

# 國立交通大學

土木工程學系  
碩士論文

進度管理技術彙整之研究

Research of schedule management technologies collection



研究生：蘇文彬

指導教授：曾仁杰 教授

中華民國九十五年十月

進度管理技術彙整之研究

Research of schedule management technologies collection

研究生：蘇文彬

Student : Wen-Bin Su

指導教授：曾仁杰

Advisor : Ren-Jye Dzeng

國立交通大學  
土木工程學系  
碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

In

Civil Engineering

October 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年十月

# 進度管理技術彙整之研究

研究生：蘇文彬

指導教授：曾仁杰 教授

國立交通大學土木工程學系（研究所）碩士班

## 摘要

準時完工為工程主要目標之一，進度管理係影響工程能否如期完工之關鍵，因此進度管理技術之運用為相當重要之課題。本研究將回顧關於進度管理技術相關文獻，將文獻提到之進度管理技術加以彙整，並利用文獻資料庫進行期刊題目標題之關鍵字搜尋，將篩選出之相關研究文獻加以主題式之分類，並進行統計，分析出過去進度管理技術研究之趨勢概況，提供研究者瞭解進度管理技術發展現況，及過去研究之趨勢，做為未來研究方向之參考。



關鍵字：排程、進度管理、研究趨勢

# Research of schedule management technologies collection

Student : Wen-Bin Su

Advisor : Ren-Jye Dzung

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

Finish on schedule is one of essential targets of projects, schedule management affects whether it can do, therefore utilization of the schedule management technologies is quite important topic. This paper will review the literature about schedule management technologies, use literate database to analyze the research trend of schedule management technologies.

Key Words : Scheduling 、 Schedule management 、 Research trend



## 誌謝

本論文承蒙指導老師 曾仁杰教授的悉心教導而得以完成，回想研究所期間，老師在論文撰寫上，啟發及指導學生對於研究應有之思考邏輯與態度，另外，在待人處事與教學態度上，學生學習到用心、嚴謹與熱誠，認真地對待每一件事物，感謝老師對於學生如此地照顧與付出。

在論文口試期間，承蒙口試委員 王維志教授、余文德教授、楊智斌教授對於本論文撥冗審閱，針對論文提出許多寶貴之建議與指正，得以使本論文更加完備與充實，在此致上誠摯感謝。

在研究所求學期間，感謝世旭學長、兆平學長、燕青學長、睿陞學長、重堯學長、忠宏學長、雅貞學姊、怡欣學姊、秉毅學長的指導與照顧。也感謝同窗好友威傑、珮茹、銘利、正倫、奉宜、明祥、政曉、育霖、偉廷、哲輝、冠文，學弟妹姜辰、汎儀、聖賢、喚雲、志仁，以及淑芳、佳良，謝謝你們陪伴我度過研究所的生活。

最後，感謝我最親愛的家人，父親、母親、大哥、二哥，在讀研究所的這段期間，一直給我鼓勵、包容以及體諒，讓我倍感溫馨，在此致上最崇高的謝意。



蘇文彬 謹誌 九十五年十月

# 目錄

目錄 .....	I
圖目錄 .....	IV
表目錄 .....	V
第 1 章 緒論 .....	1
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	1
1.3 研究方法 .....	1
1.4 研究流程 .....	2
1.5 研究範圍 .....	3
第 2 章 文獻回顧 .....	4
2.1 進度管理之目的與效益 .....	4
2.2 進度管理技術之發展 .....	5
2.3 進度管理技術之分類 .....	5
第 3 章 傳統進度管理技術 .....	8
3.1 要徑法 (Critical Path Method, CPM) .....	8
3.1.1 ADM 與 PDM .....	10
3.2 計畫評核術 (Program Evaluation and Review Technique, PERT) .....	12
3.3 要徑法與計畫評核術現存問題與目前之發展 .....	14
3.3.1 現存問題 .....	14
3.3.2 目前之發展 .....	15
第 4 章 重複性工程排程法 .....	17
4.1 平衡線法 (Line of balance, LOB) .....	18
4.2 線性排程法 (Linear Scheduling Method, LSM) .....	19
4.3 重複排程法 (Repetitive Scheduling Method, RSM) .....	20
4.4 重複性工程排程技術相關研究 .....	22
4.4.1 基本概念介紹相關研究 .....	22
4.4.2 實務應用探討相關研究 .....	23
4.4.3 分析技術修改相關研究 .....	25
4.4.4 最佳化分析模式相關研究 .....	25

4.4.5	資源規劃及與網圖技術結合分析之相關研究.....	28
第 5 章	時間成本交換 .....	30
5.1	時間成本交換問題分析方法 .....	31
5.1.1	啟發式解法 (Heuristic Method) .....	31
5.1.2	數學規劃模式 (Mathematical Programming Models) .....	32
5.2	時間成本交換分析目前之發展 .....	33
5.2.1	基因演算法 (Genetic Algorithms) .....	33
5.2.2	禁忌搜尋法 (Tabu Search Algorithm) .....	35
第 6 章	資源整平 .....	38
6.1	現有資源整平技術 .....	38
6.1.1	啟發式解法 .....	38
6.1.2	最小動差法 (Minimum Moment Method) .....	40
6.1.3	Packing Method.....	40
6.2	資源整平技術目前之發展 .....	41
6.2.1	最小動差法之改良 .....	41
6.2.2	基因演算法 .....	42
6.2.3	路徑堆積法 (Path Loading Method).....	43
第 7 章	有限資源規劃排程 .....	45
7.1	有限資源排程問題 .....	45
7.2	現有有限資源規劃排程技術 .....	49
7.2.1	利用數理模式之最佳解求法 .....	49
7.2.2	啟發式解法 .....	50
7.3	有限資源規劃排程技術目前之發展 .....	51
7.3.1	基因演算法 (Genetic Algorithms) .....	51
7.3.2	禁忌搜尋法 (Tabu Search, TS) .....	52
7.3.3	模擬退火法 (Simulated Annealing, SA) .....	53
第 8 章	電腦模擬技術 .....	54
8.1	電腦模擬技術之介紹 .....	54
8.2	電腦模擬技術於營建業之應用 .....	56
8.3	現有電腦模擬技術與目前之發展 .....	57
8.3.1	CYCLONE .....	57
8.3.2	STROBOSCOPE.....	59
8.3.3	ABC.....	62
8.3.4	SimCON .....	63

8.3.5	SmartLink .....	64
第 9 章	進度管理技術研究趨勢 .....	66
9.1	資料庫與文獻分類 .....	66
9.1.1	ASCE Civil Engineering Database .....	66
9.1.2	Scirus 文獻查詢資料庫 .....	66
9.1.3	文獻分類 .....	67
9.2	研究趨勢分析 .....	69
9.2.1	研究主題數量分佈 .....	69
9.2.2	研究主題趨勢分析 .....	69
9.2.3	文獻研究性質數量分析 .....	74
9.3	與其他研究所進行趨勢分析之比較 .....	75
第 10 章	結論與建議 .....	77
10.1	結論 .....	77
10.2	建議 .....	77
參考文獻	.....	79
附錄一	文獻分類表 .....	85





## 圖目錄

圖 1-1 研究流程圖 .....	2
圖 2-1 專案排程與監控分類主題階層圖 .....	6
圖 3-1 要徑法計算表示圖—ADM 為例 .....	9
圖 3-2 ADM 網圖 .....	11
圖 3-3 PDM 網圖 .....	12
圖 3-4 PERT 網圖 .....	13
圖 4-1 平衡線法示意圖 .....	19
圖 4-2 LSM 作業關係圖 .....	20
圖 4-3 LSM 排程圖 .....	20
圖 4-4 RSM 排程圖 .....	22
圖 5-1 典型作業工期與成本關係示意圖 .....	30
圖 5-2 禁忌搜尋法應用於時間成本交換問題演算之流程 .....	37
圖 7-1 有限資源專案排程問題分類圖 .....	48
圖 8-1 ABC-SIM .....	62
圖 8-2 ABC-MOD .....	63
圖 9-1 ASCE CE Database 搜尋畫面 .....	66
圖 9-2 Scirus 進階搜尋畫面 .....	67
圖 9-3 1970-1989 主題數量百分比 .....	72
圖 9-4 1990-1994 主題數量百分比 .....	72
圖 9-5 1995-1999 主題數量百分比 .....	73
圖 9-6 2000-2004 主題數量百分比 .....	73

## 表目錄

表 2-1 進度管理技術演進.....	5
表 3-1 ADM 網圖資訊 .....	10
表 3-2 ADM Output .....	10
表 3-3 PDM 網圖資訊 .....	11
表 3-4 PDM Output .....	11
表 3-5 PERT 網圖資訊 .....	14
表 3-6 PERT Output.....	14
表 3-7 CPM/PERT 應用問題整理 .....	15
表 3-8 CPM/PERT 應用限制改良文獻彙整 .....	16
表 4-1 線性排程技術相關文獻整理－基本概念介紹.....	23
表 4-2 線性排程技術相關文獻整理－實務應用探討.....	24
表 4-3 線性排程技術相關文獻整理－分析修改.....	25
表 4-4 線性排程技術相關文獻整理－最佳化分析模式.....	26
表 4-5 線性排程技術相關文獻整理－資源規劃及與網圖技術結合分析.....	29
表 5-1 常用優先規則整理表 .....	31
表 5-2 基因演算法於時間成本交換分析相關文獻整理.....	34
表 6-1 啟發式資源整平相關文獻整理.....	41
表 7-1 資源專案排程常見研究目標之相關研究.....	48
表 8-1 模擬之定義 .....	54
表 8-2 CYCLONE 符號表 .....	58
表 8-3 STROBOSCOPE 基本元件.....	60
表 8-4 STROBOSCOPE 主要程式語法功能.....	61
表 8-5 SimCon 符號表.....	64
表 8-6 SmartLink 元件表.....	65
表 9-1 進度管理技術文獻分類統計.....	68
表 9-2 各區間文獻主題分佈情形.....	70
表 9-3 各區間文獻百分比排名 .....	74
表 9-4 各區間文獻研究性質分佈.....	75

# 第1章 緒論

## 1.1 研究動機

準時完工為工程主要目標之一，而要達成此目標，進度管理係影響工程能否如期完工之關鍵，因此進度管理技術之運用為相當重要之課題。

進度管理之重要性不容置疑，因進度落後即代表：增加利息之負擔、增加將工程暴露於物價上揚之危機，以及延緩建築物建成後出租及出售之收入（劉福勳，1996），進度管理之重要性可見一斑。

根據 Osama Abudayyeh 等學者（2004）針對 ASCE（American Society of Civil Engineer）Journal of Construction Engineering and Management 所進行之研究趨勢分析中發現，1985 至 2002 年間，有關排程（Scheduling）之研究數量總數位居營建工程與管理相關研究主題中之第一位，可見進度管理技術於營建工程管理領域中受重視之程度。

有鑑於國內外關於進度管理之研究眾多，許多進度管理技術也陸續被發展出來，若能針對過去關於進度管理之研究與技術，加以彙整並進行研究趨勢之瞭解，對於後續之研究發展有很大之幫助。



## 1.2 研究目的

本研究將回顧有關進度管理技術之研究，探討進度管理技術發展之趨勢，研究之目的如下：

1. 彙整進度管理技術，提供瞭解進度管理技術之參考。
2. 說明進度管理技術文獻之研究現況，瞭解進度管理技術研究之趨勢。

## 1.3 研究方法

為了達到上述之目的，本研究將採用下列方法進行：

1. 藉由文獻回顧之方式，瞭解進度管理之目的及效益、技術之發展，以及進度管理技術基本之分類方式，作為進度管理技術彙整之基礎。

2. 回顧國內外進度管理技術相關之研究論文、期刊及書籍，進行進度管理技術之彙整。
3. 針對進度管理技術相關之研究文獻，進行進度管理技術研究趨勢之分析與瞭解。

## 1.4 研究流程

本研究之研究流程，如圖 1-1 所示。

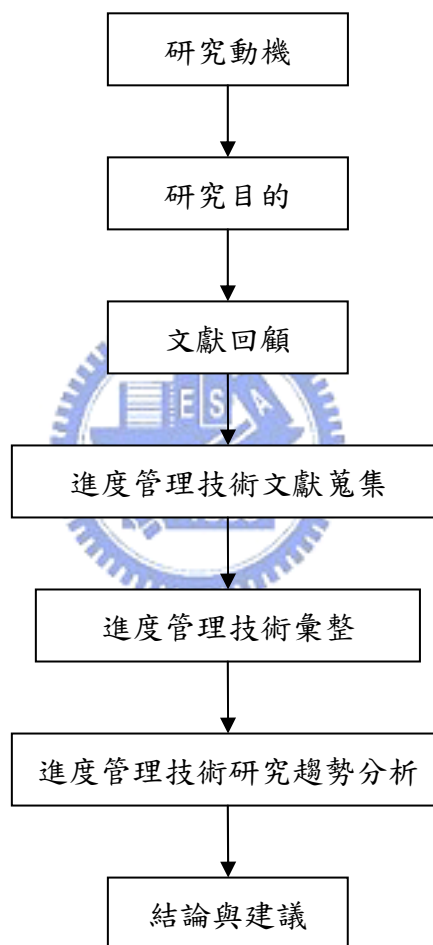


圖 1-1 研究流程圖

## 1.5 研究範圍

進度管理主要包含以下五大流程（PMI 專案管理學會，2003）：

1. 活動定義：確定產生各個專案交付物所必須進行具體活動。
2. 活動排序：研定各活動間之依存關係。
3. 活動工期估算：估算完成各項活動工期單位數。
4. 時程制訂：分析活動順序、活動工期與資源要求，以制訂專案排程。
5. 時程管制：管制專案時程變更。

各階段於進度管理皆佔有重要之地位，而本研究主要針對之主題，為時程制訂階段，各種排程技術工具之彙整，主要包括之技術如下：

1. 傳統進度管理技術：CPM、PERT。
2. 重複性工程排程法：平衡線法、線性排程法、重複排程法。
3. 時間成本交換：啟發式解法、數學規劃模式、基因演算法、禁忌搜尋法。
4. 有限資源規劃排程：最佳解法、啟發式解法、基因演算法、禁忌搜尋法、模擬退火法。
5. 電腦模擬技術：CYCLONE、STROBOSCOPE、ABC、SimCON、SmartLink。

## 第2章 文獻回顧

本章針對進度管理之目的、技術之發展沿革，以及進度管理技術之分類進行文獻回顧。

### 2.1 進度管理之目的與效益

工程進度管理之目的在於工程之生產即製程計畫之管理與控制。施工上之要素，如品質、成本以及工期等，均能由作業進行過程之管理控制加以掌握，所以工程進度管理對於施工管理控制而言，為一種重要之綜合管理控制之手段。進度管理不僅為工程之時間管理控制，亦為有效活用勞動力、機械設備及資金等資源之方法與手段。以發包者之觀點來看，工程進度管理，對外乃為維持限定工期而實施之追查管制，對內則透過進度之管理控制，達成利用最小費用，提高最大生產力之目的（林耀煌，1996）。良好之進度管理，不僅能使工程順利進行，亦有許多額外之效益，分述如下（黃价成，2000）：

#### 1. 業主方面－

- (1) 工期縮短能減少投資之風險
- (2) 標的物及早使用可增加營運之效益
- (3) 避免物價波動所造成之額外成本
- (4) 減少管理費用之支出

#### 2. 承包商方面－

- (1) 良好之進度管控可使資金靈活周轉，減少借貸壓力
- (2) 工程如期完工不僅能確保聲譽，並能避免逾期完工所遭受之罰款及處罰
- (3) 及早完工可獲得額外之獎金

#### 3. 設計單位－

- (1) 可減少人力之調度及需求
- (2) 降低成本開支



(3) 可增加專案之靈活度

## 2.2 進度管理技術之發展

進度管理技術不斷更新演進，其演進由簡單之圖表到近期之人工智慧技術之發展方向，文獻中提到之進度管理技術演進，整理於表 2-1。

表 2-1 進度管理技術演進

作者	年代	進度管理技術演進
Harris	1978	無特殊方法之進度管理、甘特圖 (Bar Chart)、要徑法 (CPM)、計畫評核術 (PERT) 三階段。
蕭定國	1986	早期之進度管理方法 (文獻中無記載之方法)、甘特圖、網狀圖、以分工結構圖 (WBS) 為基礎之整合式成本/進度控制方法、專案工程管理資訊系統等五階段。
Lewis	1991	早期之進度管理方法、甘特圖、CPM & PERT 三階段。
陳敬寬	1991	甘特圖、CPM & PERT、箭線式 (ADM) 及結點式 (PDM)、分工結構圖與階層式作業分解圖、專案工程管理資訊系統 (PMIS)、專家系統等七階段。
黃正忻	1997	甘特圖、里程碑圖、網狀圖、平衡線圖 (LOB Chart)、目標達成圖、要徑法、計畫評核術等五階段。
Hajdu	1997	傳統 (非網圖式) 式及網圖式兩階段。

(資料來源：黃正忻，1997；張敬廉，2001)

其中，以上提到文獻未記載之早期進度管理方法，係指如建造金字塔、萬里長城等工程，乃採強制手段，緊迫盯人的方式來控制進度，此一時期之工程進度管理方法於今雖無詳細資料可考，然而一般認為當時已有作業項目表及作業流程圖等之發展。而傳統式的進度管理技術則包含甘特圖、要徑法、計畫評核術等 (張敬廉，2001)。

## 2.3 進度管理技術之分類

Ahuja & Thiruvengadam (2004) 針對近期專案排程與專案監控兩個主題之文獻進行回顧，歸納出專案排程與監控領域階層式之主題分類，如圖 2-1 所示。

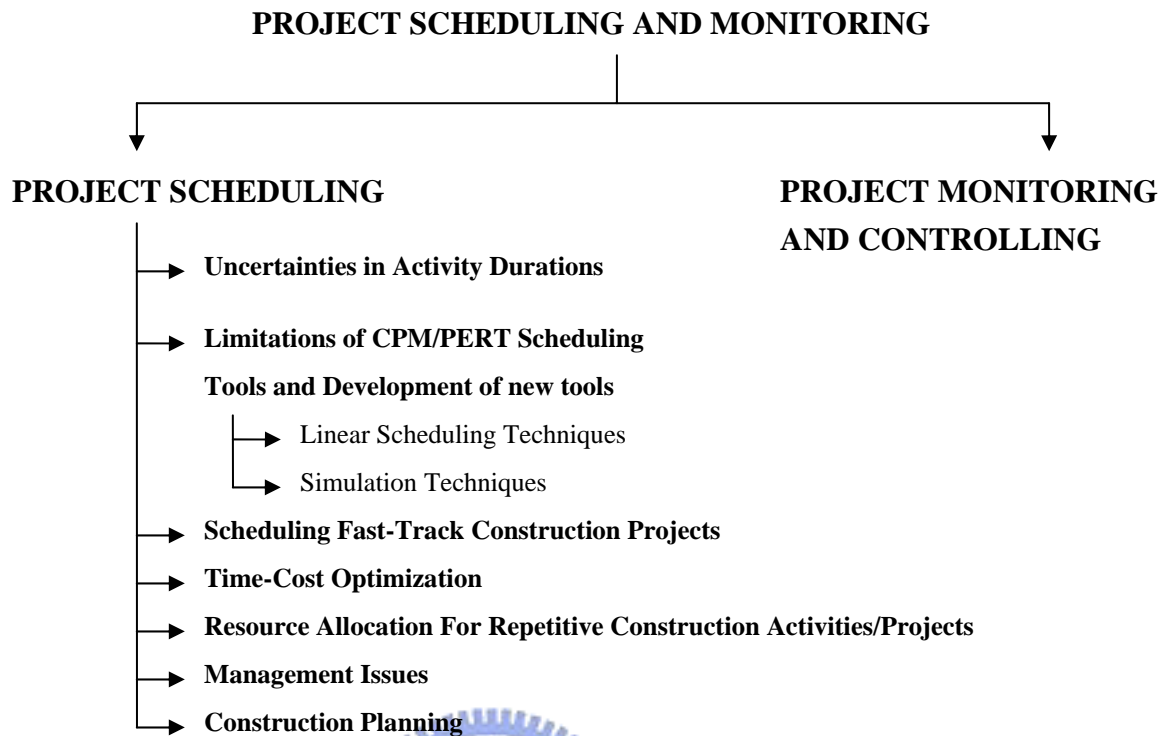


圖 2-1 專案排程與監控分類主題階層圖

(資料來源：Ahuja & Thiruvengadam, 2004)

Pietroforte & Stefani (2004) 針對 ASCE Journal of Construction Engineering and Management 1983 至 2000 年間所發表之期刊進行文章主題之回顧分析，經過統計後，將此期刊歸類為 12 個主題，分別為：公司之管理 (Management of the firm)、營建工程規劃與控制 (Construction planning and control)、工地與設備之管理 (Site and equipment management)、進度排程 (Time scheduling)、成本估算與控制 (Cost estimating and control)、施工方法與材料 (Construction methods and materials)、人力資源管理 (Management of human resources)、專案管理 (Project management)、專案執行系統 (Project delivery systems)、契約議題 (Contractual issues)、產業議題 (Industry issues)、科技發展議題 (Technology development issues) 等 12 個型式之主題。其中，作者亦將進度排程技術相關主題之研究分為 8 大類，分別為：

1. 要徑法 (Critical Path Method, CPM)
2. 計畫評核術 (PERT)



3. 網圖規劃與分析 (Network planning and analysis)
4. 時間/成本最佳化排程 (Cost/time scheduling optimization)
5. 平衡線法、線性與垂直排程法 (LOB, linear and vertical scheduling)
6. 工期估計與變異性 (Time duration estimate, variability)
7. 其他確定工期之排程技術 (Other deterministic time scheduling techniques)
8. 其他不確定工期之排程技術 (Other nondeterministic time scheduling techniques)

本研究參考以上 Ahuja & Thiruvengadam (2004) 以及 Pietroforte & Stefani (2004) 針對進度管理技術研究之分類方式，將進度管理技術回顧之主題分類為六大類，包含要徑法與計畫評核術之傳統進度管理技術、包含平衡線法及其他線性排程技術之重複性工程排程法、時間成本交換、資源整平、有限資源排程以及電腦模擬技術，分述如下：

1. 傳統進度管理技術
2. 重複性工程排程法
3. 時間/成本交換 (Time/Cost Trade-off)
4. 資源整平 (Resource Leveling)
5. 有限資源規劃排程
6. 電腦模擬技術 (Computer Simulation Techniques)



### 第3章 傳統進度管理技術

本章將回顧傳統進度管理技術，包括要徑法（Critical Path Method, CPM），以及計畫評核術（Program Evaluation and Review Technique, PERT）。

#### 3.1 要徑法（Critical Path Method, CPM）

要徑法之發展起始於 1956 至 1958 年間美國杜邦（Dupont）公司之工程師，利用網圖分析（network analysis）之原理，以施工網圖顯示施工構想之內容及流程，並以此為工期計算與進度分析之方法。以總浮時為零或最小之作業所連結之最長作業路徑為網圖上之要徑（Critical Path），並將工程專案之進度管控焦點集中於要徑上之進度管理技術（Callahan et al., 1992）。

要徑法係使用單一時間估算出專案要徑，其中假設作業之進行不受環境變化或資源數量等不確定因素所影響。其運用浮時管控路徑上之作業，防止要徑上之作業耽誤而造成專案之延遲，而要徑上各個作業之工期加總即為專案從開始至結束所需要之最長作業時間，即專案之總工期。

要徑法之計算分為前進計算及後退計算，以決定各個作業之最早開始、最早完成時間及最晚開始、最晚完成時間，藉以找出要徑作業，計算說明如下（Hajdu, 1997）：

1. 前進計算：於初始節點開始計算至最後之節點，藉以求得各個作業之最早開始時間（ES）及最早完成時間（EF），計算式如下—

$$ES_{JK} = \underset{\forall x}{\text{Max}}(ES_{xJ} + D_{xJ})$$

$$EF_{IJ} = ES_{IJ} + D_{IJ}$$

2. 後退計算：由最後之節點往初始節點計算，藉以求得各個作業之最晚開始時間及最晚完成時間，計算式如下—

$$LS_{IJ} = LF_{IJ} + D_{IJ}$$

$$LF_{JK} = \underset{\forall x}{\text{Max}}(LF_{Kx} + D_{Kx})$$

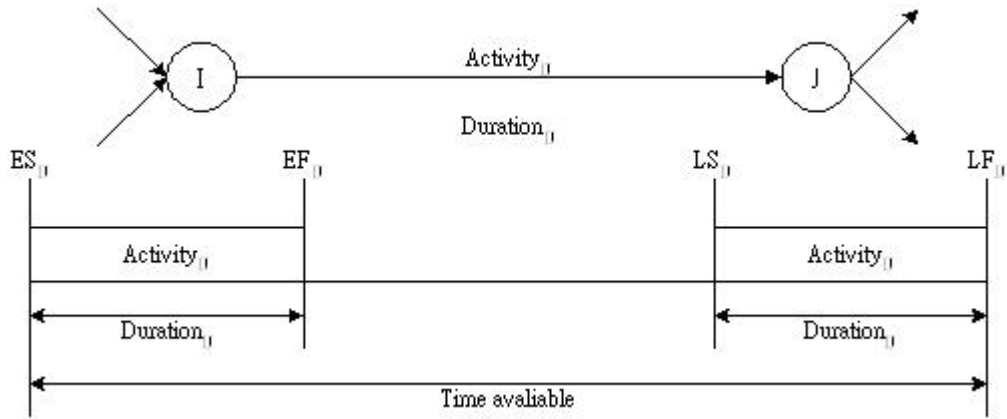


圖 3-1 要徑法計算表示圖—ADM 為例

經由前進計算及後退計算可求得各作業之最早開始、最早完成、最晚開始及最晚完成時間，利用上述資訊可進一步計算出作業間之四種浮時，計算說明如下（Hajdu，1997）：

1. 總浮時（Total Float, TF）：即在作業節點間之最大寬裕時間，此段時間即使被耗用亦不致使整個工程延遲。

$$TF_{ij} = LF_{ij} - EF_{ij} = LS_{ij} - ES_{ij}$$

2. 自由浮時（Free Float, FF）：及某作業可延遲之天數，此延遲之舉動不使整個工程延誤，亦不影響後續作業之最早開始時間。

$$FF_{ij} = \min_{\forall x} (ES_{jx}) - EF_{ij}$$

3. 干擾浮時（Interfering Float, INTF）：係由節點間除作業所需時間外之部分空閒時間所構成，使用此段時間，雖不影響工期，但會影響其後續作業之最早開始時間。

$$INTF_{ij} = TF_{ij} - FF_{ij} = LF_{ij} - \min_{\forall x} (ES_{jx})$$

4. 獨立浮時（Independent Float, INDF）：為一種作業與作業間之空閒時間，使用此段時間，不會影響工期及後續作業之最早開始時間，亦不會被任一前置作業之延遲所影響。

$$INDF_{ij} = \min_{\forall x} (ES_{jx}) - \max_{\forall y} (LF_{yi}) - D_{ij}$$

### 3.1.1 ADM 與 PDM

要徑法之網圖格式分為箭線式網圖（Arrow Diagramming Method, ADM）以及節點式網圖（Precedence Diagramming Method, PDM）兩種，箭線式網圖係將作業標示於箭線上，而節點即代表事件；節點式網圖係將作業標示於節點上，箭線則表示各作業間之相互關係。表 3-1 為一 ADM 網圖資訊，根據此網圖資訊可得到表 3-2 之計算結果及繪出如圖 3-2 之 ADM 格式網圖，表 3-3 為一 PDM 網圖資訊，根據此網圖可得到表 3-4 之計算結果以及繪出如圖 3-3 之 PDM 格式網圖。

(1)ADM：

表 3-1 ADM 網圖資訊

Node <sub>i</sub>	Node <sub>j</sub>	Activity	Duration <sub>ij</sub>	Node <sub>i</sub>	Node <sub>j</sub>	Activity	Duration <sub>ij</sub>
1	2	A	6	3	6	F	2
1	3	B	6	4	5	G	15
2	4	C	2	4	7	H	8
2	5	D	5	5	7	I	10
3	4	E	3	6	7	J	4

表 3-2 ADM Output

Node <sub>i</sub>	Node <sub>j</sub>	Activity	Duration <sub>ij</sub>	ES	EF	LS	LF	TF	FF	Critical Path
1	2	A	6	0	6	0	7	1	0	
1	3	B	6	0	6	0	6	0	0	*
2	4	C	2	6	9	7	9	1	1	
2	5	D	5	6	24	7	24	13	13	
3	4	E	3	6	9	6	9	0	0	*
3	6	F	2	6	8	6	30	22	0	
4	5	G	15	9	24	9	24	0	0	*
4	7	H	8	9	34	9	34	17	17	
5	7	I	10	24	34	24	34	0	0	*
6	7	J	4	8	34	30	34	22	22	

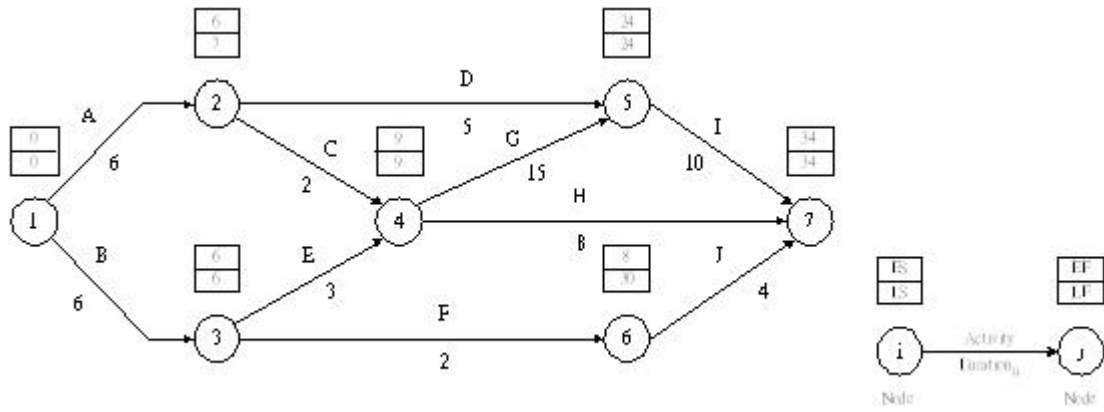


圖 3-2 ADM 網圖

(2)PDM :

表 3-3 PDM 網圖資訊

Activity	Depends on	Duration	Activity	Depends on	Duration
A	—	6	F	B	2
B	—	6	G	C、E	15
C	A	2	H	C、E	8
D	A	5	I	D、G	10
E	B	3	J	F	4

表 3-4 PDM Output

Activity	Depends on	Duration	ES	EF	LS	LF	TF	FF	Critical Path
A	—	6	0	6	0	7	1	0	
B	—	6	0	6	0	6	0	0	*
C	A	2	6	9	7	9	1	1	
D	A	5	6	24	7	24	13	13	
E	B	3	6	9	6	9	0	0	*
F	B	2	6	8	6	30	22	0	
G	C、E	15	9	24	9	24	0	0	*
H	C、E	8	9	34	9	34	17	17	
I	D、G	10	24	34	24	34	0	0	*
J	F	4	8	34	30	34	22	22	

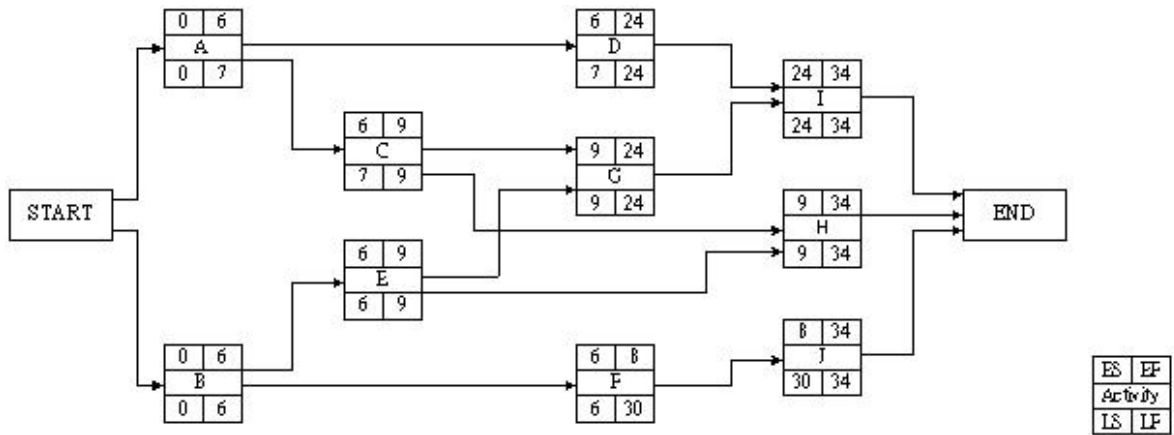


圖 3-3 PDM 網圖

### 3.2 計畫評核術 (Program Evaluation and Review Technique, PERT)

PERT 起源於 1958 年美國海軍特種工程局之北極星飛彈專案，利用 CPM 技術與當時之電腦技術，同時引入機率之概念於 1959 年發展完成，為世界上第一個電腦化之專案管理程式。其利用網圖分析計算要徑以及要徑上之寬裕時間，進行各作業所需工期之估算，同時加入機率之觀點，考慮計畫工期與期望工期間之關係，以求得專案如期完工之可能性 (Callahan et al., 1992)。

PERT 假設各個作業時間為  $\beta$  分配之隨機變數，採用三時估計法 (Three Time Estimate)，因此各作業項目需估算出三個估計時間值，說明如下 (林耀煌，1996)：

1. 樂觀時間 (Optimistic Time)：各種客觀之作業條件極為理想，且實際上一切工作亦在很順利之情況下，作業所需要之工作時間，以 a 表示。
2. 最可能時間 (Most-Likely Time)：在同一條件下，倘若該作業反覆做多次時，其最多出現之作業時間，以 M 表示。
3. 悲觀時間 (Pessimistic Time)：與樂觀時間相反，一切作業條件極為惡劣，而實際上亦難照正常狀態進行工作時，該作業所需之工作時間，以 b 表示。

估算出上述三個時間後，各作業之工期即可用  $\beta$  分配概算：

$$\text{作業時間平均值：} t_e = \frac{a + 4m + b}{6}$$

$$\text{標準差： } \sigma_{t_e} = \frac{b-a}{6}$$

$$\text{變異數： } v_{T_E} = \sum v_{t_e}$$

專案總工期之期望值即為要徑上各作業時間平均值之總和，而其總工期之變異數為要徑上各作業工期變異數之和，因此，要徑之總工期 ( $T_E$ ) 及其標準差 ( $\sigma_{T_E}$ ) 為：

$$T_E = \sum_x t_{e_x}$$

$$\sigma_{T_E} = \sqrt{v_{T_E}}$$

$\sigma_{T_E}$  值愈小，表示工程風險較低，反之則風險較大。最後可計算出符合工期要求之可能性  $Z$  ( $T_S$  為計畫所需工期， $T_E$  為期望工期)：

$$Z = \frac{T_S - T_E}{\sigma_{T_E}}$$

再由  $Z$  值推算如期完工之機率，並據此機率值評估該計畫工期之可行性。

圖 3-4 為一假設之網圖，PERT 所需之網圖資訊如表 3-5 所示，根據此網圖資訊，可得表 3-6 之計算結果。

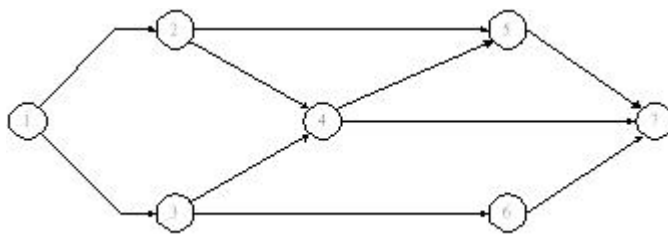


圖 3-4 PERT 網圖

表 3-5 PERT 網圖資訊

Activity	i	j	a	M	b	Activity	i	j	a	M	b
A	1	2	3	6	12	F	3	6	1	2	4
B	1	3	4	6	9	G	4	5	6	15	20
C	2	4	1	2	4	H	4	7	3	8	10
D	2	5	3	5	10	I	5	7	5	10	15
E	3	4	1	3	5	J	6	7	2	4	8

表 3-6 PERT Output

Activity	i	j	a	M	b	$t_e$	$\sigma^2$	Critical Path
A	1	2	3	6	12	6.5	2.25	
B	1	3	4	6	9	6.2	0.69	*
C	2	4	1	2	4	2.2	0.25	
D	2	5	3	5	10	5.5	1.36	
E	3	4	1	3	5	3	0.44	*
F	3	6	1	2	4	2.2	0.25	
G	4	5	6	15	20	14.3	5.44	*
H	4	7	3	8	10	7.5	1.36	
I	5	7	5	10	15	10	2.78	*
J	6	7	2	4	8	4.3	1	

### 3.3 要徑法與計畫評核術現存問題與目前之發展

#### 3.3.1 現存問題

要徑法與計畫評核術為營建工程專案於進度管理所廣泛採用之技術，然兩種技術於發展時之理論假設與實務上有所差距，造成應用上之問題，表 3-7 為學者對於要徑法與計畫評核術於應用層面研究所點出之問題整理。



表 3-7 CPM/PERT 應用問題整理

作者	年份	問題陳述
李得璋	1987	<p>一、理論假設每一作業都可被確認。然作業間之相依性可知道，但並非所有作業皆有明確之起、迄點能確認，縱使 PERT 已考慮此種影響，但在規劃初期，依然很難予以合理之認定。</p> <p>二、理論假設每一作業能直接與後續作業連結，以及所有作業必須在指定之次序下執行。然有的作業關係不明確，且有的後續作業為可較早開始或重疊施工。</p> <p>三、理論假設每一作業時間不論以單時或三時估計法，皆可獨立估算。然作業時間之估算並非完全獨立，因此造成誤差之產生。</p> <p>四、CPM 假設作業之時間—成本曲線關係為反比之線性相關。然實務上，時間—成本之相互關係難以求得，所以求最佳化工期時將會產生誤差。</p>
Tavares	1990	<p>一、假設所需資源為無限供應，只是將作業時間當作考量因素，並未考慮到資源方面之問題，因此方法中隱含著專案在執行中所需使用之資源都能充分的供應，並沒有資源限制之問題。</p> <p>二、只要滿足作業在執行上的優先順序，作業便可開始執行，此種假設在大部分的現實環境中並不能成立。</p>
方焯琮	1991	<p>礙於其理論架構之基本假設與營建工程專案實際執行情況有所差異，使得其規劃之成果常被視為不可靠甚至被批評為浮濫之工期，同時要徑法與計畫評核術亦低估計畫預算及資源使用沒有效率等問題對專案之影響力。</p>
蔡志弘	1999	<p>一、資源有限時多重專案存在資源競爭之問題，而專案間資源資源使用之優先權影響個別專案之完成。</p> <p>二、共同資源或其他資源之變異導致專案間之資源競爭。</p> <p>三、專案管理者依規劃之時間預估值開始作業，而非接續先前作業之完成時間開始作業。</p>
Pittman, Cox and Davis	1999	<p>一、資源競爭與優先權規劃之問題。</p> <p>二、非要徑作業之高度變異性。</p> <p>三、專案依時間規劃而非前置作業完成時間規劃。</p>
劉自強	1999	<p>一、過多之安全時間保護，浮濫增加工作時間之估時。</p> <p>二、安全時間被浪費。</p>

(資料來源：方焯琮，1991；高志魁，2003)

### 3.3.2 目前之發展

許多研究致力於改良其限制或增進其他工具之應用性，相關之研究整理於表 3-8。

表 3-8 CPM/PERT 應用限制改良文獻彙整

作者	年份	文獻	改良方法陳述
Fischer and Aalami	1996	Scheduling with Computer-interpretable construction method models	現今之排程工具需要利用手工之方式將設計資訊轉換為各項活動，且無法提供成本估價單與進度表間動態之連結。利用電子化及物件基礎之概念，將設計說明、進度表及成本估價單整合之機制，此種可將設計說明轉換為進度與成本觀點專案之機制為必須地。作者於研究中呈現一種電腦可編譯之模型，提供營建方法之展示以作為此種機制。此模型提供實際營建進度表之自動產生。
Gong	1997	Optimization of float use in risk analysis-based network scheduling	浮時常在不使專案期間產生負面衝擊之情況下將資源調動以減少專案成本而在網圖中被使用。然當非要徑作業時間之不確定性非常大時，浮時之使用可能使專案超時之風險增加，導致專案之成本增加。作者呈現出一種於專案網圖中，將浮時之使用最佳化之程序，此種程序整合了進度風險分析以及成本風險分析。
Cottrell	1999	Simplified program evaluation and review technique(PERT)	作者為專案規劃發展及測試一種簡化型式之 PERT，將 PERT 慣用之三個時間估計值簡化為兩個，此種簡化係利用常態分配取代原先之 Beta 分配，簡化後之兩個時間估計值分別為：最可能時間 (Most-Likely Time) 以及悲觀時間 (Pessimistic Time)。
Zhong and Zhang	2003	New method for calculating path float in program evaluation and review technique(PERT)	目前浮時觀念係基於傳統之要徑法，其假設作業工期為一定值 (deterministic)，每一條路徑之期望工期亦為常數，而非要徑之浮時完全使用時亦只會使非要徑之工期在要徑工期之範圍內改變。然在 PERT 中，作業工期為非定值，若以定值之要徑法浮時來描述非定值之 PERT 浮時，誤差將無可避免，特別為營建工地之管理者使用要徑法之浮時來執行 PERT 所編制之進度表時，無意識中亦帶來風險。作者呈現出一種應用於 PERT 之浮時估算方法，此法將可使管理者安全地使用浮時，避免工期風險。

## 第4章 重複性工程排程法

營建契約常面臨包含多單元之重複性工程之專案，所謂重複性工程為專案各單元內存在有相同類型之作業，且各類型作業施工所需要之資源必須在各單元中重複被使用到，例如高樓建築、住宅建築、公路建設以及管線鋪設等工程。在重複性工程排程規劃中並不適用一般營建工程排程規劃常用之要徑法（critical path method ,CPM）與桿狀圖（Bar Chart），其原因整理如下（Reda，1990）：

### 1. 要徑法：

- (1) 假設各作業為獨立之單位，分析時係依據作業間先後關係之限制，以最早或最晚開始時間進行施工規劃，因此其分析結果僅能確保作業間之先行後續關係，並未考慮相關資源於先行作業單元之完成後，後續相同類型之作業單元所需耗費之等候時間。由於無法保證同一類型作業於不同作業單元間能連續施工，可能規劃出資源使用率極低之施工排程。
- (2) 僅針對要徑作業增加資源之投入量以分析工程專案最佳工期，可能分析得同類型作業在不同單元中之資源投入量不相等之排程規劃，而導致工程專案施工期間內必須時常增減進行某些類型作業施工所需之資源。
- (3) 要徑法分析計算時，將各單元相同類型之作業視為彼此獨立，造成網圖分析所需計算之作業個數隨單元數之增加而呈倍數之增加，排程規劃最佳化分析所需之計算工作量及資料儲存空間亦隨之倍增。

### 2. 桿狀圖：

- (1) 由於桿狀圖無法明確表示各作業彼此間之先後邏輯關係，故排程規劃結果無法確保作業之先後邏輯關係之正確性，亦無法保證相同類型作業於不同單元間能連續施工。
- (2) 欲進行最佳工期分析時，由於桿狀圖無法明確表達作業間之邏輯關係，因而不易了解增加某作業資源投入量以縮短其施工時間對總工期之影響為何，故難以進行最佳工期分析。

傳統營建工程排程規劃方法不適合用於重複性作業之排程規劃，因此針對重複性工程特性自 1970 年以來許多新的排程方法陸續被發展出來，其多半以線性排程技術（Linear Scheduling Techniques）為基礎。

本章將回顧重複性工程排程法，包括平衡線法（Line of Balance, LOB）、線性排程法（Linear Scheduling Method, LSM）以及重複排程法（Repetitive Scheduling Method, RSM）。

#### 4.1 平衡線法（Line of balance, LOB）

平衡線法起源逾 1942 年，由美國海軍（U.S. Navy Department）所發展出來，隨後由於網圖技術之出現限制了其發展，致使平衡線法逐漸沒落，直到許多年後，英國國家建設局（National Building Agency）率先將其使用於重複性工程專案之施工排程，才激發了許多應用於工程方面之相關研究（Moselhi & EI-Rayes，1993）。

平衡線法為一種基於生產線平衡考慮之圖形化製造生產排程方法，主要在發展各個組合元件之排程，以配合最終之組合工作。構成平衡線法之技術通常可以區分為決定生產目標、決定單元生產計畫及繪製進度圖三個部分。

如圖 4-1 所示，平衡線法所需之排程資訊如下：首先依合約需求訂定生產目標，以累計完成數量表示之，接著決定個別單元之生產計畫與分析單元內各作業需要之工期及前置時間，以進一步決定單元內各作業邏輯與完成時間點之關係，並將其繪製成單元生產計畫圖，最後則可繪出各時間點之進度圖，以橫軸表示各作業，縱軸表示累積生產單元數量，針對某一個時間點繪出該特定時間點各作業應完成單元數，以確保能如期完成所需完成之成品數量，圖中各作業預定完成單元數量之折線即稱為平衡線，由此折線可以得知某特定時間點各作業之預定生產目標，同時可將該時間點實際完成之各作業數量繪於圖上，以作為作業趕工或重點管理之依據（Moselhi & EI-Rayes，1993）。

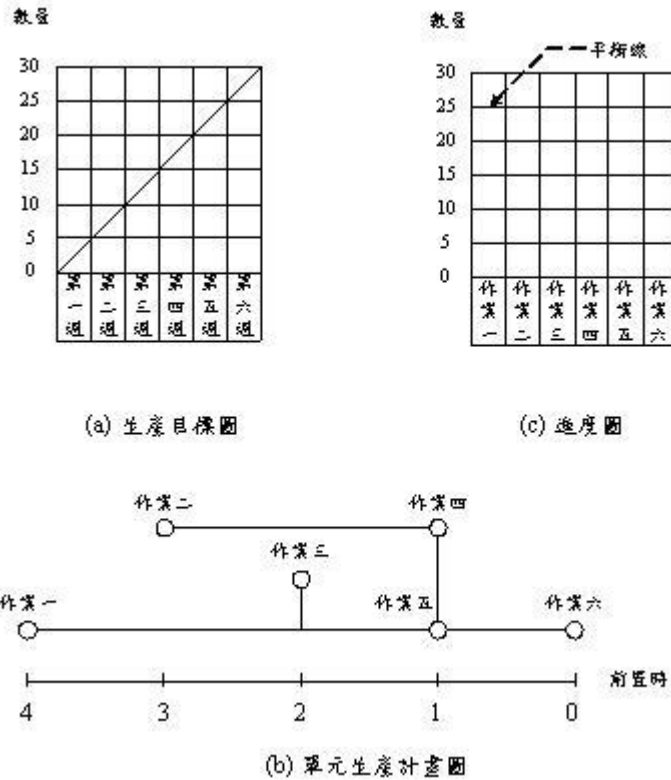


圖 4-1 平衡線法示意圖

(資料來源：吳旻謙，1999)

## 4.2 線性排程法 (Linear Scheduling Method, LSM)

線性排程技術主要分為平衡線法與線性排程法兩大類，而平衡線法可說是線性排程技術之雛形。一般之網圖排程技術所規劃出之作業工期為完成該作業總共所需之時間，因此並不能明顯地看出於特定期間內所能完成之作業單元數，而線性排程法則無此缺點，其可展示出於作業工期某段期間內，所能完成之作業單元數(Callahan et al., 1992)。

基本之 LSM 排程圖，平行軸表示時間，垂直軸則表示於專案中之位置或距離，此軸可有許多不同之定義，例如於高層建築中，此軸可能以樓高來定義；於交通建設專案中，可能以距離來定義。

LSM 排程圖中每一條曲線即代表一個作業之生產頻率，使用 LSM 排程法主要之目標在於，使所有作業生產線間在考慮經濟性之情況下，於平行軸上盡可能地靠攏，將可使專案盡快地完成，而當單一生產線斜率呈現出相當大之變異時，此時曲線斜率低者可能代表此作業之勞動力不足，相反地，曲線斜率高可能為人員過剩之情況。

圖 4-2 為一假設之作業關係圖，共有三單元之重複性作業，每單元含有四種作業，根據作業關係圖所排出之 LSM 排程圖如圖 4-3。

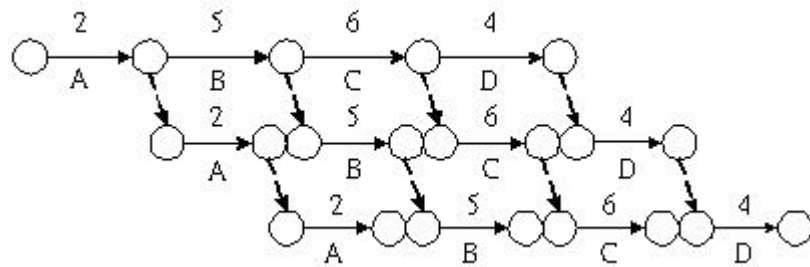


圖 4-2 LSM 作業關係圖

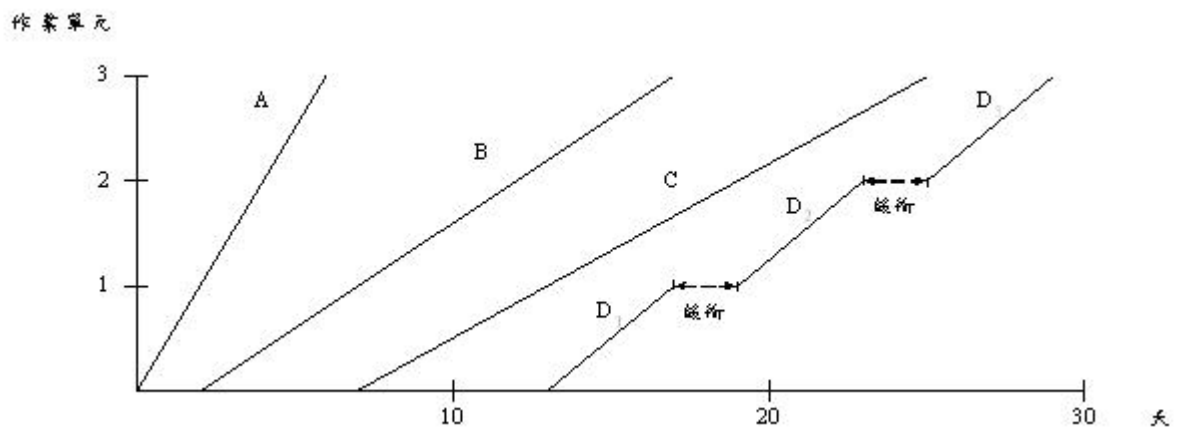


圖 4-3 LSM 排程圖

### 4.3 重複排程法 (Repetitive Scheduling Method, RSM)

重複排程法起源於 1998 年，Harris 以及 Ioannou 發展出一套適用於重複性施工之排程技術，稱為重複排程法。在複雜之多單元專案排程網圖中，RSM 排程以一 X-Y 雙軸向之圖表方式來呈現，一個軸向表示時間，而另一個則表示作業單元。在軸向之表示上，垂直性工程（例如高樓建築）通常以 Y 軸表示作業單元、X 軸表示時間；而平行性工程（例如公路建設）則常以 X 軸表示作業單元、Y 軸表示時間，以利於使用上之便利。在作業單元之表示上，重複性施工單元必須依照特定之邏輯順序安排於所選定之軸向上，以定義其重複之型態，例如樓版建築為一層接一層之施築、房屋建設則按照其計畫之銷售來安排，而車站則是依照各車站專案之開始結束或是交通狀況來安排（Harris & Ioannou, 1998）。

大多數之作業需要數種資源才能完成，例如一組施工機具需要一組人員來操作才能

進行，在 RSM 排程法中，假設只有最有代表性之資源與作業結合，亦假設了在重複性施工單元中，相同之作業使用一致之資源。在 RSM 排程法中，提到了兩種生產率概念，介紹如下 (Harris & Ioannou, 1998)：

1. 資源生產率 (resource production rate)：指某資源在單位時間內所能完成之工作數量，計算式如下 ( $rpr_A$  代表作業 A 之資源生產率， $Q_{Ai}$  為作業 A 在第 i 單元中之工作數量， $T_{Ai}$  為作業 A 在第 i 單元中所需之工期)：

$$rpr_A = \frac{Q_{Ai}}{T_{Ai}}$$

2. 單元生產率 (unit production rate)：指某資源單位時間內所能完成之作業單元數，亦為 RSM 排程圖中生產曲線之斜率，計算式如下 ( $upr_A$  代表作業 A 在第 i 單元中之單元生產率， $T_{Ai}$  為作業 A 在第 i 單元中所需之工期)：

$$upr_A = \frac{1}{T_{Ai}}$$

資源生產率只與資源之性質有關，因此在各單元中，相同作業之資源生產率視為常數，例如同一組人員從事不同單元間相同作業之生產率相同，並不會因為數量而不同，而單元生產率會隨著各單元作業之數量改變。

RSM 排程法係運用作業之單元生產率來繪製排程圖，利用一種控制點之概念來確保作業之先後關係以及資源之連續使用限制，並介紹一種計算工期之概念，工期之計算從專案開始一直到專案結束為止，而在 RSM 排程法中，此計算路徑稱為 controlling sequence，此路徑沿著第一條生產率持續延伸，並經由控制點於各生產線中轉換，直到專案結束為止，RSM 之排程圖如圖 4-4 所示 (Harris & Ioannou, 1998)。

此為一三單元之作業，圖中，粗體實線者為要徑，而  $CP_F$  (Finish control point) 表示 FTS (Finish to Start) 之關係，為一控制點，圖中之  $CP_F(AB)$  即表示 B 在 A 完成後才能開始，此一控制點(Control Point)即可確保作業之先後關係，而  $CP_E$  則表示生產曲線之結束。

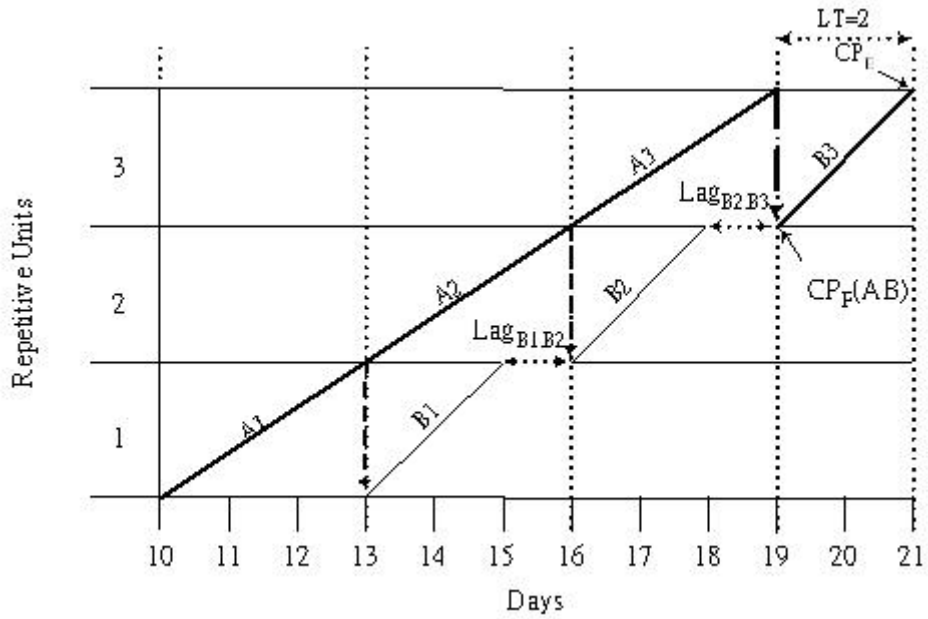


圖 4-4 RSM 排程圖

## 4.4 重複性工程排程技術相關研究

重複性工程排程法主要以線性排程技術為基礎，吳旻謙（1999）指出，線性排程技術之相關研究，大致可分為基本觀念介紹、實務應用探討、分析技術修改、最佳化分析模式建構、資源規劃及線性排程技術與網圖技術結合分析等六大類，其研究中提及之相關文獻整理於下。

### 4.4.1 基本概念介紹相關研究

有關線性排程技術基本概念介紹之相關文獻整理於表 4-1，主要在說明傳統上之網圖模式排程法不適用於重複性工程，並提出適用之方法及實例說明。



表 4-1 線性排程技術相關文獻整理－基本概念介紹

作者	年份	文獻	研究主題介紹
Khisty	1970	The application of the 'Line of Balance' technique to the construction industry	利用數值範例探討平衡線法應用於重複性工程專案排程規劃之優點。
Peer	1974	Network analysis and construction planning	指出網圖分析技術之演算法未考慮工地實際施工過程之組織問題，導致排程規劃結果在施工管理上之實用性相當有限。在工程實際進行後，原先之計畫很快地就被擱置在一旁，進而需要不斷地更正原來之排程規劃，以配合實際施工進度。上述問題起因於網圖分析技術不合理之基本假設，例如：勞務資源可任意增加及減少；另一個主要之原因為假設各作業之施工時間為固定值且互相獨立，並且以為作業可在最早開始時間點及最遲完成時間點間自由改變其施工時程，而完全忽略作業間需要連續施工及平衡整個工程專案施工過程之需求。
Carr and Meyer	1974	Planning construction of repetitive building units	探討重複性工程之特質，說明以平衡線法進行重複性施工排程規劃較以要徑法規劃為佳。
蔣維夏	1982	線平衡法施工計畫簡介	以房屋建築為例，對平衡線法於工程上之應用進行介紹。
徐曾傑	1989	LSM 管理方法於公路工程上之應用	利用範例說明線性排程法於公路工程之應用方式。
Lutz and Hijazi	1993	Planning repetitive construction : current practice	介紹平衡線法目前於工程上之應用情形及模擬軟體 MicroCYCLONE 於重複性施工排程規劃方面之運用。
Sebestyen	1993	Planning repetitive construction : comment	針對 Lutz 與 Hijazi (1993) 之研究，指出作業之施工速率可能受學習效果等因素之影響而改變，不應假設為定值。

#### 4.4.2 實務應用探討相關研究

有關線性排程技術實務應用探討之相關文獻整理於表 4-2，探討線性排程法於實務之重複性工程方面之應用情形。

表 4-2 線性排程技術相關文獻整理－實務應用探討

作者	年份	文獻	研究主題介紹
O'Brien	1975	VPM scheduling for high-rise buildings	提出高層建築明顯地可被區分成兩種興建型態，第一種型態包括土方工程、基礎工程及標準層以下之各層樓；第二種型態則為興建至一定高度以上之標準層。前者利用網圖技術進行排程規劃分析即可，該研究則針對標準層部分之垂直重複施工之特性，發展了垂直生產法（Vertical Production Method, VPM）。對於 VPM 及網圖排程技術之分析結果間之界面處理，則建議以里程碑（milestone）作為模式間之分界。此外，該研究並舉例說明 VPM 於高層建築施工排程規劃之應用。
Johnston	1981	Linear scheduling method for highway construction	對線性排程法之專有名詞進行定義，並探討其應用於公路工程施工排程之可行性。
O'Brien、Kreitzberg and Mikes	1985	Network scheduling Variations for repetitive work	以實際工程案例說明網圖規劃技術應用於重複性施工排程規劃之演進。
Arditi and Albulak	1986	Line-of-balance scheduling in pavement construction	以鋪面工程為例，說明平衡線法之運作方式。
Chrzanowski and Johnston	1986	Application of linear scheduling	分別以網圖技術及線性排程法進行公路工程規劃，以評估使用上之優缺點。
Cole	1991	Construction scheduling : principle, practices and six case studies	以六個案例比較要徑法與線性排程法應用於重複性施工排程規劃之適用性，得知要徑法適用於非重複性工程，而線性排程法則適用於重複性工程，然而絕大多數之工程專案具備重複性施工及非重複性施工部分，兩種排程方法可說相輔相成，單獨皆無法滿足營建施工規劃及控制之需求。因此，實務應用上可將工程內容區分為重複性與非重複性兩類，而後分別以適當之技術進行排程規劃。

#### 4.4.3 分析技術修改相關研究

由於利用傳統線性排程技術進行排程規劃時，無法充分考慮某些特定工程類型之排程規劃特性，因此有些研究者針對特定之排程規劃考慮事項，提出規劃概念、修改傳統之線性排程技術或開發電腦系統，以滿足分析上述特定問題之需要，相關文獻整理於表 4-3。

表 4-3 線性排程技術相關文獻整理－分析修改

作者	年份	文獻	研究主題介紹
Birrell	1980	Construction planning – beyond the critical path	作者依據實際施工狀況及理論歸納出工程規劃概念，可作為重複性施工排程規劃時之準則。
Stradal and Cacha	1982	Time space scheduling method	評估幾種常見之排程技術，並舉出數個以線性排程法進行排程之典型範例，並且考慮作業間浮時之關係，發展出 Time Space Scheduling Method 排程方法。
Thabet and Beliveau	1994	Modeling work space to schedule repetitive floors in multistory buildings	作者進一步考慮相同數個單元中，各作業之先後邏輯關係限制（水平限制），以及不同單元作業間之邏輯關係限制（垂直限制），發展出一種排程規劃方法，能分析滿足各作業垂直限制及水平限制之排程規劃結果。
Thabet and Beliveau	1994	HVLS : Horizontal and vertical logic scheduling for multistory projects	考慮了作業空間限制及資源限制，發展了 ScaRC 排程規劃方法。
Harmelink and Rowings	1998	Linear scheduling model : development of controlling activity path	作者認為傳統線性排程技術無法顯示要徑，提出一個決定重複性施工排程要徑之方法，該方法也可用於分析非要徑之浮時。

#### 4.4.4 最佳化分析模式相關研究

有些學者致力於排程規劃最佳化分析模式之研究，建立了許多數學分析模式，依據建立模式所使用之方法論不同進行分類，大致上可分為多階段規劃模式、模擬模式、線性規劃模式、機率模式及一般數學方法等類，相關之研究整理於表 4-4。

表 4-4 線性排程技術相關文獻整理－最佳化分析模式

類別	作者	年份	文獻	研究主題介紹
多階段規劃模式	Selinger	1980	Construction planning for linear projects	作者建構一個多階段規劃數學模式，並提出其演算法，可以分析得重複性工程專案之最低總工期及各類型作業之最佳勞務資源投入量。
	Russell and Caselton	1988	Extensions to linear scheduling optimization	以作業在各單元之工作量與相鄰單元間之中斷時間為二維之狀態變數，建構出能求得專案最短總工期及最佳排程規劃決策之多階段規劃數學解析模式。
	Moselhi and EI-Rayes	1993	Least cost scheduling for repetitive projects	以最低專案總成本為準則，建構能同時考慮作業直接成本與間接成本最佳化之多階段排程規劃模式，以求得各作業之最佳勞務資源投入量及對應之專案最低總成本。
	Eldin and Senouci	1994	Scheduling and control of linear projects	作者建構一個多階段最佳化分析模式，可以求得重複性工程專案最低總成本，以及對應之各作業勞務投入量、作業間中斷時間及遲滯時間，並且以圖形表示模式之最佳排程規劃結果。
	Senouci and Eldin	1996	Dynamic programming approach to scheduling of nonserial linear project	提出一個非序列多階段規劃模式，可以用於分析單元網圖不純粹由序列作業構成之重複性工程專案，以計算在各種可能總直接成本下，重複性工程專案之總工期及對應之個類型作業最佳勞務資源投入量。
	Wang and Huang	1998	Controlling activity interval times in LOB scheduling	探討了平衡線法之排程規劃結果可能發生作業間之間隔時間過大之問題，提出一個多階段規劃排程模式，可以用來分析重複性工程之作業間具有間隔時間上限時，各作業之最佳勞務資源使用量。
	王慶煌	1998	以多階段遞迴建立重複性工程排程規劃模式	考慮影響各類型作業施工速率之因素不一定相同，因此假設專案所含各類型作業之施工速率為時間之函數，建構一個多階段遞迴演算模式，能分析專案各種可能總工期所對應之最低總成本，同時可以求得對應之各作業最佳勞務資源使用量及施工起迄時間點。

模擬模式	Ashley	1980	Simulation of repetitive-unit construction	定義重複性工程專案之管理目標及可行決策並建立一個模擬模式，以探討模擬模式應用於重複性工程規劃之可行性。
	Kavanagh	1985	SIREN : a repetitive construction simulation model	以 GPSS 語言開發一個模擬模式 SIREN (simulation of repetitive networks)，可以分析得各種可能勞務資源使用狀況下，重複性工程專案之施工時程、累積成本曲線及勞務資源使用率，同時透過蒙地卡羅 (Monte-Carlo) 模擬，分析累積成本之變異情況。
	Lutz、Halpin and Wilson	1994	Simulation of learning development in repetitive construction	利用 QuickBASIC 語言發展一個模擬模式，能與 MicroCYCLONE 結合，以模擬重複性工程專案施工過程中之學習曲線現象。
	Chehayeb and AbouRizk	1998	Simulation-based scheduling with continuous activity relationships	建立合乎營建工程特性之作業邏輯關係，同時考慮作業連續製造需求，發展一個能有效應用系統模擬於工程專案排程之方法，並且以 Visual Basic 語言撰寫電腦程式，同時結合 Visual C++物件導向之觀念、ASCESS 關連式資料庫系統及 SLAM II 之模擬功能，發展 SimCon 模擬器 (Simulator)，並探討 SimCon 應用於具連續作業關係之工程專案之優點。
	Shi and Abourizk	1998	Continuous and combined event-process models for simulating pipeline construction	利用 SLAM II 發展一個結合程序及離散事件模式之重複性施工模擬模式，以模擬管線工程之施工，並且比較程序事件模式及上述結合模式應用於管線施工排程之優缺點。
	線性規劃模式	Handa and Barcia	1986	Linear scheduling using optimal control theory
Reda		1990	RPM : Repetitive project modeling	以網圖技術表達單元網圖中作業間之先行後續關係，並以圖形表示作業之工期

				與直接成本關係及時程規劃結果，同時考慮一般重複性施工排程規劃之時程限制，發展出重複性施工排程線性規劃數學模式（Repetitive Project Model, RPM）以分析重複性工程專之最低總直接成本及各類型作業之最佳施工速率。
	Mattila and Abraham	1998	Resource leveling of linear schedules using integer linear programming	考慮傳統重複性施工排程規劃模式無法進行資源整平，提出一整數線性規劃模式以克服上述問題，並且以一個公路工程為例，說明其建構模式之運用方式。
機率模式及一般數學方法	Dressler	1974	Stochastic Scheduling of linear construction sites	將單元中所有作業合併成一個集約作業，考慮作業施工速率為與單元位置和施工時間有關之機率變數，據以建構能分析最佳單元施工順序之數學模式，並且考量成本、工期超過預先估計值之機率，以評估資源之最佳投入量。
	Sarraj	1990	Formal development of Line-of-Balance technique	探討線性排程法之演進與實務應用上值得注意之問題點，發展線性排程技術分析數學式。

#### 4.4.5 資源規劃及與網圖技術結合分析之相關研究

除上述之主題以外，由於傳統線性排程技術並未考慮資源限制或資源整平方面之問題，因此有些研究者對線性排程技術有關上述資源方面之問題進行探討。此外，一般工程專案可能同時包含重複性施工及非重複性施工部分，因此有些研究則對於線性排程技術與網圖規劃技術之結合方式進行研究，此兩種主題之相關研究整理於表 4-5。

表 4-5 線性排程技術相關文獻整理－資源規劃及與網圖技術結合分析

作者	年份	文獻	研究主題介紹
Kleinfeld	1976	Manpower use in high-rise residential construction	作者針對一棟位於紐約市之高層建築工程，探討其施工過程中勞務資源使用型態。
Perera	1983	Resource sharing in linear construction	考慮各作業所需各類資源之限制，建構一規劃模式，能用以分析作業之最佳施工速率及需要總工期。
EI-Rayes and Moselhi	1998	Resource-driven scheduling of repetitive activities	提出一個資源排程規劃演算法，可分析得滿足作業連續施工、先行後續邏輯限制及勞務資源負荷之排程規劃結果，該演算法同時可將一些實際施工之影響因子納入考慮。
Schoderbek and Digman	1967	Third generation. PERT/LOB	以範例介紹 LOB 之技術，並說明其與 PERT 結合之方式。
Suhail and Neale	1994	CPM/LOB : New methodology to integrate CPM and line of balance	結合網圖技術，以分析平衡線法之並行關係作業部分，求得各作業之開始與完成時間點，並求得各時間點之作業產量平衡線。

## 第5章 時間成本交換

營建規劃人員需選擇適當之資源來實現專案中之作業，包括人員多寡、機具設備、施工方法與技術等，這些選擇最終將決定專案之時間與成本。時間與成本之交換分析（time-cost trade-off analysis）為營建專案規劃與控制之重要概念之一，為了完成專案中之作業，時間與成本存在交換之問題，一般來說，使用愈少之昂貴資源，作業完成之時間將會愈長。例如，使用施工性較好之機具設備或雇用較多之人員將會節省施工之時間，然成本亦因此而增加。圖 5-1 為一典型完成作業所需工期與成本間之關係示意圖，圖中包含三種對應之工期與成本，而營建規劃人員即需找出於專案限制工期內，最有效之成本運用方式。

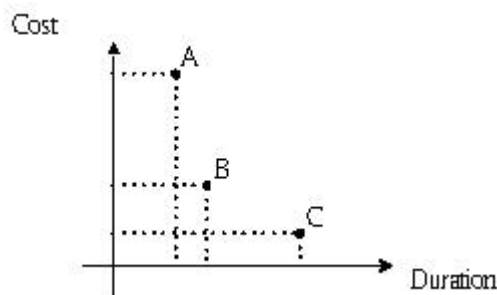


圖 5-1 典型作業工期與成本關係示意圖

有鑑於專案中並非所有作業皆為要徑作業，有些作業能在不影響專案總體工期之情況下，以較少之成本進行較慢之作業速率來完成此作業，排程人員可執行所謂之時間成本交換分析，使專案之成本或專案之總工期縮減。完整之時間成本交換分析可得到下列兩種成果（Feng et al., 1997）：

1. 時間成本交換曲線—可顯示專案時間與成本間之相互關係。
2. 建造方式之選擇—提供最佳之時間成本平衡。

現存解決時間成本交換問題之相關技術可歸類為啟發式解法（Heuristic Method）、以及數學規劃模式（Mathematical Programming Models），本章將介紹此兩種類別之成本交換問題現存之相關技術，以及目前較新之方法。



## 5.1 時間成本交換問題分析方法

### 5.1.1 啟發式解法 (Heuristic Method)

啟發式解法為一近似之最佳解 (Near Optimal Solution)，求解目標在於求得良好之解，但並不保證為最佳解，啟發式解法基本上為邏輯法則，用以簡化問題求解過程。啟發式解法分為以下兩種基本方法：串列法 (Serial Method) 與平行法 (Parallel Method)，介紹如下 (張芷宜, 2004)：

1. 串列法：乃是在排程開始時，即將各項作業按照某種原則優先規則 (prior rule)，建立一個排程優先次序表，一次排入一個作業，在排入作業時，必須在不違反作業先行關係及資源限制的條件下儘早排入。
2. 平行法：沿排程時點逐點向前推移，將排入之作業按某種優先次序儘早排入，並於同一排程時點只要不超過資源限制則可同時排入多項作業。

串列法主要缺點在於排程一開始即決定作業的優先順序，因而缺乏動態性，排程績效較平行法差，常用之優先規則及意義整理如表 5-1。

表 5-1 常用優先規則整理表

優先規則	意義
1. EST	最早開始時間越小優先權越大。
2. EFT	最早完成時間越小優先權越大。
3. LST	最遲開始時間越小者優先權越大。
4. LFT	最遲完成時間越小者優先權越大。
5. MIN DUR	作業時間越小者優先權越大。
6. MAX DUR	作業時間越大者優先權越大。
7. MIN RPW	以作業和其後續作業的時間和來決定，時間和越小者優先權越高。
8. MAX RPW	以作業和其後續作業的時間和來決定，時間和越大者優先權越高。
9. MIN RPL	RPL 為專案最終結點的最早開始時間減去作業最早開始時間，RPL 越小者優先權越高。
10. MAX RPL	RPL 為專案最終結點的最早開始時間減去作業最早開始時間，RPL 越大者優先權越高。
11. SRD	資源需求越小者優先權越高，其中 $RD_j = d_j \times \sum_{i=1}^m (r_{ij}/R_j)$ ， $d_j$ 表示作業 $j$

	之時間， $r_{ij}$ 表示作業 $j$ 所需之第 $i$ 種資源數量， $R_i$ 表示資源 $i$ 之有效數量。
12. GRD	資源需求越大者優先權越高， $RD_j$ 算法同上。
13. GCRD	累積資源需求越大者優先權越高，其中 $CRD_j$ 如下式： $CRD_j = d_j \times \sum_{i=1}^m (r_{ij}/R_i) + \sum_{k=1}^T \left[ d_k \times \sum_{i=1}^m (r_{ik}/R_i) \right]$ ，其中 $T$ 為安排於活動 $j$ 之前之活動集合，其餘符號之定義與 $SRD$ 相同。
14. MINSLK	作業浮時越小者優先權越大。
15. RSM	$RSM = MAX(0, EFT_i - LST_j)$ ， $RSM$ 越小者優先權越大，其中 $EFT_i$ 表示作業 $i$ 之最早完成時間， $LST_j$ 表示作業 $j$ 最晚開始時間， $i=a_1, a_2, a_3, \dots$ ， $a_1, a_2, a_3$ 為作業 $j$ 之先行作業。
16. GRU	資源閒置最小之作業組合優先排入，此優先規則僅適用於平行法。

### 5.1.2 數學規劃模式 (Mathematical Programming Models)

數學規劃模式求解又可稱為最佳解法 (Optimal Solution)，此種解法主要利用數學規劃之技巧來搜尋最佳解，將時間成本交換問題轉換為數學模式，以及利用線性規劃、整數規劃或動態規劃之方式求解。

Kelly (1961) 於專案進行過程中假設時間成本為線性關係，公式化時間成本交換問題；Hendrickson 與 Au (1989)，以及 Pagnoni (1990) 亦使用線性規劃來求解時間成本交換之問題，線性規劃法適用於線性之時間成本關係，但無法解決不連續之時間成本關係。Meyer 與 Shaffer (1963)，以及 Patterson 與 Huber (1974) 使用整數規劃法來解決包含線性及不連續之時間成本關係之時間成本交換問題，然整數規劃法當作業數目及資源種類較多時，計算工作量會變得相當龐大，且網圖亦顯得過於複雜，因此需限制作業之數量及資源之種類。Burns 等學者 (1996) 使用一混合式之方法，包括以線性規劃法求得時間成本交換曲線之下限，以及以整數規劃法為所需之工期求得精確之解。Robinson (1975)、Elmagraby (1993)，以及 De 等學者 (1995) 使用動態規劃法來解決特定型態網圖之時間成本交換問題，此種特定型態之網圖可分解為完全連續或平行之分支網圖 (Feng et al., 2000)。

## 5.2 時間成本交換分析目前之發展

### 5.2.1 基因演算法 (Genetic Algorithms)

在 1960 年代，John Von Neumann 提出一種自我複製 (self-reproducing) 之理論而奠定了基因演算法之基礎；之後 John Holland 更延續此觀念，並輔以達爾文之進化論「物競天擇、適者生存」，而在 1970 年發展出簡單基因演算法 (simple genetic algorithms, SGA)，使基因演算法的架構有了初步之雛形。

由於基因演算法提供一個相當簡單之系統架構、運作流程，就可產生強大之解答搜尋能力，且具有高問題獨立性，和必須要依附問題模式之傳統演算法有明顯不同，這種彈性也是其它方法所不及，同時基因演算法由群組間之各點同時探索不同之區域，再伴隨著世代演化交替、隨機搜尋之特性，這種平行處理之能力使它不容易陷入局部最佳化 (local optimum) 之困境，而向整體最佳解 (global optimum) 收斂，這些特點都讓基因演算法被廣泛地應用在各個領域。

專案計劃中可由使用較多的資源以縮短作業時間，但相對之成本也較高，因此可產生不同工期與不同作業資源需求之組合。時間成本交換問題之求解方法多為解析法，例如整數規劃法、動態規劃法等，但由於求解模式無法普遍適用於其他排程問題，且計算機資源之使用量龐大，1995 年 Liu 等人提出以線性規劃與整數規劃求解營建工程時間成本交換問題，在研究中指出，營建專案排程中，若一個 CPM 網圖有 8 個作業，且每個作業之資源組合有 2 種，如此解之組合就有  $256 (2^8)$  個，當網圖很大時，若一一求解將花費相當多之時間，因此提出以線性規劃與整數規劃求解只能適用於中小型網圖案例 (Liu et al., 1995)。有鑑於上述之原因，有學者提出應用基因演算法求解營建工程時間成本交換問題。

營建工程之時間成本交換問題於求解上並不容易，因為沒有唯一之最佳解，因此 Li 及 Love 於 1997 年提出應用基因演算法求解營建工程時間成本交換問題，基本假設前提為每一作業之作業時間於正常時間與趕工時間兩點間呈線性分佈，成本亦於正常成本與趕工成本間依比例變化，研究結果證實可較傳統演算模式更快速地找出適當之解，但因其分佈模式為線性，因此並未能符合現實狀況 (Li and Love, 1997)。1999 年 Li 等人之研究中發現大多數以基因演算法求解時間成本交換問題存在著某些問題，例如只能處理線性之時間成本關係，因此發展出結合機器學習方法 (machine learning method) 之

電腦系統，以求解非線性之時間成本交換問題，且證實能獲得較佳之解(Li et al., 1999)。1999年Leu及Yang提出整合工期成本交換、資源限制排程、資源整平問題，應用基因演算法並透過多目標規劃方法找出同時滿足三個要求的排程方案之非支配解(Non-dominated Solution)(Leu and Yang, 1999)。Feng等人於2000年提出結合模擬技術與基因演算法求解時間成交換問題，且考慮時間與成本之間之不確定關係，研究發現將基因演算法與模擬技術結合，且考慮不確定性會使得分析結果更快速且更接近實際狀況(Feng et al., 2000)。

運用基因演算法解決時間成本交換分析問題相關之文獻整理於表5-2中。

表 5-2 基因演算法於時間成本交換分析相關文獻整理

作者	年份	文獻	研究主題介紹
Li and Love	1997	Using Improved Genetic Algorithm to Facilitate Time-Cost optimization	應用基因演算法求解營建工程時間成本交換問題，假設每一作業之作業時間於正常時間與趕工時間兩點間呈線性分佈，成本亦於正常成本與趕工成本間依比例變化，研究證實可較傳統演算模式更快速地找出適當之解，但因其分佈模式為線性，因此並未能符合現實狀況。
Li et al.	1999	Using Machine Learning and GA to Solve Time-Cost Trade-Off Problems	發現大多數以基因演算法求解時間成本交換問題存在著某些問題，因此發展出結合機器學習方法(machine learning method)之電腦系統，以求解非線性之時間成本交換問題，且證實能獲得較佳之解。
Leu and Yang	1999	GA-based Multicriteria optimal model for construction scheduling	提出整合工期成本交換、資源限制排程、資源整平問題，應用基因演算法並透過多目標規劃方法找出同時滿足三個要求的排程方案之非支配解(Non-dominated Solution)。
Feng et al.	2000	Stochastic Construction Time-Cost Trade-Off Analysis	提出結合模擬技術與基因演算法求解時間成交換問題，且考慮時間與成本之間之不確定關係，研究發現將基因演算法與模擬技術結合，且考慮不確定性會使得分析結果更快速且更接近實際狀況。

## 5.2.2 禁忌搜尋法 (Tabu Search Algorithm)

禁忌搜尋法為一種求解組合最佳化問題之鄰近搜尋法，禁忌搜尋法之基本概念，在使演算法具有短期記憶能力。利用鄰近搜尋法之求解過程中，常常會有陷入區域最佳解之問題，一個不具有任何記憶能力之演算法經常會重複搜尋已經檢視過之可行解，或是在同一個區域裡長時間逗留。為此，禁忌搜尋法利用記憶架構，將不同循環所做出之移步決策，依短期或長期一一紀錄下來，以引導搜尋法跳離掉近區域最佳化之陷阱中，使得演算效率提高 (Glover et al., 1995)。

禁忌搜尋法已廣泛被應用於組合最佳化問題上，但應用於營建相關研究中則不多，以下為禁忌搜尋法基本原理之介紹。

禁忌搜尋法主要由六大要素組成 (李建漳, 2003)：

1. 起始解 (Starting Solution)：由最原始可行解中，所產生之一個起始解，一般係利用已知之啟發式解法來取得，以作為演算之起始解。
2. 候選名單 (Candidate list)：所有經由設定之變動方式所找到符合問題限制之可行解，扣掉所有禁忌移步集合，再加上凌駕規則集合，所構成的集合。一般較常用之變動方式為交換式變動 (Swap Move)、插入式變動 (Insert Move) 以及交換和插入式並用三種，所謂交換式變動即隨機選擇兩點做交換，而插入式變動即以隨機選擇一作業項目再插入一隨機選擇之位置點。
3. 移步 (Move)：移步又稱為移動路徑，係指由目前之解經由移步之屬性使其移動到另一個解，亦即在所有之鄰近解中，選取最優者作為尋優改善之移動路徑。使其向最佳解逼近。
4. 禁忌列表 (tabu list)：用來記錄搜尋中每次之移步，目的為提供一個記憶架構，且在一設定次數內將不會重複被搜尋，此一設定之次數即為禁忌列表長度 (size of tabu list)。此架構可分為「長期記憶」與「短期記憶」，所謂「長期記憶」係指從一開始搜尋便記錄所有的移步，而「短期記憶」則只記錄最近幾次之移步。一般而言，記錄禁忌列表之次數愈多則陷入區域最佳解之機率將愈低，但所需之記憶空間也愈大，電腦所需之運算時間也相對增加，可移動之空間亦將縮小，這些現象將降低求解之效率。雖然如此，現在還是沒有一套固定之方法

來決定禁忌名單之大小，通常是根據問題本身之特性來決定。

5. 凌駕規則 (Aspiration Criterion)：亦可稱為免禁準則，用來釋放禁忌名單中之移步，當此一移步在禁忌限制中但優於目前之最佳解時，為了能達到迅速求解之目的，禁忌搜尋法之凌駕規則會直接採用此解，而不受限制。
6. 搜尋停止規則 (Stopping Criterion)：禁忌搜尋法搜尋停止規則是用來終止搜尋的條件，一般有以下三種—
  - (1) 運算次數達到所設定之最多運算迭代次數。
  - (2) 無法優於現在最佳解之運算次數達所設定之最多失敗次數。
  - (3) 預設可接受之目標函數值，搜尋過程中一但達到預設值即停止搜尋。

禁忌搜尋法之演算過程可分為起始階段與搜尋階段，起始階段主要在輸入各種參數，包括了候選名單大小、禁忌名單次數、搜尋終止條件等，而搜尋階段是由一個可行之起始解開始，針對所有之鄰近解，評估目標值，然後挑出不在禁忌名單中之最佳鄰近解或雖然在禁忌名單中但滿足凌駕規則之解進行移步。整體而言，禁忌搜尋法之運算是藉由彈性記憶架構以禁止某些解之移步，而這些移步會使某些屬性又回到過去曾經搜尋過之解一樣，所以將這些移步記錄在禁忌名單中並且不允許再度拜訪，不允許再度拜訪之移步稱之為塔步 (Tabu)，而這些移步再某一特定時間後會被釋放。然而一個有效率之禁忌搜尋法需能在強化與多樣性兩方面取得平衡，換句話說，就是要在「搜尋解之效率」和「擴大搜尋之範圍」間取得平衡。

李建漳 (2003) 以禁忌搜尋法建構一整合工期/成本交換問題、資源限制排程問題之最佳化模式，並透過多目標規劃方法：逼近法，求解工期/成本交換問題，並計算出一個工期較短、成本較低，且滿足資源限制之最佳排程方案，提供排程規劃之一個建議解，模式將工期成本交換模式與多重資源限制排程模式整合，亦可單獨求解工期成本交換問題，且工期與成本間之關係可為非線性關係；或單獨求解多重資源限制排程問題。且經由實例驗證後，證明禁忌搜尋法可在較短之時間內，有效地求得近似最佳解，或最佳解，圖 5-2 為其研究中，時間成本交換演算之流程。

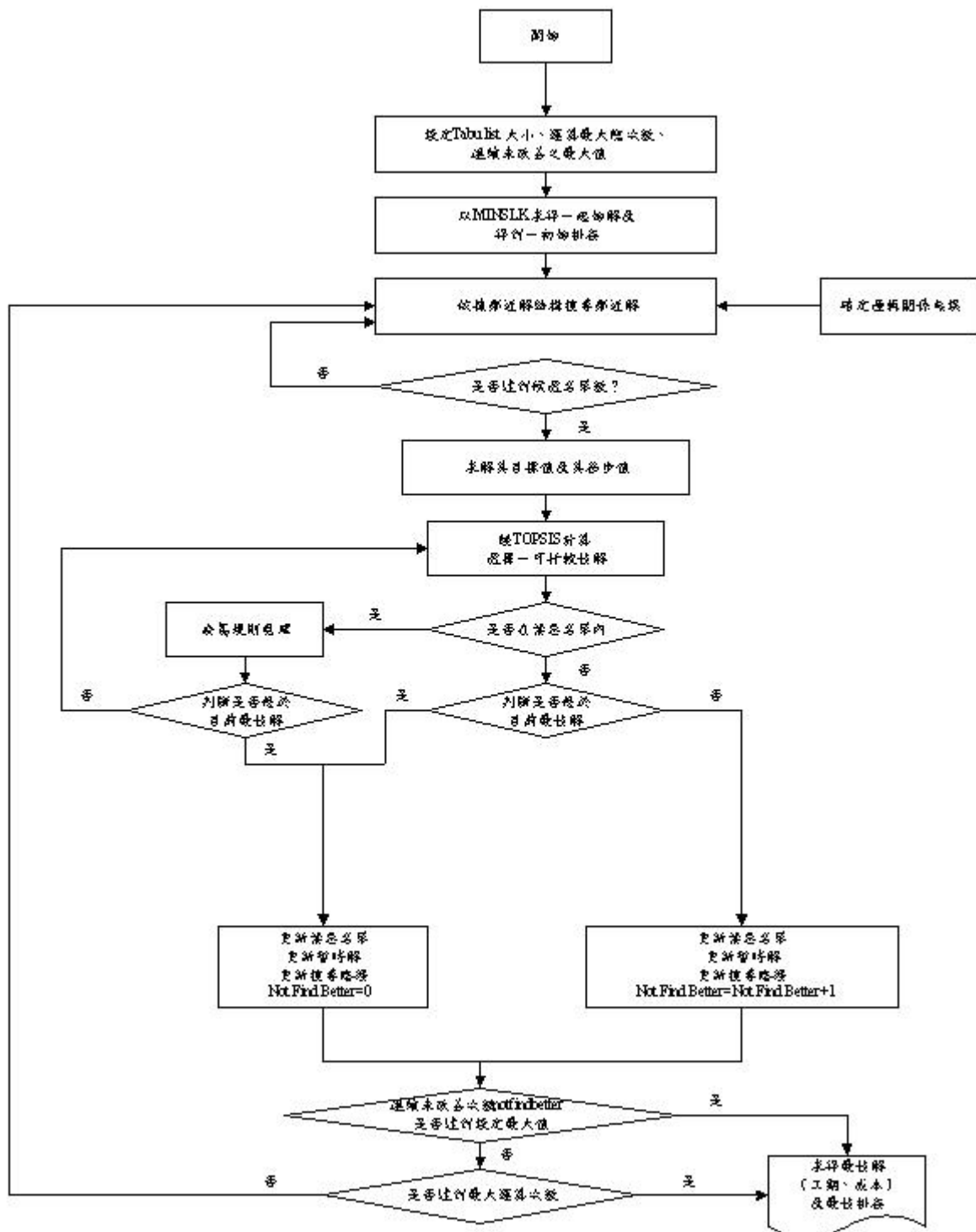


圖 5-2 禁忌搜尋法應用於時間成本交換問題演算之流程


(資料來源：李建漳，2003)

## 第6章 資源整平

資源整平之問題主要來自於工期固定之專案，承包商為了符合工期需求，必需有效地管理及使用資源，一般而言，專案計劃對於資源取用之政策，通常是採取作業能儘早取得資源之排程法則，以完成該專案計劃，然在執行期間會面臨到資源負荷不均勻之現象，例如產生資源需求之尖峰造成該時間點之資源不敷需求或產生資源閒置現象。因此承包商希望減少此資源需求尖峰之情形，以減少資源需求之波動，此波動將帶來額外之成本，例如臨時之雇用或解雇人員將使成本提高，而此資源需求波動之情形亦將使資源難以有效率地管理。資源整平之目的即在於不影響總工期之條件下，在作業寬裕之時間內調整作業之開工時間，以消除資源需求尖峰或資源波動之現象（Son & Skibniewski，1999）。

### 6.1 現有資源整平技術

#### 6.1.1 啟發式解法



資源整平（Resource Leveling）之相關研究一般區分為解析式（Analytical）以及啟發式（Heuristics）方法二種，然而資源整平問題本質上乃屬組合問題（Combinatorial Problem），求解所需之運算成本隨著問題本身規模、複雜度之增加而呈爆炸性地成長，故解析式方法之應用常受限制，求解對象只能侷限於小至中型規模之網圖，反觀啟發式方法乃係一種減少問題可能狀態，於耗費較小運算成本之情況下獲得滿意解答之方法，故處理對象之範圍可擴展至實際大型之工程專案，深具實用性上之價值，同時，啟發式方法無需如數學模式之專門理論為基礎，較易於實務界使用（李威憲，2002），因此現有之資源整平方法係以啟發式解法為主。

啟發式資源整平方法之相關研究源自於1962年，Burgess及Killebrew提出一系統化之程序，利用每日之資源平方和作為作業挪移效度之衡量準則，視每日資源需求不變後之整平效度達到最佳。首先將專案以最早開始時間進行排程，資源整平程序將由網圖中最後一個非要徑作業開始進行，作業將挪移至可移動範圍中資源平方和最小之位置後固定，挪移後之網圖將再重新計算一次所有作業之寬裕時間等資訊，往前重複上述步驟推進至第一個作業為止。上述所有步驟完成後稱為一個整平循環（Cycle），循環將持續至專案之資源平方總和不再減少為止（Harris，1990）。



Wiest 及 Levy (1977) 簡要地介紹啟發式資源整平之功能及進行方式，並提出範例輔以程式示範啟發式資源整平之操作過程，於原始專案排程完成後訂定資源之觸發水平 (trigger levels)，設定低於原資源使用量一個單位之處，整平目標即是使資源使用量符合觸發水平之限制，爾後觸發水平不斷降低，整平動作將持續至觸發水平無法降低為止。整個整平動作可將觸發水平視為一個下降之天花板，不斷地將崎嶇之資源需求圖壓平。

啟發式資源整平法主要有以下之共通點 (李威憲，2002)：

1. 基本假設：為了簡化程序，有以下六種假設—

- (1) 作業為連續施作。
- (2) 工程專案之完工工期固定。
- (3) 所需資源不受限制。
- (4) 作業之施工時間為固定。
- (5) 作業於施工時間內，單位時間資源需求保持固定。
- (6) 網圖邏輯關係保持不變。

2. 進程序：整體而言，啟發式資源整平法可分為三大部分，分別為：

- (1) 如何訂定作業之整平順序：以準則進行判斷，準則可能不僅一個，但均為賦予專案中各作業執行整平動作之優先順序。
- (2) 如何決定作業之施作時間：目的在於評量欲整平之作業於可挪移範圍內各位置之好壞，以決定作業之開始時間。
- (3) 如何維持作業間之邏輯關係：目的為在不違反作業原本邏輯關係之前提下進行作業挪移動作，直到整平程序完成。

3. 均以作業為整平動作執行時之最大單位，並以作業總浮時或自由浮時作為資源整平相關計算之依據。

## 6.1.2 最小動差法 (Minimum Moment Method)

Harris (1978) 所提出之 Minimum Moment Method，為啟發式資源整平問題中，應用最廣泛之方法，本法亦藉由挪移非要徑作業之位置以達到消弭資源高峰及低谷差距之目的，惟作業之挪移範圍乃限制於該作業本身擁有之自由浮時。本方法之程序可分為兩個計算循環：向前循環 (forward cycle) 及向後循環 (backward cycle)。進行向前循環時，首先將網圖分為數個序列階段 (sequence step)，從最後一序列階段向前進行資源整平之動作，而以最小動差 (minimum moment) 之觀念所推導出之改善因素 (improvement factor, IF)，作為決定作業之整平順序及選擇作業開始時間點之依據，IF 值越大，代表對減少資源變動之改善程度愈大，該作業之優先順序也越高，待同一序列之所有可移動作業皆進行整平動作後，需重新計算前一個序列階段各作業之自由浮時，再向前推進至下一個序列。相同之程序將持續至第一個序列為止。至此，向前循環結束，準備進行向後循環。向後循環則是從第一個序列開始，以向後浮時 (back float) 代替自由浮時，重新決定階段內各作業之開始時間，持續至最後一個序列階段。

Antill 及 Woodhead (1990) 曾以一個簡單的範例示範啟發式資源整平方法，範例中以表格化方式進行資源整平程序，作業依總浮時大小以遞增順序決定開始日期，日期之安排乃以延續施工機具及人力之使用情形為主要目標。

## 6.1.3 Packing Method

Packing Method 為 Harris (1990) 所提出，乃以 CPM 為基礎之啟發式方法，藉由堆積之方式達到資源整平之目的。該方法將要徑作業之資源使用情況視為一底部凹凸不平的箱子，堆積之目標即是將此假想箱子填平，首先定義四個準則以決定各非要徑作業之堆疊順序，四個準則分別為：

1. 資源需求量—由大至小
2. 總浮時—由小至大
3. 序列階段—由大至小
4. 隨機選取

待作業之優先順序決定後，於該選取作業之總浮時內，計算該作業與其先行及後續作業可能之資源堆積量，以總資源堆積量最小之位置為該作業之施作時間，與其他研究

相同，一但決定一作業之開始時間，則必須重新計算其餘尚未決定位置之作業的寬裕時間。有關啟發式資源整平之相關文獻，見表 6-1。

表 6-1 啟發式資源整平相關文獻整理

作者	年份	文獻	研究主題介紹
Wiest and Levy	1977	A Management Guide to PERT/CPM	訂定資源之觸發水平，並據此將整個整平過程視為一下降之天化板，不斷地壓平崎嶇之資源需求圖之過程。
Harris	1978	Precedence and Arrow Networking Techniques for Construction	藉由挪移非要徑作業之位置以達到消弭資源高峰及低谷差距之目的，惟作業之挪移範圍乃限制於該作業本身擁有之自由浮時。以最小動差 (minimum moment) 之觀念所推導出之改善因素 (improvement factor, IF)，作為決定作業之整平順序及選擇作業開始時間點之依據，IF 值越大，代表對減少資源變動之改善程度愈大。
Antill and Woodhead	1990	Critical Path Methods in Construction Practice	以表格化之方式進行資源整平程序，作業依總浮時大小以遞增順序決定開始日期，並以延續施工機具及人力使用情形為主要目標。
Harris	1990	Packing Method for Resource Leveling (PACK)	以堆疊之概念進行資源整平之動作，並定義四種準則 (資源需求量、總浮時、序列階段、隨機選取) 以決定作業之順序。

## 6.2 資源整平技術目前之發展

### 6.2.1 最小動差法之改良

Hiyassat (2000) 修改 Minimum Moment Method，目的在不犧牲結果正確性之前提下減少整平程序之計算量。該法主要提出資源需求量與浮時之相乘積 ( $R \times S$ ) 做為同一序列作業之優先順序判斷準則，代替原來以改善因子 (Improvement Factor, IF) 做為判斷之機制，雖然作業開始時間之決定仍仰賴改善因子，但該法也對改善因子之計算加以簡化，增進使用者之運算效率，該研究並指出，原來由 Harris 提出之 Minimum Moment Method 於同一序列中，須耗費  $n!$  次之運算循環，藉該法之改善可減少至  $n$  次之運算循

環。

Hiyassat (2001) 進一步考慮多重資源應用於上述之修改式 Minimum Moment Method，研究中呈現關於多重資源整平之程序，並利用案例證明其方法比傳統之 Minimum Moment Method 需要較少之計算量。

## 6.2.2 基因演算法

Hegazy (1999) 以基因演算法發展出一個新方法，同時處理資源排程 (Resource Allocation) 及資源整平 (Resource Leveling) 兩個問題，結合以往將二個問題分開之處理機制。同時，本文亦藉由對貨幣軸取動差之方式，進行資源分配之離散程度及結束時間之評估。此外，按  $M_x$  及  $M_y$  之不同性質組合，提供四種不同之評量角度供使用者選擇。

曾貽威 (2001) 之研究中指出，營建工程專案資源排程之主要目標有：(1) 使所有施工作業項目均能適時獲得資源供應開始施作，在預定工期內完成作業施作項目；(2) 當資源受到限制時，能充份有效地分配及使用資源給予各項施工作業，使工期之延誤降到最低；(3) 有效地運用施工資源以達到較佳之財務管理目標，進而增加收益。而先前之研究其大多集中在前兩項研究目標上，大多並未考量到第三目標，因此也並未考量到現金流量管理之角度於資源排程上之影響性，且先前之資源排程研究大多是集中在探討單一資源最佳化的研究課題上，但實際上營建工程作業項目皆是必須由許多項相關之資源互相搭配支援之情況下才足以完成，若只針對單一資源做最佳化排程，其結果並不見得是對整體多重資源排程也是最佳之情況，因此為了有效且實際地符合營建工程資源排程之三個主要目標及考量到多重資源排程之相互影響，必須提出一項新的分析計算模式有效的解決上述各項問題。

此外，傳統計算模式在求解這類問題上仍有許多尚待解決之問題 (如：求解效率較不理想等)，因此其研究嘗試提出一項新分析計算模式改善傳統上解法之一些缺點，建立一項較穩定且有效率之解析模式，考量到現金流量與多重資源相互影響的前提下，利用基因演算法建立新的演算模式，應用基因演算法所建構之求解模式，能夠有效地分析求解上述各項問題，並且改善傳統上計算模式之缺點，進而探討考慮現金流量對專案多重資源排程最佳化之研究，其研究主要之特點如下 (曾貽威，2001)：

1. 傳統在資源整平只考慮到整平之績效，並未考慮到整平前後之現金流量與週轉

金大小之影響，且大多都只針對單一資源並未考量到多重資源之互相影響，因此往往在資源整平後有最佳之資源分佈情形，但不見得有最佳之現金流量，且單一資源之整平最佳化對整體多重資源來說並非為最佳之情形，因此其研究結果提出一多目標決策模式，針對資金之最大化淨現值與多重資源整平績效兩權衡目標提出一組權衡解，提供決策者一個更明確客觀之決策選擇。

2. 應用傳統之演算模式（如：數學模式、啟發模式），其計算步驟繁鎖且規則眾多，在計算過程也有類似試誤法（trial and error）計算之型式，在嘗試中尋求最佳狀況，且計算過程及規則也因使用者之考量不同而有不同之結果，因此其計算結果所求解並非為相同之最佳解，除非應用窮舉法一一將所有可能解求出，才有可能挑選出最佳解，因此其研究結果所提出之計算模式不僅可以有效地求得最佳解或近似最佳解，且考慮到整平前後之現金流量之影響，更可提供決策者一個更明確客觀的決策選擇。

### 6.2.3 路徑堆積法（Path Loading Method）

李威憲（2002）之研究中指出，Burgess（1962）所提出之整平方法，整體程序主觀，整平邏輯簡單易懂。然而，整個程序對資源整平步驟之敘述不夠詳細，無法給予使用者清楚之運算流程，而作業資源整平之順序乃以箭線式網圖之結點編號為準則，然對結點號碼之編排方式卻無設定規則，不同使用者可能對同一專案採行相異之編碼順序，進而造成作業整平順序之改變，致使整平結果之不同。

相對於 Burgess 之資源整平程序，Harris（1978）及 Hiyassat（2000）所發展之方法，對整平挪移流程明確地加以敘述，並定義指標供使用者作為判斷之準則，給予使用者莫大之便利，改善了 Burgess 研究中較不嚴謹之程序，擴展了該方法之應用性。然而，Harris 及 Hiyassat 所提出之兩種整平程序並無對參與整平程序中之序列（Sequence）加以明確之定義，雖可明確清楚地排列出各別序列，但在現實環境中，所有專案作業之序列排列方法並非唯一。

因此李威憲（2002）發展一新啟發式資源整平方法—路徑堆積法，不同於現行啟發式資源整平方法大多以垂直序列水平方向之挪移方式，路徑堆積法係利用水平路徑為單位以垂直方向之堆疊達成資源整平之目標，並同時擴展現有啟發式整平程序之使用範圍，路徑堆積法之特點如下：

1. 改善現有啟發式資源整平方法均以作業為整平最大考量單位之基礎，利用路徑作為整平優先順序判斷之考量單位，有效減少整平程序中判斷之次數。
2. 利用路徑作為整平順序之考量，並以路徑可施作時間作為整平之依據，改善現有啟發式資源整平以總浮時或自由浮時作為整平依據產生之網圖更新等問題，並可同時處理非重複性及重複性兼具之工程專案，以因應現代營建專案單元化之發展趨勢。
3. 路徑堆積法除了可同時處理非重複性及重複性兼具之工程專案外，若專案規模較大，路徑堆積法之計算需求（computational effort），如計算次數、遞迴次數、挪移（堆疊次數）、更新次數等，均優於現有其他較嚴謹之方法，在現代營建環境工程規模大型化之趨勢下，路徑堆積法之應用性較強。



## 第7章 有限資源規劃排程

### 7.1 有限資源排程問題

早期開始發展出 PERT/CPM 方法以求解在專案規劃與控制之問題時，此兩種方法僅將作業時間當作考量因素，並未考慮到資源方面之問題，因此這些方法中隱含著專案在執行中所需使用之資源都能充分之供應，並沒有資源限制上之問題。且只要滿足作業在執行上之優先順序，作業便可開始執行，此種假設在大部分之現實環境中並不能成立，僅適用於未考慮資源的簡單排程環境。所以在專案執行過程中，資源衝突之情況不斷產生，造成資源分配上之問題逐漸受到重視（Tavares，1990）。

資源調配之問題，主要有三種資源調配之型態：

1. 時間成本交換問題：不同之作業工期及不同之資源需求之各種組合會對應不同之總成本及專案計畫總工期。時間成本交換之目的在於選擇適當之時間/成本組合。
2. 資源限制問題：專案計畫執行中，可供使用之資源數量有限，必須藉由排定作業取用資源之順序來化解衝突，必要時延長工期以滿足資源限制，調整適合之作業取用資源之順序，以求得專案能夠在最短工期下完成。
3. 資源拉平問題：一般專案對於資源取用之政策係採取作業能儘早取得資源之排程法則，如此在執行期間將面臨資源附和不均之現象，因而必須在不影響工期之條件下，利用作業允許之寬裕時間，調整作業之開始時間，以消除資源需求尖峰或資源閒置之情況。

Boctor 於 1990 年發表之研究中對資源限制專案計畫排程問題提出一個詳細之定義指出：「資源限制專案排程問題係由一群具有執行順序限制關係的活動集合所組成，並且已知各作業的作業時間和資源需求之情況下執行各項作業，當任何一個作業被執行時，在其執行期間中必須時時更新資源使用量，最後達成某些管理目標的最佳化」。因此，資源限制專案排程問題除了需要考慮作業時間、作業執行的優先順序外，還必須考慮到資源限制的問題（Boctor，1990）。

此類問題的重要性在於較符合現實情況，因此，通常具有以下幾個特性和假設（黃

榮村，1995）：

1. 無論在單專案或多專案排程問題中，每個專案均包含許多項作業，每項作業都有一既定之作業工期。
2. 某些作業間存在著特定之優先順序關係，且其先行作業（predecessor activities）未完成前，該作業或後續作業（immediate successor activities）均不得開始進行。
3. 每一作業均無前置準備時間（setup time）或前置準備時間均包含在作業工期內。
4. 任一作業均不得分割或被中斷。
5. 各種資源的可用資源是有限的，且在整個專案期間均維持固定水準，即無法臨時增加或減少某一種資源。
6. 各項作業在其進行之任一時點（time-period）上對各種資源之需求數為一既定數。
7. 各種資源間均無替代性（substitution）及遞延性（extension）。
8. 資源之數量（可用數與需求數）及作業工期均為整數且不可分割。
9. 目標視管理者之期望而定。

由於研究者對於有限資源專案排程問題見解之不同，導致對問題也有不同之分類方式產生。蔡茂登（1996）對於有限資源專案排程問題之分類型態有相當詳細之說明，分類方式及說明如下：（問題分類圖如圖 7-1）

1. 以同時排程專案之個數來分類：單專案排程問題及多專案排程問題。
2. 以使用之資源型態種類分：單資源及多資源問題。
3. 以求解方式分：最佳解法(optimal procedures)及搜索解法。
4. 以資源是否重複使用（renewable）分：若可用資源之數量有限，但可永續使用（例如人工），則此類問題稱為可重複使用資源問題（renewable problem），否則稱為不可重複使用資源問題（nonrenewable problem），若每期可用資源之數量有限，且資源可使用期數亦為有限，則此類問題稱為雙限問題（doubly constrained）。



5. 以排程之目標分，大致可分為五類：

- (1) 最小化總專案工期問題 (the minimization of total project duration)：此一準則為研究者及實務上所廣泛使用。其主要觀念係使專案中之每一作業均能在不違背資源之限制下儘早地完工，而當每一作業均完成時，即為整個專案之完成，且使最後完工作業之完成時間最小則是整個專案的最短完工工期。
- (2) 最小化總專案延遲問題 (the minimization of total project delay)：所謂延遲即完工時間超過到期日之時間單位，此一目標在單專案中幾乎與最短專案工期相同，然而因為實際完成工期為變數，所以在多專案問題中能使總專案工期為最短，並不一定保證可使總專案延遲為最小。
- (3) 最大化專案淨現值問題 (the maximization of the project net present value)：此一目標在近年來較多學者著手研究，其常用在多專案模式或總時程較長之單專案模式中。其主要觀念即將整個專案完成時之利潤折現回起始時點，以判斷整個專案之投資效益。
- (4) 最小化總專案成本問題 (the minimization of the project cost)：此一目標中所謂之成本係以資源不足時之取得成本、供過於需時之閒置成本以及延遲成本之罰款 (penalty) 為主。
- (5) 最大化資源利用率問題 (the maximization of resource utilization)：所謂資源利用率為被使用資源數/可供使用資源數。

除上述之目標之外，其他亦有依專案問題特性、公司或專案經理人目標之不同而定者，有關資源專案排程常見研究目標之相關研究整理於表 7-1。

表 7-1 資源專案排程常見研究目標之相關研究

研究目標	研究者
最小化總專案工期	Brand (1964)、Wiest (1967)、Pritsker (1969)、Fisher (1970)、Davids (1971)、Schrage (1972)、Patterson (1974)、Talbot (1978)、Demeulemeester (1992)、Mingozzi (1998)
最小化總專案延遲	Kurtulus (1985)、Boctor (1990)、蔡登茂 (1992)
最大化專案淨現值	Doersch (1977)、Elmaghraby (1990)、Yang (1992)、Speranza (1993)
最小化總專案成本	Slowinski (1980、1981)、Talbot (1982)
最大化資源利用率	Kurtulus (1982)、Mohanty (1989)

(資料來源：蔡政峰，2001)

6. 按待排作業是否可被預製 (preemptive) 分：若每項作業一旦開始即繼續至結束為止，不得事先完成某部份或中途間斷則此類問題稱為不可預製 (non-preemptive case) 問題，若允許作業可事先預製或分割、間斷則稱為可預製 (preemptive case) 問題。

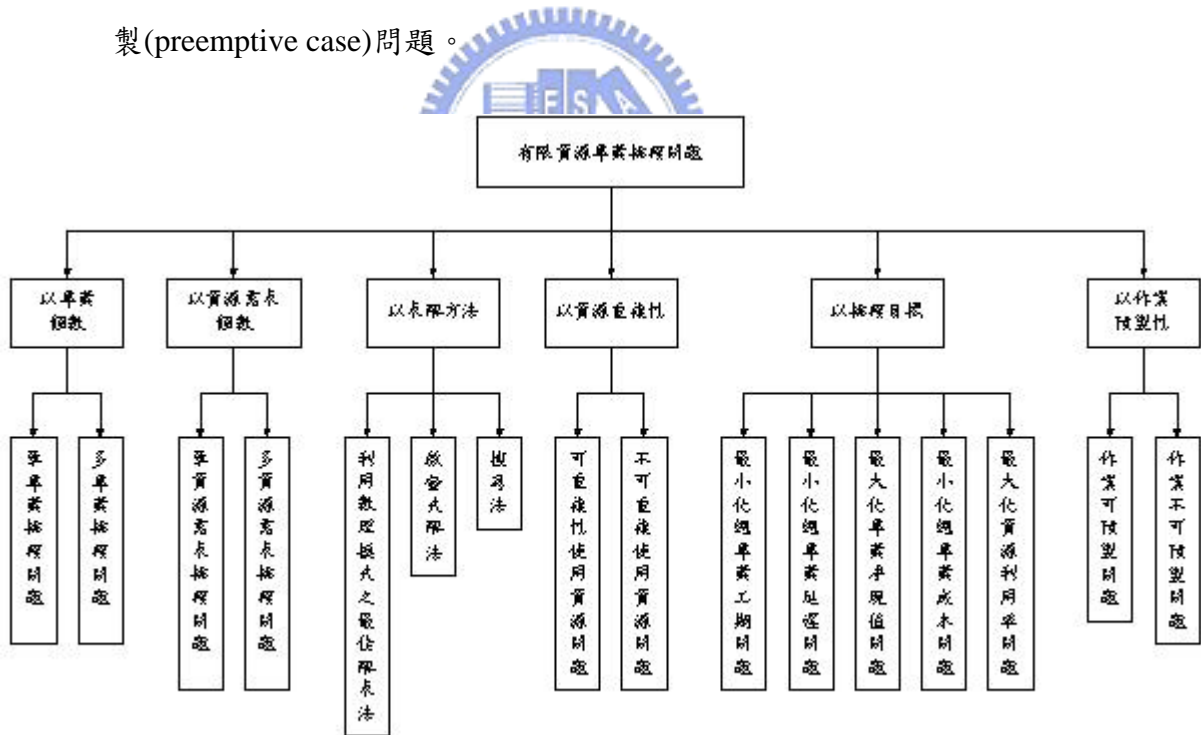


圖 7-1 有限資源專案排程問題分類圖

(資料來源：蔡登茂，1996)

## 7.2 現有有限資源規劃排程技術

### 7.2.1 利用數理模式之最佳解求法

在最佳解法中最經常用來求解有限資源專案排程問題之方法為整數規劃法 (Integer Programming) 及分枝界限法 (Branch and Bound Algorithm)。

#### 一、整數規劃法 (Integer Programming)

整數規劃法係專案排程問題中較早被提出之最佳解法。整數規劃法之基本觀念為將整個專案之計劃期間分割為幾個區間或工期，某項作業在該時間點上是否正在進行、是否開始或是否結束，以 0 或 1 來表示。目標函數乃視公司期望達成目標而定，至於技術限制 (technological constrains) 亦即條件限制式，通常須滿足下列限制：

1. 作業先後順序關係限制：所有先行作業未完成前，其緊接作業不得開始。
2. 資源限制式：每期某種資源總需求不得超過該資源之可用數量。
3. 作業不得分割之限制
4. 作業工期之限制



1963 年 Wiest 運用整數規劃法求解資源限制下專案排程之最短工期，在其研究中建構一個有 55 個作業項目，4 種資源型態之問題共需 1650 個決策變數以及 6870 個條件限制式。由於問題過於龐大，因此如何減少條件限制式與決策變數個數，增進求解效率為後續研究者之重點 (張芷宜，2004)。

#### 二、分枝界限法 (Branch and Bound Algorithm)

分枝界限法基本上係一種列舉技術，透過分枝之方式，不斷將原來之問題分割成好幾個子問題，並利用上限值及下限值之比較，將某些不可能之子問題去除，以避免不必要的運算時間。

Mueller-Merbach 於 1967 年將分支界限法首先應用到有限資源專案排程問題上，他讓一個專案可擁有數個資源型態，但在專案中每一項作業只容許使用一種資源型態且需求數量及可供使用之數量也只能以一單位為限。於同一年，另外一位學者 Johnson 提出 BETINA (bound enumeration technique in network analysis) 法，其方法與 Mueller-Merbach

相同，只限應用於最簡單之例子上，每項作業僅一種資源型態需求。其它研究分枝定界法之文獻大多集中於發展優越之上、下限值及凌越原則（dominance），以期更能有效率獲得最佳解，例如 Davis and Heidorn（1971）、Hastings（1972），Schrage（1972），Stinson（1978）以及 Christofides。然一般而言由於網路型態因專案不同而有所不同，在進行凌越原則考量時很難將所有影響因素皆列入考慮，而且在進行凌越比較時將耗費大量的計算時間及佔用大量的電腦記憶空間，於是造成求解上的困難（蔡政峰，2001）。

最佳解基本上係以數學規劃之技巧，將問題歸納出某些特性，然後利用這些共通之特性，透過模式之建立而進行最佳解之搜尋。長久以來有限資源專案排程問題之最佳解法一直以來沒有很大進展，主要原因在於專案排程問題本身除了網路結構複雜之外，網路之作業型態、資源需求以及可用資源之限制等因素交互影響使得問題隱含高度之變化性及複雜性，因而在對問題進行歸納分析時無法完成有效掌握各種型態之問題，最後建構出來之模式不但龐大而且沒有效率，雖然早期研究最佳解法之學者嘗試著以各種不同之最佳解法進行專案排程問題求解，然而都未能獲得良好之效果。由於最佳解法之諸多問題無法獲得有效之解決，而且現行解法僅能用來求解較小型之專案問題，所以目前仍無任何最佳解法可提供實務界作為專案排程之參考。

## 7.2.2 啟發式解法

於 1963 年，學者 Kelley 最早應用啟發式解法求解資源限制專案計畫排程問題，於研究中提出啟發式解法為以下兩種基本方法：串列法（Serial Method）與平行法（Parallel Method）。

1. 串列法：乃是在排程之初，即將各項作業按照某種優先規則（prior rule），建立一個排程優先次序表，一次排入一個作業，在排入作業時，必須在不違反作業先行關係以及資源限制的條件下儘早排入，常用之優先規則詳見表 5-1。
2. 平行法：沿排程時點逐點向前推移，將可排入的作業按某種優先次序儘早排入，並在同一排程時點只要不超過資源限制則可同時排入多項作業。通常平行法依循下列幾點原則進行排程工作：
  - （1）由時點 1 開始進行排程考慮，每次以一單位時點向前推移。
  - （2）在各排程時點進行排程考慮時，先將該時點之所有待排作業（即先行作業皆

已完成的作業），依某種優先規則建立排程優先次序表，然後以優先次序最高之作業開始考慮，如果有足夠資源容許該作業排入，即將該作業再予以排入，如果資源不足則延遲該作業，到下一時點再行考慮，然後再考慮下一個優先權值較高之作業。

- (3) 若在一時點上，所有待排作業皆已考慮或剩餘可用資源不足以讓任何待排作業再排入時，則時點向前推移一個單位，然後再重複原則。
- (4) 將該時點所有待排作業重新按優先次序排列，繼續進行排程考慮，直到所有專案內的作業皆被排程為止。

## 7.3 有限資源規劃排程技術目前之發展

### 7.3.1 基因演算法 (Genetic Algorithms)

Wallma (1995) 成功地將基因演算法應用於求解有限資源專案排程最佳化問題上。Chan 等人 (1996) 提出運用基因演算法求解營建專案資源排程最佳化問題，結果顯示應用基因演算法在求解資源拉平最佳化，較傳統啟發式法則容易找到更佳的解。Leu 等人 (1999) 提出針對專案時程的不確定性應用模糊理論與基因演算法求解在不確定專案時程內有限資源下資源分配排程最佳化。Leu (2000) 提出以基因演算法求解在不同風險水準下最大化專案利潤模式，在其模式中時間和成本可以有抵換關係，同時考量專案時間為模糊數的情況，以取得時間和成本間的平衡點。曾貽威 (2001) 以基因演算法考慮現金流量及多重資源最佳化，發展合適於營建作業專案排程之改良基因演算法之交配、突變計算模式 (張芷宜, 2004)。

蔡政峰 (2001) 利用基因演算法之多點平行搜尋之優點，提出以基因演算法為基礎之排程系統，並導入了移民運算子之概念，增加演算法之搜尋能力。再以模糊數學規劃方式來轉換成傳統之線性規劃模式，加以求解探討基因演算法支各項參數之重要性及優先次序，以瞭解網圖密度與基因演算法之關係。

陳飛文於 2001 年利用基因演算法全域搜尋之能力，加上可平行處理之特質，充分利用目前電腦叢集之發展，配合 MPI 平行程式語言之運作，建構兼具經濟、彈性以及高效率之平行求解計算模式，將平行運算之技巧運用於資源限制排程求解模式。

有關基因演算法運用之優缺點整理於下（羅友廷，1999）：

1. 優點：

- (1) 多點同步搜尋：基因演算法同時考慮搜尋空間上多個點而不是單一個點，因此以較有效率獲得整體最佳近似解，同時也可以避免陷入區域最佳解之機會，此項特性乃是基因演算法的最大優點。
- (2) 使用適應度函數：基因演算法之運作過程僅使用適應度函數的資訊而不需要其它資訊，因此可以使用各種型態之適應度函數（如多目標、非線性），並可節省計算時間以避免繁雜之數學計算。
- (3) 機率式之搜尋：基因演算法係使用機率規則（stochastic）之方式去引導搜尋方向，而不適用明確（deterministic）之規則，因而較能符合各種不同類型之最佳化問題。
- (4) 基因編碼：基因演算法係以參數集合之編碼進行運算而不是參數本身，因此可以跳脫搜尋空間上的限制。

2. 缺點：

- (1) 運算子之設計問題：根據不同之問題，需要設計不同功能之運算子，以提昇搜尋效率。若單純使用簡單基因演算法之運算子，搜尋速度會受到影響。
- (2) 重複搜尋之問題：因基因演算法沒有記憶功能，且其運作過程只與適應度函數相關，因此往往在搜尋過程中，重複搜尋到相同之點，增加搜尋時間。

### 7.3.2 禁忌搜尋法（Tabu Search，TS）

禁忌搜尋法應用在營建工程最佳化問題上分別為：林宏勳（1994）應用禁忌搜尋法在節線排程問題路線改善方法之研究，主要參考節點排程問題之路線改善方法及區域搜尋概念（local search algorithm），發展出路線間之交換改善步驟，再加上禁制搜尋策略擴大搜尋範圍，尋找最佳解。蕭博文（2002）應用禁忌搜尋法求解營建工程專案多重資源排程最佳化問題，其結果顯示禁忌搜尋法求解較傳統方法有效解決資源分配與資源拉平問題，並求得最佳解或近似最佳解。李建漳（2003）應用禁忌搜尋法建構一整合工期/成本交換問題、資源限制排程問題之資源排程最佳化模式，透過逼近法（TOPSIS），

求解工期/成本交換問題，並計算出一個工期較短、成本較低，滿足資源限制的最佳排程方案，最後經由實例驗證，證明可在較短時間內，有效求得最佳解或近似最佳解（張芷宜，2004）。

### 7.3.3 模擬退火法（Simulated Annealing，SA）

模擬退火法最早在 1953 由物理學家 Metropolis 所發表，主要在研究複雜系統、計算系統中能量分佈。但一直沒受到研究者之重視，因此才在 1983 年由 Kirkpatrick 提出完整之模擬退火法，並詳述模擬退火法之基本原則和使用機制。Kirkpatrick 提出模擬退火法之後，此種方法便被大量運用在求解工業工程各種組合最佳化問題上。

Van den Bout 和 Miller (1988) 以模擬退火法為基礎融合神經網路快速收斂之優點，發展出退火神經網路。Wright (1989) 應用模擬退火法求解機關車排程問題，結果顯示模擬退火法所求得之解優於一般傳統方法所求得之解。Jeffcoat 和 Bulfin (1993) 將模擬退火法與鄰近搜尋法相互比較，用以求解資源限制下排程問題，結果顯示模擬退火法求得之解較佳。黃榮村 (1995) 提出資源限制下之模擬退火法，發展出兩階段退火法搜尋最適解並以左右移動產生新解之方法取代傳統產生機構，結果顯示此方法確實很有效率。Boctor (1997) 提出應用模擬退火法求解多類型資源限制排程問題，結果指出若參數設定合宜，可以得到相當良好的解。Son 和 Skibniew (1999) 應用區域最佳法與模擬退火法發展出多重啟發模式，用以求解資源拉平問題，結果顯示這些啟發式模式能產生好的合理解，且可用於複雜的排程問題。

張嘉君應用模擬退火法考量資源限制情況下建構演算模式，用以求解營建工程多重資源限制下排程問題，其結果顯示模擬退火法應用於營建工程專案確實能有效收斂至近似最佳解或最佳解（張嘉君，2003）。

## 第8章 電腦模擬技術

### 8.1 電腦模擬技術之介紹

模擬技術（Simulation Techniques）從 1950 年代開始發展，隨著電腦技術之進步，模擬亦成為廣泛應用之工具。模擬之定義眾說紛紜，簡單來說，模擬係應用符號與數字實質之意義來描述實際之系統，經由這些符號內容與數字之變化而表現出實際系統之運作情形。相關針對模擬之定義整理於表 8-1 中。

表 8-1 模擬之定義

作者	年份	定義陳述
林宏澤、林清泉	1991	對已存在或即將設立之系統，建立其實體或抽象之模型，並基於事實或者假定之各種不同情況，對建立之模型加以試驗，使其能顯示在不同或不確定之情況下，實際從事決策或採取行動時所可能產生之結果與資訊，以作為解釋系統行為或作為改善現有系統效率及設計新系統時之參考
Michael	1992	模擬之結果並不能解決實際之問題，但可清楚將問題呈現出來，模擬之結果可用來評估與預測輸入模擬模式中之參數，透過持續調整相關之參數，比較模擬各方案所得之績效，以此決定何種方案最合適解決問題。
Harrell et al.	1992	模擬為一就真實系統之詳細模式進行試驗之技術，以確定對於系統本身之結構或環境改變時，會產生何種變化以及系統如何反應。亦即，建立一套與真實系統相類似的邏輯模型，透過電腦運作之過程，了解系統之作為，進而獲得不同決策參數下系統運作所獲得之績效，再由管理者調整決策參數，以改善系統績效。
Law and Kelton	2000	所謂模擬，係對一實際系統建立與其相類似運作模式之模型，並對此模型進行實驗，來確定當某些條件變動時，相關之事物會產生何種反應與變化的方法。

而電腦模擬係將電腦技術應用於模擬上，利用電腦正確且迅速處理之特性，將許多複雜無法由人工處理或費時費力之問題，採用電腦分析而得到成果，因此電腦模擬較明確之定義為，針對研究分析之系統，建立數學及邏輯之模型，在電腦上進行實驗，並藉由電腦之分析改進，達成系統之最佳化（蔡雅雯，2002）。

然並非全部狀況皆應用於電腦模擬，仍需依據實際適用之狀況、特性來運用，應用



電腦模擬之時機有下列幾種 (Pegden, 1995) :

1. 評估 (Evaluation) : 在實際進行作業前, 評估目標系統之設計, 利用模擬方法加以分析, 可及早發現執行時可能發生問題與作業瓶頸所在, 而能防範改善於未然。
2. 比較 (Comparison) : 比較替代方案下之功能或比較不同作業策略及過程。模擬可用以分析系統之不確定變數, 表現真實作業動態狀況, 並能提供無實際工作經驗者, 藉由模擬分析過程與結果, 而能對作業程序有具體概念。
3. 預測 (Prediction) : 預測各種情況下的績效與發展, 預先瞭解可能產生之結果, 降低錯誤判斷造成之風險。
4. 敏感性分析 (Sensitivity Analysis) : 調節、分析及比較各因素對系統個別或綜合之影響。
5. 最佳化 (Optimization) : 確定何種因素組合最有利於整個系統。
6. 功能性相關 (Function Relations) : 建立相對之關係, 分析一個或多個原因對於系統之影響。當面對重大且複雜之問題, 而無法建立數學計算式或需以複雜數學計算式分析結果時, 可以用模擬之方法進行分析。
7. 瓶頸分析 (Bottleneck Analysis) : 找尋資源配置或作業上瓶頸或限制, 並試著加以改善。

一般而言, 模擬之模式大致可分為下列三種 (黃榮堯, 1998) :

1. 離散式 / 連續式 (Discrete/Continuous) : 所謂離散式模擬, 係模擬過程中應變數 (dependent variable) 隨模擬時間之特定點而個別改變; 而連續式模擬為模式中應變數隨著模擬時間持續之變化。一般營建作業電腦模擬多採用較易處理之離散式模擬。
2. 常數式 / 隨機式 (Deterministic/Stochastic) : 模擬進行時若流程中所有作業項目之耗時皆以常數表示, 則稱為常數式電腦模擬; 相對地若耗時皆以機率分配, 如常態分配、指數分配等形式表達, 個別作業項目每次耗時係由分佈曲線形中以亂數隨機產生, 則稱為隨機式電腦模擬。

3. 靜態 / 動態 (Static/Dynamic) : 所謂動態模擬係為模型之變數隨時間而改變，反之，靜態模擬則為模型之變數不隨時間而改變。

此外，在模擬之過程中，主要為以下三種模擬策略 (蔡雅雯，2002) :

1. 事件排程策略 (Event Scheduling, ES) : 係依事件之發生時間而改變，模式開發者 (Modeler) 主要之工作在決定改變系統狀態之事件與邏輯，描述並記錄事件點上系統狀態之變化。
2. 活動掃描策略 (Activity Scanning, AS) : 觀念在於各種不同活動都可同時發生，模式開發者主要工作為確認活動可發生之條件，在模擬進行時，每一個活動都會掃描，只要有滿足之條件，就開始進行該項工作。
3. 過程互動策略 (Process Interaction, PI) : 主要利用實體通過一個系統之觀念，這些實體必須經過取得、擁有、釋放資源之過程來完成模擬。

## 8.2 電腦模擬技術於營建業之應用

電腦模擬於營建工程之應用廣泛，舉凡排程、成本控制、投標、土方作業、高層建築施工、隧道施工、機具之選擇、隧道施工作業、土方載運、路面鋪設、管線埋設、橋樑施工、基礎施工、混凝土施作等重複性單元之規劃，由工程之規劃、投標至施工作業階段甚至工程糾紛之解決皆為電腦模擬可探討運用的相關主題 (Halpin, 1992)。

電腦模擬對營建工程而言，能實際反應現況，提供詳細規劃及分析工具，使用者須先建立現實運作模式，經由不斷地測試以求得模式演變，幫助使用者對預知狀況進一步分析與瞭解，有助於計畫階段與控制階段之規劃與檢討。例如在計畫之階段若無足夠之資料，電腦模擬可適時用來推估生產力與作業資源數量之建議，可作為流程規劃人員之參考；在控制之階段，電腦模擬可用來了解生產力發生瓶頸之地方、機具之使用、閒置率以及分析最小成本及最佳工期等，可解決作業延遲與資源調配之問題，進一步有效提高作業產能 (Antonio, 1993)。

總體而言，電腦模擬於營建工程上之應用時機如下 (蔡雅雯，2002) :

1. 新方法加入：評估新方法之可行性時，利用模擬方法加以分析，預先瞭解可能產生之結果，降低錯誤判斷造成之風險。如使用 CALTITE 防水防蝕混凝土系

統對於台灣地區高速鐵路橋梁、隧道施工工期縮短趨勢之研究案，其目的在於比較探討使用整體防水系統與傳統防水膜系統之施工速率及對工程施作工期之影響，做為今後隧道工程防水系統選擇之參考，以防水施作對高速鐵路計劃橋梁與隧道施工工期之影響為探討範圍，作其評估使用新方法的狀況，故用於新方法之模擬能進一步協助工程不確定性及評估。

2. 替代方案測試：比較替代方案下之功能或比較不同之作業策略及過程。模擬可用以分析系統不確定變數，表現真實作業狀態，經由模擬分析，可及早發現執行時可能發生之問題與作業瓶頸之所在，而能防範改善於未然。
3. 資源有效利用（機具配置、人員調度）：電腦模擬可藉由資源、作業項目等元件的建構，評估資源、作業項目配合情形，且可藉由模擬輸出結果—資源使用率、閒置情形，進行機具配置、人員調度。
4. 產率評估：影響作業進行產率結果之因素相當多，如某作業項目、資源之循環時間、如何針對項目關係進行敏感度之分析，改善作業窒礙難行問題點，得出模擬最佳產率，協助作業之進行。
5. 分析、預測影響因子：營建作業受到許多外在環境影響，實難找出作業中應掌握重點，可加以利用模擬方法進行分析，進而評估、預測、影響作業進行之重要因子。
6. 精簡或規劃流程：在模擬模式的構建時，需經過團隊之討論流程，以確定模式形成，且設計缺失或瓶頸問題可透過模擬來預知，如此即在過程中規劃其作業流程，甚至流程再造。
7. 成本的估算：藉由資源、作業項目配合模擬出產率，以資源、工時，分析作業所需成本，進一步提供作業為成本預估、計算。

## 8.3 現有電腦模擬技術與目前之發展







### 8.3.1 CYCLONE

1973年Halpin發展出營建專門之電腦模擬系統CYCLONE後，許多應用類似或相同模型元件所發展出來之模擬系統如MicroCYCLONE、RESQUE、INSIGHT、STEPS、DISCO、COOPS、COST等不斷出現，構成了所謂以CYCLONE為主幹之家族。由於

CYCLONE 符號簡單易懂，且能在很短的時間內量測生產力並改善施工效率的缺失，故適合現地管理人員使用，因此，CYCLONE 可說是營建作業模擬最普遍使用之方法。

CYCLONE 能以簡單之幾個符號及邏輯模擬一般之營建作業流程，CYCLONE 符號如表 8-2 所示。CYCLONE 運用了六個簡單之符號就能把各類營建作業流程之施作情形給模擬出來，也能在作業規劃階段針對循環性作業的資源作一最有效之調配，然由於使用了簡單易學的六種符號，而產生了許多之限制，無法模擬現地施工之所有可能狀況。

表 8-2 CYCLONE 符號表

符號	名稱	說明
	Normal Activity (NOR)	本符號乃用於模擬僅需要單一資源且需要時間之工作項目。
	Combination Activity (COMBI)	本符號之作業模擬限制為需消耗到兩種類型以上(含兩個)之資源，並為該作業所需之所有資源皆到達到始可進行該作業模擬。
	Queue Node (QUE)	本符號為模擬單一類型資源之等待狀態，資源抵達時先於此節點進行等待。
	Consolidate Function Node (CON)	本符號用於模擬當工作項目需要重覆作業累積一定次數才能進行某一個後續作業時。
	Counter Accumulator (COU)	本符號為系統模擬之計數器。
	Arcs	本符號用於標示系統之作業流程。

(資料來源：Halpin，1977)

而 MicroCYCLONE 為 Halpin 利用電腦快速運算之特性，將 CYCLONE 之運算機制予以電腦化而成之系統，搭配敏感度分析、數據分布判別以及多樣化之報表輸出等功能，滿足使用者於流程規劃及資源規劃之需求。

由於 MicroCYCLONE 使用了 DOS 作業平台，故其模擬運算與操作界面上受到很大之限制，例如為了受限於 DOS 下記憶體之規劃，使用者所建立之模型結點無法過多，因此，針對作業流程較多之施作過程，MicroCYCLONE 便無法建立其模型。在此之後也陸續發展，如 Kalk 於 1980 年發展之 INSIGHT、Chang 於 1986 年發展之 RESQUE、以及 Liu 於 1992 年發展之 COOPS，皆改善了 CYCLONE 之功能。

1994 年 Huang 與 Halpin 發展軟體 DISCO (Dynamic Interface for Simulation of

Construction Operation) )，將原本 CYCLONE 圖像式之模型當作模擬之主要架構，藉由與 COOPS 類似之使用者界面可順利畫出 CYCLONE 之模型，自動產生 MicroCYCLONE 之輸入檔，使使用者不必學習 MicroCYCLONE 模擬語言，經由 MicroCYCLONE 內部運算後，傳回輸出資料，再以圖形式之方式表現出來，DISCO 可說是 MicroCYCLONE 之前處理 (Pre-processor) 與後處理器 (Post-processor) )，讓使用者親切使用圖形界面，讓模擬更便利簡單使用。

吳獻堂 (2000) 發展出 COST (Construction Operation Simulation Tool) 模擬程式，改善 CYCLONE 模擬程式，提供 CYCLONE 模擬程式使用者一更完善之營建作業模擬工具。使用者於建立 CYCLONE 模型後，可開啟現有之資料檔或直接由視窗點選輸入，資源組合之敏感性分析於資料建置時亦可一併輸入，經 COST 之執行一次完成所有運算與敏感性分析。而 MicroCYCLONE 未提供詳細之邏輯檢核錯誤訊息，其錯誤僅會出現同樣之訊息，使用者無法確實知道錯誤位置，COST 提供完整之邏輯錯誤訊息資料，正確地顯示出錯誤類型與錯誤位置，以方便使用者除錯。使用者跳脫 DOS 作業平台，使用 VB 程式以視窗化之方式輸入，增加作業選擇耗時組合及遺傳演算法尋找最佳組合等功能 (吳獻堂，2000) )。

### 8.3.2 STROBOSCOPE

STROBOSCOPE (State and Resource Based Simulation of Construction Processes) 為 Martinez 於 1996 年所發展出來之模擬語言，基本上 STROBOSCOPE 之模擬符號與 CYCLONE 類似，輔以通用型模擬語言 (General Purpose Language) 強大之進階功能，如使用者定義函數、條件判斷、變數運算等，故在元件上也增添許多 CYCLONE 未有之符號，如此更能有效地控制模型元件及整個模擬之狀況，STROBOSCOPE 之基本元件及主要程式語法如表 8-3 及表 8-4 所示。



表 8-3 STROBOSCOPE 基本元件

符號	名稱	說明
	資源等待結點 (QUEUE)	資源等待處。
	正常性施作項目 (NORMAL)	當前項作業完成時，所代表之工作可立即開始。
	限制性施作項目 (COMBI)	當設定條件均滿足時，所代表之工作才會開始進行。
	資源累積計數器 (CONSOLIDATOR)	當資源累積至一定數量之後，資源才會一次流過。
	連結線 (LINK)	連接網圖上元件之結點，並表示資源流動之種類及流動方向。
	組合器連結線 (ASSEMBLER LINK)	表示有其他種資源依附在該資源上。
	組合器 (ASSEMBLER)	將兩種以上之資源合併成複合性資源。
	分解器 (DISASSEMBLER)	將複合性資源分解。
	分解器連結線 (DISASSEMBLER LINK)	表示有其他資源由該種複合性資源分解出。
	組合分解之連結線 (DUAL BASE LINK)	同時具有組合及分解之功用。
	資源分支點 (FORK)	將在同作業項目內之資源分歧至不同作業項目。
	機率性資源 (DYNAFORK)	由機率決定其後續作業為何，一次可選數種作業為其後續作業。

(資料來源：王維志、劉正章、何春嫻，1990)

表 8-4 STROBOSCOPE 主要程式語法功能

語法種類	語法	功能
定義元件	Gentype	設定資源個體間無差異存在之資源名稱
	Comptype	產生複合性資源
	Assembler	將資源組合成複合性資源
	Disassembler	分解複合性資源
	Fork	用以決定資源之流向（一次只有一個後續作業）
	Dynafork	用以決定資源之流向（一次有多個後續作業）
	Chartype	定義資源之特殊屬性
	Subtype	依 Chartype 定義之名稱給予資源特性
	Variable	定義變數名稱及數值
	Duration	定義 Combi 及 Normal 之施作時間（機率分布或定值）
元件屬性	Enough	當進入 Combi 之資源達某特定數量時才執行下一步驟
	Drawamt	設定每一次資源會被拉走之數量
	Drawuntil	直到設定條件滿足才會停止拉資源
	Drawdur	拉動資源所花費之時間
	Releaseamt	設定每次釋放資源之數量
	Consolidator	定義一個集結點之名稱
	Discipline	定義資源流出之順序
元件屬性	Init	給予 Queue 內資源數量之起始值
	Collect	收集所需資訊
	Simulate	只有在資源用完或 runtime error 時才會停止模擬
	Priority	定義 Combi 使用資源之優先順序
	Semaphore	控制程式之停止（與資源無關）

（資料來源：王維志、劉正章、何春嫻，1990）

其中 Normal、Combi、Queue、Link 為 STROBOSCOPE 主要之模擬符號，大部分之模擬都可由此四個符號建立，其餘之符號為輔助模擬之特殊符號，例如，遇到決策或機率性之選擇問題可利用 Fork 或 Dynafork；當需要累計一定數量之資源才能進行下一個作業時，可利用 Consolidator；若模型存在複合資源，可加入 Assembler 及 Disassembler 等符號輔助模擬。

總體而言，STROBOSCOPE 有著其他模擬方法（如 CYCLONE、COOPS 等）所沒有之特殊功能，說明如下（蔡雅雯，2000）：

1. 可呼叫一些用高階語言撰寫之函數，如 C、C++、Pascal 及 FORTRAN。

2. 模擬時，可以數值表示資源之特性。
3. 可任意產生、推導資源之數量或成本。
4. 在模擬之過程中可收集任何時點之統計資料。

而 ES\_STROBO 為 STROBOSCOPE 系統為了改善其元件之複雜，以 VBA 之觀念去設計簡易元件系統，仍承續 STROBOSCOPE 之基本元件，簡化且去除複雜之功能，來改善模擬之複雜性 (Martinez, 1999)。

### 8.3.3 ABC

ABC (Activity-Based Construction) 為 Shi 於 1998 所發展之電腦模擬系統，營建模擬系統 ABC 可分為 ABC-SIM 及 ABC-MOD 兩方面探討，僅一元件 Activity 作其營建作業模擬。圖 8-1 及 8-2 為 ABC 營建模擬系統之主架構 (Shi, 1998)。

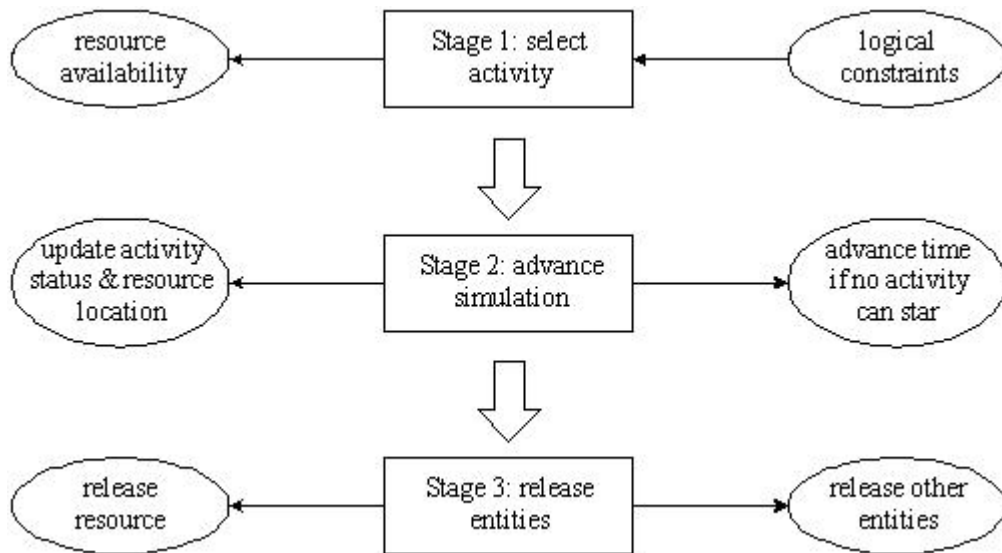


圖 8-1 ABC-SIM



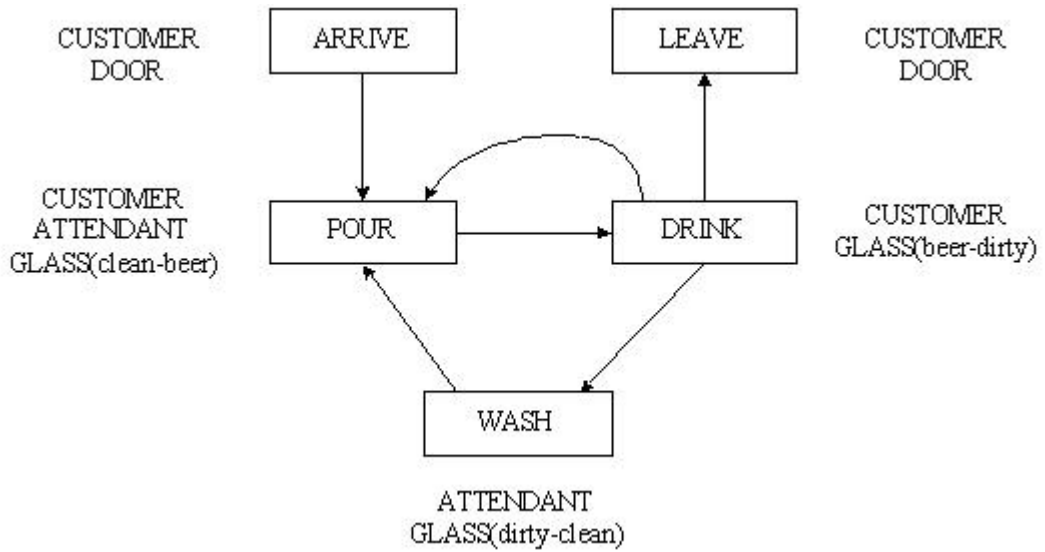


圖 8-2 ABC-MOD

### 8.3.4 SimCON

SimCon 由 Chehayeb 及 AbouRisk 發展出來，以限制理論之原理及 CYCLONE 之架構下，增加 Link 及 Free 之機制組織而成之營建系統，可作其流程思考管控機制，且以互動之圖形模型設計介面，快速之模擬，可協助營建管理人員進行有效之流程規劃、進度控制，表 8-5 為其元件符號（Chehayeb & AbouRisk，1998）。



表 8-5 SimCon 符號表

符號	名稱	說明
	PRO	主要為計算累計產量且可作機率之分流，當有 Branch A 及 Branch B 時，可選擇其累計產量，流往 Branch A 或 Branch B 之選擇。
	LINK	具有某種資源之涵義，可用在流程間傳遞、計算，代表驅動作業項目進行之必要元素。
	FREE	代表驅動作業項目進行之必要元素之釋放。
	TRACE	表示路徑管理節點。
	CON	表示作業項目，但須在其前置限制條件皆滿足之後始可開始施作。
	NOR	表示作業項目，隨著前置施作項目之完成可隨即開始施作。
	QUE	表示作業進行過程資源或物件之閒置等待狀態，通常置於 COMBI 之前。
	COUM	特殊之功能結點，用以計算統計系統之累計產率。
	FUN	用於模型中執行特殊功能之節點，如流程中流動單元 (flow unit) 之合併運算，或進行中統計等功能。
	PALR	擷取資源。
	PFREE	將擷取之資源給予釋放。
	LINK	用以連結作業系統中各點、並表示其先後邏輯關係。





AbouRisk (1999) 打破簡易之元件符號，以工業方面 EM\_PLANT 物件導向模擬系統觀念及 SimCom 程式作其結合，創造 SIMPHONY 系統，以多元化之元件符號作其模擬，不同於 CYCLONE 元件之簡單，讓各種類型之營建模擬，可作深入發展及應用，其實際應用於土方、橋梁、隧道、建物抽水井、估價、專案排程分析等。

### 8.3.5 SmartLink

洪轟嘉 (2001) 發展出一套電腦模擬系統並命名為 SmartLink，依據限制理論之原理架構出 Activity、Buffer、Sensor、Workflow 四種模型物件組織而成之營建作業模型方法，可賦予電腦模擬系統具有智慧性之流程思考機制。具有良好之圖形化模型設計介

面，快速之模擬演算效能及豐富之輔助分析用圖表工具，可協助營建管理人員進行有效之流程規劃、進度控制及施工管理。並以預拌混凝土供應鏈之派送問題為案例，進行輔助分析與規劃，其元件符號見表 8-6（洪轟嘉，2001）。

表 8-6 SmartLink 元件表

符號	名稱	說明
	Activity	具有需要花費時間之作業項目。
	Buffer	具有某種資源之涵義，可用在流程間傳遞，計算，如實體工程中之人、機、料、及完成品之計算，代表驅動作業項目進行之必要元素。
	Sensor	具有智慧性判別之感應與控制機制，藉以模擬實際工程管理時根據量化數據進行判斷決策時所做之思考行為。
	Workflow	表達作業流程之順序及資源在系統中之動向，亦表現感應端及控制端的方向。



## 第9章 進度管理技術研究趨勢

本章將針對進度管理技術研究趨勢之發展進行分析，利用 ASCE Civil Engineering Database (ASCE CEDB)，以及 EngineeringVillage 2 資料庫系統中之文獻查詢資料庫 Scirus，進行期刊題目標題之關鍵字搜尋，將搜尋到之期刊進行篩選，文獻篩選之原則為剔除與進度管理或營建工程無關之文獻，將篩選出之相關研究文獻加以主題式之分類，針對其數量及年份進行統計，並進行研究趨勢之說明。

### 9.1 資料庫與文獻分類

#### 9.1.1 ASCE Civil Engineering Database

ASCE Civil Engineering Database 主要收錄 ASCE 之出版物，其中，1970 年至今為包含摘要之期刊，因此進行期刊關鍵字搜尋之年限，將以 1970 年至 2004 年，作為搜尋之年份。圖 9-1 為 ASCE Civil Engineering Database 之搜尋畫面。

搜尋使用之關鍵字為 scheduling，搜尋出文獻共為 166 篇，經由摘要之閱讀篩選，剔除與研究主題無關之文獻 16 篇，所得之文獻共 150 篇。



圖 9-1 ASCE CE Database 搜尋畫面

#### 9.1.2 Scirus 文獻查詢資料庫

Scirus 資料庫係為 Engineering Village 2 資料庫系統中，提供科學研究之相關專門網

站及文獻查詢，而本研究則著重於文獻之搜尋。圖 9-2 為 Scirus 資料庫進階搜尋之主畫面。

搜尋之關鍵字以 scheduling AND construction 進行文獻關鍵字之搜尋，年份以 1970 至 2004 年為區間，搜尋到之文獻共為 124 篇，經由摘要之閱讀篩選，剔除與研究主題無關之文獻 58 篇，所得之文獻共 66 篇。

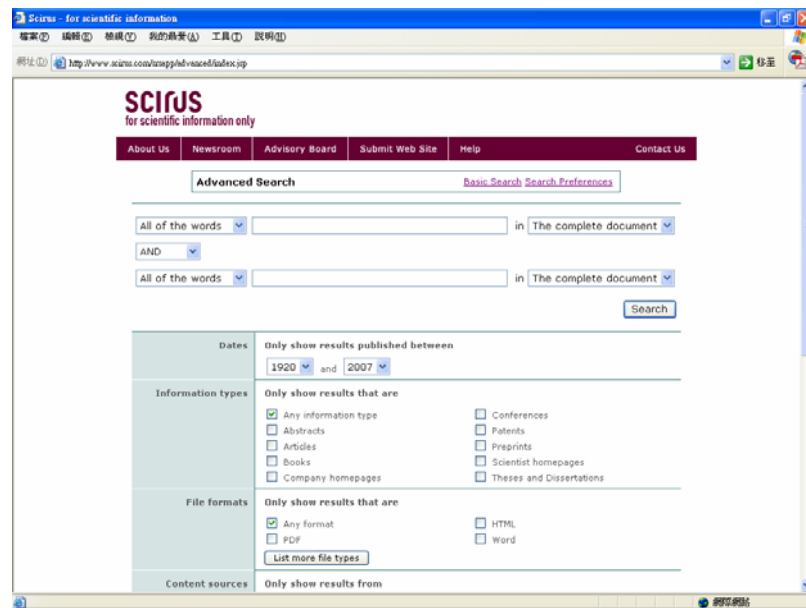


圖 9-2 Scirus 進階搜尋畫面

### 9.1.3 文獻分類

由 ASCE Civil Engineering Database 與 Engineering Village 2 – Scirus 資料庫所得之文獻總數共為 216 篇，針對所得之文獻進行分類，分類之方法主要經由文獻摘要之閱讀，針對摘要中提及之主題、文獻之關鍵字，或採用之工具及技術，分析文獻探討之主題，及文獻之性質。文獻之主題共分類為十八項，各文獻主題之分佈列於附表 2（註：■表示主要主題，□表示次要主題），而分類結果之統計，列於表 9-1。

各符號所代表之主題說明如下：A=Automation，B=CPM，C=Decision Making/Support，D=Evaluation Measurement，E=Float，F=General Management，G=Linear Scheduling Construction，H=Network Development，I=Network Representation，J=Optimization Time-Cost Trade-off，K=Repetitive Construction，L=Resource Leveling/Allocation，M=Schedule Development，N=Simplicity，O=Simulation，P=Space，Q=Uncertainty，R=Other Subjects。

表 9-1 進度管理技術文獻分類統計

	主題																		合計	性質			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R		Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other
1970-1974	-	-	-	-	-	1	1	1	2	-	-	1	-	-	-	-	-	-	6	3	-	-	3
1975-1979	1	-	-	-	-	-	-	-	3	1	-	2	-	-	2	-	-	5	14	8	2	1	1
1980-1984	-	-	-	-	-	2	-	-	4	1	3	2	-	-	2	1	-	2	17	10	2	-	4
1985-1989	-	6	1	3	-	1	4	1	1	3	-	3	1	-	1	-	-	4	29	14	3	7	-
1990-1994	2	1	4	3	2	5	4	2	4	3	2	16	4	-	2	1	1	7	63	32	5	3	2
1995-1999	1	-	1	4	1	-	3	-	9	9	1	20	2	2	4	1	2	17	77	46	-	-	1
2000-2004	3	1	-	4	3	-	3	1	11	13	11	36	-	2	2	2	1	21	114	51	3	-	5
Total	7	8	6	14	6	9	15	5	34	30	17	80	7	4	13	5	4	56	320	164	15	11	16

## 9.2 研究趨勢分析

### 9.2.1 研究主題數量分佈

由表 9-1 之統計可知，有關進度管理技術之文獻數量由 1970 年至 2004 年間，每五年之文獻主題數量分別為：6、14、17、29、63、77、114，有逐漸增加之趨勢，可見進度管理技術之領域越來越受到重視。1970 年至 2004 年間進度管理技術之相關文獻，以總數來看，有關「資源整平及配置 (Resource Leveling/Allocation)」之文獻數量為最多，共 80 篇 (25%)，其次為「其他主題 (Other Subjects)」，共 56 篇 (17.5%)，其餘依序為「Network Representation」34 篇 (10.6%)、「Optimization Time-Cost Trade-off」30 篇 (9.4%)、「Repetitive Construction」17 篇 (5.3%)、「Linear Scheduling/Construction」15 篇 (4.7%)、「Evaluation Measurement」14 篇 (4.4%)、「Simulation」13 篇 (4.1%)、「General Management」9 篇 (2.8%)、「CPM」8 篇 (2.5%)、「Automation」7 篇 (2.2%)、「Schedule Development」7 篇 (2.2%)、「Decision Making/Support」6 篇 (1.9%)、「Float」6 篇 (1.9%)、「Network Development」5 篇 (1.6%)、「Space」5 篇 (1.6%)、「Simplicity」4 篇 (1.3%)、「Uncertainty」4 篇 (1.3%)。

進度管理著重之研究主題，資源整平及配置佔了極大之部分，共佔四分之一之多，而其所佔各區間之數量依序為 1、2、2、3、16、20、36，呈現逐漸增加之趨勢，可見資源整平及配置此主題受重視之程度。

### 9.2.2 研究主題趨勢分析

由於 1970 至 1989 年間，關於進度管理技術之相關文獻數量較為稀少，因此將 1970 至 1989 年合併為一區間，區間分為：1970-1989、1990-1994、1995-1999、2000-2004，各區間主題之分佈情形如表 9-2 所示。

表 9-2 各區間文獻主題分佈情形

研究主題		1970-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	合計
Automation	篇數	1	2	1	3	7
	估主題內%	14.3%	28.6%	14.3%	42.9%	-
	估區間內%	1.5%	3.2%	1.3%	2.6%	-
	站總數%	0.3%	0.6%	0.3%	0.9%	2.2%
CPM	篇數	6	1	0	1	8
	估主題內%	75%	12.5%	0%	12.5%	-
	估區間內%	9.1%	1.6%	0%	0.9%	-
	站總數%	1.9%	0.3%	0%	0.3%	2.5%
Decision Making/Support	篇數	1	4	1	0	6
	估主題內%	16.7%	66.7%	16.7%	0%	-
	估區間內%	1.5%	6.3%	1.3%	0%	-
	站總數%	0.3%	1.3%	0.3%	0%	1.9%
Evaluation Measurement	篇數	3	3	4	4	14
	估主題內%	21.4	21.4%	28.6%	28.6%	-
	估區間內%	4.5%	4.8%	5.2%	3.5%	-
	站總數%	0.9%	0.9%	1.3%	1.3%	4.4%
Float	篇數	0	2	1	3	6
	估主題內%	0%	33.3%	16.7%	50%	-
	估區間內%	0%	3.2%	1.3%	2.6%	-
	站總數%	0%	0.6%	0.3%	0.9%	1.9%
General Management	篇數	4	5	0	0	9
	估主題內%	44.4%	55.6%	0%	0%	-
	估區間內%	6.1%	7.9%	0%	0%	-
	站總數%	1.3%	1.6%	0%	0%	2.8%
Linear Scheduling/Construction	篇數	5	4	3	3	15
	估主題內%	33.3%	26.7%	20%	20%	-
	估區間內%	7.6%	6.3%	3.9%	2.6%	-
	站總數%	1.6%	1.3%	0.9%	0.9%	4.7%
Network Development	篇數	2	2	0	1	5
	估主題內%	40.0%	40%	0%	20%	-
	估區間內%	3.0%	3.2%	0%	0.9%	-
	站總數%	0.6%	0.6%	0%	0.3%	1.6%
Network Representation	篇數	10	4	9	11	34
	估主題內%	29.4%	11.8%	26.5%	32.4%	-
	估區間內%	15.2%	6.3%	11.7%	9.6%	-
	站總數%	3.1%	1.3%	2.8%	3.4%	10.6%
Optimalization Time-Cost Trade-off	篇數	5	3	9	13	30
	估主題內%	16.7%	10%	30%	43.3%	-
	估區間內%	7.6%	4.8%	11.7%	11.4%	-
	站總數%	1.6%	0.9%	2.8%	4.1%	9.4%
Repetitive Construction	篇數	3	2	1	11	17
	估主題內%	17.6%	11.8%	5.9%	64.7%	-
	估區間內%	4.5%	3.2%	1.3%	9.6%	-
	站總數%	0.9%	0.6%	0.3%	3.4%	5.3%



研究主題		1970-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	合計
Resource Leveling/ Allocation	篇數	8	16	20	36	80
	佔主題內%	10%	20%	25%	45%	
	佔區間內%	12.1%	25.4%	26%	31.6%	
	站總數%	2.5%	5%	6.3%	11.3%	25%
Schedule Development	篇數	1	4	2	0	7
	佔主題內%	14.3%	57.1%	28.6%	0%	-
	佔區間內%	1.5%	6.3%	2.6%	0%	-
	站總數%	0.3%	1.3%	0.6%	0%	2.2%
Simplicity	篇數	0	0	2	2	4
	佔主題內%	0%	0%	50%	50%	-
	佔區間內%	0%	0%	2.6%	1.8%	-
	站總數%	0%	0%	0.6%	0.6%	1.3%
Simulation	篇數	5	2	4	2	13
	佔主題內%	38.5%	15.4%	30.8%	15.4%	-
	佔區間內%	7.6%	3.2%	5.2%	1.8%	-
	站總數%	1.6%	0.6%	1.3%	0.6%	4.1%
Space	篇數	1	1	1	2	5
	佔主題內%	20%	20%	20%	40%	-
	佔區間內%	1.5%	1.6%	1.3%	1.8%	-
	站總數%	0.3%	0.3%	0.3%	0.6%	1.6%
Uncertainty	篇數	0	1	2	1	4
	佔主題內%	0%	25%	50%	25%	-
	佔區間內%	0%	1.6%	2.6%	0.9%	-
	站總數%	0%	0.3%	0.6%	0.3%	1.3%
Other Subjects	篇數	11	7	17	21	56
	佔主題內%	19.6%	12.5%	30.4%	37.5%	-
	佔區間內%	16.7%	11.1%	22.1%	18.4%	-
	站總數%	3.4%	2.2%	5.3%	6.6%	17.5%
Total	篇數	66	63	77	114	320
	佔區間內%	100%	100%	100%	100%	-
	站總數%	20.6%	19.7%	24.1%	35.6%	100%

由表 9-2 之統計可知各區間文獻主題之分佈情形，以下針對各區間內以及區間與區間之間進行比較。

#### ■ 1970-1989

圖 9-3 為 1970 年至 1989 年間，各主題數量百分比之分佈圖，此區間內之文獻主題，以「其他主題 (Other Subjects)」為最多，共佔 16.7%，其次為「網圖表述 (Network Representation)」，佔 15.2%，第三名為「資源整平及配置 (Resource Leveling/Allocation)」，佔 12.1%。

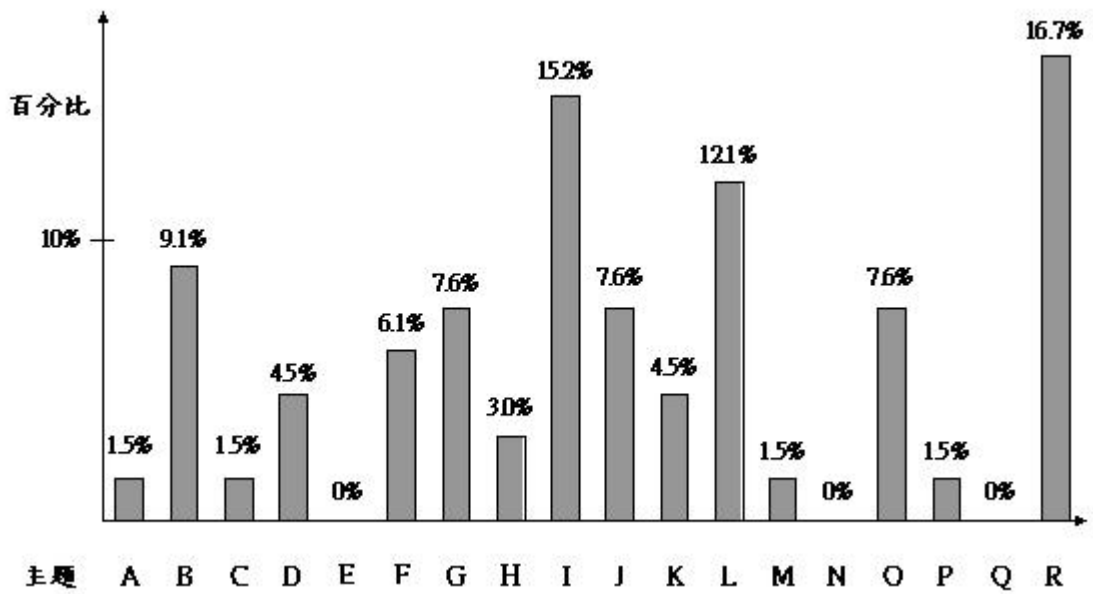


圖 9-3 1970-1989 主題數量百分比

■ 1990-1994

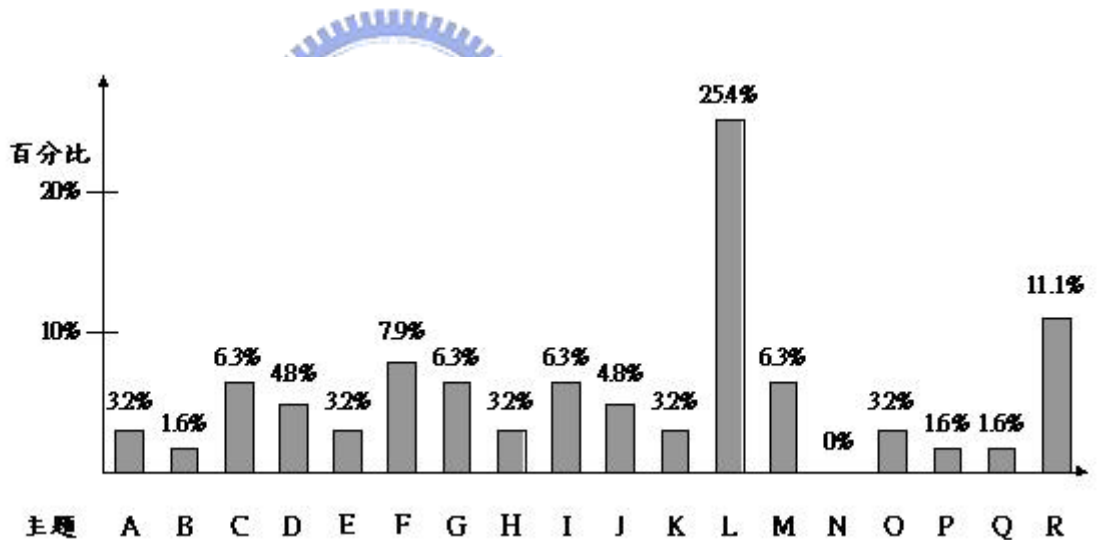


圖 9-4 1990-1994 主題數量百分比

圖 9-4 為 1990-1994 年間，各主題數量百分比之分佈圖，此區間內之文獻主題，以「資源整平及配置 (Resource Leveling/Allocation)」為最多，共佔 25.4%，其次為「其他主題 (Other Subjects)」，佔 11.1%，第三名為「整體性管理 (General Management)」，佔 7.9%。

■ 1995-1999

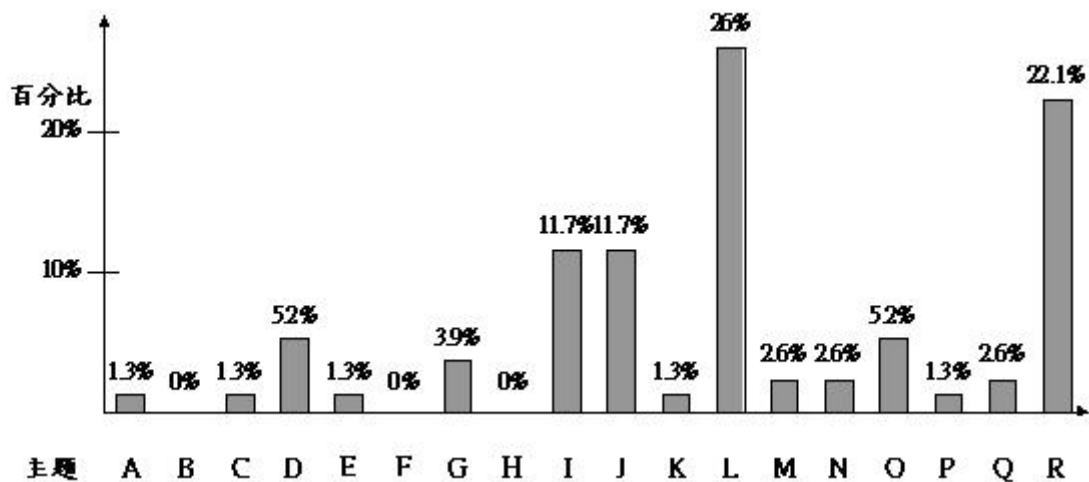


圖 9-5 1995-1999 主題數量百分比

圖 9-5 為 1990-1994 年間，各主題數量百分比之分佈圖，此區間內之文獻主題，以「資源整平及配置 (Resource Leveling/Allocation)」為最多，共佔 26%，其次為「其他主題 (Other Subjects)」，佔 22.1%，第三名為「網圖表述 (Network Representation)」以及「最佳化時間成本交換 (Optimization Time-Cost Trade-off)」，各佔 11.7%。

■ 2000-2004

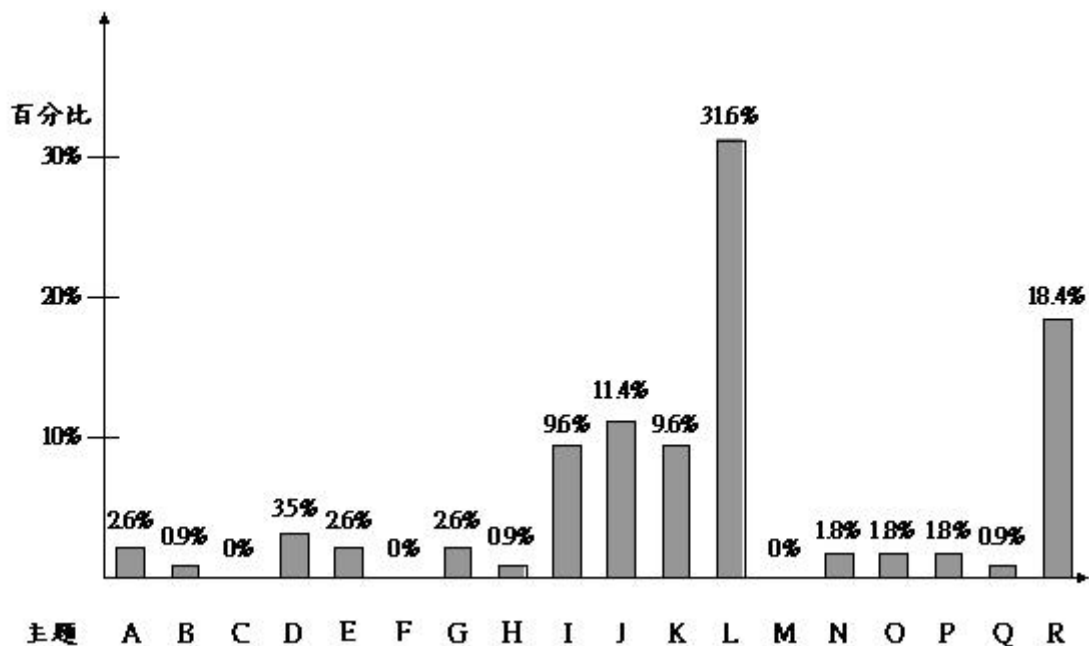


圖 9-6 2000-2004 主題數量百分比

圖 9-6 為 2000-2004 年間，各主題數量百分比之分佈圖，此區間內之文獻主題，以「資源整平及配置 (Resource Leveling/Allocation)」為最多，共佔 31.6%，其次為「其他主題 (Other Subjects)」，佔 18.4%，第三名為「最佳化時間成本交換 (Optimization Time-Cost Trade-off)」，佔 11.4%。

表 9-3 各區間文獻百分比排名

	1970-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004
No.1	其他主題 16.7%	資源整平及配置 25.4%	資源整平及配置 26%	資源整平及配置 31.6%
No.2	網圖表述 15.2%	其他主題 11.1%	其他主題 22.1%	其他主題 18.4%
No.3	資源整平及配置 12.1%	整體性管理 7.9%	網圖表述、 最佳化時間成本交換 各 11.7%	最佳化時間成本交換 11.4%

表 9-3 列出各區間內文獻主題數量排名前三名之主題，可看出於各區間內，「資源整平及配置 (Resource Leveling/Allocation)」皆佔有重要之地位，而其所佔之百分比由各區間之演變分別為：12.1%、25.4%、26%、31.6%，有明顯增加之趨勢，可看出「資源整平及配置 (Resource Leveling/Allocation)」此主題越來越受重視之情況。

### 9.2.3 文獻研究性質數量分析

表 9-4 為各區間文獻研究性質分佈，由總數來看，1970 年至 1989 年間，文獻研究性質總數最多者為「演算法之發展 (Algorithm Development)」，共 164 篇 (79.6%)，其次依序為「其他 (Other)」16 篇 (7.8%)、「討論 (Discussion)」15 篇 (7.3%)，以及「案例研究 (Case Study)」11 篇 (5.3%)。

而各區間內，1970-1989 年之次序為「演算法之發展 (Algorithm Development)」35 篇 (21.3%)、「其他 (Other)」8 篇 (13.8%)、「案例研究 (Case Study)」8 篇 (13.8%)、「討論 (Discussion)」7 篇 (12.1%)；1990-1994 年之次序為「演算法之發展 (Algorithm Development)」32 篇 (72.3%)、「討論 (Discussion)」5 篇 (11.9%)、「案例研究 (Case Study)」3 篇 (7.1%)、「其他 (Other)」2 篇 (4.8%)；1995-1999 年之次序為「演算法之發展 (Algorithm Development)」46 篇 (97.9%)、「其他 (Other)」1 篇 (2.1%)；2000-2004 年之次序為「演算法之發展 (Algorithm Development)」51 篇 (86.4%)、「其他 (Other)」5 篇 (8.5%)、「討論 (Discussion)」3 篇 (5.1%)，

各區間內最多者皆為「演算法之發展 (Algorithm Development)」。

表 9-4 各區間文獻研究性質分佈

研究性質		1970-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	合計
Algorithm Development	篇數	35	32	46	51	164
	佔主題內%	21.3%	19.5%	28.0%	31.1%	-
	佔區間內%	60.3%	72.6%	97.9%	86.4%	-
	站總數%	17.0%	15.5%	22.3%	24.8%	79.6%
Discussion	篇數	7	5	0	3	15
	佔主題內%	46.7%	33.3%	0%	20%	-
	佔區間內%	12.1%	11.9%	0%	5.1%	-
	站總數%	3.4%	2.4%	0%	1.5%	7.3%
Case Study	篇數	8	3	0	0	11
	佔主題內%	72.7%	27.3%	0%	0%	-
	佔區間內%	13.8%	7.1%	0%	0%	-
	站總數%	3.9%	1.5%	0%	0%	5.3%
Other	篇數	8	2	1	5	16
	佔主題內%	50.0%	12.5%	6.3%	31.3%	-
	佔區間內%	13.8%	4.8%	2.1%	8.5%	-
	站總數%	3.9%	1.0%	0.5%	2.4%	7.8%
Total	篇數	58	42	47	59	206
	佔區間內%	100%	100%	100%	100%	-
	站總數%	28.2%	20.4%	22.8%	28.6%	100%

### 9.3 與其他研究所進行趨勢分析之比較

吳坤鴻 (2005) 之研究「時程分析技術知識地圖之建置」中，亦針對進度管理相關之研究趨勢進行分析，以下將針對吳坤鴻之研究與本研究進行比較。

#### ■ 資料庫

吳坤鴻之研究採用 Engineering Village 2 Scirus 資料庫，本研究採用 Engineering Village 2 Scirus 資料庫，以及 ASCE Civil Engineering Database；而資料庫搜尋之年份，吳坤鴻之研究為 1920 年至 2004 年，本研究為 1970 年至 2004 年之文獻。

#### ■ 文獻分類主題

吳坤鴻之研究中，將進度管理技術主題分類為：Simulation techniques、Linear scheduling techniques、Critical Path Method、Program Evaluation and Review Technique、Graphic Evaluation and Review Technique、Resource planning and allocation、Network planning and analysis、Delay analysis、Time-Cost trade-off problems、Critical Chain scheduling 等十項。本研究則將趨勢之主題歸類為：Automation、CPM、Decision Making/

Support、Evaluation Measurement、Float、General Management、Linear Scheduling Construction、Network Development、Network Representation、Optimization Time-Cost Trade-off、Repetitive Construction、Resource Leveling/ Allocation、Schedule Development、Simplicity、Simulation、Space、Uncertainty、Other Subjects 等十八項。

#### ■ 趨勢分析方法

吳坤鴻之研究進行趨勢分析之方法係針對 Engineering Village 2 Scirus 資料庫進行各種關鍵字之搜尋，搜尋之關鍵字即為其研究中所分類之十項文獻主題，將搜尋到之文獻數量作為數據，進行年份及數量之統計分析。本研究之趨勢分析方法為，利用 ASCE Civil Engineering Database，以及 EngineeringVillage 2 Scirus 資料庫，進行期刊題目標題之關鍵字搜尋，ASCE Civil Engineering Database 採用之關鍵字為 scheduling，而 Scirus 資料庫則為 scheduling AND construction，將搜尋到之期刊，利用文獻摘要閱讀之方式，進行文獻篩選及分類，針對其數量及年份進行統計，進行研究趨勢之分析。



## 第10章 結論與建議

### 10.1 結論

進度管理技術於營建管理中扮演極重要之角色，若能針對過去關於進度管理之研究與技術，加以彙整並進行研究趨勢之瞭解，對於後續之研究發展有很大之幫助。本研究回顧過去關於進度管理之研究，將文獻提到之進度管理技術加以彙整，並針對文獻主題之分類，分析進度管理技術研究之趨勢。本研究之主要結論如下：

1. 回顧關於進度管理技術相關文獻，將文獻提到之進度管理技術加以彙整，整理出關於傳統進度管理技術、重複性工程排程法、時間成本權衡法、資源整平、有限資源規劃排程，電腦模擬技術等進度管理相關之技術，以及目前之發展概況，提供研究者瞭解進度管理現有技術及發展情況之參考。
2. 利用 ASCE Civil Engineering Database，以及 EngineeringVillage 2 資料庫系統中之文獻查詢資料庫 Scirus，分析出過去進度管理技術研究之趨勢概況，提供研究者瞭解進度管理技術之發展趨勢。
3. 經由趨勢分析，可得到下列幾種結果：
  - (1) 有關進度管理技術之文獻數量由 1970 年至 2004 年間有逐漸增加之趨勢，尤其 2000 年至 2004 年此時段之文獻數量增加更為明顯，所佔文獻數量超過樣本數三分之一（35.6%），可見得近年來關於進度管理技術之研究越來越多。
  - (2) 研究主題以「資源整平及配置（Resource Leveling/Allocation）」之文獻數量為最多（25%），且於 1990 年至 2004 年間，皆為各區間內文獻主題數量最多者。
  - (3) 文獻之性質於 1970 年至 2004 年間多屬於「演算法之發展（Algorithm Development）」，佔總數之 79.6%，且於 1970 年至 2004 年各區間內皆為總數最多者。

### 10.2 建議

針對本研究所提出之建議如下：

1. 本研究所彙整之進度管理技術多著重應用於營建工程領域之技術，後續研究若

能加入不同領域於營建工程亦可行之技術，則進度管理技術彙整上將更為完整。

2. 礙於資料庫文獻數量龐大，研究趨勢分析於文獻搜尋上所使用之關鍵字 scheduling 未能包括所有進度管理技術之文獻，於文獻之篩選上有所遺漏，後續研究若能採用不同之搜尋關鍵字及文獻分類方法，則於文獻研究趨勢分析上將更為準確。





## 參考文獻

1. Antill, J. M., and Woodhead, R. W., “*Critical Path Methods in Construction Practice*” , John Wiley & Sons, 4<sup>th</sup> ed, New York, 1990.
2. Antonio, A., Gonzalez-Quevedo, AbouRizk, S. M., Iseley, D. T., Halpin, D. W., “*Comparison of Two Simulation Methodologies in Construction*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 119 ( 3 ) , 573-589, 1993.
3. Ahuja, V., and Thiruvengadam, V., “*Project Scheduling and Monitoring : current research status*” , Construction Innovation, 4, 19-31, 2004.
4. Boctor, F. F., “*Some Efficient Multi-Heuristic Procedure for Resource-constrained Project Scheduling*” , European Journal of Operational Research, 49, 3-13, 1990.
5. Callahan, M. T., Quackenbush, D. G., Rowings, J. E., “*Construction Project Scheduling*” , McGraw-Hill, New York, 1992.
6. Chehayeb, N. N., and AbouRizk, S. M., “*Simulation-Based Scheduling with Continuous Activity Relationships*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 124 ( 2 ) , 107-115, 1998.
7. Feng, C. W., Liu, L., Burns, S. A., “*Using Genetic Algorithms to Solve Construction Time-Cost Trade-Off Problems*” , Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 11 ( 3 ) , 184-189, 1997.
8. Feng, C. W., Liu, L., Burns, S. A., “*Stochastic Construction Time-Cost Trade-Off Analysis*” , Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 14 ( 2 ) , 117-126, 2000
9. Glover, F., Kelly, J. P., Laguna, M., “*Genetic Algorithms and Tabu Search Hybrids for Optimization*” , Computers Ops Res., 22 ( 1 ) , 111-134, 1995.
10. Hajdu, M., “*Network Scheduling Techniques for Construction Project Management*” ,

Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 1997.

11. Halpin, D. W., and Riggs, L. S., “*Planning and Analysis of Construction Operations*”, Wiley, Inc., 1992.
12. Harris, R. B., “*Precedence and Arrow Networking Techniques for Construction*” , Wiley, New York, 1978.
13. Harris, R. B., “*Packing Method for Resource Leveling (PACK)*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 116 ( 2 ) , 331-350, 1990.
14. Harris, R. B., and Ioannou, P. G., “*Scheduling Projects with Repetitive Activities*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 124 ( 4 ) , 269-278, 1998.
15. Hegazy, T., “*Optimization of Resource Allocation and Leveling Using Genetic Algorithms*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125 ( 3 ) , 167-175, 1999.
16. Hiyassat, M. A. S., “*Modification of Minimum Moment Approach in Resource Leveling*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 126 ( 4 ) , 278-284, 2000.
17. Kurihara, K., Nishiuchi, N., “*Efficient Monte Carlo simulation method of GERT-type network for project management*” , Computer & Industrial Engineering, 42, 521-531, 2002.
18. Leu, S. S., and Yang, C. H., “*GA-based Multicriteria optimal model for construction scheduling*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125 ( 6 ) , 420-427, 1999.
19. Li, H., and Love, P., “*Using Improved Genetic Algorithm to Facilitate Time-Cost optimization*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 123 ( 3 ) , 223-237, 1997.

20. Li, H., Cao, J. N., Love, P. E. D., “*Using Machine Learning and GA to Solve Time-Cost Trade-Off Problems*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125 ( 5 ) , 347-353, 1999.
21. Liu, L., Burns, S.A., Feng, C. W., “*Construction Time-Cost Trade-Off Analysis Using LP/IP Hybrid Method*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 121 ( 4 ) , 446-454, 1995.
22. Martinez, J. C., and Ioannou, P. G., “*General-Purpose Systems for Effective Construction Simulation*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125 ( 4 ) , 265-276, 1999.
23. Moselhi, Osama and EI-Rayes, “*Least Cost Scheduling for Repetitive Projects*” , Canadian Journal of Civil Engineering, 20 ( 5 ) , 834-843, 1993.
24. Moselhi, Osama and EI-Rayes, “*Scheduling of Repetitive Projects with Cost Optimization*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 119 ( 4 ) , 681-688, 1993.
25. Osama Abudayyeh, P.E. et al, “*Analysis of Trend in Construction Research : 1985 – 2002*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 130( 3 ) , 433-439, 2004.
26. Pietroforte, R., and Stefani, T. P., “*ASCE Journal of Construction Engineering and Management : Review of the year 1983 – 2000*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 130 ( 3 ) , 440-448, 2004.
27. Reda, R. M., “*RPM : Repetitive Project Modeling*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 116 ( 2 ) , 316-330 , 1990.
28. Shi, J. J., “*Activity-Based Construction (ABC) Modeling and Simulation Method*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125 ( 5 ) , 354-360 , 1999.

29. Son, J., and Skibniewski, M. J., “*Multiheuristic Approach for Resource Leveling problem in Construction Engineering : Hybrid Approach*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125 ( 1 ) , 23-31 , 1999.
30. Tavas, L. M., and Weglarz, J., “*Project Management and Scheduling : A Permanent Challenge for OR.*” , European Journal of Operational Research, 49, 1-2, 1990.
31. Wiest, J. D., and Levy, F. K., “*A Management Guide to PERT/CPM*” , Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1977.
32. Zhong, D. H., and Zhang, J. S., “*New method for calculating path float in program evaluation and review technique (PERT)*” , Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 129 ( 5 ) , 501-506, 2003.
33. 劉福勳，「實用工程進度規劃與控制」，漢天下工程管理顧問有限公司，1996。
34. PMI 專案管理學會，「專案管理知識體系指南」，展碩知識管理顧問股份有限公司，台北，2003。
35. 林耀煌，「營建工程施工規劃與管理控制」，四版，長松出版社，台北，1996。
36. 黃价成，「時程管理體系整合作法」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，台南，2000。
37. 張敬廉，「網圖模組於大型公共工程主辦機關進度管理之應用」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹，2001。
38. 黃正忻，「營建工程管理」，九樺出版社，1997。
39. 李得璋，「營建經營管理－營建工程規劃與進度控制」，財團法人台灣營建研究院，1987。
40. 高志魁，「關鍵鍊排程於營建工程排程之研究」，碩士論文，中華大學營建管理研究所，新竹，2003。

41. 王炤琮，「動態網圖規劃數學模式之初步研究」，碩士論文，國立台灣工業技術學院工程技術研究所，台北，1991。
42. 黃承傑，「專案進度風險分析模式—考慮不確定性作業之影響」，碩士論文，國立高雄第一科技大學營建工程研究所，高雄，2002。
43. 傅正輝，「作業相關性對總工期不確定影響之評估模式」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，台中，2004。
44. 吳旻謙，「重複性工程排程規劃演算法之研究」，博士論文，國立台灣科技大學營建工程系，台北，1999。
45. 張芷宜，「運用機率限制規劃求解資源及資金供給不確定條件下之重複性工程排程問題」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，台中，2004。
46. 李威憲，「工程專案資源拉平方法 PLA 之研究」，碩士論文，國立台灣科技大學營建工程係，台北，2002。
47. 曾貽威，「考慮現金流量之專案多重資源排程最佳化之研究」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，台中，2001。
48. 楊崇揮，「多評準施工流程最適化計算模式之探討」，碩士論文，國立台灣工業技術學院，營建工程技術研究所，台北，1997。
49. 黃榮村，「模擬退火法應用於多資源專案排程問題之研究」，碩士論文，國防管理學院資源管理研究所，1995。
50. 蔡政峰，「求解有限資源專案排程問題最佳化之研究—以基因演算法求解」，碩士論文，國立成功大學工業管理學系，台南，2001。
51. 羅友廷，「模糊多目標混合式遺傳演算法在零工式排程系統之應用」，碩士論文，東海大學工業工程研究所，台中，1999。
52. 張嘉君，「應用模擬退火法求解營建工程專案多重資源排程最佳化之研究」，碩士

- 論文，朝陽科技大學營建工程系，台中，2003。
53. 王維志、劉正章、何春嫻，「新營建電腦模擬語言--STROBOSCOPE」，營建管理季刊，第 45 期，第 58-第 60 頁，1990。
54. 蔡雅雯，「營建作業模擬系統邏輯控制元件之研究」，碩士論文，國立中央大學土木工程學系，桃園，2002。
55. 黃榮堯，「大處著眼、小處著手—施工作業流程電腦模擬規劃分析」，營建管理季刊，第 36 期，第 38 頁-第 48 頁，1998。
56. 吳獻堂，「應用模糊理論與電腦模擬分析營建操作生產力—COST 電腦模擬程式之介紹」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程系，台中，2000。
57. 洪轟嘉，「結合限制理論與 SmartLink 電腦模擬之開發以輔助預拌混凝土供應鏈之規劃」，碩士論文，國立中興大學土木工程學系，台中，2001。
58. 吳坤鴻，「時程分析技術知識地圖之建置」，碩士論文，中華大學營建管理研究所，新竹，2005。



## 附錄一 文獻分類表

附表 1：文獻分類表分類符號代表主題說明

符號	符號代表之主題
A	Automation
B	CPM
C	Decision Making / Support
D	Evaluation Measurement
E	Float
F	General Management
G	Linear Scheduling / Construction
H	Network Development
I	Network Representation
J	Optimalization Time-Cost Trade-off
K	Repetitive Construction
L	Resource Leveling / Allocation
M	Schedule Development
N	Simplicity
O	Simulation
P	Space
Q	Uncertainty
R	Other Subjects





	主題																			性質			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
8									■												√		
9									■										√				
10												■										√	
11																			■	√			
12																			■	√			
13										■										√			
14																			■	√			
15																			■				Analysis

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
16	Kouskoulas, V., Grazioli, Jr., M., "Integrated Management System for Construction Projects", Journal of the Construction Division, ASCE, 103(1), 101-112, 1977.									■											√			
17	Webber, D. W., "Providing In-House Computer Services", Journal of the Technical Councils of ASCE, 103(1), 53-63, 1977.	■																				√		
18	Popescu, C. M., "CPM -- Interactive Training Tool", Journal of the Construction Division, ASCE, 104(2), 157-166, 1978.																			■	√			
19	Carr, R. I., "Simulation of Construction Project Duration", Journal of the Construction Division, ASCE, 105(2), 117-128, 1979.																				■	√		
20	Popescu, C. M., Wilson, J. A., "Development Planning and Scheduling Model", Journal of the Urban Planning and Development Division, ASCE, 105(1), 25-33, 1979.																					■	√	
21	Ashley, D. B. "Simulation of Repetitive-Unit Construction", Journal of the Construction Division, ASCE, 106(2), 185-194, 1980.																						√	
22	Pinnell, S. S., "Construction/Engineering Management: A Comparison", Issues in Engineering Journal of Professional Activities, ASCE, 106(4), 405-413, 1980.																						√	Comparison

	主題																			性質			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
23						■															√		
24											■												Research study
25											■												Review
26									■														Improvement
27									■												√		
28										■											√		
29																■			■		√		

		主題																		性質			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other
30	Dabbas, M. A. A., Halpin, D. W., "Integrated Project and Process Management", Journal of the Construction Division, ASCE, 108(3), 361-374, 1982.																		■	√			
31	McGough, E. H., "Scheduling: Effective Methods and Techniques", Journal of the Construction Division, ASCE, 108(1), 75-84, 1982.									■										√			
32	Stradal, O., Cacha, J., "Time Space Scheduling Method", Journal of the Construction Division, ASCE, 108(3), 445-457, 1982.																■			√			
33	Woolery, J. C., Crandall, K. C., "Stochastic Network Model for Planning Scheduling", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 109(3), 342-354, 1983.									■									□	√			
34	Ahuja, H. N., Arunachalam, V., "Risk Evaluation in Resource Allocation", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 110(3), 324-336, 1984.												■							√			
35	Daniels, D. E. S., Aquilano, N. J., "Constrained resource project scheduling subject to material constraints", Journal of Operations Management, 4(4), 369-387, 1984.												■							√			

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
36	Ahuja, H. N., Nandakumar, V., "Simulation Model to Forecast Project Completion Time", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 111(4), 325-342, 1985.				■																√			
37	Hribar, J. P., Asbury, G. E., "Elements of Cost and Schedule Management", Journal of Management in Engineering, ASCE, 1(3), 138-148, 1985.						■															√		
38	McConnell, D. R., "Earned Value Technique for Performance Measurements", Journal of Management in Engineering, ASCE, 1(2), 79-94, 1985.				■																√			
39	O'Brien, J. J., Kreitzberg, F. C., "Network Scheduling Variations for Repetitive Work", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 111(2), 105-116, 1985.		■																				√	
40	Shukla, J. H., R. L. Kudich, R. W. Staffensen, "CPM Harnesses Mammoth Powerplant Job", Civil Engineering—ASCE, 55(1), 50-53, 1985.		■																				√	
41	Willis, R. J., "Critical path analysis and resource constrained project scheduling — Theory and practice", European Journal of Operational Research, 21(2), 149-155, 1985.									■											√			
42	Arditi, D., Albulak, M. Z., "Line-of-Balance Scheduling in Pavement Construction", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 112(3), 411-424, 1986.							■															√	

	主題																			性質			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
43							■															√	
44															■				√				
45							■												√				
46		■																				√	
47		■																				√	
48		■																				√	
49			■																		√		

	主題																			性質			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
50																		■		√			
51																		■	√				
52								■											√				
53						■													√				
54																		■	√				
55													■						√				
56																			√				

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
57	Whiteman, W. E., Irwig, H. G., "Disturbance Scheduling Technique for Managing Renovation Work", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 114(2), 191-213, 1988.		■																		√			
58	Easa, S. M., "Resource Leveling in Construction by Optimization", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 115(2), 302-316, 1989											■									√			
59	Mohanty, R. P., Siddiq, M. K., "Multiple projects — Multiple resources constrained scheduling: A multi-objective analysis", Engineering Costs and Production Economics, 18(1), 83-92, 1989.										□	■									√			
60	Reda, R., Carr, R. I., "Time-Cost Trade-off Among Related Activities", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 115(3), 475-486, 1989.										■										√			
61	Chang, T. C., Ibbs, C. W., Crandall, K. C., "Network Resource Allocation with Support of a Fuzzy Expert System", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 116(2), 239-260, 1990.											■									√			
62	Chang, T. C., William I. C., "Priority ranking—a fuzzy expert system for priority decision making in building construction resource scheduling", Building and Environment, 25(3), 253-267, 1990.											■									√			



		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
63	Jesus, M., Garza, D. L., Ibbs, C. W., "Knowledge-Elicitation Study in Construction Scheduling Domain", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 4(2), 135-153, 1990.								■												√			
64	Harris, R. B., "Packing Method for Resource Leveling (PACK)", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 116(2), 331-350, 1990.												■								√			
65	Householder, J. L., Rutland, H. E., "Who Owns Float?", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 116(1), 130-133, 1990.					■																√		
66	Moselhi, O., Nicholas, M. J., "Hybrid Expert System for Construction Planning and Scheduling", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 116(2), 221-238, 1990.							■					□							■	√			
67	Tavakoli, A., "Effective Progress Scheduling and Control for Construction Projects", Journal of Management in Engineering, ASCE, 6(1), 87-98, 1990.						■															√		
68	Zohair M. Sarraj, A., "Formal Development of Line-of-Balance Technique", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 116(4), 689-704, 1990.							■					□								√			
69	Cherneck, J., Logcher, R., Sriram, D., "Integrating CAD with Construction-Schedule Generation", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 5(1), 64-84, 1991.													□						■	√			



	主題																			性質			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
77										■											√		
78												■									√		
79													■								√		
80				■		■				■											√		
81																■		■					Comparison
82																			■		√		

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
83	Moselhi, O., El-Rayes, K., "Scheduling of Repetitive Projects with Cost Optimization", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 119(4), 681-697, 1993.										□	■									√			
84	Navarrete, G., Ahmad, I., "Computer Scheduling and Construction Specs", Civil Engineering—ASCE, 63(7), 50-52, 1993.	■																					√	
85	Russell, A. D., Wong, W. C. M., "New Generation of Planning Structures", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 119(2), 196-214, 1993.							■												■	√			
86	Winstanley, G., Chacon, M. A., Levitt, R. E., "Model-Based Planning: Scaled-Up Construction Application", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 7(2), 199-217, 1993.													■							√			
87	Yates, J. K., "Construction Decision Support System for Delay Analysis", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 119(2), 226-244, 1993.																			■	√			
88	Demeulemeester, E., Herroelen, W., Simpson, W. P., Baroum, S., Patterson, J. H., Yang, K. K., "On a paper by Christofides et al. for solving the multiple-resource constrained, single project scheduling problem", European Journal of Operational Research, 76(1), 218-228, 1994.												■								√			
89	Hill, T., Remus, W., "Neural network models for intelligent support of managerial decision making", Decision Support Systems, 11(5), 449-459, 1994..			■																	√			

		主題																		性質					
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other		
90	Koonce, D. A., Parks, C. M., Ken Keys, L., "A dynamic, realtime approach to long duration manufacturing schedule monitoring and control", Computers and Industrial Engineering, 26(4), 619-631, 1994.									■											√				
91	Minciardi, R., Paolucci, M., Puliafito, P. P., "Development of a heuristic project scheduler under resource constraints", European Journal of Operational Research, 79(2), 176-182, 1994.												■									√			
92	Morad, A. A., Beliveau, Y. J. "Geometric-Based Reasoning System for Project Planning", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 8(1), 52-71, 1994.													□						■		√			
93	Nkasu, M. M., "COMSARS: a computer-sequencing approach to multi resource-constrained scheduling", International Journal of Project Management, 12(3), 183-192, 1994.												■										√		
94	Oguz, O., Bala, H., "A comparative study of computational procedures for the resource constrained project scheduling problem", European Journal of Operational Research, 72(2), 406-416, 1994.												■										√		Comparison
95	Rys, T., Stanek, R., Ziembla, W., "MIPS: A DSS for multi-objective interactive project scheduling", European Journal of Operational Research, 79(2), 196-207, 1994.			□									■										√		

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
96	Slowinski, R., Soniewicki, B., Weglarz, J., "DSS for multi-objective project scheduling", European Journal of Operational Research, 79(2), 220-229, 1994.			<input type="checkbox"/>									■								√			
97	Thabet, W. Y., Beliveau, Y. J., "Modeling Work Space to Schedule Repetitive Floors in Multistory Buildings", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120(1), 96-116, 1994.							<input type="checkbox"/>		■							<input type="checkbox"/>				√			
98	Thabet, W. Y., Beliveau, Y. J., "HVLS: Horizontal and Vertical Logic Scheduling for Multistory Projects", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120(4), 875-892, 1994.							<input type="checkbox"/>		■											√			
99	Suhail, S. A., Neale, R. H., "CPM/LOB: New Methodology to Integrate CPM and Line of Balance", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120(3), 667-684, 1994		<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>		■											√			
100	Vercellis, C., "Constrained multi-project planning problems: A Lagrangean decomposition approach", European Journal of Operational Research, 78(2), 267-275, 1994.												■								√			
101	Wolf, G., "Schedule management: An object oriented approach", Decision Support Systems, 11(4), 373-388, 1994.			■																	√			

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
102	Wu, R. W. K., Hadipriono, F. C., "Fuzzy Modus Ponens Deduction Technique for Construction Scheduling", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 120(1), 162-179, 1994.				■																√			
103	Zhan, J., "Heuristics for scheduling resource-constrained projects in MPM networks", European Journal of Operational Research, 76(1), 192-205, 1994.												■								√			
104	Chu, S. C. K., "A mathematical programming approach towards optimized master production scheduling", International Journal of Production Economics, 38(2-3), 269-279, 1995.																			■	√			
105	Kim, J. J., Ibbs, C. W., "Work-Package-Process Model for Piping Construction", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 121(4), 381-387, 1995.																			■	√			
106	Lee, C. Y., Choi, J. Y., "A genetic algorithm for job sequencing problems with distinct due dates and general early-tardy penalty weights", Computers & Operations Research, 22(8), 857-869, 1995.																			■	√			
107	Lee, C. Y., Kim, S. J., "Parallel genetic algorithms for the earliness-tardiness job scheduling problem with general penalty weights", Computers & Industrial Engineering, 28(2), 231-243, 1995.																			■	√			

		主題																			性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other		
108	Senior, B. A., "Late-Time Computation for Task Chains Using Discrete-Event Simulation", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 121(4), 397-403, 1995.				■																	√			
109	Thompson, G. M., "Labor scheduling using NPV estimates of the marginal benefit of additional labor capacity", Journal of Operations Management, 13(1), 67-86, 1995.																				■		√		
110	Agrawal, M. K., Elmaghraby, S. E., Herroelen, W. S., "DAGEN: A generator of test sets for project activity nets", European Journal of Operational Research, 90(2), 376-382, 1996.									■													√		
111	Chan, W. T., Chua, D. K. H., Kannan, G., "Construction Resource Scheduling with Genetic Algorithms", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 122(2), 125-132, 1996.																					■		√	
112	Fischer, M. A., Aalami, F., "Scheduling with Computer-Interpretable Construction Method Models", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 122(4), 337-347, 1996.																					■		√	
113	Li, S., "New Approach for Optimization of Overall Construction Schedule", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 122(1), 7-13, 1996.																						■		√



		主題																			性質			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
114	Lorterapong, P., Moselhi, O., "Project-Network Analysis Using Fuzzy Sets Theory", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 122(4), 308-318, 1996.									■								□		√				
115	Pinder, J. P., Maruchek, A.S., "Using discounted cash flow heuristics to improve project net present value", Journal of Operations Management, 14(3), 229-240, 1996.												■							√				
116	Raz, T., Marshall, B., "Effect of resource constraints on float calculations in project networks", International Journal of Project Management, 14(4), 241-248, 1996.					■							■							√				
117	Senouci, A. B., Eldin, N. N., "Dynamic Programming Approach to Scheduling of Nonserial Linear Project", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 10(2), 106-114, 1996.							□		■										√				
118	Shtub, A., Raz, T., "Optimal segmentation of projects — Schedule and cost considerations", European Journal of Operational Research, 95(2), 278-283, 1996.										■									√				
119	Smith-Daniels, D. E., Padman, R., Smith-Daniels, V.L., "Heuristic scheduling of capital constrained projects", Journal of Operations Management, 14(3), 241-254, 1996.																			■	√			

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
120	AbouRizk, S. M., Wales, R. J., “Combined Discrete-Event/Continuous Simulation for Project Planning”, Journal of Construction Engineering and Management, 123(1), 11-20, 1997.															■					√			
121	Adeli, H., Karim, A., “Scheduling/Cost Optimization and Neural Dynamics Model for Construction Projects”, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 123(4), 450-458, 1997.										■										√			
122	Dzeng, R. J., Tommelein, I. D., “Boiler Erection Scheduling Using Product Models and Case-Based Reasoning”, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 123(3), 338-347, 1997.	□												■							√			
123	Ecker, K., Gupta, J. N. D., Schmidt, G., “A framework for decision support systems for scheduling problems”, European Journal of Operational Research, 101(3), 452-462, 1997.			■																	√			
124	El-Bibany, H., “Parametric Constraint Management in Planning and Scheduling: Computational Basis”, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 123(3), 348-353, 1997.									■									□		√			
125	Herroelen, W. S., Van Dommelen, P., Demeulemeester, E. L., “Project network models with discounted cash flows a guided tour through recent developments”, European Journal of Operational Research, 100(1), 97-121, 1997.									■			□								√			Guide tour

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
126	Icmeli-Tukel, O., Rom, W.O., "Ensuring quality in resource constrained project scheduling", European Journal of Operational Research, 103(3), 483-496, 1997.												■							■	√			
127	Mori, M., Ching, C. T., "A genetic algorithm for multi-mode resource constrained project scheduling problem", European Journal of Operational Research, 100(1), 134-141, 1997.												■								√			
128	Priluck, H. M., "Scheduling Logistic Support", Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE, 2(4), 168-171, 1997.																			■	√			
129	De Reyck, B., Herroelen, W., "A flexible heuristic for a multi-mode capital constrained project scheduling problem with probabilistic cash inflows", Computers & Operations Research, 24(12), 1187-1200, 1997.												■								√			
130	Thabet, W. Y., Beliveau, Y. J., "SCaRC: Space-Constrained Resource-Constrained Scheduling System", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 11(1), 48-59, 1997																	■			√			
131	Bubshait, A. A., Cunningham, M. J., "Determining Schedule Impact: Working Practice", Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE, 3(4), 176-179, 1998.					■															√			

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
132	Ben-Haim, Y., Laufer, A., "Robust Reliability of Projects with Activity-Duration Uncertainty", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 124(2), 125-132, 1998.				■													□		√				
133	De Reyck, B., Herroelen, W., "A branch-and-bound procedure for the resource-constrained project scheduling problem with generalized precedence relations", European Journal of Operational Research, 111(1), 152-174, 1998..												■							√				
134	De Reyck, B., Herroelen, W., "An optimal procedure for the resource-constrained project scheduling problem with discounted cash flows and generalized precedence relations", Computers and Operations Research, 25(1), 1-17, 1998.												■							√				
135	Senior, B. A., Halpin, D. W., "Simplified Simulation System for Construction Projects", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 124(1), 72-81, 1998.															□	■			√				
136	Chehayeb, N. N., AbouRizk, S. M., "Simulation-Based Scheduling with Continuous Activity Relationships", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 124(2), 107-115, 1998.																		□	√				
137	Hapke, M., Jaszkiwicz, A., Slowinski, R., "Interactive analysis of multiple-criteria project scheduling problems", European Journal of Operational Research, 107(2), 315-324, 1998.																			■	√			

		主題																		性質			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other
138	Harris, R. B., Ioannou, P. G., “Scheduling Projects with Repeating Activities”, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 124(4), 269-278, 1998.									<input type="checkbox"/>		■							<input type="checkbox"/>	√			
139	Harmelink, D. J., Rowings, J. E., “Linear Scheduling Model: Development of Controlling Activity Path”, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 124(4), 263-268, 1998.							■		<input type="checkbox"/>										√			
140	Herroelen, W., De Reyck, B., Demeulemeester, E., “Resource-constrained project scheduling: A survey of recent developments”, Computers & Operations Research, 25(4), 279-302, 1998.										■		■							√			
141	Mattila, K. G., Abraham, D. M., “Resource Leveling of Linear Schedules Using Integer Linear Programming”, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 124(3), 232-244, 1998.							<input type="checkbox"/>					■							√			
142	Sprecher, A., Drexl, A., “Multi-mode resource-constrained project scheduling by a simple, general and powerful sequencing algorithm”, European Journal of Operational Research, 107(2), 431-450, 1998.												■							√			

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
143	Tommelein, I. D., "Pull-Driven Scheduling for Pipe-Spool Installation: Simulation of Lean Construction Technique", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 124(4), 279-288, 1998.									■										□	√			
144	Tukel, O. I., Rom, W. O., "Analysis of the characteristics of projects in diverse industries", Journal of Operations Management, 16(1), 43-61, 1998.												■								√			
145	Verhoeven, M. G. A., "Tabu search for resource-constrained scheduling", European Journal of Operational Research, 106(2-3), 266-276, 1998.												■								√			
146	Zhang, P., "An image construction method for visualizing managerial data", Decision Support Systems, 23(4), 371-387, 1998.																			■	√			
147	Brucker, P., Drexl, A., Mohring, R., Neumann, K., Pesch, E., "Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods", European Journal of Operational Research, 112(1), 3-41, 1999.												■								√			
148	Choo, H. J., Tommelein, I. D., Ballard, G., Zabelle, T. R., "WorkPlan: Constraint-Based Database for Work Package Scheduling", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125(3), 151-160, 1999																			■	√			
149	Cottrell, W. D., "Simplified Program Evaluation and Review Technique (PERT)", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125(1), 16-22, 1999.									■										□				

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
150	Ecker, K. H., "Scheduling of resource tasks", European Journal of Operational Research, 115(2), 314-327, 1999.												■								√			
151	Karim, A., Adeli, H., "CONSCOM: An OO Construction Scheduling and Change Management System", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125(5), 368-376, 1999.										□									■				
152	Karim, A., Adeli, H., "OO Information Model for Construction Project Management", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125(5), 361-367, 1999.										■										√			
153	Kogan, K., Shtub, A., "Scheduling projects with variable-intensity activities: The case of dynamic earliness and tardiness costs", European Journal of Operational Research, 118(1), 65-80, 1999.												■								√			
154	Lee, H. S., Yi, K. J., "Application of Mathematical Matrix to Integrate Project Schedule and Cost", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125(5), 339-346, 1999.										■										√			
155	Leu, S. S., Chen, A. T., Yang, C. H., "Fuzzy Optimal Model for Resource-Constrained Construction Scheduling", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 13(3), 207-216, 1999.												■											

		主題																		性質							
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other				
156	Leu, S. S., Yang, C. H., "GA-Based Multicriteria Optimal Model for Construction Scheduling", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125(6), 420-427, 1999.										■		■														
157	Son, J., Skibniewski, M. J., "Multiheuristic Approach for Resource Leveling Problem in Construction Engineering: Hybrid Approach", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 125(1), 23-31, 1999.												■														
158	Feng, C. W., Liu, L., Burns, S. A., "Stochastic Construction Time-Cost Trade-Off Analysis", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 14(2), 117-126, 2000.										■											√					
159	Hegazy, T., Shabeeb, A. K., Elbeltagi, E., Cheema, T., "Algorithm for Scheduling with Multiskilled Constrained Resources", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 126(6), 414-421, 2000.	■											■									√					
160	Koo, B., Fischer, M., "Feasibility Study of 4D CAD in Commercial Construction", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 126(4), 251-260, 2000.																						■	√			
161	Leu, S. S., Yang, C. H., Huang, J. C., "Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application", Automation in Construction, 10(1), 27-41, 2000.												■										√				



		主題																		性質			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other
162	Carlier, J., Neron, E., "A new LP-based lower bound for the cumulative scheduling problem", European Journal of Operational Research, 127(2), 363-382, 2000.											■								√			
163	Hartmann, S., Kolisch, R., "Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem", European Journal of Operational Research, 127(2), 394-407, 2000.											■											Feasibility study
164	Klein, R., "Bidirectional planning: improving priority rule-based heuristics for scheduling resource-constrained projects", European Journal of Operational Research, 127(3), 619-638, 2000.											■								√			
165	Li, H., Love, P. E. D., "Genetic search for solving construction site-level unequal-area facility layout problems", Automation in Construction, 9(2), 217-226, 2000.																	■		√			
166	Neumann, K., Zimmermann, "Procedures for resource leveling and net present value problems in project scheduling with general temporal and resource constraints", European Journal of Operational Research, 127(2), 425-443, 2000.											■								√			

		主題																		性質			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other
167	Abeyasinghe, M. C. L., "An efficient method for scheduling construction projects with resource constraints", International Journal of Project Management, 19(1), 29-45, 2000.											■								√			
168	O'Brien, W. J., Fischer, M. A., "Importance of Capacity Constraints to Construction Cost and Schedule", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 126(5), 366-373, 2000.										■									√			
169	Wang, W. C., Demsetz, L. A., "Application Example for Evaluating Networks Considering Correlation", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 126(6), 467-474, 2000.																■		■	√			
170	Wang, W. C., Demsetz, L. A., "Model for Evaluating Networks under Correlated Uncertainty—NETCOR", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 126(6), 458-466, 2000.											■							■	√			
171	Ammar, M. A., Elbeltagi, E., "Algorithm for Determining Controlling Path Considering Resource Continuity", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 15(4), 292-298, 2001.												■							√			
172	Chang, A. S. T., "Defining Cost/Schedule Performance Indices and Their Ranges for Design Projects", Journal of Management in Engineering, ASCE, 17(2), 122-130, 2001.				■															√			

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
173	El-Rayes, K., "Object-Oriented Model for Repetitive Construction Scheduling" Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(3), 199-205, 2001.											■	■								√			
174	El-Rayes, K., Moselhi, O., "Optimizing Resource Utilization for Repetitive Construction Projects", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(1), 18-27, 2001.											■	■								√			
175	Harmelink, D. J., "Linear Scheduling Model: Float Characteristics", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(4), 255-260, 2001					■															√			
176	Hegazy, T., Wassef, N., "Cost Optimization in Projects with Repetitive Nonserial Activities", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(3), 183-191, 2001.										■	■	■								√			
177	Hegazy, T., Ersahin, T., "Simplified Spreadsheet Solutions. II. Overall Schedule Optimization", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(6), 469-475, 2001.										■	■	■								√			
178	Isidore, L. J., Back, W. E., "Probabilistic Optimal-Cost Scheduling", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(6), 431-437, 2001										■										√			

		主題																		性質			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other
179	Shi, J. J., Cheung, S. O., Arditi, D., "Construction Delay Computation Method", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(1), 60-65, 2001.				■															√			
180	Kang, L. S., Park, I. C., Lee, B. H., "Optimal Schedule Planning for Multiple, Repetitive Construction Process", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(5), 382-390, 2001.										■	□								√			
181	Leu, S. S., Hwang, S. T., "Optimal Repetitive Scheduling Model with Shareable Resource Constraint", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(4), 270-280, 2001.										□	■								√			
182	Senouci, A. B., Adeli, H., "Resource Scheduling Using Neural Dynamics Model of Adeli and Park", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(1), 28-34, 2001.										■	□								√			
183	Yamín, R. A., Harmelink, D. J., "Comparison of Linear Scheduling Method (LSM) and Critical Path Method (CPM)", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 127(5), 374-381, 2001.		□							■													Comparison

		主題																			性質			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
184	Zamani, M. R., "A high-performance exact method for the resource-constrained project scheduling problem", Computers and Operations Research, 28(14), 1387-1401, 2001.											■									√			
185	Abeid, J., Arditi, D., "Linking Time-Lapse Digital Photography and Dynamic Scheduling of Construction Operations", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 16(4), 269-279, 2002.								■											□	√			
186	Arditi, D., Tokdemir, O. B., Suh, K., "Challenges in Line-of-Balance Scheduling", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 128(6), 545-556, 2002.								■		□	□							□			√		
187	Chan, W. T., Hu, H., "Constraint Programming Approach to Precast Production Scheduling", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 128(6), 513-521, 2002.											■									□	√		
188	Chan, W. T., Hu, H., "Production Scheduling for Precast Plants using a Flow Shop Sequencing Model", Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 16(3), 165-174, 2002.											■									□	√		
189	Isidore, L. J., Back, W. E., "Multiple Simulation Analysis for Probabilistic Cost and Schedule Integration", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 128(3), 211-219, 2002.				□						■											√		

		主題																		性質			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other
190	Karumanasseri, G., AbouRizk, S., "Decision Support System for Scheduling Steel Fabrication Projects", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 128(5), 392-399, 2002.											■							□	√			
191	Leu, S. S., Hwang, S. T., "GA-based resource-constrained flow-shop scheduling model for mixed precast production", Automation in Construction, 11(4), 439-452, 2002.											■								√			
192	Que, B. C., "Incorporating Practicability into Genetic Algorithm-Based Time-Cost Optimization", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 128(2), 139-143, 2002.										■	□			□				□	√			
193	Steyn, H., "Project management applications of the theory of constraints beyond critical chain scheduling", International Journal of Project Management, 20(1), 75-80, 2002.											□							■	√			
194	Tavares, L.V., "A review of the contribution of Operational Research to Project Management", European Journal of Operational Research, 136(1), 1-18, 2002.																		■		√		Review
195	Wei, C. C., Liu, P. H., Tsai, Y. C., "Resource-constrained project management using enhanced theory of constraint", International Journal of Project Management, 20(7), 561-567, 2002.											■								√	√		

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
196	Yi, K. J., Lee, H. S., Choi, Y. K., "Network Creation and Development for Repetitive-Unit Projects", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 128(3), 257-264, 2002.								<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			
197	Carlier, J., Neron, E., "On linear lower bounds for the resource constrained project scheduling problem", European Journal of Operational Research, 149(2), 314-324, 2003												<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>			
198	Kim, K., Garza, J. M. D. L., "Phantom Float", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 129(5), 507-517, 2003.					<input type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>			
199	Kim, S. K., Russell, J. S., "Framework for an intelligent earthwork system Part II. Task identification/scheduling and resource allocation methodology" Automation in Construction, 12(1), 15-27, 2003..	<input checked="" type="checkbox"/>											<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>			
200	Mattila, K. G., Park, A., "Comparison of Linear Scheduling Model and Repetitive Scheduling Method", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 129(1), 56-64, 2003.								<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>												Comparison

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
201	Moselhi, O., Hassanein, A., "Optimized Scheduling of Linear Projects", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 129(6), 664-673, 2003.							■			□	□									√			
202	Nasir, D., McCabe, B., Hartono, L., "Evaluating Risk in Construction—Schedule Model (ERIC-S): Construction Schedule Risk Model", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 129(5), 518-527, 2003.									■									■		√			
203	Neumann, K., Schwindt, C., Zimmermann, J., "Order-based neighborhoods for project scheduling with non-regular objective functions", European Journal of Operational Research, 149(2), 325-343, 2003.												■								√			
204	Lu, M., Li, H., "Resource-Activity Critical-Path Method for Construction Planning", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 129(4), 412-420, 2003.									■			□								√			
205	Valls, V., Quintanilla, S., Ballestn, F., "Resource-constrained project scheduling: A critical activity reordering heuristic", European Journal of Operational Research, 149(2), 282-301, 2003.												■								√			
206	Wilson, J. M., "Gantt charts: A centenary appreciation", European Journal of Operational Research, Volume 149, 2(1), 430-437, 2003..																		■					Review and future prospects



		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
207	Zhong, D. H., Zhang, J. S., "New Method for Calculating Path Float in Program Evaluation and Review Technique (PERT)", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 129(5), 501-506, 2003.				■	□															√			
208	Dzeng, R. J., Wang, W. C., "Module-Based Construction Schedule Administration for Public Infrastructure Agencies", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 130(1), 5-14, 2004.									■		□								■	√			
209	Elazouni, A. M., Gab-Allah, A. A., "Finance-Based Scheduling of Construction Projects using Integer Programming", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 130(1), 15-24, 2004.																				■	√		
210	Hegazy, T., Elhakeem, A., Elbeltagi, E., "Distributed Scheduling Model for Infrastructure Networks", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 130(2), 160-167, 2004.									■											□	√		
211	Jung, Y., Woo, S., "Flexible Work Breakdown Structure for Integrated Cost and Schedule Control", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 130(5), 616-625, 2004.									■	□										□	√		

		主題																		性質				
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	Algorithm Development	Discussion	Case Study	Other	
212	Liu, J., Rahbar, F., "Project Time-Cost Trade-Off Optimization by Maximal Flow Theory", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 130(4), 607-609, 2004.										■										√			
213	Senouci, A. B., Eldin, N. N., "Use of Genetic Algorithms in Resource Scheduling of Construction Projects", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 130(6), 869-877, 2004.										■		■											
214	Tserng, H. P., Lin, Y. C., "Developing an activity-based knowledge management system for contractors", Automation in Construction, 781-802, 2004.	■																				√		
215	Herroelen, W., Leus, R., "The construction of stable project baseline schedules", European Journal of Operational Research, 156(3), 550-565.																				■	√		
216	Yang, B., Geunes, J., O'Brien, W. J., "A heuristic approach for minimizing weighted tardiness and overtime costs in single resource scheduling", Computers and Operations Research, 31(8), 1273-1301, 2004.																				■	√		