

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩 士 論 文

受負載之正齒輪對的傳動誤差探討

Investigation on Transmission Errors
of a Loaded Spur Gear Pair



研究生：陳義仁
指導教授：蔡忠杓教授

中華民國九十四年六月

受負載之正齒輪對的傳動誤差探討

Investigation on Transmission Errors of a Loaded Spur Gear Pair

研究生：陳義仁

Student : Yee-Ren Chen

指導教授：蔡忠杓

Advisor : Chung-Biau Tsay

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程



Submitted to Degree Program of Automation and Precision Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Automation and Precision Engineering
June 2005
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十四 年 六 月

受負載之正齒輪對的傳動誤差探討

研究生:陳義仁

指導教授: 蔡忠杓 博士

國立交通大學工學院精密與自動化工程學程碩士班

摘 要

本論文的目標係以實驗方法探討正齒輪對之傳動誤差與其扭力負載之關係，主要內容包含齒輪傳動誤差之測試設備建構與測試規劃、不同扭力負載之正齒輪對的傳動誤差測試分析、不同中心距之正齒輪對的傳動誤差測試分析及不同軸交角之正齒輪對的傳動誤差測試分析。

歷經二年之泛用型齒輪測試機開發及一年之該機性能測試發展，已成功地解決該機之相關問題，齒輪角度位置解析度可達 4.88×10^{-6} 弧度，測試數據之擷取速度亦可達每秒 1800 次，該齒輪測試機已能有效的測出 0 到 10N-m 之扭力負載下之齒輪傳動誤差，且具有良好之重現性。另針對十五種不同規格或不同組合之正齒輪對，完成在 0 到 10N-m 之扭力負載下的傳動誤差多次測試，已呈現清楚之扭力負載與齒輪傳動誤差的關係，對於產業界改善齒輪噪音之方法與探索，已往前邁進一大步。本研究也分別進行了不同中心距對齒輪傳動誤差之影響實驗及不同軸交角對齒輪傳動誤差之影響實驗，亦已有具體結果。本研究之主要結論如下：

- (1) 正齒輪傳動誤差之變化與其扭力負載近乎呈線性關係，傳動誤差變化量之大小與其輪齒之剛性及節圓直徑之大小有關，剛性愈大，則齒輪組之傳動誤差的變化量愈小。相同扭力負載下，節圓直徑愈大，則齒面受力愈小，因此，齒輪對之傳動誤差的變化量也就愈小。
- (2) 實驗結果已證實齒輪傳動誤差會隨齒輪軸交角之增大而增大。

關鍵詞:齒輪負載傳動誤差、單齒腹齒輪測試機、泛用型齒輪測試機、齒形誤差、臨接節距誤差、累積節距誤差

Investigation on Transmission Errors of a Loaded Spur Gear Pair

Student: Yee-Ren Chen

Advisors: Dr. Chung-Biau Tsay

Degree Program of Automation and Precision Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The target of this thesis is to investigate the relationship between the transmission errors and applied torques of the spur gear by experiments. The main content includes the development of the gear transmission error test facility and its test planning. The transmission error tests and analyses under different loads, center distance and the axial crossed angle on spur gear pairs are also investigated.

Via two years of the universal gear tester design and manufacture, as well as one year of its performance testing development, the correlative problems to the testing and machine have been resolved successfully. The gear angular position resolution can reach 4.88×10^{-6} degrees, and the data acquisition speed can reach 1800 Hz. The developed universal gear test facility is capable of the gear transmission error test for 0~10N-m loaded to the testing gear pair and has good repeatability. After completing many times of tests on fifteen gear pairs with different specifications or combinations of gears under 0~10N-m loads, some clear trends and experimental results of the relationship between the transmission errors and loads are obtained in this study. It is really a great improvement on gear noise for industry. In this research, transmission error tests and analyses under center distance variations and different gear crossed angle for spur gear pairs are also performed and received substantial results. The main conclusions are as follows:

- (1) The relationship between the variation of gear transmission error and its load is near lineal. The variation of gear transmission error is related with gear tooth stiffness and the pitch diameter. Higher stiffness will get

smaller variation of gear transmission errors. For same torque, larger pitch diameter will get lower tooth normal force and get smaller variation of transmission error.

- (2) The experiment result has proved that the gear transmission error will be increased due to the gear crossed angle increased.

Keywords: loaded gear transmission error, single flank gear tester, universal gear tester, tooth profile error, adjacent pitch error, accumulated pitch error



誌 謝

本人於工業技術研究院從事齒輪傳動設計開發工作已過 20 個年頭，能有機會再進入校園學習，實感萬分榮幸，也深深感受到師長們在課業教導與論文指導上的熱忱及實驗室同學間之融洽。在此特予感謝我的指導教授蔡忠杓老師不辭辛勞的全程指導，感謝曾錦煥教授及洪景華教授之撥冗指教，感謝齒輪研究室之學長及同學們之提攜及協助，感謝工研院邱垂元與陳惟銓等同仁及巨克富公司何寬賢先生在泛用型齒輪測試機開發及測試發展上之協助。

最後謹以本文獻給我的家人，感謝我的妻子及兒子之支持與鼓勵，使我得以順利地完成學業。



目 錄

頁次

第一章 前言	1
1.1 研究之背景與動機.....	1
1.2 國內外相關研究概況.....	1
1.3 研究目標.....	2
第二章 齒輪傳動誤差基本理論	3
2.1 齒輪傳動誤差之定義.....	3
2.2 齒輪單齒腹測試法原理.....	4
第三章 齒輪傳動誤差之測試設備建構及測試規劃	7
3.1 泛用型齒輪測試機之建構.....	7
3.2 齒輪傳動誤差數據擷取程式撰寫.....	19
3.3 齒輪傳動誤差之測試分析規劃.....	22
3.4 齒輪傳動誤差之測試條件設定.....	28
第四章 受扭力負載之正齒輪的傳動誤差測試及分析	35
4.1 受扭力負載之正齒輪的傳動誤差測試經過.....	35
4.2 受扭力負載之正齒輪的傳動誤差測試結果.....	38
4.3 受扭力負載之正齒輪的傳動誤差測試結果之分析.....	54
4.4 受扭力負載之正齒輪的基準點相位角變化之分析.....	62
第五章 不同中心距之正齒輪的傳動誤差測試及分析	70
5.1 不同中心距之正齒輪的傳動誤差測試經過.....	70
5.2 不同中心距之正齒輪的傳動誤差測試結果.....	70
5.3 不同中心距之正齒輪的傳動誤差測試結果之分析.....	75
第六章 不同軸交角之正齒輪的傳動誤差測試及分析	79
6.1 不同軸交角之正齒輪的傳動誤差測試經過.....	79
6.2 不同軸交角之正齒輪的傳動誤差測試結果.....	79
6.3 不同軸交角之正齒輪的傳動誤差測試結果之分析.....	83
第七章 結論及未來展望	85
7.1 結論.....	85
7.2 未來展望.....	86

參考文獻..... 87
附件 齒輪傳動誤差測試功能之發展經過..... 89



表目錄

頁次

表 3.1 泛用型齒輪測試機之數據擷取卡規格表.....	12
表 3.2 本研究所設計之測試齒輪數據表(模數 2mm).....	24
表 3.3 本研究所設計之測試齒輪數據表(模數 3mm).....	25
表 3.4 本研究所設計之測試齒輪數據表(模數 4mm).....	26
表 4.1 模數 2mm 正齒輪對的傳動誤差之主要測試日期及測試數據組數 ...	35
表 4.2 模數 3mm 正齒輪對的傳動誤差之主要測試日期及測試數據組數 ...	36
表 4.3 模數 4mm 正齒輪對的傳動誤差之主要測試日期及測試數據組數 ...	36
表 4.4 模數 2mm 正齒輪對之傳動誤差測試值.....	55
表 4.5 模數 3mm 正齒輪對之傳動誤差測試值.....	56
表 4.6 模數 4mm 正齒輪對之傳動誤差測試值.....	57
表 4.7 受扭力負載之模數 2mm 正齒輪對的基準點相位角變化量	63
表 4.8 受扭力負載之模數 3mm 正齒輪對的基準點相位角變化量	64
表 4.9 受扭力負載之模數 4mm 正齒輪對的基準點相位角變化量	65
表 5.1 不同中心距之正齒輪對的基準點相位角變化量.....	76
表 5.2 不同中心距之正齒輪對的傳動誤差變化量.....	77
表 6.1 不同軸交角之正齒輪對的傳動誤差變化量.....	84
表 A1. SSM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試數據表(一).....	92
表 A2. SSM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試數據表(二).....	92
表 A3. SSM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試數據表(三).....	93

圖目錄

頁次

圖 2.1 單齒腹測試法之齒輪傳動誤差測試結果的曲線範例.....	4
圖 2.2 齒輪單齒腹測試原理示意圖 [1].....	5
圖 3.1 泛用型齒輪測試機之機台架構示意圖.....	8
圖 3.2 泛用型齒輪測試機之馬達性能曲線圖.....	9
圖 3.3 泛用型齒輪測試機之角度編碼器基本形狀尺寸圖.....	10
圖 3.4 泛用型齒輪測試機之數據擷取卡外觀圖.....	11
圖 3.5 泛用型齒輪測試機之煞車器性能曲線圖.....	13
圖 3.6 主動齒輪之傳動軸系結構圖.....	14
圖 3.7 被動齒輪之傳動軸系結構圖.....	15
圖 3.8 泛用型齒輪測試機之機台結構圖.....	16
圖 3.9 泛用型齒輪測試機之結構圖.....	17
圖 3.10 九十二年六月組立完成之泛用型齒輪測試機照片.....	18
圖 3.11 九十三年五月發展完成之泛用型齒輪測試機照片.....	18
圖 3.12 泛用型齒輪測試機之輸入軸與輸出軸凸緣照片.....	20
圖 3.13 本研究所用之輸入端齒輪接頭(右)與輸出端齒輪接頭(左)照片.....	20
圖 3.14 齒輪傳動誤差測試軟體之操作輸入畫面.....	21
圖 3.15 齒輪傳動誤差測試軟體之測試結果顯示畫面.....	21
圖 3.16 測試齒輪之滾齒加工照片.....	27
圖 3.17 測試齒輪之製作結果照片.....	27
圖 3.18 齒輪接頭安裝之平行度校驗(水平方向)照片.....	28
圖 3.19 齒輪接頭安裝之平行度校驗(垂直方向)照片.....	29
圖 3.20 PPM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(0°~360°).....	31
圖 3.21 PPM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(160°~200°).....	32
圖 3.22 SPM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(0°~360°).....	32
圖 3.23 SPM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(160°~200°).....	33
圖 3.24 SSM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(0°~360°).....	33
圖 3.25 SSM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(160°~200°).....	34
圖 3.26 PPM3-18T 齒輪對 0~12 分割摺數之傳動誤差測試結果.....	34
圖 4.1 各正齒輪對之測試安裝照片.....	37
圖 4.2 PPM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°).....	39
圖 4.3 PPM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(310°~350°).....	39
圖 4.4 PPM2-36T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°).....	40

圖 4.5 PPM2-36T 齒輪對之傳動誤差測試結果(155°~185°)	40
圖 4.6 PPM2-45T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	41
圖 4.7 PPM2-45T 齒輪對之傳動誤差測試結果(329°~353°)	41
圖 4.8 SPM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	42
圖 4.9 SPM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(270°~310°)	42
圖 4.10 SSM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	43
圖 4.11 SSM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(290°~335°)	43
圖 4.12 PPM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	44
圖 4.13 PPM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(300°~360°)	44
圖 4.14 PPM3-24T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	45
圖 4.15 PPM3-24T 齒輪對之傳動誤差測試結果(240°~290°)	45
圖 4.16 PPM3-30T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	46
圖 4.17 PPM3-30T 齒輪對之傳動誤差測試結果(195°~235°)	46
圖 4.18 SPM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	47
圖 4.19 SPM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(280°~340°)	47
圖 4.20 SSM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	48
圖 4.21 SSM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(260°~320°)	48
圖 4.22 PPM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	49
圖 4.23 PPM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(230°~290°)	49
圖 4.24 PPM4-24T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	50
圖 4.25 PPM4-24T 齒輪對之傳動誤差測試結果(245°~295°)	50
圖 4.26 PPM4-30T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	51
圖 4.27 PPM4-30T 齒輪對之傳動誤差測試結果(295°~335°)	51
圖 4.28 SPM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	52
圖 4.29 SPM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(45°~105°)	52
圖 4.30 SSM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)	53
圖 4.31 SSM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(260°~320°)	53
圖 4.32 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(模數 2mm)	58
圖 4.33 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(模數 3mm)	58
圖 4.34 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(模數 4mm)	59
圖 4.35 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(PPM)	59
圖 4.36 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(SPM)	60
圖 4.37 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(SSM)	60

圖 4.38 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量.....	61
圖 4.39 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(模數 2mm)	66
圖 4.40 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(模數 3mm)	66
圖 4.41 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(模數 4mm)	67
圖 4.42 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(PPM)	67
圖 4.43 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(SPM)	68
圖 4.44 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(SSM)	68
圖 4.45 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量.....	69
圖 5.1 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 及 0N-m)	71
圖 5.2 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果($260^{\circ}\sim 320^{\circ}$ 及 0N-m)	71
圖 5.3 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果($260^{\circ}\sim 320^{\circ}$ 及 0N-m)	72
圖 5.4 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 及 5N-m)	72
圖 5.5 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果($280^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 及 5N-m)	73
圖 5.6 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果($280^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 及 5N-m)	73
圖 5.7 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 及 10N-m)	74
圖 5.8 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果($280^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 及 10N-m)	74
圖 5.9 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果($280^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 及 10N-m)	75
圖 5.10 SSM3-18T 齒輪對變中心距之基準點相位角變化量.....	78
圖 5.11 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差變化量.....	78
圖 6.1 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 及 0N-m)	80
圖 6.2 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果($260^{\circ}\sim 320^{\circ}$ 及 0N-m)	80
圖 6.3 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 及 5N-m)	81
圖 6.4 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果($280^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 及 5N-m)	81
圖 6.5 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 及 10N-m)	

.....	82
圖 6.6 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果(280°~340°及 10N-m)	82
.....	82
圖 6.7 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差變化量.....	83
圖 A1. PPM2-27T 齒輪對之脈波數遺漏測試結果.....	90
圖 A2. PPM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試結果.....	90
圖 A3. SSM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試結果.....	91



符號說明

f_1 : 主動齒輪之角度編碼器的脈波頻率(脈波數/秒)

f_2 : 被動齒輪之角度編碼器的脈波頻率(脈波數/秒)

Z_1 : 主動齒輪之齒數

Z_2 : 被動齒輪之齒數

ϕ_1 : 主動齒輪之轉動角度

ϕ_2 : 被動齒輪之理論轉動角度

ϕ'_2 : 被動齒輪之實際轉動角度

$\Delta\phi_2$: 被動齒輪之傳動誤差



第一章 前言

1.1 研究之背景與動機

漸開線圓柱齒輪因加工較容易，精度易掌控，因此為目前產業界應用最多之齒輪，亦是使用最成熟之齒輪。然而隨著時代的進步，人們對齒輪的要求亦不斷提高，例如對於降低噪音、降低振動、提高負載能力、提高傳動效率等，仍有所期待。對齒輪之負載能力及傳動效率因已比其他傳動方式(如皮帶傳動、鏈條傳動)好得很多，因此被期待改善之壓力就較小，然而齒輪之噪音與振動往往不比其他傳動方式小，特別是高轉速、低精度之齒輪傳動場合。因此，從事齒輪之研究有較大之比率是投在噪音及振動上。個人已在工業技術研究院從事齒輪傳動設計工作多年，所面臨之最普遍齒輪傳動問題亦就是噪音問題，齒輪噪音是受齒輪製作精度(主要含偏擺、節距誤差、齒形誤差、導程誤差)、齒輪安裝精度、齒隙、材質、齒輪箱殼體設計、齒輪支撐剛性設計、轉速、接觸率、負載...等因素影響，而此眾多因素又多數會反映於其傳動誤差(Transmission Error)上，因此，傳動誤差即成為影響齒輪噪音之關鍵因素。

目前業界廣泛使用之齒輪量測儀器，係以微小直徑球形測頭直接碰觸齒面的方式來量測齒輪精度，國際上也有完整之齒輪標準來定義齒輪之精度等級，例如 AGMA(American Gear Manufacturers Association)、JIS(Japan Industrial Standard)及 BS(British Standard)等齒輪精度等級。然而前述齒輪量測方法只能量測個別之齒輪精度，且量測位置僅為齒面上之某一截面的某一個位置，其主要缺點為量測點不保證為齒輪之實際運轉傳動之接觸點，因此，齒輪精度高並不能保證其組立後齒輪運轉之傳動誤差就會很小。所以，先進國家的齒輪製造業者便以單齒腹測試法(Single Flank Test)來量測並表示嚙合齒輪對之傳動誤差，特別是航空齒輪製造業者，多以此法量測並製造出高精度低噪音齒輪。目前全世界有德國 Klingelberg 公司、美國 Gleason 公司及日本 Osaka Seimitsu 公司已產製齒輪單齒腹測試機，並予以商品化。

1.2 國內外相關研究概況

在齒輪單齒腹測試研究之文獻方面，歐洲尤其是德國係最早進行此項技術之研究，而德國國家標準 DIN(Deutsche Industrie-Norm)亦規範了齒

輪單齒腹測試標準，Smitch [1, 2, 3] 早期任職於 Gleason 公司時，曾發表一系列有關齒輪單齒腹測試文章，包括單齒腹測試法之原理、目的、資料解析例子及齒輪傳動誤差與齒輪噪音的關係等，Houser[4]、Schutt[5]及 Foster[6]則建立了受負載下之齒輪單齒腹測試機。

Litvin[7, 8]及 Tsay 等人[9, 10, 11, 12, 13, 14]探討有關齒輪運動誤差 (Kinematic Error) 之理論分析研究，已奠定齒輪運動誤差分析基礎。民國八十四年工業技術研究院機械所購入一台量測蝸桿蝸輪組之單齒腹測試機，亦開始投入蝸桿蝸輪組之傳動誤差量測工作，以供製造之改善參考。張永源[15]利用自行建置之簡易型平行軸齒輪單齒腹測試機，進行了國內單一對圓柱齒輪無負載之傳動誤差量測研究，後續雲林科技大學亦委託工業技術研究院開發了一台無負載之平行軸齒輪單齒腹測試機。交通大學蔡忠杓於民國九十年八月起與工業技術研究院合作開發泛用型齒輪測試機 (Universal Gear Tester)，歷經二年成功完成開發及製作工作，所開發之測試機不僅能測試負載下平行軸齒輪對之傳動誤差，亦能測試負載下 0° 至 90° 軸交角之齒輪對傳動誤差，同時也能測試 0° 至 90° 軸交角之齒輪對或齒輪箱的傳動效率，個人慶幸得以實際參與此泛用型齒輪測試機之開發與測試發展工作，本論文即探討並實際應用該泛用型齒輪測試機，以進行測試受負載之正齒輪對由於齒形變形對其傳動誤差之影響。

1.3 研究目標

目前工業界對齒輪之傳動誤差量測是利用單齒腹測試機在無負載下或極輕微之負載下量測，主要用於檢驗齒輪對之製造精度所反應之傳動誤差，此並未能反應齒輪實際負載下運轉之傳動誤差，因此無法有效修整齒形而獲得噪音之改善。因此，個人藉此在校進修之際，依據齒形模擬分析、齒輪運動誤差分析及無負載之傳動誤差測試等研究基礎上，進一步以實驗方法去探討正齒輪對之傳動誤差與其扭力負載之關係。主要研究內容包含齒輪傳動誤差之測試設備建構與測試規劃、不同扭力負載之正齒輪對的傳動誤差測試分析、不同中心距之正齒輪對的傳動誤差測試分析及不同軸交角之正齒輪對的傳動誤差測試分析。

第二章 齒輪傳動誤差基本理論

2.1 齒輪傳動誤差之定義

齒輪傳動之主要功能，即能高效率且平順地以其齒數比關係將主動齒輪之動力傳給被動齒輪，而得到所要之速比及扭力比輸出，亦即主動齒輪轉一角度 ϕ_1 ，則其被動齒輪即跟著轉一個角度 ϕ_2 ，其理論上之關係如下：

$$\phi_2 = \frac{Z_1}{Z_2} \phi_1 \quad (2.1)$$

其中

ϕ_1 : 主動齒輪之轉動角度

ϕ_2 : 被動齒輪之理論轉動角度

Z_1 : 主動齒輪之齒數

Z_2 : 被動齒輪之齒數

但實際上一對齒輪總存有若干製造誤差及裝配誤差，因此，(2.1)式只是個理論公式，在巨觀上是成立的，而在微觀上被動齒輪實際之旋轉角度與該理論值會有差異，這種差異即稱為該對齒輪之傳動誤差(Transmission Error)。其傳動誤差可表示如下：

$$\Delta\phi_2 = \phi'_2 - \phi_2 = \phi'_2 - \left(\frac{Z_1}{Z_2} \phi_1 \right) \quad (2.2)$$

其中

$\Delta\phi_2$: 被動齒輪之傳動誤差

ϕ_2 : 被動齒輪之理論轉動角度

ϕ'_2 : 被動齒輪之實際轉動角度

一對齒輪之傳動誤差通常有其週期性，若以主動齒輪與被動齒輪有相同齒數為例，主動齒輪每轉了一圈(360度)其傳動誤差大致又回復到與0度時相近，而不會無窮盡地一直累積增大下去。如主動齒輪與被動齒輪之齒數不同，則其週期就不一定是360度。一般齒輪其累積節距誤差往往大於單一齒之齒形誤差，因此與同齒數之標準齒輪(Master Gear)嚙合之傳動誤差測試結果，往往每360度即呈現出類似正弦波之大波浪，而每齒之轉動角範圍內又會隨著齒形誤差狀況呈現圓弧狀或鋸齒狀等各種曲線。如主動齒輪與被動齒輪均非標準齒輪，則圖2.1所示之齒形誤差(Tooth Profile Error)、臨接節距誤差(Adjacent Pitch Error)、累積節距誤差(Accumulated Pitch Error)分別為該對齒輪間之齒形差距、臨接節距差

距、累積節距差距。

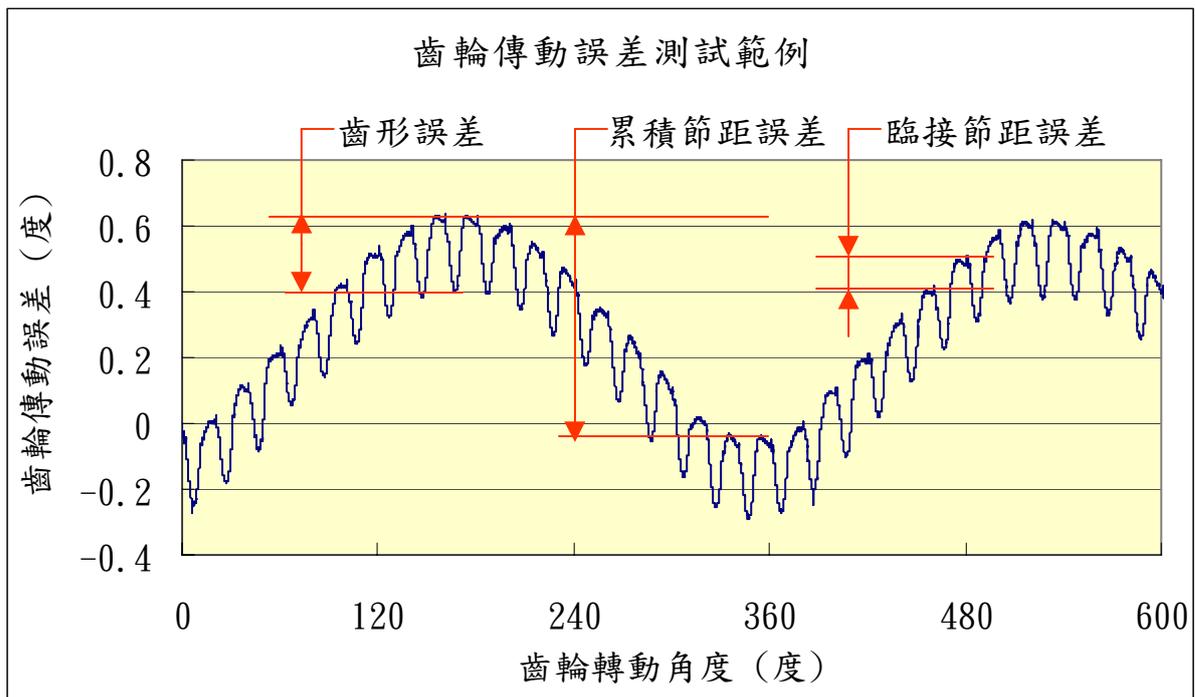


圖 2.1 單齒腹測試法之齒輪傳動誤差測試結果的曲線範例

2.2 齒輪單齒腹測試法原理

齒輪單齒腹測試法是一對齒輪最容易顯示其傳動誤差之測試方法，圖 2.2 為齒輪單齒腹測試法原理之示意圖 [1]，係利用一組配對嚙合之齒輪（可為一對待測齒輪；或主動齒輪為標準齒輪，而被動齒輪為待測齒輪），將其裝置於單齒腹測試機上，調整該齒輪對之嚙合中心距至適當值，並使該齒輪對保持單邊接觸狀態，而另一邊則維持適當之齒隙。主動齒輪軸及被動齒輪軸各裝有一個高精度之角度編碼器(Angular Encoder)，以偵測其實際轉動角度。角度編碼器的構造如圖 2.2 中之光柵盤，整個光柵盤均勻地排列數千個到數萬個透光槽，透光槽之實際數量則依角度編碼器之解析度設計而定，當光柵盤中之每一槽經過其偵測頭，即產生一脈波訊號輸出，因此，只要擷取其輸出之脈波數，即可知其實際旋轉角度。從被動齒輪端之角度編碼器所擷取之脈波數與從主動齒輪端之角度編碼器所擷取之脈波數除上齒輪減速比之值作比較，即可得到被動齒輪之實際轉動角度與理論轉動角度之差值，亦即為其傳動誤差。

齒輪單齒腹測試法可於無負載下或有負載下進行測試，無負載下測試是做為齒輪製造精度檢驗，可測出各轉動角度下被動齒輪相對於主動齒輪之傳動誤差。如主動齒輪為標準齒輪，則根據轉動角度與齒輪傳動誤差關

係可得到該被動齒輪之齒形誤差、鄰接節距誤差、累積節距誤差等資訊，但並無法提供導程誤差及節圓偏擺等資訊。雖然節圓偏擺會造成累積節距誤差，且大部分之累積節距誤差是由節圓偏擺造成，但有累積節距誤差並不代表有節圓偏擺。若為有負載下齒輪傳動誤差之測試，則測試機台需有可施加負載之裝置，如此便可測出齒輪對在負載下之轉動角度與齒輪傳動誤差關係，此時齒輪受負載之變形影響均已被包含在內，其測試結果將會比較接近實際之齒輪工作狀態的齒輪傳動誤差。

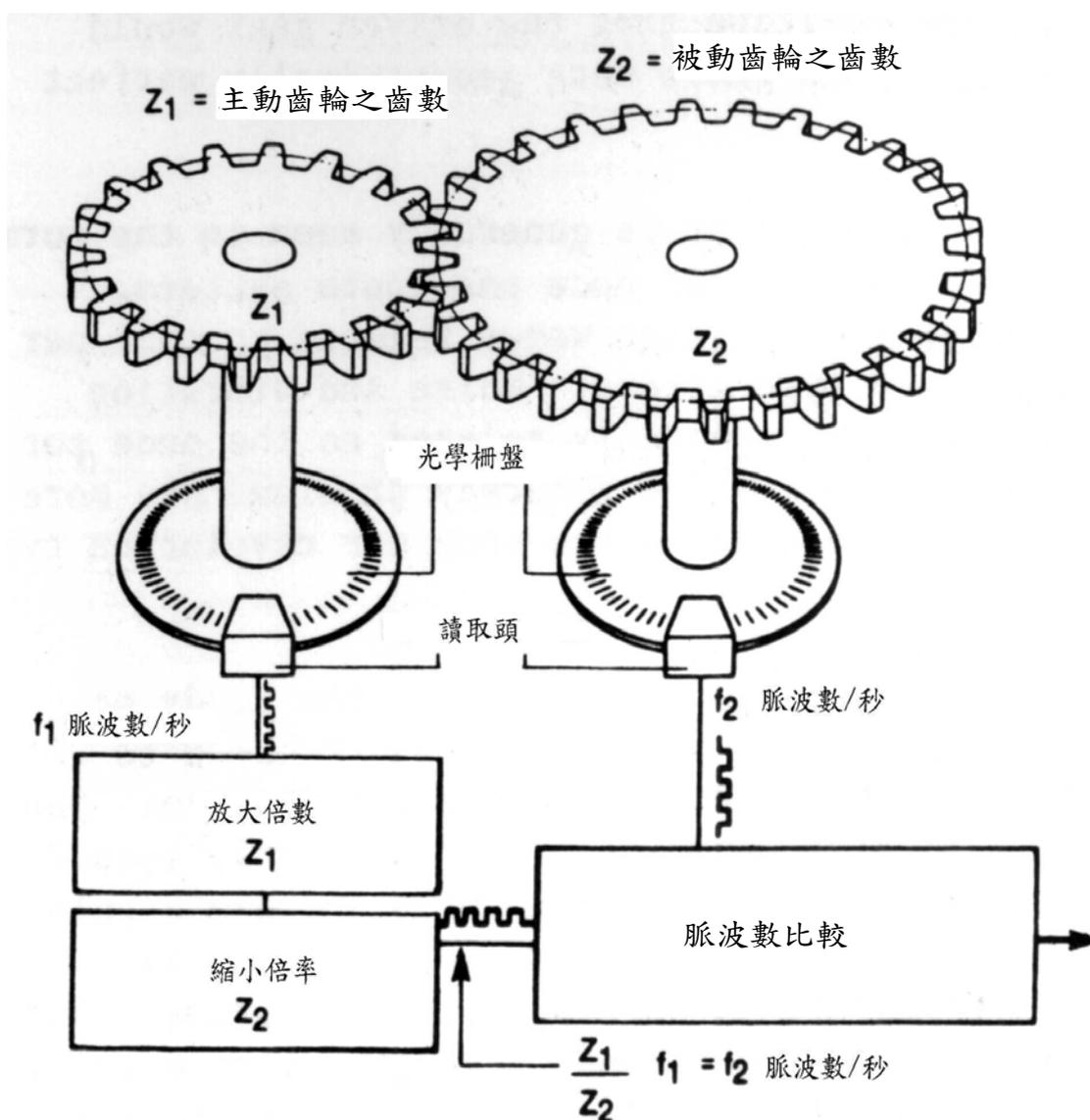


圖 2.2 齒輪單齒腹測試原理示意圖 [1]

以單齒腹測試法所測得之齒輪傳動誤差測試精度，完全取決於角度編碼器之解析度，另測試齒輪與其安裝軸之同心度需特別留意，否則將明顯影響其測試結果。齒輪單齒腹測試法可以應用於各式各樣齒輪對之傳動誤

差測試，如正齒輪、螺旋齒輪和傘齒輪。只要於齒輪傳動系統之輸入端及輸出端各連接一個高精度角度編碼器，即可量取該齒輪傳動系統之輸入端與輸出端間之傳動誤差。受限於角度編碼器之訊號輸出規格型式，從角度編碼器所接受之訊號需透過數據擷取卡做處理，電腦方可讀取及記錄。數據擷取卡通常具類比轉數位(Analog to Digit)、計數(Counting)、及訊號分割等功能，例如每個脈波分割成 2^{12} 等分，則其解析度即可提高為 4096 倍。



第三章 齒輪傳動誤差之測試設備建構及測試規劃

3.1 泛用型齒輪測試機之建構

本泛用型齒輪測試機之建構，目的在於提供平行軸齒輪對與非平行軸齒輪對(如傘齒輪對等)的單齒腹嚙合傳動誤差測試用，且可供齒輪對之效率測試使用，依此目的從 90 年 8 月起開始展開下列之泛用型齒輪測試機建構工作。

3.1.1 需求功能規格之規劃

就平行軸齒輪對之測試而言，因應測試齒輪尺寸大小之不同，則只需有 X 軸及 Y 軸分別供齒輪中心距及軸向位置調整即可。就非平行軸齒輪對之測試而言，因應測試齒輪之軸交角、齒輪尺寸大小、齒輪離軸交點之距離等不同，則除上述之 X 軸及 Y 軸外，尚需 U 軸供測試齒輪與軸交點間之距離調整及 R 軸供測試齒輪軸交角之調整。另考量測試齒輪對若為空間交錯軸，則需有 Z 軸供軸空間交錯之軸距調整。因此，整體而言，本泛用型齒輪測試機需具有 X、Y、Z 和 U 等 4 個軸之直線滑軌以及 R 軸之圓弧滑軌的工作台，如圖 3.1 所示。輸入端工作台上需具有馬達、扭力感測器(Torque Sensor)、轉速計、角度編碼器(Encoder)和主動齒輪支持座，以提供主動齒輪之運轉動力、扭力監測、轉速監測、轉動角度監測及安裝支撐。輸出端工作台則需具有被動齒輪支持座、角度編碼器、轉速計、扭力感測器和施負載裝置，以提供被動齒輪之安裝支撐、轉動角度監測、轉速監測、扭力監測、扭力負載施加。本研究用之泛用型齒輪測試機之規格規劃如下：

(1)滑座最大行程：

- X 軸：210mm
- Y 軸：210mm
- Z 軸：160mm
- U 軸：165mm
- R 軸：90 度

(2)滑座精度：

- 定位精度：20 μ m
- 重現精度：20 μ m
- 平面度：20 μ m

(3)各滑座具有停止後之鎖緊固定裝置。

(4)被測齒輪對：

- 齒數比：1~1/5
- 中心距：最大 150mm
- 單個齒輪重量：最大 15kg

(5)最大輸入功率：2kW

(6)最高輸出轉速：1800rpm。因受限於施負載裝置(Loading Device，如煞車器或動力計)型式之性能特性，可用於低轉速(200rpm 以下)之施負載裝置，通常並不適用於高轉速(1800rpm 以上)齒輪對測試。

(7)最大測試負載：機台本身結構之設計則考慮以承受 30N-m 之扭力負載為基準，為遷就市面上販售之馬達、扭力計、煞車器等元件之現成品規格，部份元件若再加大 1 號規格等級，則機台負載可能已超出 30N-m 之扭力太多。依目前所選用之 2kW 馬達、扭力計、煞車器等性能規格之限制，最大測試負載如下：

- 瞬間之額定最大測試負載：20N-m
- 1800rpm 轉速時之額定最大測試負載：9.75N-m
- 0rpm 轉速時之額定最大測試負載：12N-m

(8)單齒腹嚙合之角度量測解析度： ≤ 0.02 度

(9)效率測試誤差值： $\leq 1\%$

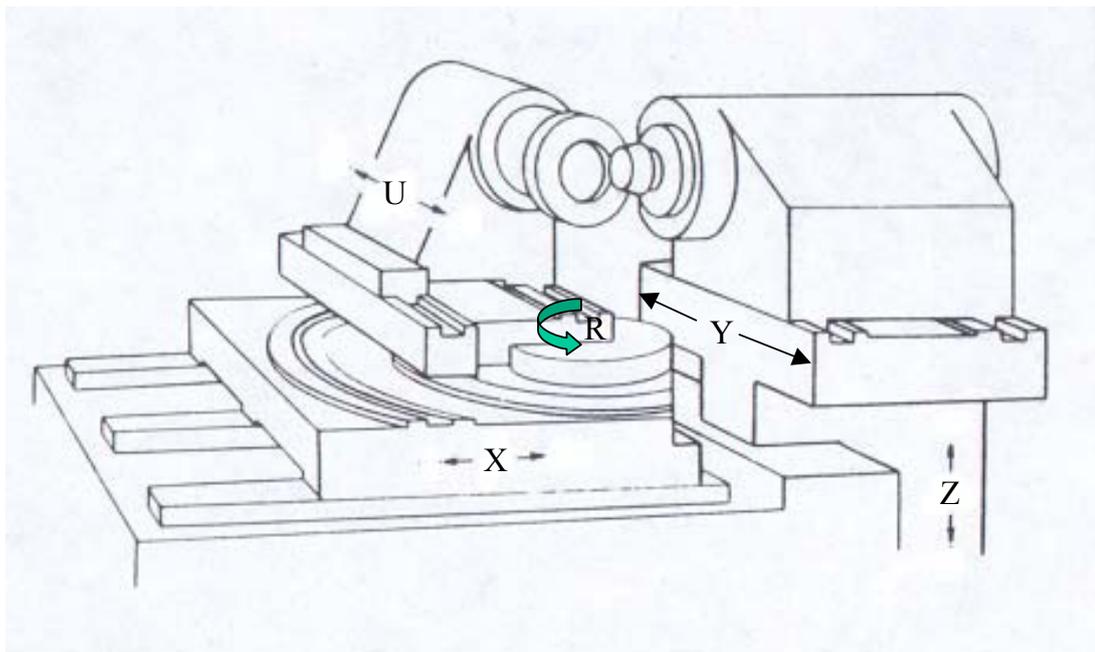


圖 3.1 泛用型齒輪測試機之機台架構示意圖

3.1.2 主要元件的規格訂定及選購：

(1) 輸入端馬達：採用 SANYO 廠牌之 P60B13200BXSA3 型交流(AC)伺服馬達，並配上 P0A050A0PJ2S01 型控制器，可正反轉，可調速度。伺服馬達之性能曲線如圖 3.2 所示，其規格如下：

- 功率：2Kw
- 額定轉速：2000rpm
- 最高轉速：3000rpm
- 額定轉速時之最大輸出扭力：9.5N-m
- 瞬間最大輸出扭力：30N-m
- 失速轉速(0rpm)時之連續運轉最大輸出扭力：12N-m
- 使用環境溫度：0~40°C
- 儲藏環境溫度：-20~65°C

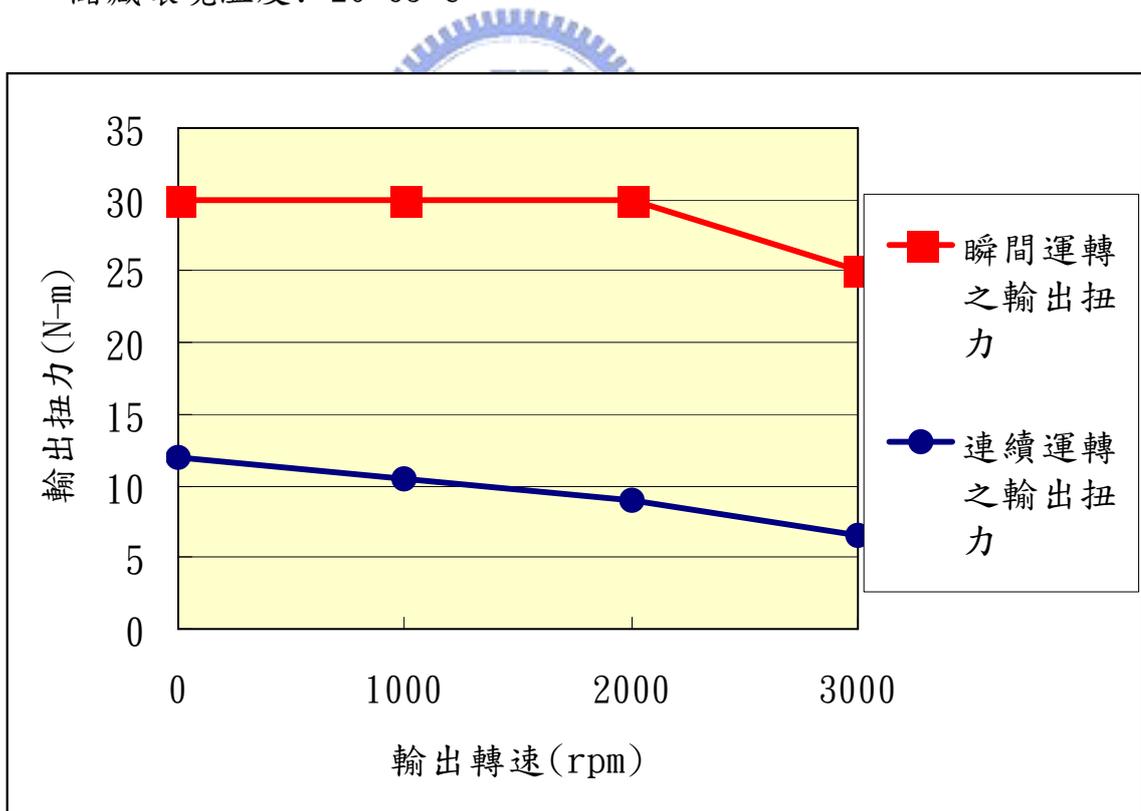


圖 3.2 泛用型齒輪測試機之馬達性能曲線圖

(2) 輸入端及輸出端之扭力計(Torque Transducer)：採用 STAIGER MOHILO 廠牌之 0170/01 型扭力計及 MS20RA 型扭力放大器。

- 最大扭力：20N-m
- 最高轉速：12,000rpm
- 扭力誤差： $\pm 0.5\%$
- 輸入訊號：5V
- 輸出訊號：0~5V

(3) 輸入端及輸出端之角度編碼器：採用 HEIDENHEIN 廠牌之 RON 255 型(中空型)角度編碼器，其外形如圖 3.2 所示，其規格如下：

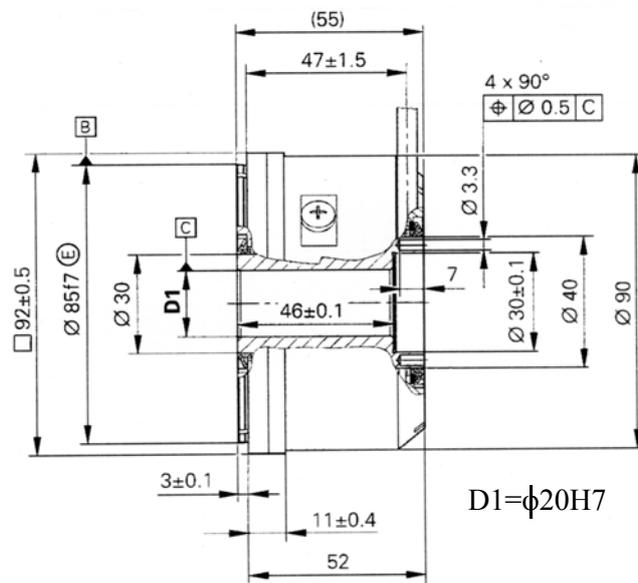


圖 3.3 泛用型齒輪測試機之角度編碼器基本形狀尺寸圖

- 脈波數:18,000 脈波/轉(Pulse/Revolution)，HEIDENHEIN 廠牌之 RPN800 型為其現有產品中最高脈波數之角度編碼器，可達 90,000 脈波/轉，但其體積大很多，為 $\phi 200\text{mm}$ 外徑 × $\phi 60\text{mm}$ 內徑 × 40mm 長，且價格比 255 型高數倍。
- 解析度： 0.02° （如再配合其 IK220 數據擷取卡具 2^{12} 之分割功能，可將每個脈波再分割成 4096 等分，則解析度可達 4.88×10^{-6} 弧度 = 0.0176 弧度-秒）
- 最高轉速：3000rpm
- 輸入電壓： $5V \pm 5\%$
- 輸入電流：150mA
- 輸出訊號： $11 \mu A_{pp}$

- 使用溫度：-20~70°C
- 儲存溫度：-30~80°C
- 轉動慣量： $60 \times 10^{-6} \text{Kg-m}^2$

(4) 數據擷取卡(Counter Card): 選用 HEIDENHEIN 廠牌之 IK220 型數據擷取卡(如圖 3.4)，其規格如表 3.1。測試齒輪之轉速往往受限於數據擷取卡之容許最大頻率，依上述角度編碼器之產生脈波(Pulse)數為 18,000 脈波/轉，本數據擷取卡對輸入脈波訊號型式 $11 \mu\text{A}_{pp}$ 之容許最大頻率為 33KHz，則該泛用型齒輪測試機做傳動誤差測試之齒輪容許最大轉速為 110rpm ($=33,000 \times 60 / 18,000 \text{rpm}$)，亦即若測試齒輪運轉超過此轉速，數據擷取卡所擷取脈波數即開始出現差錯。選用數據擷取卡通常須留意之規格項目如下：

- 可輸入訊號類型、數量及最大頻率
- 訊號分割能力(訊號分割摺數)
- 每頻道之資料讀取位元(Bit)
- 內部記憶體之大小
- 介面傳輸型式
- 驅動程式與 Windows 軟體版本之匹配



圖 3.4 泛用型齒輪測試機之數據擷取卡外觀圖

表 3.1 泛用型齒輪測試機之數據擷取卡規格表

項目	HEIDENHEIN 廠牌之 IK220 型			
1. 輸入訊號類型	1 μ A _{pp}	11 μ A _{pp}	EnDat	SSI
2. 輸入訊號數量	2 組			
3. 輸入頻率(最大)	500KHz	33KHz		
4. 訊號線長度(最大)	60m		10m	
5. 脈波(pulse)分割數	4096			
6. 數據傳輸容量	48bits			
7. 內部記憶容量	8192 位置容量			
8. 介面	PCI bus			
9. 驅動程式	Windows NT/95/98			
10. 可用之程式語言	VISUAL C++, VISUAL Basic, BORLAND DELPHI			
11. 尺寸	約 190mm× 100mm			

(5) 輸出端負載裝置：採用 MITSUBISHI 廠牌之 ZKB-2.5XN 型磁粉式煞車器及其 LD-100W 型控制器，額定煞車力為 25N-m（如選擇再大 1 號之規格品，則其額定煞車力為 50N-m）。磁粉式煞車器之煞車力大小可依輸入電流作控制，且適合中低轉速(0 至 1,800 rpm)使用。其煞車力性能曲線如圖 3.5 所示，其性能規格如下：

- 額定最大煞車力：25N-m
- 瞬間最大煞車力：34N-m
- 最大電流：1.24 安培
- 最大功率：30W
- 最大轉速：1800rpm
- 動平衡：不平衡量在 30g 以內
- 體積： ϕ 180mm 外徑×155mm 長度
- 重量：14.5Kg

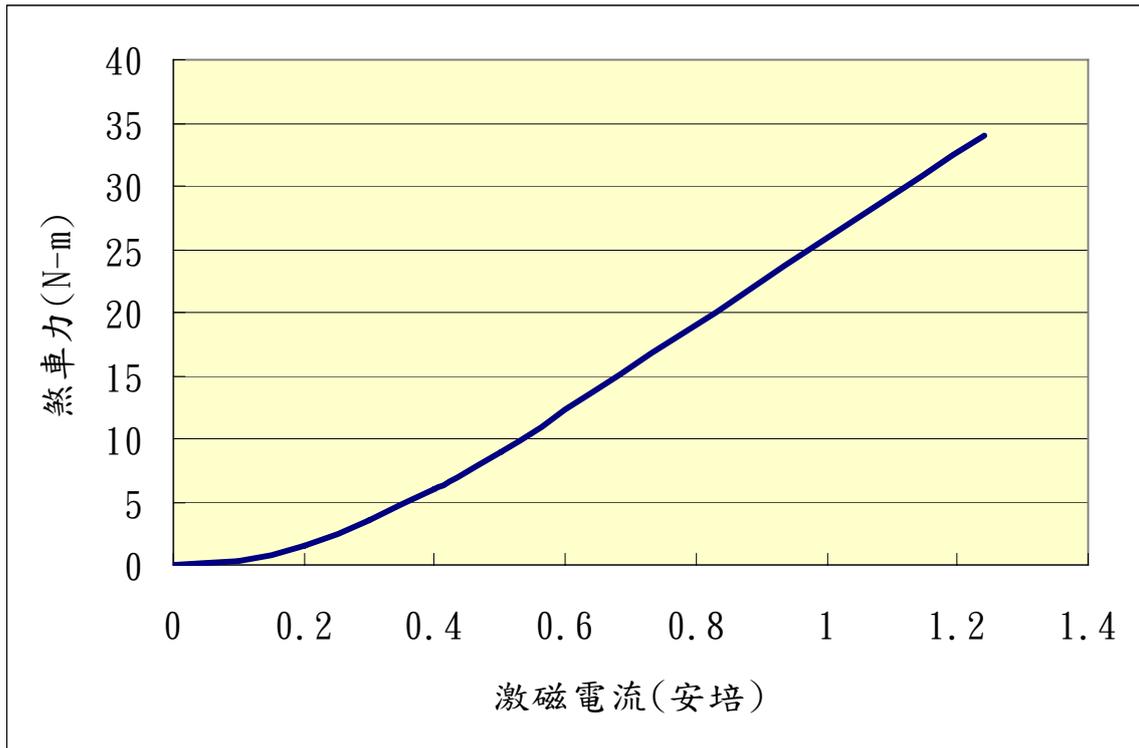


圖 3.5 泛用型齒輪測試機之煞車器性能曲線圖

- (5)轉速計：可測最高轉速為 3,000rpm。
- (6)聯軸器：共四個聯軸器，均採用剛片式聯軸器，供齒輪軸、扭力感測器和馬達、負載間的聯結，具有補償可能之同心度誤差的功能。
- (7)光學尺及顯示器：採用 NPI 廠牌之 LE0150-1A3 型光學尺搭配其 WE6800 型顯示器，每個顯示器可同時接收三支光學尺做三個軸直線位置之顯示，精度為 $2\mu m$ 。
- (8)其他訊號處理介面卡：供讀取控制相關訊號用。
- A/D Card：採用 NI 廠牌之 PCI6024E 型
 - I/O Card：採用 ADLINK 廠牌之 PCI7250 型
- (9)控制箱
- 採用 19 吋工業級 20U 箱體，烤漆面板。
 - 電源供應器：採用 220V 及 20A，提供編碼器與光學尺顯示器所需電源。
 - 系統控制器：以兩組可變電阻旋鈕分別做扭力負載及轉速之操作控制，藉由電阻的變化，而改變到激磁電流量，以達成扭力負載及轉速之調整與控制。

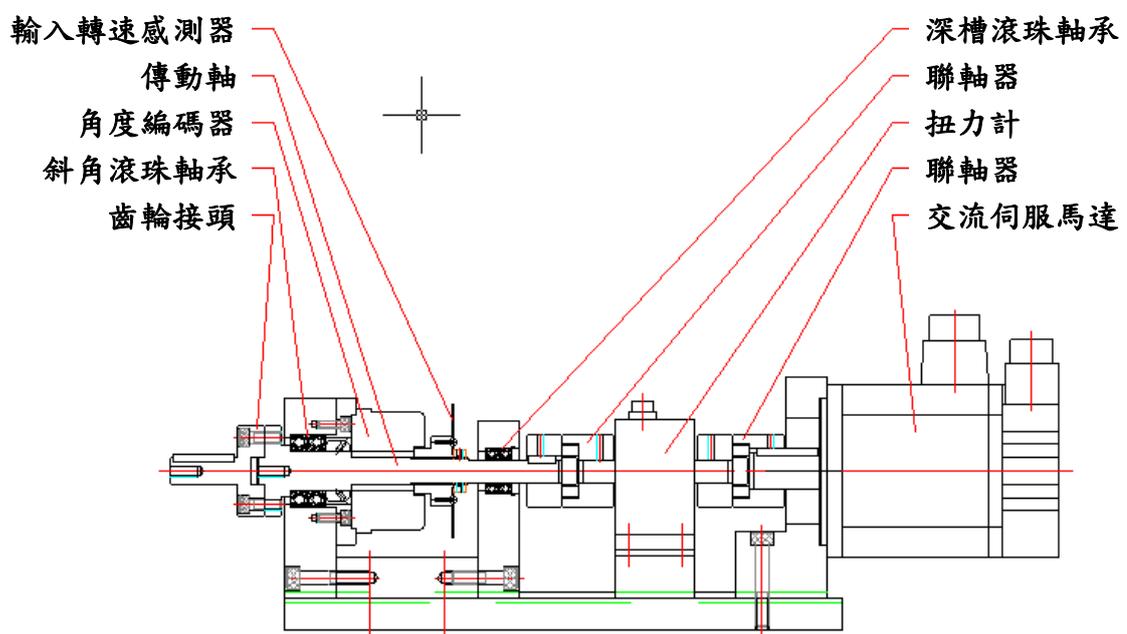
- 其他需求:相關接頭、按鈕、扭力顯示、轉速顯示、訊號線與配件。

3.1.3 測試機結構設計

整部泛用型齒輪測試機之機械結構可分成主動齒輪之傳動軸系、被動齒輪之傳動軸系和機台等三個次系統，以下依此次系統分別做說明：

(1)主動齒輪之傳動軸系設計(Layout)

整個主動齒輪之傳動軸系結構設計如圖 3.6 所示，主動齒輪之傳動軸左端採用一對斜角滾珠軸承以承擔徑向力及軸向力，右端則採用兩個深槽滾珠軸承併疊以承擔徑向力。軸右端設計成凸緣以供主動齒輪之安裝，為求適應各種齒輪之安裝，凸緣與主動齒輪間設有齒輪接頭(Adapter)，可配合各種齒輪做必要之變化。齒輪接頭是以 4 支 M8 螺栓鎖附於該傳動軸凸緣，該傳動軸之動力是由伺服馬達經扭力計傳入，該傳動軸之右端與該扭力計是以一組聯軸器連接起來，該扭力計與伺服馬達亦是以一組聯軸器連接起來。該傳動軸上裝一個轉速計及一組角度編碼器，以供主動齒輪之轉速及角度位移量之量取。



(2)被動齒輪之安裝軸系設計(Layout)

整個被動齒輪之傳動軸系結構設計如圖 3.7 所示，被動齒輪之傳動軸右端採用一對斜角滾珠軸承以承擔徑向力及軸向力，左端則採用兩個深槽

滾珠軸承併疊以承擔徑向力。軸右端設計成凸緣以供被動齒輪之安裝，為求適應各種齒輪之安裝，凸緣與被動齒輪間設有齒輪接頭，可配合各種齒輪作必要之變化，齒輪接頭是以 4 支 M8 螺栓鎖附於該傳動軸凸緣。該傳動軸之左端則以一組聯軸器連接上扭力計，該扭力計再透過另一組聯軸器連接至磁粉煞車器。該傳動軸上裝一個轉速計及一組角度編碼器，以供被動齒輪之轉速及角度位移量之量取。

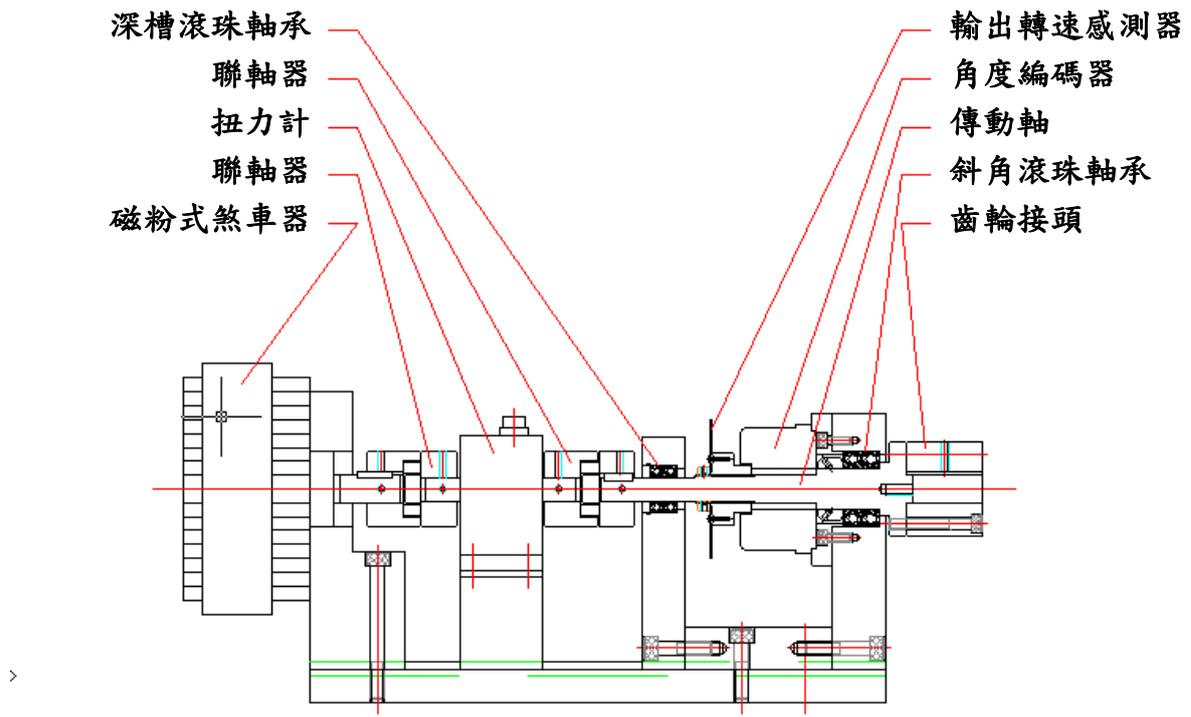


圖 3.7 被動齒輪之傳動軸系結構圖

(3)機台設計:

依上述之主動齒輪及被動齒輪等之傳動軸系尺寸大小再加上 X、Y、U、Z、R 等 5 個軸之行程需求，即可設計排列出所要之機台結構及大小，此泛用型齒輪測試機之機台結構如圖 3.8 所示。其中 X、Y、U、Z 等 4 個軸是採用現成之硬化滑軌，通常其表面硬度可達 HRC60 以上。R 軸因其運動是走圓弧軌道，並無現成之硬化滑軌可用，只能直接於基台上加工出圓弧軌道。X、Y、U 等 3 個軸為直線運動，各設有一組螺桿以做其機台之直線位置調整，並配上附有刻度之轉輪，可做刻度為 0.01mm 之行程位置微調，且各加裝一支 NPI LE0150-1A3 型光學尺，透過 NPI WE6800 型顯示器，可顯示至 $2\mu m$ 之位置精度。Z 軸為上下垂直方向之移動，因此設計一齒條搭配一主動齒輪，則只要該齒輪作旋轉運動即可調整主動齒輪系之整

體支架的上下位置，該齒輪軸亦搭配上附有刻度之轉輪，可做刻度為 0.01mm 之行程位置之微調。R 軸為垂直旋轉軸，因此設計一組蝸輪蝸桿以作 R 軸之旋轉角度位置之細調，再搭配上附有刻度之轉輪，可做 0.02 度之角度微調。X、Y、U 和 Z 軸之行程規格如下：

- X 軸(輸出端底座行程)：210mm
- Y 軸(輸入端前後行程)：210mm
- Z 軸(輸入端上下行程)：±80mm
- U 軸(輸出端前後行程)：165mm

輸出端工作台可於 R 軸滑座上做自 -10 弧度至 120 弧度範圍內之自由旋轉，以供傘齒輪等非平行軸齒輪對測試用，其精度如下：

- 定位精度：15 弧度-秒
- 重現精度：15 弧度-秒

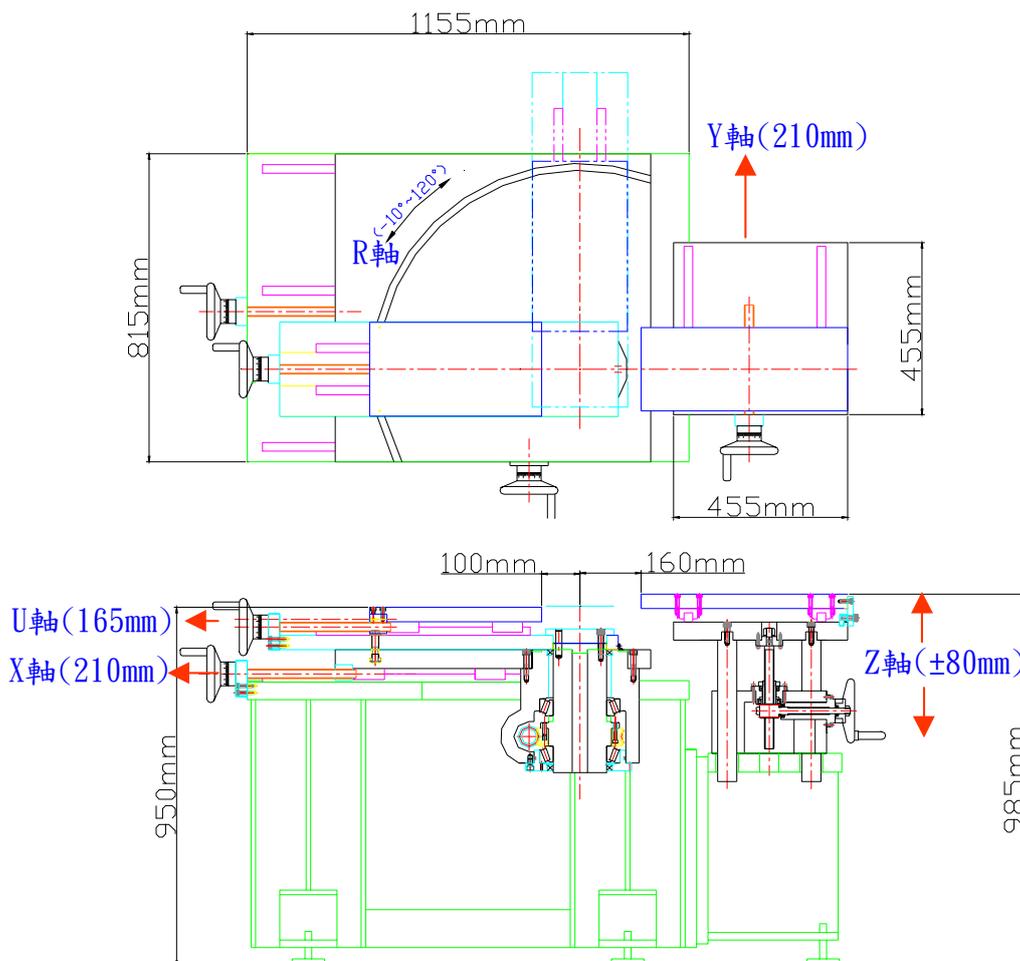


圖 3.8 泛用型齒輪測試機之機台結構圖

3.1.4 測試機製作及組立

整個機台是採系統外包方式，委託國內機械加工廠製作及組立，組立後之整部測試機結構如圖 3.9 所示，外觀如圖 3.10 所示，為便於齒輪傳動誤差數據之擷取及處理，另加一組個人電腦搭配前述測試機，如圖 3.11 所示。

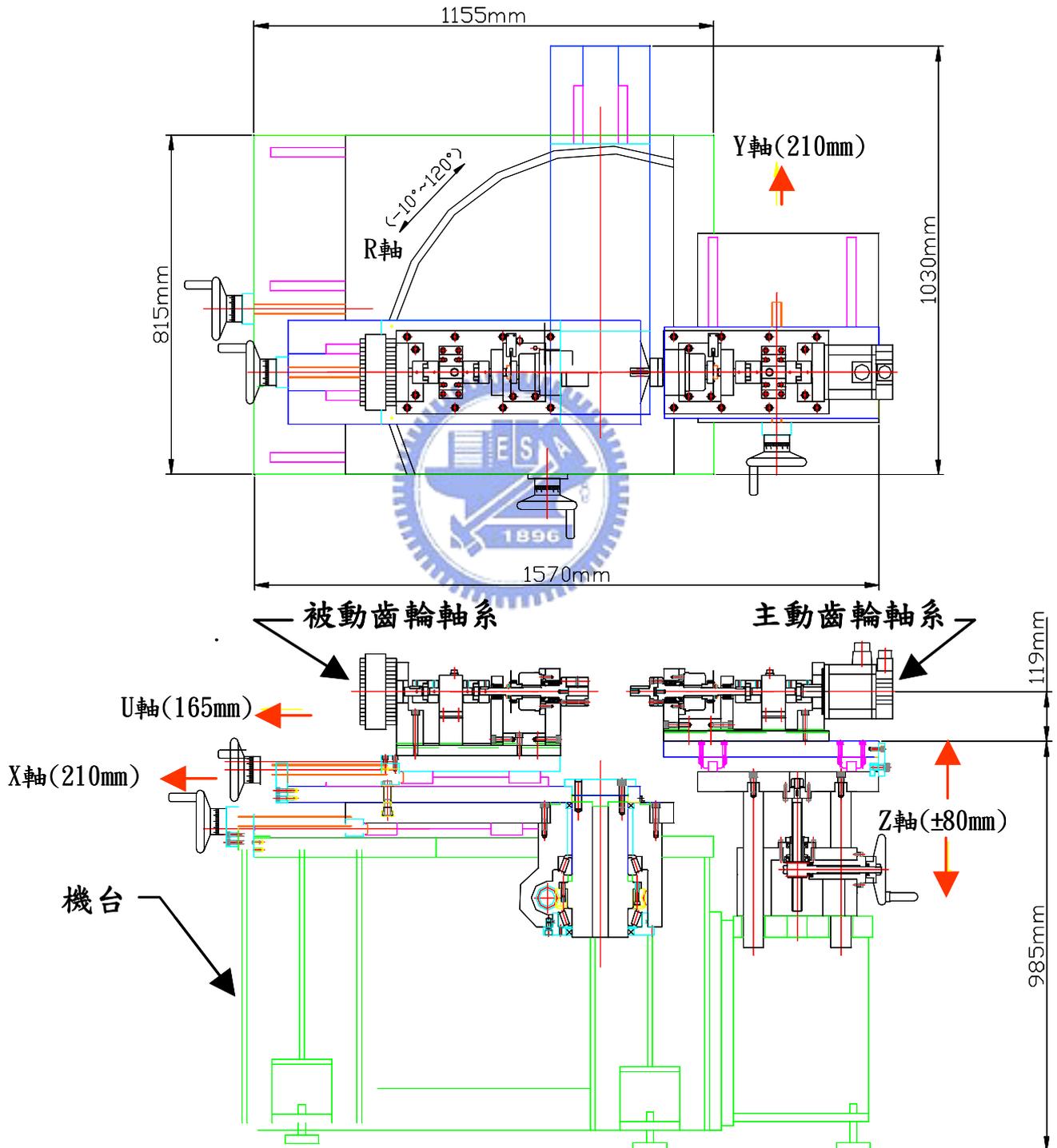


圖 3.9 泛用型齒輪測試機之結構圖



圖 3.10 九十二年六月組立完成之泛用型齒輪測試機照片



圖 3.11 九十三年五月發展完成之泛用型齒輪測試機照片
(另加一組個人電腦作齒輪傳動誤差之數據擷取及處理)

3.1.5 測試齒輪之安裝設計：

泛用型齒輪測試機之輸入軸端與輸出軸端均設計成凸緣，如圖 3.12 所示，隨測試齒輪之大小及形狀不同而可設計不同之齒輪接頭 (Adapter)。依本研究所用測試齒輪之齒輪接頭設計，如圖 3.13 所示，測試齒輪之安裝軸徑設計為 $\phi 20\text{mm}$ 外徑 $\times 36\text{mm}$ 長，直徑公差為 $+0\sim-0.005\text{mm}$ 。

3.2 齒輪傳動誤差數據擷取程式撰寫

泛用型齒輪測試機之輸入軸及輸出軸上各有一個角度編碼器，每一轉可產生 18,000 個脈波，再經海德漢(HEIDENHEIN)之 IK220 數據擷取卡，即可將每個脈波再分割成 $2^0\sim 2^{12}$ 等分(即 1~4096 等分)供選擇，各角度編碼器有一個零點(Home)可做為角度之量測基準點，使得每次之傳動誤差測試有可比較之起始角度位置基準。該數據擷取卡有兩個訊號輸入接頭，可供泛用型齒輪測試機之輸入軸及輸出軸上之角度編碼器訊號線插接，因此，本研究需撰寫數據擷取與處理之程式加以配合，如圖 3.14 及圖 3.15 所示，齒輪傳動誤差測試軟體程式須具備之功能如下：

- (1)可設定數據擷取之需求記錄筆數。
- (2)可設定由角度編碼器之零點開始記第一筆，或程式之開始執行時即開始記第一筆。
- (3)可設定測試齒輪之節圓半徑(或直徑)，以換算傳動角度誤差成長度單位(μm)。
- (4)可顯示總記錄筆數完成之時間。目前擷取每 20,000 筆數據約需 11.1 秒，即每筆約 0.000555 秒，亦即每秒約擷取 1800 筆數。在 10rpm 之轉速時，就模數 2mm $\times 27$ 齒之齒輪而言，每齒可擷取 400 筆數據；就模數 3mm $\times 18$ 齒之齒輪而言，每齒可擷取 600 筆數據。
- (5)具齒輪傳動誤差值之簡易曲線圖顯示功能，以方便於測試完成可立即顯示簡易之齒輪傳動誤差曲線圖。

整個數據擷取與處理之程式是以 Visual basic 語言撰寫，該程式所擷取與處理之數據檔，再利用 Excel 程式之功能處理轉換成所要表達之各種傳動誤差測試結果之圖表，如圖 4.2 所示。在數據擷取與處理之程式中，亦編入有簡易功能之傳動誤差圖，可於數據擷取完成立即顯示輸入端與輸出端編碼器所擷取之脈波數與轉動角度的關係，所擷取之數據如有問題，即可從該顯示之傳動誤差圖中察覺。



圖 3.12 泛用型齒輪測試機之輸入軸與輸出軸凸緣照片

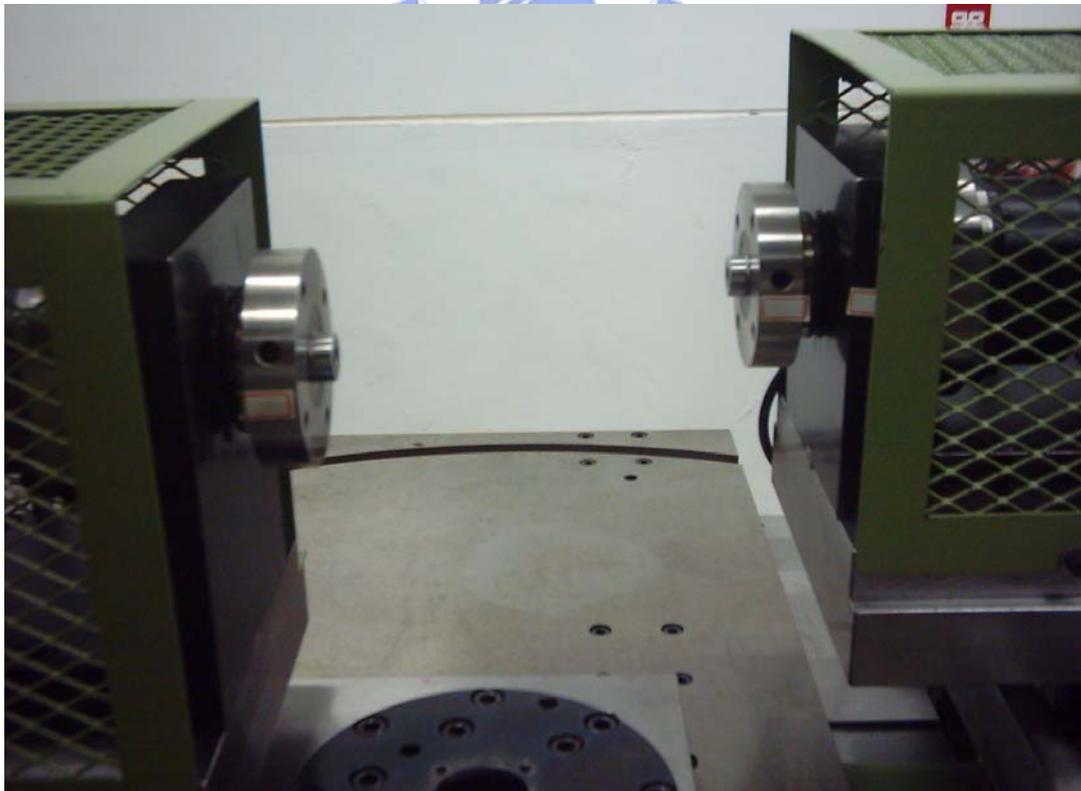


圖 3.13 本研究所用之輸入端齒輪接頭(右)與輸出端齒輪接頭(左)照片

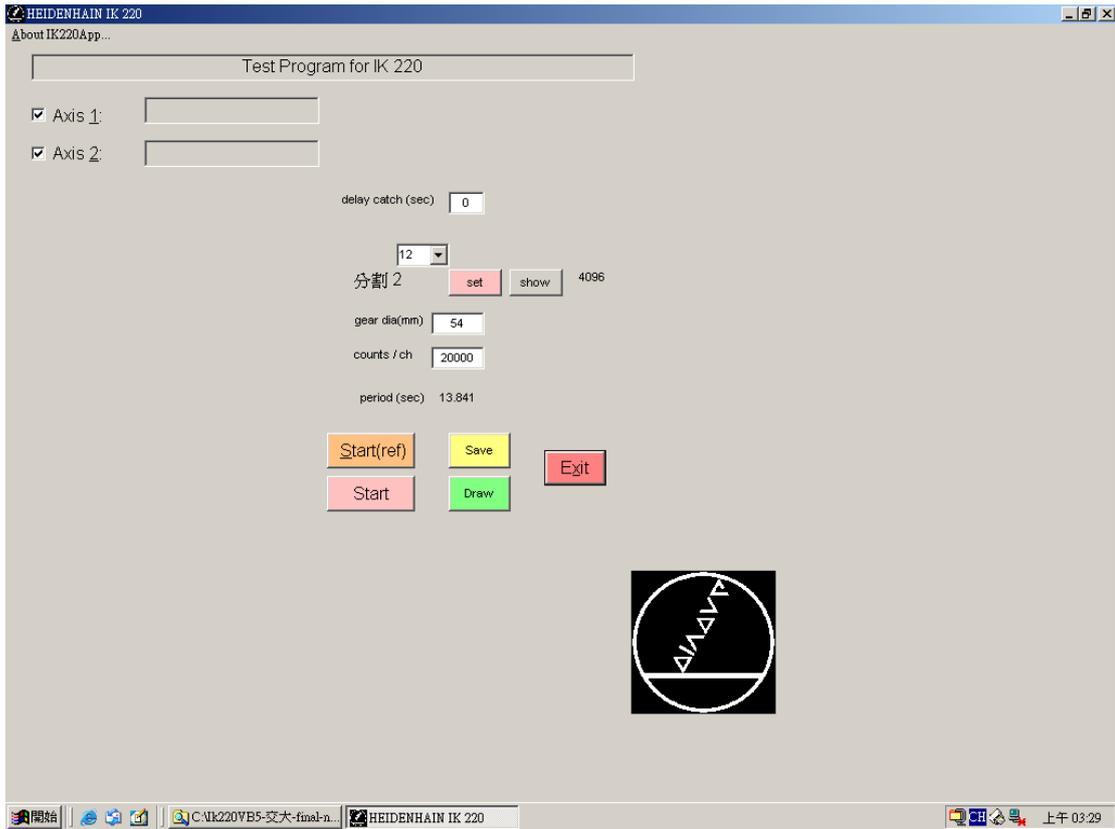


圖 3.14 齒輪傳動誤差測試軟體之操作輸入畫面

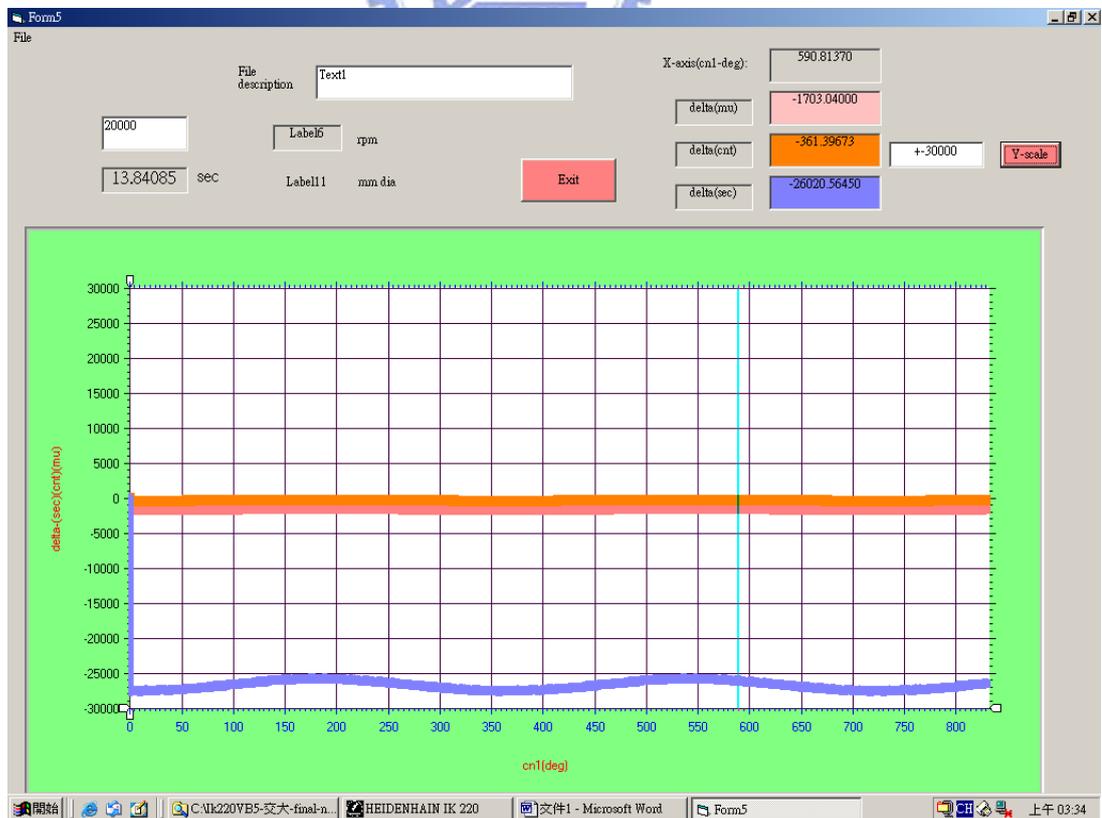


圖 3.15 齒輪傳動誤差測試軟體之測試結果顯示畫面

3.3 齒輪傳動誤差之測試分析規劃

齒輪傳動誤差之測試分析前須訂清楚測試分析之內容及測試齒輪基本參數，才能依此進行測試齒輪之設計及製作，以下分述齒輪傳動誤差之測試分析內容、測試齒輪之基本設計參數設定及測試齒輪設計與製作。

3.3.1 齒輪傳動誤差之測試分析內容

齒輪傳動誤差之測試分析共分下列三部分進行：

- (1) 受扭力負載之正齒輪傳動誤差測試分析，包含扭力負載、模數、齒數、材質等不同之齒輪傳動誤差測試分析，並進行塑膠主動齒輪配塑膠被動齒輪、鋼材主動齒輪配塑膠被動齒輪、鋼材主動齒輪配鋼材被動齒輪等不同齒輪材質配對之齒輪傳動誤差測試分析與比較。此部分為本論文研究之重點，亦花上大部分之測試分析時間在此部分，以期探討出扭力負載與齒輪傳動誤差之關係。
- (2) 不同中心距之正齒輪傳動誤差測試分析
- (3) 不同軸交角之正齒輪傳動誤差測試分析

3.3.2 測試齒輪之基本設計參數設定

為求測試分析之單純化，本研究測試之正齒輪做了下列之設定：

- (1) 主動齒輪及被動齒輪之齒數及所有齒形參數均設計相同。
- (2) 齒頂作較大幅度之倒角(0.15 倍模數)，使漸開線之齒冠高只剩 0.85 倍模數，以降低齒輪接觸率(約取 1.3)，使較大部份之轉動角範圍為單齒接觸，以利嚙合齒輪對之傳動誤差分析比較，且可避免因搬運或組立過程之碰撞，而產生毛頭。
- (3) 分別採用塑膠及鋼材做為測試齒輪之材料，讓塑膠齒輪承受扭力負載後，相對於鋼材齒輪有明顯之齒形變形差異，以凸顯其受扭力負載下之傳動誤差的影響差距。
- (4) 設計相同模數但不同齒數之齒輪，以呈現其齒數對扭力負載導致傳動誤差變化之影響。
- (5) 設計相同齒數但不同模數之齒輪，以呈現其模數對扭力負載導致傳動誤差變化之影響。
- (6) 因本研究所開發之泛用型齒輪測試機之負載容量有限，最多只能測到 12N-m，超過此負載容量馬達即跳機，為安全起見，本研究則以 10N-m 為扭力測試之上限。

3.3.3 測試齒輪之設計及製作

茲依 10N-m 為扭力測試上限，以規劃所需要之測試齒輪相關參數，而測試齒輪之考量條件如下：

- (1) 齒輪強度:在能承受 10N-m 之扭力負載，齒輪須盡可能有較大之受負載變形量發生，以凸顯其對齒輪傳動誤差之影響。
- (2) 壓力角:採用 20 度之加工壓力角，因其為目前最普遍之壓力角，較容易找到現成之滾刀。實際安裝測試時，因需有少許之齒隙，因此，實際工作壓力角會略大於加工壓力角。
- (3) 螺旋角:本研究之範圍為正齒輪，故螺旋角為 0 度。
- (4) 齒數:在不發生齒輪之齒形過切現象下，齒數盡可能減少，因齒數愈少則每齒之嚙合傳動角度愈大，愈容易看出各齒之傳動誤差之變化。同時亦特地設計不同齒數之齒輪，以比較其對受扭力負載所導致傳動誤差變化之影響。
- (5) 齒面寬:為求受扭力負載有較大之齒輪變形，以利凸顯其導致齒輪傳動誤差之影響，因此，齒面寬不宜過大，但亦不能小到會影響加工精度或造成加工夾持上之困難，特別是塑膠齒輪，且為方便比較，齒面寬均設定為 10mm。
- (6) 材質:鋼材齒輪均採用 AISI 4140 調質至 HRC27~32 之硬度，既有相當強度，且其硬度仍可於熱處理調質後再滾齒，以利加工精度之掌控。塑膠齒輪均採用 Nylon MC 工程塑膠材料，有相當強度及韌性。
- (7) 齒輪精度:以所選用之材質及滾齒所能作到之程度訂定，鋼材齒輪之精度等級設定為 AGMA 10 級，塑膠齒輪因材料剛性較差，加工時易變形，因此，只能設定為 AGMA 8 級。
- (8) 齒形修整:採用標準漸開線齒形，不做任何修整。
- (9) 導程修整:除做些許之隆齒(隆齒量 0.006~0.010mm)，以防齒輪之嚙合齒印落到齒面端部之銳邊上。
- (10) 齒隙:測試安裝之齒隙控制在 0.1~0.2mm。不同中心距之齒輪傳動誤差測試則不在此限，因同一對齒輪，其安裝之齒輪中心距加大，齒隙即會隨之增加。

前後共設計了十二種規格之齒輪，含模數 2mm、3mm 及 4mm，每種模數分別設計三種不同齒數之塑膠齒輪及一種齒數之鋼材齒輪，詳細之齒輪設計數據如表 3.2 至表 3.4 所示。滾齒之過程如圖 3.16 所示，齒輪之製作結果如圖 3.17 所示。

表 3.2 本研究所設計之測試齒輪數據表(模數 2mm)

項目		鋼材齒輪	塑膠齒輪		
齒輪代號		SM2-27T	PM2-27T	PM2-36T	PM2-45T
模數(mm)		2	2	2	2
齒數		27	27	36	45
壓力角(度)		20	20	20	20
螺旋角(度)		0	0	0	0
標準節圓直徑(mm)		54	54	72	90
基圓直徑(mm)		50.744	50.744	67.658	84.573
外徑(mm)		58	58	76	94
全齒高(mm)		4.5	4.5	4.5	4.5
齒面寬(mm)		10	10	10	10
轉位係數		0	0	0	0
齒頂倒角(mm)		0.3±0.1	0.3±0.1	0.3±0.1	0.3±0.1
齒厚	跨齒數	4	4	5	6
	跨齒厚(mm)	21.421/ 21.391	21.421/ 21.391	27.578/ 27.548	33.734/ 33.704
	量銷徑(mm)	3.456	3.456	3.456	3.456
	跨銷值(mm)	58.717/ 58.642	58.717/ 58.642	76.836/ 76.758	94.796/ 94.717
標準中心距(mm)		54	54	72	90
刀尖圓角半徑(mm)		0.5	0.5	0.5	0.5
漸開線起始圓直徑(mm)		50.8	50.8	67.7	84.6
測試安裝單邊背隙(mm)		0.05/0.10	0.05/0.10	0.05/0.10	0.05/0.10
隆齒量(mm)		0.006/ 0.010	0.006/ 0.010	0.006/ 0.010	0.006/ 0.010
精度等級		AGMA 10 級	AGMA 8 級	AGMA 8 級	AGMA 8 級
加工方法		滾齒	滾齒	滾齒	滾齒
製作數量(個)		3	3	3	3
材質		AISI 4140 調質至 HRC27~32	Nylon MC		

表 3.3 本研究所設計之測試齒輪數據表(模數 3mm)

項目		鋼材齒輪	塑膠齒輪		
齒輪代號		SM3-18T	PM3-18T	PM3-24T	PM3-30T
模數(mm)		3	3	3	3
齒數		18	18	24	30
壓力角(度)		20	20	20	20
螺旋角(度)		0	0	0	0
標準節圓直徑(mm)		54	54	72	90
基圓直徑(mm)		50.744	50.744	67.658	84.573
外徑(mm)		60	60	78	96
全齒高(mm)		6.75	6.75	6.75	6.75
齒面寬(mm)		10	10	10	10
轉位係數		0	0	0	0
齒頂倒角(mm)		0.45±0.1	0.45±0.1	0.45±0.1	0.45±0.1
齒厚	跨齒數	3	3	4	4
	跨齒厚(mm)	22.897/ 22.867	22.897/ 22.867	32.006/ 31.976	32.258/ 32.228
	量銷徑(mm)	5.184	5.184	5.184	5.184
	跨銷值(mm)	61.152/ 61.081	61.152/ 61.081	79.199/ 79.125	97.231/ 97.155
標準中心距(mm)		54	54	72	90
刀尖圓角半徑(mm)		0.5	0.5	0.5	0.5
漸開線起始圓直徑(mm)		50.8	50.8	67.7	84.6
測試安裝單邊背隙(mm)		0.05/0.10	0.05/0.10	0.05/0.10	0.05/0.10
隆齒量(mm)		0.006/ 0.010	0.006/ 0.010	0.006/ 0.010	0.006/ 0.010
精度等級		AGMA 10 級	AGMA 8 級	AGMA 8 級	AGMA 8 級
加工方法		滾齒	滾齒	滾齒	滾齒
製作數量(個)		3	3	3	3
材質		AISI 4140 調質至 HRC27~32	Nylon MC		

表 3.4 本研究所設計之測試齒輪數據表(模數 4mm)

項目		鋼材齒輪	塑膠齒輪		
齒輪代號		SM4-18T	PM4-18T	PM4-24T	PM4-30T
模數(mm)		4	4	4	4
齒數		18	18	24	30
壓力角(度)		20	20	20	20
螺旋角(度)		0	0	0	0
標準節圓直徑(mm)		72	72	96	120
基圓直徑(mm)		67.658	67.658	90.211	112.763
外徑(mm)		80	80	104	128
全齒高(mm)		9	9	9	9
齒面寬(mm)		10	10	10	10
轉位係數		0	0	0	0
齒頂倒角(mm)		0.6±0.1	0.6±0.1	0.6±0.1	0.6±0.1
齒厚	跨齒數	3	3	4	4
	跨齒厚(mm)	30.530/ 30.500	30.530/ 30.500	42.674/ 42.644	43.011/ 42.981
	量銷徑(mm)	6.912	6.912	6.912	6.912
	跨銷值(mm)	81.536/ 81.465	81.536/ 81.465	105.599/ 105.525	129.641/ 129.565
標準中心距(mm)		72	72	96	120
刀尖圓角半徑(mm)		0.5	0.5	0.5	0.5
漸開線起始圓直徑(mm)		67.7	67.7	90.3	112.8
測試安裝單邊背隙(mm)		0.05/0.10	0.05/0.10	0.05/0.10	0.05/0.10
隆齒量(mm)		0.006/ 0.010	0.006/ 0.010	0.006/ 0.010	0.006/ 0.010
精度等級		AGMA 10 級	AGMA 8 級	AGMA 8 級	AGMA 8 級
加工方法		滾齒	滾齒	滾齒	滾齒
製作數量(個)		3	3	3	3
材質		AISI 4140 調質至 HRC27~32	Nylon MC		



圖 3.16 測試齒輪之滾齒加工照片

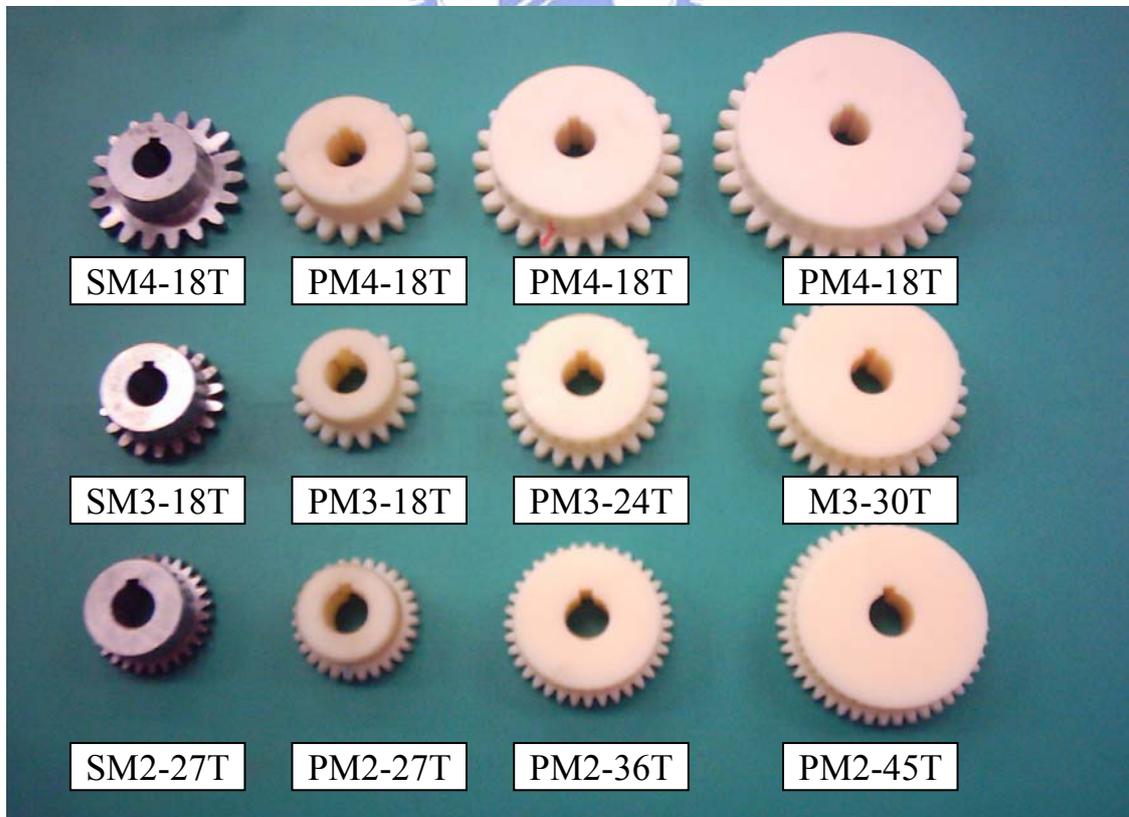


圖 3.17 測試齒輪之製作結果照片

3.4 齒輪傳動誤差之測試條件設定

在測試前須進行機台精度之校驗，並明訂承受扭力負載之正齒輪其傳動誤差測試條件與細節，包含扭力、轉速及角度編碼器之脈波分割摺數 (Fold)，以利測試結果之比較。因此，需先針對扭力、轉速及角度編碼器之脈波分割摺數等條件分別做不同之測試與比較。

3.4.1 測試前之校驗

齒輪傳動誤差測試前需將所要測試之齒輪接頭裝上，然後再用千分表做平行度及偏擺之校驗，此平行度校驗包含水平方向之平行度及垂直方向之平行度，如圖 3.18 及圖 3.19 所示，以確保測試齒輪之組立後水平方向及垂直方向之平行度能控制在 $10\mu\text{m}$ 以內。偏擺校驗之千分表架設同水平方向平行度校驗，如圖 3.16 所示，差別只是水平方向平行度校驗時，是移動滑座，使量測之齒輪接頭隨左右移動，以查看千分表之指針變動量，而偏擺校驗是慢速轉動齒輪接頭一圈(360 度)，查看千分表之指針變動量，偏擺亦必須控制在 $10\mu\text{m}$ 以內。



圖 3.18 齒輪接頭安裝之平行度校驗(水平方向)照片



圖 3.19 齒輪接頭安裝之平行度校驗(垂直方向)照片

3.4.2 測試扭力的決定

依本研究所開發之泛用型齒輪測試機的磁粉煞車之扭力容量為 25N-m，但馬達轉速在 10rpm 連續運轉下，所能提供最大扭力為 12N-m，超過此扭力，則該齒輪測試機因有保護馬達過電流之安全設定，即會自動跳機，且轉速在 10rpm 下扭力愈大則轉速愈不穩定，因此，本研究即以 10N-m 為測試扭力負載之上限。為求測試齒輪傳動誤差與承受扭力間之關係，每間隔 2N-m 做為測試扭力之增量，亦即每一對齒輪分別於 0N-m、2N-m、4N-m、6N-m、8N-m 及 10N-m 等扭力負載下，量測齒輪對之傳動誤差。對於模數為 2mm、3mm 及 4mm 之鋼材齒輪，因其承受 10 N-m 之扭力負載時，齒輪之齒形變形相當小，因此，鋼材齒輪配鋼齒輪在承受 10N-m 及 0N-m 之扭力負載狀況下，其傳動誤差應相差較小，而對塑膠齒輪而言，當承受 10N-m 之扭力齒輪之變形已是相當顯著，因此，對於鋼材齒輪配塑膠齒輪在承受扭力負載為 10N-m 及 0N-m 時，齒輪對之傳動誤差應有較大之差異，而對塑膠齒輪配塑膠齒輪在承受相同扭力負載之狀況下，則齒輪對之傳動誤差亦應有較大之差異。

對不同中心距及不同軸交角之齒輪傳動誤差測試，則以 0N-m、5N-m 及 10N-m 為其測試扭力負載。

3.4.3 測試轉速的決定

待測齒輪對若以 10N-m 為扭力負載，分別測試各種材質搭配之模數 2mm 齒輪對，亦即模數為 2mm 及齒數為 27 齒之塑膠齒輪配塑膠齒輪(PPM2-27T)、模數為 2mm 及齒數為 27 齒之鋼材齒輪配塑膠齒輪(SPM2-27T)、模數為 2mm 及齒數為 27 齒之鋼材齒輪配鋼材齒輪(SSM2-27T)之齒輪對，在轉速分別為 10rpm、20rpm、30rpm 及 60rpm 下，量測各齒輪對之齒輪傳動誤差，以了解轉速對齒輪傳動誤差之影響，其齒輪傳動誤差之測試結果如圖 3.20 至圖 3.25 所示。由此測試結果可知，當齒輪之轉速愈高，齒輪嚙合傳動所產生之振動愈明顯，例如齒輪之轉速在 20rpm 與 10rpm 下，測試結果顯示齒輪傳動誤差已可看出有些微之差異，而齒輪之轉速為 30rpm 與 10rpm 時，則齒輪傳動誤差之差異就更明顯，至於齒輪之轉速為 60rpm 與 10rpm 相比較，顯示兩者之齒輪傳動誤差之差異更大。若以扭力負載為 10N-m，齒輪之轉速如低過 10rpm，則其轉速之跳動亦明顯加大。測試結果顯示，齒輪之扭力負載在 10N-m 和轉速 10rpm 時，其轉速大致可維持在 10 ± 0.3 rpm 內，因此，本研究決定以 10rpm 做為齒輪傳動誤差之測試轉速。

3.4.4 角度編碼器之脈波分割摺數的決定

由於本研究所使用之角度編碼器每轉一圈可輸出 18,000 個脈波，即每一個脈波為 0.02 度，HEIDENHEIN 廠牌之 IK220 數據擷取卡為一個 12 位元 (Bit) 之晶片，可將所擷取到之每個脈波再分割成 0~12 摺數，亦即分割成 $2^0 \sim 2^{12}$ (即 1~4096) 等分，因此，角度編碼器之解析度可達到 0.00000488 弧度 (0.017568 弧度秒)。若每個脈波分別取 0、4、8、12 分割摺數 (Fold)，則模數為 3mm 及齒數為 18 齒之塑膠主動齒輪搭配塑膠被動齒輪 (PPM3-18T) 測試後，其齒輪對之傳動誤差測試結果如圖 3.26 所示，基本上愈高之分割摺數，則齒輪之傳動誤差曲線愈精細，因此，本研究在齒輪傳動誤差測試時，每個脈波均取 12 分割摺數，亦即可分割成 2^{12} (=4096) 等分。

3.4.5 數據擷取之角度範圍

每次測試數據之擷取時，被測試之齒輪至少需有完整之一整圈 (即 360 度) 且必須在一致之齒輪嚙合起始角度位置，因每一齒輪之齒部中心與角度

編碼器零點(即安裝角度零點)之角度關係並無一致，故每次測試數據之擷取至少需取 1.5 圈以上，以利可取其中之一整圈之實驗數據作比較，因此，本研究在設定每次擷取記錄為 20,000 筆數據(含輸入端及輸出端)，即相當於數據擷取角度約為 660 度，但為了方便比較，通常程式設立從基準點才開始擷取數據，因此，基準點前之擷取記錄均為 0，真正擷取之有效數據角度約 600~650 度不等，依按下開始記錄點與基準點之角度位置差、輸入與輸出之基準點角度位置差及數據擷取之速度而定。數據擷取之速度則是取決於電腦之運算速度、數據擷取卡之數據處理速度及數據擷取程式設計，目前本泛用型齒輪測試機之角度編碼器脈波數據擷取之速度可達每秒 1800 次。

3.4.6 數據之擷取組數

為求掌握測試結果所擷取到之數據的可信度，每次測試至少擷取五組之數據，從該五組之擷取數據中，可查閱其輸入齒輪與輸出齒輪之基準點相位角變動量，正常基準點相位角變動量應在 0.05 度以內，如超過即屬異常須重測。如基準點相位角愈變愈大或愈變愈小，即表示輸入軸與輸出軸之編碼器可能至少有一個打滑或齒輪嚙合部位有異常的急速磨耗。

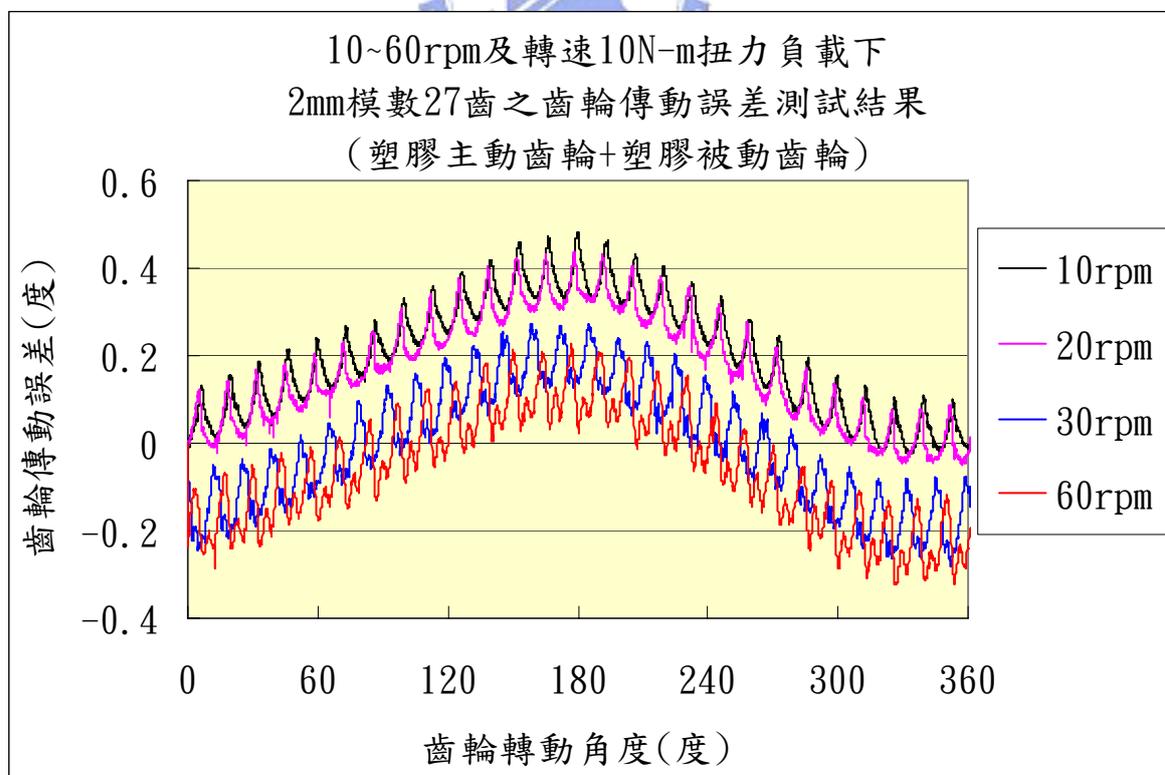


圖 3.20 PPM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(0°~360°)

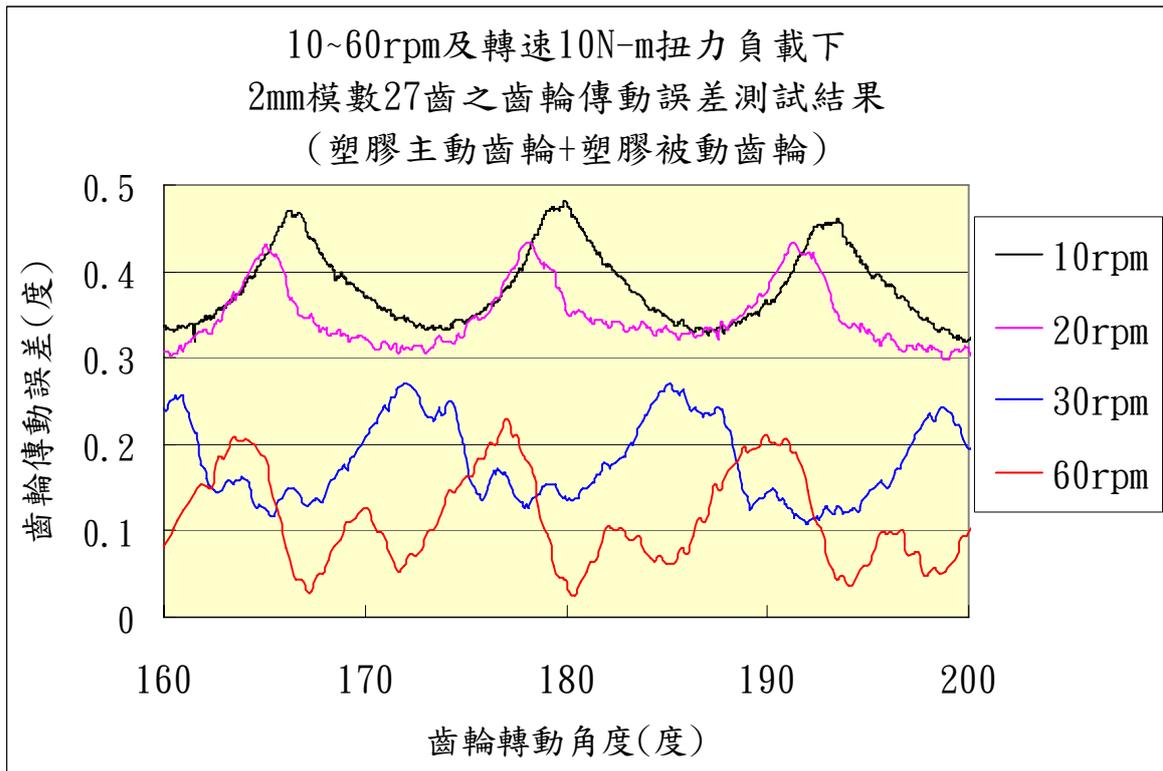


圖 3.21 PPM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(160°~200°)

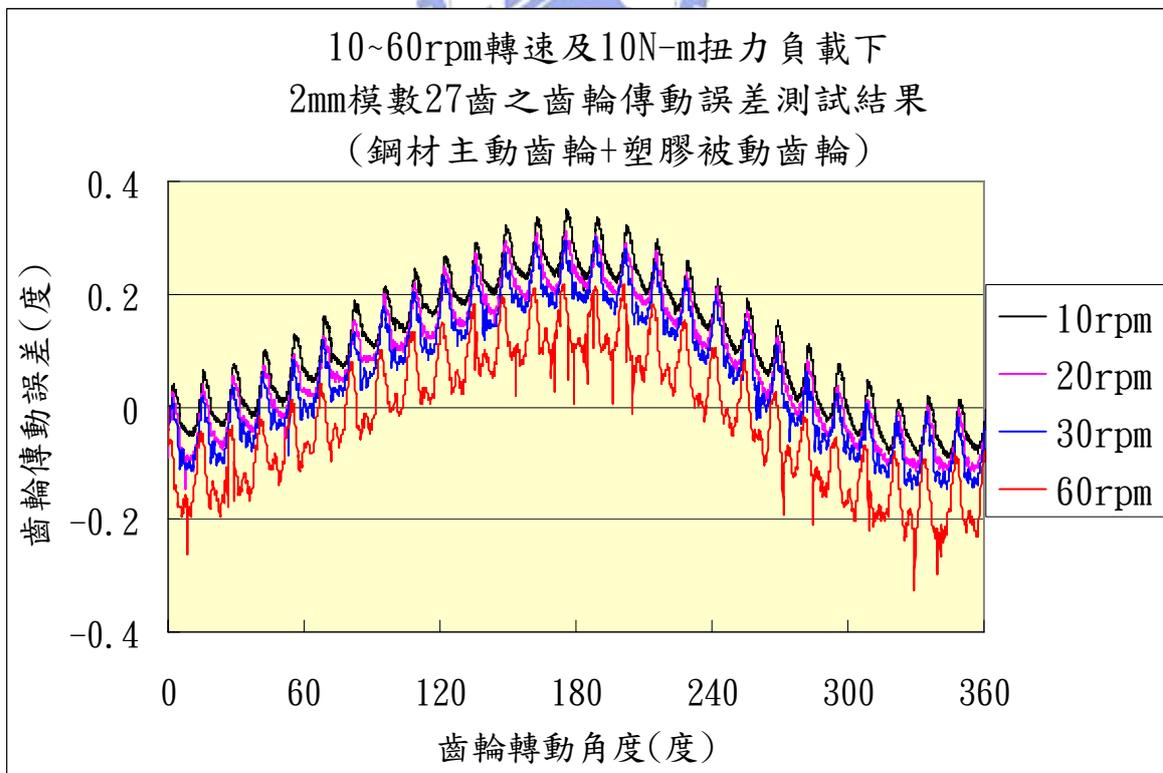


圖 3.22 SPM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(0°~360°)

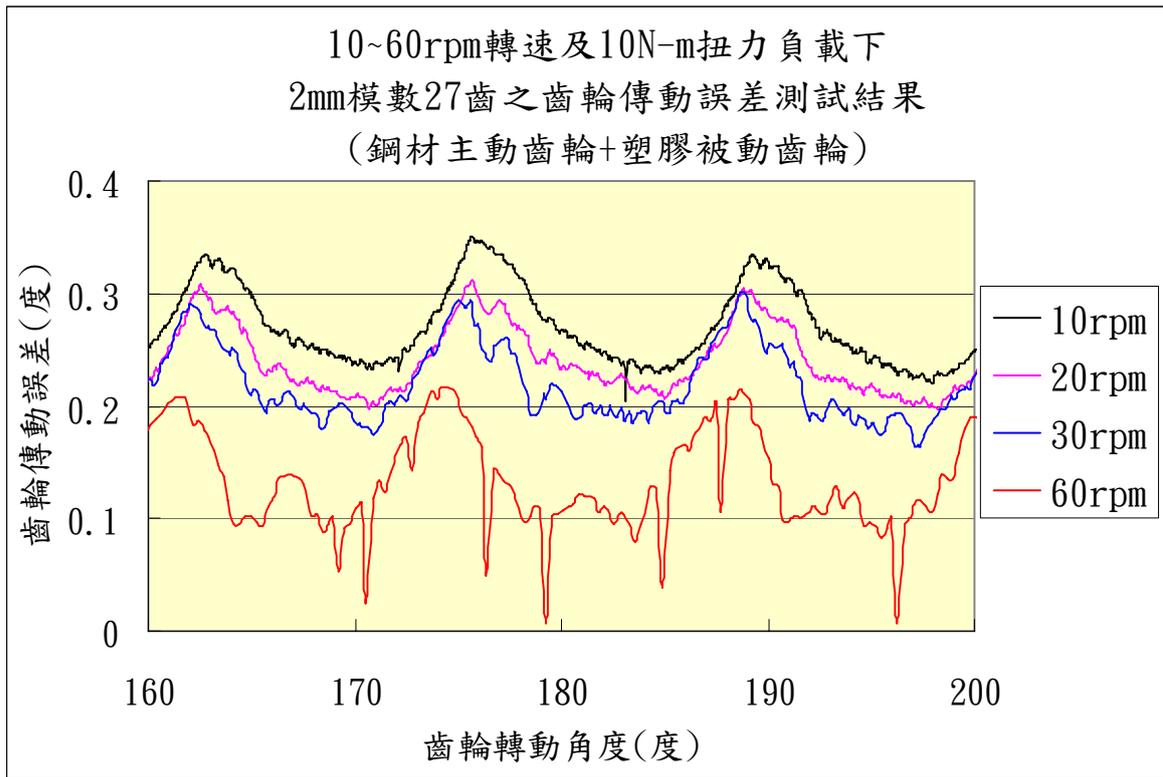


圖 3.23 SPM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(160°~200°)

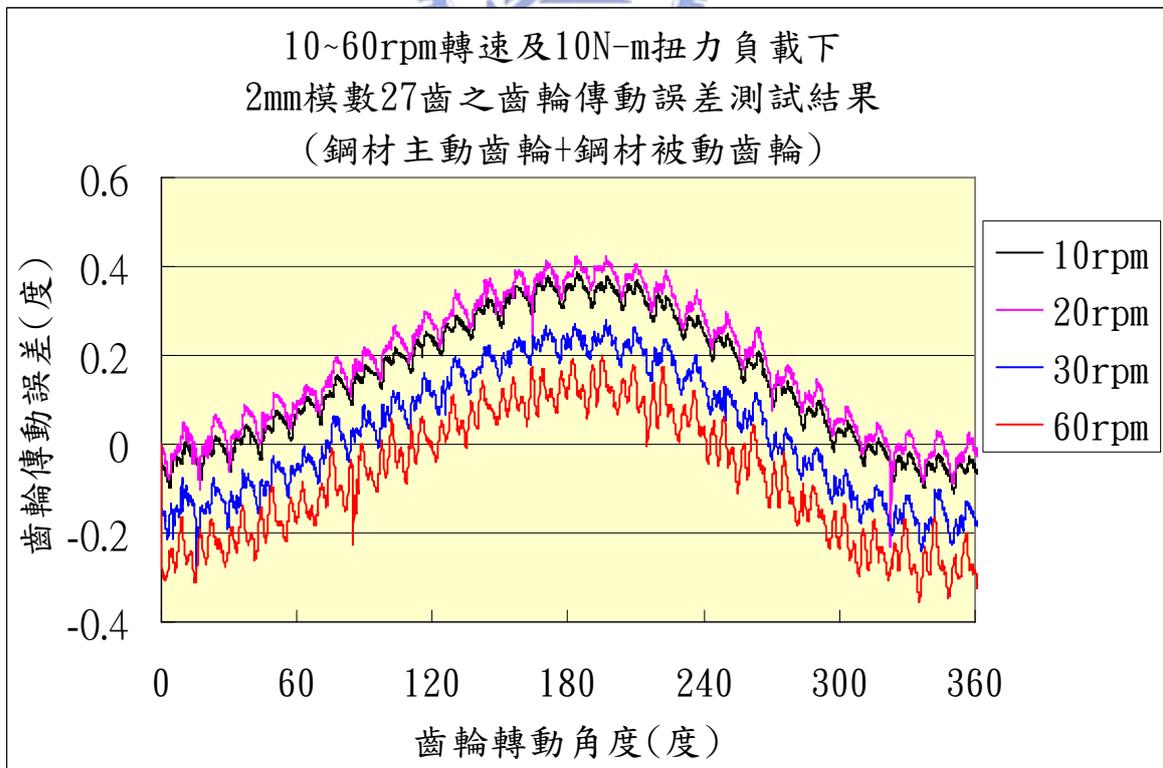


圖 3.24 SSM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(0°~360°)

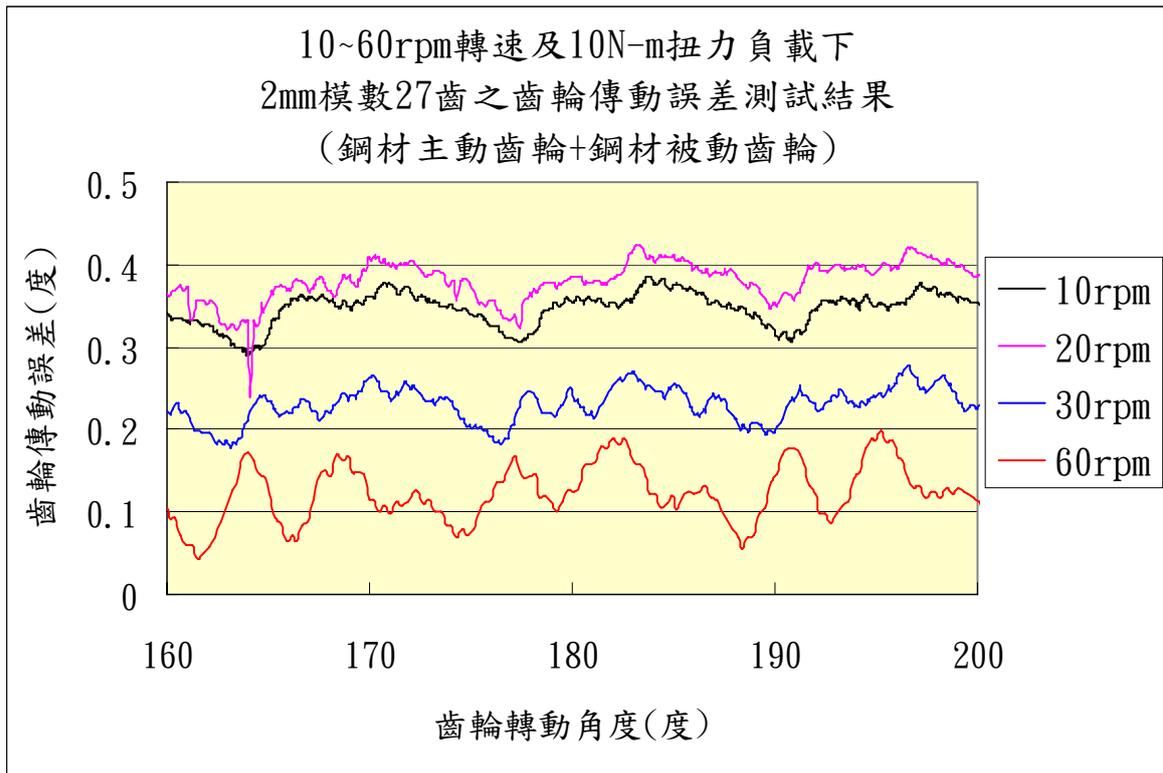


圖 3.25 SSM2-27T 齒輪對 10~60rpm 之傳動誤差測試結果(160°~200°)

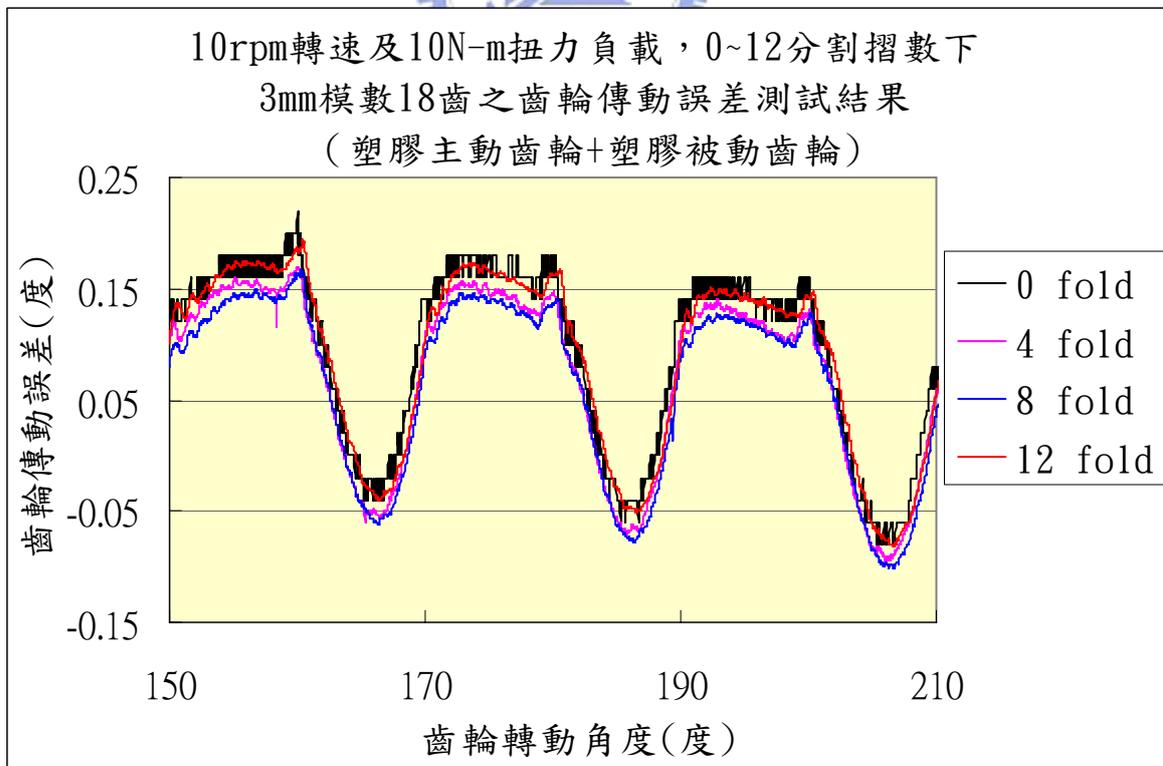


圖 3.26 PPM3-18T 齒輪對 0~12 分割摺數之傳動誤差測試結果

第四章 受扭力負載之正齒輪的傳動誤差測試及分析

4.1 受扭力負載之正齒輪的傳動誤差測試經過

本研究各正齒輪對之傳動誤差實際測試日期及其測試數據組數如表 4.1 至表 4.3 所示，亦即每個齒輪對至少測試 10 次以上，即前後共測試 10 組以上之數據，其中每組數據含 0N-m、2N-m、4N-m、6N-m、8N-m 及 10N-m 等扭力負載。測試參數如下：

- (1) 轉速:10rpm
- (2) 扭力負載: 0N-m、2N-m、4N-m、6N-m、8N-m 及 10N-m
- (3) 齒輪對: PPM2-27T、PPM2-36T、PPM2-45T、SPM2-27T、SSM2-27T、PPM3-18T、PM3-24T、PPM3-30T、SPM3-18T、SSM3-18T、PPM4-18T、PPM4-24T、PPM4-30T、SPM4-18T 及 SSM4-18T 等 15 對齒輪，安裝情形如圖 4.1 所示。
- (4) 摺數(Fold):12
- (5) 齒隙:0.2mm
- (6) 每次測試記錄之筆數:20000 筆
- (7) 記錄角度範圍:約 600 度
- (8) 潤滑:無



表 4.1 模數 2mm 正齒輪對的傳動誤差之主要測試日期及測試數據組數

模數 (mm)		2	2	2	2	2
齒數		27	36	45	27	27
齒輪對代號		PPM2-27T	PPM2-36T	PPM2-45T	SPM2-27T	SSM2-27T
材質	主動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材	鋼材
	被動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材
93 年 10 月 24 日		5 組數據			5 組數據	5 組數據
93 年 10 月 28 日		5 組數據			5 組數據	5 組數據
93 年 10 月 31 日						5 組數據
94 年 03 月 20 日			5 組數據	5 組數據		
94 年 03 月 26 日			5 組數據			
94 年 03 月 27 日		5 組數據			5 組數據	5 組數據

表 4.2 模數 3mm 正齒輪對的傳動誤差之主要測試日期及測試數據組數

模數 (mm)		3	3	3	3	3
齒數		18	24	30	18	18
齒輪對代號		PPM3-18T	PPM3-24T	PPM3-30T	SPM3-18T	SSM3-18T
材質	主動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材	鋼材
	被動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材
93 年 07 月 26 日		5 組數據			5 組數據	
93 年 07 月 27 日		5 組數據			5 組數據	5 組數據
93 年 10 月 30 日						5 組數據
93 年 10 月 31 日						5 組數據
94 年 02 月 07 日		5 組數據				
94 年 03 月 21 日			5 組數據	5 組數據		
94 年 03 月 27 日		5 組數據			5 組數據	5 組數據
94 年 04 月 09 日			5 組數據	5 組數據		

表 4.3 模數 4mm 正齒輪對的傳動誤差之主要測試日期及測試數據組數

模數 (mm)		4	4	4	4	4
齒數		18	24	30	18	18
齒輪對代號		PPM4-18T	PPM4-24T	PPM4-30T	SPM4-18T	SSM4-18T
材質	主動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材	鋼材
	被動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材
93 年 07 月 21 日		5 組數據			5 組數據	
93 年 08 月 06 日						5 組數據
93 年 12 月 25 日		5 組數據			5 組數據	5 組數據
94 年 03 月 26 日			5 組數據	5 組數據		
94 年 03 月 27 日		5 組數據			5 組數據	5 組數據
94 年 04 月 03 日						5 組數據
94 年 04 月 04 日		5 組數據			5 組數據	
94 年 04 月 16 日			5 組數據	5 組數據		

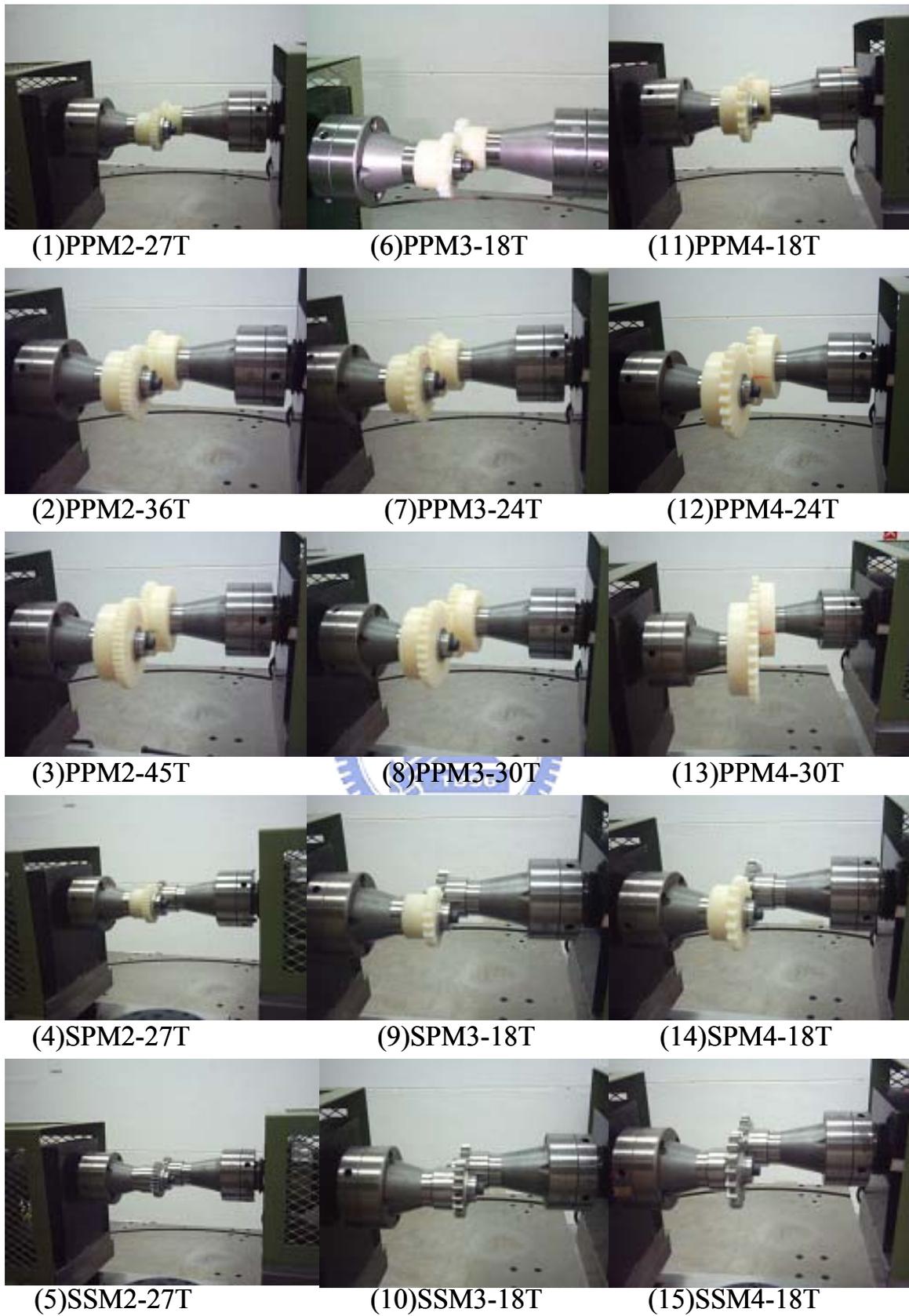


圖 4.1 各正齒輪對之測試安裝照片

4.2 受扭力負載之正齒輪的傳動誤差測試結果

表 4.1 至表 4.3 所示之正齒輪配對，分別承受 0N-m、2N-m、4N-m、6N-m、8N-m 及 10N-m 等不同扭力負載，各齒輪對之傳動誤差實驗測試結果如圖 4.2 至圖 4.31 所示，其中分別顯示 0 到 360 度內之傳動誤差及其近正弦波之波頂的三個齒之傳動誤差曲線，如該齒剛好近 360 度，而無完整之單齒傳動誤差波形呈現，則以最接近坡谷之齒替代之。因 360 度內之傳動誤差正弦波中最接近波頂(或波谷)之齒其單齒傳動誤差曲線成較水平狀態，比較容易正確估算出其單齒傳動誤差之波高，因此，在下一章節之齒輪傳動誤差測試結果分析時即以此最近正弦波之波頂(或波谷)之齒為單齒傳動誤差值(波高)之比較基準。從圖 4.2 至圖 4.31 所示之測試結果，可看出下列現象：

- (1) 各正齒輪配對之 360 度時之傳動誤差大正弦波大致上又回到 0 度時之高度位置，呈現完整之週期性。
- (2) 不同扭力負載下，同一對齒輪之傳動誤差曲線，360 度傳動誤差大正弦波之波高大致上無明顯隨扭力負載增加，此表示本測試齒輪之安裝軸結構剛性夠，到 10N-m 扭力負載仍無明顯彎曲變形而導致傳動誤差大正弦波之波高整加。
- (3) 各齒之小波則隨著扭力負載增加有明顯之單齒傳動誤差波高變化，此顯示隨扭力負載增加，齒形有明顯改變，而導致單齒傳動誤差波高明顯變動，波高變動之劇烈程度，與其齒輪對之齒部剛性有關。
- (4) 從圖 4.13、圖 4.19 及圖 4.21 等三張圖作比較，可看出鋼材主動齒輪配塑膠被動齒輪由於齒受力變形之程度不一，受力變形後主動齒輪及被動齒輪之壓力角產生差異，導致單齒之傳動誤差曲線兩邊不對稱，略往一邊傾斜。同理，圖 4.3、圖 4.9 及圖 4.11 等三張圖與圖 4.23、圖 4.29 及圖 4.31 等三張圖亦有相同現象。
- (5) 從圖 4.27 (PPM4-30T 齒輪對之測試結果)可看出，隨扭力負載之增大，原單齒傳動誤差之波高反而漸減少，原波峰漸下降，且原波谷卻逐漸上升，如扭力負載繼續增大，則其原波谷即會漸漸變成波峰，此正顯現齒形適度修整是可以讓受扭力負載時反而傳動誤差減小。本對齒輪製作時雖未特地作齒形修整，加工結果之齒形偏差，受 10N-m 扭力負載時，反而改善 0N-m 扭力負載時之傳動誤差。

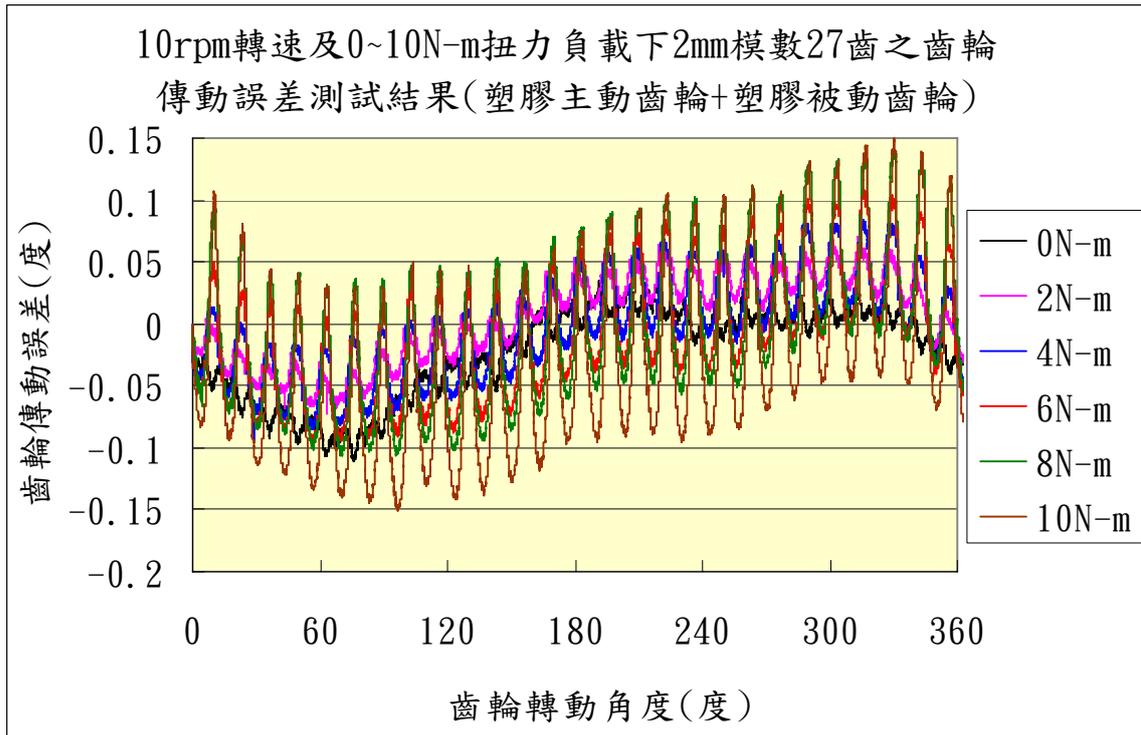


圖 4.2 PPM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0° ~ 360°)

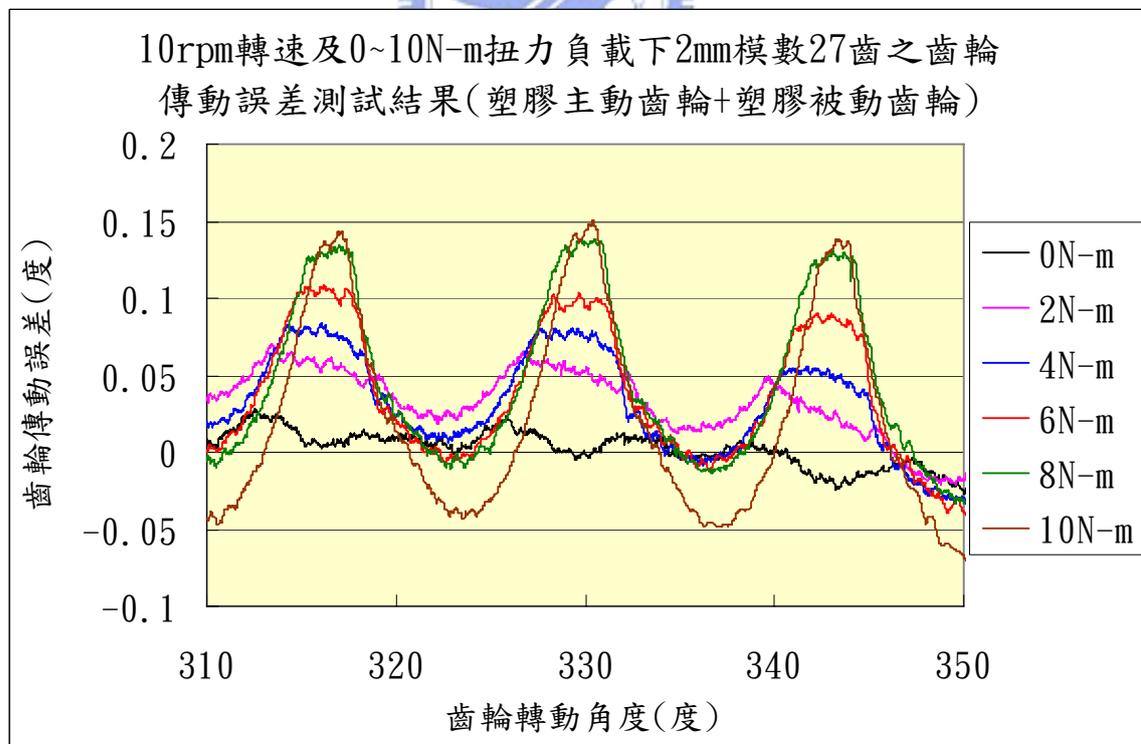


圖 4.3 PPM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(310° ~ 350°)

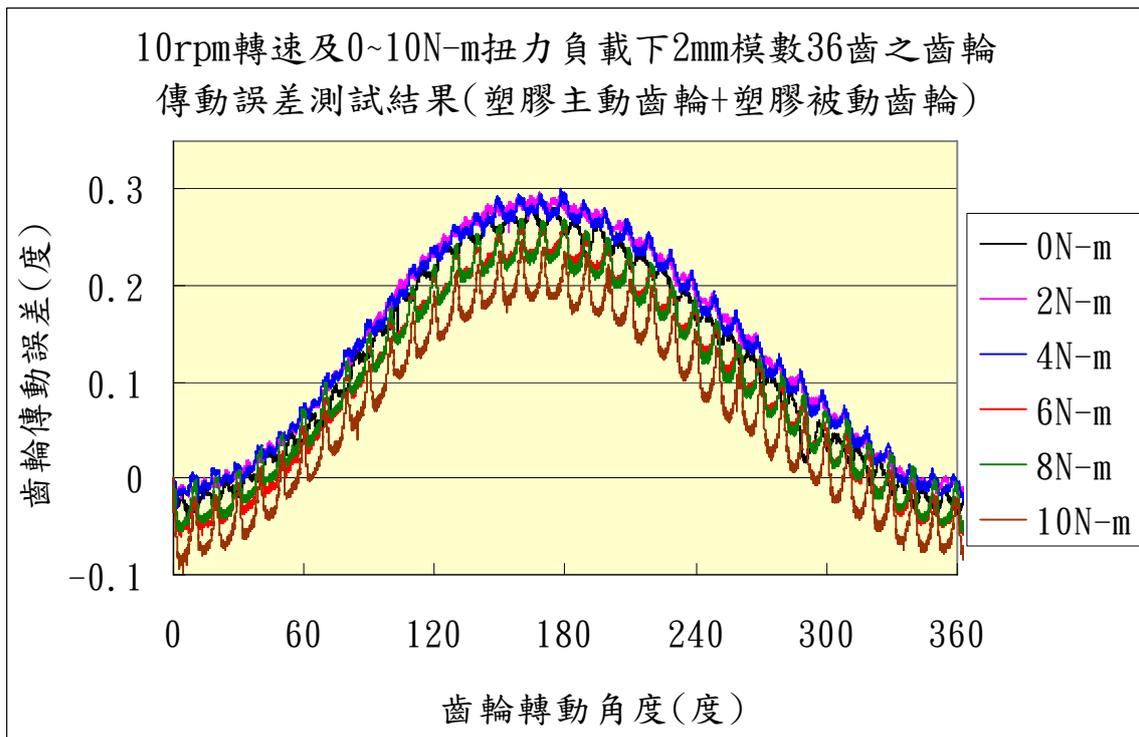


圖 4.4 PPM2-36T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0° ~ 360°)

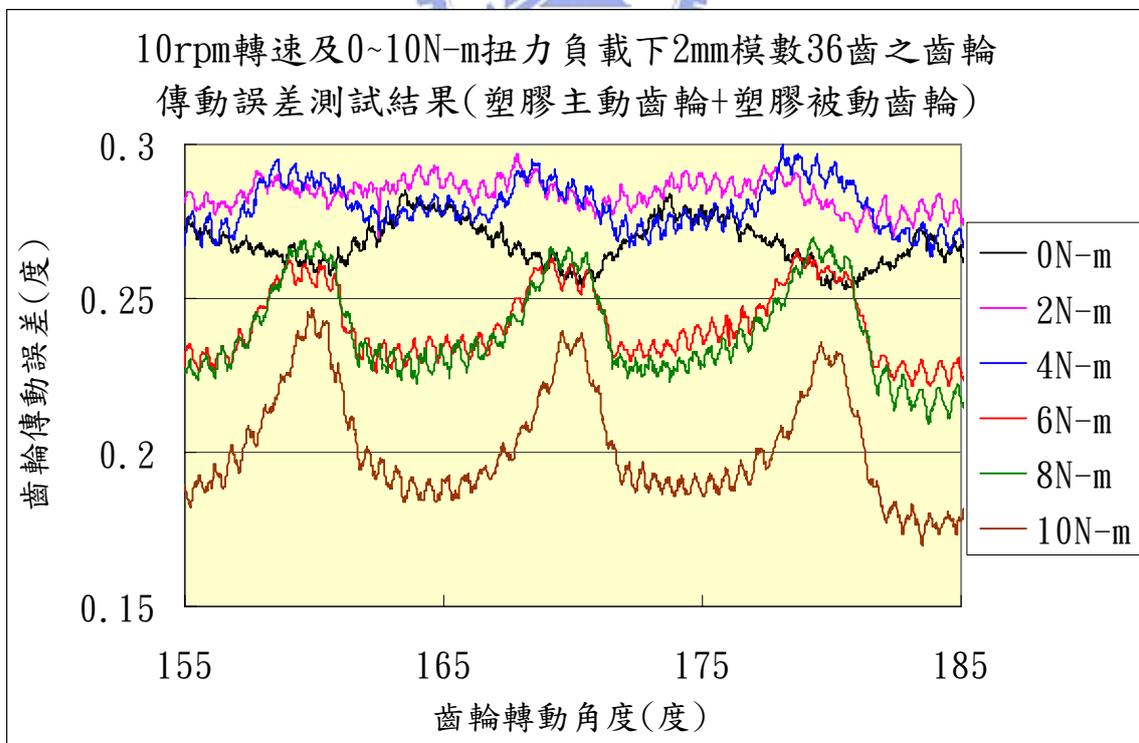


圖 4.5 PPM2-36T 齒輪對之傳動誤差測試結果(155° ~ 185°)

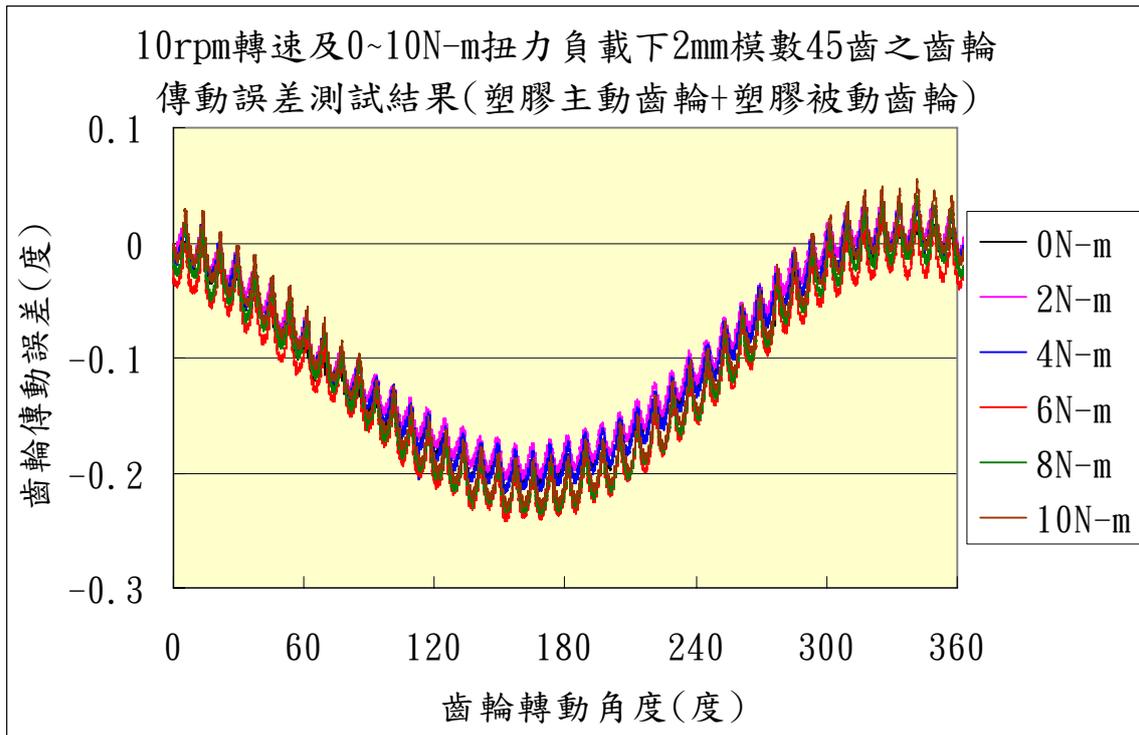


圖 4.6 PPM2-45T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)

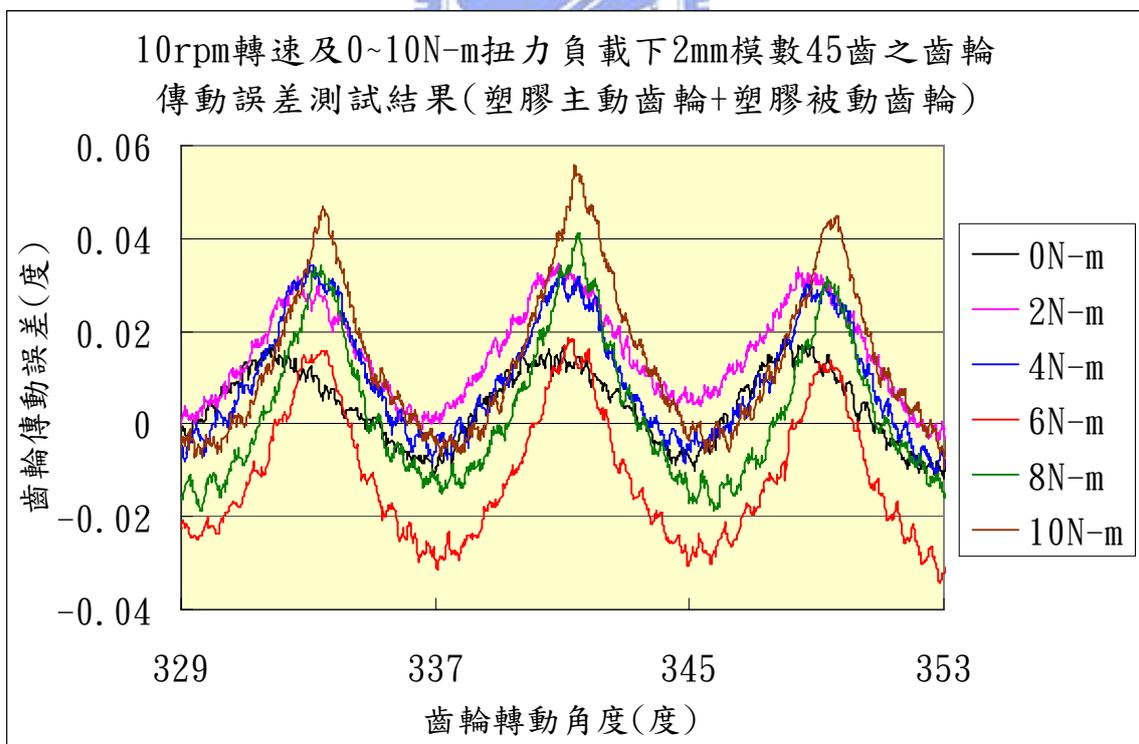


圖 4.7 PPM2-45T 齒輪對之傳動誤差測試結果(329°~353°)

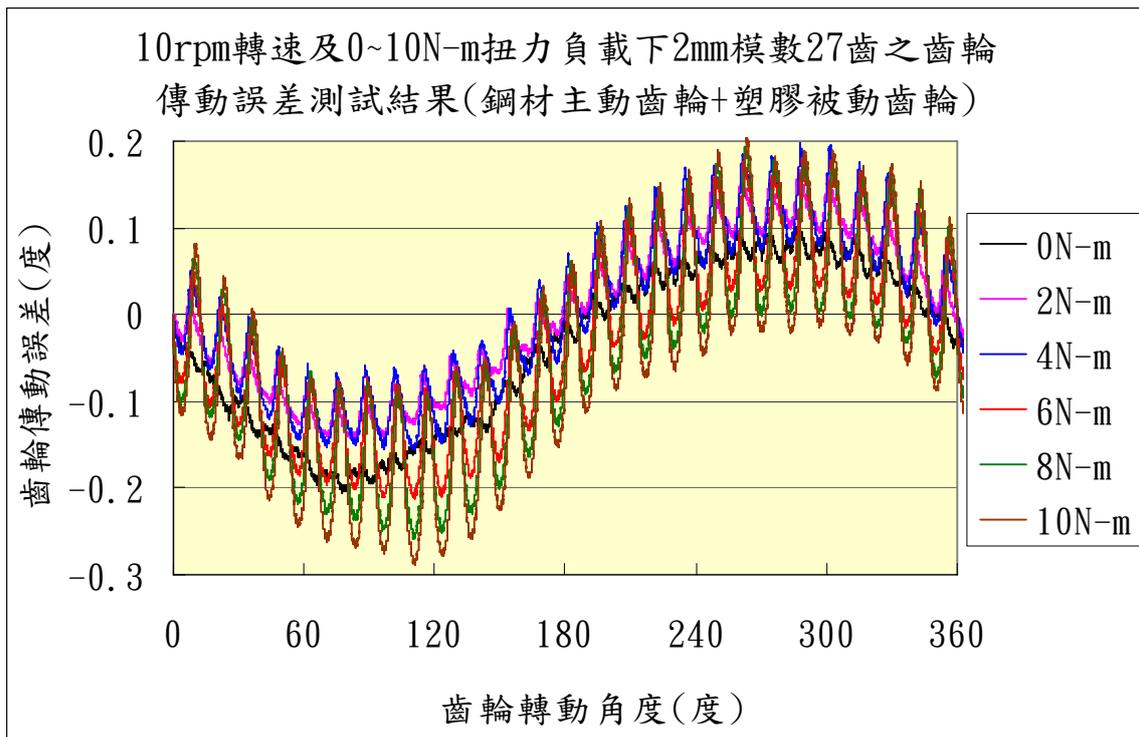


圖 4.8 SPM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)

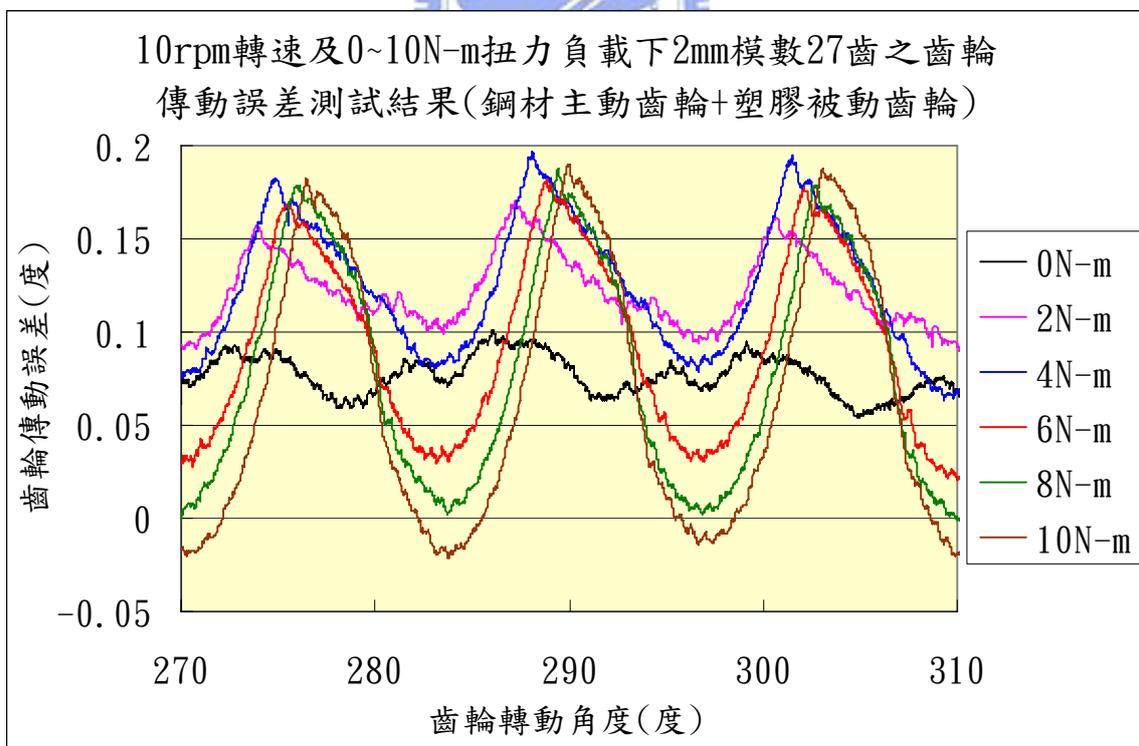


圖 4.9 SPM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(270°~310°)

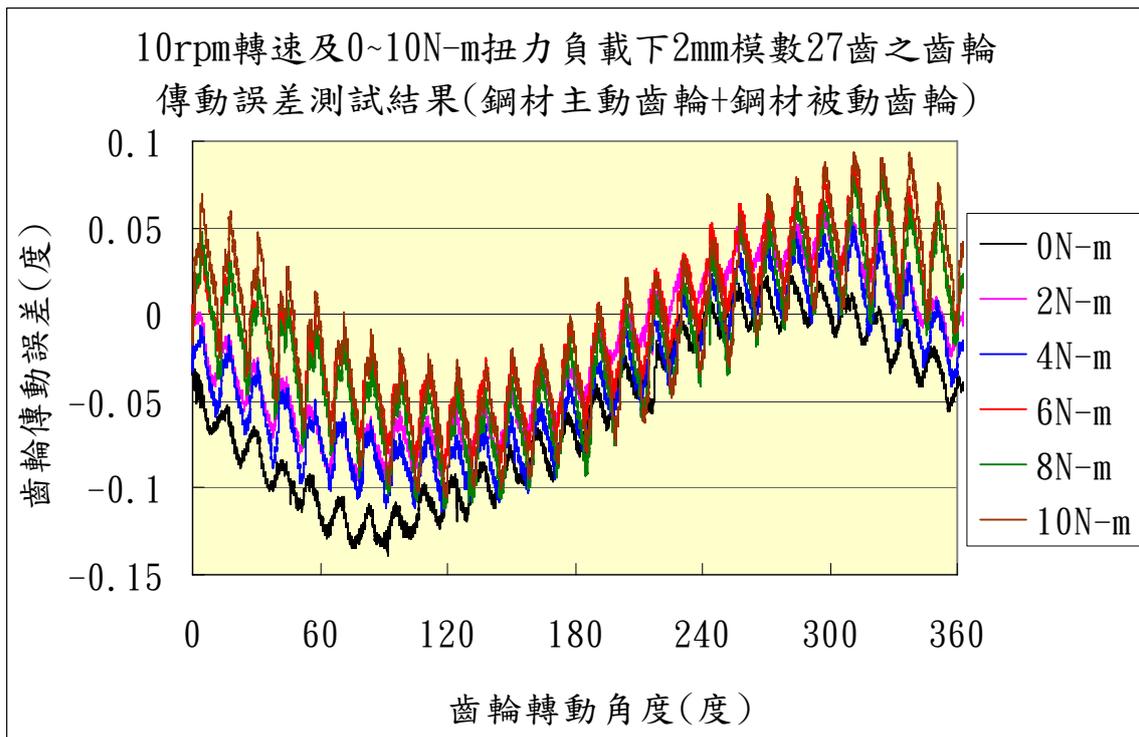


圖 4.10 SSM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0° ~ 360°)

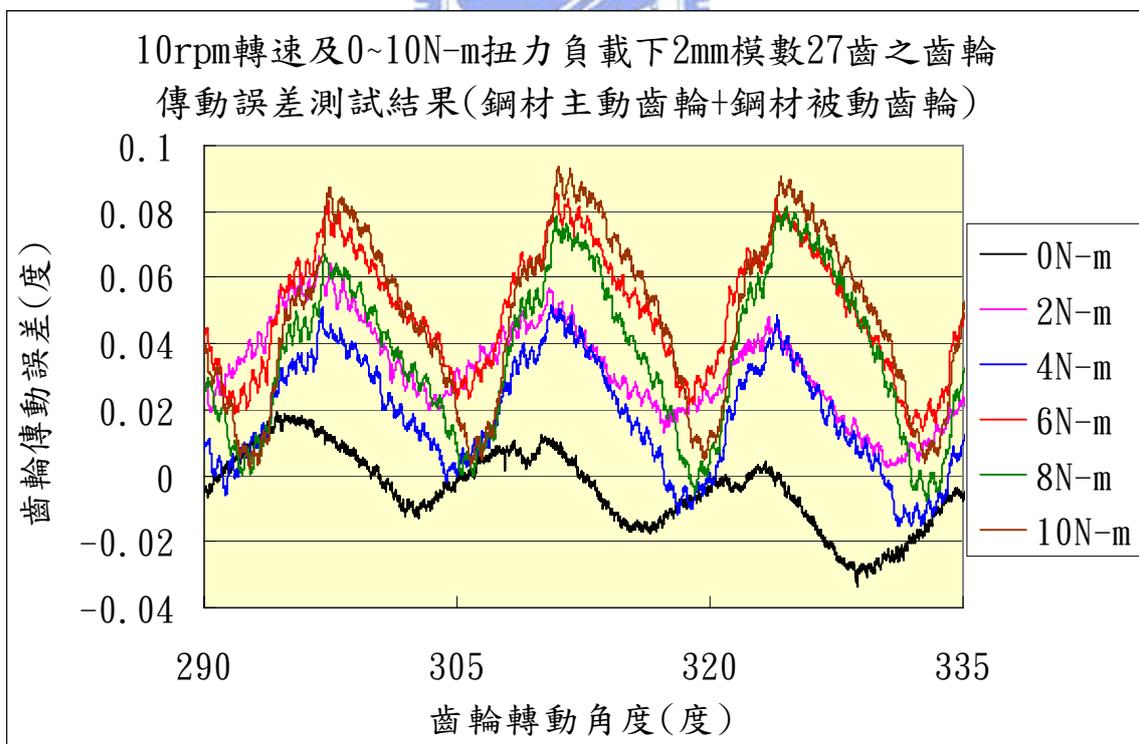


圖 4.11 SSM2-27T 齒輪對之傳動誤差測試結果(290° ~ 335°)

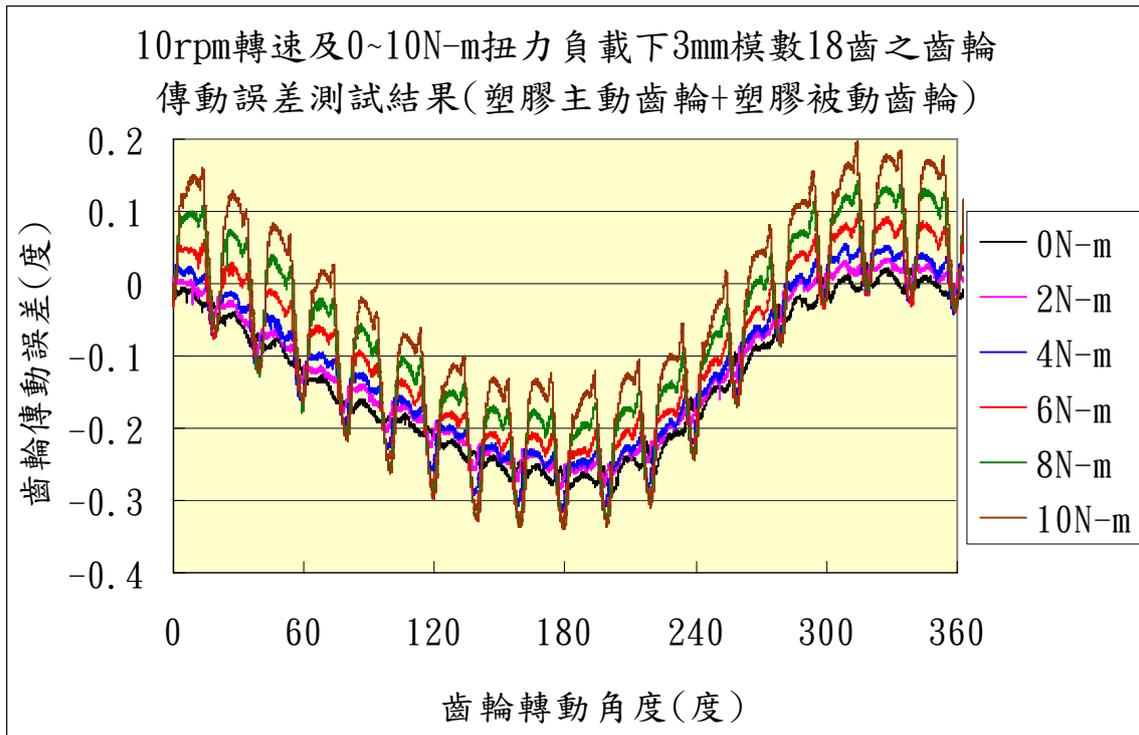


圖 4.12 PPM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)

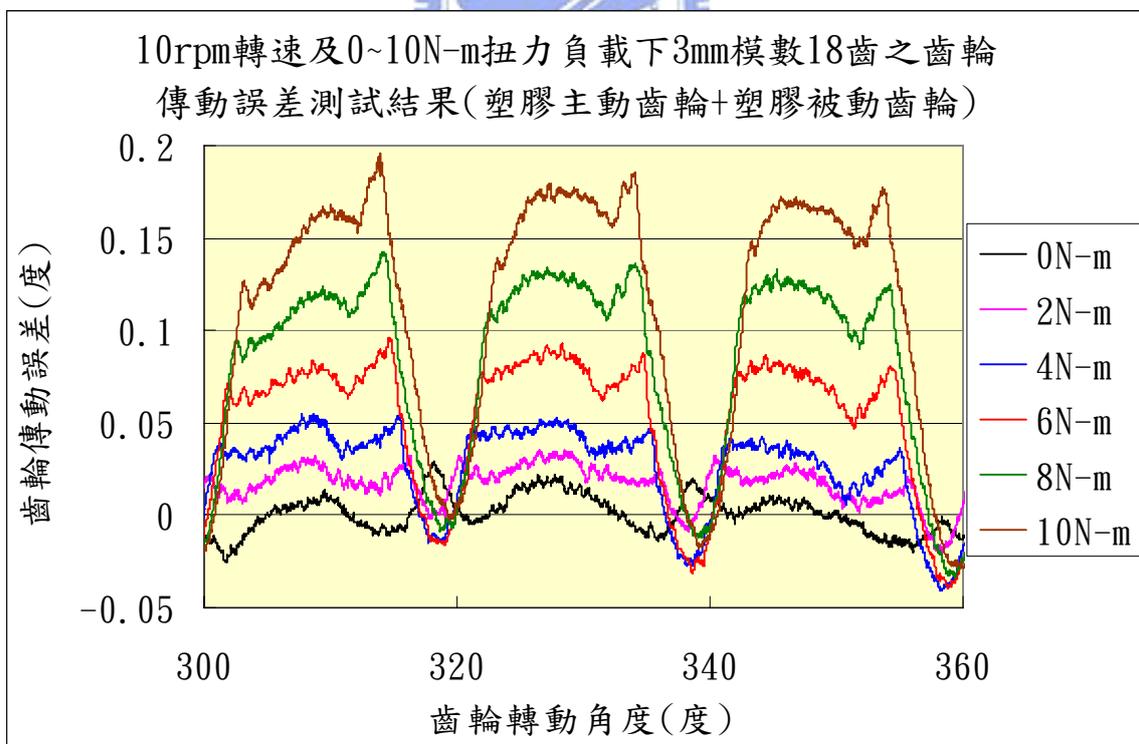


圖 4.13 PPM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果($300^{\circ}\sim 360^{\circ}$)

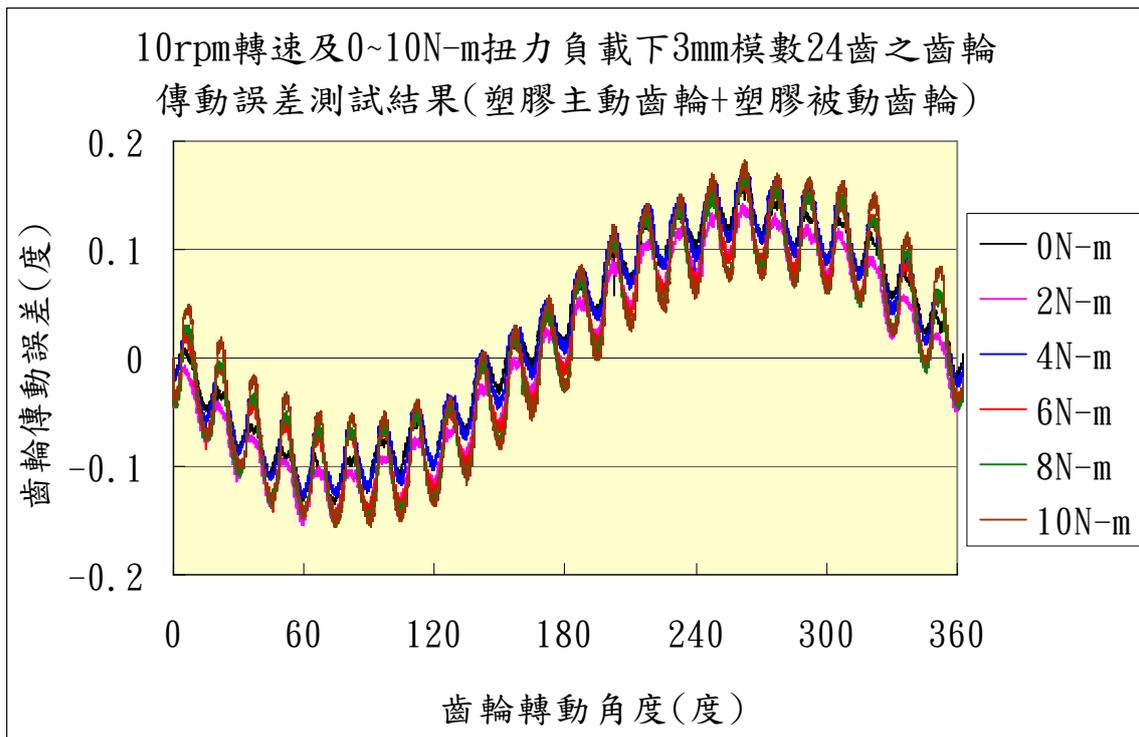


圖 4.14 PPM3-24T 齒輪對之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)

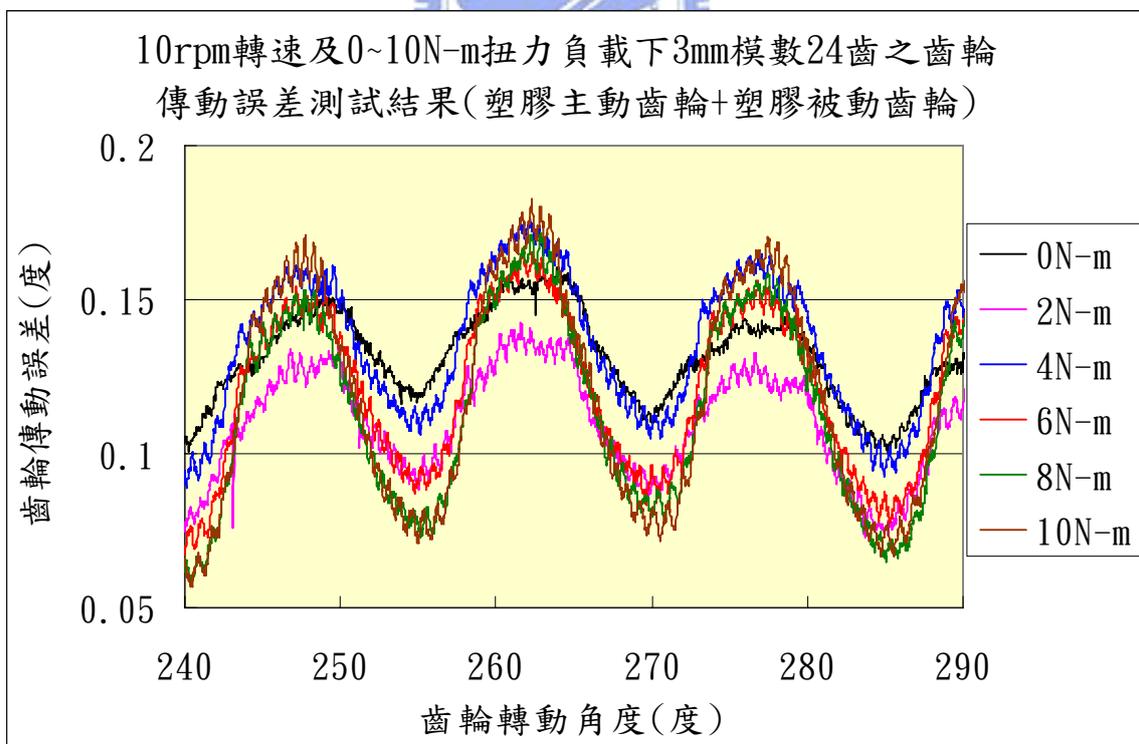


圖 4.15 PPM3-24T 齒輪對之傳動誤差測試結果($240^{\circ}\sim 290^{\circ}$)

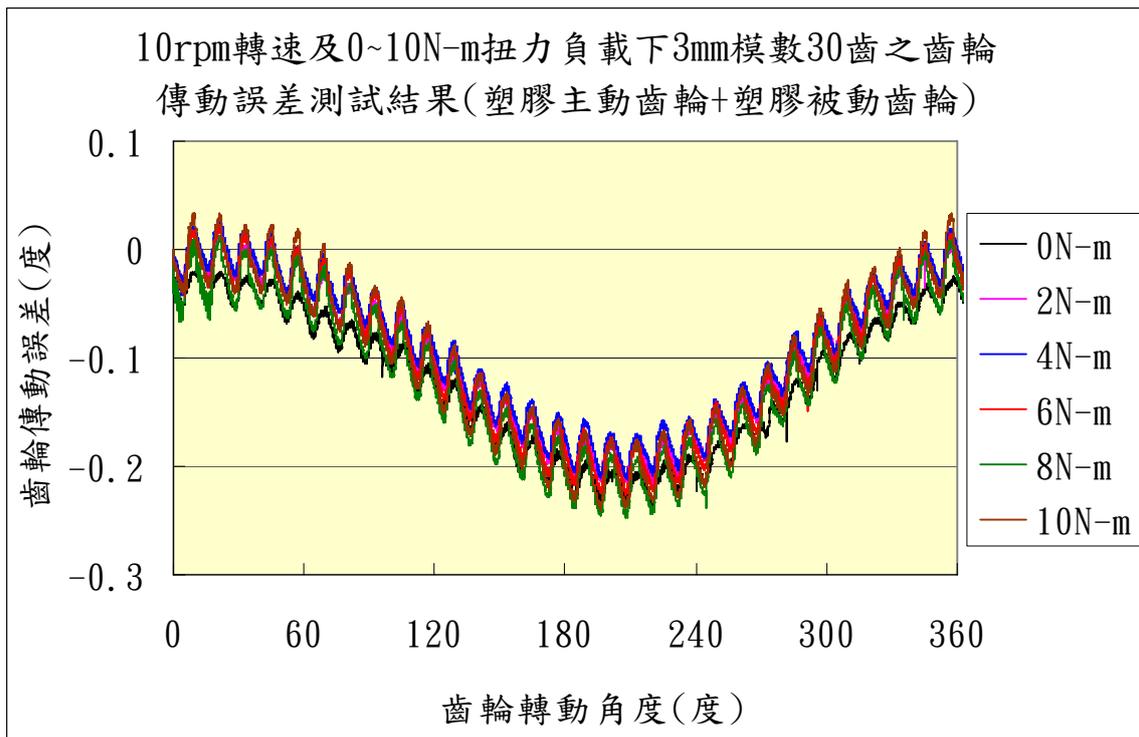


圖 4.16 PPM3-30T 齒輪對之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)

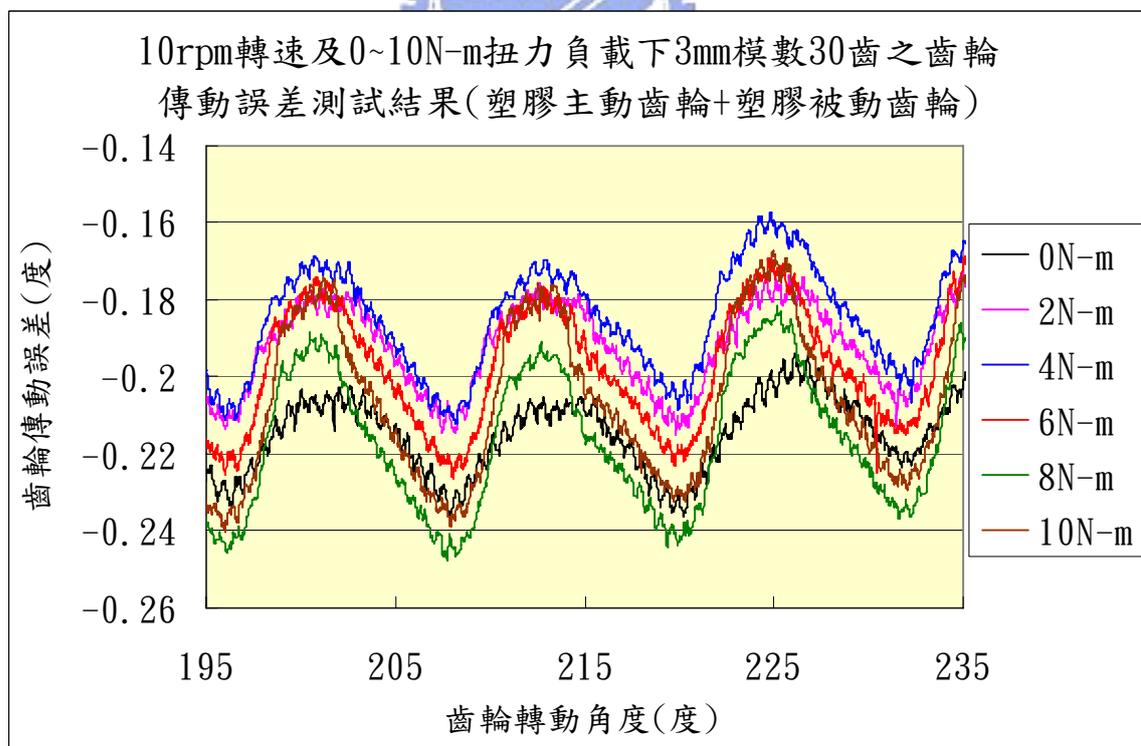


圖 4.17 PPM3-30T 齒輪對之傳動誤差測試結果($195^{\circ}\sim 235^{\circ}$)

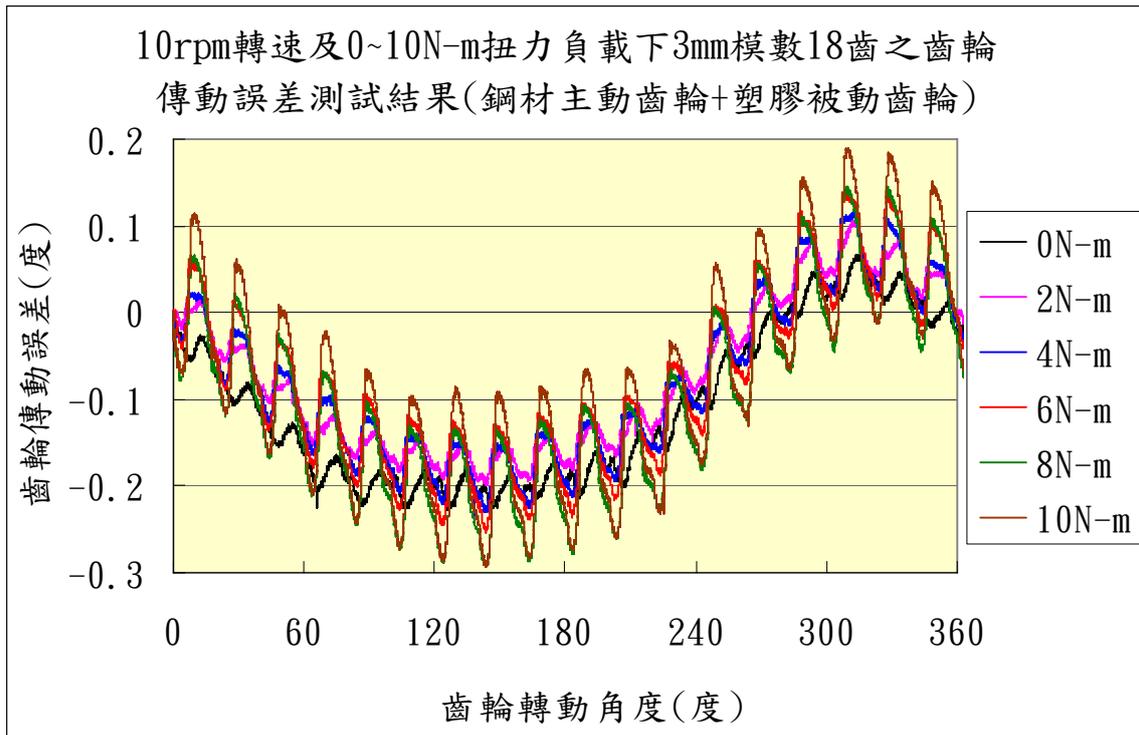


圖 4.18 SPM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)

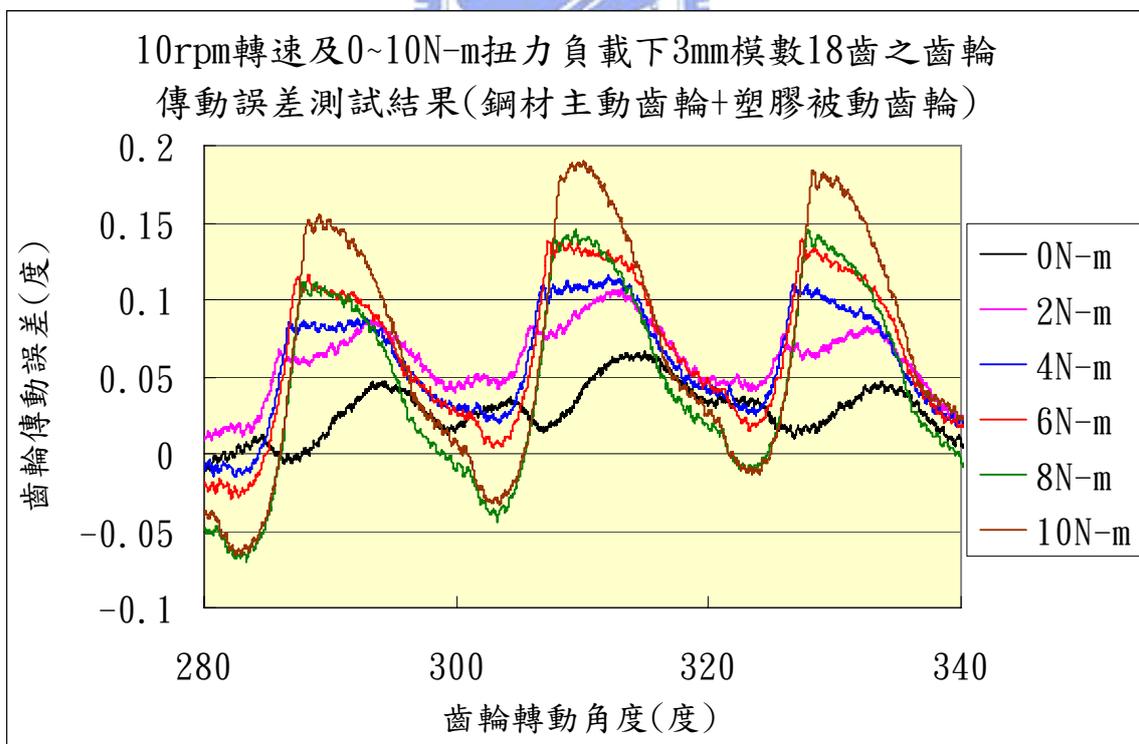


圖 4.19 SPM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果($280^{\circ}\sim 340^{\circ}$)

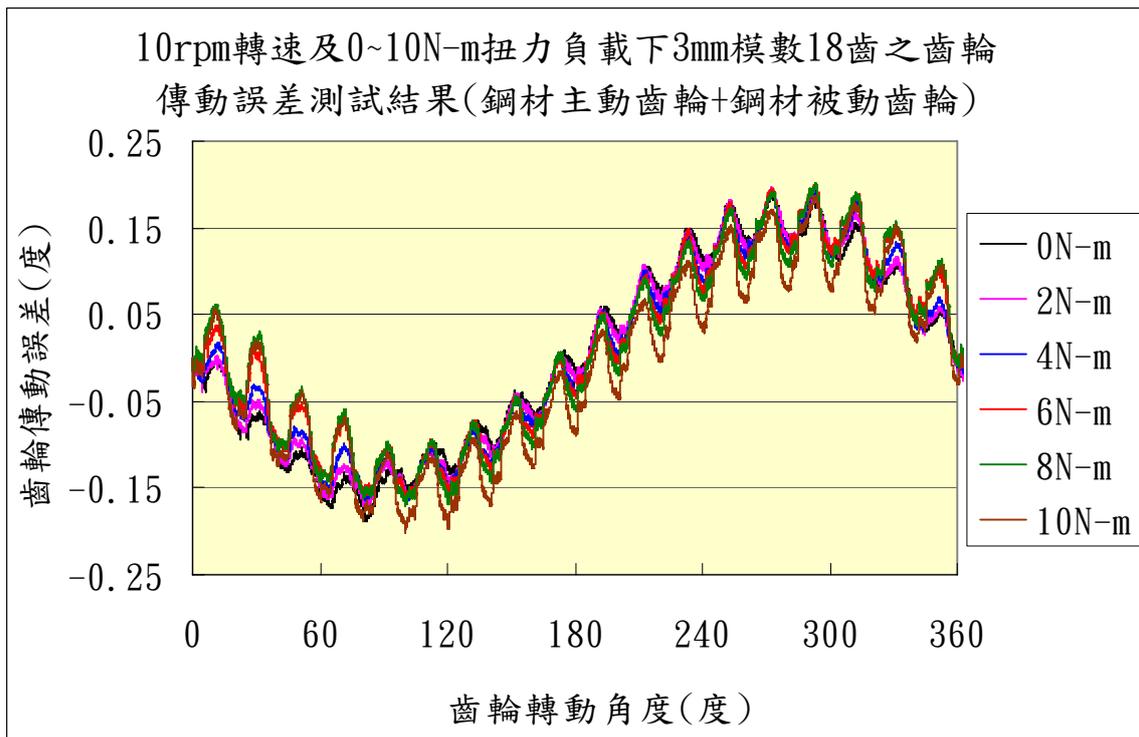


圖 4.20 SSM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)

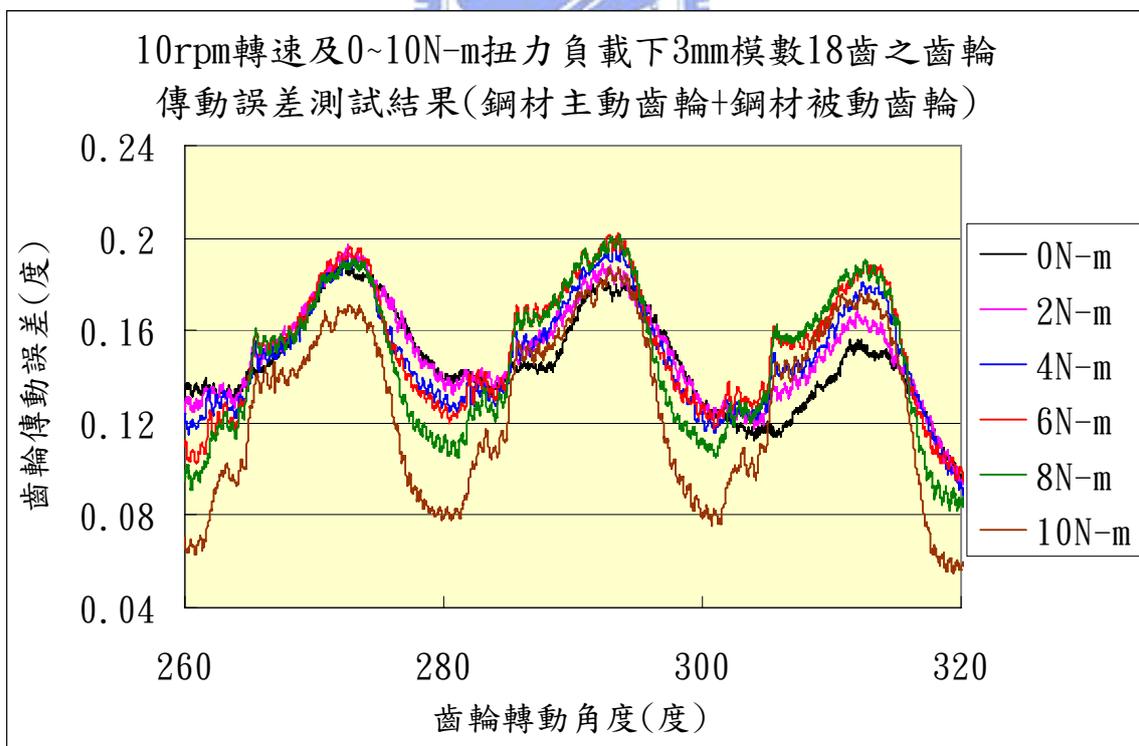


圖 4.21 SSM3-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(260°~320°)

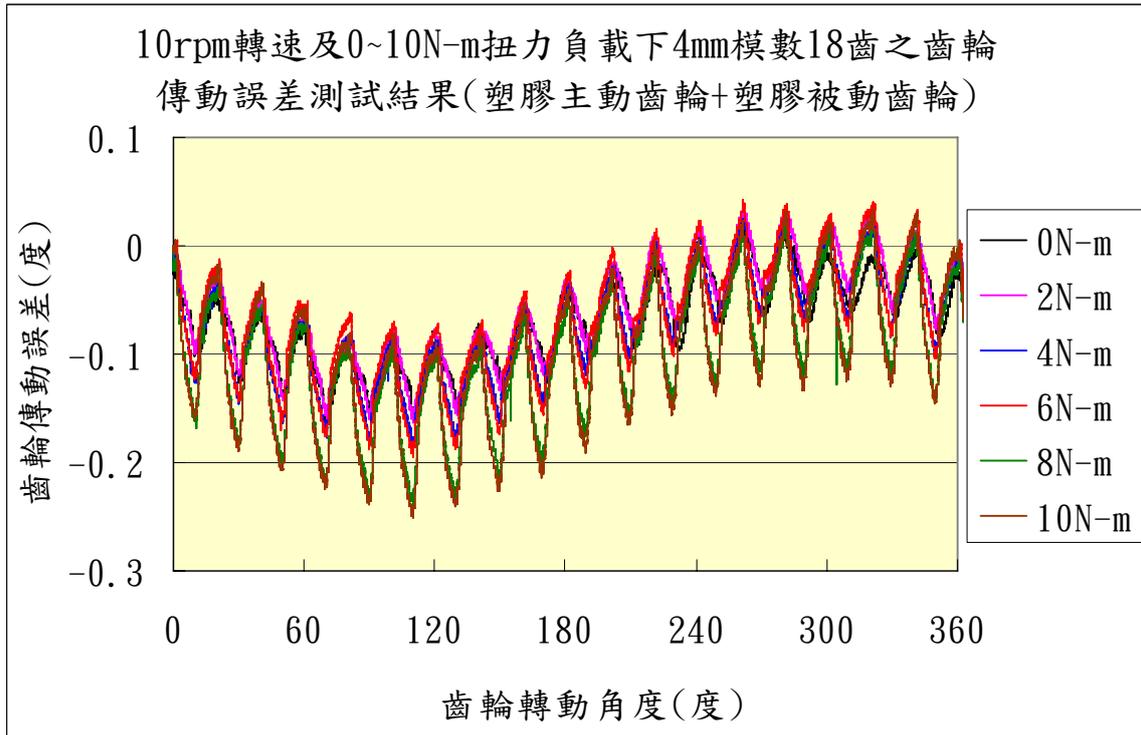


圖 4.22 PPM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0°~360°)

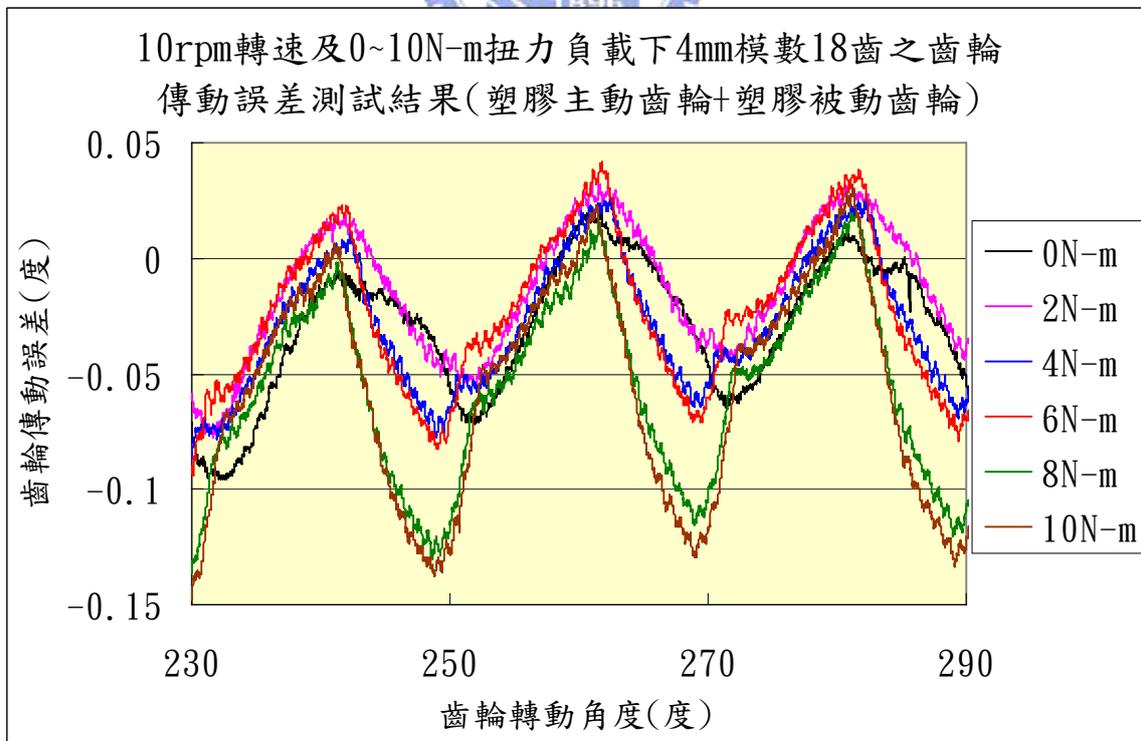


圖 4.23 PPM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果(230°~290°)

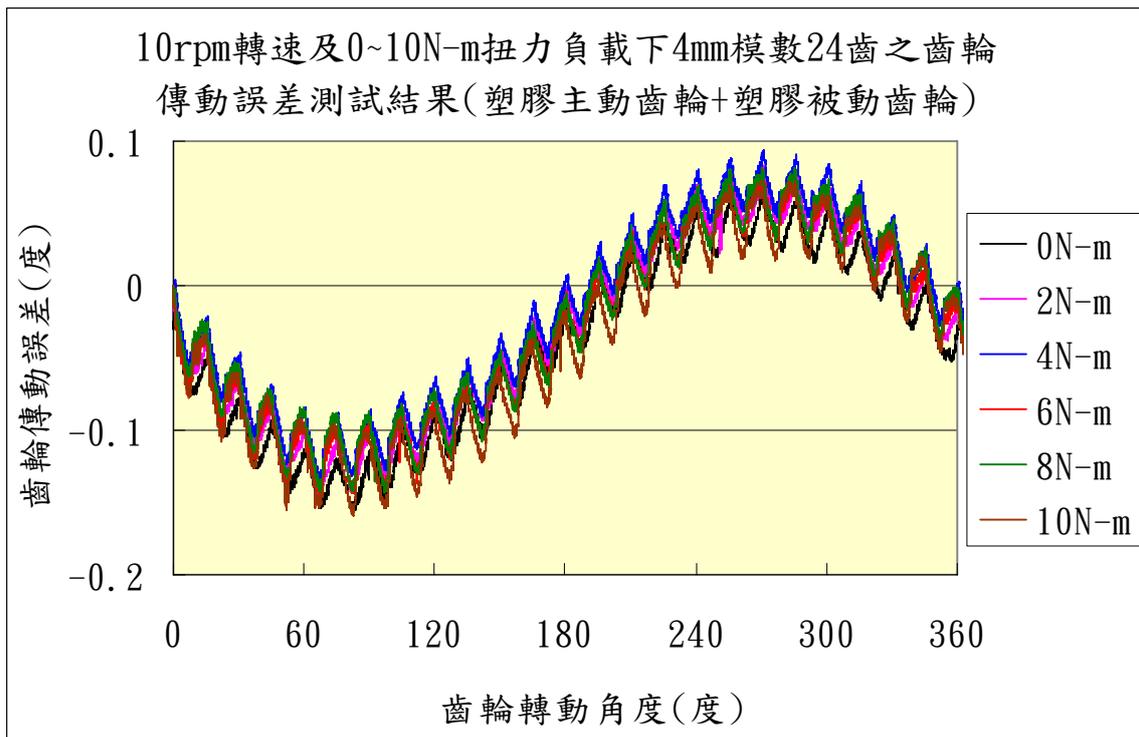


圖 4.24 PPM4-24T 齒輪對之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)

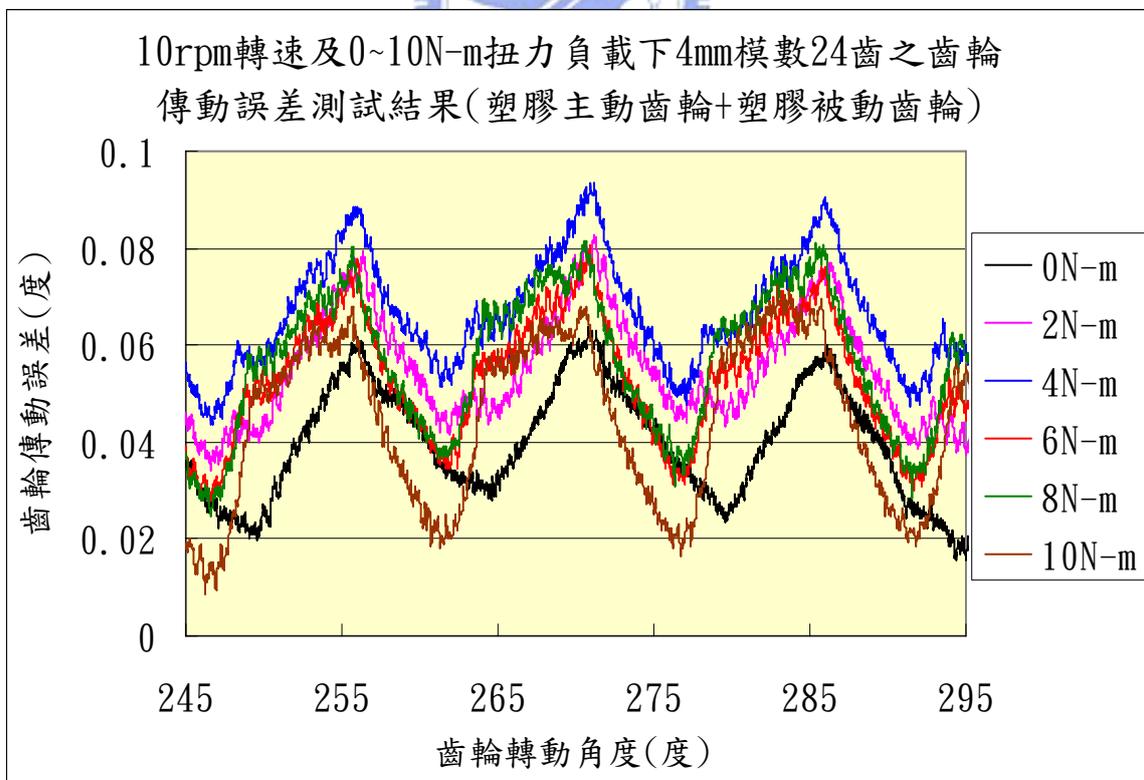


圖 4.25 PPM4-24T 齒輪對之傳動誤差測試結果($245^{\circ}\sim 295^{\circ}$)

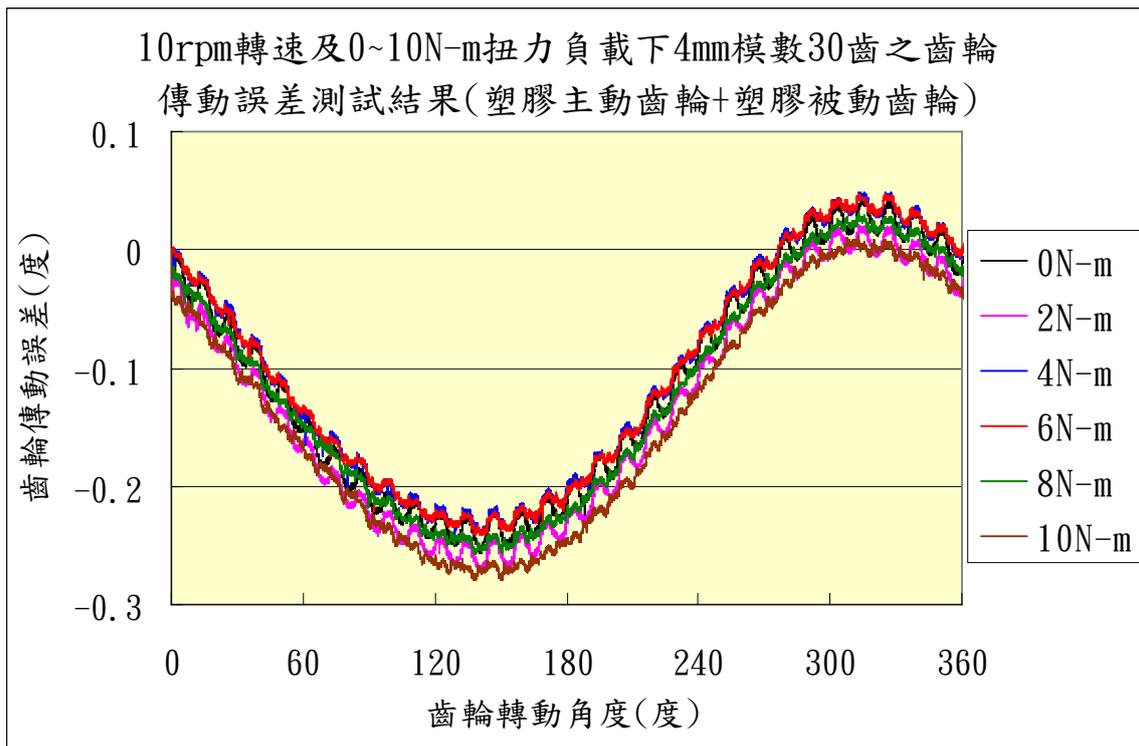


圖 4.26 PPM4-30T 齒輪對之傳動誤差測試結果(0° ~ 360°)

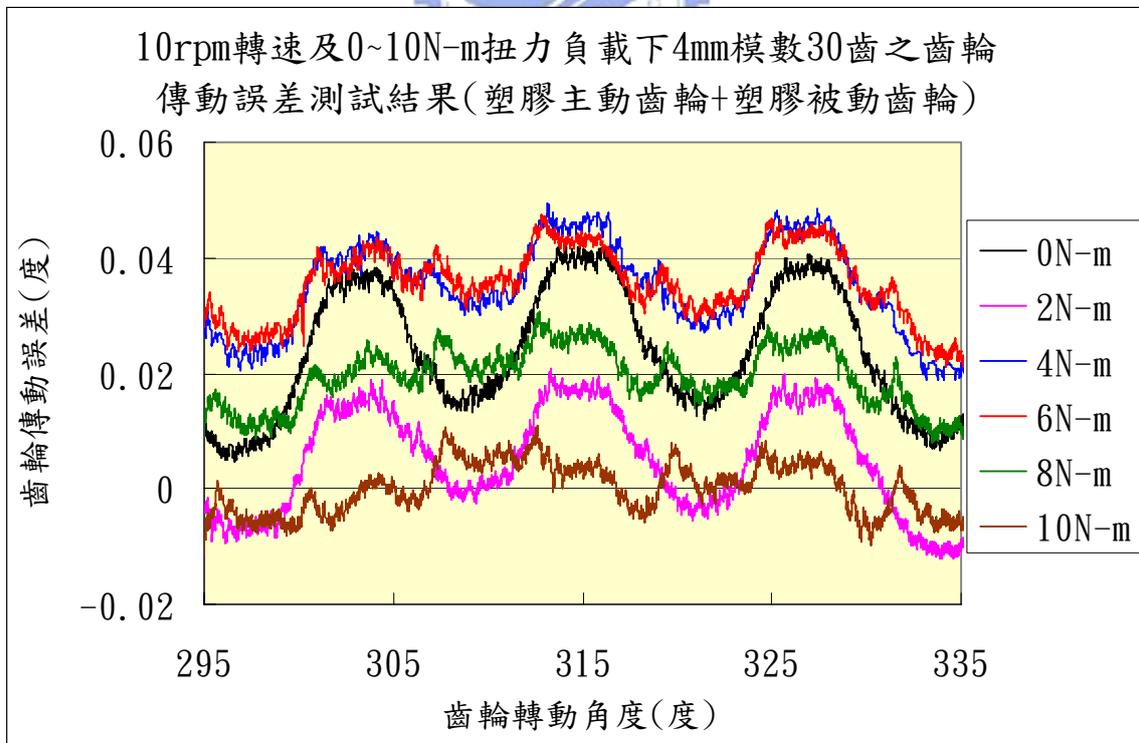


圖 4.27 PPM4-30T 齒輪對之傳動誤差測試結果(295° ~ 335°)

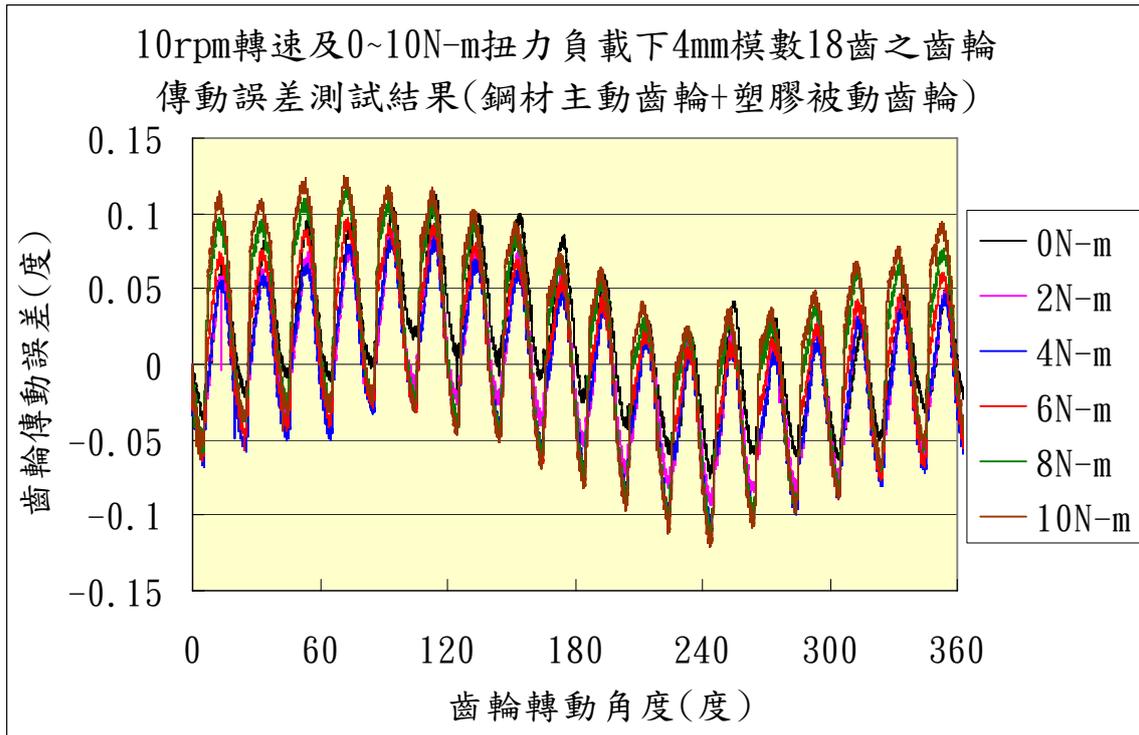


圖 4.28 SPM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)

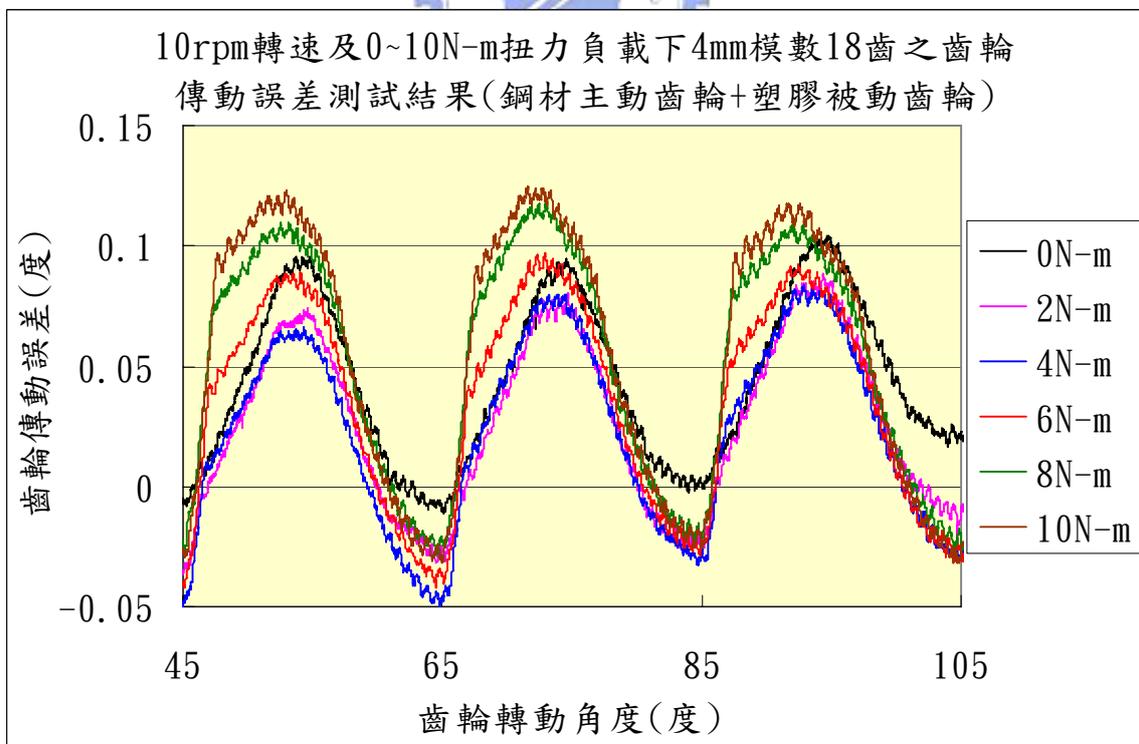


圖 4.29 SPM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果($45^{\circ}\sim 105^{\circ}$)

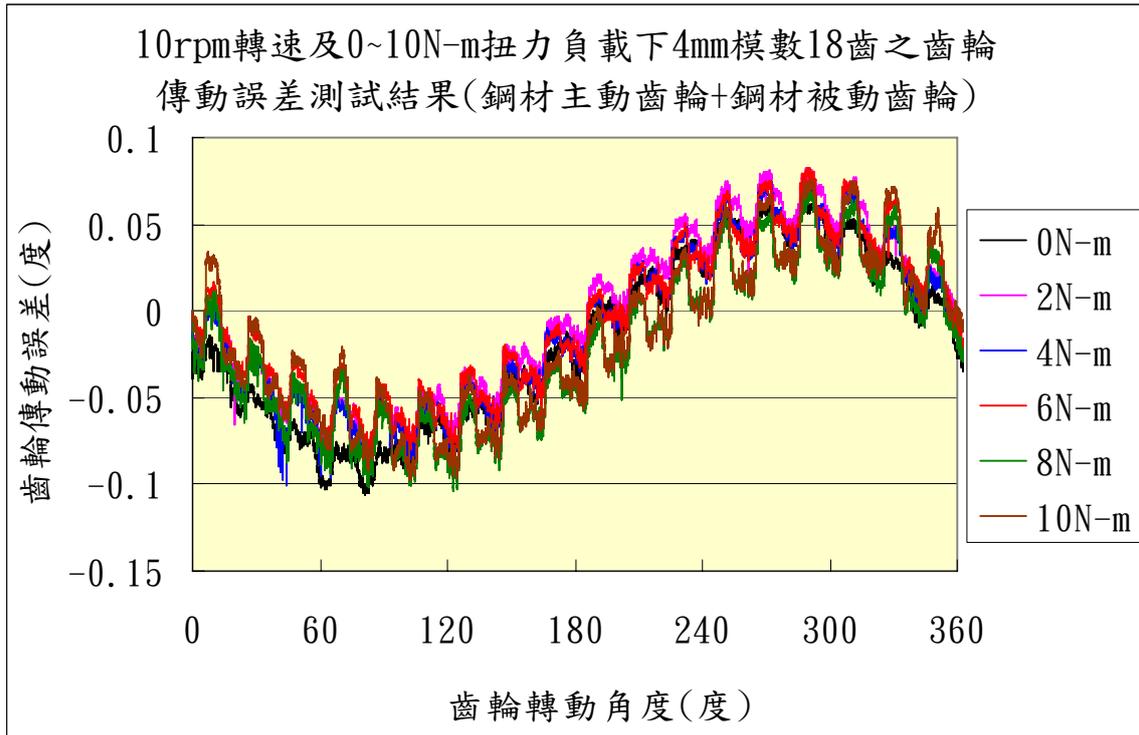


圖 4.30 SSM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果($0^{\circ}\sim 360^{\circ}$)

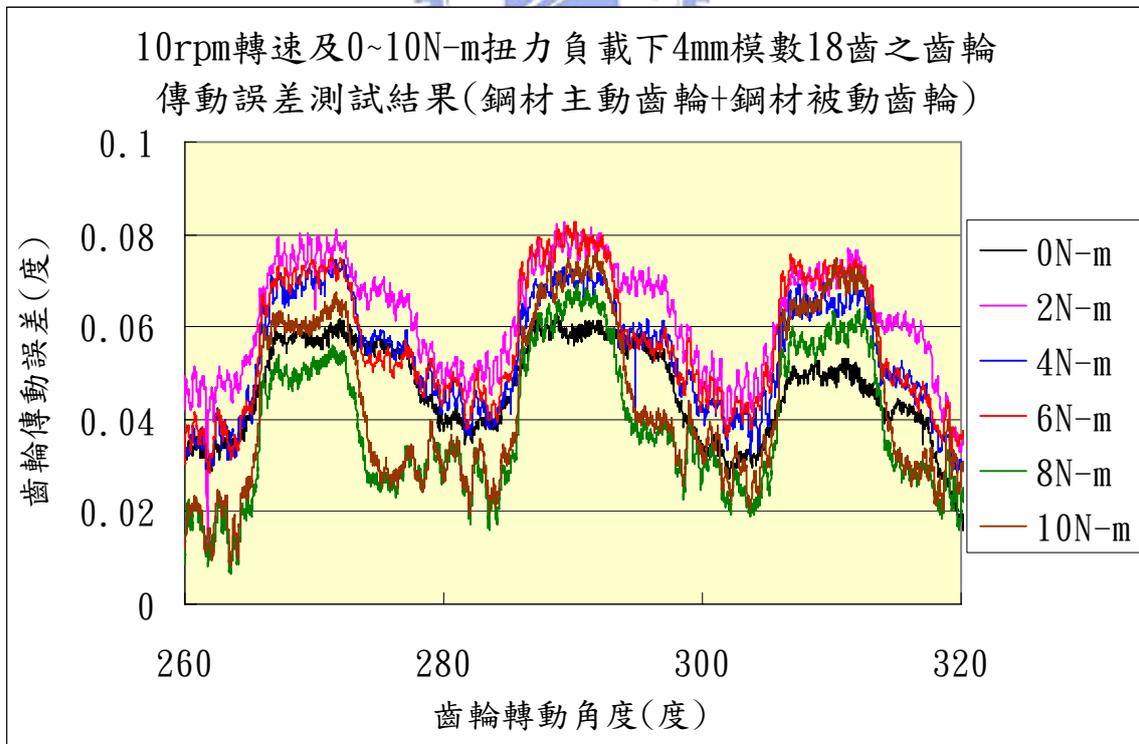


圖 4.31 SSM4-18T 齒輪對之傳動誤差測試結果($260^{\circ}\sim 320^{\circ}$)

4.3 受扭力負載之正齒輪的傳動誤差測試結果之分析

依 4.2 節之測試結果進行測試相關數據之處理與比較，以最接近 360 度內之傳動誤差正弦波之波頂之齒(如該齒剛好近 360 度，而無完整之單齒傳動誤差波形呈現，則以最接近坡谷之齒替代)的單齒傳動誤差曲線波高作為該齒傳動誤差值。因每筆數據之間隔平均僅約 0.033 度，因此，只要齒輪運轉嚙合過程中，極細微之振動均會呈現於單齒傳動誤差曲線上，使得其波峰及波谷仍會有小波，則在該波峰及波谷之附近局部作趨近線即可比較確切的找出波峰值及波谷值，再由其波峰值減去波谷值即得其波高，此即為單齒傳動誤差之值，亦即為工業界用於代表齒形誤差所引起之單齒傳動誤差值。齒輪受扭力負載時，單齒傳動誤差波形將會產生明顯的變化，單齒傳動誤差波峰與波谷不必然與原無扭力負載時之角度位置一致。換言之，受扭力負載之單齒傳動誤差波峰可能是原無扭力負載之某個波腰點或波谷點升高而成的。因此，本論文用於統計單齒傳動誤差波高是以 10N-m 扭力負載時之單齒傳動誤差波形升高最多之點訂為其波峰點，升高最少之點訂為其波谷點，依此對應至 0N-m、2N-m、4N-m、6N-m 及 8N-m 等不同扭力負載下之單齒傳動誤差波形，即可找出各扭力負載之波峰點與波谷點，並可整理出各齒輪對在 0N-m、2N-m、4N-m、6N-m、8N-m 及 10N-m 等不同扭力負載下之單齒傳動誤差值。本研究所關注的是隨扭力負載增加而產生之單齒傳動誤差變化量，因此，各扭力負載下之單齒傳動誤差值再減去 0N-m 時之單齒傳動誤差值，即得各扭力負載下之單齒傳動誤差變化量，詳如表 4.4 至表 4.6 所示。

依表 4.4 至表 4.6 之單齒傳動誤差變化量作不同之比較及繪圖，即得圖 4.32 至圖 4.38。由圖 4.32 至圖 4.38 可歸納出下列四點結論：

- (1) 單齒之齒輪傳動誤差變化量會隨扭力負載增加而增大，且近乎成線性關係，如圖 4.32 至圖 4.38 所示。但其變化量增大並非單齒之齒輪傳動誤差曲線波高均增大，亦有其波高減小現象，如表 4.6 之 PPM4-30T 及圖 4.27 所示，其單齒之齒輪傳動誤差呈現負值，即扭力負載加大，反而使原波峰漸降低，扭力負載增至 10N-m 時，負的波高已變成正的波高，當然如扭力負載續加大下去，會繼續變更大之正波高。
- (2) 相同模數及齒數時，塑膠齒輪因剛性比鋼材齒輪低，因此，同扭力負載下之單齒傳動誤差會比鋼材齒輪大，如圖 4.32 至圖 4.34 所示。
- (3) 相同模數及材質，不同齒數時，因齒數愈大，其節圓半徑愈大，同扭力負載下相對齒面之受力減小，因此，其單齒傳動誤差之變化量愈小，如圖 4.32 至圖 4.34 所示。

(4) 相同齒數及材質，不同模數時，因模數愈大，其節圓半徑愈大，同扭力負載下相對齒面之受力減小，因此，其單齒傳動誤差之變化量愈小，如圖 4.35 至圖 4.37 所示。

表 4.4 模數 2mm 正齒輪對之傳動誤差測試值

模數(mm)		2				
齒數		27	36	45	27	27
壓力角(度)		20				
螺旋角(度)		0				
齒面寬(mm)		10				
標準節圓直徑(mm)		54	72	90	54	54
齒輪對代號		PPM2-27T	PPM2-36T	PPM2-45T	SPM2-27T	SSM2-27T
材質	主動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材	鋼材
	被動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材
單齒 傳動 誤差 之波 峰值 (度)	0N-m	-0.0048	0.2592	0.0147	0.0995	0.0110
	2N-m	0.0548	0.2875	0.0323	0.1712	0.0543
	4N-m	0.0782	0.2935	0.0317	0.1898	0.0489
	6N-m	0.1003	0.2592	0.0177	0.1733	0.0853
	8N-m	0.1353	0.2661	0.0403	0.1802	0.0766
	10N-m	0.1466	0.2396	0.0557	0.1845	0.0934
單齒 傳動 誤差 之波 谷 值 (度)	0N-m	0.0004	0.2801	-0.0095	0.0594	-0.0081
	2N-m	0.0213	0.2917	0.0012	0.1006	0.0223
	4N-m	0.0094	0.2826	-0.0062	0.0846	0.0036
	6N-m	-0.0049	0.2334	-0.0278	0.0339	0.0269
	8N-m	-0.0091	0.2257	-0.0127	0.0089	0.0040
	10N-m	-0.0391	0.1849	-0.0052	-0.0177	0.0064
單齒 傳動 誤差 (度)	0N-m	-0.0052	-0.0209	0.0242	0.0401	0.0191
	2N-m	0.0335	-0.0042	0.0311	0.0706	0.0320
	4N-m	0.0688	0.0109	0.0379	0.1052	0.0453
	6N-m	0.1052	0.0258	0.0455	0.1394	0.0584
	8N-m	0.1444	0.0404	0.0530	0.1713	0.0726
	10N-m	0.1857	0.0547	0.0609	0.2022	0.0870
單齒 傳動 誤差 之變 動量 (度)	0N-m	0	0	0	0	0
	2N-m	0.0387	0.0167	0.0069	0.0305	0.0129
	4N-m	0.0740	0.0318	0.0137	0.0651	0.0262
	6N-m	0.1104	0.0467	0.0213	0.0993	0.0393
	8N-m	0.1496	0.0613	0.0288	0.1312	0.0535
	10N-m	0.1909	0.0756	0.0367	0.1621	0.0679

表 4.5 模數 3mm 正齒輪對之傳動誤差測試值

模數(mm)		3				
齒數		18	24	30	18	18
壓力角(度)		20				
螺旋角(度)		0				
齒面寬(mm)		10				
標準節圓直徑(mm)		54	72	90	54	54
齒輪對代號		PPM3-18T	PPM3-24T	PPM3-30T	SPM3-18T	SSM3-18T
材質	主動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材	鋼材
	被動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材
單齒 傳動 誤差 之波 峰值 (度)	0N-m	0.0183	0.1542	-0.2081	0.0541	0.1816
	2N-m	0.0336	0.1398	-0.1799	0.0983	0.1875
	4N-m	0.0509	0.1704	-0.1708	0.1137	0.1951
	6N-m	0.0885	0.1646	-0.1785	0.1380	0.2021
	8N-m	0.1333	0.1646	-0.1934	0.1452	0.2010
	10N-m	0.1793	0.1739	-0.1799	0.1862	0.1869
單齒 傳動 誤差 之波 谷值 (度)	0N-m	0.0252	0.1185	-0.2318	0.0315	0.1342
	2N-m	0.0021	0.0925	-0.2111	0.0425	0.1298
	4N-m	-0.0138	0.1115	-0.2083	0.0289	0.1254
	6N-m	-0.0141	0.0929	-0.2225	0.0188	0.1213
	8N-m	-0.0063	0.0801	-0.2441	-0.0098	0.1071
	10N-m	-0.0014	0.0772	-0.2371	-0.0101	0.0791
單齒 傳動 誤差 (度)	0N-m	-0.0069	0.0357	0.0237	0.0226	0.0474
	2N-m	0.0315	0.0473	0.0312	0.0558	0.0577
	4N-m	0.0647	0.0589	0.0375	0.0848	0.0697
	6N-m	0.1026	0.0717	0.0440	0.1192	0.0808
	8N-m	0.1396	0.0845	0.0507	0.1550	0.0939
	10N-m	0.1807	0.0967	0.0572	0.1963	0.1078
單齒 傳動 誤差 之變 化量 (度)	0N-m	0	0	0	0	0
	2N-m	0.0384	0.0116	0.0075	0.0314	0.0103
	4N-m	0.0716	0.0232	0.0138	0.0604	0.0223
	6N-m	0.1095	0.0360	0.0203	0.0948	0.0334
	8N-m	0.1465	0.0488	0.0270	0.1306	0.0465
	10N-m	0.1876	0.0610	0.0335	0.1719	0.0604

表 4.6 模數 4mm 正齒輪對之傳動誤差測試值

模數(mm)		4				
齒數		18	24	30	18	18
壓力角(度)		20				
螺旋角(度)		0				
齒面寬(mm)		10				
標準節圓直徑(mm)		72	96	120	72	72
齒輪對代號		PPM4-18T	PPM4-24T	PPM4-30T	SPM4-18T	SSM4-18T
材質	主動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材	鋼材
	被動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材
單齒 傳動 誤差 之波 峰值 (度)	0N-m	0.0196	0.0290	0.0154	0.0896	0.0604
	2N-m	0.0326	0.0459	-0.0014	0.0767	0.0768
	4N-m	0.0252	0.0649	0.0318	0.0783	0.0716
	6N-m	0.0407	0.0565	0.0331	0.0960	0.0794
	8N-m	0.0163	0.0666	0.0214	0.1154	0.0660
	10N-m	0.0227	0.0592	0.0051	0.1231	0.0721
單齒 傳動 誤差 之波 谷值 (度)	0N-m	-0.0350	0.0347	0.0397	0.0011	0.0371
	2N-m	-0.0395	0.0444	0.0183	-0.0232	0.0487
	4N-m	-0.0642	0.0552	0.0461	-0.0327	0.0394
	6N-m	-0.0711	0.0372	0.0423	-0.0274	0.0402
	8N-m	-0.1156	0.0372	0.0256	-0.0202	0.0231
	10N-m	-0.1284	0.0206	0.0037	-0.0258	0.0235
單齒 傳動 誤差 (度)	0N-m	0.0546	-0.0057	-0.0243	0.0885	0.0233
	2N-m	0.0721	0.0015	-0.0197	0.0999	0.0281
	4N-m	0.0894	0.0097	-0.0143	0.1110	0.0322
	6N-m	0.1118	0.0193	-0.0092	0.1234	0.0392
	8N-m	0.1319	0.0294	-0.0042	0.1356	0.0429
	10N-m	0.1511	0.0386	0.0014	0.1489	0.0486
單齒 傳動 誤差 之變 動量 (度)	0N-m	0	0	0	0	0
	2N-m	0.0175	0.0072	0.0046	0.0114	0.0048
	4N-m	0.0348	0.0154	0.0100	0.0225	0.0089
	6N-m	0.0572	0.0250	0.0151	0.0349	0.0159
	8N-m	0.0773	0.0351	0.0201	0.0471	0.0196
	10N-m	0.0965	0.0443	0.0257	0.0604	0.0253

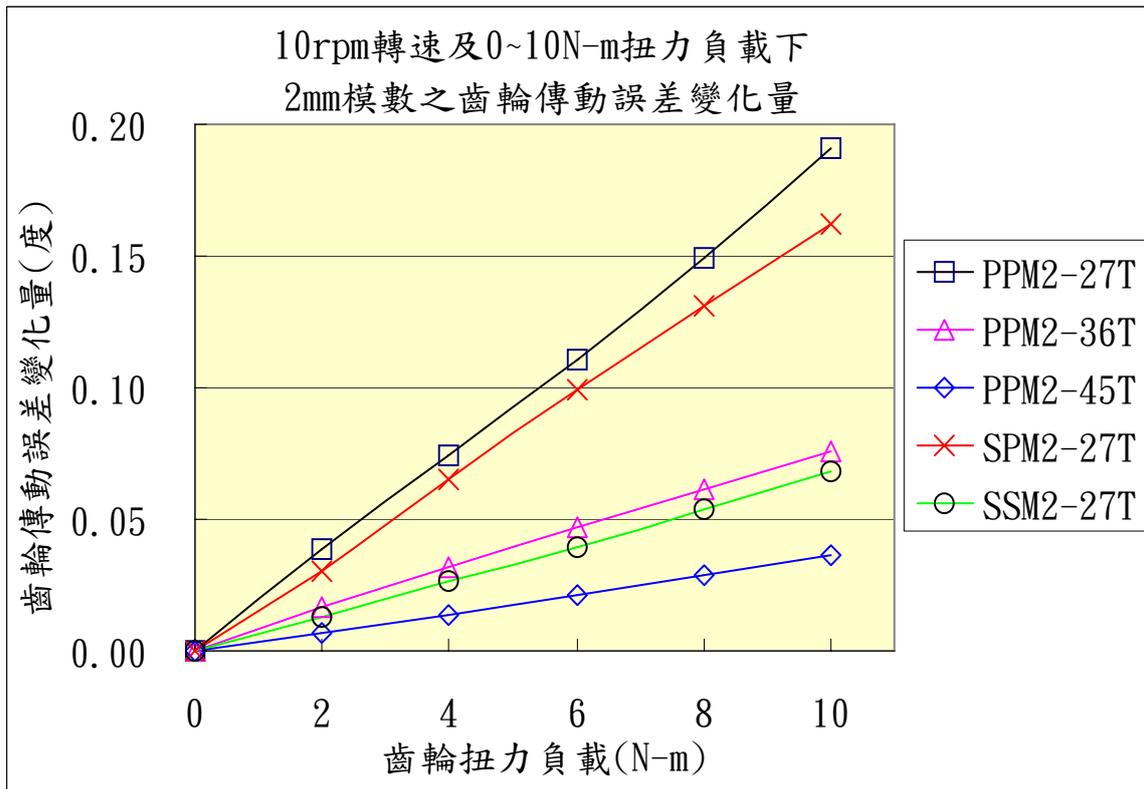


圖 4.32 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(模數 2mm)

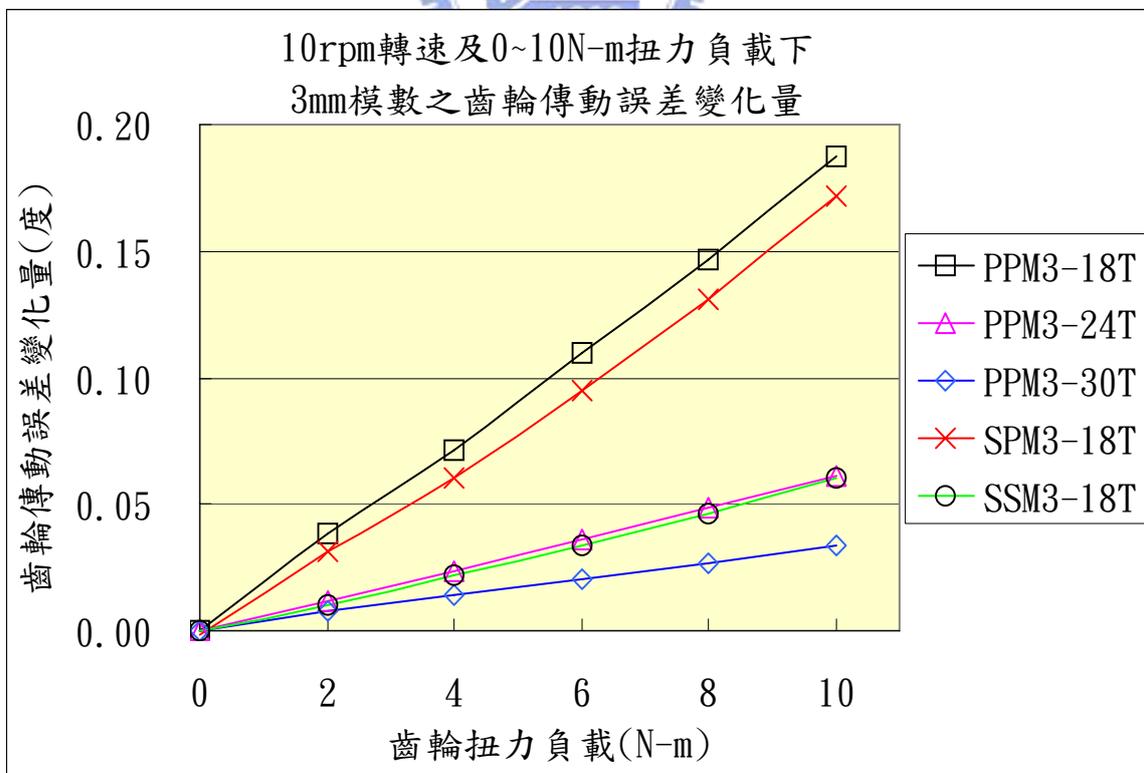


圖 4.33 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(模數 3mm)

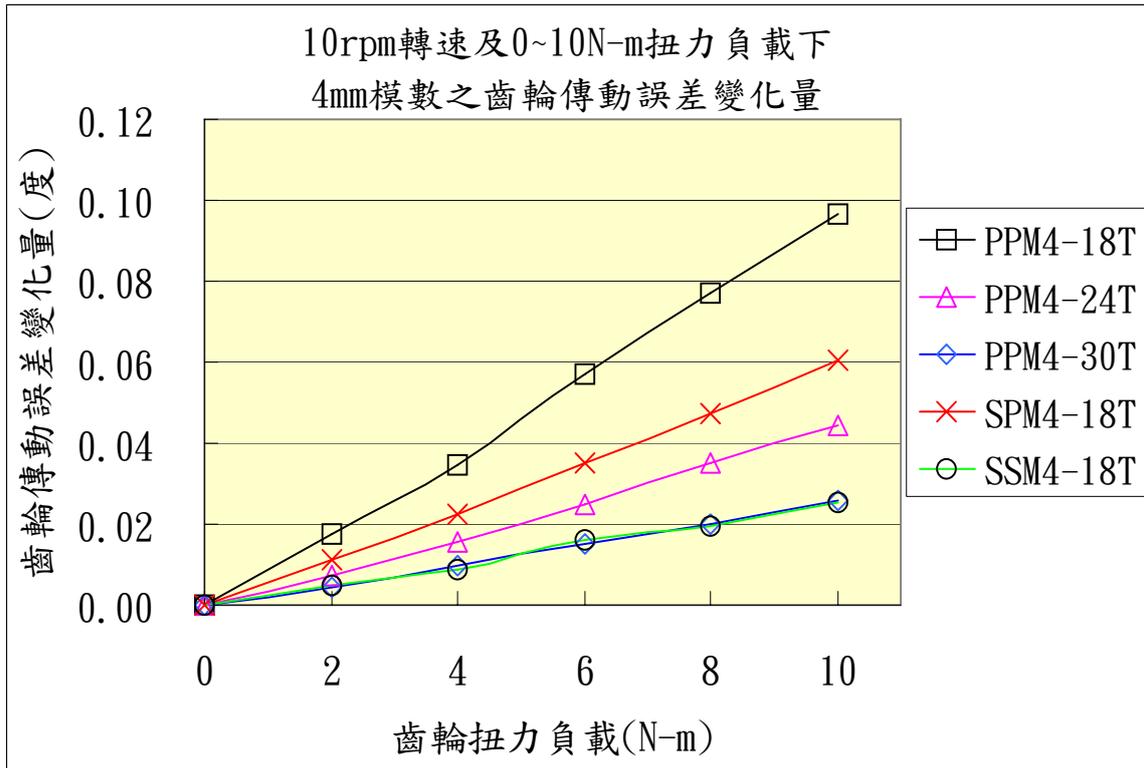


圖 4.34 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(模數 4mm)

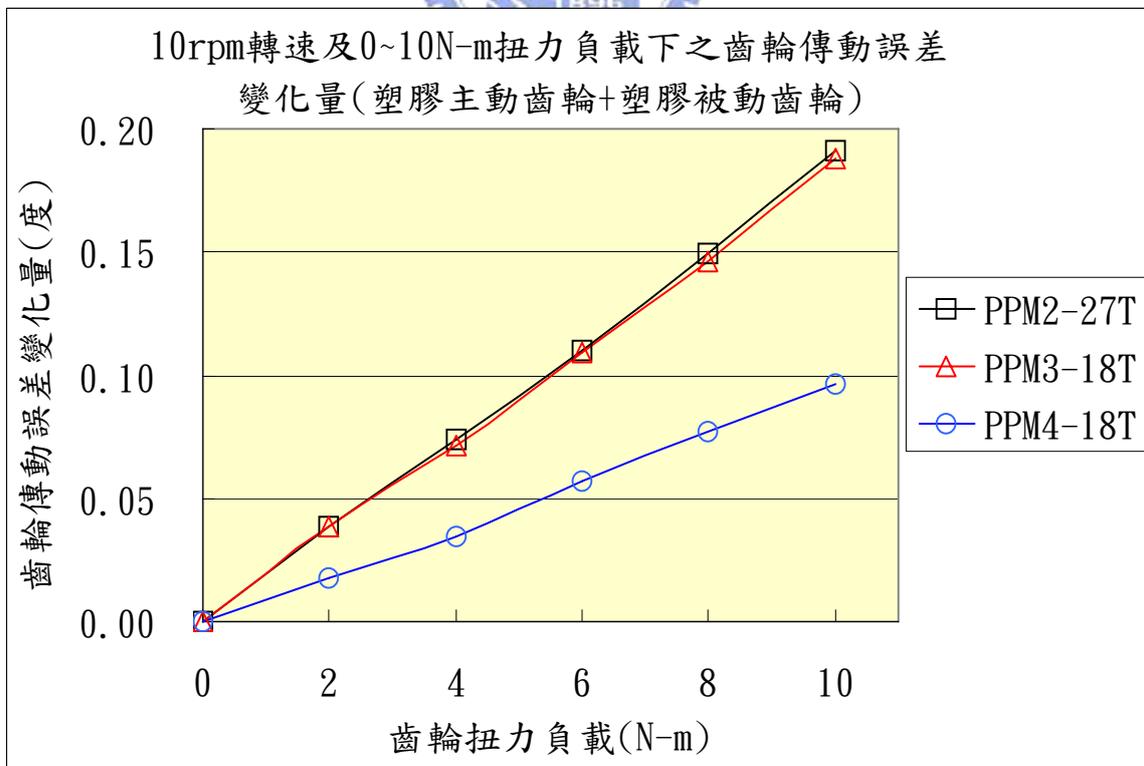


圖 4.35 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(PPM)

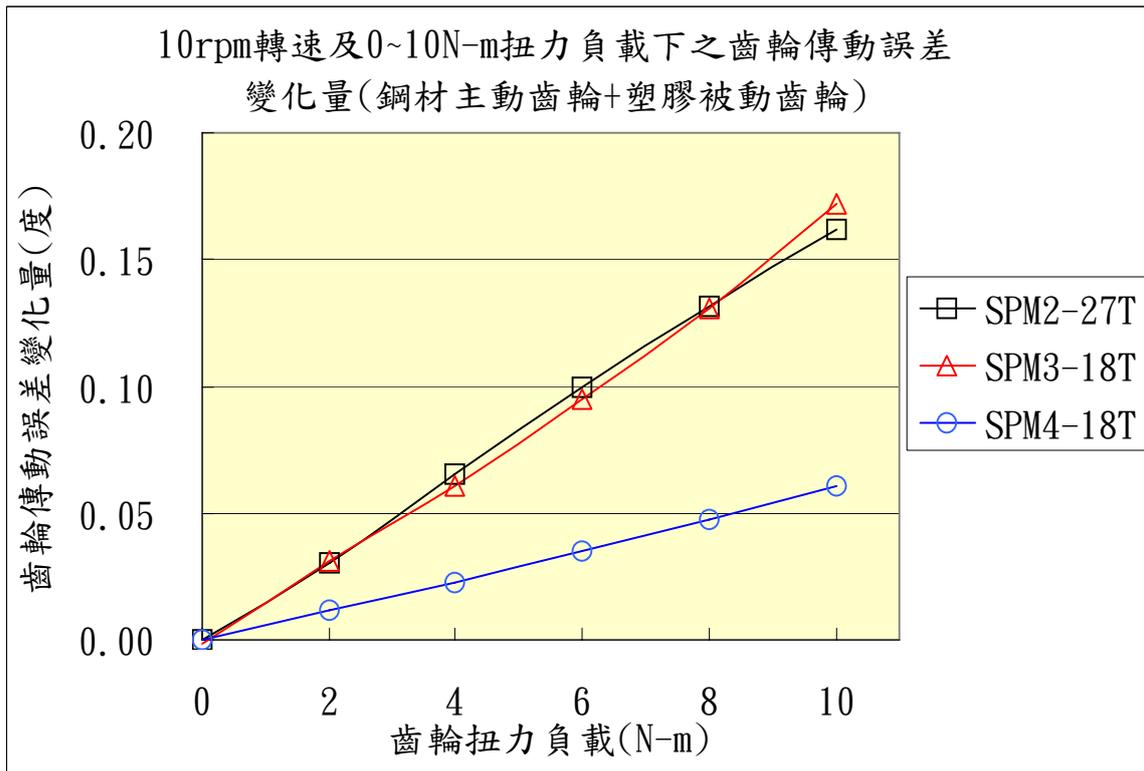


圖 4.36 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(SPM)

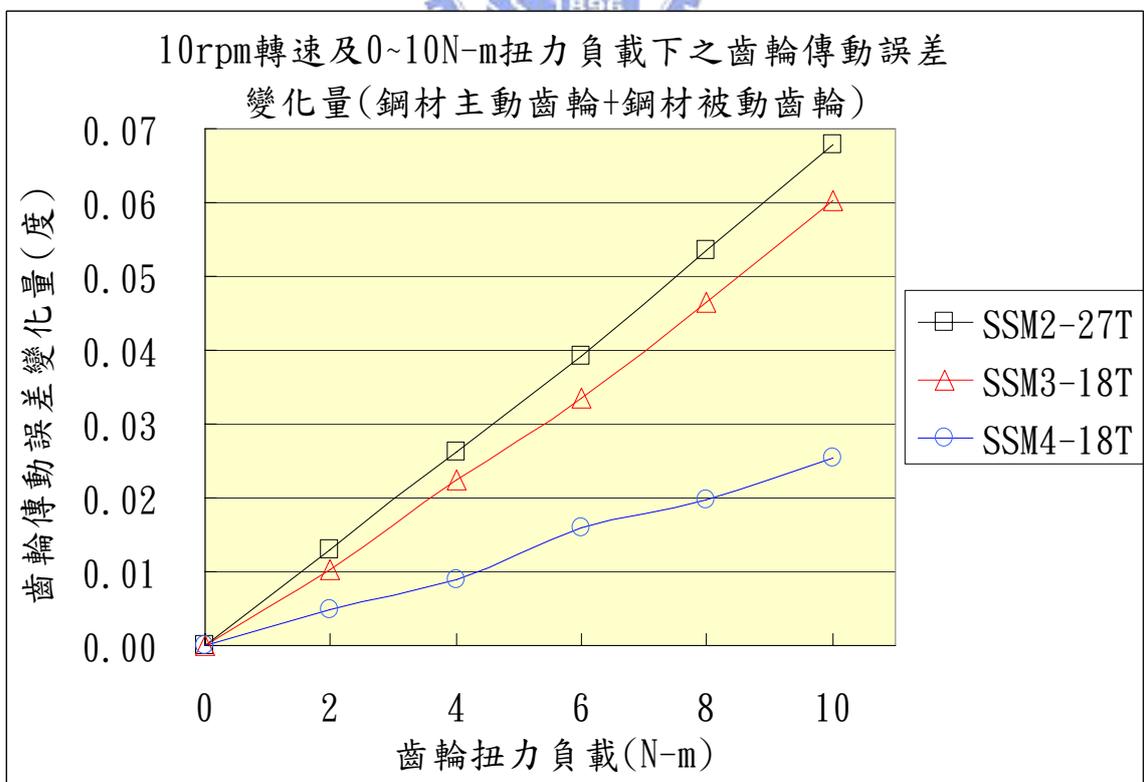


圖 4.37 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量(SSM)

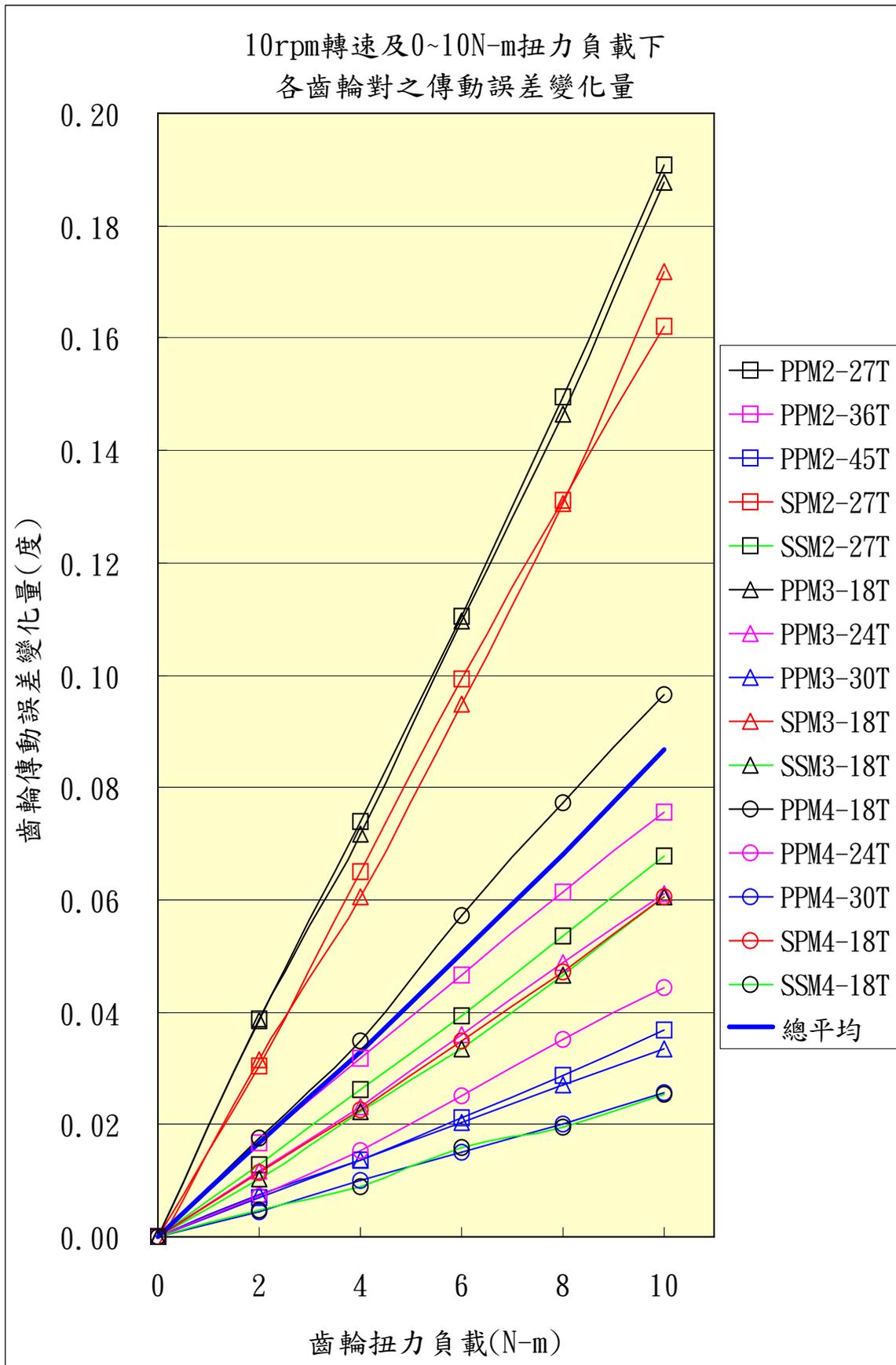


圖 4.38 受扭力負載之正齒輪對的傳動誤差變化量

4.4 受扭力負載之正齒輪的基準點相位角變化之分析

由於各齒輪之鍵槽中心與齒厚中心不易加工成一致，在齒輪傳動誤差測試之齒輪對安裝後，輸入端角度編碼器之基準(Home)點與輸出端角度編碼器之基準點會有一角度差，在此稱其為該對齒輪之基準點相位角或簡稱為齒輪基準點相位角。在本泛用型齒輪測試機進行齒輪傳動誤差測試時，本研究開發之測試程式會自動找到輸入端角度編碼器之基準點與輸出端角度編碼器之基準點，並分別做為主動齒輪及被動齒輪之角度位置記錄之起始點。每次按下開始記錄之齒輪離該角度編碼器基準點之角度位置並不會一致，因此，每次測試經過角度編碼器基準點之所擷取到之第一筆數據不會完全一樣，但相差不會超過前後相臨兩筆數據之差(約 2.5 個脈波數以內)。主動齒輪與被動齒輪經過角度編碼器基準點後所擷取到之第一筆數據，在此分別稱為主動齒輪基準點角位置及被動齒輪基準點角位置，由該被動齒輪基準點角位置減去主動齒輪基準點角位置即為該對齒輪之基準點相位角。無扭力負載時之齒輪基準點相位角大小與其傳動誤差值並無直接關係，只是代表該對齒輪之嚙合角度位置關係，本論文將其視為不同扭力負載所導致該相位角變化之比較基準。因此，從 4.2 節之齒輪傳動誤差測試結果及其測試數據，即可調查各對齒輪受扭力負載時之齒輪基準點相位角變化情況。各對齒輪之基準點相位角整理如表 4.7 至表 4.9 所示，其各扭力負載之基準點相位角減去 0N-m 時之基準點相位角即為其變化量，相位角變化量之整理結果如圖 4.39 至圖 4.45 所示。依此些基準點相位角之變化圖表可歸納成下列四點結論：

- (1) 齒輪基準點相位角變化量與扭力負載增加量成正比，如圖 4.39 至圖 4.45 所示，因此，齒輪基準點相位角會隨扭力負載增加而呈線性關係地減小。
- (2) 相同模數及齒數時，塑膠齒輪因剛性比鋼材齒輪低，因此，同扭力負載下之齒輪基準點相位角變化量比鋼材齒輪大，如圖 4.39 至圖 4.41 所示。
- (3) 相同模數及材質，不同齒數時，因齒數愈大，其節圓半徑愈大，同扭力負載下相對齒面之受力減小，因此，其齒輪基準點相位角變化量愈小，如圖 4.39 至圖 4.41 所示。
- (4) 相同齒數及材質，不同模數時，因模數愈大，其節圓半徑愈大，同扭力負載下相對齒面之受力減小，因此，其齒輪基準點相位角變化量愈小，如圖 4.42 至圖 4.44 所示。

表 4.7 受扭力負載之模數 2mm 正齒輪對的基準點相位角變化量

模數(mm)		2				
齒數		27	36	45	27	27
壓力角(度)		20				
螺旋角(度)		0				
齒面寬(mm)		10				
標準節圓直徑(mm)		54	72	90	54	54
齒輪對代號		PPM2-27T	PPM2-36T	PPM2-45T	SPM2-27T	SSM2-27T
材質	主動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材	鋼材
	被動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材
主動齒輪基準點角位置(度)	0N-m	0.0117	0.0017	0.0261	0.0062	0.0021
	2N-m	0.0226	0.0262	0.0308	0.0305	0.0281
	4N-m	0.0105	0.0365	0.0271	0.0373	0.0040
	6N-m	0.0136	0.0158	0.0026	0.0266	0.0339
	8N-m	0.0257	0.0350	0.0198	0.0242	0.0244
	10N-m	0.0131	0.0097	0.0306	0.0220	0.0341
被動齒輪基準點角位置(度)	0N-m	3.5786	9.1377	1.8606	1.7089	7.5544
	2N-m	3.3918	9.0607	1.8029	1.5352	7.4809
	4N-m	3.1553	8.9548	1.7275	1.3064	7.3408
	6N-m	2.9070	8.8125	1.6304	1.0464	7.2369
	8N-m	2.6589	8.6971	1.5631	0.7665	7.0743
	10N-m	2.3633	8.5458	1.4900	0.5014	6.9504
基準點相位角(度)	0N-m	3.5670	9.1360	1.8345	1.7027	7.5523
	2N-m	3.3691	9.0345	1.7721	1.5048	7.4528
	4N-m	3.1448	8.9183	1.7004	1.2692	7.3369
	6N-m	2.8934	8.7968	1.6278	1.0198	7.2030
	8N-m	2.6332	8.6621	1.5433	0.7423	7.0499
	10N-m	2.3502	8.5361	1.4595	0.4794	6.9163
基準點相位角之變動量(度)	0N-m	0	0	0	0	0
	2N-m	0.1978	0.1016	0.0624	0.1979	0.0994
	4N-m	0.4222	0.2178	0.1340	0.4335	0.2154
	6N-m	0.6736	0.3393	0.2067	0.6829	0.3492
	8N-m	0.9338	0.4740	0.2912	0.9604	0.5024
	10N-m	1.2167	0.5999	0.3750	1.2233	0.6359

表 4.8 受扭力負載之模數 3mm 正齒輪對的基準點相位角變化量

模數(mm)		3				
齒數		18	24	30	18	18
壓力角(度)		20				
螺旋角(度)		0				
齒面寬(mm)		10				
標準節圓直徑(mm)		54	72	90	54	54
齒輪對代號		PPM3-18T	PPM3-24T	PPM3-30T	SPM3-18T	SSM3-18T
材質	主動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材	鋼材
	被動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材
主動齒輪基準點角位置(度)	0N-m	0.0321	0.0217	0.0113	0.0068	0.0303
	2N-m	0.0373	0.0264	0.0267	0.0354	0.0242
	4N-m	0.0205	0.0203	0.0307	0.0290	0.0265
	6N-m	0.0100	0.0020	0.0215	0.0387	0.0323
	8N-m	0.0323	0.0021	0.0018	0.0091	0.0269
	10N-m	0.0393	0.0035	0.0215	0.0296	0.0049
被動齒輪基準點角位置(度)	0N-m	19.0829	13.4959	4.8174	13.8633	3.0413
	2N-m	18.8420	13.4069	4.7708	13.7166	2.9371
	4N-m	18.5807	13.2925	4.7064	13.5166	2.8138
	6N-m	18.3116	13.1709	4.6272	13.3083	2.6785
	8N-m	18.0491	13.0518	4.5378	13.0588	2.5248
	10N-m	17.7690	12.9410	4.4787	12.8481	2.3584
基準點相位角(度)	0N-m	19.0509	13.4742	4.8061	13.8564	3.0110
	2N-m	18.8047	13.3805	4.7441	13.6813	2.9128
	4N-m	18.5602	13.2722	4.6757	13.4876	2.7873
	6N-m	18.3016	13.1689	4.6057	13.2696	2.6462
	8N-m	18.0168	13.0496	4.5360	13.0498	2.4980
	10N-m	17.7298	12.9375	4.4573	12.8185	2.3535
基準點相位角之變動量(度)	0N-m	0	0	0	0	0
	2N-m	0.2461	0.0937	0.0620	0.1752	0.0982
	4N-m	0.4906	0.2020	0.1304	0.3688	0.2237
	6N-m	0.7492	0.3053	0.2004	0.5868	0.3648
	8N-m	1.0340	0.4245	0.2700	0.8067	0.5130
	10N-m	1.3211	0.5367	0.3488	1.0380	0.6575

表 4.9 受扭力負載之模數 4mm 正齒輪對的基準點相位角變化量

模數(mm)		4				
齒數		18	24	30	18	18
壓力角(度)		20				
螺旋角(度)		0				
齒面寬(mm)		10				
標準節圓直徑(mm)		72	96	120	72	72
齒輪對代號		PPM4-18T	PPM4-24T	PPM4-30T	SPM4-18T	SSM4-18T
材質	主動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材	鋼材
	被動齒輪	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠	鋼材
主動齒輪基準點角位置(度)	0N-m	0.0128	0.0070	0.0218	0.0358	0.0106
	2N-m	0.0302	0.0217	0.0017	0.0197	0.0231
	4N-m	0.0228	0.0363	0.0366	0.0057	0.0345
	6N-m	0.0357	0.0290	0.0401	0.0168	0.0327
	8N-m	0.0149	0.0326	0.0264	0.0323	0.0171
	10N-m	0.0392	0.0290	0.0038	0.0190	0.0305
被動齒輪基準點角位置(度)	0N-m	8.5750	11.4215	9.9026	13.1283	4.6665
	2N-m	8.4325	11.3731	9.8395	13.0039	4.6183
	4N-m	8.2599	11.3207	9.8307	12.8729	4.5593
	6N-m	8.1115	11.2456	9.7892	12.7679	4.4786
	8N-m	7.9387	11.1829	9.7292	12.6776	4.3771
	10N-m	7.8019	11.1094	9.6606	12.5569	4.2969
基準點相位角(度)	0N-m	8.5622	11.4145	9.8807	13.0926	4.6559
	2N-m	8.4023	11.3514	9.8378	12.9842	4.5952
	4N-m	8.2371	11.2844	9.7941	12.8673	4.5248
	6N-m	8.0758	11.2166	9.7491	12.7511	4.4459
	8N-m	7.9238	11.1503	9.7028	12.6454	4.3600
	10N-m	7.7627	11.0804	9.6568	12.5379	4.2664
基準點相位角之變動量(度)	0N-m	0	0	0	0	0
	2N-m	0.1599	0.0631	0.0430	0.1084	0.0607
	4N-m	0.3251	0.1301	0.0866	0.2253	0.1310
	6N-m	0.4864	0.1980	0.1317	0.3414	0.2100
	8N-m	0.6384	0.2643	0.1779	0.4472	0.2959
	10N-m	0.7996	0.3342	0.2239	0.5546	0.3895

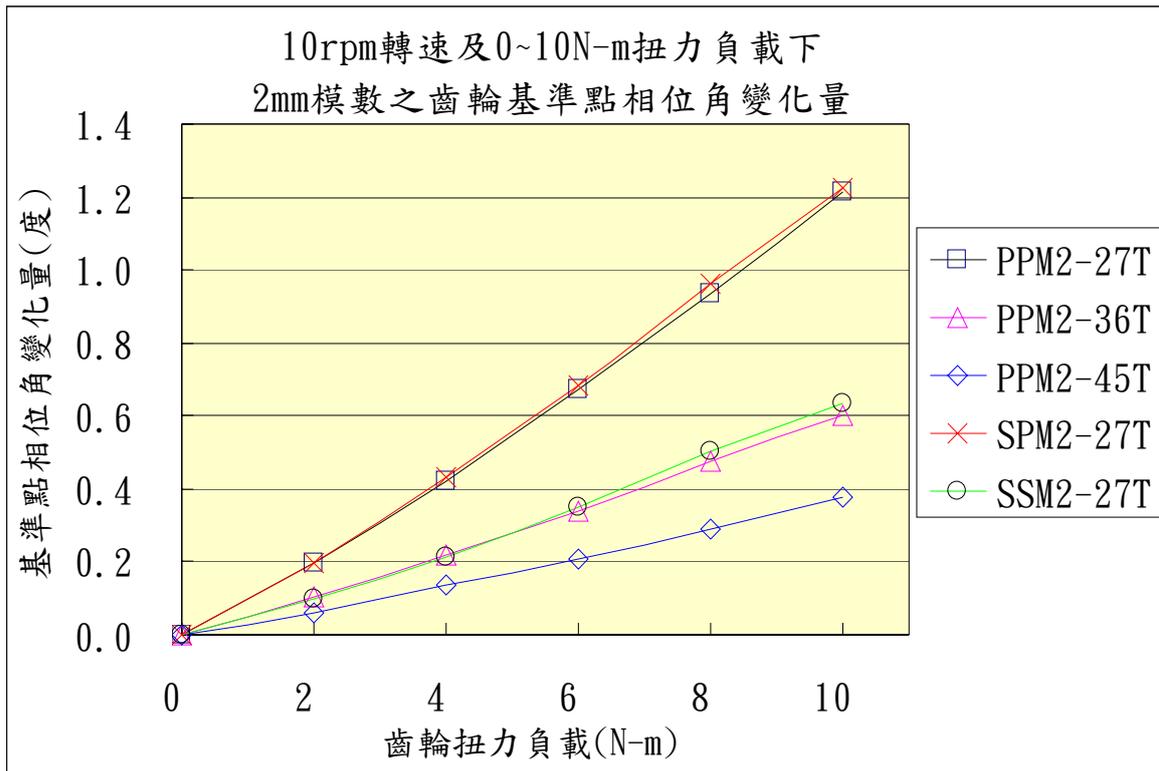


圖 4.39 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(模數 2mm)

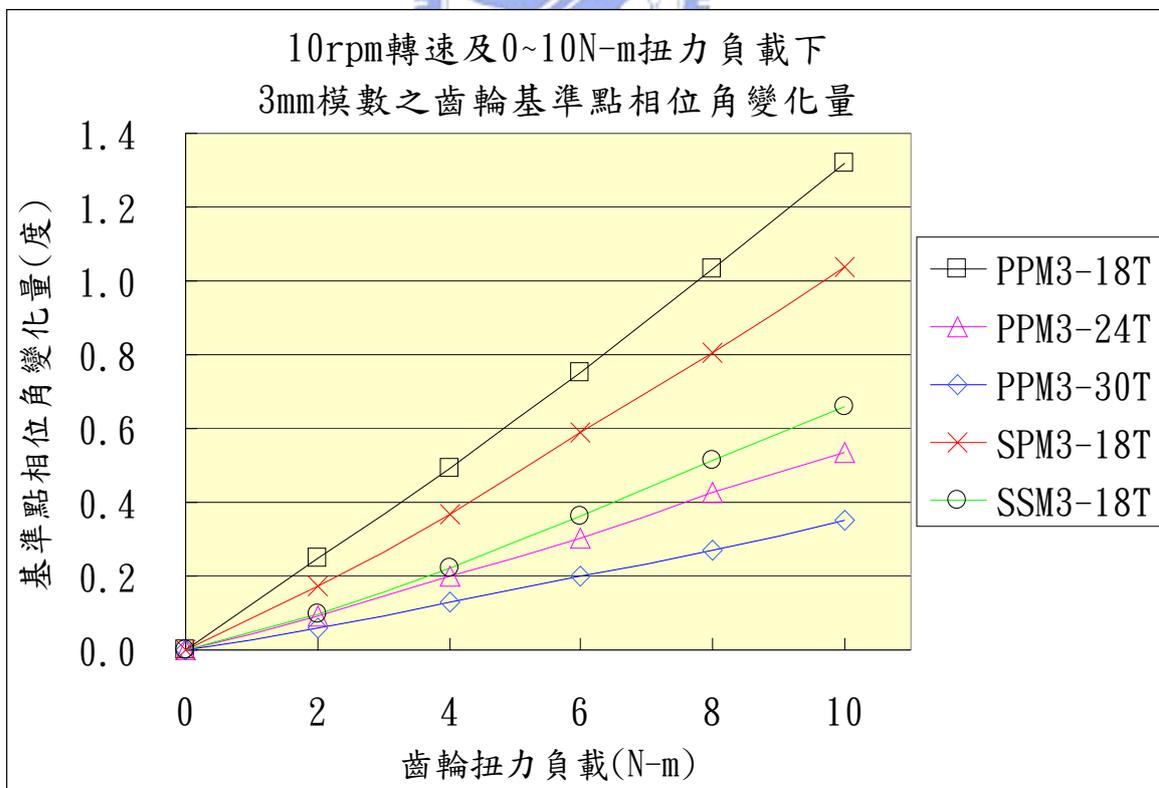


圖 4.40 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(模數 3mm)

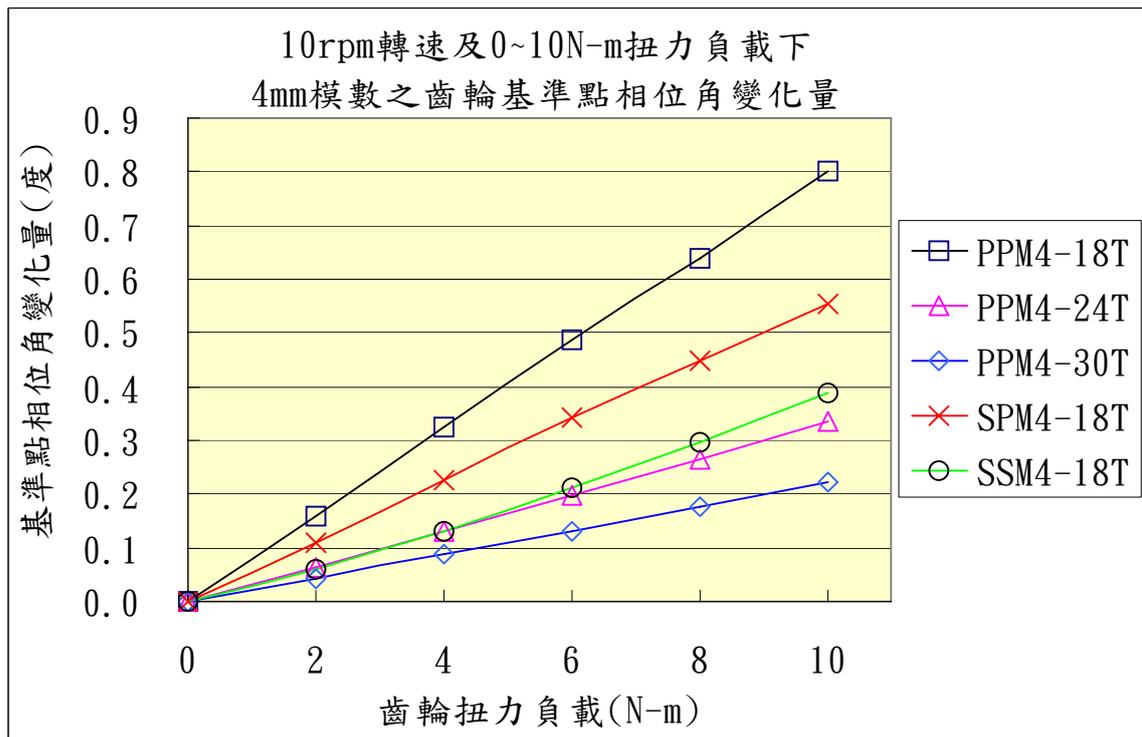


圖 4.41 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(模數 4mm)

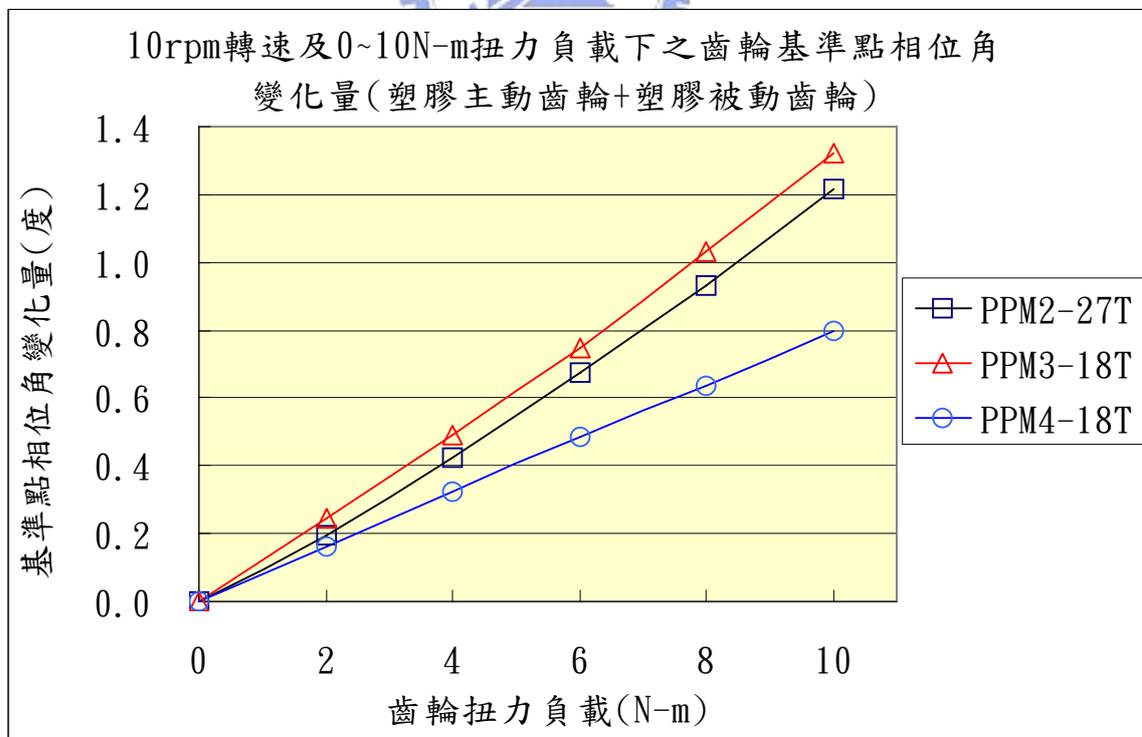


圖 4.42 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(PPM)

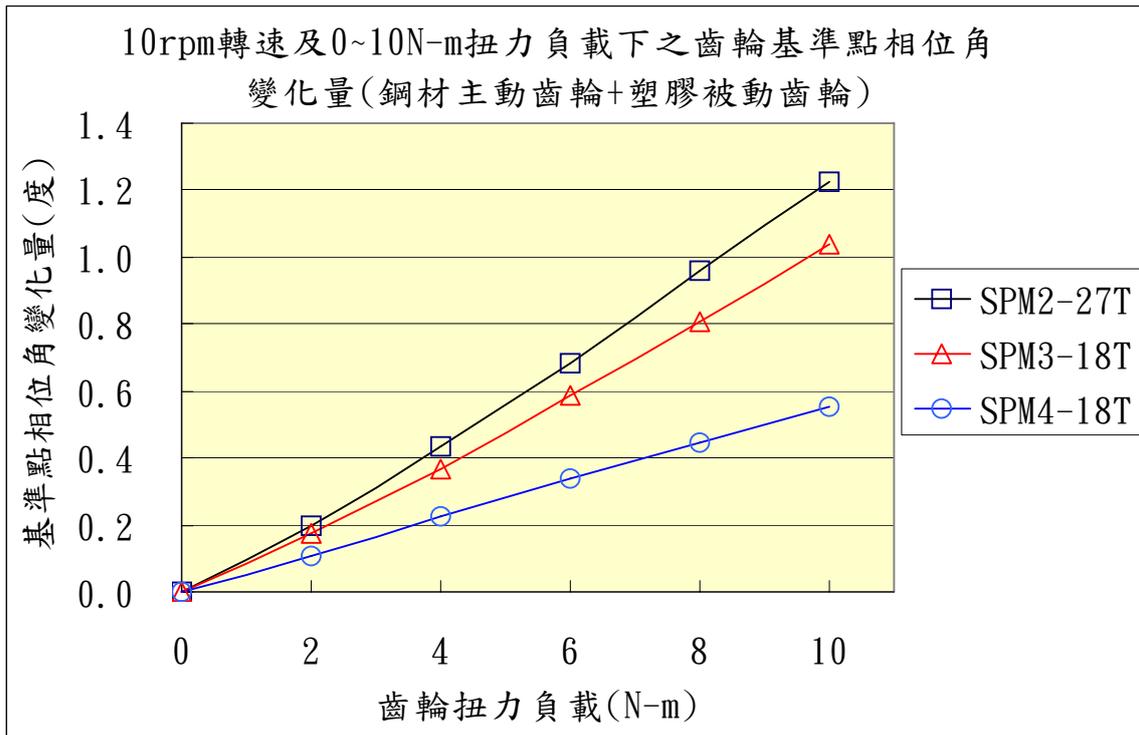


圖 4.43 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(SPM)

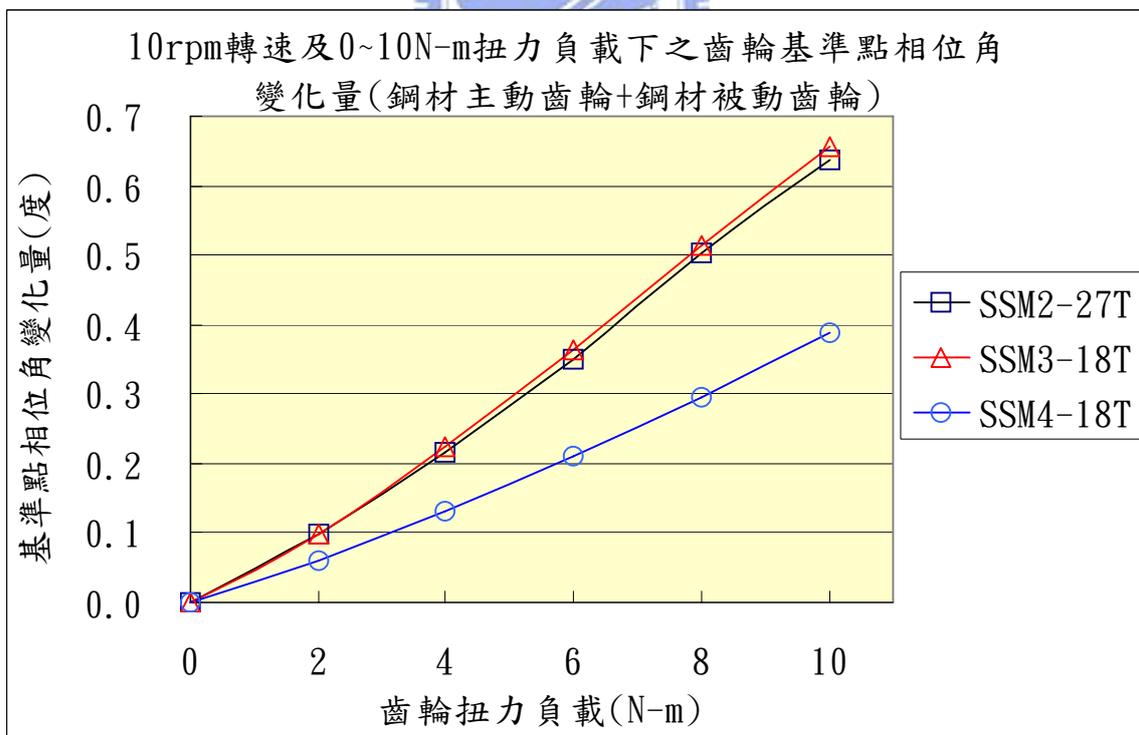


圖 4.44 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量(SSM)

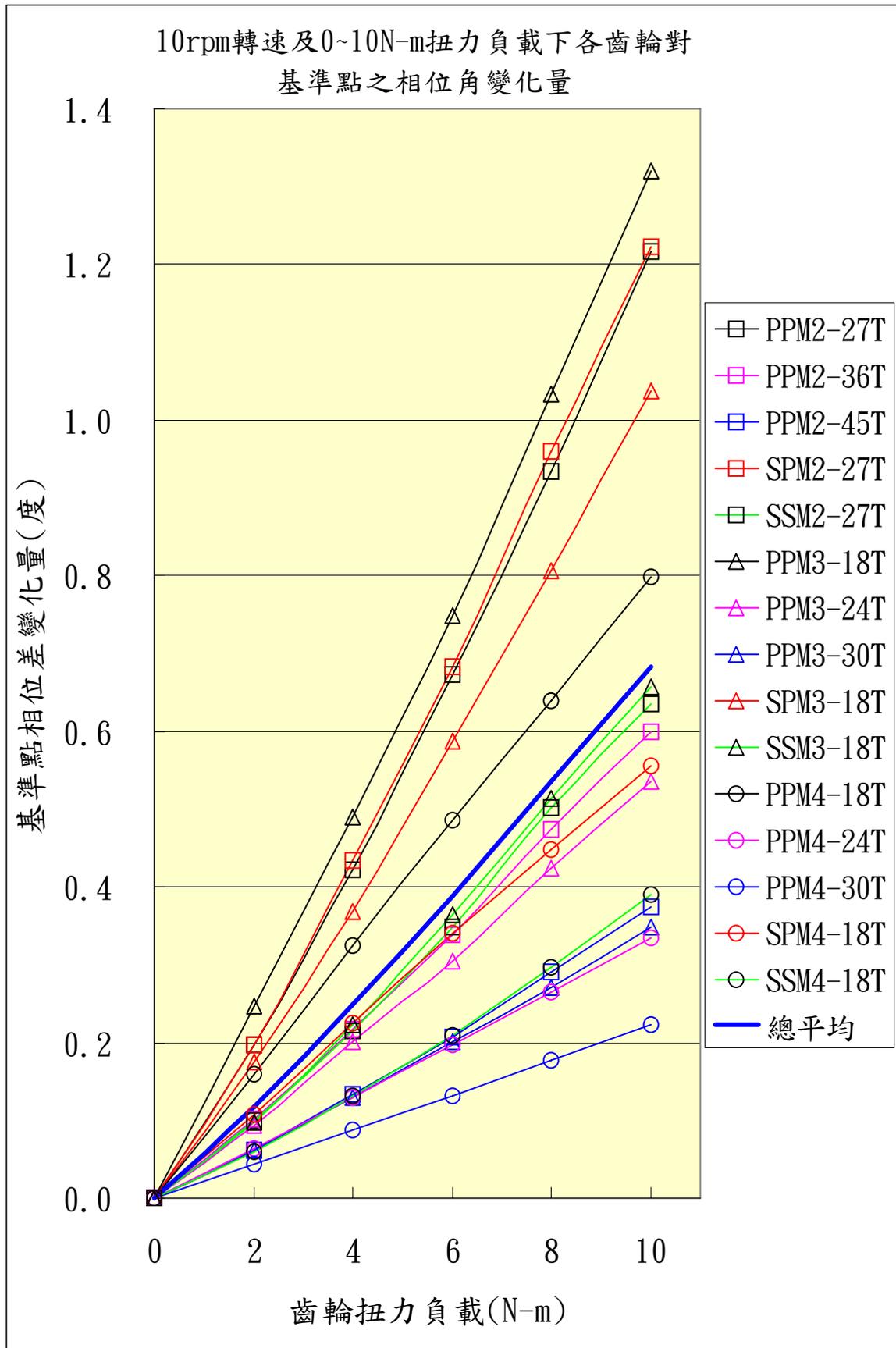


圖 4.45 受扭力負載之正齒輪對的基準點相位角變化量

第五章 不同中心距之正齒輪的傳動誤差測試及分析

5.1 不同中心距之正齒輪的傳動誤差測試經過

為求探討中心距改變對正齒輪傳動誤差之影響，以 SSM3-18T 之齒輪對為測試齒輪，於 0N-m、5N-m 及 10N-m 等扭力負載下分別測試 54.2mm 至 55.4mm 範圍內以 0.1mm 為其增量之各中心距狀況下之齒輪傳動誤差，詳細測試參數如下：

- (1) 轉速:10rpm
- (2) 扭力負載: 0N-m、5N-m 及 10N-m
- (3) 齒輪對: SSM3-18T
- (4) 摺數(Fold):12
- (5) 齒輪中心距: 54.2mm、54.3mm、54.4mm、54.5mm、54.6mm、54.7mm、54.8mm、54.9mm、55.0mm、55.1mm、55.2mm、55.3mm 及 55.4mm
- (6) 每次測試記錄之筆數:20000 筆
- (7) 記錄角度範圍:約 600 度
- (8) 潤滑:無



5.2 不同中心距之正齒輪的傳動誤差測試結果

不同中心距之正齒輪傳動誤差測試結果如圖 5.1 至圖 5.9 所示，從圖 5.1 至圖 5.9 可清楚看出在 54.8mm 中心距起單齒之傳動誤差波峰間開始另突出一小波峰，此即顯示此時該齒輪對之接觸率已下降到一以下，此突出之小波峰處，正好無輪齒在嚙合，因此，瞬間產生齒撞齒之振波。隨著中心距繼續增大，則該小波峰迅速漲高，中心距續增大到 55.4mm 時，該小波峰已高過單齒之傳動誤差波峰，此時已可以明顯地聽到齒撞齒之振動聲。從圖 5.2、圖 5.3、圖 5.5、圖 5.6、圖 5.8 及圖 5.9 可清楚看出無扭力負載時，單齒之傳動誤差波高無明顯隨中心距增加而增加之現象產生，而齒輪對在 5 N-m 及 10N-m 之扭力負載時，單齒之傳動誤差波高則明顯會隨中心距增加而增大，至 55.0mm 之中心距時單齒之傳動誤差波高均升至最高，超過 55.0 mm 之中心距後，單齒之傳動誤差波高不再升高反而是下降，此現象於下節之分析圖表中可更清楚地顯示。在產業界實際應用上不會去使用到接觸率小於一，以免導致振動及噪音之問題。

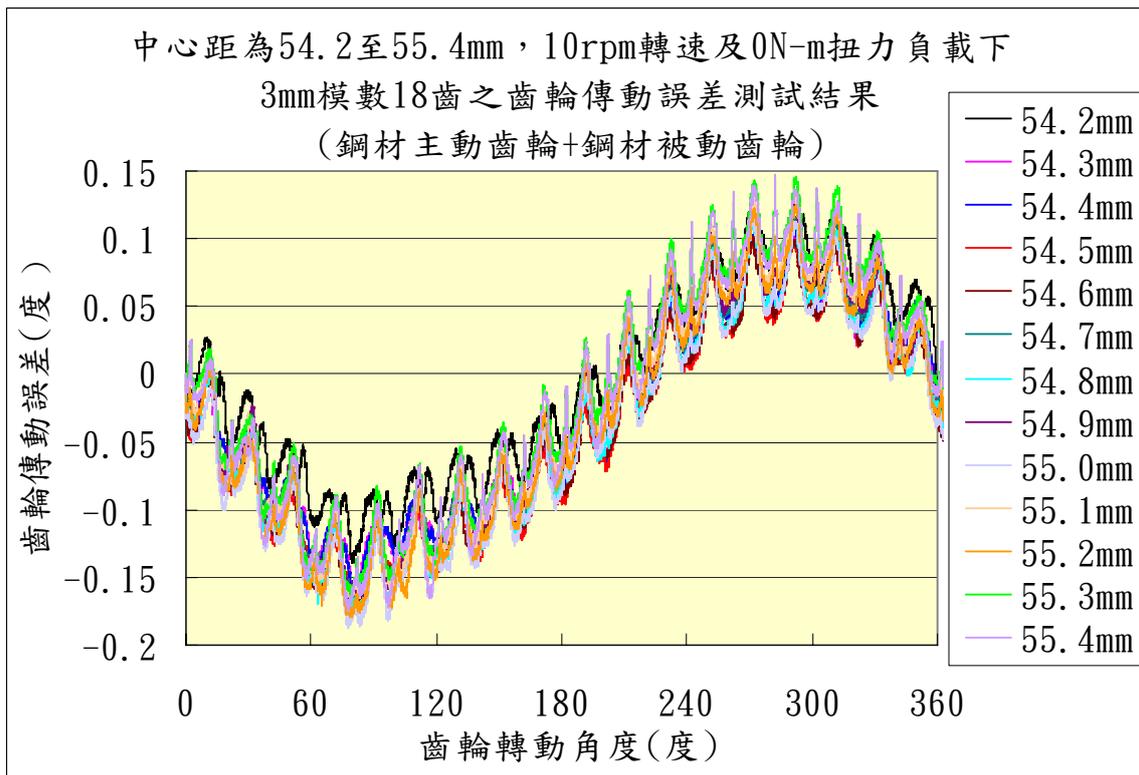


圖 5.1 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果(0°~360°及 0N-m)

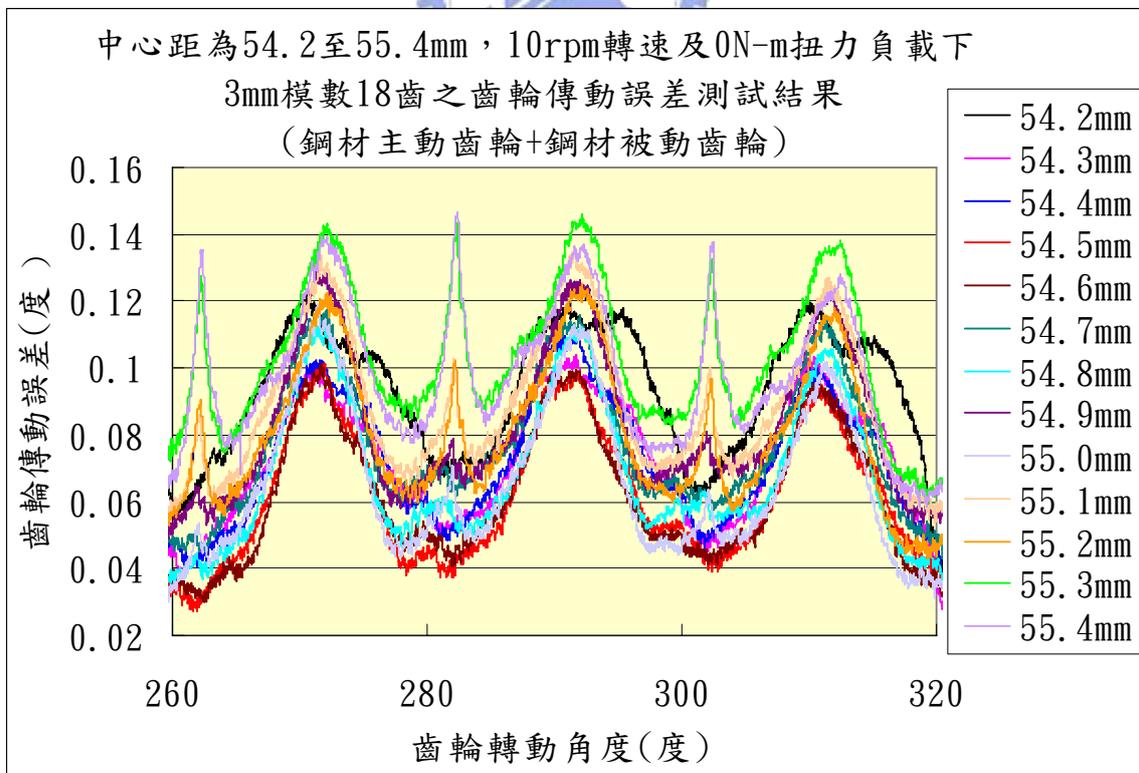


圖 5.2 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果(260°~320°及 0N-m)

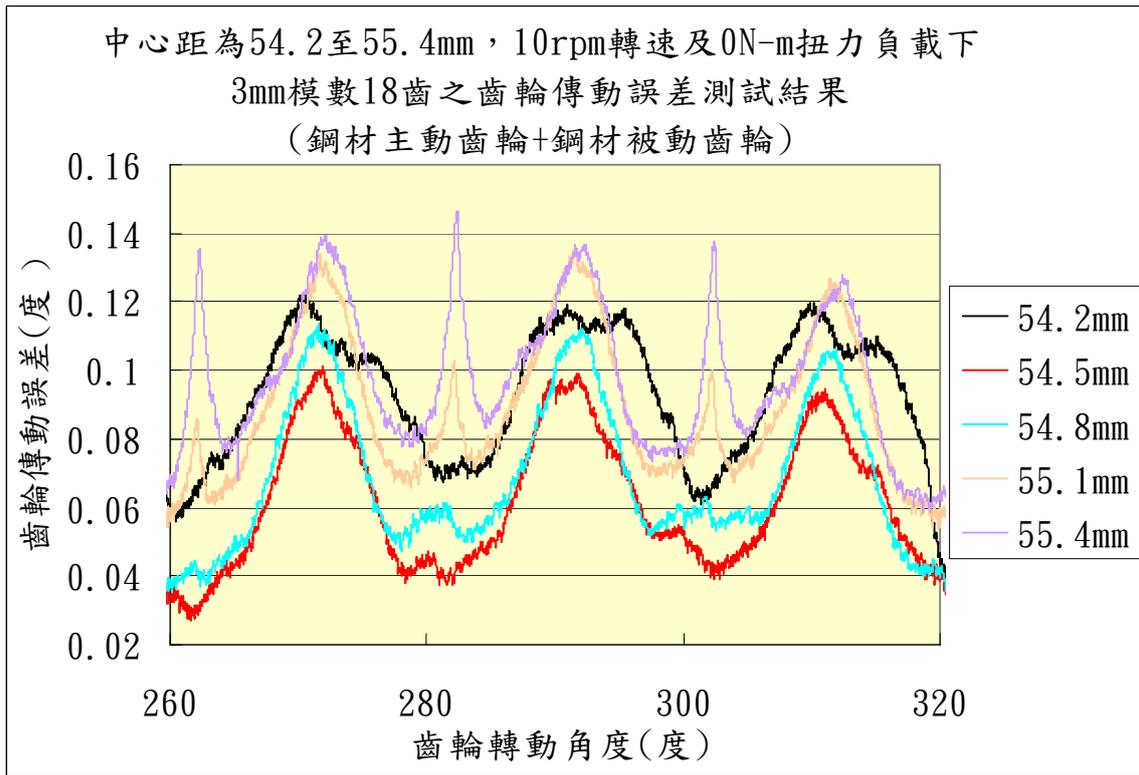


圖 5.3 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果(260°~320°及 0N-m)

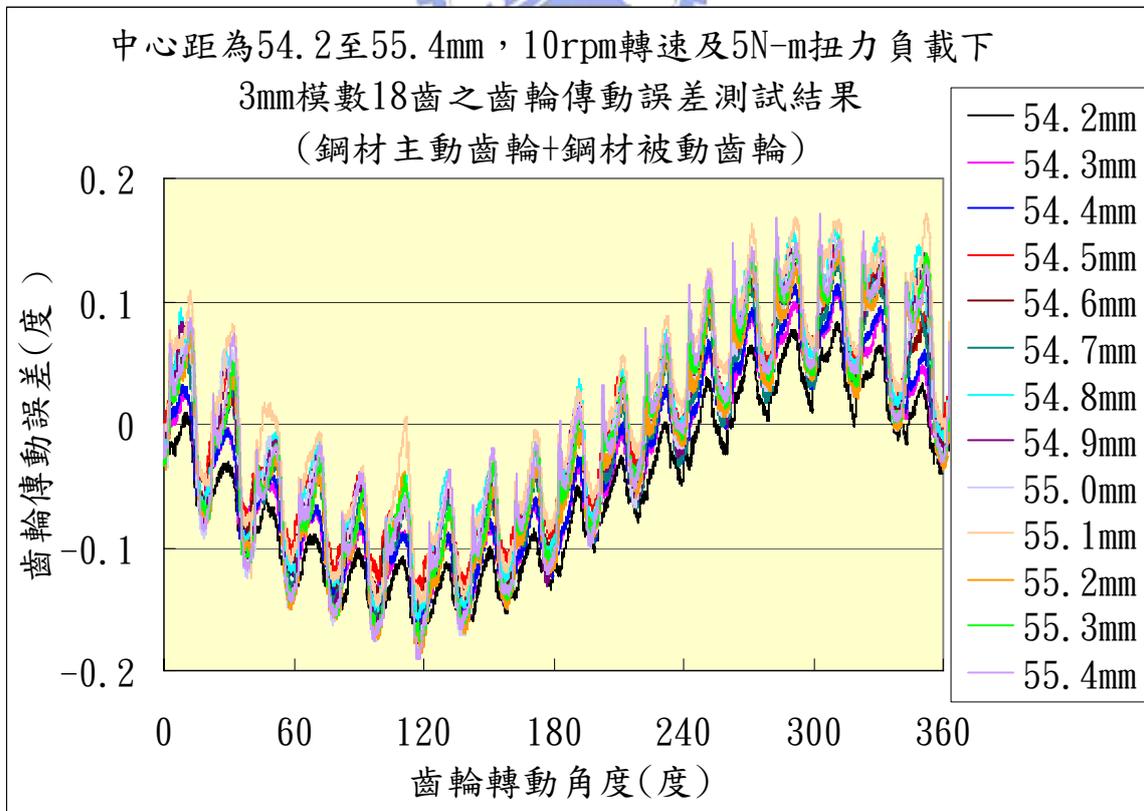


圖 5.4 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果(0°~360°及 5N-m)

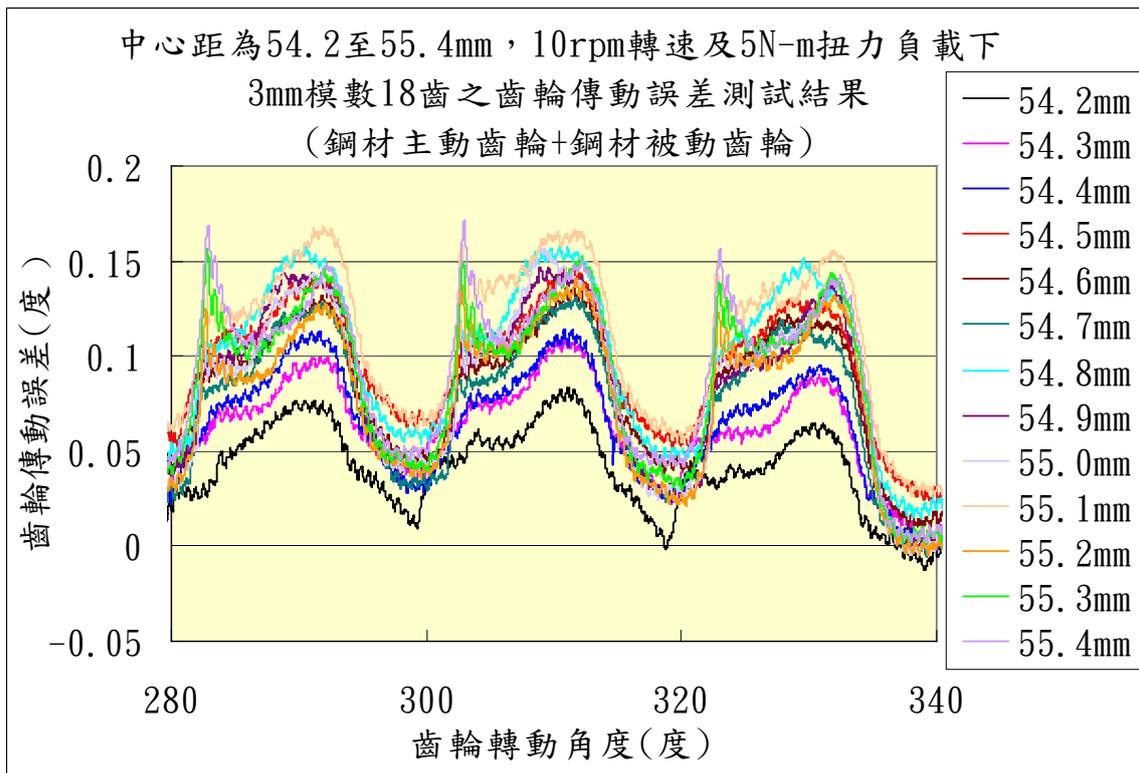


圖 5.5 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果(280°~340°及 5N-m)

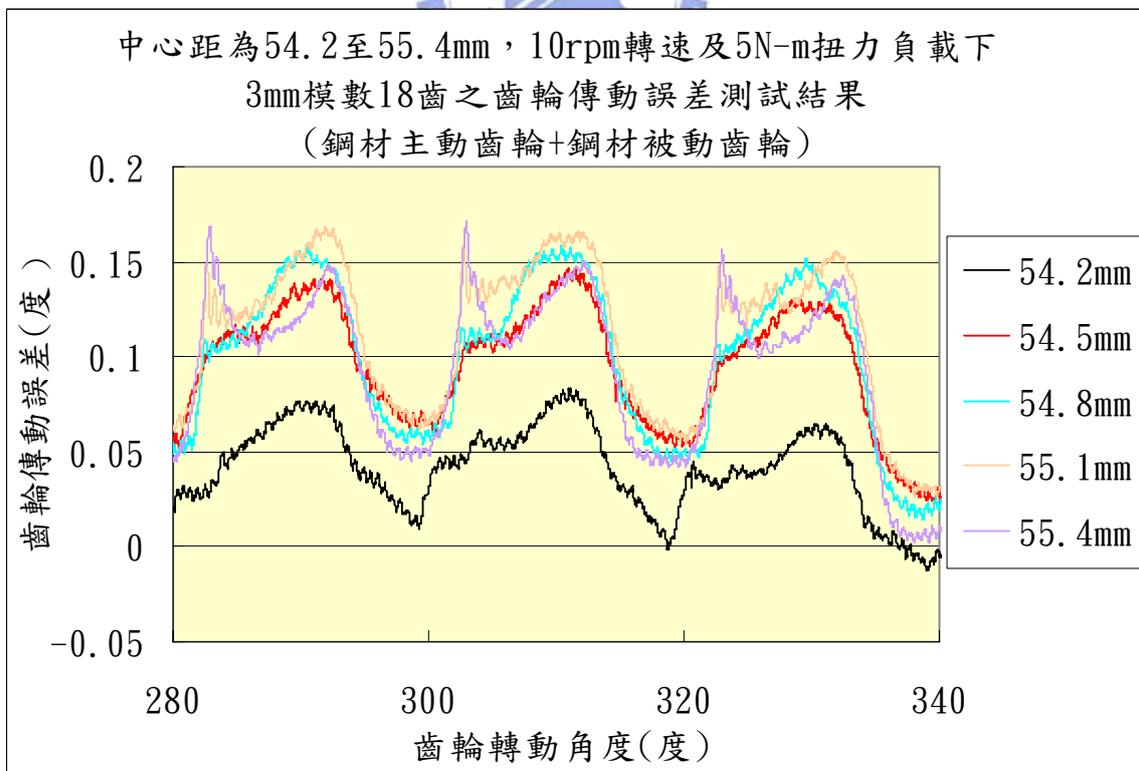


圖 5.6 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果(280°~340°及 5N-m)

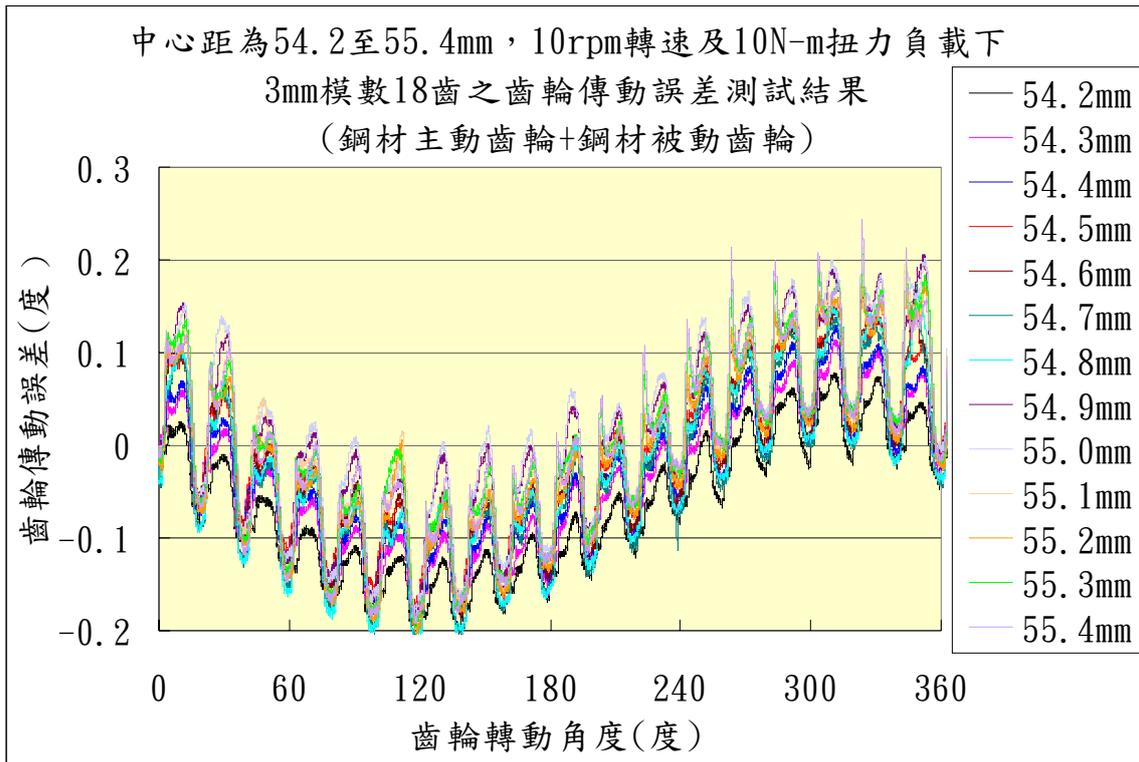


圖 5.7 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果(0° ~ 360° 及 10N-m)

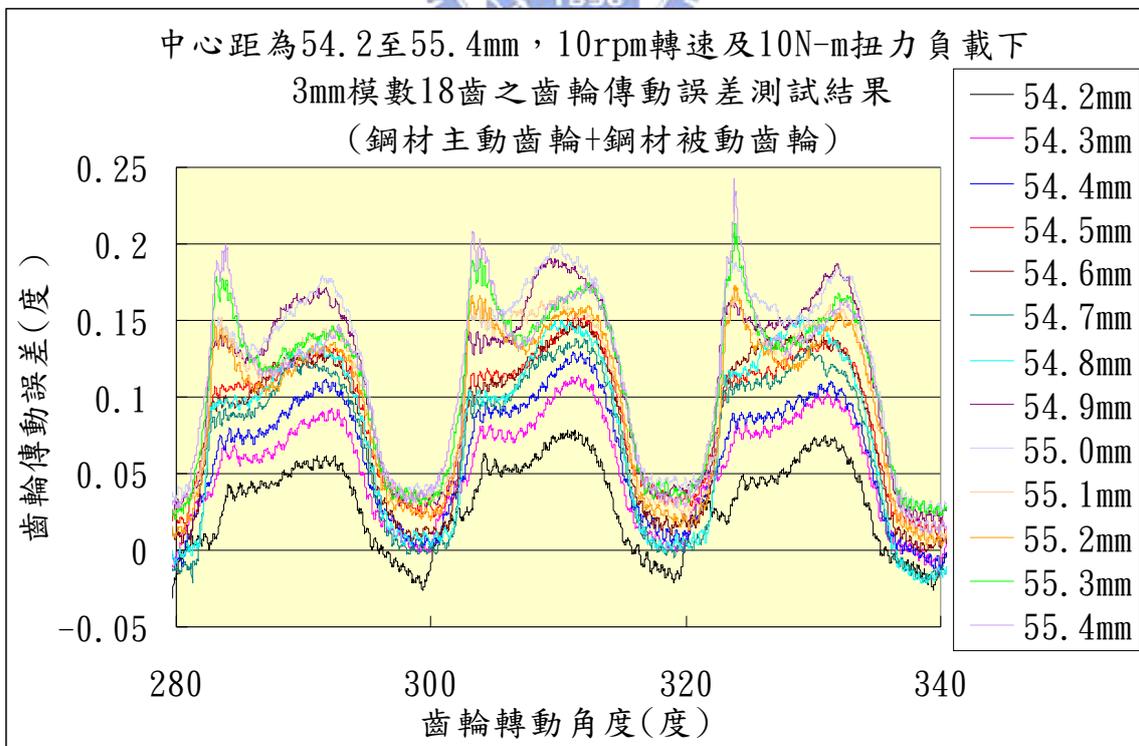


圖 5.8 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果(280° ~ 340° 及 10N-m)

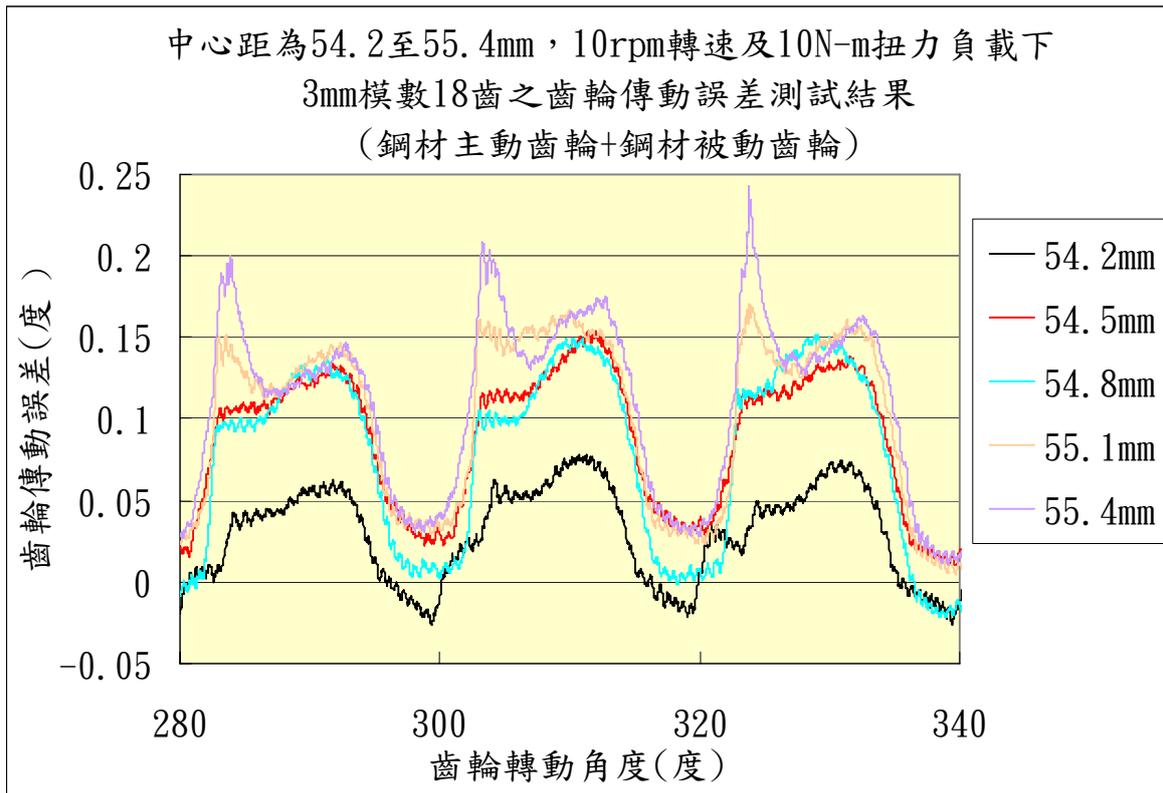


圖 5.9 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差測試結果(280°~340°及 10N-m)

5.3 不同中心距之正齒輪的傳動誤差測試結果之分析

依 4.3 節之正齒輪嚙合時單齒傳動誤差值估算方法，可將 5.2 節所探討之不同中心距的正齒輪其傳動誤差測試結果之數據作整理，如表 5.1、表 5.2 及圖 5.10 與圖 5.11 所示。依此些圖表可歸納成下列三點結論：

- (1) 齒輪基準點相位角會隨齒輪中心距加大而呈線性關係地減小，如圖 5.10 所示。
- (2) 在不考慮齒隙變化之影響條件下，理論上標準漸開線齒形之齒輪對，改變齒輪中心距並不影響其齒輪傳動誤差，但實際上所測試之齒輪不可能是完美之漸開線齒形，必有其製造上的齒形誤差存在，再則以同一對齒輪作測試，齒輪中心距加大，齒隙即隨之增大。實際之測試結果顯示，在無扭力負載(即 0N-m)時，單齒傳動誤差波高尚不會隨中心距加大而有明顯增大，但扭力負載為 5N-m 及 10N-m 時，單齒傳動誤差波高則會明顯地隨中心距增加而增大，至中心距為 55.0mm 時單齒傳動誤差波高均升至最高，此現象可能是該齒輪對之齒隙隨中心距增大而增大，所導致齒輪嚙合振動加大之影響。扭力負載為 5N-m 及 10N-m 時之單齒傳動誤差波高在超過 55.0mm 中心距後，即不再升高反而下降，如

圖 5.11 所示，此是因受接觸率降至一以下所產生之突波影響。

- (3) 在 54.8mm 中心距時，單齒之傳動誤差波峰間開始另一突出小波峰，亦即該齒輪對之接觸率已下降到一以下。

表 5.1 不同中心距之正齒輪對的基準點相位角變化量

模數(mm)		3		
齒數		18		
標準節圓直徑(mm)		54		
齒輪對代號		SSM3-18T		
材質		鋼材主動齒輪配鋼材被動齒輪		
扭力負載		0N-m	5N-m	10N-m
基準點 相位角 (度)	54.2mm	22.4794	22.1142	21.7352
	54.3mm	22.3960	22.0434	21.6710
	54.4mm	22.3064	21.9756	21.6098
	54.5mm	22.2224	21.9066	21.5366
	54.6mm	22.1382	21.8172	21.4350
	54.7mm	22.0566	21.7220	21.3434
	54.8mm	21.9668	21.6466	21.2576
	54.9mm	21.8760	21.5580	21.1860
	55.0mm	21.8030	21.4834	21.1020
	55.1mm	21.7206	21.3958	21.0028
	55.2mm	21.6422	21.3042	20.9106
	55.3mm	21.5400	21.2158	20.8288
	55.4mm	21.4646	21.1292	20.7446
基準點 相位角之 變化量 (度)	54.2mm	0	0	0
	54.3mm	-0.0834	-0.0708	-0.0642
	54.4mm	-0.1730	-0.1386	-0.1254
	54.5mm	-0.2570	-0.2076	-0.1986
	54.6mm	-0.3412	-0.2970	-0.3002
	54.7mm	-0.4228	-0.3922	-0.3918
	54.8mm	-0.5126	-0.4676	-0.4776
	54.9mm	-0.6034	-0.5562	-0.5492
	55.0mm	-0.6764	-0.6308	-0.6332
	55.1mm	-0.7588	-0.7184	-0.7324
	55.2mm	-0.8372	-0.8100	-0.8246
	55.3mm	-0.9394	-0.8984	-0.9064
55.4mm	-1.0148	-0.9850	-0.9906	

表 5.2 不同中心距之正齒輪對的傳動誤差變化量

模數(mm)		3		
齒數		18		
標準節圓直徑(mm)		54		
齒輪對代號		SSM3-18T		
材質		鋼材主動齒輪配鋼材被動齒輪		
扭力負載		0N-m	5N-m	10N-m
單齒傳動誤差(度)	54.2mm	0.0579	0.0703	0.0986
	54.3mm	0.0573	0.0751	0.1156
	54.4mm	0.0600	0.0825	0.1231
	54.5mm	0.0592	0.0861	0.1359
	54.6mm	0.0578	0.0930	0.1405
	54.7mm	0.0572	0.1008	0.1424
	54.8mm	0.0597	0.1040	0.1510
	54.9mm	0.0586	0.1085	0.1581
	55.0mm	0.0665	0.1176	0.1616
	55.1mm	0.0635	0.1048	0.1430
	55.2mm	0.0610	0.1035	0.1449
	55.3mm	0.0585	0.1070	0.1448
	55.4mm	0.0602	0.1058	0.1468
	單齒傳動誤差之變化量(度)	54.2mm	0	0
54.3mm		-0.0006	0.0048	0.017
54.4mm		0.0021	0.0122	0.0245
54.5mm		0.0013	0.0158	0.0373
54.6mm		-0.0001	0.0227	0.0419
54.7mm		-0.0007	0.0305	0.0438
54.8mm		0.0018	0.0337	0.0524
54.9mm		0.0007	0.0382	0.0595
55.0mm		0.0086	0.0473	0.063
55.1mm		0.0056	0.0345	0.0444
55.2mm		0.0031	0.0332	0.0463
55.3mm		0.0006	0.0367	0.0462
55.4mm		0.0023	0.0355	0.0482

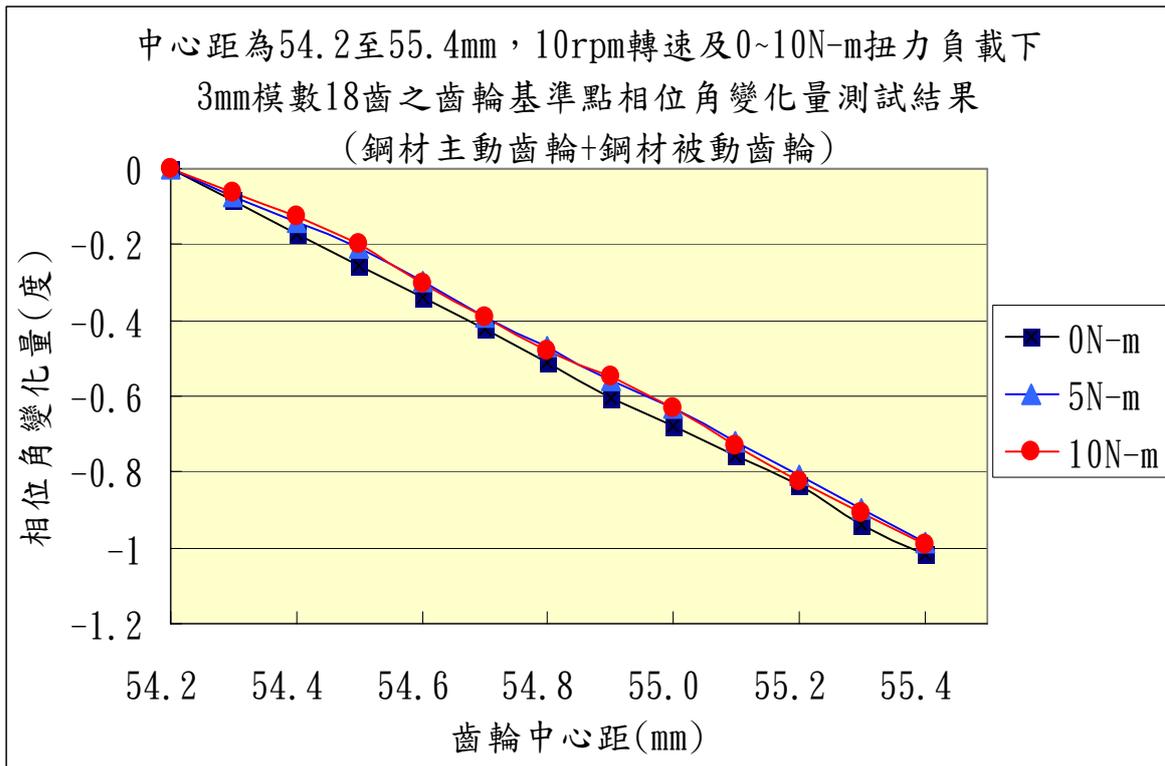


圖 5.10 SSM3-18T 齒輪對變中心距之基準點相位角變化量

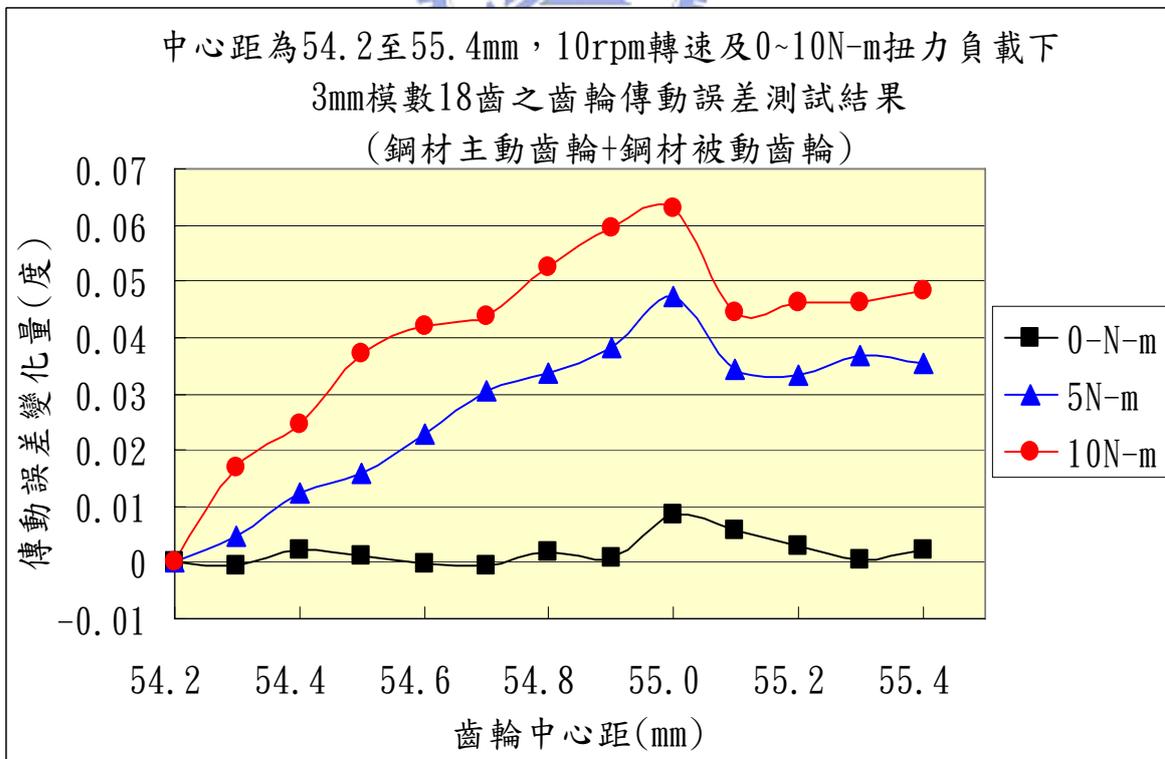


圖 5.11 SSM3-18T 齒輪對變中心距之傳動誤差變化量

第六章 不同軸交角之正齒輪的傳動誤差測試及分析

6.1 不同軸交角之正齒輪的傳動誤差測試經過

由於齒輪製造及組立總是存在若干誤差，使得實際運轉中之齒輪對或多或少仍然存在著些微之軸交角誤差(如為平行軸齒輪則稱為軸平行度誤差)，此角度誤差通常在 1 度以內，即使是很粗糙之齒輪箱其齒輪軸交角偏差亦不太會超過 3 度。因此，為求探討正齒輪之軸平行度誤差對其傳動誤差之影響，本研究即以軸偏差 3 度為探討範圍，並以調整泛用型齒輪測試機之輸出軸，使其與輸入軸成一小角度之軸交角做為齒輪安裝平行度之偏差，探討其對齒輪傳動誤差之影響。以 SSM3-18T 之齒輪對為測試齒輪，於 0N-m、5N-m 及 10N-m 等扭力負載下分別測試 0 度至 3 度範圍內以每 0.5 度為增量的軸交角狀況下之齒輪傳動誤差，詳細測試參數如下：

- (1) 轉速:10rpm
- (2) 扭力負載: 0N-m、5N-m 及 10N-m
- (3) 齒輪對: SSM3-18T
- (4) 摺數(Fold):12
- (5) 齒輪軸交角: 0 度、0.5 度、1 度、1.5 度、2 度、2.5 度及 3 度
- (6) 每次測試記錄之筆數:20000 筆
- (7) 記錄角度範圍:約 600 度
- (8) 潤滑:無

6.2 不同軸交角之正齒輪的傳動誤差測試結果

不同軸交角之正齒輪傳動誤差之測試結果，如圖 6.1 至圖 6.6 所示。對正齒輪而言，基本上軸交角不為 0 度時，已是一齒輪之齒面端部銳邊與另一齒輪之齒面嚙合，很快該銳邊即被磨鈍，因此，前後測試結果會有些差異產生，必然無法呈現如理論分析之無負載時傳動誤差與軸交角成線性關係，但基本上已顯現齒輪傳動誤差會隨軸交角之增大而變大。

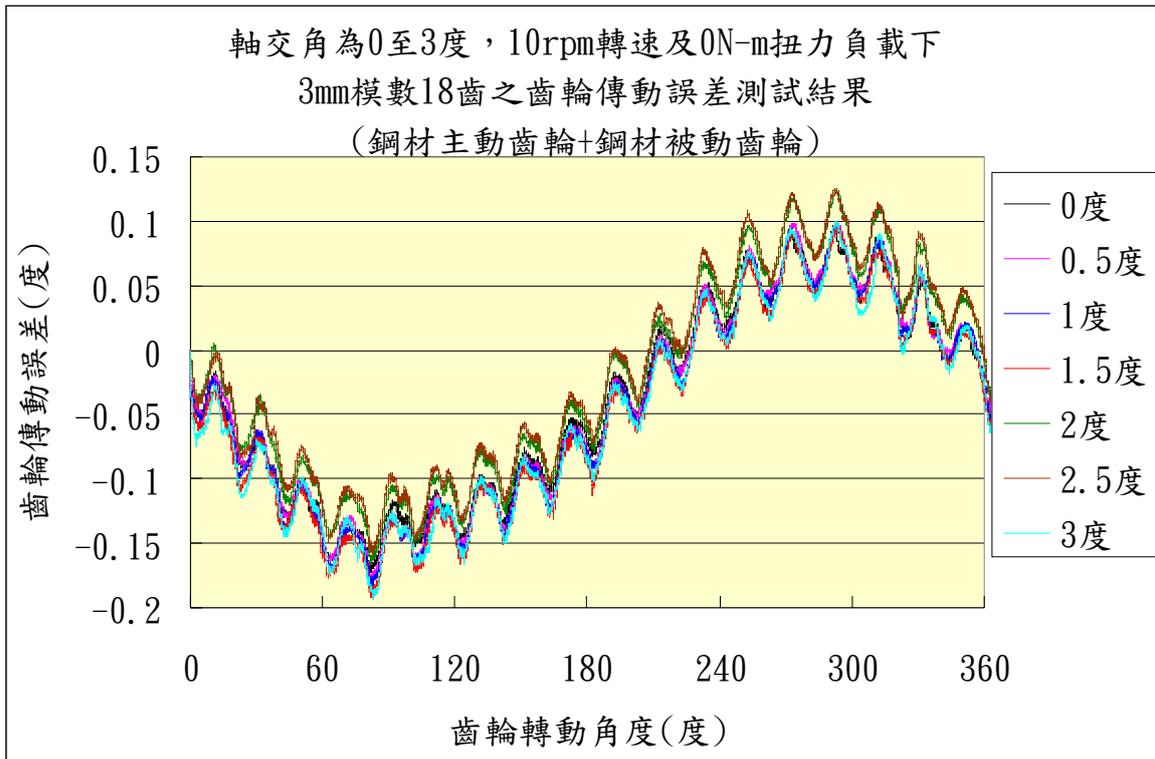


圖 6.1 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果(0°~360°及 0N-m)

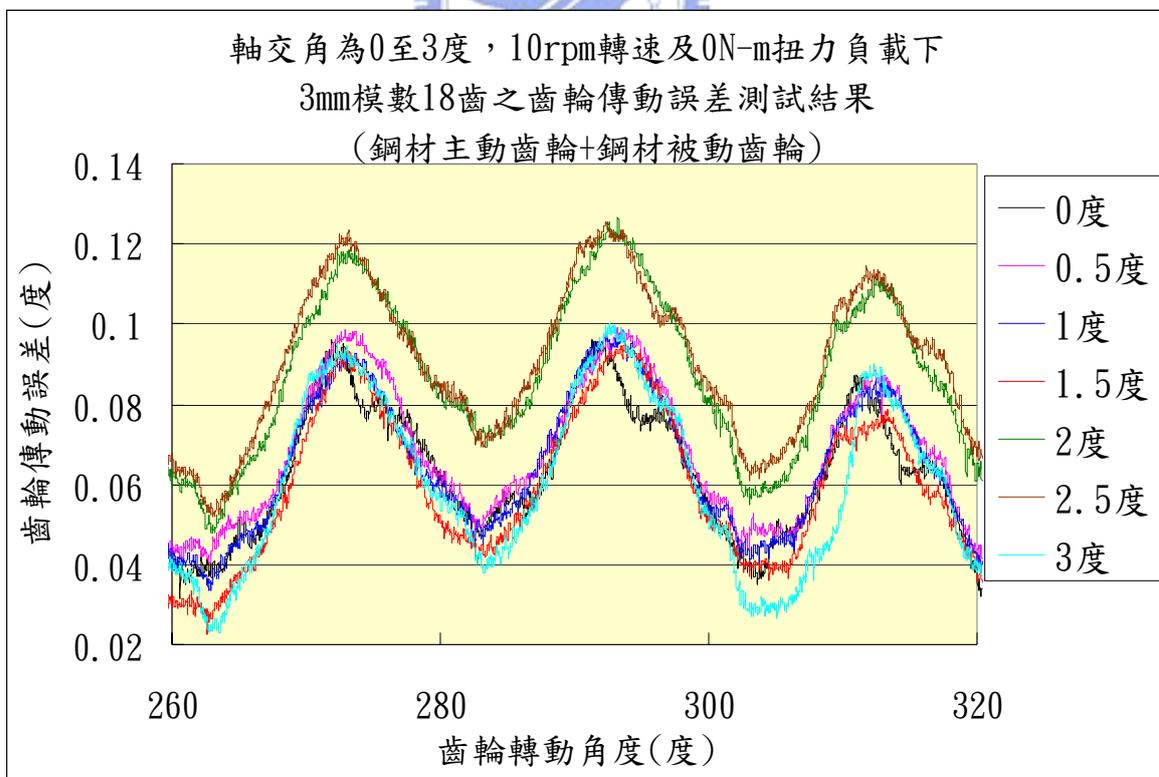


圖 6.2 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果(260°~320°及 0N-m)

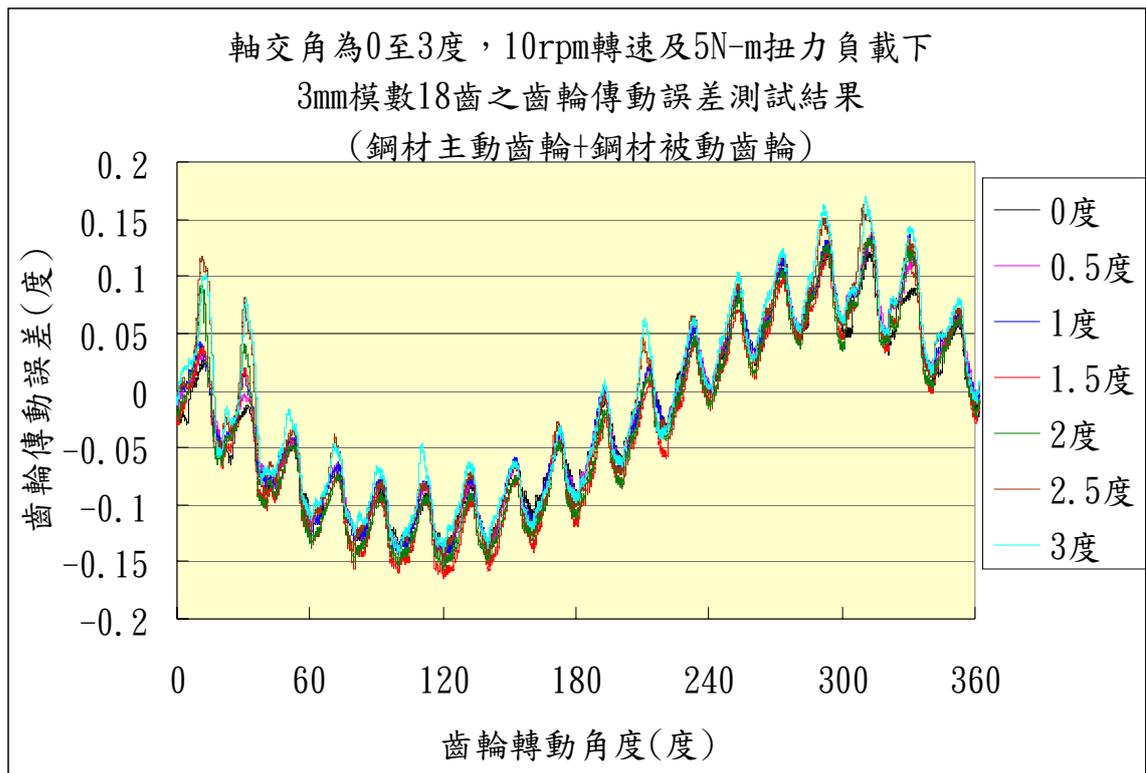


圖 6.3 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果(0°~360°及 5N-m)

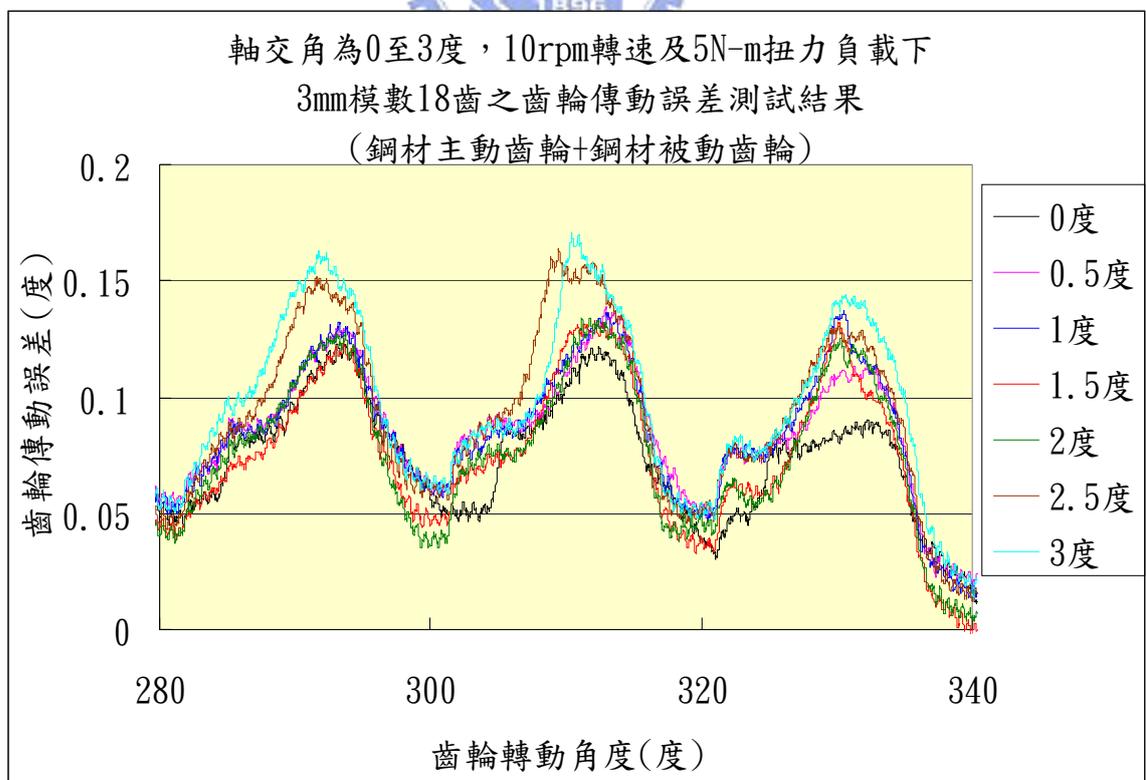


圖 6.4 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果(280°~340°及 5N-m)

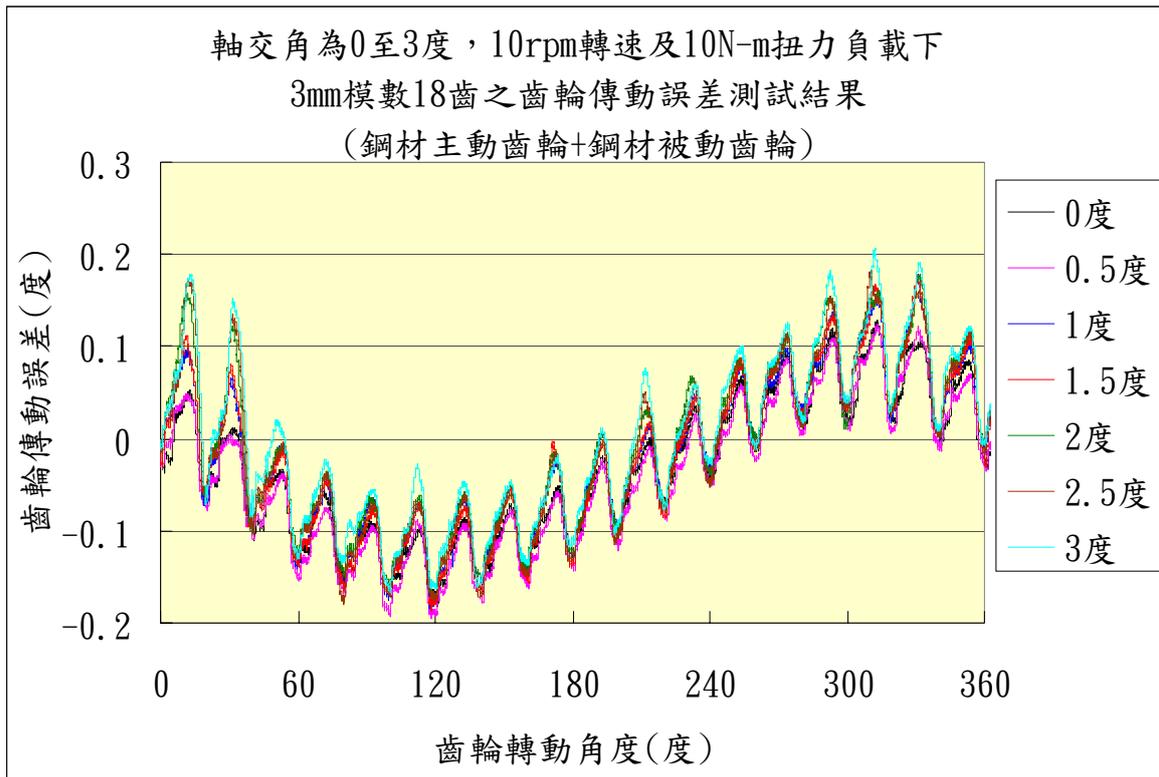


圖 6.5 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果(0°~360°及 10N-m)

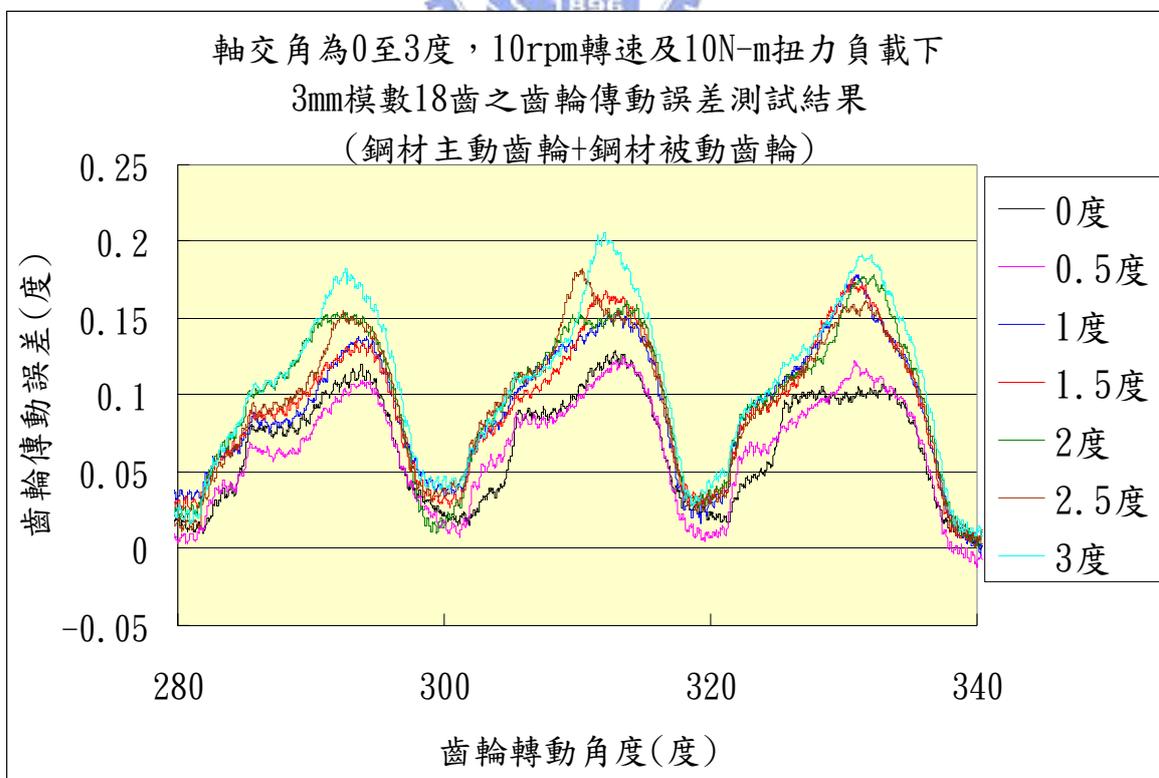


圖 6.6 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差測試結果(280°~340°及 10N-m)

6.3 不同軸交角之正齒輪的傳動誤差測試結果之分析

依據 4.3 節之正齒輪嚙合時單齒傳動誤差值估算方法，可將 6.2 節不同軸交角之正齒輪其傳動誤差測試結果之數據作整理，如表 6.1 及圖 6.7 所示。依據這些圖表可歸納成下列兩點結論：

- (1)齒輪傳動誤差基本上會隨齒輪軸交角之加大而變大，如圖 6.7 所示，但非線性關係，此與理論分析會有些差異。
- (2)不同軸交角之正齒輪傳動誤差測試，基本上是一個齒輪齒面之銳邊與另一齒輪之齒面相嚙合，因此，齒輪若加了負載後，該銳邊很快即有明顯磨耗(磨鈍)，所以測試前後數據易產生差異。

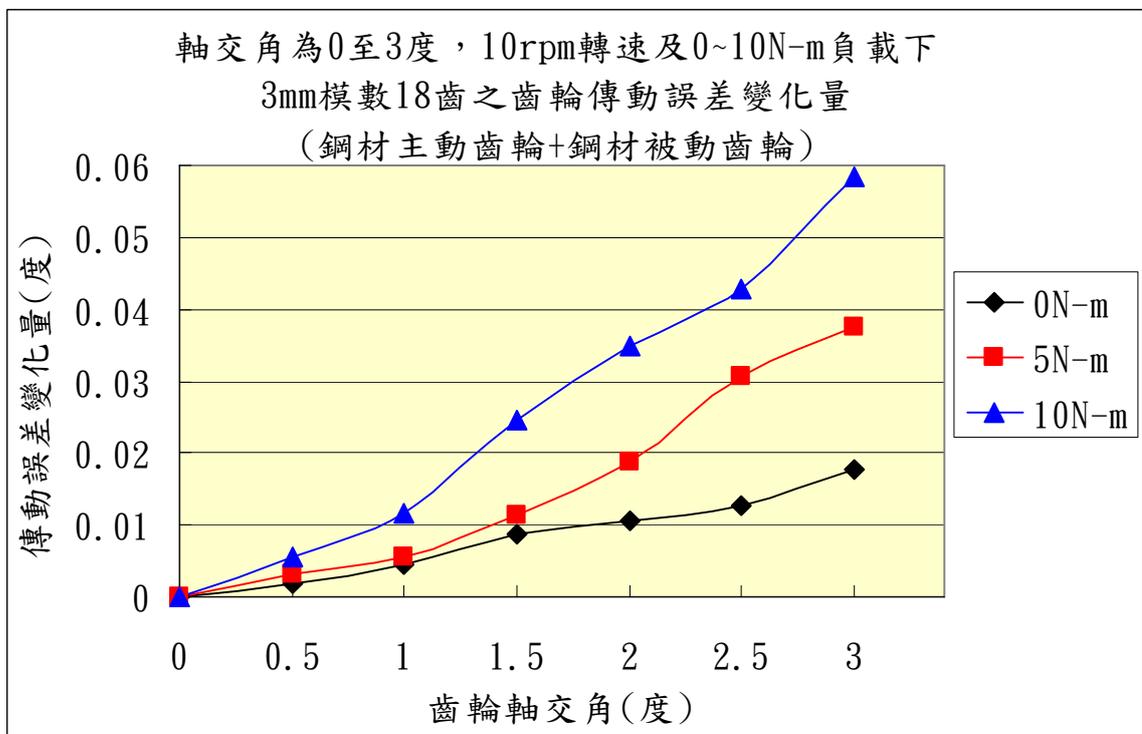


圖 6.7 SSM3-18T 齒輪對變軸交角之傳動誤差變化量

表 6.1 不同軸交角之正齒輪對的傳動誤差變化量

模數(mm)		3		
齒數		18		
齒輪對代號		SSM3-18T		
齒輪對之搭配		鋼材主動齒輪配鋼材被動齒輪		
扭力負載		0N-m	5N-m	10N-m
單齒 傳動 誤差 之波 峰值 (度)	0度	0.0923	0.1220	0.1258
	0.5度	0.0942	0.1370	0.1241
	1.0度	0.0944	0.1369	0.1547
	1.5度	0.0946	0.1319	0.1639
	2.0度	0.1246	0.1303	0.1574
	2.5度	0.1251	0.1637	0.1817
	3.0度	0.0994	0.1704	0.2046
單齒 傳動 誤差 之波 谷值 (度)	0度	0.0491	0.0472	0.0171
	0.5度	0.0491	0.0591	0.0099
	1.0度	0.0467	0.0566	0.0343
	1.5度	0.0427	0.0458	0.0307
	2.0度	0.0708	0.0367	0.0137
	2.5度	0.0691	0.0583	0.0302
	3.0度	0.0384	0.0581	0.0376
單齒 傳動 誤差 (度)	0度	0.0432	0.0748	0.1087
	0.5度	0.0451	0.0779	0.1142
	1.0度	0.0477	0.0803	0.1204
	1.5度	0.0519	0.0861	0.1332
	2.0度	0.0538	0.0936	0.1437
	2.5度	0.0560	0.1054	0.1515
	3.0度	0.0619	0.1123	0.1670
單齒 傳動 誤差 之變 化量 (度)	0度	0	0	0
	0.5度	0.0019	0.0031	0.0055
	1.0度	0.0045	0.0055	0.0117
	1.5度	0.0087	0.0113	0.0245
	2.0度	0.0106	0.0188	0.0350
	2.5度	0.0128	0.0306	0.0428
	3.0度	0.0178	0.0375	0.0583

第七章 結論及未來展望

歷經二年之泛用型齒輪測試機開發及一年之該機性能測試發展，已成功解決該機之相關問題(詳如附件)，並應用於 0N-m 至 10N-m 扭力負載範圍內之齒輪傳動誤差測試，齒輪角度位置解析度可達 4.88×10^{-6} 弧度 (=0.0176 弧度 - 秒)，測試數據之擷取速度亦可達每秒 1800 次，該齒輪測試機已能有效地測出 0 到 10N-m 之扭力負載下之齒輪傳動誤差，且具有良好之重現性。另針對十五種不同規格或不同組合之正齒輪對，完成在 0 到 10N-m 之扭力負載下的傳動誤差多次測試，已呈現清楚之扭力負載與齒輪傳動誤差的關係，對於產業界改善齒輪噪音之方法與探索，已往前邁進一大步。另亦分別進行了不同中心距對齒輪傳動誤差之影響實驗及不同軸交角對齒輪傳動誤差之影響實驗，亦已有具體結果。茲分述本研究之結論及未來展望如下：

7.1 結論

- (1)經由泛用型齒輪測試機開發和齒輪傳動誤差功能之測試發展及多組齒輪之實測驗證，該齒輪測試機已能有效地測出 0 到 10N-m 之扭力負載下之齒輪傳動誤差，且具有良好之重現性。
- (2)正齒輪基準點相位角之變化與其扭力負載呈線性關係，且齒輪之剛性愈強，則其齒輪基準點相位角之變化愈小。
- (3)正齒輪傳動誤差之變化與其扭力負載近乎呈線性關係，傳動誤差變化量之大小與其輪齒之剛性及節圓直徑之大小有關，剛性愈大，則齒輪組之傳動誤差的變化量愈小。相同扭力負載下，節圓直徑愈大，則齒面受力愈小，因此，齒輪對之傳動誤差的變化量也就愈小。
- (4)在一定之安裝齒隙及扭力負載下，任何一對齒輪會有其合適之傳動誤差測試轉速範圍，超過該轉速範圍之上限，傳動誤差波形開始出現受振動影響而有失真之現象，如圖 3.21、圖 3.23 及圖 3.25 所示。
- (5)在不考慮齒隙變化之影響條件下，理論上標準漸開線齒形之齒輪組，改變齒輪中心距並不影響其齒輪傳動誤差，但實際上所測試之齒輪不可能是完美之漸開線齒形，且必定有其製造上的齒形誤差存在，再則以同一對齒輪作測試，齒輪中心距加大，齒隙即隨之增大。實際實驗結果，在無扭力負載(即 0N-m)時，齒輪之傳動誤差並未隨著中心距之加大而有明顯增大，但扭力負載為 5N-m 及 10N-m 時，單齒傳動誤差則會明顯隨著

中心距之增加而增大，至中心距為 55.0mm 時，單齒傳動誤差波高均升至最高，此現象應是該齒輪對之齒隙隨中心距增大而增大，所導致齒輪嚙合振動加大之影響。扭力負載為 5N-m 及 10N-m 時之單齒傳動誤差在中心距超過 55.0mm 後則不再升高反而下降，如圖 5.11 所示，此乃是因受接觸率降至一以下所產生之突波影響。齒輪在實際應用，通常不建議使用接觸率小於一之狀態，因接觸率小於一時，齒輪之部份運轉角度未有輪齒嚙合，會增加齒輪之振動及噪音問題。齒隙通常只要能含蓋齒輪製造誤差、組立誤差、潤滑及溫升變化等所需之齒隙量即可，並不會無緣故的加大齒隙，因增加齒隙往往對齒輪之振動及噪音亦會帶來負面之影響。

- (6)理論上加大齒輪軸交角（即齒輪對之安裝平行度誤差變大），其齒輪傳動誤差會變大，但實際實驗結果顯示，當齒輪軸交角不為零時，齒輪之嚙合是以一個齒輪之齒端面銳邊與另一齒輪之齒面作嚙合，因此，該齒端面銳邊即出現快速磨耗，使得實際實驗結果無法像理論那樣呈現完美之線性關係，但實驗結果已證實齒輪傳動誤差會隨齒輪軸交角之增大而增大。



7.2 未來展望

- (1)齒輪傳動誤差與其噪音關係，未來尚期待有後續之研究計畫接續探討，則對齒輪噪音之改善步驟才有完整之脈絡可循，未來如能繼續探討出齒輪噪音與齒輪傳動誤差間之具體關係，則可望由齒輪對之實際工作負載下最佳噪音之齒輪傳動誤差曲線，配合本研究獲得有關扭力負載與齒輪傳動誤差的關係，來推算出無負載時之最佳齒輪傳動誤差曲線，再藉由齒形誤差與齒輪傳動誤差關係，可推算出無負載時之最佳齒形修整量，使得實際工作負載下齒輪對能呈現最佳噪音。
- (2)本泛用型齒輪測試機開發時已考量到測試齒輪減速機之傳動誤差及效率需求，目前正應用本泛用型齒輪測試機於機車減速機之傳動誤差及噪音探討中，期盼後續齒輪研究室同仁有突破性發展。
- (3)齒輪之工作轉速通常為每分鐘一千轉以上，甚至經常高達每分鐘數千轉，而轉速又對齒輪噪音有相當大的影響。因受限於數據擷取之速度限制及轉速高之振動影響，要直接測試高轉速之齒輪傳動誤差，尚有待進一步的研究與尋求技術突破。

參考文獻

- [1] Smith, R. E. ., “What Single Flank Measurement Can Do for you” AGMA Fall Technical Meeting, Washington D.C., October 15-17, 1984.
- [2] Smith, R. E., “Identification of Gear Noise with Single Flank Composite Measurement”, AGMA Technical Paper No. 85FTM13, October 14-16, 1985.
- [3] Smith, R. E., “The Relationship of Measured Gear Noise to Measured Gear Transmission Errors”, AGMA Technical Paper No. 87FTM6, October 14-16, 1987.
- [4] Houser, D. R., “The Design and Analysis of Single Flank Transmission Error Tester for Loaded Gears”, NASA Contractor Report 179621, AVS-COM Technical Report 87-C-15, June 1987.
- [5] Schutt, T. C., “Development of a Loaded Single Flank Transmission Error Measurement System Using a Drive/ Load Motor Configuration”, The Ohio State University, Department of Mechanical Engineering, Master’s Thesis, 1988.
- [6] Foster, C. A., “Digital Control of a Loaded Single Flank Transmission Error Measurement System”, The Ohio State University, Department of Mechanical Engineering, Master’s Thesis, 1991.
- [7] Litvin, F. L., Theory of Gearing, NASA Publication Rp-1212, Washington D.C., 1989.
- [8] Litvin, F. L., Gear Geometry and Applied Theory, Prentice-Hall, New Jersey, 1994.
- [9] Tsay, C. B., “Helical Gears with Involute Shaped Teeth, Geometry, Computer Simulation, Teeth, Contact Analysis, and Stress Analysis”, Transaction of the ASME, Vol. 110, December 1988.
- [10] Liu, C. C. and Tsay, C. B., “Mathematical Models and Contact Simulations of Concave Beveloid Gears”, ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 124, pp. 753-760, 2002.
- [11] Chen, Y. C. and Tsay, C. B., “Contact Ratios and Transmission Errors of a Helical Gear Set with Involute-Teeth Pinion and Modified-Circular- Arc -Teeth Gear,” JSME International Journal, series C, Vol. 44, pp. 867– 874,

2001.

- [12] Chen, Y. C. and Tsay, C. B., “Tooth Contact Analysis and Kinematic Optimization of a Modified- Circular-Arc-Teeth Gear”, Journal of CSME, Vol. 21, No. 6, pp. 537-547, 2000.
- [13] Chang, S. L., Tsay, C. B., and Tseng, C. H., “Kinematic Optimization of a Modified Helical Gear Train”, Transaction ASME, Journal of Mechanical Design, Vol.19, No. 2, pp. 307-314, 1997.
- [14] Chang, S. L., Tsay, C. B., and Tseng, C. H. “A Study on Kinematic Optimization of a Simple Helical Gear Train”, J. of CSME, Vol.17, No. 6, pp. 577- 585, 1996.
- [15] 張永源，「修整型螺旋齒輪傳動誤差之測試與分析」，交通大學碩士論文，1997年6月。



附件 齒輪傳動誤差測試功能之發展經過

泛用型齒輪測試機的齒輪傳動誤差測試功能發展，其目的在於檢驗該機之功能與發覺問題並加以解決，以驗證測試機是否達成開發時所設定之功能目標。該泛用型齒輪測試機於 90 年 10 月開始設計，92 年 5 月於工業技術研究院完成其組立及初步無負載下傳動誤差之測試，92 年 6 月安置於交大博愛校區之齒輪實驗室，開始進行相關功能之測試驗證工作。測試初期發覺該機於 10rpm 以上且加點負載時會明顯出現角度編碼器(Encoder)脈波(Pulse)數有遺漏現象，隨即開始進行此問題之下列一連串之檢測與解析，以釐清其原因，並逐一加以解決。

1. 測試脈波數遺漏結果

於 93 年 2 月開始泛用型齒輪測試機之傳動誤差功能測試，首先在齒輪轉速為 10rpm 及測試負載為 0N-m、2N-m、4N-m、6N-m、8N-m 及 10N-m 等狀態下，分別測試模數為 2mm 及齒數為 27 齒之塑膠齒輪對(PPM2-27T)、模數為 3mm 及齒數為 18 齒之塑膠齒輪對 (PPM3-18T)、模數為 3mm 及齒數為 18 齒之鋼材齒輪對(SSM3-18T)等之傳動誤差，該測試結果如下：

- (1)從圖 A1 至圖 A2 可看出，輸入端之編碼器脈波數之遺漏，大致較易發生在某些特定之角度區域，然而在部份角度範圍內之脈波數，無論扭力負載大小如何，均無編碼器脈波數遺漏的現象。本研究每次在測試時共記錄 20,000 筆數據，輸入軸之旋轉角度約 840 度(此角度與第三章中所述之旋轉角度約 660 度不一致，是因前後測試所用之電腦主機板不同，造成測試數據之擷取速度不一樣，同樣之齒輪轉速，電腦擷取數據之速度愈快，則同樣之記錄筆數所含蓋角度範圍愈小)，橫座標之單位為度，縱座標之單位為脈波數，每一脈波為 0.02 度。模數為 2mm 及齒數為 27 齒之塑膠齒輪對其測試結果(如圖 A1)與模數為 3mm 及齒數為 18 齒之的塑膠齒輪對之測試結果(如圖 A2)相近，亦即在齒輪轉速為 10rpm 和無負載下則完全未出現編碼器脈波數之遺漏，扭力負載為 2N-m 及 4N-m 下亦未有明顯之編碼器脈波數遺漏現象，然而當扭力負載為 6N-m、8N-m 及 10N-m 時，則已出現明顯之編碼器脈波數遺漏現象，且扭力負載愈大則其編碼器脈波數遺漏愈嚴重。模數為 3mm 及齒數為 18 齒之鋼材齒輪對之測試結果(如圖 A3)，在轉速為 10rpm 和無負載下，則完全未出現編碼器脈波數之遺漏，扭力負載為 2N-m 時亦未有明顯之編碼器脈波數遺漏現象，然而

在 4N-m 及 10N-m 之扭力負載下則已出現明顯之編碼器脈波數遺漏現象，且扭力負載愈大，則其編碼器脈波數遺漏愈嚴重。

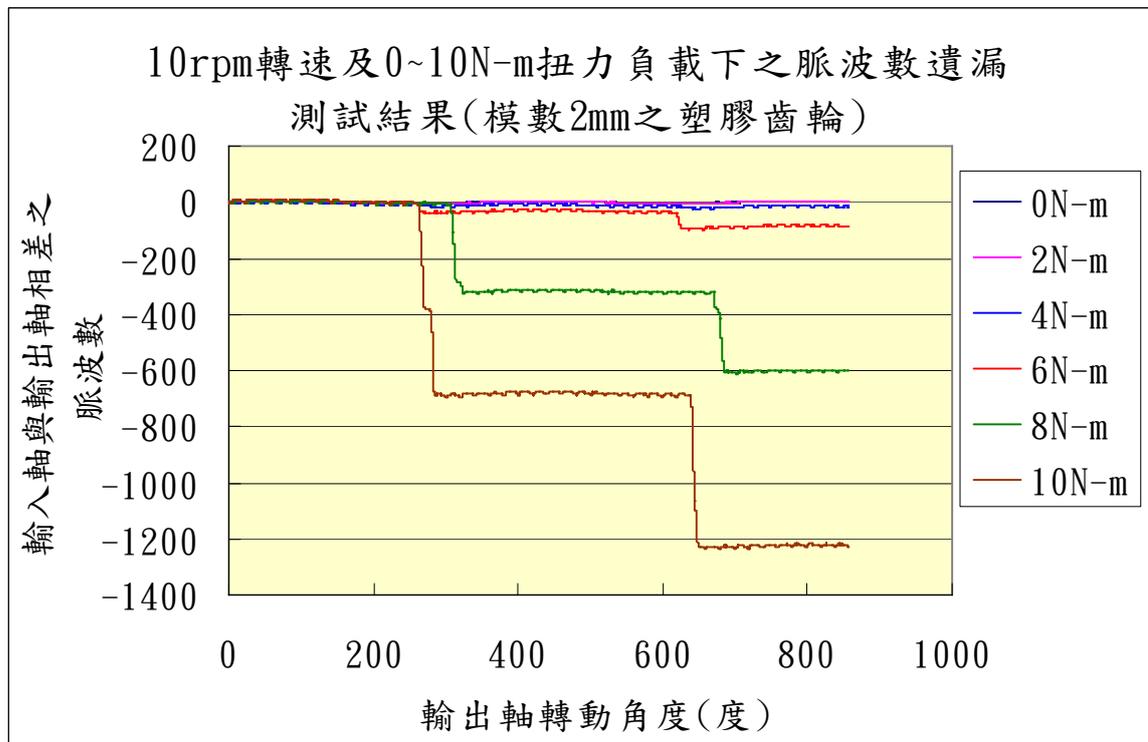


圖 A1. PPM2-27T 齒輪對之脈波數遺漏測試結果

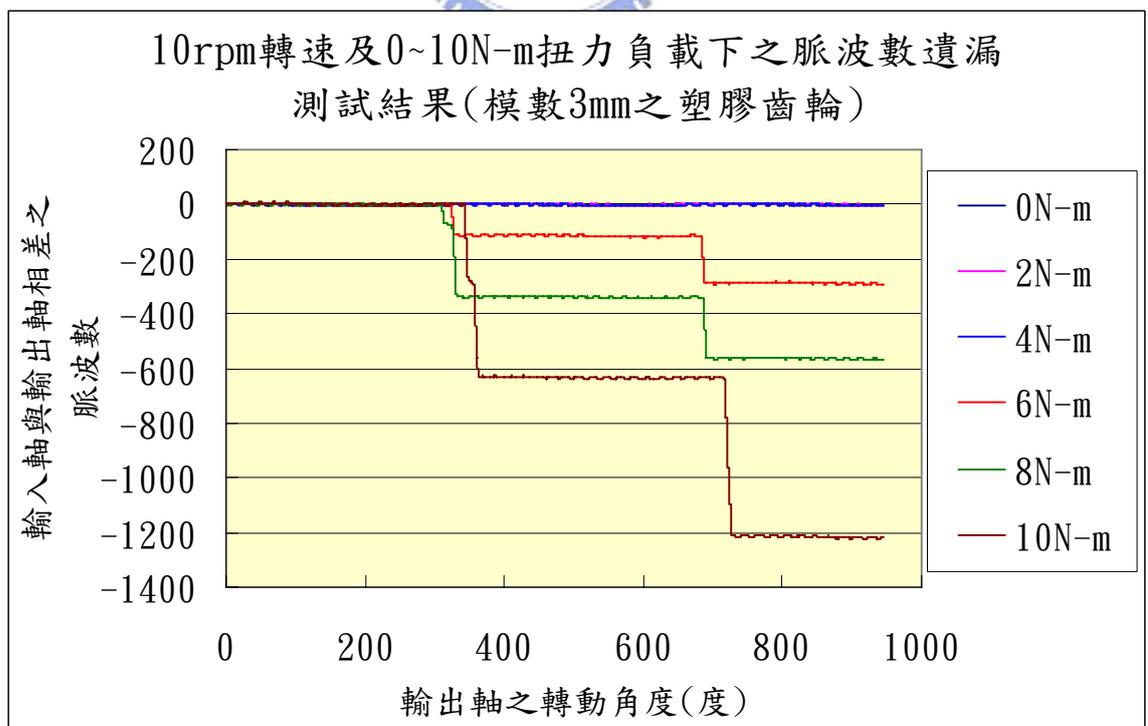


圖 A2. PPM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試結果

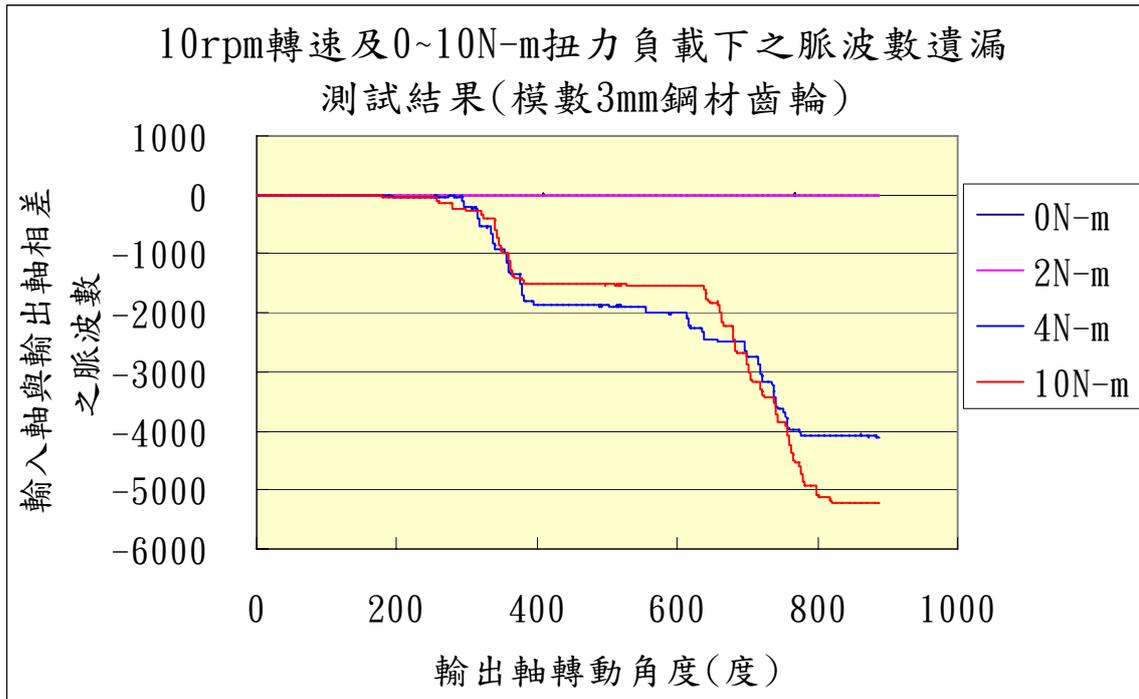


圖 A3. SSM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試結果

(2)以模數為 3mm 及齒數為 18 齒之鋼材齒輪對(SSM3-18T)為測試齒輪，設定不同齒輪轉速及扭力負載運轉一段時間，並記錄泛用型齒輪測試機之輸入端及輸出端之總編碼器脈波數，以了解其差異狀況。通常輸入端及輸出端之總編碼器脈波數之差距應維持在某一合理範圍之內，亦即傳動誤差不可能大過一個齒的角度(除非齒斷掉或鍵斷掉打滑)。該編碼器每一轉產生 18,000 脈波數，對 18 齒之齒輪而言，該齒輪一個齒之轉動角度約為 20 度，即相當於 1,000 個脈波。對同齒數之齒輪對而言，除非齒斷掉或鍵斷掉或編碼器有問題，否則不可能編碼器轉一圈時，測試齒輪對之輸入端與輸出端之總編碼器脈波數會相差超過 1,000 個脈波。然而本泛用型齒輪測試機初期之測試結果顯示輸入端及輸出端之總編碼器脈波數相差卻超過 1,000 個脈波，如表 A1 至 A3 中之紅色數字且有底線部份，若將輸入端及輸出端之角度編碼器接頭對調，仍然發生脈波數遺漏且均發生在輸入端角度編碼器。

表 A1. SSM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試數據表(一)

項次	60rpm 轉速，0N-m 扭力負載			60rpm 轉速，10N-m 扭力負載		
	輸出端脈波數	輸入端脈波數	輸出端與輸入端脈波數之差異	輸出端脈波數	輸入端脈波數	輸出端與輸入端脈波數之差異
第 1 次	1124731	1124708	23	1135415	<u>810268</u>	<u>325147</u>
第 2 次	1094708	1094681	27	1104509	<u>784581</u>	<u>319928</u>
第 3 次	1085050	1085028	22	1105622	<u>778580</u>	<u>327042</u>
第 4 次	1088834	108786	48	1093485	<u>765725</u>	<u>327760</u>
第 5 次	1190715	1190671	44	1098636	<u>768568</u>	<u>330068</u>
第 6 次	1082272	1082196	76	1117402	<u>772618</u>	<u>344784</u>
第 7 次	1403170	1403058	112	1108065	<u>762134</u>	<u>345931</u>
第 8 次	1102402	1102302	100	1097651	<u>755962</u>	<u>341689</u>
第 9 次	1091360	<u>1084498</u>	<u>6862</u>	1093662	<u>751904</u>	<u>341758</u>
第 10 次	1092944	1092924	20	1097928	<u>751141</u>	<u>346787</u>

表 A2. SSM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試數據表(二)

項次	10rpm 轉速，6N-m 扭力負載		
	輸出端脈波數	輸入端脈波數	輸出端與輸入端脈波數之差異
第 1 次	181716	<u>179886</u>	<u>1830</u>
第 2 次	186732	<u>178748</u>	<u>7984</u>
第 3 次	181544	<u>178179</u>	<u>3365</u>
第 4 次	181519	181087	432
第 5 次	181588	181357	231
第 6 次	182464	182457	7
第 7 次	182636	<u>181509</u>	<u>1127</u>
第 8 次	181586	180777	809
第 9 次	179760	<u>172085</u>	<u>7675</u>
第 10 次	181432	<u>176917</u>	<u>4515</u>

表 A3. SSM3-18T 齒輪對之脈波數遺漏測試數據表(三)

項次	30rpm 轉速，10N-m 扭力負載			10rpm 轉速，10N-m 扭力負載		
	輸出端脈波數	輸入端脈波數	輸出端與輸入端脈波數之差異	輸出端脈波數	輸入端脈波數	輸出端與輸入端脈波數之差異
第 1 次	543116	<u>441684</u>	<u>102532</u>	181838	<u>176963</u>	<u>4925</u>
第 2 次	543455	<u>425513</u>	<u>117942</u>	179820	<u>171920</u>	<u>7900</u>
第 3 次	545409	<u>431082</u>	<u>114327</u>	181184	<u>175852</u>	<u>5328</u>
第 4 次	545561	<u>414496</u>	<u>113365</u>	183286	<u>169279</u>	<u>14007</u>
第 5 次	542857	<u>426677</u>	<u>116180</u>	183111	<u>173407</u>	<u>9704</u>

基於前述脈波數遺漏之問題，特別請該編碼器供應廠海德漢公司人員用其儀器與我方電腦(安裝上 HEIDENHEIN-1K220 Counter Card)同步擷取脈波數作比對。結果與我方之數據擷取卡所讀得之脈波數完全相同，亦即脈波會遺漏之角度範圍及遺漏量完全一樣。此遺漏現象有兩種可能，一種可能是因有負載下之低轉速運轉不穩定，瞬間轉速過高而超過該數據擷取卡極限 33 KHz，產生局部脈波數遺漏現象，但如是屬於此種原因，則脈波數遺漏就不會只發生在固定之角度範圍。而另一種可能，即該輸入端之編碼器有問題。

因此，本研究即進行該編碼器之拆卸，以準備更換編碼器。但在拆卸過程中意外發覺整個編碼器之安裝出現異常，異常在於該編碼器之內圈軸向安裝位置控制不當，以致其兩端面無法逼緊而完全夾住，所以只要加點負載或提高轉速，即出現該編碼器之內圈與其安裝軸產生打滑，因此，進行軸向位置之相關零件尺寸調整。當初工業技術研究院對整個機台是以系統外包方式，外包給國內零組件加工廠承包整個零件加工及組裝，既然輸入端編碼器安裝出問題，顯然該廠商不清楚編碼器之安裝要求，可能輸出端編碼器安裝亦有問題，只是問題可能比輸入端輕，故未出現如輸入端之明顯問題而已。因此，亦進行輸出端編碼器之拆卸，果然其安裝亦不合格，所以一併進行修護及重新安裝，至此本研究之泛用型齒輪測試機編碼器之脈波數遺漏問題總算獲得完全解決，而可開始齒輪傳動誤差之測試工作。