

第三章 航機離場軌跡分析

本章以 2005 年 5 月 10 日、18 日、26 日與 6 月 3 日、11 日、19 日、27 日等七天航機雷達資料與管制條資料篩選出欲分析之航機離場資料，分析資料包含航機平面軌跡、垂直軌跡與地速。

3.1 航機離場資料篩選

本研究分析與預測使用之雷達資料格式如下。

(1) ST : TIME

某筆航機資料記錄的時間，記錄至秒以下小數第三位。

(2) ACID-SCDF

航機呼號與系統給予航機之唯一數字代號。

(3) RBC

航機次級雷達迴波器傳回的四碼代號。

(4) RSX

雷達記錄航機直角座標系 X 座標，單位：哩。

(5) RSY

雷達記錄航機直角座標系 Y 座標，單位：哩。

(6) SPD

系統計算二筆雷達資料水平位移速度，單位：節。

(7) HDG

360 度角度表示航機前進方向，單位：度。

(8) SALT

航機回報高度，單位：呎。

同一航機前後二筆資料時間差為航機飛行時間，飛行時間累計後即為累積時間，其中本研究將 ST : TIME 欄位差相減後四捨五入至秒。前後二筆 RSX/RSY 欄位以二點距離公式可求航機飛行距離，累計後為航機水平累積距離。另外，由於雷達資料中涵蓋之航機甚多，必須加以篩選出本研究所需之中正機場進離場航機，因此，以離場飛航管制條資料記錄部份格式欄位作為篩選雷達資料的依據，其中本研究使用的欄位包括：航空器識別、

航空器資料(架數、重型航空器代號(H)、機型及裝備)、電碼、航路資料(含起飛點/航路/落地點)。經航機雷達資料與管制條記錄資料比對結果，B744 機型 FB1 離場程序共 80 架次，臺北飛航情報區飛航指南 FB1 離場程序如圖 3.1 所示。航空地理座標以 WGS84 經緯度座標系統標示，航管自動化系統將 WGS84 經緯度座標系統以立體投影法轉換為 XY 直角座標系統，原點為 WGS84 經緯度座標系統北緯 18 度 00 分 00 秒與東經 114 度 00 分 00 秒。FB1 離場程序各定位點經緯座標轉換為直角座標系統與 80 架次 B744 機型 FB1 離場航行之 RSX 與 RSY 航機雷達資料繪製如圖 3.2。

臺北飛航情報區飛航指南 FB1 離場程序使用 05/06 跑道離場，但由圖 3.2 結果發現部份航機雖使用 FB1 離場程序離場，航機平面軌跡卻偏離臺北飛航情報區飛航指南頒布之 FB1 離場程序所應遵循航路甚遠。發生以上情形可能為當時時空狀態下管制員介入或駕駛員飛行 FB1 離場程序時習慣因素等所造成。本研究由航機平面軌跡圖與航機高度圖中排除管制員指示航機高度與速度等人為因素後之數據，作為分析與預測之資料。不考慮由 23/24 跑道離場航機以及航機數較少之 B-576、A1、B-591、R-595 航路，且除去高度呈現平飛狀態與高度或地速非持續增加之航機資料，保留 FB1 離場程序航機數較多之 G-587/R-583 航路。最後飛行 G-587/R-583 航路且通過 FIBER 與 ROBIN 定位點之航機資料共 27 架次，並繪製航機 RSX 與 RSY 座標平面軌跡，如圖 3.3。

圖 3.3 中 FIBER 定位點為強迫報告點且經過此點高度必須高於 4500 呎，航機通過此點後航向 90 接往 G-587/R-583 航路之 ROBIN 請求報告點，第二轉向時航機並不須確實通過圖中第二與第三段直線之交點，因而第二轉向範圍內航機水平範圍大於第一轉向範圍。因此航機朝向定位點飛航時水平軌跡左右偏移量逐漸減小，通過定位點後水平軌跡左右偏移量將逐漸加大擴散。

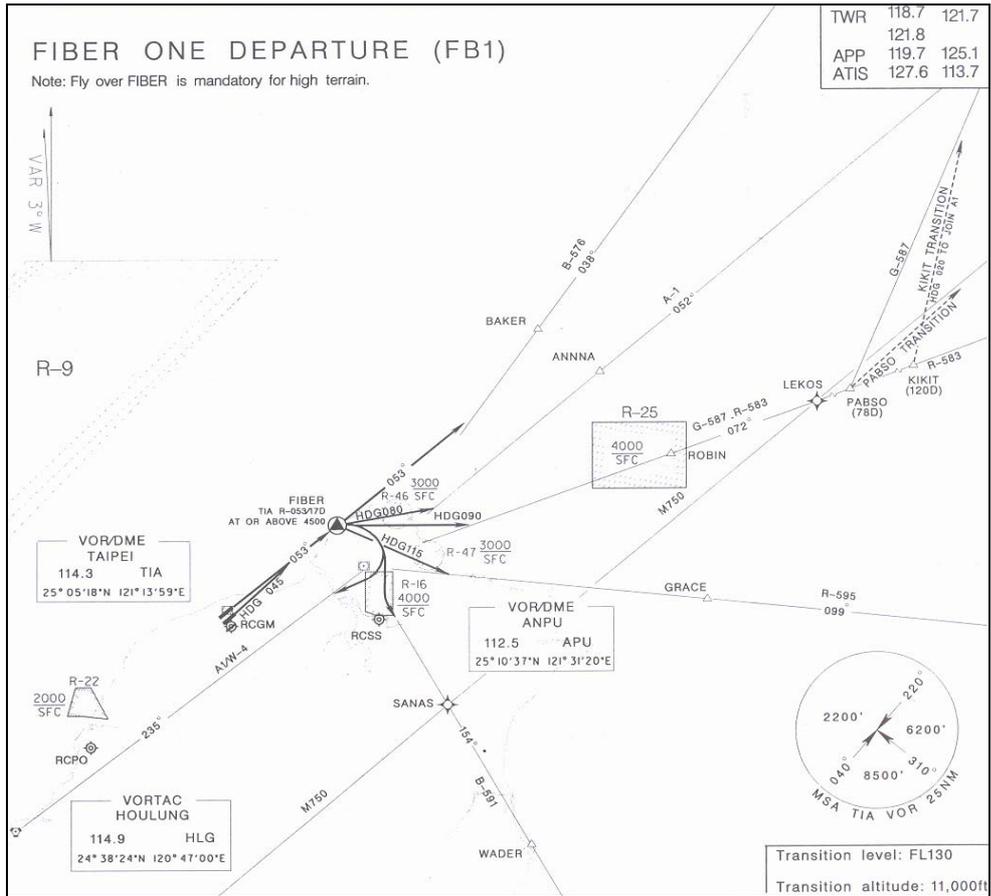


圖 3.1 FB1 離場程序圖

資料來源：[16]

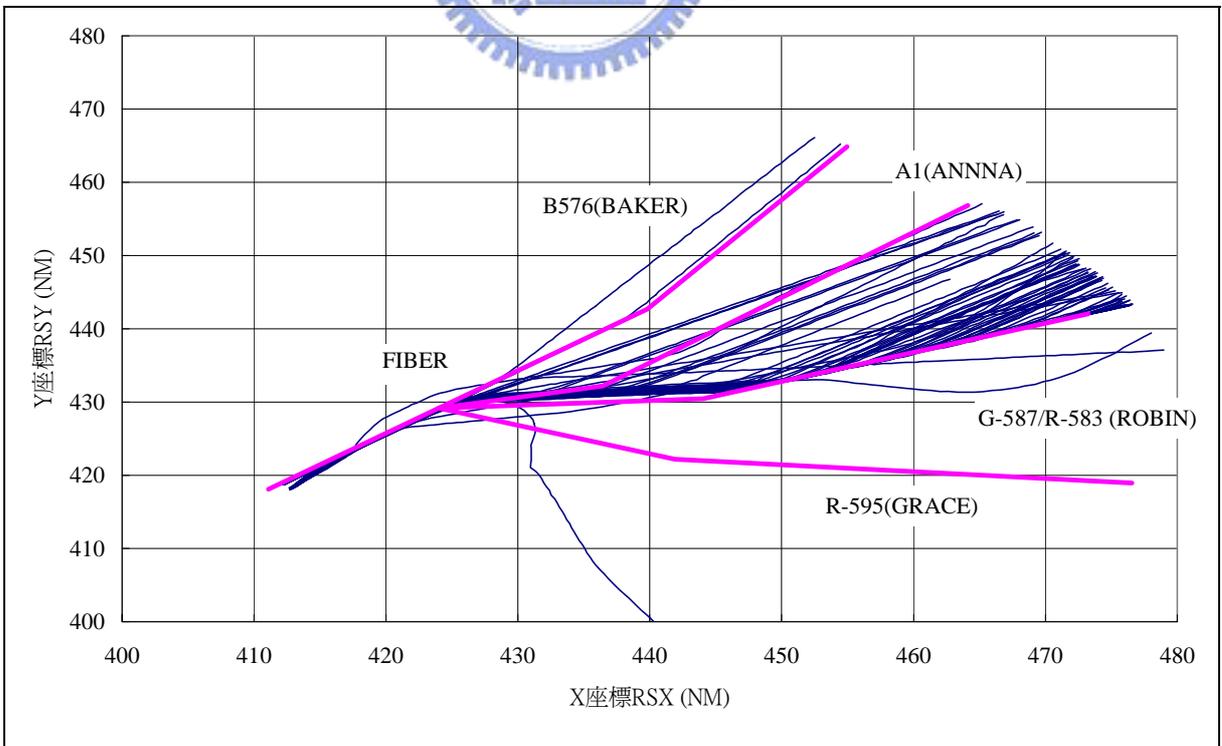


圖 3.2 B744 FB1 離場程序 RSX/RSY 平面軌跡

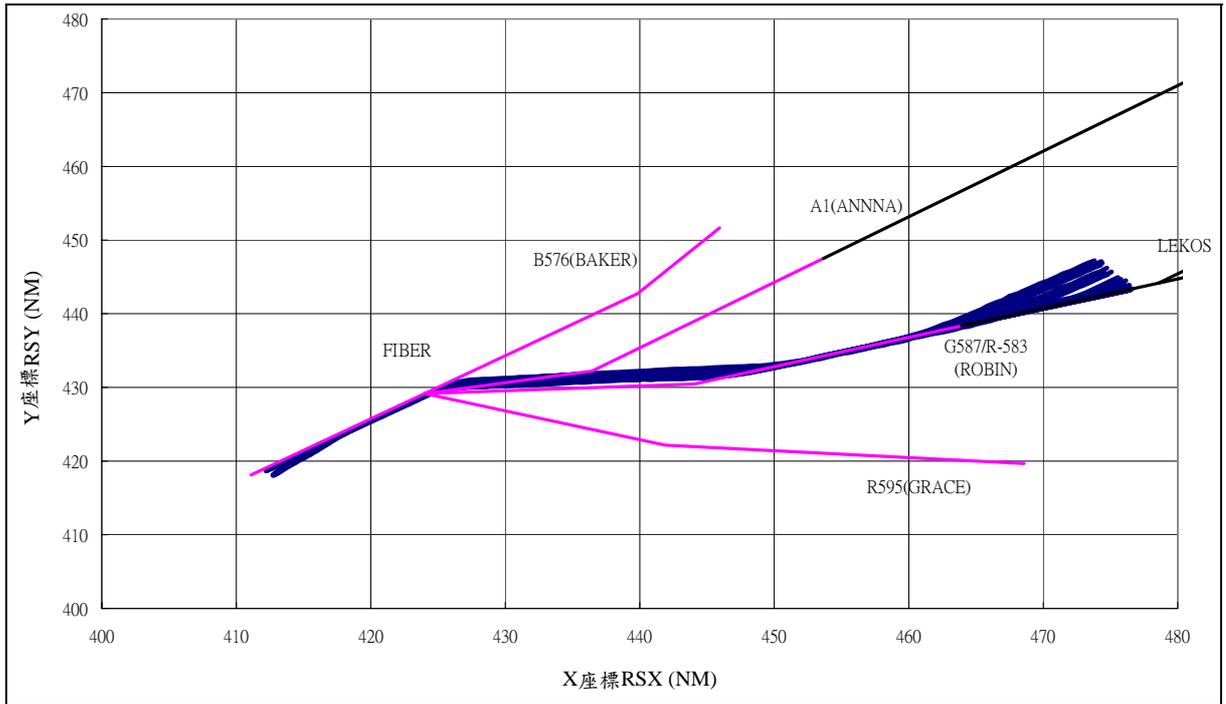


圖 3.3 篩選後 B744 FB1 離場程序 RSX/RSY 平面軌跡



3.2 航機平面軌跡

以 RSX 及 RSY 欄位繪製篩選後之雷達資料，如圖 3.3 為 B744 依 FB1 離場程序飛行之靜態平面軌跡圖。平面軌跡為航機於地面的投影，可簡單切割為直線階段及圓曲線階段，臺北飛航情報區飛航指南中之 FB1 離場程序圖共可分為三段直線及二個轉向部份。直線階段之直線方程式必須自 FB1 離場程序圖中決定參考直線，三段參考直線為：機場至 FB1、FB1 至 FB1 轉向 90 直線與 G-587(R-583)之虛擬交點、航路 G-587(R-583)。航路 G-587(R-583)上 ROBIN 定位點前為台北終端管制區之管轄範圍。此等參考軌跡可作為確定實際航機平面資料偏離參考直線之平均距離及變異數。

3.2.1 直線階段

以 AIP 離場程序圖各定位點間假想之直線為參考直線，求得航機直行階段偏離參考線之平均偏離距離、偏離之變異數及偏離之標準差。式 (1) 可求得航機平面軌跡資料至參考直線間之偏離距離，令 AIP 所規定航路直線線段為 $AX + BY + C = 0$ ，則

$$d_{ref.,(RSX,RSY)} = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (1)$$

x ：航機 RSX 座標

y ：航機 RSY 座標

第一段參考直線二端點為(411.092, 418.106)與(424.006, 429.16)，前者為機場雷達座標、後者為 FB1 定位點之座標。第一段參考直線之直線方程式：

$$Y = 0.85597X + 66.22358 \quad (2)$$

第二段參考直線二端點為(424.006, 429.16)與(444.053, 430.45)，前者為 FB1 定位點之座標、後者為 FB1 轉向 90 之直線與航路 G-587(R-583)之虛擬交點座標。第二段參考直線之直線方程式：

$$Y = 0.064349X + 401.87564 \quad (3)$$

第三段參考直線二端點為(444.053, 430.45)與(463.938, 438.34)，前者為 FB1 轉向 90 之直線與航路 G-587(R-583)之虛擬交點座標，後者為 ROBIN 定位點之座標。第三段參考直線之直線方程式：

$$Y = 0.39678X + 254.25865 \quad (4)$$

經以實際雷達資料代入對應之參考直線方程式，可得如表 3.1 所示為直線階段內航機與其參考直線之偏離統計量。於直線階段若航機必須確實通過下一定位點的情況，則航機平面軌跡平均偏離參考直線之距離較小；若直線 1、2 下一端點並非定位點，則航機平均偏離參考直線之距離將較大。

表 3.1 各直線階段與其參考直線之偏離統計量

直線階段	平均偏離距離	偏離距離變異數	偏離距離標準差	偏離距離最大值	偏離距離最小值
第一段	0.27096	0.01329	0.11526	0.87391	0.13140
第二段	1.24010	0.06766	0.26011	2.18767	0.79439
第三段	0.46741	0.81727	0.90403	4.60386	0.00024

3.2.2 圓曲線階段

當航機航向欄位之數值不再穩定而持續性地遞增或遞減時，表示航機處於轉向階段，以圓曲線代表此階段之平面軌跡，亦即將航機轉向曲線視為半徑大小不同之圓曲線。第一次轉向以雷達資料的航向欄位連續三點遞增之第一點為轉向起始座標，直至連續三點遞增結束之點為轉向終點座標；第二次轉向以雷達資料的航向欄位連續三點遞減之第一點為轉向起始座標，直至連續三點遞減結束之點為轉向終點座標。以式(5)求取轉向程序中航機之轉彎半徑 R，單位為哩，此半徑大小為航機可操作之範圍。

$$\frac{\Delta D}{2} = R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

ΔD ：轉向起始座標至轉向終點座標之距離

R ：轉彎半徑

θ ：航向差

轉向部份由航向(Heading)改變時之軌跡資料可確立圓曲線半徑範圍。由表 3.2 與表 3.3 第一、第二次轉向座標點及轉彎半徑之敘述統計結果發現，第一次轉向半徑範圍約為 8-15 哩，第二次轉向半徑範圍約為 21-30 哩。

表 3.2 第一次轉向座標點及轉彎半徑統計

統計量	轉向起始座標		轉向終點座標		起始與終點 直線距離(哩)	轉彎半徑(哩)
平均值	425.076	429.723	431.74	430.796	6.751	11.044
標準差	0.276	0.223	0.750	0.250	0.762	1.256
變異數	0.076	0.050	0.563	0.062	0.580	1.578

表 3.3 第二次轉向座標點及轉彎半徑統計

統計量	轉向起始座標		轉向終點座標		起始與終點 直線距離(哩)	轉彎半徑(哩)
平均值	447.593	432.109	454.551	434.580	7.384	25.648
標準差	1.100	0.417	1.192	0.482	0.750	2.095
變異數	1.210	0.174	1.422	0.232	0.563	4.388

表 3.4 第一次轉向座標點及轉彎半徑

航機	轉向起始座標	起始航向	轉向終點座標	終點航向	航向差	起始終點直線距離(哩)	轉彎半徑(哩)
1	(425.74, 430.36)	48	(432.35, 431.45)	85	37	6.699	10.557
2	(424.9, 429.61)	49	(431.54, 430.62)	86	37	6.716	10.584
3	(425.28, 429.76)	49	(430.9, 430.55)	84	35	5.675	9.437
4	(424.69, 429.43)	49	(431.82, 430.84)	84	35	7.268	12.085
5	(424.89, 429.6)	49	(433.56, 431.11)	83	34	8.801	15.050
6	(425.3, 429.91)	49	(431.92, 430.95)	85	36	6.701	10.843
7	(424.97, 429.67)	49	(431.37, 430.6)	85	36	6.467	10.464
8	(424.84, 429.6)	49	(431.86, 430.73)	85	36	7.110	11.505
9	(424.94, 429.52)	49	(429.92, 430.37)	83	34	5.052	8.640
10	(425.09, 429.73)	49	(432.9, 430.73)	84	35	7.874	13.092
11	(425.34, 429.83)	50	(431.11, 430.57)	85	35	5.817	9.673
12	(424.98, 429.68)	49	(431.57, 430.77)	85	36	6.680	10.808
13	(424.84, 429.6)	48	(432.2, 430.67)	86	38	7.437	11.422
14	(425, 429.69)	49	(431.05, 430.7)	85	36	6.134	9.925
15	(424.87, 429.62)	49	(430.99, 430.54)	85	36	6.189	10.014
16	(425.21, 429.8)	49	(431.66, 430.65)	86	37	6.506	10.252
17	(425.3, 429.91)	49	(432.61, 431.01)	84	35	7.392	12.292
18	(425, 429.66)	49	(430.93, 430.85)	82	33	6.048	10.648
19	(424.8, 429.52)	49	(430.97, 430.57)	85	36	6.259	10.127
20	(425.2, 429.82)	49	(431.48, 430.94)	84	35	6.379	10.607
21	(424.91, 429.58)	50	(431.24, 430.61)	84	34	6.413	10.968
22	(425.13, 429.73)	49	(431.42, 430.81)	84	35	6.382	10.612
23	(425.39, 429.79)	50	(432.25, 430.88)	85	35	6.946	11.550
24	(425.22, 429.8)	50	(432.61, 431.01)	86	36	7.488	12.116
25	(425.1, 429.74)	49	(431.83, 430.84)	84	35	6.819	11.339
26	(424.6, 429.36)	49	(432.33, 430.74)	86	37	7.852	12.373
27	(424.85, 429.57)	49	(431.99, 430.72)	85	36	7.232	11.702

表 3.5 第二次轉向座標點及轉彎半徑

航機	轉向起始座標	起始航向	轉向終點座標	終點航向	航向差	起始終點直線距離(哩)	轉彎半徑(哩)
1	(449.53, 433.04)	85	(456.4 , 435.35)	69	16	7.248	26.039
2	(446.81, 431.78)	85	(453.05, 433.98)	69	16	6.616	23.771
3	(449.37, 432.56)	83	(455.36 , 434.74)	68	15	6.374	24.418
4	(447.16, 432.11)	85	(455.1 , 434.77)	68	17	8.374	28.326
5	(448.3, 432.35)	85	(455.91 , 435.16)	67	18	8.112	25.929
6	(447.6, 432.15)	85	(455.35, 434.94)	67	18	8.237	26.327
7	(446.06, 431.48)	86	(452.87 , 433.91)	68	18	7.231	23.110
8	(446.83, 431.85)	85	(454.72, 434.63)	68	17	8.365	28.298
9	(448.38, 432.21)	83	(454.5, 434.39)	69	14	6.497	26.654
10	(446.64, 431.71)	86	(453.69, 434.23)	68	18	7.487	23.930
11	(445.67, 431.58)	86	(453.62, 434.2)	68	18	8.371	26.754
12	(447.35, 432.05)	84	(454.2 , 434.42)	69	15	7.248	27.766
13	(446.51, 431.66)	85	(453.1 , 434)	69	16	6.993	25.124
14	(447.44, 431.91)	86	(453.96 , 434.41)	67	19	6.983	21.154
15	(445.97, 431.63)	86	(452.81, 433.89)	69	17	7.204	24.368
16	(446.57, 431.68)	86	(452.81 , 433.89)	69	17	6.620	22.393
17	(447.23, 432.07)	86	(454.68 , 434.61)	68	18	7.871	25.158
18	(448.34, 432.57)	84	(456.96 , 435.56)	67	17	9.124	30.864
19	(446.95, 431.7)	85	(453.38, 434.11)	68	17	6.867	23.229
20	(448.8, 432.49)	84	(455.58, 435.03)	68	16	7.240	26.011
21	(448.35, 432.24)	84	(454.9 , 434.69)	68	16	6.993	25.124
22	(448.41, 432.47)	84	(454.07 , 434.45)	70	14	5.996	24.602
23	(448.95, 432.47)	83	(456.4, 435.35)	67	16	7.987	28.695
24	(447.71, 432.19)	85	(454.67, 434.61)	69	16	7.369	26.473
25	(448.44, 432.35)	84	(454.43 , 434.51)	69	15	6.368	24.392
26	(447.13, 431.96)	85	(454.76, 434.72)	68	17	8.114	27.447
27	(446.58, 431.75)	85	(453.74, 434.33)	68	17	7.611	25.745

3.3 航機垂直軌跡

本節探討離場航機水平累積距離及高度之數學關係。累積水平距離計算基準為 23/24 跑道頭。圖 3.4 為航機水平累積距離與相對高度圖。假設載重較重航機於相同行走水平累積距離下之高度比載重較輕航機高度為低，則圖 3.4 可以再區分為圖 3.5 載重較重與載重較輕之航機，以虛線表示載重較重航機、實線表示載重較輕航機。航機距跑道頭 5 哩前地速較為紊亂而不討論，因此航機高度亦不討論前 5 哩部份，如圖 3.4 並無水平累積距離 5 哩前圖形。

首先討論載重較輕之航機於特定階段包絡斜率，分為高度 5000 呎以下、5000 呎至 10000 呎、10000 呎至 12000 呎與 12000 呎至 FL200 等階段來探討，如圖 3.6 各階段之包絡端點以經過自行設計之 EXCEL VBA 程式取得接近 5000 呎、10000 呎、12000 呎與 FL200 之雷達資料而得。EXCEL VBA 程式可幫助尋找某高度範圍內各對應高度最小水平飛行距離及最大水平飛行距離。由各階段端點可得包圍特定高度範圍之斜率，即包絡斜率。透過此等包絡斜率，於 5000 呎、10000 呎、12000 呎與 FL200 高度內航機可能飛行水平距離之範圍即可求得。同理，載重較重航機之包絡斜率可示如圖 3.7，不過由於部份載重較重航機在尚未到達 FL200 即無航機雷達資料，因此載重較重航機第四階段高度範圍為 12000 呎至 FL180，與載重較輕航機第四階段 12000 呎至 FL200 有所不同。

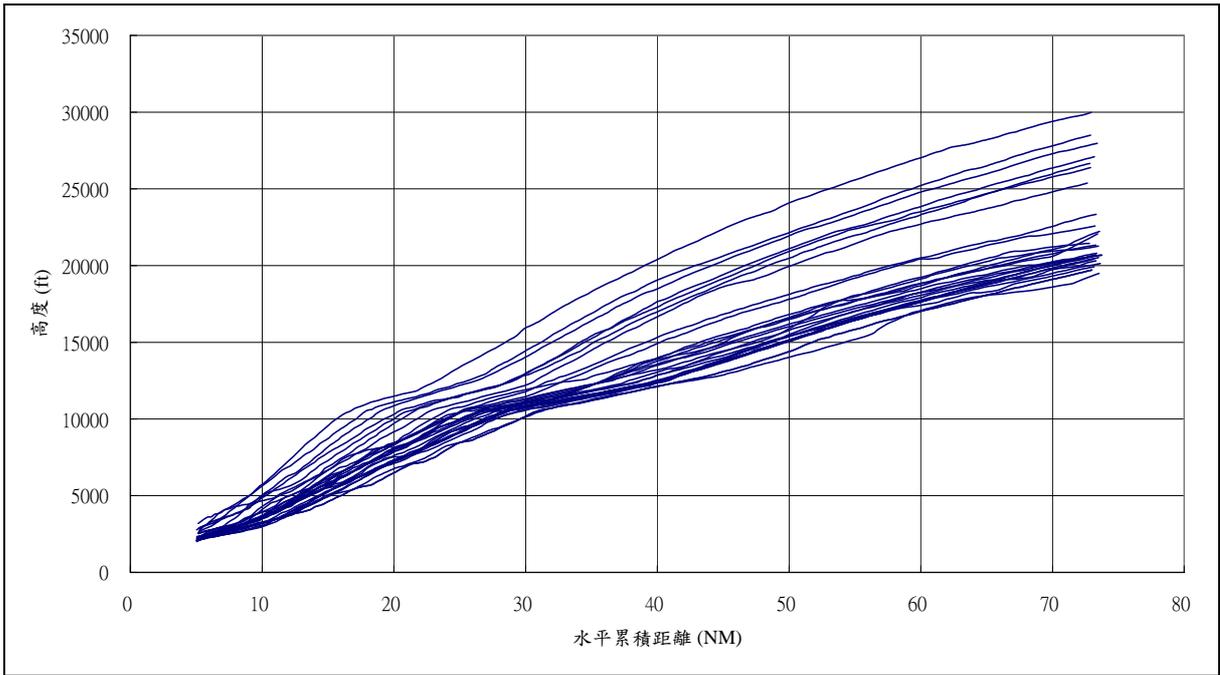


圖 3.4 B744 水平累積距離與高度圖

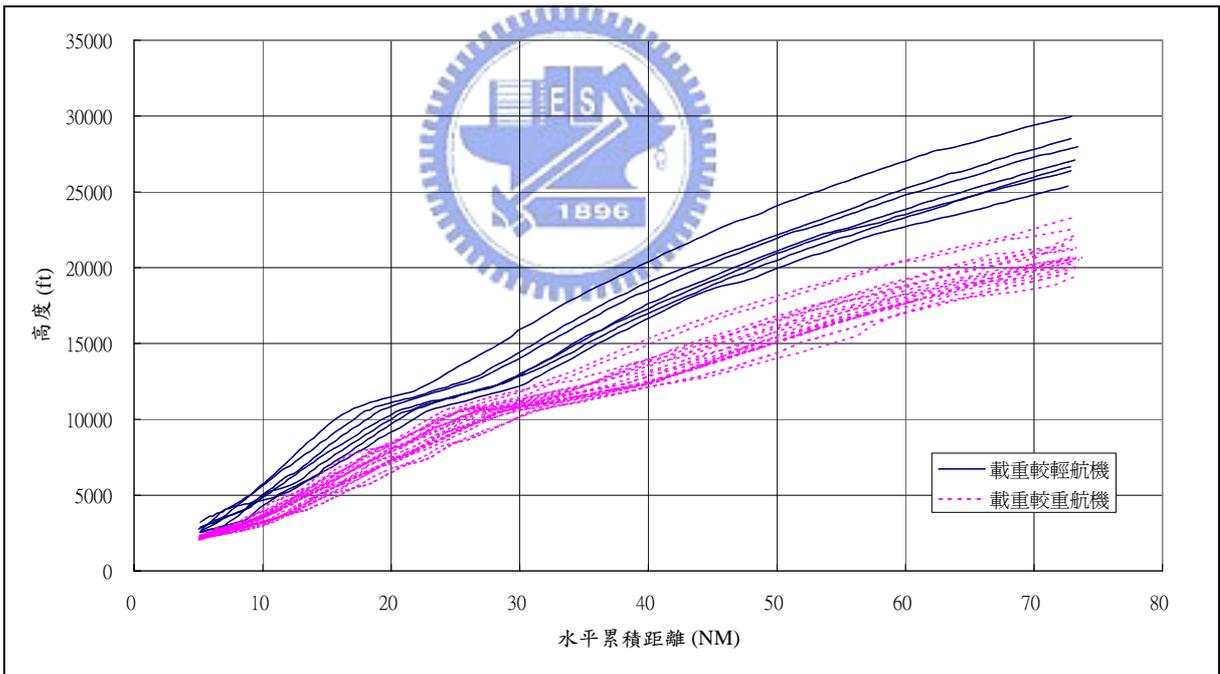


圖 3.5 B744 水平累積距離與高度圖-以航機相對載重區分

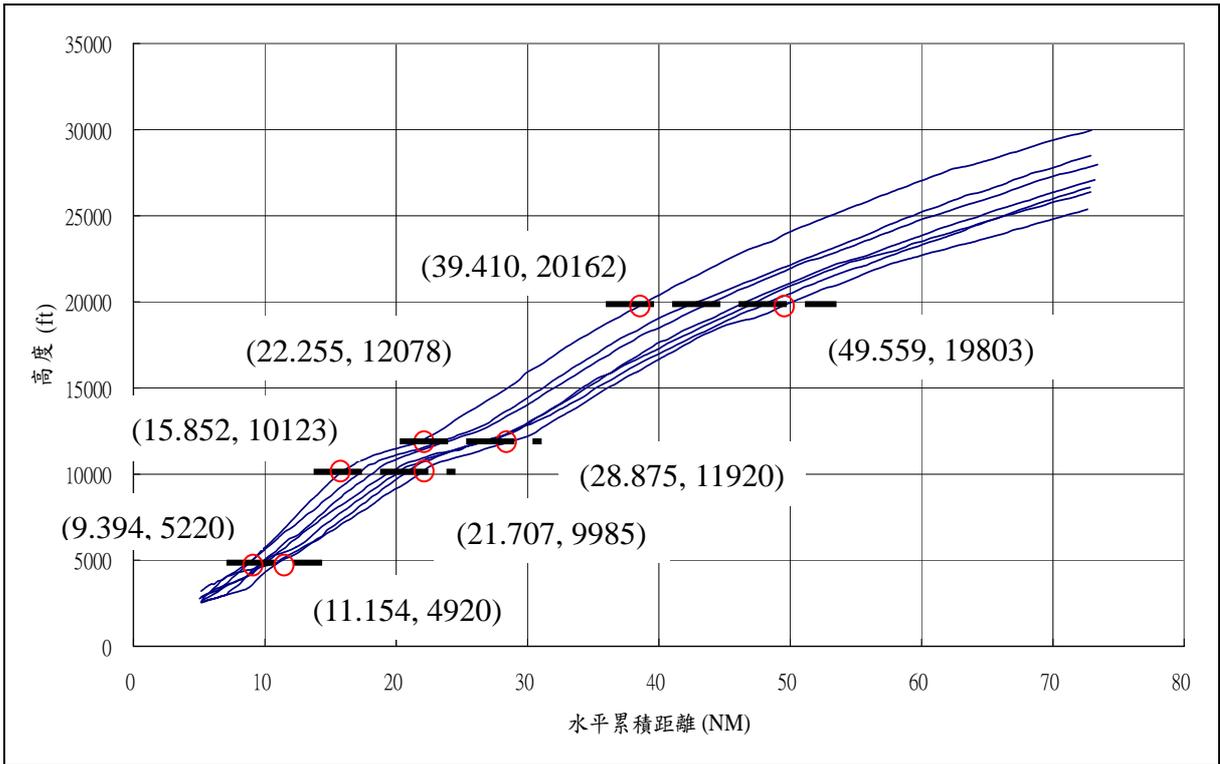


圖 3.6 載重較輕航機各階段斜率採用端點

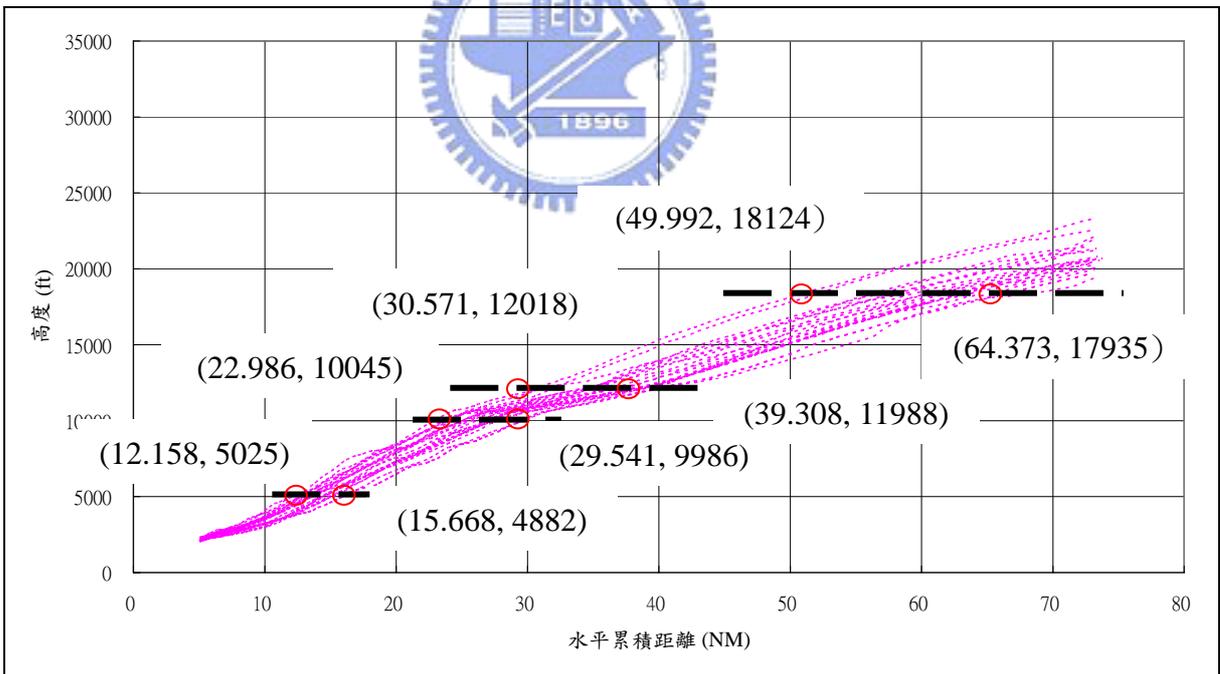


圖 3.7 載重較重航機各階段斜率採用端點

茲就各階段之包絡斜率討論說明如下：

(1) 第一階段：高度小於 5000 呎。

航機此階段屬於起始爬升時期，5000 呎內個別航機間高度無明顯差異，且航機高度 5000 呎內不易與到場航機發生衝突，但台北終端管制區 FB1 離場與 AU1A 到場航路設計因有交錯情形發生，致使航機於高度小於 5000 呎階段可能有衝突發生，因此仍列入探討。較輕航機此階段第一點平均累積水平飛行距離為 5.153 浬，其相應之爬升高度最大值為 3204 呎、最小值為 2531 呎。由最接近 5000 呎二點座標(9.394, 5220)與(11.154, 4920)求出

$$m_{left} = \frac{5220 - 3204}{9.394 - 5.153} = 475.35959 \text{ (呎/浬)}$$
$$m_{right} = \frac{4920 - 2531}{11.154 - 5.153} = 398.10032 \text{ (呎/浬)}$$

至於較重航機此階段第一點平均累積水平距離為 5.115 浬，且爬升高度最大值為 2334 呎、最小值為 2013 呎。由最接近 5000 呎二點座標(12.158, 5025)與(15.668, 4882)求得

$$m_{left} = \frac{5025 - 2334}{12.158 - 5.115} = 382.08150 \text{ (呎/浬)}$$
$$m_{right} = \frac{4882 - 2013}{15.668 - 5.115} = 271.86582 \text{ (呎/浬)}$$

(2) 第二階段：高度 5000 呎至 10000 呎。

如圖 3.6 所示，左上之座標點為(15.852, 10123)、右上之座標點為(21.707, 9985)、左下之座標點為(9.394, 5220)、右下之座標點為(11.154, 4920)。由左上及左下二點可決定斜率 m_{left} 、由右上及右下二點可決定斜率 m_{right} 。

$$m_{left} = \frac{10123 - 5220}{15.852 - 9.394} = 759.21338 \text{ (呎/浬)}$$
$$m_{right} = \frac{9985 - 4920}{21.707 - 11.154} = 479.95831 \text{ (呎/浬)}$$

已知 m_{left} 、 m_{right} 斜率及各階段端點，求交於 5000 呎與 10000 呎四點端點座標，因此交於 5000 呎二點為(9.104, 5000)、(11.321, 5000)及交於 FL100 之二點(15.69, 10000)與(21.738, 10000)。

(3) 第三階段：高度 10000 呎至 12000 呎。

如圖 3.6 所示，左上之座標點為(22.255, 12078)、右上之座標點為(28.875, 11920)、左下之座標點為(15.852, 10123)、右下座標點為(21.707, 9985)。同理可得交於 12000 呎二點為(21, 12000)與(29.171, 12000)。

$$m_{left} = \frac{12078 - 10123}{22.255 - 15.852} = 305.32563 \text{ (呎/哩)}$$

$$m_{right} = \frac{11920 - 9985}{28.875 - 21.707} = 269.94978 \text{ (呎/哩)}$$

(4) 第四階段：12000 呎至 FL200。

如圖 3.6 所示，左上之座標點為(39.410, 20162)、右上之座標點為(49.559, 19803)、左下之座標點為(22.255, 12078)、右下座標點為(28.875, 11920)。同理，交於 FL200 之二點為(39.066, 20000)與(50.076, 20000)。

$$m_{left} = \frac{20162 - 12078}{39.410 - 22.255} = 471.23288 \text{ (呎/哩)}$$

$$m_{right} = \frac{19803 - 11920}{49.550 - 28.875} = 381.28174 \text{ (呎/哩)}$$

依同樣之方式，可求算載重較重之包絡斜率，茲將載重較重與載重較輕之航機包絡斜率以及各高度對應之飛行距離範圍彙整如表 3.6 及表 3.7：

表 3.6 載重較重與載重較輕之航機包絡斜率

高度階段	載重較輕		載重較重	
	m_{left}	m_{right}	m_{left}	m_{right}
5000-10000 呎	759.21338	479.95831	463.61286	367.90889
10000-12000 呎	305.32563	269.94978	260.11866	204.97593
12000 呎-FL200 或 12000 呎-FL180	471.23288	381.28174	314.40194	237.26311

表 3.7 載重較重與載重較輕之航機各高度相交點位

高度	載重較輕航機	載重較重航機
5000 呎	(9.104, 5000)、 (11.321, 5000)	(12.104, 5000)、 (15.989, 5000)
10000 呎	(15.690, 10000)、 (21.738, 10000)	(22.813, 10000)、 (29.609, 10000)
12000 呎	(21, 12000)、 (29.171, 12000)	(30.502, 12000)、 (39.367, 12000)
FL200 或 FL180	(39.066, 20000)、 (50.076, 20000)	(49.598, 18000)、 (64.647, 18000)

3.4 航機地速

離場航機水平累積距離及速度之關係，可由圖 3.8 中之雷達資料概略分為三個階段：第一階段為水平飛行距離大於等於 5 哩至小於 22 哩，由於距離跑道頭 5 哩前之速度呈現較不規則之情形，因此不加以討論，且於水平距離 22 哩左右、地速 300 至 320 節時有明顯曲折，仍採用二元一次方程式作曲線適配；第二階段為水平航行距離大於等於 22 哩至小於 45 哩、第三階段為大於等於 45 哩，以 45 哩為分界之理由除了將大於 22 哩範圍細分外，乃因大於 45 哩已有航機高度高於 FL200，超出本研究範疇。

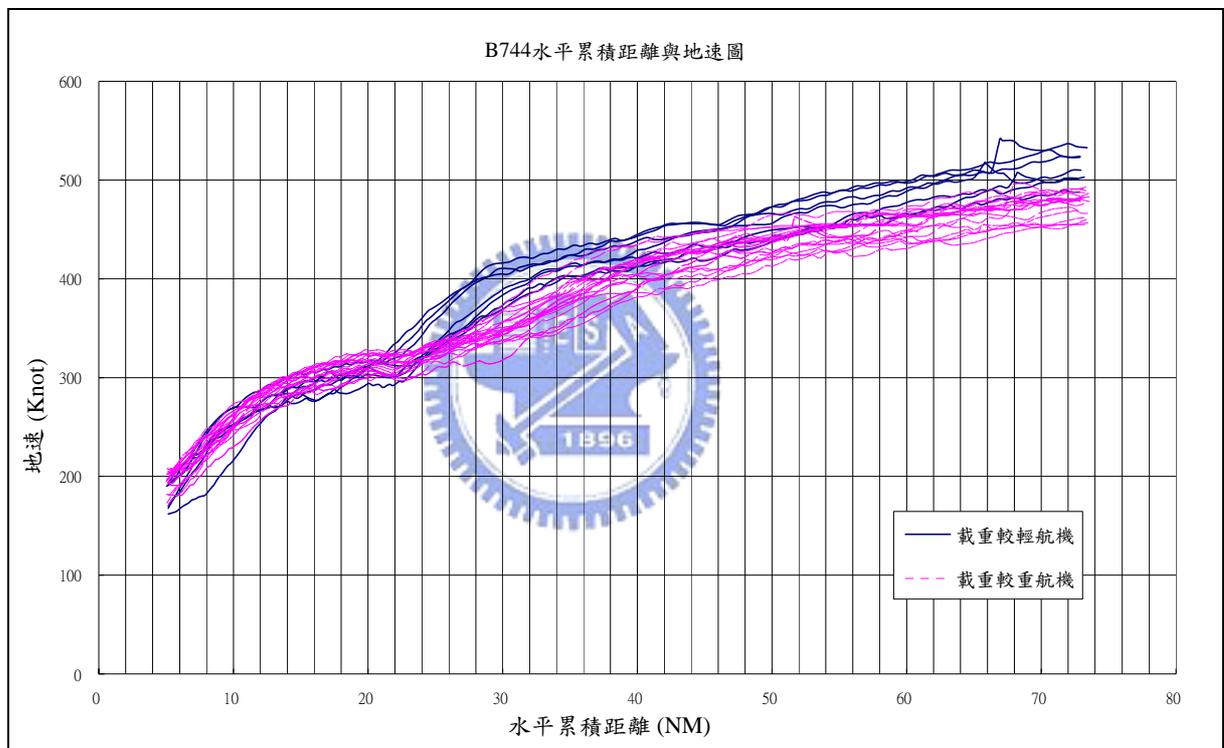


圖 3.8 B744 水平累積距離與地速圖－以航機相對載重區分

設水平累積距離為 D 哩、地速 V 節，則討論經迴歸後之各階段航機地速方程式分別如下，迴歸式底下第一列括弧表示標準差，第二列為 t 值。

- (1) 第一階段： $5 \leq D < 22$ ，較輕航機與較重航機方程式皆以二次式表之。

$$V = -0.524D^2 + 21.449D + 85.909 \quad (\text{輕}) \quad (R^2=0.89975) \quad (6)$$

(0.035) (0.924) (5.571)

(-15.165) (23.201) (15.420)

$$V = -0.504D^2 + 20.944D + 95.003 \quad (\text{重}) \quad (R^2=0.94011) \quad (7)$$

(0.014) (0.386) (2.334)

(-35.116) (54.266) (40.697)

(2) 第二階段： $22 \leq D < 45$ ，較輕航機方程式以二次式表之；較重航機以線性與二次式分析的結果，由於線性方程式即可表示較重航機的行為，因此較重航機以線性方程式表之。

$$V = -0.265D^2 + 23.017D - 65.36 \quad (\text{輕}) \quad (R^2=0.86391) \quad (8)$$

(0.022) (1.475) (23.886)

(-11.994) (15.603) (-2.736)

$$V = 5.334D + 190.88 \quad (\text{重 1}) \quad (R^2=0.87140) \quad (9-1)$$

(0.064) (2.163)

(82.808) (88.236)

$$V = 0.000131D^2 + 5.325D + 191.024 \quad (\text{重 2}) \quad (R^2=0.87140) \quad (9-2)$$

(0.011) (0.729) (11.804)

(0.012) (7.309) (16.183)

(3) 第三階段： $D \geq 45$ ，較輕航機與較重航機方程式皆以線性方程式表之。

$$V = 2.690D + 321.22 \quad (\text{輕}) \quad (R^2=0.68882) \quad (10)$$

(0.104) (6.203)

(25.813) (51.788)

$$V = 1.866D + 343.06 \quad (\text{重}) \quad (R^2=0.61926) \quad (11)$$

(0.046) (2.721)

(40.651) (126.082)

各階段航機速度與飛行距離迴歸相關係數及標準差統計如表 3.8，並將分析結果示如圖 3.9 與圖 3.10。

表 3.8 階段航機速度與飛行距離迴歸相關係數及標準差

航機載重	階段	R^2	Adjusted R^2	標準差
輕	第一階段	0.89975	0.89911	13.20671
	第二階段	0.86391	0.86296	15.12286
	第三階段	0.68882	0.68779	14.79588
重	第一階段	0.94011	0.93999	9.95641
	第二階段(線性)	0.87140	0.87127	13.61363
	第二階段(二次式)	0.87140	0.87114	13.62036
	第三階段	0.61926	0.61888	12.05297

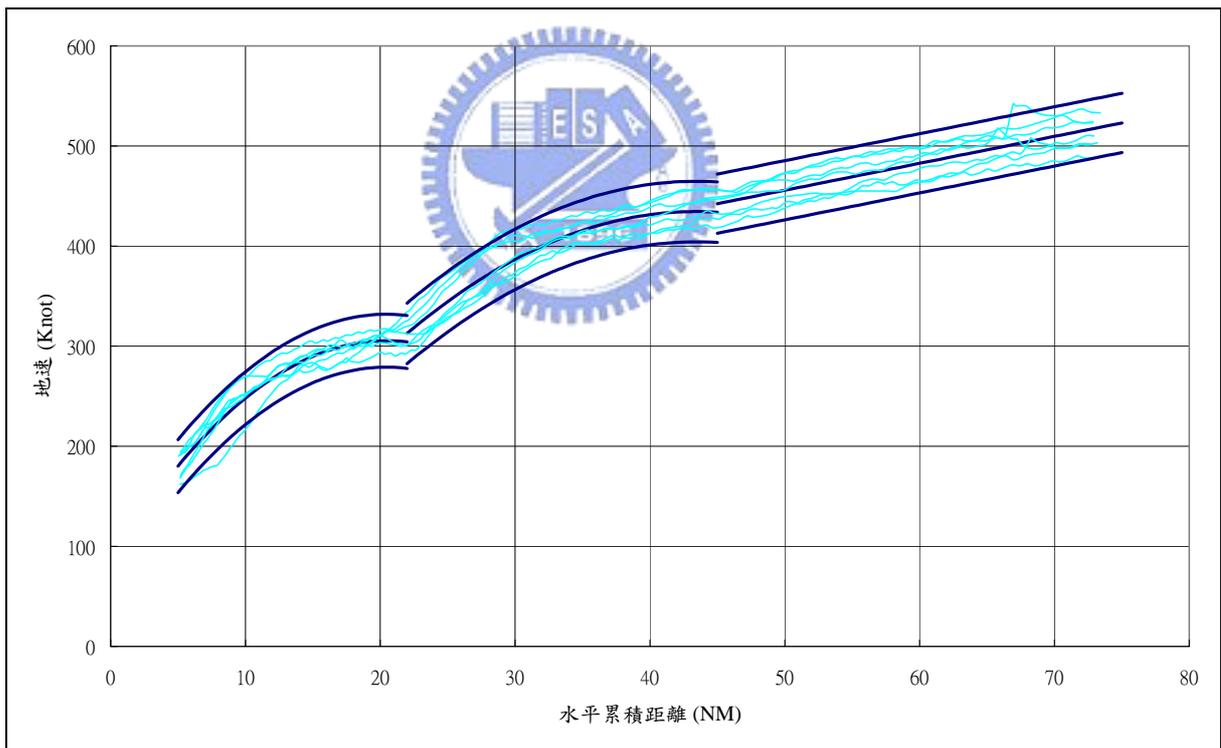


圖 3.9 載重較輕航機地速方程式與二個標準差示意圖

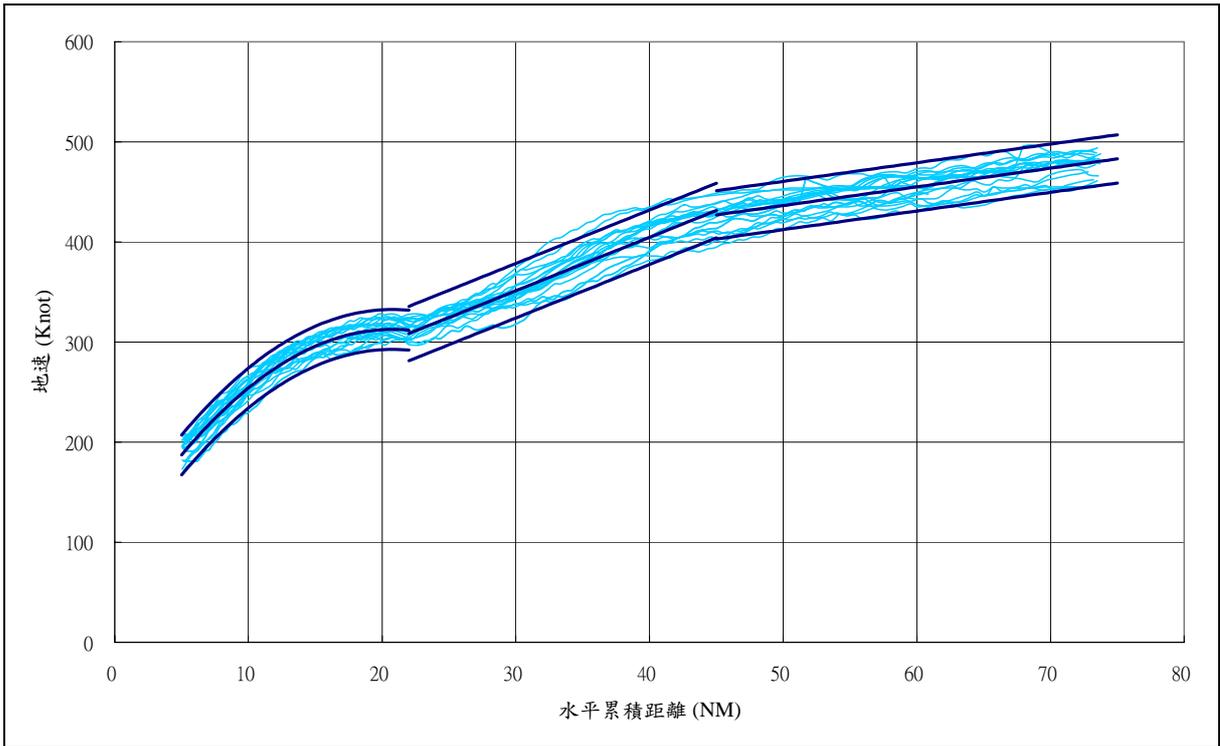


圖 3.10 載重較重航機地速方程式與二個標準差示意圖

