

直升機飛行安全之動力管理

筆者/邱銘港

提要

直升機可以在不需要機場或跑道的情况下，運利用其最初設計的獨特能力，自由飛往並降落在選定的目的地；由於直升機具備上述便利性，安全的起降亦極具挑戰性與價值性。然而，仍是存在著地相關的既存風險；如要安全使用前述直升機的獨特能力，則駕駛員需要具備高度的駕駛技能，對直升機性能的透徹瞭解以及掌握瞬息萬變環境的。

在越戰時期，所有陸軍飛機都是單發動機，且幾乎都在滿載重的狀態下操作。基此，飛行員必須學會如何完成任務並安全的返航。在當時如此嚴苛環境下，飛行員個人更能夠對自己的操作能力和飛機限制需求有所警覺。隨著航空科技及工業技術發展開發了更新、更大型且更堅固的機身，例如 CH-47、UH-60 和 AH-64 等雙發動機直升機，有更多能力承載重量、飛得更快更遠且更有餘裕的可用動力，遠比過去我們所知道的進步許多。即便當今使用已經改良的發動機和先進的機型，仍然持續發生飛行員因為動力使用不當造成飛機墜毀的事件。

本文主要探討直升機動力效能因子，提供飛行人員在操作直升機時，評估動力影響飛行安全關鍵因素，藉以尋求先期預防及改正措施，以為飛行操作安全。

關鍵詞：直升機、密度高度、動力管理

壹、前言

The European Helicopter Safety Team (EHST)歐洲直升機安全小組檢視 2000 年至 2005 年間直升機事故顯示，歐洲共發生 140 起普通航空業直升機事故並發現可能肇因與風險因素，這些因素大多與航空器駕駛員素養有關。完整的知識、細緻的飛行前準備、頻繁的飛行訓練及避免自滿是防止自己成為事故統計資料的最佳保障。

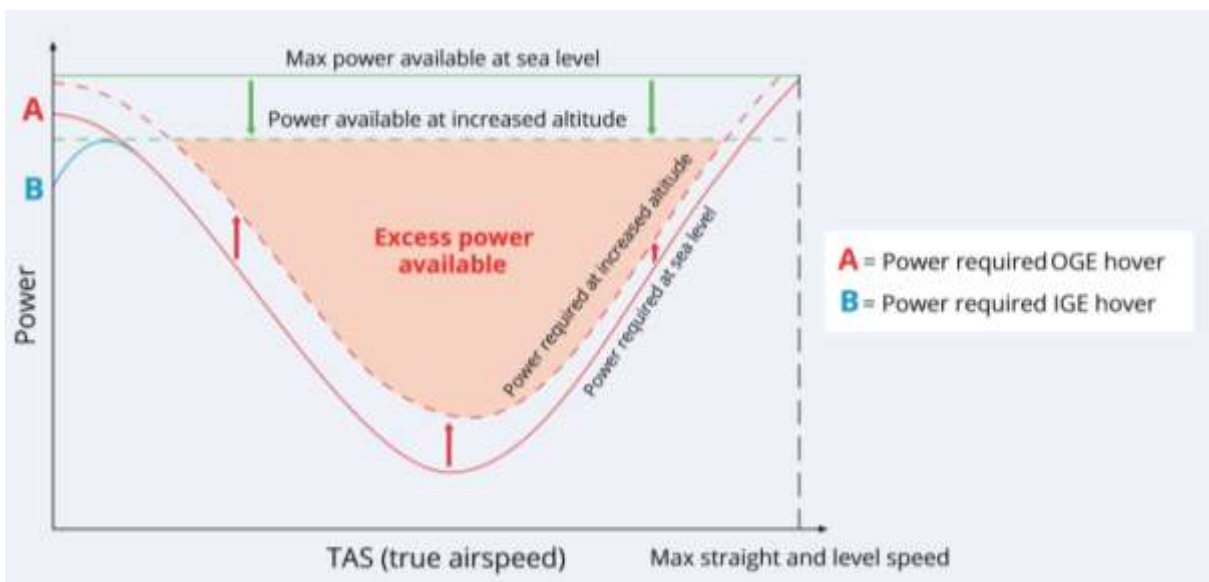
The United States Helicopter Safety Team(USHST)美國直升機安全小組分析動力管理及超出性能限制等事故約佔每年直升機事故的 20%，¹我們也在美軍飛安月刊(Flightfax)中，一次又一次地看到因為動力不足而造成操作失事的案例。因應今日構造複雜、現代化的多發動機機種，你可能覺得這方面並非那麼重要。然而，就現今的作戰環境和任務需求，飛機和機組員被迫必須在極限的邊緣操作。我們必須瞭解動力管理對飛行安全的重要性及飛行員該如何有效的動力管理，降低飛動力管理不當產生的危安風險因子發生。

貳、直升機動力及動力效能

一、直升機動力需求

直升機的性能取決於發動機的動力輸出與旋翼在空氣中作用產生的升力，任何因素均影響發動機與旋翼效率影響性能。在高總重和高密度高度之下，可用動力與所需動力間的差異值通常很小，因此密度高度對直升機飛行員變得更重要。²(圖 1)

圖 1、高度升高對(可用動力/所需動力)之影響



資料來源：Helicopter performance

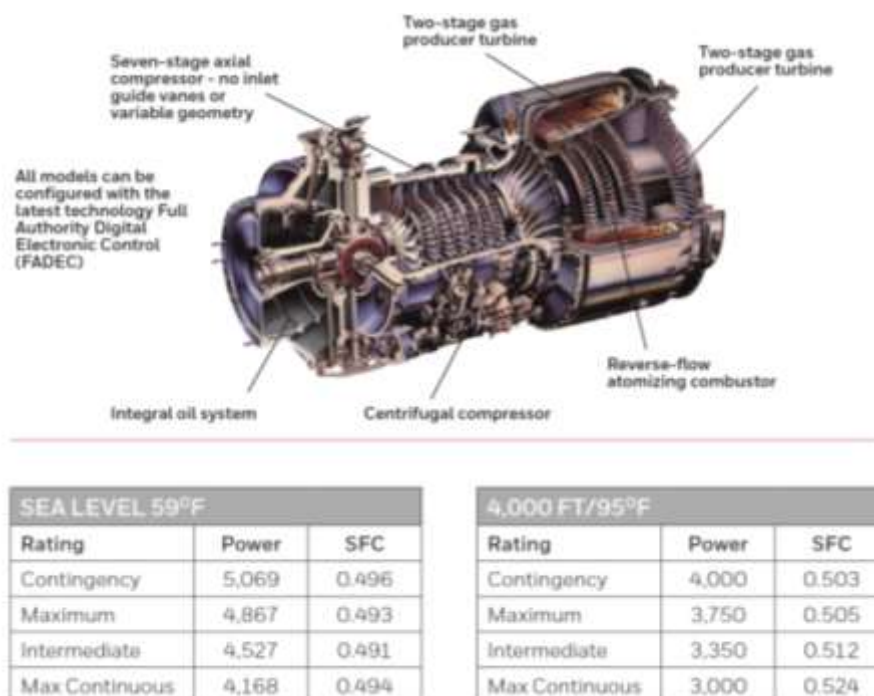
1 USHST, Vortex Ring State A USHST Airmanship Safety Bulletin (Part 1).PDF,p.3

2 Helicopter performance.pdf, CAA.govt.nz February 2020, p.11

不同於渦輪噴射發動機，直升機上的渦軸式發動機並不會因衝壓空氣增強導致進氣道壓力增大而相對使可用動力增加，因此直升機在滯空及到達 VNE(絕對不能超過的速度)空速所能使用的可用動力大約是相等的。若空氣變得稀薄密度高度(DA)增加，則油控系必須減低供油因而限制可用動力的使用，大部份的發動機將無法提供發動機製造商提供的最大動力值，以全動力供主傳動系統使用，也就是「可用動力」下降。在此同時，旋翼系統亦產生相同問題，系統需要更多空氣以產生升力；結果只能增加集體桿動力設定，亦即更多的所需動力。³

例如我國載重能力最大的 CH-47SD 中型運輸直升機，配置兩具 T55-714A 發動機，由全權數位電子控制系統(Full Authority Digital Electronic Control)簡稱(FADEC)控制每具發動機所有飛行中動力狀況的需求，⁴能使旋翼轉速維持恆定轉速值 100%(225 轉/分鐘)。然其發動機在不同高度環境下能提供的輸出動力因高度上升遞減。例如 T55-714A 發動機在平均海平面高度、溫度 59°F(15°C)時最大動力為 4867 匹，在高度上升 4000 呎 95°F(35°C)時最大動力為 3750 匹。⁵(圖 2)

圖 2、高度對 T55-714A 發動機可用動力之影響



資料來源：www.aerospace.honeywell.com

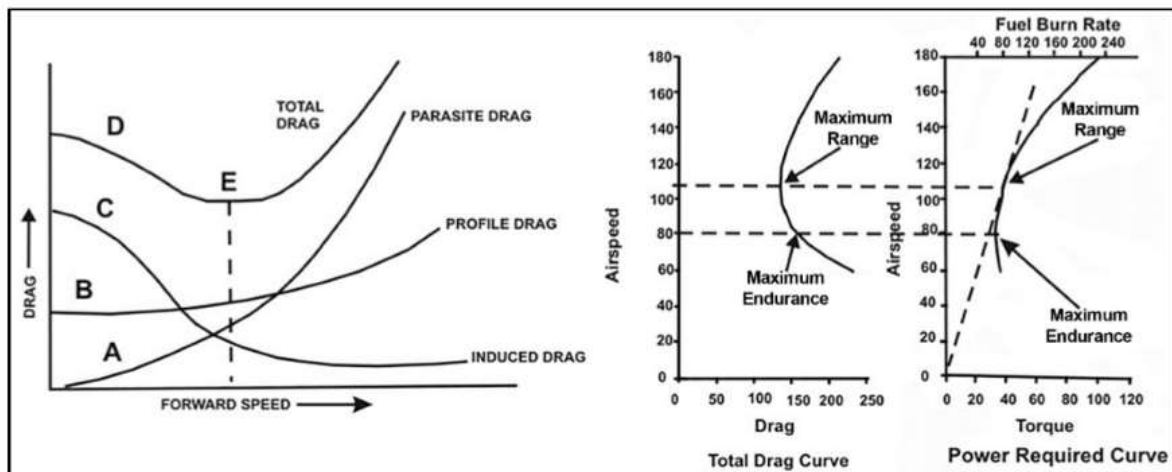
3 直升機可用馬力與所需馬力的迷思，本篇譯自南加州安全學院，王秀軍譯

4 The Boeing Company, CH-47SD OPERATOR'S MANUAL, 31 December 2012, p.2-6-1.

5 aerospace.honeywell.com, (檢索日期：2022 年 7 月 28 日)。

不論使用單一主旋翼或前後雙主旋翼架構直升機，動力需求曲線都很相似。動力需求曲線是由三種力需求因子所組成－誘導阻力、剖面阻力及寄生阻力(圖 3)。他們各在某特定空速範圍內顯示其力量。我們在大部份直升機性能圖表手冊中都可看到類似這樣的阻力、動力及空速關係圖，探討動力需求曲線將幫助我們分析在最壞的飛行環境如高高度、高熱及大載重的環境下直升機性能將如何變化。⁶

圖 3、阻力、動力、空速關係圖



資料來源：Fundamentals of Flight , JULY 2022

誘導阻力(Induced drag)是由於產生升力而產生的，更高的攻角產生更多的升力，也會產生向下的速度與渦流而增加誘導阻力。在旋翼機中，誘導阻力隨著飛機空速增加而減少，適用牛頓第二定律－作用及反作用力。事實上，滯空動力需求的大約 70-80 % 都消耗於誘導阻力，該阻力與總重量和密度高度(DA)成正比；亦即當飛機總重或密度高度(DA)增加，則誘導阻力需求亦增加。

剖面阻力(Profile drag)是由葉片在空氣中的摩擦阻力引起的，如旋翼葉片及垂直或水平安定面等。在高空速時，剖面阻力隨著葉片失速或可壓縮性的出現而迅速增加，並與前進空速成平方正比、與旋翼葉片角度成正比，而與密度高度(DA)成反比。

寄生阻力(Parasite drag)是飛機的非升力部分，隨空速而增加，它包含與機身、發動機整流罩、主承桿與旋翼轂、起落架、機翼負載、外掛武器系統及粗糙的面漆相關的阻力、表面摩擦及干擾阻力。⁷

6 直升機可用馬力與所需馬力的迷思，本篇譯自南加州安全學院，王秀軍譯

7 Fundamentals of Flight ,2022 JULY , P.1-27

二、影響直升機動力效能要素

直升機飛行員在執行每趟飛行任務前必須先行完成「性能計畫卡」(Performance Planning Card, PPC) 的計算，依據機型操作手冊中使用的各種圖表，查詢任務當時高度、大氣壓力、溫度、濕度、起飛總重求出操作限制參考數據。

救援直升機因起飛時間急迫，通常都會先建立不同環境下的性能參數數據以利任務執行參考，在較先進的機型已升級成數位化儀表系統後，更在儀表功能介面上建立性能計算電腦，透過直升機上的「大氣數據處理電腦」(Air Data Computer, ADC) 將任務環境資料，計算出操作參考限制。⁸

依據 CH-47F 系列空勤人員訓練手冊(CH-47F Series Aircrew Training Manual)第 1010 課目「執行 PPC 計算」要求，當環境溫度改變 5 度、壓力高度改變 500 呎、起飛總重改變 500 磅時必須重新計算 PPC。⁹可見些微的環境改變即影響飛機性能。

三個主要影響性能的因素為密度高度 (DA)、重量和風。但濕度通常不被認為是個重要的因素，在相同高度與溫度下潮濕的空氣與乾燥空氣相比，性能大概會降低約 3-4%，因此在高濕度環境下滯空與起飛性能會下降，雖然微不足道，若在極限環境下飛行可能會導致事故。¹⁰

(一)密度高度 (DA)

密度高度為一地當時空氣密度值相當於在標準大氣中等密度時之高度。因氣溫、氣壓與濕度 3 種因素決定密度，則密度高度又係根據氣溫而修正之氣壓高度，故知氣壓高度與氣溫直接影響密度高度。當氣壓高度的氣溫高於氣壓高度標準氣溫時，其密度高度必高；反之，當氣壓高度的氣溫低於氣壓高度標準氣溫時，其密度高度必低。¹¹

當空氣密度增加，發動機動力輸出，旋翼效率和升力也會增加。密度高度發生在標準大氣中給定大氣密度時，高於平均海平面(MSL)的高度。也可以被解釋為壓力高度針對非標準溫差的校正。四個因素影響密度高度大部份為大氣壓力、高度、溫度、及空氣中的水氣含量。

8 邱銘港，環境變遷下直升機災難防救與救援安全 (1994-2016)，2016 年 5 月，頁 47。

9 CH-47F Series Aircrew Training Manual, 15 June 2020, p.4-15

10 FAA, Helicopter Flying Handbook(2019), P.7-2

11 國防部空軍司令部，空軍氣象觀測手冊，106 年 2 月 17 日，頁 8-4

對高密度高度與低密度高度這兩種術語需要透徹理解。一般來說，高密度高度指的是稀薄空氣，而低密度高度指的是稠密空氣。產生高密度高度(稀薄空氣)的條件如高海拔、低大氣壓力、高溫、高濕度或某些其中的組合。相反的低密度高度(稠密空氣)的條件如低海拔、高大氣壓力、低溫、和低濕度下的組合環境。然而，高密度高度也可能出現在低海拔地區高溫炎熱環境時。¹²

密度高度與飛行關係：低密度高度可增進航空器飛航操作效能，反之，高密度高度能降低航空器飛航操作效能，如果遇到高密度高度，對飛航操作是一種危害。高密度高度對飛航操作能產生 3 種危害影響：

1. 減少航空器動力，因空氣密度小，空氣稀薄，降低引擎內燃能力。
2. 減少航空器衝力，因空氣變輕，使得航空器螺旋槳減低控制能力，也使噴射引擎吸入較少空氣。
3. 減少舉升力，因稀輕空氣對飛機翼面浮力較小。¹³

(二)重量

重量是抵抗升力的力。隨著重量增加，其在滯空與飛行當中所需要的動力也就越大，需要更多升力以補償增加重量所需動力也必須增加，而發動機的剩餘可用動力也就相對的減少。大多數性能圖表都將重量作為變量之一。在較高的總重量下，滯空所需動力增加會產生更大的扭力，這意味著需要更多的反扭力推力。在某些直升機中，在高空運行期間，即使總重量不在限制內，尾旋翼在滯空期間產生的最大反扭力也可能不足以克服扭力。

影響性能的三個要素中，只有載重量這一項是飛行人員所可予以控制的，通過減輕重量，直升機能夠安全起飛或降落原本不可能的位置。密度高度與風的情況均為自然界所形成，飛行途中以及降落點間的密度高度與風的情況不同，飛機動力的獲得亦就不同。有時為了保持飛機的效能，只有減少載重量，但有時因任務的需要，載重量不能減少，那就只

12 Fundamentals of Flight ,2022 JULY , P.1-55

13 國防部空軍司令部，空軍氣象觀測手冊，106 年 2 月 17 日，頁 8-6

有減少所攜油量，但是攜油量減少又縮短了飛行的航程即留空時間，所以這些必須要相互配合以作通盤的考慮才行。¹⁴

（三）風

風向和風速也會影響滯空、起飛和爬升性能。當旋翼面有相對氣流時，傳導升力隨時發生。傳導升力的產生通常在直升機運動或風引起的相對氣流時。隨著相對風速增加，傳導升力增加、滯空狀態下以致所需動力減少。

風向也是一個重要的動力考量因素。理想的操作是在逆風環境下，因為逆風有助於最大程度地提高直升機性能。強側風和順風可能需要更大尾旋翼推力使用以保持方向控制。這增加尾旋翼推力吸收發動機的動力，意味著主旋翼用於升力產生的動力更少。一些直升機甚至有臨界風方位角或最大安全相對風圖表。超過這些限制操作直升機可能導致喪失尾旋翼效能(LTE)，如(圖 6、圖 7、圖 8)。

風對直升機起飛和爬升性能的影響很大。當起飛方向為逆風時，會讓傳導升力更早出現，導致更多升力和更陡峭的爬升角。當順風方向起飛時，需要更多的距離以獲得傳導升力。¹⁵

三、成功的直升機動力管理

直升機飛行員成功的運用動力管理在高密度高度、高總重及強風的極端環境飛行的例子，是發生在 1996 年聖母峰救難事件，在事件發生時的已簽約區域性救難飛行員因天候惡劣及高度太高而拒絕接受任務後，尼泊爾皇家陸軍中校 Maden Khatri Chhetri 自願前往搜救登山者，他非常瞭解 AS-350 單發動機直升機(圖 4)動力需求值，於 20,000 呎高度世界最高峰斜坡上救出一位美籍和一位來自台灣的登山客。

他以高於 20,000 呎實用升限高度，每小時 20-70 英里風速，大氣溫度-50 度，¹⁶成功飛越峻線並在此成功找到了登山客。於嘗試幾次落地時都遭遇主旋翼轉速下降及掉高度後，他瞭解必須減少重量的事實，因此他下降至較低高度並請副駕駛離機。他非常清楚想要實施有地面效應滯空將非常困難，因此他決定使用直接（無滯空）落地。考慮到雪地太軟，因此選擇落在結冰區塊而且他成功了，儘量減少滑橇壓在地上的力量，並一次只救一位登山

14 張德光，直升機（臺北：五洲出版，2011 年 1 月第二版三刷），頁 85。

15 Fundamentals of Flight ,2022 JULY , P.1-57~P.1-58

16 <https://goefoundation.org/eagles/chhetri-madan-khatri/>（檢索日期：2023 年 4 月 20 日）

客，他保持飛機在有地面效應的情況下滑行，直到地形下坡段才開始前推機頭重新獲得空速。於終昏之前他成功的救出另一位登山者，唯有充份認知惡劣的飛行環境及精準的了解可用動力及所需動力間的關係，才促使成功達成任務。¹⁷

圖 4、AS-350 高山救援



資料來源：HELICOPTER RESCUE TECHNIQUES¹⁸

17 直升機可用馬力與所需馬力的迷思，本篇譯自南加州安全學院，王秀軍譯

18 National SAR Academy, HELICOPTER RESCUE TECHNIQUES, October 2013, p.26

參、動力管理的重要性

國際直升機安全小組 The International Helicopter Safety Team (IHST)成立於 2005 年，該組織分析 2006 年至 2011 年間美國直升機事故數據分析，在 523 起事故中有 217 起(41%)為明顯失控，而動力管理事故是其他事故的 2 倍，217 起失控事故中與動力管理有關案例就佔了 79 起(表 1)。

NTSB 再對這 79 起有關動力管理事故分析，歸納出以下三種狀況下肇事故：

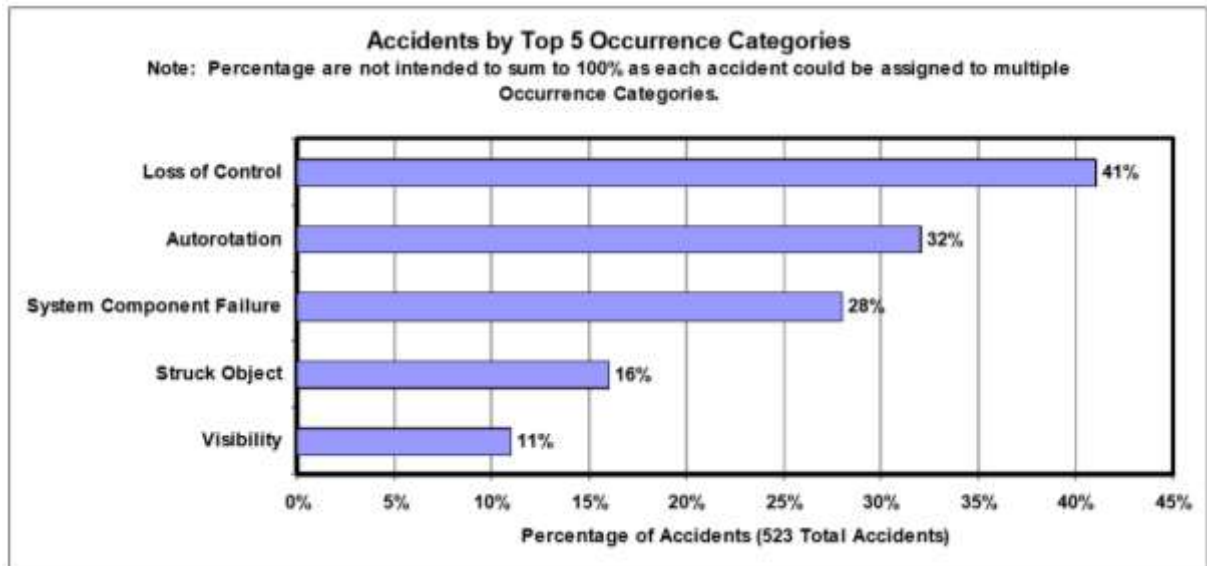
(一)練習自動旋轉期間主旋翼轉速低

1. 教官示範操作過程中主旋翼轉速低的狀況下持續操作，且未執行動力恢復或延遲動力恢復，以致動力恢復時機過晚。
2. 學員練習操作過程中主旋翼轉速低的狀況下持續操作，且教官未執行動力恢復或延遲動力恢復，以致動力恢復時機過晚。

(二)飛行員低估或未加考量尾風滯空操作及起降時的動力需求。

(三)飛行員低估了密度高度對所需動力的影響，並在可用動力不足狀況下降高度或進場。¹⁹

表 1、五大意外事故類別分類



資料來源：IHST

一、操作限制規範

技術資料提供飛行員飛行時降低操作風險，飛行員必需要知道從技術資料中可以取得什麼資料，這些資料的意義為何，以及

19 A Squirrel, a Moose, and Loss of Control in Helicopter Accidents By Lee Roskop (IHST team member),p1~p2

如何將這些資料應用於操作。有許多技術資料的來源都可以在飛行手冊之外取得，所以飛行操作手冊仍不失為找出風險所在的起跑線，這包含了正常程序、緊急程序及操作極限與限制，²⁰手冊中的「警告」、「注意」與「附註」，目的都是特別指出與風險有關的重要事項，而且可拿來作為完善的初始研究計畫的基礎。²¹各型機的操作手冊均會將各項操作限制圖列或表列說明，一旦超過限制性能通常都會急遽下降，例如 CH-47SD 操作手冊警告「超限操作極可能對飛機重要組件造成永久性損壞，超限操作也會造成飛機性能衰退，以致立即故障或在日後的飛行中發生」。²²飛行員必須認知這些手冊提供的限制數據規範，是直升機製造商與專業的試飛員在特定的環境及試飛程序操作下測試出來或是實驗室模擬出來的數據，一般飛行員在操作時應更加保守勿超過限制。

現今飛行員過分依賴現代化裝備，反誤導了對飛行準備工作及飛行安全的認知，造成疏於充實本質學識的動力，對任務中可能遭遇的狀況，考慮不夠周延，未能防於未然，也因準備不足缺少應變計畫，飛行中一旦出現預期之外的狀況，頓時會產生手足無措，狀況處置反應不及。²³

現今任務派遣，常因為環境條件，飛機實際可用動力無法滿足任務所需使用動力，致無法完成任務，這也是訓練失敗且成為問題的地方。現代化的直升機動力運用的觀念和過去差異甚大，已經不僅侷限在計較只有百分之幾的動力和極限；任務中使用動力距可用極限通常仍有 30%到 40%左右，這反而讓飛行員們覺得自滿，殊不知這是在訓練及任務期間必須關注的重要事項。也因如此，長期下來造成飛行員覺得有用不完的動力，給自己有所謂「虛假」的安全感。「多出來的 5%到 10%動力，能不能讓我安全落在一般地點？」，回想一下，前一次「認真」評估你進場時的可用動力是甚麼時候？實際上用了多少動力？是否落在所望的落地點上？

直升機飛行員必須具備「精準預判可用動力的能力」。有多少可用？需要多少？多少時間可達最大效益？這將會提升動力使用方面狀況警知的敏銳度。結合狀況警覺和動力運用兩者，多發

20 國防部史政編譯局譯印，飛行員素養之精進，(台北市)：國防部，西元 1998 年 11 月，頁 395。

21 國防部史政編譯局譯印，飛行員素養之精進，(臺北市)：國防部，西元 1998 年 11 月，頁 264。

22 陸軍司令部印頒，CH-47SD 直升機操作手冊，91 年 11 月 29 日，頁 7-2

23 藍天神鷹：飛將軍七度空中歷險記，田定忠，(台北市)：時英出版社，西元 2011 年 11 月，頁 332。

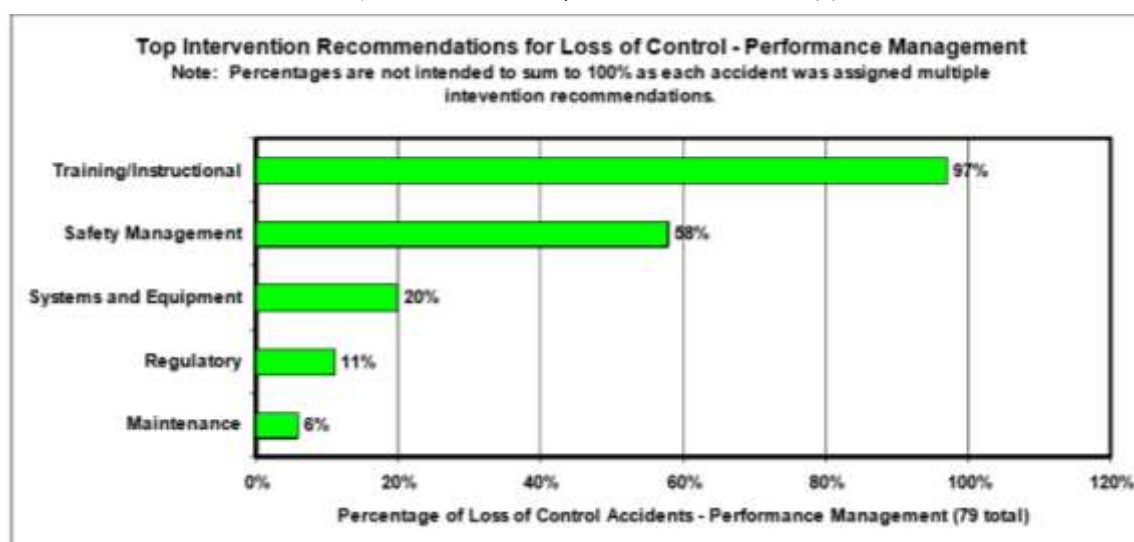
動機直升機在正常操作及單發動機緊急狀況下以判斷在起飛、落地、IGE（有地面效應）、OGE（無地面效應）、側風、尾風、爬升及轉彎等時機所用之動力做有效管理，狀況警知的提升，可使飛行員在任務執行過程中，持續地降低風險。面對的任務環境可能極端嚴苛，必須清楚總是會有更大的負載和彈藥掛載，要如何能夠具備能力從座艙內降低這些風險？²⁴

在 OGE 滯空狀況下，即使是輕微的下降率，也會導致動力需求提升，根據前賽考斯基試飛員(Nick Lappos)的說法，當直升機以每分鐘 1 至 200 呎的速度下降時，防止下降加速的所需功率可能會增加 2%-5%，如果繼續不受限的下降，也沒有向前加速已獲得有效傳導升力(ETL)，則旋翼產生的渦流將可能導致完全的環狀渦流(VRS)。²⁵

二、IHST 針對 2006 年至 2011 年間美國直升機 79 起失控事故數據分析提出預防及建議，其中的 97%起事故建議項目是「動力管理訓練及教學」（表 2），可運用以下方法：

- （一）飛行中動力及動能管理訓練。
- （二）進階強化模擬機訓練。
- （三）加強飛機性能及操作限制的訓練。
- （四）加強教官培訓及再精進訓練。
- （五）針對高風險因子做飛行提示。²⁶

表 2、失控事故預防及建議



資料來源：IHST

24 Power management-why is this still an issue, Flightfax Number 109,2022 July, p.1~p.2

25 USHST,Power Available Limitations A USHST Airmanship Safety Bulletin(Part 2).PDF, p.1

26 A Squirrel, a Moose, and Loss of Control in Helicopter Accidents By Lee Roskop (IHST team member),p2~p3

肆、動力管理失當案例

研究過去發生的直升機意外事故，大都可經由充份瞭解動力特性及風險管理練習而加以防止。從事直升機飛行工作的飛行人員在訓練學習時，都曾對該課目接受精良的訓練，但知識及技術都會消退，即便是最有經驗的飛行員也會因缺乏知識或未注意操作環境而付出代價，以下就列舉案例作說明。

一、起飛時失事案例

(一) 事件概述

民國 92 年 3 月 1 日，台北時間 1547 時，內政部消防署空中消防隊籌備處一架 UH-1H 型直升機，編號 NFA901，執行阿里山鐵路車禍傷患運送任務，於祝山觀日平台旁停機坪起飛，搭載機組員 4 人、傷患 9 人(含兒童 3 人)計 13 人，在離地高度約 30 呎時，尾旋翼擊中起飛位置東方之樹梢後，失控墜落於斜坡叢內，二次事故造成死亡 2 人、重傷 5 人、輕傷 5 人、不詳 1 人，該機全毀。

(二) 調查發現

駕駛員於高高度起飛時，未依空消隊訂定之「載重計算表」資料操作航空器，載重超出該型機滯空升限範圍，離地後因所需動力不足，致撞樹後失控墜地失事。²⁷祝山停機坪壓力高度 8,000 呎，推算當時溫度約攝氏 15 度，依 UH-1H 型機滯空限制，離地 5 呎致空限制 8,700 磅，無地面效應致空限制重量約 7,800 磅，而該機起飛離地時總重為 8,680 磅，故當滯空高度 5 呎以上時，因地面效應減小而呈現所需動力不足，產生扭力不平衡現象使機頭右偏，尾旋翼撞擊樹梢失控墜地。²⁸

二、進場時失事案例

(一) 事件概述

中興航空公司 1 架 MBB/Kawasaki BK117B-2 型直升機，於民國 102 年 10 月 16 日，執行玉山氣象站人員與物資運補任務。該機於 0638 時自松山機場起飛，0741 時先飛抵標高約 2,610 公尺之為塔塔加直升機臨時起降場（塔塔加停車場），駕駛員與地面人員討論後，預定分 3 批次將該處之

27 飛航安全調查委員會，ASC-AOR-05-01-001 飛航事故調查報告，（臺北市：飛航安全調查委員會，西元 2005 年 1 月，頁 I~III。

28 飛航安全調查委員會，ASC-AOR-05-01-001 飛航事故調查報告，（臺北市：飛航安全調查委員會，西元 2005 年 1 月，頁 73-74。

人員與物資載運至玉山氣象站旁標高約 3,825 公尺之玉山北峰停機坪。0804 時該機再度自塔塔加臨時起降場起飛，執行第 2 批次運補任務，去程載有正、副駕駛員與乘員各 1 人，及食材與貨物 8 至 9 箱。0808:58 時該機飛抵玉山北峰停機坪上空，距地面約 3 至 4 呎落地滯空時，機首突有一較大之右偏，該機高度隨即逐漸上升並開始呈順時針方向旋轉，偏出停機坪後旋轉有加劇之現象並逐漸喪失高度，最後墜落於玉山北峰停機坪東北方之懸崖下，造成機上 3 人罹難，航機全毀。

（二）調查發現

任務飛航組員於外場作業地點未確實計算航機載重，可能存在航機載重超出性能限制。以保守估算事故航次之落地總重，其重量超過飛航手冊在地面效應內滯空升限圖所允許之重量限制。事故航機在超重情況下執行落地，尾旋翼控制裕度可能已在臨界狀況，不恰當之飛航操作或風的負面影響下，均可能使尾旋翼效能失效，致航機方向右偏。飛航組員對尾旋翼效能失效之狀況警覺與發生條件之認知不足，使航機處於易遭遇尾旋翼效能失效之狀況，當航機遭遇尾旋翼效能失效時，可能左舵已無餘裕。²⁹

三、國外演訓時失事案例

（一）事件概述

美陸航在某次 AH-64E 執行晝間 CMF(戰鬥飛行)訓練過程中，由單位指定資深正駕駛帶飛新進第一類戰備副駕駛。本次訓練主要有三個重點項目，包含 CMF、低能見度環境下及儀器訓練。此失事案例在任務前評估為低風險，由單位提示官完成提示後，該飛行員連長核准任務派遣。當時天氣狀況為東南風 11 哩、能見度 10 哩無雲幕，溫度 3°C。該機開車滑出後完成一次航線起降後，起飛定向訓練場實施 CMF 操作，機長陸續示範各項動作後，由副駕駛逐一完成。接續，機長接桿示範爬升俯衝，在模擬接戰目標後，機長壓了 62 度右轉坡度實施脫離，同時導致旋翼轉速下降至 77%(正常為 94%至 104%)。飛機右側外火箭掛架及水平安定面右側撞擊地面後，飛機彈起至 50 呎高度；第二次撞擊地

29 飛航安全調查委員會，ASC-AOR-14-10-002 飛航事故調查報告，（臺北市：飛航安全調查委員會，西元 2014 年 11 月，頁 I ~ III。

面後向左滾轉，主輪碰撞地面後飛機再次彈起，飛行員仍可操作飛機落地，在落地後隨即緊急關車，飛行員離開座艙後評估飛機損壞狀況，這位前座的機長嘗試從俯衝中改出並伴隨急轉彎操作，但因為動力不足而無法順利完成。

（二）調查發現

當天的密度高度及溫度所推算出來的最大可用動力為93%(正常最大為100%)，若超出該限制，將造成旋翼轉速下降。在本次操作機組員未及時將機頭抬起高於天地線(爬升姿態)，導致俯衝改出時無法補償旋翼轉速衰降所下降的高度，因此造成飛機失去升力並撞擊地面。在最佳的動力運用狀態，應為保持飛機水平，調整至最大爬升或最大耐航空速。避免機頭向下、過大轉彎坡度、增加空速及不當操作，都能夠減少下降率並有利於建立爬升。此外，任務提示過程中，提示官應針對飛機性能、操作限制及機組員能力綜合評估風險，並由適當層級幹部核准任務派遣。³⁰

伍、動力管理不當與改正

直升機是飛行員操作著一部靠發動機產生動力在空氣中運動的載具，因此「飛行」就與飛行員、機器及大氣環境有著密切的關係，飛安事故發生的原因也就區分人為、機械、環境因素等三大項。³¹

飛行員常見動力管理不當以致事故因素，例如在起降期間轉向側風、尾風期間，因空速減少導致喪失尾旋翼效能(LTE)，五邊進場太高、太快、太近，致下降率過大並伴隨低空速及增加動力而產生環狀渦流，不正確的風向/風速判讀，導致尾風進場至重落地及/或導致動力超限等。³²在準備進入環狀渦流及喪失尾旋翼效能(LTE)狀況前，做出改正的操作是可以避免的，唯須飛行員自己提升狀況的警覺與判斷能力。

一、環狀渦流(VRS)

（一）發生因素

環狀渦流狀態經常與固定翼的失速相提並論，直升機在帶動力下降過程中，進入本身產生的下洗氣流稱為環狀渦流(圖5)；在相同的動力配置下，導致下降率劇增(典型的動力下沉所產生的下降率至少大於進入環狀渦流前三倍)。當空速30浬/時以下，直升機帶動力飛

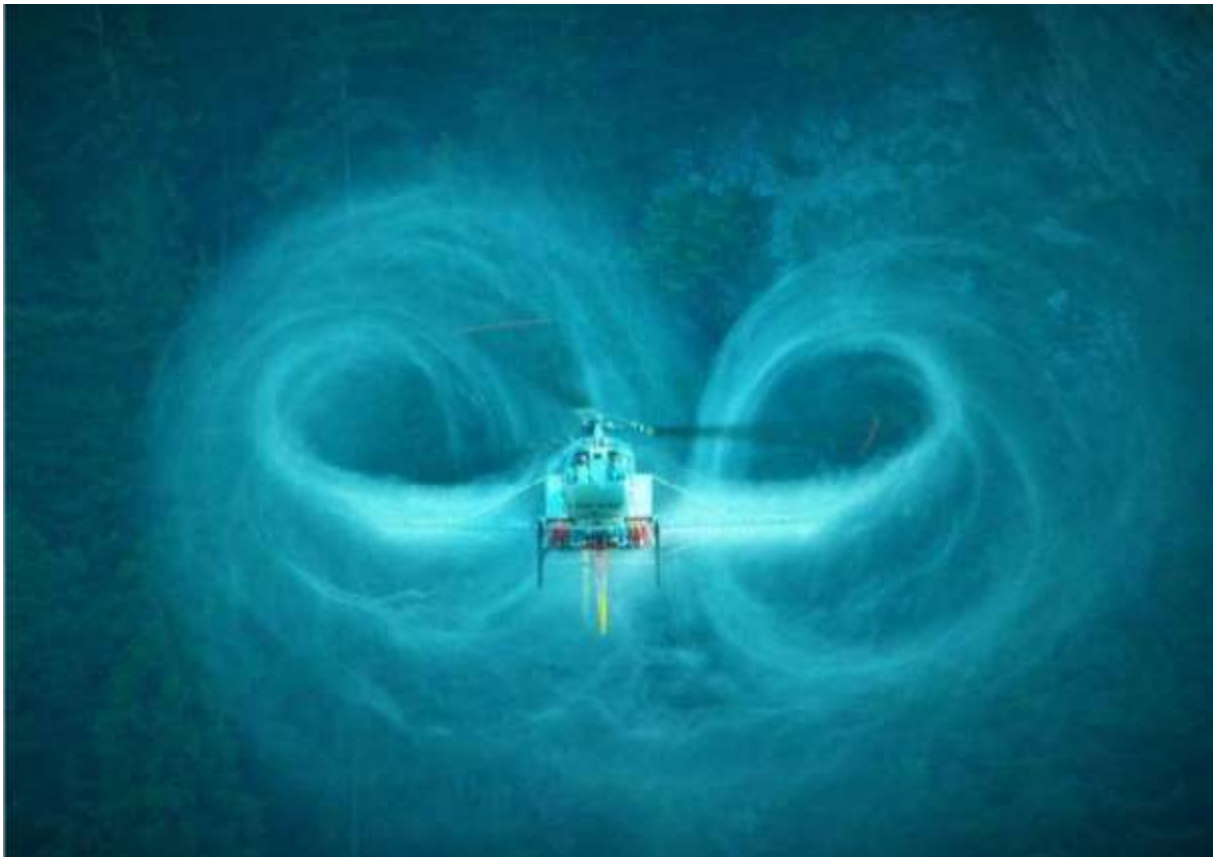
30 Mishap review-AH-64E Break Tuen, Flightfax Number 109,2022 July, p.4~p.5

31 藍天神鷹:飛將軍七度空中歷險記，田定忠，(臺北市：時英出版社，西元2011年11月，頁20。

32 European Helicopter Safety Team HE3, p.23

行下降時之下降率趨近主旋翼「下洗氣流速度」，即可能發生環狀渦流。下洗氣流速度或下洗誘導速度定義為空氣於通過旋翼旋轉盤後向下移動的速度(佛羅德方程式)。誘導速度是直升機型別及總重的函數。舉例來說，總重 2250 公斤而直徑為 10.69 公尺的三片主旋翼葉片直升機所產生的誘導速度為每秒 10 公尺/(1000 呎/分)，然而，總重 1000 公斤而直徑為 11 公尺的二片主旋翼葉片直升機所產生的誘導速度為每秒 6.5 公尺(700 呎/分)。因此，環狀渦流狀態明顯將隨著直升機的型別及總重不同而改變，但一般認定不安全的下降率是每分鐘大於 500 呎(帶動力下沉)。

圖 5、環狀渦流(VRS)圖



資料來源：IHST

(二) 改正方法

改正方式可運用迴旋桿及/或集體桿，但由於旋翼系統不同，有時僅運用迴旋桿將不足以修正直升機姿態而獲得空速。將集體桿降至最低也可能以脫離環狀渦流，但僅使用減低集體桿改正，在改出過程中損失的高度將遠高於僅使用迴旋桿改正，因為在低空速情況下執行自

轉將產生非常高的下降率。

因此，在初始發生階段應以下述改正動作來減少高度損失：

1. 明確的前推迴旋桿，建立加速姿態以獲取空速。
2. 如果加速姿態無法建立，降低集體桿並建立自轉，再次明確的視需要前推迴旋桿以增加空速。
3. 由於改正措施會造成高度大量損失，尤其在接近地面期間，所以防止環狀渦流產生顯得特別重要。避免空速低於 30 哩/時及下降率大於每分鐘 500 呎的帶動力下降，特別提醒執行以下的飛行操作應特別小心：在封閉場地執行偵察及進場、順風進場、大角度進場、無地面效應滯空(HOGE)、低空速自轉改出、順風急停、空中照測。³³

二、喪失尾旋翼效能 (LTE)

(一) 發生因素

1. 單主旋翼直升機的尾旋翼產生推力其主要功能之一就是控制直升機航向，如果尾旋翼推力不足，將發生非預期與無法控制的偏扭情形。這種現象是造成直升機意外事故因素之一，通常稱為喪失尾旋翼效能 (LTE)，尤其方向舵接近全行程位置時，更容易發生。喪失尾旋翼效能(LTE)通常在前進空速低於 30 哩/時發生，且伴隨：尾翼空氣動力效率不足、主旋翼產生的下洗氣流及其他氣流與進入尾旋翼的氣流相互干擾、需要幾乎使用全行程方向舵之大動力配置、造成尾旋翼推力需求增加之逆風環境、需要大量與快速的集體變矩桿與方向舵操作之亂流環境。舉例執行機外吊掛、救生吊掛、空中滅火、落地場偵察、低速空中照測、直升機緊急醫療服務、高密度高度 (DA) 起降時，飛行員特別容易發現自己處於低高度、低空速、高動力及風速難以判定的環境，且為了執行工作而需不斷調整直升機姿態。³⁴
2. 藉由保持對風及其對直升機產生影響的敏銳警覺，才能有效降低喪失尾旋翼效能(LTE)的發生。³⁵(圖 6、

33 European Helicopter Safety Team HE1,pp.12~13

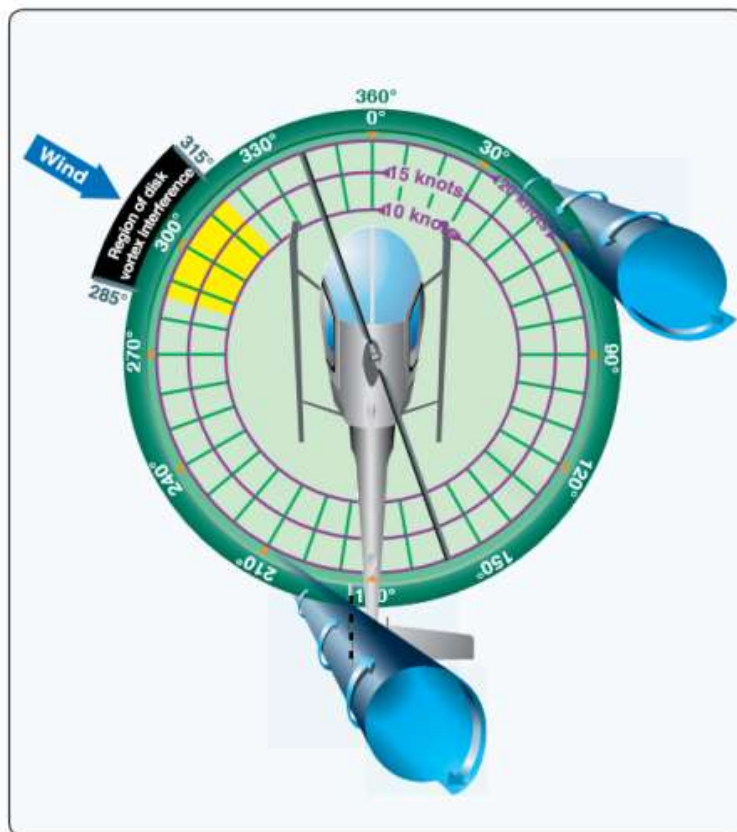
34 European Helicopter Safety Team HE1,pp.14~15

35 FAA AC90-95, Unanticipated right yaw,1995.12.16,p.8

圖 7、圖 8)飛行期間駕駛員應持續注意風向風速及可用尾旋翼剩餘推力(亦即關鍵方向舵之行程)。駕駛員應盡可能避免下列條件合併發生：逆風低速飛行、未予以控制的偏扭、低速時大量且快速的移動集體變矩桿與方向舵、亂流情況下低速飛行。飛行員須提高警覺，如果進入上述任何一種或多種組合的飛行狀態時，就是進入可能發生喪失尾旋翼效能(LTE)的情況；必須能夠辨識發生喪失尾旋翼效能(LTE)前的徵兆，並立即執行改出動作。

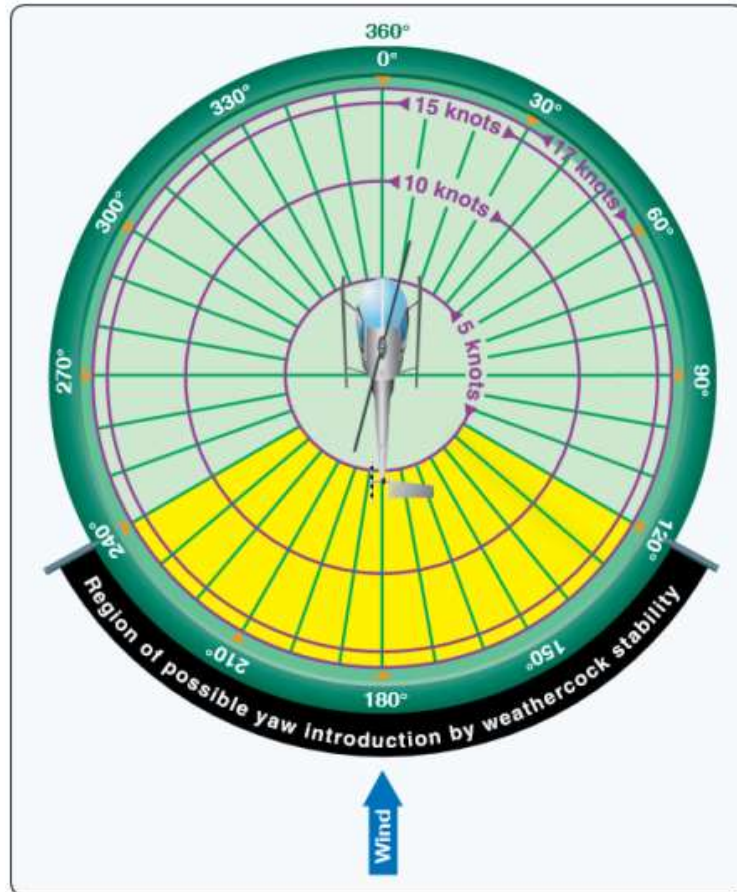
3. 飛行計畫作業期間，飛行員必須特別將飛行手冊中有關臨界風角範圍之性能圖表、作業地區的密度高度(DA)、直升機的起飛總重(AUM)與飛行特性等納入考量。

圖 6、主旋翼渦流影響尾旋翼示意圖



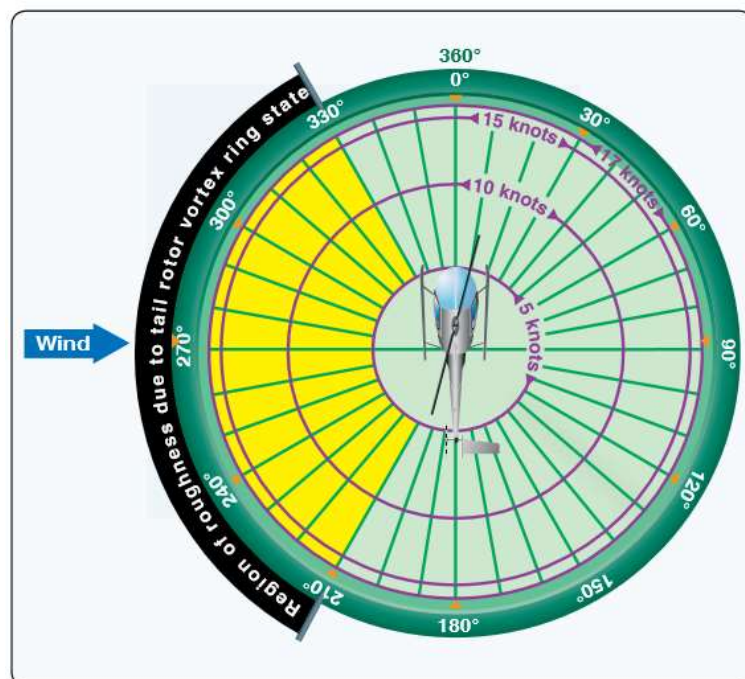
資料來源：FAA-H-8083-21B(2019)

圖 7、風標作用示意圖



資料來源：FAA-H-8083-21B(2019)

圖 8、尾旋翼渦流示意圖



資料來源：FAA-H-8083-21B(2019)

(二) 改正方法

如果高度許可，在不增加動力情況下增加前進空速（視需要減少動力），通常可以解決上述情況。這些措施可能大量喪失高度，建議在執行上述行動前，預先確定適切的重飛脫離路線。本文所述的改正方式為應用於單主旋翼由上往下看其旋轉方向為逆時鐘，主旋翼所產生的扭力會迫使機身向反方向旋轉（機頭向右），若發生無預期向偏扭應執行並注意下列動作：

1. 同使用全量之左舵，迴旋桿向前飛行以增加空速，若高度許可，降低動力配置，若情況已獲改善，回復正常向前飛行操作。
2. 減低集體桿對控制偏扭率有幫助，但會造成下降率增加，為避免撞擊地面或障礙物而快速又大量的改變集體桿，將造成偏扭率更大且會造成主旋翼低轉速。
3. 決定集體桿減低的量應視距障礙物或地表的高度、飛機總重及現場大氣環境而定。
4. 若無法停止偏轉而即將面臨碰撞，應立即減低集體桿實施自動旋轉操作是最好的方法，飛行員在直升機未停止旋轉前應保持左舵全滿舵，停止後再調整至欲保持的航向。³⁶

36 FAA AC90-95, Unanticipated right yaw,1995.12.16,p.8

伍、結論

- 一、直升機升力的產生不單就只是增加集體桿改變主旋翼攻角，產生向下的氣流以抵抗飛機的重力而獲得升力，一旦過量的操作集體桿透過發動機輸出動力，可能造成發動機效能不足、可用動力超限、傳動系統超扭損壞，更會造成主旋翼轉速下降而升力不足等，飛行員應準確判斷操作環境並運用空氣動力學轉換動力以保持有足夠的可用動力飛行。
- 二、直升機飛行員從副駕駛、正駕駛到教官等級的提升，必須接受專業的訓練及時間經驗不斷的累積，才能成為一位優秀的飛行教官，從過往的案例中檢視飛行員過失導致飛機失事時，報告中往往會引述機長技能不夠專精及過遲接桿改出等情事，機長的主要職責是不斷充實與保持本身技能，指導帶飛副駕駛，隨時掌握飛行全般狀況及知道下達指示之時機，更重要的是何時該接手操作。

陸、建議

- 一、各飛行員不論飛行等級，應持續嚴格自我要求，在每次執行訓練或任務時，針對當日相關限制，結合環境條件詳加研討，飛機外型、總重及環境改變時飛行員應密切注意並重新計算性能計畫卡(PPC)，並瞭解這些改變對於飛行性能及上述所有事項的影響確保各項課目操作安全；從航訓學員及機種換裝班隊應養成良好基礎並建立正確觀念，精練飛機性能計畫卡(PPC)相關教育訓練，以「每一次飛行都是第一次飛行」看待做好準備，勿因例行執行，久而久之而漠視其重要性。
- 二、機長可根據以下三個主要因素，接手改正副駕駛的錯誤操作，當危及其中任何一項因素時，機長應親自接手操控，重新建立飛行狀態，當狀況超越了操作者的技術能力，卻又想讓操作者賡續保持操作，對機組是一種挑戰，飛行應將干預、熟練、安全及學習緊密連繫在一起。
 - (一) 確保直升機與空勤機組的安全。
 - (二) 依據機長的專業及熟練度。
 - (三) 依據副駕駛的操作及學習狀況。

參考文獻

- 一、直升機可用馬力與所需馬力的迷思，本篇譯自南加州安全學院，王秀軍譯
- 二、國防部史政編譯局譯印，飛行員素養之精進，(臺北市)：國防部，西元 1998 年 11 月
- 三、飛航安全調查委員會，ASC-AOR-05-01-001 飛航事故調查報告，(臺北市)：飛航安全調查委員會，西元 2005 年 1 月
- 四、飛航安全調查委員會，ASC-AOR-14-10-002 飛航事故調查報告，(臺北市)：飛航安全調查委員會，西元 2014 年 11 月
- 五、張德光，直升機 (臺北)：五洲出版，2011 年 1 月第二版三刷
- 六、藍天神鷹：飛將軍七度空中歷險記，田定忠，(臺北市)：時英出版社，西元 2011 年 11 月
- 七、邱銘港，環境變遷下直升機災難防救與救援安全 (1994-2016)，2016 年 5 月
- 八、國防部陸軍總司令部印頒，CH-47SD 直升機操作手冊，91 年 11 月 29 日
- 九、國防部空軍司令部，空軍氣象觀測手冊，106 年 2 月 17 日
- 十、A Squirrel, a Moose, and Loss of Control in Helicopter Accidents By Lee Roskop (IHST team member)
- 十一、European Helicopter Safety Team HE1
- 十二、European Helicopter Safety Team HE3
- 十三、FAA, Helicopter Flying Handbook, FAA-H-8083-21B(2019)
- 十四、Power management-why is this still an issue, Flightfax Number 109, 2022 July
- 十五、USHST, Vortex Ring State A USHST Airmanship Safety Bulletin (Part 1)
- 十六、USHST, Power Available Limitations A USHST Airmanship Safety Bulletin (Part 2)
- 十七、FAA AC90-95, Unanticipated right yaw, 1995.12.16
- 十八、The Boeing Company, CH-47SD OPERATOR' S MANUAL, 31 December 2012
- 十九、National SAR Academy, RESCUE TECHNIQUES, October 2013
- 二十、Helicopter performance.pdf, CAA.govt.nz February 2020
- 二十一、CH-47F Series Aircrew Training Manual, 15 June 2020
- 二十二、Flightfax Number 109, 2022 July
- 二十三、Fundamentals of Flight, 2022 JULY
- 二十四、<https://www.aerospace.honeywell.com>
- 二十五、<https://goefoundation.org/eagles/chhetri-madan-khatri/>

筆者簡介



姓名：邱銘港

級職：中校考核官

學歷：陸軍官校專 89 年班、航空正規班 98 年班、
中正大學戰略暨國際事務研究所 105 年班。

經歷：飛行官、組長、輔導長、副連長、連長、訓練官、飛安官

電子信箱：軍網：mingkang@webmail.mil.tw

民網：mingkangchiu@gmail.com