

# 鯤鵬的故事 一

## 專訪航空研究所前副所長管志宏博士

張瑞釗 專訪/撰稿

### 序 曲

103年12月9日晨，冬陽初探，明亮而不刺眼；天空沈醉於微藍之美，雲朵停住了腳步；思緒在清新的空氣中凝結—心想著這將是個令人興奮的日子。

十時許，各路記者紛紛湧進航空所的推進試驗室，好奇與熱情沖散了原已排定好的動線。

多少人，歷經無數個寒暑，奮戰無數個夜晚，孜孜不倦埋首於設計桌和電腦房，日夜穿梭在組裝間和這個試驗室之間；從青年到壯年，默默編織著一段鮮為人知的故事。

一會兒，來自各方的新聞媒體，約六十家，幾已到齊。此時，大氣一片沈寂，令人屏息以待，引頸期盼的一刻，就要來臨。在眾多目光注視下，終於掀開了神秘的面紗，今天的主角—發動機，霎時呈現在眼前，歡欣鼓舞之聲劃破了寂靜。

傳說中，沈潛海底多時的鯤，如今躍出海面，羽化爲鵬，遠舉高飛，和大家見面，怎不令人感動。媒體記者們的鎂光燈，競相閃爍；曾經風聞，如今眼見的雀躍與喜悅，掛滿臉上。這是中科院所有參與人員披荊斬棘、辛勤耕耘多年而研發成功的渦輪扇發動機，他的名字叫鯤鵬。

### 前 言

逢新新季刊中心論題主題爲航空發動機技術發展與應用，特地訪問帶領渦輪扇發動機研發團隊的航空研究所前副所長管志宏博士(以下敬稱管博士)，和管博士暢談參與經國號戰機發動機研發之雲漢計畫及渦輪扇發動機專案的研發歷程。

雲漢計畫是我渦輪扇發動機研發之開端。自71年起，一批批還是二、三十歲的青年，陸續遠赴美國亞歷桑那州鳳凰城的蓋瑞特(Garrett)發動機公司，投入經國號戰機IDF發動機TFE1042-70國際合作研發的行列。80年代，這批青年，已值壯年，經過多年從工作中學習，在渦輪扇發動機設計各方面已是學有專精的人才，於是，在86年開啓了渦輪扇發動機的研發專案。

本文即藉訪問管博士的機會，回憶並敘述在航空所渦輪扇發動機研發的經過。其間，有苦，曾遭遇無數的技術瓶頸；有甘，建立了多項的關鍵性能量，奠定我渦輪扇發動機自製的基石。每當遇到設計製造難題或試驗失效時，管博士總能鼓舞所有參與人員同心協力，個個突破、解決。當時遭遇的挫折與成功的經驗，皆爲日後研發新型發動機寶貴的參考資料。

最後，請管博士以其帶領渦輪扇發動機研發團隊的經驗，談未來高推力發動機

研發的方向與途徑，期望對航空後進之士有所助益。

## 認識前航空所副所長管博士

今年1月8日，一陣初冬之風過後，小雨淅瀝。依約來到了管博士家中。管博士偕其夫人，精神奕奕，風采依舊(圖一)。看到管博士早已準備好的資料與照片，恍然如昨，記憶瞬間倒流，懷年少之憧憬，嘆歲月之易得；泛黃照片中，參與發動機研發之景，栩栩猶見當年。一杯茶過後，回到過去……。

管博士初中畢業後進入空軍幼校就讀，並直升空軍官校。65年官校畢業後，分發至台中空軍基地修補大隊軍電中隊，執行F-104戰機通訊電子裝備維修。兩年後，調任空軍官校航空系助教(作者按：管博士夫人當時同為官校助教)。69年獲准申請進入美國德州州立大學Austin分校航空工程研究所進修，並主修計算流體力學，是為管博士日後於渦輪扇發動機研發領域重要的開始。

碩士畢業後，71年，調派至空軍航發中心航空研究院發動機設計室任職。隨後，即於72年派赴美國亞歷桑那州鳳凰城的蓋瑞特發動機公司，參與經國號戰機IDF發動機TFE1042-70合作研發。72~73年間，作者與管博士同赴美工作；管博士負責渦輪扇發動機高壓渦輪氣動力設計，作者則

負責低壓渦輪氣動力設計。從此，與管博士情似手足，合作無間，朝夕相處22載。

76年，管博士又以績優，再度獲薦赴美國科羅拉多州州立大學Boulder分校太空研究所博士班進修(圖二)。其間，主修流體力學，並獲准使用NASA超級電腦進行研究工作，研究成果備受指導教授肯定並提前一年畢業。79年獲得博士學位後，即回原航空研究所熱氣動力學組(今動力



圖一 管博士伉儷接受本刊專訪留影



圖二 管博士(左一)於美博士班進修其間

系統組)任職並調任副組長，於84年6月再度調任組長。管博士應用所學，以多區塊重疊式格點法，完成IDF全機含掛載之流場與發動機內流場計算並發表論文，表現優異，於85年晉升為研究員。

84~86年間，逢雲漢專案漸入尾聲，航空所亟需建案接續發動機研發工作。86年7月，終於建立渦輪扇發動機研發專案，管博士即為當時的主持人，開始了我渦輪扇發動機自力研發的時代。在研發期間，領導有方，管博士再獲長官賞識，於88年11月調任航空所副所長，直至93年7月退伍。22年的航空所生涯，留下完美典範。

## 回首來時

管博士拿起照片細談從頭，每每憶及得意與興奮之處，即刻顯現昔日的光彩，對渦輪扇發動機研發的使命感不減當年，面對作者專訪，娓娓道來。

80年代以來，雲漢專案工作漸入尾聲，航空所亟需新建專案，以延續發動機研發工作。84年，管博士剛任熱氣動力學組組長，在某次會議中，雄風計畫工程師蒞所，談及可以雄風介面發展渦輪扇發動機。當時，管博士正握有經機械設計顧問所草擬的渦輪扇發動機設計圖。管博士於雄風計畫負責人面前，認為機不可失，當下即決定了重大的承諾：「我們能做！」，於是開始了渦輪扇發動機自製之路。

雖然，時任航空所所長程邦達博士(79.2~87.10)並不看好我渦輪扇發動機自製的能力，在歷次的專案會議中亦多所質疑，但管博士並不為所動。

85年7月，航發中心改制為經濟部所屬國營事業「漢翔工業股份有限公司」，航空研究所則留在中山科學研究院。所幸，參與雲漢專案之工程師，在渦輪扇發動機各組附件之設計分析及試驗人力，並未因改制而流失，大部份均留在航空研究所。

又於84~86年間，為建立渦輪扇發動機研發所需能量並銜接渦輪扇發動機研發專案，航空所聘請了航空領域的歸國學人及國內的資深專家學者為顧問，在壓縮器及渦輪設計、結構設計、機械設計、材料製程等方面提供協助。因為有了這些資深設計專家的協助與先進的分析設計程式，使得管博士信心大增。又逢雄風計畫有發動機需求，可謂天時又人和，加上建案前充分的先期能量籌備，終於說服了國防部各參謀，86年7月建立了「渦輪引擎研發計畫」案，由管博士擔任計畫主持人，至91年6月，為期五年。

87年7月，當時管博士為了「渦輪引擎研發計畫」的代名，特地請東海大學中文系教授廖雲仙博士命名，廖教授提供了「鯤鵬」一語，當時即上簽由院長圈選確定，代名「鯤鵬計畫」與「鯤鵬發動機」於焉誕生。鯤鵬語出《莊子》《逍遙遊》鯤鵬寓說：北冥有魚，其名為鯤。鯤之大，不知其幾千里也。化而為鳥，其名為鵬…。管博士以鯤鵬砥礪所有參與鯤鵬計畫人員，應於當下環境，埋首苦幹；如鯤之潛伏，俟時機成熟，則可蓄勢待發，如鵬之高舉。

## 曙光乍現

渦輪扇發動機研發專案距今已有一段時

日，然管博士似乎未受年代久遠所影響，還翻閱自己昔日的著作，很清晰的回憶著。

86年7月渦輪扇發動機研發專案建案成功，管博士擔任專案主持人，推動以共同核心發動機為基礎之發動機研發工作，整合國內研發單位與能量，領導以中科院為主之渦輪扇發動機研發團隊。

起頭是最難的，幸賴先期研究及準備，一開始即理出了頭緒。於86年，即先後完成了點火系統、燃燒室及高壓軸測試(圖三)。更令人驕傲的是，完成核心發動機之研製並點火成功—此為我渦輪扇發動機自製成功之濫觴，也同時立下了渦輪扇發動機研發的第一個里程碑。

核心發動機點火啓動、耐溫測試驗證核心段精密鑄造與結構設計的開發成功，大大鼓舞研發團隊，奠定了全發動機研製成功的基礎(圖四)，管博士也因此當選為86年中山楷模。

## 披荊斬棘

專訪中，管博士提到研發過程遭遇困難時，難免像洩了氣的汽球一般，但團隊有信心，絕不會像斷了線的風箏，失去方向；打了氣，大家很快又恢復了精神，披荊斬棘，克服難題，這些經驗對後來的研發彌足珍貴。

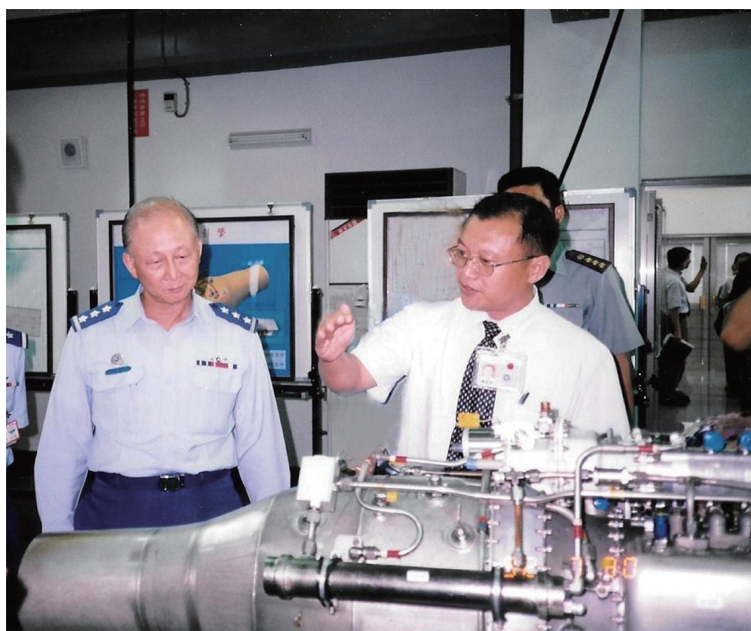
### 一、發動機振動問題

發動機試驗時，振動問題是最常發生的。某次試驗，發動機

低壓軸轉速為30000rpm時，振動上升，致發動機減速熄火。經拆檢發現為軸承因潤滑不足，造成軸承運轉超溫。經增加軸承潤滑油量，並於軸承外環加裝溫度感測計以監測溫度後，解決了振動問題。另非同步振動問題，使得發動機無法運轉至高轉速。經機架測試發現，非同步振動是由於軸承之軸向推力不足所致。經改變影響



圖三 前航發中心主任華錫鈞將軍參訪燃燒室機架試驗



圖四 前國防部副部長視導核心發動機試驗

軸承推力之參數並控制發動機葉片葉尖間隙以增加軸承軸向推力後，發動機終可運轉至30000rpm以上。

## 二、材料製程

高壓渦輪轉子應力過高，材料無法滿足需求。經材料顧問提供Mar-M247細晶及PH13-8Mo材料技術資料、整體鑄造製程及熱均壓製程之改善，成功縮短細晶關鍵製程的開發及發動機設計時程，提昇材料設計數據資料庫能量。

## 三、扇機械設計

扇轉子於設計之初，採用TFE1042扇之縮小比例而來，葉片厚度不足0.020in，以當時國內鑄造能量，無法製造。經與顧問討論，更改設計，將葉片與葉盤分開製造，再以插槽方式結合，並重新設計氣封圈，除氣封外兼具固定葉片功能。

## 四、附件齒輪箱設計

附件齒輪箱經機架測試，發現斜齒輪座塔軸軸承支撐座與3號軸承支撐座間出現裂紋。經檢驗，因其上方兩個螺桿孔位間隔過大，致支撐力不夠。因此更改設計，於斜齒輪上加上肋條，增加勁度。另將原螺桿孔位改為固定螺樁，縮短間距，增加斜齒輪座鎖定於前機匣上之強度，經測試效果良好。

## 五、氣體產生器建壓慢

由於氣體產生器所產生氣體的高溫，對發動機造成熱效應影響。但經降低溫度，改變藥柱組成時，又造成氣體產生器建壓不足或太慢的問題。最後將藥柱中心孔半徑加大，並於藥柱底部加上小藥包後，在不造成高溫的情況下，建壓快速且壓力穩定並達到壓力需求。

## 六、滑油系統之滑油泵容易磨耗

由於浮動壓力板位於齒輪及外罩之間，若間隙過小易與齒輪產生磨耗，若過大則無法建立壓力。最後採用陶瓷塗層方式，藉其高耐磨性，解決浮動壓力板易磨耗的問題。

## 七、附件齒輪箱之通氣口易大量漏油

附件齒輪箱位於發動機上方，原設計擬藉由重力使其內之滑油經塔軸流至發動機內前油槽。此設計，於機架測試時，由於前油槽壓力不高，約為大氣壓，附件齒輪箱之滑油可順利經塔軸流至發動機內油槽。但裝上發動機測試時，因前油槽壓力與低壓壓縮器出口相近，導致附件齒輪箱內滑油積壓在齒輪箱，油積滿後由齒輪箱之通氣口流出。當發動機減速時，滑油區內壓力大於主流道二次流壓力，滑油易漏至主流道。最後，修改齒輪箱底部、重新設計油氣分離器，並增加一回油口及回油泵以抽取齒輪箱滑油，解決了滑油經通氣口漏油及油氣分離不良的問題。

渦輪扇發動機研發過程中，遇到的困難當然不止這些，但以研發團隊無比的毅力及精益求精的精神，最後終能克服。

## 繁星點點

研發過程中，遇到挫折是難免的，挫折過後，就是採收甜美果實的時候了。管博士回憶發動機研發過程，深覺關鍵性技術的建立是後來成功的主要因素。88年，各項關鍵性技術陸續開發，其間多次的成果展示均獲致各界長官的嘉許。最主要的項目有：控制系統、燃油系統、潤滑系統及製造整體化。其他還包括起動系統、點火系統、電氣系統、齒輪箱系統、低壓軸

轉動系統、高壓軸轉動系統、二次流分析設計、逆流式環形燃燒室設計、離心式壓縮器設計、渦輪設計及同步工程設計等關鍵性技術(圖五)，成效可圈可點。

### 一、控制系統

新一代發動機控制器為全權數位控制器(Full Authority Digital Engine Control, FADEC)。發動機控制器依據操作環境與狀態，只需提出推力需求，即可產生適當的燃油輸出命令。鯤鵬發動機控制器(ECU)即為全權數位控制器。發動機控制器之開發技術包括控制邏輯設計、軟硬體設計、發動機動態模式建立、原型控制器開發、發動機即時模擬器開發與地面監控程式開發等。

### 二、燃油噴嘴

一般空用發動機之燃油噴嘴皆為兩段式，然考量兩段式燃油噴嘴設計與製造上之困難，經比較各型態噴嘴並選擇最適合燃燒室之設計後，成功開發中空錐型之簡式燃油噴嘴，符合鯤鵬發動機之需求。

### 三、潤滑系統

鯤鵬發動機之潤滑系統包括附件齒輪箱、滑油泵模組、油箱、軸承、軸封及滑油冷卻器。關鍵零件為軸承、軸封及滑油冷卻器；關鍵技術則在於發動機運轉時，減少滑油消耗並維持進油溫度低於250°F。考量軸封性能、封油之二次流壓力及溫度、油槽壓力、油箱、齒輪箱內油氣分離器等因素，成功降低發動機滑油消耗。

### 四、製造整體化

鯤鵬渦輪扇發動機之製造整體化關鍵技術包括扇轉子、低壓

壓縮器轉子、離心式壓縮器葉輪及前機匣。因發動機高壓軸轉速高達數萬轉，高壓渦輪轉子葉片與轉盤採整體鑄造(Blisk)，並開發細晶化製程，以達應力需求。另經整體易製性研改精進，建立扇/低壓壓縮器/低壓渦輪鑄造能量。

### 五、離心式壓縮器設計

計畫執行之初即應用NREC公司程式，建立了離心式壓縮器初步和細部設計分析能量。經多次與廠商研討，解決了葉輪葉片之進刀機製問題。葉輪出口之擴散器，由於必須在極短距離內完成氣流升壓及減速作用，經顧問指導完成擴散器葉片之陶心模鑄造，解決了製造問題。

### 六、起動系統

起動系統的主要組件為氣體產生器。氣體產生器包含鋼瓶、藥柱模組、點火器及出氣口噴嘴。氣體產生器是專為鯤鵬發動機起動全新研發之組件，是極為關鍵之技術。

### 七、高壓軸轉動系統

本院原無高壓軸轉動系統之技術，經由「渦輪引擎研發計畫」之執行，並請顧



圖五 本院長官參訪發動機關鍵性技術研發成果

問指導共同研發，建立了高速軸承設計分析、高溫高速軸封潤滑系統及高壓軸機架試驗能量。完成高壓軸試驗，達到最高轉速及長時間運轉之需求。

「渦輪引擎研發計畫」為期五年，由管博士帶領整個研發團隊，結合國內渦輪扇發動機能量，包括中科院各所、工研院機械所、漢翔公司、金屬工業發展中心及民間專業製造廠商，方突破各項關鍵技術，奠定了後續十年研發成功的基礎。

## 眺望願景

86年7月剛開始執行渦輪扇發動機專案時，管博士任專案主持人及熱氣動力學組組長，因表現優異，獲派赴哈佛大學接受三個月的經營管理訓練。課程內容主要為願景、策略管理及平衡記分卡(Balanced Scorecard, BSC)。當時，航空所也正推行策略管理，管博士即應用所學，為「渦輪引擎研發計畫」定下了願景－「渦輪如期展雄風，十年成功在鯤鵬」(圖六)，並利用各重要場合，揭示達成願景的決心，鼓勵所有人員。

訪談最後，特請管博士對航空所未來發展高推力發動機表示意見，管博士毫不猶豫的指出：仿效已成熟發展的發動機進行比例提昇設計(Scale-up)是最有效益的方式。例如以TFE1042-70為藍本比

例放大設計，除了燃油控制外，結構和氣動力方面都不需重新設計。另在試驗方面，亦可省略各組件之機架試驗，直接進行全發動機試驗即可，可以縮短研發時程近一半，並可降低研發成本及研發風險，提高可行性。另外，管博士還提及有關製造能量籌備及高推力發動機試驗設備問題，建議應於研發之初同步規劃。

管博士最後重複提到願景的重要性，並強調願景應包含兩項要素：可達成的目標，明確的期程。目標勢必會有難度，但是可以達成；在理想與現實之間取得平衡。尤其對於高推力發動機之研發願景，更應及早規劃。

外面雨停了，訪談結束了。訪問管博士是一個愉快的經驗，非常感謝管博士接受季刊中心論題之訪談。管博士毫不藏私，盡其所記憶，侃侃而談，對航空所未來發展除了嘉許，亦滿懷期望。



圖六 發動機試驗館展示牆揭示鯤鵬計畫願景