

# 應用關鍵鏈專案管理於民用航空器發動機維修業之排程規劃

## Applying Critical Chain Project Management to Scheduling the Civil Aircraft Engine Maintenance Business

郭秀貴<sup>1</sup> Hsiu-Kuei Kuo 任維廉<sup>2</sup> William Jen 黃靖媛<sup>2</sup> Jing-Yuan Huang

國立交通大學經營管理研究所

國立交通大學運輸科技與管理學系

<sup>1</sup> Institute of Business Management, National Chiao Tung University, & <sup>2</sup> Department of Transportation Technology and Management, National Chiao Tung University

(Received September 26, 2005; Final Version March 10, 2006)

**摘要：**發動機是航空器的心臟，其維修品質攸關飛行安全，其維修時間影響航空公司的航班與航機調度規劃。雖然品質方面已有國際準則規範，而時間方面卻因變異性大而不易掌控，因此發動機修護工廠需要良好的排程規劃與控制。目前實務上發動機維修業的排程規劃方法過於簡化且不易準確預估改善完工時間策略對於維修總完工時間的改善效果。本研究採用關鍵鏈專案排程技術，以一個案公司為例，進行民用航空器發動機重度翻修組裝部份的排程規劃，並使用Microsoft Project與ProChain軟體進行三種情境模擬。模擬結果發現應用關鍵鏈排程技術可以減少15.54%之總完工時間。若欲再進一步縮短發動機維修完工時間，則必須針對原關鍵鏈作業增加資源，或針對原關鍵鏈作業進行「非原件回裝」。

**關鍵詞：**關鍵鏈、專案管理、民用航空器、發動機、維修業

**Abstract :** The engine is “the heart of an aircraft” for the airlines. Maintenance quality affects flight safety. Maintenance span influences the flight schedule and aircraft dispatch of the airlines. Maintenance quality must conform to the international aviation safety regulation. However, the maintenance span is not easy to control due to its large variation. Hence, appropriate schedule planning

and controlling is very significant for the civil aircraft engine maintenance business. In practice, the existing schedule planning methods are excessively simplified and the civil aircraft engine maintenance business cannot accurately estimate the effects of the shortening span strategies on the maintenance span. This study took a civil aircraft engine maintenance company as an example, and used Critical Chain Project Management (CCPM) for planning the schedule of the overhauled engine assembly activities. For shortening the assembly span, this study simulated three scenarios by using Microsoft Project and ProChain software. The results showed that applying CCPM can shorten 15.54% of the assembly span. And if managers want to further shorten the assembly span, they must increase additional resources or change the work scope by means of spare modules on the activities of the original critical chain

**Keywords :** Critical chain, Project management, Civil aircraft, Engine, Maintenance business

## 1. 緒論

民用航空器發動機維修業為航空產業供應鏈中相當重要的一環，許家倫（民91）指出發動機是航空器的心臟，發動機的維修不僅直接影響航空器的飛行安全，也影響航空公司的營運成本，發動機的維修費用幾乎佔了整個航空器維修費用的一半，因此專業維修業者通常把發動機的維修工作與機體其他部份的維修工作分離出來獨立進行。發動機的維修品質與維修時間影響航空公司的競爭力，由於航空器投資龐大且屬沉沒成本，維修時必須品質穩定，因此一切作業程序與零件處理都受到國際準則規範，而其維修時間也應該滿足航空公司要求的交期，因為維修時間長短會直接影響航空公司所需備用發動機的數量，進而影響航空公司成本。此外若維修時間延遲，則會影響航空公司的航班及航機調度規劃，甚至因為航班延誤或取消，使航空公司失去乘客，減少獲利。因此發動機修護工廠的維修作業時程規劃與控制相當重要。

發動機維修所需執行的作業隨著模組與維修範圍的不同而有差異，通常每具發動機包含數個模組，每個模組又由許多零組件組成，模組可能進行的維修範圍有基本維護 (Minimum)、中度維修 (Performance)、重度翻修 (Overhaul) 三種，維修範圍的決定是依據適航指令、航空公司的要求及發動機修護工廠檢查而定，基本維護所需的作業量與時間最小，中度維修次之，而重度翻修所需的作業量與時間均最長。假設某類型發動機由五個模組組成，其中一個模組只有一種維修範圍，另外一個模組有兩種維修範圍，其他模組則有三種維修範圍，則該類型發動機將有54種不同的維修流程，也就是說該發動機的維修專案種類多達54種之多。此外，部分組件無法僅從外觀或內視鏡檢查即得知是否需要維修，必須將發動機拆解後才能決定，而且相同維修作業也可能因組件的損壞程度不同，導致該作業所需的維修時間不同，因此每具發動機所需維

修時間的變異性很大，使得實務上發動機修護工廠之細部排程規劃與控制課題無法以太多假設前提下的簡化數學規劃方法解決。

目前實務上發動機維修業的排程規劃，原則上為原件回裝，需符合TAT (Turn-Around Time, 整體維修時程)目標，以人工經驗在白板上進行多個作業里程碑 (Milestone) 管制維修時程。但是由於實際執行時，每具發動機所需維修時間的變異性很大，使得現行實務上的排程規劃經常無法即時周延地考量到維修作業之先後順序及瓶頸所在，或是未考量到資源限制所造成的資源衝突對於總完工時間的影響，因此修護工廠無法最妥善地運用相關資源，也無法準確預估維修業者常用的兩種改善完工時間策略：(1)資源限制改善、(2)維修範圍改變 (亦即非原件回裝) 對於維修總完工時間的改善效果。

「關鍵鏈」(羅嘉穎, 民91)一書之導讀中曾提及「以色列飛機工業有限公司運用TOC (限制理論, Theory of Constraints) 後，能將飛機維修施工期由三個月縮減至兩星期。」。Goldratt (2001) 將關鍵鏈專案管理技術應用於以色列空軍F-16的維修排程，其將每一架F-16的維修視為單一專案，應在規定的時間內完成任務。Goldratt假設關鍵鏈作業上的瓶頸資源為維修人員，在節省成本的考量下，每位維修人員被期待維持最高的效能是合理的，但若分配給他們額外的工作，超出資源限制，則關鍵鏈作業上的瓶頸資源在遭到「侵蝕」下，很顯然地系統目標將會被拖長，亦即維修總完工時間會因此而增長。

發動機的維修必須透過一連串相關的作業，並有效率地使用資源，以盡力滿足航空公司要求的交期與品質，十分符合「專案(Project)」的特性 (Gido and Clements, 1999; 宋文娟、黃振國, 民90)：(1)目標性：發動機維修必須達到航空公司期望的交期，且維修品質一定要符合國際準則規範；(2)作業不重複性：發動機的維修必須經過拆解 (Disassembly)、清洗 (Cleaning)、檢查 (Inspection)、平衡 (Balancing)、研磨 (Machining)、組裝 (Assembly)、及測試 (Testing) 等一連串相關聯而不重複的作業；(3)運用各種不同資源：發動機維修過程中需要不同的專業技術人員，以及天車吊掛、化學清洗槽、量測工具、平衡機、研磨機、及試車台等各種不同儀器、設備、物料；(4)時間性：每具進廠維修之發動機開工時間、完工時間的訂定都受到航空公司要求的交期影響；(5)獨特性：每具發動機因為損壞部位不同，以及航空公司的維修要求不同而有差異，雖然有可能維修到相同情形的發動機，但是機會不大；(6)具有顧客：發動機維修工廠的顧客為航空公司；(7)不確定性：發動機維修部分組件必須在發動機拆解後，視情況才能決定維修與否，以及後續維修作業執行的程度，且平衡、研磨、測試等作業所需時間的變異性很大。綜合以上所述，發動機維修可以「專案管理」的方式進行規劃與控制。關鍵鏈專案管理 (Critical Chain Project Management, 簡稱CCPM) 為專案管理時程規劃控制技術之一，關鍵鏈專案排程考量要徑作業與資源衝突，並將各作業的安全時間後移到緩衝區 (Buffer) 集中管理，以改善時間浪費的問題，亦即藉由緩衝時間將各作業時間的不確定性轉換為確定的時間值，以協助發動機修護

工廠預防交期的延遲。由於上述之特性，因此本研究將關鍵鏈專案排程技術應用於民用航空器發動機維修業的排程規劃。

發動機修護工廠在規劃發動機維修排程時，最重視總完工時間，總完工時間取決於維修作業流程中的關鍵鏈作業，而資源與維修範圍的改變會影響關鍵鏈作業的決定，進而影響總完工時間。由於重度翻修必須執行最完整的工作流程且使用所有可能需要的資源，藉由重度翻修的排程規劃可呈現發動機所有可能執行的維修作業與所有可能使用的資源。因此本研究以單具發動機所有模組皆重度翻修作為初步模擬，進而以資源與維修範圍的改變來進行改善策略模擬。此外發動機維修作業流程中的平衡、研磨、組裝、及測試作業的不確定性較高，對總完工時間影響最大，因此本研究針對單具發動機的平衡、研磨、組裝、及測試等維修作業，藉由以下三種情境模擬其排程：(1)初步模擬：資源固定，所有模組皆重度翻修；(2)改善策略一：資源增加，所有模組皆重度翻修；(3)改善策略二：資源固定，各模組維修範圍改變(亦即非原件回裝)。進而探討發動機修護工廠在原始關鍵鏈上的資源限制改善或維修範圍改變對於關鍵鏈、總完工時間、完工時間變異程度的影響，並探討總完工時間與完工時間變異程度的關係，提供發動機維修業管理者制定改善完工時間策略之依據。

為具體呈現關鍵鏈專案排程技術可以有效地應用於民用航空器發動機維修業之排程規劃，本文首先探討相關文獻，同時透過深度訪談了解民用航空器發動機維修作業流程，進而建立模式架構，然後收集相關資料，以此架構建立模擬系統進行情境模擬與分析，最後依據模擬的結果提出結論與建議。

## 2. 文獻探討

### 2.1 民用航空器發動機維修業概述

一般發動機維修工作可分為下述五類（教育部顧問室航太品保驗證產學策略聯盟教學資源中心，民90）：

- (1) **飛行線維護**：發動機於航空器上執行例行目視檢查；包括日常檢查、飛行前後檢查、過境及過夜檢查並拆換部分零附件，本項工作一般皆由航空公司配合航空器本身自行維護。
- (2) **場站維護**：發動機自航空器拆下並分解為模組，該項工作包括發動機於航空器上之調校及試車檢查工作。
- (3) **工廠維護**：當發動機由模組分解為分項零組件並執行非破壞性檢驗(Non-Destructive Inspection，簡稱NDI)、尺碼檢查、換件並組合於試車台試車調校、效能試車工作為第三級維修工作。
- (4) **附件修理**：發動機拆下之附件，經過分解、清洗、檢查、換件、組合及測試等過程，恢復該項附件原有功能之修理工作。

(5) **修理及工程修改**：發動機或零組件、附件性能提升及缺點改進工作；新的工作方法、工作程序等之研究發展及專業零組件修理工作；如葉片翻修、燃燒筒修理等工作，其中涉及高科技的熱處理、表面處理等工作。

發動機維修業產業結構有三個層級，以上的維修工作由此三層級負責：(1)線上維修的航空公司、(2)發動機翻修及修理之專業工廠、(3)發動機重要零組件專業修理工廠。

以我國來說，目前產業結構呈現倒三角形的結構。最上層是從事線上維修的範圍，包括各項維護檢查、調校及部份零組件之拆換工作，此範圍所牽涉之技術及設備均相當簡單，因此大部分的工作由航空公司透過原廠協助自建維修能量。

中層乃從事發動機翻修及修理之專業工廠工作，此範圍所牽涉之技術包括需運用特殊之裝備執行之全機或整具發動機拆解、組裝、平衡、校驗及測試等翻修工作，在修理方面需具備工程能力執行研發設計及工程改進、工作方法改善等工作；在這一層級有一個特點，就是將拆下待修之零組件分包下游之專業工廠修理，成為「One Stop Repair Station」之中心工廠，進而帶動下游專業修理業。因此，這一層的業者必須向上支援航空公司，向下輔導下游零組件修理工廠，可謂整個發動機維修業之核心。

最底層為發動機重要零組件專業修理工廠，此範圍之修理技術更專業、裝備需求投資額更大，同時零組件修理單價低，因此必須具備規模經濟的修護量。

## 2.2 民用航空器發動機維修之排程規劃與評析

目前國外以專案管理角度進行發動機維修業之排程規劃的研究相當少。Goldratt (2001) 曾將關鍵鏈專案管理技術應用於以色列空軍F-16的維修排程。

許家倫 (民91) 歸納了幾個發動機進廠維修的主要考慮因素，並由航空公司所獲得的成本資料，建立計算維修成本的方式，再利用基因演算法，試圖從成本面找出發動機的最佳進廠維修週期排程。劉穹林 (民92) 將發動機維修作業中的拆解階段視為一零工式生產排程問題 (Job Shop Scheduling Problem)，並且發展了此課題的混合整數規劃 (Mixed Integer Programming, MIP) 數學模式，模式的求解結果除了能夠縮短發動機拆解的完成時間外，還可以極小化系統所需之人力。陳駿逸 (民92) 針對發動機維修作業中資源容量負荷分配不均的情形，以數學規劃方法建構模式，提供一套分析方法，判斷現有容量負荷與最佳的容量負荷配置方式，以有效運用維修容量、縮短發動機維修時程。Cohen *et al.* (2004) 將關鍵鏈專案排程與其他替代方法論 (No Control、Highest Priority in Queue to a Minimum Slack Activity、Constant Number of Projects in Process以及Queue Size Control) 應用於多專案環境中的控制績效進行試驗比較。

航空公司與修護工廠最在意發動機維修成本，此成本會與維修完工時間成正比，因此各種排程規劃的目的是為了使實際維修完工時間縮短或符合所規劃的目標完工時間。然而發動機維修作業所需時間的變異性很大，使得實際維修完工時間與排程規劃有很大的落差，本研究認為

應該針對影響時間變異性的各種原因進行改善，採用能預防超出目標完工時間的規劃方法來進行排程，如此才能使排程規劃更具實用性，國內目前的研究皆未採用具有預防超出目標完工時間機制之排程規劃方法來探討發動機維修排程，本研究首次嘗試將關鍵鏈專案排程應用於發動機維修業，發動機維修業重視維修完工時間，而完工時間取決於關鍵鏈上的作業，本研究採用三種影響關鍵鏈作業之改善策略進行模擬排程，目的在於觀察改善策略對於關鍵鏈、總完工時間、完工時間變異程度的影響，提供發動機維修業管理者制定改善完工時間策略之依據。Herroelen and Leus (2004) 認為關鍵鏈專案排程過於簡化，只專注於專案剛開始時所認定的關鍵鏈，但這些關鍵鏈上的作業、資源可能隨著專案的進行與時間的流逝，而可能不再是整個專案的關鍵鏈，因此必需重新排程才能符合實務界的需要。本研究將來會針對專案開始執行後的變化進行重新排程之模擬研究，以使本研究更貼近實務界的需求。

## 2.3 關鍵鏈專案排程之文獻回顧與評析

### 2.3.1 方法與步驟

關鍵鏈專案排程由Goldratt (1986) 的限制理論發展而來，Goldratt (1997) 認為專案在規劃排程時具有三種不確定性使得作業時間的變異性加大：作業時間不確定性、路徑時間不確定性、資源不確定性。關鍵鏈的專案管理使用以下方法，改善時間的浪費、作業時間不確定性、資源不確定性 (Yeo, 2001; Herroelen *et al.*, 2002)：

- (1) **改善學生症候狀**：不設立專案完成里程碑與個別作業的到期時間。
- (2) **改善帕金森法則**：將各作業的安全時間集中到緩衝區管理，並且以接力賽跑者的精神執行作業，作業一旦完成便馬上交棒給下一個作業的執行者。
- (3) **消除多工**：對於同一個資源而言，執行完一個作業才能開始執行另一個作業。
- (4) **改善專案完工時間與各作業時間的不確定性**：Herroelen and Leus (2001) 指出緩衝的功能為保護專案準時完工。專案具有不確定性，為了使專案能準時完成，我們必須管理不確定性，過去人們習於針對各作業分別保留個別安全時間，但是這些合併在作業時間裡的安全時間經常被消耗掉，個別安全時間沒有發揮功能，最後使得專案無法準時完成，因此關鍵鏈專案排程將各作業的安全時間移到最後的緩衝區集中管理，加入專案緩衝 (Project Buffer) 確保專案完工時間，且加入匯流緩衝 (Feeding Buffer) 確保要徑上的作業不會受到非要徑作業延誤的影響，並且考量資源產能的限制，定出資源使用的優先順序，排解資源衝突，設立資源緩衝 (Resource Buffer)。

關鍵鏈排程依循著Goldratt的限制理論之思考邏輯，其實行步驟如下 (李榮貴、張盛鴻，民91)：

- (1) 確認關鍵鏈。

- (2) 縮短與保護關鍵鏈，將關鍵鏈上所有作業時間縮短一半，將所有作業被縮減的時間加在專案最後，作為專案緩衝，保護專案準時完成。由於關鍵鏈上所有作業皆需要消耗掉整個專案緩衝的機率很低，因此將專案緩衝再縮減一半。
- (3) 所有非關鍵鏈的作業、路徑、資源皆全力支援(2)的決策。
- (4) 在某一時間內以增加資源方式，化解資源衝突的作業，以縮短專案完工時間。
- (5) 回到(1)重新確認關鍵鏈，因為關鍵鏈可能改變了。

以圖1 (Yeo, 2002) 作為關鍵鏈排程的簡單範例，圖中的長方格代表專案中的作業，長方格中的英文字母大寫代表作業所需的資源，而阿拉伯數字代表該作業所需的完成時間。圖中的(a)將作業先行圖以越晚開始越好的方式配置，此時恰好沒有資源衝突的作業需要化解，關鍵鏈暫時為A20-B10-C14-E20，則專案完工時間為64天。圖中的(b) 依據Goldratt 的建議將關鍵鏈上所有作業時間縮短一半，將所有作業被縮減的時間加在專案的最後，作為專案緩衝來保護專案準時完成，並且將非關鍵鏈作業匯入關鍵鏈的部分插入匯流緩衝，匯流緩衝大小的制定方法與專案緩衝相同。由於關鍵鏈上所有作業皆需要消耗掉整個專案緩衝的機率很低，因此將專案緩衝再縮減一半，PB由圖(b)中的32天縮短成16天，成為圖中的(c)。然後再度回到確認關鍵鏈的步驟重新化解因為加入緩衝所造成的資源衝突，最後找出整個作業先行圖上具有作業相依性與資

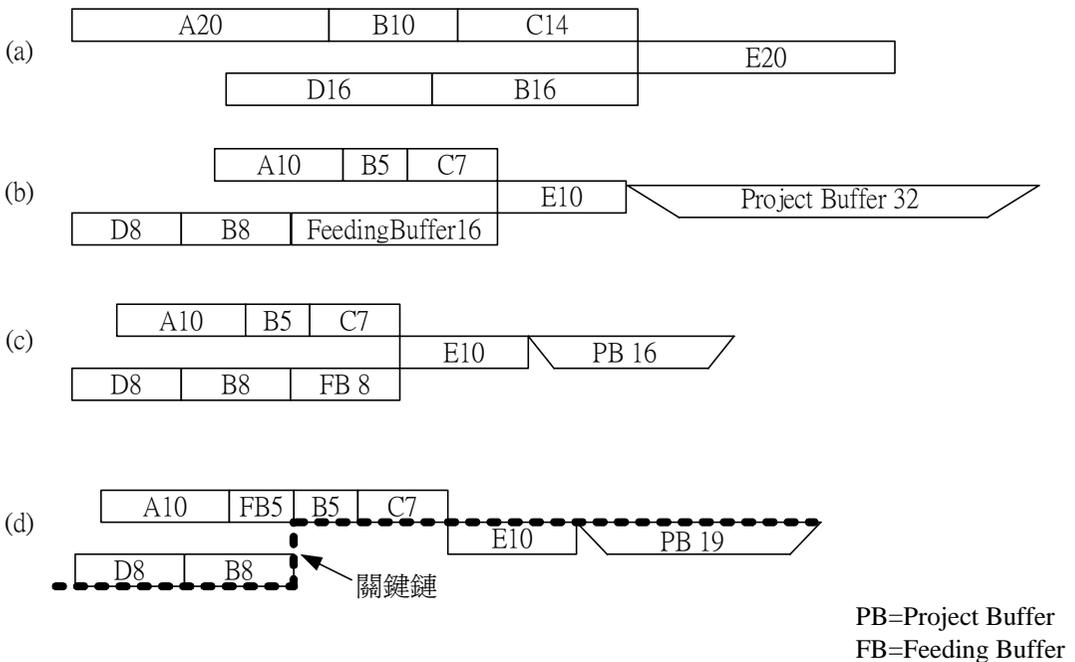


圖1 關鍵鏈專案排程示意圖

源相依性最長的路徑，即為關鍵鏈D8-B8-B5-C7-E10，根據此關鍵鏈修正專案緩衝與匯流緩衝，專案緩衝PB為關鍵鏈D8-B8-B5-C7-E10所有作業時間的一半，由圖(c)的16天修正為 $\frac{8}{2} + \frac{8}{2} + \frac{5}{2} + \frac{7}{2} + \frac{10}{2} = 19$ 天，最後專案完成時間則為57天。

### 2.3.2 績效衡量與時間估計

專案管理排程方法的優劣，需要績效衡量值來評斷，大部分的學者以最小化專案完工所需時間 (Makespan) 作為首要目標 (Herroelen and Leus, 2001)。

Perry and Greig (1975) 提出改良式三時估計法，此法利用三個百分位數( $t_{0.05}$ 、 $t_{0.50}$ 、 $t_{0.95}$ ) 的作業時間考量作業時間的變異，進而推估作業期望時間為：

$$t_e = t_{0.5} + 0.185(t_{0.05} + t_{0.95} - 2t_{0.5}) \quad (1)$$

Goldratt 建議採用中位數作為作業完成時間的單點估計，Product Development Institute提倡採用平均值，然兩者皆未考量作業的變異。Herroelen and Leus (2001) 認為各作業的特性不同，應該針對每個作業選擇適當的完成時間估計值，但是此法必須針對各作業收集足夠歷史資料，才能決定各作業符合的機率分配，需要相當長的時間與龐大的資料收集成本。在考量發動機作業變異性大，以及缺乏足夠的歷史資料之前提下，本研究採用Perry and Greig (1975) 提出改良式三時估計法。

### 2.3.3 緩衝

關鍵鏈專案排程將各作業的安全時間移到最後的緩衝區集中管理，然而實際上由於並非每個作業都需要使用安全時間，因此緩衝的大小應該比各作業安全時間的總和小，但仍必須足以保護專案準時完成。

緩衝大小的制定除了取各作業時間的一半之外，還可以採用Product Development Institute<sup>1</sup>所提的均方根公式來估計，如式(2)以各作業的最悲觀完成時間與平均完成時間差平方和之平方根來決定緩衝的大小， $S_i$ 為作業*i*最悲觀的完成時間， $A_i$ 為作業*i*的平均完成時間。此公式將作業的變異考量在內，可能較適合發動機維修作業，因此本研究採用式(2)。

$$b = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - A_i)^2} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Product Development Institute為一所專長於為顧客建立專案管理辦公室 (Project Management Office) 的顧問公司，位於美國紐澤西。

### 3. 模式構建

圖2為本研究模擬系統的架構圖，發動機修護工廠在規劃發動機維修排程時，非常重視總完工時間，而完工時間取決於維修作業流程中的關鍵鏈作業，關鍵鏈作業的決定又受到各維修作業估計時間、修護工廠設備限制、人員執班制度、及顧客要求維修範圍的影響。其中作業時間估計與緩衝制定直接影響總完工時間；修護工廠設備限制、人員執班制度則影響各作業的開始時間與完成時間，進而影響關鍵鏈作業的決定；而顧客要求的維修範圍則影響維修作業先行圖的結構，進而影響關鍵鏈作業的決定。

本研究以民用航空器發動機維修業為研究個案，而實例資料係A公司的發動機部，本研究中的實例為GECF6-80C2系列渦扇發動機 (Turbo Fan Engine)，其維修流程概要如圖3所示，而本研究的範圍則界定於GECF6-80C2系列渦扇發動機之平衡、研磨、組裝、及測試等不確定性高且對總完工時間影響最大的現場維修作業。

每具GECF6-80C2民用航空器發動機 (Engine) 外部有許多管線與零組件，稱之為QEC (Quick Engine Change)，當發動機移除QEC之後可拆解成FAN、HPC (High Pressure Compressor)、HPT (High Pressure Turbine)、LPT (Low Pressure Turbine)、及AGB (Accessory Gearbox) 五個模

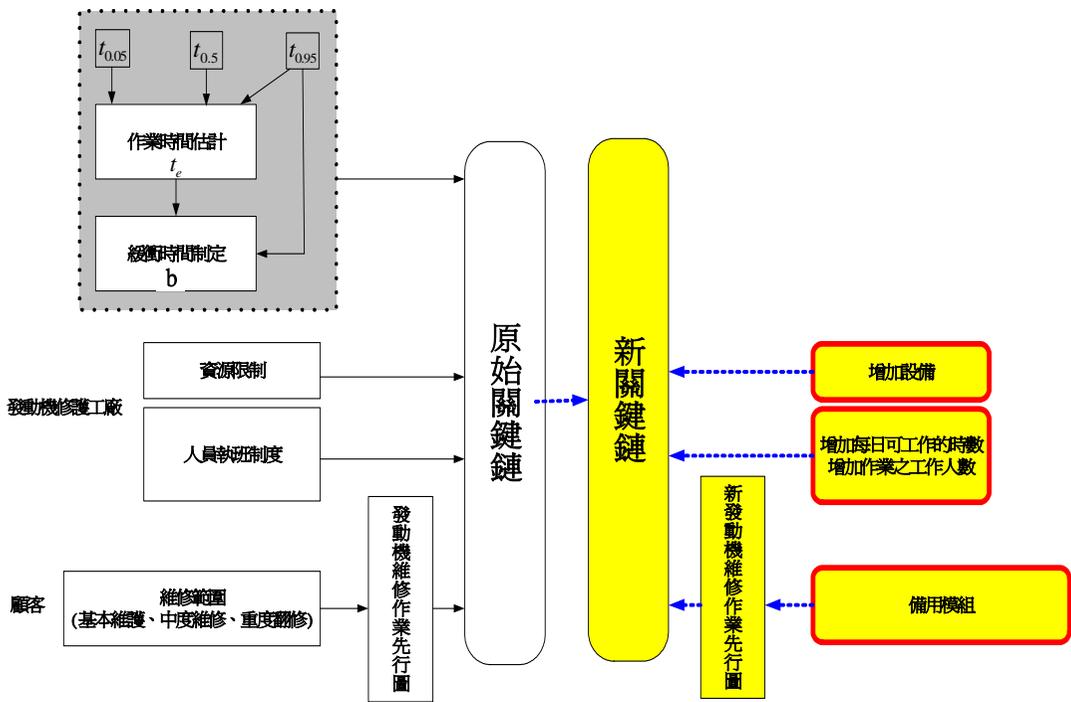


圖2 模式架構圖

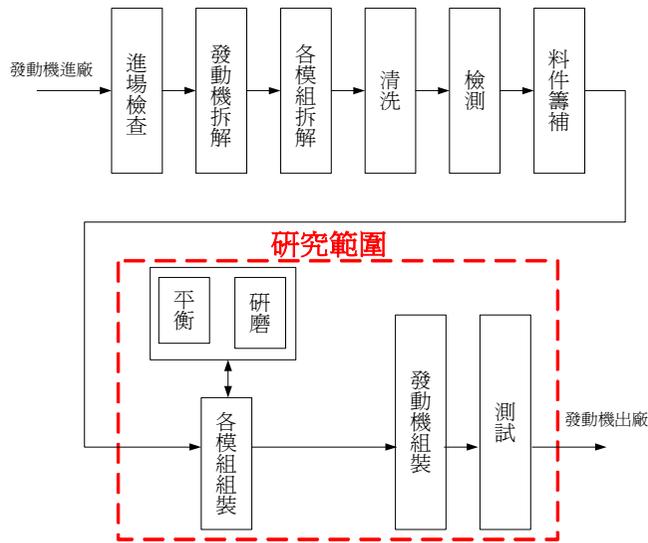


圖3 發動機維修流程示意圖

組，每個模組又由許多EMU (Engine Module Unit) 與零組件 (Piece Parts) 組成。FAN模組只有基本維護一種維修範圍，AGB模組只有基本維護、重度翻修兩種維修範圍，因此依據五個模組的維修範圍之組合而形成  $C_1^2 \cdot C_1^3 \cdot C_1^3 \cdot C_1^3 \cdot C_1^1 = 54$  種不同的維修流程，本研究以所有模組均重度翻修作為初步模擬，以呈現發動機所有可能執行的維修作業與所有可能會使用到的資源，而後再以改善方案呈現不同維修範圍。

本研究藉由資料收集、現場訪談等方式了解個案公司負責維修之發動機結構、維修作業步驟、各類作業特性、及作業所需的特定設備儀器，並蒐集個案公司2002年1月~10月營運資料來獲得模式中所需的各項數值，例如：工時統計系統中各維修工單的工作時數、人員配置情形等資料。

由於發動機維修作業程序依據工單進行，而工單其實是根據發動機結構來撰寫，作業的決定應該以發動機結構為導向。此外，由於關鍵鏈專案排程過程中，必須化解作業同時間的資源衝突，因此作業的決定若又能依照資源分配導向，則可以使資源衝突的化解更加容易，由於個案公司的資源大致依照工作中心 (Work Center) 分配，因此本研究以「工單」與「工作中心」二維綜合考量，並依據以下原則定義作業，進而量測各作業的工時：

- (1) 同一工作流程中，同一工作中心負責之工單定義為同一個作業。
- (2) 同一工單內，跨不同工作中心之部份分別定義為不同作業。

量測完所有作業的工時後，依照Perry and Greig (1975) 提出的時間估計法，將先前作業工時資料之三個百分位數 ( $t_{0.05}$ 、 $t_{0.50}$ 、 $t_{0.95}$ ) 依照式(1)推估作業的期望時間，同時本研究也必需建

構作業流程先行圖，作業流程先行圖必須顯示作業間的相依性，本研究以多次現場訪談的方式得知作業間的先後關係。作業流程先行圖如圖4所示，圖4為模組層級的HPC模組作業流程先行圖。

本研究採用Microsoft Project 2000 and Prochain Pipeline軟體，將各作業的資料輸入，並將Engine與QEC、FAN模組、HPC模組、HPT模組、LPT模組、及AGB模組之維修作業分別以00X、01X、02X、03X、04X、及05X作為作業代碼開頭，如表1所示的HPC模組組裝作業表，最後依照關鍵鏈專案排程原理，確認關鍵鏈，加入匯流緩衝、專案緩衝以保護關鍵鏈，最後重新排程求得單具發動機維修的總完工時間。

模擬系統中的參數設定如下：

- (1) **各作業越晚開始越好**：由於本研究的範圍為平衡、研磨、組裝、及測試等作業，若這些作業未待各模組物料籌補結束就提早開始，則作業可能進行到某一步驟又因為料件不足而被迫暫停，使得該作業的負責人員只好轉而執行其他作業，形成多工的情形。因此各作業應該越晚開始越好。

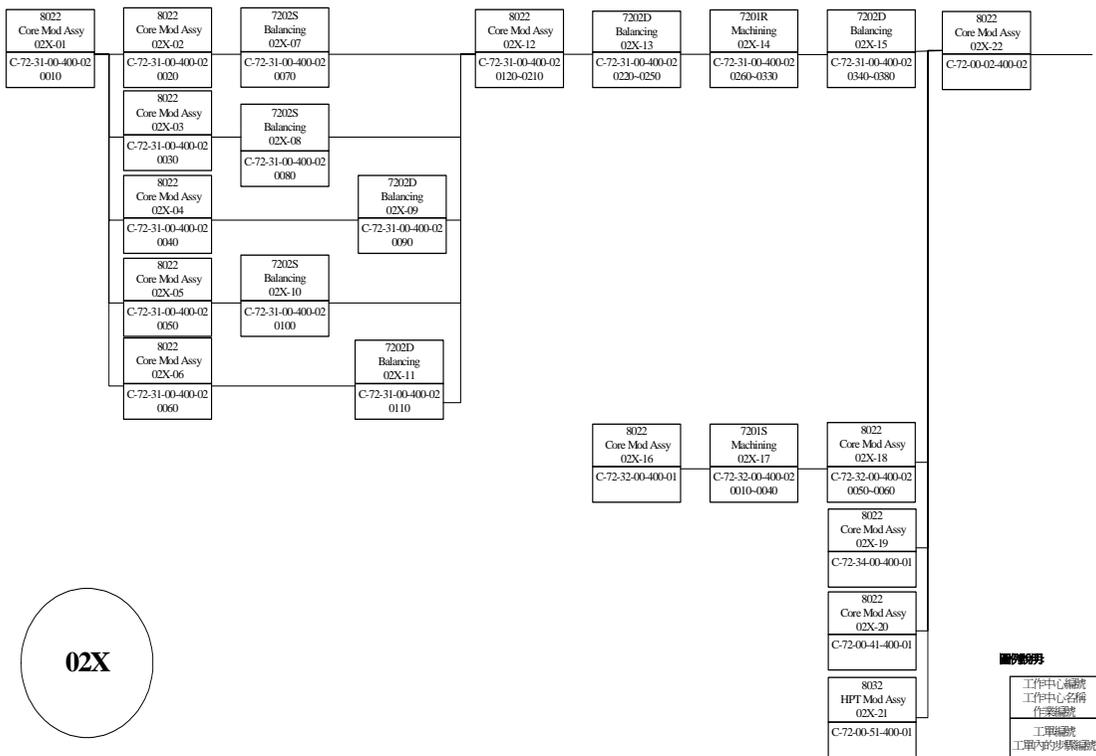


圖 4 HPC 模組的作業流程先行圖

表1 HPC模組組裝作業表

流水碼	作業代碼	作業名稱	作業時間 (小時)	第九十五百分位數之 作業時間(小時)	前置作業 (流水碼)	後續作業 (流水碼)	工作中心
31	02X-01	初步組裝HPC轉子	15.31	71.04		32,33,34,35,36	8022
32	02X-02	組裝第1級轉子葉片	2.71	5.97	31	37	8022
33	02X-03	組裝第2級轉子葉片	17.86	40.15	31	38	8022
34	02X-04	組裝第3-9級轉子葉片	8.91	17.20	31	39	8022
35	02X-05	組裝第10級轉子葉片	9.26	23.54	31	40	8022
36	02X-06	組裝第11-14級轉子葉片	21.70	40.40	31	41	8022
37	02X-07	靜平衡第1級轉子	18.83	76.27	32	42	7202S
38	02X-08	靜平衡第2級轉子	8.23	18.56	33	42	7202S
39	02X-09	動平衡第3-9級轉子	13.04	41.85	34	42	7202D
40	02X-10	靜平衡第10級轉子	6.97	24.47	35	42	7202S
41	02X-11	動平衡第11-14級轉子	16.52	34.97	36	42	7202D
42	02X-12	組裝HPC轉子	39.31	84.34	37,38,39,40,41	43	8022
43	02X-13	初步動平衡HPC轉子	43.21	78.08	42	44	7202D
44	02X-14	研磨HPC轉子葉片	30.82	61.52	43	45	7201R
45	02X-15	最終動平衡HPC轉子	6.15	9.99	44	56	7202D
47	02X-16	初步組裝HPC定子	39.60	82.94		48	8022
48	02X-17	研磨HPC定子	38.06	76.21	47	49	7201S
49	02X-18	磨銳定子葉片尖端	12.29	32.78	48	56	8022
51	02X-19	組裝CRF	57.11	99.98		56	8022
53	02X-20	組裝燃燒器	0.00	0.00		56	8022
55	02X-21	組裝HPT第1級噴嘴	0.00	0.00		56	8022
56	02X-22	組裝HPC	62.31	152.39	45,49,51,53,55	2	8022

- (2) **資源產能 (Capacity) 限制**：本研究依據現場訪談資料，設定負責各作業的工作中心產能限制，如表2所示。
- (3) **資源撫平**：依據前述的資源產能限制與接力賽跑者精神來進行資源撫平，每個工作中心必須執行完一個作業才能執行下一個指派給該工作中心的作業。
- (4) **以開始日期來進行排程**：本研究將開始日期設定為2003年1月1日。
- (5) **所有資源每日工作12小時**：個案公司目前採取兩班制輪流進行發動機的維修，因此本研究將每日工作時數設定為12小時。每日工作時間假設為上午八時至中午十二時、下午一時至下午五時，以及晚上六時至晚上十時，為了方便觀察完工的天數，本研究將每週工作日設定為週一至週日。

表2 工作中心的產能限制

工作中心(Work Center)	最大工作組數(組/班)	每組人數
8012	3	6
8022	3	6
8032	3	6
8042	3	6
8052	3	6
8092	1	4
8002	1	4
8098	1	4
8099	1	4
7303	1	2
7202S (靜平衡)	1	2
7202D (動平衡)	1	2
7201R (轉子的研磨)	1	2
7201S (定子的研磨)	1	2

(6) 緩衝大小：本研究採用Product Development Institute的式(2)來設定緩衝的大小，並以作業時間資料的第九十五百分位數 $t_{0.95i}$ 為作業 $i$ 最悲觀的完成時間， $t_{ei}$ 為作業 $i$ 的平均完成時間，如式(3)所示。

$$b = \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{0.95i} - t_{ei})^2} \quad (3)$$

#### 4. 情境模擬分析與討論

本研究假設發動機之間的進廠間隔夠大，足以使修護工廠維修完一具發動機後才維修下一具發動機，藉由單具發動機重度翻修的排程規劃來呈現發動機所有維修作業以及所有可能會使用到的資源，而後再以資源與維修範圍的改變來進行改善策略模擬，因為發動機修護工廠最重視的總完工時間取決於維修作業流程中的關鍵鏈作業，而資源與維修範圍的改變會影響關鍵鏈作業的決定，進而影響總完工時間。因此本研究針對單具發動機的維修作業藉由以下三種情境模擬其排程，探討發動機修護工廠在原始關鍵鏈上的資源限制改善與維修範圍改善對於關鍵鏈、總完工時間、及完工時間變異程度的影響，並探討改善的完工時間與完工時間變異程度的關係。

(1) 初步模擬：資源固定，所有模組皆重度翻修

(2) 改善策略一：資源增加，所有模組皆重度翻修

(3) 改善策略二：資源固定，各模組維修範圍改變

上述之情境中所稱的資源包括各工作中心的設備、維修人員的每日工作時數與單位時間所能執班的組數，而維修範圍雖然主要由航空公司決定，但是發動機修護工廠仍可以採用「非原件回裝」的方式改變發動機維修作業先行圖的結構，以航空公司寄放的備用模組、備用組件來省略原本需要進行的維修作業，進而縮減總完工時間。

本研究採用的緩衝公式為式(3)，因此本研究模擬出來的專案緩衝時間利用過去作業工時資料的第九十五百分位數與期望工時的差異，將發動機維修完成時間的不確定性以一個確切的時間值來表現，所以本研究可以從專案緩衝佔總完工時間的比例得知該情況下完成發動機維修的完工時間之變異程度，專案緩衝佔總完工時間的比例越高代表發動機維修完成時間的變異性越高。

#### 4.1 初步模擬：資源固定，所有模組皆重度翻修

所有工作中心的限制設定如先前所述，所有模組皆進行重度翻修，亦即所有維修作業都必需執行，其所得之發動機組裝作業排程如圖5所示，其模擬結果整理於表3。表3中初步模擬所得的總完工時間為989.2小時，而個案公司實際原始完工時間為1171.2小時，因此關鍵鏈排程可以將總完工時間減少182小時，亦即減少15.54%的完工時間。此係由於關鍵鏈專案排程將各作業時間的不確定性移到緩衝時間集中管理，並以消除多工的原則來排程，改善時間浪費的問題，因而使總完工時間獲得很大的改善。

由表3、圖5觀察可知，原本的關鍵鏈是HPC模組以及Engine 與QEC，但是加入匯流緩衝後，卻使得其他非關鍵鏈上的作業 (FAN模組) 比關鍵鏈上的作業要早開始，加入緩衝後，最長的維修作業路徑變成FAN模組的維修作業，而非HPC模組的維修作業。

由於初步模擬的關鍵鏈為HPC模組 (02X)、Engine與QEC (00X)，其關鍵鏈上的作業詳見表4，因此HPC模組、Engine與QEC的料件籌補一定要確保在開始組裝前都完成，一旦耽誤到HPC模組或Engine與QEC的維修作業，則會將整個發動機完工時間延後，而其他模組的維修作業的延遲則不一定會影響到整個發動機的完工時間，至多可延遲的時間為其匯流緩衝的長度，其中又以AGB模組可以最晚完成料件籌補、最晚開始執行組裝作業。

表3 初步模擬結果

關鍵鏈	最長路徑	總完工時間 (小時)	專案緩衝 (小時)	關鍵鏈上 的作業數	專案緩衝/總完 工時間	個案公司原始總 完工時間(小時)	改善的總完工 時間(小時)
02X+00X	01X+00X	989.2	293.0	17	0.30	1171.2	182.0

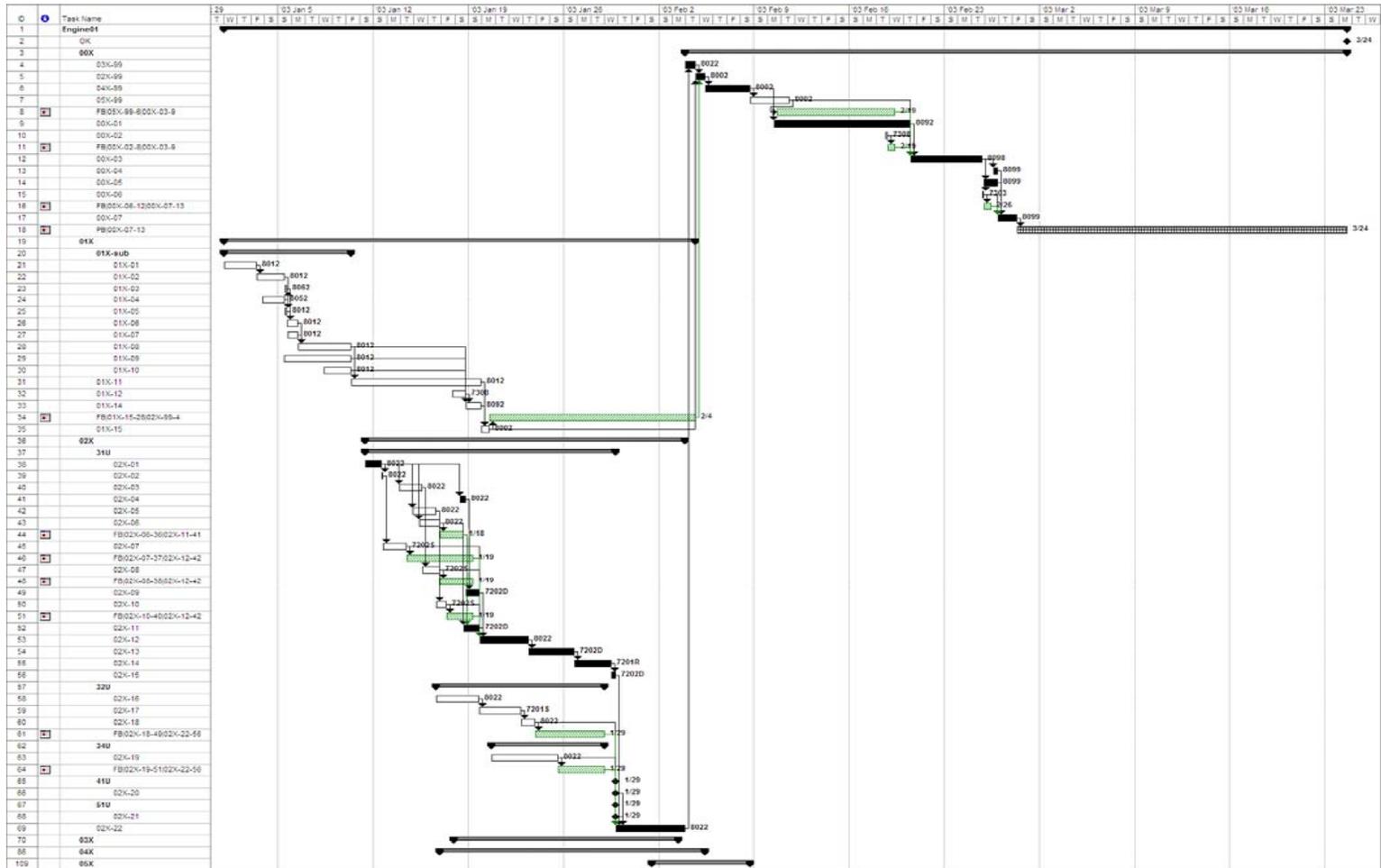


圖5 初步模擬結果示意圖

表4 初步模擬之關鍵鏈作業

作業代碼	作業名稱	作業時間 (小時)	第九十五百分位數之 作業時間(小時)	工作中心
03X-99	結合HPT與HPC	8.15	19.84	8022
02X-99	結合HPC、HPT與FAN	5.80	10.08	8022
04X-99	安裝LPT	41.80	136.69	8022
00X-01	安裝QEC	120.60	298.79	8092
00X-03	發動機試車	65.33	227.04	8098
00X-04	檢查FAN第1級風扇葉片	6.88	28.64	8099
00X-05	試車後檢查	13.10	49.71	8099
00X-07	出廠檢查	12.50	30.83	8099
02X-01	初步組裝HPC轉子	15.30	71.04	8022
02X-04	組裝第3-9級轉子葉片	8.90	17.20	8022
02X-09	動平衡第3-9級轉子	13.03	41.85	7202D
02X-11	動平衡第11-14級轉子	16.52	34.97	7202D
02X-12	組裝HPC轉子	39.30	84.34	8022
02X-13	初步動平衡HPC轉子	43.20	78.08	7202D
02X-14	研磨HPC轉子葉片	30.82	61.52	7201R
02X-15	最終動平衡HPC轉子	6.15	9.99	7202D
02X-22	組裝HPC	62.30	152.39	8022

## 4.2 改善策略一：資源增加，所有模組皆重度翻修

針對初步模擬結果的關鍵鏈作業所需之工作中心加以改善，以增加資源的方式來改善初步模擬中的關鍵鏈作業，以達到縮短總完工時間的目的，本研究曾嘗試以工時增加、工作組數增加、設備增加三種方式來進行模擬，其中以工時增加之改善方式的成本較低且實務上較易於執行，因此本文示範「工時增加」一例。

當發動機維修時間可能無法滿足航空公司要求時，管理者最先考量的策略通常是將工作中心的每日工時增加，但是工時的增加的對象必須針對原關鍵鏈上的作業才能達到縮減總完工時間的效果，因此本研究以初步模擬中負責關鍵鏈作業(表4)的工作中心增加每日工時，將人工為主的四個工作中心每日增加4小時，然而四個工作中心不一定需要同時都增加每日工時，因此本研究將四個工作中心增加工時可能出現的組合，共  $C_1^4 + C_2^4 + C_3^4 + C_4^4 = 15$ 種，分別模擬其排程。

將15種方案模擬結果，依照關鍵鏈作業不同來分類，則可歸納出兩種類型，整理如表5。由表5可發現類型一的方案，其關鍵鏈均為組裝FAN模組、Engine與QEC的作業，這些方案均透過工作中心8022增加工時來改善，由於工作中心8022負責組裝原始關鍵鏈HPC模組的作業，因此增加工作中心8022每日工時可使HPC模組組裝時間縮短，而使關鍵鏈轉變成FAN模組、Engine

表5 改善策略一與改善策略二之模擬結果

改善策略			關鍵鏈	最長路徑	總完工時間 (小時)	專案緩衝 (小時)	專案緩衝/ 總完工 時間	改善的總 完工時間 (小時)
改善策略一	資源	類型一	01X+00X	02X+00X	841.9~920.9	276.0~321.0	0.33~0.35	250.3~329.3
	增加	類型二	02X+00X	01X+00X	915.0~979.2	243.0~291.0	0.27~0.30	192.0~256.2
改善策略二	維修範圍改變	類型一	01X+00X	01X+00X 02X+00X 03X+00X 04X+00X	782.2~852.0	311.0	0.37~0.40	319.2~389.1
		類型二	03X+00X	01X+00X	915.2	284.0	0.31	256.0
	類型三	01X+00X	01X+00X 02X+00X 04X+00X	833.2~871.7	321.0	0.37~0.38	299.6~338.0	
	類型四	02X+00X	01X+00X	924.2~989.2	293.0	0.30~0.32	182.0~247.0	

與QEC；類型二的方案，其關鍵鏈均仍為組裝HPC模組、Engine與QEC的作業，因為這些方案均透過8022以外的其他工作中心增加工時改善總完工時間。

此外，還可發現同類型中所有方案的關鍵鏈作業相同，但是所得的專案緩衝卻不一定相同，原因為本情境同類型方案間的相異處在於關鍵鏈上的加班作業不同。由於本情境針對負責關鍵鏈作業之工作中心加班，而被要求加班的工作中心可以使所有該工作中心負責的作業提早完成，然後連帶使得接續該作業的後續作業也得以提早開始，因此，增加工時的工作中心不同，而使得可以提早完成的作業不同，造成關鍵鏈的長度不同，所以獲得的專案緩衝大小也就不相同。

表5的數據顯示類型一的方案改善完工時間大部份都比類型二的方案高，且類型一的專案緩衝佔總完工時間的比例皆大於0.32，類型二的專案緩衝佔總完工時間的比例皆小於0.3，專案緩衝的大小代表了專案完工時間的變異，雖然類型一改善完工時間較多，但是專案完工時間變異程度也比類型二高。觀察各方案之改善完工時間與完工時間變異程度之關係，同一類型中的總完工時間變小時，專案緩衝也同時變小，因此其專案緩衝佔總完工時間的比例幾乎都差不多。

#### 4.3 改善策略二：資源固定，各模組維修範圍改變

各模組的維修範圍雖然受制於航空公司的要求，但是短期內發動機修護工廠可以採取「非原件回裝」的方法，以備用模組或備用組件來暫時省略所需的發動機維修作業，藉此改變維修作業先行圖結構，進而改變了關鍵鏈以達到縮短總完工時間的目的。

以HPC模組為例，HPC模組有基本維護、中度維修、重度翻修三種維修範圍，基本維護代表HPC模組使用備用模組而不需組裝，因此可省略所有HPC模組的組裝作業，而中度維修代表HPC模組可以省略HPC轉子葉片的組裝、初步平衡等作業(02X-1~02X-12)。其他模組的維修範圍與其所省略的維修作業依此類推。

依據五個模組的各種維修範圍組合，模擬單具發動機所有維修範圍組合的作業排程共有54種，初步觀察可知，所有「非原件回裝」方案中，若原關鍵鏈的HPC模組組裝作業皆執行，而其他部份模組採用備用模組、備用組件，即表5改善策略二的類型四中的方案，其縮減的維修總完工時間等於或低於247小時。反之，若針對原關鍵鏈的HPC模組組裝作業進行「非原件回裝」的方案，其能縮減的維修總完工時間為256~389.1小時，即表5改善策略二的類型一、類型二、及類型三中的方案。因此針對原關鍵鏈作業進行「非原件回裝」的方案，能縮減較多的完工時間。

本研究將改善策略二中54種「非原件回裝」方案之結果，依照模擬所得關鍵鏈作業的不同來分類，共可分成四類，其分類結果如表5所示。

若將四種類型的總完工時間與完工時間變異程度之關係繪製成圖，則可由圖中點的分佈情形，發現同一類型中的「非原件回裝」方案之總完工時間與完工時間變異程度為反比關係，亦即具有相同關鍵鏈作業之「非原件回裝」方案中總完工時間較長者，其完工時間變異程度當然也較小。

因為此情境中同一類型方案資源不變且具有相同的關鍵鏈作業、相同的專案緩衝，唯一相異處在於非關鍵鏈作業，由於使用備用模組、備用組件的不同，而使非關鍵鏈作業不同，因此匯流緩衝不同，形成的最長維修路徑時間長度也不同，所以總完工時間不同。同類型方案中，非關鍵作業較多的方案，雖執行較多維修作業，維修總完工時間較長，但保護總完工時間不確定性所需的專案緩衝仍與同一類型之其他方案一樣長，因此所有「非原件回裝」方案中即使資源固定且具有相同關鍵鏈作業，其中非關鍵鏈作業較多者，使用的備用模組、備用組件較少，因而總完工時間較長，因此其完工時間變異程度較小。

一般而言，縮減完工時間方案的最佳選擇就是維修完工時間最短且完工時間變異程度最小的方案。若數個方案的發動機維修完工時間差不多時，應該選擇採用完工時間變異程度較小的方案，若數個方案的完工時間變異程度差不多時，應該選擇完工時間較短的方案。

若修護工廠的資源現況與備用模組、備用組件庫存量都能滿足所有可行方案的要求，但所有可行方案間的發動機維修完工時間與完工時間變異程度都有明顯差距，且完工時間較短的方案其完工時間變異程度較大，或完工時間變異程度較小的方案其完工時間較長時，則發動機修護工廠可能：(1)以完工時間最小化為主要目標，選擇維修完工時間較短的方案，執行時針對該方案所形成的關鍵鏈作業嚴加控管，確保關鍵鏈作業不延誤，盡量減少消耗專案緩衝時間，使實際完工時間變異程度小於規劃時所模擬的結果。(2)若短期內航空公司備用發動機的數量足

夠，在航空公司可容忍的完工時間範圍內，可以選擇完工時間較長而完工時間變異程度較小的方案，因為此種方案的不確定性佔總完工時間的比例較小，修護工廠可能不必再以額外資源或備用組件來支援。

此外，由模擬結果，亦可以觀察得知部份方案皆具有相同的總完工時間、相同的縮減完工時間效果，若依照總完工時間來分組，總完工時間相同者為一組，共可分為13組，依總完工時間由小到大排序，依序為a組~m組。仔細觀察同一組內的方案恰好具有相似的先行圖、相同的關鍵鏈作業、相同的專案緩衝時間，由於這些方案的先行圖結構相似，影響總完工時間的關鍵鏈作業與最長維修路徑也相同，因此縮減完工時間的效果也相同（見表6），以d組為例，其中「M」代表基本維護，「P」代表中度維修，方案3-10與方案3-9縮減總完工時間的效果相同，總完工時間的變異性也相同為0.3927，但是方案3-10的LPT模組為中度維修，而方案3-9的LPT模組為基本維護，方案3-10所需要的備用組件較少，所以需要執行的維修作業較多，亦即方案3-10需要航空公司投資的備用組件較少，但需發動機修護工廠耗費較多資源，此時需視當時航空公司備用組件的庫存量與發動機修護工廠的資源使用情形來選擇方案。總之，若發動機修護工廠希望達到某種程度的縮減工時效果，選擇方案時必需考量當時航空公司備用組件庫存量與發動機修護工廠的資源使用情形。

本研究將初步模擬改善策略一、改善策略二的模擬結果分析如表7所示，改善策略一由於資源的增加而造成人事成本的增加，改善策略二則是備用模組、備用組件的成本增加，然而對

表6 分組後的改善策略二方案(a~g組)

分組	方案	FAN	HPC	HPT	LPT	關鍵鏈	最長路徑	總完工時間 (小時)	專案緩衝 (小時)	關鍵鏈上 的作業數	專案緩衝/總 完工時間	改善的總完工 時間(小時)
a	3-6	M	M	M	M	01X+00X	01X+00X	782.2	311.00	10	0.3976	389.1
b	3-13	M	M	O	P	01X+00X	03X+00X	783.0	311.00	10	0.3972	388.2
c	3-7	M	M	M	P	01X+00X	04X+00X	788.4	311.00	10	0.3945	382.8
d	3-10	M	M	P	P	01X+00X	03X+00X	792.0	311.00	10	0.3927	379.2
	3-9	M	M	P	M							
e	3-12	M	M	O	M	01X+00X	03X+00X	795.0	311.00	10	0.3912	376.2
	3-11	M	M	P	O							
f	3-14	M	M	O	O	01X+00X	04X+00X	827.0	311.00	10	0.3761	344.3
	3-8	M	M	M	O							
	3-32	O	M	M	M							
	3-33	O	M	M	P							
g	3-35	O	M	P	M	01X+00X	01X+00X	833.2	321.00	14	0.3853	338.0
	3-36	O	M	P	P							
	3-38	O	M	O	M							
	3-39	O	M	O	P							

表7 情境模擬結果分析

	改善的總 完工時間 (小時)	完工時間 變異程度	人事成本 的增加	備用模 組、組件 之需求	優點	缺點	
初步模擬	182.0	0.30	無	無	1. 完工時間不 確定性較低 2. 成本最低	1. 完工時間改 善效果最小	
改善 策略 一	針對原關鍵鏈作 業增加資源	250.3~ 329.3	0.33~0.35	有	無	1. 完工時間改 善效果次佳 2. 成本較低	1. 完工時間不 確定性較高
	針對非關鍵鏈作 業增加資源	192.0~ 256.2	0.27~0.30	有	無	1. 完工時間不 確定性最低 2. 成本較低	1. 完工時間改 善效果中等
改善 策略 二	針對原關鍵鏈作 業改變維修範圍	256.0~ 389.1	0.31~0.40	無	有	1. 完工時間改 善效果最佳	1. 完工時間不 確定性最高 2. 成本最高
	針對非關鍵鏈作 業改變維修範圍	182.0~ 247.0	0.30~0.32	無	有	1. 完工時間不 確定性中等	1. 完工時間改 善效果較小 2. 成本最高

於航空公司而言，維修人事成本的索價遠低於備用模組、備用組件的成本，航空公司較希望發動機修護工廠以工時增加的方式來改善總完工時間，而較不願意投資購買備用模組、備用組件，因此改善策略一是一般航空公司最常見的選擇，改善策略一中又以針對原關鍵鏈作業增加資源的方案改善效果較佳，但是完工時間變異程度較大，則發動機修護工廠在維修作業進行的過程中必需透過良好的緩衝管理，以降低完工時間的不確定性。

## 5. 結論與建議

### 5.1 結論

本研究之目的在於增進發動機維修業的排程規劃功能，使發動機維修業能準確預估資源限制改善與維修範圍改變對於發動機維修總完工時間的改善效果。本研究透過應用關鍵鏈排程技術於民用航空器發動機重度翻修的排程規劃，並以某一個案公司為例，進行各種情境模擬、改善策略應用之示範。綜合研究結果，獲致以下結論：

- (1) 關鍵鏈專案排程技術確實可以應用於民用航空器發動機維修業。

發動機的維修具有專案的特性，而關鍵鏈專案排程能協助發動機修護工廠滿足航空公司要求的交期。針對民用航空器發動機維修業所使用的關鍵鏈專案排程，其作業的確認與作業時間的量測應該同時考量發動機的結構與資源的使用。

(2) 本研究以個案研究方式證實關鍵鏈專案排程技術可行，並具管理意義。

在個案實例中，本研究使用關鍵鏈專案排程方法，以專案管理的角度模擬發動機組裝的時程規劃，結果發現關鍵鏈排程技術可以改善總完工時間，而且縮短發動機維修完工時間必須針對原關鍵鏈作業增加資源或針對原關鍵鏈作業進行「非原件回裝」，所有模擬結果整理如下：

- 1) 關鍵鏈排程技術可以改善總完工時間182小時，亦即減少15.54%的完工時間。
- 2) 單具發動機重度翻修的關鍵鏈為組裝HPC模組、Engine與QEC的作業。
- 3) 縮短發動機維修完工時間必須針對原關鍵鏈作業增加資源。
- 4) 針對原關鍵鏈上增加的工作中心不同會影響維修完工時間與完工時間的變異程度。
- 5) 針對原關鍵鏈作業進行「非原件回裝」的方案才能縮減較多的完工時間。
- 6) 關鍵鏈作業不同，則維修完工時間與發動機維修完工時間的變異程度也不同。
- 7) 資源不變，關鍵鏈作業相同且非關鍵鏈作業不同時，總完工時間與完工時間變異程度為反比關係。
- 8) 選擇「非原件回裝」方案時，若數個方案的發動機維修完工時間相同且完工時間變異程度也相同，則應該視備用組件的庫存量與發動機修護工廠的資源使用情形來選擇較適合的方案。
- 9) 發動機維修完工時間與完工時間變異程度之關係影響發動機修護工廠的改善工時決策。

## 5.2 建議

由於本研究假設發動機修護工廠將一具發動機維修完成才進行下一具發動機的維修，因此僅針對單具發動機維修流程中的平衡、研磨、組裝、及測試等現場維修作業進行時間規劃排程與探討。本研究建議後續研究者：

- (1) 改變假設，同時進行兩具或兩具以上發動機的維修作業排程，如此更可以看出增派工作組與增購設備的工時改善效果，還能探討不同的發動機進廠間距對維修完工時間的影響。
- (2) 將維修過程中的拆解、清洗、量測檢驗等作業也納入排程，如此可以使模擬出來的發動機維修總完工時間更合理。
- (3) 針對專案開始執行後的關鍵鏈變化進行重新排程之模擬研究，以貼近實務界的需求。
- (4) 模擬與探討專案實際執行時可能遭遇的緩衝管理問題。
- (5) 將各作業成本納入考量（郭秀貴等，民92），以協助發動機修護工廠制定決策。

(6) 將其他專案管理的方法論應用於發動機維修業，進行其與關鍵鏈專案排程的適用性比較與探討。

本研究建議個案公司若要改善現場維修作業，首要改善對象應該為組裝Engine與QEC、FAN模組、HPC模組的作業。此外，個案公司應該持續搜集各作業時間的資料，定期更新各作業的估計時間，並檢討各作業時間變異發生的原因。

若要將關鍵鏈專案排程技術導入其他企業，則必須考量以下三點：

- (1) 作業先行圖必須與實際執行的情況相同，才能進行時程規劃。
- (2) 企業資訊電子化的程度，尤其人工工時記錄系統更是不可或缺，因為工時記錄系統可以使作業時間資料的處理更容易進行。
- (3) 員工必須確實記錄執行作業之工時，以避免規劃出來的專案時程與實際的差距太大。

## 參考文獻

- 宋文娟、黃振國譯，Gido, Jack and Clements, James P.著，專案管理，台中市：滄海書局，民國90年。
- 李榮貴、張盛鴻，「國立交通大學人才培訓中心專案經理人培訓班講義」，民國91年。
- 郭秀貴、任維廉、劉禎氣、葉俊廷、林容聖，「建構民用航空器發動機維修作業基礎成本制資訊系統之研究」，民航季刊，第五卷第二期，民國92年，35-56頁。
- 陳駿逸，「航空發動機維修排程作業之研究」，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國92年。
- 教育部顧問室航太品保驗證產學策略聯盟教學資源中心，航空器維修管理概論，民國90年。
- 許家倫，「發動機最佳進廠維修排程之研究」，國立成功大學航空太空工程學系碩士論文，民國91年。
- 劉穹林，「航空發動機維修作業中拆解過程之人力規劃研究」，國立交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國92年。
- 羅嘉穎譯，Goldratt, Eliyahu M.著，關鍵鏈—突破專案管理的瓶頸，台北市：天下遠見出版股份有限公司，民國91年。
- Cohen, I., Mandelbaum, A., and Shtub, A., "Multi-project Scheduling and Control: a Process-based Comparative Study of the Critical Chain Methodology and Some Alternatives," *Project Management Journal*, Vol. 35, No. 2, 2004, pp. 39-50.
- Gido, J. and Clements, J. P., *Successful Project Management*, Boston: Thomson Learning Inc., 1999.
- Goldratt, E. M., *Project Management and Engineering*, Goldratt Satellite Program Session 3, 2001.
- Goldratt, E. M., *Critical Chain*, New York : North River Press, Inc., 1997.

- Goldratt, E. M. and Fox, R.E., *The Race*, New York : North River Press, Inc., 1986.
- Herroelen, W., Leus, R., and Demeulemeester, E., “Critical Chain Project Scheduling: Do Not Oversimplify,” *Project Management Journal*, Vol. 33, No. 4, 2002, pp. 48-60.
- Herroelen, W. and Leus, R., “On the Merits and Pitfalls of Critical Chain Scheduling,” *Journal of Operations Management*, Vol. 19, No. 5, 2001, pp. 559-577.
- Herroelen, W. and Leus, R., “Robust and Reactive Project Scheduling: a Review and Classification of Procedures,” *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 8, 2004, pp. 1599-1620.
- Perry, C. and Greig, I., “Estimating the Mean and Variance of Subjective Distributions in PERT and Decision Analysis,” *Management Science*, Vol. 21, No.12, 1975, pp. 1477-1480.
- The Product Development Institute, Inc., *The Critical Chain Method*, Retrieved 27th December 2002, from <http://www.pdinstitute.com/tutorial/contents.html>.
- Yeo, K. T., “Integrating Supply Chain and Critical Chain Concepts in Engineer-procure-construct (EPC) Projects,” *International Journal of Project Management*, Vol. 20, No. 4, 2002, pp. 253-262.