

【工業】737Max必須重新認證

2019-04-08 04:46:00

原文網址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/125380769>

最近兩個月，煩心的事特別多，也就無暇照顧部落格。不過與政策直接有關的話題還是出現了兩次，我不願錯過對人類社會有貢獻的機會，仍然寫了文章來評論，都直接發表在《觀察者網》上。現在把更新過的版本也轉錄在此；這是第二篇。

=====

波音737Max上市發售不久，就一連出現兩次墜機事件，造成300多人死亡。目前已經有足夠的證據證明這兩次事故的主因都是“機動特性增強系統”（Maneuvering Characteristic Augmentation System，MCAS）的邏輯不合理，在單個迎角探測器測量有誤時，就專斷獨行，不論駕駛員如何處置，仍然堅持低頭向下紮。

這樣低級的錯誤，固然十分離譜，但是它的背後還是有一些複雜的歷史因素。737Max的起源在2010年十二月，那時空客宣佈了下一代A320Neo，採用LEAP發動機，從而大幅改善燃油效率，這立刻把波音逼入牆角。燃油是航空公司的主要花費之一，原本波音還在考慮開發一型全新的客機來取代737，但是A320Neo在2014年就要開始交貨，重新開發新機型顯然會讓空客獨霸單通道幹線客機這個重要的利基很多年；一旦波音的傳統客戶跳槽，因為駕駛員人機界面和維修系統的慣性，就會連帶把利潤更高的雙通道主線客機生意也帶走，這將成為徹徹底底的商業災難，於是波音不得不緊急啟動737Max的升級計劃，硬是在2017年就開始交貨，只比A320Neo晚了3年，而且還必須和空客一樣，不要求駕駛員做昂貴費時的新訓練。

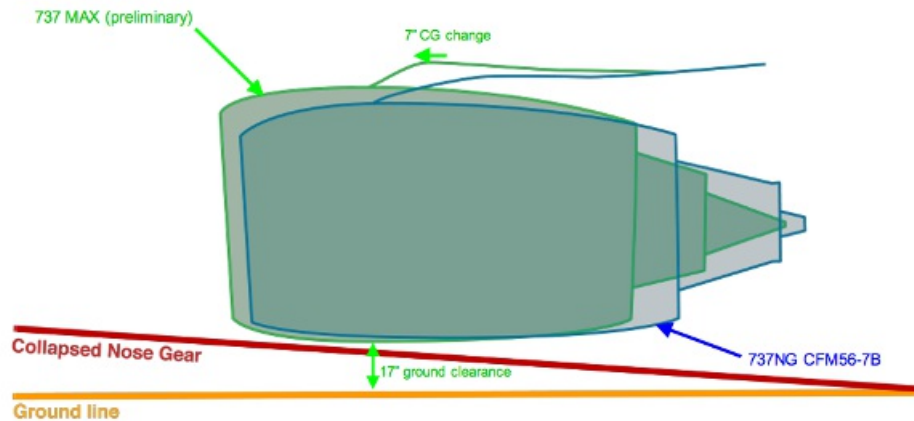
為了趕工，波音安排讓FAA（Federal Aviation Administration，聯邦航空管理局）將認證的工作交由自己代為處理。這種官商水乳交融的“自我監管”（Self-regulation）是1980年代Reagan政權起就特別強調的政治原理，其目的是在不公開直接解除政府監管表象的前提下，仍然在實際上給予財團遠遠更大的自由，而其手段則是一方面鼓勵公務員與財團高管之間的旋轉門，另一方面是削減預算，使得即使有心辦事的官員也沒有人力財力來執行任務。這個趨勢，在共和黨執政期間特別明顯，經歷Reagan、小Bush和Trump三任挖牆腳的不懈努力，美國在20世紀前70年所建立的廉潔高效官僚體制早已名存實亡。

然而在技術上，737源自60年代的原始設計過於古老，其實無法與80年代設計的空客A320平等競爭，於是犧牲基本的安全性成了必然的結果。這其中最重要的技術問題有兩項：首先（第二項是飛控，見下文），737的機翼很低，但是過去50多年來，每一代新渦扇發動機都增高了涵道比（Bypass Ratio）以追求更大的推力和更高的燃油效率，所以也就越來越粗胖。從上一代的737NG開始，機翼下已經沒有足夠的空間來吊挂發動機，於是一方面要求發動機製造商强行削平下緣，另一方面將發動機艙（Engine Nacelle）向前上方挪移。737Max為了使用更大的LEAP發動機，更是必須超越原始設計的安全極限，埋下了後來事故的伏筆。

LEAP engine installation meets existing standards

737 MAX relative to 737NG

Although the Leap-1B is larger than the CFM-56, its engine installation on the 737 MAX will achieve the same geometric objectives for ground clearance as are achieved on the 737NG



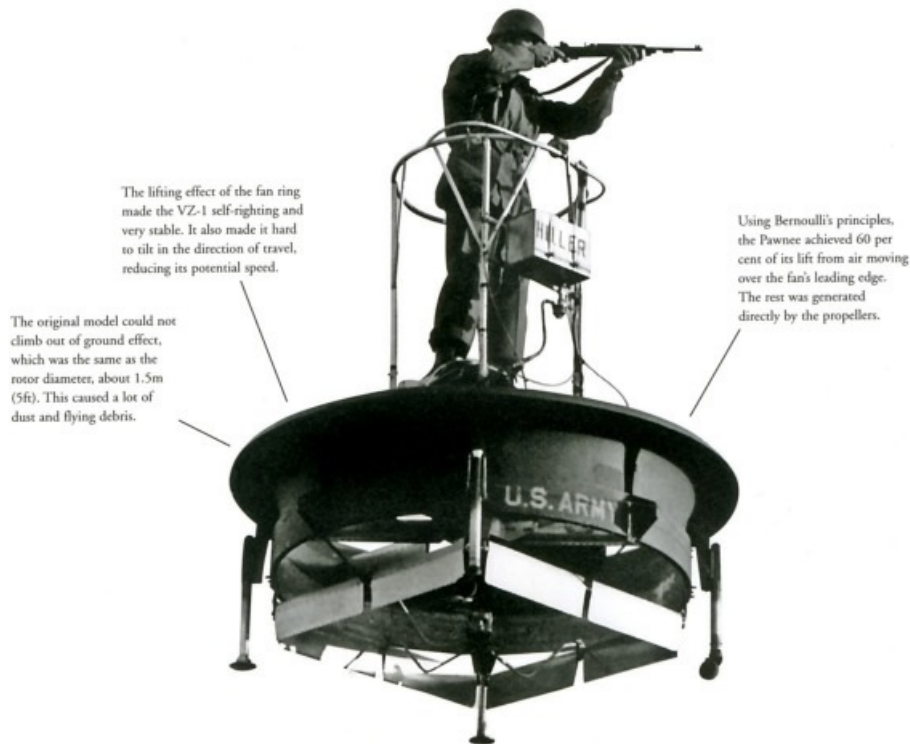
Copyright © 2012 Boeing. All rights reserved.

上圖是737Max的LEAP發動機和上一代737NG的CFM-56安裝位置的對比，可以明顯看出LEAP不但更靠前上方，而且發動機艙也更大。其實爲了保證發動機艙下緣與地面有17英寸（43公分）的距離，波音已經要求LEAP的製造商（CFM）特別以燃油效率為代價，縮小發動機直徑，所以波音特供的LEAP-1B比A320和C919所用的版本都要小一圈。至於LEAP-1B的另一個特徵：後緣的三角形鋸齒，那是爲了打破紊流、減低噪音的設計，是波音的專利。

這個問題牽涉到比較精微的空氣動力學，所以我在此詳細討論一下。很多新聞報導基於波音自己發表的一篇簡介，說737Max採用MCAS是爲了補償發動機前移所造成的額外上揚力矩，這也成爲很多網絡評論的基礎；但是專業知識比較強的作者，例如服務於航空業的張仲麟和有工程背景的晨楓，都指出把發動機向前上方移動，應該使推力軸線更接近阻力中心，所以照理說是會減低而不是增加上揚力矩。那麼波音爲什麼那麼說呢？

其實波音那個簡介的基本敘述是正確的，不過沒有把細節說清楚（可能是故意不說清楚，參見下文）。這裏的額外上揚力矩並不發生於平飛的時候，也不直接來自發動機本身的推力，而是非綫性空氣動力學的後果。發動機艙爲了減低阻力、增加空氣流量，外環的剖面形狀其實很像機翼，只是必須捲成圓形。所以飛行的時候，發動機艙外環也產生“升力”，但是它不是全部向上，而是與外環面垂直向內，於是在平飛狀態下，這些升力互相抵消，沒有實際影響。

但是在爬升階段，飛機處於大迎角（Angle of Attack，又譯爲攻角）和全油門（Full Throttle）狀態，這時氣流主要作用於發動機艙外環的下緣，總升力就是向上了。這個升力因爲有發動機抽取氣流的影響，額外強大。同樣的效應使得把發動機緊靠在機翼上緣成爲增升的極端手段之一，例如強調短距起降性能的Antonov An-72。而發動機艙外環產生意外升力以至飛行器研發失敗，也早有前例，對歷史有興趣的讀者可以搜索Hiller VZ-1 Pawnee。



VZ-1 Pawnee是Hiller Aircraft為美國陸軍設計研究的單兵飛行平臺，1955年首飛。原本設計師希望由乘員傾斜身體來改變飛行方向，結果實驗發現發動機艙外環的升力效應比預期的要強，傾斜之後，那個方向的升力就大幅增加，把平臺又推回平穩懸停狀態。一個無法很好控制如何前進後退的飛行平臺，當然是沒有用處的，所以這個計劃就被放棄了。換句話說，由於發動機艙外環升力與重心的相對位置，VZ-1 Pawnee獲得過強的靜穩定性；這一點與737Max相反。

737Max的新LEAP發動機前移之後，這個來自發動機艙外環下緣的氣動升力就會產生上揚力矩。LEAP的外環粗大、進氣量高，都使得力矩更強。更糟糕的是這個力矩隨迎角增加而有非線性的快速增大，所以一旦它開始讓飛機上揚，就會有失控性的不穩定（Runaway Instability，或者Divergence）。換句話說，737Max在俯仰軸向（Pitch）沒有完全的靜穩定性（Static Stability）。

靜不穩定性是自F16之後，現代高性能戰機的特性之一。它使得飛機極為靈活，但是因為飛機在極短時間內就可能失控，駕駛員無論如何不可能用手控來維持安全飛行，所以靜不穩定性設計的前提是電傳飛控，也就是電腦全自動控制，在不穩定性隨機發生的幾毫秒內就自行主動更正。然而737不像空客A320，並沒有電傳飛控，仍然用的是機械液壓；這也就是前面提到的，737的原始設計過於古老，兩個最重要技術問題中的第二項。

但是波音公司的商業前途，在此一舉，工程師面臨再怎樣的困難，也只能蠻幹硬上，靠打補丁來彌補，MCAS就是強加在機械液壓飛控之上的一個電傳補丁。它並不是為了預防像法航447號空難那樣在巡航過程中因為副駕駛腦子抽風、拼命拉桿、人為導致失速，而是彌補飛行包綫邊緣的一個靜不穩定區間的必要程序，所以它被設計成在起飛階段特別敏感（我的猜測），而且優先級別高過駕駛員。如果我們理解它其實被波音工程師視為簡易版的電傳飛控而不僅僅是一個安全警告裝置，就能明白為什麼駕駛員不能否決它的決定，這是因為所有電傳飛控系統原本就都有最終決定權。

那麼波音工程師實際上所犯的錯誤，就只有一點，亦即允許迎角探測器成為單點故障來源（Single Point of Failure）。但是靜不穩定性是一個很基本、很巨大的危險，如果一兩個迎角探測器有了誤讀，也不能簡單把MCAS關閉。真正的最佳解決方案，是重新設計機翼，但是波音沒

有這個時間。最佳的解決辦法，是改用完整的電傳飛控，這還是需要太久。最起碼應該用到三個以上的迎角探測器，如此一來可以容許其中一個出毛病。但是波音似乎是到設計過程的末端才注意到靜不穩定性的問題，MCAS是緊急搞出來的Band-Aid（創可貼），而737原本只有兩個迎角探測器，要臨時再加一個已經來不及。兩個讀數如果不一致，MCAS也不可能確定哪一個才是正確的，那麼反而不如始終只取其中一個讀數，出錯的機率只有一半，這也就是既有的MCAS只採用兩個迎角探測器中的一個讀數來做決定的原因。

但是迎角探測器最終會在使用過程中出錯是必然的。實際做設計工作的波音工程師也必然瞭解這一點，而公司最高層卻似乎不明白這個設計決定冒了多大的險。這一般是組織的內部文化腐敗到某種程度之後，中高層管理人員欺上瞞下成了慣例，才會出這麼大的紕漏。波音在過去十幾年裏，為美國空軍設計新一代加油機KC-46的過程中，磕磕絆絆，一再犯下許多低級錯誤，完全沒有上個世紀的精幹形象，看來不是偶然的。

中國民航局這次率先停飛737Max，固然是有膽識的正確決定，也暴露了FAA袒護本國商家的內幕，但是737Max對波音的生意太過重要，即使真相逐步揭露，波音仍然必須儘快止損，恢復交機。而重新設計新機型、新機翼、或者新飛控依舊會拖延太久，只有修改MCAS的邏輯程序，頂多加上第三個迎角探測器，是可以在幾個月或一年多內搞定的。所以波音現在的策略必然是謙卑地承認MCAS的缺陷，然後啟動所有的公關資源，把公眾的注意力集中到MCAS的改進上。但是真正的問題重點，也就是737Max在空氣動力學上的靜不穩定性，在過去FAA認證的過程中，被波音瞞天過海了。對現在的波音來說，賠償、指責、調查、聲譽損失都是小事，它最怕的是歐洲或中國的民航管理機構重新進行獨立、完整的認證過程，那麼一旦靜不穩定性被發現，新機翼和新飛控就無法推辭，這一拖延下來，少則七年、多則十幾年，波音在單通道幹線客機市場基本無法提供有競爭力的產品。

中國民航局似乎並沒有看透波音的底牌，對自身是否能夠或應該獨立啟動對737Max的重新認證還有疑慮。FAA為了保護波音，甚至已經邀請中方參與合作，共同檢查新版的MCAS（參見https://www.guancha.cn/politics/2019_04_06_496576.shtml），這是魔術師聲東擊西的伎倆，目的在於遮掩真正的問題所在。我希望藉著這篇文章，提醒民航局，為了全球乘客的安全，並且提供C919一個公平的競爭環境，對737Max進行獨立認證才是正確的選擇。

【後註一】今天（2019年六月1日）《紐約時報》刊登了一篇有關MCAS在737Max設計過程中如何演化的歷史（參見<https://www.nytimes.com/2019/06/01/business/boeing-737-max-crash.html>），主要依靠採訪當時Boeing的首席試飛員來提供內幕。整篇文章包含許多細節，最重要的有三點：1）MCAS原本觸發的門檻非常高，後來逐步改變到只由單個攻角傳感器決定；2）Boeing和FAA從來沒有考慮或測試過False Positive（偽陽性）的可能；3）MCAS適用性變廣，主要發生在737Max研發的最後一年。因為趕時間，所以Boeing特意對FAA和試飛員都隱瞞了詳情。

很可惜這篇文章仍然沒有觸及整個737Max問題的核心，也就是為什麼Boeing要冒著極大的技術風險，並且瞞著所有的外圍人員，也硬要增廣MCAS的適用範圍。當然我在正文中已經解釋了真正的問題所在，也就是Boeing在737Max研發周期的最後，才發現飛行包線的邊緣有一個靜不穩定的區間，所以不得不拉著MCAS硬上，並且儘所有力量也要隱瞞這個事實，一直到今天依舊如此。

【後註二】我在正文解釋過，因為新引擎的位置、大小和進氣量的變化，而導致737 Max在爬升狀態有了靜不穩定性，這才是Boeing最怕大家發現的事實，所以一切公關都拼命想把公眾的注意力集中到軟件上。很不幸的，連EASA拒絕快速批准737重飛的公告，都似乎中了Boeing的計，只討論MCAS的適飛性。

今天（2019年六月5日）終於看到美國知名的消費者權利運動家（Consumer Rights

Advocate) Ralph Nader公開質疑737 Max的氣動設計。他因為不是物理系出身，並沒有像我在正文裏那樣詳細解釋了氣動力學的作用機制，但是如果讀者去看他的評論（參見<https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-06-04/nader-says-boeing-737-max-is-flawed-and-should-never-fly-again>）應該可以看出他說的是同一件事。

我猜測是有Boeing的工程師，因為良心驅使，偷偷地和Nader聯係，並且解釋了細節。

【後註三】我終於看到一則在2019年十二月29日發表的德國視頻（參見<https://www.youtube.com/watch?v=PlaMQBEg-9M&list=WL&index=9&t=1822s>），正確地描述了本文中的氣動細節。這是我第一次看到歐洲有人對737Max事件做出完整的工程分析，代表著European Aviation Safety Agency（EASA）不會被波音的障眼法欺瞞，以為修改軟件就可以解決問題。換句話說，737Max應該無法很快通過EASA的認證，那麼它被強迫淘汰就成為真正的可能。

12 条留言

筒子

2019-04-08 09:10:00

寫得非常精彩，稍微補充個人看法。通常組織文化中，大公司遇到競爭激烈而導致無法生存時，它的CEO及高層就會有由營業或行銷出身的人掛帥，這時，技術就站到一旁。波音一直用的老機型，在不用開發新機型下，有利可圖，且舊機型在營運業者可省去大量的新機飛航訓練成本，如模擬機(Simulator)教材都可以一本用幾十年，甚至轉至其他機種也花很少時訓練。當然，美國雷根時代有名的開放天空政策(Open Sky Policy)也造成極大的影響。總之，它不是單一的偶然，是一個包括國會、華爾街金融及軍工業長期合作的必然，是大國製造業即將全面衰退的開始。中國應黨利用此一機遇，穩步向前，但飛安必須特別注意。前期的ceo不可用行銷或業務出身的，以避免在機械、電子等工程方面，為了省錢而打折扣。

“

當然會有特例，但是的確MBA出身的經理容易落入追尋快錢的陷阱。

!@#%\$^&*()_+

2019-04-08 15:13:00

。我是MBA。我說737是公司的超級印鈔機。售價不變的情況下，減少一片翅膀可以增加1000萬美元利潤。我就叫工程師給我設計一個沒有翅膀的737。工程師會聽話嗎？他們會把我剝皮然後丟到西雅圖動物園餵猴子。有些不會死人但是很王八蛋的決定是文科白痴做的。低到這個程度的錯誤絕對是工程師從上到下全部都該槍斃的問題。大家都知道，美國從二、三十年前就是靠亞洲人撐理工。以前是日本、中國、印度。後來日本人越來越少。中國人也是學成就當海龜。最不可能離開的就是印度人。會不會他們把大部分有權接觸機密的老工程師送去武器部門，留下那些拿綠卡、剛得到護照的人在民航部門？如果單位裡很多人是印度人，老資格的白人工程師也會想換單位。可是印度人往往沒有整體觀。搞成這麼低級，絕不可能是MBA的錯。唯一的可能就是整個決策-執行鏈都被印度人吃下去了。所以737後期型號的問題很可能不只這個。很可能是很多地方大錯特錯到底。但並不是每個錯誤都會死人。所以被忽略了。

“

要是工程師敢把白癡經理丟到動物園喂猴子，公司就還不算腐敗。我認為波音工程師絕對是提出了抗議，但是經理向項目總管反應之後，總管為了如期完工、向最高層交差，硬是把問題壓下去，要求只做簡單的補丁。不過這只是邏輯猜測，沒有證據，不能寫入正文。至於印度人的事，更加沒有事實證據的支持，連留言討論都不合適，因為它徒然引發/增強偏見。

有些文字方面的小建議，王兄請酌。靜穩定性（Static Stability） - - 如果不是正式公認的中文譯名，建議改為"靜態穩性"（只有靜字，容易誤解成聲音方面的用詞。改後亦似乎較符合中文語感）。靜不穩定性 - - 同上，建議改為"靜態失穩"（尤其"失"字很有用，因為暗示原來應該是穩定的，但會在難以預料的情況下，突然失去穩定）。

“

我寫的這些詞匯的確是常見的中文翻譯。因為靜不穩定性對現代戰機很重要，軍迷應該都知道。

南山臥蟲

2019-04-09 18:55:00

看了最新的消息：https://www.guancha.cn/industry-science/2019_04_09_496972.shtml 中国民航局：将参与波音737MAX安全评估
https://www.guancha.cn/politics/2019_04_09_496958.shtml 中飞租赁否认暂停100架波音737MAX订单：没更改计划 首先，同意王兄所述，中國發起停飛，是比過去不出頭的政策主動了很多多多了，效果亦極佳。其次，中國似乎並不想在此問題上，一下子就弄死美國 - - 不然，有一百種方法把事情鬧得不可收拾。現在，中國多了這個"意外"而得的籌碼，看來貿易戰和工業2025，應可穩操勝券了 - - 起碼可以拖得起，能拖，中國就是贏了。

“

我的猜測是，中級官員沒有把事情想通，自行做了決定。中方的政治思維文化不包括詭詐，所以沒有拿這件事來和貿易戰混為一談。否則以Trump的目光短淺，如果不先殺個下馬威，他根本不懂這事有什麼後果。肉食者鄙，未能遠謀，我的建議沒有來得及阻止他們上當，自然有些可惜，不過不在其位，不謀其政，我已經盡力了，無愧於心。

tobin

2019-04-10 03:22:00

不太理解您文中提到的：次佳的解决方案是电传控制。如果迎角感应器出了问题，单纯只是电传控制如何能解决？

“

波音737傳統上只有兩個迎角傳感器，就是因為沒有電傳，讀數純屬人眼的參考，錯了也沒有關係。完整的電傳，自然包括可靠的傳感讀數，系統的冗餘性要求高一大截。

阿拉私家零治靈

2019-04-11 10:29:00

從麥道DC-10,MD-11的LSAS到波音的737max MCAS，這負穩定民航機裡面的水很深卻引人入勝，王博士不仿再寫篇MD LSAS與Boeing MCAS 一脈相承的文章，畢竟波音收購了麥道及其設計團隊。

“

MD-11的氣動問題不一樣，還不到靜不穩定的地步，叫做Relaxed Stability（寬鬆穩定？），也就是會在一定範圍內有震蕩波動，但是不會Runaway。類似之處在於也是用軟件來彌補氣動缺失，結果自然是發現軟件總會有Bug。

小子心 —— 四平圖無限，方寸環空間

2019-04-16 10:53:00

<https://www.youtube.com/watch?v=H2tuKiiznsY>（如果有興趣，更可以看鏈接的其他相關YouTube影片）看了這部影片大致可以了解波音為何如此急切地推出737 MAX系列俾與空客的A320 Neo搶奪市場的優勢！在影片中清楚地看出其 1）為了改用較有效率的發動機而兀自擡升原掛載角度與高度；2）為了屈就因此造成的起飛爬升角度顧慮，卻又在MCAS軟體上令電腦輔助駕駛機長的人為操控；3）而對於這些改變，波音居然只是對原737機長僅施予iPad的操作訓練！（難道因為反正都是看畫面瞧鍵盤而已？！）這些改動使得原以為該拉大仰角爬升的機長卻被電腦輔助駕駛摠下頭，於是機長手控重新調高；而因為電腦設計優先的設計，結果機頭又被壓下。如此在最緊要的爬升時刻卻一再反復——以致原非常熟悉737機長無從以固有操作方式應付這種完全反常狀況，乃至於造成最近連續的空難。如今波音只強調修正電腦輔助的程序，完全避開未來

仍可能發生仰角問題的癥結。這種『鋸箭式』厚黑招數，小子只希望未來不須“被逼”得搭乘737 MAX機群！

“

我也看到了。他們除了不懂空氣動力學的細節之外，其他重要的相關事實都討論了。

無知者，無畏

2019-04-16 18:09:00

其實波音的這種決定是整個西方的商業文化 其實從王兄的文中可以看出，波音這次737Max空難的主因是他們試圖用舊皮囊裝新酒。我曾在美國軟件公司工作多年，他們有一個貌似先進的理念，什麼東西都試圖做出一個平台，然後其他東西都往這個平台上放。用我原老闆的話來說，就是要做成公用平台來滿足絕大多數客人的需求。在產品和硬件（基礎設施等）方面也不例外，一旦投資下去，就要榨取到最後一個銅板的收益機會，而不管它的風險有多大，他們的電網，水管，氣管，通訊網絡等等，都是這個理念。產品方面，波音這次只是一個例子，不得不用一個幾十年前的舊皮囊來裝leap動力這款新酒，公司預算，市場需求，外部競爭固然是一個動因，基本原因還是他們的這種“凡事用到盡”的商業文化。我早就在預料，以後更加嚴重的，會是F35，網友戲稱“肥電”，這個東西搞了幾十年，不同的需求越來越多，海軍，空軍，陸軍，海軍陸戰隊等，都使用它，整個飛機，一改再改，最終變成一隻蛤蟆。不信？等著瞧！

“

這是自由市場下資本家追求最大利潤的最優解，其代價當然是社會成本。不過在絕對自由市場的許多缺陷之中，還有很多更大的毛病。

狐禪

2019-04-23 14:33:00

中國的技術官員都被描述成「宵旰憂勤」之輩，而少「洞燭機先」者（至少上枱面的不多）。這是制定政策(戰略)時的缺陷。

“

你說到中共官僚選拔體系的問題核心了，也就是太過專注於是否勤政，而忽視了智慧和忠誠。習近平有心改，但是很難。

大一統理論

2019-05-08 13:02:00

請問王博是有什麼看法？為什麼郭台銘想要參選總統，他希望達成什麼目標

“

這個問題不適合在這裏討論，應該發在有關臺灣政局的文章下。我覺得他和Trump見面多了，受到啓發，覺得可以同樣名、利、權、氣一概兼收。

乌鹊南飞

2021-04-06 16:09:00

EASA已批准737max复飞，却并未提及气动外形的修改。只要求了软件更新和部管道更改，所谓的第三个传感器也是用软件方式代替。中国民航局虽未跟着复飞，但声明似乎也未显示对该机静不稳定的不安。

“

這一方面是因為政治壓力，很難出頭得罪美國，另一方面，“據說”A320 neo也有類似的問題，只不過沒那麼嚴重，在軟件的邏輯上也相對合理謹慎。有關A320 neo的氣動不穩定性問題，我原本不想提，因為沒有確證；剛好你問了，這是絕對關鍵的事項，只好讓它曝光，不過大家要理解此事的不確定性。737Max的氣動不穩定性是波音自己招認的（參見本文的續篇）；我懷疑是工程師不滿MBA主管反復撒謊、毀了公司，欺負後者不懂技術，偷偷夾帶入公關稿的。這種事當然可一不可再，我們拿不到空客的技術機密是很自然的。

乌鹊南飞

2021-04-07 13:05:00

a320neo也是在老机体上换新发动机，出现类似的问题也不意外，您觉得是否可以因此倒推出欧洲公司同样受到美式MBA的影响？

“

不能。A320比737晚了20年上市，一開始便是全電傳飛控，原本飛行員的操縱就只供飛控系統參考而已。

[返回索引页](#)