



作者：徐業良(2003-09-15)；推薦：徐業良(2003-09-15)。

附註：本文發表於汽車購買指南雜誌，2003 年九月號，史丹福專欄。

從引擎平順性談完美平衡的引擎結構—V12 引擎

內燃機式汽車引擎是一項已經發展百餘年，非常成熟的科技。您如果翻翻內燃機引擎的教科書，會發現一百多年來，汽車工程師嘗試了各種各樣有趣而迷人的設計，目的不外乎提升引擎的動力性能、省油效率，減低廢氣排放。

除此之外，另外一項汽車工程師致力改善的，也是您，駕駛人，對汽車引擎立即的感受—提升引擎運轉的細緻度(refinement)或者說平順性(smoothness)，簡單的說，就是希望引擎運轉能夠十分順暢，完全沒有振動或噪音。當然除了駕駛人主觀的感受之外，安靜、平順的引擎在高轉速，甚至超越紅線轉速時仍能平順運轉，產生更大動力輸出，對引擎性能的提升也有重大幫助。

引擎的平順性幾乎完全取決於先天因素，也就是引擎設計的基本架構，像是汽缸的數目，這些汽缸空間上如何安排（直線式，V 型，還是水平對臥式）。當然也可以用各種補強的技術手法來吸收引擎部分振動和噪音，使用低摩擦零件也可以進一步提升平順性和安靜性，但是引擎架構的先天因素幾乎已經決定了一切。

您知道內燃機式汽車引擎曾經有哪些不同的架構嗎？數一數給您聽：直線二缸引擎、直線三缸引擎、直線四缸引擎、水平對臥四缸引擎、直線五缸引擎、直線六缸引擎、V6 引擎、V8 引擎、W8 引擎、V10 引擎、V12 引擎、W12 引擎、W16 引擎…隨便數數就有十幾種，還有沒被數到的引擎架構的話，就真的得原諒我才疏學淺了。

1. 動力輸出的連貫性與振動問題是影響引擎平順性的兩項因素

影響引擎平順性有兩個主要因素，一是動力輸出的連貫性，另外則是引擎振動的問題。V12 引擎雖然是這篇文章的主角，但是要瞭解為什麼 V12 是內燃機引擎是最完美平衡的引擎結構，還是得要拉拉雜雜細說從頭，從最基本的理論談起。

內燃機引擎是由活塞在汽缸內往復運動，經由連桿帶動曲柄軸將動力輸出。您一定瞭解內燃機引擎有進氣、壓縮、動力、排氣四個衝程，只有動力衝程產生正向動力，而進氣衝程，排氣衝程，衝程都只消耗能量，特別是壓縮衝程消耗能量最多。四衝程引擎活塞要在汽缸內往復兩次，才能完成這四個衝程，也就是說，曲柄軸要旋轉兩圈 720 度才點火一次，有一次動力輸出。

因此如果引擎只有一個汽缸（像是一些機車引擎），引擎的動力輸出是一個週期性的脈衝，動力輸出完全不連貫，自然也很不平順，這時候便必須加上一個很重的飛輪，利用其慣性來暫時儲存、釋放引擎輸出的動能，使引擎能大約維持在一個定速運轉。當然，要完全消除這種脈衝式的引擎動力輸出，理論上飛輪得要越大、越重，動力輸出才會越平順，但過大的飛輪也同時使引擎反應變慢。

解決這個問題的答案，您早就知道了一我們需要多汽缸引擎。簡單的數學：單汽缸引擎每轉兩圈才點火一次，二汽缸引擎每轉一圈便有汽缸點火一次產生動力，三汽缸引擎每轉 $720/3=240$ 度有汽缸點火一次，四汽缸引擎每轉 $720/4=180$ 度（半圈）有汽缸點火一次，...12 汽缸引擎曲柄每轉 $720/12=60$ 度便有汽缸點火一次。顯然的，引擎汽缸數越多，動力輸出越能連貫。

引擎振動的問題解釋起來比較複雜一些，這裡還是從單汽缸引擎開始想像。引擎振動是由其內部元件的運動所引起的，主要當然是活塞和連接桿。活塞在汽缸中上下運動，如果引擎沒有被固定起來的話，一定也會向卡通影片常見的情節，上上下下到處亂跳，振動的問題會十分嚴重。而活塞連接桿的運動方向不只是上下，還帶著點兒橫向運動，所以引擎運轉時也會有橫向的振動。只是和活塞比較起來，連接桿輕得多，因此連接桿左右移動造成的振動，比起活塞上下移動造成的振動要小得多。

引擎振動帶來的噪音和不舒適感，自然是汽車工程師亟欲解決的問題。解決的方法，當然還是可以額外加入各種平衡軸來平衡振動，但是根本之道，還是要回到引擎架構的先天因素，利用多汽缸設計讓各汽缸活塞，連桿的運動巧妙地互相平衡。

多汽缸引擎運動的情況實在太複雜，我們最好一個一個來討論。

2. 直線多汽缸引擎振動的平衡

咱們一步不要跨太大，先從直線二缸引擎開始談起。

前面提到，直線二汽缸引擎曲柄軸每轉二圈，兩個汽缸輪流各點火一次，為了讓動力輸出比較連貫，一個汽缸進行進氣、壓縮衝程時，另一個汽缸同步進行動力、排氣衝程，而這兩個引擎活塞移動的方向和位置都一模一樣。

麻煩大了，這個意思是說，直線二汽缸引擎兩個活塞的運動不但沒有互相抵銷，反而同步動作，整體的振動幅度，會比單一的汽缸產生的振動還要大兩倍。因此就引擎精緻度來說，直線二汽缸是最差的引擎架構。過去雖然曾經有最便宜的迷你小車採用過這樣的引擎架構，像是飛雅特 128，本田入門及的小車 Today 等，但現代早已沒有任何量產汽車採用二汽缸引擎了，即使是目前排氣量最小的日本 K-Cars，660cc 的引擎排氣量理論上來說比較適合安排成二汽缸，但是他們仍使用三汽缸甚至四汽缸來避免二汽缸造成的嚴重振動問題。

直線三汽缸引擎的架構便開始能從先天重心的配置上解決引擎振動的問題了。直線三汽缸引擎曲柄軸每轉每轉二圈，三個汽缸輪流各點火一次，動力輸出要連貫的話，曲柄軸經過巧妙設計，讓三個汽缸的活塞隨時都在相距 $1/3$ 個衝程的位置，這樣的安排也使得不管曲柄軸旋轉到那個位置，三個活塞和連接桿合成起來的重心，始終維持在同樣的垂直位置，所以引擎垂直方向不會有任何振動產生。

不過直線三汽缸引擎中三個汽缸是一字排開，三個活塞上下運動是各自施力作用在曲柄軸三個不同的位置，因此實際上三個力並沒有彼此抵銷。想像曲柄軸是一支蹺蹺板，以第二個汽缸為中心固定住，兩端不斷被第一個汽缸和第三個汽缸的活塞輪流施力，曲柄軸便會像蹺蹺板一樣上上下下回來回振動。因此直線三汽缸引擎仍然需要一個由曲柄軸驅動的平衡軸來平衡振動，平衡軸兩端各有一個配重，配重移動的方向和兩端汽缸的活塞移動方向相反，活塞向上升、配重便向下降，活塞向下降、配重便向上升，如此一來曲柄軸蹺蹺板便不會上下振動了。

直線四缸引擎對振動的抑制又更高明一些。引擎教科書也可以找到四汽缸引擎振動的數學分析，簡單的說，四汽缸引擎曲柄軸每轉每 $720/4=180$ 度便輪到一個汽缸點火，在每一個瞬間，四個汽缸正好分別在進行四個不同的衝程。因此四個汽缸活塞中，有兩個活塞是一組，運轉過程中在完全一樣的位置，向完全一樣的方向移動，另外兩個活塞則是另一組，位置和運動方向和前一組恰恰相反。

這兩組活塞要怎麼安排，才能有最好的平衡振動效果呢？把這一字排開的四個活塞分別取名字叫做一號、二號、三號、四號的話，為了避免前面提到直線三汽缸引擎曲柄軸振動問題，最好的安排是以中央對稱，也就是一號和四號一組，二號和三號一組，如此一號的活塞對曲柄軸的施力會被四號活塞平衡，二號活塞則會被三號活塞平衡。

不曉得您頭昏了沒有。

前面提到的振動平衡，是所謂「一階力(first order force)」平衡。但是活塞向上運動和向下運動時對曲柄軸的施力不完全相同，所以一號活塞和四號活塞、二號活塞和三號活塞對曲柄軸的施力實際上沒有完全互相抵銷，沒有抵銷剩下的力就叫做「二階力(second order force)」。二階力自然比一階力小得多，但頻率是一階力的兩倍，特別是較大的引擎二階力還是會造成明顯的振動，無法被忽略，因此大型的直線四缸還是需要用平衡桿的配重來抑制引擎振動。直線四缸引擎為了平衡二階力，需要一對由引擎驅動的平衡軸，兩支平衡軸分別位於引擎兩側，旋轉方向正好相反，且轉速是曲柄軸的兩倍，平衡軸上的配重會完全抵銷二階力，讓引擎運轉平順。

這會兒您真的頭昏了。

一般來說，汽車製造廠最喜歡直線四缸引擎，因為其製造成本低，尺寸又小。而直線四缸引擎汽缸行程越長、活塞連接桿越重，前面提到的二階力也就越大，越需要加裝平衡軸。直線四缸引擎的平衡軸是由英國汽車工程大師 Lanchester 博士在二十世紀初就發明了，後來日本三菱汽車廠取得專利，1976 年首次用在量產汽車上。隨後 turbo 引擎風起，飛雅特、紳寶、乃至保時捷都紛紛從三菱取得專利授權，將平衡軸裝置在其強力的直線四缸引擎上。從 80 年代開始，汽車廠對於引擎精緻性的標準是，排氣量超過 2000cc 的直線四缸引擎，都必須加裝雙平衡軸(twin-balancer shafts)來減少振動。沒有這種雙平衡軸，保時捷絕對不可能做出 944 和 968 上的 3.0 升強力直線四缸引擎，這也是現代汽車最大的四缸引擎。

五缸引擎不那麼常見，談完直線四缸引擎，這裡直接跳到直線六缸引擎。前面談過三汽缸引擎的架構，直線六缸引擎的配置，則是將兩組三汽缸左右對稱地組合在一起，活塞一二三、活塞四五六自成兩組三汽缸自我平衡系統，而活塞一永遠和活塞六在同樣位置、活塞二和活塞五在同樣位置、活塞三永遠和活塞四在同樣位置，曲柄軸蹺蹺板式的振動，也可以得到平衡。

總而言之，直線六缸引擎不論是垂直力或橫向力，或者作用在曲柄軸上的一階力或二階力，都完全平衡，引擎總振動接近零，基本上是一個完美平衡的引擎架構。除了直線六缸引擎外，其他還有幾種引擎架構也可以達成同樣的完美平衡，但是直線六缸引擎是外型尺寸最小的一種。汽車工程師很早已前便瞭解直線六缸引擎的優美，也因此您看到許多最好的古典汽車引擎，像是勞斯萊斯，朋馳，積架，BMW 的引擎，都是直線六缸的架構。

3. V型引擎架構

直線六缸引擎雖然有完美的平衡架構，但最大的缺點是，六個汽缸排成一直線，實在是太長了，特別是前輪驅動車還得騰出空間容納傳動系統，直線六缸引擎不管是直的擺還是橫的擺，引擎室內的空間配置都非常困難。比較起來 V6 引擎的空間利用效率就好得多，橫置的 V6 引擎體積小又方正，很容易塞進前輪驅動車的引擎室中，因此頗受車廠喜愛。V6 引擎基本上是兩組三汽缸以 60 度或 90 度面對面排成 V 型，兩組汽缸的活塞運動經過搭配，作用力可以互相抵銷，加上前面提到三汽缸引擎可以自我平衡，使得 V6 引擎還是有很好的平順性。

不過 V6 引擎的兩組三汽缸，仍然有前面提到曲柄軸蹺蹺板式振動的問題，還是需要加裝平衡軸來抑制振動，理論上直線六缸引擎還是比 V6 引擎平順。而且 V6 引擎的曲柄軸、進排氣閥的設計要有兩組，比直線六缸引擎複雜許多，所以像是仍然堅持後輪驅動的 BMW 車廠，就仍鍾情於直線六缸引擎。

慘了，談了這麼久，還沒有談到本文的主角 V12 引擎。趕進度，跳過 V8、V10 引擎，直接切入 V12 引擎架構。

不過其實談到這裡，V12 引擎架構在引擎精緻度和平順性上的優勢，應該已經十分明顯，您早已心神領會，不太需要詳細解釋了。

首先，V12 引擎曲柄軸每轉兩圈，12 個汽缸就輪流各點火一次，平均每 $720/12=30$ 度就有一個汽缸動力衝程輸出，動力輸出即使不用飛輪處理，也必然十分連貫、平順。再就振動的平衡來說，V12 引擎由兩組已經是完美平衡的六汽缸架構，以 60 度面對面排成 V 型，更是理論上平衡性最完美的引擎架構。

V12 引擎動力輸出強勁自不待言，精緻度、平順性也是內燃機引擎的極品。當然 V12 引擎主要的劣勢在其製造成本、重量、和尺寸，一般量產汽車自然不容易高攀。

4. 結語

內燃機引擎架構還頗有一些學問對不對？下回您看到哪部汽車的引擎是直線四缸、直線六缸、還是 V6、V12，您應該對其引擎精緻度的先天條件有更深入的认识了。

就引擎的平衡來說，水平對臥式引擎是達成平衡最簡單、有效的方式。水平對臥式引擎也稱做 Boxer 引擎，我自己毫無考據的認為，Boxer 拳擊手這個名字的來源，應該是其兩組汽缸面對面，活塞連接桿互相搭配旋轉，就好像兩個拳擊手你一拳我一拳互相對打一樣。

水平對臥式引擎不管是幾個汽缸，兩對面的汽缸活塞都永遠在相對位置、方向和速度，因此所有的力都完全平衡。就引擎振動的平衡來說，水平對臥式引擎會是最佳選擇，但是這種汽缸配置方式引擎太寬、體積太大，很難包裝起來放在引擎室裡，所以目前只有保時捷、速霸陸等幾家車廠採用。