

自行車的輕量化革命

圖、文◎潘文華

自行車科技發展始終跟「輕量化」脫不了關係，一直以來，自行車製造商無不絞盡腦汁，希望能做出重量更輕、速度更快的「戰馬」，錙銖必較的程度與航太工業相較不遑多讓！幾乎所有自行車的零組件都會標明重量（當然是用公克做單位），自行車店裡也會放個秤，讓你親眼看看零組件重量，如此斤斤計較，到底重量對自行車有些什麼樣的影響呢？

牛頓運動學定律

首先，我們來分析一下自行車運動時會面臨的情況。我們用腳踩踏板，踏板帶動曲柄，曲柄連著齒盤，齒盤帶動鏈條，就可以將人往下踩的力量，轉個方向變成讓後輪轉動，很簡單，對吧！

當後輪開始轉動，車子會開始前進，依據牛頓運動學第一定律「靜者恆靜，動者恆動」，假設沒有阻力，只要車子開始動，我們不用再踩就可以環繞地球了。當然，任何騎過車的人都知道，現實世界絕對不是如此，所以阻力一定存

在。其實，阻力就像影子，只要你移動就一定會如影隨形地跟在身旁，想盡一切辦法讓你停下來。這時，偉大的牛頓提出了運動學第二定律—想移動嗎？只要你出的力量大過阻力就可以啦！

所以，想讓車子移動，關鍵在於車子所受的阻力，阻力的大小會直接影響你的速度。那麼車子所受的阻力有哪些呢？第一個當然就是「看不見的魔掌—風阻」，再來就是地面和輪胎間的摩擦阻力，還有車子傳動系統（鏈條、齒盤、飛輪及花鼓等）內部的摩擦阻力。風阻跟有效迎風面積、前進速度及阻力係數有關。而地面和輪胎間及傳動系統內部的摩擦阻力都和所受正向力及阻力係數成正比，其中阻力係數是固定值，而大多數正向力都是由重量（車重+人重）所造成的。

摩擦阻力 = 正向力 × 阻力係數

這是在平路騎乘的狀況，不過就如同阻力，現實世界中也不可能一路平坦沒有上坡。

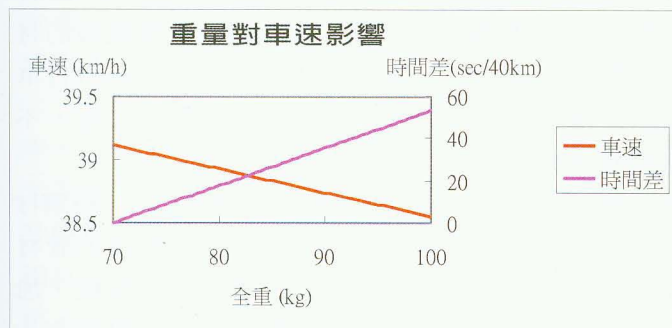
騎到上坡時，除了克服原有的阻力外，腳還要提供足夠的力量，把你「抬」到比較高的地方，就像爬山一樣，登高望遠是要付出代價的！而這代價，也與重量成正比。

上升所需能量 = 重量 × 上升高度

由此可見，要讓愛駒前進所須克服的阻力和爬坡的力量，除了風阻外，其餘都和重量成正比，所以想要騎得更快或更輕鬆，先從減輕重量著手是非常有助益的方式。那麼，要減輕多少才能看出效應呢？10克、100克還是1,000克？科學家也做了深入的學理研究。

重量與阻力關係

假設人踩的力量都一樣大，風阻與摩擦阻力係數等也都一樣，一個65公斤重的人騎相同配備只有車架重量不一樣的自行車，在平路上所能達到的速度和騎40公里（三項賽奧林匹克制的單車項目距離）後的時間差如下：



(*當然，這是假設騎40km都維持同樣速度，完全不會累的情況下，現實生活中因為身體疲勞等因素，速度多會逐漸降低，兩者的時間差會更大)

也就是說，如果騎一部UCI許可的6.8kg車，全重大約是72kg，時速可以達到39.08km/h，如果改騎相同配備但是完全沒有輕量化設計，重12kg的車，全重會超過77kg，時速就降到38.99km/h，騎完40km後，就差了8秒。

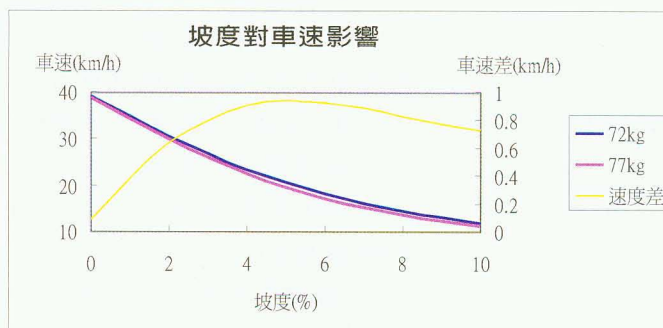
40公里騎一個多小時，差8秒算不算多呢？對一般車友而言應該可以接受，停下來喝口水喘口氣都不止8秒了！但是對於比賽選手來說，8秒差異在2004年雅典奧運三項賽單車項目，就從第一掉到第五，獎牌就飛了！（當然，一千萬高額獎金也沒了）可見重量變化對阻力的增減幅度，對於整體騎乘時間的影響有限，但在「毫秒」必爭的自行車賽中，卻是不可忽略的「輕」。

重量與爬坡關係

在平路上重量對阻力的影響僅相差幾秒，那遇到爬坡呢？之前有提到，爬坡時要多

提供力量將身體和車子「抬高」，但是一般人的力量是固定的，不像大力水手可以吃菠菜。既然無法增加力量，只好將車速降

低，一步一腳印慢慢騎上去。跟前面的例子一樣，我們先來看看用不同重量的車爬坡，會有多大的差異。



平路上兩者的速度分別是39.08 km/h、38.99 km/h，相差了0.09 km/h，騎40公里只差8秒。到了10%的爬坡時，速度就降到12.01 km/h、11.28 km/h，不到平路的三分之一，速度差也增加到0.73 km/h，騎40公里就差780秒，與平路相較，增加了近100倍。可見在爬坡時，重量造成的影響較平路更加顯著。另一方面，由計算結果可以看出，速度相差最多是在5%左右，超過這個坡

度，大家的速度都很慢，相較之下，重量造成的速度影響就沒有那麼顯著。

當然，10%的坡很少，更不用說還要連續爬40公里，三大賽事都沒有這種坡。舉個實際一點的例子，2003年環法賽第九站有個25公里長的一級爬坡（Barrage de Chambom到Col du Lautaret，約4%），如果有兩位選手實力相當，但是體重加上車重差了5kg（72kg vs. 77kg），一起從山下開始騎，在這個坡爬完後，兩人足足差了150秒，而阿姆斯特壯

(Lance

Armstrong)騎完2003年環法賽3,427.5公里後，也才贏Jan Ullrich 61秒，重量對於比賽結果的影響可見一斑。

環法賽對大家而言似乎遙遠了些，還是用大家常騎的路段來討論好了。以台灣地區最著名爬坡賽段「鐵屁股挑戰賽：埔里—武嶺」為例，從埔里台灣地理中心碑到武嶺省道最高點，約在54公里中上升2,788公尺，坡度約5.16%，前面兩位選手到武嶺時差了超過450秒！

當然，上述的計算都是理論值，真實世界中騎車是會累

的！不可能全程維持相同速度，多半會越來越慢，而且疲憊造成速度下降的幅度遠較重量影響大，所以長途騎乘後的時間差距會比上述的理論值增加許多！

重量減輕的獲益者

換個角度來看，環法賽 6 屆冠軍的美國英雄阿姆斯壯，也是減輕重量的獲益者之一。阿姆斯壯年輕時是鐵人三項運動(Triathlon)好手，因此上半身與手臂肌肉群較一般專練自行車選手發達。短程、平路賽段還好，上坡賽段就很明顯吃虧，尤其環法賽是 3 千多公里連續 20 天以上的比賽，還要越過阿爾卑斯山系和庇里牛斯山系，因此教練也一直建議他減重。罹患癌症後，他消瘦非常多，當治療結束重新開始訓練時，就完全以自行車為主，因此 1999 年復出時，可以明顯看出他身形上的改變，上半身和手臂不復往日粗壯，體重也減輕了 15 磅（約 6.8kg，跟車差不多重），就算他的實力並沒有增強，光是體重上的減輕，就讓他在 2003 年環法賽第九站的一級爬坡中，少花了 200 秒以上。沒有癌症對身心的淬鍊，就不會有偉大的 Lance Armstrong！

自行車輕量化的方式

既然重量對於自行車爬坡

有這麼大的影響，而騎乘時總是免不了遇到上坡（尤其台灣地形起伏變化大，相信車友們一定感同身受），不論選手及一般車友都在追求輕量化，那該如何達到這個目標呢？常見的方法有兩種，一種是從材料著手，一種是從造型設計方面切入。

更輕的材料

材料方面，最簡單的就是改用比以往更輕、更強的材料，因此在最講究重量與安全的航太工業中所用的材料，都紛紛被引進自行車工業中。在自行車的設計中，載重和安全強度是固定的，如果換成比重較輕的材料，就可以減輕重量，換成強度較強的材料，就可以減少材料用量，也可達到減輕重量的目的。

最早自行車是用一般鋼管（或鐵管），後來就改用強度更強的鉻鉬鋼，隨著航太工業進步，比較輕的鋁合金與比較強的鈦合金紛紛被發展出來，自行車當然馬上跟著潮流。隨後航太級碳纖維複合材料也被引進自行車界，引發一陣旋風，近年來更有廠商用鋁鈦合金與鎂（鋁鎂）合金製造自行車和零組件。

大家平常坐的飛機（波音、空中巴士），機身多是用鋁合金和鈦合金組件製成，碳纖維則常用在飛機和太空梭的機翼，鋁鈦合金最早被用在俄

製米格 29 戰機(Mig-29)，鎂合金是手提電腦和手機機殼的材料。從材料方面來看，自行車集航太與 3C 產業之大成，不愧是高科技結晶！

鉻鉬鋼的剛性較一般鋼材高，因此可以用比較薄的管材來做車架，重量自然減輕，加上剛性也較其他車架材料高，踩踏時能量傳遞較有效率。不過鉻鉬鋼比較不好加工，多半是圓形等斷面管材，設計變化比較小。

相較之下，鈦合金的強度最高，又耐腐蝕，在不考慮價格的時候，是很不錯的選擇。但由於原料價格高且加工困難，造成鈦合金車架成本不易降低，短期間仍無法成為大眾化的產品。

碳纖維複合材料的剛性最高，又可以做出各式曲面造型，是追求輕量化非常好的材料，不過由於延展性不足，且塑性變形較小，在應用上仍有些限制。

鋁（鋁鈦）合金和鎂（鋁鎂）合金都是輕金屬，所以被廣泛應用於輕量化產品（不限於自行車）。鋁合金加工容易，且近年來台灣廠商技術成熟，利用液壓成型技術做出各種變斷面管材，可以配合性能設計達到輕量化及其他特殊需求（低風阻、人體工學等）。鎂合金較輕，比剛性較鈦合金高，又可像鋁合金一樣做出變斷面管材，也是很適合輕量化的材料，不過製造成本較鋁合

金高，所以目前在自行車上的應用不如鋁合金普遍。

近年來，合金冶煉技術進步，許多單位都利用添加微量元素與不同熱處理方式等，提升傳統合金的各項性能（例如鋁鉬合金就是鋁合金加入微量鉬，再經過特殊熱處理方式製成，剛性與強度都較傳統鋁合金高），或許在不久的將來，會有更輕、更強的材料被開發出來，將自行車帶入另一個領域。

更輕的設計

至於造型設計方面，就牽涉到各自行車廠不同的設計理念，以及材料特性的問題，我們舉幾個實際的例子來說明。

巨大推出的跑車 TCR 系列，就是利用不同設計理念達到輕量化的目的。傳統跑車都是標準的 Diamond Shape，但是 TCR 採用 Compact Road 的方式，讓上管向下傾斜，並縮短了後三角及中管，所以車架用

的管材會比傳統跑車來得少，藉此達到輕量化的目的。

假設頭管到座墊，及座墊到 BB 距離相同，且用相同材料、厚度和斷面的管材，Compact Road 的車架所需之管材較少，大約比 Diamond Shape 少 8% 左右，以目前跑車車架 1,000 ~ 1,200 公克來估計，可以減輕 80 ~ 96 公克。

近來更有廠商將車架與座管，或龍頭與把手採一體成型方式製作，而不用傳統座管束環或螺絲固定方式，除增加強度外，在減輕重量上也有相當的幫助。這些都是利用新設計理念達到輕量化的實例。

另一種造型設計與材料特性結合的輕量化方式，就是台灣目前相當成熟、利用液壓成型技術製造的變斷面管材。理論上，管材能承受的負載會隨著材料剛性及管件斷面尺寸增加而提升，所以同樣材料製成的管件，斷面尺寸大的能承受較多的重量；同樣的斷面尺寸，材料剛性高的能承受較多的重量。

以下圖為例，假設 A、B 管件材料和壁厚皆相同，B 的斷面尺寸比 A 大 35%，雖然比 A 重了約 36%，但可比 A 多承

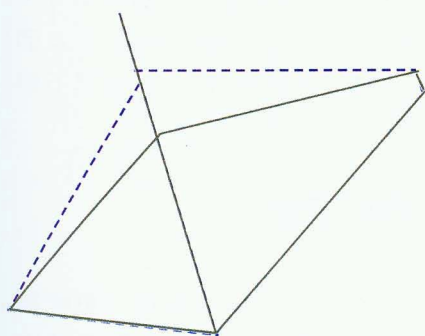
受 150% 的負載。

如果 A、B 兩者能承受的負載是一樣的，由於 B 的斷面尺寸比 A 大，所以 B 的壁厚可以比 A 減少 60%，重量輕了約 45%。如此就可以在不影響管件負載能力的情況下，減輕重量。

如果左下圖紅色 A 代表鉻鉬鋼，黑色 B 代表鋁合金，兩管件壁厚相同，雖然鋁合金材料剛性約為鉻鉬鋼的 40%，但是斷面尺寸比較大，所以兩管件能承受的負載是一樣的，而鋁合金的比重只有鉻鉬鋼的 36%，因此，B 管件的重量會較 A 減輕約 50%。

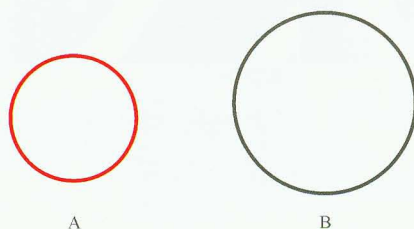
由以上的例子可以看出，只要透過適當的設計，利用改變斷面尺寸和壁厚等方式，搭配較輕的材料，可以在不影響負載能力和安全性的前提下，適度地減輕自行車組件的重量。不過採用這種方式的輕量化組件，管件斷面會比較粗大，管壁可能會較薄，搭配其他組件時可能會產生困擾或影響視覺美感。所以，隨著製造技術的進步，許多其他不同的輕量化方法也逐漸應用在自行車產業。

實際上，整支管件受力情況不一定會相同，傳統等斷面管件必須用整個管件所需最大厚度來製作，會增加一些不必要的重量。由於近年來液壓成型技術的進步，已可依照需求在同一管件上做成不同厚度或



-- : Diamond Shape

-- : Giant TCR Compact Road



A

B

斷面，只在局部地方增加厚度或改變斷面尺寸，達到所需要之負載，而不須整支管件都加粗，解決了上述問題，也實現輕量化的目標。

隨著電腦輔助模擬技術的進步，許多廠商會先計算車架或零組件應力分布狀況，再決定哪些地方可以減輕重量。由於輕量化設計很可能會影響強度與安全性，所以不可能無限減輕或隨意將車架管材變薄，只有部分現在強度超過設計需求的地方，才能減輕較多的重量。以前叉外管為例，透過電腦輔助模擬技術，可以設計 bridge 部分不同的減重孔，以及不同的外管厚度，計算出在符合測試規範下，較佳的減重方案。

以上的幾種方式，都是常用於減輕自行車組件的方法，雖然各有利弊得失，但成效卻是非常顯著！以往被視為遙不可及的輕量化目標，都逐一被打破，現在 6.8kg 以下的跑車，9.0kg 以下的登山車都成為許多車友的新戰馬。

更輕的產品

不過一般車友不太能到工廠去說「我要用這個材料，用那種斷面尺寸，做一台 Compact 的車架，配合整合式座管和龍頭」等意見。那麼，直接在市面上選購輕量化產品的時候，有什麼要注意的呢？

首先，對重量影響最大的就是車架，以及避震車的前叉和後避震系統；想要大幅減輕重量，從這幾個地方著手準沒錯！以知名大廠的產品為例，頂級的跑車車架都在 1,000 公克以內，一般多在 1,200 ~ 1,500 公克左右，超過 2,000 公克就嫌重了些。MTB 用的避震前叉，避震行程 80 ~ 100mm 的產品，重量多在 1,200 公克 ~ 2,000 公克間，原則上行程越長就會越重。至於避震車架加上後避震系統，因為各廠商不同的設計理念和不同車款，重量差異更大，從 2,000 ~ 5,000 公克不等。由於這幾項零組件重量佔全車重比例較高，且不同

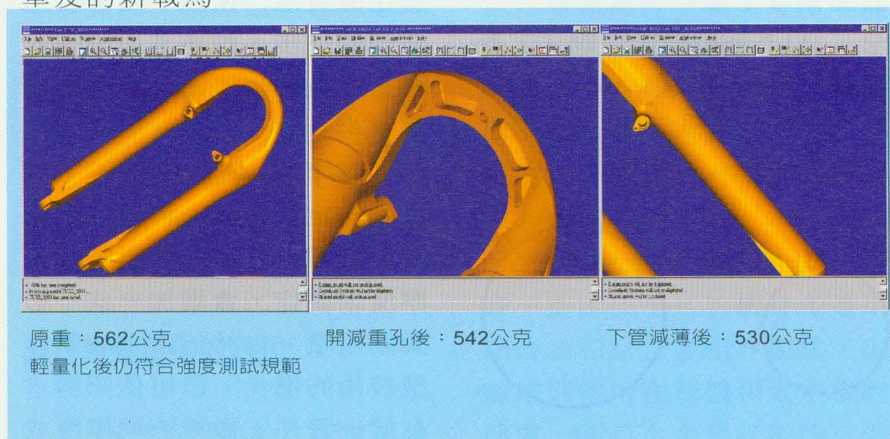
產品間重量差異也較大，如果都選用輕量化產品，能減輕的重量就非常可觀。以全避震車為例，若是用 Scott Strike Team 碳纖維後避震車架，配上 DT-Swiss SSD 的後避震器，加上 Rock Shox SID 前叉，全重不到 3,500 克，當然，所要付出的「代價」也不小。

如果從花費/效應(cost vs. benefit)來看，輕量化 MTB 的外胎應可名列前茅。外胎的重量從 400 ~ 700 公克不等，但是價格差異卻僅有幾百元台幣，多花 1 千元左右換一組輕一點的前後外胎就可以減少 4 ~ 500 公克，平均減少一公克花不到 3 元新台幣，投資報酬率比車架或前叉高許多，且對於已有愛駒，想輕量化卻又不打算大刀闊斧將愛車改頭換面的車友，換胎是非常經濟實惠的選擇。

目前自行車的各式零配件，幾乎都有輕量化產品，在基本功能上差異不大，卻可減輕不少重量（環法賽中已出現多款全重 6.8kg 以下的跑車）。至於要不要換裝，就是車友們在掏空荷包與揮汗上坡間不停地角力拔河啦！

更快、更遠

騎得更快、更遠、更輕鬆與更舒適都是騎士不斷追求的目標，輕量化只是達成這個目標的方式之一，但絕不是唯一



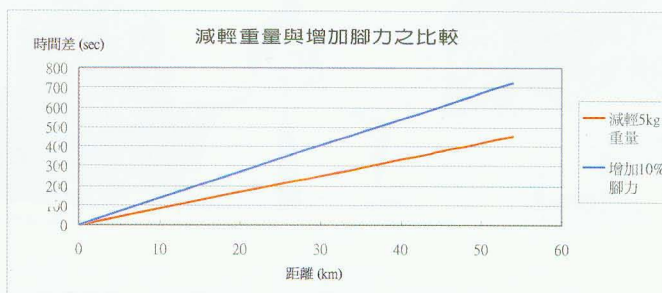
或最好的方式。許多輕量化產品都有安全係數或剛性略低的問題，造成如車架偏軟影響踩踏效率等問題。以 Rock Shox SID Team 為例，依據德國 Bike 雜誌 2003 年 1 月公布的測試報告，該型前叉在輕量化方面名列前茅，但是在側向強度與扭轉強度方面卻令試車手困擾。所以，如何設計出重量減輕但性能不變的產品，就是自行車業者絞盡腦汁、各顯神通的主戰場。

然而，另一個更有效率達成目標的方法就是勤騎車多練習！以前面提到的鐵屁股挑戰賽為例，人加車總重 77kg 的車

友，如果換輕量化的車減輕 5kg，上武嶺最多快 450 秒。若是比賽前 2、3 個月勤加練習，踩

踏輸出功率增加 10%（就是增強腿力），至少可以快上 725 秒，效果比花錢換配備好，也更能享受超越自己的成就感！

輕量化與腿力都是影響騎得更快、更遠的重要因素，但輕量化操之在「荷包」，腿力才是操之在己。 ■



參考資料

1. Chester, R. Kyle, 「Selecting Cycling Equipment」, High-Tech Cycling, pp.1-43, 1996。
2. James C. Martin, 「Spank Your Bad Self」, Bicycling, pp.47, Sept. 2003
3. 孫作豐, 「鎂合金外管減重方案」, 工業技術研究院工業材料研究所技術報告, Nov. 1999

附記

本文蒙受經濟部工業局自行車設計整合技術應用與輔導計畫、工業技術研究院工業材料研究所葉芳耀經理與李志成先生等提供經費支持與技術協助，特此致謝。



聲 明 啓 事

本人簡沛瑩研發之「聚脂纖維布料構成圖」專利，已依法通過審查，取得專利權（經濟部智慧財產局證書字號：M262504號）；若有人未經本人同意，擅自仿製或侵害上開專利者，本人必將依法追究其法律責任，絕不寬貸，特此聲明。



Dan-yu®

旦裕運動用品有限公司

總經理 簡沛瑩

正誠法律事務所 徐明珠 律師

電話:04-22216555 傳真:04-22219555

中華民國九十四年七月廿二日