

國立臺灣體育學院
National Taiwan College of Physical Education
體育研究所碩士學位論文

齒輪比及踩踏迴轉數對休閒騎士騎乘特定坡道
之生物效率探討
THE EFFECT OF GEAR RATIO AND REVOLUTION OF
PER MOMENT ON THE BIOLOGICAL ECONOMY OF
RECREATIONAL CYCLIST OF UPHILL RIDING



研究生：蔡詩溢 撰

指導教授：陳裕鏞 教授

中華民國 99 年 6 月

論文名稱：齒輪比及踩踏迴轉數對休閒騎士騎乘特定坡道之
生物效率探討

總頁數：60 頁

院校所組別：國立臺灣體育學院體育研究所運動科學組

畢業時間及提要別：九十八學年度第二學期碩士提要

研究生：蔡詩溢

指導教授：陳裕鏞

中文摘要

本研究的目的是在探討於環島最陡坡（8%）騎乘時，如何使用適當的齒輪比，搭配適當的踩踏迴轉數，方能達到最佳的生物效率。本研究以三位具單車環島經驗，但非受過單車專業訓練的男性學生為受試者，其年齡 20.93 ± 1.47 歲，環島次數 1.67 ± 0.47 次，身高 171.33 ± 1.89 cm，體重 71.17 ± 3.27 kgw，胯高長（從鞋底到恥骨的距離） 79.33 ± 0.47 cm（平均數 \pm 標準差），分別使用齒輪比 1.15、1.50、2.00，搭配踩踏迴轉數 45、60、78 rpm，於 8%（約 4.57° ）坡度的跑步機上，進行八種騎乘距離為 1 公里的騎乘測試，並收集所有受試者的外部輸出功率值、呼吸交換率、心跳率、攝氧量、二氧化碳量，經由計算所有受試者在八種測試過後之騎乘總效率值（gross efficiency），分析其最具效率的齒輪比、踩踏迴轉數之組合模式為何。另外，本研究也分析在固定騎乘速度下（10.70m/h），使用高踩頻（78 rpm）及低踩頻（45 rpm）之效率變化情形為何。結果顯示出於 8%坡度的跑步機，進行八種騎乘測試下，以齒輪比 2.20 搭配踩踏迴轉數 45rpm 最具效率（ 21.31 ± 1.75 ）；另外在固定騎乘速度下，使用低踩頻（45 rpm）的總效率值（ 21.31 ± 1.75 ）優於使用高踩頻（78

rpm) 的總效率值 (17.59 ± 1.39)。總之，對於休閒騎士而言，於 8% 上坡騎乘時，使用齒輪比 2.00，搭配 45 rpm 最具騎乘效率。

關鍵字：齒輪比、踩踏迴轉數、生物效率、總效率

TSAI, Shih Yi. (2010). The Effect of Gear Ratio and Revolution of Per Moment on the Biological Economy of Recreational Cyclist of Uphill Riding. Unpublished master thesis, National Taiwan College of Physical Education, Taichung.

Abstract

To acquire the optima gear ratio and revolution per minute in uphill riding on 8 % slope to reach the best biological efficiency, three amateur cyclists, which average age are 20.93 ± 1.47 years with average height at 171.33 ± 1.89 cm , weight at 71.17 ± 3.27 kg and legs length at 79.33 ± 0.47 cm , were recruited. The combination of three gear ratios as 1.15、 1.50、 2.00 and three revolution per minutes in bicycles riding on treadmill at about 4.57° slope for one kilometer were separately performed. During the experiment, the external outputting work in bicycles as well as respiratory exchange ratio, heart rates, oxygen consumption and exhaled carbon dioxide in subjects were carefully determined to calculate the gross efficiency. The data has shown that the gear ratio at 2.20 and RPM at 45rpm can reach the optima biological efficiency at 21.31 ± 1.75 . When cyclists keep at fixed speed, we obtained the greater gross efficiency (21.31 ± 1.75) in lower RPM at 45rpm than in higher RPM at 78rpm (17.59 ± 1.39). In summary, for amateur cyclists, riding on 8 % slope, using the gear ratio at 2.20 and RPM at 45rpm could reach the best biological efficiency.

Keywords: Gear Ratio, Revolution of Per Moment, Biological Economy, Gross Efficiency

誌謝

騎乘單車長久以來一直都是詩溢所愛好的運動項目之一，從當兵退伍至今，單車環島或是長途騎乘都是詩溢每年必會從事的休閒活動。單車運動近年來雖然已在臺灣掀起一波熱潮，但常看到許多的車友們只會騎乘單車卻不懂得如何有效率的騎乘單車，且臺灣對於單車運動在生理學方面的研究也是相當的缺乏，因此，在有幸能進到研究所的殿堂之時，便開始研究這方面的相關知識，希望經由本篇的研究之後，能有更多的研究者參與此研究行列之中。

本文的完成，詩溢要感謝指導教授陳裕鏞博士，以及在實驗上給我最多協助的黃馥鵠老師，也謝謝所有參與這項研究工作的受試者，以及在這段時間內給我協助，支持我的朋友。由衷感激，你們辛苦了。

蔡詩溢

謹誌於

國立臺灣體育學院體育研究所

中華民國 99 年 6 月

目錄

中文摘要	I
英文摘要	III
誌謝	V
目錄	VI
表目錄	VIII
圖目錄	IX
第壹章 緒論	1
第一節 研究背景與動機	1
第二節 研究目的	4
第三節 研究問題	5
第四節 名詞解釋	7
第五節 研究控制與限制	10
第貳章 文獻探討	14
第一節 外部功率及內部功率對生物效率之影響	14
第二節 齒輪比及踩踏迴轉數對生物效率之影響	22
第三節 結語	23
第參章 研究方法	25
第一節 研究對象	25
第二節 研究工具	26
第三節 研究設計	30
第四節 研究架構	37
第五節 資料分析	38
第肆章 研究結果與討論	39

第一節	齒輪比及踩踏迴轉數對生物效率之影響	40
第二節	高低踩踩踏迴轉數對總效率之影響	47
第伍章	總結及對未來研究之建議	49
第一節	總結	49
第二節	對未來研究之建議	50
參考文獻	51
中文文獻	51
西文文獻	52

表目錄

表 1-1	Sram、Shimano、Campagnolo 變速系統之比較	8
表 1-2	Shimano Deore 27 段變速系統之齒輪比分析表	9
表 3-1	受試者資料	25
表 3-2	Ergomo、SRM、Powertap 三種功率感測器之比較分析.....	28
表 4-1	八種測試之騎乘速度及平均踩踏迴轉數	39
表 4-2	八種測試之總效率量值	40

圖目錄

圖 1-1	環島必經之最陡坡路段	4
圖 1-2	受試者於騎乘測試之示意圖	13
圖 1-3	受試者之騎乘姿勢及軀幹前傾角度示意圖	13
圖 2-1	騎乘單車時所遭受之外部阻力	17
圖 2-2	影響騎乘單車時外部作功的主要阻力來源	18
圖 2-3	外部功率及內部功率示意圖	21
圖 3-1	捷安特 Iguana 27 速登山車	27
圖 3-2	Ergomo 功率感測器示意圖	27
圖 3-3	LifeGear (98320) 跑步機	29
圖 3-4	Meta Max 3B 整套器材	29
圖 3-5	跑步機安全插銷設備	33
圖 3-6	警示線	33
圖 3-7	平台式訓練車台	34
圖 3-8	輔助受試者騎乘之示意圖	35
圖 3-9	研究架構圖	37
圖 4-1	八種騎乘測試之總效率折線圖	41
圖 4-2	固定齒輪比時各踩踏迴轉數對總效率之變化情形	42
圖 4-3	固定踩踏迴轉數時各齒輪比對總效率之變化情形	44
圖 4-4	固定騎乘速度之總效率變化情形	48

第壹章 緒論

第一節 研究背景與動機

隨著近年來地球暖化現象的影響，世界各地皆紛紛祭出「節能減碳」的口號、標語或策略來因應此一危機，而在眾多減碳的方式中，騎乘單車現已成為多數民眾所採取的方式之一。隨著單車環島電影對眾多電影欣賞者及單車騎士的影響，近年來臺灣本島已掀起一波單車環島的熱潮。然而，臺灣本島因為長年累月受到地質作用的結果，造成東部多崎嶇山路地形，西部則多為平坦的平原地形，因此在挑戰單車環島時，騎乘者除須因應如此多變的地形，妥善安排騎乘的天數及每日騎乘的距離之外，在騎乘頗具難度的爬坡路段時(包含陽金公路、北宜公路、蘇花縱谷、花東公路、南迴公路等路段)，如何適當的使用單車僅有的齒輪比 (Gear Ratio)，再搭配適當的踩踏迴轉數 (Revolutions of Per Moment，單位是迴轉數 / 分或 rpm)，方能將騎士的騎乘效率發揮到最大，便是相當重要的一個課題。就筆者在從事單車環島的活動中，所行經路段 (行經省道臺 1 線、北宜公路、省道臺 9 線) 之最陡坡出現在宜蘭縣東澳村至新澳隧道處 (以公路局豎立之告示牌為主)，而公路局告示牌顯示出該路段的坡度為 8% (如圖 1-1)，因此，若能探討出單車環島可能面臨之最陡坡的騎乘方式，將能為環島騎士提供更有效率的騎乘對策，解決此一爬坡難題。

研究生物效率 (biological economy) 可瞭解生命個體如何以最低的生物需求量，達到最佳的表現量值。對於單車騎

乘表現的生物效率之相關研究而言，國外的研究者多使用 Gaesser & Brooks (1975) 提出的計算公式來計算受試者的生物效率 (Swain & Wilcox, 1992; Chavarren & Calbet, 1999; Millet, Tronchie, Fuster, & Candau, 2002; Foss & Hallén, 2004; Lucia 等, 2004; Mora-Rodriguez & Aguado-Jimenez, 2006)。在 Gasser 的計算公式中，他將騎乘單車時的騎乘效率表示為騎乘者輸出的外部功率值 (external power)，除以內部作功所耗損的能量值 (internal power)；另外，Mosely & Jeukendrup (2001) 指出在研究生物效率時，可將受試者在從事某種運動下之外部功率輸出值，除以其在從事該運動時的耗氧量值 (即經濟效益, economy) 來作為評定運動效率的一個指標。由 Gasser 及 Mosely 等所使用的計算公式皆可知，其騎乘效率或經濟效益值愈大，則表示受試者的生物效率愈佳，反之則愈差。因此，若能將上述研究者計算生物效率的模式運用於體育運動或是競技運動上，就能瞭解運動從事者如何以最小的有氧需求量，達到最佳的運動表現。

對於踩踏迴轉數的研究，一些研究者指出最具效率的踩踏迴轉數為 50-60 rpm (Gaesser & Brooks, 1975; Astrand & Rodahl, 1986; Chavarren 等, 1999)；另外，有研究者指出最理想的踩踏迴轉數 (optimum cadence) 會隨輸出功率增加而增加 (Coast & Welch, 1985; Hansen, Andersen, Nielsen, & Sjøgaard, 2002; Foss 等, 2004)；Coast 等 (1985) 指出在 80% 最大耗氧量的強度之下，最具效率的踩踏迴轉數是 78 rpm；Lucia, Hoyos, & Chicharro (2001) 針對參與歐洲環繞賽的騎士，觀察到在他們在進行爬坡騎乘的踩踏迴轉數為 62-80 rpm；Lucia 等 (2004) 針對世界級騎士研究其在固定功率輸

出下，使用不同踩踏迴轉數（60 rpm、80 rpm、100 rpm）對受試者總效率（gross efficiency）的影響，結果發現受試者在騎乘高輸出功率下（ 366 ± 37 瓦），其總效率及其經濟效益會隨踩踏迴轉數的增加而提昇。另外，Lucia 等（2004）指出對於專業的單車騎士，使用較低的踩踏迴轉數會降低其騎乘效率；Swain 等（1992）指出具登山賽經驗的騎士在跑步機上騎乘 10% 坡度時，其高踩踏迴轉數（84 rpm）比低踩踏迴轉數（41 rpm）更具優勢。

儘管國外對最具效率之踩踏迴轉數的研究已有一數量的資料，但這些研究者所採用的受試者大多為受過專業訓練的單車騎士，對於一般未受過專業訓練的休閒騎士而言，其最具效率之踩踏迴轉數的相關研究卻不多見。另外，國外研究者在進行騎乘效率實驗的控制變因多以踩踏迴轉數為主，卻少見有加入齒輪比的變因在內。再反觀國內關於單車騎乘效率的研究，竟是相當的缺乏（只針對國內已發表及公開的研究而言），因此筆者認為進行本研究實有其價值存在。



圖 1-1 環島必經之最陡坡路段。此圖顯示出宜蘭縣東澳村至新澳隧道間路段的坡度達 8%。

註：坡度的計算方式為在一定距離下，垂直移動的距離除以水平移動的距離，再乘以 100%。

第二節 研究目的

本研究的目的旨在分析及探討在環島必經路段之最陡坡 (8%)，如何使用適當的齒輪比搭配適當的踩踏迴轉數方能達到最佳的生物效率，但礙於受試者皆居住於台中，若至該路段(宜蘭縣東澳村至新澳隧道處)進行實驗測試實有其困難，又由於自然因素無法完全掌控，因此在考慮到如何模擬該路段的騎乘情形，也能將自然因素影響騎乘表現的情形降至最低，因此本研究採用 Berry, Koves, & Benedetto (2000) 的實驗模式，於跑步機上模擬 8% 的坡度進行騎乘測試。另外，本實驗測試是在室內進行，故可經由空調設備將溫度、溼度、風阻等影響騎乘表現的自然因素降至最低，以提高實驗的準

確度。

在綜合國外研究者指出之最具效率的踩踏迴轉數，並根據筆者及從事單車環島的車友之騎乘經驗後，將騎乘測試使用的齒輪比設定為 1.15、1.50、2.00，測試使用的踩踏迴轉數設定為 45、60、78 rpm，經由檢測受試者的輸出功率值 (power output)、攝氧量的變化量 ($\dot{V}O_2$)、二氧化碳變化量 ($\dot{V}CO_2$)、呼吸交換率 (respiratory exchange ratio, RER)、心跳率 (heart rate, HR)、總效率等參數，分析並探討於 8% 上坡騎乘下，八種實驗測試中最具生物效率組合模式為何(因跑步機的運轉速度無法達到使用齒輪比 2.00 搭配踩踏迴轉數 78 rpm 的騎乘速度，故取消該實驗測試)，並分析在固定騎乘速度下 (10.69 km/h)，使用高踩踏迴轉數 (78 rpm) 及低踩踏迴轉數 (45 rpm) 對生物效率的影響情形。

第三節 研究問題

一、於單車環島騎乘 8% 上坡路段時，如何選用適當的齒輪比配合適當的踩踏迴轉數方能發揮最佳的生物效率？

齒輪比是指大盤齒數 (前盤) 除以飛輪齒數 (後盤) 的值；踩踏迴轉數是指單腳每分鐘踩動踏板的圈數，以上兩者皆是影響騎乘速度的主要因素。在騎乘單車時，騎乘者可依據騎乘道路的路況、坡度，以及本身的體能條件等因素來選擇騎乘時所使用的齒輪比及踩踏迴轉數。

就市售輪圈直徑 26 吋 27 速的登山車來說，其大盤及飛輪的配置為 3×9 速，騎士一般在騎乘上坡時，會隨著騎乘坡度的增加，而逐漸降低所使用的齒輪比，然而對於何種坡度適用何種齒輪比之相關的研究卻並不多見。另外，在單車騎

乘效率的相關研究中，國外的研究者多專注於踩踏迴轉數影響騎乘表現的情形，目前也已具有相當數量的研究，但國外研究者所使用的受試者，大多為世界頂尖的騎士，或具多年單車訓練的專業騎士，對於一般未受專業訓練的休閒騎士之最具效率的踩踏迴轉數卻少有著墨。反觀本研究的研究目的，旨在研究未受專業訓練之休閒騎士於特定坡道（8%）時的騎乘表現情形，因此筆者僅能依據本身及一般休閒騎士於單車環島或是上坡騎乘時常使用齒輪比的經驗（本研究使用 1.15、1.50、2.00 的齒輪比），再參考國外長年來指出之最具效率的踩踏迴轉數來擬定測試項目（本研究使用 45 rpm、60 rpm、78 rpm 的踩踏迴轉數），藉此以分析並釐清於 8% 上坡騎乘時，如何選用適當的齒輪比配合適當的踩踏迴轉數方能發揮最佳的生物效率。

二、於相同騎乘速度下，使用高踩踏迴轉數及低踩踏迴轉數在騎乘效率上是否有其差異性？

Foss 等（2004）指出最具效率的踩踏迴轉數會隨輸出功率增加而增加，意即在增加踩踏迴轉數下，騎士的騎乘效率會隨外在阻力的增加（由 60 rpm，阻力為 0 瓦增加到 120 rpm，阻力為 350 瓦）而增加；Lucia 等（2004）針對 8 位具世界級水準的單車騎士進行研究，他指出每位受試者在相同相對高輸出功率之下（其騎乘阻力設定為每位受試者之最大輸出功率的 75%），使用較低的踩踏迴轉數（其使用的高踩踏迴轉數為 100 rpm，低踩踏迴轉數為 60 rpm）較不具騎乘效率（總效率由 100 rpm 的 $24.2 \pm 2.0\%$ 下降至 60 rpm 的 $22.4 \pm 1.7\%$ ）。由以上兩位研究者的研究結果可推知，在高阻

力下(指在高速騎乘下或是在騎乘上坡時),使用高踩踏迴轉數的效率會優於低踩踏迴轉數。儘管如此,然而這兩位研究者所使用的受試者皆為世界頂尖的單車騎士,就一般未受專業訓練的休閒騎士而言,應不具有頂尖騎士的體適能水準及騎乘技術,因此我們不禁質疑起對於一般未受專業訓練的休閒騎士,若使用較高的踩踏迴轉數是否一樣具有較佳的騎乘效率呢?在使用較低的踩踏迴轉數時,其騎乘效率又為何呢?

為探討此一問題,本研究在實驗操控之下,可經由齒輪比 1.15 搭配 78 rpm、齒輪比 1.50 搭配 60 rpm、齒輪比 2.00 搭配 45 rpm 這三種騎乘測試中(三種測試的騎乘速度近乎 10.69 km/h),來瞭解一般未受專業訓練的休閒騎士之騎乘效率變化情形。

第四節 名詞解釋

一、齒輪比 (gear ratio)

齒輪比即以大盤齒數除以飛輪齒數,其得到的數值即為齒輪比。以目前製造變速系統知名的品牌 Sram、Shimano、Campagnolo 為例,其變速系統的等級各有所不同,如表 1-1,級數越低者,表品質越佳;級數越高者,表品質越差。儘管變速系統等級的好壞會影響單車騎乘時的速度,但就各製造商在製造齒盤的齒數而言,卻又是大同小異。以 Shimano 登山車第四級 Deore 之變速系統為例,可使用的齒輪比如表 1-2。

表 1-1 Sram、Shimano、Campagnolo 變速系統之比較

等 級	Sram		Shimano		Campagnolo	
	舊式	新式	登山車	公路車	登山車	公路車
第 1 級	X.O	X.O	XTR	Dura-ace	Saint	Record
第 2 級	ESP 9.0SL	X.9	XT	Ultegra	-	Chorus
第 3 級	ESP 9.0	X.7	LX	105	—	Athena
第 4 級	ESP 7.0	5.0	Deore	Tiagra	-	Centaur
第 5 級	ESP 5.0	4.0	Alivio	Sora	-	Veloce
第 6 級	ESP 4.0	3.0	Acera	2200	—	—
第 7 級	ESP 3.0	-	Altus	-	-	Xenon
第 8 級	-	-	Tourney	-	-	-
第 9 級	-	-	DX	-	-	-
一 般	-	-	SIS-	-	-	-

註：以上各家廠牌的變速系統之級數越低者則品質愈佳，級數愈高者則品質愈差。

表 1-2 Shimano Deore 27 段變速系統之齒輪比分析表

齒輪比	飛					輪			
	11 齒	13 齒	15 齒	17 齒	20 齒	23 齒	26 齒	30 齒	34 齒
大 44 齒	4.00	3.38	2.93	2.59	2.20	1.91	1.69	1.47	1.29

盤	32									
齒		2.91	2.46	2.13	1.88	1.60	1.39	1.23	1.07	0.94
	22									
齒		2.00	1.69	1.47	1.29	1.10	0.96	0.85	0.73	0.65

註：齒輪比 (gear ratio) = 大盤齒數 / 飛輪齒數

二、 踩踏迴轉數 (revolution of per moment)

踩踏迴轉數，是指單腳一分鐘踩踏的圈數，其計算方式是以 10 秒為一單位，計算在 10 秒內單腳踩踏的總圈數再乘以 6，即得其值，單位為迴轉數 / 分或 rpm。

三、 生物效率 (biological economy)

生物效率 (biological economy) 的研究對象包括動物及植物，研究者可經由受試群某種外在形式的表現值，除以提供該受試群之某種所需的物質，而得到該受試群表現出來的效率值 (efficiency) 或經濟效益值 (economy) (Jones, 1973)。就單車騎乘表現之生物效率的評定指標而言，多以下列兩種方式計算：

(一) 肌肉效率 (muscular efficiency)

Gaesser 等 (1975) 指出肌肉效率可由下列四種不同的計算方式，評定出其效率值：

- (1) 總效率 (gross efficiency) = 總輸出功率 / 總耗能
- (2) 淨效率 (net efficiency) = 總輸出功率 (總耗能 - 休息時之耗能)
- (3) 工作效率 (work efficiency) = 總輸出功率 / (總耗能 -

無負荷騎乘時之耗能)

(4) 效率變化量 (delta efficiency) = 功率變化量 / 耗能變化量

以上四種計算方式皆無單位。

(二) 經濟效益 (economy)

Moseley 等 (2001) 指出經濟效益 = 輸出功率 / 攝氧量，其單位為焦耳 / 公升 (J / L)。

第五節 研究控制與限制

- 一、本實驗於室內進行，可經由冷氣空調來加以控制室內的溫度及濕度。為避免受試者在如此騎乘測試下，肌肉溫度快速升高而達耗竭的情形，故於跑步機的一側置有一台風扇(如圖 1-2)，並在整個測試過程中皆持續開啟。因所有受試者皆在此環境下進行實驗測試，故假定所有受試者的風阻係數為一定值。
- 二、因實驗室是在台中市的臺灣體育學院進行，故假定所有測試時的大氣壓力皆為定值。
- 三、因本實驗皆在跑步機上進行騎乘測試，故假定輪胎與接觸面的摩擦阻力為定值，而在本研究中並不探討此摩擦阻力影響受試者能量耗損的情形。
- 四、假定本研究所使用的齒輪比值是多數騎士在爬坡騎乘時所使用的齒輪比值。
- 五、為避免受試者於測試過程中達疲勞的現象，因此每次的測試距離皆設定為 1 公里，並假定所有受試者在此情形下皆無達乳酸閾值。
- 六、依據 Nordeen-Snyder (1977) 所提出之最適當之座墊高

度為騎士胯高之 107%，故在進行實驗測試前，先量測受試者鞋底至恥骨之距離（胯高），並將每位受試者之座高調至該比例高度。另外，根據余銘倫（2004）針對軀幹角度於騎乘舒適度分析之研究結果，得知當軀幹角度趨近於 38°時，所有受試者（共 250 位）之臀部及肩頸部位的不適評比皆能達到主觀感受上的平衡點，故本研究採其研究結果，將座椅前後距離調整至適當位置，使每位受試者之軀幹角度維持在前傾 38°。受試者之騎乘姿勢如圖 1-3。

- 七、一般捷安特市售的單車的車架尺寸皆固定為 14 吋、17 吋、19 吋，捷安特公司宣稱身高 167-177cm 適合選擇的車架尺寸為 17 吋，因本研究之受試者身高平均為 171.33 ± 1.89 cm，固假設本研究之受試者皆適用於 17 吋車架。
- 八、實驗所使用的單車具有前避震器，在進行所有實驗時，皆將單車的避震器關閉，故不考慮避震器影響受試者能量耗損的情形。
- 九、在所有測試過程中，單車前輪的胎壓皆固定在 50 帕，後輪的胎壓皆固定在 55 帕。
- 十、市面上銷售的單車種類大致可分為公路競賽單車、越野單車、城市通勤車、摺疊單車等，這些車種除了單車重量不同之外，避震系統、變速器等級等皆有所不同，不同的單車性能皆有其不同的騎乘效率，因此本研究無法將研究結果精準的推論到其它性能之車種上。



圖 1-2 受試者於騎乘測試之示意圖。受試者於騎乘練習及測試過程中，監視人員皆會從旁給予受試者適時的協助，以防止意外發生。

註：圖中紅色圓圈處為一電風扇，於所有測試過程中皆啟動，以降低受試者在騎乘過程中，因肌肉溫度升高而達耗竭的現象。



圖 1-3 受試者之騎乘姿勢及軀幹前傾角度示意圖

註：受試者於所有騎乘測試中，軀幹前傾角度皆保持在向前 38°

第貳章 文獻探討

第一節 外部功率及內部功率對生物效率之影響

肌肉在穩定狀態期間運動的效率定義為功率輸出量 / 能量耗損量 (Gaesser 等, 1975)。在許多的研究中 (Coyle, Sidossis, Horowitz, & Beltz, 1992; Horowitz, Sidossis, & Coyle, 1994; Hansen 等, 2002; Mogensen, Bagger, Pedersen, Fernström, & Sahlin, 2006), 對於運動期間的外部功率 (external power) 已被用來作為評估功率輸出量值的一個指標。外部功率是指在騎乘一定距離下, 肌肉或完整的個體所需的力量 (Stainsby, Gladden, & Barclay, 1980)。但事實上, 肌肉運動產生的力量不僅產生外部功率, 也包含內部功率。內部功率 (internal power) 的定義為維持身體各肢段運作所需消耗的能量 (Stainsby 等, 1980; Widrick, Freedson, & Hamill, 1992), 或是克服慣性踩踏及地心引力時, 肌肉所須輸出的能量 (Ferguson, Aagaard, Ball, Sargeant, & Bangsbo, 2000; Sjøgaard, Hansen, & Osada, 2002)。內部功率在生物力學及生理學模式下, 可經由運動生物力學的計算模式測得 (Winter, 1979; Wells, Morrissey, & Hughson, 1986; Widrick 等; Willems, Cavagna, & Heglund, 1995; Minetti, Pinkerton, & Zamparo, 2001; Hansen, Jørgensen, & Sjøgaard, 2004), 亦可由能量代謝之變化量測得 (Willems 等; Minetti 等; Sjøgaard 等), 又或是測量於無阻力下騎乘單車的輸出功率 (Foss 等, 2004)。

一、影響外部功率之因素

影響外部功率的主要因素即在克服單車前進所遭受到的阻力，其阻力來源主要有三（Berry等，2000），如圖2-1：

（一）滾動阻力

滾動阻力的來源包括：單車重量、騎士重量及輪胎與接觸面的摩擦阻力、輪圈、軸承的滑順度及鏈條拖動齒盤的阻力等。

Gregor, Broker, & Ryan (1991) 指出滾動阻力 (R_r , N) 與單車重量 (M_b , kg)、騎士重量 (M , kg)、 R_r 之相關係數 (C_{Rr} ; C_{Rr} 與胎壓、胎面、輪圈半徑及輪胎與接觸面的摩擦阻力等相關) 呈一比例關係，可以用下列方程式表示 (Olds, Norton, & Craig, 1993)：

$$R_r = C_{Rr} \times \cos [\arctan(S)] \times (M + M_b)$$

，其中的 S 是指坡度(上升距離 / 水平距離); $\cos [\arctan(S)] \times (M + M_b)$ 是指騎士克服單車重量及本身重量所需出的力，在平路騎乘時，上述公式則相當於 $M + M_b$ 。

克服滾動阻力 (E_{Rr} , 焦耳) 所需輸出之力可以下列方程式表示 (Olds 等, 1993)：

$$E_{Rr} = C_{Rr} \times \cos [\arctan(S)] \times (M + M_b) d$$

，其中 d 是指騎乘距離 (m)。

（二）空氣阻力

影響空氣阻力的因素包括：空氣密度、風速（順風或逆風）、單車及騎士擁有之裝備在流體力學中的拖曳力。

因為空氣阻力 (R_a , N) 隨速度平方增加，所以一般克服空氣阻力的方程式多為 (Olds 等, 1993)：

$$R_a = k (v_{ss} + v_w)^2$$

，其中 v_{ss} 是指單車在穩定狀態下的速度 (m/s) ， v_w 是指順風或逆風之風速 (m/s) ， k 是定值。影響此 k 值的因素則為單車的拖曳係數、騎士正面投射面積 (m^2)、空氣密度；而拖曳係數又與騎士及單車之空氣動力學的因素有關，如騎士所穿著的衣物、車架設計、單車配件、輪圈半徑、安全帽、輪胎種類等 (Kyle, 1988) 。

(三) 重力

重力對騎士外部輸出功率的影響應考慮到上坡及下坡的情形。

上述三者影響能量耗損的因素，近來多以使用下列方程式來計算 (Swain, 1994) ：

$$\text{能量耗損} = (k_r P s) + (k_a A v^2 s) + (g P I s)$$

滾動阻力 空氣阻力 重力

，其中 k_r 是滾動阻力係數， P 是騎士重量加單車重量， s 是單車之速度， k_a 是空氣阻力係數， A 是騎士的表面積， v 是單車在空氣中的速度， g 是重力加速度， I 是道路坡度。

在此方程式中，克服滾動阻力所需的力量受到騎士重量與單車重量的影響；當單車重量增加 1kg 時，則會增加滾動阻力，而單車速度隨之下降 (Kyle, 1991) 。

於水平騎乘時，能量耗損的主要來源即在克服空氣阻力。Hagberg & McCole (1996) 指出在低於 10 km/h 下，空氣阻力佔不到總阻力的 20%。然而當騎乘速度達 20 km/h 及 40 km/h 時，空氣阻力則佔總阻力的 54% 及 82%。

克服重力所需的力量為影響外部功率的第三個因素。Howe (1995) 評估在上坡騎乘期間，重力引起的阻力可能會

超過90%。此外，Howe認為使用輕量化的單車材質以減少單車重量則可顯著改善上坡騎乘的表現情形。因此，由Hagberg等（1996）以及Howe（1995）的論點中，可知空氣阻力及車重為決定公路騎乘能量耗損的主因。

綜合上述研究者指出騎士於騎乘單車時，影響外部做功的種種因素可歸納為圖2-2。

另外，近來已証實出使用全避震系統的單山車在模擬越野騎乘時將可能減低能量耗損的情形（Berry, Woodard, Dunn, Edwards, & Pittman, 1993）。然而，使用全避震系統會出現一個潛在的問題，即會增加額外的重量，導致增加額外的滾動阻力及重力，因此，對於越野騎士使用這兩種策略時（使用全避震系統及減輕車重），將能降低外部能量耗損的情形（Berry等，2000）。

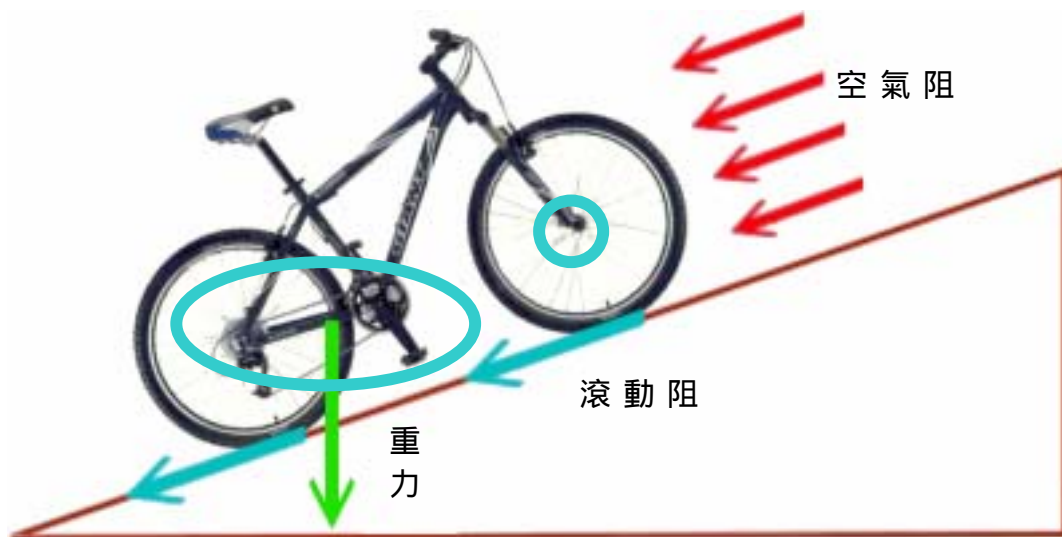


圖 2-1 騎乘單車時所遭受之外部阻力。阻力包含滾動阻力（藍色箭頭及藍色圓圈）、空氣阻力（紅色箭頭）、重力（綠色箭頭）。

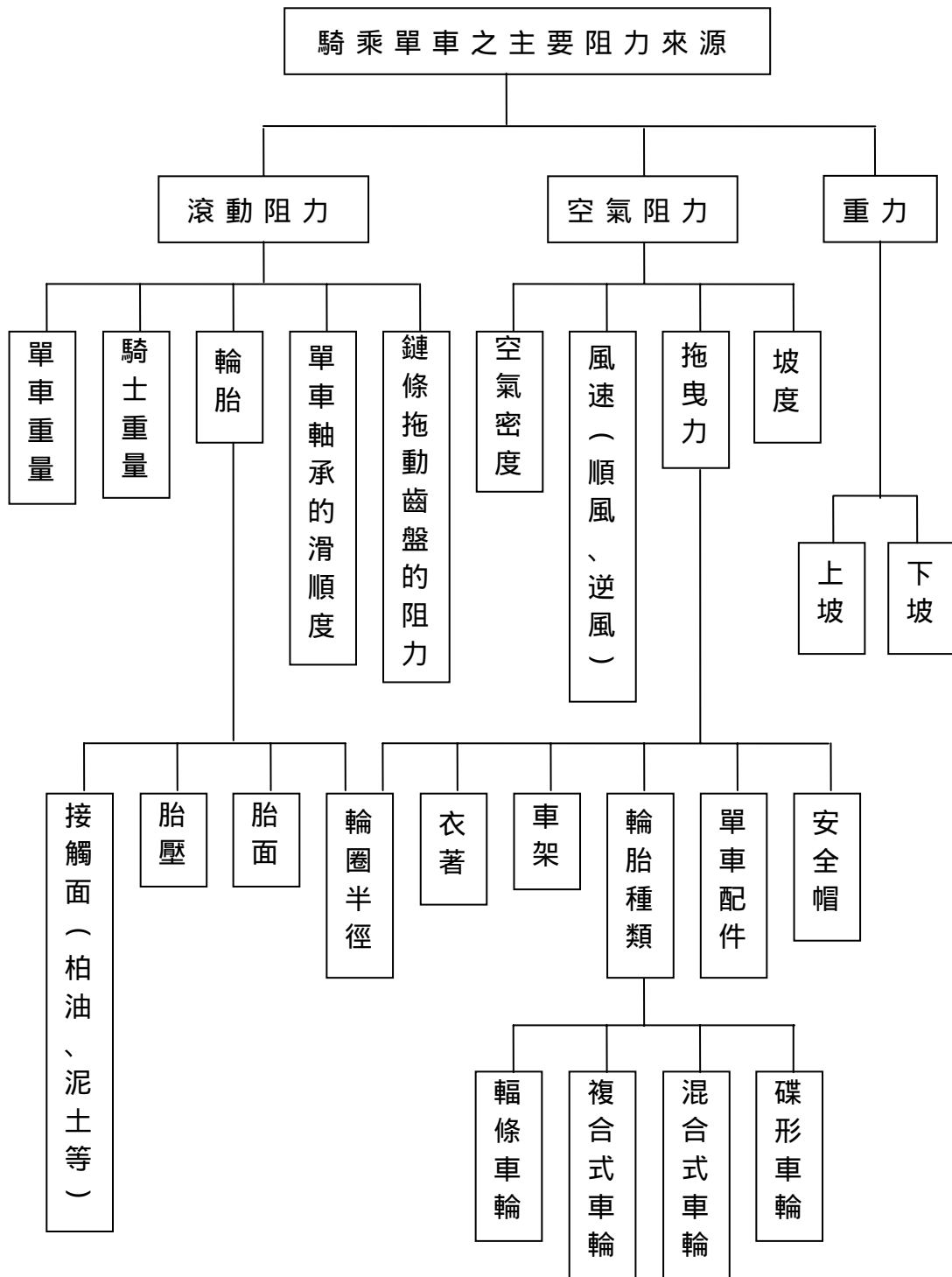


圖 2-2 影響騎乘單車時外部作功的主要阻力來源

二、影響內部功率之因素

在騎乘過程當中，內部功率輸出值會如同函數般呈指數性地增加，在使用一定高踩踏迴轉數時，氧耗量也會隨踩踏迴轉數的增加而呈指數般地增加 (Tokui 等, 2007)。即使在相同程度的外率輸出下 (Coast 等, 1985; Foss 等, 2004)，較高的踩踏迴轉數也會產生較大量的氧耗量，以及較多的內部功率輸出值。由此可知，在騎乘過程中，隨著踩踏迴轉數增加，氧耗量將隨之增加，內部功率輸出值也將隨之增加，進而影響到肌肉的效率。然而 Tokui & Hirakoba (2008) 卻認為內部功率輸出值在無負荷騎乘下與負荷騎乘下是一致的，由圖 2-3 可看出此情形。因此，由本段上述幾位研究者的研究結果可知，目前對於內部功率輸出值的看法並無一致，本文僅能例舉出一般評估內部功率輸出值的模式：

(一) 運動生物力學評估內部功率的模式

從運動生物力學的角度評估內部功率 (W_{INT}) 時，已有許多的評估公式。Hansen 等 (2004) 曾就一些研究者 (Winter, 1979; Wells 等, 1986; Widrick 等, 1992; Willems 等, 1995; Minetti 等, 2001) 對內部功率輸出的公式與能量代謝的值相較，結果發現因為各研究者評估的角度不同，所以各研究者評估的結果與能量代謝量在相較之下，有其相似與相異之處。儘管如此，Tokui & Hirakoba (2007) 指出目前對內部功率輸出值於生物力學的角度上並沒有一致的評估方式，但他們認為 Minetti 等評估內部功率輸出的模式是適當的，因此以下呈現出 Minetti 等評估內部功率輸出量值的計算公式：

1. 計算身體各肢段的角動量：

$$W'_{INT} = q \times m \times f^2$$

，其中 W'_{INT} 為，單位為瓦特， q 是各肢段移動的慣性參數， m 是身體的重量 (kg)， f 是指踩踏頻率 (Hz)。

2. 計算內部功率輸出量值：

$$WINT = W'_{INT} / m \times f / s = q \times f^3 / s$$

，其中 $WINT$ 的單位為瓦特， f 是指踩踏頻率 (Hz)， s 是各肢段移動的速度 (m/s)。

(二) 從生理學的角度評估內部功率輸出量值

從生理學的角度來評估內部功率輸出值時，可由能量代謝變化量測得。因能量代謝量與耗氧量有直接的關係存在，因此我們可由影響個體耗氧量的因素加以研究：

1. 肌纖維型態對耗氧量的影響

人類的骨骼肌是由 型及 型肌纖維所組成，一般而言， 型肌纖維負責長時間張力的維持， 型肌纖維則負責短時間的強力快速收縮 (李文森，1986)。Bosco等 (1987) 指出 型肌纖維比例較高者便能減低能量的耗損，且 Coyle等 (1992) 及 Horowitz等 (1994) 指出總效率及淨效率與受試者擁有 型肌纖維比例的多寡達顯著正相關。另外，在運動過程中， 型肌纖維的啟動即暗示出能量的來源已從有氧狀態進到無氧狀態，此時會導致乳酸的生成，最後終將影響到運動表現。因此一些學者指出人類的 型肌纖維較 型肌纖維更具效率 (Coyle等，1992; Hansen等，2007; Horowitz等，1994; Mogensen等，2006)。

2. 肌肉溫度對耗氧量的影響

Williams等 (1962) 証實在熱環境下，大量的運動量會產生大量的乳酸堆積；Saltin & Åstrand (1968) 指出當運動負荷量持續增加時，耗氧量會增加，而肌肉溫度也會隨之增加，進而導致乳酸的產生，達到運動耗竭的結果。

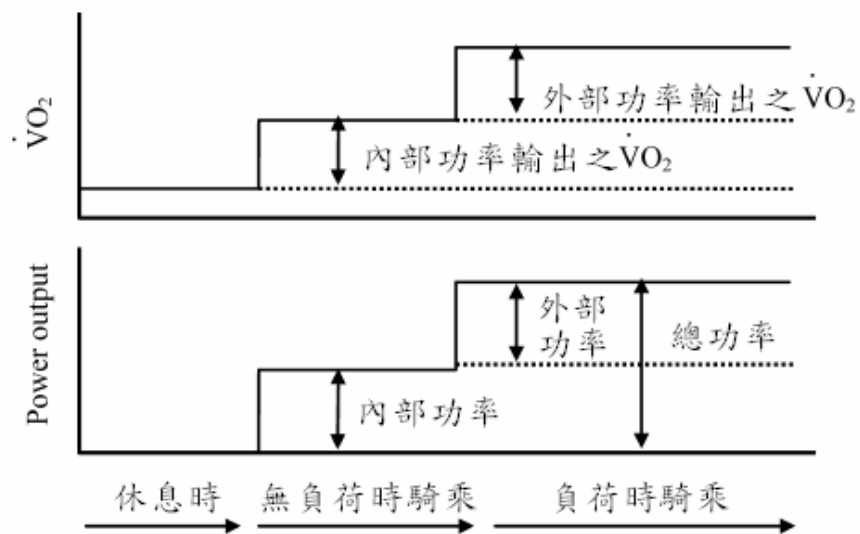


圖 2-3 外部功率及內部功率示意圖。總功率 = 內部功率 + 外部功率

第二節 齒輪比及踩踏迴轉數對生物效率之影響

一、齒輪比對生物效率的影響

在上坡騎乘時，若齒輪比太大，則雙腳無法踩動踏板前進；若齒輪比太輕，則踩踏的速度過快，不但前進速度降低，又易使雙腿在短時間內達到疲勞的程度（廖武雄，2004）。因此在選擇使用的齒輪比上，應視騎乘的路況及騎乘者自己的體能狀況而定。

二、踩踏迴轉數對生物效率的影響

在不考慮騎乘坡度的情形中，亦即在平路騎乘時，早期的研究者認為具經濟效益的踩踏迴轉數約為 50 rpm (Gaesser 等，1975; Astrand 等，1986; Chavarren 等，1999)；Chavarren 等 (1999) 指出最具經濟效益的踩踏迴轉數為 60 rpm；Lucia 等 (2001) 針對參與歐洲環繞賽的騎士，觀察到在他們在進行爬坡騎乘的踩踏迴轉數為 62-80 rpm；在 80% 最大氧量之強度下，Coast 等 (1985) 指出最具效率的踩踏迴轉數是 78 rpm。

Swain 等 (1992) 指出在 10% 坡度上騎乘時，受試者在 84 rpm 的心跳率、攝氧量、換氣量顯著低於 41 rpm，並認為在爬坡騎乘時，使用高踩踏迴轉數的經濟效益優於使用低踩踏迴轉數。

Coast 等 (1985) 以及近年來的研究者 Foss 等 (2004) 認為最具經濟的踩踏迴轉數會隨著輸出功率的增加而增加，其中 Foss 等指出最具經濟的踩踏迴轉數會從 60 rpm 輸出功率為 0 瓦時增加到 80 rpm 輸出功率為 350 瓦時 ($P < 0.05$)；Lucia 等 (2004) 也指出在高輸出功率下騎乘時，騎士的總效率或是經濟效益會隨踩踏迴轉數增加而提昇。經由上述的研究者

之研究結果可推知，在上坡騎乘或外部阻力增加下，受試者騎的生物效率會隨踩踏迴轉數的增加而隨之提昇，意即在上坡騎乘時，選擇高踩踏迴轉數的策略將優於選擇低踩踏迴轉數。

此外，當肌肉溫度增加時，在低的踩踏迴轉數及增加到高踩踏迴轉數時，其效率會減少 (Ferguson 等, 2002)。肌肉溫度的增加可比擬為增加阻力下運動的結果 (Saltin 等, 1968)。這點可幫助解釋受訓練的車手為何在增加運動強度下任意的選擇踩踏迴轉數的情形 (Sargenat 等, 1994; Hansen 等, 2002)。

第三節 結語

儘管在評估肌肉效率時，Ferguson 等 (2008) 指出應考慮到內部功率輸出及外部功率的總功率輸出，若只考慮到外部功率將會導致低估肌肉收縮的功率輸出值。然而對於內部功率的評估方式至今並無一固定的模式 (Tokui 等, 2007)，一些研究者在研究騎乘效率上也僅只計算受試者外部功率的量值 (Chavarren 等, 1999; Marsh, Martin, & Foley, 2000; Sidossis 等, 1992)，因此在評估內部功率仍尚未明確之前，本研究僅以外部功率輸出量值作為評估效率的參數。

影響單車騎乘效率的要素不外乎自然環境、機械性能，及人為因素等。當在平路高速騎乘時，能量的消耗主要在對抗空氣阻力 (di Prampero, Atchou, Brückner, & Moia, 1979)；在爬坡期間，因為速度下降的關係，影響能量耗消的主要因素就來自於抵抗騎士體重加上單車重量的重力 (Mognoni & di Prampero, 2003)，因此在進行單車騎乘之研

究時，這些影響騎乘表現的外在及人為因素都是需要去注意及控制的地方（筆者在本研究第三章中有列出本實驗控制這些變因的方法）。

第參章 研究方法

第一節 研究對象

受試者為中部臺灣體育學院無接受單車專業訓練但具單車環島經驗的男性大學生 3 位，其基本資料平均為（平均數±標準差）：年齡 20.93 ± 1.47 歲，環島次數 1.67 ± 0.47 次，身高 171.33 ± 1.89 cm，體重 71.17 ± 3.27 kgw，胯高長（從鞋底到恥骨的距離） 79.33 ± 0.47 cm。所有受試者皆無吸煙，身體健康，無特殊疾病者（如表 3-1）。

在參與本實驗之前，皆告知所有受試者整個實驗之流程、目的，並讓受試者皆瞭解本實驗的危險性以及如何防止意外發生所做的安全防護措施。

表 3-1 受試者資料

編號	性別	年齡 (歲)	環島次數 (次)	身高 (cm)	體重 (kg)	胯高 (cm)
01	男	22.7	2	170	67	79
02	男	21.0	2	170	75	79
03	男	19.1	1	174	71.5	80
平均		20.93	1.67	171.33	71.17	79.33
標準差		1.47	0.47	1.89	3.27	0.47

第二節 研究工具

一、單車

實驗使用捷安特 (Giant) 2004 年出產之 Iguana 單車，速

別為 27 段，具備前避震器，車重約 13.5 公斤（如圖 3-1）。

二、FSA 大盤

為配合 Ergomo 功率感測器，故將該車原有的大盤改為 FSA 大盤，其大盤齒數分別為 53、42、30 齒。本研究因考慮到上坡騎乘時，較常用的大盤齒數為 32 齒（二速），因而在 FSA 大盤的使用上，選擇使用最接近的齒數（30 齒）來做為實驗的大盤齒數。

三、Ergomo 功率感測器

Ergomo 設備分為輸出扭力感測器，以及液晶顯示碼錶，如圖 3-2.a、3-2.b。Duc, Villerius, Bertucci, & Grappe (2007) 針對目前市面上販售的三種功率感測器 Ergomo、SRM、Powertap 進行研究，其分析結果如表 3-2。

Duc 等 (2007) 針對三種儀器在次最大強度測試、衝刺測試、道路測試下，顯示出 Ergomo 的輸出功率值高於 SRM 及 Powertap，他認為 SRM 及 Powertap 對於功率輸出之時間有延遲的情形，亦即 Ergomo 具有最佳的靈敏度。此外，Powertap 的資料是透過鏈條、齒盤傳輸，在此情形下，其扭力值會少掉 2%。Duc 指出，Ergomo 測功感測器適用於採坐姿騎乘時，而本實驗中所有騎乘測試皆採坐姿，故能將 Ergomo 測功感測器的精準度提昇到最高。



圖 3-1 捷安特 Iguana 27 速登山車



a. 輸出扭力感測器

b. 液晶顯示碼錶

圖 3-2 Ergomo 功率感測器示意圖

表 3-2 Ergomo、SRM、Powertap 三種功率感測器之比較分析

	Ergomo	SRM	Powertap
重量	0.074kg	0.152kg	0.280kg
安裝位置	BB 曲柄軸	大盤	前輪輪轂
感測器類型及介紹	2 組光遮斷感測器 (Photointerrupter circuit)	8 個應變規 (strain gauge)	4 個應變規 (strain gauge)
溫度影響	否	是	是
製造廠商	德國	德國	美國
廠商宣稱 準確度	±1.0%	±0.5%	±1.5%
價格	約六萬	約十萬	約五萬

註：本研究採用 Ergomo 功率感測器。

四、跑步機

使用 LifeGear (98320) 跑步機 (如圖 3-3)，傳輸帶長 135cm，寬 44cm，無承載任何重量時的最大速度 16 km/h，最大坡度 12% (上升移動距離 / 水平移動距離)。

五、氣體分析儀

於運動過程中使用氣體分析儀 (MetaMax 3B, Cortex, Germany)，並對每次呼吸進行氣體分析。氣體分析儀的各項設備如圖 3-4.a-f。



圖 3-3 LifeGear (98320) 跑步機



3-4.a 電池模組



3-4.b 面罩模組



3-4.c 主機系統



3-4.d 無線裝置模組



3-4.e 心跳模組



3-4.f 筆電系統

圖 3-4 Meta Max 3B 整套器材

第三節 研究設計

一、齒輪比的選擇

由於在眾多國外的單車騎乘研究中，往往無法指出測試時受試者所使用的齒輪比為何，對於一般休閒騎士在上坡騎乘時所使用的齒輪比之數據更是缺乏。因此本研究在實驗所使用齒輪比選擇上，只能依據本研究者本身數次單車環島及多次長距離騎乘的經驗（>200 公里 / 日），以及一般休閒騎士騎乘上坡路段的經驗來擬定本研究所使用的齒輪比，分別為 2.00、1.50、1.15（前盤齒數 / 後盤齒數），依序為 30/15、30/20、30/26。

二、踩踏迴轉數的選擇

對於踩踏迴轉數的研究，一些研究者指出最具效率的踩踏迴轉數為 50-60 rpm (Gaesser 等, 1975; Astrand 等, 1986; Chavarren 等, 1999)；另有研究者指出最具效率的踩踏迴轉數會隨輸出功率增加而增加 (Coast 等, 1985; Hansen 等, 2002; Foss 等, 2004)；Coast 等指出在 80%最大耗氧量的強度之下，最具效率的踩踏迴轉數是 78 rpm；Lucia 等 (2001) 針對參與歐洲環繞賽的騎士，觀察到在他們在進行爬坡騎乘的踩踏迴轉數為 62-80 rpm；Lucia 等 (2004) 針對世界級騎士研究其在固定功率輸出下，使用不同踩踏迴轉數 (60 rpm、80 rpm、100 rpm) 對受試者總效率的影響，結果發現受試者在騎乘高輸出功率下 (366 ± 37 瓦)，其總效率及其經濟效益會隨踩踏迴轉數增加而提昇。雖然至今對於最具效率之踩踏迴轉數的研究已有不少的數量，但上述的研究者皆是以受過專業訓練的騎士為其受試者，而對於一般休閒騎士最具效率的踩踏迴轉數之研究卻是相當稀少，而國內針對單

車騎乘效率這方面的相關研究（只針對國內公開的研究）則更是缺乏。因此，筆者在綜合了國外最具效率之踩踏迴轉數與相關的研究數據，並配合所使用跑步機之最高速度（無承載任何重量時的最大速度 16 km/h），以及欲研究的相關問題後，擬定 45 rpm、60 rpm 及 78 rpm 為本實驗使用的踩踏迴轉數。

三、受試者之限制及實驗室控制

受試者於測試前 24 小時內充份休息，並要求受試者充分補充碳水化合物及水分。測試前 2 小時內禁止進食，並禁止騎乘單車至實驗室。以冷氣空調使實驗室保持在攝氏 28°，大氣壓力為 760 mmHg。

四、實驗測試

受試者分別使用三種齒輪比，搭配三種踩踏迴轉數於跑步機上，騎乘捷安特公司於 2004 年生產之 Iguana 27 段變速單車，隨機進行八騎乘測試（齒輪比 2.0 搭配 45、60 rpm；齒輪比 1.50 搭配 45、60、78 rpm；齒輪比 1.15 搭配 45、60、78 rpm），所有騎乘測試皆採坐姿騎乘，每次的測試距離皆為 1 公里。每次測試前皆先校正氣體分析儀、測功儀 (Ergomo)，及胎壓（前輪 50 帕，後輪 55 帕）。於測試騎間，所有測試者皆穿著自己的運動鞋。

(一) 安全性考量

在安全性考量上，本實驗具有下列安全措施，以防止意外發生，並藉此降低受試者心理層面的恐懼感，使得量測出的生理數值更具效度。

1. 利用跑步機提供的安全插銷設備，將安全插銷的另一端繫上一條細繩，並將該繩綁至單車豎管上，當受試者向後滑動超過 30 公分時（安全距離），則該插銷就會被單車拉出，跑步機便隨即斷電（如圖 3-5）。
2. 於跑步機把手處兩端繫上警示線（兩條具彈性的繩子），並將該繩子置於單車豎管後方。要求受試者在進行騎乘測試時，單車豎管必須維持在不觸及該彈性繩，此舉可避免受試者於騎乘時滑出跑步機外（如圖 3-6）。
3. 於跑步機的正後方放置一平台式訓練車台（如圖 3-7），可讓受試者在滑出跑步機時，後輪可落於該平台式訓練車台上轉動，抵銷向後滑動的動能，降低意外的發生。



圖 3-5 跑步機安全插銷設備。當單車快滑出跑步機之前，會拉動此安全插銷，跑步機隨之斷電。



圖 3-6 警示線。在騎乘過程中，騎乘者應隨時保持此警示線呈現鬆弛狀態。



圖 3-7 平台式訓練車台。可防止騎乘者向後方掉落。

(二) 熟練騎乘階段

當受試者開始進行跑步機騎乘練習之初期，先讓受試者於 0% 的跑步機上輕鬆騎乘。監視人員會先輕握住受試者騎乘之單車的座墊及把手處，以協助受試者保持平衡，並防止受試者向前或向後滑出跑步機。當受試者能在 0% 的跑步機上穩定騎乘時，監視人員仍舊在一旁監視受試者騎乘，此時監視人員只會在受試者不穩定時，才給予受試者立即的協助。接著，再讓受試者於 8% 的跑步機上以本研究所使用之最極端的測試情況練習騎乘（齒輪比 2.0 搭配 45 rpm；齒輪比 1.15 搭配 78 rpm），監視人員同樣地給予受試者相同的協助動作。當受試者表明自己能在以上所有的練習騎乘狀態下皆能穩定騎乘後，才算是結束騎乘練習。整個騎乘練習過程中，監視人員皆全程站立於跑步機的一側，以協助受試者熟悉整個騎乘過程（如圖 3-8）。

在練習階段中，所有受試者皆無滑出跑步機外的情形等

意外發生，且皆能在小於 20 分鐘之內完成所有的騎乘練習。



圖 3-8 輔助受試者騎乘之示意圖

(三) 熱身及實驗測試

每次測試初期，受試者先於跑步機上以速度 7 km/h、坡度 0% 騎乘 3 分鐘。在該階段中，不限制受試者使用的齒輪比及踩踏迴轉數。在 3 分鐘之後，隨即將坡度調於 8% 進行實驗測試。測試採隨機進行，共進行 10 次三組測試，而每組測試至少間隔一天。

每次測試至少間隔 5 分鐘休息時間或直到受試者心跳數降至 80 以下才得進行下個測試 (Marsh & Martin, 1997)，每組測試時間為 1.5 ± 0.2 小時。所有實驗測試於一星期之內完成。每位受試者。在每次測試完後立即擦去受試者滴落於單車上的汗水，以避免增加單車重量。

(四) 數據收集

使用 Ergomo 儀器量測所有受試者於 10 種騎乘測試最後二分鐘的輸出功率值。使用 Meta Max 3B 儀器量測所有受試者於 10 種騎乘測試期間最後二分鐘的攝氧量 ($\dot{V}O_2$)、二氧化碳量 ($\dot{V}CO_2$)、通氣量 (VE)、呼吸交換率 (RER)、心跳率 (HR)。

第四節 研究架構

研究架構如圖 3-9。

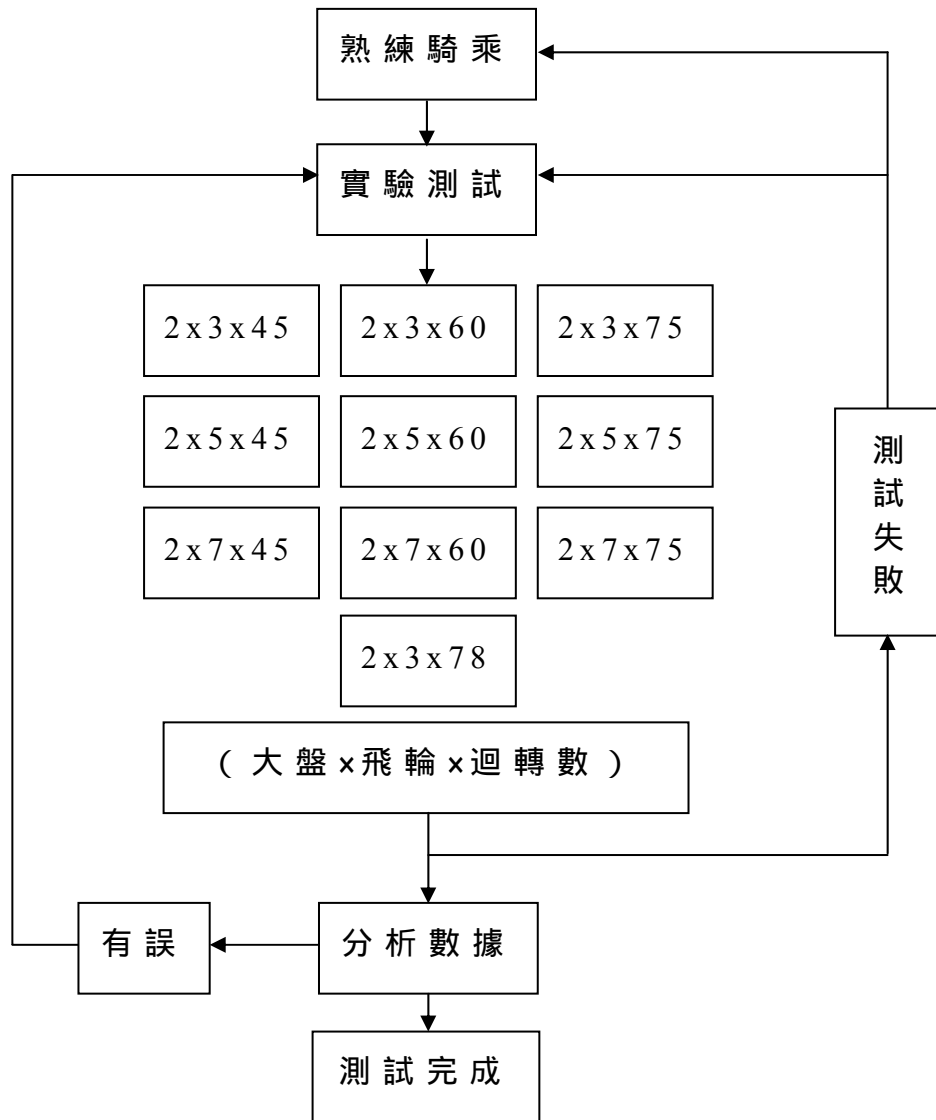


圖 3-9 研究架構圖

第五節 資料分析

1. 資料皆以平均數±標準差呈現。
2. 騎乘測試之總效率 (GE) = 輸出功率 / 能量耗損 (Gaesser 等, 1975)。
3. 能量耗損 (EE) = $[(3.869 \times \dot{V}O_2) + (1.195 \times \dot{V}CO_2)] \times [(4.186/60) \times 1000]$ (Brouwer, 1957)。
4. 取測試最後 3 分鐘的資料分析受試者個別的 GE 及 EC, 若其值大於三個標準差, 則與以刪去不列入分析計算。
5. 所有的 GE 及 EC 皆以折線圖呈現。

第肆章 研究結果與討論

各種騎乘測試之騎乘速度及平均踩踏迴轉數如表 4-1，所有受試者在八種騎乘測試的平均踩踏迴轉數皆符合實驗所要求的踩踏迴轉數（45 rpm、60 rpm、78 rpm）。

表 4-1 八種測試之騎乘速度及平均踩踏迴轉數（平均數±標準差）

實驗測試 (大盤×飛輪×踩踏迴 轉數)	騎乘速度 (km/hr)	平均踩踏迴轉 數 (rpm)
2×3×45	7.18±0.01	45.00±0.85
2×5×45	9.33±0.01	45.49±0.25
2×3×60	9.53±0.01	60.41±0.56
2×3×78	10.64±0.01	78.10±0.49
2×5×60	10.75±0.02	60.63±0.19
2×7×45	10.71±0.09	45.97±0.50
2×5×78	14.02±0.00	78.13±0.54
2×7×60	14.34±0.04	60.63±0.35

註：八種騎乘測試的順序是依照騎乘速度由慢到快排列，其中 2×3×78、2×5×60、2×7×45 這三種測試的騎乘速度理論上是一致的，為方便以下高低踩踏迴轉數的比較，故並無依速度快慢排列。

第一節 齒輪比及踩踏迴轉數對生物效率之影響

表 4-2 及圖 4-1 呈現出所有受試者於八種騎乘測試下之總效率 (GE) 的平均值及其變化情形。由表 4-2 及圖 4-1 可知總效率與騎乘速度間並無呈現出一定的趨勢，因此以下分別就固定齒輪比及固定踩踏迴轉數分析及探討各騎乘測試對總效率值影響的情形。

表 4-2 八種測試之總效率量值

實驗測試 (大盤 × 飛輪 × 踩踏 迴轉數)	總效率 (GE)
2 × 3 × 45	13.31 ± 3.64
2 × 5 × 45	19.08 ± 1.76
2 × 3 × 60	18.34 ± 3.09
2 × 3 × 78	17.59 ± 1.39
2 × 5 × 60	19.16 ± 2.67
2 × 7 × 45	21.31 ± 1.43
2 × 5 × 78	16.54 ± 0.57
2 × 7 × 60	18.94 ± 0.59

註：八種騎乘測試的順序是依照騎乘速度由慢到快排列。

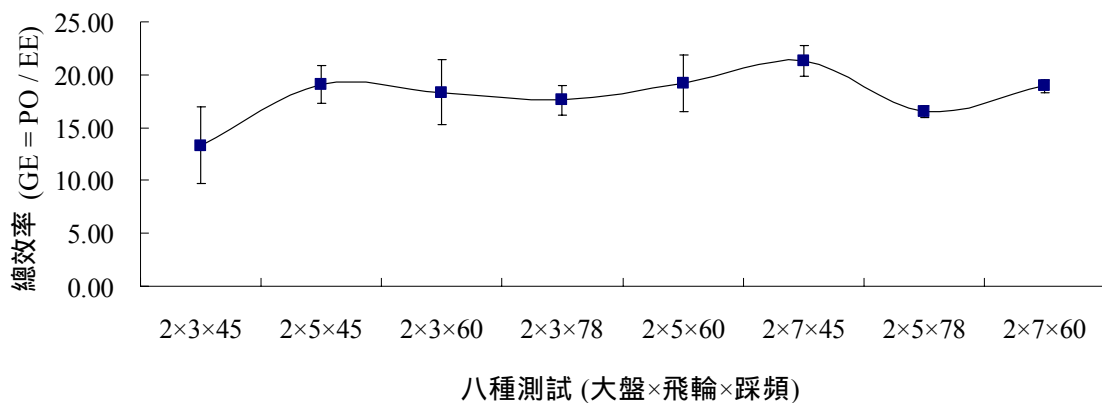


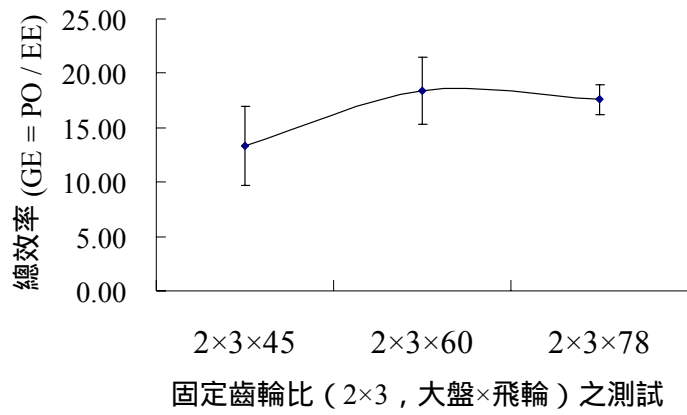
圖 4-1 八種騎乘測試之總效率折線圖

註：八種騎乘測試的順序是依照騎乘速度由慢到快排列。

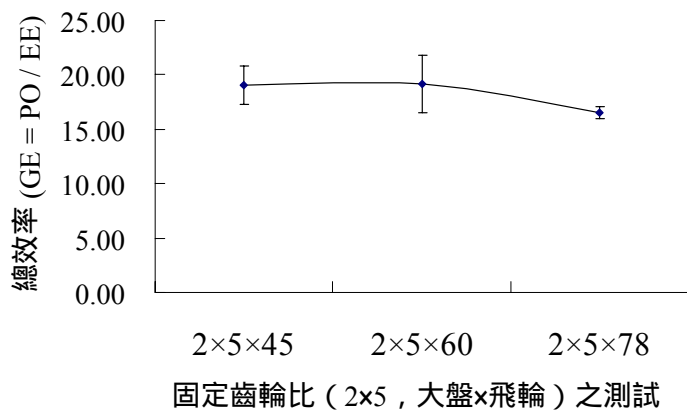
一、固定齒輪比對總效率的影響

齒輪比固定在 1.15 (2×3 , 大盤×飛輪) 時 , 如圖 4-2.a , 總效率值由 45 rpm (13.31±3.64) 增加至 60 rpm (18.34±3.09) , 而至 78 rpm (17.59±1.39) 有逐漸平緩的趨勢 ; 齒輪比固定在 1.50 (2×5 , 大盤×飛輪) 時 , 如圖 4-2.b , 總效率值於 45 rpm 及 60 rpm 之值相近 (分別為 19.08±1.76 及 19.16±2.67) , 而後至 78 rpm 時之總效率值 (16.54±0.57) 呈現下降的趨勢 ; 齒輪比固定在 2.00 (2×7 , 大盤×飛輪) 時 , 如圖 4-2.c , 總效率值由 45 rpm (21.31±1.43) 逐漸下降至 60 rpm (18.94±0.59) 。

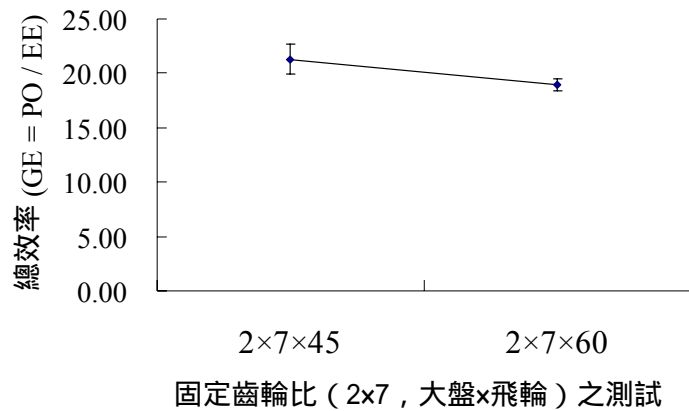
由圖 4-2.a 4-2.b 及 4-2.c 可知本實驗之受試者於低齒輪比 (1.15) 時 , 其總效率值隨著踩踏迴轉數的增加而逐漸增加 , 但隨著齒輪比的增加 , 其總效率值會隨踩踏迴轉數的增加而逐漸減少。



4-2.a 固定齒輪比於 2×3 之總效率變化情形



4-2.b 固定齒輪比於 2×5 之總效率變化情形



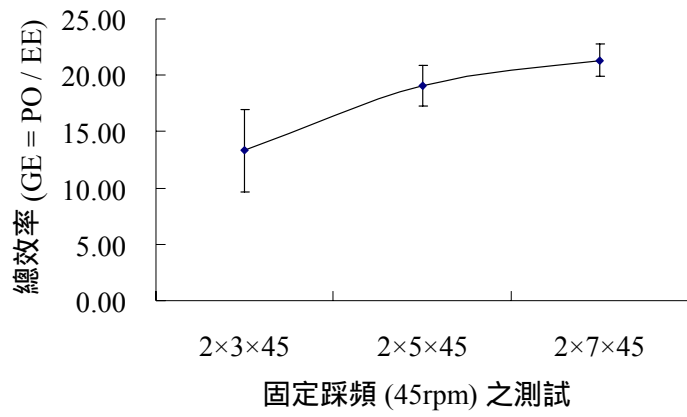
4-2.c 固定齒輪比於 2x7 之總效率變化情形

圖 4-2 固定齒輪比時各踩踏迴轉數對總效率之變化情形

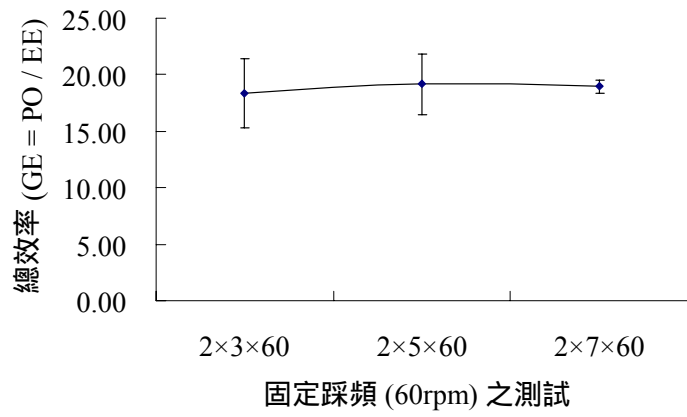
二、固定踩踏迴轉數對總效率的影響

踩踏迴轉數固定在 45 rpm 時，如圖 4-3.a，總效率值由低齒輪比（2x3，總效率值為 13.31 ± 3.64 ）逐漸增加至高齒輪比（2x7，總效率值為 21.31 ± 1.43 ）；踩踏迴轉數固定在 60 rpm 時，如圖 4-3.b，三種齒輪比的總效率值無明顯變化（齒輪比由最小至最大之總效率值依次為 18.34 ± 3.09 、 19.16 ± 2.67 、 18.94 ± 0.59 ）；踩踏迴轉數固定在 78 rpm 時，如圖 4-3.c，總效率值由低齒輪比（2x3，總效率值為 17.59 ± 1.39 ）逐漸下降至居中的齒輪比（2x5，總效率值為 16.54 ± 0.57 ）。

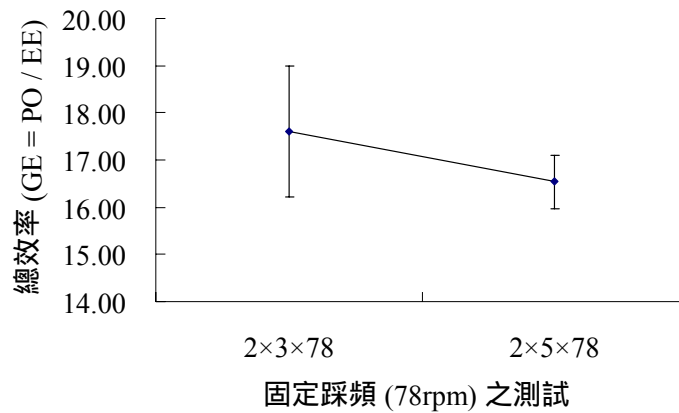
由圖 4-3.a 4-3.b 及 4-3.c 可知本實驗之受試者於低踩踏迴轉數（45 rpm）時，總效率值隨著齒輪比的增加而逐漸增加；於踩踏迴轉數 60 rpm 時，總效率值並不隨齒輪比的增加而有太大的變化；於高踩踏迴轉數（78 rpm）時，其總效率值則是隨著齒輪比的增加而逐漸減少。



4-3.a 固定踩踏迴轉數於 45rpm 之總效率變化情形



4-3.b 固定踩踏迴轉數於 60rpm 之總效率變化情形



4-3.c 固定踩踏迴轉數於 78rpm 之總效率變化情形

圖 4-3 固定踩踏迴轉數時各齒輪比對總效率之變化情形

三、 結語

由表 4-2 及圖 4-1 可知本研究之未受專業訓練的受試者，在 8% 上坡騎乘的所有測試中，於 2×7×45（大盤×飛輪×踩踏迴轉數）之騎乘測試具有最大的總效率值（ 21.31 ± 1.43 ），於 2×3×45（大盤×飛輪×踩踏迴轉數）之騎乘測試的總效率值則最低（ 13.31 ± 3.64 ）。

Coast 等（1985）以及 Foss 等（2004）認為最具效率的踩踏迴轉數會隨著輸出功率的增加而增加，其中 Foss 指出最具效率的踩踏迴轉數會從 60 轉輸出功率為 0 瓦時增加到 80 轉輸出功率為 350 瓦時（ $P < 0.05$ ）。

Lucia 等（2004）以世界頂尖的騎士為受試對象，分別使用 60 rpm、80 rpm、100 rpm，於受試者個別 75% 最大輸出功率的強度下，進行 6 分鐘騎乘測試，結果發現騎士的總效率值會隨踩踏迴轉數的增加而增加。然而在本研究固定齒輪比的騎乘測試下，僅於 2×3×45（大盤×飛輪×踩踏迴轉數）到 2

×3×60(大盤×飛輪×踩踏迴轉數)的測試中出現與 Lucia 相當的研究結果。

Chavarren (1999) 使用 7 位公路競賽騎士，以踩踏迴轉數固定在 60 rpm、80 rpm、100 rpm、120 rpm 下進行強度漸增的騎乘測試，其結果發現騎士的總效率值皆隨外部功率增加而增加。而在本研究固定踩踏迴轉數的騎乘測試下，僅於低踩踏迴轉數 (45 rpm) 時之總效率隨齒輪比的增加而增加。

李文森 (1986) 指出 I 型肌纖維負責長時間張力的維持，II 型肌纖維則負責短時間的強力快速收縮。Bosco 等 (1987) 指出 I 型肌纖維比例較高者便能減低能量的耗損，且 Coyle 等 (1992) 及 Horowitz 等 (1994) 指出總效率與淨效率對於受試者 I 型肌纖維的比例達顯著正相關。

然而，對於圖 4-1、圖 4-2 及圖 4-3 的折線圖中，皆未能呈現出與上述研究者一致的變化趨勢，因本研究並未偵測所有受試者 I、II 型肌纖維的擁有比例，所以僅能推測可能是由於本實驗之受試者之體適能不及上述研究者所使用之受試者的體適能，造成無一定變化趨勢的結果，但至少本研究之受試者在固定踩踏迴轉數的測試下 (45 rpm)，使用 2×7 的齒輪比於 8% 上坡騎乘時最具優勢。

第二節 高低踩踏迴轉數對總效率之影響

為探討在相同騎乘速度之下，使用不同踩踏迴轉數對騎乘效率的影響情形，我們針對 2×3×78、2×5×60、2×7×45（大盤×飛輪×踩踏迴轉數）與總效率的變化情形單作比較，如圖 4-4。由圖 4-4 可知本實驗之受試者之總效率值會隨著踩踏迴轉數的減少而逐漸增加，於高踩踏迴轉數（78 rpm）的總效率值（ 17.59 ± 1.39 ）低於低踩踏迴轉數（45 rpm）的總效率值（ 21.31 ± 1.43 ）。然而此結果與 Swain 等（1992）的研究結果不同，Swain 針對受專業訓練的登山車騎士於跑步機上進行 10% 的爬坡測試，在相同的騎乘速度之下（11.3 km/h），發現受試者於 84 轉的心跳率、氧耗量、換氣量皆顯著低於 41 轉，而受試者的血乳酸值、Breg 自覺量表分數、呼吸交換率卻無達顯著差異，這顯示出在相同騎乘速度下，使用高踩踏迴轉數將獲得更多的優勢。但 Swain 並無指出其受試者在所有騎乘測試下的總效率值，因而無法瞭解其受試在使用高低踩踏迴轉數下對總效率的影響情形。儘管如此，Swain 所使用的受試者仍舊是受過專業訓練的騎士，因此其結果無法與本實驗結果相較。

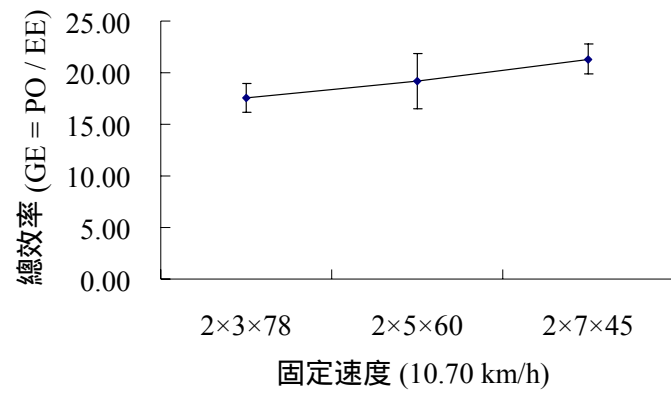


圖 4-4 固定騎乘速度之總效率變化情形

第五章 總結及對未來研究之建議

第一節 總結

在騎乘單車的過程中，當面臨不同的路況地形，使用不同的齒輪比及不同的踩頻將會導致不同的效率變化情形。在 Marsh & Martin (1993, 1997)，以及 Marsh, Martin & Foley (2000) 的研究中指出，騎士體適能的差異將會造成踩頻在效率上的差異情形。另外，Harnish, King, & Swensen (2007) 在針對世界頂尖騎士的研究中，發現騎士的踩頻最終將會面臨一個零界點，亦即當踩頻超過該值之後，騎士的騎乘表現將會下降。騎乘效率長年以來一直都是專業騎士或是休閒騎士極欲瞭解的一大課題，儘管國外的研究者已指出對受過專業訓練的騎士，使用高踩頻較具騎乘效率，但對於休閒騎士之騎乘效率的研究仍舊是缺乏的，至少在本研究結果可知使用低踩頻的效率是高於使用高踩頻的。因此，對於休閒的騎士而言，在從事單車運動中，筆者認為應先提昇自己的體適能，一旦自己的體適能提昇了，能使用之較具效率的踩頻值才會隨之增加。

最後，本研究認為在針對未受專業騎乘訓練但具環島經驗的休閒騎士而言，於跑步機上進行八種 8% 的上坡騎乘測試中，使用齒輪比 2.00 (亦即本文中所指出 2×7 的前後盤組合模式) 搭配踩頻 45 rpm 時，具有最高的總效率值 (21.31 ± 1.43)，其騎乘速度約為 10.70 km/h。

第二節 對未來研究之建議

另外，由表 4-1、表 4-2 及圖 4-1 可知騎乘速度從 7.18 km/h 至 10.70 km/h 的所有測試中，其總效率值出現隨騎乘速度的增加而增加的趨勢，但於騎乘速度由 10.70 增加至 14.02 km/h 時，其總效率值卻是下降的，而後至騎乘速度為 14.32 km/h 時，其總效率值又是逐漸增加。儘管於本研究結果中， $2 \times 7 \times 60$ 的總效率值大於 $2 \times 5 \times 78$ 的總效率值，但礙於本實驗使用之跑步機無法模擬更高的騎乘速度，因此對於騎乘速度增加至 14.00 km/h 之上時的總效率變化情形，是否亦是呈現逐漸增加，甚至超越本實驗於 10.70 km/h 之總效率值，則有待未來的研究者加以釐清。

本研究之研究主題在國外已發表的相關文獻中並不多見，但在面臨全球暖化，世界各國鼓吹節能減碳的情勢之下，相信單車騎乘活動將會愈趨流行，期望本研究能激發國人（針對未受過專業訓練的休閒騎士）進行更多與單車騎乘效率相關的研究，也期望本研究的結果能對愛好單車運動的休閒騎士們有所幫助。

參考文獻

中文文獻

余銘倫(2004)。軀幹角度對自行車騎乘舒適度之效應分析。

全國博碩士論文摘要檢索系統，092MIT00031002。

李文森(1986)。《解剖生理學》。臺北市：華杏出版股份有限公司。

廖武雄(2004)。登山車齒輪比與迴轉數。《單車誌》，13，84-86。

西文文獻

- Aaron, E. A., Johnson, B. D., Seow, C. K., & Dempsey, J. A. (1992). Oxygen cost of exercise hyperpnea: measurement. *Journal of Applied Physiology*, 72(5), 1810-1817.
- Astrand, P. O. & Rodahl, K. (1986). *Textbook of work physiology*, 3rd edn. New York: McGraw-Hill, Inc, (pp. 363-364).
- Beelen A., S., A. J. (1993). Effect of prior exercise at different pedalling frequencies on maximal power in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 66(2), 102-107.
- Berry, M. J., Woodard, C. M., Dunn, C. J., Edwards, D. G., & Pittman, C. L. (1993). The effects of a mountain bike suspension system on metabolic energy expenditure. *Cycling Sci.*, 5, 8-14.
- Berry, M. J., Koves, T. R., & Benedetto, J. J. (2000). The influence of speed, grade and mass during simulated off road bicycling. *Applied Ergonomics*, 31, 531-536.
- Bosco, C., Montanari, G., Ribacchi, R., Giovenali, P., Latteri, F., Iachelli, et al. (1987). Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetics of running. *European Journal of Applied Physiology*, 56(2), 138-143.
- Brouwer, E. On simple formulae for calculating the heat

- expenditure and the quantities of carbohydrate and fat oxidized in metabolism of men and animals, from gaseous exchange (oxygen and carbonic acid output) and urine-N. *Acta Physiol. Pharmacol. Nederl.* 6,795– 802, 1957.
- Cavanagh, P. R & Kram, R. (1985). Mechanical and muscular factor affecting the efficiency of human movement. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17, 326-331.
- Chavarren, J. & Calbet, J. A. (1999). Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 80(6), 555-563.
- Coast, J. R. & Welch H. G. (1985). Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology*, 53(4), 339-342.
- Coyle, E., Sidossis, L. S., Horowitz, J. F., & Beltz, J. D. (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of Type I muscle fibers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(7), 782-788.
- di Prampero, P. E., Atchou, G., Brückner, J. C., & Moia, C. (1986). The energetics of endurance running. *European Journal of Applied Physiology*, 55(3), 259-266.
- di Prampero, P. E., Gortili, G. Mognoni, P., & Saibene, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *Journal of Applied Physiology*, 47(1), 201-206.

- di Prampero, P. E. (2000). Cycling on Earth, in space, on the Moon. *European Journal of Applied Physiology*, 82(5-6), 345-360.
- Duc, S., Villerius, V., Bertucci, W., & Grappe, F. (2007). Validity and reproducibility of the Ergomo®Pro power meter compared with the SRM and Powertap power meters. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2, 270-281.
- Ferguson, R. A., Aagaard, P., Ball, D., Sargeant, A. J., & Bangsbo, J. (2000). Total power output generated during dynamic knee extensor exercise at different contraction frequencies. *Journal of Applied Physiology*, 89(5), 1912-1918.
- Foss, Ø. & Hallén, J. (2004). The most economical cadence increases with increasing workload. *European Journal of Applied Physiology*, 92(4-5), 443-451.
- Jones, J. G. W. (1973). *The Biological efficiency of protein production*. London: Cambridge University Press.
- Gaesser, G. A. & Brooks G. A. (1975). Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *Journal of Applied Physiology*, 38(6), 1132-1139.
- Gregor, R. J., Broker, J. P., & Ryan, M. M. (1991). The biomechanics of cycling. In: *Exercise and sports science reviews 19*, edited by J. O. Holloszy. Sydney: College of Sports Med., (pp.127-167).
- Hagberg, J. M. & McCole, S. (1996). *Energy expenditure*

- during cycling*. In: Burke, E.R. (Ed.), *High-Tech Cycling*. Human Kinetics, Champaign, IL, pp. 167-184.
- Hansen, E. A., Andersen, J. L., Nielsen, J. S., & Sjøgaard, G. (2002). Muscle fiber type, efficiency, and mechanical optima affect freely chosen pedal rate during cycling. *Acta Physiologica Scandinavica*, *176*, 185–194.
- Hansen, E. A., Jørgensen, L. V., & Sjøgaard, G. (2004). A physiological counterpoint to mechanistic estimates of “internal power” during cycling at different pedal rates. *European Journal of Applied Physiology*, *91*, 435–442.
- Hansen, E. A. & Sjøgaard, G. (2007). Relationship between efficiency and pedal rate in cycling: significance of internal power and muscle fiber type composition. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *17*, 408–414.
- Hermansen, L. & Saltin, B. (1969). Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, *26*(1), 31-37.
- Horowitz, J. F., Sidossis, L. S., & Coyle, E. F. (1994). High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *International Journal of Sports Medicine*, *15*(3), 152-157.
- Howe, C. R. (1995). Course terrain and bicycle set-up. *Cycling Science*, *6*, 14-26.
- Kyle, C. R. (1988). Mechanics and aerodynamics of cycling. In: *Medical and Scientific Aspects of Cycling*, edited by

- E. R. Burke & M. M. Newsom. Champaign, IL: Human Kinetics, (pp. 235-251).
- Kyle, C. R., (1991). Ergogenics for bicycling. In D.R. Lamb, & M.H. Williams (Eds.), *Perspectives in Exercise Science and Sports Medicine*, 4. (pp. 373-419).
Ergonomics-Enhancement of Performance in Exercise and Sport. Indianapolis, IN: Wm. C. Brown.
- Lee, H., Martin, D. T., Anson, J. M., Grundy, D., & Hahn, A. G. (2002). Physiological characteristics of successful mountain bikers and professional road cyclists. *Journal of sports sciences*, 20(12), 1001-1008.
- Lucia, A., Hoyos, J., & Chicharro, J. L. (2001). Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33, 1361-1366.
- Lucia, A., San Juan, A. F., Montilla, M., Canete, S., Santalla, A., Earnest, C., & Perez, M. (2004). In Professional Road Cyclists, Low Pedaling Cadences Are Less Efficient. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(6), 1048-1054.
- MacIntosh, B. R., Neptune, R. R., & Horton, J. F. (2000). Cadence, power, and muscle activation in cycle ergometry. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(7), 1281-1287.
- Marielle, E., Porszasz, J., Riley, M., Wasserman, K., Maehara, K., & Barstow, T. J. (1996). Effects of hypoxic hypoxia on O₂ uptake and heart rate kinetics

- during heavy exercise. *Journal of Applied Physiology*, 81(6), 2500-2508.
- Marsh, A. P. & Martin, P. E. (1993). The association between cycling experience and preferred and most economical cycling cadences. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25, 1269-1274.
- Marsh, A. P. & Martin, P. E. (1997). Effect of cycling experience, aerobic power, and power output on preferred and most economical cycling cadences. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(9), 1225-1232.
- Marsh, A. P., Martin, P. E., & Foley, K. O. (2000). Effect of cadence, cycling experience, and aerobic power on delta efficiency during cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32, 1630-1634.
- McKay, G. A., & Banister, E. W. (1976). A comparison of maximum oxygen uptake determination by bicycle ergometry at various pedaling frequencies and by treadmill running at various speeds. *European Journal of Applied Physiology*, 35(3), 191-200.
- Michielli, D. W., & Stricevic, M. (1977). Various pedalling frequencies at equivalent power outputs. *New York State Journal of Medicine*, 77(5), 744-746.
- Millet, G. P., Tronchie, C., Fuster, N., & Candau, R. (2002). Level ground and uphill cycling efficiency in seated and standing positions. *Medicine and Science in Sports*

- and Exercise*, 34(10), 1645-1652.
- Minetti, A. E., Pinkerton, J., & Zamparo, P. (2001). From bipedalism to bicyclism: evolution in energetics and biomechanics of historic bicycles. *Proceeding. Biological sciences / The Royal Society*, 268(1474), 1351-1360.
- Mogensen, M., Bagger, M., Pedersen, P. K., Fernström, M., & Sahlin, K. (2006). Cycling efficiency in human is related to low UCP3 content and to type I fibers but not to mitochondrial efficiency. *J. Physiol.*, 571, 669–681.
- Mognoni, P. & di Prampero, P. E. (2003). Gear, inertial work and road slopes as determinants of biomechanics in cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 90(3-4), 372-376.
- Mora-Rodriguez, R. & Aguado-Jimenez, R. (2006). Performance at High Pedaling Cadences in Well-Trained Cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(5), 953–957.
- Moseley, L. & Jeukendrup, A. (2001). The reliability of cycling efficiency. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(4), 621-627.
- Nordeen-Snyder. K. S., (1977). The effect of bicycle seat height variation upon oxygen consumption and lower limbs kinematics. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 9(2), 113-117.
- Olds, T. S., Norton, K. I., & Craig, N. P. (1993).

- Mathematical model of cycling performance. *Journal of Applied Physiology*, 75(2), 730-737.
- Saltin, B. & Åstrand, P. O. (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *Journal of Applied Physiology*, 23(3), 353-358.
- Sjøgaard, G., Hansen, E. A., & Osada, T. (2002). Blood flow and oxygen uptake increase with total power during five different knee-extension contraction rates. *Journal of Applied Physiology*, 93(5), 1676-1684.
- Stainsby, W. N., Gladden, L. B., & Barclay, J. K. (1980). Exercise efficiency: validity of base-line subtractions. *Journal of Applied Physiology*, 48, 518-522.
- Swain, D. P. & Wilcox, J. P. (1992). Effect of cadence on the economy of uphill cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(10), 1123-1127.
- Swain, D. P. (1994). The influence of body mass in endurance bicycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 26(1), 58-63, 1994.
- Tokui, M. & Hirakoba, K. (2007). Effect of internal power on muscular efficiency during cycling exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 101, 565-570.
- Tokui, M. & Hirakoba, K. (2008). Estimation of Oxygen Cost of Internal Power during Cycling Exercise with Changing Pedal Rate. *Journal of Physiological Anthropology*, 27, 133-138.
- Wells, R., Morrissey, M., & Hughson, R. (1986). Internal

- work and physiological responses during concentric and eccentric cycle ergometry. *European Journal of Applied Physiology*, 55, 295–301.
- Widrick, J. J., Freedson, P. S., & Hamill, J. (1992). Effect of internal work on the calculation of optimal pedaling rates. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24, 376–382.
- Willems, P. A., Cavagna, G. A., & Heglund, N. C. (1995). External, internal and total work in human locomotion. *Journal of Experimental Biology*, 198, 379–393.
- Williams, C. B., Bredell, G. A. G., Wyndham, C. H., Strydom, N. B., Morrison, J. F., & Peter, J., et al. (1962). Circulatory and metabolic reactions to work in heat. *Journal of Applied Physiology*, 17, 625-638.
- Winter, D. A. (1979). A new definition of mechanical work done in human movement. *Journal of Applied Physiology*, 46, 79–83.
- Zoladz, J. A., Rademaker A. C., & Sargeant, A. J. (2000). Human muscle power generating capability during cycling at different pedalling rates. *Experimental Physiology*, 85(1), 117-124.