

自行车运动性能的数学模型

T.S. Olds, K. I. Norton, and N. P. Craig

新南威尔士大学体育与休闲研究学院人类生物能量学实验室，新南威尔士州奥特利，2223；以及南澳大利亚州体育学院，南澳大利亚州阿德莱德，澳大利亚

Olds, T. S., K. I. Norton, and N. P. Craig. 数学 J. Appl. Physiol. 75(2): 730-737, 1993.- 提出了一个自行车运动性能的模型。该模型是基于对所做的总工作量的两个表达式的等效。一个表达式是由生物力学原理推导出来的，从总阻力中得出能量需求。另一个是有氧和无氧能量系统的可用能量模型，包括运动开始时摄氧动力学的影响。然后，该方程可以对任何变量进行求解。根据经验得出的现场和实验室数据被用来评估该模型的准确性。模型对4,000米个人追赶时间的估计显示，与18名高性能轨道自行车运动员测量的时间的相关性为0.803(P<0.0001)，平均差异(预测-测量)为4.6秒(平均表现时间的1.3%)。该模型可以估计生理、生物力学、人体测量和环境参数的改变对运动能力的影响。

生物能量学；生物力学；运动表现

将数学模型应用于运动表现可以阐明不同生理系统的相互作用，并可作为训练中的一种有价值的辅助手段。这样的模型可以用来：1) 预测成绩；2) 识别具有在特定运动中表现出色的生理逻辑要求的人；3) 量化特定生理逻辑参数变化对成绩的影响；以及4) 量化其他未知的或无法测量的成绩特征，如有氧和无氧来源的能量的相对贡献。有两类通用的量化模型，即拟合度模型和模拟模型。拟合度高的模型主要使用统计程序来预测一组回归者的响应变量。另一方面，模拟模型

"从头开始"，从已知或公理的逻辑、物理和生理规律中建立定性模型。然后加入定量表达，通常来自一些经验性研究。尽管模拟模型用于参数估计的样本的特征很敏感，而且必须采用简化的假设，但它们允许我们阐明各种参数影响响应变量的方式以及相互之间的互动。它们还允许阐述"如果"的情景。本研究试图开发一个自行车性能的模拟模型。

以前的作者(6, 8, 11)使用生物力学数据来模拟自行车运动性能。本文采用的方法是开发两个独立的前

对自行车运动能量学的推测。一个是利用di Prampero等人(6)提供的数据，从生物力学原理得出的自行车运动能量需求表达式。另一个是自行车运动员可以提供的最大能量的表达。然后，这两个表达式被等价，方程被反复求解。该模型允许预测生理、生物力学、人类学和环境因素的变化对自行车运动表现的影响。为了评估该模型的准确性，我们将其应用于18名专门从事4000米个人追逐赛的高性能场地自行车运动员的测试结果。

方法

计算自行车的能量需求。在稳态工作中，骑车人必须做功来克服滚动阻力(R_r，单位：N)和空气阻力(R_a，单位：N)。在上坡或下坡时，所做的总功会有所改变。最后，在运动开始时，需要额外的工作来加速生物循环。

R_r与自行车的综合质量成正比(M_b，in kg)和骑手(M，in kg)，以及R_r系数(CR，与轮胎压力和胎面、车轮转速和路面有关；参考文献。8)。R_r可以用以下公式表示

$$R_r = CR \cos[\arctan(S)](M + M_b) \quad (1)$$

其中S是赛道的坡度(上升/运行)。外力cos[arctan(S)](M+M_b)是由自行车的综合质量和自行车所施加的法力。

骑手。当在平地上骑行时，这等于M + M_b。在这个表达式中，齿轮、链条和其他运动部件的摩擦被认为是可以忽略的。di Prampero et al.

(6)发现R_r等同于3.2N。

自行车和骑手的平均综合质量为70公斤，地形为平地。将这些值代入公式1，得到=3.2CR，-70或CR=0.0457。这被保留为默认值。克服R_r所需的能量(E_{Rr}-单位为J)由以下公式给出

$$E_{Rr} = CR \cos[\arctan(S)](M + M_b)d \quad (2)$$

其中dis的事件距离为米。

因为R_a随着速度的平方增加，必须克服的R_a的一般表达式是

$$R_a = k(v_{as} + v_w)^2 \quad (3)$$

其中R_a的单位是牛顿，v_w是头部(正)或尾部(负)

的风速（单位是米/秒）， v_{∞} 是稳态的自行车

73 00161-7, 6/793 \$2.00 版权所有 © 美国生理学会

速度（单位：米/秒），而 k 是一个常数。这可以扩展为(19)为

$$R_a = 0.5 C_D A \rho (v_{ss} + v_w)^2 \quad (4)$$

其中 C_D

代表阻力系数， A 为亲和力。

骑手的正面面积（单位：米），空气密度（单位：公斤/米³）。 C_D 与自行车和骑手的空气动力学形状等因素有关。影响它的一些因素是服装、车架设计、配件、车轮半径、头盔和盘轮（5，11）。

A 与骑手的体表面积（BSA）有关和自行车形状。 A 随骑行姿势而变化，但在比赛姿势下，它是BSA的~25%（22）。在di

Prampero等人的研究中，骑手的BSA为 $m^{1.772}$ 。

假设 A 与BSA成正比，我们可以通过乘以校正系数（CFA）来校正。骑手的BSA是质量（ M ）和身高（ H_t ，厘米）的函数，由Dubois公式（7）给出

$$BSA = M^{0.425} H_t^{0.725} 0.007184 \quad (5)$$

因此， CFA 将等同于 $BSA/1.77$ 。

ρ 与气压（PB）成正比，在mmHg），并与温度（ T ，in）成反比。

°K)。在di Prampero等人的研究中，PB为755 Torr， T_{was} 为288°K。因此，可以使用第二个空气密度校正系数（CFP）。

$$cfp = \frac{288}{(755t)(6)} \quad (pb)$$

Di Prampero等人估计公式中的 k_3 值为

0.19。因此，这个常数可以改写为0.19CFPCF

A 。因为速度只有在加速完成后才是恒定的，所以克服 R_a 所需的能量

(ER_a ，单位：J)在稳态阶段的数据为

$$ER_a = 0.19CFPCF(v_{ss} + V_w)^2(d - d_{acc}) \quad (7)$$

其中， d_{acc} 是达到最终的 v_{ss} 所需的距离（单位：米）。

如果球场不平坦，必须考虑到违背或随坡度而做的功。在上坡时，所做的功相当于骑手和自行车的重量（牛顿）乘以垂直距离。垂直距离由 d 乘以 $\sin[\arctan(S)]$ 得到。也就是说，在一个坡度上骑行所需的能量（ $E_{g,ade}$ ，单位为J）是

$$E_{grndc} = (M + Mb)g \sin[\arctan(S)] \quad (8)$$

其中 g 是重力加速度（海平面上为9.807米/秒²）。

必须使用不同的算法来计算从起点加速所需的能量。应用牛顿第二定律，力=质量x加速度，加速的质量是骑手的质量加上自行车的质量（ $M+Mb$ ）。速度从0到 v_{ss} 在一些（未知的）时间内（ t_{acc} ，ins）改变。因此，我们可以把增加动能所需的力（ F_k ，单位N）表示为

$$F_k = (M + Mb)v_{ss}/t_{acc} \quad (9)$$

$$E_k = 0.5(M + Mb)v_{ss}^2 \quad (10)$$

这正如预期的那样，是系统在加速阶段的动能变化。然而，在这个阶段，需要额外的能量来克服 R_a ，它与 $(v_{ss} + v_w)^2$ 成正比，其中 v

是瞬时速度（单位：米）。由于速度在这一阶段不断变化，所需的功取决于动力发展的模式，因此取决于 R_a 。如果我们假设在这个阶段超过 R_a 所需的总功相当于平均 R_a 乘以总 d ，那么潜在的误差就会很小。在开始时， R_a 将是0.19CFPCFA v ！。在加速阶段结束时， R_a 将是0.19CFPCFA $\times (v_{ss} + v_w)^2$ 。平均阻力，假设线性加速，将是0.19CF μ CFA $[v + (v_{ss} + v_w)2]/2$ 。因此，加速所需能量的表达式（ E_{acc} 以J为单位）必须重新表述（结合"动能元素 E_k 和 R_a 成分）。

$$E_{acc} = 0.5(M + Mb)v_{ss} + 0.19CFPCFA \times [V_{ss} + (v_{ss} + v_w)^2]d_{acc}/2 \quad (11)$$

在加速过程中必须克服的 R_r ，已经由公式计算出来了2。

循环的总能量需求（ $E_{tot} = ER_a + ER_a + E_{grade} + E_{acc}$ 在J）因此可以表示为

$$\begin{aligned} \ddot{A} &= d\{CR, \cos[\arctan(S)](M + Mb) \\ &+ (M + Mb)g \sin[\arctan(S)]\} \\ &+ (d - d_{acc})0.19CFPCFA \\ &\times (v_{ss} + v_w)^2 + 0.5(M + Mb)v_{ss} \end{aligned} \quad (12)$$

加速时做的功（ E_k ）是加速阶段 F_k 和 d_{acc} 的乘积。在这里使用的模拟中，假定 d_{acc} 等于100平均值是这个阶段的平均速度（0.5- v_{ss} ）与 t_{acc} 的乘积。

$$+ 0.5dacc0.19CFPCFA [v! + (v_{ss} + vw)]$$

在推导 E_{tot} 的过程中，我们做了以下假设。1) CR 和 C_0 与 d_i P_{ram}

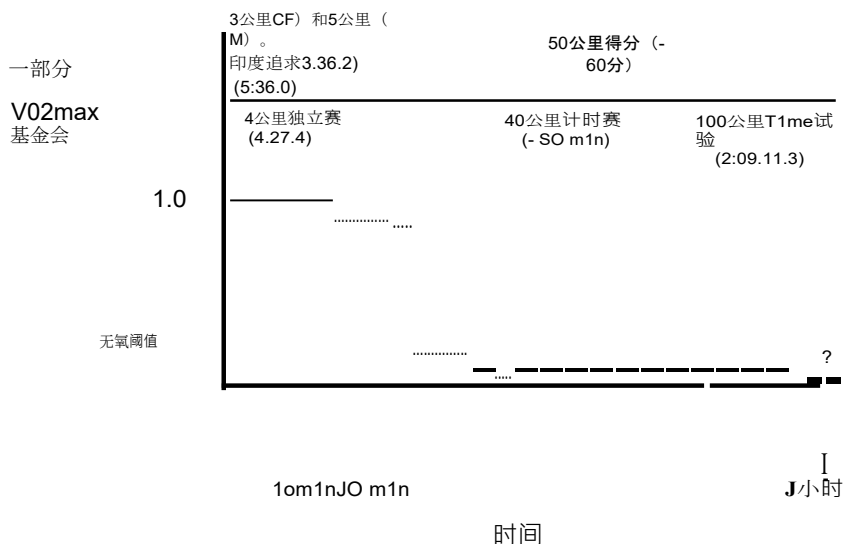
等人发现的相似；2) A 是BSA的一个恒定部分；3) 加速到 v_{ss} 是恒定的；4) 一旦达到 v_{ss} 会保持；5) "牵制"不会发生；6) 在这个模型的应用中，假设 ace 为100%；7) 自行车运动部件的摩擦被认为是可以忽略的。

可用能量的计算。可用的能量是指进行这项工作必须从有氧和无氧来源中获得，并转化为外部工作。对于持续时间小于2-3分钟的运动，也许在受过专门训练的人中更少（3），来自"无氧"能量来源（包括储存的氧）的最大贡献可以通过最大累积氧的赤字（ O_2 def, 以升为单位；文献15, 16）来量化。这可能达到3-

6升，随着比赛距离的增加，其重要性也会降低。有氧产生的能量与最大有氧功率（ Vo_{2max} , l/min）有关，也与一旦达到稳定状态，在表演期间可以维持的 vo_{2max} 的2最大部分（f）有关。对于

短时间内（<10分钟），训练有素的运动员有可能保持接近100%的 o_{2max} 容量。例如，划船运动员在整个6-7分钟的比赛保持接近 Vo_{2m}

ox的 Vo_2 （见参考文献21的图12）。对于长时间的工作，这是不可能的。对于min30和2-3h的工作时间，无氧阈值



图：说明
关系
理论1. 的
最大 O_2 摄取量 ($Vo_2 =$) 的一部分，在不同的最大骑行表演中能够维持。持续时间。包括各种轨道和公路比赛距离的当前世界纪录时间，仅供参考。F，女性；M，男性。

已被证明是预测自行车性能的一个重要因素 (3, 17)。对于中间时期 (介于1030分钟之间)， f 以一种未知的方式下降。直到

在本模型中， f 被认为是比赛时间的一个连续的非线性函数，在比赛时间为 $s10$ 分钟时取值为1，在比赛时间为分钟30时取值相当于个人无氧阈值。对于比赛时间介于分钟和10分钟之间30， f 是通过线性插值确定的 (图1)。图中描述的模式是1推测性的，但在进一步研究澄清这种关系之前，可以作为一个临时模型。几乎所有的竞争性自行车赛事都持续<10分钟或30分钟至2-

3小时 (图1)。对总的可用内能的估计 (E_{int} , 升 O_2) 因此是

$$E_{int} = O_2def + tV_02 \text{ ma}, f \quad (13)$$

其中， t 是表现时间 (分钟)， $2Odef$ 是最大的累积缺氧量，由以下公式确定

医学博士等人的方法(15)。

在运动开始时，摄氧量 (Vo_2) 不会立即上升到其最终的稳态水平。虽然更复杂的模型在更高的工作率 (WR ; 参考文献12) 下能更好地描述。 Vo_2 的动力学，在开始时的 Vo_2 动力学。的运动量可以近似地描述为

$$\dot{V}_{O_2} = (V_{O_2} - V_{O_2i}) / (1 - e^{-t/\tau}) \quad (14)$$

其中 Vo_2

t_2 是 t 时的 Vo_2 ， Vo_2f 是最终 (稳定状态) 的 Vo_2 ， Vo_2i 是初始 (比赛前) 的 Vo_2 ， r 是时间常数 (12)。在 Vo_2 之前发生的 $2Odef_2$ 高原是 $r(Vo_2 \text{ max} - f_2Vo_2i)$ (24)。因此，总的可用内能 (作为0当量 2) 可以表示为

$$E_{int} = 2Odef + tfV_02 \text{ max}_2 - r(Vo_2 \text{ max}_2 - Vo_2i) \quad (15)$$

这种能量的最大供应速度 [内部功率 (P_{int} ; 单位: $1/\text{min}$)]，在一个过程中持续时间为 $t \text{ min}$ 的事件是

$$P_{int} = [2Odef + tV_02 \text{ max}_2 - r(Vo_2 \text{ max}_2 - Vo_2i)] / t \quad (16)$$

事件的总时间 (分钟) 是加速所需时间的总和 [取为 d, c

$$P_{int} = [2Odef + (d + dacc) / 60v - Vo_2 \text{ max}_2, f - r(Vo_2 \text{ max}_2 - Vo_2i)] / [(d + dacc) / 60v -] \quad (17)$$

E_{int} 代表可用的内部能量供应。然而，由于人机系统的低效率，为完成所需的外部工作而必须在内部产生的能量将大大增加。自行车的总机械效率可以在一个模拟骑行姿势、踏板频率和赛车自行车角度的ERGocycle上测量。通过一系列次极限试验，可以建立 Vo_2 (l_2/min) 与 WR (W) 的线性回归关系，其形式如下

$$Vo_2 = \text{梯度}_2 - WR + \text{截距}$$

或

$$WR = (Vo_2 - \text{截距}) / \text{梯度} \quad (18)$$

其中梯度是回归线的斜率，截距是回归线的截距。为了把最大的 P_{int} 与最大的外部功率联系起来，我们把 P_{int} 的表达式 (公式17) 插入公式中。18

$$WR = (P_{int} - \text{intercept}) / \text{gradient} = \{ [2Odef + (d + dacc) / 60v - Vo_2 \text{ max}_2] - r(Vo_2 \text{ max}_2 - Vo_2i) \} / [(d + dacc) / 60v -] - \text{截距} \} / \text{梯度} \quad (19)$$

为了将其转换为 t 分钟内可用于外部工作的能量总量 (E_{supply} , 单位为J)，我们乘以 $(d + dacc) l_u -$

$$E_{supply} = [(d + dacc) / U_{0.1} \{ [Odef + (d + dacc) / 60v - o \text{ max}_2 - r(Vo_2 \text{ max}_2 - Vo_2i) \}] / \quad (20)$$

$J (0.5 \times 60v -)$ 1和稳态阶段所需的时间 $[(d + dacc) / 60v -]$, 即 $(d + dacc) / 60v -$ 。因此，公式 16 可写为

[(d + dacc)60v--] - 截距}/梯度

在推导 E_{supply} 方程时，做了以下假设。21,) 机械效率在超极限和亚极限水平上是相似的，3) 在改良的健身车上测得的机械效率与在跑道或公路上测得的机械效率相似，4) 机械效率是指：1.

表
改变身体和生理参数对4,000米个人自行车追逐赛成绩的影响¹。

变化的	4,000-m 时间, 秒	变化, s	变化。 %
Vo _{2m} (l/min) 5.914	328.5	-15.5	-4.5
5.143	344.0		
4.586	357.3	+13.3	+3.9
O ₂ 亏损 (升)	5.917337.0-7.0-2.0		
	4.414344.0		
2.872	350.0+6.0+1.7		
鸭嘴兽 (m)	50341.9-2.1-0.6		
	100344.0		
150	346.2		
	+2.2+0.6		
氧气量 (l/min)	342.9	-1.1	-0.4
1.105	344.0		
0.681	344.6	+U.6	+U.2
0.439			
M(kg)	335.2	-8.8	-2.6
65.25	344.0		
75.29	352.6	+8.6	+2.5
86.00			
高度 (厘米)	344.6	-2.8	-0.8
173.0	344.0		
179.3			
τ (min)	0.460341.4-2.6-0.7		
	0.594344.0		
	0.710346.2		
	+2.2+0.7		
机械效率			
0.0121; 0.125			-
330.813.2-3.8			
0.0129;	0.318344.0		
0.0142;		+0.742	
公斤	367.623.6+6.9		
	6.0343.8-0.2-0.1		
	7.0344.0		
8.0	344.2+0.2+0.1		

标准值是用来确定模型预测准确性的受试者的平均水平。Vo_{max2} 最大₂摄取量；dacc, 加速距离；Vo_{init}, 初始摄取量₂；M, 骑手的质量；Ht, 骑手的高度； τ , 时间常数；Mb, 自行车质量。机械效率是由梯度（单位：l·min⁻¹·W⁻¹）和截距（单位：l/min）组成的。

加速阶段的物理效率与稳态阶段的效率相似。

因此，我们得出了一个工作的总能量需求的表达式（公式12）和另一个能量供应的表达式（公式20）。通过对这两个表达式进行等价处理，我们可以直接或迭代地求出所有其他变量的值，以解决任何变量的问题。

模型的准确性。为了评估模型的预测准确性，将经验得出的数据代入公式12和20，并求解v，从而求解t。所有受试者都是澳大利亚或南澳大利亚体育学院的自行车奖学金获得者。测量包括实验室和赛道测

签名软件。通过使用电子扭矩计，在整个生理测量范围内对测力计进行了动态校准。

简而言之，实验室测量包括三项测试。1) 进行标准的人体测量，然后进行增量测试，使用5分钟的时间来确定稳态Vo₂在不同的亚马逊的WRs。受试者从W开始100，逐渐地以50瓦的增量增加WR，直到他们不能再保持所需的踏板节奏。所要求的踩踏节奏是指在85每个工作阶段的最后2分钟内测得的120·Vo₂被用作稳态值，并与功率输出进行回归。这一关系的斜率和截距被用作骑行效率的指标。回归线的相关系数为0.995（估计的标准误差=128ml O₂）。2) 使用1分钟的时间进行增量测试以确定最大有氧功率。受试者开始在W200

并按W/25min增加。V_{0max2}被确定为当连续的WRs的Vo₂相差<0.15 l/min。3) 在最大测试后1周内的另一天，以估计需要的强度进行超大规模的测试。进行了115%的₂最大功率测试。这个测试到用尽的时间是试。用于实验室测试的测力计是一个风刹车的自行车测力计（4）。瞬时功率（W）和总做功（kJ）的连续测量，以及其他做功指标的计算和储存，都是使用专门设计的。

根据Medb0等人(15)的程序和 v_{O_2} 动力学的速率来确定最大的累积 O_2 赤字。实际所需的WR是由每个受试者的 Vo_2 与功率输出的关系推算出来的。这些测试的平均时间为 174 ± 47 (SD) 秒。在上述每个测试过程中，逐次评估 Vo_2

基础上 (Ametek OCM-2 代谢评估系统)，然后根据测试的要求在较长时间内进行平均。10秒的 O_2 赤字和 Vo_{2ki} 的测试，S30用于 Vo_{2max} 测试，S60用于循环效率测试。

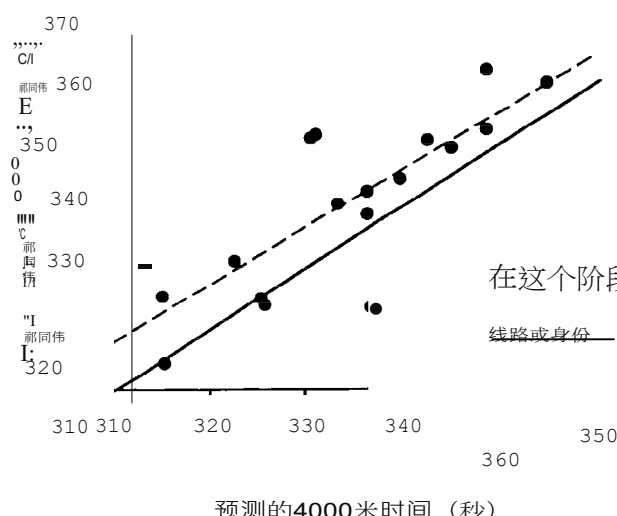
场地测试包括在400米的门外混凝土自行车场上进行定时站立启动的4000米个人追逐赛。受试者使用他们的公路自行车和服装。平均时间为 339.7 ± 14.1 (SD) 秒 (范围为314.4-362.2秒)。在赛道骑行的当天，环境条件平均为 $P_B = 768.9$ Torr, $T = 296.4^\circ K$, 最大 $v_w < 2.5$ mis (平均=) 。0.9米/秒)。

通过一系列的测试，可以推导出上述模型中概述的变量。比赛前的 Vo_2 Vo_{2init} 是紧接着超大规模测试开始前测得的 vo_2 ，直到用尽。测量了自行车和骑手的综合质量 (单位：公斤)。 τ 是通过迭代拟合以下形式的曲线得到的

$$LiV_{O2} = (V_{O2max} - Vo_{2init})(1 - e^{-t/\tau})$$

在超极限测试中记录的10s值。拟合结果都很好，相关系数从0到0.941不等。 0.98.

模拟中使用的迭代程序是一种简单的强制方法。根据 E_{tot} 和 E_{supply} 的预测值之间的差异，猜测并反复调整预测变量 (v_i) 的合理值。递增或递减



图：测量和预测的4千米时间之间的关系2。

使用0.001米/秒，直到差异的符号发生变化。E_{to}和E_{supply}之间的残差从未超过E_{supply}值的0.2%。

结果

根据模型预测的速度和时间与4000米计时赛的测量时间进行了比较。预测时间和测量时间之间的相关性为0.803 ($P_{\text{corr}} < 0.0001$; 95%置信度为0.54; $P_{\text{corr}} < 0.92$; 图2)。测量时间和预测时间的平均差异(测量-预测)为4.6秒(平均4000米时间的1.3%)，平均绝对差异为7.7秒(2.3%)，均方根误差为9.5秒(2.8%)。

讨论

利用生物群落、环境和生理因素建立了一个数学模型，以估计循环的能量需求(以及随后的时间)。这个模型的基础是di Prampero等人的研究(6)。由于所使用的自行车(现代公路自行车)和骑行表面(混凝土轨道)的相似性，本研究中所考虑的阻力和R_r特性被认为与di Prampero等人的结果非常相似。使用收集到的18名精英自行车运动员的数据对该模型的预测准确性进行了评估。预测时间和测量时间之间有很强的相关性($r = 0.803$)，误差很小。

在这项研究中，预测表现的模型的准确性是令人鼓舞的，因为受试者是一个相对同质的群体。在一个更加异质的群体中，可能会发现更强的相关性。例如，如果样本时间只代表分布的上半部分，那么实际的群体相关性将是 $r = 0.91$ (10)。预测时间和测量时间之间的小平均差、均方根误差和平均绝对误差表明，模型预测的时间是对实际时间的良好估计。

剩下的误差也许可以部分归因于动机和疲劳等因素，而这些因素

不容易建立模型。我们也没有对可能由于不同的骑行服和自行车设计而引起的C_o变化进行建模(11)。此外，我们还没有包括苏式极限运动中机械效率可能发生的变化的模型部分(20)。

这个模型中的一个简化假设是，比赛开始时的加速度是恒定的。事实上，这种情况是不可能的。主要的能量需求

是将E_k传授给自行车骑手系统。暂时的。在加速到一个典型4000米个人目标时在s14中，一个75公斤的骑手在一个7公斤的机器上必须产生J8,036的E_k。适合的速度(14 m/s)。在加速阶段的E_{tot}将取决于与速度和时间有关的函数。当一些不同的函数

通过建模(线性、指数、二次、对数、双曲线、各种多项式、两个线性分段)，估计在14秒内加速到14米/秒的E_k加E_{Ra}和E_R)，在8263和11370焦耳之间。

即使是短距离的比赛，如4000米追逐赛，E_{tot}的2%也是如此)。对于目前研究中的平均值来说，最大的可能误差为±1.4秒。一般来说，在优化总能量成本和最小化峰值功率之间存在着权衡。例如，如果速度是时间的指数函数，加速阶段所需的总能量相对较小(8,263焦耳)，但1秒的峰值功率输出需要7,196焦耳。这样的发电模式显然是不可能的。实际的加速模式可以被选择，以使整个加速阶段的功率需求均匀。当速度是时间的对数函数时，发电量是相当均匀的，能源成本是适中的。需要进一步的经验研究来确定比赛开始时的实际加速模式。

尽管有这些假设和限制，该模型所解释的变异百分比(64%)很高，大于任何单独使用或组合使用的模型参数所解释的变异百分比。逐步回归法保留了两个变量作为4000米时间的重要预测因素(V₀和V_{max2}和质量)，但综合系数(R_{adj} = 0.76)低于使用该模型得到的系数。

除了显示出与数据的良好拟合外，该模型还基于物理和生理类似物，左手边代表克服外部阻力所需的工作，右手边代表有氧和无氧系统产生的能量。该模型的每个组成部分都在标准测试中被严格操作，显示出良好的可靠性(13)。

Kyle (11) 根据生物力学原理建立了一个自行车运动的能量需求模型。然而，这个模型有局限性，因为它没有包括生理方面(即能量供应)。通过计算由于坡度、风、增加的质量和阻力造成的阻力变化，凯尔已经可以对这些变化对运动时间的影响做出一些具体的预测。本模型产生的结果是

与凯尔的预测相当相似。例如，凯尔预测，一个额外的0.454公斤的自行车质量将使一个米4,000的追赶者完成比赛的时间增加0.05秒。290

s.本模型将预测s的0.08增加。

凯尔估计，如果阻力可以减少120克，40公里的计时赛成绩将从50分钟的底线上减少39秒。本模型预测减少30秒。两个模型之间的模拟坡度和风力的影响也相当相似。根据凯尔的研究，在静止的条件下，在平地上以保持每小时公里32的速度骑行，在2%的上坡上，速度为每小时23.4公里，在2%的下坡上，速度为每小时40.9公里。本模型的相应预测值为21.3和42.5公里/小时。凯尔的模型表明，在相同的功率输出下，骑行在每8小时公里的头风中，速度为28公里/小时（而目前的模型为27.4公里/小时）。在8时速为公里的尾风中骑行将导致

导致速度为36.2公里/小时（本模型为36.7公里/小时）。Peronnet等人(18)概述了一个与这里采用的非常相似的骑行能量成本的生理模型。该模型用于预测1小时自行车运动的最佳海拔高度。在补充算法的帮助下，估计了海拔高度对最大 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}O_2$ 动力学、 p 、体重力和其他模型参数的影响，本模型也可用于预测最佳海拔高度。建议的海拔高度（3850米）与本模型在类似假设下预测的海拔高度（约3400米）相似。

这里采用的一般建模策略（能量需求和能量供应的等价表达）可以推广到其他具有类似封闭技能性质的体育赛事（例如，速度滑冰和轮滑、划船、跑步和竞走）。任务的能量需求可以从生物技术中确定。

机械第一原理或根据经验确定的 $\dot{V}O_2$ (19)。类似于这里使用的能量需求模型可以应用于速滑运动 (23)。

相当不同的物理生物力学模型（包括了级别，例如，流体力学）可用于

其他运动。目前模型的局限性包括持续时间小于2分钟的项目，在这些项目中存在着机械效率的改变和充分表达最大无氧能力的能力问题。还应该解决在超极限WR时 $\dot{V}O_2$ 动力学对WR的可能依赖问题。对于长时间的比赛（>2-

3小时），底物利用能力可能会限制成绩，因此使用这个模型是不合适的。在现实生活中，坡度和环境条件的变化使建模非常困难，如铁人三项和赛段比赛。一种策略是将比赛细分为时间或距离片，对每个片进行单独建模。风速和温度的变化可以用类似的方式进行事后建模，尽管计算会非常复杂，而且只具有理论意义。一般性的问题，如风速或坡度对往返路线的影响，可以得到解决 (11)。

这里所模拟的自行车赛事在某些方面是一个"理想

"的事件，因为它假定一旦达到恒定的比赛速度就会保持下去。这有

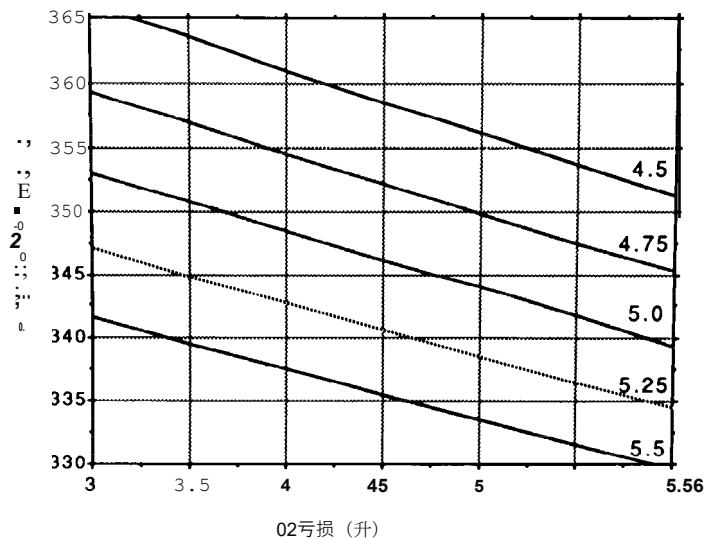


图3.改变赤字 O_2 和 $\dot{V}O_{2max}$ 对每个人的影响
曲线表示 $\dot{V}O_{2max}$ 值为4.5,4.75,5.0,5.25,5.5,5.56 min.

已经证明了精英田径运动员的情况（他们的单圈速度变化±<1 s）。能力较弱的骑手表现出稍大的变化（25）。此外，没有考虑到"牵制

"的因素，而牵制已被证明可以将32-40公里/小时的自行车的氧气成本降低20-62% (14)。然而，在铁人三项的自行车赛段、个人计时赛和阶段性比赛的计时赛段中，牵制是非法的，在大多数个人轨道耐力赛中并不适用。

模型的预测能力可以考虑

通过引入与环境因素（如海拔和温度）对生理特征的影响有关的算法，可以增强其效果。不同类型自行车的阻力特性的更多判别模型、基于人类计量学的更好的估计以及不同表面（例如，混凝土与木制自行车场）的CR数据也可以被纳入模型。关于现代设备阻力特性的明显改善的数据可以纳入目前结构的模型中。已经提出了现代轨道自行车的暂定阻力值（18）。对亏损动力学的理解，即最大累积Oidef的速度，将有助于使该模型更适用于持续时间很短（<2分钟）的事件。

尽管有这些注意事项，所采用的一般建模策略将允许根据生理参数的性能影响和这些参数的可训练性来做出训练决定。例如，该模型可用于量化各种生理参数对4,000米骑行成绩的贡献。表1显示了在保持其他参数不变的情况下改变一个模型参数的效果。这些理论上的改变对成绩的影响显然取决于改变的幅度。我们选择了我们研究中发现的每个变量的最高值和最低值的近似值，同时保持其他变量不变，大约等于记录的平均值。另一个应用的例子是

3.该图表示在改变两个变量,即 $\dot{V}O_{2\max}$ 和 V_{02} ,同时保持其他变量不变时的预测性能结果。

这些分析表明,决定4000米个人追逐成绩的主要因素包括最大有氧功率和机械效率(反映在梯度和截距上)。这并不奇怪,因为我们已经计算出有氧系统在5分钟的模拟追逐中贡献了 $84 \pm 1\%$ 的能量需求(3)。此外,场地自行车运动员有时会在训练中骑行超过35,000公里/年。这种训练的主要价值可能在于改善我的身体状况。

医学上的效率(从降低 V_{02} 型血的比率的意义上来说,正如其他运动员群体所显示的那样(9),每单位外部功率输出的机械效率,而不是基质利用率的降低。)然而,最近,一些训练有素的耐力自行车运动员的机械效率差异被归因于纤维类型的差异(1)。研究发现,与毛细胞附着效率有关的I型肌纤维百分比的决定系数为0.56。其余变化能力(44%)的决定因素尚不清楚。值得注意的是,在耐力训练年限和机械效率之间发现了显著的关系,但在循环训练年限和机械效率之间没有发现显著的关系。一个可能的解释是,机械效率的提高有生理上的原因,而不是生物力学上的原因。无氧能力和BSA(由质量和身高决定)也很重要。

对4,000米骑行成绩的贡献,而 V_{02} 动力学和最初的 V_{02} 水平对每分钟的贡献相对较小(但可能具有生理意义)。

形成。

质量会以多种方式影响自行车运动的能量需求。首先,额外的质量将增加克服 R_r 、自行车-骑手系统所需的 E_{acc} 和 E_{grade} 的能量。第二,身体质量的增加伴随着BSA的增加,因此 A 也会增加。使用本研究报告的平均值,我们的模型表明,身体质量的5公斤变化将导致4,000米时间的 ± 0.07 分钟(4.2秒)的变化。在成绩时间的总变化中,大约27-28%可以归因于质量增加对 R_r 和 E_k 的影响。其余的是由于 A 的增加,从而导致 R_a 的增加。确切的比例将随着速度、距离和坡度的变化而变化。

一个有趣的问题是风速的影响(即恒定的头风或尾风)。通过使用本研究中发现的平均值,如果比赛不是在环形赛道上进行,5公里/小时的头/尾风将使4公里的成绩时间改变 ± 7 -

8%(约25秒)。在环形赛道上,头风和尾风将趋于相互抵消。每小时 ± 1 公里的轻风将改变性能时间的 $\pm 1.5\%$ (5秒)。因此,风速是预测成绩时间的一个关键因素。在比较那些受到相同或类似风阻的运动员时,它就不那么重要了。目前不可能对交叉风的影响进行建模。

总之,本文提出的模型,当应用于4000米个人追逐赛时,显示出高度的预测准确性。该模型提供了有关运动员身体和生理特征改变后的表现结果的信息。所采用的策略也可适用于类似能量需求的运动。

作者感谢John

McCormick在重新审视本文的数学方面的协助。

本文所用算法的苹果MacIntosh电脑程序(需要HyperCard 2.0)可从T.S.Olds, St. George Campus, Univ. of New South Wales, PO Box 88, Oatley, New South Wales Australia获得。2223,

这项研究得到了澳大利亚体育委员会的部分支持。

请求重印的地址。K. I. Norton, 体育与健康学院, St. George Campus, Univ. of New South Wales, PO Box 88, Oatley, New South Wales Australia 2223。

1992年529月收到;323月接受最终形式1993。

参考文献

- Coyle, E. F., L. S. Sidossis, J. F. Horowitz, and J. D. Beltz. 循环效率与I型肌纤维的百分比有关。《医学。体育运动科学》24: 782-788. 1992.
- Craig, N. P., and R. A. J. Conyers. 40公里个人自行车计时赛的生理和生物化学相关因素。在《Proc. Aust. 运动医学。Fed. Natl. Sci. Conf. 悉尼》1988, 29-30.
- Craig, N. P., K. I. Norton, B. Squires, S. Woolford, P. C. Bourdon, T. Stanef, T. Olds, R. A. J. Conyers, and C. V. W. WALSH. 有氧和无氧指数对赛道耐力自行车性能的贡献。《Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.》In press.
- Craig, N. P., and C. Walsh. 自行车。在《体育专用指南对精英运动员的生理评估》。堪培拉: 澳大利亚体育委员会, 第198, 21-57页。
- DAL MONTE, A., L. M. LEONARDI, C. MENCHINELLI, and C. MARINI. 基于生物力学和先进技术的新自行车设计。《Int. J. Sports Biomech.》3: 287-292, 1987.
- di Prampero, P. E., G. Cortili, P. Mognoni, and F. Saibene. 自行车手的运动方程。《J. Appl. Physiol.》47: 201-206, 1979.
- DuBOIS, E. F. *Metabolism in Health and Disease* (3rd ed.). Philadelphia, PA: Lea, 1936.
- Gregor, R. J., J.P. broker, and M. M. Ryan. 自行车运动的生物力学。在《运动和体育科学评论》, 编辑19, J. O. Holloszy. 澳大利亚, 悉尼。Am. College of Sports Med., 1991, 127-167.
- HAGERMAN, F. C. 划船的应用生理学。《Sports Med.》1: 303-326, 1984.
- Hunter, J.E., F. L. Schmidt, and G. B. Jackson. *Meta-Analysis: Cumulating Research Findings Across Studies*. Beverly Hills, CA: Sage, 1982.
- KYLE, C.R. 自行车运动的力学和空气动力学。在《自行车运动的医学和科学问题》, E. R. Burke 和 M. M. Newsom 编辑。伊利诺伊州香槟市: Human Kinetics, 第1988, 235-251页。
- LINNARSSON, D. 运动开始和结束时肺部气体交换和心率变化的动态。《Acta Physiol. Scand. Suppl.》415: 1-68, 1974.
- Macdougall, J. D., H. A. Wenger, and H.J. Green. *高性能运动员的生理测试* (第二版)。Champaign, IL: Human Kinetics, 1991.
- McCole, S. D., K. Clancy, J. -C. Conte, R. Anderson, and J.M. Hagberg. 骑自行车时的能量消耗。《J. Appl. Physiol.》68: 748-753, 1990.
- MEDBO, J. I., A.-C. MOHN, I. TABATA, AND M. SEJERSTED. 由最大累积 O_2 亏损决定的有氧能力。《J. Appl. Physiol.》64: 50-60, 1988.
- medbo, j. i., and i. tabata. 有氧和无氧能量释放的相对重要性, 在滑动持久的疲惫的自行车运动。《J. 67: 1881-1886 J. Appl. Physiol.》1989.
- Miller, F. R., and T. G. Manfredi. 生理学和人类学

- 15公里计时赛自行车性能时间的计量预测。 *Res.Q.* 58: 250-254, 1987.
18. PERONNET, F., P. Bourssou, H. PERRAULT, AND J. RICCI. 在海平面和高海拔地区的一小时骑行记录。 *自行车科学》* 3: 16- 22, 1991.
 19. PUGH, L. C. G. E. 摄氧量与速度的关系, 以及对自行车测力计的比较观察。 *J. Physiol. 土地*. 241: 795-808, 1974.
 20. SALTIN, B. 无氧能力: 过去、现在和未来。在。 *运动的生物化学七*, 由A.泰勒, P.D.高尔尼克编辑。 H.J. Green, C. D. Ianuzzo, E. G. Noble, G. Metivier, and J. R. Sutton. Champaign, IL: Human Kinetics, vol1980., p21., 387-412.
 21. SECHER, N. H. The physiology of rowing. *J. Sports Sci.* 1: 23-53, 1983.
 22. SJOGAARD, G., B. Neilsen, F. Mikkelsen, B. Saltin, and E. R. Burke. *CyclinR* 中的生理学。伊萨卡, 纽约。运动出版物。1985.
 23. VAN INGEN SCHENAU, G. J. 空气摩擦对速滑的影响。 *生物力学* 15: 449-458。1982.
 24. WHIPP, B. J. 轻度运动中氧气摄取动力学的速率常数。 *J. 应用生理学*。30: 261-263, 1971.
 25. Wilberg, R. B., and J. Pratt. 追逐赛和公斤级赛道项目中的自行车运动员的比赛情况调查。 *Can.J. Sport Sci.* 13: 208-213, 1988.

