

## 优化骑行动力

作者：Alex

ander D. Springer

提交给机械工程系  
部分满足机械工程理学士学位的要求

在

麻省理工学院 6月 2016

© 2016 亚历山大-D-斯普林格。保留所有权利。

作者在此授权麻省理工学院可以将本论文的全部或部分内容以现在已知的或以后创造的任何媒介复制并公开发行纸质和电子版。

作者签名。

---

机械工程系

2016年5月6日

认证机构：：

阿内特-

细井 机械工程系教授

论文指导老师

接受的是。

---

阿内特-

细井 机械工程系教授

本科生干事



# 优化骑行动力

作者：Alex

ander D. Springer

于2016年5月6日提交给机械工程系，以部分满足学位的要求。

机械工程专业理学士

## ABSTRACT

在这项研究中，我们确定了一个可行的生物能量模型，用于自行车比赛期间的功率分配。已经提出了各种模型来解决比赛中的功率分配问题，其中有两个模型高于其他模型：Morton-Margaria三槽模型和Skiba能量平衡模型。能量平衡模型在MATLAB中实现，并与Golden Cheetah中的黄金标准实现进行比较，以模拟运动员在骑行过程中的能量消耗。通过2014年环法自行车赛的骑行数据验证了该模型的实施是成功的。此外，该模型还通过样本功率曲线进行了进一步测试，以了解骑行过程中的能量消耗情况。

调查中出现了两个关键的发现。首先，我们需要在能量平衡模型中更好地说明疲惫情况，这可以通过将低于临界功率的时间加权于高于临界功率的时间来实现。这是因为与低于临界功率时的恢复相比，自行车手在较高的功率输出下会变得更加疲惫。

第二，能量平衡模型应该使用一个可变的时间常数，因为骑行和比赛在临界功率以下有高度可变的恢复期，这影响了运动员重建其能量的能力。使用一个可变的时间常数也可以解决第一个发现中确定的低于临界功率的努力的权重问题。

论文指导老师。阿内特-细井  
瓷砖。机械工程教授



## 鸣谢

作者要感谢以下贡献者。

- 论文导师**Anette Hosoi**教授，感谢她不断的指导和建议。
- ~~埃内斯托~~马丁内斯（ Ernesto Martinez），感谢他的项目愿景和有关有用研究应用的行业反馈。
- 艾玛-斯坦哈特，感谢她为本论文收集资源和数据的基础工作。
- ~~克里斯蒂娜~~切斯，感谢她对自行车运动的洞察力和成功商业化的经验。
- Mark Liversedge，创建了 Golden Cheetah，使其成为开放源码，并提供自行车数据分析的资源。
- Fabrizio L., 回答了关于 $W'$  的细微差别和错综复杂的问题。 *bal* Skiba等人的原始论文中没有涉及的方程式。



## 目录

.....	AB
STRACT .....	3
.....	鸣
谢5	
.....	目
录.....	7
.....	数
字列表.....	8
1. 简介9	
2. 构建最佳步调 .....	策略
10	
2.1 临界功率.....	曲线
10	
2.2 人类生物能量.....	模型
13	
2.2.1 莫顿-马格里亚三槽 .....	模型
14	
2.2.2 斯基巴能源商店.....	模型
17	
3. 建立最佳起搏	
策略的模型 .....	19
4. 讨论24	
4.1 加权恢复.....	时间
24	
4.2 能量平衡	
模型的局限性.....	24
5. 结论26	
6. 参考文献 .....	29

## 数字列表

图2-1。	临界功率曲线的例子	11
图2-2:	典型的行驶功率数据和关键功率	14
图2-3。	莫顿-马格里亚三槽模型	16
图3-1。	2014年环法自行车赛中的 " $W'$ "。 $bal$	21
图3-2:	金色猎豹生产的 $W'$ 的图表 $bal$	22
图3-3。	各种功率曲线的 $W'_{bal}$ 图	23



## 1. 简介

运动员们正越来越多地寻求越来越小的优化余地，以便在他们的学科中脱颖而出。在从几百米到几百英里不等的比赛中，当领奖台上的位置只相差几秒钟，甚至更少时，任何能够帮助运动员更快地冲过终点的东西都能带来巨大的好处。在自行车运动中，性能优化可以使运动员之间产生巨大差异。在2009年的环法自行车赛中，第3<sup>rd</sup>名的列维-莱普海默与阿尔伯托-康塔多之间相差31秒，后者以小时91和秒数赢得了这场艰苦的赛段比赛<sup>26</sup>（McGann Publishing LLC）。领奖台上的选手之间的时间差占整个比赛时间的0.009%。的确，在优化比赛成绩时，每一点都很重要。

自行车运动员在比赛时有一个单一的目标；首先冲过终点线。虽然这个目标很简单，但实现它需要更多的细微差别。像许多现代运动一样，自行车运动受数字和指标的制约。对于大多数指标来说，主要的关注单位是瓦特，或者说是时间的能量。瓦特是衡量自行车运动员在自行车上所投入的力量，取决于自行车运动员在比赛期间如何分配他们的能量。自行车手可以选择在短时间内产生大量的能量，或者在长时间内使用较少的能量。自行车手如何选择使用他们的能量在自行车上产生动力，是区分第一名和中间名次的关键因素。

本论文的目标是确定一个数学模型和一组参数，以优化自行车运动员在竞争性自行车比赛中的功率分配。这个模型将考虑到自行车运动员的个人功率输出、赛道的地理环境、运动员的恢复时间和其他参数等因素，为自行车运动员的最佳功率输出提供个人建议。一些理论上的模型，如3-Tank、Exertion

曲线和Skiba模型已被提出来分配功率，但没有一个模型得到实验数据的验证。利用这些模型，预测的自行车功率输出将与实际的功率输出和恢复时间进行比较，这些数据来自精英自行车运动员的训练骑行和环法职业自行车赛。将提出一项建议，即用实际比赛数据验证的最佳数学功率模型，并考虑到具体的生理参数。这一建议将被用于开发一个自行车运动员的模型，以衡量在比赛中的实时功率输出的最佳功率输出。这个用于自行车运动员的模型将极大地改善目前的实时输出功率，并将数据转化为可操作的数据，提供关于何时进攻、何时放松以及运动员的油箱中还有多少能量可供最后冲刺的信息。

## 2. 构建最佳步调策略

### 2.1 临界功率曲线

临界功率(CP)是指一个自行车手在一定时间内所能维持的最大功率水平，单位是瓦特。一个骑车人从满能量开始能保持一定功率的最大时间长度，构成了临界功率曲线上的一个数据点。对于每一个瓦特值，都有一个有限的时间段，自行车手可以保持一定的功率。这些数据点中的每一个都构成了临界功率曲线（CPC）。通常情况下，图表的形状遵循双曲线，其中时间沿X轴，功率沿Y轴。这表明，自行车运动员可以在短时间内保持极高的功率水平（例如：在冲刺阶段），而他们可以在更长的时间内保持相对较低的功率水平（例如：在计时赛阶段）。幸运的是，现代软件套件，如自行车运动员常用的Golden Cheetah和Strava，可以根据来自功率的汇总骑行数据自动计算出临界功率曲线。

米<sup>1</sup>。这些程序识别出对应于高功率输出和低功率输出的骑行部分，以及保持该功率的时间长度，并相应形成临界功率曲线。图2-1显示了一个使用Golden Cheetah软件编制的数据的临界功率曲线例子。

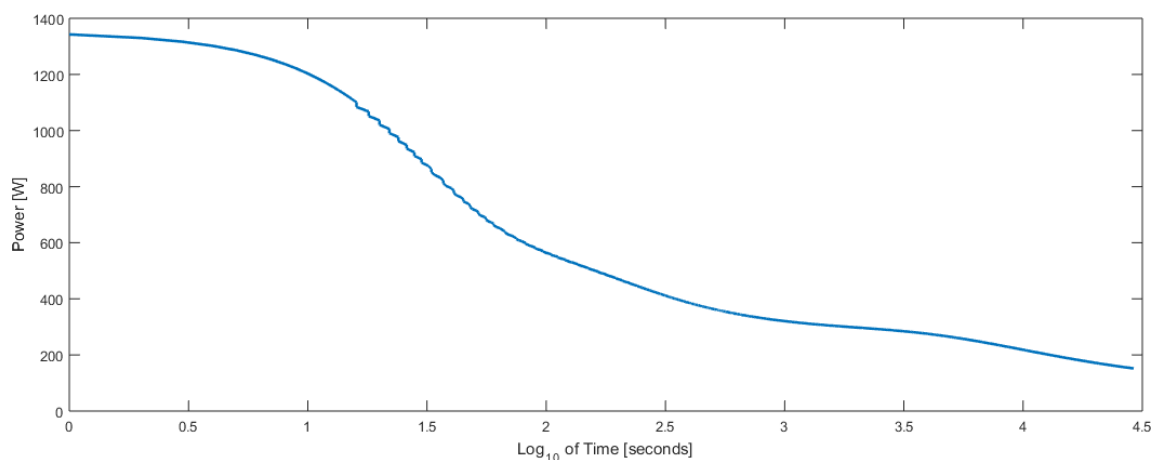


图2-

1:在对数时间尺度上绘制的临界功率曲线示例，显示了功率随时间增加而衰减的情况。对数<sub>10</sub>（0.5）等于3.2秒，对数<sub>10</sub>（4）等于2.8小时。

与临界功率曲线相结合，自行车运动员常用的另一个术语是功能阈值功率（FTP）。

功能阈值功率是指一个自行车运动员在一小时内所能维持的平均最大功率输出。当自行车运动员谈到他们的临界功率时，FTP经常被用来用一个值来描述他们的临界功率，而不是通常用来说明全貌的曲线。

对许多运动员来说，测试FTP是很困难的，因为在一小时内完成最大努力的节奏既是一种挑战，又要花费从这种努力中恢复的时间。因此，许多运动员以计时赛的方式在一个平坦的直道上完成20分钟的平均最大功率测试，以获得20分钟间隔的关键功率读数。

---

<sup>1</sup>功率计是自行车运动员常用的工具，它可以通过曲柄臂、变速箱或踏板轴实时测量他们的功率，这取决于功率系统的品牌。常见的系统有CycleOps PowerTap、Stages Power和Quarq系统。

然后，FTP可以通过取20分钟测试的平均功率的95%来计算（Wattbike）。与临界功率曲线一起，FTP通过自行车上产生最大功率的能力，提供了自行车运动员健身水平的部分情况。此外，这些工具还提供了一个比较点，可以在原始功率输出方面客观地比较自行车运动员。然而，对自行车运动员之间的功率进行更公平的比较，应以体重为标准，因为较重的自行车运动员必须产生更多的功率才能与较轻的自行车运动员走同样的距离和速度。因此，在自行车运动中，像FTP和以每公斤瓦特为单位的CP曲线这样的标准化功率指标也很常见。

由于临界功率曲线构成了运动员在一定时间内的最大平均功率输出，运动员在比赛过程中可能会超过或低于这个功率值。由于临界功率值是一个平均值，这将意味着任何高于该值的偏差都会与低于临界功率值的偏差同样匹配。然而，比赛数据显示，情况并非如此（Skiba, Chidnok 和 Vahatalo）。在一定时间内超过临界功率是有生理代价的，需要更多的时间低于临界功率来恢复，而不仅仅是平均到临界功率值的时间量。因此，在优化起搏时，最好是在不超过临界功率的情况下尽可能地接近最佳临界功率。此外，研究还表明，超过临界功率阈值的偏差越大，运动员就会更快地精疲力竭，或者必须花更多的时间来恢复（de Lucas, de Souza and Costa）。换句话说，在适度的时间内以少量的方式超过临界功率，往往比在短时间内以大量的方式超过临界功率的生理代价要小。运动员经常会提供一些轶事证据，说明在短间隔训练中，短跑的感知努力和恢复时间比长间隔高于临界值的时间要多。从这些结果来看，一个线性平均的

高于和低于临界功率的努力在生理上是不相关的。相反，任何高于临界功率的努力都必须得到更多的重视，因为它们在生理上的代价更大，运动员必须花更长时间来恢复。在确定最佳计步策略时，自行车运动员在考虑超过其临界功率以保持与大部队一起上坡时，或在决定是否发起冲刺攻击时，必须考虑这一现象。

## 2.2 人类生物能量模型

一旦自行车手确定了他们的临界功率曲线，就可以进行简单的一阶计算，找到特定比赛的最佳功率分配。这可以通过计算完成比赛所需的总能量，然后除以一个临界功率值来确定在给定功率下完成比赛所需的时间。如果完成比赛的时间等于自行车手能够保持该功率输出的时间，那么这就是该次骑行的最佳功率分配。然而，这种方法在实际比赛中由于节奏和功率要求的变化而失效。

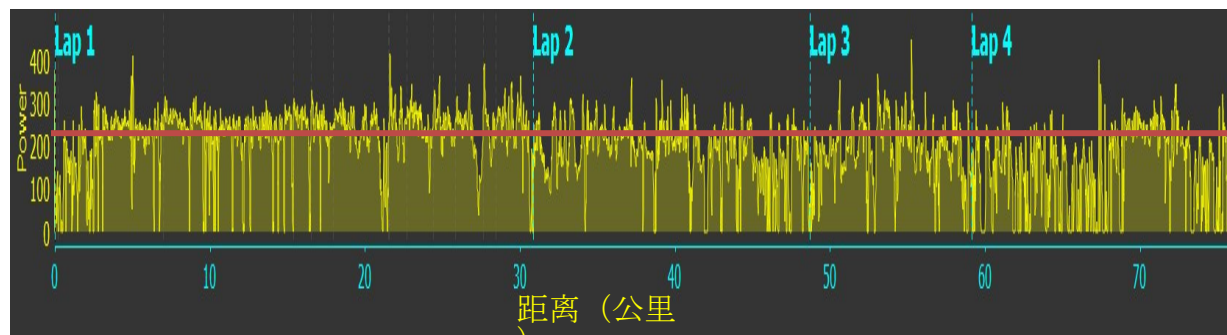
首先，计算完成一场比赛所需的总能量是很困难的，因为作用在自行车手身上的力量是可变的。有一个摩擦力，它随着路面的变化而变化。重力的计算相对简单，只要考虑到赛道的拓扑结构，并考虑到赛道上所有的海拔变化就可以了。还有一个阻力，它根据骑车人的速度、风向和风速、湿度、海拔高度、骑车人是否在另一个骑手后面起草，以及许多其他因素而变化。可靠地计算所有这些因素，并提前预测它们以计算比赛中的预期能量消耗，并不是确定赢得自行车比赛的最快方法。

由于这个问题，需要一个模型来说明功率的实时输出并考虑运动员在比赛中的生理反应。图2-

2是一个典型骑行的功率数据，以及该运动员在特定时间内骑行的临界功率线。该图显示了在一个特定的骑行过程中，临界功率上下的高变化性。考虑到低于临界功率的恢复时间以及高于临界功率的消耗，需要一个先进的功率分配模型，将生理因素与物理地理和课程条件结合起来。已经提出了各种考虑生理因素的模型，每个模型的实施方法略有不同。其中两个主要的模型包括莫顿-马尔加里亚三槽模型和斯基巴能量储存模型。

**图2-2：**典型骑行的功率数据与骑行者的临界功率线（223

W）一起绘制。功率数据变化很大，在临界功率阈值以上和以下的时间间隔各不相同。开发一个模型来考虑低于临界功率的恢复时间和高于临界功率的消耗，对于在



自行车比赛中优化分配功率是必要的。

### 2.2.1 莫顿-马格里亚三槽模型

莫顿-

马加里亚三槽模型将人体概念化为一系列的血管，这些血管在决定工作输出时遵循流体流动的规律（莫顿）。根据该模型的名称，有三个水箱构成了生物能量学模型，对应于人体产生能量的三种方式。图2-3描述了三个槽的模型。水箱P代表磷酸根系统，与工作输出W

通过自来水T，它可以调节所有高于休息的净能量消耗的流量。磷酸根系统通过使用储存的磷酸肌酸分子，以最快的方式促进三磷酸腺苷（ATP）的产生，并且可以无氧运行，也就是在没有氧气的情况下（卡普）。虽然磷酸根系统是最有效的能量生产方式，但由于身体没有储存大量的磷酸肌酸，它很快就会耗尽，实际上只用于长达10秒的极端努力（卡普）。

由于O型槽的容量是无限的，所以只显示了一部分，因为它代表了氧化源，也被称为有氧源。O槽通过R<sub>1</sub>管与P槽相连。与磷酸盐系统相比，有氧系统的ATP生成率很低，但其容量是无限的（卡普）。无限的容量使人们能够进行有氧活动，如步行，似乎是无穷无尽的。

最后一个槽，L槽，代表糖酵解无氧能量生产系统。L槽的上层设置在O槽底层的某个高度，但低于顶层，这意味着L槽只有在O槽部分排空后才开始填充P槽。在生理上，这意味着运动员在高于休息状态但低于无氧阈值的某个点上进入糖酵解无氧生产。一旦运动员超过了糖酵解的生产速度，他们在能量生产方面所剩下的就是少量的磷酸肌酸，而人体对其的利用是很迅速的。一旦耗尽，运动员必须休息和恢复，让他们的能量箱重新填满。L槽通过一个单向管R与P相连<sup>2</sup>，P通过另一个单向管R<sub>3</sub>与L相连。R<sub>2</sub>是一个比R厚得多的管子<sup>3</sup>，这意味着L排入P的速度比它被P重新填充的速度快得多。顺便说一下，当运动员耗尽了所有的槽，必须休息时，能量的回流来自O槽，因为氧气被用来产生更多的ATP，在体内作为能量源产生

磷酸根和糖酵解生产系统中使用的其他分子。有效地，这意味着补液分别通过R管<sub>1</sub>和R管<sub>3</sub>从O槽到P槽到L槽<sub>3</sub>。

糖酵解生产系统用于持续约30秒至2分钟的高强度运动，并以比磷酸根系统更快的速度生产ATP（卡普）。糖酵解系统中的无氧能量生产是肌肉中乳酸堆积的原因（Karp）。乳酸的积聚在体内有许多作用，包括抑制肌肉收缩和干扰发送到肌肉的电荷（卡普）。因此，身体在这个生产系统中实际上有一个紧急停止机制，当运动员排空了他们的油箱并超出了他们无氧生产能量的能力时，该机制会迫使肌肉停止收缩，并让运动员休息。

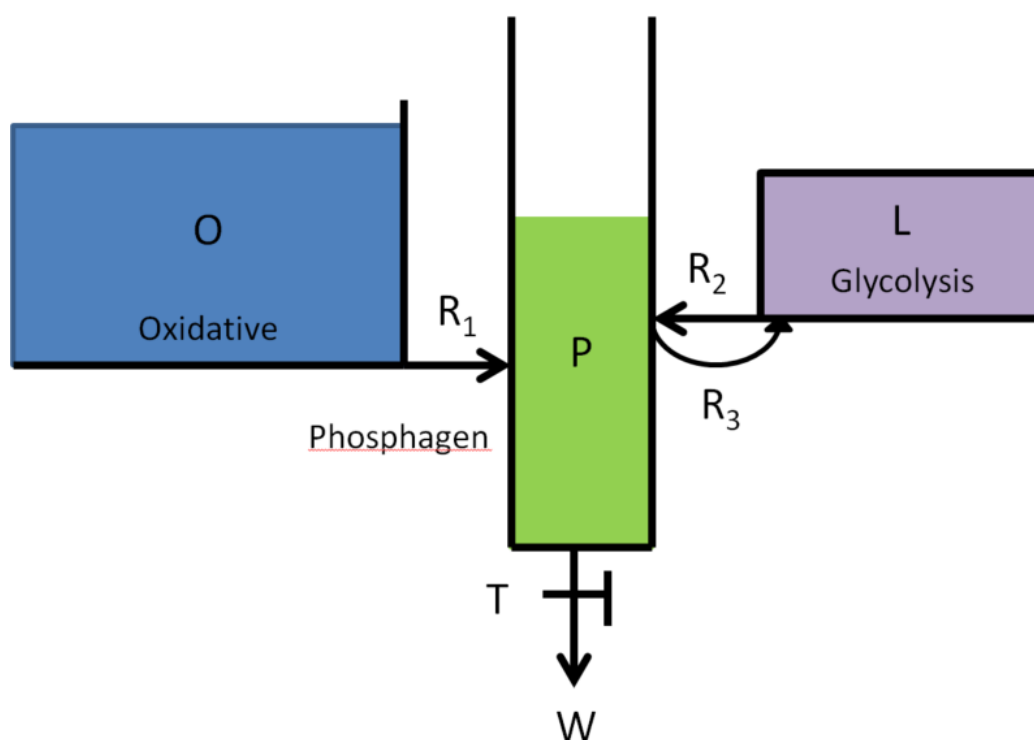


图2-3：莫顿-

马格里亚三槽生物能量学模型。该模型代表了人体的三个能量产生系统；氧化、磷酸和糖酵解；作为液压罐向任何能量消耗的工作输出，W。



虽然三槽模型提供了一个准确的能量流经身体的概念，但莫顿和马加里亚并没有量化决定该模型的流速。众所周知，磷酸根和糖酵解无氧能量的产生是有时间限制的，每个系统的能力都比氧化系统要小。运动员的恢复速度一般也是已知的，这可由摄氧量和心率来证明。从这些信息中，理论上可以确定水箱的再填充时间。然而，为了找出 $R_1$ 、 $R_2$ 和 $R$ 的相对流量<sup>3</sup>，人们必须想出一个新的测试方案，这可能会扩大液压系统隐喻的适用性的限度。另外，人们可以将液压油的流量方程编入计算机，并将参数与工作输出数据相匹配，试图尽可能地贴合工作曲线。这最后一种方法似乎是量化这个模型的最佳可能性，直到人们意识到这个模型没有考虑到耗尽的标准。换句话说，运动员在运动时，随着三个水箱的排空，最终会变得筋疲力尽，不会按照曲线匹配算法提出的流速来执行。三槽模型虽然在直觉上很吸引人，但它并不适合用于自行车运动员的工作产出和节奏优化的定量模型。

### 2.2.2 斯基巴能源商店模型

斯基巴能量储存模型与三槽模型一样，以直观的方式对人体进行概念化，这次是将人体视为一个能量储存的气罐。在斯基巴模型中，关注的主要参数是 $W'$ ，这是高于临界功率的有限工作能力（斯基巴，奇德诺克和瓦哈塔罗）。对于任何给定时间的骑行，自行车手可以在整个骑行过程中保持小于或等于其临界功率的工作输出，但一旦自行车手超过临界功率阈值，他们就开始使用油箱中的有限油量，即 $W'$ 。像 $W'$ 这样的参数比"三槽"更适合。

该理论用于模拟比赛中的最佳配速策略，因为它可以考虑到超CP的努力，如在自行车比赛中经常发生的冲刺或攻击，并将其纳入考虑范围。此外，利用现代自行车功率计，可以在骑行过程中测量功率输出，从而可以实时计算出 $W'$ ，以准确应对比赛中CP的变化和偏离。

$W'$ 的计算依赖于功率、CP和时间之间的双曲线关系。2010年，在一篇研究运动耐力和 $VO_{2max}$ 的论文中，它首次以目前公认的状态进行了数学表述（Jones, Vanhatalo and Burnley）。 $P$ 等于功率输出， $t$ 等于在该功率输出下耗尽的时间（Jones, Vanhatalo和Burnley）。

$$P = \frac{W'}{t} + CP \quad [1]$$

能量储存模型依靠三个假设来计算运动期间的能量平衡。这些假设是1) 当运动员超过CP时开始消耗 $W'$ ；2) 当运动员低于CP时，能量平衡又开始增加；3)  $W'$ 的重组遵循一个指数时间恢复路径，该路径对最近的努力比更早的努力更重视（Skiba, Chidnok和Vahatalo）。鉴于这些假设，可以制定一个方程来描述 $W'$ 的平衡（ $W'_{bal}$ ），其中消耗了一定量的 $W'$ （ $W'_{exp}$ ）。

$$W'_{bal} = W'_{exp} - \int_0^t W'_{exp} (t-u) e^{-\frac{(t-u)}{\tau_w}} du \quad [2]$$

其中， $W'$ 是从公式[1]中计算出来的， $(t-u)$

是高于CP的运动段之间的秒数， $\tau_w$ 是重建 $W'$ 的时间常数。1],  $(t-u)$

是CP以上运动段之间的时间（秒）， $\tau_w$ 是重建 $W'$ 的时间常数。这个公式需要

考虑到 $W'$ 在恢复到CP以下时记忆的消退，最近的努力比特定锻炼中遥远的过去发生的努力更有分量。

在对7名受试者进行了三种不同的运动测试以确定恢复率后，恢复常数方程被确定为如下。

$$\tau'_W = 546e^{-0.01D_{CP}} + 316 \quad [3]$$

其中 $D_{CP}$ 是所进行的测试中恢复力和CP之间的差异（Skiba, Chidnok和Vahatalo）。为了确定这个方程，数据与指数回归最接近，相关度为 $r^2=0.77$ ，特别是考虑到测试对象的数量不多（Skiba, Chidnok和Vahatalo）。该方程表明，运动员排空后 $W'$ 完全重组的最小恢复时间是316秒，略高于5分钟，之后的恢复时间会增加，这取决于休息间隔期间的工作输出（ $D_{CP}$ ）。

上述方程合在一起，构成了对运动员在竞技比赛中的实时能量监测的简单而实用的应用。现代自行车功率计可以将数据整合到这些方程中，并以 $W'$ 的形式提供可操作的数据，告知运动员何时需要恢复，或者根据运动员在比赛中的工作输出历史，何时可以进攻。

### 3. 建立最佳起搏策略的模型

有了基础方程，就可以在计算机软件中实现最佳计步策略。最终的目标是为自行车运动员在比赛中创建一个实时的能量水平指示。这可以用公式[2] 和 [3] 结合自行车运动员的功率计数据来完成。另外，对于跑步、游泳和其他运动，功率可以是

用速度代替，临界功率可以用临界速度代替，而时间可以用距离代替。使用上述方程式，可以构建一个类似的能量箱模型。

该模型是利用2014年环法赛期间各车手在网上发布的数据构建的（TrainingPeaks）。从这些数据中，我们收集了比赛过程中的时间和功率。储能方程的实现是在MATLAB中完成的，选择MATLAB是因为它的易用性和处理大型数据集的能力。由于每一秒都有一个功率数据点，考虑到骑行持续数小时，一次骑行可能有数千个数据点，必须分别进行整合，这是一个计算成本很高的过程。MATLAB是一个很适合处理这种任务的程序。

下面的图3-

1显示了一个骑行者的 $W'$ 的计算结果，与该骑行的相应功率在同一时间段内绘制。当功率超过临界功率阈值时，如蓝色虚线所示， $W'_{bal}$ 开始迅速下降，因为骑行者正在从他们的能量储存中提取能量。然而，当骑行者下降到临界功率线以下时， $W'_{bal}$ 又开始增加，尽管很慢。 $W'$ 的恢复和耗尽的斜率差异 $_{bal}$ 具有直观的意义；骑行者必须花更多的时间来恢复，而不是在临界功率以上的时间。此外，运动员恢复的时间越接近临界功率，恢复的时间就越长。同样，这也有直观的意义，因为在间歇期后以非常轻松的低瓦特输出进行恢复，比在比赛中接近临界功率的恢复要快得多。这两个发现表明， $W'_{bal}$ 的变化既取决于运动员是高于还是低于临界功率，也取决于偏离临界功率的大小。

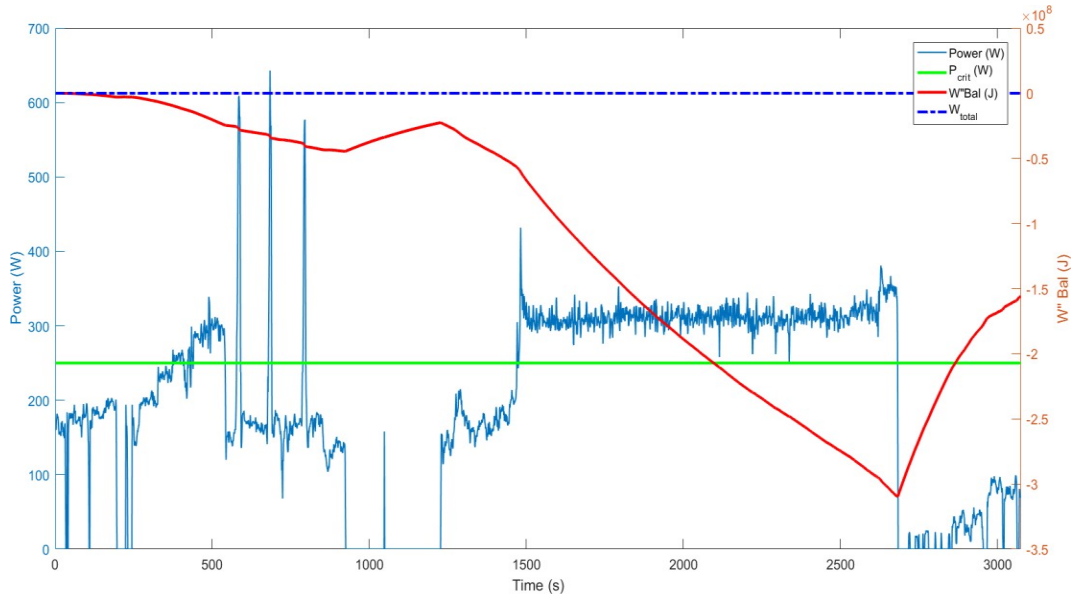


图3-

1：环法自行车运动员在比赛中的 $W'$ 模型 $_{bal}$ 与功率输出的关系。当自行车手超过他们的临界功率时，如蓝色虚线所示， $W'_{bal}$ 急剧下降。当自行车手在临界功率以下骑车进入恢复期时， $W'_{bal}$ 缓慢上升，直到完全恢复。

图3-2显示了使用Golden Cheetah软件绘制的同样的旅程。Golden

Cheetah对 $W'$ 的实现 $_{bal}$ 被认为是忠实于Skiba(Mantica)的原始方程概念的黄金标准。由于这个原因，与Golden Cheetah  $W'_{bal}$ 方程的密切匹配将被认为是能量平衡模型的准确实现。

如图所示，与MATLAB的实现相比，Golden

Cheetah软件显示了类似于骑行的能量平衡曲线。每个例子中都使用了相同的参数； $\tau_{W'}$ 、临界功率和 $W'$ ，这进一步验证了MATLAB中 $W'_{bal}$ 方程的实现。

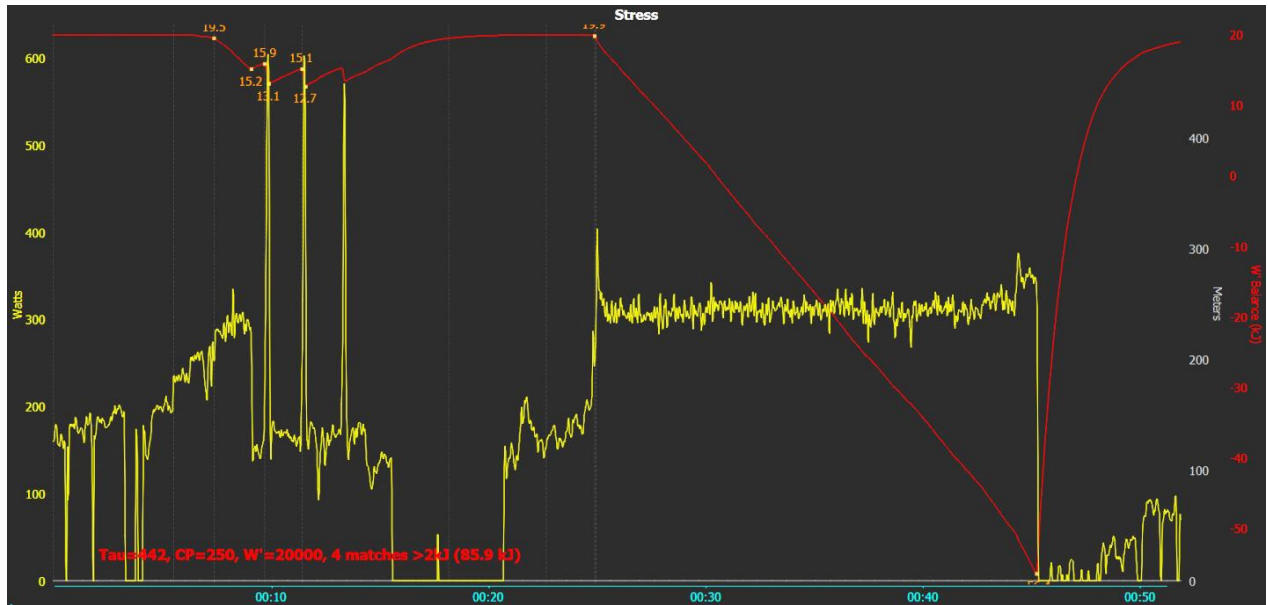


图3-2：Golden

Cheetah在MATLAB实现中 $bal$ 使用相同的 $\tau_w$ 、临界功率和 $W'$ 参数制作的 $W'$ 图，突出了所创建的能量平衡模型的相似性和可重复性。

为了进一步测试和完善该模型，我们创建了功率曲线的例子，以确定该模型的行为是否符合预期。这些测试案例包括高于和低于临界功率的时间间隔，其时间长度和高于和低于临界功率的偏差幅度各不相同。图3-

3显示了由不同的功率曲线和相应的 $W'_{bal}$ 曲线组成的四个独立图表。第一个剖面图显示功率是一个阶梯函数，从低于临界功率到高于临界功率。第二张图显示功率是一个随时间增长的线性函数。虽然这不是骑行时的现实模型，但它准确地显示了 $W'_{bal}$ 函数随着临界功率阈值的接近和超过而减少的反应，此外，随着临界功率的日益超过而更快地减少。第三个剖面包括一个高于临界功率的恒定功率函数。这个模型也超出了生理上的可能性，因为 $W'_{bal}$ 有一个最小值为0，代表完全耗尽。然而，如果一个运动员无限期地持续在临界功率以上，他们的 $W'_{bal}$ 函数将继续减少并变成负值，如第三张图所示。最后。

第四个剖面图显示了一个方形函数，在高于和低于临界功率输出的相等时期内交替出现。

尽管与临界功率的偏差在任何一边都是相同的瓦特数，但 $W'_{bal}$ 函数却在逐渐减少。这是因为

为 $W'$ 占 $bal$ 了超过临界功率的活动后需要增加的恢复，因为身体在激烈运动后需要的恢复时

间比运动时间长。由于 $W'_{bal}$ 函数与Golden

Cheetah程序中的实现密切相关，它充分处理了四个描述的测试案例，并且与生理学直觉

一致。

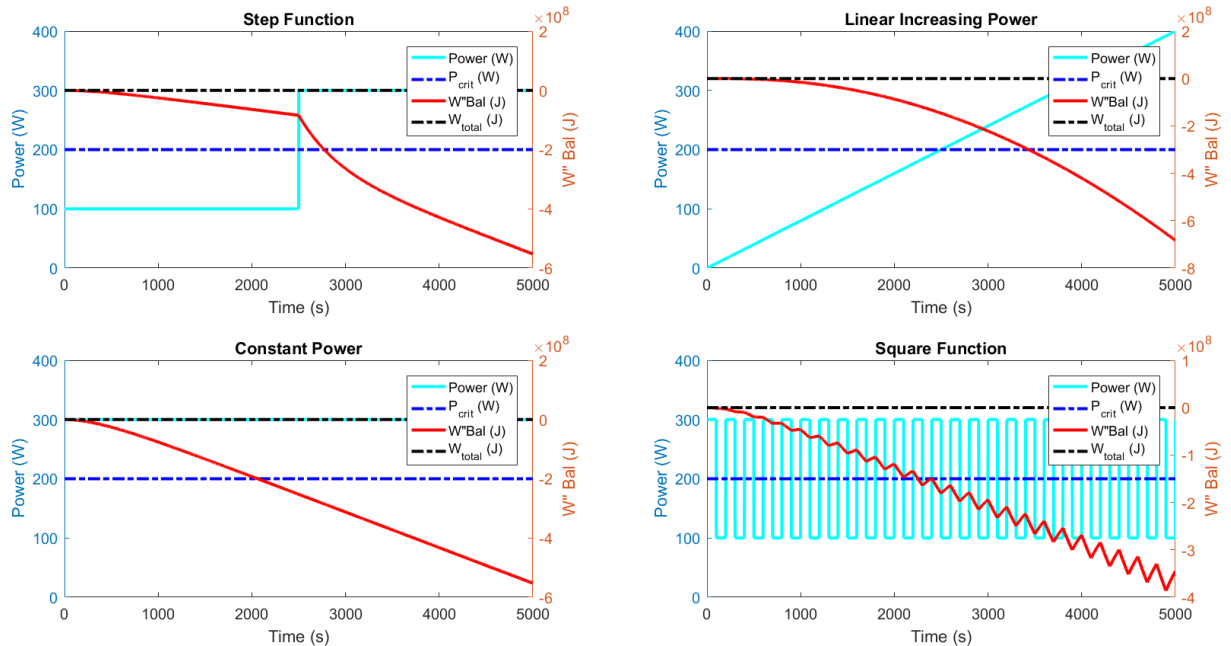


图3-

3 :  $W'_{bal}$ 函数的四个测试案例与功率曲线绘制在同一轴上。(从左顺时针方向) 1)

从时间 $t$ 开始，从临界功率以下到临界功率以上的阶梯函数。2) 在整个采样时间内

，线性功率输出单调增加。3) 高于临界功率阈值的恒定功率输出。4) 在临界功率

以上和以下交替出现的方形函数，显示了 $W'_{bal}$ 预测的恢复和耗竭率的差异。

## 4. 讨论

### 4.1 加权恢复时间

在对自行车手的能量箱储备进行建模后，必须提出一个关键的发现。也就是说，从直觉上看，超过临界功率的努力的恢复时间应该比超过临界功率的相应时间间隔长很多。例如，一个骑自行车的人如果冲刺了五秒钟，就不应该在五秒钟内恢复努力。然而，目前S kiba模型的表述并没有考虑超过临界功率后恢复间隔的任何一种加权因素。在最简单的加权实现中，可以在方程[]中插入一个恢复常数 $\alpha(W'_{exp}(t))$ ，并且只在当前功率超过临界值时实施。2]，并且只在当前功率低于临界功率时实施。由于低于临界功率的努力的恢复时间间隔应该更长，所以 $\alpha$ 应该小于或等于1。

$$W'_{bal} = W' - \alpha(W'_{exp}(t)) \int_0^t W'_{exp}(t) e^{-\frac{(t-u)}{\tau_w}} dt \quad [4]$$

$$\text{where } \alpha \leq \begin{cases} 1 & \text{if } W'_{exp} \leq CP \\ a & \text{if } W'_{exp} \geq CP \end{cases}$$

$\alpha$ 值将是另一个骑手参数，可以从骑行数据中得出，或者可以根据骑手的情况对其进行拟合，类似于方程[] $W'$ 中的变量 $\tau$ 。3]。

### 4.2 能量平衡模型的局限性

该模型的第一个限制是来自环法自行车赛的数据，实际上来自任何运动员的骑行，并不意味着一个骑手会清空他们的油箱。由于 $W'$ 是根据以前的骑行计算出来的，这个值必须重新计算，并根据体能和骑行者对自己的努力程度而经常改变。这是因为 $W'_{bal}$ 应该低于零，这将是能量负平衡的信号。如果使用了一个不准确的 $W'$ ，那么



如果一个运动员进入了特别艰苦的努力，如果 $W'$ 没有得到正确的校准，他们的 $W'_{bal}$ 可能会变成负值，这也是可行的。幸运的是，负的 $W'_{bal}$ 对 $W'$ 的 $bal$ 整体轮廓没有影响，只有 $W'$ 的具体数值 $bal$ 。如果 $W'_{bal}$ 显示在自行车电脑上，可能会给用户带来困惑，但不会破坏实际数据。

寻找自行车运动员的 $W'$ 上限的一个好方法 $bal$ 是看看精英自行车运动员在纪念碑比赛中的 $W'_{bal}$ 。纪念碑比赛是春季和夏季在欧洲举行的为期一天的赛段比赛，是艰苦的六小时以上的比赛，车手们在比赛中竭尽全力争取胜利。纪念碑比赛，相对于赛段比赛或其他形式的骑行，是理想的，因为骑手在骑行过程中不会有意识地节省任何能量，所以从纪念碑这样的全力以赴的比赛中计算出的 $W'$ 将是运动员总能量平衡的极好指示。

最后，在计算 $W'_{bal}$ 时的一个主要假设是一个常数 $\tau_{W'}$ 。3]中看到， $\tau_{W'}$ 是根据低于临界功率的恢复差异而变化的。然而，在骑行过程中，骑手在恢复过程中几乎不可能始终保持恒定的功率，而且在大多数情况下，功率数据是相当嘈杂的，方差约为5%。这将意味着 $\tau_{W'}$ 必须在骑行的每一秒钟都要重新计算，这在计算上是非常昂贵的。当然，在每次计算过程中， $\tau$ 的变化 $W'$ 会相对较小，因为即使是5%的功率偏差也会对 $\tau_{W'}$ 产生相对类似的影响，这取决于骑手的临界功率和恢复功率输出。

按照Skiba等人的论文中提出的做法， $\tau_{W'}$ 的计算方法是在骑行过程中取低于临界功率的平均功率，并使用该值来计算 $D_{CP}$ 。对于一阶近似，这个假设产生了令人惊讶的准确结果，尽管考虑一个可变的 $\tau_{W'}$ 会产生更准确的结果。此外，这个假设

在进行间歇训练时，恢复期与工作期相似，这种方法效果相对较好；但在考虑比赛数据时，这种方法就失效了。因为在比赛过程中，球场的海拔高度和攻击造成的速度变化很大，低于临界功率的偏差可能很大，例如当一个骑手在下坡时滑行，或者它们可能很小，例如当一个骑手坐在车队中的草稿上。在这种情况下，由于在亚临界功率期间施加的功率变化很大，因此整个骑行过程中统一的 $\tau_w$ 的假设不成立。

实施一个变量 $\tau_w$ 可以说明在超过和低于临界功率的努力之间的必要加权因素。例如，一个运动员在明显低于其临界功率的情况下进行恢复，将比在临界功率附近进行恢复的运动员更快恢复其能量。因此，在较低的功率输出下恢复的运动员的 $D_{CP}$ 会高得多，这将导致恢复时间常数降低，从而导致更快的恢复。这样一来，一个可变的 $D_{CP}$ 可以考虑在不同功率输出下的恢复努力，以影响自行车运动员在努力超过临界功率后恢复能量的速度。

## 5. 结论

重申一下，本论文的目标是在现有的人类生物能量模型的基础上，为运动员在比赛中的最佳功率分配提供建议。在对许多模型进行评估后，考虑的两个最有前途的模型是莫顿-马加里亚三槽模型和斯基巴能量平衡模型。然而，莫顿-马加里亚模型被放弃了，因为它没有考虑到耗竭因素，也缺乏确定运动员能量罐之间流速参数的数据。因此，能量平衡模型在MATLAB中使用一个自行车运动员的数据建立了模型

为了测试该模型在预测运动员的能量能力和疲惫方面的有效性，我们对参加2014年环法自行车赛的选手进行了测试。与Golden

Cheetah软件套件中该模型的黄金标准实现相比，衍生的模型表现非常好。此外，该模型还测试了特征功率曲线，以了解它如何解释功率的变化，并根据对消耗的生理反应的直觉进行验证。

这项调查产生了两个新的发现。首先，能量平衡模型必须考虑低于临界功率的恢复与高于临界功率的时间的权重。本模型在重组能量时对高于和低于临界功率的时间使用了相同的权重。然而，必须考虑到运动员的疲惫，因为运动员在临界功率以上运动时比在临界功率以下骑行的可比时间更疲惫。其次，在Skiba等人的论文中 $w$ 使用的恒定恢复率 $\tau$ 的假设是无效的，因为自行车运动员在骑行过程中，特别是在比赛中的恢复输出是高度可变的。今后， $W$ 的实现 $bal$ 应该包括一个取决于恢复区间内低于临界功率的偏差的可变恢复率。考虑到这一点，实施可变恢复率可以解决第一个发现所提出的问题，即评估进一步低于临界功率的恢复区间，其时间常数较低，表明运动员将比接近临界功率阈值的恢复期更快地恢复能量。考虑到这一点，实施可变恢复率应该是未来性能优化模型迭代的首要任务。

除了可变的恢复率，未来在人类生物能量学模型领域的工作可以研究其他运动的建模，如跑步和游泳。尽管在这两种情况下，实施会将临界功率换成临界速度，时间换成距离。

运动员个人的参数和方程式很可能是运动特定的，需要利用运动员的额外测试来重新制定。更准确地建立未来的生物能量学模型可以迎来一个新的性能优化水平，因为运动员能够确定他们的身体有多少能量来指导他们在比赛的关键时刻的决定。用各种运动仪器测量的数据来制定这些模型，使数据不仅仅是一个简单的数字；它成为决策的指南。简而言之，生物能量模型可以将数据从数字变成行动。

## 6. 参考文献

- de Lucas, R.D, et al.  
"训练有素的自行车运动员在临界功率及以上的耗尽时间。重度和严重强度领域之间的关系"。《科学与运动》（2013年）：E9-E14。
- Jones, Andrew M, et al. "临界功率：对确定最大氧饱和度和运动耐力的影响"。 *Med Sci Sports Exerc* (2010): 1876-1890.
- Karp, Jason. 三个代谢能量系统。2009年2月1日。4月19日 2016。  
<<http://www.ideafit.com/fitness-library/the-three-metabolic-energy-systems>>。
- Mantica, Stefano. "可穿戴设备上的人类性能建模"。 *研究门* (2015).在线。<<https://www.researchgate.net/publication/281934699>>。
- McGann Publishing LLC. 环法自行车赛获胜者，领奖台，时间。2015.2016年4月18日。  
<<http://bikeraceinfo.com/tdf/tdfindex.html>>。
- Morton, R.  
Hugh. "临界功率和相关的全身生物能量模型"。 *欧洲应用生理学杂志* (2006)：339-354。
- Skiba, Philip F, et al.  
"对超过临界功率的工作能力的消耗和重建进行建模"。 *美国运动医学学院* (2012)：1526-1532。
- TrainingPeaks. 2014年环法自行车赛第一周力量分析。5月20日2016年2014.4月。  
<<http://home.trainingpeaks.com/blog/article/2014-tour-de-france-power-analysis-week-1>>。
- Wattbike. *Functional Threshold Power*. n.d. 19 April 2016.  
<<https://wattbike.com/us/functional-threshold-power>>。