



循环中的动力消耗与动力持续时间关系的叙事回顾

彼得利奥¹ • 詹姆斯斯普拉格² • 蒂姆播客^{3, 4} • 贾斯汀S. 劳利¹ • InigoMujika^{5, 6}

收到日期: 2021年6月2日/接受日期: 2021年10月14日/在线发布日期: 2021年10月27日

©作者(s) 2021

摘要

技术创新、数据分析和实际应用的新兴趋势促进了对场地中循环功率输出的测量, 导致了训练处方、性能测试和比赛分析的改进。本文综述旨在批判性地参照循环中功率-持续时间关系的权力消耗策略, 为应用研究人员和从业者提供一个最新的观点。作者详细阐述了测量功率输出, 然后概述了功率消耗的方法方法。此外, 推导的功率-持续时间关系部分提出了现有的功率-持续时间模型的概念以及运动强度域。结合实验室和现场测试, 讨论了如何将传统的实验室和现场测试结合起来, 以告知和个性化的功率分析方法。推导出功率-持续时间模型的参数表明, 如何从实验室和现场测试中获得这些措施, 包括确保高生态效度的标准(e.g. 骑手的专业化, 比赛的要求)。建议feld测试应始终按照现有文献中预先建立的准则进行(e.g. 设置预测试验次数、试验间恢复率、道路梯度和数据分析)。还建议避免单一的efort预测试验, 如功能阈值功率。功率持续时间参数估计可以从2个参数的线性或非线性临界功率模型得到: $P(t) = W' / t + CP$ (W' - 工作容量超过CP; t - 时间)。应包括结构化现场测试, 以获得自行车运动员功率轮廓的准确指纹。

关键词 赛车训练分析性能预测功率输出

由迈克尔·林丁格进行交流。

* 彼得利奥
彼得. leo@uibk.ac. 在

¹ 因斯布鲁克大学运动科学系表现生理学与预防部,
奥地利因斯布鲁克

健康、体育活动的生活方式和运动研究
开普敦大学, 中心 (HPALS),

² 南非

位于伊佐拉岛的普里莫尔斯卡大学健康科学学院,

斯洛文尼亚

³ 自动化、生物细胞学和机器人学系,

约泽夫·斯蒂凡研究所, 卢布尔雅那, 斯洛文尼亚

⁴ 巴斯克地区大学医学和护理学院生理学系, 巴斯克地区
莱亚, 西班牙

⁵ 智利圣地亚哥芬兰陆地大学医学院运动机能学院运动
科学实验室

⁶

缩写

% O_{2max} 最大氧气的部分利用率
举起
2-P CP 双参数临界功率模型三参数临界功
3-P CP 率模型
APR 厌氧动力储备
穿透准确时间
双轮摩托车越野赛
ct 自行车越野赛
cp 临界功率
cp 临界功率
四硫富瓦烯 临界功率变化分析功能主成分分析功能
e 阈值功率气体交换阈值
EVA 实验室增量分级运动试验功率输出指数下降
家族性原发淀粉样变性
野外终点站
得到 乳酸阈值
最大需氧功率
gxt
k
lt
地图

混合液 中的悬浮固体	最大乳酸稳态
MMP	最大平均功率输出
OmPD	全功率持续时间模型
P&T	珀罗内特和蒂博特模型
$P(t)$	功率输出
P_{\max}	峰值功率超过1 s
看	估计值的标准误差
tt	循环时间试验
四硫富瓦烯	任务失败时间
O_2	氧吸收
$\dot{O}_{2\max}$	最大吸氧量
W'	临界功率以上的工作能力
水扩展 聚脂	末端测试功率以上的工作

介绍

自20世纪80年代末发明第一个自行车移动动力计以来，使用该工具进行训练和比赛已经成为多个自行车学科的标准实践，包括道路、赛道、山地自行车、自行车越野赛、自行车越野赛(BMX)和铁人三项。通过应变计测量的机械功率输出，最常安装在自行车的曲柄轴、曲柄臂或踏板轴上，并连接到安装在车把上的头部单元，可以在磁场条件下实时准确地记录功率输出数据(Maier等人。2017)。这使得我们可以深入分析自行车运动员在训练和/或比赛期间的机械功率输出，并在实验室环境之外评估运动员的耐力能力(Passfeld等人。2017)。

上述技术创新使得应用科学研究可以在循环中进行，包括内部的实时测量(e. g. 心率)和外部的功率(e. g. 功率输出)工作负载(vanErp和de康宁，2019年；Mujika，2017年；Muriel等人。2021；帕迪拉等。2000；帕迪拉等。2008)。这反过来又允许对赛车的要求被描述(Ebert等人。2005年，2006年；vanErp等人。2021b；Menaspa等。2015；Menaspa等。2013；Vogt等人。2007年b)，将进行训练/赛车性能分析(Leo等。2021c；Lucia等人。2001年；Mujika和帕迪拉，2001年；皮诺和Grappe，2011年)和需要量化的培训处方(Leo等人。2020；桑德斯等人。2020年；桑德斯和Heijboer2019a)。

循环中的功率消耗最常见的方法是评估feld衍生的功率输出，i. e. 在训练和比赛中获得的价值(Coggan2003；Leo等人。2020)。功率分析可用于跟踪性能和比赛分析的纵向变化(Leo等。2021b)。人们对权力掠夺的理论和实际意义越来越感兴趣。然而，到目前为止，对于什么是权力掠夺的最佳实践还没有达成共识，特别是考虑到有许多人

方法学上的问题和方法。因此，本叙述性综述的目的是提出和讨论现有的实践和方法，它们的实施、解释和实际应用，为统一实践和研究的权力消耗方法提供建议，并提出未来的研究方向。

测量功率输出

在分析功率输出数据之前，重要的是要了解在循环过程中是如何测量功率输出的，以及任何相关的方法问题。在自行车中，当肌肉产生一个力并垂直于自行车曲柄臂施加时，一个曲柄臂旋转就会产生两个角脉冲（每条腿一个）；这导致向前驱动。最佳的力产生，以及最佳的正向驱动，是神经支配、肌肉招募模式、肌肉收缩功能以及弹性肌腱-肌肉相互作用和代谢过程的复杂相互作用。力产生的特性通常用物理表达式来描述，如平均转矩或平均功率输出；前者描述力，后者描述在给定时间内产生的工作量(Winter等。2016)。功率输出通常被表示为一个稳态值(e. g. 100W)，但这个值是在给定的时间段内或给定比例的踏板行程内的许多脉冲的乘积。一些人认为，“平均功率输出”因此是一个更准确的描述符(Winter等人。2016)。尽管这一论点是有效的，但为了本综述的目的，作者将始终使用通常使用的术语“功率输出”。然而，需要注意的是，功率输出不包括用于加速骑自行车的四肢的能量，也不包括在非推进方向上施加的力。

机械（或外部）功率输出既可以通过应变计测量，也可以用数学计算(Maier等。2017；马丁等人。1998)。这取决于应变计的位置(e. g.，踏板主轴，曲柄，底部托架)，记录的功率输出预计会轻微偏离，因为一些能量通过动力传动系统的动态损失(Coyle等。1991；Maier等。2017；马丁等人。1998)。这强调了从不同的应变计位置得到的功率输出值可能没有可比性。同样，不同的功率计品牌和型号也有不同的真实性和精度。Maier等人(2017)发现，尽管平均商业可用的功率表记录真实为 $-0.9 \pm 3.2\%$ ，有些单位将会有偏差超过5%。作者还报告说，一些功率表品牌的精度比其他品牌明显高于其他品牌。

平均而言，迈尔等人。(2017)发现，商用功率计的精度，最小的值得变化为1.1–2.8%。这意味着

任何小于1的性能改进。1%无法通过商用的功率计设备准确定量。然而，这种价值可能因品牌、品牌和模型而异。已经对大多数商用的电表进行了验证研究，但目前还没有商定的应该与电表进行比较的金标准。因此，研究人员和从业人员在评估任何功率输出测量装置的有效性时，应注意比较测量。我们提请读者注意上述Maier及其同事（2017）的研究，以便对围绕功率表验证的方法问题进行更广泛的讨论。为了确保高数据质量，作者强烈建议在收集任何功率表数据之前，根据制造商的建议进行准确的校准。此外，动态的（Gardner等人），静态（Woolles等。在从功率计中获得的数据用于功率分析之前，建议进行日常的“零设置”校准。

获得权力的方法论方法 普罗夫林

许多方法已被应用于权力掠夺的领域。其中最基本的是简单地报告给定比赛或事件的平均功率输出值（Ebert等。2005；Vogt等人。2007a, b）。虽然这是理解给定事件需求的起点，但它没有充分利用电力消耗的全部潜力。另一个缺点是，除非数据来自在赛事中有不同表现水平的自行车手，否则这种方法不能提供任何关于峰值表现要求的信息，而仅仅描述了参与的需求。

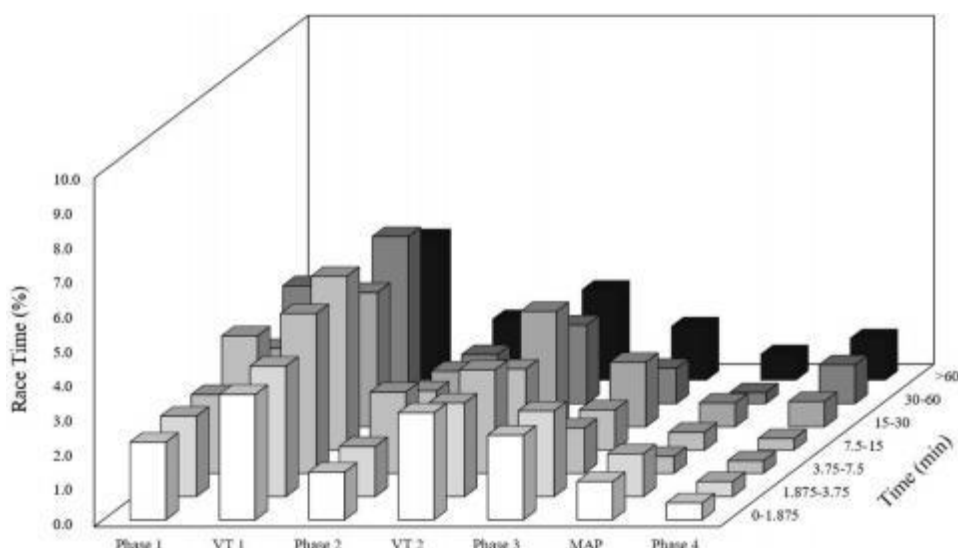
一种更先进的方法是在给定的强度下按时间来描述功率输出。这种方法通常被描述为“装箱”。装箱是将每个功率输出值分为一个装箱；每个装箱代表一个强度范围（例如100–200W）。然后，每个输出值的结果分类可以表示为每个箱子中的总累积时间或占总时间的百分比。（Abbiss等。2010；Ebert等人。2006；Leo等人。2021b；梅特卡夫等人。2017）。通常情况下，但并不总是如此，这些箱子是通过标准化的功率输出到体重（例如4–5W公斤⁻¹）。然而，这种方法的适用性可能受到质疑；例如，在某些情况下，空气阻力是一个比身体质量更重要的因素（Pringle等。2011）。除了调整相对于额叶面积的功率输出外（Padilla等。据作者所知，还没有发表过箱子代表归一化为空气阻力（WCda⁻¹）。

宾宁的优点在于，它可以描述在给定事件中竞争或表现所需的强度范围。通常，自行车事件不是在fixed功率输出下完成的；相反，功率输出在本质上是随机的，即使是在单个计时赛中（Gordon2005）。虽然装箱允许描述不同强度下的总时间，但这种方法也有一些弱点。首先，对给定容器的强度范围的选择将会提供详细的结果。通常选择任意的箱子，根据给定的功率输出归一化到身体质量，例如5.9–7.9 W kg⁻¹。如果强度范围太宽，则无法捕获功率输出数据的粒度。另一个问题是，装箱并不能深入了解单个堡垒的长度。每个功率输出箱中的累积时间可以代表一个长时间或多个短时间。最后，如果使用任意的箱子，那么单个箱子所涵盖的强度范围可能包括了从生理学的角度来看，既可持续又不可持续的功率输出。解决这个问题的一个方法是使用生理阈值来消除箱子（Abbiss等。2010；帕斯菲尔德等。2013）。例如，消除运动强度域的次最大生理阈值可以在实验室测试中确定，并用于消除箱子。虽然这种方法确实让运动员更深入地了解特定事件的生理学，但当来自多个运动员的数据合并时，问题就出现了，因为箱子虽然代表一致的生理反应，但并不一定代表所有运动员相同的绝对或相对功率输出。

如前所述，装箱的一个主要问题是，数据中没有表示单个工作过程的持续时间。然而，有一小部分工作使用暴露变化分析（EVA）来试图克服这一限制（Abbiss等人。2010；帕斯菲尔德等。2013）。这种方法使用了一个双箱系统：一组箱子采用传统的方式来描述强度。箱子可以与任意的值或生理阈值相关联。第二组箱子用于描述每个堡垒的持续时间。这里使用任意的持续时间，例如0–5s、5–10s或>1min。强度箱在x轴上，个体effort的持续时间在z轴上，总比赛时间的百分比在y轴上（见图中的样本数据。1）。

虽然单个effort的确切功率输出仍然没有显示，但EVA是一个非常强大的工具来显示给定事件中功率输出的随机性。这种方法可能特别有效地描述许多短的事件，例如循环越野或奥林匹克越野山地自行车。EVA是一种描述手术持续时间和恢复持续时间的有效方法

图1EVA暴露静脉曲张
时间的时间分析时间
6名U23自行车手的比赛 (N=6)



拳击比赛这些信息对于教练和从业者在规定间歇训练课程来复制一个事件的需求时是有价值的。

迄今为止讨论的方法的一个主要限制是它们不能描述单个effort的功率输出。为此,可以使用平均最大功率输出(MMP)方法(vanErp和Sanders2020; Puchowicz等人。2020; Quod等人。2010; Vogt等人。2007b)。MMP值表示在事件期间在给定(任意)持续时间内记录的最高平均功率。例如,在一场比赛中,在5min的持续时间内记录的最高平均功率输出将是5min的MMP。这样的MMP数据非常有价值,因为它们可以识别骑自行车运动员在比赛中进行竞争所需的功率输出和持续时间。例如,MMP数据分析显示,在一个大的旅行中,一个顶级的男性一般分类竞争者需要产生 5.8 W kg^{-1} 在关键的山上攀登20min(vanErp等。2020a, b)。对于教练和从业者来说,这是一个非常有价值的信息。

然而,MMP数据也存在一些基本问题。首先,我们不知道记录的MMP值是否来自于最大值。这与从正式测试中得到的值形成了对比,在正式测试中可以验证effort的最大值。例如,在传统的实验室增量分级运动测试(GXT)中,需要获得给定的对呼吸频率和呼吸交换比率的感知,以便该测试被认为是最大的,因此是有效的最大摄氧量($\dot{V}O_{2\max}$)将获得的值(Jones等。2016)。我们假设,几乎没有一个来自种族的MMP值在本质上是最大的。如果一个车手在比赛以外的任何时候产生最大的效果,这可能会损害他们随后在一系列比赛中跟随竞争对手的能力,或损害他们在个别比赛中的节奏策略(Leo等。2021b, c)。其次,MMP数据

从一个特定的(任意)持续时间可能是一个较长的分段的分段,或较短的持续时间和随后的恢复的结果(Leo等。2021a, b)。例如,从一个比赛中获得的5分钟MMP值不太可能代表持续时间的最大值恰好为5min。因此,当单独使用MMP值时,对最大功率输出的固有低估的可能性很高。MMP数据只表明一个骑自行车的人做了什么,而不是一个骑自行车的人能做什么。

研究中MMP数据的另一个问题是,没有商定的(任意)持续时间集。这意味着,当他们试图比较来自不同研究的数据时,教练和从业者不能进行类似的比较。随着研究小组开始纳入从~5到~1800的更广泛的MMP持续时间,这种情况有所改善。这允许使用MMP值开发一个功率-持续时间曲线,允许在研究之间进行一些比较。MMP分析的一个重要问题是,它可能实际上并不解释“赢得比赛的人”。Leo和他的同事(2021b)和vanErp和同事(2021a; b)最近的研究表明,自行车手产生的整个赛事的功率输出会下降;MMP值并不能预测比赛表现。相反,车手在比赛的关键时刻产生的能量输出可以预测性能。例如,对于公路自行车短跑运动员来说,重要的是他们在比赛时刻产生的力量,但这并不一定与他们的10秒MMP相同。这意味着MMP分析可能缺少了它试图识别的所有信息。为了更好地识别这些比赛获胜的结果,在研究中采用了一种方法,将事件细分,并报道了每个部分的MMP值(vanErp等。2021a; Leo等人。2021年b; 桑德斯和vanErp, 2021年)。到目前为止,这些部分已经被取消了。

通过累积的功，绝对值或归一化到体重，例如2后的MMP值。500kJ的工作。然而，这种迄今为止只应用于道路自行车的方法，却带来了一些进一步的限制。公路自行车是一项团队运动，骑手执行个人任务，如庇护车队领导或从后面的汽车收集营养。这并不是每个车手的目标都是试图赢得比赛。因此，报告的MMP值的下降，随着累积工作的增加，可能部分是由于一些骑手只是完成了他们的任务，因此不再产生最大的努力。

为了缓解任意MMP持续时间不匹配实际effort持续时间的问题，一些研究选择了事件的特定部分，并只在该部分中识别功率输出 (Jobson等人。2008; Leo等人。2021c; 帕迪拉等。2008)。例如，Leo和他的同事 (2021a; b) 只研究了分类攀登时的MMP值。这种方法虽然在某些情况下可能有益，但确实需要研究人员确定种族中的关键时刻进行分析。虽然这在某些赛事中是可能的，比如公路比赛阶段开始肥胖，以山顶装饰结束，但并不总是可能准确地确定比赛中的关键时刻。一个可能的解决方案是，在确定比赛的关键时期时，寻求运动员的意见。虽然这是一个很有吸引力的命题，但据作者所知，这种方法还没有在已发表的研究中使用。

如前所述，MMP分析的主要问题是关于一个持续时间是否在本质上是最大的，以及MMP持续时间是否等于一个持续持续时间的不确定性。为了解决这个问题，作者建议使用来自正式测试的功率输出值来提供与MMP值的比较度量。这种方法对教练和从业者有特别的好处，因为MMP数据和正式测试数据之间的比较可以用于监测功率分析的变化；如果骑手记录的MMP值超过了正式测试的预测，就可以安排一个新的正式性能测试。这在分析定时事件的性能时特别有用，在竞争中的功率输出和事件持续时间可以与理论的功率-持续时间关系进行比较。这个例子强调了开发功率-持续时间关系的重要性，而不是简单地使用标准持续时间性能测试，因为测试和竞争持续时间相同的可能性很低。有关围绕理论功率持续时间关系发展的方法问题，请参阅下面的“推导出功率-持续时间关系”一节。

不幸的是，这种方法 (即。仅将MMP与先前正式测试中预先建立的理论功率-持续时间关系) 进行了比较

由一些研究小组组成 (Leo等人。2020; Leo等。2021b; 尼默利希特等。2020; Quod等人。2010)。然而，所有的研究都表明，来自正式测试的功率输出值和MMP值之间有很好的 consistency。特别令人感兴趣的是Leo和同事 (2020, 2021a) 的研究表明，在需要正式重新测试之前，正式测试值只能预测6个月的比赛表现。

方法学问题

到目前为止，我们已经讨论了在权力方面的方法，然而，也有与所有方法相关的方法问题。记录的功率输出值可以通过事件的地形来高度输入 (Padilla等。2000年，2008年；桑德斯和海伊博尔2019a)，单日和多日阶段比赛之间的差异 (范厄普和德科宁2019；范厄普和桑德斯2020；露西亚等。和种族类别 (桑德斯和vanErp2021)。在专业道路自行车比赛类别中，发现了注入功率输出：在排名较低的比赛中报告了较短时间的高功率输出 (<2min)，而在多样性较高的比赛中观察到较长时间的高功率输出 (>10min)。在进行电力消耗时，另一个重要的考虑因素是环境因素。海拔、温度和湿度都可以注入运动员可以产生的能量输出。因此，从研究的角度来看，作者建议应该尽可能地报告环境和种族条件。

最近的研究还表明，仅对训练或赛车数据进行的功率消耗分析，在相同的参与者中产生了不同的结果 (Leo等人。2020)。这是一个重要的因素，并进一步强调需要提供关于收集任何功率数据的上下文的充分信息。

最后，在比赛环境中，除了上述围绕团队角色的问题外，还有其他队友和竞争对手的功率输出，这降低了给定速度的功率输出需求 (Ouvrard等人。2018年，范·德鲁伊宁和Blocken2021年)。研究还表明，竞争可能会影响骑自行车者所采用的节奏策略 (Bossi等人。2018)。

推导出功率持续时间关系

当功率输出与任务失效时间 (TTF) 绘制起来时，就出现了一致的功率-持续时间关系 (Burnley和Jones2018)。最常用数学方法描述这种关系的研究人员是莫诺德和谢勒 (1965年)，他们分析了静态状态下的肌肉疲劳

和动态工作（膝关节伸展运动），并创建了一个数学模型，描述了已完成的工作和TTF之间的双曲关系。由于几十年来强有力的科学证据（伯恩利和琼斯，2018年；琼斯等人，2010；Poole等人。功率-持续时间关系可以被认为是一种针对人类可容忍运动极限的综合方法。

从生理学的角度来看，功率-持续时间关系由四个不同的运动强度领域组成：即中度、重度、重度和极端（伯恩利和琼斯2007），其特征是不同的全身生理反应（Jamnick等。2020；范哈塔洛等人。2016；怀普1996）。虽然关于权力-持续时间关系的系统和机制基础的完整生理背景将超出了本叙事综述的范围，但感兴趣的读者可以参考以下综述文章：伯恩利和Jones（2018），Jones等人。（2010），Poole等。（2016），Poole等。（2021），范哈塔洛等人。（2016）。

教练和从业者可以使用各种模型来建模权力-持续时间关系（Sreedhara等人。2019）。然而，大多数型号只

覆盖功率-持续时间关系的一个特定部分（见图。2）。

模拟极限运动强度领域的功率输出

先前的研究（Bundle等。2003年；Bundle和Weyand，2012年；Weyand等人。研究表明，无氧功率储备（APR）能够预测极端运动强度域内的短时间（<3min）功率输出，其中 $\dot{V}O_{2max}$ 可能在任务失败发生之前无法实现。APR方法最初是在实验室环境中开发的，在GXT环境中记录的最大有氧功率（MAP）和运动员在一个踏板旋转或一秒以上可以产生的最大功率（ P_{max} ）被用作参数输入。然而，桑德斯等人。（2017, 2019b）开发了一种field测试方法，其中3minMMP可以作为MAP的替代品。在这种方法中，时间常数（ k ），它可以被转换为功率输出的指数下降的速率（i. e. 对应的时间常数 $k=1/\tau$ ）的倒数，可以在0.024–0.027值之间变化

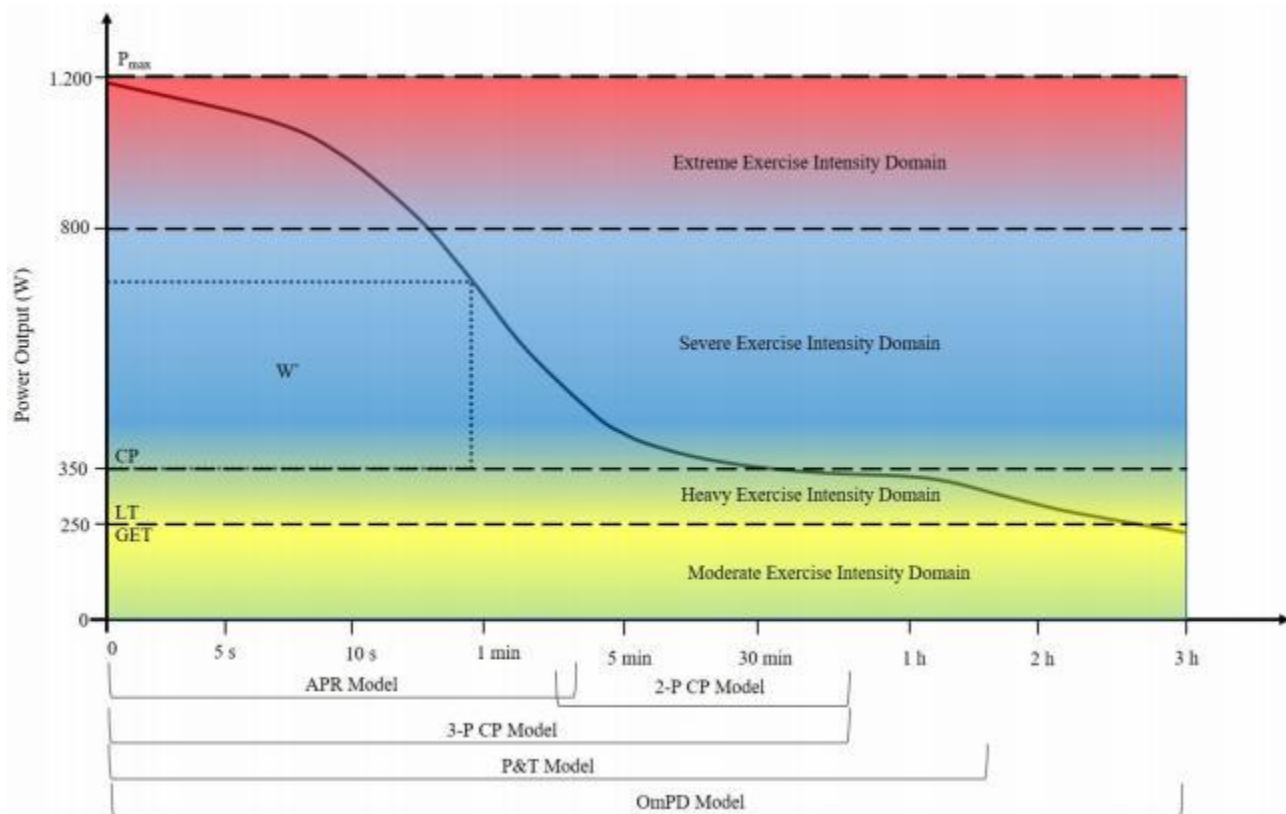


图2使用任意功率输出值说明功率-持续时间关系的生理反应谱。 P_{max} 峰值功率， W' 功大于临界功率，CP临界功率，LT乳酸阈值，GET气体交换阈值，APR

厌氧功率储备模型、2-PCP双参数临界功率模型、3-PCP三参数临界功率模型、P&T Peronnet和Thibault模型、OmPD全功率持续时间模型

ftMMP数据。这允许功率-持续时间关系模型的个性化，这可能提供一个更好的ft(桑德斯和Heijboer2019b)[见图中的样本数据。表1和表1.1)]。

除了APR模型，极端运动强度域的功率输出也可以使用三参数临界功率(3-PCP)(Morton1996)、佩隆内特和蒂博模型(P&T)(1989)和Puchowicz的全功率持续时间模型(0mPD)(Puchowicz等。2020)。需要注意的是，在P&T模型中， P_{\max} 是作为参数估计提供的，而在APR模型中，

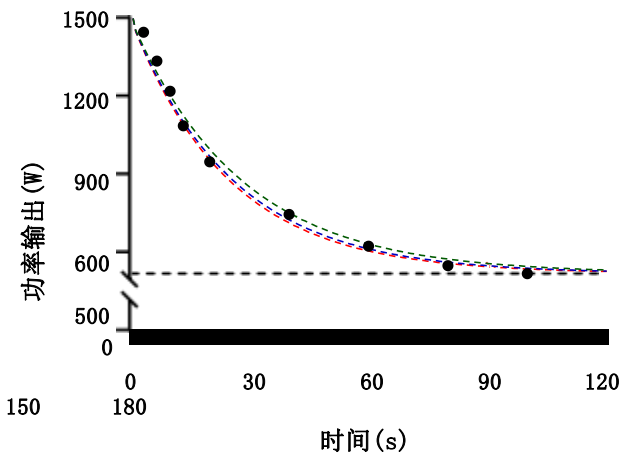


图3厌氧功率储备模型的样本数据，黑点-记录超过5、10、15、30、60、60、90、120和150s持续时间；水平黑色虚线：-厌氧功率储备；绿色、蓝色和红色虚线表示功率持续时间曲线，功率输出指数下降的速率常数(k) (k=0.024, k = 0.026, k = 0.根据桑德斯和海伊博尔(2019b))

表1各运动强度域对应的功率-持续时间模型

运动强度域	模型	方程
极其的	厌氧动力储备	$P(t) = P_{\max} - (P_{\max} - P_{\text{min}}) \times e^{-(k \cdot t)} \quad (1)$
极端和严重	3参数临界功率模型	$\frac{W}{P - CP} = \frac{W'}{P_{\max} - CP} = \frac{t}{C_{TF}} + 1 \quad (2)$
严重	2参数临界功率模型	$P(t) = \frac{W}{t} \cdot C = \frac{W'}{t} + CP \quad (3)$
极端、严重和严重	珀罗内特和蒂博特模型	$P_{\text{map}}(t) = P_{\max} - \frac{P_{\max} - P_{\text{min}}}{\ln\left(\frac{t}{MA_{TF}}\right)} \quad (4)$
	全功率持续时间模型	$P(t) = \frac{W}{t} \times \left(-e^{-\frac{P_{\max} - CP}{W}} \right) + CP \leq C_{TF} \quad (5)$

方程1: $P(t)$ 功率输出, P_{\max} (3分钟) 3. min场试验, P_{\max} 1s的峰值功率, e 基的自然对数(2.718), k 的速率常数

功率输出呈指数级下降, t 时间以秒为单位

式2: t 时间以秒为单位, W' 工作高于临界功率, P 功率输出, CP 临界功率, P_{\max} 1s峰值功率

方程3: $P(t)$ 功率输出, W' 工作超过临界功率, CP 临界功率, t 时间为秒

公式4: 最大有氧功率下的 $P_{\text{map}}(t)$ 功率输出, MA_{TF} 在最大有氧功率下任务失败的时间, t 时间以秒为单位, A 表示功率输出随时间下降的 \ln 常数, \ln 为 e 的自然对数(2.718)

方程5: $P(t)$ 功率输出, W' 工作超过临界功率, CP 临界功率, t 时间以秒为单位, C_{TF} 在临界功率下任务失败的时间, A 表示功率输出随时间下降的 \ln 常数, \ln 为 e 的自然对数(2.718)

3-pCP模型和0mPD模型 P_{\max} 需要作为输入参数。这些不同的建模方法在极端运动强度领域有相当多的注入功率输出预测(见图。4)。

模拟剧烈运动强度领域的功率输出

基于CP概念的多种方法已经被提出来预测严重运动强度域内的功率输出。尽管从数学角度来看都是等价的(i. e. 它们可以从数学上相互推导), 它们产生不同的统计参数估计, 并工作高于CP(W') (Jones等。2010; Muniz-Pumares等人。2019年), 因此在严重运动强度领域内的预测略有不同; 特别是在该领域的极端情况下。3-PCP模型(Morton1996)旨在通过结合克服短时间功率输出和极端运动强度域的限制 P_{\max} 作为一个模型参数, 但它仍然高估了中等运动强度域的功率输出(见图。4)。

模拟临界功率以下的功率输出

CP代表了功率持续时间曲线的理论渐近线, 表明一个给定的功率输出是长期可持续的。然而, 这显然不是现实世界的情况, 在CP的运动被限制在20-40min(Poole等。2016)。出于这个原因, 之前的研究(佩隆内特和蒂博, 1989年; 普乔维奇等人。

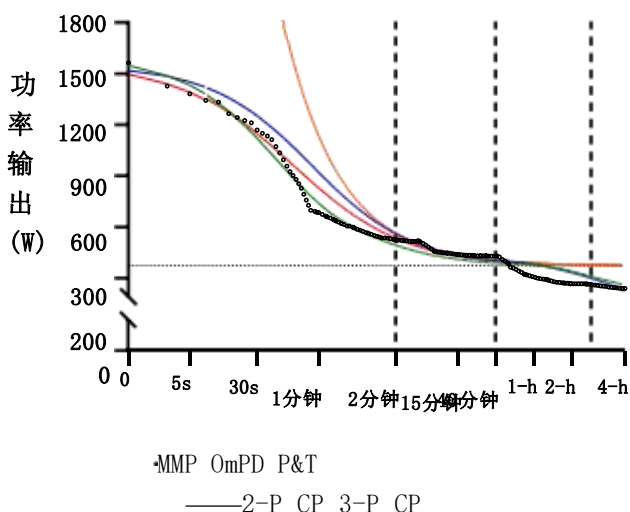


图4应用于相同的MMP数据的各种功率持续时间建模方法。MMP平均最大功率、OmPD全功率持续时间模型、P&T Peronnet和Thibault模型、2-PCP双参数临界功率模型、3-PCP三参数临界功率模型；水平虚线-临界功率渐近线；垂直虚线表示运动强度域（极端、重度、重度和中等）之间的近似过渡

已经提出了一个低于CP的指数衰减项来预测重运动强度域的功率输出(见图. 2和方程. 4和5)。然而，这些衰减项并不一定是在重运动强度和中等运动强度领域的潜在疲劳生理学中进行的(见Black等人。(2017)，Clark等人。(2019年)和Amann (2011年)概述了在这些强度下可能存在的疲劳机制)。然而，它们确实代表了迄今为止估计CP以下运动公差的最佳模型(见表1中的公式)。

选择建模方法

作者建议教练和从业者参考某一特定学科或训练方式的生理需求来指导他们的选择。然后，他们应该选择在运动员将训练和比赛的强度范围内，最能预测力量-持续时间关系的模型。例如，双参数CP模型(Moritani等. 1981；怀普等人。在严重运动强度域之外的短时间和长时间功率输出(见图. 4)，因此潜在地限制了它的效用。举一些实际例子；团队冲刺的力量输出只属于极端运动强度领域，而个人追求的力量输出同时属于极端和严重的运动强度领域(Gardner等. 2005)。在公路自行车中，很大一部分功率输出属于重强度和中等运动强度领域(vanErp和de

Koning2019)；然而，在极端和严重的运动强度领域的功率输出在预测比赛表现方面更为重要(Menaspa等. 2017)。更长的持续时间(超)耐力项目，例如，铁人距离铁人三项(Laursen2011)或“穿越美国的比赛”(Hulton等人. 2010年)属于中等运动强度的领域，以及在自行车或铁人三项的广泛的训练课程(vanErp等人. 2020b；劳森2011)。对于这些例子，可能都需要一种不同的建模方法。

有趣的是，上述的一些模型能够预测多个运动强度领域的运动耐力。虽然有相当多的证据表明，每个运动强度领域的生理反应是独一无二的(伯恩利和琼斯2007)，应该注意的是，大多数研究来自运动强度不接近阈值削弱一个给定的运动强度域。Peshick和他的同事(2020)研究了孤立膝关节伸展运动中接近临界扭矩(CT)的反应，CP的代理，表明上述CT参与者表现出了与严重运动强度域一致的生理反应。同样，也记录了略低于与重度运动强度区域相关的CT生理反应。另一个相关的例子是，研究已经表明，尽管 $\dot{V}O_{2\max}$ 慢分量是重运动强度域的一种防御特征，是慢分量的一种变体，尽管幅度较小，但也发生在中等运动强度域(Davies和汤普森1986)。而在一定比例的变化中 $\dot{V}O_2$ 吸收可能是由于基质利用的变化，这种变化不能解释整个增加 $\dot{V}O_2$ ，建议改变或额外的肌肉补充(伯恩利和琼斯，2018年)。总之，这些结果表明，不是每个运动强度域诱导不同的生理反应，而是有一个跨越功率-持续时间关系的反应谱(见图. 2)。事实上，这可以解释为什么功率-持续时间曲线在本质上是平滑的，并且不像运动强度域之间的阈值确实是预期的“困难”的那样包含“转折点”。这也可以解释为什么上述的一些模型能够预测在多个运动强度领域的跨强度的运动耐力(图. 2和表1)。

结合实验室和现场测试

实验室和field测试都被单独使用，并相互结合起来研究循环过程中的生理和性能能力(Gardner等。

2007; Jobson等人。2009; 琼斯和凡哈塔洛2017; 露西亚等人。2001年; 佩顿大学和霍普金斯大学, 2001年)。

在自行车中, 实验室测试中最常见的测量方法包括短跑或分级增量运动测试的峰值功率输出, $\dot{V}O_{2\max}$, % $\dot{V}O_{2\max}$ 、MAP、MAP的部分利用率、frst和第二乳酸或通气阈值、最大乳酸稳态和循环效率(Lorrent等。2007; Lucia等。2000; Mujika和帕迪11a2001)。尽管这些实验室测量和循环性能之间存在很好的一致性, 但上述生理变量都不能用来创建作者为功率分析而推荐的功率-持续时间关系。

如前所述, 功率-持续时间关系的一个关键组成部分是重运动强度域和重运动强度域之间的边界; 可以和不达到稳定状态的功率输出(Poole等。2016; Poole等人。1988)。这些领域之间的生理边界与耐力表现最相关(伯恩利和琼斯2007; 普尔等人。1988)。在很长一段时间内, 最大乳酸稳态(MLSS)被认为是该边界的金标准(Billat等。2003; Keir等人。2015年; 基尔丁和琼斯, 2005年)。然而, 最近的研究(Galan-Rioja等人。2020; Jammick等。2020; 琼斯等人。2019; 尼克松等。表明CP更好地估计最大代谢稳定状态, 吸氧稳定状态的最高功率输出($\dot{V}O_2$), 尽管血乳酸值增加, 但仍然可以观察到反应(Brauer和Smekal2020)。关于哪种方法(如果有的话)优于代谢稳态和非稳态运动之间的差异, 以及MLSS和CP是否真的可以互换使用, 仍存在一些争论(Jones等。2019; Keir等。2015; 尼克松等。2021; Poole等人。1988)。

在应用设置中, 有人建议使用一种改变原生的方法, 即功能阈值功率(FTP), 可以作为最大元动态稳态的替代品:(Mackey和Horner2021)。FTP被描述为在“准生理稳态”下可以保持一小时的循环功率输出(Bassett等。1999年; Coggan2003年; 麦基和霍纳, 2021年)。因此, FTP是60minMMP的替代品。有人提出, FTP也可以通过在20分钟的最大场测试中取95%的功率输出来预测(Borszcz等。2018; 摩根等。2019年; Valenzuela等人。或在8分钟的最大feld测试中取90%的功率输出(Sanders等人。2020年); 前者被常用使用(Valenzuela等。2018)。与需要对CP和MLSS进行多次测定试验的CP和MLSS相比, FTP可以从单个试验中进行预测, 因此, 耗时更少。这种有先见之明的方法可以解释为什么这个概念被广泛使用

采用在自行车赛中(麦基和霍纳, 2021年)。然而, 虽然CP和MLSS可以被认为是最大代谢稳态的估计值(Keir等。2015; Poole等人。1988年), FTP(Morgan等。2019)。虽然MLSS和FTP都是单参数估计, 但CP概念可以用于预测严重运动强度范围内功率值范围的TTF, 并提供代谢稳态和非稳态运动之间边界的估计。MLSS或FTP都不能如此, 它们只能预测功率-持续时间关系上的单个点, 或运动强度域之间的边界, 但不能预测功率输出值范围内的TTF。从生理学角度讲, CP已被证明代表了肌肉代谢物环境中没有进行性紊乱的最高功率输出(Burnley和Jones2018); 然而, 除了“硬”边界, CP代表了重强度和重度运动强度域之间的相变(Pethick等。2020)。Mitchell和同事(2018)也报道了CP和肌肉毛细血管密度之间的强关系, 这支撑了CP的有氧成分。类似地, 范哈塔洛等人。(2016)表明CP与高氧化的I型肌肉纤维的百分比密切相关。在CP以上, 严重运动强度领域发生非代谢稳定状态, 其特征是肌内肌酸磷酸存储减少, 不断增加浓度的无机磷酸盐、氢离子和血乳酸, 这些都与工作肌肉的收缩功能(Allen et al。2008; 伯恩利和琼斯, 2007年, 2018年; 琼斯等人。2010; Poole等人。2016, 1988)。

尽管FTP和CP估计之间存在很强的关系(Denham等。2020; 卡斯滕等人。2020; 摩根等。以及FTP和MLSS(Borszcz等人。2019年), 所引用的研究表明, 参数之间的一致性限制太大, 不能互换使用。这就质疑了FTP的相关性(Borszcz等人。2018; 卡斯滕等人。2020; 摩根等。2019; 瓦伦苏埃拉等。2018)。此外, Borszcz和同事(2018)证明, 20min功率输出的95%高估了60min功率输出, 并建议20min功率输出应单独用于培训处方和性能监测, 而不是试图估计60min功率输出(即。野外终点站平台毕竟, 20min和60min的功率输出在本质上都是任意的。然而, 虽然FTP可能代表一个任意的值, 而不是一个生理阈值, 但它可能在告知训练过程方面仍然具有实用价值(Valenzuela等人。2018)。然而, 据作者所知, 没有研究可以比较基于不同概念的培训处方时的表现结果。e. FTP、CP和MLSS。

也就是说, 基于上述原因, 作者认为CP是在推导功率-持续时间关系方面最有用的概念, 因此建议在功率消耗的领域中使用CP概念。

推导出功率持续时间模型的参数

对于如何最好地推导出模拟功率-持续时间关系所需的参数, 目前还没有达成共识; 即 P_{\max} , CP和 W' 。同样地, 关于应该使用哪个数学模型来推导CP和 W' 也有相当大的争论(Maturana等人。2018; Muniz-Pumares等人。2019; 尼默利希特等人。2020)。

传统上, 在2到15min的持续时间内进行三次到五次(fve)的预测试验(Karsten等。2015; 马图拉纳等人。2018; Muniz-Pumares等人。2019年)允许通过加权最小二乘或几何平均线性和非线性回归分析得到CP和 W' (Vinetti等。2017; 维内蒂等人。2020)。小于2个min的预测试验并不能保证达到 $O_{2\max}$ (i.e. 它们不属于严重强度范围)(Hill和Smith1994; 马等。2018; Muniz-Pumares等人。2019; 尼默利希特等人。而由于注入糖原消耗和心理因素, 不推荐进行超过15min的预测试验(i.e. (Karsten等。2015; 马图拉纳等人。2018)。为了避免数学建模过程中的任何偏差, 减少CP和 W' 的计算误差, 最短的预测试验应持续在2-5min之间, 最长的预测试验应持续在12-15min之间(Karsten等。2015; 马图拉纳等人。2018; Muniz-Pumares等人。2019)。预测试验之间的试验间恢复应设置为单次访问期间至少30min或多天内至少24小时(Karsten等。2017)。如果最初的预测试验引起的任何疲劳不影响随后的疲劳, 但多日的好处, 但由于功率输出的日常变化可能产生的误差。

一旦性能试验完成, 各自的功率输出和试验持续时间值可以用来推导CP和 W' 。从非线性双参数模型计算CP和 W' 估计需要访问统计软件来执行加权最小二乘或几何平均回归分析(Vinetti等。2017, 2020)。为了简化教练和从业者的这个过程, 有两种选择可以线性化双曲功率-持续时间关系(见图. 5)。从业者可以使用a)线性工作时间CP模型(见等式3和图. 5c或b)线性功率逆时间CP模型(见等式3和图. 5b), 其中CP和 W' 可以推导出为线性关系的斜率和截距(Clarke和Skiba2013; Sreedhara

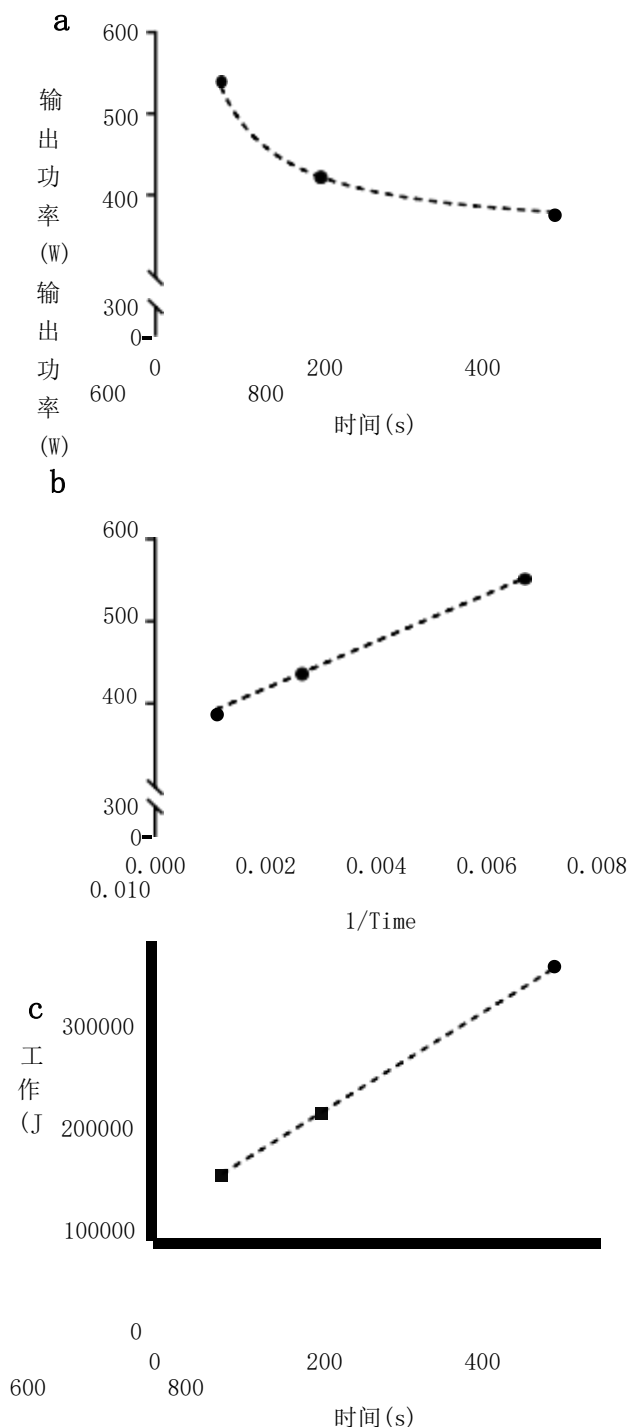


图5双曲(a)、时间(b)的逆和线性工作时间(c)的功率-持续时间关系的图示模型采用Clarke和Skiba (2013)

以及其他2019)。图中所有的数学模型。5为模型 f_t 提供了较高的精度, 但功率-持续时间参数估计(CP和 W')可能在一定程度上取决于使用的不匹配方法(Muniz-Pumares等。2019)。因此, Hill (1993) 建议, 可以更客观地选择最好的 f_t 数学模型, 其中产生估计的最低标准误差(SEE)的模型应该是

获得CP的首选方法(Hill1993; Muniz-Pumares等。2019)。

CP和W‘参数估计也可以通过两个预测试验得到(ParkerSimpson和Kordi2017)。虽然这可以被看作是一个具有时间优势的测试协议,但这种方法的局限性是,线性关系总是会产生一个完美的 $f_t(R^2=1.0)$ 。此外,对于 $f_t(i.e.,)$ 可以被导出。因此,建议使用至少3个预测试验,以确保CP(2–5%)和W‘(<10%)的低标准误差(Black等人。2016; Dekerle等。2015)。进行三次预测试验,并使用双参数CP模型来确定数据,结果为一个自由度。例如,对于一个CP为385W的自行车手来说,一个5W的标准误差需要乘以12。7来计算在两个方向上的95%可信度极限($\pm 64W$)。增加第四次预测试验,将使CP标准误差降低到3W和95%可信限($\pm 38W$),从而提高CP预测能力。

3分钟全面测试也被提出作为一种更有时间性的CP和W‘(Vanhatalo等。2007, 2008)。这个测试的主要假设是W‘或更准确地说WEP(高于结束测试功率),在这个测试中知道,在first150秒内完全耗尽,因此在最后30秒只有CP(结束测试功率)可以维持。尽管在某些情况下,与传统的CP测试相比,显示出良好的信度和效度(Wright等。2017年),其他针对精英自行车手的研究表明,3分钟全外测试得出的CP估计数明显高于传统方案(McClave等人。这可能导致对严重运动强度领域的表现能力的高估(Nicolo等。2017)。这一问题提出了3分钟的全部测试是否可以用于功率消耗的领域。

在一些功率持续时间模型中(见表1) P_{max} 是在建模电力持续时间关系时的一个附加的输入参数。广泛的研究(道格拉斯等人。2021年; 德里斯和范德瓦尔, 2013年; 麦卡特尼等人。1983年、1985年)对磷的评价和机制 max 在自行车运动中(Sargeant等人。1981)。评估 P_{max} 在实验室或现场设置中,需要对测试方案进行深思熟虑的修改。最近的研究使用了在4秒、10秒和15秒冲刺内最高的1秒功率输出来获得 P_{max} (德里斯和范德瓦尔, 2013年; 弗格森等人。2021; 加德纳等人。2007; 桑德斯和heijboer2019b)。如果使用超过10秒的efforts, P_{max} 可能会被负面输液,因为骑自行车的人可能会采用节奏策略(德里斯和范德瓦尔2013; 加德纳等。2007)。从业者也应该知道在全面的冲刺过程中出现的“学习效果”,因此建议在正式测试P之前进行充分的熟悉 max 。在测试 P_{max} 在实验室设置中是:扭矩因子设置(Forbes等。2014)和

是否预期的 P_{max} 是在功率测量装置的有效范围内。例如,一个商用智能训练器仅在700W以下有效,这远低于预期的 P_{max} 对于一些种群(Zadow等。2016)。

生态有效性

有节奏、身体位置和地形等特点。平地或上坡条件,也被证明可以注入模型参数估计(Bertucci等。2005; Kordi等。2019; 尼默利希特等人。2012)。因此,骑手的专业化(例如登山者vs.和比赛要求(上坡vs.脂肪,公路上vs.道路等)在测试环境的选择时需要考虑(尼默利希特等。2012)。测试条件应反映运动员所期望表现的条件。例如,建议计时赛专家在水平地面上对计时赛自行车进行预测试验,而攀岩专家在公路自行车的上坡条件上进行测试。

先前的研究也调查了计时试验或TTF试验是否应该作为预测试验(科克利和帕斯菲尔德2018; Karsten等。2018)。传统上, TTF试验是基于fixed百分比(即。80–105%)的功率输出在一个GXT。这种方法的主要局限性是个体间的差异可能导致试验持续时间(Jamnick等。2020)。相比之下,最大的步行时间试验需要高水平的起搏能力,因此可能只适合与有经验的自行车手一起使用(Karsten等人。2018)。然而,计时赛在场地上更容易进行,因为Simpson和Kordi(2017)表明,在精英运动员中使用计时赛的一种特别有效的方案可以产生有效的CP和W‘估计。然而,在训练较少的参与者中,在TTF试验中报道了更高的功率输出值,导致更高的CP和W‘估计(Coakley和Passfeld2018)。

如上所述,在进行任何正式测试时,应考虑环境因素。因此,正式测试期间的测试条件应尽可能接近地反映竞争环境,以确保环境的有效性。为了说明这一点,CP随着海拔高度的增加而显著下降,而W‘仅在4度以上下降。海拔000米(汤森德等人。2017);在正式测试中,热量和湿度可以注入功率输出(Racinais等。2015)。

以往的研究也研究了节奏对计时赛性能和功率-持续时间参数估计的影响。而CP估计在60时高于。受过娱乐训练的人每分钟转100圈(Barker等。2006年; 卡内瓦莱和

Gaesser1991年), 在生理决定因素(总频率, 能量转换)方面没有统计学上的显著差异。在自行车计时赛中, 精英自行车手每分钟转100转(Foss和Hallen2005)。虽然在较低的节奏下可以实现更高的功率输出, 但精英自行车手倾向于更高的节奏在每分钟90转, 尽管自行车转减少。

模型功率持续时间关系与MMP值之间的一致

据报道, 来自正式测试的CP估计值和MMP值之间有很好的 consistency (Leo等。尼默里希特等人。2020; Quod等人。2010)。虽然从正式测试和赛车中得到的CP之间有很好的 consistency, 但W'不能如此。里奥等人。(2020年)和Karsten等人。(2015)报告了来自正式测试的W'与MMP数据之间的一致性较低。这种低一致性可能是由于自行车手没有表现出最大的比赛情况下, 除了非常特殊的情况下(i.e., 在计时赛或比赛过程中)。如果骑自行车的人在任何其他情况下完全耗尽W' (i.e. 上坡钓鱼, 引导或倾斜试验), 有可能他们随后可能无法满足权力要求, 跟随速度。这些情况对比赛之后记录的MMP值有直接的影响, 因为它们没有比赛早期记录的MMP值那么高(Leo等人。2021b)。因此, 这些预测结果本身并不是通过基本的MMP分析来捕获的。

据报道, APR模型预测的职业男性自行车手的功率输出与短时间功率输出(<2min)的种族衍生MMP数据之间有很好的 consistency (Sanders等。2017; 桑德斯和海jboer2019b)。然而, 只有有限的研究来验证这种方法是否也适用于其他人群。

未来方向

虽然在文献中已经发展了许多关于权力消耗的方法, 但尚不清楚哪种方法提供了最大的见解。可以说, 对于从业者来说, 最方便的方法是回顾性地使用feld中来自训练和比赛的MMP数据(Ebert等人。2005; Menaspa等人。2017; 桑德斯和vanErp2021; Vogt等人。2007b)。虽然这类数据可以为训练有素的自行车手的比赛需求提供有价值的见解, 但可以检索到的信息很少

由于MMP值的任意选择而导致的功率-持续时间关系。

推导一个比较测量允许纵向分析; 例如, 如果一个骑手在比赛中记录的MMP值超过了正式测试的预测, 从业者可以使用该信息来监测功率分析的变化。然而, 从赛车或feld测试中得到的W'显示出较差的预测能力(Karsten等。2015; Leo等)。质疑W'在电力消耗方面的实际效用。当从正式的测试中创建一个理论的功率-持续时间曲线时, 应注意使用适当的模型。例如, 在严重运动强度领域之外应用CP概念涉及到对短时间MMP(<2min)能力和长时间持续时间MMP(>40min)可持续性的高估。因此, APR模型为预测极端运动强度域内的功率-持续时间关系提供了一个有用的概念。

而基于CP的概念, 严重运动强度领域的功率-持续时间关系已经得到了很好的研究(Jones等。2010; Poole等人。2016年), 关于得出中等和重度运动强度领域的权力-持续时间关系的研究有限(Black等。2017)。因此, 普乔维茨等人。(2020)和内和蒂博(1989)提出了数学有氧衰减项模型, 但有限的研究存在评估这些概念是否有高预测能力的中等和重型运动强度领域与肌肉生物能量系统(科尔泽涅夫斯基2019; 科尔泽涅夫斯基和罗西特2020, 2021; 凡哈塔洛等人。2016)。

最近的工作(vanErp等人。2021b; Leo等。b)显示, 随着之前工作的增加, MMP值会减少。然而, 需要进一步的研究来更好地了解导致疲劳导致的动力持续时间改变的机制, 特别是对运动强度的注入, 以及在不同的运动强度领域的工作是否会导致相同程度的动力持续时间曲线的向下移动。这是重要的提高性能容量, i.e. 权力-持续时间关系的较小变化, 与种族成功呈正相关(vanErp等。2021b; Leo等。2021b)。

在大数据科学时代, 普乔维奇(2018年)在金猎豹开放数据项目(利物浦2020年)上引入的一种新方法, 可以为电力消耗提供新的见解。功能主成分分析(FPCA)可以通过特征函数对自行车运动员之间的MMP数据的表型(短跑运动员vs. 攀登者)和性能水平。然而, 目前, 在应用任何潜在的功能缺陷之前, 使用FPCA仍然需要充分的科学验证, 才能被教练和实践者应用。

在应用设置中的实用建议

基于当前的文献和作者的经验进行功率分析在应用设置，以下建议可以作为起点教练和从业者：获得参数模型功率持续时间曲线正式的测试协议应该包括一个冲刺(我。e. ~10–15s)和2–15min之间的至少3个最大强度(Karsten等。2015; Leo等。2021a; Muniz-Pumares等人。2019年; 桑德斯和Heijboer2019b)。这些efforts可以在一次测试中完成，不过建议将feld测试连续两天分成两个阶段。efforts的顺序最好是随机的，以进行科学研究，或在应用环境中遵循自行车手或教练的个人偏好。efforts之间的试验间恢复应设置为至少30min的主动恢复(感知运动的<2评分)(Karsten等。2017)。CP和W‘应该由非线性双参数CP模型推导出来(Muniz-Pumares等。2019)，而 P_{\max} 应该参考10–15秒冲刺期间的1s峰值功率(桑德斯和海伊博尔2019b)。该协议将允许教练和从业者推导出有效的 P_{\max} ，CP和W‘估计数。然后，教练可以根据运动强度领域(s)选择最佳的建模方法，这对特定学科的比赛分析和训练处方很重要。

应验证功率表是否准确可靠，并建议根据制造商的建议进行零偏移或重新校准。

作者不建议使用单一的effortfeld测试(即。8min或20minTT)来得出FTP估计数，因为它缺乏生理背景，只代表功率-持续时间曲线上的一个点。他们也不建议使用3min全面测试，因为这可能会导致高估严重运动强度领域的功率-持续时间关系。

为了提高功率分析的生态效度，我们建议根据生物力学和生理学原理仔细选择功率-持续时间建模方法。标准化的实验室和现场测试应与训练和竞赛的绩效分析相一致进行，以提高绩效预测和训练相关结果的实际效用。

此外，任何正式的测试都应考虑到要应用功率轮廓信息的环境和地形条件。因此，步行的持续时间，梯度，试验间恢复，骑手类型专业化(登山者vs。和比赛的要求(攀爬vs。计时赛)应该尽可能地被最好地复制。

总的来说，功率分析提供了一个先进的机会，来自于训练和赛车的功率输出数据，结合传统的实验室和现场测试方法，以最大限度地提高自行车性能。

我们要感谢博士。理查德·弗格森和马格。感谢他们对实现这个项目的理论投入和帮助。

作者贡献PL, JS和IM有文章的想法。PL、JS和TP进行了文献检索、写作和图形说明。JS、TP、JL和IM对稿件进行了严格的修改。

资助由因斯布鲁克大学和因斯布鲁克医科大学提供的开放获取资金。没有收到准备这份手稿的资金。

数据和材料不适用。

代码可用性不适用。

声明

利益冲突，作者p. l., j. s., t. p., J. L. 和我。M.声明他们没有利益冲突。

伦理批准不适用。

同意参与并不适用。

同意发表，所有作者都同意发表所提交的手稿。

本文根据知识共享署名4进行授权。0国际许可，允许以任何媒介或格式使用、共享、改编、分发和复制，只要您给予原作者和来源，提供知识共享许可的链接，并表明是否进行了更改。本文中的图片或其他第三方材料都包含在文章的知识共享许可中，除非在材料的信用额度中另有说明。如果材料没有包含在文章的知识共享许可中，并且您的预期使用不被法律法规允许或超过了允许的使用，您将需要直接获得版权所有者的许可。要查看此许可证的副本，请访问<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>。

参考文献

- AbbissCR等人(2010)使用暴露变化分析研究了精英女性道路自行车手的起搏轮廓。Br J体育医学 44(6):437–442
- H(2008)骨骼肌疲劳：细胞机制。Physiol版本88(1):287–332
- AmannM(2011)中枢和外周疲劳：人类骑自行车运动中的相互作用。医学科学体育专业 43(11):2039–2045

- 巴克T, 普尔DC, 诺布尔ML, 巴斯托TJ (2006) 人类关键不同踏板频率的功率吸氧关系. *Exp Physiol* 91(3): 621–632
- BassettDR等人 (1999) 比较了1967–1996年的自行车世界小时记录: 用经验数据建模. *医学科学体育专业* 31(11):1665–1676
- BertucciW等人 (2005) 在水平地面和上坡道路自行车中改变踏板节奏时, 对曲柄扭矩倾斜的影响. *J Biomech* 38(5): 1003–1010
- BillatVL等人 (2003) 最大乳酸稳态的概念: 生物化学、生理学和运动科学之间的桥梁. *运动地中海* 33(6): 407–426
- BlackMI等人 (2016) 恒定工作速率临界功率协议高估了斜坡增量运动性能. *Eur J 应用程序系统* 33(6): 407–426
- BlackMI等人 (2017) 肌肉代谢和神经肌肉抑制-在不同的运动强度中消除疲劳. *范围* 122(3): 446–459
- BorszczFK等人 (2018) 自行车手的功能阈值功率: 概念和生理反应的有效性. *Int J 运动地中海* 39(10): 737–742
- 在受过训练的自行车手中, 功能阈值功率是否可以与最大乳酸稳定状态互换? *国际体育医学杂志* 14(8): 1029–1035
- BossiaH等人 (2018) 在循环交叉比赛中的起搏策略和战术定位. *体育体育表演* 13(4): 452–458
- BrauerEK, SmekalG (2020) VO_2 稳定状态在和略高于最大乳酸稳态强度. *印度体育医学* 41(9):574–581
- Sprint运动表现: 代谢能力重要吗? *Exerc体育科学Rev* 40(3): 174–182
- MW, HoytRW, 韦恩和PG (2003) 高速运行性能: 一种评估和预测的新方法. *J Appl 菲索尔* 95(5): 1955–1962
- (2007) 吸氧动力学作为一种决定因素-运动表现的冠军. *欧洲体育科学* 7(2): 63–79
- 伯恩利M, 琼斯上午 (2018) 权力-持续时间关系: 物理学-几何、疲劳和人类表现的极限. *欧尔J体育 Sci* 18(1):1–12
- (1991) 踏板速度对高强度运动的动力-持续时间关系的影响. *医学 Sci体育Exerc* 23(2): 242–246
- ClarkIE等人 (2019) 在长时间耐力运动和注入碳水化合物摄入期间, 能量-持续时间关系的动态. *127(3): 726–736*
- 克拉克DC, SkibaPF (2013) 为运动训练和表现的数学模型教学的基本原理和资源. *AmJPhysiol* 137(2): 134–152
- 在耐力实验室中, 自行车成绩在时间到疲劳方面的表现优于计时赛试验. *J体育科学* 36(11): 1228–1234
- CogganA (2003) 二级教练手册训练和赛车与功率计: 一个介绍
- CoyleEF等人 (1991) 与精英耐力自行车性能相关的生理和生物力学因素. *Med Sci体育Exerc* 23(1): 93–107
- DaviesCTM, 汤普森MW (1986) 的生理反应超级马拉松运动员的长期运动. *J应用物理学* 61(2):611–617
- DekerleJ等人 (2015) 运动可以通过改变严重强度领域内的工作速率来提高运动耐受性: 超过临界功率的工作不是恒定的. *PLoS ONE* 10(9): 1–15
- 德纳姆, 斯科特-汉密尔顿, 哈格斯特罗姆广告, 格雷AJ (2020) 自行车功率输出预测功能阈值功率和最大摄氧量. *J强度* 为34(12): 3489–3497
- 马丁JC (2021) 最大肌肉力量: 短跑自行车经验. *体育医学公开赛* 7(1): 48–63
- DrissT, VandewalleH (2013) 对最大(厌氧)功率输出的测量: 一篇评论. *BioMed* 2013年1月40日
- EbertTR等人 (2005) 在女子世界杯公路自行车赛期间的功率输出. *生理* 95(5): 29–36
- EbertTR, 马丁DT, 斯蒂芬斯B, 威斯特RT (2006) 电源输出-在一次职业男子公路自行车巡回赛中放置. *国际体育联合会菲索尔表演* 1(4): 324–335
- 使用基于feld的数据来模拟短跑赛道的自行车性能. *体育医学-开放* 7(1):1–12
- 福布斯SC, 肯尼迪医学博士, BouleNB, 贝尔G (2014) 的决心在臂曲柄厌氧试验的最佳负荷设置男人和女人. *国际体育中心* 35(10): 835–839
- Fossø, HallenJ (2005) 优秀自行车手的节奏和表现. *欧洲应用物理学* 93(4): 453–462
- (2020年) 临界功率和代谢/通气阈值的相对接近性: 系统回顾和meta分析. *运动地中海* 50(10): 1771–1783. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01314-8>
- GardnerAS等 (2004) 自行车SRM和动力抽头监测系统的准确性. *医学科学体育专业* 36(7):1252–1258
- GardnerSA等人 (2005) 精英赛道短跑自行车的功率输出需求. *IntJ体育运动进行分析* 5(3): 149–154
- GardnerAS等人 (2007) 在实验室和feld测试中, 优秀短跑自行车手的最大扭矩和动力踏板率关系. *欧洲人J应用物理学* 101(3): 287–292
- GordonS (2005) 在自行车计时赛期间优化功率分布. *运动Eng* 8(2): 81–90
- HillD (1993) 关键权力概念. *运动地中海* 16(4): 237–254
- HillDW, SmithJC (1994) 一种确保使用临界功率概念得出的厌氧能力估计的准确性的方法. *J体育医学物理学适合* 34(1): 23–37
- HultonAT等人 (2010) 美国各地竞赛中的能源支出(拉姆). *国际体育医学杂志* 31(7): 463–467
- JamnickNA等人 (2020) 对当前确定运动强度的方法的检查和批评. *运动医学* 50(10):1729–1756
- 乔布森, 伍德赛德, 帕斯菲尔德, 内维尔 (2008) 上坡循环性能的ric比例尺. *印度体育医学* 29(9):753–757
- JobsonSA等人 (2009) 自行车训练的分析与利用. *数据运动地中海* 39(10): 833–844
- “关键权力”(2017) “关键权力”概念: 应用-运动表现注重间歇高强度运动. *体育Med* 47(s1): 65–78
- JonesAM等人 (2010) 临界功率: 对 VO_2 的测定的影响 $_{2max}$ 和运动耐受性. *医学科学体育专业* 42(10):1876–1890
- JonesAM等人 (2016) 运动和运动生理学测试指南: 英国运动和运动科学协会指南. 劳特利奇资源不详
- JonesAM等人 (2019) 最大代谢稳态: 重新调整“金标准”. “生理学”代表第7名(10): e14098
- KarstenB等人 (2015) 临界功率场测试的有效性和可靠性. *欧洲大学物理学协会* 115(1): 197–204
- KarstenB等人 (2017) 循环中临界功率和W ‘的试验恢复时间的比较. *J体育科学* 35(14):1420–1425
- KarstenB等人 (2018) 时间试验与时间-耗竭试验: 对临界功率、W ‘和吸氧动力学的影响. *Int J 体育物理学表演* 了13个(2): 183–188

- KarstenB等人 (2020) 在循环过程中, 临界功率测试与20分钟功能阈值功率测试之间的关系。前面植物学11: 1877
- KeirDA等人 (2015) 运动强度阈值: 确定可持续表现的边界。医学科学体育专业47(9):1932–1940
- (2005) 单次访问方案估计最大乳酸稳定状态的有效性。医学科学体育专业37(10):1734–1740
- KordiM, 富勒顿C, 帕斯菲尔德L, 帕克辛普森L (2019) 输液对训练自行车运动员的临界功率和 $\dot{V}O_2$ 的测定。欧尔J体育Sci 19(2):192–198
- korz涅夫skiB (2019) π 诱导的肌肉疲劳导致近双曲功率持续时间依赖性。EurJ应用物理学119(10):2201–2213
- (2020) 超过了“关键”肌肉Pi: 对 $\dot{V}O_2$ 的影响 $\dot{V}O_2$ 代谢物慢成分, 肌肉疲劳和功率持续时间关系。EurJ应用物理学120(7):1609–1619
- (2021) 决定训练的因素 $\dot{V}O_2$ 诱导变化 $\dot{V}O_{2max}$ 、临界功率和 $\dot{V}O_2$ 动力学在骨骼肌。J应用物理学130(2): 498–507
- LaursenPB (2011) 长跑铁人三项: 需求、准备和表现。6(2): 247–63
- 劳伦特CM, 迈耶斯MC, 罗宾逊, 格林JM (2007) 20对30秒翼酸厌氧试验。Eur J Appl physioli100(6): 645–651
- LeoP等人 (2020) U23职业自行车手在整个比赛赛季中的训练特点和力量分析。运动8(12):167
- LeoP, SpraggJ, SimonD, LawleyJ等人 (2021a) 攀登-U23和职业自行车手在多阶段比赛。国际体育杂志 (印刷版)
- LeoP, SpraggJ, SimonD, MujikaI等人 (2021b) 权力掠夺, U23和pro-的工作负载特征和比赛性能在阿尔卑斯山的多阶段比赛巡回赛中的业余自行车手。英属J体育体育表演 (出版)
- (2021c) U23职业自行车手在一个竞争赛季中的权力消耗。IntJ运动生理学执行16(6): 881–889
- 利物浦M (2020) 黄金猎豹开放数据项目。"<https://osf.io/6hfpz/>。2021年2月16日
- LuciaA, HoyosJ, ChicharroJL (2000) 对亲-的生理反应越野公路自行车赛: 登山者vs. 时间审判者。国际体育联合会Med 21(7):505–512
- (2001) 专业道路生理学周而复始运动地中海31(5): 325–337
- LuciaA等人 (2003) 环法自行车赛对Vuelta: 这是更困难的体育35(5): 872–880
- FTP20测试对FTP20测试的了解与骑自行车有关? 范围审查。JSportsSciil(aop): 1–11MaierT等人 (2017) 自行车功率米对a的精度跑步机骑自行车的数学模型。印度体育医学38(6):454–461
- MartinJC等人 (1998) 道路数学模型的验证循环动力。JApplBiomechl4(3): 276–291
- MaturanaFM等人 (2018) 临界权力: 不同的协议和模型如何影响其确定。J科学医学运动21(7): 742–747麦卡特尼, 琼斯大学 (1983) 在最大限度的自行车运动中人体肌肉的功率输出和疲劳。J Appl Physioli55(1): 218–224
- 麦卡特尼, 奥姆斯基, 海J (1985) 等速循环运动中的质量关系。J应用物理学58(5):1459–1462
- (2011) 由在精英自行车手进行的3分钟的全面测试所决定的临界力量的可持续性。J强度为25(11): 3093–3098
- Menaspap等人 (2015) 在职业公路自行车比赛中, 短跑的身体需求。国际运动Nutr电子产品metab36(13): 1058–1062
- (2013) 在专业自行车和U23自行车比赛中, 公路短跑的生理需求。试点研究。J Sci Cyc 2(2):35–39
- (2017) 对世界杯精英女子公路自行车比赛的要求。IntJ运动生理学执行12(10): 1293–1296
- MetcalfAJ等人 (2017) 对职业男性公路自行车手的外部训练和比赛工作量的赛季内分布。Int J体育物理执行12(2): 2–142
- 米切尔E, 马丁N, 贝利SJ, 弗格森RA (2018) 与耐力训练个体的骨骼肌毛细血管作用和I型肌纤维呈正相关。J应用物理学125(3):737–745
- J (1965) 协同肌肉的工作能力组人体工程学8: 329–338
- MorganPT等人 (2019) 道路循环TT性能: 与功率-持续时间模型的关系以及FTP的关联。J体育Sci 37(8):902–910
- 李志明, 李志明, 李志明 (1981) 一种对体力劳动能力和无氧阈值的测量方法。Ergon24(5): 339–350
- MortonRH (1996) 一个3参数临界功率模型。埃尔贡39(4):611–619
- MujikaI (2017) 耐力运动中训练和比赛负荷的量化: 方法和应用。IntJ运动生理学执行12(2): 229
- S (2001) 男性职业公路自行车手的生理和表现特征。运动医学31(7):479–487
- 方法-方法D, 卡斯滕B, 特里斯卡C, 格莱斯特M (2019) 方法-与确定临界功率和曲率常数有关的逻辑方法和相关的挑战。J强度Cond33(2): 584–596
- MurielX等人 (2021) 在中的物理需求和绩效指标男性职业自行车手在一个盛大的旅行: 世界旅行与项目团队类别。IntJ体育体育表现l(aop): 1–9
- 3分钟全能测试 (2017) 的参数: 在严重强度领域的竞技自行车计时赛表现的高估。IntJ运动生理学执行12(5): 655–661
- , 陈, 威廉姆斯C (2012) 低的影响和高节奏间隔训练对脂肪和上坡自行车计时赛。欧洲J应用物理学112(1): 69–78(1) A等人 (2020) 场导出的功率持续时间变量来预测自行车计时赛的表现。IntJ运动生理学执行10(1): 1–8
- 尼克松RJ, KranenSH, 凡哈塔洛A, 琼斯AM (2021) 稳态MLSS以上的二氧化钒: 临界速度更好地代表MLSS的证据训练良好的跑步者的最大代谢稳定状态。Eur J应用程序物理学。<https://doi.org/10.1007/s00421-021-04780-8>
- 8OuvrardT等人 (2018) 的性能改进的机制, 由于在上坡自行车比赛中给领先的队友。印度体育医学13(9):1215–1222
- (JJ, 1999) 在职业公路自行车比赛中的水平地面和上坡自行车能力。Med Sci体育Exerc31(6): 878–885
- 安古洛F (2000) 在职业公路自行车比赛计时赛中的运动强度。医学Sci体育Exerc32(4): 850–860
- PadillaS等人 (2008) 在为期3周的专业上坡骑行比赛中的运动强度和负荷。欧洲《物理学协会102(4): 431–438

- KordiM (2017) 临界功率和来自2或3个最大检验的W' 的比较。国际体育表演12 (6): 825–830
- 帕斯菲尔L, DietzKC, HopkerJG, JobsonSA (2013) 目标暴露变化分析中的时间装箱方法。J马纳格数学24(3):269–282
- PassfeldL等人 (2017) 知识是力量: 衡量自行车运动中的训练和表现的问题。JSports科学35 (14): 1426–1434帕顿CD, 霍普金斯WG (2001) 自行车性能测试。运动Med 31(7):489–496
- G (1989) 运行性能和世界运行记录的数学分析。67 (1): 453–465PethictSL, 伯恩利M (2020) 生理证据表明临界扭矩是一个相变, 而不是一个阈值。Med Sci体育Exerc52 (11): 2390–2401
- PinotJ, GrappeF (2011) 评估工作能力的记录
- 曼斯是精英骑自行车的人。IntJ体育医学杂志32 (11): 839–844普尔特区, 沃德SA, 加德纳GW, WhippBJ (1988) 代谢和长期运动的呼吸轮廓的上限
- 男人Ergon31 (9): 1265–1279
- PooledC等人 (2016) 临界功率: 运动生理学中一个重要的疲劳阈值。医学科学运动经验48 (11): 2320–2334
- 普尔DC, 罗斯特HB, 布鲁克斯GA, 布鲁斯格莱登L (2021年) 厌氧阈值: 50+年的争议。植物学599(3):737–767
- PringleJS等人 (2011) 临界动力和气动阻力可以准确地预测英国自行车赛冠军的道路计时赛成绩。体育43 (5): 160–161
- PuchowiczMJ (2018) 金猎豹力量的功能性PCA
- 持续时间数据。<http://veloclinic.com/functional-pca>的金猎豹功率持续时间。数据/ (2020) 全域功率持续时间模型的开发和场验证。J体育科学38(7):801–813
- QuodMJ, 马丁DT, 马丁JC, 劳尔森PB (2010) 的功率分析
- 预测公路自行车MMP。国际体育医学杂志31 (6): 397–401
- 李博 (2015) 热适应对自行车计时赛性能和起搏的影响。医学科学体育课程47 (3): 601
- (2021) 职业男子自行车比赛的身体需求和力量消耗: 一个最新的评论。Int J体育物理执行16 (1): 3–12
- M(2019a) 在一个自行车大巡回赛中, 不同的舞台类型的身体需求和权力分析。欧尔J体育Sci 19(6):736–744
- 厌氧动力储备及其在专业道路自行车中的适用性。J体育科学37(6):621–629
- SandersD等人 (2017) 预测职业自行车手的高功率表现。IntJ体育物理学执行12 (3): 410–413
- (2020) 一个基于场地的自行车测试, 以评估耐力表现的预测因素和建立训练区。J强度为34 (12): 3482–3488
- (1981) 在短期动态运动中, 最大的腿部力量和力量输出。J应用物理学51(5):1175–1182
- 原VSM, Mocko通用, 和记黄埔再电 (2019) 对使用权力和能量的人类表现的数学模型的调查。体育医学公开赛54 (1): 1–13
- TownsendNE等人 (2017) 缺氧时临界功率和W' 的预测: 在工作平衡建模中的应用。前生理学23(8):180
- ValenzuelaPL等人 (2018) 功能阈值功率是乳酸阈值的有效替代品吗? 国际体育表演13:1–6
- (2021) 自行车上坡牵引的空气动力学分析。体育英语24 (1): 1–11
- 职业公路自行车赛的强度和负荷特征: 男子和女子比赛之间的差异。体育表演14 (3): 296–302
- 职业自行车比赛的要求: 种族类别和结果的注入。欧洲体育科学16 (1): 1–12
- 案例报告(2020a): 负荷、强度和性能特性
- 旅行体育52 (4): 868–875
- (2020b) 男女职业道路自行车手的训练特点: 为期4年的回顾性分析。体育表演5 (1): 1–7
- 环法自行车赛的要求: 一个世界级短跑运动员的案例研究 (第一部分)。IntJ体育表演9: 1363–1370 (出版)
- (2021b) 通过累积的工作水平来保持功率输出是职业自行车运动成功的关键决定因素。医学科学体育杂志Exerc53: 1903–1910 (出版)
- 伯恩利M (2007) 使用3分钟的全面循环试验确定临界功率。医学科学体育专业39(3):548–555
- 3分钟 (2008) 的全面循环测试对临界功率的变化很敏感。医学科学体育专业40(9):1693–1699
- VanhataloA等人 (2016) 功率-时间关系的机制基础: 肌肉代谢反应和与肌肉fbre类型的关系。Physiol594 (15): 4407–4423
- VinettiG等人 (2017) 恢复间隔持续时间对增量运动的临界功率模型参数的影响。(9): 1859–1867
- 当受到两个变量影响时的功率-持续时间关系的回归方法
- 错误欧洲《物理学协会》120 (4): 765–770
- 沃格特, 舒马赫尤, BlumA等人 (2007a) 在意大利河的脂肪和山地阶段产生的循环功率输出: 一个案例研究。J体育科学25 (12): 1299–1305
- 沃格特S, 舒马赫YO, RoeckerK等人 (2007b) 在环法自行车赛期间的功率输出。国际体育医学杂志28 (9): 756–761
- WeyandPG, 林杰, 捆绑MW (2006) 短跑性能-持续时间
- 这些关系是由外力的分数持续时间来设定的
- 申请AmJ物理学290 (3): 58–65
- WhippB等人 (1982) 一个决定高强度工作耐受持续时间的常数。美联储是费用41(5):1591
- WhippBJ (1996) 有氧功能域及其极限参数。施普林格, 波士顿
- WinterEM等人 (2016) 在运动和运动科学研究中滥用“权力”和其他机械术语。J强度金发Res30(1):292–300
- 《敏锐的PS》(2005) 一种获得SRM自行车动力曲柄校准因子的静态方法。运动Eng 8(3):137–144
- (2017) 3分钟全循环临界功率测试的信度和效度。印度体育医学38(6):462–467
- ZadowEK等人 (2016) wahooKICKR动力训练器动力设置的有效性。IntJ体育频道执行肛门11 (8): 1115–1117

出版商的注释《施普林格自然》对已出版的地图和机构纠纷中的管辖权主张保持中立。