

<https://doi.org/10.1007/s00421-021-04833-y>

特邀评论



自行车运动中的权力分析和权力-时间关系：一个叙述性的回顾

Peter Leo¹  - James Spragg² - Tim Podlogar^{3,4} - Justin S. Lawley¹ - Iñigo Mujika^{5,6}收到。26月/2021已接受。14 10月 / 在线2021发表。27 10月 2021
© 作者 2021

摘要

技术创新、数据分析和实际应用的新趋势促进了该领域自行车运动功率输出的测量，导致了训练处方、性能测试和比赛分析的改进。本综述旨在批判性地反思与自行车运动中功率-时间关系相关的功率分析策略，以便为应用研究人员和从业人员提供最新的观点。作者阐述了测量功率输出，然后概述了功率分析的方法学方法。此外，在推导功率-时间关系一节中，介绍了现有的功率-时间模型的概念和运动强度的范畴。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，为功率分析方法提供信息并使其个性化。推导出功率饱和度模型的参数，建议如何从实验室和现场测试中获得这些措施，包括确保高生态有效性的标准（如骑手专业化，比赛要求）。建议实地测试应始终按照现有文献中预先确定的指导线进行（如预测试验的设定数量、试验间恢复、道路坡度和数据分析）。还建议避免单一的努力预测试验，如功能阈值功率。力量-时间参数估计可以从参数2线性或非线性临界力量模型中得出。 $P(t) = W'/t + CP$ （ W' -工作能力高于CP； t -时间）。应包括结构化的现场测试，以获得自行车运动员功率曲线的准确指纹。

关键词 赛车-训练-分析-性能-预测-功率输出

缩略语

 $\% \dot{V}_{2max}$ OF最大摄氧量的部分利用率⁶ 智利圣地亚哥Finis
Terraes大学医学部运动学学院运动科学实验室。

由迈克尔-林丁格传达。

Peter Leo
peter.leo@uibk.ac.at

- 1 奥地利因斯布鲁克大学体育科学系表现生理学
和预防部，因斯布鲁克，奥地利
- 2 南非开普敦大学健康体育活动生活方式运动研
究中心（HPALS），开普敦，南非
- 3 斯洛文尼亚，伊佐拉，普里莫斯卡大学，健康科
学学院
- 4 斯洛文尼亚卢布尔雅那Jožef
Stefan学院自动学、生物控制学和机器人学系。
- 5 西班牙巴斯克地区Leioa，巴斯克大学医学和护理学
院生理学系。

	2-P CP双参数临界功率模型
	3-P CP三参数临界功率模型
	APRA无氧功率储备
	ATPA腺苷三磷酸
酯	
赛	BMX自行车越野
	CTC 关键扭矩
	CPC关键动力
	CP _{TTF} 在关键功率下的任务失败 时间
	自然对数的基础 ($e=2.178$)
	EVA暴露变化分析
	FPCF功能主成分分析
	FTPF功能阈值功率
	GET气体交换阈值
	GXTL实验室增量分级运动测试
k	功率输出的指数下降率
	LTL乳酸阈值
	MAP最大有氧功率

	MLSS最大乳酸稳定状态
	MMP最大平均功率输出
	OmPD Omni功率持续时间
模型	P&T Peronnet和Thibault模型
$P(t)$)功率输出
P_{\max}	峰值功率超过s1
	SEES估计的标准误差
	TTC自行车计时赛
	TTFT到任务失败的时间
$\dot{V}O_{2\max}$	氧量
$\dot{V}O_{2\max}$	最大摄氧量
W	'高于临界功率的 工作能力
	WEP高于终端测试功率的
	工作

(Leo等人, 2021b)。人们对力量分析的理论 and 实践意义越来越感兴趣。然而, 到目前为止, 对于什么是功率分析的最佳做法还没有达成共识, 特别是考虑到有许多的

简介

自从20世纪80年代末发明了第一台用于自行车运动的移动式功率计以来, 用这种工具进行训练和比赛已经成为多种自行车运动的标准做法, 包括公路、场地、山地车、越野车、自行车越野赛 (BMX) 和铁人三项。通过应变片测量的机械功率输出, 最常见的是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装置, 可以在现场条件下实时准确地记录功率输出数据 (Maier等人, 2009)。

2017).这使得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成为可能, 并在实验室环境之外评估运动员的耐力 (Passfield等人, 2008)。2017).

上述这些技术创新使自行车运动的应用科学研究得以开展, 包括实时测量内部 (如心率) 和外部 (如功率输出) 的工作负荷 (van Erp和de Koning 2019; Mujika 2017; Muriel等人。2021; Padilla et al. 2000; Padilla et al. 2008).这反过来又允许对竞赛的要求进行描述 (Ebert et al. 20052006van Erp et al. 2021b; Menaspà et al. 2015; Menaspà et al. 2013Vogt等人, 2007b), 进行训练/比赛成绩分析 (Leo等人, 2021c; Lucia等人, 2007b; Mujika和Padilla, 2007b)。2001; Mujika and Padilla 2001; Pinot和Grappe 2011), 并对训练处方进行量化 (Leo et al. 2020; Sanders et al. 2020Sanders and Heijboer 2019a)。

自行车运动中的功率分析最常见的定义是对场地输出功率的评估, 即在训练和比赛中获得的数值 (Coggan 2003; Leo等人。2020).功率分析可用于跟踪性能的长期变化和比赛分析

方法学问题和方法。因此，本叙述性综述的目的是介绍和讨论现有的实践和方法、它们的实施、解释和实际应用，提供建议以统一实践和研究中的权力分析方法，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，重要的是要了解在自行车运动中如何测量功率输出以及任何相关的方法问题。在自行车运动中，当肌肉产生一个力并垂直于自行车曲柄臂时，曲柄臂转一圈会产生两个角度的脉冲（每条腿一个）；这就产生了向前的驱动力。最佳的力的产生，以及因此而产生的最佳向前驱动力，是神经支配、肌肉招募模式、肌肉的收缩功能以及弹性肌腱-肌肉相互作用和这些组织中发生的代谢过程的复杂的相互作用。力量产生的特性通常用物理学表达式来描述，如平均扭矩或平均功率输出；前者描述力量，后者描述在给定时间内产生的功量（Winter等）。

2016).功率输出通常表示为一个稳态值（如W100），但这个值是在一定时间内或一定比例的踏板行程中许多冲动的产物。因此，有些人认为“平均功率输出”是一个更准确的描述（Winter等人）。

2016).尽管这一论点是正确的，但为了本综述的目的，作者将自始至终采用习惯上使用的术语“功率输出”。然而，应该注意的是，功率输出并不包括用于加速自行车手四肢的能量，也不包括在非推进方向上的力量。

机械(或外部)功率输出可以是测量的，也可以是测量的。

通过应变片或数学计算得到的数据（Maier等；Martin等）。2017Martin et al.

1998).根据应变片的位置（例如，踏板主轴、曲柄、底部支架），记录的功率输出预计会略有偏差，因为一些能量会通过传动系统的低效率损失（Coyle等；Maier等）。1991；Maier等人。2017马丁等人。

1998).这突出表明，从不同的应变仪位置得出的功率输出值可能没有可比性。同样地，不同的功率计品牌和型号有不同的真实性和精确度。Maier等人(2017)发现，虽然平均而言，市面上的功率计记录的真实度为 ± 0.9 3.2%，有些单位的偏差会超过5%。作者还报告说，一些功率计品牌的精度明显高于其他品牌。

平均而言，Maier等人(2017)发现，商业上可用的功率计的精度的小的最值得的变化是1.1-2.8%。这意味着

任何低于1.1%的性能改进都无法通过市面上的功率计设备进行准确量化。然而,这个数值可能因品牌和型号不同而不同。对大多数市售功率计都进行了验证研究,但没有一个公认的黄金标准来比较功率计。因此,研究人员和从业人员在评估任何功率输出测量设备的有效性时,应该注意到比较措施。我们提请读者注意前述Maier及其同事的研究(2017)对围绕功率计验证的方法学问题进行了更广泛的讨论。为了确保高数据质量,作者强烈建议在收集任何功率计数据之前,根据制造商的建议进行准确的校准。此外,动态(Gardner等人)、静态(Wooles等人 2004)、静态(Wooles et al. 2005),以及日常校准,即所谓的“零偏移”,都是建议在将功率计的数据用于功率分析之前进行的。

权力剖析的方法学方法

众多的方法已经被应用于功率分析领域。其中最基本的方法是简单地报告某一特定比赛或事件的平均功率输出值(Ebert等人, 2007年; Vogt等人, 2007年a, b)。

2005Vogt等人, 2007a, b)。虽然这是了解某一特定事件的需求的起点,但它未能充分地利用功率探测的全部潜力。另一个缺点是,除非数据来自赛事中不同性能水平的自行车手,否则这种方法不能提供任何关于峰值性能要求的信息,而只是描述了参与的要求。

一个更先进的方法是在给定强度下按时间来描述功率输出。这种方法通常被描述为“分档”。分组是指每个功率输出值被归入一个仓;每个仓代表一个强度范围(例如100-200W)。然后,每个输出值的分类可以表示为每个仓的总累积时间或总时间的百分比。(Abbiss et al. 2010; Ebert等人。

2006; Leo等人, 2021b; Metcalfe等人, 2021b。2017)。通常情况下,但并不总是这样,通过将功率输出归一化到身体质量(例如4-5 W kg⁻¹)来定义仓位。然而,这种方法的适用性可能会受到质疑;例如,在某些赛事中,空气动力阻力是一个远比身体质量更重要的因素(Pringle et al. 2011)。除了相对于正面面积的功率输出比例外(Padilla等人, 2008年),就作者所掌握的情况来看,在某些比赛中,空气动力阻力远比身体质量重要。

1999),据作者所知,还没有发表过任何研究,其中的分档代表了与空气动力阻力(W CdA⁻¹)无关的功率输出值范围。

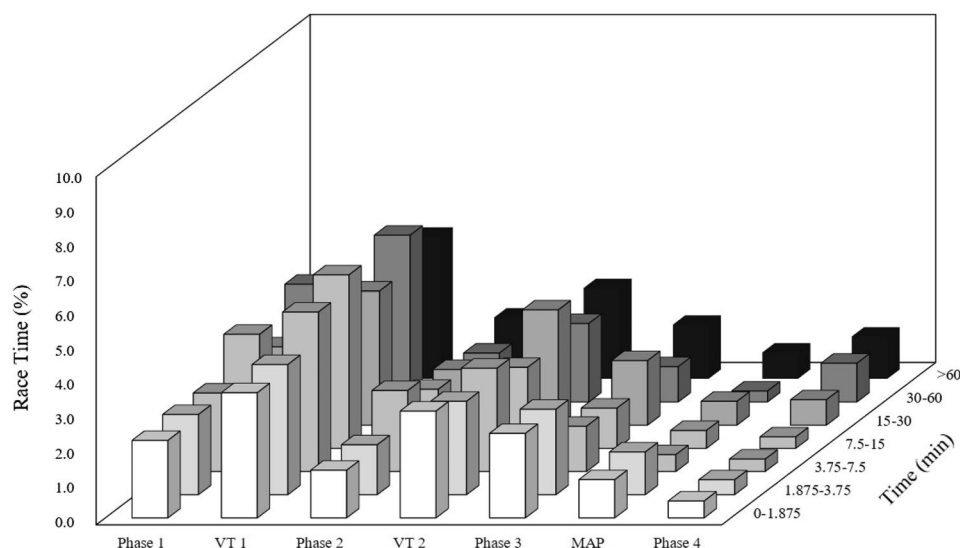
分组的好处是,它可以描述在一个特定项目中竞争或执行所需的强度范围。通常情况下,自行车比赛不是以固定的功率输出完成的;相反,功率输出是随机的,即使在个人计时赛中也是如此(Gordon 2005)。虽然分档可以描述不同强度下的总时间,但这种方法也有不足之处。首先,对一个给定仓的强度范围的选择会影响结果。通常情况下,根据给定的功率输出归一化的身体质量,例如5.9-7.9 W kg⁻¹,选择任意的分档。如果强度的范围太宽,就不能捕捉到功率输出数据的颗粒性。另一个问题是,分档无法深入了解个人努力的长度。每个功率输出仓的累积时间可能代表一个长的努力或多个短的努力。最后,如果使用任意分档,那么一个分档所涵盖的强度范围可能包括从生理学角度看既可持续又不可持续的功率输出。解决这个问题的方法是使用生理阈值来定义分档(Abbiss等人, 2009)。2010帕斯菲尔德等人。2013)。例如,定义运动强度领域的亚最大生理阈值可以在实验室测试中确定,并用于定义分档。虽然这种方法确实能让人更深入地了解个别运动员在某一事件中的生理状况,但当来自多名运动员的数据被合并时,问题就会出现,因为这些分档虽然代表了一致的生理反应,但不一定代表所有运动员的相同的绝对或相对功率输出。

如前所述,分类的主要问题之一是个人努力的持续时间不能在数据中体现出来。然而,有一小部分工作使用暴露变化分析(EVA)来试图克服这一局限性(Abbiss等人; Passfield等人)。2010帕斯菲尔德等人。2013)。这种方法使用一个双仓系统;一组仓以传统的方式用来描述强度。仓可以与任意值或生理阈值有关。第二组仓用于描述个人努力的持续时间。这里使用任意的持续时间,例如0-5秒、5-10秒或>1分钟。强度分类被绘制在X轴上,个别努力的持续时间被绘制在Z轴上,总比赛时间的百分比被绘制在Y轴上(见图中的样本数据)。1)。

虽然个人努力的确切功率输出仍未显示,但EVA是一个非常强大的工具,可以显示在特定事件中的步调策略和功率输出的随机性质。这种方法对于描述大量短距离亚最大限度冲刺与恢复期穿插进行的赛事可能特别有效,例如越野赛或奥林匹克越野山地自行车赛。EVA是描述努力和恢复持续时间的有效方法。

图1

六名U23自行车运动员在比赛最后一小时的EVA暴露变化分析 ($N=6$)。



阵。这些信息对教练和从业人员在开出间隔训练课程以复制赛事要求时是很有价值的。

到目前为止，所讨论的方法的一个主要局限性是，它们不能描述个人努力的功率输出。要做到这一点，可以使用平均最大功率输出（MMP）方法（van Erp和Sanders 2020；Puchowicz et al. 2020奎德等人2010Vogt等人，2007b）。MMP值代表在一个事件中，在给定（任意）时间内记录的最高平均功率。例如，在一场比赛中，一分钟5内记录的最高平均功率输出将是最小5的MMP。这样的MMP数据是非常有价值的，因为它们可以确定一个自行车运动员在比赛中需要产生的功率输出和持续时间，以提高竞争力。例如，MMP数据分析显示，在大环赛中，一个顶级的男性总成绩竞争者在关键的山地爬坡时，需要在20分钟内产生5.8 W kg^{-1} 的功率（van Erp等人，2020a, b）。对于教练和从业人员来说，这是非常有价值的信息。

然而，MMP数据存在一些基本问题。首先，不知道记录的MMP值是否来自于最大的努力。这与从正式测试中得出的数值形成鲜明对比，在正式测试中，努力的最大限度是可以被验证的。例如，在传统的实验室增量分级运动测试（GXT）中，需要获得给定的努力感和呼吸交换率，才能认为该测试具有最大限度的性质。因此，一个有效的最大摄氧量（ $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ ）值，以得到（Jones等人）。

2016).假设从比赛中得出的MMP值几乎没有一个是最大的性质。如果一个骑手在比赛结束时以外的任何地点产生最大努力，可能会影响他们随后在集体比赛中跟随竞争对手的能力，或影响他们在个人比赛中的步

调策略（Leo等人，2021b, c）。第二，MMP数据

从一个特定的（任意的）持续时间得出的MMP值可能是一个较长的努力，或一个较短的努力和随后的恢复的括号的结果（Leo等人，2021a, b）。例如，从一场比赛中得出的5分钟MMP值不太可能正好代表5分钟的最大努力。因此，仅使用MMP值时，很有可能存在对最大功率输出的固有低估。MMP数据只能说明骑车人做了什么，而不是骑车人有什么能力。

研究中MMP数据的另一个问题是，没有一套公认的（任意的）持续时间被应用。这意味着，当试图比较各种研究的数据时，教练和从业人员无法进行类似的比较。随着研究小组开始纳入更广泛的MMP持续时间（从~到5~1800s），这种情况已经有所改善。这就允许使用MMP值来开发一个力量-

时间曲线，允许在研究之间进行一些比较。MMP分析的最后一个问题是，它可能没有真正定义

"比赛获胜的努力"。Leo及其同事（2021b）和van

Erp及其同事（2021a;

b）最近的工作表明，自行车运动员在整个赛事中产生的功率输出会下降；MMP值不能预测比赛成绩。相反，骑手在比赛中的关键时刻产生的功率输出才是对成绩的预测。例如，对于公路自行车赛的短跑运动员来说，他们在比赛的最后时刻所能产生的功率是很重要的，但这并不一定与他们的10MMP相同。这意味着MMP分析可能会遗漏它所试图识别的努力。为了更好地识别这些赢得比赛的努力，在研究中采取了一种方法，即把事件分解成几个部分，并报告每个部分的MMP值（van

Erp等人，2021a；Leo等人，2021b；Sanders和van Erp 2021).到目前为止，这些片段被定义为

通过累积的工作,无论是绝对值还是与体重成正比的值,例如在做了2.500千焦的工作后的MMP值。然而,这种方法迄今只在公路自行车运动中应用过,它带来了一些进一步的限制。公路自行车赛是一项团队运动,骑手们在其中执行个人任务,如掩护领队或从后面的车上收集营养。努力赢得比赛并不是每个骑手的目标。因此,随着累积工作的增加,报告的MMP值下降,可能部分是由于一些骑手已经完成了他们的任务,因此不再产生最大的努力。

为了缓解任意的MMP持续时间与实际努力持续时间不匹配的问题,一些研究选择了事件的特定部分,并确定了该部分的专门功率输出(Jobson等人;Leo等人2021c; Padilla等人2021c)。20082021c; Padilla et al. 2008)。例如,Leo和他的同事(2021a; b)只研究了分类爬坡的MMP值。这种方法,虽然在某些情况下可能是有益的,但确实需要研究人员确定比赛中的关键时刻进行分析。虽然这对某些事件来说是可能的,比如一个公路赛段从平地开始到山顶结束,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,在确定比赛中的关键时刻时,征求运动员的意见。虽然这是一个有吸引力的建议,但就作者所知,这种方法还没有在已发表的研究中使用过。

如前所述,MMP分析的主要问题是围绕一个努力是否是最大性质的不确定性,以及MMP持续时间是否等于努力持续时间。为了解决这个问题,作者建议使用从正式测试中得出的功率输出值,以提供一个与MMP值相比较的措施。这种方法对教练和从业人员有特别的好处,因为MMP数据和正式测试数据之间的比较可以用来监测功率曲线的变化;如果一个骑手记录的MMP值超过了正式测试的预测值,可以安排新的正式性能测试。这在分析计时比赛的表现时特别有用,因为在这种情况下,可以将比赛中的功率输出和比赛时间与理论上的功率-时间关系进行比较。This example highlights the importance of developing a power-duration relationship rather than simply using standard duration performance tests, as the likelihood of the test and competition durations being identical is low.关于发展理论上的功率持续时间关系的方法问题,请参见下面的"推导功率持续时间关系"一节。

不幸的是,这种方法(即比较MMP对照先前正式测试得出的预先确定的理论功率-时间关系,只进行了以下的测试

由一些研究小组(Leo等人2020; Leo et al. 2021b; Nimmerichter et al. 2020; Quod et al. 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值之间有良好的到非常好的一致性。特别令人感兴趣的是Leo和他的同事们的工作(20202021a)的研究表明,在需要进行正式的重新测试之前,正式的测试值只能预测6个月内的比赛成绩。

方法论问题

到目前为止,我们已经讨论了功率分析的方法,然而,也有与所有方法有关的方法学问题。记录的功率输出值可能会受到事件地形的高度影响(Padilla et al. 2000, 2008桑德斯和Heijboer 2019a),单日赛和多日赛的差异(van Erp和de Koning 2019; van Erp和Sanders 2020; Lucía et al. 2003)和比赛类别(Sanders和van Erp 2021)。在专业公路自行车比赛中,发现比赛类别会影响功率输出:在较短的时间内(<2分钟),较低等级的比赛会有较高的功率输出,而在较长的时间内(>10分钟),难度较大的比赛会有较高的功率输出。在进行功率分析时,另一个重要的考虑因素是环境因素。海拔、温度和湿度都会影响运动员能够产生的功率输出。因此,从研究的角度来看,作者建议应尽可能地报告环境和比赛条件。

最近的研究还表明,功率剖析的分析专门对训练或比赛数据进行的分析在同一参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充分的信息,说明收集任何动力分析数据的背景。

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者对动力输出的影响,这是因为牵制降低了对特定速度的动力输出要求(Ouvrard等人, van Druenen和Blocken)。2018Ouvrard等, van Druenen和Blocken 2021)。研究还表明,竞争可能会影响自行车运动员采用的节奏策略(Bossi et al. 2018)。

推导出功率-时间关系

当功率输出与任务失败时间(TTF)相比较时,出现了一致的功率-时间关系(Burnley和Jones 2018)。第一个用数学方法描述这种关系的研究者是莫诺和谢雷尔(1965),他们分析了静止状态下的肌肉疲劳

和动态工作（伸膝运动），并建立了一个数学模型，描述了完成工作和TTF之间的双曲线关系。由于几十年来强有力的科学证据（Burnley和Jones 2018琼斯等人2010Poole et al. 2016），可以认为功率-时间关系代表了人类可承受的运动极限的综合方法。

从生理学的角度来看，功率与时间的关系是由四个不同的运动强度域组成的，即中度、重度、严重和极端（Burnley和Jones 2007），它们的特点是不同的全身生理反应（Jamnick et al. 2020梵哈塔罗等人。2016汪洋1996）。虽然完整的生理学背景，即力量-时间关系的系统和机制基础，超出了本叙述性评论的范围，但感兴趣的读者可以参考以下评论文章。伯恩利和琼斯(2018)，Jones等人(2010)，Poole等人(2016)，Poole等人(2021)，Vanhatalo等人(2016)。

教练和从业人员可以使用各种模型来建立力量-时间关系，以用于力量分析（Sreedhara等人）。2019)。然而，大多数模型只

涵盖了功率-时间关系的一个特定部分（见图。2）。

在极端运动强度领域建立动力输出模型

以前的研究（Bundle et al. 2003；Bundle和Wey-和2012；Weyand等人。

2006)已经证明，无氧功率储备(APR)能够预测短时(<3分钟)内的功率输出。

在运动强度领域， P_{2max} 可能无法达到 $\dot{V}O_2$

在任务失败发生之前。APR方法最初是在实验室环境中开发的，其中GXT期间记录的最大空气动力（MAP）和运动员在一个踏板旋转或一秒钟内所能产生的最大动力（ P_{max} ）被用作参数输入。然而，Sanders等人(20172019b)开发了一种现场测试方法，其中3分钟的MMP可以作为MAP的替代物。在这种方法中，时间常数（ k ）可以定义为功率输出的指数下降率（即相应时间常数的倒数： $k=1/\tau$ ），可以在0.024-0.027的值之间变化，以达到最佳效果。

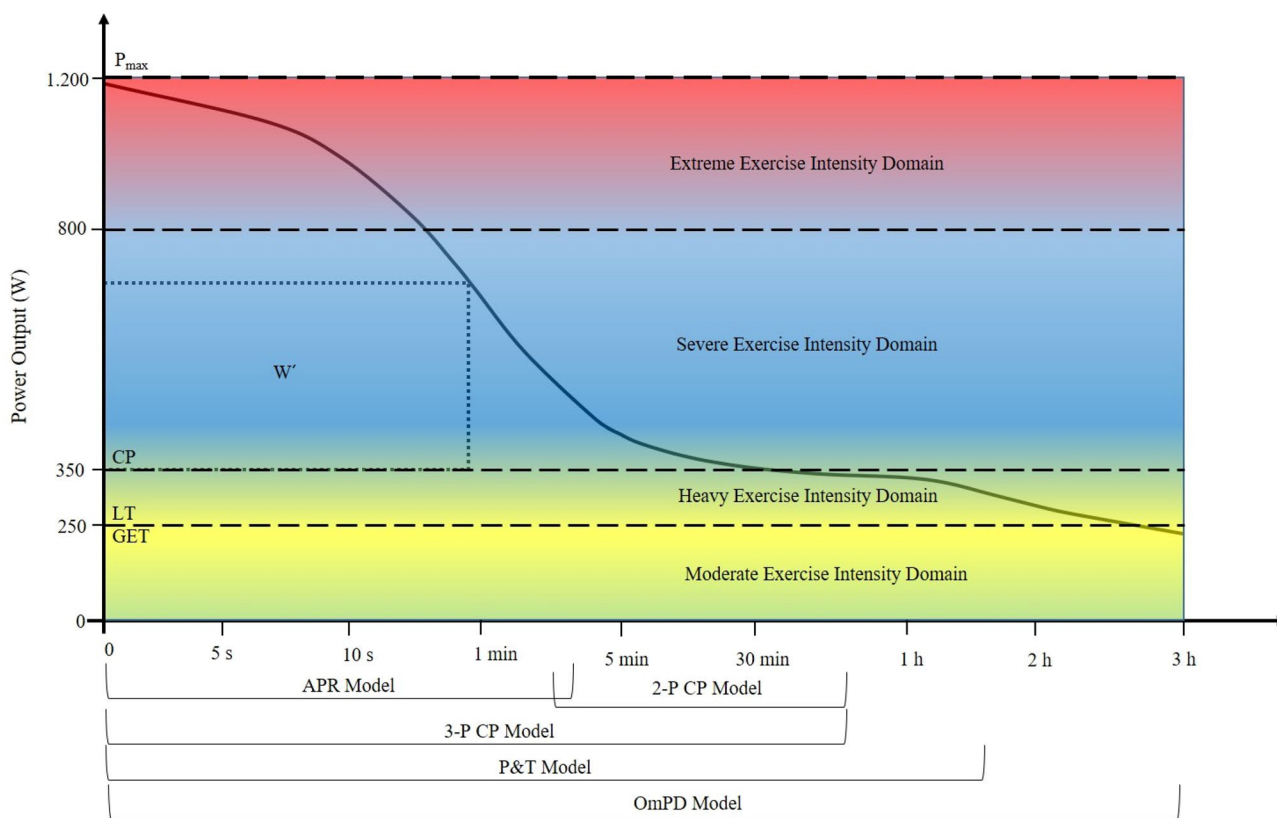


图2 使用任意的功率输出值对整个功率-时间关系的生理反应谱进行了说明。 P_{max} 峰值功率， W' 高于临界功率的工作， CP 临界功率， LT 乳酸盐阈值， GET 气体交换阈值， APR

无氧功率储备模型， $2-P$ CP 双参数临界功率模型， $3-P$ CP 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

拟合MMP数据。这使得功率-时间关系建模的个体化，可能提供更好的拟合（Sander s和Heijboer 2019b）[见图和表3（1公式1）中的样本数据]。

除了APR模型，在极端运动强度领域的功率输出也可以用三参数临界功率（3-P CP）（Morton 1996）、Peronnet和Thibault模型(P&T)(1989)和Puchowicz的全方位功率持续时间模型(OmPD)(Puchowicz et al. 2020).应该注意的是，在P&T模型中， P_{max} 是作为参数估计值提供的，而在APR模型中。

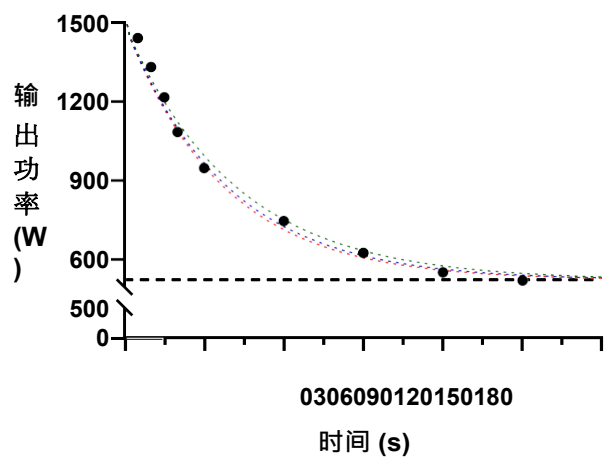


图3 无氧功率储备模型的样本数据，黑点-记录5、10、15、30、60、90、120和150秒持续时间的功率输出；水平黑色虚线：-无氧功率储备；绿色、蓝色和红色虚线代表功率持续时间曲线，根据Sanders和Heijboer (2019b)，功率输出指数下降的速率常数 ($k = 0.024, 0.026, 0.027$)。

表1 与各自运动强度领域相对应的功率-时间模型 运动强度

领域模型方程		
极端	有氧	功率储备 $P(t) = P_{3(-min)} + P_{(max)} - P_{3(-min)}$
$\times e^{(-k \times t)}$ (1) 极端和	严重的3参数临界功率模型	$t = \frac{W}{P} + \frac{W^2}{CP \times P_{max}}$
	严重的2参数临界功率模型	$P(t) = \frac{W}{t} + CP$ (3)
极端、严重和	重度Peronnet和Thibault模型	$P_{map(t)} = MAP - A \times Ln^{-1} \frac{MAP}{TTF} ; t > MAP \times TTF$ (4)
	全能动力持续时间模型	$P(t) = \frac{W}{t} \times \frac{P_{max}-CP}{P_{max}} \times e^{-t \times \frac{W}{P_{max}-CP}}} + CP ; t \leq CP \times TTF$
		$P(t) = \frac{W}{t} \times 1 - e^{-t \times \frac{P_{max}-CP}{P_{max}}} + CP - A \times Ln^{-1} \frac{CP}{CPTTF} ; t > CPTTF$ (5)

公式1： $P(t)$ 功率输出， $P_{(3-min)}$ 分钟3现场测试， $P_{(max)}$ s1峰值功率， e 自然对数的基数(2.718)， k 功率输出指数下降的速率常数， t 时间(秒)
公式2： t 时间（秒）， W 工作在临界功率以上， P 功率输出， CP 临界功率， $P_{(max)}$ s1峰值功率
公式3： $P(t)$ 功率输出， W 工作在临界功率以上， CP 临界功率， t 时间（秒）。
公式4： $P_{map}(t)$ 最大有氧功率时的功率输出， MAP_{TTF} 最大有氧功率时的任务失败时间， t 时间为秒， A 代表功率输出随时间下降的固定常数， Ln 是以 e 为底的自然对数（2.718）。

3-P CP模型和OmPD模型的 P_{max} 需要作为一个输入参数。这些不同的建模方法在很大程度上影响了极端运动强度领域的功率输出预测（见图）。4).

严重运动强度领域的功率输出建模

基于CP概念的多种方法已被提出，以预测严重运动强度领域的功率输出。尽管所有的CP模型从数学角度看是等价的（即它们可以从数学上相互推导），但它们对CP和高于CP的工作（ W' ）产生了不同的统计参数估计（Jones等；Muniz-Pumares等）。2010(Jones et al. ; Muniz-Pumares et al. 2019)，因此，在严重运动强度领域内的预测也略有不同；特别是在该领域的极端。3-P CP模型（Morton 1996）旨在通过将 P_{max} 作为一个模型参数来克服这些限制，使短时功率输出达到严重和极端运动强度领域的上限，但它仍然高估了中等运动强度领域的功率输出（见图）。4).

对低于临界功率的功率输出进行建模

CP代表了理论上的功率-持续时间曲线的渐近点，这表明给定的功率输出是无限持续的。然而，这显然不是现实世界中的情况，在CP上的运动被限制在20-40分钟内（Poole等人）。2016).由于这个原因，以前的研究（Peronnet和Thibault 1989Puchowicz等人）。

公式5: P_0 功率输出, W 高于临界功率的工作, CP 临界功率, t 时间(秒), CP_{lim} 临界功率下的任务失败时间, A 代表功率输出随时间下降的固定常数, Ln 自然对数以 e 为底(2.718)。

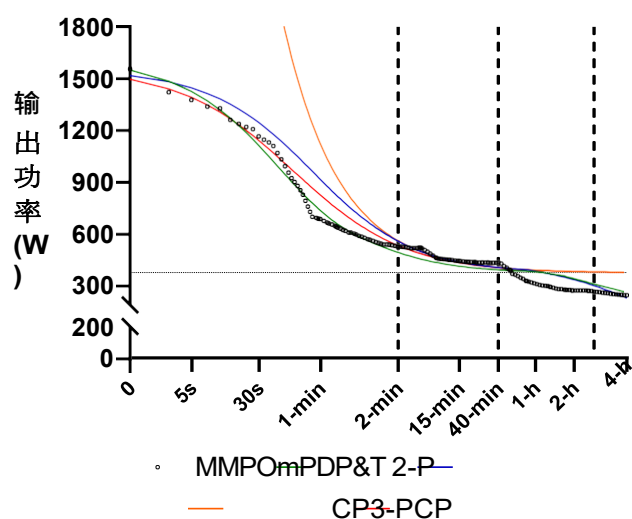


图4

应用于同一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-P* *CP*双参数临界功率模型, *3-P* *CP*三参数临界功率模型; 水平虚线-临界功率渐近值; 垂直虚线代表运动强度域(极端、严重、重度和中度)之间的大致过渡。

2020)提出了在CP以下的指数衰减项来预测大运动强度领域的功率输出(见图和2公式45)。然而, 这些衰减项不一定是在重度和中度运动强度领域的疲劳的基本生理学中找到的(见Black等人(2017)、克拉克等人(2019)和Amann(2011)关于这些强度下可能的疲劳机制的概述)。然而, 它们确实代表了迄今为止估计低于CP的运动耐力的最佳模型(见表方程式1)。

选择一种建模方法

作者建议教练和从业人员参考特定学科或训练模式的生理要求来指导他们的选择。然后, 他们应该选择能在运动员训练和比赛的强度范围内最好地预测功率-时间关系的模型。例如, 双参数CP模型(Moritani et al. 1981 Whipp et al. 1982)高估了严重运动强度领域之外的短期和长期的功率输出(见图)。

4), 因此有可能限制其效用。举一些实际的例子, 团队短跑的功率输出只属于极端运动强度领域, 而个人追逐赛的功率输出则属于极端和严重运动强度领域(Gardner et al. 2005)。在公路自行车运动中, 大部分的功率输出都属于重度和中度运动强度的范畴(van Erp和de

康宁

2019); 然而, 极端和严重运动强度领域的功率输出对预测比赛成绩更为重要(Menaspà等人。2017)。持续时间较长的(超级)耐力赛, 例如铁人三项赛(Laursen 2011)或“横穿美国”(Hulton et al. 2010)都属于中等运动强度的范畴, 自行车或铁人三项的大量训练也是如此(van Erp等人, 2020b; Laursen 2011)。对于这些例子, 可能需要不同的建模方法。

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。虽然有大量的证据表明, 每个运动强度领域的生理反应是独特的(Burnley和Jones 2007), 但应该注意的是, 大多数的研究是来自于运动强度领域。强度不接近阈值的情况下。

测定一个给定的运动强度域的老齡人。Pethick和他的同事们的工作(2020)研究了离体伸膝运动中临界转矩(C_T)附近的反应, 这是CP的替代物, 显示在CT以上的参与者显示出与严重运动强度领域相关的生理反应。同样, 略低于CT的生理反应也与大运动强度领域有关。另一个相关的例子是, 研究表明尽管 $\dot{V}O_2$ 慢速成分是一个决定性的特征在重度运动强度领域, 慢速成分的一个变体, 尽管幅度较小, 也出现在中度运动强度领域(Davies和Thomp)。

儿子1986)。虽然 $\dot{V}O_2$ 摄取量的变化有一定比例可能是由于底物利用的转变, 这种变化并不能说明 $\dot{V}O$ 的全部增加₂, 这表明改变的或额外的肌肉招募(Burnley和Jones 2018)。总之, 这些发现表明, 与其说每个运动强度领域都会引起不同的生理反应, 不如说在功率-时间关系中存在着一系列的反应(见图)。2)。Indeed, this would explain why the power-duration curve is smooth in nature and doesn't contain 'turn-points' as would be expected if the thresholds between exercise intensity domains were indeed 'hard' in nature.这也可以解释为什么上述的一些模型能够预测多个运动强度域中不同强度的运动耐力(图和表2 1)。

将实验室和现场测试结合起来

实验室测试和现场测试都被单独使用, 并相互结合, 以研究自行车运动的生理和性能能力(Gardner等人)。

时间的方法可能解释了为什么这个概念已经被广泛使用

2007; Jobson et al. 2009琼斯和范哈塔罗 2017; Lucia et al. 2001; Paton and Hopkins 2001).

在自行车运动中,最常见的实验室测试报告包括冲刺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、第一和第二乳酸或通气阈值、最大乳酸稳态和骑行效率 (Laurent等, 2009)。

2007Lucia et al. 2000; Mujika和Padilla 2001).尽管这些实验室测量方法与骑行效率之间存在良好的一致性,但上述生理变量都不能用于建立作者建议的功率-时间关系,以达到功率分析的目的。

如前所述, 功率-

时间关系的一个重要组成部分是重度和严重运动强度领域之间的边界;可以和不可以达到稳定状态的功率输出 (Poole等人)。 2016Poole等人; Poole等人。 1988).这些领域之间的生理界限与耐力表现有很大关系 (Burnley and Jones 2007Poole等人)。 1988).长期以来,最大乳酸稳态 (MLSS)被认为是这个界限的黄金标准 (Billat et al. 2003; Keir等人 2015; Kilding和Jones 2005).然而,最近的工作 (Galan-Rioja et al. 2020Jamnick et al. 2020琼斯等人。 2019Nixon et al. 2021)建议CP更好地估计最大代谢稳定状态,即稳定状态下的最高功率输出。

在摄氧量 ($\dot{V}O_2$) 的反应中仍然可以观察到。

尽管血乳酸值增加 (Bräuer和Smekal 2020).对于哪种方法 (如果有的话) 在区分代谢稳态和非稳态运动方面更有优势,以及MLSS和CP是否真的可以互换使用,仍然存在一些争论 (Jones et al. 2019; Keir等人。 2015Nixon等人; Poole等人。 2021Poole等人)。 1988).

在应用环境中,有人建议采用另一种方法,即功能阈值功率 (FTP), 可以作为最大代谢稳态的替代物: (Mackey和Horner 2021).FTP首先被描述为在 "准生理稳态

"下可维持一小时的骑行功率输出 (Bassett et al. 1999巴塞特等人; 科根 2003; Mackey和Horner 2021).因此,FTP是最小60MMP的一个替代物。有人提出,FTP也可以通过取20分钟最大场地测试中95%的功率输出来预测 (Borszcz et al. 2018Borszcz等人; Morgan等人。 2019Valenzuela等人), 或者通过采取90%的功率输出来预测FTP。

2018)或取8分钟最大场地测试中90%的功率输出 (Sander s et al.). 2020);前者是常用的方法 (Valenzuela et al.

2018).与需要多次测定试验的CP和MLSS相比,FTP可以从一次试验中预测出来,因此耗时较少。这种节省

进行比较。

在自行车运动中采用 (Mackey和Horner 2021)。然而, 虽然CP和MLSS可以被认为是对最大代谢稳定状态的估计 (Keir等人; Poole等人)。2015Poole et al. 1988), 但对于FTP来说, 这不能被证实(Morgan et al. 2019)。虽然MLSS和FTP都是单一参数的估计, 但CP的概念可以用来预测严重运动强度领域内一系列功率值的TTF, 并提供代谢稳态和非稳态运动之间的边界估计。而MLSS或FTP则不能这样说, 它们只能预测功率

时间关系上的一个点, 或运动强度域之间的边界, 但不能预测一系列功率输出值的TTF。从生理学上讲, CP已经被证明代表了最高的功率输出, 在这一阶段, 肌肉的代谢物环境没有逐渐的失调 (Burnley和Jones 2018); 然而, CP不是一个 "硬" 边界, 而是代表了重度和严重运动强度领域之间的一个阶段性过渡(Pethick等人)。

2020)。Mitchell和他的同事(2018)也报告了CP和肌肉毛细血管密度之间的密切关系, 支撑着CP的有氧成分。同样, Vanhatalo等人(2016)表明, CP与高度氧化的I型肌纤维的百分比密切相关。在CP以上, 在严重的运动强度领域, 会出现非代谢稳态, 其特点是肌肉内的磷酸肌酸储存减少, 无机磷酸盐、氢离子和血乳酸的浓度持续增加, 这些都与工作肌肉的牵引功能降低有关 (Allen等人, 2009年)。

2008Allen等; Burnley和Jones 20072018琼斯等人。

2010琼斯等人; 普尔等人。

20161988)。

虽然FTP和CP估计之间存在很强的关系 (Denham et al. 2020; Karsten et al. 2020; Morgan等人; Mackey和Horner等人。

2019虽说FTP和CP估计值之间存在很强的关系 (Denham et al. 2021), 以及FTP和MLSS(Borszcz et al. 2019), 所引用的研究表明, 参数之间的一致限度太大, 不能互换使用。这就对FTP (Borszcz等人) 的相关性提出了质疑。2018; Karsten et al. 2020摩根等人 2019; Valenzuela et al. 2018)。此外, Borszcz和他的同事(2018)证明了95%的20分钟功率输出高估了60分钟的功率输出, 并建议20分钟功率输出应单独用于训练处方和成绩监测, 而不是试图对最小60功率输出 (即FTP) 做出估计。毕竟, 两者和20最小60功率输出在本质上都是任意的。然而, 尽管FTP可能代表了一个任意的数值, 而不是一个生理上的阈值, 但它在为训练过程提供信息方面仍有实际的效用 (Valenzuela等人, 2006)。

2018)。然而, 就作者所知, 目前还没有研究对基于不同概念 (即FTP、CP和MLSS) 的训练处方的表现结果

尽管如此, 由于上述原因, 作者认为CP是在推导出功率-

时间关系方面最有用的概念, 因此建议在功率剖析领域使用CP概念。

推导出功率持久性建模的参数

目前, 对于如何最好地推导出建立功率-时间关系模型所需的参数, 即 P_{\max} 、CP和 W' , 还没有达成共识。同样, 关于应该用哪种数学模型来推导CP和 W' , 也有相当多的争论 (Maturana等人; Muniz-Pumares等人)。2018马图拉纳等; 穆尼兹-普马雷斯等。2019Nimmerichter et al. 2020)。

传统上, 在持续时间和2分钟15之间进行三到五次预测试验 (Karsten et al. 2015; Maturana等人。2018穆尼兹-普马雷斯 (Muniz-Pumares) 等人。2019) 允许通过加权最小平方或几何平均线性和非线性回归分析得出CP和 W' (Vinetti et al. 2017Vinetti et al.; Vinetti et al. 2020)。预测试短于min2不保证达到 $\dot{V}O_{2\max}$ (即它们不在 $\dot{V}O_2$ 的范围内)。严重的强度域) (Hill and Smith 1994; Maturana et al. 2018; Muniz-Pumares et al. 2019; Nimmerichter等人。2020), 而由于糖原消耗和心理因素 (即动机) 的影响, 不推荐超过15分钟的预测试验 (Karsten et al. 2015; 马图拉纳等人。

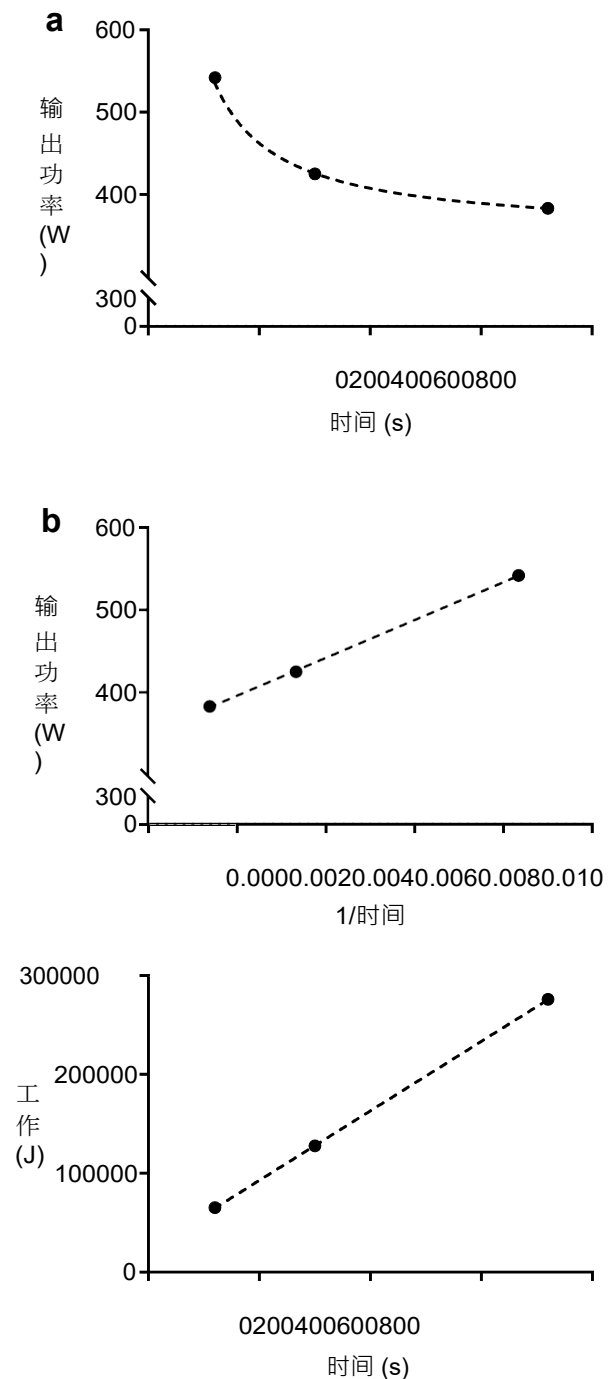
2018)。为了避免数学建模过程中的偏斜, 减少CP和 W' 的计算误差, 最短的预测试验应该在2到5分钟之间, 最长的预测试验应该在12到15分钟之间 (Karsten et al. 2015马图拉纳 (Maturana) 等人。2018马图拉纳等; 穆尼兹-普马雷斯等。2019)。预测试之间的恢复时间在一次访问中应至少为30分钟, 在多次访问24中应至少为1小时 (Karsten et al. 2017)。多天的好处是, 最初的预测试引起的任何疲劳不会影响随后的试验, 但由于功率输出的逐日变化, 可能会引入误差。

一旦完成了性能试验, 则各自的功率输出和试验持续时间值可以用来推导CP和 W' 。从非线性二参数或三参数模型计算CP和 W' 的估计值, 需要使用统计软件来进行加权最小平方或几何平均回归分析 (Vinetti et al. 20172020)。为了简化教练和从业人员的这一过程, 有两个选项可用于线性化双曲功率-时间关系 (见图)。

5)。实践者可以使用a) 线性工作时间CP模型 (见公式3和图), 或者b) 线性功率的CP模型。

5c或b) 线性功率逆时CP模型 (见公式3和图)。

5b), 其中CP和 W' 可以作为线性关系的斜率和截距得



出 (Clarke和Skiba 2013; Sreedhara

图 5 : 功率-时间关系图。模型采用的是Clarke和Skiba (2013)

双曲线 (a)、时间的倒数 (b) 和线性工作时间 (c) 的功率-时间关系图。模型采用的是Clarke和Skiba (2013)

等人。

2019). 图中的所有数学模型都提供了较高的模型拟合精度, 但有可能由于使用了哪种拟合方法, 功率-时间参数估计值 (CP 和 W') 会有一些分歧 (Muniz-Pumares et al. 2019). 因此, Hill (1993) 建议, 可以更客观地选择最适合的数学模型, 其中产生最低标准估计误差 (SEE) 的模型应该是

衍生出CP的首选方式 (Hill 1993 ; Muniz-Pumares et al. 2019).

CP和 W' 的参数估计也可以只用两个预测试验得出 (Parker Simpson和Kordi 2017).虽然这可以被看作是一个省时的测试方案,但这种方法的局限性是,线性关系-

船总是导致完全拟合 ($R^2=1.0$)。此外,不能得出拟合度的参数(即SEE)。因此,建议至少使用三次预测试验,以确保CP (2-5%) 和 W' (<10%) 的低标准误差 (Black et al. 2016德克尔等人。

2015).进行三次预测试验并使用双参数CP模型来拟合数据,会产生一个自由度。例如,一个CP值为385W的骑车者的标准误差为5W,然后需要乘以12.7来计算两个方向的95%置信限 ($\pm W64$)。增加第四个预测试验将使CP的标准误差减少到W3和95%的置信限 ($\pm W38$),从而提高CP的预测能力。

也有人提出了3分钟的全部测试,作为一种更省时的方法来推导CP和 W' (Vanhatalo等人)。2007, 2008).这个测试的主要假设是, W' 或更准确地说是WEP (高于终结测试功率的工作),在第一个s内150完全耗尽,因此在最后30s内只有CP (终结测试功率)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可靠性和有效性 (Wright et al. 2017),其他对精英自行车运动员的研究显示,从3分钟的全部测试中得出的CP估计值明显高于传统方案(McClave et al. 2011(McClave等),这可能会导致高估严重运动强度领域的表现能力(Nicolò等)。

2017).这一发现使人们对3分钟全部测试是否能用于力量分析领域产生疑问。

在一些功率-时间模型中 (见表 1)在建立功率-持续时间关系模型时, P_{\max} 是一个额外的输入参数。广泛的研究 (Douglas et al. 2021 ; Driss和Vandewalle 2013 ; McCartney et al. 19831985) 对自行车运动 \max 中 P 的评估和机制进行了研究 (Sargeant et al. 1981).在实验室或野外环境中评估 P_{\max} 需要对测试方案进行深思熟虑。最近的研究使用s4、s10和s15短跑中的最高1s功率输出来得出 P_{\max} (Driss和Vandewalle 2013 ; Ferguson et al. 2021Gardner et al. 2007Sanders and Heijboer 2019b)。如果使用超过s10的努力, P_{\max} 可能会受到负面的影响,因为骑车人可能会应用一个节奏策略 (Driss和Vandewalle 2013 ; Gardner et al. 2007).实践者也应该意识到在全力冲刺过程中的"学习效应",因此建议在正式测试 P 之前 \max 进行充分的

熟悉。在实验室设置中测试 P 时,需要考虑 \max 的其他重要因素有:扭矩系数设置 (Forbes et al. 2014)和

预期的 P 是否 P_{\max} 在功率测量设备的有效范围内。例如, 市面上的智能训练器只在700W以内有效, 这比某些人群的预期 P_{\max} 要低得多 (Zadow等人, 2006)。
2016).

分钟转数100的CP估计值较60高 (Barker et al. 2006卡纳瓦莱和

生态学的有效性

由于不同的生物力学招募模式, 节奏、身体位置以及地形, 即平地或上坡条件, 也被证明会影响模型参数的估计 (Bertucci等; Kordi等)。 2005; Kordi et al. 2019Nimmerichter et al. 2012).因此, 在选择测试环境时, 需要考虑骑手的专业性 (例如爬坡手与计时赛专家) 和比赛要求 (上坡与平地, 公路与越野等) (Nimmerichter等人, 2009)。
2012).测试条件应反映出运动员预期的表现条件。例如, 建议计时赛专家在平地上用计时赛自行车进行预测试验, 而爬坡专家则用公路自行车在上坡环境下进行测试。

以前的研究还调查了是否应将时间试验或TTF试验作为预测试验的首选 (Coakley and Passfield 2018; Karsten et al. 2018).传统上, TTF试验是基于GXT中功率输出的一个固定百分比 (即80-105%)。这种方法的主要局限性在于, 个体间的差异可能会影响试验的持续时间 (Jamnick等人, 2009年)。

2020).相比之下, 最大努力时间试验需要高水平的计步能力, 因此可能只适合于有经验的自行车手 (Karsten等人)。

2018).然而, 在野外环境中, 时间试验本来就更容易进行, 正如Simpson和Kordi (2017)已经证明了在精英运动员中使用时间试验的一个特别有时间效率的方案可以产生有效的CP和 W' 估计。然而, 在训练不足的参与者中, 较高的功率输出值已被报道在TTF试验中导致较高的CP和 W' 估计 (Coakley和Passfield 2018)。

如上所述, 在进行任何正式测试时都应考虑环境因素。因此, 正式测试期间的测试条件应尽可能地反映比赛环境, 以确保环境的有效性。为了说明这一点, CP已被证明随着海拔高度的增加而明显下降, 而 W' 只在海拔米4.000以上才下降 (Townsend et al. 2017(Townsend et al.); 在正式测试中, 热度和湿度已被证明会影响到功率输出(Racinais et al.

2015).以前的研究还调查了节奏对计时赛成绩和功率持续参数估计的影响。虽然在休闲训练的个人中, 每

Gaesser

1991), 据报道, 在自行车计时赛中, 精英自行车运动员在每分钟80转与100转之间, 生理决定因素(总效率、能量转换)没有统计学上的显著差异(Foss和Hallén 2005)。尽管在较低的步频下可以实现更高的功率输出, 但精英自行车运动员倾向于选择每分钟90转数左右的高步频, 尽管骑行效率有所下降。

模拟的功率-时间关系和MMP值之间的一致性

据报道, 从测试中得出的CP估计值和MMP值之间有很好的-一致性(Leo等人, 2021a; b; Nimmerichter等人, 2021a; b)。20202021a; b; Nimmerichter et al. 2020; Quod等人。

2010)。虽然从正式测试中得出的CP与赛车之间有很好的-一致性, 但对于 W' 来说, 同样的情况不能被证实。Leo等人

(2020)和Karsten等人(2015)都报告了从正式测试中得出的 W' 和MMP数据之间的低一致性。这种低一致性可能是由于除了非常特殊的情况(即在计时赛或比赛结束时), 自行车运动员在比赛中不进行最大限度的努力。如果自行车手在任何其他情况下(如上坡终点、领先或计时赛)完全耗尽 W' , 他们有可能随后无法满足跟随车队的动力要求。这些情况对此后记录的MMP值有直接影响, 因为它们不如比赛早期记录的MMP值高(Leo等人, 2021b)。因此, 这些努力并没有通过基本的MMP分析本身被捕捉到。

据报道, 功率输出-----之间有很好的-一致性。在专业男性自行车运动员的短时功率输出(<2分钟)中, 由APR模型和比赛衍生的MMP数据预测的结果(Sanders等人, 2009年)。2017Sanders和Heij-boer 2019b)。然而, 只有有限的研究可以验证这种方法是否也可以应用于其他人群。

未来的方向

尽管在文献中已经开发了许多有关功率分析的方法, 但仍然不清楚哪种方法能提供最大的洞察力。可以说, 对从业人员来说, 创建功率曲线的最方便的方法是回顾性地使用从训练和比赛中获得的预先定义的持续时间的MMP数据(Ebert et al. 2005Ebert等人; Menaspà等人。2017桑德斯和范埃普 2021Vogt等人, 2007b)。尽管这类数据可以为高度训练的自行车运动员的比赛需求提供有价值的见解, 但在以下方面可以检索到的信息很少。

由于MMP值的任意选择, 功率-时间关系。

得出一个比较性的措施可以进行纵向分析: 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值, 从业者可以使用该信息来监测力量曲线的变化。然而, 从比赛或实地测试中得出的 W' 已经显示出较差的预测能力(Karsten等人; Leo等人2021a)。20152021a), 质疑 W' 对功率曲线的实际效用。当从正式测试中创建一个理论上的功率持续曲线时, 应注意使用适当的模型。例如, 在严重的运动强度领域之外应用CP概念涉及到高估短MMP(<2分钟)的能力和长MMP(>40分钟)的可承受性。由于这个原因, APR模型提供了一个有用的概念来预测极端运动强度领域的功率-时间关系。

虽然严重运动强度领域的功率-时间关系已经在CP概念的基础上得到了很好的研究(Jones et al. 2010Poole et al. 2016), 但对中度和重度运动强度领域的功率-时间关系的研究有限(Black et al. 2017)。因此, Puchowicz等人(2020)以及Peronnet和Thibault (1989)提出了带有有氧衰减项的数学模型, 但在评估这些概念是否对中度和重度运动强度领域的功率-持续时间关系具有较高的预测能力方面, 研究很有限, 与肌肉生物能量系统有关(Korzeniewski 2019科泽尼沃斯基和罗西特 20202021范哈塔罗等人。2016)。

最近的工作(van Erp等人2021b; Leo等人2021b)显示, 随着先前工作的增加, MMP值也在减少。然而, 未来的研究需要更好地了解导致疲劳引起的功率-持续时间改变的机制, 特别是运动强度的影响, 以及不同运动强度领域的工作是否会引起功率-持续时间曲线的相同程度的下移。这一点很重要, 因为表现能力的提高, 即功率-持续时间关系的较小改变, 与比赛的成功率呈正相关(van Erp等人, 2021b; Leo等人, 2021b)。

在大数据科学时代, Puchowicz (2018)在黄金猎豹开放数据项目(Liversedge 2020)可以为动力分析提供新的见解。功能性主成分分析(FPCA)通过特征函数对骑手的表型(短跑运动员与爬坡运动员)和性能水平进行分类, 可以深入了解骑手之间MMP数据的变化成分。然而, 目前, 在教练和从业人员应用任何潜在的发现之前, 使用FPCA进行力量分析仍然需要充分的科学验证。

应用环境中的实用建议

根据目前的文献和作者在应用环境中进行功率分析的经验，可以提出以下建议作为教练和从业人员的出发点：为了推导出功率-

时间曲线模型的参数，正式的测试方案应该包括一次冲刺努力（即~10-

15秒）和至少三次在和2分钟15之间的最大努力（Karsten et al. 2015卡斯滕等人；Leo等人, 2021a；Muniz-Pumares等人；Sanders和Heijboer等人。

2019；Sanders和Heijboer

2019b）。这些努力可以在一次测试中完成，但建议将现场测试分为连续两天的两次测试。在科学研究中，努力的顺序最好是随机的，或者在应用环境中遵循自行车运动员或教练的个人偏好。两次试验之间的恢复时间应设定为至少30分钟的主动恢复（<2级的感知运动量）（Karsten等人, 2008年）。

2017).CP和 W' 应该由非线性双参数CP模型得出（Muniz-Pumares et al. 2019），而 P_{max} 应该是指~10-15秒冲刺努力中的1秒峰值功率（Sanders和Heijboer 2019b）。这个协议将允许教练和练习者得出有效的 P_{max} 、CP和 W' 估计值。然后，教练员可以根据对某一学科的比赛分析和训练处方很重要的运动强度领域，选择最佳的建模方法。

应验证功率计的准确性和可靠性。

建议根据制造商的建议进行测量和零点偏移或重新校准。

作者不建议使用单次努力的现场测试（即8分钟或20分钟的TT）来得出FTP的估计值，因为它缺乏生理背景，而且只代表了功率-

饱和度曲线上的一个点。他们也不建议使用3分钟的全力以赴测试，因为这可能会导致高估严重运动强度领域中的功率-饱和度关系。

为了提高功率分析的生态有效性，我们建议在生物

力学和生理学原理的基础上，仔细选择功率-时间模型的方法。标准化的实验室和现场测试应与训练和比赛中的表现分析相一致，以提高表现预测和训练相关后果的实际效用。此外，任何正式的测试都应该考虑环境和地形条件，在这些条件下，功率曲线信息将被应用。因此，努力的持续时间、坡度、试验间的恢复、骑手类型的专门化（爬坡手与平地专家）和比赛要求（爬坡赛与计时赛）应尽可能地复制。

总的来说，功率分析提供了一个先进的机会，根据训练和比赛的功率输出数据，结合传统的实验室和现场测试方法进行性能建模，以最大限度地提高自行车运动性能。

鸣谢 我们要感谢Richard Ferguson博士和Mag.Dieter Simon，感谢他们在实现这个项目方面的理论投入和帮助。

作者 贡献 PL、JS和IM提出了文章的想法。PL、JS和TP进行了文献检索、写作和图表说明。JS、TP、JL和IM对稿件进行了严格的修改。

资金来源 因斯布鲁克大学和因斯布鲁克医科大学提供开放性资金。本稿件的编写没有得到任何资助。

数据和材料的可用性 不适用。

代码可用性 不适用。

申报

利益冲突 作者P.L.、J.S.、T.P.、J.L.和I.M.声明，他们没有利益冲突。

伦理批准 不适用。

同意参与 不适用。

同意发表 所有作者都同意发表所提交的稿件。

开放存取 本文采用知识共享协议4.0国际版许可，允许以任何媒介或形式使用、分享、改编、分发和复制，但须适当注明原作者和出处，并提供知识共享协议的链接，同时注明是否作了修改。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，除非在材料的信用行中另有说明。如果材料没有包括在文章的知识共享许可中，而你的预期用途不被法定条例所允许，或者超出了允许的用途，你将需要直接从版权所有那里获得许可。要查看该许可的副本，请访问<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>。

参考文献

Abbiss

CR等人 (2010年) 使用暴露变化分析法研究了精英女子公路自行车运动员的步调概况。Br J Sports Med 44 (6) : 437-442

Allen DG, Lamb GD, Westerblad H (2008) Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms.Physiol Rev 88(1):287-332

Amann M (2011) 中枢和外周疲劳：人类骑行运动中的互动。Med Sci Sports Exerc 43(11): 2039-2045

- Barker T, Poole DC, Noble ML, Barstow TJ (2006) 人类在不同的踩踏频率下的临界功率-吸氧量关系。《实验生理学》91 (3) : 621-632
- Bassett DR等人 (1999年) 比较了1967-1996年的自行车世界小时记录：用经验数据建立模型。《Med Sci Sports Exercise》31(11):1665-1676
- Bertucci W等人 (2005年) 在平地 and 上坡公路自行车运动中改变踩踏节奏时对曲柄扭矩曲线的影响。《J Biomech》38 (5) : 1003-1010
- Billat VL等人 (2003年) 最大乳酸稳态的概念：生物化学、生理学和体育科学之间的桥梁。《运动医学》33(6):407-426
- Black MI等人 (2016) 恒定功率临界功率协议高估了斜坡增量运动表现。《Eur J Appl Physiol》33(6):407-426
- Black MI等人 (2017) 在不同运动强度域的骑行过程中，肌肉代谢和神经肌肉的疲劳探测器。《J Appl Physiol》122 (3) : 446-459
- Borszcz FK等人 (2018) 自行车运动员的功能阈值功率：概念的有效性和生理反应。《Int J Sports Med》39(10):737-742
- Borszcz FK, Tramontin AF, Costa VP (2019) 功能阈值与训练有素的自行车运动员的最大乳酸稳态是否可以互换？《Int J Sports Med》14(8):1029-1035
- Bossi AH等人 (2018年) 在越野赛期间的计步策略和战术定位。《Int J Sports Physiol Perform》13 (4) : 452-458
- Bräuer EK, Smekal G (2020) 在最大乳酸稳态强度和刚刚超过最大乳酸稳态强度时的 VO_2 稳态。《Int J Sports Med》41(9):574-581
- Bundle MW, Weyand PG (2012) 短跑运动表现：代谢能力重要吗？《Exerc Sport Sci Rev》40(3):174-182
- Bundle MW, Hoyt RW, Weyand PG (2003) High-speed running performance: a new approach to assessment and prediction.《J Appl 生理学》95(5):1955-1962
- Burnley M, Jones AM (2007) 摄氧动力学是运动表现的决定因素。《Eur J Sports Sci》7(2):63-79
- Burnley M, Jones AM (2018) Power-duration relationship: physiology, fatigue, and the limits of human performance.《Eur J Sports Sci》18(1):1-12
- Carnevale TJ, Gaesser GA (1991) 踩踏速度对高强度运动的功率-时间关系的影响。《Med Sci Sports Exerc》23(2):242-246
- Clark IE等 (2019) 长时间耐力运动中功率-时间关系的动态变化以及碳水化合物摄入的影响。《J Appl Physiol》127 (3) : 726-736
- Clarke DC, Skiba PF (2013) 运动训练和表现的数学模型教学的原理和资源。《Am J Physiol》37(2):134-152
- Coakley SL, Passfield L (2018) 在耐力实验室测试中，自行车运动的表现从时间到力竭与时间试验方面更有优势。《J Sports Sci》36 (11) : 1228-1234
- Coggan A (2003) 二级教练手册使用功率计进行训练和比赛：简介
- Coyle EF等人 (1991年) 与精英耐力自行车运动表现有关的生理和生物力学因素。《Med Sci Sports Exercise》23(1):93-107
- Davies CTM, Thompson MW (1986) 对超马运动员长时间运动的生理反应。《J Appl Physiol》61(2): 611-617
- Dekerle J等人 (2015年) 运动耐力可以通过在严重强度领域内改变工作速率来增强：超过临界功率的工作不是恒定的。《PLOS ONE》10 (9) : 1-15
- Denham J, Scott-Hamilton J, Hagstrom AD, Gray AJ (2020) 骑行功率输出预测功能阈值功率和最大摄氧量。《J Strength Cond》34(12): 3489-3497

- Douglas J, Ross A, Martin JC (2021)最大的肌肉力量：来自短跑自行车的儿子。运动医学公开7(1):48-63
- Driss T, Vandewalle H (2013)测量自行车测力计上的最大(厌氧)功率输出：一个重要的回顾。BioMed Res Int 2013:1-40
- Ebert TR等人(2005)在女子世界杯公路自行车赛中的功率输出。Eur J Appl Physiol 95(5):29-36
- Ebert TR, Martin DT, Stephens B, Withers RT (2006)在职业男子公路自行车巡回赛中的功率输出。Int J Sports Physiol Perform 1(4): 324-335
- Ferguson HA, Harnish C, Chase JG (2021)使用基于现场的数据来模拟短跑赛道的自行车运动表现。运动医学-开放7 (1) : 1-12
- Forbes SC, Kennedy MD, Boule NB, Bell G (2014)确定了男性和女性手臂曲柄无氧测试的最佳负荷设置。Int J Sports Med 35(10):835-839
- Foss Ø, Hallén J (2005) Cadence and performance in elite cyclists. Eur J Appl Physiol 93(4):453-462
- Galán-Rioja MÁ, González-Mohino F, Poole DC, González-Ravé JM (2020)临界功率和代谢/通气阈值的相对接近性：系统回顾和元分析-sis。运动医学50 (10) : 1771-1783。 <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01314-8>
- Gardner AS等人(2004年), 自行车运动中SRM和power tap功率监测系统的准确性。Med Sci Sports Exercise 36(7):1252-1258
- Gardner SA等人(2005), 精英田径短跑自行车的功率输出要求。Int J Sports Perform Analys 5 (3) : 149-154
- Gardner AS等人 (2007年) 在实验室和现场测试中, 精英短跑运动员的最大扭矩和功率与踩踏速度之间的关系。Eur J Appl Physiol 101(3):287-292
- Gordon S (2005) 优化自行车计时赛中的动力分配。体育工程8(2) : 81-90
- Hill D (1993) 临界功率概念。运动医学16(4):237-254 Hill DW, Smith JC (1994) 一种确保使用临界功率得出的无氧能力的准确性的方法。概念。J Sports Med Phys Fit 34(1):23-37
- Hulton AT等人 (2010年) 在横跨美国的比赛 (RAAM) 中的能量消耗。国际运动医学杂志》31 (7) : 463-467
- Jamnick NA等人 (2020年) 对目前确定运动强度的方法进行了检查和批评。运动医学50 (10) : 1729-1756
- Jobson SA, Woodside J, Passfield L, Nevill AM (2008), 上坡自行车运动性能的Allometric比例分析。Int J Sports Med 29(09):753-757
- Jobson SA等人 (2009) 自行车训练数据的分析和利用。运动医学》39(10) : 833-844
- Jones AM, Vanhatalo A (2017) "临界功率"概念：适用于运动表现，重点是间歇性高强度运动。运动医学47(s1) : 65-78
- Jones AM等人(2010)：临界功率：对确定 VO_{2max} 和运动耐力的影响。Med Sci Sports Exerc 42(10):1876-1890
- Jones AM等人 (2016) , 《运动和锻炼生理学测试指南：英国运动和锻炼科学协会指南》。Routledge
- Jones AM等人 (2019) 最大代谢稳定状态：重新定义"黄金标准"。Physio Rep 7 (10) : e14098
- Karsten B等人 (2015) 临界功率场测试的有效性和可靠性。Eur J Appl Physiol 115(1):197-204
- Karsten B等人 (2017年) 比较了确定自行车运动中临界功率和 W' 的试验间恢复时间。J Sports Sci 35 (14) : 1420-1425
- Karsten B等人 (2018年) 时间试验与耗时测试：对临界功率、 W' 和氧摄取动力学的影响。Int J Sports Physiol Perform 13(2):183-188

Karsten

B等人 (2020年) 自行车运动中临界功率测试和20分钟功能阈值功率测试之间的关系。《前沿生理学》11:1877

Keir

DA等人 (2015) 运动强度阈值: 确定可持续表现的界限。《Med Sci Sports Exerc》47(9):1932-1940

Kilding AE, Jones AM (2005) 估计最大乳酸稳定状态的单次访问方案的有效性。《Med Sci Sports Exerc》37(10):1734-1740

Kordi M, Fullerton C, Passfield L, Parker Simpson L (2019) 直立与计时赛骑行姿势对确定训练中的关键功率和 $\dot{V}O_2$ 的影响。《Eur J Sports Sci》19(2):192-198

Korzeniewski B (2019) Pi诱导的肌肉疲劳导致了近乎双曲的功率-时间依赖。《Eur J Appl Physiol》119(10):2201-2213

Korzeniewski B, Rossiter HB (2020) 超过 "临界" 的肌肉Pi: 对 $\dot{V}O_2$ 和代谢物慢速成分、肌肉疲劳和功率-持久关系的影响。《Eur J Appl Physiol》120(7):1609-1619

Korzeniewski B, Rossiter HB (2021) 决定训练引起的骨骼肌中 $\dot{V}_{2\max}O_2$ 、临界功率和 \dot{V}_{2O} 上运动学变化的因素。《J Appl Physiol》130(2):498-507

Laursen PB (2011) 长距离铁人三项: 需求、准备和表现。《J Sports Sci》29(2):247-63

Laurent CM, Meyers MC, Robinson CA, Green JM (2007) 20-versus 30-s wingate无氧测试的交叉评估。《Eur J Appl Physiol》100(6):645-651

Leo

P等人 (2020年) 职业U23自行车运动员在整个竞争季节的训练特点和力量概况。《体育8 (12)》: 167

Leo P, Spragg J, Simon D, Lawley J et al (2021a) U23和职业自行车运动员在多赛段比赛中的爬坡能力。《国际运动医学杂志》(印刷中)

Leo P, Spragg J, Simon D, Mujika I等人 (2021b) 在阿尔卑斯山多级比赛期间, U23和职业自行车运动员的功率分析、工作负荷特征和比赛表现。《Int J Sports Physiol Perform (in press)》

Leo P, Spragg J, Menz V et al (2021c) U23专业自行车运动员在一个竞技赛季中的功率分析。《Int J Sports Physiol Perform》16 (6) : 881-889

Liversedge M (2020) GoldenCheetah OpenData Project. " <https://osf.io/6hfpz/>. 16 2月 2021

Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL (2000) 对职业公路自行车赛的生理反应: 爬坡运动员与计时赛运动员。《Int J Sports Med》21(7):505-512

Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL (2001) 职业公路自行车赛的生理学。《运动医学》31(5) : 325-337

Lucía A等人(2003)环法自行车赛与Vuelta a España: 哪个更难? 《Med Sci Sports Exerc》35(5):872-880

Mackey J, Horner K (2021) 关于FTP20测试与自行车运动相关的知识是什么? 一个范围的回顾。《J Sports Sci》1(aop):1-11

Maier

T等人 (2017) 骑行功率计对跑步机骑行的数学模型的准确性。《Int J Sports Med》38(6):454-461

Martin JC等人 (1998年) 验证了公路自行车动力的数学模型。《J Appl Biomech》14(3): 276-291

Maturana

FM等人 (2018) 临界功率: 不同的协议和模型如何影响其确定。《J Sci Med Sport》21(7):742-747

McCartney N, Heigenhauser GJ, Jones NL (1983) 最大骑行运动中人体肌肉的功率输出和疲劳。《J Appl 生理学》55 (1) : 218-224

McCartney N, Obminski G, Heigenhauser GJ (1985) 等速自行车运动中的扭矩-velocity关系。《J Appl Physiol》

- McClave SA, LeBlanc M, Hawkins SA (2011)通过对精英自行车运动员进行3分钟全力以赴的测试确定临界功率的可持续性。J Strength Cond Res 25 (11) : 3093-3098
- Menaspà P等人 (2015年) 职业公路自行车赛中冲刺的身体需求。Int J Sport Nutr Exercise Metab 36(13):1058-1062
- Menaspà P, Quod M, Martin DT (2013) 职业和U23自行车比赛中公路冲刺的生理需求。一项试点研究。J Sci Cyc 2(2):35-39
- Menaspà P, Sias M, Bates G, La Torre A (2017) 世界杯比赛对精英女子公路自行车赛的要求。Int J Sports Physiol Perform 12 (10) : 1293-1296
- Metcalfe AJ等人(2017)职业男子公路自行车运动员的外部训练和比赛工作量的季节内分布。Int J Sports Physiol Perform 12(2):2-142
- Mitchell E, Martin N, Bailey SJ, Ferguson RA (2018) 临界功率与耐力训练者的骨骼肌毛细血管和I型肌纤维呈正相关。J Appl Physiol 125 (3) : 737-745
- Monod H, Scherrer J (1965) 协同肌肉群的工作能力。工效学》8:329-338
- Morgan PT等人(2019)公路自行车TT性能：与功率-时间模型的关系以及与FTP的关联。J Sports Sci 37(8):902-910
- Moritani T, Ata AN, Devries HA, Muro M (1981) 临界功率作为体力劳动能力和无氧阈值的测量。Ergon 24(5): 339-350
- Morton RH (1996) 一个3参数的临界功率模型。Ergon 39(4): 611-619
- Mujika I (2017) 耐力运动中训练和比赛负荷的量化：方法和应用。Int J Sports Physiol Perform 12(2):229
- Mujika I, Padilla S (2001) 男性职业公路自行车运动员的生理和性能特征。运动医学》31(7) : 479-487
- Muniz-Pumares D, Karsten B, Triska C, Glaister M (2019) 与确定临界功率和曲率常数有关的方法-逻辑方法和相关挑战。J Strength Cond 33 (2) : 584-596
- Muriel X等人 (2021年) 男性职业自行车运动员在大环赛期间的体能需求和性能指标：世界巡回赛与Proteam类别。Int J Sports Physiol Perform 1(aop):1-9
- Nicolò A, Bazzucchi I, Sacchetti M (2017) 3-min-ute 全力测试的参数：高估了竞技自行车运动员在严重强度领域的计时赛表现。Int J Sports Physiol Perform 12 (5) : 655-661
- Nimmerichter A, Eston R, Bachl N, Williams C (2012) 低和高步幅间歇训练对平地 and 上坡自行车计时赛中功率输出的影响。Eur J Appl Physiol 112(1):69-78
- Nimmerichter A等人(2020年)预测自行车计时赛成绩的现场派生功率持续变量。Int J Sports Physiol Perform 10 (1) : 1-8
- Nixon RJ, Kranen SH, Vanhatalo A, Jones AM (2021) 稳态VO2高于MLSS：证据表明临界速度更好地代表了训练有素的跑步者的最大代谢稳态。Eur J Appl Physiol. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04780-8>
- Ouvrard T等人 (2018年) 在上坡自行车运动中，由于领先的队友而导致的性能改善机制。Int J Sports Med 13(9):1215-1222
- Padilla S, Mujika I, Cuesta G, Goiriena JJ (1999) 专业公路自行车运动中的平地 and 上坡骑行能力。Med Sci Sports Exercise 31(6):878-885
- Padilla S, Mujika I, Orbañanos J, Angulo F (2000) 职业公路自行车比赛计时赛中的运动强度。Med Sci Sports Exerc 32(4):850-860
- Padilla S等人 (2008年) 在专业的3周比赛中，上坡自行车运动的运动强度和负荷。Eur J Appl Physiol 102(4):431-438

- Parker Simpson L, Kordi M (2017) 比较了从2或3个最大测试中得出的临界功率和W'。Int J Sports Physiol Perform 12 (6) : 825-830
- Passfield L, Dietz KC, Hopker JG, Jobson SA (2013) 暴露变化分析中的客观时间划分。J Manag Math 24(3):269-282
- Passfield L等人 (2017) 知识就是力量：测量自行车运动中的训练和性能问题。J Sports Sci 35(14):1426-1434 Paton CD, Hopkins WG (2001) 自行车性能的测试。体育医学31(7):489-496
- Peronnet F, Thibault G (1989) Mathematical analysis of running performance and world running records. J Appl Physiol 67(1):453-465 Pethick J, Winter SL, Burnley M (2020) Physiological evidence that the critical torque is a phase transition, not a threshold. 医学科学运动锻炼52(11):2390-2401
- Pinot J, Grappe F (2011) 用记录功率曲线来评估精英自行车运动员的表现。Int J Sports Med 32(11):839-844
- Poole DC, Ward SA, Gardner GW, Whipp BJ (1988) 人类长时间运动上限的代谢和呼吸情况。Ergonomics 31 (9) : 1265-1279
- Poole DC等人 (2016) 临界功率：运动生理学中一个重要的疲劳阈值。Med Sci Sports Exerc 48(11):2320-2334 Poole DC, Rossiter HB, Brooks GA, Bruce Gladden L (2021) The anaerobic threshold: 50多年的争论。J Physiol 599(3):737-767
- Pringle JS等人 (2011) 对英国自行车冠军的临界功率和空气动力阻力进行了准确预测。Med Sci Sports Exercise 43(5):160-161
- Puchowicz MJ (2018) 金色猎豹动力持续时间数据的功能PCA。http://veloclinic.com/functional-pca-of-the-golden-cheetah-power-duration-data/
- Puchowicz MJ, Baker J, Clarke DC (2020) 开发并实地评估了一个全域的功率饱和度模型。J Sports Sci 38(7):801-813
- Quod MJ, Martin DT, Martin JC, Laursen PB (2010) 功率曲线预测公路自行车赛的MMP。Int J Sports Med 31(6):397-401
- Racinais S, Périard JD, Karlsen A, Nybo L (2015) 热和热适应对自行车计时赛成绩和步数的影响。Med Sci Sports Exerc 47(3):601
- Sanders D, van Erp T (2021) 职业男子自行车赛的身体需求和功率参数：最新的回顾。Int J Sports Physiol Perform 16(1):3-12
- Sanders D, Heijboer M (2019a) 自行车大巡回赛中不同赛段类型的体能需求和功率曲线。Eur J Sports Sci 19(6):736-744
- Sanders D, Heijboer M (2019b) 无氧功率储备及其在专业公路自行车赛中的适用性。J Sports Sci 37 (6) : 621-629
- Sanders D等人 (2017) 预测专业自行车运动员的高功率性能。Int J Sports Physiol Perform 12 (3) : 410-413
- Sanders D, Taylor RJ, Myers T, Akubat I (2020) 基于现场的自行车测试，以评估耐力表现的预测因素和建立训练区。J Strength Cond 34(12): 3482-3488
- Sargeant AJ, Hoinville E, Young A (1981) 短期动态运动中的最大腿部力量和功率输出。J Appl Physiol 51(5):1175-1182
- Sreedhara VSM, Mocko GM, Hutchison RE (2019) 使用功率和能量的人类表现数学模型的调查。Sports Med Open 54(1):1-13
- Townsend NE等人 (2017) 预测缺氧时的临界功率和W'：应用于工作平衡模型。前沿生理学23 (8) : 180
- Valenzuela PL等人 (2018) 功能阈值功率是乳酸阈值的有效替代物吗？Int J Sports Physiol Perform 13:1-6

- van Druenen T, Blocken B (2021) 自行车运动中上坡牵制的空气动力学分析。体育工程24 (1) : 1-11
- van Erp T, de Koning JJ (2019) 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。Int J Sports Physiol Perform 14 (3) : 296-302
- van Erp T, Sanders D (2020) 职业自行车比赛的要求：比赛类别和结果的影响。Eur J Sports Sci 16(1):1-12
- van Erp T, Hoozemans M, Foster C, De Koning JJ (2020a) 案例报告：多次大环赛的负荷、强度和表现特征。Med Sci Sports Exerc 52(4):868-875
- van Erp T, Sanders D, De Koning JJ (2020b) 男性和女性职业公路自行车运动员的训练特点：4年的回顾性分析。Int J Sports Physiol Perform 5(1):1-7
- van Erp T, Kittel M, Lamberts RP (2021a) 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）。Int J Sports Physiol Perform 9:1363-1370 (in press)
- van Erp T, Sanders D, Lamberts RP (2021b) 保持功率输出与累积做功水平是职业自行车运动成功的一个关键决定因素。Med Sci Sports Exerc 53:1903- (1910in press)
- Vanhatalo A, Doust JH, Burnley M (2007)使用3分钟的全力骑行测试来确定临界功率。Med Sci Sports Exercise 39 (3) : 548-555
- Vanhatalo A, Doust JH, Burnley M (2008) 3分钟全力骑行测试对临界功率的变化很敏感。Med Sci Sports Exercise 40 (9) : 1693-1699
- Vanhatalo A等人(2016)功率-时间关系的机制基础：肌肉代谢反应和与肌肉纤维类型的关系。J Physiol 594(15):4407-4423
- Vinetti G等人 (2017) 恢复间隔时间对增量运动的临界功率模型参数的影响。Eur J Appl Physiol 117 (9) : 1859-1867
- Vinetti G, Taboni A, Ferretti G (2020) 当两个变量都有误差时，功率-持续时间关系的回归方法。Eur J Appl Physiol 120(4):765-770
- Vogt S, Schumacher YO, Blum A et al (2007a) 环意赛平地 and 山地赛段中产生的自行车动力输出：一个案例研究。J Sports Sci 25(12):1299-1305
- Vogt S, Schumacher YO, Roecker K et al (2007b) 环法自行车赛期间的功率输出。Int J Sports Med 28(9):756-761
- Weyand PG, Lin JE, Bundle MW (2006) Sprint Performance-Duration relationship are set by the fractional duration of external force application.美国生理学杂志》290 (3) : 58-65
- Whipp B等人(1982)决定对高强度工作的耐受时间的一个常数。Fed N Am Soc Exp Biol 41 (5) : 1591
- Whipp BJ (1996) 有氧功能的领域和它们的限制参数。斯普林格，波士顿
- Winter EM等人 (2016年) 在体育和运动科学研究中误用了 "功率 "和其他机械术语。J Strength Cond Res 30(1):292-300
- Woolles AL, Robinson AJ, Keen PS (2005) 获得SRM自行车动力曲柄校准系数的静态方法。体育工程 8(3) : 137-144
- Wright J, Bruce-Low S, Jobson SA (2017) 3分钟全力骑行关键功率测试的可靠性和有效性。Int J Sports Med 38(6):462-467
- Zadow EK等人 (2016年) wahoo KICKR功率训练器的功率设置的有效性。Int J Sports Perform Anal 11 (8) : 1115-1117

出版商说明 《施普林格-

自然》对出版的地图和机构隶属关系中的管辖要求保持中立。