

功能性阈值功率：构建耐力训练负荷监控的新范式

杨中和 苏玉莹 石煜 林俊磊 彭凡 阙怡琳 黄佳儒 李卫

Functional Threshold Power: Establishing a New Paradigm for Load Monitoring in Endurance Training

YANG Zhonghe, SU Yuying, SHI Yu, LIN Junlei, PENG Fan, QUE Yilin, HUANG Jiaru, LI Wei

在线阅读 View online: <http://tykx.xml-journal.net/article/doi/10.16469/J.css.2026KX074>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[session-RPE训练负荷量化方法的发展及对运动训练的启示](#)

The Development of the session-RPE Method for Training Load Monitoring and Usefulness in Sports Training

体育科学. 2021, 41(6): 42-57 <https://doi.org/10.16469/j.css.202106005>

[功能性过量训练的双重性：内涵厘定、生理表征与界定标准的再审视](#)

The Duality of Functional Overreaching: A Reassessment of Conceptual Definition, Physiological Characterization, and Diagnostic Criteria

体育科学. 2026, 46(7): 50-61, 97 <https://doi.org/10.16469/J.css.2026KX041>

[应急救援人群高强度功能训练的应用效果与作用机制研究进展](#)

The Research Progress on the Effects and Action Mechanisms of High-Intensity Functional Training on Emergency Rescue Personnel

体育科学. 2023, 43(3): 58-68 <https://doi.org/10.16469/j.css.202303006>

[中等强度抗阻训练对甲基苯丙胺成瘾者脑功能连接的影响](#)

Effects of Moderate Intensity Resistance Training on Brain Functional Connectivity of Methamphetamine Addicts

体育科学. 2021, 41(3): 25-33 <https://doi.org/10.16469/j.css.202103004>

[优秀公路自行车运动员赛前负荷特征研究——以史航备战第13届全运会为例](#)

Research on Training Load Characteristics of Elite Cyclist in Pre-competition—Based on Shi Hang in the 13th National Games of China

体育科学. 2022, 42(11): 56-61, 89 <https://doi.org/10.16469/j.css.202211007>

[通过心率变异性联合儿茶酚胺和常规生化指标监控优秀赛艇运动员身体机能状态](#)

The Monitoring of Physical Functions in Elite Rowers by Combining Heart Rate Variability, Catecholamine and Routine Biochemical Indexes

体育科学. 2021, 41(8): 61-69, 97 <https://doi.org/10.16469/j.css.202108008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



功能性阈值功率:构建耐力训练负荷监控的新范式

杨中和^{1,3,4}, 苏玉莹², 石煜^{1,3,4}, 林俊磊^{1,3,4}, 彭凡^{1,3,4}, 阙怡琳^{1,3,4}, 黄佳儒^{1,3,4}, 李卫^{1,3,4,5*}

(1. 北京体育大学 体能训练学院, 北京 100084; 2. 南京师范大学 体育科学学院, 江苏 南京 210023;

3. 北京体育大学 力量-速度实验室, 北京 100084; 4. 教育部体能训练关键核心技术集成系统与器械工程研究中心, 北京 100084; 5. 北京体育大学 中国冰雪运动学院, 北京 100084)

摘要:耐力训练负荷监控的关键在于将实验室识别的生理强度边界转化为训练实践中可执行、可追踪的外部负荷参数。功能性阈值功率(functional threshold power, FTP)与最大乳酸稳态(maximal lactate steady state, MLSS)等代谢阈值具有一定关联,但二者的一致性受测试方案、无氧做功能力和训练水平等因素影响,不能直接互换。研究以自行车项目研究为主要证据基础,梳理FTP的理论演进与生理基础,辨析其与MLSS、乳酸阈值、通气阈值及临界功率的概念边界,总结长时间持续测试、20 min最大持续功率测试(FTP₂₀)和历史功率建模等评估方法,重点分析95%折算系数的无氧代偿误差与个体化校正。阐释FTP训练强度分区和周期化负荷调控逻辑,提出融合功率、肌氧饱和度和心率变异性的动态校正路径,结合场地自行车专项训练与速度滑冰陆地辅助训练案例讨论其实践应用。现有证据显示,FTP的成熟应用仍集中于自行车项目,其他耐力项目应依托专项阈值体系开展独立验证。FTP的核心价值并非替代MLSS等生理学金标准,而在于连接实验室生理评价与场地功率训练,为个体化强度分区、阶段性复测和周期负荷调整提供应用性参照。未来应通过大样本平行对照、多项目校正和专项功率建模,进一步明确FTP效度边界与训练贡献。

关键词:功能性阈值功率;耐力训练;训练负荷监控;强度分区

中图分类号: G808 **文献标识码:** A

周期性耐力项目涵盖走、跑、骑、游、划、滑6种运动技术动作,且在夏、冬奥运会比赛项目中多有涉及(邓运龙, 2010)。此类项目数量多、普及面广、技术与科技融合程度高、竞技影响力大,整体水平既是衡量竞技体育综合实力的核心标尺,也是当前我国基础大项训练科学化进程中亟待深化的关键方向。2024年巴黎奥运会,我国田径、游泳和水上项目的整体实力与国际先进水平仍存在一定差距,现有训练负荷监控体系在生理适应的精准量化方面仍有改进空间。鉴于自行车、游泳、跑步和赛艇等项目显著的竞速属性,运动员在比赛过程中需不断冲击速度与耐力极限,竞技表现高度依赖能量代谢系统的高效转化与稳定输出,这对训练过程中强度的分区调控、负荷刺激与个体能量代谢特征的深度匹配提出了科学化监控要求。

近年来,随着运动训练科学化进程显著加快,一些创新性训练理论与方法已在奥运备战中得以应用,并在奥运会部分短距离竞速项目中取得明显成效(姜自立等, 2019; 李卫等, 2024)。然而,在周期性耐力项目中,训练负荷的精准量化与个体化适配仍面临较大挑战。长期以来,训练负

荷在较大程度上依赖教练员经验,训练强度的划定和负荷刺激的调整缺乏稳定、客观和可重复的量化依据,忽视了运动员机体对不同强度刺激所诱发的专项化适应规律(李捷等, 2018),最终制约运动员竞技潜力的挖掘。目前,常用监控指标虽在训练实践中有一定价值,但难以完全满足实践训练对实时化、无创化和个体化强度调控的需求。例如,心率(heart rate, HR)易受高温、高原、疲劳累积、情绪状态和个体差异影响,主观疲劳程度(rating of perceived exertion, RPE)具有较强主观性,血乳酸测试虽可量化代谢强度,但存在一定侵入性和设备依赖性,难以在日常训练中频繁应用(Impellizzeri et al., 2019)。因此,耐力项目训练负荷监控

收稿日期: 2025-12-11; 修订日期: 2026-08-26

基金项目: 国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2019YFF0301601-2)。

第一作者简介: 杨中和(1998-),男,在读博士研究生,主要研究方向为运动训练理论与实践, E-mail: bsuyzh@foxmail.com。

*通信作者简介: 李卫(1971-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为运动训练理论与实践, E-mail: liweiwin@sina.com。

急需能够连续记录外部输出、反映个体强度边界、便于训练实践应用的量化指标。功率输出为外部负荷监控提供了可量化的数据基础,而功能性阈值功率(functional threshold power, FTP)将外部功率与个体代谢阈值相连接,为训练强度分区和周期化负荷调控提供了功能性参照。

FTP以1 h最大可持续功率为操作定义,与最大乳酸稳态(maximal lactate steady state, MLSS)、第二乳酸阈值(lactate threshold 2, LT2)具有一定关联,具备功率表达直观、可重复测量和个体适配性较强等优势,是连接实验室生理评价与实践功率训练的重要功能性参数(Borszcz et al., 2018)。本研究以自行车FTP研究为主要理论基础,系统阐述FTP的生理机制、方法学演进、训练强度分区和周期化负荷调控逻辑,并结合场地自行车专项训练和速度滑冰陆地辅助训练分析其实践应用。对于跑步、游泳和赛艇等项目,本研究主要依据现有研究讨论其与功能性阈值训练思路之间的联系和未来验证方向,以期FTP在耐力训练负荷监控中的规范应用提供理论支撑与实践参考。

1 FTP 的理论基础与生理机制

1.1 从临界功率到 FTP 的演进

人类及其他物种在高强度耐力运动中表现出的疲劳特征高度一致,在运动生理学中,这一特征被描绘为功率-持续时间关系(power-duration relationship, PDR)。工作速率(如功率或速度)与持续时间的坐标图表明,工作速率随运动时长呈双曲线递减形态(图1),其生理基础在于随着强度增加或时间延长,人体能量代谢渐趋极限,诱发中枢与外周疲劳机制,最终使功率输出与持续时间形成双曲线关系(Monod et al., 1965; Poole et al., 1988)。目前, PDR 模型已成为耐力训练与竞赛的核心工具,可用于制定训练计划、预测运动表现、评估高强度间歇训练的能量恢复(Nimmerichter et al., 2017; Okuno et al., 2011; Petrigna et al., 2022), 以及进行运动营养干预效果评估(Fukuda et al., 2010)和兴奋剂检测(Puchowicz et al., 2018)。因此, PDR 的双曲线形态被视为“生命系统的基本生物能量特征”(Jones et al., 2019),是描述耐力运动功率输出与持续时间关系的重要工具,为临界功率(critical power, CP)及后续FTP的建立提供了理论基础。

基于PDR的数学建模催生了CP概念,CP被定义为机体在不破坏代谢稳态的条件下可长时间维持的最高功率输出,在PDR曲线中表现为渐近线,理论上可持续无限时长(杨阔等, 2025)。当运动强度低于CP时,人体能维持生理稳态;超过CP时,机体的无氧供能需求激增,导致机体在运动中快速达到力竭状态。分析不同距离的赛艇与竞走项目的完赛速度发现,运动时间与速度呈反比例衰减,并假设存在可长期维持的特定强度阈值,为后续学者

对CP的研究奠定了基础(Burnley et al., 2025)。此后, Morton(2006)基于人体单关节肌肉群的双曲线力竭规律,结合PDR关系,系统总结并扩展了CP及相关全身生物能量模型,通过3~5次不同功率力竭实验证实了CP关系也适用于全身运动。

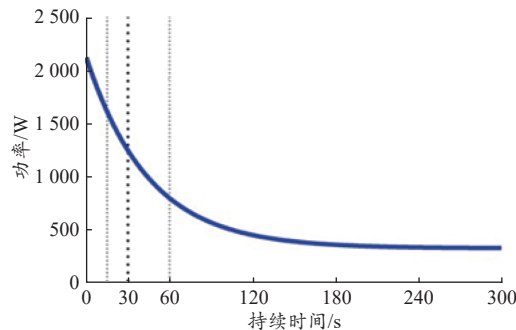


图1 功率-持续时间关系(Douglas et al., 2021)

Figure 1. Power-Duration Relationship (Douglas et al., 2021)

当前,CP测试方法主要包括3~5次恒定功率测试、斜坡递增测试、3 min 全力测试和比赛数据建模(杨阔等, 2025)。尽管上述方法能够界定运动中的稳态与非稳态功率边界,但受不同参数模型(如双参数与三参数模型)拟合误差的影响,CP的预测结果在准确性与适用性上存在明显差异,难以反映运动员的真实竞技状态(Vinetti et al., 2023)。基于比赛成绩计算CP的优势在于能真实反映运动员在比赛或训练中的运动表现(杨阔等, 2025),但受制于人体有氧和无氧能力之间的动态制约关系,耐力运动员鲜有兼顾短、中、长距离赛事的能力(李捷等, 2018),难以在PDR曲线拟合完整数据,削弱了CP测试在训练实践中的可靠性与应用价值(图2)。

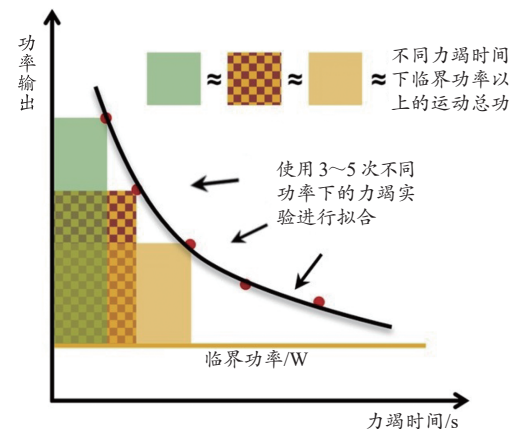


图2 基于3~5次测试拟合CP曲线(Sreedhara et al., 2019)

Figure 2. CP Curve Fitted by 3-5 Tests (Sreedhara et al., 2019)

FTP弥补了传统生理阈值测试在训练中的局限,被定义为接近代谢稳态强度且无明显疲劳特征下,人体持续约1 h的最高功率输出(Allen et al., 2012)。随着自行车功率计的普及,FTP逐渐发展为自行车训练中重要的功能性

阈值评估指标,为运动员的训练强度分区、功率变化追踪和周期负荷调控提供了统一参照。跑步功率计和赛艇测功仪等研究开始借鉴类似的阈值识别与训练分区思路,但尚未形成与自行车 FTP 相同的标准化测试体系。在自行车训练中,FTP 还进一步衍生出标准化功率(normalized power, NP)等负荷监控指标,形成了较为完整的功率训练分区体系,用于组织有氧耐力、阈值训练和高强度间歇训练。

1.2 FTP 的概念辨析与生理学基础

长期以来,针对不同运动项目的专项需求,探寻耐力素质的最优发展路径与精准化训练方法,始终是运动生理学与运动训练领域的研究前沿(蔡旭旦等, 2021)。生理阈值反映运动强度增加过程中机体由相对稳态向非稳态转变的关键边界,是耐力训练强度划分的重要生理依据(Poole et al., 2021)。实验室常用的阈值评估指标主要涵盖 3 类:1)代谢动力学指标,如最大摄氧量百分比($\% \dot{V}O_{2max}$)与摄氧

量动力学,通过气体代谢仪监测摄氧效率变化,界定不同能量代谢转换的强度边界(黎涌明, 2015);2)乳酸标志物,包括乳酸阈值 1(LT1, 血乳酸浓度达到 2 mmol/L 时的强度)、乳酸阈值 2(LT2, 血乳酸浓度达 4 mmol/L 时的强度,需注意个体乳酸转折点存在差异)和 MLSS(可维持约 30 min 且血乳酸浓度变化不超过 1 mmol/L 的最高运动强度),MLSS 被认为是有氧供能为主导的运动强度上限(Faude et al., 2009);3)肺通气动力学指标,如通气阈值(ventilatory threshold, VT),以通气量和摄氧量关系的拐点为标志,反映代谢模式的转换。以上指标的共性在于,当运动强度超越特定阈值后,机体会发生标志性生理“突变”,如血乳酸浓度或通气量的急剧非线性上升(Wasserman et al., 1973)。基于以上生理阈值,通常运动强度分为低、中、高、极限等多个强度区间,每个区间对应不同的能量主导系统、代谢产物累积速率和预期的训练适应目标(图 3)。

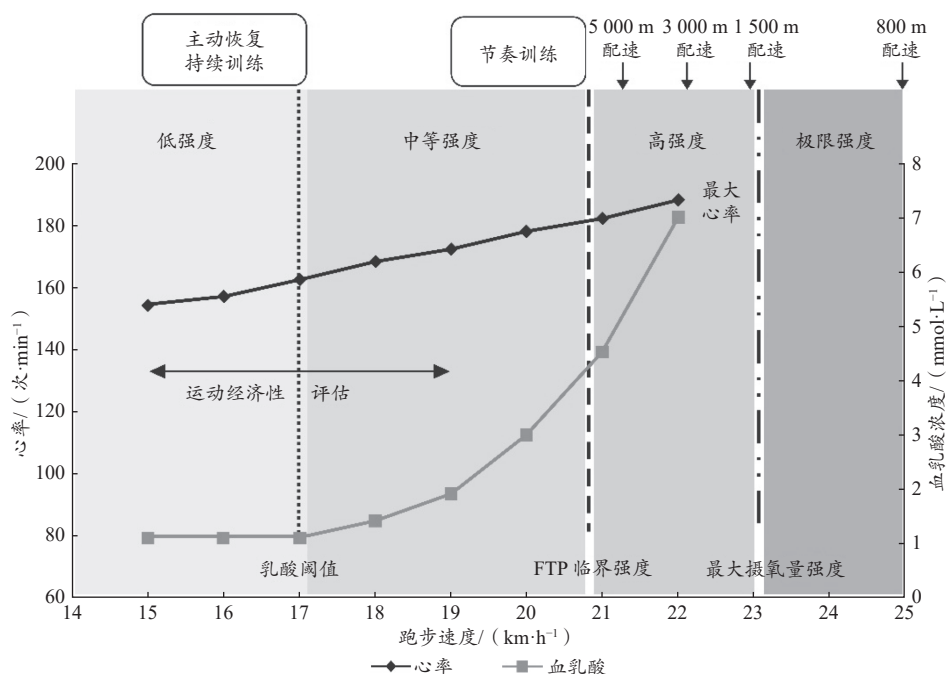


图 3 依据不同生理阈值所划分的强度分区(Ozkaya et al., 2022)

Figure 3. Intensity Zones Classified According to Physiological Thresholds (Ozkaya et al., 2022)

基于上述划分,建立明确的强度分区体系成为现代耐力训练的核心策略。体系的根本目标在于实现训练刺激与人体机能适应的精准匹配,从而定向诱导有氧与无氧能量系统及相关生理结构的特异性适应(Jamnack et al., 2020; Seiler et al., 2006),克服传统经验主导模式下训练刺激模糊、适应方向不明的弊端。例如,在训练周期的准备期,低于 LT1 的低强度训练主要依赖脂肪氧化供能,能在非疲劳状态积累可观的耐力训练量,有效促进线粒体生物合成与毛细血管网增生,为后续更高强度的训练奠定重要的生理结构基础(陈小平, 2010);介于 LT1 和 LT2 之间的中等

强度训练,可有效增强 I 型肌纤维线粒体氧化酶活性,改善乳酸清除能力(Sitko et al., 2025);高于 MLSS 的高强度与极限强度训练以糖酵解供能为主,同时提升 $\dot{V}O_{2max}$ 与乳酸耐受能力,是挪威“双阈值训练模式”的核心组成部分(魏博等, 2025);短时间超越最大摄氧量强度的神经肌肉功率训练($> \dot{V}O_{2max}$ 强度),主要用于发展心输出量与无氧速度储备,其运动表现同时反映了运动员在神经肌肉、生物力学与能量代谢方面的协调特性,反映运动员的肌肉类型和代谢特点(Sandford et al., 2021),可用于中长距离项目的选材(Sandford et al., 2019)。

尽管上述实验室指标构建了训练强度评价框架,但在训练实践中,单纯依赖生理学指标存在明显的生态效度缺失和实操壁垒。例如,跑台测试的临界速度在跑台与户外运动的生理反应可能存在差异,难以精准反映训练状态(Panasci et al., 2017)。此外,血乳酸测试过程具有侵入性强、操作复杂、成本高等特点,如在确定 MLSS 或实施双阈值训练监控时,需在多次或连续测试中反复采集血乳酸(Casado et al., 2023)。为提高个体阈值在训练中的可操作性,Allen 等(2012)提出 FTP 概念,将其定义为“人体在内环境准稳态下能维持约 1 h 的外部机械功率输出”。与依据内部生理反应界定代谢稳态边界的 MLSS 不同,FTP 直接以外部机械功率表征运动员的持续做功能力。研究发现,FTP 与 MLSS 在耐力运动人群中具有较高相关性,在个体层面存在明显差异,不能直接互换;且采用 20 min 最大持续功率测试估算 FTP(以下简称“FTP₂₀”)的效度受测试方案和个体特征影响,与生理阈值之间的一致性并非固定不变。因此,FTP 更适合作为生理强度边界向场地功

率训练转化的功能性指标,而非 MLSS 的生理等价物(Borszcz et al., 2019; Mackey et al., 2021)。现有 FTP 研究及应用仍以自行车项目为主。跑步领域已开始探索 FTP 及其与 CP 之间的关系(Nancupil-Andrade et al., 2024);赛艇项目尝试利用测功仪功率评估功能性阈值(McGrath et al., 2023);游泳项目主要采用临界游速等专项阈值指标,其训练分区功能与 FTP 具有一定相似性,但属于相对独立的评价体系(Wakayoshi et al., 1992);速度滑冰中的 FTP 主要服务于陆地辅助训练的负荷量化与强度控制(杨中和 等, 2025)。

综上,FTP 当前较为成熟的应用仍集中于自行车功率训练,核心价值在于将个体强度边界转化为可直接执行和持续追踪的外部功率参数,为训练强度分区和周期负荷调控提供应用性参照。相较 MLSS 测试,FTP 对实验室条件、测试时间和侵入性测量的依赖程度较低(Mackey et al., 2021),比气体代谢监测的实施更便捷。FTP 与 LT2、CP、VT 和 MLSS 的具体特征比较见表 1。

表 1 FTP 与 LT2、CP、VT 和 MLSS 的特征对比
Table 1 Comparison of Characteristics Among FTP, LT2, CP, VT and MLSS

指标	测试方法	信效度特征	关键差异与结论
FTP	训练中常采用 FTP ₂₀ 估算,以 20 min 平均功率的 95% 作为初始估计值	测试简便、成本低,但结果受配速策略、测试流程、换算系数等因素影响	FTP 使用外部机械功率表征个体的持续做功能力,是连接生理阈值评价与训练强度分区的功能性参照,其核心价值在于训练应用
LT2	在递增负荷测试中连续采集并分析血乳酸浓度,识别其出现非线性上升的转折点	依赖于血乳酸精准采样和设备精度	FTP 与 LT2 不可互换,但 FTP 场地化、无创性使其更适用于训练的强度分区,解决了 LT2 实验室测试的操作复杂与采样限制问题(Valenzuela et al., 2018)
CP	进行多次不同持续时间的最大或近最大努力测试,依据 PDR 推导 CP	依赖于功率-时间曲线的多次拟合精度,且不同参数建模之间的误差较大	FTP 通过单次力竭测试即可估算,较 CP 的多次测试更便捷高效;FTP 在训练强度的日常调控中更具操作性,尤其适用于周期化训练的强度分期设计(Nancupil-Andrade et al., 2024)
VT	实验室中进行递增负荷,检测运动中通气量与摄氧量不成比例增加的生理临界点	依赖于气体代谢分析的精准性	FTP 与 VT 均可用于表征运动强度转折,但二者的生理含义和数值边界并非固定对应,FTP 在耐力项目中的强度量化更具专项关联性(Sitko et al., 2022a)
MLSS	在多次恒定负荷测试中连续监测血乳酸浓度,测量血乳酸达到稳态时的最高运动强度	实验室的 MLSS 是代谢稳态表征的金标准,测试耗时较长,用于训练实践的成本较高	MLSS 的代谢稳态表征更精准,但 FTP 在日常训练监控与强度分区中具有低成本、高便捷性的优势,可作为 MLSS 向训练实践转化的功能性参照(Inglis et al., 2020; Lillo-Beviá et al., 2022)

2 FTP 的测试方法与技术革新

2.1 FTP 测试的实验室测定与场地数据预测

当前,主流的 FTP 测试涵盖实验室测定与场地数据预测两大体系。1)实验室测试以 1 h 持续功率测试作为 FTP 直接评估的重要方法,核心优势在于直接对应 FTP 定义(可持续约 1 h 的最高功率)与 MLSS 的生理关联(Borszcz et al., 2018)。但长时间的耐力测试容易造成较大疲劳,且对运动员的配速能力和测试动机要求较高,因而在日常训练中实施的频率受到限制。为简化测试流程,FTP₂₀ 通常要求运动员在标准化热身完成后完成 20 min 全力计时赛,并以 20 min

平均功率的 95% 作为 FTP 初始估计值(图 4)。该方法实施便捷、重复测试成本较低,但 95% 属于经验性折算系数,估算误差受无氧供能贡献、疲劳耐受能力、配速策略和训练水平等因素影响。无氧做功能力较强的运动员可能因 20 min 测试中的额外无氧贡献而高估持续功率能力;训练水平较低或测试经验不足的运动员,更容易受到配速波动和测试熟悉程度的影响。

因此,FTP₂₀ 应依据运动员能力特征进行个体化校正。对于测试经验丰富、配速稳定且以有氧耐力能力见长的高水平运动员,可将 95% 作为初始估计,并结合 40~60 min

持续功率、乳酸阈值、MLSS、CP或专项比赛功率进行交叉验证;对于训练水平较低、测试经验不足或无氧能力较强的运动员,通过测试熟悉过程及较长时间持续功率表现修正折算比例(Borszcz et al., 2018)。

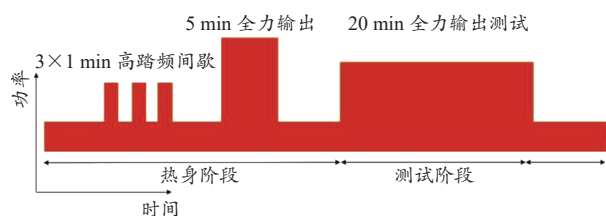


图4 FTP测试流程

Figure 4. FTP Test Protocol

随着训练数据积累,应根据运动员能力结构及训练状态定期复核个体折算关系。现有研究所得样本平均校正比例提示,传统95%折算在部分运动员中可能产生系统性高估,但目前未建立针对不同训练水平的统一折算系数。因此,95%更适合作为 FTP_{20} 的经验性初始值,个体化校正与多指标交叉验证是提高测试效度的关键。

2)场地数据预测是利用运动员历史训练数据集,通过功率分析软件生成功率分布图(power profile),进而估算FTP。教练员可将运动员的累计训练功率数据导入软件(如Training Peaks),以预设功率区间为横轴、对应区间累计维持时间为纵轴,拟合不同功率的频率分布特征。该方法的生理机制为:在亚阈值强度下,人体有氧代谢占据主导,功率维持时间较长;随着功率超过可持续强度边界,机体逐渐进入非稳态代谢状态,可持续时间快速缩短。该功率分布变化区间可作为判断FTP所在范围的辅助依据,通常对应分布图中时间占比急剧下降的区间。图5所示功率分布中,300~315 W以上累计维持时间明显下降,因此可将该区域作为FTP经验判断的参考范围。该方法的优势在于无创、实施便捷、可利用日常训练数据动态更新,但对训练数据质量和拟合模型准确性依赖度较高。

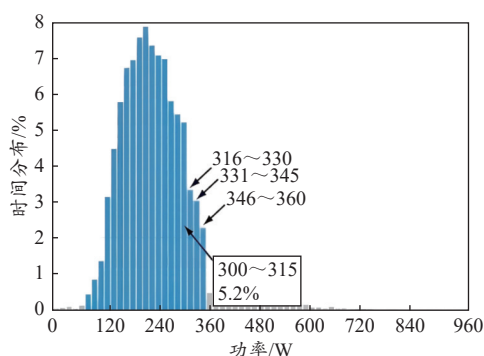


图5 基于功率-时间分布矩阵估算FTP(Allen et al., 2012)

Figure 5. Estimating FTP Based on the Power-Duration Distribution Matrix (Allen et al., 2012)

上述测试体系虽以自行车功率为基础发展而来,但其

方法学原理已逐步延伸至其他耐力项目。在跑步领域,功率作为外部机械输出指标,对步频、步幅和生物力学变化的敏感性高于配速、运动经济性等传统指标(Austin et al., 2018),可有效规避坡度、风速等环境因素对实际训练强度的干扰(van Rassel et al., 2024);在游泳领域,基于PDR关系的临界速度阈值也为竞技游泳的训练强度监控提供了场地实践工具(Wakayoshi et al., 1992)。上述研究表明,不同耐力项目需依据专项负荷表达方式建立相应的阈值测试与校正方法,不宜直接采用自行车 FTP_{20} 测试和95%折算系数。

2.2 基于多模态数据融合的FTP动态校正

传统FTP测试主要依靠周期性复测更新功率区间,结果具有明显的时点属性。当运动员的训练适应、疲劳积累和恢复状态发生变化时,既往FTP可能无法及时反映实际能力,造成训练区间偏离当前机能状态。人工智能在运动训练中的应用,为连续识别运动能力变化和优化训练决策提供了新的技术路径(尤传豹, 2025)。可穿戴设备能在真实训练环境中持续采集外部负荷与内部生理反应,为FTP由周期性测量向动态监控转变提供数据基础(Seshadri et al., 2019)。现代自行车功率计已广泛集成于牙盘、曲柄和踏板等部件,可与心率带、肌氧传感器和移动终端构成多模态数据采集系统(Seckin et al., 2023)。其中,功率曲线反映运动员在不同持续时间的外部做功能力;肌氧饱和度(SmO_2)反映运动肌肉局部氧供需及恢复特征,测量信度和效度为训练过程的连续监测提供了依据(Feldmann et al., 2019);心率变异性(heart rate variability, HRV)反映自主神经调节状态,可辅助识别疲劳积累、恢复进程和训练适应趋势(Buchheit, 2014)。三类数据分别对应运动表现、局部肌肉氧合和整体机能恢复,构成FTP动态校正的主要信息维度。

基于连续功率数据预估运动员的FTP边界已具备一定方法学基础。Spragg等(2023)利用职业自行车运动员比赛中的平均最大功率估计CP,表明训练和比赛数据能用于识别功率-持续时间关系及其阶段性变化。虽然该研究针对的是CP而非FTP,但其结果为利用历史功率轨迹校正功能性阈值提供了参考。同时,人工智能在耐力运动中的应用已由单一表现预测逐步拓展至训练负荷、恢复状态、代谢反应和营养需求的综合分析(Grivas et al., 2025)。据此,FTP动态校正可构建“基准测定—连续监测—状态识别—区间调整”的技术路径。1)以标准化FTP测试建立个体基准;2)从日常训练提取平均最大功率、功率曲线变化率、训练完成率、HRV基线偏移、 SmO_2 下降幅度和恢复速度等特征,后续研究可探索利用随机森林识别多维变量与FTP变化之间的非线性关系及特征贡献,利用长短时记忆网络(long short-term memory, LSTM)刻画疲劳、恢复

与能力变化的时间依赖特征; 3) 估计运动员相对于基准 FTP 的变化量, 据此形成动态校正值。该过程并非以单次生理波动直接改变 FTP, 是通过多日连续数据识别具有稳定趋势的能力迁移。

动态校正的训练价值在于将状态识别转化为负荷决策。当功率表现持续下降, 并伴随 HRV 偏离个体基线、 SmO_2 恢复延缓、主观疲劳升高时, 可适当下调目标功率或调整训练内容; 当功率曲线持续改善且恢复指标保持稳定时, 可上调训练区间或触发标准化复测。为降低偶然波动和测量噪声的影响, 模型更新应设置数据完整性、连续变化时长和最小变化幅度等判定条件, 避免因单日状态变化频繁修订训练阈值。

3 FTP 在耐力训练负荷监控中的核心应用

3.1 基于代谢稳态的 FTP 训练强度分区

FTP 训练分区的核心在于将个体化功率阈值转换为可直接执行的训练强度区间, 使恢复、基础耐力、阈值、高强度间歇和神经肌肉训练获得统一的相对功率参照。有研究(Chidnok et al., 2013)使用磷磁共振波谱技术(^{31}P -MRS)证实, 人体在低于稳态功率强度的运动中, 能维持肌肉内磷酸肌酸(phosphocreatine, PCr)浓度与细胞内 pH 值的动态平衡, 间接支持了 FTP 的阈值参照逻辑。FTP 与其他代谢阈值指标(LT2、VT)的高度关联性, 进一步强化了其作为训练强度参照的理论效度。Ñancupil-Andrade 等(2024)在跑步项目中的实证研究显示, 基于 FTP 的场地测试数据与 3 次亚极量测试拟合的 CP 值呈高度正相关, 表明 FTP 能在一定程度上界定中、高运动强度的划分边界, 为耐力训练的精细化负荷管理提供依据。虽然 FTP 与 MLSS、LT2、VT 和 CP 在生理含义上不等价, 但这些指标均可从不同维度反映运动强度边界, 为解释 FTP 训练分区提供理论参照(Lillo-Beviá et al., 2022; Ñancupil-Andrade et al., 2024; Sitko et al., 2022b; Valenzuela et al., 2018)。

训练强度分布研究表明, 不同强度刺激在周期化训练过程中的结构配置是影响耐力适应的重要因素(Seiler et al., 2006)。低强度大容量与高强度关键刺激的比例配置, 是影响耐力适应与竞技表现的重要因素。基于 FTP 构建的七级训练分区模型(表 2), 能实现训练刺激与特定代谢适应机制的精准匹配。

1) 区间 1(主动恢复区), 主要通过低强度有氧运动促进人体代谢副产物的清除, 从而进行再生恢复, 生理学价值在于加速 PCr 的再合成速率及细胞内 pH 值的动态平衡(Jemni et al., 2003), 典型应用场景涵盖高强度训练后的主动恢复及微周期内的减量调整, 旨在最小化生理应激的同时维持基础血流灌注(Stamford et al., 1981; Weltman et al., 1979)。2) 区间 2 与区间 3(基础有氧区), 构成耐力运动表

现的生理基石, 也是耐力训练“两极化”与“金字塔”训练强度分布中的负荷主体(Filipas et al., 2022)。现有文献表明, 精英耐力运动员(如长跑、赛艇)训练大周期内约 80% 的训练量分布于此低强度区间(Muniz-Pumares et al., 2025)。该强度的长期训练表明, 通过耐力训练的剂量-反应机制诱导机体产生外周适应, 包括毛细血管密度增加、线粒体酶活性上调和氧化磷酸化效率提升, 从而为 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 与 CP 的提升构建结构性生理基础(Hellsten et al., 2024; Hopker et al., 2009; Scribbans et al., 2016)。3) 区间 4(阈值训练区), 强度位于 FTP 附近, 可充分刺激机体的有氧供能系统, 进而提高 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ 水平(周庆玺 等, 2024), 同时最大化刺激乳酸穿梭机制, 提升单羧酸转运蛋白(monocarboxylate transporters, MCTs)效率和机体的乳酸清除能力(MacInnis et al., 2017)。有研究指出, 虽然该强度能显著改善无氧阈水平, 但高水平运动员若过分依赖中高强度的阈值训练可能导致自主神经系统疲劳积累。相比之下, 低强度大训练量(区间 2)在诱导线粒体生物发生及长期的有氧适应方面往往更具优势(陈小平等, 2014)。4) 区间 5 与区间 6(最大摄氧量与无氧耐力区), 强度负荷突破 FTP 进入高强度区间, 机体供能迅速转向糖酵解系统, 并伴随 II 型肌纤维的大量募集。训练目标在于逼近心肺与代谢系统的生理极限。一方面, 巨大的氧亏与心输出量需求驱动左心室容积扩张及每搏输出量增加, 直接提升 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ (Williams et al., 2019); 另一方面, 高强度的代谢性酸中毒压力上调了磷酸果糖激酶(phosphofructokinase, PFK)活性, 优化了机体在高乳酸环境下的功率维持能力(MacInnis et al., 2017)。5) 区间 7(神经肌肉爆发力区), 训练持续时间通常短于 30 s, 主要针对磷酸原供能系统(adenosine triphosphate-phosphocreatine, ATP-PCr)。该强度的冲刺间歇训练能诱导两项关键生理适应: 在神经层面, 高频刺激缩短了动作电位潜伏期, 提升了运动皮层到脊髓 α 运动神经元的传导速率及运动单位的同步化募集; 在肌肉层面, 肌球蛋白 ATP 酶活性的增强加速了横桥循环速率。二者协同作用, 可显著改善运动员的启动反应速度和无氧做功峰值(李钊 等, 2016)。

表 2 基于 FTP 的训练强度分区
Table 2 Training Intensity Zones Based on FTP

训练强度分区	训练目的	%FTP	%HR _{max}	RPE
区间1	主动恢复	<55	50~60	<3
区间2	基础有氧	55~75	60~70	3~4
区间3	强度有氧	75~90	70~80	5~6
区间4	阈值训练	90~105	80~90	7
区间5	最大摄氧量	105~120	90~100	8
区间6	最大乳酸生成	120~130	N/A	9
区间7	神经肌肉功能	>130	N/A	10

注: N/A表示不适用(not applicable); RPE强度由1~10递增。

3.2 FTP 在周期化训练中的负荷量化与调控

耐力项目周期化训练的本质,是依据机体适应的一般规律,对训练强度、负荷量和恢复过程进行结构化的时序安排,旨在通过调控“刺激—疲劳—恢复—适应”的循环,引导运动员在特定时间实现竞技能力的最大化提升(Haff, 2004)。在该体系中,FTP 不仅是划分训练强度的静态标尺,更是贯穿训练大周期的动态负荷参照,为训练计划的制定、负荷的量化与调整提供核心依据。传统基于经验或单一心率、乳酸指标的训练监控往往存在模糊性,容易导致训练负荷过量或恢复不足(刘俊一, 2018),以 FTP 为核心的负荷量化方法能以外部功率近似表征运动员的阈值状态,有助于改善传统周期训练中强度界定模糊、负荷适配不足的问题。需要强调的是,功率计解决外部负荷数据采集问题,FTP 解决功率输出的个体化监控与训练强度分区问题。相同的绝对功率,对于不同运动员可能对应不同的代谢强度,因此仍需依据 FTP 变化动态校准训练区间,明确不同周期与阶段训练刺激的生理指向。

传统大周期模型,包括基础准备期、专项准备期、比赛期和恢复期 4 个阶段(图 6)。根据两极化训练强度分布的规律,准备期以低强度有氧容量积累为主,诱导骨骼肌线粒体生物发生与毛细血管密度增加,提升机体的氧化磷酸化效率。此阶段 FTP 的应用重点在于通过功率的反馈,避免运动员过早进入高强度区,确保基础有氧适应的训练效果。为匹配机体有氧能力的提升,建议定期执行标准化的 FTP 测试或结合人工智能校准功率区间,确保负荷刺激的有效性。

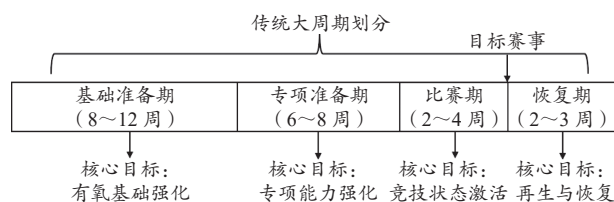


图 6 传统大周期划分

Figure 6. Overview of Traditional Macrocycle Divisions

进入专项准备期后,逐步提高阈值及高强度训练占比,通过阈值区间的训练,提升乳酸穿梭能力,实现基础有氧能力向专项运动表现的转化。区间 4 与区间 5(90%~120% FTP)的训练占比提升显著,旨在强化不同能量代谢供能系统的能力及提升 FTP 阈值附近的功率维持水平。同时,仍需保留约 60%~65% 的区间 2~3 的训练量,以维持基础有氧耐力,并促进各个高强度训练之间的主动恢复。

随着目标赛事临近,在降低总训练量的同时保留适量比赛专项强度和高强度刺激。通过极高强度的短时刺激激活神经肌肉系统,维持神经肌肉兴奋性,提升运动单位的同步化募集与动作电位传导速率,确保运动员在比赛中

具备最佳的功率输出能力与竞技状态。恢复期以低强度主动恢复为主,90% 以上的训练内容被严格限制在区间 1 (<55% FTP, 主动恢复区),同时避免任何高强度(区间 4 及以上)引起的交感神经应激。

4 精英运动员中的 FTP 实证应用

基于在 FTP 应用场景上的差异性与互补性,选取夏季奥运会场地自行车与冬季奥运会速度滑冰项目作为实证案例。场地自行车功率计应用成熟,可直接以外部功率数据完成 FTP 测试、强度分区与训练负荷调控,代表 FTP 在成熟功率监测项目中的直接应用路径。速度滑冰冰上专项功率监测目前未达到普及且稳定的应用水平,日常训练中难以像自行车项目一样直接获得可靠功率数据。因此,本研究中的速度滑冰案例并非将 FTP 等同于冰上专项功率,而是将自行车 FTP 作为陆地辅助训练的强度分区依据,用于亚高原集训期间的负荷调控,体现了 FTP 在速度滑冰陆地辅助训练中的负荷监控价值。

4.1 场地自行车运动员 8 周耐力训练实证

4.1.1 研究对象

以我国某省级场地自行车队 8 名男子运动员(表 3)为研究对象,其中 1 名为国际级运动健将,7 名为国家级运动健将,训练处于全运会备战大周期的准备期阶段。

表 3 研究对象基本信息

Table 3 Basic Information of Research Subjects

性别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	训练年限/年
男(n=8)	20.3±1.5	178.5±5.2	78.4±4.7	7.7±1.8

4.1.2 训练方案

8 周耐力训练板块以 FTP 为核心进行训练强度分区与周期化负荷监控,总体遵循“强度渐进—减量恢复—强化提升”的波浪式负荷安排,并结合两极化训练强度分布原则。训练内容包括自行车耐力训练、力量训练和专项技术训练。其中,力量训练与专项技术训练属于同期常规训练内容,研究期间总体负荷相对稳定,未设置明显的周期性强度递增。具体而言,力量训练包括举重及其衍生动作、深蹲和硬拉等复合动作(强度 70%~85% 1RM, 6~10 次/组, 3~4 组);专项技术训练以高质量技术重复为主,组间休息时间较长,整体代谢负荷相对较低。

训练前 1 周,所有运动员完成 FTP₂₀ 测试用于划分训练强度区间,训练期间结合 RPE、晨起心率等指标对个体强度区间进行微调,整体训练逻辑如下: 1) 基础积累期(第 1—4 周),训练目标为夯实有氧基础,典型训练内容包括长时间持续训练(区间 2~3, 55%~90% FTP, 持续 1~5 h)和阈值间歇训练(区间 4, 90%~105% FTP, 4×8 min, 间歇恢复 4 min); 2) 减量恢复期(第 5 周),训练目标为促进代谢

废物清除, 诱导生理与神经系统的超量恢复, 缓解累积性疲劳, 为后续高强度训练铺垫, 典型训练内容包括低强度恢复性骑行(区间 1, <55% FTP)和被动休息; 3) 强化整合期(第 6—8 周), 训练目标为提升 $\dot{V}O_{2max}$ 和在较高乳酸环

境下的功率输出能力, 典型耐力训练内容为高强度间歇训练(区间 5~6, 105%~130% FTP, 6×3 min, 间歇恢复 4 min)。每周训练均为 6 天训练和 1 天休息, 周期示例见图 7。

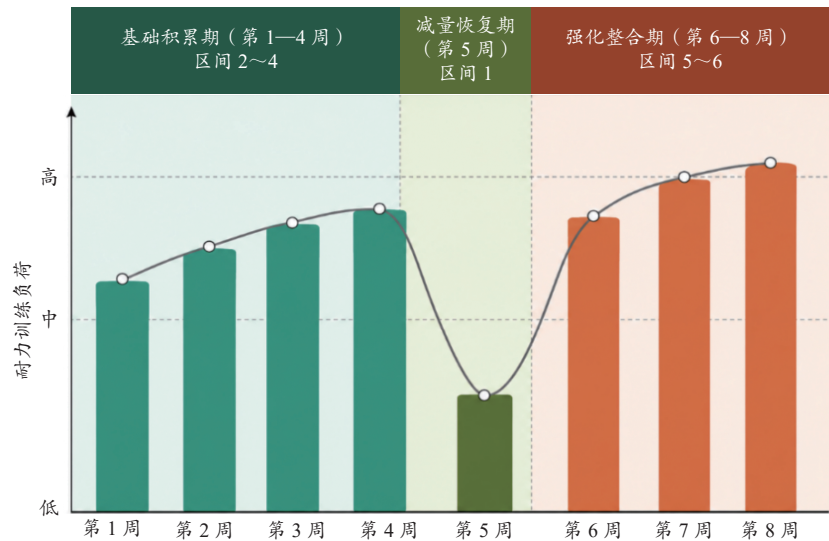


图 7 场地自行车运动员 8 周耐力训练安排
Figure 7. Eight-Week Endurance Training Schedule for Track Cyclists

4.1.3 测试指标与成效

为客观评估 8 周耐力训练的效果, 针对项目特点选取 FTP、 $\dot{V}O_{2max}$ 和 4 km 模拟计时赛(TT_{4000 m})为测试指标, 使用 Wattbike 功率自行车(trainer, 英国)、Cortex Metamax 3B(德国)采集数据。数据处理采用配对 *t* 检验(paired *t*-test, SPSS 26.0), 自由度 *df*=7, 显著性水平设为 0.05; 计算 Cohen's *d* 效应量以评估变化幅度(Scribbans et al., 2016)。

结果以均值±标准差(*M*±*SD*)呈现, 效应量遵循 Cohen's *d* 标准(0.2、0.5、0.8 分别作为小、中、大效应的参考界值)。较训练前, 训练后 FTP 和 $\dot{V}O_{2max}$ 显著升高, TT_{4000 m} 完成时间显著缩短(*P*<0.05)(表 4)。结果反映了同一组运动员在 8 周综合训练周期前后的指标变化, 但由于未设置同期平行对照组, 不能据此将相关变化解释为 FTP 分区训练的独立效应。

表 4 FTP、 $\dot{V}O_{2max}$ 、TT_{4000 m} 测试结果
Table 4 Test Results for FTP, $\dot{V}O_{2max}$ and TT_{4000 m}

指标	训练前	训练后	<i>t</i> (7)	<i>P</i>	效应量(<i>d</i>)
FTP/W	372.38±13.95	390.11±10.77	-7.240	<0.001	1.41
$\dot{V}O_{2max}/(mL \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1})$	61.38±2.62	64.38±1.41	-4.786	0.002	1.43
TT _{4000 m} /s	288.64±6.38	281.38±7.85	5.777	0.001	1.01

4.1.4 实证案例启示

8 周训练后, 运动员的 FTP 由(372.38±13.95)W 升至(390.11±10.77)W, 这一变化与三阶段训练安排在逻辑上具有较好的对应关系。基础积累期(第 1—4 周)以 2~3 区间为训练主体, 核心作用在于防止训练强度过高, 确保运动员在有氧代谢主导区间内充分积累线粒体生物发生与毛细血管适应; 减量恢复期(第 5 周)主要将训练负荷控制在区间 1, 最小化疲劳残留; 强化整合期(第 6—8 周)引入区间 5~6 高强度刺激, $\dot{V}O_{2max}$ 的同步提升与 TT_{4000 m} 成绩改善, 也从有氧能力与专项表现 2 个维度支持了上述训

练逻辑。

本案例采用自身前后对照设计, 未设置空白对照组、同期平行对照组, 也未进行随机分组, 因此存在较为明确的内部效度限制。统计分析显示, 8 周耐力训练后 $\dot{V}O_{2max}$ 的提升效应量较大(*d*>1.3), 高于耐力训练元分析(Scribbans et al., 2016; Williams et al., 2019)报道的平均水平(*d*=0.5~1.2)。结合现有结果, 推断运动员相关指标的改善与 FTP 分区训练的实施在时间上同步, 变化方向与预设训练目标基本一致, 提示 FTP 分区可能是促进训练适应的因素之一。虽存在上述局限, 本案例仍能为 FTP 在场地自行车项目中的

训练应用提供实践参考。启示在于,FTP的价值不仅在于记录功率变化,更在于将外部功率数据转化为个体化训练区间,并为准备期、恢复期和强化期的负荷调控提供依据。

4.2 速度滑冰运动员的亚高原板块训练实证

4.2.1 研究对象

选取我国15名高水平速度滑冰运动员作为研究对象(表5),其中男子运动员9名(国际级运动健将1人,国家级运动健将8人),女子运动员6名(国际级运动健将1人,国家级运动健将5人)。

表5 研究对象基本信息

Table 5 Basic Information of Research Subjects

组别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	训练年限/年
男子(n=9)	18.8±1.5	177.1±4.3	67.7±6.9	6.5±0.5
女子(n=6)	19.0±1.8	165.5±3.0	55.1±4.4	6.7±1.0

4.2.2 训练方案

训练方案来源于我国某省速度滑冰队备战第十四届全国冬季运动会的亚高原集训,整个集训周期为6周,划分为2个训练板块。为聚焦研究主题,仅以第1训练板块为例进行详细阐述,完整训练安排及生理机能变化详见相关研究(杨中和等,2025)。整个集训主要采用自行车骑行作为陆地辅助手段强化心肺耐力与下肢专项力量,因骑

行和滑冰运动在下肢三关节的蹬伸运动链上具有高度相似性,将自行车训练作为交叉训练手段可以有效规避跑步等带来的离心冲击;在亚高原环境中,由于氧分压与平原存在差异,使用FTP划分训练分区并通过功率进行强度监控能提高陆地训练外部负荷控制的一致性和可操作性。该板块共包含3周训练,训练阶段按照有氧耐力积累、无氧能力储备与减量恢复逻辑递进(表6)。

4.2.3 测试指标与成效

测试内容包含FTP₂₀测试和血液生理测试,FTP₂₀测试指标包括FTP、平均心率(average heart rate, AHR)和最大心率(maximum heart rate, HR_{max}),训练周期内测定运动员睾酮(testosterone, T)和皮质醇(cortisol, C),用以监测运动员的疲劳恢复。血液生理测试由乌鲁木齐县人民医院的专业医师进行,时间分别为第1周与第4周的周一早晨,要求运动员保持晨起空腹状态。数据采用混合设计方差分析(Mixed ANOVA, SPSS 26.0),分析组别、时间主效应及交互效应,显著性水平设为0.05。结果表明,FTP、血清睾酮、AHR和HR_{max}的时间主效应均显著,训练后FTP和血清睾酮水平升高,AHR和HR_{max}下降;血清睾酮的组别与时间交互作用显著,男子运动员升高幅度大于女子运动员;皮质醇的时间主效应与交互作用均未达显著水平(表7)。

表6 板块阶段划分和主要训练内容

Table 6 Training Block Division and Main Training Content

周次	训练阶段	训练区间	训练内容	训练目的
第1周	有氧耐力积累	区间2~3; 区间4	有氧骑行2 h; 大传动爬坡10组×2 min/组, 间歇4 min, 每5组之间进行15 min被动休息	通过长时间有氧骑行和间歇大传动爬坡训练,重点在于积累运动员的基础有氧耐力,提高心血管系统的功能效率和长时间运动的能力
第2周	无氧能力储备	区间2; 区间5~6	有氧骑行1.5 h; 间歇大阻力骑行12组×40 s/组, 间歇4 min, 每6组之间进行30 min被动休息	通过较短时间的有氧骑行,结合更高强度的间歇大阻力骑行训练,重点在于发展和储备无氧运动能力,提高肌肉的爆发力、最大功率输出和乳酸耐受力
第3周	减量恢复	区间1~2	有氧骑行1 h; 主动恢复骑行45 min	训练时间大幅减少,采用主动恢复骑行,让身体系统从前两周的高强度训练中进行充分恢复,并保持肌肉的活性和神经系统的兴奋性,为下一阶段训练做好准备

4.2.4 实证案例启示

3周训练后,男子运动员FTP由(239.89±24.21)W升至(257.44±21.40)W,涨幅约7.3%;女子运动员FTP由(173.17±17.66)W升至(180.33±23.49)W,涨幅约4.1%,且时间主效应显著。这一变化与“有氧积累—无氧储备—减量恢复”的三阶段训练安排在逻辑上具有较好的对应关系。有氧积累阶段(第1周)以区间2~3训练为主,穿插区间4进行刺激,有助于在亚高原环境下积累基础有氧负荷。由于低氧环境中相同外部功率可能诱发更高心率反应,单纯依赖心率控制强度可能导致外部负荷安排偏离预期,因此以FTP划分训练区间有助于提高负荷控制的稳定性。无氧储备阶段(第2周)依据FTP设置区间5~6训练,有

助于使间歇刺激进入高强度代谢区间,促进无氧供能能力和高功率输出能力的发展。减量恢复阶段(第3周)将训练负荷主要控制在区间1~2,以降低累积性疲劳。

训练后,运动员FTP和血清睾酮水平显著升高,AHR和HR_{max}显著下降,提示该训练板块可能改善了陆地骑行条件下的耐力输出能力,并伴随较好的恢复状态。皮质醇水平未出现显著变化,结合睾酮升高,表明该训练板块负荷未造成明显的分解代谢累积。从实践角度看,自行车FTP可作为速度滑冰陆地辅助训练的强度分区依据,但其变化不能直接等同于冰上专项功率或比赛能力。陆地功率向冰上专项表现的迁移,仍需结合专项成绩、技术指标和生理指标进一步验证。

表 7 FTP、AHR、HR_{max}、T、C 测试结果
Table 7 Results of FTP, AHR, HR_{max}, T and C

指标	组别	前测	后测	$F_{\text{组别}(1,13)}$	$F_{\text{时间}(1,13)}$	$F_{\text{交互}(1,13)}$
FTP/W	男子	239.89±24.21	257.44±21.40	40.17 [*]	23.20 [*]	4.10
	女子	173.17±17.66	180.33±23.49			
AHR/(次·min ⁻¹)	男子	185.67±11.30	180.33±5.28	0.13	8.61 [*]	2.15
	女子	187.33±8.76	173.67±18.81			
HR _{max} /(次·min ⁻¹)	男子	203.56±6.50	199.33±8.91	0.71	12.28 [*]	0.01
	女子	199.83±8.89	195.83±9.79			
T/(ng·mL ⁻¹)	男子	5.08±0.81	7.07±0.86	553.75 [*]	18.28 [*]	13.60 [*]
	女子	0.31±0.09	0.45±0.11			
C/(μg·dL ⁻¹)	男子	14.92±2.49	12.55±2.63	0.33	2.85	3.02
	女子	14.59±4.13	14.63±3.86			

注: *表示对应效应达到统计学显著水平($P<0.05$)。

5 结论与展望

本研究围绕 FTP 在耐力训练负荷监控中的理论基础与实践应用展开分析。FTP 并非 MLSS、LT2 或 VT 的生理等价物,其核心价值在于将实验室识别的代谢强度边界转化为训练实践中可执行、可追踪的外部功率参数,形成“生理阈值识别—训练强度分区—周期负荷调控”的转化链条。以 FTP 为周期化训练的负荷锚点,可根据准备期、专项准备期、比赛期和恢复期的目标差异,组织低强度容量积累、阈值能力发展、高强度刺激和减量恢复,并通过阶段性复测及时调整训练区间。场地自行车和速度滑冰案例分别呈现了 FTP 在专项功率训练与跨项目辅助训练中的应用路径,体现了其连接实验室评价与训练现场、衔接能力诊断与训练实施的实践价值。

未来研究可从 3 个方面推进: 1)开展大样本、平行对照和多时间点追踪研究,控制自然训练进程、力量训练、赛季阶段及恢复状态等混杂因素,进一步检验 FTP 分区训练的独立效应; 2)围绕不同训练水平、性别和项目特点建立 FTP 测试误差及个体校正模型,探索跑步、游泳、赛艇和速度滑冰等项目中特异性阈值指标的适用边界; 3)加强专项功率建模,明确陆地功率、场地测试指标与专项比赛表现之间的映射关系。在此基础上,进一步融合功率、乳酸、摄氧量、心率变异性和肌氧饱和度等多模态数据,推动 FTP 由周期性测试指标向动态训练调控工具发展。

作者贡献声明:

杨中和: 论文撰写与修改; 苏玉莹: 文献梳理; 石煜、林俊磊、彭凡、阙怡琳、黄佳儒: 数据分析,内容补充与校对; 李卫: 选题与设计。

参考文献:

蔡旭旦,毛丽娟,张蓓,等, 2021. 跨项目运动员越野滑雪长期训练运动能力变化: 基于运动机能监控的研究 [J]. 体

育科学, 41(8): 3-13.

陈小平, 2010. 有氧与无氧耐力的动态关系及其对当前我国耐力训练的启示 [J]. 体育科学, 30(4): 63-68.

陈小平,褚云芳,纪晓楠, 2014. 竞技体能训练理论与实践热点及启示 [J]. 体育科学, 34(2): 3-10.

邓运龙, 2010. 实现耐力性竞速项目突破的关键问题 [J]. 南京体育学院学报(社会科学版), 24(4): 109-111.

姜自立,黎涌明,李庆, 2019. 短跑不同模式速度耐力训练的能量代谢特征 [J]. 体育科学, 39(5): 51-60.

李捷,王晓军,裘晟,等, 2018. 论运动训练的科学化与竞技训练实践的几个关键问题: 系统训练生物原理与当前中国传统“大周期”认识逻辑错误的对比分析(上) [J]. 成都体育学院学报, 44(1): 1-6.

李卫,石煜, 2024. 北京冬奥会速度滑冰男子 500 m 冠军高亭宇的备战策略研究 [J]. 体育科学, 44(4): 52-61.

黎涌明, 2015. 摄氧量动力学: 历史、特征和启示 [J]. 武汉体育学院学报, 49(3): 63-69.

李钊,李庆, 2016. 论力量训练安排的模式及其实际应用 [J]. 体育科学, 36(12): 30-39.

刘俊一, 2018. “周期”训练理论的重新审视: 以张虹 2014、2018 年冬奥会周期训练模式为案例 [J]. 成都体育学院学报, 44(1): 7-12.

魏博,邱建钢, 2025. “挪威模式”双乳酸阈值训练: 一种耐力训练的新方法 [J]. 上海体育大学学报, 49(3): 63.

杨阔,王统领,王丰,等, 2025. 临界功率理论及其在马拉松运动中的应用价值研究 [J]. 中国体育科技, 61(5): 56-64.

杨中和,苏玉莹,石煜,等, 2025. 6 周亚高原训练对中长距离速度滑冰运动员耐力表现及生理机能的影响 [J]. 中国体育科技, 61(9): 14-22.

尤传豹, 2025. 人工智能赋能体育 [J]. 体育学研究, 39(2): 2.

周庆玺,赵亮,刘瑞东, 2024. 高强度和大运动量相结合的体能类项目训练模式述评 [J]. 成都体育学院学报, 50(2):

- 135-142.
- Allen H, Coggan A, 2012. Training and Racing with a Power Meter[M]. Boulder, CO: VeloPress.
- Austin C L, Hokanson J F, McGinnis P M, et al., 2018. The relationship between running power and running economy in well-trained distance runners[J/OL]. Sports (Basel, Switzerland), 6(4): 142. <https://doi.org/10.3390/sports6040142>.
- Borszcz F K, Tramontin A F, Bossi A H, et al., 2018. Functional threshold power in cyclists: Validity of the concept and physiological responses[J]. Int J Sports Med, 39(10): 737-742.
- Borszcz F K, Tramontin A F, Costa V P, 2019. Is the functional threshold power interchangeable with the maximal lactate steady state in trained cyclists?[J]. Int J Sports Physiol Perform, 14(8): 1029-1035.
- Buchheit M, 2014. Monitoring training status with HR measures: Do all roads lead to rome?[J/OL]. Front Physiol, 5: 73. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00073>.
- Burnley M, Vanhatalo A, Poole D C, et al., 2025. Blue plaque review series: A.V. hill, athletic records and the birth of exercise physiology[J]. J Physiol, 603(6): 1361-1374.
- Casado A, Foster C, Bakken M, et al., 2023. Does lactate-guided threshold interval training within a high-volume low-intensity approach represent the “next step” in the evolution of distance running training?[J/OL]. Int J Environ Res Public Health, 20(5): 3782. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053782>.
- Chidnok W, Fulford J, Bailey S J, et al., 2013. Muscle metabolic determinants of exercise tolerance following exhaustion: Relationship to the “critical power”[J]. J Appl Physiol (Bethesda, Md.: 1985), 115(2): 243-250.
- Douglas J, Ross A, Martin J C, 2021. Maximal muscular power: Lessons from sprint cycling[J/OL]. Sports Med Open, 7(1): 48. <https://doi.org/10.1186/s40798-021-00341-7>.
- Faude O, Kindermann W, Meyer T, 2009. Lactate threshold concepts: How valid are they?[J]. Sports Med (Auckland, N.Z.), 39(6): 469-490.
- Feldmann A, Schmitz R, Erlacher D, 2019. Near-infrared spectroscopy-derived muscle oxygen saturation on a 0% to 100% scale: Reliability and validity of the moxy monitor[J]. J Biomed Opt, 24(11): 1-11.
- Filipas L, Bonato M, Gallo G, et al., 2022. Effects of 16 weeks of pyramidal and polarized training intensity distributions in well-trained endurance runners[J]. Scand J Med Sci Sports, 32(3): 498-511.
- Fukuda D H, Smith A E, Kendall K L, et al., 2010. The effects of creatine loading and gender on anaerobic running capacity[J]. J Strength Cond Res, 24(7): 1826-1833.
- Grivas G V, Safari K, 2025. Artificial intelligence in endurance sports: Metabolic, recovery, and nutritional perspectives [J/OL]. Nutrients, 17(20): 3209. <https://doi.org/10.3390/nu17203209>.
- Haff G G, 2004. Roundtable discussion: Periodization of training- Part1 [J]. Strength Cond J, 26(1): 50-69.
- Hellsten Y, Gliemann L, 2024. Peripheral limitations for performance: Muscle capillarization[J/OL]. Scand J Med Sci Sports, 34(1): e14442. <https://doi.org/10.1111/sms.14442>.
- Hopker J, Passfield L, Coleman D, et al., 2009. The effects of training on gross efficiency in cycling: A review[J]. Int J Sports Med, 30(12): 845-850.
- Impellizzeri F M, Marcora S M, Coutts A J, 2019. Internal and external training load: 15 years on[J]. Int J Sports Physiol Perform, 14(2): 270-273.
- Inglis E C, Iannetta D, Passfield L, et al., 2020. Maximal lactate steady state versus the 20-minute functional threshold power test in well-trained individuals: “Watts” the big deal?[J]. Int J Sports Physiol Perform, 15(4): 541-547.
- Jamnick N A, Pettitt R W, Granata C, et al., 2020. An examination and critique of current methods to determine exercise intensity[J]. Sports Med (Auckland, N.Z.), 50(10): 1729-1756.
- Jemni M, Sands W A, Friemel F, et al., 2003. Effect of active and passive recovery on blood lactate and performance during simulated competition in high level gymnasts[J]. Can J Appl Physiol, 28(2): 240-256.
- Jones A M, Burnley M, Black M I, et al., 2019. The maximal metabolic steady state: Redefining the “gold standard” [J/OL]. Physiol Rep, 7(10): e14098. <https://doi.org/10.14814/phy2.14098>.
- Lillo-Beviá J R, Courel-Ibáñez J, Cerezuela-Espejo V, et al., 2022. Is the functional threshold power a valid metric to estimate the maximal lactate steady state in cyclists?[J]. J Strength Cond Res, 36(1): 167-173.
- Macinnis M J, Gibala M J, 2017. Physiological adaptations to interval training and the role of exercise intensity[J]. J Physiol, 595(9): 2915-2930.
- Mackey J, Horner K, 2021. What is known about the FTP20 test related to cycling? A scoping review[J]. J Sports Sci, 39(23): 2735-2745.
- Mcgrath E, Mahony N, Fleming N, et al., 2023. Prediction of rowing functional threshold power using body mass, blood

- lactate and GxT peak power data[J]. *Int J Exerc Sci*, 16(4): 31-41.
- Monod H, Scherrer J, 1965. The work capacity of a synergic muscular group[J]. *Ergonomics*, 8(3): 329-338.
- Morton R H, 2006. The critical power and related whole-body bioenergetic models[J]. *Eur J Appl Physiol*, 96(4): 339-354.
- Muniz-Pumares D, Hunter B, Meyler S, et al., 2025. The training intensity distribution of marathon runners across performance levels[J]. *Sports Med (Auckland, N.Z.)*, 55(4): 1023-1035.
- Nancupil-Andrade A A, Ruiz-Alias S A, Pérez-Castilla A, et al., 2024. Running functional threshold versus critical power: Same concept but different values[J]. *Int J Sports Med*, 45(2): 104-109.
- Nimmerichter A, Novak N, Triska C, et al., 2017. Validity of treadmill-derived critical speed on predicting 5000-meter track-running performance[J]. *J Strength Cond Res*, 31(3): 706-714.
- Okuno N M, Perandini L A B, Bishop D, et al., 2011. Physiological and perceived exertion responses at intermittent critical power and intermittent maximal lactate steady state[J]. *J Strength Cond Res*, 25(7): 2053-2058.
- Ozkaya O, Balci G A, As H, et al., 2022. Grey zone: A gap between heavy and severe exercise domain[J]. *J Strength Cond Res*, 36(1): 113-120.
- Panasci M, Lepers R, La Torre A, et al., 2017. Physiological responses during intermittent running exercise differ between outdoor and treadmill running[J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 42(9): 973-977.
- Petrigna L, Karsten B, Delextrat A, et al., 2022. An updated methodology to estimate critical velocity in front crawl swimming: A scoping review[J]. *Sci Sports*, 37(5-6): 373-382.
- Poole D C, Rossiter H B, Brooks G A, et al., 2021. The anaerobic threshold: 50+ years of controversy[J]. *J Physiol*, 599(3): 737-767.
- Poole D C, Ward S A, Gardner G W, et al., 1988. Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man[J]. *Ergonomics*, 31(9): 1265-1279.
- Puchowicz M J, Mizelman E, Yogev A, et al., 2018. The critical power model as a potential tool for anti-doping[J/OL]. *Front Physiol*, 9: 643. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00643>.
- Sandford G N, Kilding A E, Ross A, et al., 2019. Maximal sprint speed and the anaerobic speed reserve domain: The untapped tools that differentiate the world's best male 800 m runners[J]. *Sports Med (Auckland, N.Z.)*, 49(6): 843-852.
- Sandford G N, Laursen P B, Buchheit M, 2021. Anaerobic speed/power reserve and sport performance: Scientific basis, current applications and future directions[J]. *Sports Med (Auckland, N.Z.)*, 51(10): 2017-2028.
- Scribbans T D, Vecsey S, Hankinson P B, et al., 2016. The effect of training intensity on $\dot{V}O_{2max}$ in young healthy adults: A meta-regression and meta-analysis[J]. *Int J Exerc Sci*, 9(2): 230-247.
- Seckin A C, Ates B, Seckin M, 2023. Review on wearable technology in sports: Concepts, challenges and opportunities [J/OL]. *Appl Sci*, 13(18): 10399. <https://doi.org/10.3390/app131810399>.
- Seiler K S, Kjerland G Ø, 2006. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: Is there evidence for an “optimal” distribution? [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 16(1): 49-56.
- Seshadri D R, Li R T, Voos J E, et al., 2019. Wearable sensors for monitoring the internal and external workload of the athlete[J/OL]. *NPJ Digital Med*, 2: 71. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0149-2>.
- Sitko S, Artetxe X, Bonnevie-svendsen M, et al., 2025. What is “zone 2 training”? Experts’ viewpoint on definition, training methods, and expected adaptations[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 20(11): 1614-1617.
- Sitko S, Cirer-sastre R, Corbi F, et al., 2022a. Relationship between functional threshold power, ventilatory threshold and respiratory compensation point in road cycling[J]. *J Sports Med Phys Fit*, 62(5): 626-632.
- Sitko S, Cirer-sastre R, López I, 2022b. Time to exhaustion at estimated functional threshold power in road cyclists of different performance levels[J]. *J Sci Med Sport*, 25(9): 783-786.
- Spragg J, Leo P, Swart J, 2023. An improved methodology for estimating critical power from mean maximal power output data[J]. *J Sports Sci*, 41(10): 964-971.
- Sreedhara V S M, Mocko G M, Hutchison R E, 2019. A survey of mathematical models of human performance using power and energy[J/OL]. *Sports Med Open*, 5(1): 54. <https://doi.org/10.1186/s40798-019-0230-z>.
- Stamford B A, Weltman A, Moffatt R, et al., 1981. Exercise recovery above and below anaerobic threshold following maximal work[J]. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 51(4): 840-844.
- Valenzuela P L, Morales J S, Foster C, et al., 2018. Is the functional threshold power a valid surrogate of the lactate threshold? [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(10): 1293-1298.

- van Rassel C R, Sales K M, Ajayi O O, et al., 2024. A comparison of critical speed and critical power in runners using strydom running power[J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 19(1): 84-87.
- Vinetti G, Pollastri L, Lanfranconi F, et al., 2023. Modeling the power-duration relationship in professional cyclists during the giro d'italia[J]. *J Strength Cond Res*, 37(4): 866-871.
- Wakayoshi K, Ikuta K, Yoshida T, et al., 1992. Determination and validity of critical velocity as an index of swimming performance in the competitive swimmer[J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 64(2): 153-157.
- Wasserman K, Whipp B J, Koyl S N, et al., 1973. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise[J]. *J Appl Physiol*, 35(2): 236-243.
- Weltman A, Stamford B A, Fulco C, 1979. Recovery from maximal effort exercise: Lactate disappearance and subsequent performance[J]. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 47(4): 677-682.
- Williams C J, Gurd B J, Bonafiglia J T, et al., 2019. A multi-center comparison of O₂peak trainability between interval training and moderate intensity continuous training[J]. *Front Physiol*, 10: 19. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00019>.

Functional Threshold Power: Establishing a New Paradigm for Load Monitoring in Endurance Training

YANG Zhonghe^{1,3,4}, SU Yuying², SHI Yu^{1,3,4}, LIN Junlei^{1,3,4}, PENG Fan^{1,3,4},
QUE Yilin^{1,3,4}, HUANG Jiaru^{1,3,4}, LI Wei^{1,3,4,5*}

1. School of Strength and Conditioning Training, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 2. School of Sports Science and Physical Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 3. Strength-Speed Laboratory, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 4. Engineering Research Center of Strength and Conditioning Training Key Core Technology Integrated System and Equipment, Ministry of Education, Beijing 100084, China; 5. China Winter Sports College, Beijing Sport University, Beijing 100084, China

Abstract: Accurate monitoring of endurance training load requires translating physiological intensity boundaries established in the laboratory into executable, trackable external-load parameters in field-based training. Functional threshold power (FTP) is associated with maximal lactate steady state (MLSS) and other metabolic thresholds; however, their consistency is affected by the testing protocol, anaerobic work capacity, and training status, and the corresponding values should not be used interchangeably. Based on the research evidences from cycling, this study reviewed the theoretical development and physiological basis of FTP, distinguished it from MLSS, lactate threshold, ventilatory threshold, and critical power, and then summarized assessment approaches including prolonged-duration testing, the 20-min maximal sustainable power test(FTP₂₀), and historical power-data modeling. Particular attention was given to the anaerobic compensation error associated with the conventional 95% conversion factor and to individualized calibration. In this study, we further explained FTP-based intensity zoning and periodized load regulation, proposed a dynamic calibration pathway integrating power output, muscle oxygen saturation, and heart rate variability, and discussed its practical application through observational cases involving cycling-specific training and land-based auxiliary training for speed skating. Current evidence indicated that the most established applications of FTP remain concentrated in cycling, whereas other endurance sports require independent validation within their sport-specific threshold systems. The principal value of FTP lies in bridging laboratory physiological assessment and field-based power training by providing a practical reference for individualized intensity zoning, periodic reassessment, and periodized load adjustment, rather than replacing physiological gold standards such as MLSS. Future research should employ large-sample controlled designs, cross-sport calibration, and sport-specific power modeling to clarify its validity boundaries and contribution to training adaptation.

Keywords: functional threshold power; endurance training; training load monitoring; training intensity zone