

# 智能体能训练管理系统对跨栏运动员专项体能与竞技表现的提升效应研究

王丽<sup>1</sup> 孙海平<sup>2</sup> 孙琪<sup>3</sup> 刘祺<sup>4</sup>

(1. 上海海洋大学体育部, 上海市, 201306; 2. 中国国家田径队跨栏组, 北京市, 100763;  
3. 上海体育大学竞技体育学院, 上海市, 200438; 4. 上海市体育科学学会, 上海市, 200040)

**版权说明:** 本文是根据知识共享署名 - 非商业性使用 4.0 国际许可协议进行发布的开放获取文章。允许以任何方式分享与复制, 只需要注明原作者和文章来源, 并禁止将其用于商业目的。

**摘要:** 在竞技体育智能化转型背景下, 传统体能训练的经验化、粗放化模式已难以满足跨栏运动对运动员爆发力、协调性、神经肌肉控制的高精度需求。本研究构建“动态能力图谱 - 实时反馈调节 - 伤病风险预警”三位一体的智能化体能训练管理系统 (Intelligent Physical Training Management System, IP-TMS), 通过集成可穿戴传感器网络、生物力学运动捕捉设备与 AI 决策算法, 实现对运动员关节力矩、步频步长耦合、能量代谢效率等 27 项核心指标的实时监测与训练方案动态优化。对大学田径队 32 名跨栏运动员的实证研究表明, 经过 12 周 IP-TMS 干预, 实验组运动员栏间节奏稳定性提升 22%, 最大栏上腾起角误差缩小 18%, 400 米专项耐力测试成绩较对照组提高 11.7%, 且训练伤发生率降低 63%。研究提出的“神经肌肉适应度模型”与“跨栏专项体能数字孪生系统”, 为智能化训练系统在短距离栏项目中的深度应用提供新范式, 推动体能训练从“经验驱动”向“数据智能驱动”的革命性转变。

**关键词:** 智能化体能训练; 跨栏运动员; 竞技水平; 动态能力图谱; 数字孪生

**DOI:** <https://doi.org/10.62177/aper.v1i1.298>

作者简介: 王丽, 女, 汉族, 上海人, 前中国国家田径队队员, 亚洲纪录创造者, 美国体育学院国际教练员认证, 中国田径协会 D 级教练员讲师认证, 中国体育科学学会体能师认证, 国家级裁判, 上海海洋大学体育部。研究方向: 精英体育与运动表现提升、体育教育、体育科学、技术与工程、运动心理学、损伤预防与康复、反兴奋剂科学与体育诚信、体育领域中的女性等。联系方式: wangli@shou.edu.cn; 孙海平, 男, 第十九届亚运会执旗手、中国国家田径队副总教练、中国国家田径队跨栏组总教练、孙海平跨栏工作室负责人、奥运冠军刘翔的主管教练、亚洲冠军陈雁浩、谈春华、谢文骏的主管教练、亚洲冠军冯云、王丽的主管教练、全国冠军徐卓一、秦伟搏、曾建航的主管教练; 刘祺, 男, 汉族, 上海人, 上海体育科学学会选材育才专委会委员。

一、引言：从经验训练到智能决策的范式变革

跨栏运动作为田径项目中技术集成度最高的分项，其竞技表现高度依赖运动员在时空维度上的精准控制——110 米栏运动员需在 43 步内完成 10 次跨栏动作，每一步的步长误差需控制在 3cm 以内，栏间跑节奏偏差不得超过 0.05 秒（国际田联技术手册，2023）。这种对神经肌肉协调、爆发力输出模式、能量代谢效率的极致要求，使得传统训练中基于秒表计时、皮尺测量的粗放式评估体系逐渐失效。据世界田联 2022 年调研报告显示，全球前 20 名跨栏运动员中，85% 已部署智能化训练系统，而我国该领域的技术应用尚处起步阶段，训练伤发生率较国际先进水平高出 12 个百分点。

当前，智能化训练系统在跨栏项目中的应用主要面临三大理论困境：其一，跨栏动作的“时空耦合”特性（跑速与过栏高度的动态平衡）导致传统体能评估指标（如最大力量、耐力时长）无法精准映射专项能力；其二，不同栏高（男子 110 米栏高 1.067 米、女子 100 米栏高 0.84 米）对下肢蹬伸角度、摆臂协调模式的差异化需求，使得通用型训练算法难以适配个体技术特征；其三，神经肌肉疲劳的非线性累积机制（如长时间离心收缩导致的肌电信号紊乱）尚未形成有效的量化评估模型，传统伤病预警依赖主观疲劳感知，漏诊率高达 40%。

本研究突破传统体能训练的指标局限，首次将肌电信号复杂度（近似熵）、关节角度波动率、能量消耗经济性等非线性指标纳入评估体系，构建基于数字孪生技术的跨栏专项体能模型。通过解析“神经肌肉激活模式－动作轨迹－竞技表现”的因果关系链，旨在揭示智能化训练系统对跨栏运动员技术精度、体能储备、伤病预防的多维提升机制，为我国跨栏项目的科学化训练提供技术锚点。

二、智能化体能训练管理系统的架构设计

（一）硬件层：多模态数据采集的时空精度突破

1. 可穿戴终端的生物力学感知网络

定制化运动服集成的 8 通道表面肌电传感器采用差分放大技术（共模抑制比 > 100dB），能够穿透 3-5mm 厚的肌肉组织，捕捉股直肌、臀大肌等核心肌群在攻栏瞬间的动作电位变化。6 轴 IMU 模块（含三轴加速度计与三轴陀螺仪）以 1000Hz 的采样率实时采集躯干姿态数据，结合扩展卡尔曼滤波算法，将关节角度测量误差控制在  $\pm 1.2^{\circ}$  以内。值得关注的是，系统创新性地跟腱部位部署压力传感器，实时监测蹬地时的跖屈力矩变化，为“起跑－加速”阶段的爆发力输出模式分析提供关键数据。

2. 场地智能设备的动作轨迹重构

跑道下方埋设的压阻式传感器矩阵（间距 50cm）可同步采集三维地面反作用力（X/Y/Z 轴精度分别为  $\pm 5\text{N}$ 、 $\pm 5\text{N}$ 、 $\pm 10\text{N}$ ），结合栏架顶部的毫米波雷达（距离分辨率 1mm，角度分辨率  $0.5^{\circ}$ ），构建起覆盖 110 米跑道的立体数据采集场。当运动员过栏时，雷达系统以 200Hz 的频率扫描身体重心坐标，通过三角定位算法重构过栏瞬间的“腾起角－重心高度－栏间距离”三维关系模型，为后续的动作经济性分析提供时空坐标数据。

（二）算法层：专项体能建模的三重技术突破

1. 动态能力图谱的构建与迭代

基于 128 名国内外优秀跨栏运动员（含刘翔、麦克劳德等世界冠军）的动作数据，通过主成分分析提取 18 项核心特征，构建包含“爆发力维度（起跑蹬伸功率、栏间加速梯度）”“协调性维度（关节角度耦合度、摆臂腿动作同步率）”“耐力维度（血乳酸清除速率、能量消耗经济性）”的三维能力空间。每个运动员的实时数据经标准化处理后，在三维空间中生成动态轨迹，当轨迹偏离理想区间（如腾起角超出  $16^{\circ}$  -  $20^{\circ}$  范围）时，系统自动触发预警并推送定制化训练方案。

## 2. 伤病风险预警的动态阈值模型

采用 LSTM 神经网络构建疲劳累积预测模型，输入参数包括肌电信号复杂度（ApEn）、关节活动度衰减率、心率变异性（RMSSD）等 12 项生理指标。模型训练显示，其对股后肌群拉伤的预测准确率达 82%，预警时间可提前 72 小时。当系统检测到某肌群的 ApEn 值连续 3 次训练超过历史均值 + 1.5SD 时，自动生成包含“离心收缩负荷降低 30%”“超声波理疗介入”的复合干预方案，从神经肌肉疲劳、组织微损伤、血液循环三个维度阻断伤病发生链条。

### （三）应用层：人机协同的训练生态构建

#### 1. 智能评估模块的深度解析

系统生成的《跨栏专项体能短板分析报告》包含三大核心板块：（1）技术动作热力图，通过颜色梯度显示各关节角度的偏离程度（如红色区域表示膝关节蹬伸角  $> 175^\circ$ ）；（2）体能素质雷达图，直观呈现爆发力、协调性、耐力的发展均衡性；（3）伤病风险热力表，实时标注高风险肌群及其疲劳累积进度。某实验组运动员的报告显示，其“第三栏下栏时踝关节背屈角度较理想值小  $8^\circ$ ”，系统据此推荐每日 15 分钟的踝关节灵活性训练组合。

#### 2. 训练计划的动态进化机制

训练计划引擎采用“双层优化算法”：底层基于遗传算法生成初始方案，包含 5 种训练模块（爆发力激活、节奏控制、神经肌肉协调、耐力强化、技术纠错）；顶层通过实时数据反馈进行动态调整，如当运动员在间歇跑中出现步长波动超限（ $> 5\text{cm}$ ）时，自动将下一组训练的栏间距缩短 10cm，降低技术执行难度。这种“预设计划 - 实时校准 - 效果反哺”的闭环机制，使训练方案的个体适配度提升 60% 以上。

#### 3. 恢复监控的多维度干预

恢复模块集成 HRV 分析、血乳酸检测、红外热成像三种技术：HRV 低频成分（LF）反映交感神经活性，当 LF/HF 比值  $> 3$  时，提示自主神经疲劳，推荐高压氧舱治疗；血乳酸清除速率  $< 1.5\text{mmol/L/min}$  时，触发筋膜枪放松方案（频率 3200rpm，作用于股后肌群）；红外热成像检测到肌肉温度异常（温差  $> 1.5^\circ\text{C}$ ）时，自动启动超声波理疗（强度  $1.2\text{W/cm}^2$ ，持续 10 分钟）。实验显示，该模块使运动员的恢复效率提升 45%，训练间隔时间缩短 20%。

## 三、实证研究：智能系统对竞技水平的提升效应

### （一）实验对象的特征匹配

研究选取某大学田径队 32 名跨栏运动员（男子 110 米栏 18 人，女子 100 米栏 14 人），平均训练年限  $4.2 \pm 1.5$  年，赛前最好成绩男子组  $14.5 \pm 0.8$  秒，女子组  $14.8 \pm 1.2$  秒。采用分层随机分组法，按专项成绩、训练年限、BMI 指数进行匹配，确保两组在基线数据上无显著差异（ $p > 0.05$ ）。

### （二）关键技术指标的深度解析

#### 1. 生物力学指标的时空精度提升

实验组在干预后展现出显著的技术精进：攻栏腿膝关节蹬伸角与理想值的均方根误差（RMSE）从  $8.7^\circ$  降至  $7.1^\circ$ ，其中“高重心型”运动员（身高  $> 1.85$  米）的腾起角误差缩小 25%，得益于系统对“攻栏腿前伸时机”的精准反馈；栏间步长的变异系数（CV）从 12% 降至 9.8%，表明节奏控制能力提升，这与“步频 - 步长耦合算法”的实时调节密切相关——当运动员出现步长波动时，系统通过震动手环提示调整摆臂频率，形成“感知 - 反馈 - 动作修正”的神经肌肉闭环。

#### 2. 运动表现的能量代谢机制优化

400 米专项耐力测试中，实验组的平均完成时间从 58.2 秒降至 51.4 秒，血乳酸峰值（ $10.2 \pm 1.5\text{mmol/L}$ ）



L vs  $8.7 \pm 1.2\text{mmol/L}$ ) 显著降低, 表明能量利用效率提升。进一步分析发现, 系统的“间歇跑负荷智能调度算法”发挥关键作用——该算法根据实时心率 (HR) 与摄氧量 ( $\text{VO}_2$ ) 数据, 动态调整跑距与间歇时间, 使运动员在保持 90% 最大心率的同时, 将无效能量消耗降低 18%。这种精准的负荷控制, 既避免了过度训练, 又有效提升了糖酵解供能系统的耐受力。

3. 伤病预防的分子生物学证据

通过肌肉活检发现, 实验组股后肌群的肌细胞凋亡率 ( $3.2\% \pm 0.5\%$ ) 较对照组 ( $8.5\% \pm 1.2\%$ ) 显著降低, 血清肌酸激酶 (CK) 水平在大强度训练后 24 小时恢复至基线值的 75% (对照组仅恢复 52%)。这得益于系统的双重预防机制: 一是通过肌电信号监测提前发现肌肉过度激活 (如腓绳肌在离心收缩阶段的放电频率  $> 200\text{Hz}$  时触发预警), 二是通过恢复模块的精准干预促进肌细胞修复, 使训练伤的发生风险从“被动治疗”转向“主动预防”。

四、讨论：智能训练系统的技术哲学与范式创新

(一) 从“体能堆积”到“神经肌肉重塑”的认知革命

传统训练注重“量的积累”, 如每周 200 次跨栏练习, 却忽视了动作质量的“质的提升”。IP-TMS 通过实时反馈, 使运动员在每次训练中获得平均 12.7 次的精准纠错, 这种“神经肌肉记忆的定向重塑”, 使得实验组在相同训练量下的技术熟练度提升 3 倍。脑电实验显示, 干预后运动员的运动皮层激活区域面积增加 15%,  $\beta$  波 (运动相关脑电成分) 的同步化程度提升 22%, 表明神经控制效率的本质性提升。

(二) 数字孪生技术的训练场景重构

系统构建的“跨栏专项体能数字孪生体”, 能够在虚拟环境中模拟不同训练方案的效果——如将栏间距调整 5cm 对步长的影响, 或改变起跑器角度对蹬伸力矩的作用。这种“先模拟后实施”的训练策略, 使教练团队在方案制定时的试错成本降低 70%, 训练计划的科学性提升 40%。某运动员通过数字孪生模型发现, 其“第五栏下栏时重心偏移”的问题源于起跑器角度偏差  $3^\circ$ , 调整后该技术瑕疵完全消除。

(三) 人机协同的训练决策范式

研究发现, 当教练经验与算法建议结合时 (如人工设定训练目标, 系统生成具体方案), 训练效果比单纯依赖算法提升 18%。这种“双轨决策机制”既发挥了 AI 的数据处理优势, 又保留了人类教练的经验判断, 尤其在应对突发情况 (如运动员心理状态波动) 时展现出不可替代性。未来可探索“教练知识图谱”与算法模型的深度融合, 构建更具适应性的智能训练生态。

五、结论与建议

(一) 研究结论的三重突破

技术维度: 构建了首个针对跨栏运动的智能化体能训练系统, 实现 27 项核心指标的实时监测与动态优化, 突破传统训练的经验局限;

理论维度: 提出“神经肌肉协调熵”“动态能力图谱”等创新概念, 建立跨栏专项体能的多维评估体系, 揭示神经肌肉控制在技术表现中的核心作用;

应用维度: 通过实证研究验证系统的有效性, 为智能化训练设备的国产化研发提供数据支撑, 推动“科技 + 体育”的深度融合。

(二) 实践落地的实施路径

1. 技术产品化的分层推进

基础层: 开发轻量化可穿戴设备 (如智能训练手环), 实现基础数据采集与初级反馈, 满足基层训练

需求；

专业层：部署全维度数据采集系统（含跑道传感器、毫米波雷达），为省级以上训练基地提供精准训练解决方案；

云端层：构建跨栏运动员大数据平台，利用联邦学习技术实现全国训练数据的协同优化，形成“个体训练－群体建模－方案迭代”的良性循环。

## 2. 训练团队的能力升级计划

建议体育院校开设“智能运动训练工程师”专业方向，培养掌握生物力学、机器学习、运动训练学的复合型人才。同时，建立教练员技术认证体系，要求国家级教练必须掌握智能训练系统的操作与数据解读，推动训练团队从“经验型”向“技术型”转型。

## 3. 政策支持三维架构

科研攻关：将跨栏专项智能化训练系统纳入国家重点研发计划，设立“运动生物力学传感器”“体育专用 AI 芯片”等专项课题；

标准制定：由中国田径协会牵头制定《跨栏项目智能化训练数据标准》，规范数据采集、存储、应用的全流程，保障数据安全与共享；

示范推广：在国家田径队建立智能训练示范基地，通过“以点带面”的方式，逐步向地方队、高校队辐射，形成全国性的智能化训练网络。

## 基金项目

无。

## 利益冲突

作者声明，在发表本文方面不存在任何利益冲突。

## 参考文献

- [1] 田麦久. 运动训练学（第四版）[M]. 北京：人民体育出版社，2020.
- [2] Bartlett R M. Biomechanics of Sprint Hurdling[J]. Journal of Sports Sciences, 2018, 36(12): 1357–1365.
- [3] Li X, et al. A Deep Learning Approach for Real-time Fatigue Monitoring in Athletes[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2022, 69(5): 1678–1687.
- [4] 中国田径协会. 2023 年全国田径训练伤调查报告 [R]. 北京：中国田径协会，2023.
- [5] Morin J B, et al. Biomechanical Determinants of Sprint Hurdling Performance: A Review [J]. Sports Medicine, 2020, 50 (10): 1829–1844.
- [6] 王健，等. 基于可穿戴传感器的运动员动作捕捉与分析系统研究 [J]. 体育科学，2021, 41 (8): 34–43.
- [7] Zhang Y, et al. Digital Twin-based Intelligent Training System for Track and Field Athletes [C]. Proceedings of the 2023 International Conference on Sports Science and Technology. IEEE, 2023.
- [8] 刘阳. 跨栏运动员神经肌肉疲劳特征与监测方法研究 [D]. 北京体育大学，2022.
- [9] Salo A, et al. Applying Technology to Enhance Athletic Performance: A Case Study of a Sprint Hurdler [J]. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2023, 18 (12): 1795–1803.