

## 知网个人查重服务报告单(全文标明引文)

报告编码:BC20260425220272217729938

检测时间:2026-04-25 22:03:51

篇名: 运动生物力学研究进展: 从方法革新到实践应用的整合与前瞻

作者: 段亚鲲

检测类型: 课程作业(研究生)

比对截止日期: 2026-04-25

### 检测结果

去除本人文献复制比: 0.7% 去除引用文献复制比: 0.7% 总文字复制比: 0.7%

单篇最大文字复制比: 0.4% (竞技体育运动生物力学研究现状与趋势)

重复字符数: [36] 单篇最大重复字符数: [22] 总字符数: [5535]

0.7% (36) 0.7% (36) 运动生物力学研究进展: 从方法革新到实践应用的整合与前瞻\_第1部分 (总5535字)

(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

### 1. 运动生物力学研究进展: 从方法革新到实践应用的整合与前瞻\_第1部分

总字符数 5535

#### 相似文献列表

去除本人文献复制比: 0.7% (36) 去除引用文献复制比: 0.7% (36) 总文字复制比: 0.7% (36)

|   |   |                      |
|---|---|----------------------|
| 1 | 竞技体育运动生物力学研究现状与趋势<br>刘卉;于冰;张力文;吴海军; - 医用生物力学 - 2021       | 0.4% (22)<br>是否引证: 否 |
| 2 | 福建省运动生物力学学科发展研究报告<br>彭飘林;陈敏;于海滨;卢建军;张英;李家保; - 海峡科学 - 2016 | 0.3% (14)<br>是否引证: 否 |

#### 原文内容

运动生物力学研究进展: 从方法革新到实践应用的整合与前瞻

摘要: 运动生物力学是研究人体运动中力学规律的交叉学科, 在竞技体育、运动损伤预防与康复等领域发挥着日益重要的作用。本文系统梳理了2013至2025年间该学科的研究进展, 重点对比了运动捕捉、表面肌电、足底压力及肌肉骨骼建模四类技术的优劣。研究发现, 当前测试场景正由实验室向真实运动场景延伸, 但便携设备的测量精度仍未达到“金标准”水平。应用层面, 运动表现、损伤预防与装备研发呈交叉融合态势, 但多数研究仍以群体均数比较为主, 难以解释显著的个体差异。学科面临的核心困境在于生态效度与测量精度难以兼顾, 群体结论无法支持个体化干预, 且生物力学指标与损伤间的因果关系尚不明确。未来应重点突破无标记捕捉与可穿戴传感器的精度瓶颈, 发展个体化建模与单被试实验设计, 并探索AI驱动的多模态数据整合与因果推断路径。

关键词: 运动生物力学; 运动捕捉; 肌电图; 损伤预防; 可穿戴设备; 人工智能

#### 1. 引言

运动生物力学作为生物力学的重要分支, 主要通过定量测量与力学分析, 揭示运动技术的科学内涵, 为体育教学、运动训练和损伤预防提供科学依据。[2][12]。近年来, 无标记运动捕捉、高密度肌电、可穿戴传感等技术快速迭代, 推动该学科从以运动学描述为主的阶段, 逐步转向多尺度、多模态数据融合的定量建模阶段。刘宇等指出, 运动生物力学研究方法正朝着精细化、多维度、实时化的方向发展。唐刚等认为, 近年来在运动数据获取、力学参数测量及人体动力学模型建立等方面取得了许多重大进展, 并对运动损伤预防及康复医学等领域产生了重要的影响[3]。刘程林等认为, 运动生物力学在理论建模和模拟仿真计算方面, 肌肉本构理论及肌肉力计算准确性是重点和难点[2]。傅维杰等指出, 运动生物力学测试的生态学效度问题已成为制约研究成果向实践转化的关键瓶颈[17]。国内学者梳理2013—2023年运动生物力学在竞技体育各项目中的应用情况后发现, 该学科在体能、技能、技战术主导类项目中的应用持续深化, 但宏观研究数据到微观实践指导的转化机制仍存在明显短板[10]。在此背景下, 本研究系统梳理了近十年运动生物力学在方法革新与应用拓展方面的关键进展, 剖析了制约学科发展的理论与方法瓶颈, 并探讨了未来可能的突破方向。

#### 2 核心研究方法的发展与批判性比较

##### 2.1 运动捕捉技术: 从标记到无标记的跨越与精度权衡

传统红外标记式三维运动捕捉系统是当前运动学测量的公认标准, 测量精度可达亚毫米级。但这类系统使用前需要在受试者体表粘贴标记点, 整体操作流程耗时较长, 测量结果易受皮肤位移干扰, 同时对拍摄环境的光线条件、动作遮挡情况要求较高

，难以直接应用于真实运动训练场景[16]。

近年来，基于深度学习的无标记运动捕捉技术逐步成熟，该技术依托卷积神经网络与时序模型，可从单目或多视角视频中自动识别人体关键点。王俊清等在综述中指出，基于深度学习的人体姿态估计方法在运动生物力学中具有广泛应用前景，但面临着姿态估计精度不足、复杂运动场景适应性差等挑战[13]。郝卫亚认为，人体运动生物力学仿真建模的核心在于肌肉骨骼模型的个体化构建与验证[16]。

目前无标记运动捕捉仅可作为实验室外生态化评估的补充手段，无法完全替代标记式系统，研究者设计测量方案时，需优先权衡精度与生态效度的适配性。

2.2 表面肌电图：从宏观激活到运动单元策略的深入

表面肌电图是评估神经肌肉激活时序和强度的常用工具。为克服传统双极电极信号串扰的局限，高密度肌电技术应运而生。高密度肌电（HD-sEMG）借助二维电极阵列与盲源分离算法，可将宏观信号分解为单个运动单元的活动序列，研究者可通过该技术直接观测中枢神经系统的运动单位募集与发放策略[14][17]。王乐军等指出，高密度表面肌电技术的发展为体育科学研究中神经肌肉控制机制的探讨提供了新的技术手段。表面肌电技术涉足体育科学领域的研究虽尚处初级阶段，但应用极为广泛[14]。目前HD-sEMG的应用存在两项明确局限：一是动态高收缩力任务下信号稳定性不足，电极-皮肤界面阻抗易受运动干扰；二是现有技术仍无法检测深层肌肉活动。目前，该技术的局限在于动态高收缩任务下信号稳定性不足，且无法检测深层肌肉活动。已有初步研究证实，疲劳状态下运动单位同步化水平会升高，慢性踝关节不稳患者的运动单位离散度明显增大，但这些发现仍待更大规模数据验证。

2.3 地面反力与足底压力：从固定式测力台到便携传感器的妥协

在足地界面力学测量领域，内嵌式测力台被公认为地面反作用力（Ground Reaction Force, GRF）测量的“金标准”，具备三分量高精度采集能力[12][15]。然而，其空间固定的属性决定了它无法满足动态多步态、真实运动场景的测试需求。便携式压力鞋垫和智能跑道系统虽可实现足-地作用力的连续监测，但已有对比研究证实，当前市售主流产品对冲击峰值力的测量普遍存在12%至18%的系统性低估，且基本不具备剪切力分量的有效测量能力[15]。不同BMI、不同着地方式跑者的下肢损伤生物力学分析正受限于这一技术短板：便携设备无法在户外长距离跑步测试中同时获取高精度的动力学与运动学数据，是生态化损伤风险评估领域的关键方法学缺口。

2.4 肌肉骨骼建模与仿真：个体化适配与结果验证的现存瓶颈

基于逆向动力学、前向动力学驱动的肌肉骨骼模型，可估算在体环境下无法直接测量的肌肉力、关节接触力，为前交叉韧带损伤机制等高危动作的载荷分析提供虚拟实验路径。结合MRI、超声影像构建的个体化模型能显著提升预测精度，但当前多数研究仍使用经缩放的通用模板，肌腱刚度、肌肉最优纤维长度等关键参数无法实现个体化设定，且模型输出结果的验证高度依赖植入式传感器等侵入性测量手段，直接降低了个体化仿真结果的可信度[16]。该技术的实用化落地，后续需重点突破无创校准方法，同时建立大规模基准验证数据集。

综上所述，运动捕捉、表面肌电、足底压力测量与肌肉骨骼建模仿真四类核心方法，存在同一个结构性问题：以红外标记捕捉和内嵌式测力台为代表的实验室“金标准”方法，精度优势显著，却因设备固定、操作复杂、环境要求苛刻而难以迁移至真实运动场景；以无标记视频、惯性传感器和便携压力鞋垫为代表的新兴技术，虽大幅提升了测试的生态效度，但其测量误差，尤其在额状面与横断面运动学、冲击性动力学指标上，尚未达到可完全替代传统方法的水平。这一局面决定了未来运动生物力学方法论的突破方向，不在于追求某一种技术的极致化，而在于构建一套层次化的测量与校准体系。高生态效度的便携与无标记技术作为常态化的“先导层”，承担大样本、多场景的连续监测任务，实验室金标准方法作为周期性的“校准层”，通过同步测试建立个体化的指标映射与误差校正关系，在精度与生态效度之间实现有依据的折中。这一层次化测量框架，为下文讨论运动表现、损伤预防与装备研发中的生物力学应用提供了方法论前提，只有承认并管理精度与生态效度的固有张力，才能在不同应用场景中做出有据可依的测量方案选择。各主要技术的优势、局限及生态效度水平概览见表1。

表1 运动生物力学核心测量技术的优势、局限与生态效度比较

| 技术类别   | 金标准（局限）                  | 新兴替代（优势与局限）                              | 生态效度      | 层次化定位         |
|--------|--------------------------|--|-----------|---------------|
| 运动捕捉   | 红外标记式：亚毫米精度，但操作耗时、环境要求苛刻 | 无标记视频：现场可用，矢状面误差<3°，但额状面/横断面精度不足         | 标记：低      | 无标记：中 标记→校准层  |
| 表面肌电   | 双极sEMG：可测激活时序，但信号串扰明显    | HD-sEMG：可分解运动单位活动，但动态任务信号不稳，深层肌肉无法检测     | 中（动态任务偏低） | 先导层（需周期性校准）   |
| 足地界面力学 | 内嵌测力台：GRF三分量高精度，但空间固定    | 便携鞋垫/智能跑道：可连续监测，但冲击峰值力低估12% - 18%，无剪切力测量 | 测力台：低     | 便携式：高 测力台→校准层 |
| 内部载荷估算 | 侵入式测量：直接测量，但创伤性、伦理受限     | 肌肉骨骼仿真：可无创估算肌肉力/关节力，但个体化参数难以获取，验证依赖侵入手段  | 低         | 深度层           |

3. 核心应用领域的交叉融合

3.1 运动表现优化：从技术诊断到个体化方案

运动生物力学应用于竞技体育的核心路径为“技术诊断—关键参数识别—反馈优化”。现有研究已实现铅球、太极拳等项目专业运动员与初学者运动学特征的量化差异[9][10]，但相关研究多采用群体均数比较的分析方式，对运动员个体内部的“最优协调模式”关注度不足。换言之，同一技术目标可对应多种关节负载策略，完全参照群体均值设定的“标准技术”，反而可能限制部分运动员发挥个体最佳水平。因此，建立个体化技术诊断范式，已成为该子领域目前亟需突破的核心理论问题。

3.2 损伤预防与康复：神经肌肉控制视角下的整合

运动损伤预防的研究重心正从孤立的结构载荷分析，逐步转向神经肌肉控制策略与生物力学耦合机制研究。羽毛球落地动作中，女性运动员关节刚度、肌肉预激活幅值均低于男性，这一发现为前交叉韧带（ACL）损伤的性别差异提供了神经力学层面的解释[19]。针对慢性踝关节不稳患者的步态研究显示，该群体普遍存在腓骨长短肌激活延迟、足部刚度降低的异常表现[7][8]。膝外翻角增大等同一类生物力学偏差，在不同个体中可对应完全不同的神经肌肉诱因，若群体统计类风险筛查未纳入

个体代偿 模式分析，最终预测效能会出现明显下降。当前康复生物力学研究已开始推动功能训练与神经肌肉控制再训练的整合，但现有 干预方案的个体化适配性不足，且多数方案的生物力学机制支撑仍有待完善。

3.3 运动装备研发：数据驱动与人体响应并重

运动鞋功能设计已脱离传统经验型结构优化路径，形成以足-地界面生物力学特征为核心的科学化设计逻辑。白啸天等[5]的研究证实，鞋底的纵向弯曲刚度、后跟杯结构等参数可直接影响踝关节力矩与跟腱载荷水平，推动运动鞋研发从单一缓冲的传统思路向“载荷调控”的设计理念转变。大数据与机器学习方法可用于构建足形特征与步态参数的关联模型，为该领域的参数化 分析提供技术支撑[1]。

现有装备优化存在明显局限：若设计偏向过度保护，使用者长期穿戴后可能出现足部内在肌群退化，自身天然稳定机制也会受到抑制。运动装备的最优设计需要以维持、促进人体自身神经肌肉功能为前提，现有研究对这一维度的关注度仍有不足。当前运动鞋生物力学研究对鞋面包裹性、鞋垫材料特性等变量的关注亦不充分，且多采用短期横断面设计，缺乏长周期穿戴追踪 数据，装备干预对足部内在肌群功能的长期效应尚不明确。

3.4 人工智能的应用：从特征识别到因果建模

人工智能在生物力学中的应用已超越初步的姿态识别阶段，正向自动化特征提取、时序动作预测及损伤预警模型构建深化。然而，当前绝大多数AI应用仍属于“黑箱”模型，虽然其在分类和预测准确率上表现出色，却缺乏力学机制的可解释性。这一问题对于以因果关系探究为核心的科学研究和以循证为基础的临床决策而言，构成了重大障碍，也是当前运动生物力学领域引入人工智能技术时面临的主要挑战之一[4]。

4. 批判性反思与理论挑战

当前运动生物力学研究领域仍存在三类相互关联的结构性问题。

第一类是研究生态效度不足。实验室环境下采集的生物力学数据与真实运动场景中的实测结果存在明显偏差。若研究过程引入疲劳、注意负荷及环境不确定性变量，受试者关节动力学模式与基线测量值的差异会显著增大[17]，直接将未经过生态化验证的实验室结论应用于运动实践，存在明确的应用风险。可穿戴传感技术虽具备在真实场景采集数据的技术潜力，但其测量精度仍需通过更多信效度研究验证。

第二类是群体研究结论无法覆盖个体差异。当前主流研究范式以组间比较、零假设检验为核心逻辑，默认同组受试者的力学响应具有同质性。但个体间关节几何形态、肌肉募集模式、运动训练经验的固有差异，会导致同一干预方案在不同对象身上产生完全相反的生物力学效应。目前单被试实验设计、个体反应变异性分析方法尚未在领域内普及，直接限制了个体化训练、康复方案的生物力学证据积累。

第三类是现有研究多未确立明确因果关系。多数研究仅能验证特定动作参数与损伤风险、运动表现之间的相关性，高质量前瞻性队列研究数量有限，且现有研究的预测效能普遍偏低[19]。因果证据的缺失，是运动生物力学相关损伤预防指南应用层级受限的根本原因。该问题的解决需要依托长周期前瞻性研究设计，结合规范的中介分析、建模仿真框架下的反事实推断方法逐步推进。

5. 研究展望

当前，运动生物力学测量体系仍存在场景适配性不足的问题，实验室级金标准测量难以直接应用于训练、康复等真实场景，无标记捕捉、可穿戴传感器的测量精度尚未完全满足科研与临床需求。后续可依托深度学习与多传感器融合技术，进一步优化 无标记运动捕捉与便携式动力学传感器的精度，逐步搭建包含实验室金标准测量、现场可穿戴设备、视频无标记捕捉的三级精度层次化测量框架，相关技术迭代预计在五到十年内可完成落地。当前运动生物力学研究多采用群体均值比较范式，个体的特异性运动特征容易被平均数据掩盖，难以直接用于指导个体化的训练与康复方案设计。未来可进一步推广个体化肌肉骨骼建模 方法与单被试实验设计，推动现有研究范式向个体化响应分析转型，为精准训练、精准康复提供更具针对性的生物力学支撑。

可解释性人工智能与因果推断方法的引入，能够将生物力学大数据转化为可操作的机理性知识，实现“海量数据一个体化指导”的转化衔接。多模态数据（运动学、动力学、生理、心理）的同步整合，是全面解析运动行为规律的必要前提。数字孪生的应用落地，将率先在技术动作虚拟优化、康复方案虚拟预演两个场景实现突破，应用效果取决于个体化模型计算效率与实时 交互能力的同步提升。

6. 结论

综上所述，运动生物力学目前已形成从实验室精准测量到现场生态化监测的多层次方法体系，运动表现提升、运动损伤预防、运动装备研发三类应用场景呈现深度交叉融合的发展趋势。但现有研究仍存在以下局限：第一，生态效度与测量精度难以兼顾，现场监测数据的可靠性仍需提高；第二，群体层面的研究结论难以覆盖个体差异，普适性指导的适配性较低；第三，运动生物力学参数与运动损伤、运动表现之间的因果关系尚未得到充分验证，多数研究仍停留在相关性分析层面[19]。三者共同构成了制约研究成果向实践转化的核心瓶颈。

后续研究可围绕个体化建模、可解释性人工智能、严谨因果推断三个核心方向完善方法体系，结合可穿戴、低负荷测量技术的支撑，进一步拓展学科在“健康中国”战略实施、竞技体育科学化发展中的应用场景，提升实践指导的精准性。

参考文献

顾耀东, 孙冬, 梅齐昌. 大数据和人工智能背景下运动鞋生物力学研发思路及启示[J]. 上海体育学院学报, 2021, 45(2): 64.

刘程林, 郝卫亚, 霍波. 运动生物力学发展现状及挑战[J]. 力学进展, 2023, 53(1).

唐刚, 王建. 人体运动力学分析方法的回顾与展望[J]. 生物医学工程学进展, 2023, 44(1).

黄泽. 人工智能视角下生物力学对运动力量训练的研究分析[J]. 医用生物力学, 2024, 39(1).

白啸天, 霍洪峰. 基于运动生物力学的运动鞋功能研究进展[J]. 皮革科学与工程, 2023, 33(5).

王力. 基于运动生物力学特征的足球鞋研究综述[J]. 中国皮革, 2024, 53(4).

孟宪梅, 杨建强, 裴子文, 陈建. 慢性踝关节不稳患者下肢肌肉激活特征研究现状[J]. 中国康复理论与实践, 2018, 24(6).

覃华生, 潘玮敏, 李然, 李新通. 慢性踝关节不稳的运动康复: 研究现状与特点[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(4).

蔡菊, 华世民, 石杰传, 韦伟南. 太极云手在高校体育课堂的教学启示[J]. 体育科技文献通报, 2022, 30(4).

王腾. 运动生物力学在竞技体育运动项目中的研究进展[J]. 内江科技, 2025(1).

- 武大伟, 王新. 体育高考原地推铅球技术生物力学特征研究[J]. 体育学研究, 2023, 37(5).
- 刘宇, 傅维杰, 王立平, 等. 运动生物力学研究方法与技术的新进展[J]. 体育科学, 2016, 36(1): 70-79.
- 王俊清, 王新, 刘宇. 基于深度学习的人体姿态估计在运动生物力学中的应用: 挑战与展望[J]. 上海体育学院学报, 2022, 46(1): 42-53.
- 王乐军, 陆爱云, 龚铭新. 高密度表面肌电技术的发展及其在体育科学中的应用[J]. 北京体育大学学报, 2014, 37(11): 78-83+144.
- 李立, 周平, 霍洪峰. 三种便携式足底压力测试系统评估步态时地面反力的一致性研究[J]. 中国运动医学杂志, 2019, 38(11): 953-959.
- 郝卫亚. 人体运动生物力学仿真建模的研究进展与挑战[J]. 中国运动医学杂志, 2020, 39(7): 561-569.
- 傅维杰, 刘宇. 运动生物力学测试的生态学效度: 现状与挑战[J]. 体育科学, 2015, 35(4): 88-95.
- 李翰君, 曲毅, 刘卉. 无标记运动捕捉系统在运动生物力学中的应用与验证[J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1): 55.
- 曲毅, 刘卉, 于冰. 前交叉韧带损伤的神经肌肉危险因素研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2019, 38(7): 604-610.

说明: 1. 总文字复制比: 被检测文献总重复字符数在总字符数中所占的比例

2. 去除引用文献复制比: 去除系统识别为引用的文献后, 计算出来的重合字符数在总字符数中所占的比例

3. 去除本人文献复制比: 去除系统识别为作者本人其他文献后, 计算出来的重合字符数在总字符数中所占的比例

4. 单篇最大文字复制比: 被检测文献与所有相似文献比对后, 重合字符数占总字符数比例最大的那一篇文献的文字复制比

5. 复制比按照“四舍五入”规则, 保留1位小数; 若您的文献经查重检测, 复制比结果为0, 表示未发现重复内容, 或可能存在的个别重复内容较少不足以作为判断依据

6. **红色文字**表示文字复制部分; **绿色文字**表示引用部分(包括系统自动识别为引用的部分); **棕灰色文字**表示系统依据作者姓名识别的本人其他文献部分

7. 系统依据您选择的检测类型(或检测方式)、比对截止日期(或发表日期)等生成本报告

8. 知网个人查重唯一官方网站: <https://cx.cnki.net>