

体育器材动态力学性能实时监测技术探索

赵鑫泽 周 宽 季献波
浙江省质量科学研究院 浙江 杭州 310000

摘要: 本文聚焦于体育器材动态力学性能的实时监测技术,系统梳理了当前主流传感技术(包括应变片、光纤光栅、压电材料、惯性测量单元及柔性电子等)在体育器材中的应用原理与适用场景;深入探讨了多源异构数据融合、边缘计算与轻量化模型部署、无线低功耗传输等关键技术挑战;构建了“感知—传输—处理—反馈”一体化的实时监测系统架构;并通过网球拍、滑雪板、自行车车架等典型器材案例,验证了该技术在提升运动表现分析精度、优化器材设计迭代、预防运动损伤及延长器材使用寿命等方面的显著价值。最后,本文展望了人工智能深度赋能、数字孪生技术融合及标准化体系建设等未来发展方向,旨在为智能体育装备的研发与科学化训练提供理论支撑与技术路径。

关键词: 体育器材; 动态力学性能; 实时监测; 智能传感; 数据融合

引言

体育器材是连接运动员与运动项目的核心,其力学性能关乎运动效率、技术发挥和人身安全。从职业赛场到大众健身,碳纤维自行车、滑雪板、网球拍等对器材性能都有精准要求,凸显了对器材性能精准、动态评估的迫切性。长期以来,体育器材性能评估主要依赖实验室静态或准静态测试,虽能获取基本力学参数,却无法捕捉高速、复杂载荷下的瞬态响应特性。如网球拍击球、滑雪板高速转弯时的关键信息,若不能实时捕获解析,将制约器材性能优化与运动员潜能释放。近年来,物联网、微机电系统、柔性电子及人工智能等技术发展,为体育器材智能化与实时监测提供技术基础。在器材嵌入传感器网络,结合数据处理与无线通信技术,实现动态力学性能连续、无感、高保真监测,成为研究热点。

1 体育器材动态力学行为特征与监测需求

1.1 力学行为特征

体育器材的动态力学性能是指其在真实运动过程中,对外部动态载荷(如冲击、振动、周期性交变力)的响应特性。这种响应具有高度的时空非线性和环境依赖性。许多运动动作,如击球、起跳或落地,持续时间往往仅有几毫秒,却会产生高达数千甚至上万牛顿的瞬时冲击力,并伴随高频振动。高尔夫球杆在击球瞬间的峰值加速度可超过10,000g,这种极端工况对监测系统的采样率和动态范围提出了极高要求^[1]。与此同时,器材的力学响应并非孤立存在,而是与热学、声学等物理场深度耦合。例如,剧烈摩擦可能导致局部温升,进而改变复合材料的刚度;结构内部微裂纹扩展则会释放弹性波,形成可被捕捉的声发射信号。此外,现代高端体

育器材广泛采用碳纤维增强树脂基复合材料等先进材料,其力学性能不仅表现出显著的方向依赖性(各向异性),在大变形条件下还呈现出明显的非线性特征。更不容忽视的是,户外运动环境中的温度、湿度变化会直接影响聚合物基体的力学行为,使得同一器材在不同气候条件下的动态响应存在差异。

1.2 监测需求

正是由于上述复杂性,对体育器材动态力学性能的实时监测必须满足一系列严苛的技术指标。监测系统首先需要具备高时空分辨率,以确保能够完整记录瞬态事件的全过程并精确定位载荷作用区域。其次,传感器必须拥有宽广的动态测量范围和极高的灵敏度,既要能感知微米级的形变,又要能承受极端冲击而不失效。在工程实现层面,传感单元必须足够微型化、轻量化,并能以无感方式集成于器材结构之中,避免破坏原有的空气动力学外形、重量分布或运动员的手感体验。此外,系统还需具备良好的环境鲁棒性,能够在雨雪、沙尘、强电磁干扰等复杂户外条件下长期稳定工作。最后,考虑到便携性与用户体验,整个监测装置必须实现低功耗设计,支持长时间连续运行,甚至探索自供能的可能性。

2 核心传感技术及其在体育器材中的应用

为满足上述严苛需求,多种先进的传感技术被引入体育器材监测领域。

2.1 应变片

作为最经典的力学传感器,电阻应变片通过测量导体或半导体材料在受力变形时的电阻变化来推算应变。其优势在于技术成熟、成本低廉、精度高。在自行车车架、赛艇桨叶等刚性结构上粘贴应变片阵列,可有效监

测骑行或划桨过程中的应力分布与疲劳累积^[2]。然而,传统金属箔式应变片体积较大、易受电磁干扰,且需要复杂的惠斯通电桥电路,限制了其在微型化和无线化方面的应用。近年来,基于MEMS工艺的硅基应变片和印刷电子应变片的发展,为其在更复杂场景的应用开辟了新路径。

2.2 光纤布拉格光栅(FBG)

FBG传感器是将光栅刻写在光纤纤芯中,当外界的应变或温度发生变化时,反射光的中心波长会发生漂移。通过解调波长变化即可反演物理量。FBG具有抗电磁干扰、体积小(直径约125 μm)、可分布式测量(一根光纤上可串联多个光栅)、耐腐蚀等突出优点。将其嵌入碳纤维复合材料制成的网球拍框、滑雪板或曲棍球杆内部,可以在不破坏结构完整性的前提下,实现对内部应变场的准分布式、高精度监测,尤其适合监测复合材料层间的应力传递与潜在损伤。

2.3 压电材料

压电材料(如PZT陶瓷、PVDF薄膜)能在机械应力作用下产生电荷(正压电效应),反之亦然。利用正压电效应,可以将其作为自供能的动态力/加速度传感器。PVDF薄膜因其柔韧性好、声阻抗与人体组织接近,常被用于制作智能鞋垫,监测跑步时的足底压力分布与冲击力。而刚性的PZT元件则可用于监测球拍、球棒的高频振动特性。压电传感器的输出信号通常较弱,且对静态载荷不敏感,更适合捕捉动态冲击事件。

2.4 惯性测量单元(IMU)

IMU集成了三轴加速度计、三轴陀螺仪,有时还包括磁力计,能够全面描述物体的线性加速度和角速度。得益于MEMS技术的成熟,现代IMU已做到芯片级尺寸和极低功耗。在体育领域,IMU被广泛应用于运动姿态捕捉。将其嵌入球拍手柄、滑雪板固定器或自行车头盔,可以实时获取器材的空间运动学信息(如挥拍轨迹、滑雪板倾角、自行车颠簸频率),进而间接推断其动力学状态。虽然IMU不直接测量力或应变,但其提供的运动学数据是构建动力学模型、反演内部载荷的关键输入。

2.5 柔性电子与新兴传感技术

柔性电子技术的发展催生了新一代可拉伸、可共形贴附的传感器。例如,基于液态金属或导电聚合物的柔性应变传感器,可以像“电子皮肤”一样贴合在曲面器材(如足球、篮球)表面,监测其在踢、拍打过程中的局部形变^[3]。此外,声发射(AE)技术通过捕捉材料内部微裂纹扩展或纤维断裂时释放的弹性波,可实现对复

合材料器材早期损伤的无损在线诊断。这些新兴技术为解决传统刚性传感器难以适配复杂曲面和柔性结构的问题提供了创新方案。

3 实时监测关键技术及关键技术

3.1 技术架构

体育器材动态力学性能实时监测系统的整体架构采用“感知—传输—处理—应用”四层一体化设计:感知层通过嵌入式多源异构传感器(如FBG、IMU、柔性应变片等)无感采集器材在真实运动中的应变、加速度、振动等动态力学信号,并经信号调理与边缘预处理;传输层利用蓝牙低功耗(BLE)等短距无线技术将数据传至网关,再通过Wi-Fi或蜂窝网络接入云端,同时结合能量管理策略保障长期运行;处理层采用“边缘-云协同”模式,边缘端执行毫秒级实时推理(如动作识别、异常预警),云端则负责模型训练、数字孪生仿真与多源数据深度融合;最终,应用层面向运动员、教练、制造商等不同角色,提供运动表现分析、技战术优化、预测性维护及产品迭代支持等智能化服务,形成从物理感知到决策反馈的完整闭环。

3.2 关键技术

3.2.1 多源异构数据融合

单一传感器往往只能提供有限维度的信息。例如,仅靠IMU无法得知球拍弦床的张力损失,仅靠应变片也无法还原完整的空间运动轨迹。因此,必须采用多源异构数据融合技术。这通常涉及两个层面:(1)数据级融合:对来自不同传感器的原始数据进行时间同步、坐标对齐和滤波去噪,形成统一、高维的数据流。(2)特征级/决策级融合:利用机器学习模型(如卡尔曼滤波、支持向量机、深度神经网络)从融合后的数据中提取深层特征,或直接对器材状态(如健康度、性能等级)做出综合判断^[4]。例如,结合FBG测得的应变数据和IMU测得的加速度数据,可以更准确地重构网球拍在击球瞬间的三维动态变形场。

3.2.2 边缘计算与轻量化模型部署

将海量原始数据全部上传至云端进行处理,会带来巨大的带宽压力和延迟,无法满足“实时”反馈的需求。边缘计算(Edge Computing)将部分计算任务下沉到靠近数据源的终端设备(如嵌入在器材中的微控制器)。在此基础上,需要开发轻量化的AI模型(如MobileNet、TinyML),使其能在资源受限的嵌入式平台上高效运行,实现本地化的实时分析与预警。例如,在滑雪板上部署一个轻量级CNN模型,可实时识别危险的扭转模式并发出警报。

3.2.3 无线低功耗传输与能源管理

可靠的无线通信是实现数据远程回传和用户交互的基础。蓝牙低功耗 (BLE)、Zigbee、LoRa 等协议因其低功耗特性成为主流选择。同时,高效的能源管理策略至关重要,包括采用低功耗硬件设计、动态调整采样率、利用压电或太阳能等能量收集技术为系统供电,以最大限度延长设备的使用寿命。

4 典型应用场景与案例分析

4.1 网球拍智能监测系统

在高端网球拍手柄内部集成微型IMU和若干FBG传感器。系统可实时记录每次击球的挥拍速度、拍面角度、击球点位置以及拍框的动态应变。通过云端AI模型分析,不仅能为运动员提供详细的技战术报告(如正手击球的发力效率),还能评估球拍弦床的老化程度和拍框的潜在损伤风险,提醒用户及时维护或更换。

4.2 自行车车架健康监测

在碳纤维自行车车架的关键受力部位(如五通、后叉)预埋FBG传感网络。在日常骑行中,系统持续监测车架的应变历史。通过分析累积的疲劳损伤,可以预测车架的剩余寿命,并在达到安全阈值前向骑手发出预警,有效预防因车架突然断裂导致的严重事故。

4.3 智能滑雪板

在滑雪板板芯嵌入柔性应变传感器阵列和IMU。系统能够实时感知滑雪者不同雪况下的转弯半径、板刃压力分布以及板体的扭转刚度。这些数据不仅可以帮助滑雪者改进技术,还可以反馈给制造商,用于优化下一代滑雪板的设计,使其在特定场景下(如粉雪、冰面)拥有更佳的动态性能。

5 挑战与未来展望

尽管前景广阔,体育器材动态力学性能实时监测技术仍面临诸多挑战:一是传感器长期可靠性与校准:嵌入式传感器在长期使用和恶劣环境下可能发生漂移或失效,如何实现自校准或免校准是一个难题。二是成本与商业化平衡:高精度传感器和复杂的数据处理系统成本高昂,如何降低成本以惠及大众市场是推广的关键。三是数据隐私与安全:运动员的生物力学数据属于敏感信

息,需要建立完善的数据安全和隐私保护机制。展望未来,该领域将朝着以下方向发展:(1)AI深度赋能:利用深度学习(特别是图神经网络、Transformer)从海量监测数据中挖掘更深层次的规律,实现从“状态监测”到“性能预测”和“智能优化”的跨越。(2)数字孪生(DigitalTwin)融合:为每一件高端体育器材构建一个高保真的虚拟数字孪生体,实时同步其物理状态。教练和工程师可以在虚拟空间中进行仿真、测试和优化,指导现实世界的训练和设计。(3)标准化与生态构建:推动传感器接口、数据格式、通信协议的行业标准化,构建开放的软硬件生态,促进不同品牌、不同类型器材监测数据的互联互通,催生新的体育科技服务模式。

6 结语

体育器材动态力学性能的实时监测技术,正从实验室走向赛场与日常生活。它不仅是提升竞技体育科学化水平的利器,也是保障大众健身安全、推动体育装备制造产业升级的核心驱动力。通过融合先进的智能传感、边缘计算与人工智能技术,我们能够以前所未有的深度和广度理解人-器材-环境这一复杂系统的交互机理。尽管在可靠性、成本和标准化等方面仍需攻坚克难,但随着技术的不断成熟与生态的逐步完善,一个万物互联、数据驱动的智能体育新时代已然开启。未来的体育器材将不再是冰冷的工具,而是能够感知、思考并与使用者协同进化的智能伙伴。

参考文献

- [1]谢华.体育器材智能化:驱动体育课后服务高质量实施的新引擎[J].文体用品与科技,2025,(06):121-123.
- [2]于海彬.新型智能体育器材在学校训练中的应用现状与优化路径[J].文体用品与科技,2025,(19):127-129.
- [3]周潘一郎,王京晶.智能科技在社区体育器材应用中的现状与优化策略研究[C]//中国班迪协会(CBF).2025年第一届中国智慧体育科学大会论文集(上).宁波大学;浙江诺威检测认证有限公司,2025:26-31.
- [4]武斌.智慧体育器材的合理应用探析[J].文体用品与科技,2024,(17):190-192.