

面向运动科学应用的可穿戴柔性肌肉应力监测设备设计与初步验证

毛纤雨¹ 陈泽睿² 唐嘉辰²

1. 中南大学体育教研部, 湖南 长沙 410083

2. 中南大学邓迪国际学院, 湖南 长沙 410083

[摘要]针对运动训练、康复评估等领域对肌肉发力状态实时、可视化监控的迫切需求,本研究设计并开发了一套面向体育科学应用的可穿戴柔性肌肉应力监测系统。研究核心包括:研制了以 Ecoflex 为基底、炭黑/石墨烯为导电材料的柔性应变传感器,经测试具备良好线性度、约 60ms 的快速响应及可靠的循环稳定性,能满足动态体育动作的监测要求;依据运动解剖学原理,设计了 4×3 传感阵列布局与贴合人体形态的绑带结构;完成了从多通道信号调理、嵌入式处理到无线传输的硬件系统集成,并实现了将传感器数据实时转化为肌肉应力热力图的可视化方法。本研究完成了核心传感单元的制备与验证,更构建了完整的系统解决方案,为力量训练监控、技术动作分析与运动康复评估提供了直观、量化的新型工具,具备明确的体育应用前景。

[关键词]可穿戴设备; 柔性应变传感器; 肌肉应力监测; 运动生物力学; 训练监控; 运动康复

DOI: 10.33142/jscs.v6i2.19298

中图分类号: R318.6

文献标识码: A

Design and Preliminary Validation of Wearable Flexible Muscle Stress Monitoring Equipment for Sports Science Applications

MAO Xianyu¹, CHEN Zerui², TANG Jiachen²

1. Department of Physical Education and Research, Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China

2. Dundee International Institute of Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China

Abstract: In response to the urgent need for real-time and visual monitoring of muscle force state in fields such as sports training and rehabilitation evaluation, this study designed and developed a wearable flexible muscle stress monitoring system for sports science applications. The research core includes the development of a flexible strain sensor based on Ecoflex and using carbon black/graphene as conductive materials. It has been tested to have good linearity, a fast response of about 60ms, and reliable cyclic stability, which can meet the monitoring requirements of dynamic sports movements; Based on the principles of sports anatomy, a 4 × 3 sensing array layout and a strap structure that conforms to human body shape were designed; We have completed the hardware system integration from multi-channel signal conditioning, embedded processing to wireless transmission, and implemented a visualization method for real-time conversion of sensor data into muscle stress heat maps. This study has completed the preparation and verification of the core sensing unit, and has also constructed a complete system solution, providing an intuitive and quantifiable new tool for strength training monitoring, technical action analysis, and sports rehabilitation evaluation, with clear prospects for sports applications.

Keywords: wearable devices; flexible strain sensor; muscle stress monitoring; sports biomechanics; training monitoring; sports rehabilitation

精准、实时地量化评估运动中的肌肉功能,是提升竞技体育表现、落实“体卫融合”政策、实现科学健身与康复的核心基础。在竞技体育领域,优化技术动作、预防损伤需要客观诊断发力模式与肌肉状态;在大众健康领域,制定个性化运动方案依赖于对肌肉活动的可靠监控。然而,现有主流技术难以满足这一需求。表面肌电信号易受干扰,且与肌肉力学输出的关系复杂,无法提供直观的“发力”视觉反馈;光学动作捕捉系统昂贵且受环境限制,难以用于日常训练;而传统的力学传感器(如图1所示测力台、手柄传感器)通常设备笨重、集成度低,且测量维度单一(多测量合外力或力矩),无法对特定肌肉的应力分布进行无损、分布式、多维度的实时监测。因此,教练、康复师及运动者仍缺乏一种能够实时、直观、无感地获取肌肉应力大小、空间分布及动态变化的有效工具,这已成为制

约训练科学化与健康管理精准化的关键瓶颈。

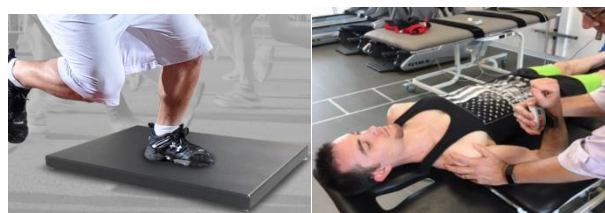


图1 测力台、手柄传感器

近年来,柔性电子技术为解决上述问题提供了新的可能。柔性应变传感器(如图2)能像“电子皮肤”一样与人体自然贴合,直接将肌肉的机械形变转化为电信号,在穿戴舒适性与多维度力学感知方面展现出独特优势。基于此,本研究旨在探索并设计一种基于柔性应变传感的新型可穿戴监测设备,通过将其与体育科学的具体应用场景深度结合,

以期弥补现有技术鸿沟，推动肌肉功能监测向实时化、可视化、普惠化方向发展，具有明确的研究价值与应用前景。

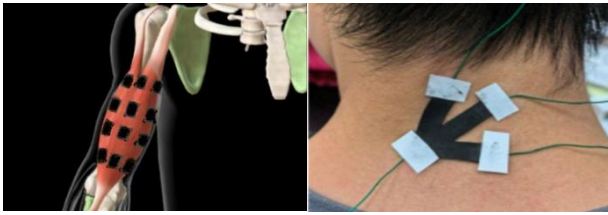


图 2 柔性应变传感器

1 研究目的

为此，本研究旨在设计并初步验证一套面向运动科学应用的可穿戴柔性肌肉应力监测系统，具体目标如下：研制高性能柔性应变传感单元，验证其在响应速度、线性度与循环稳定性方面的性能，满足动态运动监测需求；提出面向典型肌群（以肱二头肌为例）的系统化设计方案，涵盖传感阵列布局、信号采集传输与肌肉应力热力图可视化全链路；规划系统验证路径并分析其在训练监控、康复评估等场景中的应用潜力，为后续实际应用提供依据。本研究通过将柔性传感、嵌入式系统与运动信息可视化相结合，致力于推动肌肉功能监测向实时化、可视化、可穿戴化方向发展，为体育科学、康复工程及大众健身提供一种新型、实用的力学状态监测工具。

2 文献综述

2.1 基于技术路径分类的研究现状评述

围绕肌肉运动监测的研究主要遵循四条技术路径，其在实现“肌肉应力直接可视化”这一核心目标上均存在固

有局限。在表面肌电技术路径上以 sEMG 为代表，通过检测肌肉电活动进行功能评估。尽管在临床康复与运动科学中广泛应用（如中科院柔性 sEMG 传感器），但其本质监测的是神经驱动产生的电信号。该信号与肌肉实际产生的机械应力之间需经过复杂的生理-力学转换，无法建立直接的、量化的对应关系，因此难以实现“发力大小”的可视化映射，且易受皮下脂肪厚度、皮肤湿度等因素干扰；代谢与光学监测路径中以近红外光谱等技术为核心，典型如美国加州大学伯克利分校及荷兰 Artinis 公司的肌氧监测系统。该路径擅长于评估肌肉的代谢状态（如氧合水平、血流量），为耐力训练提供重要指标。然而，其监测目标为生化代谢产物，完全无法直接捕获肌肉的机械形变与应力，故不具备力学可视化的基础；以及惯性传感与动作识别路径：基于惯性测量单元结合机器学习算法（如 CNN、HMM），在动作模式分类上已实现高精度。此路径的核心贡献在于“动作识别”，能够判断“身体在做什么运动”，但传感器不与被测肌肉直接力学耦合，无法感知和呈现肌肉内部的应力分布与变化；柔性应变传感作为最直接感知机械形变的技术，在原理上最契合“应力可视化”的需求。然而，当前绝大多数研究聚焦于材料科学层面的性能优化（如提升灵敏度、拉伸率），存在“重材料，轻系统”的明显倾向。具体表现为：研究多停留于单一传感器性能表征，缺乏面向大肌群多维度监测的阵列化工程设计与验证；未能完成从敏感材料、信号电路、处理算法到体育专用可视化反馈的端到端系统集成；其验证场景也多局限于实验室的静态或简单机械拉伸，与复杂、动态的真实体育动作脱节。

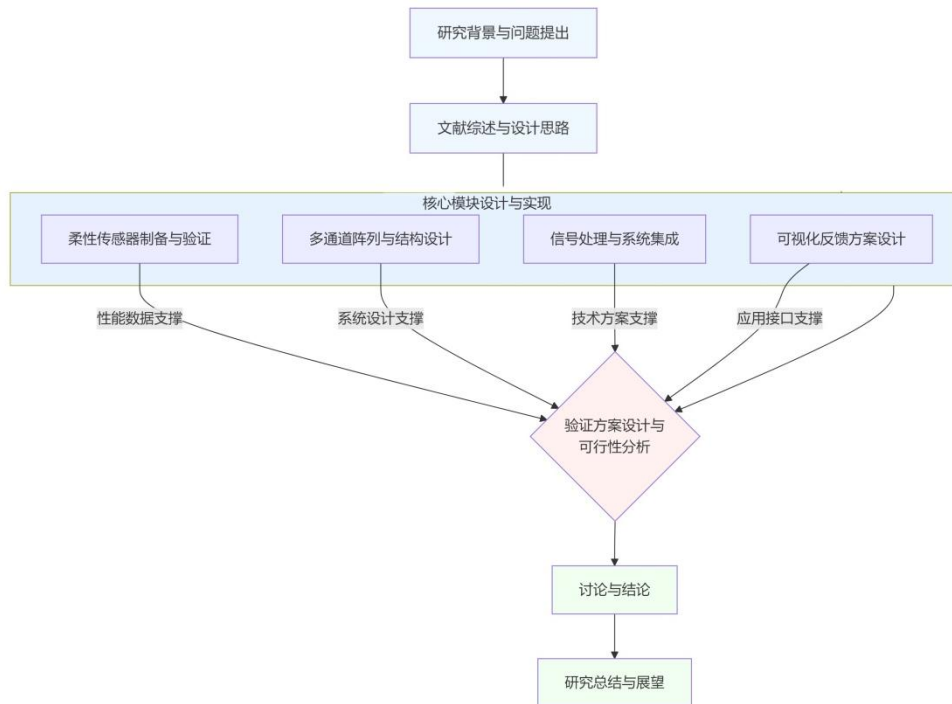


图 3 结构路线图

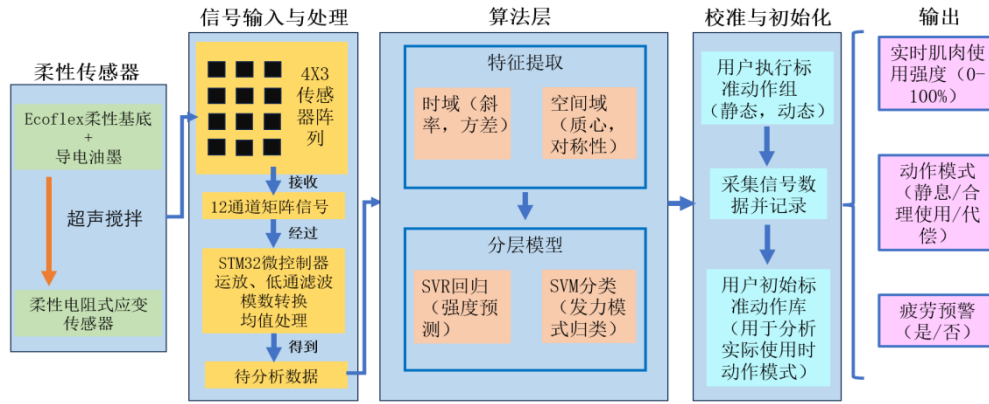


图 4 系统组成与工作流程框图

2.2 本研究总体设计思路

综上，现有技术或无法直接测量力学信号，或虽具备潜力但未能转化为面向体育实践的可用工具。本研究旨在精准填补“从先进的柔性传感材料，到面向体育应用的专用监测系统”之间的关键空白。本研究以多通道柔性应变传感阵列作为直接感知单元，进行从解剖学驱动的阵列布局、低噪声硬件设计、嵌入式实时处理到肌肉应力热力图可视化反馈的全链路、系统化设计与集成。研究不仅关注传感器单元本身的性能，更着重解决其在动态体育应用中的工程实现问题，并通过设计贴近体育场景的验证方案，探索将材料潜力转化为切实解决“肌肉应力直接可视化”这一体育科学需求的可行路径。

3 面向体育监测需求的设备设计与实现

3.1 总体设计

为满足体育训练与康复监控场景对肌肉应力监测的实用需求，本系统设计确立了明确的量化指标，以确保其在动态运动环境下的可靠性、舒适性与数据有效性。在佩戴体验上，设备整体穿戴重量需低于 50g，传感器区域厚度不超过 2mm，以实现真正的“无感”佩戴；绑带拉伸率不低于 150%，并具备快拆调节结构与高于 40%的透气率，从而在剧烈活动中保持稳定贴合、透气耐汗，最大限度减少对运动的干扰。在核心测量性能上，采用 4×3 传感器网格布局以覆盖目标肌群并解析应力分布梯度，传感器拉伸响应时间不超过 60ms，释放恢复时间不超过 80ms，系统整体信号链延迟（含采集、调理、AD 转换、嵌入式预处理）控制在 50ms 以内，以精准捕捉快速发力的瞬态特征；同时，设备需在 0%~30%的有效应变范围内保持优异的线性度 ($R^2 > 0.95$) 与循环稳定性（1000 次循环后电阻漂移 < 10%），保障数据的准确与可靠。该检测范围覆盖人体骨骼肌静息至极限发力的形变区间，符合运动解剖生物力学特性。在系统层面，设备在典型工作模式（采样率 $\geq 100\text{Hz}$ ，蓝牙实时传输）下的连续工作时间不低于 6h，无线连接在 10m 距离内的数据包丢失率低于 1%，且从数据采集到移动端热力图显示的端到端延迟（含硬件处

理、蓝牙传输、移动端可视化渲染）小于 150ms，以此确保其在真实体育应用场景中能够提供稳定、实时的长效监测与生物反馈。这些指标共同构成了设备设计的量化目标，将直接决定其在力量训练监控、技术动作分析与康复进程评估中的实用价值。

3.2 柔性应变传感器的制备与性能验证

电阻式柔性应变传感器具有制造成本较低，灵敏度较高，在不同形变量与形变速度下稳定性强，响应速度较快的优点。通过对传感器拉伸过程中电阻变化的信号处理，能够得到相应肌肉发力的情况，并做出所对应的反馈。柔性应变传感器阵列由多个传感器单元与导线排布组成，对于不同的肌肉部位，采取不同的阵列来获取对应的信号内容。

3.3 多通道阵列与穿戴结构设计

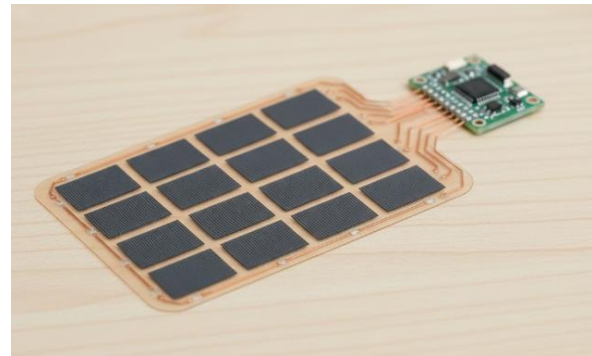


图 5 柔感设备穿戴结构设计

(1) 柔性基底制备：

将砂纸附着在深度为 1mm 的容器中，使得干燥后的 Ecoflex 柔性基底的深度约为 1mm。然后将 Ecoflex 的 A 胶和 B 胶以 1:1 的比重混合和搅拌均匀后倒入到贴有砂纸的容器中，在 55°C 干燥 10min 后，将柔性膜从容器中剥离。

(2) 导电油墨涂覆：

将具有微坑结构的条带状的柔性基底浸入到制备好的 CB/Gr 导电油墨中搅拌 3h，使得导电纳米复合材料粘附在柔性膜上。随后，将混合物在超声振动器中进行

30min 的超声处理，以破坏分子间作用力，从而得到均匀涂覆 CB/Gr 导电油墨的柔性基底。

(3) 烘箱固化与电极连接：

将搅拌后的柔性膜放入到干燥箱中，在 55°C 下干燥 10min，以确保无水乙醇完全蒸发。从而获得粘附性良好的导电层。最后，利用铜线和导电银浆在导电薄膜的两端引出电极，就得到了高灵敏度和宽传感范围的柔性应变传感器。

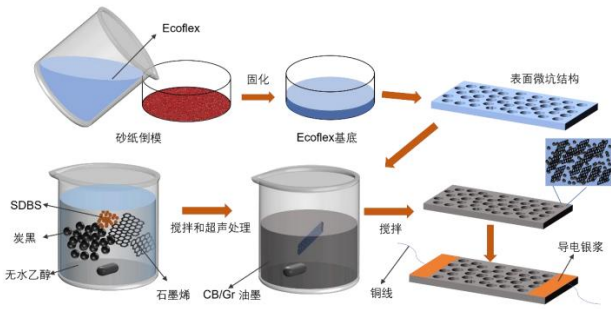


图 6 柔性应变传感器制备流程

3.4 信号处理与系统集成方案

在实验中，我们选用 WNMC400 直线电机及其控制设备进行对电阻式柔性应变传感器的各项数据的测量。

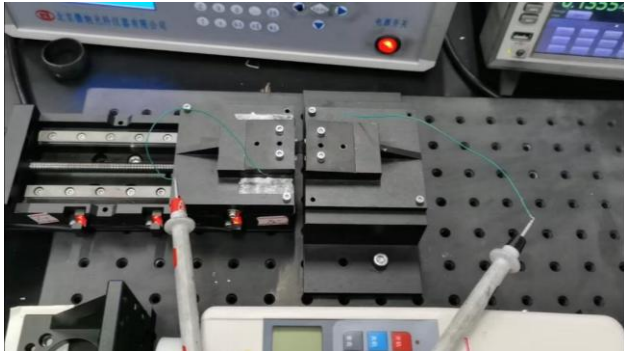


图 7 利用 WNMC400 电机对柔性应变传感器性能测量图

将传感器固定在 WNMC400 电机驱动控制器上并设定一个固定的拉伸长度，传感器两端导线连接数字万用表（选用 DMM6500）并接入电脑从而采集传输数据。进行三个层面的表征测试：机械性能（确保性能仍然良好情况下的拉伸极限），反应时间（电阻变化与拉伸间的迟滞性），稳定性（在不同频率拉伸下的性能变化）。使用配套的实时图像生成软件将传感器数据处理为图像，最终通过分析图像反映传感器的电阻在拉伸过程中随时间变化的情况。

机械性能通常以应力和应变的关系得出，由这一项测试，我们可以得到传感器能够确保正常工作的应变范围。对传感器的应变范围计算公式为：

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \text{ 其中 } \varepsilon \text{ 为应变, } l \text{ 为拉伸后长度, } l_0 \text{ 为原始长度}$$

在正常工作应变范围内，传感器的电阻变化曲线应当保持稳定，所以我们逐步增大传感器的拉伸长度进行测试。直到传感器的电阻变化曲线出现明显波动的情况下，代表

该应变已经超出传感器的正常工作应变范围。由此，本传感器能够精准地捕捉肌肉收缩（纵向缩短）与舒张过程的形变信号，适配运动场景下的动力学监测需求，为量化训练中的发力强度梯度提供了可靠的测量基础。

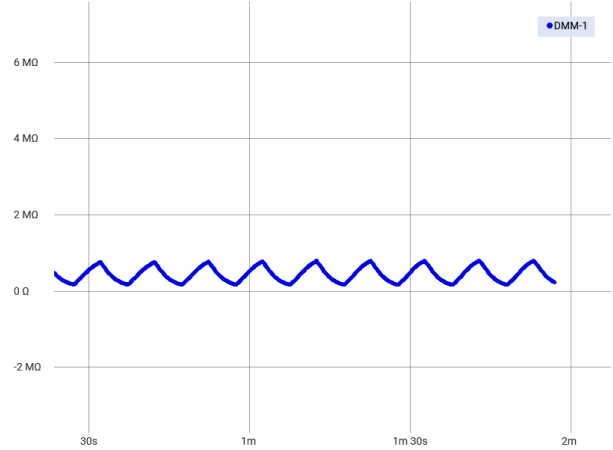


图 8 柔性传感器抗拉伸性能数据图

反应时间通过数字万用表的监测，测试测得传感器的拉伸响应时间约为 60ms，释放恢复时间约为 80ms。这一指标对于体育监测至关重要。许多爆发式体育动作（如投掷、挥拍、跳跃）的核心发力阶段持续时间通常在 100~300ms 之间。传感器小于 100ms 的响应延迟，确保了其能够准确捕捉发力曲线中的快速上升沿、峰值时刻及放松阶段，从而满足对动作技术进行实时分析与即时反馈的时序精度要求。

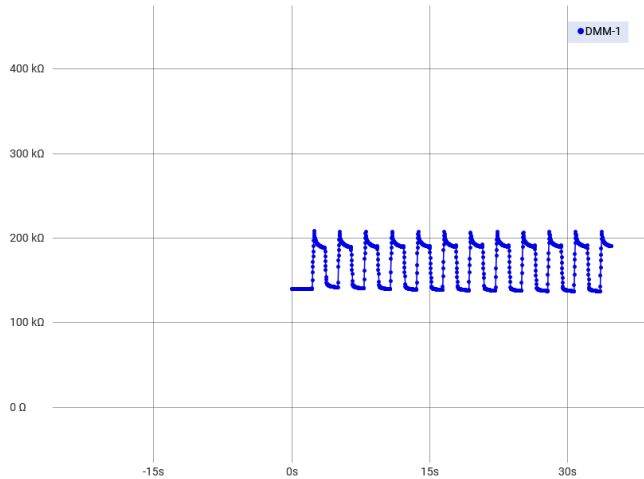


图 9 柔性传感器拉伸响应图

稳定性体现在不同拉伸频率下，传感器的电阻变化范围仍然近似相等。在机械性能中测试出的应变范围内，取一个合适的应变值，在同一次测试中多次改变拉伸的速度，然后获得在不同频率下的电阻变化区间数据，通过比对，发现区间数据变化很小，在指定应变范围内，传感器经历多次循环拉伸后，电阻基线保持稳定。这一特性意味着，在单次训练课中（通常包含数十至上百次重复动作），传

感器输出不会因自身疲劳而产生显著漂移,保证了同一训练单元内数据比较的有效性。这为监测重复性力量训练中的肌肉状态变化、评估疲劳出现点提供了稳定的信号基础。

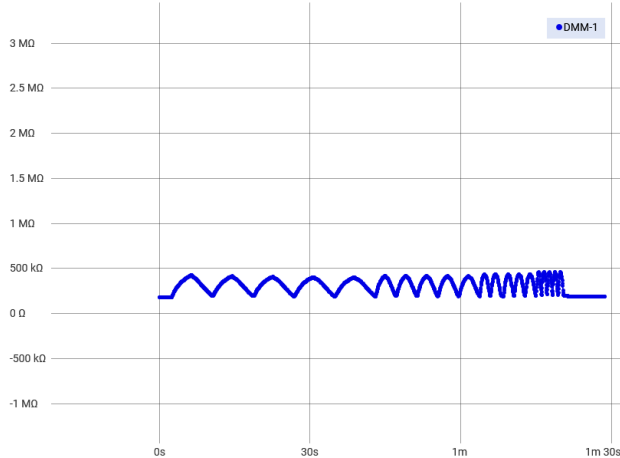


图 10 同拉伸速度下柔性应变传感器性能数据图

综上所述,本研究所制备的柔性应变传感器,在量程、速度与可靠性三个维度上,均具备了作为动态体育监测设备核心感知元件的关键技术条件。其性能并非仅为实验室指标,而是直接对应于解决体育科学中量化发力强度、分析动作时序、追踪重复训练表现等实际问题的能力。

3.5 多通道传感阵列与运动兼容性结构设计

模块化传感器布局:采用4纵×3横网格模板,通过3D打印制作柔性网格基板(材料:TPU或柔性PLA)。传感器单元(导电油墨涂覆的Ecoflex贴片)按人体力学解剖分布固定在基板上。纵向传感器(L1-L4)和横向传感器(T1-T3)基于肱二头肌长头和短头的体表投影,在弹性绑带上预置用于手动调节参考的定位标记。用户佩戴时需将绑带上的“长头标记点”对准肱二头肌外侧隆起最高点,“短头标记点”对准内侧肌腹中线。

外层材料采用弹性氨纶布料,其拉伸率达到150%,兼具弹性和耐用性。内层材料使用无纺布(克重70~80g/m²),保证透气性。且在无纺布的内侧粘合弹性线网,从而增强弹性。内层材料与外层材料之间使用医用级压敏胶粘合,保证材料相容性的同时防止人体电阻影响传感器测量;绑带整体采用单层复合结构,柔性传感器直接绑定在压敏胶与外层材料间,同时在制作工艺上采用非对称剪裁的工艺,使绑带内侧弧度贴合肱二头肌隆起形状,外侧平直减少运动束缚感。此外,在肘窝等没有传感器布置的关键区域开设蜂窝状透气孔,保证舒适度与透气性。

3.6 信号处理与系统集成设计

为实现对12通道传感器信号的高质量采集与处理,本系统采用“多路选通-信号调理-嵌入式处理”的集成设计方案,其核心是构建一条稳定、实时的数据流通道。

3.6.1 多通道选通与硬件架构

系统采用两片多路模拟开关(CD4051)对3×4传感

器阵列进行循环选通,由STM32微控制器控制,将多路模拟信号复用至单一处理链路,大幅简化了系统设计。电源模块使用低压差稳压器提供稳定5V供电。

3.6.2 模拟信号调理与采集

选通后的微弱信号经两级调理:首先由低噪声运放(如LM358)构成同相放大电路,提升信号幅值;随后经一阶RC低通滤波器滤除高频噪声。调理后的信号由16位高精度ADC(ADS1115)进行模数转换,并通过I²C总线传输至微控制器,确保了信号的精确数字化。

3.6.3 嵌入式处理与数据传输

STM32微控制器作为核心,协调通道选通、数据读取与预处理。其在固件中实现均值滤波等算法以平滑数据,并将处理后的数据通过低功耗蓝牙模块打包发送至移动终端,为后续可视化提供低延迟、可靠的数据流。

3.6.4 系统工作流程

系统工作遵循明确的数据流:肌肉形变→电阻变化→电压信号→多路选通→放大滤波→ADC转换→嵌入式预处理→无线传输。该设计确保了从物理信号到可分析数据的完整性与时效性,为满足体育监测的实时性要求奠定了硬件与底层软件基础。

3.7 数据可视化方法

在轻量级分析模型构建中,支持向量机(SVM)与支持向量回归(SVR)通过构建最优超平面(或超曲面)实现数据的高效划分或预测。主要分为SVM对肌肉发力模式分类和SVR:发力强度连续预测。

对于分类任务,SVM的核心在于针对线性可分数据寻找一个最大间隔超平面,使不同类别的数据点到该平面的距离最大化;而对于线性不可分数据,则借助核函数将数据映射到高维空间,从而在高维空间中实现线性可分。

数学表达:

超平面方程: $w^T x + b = 0$, 其中 w 为权重向量, b 为偏置。

优化目标:

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (1)$$

其中 C 为惩罚因子, ξ_i 为松弛变量,允许少量样本误分类。

核函数类型:

线性核: $K(x_i, x_j) = x_i^T x_j$ (计算量小,适合嵌入式设备)。

多项式核: $K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + c)^d$ (复杂度随阶数 d 增加)。

高斯核(RBF): $K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2)$ (需计算欧氏距离,资源消耗大)。

该模型以时域(均值、方差)和空间域(质心、对称性)特征作为输入,能够有效区分静息、握拳、举重等不

同发力动作以及疲劳等异常状态。在离线训练阶段,利用 MATLAB/Python 训练线性 SVM 模型,通过提取支持向量与权重参数并优化超参数,在分类精度与泛化能力间达成平衡。模型部署时,将支持向量与权重硬编码为常量数组嵌入 STM32 代码,通过实时计算特征向量与支持向量的内积输出分类结果。

而在发力强度连续预测任务中,支持向量回归(SVR)以总应力、峰值、变化率等为输入特征,目标是将肌肉发力强度映射至 0%~100% 的标度范围,为实时反馈或控制外骨骼设备提供依据。具体实现时,先对不同发力强度对应的特征向量进行标记,再通过离线训练构建线性 SVR 模型,以此实现对肌肉发力强度的精准预测。

3.7.1 软件与算法流程设计

轻量级分析模型在 STM32 上实现时,可从模型轻量化、计算加速和存储优化三方面提升性能并减少资源占用。模型轻量化上,优先选择线性核,避免如高斯核这类需指数运算的高维映射计算,有效减轻计算负担。同时,采用支持向量剪枝,通过缩减训练集规模保留对分类贡献大的向量,简化模型结构且不显著影响性能。计算加速方面,采用定点数运算,将权重与特征值量化为 Q15 等 Q 格式,用整数运算替代浮点运算,提升计算效率。借助 CMSIS - DSP 库的优化函数(如 arm_dot_prod_f32)加速向量内积计算。存储优化主要通过参数压缩实现,对权重 w 进行 8 位量化,可减少 75% 的存储空间,并且删除接近零的权重进行稀疏化处理,降低模型复杂度并进一步节省存储。通过这些措施,使得轻量级分析模型能在 STM32 上更高效运行。

对传感器阵列实时采集的肱二头肌发力数据,经预处理后提取时域与空间域特征将高维、冗余的传感器信号转化为低维。时域特征直接基于传感器信号的时间序列数据,反映肌肉发力的强度、速度与稳定性。对于窗口内单通道特征,提取所检测力的均值、方差、峰值和斜率(变化率),作为对肌肉发力的平均强度,稳定程度,速度和整体肌肉群的总发力强度的评价指标。空间域特征基于传感器阵列的二维分布(4×3),反映发力的空间分布特性。基于应力在阵列上的空间分布,通过公式计算应力质心的分布:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 x_{i,j} \cdot S_{i,j}}{\sum S_{i,j}}, \quad Y_c = \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 y_{i,j} \cdot S_{i,j}}{\sum S_{i,j}} \quad (2)$$

通过区域激活度(Regional Activation),计算各区域应力占比。

$$\text{Activation}_{\text{proximal}} = \frac{\sum_{\text{近端传感器}} S_i}{S_{\text{total}}} \quad (3)$$

通过均值、方差等时域特征,以及质心、对称性等空间域特征,将数据压缩为少数关键指标,降低后续分析的复杂度。

4 验证方案

在完成传感器单元性能验证的基础上,后续研究将开展系统级集成测试与效度验证,重点评估本系统在真实人体运动场景下的时序精度、信号稳定性以及与经典肌电信号的相关性。初步验证方案设计如下:

实验设计:招募 10~15 名具备基础运动经验的健康受试者,在可控实验室环境下,执行标准化的肘关节屈曲动作(如握拳、举重),同步采集本系统输出的应力信号与表面肌电信号。

验证指标与方法:围绕系统可靠性、一致性与应用性,设定以下四项核心验证指标,具体分析方法如表 1 所示。

表 1 分析方法

验证指标	如何验证
时序误差	用户动作关键事件点(如发力峰值)与模板的时间偏移量。
连续动作稳定性	用户连续多次执行同一动作时数据波动的标准差。
幅度匹配	同一动作下 EMG RMS 值与传感器电阻变化率的趋势相似性。
特征相似度	用户实时传感器数据与标准化动作库中模板数据的相似性度量

5 讨论

本研究所设计的可穿戴柔性肌肉应力监测设备,旨在从器件、系统、功能三个层面实现创新,以应对传统监测设备在体育应用中的痛点。

在器件层面,创新性地采用了炭黑/石墨烯基电阻式柔性应变传感器。该传感器以 Ecoflex 为基底并设计微坑结构,显著提升了导电油墨的附着性与灵敏度,在保证高拉伸度的同时解决了传统刚性传感器的穿戴不适问题。特别地,采用 4×3 网格阵列布局,纵向沿肌纤维方向捕捉主发力链的收缩梯度,横向则用于监测代偿动作引发的形变,从而实现了肌肉应力空间分布的多维度感知。

在系统层面,构建了“柔性传感-低功耗硬件-无线传输-轻量应用”的协同体系。传感器与采用非对称剪裁、蜂窝状透气孔设计的弹性绑带(拉伸率≥150%)集成,整体重量轻(<50g),实现了真正意义上的“无感穿戴”。通过模块化设计和手动定位标记,设备可快速适配肱二头肌、股四头肌等多个肌群,应用场景扩展性较单一监测部位的传统设备显著提升。硬件上选用低功耗 STM32 微控制器与 BLE 5.0 通信方案,确保了设备的便携性与稳定连接。

在功能与应用层面,开发了以数据可视化与智能交互为核心的小程序终端(如图 11)。系统能将传感器阵列数据实时转化为动态肌肉应力热力图与发力曲线,为用户提供直观、精准的视觉反馈,解决了传统设备反馈抽象、“通用建议”的痛点。通过构建“硬件采集-算法分析-可视化反馈-场景应用”的完整闭环,将专业的肌肉应力监测转化为易懂、易用的健康管理工具,有效提升了在健身训练、

运动康复等场景下的用户体验与训练效率。



图 11 小程序测试版

5.1 下一步研究

本研究已完成核心传感单元与系统方案的初步设计与验证。为使本设备从实验室原型转化为体育科学实践中有价值的工具，后续研究将重点围绕以下三个与体育实践紧密结合的方向展开：

- (1) 专项动作效率研究：在举重、投掷等典型动作中，同步采集系统信号与生物力学数据，分析肌肉应力分布与动作阶段、发力效率的关联，为技术优化提供新指标。
- (2) 纵向监控应用：利用设备的可穿戴特性，开展训练或康复周期内的连续监测，探索应力变化与疲劳积累、恢复进程及运动表现间的动态关系。
- (3) 工具化开发：集成数据采集与分析功能，开发

面向教练与康复师的轻量化软件模块，实现一键生成肌肉激活报告、对称性评估及风险预警，推动系统向实用工具转化。

6 结论

本研究针对运动科学中对肌肉应力进行实时、可视化监测的需求，系统性地完成了一项从核心器件到系统设计的探索性工作。首先，成功设计并制备了基于 Ecoflex 与炭黑/石墨烯的柔性应变传感器，其良好的线性响应、约 60ms 的快速动态性能及可靠的循环稳定性，为动态体育动作的应力监测奠定了感知基础。其次，面向典型肌群(以肱二头肌为例)，提出了基于运动解剖学的 4×3 传感阵列布局与人体工学绑带设计，并完成了从多通道信号调理、嵌入式处理到无线传输的完整系统方案设计，构建了“传感-处理-可视化”的技术链路。最后，规划了系统的实验验证路径，明确了其在力量训练监控、技术动作分析与康复进程评估等体育场景中的应用潜力。

本研究不仅实现了核心柔性传感单元的制备与性能验证，更形成了一套面向体育应用的系统性设计框架与验证思路，为后续开发实用化、可穿戴的肌肉力学状态监测工具提供了技术依据与可行性支撑，对推动体育工程学与训练科学的交叉融合具有积极意义。

[参考文献]

[1]Lu Z,Deng Y,Zhou X,et al.Highly Stretchable Conductor Inspired by Compliant Mechanism[J].Advanced Electronic Materials,2023(9):2300343.

[2]Xia J,He L,Lu Z,et al.High Performance Strain Sensor Based on Carbon Black-Graphene-Ecoflex for Human Health Monitoring and Vibration Signal Detection[J].ACS Applied Nano Materials,2023(6):19279-19289.

[3]Lu Z,Wang J,He L,et al.High-Performance Multidirectional Flexible Strain Sensor for Human Motion and Health Monitoring[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2024(16):41409-41420.

作者简介：毛纤雨（2001—），女，湖北宜昌人，硕士在读，中南大学，研究方向：体育教学与训练；陈泽睿（2005—），男，重庆人，本科在读，中南大学，研究方向：机械设计制造及其自动化；唐嘉辰（2005—），男，福建福州人，本科在读，中南大学，研究方向：柔性应变传感器。