

# 基于加速度传感器的大学生运动能量 消耗监测系统的设计与实现<sup>\*</sup>

罗奇<sup>1,2</sup> 何天宇<sup>3</sup>

(1.武汉体育学院 体育工程与信息技术学院 武汉 430079; 2.华中师范大学 教育信息技术学院 武汉 430079;  
3.武汉体育学院研究生院 武汉 430079)

**摘要:** 目前可穿戴计算在监控人体健康指标领域的应用日益广泛,对大学生运动能量消耗进行精准监测,对大学生制定科学的运动健身计划、改善身体健康状况等都具有重要意义。设计并实现了大学生运动能量消耗监控系统,同时提出了一种基于几何均值(GM)的运动能量消耗监测算法,并通过实验加以验证。该系统通过三维加速度传感器获得运动参数,采用GM算法得到运动能耗数据,并与不同运动类型的标准数据进行比较和分析,从而获得大学生运动差异及其改进建议,提高了大学生运动的标准性和安全性。

**关键词:** 加速传感器;运动能量消耗;运动处方;体质健康

**中图分类号:** TN98    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.3030

## Design and implementation of energy expenditure monitoring system for college students based on acceleration sensor

Luo Qi<sup>1,2</sup> He Tianyu<sup>3</sup>

(1.College of Sports Engineering and Information Technology, Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China;  
2.School of Educational Information Technology, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China;  
3.Graduate School, Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** wearable computing is widely used in the field of monitoring human health indicators, and monitoring energy consumption through acceleration sensors has broad application prospects. Accurate monitoring of college students' exercise energy consumption is of great significance to help college students formulate scientific exercise and fitness plans and improve their physical health. This paper designs and implements the college students' energy consumption monitoring system, and proposes a motion energy consumption monitoring algorithm based on geometric mean (GM), which is verified by experiments. The system obtains the motion parameters through the three-dimensional acceleration sensor, uses the GM algorithm to obtain the sports energy consumption data, and compares and analyzes the standard data of different sports types, so as to obtain the sports differences and suggestions for improvement of college students, and improve the standard and safety of college students' sports.

**Keywords:** acceleration sensor; energy expenditure; exercise prescription; physical health

## 0 引言

随着科技的不断发展,人们越来越重视身体健康,而我国大学生的平均身体素质却逐年下降,尤其是在耐力、力量、柔韧性等身体素质方面,大学的成绩甚至比高中生还要低。如何监测大学生的运动能量消耗,已成为我国专家学

者们关注的重要问题<sup>[1]</sup>。

向剑锋等<sup>[2]</sup>利用 Actigraph GT3X 加速度计对 80 名非体育院校男女大学生日常体力活动的能量消耗进行监测并建立能量消耗方程,根据其研究结果提出有必要增加大学生体力活动量,以达到增强学生体质的最终目标。蔡靖等<sup>[3]</sup>对 Android 智能手机 App 健身的自我监控功能进行研

收稿日期:2019-01-20

<sup>\*</sup> 基金项目:中国博士后科学基金(2015M580655)、湖北省自然科学基金计划项目(2017CFB560)、湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20144102)资助

究,实现了对运动能量的实时监控,为能量监测系统的研发提供了理论依据。刘丹松<sup>[4]</sup>针对大学生平躺、步行、跑步等 7 项日常体力活动能量消耗数据进行收集,构建了基于不同日常体力活动的能量消耗预测模型,为指导大学生通过体力活动实现目标活动量提供参考依据。修艳<sup>[5]</sup>利用加速度传感器对人体最适能量消耗的阶段分测数据进行采集,探讨了不同身高、体重的人群对不同运动阶段、不同运动项目的能量消耗之间的相关联系,明确了运动过程中人体能耗的特征与规律,为大学生进行科学健身提供了相关参考。梁春瑜等<sup>[6]</sup>为了探讨大学生运动中能量消耗与身体素质之间的具体联系,选取了 54 名北京体育大学男性大学生进行 3 次速度不同的徒步运动测试,收集测试前后受试者指标与能耗数据,通过 SPSS 分析和多元回归建立回归方程,建立了能量消耗简易推算方法,可为研究大学生运动能量消耗提供一定的依据。李晶晶等<sup>[7]</sup>通过对北京市 465 名大学生每日体力活动量及强度进行调查,结果表明,高校大学生日体力活动达标率与 2010 年中国成人行为危险因素监测结果基本一致,与身体健康成年人日常活动量有较大差异。在大学生体力阻碍因素方面,多是由不良的生活习惯、缺少正确的健康意识所造成的。

### 1 大学生运动能量消耗监测系统的设计

大学生运动能量消耗监测系统采用当今较为流行的系统开发工具与技术,以浏览器/服务器(B/S)为结构,开发了基于 Web 技术的开放性应用程序,实现了大学生运动能量消耗监测模型。在系统设计与开发过程中应用了 Eclipse 集成开发环境、Java 语言和 Access 数据库。

大学生运动能量消耗监测系统由数据处理与分析、数据采集等单元构成。通过三维加速度传感器获得运动指标,采用几何均值(geometric mean, GM)算法得到运动能耗数据,并与不同的标准数据进行对比分析,从而获得个体运动的改进建议。

数据采集单元由传感器、控制器和无线传输模块组成,如图 1 所示。其中,三维数字加速度传感器采集运动加速度变化,红外脉搏传感器和温度传感器分别实时监测运动个体心率和体表温度变化,为个体运动提供安全保障,如心率变化不正常、发热状态等可提醒降低运动强度或停止运动。微处理器通过对数据进行简单地处理,实现本地显示,并通过大容量的存储器存储,当无线通信或 USB 接口唤起,可将数据上传到上位机进一步处理和分析。

作为随身携带的运动参数检测,系统选用低功耗的微处理器 MSP430F4270,三维数字加速度传感器为 MMA7660,大容量存储器采用 25VF080,容量达到 8 Mbit,数字温度传感器 DS18B20,上述传感器均采用 I<sup>2</sup>C 总线,节省微处理器 I/O 口资源,红外脉搏传感器选用 HKG-07 A,达到医用等级,数据采集单元电路,如图 2 所示。

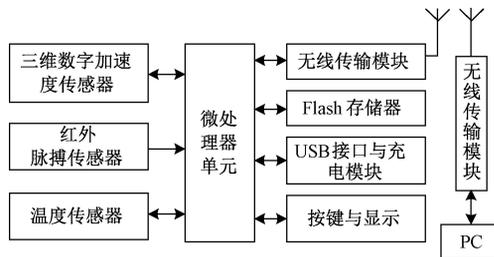


图 1 数据采集单元结构

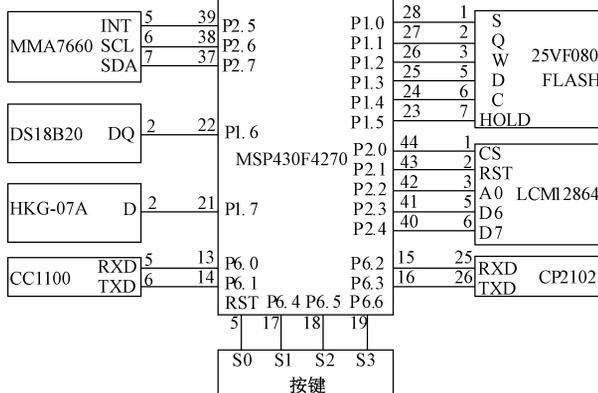


图 2 数据采集单元电路

同时,系统留有 USB 接口和无线通信端口。USB 通过 CP2102 芯片完成其协议,将数据上传至上位机,以及充电功能。无线通信端口选用 CC1100 芯片,将数据无线传输到上位机。

该系统具有复位按钮、测量按钮、向上按钮和向下按钮。向上按钮、向下按钮与测量按钮的组合操作可作为预置身高、体重,时间校准等功能使用,液晶显示器选用 LCM12864 型号,可显示脉搏、时间、体温和累计能耗等相关参数。

上位机接收的数据通过数据库管理、分析和处理运动过程中脉搏和体温的变化,如能耗分析、姿势分析等。并根据个人不同的需要和状态提供个性化的健康咨询,如推荐运动项目、持续时间等。

### 2 基于 GM 的能量消耗监测算法的研究

大学生运动能量消耗监测系统主要通过提出的基于 GM 的算法计算能量消耗。

Bouten 等<sup>[8]</sup>在三维加速度传感器的研究中,利用三维正交的一维压电传感器布置构建了加速度传感器及其支持数据处理软件对人体运动进行检测。结果表明,在进行的仪器重复性与可靠性实验当中,三维加速度传感器的位移值与灵敏度两者之间没有明显差异。此外,通过实验可得出在输出与能量消耗方面三维加速度传感器呈现明显的线性相关联系 ( $r = 0.95, p < 0.001$ )。

在不同的强度进行对比实验中,一维加速度传感器的耗能相对较大,三维加速度传感器与其相比,在输出和能量消耗都具有优势。其输出值更接近实际目标值。根据收集的数据分析,对运动能耗  $EE_{act}$  的运算如下:

$$EE_{tot} = EE_{act} + SMR \quad (1)$$

可以对氧气与二氧化碳的量进行收集(呼吸气体分析仪),通过式(1)计算出总人体能耗值  $EE_{tot}$ 。与此同时还可以对处于呼吸室中的测试者进行数据收集,根据公式计算出人体静睡时的睡眠代谢量值(sleeping<sub>x</sub> metabolic<sub>x</sub> rate, SMR)<sup>[9]</sup>。

Bouten 等<sup>[10]</sup>对实验进行深入研究,发现实验安排在进食后 1.5~2 h 后开始可以排除  $EE_{diet}$  (进食后产生的热量)的影响,增加实验数据的准确性。从此可得公式  $EE_{tot} = EE_{act} + SMR$ , 实验说明排除进食后产生的热量后的  $EE_{act}$  值被普遍认为是人体运动能耗的真实值。

在测试中,将测试设备安置于人体后腰部位,利用相对应的数据分析处理装置对获得的加速度输出值进行滤波、整形、放大,之后以 30 s/次的频率对输出值进行绝对值的积分,得到 X、Y、Z 轴方向的输出值  $AO_X$ 、 $AO_Y$ 、 $AO_Z$ 。

$$AO_X = \int_0^t |a_x| dt \quad (2)$$

$$AO_Y = \int_0^t |a_y| dt \quad (3)$$

$$AO_Z = \int_0^t |a_z| dt \quad (4)$$

$$AO_{tot} = AO_X + AO_Y + AO_Z \quad (5)$$

联立式(1)~(5),可得:

$$EE_{act} = -0.176 + 0.085 AO_X \quad (6)$$

$$EE_{act} = 0.104 + 0.023 AO_{tot} \quad (7)$$

式中:AO 表示加速度计的输出,单位为次/min; $EE_{act}$  表示能耗,单位为  $J \cdot \min^{-1} \cdot kg^{-1}$ 。

以下是卡路里、焦耳两者之间的转换式。

$$1\ 000\ cal = 4\ 184\ J \quad (8)$$

通过大量的实验得出结论,时间的积分与能量或氧气消耗与身体运动的绝对值加速度两者之间成线性联系。这为使用三维加速度计对人体能耗进行测试与评估的实验提供了相关理论基础与计算方式<sup>[11-13]</sup>。

因此,在现有的基础上提出了一种基于几何均值 GM 的能量消耗算法,能用于三维加速度传感器对运动能耗的评估。该算法基于能耗计算原理,以几何均值 GM(传感器 X、Y 和 Z 的 3 个轴的输出信号)为特征量,对特征量进行中值滤波和高通滤波的方式处理,并以式(9)转换为 X、Y、Z 三轴加速度加以计算,得出几何平均值。

$$GM = \sqrt{(A_X^2 + A_Y^2 + A_Z^2)/3} \quad (9)$$

其中,  $A_X$ 、 $A_Y$ 、 $A_Z$  分别是各轴的加速度值,单位为  $g$ 。

几何均值 GM 通过式(9)获得。基于物理学定理运动能量法可知,力在方向上的位移、力的大小、运动能耗三者之间密切相关。可得式(10)。通过该公式能计算出相应的

运动能耗  $E$  的值。

$$E = \frac{1}{2} umg \int_{a_1}^{a_2} da \int_{t_1}^{t_2} t dt \quad (10)$$

式中:  $a$  为几何均值 GM 的数据。在实验中,收集几何平均 GM 值在一定时间内产生的变化量,将其代入式(10)得出能耗值  $E$  (单位为 cal),并将跑步机测得的能耗值设为标准值,得到  $u$  值( $u$  为参数)。

### 3 系统实现

系统主要使用 LabVIEW 语言进行编程设计。软件功能模块主要包括用户登陆、生理情况、运动情况、膳食跟踪和虚拟教练等模块。运动情况主要记录温度、心率、运动量、步数、强度、路程、能量消耗等参数,具体参数如表 1 所示。软件部分界面运行如图 3~5 所示。

表 1 主要参数说明

参数	描述	说明
温度	摄氏温度 $^{\circ}C$	摄氏温度 $^{\circ}C$
心率	每分钟的瞬时心率	每分钟的瞬时心率(心率)
平均心率	每分钟平均心率	上次数据重置后的平均值
最高心率	每分钟最高心率	上次数据重置后的记录
运动量	卡路里燃烧总量	卡路里燃烧总量
步数	总步数	上次数据重置后的总步数
强度	活动强度水平	根据专有算法进行计算得出 (小强度,中等强度,大强度及超大强度)
路程	总路程	上次数据重置后的活动路程



图 3 用户个人信息

### 4 实 验

为了验证大学生运动能量消耗监测系统的可靠性,本次实验选择大学生志愿者共计 2 名分别进行实验。其中男性志愿者 1 名,女性志愿者 1 名,在测试正式开始前对受试者进行培训,使其了解整个测试的注意事项和流程,对其身



图 4 生理情况



图 5 运动耗能界面

面进行改善。

表 2 大学生运动能量消耗监测系统与 Livepod R3 两者相对精度对比

跑步速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	试验 次数	本系统/%		Livepod R3/%	
		男志愿者	女志愿者	男志愿者	女志愿者
1	1	95.03	95.07	98.82	98.85
1	2	94.16	94.12	98.76	98.79
1	3	96.35	96.38	99.01	99.07
5	1	94.96	95.92	97.35	97.38
5	2	93.87	93.84	97.12	97.08
5	3	93.32	93.36	98.30	98.27
10	1	92.14	92.19	96.11	96.14
10	2	92.88	92.83	97.02	97.09
10	3	93.21	93.18	97.08	97.02

## 5 结 论

对于大学生来说,正确合理的运动强度能够保持饮食与能耗两者之间的平衡关系,同时对运动能力和健康水平的提高都有着不可或缺的影响。当一个人在进行走跑运动时,如果他知道适合的运动速度和达到身体健康的所需的最佳运动时间,这都会达到增强个人体质的目的。因此,本研究从大学生运动能量监测研究存在的问题的角度出发,结合国外加速度计评估运动能量的机理。利用三维加速度传感器,电子电路设计方法,设计了大学生运动能量消耗监测系统。同时在硬件结构中,增加了无线信号发送模块,便携式测量装置采集的数据既可以通过 USB 接口传输给计算机,还可以通过无线发送与接收电路进行传输。最后提出了基于几何均值 GM 的能量消耗监测算法,以三轴加速度数据的几何均值作为特征量,构建一种基于三维加速度传感器的大学生运动能耗模型。

虽然开发的大学生运动能量消耗监控系统相对精度较高,但是与 Livepod R3 相比,本系统还需改进,特别是精度提高,可以考虑进一步改进算法。

## 参考文献

- [1] 吴廉卿,刘丹松,屈萍.基于三轴加速度传感器的大学生体力活动能量消耗模型研究[J].武汉体育学院学报,2018,52(4):87-91.
- [2] 向剑锋.大学生体力活动监测中运动传感器能耗预测方程的建立与应用[D].上海:上海体育学院,2011.
- [3] 蔡靖,田入运,刘磊,等.运动监控系统设计与实现:基于人体感知与安卓技术[J].电子技术应用,2015,41(4):63-66.
- [4] 刘丹松.基于日常体力活动与大学生体质健康调查的能耗模型构建[D].武汉:武汉体育学院,2014.
- [5] 修艳.最适能耗的不同健身阶段分测及相关性分

体状况进行评估,要求无运动禁忌,生理、心理无异常。

采用身高体重仪对受试者身高、体重进行测量。实验过程中,将开发的大学生运动能量消耗监测系统佩戴于人体的腰部,系统采用 30 Hz 的频率采集加速度信号。

本次实验参照国家体育总局发布的市场常见用运动能耗监测产品的精度检验报告,选取高精度 Livepod R3 产品(知康科技有限公司产品)作为精度对比设备与开发的大学生运动能耗监测系统进行研究对比。在实验过程中,通过两名志愿者分别将开发的大学生运动能量消耗监测系统和 Livepod R3 佩戴在腰部,同时跑步机(Life Fitness 95ti Treadmill 型号)上进行 3 组不同速度(1、5、10 km/h)跑步运动,每种速度进行 3 次实验,每次实验监测能量消耗时间为 1 min,最终的对比结果如表 2 所示。

实验表明,本文开发的大学生运动能量消耗监测系统的相对准确率比 Livepod R3 低 2%~4%,但总体准确率较高,表明基于 GM 的能耗监测算法是有效的。同时发现男志愿者和女志愿者精度差异不是很明显,说明大学生运动能量消耗监测系统的性别没有非常严格的要求。从表 2 可以得出结论,随着运动速度的增加,相对精度降低。这可能是由于在高移速情况下设备无法达到与 Livepod R3 相同的高频率进行检测所造成的,后续研究中会继续对这些方

- 析[J]. 科技通报, 2018, 34(1): 262-265.
- [6] 梁春瑜, 王林佳, 毛雅芸, 等. 一种简单的男大学生步行健身能耗计算方法[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(12): 1143-1146.
- [7] 李晶晶, 杨天, 吴旭龙, 等. 大学生日常体力活动现状及影响因素分析: 基于北京市 465 名大学生[J]. 中国学校卫生, 2015, 36(04): 524-526.
- [8] BOUTEN C V, SAUREN A A, VERDUIN M, et al. Effects of placement and orientation of body-fixed accelerometers on the assessment of energy expenditure during walking[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 1997, 35: 50-56.
- [9] 易容, 张海平. 基于加速度计传感器技术的老年人日常体力活动与能量消耗的研究[J]. 中国老年学杂志, 2016, 36(4): 918-919.
- [10] BOUTEN C V, WESTERTERP K R, VERDUIN M, et al. Assessment of energy expenditure for physical activity using a triaxial accelerometer[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1994, 26(12): 1516-1523.
- [11] 段艳平, 杨剑, 孙昌文, 等. 大学生身体活动变化阶段与能量消耗关系研究[J]. 中国运动医学杂志, 2013, 32(10): 910-915.
- [12] 史强强, 张亚维. 多类型振动信号采集卡设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(7): 157-160.
- [13] 邸文华, 刘昱, 黄镇彩. 基于 iOS 平台的步长计算方案与实现[J]. 电子测量技术, 2012, 35(9): 32-35.

### 作者简介

**罗奇**, 博士、副教授、硕士生导师, 主要研究方向为体育电子信息工程。

E-mail: 402135168@qq.com

**何天宇**, 硕士研究生, 主要研究方向为体育电子信息工程。