

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005314

基于移动端的人体运动能耗检测系统*

陈超^{1,2} 孙少明^{1,3} 王威^{1,2} 陈竟成^{1,2} 张海涛¹(1.中国科学院合肥物质科学研究院合肥230031; 2.中国科学技术大学合肥230026;
3.中科院合肥技术创新工程院合肥230088)

摘要: 量化运动能耗是科学运动的基础。目前日常运动能耗的检测设备存在诸多限制条件。针对这一问题,采用近些年飞速发展的图像识别技术,设计了一套基于移动手机端的人体运动能耗检测系统,系统包含4种运动健身动作,通过手机前置摄像头拍摄在语音和视频指导下人体完成相应动作的视频,利用图像分析技术实时计算出人体运动能耗值,实现对人体运动时的能耗检测,实验结果与被称为“金标准”的间接测热法测得值的相关系数均达到了0.6以上($P < 0.01$),另外提出了4种动作的能耗预测方程,采用Bland-Altman分析法分析验证组的实验结果与标准值得一致性程度,结果表明两种方法的一致性较高,可作为传统方法的替代。

关键词: 移动端;能耗测量;动作检测

中图分类号: TP2 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 520.5099

Mobile-based human movement energy monitoring system

Chen Chao^{1,2} Sun Shaoming^{1,3} Wang Wei^{1,2} Chen Jingcheng^{1,2} Zhang Haitao¹

(1.Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. CAS(Hefei) Institute of Technology Innovation, Hefei 230088, China)

Abstract: Quantifying sports energy consumption is the foundation of scientific sports. At present, there are many limitations in the detection equipment of daily exercise energy consumption. To address this problem, this paper adopts the image recognition technology that has been developing rapidly in recent years, and designs a set of human movement energy consumption monitoring system based on the mobile phone terminal, the system contains four kinds of movement and fitness actions, through the mobile phone front camera to shoot the video of the human body completing the corresponding action under the voice and video guidance, using the image analysis technology to calculate the human movement energy consumption value in real time, to realize the human movement energy consumption monitoring. The correlation coefficients between the experimental results and the measured value of indirect calorimetry, which is called the “gold standard”, reached more than 0.6 ($P < 0.01$), and the energy consumption prediction equations for four actions were proposed. The methods are more consistent and can be used as an alternative to traditional methods.

Keywords: mobile; energy consumption measurement; motion detection

0 引言

随着中国经济的不断发展,人民群众生活水平日益提高,居民饮食营养充足,但中国人的健康问题也日益严峻。各类疾病出现年轻化趋势,截止2019年末,中国高血压人口有2.7亿人,超重或患肥胖症人口超过2亿人,慢性病将成为威胁中国人健康的致命因素。经医学领域研究,人体不合理的饮食习惯和缺乏足够的体力运动是导致慢性疾病

发生的主要危险因素^[1]。因此科学的运动健身是非常重要的。而科学的运动健身是指根据每个人身高、体重、年龄和性别等生理特征采取适宜的运动强度。

美国卫生及公共服务部(HHS)发布的《体力活动指南》中指出:提高体质健康水平可通过适度规律的体力活动来实现,且具有相当大的促进效果和益处^[2]。Caspersen在1985年提出体力活动的定义:任何由骨骼肌收缩引起的导致能量消耗的身体运动^[3]。所以能量消耗监控是健康饮

收稿日期:2020-11-05

* 基金项目:中国科学技术大学智慧城市研究院(芜湖)科技成果转化项目(2019ZX01)、国家重点研发计划(2018YFC2001304)项目资助

食、疾病治疗、科学运动的基础。

近年来对人体运动能耗的研究是热门领域之一。常用的能耗检测方法包括双标水法、心率法^[4]、间接测热法(indirect calorimetry, IC)、运动传感法等。其中, IC 法被公认是测量能量消耗的金标准^[5], 但由于操作复杂、费用高昂、连续作业时间短等原因, 不能作为大样本下人体运动能耗测量方法。运动传感法是在空间 3 个维度变化趋势下, 利用人体运动的强度、时间等信息计算一定时间内能量消耗情况^[6]。但运动传感法通常采用的是三轴加速度计实现, 加速度计作为一种可穿戴设备附着在衣服或皮肤表面, 在运动过程中随着运动幅度的改变, 设备的附着性也随之减弱, 这导致了设备测量精度的降低^[7]。另一方面由于一个加速度计只能记录佩戴部位的能量消耗, 在实际使用中需要不同部位分别佩戴多个加速度计, 增加了设备对人体的侵入性。相对于可穿戴设备, 图像分析技术对人体运动的侵入性大大的降低, 通过图像检测技术可以简单便捷的获取人体重心位置和人体运动过程中加速度值的变化。在国内外, 利用图像检测技术对人体动作识别领域有了长足的发展。王芫^[8]提出了一个新的深度神经网络模型用于估计单帧图像中羽毛球运动员的人体姿态, 在估计精度和估计速度方面都有良好表现; 闫航等^[9]通过构建基于多层特征融合的 GRU 网络和注意力机制进行动作分类用于提高卒中患者康复动作识别的准确率和实时性; 王柳程^[10]提出了一种基于图卷积神经网络的人体姿态估计方法, 该方法可以对人体部位和关键点进行检测, 提高了人体姿态估计的精度。

根据以上概述, 本文提出了一种人体运动能耗实时测评系统, 主要研究内容包括: 在移动端手机摄像头拍摄训练动作, 利用神经网络模型获取到人体关键骨骼点数据, 提出了视频分析的运动能耗检测方法, 以 IC 法所测能耗为标准值, 探索视频分析法检测人体运动能量消耗的可行性, 比较 IC 法和加速度法两种能量消耗测试方法的差异性, 以手机端平台为基础搭建了一套运动能耗检测系统, 实现智能化检测和数据展示。

1 方案设计

本系统以智能化检测人体运动能量消耗为目标, 采用 Android 端平台作为检测设备, 通过手机拍摄受试者在在规定时间内完成开合跳、双臂伸展、跳绳和原地高抬腿动作, 训练过程界面如图 1 所示以运动过程中每帧数据的重心值为基准计算加速度值, 结合 IC 法拟合 4 种动作对应的能耗方程, 进而计算出动作完成的实时能耗值。本系统实现可视化、智能化的运动能量消耗检测系统, 既满足了实际场景中运动能耗计算的实时性要求, 同时视频分析计算出的加速度值包含了全身的运动信息, 解决了目前常见的运动传感法因只记录佩戴位置的能耗值带来的误差问题。

如图 2 所示, 本系统分为技术模块和软件模块, 软件模



图 1 训练过程界面

块主要实现了用户的登录、训练数据记录与显示功能, 而技术模块是本系统的核心, 主要包括骨骼点数据获取、力矩合成法获取重心值、获取当前帧的合加速度值、拟合能耗方程。

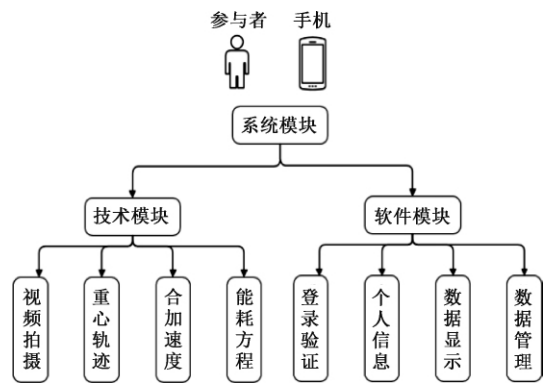


图 2 系统工作模块

1.1 视频动作数据采集

骨骼点识别算法采用的是谷歌近些年发布的 Blaze 系列算法中 BlazePose 算法, 该算法基于轻量级卷积神经网络架构, 在追求移动设备的实行性的同时也保证了有较高的识别精度, 在识别过程中该网络可为一个人每帧生成 33 个身体关键点, 如图 3 所示。

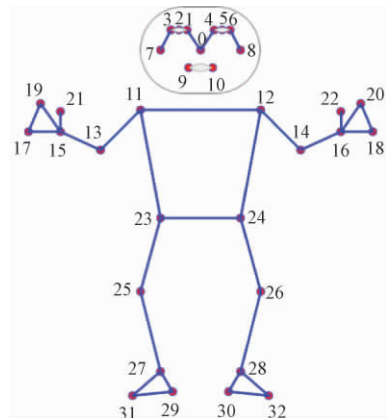


图 3 BlazePose 骨骼点识别

1.2 人体重心计算方法

BlazePose 算法可以提供最多 33 个人体骨骼点数据,

能够满足力矩合成法计算重心的要求。本文利用王蔚等^[11]提出的人体重心计算方法计算出每帧图像人体重心值。根据式(1)、(2)对人体重心进行计算。

$$X_c(t) = \sum_{i=1}^{17} k_i \cdot X_i(t) \quad (1)$$

$$Y_c(t) = \sum_{i=1}^{17} k_i \cdot Y_i(t) \quad (2)$$

式中: $X_c(t), Y_c(t)$ 为某一帧通过 BlazePose 算法获取到的骨骼点数据在 X, Y 轴坐标和, $X_i(t), Y_i(t)$ 为帧数为 t 时某骨骼点 i 在 X, Y 轴的坐标, k_i 为骨骼点 i 对应的系数值, 具体数值如表 1 所示^[12]。

表 1 人体骨骼点系数

骨骼点	对应系数值(k)
鼻子	0.070 6
肩	0.035 6
两肩连线中点	0.239 1
肘	0.058 0
手	0.037 2
髌	0.129 7
两髌连线中点	0.163 0
膝	0.163 0
脚	0.080 1

1.3 加速度指标

本文采用基于几何均值 (geometric mean, GM) 算法, 以图像识别算法得到的骨骼点信息求出加速度数据的几何均值式(3)作为特征量, 来计算人体运动能耗。

$$GM = \sqrt{(A_x^2 + A_y^2)/2} \quad (3)$$

式中: A_x 和 A_y 分别为人体运动时在 X, Y 轴的加速度值, 单位为 m/s^2 。

根据杨慧亮等^[13]提出的加速度的几何平均值 GM 与人体运动能耗之间的相关性式(4)计算人体能耗计算方程。

$$E = \left(\frac{1}{2} umg \int_{a_1}^{a_2} da \int_{t_1}^{t_2} t dt \right) / 4.18 \quad (4)$$

式中: u 为常量系数, 值为 0.014; a 为加速度的几何均值 GM; m 为受试者体重。

2 实验设计与结果分析

2.1 受试者

本系统选取 45 位受试者, 如表 2 所示, 所有受试者身体健康、无运动性损伤, 将所有受试者随机选取 30 人作为建模组, 15 人作为验证组。利用 30 人训练骨骼点数据计算出的加速度值用于构建能量消耗线性回归方程, 其余 15 人训练数据值用于验证回归方程。

2.2 实验方案

所有受试者被分为建模组和验证组, 所有实验仪器在

表 2 受试者基本情况 ($\bar{X} \pm SD$)

	男性 ($n=35$)	女性 ($n=10$)
年龄/岁	25±6	24±4
身高/cm	182.1±5.2	161.2±3.8
体重/kg	80.5±7.3	48.7±5.6
BMI/($kg \cdot m^{-2}$)	24.3±3.4	18.9±2.8

使用前均进行了时间校准。建模组在实验开始时佩戴运动心肺功能仪, 检测运动过程中 VO_2 和 VCO_2 等数据计算出能量消耗值作为标准值。同时受试者选择训练方案开始测试后调整到合适位置, 跟随语音和动作指导视频完成开合跳、双臂伸展动作训练, 记录下训练骨骼点数据。验证组受试者需要佩戴运动心肺功能仪, 受试者选择训练方案开始测试后调整到合适位置, 跟随语音和动作指导视频完成开合跳、双臂伸展、跳绳和原地高抬腿动作训练, 记录下训练数据。

2.3 数据预处理

图像识别算法的测量精度和环境影响, 在实验中采集到的骨骼点数据会出现关节抖动, 为了提高实验数据的准确度和构建效果更好的运动能耗方程, 需要在构建能耗方程前对原始骨骼点数据进行数据预处理, 尽可能减小因识别算法导致的关节抖动影响。

在双臂伸展运动中左髌关节的 x 轴数据进行均值滤波处理^[14], 通过对比后选取每帧数据前后两帧数据包括当前帧数据共 5 个数据的均值作为当前帧的值。如图 4 所示, 可以明显得出滤波处理后曲线更平滑。同样在对所有选取的 17 个骨骼点数据进行均值滤波后, 再利用人体重心计算方法计算出每帧的重心值, 如图 5、6 所示, 可以看出重心值在均值滤波后噪声得到了有效的降低。

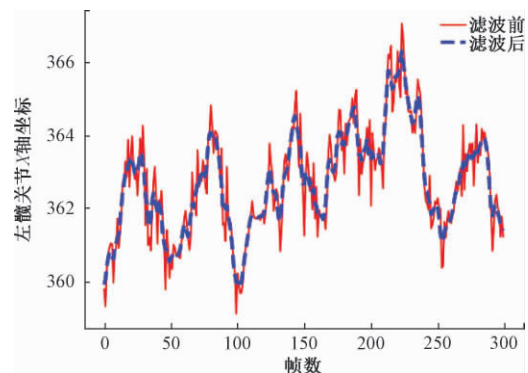


图 4 左髌关节 X 轴滤波

2.4 实验结果与分析

利用 spss20 软件进行统计学分析, 通过把运动心肺功能仪测得的标准值与加速度法测得的预测值进行比对, 计算出加速度法求得开合跳、双臂伸展、跳绳和原地高抬腿 4 种运动能耗值准确性。准确性用 Pearson 分析法求出的

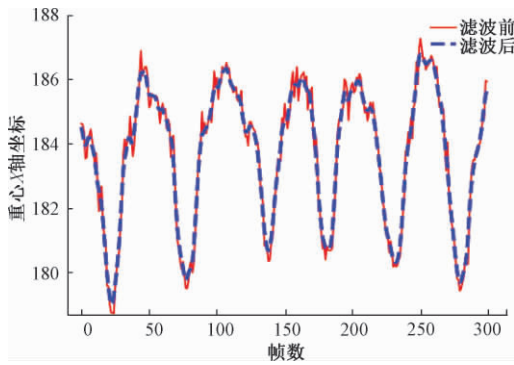


图 5 重心 X 轴滤波

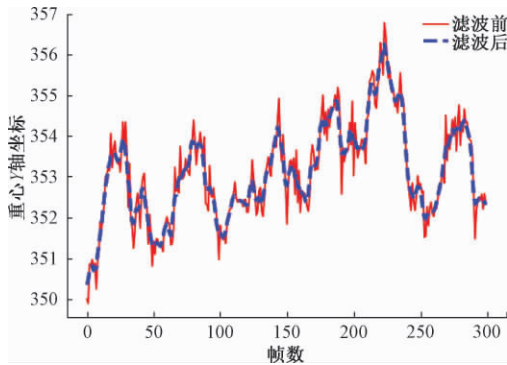


图 6 重心 Y 轴滤波

相关系数表示,相关系数越高,准确性越高。如表 3 所示,可以看出 4 种运动方式使用加速度法测得的能量消耗值与运动心肺功能仪测得的值存在一定的相关性,相关系数在 0.640~0.837 之间。其中开合跳的相关系数最高达到了 0.837,原地高抬腿的相关系数最低为 0.640,同时显著性(双侧)结果均 < 0.01,认为具备显著性。

表 3 受试者运动能耗

运动项目	IC 法	加速度法	相关系数
双臂伸展	5.01±0.85	5.94±1.42	0.782**
开合跳	7.46±0.87	8.34±1.17	0.837**
跳绳	9.03±1.27	9.33±1.66	0.815**
原地高抬腿	6.02±1.74	6.19±1.66	0.640**

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

在具备相关性的前提下,对标准值与预测值作进一步分析,构建一元线性方程建立回归分析。如表 4 所示,将加速度法值作为自变量,运动心肺功能仪测得值作为因变量就 4 种运动分别建立能耗预测模型。开合跳的线性回归模型拟合度最好 $R^2=0.701$,原地高抬腿的线性回归模型拟合度最低 $R^2=0.410$,与标准值的拟合效果也最差。导致原地高抬腿拟合效果较差的可能原因是:当进行原地高抬腿实验时,腿部关节在前后位置的骨骼点信息被忽略,导致

了原地高抬腿预测值小于标准值。

表 4 4 种动作能耗预测方程

运动项目	能耗方程	R^2	sig
双臂伸展	$y = 2.26 + 0.464x$	0.612	0.000
开合跳	$y = 2.28 + 0.622x$	0.701	0.000
跳绳	$y = 3.18 + 0.627x$	0.664	0.000
原地高抬腿	$y = 1.860 + 0.671x$	0.410	0.001

注: x 为预测值, y 为标准值(单位: Kcal/min)。

能耗预测模型构建完毕后,验证组的受试者在上述 4 种运动方式中测得的加速度值分别带入对应的能耗预测方程,即可获得能耗预测值。使用 MedCalc 软件提供的 Bland-Altman 分析功能(B-A 图)将验证组所测得的标准值与预测值进行一致性分析。Bland-Altman 分析法原理是计算出两种方法测量结果的“95%一致性界限”,并且用图形的方式直观的展现出一致性界限,同时代表两种方法测量的差值的均数实线越接近代表差值均数为 0 的虚线,则说明两种方法的一致程度越高^[15]。如图 7~10 所示,4 种运动方式的预测值与标准值的一致性程度很高,都在 95%的置信区间内,开合跳和双臂伸展的差值均值较高分别为 -0.88 和 -0.9,而跳绳和原地高抬腿的差值均值较低分别为 -0.3 和 -0.2。

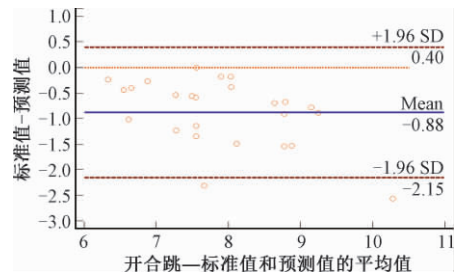


图 7 开合跳预测值与标准值的 B-A 图

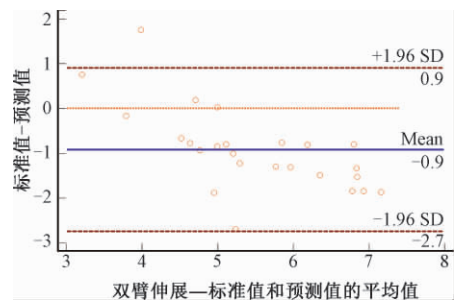


图 8 双臂伸展预测值与标准值的 B-A 图

结合上述实验结论,本文制定的基于视频分析方法的人体运动能耗检测模型(表 4),为科学运动、疾病治疗提供可靠的基础。

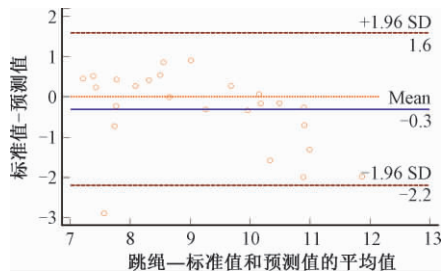


图9 开合跳预测值与标准值的 B-A 图

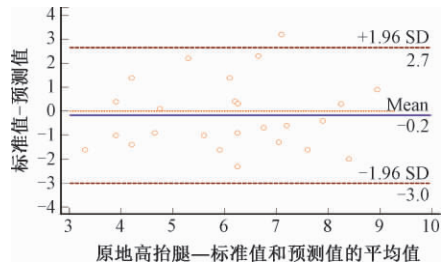


图10 原地高抬腿预测值与标准值的 B-A 图

3 讨论

本文采用基于移动端手机设备的人体运动能耗检测系统,就实验结果和训练过程中受试者的体验效果来看,移动手机端的设备操作简单、容易携带、系统简洁明朗、测量数据较为准确,使得受试者可以在更便捷的条件中进行训练,也有利于提高受试者的身体健康水平。

3.1 移动端在运动能耗检测的优势

基于移动手机端的运动能耗检测系统只需要安卓手机即可在适宜条件下进行运动能耗检测,而传统的运动能耗检测设备如运动心肺功能仪设备昂贵,难以携带,不适合日常使用,而加速度计等设备则需要使用者在日常训练中携带加速度仪器,且需要与手机端进行连接,才能记录下运动能耗,所以采用移动手机端进行运动能耗训练检测更便捷。

3.2 移动端在运动能耗检测的局限性

基于移动手机端的运动能耗检测系统能够达到有效的能耗检测效果且它具有的优势:便捷、费用低和准确率高非常适用于日常运动训练能耗检测领域,但本系统也存在一些局限性,首先,由于手机前置摄像头的硬件原因,所获取到的骨骼点没有提供深度信息,在完成一些例如健美操需要前后移动的运动时所预测的能耗值与标准值可能存在较大差异,其次本系统由于需要手机端对图像进行骨骼点识别,对手机 CPU 的性能有一定的要求,在实验中同一受试者在使用一些 CPU 性能不强的手机与性能强的手机时,所预测的值存在一定的差异性。

4 结论

针对近年来国民健康水平逐渐下降和慢性病有年轻化

趋势的严峻形势,同时越来越多人追求快节奏的生活方式,本文提出了基于移动手机端设备的人体运动能耗检测系统,既具备简单、便携、使用成本低的优势,同时为基于移动手机端在运动能耗检测领域的研究提供了参考,极具社会意义。本文与传统运动传感法不同,在运动过程中减少了对人体的侵入性,同时与运动传感法相比在精度方面有较大提升,在实际使用中满足了实时性要求,所提出的能耗预测方程所测得的值在与运动心肺功能仪所测得标准值进行了比较,具有较强的相关性,在数据拟合方面也具有较好的效果。本系统结合课题组开发的健康平台,将用户的基本信息、日常运动能耗数据上传到服务器端,便于用户的日常使用和数据的存储和展示。本文目前只提供了4种运动方式的能耗检测模型,下一步拟将提供更全面的运动种类,以及在运动数据处理方面考虑选用有深度信息的摄像头进行视频分析,同时在滤波方面目前使用滑动平均滤波法,下一步计划采用带通滤波法以期提高噪声滤波效果,最终进一步提高能耗预测的准确性。

参考文献

- [1] 熊勃.科学营养与运动对慢性疾病的预防和康复作用[J].和田师范专科学校学报,2009,28(4):194-195.
- [2] ROSS R, BLAIR S N, ARENA R, et al. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: A case for fitness as a clinical vital sign: A scientific statement from the american heart association [J]. Circulation, 2016,134(24):653-699.
- [3] GARBER C E, BLISSMER B, DESCHENES M R, et al. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise [J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2011,43(7):1334-1359.
- [4] 宋攀.心率联合加速度运动传感器在青少年中的验证与应用[D].上海:上海体育学院,2015.
- [5] 廖方萍.加速度计监测高强度复杂运动能量消耗的模型构建与准确性评估[D].成都:四川师范大学,2019.
- [6] ROBUSTO K M, TROST S G. Comparison of three generations of ActiGraph activity monitors in children and adolescents[J]. Journal of Sports Sciences, 2012,30(13):1429-1435.
- [7] 孙建刚,柯友枝,洪金涛,等.利器还是噱头:可穿戴设备在身体活动测量中的信效度[J].上海体育学院学报,2019,43(6):29-38.
- [8] 王芄.基于深度神经网络的人体运动姿态估计与识别[D].成都:电子科技大学,2020.
- [9] 闫航,陈刚,佟瑶,等.基于姿态估计与GRU网络的人体康复动作识别[J].计算机工程,2021,47(1):12-20.
- [10] 王柳程.人体姿态点识别算法研究[D].赣州:江西理工

- 大学,2020.
- [11] 王蔚,冯亚琴,杨再兴,等.基于体感交互设备的人体重心计算方法[J].数据采集与处理,2018,33(4):595-602.
- [12] 李柠薇.基于三维体感相机的人体平衡功能评估方法研究[D].上海:上海体育学院,2020.
- [13] 杨慧亮,孙怡宁,李丹,等.基于Android手机平台的人体能耗检测系统的研究与开发[J].仪表技术,2013(7):13-16.
- [14] 王俊芳,王正欢,王敏.常用图像去噪滤波方法比较分析[J].现代商贸工业,2009,21(16):310-311.
- [15] 陈卉.Bland-Altman分析在临床测量方法一致性评价中的应用[J].中国卫生统计,2007,24(3):308-309,315.

作者简介

陈超,在读硕士研究生,主要研究方向为智能检测技术。

E-mail:ahcc0920@163.com

孙少明(通信作者),研究员,博士,主要研究方向为运动与健康。

E-mail:smsun@iim.ac.cn