



## 从直接测热法到计算机视觉技术: 身体活动能量消耗测量的历史与未来

王轶凡, 温煦

**From Direct Calorimetry to Computer Vision: History and Future of Measurement of Energy Consumption in Physical Activities**

### 引用本文:

王轶凡, 温煦. 从直接测热法到计算机视觉技术: 身体活动能量消耗测量的历史与未来[J]. *上体育大学学报*, 2023, 47(4): 92-104.

WANG Yifan, WEN Xu. From Direct Calorimetry to Computer Vision: History and Future of Measurement of Energy Consumption in Physical Activities[J]. *Journal of Shanghai University of Sport*, 2023, 47(4): 92-104.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16099/j.sus.2022.07.13.0004>

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 基于计算机视觉的运动动作无标记识别技术研究进展

Research Progress of Computer Vision-Based Markerless Sports Motion Capture Technology

上海体育学院学报. 2021, 45(9): 70-85

#### 不同类型足球小场地比赛球员跑步表现及能量消耗的差异

Difference of Running Performance and Energy Cost of Soccer Players in Different Types of Small-Sided Games

上海体育学院学报. 2021, 45(5): 81-88

#### 《身体活动汇编》(Compendium of Physical Activities): 内容、应用与发展

Compendium of Physical Activities: Content, Application and Development

上海体育学院学报. 2020, 44(9): 53-63

#### 运动智能手环监测身体活动量的效度研究进展

The Validation Study on Wrist-wearable Activity Monitors for Monitoring Physical Activity

上海体育学院学报. 2019, 43(4): 73-83

#### 运动密度对青少年运动能耗与体质健康的影响

Influence of Exercise Time to Adolescents' Energy Consumption & Physical Fitness

上海体育学院学报. 2019, 43(1): 93-102

#### 基于计算流体力学方法的乒乓球轨迹仿真

Simulation of Table Tennis Trajectory Based on Computational Fluid Dynamic Method

上海体育学院学报. 2017, 41(3): 89-94



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

## 研究综述

# 从直接测热法到计算机视觉技术: 身体活动能量消耗测量的历史与未来

王轶凡<sup>1</sup>, 温煦<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学教育学院, 浙江 杭州 310028; 2. 浙江大学公共体育与艺术部, 浙江 杭州 310028)

**摘要:** 系统回顾身体活动能耗测量技术的发展历程, 剖析各类能耗测量方法, 重点介绍计算机视觉估算人体能耗的新技术, 探索人工智能时代能耗测量技术的发展方向。17世纪以来能耗测量技术以测热法为起点逐渐延伸出各种非测热法。17—18世纪测热理论的建立是能耗测量技术诞生的直接原因。19世纪, 在代谢疾病日益严峻的背景下, 人体代谢系统研究的进步驱动了人体测热系统的开发。20世纪后, 第二次工业革命带来的技术飞跃以及对新陈代谢的深入研究助力能耗测量技术的革新, 涌现出许多新方法。21世纪, 在人工智能的赋能下能耗测量技术实现无接触式测量的新突破。能耗测量技术在科研需求、理论和技术发展的驱动下不断推陈出新, 现有的能耗测量技术各具特色, 但在测量精度、可操作性和经济性等方面仍存在局限。测热法成本高、操作复杂、实用性差, 非测热法相对便捷但测量精度有待提高。智能化、无接触的测量技术可能成为重点发展趋势: 在测热法方面应推进微型传感器的应用, 实现远程数据传输, 使设备更加便捷; 在非测热法方面, 应进一步探索更多运动相关生理指标, 提高测量精度, 完善理论框架。

**关键词:** 能量消耗; 身体活动; 测热法; 非测热法; 计算机视觉技术

**中图分类号:** G804.49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5498(2023)04-0092-13 **DOI:** 10.16099/j.sus.2022.07.13.0004

作为新陈代谢的重要组成部分, 能量代谢是维持生命活动的基本条件, 也是重要的科学研究对象。人体能量消耗(Energy Expenditure, EE)是能量代谢的关键过程, 而身体活动是人体能耗的重要影响因素<sup>[1]</sup>, 增加身体活动能量消耗对人类健康有重要意义。Arem等<sup>[2]</sup>发现每周运动7.5 h即可使死亡率降低20%, 随着运动量的增加死亡率下降的比例也随之增加。运动是影响身体活动量的关键因素, 精确测量运动能耗是进行身体活动干预和研究的前提。能量消耗测量技术的起源可追溯至17世纪<sup>[3]</sup>。早期测热法占据主导地位, 随着理论和技术的发展, 逐渐衍生出各类基于人体生理学和生物力学的非测热法。近年来, 各类人工智能算法被引入体育领域, 其中计算机视觉技术通过人体动作捕捉自动化估算能耗, 可做到无接触测量。然而, 目前的测量方法

各有局限, 存在诸如测量精度不高、环境限制、成本昂贵、设备穿戴繁琐、数据延迟等问题, 因此, 研究人员仍在不断探索新技术。能耗测量方法如何逐步演变至今, 未来又将如何发展? 回答上述问题需系统回顾能耗测量发展史, 厘清能耗测量技术的演变历程。本文基于文献资料, 梳理了近400年来能量消耗测量方法的发展历史, 系统回顾身体活动能耗测量技术的发展历程, 聚焦主要的里程碑事件, 着重介绍计算机视觉技术测量人体能耗的新方法, 对各类能耗测量方法进行剖析, 探索人工智能新时代能耗测量技术的发展方向。

## 1 17世纪: 理论源起——从体液学说到新陈代谢

17世纪前人们对新陈代谢及能量消耗的认知还

收稿日期: 2022-07-13; 修回日期: 2023-02-26

第一作者简介: 王轶凡(ORCID: 0000-0001-8148-7268), 女, 河南开封人, 浙江大学博士研究生; 研究方向: 身体活动与健康, E-mail: zjuwangyifan@zju.edu.cn

通信作者简介: 温煦(ORCID: 0000-0003-3658-6368), 男, 江西赣州人, 浙江大学教授, 博士; 研究方向: 身体活动与健康, E-mail: wenxu@zju.edu.cn

停留在希波克拉底的“体液学说”，认为人类血液中携带内在热量，可以促进新陈代谢。直到1614年意大利医师Sanctorius将定量科学引入医学领域，才革新了人们对代谢的认知，他也因此被后人誉为“新陈代谢领域的始创者”<sup>[4]</sup>。Sanctorius发明了一种测量体质量及排泄量的设备，成功对人体水分流失进行了量化，创立了质量平衡法<sup>[5]</sup>，该方法作为研究代谢的一种手段对后世测热法的发展具有重要指导意义<sup>[4]</sup>。然而，Sanctorius的质量平衡法并未统一人们对新陈代谢的认知，当时的化学家(或炼金术士)仍坚信“燃烧素理论”即可燃物在燃烧时会释放“火元素”<sup>[6]</sup>，而当时的生理学家(医生)则认为人体内部的运转无法用简单的化学理论解释<sup>[4]</sup>。直到17世纪中期现代化学奠基人Robert Boyle的发现打破了这一僵局。1660年Boyle将老鼠和点燃的蜡烛置于同一密封罐内，排出罐内气体后，老鼠死亡与蜡烛熄灭几乎同时发生，于是他认为生命体新陈代谢和蜡烛燃烧是等效的，且该过程需要“空气”<sup>[7]</sup>。1668年Mayrow针对Boyle的实验进行了更深入的探索，发现小鼠用掉罐内约1/14的气体后会死亡，证实了空气中仅部分气体可用于哺乳动物呼吸<sup>[8]</sup>，该结果不仅推动了O<sub>2</sub>的发现，也使人类找到了新陈代谢过程中的重要物质。

## 2 18世纪:测热理论建立——从直接测热法到间接测热法

18世纪一些炼金术士致力于研究助燃气体，通过燃烧和提纯等方法，先后发现了CO<sub>2</sub>(1754年)<sup>[6]</sup>和O<sub>2</sub>(1772年)<sup>[9]</sup>，这2种气体的发现促进了代谢理论的发展。法国著名化学家Lavoisier是发展代谢理论的关键人物，他于18世纪末成功揭秘了代谢的主要过程并建立了测热理论。自1774年，Lavoisier利用前人的燃烧实验范式对呼吸过程进行了系列探索，最终发现新陈代谢的本质是一种缓慢的燃烧形式，此过程会消耗O<sub>2</sub>同时产生CO<sub>2</sub>。1783年，Lavoisier联合法国数学家Laplace利用小鼠实验量化了CO<sub>2</sub>产生量与热量释放量的比例关系，该研究首次使用直接测热法(冰测热计)测量哺乳动物能耗，第一个动物测热计诞生<sup>[4,10]</sup>。研究中使用的冰热量计外壳是雪，内层是冰，动物的代谢热将冰融化，通过测量融化后水的质量计算冰吸收的热量即为代谢热<sup>[11]</sup>。然而，冰测热计对环境的要求很高，必须在气温接近冰点时方可使用，于是在初代实验后，冰测热计几乎不再复用。基于上述局限，Lavoisier

在测量设备上进行了优化，在后续的研究中发现实验收集的气体通过计算所得的热量与直接测得的热量几乎一致<sup>[11]</sup>。在上述现象的启发下，结合多年来的实验成果最终建立了间接测热理论<sup>[8]</sup>，即分析单位时间内O<sub>2</sub>消耗量和CO<sub>2</sub>产生量利用公式计算能量消耗。此后基于测热理论直接测热法和间接测热法一直沿用至今。

## 3 19世纪:测热计革新——从动物到人体

基于测热理论，19世纪各种直接测热和间接测热设备不断更新迭代。1824年，Despretz和Dulong在直接测热计的基础上利用间接测热理论发明了历史上首台呼吸测热计，并成功测量了兔子的代谢热<sup>[4]</sup>。1849年，Regnault和Reiset首次报道了一种闭环间接量热系统(图1)用于测量动物热量<sup>[12-13]</sup>。该系统的主体为密封的房间(供动物活动)，内置干燥剂和气体吸收器，以量化水和CO<sub>2</sub>进而计算热量，同时根据室内气体消耗速率等速供给O<sub>2</sub>。1862年，Pettenkofer在闭环间接量热系统基础上建造了第一个开路呼吸室<sup>[4]</sup>，该设备直接与外界空气相连，在测热计的出口处测量气流，并对空气样本进行CO<sub>2</sub>和水蒸气的分析。与闭环系统相比，开路系统无须主动通气且气流计可直接测得CO<sub>2</sub>及水含量，大大降低了系统操作的复杂程度。19世纪末，随着工业化的发展，大型仪器的制造成为可能，直接测热法也在此期间迎来新发展。Rubner在1894年制造了第一个等温直接测热计用于测量狗的代谢热，该设备仍以房间为主体，利用阻隔层将室内与房间外的恒温水系统隔开，阻隔层两表面之间的温差即所测热量<sup>[14]</sup>。上述测热设备多用于中小型哺乳动物研究，由于设备体积及分析装置的限制很难应用于人体。然而，19世纪中后期西方国家人口肥胖问题初显，通过大量观察人们发现肥胖与人体代谢密不可分<sup>[15]</sup>，人体测热设备

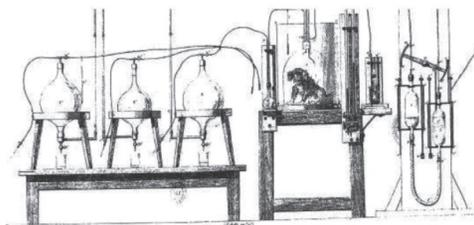


图1 Regnault和Reiset设计的闭环间接测热计<sup>[13]</sup>  
Figure 1 Closed loop indirect calorimeter designed by Regnault and Reiset

的需求随之凸显。1897年, 在 Atwater 长达 4 年的努力下第一个人体测热仪正式诞生(图 2), 该设备也是首个散热型直接测热计, 在等温系统的基础上, 将房间外层恒温水系统替换为流经室内的铜制水管, 通过测算管内水流量及温度变化即可得到热量<sup>[4]</sup>。Atwater 测热计的诞生标志着使用直接测热法进行人体代谢研究的开始<sup>[1]</sup>。



图 2 Atwater 测热计<sup>[1]</sup>  
Figure 2 Atwater calorimeter

#### 4 20 世纪: 新方法蓬勃发展

20 世纪能耗测量新方法蓬勃发展, 基于 2 种测热法的设备进一步革新, 尤其是间接测热法一跃成为后世的主流。同时随着研究领域的扩展及测量需求的增加, 涌现出许多非测热的能耗测试方法。

##### 4.1 测热法逐渐完善

20 世纪 2 种测热法在用途和发展方向上出现了明显差异。一方面, 直接测热法在测量技术、设备体积和反应时方面取得了巨大进步。1911 年, Lefèvre 对 19 世纪 Despretz 和 Dulong 的动物测热装置进行了改进, 发明了首个对流空气测热计<sup>[11]</sup>。1935 年, Murlin 等<sup>[16]</sup>在罗切斯特大学医学院开发了一种新的呼吸测热计(现代梯度层测热计的雏形), 该设备利用散热器和梯度原理, 形成了一个闭合循环呼吸室。同期, Winslow 等<sup>[17]</sup>设计了第一个分度测热计, 该设备是一个非密封的房间, 比传统的测热计具有更快的反应时, 可记录短时间内发生的热交换。20 世纪中后期, 人们愈发关注代谢性疾病发生的原因, 与之相关的能量平衡临床评估变得至关重要<sup>[11]</sup>, 该需求促进了更大尺寸测热计的回归, 这种设备能够连续 24 h 对全身能量消耗和热损失进行高精度测量<sup>[18]</sup>。第二次世界大战之

后, 直接测热计逐渐从全身代谢研究转入人体体温调节研究, 此后越来越多的直接测热计都以此为目的进行设计<sup>[19]</sup>。20 世纪末, 体温调节的研究场景更为多样, 运动中的体温调节是当时的热点, 为避免设备对人体活动的限制, 直接测热计也开始尝试精简。最典型的是 1970 年 Webb 基于散热型直接测热计原理设计的穿戴式隔热服(图 3)<sup>[11]</sup>。隔热服连接一根通水的塑料管, 管道连接控制水温的硬件, 使进水温度与受试者产生热量的速率相同, 该设备在相当程度上解放了受试者的活动空间, 可测量在多种环境下休息和运动的能耗。



图 3 穿戴式隔热服<sup>[11]</sup>  
Figure 3 Wearable thermal insulation suit

另一方面, 间接测热法一直专注于向便携式系统发展。早期人们希望摆脱固定房间, 于是对气体收集形式进行了改良。典型的设备如 Tissot 肺活量计(1904 年)和道格拉斯气袋(1911 年), 通过面罩收集所有呼出气体并进行分析, 但这些设备均受到收集容器大小的限制, 于是掩膜法应运而生, 该方法将受试者连接到一个静态装置中, 直接测量气体体积的变化<sup>[20]</sup>。1952 年, Müller 和 Franz 发明了一种可以装在袋子里的开路掩膜系统<sup>[21]</sup>, 该方法为后续便携式气体分析仪的研发提供了启发。上述设备虽然精度高, 但气体收集装置体积庞大无法随意移动, 且需要一定的时间培训专业人员来操作系统, 仅适合在实验室内使用。此外, 早期设备检测存在明显的延迟性, 反应时间通常在 2~10 min。COSMED 医疗设备公司于 1994 年发明了一种便携式气体分析仪 Cosmed K4RQ™, 目前已优化至第五代产品(Cosmed K5™)。最新的设备在保证精度的同时缩短了检测时间(10~30 s), 并利用蓝牙无线传输数据, 在很大程度上摆脱了场地的束缚<sup>[22]</sup>。目前

该设备被广泛应用于自由运动过程中的能量代谢测定,具有良好的信效度<sup>[23]</sup>,是短时测热的“金标准”<sup>[1]</sup>。然而,该设备在测试过程中需要佩戴呼吸面罩可能会给受试者带来不适感,其耗电量也相对较高,电池续航能力较弱(2~4 h)<sup>[23]</sup>,仅满足短时运动能耗测定的需求。

#### 4.2 双标水法(20世纪初)

20世纪初,O和H同位素的发现推动了新能耗测量方法的诞生。1949年Lifson等<sup>[24]</sup>首次使用同位素标记法研究小鼠的代谢过程,经过长达6年的探索建立了双标水法<sup>[25]</sup>。然而,该方法费用昂贵,早期只能用于小型动物实验,直到20世纪80年代,同位素提取方法逐渐成熟,且当时西方学者发现肥胖症等代谢疾病形势严峻,于是开始将目光转向人体研究。1982年Schoeller等<sup>[26]</sup>首次使用双标水法对人体能量代谢进行研究,随后各种验证性研究大幅提升了该方法的使用率,并在研究中不断优化计算方法,最终双标水法以其高精度、高自由度且无毒副作用的特点被学者们广泛接受,一度成为测量能耗的“金标准”<sup>[8]</sup>。虽然双标水法打破了传统能耗测量方法在实验室内展开的局限,但其高昂的成本使该方法难以在大规模研究中得到应用。此外,利用同位素标记仅能得到一段时间内的人体总能耗,无法直接获取单一活动的能耗信息,不适用于精准运动分析。

#### 4.3 心率法(20世纪50年代)

20世纪50年代,Berggren等<sup>[27]</sup>建立了一种基于心率与摄氧量估算亚极量运动的方法,自此开启了利用心率评估身体活动的研究。随着研究的深入,逐渐衍生出平均心率、心率差值(运动心率-安静心率)、心率储备百分比 $[(\text{心率差值}/\text{最大心率}-\text{安静心率})\times 100\%]$ 、曲线心率、心率-传感器等方法,其中大部分方法仅作为评估运动强度的分级指标,曲线心率法可根据心率与耗氧量之间的回归方程估算具体能耗,心率-传感器法则结合了其他运动传感器,测量精度明显提升<sup>[28]</sup>。心率的采集设备相对成熟,主要基于心电和光电技术,在胸部或腕部佩戴小型光电子设备即可获取心率信息。心率法的优势在于测量设备便携且操作简单,数据易采集且不受场景限制,可进行连续测量。根据Freedson等<sup>[29]</sup>的研究,心率仅在110~150次/分区间内才与耗氧量呈现强线性关系,因此,利用心率直接估算能耗更适用于中等强度身体活动,当强度过高

或过低时其准确性均难以保证。此外,心率容易受环境、精神状态、运动水平等因素影响,个体间差异明显,利用心率反映能量消耗存在很大局限。虽然单纯利用心率预测能耗并不准确,但当其结合其他方法(多为运动传感器)进行校正时,可大幅提高整个系统的测量精度<sup>[30]</sup>。

#### 4.4 问卷法(20世纪60年代)

20世纪60年代得益于身体活动流行病学的发展,问卷法被正式引入身体活动测量领域<sup>[31]</sup>。问卷法种类繁多,主要包括日记、日志、定量化回忆、活动回忆、访谈等形式,评估时长从1d至数月不等,以7d居多。常用的问卷主要有《国际身体活动问卷》(International Physical Activity Questionnaire, IPAQ)<sup>[32]</sup>、《久坐行为问卷》(Sedentary Behavior Questionnaire, SBQ)<sup>[33]</sup>、《老年人身体活动量表》(Physical Activity Scale for the Elderly, PASE)<sup>[34]</sup>和《学龄前儿童身体活动问卷》(Pre-school-age Children's Physical Activity Questionnaire, Pre-PAQ)<sup>[35]</sup>。问卷法成本较低,弥补了传统能耗测量方法难以进行大规模调研的局限,且操作简便,不影响日常活动,测试时间相对较短,易被调查者接受,也便于主试收集和管理。然而,问卷法本质为主观回忆,受试者易出现回忆偏差,且不同人对身体活动水平的理解不一致,准确性(信度0.62~0.76,效度0.25~0.41)难以保证<sup>[36]</sup>。总体而言,问卷法虽不能精确测量,但在大规模的流行病学研究中仍有优势。

#### 4.5 运动传感器(20世纪60—80年代)

运动传感器本质上是一种机械或电子设备,主要包含加速度传感器、惯性传感器(陀螺仪)和电子罗盘,它可以捕捉不同身体部位(肢体或躯干)的加速度和运动方向,进而利用回归方程估算能量消耗<sup>[37]</sup>。最早应用的运动传感器是计步器,虽然计步器早在16世纪就已经存在,但直到20世纪末才被用于能耗测量,其内部包含一个由弹簧组成的机械臂,通过采集垂直方向的加速度记录步数<sup>[38]</sup>。计步器虽无法量化步幅和总位移,也不能反映运动强度和运动模式,灵敏度较低,效用有限<sup>[28]</sup>,但其体积小、成本低,是一种便捷的运动监控方式,计步器的出现也引起了“每天一万步”的锻炼热潮<sup>[39]</sup>,为后续运动传感器的发展奠定了基础。

加速度计是身体活动研究中常用的运动传感器,采用电子传感器测量佩戴部位的加速度数据,经过数据提取后利用相应公式可估算出测量期间的能量消

耗, 通过数据分析还可获得身体的总位移、运动强度和运动时间<sup>[38]</sup>。20世纪70年代加速度计首次被应用于能耗测量。早期多使用水银球测量加速度且均为单轴加速度计, 20世纪80年代电子加速度计出现, Caltrac、Tritrac-R3D、RT3、ActiGraph、Actical以及Actiwatch成为典型的初代加速度计<sup>[39]</sup>。随后衍生出压电式、电磁式、压阻式和电容式等各类加速度传感器, 同时也从单轴扩展至三轴加速度计。研究结果显示, 单轴加速度计容易过高或过低估计低强度和高强度运动下的能耗<sup>[40]</sup>, 而三轴加速度计的稳定性更好, 甚至在某些情境下可达到双标水法的精确度<sup>[41]</sup>。加速度计佩戴方便、价格适中、操作简单, 续航能力强, 且采集数据较为全面, 可获得不同运动强度下的身体活动时间和睡眠时间, 目前已普遍应用于各类身体活动研究, 包括一些较大规模的流行病学调查<sup>[42-43]</sup>。加速度计的信效度受到传感器型号、佩戴部位、运动方式、运动速度和数据分析方式等多方面因素的影响<sup>[43]</sup>, 因此, 在应用中会存在一定的偏差, 尤其在估算上肢活动较多的运动项目时准确性较差<sup>[44]</sup>。

#### 4.6 肌电信号(20世纪70—80年代)

人体在运动时的能量消耗主要分为由肌肉收缩产生的热能和维持人体代谢的能量, 其中肌肉活动占主要部分, 因此, 可通过测量肌肉活动估算人体运动时的能量消耗<sup>[45]</sup>。肌电图(Electromyography, EMG)是利用相关设备检测肌肉收缩时产生的生物电流反映肌肉活动情况。20世纪中后期学者们发现在有氧状态下人体能耗与肌电信号之间存在线性关系<sup>[46]</sup>, 这为EMG预测能耗提供了理论依据。此后, 学者们尝试通过时域分析(平均肌电)<sup>[45]</sup>和频域分析(快速傅里叶变换)<sup>[46]</sup>等方法建立能耗估算方程, 成功获得了跑步和自行车运动的能耗。Blake等<sup>[45]</sup>发现, EMG比代谢气体包含更多运动信息, 可用于瞬时能耗的估算, 然而不同肌肉的肌电信号与肌力的关系不同, 为保证较高的预测准确性, 需要同时测量多个肌群的电信号, 导致该方法的实用性和操作性不高。由于目前尚未解决上述问题, 所以EMG预测能耗的应用并不多, 仍需继续探索。

#### 4.7 行为观察法(20世纪90年代)

行为观察法是一种通过观察员现场观察或观看视频资料来记录某一时段内观察目标的行为, 借助特定的活动编码获取身体活动信息的方法<sup>[47]</sup>。行为观察法

的出现源自人们对幼儿、儿童和青少年身体活动研究的诉求, 由于该群体认知水平较低、实验依从性较差, 易受环境影响, 研究者希望在无干扰的情况下测得其运动能耗。1990年Puhl等<sup>[48]</sup>发明了首个儿童身体活动编码, 包含5种不同等级的代表性活动, 用来反映幼儿的能量消耗情况, 然而该编码仅体现了运动强度, 并未提供其他与身体活动有关的信息, 只适用于个体观察。为解决上述问题, 又相继诞生了饮食行为和儿童健康身体活动评估系统<sup>[49]</sup>、学生活动参与编码<sup>[50]</sup>和群体观察法(青少年课外体育锻炼观察系统)<sup>[51]</sup>。观察法可较为客观地反映观察对象的运动项目、时间、频率和强度, 目前观察法仍为评估青少年身体活动较为常用的工具之一, 可同时观察群体的身体活动, 适用于中小样本量的研究但培养观察员成本较高, 一名合格的观察员不仅需要经过长期系统培训并熟练掌握观测方法, 还要定期进行复训和练习。

#### 4.8 皮肤温度、湿度和皮肤电信号(20世纪末)

得益于传感器的发展, 皮肤温度、湿度和皮肤电信号等方法在20世纪末陆续诞生。皮肤温度可以在一定程度上反映人体的散热情况, 因此, 有学者尝试使用热成像来检测人体在环境中的热量损失。随着技术的进步, 最近的研究已经开始使用自动化、高分辨率、反应迅速的热成像技术<sup>[52]</sup>, 但其缺陷是皮肤温度与能量代谢之间的关系尚未得到很好的验证。此外, 也有一些研究<sup>[53]</sup>将自主神经系统信号如皮肤湿度和皮肤电活动用于能量消耗估算。皮肤电活动也被称为皮肤电反应是皮肤导电性的一种测量方法, 当一个人开始出汗时, 皮肤导电性会发生变化, 虽然皮肤电活动主要被用作情绪或压力变化的指标, 但该信号的变化也与外力负荷的变化有关<sup>[54]</sup>。总之, 此类方法由于其指标与能耗之间的相关性并不稳定, 目前尚未得到广泛应用, 但若将各类生物信号融合并进行综合预测将大幅提升测量精度, 该思路在21世纪综合测量设备中得以实现。

### 5 21世纪: 智能设备崭露头角

从20世纪新方法的诞生可以发现, 学者们逐渐摆脱了单纯依靠热量测量的思维, 拓展了能量消耗测试的方法。到21世纪, 随着传感器的更新和人工智能的发展, 能耗测量领域迎来智能时代。

#### 5.1 综合穿戴设备(21世纪初)

综合穿戴设备主要指融合多种传感器的智能化和

无创性穿戴设备。综合穿戴设备近10年迅速崛起,常见的设备包括肌电图短裤<sup>[55]</sup>和Hexoskin智能衬衫(包含嵌入背心的加速计、心率监测器、测量呼吸和通气时间的呼吸带)<sup>[56]</sup>等。综合穿戴设备可收集多方面信息,将生理生化指标和运动传感器相结合,增加了健康评估的新功能<sup>[57]</sup>。综合穿戴设备多借助机器学习、模式识别、人工神经网络等人工智能算法,通过数学建模将加速度计、心率监测器、间接测热法和其他人体生理信号相结合,丰富了评估指标<sup>[58]</sup>。研究<sup>[59]</sup>证实,使用综合可穿戴设备预测能量消耗可以提高对身体活动能量成本估算的精度。虽然综合穿戴设备可以在实验室环境外进行高保真的生理信号采集,也具有好的能耗预测准确性,但不可否认,穿戴式设备都存在舒适感和美观性不足的问题,影响受试者的依从性,且价格昂贵、体积较大难以被引入大规模研究。

## 5.2 基于计算机视觉技术估算人体能耗(21世纪初)

计算机视觉是一种模拟人类视觉的系统,可自动对画面进行识别,随后确定目标图像并对其进行特征提取,分析物体的形态及运动情况,从而得到对该目标的某种认识并做出相应决策<sup>[60]</sup>。在计算机视觉领域,人体运动分析的目的是跟踪和检测人,并解释其运动<sup>[61]</sup>。计算机视觉技术被用于能耗测量最早出现于21世纪初,但由于技术限制目前仍处于发展阶段。利用计算机视觉估算人体能耗的方法很多,依据图像处理方法和算法理论依据的差异分为以下几类。

### 5.2.1 运动学模型

运动学方法主要应用于以位移为主的运动,通过视频提取人体运动过程中整体的速度、加速度和位移估算能耗,其中基于整体加速度的方法不仅可以预测单人的能耗,还可应用于多人场景。利用运动学模型进行能耗测量的理论基础受启于冲刺跑研究,由于设备限制传统方法无法直接测量变速跑时的能耗。为了攻克该难题,2005年意大利学者Di Prampero等<sup>[62]</sup>提出了一种以质心模型为基础的等价替换法,该理论认为人体在水平面上加/减速跑可等价于匀速上/下坡,并依此构建了加速度与能耗的函数,通过人体总加速度即可求得单位时间内的能耗。足球运动中充斥着各种跑动,因此,这种方法可用于全球定位系统(GPS)对足球运动的研究<sup>[63]</sup>。缪律等<sup>[64]</sup>也尝试基于该理论借助GPS设备测量足球运动员在不同类型小场地比赛中跑动的能量消耗,但GPS仍属于穿戴型设备,无法用于

正式比赛。2010年Osgnach等<sup>[65]</sup>将视频分析与代谢模型相结合,利用视频采集加速度数据对2007—2008年意大利足球甲级联赛进行分析,使等价替换法得到了更广泛的应用,并有望推广到其他以冲刺跑为主的集体球类运动。质心模型也有明显短板,将人体作为整体进行分析,只考虑了水平方向的加速度,不可避免地会遗漏四肢运动及质心上下浮动产生的能耗,因此对于一些上肢运动和跳跃居多的运动不适用。

2015年Silva等<sup>[66]</sup>报告了一种基于整体加速度的自动视频分析系统。该系统利用观察法和加速度计通过建立速度与运动强度之间的回归方程预测身体活动强度,旨在证明一些计算机视觉方法,如离线图像分割、玩家检测和卡尔曼滤波等,也适用于身体活动评估。该研究为后续身体活动评估带来新思路,Carlson等<sup>[67-68]</sup>在随后的5年间沿着这种思路进行了新系统研发,在Silva等<sup>[66]</sup>研究的基础上扩大样本量,增加拍摄场景,对低强度和高强度运动分级的准确性有所提高。然而,上述研究仍旧将人体视为质点,只能完成简单的运动强度分级,无法计算出具体的能耗值,但这种自动评估系统能够同时对多人进行评估,可有效代替行为观察法。

2020年Gray等<sup>[69]</sup>又提出了一种基于弹球模型的新理论,创新性地将跑步分为向前和腾空两部分运动,计算外部功的同时也考虑了下肢摆动的内部功,不足之处在于肢体的摆动是由GPS数据估算得来而非直接测量。虽然该理论还没有在计算机视觉领域得到应用,但涉及的参数均可通过视觉测量,或许可以得到更准确的能耗值。此外,这种通过理论计算所得的能耗仅为机械能,理论本身带来的误差可能会低估总能耗,需要与代谢能相结合才能提高测量精度。

### 5.2.2 模式识别

模式识别方法的基本思路是将复杂运动或一系列活动进行动作分解,转化为由简单动作组成的集合。首先建立每个简单动作的代谢能模型,再利用计算机视觉和模式识别的方法记录每个简单动作的时长,最终计算出总能耗。这种方法不仅适用于运动场景,也适用于日常生活的身体活动测量。2011年Botton等<sup>[70]</sup>首次引入了动作分解法,开发了一种网球运动能量估算方法(CORR=0.93),将网球动作分解为步行、跑步、坐着、拍击和发球5种动作,使用间接测热法建立5种动作的代谢模型,通过视频获取每种动作的持续时间,

计算各动作能耗之和即为网球运动的总能量消耗。2018年 Tao 等<sup>[71]</sup>对居家身体活动进行研究,依据身体活动编码将居家活动分为躺、坐、站、走、阅读、扫地等 11 种动作,通过计算机视觉技术和加速度计结合的方式实现了居家能耗估算。这类方法非常依赖数据集,只能测量已被算法涵盖的运动或动作,当遇到新动作时均需重新进行数据集训练。

### 5.2.3 人体骨架模型

骨架关节点模型是根据人体形态学特征建立的一种球棍模型,人体姿态可以通过若干人体关节点来表示<sup>[72]</sup>。目前利用计算机视觉技术可提取人体骨架模型,进而得到关节点速度、加速度、关节角度、角速度等一系列运动学信息。基于人体骨架模型的能耗预测方法的基本思路则是将运动学信息与人体能耗建立回归方程,利用该方程推算能耗。这种方法最早的灵感来自体感游戏,因此,早期的研究多利用深度相机进行视频采集。2012年 Liu 等<sup>[73]</sup>通过分析 Microsoft Kinect 采集的数据开发了一个实时计算舞者能量消耗的程序,通过 15 个节点连接不同的身体部位建立 3D 人体骨骼模型,将玩家的动作分解为环节刚体运动,运动能耗为克服每个环节重力所需能量的总和,但由于无法直接测得环节质量,通过估算的方式获取的肢体质量存在较大误差,且研究中并未进行“金标准”验证,其准确性暂未可知。2015年 Nathan 等<sup>[74]</sup>利用肢体长度和环节质心的移动来计算机械功,同时使用自动气体分析系统测量代谢能,最终采用高斯回归模型确定总能耗( $CCC=0.879$ ,  $RMS=8.384$ )。这种方法对骨架模型和拟合程度要求很高,在很大程度上影响了测量的准确性。上述 2 种方法所得的能耗本质均为机械能,理论上略低于真实总能耗,但优势在于不受运动类型的限制,应用场景更广。

除上述计算机械能的方法外,不少学者采用建立回归方程的方法预测代谢能耗,这种方法可有效利用视频采集的信息,且无须考虑环节长度和质量。其中很典型的方法是利用计算机视觉识别人体骨架,提取各个关节的加速度,建立加速度与间接测热法所得能耗的回归方程。2013年 Kim 等<sup>[75]</sup>利用深度相机采集视频,选取 5 个关节的加速度作为特征值直接进行非线性分析,利用支持向量机建立回归方程。杨慧亮等<sup>[76]</sup>和陈超等<sup>[77]</sup>则使用手机后置相机拍摄视频,利用人体关节加速度的几何均值作为特征值进行回归

分析。Lin 等<sup>[78]</sup>将关节加速度和关节角度列为特征值测量了在跑步机上运动的能耗,并对比了不同拍摄角度能耗估算的准确性,最终发现侧后方拍摄效果更佳。此外,该研究还评估了 5 种不同模型(线性回归、随机森林、多层感知机、套袋回归树和支持向量机)的预测效果,发现多层感知机的预测误差最小( $RMSE=0.76$ )。温煦等<sup>[79]</sup>基于 OpenPose 算法成功建立了健身操能耗与关节角度及角速度的回归方程,可用于测量多种健身操运动。然而,利用回归方程进行能耗预测最大的弊端是无法迁移至其他运动,需要不断地扩大动作样本。此外,如果遇到物体遮挡,或者静态姿势(如坐、站立、蹲马步),其能耗预测的准确性将大打折扣。

### 5.2.4 光流法

光流法是利用计算机视觉技术进行运动目标检测的一大分支。光流法认为运动中物体的亮度模式会随时间不断变化,因此其是一种利用光流特点描述物体运动的方法<sup>[80]</sup>。光流法最早诞生于 1981 年, Horn 等<sup>[81]</sup>依据图像灰度守恒原理创立了一种时空梯度算法,简称 HS 光流法。该方法利用灰度与二维速度场的相关性,建立了基本光流约束函数从而计算出像素点的速度矢量。随着光流法的不断优化,又相继出现了模块匹配、基于能量和相位等分析方法<sup>[60]</sup>。

近年来光流法逐渐应用于能量消耗的测算。2016年 Jensen 等<sup>[82]</sup>首次利用热成像法获得的光流精确地估算了在跑步机上步行和跑步的能量消耗,证实了光流与摄氧量及加速度之间的相关性。该方法最大的优点是大幅缩短了响应时间(仅 3~4 s),为瞬时能耗的测量带来了希望。然而, Jensen 等<sup>[82]</sup>仅测试了跑步机上的运动,对其他形式的运动是否适用尚未可知,且无法区分有氧和无氧运动状态。此外,当不同受试者以相同速度运动时,无法测量出由个体差异带来的能耗差异。2018年 Koporec 等<sup>[83]</sup>分别尝试了利用二维或三维图像数据预测壁球运动的能量消耗,同样采用间接测热法获得光流与能耗的回归方程,结果显示该方法具有较高的准确性( $CORR=0.995$ ,  $CCC=0.989$ ,  $RMSE=9.870$ ),并可在一定程度上估计心率( $CORR=0.860$ ),该研究说明光流法可不受视频采集形式影响,但能耗回归模型的泛化能力较差,仅适用于壁球运动。此外,周围环境的光线会影响视频采集效果,也影响最终能耗预测的准确性,因此,户外活动能耗的采集是该领域

需要攻克的技术难题。

综上,基于计算机视觉估算能耗方法的优势在于:①无接触测量,不影响受试者的运动表现;②数据采集便捷,只需架设一台或多台摄像机即可长期采集数据,借助计算机技术可进行远程拍摄和自动化分析,降低了人工成本;③信息多元化,利用计算机视觉采集技术不仅可以获取人体姿态和运动学数据,还可捕捉人类表情、运动器械以及周围环境特征,为后续分析提供更丰富的信息;④应用场景广泛,无论日常生活还是竞技比赛,只要能拍摄到视频的场景均可使用。其局限在于:①需要高质量的视频数据,视频的拍摄可能会受视野、光线和遮挡等因素影响,视频的质量会直接影响能耗估算的准确性;②依赖数据集,泛化能力差,先前的各类视觉估算方法仅用于各自特定的场景和人群,目前还未出现可以通用的技术,每增加一种新的动作或运动均需要建立数据集进行训练;③测试项目有限,仅能测得徒手运动时的能量消耗,无法获得静息能耗和食物动力效应,且无法准确测量需要器械的力量训练及以肌肉静力性收缩的动作;④存在隐私保护问题,视频采集会泄露受试者信息。

## 6 能耗测量技术发展的动因与局限

纵观能耗测量方法的发展史,在科技浪潮的推动下能耗测量技术不断革新。科学研究的需求(内驱力)

与理论和技术的进步(外驱力)是推动能耗测量技术发展的重要因素。17—18世纪测热理论的建立是能耗测量技术诞生的直接原因。19世纪在代谢疾病日益严峻的背景下,人体代谢系统研究的进步驱动了人体测热系统的开发。20世纪后,第二次工业革命带来的技术飞跃以及对新陈代谢的深入研究再次助力能耗测量技术的革新,涌现出许多新方法。21世纪在人工智能的赋能下能耗测量技术实现无接触式测量的新突破。能耗测量技术逐渐将目光从测热法转至非测热法(图4)。新陈代谢和测热理论的率先建立奠定了测热法的主导地位,这类方法通过测量代谢过程中产生的热量或参与其中的元素推算能量消耗,包括直接测热法、间接测热法和双标水法。非测热法直到20世纪中后期才逐渐出现,得益于新陈代谢理论的完善,人们意识到身体活动是能耗的重要影响因素。非测热法通过测量与身体活动相关的非热量指标,以测热法为标准建立回归方程,从而估算能量消耗,主要包括心率法、肌电图、问卷法、行为观察法、运动传感器、皮肤温度和湿度等方法,这种新思路也为后续计算机视觉技术的出现提供了理论基础。目前,关于非测热法的研究仅有几十年的历史,对于已涉及指标的了解还不够深入,仍有很多未知领域需要探索,未来非测热法将是能耗测量技术革新的关键。

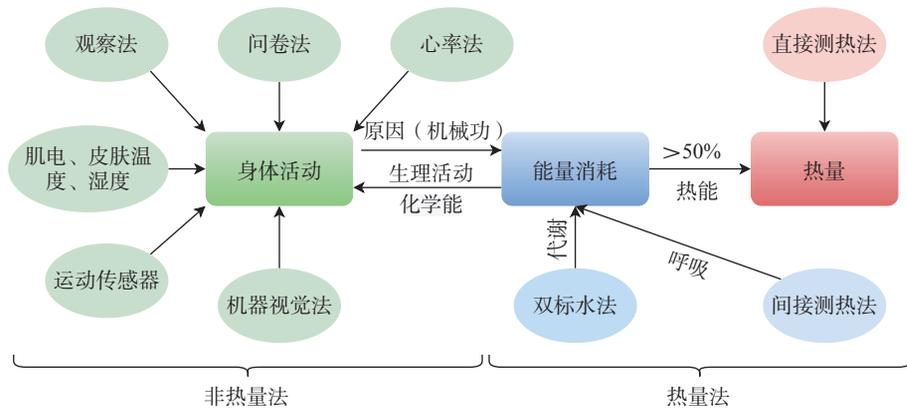


图4 身体活动能耗测试方法原理分类

Figure 4 Principle classification of energy consumption test methods of physical activity

当前的测量方法仍存在测量结果不够精准、测量环境限制、设备穿戴繁琐、数据延迟等问题(表1)。在能耗测量设备发展之初人们着重提升测量精度,忽略了设备成本和可操作性。随着测量场景的扩展,经济性和可操作性局限日益突出,能耗测量设备开始向小

体积、低成本、便携式方向发展。现有测量技术均可在一定程度上兼顾2种因素,但还未有方法能同时满足3种需求(表1雷达图)。此外,目前的设备几乎只适用于有氧运动状态,对无氧运动的评估方法很少,因此,创建更全面的测量技术是未来需要突破的方向。

表 1 常用身体活动能量消耗测量方法对比

Table 1 Comparison of commonly used energy consumption measurement methods of physical activity

方法	单次测量人数	测量时长	精度、经济性和可操作性	基础代谢率	静息能耗	食物动力效应	具体运动能耗	总能耗	优势	局限
直接测热法 <sup>[8]</sup>	1	1~7 d		√	√	√	√	√	信息全, 精度高	仅在实验室内使用, 受试者不自由, 设备操作复杂, 成本高
间接测热法 <sup>[8]</sup>	1	<9 h		√	√	√	√	√	信息全, 精度高	无法长时间测试, 仅在小场地内使用, 佩戴面罩影响呼吸
双标水法	1	1~3周		×	×	×	×	√	精度高, 可长期测量, 不影响受试者活动	成本高, 只有总能耗信息, 无法单独计算各种活动能耗
心率法	1	1~2周		×	×	×	×	√	成本较低, 可重复使用, 采集便捷	精度差, 易受环境情绪影响
问卷法	1	<1 h		×	×	×	×	×	便捷, 成本低, 适合大样本研究	精度较低, 无法获取具体能耗值
行为观察法	>1	1~3周		×	×	×	√	√	适用于儿童和青少年	人工成本高
运动传感器	1	1~2周		×	×	×	√	√	成本较低, 可重复使用, 采集便捷, 可用于中等样本量研究	佩戴设备可能影响受试者运动和生活, 且精度有待提高
计算机视觉	>1	不受时长限制		×	×	×	√	√	成本较低, 无穿戴, 不影响受试者, 使用场景广泛, 可长期测量	仍处于发展阶段, 无通用算法, 精度需要提高, 有隐私泄露的风险

注: √表示具有该功能, ×表示不具有该功能。

## 7 展望

随着人工智能时代的来临, 智能化、无接触的测量技术可能成为重点发展趋势, 需要在保证精度且不影响受试者活动的情况下更经济地测量能耗。目前计算机视觉技术已被证实有望提高测量的经济性和可操作性, 未来应集中力量突破测量精度的瓶颈。测热法的核心是对热量或呼吸气体的测量与分析, 未来可利用微型传感器, 将设备置于皮肤表面或鼻腔内, 实现远程数据传输, 使设备更加便捷。非测热法的开发尚浅, 未

来应探索更多与运动相关的生理指标, 提高测量精度, 完善理论框架。

### 作者贡献声明:

王轶凡: 收集、整理文献资料, 设计论文框架, 撰写、修改论文;

温煦: 提出论文选题, 设计论文框架, 提供资料支持, 修改论文。

## 参考文献

- [ 1 ] 朱琳,陈佩杰. 能量消耗测量方法及其应用[J]. *中国运动医学杂志*, 2011, 30(6): 577-582
- [ 2 ] AREM H, MOORE S C, PATEL A, et al. Leisure time physical activity and mortality: A detailed pooled analysis of the dose-response relationship[J]. *JAMA Internal Medicine*, 2015, 175(6): 959-967
- [ 3 ] MURDOCH D R. High life: A history of high altitude physiology and medicine[J]. *BMJ*, 1999, 318(7198): 1631
- [ 4 ] HEYMSFIELD S B, BOURGEOIS B, THOMAS D M. Assessment of human energy exchange: Historical overview[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2017, 71(3): 294-300
- [ 5 ] SANTORIO S, DAVIES J, STARKEY J, et al. *Medicina statica, or, rules of health in eight sections of aphorisms*[M]. London: Printed for John Starkey at the Miter in Fleetstreet, near Temple Bar, 1676: 1
- [ 6 ] MCLEAN J A, TOBIN G. *Animal and human calorimetry*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987: 1
- [ 7 ] WEST J B. *High life: A history of high-altitude physiology and medicine*[M]. New York: Springer, 1998: 1
- [ 8 ] AINSLIE P, REILLY T, WESTERTEP K. Estimating human energy expenditure: A review of techniques with particular reference to doubly labelled water[J]. *Sports Medicine*, 2003, 33(9): 683-698
- [ 9 ] DONOVAN A. *Science, administration, and revolution*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 1
- [ 10 ] MENDELSON E. *Heat and life: The development of the theory of animal heat*[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1964: 1
- [ 11 ] KENNY G P, NOTLEY S R, GAGNON D. Direct calorimetry: A brief historical review of its use in the study of human metabolism and thermoregulation[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2017, 117(9): 1765-1785
- [ 12 ] WEST J B, BLACK J. Carbon dioxide, latent heat, and the beginnings of the discovery of the respiratory gases[J]. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology*, 2014, 306(12): L1057-L1063
- [ 13 ] MTAWEH H, TUIRA L, FLOH A A, et al. Indirect calorimetry: History, technology, and application[J]. *Frontiers in Pediatrics*, 2018, 6: 257
- [ 14 ] MCLAUGHLIN J E, KING G A, HOWLEY E T, et al. Validation of the COSMED K4 b2 portable metabolic system[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2001, 22(4): 280-284
- [ 15 ] LAMBIE C G. Obesity: Aetiology and metabolism[J]. *British Medical Journal*, 1935, 2(3905): 885-889
- [ 16 ] MURLIN J R, BURTON A C. Human calorimetry: I. A semi-automatic respiration calorimeter: Nine figures[J]. *The Journal of Nutrition*, 1935, 9(2): 233-260
- [ 17 ] WINSLOW C E A, HERRINGTON L P, GAGGE A P. A new method of partitional calorimetry[J]. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 1936, 116(3): 641-655
- [ 18 ] GARROW J S, MURGATROYD P, TOFT R, et al. A direct calorimeter for clinical use [proceedings][J]. *The Journal of Physiology*, 1977, 267(1): 15-16
- [ 19 ] JÉQUIER E. Direct calorimetry: A new clinical approach for measuring thermoregulatory responses in man[J]. *Bibliotheca Radiologica*, 1975(6): 185-190
- [ 20 ] ROTH P. Modifications of apparatus and improved technic adaptable to the benedict type of respiration apparatus[J]. *The Boston Medical and Surgical Journal*, 1922, 186(15): 491-498
- [ 21 ] SIMONSON D C, DEFRONZO R A. Indirect calorimetry: Methodological and interpretative problems[J]. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 1990, 258(3): E399-E412
- [ 22 ] LEPRÉTRE P M, WEISSLAND T, PATON C, et al. Comparison of 2 portable respiratory gas analysers[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2012, 33(9): 728-733
- [ 23 ] 孙建刚,刘阳,任波,等. 身体活动客观测量方法的比较与选择[J]. *体育科研*, 2021, 42(1): 69-76
- [ 24 ] LIFSON N, GORDON G B. The fate of utilized molecular oxygen and the source of the oxygen of respiratory carbon dioxide, studied with the aid of heavy oxygen[J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1949, 180(2): 803-811
- [ 25 ] SPEAKMAN J R. The history and theory of the doubly labeled water technique[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1998, 68(4): 932S-938S
- [ 26 ] SCHOELLER D A, VAN SANTEN E. Measurement of energy expenditure in humans by doubly labeled water method[J]. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 1982, 53(4): 955-959
- [ 27 ] BERGGREN G, CHRISTENSEN E H. Heart rate and body temperature as indices of metabolic rate during work[J]. *Arbeitsphysiologie*, 1950, 14(3): 255-260
- [ 28 ] 戴剑松,孙颀. 体力活动测量方法综述[J]. *体育科学*, 2005, 25(9): 69-75
- [ 29 ] FREEDSON P S, MILLER K. Objective monitoring of physical activity using motion sensors and heart rate[J]. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 2000, 71(sup2): 21-29
- [ 30 ] KALKWARF H J, HAAS J D, BELKO A Z, et al. Accuracy of heart-rate monitoring and activity diaries for estimating energy expenditure[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1989, 49(1): 37-43
- [ 31 ] WESSEL J A, MITCHELL H, MONTOYE H J. Physical activity assessment: By recall records[J]. *American Journal of Public Health and the Nation's Health*, 1965, 55(9): 1430-1436
- [ 32 ] CRAIG C L, MARSHALL A L, SJÖSTRÖM M, et al.

- International physical activity questionnaire: 12-country reliability and validity[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2003, 35(8): 1396
- [33] ROSENBERG D E, BULL F C, MARSHALL A L, et al. Assessment of sedentary behavior with the International Physical Activity Questionnaire[J]. *Journal of Physical Activity & Health*, 2008, 5(Suppl 1): S30-S44
- [34] WASHBURN R A, SMITH K W, JETTE A M, et al. The physical activity scale for the elderly (PASE): Development and evaluation[J]. *Journal of Clinical Epidemiology*, 1993, 46(2): 153-162
- [35] DWYER G M, HARDY L L, PEAT J K, et al. The validity and reliability of a home environment preschool-age physical activity questionnaire (Pre-PAQ)[J]. *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 2011, 8: 86
- [36] HELMERHORST H J F, BRAGE S, WARREN J, et al. A systematic review of reliability and objective criterion-related validity of physical activity questionnaires[J]. *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 2012, 9: 103
- [37] BASSETT D R Jr, AINSWORTH B E, SWARTZ A M, et al. Validity of four motion sensors in measuring moderate intensity physical activity[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2000, 32(9 Suppl): S471-S480
- [38] MEIJER G A, WESTERTERP K R, VERHOEVEN F M, et al. Methods to assess physical activity with special reference to motion sensors and accelerometers[J]. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 1991, 38(3): 221-229
- [39] 汤强, 王香生, 盛蕾. 体力活动测量方法研究进展[J]. *体育与科学*, 2008, 29(6): 79-86
- [40] ARVIDSSON D, SLINDE F, HULTHÉN L. Free-living energy expenditure in children using multi-sensor activity monitors[J]. *Clinical Nutrition*, 2009, 28(3): 305-312
- [41] YAMADA S, BABA Y. Validity of daily energy expenditure estimated by calorie counter combined with accelerometer[J]. *Journal of UOEH*, 1990, 12(1): 77-82
- [42] LOPRINZI P D. Accelerometer-determined physical activity and all-cause mortality in a national prospective cohort study of hypertensive adults[J]. *Journal of Hypertension*, 2016, 34(5): 848-852
- [43] 刘阳. 基于加速度计的身体活动测量研究前沿[J]. *北京体育大学学报*, 2016, 39(8): 66-73
- [44] 王欢, 王馨塘, 佟海青, 等. 三种加速度计测量多种身体活动的效度比较[J]. *体育科学*, 2014, 34(5): 45-50, 65
- [45] BLAKE O M, WAKELING J M. Estimating changes in metabolic power from EMG[J]. *SpringerPlus*, 2013, 2(1): 229
- [46] WILLIAMS G, LI S Y, PATHIRANA P N. Preliminary investigation of energy comparison between gyroscope, electromyography and VO<sub>2</sub> wearable sensors[J]. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2016, 2016: 4963-4966
- [47] BARANOWSKI T, THOMPSON W O, DURANT R H, et al. Observations on physical activity in physical locations: Ager gender, ethnicity, and month effects[J]. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1993, 64(2): 127-133
- [48] PUHL J, GREAVES K, HOYT M, et al. Children's activity rating scale (CARS): Description and calibration[J]. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 1990, 61(1): 26-36
- [49] MCKENZIE T L, SALLIS J F, NADER P R, et al. BEACHES: An observational system for assessing children's eating and physical activity behaviors and associated events[J]. *Journal of Applied Behavior Analysis*, 1991, 24(1): 141-151
- [50] BROWN W H, ODOM S L, LI S M, et al. Ecobehavioral assessment in early childhood programs[J]. *The Journal of Special Education*, 1999, 33(3): 138-153
- [51] MCKENZIE T L, MARSHALL S J, SALLIS J F, et al. Leisure-time physical activity in school environments: An observational study using SOPLAY[J]. *Preventive Medicine*, 2000, 30(1): 70-77
- [52] SHURAN M, NELSON R A. Quantitation of energy expenditure by infrared thermography[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1991, 53(6): 1361-1367
- [53] ALTINI M, CASALE P, PENDERS J F, et al. Personalization of energy expenditure estimation in free living using topic models[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2015, 19(5): 1577-1586
- [54] NOVAK D, MIHELJ M, MUNIH M. Psychophysiological responses to different levels of cognitive and physical workload in haptic interaction[J]. *Robotica*, 2011, 29(3): 367-374
- [55] TIKKANEN O, KÄRKKÄINEN S, HAAKANA P, et al. EMG, heart rate, and accelerometer as estimators of energy expenditure in locomotion[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2014, 46(9): 1831-1839
- [56] VILLAR R, BELTRAME T, HUGHSON R L. Validation of the Hexoskin wearable vest during lying, sitting, standing, and walking activities[J]. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 2015, 40(10): 1019-1024
- [57] 马勇, 马佳仪, 孙志远, 等. 体力活动测量方法与工具的新趋势[J]. *山东体育学院学报*, 2021, 37(4): 112-118
- [58] CLARK C C T, BARNES C M, STRATTON G, et al. A review of emerging analytical techniques for objective physical activity measurement in humans[J]. *Sports Medicine*, 2017, 47(3): 439-447
- [59] BRAGE S, BRAGE N, FRANKS P W, et al. Branched equation modeling of simultaneous accelerometry and heart rate monitoring improves estimate of directly measured physical activity energy expenditure[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2004, 96(1): 343-351
- [60] 张冬梅, 武杰, 李丕丁. 基于机器视觉的运动目标检测算法综述[J]. *智能计算机与应用*, 2020, 10(3): 192-195, 201

- [61] DECOST B L, HOLM E A. A computer vision approach for automated analysis and classification of microstructural image data[J]. *Computational Materials Science*, 2015, 110: 126-133
- [62] DI PRAMPERO P E, FUSI S, SEPULCRI L, et al. Sprint running: A new energetic approach[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2005, 208(Pt 14): 2809-2816
- [63] DI PRAMPERO P E, OSGNACH C. Metabolic power in team sports - part 1: An update[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2018, 39(8): 581-587
- [64] 缪律, 吕季东, 吴瑛, 等. 不同类型足球小场地比赛球员跑动表现及能量消耗的差异[J]. *上海体育学院学报*, 2021, 45(5): 81-88
- [65] OSGNACH C, POSER S, BERNARDINI R, et al. Energy cost and metabolic power in elite soccer: A new match analysis approach[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2010, 42(1): 170-178
- [66] SILVA P, SANTIAGO C, REIS L P, et al. Assessing physical activity intensity by video analysis[J]. *Physiological Measurement*, 2015, 36(5): 1037-1046
- [67] CARLSON J A, LIU B, SALLIS J F, et al. Automated ecological assessment of physical activity: Advancing direct observation[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(12): 1487
- [68] CARLSON J A, LIU B O, SALLIS J F, et al. Automated high-frequency observations of physical activity using computer vision[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2020, 52(9): 2029-2036
- [69] GRAY A, ANDREWS M, WALDRON M, et al. A model for calculating the mechanical demands of overground running[J]. *Sports Biomechanics*, 2020: 1-22
- [70] BOTTON F, HAUTIER C, ECLACHE J P. Energy expenditure during tennis play: A preliminary video analysis and metabolic model approach[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2011, 25(11): 3022-3028
- [71] TAO L L, BURGHARDT T, MIRMEHDI M, et al. Energy expenditure estimation using visual and inertial sensors[J]. *IET Computer Vision*, 2018, 12(1): 36-47
- [72] JOHANSSON G. Visual perception of biological motion and a model for its analysis[J]. *Perception & Psychophysics*, 1973, 14(2): 201-211
- [73] LIU Z B, TANG S C, QIN H L, et al. Evaluating user's energy consumption using kinect based skeleton tracking [C]//*Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimedia*. New York: ACM, 2012: 1373-1374
- [74] NATHAN D, HUYNH D Q, RUBENSON J, et al. Estimating physical activity energy expenditure with the Kinect Sensor in an exergaming environment[J]. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0127113
- [75] KIM M, ANGERMANN J, BEBIS G, et al. ViziCal: Accurate energy expenditure prediction for playing exergames[C]// *ACM symposium on user interface software & technology*. New York: ACM, 2013: 397-404
- [76] 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
- [77] 陈超, 孙少明, 王威, 等. 基于移动端的人体运动能耗检测系统[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(2): 115-120
- [78] LIN B S, WANG L Y, HWANG Y T, et al. Depth-camera-based system for estimating energy expenditure of physical activities in gyms[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2019, 23(3): 1086-1095
- [79] 温煦, 杨雨馨, 高元龙, 等. 基于OpenPose计算机视觉算法的健身操能量消耗非接触式测量方法[J]. *上海体育学院学报*, 2022, 46(8): 23-32, 55
- [80] 施家栋, 王建中, 王红茹. 基于光流的人体运动实时检测方法[J]. *北京理工大学学报*, 2008, 28(9): 794-797
- [81] HORN B K P, SCHUNCK B G. Determining optical flow[J]. *Artificial Intelligence*, 1981, 17(1-3): 185-203
- [82] JENSEN M M, POULSEN M K, ALLDIECK T, et al. Estimation of energy expenditure during treadmill exercise via thermal imaging[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2016, 48(12): 2571-2579
- [83] KOPOREC G, VUČKOVIĆ G, MILIĆ R, et al. Quantitative contact-less estimation of energy expenditure from video and 3D imagery[J]. *Sensors*, 2018, 18(8): 2435

## From Direct Calorimetry to Computer Vision: History and Future of Measurement of Energy Consumption in Physical Activities

WANG Yifan<sup>1</sup>, WEN Xu<sup>1,2</sup>

**Abstract:** The development process of energy consumption measurement technology is systematically reviewed and clarified; various energy consumption measurement methods are analyzed; the new technology of computer vision estimation of human body energy consumption is mainly introduced; the development direction of energy consumption measurement technology in the new era of artificial intelligence is explored. Since the 17th century,

the energy consumption measurement technology has gradually extended to a variety of non-calorimetric methods which started from the calorimetric method, resulting from the reason that calorimetric theories were established in 17th and 18th centuries. The 19th century witnessed the development of human body calorimetric system with the research progress on metabolism system, in the context of increasingly serious diseases. Since the 20th century, the technology innovation from the second industry revolution and further research on metabolism have helped the renewal of energy consumption measurement technology. Artificial Intelligence (AI) in the 21st century empowered the technology to develop into contactless measurement methods. With the impetus of research needs, theory and technology development, the existing measurement technologies have been renewing, but they still have limitations in terms of the measurement accuracy, operability and economy. Calorimetric method is characterized by high cost, complex operation, and poor practicability, while non-calorimetric method still needs to be improved on measurement accuracy. With the advent of the era of AI, intelligent and contactless measurement technology will be a key development direction. Microsensor is suggested to be applied regarding the calorimetric method; remote data transmission can be used to make the equipment quicker and more convenient. When regarding the non-calorimetric method, more related physical signs shall be explored to improve its measurement accuracy.

**Keywords:** energy consumption; physical activity; calorimetric method; non-calorimetric method; computer vision technology

**Authors' addresses:** 1. College of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310028, Zhejiang, China; 2. Department of Public Sports and Art, Zhejiang University, Hangzhou 310028, Zhejiang, China

(上接第 70 页)

## Characteristics of Interdisciplinary Knowledge Flow in Sports Science Based on Citation Analysis

ZHANG Yuanliang, XUE Yuan

**Abstract:** Taken 79,758 sports science research papers collected from the core collection data in Web of Science from 2011 to 2020 as samples, the characteristics of interdisciplinary knowledge flow of sports science from the two dimensions of knowledge absorption and knowledge diffusion are analyzed by the methods of literature measurement and visualization. The results show that the knowledge absorption of sports science mainly comes from the journal groups such as health, nursing, medicine, molecular genetics, biology, psychology, pedagogy, sociology and rehabilitation, etc., and has gradually formed a relatively stable interdisciplinary research model. In the corresponding time period, the knowledge diffusion breadth of sports science increases logarithmically with time; the knowledge diffusion intensity shows the characteristics of power-law distribution, while the knowledge diffusion speed increases exponentially with time. 15 disciplines such as orthopedics, surgery, rehabilitation, physiology and other are the core disciplines of knowledge diffusion for sports science while the research fields of interdisciplinary knowledge flow mainly focus on sports trauma, sports physiology, sports rehabilitation, sports psychology, sports sociology, sports system engineering, sports neuroscience, sports health and environment, sports nutrition, sports biomechanics, physical education and teaching, children's sports and geriatric sports medicine, etc.

**Keywords:** citation analysis; sports science; interdisciplinary; knowledge flow

**Authors' address:** School of Physical Education, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China