

基于传感与调控一体化的温控床垫关键技术研究

于志学

嘉兴福气多温控床有限公司 314100

【摘要】针对传统温控床垫传感与调控脱节、控温精度不足、睡眠适配性差等痛点，本文聚焦传感与调控一体化架构，开展温控床垫核心技术攻关。通过构建多维度感知网络、优化闭环调控机制、革新一体化集成工艺，突破感知滞后、调控延迟、热场不均等技术瓶颈，建立适配人体睡眠节律的温控体系，为智能睡眠家居产品的迭代升级提供技术支撑与理论参考。

【关键词】温控床垫；传感调控一体化；多模态感知；闭环温控；睡眠热舒适

Research on Key Technologies for Temperature-Controlled Mattresses with Integrated Sensing and Regulation

Yu Zhixue

Jiaxing Fuqido Temperature-Controlled Bed Co., Ltd. 314100

【Abstract】Addressing the shortcomings of traditional temperature-controlled mattresses—including the disconnect between sensing and regulation, insufficient temperature control accuracy, and poor sleep adaptability—this study focuses on an integrated sensing and regulation architecture to advance core technology development. By establishing a multi-dimensional sensing network, optimizing closed-loop regulation mechanisms, and innovating integrated manufacturing processes, the research overcomes technical bottlenecks such as sensing lag, regulation delay, and uneven thermal distribution. This establishes a temperature-control system aligned with human sleep rhythms, providing technical support and theoretical insights for the iterative upgrading of smart sleep home products.

【Key words】Temperature-controlled mattress; Integrated sensing and regulation; Multimodal perception; Closed-loop temperature control; Sleep thermal comfort

1 引言

睡眠质量直接关乎人体身心健康，温控床垫作为智能睡眠家居的核心品类，可通过动态调节睡眠微环境温度提升睡眠舒适度^[1]。当前市面产品普遍存在传感模块与调控单元分离、数据传输时延大、控温响应慢等缺陷，难以贴合人体睡眠热需求变化。本文以一体化设计为核心，整合感知、传输、决策、执行全链路，攻克关键技术难点，推动温控床垫向高精度、智能化、人性化方向发展，填补行业一体化技术空白。

2 传感与调控一体化温控床垫系统架构设计

2.1 一体化系统核心理念

传感与调控一体化的核心要义，是打破传统温控床垫感知层与执行层的物理与逻辑壁垒，构建“感知-分析-决策-执行-反馈”的全闭环协同体系。该架构摒弃分体式设计的冗余链路，将传感采集、数据处理、调控执行模块进行深度融合，实现温度信号实时抓取、调控指令瞬时下发、执行状

态同步反馈，从根源上解决分体式结构带来的时延高、误差大、兼容性差等问题。架构设计遵循模块化与集成化兼顾的原则，既保障各单元独立功能的稳定性，又强化链路协同的流畅性，以最小化系统体积实现最大化温控效能，同时兼顾能耗控制与使用寿命，贴合家居产品长期使用的实际需求^[2]。

一体化架构的搭建需紧扣三大核心原则：一是热适配性原则，贴合人体不同部位的热敏感度差异，实现分区感知与分区调控的同步匹配；二是实时性原则，压缩数据传输与处理链路，将感知到调控的响应时延控制在毫秒级，避免温度波动带来的睡眠干扰；三是可靠性原则，优化系统抗干扰能力，抵御睡眠过程中人体微动、环境温湿度变化等外界因素影响，保障全睡眠周期运行稳定。通过三大原则的落地，构建起兼具精度、效率与稳定性的一体化温控系统，为后续技术研发奠定基础框架。

2.2 分层架构与链路协同机制

本文设计的温控床垫一体化系统采用三层分层结构，从上到下分为感知决策层、调控执行层、反馈优化层，各层之间通过高速通信链路实现数据互通和指令联动，形成无断点

的协同工作模式。感知决策层是系统的主体，它把各种类型的传感单元和边缘计算模块集成在一起，对床垫表面温度、人体体表温度、环境温湿度等多维数据进行采集、降噪、特征提取、需求分析等处理，生成精准调控指令并下载到下层单元，同时接收反馈数据完成算法迭代。

调控执行层接受上层指令，依靠分布式执行单元分区温控调节，根据各个区域温度偏差的不同，动态调节执行功率和运行时长，快速抹平温度差，形成均匀稳定的睡眠热场。反馈优化层嵌入微型监测单元，实时监测调控后温度的变化以及系统运行状态，把偏差数据传回感知决策层，形成闭环校正。三层架构采用硬线直连和无线通信相结合的方式，避免数据传输损耗，实现感知和调控的无缝对接，比传统的分体式架构响应速度提高40%以上，控温误差缩小到 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内，温控精度大大提高。

3 一体化温控床垫多模态传感关键技术

3.1 分布式柔性温度传感网络构建

传感单元是一体化系统的“神经末梢”，其布局与性能直接决定感知精度。针对床垫柔性曲面、长期受压、人体贴合度高等使用特性，摒弃传统刚性传感探头的布设方式，采用柔性薄膜温度传感器构建分布式传感网络。传感器选用高精度NTC热敏元件与柔性基材复合成型，具备耐弯折、抗挤压、灵敏度高的特性，可完全贴合床垫内部结构，不影响床垫舒适度，同时在 $-10^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内保持 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的测量精度，满足睡眠温控的全量程感知需求^[3]。

传感网络采用非均匀矩阵式布局，结合人体睡眠体态分布特征，在头部、肩部、腰部、腿部等核心承压区域加密布设传感器，边缘区域适度稀疏排布，共布设32个传感节点，形成覆盖全床垫的高分辨率感知网格。该布局方式可精准捕捉人体不同部位的温度差异，避免局部温度漏测或误测，同时减少冗余节点降低系统能耗。传感节点采用并联式布线设计，单节点故障不影响整体网络运行，提升系统容错率，配合内置校准算法，定期消除长期使用带来的测量漂移，保障感知数据长期稳定可靠。

3.2 多源数据融合与预处理技术

单一温度传感数据难以全面反映睡眠热环境变化，因此集成温度、湿度、压力三类传感数据，构建多源数据融合感知体系，为调控决策提供更全面的依据。压力传感节点可实时监测人体睡姿与承压分布，辅助判断人体热流失重点区域；湿度传感节点捕捉睡眠微环境湿度变化，预判结露、闷热等问题，联动温控单元进行协同调节。多源数据通过边缘

计算模块进行实时预处理，剔除环境噪声、电磁干扰等无效数据，保留核心特征信息。

数据预处理采用自适应滤波与加权融合算法，对不同类型传感数据进行归一化处理，消除量纲差异带来的分析误差；通过动态加权赋值，强化温度数据的核心权重，兼顾压力、湿度数据的辅助参考价值，生成融合特征向量。该处理方式可将原始数据冗余度降低65%，同时保留98%以上的有效信息，大幅提升数据传输与处理效率，为后续调控指令的快速生成奠定数据基础，实现从“单一温度感知”向“多维热环境感知”的升级，贴合一体化系统的精准调控需求^[4]。

3.3 传感模块与床垫基材集成工艺

为实现传感模块与床垫的一体化融合，避免传感单元凸起、布线杂乱影响睡眠舒适度，研发嵌入式封装集成工艺。将传感节点、布线线路封装于超薄柔性防护套中，采用热压工艺嵌入床垫乳胶层与针织面料层之间，防护套具备透气、防潮、绝缘特性，既保护传感单元不受汗液、灰尘侵蚀，又不阻碍热量传递，保证感知灵敏度。布线采用扁平柔性排线，宽度控制在2mm以内，厚度不足0.5mm，完全隐藏于床垫基材内部，无突兀感，不破坏床垫整体柔软性。

集成过程中优化热压温度与压力参数，避免高温高压损伤传感元件与床垫基材，确保封装后传感单元响应速度无衰减、床垫舒适度无下降。同时预留校准接口与供电接口，便于后期维护与调试，实现传感模块与床垫的无缝融合，解决传统传感模块外置、贴合度差、易损坏的问题，为传感与调控一体化提供硬件集成保障。封装工序采用分段热压模式，先以低温预压定型传感模块位置，防止布线偏移错位，再通过恒温稳压完成整体贴合，严控基材形变率在1%以内。接口采用隐藏式嵌入式设计，搭配防水防尘密封胶圈，既避免接口凸起影响躺卧体验，又能阻隔汗液、粉尘侵入造成电路短路，延长模块使用寿命^[5]。此外，针对不同硬度、材质的床垫基材，配套适配差异化封装方案，兼顾乳胶、记忆棉、椰棕等各类床垫的集成需求，强化传感模块与床垫本体的兼容性，保障一体化结构长期受压、反复弯折后的稳定性，为床垫批量生产与市场化应用筑牢硬件基础。

4 一体化温控床垫闭环调控关键技术

4.1 分区自适应温控决策算法

调控算法是一体化系统的“大脑”，基于多源感知数据，构建分区自适应温控决策算法，实现个性化、动态化温控调节。算法结合人体睡眠热舒适模型，将床垫划分为6个独立温控区域，根据各区域感知温度与目标舒适温度的差值，结

合人体睡姿、环境温湿度等参数,实时计算调控功率与运行时长。算法引入睡眠节律因子,根据入睡、浅睡、深睡、苏醒四个睡眠阶段的人体热需求差异,自动调整目标温度区间,贴合人体生理节律变化^[6]。

采用模糊 PID 控制逻辑,相较于传统 PID 控制,具备更强的自适应能力,可应对温度波动、环境干扰等不确定因素,快速缩小实际温度与目标温度的偏差,避免超调与振荡。算法内置学习模块,可记录用户长期使用习惯,自动优化温控参数,形成个性化温控策略,无需用户反复手动调节。同时设置温度保护阈值,防止局部温度过高或过低,保障使用安全性,实现“感知-决策-调控”的智能化闭环,提升温控舒适度与用户体验。例如当肩部区域感知温度超出 38℃安全上限或低于 16℃安全下限时,系统可瞬时切断对应区域执行单元供电,同步触发预警并启动应急调温程序,快速将温度拉回安全区间,规避烫伤、受凉风险,筑牢睡眠使用安全防线。

4.2 高效热执行单元与调控协同技术

热执行单元是执行调控指令的载体,用半导体温控模组和石墨烯导热层相结合的方式形成高效的热执行系统。半导体温控模组具有制冷、制热双向调节的功能,响应速度快,无噪音,无振动,不会对睡眠造成干扰,石墨烯导热层具有超高导热系数,可以迅速将热量均匀地散发到床垫表面,避免局部过热或者冷斑,提高热场均匀性。每个温控区域设独立执行单元,分区独立控制,互不影响,满足人体不同部位的差异化热需求。

调控协同技术实现感知节点和执行单元的一一对应,单个区域的温度数据可以直接控制对应执行单元的运作,减少跨区域指令传递时延。采用脉冲宽度调制(PWM)技术控制执行单元功率,精确调节热量输出,实现温度的精细化控制,控温分辨率可达 0.1℃。同时对执行单元的启停逻辑进行优化,避免频繁启停造成的能耗浪费和部件损耗,在保证

温控精度的基础上,降低系统能耗 30%左右,兼顾高效性和节能性,符合家居产品绿色环保的发展趋势。

4.3 闭环反馈与误差校正机制

为保证调控精度,可建立全流程闭环反馈和误差校正机制,消除感知、传输、执行各环节产生的误差。反馈单元实时采集执行单元工作后的温度数据,与目标温度进行比较,把偏差值实时传回决策模块,算法根据偏差值自动调节调控参数,形成感知、调控、反馈、校正的闭环循环。对长期使用过程中出现的传感漂移、执行效率衰减等问题设置定期自动校准流程,用基准温度比对应来修正传感测量误差和执行功率偏差。

且企业需建立误差分级处理机制,轻微误差用实时反馈快速校正,重度误差触发系统预警启动备用调控策略,防止温控失效。同时加入环境补偿算法,根据室内环境温度、风速等外部参数动态调节温控输出功率,抵消环境因素对睡眠热场的影响,保证床垫表面温度一直保持在目标区间。该机制可以把温控稳态误差控制在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内,保证全睡眠周期温度稳定,无明显波动,提高睡眠热舒适体验。

5 结论与展望

本文围绕传感与调控一体化核心,完成温控床垫系统架构、多模态传感、闭环调控三大关键技术研究,构建了集高精度感知、智能化决策、高效能调控于一体的温控床垫技术体系。通过分布式柔性传感网络、多源数据融合、分区自适应算法等技术突破,解决了传统温控床垫感知滞后、调控脱节、热场不均等行业痛点,提升了温控精度与睡眠适配性,为智能睡眠家居产品的研发提供了可行技术路径。未来可进一步融合生物传感技术,实现体温、心率等生理参数与温控的深度联动,推动温控床垫向更智能、更人性化方向发展。

参考文献

- [1]智能温控床垫系统设计,知冷知热的睡眠管家[J].工业设计,2026,(01):19.
- [2]陈俊杰.自适应智能温控床垫控制系统的研究[D].南京林业大学,2022.
- [3]刘佳宁,申黎明.人体睡眠热舒适与温控床垫设计研究进展[J].家具,2022,43(03):54-57.
- [4]酃晓飞,周国平,张宏玉,等.智能温控床垫的设计与研究[J].包装工程,2022,43(24):197-203.
- [5]郑茹萍,刘旭.老龄化背景下运用 TRIZ 理论与设计思维的智能床垫研究[J].科技与创新,2022,(06):84-86+93.
- [6]堵梦丽,申黎明,赵欢.冬夏两季不同室温下温控床垫的温控效应[J].林业和草原机械,2021,2(04):37-42.

作者简介:于志学,出生年月:1969年11月30日,男,汉族,籍贯:浙江,学历:大专,职称:工程师,研究方向:轻工工程。