

低温热水地面辐射供暖热计量方案探讨

刘春祥

包头市热力(集团)有限责任公司 内蒙古 包头 014030

摘要: 低温热水地面辐射供暖以其舒适、节能和节省室内空间等优势,在我国新建建筑中得到广泛应用。然而,其独特的热工特性和系统构造为热计量工作带来了新的技术挑战。本文系统分析了低温热水地面辐射供暖系统的热工特性及其对热计量的影响,指出现有主流热计量方法在应用于该系统时的适用性与局限性。在此基础上,从计量方式选择、热量分摊模型构建、室内温度修正以及数据管理平台建设等方面,提出了一套适应低温热水地面辐射供暖系统特点的热计量综合解决方案,旨在为供热体制改革和建筑节能工作提供理论参考。

关键词: 低温热水地面辐射供暖;热计量;热量分摊;热工特性;供热计量

引言

随着我国城镇化进程的持续推进和人民生活水平的不断提高,建筑供暖能耗已成为建筑运行能耗的重要组成部分。在“双碳”目标背景下,推进供热计量收费改革、促进用户行为节能,已成为建筑供热领域节能减排的重要途径。低温热水地面辐射供暖(以下简称“地面辐射供暖”)作为一种新兴供暖方式,因具有温度梯度合理、舒适性好、不占用室内使用面积等突出优点,近年来在住宅和公共建筑中获得了迅速推广。然而,地面辐射供暖系统在热工特性上与传统的散热器供暖系统存在显著差异,这给热计量工作带来了新的技术难题。地面辐射供暖系统热惰性大、蓄热效应明显,传统以入户热量表为核心的计量方法难以准确反映用户的实时用热行为和实际获得的热舒适水平。如何在充分认识地面辐射供暖热工特性的基础上,设计科学合理的热计量方案,实现“公平、公正、合理”的热量分摊,已成为供热行业面临的重要技术课题。

1 低温热水地面辐射供暖的系统特征

1.1 系统的构造与工作原理

低温热水地面辐射供暖系统以温度不高于60℃的热水为热媒,通过埋设在建筑地面构造层内的加热盘管循环流动,将热量以辐射和对流的方式传递至地面表面,再由地面表面向室内空间辐射散热,从而实现室内供暖。其地面构造由下至上通常包括绝热层、加热管、填充层和地面面层等组成部分。其中,绝热层铺设于结构楼板之上,主要起减少向下热损失的作用;加热管固定在绝热层上方,是热媒流过的通道;填充层包裹加热管,既起保护管道的作用,又具有蓄热和均匀传热的功能。

1.2 系统的热工特性

地面辐射供暖系统的热工性能与散热器供暖系统存

在本质区别,主要体现在以下几个方面。其一,辐射传热占主导地位。地面辐射供暖以辐射传热为主要方式,辐射换热量占总换热量的比例可达50%以上。这种传热方式的差异决定了室内温度场分布更为均匀,但同时也使得热计量中单纯依靠供水温度或回水温度的方法难以全面反映实际供热量^[1]。其二,系统热惯性大。由于填充层(通常为混凝土或水泥砂浆)具有较大的热容量,地面辐射供暖系统的热惯性显著大于散热器系统。当供水温度发生变化时,地面表面温度和室内空气温度的变化存在明显滞后,这种蓄热效应使得瞬时热量的测量与用户瞬时热舒适感受之间存在偏差。其三,地面表面温度受限制。为满足人体热舒适要求和防止地面温度过高对人体健康产生不利影响,地面表面温度通常被限制在24℃至26℃之间(对于经常停留区域)。这一限制条件决定了地面辐射供暖系统以“低温大流量”为运行特征,供回水温差较小,一般为5℃至10℃,这对热量计量仪表的精度和量程提出了更高要求。

1.3 系统的运行特点

在实际运行中,地面辐射供暖系统呈现出间歇供暖与连续供暖并存的复杂模式。对于住宅建筑,用户可能有不同的用热需求,同一栋建筑内不同住户对供暖温度和时长的要求各不相同,形成了复杂的部分负荷运行工况。同时,地面辐射供暖系统的热响应滞后使得系统启停控制不宜过于频繁,这进一步增加了热计量的复杂性。

2 现有热计量方法及其适用性分析

2.1 常用热计量方法概述

目前,我国供热计量领域常见的方法主要包括热量表法、热分配表法和通断时间面积法。热量表法是依据热力学第一定律,通过测量流经用户的热水流量和供回水温差来计算用户消耗热量的方法。其数学表达式为

$Q = \int q_v \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t \cdot dt$, 其中 q_v 为体积流量, ρ 为热水密度, c_p 为热水定压比热容, Δt 为供回水温差。该方法原理清晰、物理意义明确, 是目前应用最为广泛的户用热量计量方法。热分配表法是通过在每组散热器表面安装蒸发式或电子式热分配表, 根据散热器表面温度与室内温度的差值随时间积分来计算各散热器的散热量, 再按比例分摊楼栋总热量。该方法适用于散热器供暖系统, 其优点在于不必在每户安装热量表, 初投资相对较低。通断时间面积法是通过统计每户供暖阀门开启的时间, 结合用户的供暖面积占比来进行热量分摊的一种方法。该方法不直接测量热量, 而是将供热时间作为衡量用热量的间接指标。

2.2 地面辐射供暖条件下各方法的适用性分析

上述方法在散热器供暖系统中已积累了较为丰富的应用经验, 但将其直接移植于地面辐射供暖系统, 均存在一定的适用性问题。

2.2.1 对于热量表法

虽然户用热量表可以直接安装于入户管道上, 测量进入该户的热量, 但如前所述, 地面辐射供暖系统供回水温差小(常规工况下仅为 5°C 左右), 这对热量表配对温度传感器的测量精度提出了很高要求。目前市场上常用的热量表在供回水温差较小时测量误差显著增大, 在部分负荷运行时尤为突出。此外, 该系统巨大的热惯性使得热量表测量的瞬时热量与用户的实时热需求之间存在相位差, 单纯以瞬时热量作为收费依据, 可能会在一定程度上损害计量公平性。

2.2.2 对于热分配表法

其基本假设是散热器表面温度与散热量之间存在确定性的函数关系。然而, 地面辐射供暖的散热面积是整个地面, 而非若干组散热器, 热分配表无法直接安装于地面表面进行有效测量^[2]。若将其安装在室内墙壁或地面特定位置, 所测温度既不能代表地面辐射传热量, 也难以建立与总散热量的可靠定量关系。因此, 该方法基本不适用于地面辐射供暖系统。

2.2.3 对于通断时间面积法

该方法以阀门开启时间作为用热量的度量, 隐含了一个重要前提: 在阀门开启期间, 系统的供热量是恒定不变的。然而, 地面辐射供暖系统因热惯性的存在, 即使阀门关闭, 地面的蓄热仍将继续向室内释放热量, 即“通断”状态与实际的“供热/不供热”状态之间存在显著差异。因此, 通断时间与用户实际获得的热量之间并非简单的正比关系, 该方法应用于地面辐射供暖系统时会产生较大的分摊误差。

2.3 地面辐射供暖热计量的关键问题提炼

综合上述分析, 地面辐射供暖热计量的特殊性可归纳为三个关键问题: 其一, 小温差工况下的精确计量问题, 即如何提高热量表在小温差、变流量工况下的测量精度; 其二, 热量分摊与热舒适度的关联问题, 即如何建立反映用户实际获得热舒适水平的分摊模型, 而非仅仅依赖瞬时物理热量; 其三, 系统热惯性影响的消解问题, 即如何在分摊算法中合理考虑地面蓄热效应, 实现按需供热和公平计量的有机统一。

3 适应地面辐射供暖特点的热量计量方案设计

针对上述关键问题, 本文从计量方式选择、分摊模型构建、温度修正策略和数据管理平台四个层面提出综合技术方案。

3.1 计量方式的选择与优化

基于地面辐射供暖系统的运行特点, 户用热量表法仍是首选的计量方式, 因为只有该方法能够直接测量进入用户室内的热量, 物理基础最为可靠。但在应用时需要传统方案进行以下优化。首先, 在热量表的选型方面, 应优先选用电磁式或超声波式热量表。相较于传统的机械式热量表, 电磁式和超声波式热量表无可动部件, 压损小, 且在小流量工况下仍能保持较高的测量精度。对于温度测量部分, 应选用配对精度不低于IEC60751标准中1/3DIN级的高精度铂电阻温度传感器, 并确保供回水温度传感器的配对误差在全温度范围内不超过 0.1°C 。其次, 在安装方面, 流量计应安装于供水管上, 该处水流状态相对稳定, 有利于提高流量测量精度^[3]。温度传感器应安装在管道直管段, 确保温度测量不受局部水流扰动的影响。此外, 热量表的积分仪应具有足够小的采样周期(建议不超过10秒), 以捕捉由于温控阀动作引起的供回水温差瞬时变化。

3.2 热量分摊模型的构建

户用热量表测量的是进入该户的累计热量, 但在楼栋总热量的分摊中, 还需考虑各户位置差异导致的围护结构热损失差异以及地面辐射供暖系统的蓄热特性。因此, 宜采用“楼栋总热量计量+各户热量分摊”的二级计量体系。在楼栋热力入口处安装楼栋热量表, 计量整栋建筑的总供热量。各用户的热量分摊则依据入户热量表的读数, 并按下列因素进行综合修正。第一个因素是户间传热修正。中间户与边户、顶层与中间层由于外围护结构面积不同, 通过墙体、屋顶和地面向外散失的热量存在显著差异。为体现用热公平, 应在分摊算法中引入位置修正系数, 该系数可通过理论计算(基于围护结构传热系数和面积)或实际供热数据回归分析确定。第二

个因素是热惯性修正。地面辐射供暖系统的蓄热效应使得当日供热量可能部分来自前一日甚至前几日的供热输入。因此,在按日或按采暖季进行热量分摊时,建议采用移动平均或指数平滑方法,将用户的热量表读数与室内温度历史数据进行综合处理,以削弱热惯性对当日分摊结果的冲击。第三个因素是供暖面积修正。用户的供暖面积是决定其热需求大小的基本参数,在分摊计算中应作为基础权重因子。

3.3 室内温度参数的引入与修正

在热量分摊中引入室内温度测量,是实现从“按热量收费”向“按热舒适水平收费”转变的关键环节。建议在各户的主要房间(如起居室、主卧室)设置室内温度传感器,实时采集室内空气温度数据。温度数据在热计量中的功能主要体现在两个方面:其一是进行温度达标判定,即当用户室内温度在设计供暖温度(通常为 18°C 至 20°C)上下浮动时,应对分摊结果进行相应修正;其二是参与分摊算法的反馈校正,即当某户室内温度持续偏高而热量表读数偏低时,说明可能存在户间传热得热的情况,应在分摊中予以合理调整^[4]。具体而言,可以建立以热量表读数为基础、以室内温度为约束条件的综合分摊模型。在每一结算周期内,先按各户热量表读数进行初步分摊,再根据各户室内温度与整栋建筑平均温度的偏差进行二次修正。修正幅度应与温度偏差程度成合理比例,既体现对用热行为的引导,又不至于过分放大温度测量误差的影响。关于各修正系数的具体取值,应在对系统运行数据进行统计分析的基础上,结合当地供热企业的收费政策统筹确定。

3.4 计量数据的采集与管理

地面辐射供暖热计量系统的实施离不开稳定可靠的数据采集与管理平台。该平台应包括以下几个层次。在数据采集层,应通过M-Bus、RS-485或无线通信方式,将各户热量表、温度传感器、楼栋热量表等终端设备的数据统一汇集至数据采集器。数据采集频率应根据需要设定,建议每15分钟采集一组完整数据,既保证数据的时序分辨率,又避免数据量过大造成存储压力。在数据

传输层,应采用有线网络或4G/5G无线通信方式,将采集器中的数据定时上传至供热企业的管理服务器。通信协议应符合国家现行标准《户用计量仪表数据传输技术条件》(CJ/T188)的要求,确保数据的完整性和安全性。在数据应用层,应开发专用的热计量管理软件,实现数据自动抄收、异常报警、分摊计算、账单生成和统计分析等功能。该软件还应具备数据校验机制,能够识别并标记异常数据(如热量表读数突增突降、温度传感器失效等),确保分摊结果的可靠性。

4 结语

低温热水地面辐射供暖系统的热工特性和运行特点决定了其热计量工作不能简单沿用传统散热器供暖系统的技术路线。本文通过系统分析地面辐射供暖系统在传热方式、热惯性和运行工况等方面的特殊性,指出现有热量表法、热分配表法和通断时间面积法在应用于该系统时所面临的技术瓶颈。在此基础上,提出了一套以高精度户用热量表为基础、以综合热量分摊模型为核心、以室内温度参数为约束、以数据管理平台为支撑的热计量综合解决方案。该方案的核心思想在于,地面辐射供暖热计量的目标不应仅仅是测量流入各户的热水量和热量,更应合理地反映用户实际获得的热舒适水平和公平的用热成本分担。因此,计量方案的设计必须在硬件精度提升与算法合理性改进两个维度上同步推进。供热计量改革是推动建筑节能和供热系统优化的重要杠杆,而科学合理的计量方案则是这项改革落地的技术基石。

参考文献

- [1]刘艳峰,刘加平.低温地板辐射供暖系统的热性能研究[J].暖通空调,2022,52(3):15-21.
- [2]王刚,陈超,李先庭.供热计量技术的发展现状与趋势分析[J].建筑热能通风空调,2021,40(6):1-7.
- [3]张伟,赵建成,石文星.通断时间面积法在辐射供暖系统中的应用问题探讨[J].区域供热,2023(2):34-40.
- [4]陈振乾,施明恒.低温热水地面辐射供暖热计量方法研究综述[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(4):601-609.