

既有建筑节能改造中热桥效应的检测与优化

文 / 刘智勇 安徽众锐质量检测有限公司

摘要：热桥效应是建筑节能设计中亟待解决的问题，它不仅影响室内温度的均匀性，还增加了建筑的能量损耗。本文针对热桥效应的形成机制及其对建筑节能性能的影响，提出了多项优化策略。通过采用红外检测、超声波成像、光纤分布式监测等先进检测技术，本研究构建了一个多技术融合的热桥效应检测平台，能够实现精确的热桥定位和实时监测。为降低热桥效应对能效的影响，研究还提出了被动式和主动式调控技术，并探索了构造节点的优化设计，极大地提升了节能改造效果。最终，本研究通过动态能效监测平台验证了所提优化策略的有效性，提出了切实可行的节能改造方法，并建立了热桥效应的标准化评价框架，为建筑节能设计提供了理论指导和实践依据。

关键词：热桥效应；节能改造；红外检测；数值模拟；动态监测；优化策略

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.14.016

引言

热桥指围护结构中热流强度显著增大的部位。热桥是影响建筑能耗的主要因素之一，研究表明，在传统建筑中的热桥局部能耗占建筑总能耗的10%左右；而在绿色节能建筑中热桥所造成的能耗损失最高可占到建筑总能耗损失的25%。随着全球气候变化问题的日益严重，建筑能效成为节能减排的重要目标之一。热桥效应是指建筑物中某些结构部分由于热导率较高，导致热量流失加剧，从而影响整体能效的现象^[1]。随着节能要求的提升，传统的热桥治理方法逐渐暴露出诸如局部适应性差、能效改善有限等问题。因此，寻找更加高效、智能化的检测与优化策略，成为了当前建筑节能领域的研究热点。本文将深入分析热桥效应的形成机理及其对建筑能效的影响，并结合现代科技发展，提出一种综合性的优化方法。通过多种先进检测技术的融合应用与数值模拟技术的结合，本文旨在为解决热桥效应提供新的思路与解决方案。研究重点包括热桥的精确检测、风险评估、优化设计及最终的节能效果验证，以期建筑节能改造提供科学的理论依据和实际操作指南。

一、热桥效应的形成机理与传热特性

（一）构造热桥的几何特征分析

构造热桥的几何特征对热桥效应的形成和热量传递过程起着至关重要的作用。线性热桥的几何形状决定了其热流的分布和热传导的效率，尤其是在高热导材料与低热导材料交接处，热量往往在几何角度或接触面处集结，形成局部热阻。截面的形状越复杂，热桥效应的影响往往越大。例如，边角或接缝部位的热桥，因其与外界接触的面积较小，传热能力有限，容易在这些位置形成温差集中区，导致热能过度流失。对于点状热桥，热流的分布呈现出三维扩散的规律，热量沿着热导率较高的部分集中流动，产生局部的热积聚现象。点状热桥的出现通常是在建筑接口、结构节点等地方，这些地方由于材料不均匀，或者是由于密封性不足而形成的隐蔽性热桥，其热流分布更加复杂且难以准确量化。准确理解

并模拟这些几何特征对于热桥的预测与治理至关重要，尤其是在多种材料的交界处，热流的异常变化尤为显著。

（二）材料界面传热机制研究

在热桥的形成过程中，材料的界面传热机制是不可忽视的因素。异质材料的接触界面通常会形成热阻，热阻直接影响了热能从高温端到低温端的传导效率。接触热阻的研究对于理解热桥效应至关重要，它能够量化两种不同材料之间热传递的效率。这一热阻往往受材料表面粗糙度、接触压力及其物理化学特性的影响。现代研究已经提出了许多针对这一问题的定量模型，如通过多层界面传热模型来精确模拟不同材料的热交换过程。湿迁移耦合传热的动态方程则为解决热桥效应提供了更具前瞻性的视角，特别是在气候变化频繁的环境中，湿气的迁移对热传递有着重要的影响。水蒸气的存在会加剧热传导的非线性效应，使得材料界面的热阻发生变化，从而影响整体热桥效应的强度。

（三）环境参数耦合作用机制

环境参数对热桥效应的影响是多方面的，尤其是风速与太阳辐射等因素，它们通过改变建筑表面的热交换系数，直接影响热量的传递过程。风速对表面换热系数的修正模型提供了一种新的思路，风速的增加会加剧表面热流的散失，导致热桥效应更为明显。具体来说，风速增大时，建筑外墙表面热量的传导速率提高，温差加剧，从而进一步放大热桥的负面影响。此外，太阳辐射对建筑表面的非均匀加热效应，也是热桥效应研究中不可忽视的因素。太阳辐射在建筑表面的照射不是均匀的，表面温度差异较大的区域容易成为热桥形成的“温床”。特别是在建筑物表面朝向阳光的方向，太阳辐射强度较大，局部区域会因过度加热形成温度梯度，导致局部热流的集中（如图1为太阳辐射对热桥效应的影响机制图）。针对这一问题，研究人员提出了太阳辐射非均匀加热效应的分析模型，力图通过合理设计建筑外立面，减少这些环境因素对热桥效应的影响。

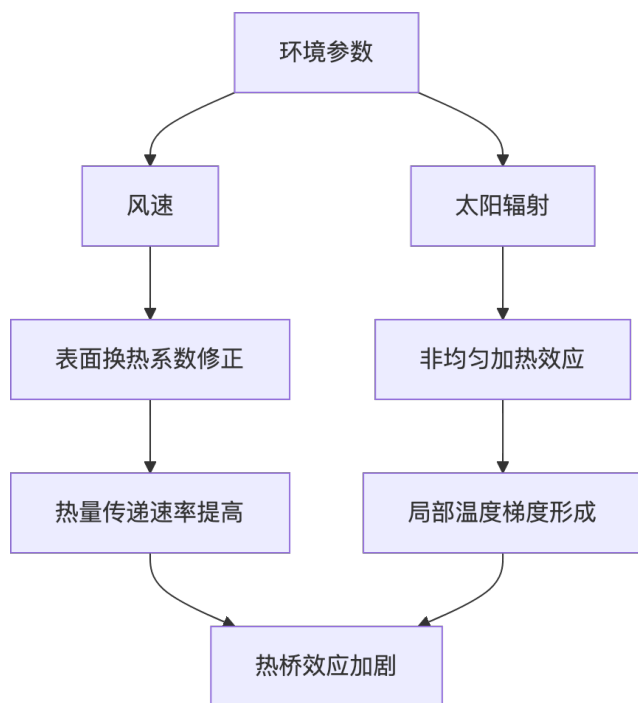


图1 太阳辐射对热桥效应的影响机制图

二、多技术融合检测方法体系

(一) 非接触式红外检测技术

非接触式红外检测技术作为一种高效的无损检测手段，已经在多领域得到广泛应用。表面温度场的亚像素级重构算法则是通过提高图像解析度和精度，能够更加准确地捕捉到表面温度的微小变化。这种算法通过对图像的像素进行超分辨率处理，推算出高精度的温度场分布，从而为后续的热流分析提供更可靠的数据支持；另一方面，热流密度的辐射反演模型进一步增强了该技术的应用价值。该模型能够从表面温度场数据中逆推热流密度的分布情况，精准地揭示出潜在的热桥或热流异常区域。其原理是根据物体表面辐射出的红外辐射特性与热流密度之间的关系，采用反演计算技术对热流场进行模拟^[2]。此方法不仅提升了红外检测技术的应用范围，也有效克服了传统热成像技术中无法定量评估热流密度的局限性。

(二) 超声波层析成像技术

超声波层析成像技术的应用为多技术融合检测方法体系增添了重要的一环。该技术通过反向求解材料内部的热导系数分布，能够有效地解决材料中存在的非均匀性与异质性问题。具体来说，超声波层析成像能够对材料的内部结构进行深入分析，推算出不同层次、不同区域的导热系数分布。在该过程中，材料的反射和透射声波会随着其导热特性的不同而发生变化。随着数学模型和算法的不断优化，超声波层析成像的反问题求解能力得到了显著提升，可以更精准地描述复杂结构中的热流行为。而界面缺陷的声阻抗特征识别则进一步拓宽了该

技术的应用场景。声阻抗特征分析通过检测材料界面处的声波传输特性变化，能够揭示出由于热桥效应或其他缺陷导致的热阻增大情况。界面处的缺陷往往是热桥形成的“温床”，通过超声波层析成像技术，可以实时监测并识别出这些隐藏的结构问题，从而为建筑结构的健康监测和维护提供了强有力的技术支持。

(三) 光纤分布式监测技术

光纤分布式监测技术作为一种高精度、高灵敏度的实时监测手段，近年来得到了广泛关注。在建筑结构健康监测中，光纤传感器能够实现温度和应变的同时监测，尤其在热桥效应的动态监测方面展现了独特的优势。温度-应变复合传感网络的构建，使得光纤分布式监测系统能够同时监控建筑物各个部位的温度和应变状态。

三、数值模拟与机器学习预测

(一) 多物理场耦合仿真模型

多物理场耦合仿真模型则是通过对不同物理场的交互作用进行模拟，可以更全面地揭示热传导、力学行为与环境因素之间的关系。非稳态边界条件的动态加载方法则是该模型中的关键技术。传统的静态边界条件假设往往无法反映实际工程中动态变化的环境条件，非稳态边界条件能够在时间维度上更准确地模拟热流和热应力的分布，尤其在建筑材料受外界气候变化影响时，该方法能够实时反映环境因素对热桥效应的推动作用^[4]。在动态加载下，模型能够捕捉到瞬时温度变化和热流密度的波动，从而提高预测的准确性；另外，相变材料界面传热的格子玻尔兹曼模拟技术为复杂材料的热传导行为提供了新的分析手段。格子玻尔兹曼方法能够有效模拟具有界面传热特征的相变材料，在热桥的形成过程中，对材料界面的热阻效应进行精确的动态追踪。

(二) 热桥风险智能评估系统

随着技术的进步，热桥风险智能评估系统已经成为建筑节能优化的重要工具。卷积神经网络(CNN)的热斑模式识别技术在此系统中发挥了重要作用。通过深度学习算法，CNN能够对建筑表面温度分布图像进行自动化分析，识别出可能存在热桥的区域。这一技术不仅能够识别复杂的热斑模式，还可以精确定位热桥的具体位置，提升了热桥检测的效率与准确性。机器学习模型通过学习大量的样本数据，能够不断优化其识别能力，从而在多变的环境下保持较高的预测稳定性；随机森林算法在热桥风险等级分类中的应用，则为热桥问题的量化评估提供了强有力的支持。随机森林算法通过构建多个决策树，综合不同数据源的特征，实现了多维度的风险评估。随机森林算法可以根据建筑物的温度、湿度等环境参数，对热桥发生的风险进行分类，帮助工程师做出更加精准的决策，从而优化建筑的能源利用效率和设计方案。

四、热桥效应优化技术体系

(一) 被动式阻断技术

被动式阻断技术是解决热桥效应的一项重要策略，旨在通过非能量驱动的方式有效减少热传导，提升建筑的热工性能。气凝胶复合隔热层作为一种新型隔热材料，在建筑领域中展现了广泛的应用潜力。气凝胶具有极低的导热性，其作为复合隔热层的一部分，能够有效隔断不同区域之间的热流。尤其是在建筑的外墙、屋顶等易形成热桥的部位，通过合理的界面处理，不仅能避免热量的传递，还能够有效提高墙体的整体热阻性能^[5]。采用气凝胶复合材料的界面处理技术，能够优化材料的搭接接口，提高其稳定性，防止因接缝处产生额外热桥。

(二) 主动式调控技术

主动式调控技术在热桥效应的应对中扮演着更加灵活和精准的角色，通过外部能源调节实现实时热流控制。毛细管网辐射系统作为这一领域中的代表性技术，能够通过精细控制热流的导向，避免局部区域的热桥效应。该系统通过布置在建筑内部的毛细管网络，在供热系统与建筑结构之间建立起热流引导机制。在冬季，当外部温度骤降时，系统能够调节热流的流向，确保建筑内部的热量均匀分布，减少外墙与内部热量之间的过大差距，防止热桥的形成。毛细管网的高效性使其成为优化建筑节能的有效手段，尤其适用于高能效建筑或极端气候环境中的建筑物。

(三) 构造节点优化设计

构造节点的优化设计是消除热桥效应的重要手段之一，尤其是在建筑结构的关键连接部位，通过精心设计可以有效减轻热量传导带来的不良影响。热桥弱化结构的拓扑优化是构造节点设计中的重要方向。通过拓扑优化技术，可以在设计阶段对结构的热传导路径进行重新安排，使得结构中的热桥部分得到有效弱化。拓扑优化技术通过算法模拟，在不同的设计方案中寻找最佳的材料分布和结构布局，最大限度地减少热流的直接传递路径。

五、能效提升评估与验证体系

(一) 动态能效监测平台

动态能效监测平台作为建筑能效管理的重要工具，能够实时追踪建筑能源消耗情况，并为优化能效提供数据支持。无线传感网络的数据融合架构是该平台的核心组成部分。通过部署一系列低功耗、广域覆盖的无线传感器，可以实时收集温度、湿度、光照等环境数据，同时结合建筑的能源消耗信息，形成全面的监测网络。这些传感器能够在建筑各个部位提供即时数据反馈，通过无线传输，将数据汇聚至云端进行处理与分析。数据融合技术通过集成不同类型的传感器信息，实现多维度的能效监测和预测，提升平台的响应速度和准确度。

(二) 全生命周期评估模型

全生命周期评估模型是建筑能效提升中不可忽视的一部分，它从建筑的设计、施工、使用到改造的每一个环节进行全面的能效评估。在这一模型中，热桥影响因子的敏感性分析起到了至关重要的作用。热桥不仅仅影响建筑的能效，还对建筑的长期性能产生深远影响。通过敏感性分析，可以识别出热桥效应在建筑生命周期中对能效的具体影响程度，并帮助优化设计和施工过程中的热桥处理策略。利用计算机模拟和数据挖掘方法，分析热桥效应在不同气候条件、建筑材料及结构形式下的表现，提供针对性改进建议。该分析能够为能效改造项目提供科学依据，确保能效提升的效果最大化。

结语

本文研究了热桥效应在建筑节能中的关键影响，并提出了相应的检测与优化技术体系。通过对热桥形成机理、传热特性以及环境因素的综合分析，本文揭示了热桥效应的复杂性与多样性，强调了不同构造类型、材料界面及环境条件对热桥效应的影响。为应对这一问题，本文提出了多技术融合的检测方法体系，其中非接触式红外检测技术、超声波层析成像技术和光纤分布式监测技术的结合，极大地提升了热桥效应的检测精度与效率。通过数值模拟与机器学习技术的应用，开发的热桥风险评估系统能够实现对热桥效应的动态监测与智能预测，进一步指导节能改造措施的实施。针对热桥效应，本文提出了被动式与主动式调控技术，并通过构造节点优化设计，减缓了热桥的形成与发展，提升了建筑的能效水平。在实际应用中，通过动态能效监测平台对改造效果的实时跟踪验证，进一步证明了所提优化策略的可行性和效果。最后，本文建立了热桥效应的标准化评价框架，为今后建筑节能设计和热桥治理提供了系统化的理论支持和实践参考。

参考文献

- [1] 孙宝梁, 孙宝华. 居住建筑节能设计的特点及相关构造 [J]. 墙材革新与建筑节能, 2004 (2): 36-38.
 - [2] 谢意. 夏热冬暖地区居住建筑热桥效应对建筑节能的影响 [J]. 山西建筑, 2015 (8): 209-210.
 - [3] 甘心怡, 朱一辛. 木结构墙体热桥效应的研究现状和展望 [J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49 (8): 31-35.
 - [4] 邝福军, 王汉青. 装配式墙体的热桥效应分析及保温措施 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (24): 286-292.
 - [5] 刘学来, 蔡明庆, 李永安. 供热管道固定支墩热桥效应 [J]. 山东建筑大学学报, 2012, 27 (2): 176-180.
- 作者简介: 刘智勇 (1989.12), 男, 汉族, 安徽省合肥市人, 本科学历, 工程师, 主要从事工程检测工作。