

低温热水/高温冷水 辐射供暖供冷系统

Low Temperature Heating and High Temperature Cooling
Embedded Water Based Surface Heating and Cooling Systems

Jan Babiak
Bjarne W. Olesen 编写
Dušan Petráš

中国建筑学会暖通空调分会 组织翻译
张 叶 刘志坚 张时聪 翻 译
徐 伟 校 稿

中国建筑工业出版社

REHVA 技术导则 7

低温热水/高温冷水辐射供暖供冷系统

Jan Babiak

Bjarne W. Olesen 编写

Dušan Petráš

中国建筑学会暖通空调分会 组织翻译

张 叶 刘志坚 张时聪 翻译

徐 伟 校稿

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2013-3787 号

图书在版编目(CIP)数据

低温热水/高温冷水辐射供暖供冷系统/Babiak 等编写；张叶等
翻译. —北京：中国建筑工业出版社，2013. 9

(REHVA 技术导则 7)

ISBN 978-7-112-15444-9

I. ①低… II. ①B…②张… III. ①辐射采暖-热力系统②辐射-制冷系统 IV. ①TU83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 105964 号

Copyright © 2007 by Rehva,

Federation of European Heating and Air-conditioning Associations

Chinese translation copyright © 2013 by China Architecture & Building Press

All right reserved.

本书由 Rehva 授权我社在中国翻译、出版、发行本书中文版

低温热水/高温冷水辐射供暖供冷系统是暖通空调系统的一种新形式，近年来辐射供暖供冷技术发展很快，已不再局限于地面辐射供暖形式，顶棚、墙面辐射供暖供冷系统及新型的辐射供暖供冷方式在国内都已得到应用，正是体现出近年来辐射供暖供冷技术在国内的迅速发展。

本书主要从专业术语（第 1 章）、基础理论（第 2、3 章）、系统评估及控制（第 4、5 章）、安装安全性及要点（第 7~9 章）及效果分析（第 10 章）全面阐述了低温热水/高温冷水辐射供暖供冷系统主要内容，从而让广大工作人员更加深入了解相关内容。

本次全国暖通学会组织翻译此书，可作为《辐射供暖供冷技术规程》JGJ 142—2012 的补充技术材料，供科研人员、工程技术人员、设计人员、设备人员、高等学校教育等使用。

责任编辑：田立平

责任设计：董建平

责任校对：肖 剑 关 健

REHVA 技术导则 7

低温热水/高温冷水辐射供暖供冷系统

Jan Babiak Bjarne W. Olesen Dušan Petráš 编写

中国建筑学会暖通空调分会 组织翻译

张 叶 刘志坚 张时聪 翻译

徐 伟 校稿

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

化学工业出版社印刷厂印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：7¼ 字数：180 千字

2013 年 6 月第一版 2013 年 6 月第一次印刷

定价：25.00 元

ISBN 978-7-112-15444-9

(24047)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

译 稿 前 言

欧洲暖通空调学会联盟 (Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, REHVA, 简称欧洲暖通学会) 成立于 1963 年, 总部设在比利时首都布鲁塞尔, 现有 26 个欧洲国家暖通空调组织组成, 包括英国、法国、德国、俄罗斯等国家暖通空调学会, 注册会员超过 10 万人, 是欧洲最有影响力的暖通空调学术组织。欧洲暖通空调学会长期致力于提高建筑能效和室内环境健康、舒适的水平, 推进建筑节能和可再生能源的应用。在这些领域, 欧洲暖通空调协会对相关国际组织、政府的战略规划和研究活动有重要的影响力, 同时对相关研究机构和成员企业也有较强的领导力, 其工作组、研讨会、出版物是提供技术信息和研究成果的交流与合作的重要平台。欧洲暖通空调学会对欧盟建筑节能相关法规 and 政策的制定提供技术支持, 其相关专家负责欧盟暖通空调标准及相关技术导则的制定, 在建筑能效、建筑节能、低能耗建筑以及零能耗建筑等领域的研究处于领先地位。

2011 年 10 月 28 日, 中国建筑学会暖通空调分会 (简称全国暖通学会) 与欧洲暖通学会在欧洲暖通空调学会总部布鲁塞尔举行合作备忘录签约仪式。双方达成协议将加强信息的交流与共享, 支持人员的交流与互访, 推动相关技术委员会和学组的合作, 加强暖通空调相关技术的交流与共享, 共同举办或资助相关教育和培训活动, 强化相关标准的宣传与推广, 促进中国标准、欧洲标准、国际标准之间的协调与衔接, 共同举办国际性学术会议和展会, 强化双边组织和成员的合作关系。

在 REHVA 的相关出版物中, 其《导则》(Guidebook) 系列丛书在暖通空调工程建设中影响力最为广泛, 截止 2012 年 11 月, REHVA 共出版 17 本《导则》, 涵盖了建筑供热供冷空调多个系统类型。经过全国暖通学会与欧洲暖通学会讨论, 双方共同确定选取 REHVA 技术导则 7 《LOW TEMPERATURE HEATING AND HIGH TEMPERATURE COOLING》(《低温热水/高温冷水辐射供暖供冷系统》) 作为双方第一本合作翻译书籍进行翻译, 在国内推广普及关于此系统的欧洲相关技术知识。

低温热水和高温冷水辐射供暖供冷系统是暖通空调系统的一种新形式, 近年来辐射供暖供冷技术发展很快, 已不再局限于地面辐射供暖形式, 顶棚、墙面辐射供暖供冷系统及新型的辐射供暖供冷方式在国内都已得到应用, 住房和城乡建设部前不久正式批准的新行业标准《辐射供暖供冷技术规程》JGJ 142—2012, 定于 2013 年 6 月 1 日起实施, 该标准名称由“地面辐射供暖供冷技术”变更为“辐射供暖供冷技术规程”, 正是体现出近年来辐射供暖供冷技术在国内的迅速发展。

本次全国暖通学会组织翻译此书, 可作为《辐射供暖供冷技术规程》JGJ 142—2012 的补充技术材料, 供科研人员、工程技术人员、设计人员、设备人员、高等学校教育等使用。

本书翻译过程中, 得到了相关人员的大力支持, 感谢 REHVA 委托全国暖通学会组织

本书翻译，感谢 REHVA 秘书长 Olli Seppänen 教授和本书作者丹麦科技大学室内环境与能源国际研究中心主任 Bjarne W. Olesen 教授的在翻译过程中的指导和支持。欧博诺贸易（北京）有限公司对本书的翻译和出版给予支持，在此表示感谢。新疆大学张叶老师、中国建筑科学研究院刘志坚博士、中国建筑科学研究院张时聪工程师参与了具体翻译，在此一并表示感谢。

徐 伟

中国建筑学会暖通空调分会 理事长

前言 REHVA——欧洲暖通空调学会联盟

REHVA 是欧洲供暖通风与空调领域的专业学术性组织，已经成立 50 余年，REHVA 的影响力可覆盖欧洲 31 个国家 10 万多名暖通空调工作者。

目前，REHVA 的主要工作是针对楼宇暖通空调系统及设备的运行过程，开发和推广经济、高效节能和有利于人体健康的技术，此项工作由 REHVA 董事会监督执行，REHVA 技术委员会负责协调相关指导手册编制工作。

目前几个专家小组正在致力于 REHVA 技术导则的编写工作，主要包括：试运行阶段如何提高暖通空调系统能量效率及改善室内环境；暖通空调系统运行及卫生状况；清洁通风系统标准；通风设计中 CFD 计算等。

供暖、供冷、通风和照明所消耗能源占世界一次能源需求量的三分之一以上，提高建筑物能源效率势在必行。现有的节能潜力挖掘不但要注意能源消耗的数量控制，而且要更加注重能源的使用质量提升。低火用系统的思路是采用低温热源进行供暖，高温热源进行供冷，目前市场上已经存在许多类似系统。低温系统通过利用更广泛地可再生能源及绿色能源，以及通过建筑环境创新系统方案设计研发从而实现节约火用能目标。

本指导手册介绍低火用系统的基本传热原理，但更侧重于该类系统的实际设计及安装。本指导手册主要供设计师、施工安装人员、建筑师和业主使用。本手册中还介绍了已建成的项目实例，并配有插图，因此它也是一本很好的供楼宇设备工程师专业培训使用的教科书。

这本关于低温供暖系统的手册由国际高素质研究人员、咨询专家和设计人员共同编写。该项工作是在相关人员自愿基础上完成，无任何商业利益。REHVA 董事会借此对该工作组成员表示衷心感谢，同时 REHVA 还要对资助本工作顺利完成的所有公司致以诚挚的谢意。

Olli Seppänen
REHVA 技术委员会主席

欧洲暖通空调学会联盟成员国

奥地利 希腊 俄罗斯 比利时 匈牙利 塞尔维亚和黑山 波斯尼亚和黑塞哥维那 爱尔兰 斯洛伐克 保加利亚 意大利 斯洛文尼亚 克罗地亚 拉脱维亚 西班牙 捷克共和国 立陶宛 瑞典 丹麦 荷兰 瑞士 土耳其 爱沙尼亚 挪威 芬兰 波兰 英国 法国 德国 罗马尼亚 葡萄牙

REHVA 低温热水/高温冷水辐射供暖供冷系统专家工作组

目前，REHVA 低温热水/高温冷水辐射供暖供冷系统专家工作组一直在开展相关工作。小组在 2005 年洛桑市气候会议组织了研讨会；在 2006 年莫斯科寒冷气候会议上，特别小组陈述和讨论此项工作的结果。同时特别小组在 2004 年维尔纽斯，2005 洛桑市及 2006 年莫斯科全体会议对该项工作进行了汇报。

专家工作组成员

Jan Babiak	斯洛伐克科技大学，伯拉第斯拉瓦
Bjarne W. Olesen	环境与能源中心，丹麦科技大学
Dušan Petráš	斯洛伐克科技大学，伯拉第斯拉瓦

评审委员

下列人员参与本书的评审工作并且提出了宝贵的意见。

László Bánhidi	布达佩斯技术与经济大学，匈牙利
Derrick Braham	楼宇建筑工程协会，英国
Reto M. Hummelshøj	丹麦能源科技公司部门经理
Dietrich Schmidt	弗劳恩霍夫建筑物理研究所，德国
Peter Novak	斯托维尼亚能源技术中心

致谢

专家工作组成员由衷感谢 Verity 和 Derrick Braham 在语言校正工作中所做的贡献，因为专家工作成员中的部分特邀成员的母语不是英语。作者由衷感谢 Mr Jarkko Narvanne 对指导手册的最终排版工作。

目 录

1. 术语, 单位和符号	1
1.1 术语和定义	1
1.2 符号和单位	6
2. 表面辐射供暖和供冷的基本理论	9
2.1 传热	9
2.2 辐射换热原理	10
3. 室内环境条件	14
3.1 热环境	14
3.2 室内空气品质与表面辐射供暖, 供冷系统	19
3.3 声舒适和噪声	20
4. 系统形式与供暖/供冷能力评估	22
4.1 辐射表面和室内换热系数	23
4.2 辐射顶板供暖/供冷系统	25
4.3 嵌入式表面辐射供暖/供冷系统	28
4.4 混凝土辐射空调系统 (TABS)	40
4.5 相变材料 (PCMs)	47
5. 系统控制和运行	51
5.1 概述, 分类	51
5.2 辐射供暖系统的控制	52
5.3 辐射供冷系统的控制	54
5.4 混凝土辐射空调系统的控制	58
5.5 运行过程经济效益分析	60
5.6 瞬态环境温度交替控制节能策略	60
6. 能源	61
6.1 供暖, 热源	61
6.2 冷源	62
6.3 建筑供冷供暖的低 [火用] 概念	63
6.4 热泵	66
7. 安装	68
7.1 类型 A~D、G 系统的安装	68

7.2 混凝土辐射空调系统安装	72
8. 安全	76
8.1 系统的耐久性	76
8.2 室内环境的影响	78
9. 系统在建筑中的应用	79
9.1 住宅建筑	79
9.2 办公建筑	81
9.3 教育设施	85
9.4 体育设施	88
9.5 工业建筑	89
9.6 博物馆	91
9.7 其他公共建筑	93
9.8 系统设计过程（流程图）	95
10. 设计工具	99
10.1 模拟有效性分析	99
10.2 稳态分析工具	99
10.3 瞬态分析工具	99
10.4 混凝土辐射空调系统运行的计算机分析（例）	100
10.5 混凝土辐射空调系统的计算机有限元分析	101
10.6 混凝土热力活性楼板有效厚度确定	103
参考文献	105

1. 术语，单位和符号

1.1 术语和定义

本手册中的术语和定义均参照现有的 CEN 和 ISO 标准。包括 EN ISO 7730, EN ISO 7726, EN 12828, CEN 报告 CR1752, EN 15377, EPBD-CEN TC228/WG4。

换气次数 (Ach)

单位时间内室内空气的更换次数，即通风量与房间容积的比值。

空气调节系统

用于处理房间或封闭空间内的空气，使其温度、湿度、洁净度和气流速度等参数达到给定要求的所有设备的总称。

空气流量

经过调节后供入室外的室外空气流量。

面积，辐射供暖或供冷区域

辐射供暖/供冷表面区域包括管道之间的区域及管道系统外边缘条状区域，该条状区域宽度应等于管间距的一半，并不超过 0.15m。

区域，非主动式结构供冷供暖

未经供暖/供冷系统覆盖的区域。

非工作区面积

被加热到更高温度或冷却到更低温度的区域。通常指外围护结构宽度为 1m 以内的带状区域面积，为非工作区。

空调面积

空调面积指各层（多层建筑）建筑面积之和，不包括无人居住的地下室和无人居住的地上空间的面积。

工作区面积

由辐射供冷/供暖表面覆盖的工作区面积。通常工作区指距地面 1.8m，距外围护结构及暖通设备 1.0m，距内围护结构 0.5m 以内的范围。

楼宇自动控制系统

楼宇自动控制系统是指为实现建筑高效节能、经济安全运行的自动控制监测优化，人为干预和管理，软件和服务设备的集成。

建筑设备

提供的适宜的室内环境，生活热水，照明及其他相关服务相关设备的总称。

基础特性曲线

反映的热流密度和表面平均温度差之间的曲线或公式。通常取决于热/冷表面的位置

(地板、墙面或顶棚),与辐射系统埋管(嵌入)的形式无关。

环路

与分水器相连的分支系统,每一个环路可以独立的开关或控制。

按需控制通风

房间通风系统的气流速度根据排除空间内污染物的给定水平而改变通风量自动控制通风形式。

设计标准

基于特定室内环境条件(如:室内空气品质、热舒适和声学舒适)的详细规定,及用于设备相关系统控制节能要求评价依据总称。

分水器

用于连接各环路的配水装置。

吹风感

吹风感是指由于气流运动和温度造成人体不适的局部冷作用。

嵌入式表面供暖/供冷系统

由嵌入地板、墙壁或顶棚结构中的管道环路、分水器以及控制系统组成的辐射供暖/供冷系统。

与建筑主体结构热绝缘的嵌入式系统

与建筑主体结构(楼板、墙壁)间有保温绝热层的地板、墙壁和顶棚表面辐射系统。

热/冷源

可以直接提取、收回的或通过转换的有用能源。

可再生能源

可再生能源,如:太阳能(热能、光电),风能,水电能,生物质能。

室内供暖和供冷能耗

满足室内供暖和供冷(包括除湿)需求的需要热源/冷源提供的能量。

通风系统能耗

空气输配、热回收(不包括空气预热)和满足加湿要求所需的能量。

水媒地板(墙面、顶棚)供暖和供冷系统

由水或水溶液作为冷/热媒敷设在地板(墙面、顶棚)中的系统。

热媒

可用于产热或传递热或实现某物理过程的物质或流体。

热流密度

通过冷却/加热表面单位面积的热流量。

设计热流密度

考虑辐射表面温度,除辅助供暖/供冷设备外满足设计要求的供暖/供冷能力的热流密度。

得热量

空调房间内,某时刻房间内热源产热或以其他形式进入房间的总热量,不包含供暖供冷或生活热水设备等提供的热量。

内部得热量

建筑内的人体散热量, 照明散热量及设备散热量。不包括人为提供加热, 冷却或生活热水设备提供的热量。

太阳辐射得热量

直接(通过窗户、透明幕墙、天窗或被动式太阳能装置)或间接(被建筑物表面吸收后)进入房间的太阳辐射热量。

传热系数

冷/热辐射表面和室内环境(室内设计温度)之间的对流及辐射作用下的综合换热系数。

设计供暖/供冷能力

设计条件下供暖/供冷系统能提供的热量/冷量。

设计供暖/供冷介质流量

为了达到设计要求的热流密度, 环路内必需的冷热媒质量流量。

绝对湿度

每立方米湿空气中所含有的水蒸气质量, 单位 kg/m^3 。

相对湿度

湿空气的绝对湿度与同温度下饱和空气的饱和绝对湿度的比值, 反映了湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度。

室内空气品质 (IAQ)

室内空气质量是反映在某个具体的环境内, 空气中某些要素对人们生活、工作的影响, 包括空气中的悬浮微粒和气体组分、温度和湿度等关键参数。室内空气品质能够反映室内空气污染物的浓度, 同时能够体现人们对室内空气的感知程度(对敏感受试者同样适用), 例如通过闻和刺激的方式(刺激测试)。

室内环境品质 (IEQ)

室内环境品质涵盖了室内环境的各个方面, 包括空气品质, 通风, 热舒适, 照明及声环境。

服装热阻

服装的显热热阻。注意: 服装热阻仅描述了从皮肤到服装间的热阻, 不包括皮肤和服装间的接触热阻, 单位为 clo 或者 $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$, $1\text{clo}=0.155 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。

间歇供暖/供冷

供暖或供冷模式下, 供暖或供冷期减少或不供暖或供冷交替。

代谢率

人体代谢的速率。注意: 代谢率随人体的行为活动变化, 单位为 met 或 W/m^2 , $1\text{met}=58.2\text{W}/\text{m}^2$ 。1met 为人体静坐时单位表面积的产热量, 人体平均皮肤面积约为 1.8m^2 。

空气间隙

在地板, 墙壁, 吊顶结构中的缝隙, 通过间隙空气可以与室内、外空气发生热交换。

预计平均热感觉指数 (PMV)

PMV 指数是根据人体热平衡的基本方程以及心理、生理学主观热感觉的等级为出发点, 考虑了人体热舒适的诸多有关因素的全面评价指标。PMV 指数表明群体对于

(+3~-3) 七个等级热感觉投票的平均指数。

预计不满意者的百分数 (PPD)

PPD 表示人群对热环境不满意的百分数。

辐射供暖/供冷顶板

通常为金属板布置于顶棚下, 热/冷媒流体温度接近于室内温度。一般在辐射板和建筑结构之间设有保温层。

回调温度

在缩减的供暖/供冷周期内室内保持的最低温度和最高温度。

空调区域设定温度

控制系统在正常供热模式下室内设定的最低温度, 或者控制系统在正常供冷模式下室内最高温度的设定值。

空调区域

供暖或供冷的空间。

供冷区域

根据需求将房间或封闭空间冷却到设定的温度。

供暖区域

根据需求将房间或封闭空间加热到设定的温度。

平均表面温度

工作区和非工作区所有表面温度的平均值。

室内设计温度

空调房间中心的运行温度, 用来计算室内负荷和设备容量。

室外温度

室外空气温度。

平均辐射温度

辐射温度的平均值是假设等温围合面的表面温度, 该假设等温围合面与人体间的辐射换热量等于人体周围实际的非等温围合面与人体之间的换热量。

最高表面温度

满足人体生理需求或建筑物理允许的最高温度, 对计算的临界曲线, 可能出现在工作区或非工作区表面上的某一点 (地板、墙壁、顶棚), 取决于特定情况下供暖介质的温降 σ 是否等于 0。

最低表面温度

满足人体生理需求或建筑物理允许的最低温度, 对计算的临界曲线, 可能出现在工作区或非工作区表面上的某一点 (地板、墙壁、顶棚), 取决于特定情况下供冷介质的温降 σ 是否等于 0。

操作温度

操作温度是假设等温围合面的表面温度, 该假设等温围合面与人体间的对流辐射换热量等于人体周围实际的非等温围合面与人体之间的对流辐射换热量。

表面辐射温度

假设等温围合面的表面温度, 该假设等温围合面一侧平面的辐射量等于非等温围合面

一侧平面的辐射量。

非对称辐射温度

两个对立面之间的平面辐射温度差值。

热媒/冷媒温差

取热媒/冷媒和室内设计温度之间的对数平均温差。

平均表面温差

平均表面温度和室内设计温度之间的差值, 该值决定热流密度。

垂直温差

人体头部和脚踝之间的空气温差。注: 坐姿为 $0.1 \sim 1.1\text{m}$ 的温差, 站姿为 $0.1 \sim 1.7\text{m}$ 的温差。

温降

各环路热媒/冷媒的供、回水温差。

热媒/冷媒温度

热媒/冷媒供回水温度的平均值。

热舒适

对热环境表示满意的意识状态。

热环境

室内环境的特性, 影响人体和环境之间热交换。

热环境是指由太阳辐射、气温、周围物体表面温度、相对湿度与气流速度等物理因素组成的作用于人, 且影响人的冷热感和健康的环境。

混凝土辐射空调系统

热耦合的辐射盘管预埋在建筑结构中(混凝土板、墙壁)的表面辐射供暖/供冷系统。

空气相对流速

空气相对于室内人员的流速, 考虑人体的移动。

通风

为改善生产和生活条件, 采用自然或机械方法, 对某一空间进行换气, 以造成卫生、安全等适宜空气环境的技术。

通风效率

排出房间的污染物浓度和人员呼吸区污染物浓度之间的关系。

通风系统(机械通风和自然通风)

通过向室内供入新风将室内污染物排出室外的整套装置。系统由空气处理机组、风管和终端设备组成。通风系统也指通过百叶窗(室外风力)的自然通风系统和机械排风系统的结合(例如走廊、厕所等的通风系统)。不论机械通风还是自然通风都可与开启外窗相结合, 混合通风系统也是可行的。

空调分区

具有相同使用功能的空调房间, 具有相同的室内设定温度, 各房间温度的微小变化可忽略不计。通常, 这些房间划为一个空调分区, 采用同一个供暖, 供冷和(或)通风系统。

工作区

人员长期活动或居住区域，需要满足设计标准的要求。

1.2 符号和单位

符号	定义	单位
a_B	表面覆盖系数	—
a_D	管道外径系数	—
A_g	对应地板面积	m^2
a_k	接触校核因数	—
A_k	与地表接触的建筑构件的面积	m^2
a_T	间距系数	—
a_u	覆盖系数	—
a_{WL}	热传导装置系数	—
B	系统相关参数	$W/(m^2 \cdot K)$
B'	特征参数	—
$D=d_a$	管外径	m
ϵ_t	发射率	—
f_{g1}	室外温度年际变化修正系数	—
f_{g2}	室外温度和室外计算温度之差引起的温度折减系数	—
F_{max}	最大角系数	—
F_{p-N}	人体和房间表面之间的角系数	—
G_w	地下水影响系数	—
h	供冷墙高度	m
h_t	全热交换系数	$W/(m^2 \cdot K)$
H_{Tig}	设计地面稳态时传热量损失，传热系数	W/m
K_H	等效传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
K_{WL}	热传导装置，特征值	—

1. 术语, 单位和符号

符号	定义	单位
$M_{H,sp}$	供暖/供冷流体的具体设计质量流量 (相关管道覆盖面积)	kg/s
m_T	管道间距	m
m_u	面层厚度	m
P	辐射板周长	m
q	表面热流密度	W/m ²
q_1	地板上壁面热流密度	—
q_2	顶棚下壁面热流密度	—
R'_R	管壁的总热阻	(m ² · K)/W
$R'_{R,con}$	导热板和加热管之间的接触热阻	(m ² · K)/W
R'_U	导热装置 U 型剖面的热阻	(m ² · K)/W
R_{CL}	虚拟导热层的热阻	(m ² · K)/W
R_e	相邻房间或室外空气和导热层之间的热阻	(m ² · K)/W
R_{HC}	热媒和虚构的核心或热传导层之间的等效热阻	(m ² · K)/W
R_i	导热层上的热阻, 例如空调房间和导热板之间	(m ² · K)/W
R_r	流体和管壁之间的热阻	(m ² · K)/W
R_t	虚拟热阻, 供水温度 θ_v 和导热层的平均温度 θ_c 之间的热阻	(m ² · K)/W
R_x	管外壁温度和导热层平均温度之间的热阻	(m ² · K)/W
R_z	供水温度 θ_v 和平均水温 θ_m 之间的热阻	(m ² · K)/W
$R_{\lambda,B}$	表面覆盖热阻	(m ² · K)/W
$R_{\lambda,ins}$	保温层热阻	(m ² · K)/W
S_{ins}	保温层厚度	m
S_u	管道层厚度	m
S_{WL}	导热装置的厚度	m
T	管道间距	m
$U_{equiv,k}$	建筑构件等效热传热系数	W/(m ² · K)
U_i	导热层和室内空间的传热系数	W/(m ² · K)

符号	定义	单位
x	冷表面的距离	m
β	热膨胀系数	10^{-6} K
$\Delta\theta_{\text{H}}$	供暖/供冷介质的温度差	k
θ_{C}	导热层的平均温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{i}	室内操作温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{R}	供暖/供冷介质回流温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{s}	辐射供暖/供冷表面温度	$^{\circ}\text{C}$
$\theta_{\text{S,m}}$	表面平均温度	$^{\circ}\text{C}$
θ_{V}	供暖/供冷介质供给温度	$^{\circ}\text{C}$
λ	导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
$\lambda_{\text{E}}=\lambda_{\text{u}}$	找平层导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ_{g}	地表导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ_{ins}	绝热层的导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ_{M}	管外套的导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ_{R}	管道导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
λ_{WL}	导热装置的导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
v_{max}	最大气流速度	m/s
$\prod a_i^{\text{mi}}$	幂乘积	—