

低温辐射供暖 与辐射供冷

王子介 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



低温辐射供暖与辐射供冷

王子介 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了利用围护结构内表面作为热(冷)辐射面的低温辐射供暖和辐射供冷的原理、特点、系统形式和设计计算方法等,具体内容包括:热、冷负荷及辐射供暖、供冷量,水媒辐射供暖,电热辐射供暖,辐射供冷,辐射供冷源的冷热源,辐射供冷源的热舒适性,辐射供冷源能耗分析与计算,辐射供冷源的模拟计算和辐射供冷源应用实例。本书既介绍了国内外相关领域的研究成果,又介绍了现行规范、标准中对设计、施工的要求;既考虑到学术性和一定的理论深度,又照顾到应用性和简明适用的要求,可供相关领域的研究人员、工程技术人员以及大专院校的研究、本专科生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

低温辐射供暖与辐射供冷/王子介编著 —北京:机械工业出版社, 2004.6

ISBN 7-111-14672-7

I. 低... II. 王... III ①低温—辐射—供热②低温—辐射—制冷 IV. TU83

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第060607号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:杨少彤 王晓阳 版式设计:霍永明 责任校对:唐海燕

封面设计:王伟光 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·14.5印张·357千字

0 001—4 000册

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

不少朋友和同行，特别是一些企业界的同行，早就希望有一本书来反映一下地板采暖近年来的发展情况，同时也很关心辐射供冷的可行性问题，我之所以迟迟未动笔，主要原因是感到力不从心：一是辐射供冷暖在理论方面，特别是人体与辐射面间准确换热量的确定，从而也涉及到负荷计算的准确程度、辐射面供热供冷量的准确确定、舒适性的定量评价等一系列问题，这些都还在不断研究、发展之中；二是近年来国内地板采暖虽然发展很快，但技术上的总结和相关的规范相对滞后，辐射供冷的工程实践则还很少；三是确实感到自己水平有限，所做的工作还很不够。

但总被一种责任心驱动着，在异国他乡享受舒适的地板采暖时（当时在国内还很少应用），在 INSA 作客座教授从事相关的研究时，心中就萌动着这种期望：希望先进的工程技术尽早在生我养我的故土上发展、普及，为人民造福。后来在国内做有关项目时，更加体会到市场对新技术强有力的呼唤。恰巧在这时，机械工业出版社的编辑同志找到了我。

我想在我们 13 亿人口的泱泱大国，任何个人或研究集体，在技术进步过程中能起到的作用都是微小的，即便在媒体如此发达的今天，由于种种条件的限制，能获取、应用的资料和信息也是很有限的。除了一些基础性的东西以外，在工程技术领域，知识的发展更新又如此之快，所以如果这本小书能在某些方面正确地总结和反映前人和当代人的研究成果，又有一些我们自己的研究和实际体会，可以在一段时间内使读者有所得，也就是尽了我們一份有益的社会职责了。特别是对于相关专业的青年学生，我们也就尽到师长应尽的一份责任了。

这样想着，也就欣然命笔了。

作者的本意是使本书尽可能作到学术性和应用性二者兼顾，以便于更广泛的读者阅读参考。因此，在本书中，既介绍了国内外相关领域的研究成果，又介绍了现行规范、标准中对设计、施工的要求；既有比较繁复的模拟计算方法和物理、数学模型，又有简明的例证和应用实例。本书可供相关领域的研究人员、工程技术人员以及大专院校的研究生、本专科生阅读参考。

本书内容包括：第一章绪论，第二章热、冷负荷及辐射供暖供冷量，第三章水媒辐射供暖，第四章电热辐射供暖，第五章辐射供冷，第六章辐射供冷暖

的冷热源，第七章辐射供冷暖的热舒适性，第八章辐射供冷暖能耗分析与计算，第九章辐射供冷暖的模拟计算及第十章辐射供冷暖应用实例。

感谢同济大学李强民教授、刘传聚教授，法国国家应用科技大学（INSA）Jean BRAU 教授、Gerard KRAUSS 教授，法国空调工业科学技术委员会（COSTIC）Wen HU 博士，感谢南京师范大学余跃进副教授、袁冬雪、李奇贺等老师以及研究生李先中、夏学鹰、张琦，他们或者提供了重要的资料和宝贵的建议，或者参加了本书有关内容中涉及的研究工作或实验室建设工作。在此也一并对所有帮助过我的师长、朋友、同行表示由衷地感谢。

由于前述的种种原因，书中错漏之处在所难免，诚恳地欢迎读者予以批评、指正。

作 者

目 录

前言			
第一章 绪论	1		
第一节 概述	1		
第二节 辐射供冷暖的特点	1		
第三节 辐射供冷暖与建筑节能	4		
第二章 热、冷负荷及辐射供暖供冷量	8		
第一节 室内外计算参数	8		
第二节 热、冷负荷	13		
第三节 辐射供暖供冷量	15		
第四节 长周期平均负荷与峰值负荷	18		
第三章 水媒辐射供暖	31		
第一节 概述	31		
第二节 管路系统构造与形式	31		
第三节 管路系统设计与选用	36		
第四节 施工与验收	41		
第五节 控制与调节	42		
第六节 塑料管材与管件	44		
第七节 常用绝热材料	46		
第四章 电热辐射供暖	50		
第一节 电热发热体与辐射板	50		
第二节 设计选用与安装调试	52		
第五章 辐射供冷	56		
第一节 顶板供冷	56		
第二节 地板供冷	59		
第三节 置换通风及置换通风-辐射供冷复合系统	65		
第四节 防止冷表面结露的除湿通风量计算	72		
第六章 辐射供冷暖的冷热源	82		
第一节 电热锅炉和燃气锅炉	82		
第二节 热泵装置	87		
第三节 太阳能	93		
第四节 被动冷却	97		
第五节 地热水与地下(地表)冷水	108		
第六节 复合冷热源系统	112		
第七章 辐射供冷暖的热舒适性	118		
第一节 人体热感觉的生理学基础	118		
第二节 室内热舒适性影响因素及其标准值	120		
第三节 热舒适性的评价方法	127		
第四节 地板采暖的热舒适性	133		
第五节 顶板辐射供冷的热舒适性	142		
第六节 地板供冷的热舒适性	147		
第七节 辐射供冷房间污染物的排出	148		
第八章 辐射供冷暖能耗分析与计算	153		
第一节 水媒地板供暖系统能耗及其影响因素	153		
第二节 辐射供冷能耗	157		
第三节 利用太阳能系统节省能耗	159		
第四节 能耗分析的稳态算法	165		
第五节 辐射供冷暖常用冷热源设备能耗计算	171		
第九章 辐射供冷暖的模拟计算	178		
第一节 概述	178		
第二节 网络模拟法及其应用	178		
第三节 辐射供冷暖设备的数值模拟	191		
第十章 辐射供冷暖应用实例	201		
第一节 辐射供暖	201		
第二节 辐射供冷	210		
参考文献	221		

第一章 绪 论

第一节 概 述

一、辐射供暖的概念

辐射供暖（供冷）是指提升（降低）围护结构内表面中一个或多个表面的温度，形成热（冷）辐射面，依靠辐射面与人体、家具及围护结构其余表面的辐射热交换进行供暖（降温）的技术方法。辐射面可以通过在围护结构中埋入（设置）热（冷）媒管路（通道）来实现，也可以在天花板或墙外表面加设辐射板来实现。由于辐射面及围护结构和家具表面温度的升高（降低），导致它们与空气间的对流换热加强，使房间空气温度同时上升（降低），进一步加强了供暖（降温）效果。在这种技术方法中，一般来说，辐射换热量占总热交换量的50%以上。

二、辐射供暖的分类

通常辐射面温度 $> 150^{\circ}\text{C}$ 时，称为高温辐射供暖；辐射面温度 $< 150^{\circ}\text{C}$ 时，为中、低温辐射供暖^[1]。水媒地板供暖、电热吊顶或电热地板供暖等供暖方式，由于辐射面表面温度一般控制在 30°C 以下，都属于低温辐射供暖。

由于改变围护结构内表面温度的方法可以通过电热、热（冷）空气或热（冷）水；辐射面可以是地板、顶板或墙面等立面（还可以做成屏风等形式）；系统可以单独供暖或供冷；也可以同一系统夏天供冷冬天供暖，所以辐射供暖（冷）系统又按不同工作媒质或不同辐射面位置，分别命名为水媒辐射供暖（冷）、电热辐射供暖、顶板辐射供暖（冷）、地板辐射供暖（冷）等等。由于其安全、经济、方便、热容量大等优点，以水作为热冷媒的应用最为普遍。一般认为地板供暖或顶板供冷舒适性高，对流传热强。但为了简化系统，也可用地板供暖或顶板供暖，这样使用时，一般都采用同一系统，冬天供暖，夏天供冷。

如所周知，散热器英文叫“radiator”。从一定意义上来说，沿墙面或踢脚布置的采暖散热器也是辐射板。特别是有些散热器，例如板式散热器，其辐射热交换量达50%以上，可以说是名副其实的辐射板。但由于：

1) 对散热器的研究已有长久的历史和丰富的经验，所以墙面布置的辐射板在设计、使用上完全可以按现行散热器的方法实行；

2) 墙壁内埋管构成竖向辐射面辐射供暖的做法很少采用，因此本书对水媒辐射采暖方面的介绍，除了发热量等少量内容以外，将以地板采暖为主，而不再涉及竖向辐射板。

第二节 辐射供冷暖的特点

水媒辐射采暖中，被使用得最多的是低温地板辐射供暖系统，比如在北美、欧洲、韩国等，已有近30年历史。随着建筑保温程度的提高和管材的发展，低温地板辐射供暖系统的

使用日益普遍。据 20 世纪 90 年代统计, 西欧国家住宅建筑中装设地板供暖系统的占到 20% ~ 50%^[2]。

一、辐射供暖的主要优点

(1) 节能 由于较之传统的采暖方法, 地板供暖系统供水温度低, 加热水而消耗的能量少, 热水传送过程中热量的消耗也少。地板采暖主要依靠辐射传热, 室内作用温度比采用散热器时要高 1~2℃。再者, 由于进水温度低, 便于使用热泵、太阳能、地热及低品位热能, 可以进一步节省能量。综上所述, 一般认为, 地板采暖比传统的采暖方式节能 20%~30%, 这还没有计入地暖用塑料管, 以塑代钢所节省的能量。在目前能耗主要靠燃煤的情况下, 节能 20% 以上意味着能够减少大量烟尘、有害气体的排放;

(2) 舒适性强 辐射采暖提高了室内平均辐射温度, 使人体辐射散热大量减小, 增强了人体舒适感。特别是地板埋管的水媒辐射采暖, 由于混凝土热容量大, 采用间歇采暖时升温波动小, 短时间开窗通风对室温影响也不明显, 间歇采暖时的舒适性强。由于室温可以比采用散热器时低, 室内空气就不那么干燥;

(3) 实现“按户计量、分室调温” 可以节省室内面积, 使空间布置显得方便和灵活;

(4) 造价与散热器基本持平 技术已相对成熟。由于化学建材的科研水平、生产水平迅速发展, 目前国内已能大批量生产合格的交联聚乙烯、聚丁烯、铝塑复合管等地暖系统实用的管材, 以及配套的阀门、接头、卡钉等零部件, 且掌握了施工运行技术, 积累了工程经验, 这就为地暖的大量使用奠定了基础。

由于地暖的上述显著优点, 近年来在我国开始被采用后, 立即迅速普及, 受到用户的好评。1999 年被建设部列为先进技术予以大力推广。

在辐射供暖大量被使用的同时, 能否使用辐射供冷, 自然是人们会考虑的。安装了水媒辐射供暖系统的, 当然希望能将管路系统用于夏季供冷。实际上, 在住宅或者办公建筑等建筑物中, 夏季用地板供暖系统来供冷, 完全可以部分或全部地解决夏季降温问题。据国外的研究报道显示, 一般可降低室温 3~5℃。在炎热干燥地区, 降温幅度还可能有一定的提高。

二、辐射供冷的优点

(1) 节能 通常认为比常规空调系统节能 28%~40%^[3]。例如 C. Stetiu^[4] 使用美国全境各地气象参数对商用建筑进行模拟计算的基础上得出结论, 辐射供冷的耗能量可以节省 30%。注意, 这里的比较是在都使用电力 (不包括使用自然冷热源) 的前提下进行的;

(2) 舒适性强 一般认为, 舒适条件下人体产生的热量, 大致以这个比例散发: 对流散热 30%、辐射 45%、蒸发 25%。辐射供冷在夏季降低围护结构表面温度, 加强人体辐射散热份额, 提高了舒适性, 美国、日本、欧洲对此都作过大量的研究测试, 其结论是一致的^{[5]-[7]}。此外, 辐射供冷没有吹冷风的感觉, 不存在“空调病”, 以及使用分体式空调时室内机噪声的问题。大量研究均证实, 对于穿普通鞋袜的人, 地面温度 20℃ 左右无不舒适感。辐射供冷解决了空调冷风吹向人体引起的身体不适, 尤其是在人睡眠时;

(3) 转移峰值耗电, 提高电网效率 高温时段空调用电集中, 这是很多城市伤脑筋的事情, 而辐射供冷的峰值耗电量是全空气系统的 27% 左右^[4], 所以其调峰作用明显。特别是吊顶或地板埋管式辐射供冷系统的蓄冷作用强, 可以主要利用夜间低谷电力制冷, 进一步增强了转移峰值耗电的作用, 在实行峰谷电价的地区, 可大大节省运行费;

(4) 提高节能性, 减少环境污染 由于辐射供冷时所用冷媒温度高, 所以为低温的地面

水、地下水、太阳能、地热（冷）等自然冷热源的使用，提供了可能性，进一步提高了节能性，能够减少环境污染。由于冬、夏两季共用一套室内系统，又可推进冷热一体化的热泵装置的应用。对于采用顶板或地板埋管的辐射供冷系统来说，由于其蓄热性强，更便于同建筑物被动冷却、混合冷却之类的方法^[8]结合使用，一方面节省能耗，一方面还可部分地补足辐射供冷系统冷量低的弱点；

(5) 提供了另一种末端系统形式 为目前冬季供暖、夏季供冷的居住建筑，提供了又一种可能的末端系统形式，改变了原来只能选用风机盘管或小型集中送风系统的情况。特别是地板供冷结合新风机组送少量干燥的新风，既改善了室内卫生条件，提高了空调降温效果，又降低了室内露点温度，可以进一步降低供冷水温，从而满足气候较潮湿地区的空调降温需要；

(6) 有利于系统形式和布置方式的优化 空调送风系统，特别是采用全新风的空调系统，其风管截面大、占用建筑空间大、有时还有与建筑的梁相碰，难于布置。采用地板供冷，有利于系统形式和布置方式进一步优化，减少建筑层高的增加幅度。

一般认为地板供暖或顶板供冷的舒适性好、对流传热强。但为了简化系统，也可用地板供冷或顶板供热，一般都是使用同一系统冬天供暖、夏天供冷的。Olesen^[9,10]在总结欧洲研究经验和工程实例的基础上，从舒适性、供冷能力、控制和设计方面客观地评价了地板供冷这一技术方法，肯定了其可行性，分析了其使用条件，给出了部分设计用的数据。按照多数国家标准和国际标准（例如ASHRAE 1992；ISO 1994），对于静坐或站立的人，推荐地面温度在18~29℃范围内，对于从事体力劳动的人，地面温度还可降低，此时供冷量可达到约50W/m²左右。由于人体与地面间辐射换热的角系数数倍于吊顶供冷，因此地板供冷能力并不一定低于吊顶供冷能力。国内对于地板供冷也作了一些初步的研究和探讨^[11-18]。由于空气露点温度较高时，会限制地板供冷能力，影响室内卫生条件，必需通过控制系统避免结露发生。对于湿度较高的地区，可以结合使用置换通风或其他送风方式送一部分干燥空气，或使用除湿机进行局部除湿。

需要指出的是，辐射供冷像辐射供暖一样具有“自调节”功能。当室内辐射负荷加大，例如日射直射辐射量较大时，地板或者房间墙壁内表面温度升高，特别是不设外遮荫的窗户和玻璃幕墙的内表面升温更大，这将大幅度提高冷顶板或冷地板与房间围护结构其余表面的辐射换热量。由于辐射热交换与表面绝对温度四次方之差成单调增减的函数关系，所以温差较大时，供冷量的提高是可观的。研究表明，当玻璃穹顶温度达到50℃时，通常供冷能力较低的地板供冷，其供冷能力可升高至100~150W/m²^[19]。

三、辐射供冷的缺点

1) 表面温度低于空气露点温度时，会产生结露，影响室内卫生条件；
2) 由于露点温度限制，加上表面温度太低，会影响人的舒适感，所以限制了辐射供冷的供冷能力；

3) 在潮湿地区，室外空气进入室内会增大结露的可能性，因此要求门窗尽可能密闭，影响自然通风；

4) 不同时使用风系统时，室内空气流速太低，如果温度达不到要求，更增加闷热感。

由于以上原因，辐射供冷经常要与某种形式的送风结合，例如在欧洲就大量使用置换通风，将室外新风经过除湿处理后送入室内，既解决了新风问题，又降低了室内空气湿度，避

免了结露的危险。送风还可以承担一定的室内冷负荷,使得辐射供冷在负荷较大的场合也能使用。

第三节 辐射供冷暖与建筑节能^[20~25]

如前所述,辐射供暖能耗低,适用于分户采暖,有利于集中供暖系统使用中的热能分户计量。因此从某种意义上说,辐射供暖和供冷是建筑节能的又一次机会和又一条途径。在我国,地板采暖的推广成为推行建筑节能政策的一个组成部分,为此有必要对建筑节能的国内外情况作一个简要概括。

一、建筑能耗与环境

能源是能量的源泉,是社会发展的动力。凡是能从自然界直接开发出来而未经动力转换的能源,称为“一次能源”,如煤、石油、天然气以及太阳能、风能、水能等自然能;凡需要依靠其他能源制取或生产的能源,称为“二次能源”,如电力、蒸汽等。从生态学的观点说,一次能源又可分为“可再生能源”和“不可再生能源”,前者如风力、水力、潮汐;后者如煤、石油、天然气。

20世纪以来,由于世界经济的发展和不断追求更高水准的生活,能源消耗的增长速度远远超过人口增长的速度。20世纪的前75年,世界人口在原基础增长了1.5倍,而能源消耗增长了10倍,由7.75亿吨增至85.7亿吨标准燃料。根据1978年的报导,世界化石燃料的经济可开采储量约折合7300亿吨标煤,如按现在的开采技术水平,煤可用约200年,石油大约可用30年,天然气可用50余年,这充分说明了能源问题的严重性。因而在现代社会中,任何国家都把节能作为一项国策。有人将“节能”称为在煤、石油、天然气、电能这些常规能源之外的第五大“能源”,是有道理的。

建筑能耗通常是指建筑物使用过程中所消耗的能源,主要包括暖通空调、热水供应、炊事、家用与办公电器、照明等方面的能耗,其中以采暖空调能耗为主。空调能耗主要包括两项:一项是冷源、热源能耗;另一项是输送空气和水所用的风机和水泵能耗。空调系统耗能量的影响因素有室外气象参数(主要有室外空气温度、湿度、风力和太阳辐射强度等)、室内设计标准、围护结构特性、室内人、设备、照明等的热、湿负荷以及新风量等。另一方面,系统风机、水泵的耗电直接受所输送空气量、水量的大小和风系统、水系统阻力的影响。而风、水系统的流量和阻力又受系统形式、温差、流速和设备效率的影响。

据20世纪80年代中期的统计,美国、日本等国的建筑能耗大约占社会总能耗的1/3,气候寒冷的北欧国家如瑞典等已达45%,并以大约每年4%的速度增长。据统计,我国1995年寒冷地区采暖能耗已达1.27亿t标准煤,占全国总能耗10.7%,占采暖地区社会总能耗的21.4%。预计到2000年,以上数字将分别达到1.79亿t标准煤,占全国能源消费总量的13.6%,占采暖地区社会总能耗的27.2%。建筑能耗的比例日益与国际水平接近。

值得注意的是能耗越高,环境的污染也日益加剧,以燃煤为主的能耗结构更加剧了大气的污染,包括:有害气体和灰尘排放、臭氧层破坏、温室气体排放造成的温室效应、夏季空调冷凝热造成的热污染等等。即以温室气体而言,研究表明:如果大气中的CO₂含量增长一倍,由此产生的温室效应将导致全球气温上升3℃,使海平面上涨约2~5m,被淹没的肥沃土地将使世界农业减产25%,迫使10亿人背井离乡。在地球发展史上多次出现的冰河期

里, 平均温度仅下降 10°C , 就使大批物种灭绝, 可见地球圈环境在温度变化面前是很脆弱的。与其造成污染后再花费人力、物力来治理, 不如节省能耗、减少污染、防患未然。

二、发达国家建筑节能简况

由于发达国家建筑耗能量高, 加之自 1973 年由于中东石油禁运引起西方的能源危机, 发达国家纷纷制定节能法规, 以法律和各种规章形式限制建筑能耗量。例如, 美国国家建筑规范标准会议 (NC SBCS) 于 1973 年制定了《新建筑物节能暂行标准》; 美国国家标准局 (NBS) 于 1974 年制定了“新建筑物节能设计及评价标准”; 美国 ASHRAE 于 1975 年编制了《新建筑物节能规范》(ASHRAE 90—1975), 后又多次修订; 1978 年美国颁布“国家能源法”。

日本于 1980 年连续颁布了《住宅能源使用合理化的判断标准》、《办公用建筑物能源使用合理化的建筑业主判断标准》、《已建建筑物空调设备节能指南》《新建建筑物空调设备节能指南》等。

自 1974 ~ 1989 年, 法国先后发布了 3 个节能法规及一系列的配套规范、技术方法、技术准则。1976 年前西德颁布《建筑节能法》; 1977 年加拿大颁布《新建筑节能法》; 1979 年英国颁布《建筑节能法》。

上述建筑节能法规颁布实施以后, 取得了很好的效果。比如法国每一个节能法规的实施, 大体都可在原有基础上节能 20% ~ 30%; 英国标准在能源危机前外墙传热系数为 $1.6\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$, 经过 3 次修订标准后, 现已降至 $0.45\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$; 丹麦经过 4 次修订标准后, 现已降至 $0.3\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 和 $0.2\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$; 日本除医院以外的各种建筑, 其能耗均减少 13% 左右。

三、我国建筑节能简况

(一) 我国建筑节能现状

我国经济发展迅速, 而能源生产的发展相对要滞后得多。“九五”期间我国经济预计将保持 8% ~ 9% 的增长速度, 而一次能源增长率则有可能争取达到 4%。因此, 发展经济所需的能源应更多地依靠节能来解决。

特别是由于我国地域广阔, 与同纬度其他国家相比, 冬寒夏热十分突出。7 月平均气温偏高 $1.3 \sim 2.5^{\circ}\text{C}$; 而 1 月平均气温差别更大, 东北地区偏低 $14 \sim 18^{\circ}\text{C}$, 黄河中下游偏低 $10 \sim 14^{\circ}\text{C}$, 长江以南偏低 $8 \sim 10^{\circ}\text{C}$, 华南沿海偏低 5°C 左右。而我国建筑物的保温隔热和气密性能很差, 采暖系统热效率低, 单位住宅建筑面积采暖能耗约为发达国家的 3 倍。因此, 尽管采暖区范围仅限于北方城镇, 采暖人口只占全国人口总数的 13.6%, 在多数房屋的冬季室温达不到 16°C 的情况下, 1995 年寒冷地区采暖能耗已达 1.27 亿吨标准煤, 占全国总能耗的 10.7%, 占采暖地区全社会能耗的 21.4%, 在一些寒冷地区城镇建筑能耗则高达当地社会总能耗的一半以上。随着生活的不断改善, 人们对于建筑环境舒适性的要求日益迫切, 过去作为“非采暖区”的我国中部地区城镇以及农村房屋正越来越广泛地使用采暖设施, 全国范围内的“空调热”日渐高涨, 且大都在用电高峰期间使用。因此, 采暖和空调能耗还将不断增长。

我国建筑用能以煤为主, 现在每年采暖燃煤要排放 CO_2 达 1.9 亿 t, 排放 SO_2 近 300 万 t, 排放烟尘也在 300 万 t 左右。研究表明, 采暖季节的采暖燃煤已经成为城镇空气污染大大超过标准的主要原因。如果北方地区建筑采暖耗煤量不大幅度降低, 采暖区城镇的冬季大气环

境质量就不可能达到要求的标准。在广大农村,采暖及炊事用燃料主要依靠烧薪、柴、秸秆等生物能源,一年要烧掉的薪、柴、秸秆折合标准煤 2.6 亿 t, 约占农业能耗的 60%。致使水土流失加剧,秸秆不能还田,土壤肥力下降,生态环境遭到破坏。随着每年城乡建成约 10 亿 m^2 房屋,以及房屋热舒适要求的不断提高,燃煤量将持续增加。不仅空气污染将日益严重,有损人体健康,并且还将加大对大气层“温室效应”的影响,危及地球的生态环境。

为了推动建筑节能,从 20 世纪 80 年代开始,建设部和国家其他有关部门陆续制定了《民用采暖居住建筑节能设计标准》,《旅游旅馆建筑热工与空气调节节能设计标准》等一些标准和法规,规定北方节能住宅免交固定资产投资方向调节税。采暖区各省、自治区和直辖市还颁布了节能设计标准的实施细则和一些地方性法规。夏热冬冷地区的建筑节能法规也已开始执行。建设部还颁布了不符合建筑节能标准的工程不许建设的规定。

为了交流经验,传播信息,我国召开了多次全国性和地区性的建筑节能研讨会。1994 年在北京举行了有 10 多个国家参加的城市建筑节能国际会议。目前,已与瑞典、英国、丹麦、法国、美国和加拿大等一些国家建立了国际合作与交流关系。

(二) 我国与发达国家在建筑能耗上的差距

我国与发达国家相比,建筑能耗差距还是很大的。具体表现为:

(1) 在建筑保温状况上与气候条件相近的发达国家相比,我们多层住宅单位能耗,外墙为他们的 4~5 倍,屋顶为 2.5~5.5 倍,外窗为 1.5~2.2 倍,门窗空气渗透为 3~6 倍。

(2) 在建筑标准上 近 20 年来,发达国家每修订一次标准,都将节能要求提高一步。如法国现行标准已是第三个节能 25% 的标准;又如英国标准,在能源危机前外墙传热系数为 $1.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,经过 3 次修订标准后,现已降至 $0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;丹麦经过 4 次修订标准后,现已降至 0.3 和 $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。而我国采暖居住建筑第一阶段的节能标准北京地区才降至 $1.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

(3) 在采暖系统上 发达国家热水采暖均为双管系统,设有多种动态变流量自动调节控制设备及热量计量仪表,用户可按需要设定室温;我国则基本上沿用单管系统,无调控设备,也无法计量。在同一采暖系统内室温畸高畸低。

(4) 在旧房改造上 不少发达国家的旧房节能改造工作早已结束,其他国家也已大部分完成,并已取得实效。如丹麦每平方米建筑面积供暖能耗 20 年来已降低了 50%,同时舒适程度有所提高。而我国只是开始搞了一部分试点建筑。

(5) 在建筑节能产业上 由于广阔的建筑节能市场的迫切需要,发达国家已经形成了保温隔热材料、保温门窗、密封材料、面层抹灰及加强材料、采暖系统调控元器件、管道及其配件等多种多样的高新技术产业部门,进行工业化大生产,而其中大多数部门在我国才刚刚起步。

在我国建筑中提高能源利用效率,其潜力十分巨大。建筑节能是缓解我国能源紧缺矛盾、改善人民生活工作条件、减轻环境污染、促进经济持续发展的一项最直接、最廉价的根本措施,也是经济体制改革的一个必要的组成部分。

人类学家 Edward T. Wall 曾说过,人类实际上是能够适应辐射热交换的,毕竟人类已经生活在一个由辐射能加热的世界上达几亿年之久。人类的皮肤,不管肤色如何,发射率达到 0.99。Wall 还大胆地预测:“如果世界上的热交换完全靠辐射来完成,我们在目前能耗水平 1/3 的基础上就可以生活得更好”^[25]。

建筑及其 HVAC 系统设计和运行过程中应该以热舒适为目标，而不是单单考虑室内温度，以便在保证热舒适的前提下提高设备动态性能及减少高峰负荷。实践证明，这样做才能获得更高的能源使用效率。ASHRAE 的主席（1987）曾经说过：“许多使用者，包括设计者，并没有意识到节能是有很多机会的，他们在新建筑的设计中比较保守。实际上，关于热舒适的研究已经得出了大量可以应用于建筑人工环境的节能概念。不论是新发现的还是发展成熟的环境控制方面的新概念，对基于热舒适理论的能源消耗都会产生积极的效果。例如，作用温度概念的引入，使我们能够在平均辐射温度和干球温度的基础上优化热舒适和能源效率，也为辐射供冷提供了较为广阔的应用前景。同样地，在不同的作用温度与露点温度下，可以通过合理确定热环境控制参数，在最少的能耗和令人满意的室内环境的前提下，实现各种室内指标。”^[25]

第二章 热、冷负荷及辐射供暖供冷量

确定房间辐射供暖的热负荷及辐射供冷时的冷负荷是进行辐射供暖、供冷管路系统设计和设备选型的第一步。对于舒适性空调（辐射供冷暖目前主要用于人体舒适目的）而言，最终的作用目标是人体，辐射供暖、供冷又以辐射热交换为主，所以负荷计算时理应考虑到这一因素。但由于人体相对围护结构内表面间的变动因素多而复杂，加上人的活动程度、个体的不同等等，很难准确计算。目前仍沿用传统的采暖、空调负荷计算方法，同时对室内设计温度稍加变动。

由于采暖、空调负荷计算的著述较多，本章对此只作简要介绍。

目前我国沿用的设计负荷（或称机器负荷）算法主要是以“设计日”和一定的“保证率”为基础，而对长周期平均负荷（常称为建筑负荷）和在此基础上得到的峰值负荷，并未加以应有的重视。实际上，这类方法，特别是改良温频法（Modified Bin Method），不仅可用于能耗分析，也可用于机器负荷的计算参考。特别对于蓄能性强的系统，如冰蓄冷系统、低温辐射供暖及辐射供冷系统，长周期基础上的负荷计算的合理性尤显突出。目前主要的应用困难是气象参数的问题，相信随着基础研究的不断进展，这一问题将得到解决。本章介绍了ASHRAE改良温频法以及为了能将该法合理应用于我国所做的一些工作。

第一节 室内外计算参数

一、平均辐射温度与作用温度

传统的空调和采暖方式以对流换热为主，室内温度设计参数使用空气干球温度。但采用辐射传热为主要份额的辐射供冷暖时，仅使用室内空气温度已不能准确地评价室内舒适性，因此引入平均辐射温度（Mean Radiant Temperature, MRT）与作用温度（Operation Temperature, OT）的概念。平均辐射温度定义为：假设在一个绝热黑体表面构成的封闭空间里，人体与周围的辐射换热量和在一个实际房间里的辐射换热量一样，则这一黑体封闭空间的表面平均温度称为实际房间的平均辐射温度。

平均辐射温度可以从辐射强度直接计算得到，Palmer^[2]给出了计算公式，但这种计算比较复杂，这里不再详细引述。工程应用中，可近似认为平均辐射温度等于围护结构内表面平均温度，围护结构内表面平均温度采用面积加权平均温度，即平均辐射温度

$$\bar{t}_r = \frac{\sum A_i t_i}{\sum A_i} \quad (2-1)$$

式中， \bar{t}_r 为平均辐射温度（℃）； A_i 为*i*表面面积； t_i 为*i*表面温度（℃）。

由于围护结构内表面温度可以比较方便地测得，则可计算得到平均辐射温度。

在室内作用温度已定情况下，平均辐射温度也可以用下式计算：

$$\bar{t}_r = t_a + \frac{h(t_o - t_a)}{h_r} \quad (2-2)$$

式中, t_a 为室内空气温度 ($^{\circ}\text{C}$); t_o 为作用温度 ($^{\circ}\text{C}$); h 为空气与围护结构内表面间的总表面传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$]; h_r 为辐射传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$]。辐射传热系数可用下式求得:

$$h_r = 4\sigma f_{\text{eff}} \left[\frac{(\bar{t}_r + t_a)}{2} + 273 \right]^3 \quad (2-3)$$

式中, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; f_{eff} 为辐射传热时人体表面积有效系数, 表征了人体着装后表面积与裸体表面积之比, 一般可取为 0.71。

作用温度是考虑平均辐射温度与室内空气温度综合作用而引入的参数, 其定义为: 假设在一个各表面温度相同的绝热黑体表面构成的封闭空间里, 人体与周围的辐射与对流换热量之和与在一个实际房间里的换热量一样, 则这一黑体封闭空间的表面温度称为实际房间的作用温度。作用温度可用下式计算:

$$t_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c} \quad (2-4)$$

式中, h_c 为表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。表面传热系数可由以下经验公式计算:

$$h_c = 8.5v^{0.5} \quad (2-5)$$

式中, v 为空气流速 (m/s)。

在室内空气流速小于 $0.2 \text{ m}/\text{s}$ 时, 平均辐射温度和室内空气温度的差异将小于 4K , 作用温度可认为等于平均辐射温度和室内空气温度的平均值, 即作用温度

$$t_o = \frac{1}{2} (t_a + \bar{t}_r) \quad (2-6)$$

这意味着室内空气温度和平均辐射温度对于室内热舒适的影响是同等重要的。

二、室内设计参数

对于采暖和舒适性空调而言, 室内设计参数直接影响到人体舒适性, 从而影响到人的工作效率和生活质量。室内设计参数的确定还要考虑到能耗因素, 冬季不必要的温度过热和夏季不必要的温度过低, 不仅会使室内外温差加大, 容易造成人外出时对过大温差的不适应, 还会造成不必要的能量浪费。

我国《采暖通风与空气调节设计规范》(以下简称《暖通空调规范》)规定: 夏季舒适性空调的室内设计温度为 $24 \sim 28^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $40\% \sim 60\%$, 风速不应超过 $0.3\text{m}/\text{s}$; 冬季空调的室内设计温度一般为 $18 \sim 22^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $40\% \sim 60\%$, 风速不应超过 $0.3\text{m}/\text{s}$ 。该标准中规定的冬季采暖室内设计参数列于表 2-1。我国旅店客房卫生标准 (GB9663—1996) 中对室内温湿度和风速标准的规定值列于表 2-2。

表 2-1 冬季采暖室内设计参数

使用类别	设计温度/ $^{\circ}\text{C}$
民用建筑主要房间	16 ~ 20
浴室	25
更衣室	23
托儿所、幼儿园、医务室	20
办公用室	16 ~ 18
食堂	14
盥洗室、厕所	12

表 2-2 旅店客房室内设计参数

项 目	3~5 星宾馆	1~2 星宾馆	普通旅馆、招待所
温度 (冬季) /℃	> 20	> 20	≥ 16
温度 (夏季) /℃	< 26	< 28	-
相对湿度 / (%)	40~65	-	-
风速 / (m/s)	≤ 0.3	≤ 0.3	-

为了借鉴国外室内设计参数,表 2-3 给出了日本空调和卫生工学会的住宅室内温度推荐值^[3],该标准给出了适宜不同年龄和健康状况的人群的适宜温度,可供参考。表 2-4^[3]给出了部分国家室内热环境标准及室内设计参数或规定的建筑围护结构热阻。

表 2-3 日本空调和卫生学会推荐的住宅适宜温度 (单位:℃)

房间类别	冬 季			春 秋 季			夏 季		
	普通	高龄	残疾	普通	高龄	残疾	普通	高龄	残疾
客厅、餐厅	17~24	21~25	21~25	21~27	22~26	22~26	25~29	23~27	23~27
卧室	15~21	18~22	18~22	19~25	20~24	20~24	24~28	23~27	23~27
厨房、走廊	15~21	20~24	20~24	19~25	20~24	20~24	24~28	24~28	23~27
浴室更衣室	22~26	23~27	23~27	24~28	24~28	24~28	26~30	26~30	23~29
厕所	20~24	22~26	22~26	22~26	22~26	22~26	25~28	25~29	23~27

表 2-4 部分国家的室内热环境标准

国 名	规格、标准名	规格的种类和内容
美国	UNIFORM BUILDING CODE ANSI/ASHRAE 55-1992	建筑的规格,要求采暖室内温度 21℃ 空调选型,建筑热环境条件,不同服装热阻 clo 值时适宜的作用温度, 室温推荐相对湿度 50%
英国	BS 5720-1979 BS 5619-1978 BS 4467-1978	空调选型,建筑物的机械换通风换气及空气调节的技术标准,设计推 荐值 21℃ 考虑了残疾人的住宅技术标准 针对高龄者设计的住宅的基于人体学和人类工程学方面的建议
德国	DIN 4701 DIN 18025	采暖计算,建筑物热负荷的标准,住宅的标准室温为 20℃ 重度残疾者住宅设计的基础事项,设定居室采暖温度为 24℃
法国	DTU P 50-102	采暖计算规范,计算建筑围护结构的热性能、建筑物的基本热损耗以 及居住地区和住宅其他部分 G 值的标准
EC 委员会	BUILDING PRIN-CIPLES	采暖室温的最大值为 19℃ (浴室除外)
瑞典	SBN 1980 KAPITEL 35	设定住宅的作用温度下限为 18℃
挪威	NS 3031	采暖住宅设定为 20~22℃。

有些国家的设计规范中,室内计算温度直接使用作用温度。我国现行的一些地方标准中提出:使用辐射供暖时,室内设计温度(空气温度)可以比采用传统采暖方式时降低 1~2℃,实际也是由于采用辐射采暖时,比之传统采暖方式,室内作用温度要高 1~2℃ 的原因。因此,采用地板供暖时的室内设计温度应为 16~18℃,或作用温度 16℃。

同样地,当采用辐射供冷时,比采用传统空调系统室内作用温度可降低 1~2℃,照此推理,室内空气设计温度可以提高 1~2℃,但由于风速较低,室温过高时产生闷热感,故

仍以 26~28℃ 为限, 不宜再高。此外, 采用辐射供冷时, 为防止辐射面结露, 应当关注室内空气露点温度和含湿量。例如, 采用地板辐射供冷的地面舒适温度下限一般为 19℃, 当室内相对湿度 50% 时, 若干球温度 26℃, 则空气含湿量为 10.5 g/kg, 露点温度为 15℃; 若干球温度 28℃, 则空气含湿量约为 12g/kg, 露点温度约为 16.8℃, 均不会引起结露。但当温度 28℃、相对湿度 65% 时, 空气含湿量为 15.5g/kg, 露点温度为 21℃, 若不采取其他措施, 将造成地板结露。所以, 此时适宜的室内设计参数建议为室温 26~28℃, 相对湿度 50%, 或室内作用温度 26℃, 相对湿度 50%。表 2-5 给出了采用辐射供暖、供冷时室内参数推荐值。

表 2-5 采用辐射供暖、供冷时室内参数推荐值

供暖、供冷方式	空气温度/℃	作用温度/℃	相对湿度 (%)
地板、顶板供暖	16~18	16	—
顶板、地板供冷	26~28	26	50

三、室外计算参数

室外计算参数是采暖系统、空调系统设计选型计算的基础。辐射供暖、供冷是建筑物采暖和降温的方式之一, 其冷热源设备也大致同于其他采暖空调方式, 所以室外计算参数的取用大体上是相同的。应该强调的是, 采用辐射供冷时, 特别同时使用置换通风时, 应该根据室外空气含湿量和露点温度对设备进行设计选用或校核计算。此时, 室外设计参数除了通常使用的干、湿球温度以外, 还应该表明相应的含湿量, 以便于应用。

按照我国暖通空调规范规定, 冬季采暖室外计算温度采用历年平均每年不保证 5 天的日平均温度, 其值见表 2-6^[4], 辐射采暖系统的室外设计温度亦采用该设计温度。

辐射供冷的冷源采用冷水机组或热泵机组时, 室外设计参数应参照空调系统设计来取用。我国暖通空调规范规定: 夏季空调室外计算干球温度, 采用历年平均每年不保证 50h 的干球温度; 夏季空调室外计算湿球温度, 采用历年平均每年不保证 50h 的湿球温度; 夏季空调室外计算日平均温度, 采用历年平均不保证 5 天的日平均温度; 夏季空调室外计算逐时温度用下式计算:

$$t_i = t_{wp} + A\Delta t_r \quad (2-7)$$

式中, t_{wp} 为夏季空调室外计算日平均温度, 其值见表 2-6; A 为室外温度逐时变化系数, 按表 2-7^[4] 查取; Δt_r 为夏季室外计算平均日较差, 可查表 2-6, 或按下式计算:

$$\Delta t_r = \frac{t_{wg} - t_{wp}}{0.52} \quad (2-8)$$

式中, t_{wg} 为夏季空调室外计算干球温度 (℃), 其值见表 2-6。

表 2-6 冬、夏季空调室外计算参数

序号	城市	冬季采暖室外计算温度/℃	夏季空调日平均温度/℃	夏季空调干球温度/℃	夏季空调湿球温度/℃	计算日较差/℃
1	北京	-9	28.6	33.2	26.4	8.8
2	石家庄	-8	29.7	35.1	26.6	10.4
3	呼和浩特	-19	25.0	29.9	20.8	9.4
4	太原	-12	26.1	31.2	23.4	9.8