



普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

供热工程 (上册 供暖工程)

邹平华◎主编

邹平华 方修睦 王 芃 倪 龙◎编著

石兆玉◎主审



非
外
借

中国建筑工业出版社

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

供 热 工 程

(上册 供暖工程)

邹平华 主编
邹平华 方修睦 王 芑 倪 龙 编著
石兆玉 主审

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

供热工程 (上册 供暖工程)/邹平华主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 12

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材
ISBN 978-7-112-21162-3

I. ①供… II. ①邹… III. ①供热系统-高等学校-教材
IV. ①TU833

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 214172 号

本书为普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材, 分上、下两册。

本书根据建筑环境与能源应用工程专业课程基本要求和专业培养计划的课程体系编写。在上册——供暖工程中全面系统地阐述了以热水和蒸汽作为热媒的集中供暖系统的构成、工作原理和设计方法, 介绍了有关供暖设备的基本知识。

本书体现了编写组多年来从事“供暖工程”的教学经验和科研工作体会, 反映了国内外供暖工程领域的最新研究进展, 汲取了国内外供热工程教材的精华。力求文字通俗易懂, 简明扼要; 图形表现注重清晰、标准和突出重点。内容系统性强, 为教学和自学提供便利。每章后附形式多样的思考题与习题, 利于加深对所学内容的理解。通过扫描部分章节附带的二维码, 可观看知识点动画与图片 (部分为付费观看), 便于扩大学生的知识面和增强学习兴趣。

本书可作为建筑环境与能源应用工程专业的教材, 亦可作为其他有关专业的参考教材, 还可作为从事供热通风空调工程设计、制造、安装和运行人员的工作参考用书。

责任编辑: 齐庆梅

责任校对: 王宇枢 刘梦然

普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高等学校建筑环境与能源应用工程专业规划教材

供热工程 (上册 供暖工程)

邹平华 主编

邹平华 方修睦 王 芑 倪 龙 编著

石兆玉 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11½ 字数: 284 千字

2018 年 6 月第一版 2018 年 6 月第一次印刷

定价: 26.00 元 (定价不含动画内容)

ISBN 978-7-112-21162-3

(30329)

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)

前 言

供热工程广泛应用于国民经济各个部门，与能源应用、环境保护、节能减排、雾霾治理和提高生活质量密切相关。为了使供热系统经济、节能、安全、可靠运行，需要有一大批具有专门知识的专业人才。学习《供热工程》，为培养这一类专门人才打下必要的基础。

《供热工程》根据建筑环境与能源应用工程专业课程基本要求和专业培养计划的课程体系编写。书中总结了编制组近年来在“供热工程”教学中的经验和科研工作体会，反映了国内外供热工程领域的最新研究成果，汲取了国内外供热工程教材中的精华。

全书分为上、下两册：上册——供暖工程；下册——集中供热。两册内容相对独立，可以全选或单选使用。

供热工程（上册 供暖工程）中分别介绍了热水供暖系统和蒸汽供暖系统。全面系统地阐述了常见各类集中供暖系统的构成和工作原理；热水供暖系统等温降和非等温降的水力计算方法；低压蒸汽和高压蒸汽供暖系统的水力计算方法；散热器、暖风机和辐射板等散热设备的工作原理、布置和选用计算。书中各章节既相对独立又相互联系。

在编写过程中作者注意深入浅出，前后呼应；结合国情，外为中用。叙述文字简单明确；图文配合诠释概念和原理；图形表达侧重突出重点；例题与水力计算方法匹配。扩展和延伸了单管式供暖系统的形式，高层建筑供暖系统的形式，单、双管供暖系统的最佳调节公式等内容。

为了扩大学生的知识面和学习兴趣，加强对系统和设备工作原理等知识的理解，书中部分章节增加了可扫描的二维码，以供观看与教学内容相关的图片和动画（其中一部分为免费观看，另一部分用▶标记的为低价收费观看）。此项工作为初次尝试，图片和动画数量有限，有待今后补充和完善。

在使用本教材时，可视实际的教学时数及课程安排取舍。为此在一些章节编号后标以星号（*），以示可作为选修或自学的内容。

本书可作为高等工科院校建筑环境与能源应用工程专业“供热工程”课程的教材，亦可作为相关专业教学参考，还可作为从事供热通风空调工程设计、制造、安装和运行人员工作参考用书。

本书由邹平华、方修睦、王芑、倪龙合编，邹平华担任主编。绪论由邹平华编写；第1章由方修睦、王芑、倪龙合编；第2章~第4章由邹平华编写；第5章由邹平华、王芑合编；第6章由方修睦、邹平华、王芑合编。王芑为本书成稿做了大量辅助工作。

本书承蒙清华大学石兆玉教授细致审阅，提出了不少宝贵意见，在此谨致衷心谢意。

在本书编写过程中，得到了本学科专业指导委员会的支持和鼓励，得到了中国建筑工业出版社领导的支持，中国建筑工业出版社齐庆梅编辑做了大量的组织工作。在此一并向他们表示衷心感谢。

由于时间仓促和编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请批评指正。如有意见和建议，可寄送哈尔滨工业大学（Email: zph@hit.edu.cn, cahnburg@hit.edu.cn）。索取教材配套ppt，可发邮件至jiangongshe@163.com。

目 录

绪论	1
第1章 供暖热负荷	6
1.1 供暖室内、外计算温度	6
1.1.1 供暖室外计算温度	6
1.1.2 室内计算温度	7
1.2 供暖设计热负荷	8
1.2.1 围护结构的基本耗热量	8
1.2.2 围护结构的附加(修正)耗热量	12
1.2.3 冷风渗透耗热量	15
1.2.4 冷风侵入耗热量	19
1.3 围护结构的最小传热阻	24
复习思考题	26
第2章 散热器热水供暖系统	28
2.1 散热器	28
2.1.1 对散热器的要求	28
2.1.2 散热器的种类	29
2.1.3 散热器的选型与布置	31
2.1.4 散热器用量的计算	33
2.2 散热器热水供暖系统的工作原理和系统形式	38
2.2.1 热水供暖系统的工作原理	38
2.2.2 散热器热水供暖系统的基本形式	40
2.2.3 *高层建筑热水供暖系统形式	46
2.2.4 分户式热水供暖系统形式	50
2.3 热水供暖系统的附属设备	52
2.3.1 膨胀水箱	52
2.3.2 排气器具	54
2.3.3 除污器和过滤器	56
2.3.4 恒温阀	57
2.4 热力入口	58
复习思考题	59
第3章 * 暖风机供暖	61
3.1 暖风机	61

3.2	暖风机供暖的特点	62
3.3	暖风机供暖系统	63
3.3.1	暖风机的选择计算	63
3.3.2	暖风机热水供暖系统方案及管路布置	65
	复习思考题	66
第4章	辐射供暖	67
4.1	概述	67
4.1.1	辐射供暖的概念	67
4.1.2	辐射供暖的能源及类型	67
4.2	辐射板及辐射供暖的特点	67
4.2.1	辐射板	68
4.2.2	辐射供暖的特点	71
4.3	热水辐射供暖系统	73
4.3.1	热水辐射供暖系统的形式及辐射板的布置	73
4.3.2	热水辐射供暖系统辐射板供热量的计算	74
4.4	*电热辐射供暖	77
4.4.1	电热辐射供暖的特点	77
4.4.2	电热辐射供暖的形式与计算	77
	复习思考题	80
第5章	热水供暖系统的水力计算与调节	82
5.1	热水供暖系统水力计算基本公式	82
5.1.1	管段阻力损失计算公式	82
5.1.2	热水供暖系统管段阻力损失的计算方法	84
5.2	热水供暖系统的作用压头	85
5.2.1	重力循环热水供暖系统的作用压头	85
5.2.2	机械循环热水供暖系统的作用压头	90
5.2.3	*单管热水供暖系统散热器的小循环作用压头和进流系数	91
5.2.4	单管热水供暖系统散热器进、出口水温的计算	93
5.3	热水供暖系统的水力计算方法	95
5.3.1	等温降水力计算方法	95
5.3.2	非等温降水力计算方法	108
5.4	热水辐射供暖系统的水力计算	113
5.5	*供暖调节	114
5.5.1	供暖系统最佳调节的基本公式	114
5.5.2	双管热水供暖系统的最佳调节方法	116
5.5.3	顺流式单管热水供暖系统的最佳调节方法	117
	复习思考题	118
第6章	*蒸汽供暖系统及其水力计算	120
6.1	蒸汽供暖系统形式	120

6.1.1	低压蒸汽供暖系统	120
6.1.2	高压蒸汽供暖系统	123
6.2	蒸汽供暖系统的水力计算	125
6.2.1	低压蒸汽供暖系统水力计算方法	126
6.2.2	高压蒸汽供暖系统水力计算方法	131
6.3	蒸汽供暖系统的辅助设备	136
6.3.1	疏水器	136
6.3.2	减压阀	140
6.3.3	二次蒸发箱	143
6.3.4	安全水封	143
	复习思考题	144
	附录	145
	参考文献	176

绪 论

供暖是室外温度下降到某一水平，用人工方法向建筑物供给热量并保持一定的室内温度，创造适宜的生活或工作条件的技术。供暖的主要目的是冬季为人们创造温暖、舒适的生活或工作环境，供暖设施是寒冷地区保证人的身体健康、提高生活质量和工作效率、提高产品质量的基本建筑设备。冬季采取怎样的手段将热量送到室内？当室外温度不断变化时，如何保证室内温度维持在一定的水平？怎样消耗最少的燃料、对环境影响最小，而获得最好的供暖效果？面对五花八门的供暖产品市场，如何选择合适的供暖设备？房间要选多大的管道、用多少散热设备，才能取得满意的供暖效果？为了解答上述问题和其他有关供暖的问题，让我们共同走进《供暖工程》。

1. 供暖系统

供暖工程是将热能应用于室内供暖的工程。供暖系统是实现供暖的硬件系统。

(1) 供暖系统的基本组成及其工作原理

供暖系统由热源、管道系统和散热设备三个基本部分组成，分别生产、输送和应用热能。热媒将热源生产的热能通过管道系统送到散热设备中，将三个部分有机联系成一个系统。散热设备向室内散热实现供暖的功能。热媒有热水、蒸汽和热烟气，其中热水和蒸汽为常用热媒。用示意图来初步了解供暖系统的基本原理和构造。

图 1 为简单的水暖系统示意图。热水供暖系统以热水为热媒。热源 1 制备的热水由循环水泵 6 提供动力，沿供水管 2 进入散热设备 3，在散热设备中向建筑物 5 的房间散热而降低温度，沿回水管 4 回到热源重新加热。

图 2 为简单的蒸汽供暖系统示意图。蒸汽供暖系统以蒸汽为热媒。蒸汽锅炉 1 生产的

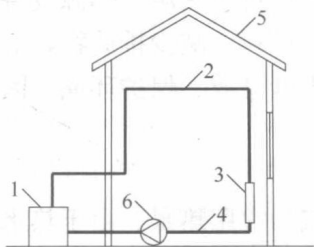


图 1 热水供暖系统示意图

1—热源；2—供水管；3—散热设备；
4—回水管；5—建筑物；6—循环水泵

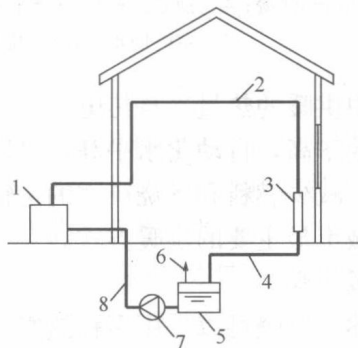


图 2 蒸汽供暖系统示意图

1—蒸汽锅炉；2—供汽管；3—散热设备；4—凝结水管；
5—凝结水箱；6—放气管；7—凝结水泵；8—室外凝结水管

蒸汽靠自身压力沿供汽管 2 进入散热设备 3，在散热设备内定压冷凝向房间供暖；冷凝水沿凝结水管 4 自流入凝结水箱 5；凝结水经凝结水泵 7 加压，沿室外凝结水管 8 送回到锅炉重新加热。放气管 6 用于排放系统内的空气。

(2) 集中供暖与局部供暖

供暖系统分为集中供暖系统和局部供暖系统。局部供暖是热源、管道系统和散热设备在结构上合为一体或者设置在同一单体建筑内，直接在建筑物内生产、传输和应用热量的供暖方式。图 1 其实就是一个户式热水供暖系统，是典型的局部供暖系统。户式热水供暖系统的热源以往采用小锅炉，现在可采用电锅炉或燃气壁挂炉。我国北方的火墙、火炕，国外的壁炉等烟气供暖，各种使用电热和燃气供暖设备等的供暖方式都属于局部供暖的范畴。集中供暖是热源和散热设备分别设置，由热源通过管道向多个建筑物供暖的方式。图 3 为热水集中供暖系统示意图。由热源 1 向多个建筑物供暖（图中仅示意性地给出 3 个）。热源可以是独立的锅炉房，也可以是供应热能的大型集中供热热源（热电厂或大型锅炉房）的热力站（转换供热介质种类、改变供热参数、分配、控制及计量供给热用户热量的综合体）。在换热器 2 中室外管网与室内供暖系统的循环水交换热量，室外管网中温度为 τ_g 的循环水由供水管 6 进入换热器，将热量传递给室内供暖系统的循环水后温度降至 τ_h ，由回水管 7 回到热源。供暖热用户的循环水从换热器获得热量，温度升至 t_g ($\tau_g > t_g$)，经供水管 3 输送至散热设备 5，向室内散热后温度降至 t_h ，并由回水管 4 回到换热器被重新加热。室内供暖系统和室外供热管网分别为两个互相隔绝的系统，循环水泵 8 和 9 分别给这两个系统提供循环动力。

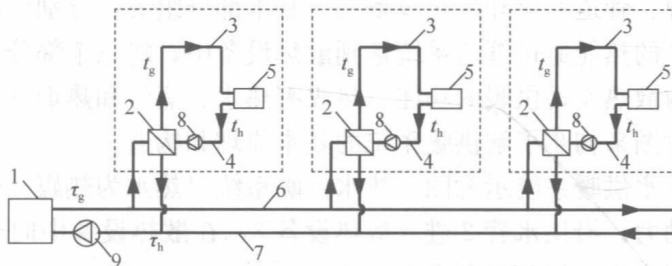


图 3 集中热水供暖系统示意图

- 1—热源；2—换热器；3—供水管；4—回水管；5—散热设备；6—室外供水管；
7—室外回水管；8—用户循环水泵；9—室外管网循环水泵

由于集中供暖的热量来自热电厂、大型锅炉房或其他可再生热源。热源设备最主要的优越性是热效率高，自动化水平高，可以节省热能、节省燃料、减少排放物，节省劳动力和劳动强度，减少燃料和燃烧产物的运输量，有利于减少碳排放、保护环境。因此集中供暖成为当今城市最主要的供暖方式。

(3) 供暖热媒

如上所述，供暖可以采用多种热媒，其中热水和蒸汽为常用热媒。由于热水和蒸汽这两种介质本身的特点，它们作为供暖热媒也具有不同的特点。

1) 热水作为热媒的主要特点

优点：有利节能减排，经济性好。供水温度低，漏水量小，散热损失小。可随室外温度的变化调节供热量。热水供暖温度较蒸汽低，可降低热电厂的抽汽压力，降低热电厂的

标煤耗量和提高经济性。室内温度波动小，人体舒适度高；散热设备表面温度低，室内卫生条件好，因而供暖质量好。易损和需要经常维护的部件少，运行管理较简单，维修费用低。管道和设备锈蚀较轻，使用寿命长。

缺点：散热设备传热系数和传热温差小，相同设计热负荷下所需供暖设备面积多；管径大，初投资高。输送热水时，循环水泵消耗电能，运行费用高。发生事故时，热水供暖系统的管道与设备易产生冻结危害。水的密度大，系统高度相同时水产生的压头大，因此，用于高层建筑需要分区，以避免压头超过散热设备的承压能力。

2) 蒸汽作为热媒的主要特点

优点：蒸汽依靠自身的压力输送，运行费用低。蒸汽供暖时散热设备传热系数和传热温差大，所需散热设备面积小，凝结水管道管径小，初投资低。停止供热时不存在冻害。蒸汽密度比水小得多，用蒸汽向高层建筑高层部分供给热量，不存在超压问题。

缺点：蒸汽温度高，易漏汽，凝结水回收率不高，散热损失大，能耗高。只能采用间歇调节，室内温度波动大，舒适度差。蒸汽供暖时散热设备表面温度高，灰尘在高温时分解加剧，室内空气质量差。蒸汽作热媒热得快、冷得快。蒸汽和凝结水在管道内流动时伴随相变，状态多变，部件需要经常维护，管理复杂，维修费用高。管道（特别是凝结水管）和设备氧腐蚀严重，使用寿命短。

热水凭借在节能环保、供暖质量、运行管理、使用寿命和经济效益等方面的优势，成为当前国内外住宅和公用建筑集中供暖的主要热媒。工业企业有生产用汽时的厂房、间歇生产的车间和需要临时供暖的场合，可以用蒸汽作为热媒。工业企业的办公楼等辅助建筑可以用蒸汽制备热水供暖。

2. 国内外供暖技术发展概况

人类生存、发展与热能利用相随、相伴，供暖是人类应用热能的主要方式。人类社会的进步史也是热能利用技术进步的历史。社会进步和技术经济发展促使和推动供暖技术的发展与进步。其中供暖作为集中供热的主要热负荷，其发展与机械、电力工业生产的发展、机械制造技术的进步和设备的开发密不可分。从最原始的直接燃烧固体燃料的辐射供暖到火炉、壁炉等利用烟气的局部辐射供暖，从局限于一个建筑物内的热水或蒸汽供暖发展到向多个建筑物的集中供暖。

(1) 国外供暖技术发展概况

人们在考古活动中发现早在古罗马、土耳其和希腊等国家的王族宫殿中就有应用地板辐射供暖的遗迹。后来俄罗斯等欧洲国家的壁炉、西伯利亚的火炕、日本和韩国的地炕都应用了辐射供暖的原理。这些采用热烟气的供暖方式都属于局部供暖。

采用热水和蒸汽的供暖技术起源于欧洲。不同资料所记载的发明年代有差别，但都在17世纪以后，发明者也众说纷纭。1675年，英国工程师埃文林在温室中用热水供暖。1745年英国上校提出蒸汽供暖的建议，但未实际应用。1784年蒸汽机发明家詹姆斯·瓦特用蒸汽给自己的办公室、公司浴池和纺织厂供暖，从此蒸汽供暖得到越来越广泛的应用。19世纪40年代，资本主义生产完成了从工场手工业向机器大工业过渡的阶段，西方国家进入了工业革命时代。工业革命使供暖技术的发展进入了一个新的阶段，创造出热水

锅炉和金属散热器。在俄罗斯,第一个热水供暖系统出现于1834年。19世纪90年代在德国出现了双管热水供暖系统。20世纪30~40年代在苏联有垂直式和水平式单管供暖系统的应用。1905年出现辐射供暖系统。1907年俄罗斯圣·彼得堡儿童医院的13栋楼采用了自然循环热水供暖系统,1909年在圣·彼得堡剧院出现了机械循环热水供暖系统,集中供暖渐具规模。1917年十月革命后,集中供暖快速发展,供暖技术走在世界前列,出现了一批杰出的专家和学者,研究了与供暖有关的建筑热工、供暖系统设计计算的基本理论和供暖系统形式,20世纪30年代或更早已有供暖教科书出版。苏联解体后,技术进步相对迟缓。欧美国家发展集中供暖的情况与各国的气候和能源及其政策有关。一些欧美国家(例如美国、英国等)在民用建筑中仍然以户式局部供暖为主。丹麦、芬兰、德国等欧洲国家注重集中供暖,20世纪40年代国外新型钢制散热器问世,结束了长期应用铸铁散热器的历史。由于不耐腐蚀,钢制散热器也曾一度被禁用,经过几十年改进制造工艺和加强供暖系统水处理后又重新投入市场。北欧国家研发了一系列新型散热器、换热器、调节阀、控制器和各类仪表等,行销世界许多国家。由于能源危机,20世纪70年代以后一些欧洲国家注重推行分户计量供暖,取得良好的节能效果。

(2) 中国供暖技术发展概况

我国在远古时代就有钻木取火的传说,西安半坡遗址出土的新石器时代仰韶时期的房屋中就发现了方形灶坑,屋顶设有小孔用来排烟。夏商周时期出现供暖火炉,汉代出土文物中有带炉算子的炉灶和带烟道的局部供暖设备。至今在北京故宫和颐和园还有保存完整的火地,是早期采用烟气进行地板辐射供暖的典型实例。其他简单的辐射供暖,如火墙、火炕、火炉等在北方农村沿用至今。

在旧中国供暖事业基础非常薄弱。只在比较发达的大都市(如北京等),以及受国际化影响(如哈尔滨等)和有外国租界地的大城市(上海、天津等)的一些高档建筑物中装有供暖设施,当时被人们认为是稀有的、高贵的室内建筑设施。新中国成立后,从20世纪50年代开始发展集中供暖,当时铸铁散热器品种单一,不少是仿制品(例如大60型、小60型和M132型等),传热性能不佳。20世纪50、60年代供暖热媒采用蒸汽和热水,20世纪70年代以后由于节能和提高供暖质量等原因,在民用建筑中开展了大规模的“汽改水”工程。20世纪70年代开始生产暖风机。20世纪80年代开始生产钢制散热器,改进铸铁散热器。2000年之后出现各种材质的散热器,并引进和生产了其他新型供暖设备(如电热膜、加热电缆和预制辐射板等),满足了经济水平提高、生活品位不同的人对散热设备的要求。

以前供暖系统形式主要采用垂直式双管和单管系统,单管系统尤其流行,只在一些公共建筑的厅堂和会议室局部采用水平式单管系统。2000年后,开始采用共用立管的分户式系统,户内为水平式系统,增加了计量和控制装置。20世纪70年代前除曾在为数不多的工厂和公共建筑采用过辐射供暖之外,主要采用对流供暖。近年来随着新型塑料管材的问世,地板辐射供暖得到大力推广。

在发展集中供暖的初期几乎没有自动控制手段,冷热不均现象严重,能耗指标高。随着各种调节阀的引进和研发、流量计量仪表的不断问世,供暖系统的自控水平和调节手段不断提高,取得了可观的节能效果。直到20世纪80年代集中供暖普及率还不高。改革开放以后,随着国民经济建设的持续高速发展和社会生活水平的提高,我国的集中供暖事业

迅速发展。截至 2015 年末,全国城市集中供暖总面积已达到 67.2 亿 m^2 ,不少矿区、林区和农场等人们集中居住的地方也实现了集中供暖,普及率迅速提高,对提高居民生活质量和推动经济发展,建设现代化城市起到重要作用。

20 世纪 50 年代,我国主要学习苏联的供暖技术和翻译苏联的供暖教材。50 年代后期原哈尔滨建筑工程学院和西安冶金学院等高校编写了本校用教材,在此基础上于 60 年代初出版了适应我国社会发展和需求的供暖与供热教材。80 年代,原哈尔滨建筑工程学院、西安冶金建筑工程学院、天津大学、太原理工大学等高校进一步提升了这些教材的水平,对推动国内供暖技术的发展和培养技术人才起到积极作用。

经过数十年众多专业技术人员的不断努力,1975 年建设部颁布了《工业企业采暖通风和空调调节设计规范》TJ 19—75,于 1987 年颁布了适合我国国情的《采暖通风与空气调节设计规范》GBJ 19—87,2003 年对该规范全面修订并颁布了《采暖通风与空气调节设计规范》GB 50019—2003,之后针对民用建筑和工业建筑进行细化,于 2012 年和 2015 年分别颁布了《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736—2012 和《工业建筑供暖通风与空调设计规范》GB 50019—2015。近年来还颁布了一系列其他有关供暖的标准规范。这些标准和规范总结了我国在专业领域的实践经验,反映了各时代的研究成果,借鉴了有关国际标准和国外先进标准,对提高行业技术水平和推动技术进步起到了重要作用。

总之,国内外供暖技术走过了由局部供暖发展到集中供暖,由自然循环到机械循环供暖,由小规模到大规模,由简单到复杂的系统形式的发展历程。当前的集中供暖与集中供热密不可分。集中供暖的热源多来自集中供热热源。提高能效、减低供暖能耗、开发再生能源来满足经济和社会发展对供暖的需求是不断努力的目标。

3. 教材内容

本教材分上、下两册,上册为供暖工程,下册为集中供热。考虑可根据教学计划或需要单选或全选,两册内容相对独立。在本书(上册 供暖工程)中全面阐述以热水和蒸汽为热媒的室内供暖系统的形式、结构和工作原理,供暖设计热负荷的计算,管道系统水力计算的基本原理和计算方法,散热设备的性能和选择计算。有关集中供暖的室外管网和热源等内容将在本教材的下册介绍。加注(*)号的章节,可根据教学需要和教学时数选修。

我国的供暖事业已得到空前的发展,从理论到实践技术水平都有极大的提升,但还有许多理论研究、产品开发和应用研究工作有待开展。特别是工程粗放、供暖能耗指标高、调节控制手段差的局面还需要进一步改变,在减轻失调提高供暖系统的能源效率、降低单位面积能耗指标,提高管道输送效率、降低碳排放指标、提高自控和智能化水平等方面与国际先进水平还有差距,需要一大批专业人才进行研究和实践。希望通过本教材的学习,能为培养具有供暖系统设计、运行、管理和产品开发的基础知识和技能,能实现供暖系统高效、节能、环保运行的专门人才奠定基础。

第1章 供暖热负荷

热负荷是单位时间内的供热量或耗热量。热负荷大小与许多因素有关，而这些影响因素也可能是变化的。设计供暖系统所采用的热负荷称为设计热负荷。如设计热负荷取值偏大，则将增大管道系统的管径和设备容量，增大投资；设计热负荷取值偏小，可减小管道系统管径和设备容量、降低投资，但可能不满足供热要求，应正确、合理地确定设计热负荷。

1.1 供暖室内、外计算温度

1.1.1 供暖室外计算温度

供暖室外计算温度 t'_w 是热负荷计算的重要基础数据。如采用过低的 t'_w 值，会使供热系统的造价增加；如采用值过高，则不能保证供暖效果。

目前国内外选定供暖室外计算温度的方法，可以归纳为三种：一种是根据围护结构的热惰性原理来确定，另一种是采用不保证率的方法来确定，第三种是根据不保证天数的原则来确定。

围护结构的热惰性原理是苏联建筑法规规定供暖室外计算温度采用的方法。它规定的供暖室外计算温度要按 50 年中最冷的八个冬季里最冷的连续 5 天的日平均温度的平均值确定。通过围护结构热惰性原理分析得出：在采用 2½ 砖实心墙情况下，即使昼夜间室外温度波幅为 ±18℃，外墙内表面的温度波幅也不会超过 ±1℃，对人的舒适感没有影响。根据热惰性原理确定的供暖室外计算温度偏低。

美国、加拿大、日本等国家一般采用不保证率的方法，计算参数并不唯一，选择空间较大。美国、加拿大以全年 8760 小时为基础（日本以 11~2 月为基础），按 99.6% 和 99% 的两种累积保证率计算，得出 2 个设计干球温度，让设计者选择。一般根据所选的级别不同，每年冬天最多允许有 35 个小时或 88 个小时不满足供暖要求。

不保证天数方法的原则是：允许有几天时间可以低于规定的供暖室外计算温度值，亦即允许这几天室内温度可低于室内计算温度 t_n 值。不保证天数根据各国规定而有所不同，有规定 1 天、3 天、5 天等。

目前我国现行《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》规定：“供暖室外计算温度应采用历年平均不保证 5 天的日平均温度。”对大多数城市来说，是指将 1971 年 1 月 1 日至 2000 年 12 月 31 日共 30 年的历年日平均温度进行升序排列，通过按历年平均不保证 5 天时间的原则对数据进行筛选计算后得到。与采用热惰性原理对比，采用不保证 5 天的方法确定 t'_w 值，使我国大部分城市的 t'_w 值普遍提高了 1~4℃，从而降低了供暖系统的设计热负荷并节约了费用，而对供暖效果无太大影响。由此确定的供暖室外计算温度，大体上与采用 97.5% 保证率的不保证率方法计算的 t'_w 数值相当。

我国幅员辽阔,由于地理纬度、地势等条件的不同,各地气候差异较大,气象基本要素直接影响建筑围护结构及建筑能耗。我国《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》中根据采暖度日数 $HDD18$ 和空调度日数 $CDD26$ 将严寒和寒冷地区共分为 5 个气候子区,见表 1-1。

建筑热工设计严寒与寒冷地区区划指标

表 1-1

二级区划名称	区划指标	
严寒 A 区 (1A)	$6000 \leq HDD18$	
严寒 B 区 (1B)	$5000 \leq HDD18 < 6000$	
严寒 C 区 (1C)	$3800 \leq HDD18 < 5000$	
寒冷 A 区 (2A)	$2000 \leq HDD18 < 3800$	$CDD26 \leq 90$
寒冷 B 区 (2B)		$CDD26 > 90$

注: 1. $HDD18$ 是将一年中室外日平均温度低于 18°C 时的温度差值累加;

2. $CDD26$ 是一年中外日平均温度高于 26°C 时的温度差值累加。

1.1.2 室内计算温度

室内计算温度 t_n 是指室内距地面 2m 以内人们活动地区的平均空气温度。室内空气温度的选定应满足人们生活和生产工艺的要求。生产要求的室温,一般由工艺要求确定。生活用房间的温度,主要决定于人体的生理热平衡。它和房间的用途、室内的潮湿状况和散热强度、人的着衣状况、劳动强度以及生活习惯、生活水平等有关。

许多国家所规定的冬季室内温度在 $16 \sim 22^{\circ}\text{C}$ 范围内。根据国内有关卫生部门的研究结果:当人体衣着适宜,保暖量充分且处于安静状况时,室内温度 20°C 比较舒适, 18°C 无冷感, 15°C 是产生明显冷感的温度界限。冬季的热舒适 ($-1 \leq PMV$ (预测平均投票数) $\leq +1$) 对应的温度范围为: $18 \sim 28.4^{\circ}\text{C}$ 。本着提高生活质量、满足室温可调要求,在到达舒适的条件下尽量考虑节能的原则,《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》选择偏冷 ($-1 \leq PMV \leq 0$) 的环境,将严寒和寒冷地区主要房间冬季供暖室内计算温度定为 $18 \sim 24^{\circ}\text{C}$,大部分建筑供暖室内计算温度为 $18 \sim 20^{\circ}\text{C}$,辐射供暖室内计算温度宜降低 2°C 。设置值班供暖房间的冬季供暖室内计算温度不低于 5°C 。

工业建筑供暖室内计算温度按下述原则确定:(1)生产厂房、仓库、公用辅助建筑的工作地点按作业人员的能量消耗程度确定供暖室内计算温度(见表 1-2);(2)生活、行政辅助建筑及厂房、公用辅助建筑的辅助用室根据建筑用途确定供暖室内计算温度;(3)生产工艺对厂房有温、湿度要求时,按工艺要求确定。

工业建筑供暖室内计算温度

表 1-2

项目	供暖室内计算温度 ($^{\circ}\text{C}$)			备注
	轻作业 ^①	中作业 ^②	重作业 ^③	
生产厂房、仓库、公用辅助建筑的工作地点	$18 \sim 21$	$16 \sim 18$	$14 \sim 16$	
	10	7	5	每名工人占用面积大于 50m^2
	浴室、更衣室	办公室、休息室、食堂	盥洗室、厕所	
生活、行政辅助建筑及厂房、公用辅助建筑的辅助用室	≥ 25	≥ 18	≥ 14	

注: ①能量消耗在 140W 以下的工种为轻作业工种,如仪表、机械加工、印刷、针织等; ②能量消耗在 $140 \sim 220\text{W}$ 的工种为中作业工种,如木工、钣金、焊接等; ③能量消耗在 $220 \sim 290\text{W}$ 的工种为重作业工种,如人力运输、大型包装等。

1.2 供暖设计热负荷

在某一室外温度 t_w 下, 为了使建筑物达到要求的室内温度 t_n , 由供暖系统在单位时间内供给的热量 Q_n , 称为供暖热负荷。在室外计算温度 t'_w 下的供暖热负荷, 称为供暖设计热负荷。它是设计供暖系统和选择设备的最基本依据。

要使室内空气温度保持不变, 必须使室内的总失热量与总得热量保持相等, 即

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_n + Q_4 \quad (1-1)$$

式中 Q_1 ——围护结构传热耗热量, W;

Q_2 ——加热由门、窗缝隙渗入室内的冷空气的耗热量, 称冷风渗透耗热量, W;

Q_3 ——加热由门、孔洞及相邻房间侵入的冷空气的耗热量, 称冷风侵入耗热量, W;

Q_4 ——太阳辐射进入室内的热量, W;

Q_n ——供暖系统供给室内的热量, W。

民用建筑中的其他得热量, 如人体、炊事、电器设备和照明散热量等(统称为自由热), 由于散热量不稳定, 为了维持室内温度, 一般按最不利条件, 即自由热为零的工况来计算。这样, 供暖设计热负荷 Q'_n 可用下式表示:

$$Q'_n = Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 - Q'_4 \quad (1-2)$$

上式带“'”的上标符号均表示在设计工况下的各项数值。

对于工业建筑, 在计算设计热负荷时还应考虑加热由外部运入的冷物料和运输工具的耗热量、通风耗热量、工艺设备和其他管道等热表面的散热量、热物料的散热量等。

在工程设计中, 计算供暖设计热负荷时, 常把围护结构的传热量 Q'_1 分成基本耗热量 $Q'_{1,j}$ 和附加(修正)耗热量 $Q'_{1,x}$ 两部分进行计算。基本耗热量是指在设计条件下, 通过房间各部分围护结构(门、窗、墙、地面和屋顶等)从室内传到室外的稳定传热量的总和。附加(修正)耗热量是指围护结构的传热状况发生变化而对基本耗热量进行修正的耗热量。当将太阳辐射进入室内的热量纳入修正耗热量时, 供暖设计热负荷可以表示为:

$$Q'_n = Q'_{1,j} + Q'_{1,x} + Q'_2 + Q'_3 \quad (1-3)$$

式中 $Q'_{1,j}$ ——围护结构的基本耗热量, W;

$Q'_{1,x}$ ——围护结构的附加(修正)耗热量, W;

其他符号同式(1-2)。

1.2.1 围护结构的基本耗热量

围护结构是指将室内与室外分隔开的所有建筑结构的总称, 包括墙、门、窗、地面和屋顶等。

在工程设计中, 围护结构的基本耗热量是按一维平壁稳定传热过程进行计算的。围护结构基本耗热量可按下式计算:

$$q' = KF(t_n - t'_w)a \quad (1-4)$$

式中 q' ——围护结构基本耗热量, W;
 K ——围护结构传热系数, W/(m²·°C);
 F ——围护结构面积, m²;
 t_n 、 t'_w ——分别为供暖室内计算温度和供暖室外计算温度, °C;
 a ——围护结构的温差修正系数。

整个建筑物或房间的基本耗热量 $Q'_{1,j}$ 等于各围护结构基本耗热量 q' 的总和。

$$Q'_{1,j} = \sum q' = \sum KF(t_n - t'_w)a \quad (1-5)$$

1.2.1.1 围护结构的传热系数

1. 匀质多层材料组成的围护结构(平壁)的传热系数
 一般建筑物的外墙和屋顶都属于匀质多层材料的平壁结构, 其传热过程如图 1-1 所示。传热系数 K 值可用下式计算:

$$K = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \sum \frac{\delta_i}{\alpha_\lambda \lambda_i} + R_k + \frac{1}{\alpha_w}} = \frac{1}{R_n + \sum R_i + R_k + R_w} \quad (1-6)$$

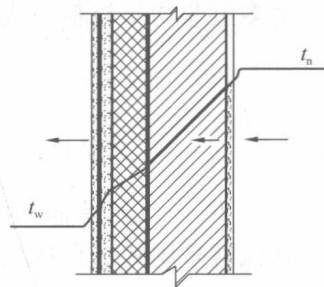


图 1-1 通过围护结构的传热过程

式中 K ——由匀质多种材料(平壁)组成的围护结构的传热系数, W/(m²·°C);

R_0 ——由匀质多种材料(平壁)组成的围护结构的传热阻, m²·°C/W;

α_n 、 α_w ——分别为围护结构内表面、外表面的换热系数, W/(m²·°C);

R_n 、 R_w ——分别为围护结构内表面、外表面的换热阻, m²·°C/W;

λ_i ——围护结构各层导热系数, W/(m·°C);

α_λ ——材料导热系数修正系数;

δ_i ——围护结构各层厚度, m;

R_i ——由单层或多层材料组成的围护结构各材料层热阻, m²·°C/W;

R_k ——封闭空气间层的热阻, m²·°C/W。

围护结构表面换热过程是对流和辐射的综合过程。围护结构内表面的换热是壁面与邻近空气的自然对流换热和与其他壁面的辐射换热; 围护结构外表面的换热是由于风力作用产生的强迫对流换热和向天空及周围环境的辐射换热。工程计算中采用的换热系数分别列于表 1-3 和表 1-4。

内表面传热系数 α_n

表 1-3

围护结构内表面特征	α_n [W/(m ² ·K)]
墙、地面、表面平整或有肋状突出物的顶棚, 当 $h/s \leq 0.3$ 时	8.7
有肋、井状突出物的顶棚, 当 $0.2 < h/s \leq 0.3$ 时	8.1
有肋状突出物的顶棚, 当 $h/s > 0.3$ 时	7.6
有井状突出物的顶棚, 当 $h/s > 0.3$ 时	7.0

注: h 为肋高 (m); s 为肋间净距 (m)。

外表面换热阻 α_w

表 1-4

围护结构外表面特征	α_w [W/(m ² · K)]
外墙和屋顶	23
与室外空气相通的非供暖地下室上面的楼板	17
闷顶和外墙上有窗的非供暖地下室上面的楼板	12
外墙上无窗的非供暖地下室上面的楼板	6

2. 由两种以上二向（或三向）非均质材料组成的围护结构（平壁）的传热系数由多层非均质材料组成的围护结构的传热系数 K 按下式计算：

$$K = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_n + \bar{R} + R_k + R_w} \quad (1-7)$$

式中 K ——多层非均质材料组成的围护结构的传热系数，W/(m² · °C)；

\bar{R} ——多层非均质材料组成的材料层的平均热阻，m² · °C/W；

其他符号同式 (1-6)。

R 按照《民用建筑热工设计规范》GB 50176—2016 中附录 C 的规定计算。

在严寒地区和一些高级民用建筑中，围护结构内常增加空气间层以减少传热量，如双层玻璃、空气屋面板、复合墙体的空气间层等。间层中的空气导热系数比组成围护结构的其他材料的导热系数小，增加了围护结构传热阻。空气间层传热同样是辐射与对流换热的综合过程。在间层壁面涂覆辐射系数小的反射材料，如铝箔等，可以有效地增大空气间层的换热热阻。对流换热强度，与间层的厚度、间层设置的方向和形状以及密封性等因素有关。当厚度相同时，热流朝下的空气间层热阻最大，竖壁次之，而热流朝上的空气间层热阻最小。同时，在达到一定厚度后，反而易于对流换热，热阻的大小几乎不随厚度增加而变化了。在工程设计中，封闭空气间层热阻 R_k 可查《民用建筑热工设计规范》GB 50176—2016。

3. 考虑结构性热桥的围护结构平均传热系数

我国的墙体以前以红砖为主，此时在建筑外围护结构中，墙角、窗间墙、凸窗、阳台、屋面、楼板、地板等处形成的结构性热桥对墙体传热系数的影响不大。因此在以前进行围护结构基本耗热量计算时，非透明类围护结构传热系数计算中忽略了结构性热桥的影响。门窗类的透明围护结构，将结构性热桥影响直接加在了门窗本体传热系数中（如双层木窗 $K=2.68$ W/(m² · °C)，即包含了窗周边热桥的影响）。近些年我国围护结构变化较大，结构性热桥影响已经不能忽略。

围护结构传热系数应由围护结构平壁的传热系数 K 与结构性热桥产生的附加传热系数 ΔK 组成。为方便工程上应用，将附加传热系数折算到平壁传热系数上，则平均传热系数可以表示为：

$$K_p = K + \Delta K = K + \frac{\sum \psi_i l_i}{F} = \varphi K \quad (1-8)$$

式中 K_p 、 K ——分别为围护结构平均传热系数和围护结构平壁的传热系数，W/(m² · °C)；

ΔK ——结构性热桥产生的附加传热系数，W/(m² · °C)；