

第一章 暖通空调的发展与原理	1
第一节 暖通空调的发展.....	1
第二节 热工学基础与湿空气的物理性质.....	8
第三节 传热基本原理.....	13
第二章 供暖系统节能技术与应用	18
第一节 供暖计量与节能.....	18
第二节 气候补偿与节能.....	28
第三节 供暖系统节能改造与凝结水回收利用.....	31
第四节 锅炉排污及烟气的回收利用与节能.....	33
第五节 蓄热技术及其应用.....	39
第三章 热源节能技术与应用	48
第一节 锅炉节能技术.....	48
第二节 余热锅炉.....	59
第三节 地热技术.....	63
第四节 热泵技术.....	70
第五节 太阳能供暖设备.....	80
第四章 通风节能技术与应用	92
第一节 被动式自然通风.....	92
第二节 多元通风.....	99
第三节 置换通风.....	107
第四节 通风空调系统的节能.....	115

第五章 可再生能源技术与应用.....	127
第一节 太阳能工位送风空调系统.....	127
第二节 太阳能半导体制冷 / 制热系统的试验	132
第三节 空气源热泵冷、热、热水三联供系统.....	135
第六章 暖通空调系统与设备控制节能技术.....	144
第一节 供暖系统与热源设备的控制节能.....	144
第二节 空调系统与设备的控制节能.....	152
第三节 暖通空调节能控制的优化技术.....	164
第四节 公共建筑计算机网络能耗统计与管理技术.....	171
第七章 负荷匹配与控制技术.....	180
第一节 液体除湿空调性能.....	180
第二节 负荷独立控制空调系统.....	184
第三节 用低温送风技术解决辐射供冷结露问题.....	191
第五节 地板辐射供暖的系统形式及相变蓄热材料.....	195
第五节 地板辐射供暖的热舒适性试验.....	198
第八章 绿色建筑暖通空调应用.....	202
第一节 绿色建筑的概念.....	202
第二节 绿色建筑设计要素.....	208
第三节 绿色建筑暖通空调相关技术的具体应用.....	222
参考文献.....	226

第一章

暖通空调的发展与原理

第一节 暖通空调的发展

一、暖通空调的发展历史

（一）暖通空调的发展

人类为了抵御严寒和酷暑，很早以前就采取了各种各样的办法，如生火取暖、凿窖储冰降温。随着工业发展和科学技术进步，逐渐形成了一门重要的环境调控与保障技术——暖通空调技术，这项技术使人类能够改变自己居住场所的热湿环境。

在改善建筑环境条件方面，人类经历了一个漫长的探索、实践与经验积累过程。人们在西安半坡遗址发现了长方形灶炕，屋顶有小孔用以排烟，还有双连灶形的火炕，这就是说，在新石器时代仰韶时期就有了火炕。北京故宫中还完整地保留着火地供暖系统，即以烟气为介质的辐射供暖。除此之外，自然通风在古代已经被用来降温，如在建筑的布局上利用穿堂风等。

目前北方农村中还普遍应用着古老的供暖设备与系统火炕、火炉、火墙。我国早在明朝时就已在皇宫中开创了应用火地形式的烟气供暖系统及手拉风扇装置等，如今在北京故宫、颐和园中尚可觅其踪影。这意味着一种初级的建筑环境控制技术正在逐步形成，暖通空调技术势必会发展起来。

新中国成立后，我国供暖通风与空调技术才得到迅速发展。在 20 世纪 50 年代，我国迎来了工业建设的第一次高潮，但是由于经济的原因，当时新建的住宅中还大量采用了经改进的火炉、火墙、火炕等烟气供暖系统。在这段时期国家建立了供暖、通风和制冷设备

的制造厂，主要是仿制苏联产品，生产供暖、通风和制冷产品，如暖风机、空气加热器、除尘器、过滤器、通风机、散热器、锅炉、制冷压缩机及辅助设备等。但是，当时基本上没有空调产品和专门供空调用制冷设备。为了培养供暖、通风、空调技术方面的人才，教育部门相继在哈尔滨工业大学、清华大学、同济大学、东北大学、天津大学、太原工学院、重庆建筑工程学院和湖南大学八所院校设置了“供热、供燃气与通风”专业，完全按苏联的模式进行暖通空调人才培养。

20 世纪六七十年代，我国从仿制苏联产品转向自主研发。这段时期热水供暖、集中供暖技术得到快速的发展。20 世纪 70 年代末，我国东北、西北、华北地区集中供暖面积已达 1248 万平方米。该时期电子工业发展迅速，从而促进了洁净空调系统的发展，其主要应用在高级宾馆、会堂、体育馆、剧场等公共建筑中。

20 世纪八九十年代是我国供暖通风与空调技术发展最快的时期。这个时期也是我国经济转轨时期，为供暖通风与空调技术提供了广阔的市场，空调器也陆续进入家庭。

（二）暖通空调的技术领域

暖通空调是指建筑内部环境在“热”“湿”及“污染物”干扰条件下的调控技术，这里的建筑内部环境一词限指特定建筑空间内部围绕人的生存与发展所必需的全部物质世界。暖通空调技术领域侧重研究室内热（湿）环境与空气品质等物理环境，并未涵盖建筑环境质量的全面控制问题。

随着科学技术的发展和人们生活水平的提高，暖通空调工程在日常生活和社会生产中发挥着越来越重要的作用。先进的暖通空调技术可以给人们的生活提供便利，有助于提高人们的生活水平。同时，任何科学技术的发展都有暖通空调技术的贡献，特别是对环境有严苛要求的科学实验、电子产品生产、抗生素生产、手术室、高精密的仪器生产车间等，都需要可靠的暖通空调系统做保障。

建筑物内部环境质量的好坏及污染物量的相对平衡总是受到室内与室外两种干扰因素的影响。建筑环境控制要依据污染物类别、数量的不同，采用不同的暖通技术从而实现建筑物内部的人工调控。这里所说的污染物类别，可以是“热”“湿”及“其他有害物，如粉尘、有害气体等”。

在暖通空调技术的应用中，人们通常需要借助相应的暖通空调系统来实现对建筑环境的控制。暖通空调系统通常由供暖、通风、空气调节三个基本部分组成，缩写为 HVAC。

1. 供暖

供暖，又叫作采暖，是用人工方法向室内供给热量，保持一定的室内温度，以创造适宜的生活或工作环境的技术。当建筑物室外温度低于室内温度时，房间通过围护结构及通风通道会造成热量损失，供暖系统的功能则是将热源产生的热媒经输热管道送至用户，通过补偿这些热损失以维持室内温度在要求的范围内。供暖是人类最早发展起来的建筑环境控制技术，如火炕、火炉、火墙、火地等供暖方式及今天的供暖设备与系统。一个供暖系统由热源、管网系统、散热末端及附属设备组成，能在寒冷季节保证室内温度。

供暖主要采用辐射或对流等形式使空间内的温度达到设计要求。供暖系统有多种分类方法，人们常用按热媒种类划分，其分为热水采暖、蒸汽采暖和热风采暖三种。供暖热源可以选用各种锅炉、热泵、热交换器或各种取暖器具。散热设备包括各种结构、材质的散热器（暖气片），空调末端装置及各种取暖器具。其用能形式则包括耗电、燃煤、燃油、燃气或建筑废热与太阳能和地热能等自然能利用。

2. 通风

通风的实质就是给室内送入新鲜空气，排出污浊空气，保持室内有害物浓度在一定的卫生要求范围内的技术手段。通风的主要任务是控制室内空气污染物，保证其良好的空气品质。通风的基本功能是稀释室内污染物和气味、排除室内的余热和余湿、提供人们所需的新鲜空气、排除室内污染物及补充燃烧所消耗的空气。

通风系统同样可分为多种类型。某些严重污染的工业厂房和特种工程（如人防）的通风系统可能需要配备一些专用设备与构件，对空气的处理也有比较严格或特殊的要求。

3. 空气调节

空气调节简称空调，其用来对某一房间或空间内的温度、湿度、洁净度和空气流动速度等进行调节与控制，并提供足够量的新鲜空气。空调系统由冷源、热源、管道系统、动力设备、空气处理设备和风口等组成。

空调系统一般由被调对象、空气处理设备、输配管网、冷热源和自动控制系统组成。空调设备种类繁多，按照结构形式可分为组合式、整体式及其他小暖通空调设计与技术应用研究型末端空调器等。冷源又分为天然冷源和人工冷源。

空气调节按照服务对象不同可分为两大类：①舒适性空调，即主要为满足人体舒适性要求的空气调节技术；②工艺性空调，即主要为满足生产或其他工艺过程要求而进行的空气调节技术，根据工艺不同，有的侧重于温度，有的侧重于湿度，有的侧重于空气洁净度，并且其提出了一定的调节精度要求，如精密仪器生产车间、纺织厂、净化厂房、电子器件生产车间、计算机房、生物实验室等。

暖通空调的任务就是要向室内提供冷量或热量，并稀释室内的污染物，以保证室内具有舒适的气温环境和良好的空气品质，满足人们的生活、工作、生产与科学实验等活动对环境品质的特定要求。

在工程上，人们将只实现空气温度调节和控制的技术手段称为供暖或供冷，将只实现空气的清洁度处理和控制并保持有害物浓度在一定的卫生要求范围内的技术手段称为通风。就其实质而言，供暖、供冷及通风都是对内部空间环境进行调节和控制，只是在调节和控制的要求及在空气环境参数调节的全面性方面有别而已。此外，用来控制和调节空气温度、湿度的冷（热）源可能是人工的，也可能是天然的。

（三）暖通空调的地位与作用

暖通空调对国民经济各部门的发展和人民物质文化生活水平的提高具有重要作用。在工艺性空调中，为了保证产品的质量和必要的工作条件，其形成了各具特点的部门。有以高精度、恒温、恒湿为特征的精密机械及仪器制造业，在这些行业的生产过程中，为避免元器件由于温度变化产生胀缩及湿度过大引起表面锈蚀，因此它们对空气的温度和相对湿度有严格规定，如 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，50% ~ 5%；有对空气的洁净度有高度要求的电子工业，它除了对空气的温度、湿度有一定要求外，还对室内空气的洁净度有严格要求，如在超大规模集成电路的某些工艺过程中空气中悬浮粒子的控制粒径已降低到 $0.1\mu\text{m}$ ，并规定每升空气中等于和大于 $0.1\mu\text{m}$ 的粒子总数不得超过一定的数量；在纺织工业中，如在合成纤维工业、锦纶生产厂的多数工艺过程中就要求相对湿度的控制精度在 $\pm 2\%$ 。此外，如胶片、光学仪器、造纸、橡胶、烟草等工业也都有一定的温湿度控制要求；作为工业中常用的计量室、控制室及计算机房等，均要求有空气调节设备；在通信、航天飞行中的座舱、飞机、轮船等地点均需采用空气调节技术。同时，在公共及民用建筑中，装有空调的音乐厅、影剧院、办公楼、民用住宅更是随处可见。随着经济的发展和人民生活水平的不断提高，暖通空调的发展前景更是广阔，一些新的领域还有待人们去开拓。

暖通空调课程以流体力学、工程热力学、传热学、建筑环境学、流体输配管网、传热传质原理与设备等主要专业技术基础课为先修课程，所以有关湿空气物理性质、室内热湿环境、空气环境与声、光环境控制、热湿交换设备及其传热传质计算、流体输配管网的设计分析、暖通空调系统的自动控制等内容，主要放到这些相应专业技术基础课中讲授。

暖通空调课程则侧重于学生工程应用知识与能力的培养，使其掌握各种具体的建筑室内环境调节与控制技术、工程实用设计计算方法、相关设备的选择计算及相关系统的设计与运行调节等知识和技能。

二、暖通空调技术的发展趋势

（一）暖通空调技术发展概述

从某种意义上来说，现代暖通空调技术的发展，既是节能技术、空调技术的发展过程，又是一个人们对环境控制不断加强、深入、深化的过程。现代暖通空调有两个发展方向：走可持续发展之路及充分利用信息技术和自动控制技术。

新材料、新设备的快速发展，促进暖通空调系统及设备能效水平进一步提高。各种聚合材料由于重量轻、耐腐蚀及良好的热性能和经济性等特点，在暖通空调工程中得到了广泛应用，收到了良好的效果。除此之外，新型设备不断出现，使暖通空调工程向着更加节约和高效的方向发展。

（二）发展趋势

1. 节能与能源的合理利用

建筑环境质量的保障总是要以资源、能源的巨额消费为代价。在一些发达国家，建筑能耗已占到全国总能耗的 30% ~ 40%。能源是社会发展的物质基础，节能早已成为全世界共同关注的带有战略性的根本问题。人们要不断提高空调产品的性能，降低能源消耗，更重要的是要促进利用余热、自然能源和可再生能源的产品开发与应用。人们在实际设计过程中应优先采用蒸发冷却和溶液除湿空调等自然冷却方式。

2. 关注室内空气品质

由于西方国家曾经采取的抑制暖通空调能耗增长的措施，如增强建筑密封性、降低空调设计标准等，导致了室内环境污染严重，甚至对人们的身体健康造成危害，因此建筑环境的舒适性与室内空气品质引发了暖通空调行业学者们的热议和研究。人们要关注现代建筑中室内装修的材料应用，有效治理挥发性有机化合物（VOC）污染和苯乙烯（SBS）等环境问题，创造健康、环保、绿色的室内环境。

3. 加强自动控制技术

要加强能源管理自动化技术，在暖通空调工程建设中解放工程技术人员的双手，利用微型计算机强大的功能，对大数据信息进行采集和处理，采用数字化的控制和监督系统，分级分步骤地控制集散系统，使用动态特性模拟调节器，提高建筑能源的自动化管理。

4. 加强标准化建设

暖通空调制冷行业的技术法规和标准是提高生产效率、保证产品质量和推进国际贸易必不可少的手段和依据。有关部门要加强空调行业的标准化建设，积极采用国际标准和国外先进标准。

三、暖通空调节能技术的应用

（一）热泵技术

其是一种热能回收技术，利用空气、水或土壤中所蕴藏的、趋于无限的能量，一年四季都可以取出其中的热量来制造热水，或者将热量排放到空气、水、土壤中。热泵机组（水源或空气源）是当前最为节能、最为环保的空调采暖设备，也是最为安全、最为可靠、最为简便的热水设备。

（二）冷热电三联供技术

冷热电联产是热电联产的进一步发展。对一些以冬季采暖为主要目的热电联产系统，在非采暖季节很难实现高效运行，特别是在以热定电的运行模式（以热为主，按照一定的热电比，以供热量的多少来确定发电量）下，热电联产的发电功率受到极大限制，夏季运行工况的经济性和能源利用效率难以保障。吸收式制冷技术利用余热制冷，可以将用户夏季对冷负荷的需求转化为对热负荷的要求，使得热电联产进一步发展为冷热电联产。典型的冷热电联产系统是由一个联合循环的热电联产电厂和一个吸收式制冷装置组成，其在夏季可以实现冷电联合生产和供应，从而大幅度提高系统全年有效运行时间，使其经济性进一步提高。

近年来，分布式冷热电联产系统日益受到人们重视。分布式冷热电联产系统主要以小型燃气轮机、内燃机、燃料电池和微型燃气轮机为动力，配以余热利用锅炉、吸收式制冷实现冷热电联供。该系统将燃气轮机的排气送入余热锅炉产生水蒸气，再将蒸汽引入汽轮机做功，汽轮机排除的蒸汽直接用于采暖用蒸汽或送入换热器制取采暖用热水，而在夏季工况蒸汽则作为吸收式制冷机的驱动热源，制取空调用冷水。

（三）气候补偿器技术

过量供热是目前我国集中采暖系统普遍存在的问题。导致过量供热的主要原因是集中

供热系统热源未能随着天气变化及时有效调整供热量，使得整个供热系统部分时间整体过热，这种现象在采暖初期和末期尤为明显。过量供热使得建筑实际耗能量高于需热量，造成了能源浪费。据统计，在集中供热系统各环节损失的能耗中，小规模集中供热的过量供热量约占 10%，大型城市集中供热的过量供热量约占 20%。

要减少过量供热，采用气候补偿器就可以有效解决这一问题。气候补偿器的工作原理是当室外温度改变时，其首先根据室外温度计算出一个合理的用户需求供水温度，再通过可自动调节的阀门调节热源或热网的供水温度至该需求温度，从而使供水温度随天气变化及时调节，在时间轴上实现热量的供需平衡。由于采暖热负荷并不是一个可直接测量的物理量，从而无法通过热负荷直接反馈的方式控制热源出力，人们只能通过检测室外温度间接预测热负荷后，再控制热源与之匹配，以达到适量供热。为了弥补这种不足，在完善的气候补偿器系统中，其还要监测用户室内温度，依据反馈回来的房间温度对供水温度进行适当修正。这样气候补偿器在实际运行时就利用监测到的室外温度 and 用户室内温度计算出需要的供水温度（计算供水温度），然后通过某种控制手段将系统的实际供水温度控制在计算供水温度允许的波动范围之内。

（四）蓄能空调技术

蓄能空调技术是在蓄冷、蓄热技术的基础上发展起来的新技术，它利用蓄能设备在空调系统不需要能量的时间内将能量储存起来，在空调系统需要的时间将这部分能量释放出来，主要包括潜热蓄能、冰蓄冷、显热蓄能、水蓄冷、蓄热等相关技术。将冷量以显热或潜热形式储存在某种介质中，并能够在需要时释放出冷量的空调系统称为蓄冷空调系统。蓄冷系统，也称热能贮存系统，即在夜间空调负荷很低的时候，制冷系统开机制冷，将冷量以冰、冷水或凝固状相变材料的形式储存起来，待白天空调负荷高峰时将冷释放出来以满足空调负荷的需要。

（五）太阳能利用技术

太阳能利用技术主要包括太阳能光电技术和太阳能光热技术，太阳能光电技术主要是将太阳能的辐射能直接转化为电能；太阳能光热技术是指在不采用特殊机械设备的情况下，利用辐射、对流和导热使热能自然流经建筑物，并经过建筑物本身的性能控制热能流向，从而得到采暖和制冷的效果。目前，太阳能光热技术的主要应用包括太阳能生活热水、太阳能采暖、太阳能制冷、太阳能幕墙等。

（六）通风系统节能技术

自然通风是一种利用自然能量而不依靠空调设备来维持适宜的室内热环境的简单通风方式。自然通风方式适合于全国大部分地区的气候条件，常用于夏季和过渡（春、秋）季建筑物室内通风、换气及降温，通常也作为机械通风的季节性、时段性的补充通风方式。

置换通风方式比混合通风方式节能，根据有关资料统计，置换通风方式在高大空间可节约制冷能耗 20% ~ 50%。置换通风具有较高的室内空气品质、热舒适性和通风效率，同时可以节约建筑能耗。

排风热回收节能技术。空调系统的新风负荷在空调系统负荷中占有较大的比例，为 30% ~ 50%，在人员密集的公共建筑内区甚至占到 70% 以上，因此降低新风处理系统的能耗成为空调节能中的重要环节。

上述通风系统节能技术，没有地域限制。对公共建筑来说，均可以根据实际需要采用一种或多种节能技术。

第二节 热工学基础与湿空气的物理性质

一、热工学概述

在暖通空调工程中经常会遇到计算供暖、空调房间负荷，确定换热设备规格，处理送入房间的空气等问题。要解决这类问题就需要具备热工学方面的知识。本节简要介绍有关水蒸气的性质、湿空气的性质以及传热学等的基本知识。

（一）基本概念

1. 工质

在暖通空调系统中，经常会需要实现热能与机械能的转换、或热能的转移等热力过程，通常都需要借助于一种能携带热能的工作物质来实现这些热力过程，这种工作物质简称工质，工程中常用的工质有气体、液体和蒸汽等。

2. 热力系统

热力学的重要研究方法之一就是选取及建立热力系统，本节研究的物质的热力状况，可以将这种物质利用一个闭合的边界（设备界面、与外界的接触面等真实或假想的边界），将其从周围的环境划分出来，边界内部所包围的空间物体就称为热力系统，边界外部物体称为边界或环境。

热力系统与外界之间没有热的相互作用，这种系统称为绝热系统。系统既不与外界发生质量交换，又不发生能量交换，则称为孤立系统。但，孤立系统也可能是由几个物质和能量交换的分系统组成。这两个系统的概念是抽象的概念，虽然自然界不存在绝对的绝热和孤立系统，但对热力系统的研究有帮助。

3. 温度

温度是表征物体冷热程度的参数，是物质分子平移运动的平均动能的量度；在一个系统中大量分子的热运动，可以用一个平均速度表示其热运动的情况，分子热运动越强烈，分子热运动平均速度越大，表现为系统的温度越高。因此，气体的平均动能仅与温度有关，并与热力学温度成正比。可见，温度的高低标志着物质内部大量分子热运动的强烈程度。

物体温度用温度计测量。测量的依据是：处于热平衡中的各个物体间具有相同的温度。所以当温度计与被测物体达到热平衡时，温度计指示的数值即为被测物体的温度。为保证各种温度计测出的温度值具有一致性，必须有统一的温度标尺，即温标。热力学温标为基本温标，其基本温度为热力学温度，也叫绝对温度，用 T 表示，单位为开尔文（Kelvin），符号为 K 。热力学温度也可采用摄氏温度，用 t 表示，单位为摄氏度，符号为 $^{\circ}C$ 。两种温标的关系为：

$$t = T - 273.15 \approx T - 273, ^{\circ}C \quad (1-1)$$

4. 比热容

为了计算热力过程所交换的热量，必须知道单位数量物质的热容量。单位数量物质的热容量称为比热容。比热容的定义是：在加热（或冷却）过程中，使单位质量（ kg ）的物质温度升高（或降低） $1K$ （或 $1^{\circ}C$ ）所吸收（或放出）的热量。表示物量的单位不同，比热容的单位也不同。对固体、液体常用质量（屈）表示，相应的是质量热容，用符号 c 表示，单位是 $kJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 。对气体除用质量外，还常用标准容积（ m^3 ，标态）和千摩尔（ $kmol$ ）作单位，对应的是容积热容和摩尔热容。单位分别为 $kJ/(m^3 \cdot ^{\circ}C)$ 和 $kJ/(kmol \cdot ^{\circ}C)$ 。比热容除与物质性质有关外，还与其温度有关。在温度变化不很大的场合，一般可把比热容看作定值。

质量为 m 、比热容为 c 的物质，从温度 t_1 升高到 t_2 今所需吸收的热量 Q ，可用式 (1-2) 计算：

$$Q=mc(t_1-t_2) \quad (1-2)$$

气体比热容的大小与热力过程的特性有关。定压加热过程中气体的比热容称为质量定压热容，用符号 c_p 表示；定容加热过程气体的比热容称为质量定容热容，用符号 c_v 表示。定压加热是保持气体压力不变的加热过程。在一个闭口系统中，在气体定压加热过程中，气体可以膨胀，所以加入的热量除了用来增加气体分子的动能外，还应克服外力做功，因此对同样质量的气体升高同样的温度，在定压过程中所需加入的热量比定容过程要吸收更多的热量。因此，同种物质，其质量定压热容 c_p 比质量定容热容 c_v 大。

(二) 水蒸气的物理性质

水蒸气是暖通工程上经常遇到的工质。因此，掌握水蒸气的性质十分重要。

1. 气化

工质由液态转变为气态的过程称为气化，相反的过程称为凝结。气化有蒸发和沸腾两种方式。蒸发是在液体表面上进行的气化过程，它可在任意温度下进行。蒸发是由于液体表面上的一些能量较高的分子，克服其邻近分子的引力而离开液体表面进入周围空间所致。液体温度越高，具有较高能量的分子数目越多，蒸发越剧烈。蒸发除与液体温度有关外，还与蒸发表面积大小及液面上空的压力有关。由于能量较高的分子离开液面，致使液体分子平均动能减小，液体的温度随之降低。蒸发时与之相反的过程也在同时进行，即空间某些蒸汽分子与液面相接触而由气态转变为液态。

在封闭容器内，当蒸发与凝结的分子数目相等时，蒸汽分子浓度保持不变，蒸汽压力达到最大值，此时气液两相处于动态平衡。两相平衡的状态称为饱和状态；所对应的蒸汽、液体、气液两相的温度和压力分别称为饱和蒸汽、饱和液体、饱和温度、饱和压力。在一定温度下的饱和蒸汽，其分子浓度和分子的平均动能是一个定值，因此蒸汽压力也是一个定值。温度升高，蒸汽分子浓度增大，分子平均动能增大，蒸汽压力也升高。所以，对应于一定的温度就有一个确定的饱和压力；反之，对应于一定的压力也有一确定的饱和温度。例如，100℃水的饱和压力为 101.325kPa，20℃时其饱和压力为 2.29kPa。

沸腾是指表面和液体内部同时进行的剧烈气化现象。在一定的外部压力下，当液体温度升至一定值时，液体的内部产生大量气泡，气泡上升至表面破裂而放出大量蒸汽，这就是沸腾，对应的温度称为沸点。沸点随外界压力的增加而升高，二者具有一一对应关系，例如，压力为 100kPa 时，水的沸点为 99.63℃；压力为 500kPa 时，其沸点相应为

151.85℃。不同性质的液体沸点不相同，如在一个物理大气压下酒精沸点为 78℃，氨的沸点为 -33℃。

2. 湿饱和蒸汽、干饱和蒸汽和过热蒸汽

若在定压下对液体进行加热，当达到饱和温度时，液体沸腾变成蒸汽；继续加热，则比容增加，温度不变，称为饱和温度。这时容器内存在饱和液体与饱和蒸汽的混合物，称为湿饱和蒸汽状态。再继续加热，液体全部变成为饱和蒸汽，此时称为干饱和蒸汽状态。如进一步加热，则蒸汽的温度升高而超过该饱和压力下对应的饱和温度，比容也将增加，这种状态称为过热蒸汽。过热蒸汽温度与饱和温度之差称为过热度。

水蒸气是由液态水气化而来的一种气体，它离液态较近，不能将其作为理想气体。对水蒸气热力性质的研究，通常按各区分别通过实验测定并结合热力学微分方程，推算出水蒸气不可测的参数值，将数据列表或绘图供工程计算用。

二、湿空气的物理性质与焓湿图

湿空气既是空气环境的主体又是空调工程的处理对象。因此，首先要熟悉湿空气的物理性质及空气的焓湿图。

（一）湿空气的组成

大气由干空气和一定量的水蒸气混合而成的，称为湿空气。干空气的成分主要是氮、氧、氩及其他微量气体，其中多数成分比较稳定，少数随季节和气候条件的变化有所波动。但从总体上仍可将干空气作为一种稳定的混合物来看待。

空气环境内的空气成分和人们平时所说的“空气”实际上是干空气和水蒸气的混合物，即湿空气。湿空气中水蒸气的含量虽少，质量比通常为千分之几至千分之二十几。此外，水蒸气含量常随季节、气候、地理环境等条件的变化而变化。因此，湿空气中水蒸气含量的变化对空气环境的干湿程度产生重要影响，并使湿空气的物理性质随之改变。

（二）湿空气的状态参数

1. 压力

地球表面的空气层在单位面积上所形成的压力称为大气压力。大气压力随着各个地区的海拔高度不同而存在差异，海平面的标准大气压力为 101.325kPa。

湿空气中水蒸气单独占有湿空气容积，并具有与湿空气相同的温度时所产生的压力称

为水蒸气分压力。根据道尔顿定律,湿空气的压力应等于干空气的分压力与水蒸气的分压力之和:

$$B=P_g+P_q \quad (1-3)$$

式中: B ——湿空气压力,即大气压力,Pa;

P_g 、 P_q ——干空气及水蒸气分压力,Pa。

在常温常压下干空气可视为理想气体,而湿空气中的水蒸气一般处于过热状态且含量很少,可近似地视作理想气体。所以,湿空气也应遵循理想气体的状态方程。

2. 含湿量

在空调工程中经常涉及湿空气的温度变化,湿空气的体积也会随之而变。用水蒸汽密度作为衡量湿空气含有水蒸气量多少的参数会给实际计算带来诸多不便。为此,定义含湿量为:相应于1kg干空气的湿空气中所含有的水蒸气量,即:

$$d = \frac{m_q}{m_g}, \text{kg} / \text{kg}_{\text{干}} \quad (1-4a)$$

因为 $m_g=V\rho_g$, $m_q=V\rho_q$, 所以,式(1-4a)还可写为:

$$d = \frac{\rho_q}{\rho_g}, \text{kg} / \text{kg}_{\text{干}} \quad (1-4b)$$

3. 相对湿度

在一定温度下,湿空气所含的水蒸气量有一个最大限度,超过这一限度多余的水蒸气会从湿空气中凝结出来。这种含有最大限度水蒸气量的湿空气称为饱和空气。饱和空气所具有的水蒸气分压力和含湿量称为该温度下湿空气的饱和水蒸气分压力和饱和含湿量。若温度发生变化,它们也将相应地变化,见表1-1。

表 1-1 空气温度与饱和水蒸气压力及饱和含湿量的关系

空气温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气压力 $P_{q,b}/\text{Pa}$	饱和含湿量 $d_b/\text{g} \cdot \text{kg}_{\text{干}}^{-1}$ ($B=101325\text{Pa}$)
10	1225	7.63
20	2331	14.70
30	4232	27.20

湿空气中水蒸气分压力与同温度下饱和水蒸气分压力之比称为相对湿度它是另一种度量水蒸气含量的间接指标,可表示为:

$$\varphi = \frac{P_q}{P_{q,b}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中: $P_{q,b}$ ——饱和水蒸气分压力, Pa。

4. 湿空气的焓

在暖通工程中, 空气的压力变化一般很小, 可近似于定压加热或冷却过程。因此, 可直接用空气焓的变化来度量空气的热量变化。湿空气的焓应等于 1kg 干空气的焓 i 加上与其同时存在的 d kg (或 g) 水蒸气的焓。已知干空气的质量定压热容 $C_{p,g}=1.01\text{KJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 水蒸气的质量定压热容 $C_{p,q}=1.84\text{KJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 则湿空气的焓为:

$$i=1.01t+(2500+1.84d)t,\text{KJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-6a)$$

或

$$i=2500d+(1.01+1.84d)t,\text{KJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-6b)$$

由式 (1-6b) 可看出, $[(1.01+1.84d)t]$ 是随温度而变化的热量, 称为显热; 而 $(2500d)$ 仅随含湿量变化而与温度无关, 称为潜热。由此可见, 湿空气的焓将随温度和含湿量的升高而增大, 随其降低而减少。式 (1-6) 中的常数 2500 是水在 0°C 时的气化潜热。

第三节 传热基本原理

一、传热基本方式

凡是存在温度差的地方, 就有热量由高温物体传到低温物体。因此, 传热是自然界和人类活动中非常普遍的现象。以房屋墙壁在冬季的散热为例, 整个过程分为 3 段。首先室内空气以对流换热的形式、墙与物体间的以辐射方式把热量传给墙内表面; 再由墙内表面以固体导热方式传递到墙外表面; 最后由墙外表面以空气对流换热、墙与物体间以辐射方式把热量传给室外环境。从这一过程可以了解到: 传热过程是由导热、热对流、热辐射 3 种基本传热方式组合形成的。不同的传热方式具有不同的传热机理, 要了解传热过程的规律, 首先要分析 3 种基本传热方式。

(一) 导热

导热又称热传导, 是指物体各部分无相对位移或不同物体直接接触时依靠分子、原子

及自由电子等微观粒子的热运动而进行的热量传递现象。导热过程可以在固体、液体及气体中发生。但在引力场下，液体和气体出现热对流，因此单纯的导热一般只发生在密实的固体中。

大平壁导热是导热的典型问题。平壁导热量与平壁两侧表面的温度差成正比，与壁厚成反比，并与材料的导热性能有关。因此，通过平壁的导热量的计算式可表示为：

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \ddot{A} t F \quad (1-7a)$$

或热流通量

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \ddot{A} t \quad (1-7b)$$

式中：\$Q\$——导热量，W；

\$q\$——热流通量，W/m²；

\$F\$——壁面积，m²；

\$\delta\$——壁厚，m；

\$\ddot{A}t\$——壁两侧表面的温差，℃，\$\ddot{A}t=(t_{w2}-t_{w1})\$；

\$\lambda\$——导热系数，指具有单位温度差的单位厚度物体，在它的单位面积上每单位时间的导热量，单位是 W/(m²·℃)。它表示材料导热能力的大小。导热系数一般由实验测定。改写式(1-7b)，得：

$$q = \frac{\ddot{A} t}{\delta / \lambda} = \frac{t}{R_{\lambda}} \quad (1-8)$$

用 \$R_{\lambda}\$ 表示导热热阻，则平壁导热热阻为 \$R_{\lambda}=\delta/\lambda(\text{m}^2 \cdot \text{℃} / \text{W})\$。可见平壁导热热阻与壁厚成正比，而与导热系数成反比。不同情况下的导热过程，导热热阻的表达式各异。

(二) 热对流

依靠流体的运动，把热量由一处传递到另一处的现象，称为热对流，它是传热的另一种基本方式。若热对流过程中，单位时间通过单位面积、质量为 \$m\$ (kg/m²·s) 的流体由温度 \$t_1\$ 的地方流到 \$t_2\$ 处，则此热对流传递的热量为：

$$q = mc_p(t_2 - t_1) \quad (1-9)$$

因为有温度差，热对流又必然同时伴随热传导。而且工程上遇到的实际传热问题，都是流体与固体壁面直接接触时的换热，故传热学把流体与固体壁间的换热称为对流换热(也称放热)。与热对流不同的是，对流换热过程既有热对流作用，也有导热作用，故已不再

是基本传热方式。对流换热的基本计算式是牛顿提出的，即：

$$q = \alpha (t_w - t_f) = \alpha \Delta t \quad (1-10a)$$

式中： t_w ——固体壁表面温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_f ——流体温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

α ——换热系数，其意义指单位面积上，当流体与壁面之间为单位温差，在单位时间内传递的热量。换热系数单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

α 的大小表达了该对流换热过程的强弱。式 (1-10a) 称为牛顿冷却公式。利用热阻概念，改写 (1-10a) 可得：

$$q = \frac{\Delta t}{1/\alpha} = \frac{t}{R_\alpha} \quad (1-10b)$$

式中： R_α 为单位壁表面积上的对流换热热阻， $R_\alpha = 1/\alpha$ ， $(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W})$ 。

(三) 热辐射

导热或对流都是以冷、热物体的直接接触来传递热量，热辐射则不同，它依靠物体表面对外发射可见和不可见的射线（电磁波或者称光子）传递热量。物体表面每单位时间、单位面积对外辐射的热量称为辐射力，用 E 表示，单位是 W/m^2 ，其大小与物体表面性质及温度有关。对于绝对黑体（一种理想的热辐射表面），理论和实验证实，它的辐射力 E_b ，与表面热力学温度的 4 次方成比例，即斯蒂芬——玻尔茨曼定律：

$$E_b = C_b (T/1000)^4 \quad (1-11a)$$

式中： E_b ——绝对黑体辐射力， W/m^2 ；

C_b ——绝对黑体辐射系数， $C_b = 5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；

T ——热力学温度， K 。

一切实际物体的辐射力 E 都低于同温度下绝对黑体的辐射力，有：

$$E_b = \varepsilon_b C_b (T/1000)^4, \text{W}/\text{m}^2 \quad (1-11b)$$

式中： ε 为实际物体表面的发射率，也称黑度，其值处于 $0 \sim 1$ 之间。

物体间依靠热辐射进行的热量传递称为辐射换热，它的特点是：在热辐射过程中伴随着能量形式的转换（物体内能 - 电磁波能 - 物体内能）；不需要冷热物体直接接触；不论温度高低，物体都在不停地相互发射电磁波能，相互辐射能量，高温物体辐射给低温物体的能量大于低温物体向高温物体辐射的能量，总的结果是热量由高温物体传到低温物体。

两个无限大的平行平面间的热辐射是最简单的辐射换热问题，设两表面的热力学温度分别为 T_1 和 T_2 ，且 $T_1 > T_2$ ，则两表面间单位面积、单位时间辐射换热量的计算式是：

$$q=C_{12}[(T_1/100)^4-(T_2/100)^4] \quad (1-11c)$$

式中： C_{12} 称为 1、2 两表面间的相当辐射系数，它取决于辐射表面的材料性质及状态，其值在 0 ~ 5.67 之间。

二、传热过程

在工程中经常遇到两流体间的换热。热量从壁面一侧的流体通过平壁传递给另一侧的流体，称为传热过程。实际平壁的传热过程非常复杂，为研究方便，将这一过程理想化，看作是一维、稳定的传热过程。设有一无限大平壁，面积为 Fm^2 ，两侧分别为温度 t_{f1} 的热流体和 t_{f1} 的冷流体，两侧换热系数分别为 α_1 及 α_2 ，两侧壁面温度分别为 t_{w1} 和 t_{w2} ，壁材料的导热系数为 λ ，厚度为 δ 。

整个传热过程分 3 段，分别用下列 3 式表达：

(1) 热量由热流体以对流换热传给壁左侧，单位时间和单位面积传热量为：

$$q=\alpha_1 (t_{f1}-t_{w1})$$

(2) 热量以导热方式通过壁：

$$q=\frac{\lambda}{\delta}(t_{w1}-t_{w2})$$

(3) 热量由壁右侧以对流换热传给冷流体，即：

$$q=\alpha_2 (t_{w2}-t_{f2})$$

在稳态情况下，以上三式的热流量 q 相等，把它们改写为：

$$t_{f1}-t_{w1}=\frac{q}{\alpha_1}, t_{w1}-t_{w2}=\frac{q}{\lambda/\delta}, t_{w2}-t_{f2}=\frac{q}{\alpha_2}$$

三式相加，消去未知的 t_{w1} 和 t_{w2} ，整理后得：

$$q=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta}{\lambda}+\frac{1}{\alpha_2}}(t_{f1}-t_{f2})=K(t_{f1}-t_{f2}) \quad (1-12a)$$

对 Fm^2 的平壁传热量为：

$$Q=KF(t_{f1}-t_{f2}) \quad (1-12b)$$

其中

$$K=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta}{\lambda}+\frac{1}{\alpha_2}}=\frac{1}{R_K} \quad (1-13)$$

K 称为传热系数。它表明在单位时间、单位壁面积上，冷热流体间每单位温度差可传递的热量， K 的单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，可反映传热过程的强弱。 R_K 表示平壁单位面积的传热热阻。 R_K 可表示为：

$$R_K = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (1-14)$$

由式(1-14)可见传热过程的热阻等于热流体、冷流体的换热热阻及壁的导热热阻之和，类似于电阻的计算方法，掌握这一点对于分析和计算传热过程十分方便。由传热热阻的组成不难看出，传热阻力的大小与流体的性质、流动情况、壁的材料以及厚度等因素有关，所以数值变化范围很大。

第二章

供暖系统节能技术与应用

第一节 供暖计量与节能

一、供暖计量的意义及方法

（一）供暖计量的意义

1. 节能措施

为节约能源进行热计量的收费之后，一般通过四种措施实现节能：

- （1）对用户在使用中的节能意识进行调节，最终达到节能的目的。
- （2）公共和商业建筑闲置时的服务暖气。
- （3）在低负载时，调整质量和数量以减少循环水泵的消耗。
- （4）使用恒温阀充分利用房间的自然热量。

在我国，健康采暖已经实施了很长一段时间，其能耗与用户的利益无关。这是大型盆栽水稻系统的主要缺点，也是加热和节能期间比较大的一种障碍。必须测量家庭能耗并向用户收费。这是适应社会主义市场经济要求的重要改革，是供热企业改变经营机制的重要措施，是促进节能建设的根本措施。

2. 大力促进环境保护

在中国，煤炭是用于取暖和发电的一次能源，所占比例最高，以煤炭为主要能源会造成严重的空气污染。现阶段，二氧化碳的排放量非常大，由其引起的环境问题也日益严重。中国的能源行业在未来 20 年将面临许多挑战。在中国实施计量供暖不仅对中国而且对保护全球环境都具有重要而深远的意义。

3. 促进供热行业总体水平的提高

在市场经济进一步发展，政府和用户以及供热公司原有的关系发生了一系列改变。计划经济时代，政府直接负责供热公司，最终的福利归用户，同时，供热公司有效落实福利。当水温低时，热水热交换器出口处的制冷剂直接从冷凝器的入口到出口，冷凝器被停用，仅热水热交换器用于处理冷凝水。在市场经济中，用户是热消费者，供暖公司是供热商，而政府是监督以及管理的责任人。以往的旧征收制度不利于各方面发展。政府、用户和供热公司之间的关系只有在根据卡路里测量系统对单个供暖系统收费后才能理顺。

（二）供暖计量方法

对于现阶段计量技术的发展来说，能够非常准确地计量热量。然而对于供暖系统的发展来说，需要注重技术以及经济的发展，不需要有比较高的精度，只需要计量系统能够符合精度的过程中提高自身的稳定性，与国家技术的发展相当即可。由于制冷剂在水冷热交换器的后半部分冷凝成过冷液体并形成液体存储现象，因此系统未配备制冷剂平衡装置作为液体接收器，制冷剂的量略有不足，系统的能效水平尚未得到充分利用。

现阶段欧盟国家选择热量计量的策略建设供暖工程，不同的方案特征不同，最终受到的成本效益也是存在差异的，具体策略如下。

策略 1：在楼栋间装置热量表：在热力入口位置安装热量表，对楼栋的热耗进行计量，根据面积进行平均，属于每户最终的热耗量。

策略 2：装置热水以及楼栋两种热量表：在热力入口位置安装热量表，对整栋楼的热耗进行计量，之后，需要在热水表计量的作用下对每户的热量耗损进行再次分配。

策略 3：安装热分配表和楼栋热量表：在热力入口位置安装热量表，用来控制整个楼的总体热耗，同时，在每户中安装散热器散热量，通过蒸发式实现再次的热量分配。

策略 4：安装户用的热量表和楼栋热表：在热力入口位置安装热量表，用来控制整栋楼的总体热耗，之后，在热量表的作用下计量每户的热能

虽然每种方案都能计量用户耗热，但准确性、易用性和经济性却存在差异。计量准确度由高到低排序应是：策略 4、策略 3（电子式）、策略 3（蒸发式）、策略 2、策略 1；而所需费用由高到低排序则恰恰相反。

热计量方法的选择是推广计量供暖技术急需解决的问题。如何根据我国的实际情况，选择技术可靠、经济合理的热计量方法，是关系到计量供暖能否良性发展的主要环节。

当前测量中国用户热量分布的方法是在建筑物（或热交换机房）的热量输入处安装一个热量表，以测量总热量，然后确定使用每个独立的记账用户通过家庭安装的测量和记录

设备的热量与总热量之比,然后计算用户的共享热量以实现家庭热量测量。近几年供暖计量技术发展很快,用户热分摊的方法较多,有的尚在试验当中。

1. 散热器的热分布方法

对于散热器的热分布方法来说,一般是在不同类型以及散热器改造之后的加热系统当中进行应用,尤其是现有加热系统的热测量转换。循环加热系统与循环水泵一起工作,循环水在水冷热交换器和热水储罐之间循环,水不断吸收由水冷却的热交换器释放的热量。制冷剂凝结到热水箱中。出水温度达到设定温度。在按家庭划分的水平系统中。此方法不适用于地板采暖系统。散热器热量分布测量方法仅分配计算热量;调节内部温度需要安装散热器恒温控制阀。

散热器热量表的方法是使用散热器热量表测量的每组散热器的散热量之间的比例,以分配给建筑物的总热量,存在三种类型的热分布表:蒸发型,电子型和电子远程传输型。最后两个是未来的发展趋势。在选择这一方法开展工作的时候,需要预先通过散热器以及热量分布仪热耦对系数进行校正。我国具有非常多的散热器类型,还比较缺乏校正系数检测的经验,需要加强研究力度。

散热器盖在热量分布中产生的影响的问题,其实,不只属于散热器的计量器方法面临的问题,其他热量分配方法,例如该方法为了共享流量温度,共享开关时间区域的方法也面临相同的问题。

2. 流动温度法

流动温度法适用于蛙跳式单管立式加热系统和单立管,立式立管共享的家用循环加热系统。该方法仅分配用于计算的热量,并且需要一个附加的调节装置来调节内部温度。机组系统配置基于以上对各种形式的系统结构,加热方式,热交换器的选择以及热水储罐的选择进行的分析和研究,对系统进行了相应的改进。当前系统。它可以在五种不同的模式下运行,并在一定程度上自动调节所需的制冷剂量,克服了常规系统中存在的各种问题,并使系统以稳定,平衡和高效的方式工作。

就流量温度法来说,这是在流量比固定的基础上应用的,换言之,单管立式跳跃加热系统,每根立管与主立管的流量比基本不变;对于在房屋入口处带有横管的共享垂直管循环加热系统,每个房屋和横管加热系统的流量之和与普通电梯的流量之和实际上是不变的。然后,通过将先前测得的流速系数与每个旁路三通前后的温差相结合,共享建筑物的总热量。由于这一方法的应用是在流量比不发生变化基础上进行的,因此,需要重视提前测量的一些流量系数。不仅需要选择小型的超声波类型的流量计,同时,必须注重正确的安装和使用。