

绪 论

一、城市轨道交通发展概况

交通运输对社会的发展具有深远的影响，改变了人类的生产生活方式，并带动辐射区域的经济。而交通运输的重要组成部分——轨道交通则是不可回避的重要环节。保证高效、畅通的轨道交通是我国交通运输业发展规划的重要内容。谈及轨道交通，不可避免地要涉及城市轨道交通。

城市轨道交通是指具有固定线路，铺设固定轨道，配备运输车辆及服务设施等的城市交通设施。城市轨道交通是一个范围外延很大的概念，在国际上没有统一的定义。一般而言，广义的城市轨道交通包括城市铁路、有轨电车、地下铁道、轻轨交通、磁悬浮轨道交通等，是一个复杂而庞大的交通系统；狭义的城市轨道交通特指地下铁道、轻轨系统，即本教材所指城市轨道交通。

随着社会经济的发展，城市化进程加快，城市的规模不断扩大，城市人口增长迅猛。人口密度的增加和机动车数量猛增导致的交通阻塞、环境污染、能源匮乏，已经严重影响到我国的可持续性发展战略。因此，探索解决城市交通问题的有效途径是国家迫切需要解决的问题。我国城市轨道交通建设经历了早期建设、高速发展、建设调整的长期过程，现已经步入稳定、持续、有序的蓬勃发展阶段。《国家中长期科学和技术发展纲要》明确提出了构建以城市轨道交通

为骨架的城市公共综合交通体系，城市轨道交通具有安全、清洁、高效、便捷、准点、运量大等诸多优点，已被我国越来越多的城市进行规划和实施。我国轨道交通（含港、澳、台地区）建设规模见表 0-1。

表 0-1 中国城市交通建设规模

年 度	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2020
城市数	15	15	17	19	22	38	79
运营里程/km	1 760	1 970	2 064	2 539	3 137	4 190	> 10 000

截至 2016 年底，我国（不含港、澳、台地区）共计 30 座城市开通了地铁，运营里程达 4 153 km；同时，在建线路总里程达 5 636 km。

第三轮建设规划至 2021 年，全国 79 个城市规划轨道交通建设总里程为 13 385 km。未来全国有 86 个城市规划轨道交通，总计里程将达 30 556 km。

二、城市轨道交通车站空调与通风系统概述

现代化城市轨道交通车站大都配备了营造舒适环境的中央空调系统，在车站设计、施工、运营的全过程中，中央空调系统的初投资并不算高，但运行过程中的能耗高，以耗电量计算，几乎占到城市地下铁道系统总耗电量的 40%。因此，进行节能减排和保证安全高效运行几乎是所有地铁车站运维必须考虑的问题。

城市轨道交通车站的空调与通风系统在城市轨道交通系统中又称为环境控制系统（简称环控系统），是指在城市轨道交通系统中的可以调节指定区域空气的温度、湿度、新风量，组织有害气体排出和排出余热量的空气处理系统。根据城市轨道交通车站建筑形式的不同，空调与通

风系统也有不同的形式。车站建筑形式可分为地面高架车站、地面车站和地下车站三种主要形式。城市轨道交通空调与通风系统服务对象分为地面车站（包括地面高架车站）、地下车站、地下区间隧道、主变电所、牵引变电所等。城市轨道交通的空调与通风系统主要包括以下子系统：隧道通风系统（包括区间隧道通风系统、车站隧道通风系统、隧道洞口射流风机系统、地下配线通风系统）、车站通风空调系统、空调制冷供冷系统、多联空调系统、局部通风空调系统等。地下铁道通风系统，按照地铁内部与外界大气的连通方式，分为开式系统和闭式系统（闭式系统通过风阀的开关，可进行开/闭式运行）。在闭式系统的基础上，站台设置一道全封闭的站台门（屏蔽门），将车站内部空气与区间隧道隔离开来，衍生出屏蔽门式系统。我国长江流域及其以南地区的地下铁道通风系统，普遍采用屏蔽门式系统。

三、城市轨道交通车站通风空调技术发展展望

城市轨道交通通风空调系统，除了部分采用常规智能楼宇中央空调系统外，应根据不同地区因地制宜地选择更适合的系统方式。从降低初投资和节省运营成本等方面，众多专业技术人员进行尝试和实践，研发出很多新技术和新设备，并且在一些城市轨道交通车站的运行过程中取得了良好的经济效益和社会效益。主要的创新技术可从以下 6 个方面来展望。

(1) 节能方面，可从系统的合理配置、新型高效制冷主机的应用、冷量的高效输配送等方面考虑。如采用小型磁悬浮离心机达到高效制冷，采用直接蒸发和蒸发冷凝等技术省去冷冻水和冷却水输送能耗等。

(2) 从设计的源头合理简化、优化系统形式和运行模式。包括车站排热系统的优化、简化；车站通风空调大系统运行模式的简化；车站通风空调小系统的精细化设计；二线城市通风空调

系统的简化设计，车站大、小系统空调冷源分开设置；车站通风空调大系统采用单端送风、回风；灵活采用分散式“空气-水”系统等。

(3) 相关产品的工业化、集成化、自动化和智能化。可从多联空调系统、集成式冷站、机电一体化设备、集成式系统等方面考虑。如通风空调多功能集成设备系统、高效一体化集成式冷冻站、一体化变风量变水量空调器、可调通风型站台门通风空调系统、蒸发冷却式通风空调系统等。

(4) 探索轨道交通能耗指标和标准体系。根据不同的气候分区、城市等级、线路功能定位、运能、车站类型等因素，将轨道交通车站分类，研究其合理的能耗指标。

(5) 研究解决建筑内更高的综合空气品质相关技术。包括综合解决室内空气的含尘量、有机污染物、细菌、CO₂浓度、异味、噪声、温度场、风速场等问题。

(6) 运营大数据、既有节能改造、设备物联网等技术。测试运营线路的设计，收集运营数据，建立大数据库，分析出规律和状态，为节能改造做好技术储备；利用互联网、云平台，搭建网络管理平台，集成运营管理、设备维护、能耗管理、节能控制、专家诊断等功能。研究通风空调设备物联网技术的应用，主要用于远程设备（系统）运行状态监控、运营维护、状态分析等方面。

随着科技的进步，还会有大量的技术创新不断涌现。

四、学习制冷与空调知识的必要性

城市轨道交通车站属于大型公共交通建筑，其空气调节系统涉及热工学、制冷原理等基础知识。从事轨道交通车站通风空调系统维护的人员需要有热工学、制冷原理、流体力学、设备

构造等知识储备，能够在解决系统运行出现的专业技术问题时，做到得心应手，触类旁通。

模块 1 制冷原理

制冷就是使自然界的某物体或空间温度达到低于周围环境温度，并在一定时间内维持该温度。实现制冷有两种途径，一是利用天然冷源；二是利用人工冷源。

天然冷源如利用深井水或天然冰冷却物体或空间的空气。天然冷源具有价廉和不需要复杂技术设备等优点，但受时间、地区等条件限制，而且不宜用来大量获取 0 °C 以下温度。

19 世纪中叶，第一台机械制冷装置问世，人们开始采用人工冷源。人工制冷，是利用人工方法，依靠一定的机械装置，通过工质的状态变化，消耗一定的能量（电能、热能、太阳能等）来达到人工制冷的目的。人工制冷的方法及所能达到的温度范围见表 1-1。

表 1-1 人工制冷的方法及温度范围

人工制冷方法	制冷原理	温度范围	制冷工质	制冷范围
蒸汽压缩式制冷	利用液体气化时吸热的原理	环境温度 ~ - 153.15 °C	氟利昂 氨水 溴化锂溶液 碳氢化合物	普通制冷
吸收式制冷	利用液体气化时吸热的原理			
蒸汽喷射式制冷	利用喷射器来引射气体提高蒸汽压力			
气体绝热膨胀制冷	利用高压气体膨胀时吸热使空间温度降低原理制冷	- 153.15 °C ~ - 268.94 °C	空气 甲烷 氮气 氧气	深度制冷
绝热放气制冷	是在刚性容器中高压气体绝热放气时温度要降低的原理制冷			
半导体制冷	也称热电制冷，是利用金属的温差电效应，在两种不同金属组成的热电偶中通电流，在不同结点中产生吸热和放热效应来制冷			

磁制冷	利用顺磁性物质绝热去磁过程中温度会降低的磁热效应来制冷			
		- 268.94 °C 以下	氦气	低温和超低温制冷

空气调节用制冷技术属于普通制冷范畴，主要采用液体气化制冷法，其中包括蒸汽压缩式制冷、蒸汽喷射式制冷等。本书重点讲述单级蒸汽压缩式制冷。

项目 1 热力学基础

热力学是从物理的热学发展而来，是研究与热现象有关的能量转换规律的一门学科。工程热力学是热力学的重要分支，是从工程应用的角度研究热能与机械能相互转换的规律。能量转换实例见图 1-1。



(a) 热电厂 (热能→机械能)



(b) 汽车 (热能→机械能)



(c) 飞机 (热能→机械能)



(d) 冰箱 (机械能→热能)

图 1-1 能量转换实例

热力学第零定律、热力学第一定律、热力学第二定律是从无数实践中归纳总结的定律，是分析各种热力过程的依据，也是各种热力设备分析计算的理论基础。

知识点 1 工质

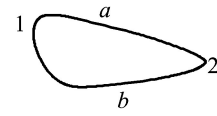


图 1-2 工质状态变化过程

热能与机械能之间的转换必须借助转换设备和载体。设备一般是指热力设备（热机），而载体一般是指工质，即能够装载热能的物质。

各种形式能量的转换或转移，需要借助携带热能的工作物质来完成，这种工作物质称为工质。

因此能量与物质实质上是不可分割的，能量可认为是物质运动的量度。

工质是多种多样的，有气态、液态、固态。液态与气态具有良好的热膨胀性和流动性，在工程上应用广泛，如水、水蒸气、湿空气、烟气、制冷剂等。

一、工质的热力状态及状态参数

在热力设备中，能量的转换与转移是通过工质吸热或放热、膨胀或压缩等变化来实现的。

例如，锅炉中燃料燃烧生成的高温烟气将锅筒中的水加热成为高温热水，即高温烟气与水之间的温差导致热量的转移。从上例可看出，工质（如烟气）在热量转移过程中，其温度、压力等物理性质发生改变，为表达变化前后的状态，我们将工质在某一瞬间的表现出来的宏观热力性质状态称为热力状态或状态，用来描述状态的各宏观物理量，称为工质的状态参数，简称状态参数。

工质状态发生变化，其状态参数也相应发生变化。工质发生状态变化的终状态参数变化值仅与初、终状态有关，而与工质状态变化的途径无关，如图 1-2 所示。因此，状态参数的数学特征是点函数，即

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad (1-1)$$

$$\oint dx = 0 \quad (1-2)$$

式中 x ——工质的某一状态参数。

根据式 (1-1) 和式 (1-2) 总结状态参数的特征有：① 状态确定，则状态参数也确定，反之亦然；② 状态参数的积分特征是状态参数的变化量与路径无关，只与初终态有关。

二、工质的状态参数介绍

常用的状态参数有温度 (T)、压力 (p)、体积 (V) 或比体积 v (密度 ρ)、热能 (U)、焓 (H)、熵 (S) 等，其中只有温度 (T)、压力 (p)、体积 (V) 可以通过仪器、仪表直接或间接测量，称为基本状态参数。其他参数由基本状态参数间接计算求得，称为导出参数。

1. 温 度

宏观上，温度可以描述物体的冷热程度。如两个存在温差的物体接触，冷物体变热，热物体变冷，经过足够长时间，两物体温度趋于一致，则说明两物体的冷热程度是相同的，即处于热平衡状态。

微观上，温度实际上是表示大量分子热运动的强烈程度。根据分子运动学说，理想气体热力学温度与分子热运动的平均动能之间存在如下关系

$$\frac{m\bar{\omega}^2}{2} = BT \quad (1-3)$$

式中 $\frac{m\bar{\omega}^2}{2}$ ——分子平移运动的平均动能，其中 m 是一个分子的质量， $\bar{\omega}$ 是分子平移运动的均方根速度；

B ——比例常数；

T ——热力学温度。

由式 (1-3) 可知，工质的热力学温度与其分子平移运动的平均动能成正比。

温度的高低用温标来衡量，目前国际上用得较多的温标有 3 种，华氏温标 T_f (单位符号

°F)、摄氏温标 t (单位符号°C)、绝对温标 (又称开氏温标) T (单位符号 K)。

绝对温标是以纯水的三相点温度 (冰、水、汽三相共存平衡时的温度) 为基准点, 热力学温度为 273.16 K, 每 1 K 为水三相点温度的 $1/273.16$ 。

摄氏温标是根据标准压力下水的冰点为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 沸点为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 将水银柱的高度划分为 100 个等分得出。

温标之间的关系如下:

$$T_t = 32 + \left(\frac{9}{5}\right)t \quad (1-4)$$

$$T = t + 273.15 \quad (1-5)$$

温度不能直接测量, 只能通过物体随温度变化的某些特性来间接测量。测量温度的仪表有普通温度计、热电偶温度计、双金属温度计、红外线温度计等。

2. 压 力

宏观上, 压力是指垂直作用于容器壁单位面积的力, 也称为压强, 一般用 p 表示。即

$$p = \frac{P}{f} \quad (1-6)$$

式中 P ——作用于容器壁的总压力, N;

f ——容器壁的总面积, m^2 。

微观上, 气体分子运动学说认为, 气体的压力是气体分子做不规则运动时撞击容器壁的结果。由于气体分子撞击频繁, 人们不可能分辨出气体单个分子的撞击作用, 只能观测到大量分子撞击的平均结果。因此, 作用在单位面积上的压力与分子运动的平均动能以及分子浓度之间存在相互关系如下

$$p = \frac{2}{3}n \frac{m\bar{\omega}^2}{2} = \frac{2}{3}nBT \quad (1-7)$$

式中 p ——单位面积的绝对压力;