

城市地下空间

环境质量保障关键技术

姚 杨 主编



中国建筑工业出版社

城市地下空间环境质量保障 关键技术

姚 杨 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城市地下空间环境质量保障关键技术/姚杨主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 11
ISBN 978-7-112-12537-1

I. ①城… II. ①姚… III. ①城市建设-地下工程-工程技术-研究 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 196184 号

本书从地下空间环境舒适与安全、系统合理以及可持续发展的角度出发, 介绍了以下几个方面最新研究成果: 城市地下空间热湿负荷计算方法; 城市地下空间舒适性指标体系与环境质量评价标准; 城市地下空间通风空调系统和相关设备; 城市地下空间噪声控制技术; 城市地下空间采光及照明设计技术和城市地下空间节能控制与能量管理系统等内容。本书适合相关工程技术人员、科研人员参考使用。

* * *

责任编辑: 石枫华

责任设计: 董建平

责任校对: 姜小莲 刘 钰

城市地下空间环境质量保障关键技术

姚 杨 主编

*

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

北京红光制版公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25 字数: 630 千字

2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月第一次印刷

定价: 66.00 元

ISBN 978-7-112-12537-1

(19787)

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

改革开放以来,我国国民经济进入持续、稳定、高速发展的新时期。短时间内城市规模和人口的激增势必使“城市综合症”越来越严重,其具体表现为:城市人口超饱和,交通拥挤、堵塞,建筑空间拥挤,绿化面积减小,城市污染加剧,环境质量下降,城市抗灾自救能力降低等等。城市化的高速发展,迫使人们开发地下空间。综合利用城市地下空间这种新型国土资源是解决城市人口、资源、环境三大危机的重要措施。

地下建筑大部分被岩土层包围,内部空间环境质量有其特殊性,与地上建筑空间环境有着较大的差异,需更多地依靠人工手段来加以控制和改善。由于我国以往未重视地下空间开发及其内部环境质量的改善,长期以来人们形成了一种地下建筑环境不如地面建筑环境的认识与感受。一些有关地下建筑空间环境质量调查的研究也表明,现有地下建筑内部空间环境的现状不能令人满意,大部分达不到应用的标准,尤其表现在空气品质差、新风供应不足、 CO_2 浓度、灰尘、微生物总数偏高、氡浓度偏高、室内异味明显,夏季和梅雨季湿度大,潮气促使霉菌、细菌和病毒生长、微生物污染比地上建筑严重,病态建筑综合症(SBS)的发生率高于地上建筑。此外,人们进入地下环境中,普遍感受到空间闭塞、压抑、单调、阴暗、与世隔绝以及方向感、时间感、季节气候变化感缺失等不良心理感受,甚至存在着担心生命安全以及有损身体健康的地下空间恐惧症。因此,系统地研究地下空间环境改善与保障技术是一个重要而紧迫的问题。但到目前为止,系统介绍城市地下空间的环境质量问题及相关保障技术的书籍还很少。

本书紧密结合“十一五”国家科技支撑计划重点项目之课题“城市地下空间环境质量保障技术研究”(2006BAJ27B03)的研究进展,内容涵盖了城市地下空间环境保障技术领域内从理论到工程实际应用的最新成果,具有很大的创新性,是指导和规范今后我国地下空间的设计和施工,对城市地下空间环境进行有效控制的理论基础。书稿中包括的主要创新性成果和内容有:

- (1) 城市地下空间热湿负荷计算方法的研究;
- (2) 城市地下空间舒适性指标体系与环境质量评价标准研究;
- (3) 城市地下空间通风空调系统和设备的研究;
- (4) 城市地下空间噪声控制技术研究;
- (5) 城市地下空间采光及照明设计技术研究;
- (6) 城市地下空间节能控制与能量管理系统研究。

本书由哈尔滨工业大学姚杨负责整体的策划和组织,拟定编写大纲和全书审稿,哈尔滨工业大学刘京负责全书统稿和编写过程中的协调工作。书稿编写的具体分工为:第2章由哈尔滨工业大学姚杨等编写;第3章、4.2节由中国建筑科学研究院曹勇、宋业辉、狄严强和北京建筑工程学院于丹等编写;第1章、4.1节由哈尔滨工业大学刘京和上海大智科技发展有限公司霍小平、李金编写;4.3节由清华大学石文星、解放军理工大学韩旭、

周森林等编写；4.4节由广州大学裴清清等编写；第5章由中国建筑科学研究院赵建平、王书晓等编写；第6章由哈尔滨工业大学金虹、康健等编写；第7章由上海建筑科学研究院刘笙、郑竺凌、朱伟峰、哈尔滨工业大学姜益强等编写。另外，韩宗伟、邵晓亮、韩俊召、王顺林、周智明、陈煜健、刘帅、周莉、廖柱、姜红、孟琪、唐征征、宋菲、张微微、张震、于德梓、张滨、李娟、肖光华、邓小池、王寅等研究生为本书的成稿提供了帮助，哈尔滨工业大学研究生戎小寅参与了本书的文字编辑，在此一并表示衷心感谢。

本书的出版凝聚了中国建筑工业出版社石枫华编辑的辛勤工作，在此表示敬意和感谢。

本书可供从事该领域的工程技术人员、科研人员等参考使用。

由于时间仓促，编者水平有限，本书中难免存在缺点和错误，恳请读者给予批评指正。

2010年7月

目 录

第 1 章	绪论	1
	1.1 我国地下空间的发展现状	1
	1.2 地下空间环境控制的重要意义	1
第 2 章	城市地下空间热湿负荷计算方法	4
	2.1 城市地下空间热湿负荷及研究现状	4
	2.2 地下空间围护结构传热数学模型的建立	7
	2.3 地下空间围护结构传热分析	14
	2.4 地下空间室内热源形成的负荷、新风负荷及湿负荷	18
	2.5 地下空间热湿负荷计算软件的编制	22
	2.6 典型地区地下空间热湿负荷计算分析	26
第 3 章	城市地下空间舒适性指标体系与环境质量评价标准	34
	3.1 城市地下空间热舒适现状调查研究	34
	3.2 城市地下空间空气质量现状调查研究	42
	3.3 城市地下空间热舒适影响因素与评价体系	53
	3.4 城市地下空间空气质量指标体系与评价方法的研究	73
	3.5 城市地下空间环境质量综合评价标准体系的研究	85
第 4 章	城市地下空间通风空调系统和相关设备	98
	4.1 基于地下空间空气品质的需求控制通风的研究	98
	4.2 适用于城市地下空间的新型空调机组的开发	131
	4.3 城市地下空间空气质量检测及净化技术的开发	137
	4.4 城市地下空间除湿及控制技术的开发	167
第 5 章	城市地下空间噪声控制技术	205
	5.1 城市地下空间的声学分类	205
	5.2 城市地下空间声场及声源的调查分析	208
	5.3 城市地下空间声环境的主观评价特征	228
	5.4 城市地下空间声场模拟及计算方法	246
	5.5 城市地下空间噪声控制技术的设计策略	265
第 6 章	城市地下空间采光及照明设计技术	280
	6.1 城市地下空间采光及照明设计现状	280
	6.2 城市地下空间光环境评价体系	280
	6.3 城市地下空间采光设计研究	289
	6.4 城市地下空间照明设计研究	300

	6.5 城市地下空间照明设计案例	325
第 7 章	城市地下空间节能控制与能量管理系统	332
	7.1 建筑能耗分项计量	332
	7.2 城市地下空间用能系统分析与能耗诊断技术	342
参考文献		382

第 1 章 绪 论

1.1 我国地下空间的发展现状

我国已进入快速城镇化时期，城市化率将由 2002 年的 37.7% 上升到 2020 年的 58%~60%，城市人口将由 2003 年底的 3.38 亿上升到 2020 年的 8~9 亿。城市的发展对开发利用地下空间提出了客观需求，而地下空间的开发利用，为城市提供了大量后备空间资源，为解决上述难题开辟了有效的途径，符合城市发展规律。综合利用城市地下空间是解决城市人口、资源、环境三大危机的重要措施。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》（2006—2020 年）中，城镇化与城市发展为重点开展研究领域，其中明确指出城市地下空间开发利用技术为优先主题之一。

近年来，我国在地下空间的开发利用方面投入力度很大，开展了大量的工作。首先以地铁为例，我国的地铁发展始于 20 世纪 60 年代，由于修建地铁费用较高，以前只有北京等特大城市有地铁运营或修建地铁。进入 21 世纪，国家首次把“发展城市轨道交通”列入国民经济计划发展纲要，并作为拉动国民经济，特别是大城市经济持续发展的重大战略，进而掀起了“地铁和轻轨热”，继北京地铁之后，上海、天津、广州、深圳、南京以及重庆、沈阳、哈尔滨、武汉、成都、杭州等城市都已建成或开始建设地铁。中国 34 个人口数量过 100 万的城市中，有 20 个城市提出修建地铁的计划。地铁的发展对解决大城市交通拥堵、提高环境质量、调整城市区域结构和产业布局以及拉动城市社会经济持续发展和合理布局起到了突出作用，同时提高了居民的生活质量，促进了城市合理布局的形成；其次，结合人防工程的地下商业等民用建筑的建设增长幅度很大。“九五”期间全国重点人防城市年平均竣工面积不足 $200 \times 10^4 \text{m}^2$ ，“十五”期间年平均竣工 $1500 \times 10^4 \text{m}^2$ ，进入“十一五”年平均竣工在 $2000 \times 10^4 \text{m}^2$ 左右。有代表性的如北京中关村广场地下 $50 \times 10^4 \text{m}^2$ 集商业、娱乐、餐饮、休闲、停车等多位一体的地下综合体、上海人民广场 $5 \times 10^4 \text{m}^2$ 的人防综合工程、大连胜利广场地下工程等等。

综上所述，从总体上看，我国地下空间发展呈现出以下几个主要特点：

- (1) 开发规模和力度大，开发速度快；
- (2) 从孤立的单体建设转变为城市整体建设和改造的组成部分；
- (3) 从孤立的地下建筑形式转变为功能复杂多样的巨大地下综合体。

1.2 地下空间环境控制的重要意义

城市地下空间环境控制是一个系统工程，包括热湿环境控制、空气品质、声环境控制、光环境控制、心理与视觉环境控制以及节能控制等，只有各方面相互协调、相互配合，才能创造一个适合人在地下空间生存和活动要求的环境。但需要指出的是，地下空间

环境特点与地上建筑有非常大的区别,主要体现在以下几个方面(这些内容将会在后面各章中做详细的论述,此处仅进行简单的概括):

(1)与地面自然环境相比,地下空间位于地下,封闭、自然光线缺乏、空气流通较差。人们进入地下环境,普遍感受到空间闭塞、压抑、单调、阴暗、与世隔绝以及方向感、时间感、季节气候变化感缺失等不良心理感受,甚至存在着担心生命安全以及有损身体健康的地下空间恐惧症。目前我国针对城市地下空间舒适性和环境质量的研究相对较少,其评价方法和评价体系尚未建立。

(2)与地面建筑相比,地下建筑具有蓄热能力强,热稳定性好,温度变化幅度小和潮湿等特点。其中最普遍存在的问题是潮湿问题。地下工程在修建和运营中,由于处于地下,复杂的地质环境决定了可能发生涌水、壁面结露、室内空气湿度可高达90%~100%。潮湿的地下环境可危害人体健康,使金属生锈,贮藏物资受潮变质以及毁坏电器设备等。如果在地下空间负荷计算方面不充分考虑这些特点,往往会使负荷偏大,进而导致所选设备偏大,引起初投资和运行费用过高,造成能源和经济上的浪费。因此,针对地下建筑的热湿特性,考虑地下空间的室内空气品质要求,研究一种合理的地下空间热湿负荷计算方法,为空调系统的设计提供科学准确的理论依据,对地下空间的开发利用与节能有着十分重要的现实意义。

(3)目前绝大多数的地下建筑采用地面建筑的通风空调系统、设备来处理和控制热湿环境,以达到空气品质要求。但地下空间具有自身的特点。首先,由于地下空间布局的问题,一些常规通风空调系统和设备,特别是屋顶设备,如冷却塔等应用时受到限制;地下空间自身具有隔热性、恒温性、蓄热性,同时湿负荷较大,使得热湿比相对较小,对除湿和湿度调节功能要求更高;地下空间周围主要为岩土、地下水等,都是可供利用的自然能源。但到目前为止的利用率还很低;由于地下空间很难利用自然通风的辅助作用,而通风口的位置、个数又受到很大限制,使得常规通风空调设计方法和设备运行极易造成地下空间内整体气流组织困难和局部通风不畅问题,从而影响人员的热舒适度和对空气品质的需求;地下空间内污染物种类繁多,不对回风进行综合高效的净化处理的话,会带来严重的空气品质问题。综上,有必要利用地下空间恒温、隔热、蓄热、耐候、气密等有利因素,同时解决空间局限、相对密闭等不利因素的负面影响,开发研究出适用于地下空间的通风空调系统和设备,这对于在节省能源的同时,建立健康舒适的地下空间环境具有重要意义。另外,上述系统在运行过程中,都需要消耗各种形式的能源,如电能等。但是由于我国在这些系统的设计和运行方面尚缺乏丰富科学的经验和严格完善的标准规范,使得目前地下空间的照明、通风、空调、强弱电、给水排水、供燃气等系统在满足基本需要的前提下其使用能耗却居高不下,这是急待解决的一个问题。因此,针对城市地下空间里的各个用能系统和环节,进行节能控制和能量管理方面的研究,使得在满足人们需求的同时尽可能高效低耗地消费能源,对我国的节能战略实施和地下空间的持续健康发展都具有重要意义。

(4)随着地下空间被人们广泛利用,其噪声污染问题也突显出来。地下空间的封闭性使得声音难以扩散,如地下空间结构和装修处理不当,将会使得回声现象严重,尤其是常用的拱形结构,在吸声处理不好的地方,声音会不断地反射,形成声聚焦,使得同一噪声源在地下空间内的声压级要大于地面3~8dB。噪声污染的危害众所周知,如损害听力,

有害于人的心血管系统，影响人的神经系统，使人急躁、易怒。长期在噪声环境下工作的人，还会引起神经衰弱症候群（如头痛、头晕、耳鸣、记忆力衰退、视力降低等）。另外，地下空间噪声的污染除了以上的危害之外还会导致很多意想不到的事故发生，可见，研究地下空间的声学设计方法、噪声控制标准及控制技术是非常必要的。

（5）天然光照环境能满足人们生理（视觉）、心理和美学需要，但天然光线不足是地下空间的一个固有缺陷，如何弥补天然光线不足的问题，克服人在地下空间中昏暗、封闭的感觉，创造一种稳定、符合人体视觉特点的光照环境就具有重要的意义。然而，目前还没有关于结合人们对于光环境的需求，完成地下空间照明设计以及利用仿真系统，帮助人们获取外部环境信息等方面研究成果。

综上，由于地下建筑内部空间环境质量的特殊性，与地上建筑空间环境有着较大的差异，需更多地依靠人工手段来加以控制和改善。我国以往未重视地下空间开发及其内部环境质量的改善，一些有关地下建筑空间环境质量调查的研究也表明，现有地下建筑内部空间环境的现状不能令人满意，大部分达不到应用的标准，尤其表现在空气品质差、新风供应不足、CO₂ 浓度、灰尘、微生物总数偏高、氨浓度偏高、室内异味明显，夏季和梅雨季湿度大，潮气促使霉菌、细菌和病毒生长、微生物污染比地上建筑严重，病态建筑综合症（SBS）的发生率高于地上建筑，噪声污染严重、天然光线不足，从而造成了长期以来形成的地下建筑环境不如地面建筑环境的认识与感受。因此，系统地研究、开发地下空间环境改善与保障技术是一个重要而紧迫的问题。

第2章 城市地下空间热湿负荷计算方法

2.1 城市地下空间热湿负荷及研究现状

空调通风系统在地下建筑中的应用变得日益广泛,且对其要求也不断提高。目前,在地下建筑的空调系统设计中,很多设计人员或者采用固定不变的参数,或者采用地面建筑的计算方法,或是采用指标估算来确定热湿负荷,而往往忽略了地下建筑与地面建筑的差别。与地面建筑相比,地下建筑的热湿负荷具有其自身的特点和存在的问题:

(1) 地下建筑围护结构冷热负荷均比地面建筑少

“冬暖夏凉”是对地下建筑热工性能的高度概括。地面建筑围护结构的冷热负荷直接随着气温的变化而变化,而地下建筑则不完全如此。地温的变化既受气温的影响,又受埋深的影响。地温随着深度的增加而衰减,长期延迟,到达一定深度后则为一个常数。浅埋地下建筑在 $-3.0\sim-5.0\text{m}$ 范围内,夏季的初始温度较低,而且地下建筑均不计太阳辐射热,因此,地下建筑的围护结构冷热负荷均比地面建筑少。

(2) 地下建筑的潮湿问题

由于地下建筑围护结构表面散湿,又不直接受太阳的照射,因此比地面建筑潮湿。在夏季,地下建筑内温度比室外气温低,室外空气进入地下建筑后,温度下降,相对湿度升高,当壁面温度低于露点温度时,即出现凝结水,使地下建筑夏季潮湿问题更为突出。地下建筑的湿源主要包括以下几项:施工水;裂隙水;壁面散湿;空气带入的水分;人员散湿;工艺散湿等^[1]。正是由于地下建筑内空气环境的特殊性,“防潮除湿”成为地下建筑通风空调设计的关键环节。

基于以上考虑,地下建筑热湿负荷计算是地下建筑采暖、通风和空气调节系统设计的一项重要依据,它不仅影响到采暖、通风和空气调节系统设计的投资和设备的选择,而且还直接涉及到采暖、通风和空气调节设施的实际运行效果。如有些地下建筑的采暖、通风和空气调节系统的设计因没有充分考虑壁面的热工特性,使得工作区温度偏低,相对湿度偏高,负荷增大,给设备的选择带来了不必要的浪费。为了使暖通设计更加符合地下建筑的特点,使地下建筑内的热工环境满足工艺要求,对地下建筑热湿负荷计算方法的研究就具有十分重要的现实意义。

国内外在地下建筑热湿负荷计算方面进行了大量的研究,主要分以下几方面。

2.1.1 围护结构传热

与地面建筑相比较,地下建筑的一个显著特点,是它的围护结构(被覆结构和基岩或土壤)“无穷厚”(深埋)或大部分“无限厚”及局部有限厚(浅埋)。这是构成地下建筑传热过程区别于地面建筑的一个重要条件。在“无穷厚”的建筑墙体的热和湿的传递过程中,伴着地下建筑物内部的空气流动,使温度场、湿度场及空气流动场耦合在一起相互作用^[1]。为使问题处理简单并且准确,研究工作者须在分析过程中采用“分类处理”,“问题

模型化”，“引入假设条件”等研究手段。

文献 [2] 按地表面温度年周期性变化对地下建筑围护结构传热影响大小将其分为深埋和浅埋两类，对地下建筑围护结构传热影响较小的为深埋建筑。一般当地下建筑覆盖层厚度大于 6~7m 时，地表面温度年周期性变化对地下建筑围护结构传热的影响可以忽略不计。并对深埋和浅埋的地下建筑壁面传热给出了不同的计算公式。

赵敬源等^[3]分析了地下建筑的传热特性，建立了深埋地下建筑壁面动态传热的数学模型，在边界条件的处理上引进了反应系数，使动态问题得以解决。依据建立起的传热微分方程编制了相应的计算机程序，以此程序对地下厂房的热工环境进行了模拟，具体分析了壁面传热的主要影响因素。

忻尚杰等^[4]通过对浅层地下建筑结构进行简化，并根据空调系统实际运行特点，建立了传热过程的数学模型。用气象模型产生作用于地下工程的地面空气温度，用线性求解实现传热过程的动态模拟。并通过两个实际工程的同步实测与模拟，确认了模拟模型的有效性和可行性。

彭梦珑等^[5]针对地下建筑中空气和岩壁的对流换热属于第四类边界条件，传统编程计算十分复杂的特点，使用 Fluent 软件对洞室岩壁的非稳态传热进行了计算。根据实例计算得出：间歇通风条件下岩壁热流量达到稳定所需的时间约为 1 个月，并比较了不同风速和不同岩体材料时，洞室壁温和室温随时间的变化状况，为深埋地下洞室岩壁的热负荷计算提供了参考。

胡铁山等^[1]提出地下建筑壁面与流动空气之间同时发生着对流传热与对流传质，属于热湿耦合对流传递过程，并且建立了壁面热湿耦合对流传递数学模型。在对实验空间进行春、夏、秋、冬四个季节的实验数据分析整理后，得到了四个季节壁面和空气热湿耦合对流传递过程的无量纲准则式，为控制地下建筑热湿环境提供理论依据。

王丹宁等^[6]利用了控制容积法的原理分析了通风系统间歇运行时的地道壁体的传热过程。即在计算区域内划分网格，定义网格线的交点为控制节点，并以节点为中心建立单元体。然后，根据控制容积法的原理，用热平衡法，推导出每个单元体内节点的关系式，从而求解出计算区域内的温度场分布。

朱培根等^[7]针对地下建筑随使用时间的增长，恒温传热过程逐步趋于稳定，年波动传热过程逐步进入准稳定状态的特点，根据地下建筑供暖空调负荷设计计算的相关文献和规范，以 Visual Basic6.0 和 Compaq Visual Fortran 等为工具，研究开发了地下建筑供暖空调负荷模拟和能耗预测软件。

国外方面，Thomas B.^[8]早在 1975 年就提出在地下 0~10m 深度之间，可以通过扭曲正常的热学模式来使温度波动最小化。为此可在地下空间的顶棚和表面土壤之间放置绝热材料，并水平延伸超过地下空间。在这种情况下，地表温度需要花费更长的时间穿透深厚的土壤地块以到达地下空间的墙体。Golany S. G.^[9]也提出了另外一种方法，就是在地下空间的上部地表上建造房屋或密植树木，使太阳热量的影响最小化。

对于地下建筑壁面物理传热的分析研究，Maref W. 等^[10,11]建立了三维传热模型的理论及数值方法，并选择 Implicit Spline Method 作为解决方法，以不同材料的温度分布测量值检验了模型的有效性。然后将该模型用于估计侧面热流的影响，同时给出了简要的实验细节并给出模型验证结果。

Skrjanc I. 等^[12]分析了建筑物热动态模拟方法,即理论模拟与实验模拟的优缺点。理论模拟以能量平衡方程为基础,并应用了 MATLAB 等工具。在实验模拟中,得到了输入、输出变量之间的一个非线性模糊模拟模型。

2.1.2 设备、照明和人体等散热量

相对于围护结构传热和计算新风负荷,设备、照明和人体等散热量在地下空间空调负荷中所占比例较大。文献 [2] 介绍了各种不同类别地下建筑内的设备、照明、人体和热介质管道等散热量的简化计算公式,并附有各种相关的计算参数。

王海文^[13]认为对负荷计算影响较大的是地下商场内同时停留的人数,这是由两部分组成的,一是售货员,二是顾客。经观察不同类别的商场,根据简化计算的结果,得出地下商场内同时停留的人员密度为 $0.7 \sim 1.3$ 人/ m^2 。

日本对于地下建筑内部环境,在参照“楼宇管理法”的同时,采用了最保守的管理标准,而且特别考虑由于季节的不同而需要的舒适环境标准不同。如以地下街为特点的地下空间,其空调条件与一般建筑物基本相同,但也考虑其特殊性:认为空气环境标准应高于地面建筑空气环境标准。综合性的地下街空调方式,应将负荷变动激烈、排风量大的饮食店部分,与照明比较稳定、不必保持较大排风量的商店部分分别考虑^[14]。

2.1.3 湿负荷计算

地下工程的潮湿一般指的是相对湿度大于 75% 的空气环境。在每年的雨季,潮湿的外部空气在建筑物与土壤接触的墙壁上会被冷却,容易造成地下空气的相对湿度过高,使人体散热困难,使人感到闷热,不舒服。另外湿度过大会促使霉菌的生长,从而导致金属锈蚀、木器变形、物品发霉变质腐烂,影响设备的正常使用。因此近些年来,国内外学者对地下建筑的湿负荷展开了很多研究。

赵平歌^[15]通过对我国部分城市地下工程湿度环境调查,探讨了地下工程潮湿的原因。提出了包括“采暖通风除湿法”,“冷却除湿法”,“固体和液体吸湿剂除湿法”和“压缩除湿法”在内的一些除湿措施和防潮措施。

程绍仁^[16]以地下建筑维护管理的内容为重点,论述了地下建筑内潮湿的原因及各种湿源的散湿量计算方法,并给出了地下建筑防潮除湿的方法。

Aberg O.^[17]提出在不通风地道中,可以通过切断湿源来解决地道内空气相对湿度过高的问题,即隔绝室外空气进入地道。但实际上这样做是很困难的,因为轻微程度的密闭不严都可能导致室内相对湿度的升高。

Kurnitiski J.^[18,19]为确定地面的散湿量和湿交换系数,对一地道采用自然通风和机械通风两种通风方式进行了监测。得到如下结果:裸露地面的散湿量平均值为 $3.6 \sim 5.7 \text{ g}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$,相应的湿交换系数为 $0.0012 \sim 0.0018 \text{ m/s}$ 。由蒸发作用决定的湿交换系数要考虑温度的变化。测试表明:通常条件下,只需考虑自然对流。但在强烈的通风换气条件下,要考虑强迫对流。较高的换气次数增加了散湿量,但仍可维持较低的相对湿度。夏季,在换气次数为 3 次/h 的条件下,地道中的相对湿度为 75.4%。因此,控制散湿量和热作用是维持湿平衡的关键因素。

Samuelson I.^[20]指出夏季室外空气的温度和相对湿度都要高于地道中的空气,此时室外空气进入地道就会导致地道中空气的相对湿度升高。在夏季,地道中空气相对湿度高达 85%~95%,甚至有些时候能达到 100%。因此,必须对地道采取改进措施。

2.1.4 研究现状分析

通过以上文献分析可以看到：

(1) 国内外学者对地下建筑热湿负荷中的各部分内容，都已经展开了相关研究，进行了部分工程的应用。但对地下空间整体热湿负荷的研究还不是很多。

(2) 对地下建筑热湿负荷中的涉及多方面因素、具有普遍适用意义的围护结构传热的动态研究还不是很完善。

(3) 地下建筑夏季潮湿问题还没有彻底的解决方法，地下建筑湿负荷的计算方法研究还有待继续准确有效的开展。

(4) 哈尔滨工业大学热泵空调技术研究所针对地下建筑围护结构传热研究出了动态模拟计算方法，但是此项工作还需要进一步的完善和简化，力求作出成果性的进展。

(5) 目前还没有适合的计算地下建筑热湿负荷的软件。

2.2 地下空间围护结构传热数学模型的建立

2.2.1 围护结构模型的建立

1. 控制方程

地下建筑围护结构传热有其不同于地上建筑的特点。对于地上建筑来说，围护结构传热主要受房间内部温度的设定、围护结构的蓄热、导热性等材料特性、围护结构外室外气温的变化等因素的综合影响。而地下建筑围护结构的传热是基于地上建筑围护结构原有特点的基础上，还受地温变化、地层深度（地温随着深度的增加而衰减和延迟）、湿传导对传热的影响等因素的综合作用。总的来说，地下建筑围护结构传热过程是复杂的非稳态过程。

基于地下建筑中湿传导的特殊性和复杂性，需要予以个别研究。据原重庆建筑工程学院对地下建筑围护结构的传热传湿问题进行的理论推导和实验验证，结果表明蒸汽渗透的存在对壁面温度的变化没有多大影响。因此，在地下建筑围护结构传热计算中，湿传导对热传导的影响可以忽略不计（严重的地下水运动和裂缝水除外）^[2]。这说明在防潮措施完善的情况下，可以忽略湿传导对地下建筑围护结构传热影响。

综上，地下建筑围护结构传热过程可以概括为一个三维非稳态无内热源的导热过程，如图 2-1。此过程可以用导热微分方程来描述，如式 (2-1) 所示：

$$\rho c_p \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (2-1)$$

式中 $t(x, y, z, \tau)$ —— τ 时刻位于点 $P(x, y, z)$ 的温度值；

λ ——点 $P(x, y, z)$ 处热导率， $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

对图 2-1 所示的地下建筑建立坐标系：坐标原点位于地表面处； y 轴垂直于地表面，

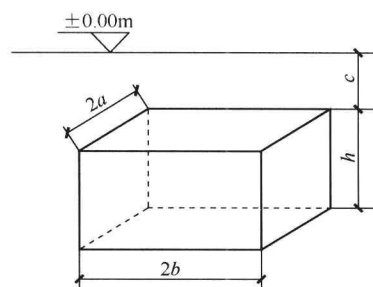


图 2-1 地下建筑模型简图

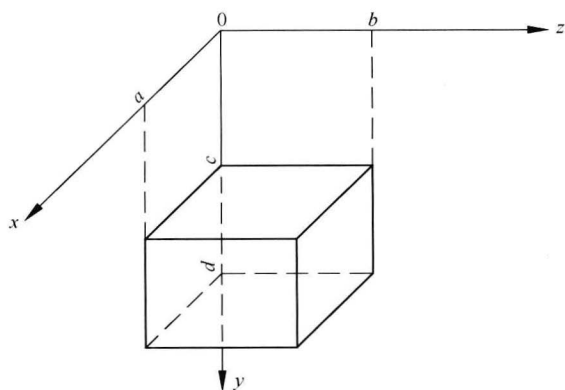


图 2-2 地下建筑坐标系

同时通过地下建筑地面的中心和顶板的中心； x 轴和 z 轴平行于地表面。这样，使得该地下建筑沿 x 轴关于 y 轴对称，沿 z 轴关于 y 轴对称。因地下建筑无须考虑朝向问题，因此在做地下建筑围护结构传热计算时，可以只计算如图2-2所示的部分（ ob 长度为地下建筑长的1/2， oa 长度为地下建筑宽的1/2）。

2. 初始条件及边界条件

根据地下建筑暖通空调系统运行特点给出初始条件和边界条件如下：

(1) 初始条件^[2]

$$t_a(0) = t_n \quad (2-2)$$

$$t(x, y, z, \tau) \big|_{\tau=0} = t_0 + \theta_d \exp\left[-\sqrt{\frac{\omega_1}{2a}} y\right] \cos\left(\omega_1 \tau_0 - \sqrt{\frac{\omega_1}{2a}} y\right) \quad (2-3)$$

式中 $t_a(0)$ ——初始时刻地下建筑室内空气温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_n ——设计室内温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_0 ——地表面年平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

θ_d ——地表面温度年周期性波动振幅， $^{\circ}\text{C}$ ；

ω_1 ——温度年周期性波动频率， $1/\text{h}$ ， $\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{8760} = 0.000717$ ；

τ_0 —— $\tau=0$ 时从地面温度年波幅出现算起的时间， h ；

a ——地层材料的导温系数， m^2/h 。

(2) 内边界条件

理想工况下，假定地下建筑室内各处空气温度接近，因此室内空气各点温度相等。

则有：

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial x} \bigg|_{x=a} + \alpha_1 (t_a(\tau) - t(x, y, z, \tau) \big|_{x=a}) = 0 \end{array} \right. \quad (2-4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial y} \bigg|_{y=d} + \alpha_1 (t_a(\tau) - t(x, y, z, \tau) \big|_{y=d}) = 0 \end{array} \right. \quad (2-5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial y} \bigg|_{y=c} + \alpha_1 (t_a(\tau) - t(x, y, z, \tau) \big|_{y=c}) = 0 \end{array} \right. \quad (2-6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial z} \bigg|_{z=b} + \alpha_1 (t_a(\tau) - t(x, y, z, \tau) \big|_{z=b}) = 0 \end{array} \right. \quad (2-7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial x} \bigg|_{x=0} = 0 \end{array} \right. \quad (2-8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial y} \bigg|_{z=0} = 0 \end{array} \right. \quad (2-9)$$

式中 $t_a(\tau)$ —— τ 时刻地下建筑室内空气温度， $^{\circ}\text{C}$ （在使用期 $t_a(\tau) = t_n$ ）；

α_1 ——地下建筑室内空气与壁面之间的对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

(3) 外边界条件

相对而言比较复杂。与围护结构相接触的地温受地表面温度周期性变化的影响，且随深度的增加而发生温度的衰减和延迟，按自然指数规律减小^[2]。

$$t(x, y, z, \tau) \big|_{x \rightarrow \infty} = t(x, y, z, \tau) \big|_{z \rightarrow \infty} = t_0 + \theta_d \exp \left[-\sqrt{\frac{\omega_1}{2a}} y \right] \cos \left(\omega_1 \tau_0 - \sqrt{\frac{\omega_1}{2a}} y \right) \quad (2-10)$$

$$t(x, y, z, \tau) \big|_{y \rightarrow \infty} = t_0 \quad (2-11)$$

$$\lambda \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial y} \bigg|_{y=0} + \alpha_2 (t(x, y, z, \tau) \big|_{y=0} - t_e(\tau)) = 0 \quad (2-12)$$

$$t_e(\tau) = \frac{\alpha_s \cdot Q}{\alpha_w} + t_w(\tau) \quad (2-13)$$

式中 τ ——模拟的时间，h；

$t_e(\tau)$ —— τ 时刻考虑太阳辐射的地下建筑室外空气综合温度， $^{\circ}\text{C}$ ^[27]，可由式 (2-13) 计算；

α_s ——土壤表面对太阳总辐射值的吸收率；

α_w ——室外空气和地表面之间的对流换热系数，一般情况下可取为 $23.3 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ；

Q ——逐时太阳总辐射值， W/m^2 ；

$t_w(\tau)$ ——室外空气逐时温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

式中其他符号意义同前。

2.2.2 模型与边界条件的简化

在对地下建筑围护结构三维问题的研究上，Maref W. 等^[10]进行了实测与数值模拟，得出了以下重要结论：地下建筑围护结构的温度沿深度方向变化明显，而除了墙角周围的极小部分区域，在同一墙面上相同深度处各点的温度几乎相等。也就是说在室内各处空气温度较为接近的前提下，相同深度围护结构各处的热流密度基本相等。文献 [10] 还对地下建筑围护结构传热分别进行了二维和三维模拟，两者相差不超过 7%。说明二维计算与三维计算结果是比较接近的。其结果与忻尚杰等^[4]的研究是一致的。因此，本书中将地下建筑传热的三维问题简化为二维问题，即把三维模型简化为二维模型。相应的边界条件也可以得到相应的简化。

1. 模型简化

将式 (2-1) 简化为：

$$c\rho \frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (2-14)$$

式中 $t(x, y, \tau)$ —— τ 时刻位于点 $P(x, y)$ 的温度值， $^{\circ}\text{C}$ ；

λ ——点 $P(x, y)$ 处热导率， $\text{W/(m} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ 。

因此，可以将图 2-2 所示的空间三维坐标系简化为二维坐标系，如图 2-3 所示。在这种情况下，

此地下建筑无论从结构上还是从温度场上来说都是关于 y 轴对称的，就可以只研究 $x > 0$

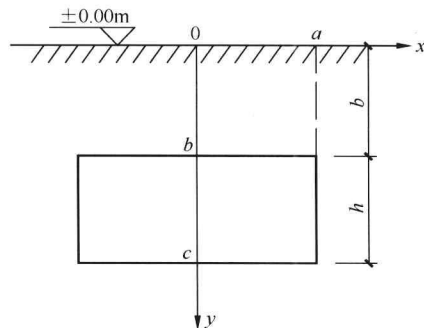


图 2-3 简化后的地下建筑坐标系

和 $y > 0$ 的部分了。

2. 初始条件及边界条件简化

(1) 初始条件

初始条件简化如下：

$$t(x, y, \tau) |_{\tau=0} = t_0 + \theta_d \exp\left[-\sqrt{\frac{\omega_1}{2a}} y\right] \cos\left(\omega_1 \tau_0 - \sqrt{\frac{\omega_1}{2a}} y\right) \quad (2-15)$$

式中符号意义同前。

(2) 内边界条件

假设空调设备开始使用后地下建筑室内空气温度迅速达到设计值，在计算开始后，在空调系统的作用下，室内空气温度维持在设计值，即 $t_a(\tau) = t_n$ ，则内边界条件简化如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=a} + \alpha_1 (t_n - t(x, y, \tau) |_{x=a}) = 0 \end{array} \right. \quad (2-16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=b} + \alpha_1 (t_n - t(x, y, \tau) |_{y=b}) = 0 \end{array} \right. \quad (2-17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=c} + \alpha_1 (t_n - t(x, y, \tau) |_{y=c}) = 0 \end{array} \right. \quad (2-18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \end{array} \right. \quad (2-19)$$

式中符号意义同前。

(3) 外边界条件

外边界条件简化如下：

$$t(x, y, \tau) |_{x \rightarrow \infty} = t_0 + \theta_d \exp\left[-\sqrt{\frac{\omega_1}{2a}} y\right] \cos\left(\omega_1 \tau_0 - \sqrt{\frac{\omega_1}{2a}} y\right) \quad (2-20)$$

$$t(x, y, \tau) |_{y \rightarrow \infty} = t_0 \quad (2-21)$$

$$\lambda \frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=0} + \alpha_2 (t(x, y, \tau) |_{y=0} - t_e(\tau)) = 0 \quad (2-22)$$

式中符号意义同前。

2.2.3 节点方程组的确定

1. 常用计算方法及选择

在传热计算中目前应用较为广泛的方法主要包括有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)、有限元法 (Finite Element Method, FEM)、有限容积法 (Finite Volume Method, FVM) 等。

(1) 有限差分法 (FDM)

基本思想是把连续的求解区域用有限个离散点构成的网格来代替，这些离散点称作网格的节点；把连续求解区域上的连续变量的函数用在网格上定义的离散变量函数来近似；把原方程和定解条件中的微商用差商来近似，积分用积分和来近似，于是原微分方程和定解条件就近似地代之以代数方程组，即有限差分方程组，解此方程组就可以得到原问题在离散点上的近似解。然后再利用插值方法便可以从离散解得到定解问题在整个区域上的近似解。