

# Design of Underground Construction Structure

## 地下建筑结构设计

王树理 主编

Wang Shuli

王树仁 孙世国 杨万斌 朱建明 副主编

Wang Shuren Sun Shiguo Yang Wanbin Zhu Jianming



清华大学出版社



# Design of Underground Construction Structure

## 地下建筑结构设计

王树理 主编

Wang Shuli

王树仁 孙世国 杨万斌 朱建明 副主编

Wang Shuren Sun Shiguo Yang Wanbin Zhu Jianming



清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统介绍了目前最主要的、流行的地下建筑结构设计种类、设计理论、设计原理、设计方法和设计规范,突出地下建筑支护结构的设计,旨在培养地下建筑结构设计人才。全书共分10章,内容包括地下建筑结构及设计的概念;地下建筑结构设计的基本方法、设计内容、设计原则;地下建筑结构设计的计算理论;盾构法隧道衬砌结构设计;钻爆法隧道支护结构设计;非开挖顶管施工与设计;明挖基坑支护结构设计;沉井基础构造和结构设计计算;沉管结构设计计算;地下建筑工程降水与防水设计。

全书内容丰富、理论先进、设计可行,可作为大土木工程地下建筑工程本科生教材,供地下工程、地质工程、岩土工程等领域相关专业高校师生及广大科技工作者使用或参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

地下建筑结构设计/王树理主编. —北京:清华大学出版社,2007.3

ISBN 978-7-302-14679-7

I. 地… II. 王… III. 地下建筑物—结构设计 IV. TU93

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第021286号

责任编辑:徐晓飞 李 嫻

责任校对:赵丽敏

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:203×253 印 张:15 字 数:357千字

版 次:2007年3月第1版 印 次:2007年3月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.80元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:024905-01

# 前 言

“地下建筑结构设计”是高等院校大土木工程专业主干课程之一。根据教育部新的普通高等院校本科专业目录,原建筑工程、交通土建工程、桥梁工程、地下工程等多个专业合并为大土木工程专业。为改变目前地下工程专业偏重于施工工艺方法的教学现状,由中国地质大学(北京)组织,联合国内4所高校地下工程专业方向教学、科研经验丰富的师资力量,基于近年来国内外地下工程领域的最新理论和工程技术成果,共同编写了《地下建筑结构设计》普通高校本科教材。

本书重点突出地下建筑结构设计基本概念、基本理论与基本方法的教学,应用范围涉及地下工程、交通运输工程、采矿工程、岩土工程和城市建设等众多工程学科,是适用于各类与地下工程专业相关的全国通用教材,也是大土木工程专业地下工程的主干教材。本书的编写注重教材的基础性、通用性、实用性、新颖性和先进性,结合工程实例展开教学,使学生在实战中提高分析问题、解决问题的能力。在策划和编写过程中,尽可能采用各个大学已经出版的教材资料以及专家、学者在教学、科研、设计和施工中积累的资料,以使《地下建筑结构设计》一书在理论、术语和符号与目前的教材资料相统一。由于篇幅有限,书末列出了主要文献目录,在此感谢相关文献资料的作者、编者。本教材由中国地质大学(北京)王树理主编,王树仁(燕山大学)、孙世国(北方工业大学)、杨万斌(河北工程大学)和朱建明(北京航空航天大学)副主编完成。各章节编写内容分工为:

- 前言、第1章——王树理;
- 第2章——王树仁、孙世国;
- 第3章——王树理、王树仁;
- 第4章——王树理、冉恒谦;
- 第5章——王树理、朱建明;
- 第6章——杨万斌、王树理;
- 第7章——孙世国、朱建明;

## II 地下建筑结构设计

第 8 章——孙世国、杨万斌；

第 9 章——杨万斌、王树仁；

第 10 章——朱建明、杨万斌。

全书由王树理统稿。在本书的编写和出版过程中,得到了参编院校和有关领导的大力支持和帮助,在此深表谢意!限于编者的水平和时间,对书中谬误和不当之处,敬请批评指正,以期在以后的再版中不断改进和完善。

编 者

2006 年 10 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 地下建筑结构概念和特点 .....	1
1.1.1 工程特点 .....	1
1.1.2 设计特点 .....	2
1.2 地下建筑结构分类和形式 .....	2
1.2.1 居民住宅 .....	3
1.2.2 娱乐场所 .....	4
1.2.3 商业与教育设施建筑物 .....	5
1.2.4 特殊设施 .....	6
1.2.5 地下停车场 .....	6
1.2.6 工业设施 .....	6
1.2.7 军事及人防设施 .....	7
1.2.8 储藏建筑 .....	7
1.2.9 交通运输 .....	9
1.2.10 公共隧道 .....	10
1.2.11 地下采矿巷道 .....	12
1.2.12 明挖基坑结构 .....	13
复习思考题 .....	14
<b>第 2 章 地下建筑结构设计基本方法</b> .....	15
2.1 地下建筑结构设计内容 .....	15
2.2 地下建筑结构设计原则 .....	17
2.3 地下建筑结构设计方法 .....	17
2.3.1 工程类比设计方法 .....	17

2.3.2	力学模型设计方法 .....	18
2.3.3	结构可靠度设计方法 .....	18
2.3.4	结构荷载共同作用设计方法 .....	19
	复习思考题 .....	21
<b>第3章</b>	<b>地下建筑设计计算理论 .....</b>	<b>22</b>
3.1	土压力计算理论 .....	22
3.1.1	土压力及其分类 .....	22
3.1.2	静止土压力 .....	23
3.1.3	朗肯土压力理论 .....	24
3.1.4	库仑土压力理论 .....	27
3.2	岩石力学计算理论 .....	30
3.2.1	围岩压力及分类 .....	30
3.2.2	非圆形洞室等代圆法 .....	35
3.2.3	圆形洞室围岩线弹性应力和位移分析 .....	37
3.2.4	圆形洞室围岩弹塑性应力和位移分析 .....	39
3.2.5	非轴对称条件下围岩的应力分布特征 .....	47
3.2.6	围岩与支护结构的相互作用 .....	48
	复习思考题 .....	51
<b>第4章</b>	<b>盾构法隧道衬砌结构设计 .....</b>	<b>52</b>
4.1	盾构法概述 .....	52
4.2	盾构衬砌结构设计方法 .....	57
4.2.1	设计原则 .....	57
4.2.2	荷载 .....	57
4.2.3	衬砌材料 .....	64
4.2.4	安全系数 .....	65
4.2.5	管片结构设计计算 .....	65
4.2.6	断面安全性检验 .....	71
4.2.7	连接缝构造计算 .....	73
4.2.8	衬砌安全性校核 .....	73
4.2.9	管片构造 .....	73
4.2.10	管片的生产 .....	75

4.2.11 二次衬砌·····	76
4.3 设计实例·····	78
复习思考题·····	89
<b>第5章 钻爆法隧道支护结构设计</b> ·····	<b>90</b>
5.1 钻爆法概述·····	90
5.2 爆破损伤及控制·····	91
5.2.1 爆破损伤·····	91
5.2.2 爆破破坏控制·····	92
5.3 隧道爆破设计与控制·····	95
5.4 隧道支护结构设计·····	96
5.4.1 支护结构概述·····	96
5.4.2 常用支护类型及其受力特点·····	99
5.4.3 支护结构抗力设计计算·····	102
5.4.4 组合支护体系特性·····	104
5.4.5 圆形隧道 ETD2006 支护设计数值模拟·····	105
5.5 隧道工程注浆加固设计·····	106
5.5.1 注浆加固概述·····	106
5.5.2 注浆设计主要内容·····	108
5.5.3 注浆加固设计计算·····	109
5.5.4 隧道注浆加固实例分析·····	118
复习思考题·····	120
<b>第6章 非开挖顶管施工与设计</b> ·····	<b>121</b>
6.1 非开挖顶管法概述·····	121
6.2 顶管工程设计方法·····	122
6.2.1 顶管工作井设计·····	122
6.2.2 顶管顶力计算·····	123
6.2.3 顶管壁后土体稳定验算·····	124
6.3 顶管技术设备及部件·····	128
6.3.1 顶管机类型及原理·····	128
6.3.2 中继环结构及原理·····	130
6.3.3 各类管道及其接口·····	131



6.4	顶管法施工关键技术 .....	133
6.4.1	工程地质勘察要点 .....	133
6.4.2	顶进方向控制 .....	133
6.4.3	减少顶进阻力措施 .....	134
6.4.4	接力顶推技术 .....	135
6.4.5	顶管土体稳定性验算 .....	136
	复习思考题 .....	136
<b>第7章</b>	<b>明挖基坑支护结构设计 .....</b>	<b>137</b>
7.1	基坑支护概述 .....	137
7.1.1	支护结构 .....	137
7.1.2	地基加固 .....	138
7.1.3	井点降水 .....	138
7.1.4	开挖过程 .....	138
7.1.5	施工监测 .....	139
7.2	支护结构类型 .....	139
7.2.1	重力式挡土墙 .....	139
7.2.2	排桩与地下连续墙式挡土结构 .....	139
7.2.3	逆作拱墙挡土结构 .....	143
7.2.4	土钉支护结构 .....	144
7.3	基坑支护设计依据 .....	144
7.3.1	相关规范规程 .....	144
7.3.2	地质勘察资料 .....	144
7.3.3	工程环境条件 .....	145
7.3.4	主体结构设计资料 .....	146
7.3.5	场地施工条件 .....	146
7.4	重力混凝土挡墙设计 .....	146
7.4.1	设计内容 .....	146
7.4.2	土压力计算 .....	147
7.4.3	基本验算 .....	147
7.5	排桩与地下连续墙式支护结构设计 .....	151
7.5.1	支护桩墙设计 .....	151
7.5.2	支护系统设计 .....	158

7.5.3	土层锚杆设计	162
7.6	土钉墙支护结构设计	165
7.6.1	一般规定	165
7.6.2	基本计算	165
	复习思考题	168
<b>第8章</b>	<b>沉井基础构造和结构设计计算</b>	<b>169</b>
8.1	沉井概述	169
8.1.1	沉井基础特点及其应用范围	169
8.1.2	沉井分类	169
8.1.3	沉井设计原则	170
8.1.4	沉井施工步骤	170
8.2	沉井构造	171
8.3	沉井结构设计计算	174
8.3.1	下沉系数计算	174
8.3.2	沉井底节验算	174
8.3.3	沉井井壁计算	175
8.3.4	沉井刃脚验算	177
8.3.5	沉井封底计算	179
8.3.6	沉井底板计算	182
8.3.7	沉井抗浮稳定验算	183
	复习思考题	183
<b>第9章</b>	<b>沉管结构设计计算</b>	<b>184</b>
9.1	沉管结构概述	184
9.2	沉管结构设计	186
9.2.1	沉管结构所受荷载	186
9.2.2	浮力设计	187
9.2.3	结构分析与配筋	188
9.3	接缝管段处理与防水措施	189
9.3.1	变形缝布置与构造	189
9.3.2	止水缝带	190
9.3.3	管段外壁防水措施	191

9.3.4	钢壳与钢板防水	191
9.3.5	卷材防水	192
9.4	管段沉设与水下连接	192
9.4.1	沉设方法与设备	192
9.4.2	水下连接	194
9.5	管段接头	194
9.5.1	刚性接头	195
9.5.2	柔性接头	195
9.6	沉管基础	195
9.6.1	地质条件与沉管基础	195
9.6.2	基础处理	196
9.6.3	软弱土层上的沉管基础	198
	复习思考题	199
<b>第 10 章</b>	<b>地下建筑工程降水与防水设计</b>	<b>200</b>
10.1	地下建筑工程降水与防水重要性	200
10.2	地下水的类型及性质	200
10.2.1	地下水的基本类型	200
10.2.2	地下水的基本性质	202
10.3	地下建筑工程降水设计	202
10.3.1	地下建筑工程降水方法	202
10.3.2	降水工程的平面布置	205
10.3.3	基坑总排水量计算	206
10.3.4	单井最大出水量计算	208
10.3.5	井点间距计算	209
10.3.6	降深与降水预测	209
10.3.7	降水观测	210
10.3.8	井点管拔除	211
10.4	地下建筑工程防水设计	211
10.4.1	设计原则	211
10.4.2	设计要求	212
10.4.3	地下工程防水等级与设防要求	213
10.5	地下建筑防水材料	215

10.5.1	卷材防水层 .....	215
10.5.2	涂料防水层 .....	216
10.5.3	塑料防水板防水层 .....	216
10.5.4	膨润土板(毯)防水层 .....	217
10.6	地下建筑混凝土结构防水 .....	218
10.6.1	变形缝防水 .....	218
10.6.2	施工缝防水构造 .....	219
10.6.3	后浇带防水 .....	220
10.7	地下建筑工程环境保护 .....	221
10.7.1	环境、环境问题及环境保护 .....	221
10.7.2	地下工程环境保护内容 .....	221
10.7.3	地下工程环境保护意义 .....	223
10.7.4	地下工程环境保护方法 .....	223
	复习思考题 .....	226
	参考文献 .....	227

# 绪 论

## 1.1 地下建筑结构概念和特点

地下建筑结构是指在地面以下保留或回填上部地层,在地下空间内修建能够提供某种用途的建筑结构物。

### 1.1.1 工程特点

地下建筑结构设计不同于地上建筑结构设计,其设计的工程特点表现在:

(1) 地下空间内建筑结构替代了原来的地层,建筑结构承受了原本由地层承受的荷载。在设计和施工过程中,要最大限度发挥地层自承载能力,以便控制地下建筑结构的变形、降低工程造价。

(2) 在受载状态下构建地下空间结构物,地层荷载随着施工进度发生变化,因此,设计要考虑最不利的荷载工况。

(3) 作用在地下建筑结构上的地层荷载,应视地层介质的地质情况合理概化确定。对于土体一般可按松散连续体计算;而对岩体,首先查清岩体的结构、构造、节理、裂隙等发育情况,然后确定按连续或非连续介质处理。

(4) 地下水状态对地下建筑结构设计 and 施工影响较大。设计前必须弄清地下水的分布和变化情况,如地下水的静水压力、动水压力、地下水的流向、地下水的水质对结构物的腐蚀影响等。

(5) 地下建筑结构设计要考虑结构物从开始构建到正常使用以及长期运营过程的受力工况,注意合理利用结构反力作用,节省造价。

(6) 在设计阶段获得的地质资料,有可能与实际施工揭露的地质情况不一样,因此,在地下建筑结构施工过程中,应根据施工的实时工况,随时修改设计。

(7) 地下建筑结构的围岩既是荷载的来源,在某些情况下又与结构共同构成承载体系。

(8) 当地下建筑结构的埋置深度足够大时,由于地层的成拱效应,结构所承受的

## 2 地下建筑结构设计

围岩垂直压力总是小于其上覆地层的自重压力。地下结构的荷载与众多的自然和工程因素有关,它们的随机性和时空效应明显而且往往难以量化。

### 1.1.2 设计特点

地下建筑结构设计方法与地上建筑结构设计方法相比,其设计特点有以下几个方面:

#### (1) 基础设计

- ① 深基础的沉降计算要考虑土的回弹再压缩的应力应变特性;
- ② 处于高水位地区的地下工程应考虑基础底板的抗浮问题;
- ③ 厚板基础设计,如筏型基础的板厚设计,应根据建筑荷载和建筑物上部结构状况以及地层的性能,按照上部结构与地基基础协同工作的方法确定其厚度及配筋。

#### (2) 墙板结构设计

地下建筑结构的墙板设计比地上建筑结构要复杂得多,作用在地下建筑结构外墙板上的荷载(作用力)分为垂直荷载(永久荷载和各种活荷载)、水平荷载(施工阶段和使用阶段的土体、水压力以及地震作用力)、变形内力(温度应力和混凝土的收缩应力等),设计工作应根据不同的施工阶段和最后使用阶段,采用最不利的组合和板的边界条件,进行结构设计。

#### (3) 明挖与暗挖结构设计

地下建筑结构的明挖可采用钢筋混凝土预制件或现浇钢筋混凝土结构,而暗挖法施工一般采用现浇钢筋混凝土拱形结构。

#### (4) 变形缝的设置

地下建筑结构中设变形缝最难处理的是防水问题,所以,地下建筑结构一般尽量避免设变形缝。即使在建筑荷载不均匀可能引起建筑物不均匀沉降的情况下,设计上也尽可能不采用沉降缝,而是通过局部加强地基、用整片刚性较大的基础、局部加大基础压力增加沉降或调整施工顺序等来得到整体平衡的设计方法,使沉降协调一致。地下结构环境温差变化较地上结构小,温度伸缩缝间距可放宽,也可以通过采用结构措施来控制温差变形和裂缝,以避免因设置伸缩缝出现的防水难题。

#### (5) 其他特殊要求

地下建筑结构设计还应考虑防水、防腐、防火、防霉等特殊要求的设计。

## 1.2 地下建筑结构分类和形式

根据地下空间的特点,地下建筑结构按用途、几何形状和埋深的分类见表 1-1~表 1-3。

表 1-1 地下建筑结构按用途分类

序号	用途	功能
1	工业民用	住宅、工业厂房等
2	商业娱乐	地下商业城、图书馆等
3	交通运输	隧道、地铁、地下停车场等

续表

序号	用途	功能
4	水利水电	电站输水隧道、农业给排水隧道等
5	市政工程	给水、污水、管路、线路、垃圾填埋等
6	地下仓储	食物、石油及核废料存储等
7	人防军事	人防工事、军事指挥所、地下医院等
8	采矿巷道	矿山运输巷道和开采巷道等
9	其他	其他地下特殊建筑

表 1-2 地下建筑结构按几何形状分类

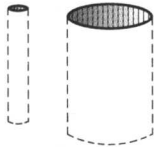
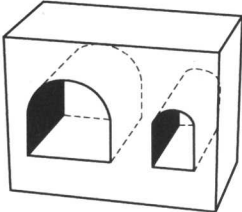
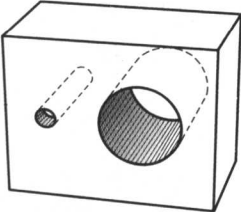
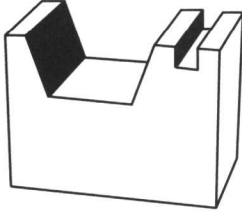
几何形状	施工形式	方向	几何形状	施工形式	方向
	钻孔或竖井	垂直或倾斜		洞室或洞穴	水平或倾斜
	隧道或微型隧道	水平或倾斜或螺旋		堑壕或露天矿	倾斜或垂直

表 1-3 地下建筑结构按埋深分类

名称	埋深范围/m			
	小型结构	中型结构	大型运输系统结构	采矿结构
浅埋	0~2	0~10	0~10	0~100
中深	2~4	10~30	10~50	100~1 000
深埋	>4	>30	>50	>1 000

典型的地下建筑形式如下。

### 1.2.1 居民住宅

窑洞可能是人类使用地下建筑结构最古老的形式。图 1-1 为我国农村地下黄土窑洞。世界上许多地区的宗教和超常规使用的场所也被安排到地下,如图 1-2、图 1-3 所示。图 1-2 为哥伦比亚锡帕基拉(Zipaquira)地下盐洞大教堂入口。图 1-3 为印度建在岩石中的阿楼拉(Ellora)佛教寺庙。

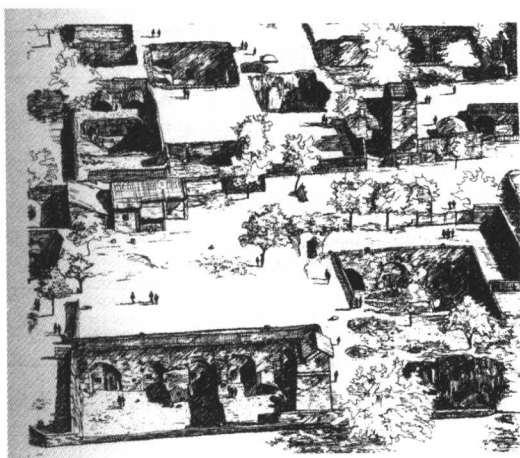


图 1-1 我国农村地下黄土窑洞

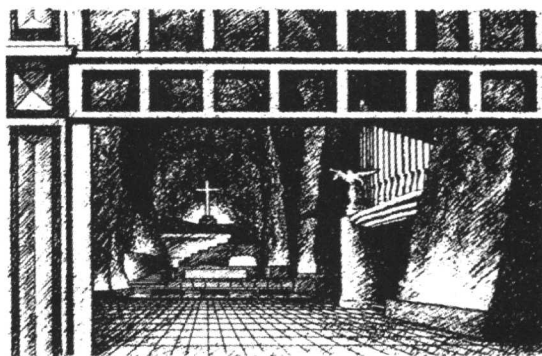


图 1-2 哥伦比亚锡帕基拉地下盐洞大教堂入口(Pinzon-Isaza, 1983年)

### 1.2.2 娱乐场所

地下建筑娱乐场所包括天然洞室探险、旅游观光、运动设施和社区中心。

图 1-4 是前捷克斯洛伐克的旅游小船穿过迈查尔(Machocha)溶洞。

图 1-5 是挪威加尔克(Gjorvik)地下游泳池。

图 1-6 是加拿大蒙特利尔(Montreal)地下步行街网络布置图(部分)。

图 1-7 是法国巴黎亚乐(Les Halles)地下街。



图 1-3 印度建在岩石中的阿楼拉佛教寺庙

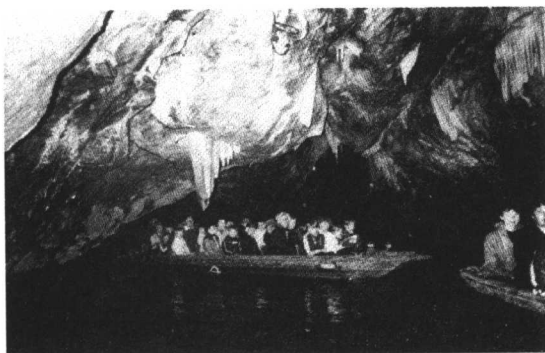


图 1-4 前捷克斯洛伐克的旅游小船穿过迈查尔洞室

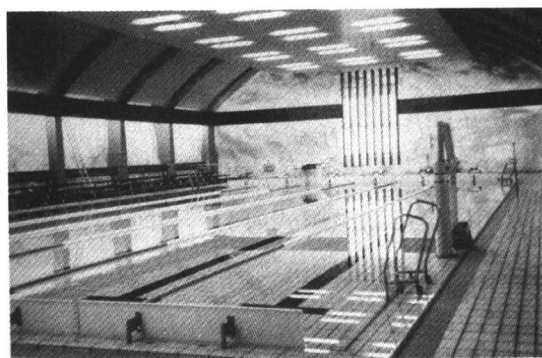


图 1-5 挪威加尔克的地下游泳池



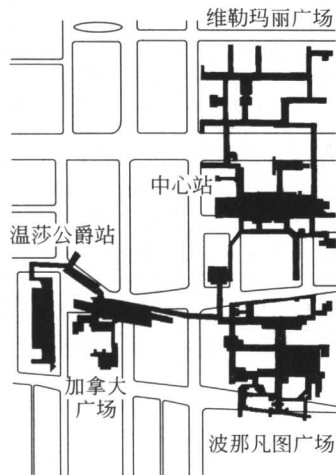


图 1-6 加拿大蒙特利尔地下步行街网络布置图(部分)



图 1-7 法国巴黎亚乐地下街

### 1.2.3 商业与教育设施建筑物

地下商业建筑物包括游览设施、展览馆和图书馆等。如建在哈佛大学校园里的内森·汞撒利·蒲赛(Nathan Mersh Pusg)图书馆(图 1-8); 英国牛津大学的拉德克利夫(Radcliffe)科学图书馆和日本东京七层深的国家国会图书馆。

教育设施建筑在地下建筑中占有重要地位,一般是浅埋明挖式建筑物,以防范火灾,使人容易从安全出口逃脱,如图 1-9、图 1-10。明尼苏达大学的民用与矿产工程技术大楼,就是针对校园地表空间的拥挤和明尼苏达州恶劣的天气而修建的,表明在明尼阿波利斯圣保罗开发地下空间存在巨大潜能。



图 1-8 哈佛大学蒲赛图书馆

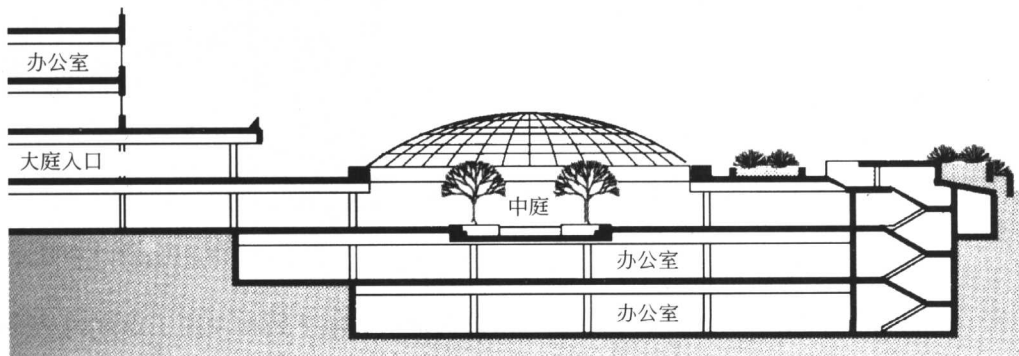


图 1-9 美国内布拉斯加州奥马哈建筑群