

# 隧道工程

---

主 编   ◎  孙宏伟   曹志军   张永福  
副主编   ◎  任庆国   耿  敏   任  昆  
          刘  军   赵丽华   吴会军  
          张吉松

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

---

图书在版编目 ( C I P ) 数据

隧道工程 / 孙宏伟, 曹志军, 张永福主编. —成都:  
西南交通大学出版社, 2021.10  
ISBN 978-7-5643-8344-2

I. ①隧… II. ①孙… ②曹… ③张… III. ①隧道工  
程—高等学校—教材 IV. ①U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 220068 号

---

Suidao Gongcheng

隧道工程

主编 孙宏伟 曹志军 张永福

---

责任编辑 姜锡伟

封面设计 何东琳设计工作室

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川森林印务有限责任公司

---

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 34.25

字数 899 千

版次 2021 年 10 月第 1 版

印次 2021 年 10 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-8344-2

定价 69.00 元

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# P R E F A C E

## 前 言

隧道工程是土木工程（包含铁道与轨道交通工程方向、道路与桥梁工程方向）以及交通工程、交通运输、隧道与地下工程、公路与城市道路工程、铁道工程、市政工程、桥梁工程等专业的专业重要专业课。本书依据高等学校土木工程学科专业指导委员会制定颁布的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》，结合编者多年教学和实践经验，按照培养高级应用型人才的要求进行编写，适用于普通高等学校土木工程专业学生学习，也可作为交通类等相近专业的教学用书，同时对隧道及地下工程技术人员有一定参考价值。

近年来，随着我国高速铁路、公路及城市地铁的快速发展，隧道工程学科取得了长足进步，新技术、新材料、新工艺层出不穷，相关规范进行了较大规模的修订和补充，如《铁路隧道设计规范》（TB 10003—2016）、《铁路隧道设计规范（极限状态法）》（Q/CR 9129—2018）、《铁路隧道工程施工安全技术规程》（TB 10304—2020）、《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》（JTG 3370.1—2018）、《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660—2020）等相继颁布实施。然而由于时间的原因，现有的隧道工程教材未能及时反映全部新规范的修订内容。本书力图吸取近几年来隧道工程学科的新进展，按照铁路隧道、公路隧道相关最新规范和规程进行编写，希望可以为高等学校隧道工程教学先进性略尽绵薄之力。

全书共分 16 章，可供 32 ~ 64 学时的高校本专科教学使用。本书主要内容包括：绪论、隧道工程地质环境与围岩分级、隧道总体设计、隧道主体建筑物、隧道附属建筑物、隧道支护结构计算、隧道施工方法、隧道矿山法施工技术、特殊性岩土和不良地质隧道施工、隧道施工辅助坑道与辅助作业、隧道施工组织与管理、隧道掘进机施工与盾构法、沉管法、隧道运营管理与养护维修、隧道工程的环境保护与防灾救援、隧道工程中 BIM 技术的应用。本书兼顾公路隧道与铁路隧道，涉及铁路隧道部分兼顾高速铁路隧道和普速铁路隧道；既重点介绍隧道工程的设计和施工，也介绍隧道运营养护知识；内容系统性强，可满足设计、施工单位人才培养需要，也可满足运营单位人才培养需要。学时较少或专业性较强的院校可以根据需要选择有关内容讲授。结合现代网络数字化工具，读者可通过扫描二维码获得扩展电子资源，拓展教材的深度和广度，满足课程设计、毕业设计需要。每章后附有思考题与习题，供学习时使用。

本书重视理论联系实践，由大连交通大学等高校联合设计、施工单位共同编写，由孙宏伟（中铁建大桥工程局第一工程公司高级工程师）、曹志军（大连交通大学）、张永福（上海建科工程咨询有限公司高级工程师）任主编，具体编写分工为：第1章由曹志军编写，第2章由任庆国（陕西铁路工程职业技术学院）、曹志军编写，第3章由曹志军、耿敏（大连交通大学）编写，第4章由曹志军、孙宏伟编写，第5、6章由曹志军、张永福编写，第7章由孙宏伟、曹志军编写，第8章由孙宏伟、曹志军、任昆（大连交通大学）编写，第9章由孙宏伟、曹志军编写，第10章由孙宏伟、任昆编写，第11章由孙宏伟、曹志军编写，第12章由刘军（大连交通大学）、任庆国编写，第13章由赵丽华（大连交通大学）编写，第14章由吴会军（大连交通大学）、张永福编写，第15章由耿敏编写，第16章由张吉松（大连交通大学）编写，全书由曹志军统稿。

本书在编写过程中得到了大连交通大学白海峰、赵晶、王海涛、王忠昶等教授的支持和帮助，同时参阅了许多专家、学者在教学、科研、设计和施工中积累的相关资料和优秀教材，在此一并表示感谢！西南交通大学出版社的老师也为本书出版付出了艰辛的劳动，在此致以诚挚的谢意！

由于编者水平所限，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请专家和读者批评指正。

**编者**

2021年6月

## 多媒体资源目录

序号	章	节	资源名称	资源类型/数量	页码
1	第 1 章	1.3	隧道设计与计算理论的发展	图文/1	11
2	第 2 章	2.4	铁路隧道围岩亚分级	图文/1	35
3	第 3 章	3.3	采用作图法确定进洞里程及边仰坡开挖线	图文/1	54
4		3.5	公路隧道限界与内轮廓图	图文/1	77
5		3.5	隧道总体设计实例分析	图文/1	80
6	第 4 章	4.1	隧道的喷锚支护类型和设计参数	图文/1	86
7		4.3	洞口建筑设计及景观设计	图文/1	114
8	第 5 章	5.3	铁路隧道照明设施	图文/1	135
9		5.4	公路隧道主要设备洞室	图文/1	139
10		5.4	公路隧道照明要求	图文/1	141
11		5.4	公路隧道照明设计实例	图文/1	142
12	第 6 章	6.2	偏压隧道围岩松动压力的确定方法	图文/2	164
13		6.2	其他围岩压力理论		
14		6.3	按破损阶段法验算钢筋混凝土构件截面强度	图文/1	177
15		6.3	曲墙式隧道衬砌结构力学法算例	图文/2	178
16		6.3	结构力学模型有限元法算例		
17		6.4	确定支护限制线的方法	图文/1	195
18		6.4	隧道衬砌最小支护抗力的计算	图文/2	200
19		6.4	隧道初期支护验算算例		
20		6.5	经验设计法要点	图文/1	205
21		6.6	洞门计算部位和验算内容	图文/2	208
22		6.6	洞门设计计算实例		
23	第 7 章	7.5	明挖法施工概要	图文/1	248
24	第 8 章	8.2	炸药的性能	图文/1	274
25		8.3	隧道导坑开挖法钻爆设计示例	图文/3	301
26		8.3	隧道台阶开挖法钻爆设计示例		
27		8.3	隧道全断面开挖法钻爆设计示例		

续表

序号	章	节	资源名称	资源类型/数量	页码
28	第 8 章	8.6	铁路隧道、公路隧道必测项目和选测项目	图文/1	338
29		8.6	选测项目的量测方法和数据处理	图文/1	339
30		8.8	拱墙衬砌施工实例	图文/1	365
31		8.8	仰拱与底板施工技术措施	图文/1	366
32	第 9 章	9.3	膨胀性围岩隧道设计实例	图文/1	375
33		9.4	黄土隧道工程实例	图文/1	377
34		9.5	岩溶隧道工程实例	图文/1	382
35		9.7	岩爆隧道工程实例	图文/1	389
36	第 10 章	10.2	漏风系数表	图文/1	408
37		10.2	施工通风摩擦阻力系数表	图文/1	409
38	第 11 章	概述	隧道施工管理	图文/1	426
39		11.2	隧道施工组织设计实例	图文/1	433
40	第 12 章	12.1	掘进机施工管理要点	图文/1	460
41		12.1	掘进机施工隧道实例	图文/1	461
42		12.2	常用盾构机的选型	图文/1	465
43	第 13 章	13.2	沉管隧道设计	图文/1	477
44	第 14 章	14.3	铁路隧道衬砌结构劣化评定	图文/1	494
45		14.3	公路隧道土建结构技术状况评定方法	图文/1	495

# C O N T E N T S

## 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 隧道工程的基本概念和特点 .....	1
1.2 隧道的分类和作用 .....	3
1.3 隧道工程的历史及发展 .....	6
思考题与习题 .....	14
第 2 章 隧道工程地质环境与围岩分级 .....	15
2.1 隧道围岩的概念 .....	15
2.2 围岩的工程性质 .....	15
2.3 围岩的稳定性 .....	21
2.4 围岩分级 .....	24
2.5 隧道工程地质调查与勘测 .....	35
思考题与习题 .....	41
第 3 章 隧道总体设计 .....	42
3.1 隧道设计概述 .....	42
3.2 隧道位置的选择 .....	43
3.3 隧道洞口位置的选定 .....	51
3.4 隧道平纵断面设计 .....	54
3.5 隧道横断面设计 .....	62
思考题与习题 .....	81
第 4 章 隧道主体建筑物 .....	82
4.1 隧道洞身衬砌结构 .....	82

4.2	明洞结构 .....	96
4.3	洞门结构 .....	104
	思考题与习题 .....	114
第 5 章	隧道附属建筑物 .....	115
5.1	隧道防排水建筑物 .....	115
5.2	隧道通风设施 .....	124
5.3	铁路隧道附属构筑物与轨道结构 .....	131
5.4	公路隧道附属建筑物与路基路面 .....	136
	思考题与习题 .....	149
第 6 章	隧道支护结构计算 .....	150
6.1	隧道支护体系的计算模型 .....	150
6.2	围岩压力 .....	155
6.3	结构力学方法 .....	164
6.4	岩体力学方法 .....	178
6.5	信息反馈方法与经验方法 .....	200
6.6	隧道洞门计算 .....	206
	思考题与习题 .....	208
第 7 章	隧道施工方法 .....	209
7.1	隧道施工概述 .....	209
7.2	矿山法 .....	212
7.3	隧道洞身开挖方法 .....	218
7.4	隧道洞口施工方法 .....	237
7.5	明洞施工方法 .....	245
7.6	浅埋暗挖法 .....	248
	思考题与习题 .....	250
第 8 章	隧道矿山法施工技术 .....	252
8.1	围岩预支护与预加固 .....	252



8.2	隧道掘进与爆破基本知识	269
8.3	隧道钻爆开挖技术	285
8.4	装渣、运输与卸渣	307
8.5	初期支护	316
8.6	监控量测与数据分析	337
8.7	隧道防排水施工	350
8.8	二次衬砌	356
	思考题与习题	366
第 9 章	特殊性岩土和不良地质隧道施工	367
9.1	特殊性岩土和不良地质隧道概述	367
9.2	富水断层破碎围岩	368
9.3	膨胀性和挤压性围岩	370
9.4	黄土地质	375
9.5	岩溶地质	377
9.6	煤系地层	382
9.7	高地应力硬岩(岩爆)地质	386
9.8	高地温	389
9.9	隧道施工坍方处理措施	390
	思考题与习题	393
第 10 章	隧道施工辅助坑道与辅助作业	394
10.1	隧道施工的辅助坑道	394
10.2	施工通风与防尘	403
10.3	压缩空气的供应	413
10.4	施工供水与施工排水	417
10.5	施工供电与照明	421
	思考题与习题	425
第 11 章	隧道施工组织与管理	426

11.1	隧道施工准备 .....	426
11.2	隧道施工组织设计 .....	429
11.3	隧道施工场地布置 .....	433
11.4	隧道施工进度计划 .....	436
11.5	隧道施工风险评估与管理 .....	443
	思考题与习题 .....	449
第 12 章	隧道掘进机施工与盾构法 .....	450
12.1	隧道掘进机 (TBM) 施工 .....	450
12.2	盾构法 .....	462
	思考题与习题 .....	474
第 13 章	沉管法 .....	475
13.1	沉管法概述 .....	475
13.2	沉管隧道设计 .....	476
13.3	沉管施工 .....	477
	思考题与习题 .....	485
第 14 章	隧道运营管理与养护维修 .....	486
14.1	运营隧道管理技术 .....	486
14.2	运营隧道检测监测技术 .....	488
14.3	运营隧道综合评价技术 .....	493
14.4	运营隧道病害整治技术 .....	496
	思考题与习题 .....	507
第 15 章	隧道工程的环境保护与防灾救援 .....	508
15.1	隧道工程的环境保护 .....	508
15.2	隧道工程的防灾救援 .....	511
	思考题与习题 .....	521
第 16 章	隧道工程中 BIM 技术的应用 .....	522
16.1	BIM 技术应用现状 .....	522

16.2 BIM 建模平台 .....	525
16.3 BIM 技术在隧道工程中的应用 .....	528
思考题与习题 .....	534
参考文献 .....	535



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 隧道工程的基本概念和特点

### 1. 隧道工程的概念

隧道通常是指修建于地下或山体内部，具有特定使用功能的人工建筑物。其基本特征：一是具有特定的使用功能，供车辆、行人、水流及管线等通过；二是有一定规模，通常两端有出入口，且长度远大于宽度和高度。1970年，国际经济合作与发展组织召开的隧道会议综合了各种因素，对隧道给出的定义是：“以某种用途，在地面下采用任何方法，按规定形状和尺寸修筑的断面积大于 $2\text{ m}^2$ 的洞室”。

隧道及地下工程（tunnel and underground engineering）有两方面的含义：一方面是指从事研究和建造各种隧道及地下工程的规划、勘测、设计、施工和养护的一门应用科学和工程技术，是土木工程的一个分支；另一方面也指在岩体或土层中修建的通道和各种类型的地下建筑物。

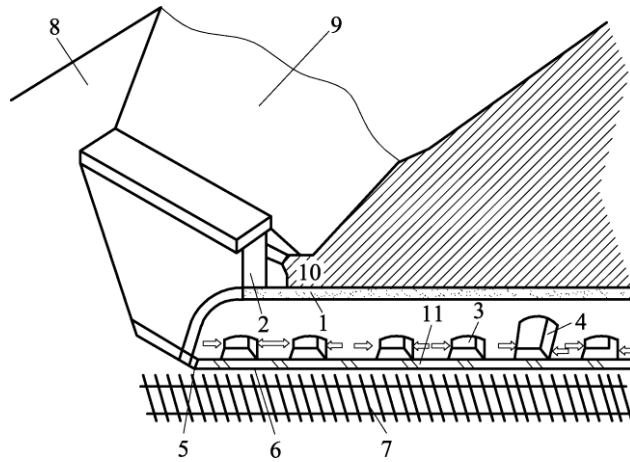
### 2. 隧道的结构组成

隧道是地下工程结构物，修建时，首先要将地层中的一部分岩土体开挖出来形成具有一定形状的地下空间，这种地下空间在没有设置人工支护结构时称为毛洞或坑道，而坑道周围的岩土体称为围岩。如果坑道周围的岩土体很稳定，则可能不需要修建任何人工结构物坑道也能保持自身的形状不发生坍塌；但在大多数情况下，由于地层开挖后，改变了周围岩土体的受力平衡，坑道很容易发生变形、坍塌或有水涌入。为了保证坑道周围地层的稳定，保障交通安全，就需要修建各种人工结构物，包括隧道主体建筑物和隧道附属建筑物。

隧道主体建筑物包括洞身衬砌和洞门建筑两部分，如图 1-1-1 所示为铁路隧道一般构造。洞身衬砌的作用是承受围岩压力、结构自重和其他荷载，防止围岩坍塌、风化和防水等。洞门的作用是防止洞口坍方落石、保持边仰坡的稳定等。在洞门容易坍塌的地段，应接长洞身，或加筑明洞洞口，如图 1-1-2 所示。

隧道附属建筑物的作用是保证隧道运营的安全与舒适，包括为运营管理、维修保养、给水排水、储蓄发电、通风、照明、通信、安全等而修建的构造物。

隧道工程的组成部分，见隧道纵断面（图 1-1-3）和开挖横截面（图 1-1-4）所示。在图 1-1-3 所示的隧道纵断面中，隧道的进出口处称为“洞门”，洞门上方挖掉原有覆盖的地层后的部分称为“仰坡”，仰坡面延长线与隧道底线的交点称为“开挖点”，隧道顶部至地表面的垂直距离称为此处隧道的“覆盖层厚度”，隧道施工作业最前端的横断面称为“开挖工作面”或“掌子面”，隧道开挖后为保证施工过程安全立即施作的人工支护结构称为初期支护，为保证隧道长期使用过程的安全而在初期支护内部再次施作的人工支护结构称为二次衬砌。在图 1-1-4 所示的横截面中，未开挖的隧道横断面上部约 $1/3$ 的部分称为拱部，下部 $1/3$ 的部分称为洞底，中间 $1/3$ 的部分称为洞身，洞身及洞底的对称中心部分称为核心土；开挖后形成的隧道空间，对应于拱部上边缘人工结构物的弧线部分称为拱圈，洞身对应的人工结构物的弧形边缘部分称为侧墙或侧拱，洞底对应的下边人工结构物的弧线部分称为仰拱。



1—衬砌；2—洞门；3—小避车洞；4—大避车洞；5—洞内排水沟；  
6—水沟盖板；7—洞内线路；8—洞口路堑边坡；9—洞口仰坡；  
10—洞门墙顶排水沟；11—避车洞标志。

图 1-1-1 铁路隧道结构组成

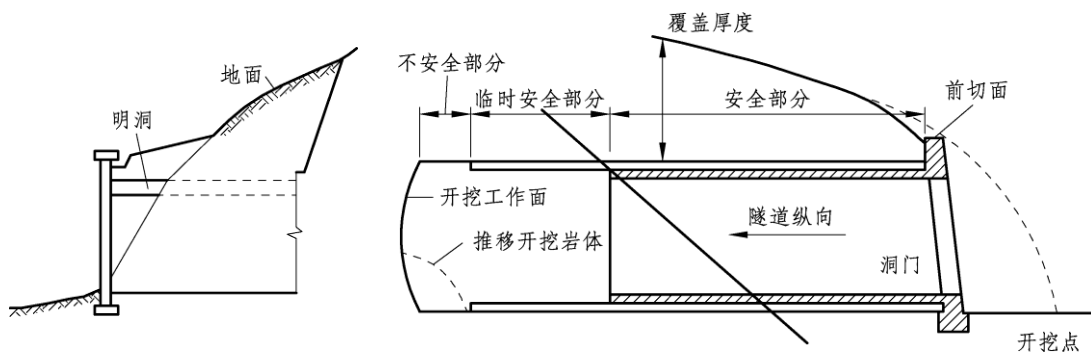


图 1-1-2 明洞

图 1-1-3 隧道纵断面的构成

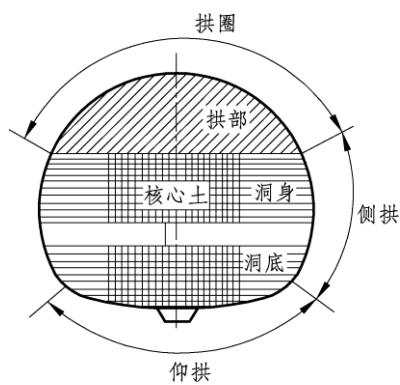


图 1-1-4 隧道开挖横截面

### 3. 隧道工程的特点

隧道工程的特点可归纳如下：

(1) 隧道工程主体结构埋设于地面以下, 因此, 隧道周围区域的工程地质和水文地质条件好坏对隧道施工是否能够顺利进行, 起着重要的甚至是决定性的作用。例如: 瑞士圣哥达铁路阿尔卑斯山隧道遇到高温 ( $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和涌水 ( $660\text{ L/min}$ ), 给施工带来很大的困难, 最后延期两年才完成; 我国在渝怀铁路圆梁山隧道工程中, 虽然进行过长时间大量的地质勘察和预报, 但仍在施工时突发岩溶性爆发喷射型突泥 ( $4\ 200\text{ m}^3$ )、突水 ( $1.45 \times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$ , 持续  $8\text{ min}$ )。又如: 我国兰新铁路乌鞘岭隧道也遇到了强流变地层 (累计变形量为  $50\sim 70\text{ cm}$ ), 实际采用的初期支护参数比原设计参数大很多。因此, 隧道工程必须在勘测阶段做好详细的地质调查和勘探, 尽可能准确地掌握隧道工程范围内的岩层性质、岩体强度、完整程度、地应力场、自稳能力、地下水状态、有害气体和地温状况等资料, 并根据这些资料, 初步设计隧道支护形式和施工方法。此外, 由于地质条件的复杂性和勘探手段的局限性, 在施工中有可能出现没有预见到的特殊地质条件, 相关单位还需采取超前导坑、超前水平钻孔、超前声波探测等技术手段, 进一步查清开挖面前方的地质条件, 以便修改支护参数、施工方法和采取必要的技术措施。

(2) 隧道是一个狭长的建筑物, 它不像桥梁、线路等工程可以将作业全面铺开, 而是只有进口与出口两个工作面 (一般情况如此, 即使开设辅助坑道增设工作面, 也十分有限); 因此, 隧道工程的施工速度比较慢, 工期也比较长, 一些长大隧道往往成为新建线路上起控制性作用的关键工程, 施工单位需要精心组织和管理, 应尽可能多地将施工工序沿隧道纵向展开, 进行平行作业, 并解决好顺序作业与平行作业之间的关系。对于长大隧道, 则可考虑适当设置平行导坑、横洞、斜井或竖井等辅助坑道来增加工作面, 以加快施工进度, 缩短总工期。

(3) 地下工程的施工环境较差, 在施工过程中还可能进一步恶化, 例如爆破产生有害气体、喷射混凝土产生粉尘等, 必须采取有效的措施。

(4) 隧道大多穿越崇山峻岭, 工地一般都位于偏僻的深山峡谷之中, 往往远离已有交通线, 运输不便, 物资供应困难, 这些问题也是规划隧道工程时应当考虑的。

(5) 隧道是一种埋设于地下的大型隐蔽工程, 它建成困难, 建好困难, 一旦建成要更改就更困难。所以, 在隧道规划和设计时, 应认真研究隧道与线路之间的关系, 详细调查隧道区域地质等问题; 在施工过程中, 每一道工序都要严格按有关规定进行, 确保隧道工程质量达到标准要求, 当工期与质量发生冲突时, 应先保证工程质量。

(6) 与桥梁和线路工程相比, 隧道施工可以不受或少受昼夜更替、季节变换、气候变化等自然条件的影响, 可以常年全天候稳定地安排施工。

## 1.2 隧道的分类和作用

隧道种类很多, 可以从不同角度进行分类。按照常规, 从所处的地质条件来分, 隧道可以分为两大类: 一类是岩石隧道或石质隧道; 一类是软土隧道或土质隧道。从所在的位置来分, 隧道可以分为山岭隧道、水底隧道、城市隧道。从埋深的深度来分, 隧道可以分为浅埋隧道、深埋隧道。按施工方法不同, 隧道可分为明挖隧道和暗挖隧道。按断面形式分类, 隧道可分为圆形隧道、马蹄形隧道、矩形隧道等。国际隧道协会 (ITA) 定义的隧道横断面积的大小划分标准如表 1-2-1 所示。根据隧道的长度不同, 公路隧道和铁路隧道又可分为特长隧道、长隧道、中长隧道和短隧道, 如表 1-2-2 所示。根据隧道开挖跨度不同, 公路隧道和铁路隧道又可分为小跨度隧道、中等跨度隧道、大跨度隧道、超大或特大跨度隧道, 如表 1-2-3 所示。铁路隧道又可按容纳的线路数目分为单线隧道、双线隧道、三线隧道、多线隧道等。按用途来分, 隧道

可以分为交通隧道、水工隧道、市政隧道、矿山隧道等。

表 1-2-1 隧道按横断面积分类

隧道横断面积 /m <sup>2</sup>	2~3	3~10	10~50	50~100	>100
隧道种类	极小断面隧道	小断面隧道	中等断面隧道	大断面隧道	特大断面隧道

表 1-2-2 隧道按长度分类

隧道分类	公路隧道长度 $L/m$	铁路隧道长度 $L/m$
特长隧道	$L > 3000$	$L > 10000$
长隧道	$1000 \leq L \leq 3000$	$3000 < L \leq 10000$
中长隧道	$500 < L < 1000$	$500 < L \leq 3000$
短隧道	$L \leq 500$	$L \leq 500$

表 1-2-3 隧道按跨度分类

隧道分类	铁路隧道开挖跨度 $B/m$	公路隧道开挖跨度 $B/m$
小跨度隧道	$5 < B \leq 8.5$	$B < 9$
中跨度隧道	$8.5 < B \leq 12$	$9 \leq B < 14$
大跨度隧道	$12 < B \leq 14$	$14 \leq B < 18$
特大(超大)跨度隧道	$B > 14$	$B > 18$

## 1. 交通隧道

交通隧道是隧道中数量最多的一种。它的作用是提供交通运输和人行的通道，以满足交通线路畅通的要求，一般包括以下几种：

### (1) 铁路隧道。

铁路隧道是专供列车行驶的隧道。铁路穿越山岭地区时，往往会遇到高程障碍，而铁路限坡平缓，无法拔起需要的高度，同时限于地形又无法绕避，这时，开挖隧道直接穿山而过最为合理。它既可使线路顺直，避免许多无谓的展线，使线路缩短；又可以减小坡度，使运营条件得以改善。所以，在山区铁路线上修建隧道的范例是很多的。川黔线凉风垭隧道、成昆线沙木拉达隧道、大秦线军都山隧道、西康线秦岭隧道、朔黄线长梁山隧道以及兰新复线乌鞘岭隧道等都是著名的越岭隧道，而成昆线的关村坝隧道、衡广复线大瑶山隧道等都是河谷地段截弯取直的良好范例。目前，我国西部山区的铁路中隧道长度占线路总延长的比例普遍较高，多条线路超过 50%，由此可见山区铁路隧道的作用了。

铁路隧道按照列车运行速度和运输功能的不同，又可分为客货混行的普通铁路隧道（行车速度在 160 km/h 以下）、高速铁路隧道和重载铁路隧道。

### (2) 公路隧道。

公路隧道是专供汽车运输行驶的通道。以往的山区公路为节省工程造价，常常选择盘山绕行，宁愿绕行一些距离，而不愿修建费用高昂的隧道。因此，过去公路隧道为数不多。社会经济的迅速发展，对道路技术标准提出了更高的要求，要求线路顺直、平缓、路面宽敞等。高速



公路的大量出现，在穿越山区时采用了大量的隧道方案。此外，在城市附近，为避免平面交叉，利于快速行车，也常采用隧道方案。公路隧道在改善公路技术标准、提高运输能力、减少交通事故等方面起到了重要的作用。我国修建的秦岭终南山隧道长 18.02 km，它的建成将翻越秦岭的道路缩短了约 60 km，时间减少 2 h 以上。

### （3）城市地铁隧道。

城市地铁隧道是修建于城市地层中，为解决城市交通问题的列车运输通道。国内外实践经验表明，城市地铁是在大城市中解决交通拥挤的有效途径之一。由于能大量、快速、安全、准时输送乘客，城市地铁成为大城市解决交通矛盾的有力手段，在战时，还可以起到人防的功能。我国北京、上海、广州等城市已经建成的地下轨道交通系统，为改善城市的交通状况，减少交通事故起到了重要的作用。截至 2021 年 5 月，我国（不含港澳台）共有 45 个城市开通运营城市轨道交通线路 237 条，运营里程 7 747 km；地铁线路长度超过 100 km 的城市有 22 座。可见城市地铁对保障城市正常运行，满足社会公众出行需要发挥了重要作用。

### （4）水底隧道。

水底隧道是修建于江、河、湖、海下，供汽车和火车运输行驶的通道。当交通线路跨越江、河、湖、海时，可以选择的方案有架桥、轮渡和隧道，但架桥受净空的限制，轮渡限制通行量，如果这些矛盾得不到有效的解决，水底隧道是一种很好的方案。其优点是不受气候影响，不影响通航，引道占地少，不暴露重要交通设施目标等，越来越受到人们青睐。我国在上海跨越黄浦江、广州穿越珠江、港珠澳大桥工程的通航水域、深圳至中山通道的通航水域等都修建了跨江跨海的水底隧道。其缺点是造价较高。

### （5）航运隧道。

航运隧道是专供轮船运输行驶而修建的通道。当运河需要穿越分水岭时，克服高程的有力手段是修建运河隧道，其优点是缩短航程，减少运营费用，河道顺直，航运条件大大改善。

### （6）人行隧道。

人行隧道是专供行人通过的通道。人行隧道一般修建于城市人口密集区穿越街道或跨越铁路、公路等行人众多、往来交错、车辆密集、偶有不慎便会发生交通事故的地点。人行隧道的作用是缓解地面交通压力，减少交通事故，保障行人安全。

## 2. 水工隧道

水工隧道，也称水工隧洞，是水利工程和水力发电枢纽的重要组成部分。水工隧道包括：

（1）引水隧道。其作用是进行水资源的调动或把水引入水电站的发电机组，产生动力。引水隧道按照水在隧道中的充满状态又分为有压隧道和无压隧道：有压隧道因隧道内部充满水而使隧道衬砌既承受围岩压力又承受向外的水压力；无压隧道因隧道内部未充满水，因此隧道衬砌过水部分既承受围岩压力又承受向外的水压力，不过水部分只承受围岩压力。

（2）排水隧道（尾水隧道）。它是把发电机组排出的废水（尾水）送出去的隧道。

（3）导流隧道或泄洪隧道。它是水利工程中的一个重要组成部分，由它疏导水流并在溢洪道流量超限后起泄洪作用。

（4）排沙隧道。它用来冲刷水库中淤积的泥沙，把泥沙裹带运出水库，有时也用来放空水库里的水，以便进行库身检查或修理建筑物。

## 3. 市政隧道

市政隧道是城市中为安置各种不同市政设施而修建的地下孔道。由于城市不断发展，工商业日趋繁荣，人民生活水平逐步提高，对公用事业的要求也越来越高。许多城市不得不利用地下空间，把市政设施安置在地下，这样既可占用地面面积，又不至扰乱高空位置和影响市容。按照用途，市政隧道可有如下几种分类。

(1) 给水隧道。给水隧道是用于城市供水的隧道。

(2) 污水隧道（排水隧道）。污水隧道是为城市污水排送系统修建的隧道。城市污水除部分污染严重的需要引入全污水处理厂以净化返用外，大部分的污水要排放到城市以外的污水处理系统。这都需要有地下的排污隧道。这种隧道可能是本身导流排送，此时隧道的形状多采用卵形；也可能是在孔道中安放排污管，由管道排污。一般排污隧道的进口处，多设有拦渣隔栅，把漂浮的杂物拦在隧道之外，使其不致涌入造成堵塞。

(3) 管路隧道。管路隧道是为城市能源供给（煤气、暖气、热水等）的管路系统修建的隧道，需进行防漏及保温措施处理，多半沿街道两侧敷设。

(4) 线路隧道。线路隧道是为各种线路而修建的隧道。在城市中，为了保证电力电缆和通信电缆不被人们的活动所损伤破坏，避免悬挂于高空中影响市容景观，一般将其放置于地下孔道中。

在城市现代化进程中，按城市的布局 and 规划，可将以上四种具有共性的市政隧道建成一个共用隧道，称为“共同管沟”或“地下综合管廊”，是现代城市基础设施规划和发展的方向。

(5) 人防隧道。人防隧道是为战时的防空目的而修建的防空避难隧道。人防工程除应设有排水、通风、照明和通信设备以外，还应考虑储备饮水、粮食和必要的救护设备，在洞口处还需设置各种防爆装置，以阻止冲击波的侵入。同时，人防隧道正要做到多口联通、互相贯穿，在紧急时刻，可以随时找到出口。

#### 4. 矿山隧道

矿山隧道又称为矿山坑道或巷道，是用于穿越地层通向矿床，以便开采矿体的隧道。矿山隧道有：

(1) 运输巷道。运输巷道是向山体开凿隧道通到矿床，并逐步开辟巷道，通往各个开采面的通道。前者称为主巷道，是地下矿区的主要出入口和主要的运输干道；后者分布如树枝状，分向各个采掘面。此种巷道多用临时支撑，仅供作业人员进行开采工作时使用。

(2) 给水隧道。给水隧道是为送入清洁水为采掘机械使用，并将废水及积水排出洞外的通道。

(3) 通风隧道。矿山地下巷道穿过许多地层，将会有多种地下气体涌入巷道中，再加上采掘机械不断排出废气，还有工作人员呼出气体，使得巷道内空气变得污浊。如果地下气体含有瓦斯，在含量达到一定浓度后，将会发生危险，轻则致人窒息，重则引起爆炸，必须及时把有害气体排除出去，因此需要设置通风巷道，用通风机把污浊空气抽排出去，并把新鲜空气补充进来。

### 1.3 隧道工程的历史及发展

#### 1.3.1 世界隧道工程发展简况

隧道的产生和发展，是与人类文明的进程相呼应的，大致可以分为如下四个时代：

(1) 原始时代：人类的出现到公元前 3000 年的新石器时代，是人类利用隧道来防御自然

威胁的穴居时代。人们利用天然洞穴作为栖身之所，并且逐步会在平原地区自己挖掘类似天然洞穴的窑洞来居住。此时的隧道是用兽骨、石器等工具开挖，修筑在可以自身稳定而无须支撑的地层中的。

(2) 远古时代：从公元前 3000 年到 5 世纪，即所谓的文明黎明时代，是为生活和军事防御目的而利用隧道的时代。这个时代隧道的开发技术形成了现代隧道开发技术的基础。如公元前 2180 年至公元前 2160 年，在古巴比伦城幼发拉底河下面修筑的人行隧道，是迄今已知的最早用于交通的隧道，为砖砌隧道，长 1 km，3.6 m×4.5 m 断面，用明挖法修建。公元前后的古罗马时代，利用棚架支护和卷扬机提升土石，开挖了数量较多的军用隧道和水工隧道，开挖方法是用火烧开挖面，烧热后急速泼冷水使岩石开裂而形成。

(3) 中世纪时代：约从 5 世纪到 14 世纪的 1000 年左右。这个时期正是欧洲文明的低潮期，建设技术发展缓慢，隧道技术没有显著的进步，但由于对地下铜、铁等矿产资源的需要，开始了矿石开采。如我国在公元 1271—1368 年就有深达数百米的盐井。

(4) 近代和现代：从 15 世纪以后的产业革命开始。这个时期由于炸药的发明和应用，加速了隧道技术的发展。如有益矿物的开采，灌溉渠、运河、公路和铁路隧道的修建，以及随着城市的发展修建地下铁道、上下水道等，使得隧道的技术得到极大的发展，其应用范围迅速扩大。

近代隧道兴起于运河时代，从 17 世纪起，欧洲陆续修建了许多运河隧道，如法国的马尔派斯运河隧道，建于 1678—1681 年，长 157 m，可能是最早用火药开凿的航运隧道。第一座用于现代交通的水底隧道是 1807 年兴建的伦敦泰晤士河下公路隧道；1818 年布鲁内尔发明了盾构，1896 年英国人格雷特黑德第一次用压缩空气和盾构修筑水底隧道。

1820 年后，铁路成为新的运输手段，1827 年在英国、1837 年在法国先后开始修建铁路隧道，之后欧洲各国、美国、日本陆续开始修建铁路，1895—1906 年出现了长达 19.73km 的穿越阿尔卑斯山的辛普伦铁路隧道，最先使用凿岩机和硝酸甘油炸药开挖岩石隧道。目前最长的铁路隧道是 2016 年 12 月建成通车的瑞士新圣哥达隧道，长 57 km。

1927 年，位于纽约哈德逊河底的荷兰隧道建成，是最早的较为完善的水底隧道。目前，世界最长的水底隧道是 1984 年建成的日本青函海底隧道，长达 53 850 m，海底部分就有 23 300 m；此外，比较著名的还有 1991 年建成通车的英法海底隧道（长 50.5 km）和 1997 年开放的日本东京湾水隧道（长 15.1 km）。

19 世纪初，欧洲的法国、意大利、瑞士等国就已在山区修建公路隧道，之后由于运输量急剧增长，随之出现了不少比较著名的公路隧道，如跨越法国—意大利边境的勃朗峰隧道（长 111.7 km，1965 年）、奥地利的阿尔贝格公路隧道（长 14.0 km，1978 年）、瑞士的圣哥达公路隧道（长 16.3 km，1980 年）。2016 年投入运营的挪威西部的拉达尔隧道长 24.5 km，是目前世界最长的公路隧道。

随着城市的发展，城市交通日益繁忙，车辆拥堵严重，加之新的开挖工具盾构的出现，地下铁路随之兴起。1863 年，英国伦敦修筑了第一条地下铁道。截至 20 世纪末，全世界共有 43 个国家的 117 座城市建有地铁，总运营里程接近 6000 km。2014 年，地铁线路长度超过 200 km 的城市有 13 座，其中纽约和伦敦均超过 400 km，巴黎超过 200 km，莫斯科和东京超过 300 km，而且把地上、地下的交通连接起来，成为城市中的立体交通网。地下铁道的建筑，也一天比一天规模宏大、雄伟壮观。德国慕尼黑地下铁道的卡尔广场车站建筑就上下深达六层。第一层是人行通道及商店餐厅；第二层作为货运及仓库；第三、四层为地下停车场，可同时容纳 800 辆汽车；第五、六层才是车站集散厅及车道。目前世界各国的地下铁道大多已用电脑指挥和控制

列车运行。速度最高的是旧金山的地下铁道，平均速度为 80 km/h，最高可达 120 km/h。客运量最大的是莫斯科地下铁道，1977 年统计年运送 21.6 亿人次。

1964 年日本铁路新干线的运营，标志着铁路高速技术进入实用化阶段。高速铁路的发展，必然伴随大量隧道工程的出现，这主要是因为线路的标准必须大大提高，如最小曲线半径在多数情况下都需大于 4000 m，线路坡度必须比较平缓等。日本新干线中，隧道的工程量便相当可观。北陆新干线轻井—长野段，长 83.6 km，隧道约占 44%；东北新干线宫内—八户段，长 60.0 km，隧道约占 85%；九州新干线八代—西鹿儿岛段，长 211.2 km，隧道约占 70%。在这些线路上也出现了几座长隧道，如岩手隧道长 25.8 km，紫尾山隧道长 10.0 km 等。德国于 20 世纪 80 年代初期动工修建的汉诺威兹堡新干线，长 327 km，隧道总延长达 118 km，占线路长度的 37%。另一条从曼海姆到斯图加特的线路，长 100 km，隧道约占 30%。目前世界上超过 20 km 的铁路隧道、公路隧道已有几十座。

自 1974 年起，国际隧道协会成立，每年召开一次年会，各国隧道技术有了一个交流平台，可以及时交流有关隧道的各种问题。历经长期的工程建设活动，隧道及地下工程学科已经具备相对独立的知识体系，包括隧道力学理论、围岩稳定性评价及分级方法、新奥法原理，挪威法、新意法等修建技术方法，以及相对独立的隧道设计、施工、装备、材料、养护维修技术体系。

目前，许多国家都在进行海峡隧道的研究和筹建，如直布罗陀海峡隧道（西班牙—摩洛哥）、连接意大利本土和西西里岛的墨西拿海峡隧道、连接欧亚大陆的土耳其伊斯坦布尔（博斯普鲁斯）海峡隧道等。

## 1.3.2 我国隧道工程的发展

### 1. 我国隧道工程的历史

在我国，用于矿物开采、水工建造、交通运输、人居和仓储的隧道、井巷、地下洞室历史悠久。我国最早有文字记载的地下人工建筑物，出现在东周初期（约公元前 700 年），《左传》中有“阙地及泉，隧而相见”的记载。东汉明帝永平九年（公元 66 年）的石门隧道，位于今陕西省汉中市褒谷口内，是我国最早采用“火烧水浇”开凿的穿山通车隧道。修建于隋朝洛阳的含嘉仓，历经隋、唐、宋三个王朝，沿用 500 年。安徽亳县城内的古地下道，建于宋末元初（约 13 世纪），是我国最早的城市地下通道。辽宁绥中长城隧道，是明洪武十四年（1381 年）开凿的一条从长城内侧校军场秘密直抵关外的山中暗道，长 1027 m，内设 29 个大小岩洞，可藏兵 2000 余人。这些隧道建造技术原始，规模也很有限，现仅有少量遗迹存在。

20 世纪中叶以前，中国的隧道主要集中在铁路上。有关资料显示，从 1874 年修建第一条上海至吴淞的窄轨铁路起，至 1911 年清王朝灭亡的 37 年间，共修建铁路隧道 238 座，总长大约 42 km，其中 1km 以上的隧道只有 4 座；自 1911 年 10 月到 1949 年 10 月新中国成立之前的 38 年间，共修建铁路隧道 427 座，总长大约 114km，大部分分布在东北地区的铁路线上，其中长度超过 1km 的隧道有 18 座。1890 年修建的台湾基隆至新竹铁路狮球岭隧道是我国的第一座铁路隧道，此后在京汉、中东等铁路上修建了一些隧道。1908 年，京张铁路关沟段建成了 4 座隧道，这是我国通过自己的技术力量修建的第一批隧道，其中最著名的是由我国著名工程师詹天佑主持建造的长 1091 m 的八达岭隧道。1937—1942 年修建了近代最长隧道杜草隧道，长 3.85 km，采用上下导坑法施工，使用混凝土衬砌。公路隧道在新中国成立之前仅有几十座，最长不超过 200 m，且大部分为无衬砌的单车道隧道。这一时期隧道主要采用人力建造，机具

非常简单，施工速度慢，既没有固定的专业技术队伍，也没有完整的设计、施工规范，建成的隧道，长度超过 3 km 的只有 3 座。

## 2. 新中国隧道工程的发展

### (1) 我国铁路隧道发展历程。

新中国成立后，自 20 世纪 50 年代起，开始大规模铁路建设，需要修建大量的隧道工程。新中国十分重视隧道建设专业队伍建设，并逐步制定了铁路隧道勘测设计、施工规范，编制了一些隧道建筑标准设计图。施工由以前的人力为主转变为采用中小型机械施工，施工方法以导坑开挖为主，施工水平整体提升，规模质量逐步提高，如 20 世纪 50 年代建成的宝成线上的秦岭隧道（长 2 363 m），在施工中首次使用了风动凿岩机和轨行式矿车，成为我国隧道修建中从人力开挖过渡到机械开挖的标志。20 世纪 60 年代建成川黔线上的凉风垭隧道，长度达 4270 m，是当时隧道建设水平的代表。20 世纪 70 年代，由于铁路路网迅速扩展，我国完成了较多的隧道工程，在规模、速度和数量上，又大大超过五六十年代，是中国铁路隧道建设史上建成隧道较多的时期。同时，随着平面控制测量技术的发展，以及航测遥感和工程物探技术的应用，隧道勘测设计技术逐步成熟，施工开始采用全断面开挖，研究试用光面爆破，对整治岩溶、岩爆、坍塌、涌水和瓦斯等也逐步积累了经验，使隧道修建技术得到了迅速提高，山区铁路长隧道显著增多，如 70 年代建成的京原线上的驿马岭隧道，长 7 032 m。

20 世纪 80 年代以来，铁路隧道、公路隧道、输水隧道、城市地铁等各种隧道大量建设，隧道修建技术从传统的矿山法转向采用以新奥法原则为指导的一系列新技术、新设备。隧道施工进入大型机械配套的时期，开始整体追赶世界先进水平。以衡广复线上的大瑶山隧道为代表，我国攻克了双线特长隧道设计和施工中的难题，解决了双线长隧道施工大型机械配套问题，应用新奥法原则指导大断面和全断面隧道施工取得了成功，长度达到了 14 295 m，最大埋深约 910 m，是我国第一座长度超过 10 km 的特长隧道。单线铁路施工技术也不断刷新纪录，米花岭隧道取得了双口月成洞 769 m 的成绩，单口月成洞则最高达 515.9 m。

同一时期，北京地铁复兴门折返线引入军都山隧道在洪积、冲积地层浅埋矿山法施工的经验，逐渐开始了在城市地铁中采用浅埋矿山法修建区间隧道及各种跨度车站的新时代。由于解决了在城市环境条件下不拆迁、不扰民的问题，大大加快了施工进度，因此这一方法在 1987 年被定名为“浅埋暗挖法”。在明挖法、盾构法不适应的条件下，浅埋暗挖法显示出了巨大的优越性。根据多年的工程实践，目前浅埋暗挖法已有自己全套的设计、施工理论，被国内外所采用。

到 90 年代，铁路干线隧道工程更多，工程地质条件极其复杂，施工方法逐渐呈现多样性，开挖方法由单线隧道的台阶法演变为采用单侧壁导坑、双侧壁导坑法、中隔壁法、交叉中隔壁法等修建三线、四线等大跨度的铁路隧道及车站。1993 年，我国成功采用沉管法修建了穿越珠江的公铁两用隧道，标志着中国内地沉管法建造技术的成熟。另有许多著名的隧道，如南昆线米花岭隧道和家竹箐隧道、西康线秦岭 I 线隧道、京九线五指山隧道以及朔黄铁路长梁山隧道等均在这一时期建成。全长 18 km 的西康线秦岭隧道 I 线隧道，采用技术先进的敞开式全断面 TBM（tunnel boring machine，隧道掘进机）建成，标志着我国铁路隧道机械化施工跨入了世界隧道建造的先进行列，整体上代表了我国当时铁路隧道工程的新水平。从此，铁路隧道由穿山越岭发展到穿越江河湖海和城镇都市。截至 20 世纪末，我国运营铁路隧道总数达 5 000 座，总延长 3 000 km。

进入 21 世纪，中国铁路进入新一轮的发展高峰，许多隧道工程向过去的隧道修建禁区发

展，出现了大量岩溶区高水压隧道、穿越煤层的高瓦斯地区隧道、高海拔多年冻土隧道、长距离跨海隧道、长度超过 30 km 的铁路隧道，高速铁路隧道从 2008 年合宁铁路（南京南至合肥南）第一条有隧道的高速铁路开始也大幅增加，隧道的建设标准也越来越高。特别是近 15 年来，中国铁路隧道发展极为迅速，共建成铁路隧道 9 270 座，总长约 15 321 km（占中国铁路隧道总长度的 78%）。这一阶段重要的隧道包括乌鞘岭隧道、太行山隧道、狮子洋隧道（长 10.800 km，单线双洞，是国内第一座水下及高速铁路盾构隧道，也是世界上速度目标值最高的水下隧道，2010 年建成）、新关角隧道（目前国内建成最长的铁路隧道，2014 年建成）、高黎贡山隧道（目前国内在建最长的铁路隧道，计划 2022 年建成）。

据统计，从 1980 年至 2020 年的 40 年间，中国共建成隧道 12 412 座，总长约 17 621 km（占中国铁路隧道总长度的 90%）。截至 2020 年底，我国投入运营的铁路隧道共有 16 798 座，总长约 19 630 km。投入运营的特长铁路隧道共 209 座，总长 2 811 km。其中，长度在 20 km 以上的特长铁路隧道 11 座，总长 262 km。2020 年，新增开通运营线路特长铁路隧道 39 座，总长 498 km。在建特长铁路隧道 116 座，总长 1 675 km，其中长度在 20 km 以上的特长铁路隧道 10 座，长 276 km。我国已经完全掌握 20 km 级隧道的修建技术，正在向着修建 30 km 级以上特长隧道的水平发展。

### （2）我国公路隧道发展历程。

我国公路隧道建设起步较晚，20 世纪 80 年代后期才开始大规模兴建高速公路和高速公路隧道，90 年代开通的成渝高速公路中的中梁山隧道，把我国公路隧道单洞长度提高到了 3 000 m 以上，并在处理通风、坍方、瓦斯、地下水和营运管理与交通监控技术等方面取得了突破性进展。

进入 21 世纪，我国公路网交通逐渐向崇山峻岭穿越，向离岸深水延伸，呈加速发展态势。现代中国公路建设中，除钻爆法外，已广泛采用明挖法、盾构法和沉管法等挖掘隧道的方式穿越山岭、河流和海底，以缩短线路里程，提高道路技术标准，如厦门翔安海底隧道采用钻爆法，上海长江隧道和武汉长江隧道采用盾构法，上海外环越江隧道和港珠澳大桥隧道采用沉管法。随着交通和城市建设的不断发展，我国出现了不少大跨度隧道，还建成了大量连拱隧道、小净距隧道及隧道大型地下立交工程等复杂结构的隧道。我国建成的深圳雅宝隧道、重庆白鹤嘴隧道和广州龙头山隧道等都是双洞八车道隧道。

近年来，我国公路特长、长隧道发展迅速。2010 年底，全国公路隧道为 7 384 座，总长 512.26 万米，其中特长隧道 265 座、长 113.80 万米，长隧道 1 218 座、202.08 万米。到 2019 年，我国公路隧道数量为 19 067 座，总长度达到 1 896.66 万米，其中公路特长隧道数量增长至 1 175 座，长度达到 521.75 万米，长隧道数量达到 4 784 座、826.31 万米。在世界上已建成的 10 km 以上的约 30 座公路隧道中，我国占了一半，另外我国在建的 10 km 以上的公路隧道还有 30 座，建设规模世界第一。

截至 2020 年，中国已建成通车的最长的公路隧道是位于陕西省的秦岭终南山隧道，全长 18 020 m，双洞四车道，于 2007 年 1 月 20 日正式通车。同时，该隧道也是世界第三长公路隧道、世界上最长的双洞山岭公路隧道以及亚洲最长的山岭公路隧道。中国正在建设中的最长的公路隧道是位于新疆维吾尔自治区的天山胜利隧道，全长 22 035 m，双洞四车道，计划 2025 年建成通车。我国已成为世界上隧道工程数量最多、规模最大、发展速度最快的国家。

### （3）我国隧道工程技术现状。

伴随重大工程的修建，我国隧道及地下工程修建技术取得了长足发展。在勘察技术方面，

随着高分航遥等先进勘察手段的逐步引入应用,以及无人机勘察技术水平的快速提升,在隧道工程勘察技术方面逐渐形成了“空、天、地”三位一体的综合勘察技术,解决了复杂艰险山区传统勘察方式难以实现“上山到顶,下沟到底”的难题。三臂液压凿岩台车、三臂拱架安装机、湿喷机械手、全液压自行式仰拱栈桥、新型隧道衬砌台车、衬砌自动养护台车等一系列隧道专业设备的开发与应用,推进了我国隧道施工机械化发展,明确了智能化的发展方向。港珠澳大桥建成通车,标志着我国沉管隧道修建技术达到国际领先水平。现代信息技术的积累与突破性发展,为隧道行业构建大数据平台奠定了技术基础,我国开发完成多个基于多维海量信息构建的隧道大数据平台,利用平台深挖掘与自学习能力,提高工程决策水平,促进隧道智能化建设的发展。世界级难度水电巨型工程的成功建设,取得了一系列研究成果,我国水电领域的隧道和地下工程技术已居于世界领先水平。随着更大量的铁路与公路隧道、城市地铁的建设,毫无疑问,我国正在由世界隧道大国步入世界隧道建造技术强国的行列。隧道设计与计算理论的发展可扫描二维码了解。



隧道设计与  
计算理论的  
发展

### 1.3.3 隧道工程发展展望

隧道及地下工程是现代公路、铁路、城市地铁、水电工程、城市地下空间建设中的重要组成部分,在现代综合交通运输体系建设、地下空间开发利用中发挥着越来越重要的作用。近年来,随着我国社会与经济的飞速发展和交通强国战略目标的明确提出,我国的交通建设由规模速度型发展转向质量效率型发展,在综合交通运输基础设施加速成网、交通运输业加快转型升级、现代治理能力持续提升、现代综合交通运输体系加快构建的黄金机遇期,隧道及地下工程领域在得到了全面发展的同时,也在一路前行中不断迎接新的机遇和挑战。

#### (1) 高海拔、高烈度地震区、大埋深超长隧道大规模建设。

随着中国经济的发展,西部地区铁路、公路建设规模逐年加大,高海拔、高烈度地震区、大埋深超长隧道将越来越多,特别是刚刚开工建设的川藏铁路雅安至林芝段,隧线比高达82%,分布有72座隧道,其中:长度在20 km以上的隧道有16座,长度在30 km以上的隧道有6座,最长隧道超过40 km;埋深超过1 000 m的隧道段长610 km,且处于印度洋板块与欧亚板块强烈挤压的“喜马拉雅东构造结”,新构造运动强烈,穿越新构造板块活动强烈的横断山区,地质条件极端复杂,隧道建设将要面临的硬岩岩爆、软岩大变形、高地温、活动断裂、超高压富水断裂等不良地质问题十分突出。目前,我国虽然在拉林、成兰等艰险山区铁路隧道建设中积累了一定的工程经验,但在川藏铁路建设中遇到的诸多世界级难题必然会超出认知,特别需要广大隧道建设者齐心协力,坚持科技创新,攻坚克难。

在全国范围内,近年来建设的各类交通路网中隧道占比越来越高,而且持续向着超长隧道发展。除前述已建成和在建的超长隧道外,我国近期规划特长铁路隧道340座,总长5 078 km,其中长度在20 km以上的特长铁路隧道37座、长999 km。可见超长隧道修建技术水平既是隧道技术发展的必然方向,也是实现交通强国战略的客观要求。

超长山岭隧道一般都穿越人迹罕至的地区,有大埋深的特点,隧道建设将要面临的硬岩岩爆、软岩大变形、高地温、活动断裂、超高压富水断裂等不良地质问题十分突出,给超长山岭隧道勘察、设计、施工、运维带来了多方面技术挑战。在高原、高寒地区修建长大隧道面临的技术挑战还包括:生态环境保护的巨大挑战,保护建设人员职业健康的重大挑战,高效低耗新能源装备的挑战,工程品质受制因素多的挑战。

### (2) 修建跨海或越江隧道将成为必然发展趋势。

我国自 1981 年在上海的黄浦江建成第一座水下隧道以来，已先后应用不同工法建成了数十座水底隧道，如港珠澳大桥沉管隧道等，代表着我国水底隧道的施工技术水平。随着珠江口水底隧道、汕头湾海底隧道、甬舟海底隧道的开工建设，以及琼州海峡、渤海海峡、台湾海峡跨海通道规划研究的逐步深入，超长深水跨海铁路隧道的建造技术亟须取得突破。地震防御、隧道长度急剧增长和过高的水压、长距离水上通风等将这些隧道的修建难度推向了一个顶峰，现有的修建技术必须进行全方位的提升才能满足建设需求。

与此同时，一种新概念的水中悬浮隧道吸引了世人的关注和研究。2016 年，挪威耗资 250 亿美元打造的松恩海峡水中悬浮隧道正式开建，预计将于 2035 年完工。水中悬浮隧道，又称阿基米德桥，它既不是搁置于地层上，也不是从地层中穿过，而是依靠本身的结构浮力及必要的支撑或固定系统来保持悬浮于水中。因其具有单位长度造价低、对环境整体影响小、受天气影响小、过往车辆能耗低等优势，建设水中悬浮隧道逐渐成为跨越大面积水域交通工程的热门候选方案，挪威、意大利、美国、日本、中国等对此均有不同程度的研究。采用这种方案正在进行规划设计的工程实例主要有连接西西里岛至意大利本土的墨西拿海峡隧道和挪威赫格峡湾水下隧道等。

### (3) 发展新型隧道，提高列车运行速度。

经过多年的积累，我国已掌握了高铁核心技术，能保证时速 300 km 下列车的安全运行（若不计运营成本，时速甚至可以超过 400 km）。在世界范围内，德国城际高速铁路系统（ICE）、日本新干线以及法国高速列车（TGV）均可达到这个速度量级，并已经向更高运行速度发展。由此给我国在高速和超高速铁路发展方面带来了巨大的挑战，提供了技术前行的压力与动力，需要创新思维，发展新型隧道。

目前，从我国多条高速铁路勘察设计来看，隧桥比已占线路全长 85% 以上，因此，整条线路采用真空管（隧）道来解决空气阻力问题以及噪声问题，从经济性和修建技术上具备可行性。同时考虑到我国在高温超导磁悬浮方面取得的技术成果，发展低真空管（隧）道磁悬浮高速铁路技术具有较大的技术优势和可行性。同时，我们也看到这一技术距离实现大规模应用还需要一个时期的发展，需要跨学科、系统性地解决大量技术难题。

### (4) 提高超大地下空间利用的技术。

社会经济发展还对隧道及地下工程提出了大规模地下空间利用的需求。京津冀、长三角、珠三角、环渤海湾等区块经济体模式要求其成员城市与中心城市之间具有大规模交通吞吐能力，修建功能强大、环境友好、与城市紧密结合的超大地下交通枢纽推进城市区块化发展成为必然。另外，超大跨地下洞室能为能源和国防安全提供保障。

随着断面尺寸的一再增大，从支护结构受力和施工手段上来讲，超大断面地下工程与小断面地下工程发生了“由量到质”的改变。这方面的工程实践在不断前进，地下洞室的跨度和体量持续突破，但相关的设计理论仍处于工程类别和半理论、半经验阶段，对其开挖后的受力机理不清，各类岩石应力、应变本构关系应用上较为不清晰，造成了在某些条件下设计保守，造成巨大的工程浪费，而在有些条件下则可能使得工程存在较大的安全风险。目前，世界上最大跨度地下洞室的开挖断面面积达到 1 000 m<sup>2</sup>，我国大跨地下洞室也达到了 760 m<sup>2</sup>（重庆轨道交通红旗河沟站）。对于该类断面应采取何种工法进行开挖尚处于摸索阶段，如何通过设置合理的参数达到安全高效施工是超大跨洞室工程要解决的重大技术难题。另外，因地制宜地研发超大断面地下洞室的施工装备是该类工程大规模发展急需解决的技术难题。



我国地下空间开发数量和规模逐年增加，并呈现爆发性的增长态势，浅部和中部地下空间资源的消耗速度日益增快，城市发展建设对地下空间资源需求的持续增大，使地下空间开发利用正向深层发展和延伸。我们常说的城市深层地下空间主要是指地下 50~100 m 的垂直距离范围内的地下空间。这一深度的地下空间开发要面临设计方法、施工技术等多个方面的挑战。

(5) 全面采用可靠度理论进行隧道结构设计。

隧道结构所处的环境条件极为复杂，很多作用机理人们还没有充分认识，许多因素都不是定值而是随机变量，它们的离散性和随时空的变异性也较地面结构更为突出，计算模式的不定性尤为明显。因此，应用结构可靠度理论和推行概率极限状态设计法，制定与隧道结构相适应的结构设计标准，是当前国内外发展的必然趋势。目前，我国采用可靠度理论的《铁路隧道设计规范（极限状态法）》（Q/CR 9129—2018）\*已经颁布，并于 2019 年 6 月实施。

(6) 大力发展创新技术导致施工方法的革新。

隧道工程建设“以机代人”，少人化（甚至无人化）是未来隧道工程建设发展的必然趋势。尤其是在长大隧道和重点地下工程中，推行施工综合机械化，将成为一个重要发展对策。

① 全域性大直径隧道掘进机的应用。全断面隧道掘进机是目前最为高效的隧道开挖设备。在我国，习惯上将用于软土和复合地层的具备压力平衡功能的隧道掘进机称为盾构机，将用于硬岩地层的不具备建立压力平衡的隧道掘进机称为全断面隧道掘进机（TBM）。近年来，伴随着大规模的交通与水利基础工程建设，盾构和 TBM 得到了广泛应用，在设计制造方面出现了多项技术创新，其工作性能得到了持续提升。该技术领域今后一个时期的技术发展方向可以概括为两点：一是体量上会朝着更大直径的方向发展；二是地层适应性上会朝着全域性方向发展。全域性大直径隧道掘进机的采用将会越来越普及，从而彻底改变我国山岭隧道开挖以钻爆为主的方式。

② 随着我国隧道建设中面临的复杂地质和环境问题的增多，以及对隧道修建机械化的迫切需求，预切槽技术将在砂黏土、土砂、黄土地层等大断面隧道施工中显示出极大优势，具有广阔的应用前景。

③ 新式破岩机理研究与应用也将成为施工方法革新的热点，如大断面激光破岩技术和非爆破开挖技术。另外，据文献报道，应用高压水的射流破岩技术已经过关，这种技术能以很快的速度在坚硬岩层中打出炮眼，再在隧道周边用高压水切槽，然后爆破破岩。其优点是减少超挖，可以开凿任意断面形状的隧道，保护围岩，降低支护成本，并能增加自由面以降低炸药消耗和炮眼数量，但目前还需解决消耗功率较大、设备成本较高的缺陷。可以预计，在未来的 20 年内，该技术将会正式在隧道工程中应用。

(7) 重视隧道健康评估与重置技术。

随着各种隧道的大量修建，我国需要越来越重视隧道运营养护工作。经过数十年运营的隧道大都存在着隧道渗漏水、衬砌裂损（裂缝）、冻害、衬砌腐蚀及隧底翻浆冒泥等类型病害，我国现有的很多隧道工程已经进入了“老龄化”，需要进行健康监测与诊断，必要时进行适当的修复。在目前的基础上，如何发展出针对不同类型隧道病害的快速监测和诊断技术以及修复效果经济高效的高性能材料是该领域面临的重大挑战。

(8) 隧道建造技术的信息化和智能化。

近十年来，大数据与深度学习相关技术发展的日新月异极大促进了跨界技术结合的兴起，

---

\* 编者注：本书所引规范，若无特别说明，均指其现行有效版本。

这些技术变革在隧道行业的多个技术方面都存在广阔的应用空间。

① 发展应用深度学习方法，如基于深度学习方法的隧道衬砌病害识别判别方法、提取掌子面图片信息进行围岩分级及其在地质超前预报方面的应用。

② 发展隧道修建方面的大数据技术。当今世界已处于互联网高度发达的高科技时代，大数据技术正是这种互联网发达的产物。将大数据技术应用于隧道工程的勘察、设计、施工、监测与运营管理全过程，为隧道工程的建设、维护与防灾提供信息共享平台，利用信息技术的手段实现隧道工程全生命周期的数字化管理，并通过隧道空间数字地层及工程模型在隧道建设各个阶段的灵活运用，能够对工程中各类数据进行高效化查询与管理，从而可实现建养一体化。可以预见，大数据技术（包括人工智能）将会在隧道与地下工程中发挥越来越重要的作用。

③ 在隧道工程领域发展应用 BIM（building information modeling，建筑信息模型）技术。近年来发展起来的 BIM 技术在隧道及地下工程领域得到了广泛的应用。BIM 技术平台整合多源数据，以数字化、信息化和可视化的方式提升了规划、设计阶段的精度和深度，实现了施工阶段的动态模拟和信息化管理，并为运维阶段实现信息化、精细化资产管理提供技术支持。然而，目前国内针对隧道与地下工程的 BIM 技术缺乏顶层合计，各自为政，缺乏行业统一标准和中国自主知识产权平台，对今后发展不利，需要政府、学会、企业、高等院校、科研院所各界同仁多方面齐心协力，为数字隧道、智慧隧道的建设努力。

===== 思考题与习题 =====

- 1-1 简述隧道的定义和用途。
- 1-2 简述隧道的分类。
- 1-3 隧道工程的特点主要体现在哪几个方面？
- 1-4 试列举 2 座以上我国有代表性的隧道工程实例或搜集一座隧道的全套设计资料。
- 1-5 隧道工程的未来发展可体现在哪些方面？