

NANJING DITIE JIEGOU BAOHU TANSUO YU SHIJIAN

南京地铁结构保护 探索与实践

余才高◎编著



图书在版编目(CIP)数据

南京地铁结构保护探索与实践 / 余才高编著. -- 武汉 : 华中科技大学出版社, 2021.12
ISBN 978-7-5680-7891-7

I. ①南… II. ①余… III. ①地下铁道 - 铁路工程 - 工程结构 - 研究 - 南京 IV. ①U231

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第002021号

南京地铁结构保护探索与实践
Nanjing Ditie Jiegou Baohu Tansuo yu Shijian

余才高 编著

策划编辑: 周永华
责任编辑: 周永华
装帧设计: 武汉东橙品牌策划设计有限公司

责任校对: 王亚钦
责任监印: 朱 玢

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)
武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话: (027)81321913
邮编: 430223

录 排: 武汉东橙品牌策划设计有限公司
印 刷: 武汉精一佳印刷有限公司
开 本: 710 mm × 1000 mm 1/16
印 张: 19
字 数: 365千字
版 次: 2021年12月第1版第1次印刷
定 价: 168.00元



本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线400-6679-118竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

编 委 会


- 主 编：** 余才高 南京地铁集团有限公司
- 副主编：** 于百勇 南京地铁集团有限公司
张伯林 南京地铁集团有限公司
张建平 南京地铁集团有限公司
- 编 委：** 李 浩 华设设计集团股份有限公司
郑 军 南京地铁集团有限公司
沈晓伟 南京地铁集团有限公司
张书丰 南京地铁集团有限公司
王 涛 华设设计集团股份有限公司
万 钟 华设设计集团股份有限公司
张学华 南京地铁运营有限责任公司
宋 磊 华设设计集团股份有限公司
张 杰 华设设计集团股份有限公司
高 永 南京地铁运营有限责任公司
徐洪宇 南京地铁集团有限公司
汤长悦 南京地铁集团有限公司
裴 欢 南京地铁集团有限公司
顾歆甜 南京地铁集团有限公司
赵 进 华设设计集团股份有限公司

序

南京地铁经过近 20 年的建设，目前已开通运营 10 条线路，总里程 378 km，线网规划里程近 1200 km。地铁是城市公共交通的主干线、客流运送的大动脉，也是城市的生命线工程。随着线网规模不断扩大，运营环境更加复杂，安全风险不断增多，安全运行压力日趋加大，结构安全则是保证地铁安全运行的重中之重。地铁所具备的便利性和商业价值促使其沿线迅速成为商业、住宅等建筑开发的黄金地带，沿线建设工程“更高、更深、更大、更近”的趋势越来越显著，地铁结构保护既是一项持续性、常态化的工作，也是一项艰巨、复杂、高难度的工作。近年来，国内出现多起因地铁周边施工建设引发的地铁停运、结构破坏等事件，引起国家、社会重点关注，地铁结构安全保护管理工作面临严峻挑战，迫切需要不断提升管理手段、加强创新技术措施、提高技术水平。

南京素有“地质博物馆”之称，长江漫滩、富水软土、岗地、岩溶等多种地貌单元并存，地铁隧道穿越多种软弱不均地层，局部地段变化剧烈。河西漫滩区域为典型河流冲积二元结构，软土强度低、压缩性高、灵敏度高，砂层深厚、承压水头高、渗透性大且与长江有水力联系。在复杂地层条件下，地铁结构保护难度极高，面临诸多难题。在《南京地铁结构保护探索与实践》一书中，编者根据实践经验，结合理论研究、大量典型工程实例与监测数据，详细介绍了南京地铁结构保护管理体系，全面剖析了外部建设活动的影响因素与管控要点，开创性提出了“外控内治，动态平衡”的保护思路，研究并得出了盾构隧道的变形规律、预警体系、控制指标，系统阐述了地铁结构病害的分级原则与治理措施，详细介绍了地铁监护的新方法与新技术。该书为编者对多年来地铁结构保护管理工作经验的系统总结，为我国地铁结构保护工作的发展与提高作出了贡献。

《南京地铁结构保护探索与实践》是目前地铁保护管理领域中充分融合理论与实践、凸显前沿技术的应用型工程著作，具有丰厚的技术含量和重大的实用价值，对地铁保护管理工作具有很好的总结与提升意义，愿广大读者从中受益。

中国工程院院士：

前 言

随着经济快速发展和城市规模不断扩大，城市人口日益增多，交通压力日益增大，路面交通已远远不能满足人们的出行需求，越来越多的城市修建了地铁，截至 2020 年底，国内（不含港、澳、台）已有 37 座城市的地铁开通运营。鉴于地铁具有大运量、快捷舒适、安全准点等优点，其已成为市民出行时的公共交通首选。南京目前已开通 1 至 4 号线、10 号线、机场线（S1 号线）、宁天线（S8 号线）、宁溧线（S7 号线）、宁和线（S3 号线）、宁高线（S9 号线）共 10 条线路，174 座车站，总里程达 378 km，结合城市总体规划修编线网规划接近 1200 km。

地铁的大规模开通运营有效地解决了城市交通、人口与土地资源等方面的问题，但如何确保地铁安全运行也是各地所面临的共同难题和严峻挑战。地铁结构安全是保障地铁正常运行的重要前提，一旦地铁结构发生安全突发情况，轻则造成地铁停运，给广大市民的日常出行带来阻碍，情况严重时，甚至会导致群死群伤，带来严重的负面社会影响及重大的经济损失。虽然全国各城市制定了地方性的轨道交通管理办法或条例，但总体上监督管理力度尚存在一定不足，地铁保护尚存在一定盲点，近几年影响地铁安全运行的事件时有发生。

南京地铁自 1 号线开通运营后即非常重视地铁结构保护工作，目前已累计完成 5000 多个保护区项目的技术审核与现场管控，其中不乏对地铁影响较大的深基坑、加卸载、降水等施工活动的管控，在此过程中也不断地进行总结与摸索。本书以国内外相关行业规程、标准为基础，结合典型案例、监测数据、科研成果，围绕“外控内治，动态平衡”的保护理念，从技术审查、监控量测、巡查执法、现场管控这四个方面介绍了南京地铁保护区管理工作，具体章节内容如下。

第 1 章绪论，从工程建设、技术发展（勘察、监测、设计、施工）等角度出发介绍了地铁发展历程，提出了地铁结构安全所面临的挑战。第 2 章南京地铁保护区管理技术，从技术审查、监控量测、巡查执法和现场管控四个方面介绍了南京地铁保护区的管理体系、技术要求。第 3 章南京地铁盾构隧道承载和变形性能，基于南京地铁盾构隧道管片足尺试验成果，研究在超载、卸载等各种条件下盾构隧道的承载力性能变化，并结合工程实践经验，提出地

铁变形控制指标、预警体系和加固标准。第4章地下结构常见病害及治理技术，分析了地铁常见病害类型和成因，给出了病害分级标准，并提出了对应的病害治理措施。第5章南京工程地质特点和工程防控措施，结合南京河西漫滩区域的特殊地质状况，阐述了深厚软土、富含承压水条件下采取的防控保护措施与经验。第6章典型工程案例分析，基于保护区常见的、典型的基坑、桩基、近接施工案例，介绍了设计、施工保护技术要点，对成功经验进行了总结与提炼，对出现的异常变形进行了剖析与反思。第7章思考与展望，对当前的保护区形势进行了思考，并展望了未来可拓展的方面。

本书在编写过程中得到了华设设计集团股份有限公司、同济大学等单位的关心和支持，并得到来自韦扣均、张绍华、张治亮、朱义欢、汪乐、韩春雷、李季佩、管珊珊、蓝天、丁文强、成建阳、赵启超、周亚等同志的无私付出与帮助，还得到许多其他同志的宝贵建议和指导，在此表示由衷感谢！

地铁结构安全贯穿规划、建设、运营各个阶段，涵盖基坑、桥梁、道路、市政、勘察多个领域，是一项长期、复杂、专业性较强的工作，既需要不断固化经验、成果，更需要不断地技术创新，地铁保护工作任重而道远。鉴于本书编写人员理论和技术水平有限，书中存在疏漏和不足在所难免，望广大读者和同仁不吝赐教，提出批评和建议。

余才高

2021年11月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 国内地铁概况	2
1.1.1 地铁建设和技术发展	2
1.1.2 国内地铁概况	7
1.1.3 南京地铁概况	8
1.2 地铁结构保护的必要性	11
1.2.1 地铁结构安全的影响因素	11
1.2.2 地铁结构安全保护的意义	16
第 2 章 南京地铁保护区管理技术	21
2.1 方案审查	22
2.1.1 保护区的设置	22
2.1.2 风险识别与分级标准	24
2.1.3 方案审查管理内容和关注要点	36
2.1.4 软弱土特殊地层“外控内治”措施	42
2.2 监控量测	47
2.2.1 监测一般要求	47
2.2.2 保护区监测方法与技术	59

2.2.3	地铁隧道零状态普查：三维激光扫描技术	76
2.3	现场巡查	81
2.3.1	巡查等级	82
2.3.2	符合性巡查	87
2.3.3	巡查执法	91
2.4	信息化管理系统	95
2.4.1	组织架构	95
2.4.2	系统功能介绍	95
第3章 南京地铁盾构隧道承载和变形性能		105
3.1	地铁盾构隧道错缝拼装区间的承载性能	106
3.1.1	设计荷载工况下盾构隧道结构承载性能	108
3.1.2	超载工况下盾构隧道结构承载性能	109
3.1.3	卸载工况下盾构隧道结构承载性能	111
3.1.4	超载和卸载工况下盾构隧道屈服和裂缝规律	112
3.2	地铁盾构隧道变形预警体系	114
3.2.1	盾构隧道变形预警体系	114
3.2.2	盾构隧道安全状态评估	115
3.3	地铁盾构隧道加固启动标准	122
第4章 地下结构常见病害及治理技术		125
4.1	常见病害类型和影响因素	126
4.1.1	常见病害类型	126
4.1.2	病害影响因素	132
4.2	病害分级控制指标	136

4.2.1	渗漏水分级指标	136
4.2.2	管片裂损分级指标	137
4.2.3	管片接缝错台分级指标	138
4.2.4	不均匀沉降变形分级指标	138
4.2.5	横断面变形分级指标	139
4.3	结构病害治理技术	141
4.3.1	病害治理原则	141
4.3.2	病害治理措施	145
4.3.3	典型工程案例	155
第5章 南京工程地质特点和工程防控措施		173
5.1	南京工程地质概况	174
5.1.1	地质概况	174
5.1.2	软土地层岩土特性	176
5.1.3	地下水位变化作用	181
5.2	工程防控措施	183
5.2.1	隔离式土体加固保护方式	183
5.2.2	深厚承压水封闭隔断方式	187
第6章 典型工程案例分析		195
6.1	南京地铁结构概况	196
6.2	基坑工程对邻近地铁隧道影响分析	197
6.2.1	基坑工程对邻近地铁隧道影响机理	197
6.2.2	案例一：紫鑫中华广场三期工程	207
6.2.3	案例二：南京金融城工程	221

6.2.4	项目小结	229
6.3	桩基工程对邻近地铁结构影响分析	230
6.3.1	桩基工程对邻近地铁结构影响机理	230
6.3.2	案例一：龙王大街工程	237
6.3.3	案例二：龙翔西立交工程	244
6.3.4	项目小结	251
6.4	近接工程对地铁结构影响分析	252
6.4.1	近接工程对地铁结构影响机理	252
6.4.2	案例一：滨河路箱涵工程	256
6.4.3	案例二：下穿既有盾构区间工程	264
6.4.4	案例三：零距离下穿既有车站工程	269
6.4.5	项目小结	280
6.5	既有地铁结构改造工程	280
6.5.1	接口通道改造	280
6.5.2	风亭、冷却塔改移	283
第7章 思考与展望		285
7.1	设计、施工指导性建议	286
7.2	管片设计思考	287
7.3	尽量将线路敷设于力学性质相对较好的地层	288
7.4	适当增大隧道内径与管片厚度	289
参考文献		291

第 1 章

绪 论

地铁具有运量大、快捷舒适、安全准点、节约能源和用地等优点，其以任何其他地面交通工具都不可比拟的优越性，逐渐成为人们出行的首选交通工具。地铁的便利和商业价值促使地铁沿线地区迅速成为商业、住宅等建筑开发的黄金地带，周边工程“更高、更深、更大、更近”的趋势日益显著，这必然对地铁安全形成严峻挑战和威胁。地铁安全是保障地铁正常运营的重要前提，一旦地铁发生安全突发情况，必然影响地铁正常运营，给广大市民的日常出行带来阻碍；情况严重时，甚至会导致群死群伤，带来严重的负面社会影响及重大的经济损失。

1.1 国内地铁概况

1.1.1 地铁建设和技术发展

地铁建设是一个伴随工法、设备技术进步不断发展的过程，同时技术进步又推动着地铁建设快速和安全发展，两者相辅相成。

1.1.1.1 地铁建设发展

我国地铁建设以1965年7月1日开工建设的北京地铁为开端，发展至今，大致经历了以下五个阶段。

1. 起始阶段

该阶段的地铁工程以1965年开始建设、1969年10月1日建成通车的北京地铁（北京站—苹果园站，全长23.6 km）和1970年开始兴建、1984年建成通车的天津地铁（新华路站—西站，全长7.4 km）为代表。这一阶段地铁的规划与建设除了实现城市客运功能，更重要的是考虑满足人防战备需求。

2. 建设发展阶段

该阶段的地铁工程以北京地铁1号线完全建成（复八线建设和1号线改造）、上海地铁1号线（上海火车站—莘庄站）建设、广州地铁1号线（西塱站—广州东站）建设为标志。随着改革开放和经济体制改革的逐步深入，城市交通需求剧增，导致道路交通供给能力严重

不足，交通供需矛盾突出，成为城市社会经济发展的一个重要制约因素。为适应城市发展的需要、缓解城市交通的紧张状况，从20世纪90年代开始，政府加大了对城市交通基础设施的投入，强调地铁对解决城市交通问题和引导城市发展的作用。从此，发展大容量地铁方式的理念开始显现，我国进入了地铁建设发展阶段。

3. 建设高潮阶段

随着经济的发展和城市化进程的加快，我国城市规模和人口规模在不断扩大，城市交通问题更加突出。城市交通问题解决必须依赖公共交通发展，特大城市及大城市必须建设一个以地铁系统为骨干、以公共交通为主体、多种交通方式相互协调的综合交通系统成为共识。同时，经济的快速发展也为发展城市地铁奠定了雄厚的物质基础。自20世纪末到21世纪初，我国城市地铁建设进入快速发展的高潮阶段。

4. 建设调整期

1995年到1998年，由于地铁建设发展迅猛，部分城市不顾地方经济实力，盲目启动地铁建设项目，忽视了是否适合本城市的实际情况等问题，同时针对工程造价高（每千米地铁造价接近7亿元）、车辆全部引进、大部分设备大量引进等问题，1995年国务院办公厅60号文件通知“除北京、广州两个在建地铁项目和上海地铁二号线项目外，今后一段时间内暂停审批城市地下快速轨道项目”，并要求做好发展规划和国产化工作。从1995年到1998年，近3年时间国家没有审批城市地铁项目，地铁建设与发展经历了一段曲折的历程。

5. 蓬勃发展阶段

我国地铁在经历了早期建设、高速发展、建设调整等曲折发展过程后，已步入稳步、持续、有序的蓬勃发展阶段。

1.1.1.2 技术发展

1. 地铁勘察技术发展

地铁岩土工程勘察成果直接关系到地铁线路选线、设计方案和施工工法、建设成本和建设周期，以及运营期的维护费用等。我国地铁岩土工程勘察的发展大致可分为以下三个阶段。

(1) 探索阶段：从20世纪50年代到80年代初，北京地铁1号线的勘察设计揭开了我国城市地铁建设的序幕，它还引领了上海、广州和天津等城市地铁建设的岩土工程勘察

工作。

(2) 标准化、规范化阶段: 从 20 世纪 80 年代初到 20 世纪末, 这一阶段积累了大量的地铁岩土工程勘察经验和技能, 并制定了一系列国家标准和规范, 使得我国地铁岩土工程勘察标准化、规范化。

(3) 快速发展阶段: 21 世纪以来, 国民经济发展迅速, 为了满足人们的需求, 在政府的大力支持下, 全国各地大部分城市依据国家标准和规范, 积极、有序地开展地铁岩土工程勘察工作。

勘察技术由传统单一的测量、钻探、取样、试验模式向多种手段结合的综合勘察模式发展(图 1-1), 勘测技术逐步全面化、精细化、智慧化, 为地铁设计、施工、运营、保护提供更真实可信的翔实数据。

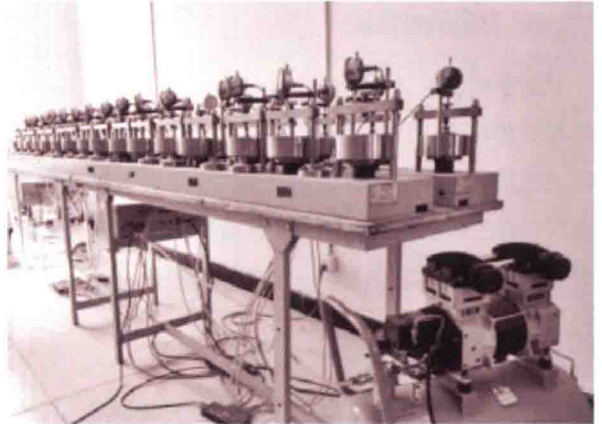


图 1-1 全自动气压固结测试仪及自动采集系统

2. 地铁监测技术发展

监测技术是保障地铁建设安全的重要手段, 我国监测技术手段可分为人工监测和自动化监测两种。

(1) 人工监测: 是起初最基本的监测方式, 即由监测人员采用监测仪器进行常规监测。人工监测受监测人员监测水平和常规监测仪器功能等方面的限制, 只能在一定精度范围内和适当的工作条件下进行监测, 具有一定的局限性。

(2) 自动化监测: 具有数据采集和传输快、精度高、稳定性强、安装灵活、不受环境条件限制、可实现全天候监测等特点。自动化监测可解决人工监测受限制的问题, 监测系统由传感器、智能型数据采集单元、通信模块、主控计算机及软件系统组成, 通过静力水准仪、变位计、测量机器人等进行数据采集, 可进行实时监测和数据分析。

近几年, 监测技术、方法、监测成果分析和信息反馈等水平明显提高, 目前在努力打造高精度、遥测、遥控、数据远程传输、预警、一体化网络功能, 以更好地发挥对地铁建设、运营保驾护航的功能。如图 1-2 所示为基于集成化、自动化的智能监测系统。

3. 设计施工技术发展

采用不同的施工工艺和施工设备，地铁建设的难易程度、建成后的结构抗变形能力均是不同的，即使是在相同的地质条件下，不同的施工工艺、施工设备、施工参数等对周边环境的适应能力、扰动程度和扰动范围也是不同的。

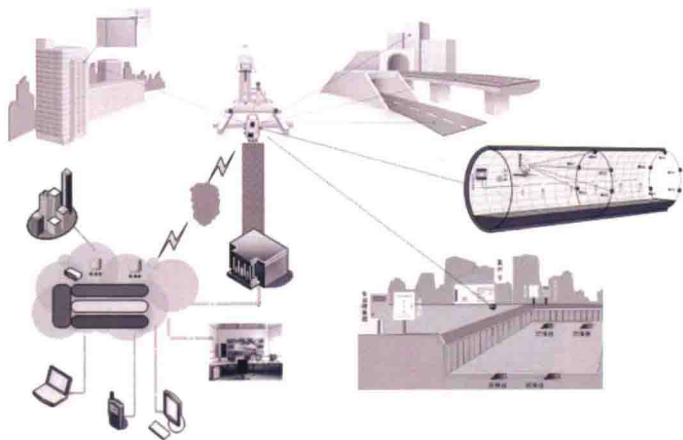


图 1-2 基于集成化、自动化的智能监测系统

我国地铁建设方法已由最初单一的明挖法发展到现在的明挖法、盾构法、冻结法、矿山法、顶管法、装配式等多种工法（图 1-3）并行，设计施工技术不断发展，已初步形成专门的学科体系，极大地推动了地铁建设科学性发展，既能保证建设期的安全，又综合考虑了运营期的变形及稳定要求。

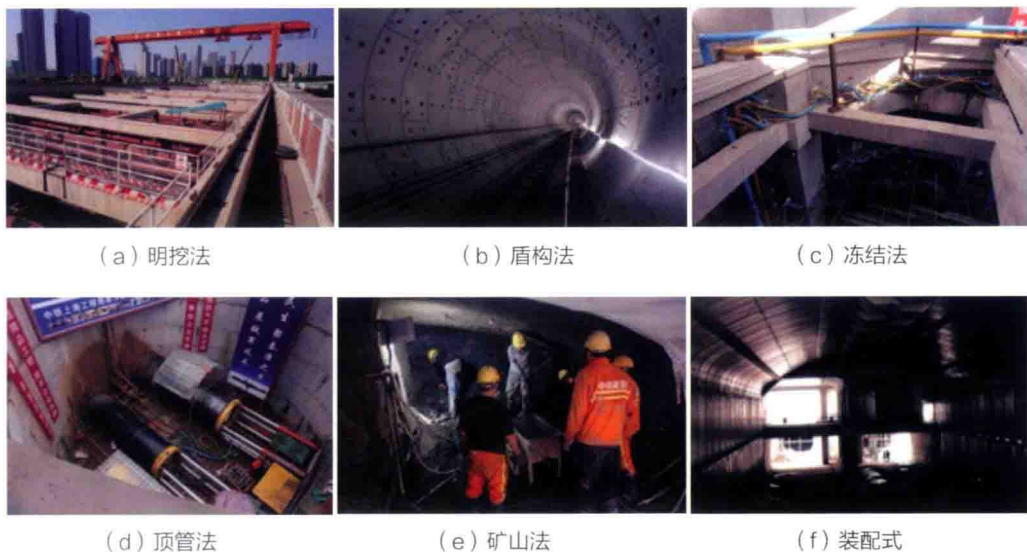


图 1-3 不同施工工法

工程技术的发展同时也促进了地铁线路敷设方式的改变（图 1-4），使得地铁线网对周边环境的适应能力变强，地下空间得以充分利用。

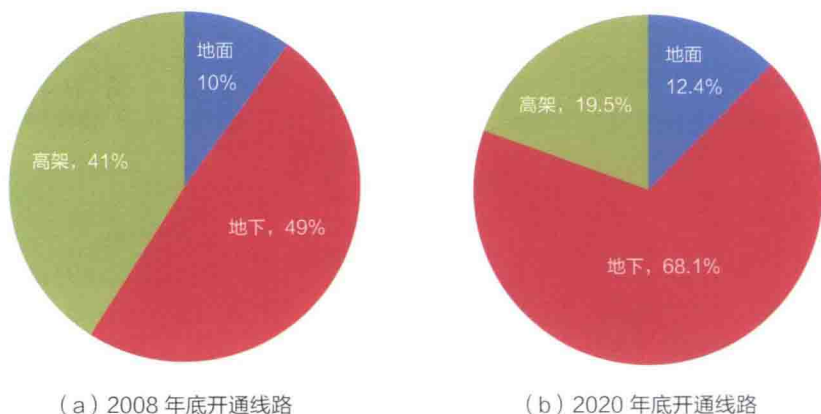


图 1-4 地铁敷设方式占比

1.1.1.3 减振降噪技术的发展

地铁线路不可避免会遇到需穿越住宅区、文教卫生区等环境敏感区域的情况，如何有效解决地铁运行产生的噪声和振动与周边环境之间的矛盾，是地铁可持续发展道路上的关键问题之一。地铁对邻近建筑物的影响如图 1-5 所示。

地铁列车运行时产生的噪声是由机车电机系统、车辆悬挂系统、车轮与轨道的轮轨系统振动，以及因上述振动引发的二次振动产生的。随着地铁车辆机械的不断升级和发展，机车电机系统及车辆悬挂系统产生的振动和噪声已降低很多，对地面建筑物和居民的影响较小。

地铁列车运行对轨道的冲击作用产生振动，通过轨道结构、道床基础及隧道结构衬砌传递到周边地层，进而通过土体向四周传播。道床减振技术发展有效地降低了地铁振动的影响，以浮置板轨道和弹性短轨枕轨道为代表，减振效果明显，能很好地适应敏感地区建筑物保护的要求。

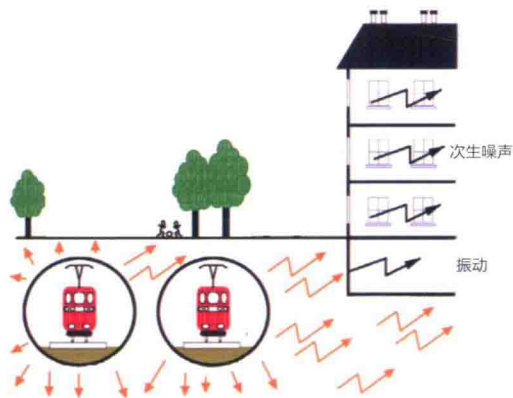


图 1-5 地铁对邻近建筑物的影响

1.1.2 国内地铁概况

1. 运营规模

截至2020年底,国内(不含港、澳、台)共有37座城市的地铁开通运营,运营线路总里程约为6280.8 km。线网规模超100 km以上的城市共计22座,约占已开通运营地铁的城市总数的59%,地铁开通运营的城市如表1-1所示。

表 1-1 国内地铁开通运营城市

时间	地铁开通运营城市
1971年12月	1座城市,北京
1984年12月	2座城市,北京、天津
1993年12月	3座城市,北京、天津、上海
2000年12月	4座城市,北京、天津、上海、广州
2005年12月	7座城市,北京、天津、上海、广州、深圳、南京、武汉
2010年12月	10座城市,北京、天津、上海、广州、深圳、南京、武汉、成都、沈阳、佛山
2015年12月	23座城市,北京、天津、上海、广州、深圳、南京、武汉、成都、沈阳、佛山、重庆、西安、苏州、昆明、杭州、哈尔滨、郑州、长沙、宁波、无锡、大连、青岛、南昌
2016年12月	27座城市,北京、天津、上海、广州、深圳、南京、武汉、成都、沈阳、佛山、重庆、西安、苏州、昆明、杭州、哈尔滨、郑州、长沙、宁波、无锡、大连、青岛、南昌、福州、东莞、南宁、合肥
2017年12月	31座城市,北京、天津、上海、广州、深圳、南京、武汉、成都、沈阳、佛山、重庆、西安、苏州、昆明、杭州、哈尔滨、郑州、长沙、宁波、无锡、大连、青岛、南昌、福州、东莞、南宁、合肥、石家庄、长春、贵阳、厦门
2018年12月	32座城市,北京、天津、上海、广州、深圳、南京、武汉、成都、沈阳、佛山、重庆、西安、苏州、昆明、杭州、哈尔滨、郑州、长沙、宁波、无锡、大连、青岛、南昌、福州、东莞、南宁、合肥、石家庄、长春、贵阳、厦门、乌鲁木齐
2019年10月	32座城市,北京、天津、上海、广州、深圳、南京、武汉、成都、沈阳、佛山、重庆、西安、苏州、昆明、杭州、哈尔滨、郑州、长沙、宁波、无锡、大连、青岛、南昌、福州、东莞、南宁、合肥、石家庄、长春、贵阳、厦门、乌鲁木齐
2020年12月	37座城市,北京、天津、上海、广州、深圳、南京、武汉、成都、沈阳、佛山、重庆、西安、苏州、昆明、杭州、哈尔滨、郑州、长沙、宁波、无锡、大连、青岛、南昌、福州、东莞、南宁、合肥、石家庄、长春、贵阳、厦门、乌鲁木齐、济南、兰州、常州、徐州、呼和浩特