

市政工程新技术及工程实例丛书

现代顶管施工技术 及工程实例

葛金科 沈水龙 许烨霜 ◎ 编著

中国建筑工业出版社

市政工程新技术及工程实例丛书

现代顶管施工技术及工程实例

葛金科 沈水龙 许烨霜 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代顶管施工技术及工程实例/葛金科, 沈水龙, 许烨霜
编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2009
(市政工程新技术及工程实例丛书)
ISBN 978-7-112-11214-2

I. 现… II. ①葛… ②沈… ③许… III. 顶进法施工
IV. TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 151643 号

本书是一本有关顶管技术的专著, 介绍了顶管技术中我国目前使用的施工设备与施工技术的最新成果, 以及各类顶管工程的施工实例。本书共分 7 章, 第 1 章介绍顶管施工技术的背景, 发展历史与现状, 基本原理与步骤及顶管施工技术的分类。第 2 章介绍顶管施工前的调查。第 3 章给出顶管施工中的基本设计。第 4 章介绍顶管的主要施工设备的原理与构造, 主要包括泥水平衡式和土压平衡式顶管设备。第 5 章介绍顶管施工中的控制技术。第 6 章介绍各类顶管工程的施工实例, 包括曲线顶管、超长距离顶管和垂直顶升、矩形顶管、地下对接顶管、玻璃钢夹砂管顶管、穿越建筑物顶管、管幕-箱涵顶进和复杂砂砾地层超长距离顶管的工程实例。第 7 章对顶管施工技术未来的发展作了展望。

本书可供从事顶管技术的设计、施工、检测和监理的技术人员参考, 也可供大专院校土木、水利工程专业的师生参考。

* * *

责任编辑: 王 梅 刘瑞霞

责任设计: 赵明霞

责任校对: 王金珠 王雪竹

市政工程新技术及工程实例丛书
现代顶管施工技术及工程实例
葛金科 沈水龙 许烨霜 编著

*

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
北京千辰公司制版
北京市铁成印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 字数: 450 千字

2009 年 10 月第一版 2009 年 10 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 42.00 元

ISBN 978-7-112-11214-2
(18430)

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

顶管施工技术是一种非开挖的隧道施工技术,也是一种快速和经济的隧道施工方法。顶管不需要拼装隧道衬砌,能够穿越公路、铁道、河川、地面与地下构(建)筑物及各种地下管线等。顶管施工技术 100 多年前产生于美国,得到较大的发展是在第二次世界大战以后的欧洲与日本。我国的顶管技术自 20 世纪 50 年代相继在北京与上海开发后,已历经 50 余载,应用于成百上千项顶管隧道工程。20 世纪 70 年代末,上海开发了网格水冲气压平衡顶管机,这一工法直到现在还在长距离复杂地层的顶管工程中被应用。20 世纪 80 年代初期,随着城市建设开发的不断深入进行,在上海、北京、南京等地陆续引进了国外先进的机械式土压和泥水平衡顶管机,如上海市市政工程管理局引进了日本的机械式土压(泥水)平衡顶管机,以后又在上海市合流污水治理一期工程中引进了德国的 F 型钢筋混凝土管制管工艺。在此基础上,一方面上海在顶管机的研制上不断取得进展,先后开发了不同直径的土压平衡顶管机和泥水平衡顶管机,国产化率达到 100%。设备的可靠性已经完全能够满足工程的需要。另一方面,在与顶管施工相关的关键施工技术上也取得了飞速的发展,如顶管进出洞、顶管注浆减阻、曲线顶管、顶管姿态控制、顶管沉降控制、中继间、制管工艺和长距离顶管等。目前,在顶进距离方面,无论是钢管顶管还是钢筋混凝土管顶管,都创造了一次顶进超过 2km 的施工记录。在曲线顶管方面,已经开发成功了顶管自动引导测量系统,并掌握了三维复合小曲率半径的顶管施工技术,使得曲线顶管施工技术得到广泛的应用。在顶管的地面沉降控制方面,已经能够顺利地穿越地上和地下构(建)筑物,施工精度正在不断提高。在顶管注浆减阻方面,管外壁单位面积摩阻力能够控制在 1kPa 以内。所有这些顶管施工技术成果都表明,目前我国的顶管施工技术已经达到了国际先进水平。近年来我国城市供水、排水、水利、能源和电网工程等基础设施建设正在飞速发展,由于顶管法在经济上和环境保护上具有很大的优势,所以可以预见顶管施工技术必将得到更广泛的应用,并且随着顶管工程规模的不断扩大,更多的顶管施工记录将被刷新,顶管施工技术将会不断地取得新的进展。

据作者不完全的统计,在过去的 20 多年内,国内共出版过如下几部有关顶管技术的专业著作:中国建筑工业出版社三部:1983 年马谢尔勒著的《顶管工程》(漆平生,杨顺喜,李明堃译);1984 年高乃熙与张小珠编著的《顶管技术》及 2008 年韩选江著的《大型地下顶管施工技术原理及应用》;人民交通出版社两部:2003 年余彬泉与陈传灿编著的《顶管施工技术》与马保松、Stein 与蒋国威等编著的《顶管和微型隧道技术》。这些著作从不同角度论述了顶管技术的设备构成、设计施工等内容,各有其特点,着重于对原理的介绍,但对工程实例的介绍与分析较少。作者编写本书的目的在于介绍目前在我国生产实践中使用的顶管技术的施工设备与施工技术的最新成果,然后介绍了各种类型的顶管工程实例,以弥补现有专著中原理介绍偏多、工程实例介绍偏少的不足,供同行参考。

本书共分7章,第1章简要介绍了顶管施工技术的背景、发展历史与现状、基本原理与步骤及顶管施工技术的分类。第2章介绍了顶管施工前的调查,包括水文与工程地质调查,历史调查,地下构建筑物、管线和不明障碍物的调查以及地上构建筑物和交通情况的调查。第3章给出了顶管施工中的基本设计,包括管道轴线的确定、管材与接口的选择、不同管径的顶距确定、工作井尺寸的确定。第4章介绍了顶管的主要施工设备,包括泥水平衡式和土压平衡式顶管设备的原理与构造等。第5章介绍了顶管施工中的控制技术,包括顶力控制技术、姿态控制技术、曲线顶管技术、地面沉降控制与环境控制技术。第6章为本书的重点,介绍了由上海市第二市政工程有限公司、上海隧道工程股份有限公司、上海市机械施工有限公司、上海市第一市政工程有限公司、中铁十六局集团有限公司等施工的几个典型的顶管工程实例,包括曲线顶管、超长距离顶管和垂直顶升、矩形顶管、地下对接顶管、玻璃钢夹砂管顶管、穿越建筑物顶管、管幕-箱涵顶进和复杂砂砾地层超长距离顶管的工程实例。第7章对顶管施工技术未来的发展作了展望。本书可供从事顶管技术的设计、施工、检测和监理的技术人员参考,也可供大专院校土木、水利工程专业的师生参考。

作者期望以此书推动顶管技术在我国的发展和应用。本书在编写过程中虽经多次讨论和修改,因顶管施工是一项很复杂的技术,其理论和技术都有待于进一步提高,加之作者的水平有限及时间仓促,书中难免会有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

本书的最初策划由上海城建(集团)公司的白云总工程师提出,同时在编写过程中也不断地得到他的指导与帮助,本书的成功付梓倾注了他的心血。本书的编写工作还得到了上海城建(集团)公司以及上海市重点学科建设项目资助(项目编号:B208)。作者还要感谢上海市第二市政工程有限公司的领导与同事,没有他们的支持与帮助本书不可能顺利完成。作者还要感谢中国建筑工业出版社的领导与编辑,他们的关心与支持是本书成功的保证。

本书的分工如下:全书统稿策划由葛金科完成;前言由沈水龙撰写;第1章由葛金科编写;第2章由沈水龙编写;第3章许烨霜编写;第4章由葛金科与沈水龙编写;第5章由葛金科与许烨霜编写,上海市政工程设计研究院的张传钊与方韜编写了“质量通病防治”一节,浙江丰虹黏土化工有限公司林鸿福对膨润土进行了修改;第6章由葛金科、沈水龙、许烨霜统编,上海市第一市政工程有限公司徐飞提供了地下对接顶管的工程实例,上海市政工程设计研究院的张传钊提供了玻璃钢夹砂管顶管施工实例;第7章由葛金科与许烨霜撰写。上海市机械施工有限公司周杜鑫提供了矩形顶管的工程实例资料;上海隧道工程股份有限公司吕建中提供了偏心多轴矩形顶管工程的资料;谢彬提供了膨润土技术的相关资料;上海市基础工程公司的李耀良提供了该公司的部分企业业绩资料;中铁十六局集团有限公司的陈建军提供了穿越黄河顶管施工的资料,并在成稿后校核修改了稿件;上海钟仓机械设备有限公司李浩民提供了日本有关的顶管图片和资料;无锡华毅管道有限公司提供了PCCP管的有关资料。上海市第二市政工程有限公司的田培云对顶管用管材与接口部分进行了修改,岳秀平、黄高飞对测量部分进行了校核。此外,上海交通大学的罗春泳博士以及同校在读研究生张金辉、孙阳、王志丰、郑品、赵建立、王领等同学参加了部分文字录入与插图的绘制工作。在本书的资料调查过程中还得到许多单位的帮助,在此难于一一列举。在此谨向他们致以诚挚的感谢与敬意。

作者

2009年4月于上海

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 顶管施工技术的历史与现状	2
1.2 顶管施工技术的构成与步骤	7
1.3 顶管施工技术的分类	15
第2章 顶管施工前的调查与环境保护方案	18
2.1 调查的目的与内容	18
2.2 工程地质与水文地质调查	21
2.3 地下障碍物调查	23
2.4 地上建（构）筑物调查	24
2.5 环境调查	25
2.6 确定环境保护方案	25
第3章 顶管施工中的基本设计	29
3.1 前言	29
3.2 管道轴线的选定	30
3.3 顶管用管材与接口	30
3.4 管材在施工中的受力分析	43
3.5 工作井设计	50
第4章 顶管的施工设备	56
4.1 前言	56
4.2 顶管机的选型	56
4.3 泥水平衡式顶管工法	66
4.4 土压平衡式顶管工法	88
第5章 顶管施工中的控制技术	101
5.1 前言	101
5.2 顶管进出洞技术	102
5.3 顶力控制技术	107
5.4 顶管的姿态控制技术	130

5.5 曲线顶管工法	145
5.6 变形控制与环境控制技术	155
5.7 质量通病与防治技术	169
第6章 工程实例	177
6.1 曲线顶管施工实例	177
6.2 长距离顶管和垂直顶升施工实例	190
6.3 矩形顶管施工实例	200
6.4 地下对接顶管施工实例	211
6.5 玻璃钢夹砂管顶管施工实例	224
6.6 穿越建筑物顶管施工实例	228
6.7 管幕—箱涵顶进施工实例	246
6.8 复杂砂砾地层超长距离顶管施工实例	257
第7章 顶管施工技术的发展展望	273
7.1 顶管技术的发展及其必然性	273
7.2 顶管技术的发展趋势及存在问题	274
参考文献	277

第 1 章 绪 论

顶管技术是在不开挖地表的情况下，利用液压油缸从顶管工作井将顶管机和待铺设的管节在地下逐节顶进，直到顶管接收井的非开挖地下管道敷设施工工艺^[1]。由于顶管施工无须进行地面开挖，因此不会阻碍交通，不会产生过大的噪声和振动，对周围环境影响也很小。顶管最初主要用于下水道施工，随着城市建设的发展，其应用领域也越来越广泛，目前广泛应用于城市给水排水、煤气管道、电力隧道、通信电缆、发电厂循环水冷却管道等基础设施建设以及公路、铁路、隧道等交通运输的施工中。

图 1-1 为顶管施工示意图，具体施工过程如下：在事先准备好的工作井内，用液压油缸将管节压入土层中，同时排出和运走挖出的泥土。当第一节管节完全压入土层后，再把第二节管节接在后面继续顶进。同时将第一节管节内挖出的泥土运走，直到第二节管节也全部压入土层。然后再把第三节管节接上顶进，如此循环重复。从理论上说，只要液压油缸的顶力足以克服顶管时产生的阻力，这个过程便可一直重复下去。

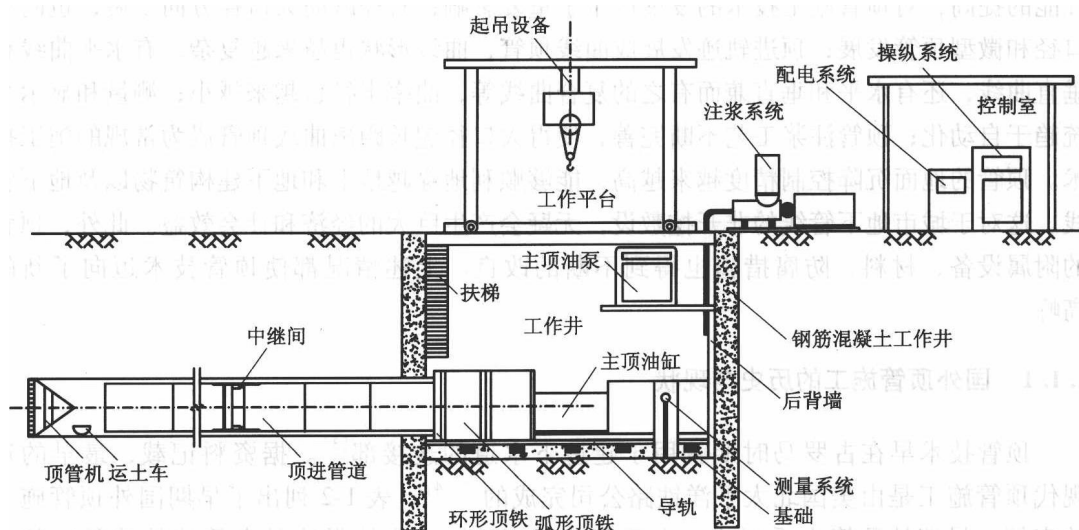


图 1-1 顶管施工示意图^[2]

虽然与其他非开挖工法相比，顶管施工技术有其独特的优点，但同样也存在不足。表 1-1 列出了顶管工法与盾构工法及定向钻进技术的特点，以及三者 in 适用范围、直径、精度、速度等方面的比较。

顶管施工与其他工法的比较 表 1-1

工法 比较		顶 管	盾 构	定 向 钻 进
特点	优点	顶进精度高	适用于大口径隧道	施工速度快
	缺点	施工成本较高	管材成本高	由于精度限制,无法用于重力流管道施工
适用范围		通信管、排水管、煤气管、自来水管、综合管道	综合管道、地铁、隧道	通信管、煤气管、自来水管
适用管径 (mm)		φ350 ~ φ4000	φ3000 ~ φ15000	φ100 ~ φ1000
施工精度		50mm 以内	50mm 以内	1000mm 以内
施工速度		约 15 ~ 25m/d	约 10 ~ 20m/d	约 50 ~ 100m/d

1.1 顶管施工技术的历史与现状

早期顶管是一种特殊的施工手段,一般不轻易采用。如今顶管作为一种常规施工工艺已广泛应用。开挖方式从原始的手掘式过渡为机械式,包括土压平衡式、泥水平衡式和气压平衡式。管材呈现多样化,管材的制作精度不断提高,尤其是管节接口尺寸精度和密封性能的提高,对顶管施工技术的发展产生了重要影响;管径既向大口径方向发展,也向小口径和微型顶管发展;顶进轨迹发展成曲线顶管,曲线形状也越来越复杂,有水平曲线和垂直曲线,还有水平和垂直兼而有之的复合曲线等,曲率半径也越来越小;测量和显示系统趋于自动化;顶管注浆工艺不断完善,使得大口径超长距离曲线顶管成为常规的施工技术。顶管的地面沉降控制精度越来越高,能够顺利地穿越地上和地下建构筑物以及地下管线。这对于城市地下管线的非开挖敷设,无疑会产生巨大的经济效益。此外,顶管的附属设备、材料、防腐措施也得到不断的改良。上述情况都使顶管技术迈向了新的高峰。

1.1.1 国外顶管施工的历史与现状

顶管技术早在古罗马时期就用于建造下水道的连接部^[3]。据资料记载,最早的近现代顶管施工是由美国北太平洋铁路公司完成的^{[3][4]}。表 1-2 列出了早期国外顶管施工的实例。早期的顶管为手掘式,主要用于下穿铁道。具体做法是在管节的前部安装一个钢制的切削装置,当时还没有单独的可调试顶管机。当地层条件较好时,事先在管节前方挖土来调整方向,开挖土体的工具主要是镐和铲;当地层中有孤石和漂石时,辅以气动黏土铲并借助气动锤来破碎;当在坚硬的岩石地层中施工时,降低岩石强度后用气动锤破碎。

国外顶管技术发展一览表^{[3]~[9]}

表 1-2

国 家	施 工 方 法	年 代	代 表 性 工 程
美国	顶进铸铁管	1896 ~ 1900 年	北太平洋铁路
	顶进波纹管	20 世纪 20 年代早期	
	顶进混凝土管道	20 世纪 20 年代后期	
	制定混凝土顶管规范	20 世纪 30 年代	北太平洋铁路公司
	混凝土管节长度 2.4m	20 世纪 30 年代后期	
	多点长行程液压顶管系统	20 世纪 60 年代后	
欧洲	顶进铸铁管	20 世纪 30 年代	英国供水公司
	顶进混凝土管道	1957 年	德国 Ed Zublin 公司
	顶进波纹管	1958 年	英格兰 Glenton 铁路
	世界上首次顶进千米混凝土管道	1970 年	德国汉堡下水道顶管工程
日本	顶进铸铁管道；手摇液压油缸	1946 年	尼崎市铁路下穿越
	顶进混凝土管道	20 世纪 50 年代末	
	采用液压油泵驱动油缸	1957 年	
	中继间的使用	1960 ~ 1980 年	
	全封闭的开挖，远距离遥控的小口径管顶管施工技术	1975 年	

1.1.1.1 美国早期的顶管技术

1896—1900 年间，美国北太平洋铁路公司在北太平洋铁路的铺设工程中完成了最早的顶管施工^[3]。随后许多铁路公司将这项技术确定为在铁道下面顶进铸铁管道的标准方法。从管材来看，美国早期主要使用铸铁管；20 世纪 20 年代开始使用波纹钢管；20 世纪 20 年代后期使用钢筋混凝土管；20 世纪 30 年代制定了混凝土顶管规范。从管径来看，最初顶进的混凝土管道直径为 750 ~ 2400mm。20 世纪 30 年代限定管道内径为 108 ~ 1800mm。从管节长度来看，美国最初多采用 1.2m 的混凝土管节，并带插嵌式接头；20 世纪 30 年代后期，管节长度主要为 2.4m；20 世纪 60 年代之后，美国制造了多点长行程顶管系统，一次顶进达到 150 多米^{[3]~[6]}。

1.1.1.2 顶管技术在欧洲的发展

20 世纪 30 年代，英国某供水公司开始顶进铸铁管道。20 世纪 50 年代，欧洲出现了一批独立经营的个体公司，并开始自主研究顶管施工原理并研制施工设备和施工方法。1957 年德国首次进行了混凝土管道的顶进施工。1958 年，英格兰 Armco 公司顶进了 30m 长的波纹钢管。20 世纪六、七十年代随着欧洲发达国家交通网络的发展，由于大量工程需在运行中的铁路、公路以及其他重要设施的下面施工，越来越多的公司进入顶管技术领域，经营方式也发展成为合资形式，从而有力地推动了顶管技术的发展。由于中继间的使用，顶进长度也从早期的小于 100m 发展到大于 1000m。1970 年德国汉堡下水道顶管工程是世界上首次一次顶进距离超过千米的混凝土顶管工程^{[6][7]}。

1.1.1.3 顶管技术在日本的发展

日本首次运用顶管是 1946 年在大阪府的尼崎市施工下穿铁路的煤气管道，顶进钢管

内径为 600mm, 顶进距离为 6m, 顶进方式为手摇式液压油缸^{[8][9]}。而后随着日本经济的复兴, 地下公共设施的需求量猛增, 而地下公共基础设施的建设比道路要晚, 为了不影响地面交通, 日本各大城市的下水道等地下基础设施的建设采用了非开挖的顶管法施工。在 1993 年度, 全日本约有 1300km 的地下管道采用顶管法施工^[10]。20 世纪 50 年代末, 日本开始顶进混凝土管道; 1957 年, 日本开始采用液压油泵驱动油缸作为主顶动力。20 世纪五六十年代, 日本顶管一般为手掘式技术, 即施工人员进入开挖面开挖土体。1975 年日本颁布法规禁止人员进入 800mm 以下的管道施工, 许多施工单位被迫采用套管法施工, 即先用比设计直径大一圈的顶管机顶进, 然后把小口径管装入。这样的施工使开挖面过大, 施工费用也较高, 造成很大的浪费。为此, 日本从 1975 年起开始研究全封闭全自动开挖顶进, 并且实现了远距离遥控的小口径管顶管技术。为了满足长距离顶进的需要, 日本相继开发了各种功能的中继间。日本顶管使用的材料根据设计功能要求有钢管、铸铁管、PVC 管、强化塑料管、混凝土复合管等。20 世纪 70 年代后, 日本顶管着重于小口径自动导向顶管机、土压平衡式与泥水平衡式顶管机、中继间的使用和开发。1995 年后日本顶管着重于提高抗震性能、长距离顶进、曲线顶进等技术层面的发展^{[8][9]}。

1.1.2 国内顶管施工的历史与现状

国内的顶管施工是 1953 年从北京开始的, 之后上海也在 1956 年开始顶管试验。国内顶管施工技术的发展进程如表 1-3 所示。20 世纪 80 年代以后, 北京、上海、南京等地先后开始引进国外先进的机械式顶管设备。我国的顶管技术发展迅速, 无论是理论上还是施工工艺上, 都有了充分的发展。但是与国外发达国家如日本和德国相比, 我国的顶管技术在顶管设备上仍然存在明显的差距, 国内顶管技术的区域差异明显, 施工队伍的技术水平参差不齐。

国内顶管技术发展代表性工程一览表

表 1-3

施 工 方 法		时 间	研发地点或代表性工程
开 挖 方 式	手掘式顶管	1953 年	北京西郊行政区污水管工程
	人工手掘式顶管	1956 年	上海
	机械式顶管	1964 年	上海
	小口径遥控土压式机械顶管机	1967 年	上海
	挤压法顶管	1978 年	上海
	小刀盘土压平衡顶管机	1987 年	上海塘桥地区的排水工程
	多刀盘土压平衡顶管机	1988 年	上海虹漕路、浦建路等许多工地
	大刀盘液压驱动土压平衡顶管机	1989 年	上海
	加泥式土压平衡顶管机	1992 年	广东省汕头市金砂东路的繁忙路段施工
	3.8m×3.8m 组合刀盘土压平衡式矩形顶管机	1999 年	上海地铁 2 号线陆家嘴站 5 号出入口地下人行通道
	4m×6m 偏心多轴双刀盘土压平衡式矩形顶管机	2003 年	宁波市开明街——药行街地下通道工程
	TH625PMX-1 矩形顶管机	2007 年	上海地铁 6 号线漕电路车站地下通道

续表

施 工 方 法		时 间	研发地点或代表性工程
顶 进 距 离	三段双铰型顶管机, 解决百米顶进技术	1978 年	上海
	第一次应用中继间	1981 年	浙江穿越甬江的管道工程
	第一根超长距离顶管	1987 年	上海南市水厂过江顶管工程
	长 2050m, 直径 2m 的钢筋混凝土管顶管工程	2001 年	嘉兴污水处理排海工程
	长 1259m, 管径 1.8m 的钢管从 23 ~ 25m 深的地下成功穿越黄河	2002 年	西气东输工程
	管径 3.5m 钢筋混凝土顶管, 长 854m, 最大直径在 30m 深的地下, 在高水头、硬黏土和粉砂层中的越江工程	2008 年	上海市北京西路至华夏西路电力电缆隧道三标 7 号 ~ 6 号井顶管工程
	目前长度居世界第二的过海输水管, 管径 2.0m 钢管, 全长 2080m, 地质条件复杂	2008 年	汕头市第二过海水管续建工程
管 材	铸铁管	1953 年	北京
	钢筋混凝土管	1954 年	北京
	首次颁布混凝土与钢筋混凝土排水管标准	1967 年	北京
	引进增强玻璃纤维管制造技术	1985 年	江苏
	首次应用玻璃钢夹砂顶管	1999 年	西安护城河月亮桥工程
	DN3100mm 玻璃钢夹砂顶管	2005 年	新疆引额济乌一期一步工程小洼槽倒虹吸玻璃钢管道
	DN2200mm 预应力钢筒混凝土顶管	2007 年	南通狼山水厂取水输水工程

注: 部分资料来自文献 [11] ~ [17]。

从开挖方式来看, 我国顶管施工技术早期发展较慢, 多为人工手掘式顶管, 技术落后; 1964 年前后, 上海首次使用了机械式顶管; 1967 年前后, 上海研制了人不必进入管子的小口径遥控土压式机械顶管机, 口径有 700 ~ 1050mm 多种规格; 1978 年前后, 上海成功研制了挤压法顶管, 这种顶管特别适用于软黏土和淤泥质黏土。20 世纪 80 年代中期开始研制土压平衡式顶管机; 1987 年上海第二市政工程有限公司研制了我国第一台小刀盘土压平衡式顶管机; 1989 年上海隧道工程股份有限公司研制了我国第一台大刀盘液压驱动土压平衡式顶管机 (DN2200mm); 1989 年上海市政工程设计研究所等单位联合成功研制了我国第一台机械式土压泥水平衡顶管机 (DN1200mm); 1999 年上海隧道工程股份有限公司研制了我国第一台 3.8m × 3.8m 组合刀盘土压平衡式矩形顶管机; 2003 年上海隧道工程股份有限公司首创开发研制成功了第一台大断面 (4m × 6m) 偏心多轴多刀盘土压平衡式矩形顶管机。目前, 在对顶管掘进的研制方面, 已经开发了不同直径的土压平衡和泥水平衡顶管机, 设备的可靠性不断提高。

从管材上看, 我国首次顶进的管道是直径为 900mm 的铸铁管; 后逐渐改用平口的钢筋混凝土管, 管径由 900mm 逐渐增加到 1600mm; 1967 年建材工业部颁布了我国第一个离心法生产混凝土与钢筋混凝土排水管标准; 1985 年开始采用 T 形钢套环接口的钢筋混

凝土管,管径由800mm至2400mm;1990年上海合流污水一期工程以后,逐步改用F形钢筋混凝土管,管径从600mm至3500mm。近年来,玻璃钢夹砂管由于具有接口密封性能好,耐腐蚀的优点,在部分中小直径管道顶管中得到应用。另外,预应力钢筋混凝土管(PCCP)也在顶管项目上得到应用,它能够承受较高的内压,适用于给水管道。1997年无锡华毅管道有限公司开发了双胶圈接口PCCP,填补了国内空白。2001年该公司又研发了管径为3000mm的PCCP抗轴力管、铠装接口及双层缠丝技术。在排水顶管项目中,国内应用较多的是钢管顶管。

从顶进距离来看,顶管施工的距离向长距离方向发展。过去施工距离较短,一般在50m以内。1964年上海开始使用机械式顶管,顶进口径2m的钢筋混凝土管,一次顶进距离达120m。1978年成功研制的三段双铰形顶管机解决了百米顶管技术的难关;1981年浙江镇海穿越甬江的管道工程第一次成功应用中继间,其顶进长度达581m,标志着我国长距离顶管技术的成熟发展;1987年我国完成了第一根超长距离顶管,一次顶进1120m;2002年由中铁十六局集团有限公司施工的西气东输工程,成功地将长1259m、管径1.8m的钢管从23~25m深的地下穿越黄河。目前,一次顶进距离超过1000m的顶管项目已经很多了。嘉兴污水处理排海顶管工程采用D2000F型钢筋混凝土管,一次顶进距离2050m,是钢筋混凝土顶管的最长纪录。汕头市第二过海水管续建工程的顶管段全长2080米,顶管采用DN2000mm钢管,壁厚22mm,是目前长度居世界第二的过海输水管,也是国内钢顶管中长度最长的工程。表1-4列出了国内部分已完成的长距离顶管工程。

国内部分长距离顶管代表性工程一览表

表 1-4

时 间	地 点	工 程	内径 (mm)	顶进距离 (m)	管 材	特 征
1981 年	浙江	穿越甬江顶管工程	2600	581	钢管	第一次应用中继间
1987 年	上海	南市水厂过江顶管工程	3000	1120	钢管	国内第一次超长距离顶进
1989 年	汕头	自来水厂过海输水顶管工程	2000	1140	钢管	创当时顶管过海距离最长纪录
1991 年	上海	合流污水治理工程 3.2 标段	4160	2200	钢筋混凝土管	曲线顶管,采用了薄膜气压平衡技术
1991 年	上海	奉贤开发区污水排海顶管工程	1600	1511	钢筋混凝土管	创钢筋混凝土管单向顶进长度纪录
1995 年	深圳	妈湾污水排海顶管工程	2400	1609	钢管	首次应用组合密封中继间
1997 年	上海	黄浦江上游引水工程中的长桥支线顶管	3500	1743	钢管	解决了高压供电技术
1998 年	上海	奉贤污水南排工程	1600	1856	钢筋混凝土管	创国内海底一次顶进最长距离顶管纪录
2002 年	浙江	嘉兴污水排海工程	2000	2050	钢筋混凝土管	一次顶进距离最长,并采用了垂直顶升技术
2002 年	河南	西气东输郑州黄河顶管工程	1800	1259	钢管	当时大直径钢管一次性顶进距离最长的顶管工程

续表

时 间	地 点	工 程	内径 (mm)	顶进距离 (m)	管 材	特 征
2004 年	广州	广州南州水厂顶管工程	3000	1420	钢管	复杂地层
2005 年	上海	上海临港新城给水排水管网及污水处理一期 B4 标	2000	1622 1078	钢筋混凝土管	全断面粉砂、多曲线、穿越多条河道及民房
2008 年	汕头	汕头第二过海水管续建工程	2000	2080	钢管	国内相同管径的钢顶管中长度最长的工程, 复杂地层
2008 年	上海	上海市北京西路至华夏西路电力电缆隧道三标 12 号~13 号井顶管工程	3500	1289	钢筋混凝土管	曲线顶管, 穿越民房群, 地面沉降在 10mm 以内
2008 年	上海	上海市北京西路至华夏西路电力电缆隧道三标 7 号~6 号井顶管工程	3500	854	钢筋混凝土管	最大直径的在 30m 深的地下, 在高水头、硬黏土和粉砂层中越江工程
2009 年	上海	上海市雪野路电力电缆隧道 A 号~7 号井顶管工程	3000	884	钢筋混凝土管	三维复合曲线, 最小曲率半径 134m, 是轴线变化最复杂的顶管工程

注: 部分资料来自文献[11][13][16]~[19]。

在顶管直径方面, 已经覆盖了从 $\phi 600\text{mm}$ 至 $\phi 3500\text{mm}$ 的钢筋混凝土管。在顶管深度方面, 能完成在埋深 30m 左右的高水头、深覆土、硬黏土层条件的顶管。在曲线顶管方面能完成三维复合急曲线顶管, 最小曲率半径仅 $37D$ 。在地表变形方面, 能顺利穿越复杂构筑物, 地下管线和铁路等工况。在顶管测量方面, 已成功开发了顶管自动引导测量系统。在对地层的适应性方面, 已经摸索出对不同地层的顶管机的设计制造。此外, 在与顶管施工相关的顶管注浆减摩工艺、顶管进出洞口施工技术等方面都取得了很大的技术进步。

1.2 顶管施工技术的构成与步骤

1.2.1 顶管施工技术的构成

图 1-2 为顶管施工技术构成图。如图所示, 完整的顶管施工大体包括工作井、推进系统、注浆系统、定位纠偏系统及辅助系统五个部分。

1.2.1.1 工作井

在需要顶进的管道一端修建的竖井称为工作井, 或称基坑, 如图 1-3 所示。工作井按其使用用途可分为顶管工作井和接收工作井。顶管工作井是为布置顶管施工设备而开挖的工作井, 一般设置有后背墙以承受施工过程中的反力; 接收工作井是为接收顶管施工设备而开挖的工作井^[1]。通常管节从顶管工作井中一节节推进, 到接收工作井中把顶管机吊起, 当首节管进入接收工作井时, 整个顶管工程才告结束。

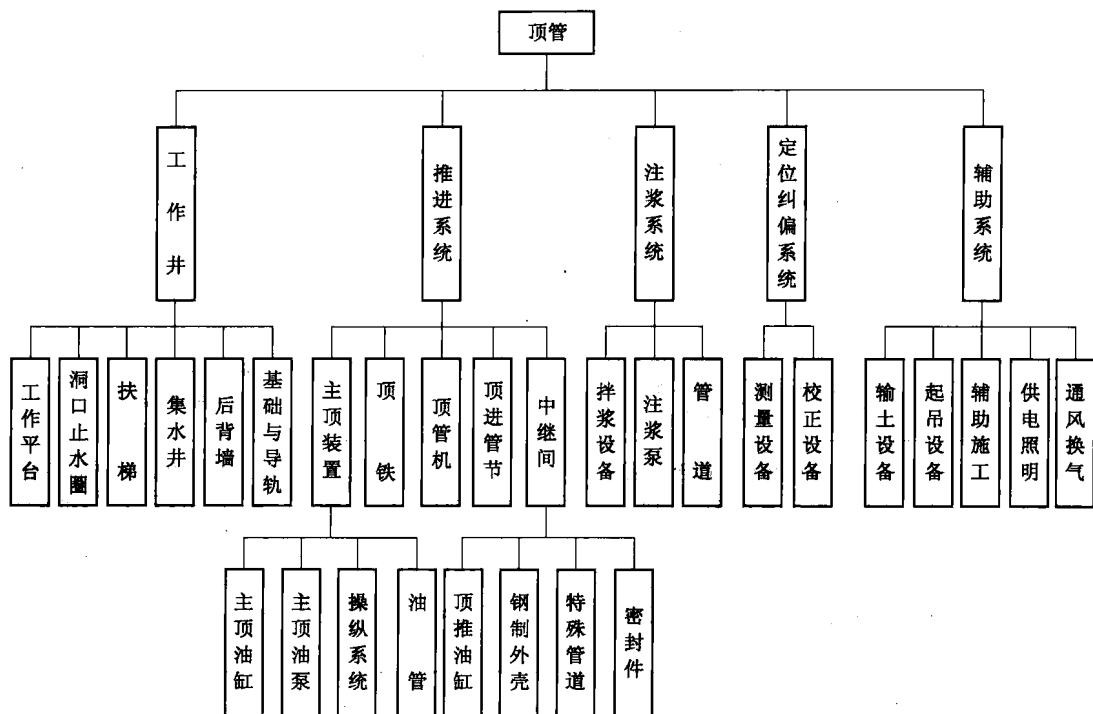


图 1-2 顶管施工技术构成图

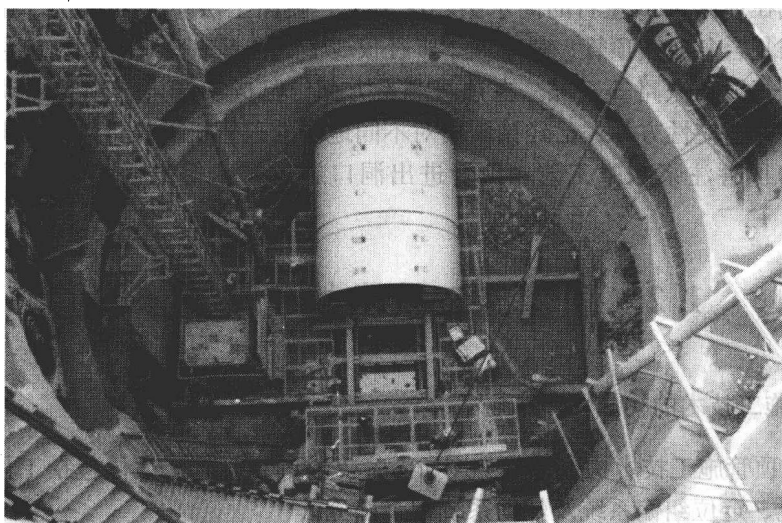


图 1-3 工作井现场施工

工作井中常需要设置各种配套装置，包括扶梯、集水井、工作平台、洞口止水圈、后背墙以及基础与导轨。

1) 工作平台

工作平台宜布置在靠近主顶油缸的地方，由型钢架设而成，上面铺设方木和木板。

2) 洞口止水圈

洞口止水圈安装在顶管工作井的出洞洞口,防止地下水和泥砂流入工作井。

3) 扶梯

工作井内需设置扶梯,以方便工作人员上下,扶梯应坚固防滑。

4) 集水井

集水井用来排除工作井底板处的地下水,或兼作排除泥浆的备用井。

5) 后背墙

后背墙位于顶管工作井顶进方向的对面,是顶进管节时为顶管工作井提供反作用力的一种结构^[1]。后背墙在顶管施工中必须保持稳定,具有足够的强度和刚度。它的构造因工作井的构筑方式不同而不同。在沉井工作井中,后背墙一般就是工作井的后方井壁。在钢板桩工作井中,必须在工作井内的后方与钢板桩之间浇筑一座与工作井宽度相等的厚度为0.5~1m的钢筋混凝土墙。由于主顶油缸较细,若把主顶油缸直接抵在后背墙上,后背墙很容易损坏。为了防止这类事情发生,在后背墙与主顶油缸之间,需垫上一块厚度为200~300mm的钢构件,即后靠背。在后靠背与钢筋混凝土墙之间设置木垫,通过它把油缸的反力均匀地传递到后背墙上,这样后背墙就不太容易损坏。

6) 基础与导轨

基础是工作井坑底承受管节重量的部位。基础的形式取决于地基土的种类、管节的重量及地下水位。一般的顶管工作井常采用土槽木枕基础、卵石木枕基础及混凝土木枕基础。①土槽木枕基础:适用于地基承载力大而又没有地下水的地方。这种基础在工作井底部平整后,在坑底挖槽并埋枕木,枕木上安放导轨;②卵石木枕基础:适用于有地下水但渗透量较小、以细粒为主的粉砂土。为防止安装导轨时扰动地基土,可铺设一层100mm的碎石以增加承载力;③钢筋混凝土基础:适用范围比较广,适用于地下水位高、地基土软弱的情况。这种基础是在工作井地基上浇筑一定厚度的钢筋混凝土,导轨安装在钢筋混凝土基础上。它的作用主要有两点:一是使管节沿一稳定的基础导向顶进;二是让顶铁工作时能有一个可靠的托架。导轨一般采用型钢焊接而成,应具有较高的尺寸精度,并具有耐磨和承载力大的特点;导轨下方应用刚性结构垫实,两侧撑牢固定。基础和导轨是顶管的出发基准,应该具有足够的强度和刚度,并具有坚固且不移位的特点。

1.2.1.2 推进系统

1. 主顶装置

主顶装置主要由主顶油缸、主顶液压泵站、操纵系统以及油管等组成。①主顶油缸:主顶油缸是主顶装置的主要设备,工程中习惯称之为千斤顶,它是管节推进的动力。如图1-4所示,主顶油缸安装在顶管工作井内,一般均匀布置在管壁两侧,油缸主要由缸体、活塞、活塞杆及密封件组成,其形式多为可伸缩的液压驱动的活塞式双作用油缸。②主顶液压泵站:主顶液压泵站的压力油由主顶油泵通过高压油管供给,如图1-5所示。③操纵系统:主顶油缸的推进和回缩是通过操纵系统控制的,如图1-6所示。操纵方式有电动和手动两种,前者使用电磁阀或电液阀,后者使用手动换向阀。④油管:常用的油管

有钢管、高压软管等。管接头的形式根据系统压力选取，常用的管接头有卡套式和焊接式。

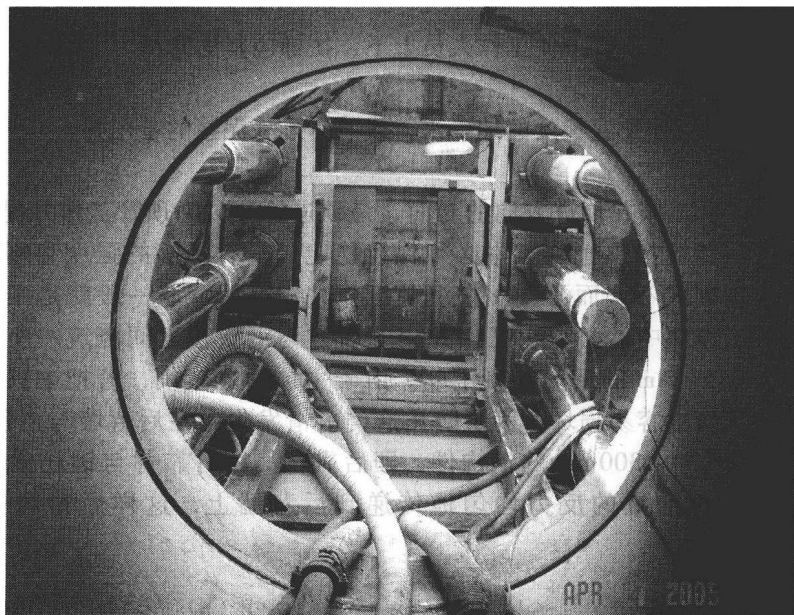


图 1-4 主顶油缸

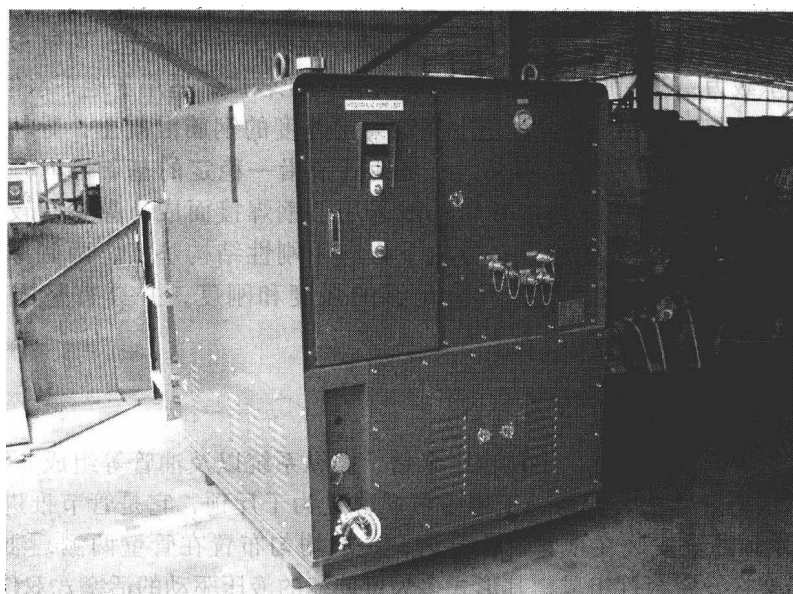


图 1-5 主顶液压泵站