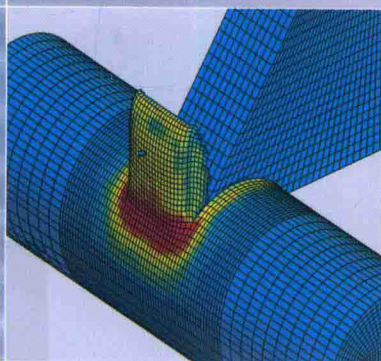




盾构切削大直径钢筋混凝土群桩的理论与实践

袁大军 王 飞 著



科学出版社

盾构切削大直径钢筋混凝土 群桩的理论与实践

袁大军 王 飞 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

在城市盾构掘进施工中,常会遇到地中障碍物。其中,桩基就是最典型的一种障碍物。在能确保桩所支撑的建(构)筑物安全和满足功能的条件下,盾构直接切桩通过是最理想的选择。本书呈现给读者的正是盾构切削大直径钢筋混凝土桥桩的研究成果和成功案例。全书共13章,从理论分析、现场切桩试验和工程验证等角度,详细地论述了盾构切削“钢筋”“混凝土”机理、新型刀具的研发及配置、盾构切削钢筋混凝土桩模式、盾构机改造方法、现场盾构切削钢筋混凝土桩试验以及盾构切削苏州广济桥14根大直径钢筋混凝土桥桩过程,最后介绍研究开发的与切桩密切相关的壁后注浆、渣土改良等内容。

本书配有大量图片,内容深入浅出,对盾构工程的设计、施工和管理有较大的借鉴意义,可供隧道工程等相关专业的工程技术人员、科研人员以及高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

盾构切削大直径钢筋混凝土群桩的理论与实践 / 袁大军, 王飞著.
—北京: 科学出版社, 2017.9
ISBN 978-7-03-053115-5

I. ①盾… II. ①袁… ②王… III. ①钢筋混凝土-群桩-盾构法
IV. ①TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 126219 号

责任编辑: 张晓娟 / 责任校对: 桂伟利
责任印制: 张克忠 / 封面设计: 熙 望

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017年9月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 353 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

袁大军教授长年从事盾构隧道研究，在日本留学并工作多年，在早稻田大学师从森麟教授、小泉淳教授，有较为扎实的理论基础和实践经验。回到北京交通大学工作后专心从事盾构研究，长期坚守在工程一线，以解决实际工程中的难题见长，取得了诸多优秀的科研成果，是国家重点基础研究发展计划（973 计划）“高水压越江海长大盾构隧道工程安全的基础研究”的首席科学家。

近年来，随着盾构技术的飞速发展，盾构已成为地下工程不可或缺的利器。但盾构也有其局限性，如难以直接切除地中障碍物。与可以人工拆除的暗挖法相比，劣势凸显，影响了盾构的选用。

令人欣喜的是，袁大军教授带领的团队对盾构切削大直径钢筋混凝土群桩进行了研究，不仅在切桩理论、新型刀具的研发、刀盘及刀具配置方法上有所突破，而且还进行了国内外首次盾构切桩试验，并成功应用于切削苏州广济桥 14 根大直径钢筋混凝土桥桩工程，取得了可喜的成果。同时，拓宽了盾构技术的应用领域，对建（构）筑物桩基林立的城市中心区地下工程有重要的意义。该成果已在北京、杭州、深圳等地的地铁盾构隧道工程中成功应用，推广前景广阔。

我对该书的内容比较了解，也源于我的博士生王飞的博士论文是该研究成果的一部分。书中有许多珍贵的图片和试验成果，作者都毫无保留地呈现出来。在国际上，日本也有盾构切削排水板、钢管等专用刀具，但无法切削土体，必须在切削障碍物前后进行更换，不仅工程效率低，而且在地中更换刀具具有较大的施工风险。该研究成果的盾构刀具不仅可以切削钢筋混凝土群桩，而且可以切削软土，不必更换刀具。从这些方面来看，该成果具有国际领先水平。

该书内容丰富，图文并茂，既有对盾构切削基础理论的叙述，又有对工程案例的详细介绍，可供盾构工程技术人员、科研人员以及高等院校相关专业的师生参考。



2017 年 3 月 27 日

前 言

若从在早稻田大学跟随我的盾构启蒙老师森麟教授学习盾构硕士课程算起，自己从事盾构研究已有 27 年。当年第一次在东京湾海底隧道工地见到盾构的震撼，跟随师兄们挥汗做盾构泥水劈裂模型试验，后来在日产建设技术研究所研制盾构模型机，做刀盘堵塞试验，再后来跟随恩师小泉淳教授攻读博士学位，边喝啤酒边熬夜写论文的情景依然历历在目！虽然没有什么惊人的研究成果，也算得上是盾构隧道队伍里的一员。

回国后，正好赶上如火如荼的地铁及地下工程建设，自己所学的盾构知识也派上了用场，主持完成了多个与盾构掘进工程相关的科研项目。从北京地铁砂卵石地层盾构掘进研究开始，到广州地铁复合盾构滚刀磨损，南京长江隧道和南京纬三路过江隧道高水压小覆土盾构掘进安全，以及深圳地铁盾构穿越既有线等。其中印象最深、研究周期最长、团队参与研究人数最多的还是苏州轨道交通 2 号线盾构穿越构筑物的研究，不仅在富水软弱地层的苏州地区连续盾构、连续穿越 570 栋次建筑物，而且进行了盾构切桩的大胆尝试！记得当时提出切桩后，反对声、疑问声十分强烈，特别是设计咨询单位。如果按原设计的拆桥方案，确实问题就简单了！谁都不担责任。但就这样把刚建设没几年的桥拆了，作为一个技术工作者确实心有不甘！记得，当时自己没有把握，打电话询问恩师小泉淳教授，回答也是：“在日本几乎没听说过，要慎重！”幸好，苏州市轨道交通集团的领导坚决支持切桩，使得我们的研究团队也有了完成这项艰巨任务的信心。当然，反对声和质疑声也使我们更加慎重，应该说是如履薄冰地开始了研究工作。

盾构切桩研究从国内外调研开始，我们几乎查遍了所有可能查到的与盾构切削桩基有关的工程案例和相关资料，仔细分析并到相关单位及现场调研、学习请教。理论分析自不必说，即使在采用滚刀或切刀的切削钢筋混凝土桩这个最基本的问题上，两种意见争论相持不下，甚至专家会上也是两种意见各不相让。无论从切削原理还是已有的案例看，都是滚刀有利。但苏州富水软土地层难以实现其掘削效果，可用切刀直接切削“钢筋”“混凝土”，又担心其切削能力和刀具损伤。我们在这方面做了较多的研究和探索工作，最终采用了改良的刀具和刀盘，效果还比较好，书中有详细论述。

本书另一个值得读者重点参考的是盾构切削钢筋混凝土桩试验，这也是国际上的首次试验。起初，我们实在是对切钢筋混凝土桩心里没底，一旦不成功，就会给工程带来极大的麻烦，这逼迫我们必须要做个真实的切桩试验，来确认我们

的想法是正确的，方案是可行的。幸好，在施工单位中铁十三局（现中国铁建大桥工程局集团有限公司）的大力支持和盾构机制造商小松（中国）的积极配合下，我们实现了这个难能可贵的试验，同时观察到了盾构切桩的全部过程，使我们对盾构切桩工程有了底气和信心。

虽然我们做了充分的研究和精心的准备，但真正切桩施工时，还是极为紧张。桥的安全必须保证，同时桥也不能封，客人旅游观光及公共交通不能受到影响。深夜里听到从地下传出的盾构切桩的吱吱嘎嘎的奇怪声音，甚至有点恐怖！书中对切桩的过程都有较详细的描述。

切桩项目能够圆满完成，要感谢很多人。首先应该感谢的是苏州市轨道交通集团有限公司常务副总经理董朝文教授级高工，是他提出盾构切桩的命题。从调研开始，到盾构改造方案、盾构切桩试验，直到切桩工程完成，他一直在前线协调和指挥，每当遇到困难，都是他跟我们一起出主意、想办法，他胆大心细，周密布置，没有他的奉献，本项目的完成是无法想象的。苏州市轨道交通集团有限公司周明保董事长、王占生总工程师也经常到现场指导和鼓励，在重大方案的决策上，他们积极支持，出谋划策，勇于担当。建设分公司的多位年轻负责人：蔡荣副总、王社江主任、朱宁博士，薛永健副主任、陈海丰博士都和我们团队一起熬夜琢磨，坚守现场。设计单位中铁第四勘察设计院集团有限公司苏州设计研究院王效文院长，施工单位中铁十三局穆永江项目经理、韩冰总机械师、李海总工，盾构机制造商小松（中国）技术负责人南好人先生都给予了我们大力支持和积极配合。

盾构切桩项目完成后，时常有地铁建设、设计、施工单位来询问盾构切桩的问题。特别是去年，在评审北京地铁 12 号线、19 号线等设计总体方案时，盾构能否切桩成为了一个关键问题。在会上，我用苏州盾构切削大直径钢筋混凝土群桩的经验来说明盾构切桩是可行的，最终切桩方案被采用。在专家会休息聊天的时候，一位老前辈说，你应该把切桩的事系统地写出来，让大家知道。仔细想来，我们的研究成果还略显粗浅，不够系统，距离出书还有距离，甚至有些内容还不够成熟，须再认真推敲，深入研究。但不管怎么说，团队对盾构切削钢筋混凝土桩有了较多的感悟和认识，将这些心得体会写出来，与读者分享，既可供设计施工者参考，为盾构穿越桩基提供一个新思路和方法，也能为相关研究提供些许借鉴。带着这种复杂的心情，我们战战兢兢地开始了本书的撰写工作。

本书由袁大军制定大纲并组织撰写，王飞结合他的博士论文撰写了相关内容，书中还包括陈海丰的博士论文以及王全华、蒋兴起、刘浩和周璇的硕士论文的主要内容。最后由袁大军统一修改，形成本书。

本书的主要内容是团队盾构切桩项目的研究成果，李兴高教授、丁洲祥副教授、乔国刚博士后等在项目研究中做了大量工作。在撰写本书过程中，团队成员

博士研究生金大龙、吴俊、沈翔、王滕、毛家骅、王将，硕士研究生韦家昕、陆平、许亚楼、王小宇、高振峰、王旭阳等都参与了文献搜集、图表绘制、校稿等工作，特此致谢。本书的出版得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)“高水压越江海长大盾构隧道工程安全的基础研究”(2015CB57800)的资助，在此表示感谢。

盾构切削钢筋混凝土群桩是可能的，但“切桩有风险，切桩需谨慎”！若本书能为读者提供这方面的些许参考和借鉴，那将是我们莫大的荣幸。



2017 年 3 月 21 日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 盾构的起源及发展	1
1.2 盾构技术在我国的应用	5
1.3 盾构切削大直径钢筋混凝土桩问题的提出	6
参考文献	7
第 2 章 盾构切桩工程案例	8
2.1 盾构切桩工程案例调研	8
2.2 盾构切桩工程详例介绍	11
2.2.1 沈阳地铁 1 号线盾构切削桥梁桩基	11
2.2.2 上海轨道交通 7 号线盾构切削工业厂房桩基	12
2.2.3 上海轨道交通 10 号线盾构切削简支梁桥桩基	14
2.2.4 天津地铁 9 号线盾构被动切削房屋桩基	16
2.2.5 上海轨道交通 9 号线盾构切削简支梁桥桩基	17
2.2.6 广州地铁 3 号线盾构切削居民楼桩基	18
2.3 调研案例与苏州工程切桩的比较分析	19
2.4 本章小结	21
参考文献	21
第 3 章 盾构的刀盘、刀具与切削（掘削）	23
3.1 盾构的刀盘与刀具	23
3.1.1 刀盘	23
3.1.2 刀具	24
3.2 盾构切刀切削	25
3.2.1 切刀的种类及功能	25
3.2.2 切削机理	26
3.2.3 刀具磨损	27
3.3 盾构滚刀掘削	29
3.3.1 滚刀的种类及功能	29
3.3.2 掘削机理	30
3.3.3 刀具磨损	30

3.4 刀盘选型原则与切削刀具的配置原理	30
3.4.1 刀盘选型原则	30
3.4.2 刀具配置原理	31
参考文献	32
第4章 盾构切削钢筋混凝土桩的可行性	34
4.1 盾构切削钢筋混凝土桩的特性	34
4.1.1 切刀切削钢筋混凝土桩的特性	34
4.1.2 滚刀切削钢筋混凝土桩的特性	35
4.2 切削钢筋混凝土桩刀具的选择	36
4.2.1 切削钢筋混凝土桩的边界(围岩)条件	36
4.2.2 刀具配置具体目标	36
4.2.3 刀具选型	36
4.3 盾构切削钢筋混凝土桩可能存在的问题	38
参考文献	40
第5章 刀刃与钢筋混凝土的相互作用及切削机理研究	41
5.1 刀刃切桩的适应性分析与选型	41
5.2 切削仿真有限元基础	42
5.2.1 LS-DYNA 动力学软件简介	42
5.2.2 动态接触算法	43
5.2.3 单点高斯积分与沙漏控制	44
5.2.4 显式求解方法与时步控制	45
5.3 刀刃切削钢筋机理	46
5.3.1 钢筋本构模型	46
5.3.2 钢筋切屑分离准则	47
5.3.3 切削钢筋细观模型建立	48
5.3.4 负前角刀刃切削钢筋的机理分析	49
5.4 三维刀刃动态切削钢筋仿真	52
5.4.1 仿真模型建立	52
5.4.2 典型刀刃动态切削钢筋过程及特征	53
5.4.3 前角对切削钢筋的影响规律	56
5.4.4 刃角和刃宽对切削钢筋的影响规律	56
5.5 刀刃切削混凝土机理	59
5.5.1 混凝土的本构模型	59
5.5.2 切削混凝土细观模型建立	62

5.5.3 负前角刀刃切削混凝土的机理分析	63
5.6 三维刀刃动态切削混凝土仿真	64
5.6.1 典型刀刃动态切削混凝土分析	64
5.6.2 前角对切削力的影响规律	66
5.6.3 刃角和刃宽对切削力的影响规律	66
5.7 本章小结	67
参考文献	68
第 6 章 新型刀具的切桩性能与磨损机理研究	70
6.1 新型切桩刀具研发	70
6.2 新型刀具切削钢筋的力学特征与规律分析	71
6.2.1 热力耦合分析方法	71
6.2.2 切削钢筋模型建立	72
6.2.3 切削钢筋效果与动态过程分析	73
6.3 切深和切速对切削钢筋的影响规律	76
6.3.1 切深对切削钢筋的影响规律	76
6.3.2 切速对切削钢筋的影响规律	77
6.4 新型刀具切削混凝土的力学特征与规律分析	78
6.4.1 动态切削全过程分析	78
6.4.2 混凝土和刀具应力分析	79
6.4.3 切削力分析	79
6.5 切深对切削混凝土的影响规律	80
6.6 切桩刀具磨损机理与类型判别	81
6.7 本章小结	82
参考文献	83
第 7 章 切桩主力刀具配置与掘削参数控制的理论探析	84
7.1 切桩主力刀具的布置及数量	84
7.1.1 布置方法比选	84
7.1.2 刀间距初步方案	84
7.1.3 轨迹布刀数量和相位角的设置	86
7.2 刀盘切桩受力计算模型	86
7.2.1 数学模型建立	86
7.2.2 刀具切深的确定	87
7.2.3 计算程序编制	90
7.3 推力扭矩的特征与影响因素	91

7.3.1 切桩刀数和推力扭矩的变化特征	91
7.3.2 桩身宽度对推力扭矩的影响	93
7.3.3 桩基偏移距离对推力扭矩的影响	94
7.4 不平衡力和倾覆力矩的特征与影响因素	95
7.4.1 计算方法	95
7.4.2 切削中部桩和侧部桩的变化特征	96
7.4.3 桩身宽度和偏移距离的影响	97
7.5 切削参数设置和控制建议	98
7.6 本章小结	99
参考文献	100
第8章 切桩盾构设备的适应性改造	101
8.1 所用盾构机改造前情况	101
8.2 刀盘、刀具改造加强	103
8.2.1 切桩主力刀具配置	103
8.2.2 其他切桩刀具的设计及布置	103
8.2.3 加强改造后的刀盘、刀具装配图	105
8.3 螺旋输送机改造	105
8.3.1 改造方案探讨	105
8.3.2 改造实施具体方案	106
8.4 其他改造措施	107
8.5 刀盘刚度加强与检算	108
8.6 本章小结	109
第9章 盾构切削大直径钢筋混凝土桩基试验	111
9.1 现场试验方案	111
9.1.1 试验的必要性及意义	111
9.1.2 试验总体方案比选	111
9.1.3 试验研究内容	112
9.1.4 试验桩布置及约束	112
9.1.5 切削工况设计	114
9.2 试验现象和结果	114
9.2.1 各工况实际实施情况	114
9.2.2 试验过程及现象	115
9.2.3 试验结果统计	122
9.3 切削混凝土分析	122

9.3.1 中心小贝壳刀切削混凝土效果	122
9.3.2 正面大贝壳刀切削混凝土效果	123
9.3.3 混凝土脊量测与合理刀间距分析	124
9.4 切削钢筋分析	126
9.4.1 断筋长度统计	126
9.4.2 钢筋断口形态分析	126
9.4.3 混凝土包裹对断筋长度的影响	128
9.5 切削参数分析	129
9.5.1 切削参数统计	129
9.5.2 推力和扭矩变化特征	131
9.5.3 与切深和刀盘转向的关系	133
9.6 刀具损伤分析	134
9.6.1 刀具损伤数量及形式	134
9.6.2 刀具损伤分布规律	135
9.6.3 刀刃防崩损改进与防护	136
9.7 试验桩变形与钢筋受力分析	137
9.7.1 试验桩变形监测	137
9.7.2 试验桩钢筋受力分析	139
9.8 刀具立体布局优化与群刀切削仿真实验	140
9.8.1 分次切筋理念与刀具立体布局优化方案	140
9.8.2 超前贝壳刀立体布局方案切桩仿真试验	141
9.9 本章小结	144
第 10 章 盾构切削大直径群桩的控制措施与施工实践	146
10.1 盾构切削 14 根大直径桩基的风险点与可行性分析	146
10.1.1 盾构切削大直径群桩的风险点分析	146
10.1.2 刀具切削群桩的磨损量预测	148
10.1.3 工程可行性分析	150
10.2 桥梁结构的承载力检算与加固	151
10.2.1 分析思路和检算方法	151
10.2.2 检算结果及分析	152
10.2.3 1#桥墩加固方案比选	154
10.2.4 1#桥墩加固具体施工措施	155
10.3 隧道管片衬砌的附加应力计算与配筋增强	159
10.3.1 切桩后桩端与管片相对位置分析	159

10.3.2	计算断面选取	160
10.3.3	附加应力计算	160
10.3.4	管片受力和配筋计算分析	161
10.4	盾构切削穿越大直径桩基施工控制技术	163
10.4.1	刀盘切削关键技术	163
10.4.2	穿桩施工辅助技术	166
10.4.3	工程管理措施	168
10.4.4	其他应考虑的问题	169
10.5	双线切削穿桩施工总体情况	171
10.5.1	工程实施总体效果	171
10.5.2	左、右线切桩历时与切削参数统计	171
10.6	左线切削 5 排 7 根大直径桩基的实施过程与效果	173
10.6.1	切削 3 [#] 桥台 3-1、3-2 排桩施工情况	173
10.6.2	切削 2 [#] 桥墩 2-1、2-2 排桩施工情况	176
10.6.3	切削 1 [#] 桥墩 1-1 排桩施工情况	179
10.7	右线切削 7 排 7 根大直径桩基的实施过程与效果	180
10.7.1	切削 3 [#] 桥台 3-3、3-4 排桩施工情况	180
10.7.2	切削 2 [#] 桥墩 2-3、2-4 排桩施工情况	183
10.7.3	切削 1 [#] 桥墩 1-2 排桩施工情况	184
10.7.4	切削 0 [#] 桥台 0-1、0-2 排桩施工情况	186
第 11 章	盾构切削大直径群桩的实测分析	188
11.1	钢筋收集与切筋效果分析	188
11.1.1	受切钢筋和混凝土的理论量	188
11.1.2	钢筋收集方式与排出量统计	188
11.1.3	钢筋长度统计分析	190
11.1.4	钢筋形态统计分析	191
11.2	刀具损伤分析与磨损系数回归	193
11.2.1	各类刀具损伤现象	193
11.2.2	刀具磨损量统计及其规律	195
11.2.3	超前贝壳刀磨损系数	196
11.2.4	正面大贝壳刀磨损系数	197
11.3	切桩推力扭矩的变化规律及影响因素	197
11.3.1	切桩过程中推力变化规律	197
11.3.2	切桩过程中扭矩变化规律	201

11.3.3 刀盘前注入添加剂对推力扭矩的影响	205
11.3.4 刀盘正反转对推力扭矩的影响	207
11.3.5 盾构停机对推力扭矩的影响分析	209
11.3.6 刀具损伤对推力扭矩的影响	209
11.4 桥梁墩台三维变形监测统计与规律分析	211
11.4.1 桥梁墩台三维变形监测方案	211
11.4.2 各墩台三维变形监测数据统计	212
11.4.3 盾构切桩对桥梁墩台变形的影响分析	213
11.4.4 墩台三维变形历时曲线及其规律	215
11.4.5 桥梁安全性评估	220
11.5 隧道管片变形及结构安全性研究	220
11.5.1 管片三维变形监测及分析	220
11.5.2 管片椭圆度变化规律分析	223
11.5.3 管片错台数据统计及分析	225
11.5.4 隧道结构安全性评估	226
11.6 隧道管片变形及结构安全性研究	226
第 12 章 盾构切削钢筋混凝土桩的辅助技术	228
12.1 新型壁后注浆材料	228
12.1.1 新型浆液原材料及浆液性能指标要求	229
12.1.2 新型浆液组成材料的功能分析	230
12.1.3 新型浆液试验与结果分析	230
12.1.4 新型浆液的应用	245
12.2 新型土体改良泡沫剂	248
12.2.1 泡沫的作用	248
12.2.2 泡沫剂开发	248
12.2.3 泡沫改良土体试验	249
12.2.4 泡沫改良土体现场应用	253
12.3 本章小结	254
参考文献	255
第 13 章 结语	256
13.1 可供参考的研究成果	256
13.2 存在的问题及改进建议	257
13.2.1 合金刀刃崩损较多问题	257
13.2.2 刀具不等量磨损问题	258

13.2.3 切桩连续作业以致温度过高问题	259
13.3 切桩有风险，切桩需谨慎	260
13.4 展望	261

第 1 章 绪 论

盾构法是暗挖构筑地下工程的一种施工方法，它起源于欧洲，随着科技的不断进步，盾构法已成为地下工程中不可或缺的工法。盾构是英文“Shield”的中文翻译语，在我国台湾地区则翻译成“潜盾”，英文词根是“盾”或“盾牌”的意思。翻译成盾构，确实能更形象准确地表达其工程意义。盾构有两层含义，盾，象征与盾牌形状相近的盾构机的刀盘，且有支护开挖面之意；构，构筑隧道，是管片衬砌结构的意思。现今，盾构这个词已成为国内外地下工程界最常用的词。与之相近的是 TBM (tunnel boring machine)，是隧道掘进机之意，泛指硬岩掘进机。在欧洲，有把盾构和 TBM 统称为 TBM 的习惯；但在亚洲，由于日本、我国等区域软土分布广、应用多，为区别软土和硬岩掘进模式的不同，强调软土“盾”的作用，一般将软土掘进构筑隧道的方法统称为盾构法，将硬岩掘进构筑隧道的方法统称为 TBM 法。

1.1 盾构的起源及发展

说起盾构，如今它已成为地下工程不可或缺的锐器，甚至是现代重大装备。自从火药发明以来，在岩石中构筑隧道技术迅速发展，但在软土中用暗挖的形式构筑隧道却几经失败，举步维艰。从世界盾构隧道发展历史来看，最早尝试在软土中构筑隧道的是 1804 年英国工程师 Trevithick 以及他的助手 Vasey。当时由于英国伦敦泰晤士河口附近有军港，无法架桥，过河须用渡船或迂回到河中部的桥，且渡船事故频发，如图 1.1.1 所示。Trevithick 首次提出了用隧道的方法穿越泰晤士河的方案。

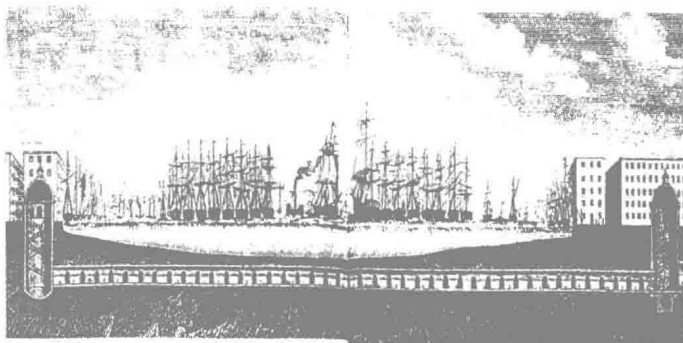


图 1.1.1 泰晤士河船运示意图

据史料记载,该方案是在泰晤士河两岸构筑深 25.3m 的竖井,从竖井开始进行穿越泰晤士河挖掘工作。第一步是施做先行导坑,高 1.7m,上部宽 0.75m,底部宽 1m,人工挖掘,掘进速度为 1.3~3.3m/d,18 个月掘进了 330m。掘进作业涌水不断,特别是作业受高潮的影响,水位上升,发生了两次塌方事故。另外,掘进方向的测定采用掘进一段后,用铁棒捅破导坑顶部露出水面,用岸上基准点进行角度测量的方法,这也成为导坑坍塌的直接诱因,最后工程被迫终止。之所以把这段写出来,是为了纪念那些在软土区域挑战构筑隧道的伟大先行者们。他们的勇气和探索精神值得我们永远学习、敬仰和铭记。

盾构技术的诞生实现了人类在软土中构筑隧道的梦想。关于盾构最初的探索最著名的应该是称作盾构鼻祖的法国工程师 Marc Isambard Brunel 于 1818 年发明的早期盾构技术,至今已有近 200 年的历史^[1]。这个最初的盾构设计借鉴了 Trevithick 的失败经验,虽然也历尽磨难,但最终获得成功,图 1.1.2 是当时 Marc Isambard Brunel 申请专利的图片。虽然盾构技术今非昔比,发生了巨大的变化,但其原理与这台早期的盾构机的基本思想——在坚固的铁框架(strong iron frame)的保护下进行开挖和衬砌作业——别无两样。

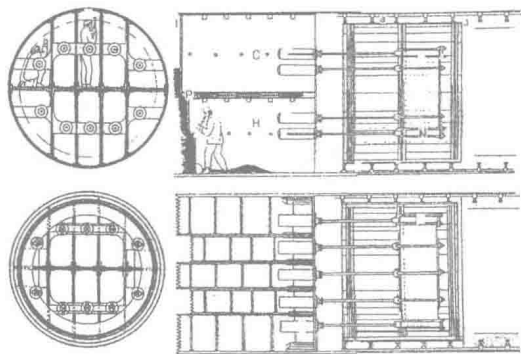


图 1.1.2 Marc Isambard Brunel 申请的盾构专利图

1823 年, Marc Isambard Brunel 的儿子 Isambard Kingdom Brunel 制定了穿越泰晤士河双线隧道方案,如图 1.1.3 所示。盾构由 12 个高 7.33m、宽 1m 的铸铁框架组合而成,每个又分为高 2.3m 的三个区域,每个区域由 36 人进行挖掘作业。盾构掘进由螺旋千斤顶提供反力,衬砌是在每个铸铁做成的框架上部用砖砌起来的。对于开挖面塌落的土砂,采用长 1m、宽 15cm 的挡板并用螺旋千斤顶顶住的方式来固定。

作业时,把一块或两块板取下进行开挖作业,以防止泄水和流土。当遇到流动性大的土时,在板上再加斜撑,以增加板对掌子面的支撑力。担任技术负责的主任工程师是 Isambard Kingdom Brunel。开工日期是 1825 年 3 月 2 日,直到 1826