

机械工程前沿著作系列 HEP  
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

# 全断面隧道掘进机刀盘系统 现代设计理论及方法

霍军 周孙 伟  
马跃 郭郭 莉  
李震 张旭 著

Modern Design Theory and  
Method of Full-face Tunnel Boring  
Machine Cutterhead System

高等教育出版社

机械工程前沿著作系列 HEP  
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

# 全断面隧道掘进机刀盘系统 现代设计理论及方法

Modern Design Theory and  
Method of Full-face Tunnel Boring  
Machine Cutterhead System

霍军周 孙伟 马跃 郭莉 李震 张旭 著

QUANDUANMIAN  
SUIDAO JUEJINJI  
DAOPAN XITONG  
XIANDAI SHEJI  
LILUN JI FANGFA

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书主要介绍面向全断面隧道掘进机(TBM)刀盘系统的若干关键问题及其设计理论、方法与技术体系。全书共分9章,包括绪论、滚刀群破岩机理及滚刀群多阶段受力预测模型、强冲击载荷下TBM滚刀动态特性及新结构研究、TBM刀群三维回转切削仿真与刀间距优化设计、滚刀群与盘体支撑结构耦合布置设计、性能驱动的刀盘盘体结构设计、面向可靠性和振动特性的TBM主轴承结构设计、TBM刀盘系统振动特性分析与掘进现场测试研究,以及TBM刀盘设计系统开发。

本书贴合机械工程实际,内容丰富、系统。在隧道掘进工程领域,本书既可作为从事结构设计分析的科研和工程技术人员的参考书,又可作为高等院校高年级本科生、研究生的教学用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

全断面隧道掘进机刀盘系统现代设计理论及方法 /  
霍军周等著. -- 北京:高等教育出版社, 2017. 1

(机械工程前沿著作系列)

ISBN 978-7-04-046946-2

I. ①全… II. ①霍… III. ①隧道工程 - 全断面掘进机 - 掘进机刀具 - 系统设计 IV. ①U455.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第289731号

策划编辑 刘占伟	责任编辑 刘占伟	特约编辑 陈 静	封面设计 杨立新
版式设计 杜微言	插图绘制 杜晓丹	责任校对 陈旭颖	责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印 刷 北京汇林印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 26.75  
字 数 490千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2017年2月第1版  
印 次 2017年2月第1次印刷  
定 价 99.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 46946-00

## 作者简介



霍军周, 男, 汉族, 1979 年出生, 大连理工大学机械工程学院副教授, 工学博士, 博士生导师。入选辽宁省百千万人才工程、辽宁省高等学校杰出人才资助计划。主要从事性能驱动的机械零部件结构优化设计及测试、机械复杂系统三维空间布局设计、机械零部件结构损伤检测与寿命预测的教学与研究工作。近年来主持博士后基金、博士后特别资助项目、国家青年自然科学基金、国家自然科学基金青年一面上连续资助项目、国家科技支撑计划课题、企业横向课题共 8 项, 作为技术骨干参与国家 973 项目、国家科技支撑计划项目、辽宁省重大项目共 3 项。申请和授权专利 14 项, 获得 2016 年辽宁省科技进步二等奖, 2013 年辽宁省和大连市自然科学优秀学术论文一等奖, 总计发表论文 50 余篇, 其中 SCI 收录 12 篇, EI 收录 35 篇。



孙伟, 男, 汉族, 1967 年出生, 大连理工大学机械工程学院教授, 工学博士, 博士生导师。现为中国机械工程学会高级会员、中国机械工程学会机械工业自动化分会委员、辽宁省自动化学会第七届理事会理事, 获教育部新世纪人才计划资助, 入选辽宁省第三批百千万人才工程。主要从事大型掘进装备设计等方面的研究和应用工作, 先后负责和参加了国家科技部、辽宁省自然科学基金、企业横向课题 20 余项。结题和在研 973 项目、国家 863 项目多项。在国内外重要期刊上发表学术论文 87 篇, 其中 SCI 收录 20 篇, EI 收录 54 篇。



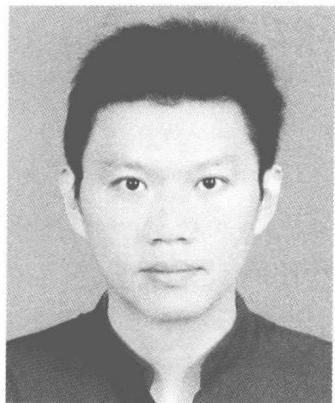
马跃, 男, 汉族, 1960 年出生, 大连理工大学机械工程学院副教授, 工学硕士, 硕士生导师。主要从事复杂机械装备数字化设计、自动化技术应用的教学与研究。参加完成国家 973 项目、高档数控机床与基础制造装备数控专项、辽宁省教育厅科学技术研究重大项目、企业横向科研项目多项。在国内外刊物发表学术论文 22 篇, 多篇被 SCI、EI 收录。



郭莉, 女, 汉族, 1978 年出生, 大连理工大学机械工程学院讲师。主要从事全断面隧道掘进机滚刀破岩机理方面的研究。在国际刊物发表学术论文 6 篇。



李震, 男, 汉族, 1975 年出生, 大连理工大学机械工程学院讲师, 工学博士, 硕士生导师。主要从事复杂机械装备数字化设计、结构优化方面的教学与研究。负责或参加完成国家自然科学基金资助项目、辽宁省教育厅科学技术研究一般项目等 4 项, 企业横向科研项目 2 项。获国家专利 1 项。在国内外刊物发表学术论文 16 篇, 其中 EI 和 SCI 收录 9 篇。



张旭, 男, 汉族, 1978 年出生, 大连工业大学机械工程学院讲师, 工学博士, 硕士生导师。主要从事复杂机械装备数字化设计、计算智能方面的教学与研究。负责或参加完成国家自然科学基金资助项目、辽宁省教育厅科学技术研究一般项目、博士后基金项目等 4 项, 企业横向科研项目 2 项。获国家专利 2 项。在国内外刊物发表学术论文 26 篇, 其中 EI 和 SCI 收录 19 篇。

# 前 言

市场全球化使得各国装备制造企业面临严峻的国际竞争,各国政府和企业都在积极制订措施,采用先进的设计和制造技术提高产品的竞争力。对我国而言,装备制造业的综合竞争力是推动工业转型升级的引擎,是国家核心制造能力的重要体现。国家《高端装备制造业“十二五”发展规划》明确提出:“大力培育和发展高端装备制造业,是提升我国产业核心竞争力的必然要求,是抢占未来经济和科技发展制高点的战略选择,对于加快转变经济发展方式、实现由制造业大国向强国转变具有重要战略意义。”

在新的历史机遇面前,我国掘进机行业迎来了巨大的发展空间和机遇。近年来,随着我国交通、引水等基础建设规模的扩大,隧道工程项目越来越多,隧道掘进机的使用也越来越广泛。目前,我国全断面隧道掘进机(TBM)主要处于引进合作生产阶段,外方对关键技术实行封锁,关键部件通常由外方企业设计完成。而TBM刀盘系统设计问题是TBM设计的关键技术,该问题的解决对提高我国企业在世界掘进装备制造业中的竞争力具有重大的影响!

TBM刀盘系统(滚刀、盘体、主驱动等)作为TBM的核心部件,在掘进过程中起到破碎岩石和支撑掌子面功能。TBM刀盘系统设计既要考虑高承载能力,又要考虑高可靠性、高安全性和长寿命的设计要求,必须根据全程施工地质情况进行面向地质适应性的非标定制设计。合理的刀盘系统对提高刀盘和刀具寿命、TBM掘进效率和安全性,减轻掘进机振动,降低噪声等具有重要的作用。由于TBM刀盘系统设计技术含量高,我国一直不具备自主研发的能力,如何在最短的时间内深入研究TBM刀盘系统设计涉及的机理和关键技术,打破国外技术封锁,提高我国掘进装备制造业的自主研发水平,无疑是一项既有学术价值,又有重要实用意义和广泛应用前景的研究课题。

本书围绕TBM刀盘系统设计这一关键问题,在综合分析TBM刀盘系统设计研究现状的基础上,针对TBM刀盘系统中的滚刀群破岩机理及受力预测模型、盘形滚刀动态特性及新结构研究、刀群三维回转切削仿真与刀间距优化设计、滚刀群与盘体支撑结构耦合布置设计、刀盘盘体结构设计以及TBM刀盘设计系统开发9个方面进行了广泛而深入的研究。

本书是一部针对全断面隧道掘进机刀盘系统的若干关键问题及其设计理论、方法与技术体系的专著,系统而全面地总结了作者在国家自然科学基金、辽宁省科技攻关项目以及国家973项目等资助下在该领域所取得的一些成果。本书的内容

分为以下部分:

第 1 章讨论全断面隧道掘进机发展历程及结构组成, 概述 TBM 刀盘系统中滚刀破岩机理、滚刀结构设计、滚刀群布置设计, 以及刀盘盘体结构设计的研究现状和关键技术。

第 2 章讨论滚刀群破岩机理及滚刀群多阶段受力预测模型。在此基础上, 基于密实核理论, 针对特定岩石条件, 考虑滚刀在破岩过程中复杂的受力情况, 将滚刀楔形刃破岩过程分为 4 个阶段: 弹性变形阶段、挤压破碎阶段、密实核破碎阶段与卸载阶段, 且认为在密实核破碎阶段, 密实核处于静水压状态, 静水压力增大, 会使受力物体的体积缩小, 但不会改变其形状。并提出了单滚刀和滚刀群多阶段受力预测模型。进而开展了滚刀线性切割岩石实验研究, 并与理论模型进行了对比。

第 3 章讨论强冲击载荷下 TBM 盘形滚刀动态特性及新结构。基于滚刀轴承接触模型, 采用集中质量法建立滚刀系统的弯 - 轴 - 摆耦合动力学模型, 通过对固有特性的分析可得滚刀系统的各阶固有频率及其对应的振动形态, 进一步研究和分析振动系统在内、外部激励共同作用下的动态响应以及侧向载荷系数对滚刀耦合动力学系统动态响应的规律。通过系统动力学模型和轴承接触模型得到滚刀轴承动态响应以及滚刀时变载荷历程, 进而计算滚刀轴承接触疲劳寿命; 同时, 基于滚刀载荷对滚刀轴承进行修形设计。在传统滚刀系统动态特性研究和滚刀结构基础上, 建立一种新型滚刀结构设计方法, 然后分别从结构设计、装配和性能评价对新型滚刀进行研究, 为新型滚刀的设计生产提供理论依据和参考。

第 4 章讨论不同模式下 TBM 刀群三维回转切削仿真与刀间距优化设计。建立了基于 LS-DYNA 平台的不同模式下盘形滚刀群切割岩石仿真模型, 获取了滚刀切割岩石过程中的三向载荷、单位时间内破碎的岩石量、岩石的应力分布云图、侧向力与滚动力所占比重、三向力的动态变化频率。分析不同刀间距下滚刀受力及切削效率, 对盘形滚刀刀间距进行优化设计; 分析不同安装角度下滚刀受力及切削效率, 对边滚刀安装角度进行优化设计; 分析不同顺次角度下滚刀受力及切削效率, 对盘形滚刀顺次角度进行优化设计。

第 5 章讨论滚刀群与盘体支撑结构耦合布置设计方法。考虑到刀群布置与刀盘盘体支撑结构间的耦合因素, 提出了以刀盘侧向力合力、牵连惯性力合力、不平衡合力矩、刀盘应力和应变最小化为优化目标, 刀具安装角与支撑筋初始位置角为设计变量, 同时以不干涉、质心分布、刀间距、顺次破岩、制造与装配等多项要求为约束的刀群与盘体支撑结构耦合布置优化设计模型。根据该优化模型中设计目标相互制约、协调的特点, 提出了协同进化遗传算法 (CCGA) 求解方法, 最后通过工程实例加以验证。

第 6 章讨论性能驱动的刀盘盘体结构设计方法。针对 TBM 刀盘出碴槽设计领域的空白, 建立了刀盘排碴离散元仿真模型, 分析了出碴槽设计参数对 TBM 排碴效率及稳定性的影响规律, 提出了基于岩碴流动性的出碴槽设计规则。考虑刀盘支撑筋支撑和出碴的功能, 设计了一种 L 形的 TBM 刀盘支撑筋结构。进行了刀



盘盘体结构拓扑与参数优化设计, 获取到最优的刀盘支撑拓扑模式及盘体结构主参数。提出了基于可靠性的刀盘盘体结构轻量化设计方法。

第 7 章讨论面向可靠性和振动特性的 TBM 主轴承结构设计方法。根据掘进机连续掘进的特点, 建立考虑复合地层、刀盘刀具布局、刀具切削载荷和刀盘复合载荷计算的刀盘载荷时间历程的模拟方法。以应力强度干涉模型为基础, 采用 JC 法计算主轴承结构的可靠度, 并根据系统内失效关系建立了基于关联矩阵和布尔函数的系统可靠度计算方法。借助滚子滚道的接触模型建立与疲劳可靠性匹配的系统动力学模型。以主轴承的疲劳可靠度和振动程度为目标, 以系统整体的设计要求为约束, 建立主轴承结构参数优化模型。最后, 通过工程实例加以验证。

第 8 章讨论 TBM 刀盘系统振动特性分析与掘进现场测试。综合考虑大齿圈和小齿轮时变啮合刚度、误差及啮合齿侧间隙等因素, 建立 TBM 刀盘系统弯-扭-轴-摆多向耦合非线性时变动力学模型, 使用 Newmark 数值积分方法对刀盘系统进行求解, 得到刀盘系统各构件的振动响应; 进一步提出非线性时变刀盘系统稳定性判断的方法, 为参数匹配提供依据; 在前面工作的基础上, 对刀盘结构形式等因素对刀盘动力学行为的影响进行分析, 为刀盘结构设计、振动控制及施工参数选择提供了参考。通过对现场施工环境的调研, 选择传感器型号并对传感器进行安装设计。通过采集得到的工程数据与理论求解数据的对比分析, 验证了理论方法的正确性。

第 9 章讨论 TBM 刀盘设计系统的开发。基于岩石破碎理论和工程数据, 在给定的典型岩石边界条件下, 开发全断面隧道掘进机刀盘设计软件系统, 实现刀具选型、滚刀布置和刀盘结构初步方案设计, 输出相应的滚刀布置方案、刀盘结构初步方案及相关技术性能参数, 包括项目信息、岩石参数、刀盘选型、刀具选型、刀间距设计、刀间距优化、施工预测、平面布置、结构设计、推力扭矩等功能模块。

本专著是对 TBM 刀盘系统设计的初步探索, 由于作者水平有限, 论述中仍难免存在不当或谬误, 敬请读者惠予指正。

作者

2016 年 8 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 全断面隧道掘进机 (TBM) 结构组成及工作原理 . . . . .	1
1.1.1 TBM 发展历史 . . . . .	1
1.1.2 TBM 结构组成及工作原理 . . . . .	6
1.1.3 TBM 刀盘系统组成及关键技术 . . . . .	8
1.2 滚刀破岩机理及受力预测模型研究现状 . . . . .	9
1.2.1 滚刀与岩石相互作用机理 . . . . .	9
1.2.2 滚刀受力预测模型 . . . . .	10
1.2.3 滚刀受力现场实测 . . . . .	14
1.3 滚刀结构设计研究现状 . . . . .	15
1.3.1 滚刀磨损与制造工艺研究 . . . . .	15
1.3.2 滚刀结构设计研究 . . . . .	16
1.4 滚刀群布置设计研究现状 . . . . .	16
1.4.1 滚刀群刀间距布置设计 . . . . .	16
1.4.2 滚刀群平面布置设计 . . . . .	17
1.5 刀盘盘体结构设计研究现状 . . . . .	18
1.6 小结 . . . . .	19
参考文献 . . . . .	19
<b>第 2 章 滚刀群破岩机理及滚刀群多阶段受力预测模型</b> . . . . .	<b>23</b>
2.1 岩石力学性质 . . . . .	23
2.2 岩石损伤现象及破坏机理 . . . . .	25
2.3 滚刀破岩机理 . . . . .	26
2.3.1 密实核破岩机理 . . . . .	26
2.3.2 基于密实核理论的滚刀群多阶段空间复合破碎岩石机理 . . . . .	28
2.3.3 基于密实核理论的滚刀群多阶段空间复合受力预测模型 . . . . .	30
2.3.4 总体模型的表达 . . . . .	39

2.4 小结	40
参考文献	40
<b>第 3 章 强冲击载荷下 TBM 滚刀动态特性及新结构研究</b>	<b>41</b>
3.1 滚刀的结构和承载形式分析	41
3.1.1 滚刀的结构形式和类型	41
3.1.2 滚刀的运动特性和力学特性	42
3.2 滚刀系统耦合动力学模型研究	42
3.2.1 滚刀弯-轴-摆耦合动力学模型	43
3.2.2 振动模型动力学参数的确定	47
3.2.3 动力学模型的求解	53
3.3 滚刀系统动态特性研究	57
3.3.1 滚刀系统固有特性分析	57
3.3.2 内外激励下系统的动态响应分析	59
3.3.3 侧向载荷系数对滚刀动态响应的影响	66
3.4 滚刀轴承寿命预测及修形设计	69
3.4.1 滚刀轴承动态载荷分析	70
3.4.2 滚刀轴承疲劳寿命	72
3.4.3 滚刀轴承修形设计	74
3.5 新型滚刀结构设计及性能评价	77
3.5.1 新型滚刀整体方案设计	78
3.5.2 新型滚刀关键结构件设计	79
3.5.3 新型滚刀装配工艺设计	83
3.5.4 新型滚刀性能评价	84
3.6 小结	88
参考文献	90
<b>第 4 章 TBM 刀群三维回转切削仿真与刀间距优化设计</b>	<b>91</b>
4.1 不同切削模式下盘形滚刀切割岩石的三维模型	91
4.1.1 中心滚刀三维切削模型的构建	93
4.1.2 正滚刀三维切削模型的构建	93
4.1.3 边滚刀三维切削模型的构建	94
4.2 不同模式下刀间距优化设计	95
4.2.1 刀间距优化模型	95
4.2.2 数据统计	96

4.2.3	结果分析	100
4.3	安装角度优化设计	101
4.3.1	安装角度优化模型	101
4.3.2	数据统计	101
4.3.3	结果分析	102
4.4	不同模式下顺次角度优化设计	103
4.4.1	顺次角度优化模型	103
4.4.2	数据统计	104
4.4.3	结果分析	107
4.5	小结	108
	参考文献	109
<b>第 5 章</b>	<b>滚刀群与盘体支撑结构耦合布置设计</b>	<b>111</b>
5.1	滚刀平面布置的形式	111
5.2	滚刀平面布置的技术要求	112
5.3	不同滚刀群布置规则模型	113
5.3.1	多螺旋线布置模式	113
5.3.2	动态星形布置模式	114
5.3.3	随机型布置模式	116
5.3.4	基于工程实例的不同布置规则对比分析	116
5.4	滚刀群布置与刀盘盘体结构耦合问题协同求解	125
5.4.1	刀具布置与刀盘盘体结构耦合关系分析	125
5.4.2	刀具布置与刀盘盘体结构耦合设计优化模型	128
5.4.3	刀具布置与刀盘盘体耦合问题的协同求解方法	133
5.4.4	工程实例验证分析	138
5.5	小结	142
	参考文献	142
<b>第 6 章</b>	<b>性能驱动的刀盘盘体结构设计</b>	<b>143</b>
6.1	刀盘结构设计中的关键问题	143
6.2	基于出碴性能的刀盘出碴槽结构设计	143
6.2.1	离散元方法基本原理	144
6.2.2	岩碴离散元微观参数的选取	145
6.2.3	刀盘排碴系统离散元仿真模型	147
6.2.4	基于出碴性能的刀盘出碴槽设计方法	151

6.2.5	工程实例分析与出碴槽改进设计	157
6.3	刀盘支撑筋结构改进设计	160
6.3.1	支撑筋设计要求及改进思路	161
6.3.2	岩碴生成量及运动规律分析	163
6.3.3	选取 L 形支撑筋设计参数	169
6.3.4	新型支撑筋改进方案实例验证	172
6.4	刀盘盘体结构拓扑与参数优化设计	177
6.4.1	刀盘支撑筋结构拓扑优化设计	177
6.4.2	刀盘盘体结构主参数优化设计	183
6.5	基于可靠性的刀盘盘体结构轻量化设计	190
6.5.1	结构可靠度理论及刀盘的强度和刚度可靠度计算方法	190
6.5.2	基于支持向量机的 TBM 刀盘可靠度计算	196
6.5.3	基于可靠性的刀盘结构的优化设计方法	204
6.5.4	工程实例验证	212
6.6	小结	225
	参考文献	226
<b>第 7 章 面向可靠性和振动特性的 TBM 主轴承结构设计</b>		<b>229</b>
7.1	主轴承载荷预测与应力谱编制	229
7.1.1	主轴承结构及承载形式分析	229
7.1.2	主轴承载荷谱计算模型	230
7.1.3	复合岩层下掘进机刀盘载荷历程模拟	231
7.1.4	主轴承静载荷分布分析	242
7.1.5	主轴承应力谱预测	250
7.2	主轴承系统疲劳可靠性分析模型	256
7.2.1	结构疲劳可靠性基础	257
7.2.2	结构强度非线性退化模型	259
7.2.3	主轴承疲劳可靠性模型	263
7.2.4	主轴承系统疲劳可靠性分析	267
7.3	主轴承系统振动特性分析	272
7.3.1	主轴承振动成因及危害分析	272
7.3.2	主轴承振动形式分析	273
7.3.3	主轴承动力学分析	274
7.4	主轴承结构参数优化设计模型	281
7.4.1	目标函数的建立	281

7.4.2	边界约束的确定	283
7.5	工程实例分析	285
7.5.1	刀盘掘进载荷仿真	285
7.5.2	主轴承应力谱编制	288
7.5.3	系统的疲劳可靠度预测	290
7.5.4	主轴承振动分析	293
7.5.5	主轴承结构参数优化设计	295
7.6	小结	298
	参考文献	299
<b>第 8 章</b>	<b>TBM 刀盘系统振动特性分析与掘进现场测试研究</b>	<b>301</b>
8.1	TBM 刀盘系统非线性时变动力学模型	301
8.1.1	刀盘系统等效力学模型的建立	301
8.1.2	等效力学模型中主要参数的确定	304
8.1.3	刀盘系统分析模型的建立	307
8.2	TBM 刀盘系统动力学方程求解及稳定性分析	313
8.2.1	求解方法原理及求解过程简介	313
8.2.2	刀盘系统固有特性研究	318
8.2.3	刀盘系统振动特性分析	320
8.2.4	稳定性分析	325
8.3	不同因素影响下的刀盘动力学行为	328
8.3.1	刀盘结构对刀盘动力学响应的影响	328
8.3.2	其他参数对刀盘动力学响应的影响	336
8.4	TBM 刀盘掘进现场振动测试研究	340
8.4.1	刀盘掘进环境调研及传感器选型	340
8.4.2	刀盘现场检测系统构建	341
8.4.3	测试结果与理论模型相互验证	344
8.5	小结	347
	参考文献	349
<b>第 9 章</b>	<b>TBM 刀盘设计系统开发</b>	<b>351</b>
9.1	系统架构	351
9.2	系统功能模块划分	352
9.3	系统功能模块交互界面设计	353
9.3.1	项目信息	353

9.3.2	岩石参数	354
9.3.3	刀盘选型	355
9.3.4	刀具选型	355
9.3.5	刀间距优化	356
9.3.6	刀间距设计	357
9.3.7	施工预测	358
9.3.8	平面布置	359
9.3.9	结构分析	360
9.3.10	推力扭矩	361
9.4	工程实例验证	362
9.4.1	项目信息	362
9.4.2	岩石参数	362
9.4.3	刀盘选型	363
9.4.4	刀具选型	366
9.4.5	刀间距优化	366
9.4.6	刀间距设计	366
9.4.7	施工预测	369
9.4.8	平面布置	369
9.4.9	结构分析	376
9.5	小结	382
	参考文献	383
	致谢	385

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 全断面隧道掘进机 (TBM) 结构组成及工作原理

### 1.1.1 TBM 发展历史

自 1846 年第一台掘进机发明并研制以来,掘进机已有 170 多年的发展历史,至今已发展到第四代。从最初的第一台掘进机月进尺不足 100 m,到如今最高月进尺可达 2 000 m 左右,相当于钻爆方法的 4 倍以上。目前,对于地下隧道开挖工程,几乎都可以用掘进机进行。无论是效率、安全性、适应性还是施工成本,掘进机作业都全面超越了其他开挖方式,此种盾构开挖方法的应用越来越广泛。

第一代掘进机由于无法实现一次性全断面切削,因此并不是真正意义上的隧道掘进机。图 1.1 所示为 1846 年比利时工程师 Henri Joseph Maus (亨利约瑟夫·毛斯) 为塞尼山隧道设计制造的机器,此台设备首先进行了为期两年的挖掘实验,展现了完美的性能,但是机器的驱动装置及磨损问题在当时没有得到很好的解决,最终它并没有被运用到塞尼山隧道的建设中。尽管存在诸多问题,毛斯断言此类设备

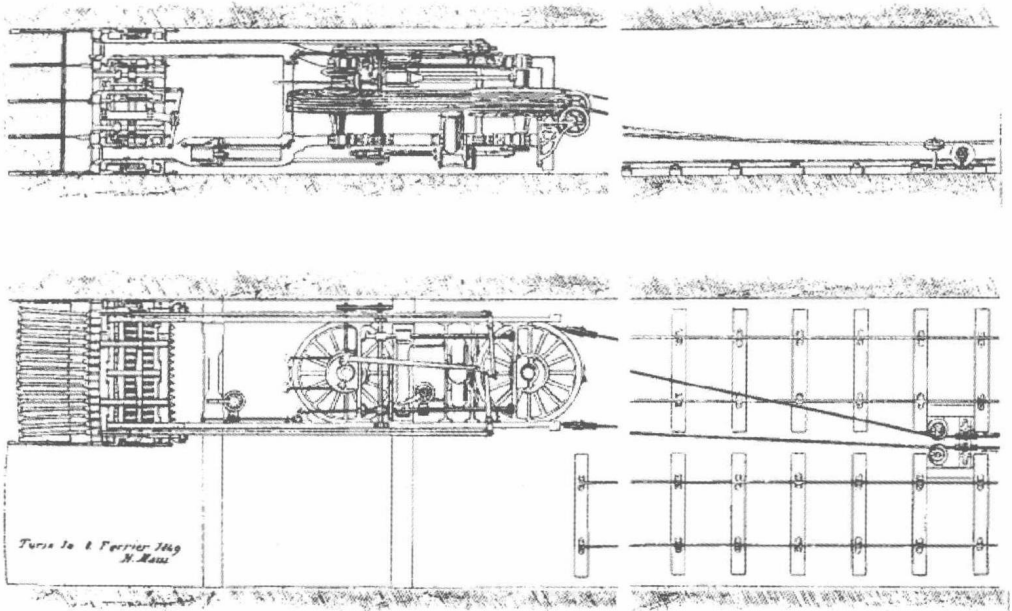


图 1.1 1846 年 Henri Joseph Maus 制造的掘进机<sup>[1]</sup>



的掘进速度可达到 5 m/d。

1851 年, 美国人 Wilson 开发了一套挖掘机器系统。与第一代掘进机不同的是, 这套设备拥有现代隧道掘进机的主要特点, 如盘形滚刀滚压破岩、侧壁支撑推进等。虽然此设备在 1853 年接受了各种检验并应用于 Hoosac 隧道的施工 (见图 1.2), 但是由于滚刀本身切削磨损的问题, 该机器无法与钻爆法相抗衡。

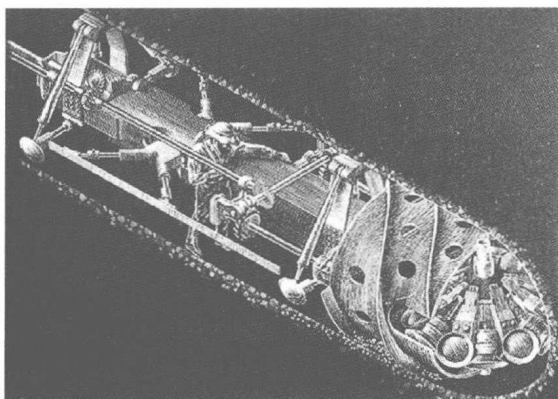


图 1.2 1853 年 Wilson 为 Hoosac 隧道设计的掘进机<sup>[2]</sup>

但是 Wilson 并不气馁, 他吸取经验和教训, 不断改进, 在 1875 年研制了此类设备的改进版, 如图 1.3 所示。改进版的机器主要在切削方式上进行了全新的改进设计, 隧道开挖面中心和外周区域的岩土由掘进机进行切削, 达到最大的切削深度

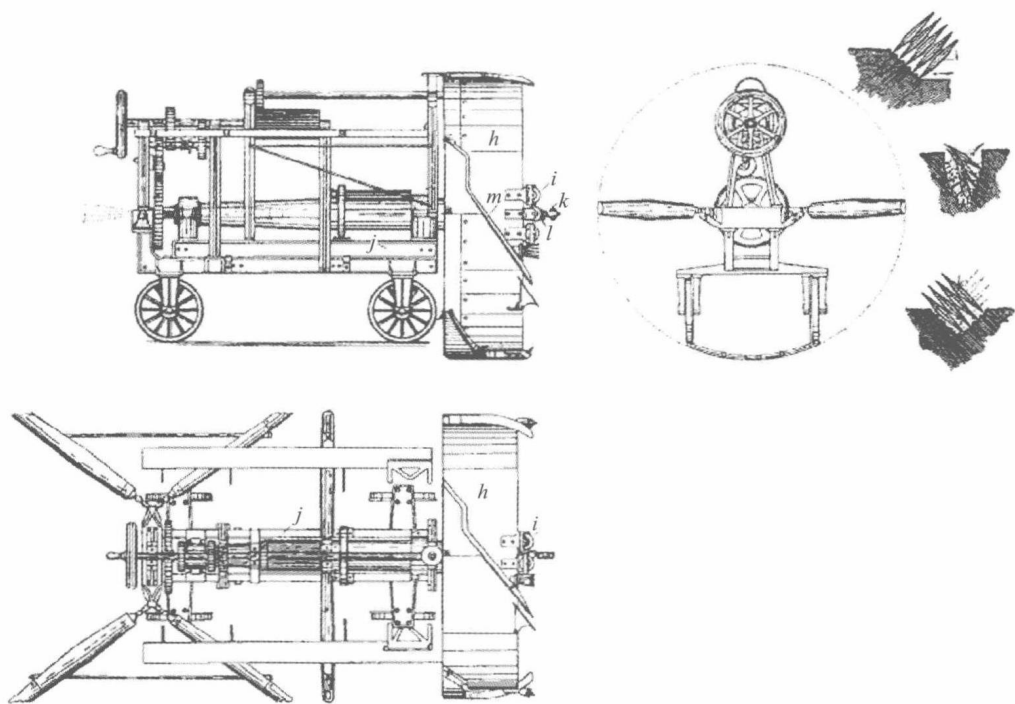


图 1.3 1875 年 Wilson 进一步开发的掘进机<sup>[1]</sup>