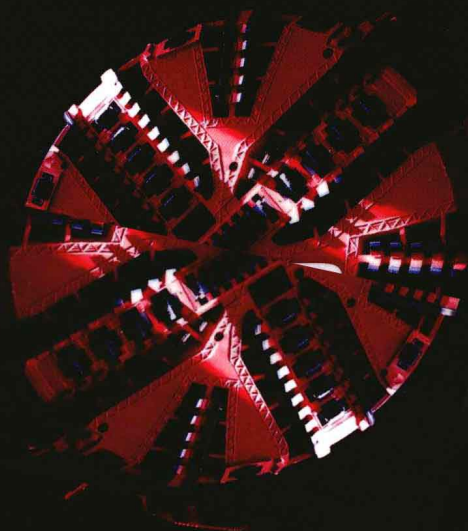


# 盾构机土仓压力控制技术

CONTROL OF PRESSURE IN SOIL CHAMBER  
IN SHIELD TUNNELING

李守巨 曹丽娟 孙伟 上官子昌 屈福政 著



大连理工大学出版社

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

# 盾构机土仓压力控制技术

CONTROL OF PRESSURE IN SOIL CHAMBER  
IN SHIELD TUNNELING

李守巨 曹丽娟 孙伟 上官子昌 屈福政 著



大连理工大学出版社  
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

**图书在版编目(CIP)数据**

盾构机土仓压力控制技术 / 李守巨等著. — 大连 :  
大连理工大学出版社, 2011.11

ISBN 978-7-5611-6628-4

I. ①盾… II. ①李… III. ①隧道施工—盾构—压力  
—控制 IV. ①U455.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 238216 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:http://www.dutp.cn

大连美跃彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

---

幅面尺寸:170mm×240mm 印张:10.75 字数:194千字  
2011年11月第1版 2011年11月第1次印刷

---

责任编辑:于建辉

责任校对:李云霄

封面设计:宋明亮

---

ISBN 978-7-5611-6628-4

定 价:38.00 元

# 前 言

土压平衡盾构机已经被广泛用于城市地铁隧道掘进工程中,并且被认为是目前地铁隧道中最普遍使用的盾构机类型之一。盾构机在掘进过程中,由刀盘切割破碎的渣土从刀盘开口进入刀盘后面与隔板之间的密封压力舱,然后经改性后由螺旋输送机排出土仓内的改性渣土。螺旋输送机的转速和排土率由盾构机操作工或者计算机软件控制,使得螺旋输送机排出的土体与从刀盘进入的土体相平衡,其目的是控制掘进工作面的土压力,进而有效控制盾构机掘进过程中的地表变形。在盾构机掘进过程中,掘进工作面的稳定性是通过控制土仓的支护压力得以实现的,掘进工作面支护压力过大会造成地表隆起,而压力过小,容易导致地表沉陷甚至坍塌。目前,盾构机土仓压力控制参考值大多凭经验人为设定,土仓压力由操作者手工实时调整螺旋输送机转速进行控制。盾构机隧道掘进过程中土仓压力控制普遍遇到的关键问题包括:①土仓压力优化设置问题;②盾构机合理推力优化问题;③盾构机土仓压力分布数值模拟问题;④盾构机土仓压力控制数学模型问题;⑤控制数学模型参数实时辨识问题;⑥优化控制策略和自动控制问题。

本书共分五章。在第1章,系统地回顾了盾构机的发展历史及应用现状、盾构机土仓渣土本构模型及其参数估计研究进展和盾构机土仓压力控制问题的研究进展,指出了目前盾构机土仓压力控制所存在的主要问题,并对盾构机土仓压力控制方法的发展趋势进行了总结。

在第2章,基于土力学的主动土压力和被动土压力理论,分析了掘进工作面稳定性机理,采用解析方法研究了盾构机与土体之间的相互作用,确定了合理的掘进工作面压力范围,提出了优化盾构机推力的方法。经过与现场的观测数据相对比,验证了所提出的优化盾构机推力方法的有效性。土仓土压力优化设定是盾构机掘进过程中一个极为关键的控制参数,其数值的大小直接关系到掘进工作面的稳定和地表的变形。研究了刀盘开口率变化对土仓压力传递系数的影响,建立了压力传递系数与刀盘开口率之间的映射关系。土仓可观测压力与掘进工作面土压力之间关系的确定为优化设置土仓压力提供了理论依据。根据优化确定的掘进工作面土压力以及渣土的 Duncan-Chang 非线性本构模型和反演的模型参数,数值模拟了盾构机土仓土压力分布特性,数值模拟结果与现场观测

的土仓隔板压力分布进行对比,模拟值与观测值基本一致。

在第3章,为了模拟盾构机土仓内的压力分布特性,提出了反演确定改性后渣土的力学模型和模型参数的方法。参数识别反演问题通过对定义的目标函数进行极小化来求解。参数反演的目标函数定义为观测的应变矢量与模型计算的应变矢量的残差平方和,而模型计算的应变矢量是被估计参数的函数。常规的基于梯度搜索的优化方法包括单纯形法、阻尼最小二乘法和高斯-牛顿法等。但遗憾的是,基于梯度搜索的优化方法存在的固有缺陷在于容易陷入局部极小值;而研究表明,由于观测误差和模型误差的存在,参数识别反问题存在多个极小值。为了解决这个问题,建立了基于浮点编码遗传算法的参数反演方法,该方法将简单遗传算法与梯度搜索优化算法相结合,用以提高反演精度和速度。将从沈阳某地铁隧道施工现场采集的土样加工成三轴压缩试验试件,实验得到不同围压条件下的应力-应变曲线为本构模型参数反演提供了实验数据。根据参数反演得到的渣土本构模型参数,预测三轴压缩试验变形曲线。研究结果表明,预测值与观测值吻合较好,所提出的参数反演方法的有效性和精度得到了验证。

在第4章,以土仓渣土的 Duncan-Chang 非线性弹性本构模型为基础,建立了盾构机土仓土压力与盾构机推进速度和螺旋输送机转速的映射关系,提出了单独调整螺旋输送机转速的盾构机土仓土压力优化控制模型。将土仓隔板压力的变化分解为两部分,即土仓渣土质量改变和掘进工作面土压力改变引起的土仓隔板压力变化。建立了土仓渣土质量改变与盾构机推进速度和螺旋输送机转速之间的关系,以及掘进工作面土压力改变与盾构机的推力之间的关系。考虑到盾构机与土体之间的耦合作用,建立了新的土仓压力控制数学模型。该模型可以通过同时控制螺旋输送机转速、盾构机推进速度和推力,快速实现土仓压力平衡和自动控制。基于系统辨识原理,建立了土仓压力控制模型参数在线辨识方法。这些需要辨识的参数很难在实验室或者通过其他方法在现场直接确定,参数包括改性后渣土的变形模量、螺旋输送机的排土效率和土体的可松性系数等。根据盾构机掘进过程中的观测信息,基于观测到动力系统的输入(螺旋输送机转速)和输出(土仓观测点压力),采用优化方法识别出动力系统中模型的参数。考虑到观测噪声的存在,随机模拟了带有观测噪声的系统参数辨识问题。提出了基于BP神经网络的盾构机土仓压力非线性和时变系统的辨识模型和方法,该方法能够实时对盾构机土仓压力系统进行在线辨识,具有较高的辨识精度。数值模拟结果表明,即使存在随机观测噪声,辨识方法仍然能够比较准确地辨识出控制模型的参数。将非线性动力系统模型参数辨识与优化控制集合为一体,建立了基于神经网络的盾构机土仓压力控制策略和方法。建立基于实时观测信息的土仓压力控制模型中参数辨识方法,解决了盾构机土仓压力控制的非

线性、随机性、时滞性和时变性等问题,提高了控制系统的精确性、抗干扰性和鲁棒性。数值仿真结果表明,该方法对于盾构机土仓压力时变和非线性系统控制,具有良好的稳定性和控制效率,所提出新的控制模型的有效性和精确性通过数值仿真进行了验证。

在第 5 章,盾构机试验平台验证了盾构机土仓压力控制模型、控制模型参数在线辨识方法和土仓压力自动控制策略的有效性。试验平台可以观测的数据包括盾构机土仓压力、螺旋输送机的转速和盾构机的推力等。根据观测的盾构机土仓压力和螺旋输送机转速,首先辨识出控制数学模型参数。然后,根据辨识出的模型参数和预先设定的土仓压力,实现了土仓压力自动和实时控制。

本书是作者在完成国家重点研究发展规划项目(2007CB714006),对五年来所进行的相关研究工作进行总结,并参考国内外 200 余篇学术论文和专著的基础上完成的。其中,第 1 章由孙伟教授撰写,第 2 章由曹丽娟副教授撰写,第 3 章由上官子昌教授撰写,第 4 章由李守巨教授撰写,第 5 章由屈福政教授撰写,最后全部书稿由李守巨教授统一修订和补充。在本书的撰写过程中得到了马跃副教授、孙铁兵讲师、霍军周博士、武力博士、刘畅博士、孟庆琳博士、亢晨钢硕士、占善新硕士、刘博硕士等的帮助,在此对他们所做的工作表示感谢。鉴于作者的学识水平、实验条件和可获得资料有限,本书不妥之处在所难免,敬请同行专家和读者批评指正。

李守巨 曹丽娟 孙伟 上官子昌 屈福政

2011 年 5 月于大连

# 目 录

<b>第 1 章 引 言</b> .....	1
1.1 概 述 .....	1
1.2 盾构机的发展历史及应用现状 .....	2
1.3 盾构机土仓渣土本构模型及其参数估计研究进展.....	14
1.4 盾构机土仓土压力控制问题的研究进展.....	17
1.5 小 结.....	24
参考文献 .....	25
<b>第 2 章 盾构机土仓渣土非线性本构模型参数反演</b> .....	31
2.1 渣土非线性本构关系参数反演的背景.....	31
2.2 土体的非线性本构关系概述.....	32
2.2.1 经典的线弹性本构模型.....	36
2.2.2 Mohr-Coulomb(M-C)模型 .....	38
2.2.3 Drucker-Prager(D-P)模型 .....	42
2.2.4 Cam-Clay(Cam)模型 .....	43
2.2.5 Duncan-Chang(D-C)模型 .....	45
2.2.6 Lade-Duncan(L-D)模型 .....	46
2.2.7 土的清华弹塑性本构模型.....	47
2.3 盾构机土仓渣土的三轴压缩试验.....	48
2.4 土仓渣土的 Duncan-Chang 非线性本构模型 .....	50
2.5 基于遗传算法的改性渣土非线性本构模型参数反演.....	52
2.5.1 渣土非线性本构模型参数反演目标函数的定义.....	52
2.5.2 基于遗传算法的渣土非线性本构模型参数反演方法.....	53
2.5.3 参数反演结果.....	57
2.6 小 结.....	59
参考文献 .....	60
<b>第 3 章 盾构机土仓压力分布的有限元数值模拟</b> .....	64
3.1 盾构机土仓压力分布模拟的工程背景.....	64

3.2	掘进工作面土压力计算方法研究	67
3.2.1	基于弹性力学理论的土压力计算方法	67
3.2.2	基于土力学理论的土压力计算方法	69
3.2.3	土水压力迭加计算方法	69
3.2.4	数值算例	70
3.3	盾构机土仓土压力分布有限元模拟	72
3.3.1	掘进工作面主动与被动土压力分布	73
3.3.2	土仓内土压力分布的有限元数值模拟	76
3.4	盾构机合理推力研究	86
3.5	盾构机土仓土压力与掘进工作面土压力关系研究	88
3.6	小结	92
	参考文献	93
<b>第4章</b>	<b>盾构机土仓压力控制数学模型及其优化控制策略研究</b>	<b>96</b>
4.1	盾构机土仓压力控制问题的工程背景	96
4.2	盾构机土仓压力控制数学模型	103
4.2.1	基于渣土体积平衡的土仓压力控制数学模型	103
4.2.2	考虑土体与盾构机作用的土仓压力控制数学模型	105
4.3	盾构机土仓压力优化控制方法研究	110
4.3.1	单独控制螺旋输送机转速策略	110
4.3.2	同时控制螺旋输送机转速和盾构机推力策略	114
4.4	基于神经网络的盾构机土仓土压力控制模型参数辨识	120
4.4.1	确定性土仓压力控制模型参数辨识	120
4.4.2	非确定性土仓压力控制模型参数辨识	122
4.4.3	非确定性、非线性土仓压力控制模型参数辨识	124
4.5	基于神经网络的盾构机土仓土压力控制研究	126
4.5.1	PID神经网络及其控制模型	126
4.5.2	基于神经网络的盾构机土仓压力控制方法	129
4.5.3	土仓压力控制数值仿真算例	131
4.6	小结	133
	参考文献	133
<b>第5章</b>	<b>盾构机土仓压力控制有效性的实验验证</b>	<b>137</b>
5.1	实验目的和内容	137
5.2	改性砂土的物理力学特性实验	141



5.3 实验台的主要特征尺寸 .....	142
5.4 盾构机土仓压力控制模型参数辨识实验研究 .....	145
5.5 盾构机土仓压力优化控制策略实验研究 .....	151
5.6 土仓压力和螺旋输送机转速周期性波动问题 .....	154
5.7 盾构机土仓压力双控策略及其实验验证 .....	156
5.8 小 结 .....	158
参考文献 .....	159

# 第1章 引言

## 1.1 概述

隧道掘进机是一种专门用于开挖地下隧道工程的大型、复杂施工装备,它具有开挖速度快、工程质量高、施工安全性好、经济效益高、有利于环境保护和降低劳动强度的优点。掘进机技术体现了计算机、新材料、自动化、信息化、系统科学、管理科学等的综合和密集,反映了一个国家的综合国力和科技水平<sup>[1]</sup>。按照地层条件和具体施工方法的不同,一般将隧道掘进机分为三类,即盾构掘进机(shield machine)、岩石掘进机(tunnel boring machine, TBM)和顶管掘进机(pipe jacking machine)。自20世纪60年代起,英国首先研制出了泥水加压盾构,日本研制出了土压平衡盾构<sup>[2]</sup>。由于盾构机能在含水饱和的松软地层中开挖隧道,因而在地下工程施工中得到了迅速发展,尤其是在欧美和日本等国的隧道开挖中得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。我国从20世纪50年代就开始研制和应用盾构机修建隧道,但是,由于各种人为和客观因素的制约,目前与世界上的先进技术相比还有较大的差距,尤其在控制软件方面。进入21世纪,世界经济的迅猛发展加速了城市化建设。当今世界各国都十分重视城市地下铁道和地下穿越江河隧道等地下工程的建设。我国人口众多、城市居民区密集,只有大规模地在中心城市修建地下铁道,才能够从根本上解决当今各大城市的交通拥挤和阻塞问题。而在城市地下铁路建设施工中,最安全、节约和快速的方法之一是因地制宜地采用不同类型的盾构机进行隧道施工。近年来,我国已在致力于改善城市交通紧张状况,北京、上海、南京、广州、天津、重庆、成都、深圳、沈阳、西安、杭州、青岛和大连等城市都正在修建或扩建地下铁道,可以预见,盾构法施工地下隧道具有良好的发展前景。

盾构机掘进隧道施工过程中,总会对盾构机周围的土体造成一定的扰动,一

定范围内土体的应力状态发生变化,严重时会引起地表变形。盾构机土仓压力分布以及掘进参数的不同,将对盾构机周围土体造成不同程度的扰动,土体应力应变将呈现不同的状态,使得地表的变形程度也不相同。如何通过设定盾构机施工参数,在保证开挖面稳定的同时,减小对地层的扰动,并且使得盾构机掘进过程中能耗最低,这些都是盾构机设计与施工中的重要课题。目前盾构机土仓压力控制存在的主要问题包括:

(1)土仓压力值的设定缺少足够的理论依据,大多都根据经验选取,不同的施工单位采用的数值差异较大,导致地表变形控制不理想;

(2)将土仓隔板观测的土压力等同于掘进工作面的土压力,没有考虑由于刀盘开口率的不同引起的这两个界面之间的压力差,缺少土仓土压力与掘进工作面土压力之间的映射关系的研究;

(3)土仓压力控制缺少完备的数学模型,例如土仓系统的动力方程、输出方程、量测方程和参考模型等;

(4)缺少土仓土压力与控制变量之间关系的模型,无法从物理本质上仿真土仓土压力随控制变量改变而动态变化的特性;

(5)土仓压力控制模型没有考虑到地层的随机特性和压力观测信息的不确定性等问题,无法准确表征土仓系统的非线性、时变、时滞和不确定的动力特性,控制模型的鲁棒性和稳定性较差。

## 1.2 盾构机的发展历史及应用现状

随着城市密集度的提高和高层建筑的不断增加,城市内原来就比较紧张的地面可利用空间越来越少,而地下又布满了各种用途的管线,所以,如何更有效地利用和开发地下空间已经成为当今城市现代化建设的重要课题,采用盾构机建设和开发地下空间是最佳选择。盾构机(shield machine),全名叫盾构隧道掘进机,也称作盾构掘进机,是地下暗挖隧道的一种专用工程机械。现代盾构机集光、机、电、液、控等技术于一体,具有开挖切削土体、输送渣土、拼装隧道衬砌、测量导向纠偏等功能,而且要根据不同的地质条件和盾构机的几何尺寸进行“量体裁衣”式的设计与制造,可靠性要求极高。用盾构机进行隧道施工具有自动化程度高、施工速度快、开挖时可控制地面沉降、减少对地面建筑物的影响和在水下开挖时不影响水面交通等特点,在地下水位较高、隧道较长、埋深较大的情况下,用盾构机施工更为经济合理,因而盾构机被广泛用于地铁隧道、越江隧道、铁路

隧道、水电隧道、市政公路隧道等工程的建设。盾构机的基本工作原理就是一个圆柱体的钢组件沿隧道轴线边向前推进边对土体进行挖掘和支护。该圆柱体组件的壳体(即护盾)对挖掘出的还未衬砌的隧道段起着临时支撑的作用,承受周围土层的压力,有时还承受地下水压。挖掘、排土、衬砌等作业就在护盾的掩护下进行。

盾构机的分类方法很多:根据工作原理的不同,盾构机可以分为手掘式盾构机、挤压式盾构机、半机械式盾构机(局部气压、全局气压)、机械式盾构机(开胸式切削盾构机、气压式盾构机、泥水加压盾构机、土压平衡盾构机、混合型盾构机、异型盾构机);根据适用的土质及工作方式的不同,盾构机可以分为开胸式、压缩空气式、泥水式、土压平衡式、组合式、插板式以及多断面式盾构机等。此外,盾构机还可按直径分为特大、大、中、小及微型盾构机;按开挖断面分为部分断面开挖和全断面开挖的盾构机等等。目前作为主流技术的主要有:泥水加压平衡盾构机、土压平衡盾构机、组合式盾构机和微型盾构机等<sup>[4]</sup>。

1806年,马克·布鲁诺尔(Marc Isambard Brunel)在蛀虫钻孔并用分泌物涂在四周的启示下,最早提出了盾构掘进隧道的原理并注册了专利——布鲁诺尔专利<sup>[5]</sup>。该盾构由不同的单元格组成,每一个单元格可容纳一个工人独立工作并对工人起到保护作用。所有的单元格牢靠地装在盾壳上。当一段隧道挖完后,由液压千斤顶将整个盾壳向前推进。1818年,布鲁诺尔完善了盾构结构的机械系统,设计成用全断面螺旋式开挖的封闭式盾壳,衬砌紧随其后。1825年,布鲁诺尔第一次在伦敦泰晤士河下用一个断面高6.8 m、宽11.4 m的矩形盾构修建了第一条盾构法隧道。盾构机问世至今已有200多年的历史。在日本,由于经济的快速发展及实际工程的需要,盾构机尤其是土压平衡式和泥水式盾构机发展很快<sup>[6]</sup>。德国的盾构机技术也有独到之处,尤其是在地下施工过程中,在保证密封的前提下,可以在高达0.3 MPa气压的情况下更换刀盘上的刀具,从而提高盾构机的一次掘进长度。据不完全统计,目前国外盾构机的主要制造企业有18家,集中在日本和欧美,如日本的川崎重工、三菱重工、石川岛播磨重工业株式会社、小松制作所,德国的海瑞克公司、维尔特公司,美国的罗宾斯公司,加拿大的罗浮特公司等。它们可以根据不同的地质条件和不同的工程对象,以及使用单位的不同要求,设计、生产出不同直径、不同类型,以及有特殊要求的盾构机,以满足用户的需要,其生产设备和工艺水平居世界前列。我国从20世纪50年代开始进行盾构技术的研究和应用。1966年,上海隧道工程设计院设计、江南造船厂制造了我国第一台直径10.2 m的超大型网格挤压盾构机。1986

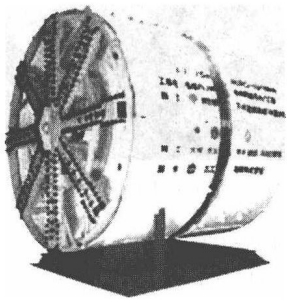
年,中铁隧道集团有限公司研制成功国内第一台半断面插刀盾构机。1987年,上海隧道工程股份有限公司研制成功我国第一台直径4.35 m的加泥式土压平衡盾构掘进机。此后,中铁隧道集团有限公司和上海隧道工程股份有限公司等国内公司先后研制成功40多台直径3.8 m~6.34 m各种类型的盾构机<sup>[6]</sup>。虽然目前国内有许多企业,如上海隧道工程股份有限公司、中铁隧道集团有限公司、广重企业集团有限公司、沈阳重型机械集团有限责任公司等单位都相继开展了盾构设备的研制和相关技术的开发,但是与国外相比,我国现代盾构机的研制在适应性设计、系统集成技术和关键元配件的生产制造、模型试验与系统仿真等方面,仍存在着一定的差距,尤其是在土仓压力控制模型和算法上差距更大。

对于掘进界面稳定的控制方式也有其发展过程。1830年,劳德·考克让施(Lord Cochran)发明了施加压缩空气防止涌水的“气压法”。1874年,格雷蒙特(James Henry Greathead)在伦敦地铁南线的隧道建设中采用了气压盾构法的施工工艺,并首创了在盾尾后面的衬砌外围环形空隙中压浆的施工方法,并开发了用流体支撑开挖面的盾构,开挖出的渣土以泥水流的方式排出。1896年,Haag在柏林第一次申请了德国泥水式盾构的专利,形成了现代泥水式盾构的雏形,推动了盾构施工技术的发展。到20世纪初,盾构施工法在英、美、德、俄、法、日等国开始推广。1917年,日本开始在铁羽越线的折返段隧道施工中引进盾构法,1938年正式在国铁关门隧道应用盾构法施工,为日本盾构技术的发展奠定了基础。1967年,由英国提出的泥水加压系统在日本得到了实施,日本研制成功第一台有切削刀盘、水力出土的泥水加压式盾构(直径为3.1 m)。1974年,日本独创性地研制成功土压平衡盾构,同时德国Wayss和Freytag也研制成功颇具特点的膨润土悬浮液支撑开挖面的泥水平衡盾构。之后,盾构技术得到了迅猛发展,已成功应用于各种公路隧道、地铁隧道、引水隧道以及市政公用设施隧道等。

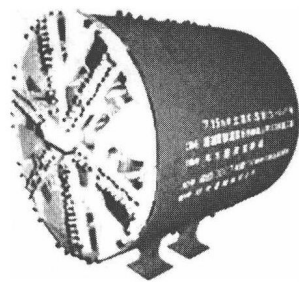
纵观盾构隧道掘进200多年的发展历史,盾构隧道施工法和盾构掘进机的改进都是在围绕着地层稳定和地面沉降控制、机械化自动化掘进和掘进速度、衬砌和隧道质量这三个要素进行。传统的盾构法是把这三个要素分别独立考虑的。地层稳定处理作为盾构的辅助方法,主要有降低地下水位法、改良地基法、冻结法及气压法等。在盾构掘进机本身结构上没有考虑如何保证地层稳定和控制地表变形的问题,盾构一般为敞胸式结构。然而,任何地层稳定处理方法即使能抑制对地层的影响,也很难满足在城市内施工时的各种要求,特别是关系到地面建筑安全的地面沉降问题,所以,很自然地发展到下一代盾构——闭胸式盾

构。

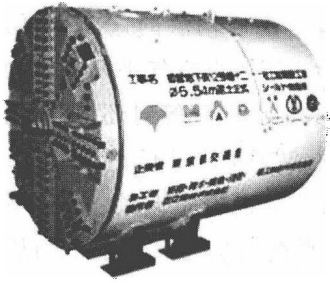
现代盾构的一个最为显著的特点就是统筹考虑盾构法的这三个要素,用盾构掘进机设备本身解决工作面稳定的问题。由于用压缩空气平衡土压力的方法容易发生漏气、喷发、工作面崩塌等事故,及造成地面沉降等对环境的不良影响,尤其在遇到粘聚力小、透气性强的地层时,这种方法无法胜任。自然,人们想到用液体代替空气来支撑工作面,最初在德国和英国进行了有关。1967年,日本完成了这一系统,即产生了现代概念上的泥水平衡盾构<sup>[6]</sup>。泥水平衡盾构是靠送入工作面与密闭胸板间所形成空腔的加压泥水来平衡土压、保持工作面稳定,并用泥水输送刀盘切削下来的渣土。这个方法问世使工作面稳定状况大大改善,盾构法的适用范围被大大拓宽,盾构掘进机得到了前所未有的发展。然而,由于泥水平衡盾构需要大规模的泥水分离处理系统、占地面积大、对环境影响大、施工成本高,对城市内施工的隧道这个系统并不理想。继而在1974年日本首先研制成功土压平衡盾构,这一系统是将刀盘切削下来的渣土送入前端密闭仓内,搅拌或注入添加剂搅拌成塑流化的渣土并与螺旋型输送机等机构相结合,边使工作面保持适当稳定的压力,边通过螺旋输送机向外排土。这一系统由于排土处理简单、可靠性较高,得到了广泛的应用。现代盾构掘进机在部件结构、驱动方式、自动控制、测控导向等方面作了很大的改进,工作面压力平衡的原理和方法一直沿用至今。当今盾构基本都是基于泥水平衡和土压平衡这两种模式,或是这两种模式的组合,或是这两种模式与开胸式组合,形成复合型盾构以适应地层条件多变的隧道施工的要求。图1.1为典型的土压平衡和泥水盾构机;图1.2为适用于砾石和岩层掘进的土压平衡盾构机;图1.3为适用于岩层掘进的盾构机及其辅助系统;图1.4为盾构机在国外的应用。



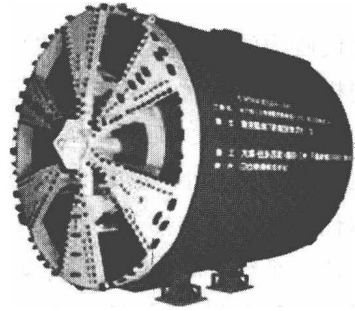
(a)7.75 m 土压平衡盾构机



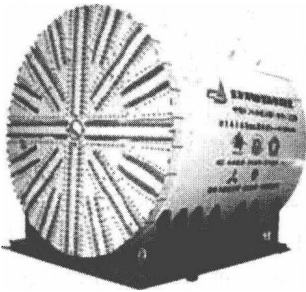
(b)7.15 m 土压平衡盾构机



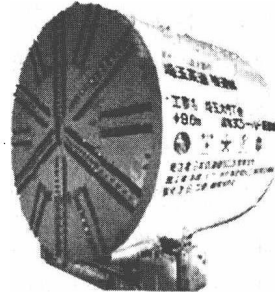
(c) 5.54 m 土压平衡盾构机



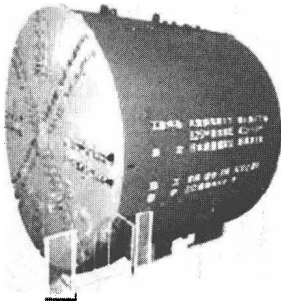
(d) 日立土压平衡盾构机



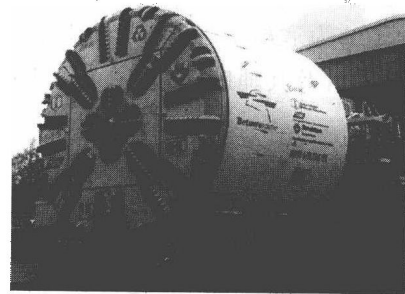
(e) 14.14 m 泥水盾构机



(f) 9.6 m 泥水盾构机



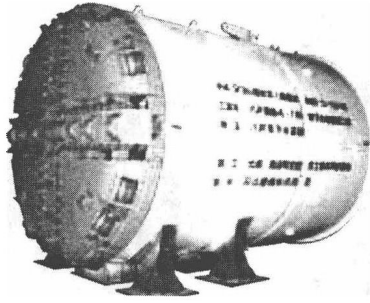
(g) 8.25 m 泥水盾构机



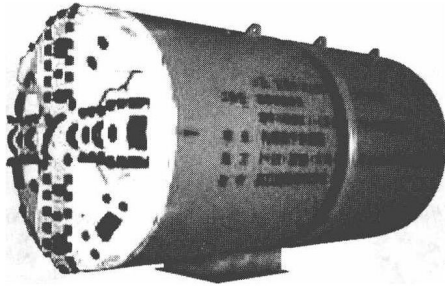
(h) 9.755 m 土压平衡盾构机

图 1.1 典型的土压平衡和泥水盾构机

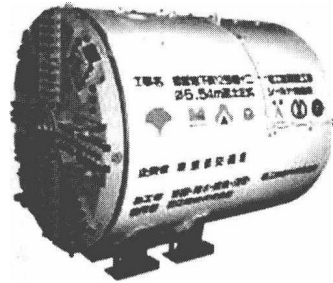
Fig. 1.1 Typical earth pressure balanced shield and slurry shield



(a)适用于砾石和岩层掘进的土压平衡盾构机( $\phi 4.93$  m)



(b)适用于砾石和岩层掘进的土压平衡盾构机( $\phi 3.28$  m)



(c)适用于砾石和岩层掘进的土压平衡盾构机( $\phi 5.54$  m)

图 1.2 适用于砾石和岩层掘进的土压平衡盾构机

Fig. 1.2 Earth pressure balanced shield for gravel and rock stratum



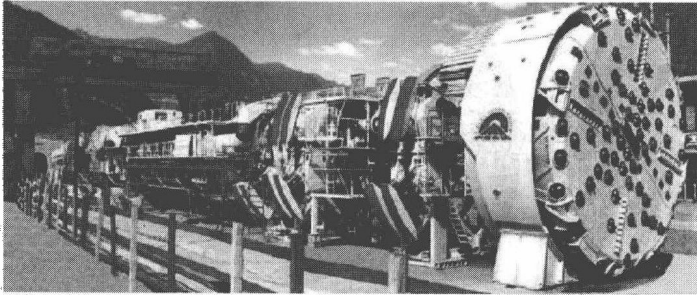
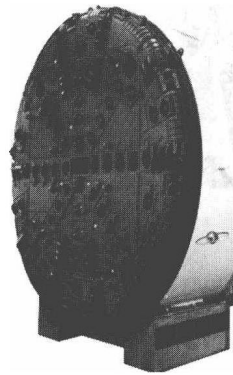
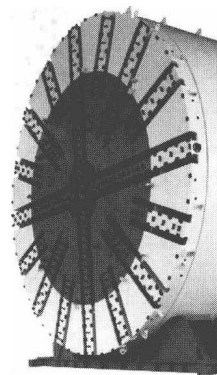


图 1.3 适用于岩层掘进的盾构机及其辅助系统(TBM)

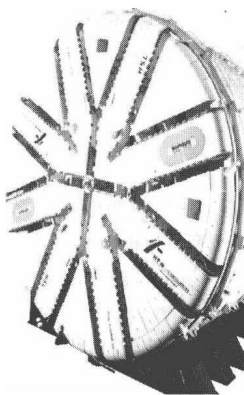
Fig. 1.3 Tunnel boring machine for rock stratum



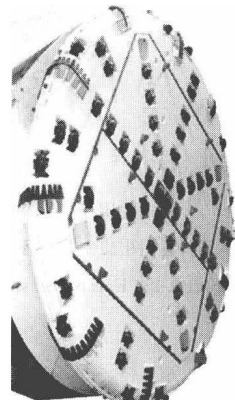
(a) 马德里/西班牙



(b) 东京/日本



(c) 兰斯塔德/荷兰



(d) 玛纳波里/新西兰