

盾构机反交错双螺旋线刀具布置形式

杨新安¹, 张业炜², 邱 龔¹, 龚振宇³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 江苏省交通规划设计院, 江苏 南京 210004;

3. 中铁五局集团有限责任公司, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 总结了盾构机刀盘上刀具布置的基本原则和一般方案, 提出了根据最优刀间距和相邻刀具相位差求解一般双螺旋线系数的方法; 在此基础上提出了形式完全不同的反交错双螺旋线布置形式, 并以狮子洋盾构隧道工程的使用案例对该布置形式进行了详细论述; 分析了刀盘正反转情况下不同的破岩次序和破岩效率; 以狮子洋隧道工程的实际统计数据为据, 发现布置在螺旋线交错处的刀具存在局部磨损突出的现象. 刀具反交错螺旋线型布置使得刀盘在逆时针旋转条件下的破岩效率提高, 但刀具磨损快且差异性大.

关键词: 隧道工程; 盾构; 刀具布置; 螺旋线; 刀具磨损

中图分类号: U25, U455.43

文献标志码: A

Shield Machine Cutters Layout with Reverse Cross Double Spirals Pattern

YANG Xin'an¹, ZHANG Yewei², QIU Yan¹, GONG Zhenyu³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute, Nanjing 210004, China; 3. China Railway No.5 Engineering Group Co. Ltd., Guiyang 550003, China)

Abstract: The basic principle and general scheme of disc cutters layout of shield machines were summarized, and a method of solution for general double spirals coefficients were proposed according to the optimal cutter distance and adjacent cutter phase-difference. Consequently, a different layout pattern in double spirals was provided and discussed in detail with the Shiziyang shield tunneling engineering as the case of application. Moreover, the sequence and efficiency of rock-breaking when the cutter head rotating normally and reversely were analyzed. Analysis of the statistical data of the Shiziyang tunnel construction shows that there exists a significant local wearing at the crossing of two spirals. The shield cutter layout in reverse cross double spirals pattern can raise the rock-broken efficiency when the cutter head rotating

reversely, but the cutters will be worn out quickly and unevenly.

Key words: tunneling; shield; cutters layout; spiral; cutters wearing

盾构法由于机械化程度高、洞身成型好、环境扰动小等优点被广泛用于城市地铁隧道、铁路公路隧道、水利水电隧道和煤矿巷道等地下工程施工. 刀盘作为盾构机唯一的切削部件, 刀盘上刀具的布置不仅是盾构设计、制造的依据, 更会直接影响到盾构机的施工工况与施工效率, 对盾构机的寿命、工作中的振动、噪音等都有较大影响. 合理布置刀具在刀盘上的位置, 对确保施工安全、保障施工质量和进度以及减少工程造价至关重要.

刀具布置可概括为三方面主要问题: ①刀具在刀盘上的布局与布置形式(或称布置模式); ②刀盘上不同类型刀具的数量及其合理配置; ③刀具布置与磨损之间关系. 对后两方面问题, 已开展了多年研究, 特别是我国近一、二十年在地铁盾构隧道施工中, 根据各地区的地层地质特点, 总结出一些行之有效的刀具配置的经验, 如, Balci^[1]给出了严重破裂岩层中的刀具磨损的预测方法, 张照煌等^[2]通过对盘形滚刀的运动与受力分析, 提出了盘形滚刀在刀盘上布置的原则, 张国京^[3]根据北京地区地层复杂多变的特点, 探讨了土压式盾构刀具的选择与布置. 但是, 对于第一方面的问题, 即刀具在刀盘上的布局与布置形式的研究, 由于盾构作业对象的离散性、多样性和复杂性, 还由于盾构制造商的保密, 这方面的研究相对较少, 王家骅^[4]通过分析国外岩石隧道掘进机的特点, 提出刀盘上的刀具有单螺旋线和双螺旋线两种布置方式, 但没有给出定量描述. 张照煌

等^[5-6]对刀盘上滚刀受力及其对刀盘的影响进行了较为详细系统地分析,建立了按螺旋线布置且满足刀盘受力平衡要求的滚刀布置数学模型;Ronnkvist等^[7]制作了一台直径32英寸的微型硬岩掘进机,并按双螺旋线布置方式对在刀盘上布置了12把直径5英寸的微型滚刀,平均刀间距为2英寸,通过切削试验表明该螺旋线布置方式破岩效果较好;乔永立^[8]认为增加螺旋线数目在一定范围内可以优化刀盘受力平衡,螺旋线的螺旋角度对刀盘受力平衡状况没有决定性影响,但可以通过改变螺旋线的起始位置来调节刀盘受力;陈国盛^[9]给出了刮刀的两条常见的螺旋线布置方式的数学表达式,同时指出为确保施工安全,应按两条或两条以上的螺旋线布置刀具。

总之,盾构刀具布置还没有统一的设计准则和方法体系,主要依赖在施工过程中逐渐积累的经验。而针对螺旋线形的布置形式,也没有形成统一的理论体系。对不同线形的螺旋线布置形式与破岩效率及其刀具磨损的关系则少有研究,对反交错双螺旋线这种新的刀具布置模式的特点及其对地层的适应性的研究还没有见到。

本文总结了盾构刀具布置原则和一般方案,根据广深港狮子洋隧道盾构施工中刀具布置形式与破岩效率及其刀具磨损的关系,深入分析了刀具布置反交错双螺旋线模式的优缺点及其对地层的适应性,也解释了狮子洋隧道刀具磨损快、刀具更换次数多的原因。本文的研究结果和思路均有助于深化对盾构刀具布置形式的认识。

1 盾构机刀具布置原则及一般方案

1.1 刀具布置基本原则

文献^[10]指出,刀盘上刀具所承受的荷载对刀盘中心坐标轴产生的力矩应满足平衡条件;Roxborough等^[11]也提出了类似观点;史晶^[12]对罗宾斯反井钻机(83RM-HE)上扩孔钻头的滚刀布局进行研究,提出了常规布置、等破碎功布置及受力平衡布置三种方案原则;张国京^[3]指出刀具应成对并且在刀盘上任意回转半径上布置,位于刀盘外边缘区域的同一回转半径上可布置多把刀具;裴瑞英^[13]在进行刀具布置与磨损的相关性研究中,提出了等磨损量的布置原则。

综上,刀具布置应满足以下基本原则:①刀盘稳定要求,为了使盾构机在掘进过程中保持良好姿态和稳定性,刀盘受力必须尽量满足空间力系平衡条

件,即刀具传递给刀盘的侧向荷载和所造成的倾覆力矩应最小;②等量破岩要求,在同一地层条件下,破岩量与刀具磨损量成正比,为了增加换刀效率与减少进仓次数,应尽量使每把刀具的破岩量相同,从而在一次进仓中更换更多的刀具,可以通过增加刀盘外边缘区域刀具分布数量或减少刀间距以实现等量破岩;③顺次破岩要求,先破岩的刀具安装直径应小于后破岩的刀具以提供破岩临空面利于排渣。

1.2 刀具布置一般形式

刀具布置的一般形式有同心圆和螺旋线两种,由于螺旋线布置形式可以满足全断面和顺次破岩的要求,并且布置方式灵活,因此得到了广泛地应用。

如上所述,针对螺旋线形的布置形式研究集中于定量的数学描述和刀盘受力影响,没有形成统一的理论体系。对不同线形的螺旋线布置形式的受力情况和刀具破岩效果的影响少有研究。

2 反交错双螺旋线刀具布置形式实例

2.1 一般双螺旋线布置形式

一般单螺旋线刀具布置示意图如图1所示。图中, ρ 为极径, ρ_0 为极径初始值(即初始动点到极点的距离), α 为常数。

单螺旋线的定量描述为:

$$\rho = \rho_0 + \alpha(\theta - \theta_0) \quad (1)$$

式中: θ 为极角, θ_0 为初始极角。相邻两螺旋线间距离满足:

$$\Delta\rho = 2\pi\alpha \quad (2)$$

一般的双螺旋布置形式(图2)是基于单螺旋线基础上的,图中, ρ_1^0, ρ_2^0 分别为第一、二条螺旋线的极径初始值; ρ_1, ρ_2 分别为第一、二条螺旋线的极径。第二条螺旋线与第一条螺旋线的螺间距大小相等,极轴初始值关于刀盘纵轴或横轴对称,螺旋绕行方向一致。该布置形式等于将第一条螺旋线螺间距均匀加密,两条螺旋线始终无交叉现象。对于有特殊需要的刀盘外边缘区域,可设两条以上的螺旋线,此时在满足绕行方向一致且无交叉的同时,起始点应关于刀盘中心点对称。

设 m 为任一回转半径上所布置刀具的数目; n 为螺旋线绕行一周上所布置的刀具数目; s 为刀间距; $\Delta\varphi$ 为相邻两把刀具布置的相位差。

则有:

$$n = 2\pi/\Delta\varphi \quad (3)$$

$$s = \Delta\varphi/nm \quad (4)$$

联立式(2)~(4)可得:

$$\alpha = sm/\Delta\varphi \quad (5)$$

由此,根据岩石特性确定出最优刀间距 s ,根据刀盘结构形式算出相邻滚刀布置相位差 $\Delta\varphi$ (通常滚刀顺时针或逆时针依次布置在刀盘辐条上),再通过试选定螺线数量,即可得到确定螺线形状的常数 α 值。

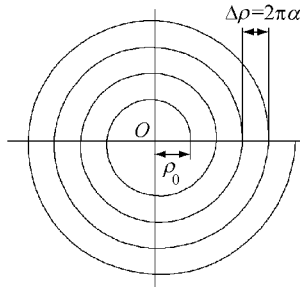


图1 一般单螺旋线刀具布置示意图

Fig.1 Sketch of cutters layout of common single spiral

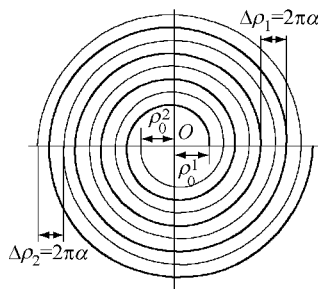


图2 一般双螺旋线刀具布置示意图

Fig.2 Sketch of cutters layout of common double spirals

2.2 反交错双螺旋线布置形式

目前所有的文献基本针对于一般螺旋线布置形式,对于特殊的螺旋线布置形式并无涉及,但螺旋线的布置形式是多样的,并不是只有一种形式。国外的公司针对螺线的布置形式有着较为深入的研究,但成果通常严格保密。在研究基础上发现,法国 NFM 公司生产的 $\Phi 10.8$ m 复合式盾构机使用了一种较为特殊的双螺旋线布置方式(图3),它与一般的双螺旋线布置方式的不同在于:两条螺线绕行方向相反且相互交叉,因此称之为“反交错双螺线”。

反交错双螺线布置的基本特征如下:螺线1和螺线2螺间距相同,螺线1逆时针绕行,初始极角 $\theta_0 = 0$;螺线2顺时针绕行,初始极角 $\theta_0 = \pi$,并且初始极径长度并不相同 $\rho_0^2 \neq \rho_0^1$ 。

图4所示两条反交错螺线的表达式分别为

$$\rho_1 = \rho_0^1 + \frac{sm}{\Delta\varphi}\theta \quad (6)$$

$$\rho_2 = \rho_0^2 + \frac{sm}{\Delta\varphi}(\pi - \theta) \quad (7)$$

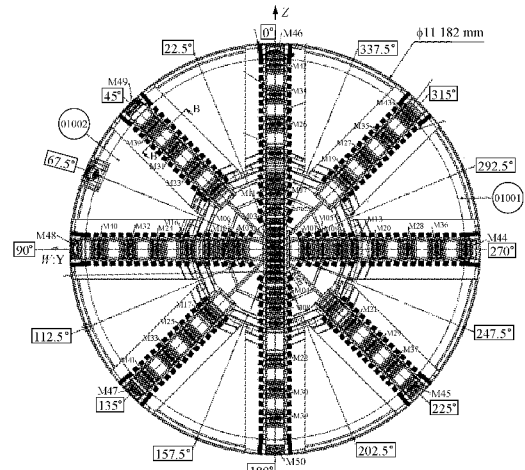


图3 狮子洋盾构机刀具布置

Fig.3 Shield machine cutters layout for Shiziyang Tunnel

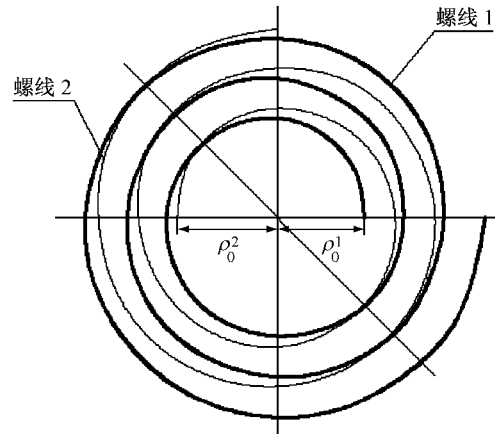


图4 反交错双螺旋线布置示意图

Fig.4 Sketch of reverse cross double spirals pattern

2.3 工程实例应用

狮子洋隧道盾构机的刀盘分为内外两个区域,每个区域由两条螺旋线构成,两个区域由一条过渡螺线连系,如图5所示。正面滚刀刀间距为100 mm,任一回转半径上均只有一把滚刀;内区域螺距为400 mm,螺线绕行一周上滚刀布置4把,分别位于四根主辐条上;外区域螺距为800 mm,每绕行一周布置滚刀8把,除4条主辐条外另增加4条辅助辐条。4条螺旋线的表达式及线上所布置滚刀号分别如下。

螺线1: $\rho_1 = 888 + \frac{200}{\pi}\theta$, $\theta \in [0, 6\pi]$, 该螺线上布置的滚刀依次为: M01→M04→M05→M08→M09→M12→M13, 见图6;

螺线2: $\rho_2 = 788 + \frac{200}{\pi}(\pi - \theta)$, $\theta \in [-\frac{11}{2}\pi, 0]$ 该螺线上布置的滚刀依次为: M02→M03→M06→M07→M10→M11, 见图6;

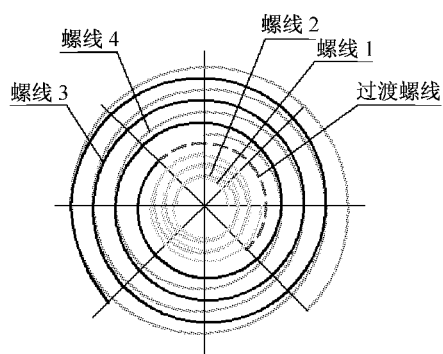


图 5 狮子洋盾构机反交错双螺旋线示意图

Fig.5 Sketch of reverse cross double spirals pattern for Shiziyang Tunnel

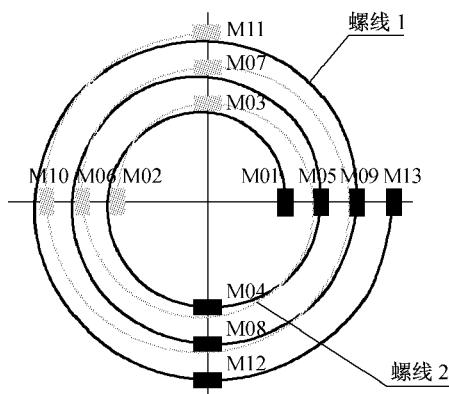


图 6 狮子洋盾构机内区域滚刀位置

Fig.6 Position of disc cutters in the inner region of shield for Shiziyang Tunnel

$$\text{螺线 3: } \rho_3 = 1988 + \frac{400}{\pi} \left(\theta + \frac{3}{4}\pi \right), \theta \in \left[0, \frac{13}{2}\pi \right].$$

该螺线上布置的滚刀依次为: M15→M16→M17→M20→M23→M24→M25→M28→M31→M32→M33→M36→M39→M40, 见图 7;

$$\text{螺线 4: } \rho_4 = 2388 + \frac{400}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right), \theta \in \left[0, \frac{27}{4}\pi \right].$$

该螺线上布置的滚刀依次为: M18→M19→M20→M21→M22→M24→M26→M27→M28→M29→M30→M31→M32→M34→M35→M36→M37→M38→M40→M42→M43→M44→M45, 见图 7.

M14 号滚刀未处于任何螺线中, 它与 M15 号滚刀单独构成一条过渡螺旋线, 表达式为: $\rho' = 2188 + \frac{100}{\pi} \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right), \theta \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{3}{4}\pi \right]$

3 刀盘正反转滚刀破岩特征分析

按照一般双螺旋线形式布置的滚刀是严格关于刀盘中心对称的, 因此刀盘正反转之下滚刀的破岩情

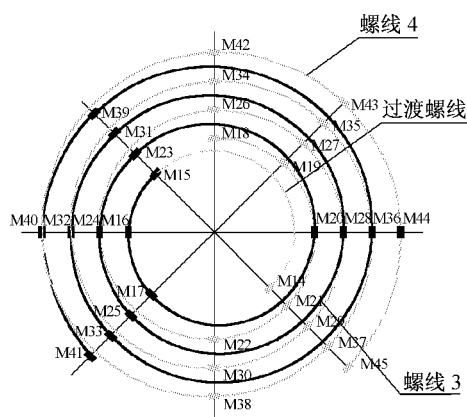


图 7 狮子洋盾构机外区域滚刀位置

Fig.7 Position of disc cutters in the outer region of shield for Shiziyang Tunnel

形是相同的; 而按反交错双螺旋线形式布置的滚刀并不关于中心对称, 因此正反转情况下, 滚刀的破岩次序是不同的。

以 M01~M05 五把滚刀为例, 由于 M01 和 M05 安装在同一辐条上, 因此总是在岩面同一径向上进行切割。设刀盘转动一周需要时间为 T , 刀盘旋转一周的滚刀贯入度为 P , 在切割过程中滚刀的实际破岩深度为 h 。

若刀盘按图 6 所示位置顺时针旋转, 则滚刀的切削顺序为图 8 所示, 其中黑色实体部分代表螺线 1 上分布滚刀, 斜线阴影部分代表螺线 2 上分布滚刀。设在 t_0 时刻, 岩面上某径向位置刚好接触 M01 和 M05 (此时还未进行切割); 在 $t_0 + T/4$ 时刻, 该位置在 M01 和 M05 处的切深已达到 $P/4$, 同时接触 M03; 再经历 $T/4$ 时间后, 到 $t_0 + T/2$ 时刻, M01 和 M05 位置的切深达到 $P/2$, M03 处的切深为 $P/4$, 此时 M02 开始接触该部分岩面; 以下依次分析。

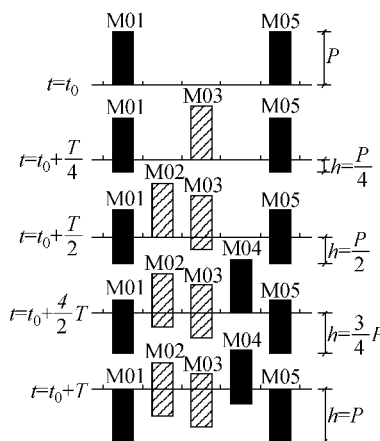


图 8 刀盘顺时针旋转破岩次序

Fig.8 Rock broken sequentially clockwise rotation by cutter head

故 M44 号滚刀未处于波峰位置. 螺线 1 和螺线 2 也有交叉,但在交叉位置未安装滚刀,因此没有上述现象.由此可见反交错双螺线在螺线交叉处的滚刀处于不利的磨损环境中,应着重保护该位置的滚刀,可以有效减少各滚刀间的差异磨损.

5 主要结论

(1) 总结归纳了盾构机刀盘上刀具布置应满足刀盘稳定、等量破岩和顺次破岩三项基本原则,并对刀盘螺旋线布置形式的研究现状进行了评述分析,认为目前对双螺线布置形式的研究集中于同向且无交叉形式的螺线形式.

(2) 通过单螺线和一般双螺线布置形式的定量描述,给出了一般情况下多条螺线布置形式的主要参数的求解方式.

(3) 结合反交错双螺线布置形式的特点,给出其定量描述,并以狮子洋盾构隧道中的应用做了详细的实例分析.

(4) 分析了按反交错双螺线布置形式安装刀具的刀盘,在正反转两种不同情形下,刀具破岩的次序和破岩效率,认为狮子洋盾构机刀盘顺时针旋转的破岩形态更加均匀,但破岩效率比逆时针旋转情况下低 14.3%.

(5) 通过狮子洋隧道工程 SDII 标段刀具实际更换次数的统计结果,认为刀具整体磨损量大,并不适合软硬岩性不均的地质条件使用,且在双螺线交叉处的刀具存在局部磨损量增大的情况.

最后,本文认为反交错双螺线刀具布置方式是刀具布置理论上一次探索性的尝试,其主要目的是为了通过非对称的螺线型布置使得刀盘在逆时针旋转条件下破岩效率相对提高.但实际应用的效果表明,该布置形式下刀具的地层适应性较差,刀具磨损差异性大且磨损速率很快,对该刀具布置理念的优缺点和应用领域还有待深入挖掘.

致谢: 本文研究得到中铁五局集团有限责任公司科研项目“深圳地铁 11 号线宝碧区间复杂条件下盾构施工关键技术与风险控制研究”的支持.

参考文献:

[1] Balci C. Correlation of rock cutting tests with field

performance of a TBM in a highly fractured rock formation; a case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 423.

[2] 张照煌, 乔永立. 全断面岩石掘进机盘形滚刀布置规律研究[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 172.

ZHANG Zhaohuang, QIAO Yongli. Research on the layout of TBM disc cutter[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 172.

[3] 张国京. 北京地区土压式盾构刀具的适应性分析[J]. 市政技术, 2005, 23(1): 9.

ZHANG Guojing. Analysis on EPB-type shield cutters adaptability in Beijing district [J]. Municipal Engineering Technology, 2005, 23(1): 9.

[4] 王家骥. 国外岩石隧道掘进机纵横谈[J]. 电站施工机械, 1980(2): 1.

WANG Jialu. Freely discuss of foreign TBM[J]. Power Plant Construction Machinery, 1980(2): 1.

[5] 张照煌. 掘进机刀盘上盘刀布置规律的探讨[J]. 工程机械, 1996, 27(7): 24.

ZHANG Zhaohuang. An investigation in the cutter arrangement rules for tunneler disk [J]. Construction Machinery and Equipment, 1996, 27(7): 24.

[6] 纪昌明, 张照煌. 盘形滚刀刀间距对岩石跃进破碎参数的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(2): 255.

Ji Changming, ZHANG Zhaohuang. The influence of the disk cutter space on rocks jump break coefficients[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(2): 255.

[7] Ronkvist E, Ozdemir L. Testing and performance evaluation of a 32 inch cutterhead using mini disc cutters[C]//Proceedings of ISDT Annual Technical Conference'94. Las Vegas; Institute of Shaft Drilling Technology, 1994: 8 pages.

[8] 乔永立. 全断面岩石掘进机盘形滚刀布置规律的研究[D]. 北京: 华北电力大学能源动力与机械学院, 2009.

QIAO Yongli. Research on the layout of TBM disc cutter[D]. Beijing: School of Energy & Power Engineering of North China Electric Power University, 2009.

[9] 陈国盛. 阿基米德螺线在盾构技术中的应用[J]. 重工与起重技术, 2006(2): 18.

CHEN Guosheng. The use of Archimedes Spiral in the shield technology[J]. Heavy Industry and Lifting Technology, 2006(2): 18.

[10] 秋の三藤三朗. 滚刀破岩の理论です[J]. 小松技報, 1970, 16(3): 43.

[11] Roxborough F F, Phillips H R. Rock excavation by disc cutter [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1975, 12(12): 361.

[12] 史昂. 反井钻机扩孔钻头滚刀的排布[J]. 煤矿机械, 1990(9): 12.

SHI Jing. Hobbing cutters assignment on the inverse well drill expanding bit[J]. Mining Machinery, 1990(9): 12.

[13] 裴瑞英. 盾构机刀具磨损与布局问题分析研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2009.

PEI Ruiying. Analysis research on shield construction machine tool wear and layout problems [D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering of Tianjin University, 2009.