

DOI: 10.7652/xjtuxb201309017

全断面岩石掘进机滚刀布置的优化方法

耿麒, 魏正英, 杜军

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为解决传统滚刀布置设计方法无法同时考虑刀盘受力平衡和滚刀破岩量均衡的问题,提出了一种全断面岩石掘进机滚刀布置的优化方法。根据极径与极角分别求解的策略,综合考虑设计方案、方案集数目和计算速度的要求,对刀盘初始方案中的滚刀进行合理分组,通过对组内每把滚刀的位置参量(极径、极角)施加微幅波动来建立滚刀布置方案集。采用加权灰靶决策方法,筛选出方案集中的最优方案,并对现有 TB880E 型掘进机滚刀布置进行了优化。与优化前相比,刀盘倾覆力矩减小了 65%,并且不改变滚刀的布局模式,因此该方法不会对刀盘结构刚度产生不良影响,还在一定程度上避免了刀盘应力的集中。

关键词: 全断面岩石掘进机;滚刀布置优化;加权灰靶决策

中图分类号: TU94;TP391.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0100-06

Cutter Layout Optimization Method of Full-Face Rock Tunnel Boring Machine

GENG Qi, WEI Zhengying, DU Jun

(State key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A cutter layout optimization strategy for full-face rock tunnel boring machine (TBM) is proposed, to overcome the difficulty that the original design proposal usually can not meet the balance challenge of cutter head forces as well as the rock breaking amount of each cutter. In the strategy the position radius and position angle are solved separately. The layout scheme sets are established by grouping the cutters and exerting micro-adjustment for the position angle and radius, considering the requirements of design proposal, number of scheme sets and the computing rate. The best layout pattern is achieved by selecting the layout scheme following weighted grey target way. The TB880E TBM cutter layout proposal are optimized, compared with the computational results of the original layout design, the eccentric moment decreases by 65%. Since the cutter layout pattern are not adjusted, the optimization strategy enables to avoid stress concentration in some degree without harm to structural stiffness.

Keywords: full-face rock tunnel boring machine; cutter layout optimization; weighted grey target strategic decision

全断面岩石掘进机是一种用于隧道全断面开挖的大型专用工程机械,被广泛应用于矿山、铁路、地铁、水利水电隧道工程中。刀具在刀盘上的布置技术是掘进机设计的核心技术^[1],合理的刀具布置又

关系到刀具的切削性能和寿命,以及刀盘主轴承寿命、掘进机的振动和噪声等。针对滚刀的布局设计,科罗拉多矿业学院提出的半理论计算模型可用于滚刀的布置优化^[2],但并未对外公布。张照煌等人从

收稿日期: 2013-01-28。 作者简介: 耿麒(1989—),男,博士生;魏正英(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035402)。

网络出版时间: 2013-06-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130617.0840.005.html>

刀盘受力均衡和滚刀破岩效率的角度,给出了单螺旋线布置的数学模型及其求解方法^[3]。张厚美等人根据等磨损布刀的原则,在不改变滚刀数目和极角的情况下,优化刀间距,有效减小了冠部滚刀的破岩负荷,使各刀位滚刀的破岩量更加均衡合理^[4]。霍军周等人综合了刀盘受力和滚刀破岩量等因素,提出了采用遗传算法求解的滚刀布局优化方法^[5]。滚刀布局优化问题可归为多目标决策问题,灰靶决策是灰色系统理论中解决多目标决策问题的一种方法,在武器、电力等各种系统评估中被广泛应用^[6-8],说明该方法处理多目标决策问题的有效性,但目前尚未见在滚刀布局优化领域的应用报道。

本文提出了一种利用加权灰靶决策进行求解的滚刀布局优化方法,该方法在不改变滚刀布局模式的条件下,通过对设计方案中的滚刀位置进行微调,得到优化后的滚刀布局方案,较大程度地减小了刀盘径向不平衡力、刀盘倾覆力矩、滚刀群质心偏斜量和滚刀破岩量的方差,从而使得刀盘受力更加平衡,滚刀破岩量更加均衡。

1 优化方法

1.1 极径优化

如图 1 所示,在不改变滚刀布局模式,即在不改变出碴孔和人孔位置的前提下,优化滚刀位置。采用极径与极角分别优化的策略,其步骤为:①输入待优化滚刀布局参数;②建立布局方案约束方程,求解方案集;③计算各方案的评价指标,建立效果样本矩阵;④建立加权灰靶决策模型并筛选当前最优结果。在滚刀中正滚刀占大多数,同时中心刀和边滚刀的极径相对固定,所以针对正滚刀进行极径优化。

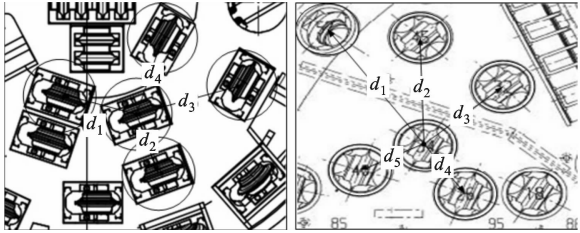
1.1.1 方案集求解 分析刀盘结构形式与滚刀的布置,得到的极径布置约束条件为:①滚刀数目不

变;②刀盘直径不变;③刀间距从中心刀至边滚刀呈总体递减趋势;④正滚刀的刀间距大于第 1 把边缘滚刀的刀间距,并小于中心刀的刀间距。建立的方案集约束方程如下

$$\left. \begin{aligned} x_1 + x_2 + \cdots + x_k &= N_n \\ x_1 y_1 + x_2 y_2 + \cdots + x_k y_k &= r_n \\ y_k &\geq y_{k-1} \geq \cdots \geq y_1 \\ y_1 &< S_c \\ y_k &> S_s \\ x_1, x_2, \cdots, x_k &\geq 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: k 为正滚刀分区数目; x_k 、 y_k 分别为分区 i 的滚刀数目和刀间距; N_n 为正滚刀数目; r_n 为编号最大的中心刀正滚刀之间的径向距离; S_c 、 S_s 分别为中心刀和第 1 把边缘滚刀的刀间距。

1.1.2 不干涉条件 为了避免优化后的滚刀(刀孔)相互干涉,需要引入不干涉条件,对已求解方案集进行筛选。对于矩形刀孔(如图 2a),将刀孔简化为矩形的外包络圆,刀孔不干涉的条件简化为相邻两包络圆中心距大于圆的直径;对于圆形刀孔(如图 2b),可直接计算中心距进行筛选。



(a) 矩形刀孔 (b) 圆形刀孔
 $d_1 \sim d_5$: 刀孔中心距

图 2 滚刀不干涉条件示意图

1.1.3 加权灰靶决策方法 由于在不干涉的条件下,滚刀布置主要考虑径向不平衡力和倾覆力矩的指标,并兼顾破岩量方差和滚刀群质心偏斜量,因此选取刀盘径向不平衡力、刀盘倾覆力矩、滚刀群质心偏斜量和滚刀破岩量方差作为滚刀布局的 4 项评价指标,并记为 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 。根据刀盘的设计要求,所选取的评价指标应越小越好,即均为极小值极性。评价指标的标准模式为

$$\omega_{jl} = \min \omega_{jl}; \quad j = 1, 2, \cdots, m; \quad l = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

式中: ω_{jl} 为第 j 套方案的第 l 个评价指标值; m 为方案的总数目。记第 l 个评价指标的标准靶心为 x_{0l} , 靶值为 1。对 ω_{jl} 进行灰靶变换,得到第 j 套方案对应的第 l 个评价指标的靶值为

$$x_{jl} = \frac{\min\{\omega_{jl}, \omega_{0l}\}}{\max\{\omega_{jl}, \omega_{0l}\}} \quad (3)$$

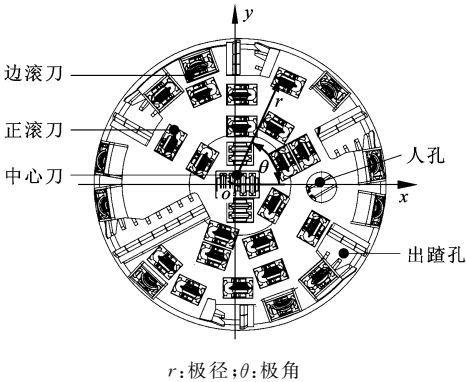


图 1 刀盘面基本布置元素示意图

灰关联差异信息空间为

$$\Delta_{GR} = (\Delta, \xi, \max \Delta_{0jl}, \min \Delta_{0jl})$$
$$\Delta = \{\Delta_{0jl} \mid j = 1, 2, \dots, m; l = 1, 2, 3, 4\}$$
$$\Delta_{0jl} = |x_{0l} - x_{jl}| = |1 - x_{jl}|$$
$$\max(\Delta_{0jl}) = \max_j \{\max_l \Delta_{0jl}\}$$
$$\min(\Delta_{0jl}) = \min_j \{\min_l \Delta_{0jl}\}$$

(4)

式中： ξ 为区别系数，一般取 0.5。由式(4)计算得到靶心系数

$$\gamma(x_{0l}, x_{jl}) = \frac{\min(\Delta_{0jl}) + \xi \max(\Delta_{0jl})}{\Delta_{0jl} + \xi \max(\Delta_{0jl})}$$

(5)

进而得到靶心度

$$\gamma(x_0, x_j) = \sum_{l=1}^4 \gamma(x_{0l}, x_{jl}) \bar{\omega}_l$$

(6)

式中： $\bar{\omega}_l$ 为第 l 个评价指标的权重。由靶心度可以对滚刀布置方案集进行排序，利用靶心度来衡量各布置方案评价指标的综合效果，靶心度越大，表明模式越接近靶心。当 4 项评价指标按权重综合取值最小时，表明该布局模式的综合效果最好。

1.2 极角优化

极径优化完成后，得到相对的最优布局模式，以该模式为输入条件，进行极角的优化。由于中心刀的位置是固定的，因此针对正滚刀和边滚刀进行极角优化。极角优化采用由内向外、分组优化的方法。由于编号相邻的 4 把滚刀基本分布在坐标系的 4 个象限中，因此取极角优化分组内的滚刀数目为

$$p = 4N, \quad N = 1, 2$$

(7)

以 1° 为最小波动角度，对组内滚刀的极角施加上下微幅波动，构成滚刀极角的取值集合 U ， U 元素数目用 q 表示，分组中每把滚刀均按此方法操作，可得出分组的极角方案集。采用与极径优化相同的方法进行不干涉方案集的筛选和灰靶排序，第 i 个分组优化完成后，该分组内的滚刀参与 $i+1$ 分组内滚刀的布置优化计算。

2 评价指标权重计算

参照相关模型^[9-11]进行各评价指标及相应载荷的计算。

2.1 评价指标重要性的对比

在滚刀布局优化中，多个评价指标的重要程度并不完全相同，需要对各评价指标的权重进行从定性到定量的分析计算。工程上主要考虑 C_1 、 C_2 指标，其重要性大于 C_3 、 C_4 ，即 $C_2 > C_1 > C_3 = C_4$ 。

TBM 轴承的典型结构如图 3 所示。由于径向滚子承受径向力，轴向滚子承受轴向的拉力或推力，

因此 C_1 主要影响径向滚子的寿命， C_2 主要影响止推滚子寿命。工程要求径向不平衡力要比轴向推力小 2 个数量级，倾覆力矩要比刀盘扭矩小 2 个数量级^[12]。TB880E 型掘进机在正常掘进状态下，推力为 14 000 kN 时，扭矩约为 5 600 kN·m^[4]，可取许用为径向不平衡力 200 kN，倾覆力矩 80 kN·m，质心偏斜 55 mm。由文献[13]所述方法计算得到止推滚子寿命为 5.385×10^7 h，径向滚子寿命为 3.012×10^8 h，因此 C_2 比 C_1 更影响轴承寿命，其重要程度大于 C_1 。

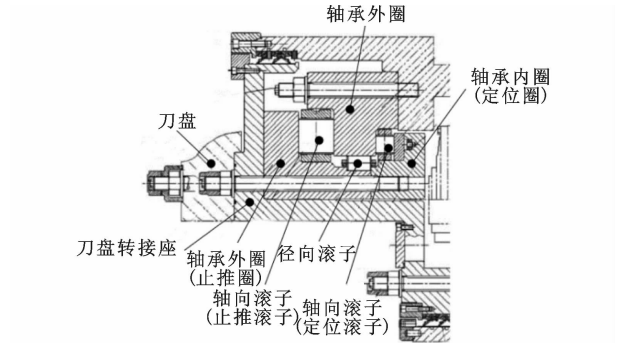


图 3 刀盘主轴承示意图

2.2 评价指标权重的计算

采用层次分析法对各评价指标权重进行计算，包括建立层次结构模型(见图 4)、构造判断矩阵 A 、

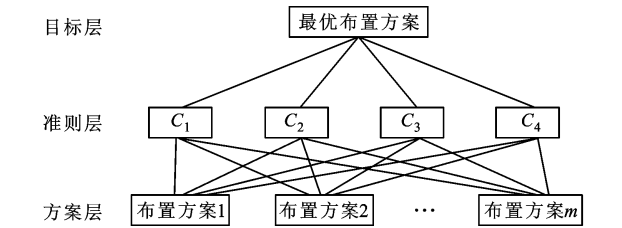


图 4 滚刀布局的层次结构模型

权重计算 3 个步骤。采用 1~9 的比较尺度^[14]来构造判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 7 & 7 \\ 3 & 1 & 9 & 9 \\ 1/7 & 1/9 & 1 & 1 \\ 1/7 & 1/9 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

通过对判断矩阵进行归一化和一致性检验，最终求得各评价指标的权重向量

$$\bar{\omega} = [0.306\ 3; 0.585\ 7; 0.054\ 0; 0.054\ 0]$$

3 实例数值验证

3.1 已知条件

TB880E 型掘进机正常掘进时，其刀盘主要结构参数、掘进参数和地质参数如下^[4]：刀盘半径

$R=4\,400\text{ mm}$,滚刀直径 $D=432\text{ mm}$,中心刀数 $n_1=6$,正滚刀数 $n_2=51$,边滚刀数 $n_3=14$,滚刀质量 $M=200\text{ kg}$;刀盘转速 $n=5.4\text{ r/min}$,滚刀切深为 9 mm/r ;岩石单轴抗压强度 $\sigma_c=150\text{ MPa}$,岩石抗拉强度 $\sigma_t=6\text{ MPa}$ 。

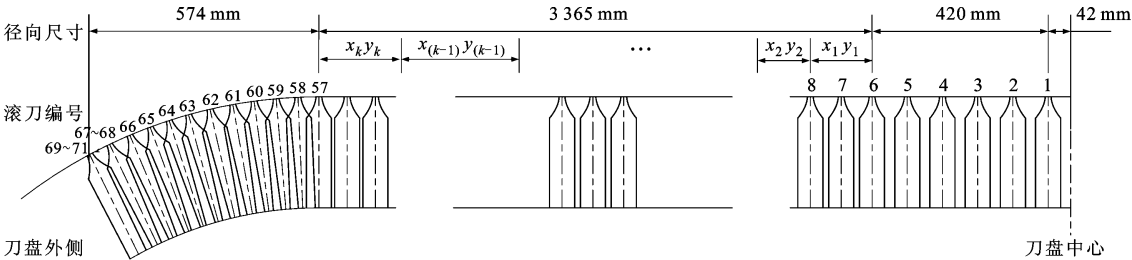
3.2 极径优化

由图 5 数据及刀盘基本参数得到: $N_n=51$, $r_n=3\,365\text{ mm}$, $S_c=84\text{ mm}$, $S_s=63\text{ mm}$ 。为表示评价指标 $C_1\sim C_4$ 在极径优化前后的变化情况,定义归

一化变量如下

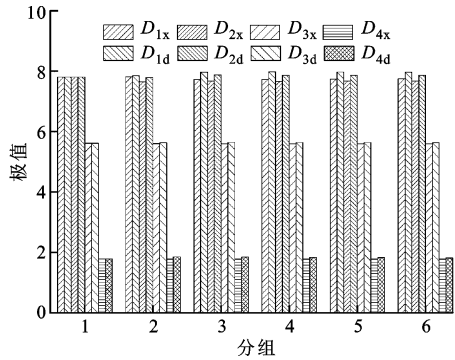
$$D_1 = \frac{C_1}{10}; D_2 = \frac{C_2}{100}; D_3 = \frac{C_3}{10}; D_4 = \frac{C_4}{10^6}$$

图 6 中,分组 1 对应 TB880E 型掘进机滚刀布置优化前各极值的计算结果;分组 2~6 对应 $k=2\sim 6$ 时各极值的计算结果。由图 6,优化前后的变量 $D_1\sim D_4$ 的极值无明显变化,且分组内各变量的极大值与极小值也无明显差别,这说明 $C_1\sim C_4$ 在极径优化过程中不会发生明显变化。



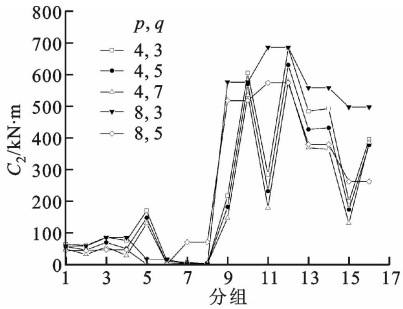
1~6: 中心刀;7~57: 正滚刀;58~71: 边滚刀

图 5 TB880E掘进机刀盘滚刀覆盖图

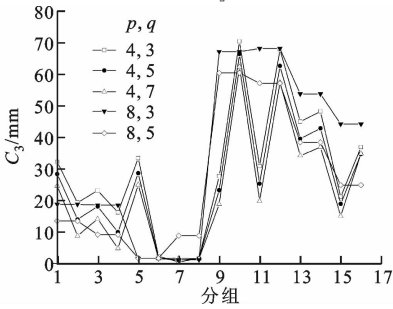


D_{1x}, D_{1d} : D_1 的极小值与极大值; D_{2x}, D_{2d} : D_2 的极小值与极大值; D_{3x}, D_{3d} : D_3 的极小值与极大值; D_{4x}, D_{4d} : D_4 的极小值与极大值

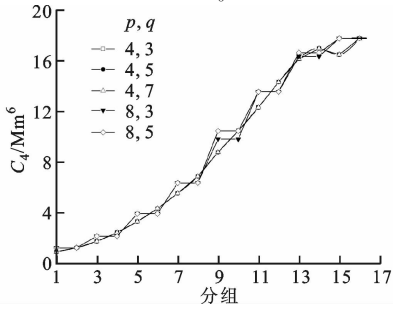
图 6 极径分区优化计算结果的对比



(b) C_2



(c) C_3

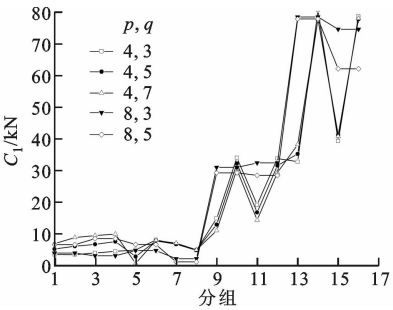


(d) C_4

图 7 极角分组优化过程中各评价指标的变化曲线

3.3 极角优化

取极径优化值 $k=5$ 得到的结果作为极角优化的输入条件,取 $(p,q)=(4,3;4,5;4,7;8,3;8,5)$ 进行极角优化,评价指标计算结果如图 7、表 1 所示。



(a) C_1

表 1 TB880E 优化前及各分组优化评价指标的计算结果

评价指标	优化前	优化后				
		$p=4,q=3$	$p=4,q=5$	$p=4,q=7$	$p=8,q=3$	$p=8,q=5$
C_1/kN	76.54	77.95	76.98	77.25	73.87	61.55
$C_2/\text{kN}\cdot\text{m}$	750	394	376	384	496	260
C_3/mm	56	37	35	35	44	25
C_4/cm^6	1.78×10^7	1.78×10^7	1.78×10^7	1.78×10^7	1.78×10^7	1.78×10^7

图 7 中分组 1~16 分别对应的滚刀编号为 7~10、11~14、15~18、19~22、23~26、27~30、31~34、35~38、39~43、44~47、48~51、52~55、56~59、60~63、64~67 和 68~71 的组合。

如图 7 所示,在分组 8 之前, C_1 、 C_2 、 C_3 维持较小数值,并逐渐向 0 趋近,因为这些分组中滚刀布置较为对称,且安装极径较小(小于 2 500 mm)。第 9 分组的评价指标 C_1 、 C_2 、 C_3 呈现突跳趋势,因为受布局模式限制,此分组包含 5 把滚刀,并且空间分布不对称。

在图 7 所示 p 、 q 的 5 种取值组合下, C_1 、 C_2 、 C_3 均有减小, C_4 基本维持不变。 $p=8,q=5$ 时的计算结果最好,与刀盘优化前相比, C_1 、 C_2 、 C_3 分别减小了 21%、65%和 37%。

3.4 刀盘变形与应力计算

计算刀盘应力应变时,加载条件为正常工作状态下的载荷^[5]。由图 8a、8b,优化前后的最大变形

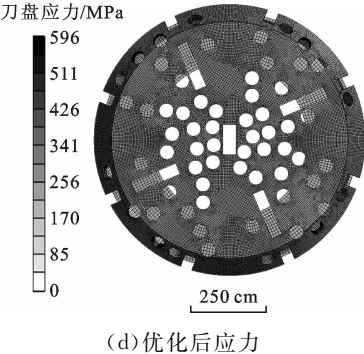
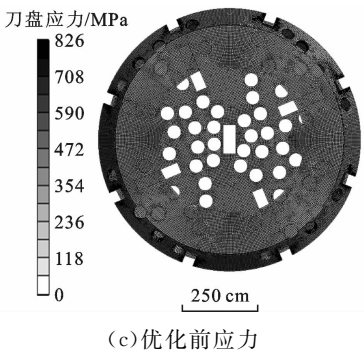
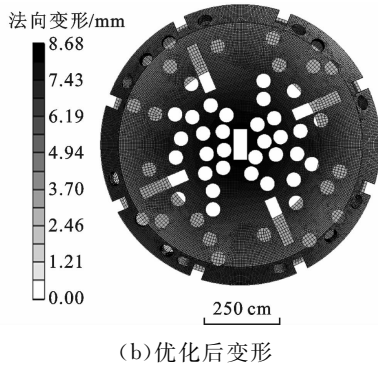
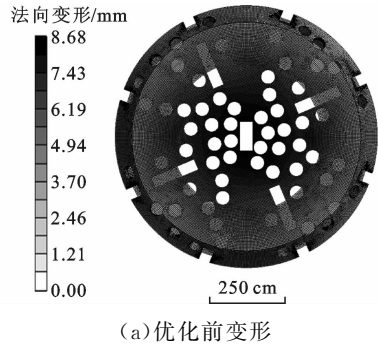


图 8 刀盘优化前后的应力应变云图

量均发生在近刀盘中心位置,变形量数值均呈现从刀盘中心到外周逐渐减小的趋势,优化前后的刀盘应力值如图 8c、8d 所示。优化后,刀盘刚度无明显改变,但更能避免产生应力集中。

4 结 论

本文提出了一种用加权灰靶决策方法进行求解的滚刀布局优化方法,该方法在不改变滚刀布局模式的条件下,通过对设计方案中滚刀位置的微调,得到了优化后的滚刀布局方案,其结论如下。

(1)采用本文方法求出的滚刀布置方案,其 4 个评价指标的计算结果优于原方案,并且本文方法具有对原设计方案改动小、简单、相对全面、易操作的特点。

(2)滚刀布置优化主要是对极角的优化,改变滚刀极径不会对以 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 为表征的刀盘性能

产生明显影响,但改变滚刀极角会对刀盘性能产生明显影响。

(3)分析极角优化过程发现,滚刀布局模式对刀盘性能具有重要影响,因此在设计方案中应使滚刀的安装位置尽可能对称。

(4)对比刀盘优化前后的应力应变计算结果,发现本文方法不仅对刀盘结构刚度不会产生不良影响,而且还在一定程度上避免了刀盘应力的集中。

参考文献:

- [1] GERTSCH R E. Rock toughness and disc cutting [D]. Missouri, USA: University of Missouri-Rolla, 2000.
- [2] ROSTAMI J, OZDEMIR L, NILSEN B. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models [C]// Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling Technology. Las Vegas, NV, USA: Institute of Shaft Drilling Technology, 1996: 11-12.
- [3] 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): 172-177.
ZHANG Zhaohuang, QIAO Yongli. Research on the layout of TBM disc cutter [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 172-177.
- [4] 张厚美. TBM的掘进性能数值仿真研究 [J]. 隧道建设, 2007, 26(增刊): 1-7.
ZHANG Houmei. Study on numerical simulations of performance of tunnel boring machines [J]. Tunnel Construction, 2007, 26(supp): 1-7.
- [5] HUO Junzhou, SUN Wei, CHEN Jing. Optimal disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine based on a multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(2): 521-528.
- [6] 邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1987: 112-138.
- [7] 常雷雷, 张小可, 李孟军. 基于灰靶理论的武器装备体系技术贡献度评估 [J]. 兵工自动化, 2010, 29(10): 13-15.
CHANG Leilei, ZHANG Xiaoke, LI Mengjun. Weapon system of system technology contribution evaluation based on grey target theory [J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(10): 13-15.
- [8] 李建坡, 赵继印, 郑蕊蕊, 等. 基于灰靶理论的电力变压器状态评估新方法 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(1): 201-205.
LI Jianpo, ZHAO Jiying, ZHENG Ruirui, et al. A grey target theory based method for state assessment

of power transformer [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(1): 201-205.

- [9] ROSTAMI J. HARD rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction [J]. Geomechanics and Tunneling, 2008, 1(1): 18-28.
- [10] 曹旭阳, 张伟, 王欣, 等. TBM典型刀盘刀具布置方法及软件实现 [J]. 工程机械, 2010, 41(1): 21-25.
CAO Xuyang, ZHANG Wei, WANG Xin, et al. Typical cutterhead tool layout method and software implementation of TBM [J]. Construction Machinery, 2010, 41(1): 21-25.
- [11] 张照煌, 叶定海. 盘形滚刀破岩模型及其侧向力的计算 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, 12(3): 293-298.
ZHANG Zhaohuang, YE Dinghai. The disc cutter rock breaking model and its calculation of lateral force [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(3): 293-298.
- [12] 王梦恕. 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 27.
- [13] 张照煌. 全断面岩石掘进机刀盘轴承受力分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(增刊): 225-232.
ZHANG Zhaohuang. Bearing loading analysis of full-face rock tunnel boring machine (TBM) cutter head [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(S1): 225-232.
- [14] SAATY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3): 234-281.

[本刊相关文献链接]

- 樊文刚, 李建勇, 黄泽华, 等. 多点切触加工在复杂凸曲面中的应用. 2012, 46(3): 53-57. [doi: 10.7652/jxtxb201203010]
- 樊文刚, 李建勇, 蔡永林, 等. 复杂曲面多点切触加工特征参数线刀轨规划. 2012, 46(1): 81-85. [doi: 10.7652/jxtxb201201015]
- 蔡改改, 陈雪峰, 陈保家, 等. 利用设备响应状态信息的运行可靠性评估. 2012, 46(1): 108-113. [doi: 10.7652/jxtxb201201020]
- 韩有昂, 张英杰, 喻明让. 一种有向投影的测量数据刀具轨迹生成技术. 2011, 45(9): 11-14. [doi: 10.7652/jxtxb201109003]
- 陈保家, 陈雪峰, 何正嘉, 等. 利用运行状态信息的机床刀具可靠性预测方法. 2010, 44(9): 74-77. [doi: 10.7652/jxtxb201009015]

(编辑 管咏梅)