

引用格式:孙玲,贾凯. 基于粒子-蚁群混合算法的截割头形状优化设计[J]. 有色设备,2024,38(2):46-51.

SUN Ling, JIA Kai. Optimization design of cutting head shape based on particle-ant colony hybrid algorithm[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024,38(2):46-51.

# 基于粒子-蚁群混合算法的截割头形状优化设计

孙玲<sup>1</sup>, 贾凯<sup>2</sup>

(1. 阜新市产业转型振兴服务中心, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 锦州 121000)

**[摘要]** 针对 EBH-150 型横轴式掘进机截割头在截割过程中遇到的载荷波动问题,采用粒子-蚁群混合算法对现有抛物线形截割头进行优化设计。利用 Matlab 数值模拟软件,对截齿的排列参数进行多目标优化,以期减少载荷波动并提升掘进机的工作稳定性。优化结果显示,截割头的截线间距经过调整后,从外向内逐渐减小,使得单个截齿受力更为均匀。横向载荷波动降低了约 62%,其他方向的载荷波动也显著降低,均超过 50%。这些改进有效提高了掘进机横摆进刀的稳定性,并有助于延长截割头的使用寿命。尽管优化后的截割头在某些方向上的载荷均值有所增加,但载荷峰值降低,避免了单个截齿的过载现象。总体而言,优化设计取得了理想的效果,但仍需通过实际应用进行验证。本研究为掘进机截割头的优化设计提供了一种有效的算法支持,对于提高掘进机的工作效率和安全性具有重要意义。

**[关键词]** 掘进机; 截割头; 粒子-蚁群优化; 混合算法; Matlab 软件; 数值模拟

**[中图分类号]** TD421 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)02-0046-06

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.02.008

## 0 引言

截割头是掘进机进行有效作业的关键部件,其通常包含多个截齿,这些截齿配合截割头的转动对煤层进行切割和破碎。由于截割头是与煤层直接接触并完成采矿作业的部分,其设计质量、制造精度以及工作参数配置等影响掘进机的工作效率以及安全性<sup>[1]</sup>。截割头的可靠性和整机的安全性也是生产中不容忽视的问题。若截割头设计不当或截齿安排不合理,可能导致截割头在工作过程中承受不均匀的载荷,这会增加截割头的机械疲劳,从而降低其使用寿命,并可能因机械故障导致生产安全事故。在截割过程中,单个截齿的截割角度、排列位置等因素显然会造成整体载荷的波动<sup>[2-3]</sup>。不同的角度和排列将导致截割力矩的变化,进而影响到截割头以及整个掘进机的稳定性与效率。为此,对截齿的排列进行优化,能显著提升截割效率,减少能耗,同时也能降低因不均衡载荷导致的机械故障风险,延长

掘进机以及截割头的使用周期。

## 1 截割头介绍

截割头的形状是指截割头绕自身主轴转动时,截齿齿尖所形成的外轮廓,也称截割头包络面,如图 1 所示。截割头绕轴线旋转时,各个截齿齿尖与过轴线平面都有一个交点,连接这些交点就得到齿尖包络曲线。该包络曲线绕截割头轴线旋转就得到截割头的空间包络面。

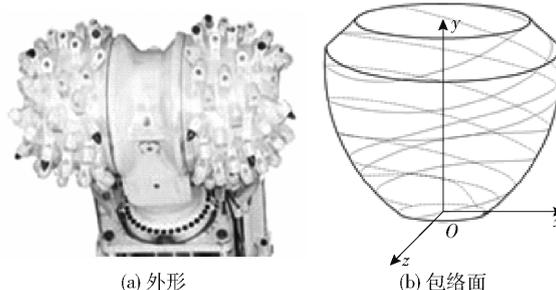


图1 截割头形状及截割头齿尖包络面  
Fig.1 Shape of cutting head and envelope surface of cutting head tooth tip

现有计算截割头载荷的公式中,截割头的截齿排列参数包括截线间距、截齿圆周角和每线截齿数。

[收稿日期] 2023-11-12

[第一作者] 孙玲(1984—),女,辽宁阜新人,工程师,硕士,主要研究方向为机械设计及理论。

在截割头总体结构即截割头几何尺寸以及截齿数目不变的前提下,截线间距和截齿圆周角直接影响单个截齿的受力,进而影响到截割头在竖直方向、推进方向、横切方向上的载荷以及负载扭矩的波动情况。因此,本文选择每个截齿的截线间距与截齿圆周角作为优化设计的设计变量,即  $X = [t, \theta]^{[4]}$ 。

## 2 目标函数的建立

衡量截割头载荷波动大小以载荷的变系数大小作为衡量标准。因此,以截割头竖直方向载荷  $R_a$ 、推进方向载荷  $R_b$ 、横切方向载荷  $R_c$  和负载扭矩  $M_c$  的变系数最小作为截齿排列参数优化的目标函数<sup>[5-6]</sup>。模拟横轴式掘进机横切的工况时,将横切载荷的变系数作为首要目标,建立目标函数如下。

$$F(X) = 0.2f_{R_a}(X) + 0.2f_{R_b}(X) + 0.4f_{R_c}(X) + 0.2f_{M_c}(X) \quad (1)$$

式中: $f_{R_a}(X)$ 、 $f_{R_b}(X)$ 、 $f_{R_c}(X)$ 、 $f_{M_c}(X)$  分别为  $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$  和  $M_c$  变系数最小的单目标优化目标函数。

$$\text{其中,} \quad f_{R_a}(X) = \frac{\sigma_{R_a}}{E_{R_a}} \quad (2)$$

$$f_{R_b}(X) = \frac{\sigma_{R_b}}{E_{R_b}} \quad (3)$$

$$f_{R_c}(X) = \frac{\sigma_{R_c}}{E_{R_c}} \quad (4)$$

式中:

$$\sigma_{R_c} = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (R_{Xi} - E_{R_a})^2}, E_{R_a} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} R_{Xi}$$

$$\sigma_{R_b} = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (R_{Yi} - E_{R_b})^2}, E_{R_b} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} R_{Yi}$$

$$\sigma_{R_c} = \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (R_{Zi} - E_{R_c})^2}, E_{R_c} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} R_{Zi}$$

式中, $\sigma_R$  为各方向载荷的标准差; $E_R$  为截齿在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向载荷的平均值; $n$  为截齿数量; $R$  为单个截齿在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上的载荷。

## 3 约束条件

根据改型掘进机截割头的参数和使用要求,确定如下条件和对应的约束条件。

1) 截线间距的范围:

$$g_1(X) = x_1 - 18 > 0 \quad (5)$$

$$g_1(X) = 42 - x_1 > 0 \quad (6)$$

2) 截齿圆周角范围:

$$g_3(X) = 40 - x_2 > 0 \quad (7)$$

$$g_4(X) = x_2 - 60 > 0 \quad (8)$$

3) 截齿安装角限制:

$$g_5(X) = x_3 - 60 > 0 \quad (9)$$

$$g_6(X) = 90 - x_3 > 0 \quad (10)$$

4) 截齿齿尖安装截距的限制:

$$g_7(X) = x_4 - 80 > 0 \quad (11)$$

5) 优化后实际生产率限制:

$$g_8(X) = x_5 \geq Q_j \quad (12)$$

$$Q_T = S_r V_b \quad (13)$$

$$S_r = ae \quad (14)$$

式中: $S_r$  为截割头的有效截割面积,  $\text{mm}^2$ ;  $V_b$  为截割头摆动的平均速度,  $\text{m/s}$ ;  $a$  为截割厚度,  $\text{mm}$ ;  $e$  截割深度,  $\text{mm}$ 。

6) 悬臂摆速限制:

$$g_9(X) = v_b \quad (15)$$

式中: $v_b \in [0.3, 3]$ 。

7) 截割头转速限制:

$$g_{10}(X) = n \quad (16)$$

式中: $n \in [10, 75]$ 。

8) 螺旋升角限制:

$$g_{11}(X) = \arcsin\left(\frac{V_a \cos \varphi_f}{D \varphi} - \sin \varphi_f\right) - \varphi_f \quad (17)$$

式中: $V_a$  为煤流的轴向流速<sup>[7]</sup>,  $\text{m/s}$ ,按式(18)计算得到。

$$V_a = 0.5 D \varphi \frac{\sin \alpha \cos(\alpha + \varphi_f)}{\cos \varphi_f} \quad (18)$$

式中: $\varphi$  为截割头转过的角度, ( $^\circ$ );  $D$  为截割头直径,  $\text{mm}$ ;  $\varphi_f$  为煤岩与螺旋叶片的摩擦角, ( $^\circ$ )。

## 4 优化方法与程序设计

针对传统蚁群算法易陷入局部最优解和后期收敛速度慢的问题,基于粒子群算法,对传统蚁群算法作了改进,提出了一种基于粒子群算法的蚁群算法。该算法的基本思想是使用粒子群算法来构造变异算子和分割种群,通过对3个多峰函数的优化,与传统蚁群算法进行比较,定量地研究了该算法<sup>[8-10]</sup>。之前的试验结果表明,该算法很好地保持种群的多样性,有效克服早熟现象,显著提高蚁群算法的收敛速度。程序设计框图如图2所示。

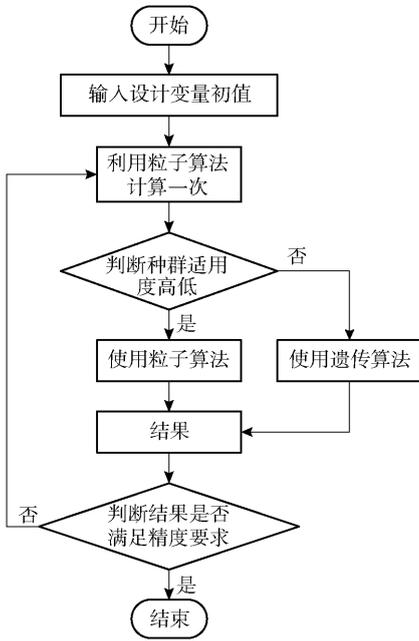


图 2 优化设计程序框图

Fig. 2 Block diagram of optimization design program

## 5 优化结果分析

通过优化,得到抛物线形截割头新的截齿排列见表 1,优化前的截齿排列见表 2。表中, $t$  为截齿长度 (mm)、 $R$  为分布半径 (mm)、 $\beta$  为安装角 ( $^{\circ}$ )、 $\theta$  为圆周角 ( $^{\circ}$ )、 $L$  为轴向位置 (mm),在相同工况下对其载荷再次模拟,得到优化后的载荷曲线,如图 3 所示。

通过模拟出的载荷曲线图,发现经过优化后的截割头载荷明显改善,统计出的数据表明优化前该型号掘进机截割头的载荷存在剧烈的波动和峰值。优化后截线间距从外向内逐渐减小,适应了圆锥段煤层压张系数从自由面向内逐渐增大和过渡圆弧段截齿倾斜角逐渐增大的特征,有利于单个截齿受力的均匀。由表 3 可知,优化后截割头载荷波动明显降低,横向载荷波动降低了 61.92%,提高了掘进机横摆进刀的稳定性,其他方向上的载荷波动降幅也都达到 50% 以上。尽管优化后截割头的载荷均值稍有增大,但载荷峰值都有所降低,避免了单个截齿过载。总体上看,优化结果较理想,但仍需实际工作进行检验。

优化前后的截割头轮廓线分别如图 4、图 5 所示。优化后的截割头轮廓根部和中部由抛物线构成,顶部则是圆弧,如图 6 所示。

新的截齿排列图如图 7 所示。截割头轮廓线实际上是将离散的截齿坐标利用 Matlab 进行拟合得

表 1 抛物线形截割头优化后截齿排列

Table 1 Pick arrangement after optimization of parabolic cutting head

截齿序号	$t$	$R$	$\beta$	$\theta$	$L$
1	18	316	36.3	135	5
2	18	344	36.3	225	19
3	18	353	31.6	315	28
4	18	371	31.6	45	42
5	18	381	27.0	162	56
6	32	381	27.0	252	56
7	32	385	22.3	342	70
8	32	385	22.3	72	70
9	32	390	17.6	187	93
10	32	390	17.6	277	93
11	32	395	15.0	7	121
12	32	395	15.0	97	121
13	32	399	15.0	205	149
14	40	399	15.0	295	149
15	40	404	15.0	25	186
16	40	404	15.0	115	186
17	40	404	15.0	230	223
18	40	404	15.0	320	223
19	40	399	15.0	50	241
20	40	399	15.0	140	241
21	40	395	15.0	250	269
22	40	395	15.0	340	269
23	40	390	15.0	70	297
24	40	390	15.0	160	297
25	40	385	15.0	275	316
26	32	385	17.6	5	316
27	32	381	17.6	95	344
28	32	381	22.3	185	344
29	32	371	22.3	295	362
30	32	371	27.0	25	362
31	32	362	27.0	115	395
32	32	362	31.6	205	395
33	32	353	31.6	318	423
34	32	353	36.3	48	423
35	18	353	36.3	138	441
36	18	353	44.6	228	441
37	18	334	44.6	348	464
38	18	334	54.9	78	464
39	18	325	54.9	168	483
40	18	325	64.2	258	483
41	18	302	64.2	17	502
42	18	302	73.5	107	502
43	18	279	73.5	197	515
44	18	251	83.0	287	525
45	18	232	90.0	81	529
46	18	200	90.0	171	529
47	18	167	90.0	261	529
48	18	139	90.0	351	534

表 2 抛物线形截割头优化前截齿排列

Table 2 Truncation arrangement before optimization of parabolic truncation head

截齿序号	$t$	$R$	$\beta$	$\theta$	$L$
1	20	316	36.3	136	5
2	20	344	36.3	217	19
3	20	353	31.6	317	28
4	20	371	31.6	42	42
5	20	381	27.0	163	56
6	20	381	27.0	246	56
7	34	385	22.3	341	70
8	34	385	22.3	58	70
9	34	390	17.6	186	93
10	34	390	17.6	267	93
11	34	395	15.0	8	121
12	35	395	15.0	82	121
13	35	399	15.0	207	149
14	35	399	15.0	287	149
15	42	404	15.0	30	186
16	42	404	15.0	109	186
17	39	404	15.0	232	223
18	42	404	15.0	312	223
19	42	399	15.0	52	241
20	42	399	15.0	132	241
21	42	395	15.0	252	269
22	42	395	15.0	336	269
23	42	390	15.0	72	297
24	42	390	15.0	155	297
25	39	385	15.0	277	316
26	34	385	17.6	176	316
27	34	381	17.6	99	344
28	33	381	22.3	177	344
29	33	371	22.3	297	362
30	31	371	27.0	19	362
31	35	362	27.0	117	395
32	34	362	31.6	197	395
33	34	353	31.6	320	423
34	34	353	36.3	35	423
35	20	353	36.3	140	441
36	20	353	44.6	218	441
37	20	334	44.6	350	464
38	20	334	54.9	67	464
39	20	325	54.9	172	483
40	20	325	64.2	2 471	483
41	20	302	64.2	19	502
42	18	302	73.5	107	502
43	18	279	73.5	197	515
44	18	251	83.0	288	525
45	18	232	90.0	83	529
46	18	200	90.0	138	529
47	18	167	90.0	267	529
48	18	139	90.0	312	534

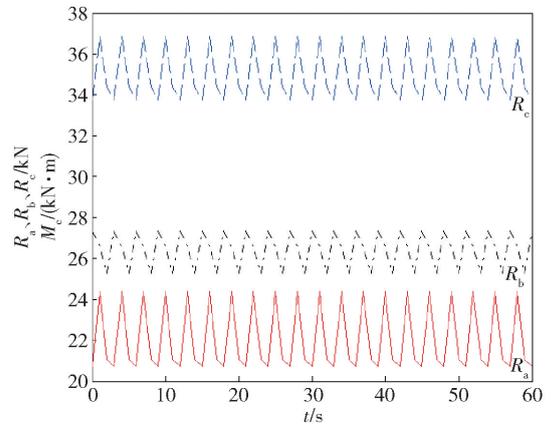


图 3 优化后载荷图

Fig. 3 Load diagram after optimization

表 3 抛物线形截割头优化后载荷情况

Table 3 Load condition after optimization of parabolic cutting head

载荷	统计量	优化前	优化后	变化量	变化率/%
$R_a$	最大值/kN	28.692 8	24.498 2	4.194 6	14.62
	均值/kN	21.930 6	22.534 3	-0.603 7	-2.753
	变差系数	0.111 2	0.028 3	0.082 9	74.55
$R_b$	最大值/kN	30.109 8	27.297 7	2.812 1	9.339
	均值/kN	25.748 3	26.372 4	-0.624 1	-2.424
	变差系数	0.055 4	0.024 7	0.030 7	55.42
$R_c$	最大值/kN	38.797 7	36.809 8	1.987 9	5.124
	均值/kN	34.947 8	34.748 3	0.199 5	0.570 9
	变差系数	0.049 9	0.022 1	0.027 8	61.92

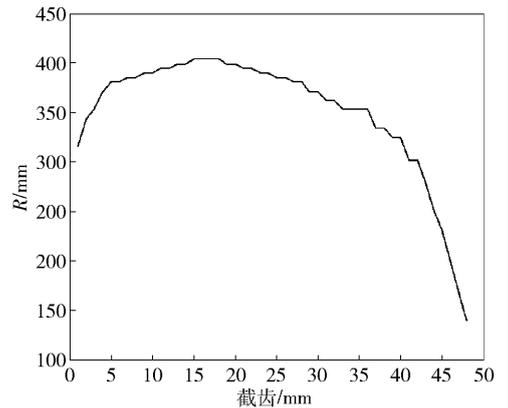


图 4 优化前截割头轮廓图

Fig. 4 Outline of the cutting head before optimization

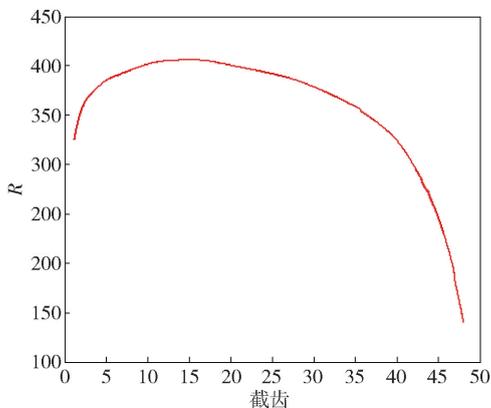


图 5 优化后截割头轮廓

Fig.5 Optimized cutting head profile

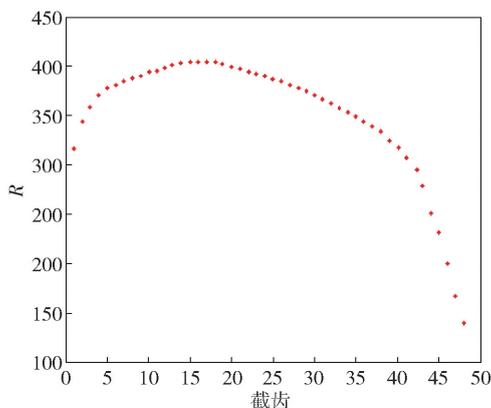


图 6 优化后截齿投影图

Fig.6 Optimized pick projection

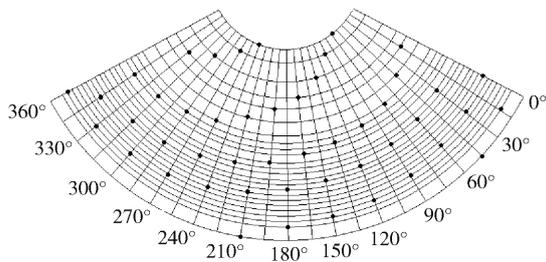


图 7 优化后截齿排列

Fig.7 Optimized pick arrangement

到的,两段抛物线的方程为:

$$y_1 = -0.0435x^2 + 3.0435x + 302 \quad (19)$$

$$y_2 = -0.0019x^2 + 0.918x + 299 \quad (20)$$

由式  $Q_T = S_r V_b$ , 计算新型截割头生产理论功率最低为 111 kW, 达到使用标准。

## 6 结论

本文针对 EBH-150 型横轴式掘进机截割头实

际作业中遇到的载荷波动问题,采用粒子-蚁群混合算法进行了优化设计。通过 Matlab 数值模拟软件对截齿排列参数进行多目标优化,取得了以下结论。

1) 载荷波动显著降低。优化后的截割头在横向载荷方向上的波动降低了约 62%, 而其他方向上的载荷波动也均有超过 50% 的降低。这一显著的改善有助于减少截割头在工作过程中的机械应力, 从而降低了因载荷不均导致的机械故障风险。

2) 掘进机稳定性提升。通过优化设计,截割头的截线间距从外向内逐渐减小,使得单个截齿受力更为均匀,有效提高了掘进机在横摆进刀时的稳定性。这对于确保掘进作业连续性和安全性具有重要意义。

3) 使用寿命延长。优化设计通过调整截齿排列,减少了单个截齿的受力不均和过载现象,有助于延长截割头的使用寿命。尽管优化后在某些方向上的载荷均值有所增加,但载荷峰值的降低避免了截齿的过载,从而减少了机械疲劳。

4) 算法有效性验证。虽然优化设计在模拟中显示出了显著的性能提升,但这些改进效果仍需在实际工作中进行验证。未来的工作包括将优化后的截割头应用于实际掘进作业中,并对其性能进行长期监测,以进一步确认优化设计的实际效果。

综上所述,本研究成功地应用了粒子-蚁群混合算法对掘进机截割头进行了优化设计,为提高掘进机的工作效率和安全性提供了有效的技术支持。未来的研究将进一步验证优化设计在实际应用中的性能,并探索该算法在其他工程领域的潜在应用。

### [参考文献]

[1] 王虹,陈明军,张小峰. 我国煤矿快速掘进 20 年发展与展望[J/OL]. 煤炭学报;1-16[2024-03-25].

[2] 方志准,王吉安. 掘进机掘进技术的发展现状[J]. 矿山机械,2003(11):11-12,4.

[3] 邢印成,王凤林,郭滨. 掘进机的发展[J]. 煤炭技术,2005(5):5-6.

[4] 安云伟. EBZ40 型掘进机截割头结构设计与仿真研究[J]. 机械管理开发,2023,38(8):34-35,40.

[5] 井庆贺,宋文杰,张启良,等. 夹研工况下截割运动参数对截割性能的影响[J]. 煤炭技术,2023,42(8):211-215.

[6] 李四维. 基于不同煤岩性质的矿井掘进机截割载荷分析

- 研究[J]. 机械管理开发,2023,38(3):54-55,61.
- [7] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [8] 陈伦军,罗延科,陈海虹,等. 机械优化设计遗传算法[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 陈金环,王冠,王东云. 粒子群算法及特性的研究[J]. 中原工学院学报,2007(4):13-15,71.
- [10] 高尚,杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

## Optimization design of cutting head shape based on Particle-Ant Colony Hybrid algorithm

SUN Ling<sup>1</sup>, JIA Kai<sup>2</sup>

(1. Fuxin Industrial Transformation and Revitalization Service Center, Liaoning 123000, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** In addressing the issue of load fluctuations encountered by the cutting head of the EBH-150 type horizontal axis tunneling machine during the excavation process, this study employed a hybrid Particle-Ant Colony Optimization algorithm to refine the design of the existing parabolic-shaped cutting head. By utilizing the numerical simulation software Matlab, a multi-objective optimization of the arrangement parameters of the cutter teeth was conducted, aiming to diminish load fluctuations and enhance the operational stability of the tunneling machine. The optimization outcomes revealed that the spacing of the cutting lines was adjusted to gradually decrease from the exterior towards the interior, resulting in a more uniform distribution of force on each cutter tooth. There was a 62% reduction in lateral load fluctuations, and significant reductions in load fluctuations in other directions as well, all exceeding 50%. These enhancements effectively improved the stability of the machine's lateral cutting entry and contributed to extending the lifespan of the cutting head. Although there was an increase in the average load in certain directions following the optimization, the peak load values decreased, preventing the overload phenomenon of individual cutter teeth. Overall, the optimization design achieved desirable results, yet its efficacy still requires validation through practical application. This research provides effective algorithmic support for the optimization design of tunneling machine cutting heads and holds significant implications for improving the work efficiency and safety performance of tunneling machines.

**Key words:** heading machine; cutting head; particle-ant colony optimization; hybrid algorithm; numerical simulation; software Matlab

