滑动轴承表面椭圆偏置类抛物线微织构研究

于英华[1a]，杨帅彬[1a]，曹茂林[2]，沈佳兴[1a,1b]，阮文新[1a]

（1.辽宁工程技术大学 a.机械工程学院，b.矿产资源开发利用技术及装备研究院，
辽宁 阜新 123000；2.山西航天清华装备有限责任公司，山西 长治 046000）

摘要：目的 充分发掘微织构对于提高滑动轴承的承载性能和抗摩擦磨损性能的潜力。**方法** 选取某系列汽车发动机活塞连杆组件中的滑动轴承为原型，采用 CFD 方法对该轴承的承载性能和摩擦性能进行分析。综合运用正交试验和灰色关联分析理论，通过有限元仿真分析方法研究椭圆开口偏置类抛物线微织构结构参数对织构轴承承载力和摩擦因数的影响规律，对其进行多目标优化设计。在此基础上，基于响应面优化设计理论，运用有限元仿真分析方法研究微织构分布参数对织构轴承承载力和摩擦因数的影响规律，建立相应的数学模型并对其进行多目标优化设计。将具有最优参数微织构的滑动轴承的承载性能和摩擦因数与原型轴承进行对比。**结果** 微织构的最优参数为椭圆长、短半轴长分别为 200 μm 和 110 μm，深度和对称轴的偏移量分别为 60 μm 和 30 μm，起始角和包角分别为 4.65°和 116.75°，间距为 2.79 mm。在滑动轴承表面加工椭圆偏置类抛物线微织构后，其承载力相较于原型滑动轴承增加了 21.05%，摩擦因数降低了 27.93%。**结论** 在滑动轴承表面加工出具有最优参数的椭圆偏置类抛物线微织构可以极大地提高滑动轴承的承载性能和摩擦性能。

关键词：滑动轴承；承载性；摩擦因数；椭圆偏置类抛物线；微织构；灰色关联；响应面分析；优化设计

中图分类号：TH117 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-3660(2022)09-0131-10

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.09.013

Elliptic Bias Parabolic Micro-texture of Sliding Bearing Surface

YU Ying-hua[1a], YANg Shuai-bin[1a], CAO Mao-lin[2], SHEN Jia-xing[1a,1b], RUAN Wen-xin[1a]

(1. a.School of Mechanical Engineering, b.Research Institute of Technology and Equipment for the Exploitation and Utilization of Mineral Resources, Liaoning Technical University, Liaoning Fuxin 123000, China;
2. Shanxi Aerospace Tsinghua Equipment Co., LTD, Shanxi Changzhi 046000, China)

ABSTRACT: Surface texture technology is to process nano micro texture with specific shape and size and special arrangement on the moving friction surface according to people's will by mechanical processing, chemical or physical methods. In this paper, the effect of elliptic opening bias parabolic microtexture on bearing capacity and friction and wear resistance of plain bearing and its multi-objective parameter optimization are studied.

A four-factor and five-level orthogonal experimental table was established, and Workbench software was used to analyze

收稿日期：2021–08–25；**修订日期**：2021–12–09

Received：2021-08-25；**Revised**：2012-12-09

基金项目：辽宁省教育厅科学技术研究（重点攻关）项目（LJ2020ZD001）

Fund：Science and Technology Research (Key Research) Project of the Education Department of Liaoning Province (LJ2020ZD001)

作者简介：于英华（1965—），女，博士，教授，主要研究方向为现代机械设计理论及方法、先进制造系统与技术。

Biography：YU Ying-hua (1965-), Female, Ph. D., Professor, Research focus: modern mechanical design theory and method, advanced manufacturing system and technology.

引文格式：于英华，杨帅彬，曹茂林，等. 滑动轴承表面椭圆偏置类抛物线微织构研究[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 131-140.

YU Ying-hua, YANG Shuai-bin, CAO Mao-lin, et al. Elliptic Bias Parabolic Micro-texture of Sliding Bearing Surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 131-140.

the bearing capacity and friction coefficient of sliding bearings under different micro-texture structural parameters. The range analysis method was used to analyze the influence of microtexture structural parameters on the bearing capacity of sliding bearing oil film in the order of microtexture depth > long half-shaft length > offset > short half-shaft. The order of influence on friction coefficient is as follows: long semi-axial length > micro-texture depth > offset > short semi-axial length. The optimal microtexture parameters are 200 μm long half axis of the ellipse, 110 μm short half axis of the ellipse, 60 μm depth and 30 μm offset. The establishment and the optimal structure parameters of the micro texture open area ratio, the depth the same, no circular openings of the deviation of the symmetric parabolic micro texture, by comparing the oil film bearing capacity and the friction coefficient of the two, prove that compared with the circular opening micro texture elliptic offset class parabolic micro texture on the bearing performance and friction performance of the sliding bearing to improve better.

The influence of micro-texture distribution parameters on the bearing performance and friction coefficient of sliding bearings was analyzed by response surface analysis (RSM). The influence degree of distribution parameters on bearing capacity of sliding bearing oil film is as follows: micro-texture envelope angle > micro-texture axial spacing > micro-texture starting angle. The influence degree of friction coefficient on sliding axis is as follows: micro-texture initial angle > micro-texture axial spacing > micro-texture envelope angle. At the same time, a mathematical model was established for the bearing performance and friction coefficient of sliding bearing with the variation of micro-texture distribution parameters. Then, with the optimal bearing performance and the minimum friction coefficient as the objective function, the distribution parameters of micro-texture were optimized. After optimization processing, The optimal microtexture distribution parameters were obtained as follows: microtexture inclusion angle 4.65°, microtexture starting angle 116.75° and microtexture axial spacing 2.79 mm.

The optimal parameters of ellipse openings will offset parabolic sliding bearing of the bearing capacity and the friction coefficient is simulated, and its results and the prototype of smooth sliding bearing and the established model prediction were compared, the results show that the established on the basis of micro texture distribution parameters on the micro texture predict the bearing capacity and the friction coefficient of sliding bearing of the mathematical model with sufficient accuracy; Compared with the prototype sliding bearing, the bearing capacity of the optimal micro-texture sliding bearing increases by 21.05%, while the friction coefficient decreases by 27.93%. In a word, the bearing performance and friction and wear resistance of plain bearings can be greatly improved by machining elliptical bias parabolic microtexture with optimal structure and distribution parameters.

KEY WORDS: sliding bearing; load carrying capacity; friction coefficient; elliptic bias parabolic; micro-texture; gray correlation; response surface analysis; optimal design

滑动轴承因其具有结构简单、制造方便、吸振、抗冲击性、旋转精度高和寿命长等优点，使其在各种旋转机械特别是高速、高精、重载机械中得到了广泛的应用。轴承的摩擦学行为、承载性对其所服役的各种机械设备的工作性能、运行效率、使用寿命及节能环保等各个方面都有着至关重要的影响。为此，研究提高滑动轴承的承载性能和抗摩擦磨损性能的理论和技术具有重大意义[1-3]。

表面织构被证明是改善滑动轴承抗磨擦磨损性能的一种有效手段，成为近年来国内外广泛关注的研究热点问题[1-9]。Sinanoglu 等[5]通过对梯形和锯齿形织构滑动轴承摩擦性能的试验研究，得出应用梯形织构的轴承具有更优异的摩擦性能的结论。Tala-lghil 等[6]研究了球形、圆柱形和矩形 3 种不同的微织构分别对滑动轴承承载性能和摩擦性能的影响，结果显示，对承载力和摩擦力矩的影响最大的为矩形微坑织构。Fiaschi 等[7]通过试验方法研究了半球形窝状织构的结构参数对轴承摩擦性能的影响。聂富成等[1]以正方形、三角形和圆形开口直通平底截深微织构为例，研究了织构形状、深度、特征长度、分布位置密度等对轴承润滑性能的影响规律，结果显示，当表面微织构的结构参数和分布参数设计合理时，可较好地提高轴承的承载性能。王俊等[9]通过数值仿真分析方法研究了单一凹/凸和两者复合的椭圆抛物面微织构对滑动轴承的承载性能和摩擦因数的影响规律，结果显示，具有最优几何参数的凹凸复合表面微织构可使滑动轴承的承载性能和抗摩擦磨损性能得到最大的提升。

总之，截止目前，国内外对微织构在滑动轴承中的应用研究开展了大量工作，取得了许多成果，但还存在如下不足：其一，研究的微织构单元胞孔形状还有一定的局限性，多集中于球形、圆柱形、三角形和方形柱体，椭圆开口很少有触及，且仅见的几篇椭圆开口微织构相关论文研究的椭圆开口微织构在深度方向也只是等截面直通深度或者是对称抛物线，这显然不利于寻求到最优微织构。其二，多数研究只集中于微织构结构参数对滑动轴承摩擦磨损性能的影响，

而对基于服役条件，考虑滑动轴承的多功能要求，运用多目标优化设计理论对微织构特征参数进行全面寻优等方面的研究不足。本文构筑一种椭圆开口偏置类抛物线单元胞孔形状微织构，研究该新型微织构的特征参数对滑动轴承承载性能和摩擦性能的影响规律，建立相应的数学模型，并对其进行多目标多参数优化设计，以充分发掘微织构对提高滑动轴承综合性能的潜力。

1　原型滑动轴承的选取及性能分析

1.1　原型滑动轴承的选取

本文选取某系列汽车发动机活塞连杆组件中的滑动轴承作为研究原型。其主要参数如表 1 及图 1 所示。随着汽车不断向着节能环保、轻量化、可靠安全和乘坐舒适性等方向的发展，对汽车发动机活塞连杆组件中滑动轴承的承载性能和抗摩擦磨损性能的要求越来越高。

表 1　滑动轴承主要参数
Tab.1 Main parameters of sliding bearing

Name	Numerical value	Name	Numerical value
Inner diameter D/m	3.50×10^{-2}	Rotation speed n/(r·min^{-1})	60
Width B/m	2.50×10^{-2}	Load F/N	1 150
Shaft diameter d/m	2.50×10^{-2}	Lubricating oil dynamic viscosity η (50 ℃)/(Pa·s)	1.25×10^{-2}
Eccentricity e/m	2.50×10^{-5}	Lubricating oil density ρ/(kg·m^{-3})	876
Misalignment angle θ/rad	49.8	Flow state	Laminar flow
Radius clearance c/m	5×10^{-5}		

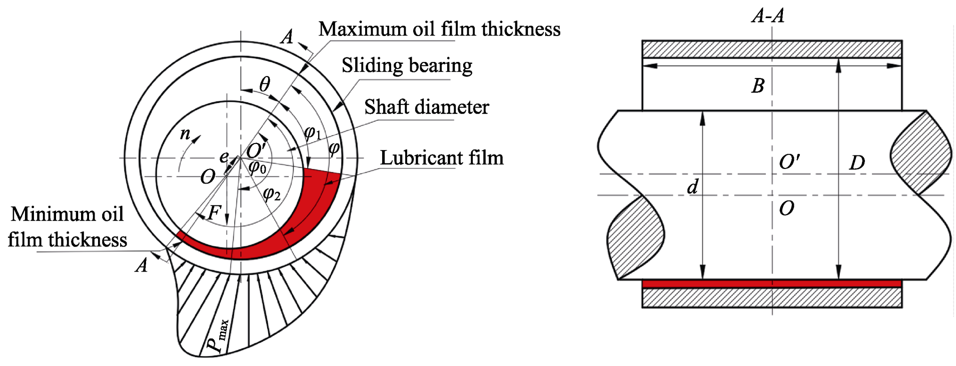


图 1　原型轴承结构简图
Fig.1 Schematic diagram of prototype bearing: a) axial view; b) sectional view

轴径开始转动时，作用在轴径上的外载荷会对油膜产生一定的挤压效应，当轴径转速稳定后，轴径会稳定在一定的偏心距 e 位置上。

1.2　原型滑动轴承承载力分析

根据一维雷诺方程可知：

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}=6\eta U\frac{h-h_0}{h^3} \tag{1}$$

式中：$\mathrm{d}p/\mathrm{d}x$ 为油膜压力在径向方向的变化率，Pa/mm；η 为润滑油动力黏度，Pa·s；U 为轴承与轴径表面相对速度，m/s；h 为任意位置油膜厚度，mm；h_0 为油膜压力最大处油膜厚度，mm。

为了方便求解计算，将式（1）写成极坐标表达式，令 dx=rdβ，$U=\pi dn$，d 为轴径直径，则极坐标形式下的一维雷诺方程如式（2）所示。

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\beta}=12\pi\frac{\eta n}{\psi^2}\cdot\frac{\varepsilon_0(\cos\phi-\cos\phi_0)}{(1+\varepsilon_0\cos\phi)^3} \tag{2}$$

式中：ε_0 为偏心率；ϕ 为从 OO' 至任意油膜处的角，rad；ϕ_0 为从 OO' 至油膜压力最大处的角，rad；ψ 为轴承相对间隙，$\psi=c+e\cos\phi$。

将式（2）进行积分，便可得到任意 ϕ 角处的油膜压强，如式（3）所示。

$$p_\beta=12\pi\frac{\eta n}{\psi^2}\int_{\phi_1}^{\phi}\frac{\varepsilon_0(\cos\phi-\cos\phi_0)}{(1+\varepsilon_0\cos\phi)^3}\mathrm{d}\phi \tag{3}$$

式中：ϕ_1 为从 OO' 至油膜起始位置处的角，rad。近一步可以得到油膜承载力 F_n，如式（4）所示。

$$F_n=\int_{\phi_1}^{\phi_2}\frac{1}{2}dp_\beta\left[-\cos(\phi+\theta)\right]\mathrm{d}\phi \tag{4}$$

式中：θ 为偏位角（外载荷 F 作用线与 OO' 的夹角），rad；ϕ_2 为从 OO' 至油膜终止位置处的角，rad。

将 F_n 沿轴承宽度积分，最终求得有限宽轴承的总承载力如式（5）所示。

$$F_N=\frac{\eta nBd}{\psi^2}\left\{4\pi\int_{\phi_1}^{\phi_2}\left[\int_{\phi_1}^{\phi}\frac{\varepsilon_0(\cos\phi-\cos\phi_0)}{(1+\varepsilon_0\cos\phi)^3}\mathrm{d}\phi\right][-\cos(\phi+\theta)]\mathrm{d}\phi\right\} \tag{5}$$

通过 Fluent 软件进行仿真分析得到原型滑动轴承达到稳定转速时的油膜压力云图如图 2 所示。

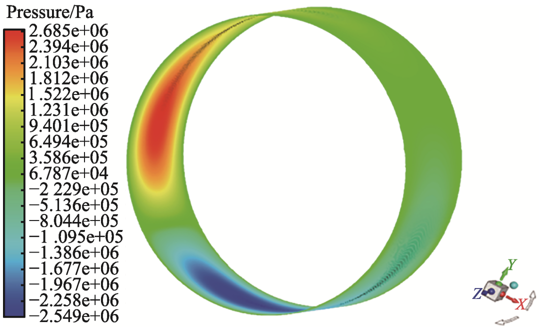


图 2　油膜压力分布云图
Fig.2 Nephogram of oil film pressure distribution

通过求解壁面平均压应力，对其整个壁面进行积分，便可求得轴承的承载力如式（6）所示。

$$F_N=S\cdot\int_S F_n\mathrm{d}S \tag{6}$$

式中：S 为壁面面积，mm^2。

最终求得原型滑动轴承的承载力约为 1 126.2 N。

1.3　原型滑动轴承摩擦力及其摩擦因数分析计算

在运用 Ansys 软件进行后处理的过程中，通过选取 Wall Fluxes，选择其下的 Wall Shear Stress，便可得出壁面切应力分布云图如图 3 所示。

由图 3 易知，最大切应力出现在厚度最小油膜附近区域，且在其宽度方向 2 个侧面的切应力要高于中部的切应力，而在油膜其他区域切应力相对较小但不为零。通过求解壁面平均切应力，对其整个壁面进行积分，便可求得轴承的摩擦力如式(7)所示。

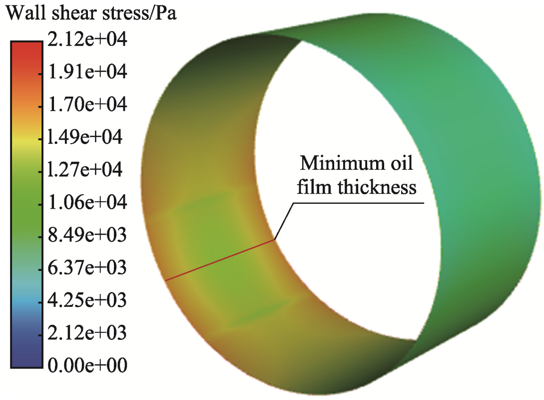


图 3　油膜壁面切应力分布云图
Fig.3 Nephogram of shear stress distribution on oil film wall

$$F_f=S\cdot\int_S F_\tau\mathrm{d}S \tag{7}$$

式中：F_f 为轴承壁面摩擦力，N；F_τ 为单位面积平均切应力，Pa。可以得到摩擦因数 μ 如式（8）所示。

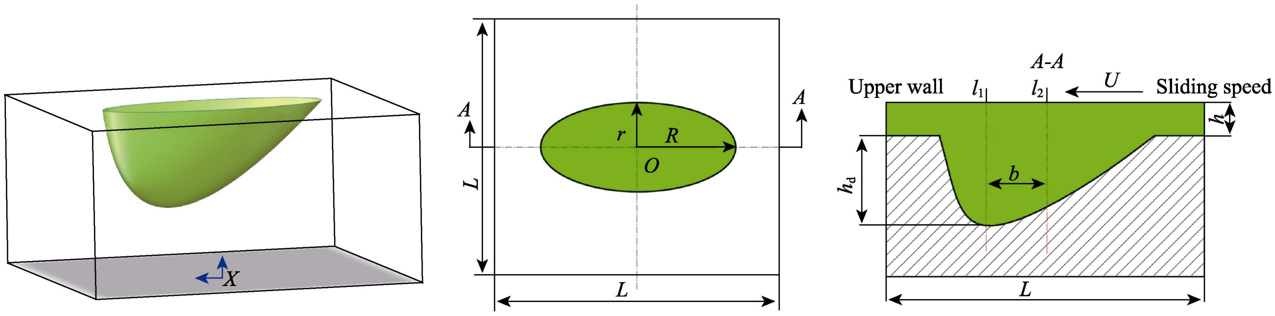
$$\mu=\frac{F_f}{F_N}=\frac{S\cdot\int_S F_\tau\mathrm{d}S}{S\cdot\int_S F_n\mathrm{d}S}=\frac{\int_S F_\tau\mathrm{d}S}{\int_S F_n\mathrm{d}S} \tag{8}$$

经计算求得原型滑动轴承的摩擦力 F_f 约为 45.27 N，摩擦因数 μ 约为 0.040 1。

2　微织构单元胞构筑及其结构参数优化

2.1　微织构单元胞构筑

本文构筑的微织构单元胞孔为如图 4 所示的椭圆开口偏置类抛物线形状。由于椭圆开口本身具有各向异性的特点，在一定条件下可以转化为圆形，加之其在深度方向的截面形状为偏置类抛物线形，这样可以增大对微织构单元胞结构参数的寻优空间，进而充分发掘微织构对于提高滑动轴承相关性能的最大潜力。

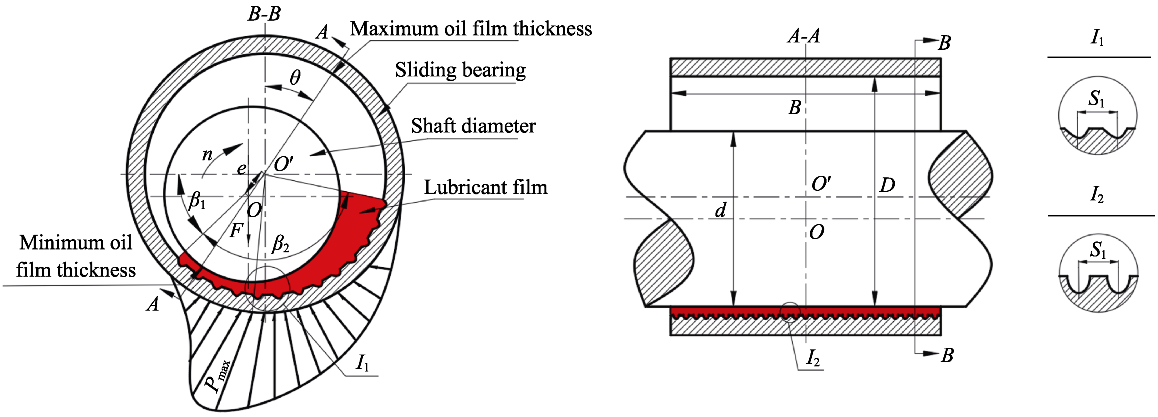


a 立体图　　b 俯视图　　c 剖面图

图 4　微织构单元结构简图
Fig.4 Structure sketch of the micro-textured unit structure: a) stereogram; b) vertical view; c) profile

由于微织构的尺寸参数均为微米级，与轴承（轴瓦）的内径尺寸相比非常小，所以微织构之间在轴向的圆弧距离即可以近似用直线代替。因此在研究单元胞孔微织构尺寸参数对轴承性能的影响时，可将织构的轴承圆弧面简化成平面，在轴承织构处取出 $L\times L$ 的微单元进行研究。假设油膜厚度 h 在微单元上保持不变，其中 O 为椭圆的中心，r 为椭圆短半轴长，R 为椭圆长半轴长，l_2 为椭圆开口的中心轴线，l_1 为偏置类抛物线截深最低点处的轴线，h_d 为织构深度，b 为轴 l_1 相对于轴 l_2 的偏移量，上壁面为动壁面，其速度大小为 U，运动方向为轴 l_1 相对于轴 l_2 的偏移量的方向。

微织构滑动轴承结构简图如图 5 所示。图中 β_1 和 β_2 分别为微织构沿圆周分布的起始角和包角，S 为微织构间的轴向距离和周向展开距离。



a 截剖面　　　　b 轴剖图　　　　c 放大图

图 5　微织构轴承结构简图

Fig.5 Schematic diagram of micro-textured bearing structure: a) sectional profile; b) axial profile; c) enlarge figure

2.2　微织构单元胞结构参数优化设计

选取椭圆长半轴长（A）、椭圆短半轴长（B）、微织构深度（C）和对称轴的偏移量（D）4 个参数作为参变量（即正交试验的四因素），以承载力和摩擦因数作为考察目标，通过正交试验方法[10-13]确定各参变量对考察目标的影响规律，并在此基础上运用灰色关联理论对微织构的结构参数进行优化设计。

2.2.1　正交试验的设计及分析

鉴于目前研究的微织构直径一般为 100~250 μm，深度为 40~60 μm。故本文选择四因素五水平正交试验并通过 Fluent 软件对不同参数微织构滑动轴承的承载力和摩擦因数进行仿真分析，结果如表 2 所示。

利用极差法分析各因素对考察目标的影响规律及主次顺序，结果如表 3 所示。表中，K_{11}、K_{12}、K_{13}、K_{14}、K_{15} 分别为 4 个因素在各个水平内油膜承载力的均值；R_1 为油膜承载力的极差；K_{21}、K_{22}、K_{23}、K_{24}、K_{25} 分别为 4 个因素在各个水平内摩擦因数的均值；R_2 为摩擦因数的极差。

通过分析表 3 可知，当以油膜承载力作为衡量指标时，微织构深度为 4 个参数中最主要的影响因素，此时的最优方案组合为 $A_5B_2C_5D_1$；当以摩擦因数作为衡量指标时，微织构椭圆长半轴长是 4 个参数中最主要的影响因素，此时的最优方案组合为。根据表 3 绘制各影响因素对油膜承载力和摩擦因数的效应曲线，如图 6 所示。

表 2　微织构滑动轴承性能仿真分析结果

Tab.2 Performance simulation analysis results of micro-textured sliding bearings

Test number	A/μm	B/μm	C/μm	D/μm	Bearing capacity/N	Coefficient of friction
1	150	100	40	30	1 285.514	0.035 22
2	150	110	45	40	1 278.114	0.035 42
3	150	120	50	50	1 272.473	0.035 58
4	150	140	55	60	1 269.669	0.035 65
5	150	150	60	75	1 269.669	0.035 65
6	180	100	45	50	1 250.402	0.036 20
7	180	110	50	60	1 279.013	0.035 39
8	180	120	55	75	1 264.044	0.035 82
9	180	140	60	30	1 303.414	0.034 73
10	180	150	40	40	1 291.228	0.035 06
11	200	100	50	75	1 300.036	0.034 82
12	200	110	55	30	1 317.505	0.034 36
13	200	120	60	40	1 307.886	0.034 61
14	200	140	40	50	1 280.432	0.035 36
15	200	150	45	60	1 264.237	0.035 81
16	220	100	55	40	1 290.262	0.035 09
17	220	110	60	50	1 310.399	0.034 55
18	220	120	40	60	1 287.716	0.035 16
19	220	140	45	75	1 293.421	0.035 00
20	220	150	50	30	1 301.566	0.034 78
21	250	100	60	60	1 314.848	0.034 43
22	250	110	40	75	1 308.257	0.034 60
23	250	120	45	30	1 294.547	0.034 97
24	250	140	50	40	1 303.630	0.034 73
25	250	150	55	50	1 291.183	0.035 06

表 3 极差分析结果
Tab.3 Range analysis results

Parameter	A	B	C	D	Order	Optimal solution
K_{11}	1 275.088	1 288.212	1 290.629	1 300.509		
K_{12}	1 277.631	1 298.658	1 276.144	1 296.735		
K_{13}	1 296.531	1 287.845	1 291.343	1 280.978	$C>A>D>B$	$A_5B_2C_5D_1$
K_{14}	1 296.673	1 290.113	1 286.532	1 283.097		
K_{15}	1 302.493	1 283.577	1 303.755	1 287.085		
R_1	27.405	15.081	27.611	19.531		
K_{21}	0.035 503	0.035 142	0.035 076	0.034 809		
K_{22}	0.035 433	0.035 090	0.035 464	0.034 911		
K_{23}	0.034 916	0.035 152	0.035 057	0.035 340	$A>C>D>B$	$A_5B_4C_5D_1$
K_{24}	0.034 912	0.034 859	0.035 188	0.035 282		
K_{25}	0.034 756	0.035 269	0.034 723	0.035 173		
R_2	0.000 747	0.000 410	0.000 741	0.000 531		

由图 6 可知，微织构椭圆长半轴长和微织构偏移量对承载力和摩擦因数的影响有较为明显的规律：随着微织构椭圆长半轴长的增加，油膜承载力也不断提高；随着微织构偏移量的增加，油膜承载力呈现出先减小后增大的趋势；随着微织构椭圆长半轴长的增加，摩擦因数不断减小；随着微织构偏移量的增加，摩擦因数呈现出先增大后减小的趋势。而微织构椭圆短半轴长和微织构深度对承载力和摩擦因数的影响无明显规律。

2.2.2 运用灰色关联理论对微织构结构参数的优化

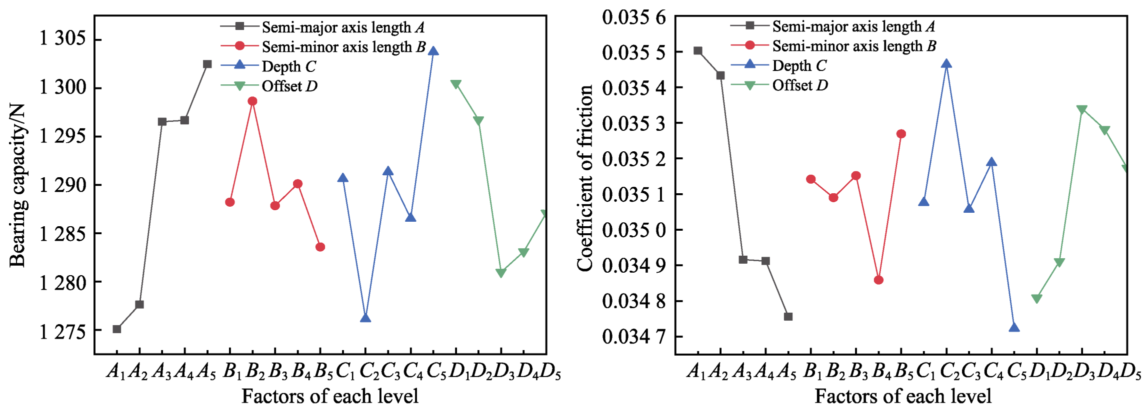
由前面通过正交试验分析结果可见，当以不同的轴承性能为考察目标时，得到的微织构结构参数的最优组合是不同的。为此，为了更加科学合理地寻求可使轴承综合性能最优的微织构结构参数组合，有必要对正交试验数据进行灰色关联理论分析处理。

灰色关联分析（Grey Relational Analysis）是一种利用灰色关联度来研究和决定系统各因素之间的作用程度或者是各个因素对系统主要行为影响的重要程度的方法。该分析法对样本的数量多少以及样本是否有规律并不敏感，适用范围广，且计算过程精简利索，十分方便，更重要的是它的结果能够表现出量化结果和定性分析结果良好的一致性[14-19]。

运用灰色关联分析方法得到微织构各参数水平的平均关联度如表 4 所示。对于微织构的同一参数，平均关联度越大其水平值越优。

由表 4 可知，当椭圆长半轴长为 200 μm、椭圆短半轴长为 110 μm、微织构深度为 60 μm 和偏移量为 30 μm 时，其对应的平均关联度最大。建立最优结构参数微织构几何模型，通过仿真分析其油膜压力，得出的油膜压力分布云图如图 7 所示。

另建立与最优参数微织构开口面积比率、深度相同，无偏移量的圆形开口对称抛物线型微织构，并通过仿真分析其油膜压力，得出油膜压力分布云图如图 8 所示。



a 承载力效应曲线　b 摩擦因数效应曲线

图 6 微织构四因素对承载力和摩擦因数效应曲线

Fig.6 Effect curve of four factors of micro-texture on bearing capacity and friction coefficient: a) bearing capacity effect curve; b) friction coefficient effect curve

表 4　微织构各参数水平的平均关联度

Tab.4 Average correlation degree of each parameter level of microtexture

A		*B*		*C*		*D*	
Value/μm	Average relevance	Value/μm	Average relevance	Value/μm	Average relevance	Value/μm	Average relevance
150	0.419 0	100	0.500 9	40	0.554 6	30	0.669 0
180	0.474 7	110	0.641 5	45	0.486 3	40	0.649 5
200	0.645 4	120	0.577 4	50	0.603 5	50	0.527 8
220	0.631 8	140	0.598 0	55	0.568 9	60	0.478 2
250	0.605 7	150	0.558 8	60	0.663 3	75	0.551 9

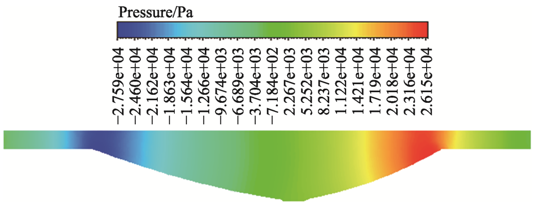


图 7　最优结构参数微织构压力分布云图

Fig.7 Nephogram of pressure distribution in micro-texture with Optimal structural parameters

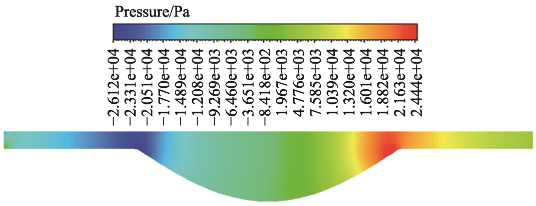


图 8　圆形开口对称抛物线型微织构压力分布云图

Fig.8 Nephogram of pressure distribution in circular opening symmetrical parabolic micro-texture

根据式（6）和式（8）计算求得优化后微织构滑动轴承模型的承载力为 1 320.443 N，摩擦因数为 0.034 28。圆形开口对称抛物线型微织构滑动轴承的承载力为 1 294.735 N，摩擦因数为 0.034 95。证明与圆形开口微织构相比，椭圆偏置类抛物线微织构对滑动轴承承载性能和摩擦性能的改善更好。

3　微织构分布参数对滑动轴承性能影响规律的数学模型建立及分布参数优化设计

微织构对轴承性能的影响不仅与微织构单元胞的结构参数相关，还与其在轴承表面的分布参数有关。因此在前文确定的最优微织构结构参数的基础上，有必要研究椭圆开口偏置类抛物线微织构在轴承表面的分布参数——始角、包角和微织构间距对其性能的影响，并对其进行优化设计。

3.1　微织构分布参数响应面分析及相关模型建立

将 β_1、β_2 和 S 作为参变量，将滑动轴承的承载力和摩擦因数作为考察目标。运用响应面分析方法[20-22]，设计三因素五水平如表 5 所示。选用 Design-Expert[23-25]进行三因素五水平二指标响应面试验，通过仿真分析得到各指标的响应数据，如表 6 所示。

表 5　响应面试验因素与水平

Tab.5 Test factors and levels of response surface

Level	β_1/(°)	β_2/(°)	S/mm
1	0	30	1
2	30	60	2
3	60	90	3
4	90	120	4
5	120	150	5

表 6　微织构分布参数对各指标的响应

Tab.6 Response of micro-texture distribution parameters to various indicators

Test number	β_1/(°)	β_2/(°)	S/mm	Bearing capacity/N	Coefficient of friction
1	0	30	1	1 397.24	0.028 0
2	120	30	1	1 353.23	0.028 7
3	0	150	1	1 427.42	0.027 8
4	120	150	1	1 239.83	0.035 0
5	0	30	5	1 381.24	0.028 5
6	120	30	5	1 337.23	0.032 2
7	0	150	5	1 411.42	0.028 8
8	120	150	5	1 197.16	0.036 2
9	30	90	3	1 329.76	0.032 8
10	90	90	3	1 309.62	0.033 6
11	60	60	3	1 348.18	0.030 0
12	60	120	3	1 333.25	0.032 5
13	60	90	2	1 344.89	0.029 8
14	60	90	4	1 325.98	0.033 0
15	60	90	3	1 340.78	0.030 2
16	60	90	3	1 340.78	0.030 2
17	60	90	3	1 340.78	0.030 2
18	60	90	3	1 340.78	0.030 2
19	60	90	3	1 340.78	0.030 2
20	60	90	3	1 340.78	0.030 2

利用 Design-Expert 软件对数据进行分析处理并进行优化处理，以提高二次多项式方程拟合时的精度。通过方差分析及建立回归模型得出微织构分布参数对滑动轴承油膜承载力和摩擦因数的影响规律。其结果如表 7 和表 8 所示。

表 7 承载力对比结果

Tab.7 Comparison results of bearing capacity

Category	Model F value	Notable item
Keep insignificant items	49.99	β_1, β_2, S, $\beta_1\beta_2$, $\beta_2 S$, S^2
Get rid of $\beta_1 S$, β_1^2, β_2^2	54.69	β_1, β_2, $\beta_1\beta_2$, $\beta_2 S$, S^2
Get rid of $\beta_1 S$	56.50	β_1, β_2, S, $\beta_1\beta_2$, $\beta_2 S$, β_2^2, S^2
Get rid of $\beta_1{}^2$	63.75	β_1, β_2, S, $\beta_1\beta_2$, $\beta_2 S$, β_2^2, S^2
Get rid of $\beta_2{}^2$	35.74	β_1, β_2, $\beta_2 S$, S^2

表 8 摩擦因数对比结果

Tab.8 Comparison result of friction coefficient

Category	Model F value	Notable item
Keep insignificant items	38.16	β_1, β_2, S, $\beta_1\beta_2$, $\beta_1 S$, $\beta_2 S$, β_1^2, S^2
Get rid of β_2^2	35.70	S

由表 7 可知：对于承载力模型，当去掉不显著项 β_1^2 时，模型的 F 值从保留全部不显著项的 49.99 增加到了 63.75，故选择该模型作为承载力的二次多项式回归模型。由表 8 可知：摩擦因数模型只有 1 个不显著项 β_2^2，去掉后模型 F 值降低，故选择保留所有不显著项时的模型作为摩擦因数的二次多项式回归模型。

通过上述分析可以得到滑动轴承油膜承载力 R_1 及其摩擦因数 R_2 关于各因素的回归方程如式（9）和式（10）所示。

$$\begin{aligned} R_1 = {} & 1\,369.135\,6 + 0.116\,2\beta_1 + 0.624\,6\beta_2 + \\ & 17.81S - 0.016\,9\beta_1\beta_2 - 0.063\beta_1 S + \\ & 0.210\,7\beta_2 S - 4.960\,8\times10^{-3}\beta^2{}_2 - 6.627S^2 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} R_2 = {} & 0.032 - 6.583\times10^{-5}\beta_1 - 2.187\times10^{-5}\beta_2 - \\ & 1.313\times10^{-3}S + 7.43\times10^{-7}\beta_1\beta_2 + \\ & 7.5\times10^{-6}\beta_1 S - 6.875\times10^{-6}\beta_2 S + \\ & 2.639\times10^{-7}\beta_1^2 + 1.458\beta_2^2 + 2.625\times10^{-4}S^2 \end{aligned} \tag{10}$$

微织构分布参数对目标 R_1 和 R_2 的影响程度是通过贡献率 K 值的大小来表现的。K 值越大，该因素对目标 R_1 和 R_2 的影响越大，如式（11）和式（12）所示。

$$\delta = \begin{cases} 0 & F \leqslant 1 \\ 1 - \dfrac{1}{F} & F > 1 \end{cases} \tag{11}$$

$$K_{\beta_i} = \delta_{\beta_i} + \frac{1}{2}\sum_{i=1,2}\delta_{\beta_i\beta_j} + \sum_{i=1,2}\delta_{\beta_i S} + \delta_{\beta_i^2} \quad j=1,2 \quad i\neq j \tag{12}$$

式中：F 为回归方程中各回归项 F 值；δ 为回归项对 F 值的考核值；K_{β_i} 为各影响因素贡献率。分析结果如表 9 所示。

表 9 各影响因素贡献率

Tab.9 The contribution rate of each influencing factor

Evaluation index	Contribution rate of each factor K			Contribution rate
	β_1	β_2	S	
Bearing capacity	1.980 4	2.805 8	2.760 2	β_2>S>β_1
Coefficient of friction	3.133 3	3.082 6	3.104 4	β_1>S>β_2

得出各因素对滑动轴承油膜承载力模型 R_1 的贡献率为：微织构包角>微织构轴向间距>微织构起始角；对滑动轴承油膜摩擦因数模型 R_2 的贡献率为：微织构起始角>微织构轴向间距>微织构包角。

3.2 微织构分布参数优化设计

以滑动轴承的承载力 $f_6(P)$最大和摩擦因数 $f_7(P)$最小为目标函数，以优化后的表面微织构滑动轴承的承载力 $g_4(P)$和摩擦因数 $g_5(P)$优于无织构滑动轴承为约束条件，以微织构滑动轴承分布参数为变量，建立其优化的数学模型如式(13)所示。

$$\begin{aligned} & \min F(P) = [f_6(P) - f_7(P)]^{\mathrm{T}} \\ & s.t.\begin{cases} g_4(P) > 1126.2 \\ g_5(P) < 0.040\,1 \\ P = [P_1, P_2, P_3]^{\mathrm{T}} \\ 0 \leqslant P_1 \leqslant 120 \\ 30 \leqslant P_2 \leqslant 150 \\ 1 \leqslant P_3 \leqslant 5 \end{cases} \end{aligned} \tag{13}$$

式中：P_1、P_2、P_3 为微织构滑动轴承分布参数优化变量，即前文的 β_1、β_2、S。

利用 Design-Expert 软件对微织构的最优分布参数进行寻优得出的各因素水平下的目标期望值如图 9 所示。

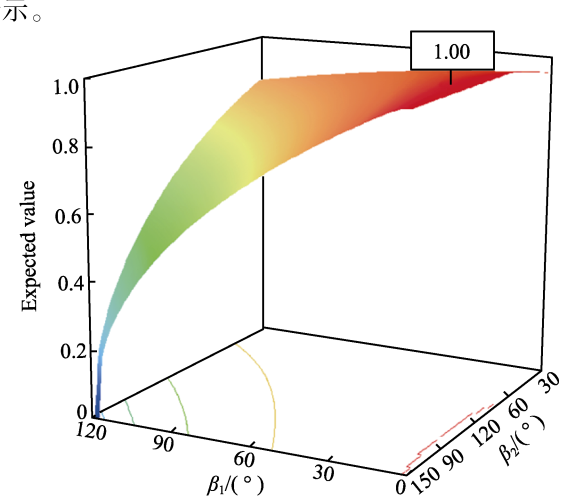
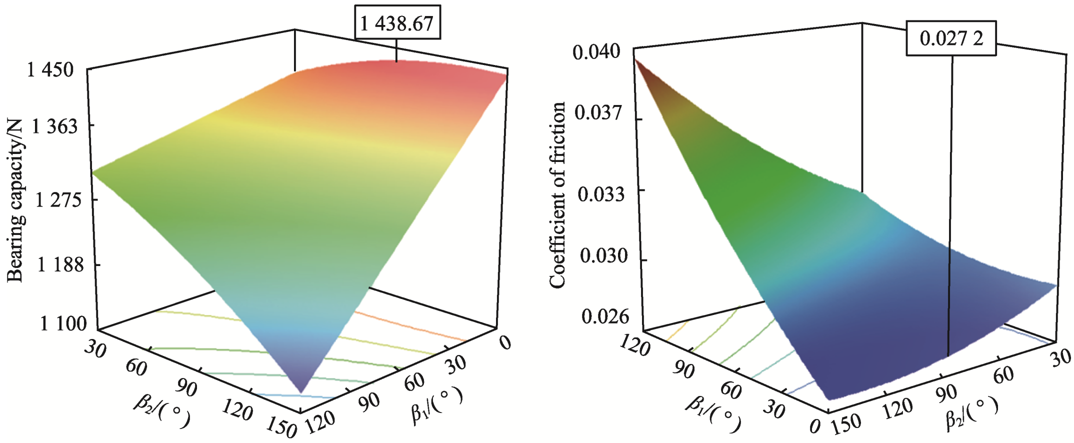


图 9 各因素下的目标期望值

Fig.9 Target expectations under various factors

当目标期望值为 1 时，其对应的参数组合最优。此时通过 Design-Expert 软件获得最优微织构轴向间距为 2.79 mm。最优参数承载力和摩擦因数响应曲面如图 10 所示。由图 10 可知，起始角为 0°~30°、包角为 90°~120°时存在最优值。

经寻优处理后，得到的微织构最优分布参数为：微织构起始角 4.65°，微织构包角 116.75°，微织构轴向间距 2.79 mm。根据前文所建立的依据微织构分布参数对微织构滑动轴承相关性能进行预测的数学模型——式（9）和式（10），可计算出此参数微织构的滑动轴承油膜承载力的最大值为 1 438.67 N，摩擦因数最小值为 0.027 2。



a 承载力响应曲面　　b 摩擦因数响应曲面

图 10　最优参数下承载力和摩擦因数响应曲面

Fig.10 Responsive surfaces of bearing capacity (a) and friction coefficient (b) under optimal parameters

3.3　最优微织构参数滑动轴承性能仿真分析

采用前文确定的最优微织构结构参数和分布参数建立滑动轴承油膜模型，并进行仿真分析，得到滑动轴承油膜压力分布云图如图 11 所示。根据式（6）和式（8）计算求得最优微织构滑动轴承油膜的承载力和摩擦因数分别是 1 363.28 N 和 0.028 9。将最优参数微织构滑动轴承的承载力和摩擦因数的仿真值分别与依据式（9）和式（10）的预测值及仿真分析得到的原型滑动轴承的性能参数做对比，结果如表 10 所示。

由表 10 可知：仿真分析得到的最优参数微织构滑动轴承的承载力和摩擦因数与根据所建模型预测值的误差分别为 5.144%和 5.88%，说明所建立的依据微织构分布参数对微织构滑动轴承的承载力和摩擦因数进行预测的数学模型具有足够的精度。此外，相较于原型滑动轴承，最优参数微织构滑动轴承的承载力增加了 21.05%，而摩擦因数却降低了 27.93%，说明在滑动轴承表面加工出具有最优结构和分布参数的椭圆偏置类抛物线型微织构可以极大地提高滑动轴承的承载性能和抗摩擦磨损性能。

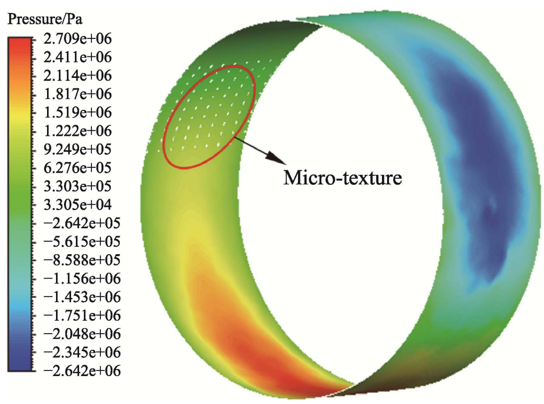


图 11　最优微织构参数滑动轴承油膜压力分布云图

Fig.11 Nephogram of oil film pressure distribution sliding bearing with optimal micro texture parameters

表 10　性能参数对比

Tab.10 Comparison of performance parameters

	Non-textured sliding bearing	Optimal micro-texture sliding bearing			Rate of change
		Model prediction	Simulation value	Relative error	
Bearing capacity	1 126.2 N	1 438.67 N	1 363.28 N	5.144%	21.05%
Coefficient of friction	0.040 1	0.027 2	0.028 9	5.88%	27.93%

4 结论

1）椭圆偏置类抛物线微织构结构参数对油膜承载力的影响因素主次顺序为：微织构深度>长半轴长>偏移量>短半轴。对摩擦因数的影响因素主次顺序为：长半轴长>微织构深度>偏移>短半轴长。最优微织构结构参数为：椭圆长半轴长 200 μm，椭圆短半轴长 110 μm，深度 60 μm，偏移量 30 μm。

2）椭圆偏置类抛物线微织构分布参数对滑动轴承载力影响程度为：微织构包角>微织构轴向间距>微织构起始角。最优的微织构分布参数为：微织构包角 4.65°，微织构起始角 116.75°，微织构轴向间距 2.79 mm。

3）所建立的依据微织构分布参数对微织构滑动轴承的承载力和摩擦因数进行预测的数学模型具有足够的精度。

4）在滑动轴承表面加工出具有最优参数的椭圆偏置类抛物线微织构可以极大地提高滑动轴承的承载性能和抗摩擦磨损性能。

参考文献：

[1] 聂富成. 表面微织构对大比压中间轴承润滑性能影响及优化研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2019.
NIE Fu-cheng. Study and Optimization of the Influence of Surface Texture on the Lubrication Performance of Intermediate Bearing with Large Specific Pressure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[2] CHEN Chang-sheng, LI Shan, MA Zhen-lai, et al. Study on the Influence of Surface Texture on the Dynamic Performance of Sliding Bearing[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1820(1): 12108.

[3] SHINDE A B, PAWAR P M. Multi-Objective Optimization of Surface Textured Journal Bearing by Taguchi Based Grey Relational Analysis[J]. Tribology International, 2017, 114: 349-357.

[4] 纪敬虎, 周莹超, 田朋霖, 等. 局部凹坑织构化径向滑动轴承流体动力润滑数值分析[J]. 表面技术，2021, 50(10): 214-220, 278.
JI Jing-hu, ZHOU Ying-chao, TIAN Peng-lin, et al. Numerical Analysis of Hydrodynamic Lubrication of Partially Textured Surfaces with Dimples for Journal Bearing [J]. Surface Technology, 2021, 50(10): 214-220, 278.

[5] SINANOĞLU C, NAIR F, KARAMıŞ M B. Effects of Shaft Surface Texture on Journal Bearing Pressure Distribution[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(2): 344-353.

[6] NACER T I, MICHEL F. Surface Texturing Effect Comparative Analysis in the Hydrodynamic Journal Bearings[J]. Mechanics & Industry, 2015, 16(3): 589.

[7] FIASCHI G, DI LAURO M, BALLESTRAZZI A, et al. Tribological Response of Laser-textured Steel Pins with Low-Dimensional Micrometric Patterns[J].Tribology International,2020,149-156.

[8] 张瑜, 陈国定, 王琳, 等. 空化与惯性效应耦合作用下的非对称表面微织构滑块承载力分析[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(6): 1026-1032.
ZHANG Yu, CHEN Guo-ding, WANG Lin, et al. Analysis of Bearing Load-Carrying Capacity with Asymmetric Surface Textures under Coupling Effects of Cavitation and Inertia Effect[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(6): 1026-1032.

[9] 王俊, 张俊红, 马梁. 具有椭圆抛物面织构的滑动轴承性能研究[J]. 润滑与密封, 2018, 43(5): 46-52.
WANG Jun, ZHANG Jun-hong, MA Liang. Performance Study of Sliding Bearings with Elliptical Paraboloid Textured[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(5): 46-52.

[10] 沈佳兴, 徐平, 于英华, 等. BFPC 机床龙门框架组件优化设计及综合性能分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 127-135.
SHEN Jia-xing, XU Ping, YU Ying-hua, et al. Optimization Design and Comprehensive Performance Analysis of BFPC Gantry Machine Framework Components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 127-135.

[11] 崔颖, 孙唯一, 于颖嘉, 等. 基于正交试验的粗糙表面接触密封性能预测方法[J]. 大连海事大学学报, 2019, 45(3): 53-58.
CUI Ying, SUN Wei-yi, YU Ying-jia, et al. Prediction Method of Contact Sealing Performance of Rough Surface Based on Orthogonal Experiments[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019, 45(3): 53-58.

[12] 于英华, 石瑞瑞, 徐平, 等. 玄武岩纤维增强 PMC 组分优化的实验研究[J]. 非金属矿, 2015, 38(3): 16-18, 39.
YU Ying-hua, SHI Rui-rui, XU Ping, et al. Experiment Research on Optimization of Component in Polymer Mineral Concrete Reinforced by Basalt Fiber[J]. Non-Metallic Mines, 2015, 38(3): 16-18, 39.

[13] 孙振起, 黄明辉. 正交试验法优化铝锂合金表面处理工艺研究[J]. 表面技术, 2011, 40(3): 68-70.
SUN Zhen-qi, HUANG Ming-hui. Orthogonal Experiment Selection of the Parameters of the Aluminum Lithium Alloy Surface Anodization[J]. Surface Technology, 2011, 40(3): 68-70.

[14] BILAL K, ENSAR B Y. Optimization of Cutting Parameters with Taguchi and Grey Relational Analysis Methods in MQL-Assisted Face Milling of AISI O_2 Steel[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(1): 112-125.

[15] 洪旗, 史耀耀, 路丹妮, 等. 基于灰色关联分析和响应面法的复合材料缠绕成型多目标工艺参数优化[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2822-2832.
HONG Qi, SHI Yao-yao, LU Dan-ni, et al. Multi-Response Parameter Optimization for the Composite Tape Winding Process Based on Grey Relational Analysis and Response Surface Methodology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(12): 2822-2832.

（下转第 167 页）