

引文格式: 于英华, 王智群, 要金龙, 等. 机床滑动导轨微织构多目标优化设计[J]. 航空制造技术, 2022, 65(6): 36-44.

YU Yinghua, WANG Zhiqun, YAO Jinlong, et al. Multi-objective optimization design of micro-texture of sliding guideway in machine tool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(6): 36-44.

# 机床滑动导轨微织构多目标优化设计\*

于英华, 王智群, 要金龙, 徐平

(辽宁工程技术大学, 阜新 123000)

**[摘要]** 为探索满足数控机床对其导轨高承载性、高精度、高精度保持性等方面要求的新途径, 提出在滑动导轨表面制备椭圆开口偏置类抛物线微织构。选取矩形滑动滑块导轨副为研究原型, 通过 CFD 方法对其在流体润滑状态下的承载压强、摩擦系数、温升及在乏油状态下的表面接触应力进行分析; 基于响应面理论, 通过 CFD 方法研究了微织构形状参数对导轨承载压强和摩擦系数的影响规律, 并优化得到最优微织构形状参数; 在此基础上, 研究了微织构分布参数对导轨承载压强、摩擦系数、温升的影响规律, 并优化得到最优微织构分布参数; 最后, 对最优特征参数微织构导轨的承载压强、摩擦系数、温升及乏油状态下的接触应力进行仿真分析, 并将其结果与原型导轨相关性能进行对比。结果表明, 该新型微织构可使导轨在润滑状态下的承压提高 15.15%, 摩擦系数、温度及乏油状态下的接触应力分别降低 26.43%、7.94% 和 8.09%。

**关键词:** 滑动导轨; 微织构; 优化设计; 承载压强; 摩擦系数; 温度; 接触应力

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2022.06.036



于英华

教授, 博士, 主要研究方向为先进制造系统与技术、现代机械设计理论与方法。

科技的飞速发展要求作为机械装备制造母机的机床不断向着高精、高效、高自动化、高可靠性等方向发展, 而在机床中承担支承和导向作用的导轨副的承载性、摩擦磨损性、低温升性等对机床如上性能的优劣起着至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。表面织构以其优异的降摩擦磨损、提高承载性、降低温升、自清洁等特性, 被认为是改善摩擦副性能的一种有效手段<sup>[3-10]</sup>, 该技术可以看作是可将先进的优化设计理论和先进制造技术融于传统刮研技术的一种新技术。优化设计理论和先进制造技术可实现根据微织构表面所需要的使役性能设计和制造出最优形貌特征参数的微织构, 以最大限度发挥其对应提升微织构化摩擦副(或表面)的相关性能的作用。此外, 该技术还可以克服传统刮研技术劳动强度大、生产

率低和效果依赖于操作者水平的弊端。因此将微织构应用于机床滑动导轨副必将有效提升机床整机的多项性能。目前, 微织构导轨方面的研究逐渐成为国内外学者的研究热点, Kovalchenko 等<sup>[2]</sup>通过试验方法研究了按一定规律分布排列的圆形凹坑微织构对钢制导轨储油能力和摩擦磨损性能的影响, 证明了该微织构可增加导轨表面的储油能力, 进而改善其摩擦磨损性能。张赞<sup>[3]</sup>综合运用仿真分析和试验方法研究了两种不同取向的直通沟槽、两种不同取向的仿生六边形沟槽和正方形沟槽的形貌参数对钢制导轨摩擦磨损性能的影响规律, 得出了最佳微织构参数。骆海波<sup>[4]</sup>通过试验方法对网状仿生微织构特征参数对导轨耐磨性的影响规律进行了研究, 得出了可使滚动导轨抗摩擦磨损的性能最优的

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

该型微织构的特征参数。张瑜等<sup>[5]</sup>研究了矩形开口非等边三角形截深织构在空化以及惯性效应的耦合作用下对导轨承载性能的影响规律,得出导轨滑块在运动过程中因惯性效应的存在使得其间的润滑油膜的承载压强有所提升,速度对微织构承载性能有较大影响,当速度大于 10m/s 时,流体在非对称微织构处产生的空化与惯性耦合作用对摩擦副承载性能影响更大。张东亚等<sup>[6]</sup>研究了 2 层沟槽微织构形貌对机床滑动滑块导轨副表面流体动压效应的影响规律,结果表明,当所构筑的沟槽体积相同时,2 层沟槽的润滑油膜承载压强提升效果优于 1 层沟槽织构;随着第 2 层微织构沟槽深度的增加,导轨承载性能先增大后减小,并存在可使导轨承载压力最大的沟槽深度。

综上所述,迄今为止国内外学者对微织构在导轨中应用方面的研究主要集中在圆型或矩形开口凹坑和沟槽微织构导轨承载能力以及摩擦磨损性能方面。本研究依据响应面分析理论、运用 CFD 方法研究即有利于增大寻优空间又相对便于制造的椭圆开口偏置类抛物线微织构特征参数对导轨承载压强、摩擦系数、温升及乏油状态下的接触应力等多项性能的影响规律,并运用多目标优化设计理论对微织构特征参数进行优化,旨在为充分挖掘微织构对提升导轨乃至其他摩擦副综合性能的潜能提供参考。

## 1 原型导轨的选取及其性能分析

### 1.1 原型导轨的选取

本研究选取矩形滑动滑块导轨为研究原型,其简化模型如图 1 所示,其运行速度、材料性能参数以及所用润滑油参数如表 1 所示。

### 1.2 滑动导轨流体润滑理论

当导轨在液态润滑状态下运动时,导轨副之间的润滑油膜遵循层流

状态下的二维稳态不可压缩润滑油流体动压 Reynolds 方程,即

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6V\eta \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

式中,  $p$  为导轨间的压力, Pa;  $h$  为油膜厚度, mm;  $\eta$  为润滑油黏度, Pa·s;  $V$  为导轨副的相对滑动速度, m/s, 在稳态状态下忽略在油膜厚度方向上的速度矢量, 即  $\partial h / \partial t = 0$ 。忽略润滑油在导轨滑块表面沿横纵向的热传导, 其间润滑油的比热容以及传导系数为固定常数, 所以可得能量控制方程为

$$c_f \left[ \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} - \left( \frac{\partial}{\partial x} \int_0^z \rho u dz + \frac{\partial}{\partial z} \int_0^z \rho v dz \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{T}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \left( u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} \right) = k_f \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为润滑油密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_f$  为滑油的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $k_f$  为热传导系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $u$ 、 $v$  分别为滑动滑块导轨副在  $x$ 、 $y$  方向的速度分量, m/s。

根据式(1),对润滑油膜承载压强  $p(x,y)$  积分进而得到润滑油膜的承载量,即承载力公式为

$$W = \iint_D p(x,y) dx dy \quad (3)$$

润滑油膜作用在导轨副的摩擦力可通过对导轨副之间的流体剪力沿整个面积积分求得,即

$$F_f = \iint_D \eta \frac{\partial u}{\partial z} dx dy \quad (4)$$

于是可得导轨副之间的摩擦系数  $\mu$  为

$$\mu = \frac{W}{F_f} = \frac{\iint_D \eta \frac{\partial u}{\partial z} dx dy}{\iint_D p(x,y) dx dy} \quad (5)$$

根据式(2),对滑动滑块导轨副间的润滑油膜温度  $T(x,y)$  积分进而可得油膜的平均温度为

$$T = \frac{\iint_D T(x,y) dx dy}{S} \quad (6)$$

式中,  $S$  为油膜面积,  $\text{mm}^2$ ;  $D = \{(x,y) | 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y\}$ 。

### 1.3 流体润滑条件下原型导轨相关性能有限元仿真分析

为在不影响仿真分析结果的前提下提高仿真分析效率,选取机床导轨的  $15\text{mm} \times 15\text{mm}$  局部单元对原型导轨摩擦副相关性能进行有限元仿真分析。设定所研究的滑动滑块导轨副两表面处于流体润滑状态,油膜厚度  $h$  为  $10\mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>, 依此建立导轨仿真分析模型。根据滑块导轨的实际工况,设定长导轨表面固定,滑块在其上以  $2\text{m/s}$  的速度向右运动,对导轨模型施加的边界约束如图 2 所示。采用 Multi Zone Quad/Tri Method 方法,对其三维模型进行网格划分,如图 3 所示,将能量方程打开,按照表 1 输入润滑油的性能参数。润滑油

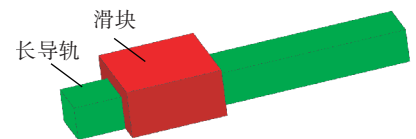


图1 导轨简易模型  
Fig.1 Simple model of guide

表1 原型导轨及润滑油的主要性能参数  
Table 1 Main performance parameters of prototype guide rail and lubricating oil

参数	数值
润滑油密度 $\rho_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	870
润滑油动力黏度 $\eta / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.07
润滑油膜厚度 $h_0 / \mu\text{m}$	10
润滑油比热 $c_f / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	2000
润滑油导热系数 $k_f / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.13
导轨速度 $V / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0~2
环境温度 $T / ^\circ\text{C}$	30
导轨密度 $\rho_2 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7850
杨氏模量 $E / \text{Pa}$	$2.1 \times 10^{11}$
泊松比 $\gamma$	0.3

流体域边界条件的设定如下:导轨副间润滑油膜入口边界为压力入口,出口边界为压力出口,进油温度设为 30℃,均设为 1 个大气压,润滑油膜顶层边界速度设为 2m/s,润滑油膜底层边界速度为 0。运用 Ansys 软件进行后处理,最终求得如图 4 所示的油膜上表面的承载压强、切应力以及温度的分布云图。根据式 (3)~(6) 计算出导轨的承载压强为 100218Pa,切应力为 14010.48Pa,摩擦系数为 0.14,平均温度为 42.08℃。

由图 4 可见,沿着滑块的运动方向油膜压强和温度均呈上升的趋势,而油膜的切应力则无明显变化。导轨副间的润滑油膜压强越大,即导轨的承载力越大;切应力越小,摩擦系数越低,越有助于减少诱发摩擦自激振动的概率<sup>[11]</sup>,并越有利于降低运行能耗,进而降低成本、提高节能环保性;温升越低,越既可减小导轨副的热变形,又可减少润滑油黏度的变化,这些对于提高导轨的精度保持性就越有利。

#### 1.4 原型导轨低速乏油状态下接触应力仿真分析

当机床滑动导轨处于启动、停止、低速工况时,其滑动导轨摩擦副

间处于乏油状态,摩擦表面表现为未形成完整的润滑油膜的干摩擦或边界摩擦情况,由于滑动滑块导轨副接触面的应力会影响最终的润滑效果,为此有必要分析导轨低速乏油状态下的接触应力。

本研究利用 Ansys Workbench 软件对滑动滑块导轨副模型进行摩擦副接触应力的仿真分析。为了提高计算效率,选取滑动滑块导轨副的 15mm×5mm×3mm 典型局部单元进行仿真分析。利用 UG 软件建立其三维模型,按照表 1 赋予材料性能参数,设置滑块为接触面,导轨设置为目标面,设置滑块的接触方式为摩擦接触,摩擦系数设置为 0.1;将导轨下表面进行固定约束,滑块的上表面施加 1MPa 的压强,如图 5(a)和(b)所示;滑块的移动速度为 1000μm/s,沿导轨上表面匀速向右运动,如图 5

(c) 所示;最终求得滑块运动 1s 后导轨接触应力分布如图 5(d) 所示。

由接触应力分布图可知,导轨副表面上的最大接触应力为 1.3504MPa,分布在导轨摩擦接触面边缘处。

## 2 微织构构型及其形状参数对导轨性能影响规律研究

### 2.1 微织构单元胞孔构筑

本研究构筑的表面微织构单元胞孔为图 6 所示的椭圆开口偏置类抛物线孔型,即在单元尺寸  $L_x \times L_y = 1500\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$  的导轨副表面加工长半轴长为  $A$ ,短半轴长为  $B$  的椭圆开口,抛物线的类型系数  $Rho$  (即凹坑深度与类抛物线进出口切线交点距开口表面垂直距离的比值)为  $C$ ,

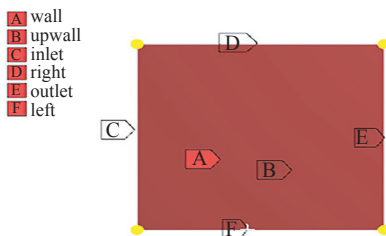


图2 边界约束定义

Fig.2 Definition of boundary constraints

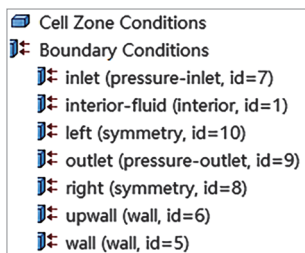
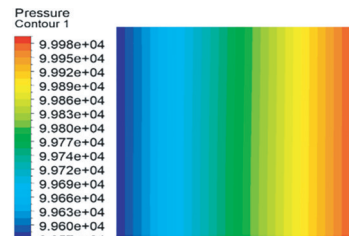
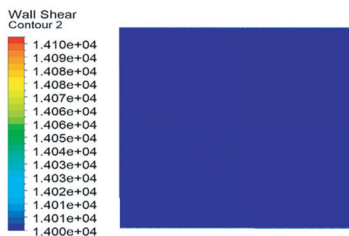


图3 边界条件设定

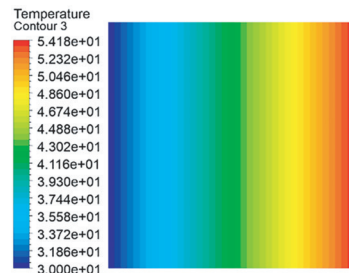
Fig.3 Boundary condition setting



(a) 承载压强



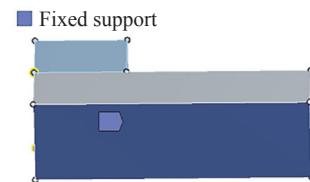
(b) 切应力



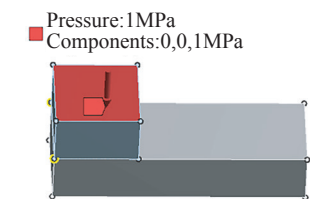
(c) 温度

图4 原型导轨性能仿真分析云图

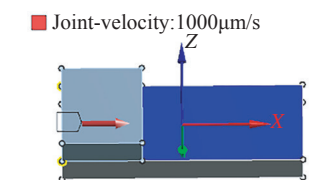
Fig.4 Simulation analysis cloud diagram of prototype guide performances



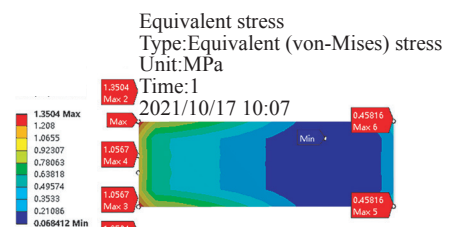
(a) 固定约束



(b) 压强约束



(c) 速度约束



(d) 接触应力分布

图5 接触应力分析约束条件设置及结果

Fig.5 Constraint conditions setting and results of contact stress analysis

抛物线最深点距椭圆中心的偏置距离(偏置量)为 $D$ ,深度为 $E$ 的偏置类抛物线截深的凹坑微织构。由于其椭圆开口本身具有各向异性的特点,而且在特定条件下又可以转化为圆形;加之其在深度方向的截形为偏置类抛物线形,特殊情况下可以转化为对称抛物线和球冠形。因此这样可使研究中对微织构单元胞孔的结构参数和排布方式的寻优空间增大,以利于获得更优的微织构形式。

## 2.2 微织构形状参数对导轨性能影响规律

通过响应面理论和 Design-Expert 软件研究微织构形状参数对导轨性能影响规律及参数优化。利用 Design-Expert 软件中的 CCD 中心复合设计方法构造出如表 2 所示的微织构形状参数五因素五水平的 32 组三维结构模型,对其承载压强及摩擦系数进行仿真分析。

根据表 2 中的仿真分析结果,应用软件中的响应面分析模块生成微织构形状参数两两因素交互作用对承载压强和摩擦系数的影响曲面,限于篇幅,本研究只给出承载压强的相应曲面,如图 7 所示。

由图 7 (a)~(d)可知,当  $Rho$  和其他因素比较时,在  $Rho$  方向上的等高线最为密集且以承载压强为目标的响应面颜色变化更明显,即  $Rho$  对导轨承载压强的影响最显著;由图 7 (f)和(g)可知,其他 4 个形状参数相比较时,长半轴方向上的等高线较另外 3 个参数密集且响应面颜色变化更明显,即长半轴较另外 3 个参数显著;由图 7 (h)和(i)可知,当深度、偏置量、短半轴相比较时,深度方向上等高线较其他两个参数密集且响应面颜色变化更明显,即深度较偏置量、短半轴对导轨承载压强的影响更显著;最后通过图 7 (j)可知,当偏置量和短半轴径作比较时,偏置量方向上等高线更密集且响应面颜色变化更明显,即偏置量对导轨承载压

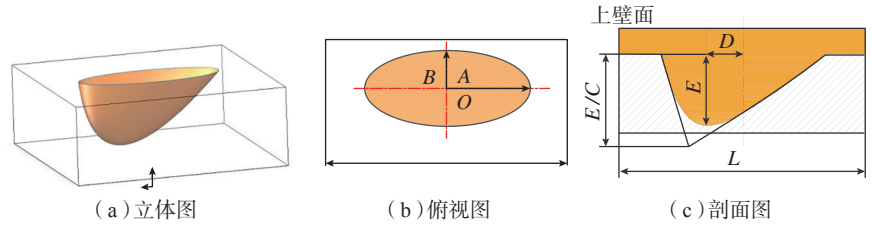


图6 单元胞孔结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of unit cell structure

表2 微织构形状参数因素水平与结果

Table 2 Level of microtexture shape parameter factors and results

组号	$A/\mu\text{m}$	$B/\mu\text{m}$	$C/\mu\text{m}$	$D/\mu\text{m}$	$E/\mu\text{m}$	承载压强 /Pa	摩擦系数
1	450	280	0.35	220	120	105245.98	0.109
2	400	260	0.50	200	150	105075.69	0.113
3	400	260	0.50	200	150	105075.69	0.113
4	350	240	0.65	180	120	105430.20	0.118
5	500	260	0.50	200	150	106251.14	0.106
6	450	240	0.35	220	180	103863.55	0.112
7	350	280	0.35	180	120	103597.52	0.117
8	450	240	0.65	220	120	108376.45	0.111
9	350	280	0.65	180	180	104204.86	0.115
10	450	280	0.65	220	180	107066.52	0.106
11	450	280	0.35	180	180	103411.99	0.108
12	400	220	0.50	200	150	104817.86	0.116
13	400	260	0.50	240	150	105765.42	0.112
14	400	260	0.80	200	150	107330.94	0.112
15	350	240	0.35	220	120	103955.73	0.119
16	350	240	0.65	220	180	104532.25	0.118
17	350	280	0.65	220	120	106686.30	0.115
18	450	280	0.65	180	120	107644.11	0.108
19	400	260	0.20	200	150	102361.60	0.115
20	300	260	0.50	200	150	103601.93	0.120
21	350	240	0.35	180	180	102573.98	0.119
22	400	260	0.50	200	150	105075.69	0.113
23	400	260	0.50	200	150	105075.69	0.113
24	400	260	0.50	200	150	105075.69	0.113
25	400	260	0.50	200	210	103964.88	0.112
26	400	300	0.50	200	150	105444.63	0.109
27	450	240	0.65	180	180	105522.27	0.111
28	400	260	0.50	160	150	104395.60	0.114
29	450	240	0.35	180	120	104338.69	0.114
30	400	260	0.50	200	90	106509.51	0.115
31	350	280	0.35	220	180	103120.04	0.115
32	400	260	0.50	200	150	105075.69	0.113

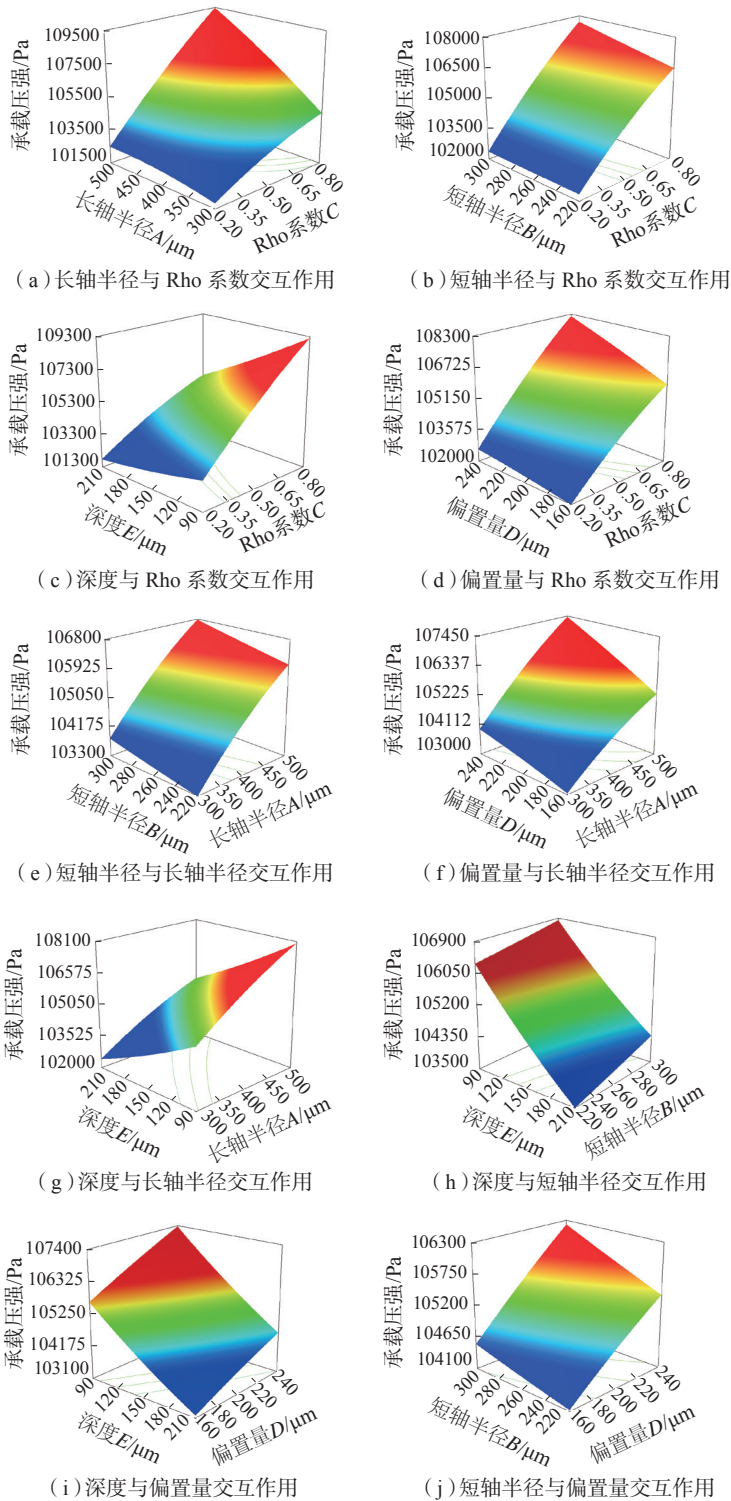


图7 承载压强对形状参数的响应面

Fig.7 Response surfaces of shape parameters on bearing pressure

强的影响更显著。最终可以判断 5 个形状参数对承载压强的影响程度次序为 Rho> 长轴半径> 深度> 偏置量>

短轴半径。同理可得 5 个形状参数对摩擦系数的影响次序为长轴半径> 短轴半径>Rho> 深度> 偏置量。

### 3 微织构形状参数优化设计

为寻求可使导轨承载压强最大、摩擦系数最小的微织构形状参数,以微织构的承载压强最大、摩擦系数最小为目标函数,以微织构的承载压强大于无织构承载压强以及微织构的摩擦系数小于无织构的摩擦系数为约束条件;以前叙 5 个微织构形状参数为设计变量,最终建立优化数学模型为

$$\begin{aligned} \min F(P) &= [-f_1(P), f_2(P)]^T \\ \text{s.t.} & \begin{cases} f_1(P) \geq 100704.61 \\ f_2(P) \leq 0.1390461668 \\ P = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5]^T \\ 300\mu\text{m} \leq P_1 \leq 500\mu\text{m} \\ 220\mu\text{m} \leq P_2 \leq 300\mu\text{m} \\ 0.2 \leq P_3 \leq 0.8 \\ 160\mu\text{m} \leq P_4 \leq 240\mu\text{m} \\ 90\mu\text{m} \leq P_5 \leq 210\mu\text{m} \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

式中,  $f_1(P)$  为微织构单元胞的承载压强, Pa;  $f_2(P)$  为微织构单元胞的摩擦系数;  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  分别为微织构形状参数  $A, B, C, D, E$ 。

依据式(7)优化模型,通过 CCD 中“Optimization”优化模块可得微织构的最优形状参数(对最初优化得到的 5 个参数进行了圆整):  $A$  为  $450\mu\text{m}$ ,  $B$  为  $278\mu\text{m}$ ,  $C$  为  $0.65$ ,  $D$  为  $220\mu\text{m}$ ,  $E$  为  $135\mu\text{m}$ 。根据上述得到的单元胞最优结构参数,构造单元微织构三维模型并进行流体仿真,得到其压强分布云图如图 8 (a) 所示。为对比分析,对相同尺寸单元的未织构导轨间油膜的压强进行仿真分析,得到其压强分布云图如图 8 (b) 所示。

由如上分析得到的油膜压力,依据式(3)~(5)可得织构和未织构单元油膜承载压强分别为  $106838.63\text{Pa}$  和  $100704.61\text{Pa}$ , 而摩擦系数分别为  $0.106$  和  $0.139$ , 即织构相较于未织构单元的油膜承载压强提高了  $6.09\%$ , 而摩擦系数却降低  $23.74\%$ 。

## 4 微织构分布参数对导轨性能影响规律研究及优化

### 4.1 对导轨性能影响规律研究

由于微织构摩擦副轴承性能不仅与其结构参数相关,还与其在摩擦副表面的分布参数相关。为此有必要在前文获得微织构最优结构参数基础之上,研究微织构分布参数对导轨性能影响规律,并对分布参数进行优化设计。

微织构导轨的简易模型如图9所示,其中微织构的分布参数包括3个,分别为微织构在导轨表面分布的纵向和横向间距( $F$ 、 $G$ )和椭圆开口长轴与运动方向之间的夹角( $H$ )。设计分布参数三因素五水平的试验方案,并应用 Design-Expert 10 软件

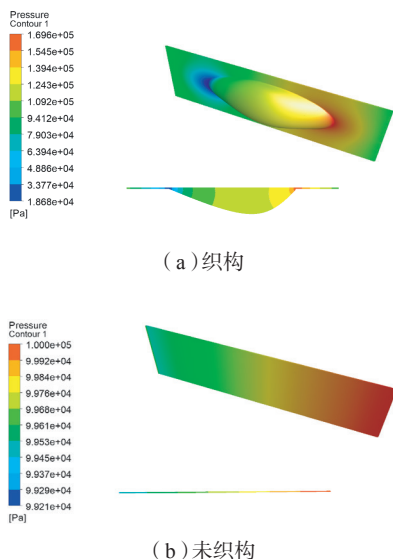


图8 单元压强分布云图

Fig.8 Pressure distribution cloud diagram of elements

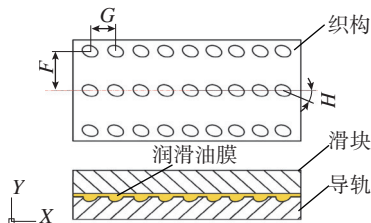


图9 微织构导轨副简易模型

Fig.9 Simple model of micro texture sliding guide pair

中的 Box-Behnken 响应面设计方法构造出 17 组三维结构模型,对其承载压强、摩擦系数及温度进行仿真分析,结果如表 3 所示。

进一步生成微织构分布参数两两因素交互作用对承载压强、摩擦系数和温度的影响规律曲面如图 10 所示。

参照前文中依据响应曲面判断影响因素对考察目标影响程度大小顺序的方法,依据图 10 可以得出微织构的 3 个分布参数对导轨的承载压强、摩擦系数和温度的影响程度大小分别为角度 > 横向间距 > 纵向间距、纵向间距 > 横向间距 > 角度、纵向间距 > 纵向间距 > 角度。

### 4.2 优化设计

为寻求可使导轨的承载压强高、摩擦系数低和温升小的微织构分布参数,以导轨承载压强最大、摩擦系数最小、温度最低为目标函数,以前叙 3 个微织构分布参数为设计变量,建立优化数学模型为

$$\begin{aligned} \min F(P) &= [f_3(P), f_4(P), f_5(P)]^T \\ &\begin{cases} f_3(P) \geq 100218 \\ f_4(P) \leq 0.1398 \\ f_5(P) \leq 42.083296 \end{cases} \\ \text{s.t.} &\begin{cases} P = [P_6, P_7, P_8]^T \\ 1000\mu\text{m} \leq P_6 \leq 5000\mu\text{m} \\ 1000\mu\text{m} \leq P_7 \leq 5000\mu\text{m} \\ 0^\circ \leq P_8 \leq 90^\circ \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

式中,  $f_3(P)$  为微织构滑动滑块导轨副的承载压强, Pa;  $f_4(P)$  为摩擦系数;  $f_5(P)$  为温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $P_6$ 、 $P_7$ 、 $P_8$  分别为微织构分布参数  $F$ 、 $G$ 、 $H$ 。

基于如上优化模型通过 Box-Behnken 优化模块,最终得到最优微织构形状参数(对最初优化得到的 3 个参数进行了圆整):  $F$  和  $G$  均为  $1000\mu\text{m}$ ;  $H$  为  $32^\circ$ 。

### 4.3 最优特征参数微织构导轨相关性能研究

#### 4.3.1 液体润滑状态下微织构导轨相关性能研究

建立最优特征参数微织构导

表3 分布参数试验方案设计与结果

Table 3 Design of distributed parameter test and results

组号	$F/\mu\text{m}$	$G/\mu\text{m}$	$H/(\text{^\circ})$	承载压强 /Pa	温度/ $^\circ\text{C}$	摩擦系数
1	3000	1000	90	111265	41.44	0.132
2	3000	1000	0	112696	40.90	0.126
3	3000	3000	45	111519	40.71	0.124
4	5000	3000	0	111032	41.85	0.136
5	1000	1000	45	113590	39.77	0.103
6	3000	3000	45	111519	40.71	0.124
7	1000	3000	90	111228	41.44	0.132
8	5000	3000	90	111059	41.85	0.138
9	5000	1000	45	111495	41.40	0.131
10	3000	3000	45	111519	40.71	0.124
11	3000	3000	45	111519	40.71	0.124
12	3000	5000	90	110856	41.85	0.137
13	3000	5000	0	111992	41.85	0.136
14	3000	3000	45	111519	40.71	0.124
15	5000	5000	45	111724	41.71	0.136
16	1000	3000	0	112282	41.00	0.126
17	1000	5000	45	111229	41.43	0.132

轨副之间油膜三维模型,将其导入 Fluent 并进行网格划分,边界条件施加同原型导轨,得到油膜表面压强、切应力及温度分布云图如图 11 所示。进一步计算得到导轨的承载压强 115402.62Pa、摩擦系数 0.103 和平均温度 38.74℃,与未织构原型导轨的 100218Pa、0.140 和 42.08℃ 相比,前者提高了 15.15%,而后两者分别降低了 26.43% 和 7.94%。

### 4.3.2 乏油状态下微织构导轨接触应力仿真分析

建立与前文中原型导轨相同外形尺寸的织构导轨三维模型如图 12 (a) 所示,对其进行网格划分并设置同原型导轨的接触及约束条件,最终得到乏油状态下微织构导轨接触应力云图如图 12 (b) 所示。

对比图 12 (b)和图 5 (d)可知,微织构导轨最大应力为 1.4207MPa,

比原型接触面的最大应力值 1.3504MPa 略大,但其并不在接触表面上而是分布在微织构内部,对接触表面的润滑基本没有影响,而在接触面处的最大接触应力为 1.2412MPa,较织构前的最大接触应力 1.3504MPa 降低了 8.09%。最大值也分布在摩擦副表面边缘,这与张赟<sup>[3]</sup>所研究的圆孔微织构结论一致。可见,在低速重载乏油状态下,导轨上织构

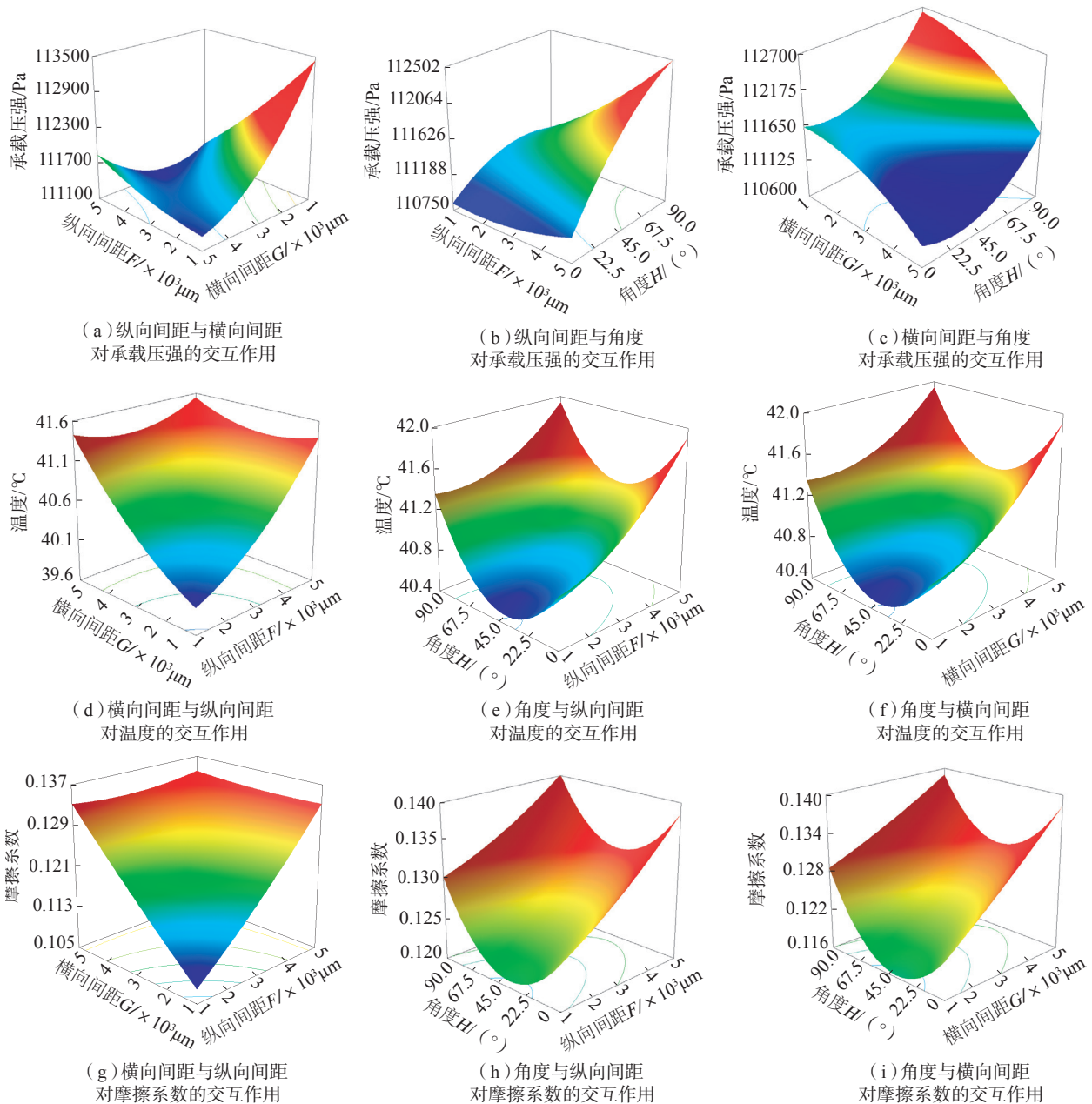


图10 分布参数对油膜性能响应面

Fig.10 Response surface of distributed parameter factors on oil film performances

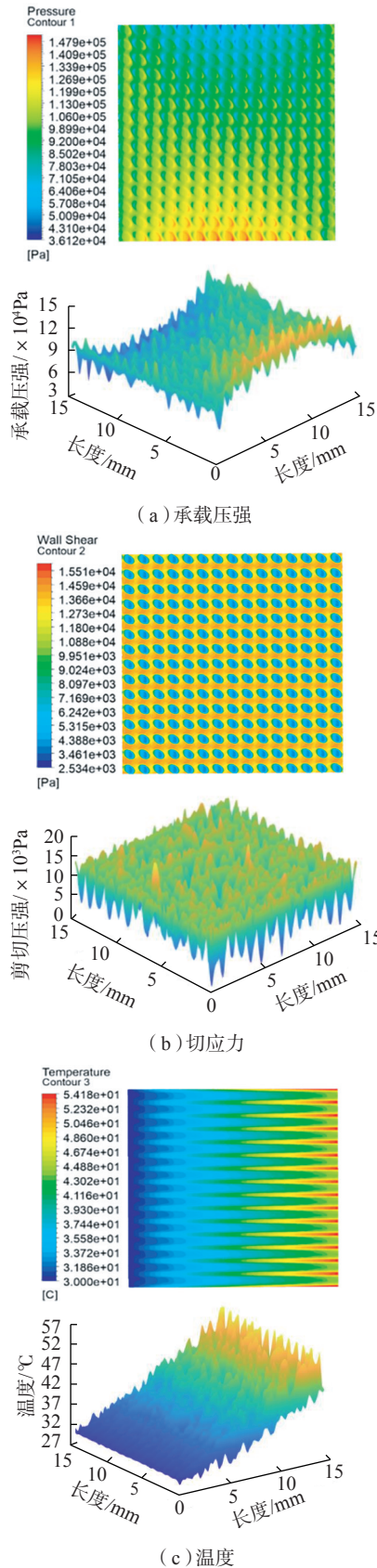


图11 最优微织构导轨副性能分布云图  
Fig.11 Performance distribution clouds diagram of optimal micro-texture guide pair

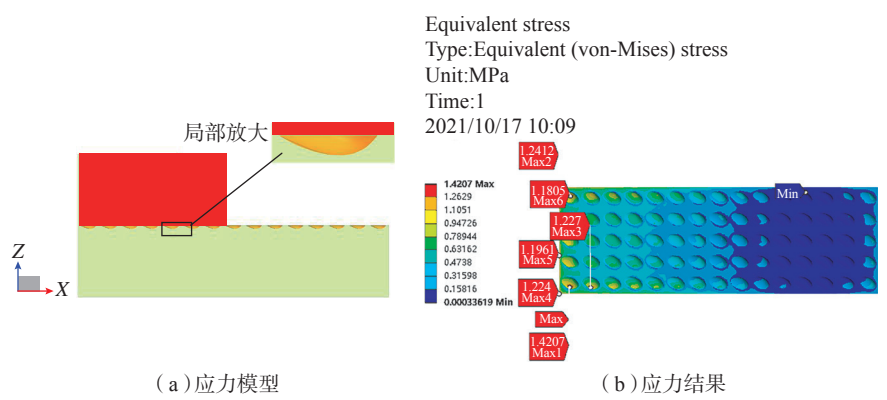


图12 乏油状态下微织构导轨接触应力模型及结果  
Fig.12 Contact stress model and results of microtextured guide under lack of oil condition

椭圆开口偏置类抛物线微织构后能够有效减小接触应力,进而有利于润滑油膜的形成改善导轨的摩擦磨损性。

### 5 结论

(1) 在滑动导轨副定导轨上织构椭圆开口偏置类抛物线微织构时,位置形状参数对导轨承载压强和摩擦系数的影响程度大小顺序分别为  $Rho > \text{长轴半径} > \text{深度} > \text{偏置量} > \text{短轴半径}$ 、 $\text{长轴半径} > \text{短轴半径} > Rho > \text{深度} > \text{偏置量}$ 。以承载压强最大摩擦系数最小为目标进行优化得到的最优微织构结构参数为椭圆长半轴长  $450\mu\text{m}$ 、椭圆短半轴长  $278\mu\text{m}$ 、深度  $135\mu\text{m}$ 、偏移量  $220\mu\text{m}$ 、 $Rho$  系数为  $0.65$ 。最优形状参数微织构单元承载压强较原型提升  $6.09\%$ ，摩擦系数较原型降低  $23.74\%$ 。

(2) 织构的 3 个分布参数对导轨的承载压强、摩擦系数和温度的影响程度大小顺序分别为  $\text{角度} > \text{横向间距} > \text{纵向间距}$ 、 $\text{纵向间距} > \text{横向间距} > \text{角度}$ 、 $\text{横向间距} > \text{纵向间距} > \text{角度}$ 。以承载压强最大、温度和摩擦系数最小为目标优化得到的最优分布参数为纵、横向间距均  $1000\mu\text{m}$ 、椭圆开口长轴与运动方向之间的夹角  $32^\circ$ 。

(3) 最优特征参数椭圆开口偏置类抛物线微织构导轨的承载

压强、摩擦系数和平均温度分别为  $115402.62\text{Pa}$ 、 $0.103$  和  $38.74^\circ\text{C}$ ，与原型未织构导轨的  $100218\text{Pa}$ 、 $0.140$  和  $42.08^\circ\text{C}$  相比,前者提高了  $15.15\%$ ，而后两者分别降低了  $26.43\%$  和  $7.94\%$ ；在乏油状态下,椭圆开口偏置类抛物线微织构导轨最大接触应力为  $1.2412\text{MPa}$ ，较原型未织构导轨的  $1.3504\text{MPa}$  降低了  $8.09\%$ 。

### 参考文献

[1] WANG R D, FAN K G, LI Q, et al. An optimization method for thermal convex deformation of machine tool's guideway based on the conservation of energy[J]. International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 2021, 9(2): 33.

[2] KOVALCHENKO A, AJAYI O, ERDEMIR A, et al. The effect of laser texturing of steel surfaces and speed-load parameters on the transition of lubrication regime from boundary to hydrodynamic[J]. Tribology Transactions, 2004, 47(2): 299-307.

[3] 张贇. 微织构对导轨副摩擦磨损特性影响的研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

ZHANG Yun. Effect of micro-textures on the friction and wear characteristics of guideways[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

[4] 骆海波. 网状仿生耦合单元的特征参数对滚动导轨耐磨性的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

LUO Haibo. Effects research of grid bionic coupling unit's characteristics on rolling guide's wear performance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

University, 2016.

[5] 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结构滑块承载力分析[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(6): 1026-1032.

ZHANG Yu, CHEN Guoding, 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.

[6] 张东亚, 赵飞飞, 高峰, 等. 二层沟槽织构对机床导轨表面润滑特性的影响[J]. 中国机械工程, 2018, 29(14): 1661-1665.

ZHANG Dongya, ZHAO Feifei, GAO Feng, et al. Effects of double-layer groove texture on lubrication performance of machine tool slideway surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(14): 1661-1665.

[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: 105548.

[8] 张臣, 霍建强, 侯磊, 等. 基于回转基准面的椭圆振动辅助切削微织构过程仿真研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(13): 45-52.

ZHANG Chen, HUO Jianqiang, HOU Lei, et al. Investigation on simulation of elliptical vibration-assisted cutting micro-texture based on rotary surface[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(13): 45-52.

[9] 魏盼, 张臣, 宋云, 等. 叶片微织构数控加工无干涉刀轴生成方法研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(22): 88-94, 101.

WEI Pan, ZHANG Chen, SONG Yun, et al. Research on generation method of collision-free tool orientation for numerical control machining of blade micro-texture[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(22): 88-94, 101.

[10] SHARMA S, JAMWAL G, AWASTHI R K. Enhancement of steady state performance of hydrodynamic journal bearing using chevron-shaped surface texture[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019, 233(12): 1833-1843.

[11] 王焕杰. 水润滑轴承表面织构橡胶板条摩擦振动抑制机理及试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

WANG Huanjie. Research on mechanism and experiment of friction vibration suppression on textured rubber slat of water-lubricated bearing[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.

通讯作者: 王智群, 硕士研究生, 研究方向为先进制造系统与技术。

## Multi-Objective Optimization Design of Micro-Texture of Sliding Guideway in Machine Tool

YU Yinghua, WANG Zhiquan, YAO Jinlong, XU Ping  
(Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**[ABSTRACT]** To explore new ways to meet the requirements of high load-bearing, high-precision and high-precision retention of its guide rails by CNC machine tools, it is proposed to prepare an elliptical opening offset parabolic micro-texture on the surface of the sliding guide rail. The rectangular sliding block guide rail pair is selected as the research prototype, and its bearing compression force, attrition modulus, exotherm and outside contact stress in the state of exhausted oil are analyzed by the CFD method. Based on the response surface theory, CFD is took on the effect of micro-texture shape arguments on the bearing pressure and attrition coefficient of the guideway was researched, and the optimal micro-texture shape parameters were optimized. On this ground, the effect of the micro-texture distribution arguments on the bearing pressure and attrition modulus of the guideway was researched. The influence law of temperature rise and the optimal micro-texture distribution arguments was also researched. Finally, the load-bearing pressure, friction coefficient exotherm and contact stress in the state of spent oil of the optimal characteristic parameters of the micro-texture guide rail are simulated and analyzed. Comparing the results with the relative performance of the prototype guide rail, the results show that the new micro-texture can increase the pressure bearing strength of the guide rail in the lubricated state by 15.15%, and reduce the friction coefficient, temperature and contact stress in the depleted state by 26.43%, 7.94% and 8.09%.

**Keywords:** Sliding guide way; Micro-texture; Optimized design; Bearing pressure; Friction coefficient; Temperature; Contact stress

(责编 古京)