凹凸接触反向式行星滚柱丝杠参数化设计及承载性能分析

刘 鑫[1] 高 鹏[2] 陈永洪[3] 廖应策[1] 李贵元[4] 李玲玲[1] 高艳娥[1]
（1. 西南大学 工程技术学院，重庆 400715）
（2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院，重庆 401120）
（3. 重庆大学 高端装备机械传动全国重点实验室，重庆 400044）
（4 奇瑞汽车股份有限公司，芜湖 241009）

摘要：【目的】针对现有反向式行星滚柱丝杠在高负载运动条件下承载能力不足等问题，建立凹凸接触的反向式行星滚柱丝杠，进行参数化设计并完成承载性能分析。【方法】首先，建立凹凸接触反向式行星滚柱丝杠的数学模型，开发参数化设计软件，实现快速建模；其次，设计正交试验并开展有限元分析，研究螺母-滚柱螺纹圆弧半径比、丝杠-滚柱螺纹圆弧半径比、滚柱螺纹圆弧半径、牙侧角及螺距等5个主要参数对凹凸接触反向式行星滚柱丝杠承载性能的影响规律；最后，通过极差分析和矩阵分析法，获得最优参数组合。【结果】结果表明，影响凹凸接触反向式行星滚柱丝杠承载性能的最主要因素为滚柱螺纹圆弧半径，其次为牙侧角和螺距；承载性能最优的参数组合为2.9∶1、2.8∶1、12.27 mm、44.8°和5.1 mm。研究结果可为反向式行星滚柱丝杠设计提供参考。

关键词：反向式行星滚柱丝杠；凹凸接触；参数化建模；正交试验；有限元分析
中图分类号：TP242；TP31 **DOI：**10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

行星滚柱丝杠（Planetary Roller Screw Mechanism, PRSM）是一种由多个行星滚柱与丝杠、螺母组成的啮合副，是一种通过滚动接触实现旋转运动与直线运动相互转换的精密传动机构[1]108127。得益于其高承载能力及长寿命等优势，PRSM已广泛应用于航空航天、数控机床、工业机器人、军工装备及医疗器械等领域。随着高端装备制造技术的快速发展，人们对PRSM的承载性能、运行稳定性等提出更高要求[2-6]。

近年来，PRSM的相关研究主要围绕结构参数优化、运动学特性分析、摩擦行为及传动效率提升等方面展开[7]107570[8-9]。Xing等[1]108127建立了PRSM接触运动学模型，揭示了接触位置变化规律。Lepagneul等[10]系统分析了接触几何、曲率及滑动行为，并提出接触应力与疲劳寿命预测方法。Liu等[11]指出，实际工况下接触位置受制造误差与构件变形共同影响，滚柱存在滑动趋势。Du等[12][13]108709分析了时变接触模型和凸凹接触结构，结果表明，优化接触形式可有效减小接触应力，改善承载性能。作为决定PRSM力学性能与传动性能的关键因素，螺旋面接触特性对其承载能力、传动精度、噪声水平及服役寿命具有重要影响。因此，滚柱丝杠接触面及牙形优化问题已成为该领域的一项重要研究内容[14-17]。

相较于传统PRSM，反向式行星滚柱丝杠（Inverted Planetary Roller Screw Mechanism, IPRSM）通过对丝杠、螺母及滚柱空间布局的重新设计，实现了传动构型的反向化，在结构集成性、轴向空间利用率及电驱动系统适配性等方面展现出潜在优势[18]。近年来，随着航空航天、电动作动器及高端伺服系统对紧凑化、高承载和高精度传动需求的不断提升，IPRSM逐渐受到关注。然而，相较于传统PRSM较为成熟的研究体系，对IPRSM的研究仍相对有限，尤其是在接触承载分析、参数化建模等方面仍缺乏系统研究。

在牙廓接触形式方面，现有研究主要针对传统

收稿日期：2026-06-03 修回日期：2026-06-24
基金项目：重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目（CSTB2024NSCQ-LZX0028）；浙江省科技计划项目（2025C01018）
作者简介：刘鑫，男，1998年生，四川遂宁人，硕士；主要研究方向为参数化设计、机械传动设计；13060222546@163.com。
高艳娥（通讯作者），女，1985年生，山东菏泽人，博士，讲师；主要研究方向为参数化设计、增材制造技术、机械传动设计；yanegao@sina.com。
引用格式：刘鑫，高鹏，陈永洪，等.凹凸接触反向式行星滚柱丝杠参数化设计及承载性能分析［J］.机械传动，XXXX，XX（XX）：1-12.
Liu Xin，Gao Peng，Chen Yonghong，et al.Parametric design and load-carrying perdormance analysis of an inverted planetary roller screw mechanism with concave-convex contact［J］.Journal of Mechanical Transmission，XXXX，XX（XX）：1-12.

免费获取

直线牙廓开展修形优化，通过局部曲率调整或接触线型修正改善啮合性能[7]107570。传统PRSM多采用凸-平面接触形式，即滚柱为凸圆弧牙廓，而丝杠和螺母为直线牙廓[13]108709。然而，IPRSM空间构型的重构改变了接触几何关系及载荷传递路径，使传统牙廓易产生接触应力集中和载荷分布不均等问题[19]。在此背景下，引入曲率互补型凹凸接触形式，可优化接触法向曲率匹配关系，改善接触应力分布和载荷均匀性，为IPRSM接触性能优化提供新的设计思路。

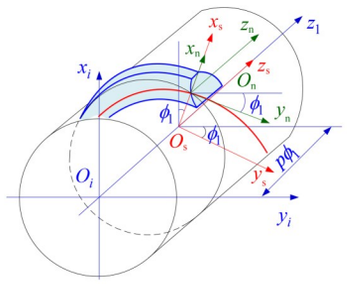
随着智能设计与数字化制造技术的发展，基于CAD/CAE平台的参数化设计方法已广泛应用于复杂机械系统的快速建模与性能分析[20]。其中，NX平台集成了丰富的二次开发接口与参数化建模工具，可有效实现复杂机械结构的自动化建模、分析与优化，在工程设计领域具有广泛的应用前景。Zhou等[21]基于NX平台二次开发，实现了复杂表面结构刀具的多尺度离散与高精度近场动力学模型构建。周均健等[22]基于NX平台二次开发，实现了分阶式4点接触齿轮滚刀的参数化三维建模与有限元分析，构建了可通过交互参数驱动的高精度滚刀实体模型。廖应策等[23]基于NX平台二次开发，提出将扫掠法与芯厚模型法相结合的髓腔锉刀加工路径参数化设计方法，实现了复杂锉齿结构刀具轨迹的自动生成与高效构建。研究表明，参数化设计与自动化分析方法能够有效提升复杂机械系统的设计效率与优化能力，但针对IPRSM的参数化设计研究仍较少。

基于上述背景，本文面向高性能直线驱动系统的应用需求，以凹凸接触型IPRSM为研究对象，建立其螺旋接触面的数学模型，并基于NX平台二次开发技术开发参数化设计软件，实现不同结构参数条件下IPRSM的快速三维建模；然后，结合正交试验设计与有限元分析方法，系统研究关键几何参数对接触应力与承载性能的影响规律，揭示凹凸接触曲率匹配对承载能力的作用机制，并获得优化参数组合。研究结果可为IPRSM的结构设计、性能优化及工程应用提供模型基础与技术参考。

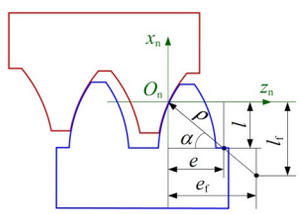
1 理论和方法

1.1 凹凸接触螺旋面数学模型

IPRSM主要由丝杠、滚柱及螺母组成，为提高接触承载能力，采用凹凸接触牙廓形式，即滚柱采用凸圆弧螺旋面，丝杠与螺母采用凹圆弧螺旋面。为描述牙廓绕轴线螺旋运动生成螺旋面的过程，建立固定坐标系、动坐标系及轴截面坐标系，如图1所示。



（a）空间坐标系



（b）截面坐标系

图1 坐标系

Fig. 1 Coordinate systems

固定坐标系为$S_i(O_i x_i y_i z_i)$，其中，z_i轴与构件的回转轴线重合，当$i=1$时，表示滚柱凸圆弧螺旋面方程；当$i=2$时，表示丝杠凹圆弧螺旋面方程；当$i=3$时，表示螺母凹圆弧螺旋面方程。动坐标系$S_s(O_s x_s y_s z_s)$绕定坐标系做螺旋运动，z_s轴与z_i轴重合。当螺旋角为ϕ_1时，原点O_s在z_i轴上移动距离为$p\phi_1$，其中，p为每旋转1 rad时沿轴向移动的距离。在轴面坐标系$S_n(O_n x_n y_n z_n)$中，z_n轴与z_i轴平行；y_n轴的方向为螺旋线切线方向，与y_s轴平行；O_n为中径螺旋线上的一点；x_n轴与x_s轴重合，并通过轴心；z_n轴与中径线重合。通过轴截面牙廓曲线的螺旋运动，可生成丝杠、滚柱和螺母的工作螺旋面。

如图1(b)所示，滚柱凸圆弧牙廓$\boldsymbol{r}_n$与丝杠、螺母凹圆弧牙廓$\boldsymbol{r}_n'$在轴截面内均可由圆弧参数方程表示，即

$$\begin{cases} \boldsymbol{r}_n(\alpha)=x_n(\alpha)\boldsymbol{i}+y_n(\alpha)\boldsymbol{j}+z_n(\alpha)\boldsymbol{k} \\ x_n(\alpha)=\rho\sin\alpha-l_j \\ y_n(\alpha)=0 \\ z_n(\alpha)=\pm(-\rho\cos\alpha+e_j-0.5w_a) \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{r}_n'(\alpha_f)=x_n'(\alpha_f)\boldsymbol{i}_n+y_n'(\alpha_f)\boldsymbol{j}_n+z_n'(\alpha_f)\boldsymbol{k}_n \\ x_n'(\alpha_f)=-(\rho_f\sin\alpha_f-l_f) \\ y_n'(\alpha_f)=0 \\ z_n'(\alpha_f)=\pm(-\rho_f\cos\alpha_f+e_f+0.5w_f) \end{cases} \tag{2}$$

式中，ρ和ρ_f分别为凸圆弧段和凹圆弧段半径；α为滚柱凸圆弧牙廓的角度参数；α_f为丝杠或螺母凹圆弧牙廓的角度参数；“±”中的“+”和“−”分别表示左、右侧牙廓曲线段；$(l_j,\ e_j)$、$(l_f,\ e_f)$分别为凸、凹圆弧的圆心坐标；w_a和w_f分别为滚柱和丝杠螺母的牙槽宽度。

通过轴截面牙形的螺旋运动构建IPRSM螺旋面$\boldsymbol{r}_i$，根据运动关系，螺旋面方程为

$$\boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{Q}_{in}\boldsymbol{r}_n \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{Q}_{in}$为坐标系S_n到S_i的坐标变换矩阵，表达式为

$$\boldsymbol{Q}_{in} = \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & -\sin\phi_1 & 0 & r_r\cos\phi_1 \\ \sin\phi_1 & \cos\phi_1 & 0 & r_r\sin\phi_1 \\ 0 & 0 & 1 & p\phi_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，r_r为滚柱或螺母或丝杠的中径半径。

将式(1)、式(2)和式(4)代入式(3)，可得滚柱、丝杠及螺母的螺旋面坐标方程分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{r}_i(\alpha,\phi_1) = x_{ni}(\alpha,\phi_1)\boldsymbol{i}_s + y_{ni}(\alpha,\phi_1)\boldsymbol{j}_s + z_{ni}(\alpha,\phi_1)\boldsymbol{k}_s \\ x_{ni}(\alpha,\phi_1) = x_n(\alpha)\cos\phi_1 - y_n(\alpha)\sin\phi_1 + \dfrac{d_i}{2}\cos\phi_1 \\ y_{ni}(\alpha,\phi_1) = x_n(\alpha)\sin\phi_1 - y_n(\alpha)\cos\phi_1 + \dfrac{d_i}{2}\sin\phi_1 \\ z_{ni}(\alpha,\phi_1) = p\phi_1 + z_n(\alpha) \end{cases}$$
$$(i = 1, 2, 3) \tag{5}$$

式中，d_i为滚柱或螺母或丝杠的中径。

1.2 参数化建模方法

为实现凹凸接触IPRSM的快速设计，本文建立了基于螺旋面点数据驱动的参数化建模方法。通过“参数输入-点集生成-曲面重构-实体输出”的几何映射，实现模型快速生成与参数灵活调整。该方法基于NX 12.0平台实现，采用Visual Studio 2015作为开发环境，主要使用C++语言调用NX Open API接口完成功能扩展与核心算法实现，同时结合UI Styler块界面编辑器构建图形化人机交互界面，并辅以Journaling技术实现关键操作的录制与复现。

参数化建模包括计算单元和建模单元两部分，建模流程如图2所示。计算单元根据输入参数生成丝杠、滚柱及螺母的螺旋面点数据；建模单元读取点数据，并自动生成三维实体模型。输入参数涵盖大径、中径、小径、螺距、头数、牙厚、圆弧半径、牙侧角及构件长度等。针对丝杠、滚柱和螺母3类构件，流程采用统一建模框架：丝杠与螺母采用凹螺旋面建模，滚柱采用凸螺旋面建模。

为满足后续正交试验与有限元分析，建模单元应自动构建曲面、生成螺纹特征并输出实体模型。如图3(a)~图3(c)所示，螺母、丝杠和滚柱的建模逻辑均为“创建参考平面-创建螺旋面-阵列螺旋面-创建拉伸体-合并特征”，但拉伸体建立和创建螺旋面顺序略有差异。对于螺母，先建立基体圆柱，再导入凹螺旋面点数据生成螺旋曲面，通过扫掠、布尔切除及阵列形成内螺纹；对于丝杠与滚柱，则先构建螺旋面并完成阵列，再建立基体圆柱，合并形成外螺纹实体。

1.3 有限元方法

为分析不同牙廓参数下IPRSM的承载性能，建立有限元模型。完整结构接触单元数量多，直接建模将显著增加计算成本，因此，在保证接触区力学特征的前提下，对模型进行简化。

多齿啮合中的载荷分配不均主要影响整机层面的载荷分布特性，而对局部接触区域的应力变化规律影响相对有限。因此，所建模型适用于分析结构参数对承载性能的相对影响规律，但在整机载荷分配的精确预测方面存在一定理想化假设。如图4所示，原模型滚柱数量为8个，啮合齿数为10，简化后模型保留丝杠、滚柱与螺母的主要啮合区域，将三维螺旋面简化为局部单牙接触模型。丝杠与螺母采用1/18扇形结构，以减少网格数量、提高计算效率；对螺母外表面施加固定约束，丝杠、螺母和滚柱两侧施加对称约束；保持螺母和滚柱轴向自由度，同时限制径向位移；在丝杠端面施加大小为330 N的轴向载荷，以模拟实际工况，该载荷为局部接触模型的等效载荷，用于表征典型啮合区域的受力状态。由于模型采用1/18扇形结构及单牙接触简化，其结果主要用于分析结构参数对局部承载性能的影响规律，而不直接用于整机载荷分配及额定承载能力的精确预测。接触分析采用罚函数接触算法，并设置摩擦因数为0.05。采用六面体网格划分有限元模型，整体网格尺寸为0.4 mm，将接触区域网格局部加密至尺寸为0.2 mm。局部加密的网格划分策略能够更有效地表征接触区域较大的应力梯度变化，同时兼顾计算精度与计算效率，在保证求解精度的基础上降低了计算成本。

2 承载性能试验设计

2.1 因素与指标选择

在完成IPRSM参数化建模与有限元模型简化的基础上，为保证各试验方案具有统一的结构基准，设置其基础结构参数，如表1所示。为研究关键牙廓参数对承载性能的影响，选取5个主要设计因素：螺母–滚柱螺纹圆弧半径比A、丝杠-滚柱螺纹圆弧半径比B、滚柱螺纹圆弧半径C、牙侧角D及螺距E。这些参数直接参与螺旋面几何构成与接触匹配，是影响接触应力分布、接触区域形态及载荷传递路径的核心变量。其中，螺母-滚柱与丝杠-滚柱圆弧半径比决定凹凸螺旋面曲率匹配，影响接触形式及应力集中；滚柱圆弧半径反映螺旋面局部曲率，对赫兹接



图2　参数化建模流程

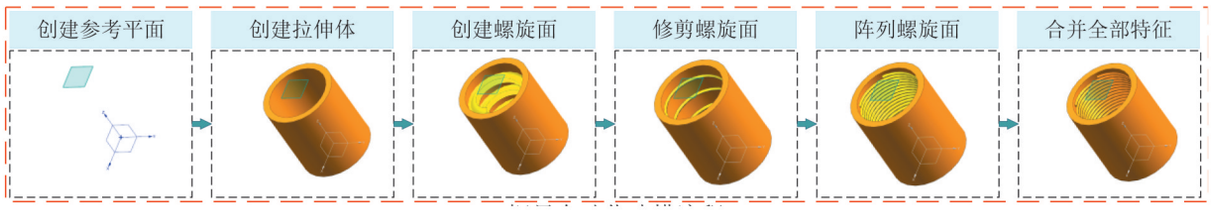
Fig. 2　Parametric modeling process

触特性起主导作用；牙侧角控制螺旋面法向方向及载荷路径，对等效应力分布影响显著；螺距影响螺旋面的空间展开方式，进而对接触区域和载荷分布产生作用。综合螺旋面几何、接触力学及参数可调性，选取上述5个参数作为正交试验因素，以系统分析承载性能。

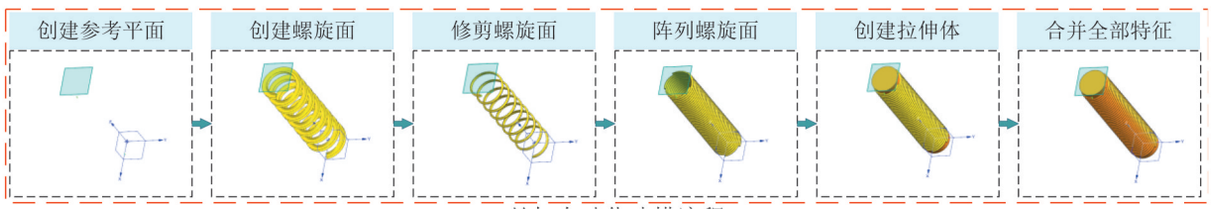
评价指标为接触位置的最大变形、最大等效弹性应变、最大等效应力及最大接触应力，均为“越小越优”型。这4类指标能够从结构刚度、材料强度和接触力学3个层面全面反映IPRSM的服役性能。最大变形反映整体结构刚度与宏观变形能力；等效弹性应变表征材料弹性变形协调程度；等效应力用于评估材料内部应力水平及失效风险；接触应力则直接反映螺旋接触界面的赫兹应力状态，是影响接触疲劳寿命的关键指标。

2.2　正交试验方案

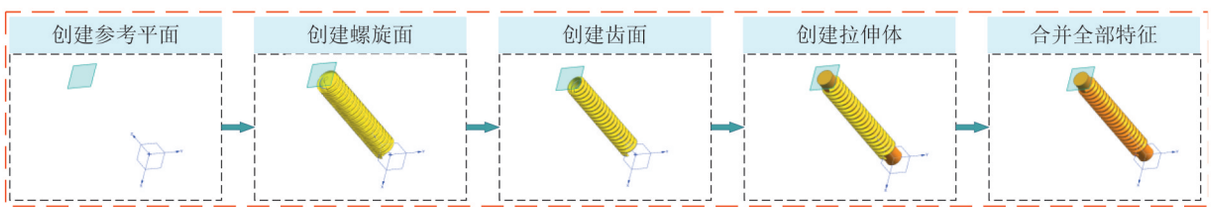
考虑到5个设计因素均具有多水平变化特征，为提高参数分析分辨能力并保证结果稳定性，本文在满足IPRSM几何啮合约束与结构可制造性要求的基础上，结合相关研究的参数取值范围，以基准结构参数为中心，进行对称扰动，并采用等间隔方式设置5个水平，以保证各因素在设计区间内变化的均匀性与可比性。各因素水平设置如表2所示。



（a）螺母自动化建模流程



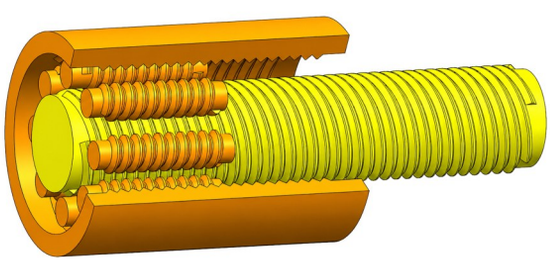
（b）丝杠自动化建模流程



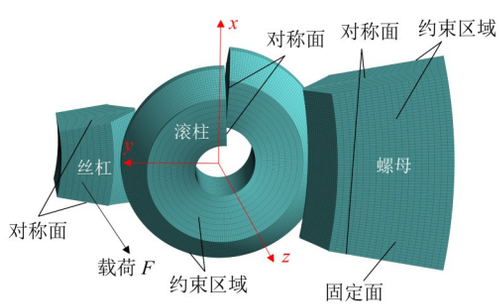
（c）滚柱自动化建模流程

图3 IPRSM建模流程

Fig. 3 IPRSM modeling process



（a）丝杠、螺母与滚柱三维模型



（b）有限元边界图

图4 IPRSM模型

Fig. 4 IPRSM model

试验采用标准正交表$L_{25}(5^6)$进行试验设计，得到25组参数组合。对每组组合，首先，基于参数化建模方法自动生成三维模型；然后，导入有限元软件进行接触分析，提取最大变形、最大等效弹性应变、最大等效应力及最大接触应力等评价指标；最后，对结果进行极差分析及综合评价，以揭示各设计因素对承载性能的影响规律。

表1 IPRSM基础结构参数

Tab. 1 IPRSM foundation structure parameters

参数	丝杠	滚柱	螺母
中径/mm	42	14	70
大径/mm	43. 4	15. 4	72. 6
小径/mm	39. 5	11. 8	68. 5
螺纹厚度/mm	2	2. 5	2
螺纹头数	5	1	5
外径/mm	—	—	45
弹性模量/MPa	2×10^5	2×10^5	2×10^5
泊松比	0. 3	0. 3	0. 3
材料牌号	GCr15		
许用接触应力/MPa	2300		

表2 正交试验因素及水平

Tab. 2 Orthogonal test factors and levels

水平	螺母-滚柱螺纹圆弧半径比A	丝杠-滚柱螺纹圆弧半径比B	滚柱螺纹圆弧半径C/mm	牙侧角D/(°)	螺距E/mm
1	2. 8∶1	2. 8∶1	9. 27	44. 8	5. 0
2	2. 9∶1	2. 9∶1	10. 27	44. 9	5. 1
3	3. 0∶1	3. 0∶1	11. 27	45. 0	5. 2
4	3. 1∶1	3. 1∶1	12. 27	45. 1	5. 3
5	3. 2∶1	3. 2∶1	13. 27	45. 2	5. 4

3 结果与讨论

3. 1 正交试验结果

正交试验得到的25组有限元结果如表3所示。为

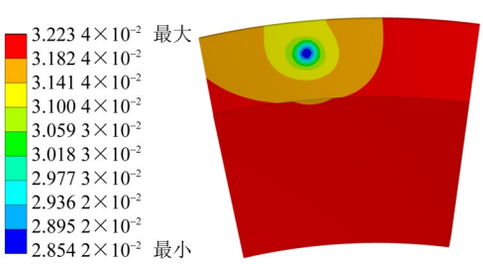
进一步揭示不同结构参数下接触区力学响应特征，提取各评价指标的极值工况，其有限元结果如图5所示。由表3和图5可知，在变形方面，丝杠-滚柱侧最大变形在30.184~32.234 μm，而螺母-滚柱侧在6.144~6.889 μm，约为前者的1/5，说明丝杠-滚柱侧在载荷作用下承受了更大的弯曲变形，应作为结构刚度设计的重点区域；在等效弹性应变方面，丝杠-滚柱侧的等效弹性应变在4.563 2×10^{-3}~5.598 1×10^{-3}，螺母-滚柱侧在3.759 1×10^{-3}~4.567 3×10^{-3}，总体上，丝杠-滚柱侧的局部变形相对分散；在等效应力方面，丝杠-滚柱侧的等效应力在912.1~1 110.2 MPa，螺母-滚柱侧在749.5~912.8 MPa，丝杠-滚柱侧的等效应力普遍更大，易出现应力集中；在接触应力方面，丝杠-滚柱侧的接触应力在1 535.6~2 042.1 MPa，螺母-滚柱侧在1 325.6~1 672.7 MPa，丝杠-滚柱侧承受更高的赫兹接触应力，是接触疲劳失效的主要风险区域。

表3 正交试验结果

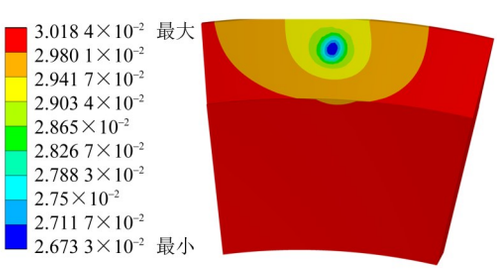
Tab. 3 Results of orthogonal test

方案	因素所在水平					结果							
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	δ^s/μm	δ^n/μm	ε^s_{vm}/10^{-3}	ε^n_{vm}/10^{-3}	σ^s_{vm}/MPa	σ^n_{vm}/MPa	σ^s_c/MPa	σ^n_c/MPa
1	1	1	1	1	1	32.133	6.529	4.936 8	4.232 3	986.8	814.5	1 753.3	1 435.5
2	1	2	3	4	5	31.122	6.522	4.678 3	4.205 3	933.3	834.3	1 809.0	1 585.9
3	1	3	5	2	4	30.389	6.202	4.838 6	3.759 1	967.4	751.6	1 785.6	1 390.8
4	1	4	2	5	3	30.987	6.889	5.598 1	4.334 6	1 110.2	865.2	1 804.9	1 554.5
5	1	5	4	3	2	31.058	6.467	4.897 3	3.768 5	979.1	751.4	1 681.4	1 344.2
6	2	1	5	4	3	30.184	6.484	4.573 5	3.973 2	913.6	794.2	1 677.2	1 509.9
7	2	2	2	2	2	31.654	6.453	4.840 1	4.128 5	967.3	806.3	1 620.0	1 484.1
8	2	3	4	5	1	31.097	6.869	4.687 5	3.954 1	937.0	789.9	1 550.0	1 476.0
9	2	4	1	3	5	31.929	6.516	4.996 0	4.133 6	998.9	820.7	1 914.6	1 551.0
10	2	5	3	1	4	31.260	6.201	4.781 8	3.963 5	955.4	786.4	1 858.9	1 465.4
11	3	1	4	2	5	30.977	6.173	4.783 1	3.899 1	951.4	770.5	1 640.2	1 325.6
12	3	2	1	5	4	31.964	6.725	5.178 8	4.306 1	1 035.3	860.3	1 855.8	1 566.4
13	3	3	3	3	3	31.159	6.411	5.021 3	3.918 5	1 004.0	775.1	1 777.7	1 591.4
14	3	4	5	1	2	30.592	6.180	4.563 2	3.881 6	912.1	749.5	1 569.4	1 391.2
15	3	5	2	4	1	31.777	6.685	4.864 1	4.110 1	971.8	811.7	1 662.1	1 502.0
16	4	1	3	5	2	31.240	6.717	4.732 2	4.149 2	945.3	829.6	1 535.6	1 438.6
17	4	2	5	3	1	30.792	6.529	4.775 0	3.816 8	954.2	761.5	1 597.8	1 402.8
18	4	3	2	1	5	31.407	6.144	4.954 0	4.150 5	990.4	797.5	1 803.8	1 592.5
19	4	4	4	4	4	30.682	6.433	4.653 3	4.054 0	929.8	810.6	1 702.5	1 479.1
20	4	5	1	2	3	32.234	6.399	5.043 7	4.307 5	1 008.5	828.9	2 042.1	1 626.1
21	5	1	2	3	4	31.665	6.288	4.766 8	4.094 2	947.0	818.6	1 916.9	1 672.7
22	5	2	4	1	3	31.010	6.150	4.610 5	4.039 1	921.3	777.4	1 749.0	1 456.3
23	5	3	1	4	2	32.219	6.671	5.118 6	4.217 7	1 023.1	829.5	1 779.1	1 495.9
24	5	4	3	2	1	31.501	6.461	4.872 5	4.120 8	974.1	790.4	1 659.6	1 461.5
25	5	5	5	5	5	30.426	6.572	4.714 2	4.567 3	939.4	912.8	1 806.2	1 462.1

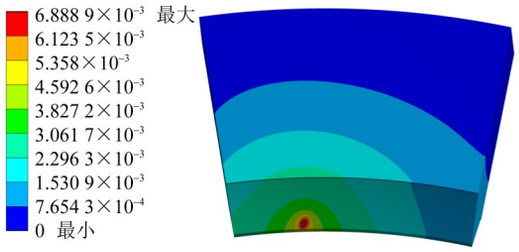
注：表中，δ^s为丝杠-滚柱侧最大变形；δ^n为螺母-滚柱侧最大变形；ε^s_{vm}为丝杠-滚柱侧最大等效弹性应变；ε^n_{vm}为螺母-滚柱侧最大等效弹性应变；σ^s_{vm}为丝杠-滚柱侧最大等效应力；σ^n_{vm}为螺母-滚柱侧最大等效应力；σ^s_c为丝杠-滚柱侧最大接触应力；σ^n_c为螺母-滚柱侧最大接触应力。



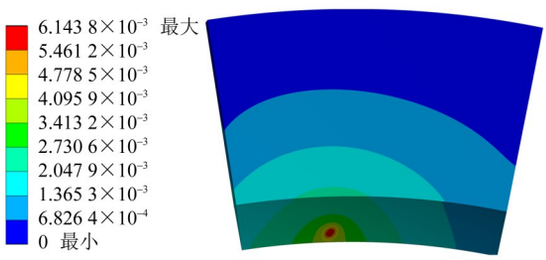
（a）丝杠侧最大变形最大值



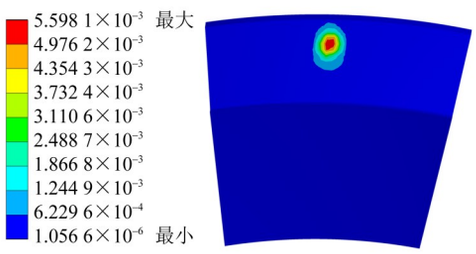
（b）丝杠侧最大变形最小值



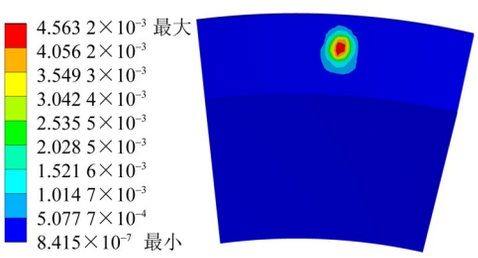
（c）螺母侧最大变形最大值



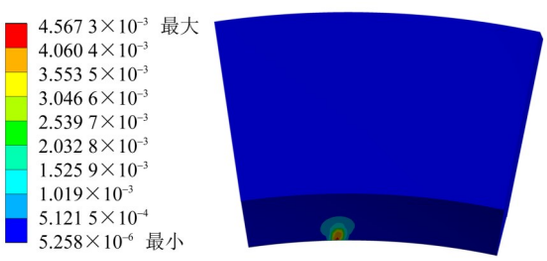
（d）螺母侧最大变形最小值



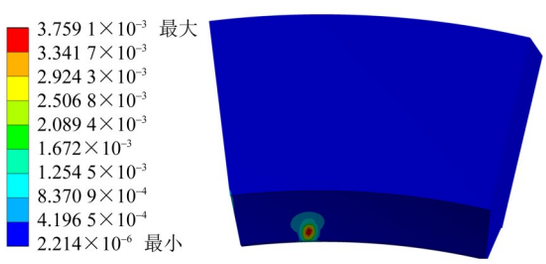
（e）丝杠侧最大等效弹性应变最大值



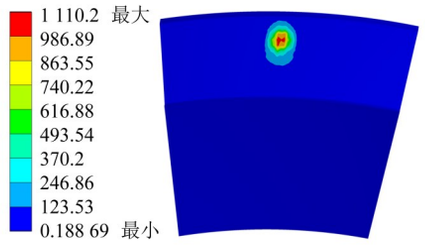
（f）丝杠侧最大等效弹性应变最小值



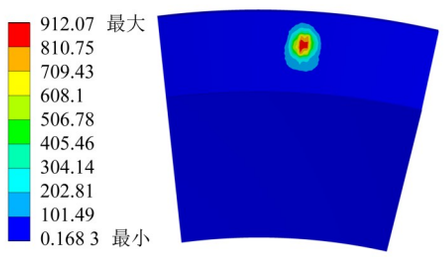
（g）螺母侧最大等效弹性应变最大值



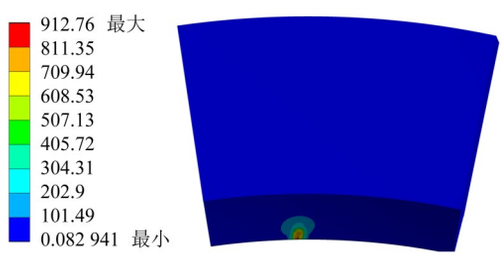
（h）螺母侧最大等效弹性应变最小值



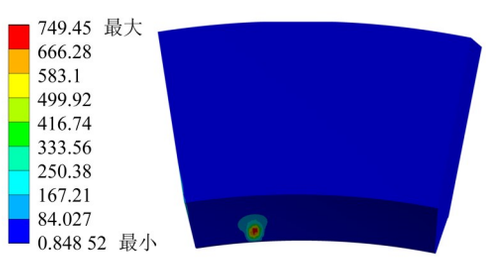
（i）丝杠侧最大等效应力最大值



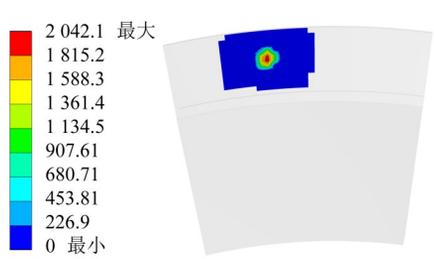
（j）丝杠侧最大等效应力最小值



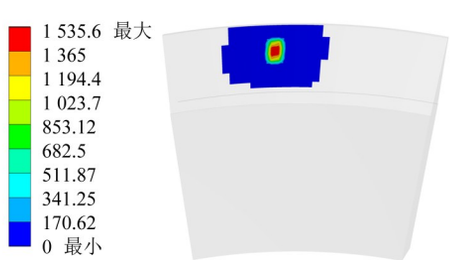
（k）螺母侧最大等效应力最大值



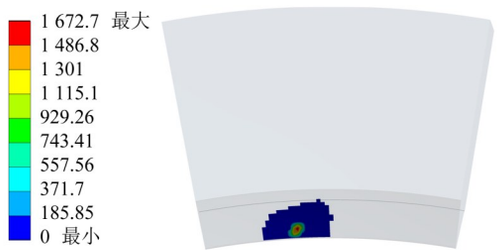
（l）螺母侧最大等效应力最小值



（m）丝杠侧最大接触应力最大值



（n）丝杠侧最大接触应力最小值



（o）螺母侧最大接触应力最大值



（p）螺母侧最大接触应力最小值

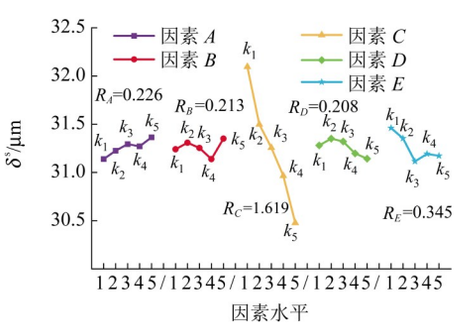
图5 各指标最大、最小值有限元结果

Fig. 5 The maximum and minimum values finite element results of each index

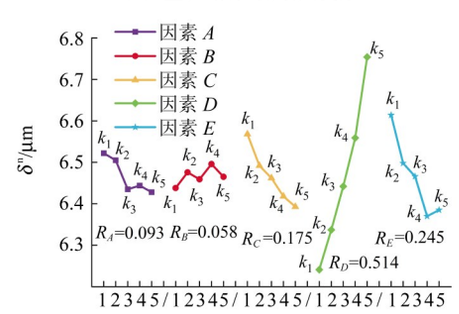
3.2 极差分析

极差分析可以直观地展现正交试验中各变量因素对结果的影响程度；极差越大，该因素的变化对试验结果的影响越显著，即该因素对结果越敏感，其权重也越大[24]。极差分析结果如图6所示。

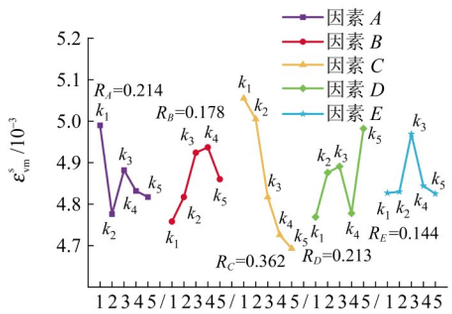
由图6可知，在不同性能指标下，各因素对丝杠-滚柱侧和螺母-滚柱侧的影响权重及最优参数组合存在差异。对于最大变形，丝杠-滚柱侧的主导因素为滚柱螺纹圆弧半径C和螺距E，而螺母-滚柱侧的主导因素为牙侧角D和螺距E，其最优组合分别为



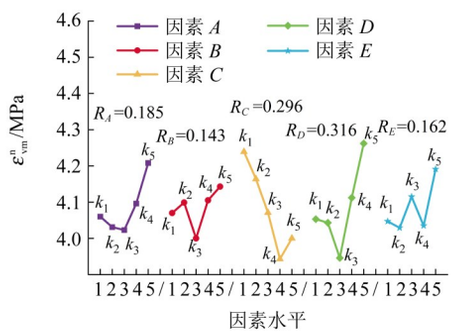
（a）丝杠-滚柱侧最大变形



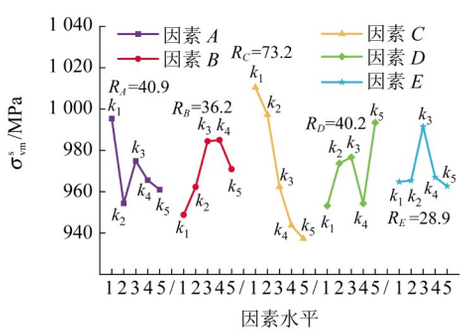
（b）螺母-滚柱侧最大变形



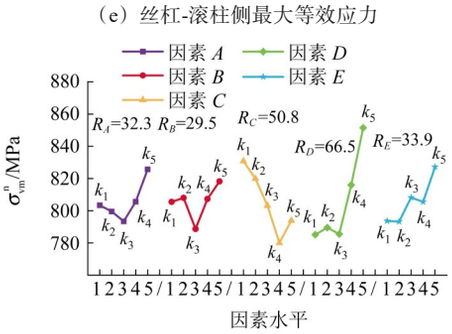
（c）丝杠-滚柱侧最大等效弹性应变



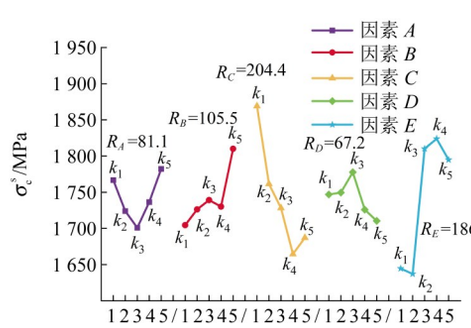
（d）螺母-滚柱侧最大等效弹性应变



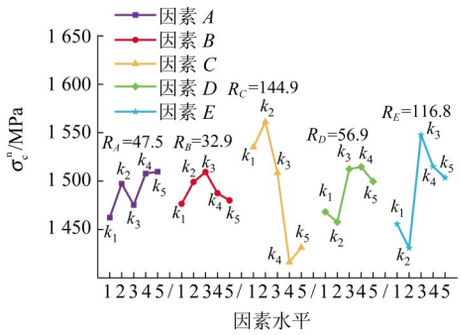
（e）丝杠-滚柱侧最大等效应力



（f）螺母-滚柱侧最大等效应力



（g）丝杠-滚柱侧最大接触应力



（h）螺母-滚柱侧最大接触应力

图6 极差分析结果

Fig. 6 Range analysis results

$A_1B_4C_5D_5E_3$与$A_5B_1C_5D_1E_4$；对于最大等效弹性应变，丝杠-滚柱侧以滚柱螺纹圆弧半径C为主导因素，螺母-滚柱侧以牙侧角D为主导因素，其最优组合分别为$A_2B_1C_5D_1E_5$与$A_3B_3C_4D_3E_2$；对于最大等效应力，丝杠-滚柱侧仍以滚柱螺纹圆弧半径C为主导因素，螺母-滚柱侧以牙侧角D为主导因素，其最优组合分别为$A_2B_1C_5D_1E_5$与$A_3B_3C_4D_1E_2$；对于最大接触应力，丝杠-滚柱侧主导因素为滚柱螺纹圆弧半径C与螺距E，螺母-滚柱侧主导因素为滚柱螺纹圆弧半径C与螺距E，其最优组合分别为$A_3B_1C_4D_5E_2$与$A_1B_1C_4D_2E_2$。产生差异的原因在于丝杠-滚柱侧与螺母-滚柱侧在结构几何、接触位置和受力特性上存在差异：滚柱螺纹圆弧半径C对局部曲率和承载能力影响最大，牙侧角D调节接触法线和载荷传递路径，螺距E影响螺旋面展开；不同指标反映的力学特性不同，例如，最大变形依赖整体刚度，而接触应力受局部曲率和接触面积主导，这表明单一指标难以表述整体规律，需要采用多指标综合评价方法进行参数优化。

3.3 综合最优方案确定

矩阵分析法适用于多指标影响因素的综合评估[25]。在本研究中，测试指标层矩阵记为$\boldsymbol{M}$。对于共计l个因素、m个水平的正交试验，k_{hj}代表h因素j水平的平均试验指标值。如果较高的指标值表示更好的性能，则将K_{hj}设置为k_{hj}；如果较低的指标值表示更好的性能，那么将K_{hj}设置为$1/k_{hj}$。此外，定义因子层矩阵$\boldsymbol{T}$和水平层矩阵$\boldsymbol{S}$，它们的分量T_h、S_h的计算式分别为

$$T_h = 1/\sum_{j=1}^{m} k_{hj} \tag{6}$$

$$S_h = s_h/\sum_{h=1}^{l} s_h \tag{7}$$

$\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}$分别表示为

$$\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{15} & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{25} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & & \cdots & \cdots & \cdots & & \cdots & & \cdots & \cdots & & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & K_{51} & K_{52} & \cdots & K_{55} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_5 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 \end{bmatrix} \tag{10}$$

定义影响试验指标的权重矩阵$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{MST}$，其可由式(8)~式(10)计算得出。

在确定了8个试验指标的权重ω_1、ω_2、ω_3、ω_4、ω_5、ω_6、ω_7和ω_8后，通过对这8个指标的权重取平均值，得到平均权重ω，即

$$\omega = \frac{1}{8}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \omega_7 + \omega_8) \tag{11}$$

然后，可得到包含平均权重信息的整体向量$\boldsymbol{A}$，即

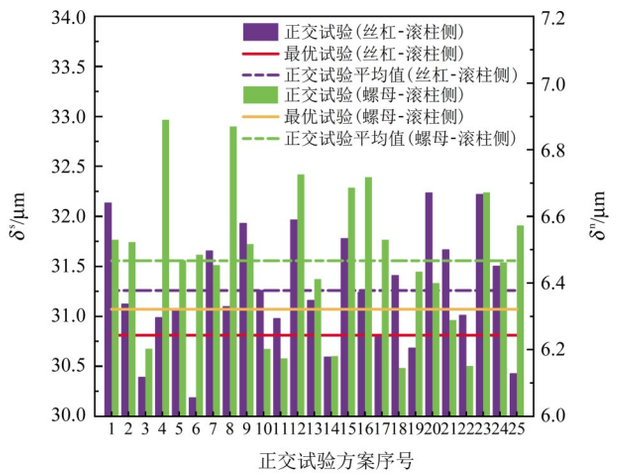
$$\begin{aligned} \boldsymbol{A} = [\, & A_1 \quad A_2 \quad A_3 \quad A_4 \quad A_5 \quad B_1 \quad B_2 \quad B_3 \quad B_4 \quad B_5 \\ & C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4 \quad C_5 \quad D_1 \quad D_2 \quad D_3 \quad D_4 \quad D_5 \quad E_1 \quad E_2 \quad E_3 \quad E_4 \quad E_5 \,]^{\mathrm{T}} = \\ & 10^{-3} \times [\, 27.69 \quad 28.15 \quad 28.08 \quad 27.91 \quad 27.66 \quad 24.66 \quad 24.42 \quad 24.37 \quad 24.24 \quad 24.10 \quad 63.30 \quad 64.31 \\ & 65.78 \quad 67.56 \quad 67.53 \quad 45.23 \quad 44.83 \quad 44.65 \quad 44.14 \quad 42.91 \quad 38.26 \quad 38.55 \quad 36.96 \quad 37.39 \quad 37.33 \,]^{\mathrm{T}} \end{aligned} \tag{12}$$

分析式(12)中的计算结果可知，IPRSM承载性能影响因素由强到弱依次为：滚柱螺纹圆弧半径C、牙侧角D、螺距E、丝杠-滚柱螺纹圆弧半径比B、螺母-滚柱螺纹圆弧半径比A，因素A_2、B_1、C_4、D_1、E_2的权重最大，最优参数组合为$A_2B_1C_4D_1E_2$，即螺母-滚柱螺纹圆弧半径比2.9∶1、丝杠-滚柱螺纹圆弧半径比2.8∶1、滚柱螺纹圆弧半径12.27 mm、牙侧角44.8°、螺距5.1 mm。

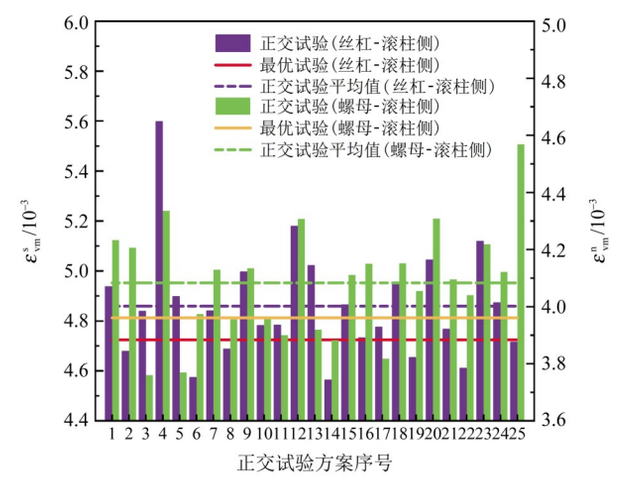
3.4 最优组合性能验证

本试验针对最优结构参数组合开展了有限元分析，最优组合试验与上述25组正交试验的各项指标对比结果如图7所示。结果显示，在螺母-滚柱侧，最优组合在最大接触应力和最大等效应力两项指标上表现最为突出，分别优于22组和20组正交试验数据；在最大变形与最大等效弹性应变方面，表现均优于18组试验方案，显示出明显的优化效果。在丝杠-滚柱侧，最优组合在最大接触应力上优于20组试验数据，

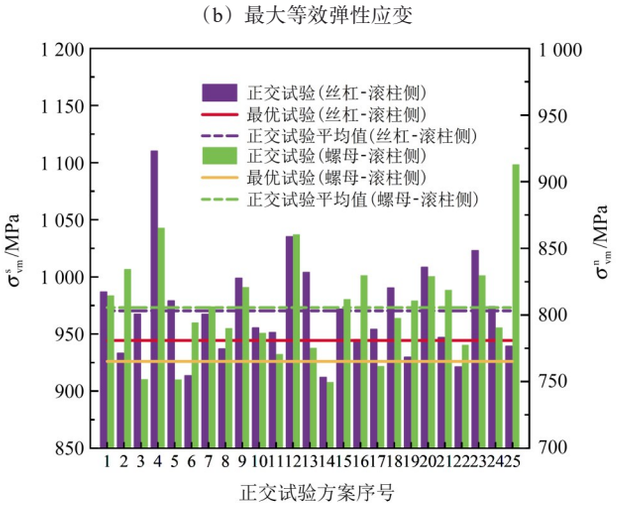
优化效果最为显著；在最大变形和最大等效弹性应变方面均优于18组试验方案；在最大等效应力方面优于17组试验方案。最优试验各指标均低于正交试验各指标平均值。由此可见，所得最优组合虽未在各单项评价指标上均达到全局最优，但其整体性能优于正交试验中的大部分方案，表现出较好的综合承载能力与多指标协调优化效果。这进一步验证了矩阵分析法在IPRSM多指标优化设计中的有效性。



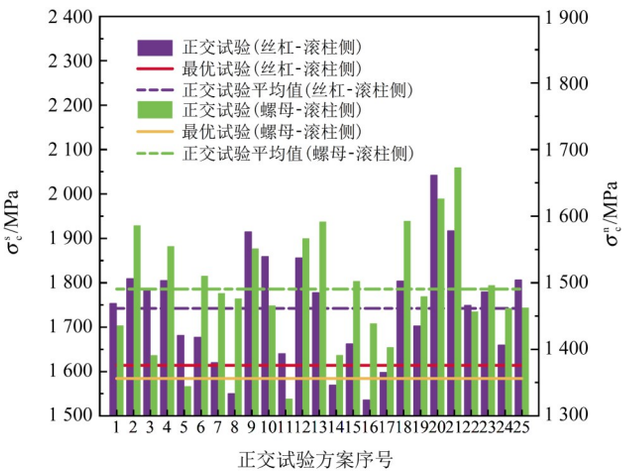
（a）最大变形量



（b）最大等效弹性应变



（c）最大等效应力



（d）最大接触应力

图7　正交试验与最优组合试验性能指标比较

Fig. 7　Performance index comparison between orthogonal test and optimal combination test

4　结论

针对凹凸接触型IPRSM开发了三维建模软件，进行了参数化计算，实现了数字化模型的快速构建。结合正交试验设计与有限元分析方法，系统研究了关键结构参数对IPRSM承载性能的影响规律，分析了局部赫兹接触状态及曲率匹配关系，并获得了优化的参数组合。最后，对优化前、后结构的承载性能进行了对比分析，验证了优化设计的有效性。主要研究内容与成果如下：

1）丝杠-滚柱侧的最大变形量约为螺母-滚柱侧的5倍，接触应力约为1.2倍。丝杠-滚柱侧是影响IPRSM接触疲劳寿命及承载能力的关键区域。

2）凹凸接触IPRSM的承载性能与接触副几何参数密切相关。滚柱螺纹圆弧半径对接触应力、应变及变形响应起主导作用，而牙侧角主要影响载荷分布及局部应力水平。合理匹配相关几何参数可改善接触曲率协调性，优化载荷传递路径，从而提高机构的承载性能。

3）不同结构参数对IPRSM承载性能的影响程度存在显著差异，其中，滚柱螺纹圆弧半径及凹凸接触曲率比起主导作用。合理的曲率匹配能够改善接触载荷分布、减弱应力集中，从而提升承载性能。最优参数组合实现了多项性能指标的协调优化，表现出较优的综合承载能力。

4）构建的凹凸接触型IPRSM参数化设计与多指标优化分析方法实现了从螺旋面参数化建模到接触性能评估的一体化设计流程，为IPRSM的快速设计

与工程优化提供了一种有效技术手段。

本文主要针对静态载荷条件下的承载性能进行了分析，尚未考虑离心力、摩擦发热及动态载荷等因素的影响。后续将结合多齿耦合接触模型，引入动力学分析方法，进一步研究复杂工况下凹凸接触反向式行星滚柱丝杠的承载特性与服役行为。

参 考 文 献

[1] Xing M C, Zhang B H, Deng P, et al. A comprehensive analysis of contact kinematics for planetary roller screw mechanism[J]. Tribology International, 2023, 179: 108127.

[2] Wang Y Z, Shang B L, Zhou D X, et al. Aviation armament system-of-systems modeling and identification method of vulnerable nodes based on interdependent network[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(12): 358-372.

[3] 乔冠, 陈佳琪, 唐术锋, 等. 行星滚柱丝杠副热特性研究综述[J/OL]. 中国机械工程, 2026-06-03. https://link. cnki. net/urlid/42. 1294. TH. 20250226. 1012. 004.
Qiao Guan, Chen Jiaqi, Tang Shufeng, et al. A review of thermal characteristics of planetary roller screw mechanism[J/OL]. China Mechanical Engineering, , 2026-06-03. https://link. cnki. net/urlid/42. 1294. TH. 20250226. 1012. 004.

[4] Li Z B, Li S, Luo X. An overview of calibration technology of industrial robots[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(1): 23-36.

[5] Gao X H, Wang L, Yu X Y, et al. Conditional probability based multi-objective cooperative task assignment for heterogeneous UAVs[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 123: 106404.

[6] Yu L H, Yao M. Don't forget the oldies: using IoT to connect the legacy medical equipments[J]. Critical Care, 2022, 26(1): 256-256.

[7] Yao Q, Zhang M C, Ma S J. Structural design for planetary roller screw mechanism based on the developed contact modelling[J]. Tribology International, 2022, 171: 107570.

[8] Yao Q, Zhang M C, Ma S J, et al. Study on multi-level progressive optimization of planetary roller screw mechanism[J]. Tribology International, 2023, 189: 109008.

[9] Hu R, Wei P T, Du X S, et al. Multi-objective optimization and accelerated experimental research on load distribution of planetary roller screw mechanism[J]. Tribology International, 2024, 199: 110046.

[10] Lepagneul J, Tadrist L, Sprauel J M, et al. Fatigue lifespan of a planetary roller-screw mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 172: 104769.

[11] Liu G S, Wei P T, Li H, et al. Toward a further understanding of planetary roller screw mechanism transmission accuracy: from component relocatable space to actual contact position to sliding-rolling kinematic characteristics[J]. Advanced Engineering Informatics, 2026, 69: 103884.

[12] Du X, Wu L Y, Miao J C, et al. Time-varying contact characteristics of the planetary roller screw mechanism considering nonuniform surface waviness[J]. Tribology International, 2023, 187: 108668.

[13] Du X, Lu S Y, Tang R, et al. An efficient method for designing high-performance planetary roller screw mechanism with low contact stress[J]. Tribology International, 2023, 187: 108709.

[14] Zhao J, Ma C B, Zhang Y Y, et al. Effect of tooth surface pitting on dynamic characteristics under mixed lubrication[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 167: 108961.

[15] Luo Y K, Xu L X. Contact dynamic modeling and corner contact analysis of the spur gear pair with pitch deviations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 227: 112377.

[16] 刘荣荣, 陈永洪, 杜兴, 等. 凸凹接触式行星滚柱丝杠的啮合承载特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(1): 49-57.
Liu Rongrong, Chen Yonghong, Du Xing, et al. Meshing and bearing characteristics of convex-concave contact planetary roller screw mechanism[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(1): 49-57.

[17] Wei Y F, He Y Y, Gu Z H, et al. Influence of laser-induced discrete hardening units on gear surface fatigue resistance: investigation from contact behavior and lubrication state[J]. Tribology International, 2025, 210: 110797.

[18] 乔冠, 张智杰, 刘永良, 等. 反向式行星滚柱丝杠副静态模型与承载特性研究[J/OL]. 工程设计学报, 2026-06-03. https://link. cnki. net/urlid/33. 1288. TH. 20260421. 0942. 004.
Qiao Guan, Zhang Zhijie, Liu Yongliang, et al. A static model and load-bearing characteristics of the inverted planetary roller screw mechanism[J/OL]. Chinese Journal of Engineering Design, 2026-06-03. https://link. cnki. net/urlid/33. 1288. TH. 20260421. 0942. 004.

[19] 蔡威, 刘更, 马尚君, 等. 基于乌鸦搜索算法的行星滚柱丝杠参数优化[J]. 工程科学学报, 2023, 45(6): 1013-1022.
Cai Wei, Liu Geng, Ma Shangjun, et al. Optimization research of planetary roller screw mechanism parameters based on crow search algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(6): 1013-1022.

[20] Zhai G J, Wei Z H, Ma Z, et al. Establishment and program development of failure criterion of hollow glass microspheres/epoxy resin composites based on tension/compression discrepancy[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 149: 107270.

[21] Zhou X R, He L. Research on brittle damage of turning tool with complex surface structure based on PD multi-scale discrete method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 150: 812-826.

[22] 周均健, 高艳娥, 谭为民. 分阶式四点接触齿轮滚刀的参数化设计[J]. 工具技术, 2023, 57(1): 77-82.
Zhou Junjian, Gao Yan'e, Tan Weimin. Parametric design of four point contact gears with ladder shape of teeth[J]. Tool Engineer-

ing，2023，57(1)：77-82.

[23] 廖应策，周均健，冯福笋，等. 髓腔锉刀加工路径参数化设计[J]. 工具技术，2025，59(2)：42-49.
Liao Yingce，Zhou Junjian，Feng Fusun，et al. Parametric design of machining path of medullary file[J]. Tool Engineering，2025，59(2)：42-49.

[24] Xu L S，Zhang Y，Zhang Z B，et al. Experimental investigation on thermal performance of self-service cold storage cabinet based on the orthogonal test[J]. Applied Thermal Engineering，2024，242：122315.

[25] Leng Y L，Hu Y，Xu M X，et al. Effects of vacuum hot-pressed sintering parameters on the microstructures and mechanical properties and process optimization of TiB_2p/Al7050 composites[J]. Journal of Alloys and Compounds，2023，938：168580.

Parametric design and load-carrying perdormance analysis of an inverted planetary roller screw mechanism with concave-convex contact

Liu Xin[1] Gao Peng[2] Chen Yonghong[3] Liao Yingce[1] Li Guiyuan[4] Li Lingling[1] Gao Yan'e[1]

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401120, China)

(3. State Key Laboratory of Mechanical Transmission for advanced equipment, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(4. Chery Automobile Co., Ltd., Wuhu 241009, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the insufficient load-bearing capacity of existing inverted planetary roller screws under high-load operating conditions, an inverted planetary roller screw with concave-convex contact was proposed for parametric design and load performance analysis. [Methods] Firstly, the mathematical model of the concave-convex contact inverted planetary roller screw was established, and parametric design software was developed to realize rapid modeling. Secondly, orthogonal tests were designed and finite element analyses were carried out to investigate the effects of five key parameters on the load performance, namely the arc radius ratio of nut - roller thread, the arc radius ratio of screw - roller thread, the thread arc radius of roller, thread flank angle and lead. Finally, the optimal parameter combination was obtained via range analysis and matrix analysis. [Results] The results show that the thread arc radius of roller is the dominant factor affecting the load performance of the concave-convex contact inverted planetary roller screw, followed by the thread flank angle and lead. The optimal parameter combination for load performance is 2.9∶1, 2.8∶1, 12.27 mm, 44.8° and 5.1 mm. The research findings can provide a reference for the design of inverted planetary roller screws.

Key words: Inverted planetary roller screw mechanism; Concave-convex contact; Parametric modeling; Orthogonal test; Finite element analysis （编辑：刘星泽）