

基于多圆弧拟合的轴承滚子修形曲线设计研究

张思颖¹ 许明贤^{2,3}

(1. 中国铁建重工集团股份有限公司, 长沙 410110)

(2. 洛阳轴承集团股份有限公司, 洛阳 471039)

(3. 航空精密轴承国家重点实验室, 洛阳 471039)

摘要:【目的】针对轴承圆柱滚子修形曲线的设计需求, 提出一种基于多圆弧拟合理想对数曲线的设计方法。【方法】首先, 以2段圆弧与理想对数曲线函数差的平方和最小为目标, 采用牛顿迭代法对其结构参数进行无约束优化; 其次, 在2段圆弧间构建相切圆弧, 以该圆弧与理想对数曲线函数差的平方和最小为目标, 结合2切点位于滚子有效长度内的约束, 构建惩罚项, 将有约束优化转化为无约束优化, 通过贪心算法优化相切圆弧参数; 最后, 对3种不同尺寸的滚子进行拟合验证, 并采用有限长线接触算法计算接触应力。【结果】结果表明, 由该方法获得的拟合曲线与理想对数曲线逼近度高, 且圆弧交点处函数连续; 滚子受载后接触应力分布接近理想状态。尽管交点处因曲率不连续存在轻微应力阶跃, 但最大接触应力出现的位置仍在滚子中部, 验证了该设计方法的合理性。

关键词: 轴承; 滚子; 修形曲线; 圆弧拟合; 优化; 有限长线接触; 接触应力

中图分类号: TH132 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.XXXX.XX.001

0 引言

轴承作为工业领域不可或缺的基础零部件, 广泛应用于各类机械产品中^[1-2]。据统计, 80%的轴承失效源于滚子破坏, 其中, 凸度设计不合理是核心诱因之一, 这会导致轴承承载能力远低于设计标准, 工作寿命远短于设计标准。滚子两端因应力集中, 易过早出现磨损, 最终引发整体失效^[3-4]。因此, 开展滚子表面素线修形方式研究, 成为确定滚子最佳凸度、提升轴承使用性能的关键途径。

1939年, Lundberg^[5]首次提出滚子表面修形理论, 通过对数曲线对滚子进行修形, 可实现接触应力沿滚子长度均匀分布, 有效改善了边缘应力集中导致的轴承早期失效问题。但受当时加工技术限制, 在该理论提出后的较长时期内, 对数曲线难以直接应用于滚子轮廓加工^[6]。为此, 业界逐步发展出多种圆弧修形方案, 其中, 相切圆弧滚子应用最为广泛^[7], 其结构为两端圆弧与中间直线衔接, 且直线与圆弧在衔接点保持相切, 确保轮廓平滑过渡。

随着技术进步, 对数修形滚子已在轴承领域被广泛应用, 但特大型对数曲线滚子仍面临加工效率低等难题^[8-10]。目前, 这类滚子多采用磨床加工, 通过将砂轮修整为多段圆弧来拟合理想对数曲线, 其

核心难点在于难以精确复现目标对数曲线轮廓; 同时, 磨削工艺流程中需要专门增设修整倒角工序, 以去除圆弧交点区域的多余材料, 而该工序的去除方法与去除量尚未有明确的相关规范, 最终导致加工效率偏低、质量稳定性不足。

为解决多圆弧拟合理想对数曲线精度难以控制的问题, 贾松阳等^{[11]-[12]}提出双圆弧修形方案, 以双圆弧修形曲线与理想对数曲线函数值差的平方和最小为目标, 优化双圆弧修形参数。但是, 该方法虽提升了拟合精度, 但仍未解决圆弧交点处曲线不连续的问题, 滚子磨削加工后期仍需要修整倒角工序, 未能从根本上突破现有技术瓶颈。

基于上述研究现状与现存问题, 本文提出圆柱滚子3圆弧修形方案。通过3段圆弧拟合理想对数曲线, 在保证修形曲线与理想对数曲线逼近度高的同时, 实现圆弧交点处的函数值连续, 从而降低应力集中程度, 省去后期人工修磨工序, 为特大型滚子高效、高精度加工提供新路径。

1 滚子修形曲线设计

目前, 圆柱滚子修形曲线主要包括4种常规类型: 全凸圆弧修形、相交圆弧修形、相切圆弧修形、

收稿日期: 2025-10-28 修回日期: 2025-12-02

作者简介: 张思颖, 男, 1993年生, 江西南昌人, 硕士, 工程师; 主要研究方向为机械结构优化设计; sixbar@foxmail.com。

引用格式: 张思颖, 许明贤. 基于多圆弧拟合的轴承滚子修形曲线设计研究 [J]. 机械传动, XXXX, XX (XX): 1-7.

Zhang Siying, Xu Mingxian. Research on bearing roller modification curve design based on multi-arc fitting [J]. Journal of Mechanical Transmission, XXXX, XX (XX): 1-7.



免费获取

对数修形^{[13][32][14]}，其数学表达式如图1所示。图1中， $z(x)$ 为滚子3圆弧曲线方程； r 为滚子圆角半径； L_w 为滚子总长度； L_{we} 为滚子有效长度， $L_{we} = L_w - 2r$ ；

D_{we} 为滚子公称直径； $A = -3.5 \times 10^{-4} D_{we}$ ； R_c 为圆弧修形的圆弧半径； l 为平直段母线长度； z 为滚子修形的凸度。

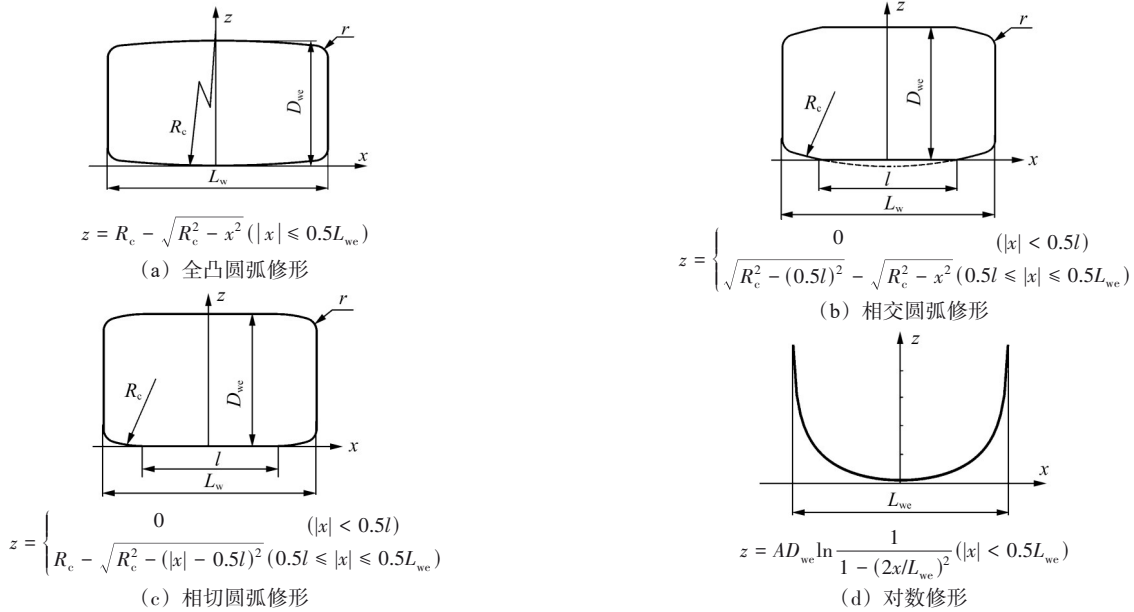


图1 圆柱滚子常规修形曲线

Fig. 1 Conventional modification curve of the cylindrical rollers

1) 全凸圆弧修形：滚子与滚道接触呈点接触特征，接触应力集中于滚子中部，适用于轻载工况，且可适应一定偏载^{[13][32]}。

2) 相交圆弧修形：圆弧与中间直线段交点处存在斜率突变，易产生类边缘应力集中，受力适应性优于直母线无修形，但弱于全凸圆弧修形。

3) 相切圆弧修形：圆弧与中间直线段交点处函数值连续，虽存在曲率阶跃，但通常无明显应力集中，是目前应用最广泛的修形方式^{[13][32]}。

4) 对数修形：滚子中部70%长度范围内凸度量接近直线，两端曲线陡峭，承载性能最优，且抗偏载能力强，但对加工精度要求极高。

中点为坐标原点，建立直角坐标系， x 轴沿滚子长度方向， y 轴沿滚子直径方向。修形曲线由圆弧 R_a 、圆弧 R_b 及圆弧 R_q 组成。圆弧 R_a 与圆弧 R_b 相交，交点的横坐标为 c ， $c = m \frac{L_{we}}{2}$ ；圆弧 R_q 分别与圆弧 R_a 、圆弧 R_b 相切，切点的横坐标分别为 x_1 、 x_2 。

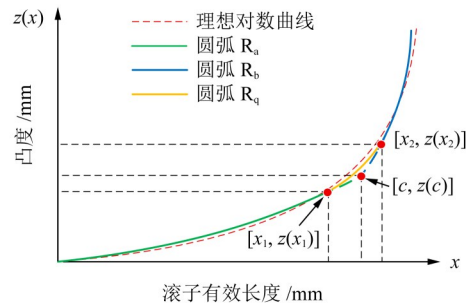


图2 3圆弧修形曲线

Fig. 2 Three-circular-arc modification curve

3圆弧修形曲线方程为

$$z(x) = \begin{cases} R_1 - \sqrt{R_1^2 - x^2}, & |x| \leq \frac{R_1 x_{oq}}{R_1 - R_q} \\ -\sqrt{R_q^2 - (|x| - x_{oq})^2} + y_{oq}; & \frac{R_1 x_{oq}}{R_1 - R_q} < x \leq \frac{R_2 x_{oq}}{R_2 - R_q}, -\frac{R_2 x_{oq}}{R_2 - R_q} \leq x < -\frac{R_1 x_{oq}}{R_1 - R_q} \\ R_1 - \sqrt{R_1^2 - c^2} + \sqrt{R_2^2 - c^2} - \sqrt{R_2^2 - x^2}; & \frac{R_2 x_{oq}}{R_2 - R_q} < x < \frac{L_{we}}{2}, -\frac{L_{we}}{2} < x < -\frac{R_2 x_{oq}}{R_2 - R_q} \end{cases} \quad (1)$$

式中， R_1 为圆弧 R_a 的曲率半径； R_q 为圆弧 R_q 的曲率半径； (x_{oq}, y_{oq}) 为圆弧 R_q 圆心的坐标； R_2 为圆弧 R_b 的曲率半径。

在式(1)中， R_1 、 R_q 、 R_2 、 x_{oq} 、 y_{oq} 、 m 均为未知

量， L_w 、 r 为已知量。为求解未知量，基于最优化理论，以式(1)与理想对数曲线函数值的偏差最小为目标，在方程函数值无限逼近理想对数曲线函数值的条件下，求得未知量的最优参数。该曲线与当前常

用的相切圆弧修形相比, 轮廓更接近理想对数曲线, 且因由圆弧构成, 更容易数控加工。

2.1 圆弧 R_a 、 R_b 修形曲线设计

滚子理想对数修形曲线方程为

$$z_0(x) = A \ln[1 - (2x/L_{we})^2] \quad (2)$$

式中, z_0 为滚子对数修形凸度。

在 x 轴正方向上, 设置圆弧 R_a 与圆弧 R_b 的一系列交点的横坐标值, 可表示为

$$c_i = (m_i \frac{L_{we}}{2}, 0) \quad (3)$$

式中, $m_i = \frac{b-a}{n}i + a$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$, 其中, n 为交点横坐标值的数量; a 、 b 为常数, 本文设置 $a = 0.5$ 、 $b = 0.9$ 。

$x \in [0, c_i]$ 时, 以圆弧 R_a 与理想对数修形曲线函数差的平方和最小为优化目标, 利用牛顿迭代法对圆弧 R_a 的曲率半径 R_{1i} (i 为优化次数) 进行无约束优化^{[15]59-60}。目标函数可表示为

$$V_{\text{objFun}_{1i}}(R_{1i}) = \sum_{j=1}^{l_1} [f_{1i}(x_j, R_{1i}) - z_0(x_j)]^2 \quad (4)$$

式中, $f_{1i}(x_j, R_{1i}) = R_{1i} - \sqrt{R_{1i}^2 - x_j}$; l_1 为区间 $[0, c_i]$ 的等分点数。

当 $x \in (c_i, \frac{L_{we}}{2})$ 时, 以圆弧 R_b 与理想对数修形曲线函数差的平方和最小为优化目标, 利用牛顿迭代法对圆弧 R_b 的曲率半径 R_{2i} 进行无约束优化。目标函数可表示为

$$V_{\text{objFun}_{2i}}(R_{1i}, R_{2i}) = \sum_{j=1}^{l_2} [f_{2i}(x_j, R_{1i}, R_{2i}) - z_0(x_j)]^2 \quad (5)$$

式中, l_2 为区间 $[c_i, \frac{L_{we}}{2})$ 的等分点数; $f_{2i}(x_j, R_{1i}, R_{2i}) = R_{1i} - \sqrt{R_{1i}^2 - c_i^2} + \sqrt{R_{2i}^2 - c_i^2} - \sqrt{R_{2i}^2 - x_j^2}$ 。

计算目标函数值之和, 有

$$V_{\text{sumFun}_i} = V_{\text{objFun}_{1i}}(R_{1i}) + V_{\text{objFun}_{2i}}(R_{1i}, R_{2i}) \quad (6)$$

改变 m_i 的值, 计算一系列 V_{sumFun_i} ($i = 0, \dots, n$), 找出 $\min(V_{\text{sumFun}_i})$ ($i = 0, \dots, n$) 对应的 $\min(R_{1i})$, $\min(R_{2i})$ 及 $\min(m_i)$ 。

2.2 圆弧 R_q 修形曲线设计

通过第 2.1 小节, 可以得到圆弧 R_a 、圆弧 R_b 的曲率半径 R_1 、 R_2 及与圆弧 R_a 、圆弧 R_b 交点有关的变量 m 。本小节在其基础上计算圆弧 R_q 的曲率半径 R_q 。

1) 优化模型的建立

由于圆弧 R_q 与圆弧 R_a 、圆弧 R_b 内切, 切点横坐标可表示为

$$x_1 = R_1 \frac{x_{\text{oq}}}{R_1 - R_q} \quad (7)$$

$$x_2 = R_2 \frac{x_{\text{oq}}}{R_2 - R_q}$$

当 $x \in [x_1, x_2]$ 时, 以圆弧 R_q 与理想对数修形曲线函数差的平方和最小为目标, 对 R_q 进行有约束优化, 得到圆弧 R_q 的曲率半径 R_q , 目标函数可表示为

$$V_{\text{objFun}_q}(R_q) = \sum_{j=1}^{l_3} [f_q(x_j, R_q) - z_0(x_j)]^2 \quad (8)$$

式中, $f_q(x_j, R_q) = -\sqrt{R_q^2 - (|x_j| - x_{\text{oq}})^2} + y_{\text{oq}}$; l_3 为区间 $[x_1, x_2]$ 的等分点数。为保证圆弧 R_q 与圆弧 R_a 、圆弧 R_b 的切点在 $[0, L_{we}/2)$, 需要对切点横坐标 x_1 、 x_2 建立约束条件, 可表示为

$$\begin{cases} g_1(R_q) = -R_q < 0 \\ g_2(R_q) = R_q - \min(R_1, R_2) < 0 \\ g_3(R_q) = R_2 x_{\text{oq}} - \frac{L_{we}}{2} (R_2 - R_q) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

x_{oq} 的表达式为

$$x_{\text{oq}} = \sqrt{(R_1 - R_q)^2 - (y_{\text{o1}} - y_{\text{oq}})^2} \quad (10)$$

y_{oq} 的表达式为

$$y_{\text{oq}} = \frac{(y_{\text{o1}}^2 - y_{\text{o2}}^2) - (R_1 - R_q)^2 + (R_2 - R_q)^2}{2(y_{\text{o1}} - y_{\text{o2}})} \quad (11)$$

式中, y_{o1} 、 y_{o2} 分别为圆弧 R_a 、圆弧 R_b 圆心的纵坐标, 它们的表达式分别为

$$\begin{cases} y_{\text{o1}} = R_1 \\ y_{\text{o2}} = R_1 - \sqrt{R_1^2 - c^2} + \sqrt{R_2^2 - c^2} \end{cases} \quad (12)$$

2) 优化模型的计算

利用惩罚函数法将有约束优化模型转化为无约束优化模型, 并利用贪心算法对无约束优化模型进行计算^{[15]138-140[16]}。

a) 初始迭代点 R_{q0} 的构建

根据约束条件(9), 初始迭代点可表示为

$$\begin{cases} R_{q0} = x_{\text{lb}} + \text{rand}(x_{\text{ub}} - x_{\text{lb}}) \\ R_2 x_{\text{oq}} - \frac{L_{we}}{2} (R_2 - R_{q0}) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $x_{\text{lb}} = 0$; $x_{\text{ub}} = \min(R_1, R_2)$; $\text{rand}(\cdot)$ 为随机数, $\text{rand}(\cdot) \in [0, 1]$ 。

b) 初始步惩罚因子 r_0 的构建

$$r_0 = \left| \frac{V_{\text{objFun}_q}(R_{q0})}{\sum_{k=1}^3 g_k(R_{q0})} \right| \quad (14)$$

c) 初始惩罚函数 $\Phi(R_q, r_0)$ 的构建

$$\Phi(R_q, r_0) = V_{\text{objFun}_q}(R_q) - r_0 \sum_{k=1}^3 \frac{1}{g_k(R_q)} \quad (15)$$

以 R_{q0} 为初始迭代点,利用贪心算法对 $\Phi(R_q, r_0)$ 进行无约束优化,得到 R'_{q0} 。

d) 下一步迭代因子 r_1 的构建

$$r_1 = sr_0 \quad (16)$$

式中, s 为惩罚因子缩减系数,其取值范围通常为0.1~0.7。

e) 下一步惩罚函数 $\Phi(R_q, r_1)$ 的构建

$$\Phi(R_q, r_1) = V_{\text{objFun}_q}(R_q) - r_1 \sum_{k=1}^3 \frac{1}{g_k(R_q)} \quad (17)$$

以 R_{q1} 为初始迭代点,利用贪心算法对 $\Phi(R_q, r_1)$ 进行无约束优化,得到 R'_{q1} 。

f) 收敛条件判定

若迭代过程满足式(18),则停止计算,得到 R'_{q0} ;否则,令 $r_0 = r_1$ 、 $R_{q0} = R_{q1}$,返回步骤c)进行计算。

$$\begin{cases} \left| \frac{\Phi(R_{q1}, r_1) - \Phi(R_{q0}, r_0)}{\Phi(R_{q0}, r_0)} \right| \leq \varepsilon_1 \\ |R_{q1} - R_{q0}| \leq \varepsilon_2 \end{cases} \quad (18)$$

式中,收敛系数 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1 \times 10^{-6}$ 。通过式(2)~式(18),即可找到未知量 R_1 、 R_q 、 R_2 、 m ,再将 R_1 、 R_q 、 R_2 代入式(10)~式(11),即可得到圆弧 R_q 对应的圆心坐标 x_{oq} 、 y_{oq} ,求出式(1)的所有未知量。图3为3圆弧修形曲线的计算流程图。

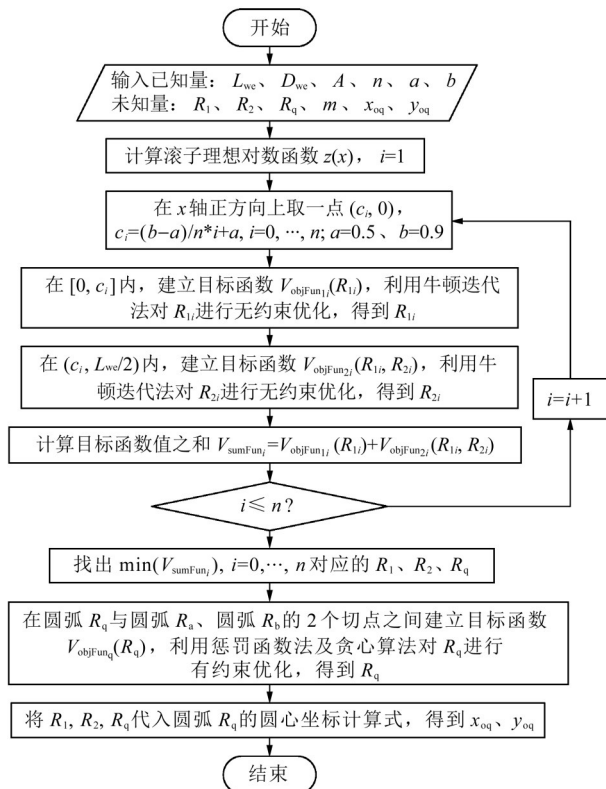


图3 计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart

2.3 修形曲线性能的验证

为验证修形曲线的承载性能,利用有限长线接

触理论,计算修形滚子与滚道之间的接触应力。有限长线接触问题一般方程为

$$\begin{cases} \frac{1}{\pi E'} \frac{P(x, y) dx dy}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} = \delta - Z(x, y) \\ \iint_S P(x, y) dx dy = F \end{cases} \quad (19)$$

式中, E' 为材料常数; $P(x, y)$ 为接触应力分布, $P(x, y) \geq 0$; F 为滚子所承受的载荷; δ 为发生弹性变形时,两物体的弹性趋近量; S 表示实际接触区域; (x, y) 、 (x', y') 为接触区域2个接触点的坐标; $Z(x, y)$ 为两接触表面间的初始距离函数,可表示为

$$Z(x, y) = z(x) + \frac{y^2}{D_{we} - z(x) + \sqrt{[D_{we} - z(x)]^2 - y^2}} \quad (20)$$

将不同修形曲线方向 $z(x)$ 代入式(19),即可得到对应的滚子接触应力分布 $P(x, y)^{[11]-2}$ 。

3 计算实例及分析

为验证计算过程的通用性,列举了3个不同尺寸的滚子进行计算所需要的输入参数,如表1所示。

表1 输入参数

Tab. 1 Input parameters

滚子编号	1	2	3
滚子公称直径 D_{we}/mm	110	60	40
滚子有效长度 L_{we}/mm	104	90	62
理想对数曲线修形系数 A	-0.038 5	-0.021 0	-0.014 0
滚子所承载荷 Q/kN	500	240	70

3.1 修形曲线计算

利用牛顿迭代法计算 R_1 、 R_2 时,将收敛精度设置为 1×10^{-6} 。经计算,目标函数为关于优化变量的单极值函数。因此,优化初始值对结果影响不大。将初始值设置为160 mm;利用贪心算法计算 R_q 时,将收敛精度设置为 1×10^{-6} 。3圆弧修形曲线参数优化结果如表2所示。

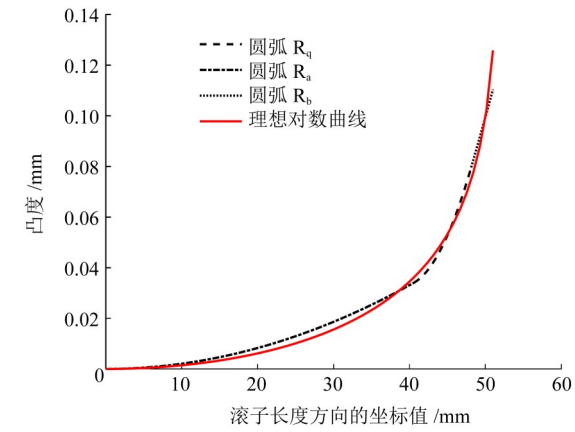
表2 3圆弧修形曲线参数优化结果

Tab. 2 Parameter optimization results of three-arc modification curve

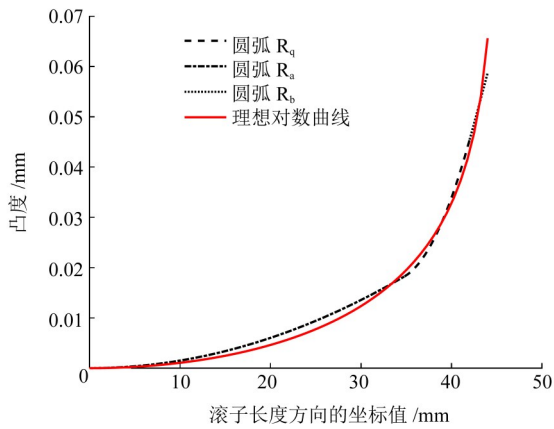
滚子编号	1	2	3
R_1/mm	24 182.41	33 201.61	24 567.41
R_q/mm	863.84	1 314.98	1 273.08
R_2/mm	4 264.34	6 447.78	5 841.07
m	0.85	0.85	0.82
x_{oq}/mm	39.14	33.44	21.89
y_{oq}/mm	863.88	1 315.49	1 273.42

3圆弧曲线能够很好地对理想对数曲线进行拟合,在圆弧 R_q 与圆弧 R_1 、 R_2 的交点处,曲线函数值

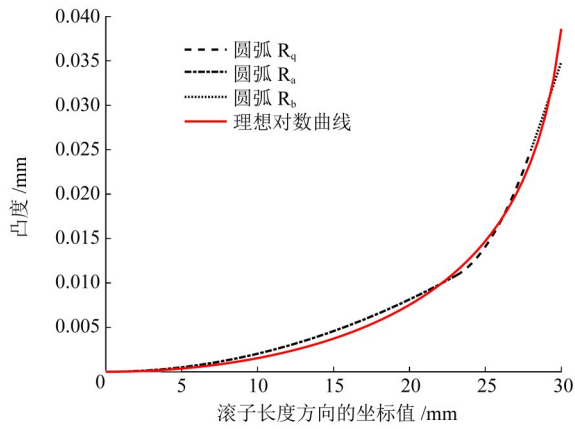
平滑过渡, 如图4所示。



(a) 滚子1



(b) 滚子2



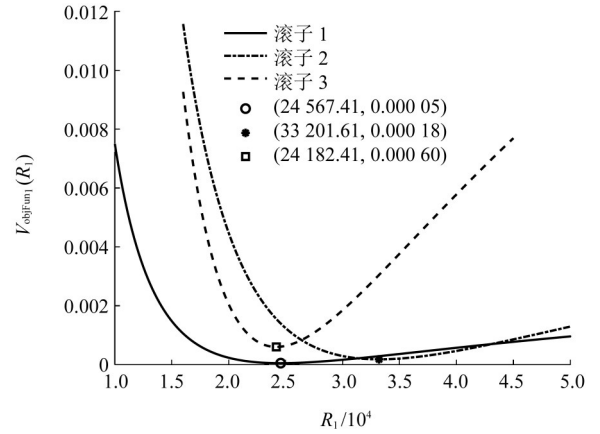
(c) 滚子3

图4 圆柱滚子轮廓修形曲线

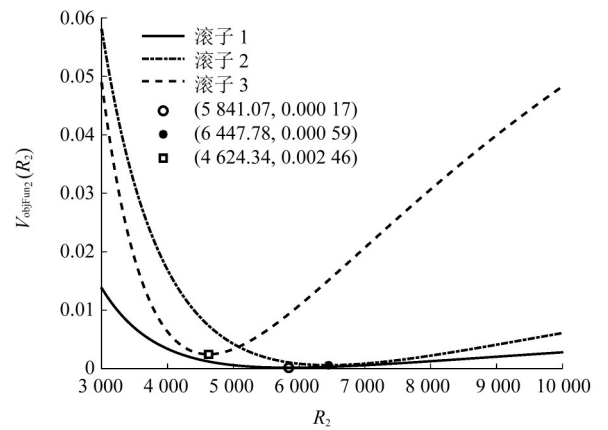
Fig. 4 Cylindrical roller profile modification curve

3.2 拟合精度分析

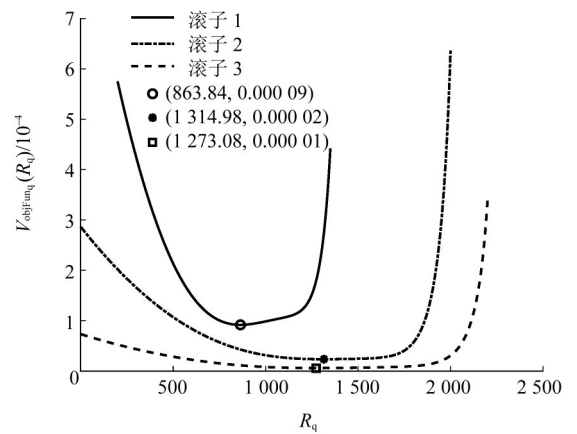
在优化过程中, 所建的目标函数体现了3圆弧修形曲线与理想对数曲线函数值的逼近程度。绘制目标函数随曲率半径的变化曲线, 并将表1中 R_1 、 R_2 、 R_q 的优化结果代入目标函数, 如图5所示。由图5可知, 在3个案例中, R_1 、 R_2 、 R_q 的优化结果均处于目标函数的极小值点, 使得3圆弧修形曲线与理想对数曲线函数值拟合误差最小。



(a) 目标函数 V_{objFun_1} 的极小值点



(b) 目标函数 V_{objFun_2} 的极小值点



(c) 目标函数 V_{objFun_q} 的极小值点

图5 修形曲线拟合精度分析

Fig. 5 Fitting accuracy analysis of the modification curve

3.3 接触应力计算

利用式(19)计算滚子修形后的接触应力分布, 如图6所示。在相同载荷条件下, 3圆弧曲线的接触应力分布接近理想对数曲线的接触应力分布, 接触应力最大值均出现在滚子中部。

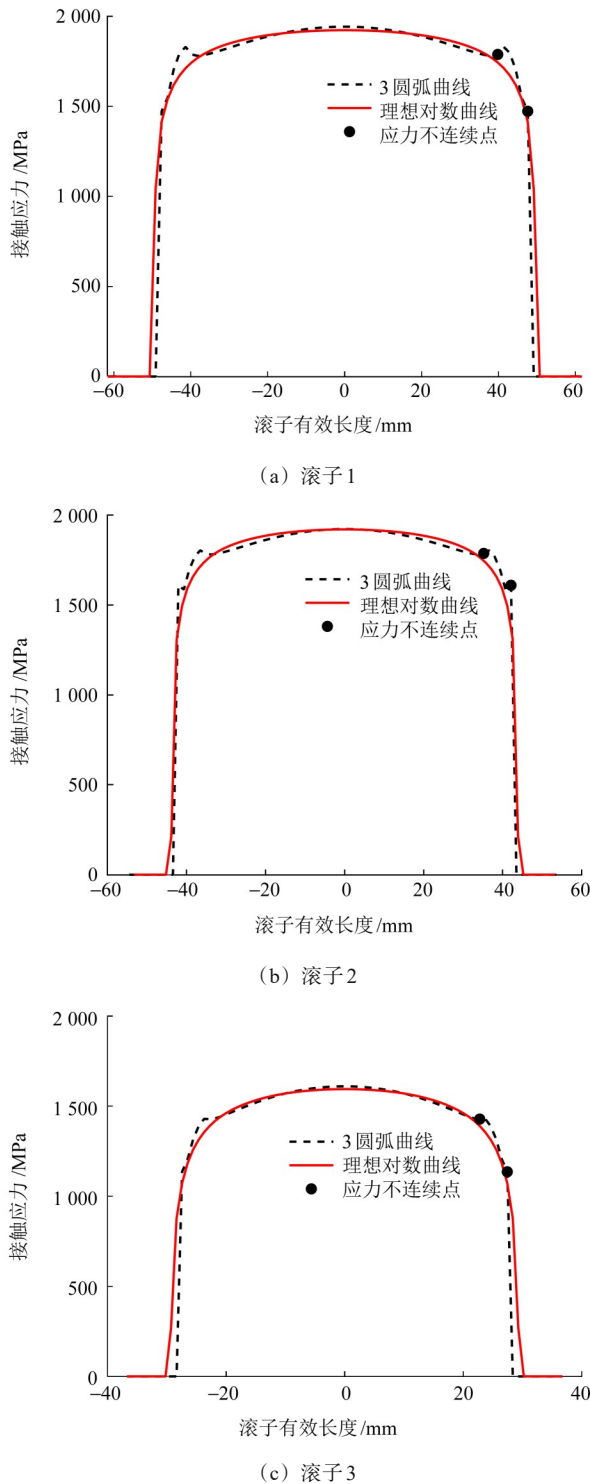


图6 圆柱滚子接触应力计算

Fig. 6 Calculation of contact stress for the cylindrical roller

在圆弧交点处,因圆弧曲率不连续,应力值存在少量阶跃,但数值未超过滚子中部的最大应力。

4 结论

提出一种轴承滚子3圆弧修形曲线计算方法。通过建立曲线参数的优化模型,得到修形曲线结构参数,并利用有限长线接触算法计算滚子修形后的接触应力。得出以下主要结论:

1) 该方法能够得到与理想对数曲线具有较高拟合度的圆弧曲线,保证圆弧曲线交点处的函数连续性。

2) 滚子受载后的接触应力分布接近理想对数曲线的接触应力分布,但在圆弧曲线交点处仍然存在因曲率不连续造成的轻微应力阶跃,数值未超过滚子中部的最大接触应力,能够满足较高精度的使用要求。

3) 利用该方法得到的修形曲线可以直接使用砂轮进行圆弧仿形磨削得到,或者采用硬车工艺,按照“圆弧 R_a 、圆弧 R_b 、圆弧 R_q ”这一加工顺序,通过车削得到。

参 考 文 献

- [1] 雷贤卿,张亚东,马文锁,等. 轴承滚子凸度轮廓的最小二乘拟合与误差评定[J]. 光学精密工程,2018,26(8):2039-2047.
Lei Xianqing, Zhang Yadong, Ma Wensuo, et al. Least square fitting and error evaluation of the convex contour of bearing roller [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 2039-2047.
- [2] 章滔,阳雪兵,何录忠,等. 风电机组回转支承滚子修形曲线设计方法研究[J]. 机械强度,2021,43(1):183-190.
Zhang Tao, Yang Xuebing, He Luzhong, et al. Research on the design method of roller modification curve for wind turbine [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(1): 183-190.
- [3] 杨凡,赵俊,张龙周. 滚子轮廓修形对圆柱轴承接触应力及寿命的影响[J]. 机械工程师,2019(3):136-141.
Yang Fan, Zhao Jun, Zhang Longzhou. Effect of roller profile modification on contact stress and life of cylindrical bearings [J]. Mechanical Engineer, 2019(3): 136-141.
- [4] 刘银伟,李政民卿,赵江,等. 斜撑离合器楔块外凸轮修形及其性能分析[J]. 机械传动,2023,47(11):135-140.
Liu Yinwei, Li Zhengminqing, Zhao Jiang, et al. Modification of the outer cam of sprags and performance analysis of sprag clutches [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(11): 135-140.
- [5] Lundberg G. Elastische berührung zweier halbräume [J]. Forschung Auf Dem Gebiet des Ingenieurwesens A, 1939, 10 (5) : 201-211.
- [6] 刘昌锋,李志新,冯浩原,等. 重卡轮毂轴承中滚子轮廓曲线的不对称修形[J]. 中国工程机械学报,2015,13(4):321-324.
Yan Changfeng, Li Zhixin, FENG Haoyuan, et al. Non-symmetric shape modification for roller profile of heavy-truck hub bearings [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2015, 13 (4) : 321-324.
- [7] 李庆玲. 圆锥滚子凸度超精研修形研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2014:12-13.
Li Qingling. Research on superfinishing modification of tapered roller crowing [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014: 12-13.
- [8] 张玉玲,秦昆阳,张天立. 特大型对数曲线调心滚子硬车削工艺

- [J]. 轴承, 2022(9):34-35, 50.
Zhang Yuling, Qin Kunyang, Zhang Tianli. Hard turning process for spherical roller with extra large size and logarithmic curve[J]. Bearing, 2022(9):34-35, 50.
- [9] 林国福, 石永, 徐占华, 等. 特大型圆柱、圆锥滚子凸度磨加工工艺分析[J]. 轴承, 2016(4):19-21.
Lin Guofu, Shi Yong, Xu Zhanhua, et al. Analysis on grinding technology for convexity of extra large size cylindrical and tapered rollers[J]. Bearing, 2016(4):19-21.
- [10] 马长春, 高作斌, 王瑞琨, 等. 圆柱滚子凸度超精导辊的包络法数控磨削研究[J]. 轴承, 2023(7):24-31.
Ma Changchun, Gao Zuobin, Wang Ruikun, et al. Research on enveloping NC grinding of guiding rollers for superfinishing convexity of cylindrical rollers[J]. Bearing, 2023(7):24-31.
- [11] 贾松阳. 滚子凸度轮廓的多圆弧拟合设计方法[J]. 轴承, 2020(11):1-5.
Jia Songyang. Multi arc fitting design method for crown profile of rollers[J]. Bearing, 2020(11):1-5.
- [12] 贾磊, 李云峰. 基于圆弧拟合的轴承滚子凸度最优设计研究[J]. 机电工程, 2020, 37(11):1356-1360.
Jia Lei, Li Yunfeng. Optimal design of bearing roller crown based on arc fitting[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(11):1356-1360.
- [13] 张思颖, 刘华, 陈浩林. 基于有限长线接触的圆柱滚子接触应力分析[J]. 铁道建筑技术, 2023(5):31-34.
Zhang Siying, Liu Hua, Chen Haolin. Contact stress analysis of cylindrical roller based on finite length line contact[J]. Railway Construction Technology, 2023(5):31-34.
- [14] 何贞志, 陈於学, 柳剑. 圆弧修形滚子-滚道接触变形计算的拟合方法[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(2):209-211.
He Zhenzhi, Chen Yuxue, Liu Jian. The fitting method for calculating the contact deformation between the circular crowned roller and the raceway[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(2):209-211.
- [15] 孙靖民, 梁迎春. 机械优化设计[M]. 5版. 北京:机械工业出版社, 2012:59-140.
Sun Jingmin, Liang Yingchun. Mechanical optimization design [M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2012:59-140.
- [16] 张德丰. MATLAB数值分析与仿真案例[M]. 北京:清华大学出版社, 2011:23-24.
Zhang Defeng. MATLAB numerical analysis and simulation case [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011:23-24.

Research on bearing roller modification curve design based on multi-arc fitting

Zhang Siying¹ Xu Mingxian^{2,3}

(1. China Railway Construction Heavy Industry Co., Ltd., Changsha, 410100, China)

(2. Luoyang bearing group Co., Ltd., Luoyang 471039, China)

(3. State Key Laboratory of Aviation Precision Bearings, Luoyang 471039, China)

Abstract: [Objective] To satisfy the design requirements for the crowned profile of cylindrical roller bearings, a design method based on multi-circular-arc fitting of the ideal logarithmic curve was proposed. [Methods] Firstly, taking the minimum sum of squared deviations between two circular arcs and the ideal logarithmic curve as the optimization objective, the Newton iteration method was adopted to perform unconstrained optimization of structural parameters. Secondly, a transitional tangent arc was arranged between the two arcs. With the minimum sum of squared deviations between the tangent arc and the ideal logarithmic curve set as the objective, penalty functions were introduced according to the constraint that two tangent points fall within the effective length of the roller to convert constrained optimization into unconstrained optimization, and the greedy algorithm was used to optimize parameters of the transitional tangent arc. Finally, fitting verification was carried out on rollers with three different dimensions, and the contact stress was calculated using finite-length line contact algorithm. [Results] The results indicate that the fitted curve obtained by the proposed method achieves high approximation to the ideal logarithmic curve with continuous function values at arc intersection points. The contact stress distribution of loaded rollers is close to the ideal condition. Although slight stress jumps occur at intersections due to discontinuous curvature, the maximum contact stress still appears near the roller midsection, which verifies the validity of the presented design method.

Key words: Bearing; Roller; Modification Curve; Arc Fitting; Optimization; Finite line contact; Contact Stress

(编辑: 刘星泽)