

基于 Kriging 模型的轴承结构参数 优化设计方法

冯吉路^{1,2}, 孙志礼¹, 李皓川¹, 田 越¹

- (1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819;
2. 山东省科学院 海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001)

摘 要: 轴承的生热率与轴承的使用寿命密切相关,为了减小轴承的生热率,以滚动轴承拟静力学分析和滚道控制理论为基础,求得轴承运转过程中的相关参数,进而得到轴承生热率.将轴承最小生热率为目标函数,通过 Kriging 模型和粒子群优化算法相结合的方式进行了轴承结构参数优化.对 NSK 7016A5 轴承的研究结果表明:轴承结构参数优化后,轴承整体和轴承内外圈生热率均变小. Kriging 模型和粒子群优化算法相结合的轴承结构参数优化方法取得了良好的设计效果,并且提高了轴承的设计效率.

关 键 词: 角接触球轴承; 生热率; 曲率半径; Kriging 模型; 粒子群优化

中图分类号: V233.4⁺51 **文献标志码:** A

Optimization design method of bearing structure parameters based on Kriging model

FENG Ji-lu^{1,2}, SUN Zhi-li¹, LI Hao-chuan¹, TIAN Yue¹

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Institute of Oceanographic Instrumentation,
Shandong Academy of Sciences, Qingdao Shandong 266001, China)

Abstract: There is a close relationship between heat generation rate and the life of the bearing. To decrease the heat generation rate of the bearing, associated parameters of the working bearing were obtained based on pseudo statics analysis and raceway control theory of the bearing, and then, the heat generation rate of the bearing was further acquired. The Kriging model and particle swarm optimization algorithm were proposed for optimizing structure parameters of the bearing to obtain the minimum heat generation rate of the bearing. Taking the NSK-7016A5 bearings as an example, the results show that the total heat generation rate of the bearing and inner and outer rings can be decreased after optimization of bearing structure parameters. The combination method of Kriging model and particle swarm optimization for optimizing bearing structure parameters could obtain satisfactory design re-

收稿日期:2015-07-09

基金项目:国家科技重大项目(2013ZX04011-011);中央高校基本科研业务费专项资金(N140306004)

作者简介:冯吉路(1988—),男,博士生,主要从事轴承动力学方面研究.

通讯作者:孙志礼(1957—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事机械结构可靠性方面研究.

引用格式:冯吉路,孙志礼,李皓川,等.基于 Kriging 模型的轴承结构参数优化设计方法[J].航空动力学报,2017,32(3):723-729.

FENG Jilu,SUN Zhili,LI Haochuan,et al. Optimization design method of bearing structure parameters based on Kriging model[J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(3):723-729.

sults, and increase bearing design efficiency as well.

Key words: angular contact ball bearing; heat generation rate; radius of curvature; Kriging model; particle swarm optimization

随着装备制造业向着高速度、高精度和高自动化程度的不断发展,轴承作为基础支撑功能部件,其在提供支撑刚度、承载能力及其组成的转子系统的回转精度方面发挥了重要的作用^[1]. 轴承作为转子系统的主要生热部件,其生热率的过大会导致轴承温度升高异常,从而热位移量变大,进而影响轴承转子系统的回转精度^[2-5]. 同时,轴承温度升高异常也会造成接触面材料回火软化,导致轴承过早疲劳失效. 轴承的结构参数将会影响轴承的生热率,而降低轴承的生热率有利于延长轴承的使用寿命. 因此,轴承结构参数的优化应该引起相关研究者的重视.

目前,科研人员对结构优化进行了大量的研究,而结构优化算法成为了研究的焦点. 其中,对实际工程问题建立响应面近似模型进行结构优化的方法得到了广泛的应用,建立近似模型的主要方法有多项式响应面模型、人工神经网络近似方法和 Kriging 模型^[6-7]. 人工神经网络需要大量的设计样本和神经网络的训练迭代来提高近似模型的精度. 多项式响应面模型虽然计算量小,但对于非线性程度较高的问题,该模型的拟合精度较差^[8-9]. 相比之下, Kriging 模型对处理非线性程度较高和局部响应突变的问题具有较好的效果,并不需要大量的设计样本点. 在处理多目标优化问题时,粒子群优化算法是通过群体中的每个个体间的相互作用来实现全局寻优,并且粒子群优化算法被广泛应用于结构总体参数优化^[10-12]. 虽然 Kriging 模型与智能算法相结合的方式在焊接领域作为优化焊接工艺参数的方法得到了广泛的应用,如文献^[13-15]所示,但此方法并没有在轴承结构参数优化方面得到应用. 同样,轴承生热率是影响轴承性能的重要指标,鲜有研究人员以轴承的最小生热率为优化目标对其结构参数进行优化研究.

本文采用本文采用 Kriging 模型和粒子群优化算法相结合的方法,进行了角接触球轴承结构参数优化;通过拉丁超立方抽样选取设计样本点,将样本点进行 Kriging 函数拟合确定目标函数,再应用粒子群优化算法进行寻优. 对比优化前后轴承的生热率,验证了所提方法的正确性和有效性.

1 轴承结构参数优化设计模型

1.1 轴承生热计算模型

轴承的摩擦热主要由轴承滚动体和轴承内外圈滚道的摩擦产生. 根据 Palmgren^[16] 的摩擦力矩经验公式可知,轴承的摩擦力矩 M 由两部分组成,分别是空载时润滑油黏性产生的摩擦力矩 M_v 和外载荷产生的摩擦力矩 M_l . 外载荷相关的摩擦力矩 M_l 可表示为

$$M_l = f_1 F_\beta D_m \quad (1)$$

式中 D_m 是轴承的节径; F_β 为轴承摩擦力矩的计算载荷,主要取决于力的大小和方向; f_1 为与轴承类型和所受的载荷相关的系数.

Harris 提出了评估与润滑油黏性相关的摩擦热的经验公式

$$\begin{aligned} M_v &= 10^{-7} f_0 (\nu_0 n)^{2/3} D_m^3 & \nu_0 n &\geq 2000 \\ M_v &= 160 \times 10^{-7} f_0 D_m^3 & \nu_0 n &< 2000 \end{aligned} \quad (2)$$

式中 n 为转速; ν_0 为工作温度下润滑剂的运动黏度; f_0 为与轴承的类型和润滑方式相关的经验常数. 由于运动黏度与温度是相关的,因此,计算时应该取平均润滑温度时所对应的润滑剂运动黏度.

自旋摩擦力矩是引起摩擦热的另一个重要原因,内外圈沟道接触区自旋摩擦力矩分别为

$$M_{si} = \frac{3\mu_{si} Q_i a_i \Sigma_i}{8} \quad M_{so} = \frac{3\mu_{so} Q_o a_o \Sigma_o}{8} \quad (3)$$

式中 μ 为滚动体与沟道接触区的自旋摩擦因数, Q 为滚道与沟道法向接触载荷, a 为滚道赫兹接触椭圆长半轴, Σ 为滚道接触区第 2 类椭圆积分.

由于离心作用,轴承内外接触角不同. 因此,滚动体与轴承内外圈滚道的接触摩擦不同,可将摩擦力矩 M 等效地分为内圈分量 M_i 和外圈分量 M_o . 然后将其转换成各个滚动体接触区的局部分量为

$$\begin{aligned} M_{ij} &= \frac{1}{Z} \cdot \frac{D_w}{D_{oo}} \left[5 \times 10^{-8} f_0 (\mu \omega)^{2/3} D_m^3 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} f_1 \left(\frac{F_{si}}{C_s} \right)^{1/3} F_{\beta i} D_m \right] \\ M_{oj} &= \frac{1}{Z} \cdot \frac{D_w}{D_{oi}} \left[5 \times 10^{-8} f_0 (\mu \omega)^{2/3} D_m^3 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} f_1 \left(\frac{F_{so}}{C_s} \right)^{1/3} F_{\beta o} D_m \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中 D_w 为滚动体直径; Z 为滚动体个数; F_s 为当量静载荷; C_s 为基本额定静载荷; D_{oi} , D_{oi} 分别为内、外圈滚道与滚动体接触点的直径。

接触区的生热率与接触区摩擦力矩及旋转速度有关,滚动体与内外圈滚道接触区的生热率分别为

$$H_{ij} = \omega_{\text{roll}} M_{ij} + \sum_{j=1}^z (\omega_{\text{si}j} M_{\text{si}j}) \tag{5}$$

$$H_{oj} = \omega_{\text{roll}} M_{oj} + \sum_{j=1}^z (\omega_{\text{so}j} M_{\text{so}j})$$
$$\omega_{\text{roll}} = \omega_c \frac{D_m}{D_w} \tag{6}$$

式中 ω_{roll} 为轴承的旋转速度; $\omega_{\text{si}j}$, $\omega_{\text{so}j}$ 分别为第 j 个滚动体与内外圈滚道的接触旋转速度。

接触区的总生热率 H 为内外圈生热率之和, 总生热率为

$$H = H_{ij} + H_{oj} \tag{7}$$

1.2 优化目标函数

在分析轴承生热率计算时,忽略轴承滚动体与轴承保持架间的摩擦作用生热,可将角接触球轴承简化为轴承内外圈以及滚动体组成的结构如图 1 所示. 由式(5)~式(7)可知,决定轴承总生热率的轴承主要结构参数分别为轴承内外圈滚道的曲率半径 ρ_i 和 ρ_o 、轴承接触角 α_0 、轴承内圈滚道直径 D_i 及轴承外圈滚道直径 D_o 。

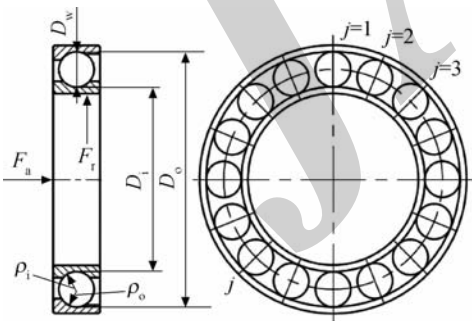


图 1 角接触球轴承剖面图

Fig.1 Sectional drawing of angular contact ball bearing

在不影响轴承使用性能的前提下,降低轴承生热率有助于延长轴承的使用寿命. 通过调节轴承的结构参数 ρ_i , ρ_o , α_0 和 D_m 能够改变轴承生热率. 由于轴承的外载荷和转速会影响轴承的生热率,因此,在进行结构参数优化时不考虑外载荷和转速变化对轴承生热率的影响. D_m 为轴承节径,是轴承内外圈滚道直径之和的一半. 本文中为了减小计算量,将轴承的内圈滚道直径设为固定值,

因此, D_m 的大小仅由轴承外圈滚道直径 D_o 决定. 轴承结构参数的取值如表 1 所示. 此时,轴承接触角与轴承的结构参数 ρ_i , ρ_o 和 D_o 有关,其表达式如下:

$$\cos \alpha_0 = 1 + \frac{D_i + 2D_w - D_o}{2(\rho_i + \rho_o - D_w)} \tag{8}$$

式中 D_w 为滚动体直径,其取值由国标决定.

表 1 轴承设计变量的取值范围
Table 1 Value of bearing design variables

设计变量	均值	方差
ρ_i/mm	7.101	0.005
ρ_o/mm	6.966	0.005
D_o/mm	116.035	0.01

根据轴承结构参数的取值范围,可以建立以轴承结构参数为约束,轴承最小生热率为目标函数的优化问题模型,其数学表达式为

$$\begin{aligned} \min H_{\text{heat}} &= f(\rho_i, \rho_o, \alpha_0, D_o) \\ \text{s. t.} \quad &7.096 \leq \rho_i \leq 7.116 \\ &6.951 \leq \rho_o \leq 6.981 \\ &116.005 \leq D_o \leq 116.065 \end{aligned} \tag{9}$$

式中约束条件分别 ρ_i , ρ_o 和 D_o ,其取值范围通过 3σ 取值原则求得. f 表示计算轴承生热率的目标函数,其函数的拟合可以通过 Kriging 方法得到.

1.3 Kriging 方法

Kriging 模型是一种半参数化的插值模型,不需要给出状态函数的具体形式,这样可以使模型的预测精度不受假定函数形式的影响. 另外, Kriging 模型可以应用于强非线性问题. Kriging 模型^[17]表示为

$$g(x) = f^T(x)\beta + z(x) \tag{10}$$

式中 $f^T(x)\beta$ 为回归模型, β 为回归系数, $f(x)$ 为随机变量 x 的多项式函数,通常可以取固定值,其取值的大小并不影响模型的近似精度.

$z(x)$ 是随机过程函数,反映局部偏差的近似,它的均值 μ 是零,方差是 σ^2 ,协方差矩阵表示为

$$\text{cov}[z(x_i), z(x_j)] = \sigma^2 R(x_i, x_j) \tag{11}$$

式中 $R(x_i, x_j)$ 是带有参数 θ 的关于样本点 x_i 和 x_j 的相关函数,模型的准确性取决于随机过程 $z(x)$, 相关函数通常选用高斯相关方程,其表达式如下:

$$R(x_i, x_j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^{n_s} \theta_k |x_k^i - x_k^j|^2\right) \tag{12}$$

式中 n_s 为随机变量的个数, x_k^i 与 x_k^j 分别为样本点 x_i 与 x_j 的第 k 个分量. θ_k 是相关性参数,有相

关函数的极大似然估计确定,即

$$\theta = \min_{\theta} [(\det \mathbf{R})^{1/m} \hat{\sigma}^2] \tag{13}$$

给定训练样本集合 $\mathbf{S}=[x_1,x_2,\cdots,x_{n_s}]$, 计算相应的实际功能函数响应值,将其用向量形式表达为

$$\mathbf{Y} = [g(x_1),g(x_2),\cdots,g(x_{n_s})]^T \tag{14}$$

式中 β 和 σ^2 的估计值为

$$\hat{\beta} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{g} \tag{15}$$

$$\hat{\sigma}_z^2 = \frac{1}{N_0} (\mathbf{g} - \beta \mathbf{F})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{g} - \beta \mathbf{F}) \tag{16}$$

式中 N_0 是向量的维数.

通过 Kriging 模型,得到待测点 x 的预测响应值为

$$\hat{g}(x) = \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(x) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{f} \hat{\beta}) \tag{17}$$

其中

$$\mathbf{f} = [f(x_1),f(x_2),\cdots,f(x_{n_s})]^T \tag{18}$$

$$\mathbf{r}(x) = [R(x,x_1),R(x,x_2),\cdots,R(x,x_{n_s})]^T \tag{19}$$

Kriging 方差为

$$\hat{\sigma}_g^2(x) = \hat{\sigma}^2 \{1 - \mathbf{r}^T(x) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}(x) + \mathbf{u}^T(x) [\mathbf{f}^T(x) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{f}(x)]^{-1} \mathbf{u}(x)\} \tag{20}$$

其中 $\mathbf{u}(x) = \mathbf{f}^T(x) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}(x) - 1$.

建立 Kriging 近似方程后,要用过比较估计值和真实值之间的差异来确定模型的好坏. 常用的近似模型检验方法有复相关系数(R^2)、修正的复相关系数(adjusted R^2)、方均根误差(RMSE)等.

1.4 粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种基于种群的智能算法,种群的每一个成员被称之为粒子,代表一个潜在的可行解. 在模拟鸟群寻找食物的最佳位置组合时,群粒子在飞行过程中不断向最优解靠近,最终找到最优解. 对于粒子群中的任意粒子,第 k 次更新时的位置和速度分别为 x_d^k 和 v_d^k 时: 粒子第 $k+1$ 次迭代的速度和位置可描述为

$$\mathbf{v}_d^{k+1} = \omega \mathbf{v}_d^k + c_1 r_1 (\mathbf{p}_d^k - \mathbf{x}_d^k) + c_2 r_2 (\mathbf{p}_g^k - \mathbf{x}_d^k) \tag{21}$$

$$\mathbf{x}_d^{k+1} = \mathbf{x}_d^k + \mathbf{v}_d^{k+1} \tag{22}$$

式中 ω 为惯性系数; c_1 和 c_2 为权重系数,通常取 $c_1=c_2=2$; r 表示约束系数, r_1, r_2 是 $[0,1]$ 之间的随机数. 位置矢量 $\mathbf{p}_d^k$ 为粒子在自身更新 k 次后的最佳位置,被称为 P-best; $\mathbf{p}_g^k$ 为粒子群中 k 次更新出现的最好粒子位置,被称为 G-best.

目前,采用较多的动态惯性权重值是线性递减权重策略,其表达式如下^[18]:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} \times k \tag{23}$$

式中 $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 代表惯性系数的最大和最小值.

为了避免粒子群陷入局部最优,采用自适应变异方法对粒子的位置进行调整,其表达式如下:

$$x(i,j) = x_{\max} \times \text{rand} \tag{24}$$

其中 $i = m \cdot \text{rand}_0$, m 为种群规模.

2 轴承结构参数的优化算法和程序

根据上述分析,提出了以最小生热率为优化目标的轴承结构参数优化方法. 根据已知轴承的结构参数,选择合理的均值和方差进行拉丁超立方抽样. 将样本数据作为初值进行轴承非线性方程组求解,从而进一步求得对应初值的轴承接触区的总生热率. 根据生热率的计算结果,应用 Kriging 进行目标函数拟合,将拟合函数作为粒子群优化算法的各粒子目标函数,对粒子群进行个体和全局寻优. 当迭代次数达到最大值时,迭代结束,得到轴承结构参数的优化结果. 轴承结构参数优化流程如图 2 所示.

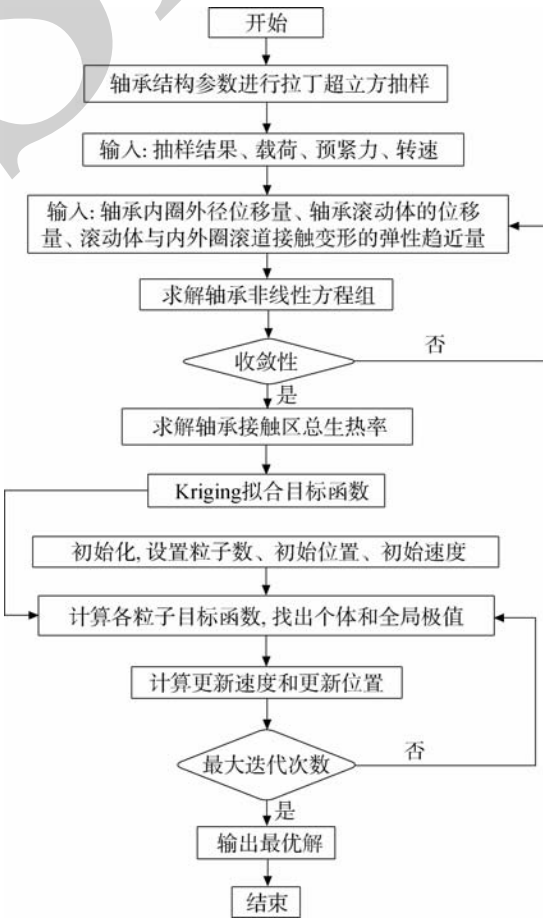


图 2 轴承结构参数优化流程图

Fig. 2 Computation flow chart of bearing structure parameters

3 优化设计结果及验证

3.1 优化结果

利用上述优化算法,对角接触球轴承 NSK 7016A5 进行了结构参数优化.分析中忽略了轴承滚动体与保持架之间的摩擦生热,且轴承预紧力和转速的为定值,分别计算了轴承优化前后滚动体与轴承内外圈滚道的生热率变化.轴承所承受的外部径向载荷 $F_r=200\text{ N}$,预紧力 $F_a=4000\text{ N}$,转速 $n=6\,000\text{ r/min}$.轴承材料为 GCr15.轴承的结构参数和标准粒子群优化算法的相关初始参数分别如表 2 和表 3 所示.

表 2 角接触球轴承的初始参数
Table 2 Initial parameters of angular contact ball bearing

参数	数值
轴承内径 d/mm	80
轴承外径 D/mm	125
滚动体直径 D_w/mm	13.494
节径 D_m/mm	103.141 7
内圈滚道的曲率半径 ρ_i/mm	7.101
外圈滚道的曲率半径 ρ_o/mm	6.966
滚动体数目 Z	20

表 3 标准粒子群优化算法初始参数
Table 3 Initial parameters of particle swarm optimization

参数	设置初始参数数值
权重系数 c_1, c_2	2
最大迭代次数 $k_{\max}$	200
群粒子数 N_d	30, 50, 70
最大惯性系数 $\omega_{\max}$	0.5
最小惯性系数 $\omega_{\min}$	0.1

利用拉丁超立方抽取 30 个影响轴承生热率的轴承结构参数样本点,经过拟动力学求解轴承非线性方程组求得轴承生热率计算所需参数,代入方程式(1)~式(7)求得轴承的总发热率,其计算结果如图 3 所示.经过 Kriging 算法拟合后,样本点与其响应值之间的误差非常小,其数量级为 10^{-12} ,其均方差根误差趋近于零,进而说明 Kriging 模型满足校验要求.

由于粒子群优化算法在进行寻优时,容易陷入局部最优解.为了说明在轴承结构优化过程中,

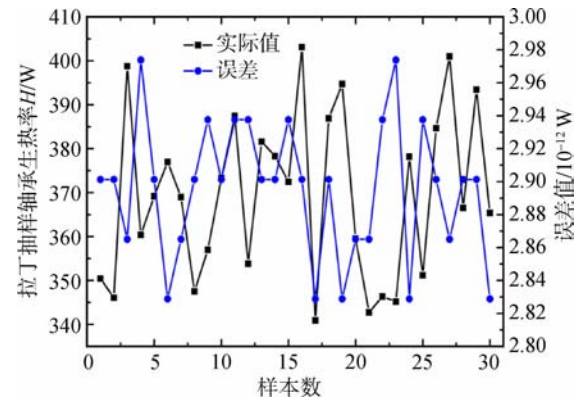


图 3 Kriging 拟合误差分析
Fig. 3 Fitting error of Kriging

算法没有陷入局部最优,通过改变群粒子数进行求解,得到不同群粒子数时迭代次数与适应度的关系如图 4 所示.当群粒子数分别为 30, 50, 70 时,迭代均在终止代数之前收敛,并且群粒子数越大,迭代收敛的速度越快.迭代收敛时,适应度值均为 338.29 W,3 次寻优得到的轴承结构参数如表 4 所示.由于 3 次寻优的结果没有任何变化,所以粒子群优化算法没有陷入局部最优.考虑到

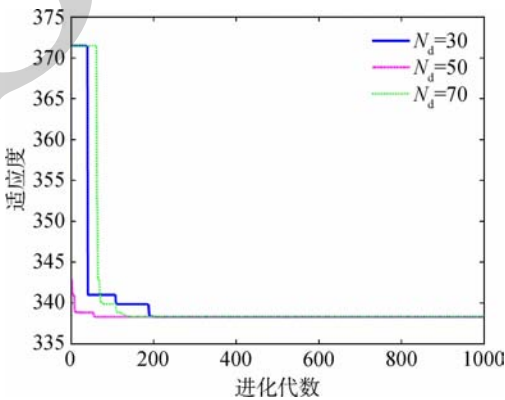


图 4 迭代次数与适应度的关系
Fig. 4 Relation ship between iterations and fitness

表 4 轴承结构参数优化结果

Table 4 Optimization results of bearing structure parameters

参数	数值		
	第 1 次寻优	第 2 次寻优	第 3 次寻优
轴承外圈滚道直径 D_i/mm	116.065	116.065	116.065
内圈滚道的曲率半径 ρ_i/mm	7.1103	7.1103	7.1103
外圈滚道的曲率半径 ρ_o/mm	6.9551	6.9551	6.9551

轴承实际加工的精度要求,轴承的结构参数需要精确到小数点后 3 位.通过比较 3 次轴承结构参数寻优结果发现,当轴承的外圈滚道直径为 116.065 mm,内外圈滚道的曲率半径分别为 7.110 mm 和 6.955 mm 时,轴承的生热率最小.

3.2 优化效果验证

如图 5~图 7 所示,通过对比在外载荷和转速相同情况下,轴承结构参数优化前后轴承生热率的变化,验证轴承结构参数的优化效果.由图 5 分析可知,轴承结构参数优化后,轴承整体和轴承内外圈生热率均变小.其中,轴承总生热率和轴承内圈生热率分别降低了 26.02 W 和 27.41 W,轴承外圈发热率分别升高了 1.39 W.相比之下,轴承结构参数优化前后,轴承内圈的生热率的变化明显大于轴承外圈.分析可知,优化轴承结构参数,达到了降低轴承生热率的目的.

由图 6 和图 7 分析可知,在 11 号滚动体处轴承的生热率最小,此时滚动体的承载最小,而 11 号两侧滚动体的承载不断增大,在 1 号滚动体处轴承生热率达到最大,20 号滚动体次之.轴承内圈的生热率明显大于轴承外圈的生热率,且滚动体在轴承不同位置内外圈的生热率具有对称性.轴承内圈不同位置处滚动体生热率呈现谷形分布,而轴承外圈呈现峰形分布.轴承结构优化前,承载区和非承载区的轴承内圈的生热率最大相差 1.425 W,优化后生热率最大相差 1.376 W.优化前后轴承外圈生热率的最大差值仅有微小的变化.同时,优化后轴承滚动体在各个位置处的生热率明显小于优化前的生热率.

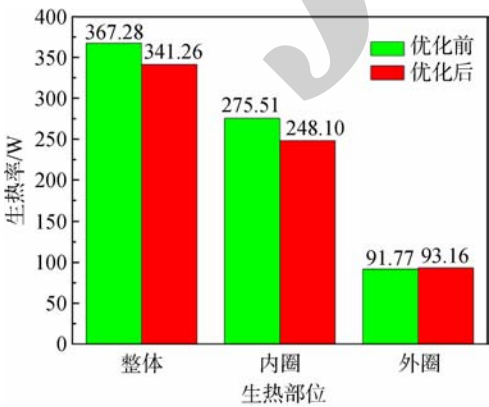


图 5 轴承结构参数优化前后的生热率
Fig. 5 Heat generation rate of bearing structure parameters before and after optimization

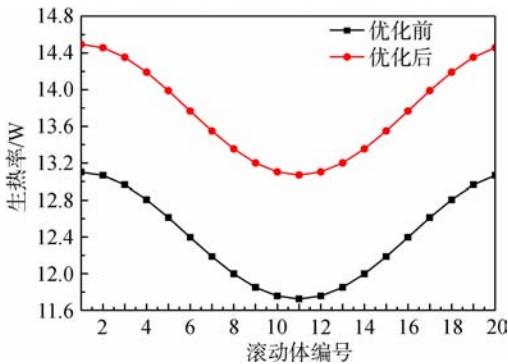


图 6 轴承结构参数优化前后内圈的生热率
Fig. 6 Inner ring heat generation rate of bearing structure parameters before and after optimization

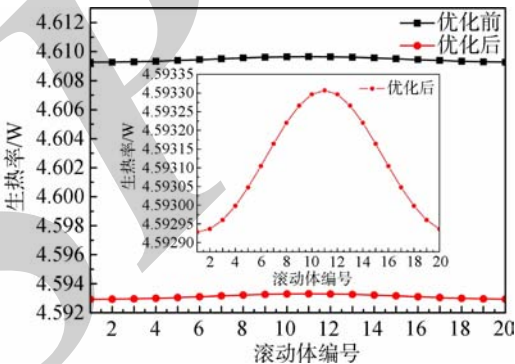


图 7 轴承结构参数优化前后外圈的生热率
Fig. 7 Outer ring heat generation rate of bearing structure parameters before and after optimization

4 结 论

降低轴承生热率,可以提高轴承的使用寿命.在轴承设计过程中,当多个轴承结构参数共同决定某一指标时,则需要大规模的轴承设计点进行反复取值验证,从而导致计算量变大和设计周期延长的缺点.因此,采用合理的设计方法优化轴承结构参数具有重要的学术和应用价值.

本文采用 Kriging 和粒子群优化相结合的方法,进行了 NSK 7016A5 角接触球轴承结构参数优化;通过拉丁超立方抽样选取设计样本点,将样本点进行 Kriging 函数拟合确定目标函数,再应用粒子群优化算法进行寻优.该方法能够显著地减少设计样本点的选取数量,提高设计效率;通过实例分析进行了设计优化方法的验证,结果表明,通过该方法寻找的轴承结构参数能够明显降低轴承的生热率,从而进一步验证了所提方法的正确性和有效性.

参考文献:

[1] Hwang Y, Lee C. A review on the preload technology of the rolling bearing for the spindle of machine tools[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2010, 11(3): 491-498.

[2] 胡小秋, 陈维福. 角接触球轴承热特性分析及试验[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(2): 106-110.

HU Xiaoqiu, CHEN Weifu. Thermal characteristics analysis and experiment for angular contact ball bearing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 106-110. (in Chinese)

[3] Zivkovic A, Zeljkovic M, Tabakovic S, et al. Mathematical modeling and experimental testing of high-speed spindle behavior[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5): 1071-1086.

[4] Holkup T, Cao H, Kolář P, et al. Thermo-mechanical model of spindles[J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 365-368.

[5] Ma C, Yang J, Zhao L, et al. Simulation and experimental study on the thermally induced deformations of high-speed spindle system[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 86: 251-268.

[6] 黄章俊, 王成恩. 基于 Kriging 模型的涡轮盘优化设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(5): 905-911.

HUANG Zhangjun, WANG Cheng'en. Turbine discs optimization design based on Kriging model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(5): 905-911. (in Chinese)

[7] Hosder S, Watson L T, Grossman B, et al. Polynomial response surface approximations for the multidisciplinary design optimization of a high speed civil transport[J]. Optimization and Engineering, 2001, 2(4): 431-452.

[8] Bucher C, Most T. A comparison of approximate response functions in structural reliability analysis[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2008, 23(2/3): 154-163.

[9] Giunta A A, Watson L T. A comparison of approximation modeling techniques: polynomial versus interpolating models[R]. AIAA 98-4758, 1998.

[10] 孙光永, 李光耀, 钟志华, 等. 基于序列响应面法的汽车结构耐撞性多目标粒子群优化设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 224-230.

SUN Guangyong, LI Guangyao, ZHONG Zhihua, et al. Optimization design of multi-objective particle swarm in crashworthiness based on sequential response surface method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 224-230. (in Chinese)

[11] 沈俊, 韩丽川, 沈益斌. 基于粒子群算法的飞机总体参数优化[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1538-1541.

SHEN Ji, HAN Lichuan, SHEN Yibin. Optimization of airplane primary parameters based on particle swarm algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1538-1541. (in Chinese)

[12] Yang L, Liu S, Zhang G, et al. Global optimization for ducted coaxial-rotors aircraft based on Kriging model and improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(4): 1315-1323.

[13] Jiang P, Cao L, Zhou Q, et al. Optimization of welding process parameters by combining Kriging surrogate with particle swarm optimization algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(9): 2473-2483.

[14] Gao Z, Shao X, Jiang P, et al. Parameters optimization of hybrid fiber laser-arc butt welding on 316L stainless steel using Kriging model and GA[J]. Optics and Laser Technology, 2016, 83: 153-162.

[15] Fang J, Gao Y, Sun G, et al. Optimization of spot-welded joints combined artificial bee colony algorithm with sequential Kriging optimization[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 573-583.

[16] Palmgren A. Ball and roller bearing engineering[M]. 3rd. ed. Philadelphia, US: Philadelphia SKF Industries Incorporation, 1959: 34-41.

[17] Wong S M, Hobbs R E, Onof C. An adaptive response surface method for reliability analysis of structures with multiple loading sequences[J]. Structural Safety, 2005, 27(4): 287-308.

[18] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, US: IEEE Press, 1998: 69-73.

(编辑: 陈 越)