

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201912015



运用灵敏度分析的角接触球 轴承多目标优化设计

胡启国, 杨学蛟

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为了提高角接触球轴承的性能,以双列角接触球轴承为研究对象,提出一种基于 Isight 多学科优化技术的双列角接触球轴承优化设计方法.然后,以双列角接触球轴承的额定动载荷和额定静载荷为性能指标,采用最优拉丁超立方设计方法,对双列角接触球轴承结构设计参数进行灵敏度分析.搭建 Isight 和 MATLAB 联合仿真平台,采用 NSGA- II 优化算法对 3210 角接触球轴承结构设计参数进行优化设计.结果表明,优化后的 3210 角接触球轴承的额定动载荷和额定静载荷相对于轴承手册标准值分别提高了 63.93% 和 75.98%.同时,与基于免疫算法的 3210 角接触球轴承优化设计进行比较.研究结果表明:采用多学科优化设计方法优化后的 3210 角接触球轴承的额定动载荷和额定静载荷相对于免疫算法的优化结果,分别提高了 4.997% 和 1.370%.

关键词: 角接触球轴承; 灵敏度分析; 多学科优化设计; NSGA- II 算法

中图分类号: V 231; TH 133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)05-0555-06

Multi-Objective Optimization Design of Angular Contact Ball Bearings Based on Sensitivity Analysis

HU Qiguo, YANG Xuejiao

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to improve the performance of angular contact ball bearing, taking double-row angular contact ball bearing as the research object, its design method based on Isight multidisciplinary optimization technology was proposed. With the dynamic load and static load as the performance indicators, the structural design parameters of the double-row angular contact bearing were analyzed using the optimal Latin hypercube design method. A co-simulation optimal platform was developed by the Isight and MATLAB, and the NSGA- II algorithm was used to optimize the design parameters of the 3210 angular contact ball bearing. The results show that the dynamic load and static load of the optimized 3210 angular contact ball bearing are increased by 63.93% and 75.98% respectively compared with the standard values of the bearing manual. Moreover, the design was compared with that given by the immune algorithm-based method. The results show that the dynamic load and static load of 3210 angular contact ball bearing optimized by the multi-disciplinary optimization design method are improved by 4.997% and 1.370% respectively compared with the immune algorithm opti-

收稿日期: 2019-12-10

通信作者: 胡启国(1966-),男,教授,博士,主要从事机械可靠性分析及优化、机械系统动力学研究. E-mail:swpi-hqg@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375519);重庆市基础科学与前沿技术研究专项基金资助项目(CSTC2015JCYJBX0133)

zation results.

Keywords: angular contact ball bearing; sensitivity analysis; multidisciplinary optimal design; NSGA-II algorithm

在工业生产中,轴承作为旋转机械传动系统中的重要基础部件,有“机械关节”和“机械心脏”之称^[1-2],广泛应用于航空航天、数控机床、国防科技等领域. 双列角接触球轴承作为限制轴和轴承双向位移的支撑部件,其运行状态直接关乎整个设备的工作状态,开展双列角接触球轴承研究,对提高设备可靠性和安全性具有重要意义.

目前,国内外学者针对轴承的优化设计开展了一系列研究. 文献[3]将 Kriging 算法和粒子群 (PSO)算法相结合,以轴承最小生热率为目标函数,对轴承的结构参数进行了优化. 文献[4]基于宏观空穴效应建立了曲轴-主轴承系统的流体动力学润滑模型,以油膜支撑载荷和油膜支撑力矩为优化目标,对主轴承结构参数进行了多目标优化设计. 文献[5]以角接触球轴承的轴向刚度为目标,对其结构参数进行了优化设计. 文献[6]以自润滑关节轴承的接触性能为目标,采用正交试验法来提高轴承的接触性能. 文献[7]使用遗传算法对双列角接触球轴承的主要结构参数进行了优化设计.

本文利用 Isight 和 MATLAB 搭建协同仿真优化平台,对双列角接触球轴承额定动载荷和额定静载荷进行灵敏度分析,由此建立多目标优化模型,采用 NSGA-II 优化算法对其结构参数进行多学科优化设计.

1 双列角接触球轴承额定载荷计算

轴承的使用寿命主要与其额定动载荷和额定静载荷相关,高的额定动载荷与额定静载荷能够提高轴承的承载能力和抗冲击载荷能力,进而延长其使用寿命. 双列角接触球轴承的额定动载荷 C 和额定静载荷 C_0 ^[8]分别为

$$C=b_m f_c (i \cos \alpha) 0.7 Z^{2/3} d_w^{1.8}, \tag{1}$$

$$C_0=\frac{23.8 i Z d_w^2 (a_i^* b_i^*)^3 \cos \alpha}{\left[4-\frac{1}{f_i}+\left(\frac{2 \gamma}{1-\gamma}\right)^2\right]}. \tag{2}$$

式(1),(2)中: b_m 为额定载荷系数; i 为轴承的列数,文中取 $i=2$; α 为轴承的初始接触角, $\alpha=30^\circ$; Z 为单列轴承滚珠数; d_w 为滚珠直径; f_c 为与轴承零件的类型、内部几何参数、材料及制造水平有关的系数; a_i^*, b_i^* 分别为滚珠与轴承内滚道椭圆接触的长半轴和短半轴, a_i^* 和 b_i^* 可通过查阅文献[9]求得. 其中,系数 f_c 的表达式为

$$f_c=39.9\left\{1+\left[1.04\left(\frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right)1.72\left(\frac{f_i(2 f_e-1)}{f_e(2 f_i-1)}\right)0.41\right]^{\frac{10}{3}}\right\}-0.3 \times \frac{\gamma^{0.3}(1-\gamma)1.39}{(1+\gamma)}\left(\frac{2 f_i}{2 f_i-1}\right)^{0.41}. \tag{3}$$

式(3)中: γ 为无量纲几何参数, $\gamma=\frac{d_w \cos \alpha}{D_{wp}}, D_{wp}$ 为滚珠组节圆直径; f_i 为内滚道沟曲率半径系数; f_e 为外滚道沟曲率半径系数.

2 轴承设计参数灵敏度分析

2.1 联合仿真分析方法

根据双列角接触球轴承额定动载荷和额定静载荷分析计算,编写 MATLAB 仿真程序,以 Isight 软件为灵敏度分析平台,通过 Isight 的试验设计组件对 MATLAB 集成,实现仿真程序的调用^[10]. Isight 内的最优拉丁超立方设计使试验点充满设计空间且分布更加均匀,具有更好的空间填充性和均衡性. 因此,选用最优拉丁超立方设计进行抽样,以双列角接触球轴承动载荷和静载荷为响应指标,对轴承主要

结构参数做灵敏度分析^[11].

灵敏度分析是采用 Pareto 图来诠释灵敏度,应用百分比来表示设计变量对响应指标的影响效应大小,反映设计变量对响应指标的贡献程度. 使用集成和联合仿真思想,基于参数分析方法设计,建立 Isight 和 MATLAB 联合仿真的参数影响分析流程,如图 1 所示. 为保证分析精度,试验点数 n 和设计变量总数 N 应当满足如下关系,即

$$n \geq (N+1)(N+2). \tag{4}$$

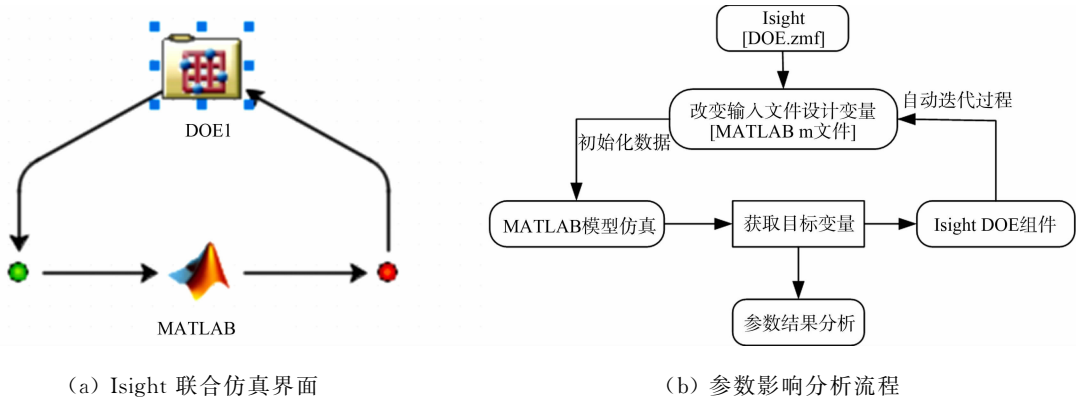


图 1 联合仿真参数影响分析流程

Fig. 1 Co-simulation parameter impact analysis process

2.2 仿真结果和分析

由式(4)确定出试验点个数 n 为 50,即经过 50 次运算后得到灵敏度分析结果. 设计变量对额定动载荷和额定静载荷指标影响的 Pareto 图,如图 2 所示. 图 2 中: D 为设计变量对指标的影响程度值;蓝色代表正效应;红色代表负效应. 正效应是指标随着设计变量增大而增大,负效应是指标随着设计变量增大而减小. 出现设计变量的二次方,则为二阶主效应,表明设计变量为非线性影响因素;若两个设计变量之间采用“-”连接,表明两个设计变量之间存在交互效应,即两个设计变量共同变化时对指标的影响.

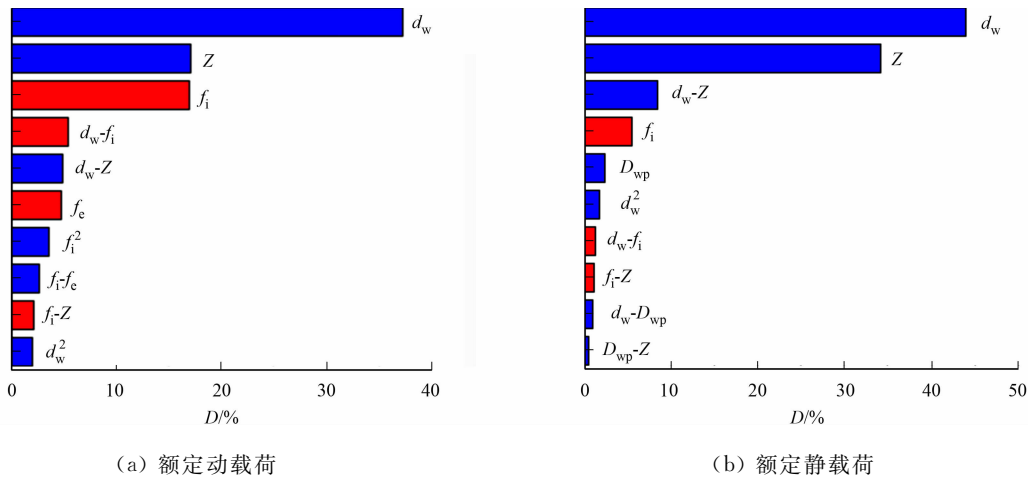


图 2 设计变量对设计指标影响的 Pareto 图

Fig. 2 Pareto diagram of influence of design indicators variables

由图 2(a)可知:对双列角接触球轴承额定动载荷影响最大的前几个设计变量. 首先是滚动体直径和滚珠个数,其次是内滚道沟曲率半径系数,最小的是滚珠直径与内滚道沟曲率半径系数交互效应、滚珠直径与滚珠个数交互效应和外滚道沟曲率半径系数. 其中,内滚道沟曲率半径系数、滚珠直径与内滚道沟曲率半径系数交互效应和外内滚道沟曲率半径系数具有负效应,其余为正效应.

由图 2(b)可知:对双列角接触球轴承额定动载荷影响最大的前几个设计变量. 首先是滚珠直径和滚珠个数,其次是滚珠直径与滚珠个数交互效应及内滚道沟曲率半径系数,最小的是内滚道沟曲率半径系数和滚珠组节圆直径. 其中,内滚道沟曲率半径系数具有负效应,其余为正效应.

由轴承的灵敏度分析结果可知,轴承滚珠直径和滚珠个数对轴承的额定静载荷和额定动载荷影响

较大,在进行轴承结构参数优化设计时,应该重点关注轴承滚珠加工精度,并安排合理的滚珠个数.

3 轴承优化数学模型的建立

3.1 目标函数

根据轴承的服役条件^[12]可知,轴承设计的总体目标为尽可能地提高其使用寿命、承载能力和运行平稳性.因此,在进行轴承的优化设计时,需要尽可能地提高轴承的额定动载荷和额定静载荷.双列角接触球轴承的多目标优化数学模型为

$$\min \begin{cases} f_1(X) = \frac{1}{C} = \frac{1}{b_m f_c (i \cos \alpha) 0.7 Z^{\frac{2}{3}} d_w^{1.8}}, \\ f_2(X) = \frac{1}{C_0} = \frac{\left[4 - 1/f_i + \left(\frac{2\gamma}{1-\gamma}\right)\right]^2}{23.8 i Z d_w^2 (a_i^* b_i^*)^3 \cos \alpha}. \end{cases} \tag{5}$$

式(5)中: $f_1(X)$, $f_2(X)$ 分别为第一、第二优化目标.

3.2 设计变量

轴承的几何结构主要由轴承的内、外滚道沟曲率半径系数 f_i 和 f_e 、滚珠数(Z)、滚珠直径(d_w),以及滚珠组节圆直径(D_{wp})来确定.将上述的轴承参数作为设计变量 $x_1 \sim x_5$,则有

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5] = [f_i \quad f_e \quad Z \quad d_w \quad D_{wp}].$$

3.3 约束条件

进行角接触球轴承的优化设计时,其主要优化设计参数应满足如下 5 个约束函数.

1) 轴承滚道沟曲率半径系数约束. Rao 等^[13]指出轴承内外滚道沟曲率半径应大于 $0.515d_w$,曲率半径低于 $0.515d_w$ 时,会降低轴承的额定动载荷.根据经验沟曲率半径上限取 $0.535d_w$.则沟曲率半径系数约束为

$$\begin{cases} 0.515 \leq f_i \leq 0.535, \\ 0.515 \leq f_e \leq 0.535. \end{cases}$$

2) 球径约束.对滚珠直径进行约束,有

$$K_{w,\min} \left(\frac{D-d}{2} \right) \leq d_w \leq K_{w,\max} \left(\frac{D-d}{2} \right).$$

上式中: $K_{w,\min}$ 为滚珠直径约束条件系数最小值; $K_{w,\max}$ 为滚珠直径约束条件系数最大值; D 为轴承外径; d 为轴承内径.

3) 保持架刚度和强度约束.为了增大轴承的承载能力,应保证轴承内有足够多的滚珠数,但是滚珠数量与保持架过梁宽度互相矛盾.当滚珠数较大时,保持架刚度和强度无法满足要求^[13].为了使保持架的刚度和强度满足设计要求,对保持架进行约束,有

$$\frac{\pi D_{wp}}{Z} - 1.05 d_w \geq b_{\min}. \tag{6}$$

4) 滚珠组节圆直径约束.滚珠组节圆直径与轴承平均直径的差值应保持相近,差值过大会降低轴承的旋转灵活性.因此,轴承结构优化时,滚珠组节圆直径应大于轴承平均直径,约束条件为

$$0.5(D+d) \leq D_{wp} \leq \epsilon(D+d).$$

上式中: ϵ 为常数.

5) 外圈壁厚约束.轴承外圈沟底壁厚度应满足轴承壁厚的要求,其值应大于 ξd_w , ξ 为常数,则有

$$\frac{D - D_{wp} - d_w}{2} \geq \xi d_w.$$

3.4 模型求解

为了实现轴承结构参数的多目标优化,利用 Isight 和 MATLAB 搭建了协同仿真优化平台.以 MATLAB 作为分析系统,编写角接触球轴承额定动载荷和额定静载荷的多目标 MATLAB 仿真程序,将 MATLAB 仿真结果实时传输到 Isight 进行双列角接触球轴承结构的优化.采用带精英策略的快速非劣排序的 NSGA-II 作为优化算法,提高了算法的收敛性、鲁棒性和求解效率^[14].轴承结构参数的优

化步骤如图 3 所示。

4 算例分析

4.1 NSGA-Ⅱ 算法求解

以 3210 角接触球轴承为例,对其额定动载荷和额定静载荷进行优化设计. 3210 角接触球轴承材料为 GCr15,其装配尺寸为外径 $D=90\text{ mm}$,内径 $d=50\text{ mm}$. 约束条件中对应的常数, $b_{\min}=0.1d_w$, $K_{w,\min}=0.45$, $K_{w,\max}=0.6$, $\epsilon=0.55$, $\xi=0.3$.

NSGA-Ⅱ 算法控制参数:种群数为 20,优化代数 为 50,交叉概率为 0.9. 在优化过程中,Isight 将每一代的设计变量传输到 MATLAB,同时, MATLAB 根据输入的设计变量计算轴承的额定静载荷和额定动载荷,并将其返回至 Isight,进行目标函数值的计算,判断其是否满足收敛条件. 优化后设计变量值,如表 1 所示。

由表 1 可知:优化后各尺寸参数满足设计要求,在不改变轴承空间装配尺寸下,轴承的内径和外径满足标准化系列推荐值,优化后的各尺寸参数经检验在约束范围内,符合设计要求。

将表 1 轴承结构参数代入式(1),(2),可得到优化后 3210 轴承的额定动载荷和额定静载荷分别为 75.411 和 82.364 kN. 通过查阅滚动轴承设计手册,轴承 3210 的额定动载荷为 46 kN,额定静载荷为 46.8 kN. 相对于标准 3210 轴承,其额定动载荷和额定静载荷分别提高了 63.93%和 75.98%。

4.2 优化结果分析

为了验证双列角接触球轴承的优化效果,对 3210 角接触球轴承采用免疫算法^[15]进行优化设计,所得优化设计变量值,如表 2^[16]所示. 两种优化算法所得的目标函数结果,如表 3 所示。

由表 3 可知:经过 NSGA-Ⅱ 化算法优化后轴承的额定动载荷和额定静载荷显著提高,与免疫算法相比,额定动载荷提高了 4.997%,额定静载荷提高了 1.370%。经计算分析,文中采用的 NSGA-Ⅱ 算法的优化结果优于免疫算法。

表 2 免疫算法优化后设计变量值

Tab. 2 Immune algorithm-based optimization design variable values

设计变量	f_i	f_e	Z	d_w	D_{wp}
优化结果	0.515	0.515	18	11.388 7	71.778

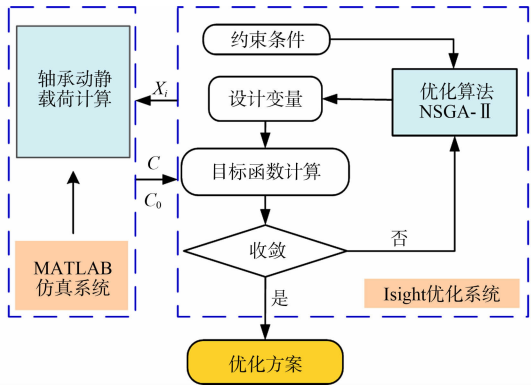


图 3 角接触球轴承结构参数优化流程图

Fig. 3 Flow chart of angular contact ball bearing structure parameter optimization

表 1 NSGA-Ⅱ 算法优化后设计变量值

Tab. 1 NSGA-Ⅱ algorithm-based optimization design variable values

设计变量	f_i	f_e	Z	d_w	D_{wp}
优化结果	0.515	0.515	17	11.907 4	70.891 6

表 3 两种优化算法目标函数值结果对比

Tab. 3 Comparison of objective function values of two optimization algorithms

算法类型	C/kN	C_0/kN
NSGA-Ⅱ 算法	75.411	82.364
免疫算法	71.822	81.251

5 结论

1) 采用 Isight 调用 MATLAB 程序进行联合仿真,对角接触球轴承的额定动载荷和额定静载荷进行灵敏度分析. 结果表明,影响轴承性能的主要结构参数是滚珠个数和滚珠直径,可为轴承加工提供理论依据。

2) 搭建协同仿真优化平台,采用 NSGA-Ⅱ 作为优化算法,对 3210 角接触球轴承进行多目标优化,获得在恒定尺寸和空间约束下最佳轴承结构参数. 结果表明,优化设计后的 3210 角接触球轴承的额定动载荷与额定静载荷相对于设计手册中标准 3210 角接触球轴承分别提高了 63.93%和 75.98%。将所得的优化设计结果同免疫算法结果进行对比,NSGA-Ⅱ 算法所得的额定动载荷和额定静载荷分别提高了 4.997%和 1.370%。

3) 通过灵敏度分析和联合仿真优化,能够有效地获得轴承结构参数对轴承性能的影响,为轴承结

构参数设计和加工精度选定提供一定理论参考依据.

参考文献:

[1] 王奉涛,王贝,敦泊森,等.改进 Logistic 回归模型的滚动轴承可靠性评估方法[J]. 振动、测试与诊断,2018,38(1): 123-129,210. DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2018.01.019.

[2] 常斌全,剡昌锋,苑浩,等.多事件激励的滚动轴承动力学建模[J]. 振动与冲击,2018,37(17):16-24. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2018.17.003.

[3] 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. DOI:10.13224/j.cnki.jasp.2017.03.026.

[4] 何振鹏,谢海超,仲崇高,等.基于宏观空穴理论的主轴承多目标优化设计[J]. 润滑与密封,2018,43(11):93-101, 107. DOI:10.3969/j.issn.0254-0150.2018.11.017.

[5] 罗天宇,孙东.以角接触球轴承刚度为目标函数的主参数优化设计[J]. 轴承,2018(9):1-3. DOI:10.19533/j.issn1000-3762.2018.09.001.

[6] 王泽民,张宁,常浩捷,等.基于接触性能的自润滑关节轴承结构尺寸设计[J]. 机械强度,2019,41(2):383-388. DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2019.02.020.

[7] 程超,汪久根.基于遗传算法的双列角接触球轴承优化设计[J]. 机械设计,2015,32(2):46-50. DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2015.02.010.

[8] 哈里斯 T A.滚动轴承分析(第 1 卷):轴承技术的基本概念(原书第 5 版)[M]. 罗继伟,等译. 北京:机械工业出版社,2009.

[9] 王黎钦.滚动轴承的极限设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.

[10] 李奇,张勇,张成,等.灵敏度分析的客车车身模块重构与结构轻量化优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015,36(4):377-382. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.04.0377.

[11] LI Zhihua,ZHANG Xinjie, GUO Konghui, *et al.* A novel squeeze mode based magnetorheological valve: Design, test and evaluation[J]. Smart Materials and Structures, 2016,25(12):127003. DOI:10.1088/0964-1726/25/12/127003.

[12] 邓四二,董晓,崔永存,等.双列角接触球轴承动刚度特性分析[J]. 兵工学报,2015,36(6):1140-1146. DOI:10.3969/j.issn.1000-1093.2015.06.026.

[13] RAO B R, TIWARI R. Optimum design of rolling element bearings using genetic algorithms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007,42(2):233-250. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2006.02.004.

[14] 赵树恩,杨明森,彭光旭.基于 NSGA-II 混合灵敏度分析的白车身轻量化优化设计[J]. 机械强度,2019,41(4): 887-894. DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2019.04.020.

[15] 包子阳,余继周,杨杉.智能优化算法及其 MATLAB 实例[M]. 北京:电子工业出版社,2016.

[16] 程超,汪久根.双列角接触球轴承的免疫算法优化设计[J]. 航空动力学报,2015,30(11):2810-2816. DOI:10.13224/j.cnki.jasp.2015.11.032.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:崔长彩)