

基于正交试验法的关节轴承结构参数优化设计

高军斌

上海市轴承技术研究有限公司 上海

【摘要】以应用在飞机起落架上冲击载荷较大的关节轴承为研究对象,利用 ABAQUS 软件建立了带有油槽和油孔关节轴承的仿真模型,通过正交试验分析了外圈油孔油槽个数、内圈油孔油槽个数以及油孔直径 3 个因素下对内外圈最大接触应力的影响。结果表明:影响内外圈最大接触应力的因素主次顺序分别为内圈油孔油槽个数>外圈油孔油槽个数>油孔直径;以内外圈最大接触应力最小为目标,得出最佳的结构参数为内圈油孔油槽个数 6 个、外圈油孔油槽个数为 6 个、油孔直径为 3mm;由最佳的结构参数可知,最大接触应力区域主要集中在外圈端面和内圈内球面油槽的两侧,内圈外球面和外圈内球面在油孔附近有应力集中。

【关键词】关节轴承;正交试验;优化设计;接触应力;有限元法

【收稿日期】2026 年 2 月 10 日 **【出刊日期】**2026 年 3 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20260001

Optimization design of joint bearing structural parameters based on orthogonal experimental method

Junbin Gao

Shanghai Bearing Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai

【Abstract】Focusing on joint bearings subjected to high impact loads in aircraft landing gear, a simulation model of joint bearings with oil grooves and oil holes was established using ABAQUS software. Through an orthogonal test, the effects of three factors—the number of oil grooves and oil holes on the outer ring, the number of oil grooves and oil holes on the inner ring, and the diameter of the oil holes—on the maximum contact stress of the inner and outer rings were analyzed. The results show that the factors affecting the maximum contact stress of the inner and outer rings are ranked as follows: number of oil grooves and holes on the inner ring > number of oil grooves and holes on the outer ring > oil hole diameter. With the goal of minimizing the maximum contact stress of the inner and outer rings, the optimal structural parameters were determined to be: 6 oil grooves and holes on the inner ring, 6 on the outer ring, and an oil hole diameter of 3 mm. Based on the optimal structural parameters, it was found that the regions of maximum contact stress are mainly concentrated on the end face of the outer ring and on both sides of the oil grooves of the inner sphere of the inner ring, while stress concentration occurs near the oil holes on the outer surface of the inner ring and the inner surface of the outer ring.

【Keywords】Joint bearing; Orthogonal test; Optimal design; Contact stress; Finite element method

1 引言

关节轴承具有耐冲击、承载能力大以及长寿命等特点,在机械工程、水利设备以及航空航天等领域有着广泛应用^[1-4]。为了满足飞机起落架中关节轴承在服役过程中实际需求,需对其结构进行优化。

赵凯^[5]对不同工况下金属关节轴承进行了静力学分析,戴雨静^[6]对倾斜位置下关节轴承进行静力学分析,周勇勇^[7]分析了不同载荷、摩擦系数以及外圈扭摆角度对关节轴承接触压力及变形的影响规律。

关节轴承在研制过程中润滑孔道的设计是非常重要的一个环节,上述文献中尚未涉及到润滑孔道的设计。本文以带有油槽油孔的关节轴承为仿真对象,外圈油孔油槽个数、内圈油孔油槽个数以及油孔直径为影响因素,通过正交试验分析各因素对内外圈最大接触应力的影响。

2 关节轴承静力学设置

2.1 有限元模型

在三维建模软件中建立关节轴承几何模型如图

1 (a) 所示。主要结构参数为：内圈内径为 75mm，外圈外径为 115mm，内圈宽度为 55mm，外圈宽度 37.6mm。在 ABAQUS 软件对几何结构进行六面体网格划分，其中工装和轴网格尺寸为 2mm；内外圈网格尺寸为 0.8mm；有限元模型如图 1 (b) 所示。

2.2 材料设置

轴承内外圈设置为弹塑性体、工装及轴设置为刚性体。有限元模型中各个部件的材料属性如表 1 所示。

2.3 边界及载荷设置

边界及载荷设置如图 2 所示，轴两侧壁面固定，工装上表面施加额定载荷为 642kN。

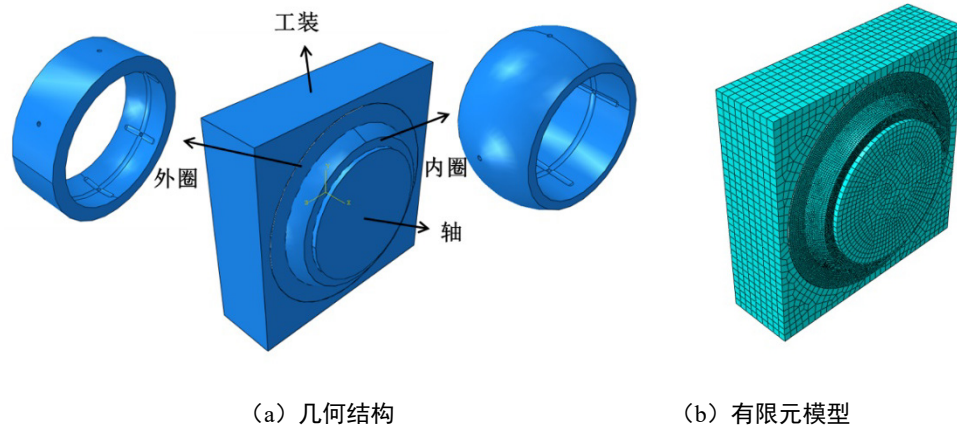


图 1 模型结构

表 1 材料属性

部件	密度 (kg/m^3)	弹性模量 (MPa)	泊松比	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
内圈	8300	122000	0.3	990	1270
外圈	7900	201000	0.26	1150	1200
轴	7800	180000	0.3	1150	1400

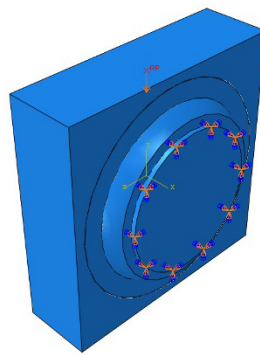


图 2 关节轴承边界及载荷设置

2.4 分析步设置

分析步采用 Static, General 分析方法, Quasi-Newton 迭代分析技术, 用直接法的方程求解器对关节轴承径向分析进行计算, 分析步时间设置为 1s。为保证获取数据的均匀性, 设置 history output 及 field output 的输出频率为每 0.1s 输出一个数据。

2.5 接触设置

模型设置三组接触对, 即工装与轴承外圈接触、轴承内外圈球面接触以及内圈与轴接触。接触对均选用 surface-to-surface contact (standard) 的形式, 接触对滑移方式选择有限滑移, 接触离散化技术选择面对面。接触属性中法向接触压力-过盈接触方法选

择“硬”接触。切向接触中摩擦公式选择罚函数，金属零部件之间摩擦系数为 0.1。

3 正交试验分析法

内圈油孔油槽个数的范围为 2~10，外圈油孔和油槽的个数的范围 2~10，油孔直径的范围为 2.0~4.0mm，各选取的 3 因素 5 水平如表 2 所示。

分析正交试验结果采用极差分析的方法，计算方法如式（1）所示。

$$T_i = \max(K_{im}) - \min(K_{in}) \quad (1)$$

式中： K_{im} 为某一因素的某个水平下评价指标的平均值；

K_{in} 为某一因素的其他水平下评价指标的平均值；

T_i 为某个因素下所有水平中最大评价指标平均值与最小评价指标平均值之差， T_i 值越大说明该因素对该评价指标的影响越大。

4 结果分析

表 2 水平因素表

水平	内圈油孔油槽个数（个）	外圈油孔油槽个数（个）	油孔直径（mm）
1	2	2	2.0
2	4	4	2.5
3	6	6	3.0
4	8	8	3.5
5	10	10	4.0

表 3 正交试验表

序号	内圈油孔油槽个数（个）	外圈油孔油槽个数（个）	油孔直径（mm）	内圈最大接触应力（MPa）	外圈最大接触应力（MPa）
1	2	2	2.0	379.6	782.2
2	2	4	2.5	378.4	631.4
3	2	6	3.0	374.5	467.2
4	2	8	3.5	375.4	795.4
5	2	10	4.0	380.3	435.2
6	4	2	2.5	365.7	458.3
7	4	4	3.0	380.1	418.7
8	4	6	3.5	378.2	418.7
9	4	8	4.0	386.2	442.1
10	4	10	2.0	393.2	419.2
11	6	2	4.0	367.2	423.5
12	6	4	3.5	384.2	431.5
13	6	6	3.0	357.6	417.3
14	6	8	2.0	384.2	433
15	6	10	2.5	361.2	426.2
16	8	2	3.5	392.4	419.4
17	8	4	4.0	378.8	455.8
18	8	6	2.0	396.5	422.3
19	8	8	2.5	373.7	450.5
20	8	10	3.0	382.8	428.6
21	10	2	4.0	366.7	719.3
22	10	4	2.0	384.6	526.3
23	10	6	2.5	397.3	623.8
24	10	8	3.0	417.2	457.8
25	10	10	3.5	374.8	428.3

通过正交试验法得到的仿真结果如表 3 所示。各因素对内圈最大接触应力和外圈最大接触应力极差结果如图 3 所示,从图中可以看出各因素对内圈最大接触应力的影响为:内圈油孔油槽个数>外圈油孔油槽个数>油孔直径,各因素对外圈最大接触应力的影响为:内圈油孔油槽个数>外圈油孔油槽个数>油孔直径。故在正交试验结果中得出,内圈油孔油槽个数是对内圈最大接触应力和外圈最大接触应力影响最大的一个因素。从表 3 中可知,所有结果得出的内外圈最大接触应力均小于材料本身的屈服强度,且外圈最大接触应力均大于内圈接触应力。

以内外圈最大接触应力最小为指标可得出最佳的结构参数:内圈油孔油槽个数为 6 个、外圈油孔油槽个数为 6 个以及油孔直径为 3.0mm。

下面以内圈油孔油槽个数为 6 个,外圈油孔油槽个数为 6 个,油孔直径为 3.0mm 为例,分析内外圈最大接触应力主要集中的位置。图 4 给出了内圈油孔油槽个数为 6 个,外圈油孔油槽个数为 6 个,油孔直径为 3.0mm 的内圈接触应力分布图。从图 4 可以看出,内圈最大接触应力区域主要集中在油槽的两侧,应力向两侧逐渐减少。油孔和油槽与内圈球面相接触的地方有应力集中。

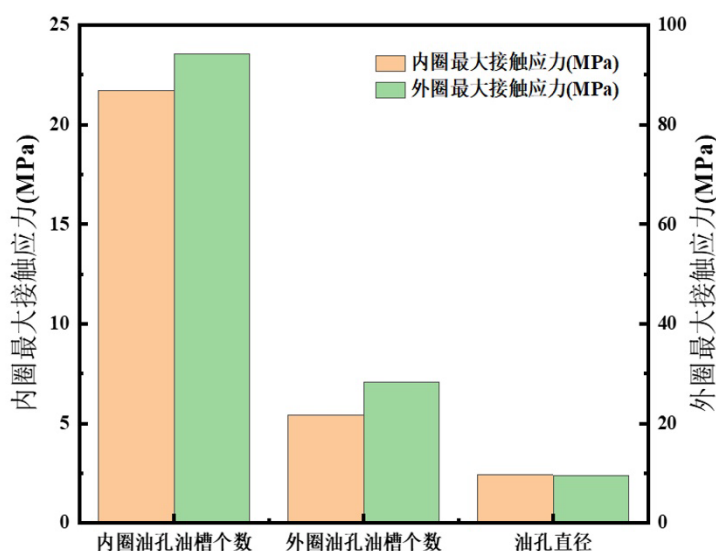


图 3 各因素对内圈最大接触应力和外圈最大接触应力极差值

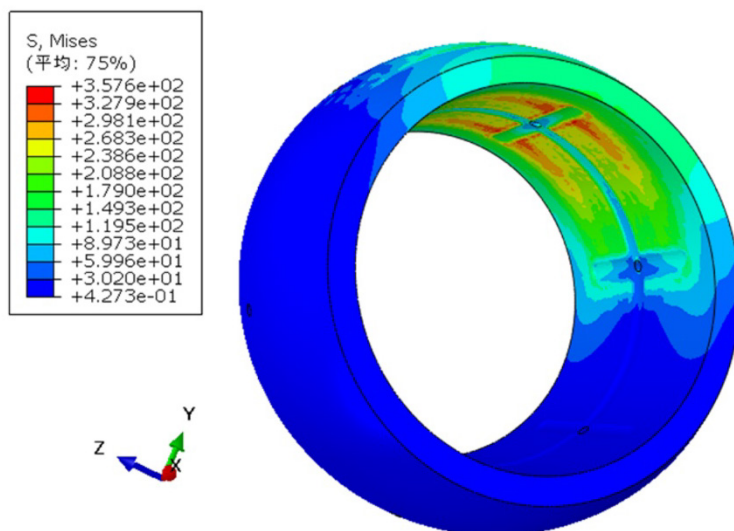


图 4 内圈油孔油槽个数为 6 个,外圈油孔油槽个数为 6 个,油孔直径为 3.0mm 的内圈接触应力分布图

图 5 给出了内圈油孔油槽个数为 6 个，外圈油孔油槽个数为 6 个，油孔直径为 3.0mm 的外圈接触应力分布图。从图 5 可以看出，外圈最大接触应力区域主要集中在外圈的端面，应力向两侧逐渐减少。油孔和油槽与外圈内球面相接触的地方有应力集中。

5 试验验证

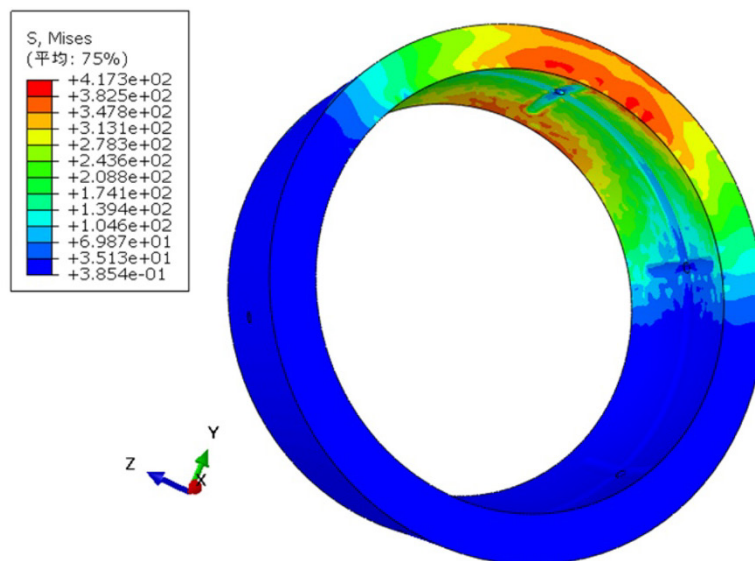


图 5 内圈油孔油槽个数为 6 个，外圈油孔油槽个数为 6 个，油孔直径为 3.0mm 的外圈接触应力分布图



图 6 关节轴承试验件

6 结论

以带有油槽油孔的关节轴承为仿真对象，外圈油孔和油槽个数、内圈油孔和油槽个数以及油孔直径为影响因素，通过正交试验分析各因素对内外圈最大接触应力的影响。得出如下结论：

(1) 影响内外圈最大接触应力的因素主次顺序

选取内圈油孔油槽个数为 6 个，外圈油孔油槽个数为 6 个，油孔直径为 3.0mm 加工成如图 6 所示的关节轴承。按照 GJB10850^[8]上施加额定径向载荷的试验方法及评判标准得出该试验件实测的永久变形量为 0.038mm 小于标准值 0.07mm，符合产品要求。

分别为内圈油孔油槽个数>外圈油孔油槽个数>油孔直径。内圈油孔油槽个数是对内圈最大接触应力和外圈最大接触应力影响最大的一个因素。

(2) 以内外圈最大接触应力最小为目标，得出最佳的结构参数为内圈油孔油槽个数 6 个、外圈油孔油槽个数为 6 个、油孔直径为 3mm。

(3) 最大应力区域主要集中在外圈端面和内圈内球面油槽的两侧, 内圈外球面和外圈内球面在油孔附近有应力集中。

参考文献

- [1] XUE Y H, YAN S C, XIE J, et al. Contact and tribological properties of self-lubricationg ellipsoidal plain bearings[J]. Tribology International, 140(2019): 105840.
- [2] 杨育林, 祖大磊, 黄世军. 自润滑关节轴承现状及发展[J]. 轴承, 2009, (1): 58-61.
- [3] 沈雪瑾, 曹磊, 陈有光等. 织物衬垫自润滑关节轴承的研究现状与发展[J]. 轴承, 2009, (3): 57-59.
- [4] BYUNG C K, DAI G L. Development of a spherical bearing with uni-directional carbon/epoxy composite[J]. Composite structures, 2009, 89(1): 102-109.
- [5] 赵凯. 基于 ANSYS 的飞机起落架用金属关节轴承静力学分析[J]. 工业加热, 2022, 51(05): 54-57+62.
- [6] 戴雨静, 汪久根, 洪玉芳, 等. 起落架用金属关节轴承有限元分析[J]. 轴承, 2019, (08): 1-6.
- [7] 周勇勇, 章有良, 蒋智杰, 等. 基于有限元方法的关节轴承模型仿真分析及寿命试验[J/OL]. 机电工程技术, 1-9.
- [8] GJB10850-2022. 低速摆动自润滑向心关节轴承规范[S].

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS