

基于ANSYS的传动轴静力学分析与多目标响应面优化研究

张俊杰

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年12月8日; 录用日期: 2025年1月1日; 发布日期: 2025年1月13日

摘要

基于ANSYS对大型球磨机衬板更换机械手的传动轴进行静力学分析与多目标优化研究。首先在SolidWorks中建立传动轴的三维模型, 并将其导入Workbench进行结构静力学分析, 发现传动轴所受应力远小于材料的抗扭强度, 具备优化空间。在此基础上, 以响应面方法为基础, 对该传动轴的结构进行了优化设计, 并通过仿真验证了模型的正确性。计算结果表明, 该方案可使传动轴的重量减轻1.8%, 最大变形减小18.5%, 最大应力减小12%, 对同类传动轴的设计具有一定的借鉴意义。

关键词

ANSYS, Workbench, 传动轴, 响应面优化

ANSYS-Based Static Analysis and Multi-Objective Response Surface Optimization Study of Transmission Shafts

Junjie Zhang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 8th, 2024; accepted: Jan. 1st, 2025; published: Jan. 13th, 2025

Abstract

Based on ANSYS, a static analysis and multi-objective optimization of the drive shaft of a large ball

mill liner replacement manipulator is carried out. Firstly, the three-dimensional model of the drive shaft is established in SolidWorks and imported into Workbench for structural static analysis, and it is found that the stress on the drive shaft is much smaller than the torsional strength of the material, which has the space for optimization. On this basis, the structure of this drive shaft is optimized and designed based on the response surface method, and the correctness of the model is verified by simulation. The calculation results show that the scheme can reduce the weight of the drive shaft by 1.8%, the maximum deformation by 18.5%, and the maximum stress by 12%, which is of some significance for the design of similar drive shafts.

Keywords

ANSYS, Workbench, Drive Shaft, Response Surface Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

大型球磨机衬板更换机械手是一种用于矿山和水泥等重工业中的关键设备，旨在提高衬板更换过程的安全性和效率。传统上，衬板更换多依赖人工操作，存在工作强度大、安全风险高等问题。更换机械手的应用不仅能减少人工劳动量，还能在复杂、危险的环境中提高工作精准度和安全性[1] [2]。

衬板机械手的研发与应用为矿山作业带来了显著的经济和社会效益。自动化换衬板机械手不仅减少了停机时间，提升了生产效率，还有效降低了人工更换过程中可能发生的安全事故。在更换机械手的核心部件中，传动轴起到了关键的扭矩传递作用，直接影响机械手的稳定性和使用寿命。尽管通过理论推导可以得到大型球磨机衬板更换机械手传动轴的理论计算方法，但由于理论计算虽精确但效率较低，有限元分析在此过程中显得尤为重要。通过有限元分析对传动轴的应力和变形进行数值模拟，可以优化设计参数，提升结构强度，从而保证机械手的整体性能和安全性，以更好地服务于高强度的工业应用环境。

同时，在机械部件优化领域，响应面方法(RSM)被广泛应用于传动轴和曲轴的结构优化，以提升强度、降低应力集中并延长疲劳寿命。例如，吴辰对四缸发动机曲轴进行了优化，着重分析其关键部位的应力分布，优化后显著提高了曲轴的强度和可靠性[3]。施佳裕进一步研究了曲轴在弯扭复合载荷下的应力变化，利用响应面优化方法使曲轴的最大应力降低了 14.45%，为复杂载荷条件下的优化设计提供了指导[4]。同样，吕泽苗在吊装输送机构传动轴的研究中，通过 ANSYS 和 ADAMS 进行应力分析和响应面优化，实现了最大应力降低约 20%的目标[5]。刘龙杰和刘军则将 RSM 应用于传动直轴和泥浆泵曲轴的疲劳寿命优化，显著提升了这些部件的耐久性和可靠性[6] [7]。此外，姚行举等人研究了发动机曲轴在高速重载下的失效问题，通过有限元分析和响应面优化，优化后的曲轴最大应力减少了 12.42%，最大变形降低了 16.83% [8]。综上所述，响应面方法在机械部件优化中的应用已相当成熟，通过有限元分析和多目标优化，能够有效提高关键部件的性能和寿命，为实现高效可靠的机械设计提供了有力支持。

2. 传动轴的结构及工况分析

本文研究的对象是某大型球磨机的衬板更换机械手中的一个关键传动轴，如图 1 所示。各轴段的具体参数见表 1。该传动轴是机械手的核心组件，负责通过键连接链轮从而传递电动机的扭矩并推动机械手机架的移动。

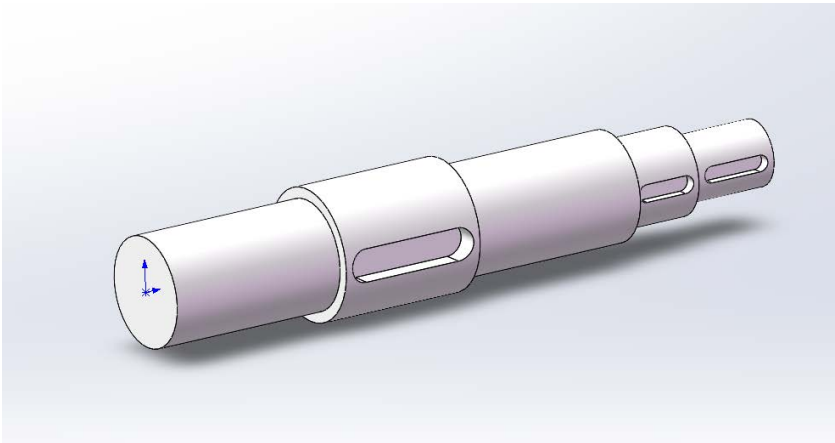


Figure 1. Drive shaft
图 1. 传动轴

Table 1. Drive shaft parameters
表 1. 传动轴参数

轴端	1	2	3	4	5
长度/mm	168	138	172	67	84
直径/mm	50	60	50	40	30

3. 基于 ANSYS 的静力学分析

3.1. 前处理

根据设计要求，传动轴采用 42CrMo4 钢作为材料。其密度为 7850 kg/m^3 ，杨氏模量为 212 GPa ，泊松比为 0.3 。根据该传动轴的热处理状态和加工工艺，最大屈服强度可达到 $\sigma = 920 \text{ MPa}$ 。

我们首先将传动轴的三维模型导入 ANSYS Workbench 模块中，同时为确保了模型在受力分析时的准确性，考虑到由于各个轴段之间存在圆角，可能会影响模拟结果，所以在网格划分时，需要对这些圆角部分进行更细致的网格加密。经过处理，最终的网格划分结果包含 22,337 个单元和 35,452 个节点，详细情况如图 2 所示。

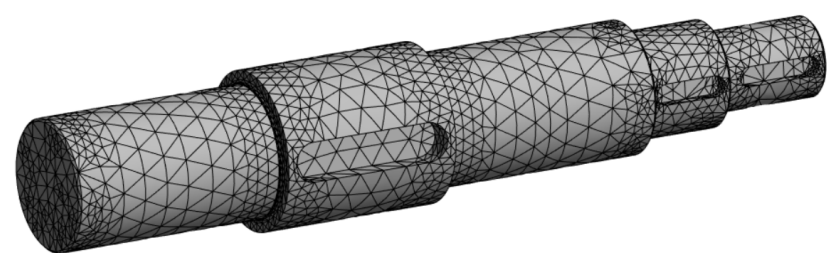


Figure 2. Grid division model
图 2. 网格划分模型

在对有限元模型进行分析时，添加约束和载荷的步骤必须根据实际工况仔细考虑。在这项工作中，第 1 个和第 3 个轴段各自装有一个轴承，因此我们需要在这些位置设置圆柱支撑，以确保仅保留轴向的转动自由度。这种设计不仅提升了结构的稳定性，还能够有效地承受在运行过程中可能产生的扭矩。此

外，值得注意的是，轴的第 4 段通过键与链轮相连，作为输入端，通过键连接传递动力至传动轴。施加的载荷和约束如图 3 所示。

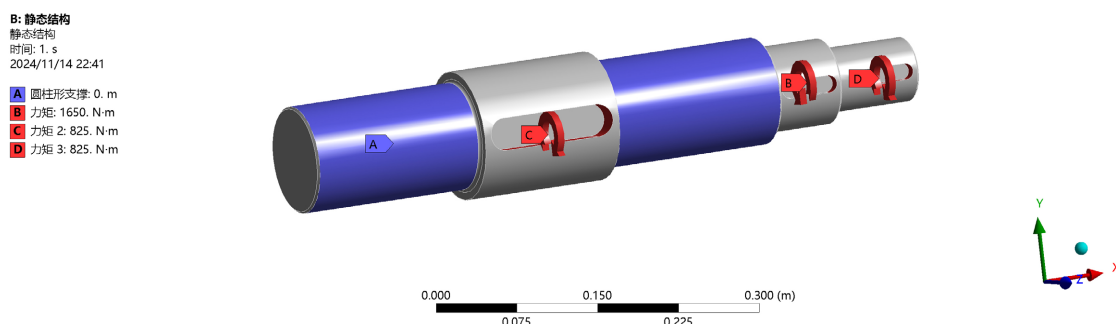


Figure 3. Restraint and load application
图 3. 约束和载荷施加

3.2. 静力学分析结果

如图 4 和图 5 所示为求解完成后，传动轴的应力和变形结果。

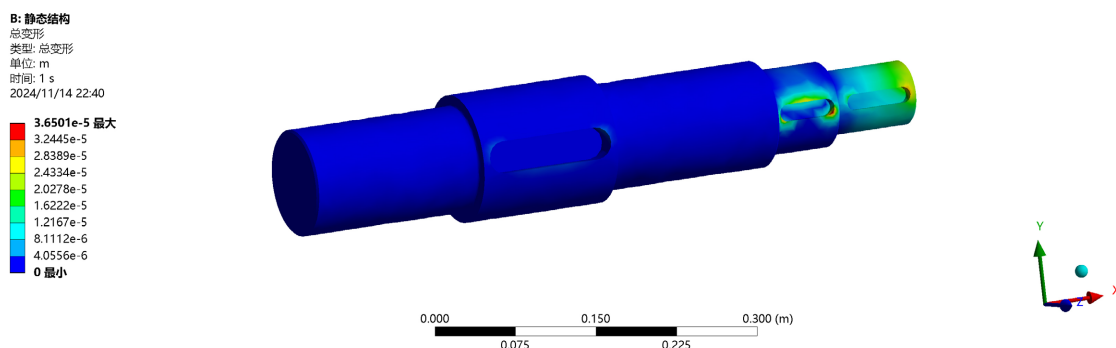


Figure 4. Deformation solution result
图 4. 变形求解结果

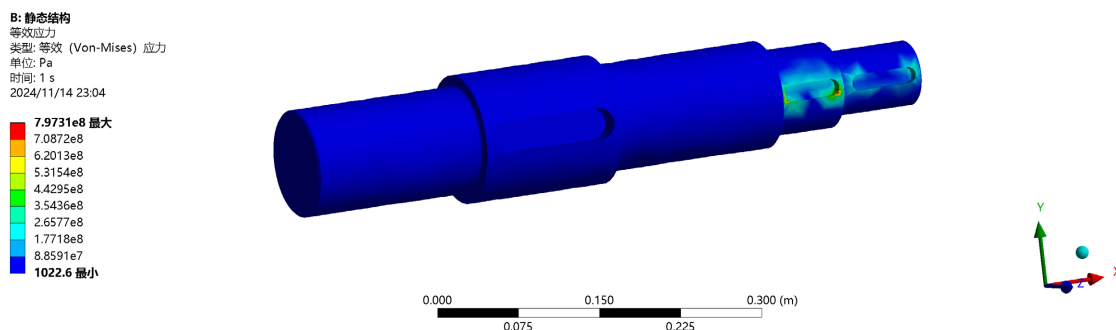


Figure 5. Stress solution result
图 5. 应力求解结果

由图 4 和图 5 的求解结果可以看出，传动轴在运动过程中最大应力达到 797.31 MPa，仍然低于材料的强度极限。同时，最大变形量为 0.0365 mm，出现在第 4 轴段，远低于设计标准。因此，可以确认传动轴的设计满足了所有相关要求。

4. 基于 ANSYS 响应面法的传动轴优化设计

响应面拟合是一种统计建模方法，用于建立响应变量与输入因素之间的关系模型。它通过拟合一个数学函数来描述变量与输入因素之间的关系，并用于预测和优化系统的性能。响应面拟合的目标是找到最佳的输入因素组合，通过优化响应面模型，可以确定在给定因素范围内，使响应变量达到最优的因素值组合。其直接改变设计变量快速获得响应的估计值，而不需要耗费大量资源去重新计算真实模型。

4.1. 参数设置及优化系统搭建

静力学仿真结果表明，机械臂在工作时，传动轴的第 4 和第 5 轴段承受了较高的应力，并且在第 4 轴段观察到显著的变形。这些现象可能对传动轴的使用寿命产生负面影响。为了降低应力和变形，提高传动轴的刚度和疲劳寿命，优化传动轴的尺寸显得尤为重要。因此，我们将第 4 轴段和第 5 轴段的长度与直径作为设计变量，如表 2 所示。优化的主要目标是减少在工作条件下的应力和变形值，值越低表示优化效果越佳，本次优化将采用响应面法进行分析。

Table 2. Drive shaft parameters

表 2. 传动轴参数

序号	说明	变量名	初始量/mm	优化参数范围/mm
1	第 4 轴段长度	DS_D9	67	55-75
2	第 4 轴段直径	DS_D4	40	35-45
3	第 5 轴段长度	DS_D10	84	70-90
4	第 5 轴段直径	DS_D5	30	25-35

4.2. 响应面分析

图 6 是 ANSYS Workbench 中的响应面优化包含的分析结果，可以看到，在优化设计过程中，并不是每一个设计参数都对目标函数产生明显的影响，重点是研究各个设计参数对传动轴的应力、变形及质量的影响。结果表明，轴段 4 的直径对传动轴的最大变形及总重量有明显的影响。这表明，在设计过程中，关注关键参数的调整至关重要，以实现优化效果。

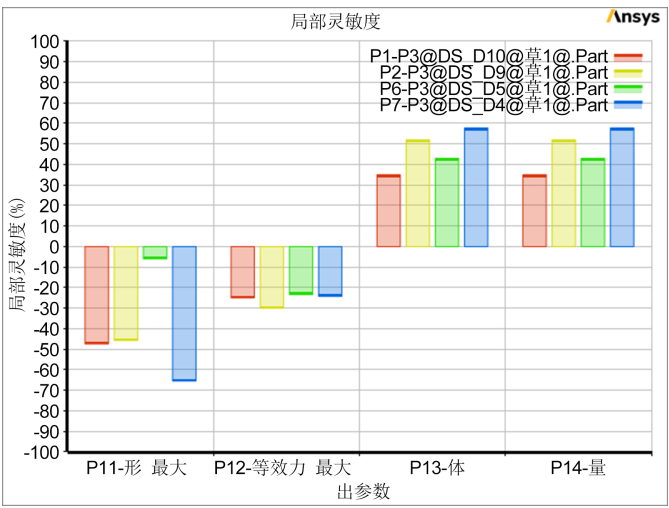


Figure 6. Stress solution result

图 6. 应力求解结果

选择任意两个设计变量和单个响应可以通过三维图表达三者的响应面关系。本文的设计变量和响应参数较多,无法直接观察到所有参数的响应面关系,如图7所示x轴为变量轴段5长度的变化范围,y轴为变量轴段4直径的变化范围,z轴为对应变形的变化范围;图8所示x轴为轴段5长度的变化范围,y轴为轴段4长度的变化范围,z轴为对应等效应力的变化范围;图9所示x轴为轴段4直径的变化范围,y轴为轴段4长度的变化范围,z轴为对应质量的变化范围。

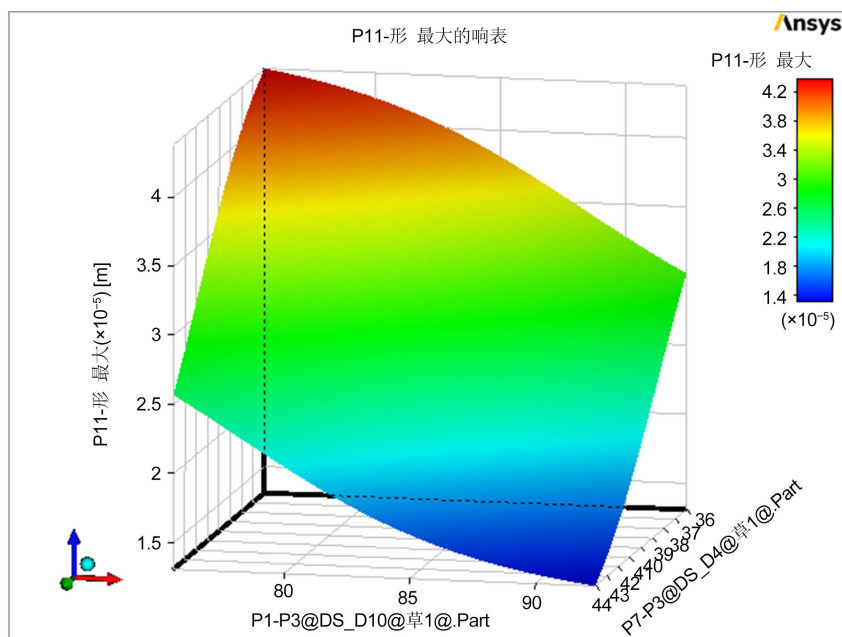


Figure 7. Deformation response surface model

图 7. 变形响应面模型

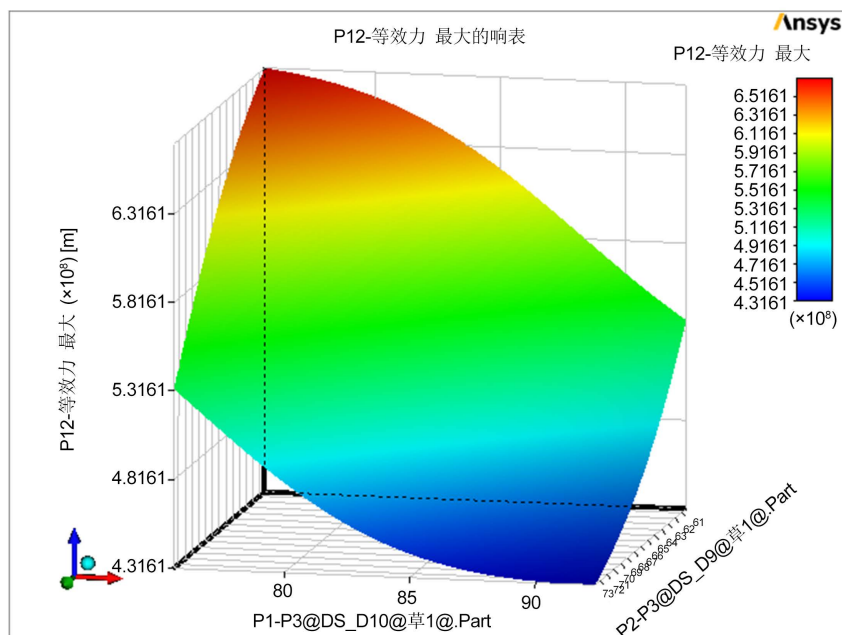


Figure 8. Equivalence force response surface model

图 8. 等效应力响应面模型

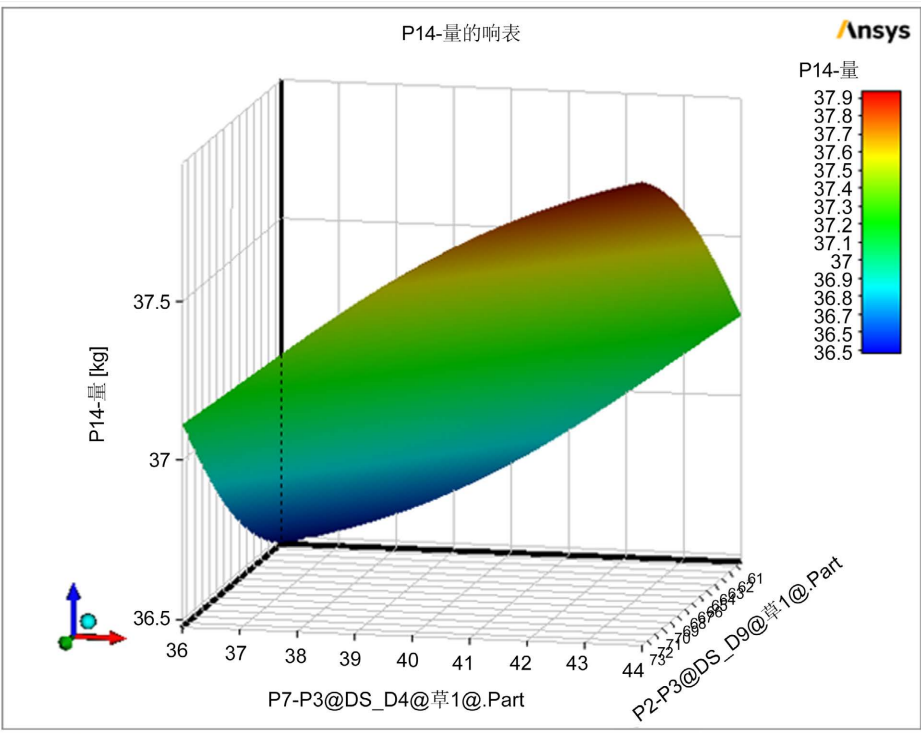


Figure 9. Mass response surface model
图 9. 质量响应面模型

4.3. 多目标优化

本文以质量最小化和等效应力最小化为目标，使用 MOGA 优化方法对该结构进行优化。MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm)是一种针对多目标优化问题的迭代遗传算法，特别适用于处理连续设计变量的优化。该方法能够有效搜索全局最优解，并可同时应用于响应面优化系统和直接优化系统。优化后的候选点数据列在表 3 中。

通过 ANSYS 软件的计算结果，生成了候选设计方案，如图 3 所示。根据表 3 的分析，候选点 3 在最大变形和最大应力方面均优于其他候选点，且其质量也有所降低。综合考虑，候选点 3 被选定为最优解。

Table 3. Drive shaft parameters
表 3. 传动轴参数

候选点	DS_D9/mm	DS_D4/mm	DS_D10/mm	DS_D5/mm	最大变形/mm	最大应力/Mpa	质量/kg
点 1	60.306	36.04	75.701	27.081	0.04332	703	36.375
点 2	60.374	36.04	75.684	27.658	0.04373	704.3	36.38
点 3	60.52	36.021	75.678	27.019	0.04328	702.6	36.379

接着，在 SolidWorks 里将选中候选点 3 的四个参数重新输入到方程式中，建立出新的传动轴。再将该模型导入到 ANSYS Workbench 模块进行静力学分析，进一步评估轴在正常工况下的应力和变形情况。最后经过分析，如图 10 和图 11 所示，为优化后的变形和应力结果。

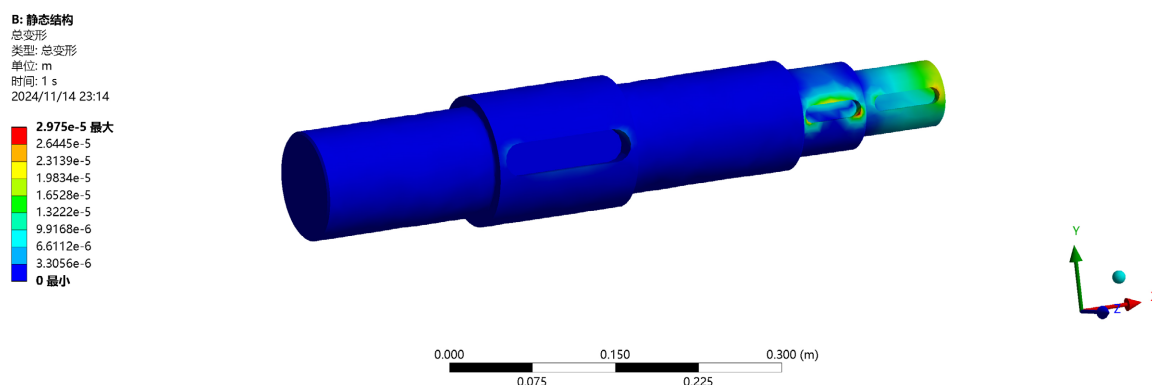


Figure 10. Deformation solution result

图 10. 变形求解结果

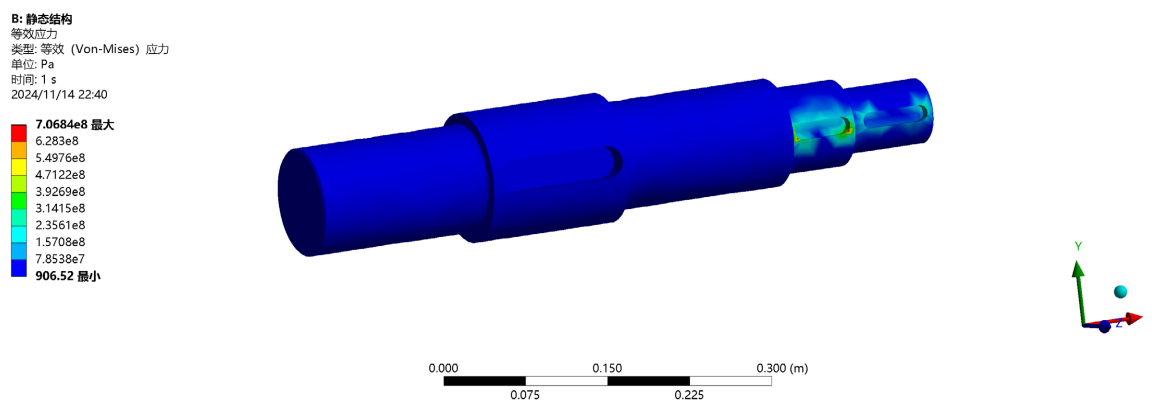


Figure 11. Stress solution result

图 11. 应力求解结果

5. 结论

本文通过大型球磨机衬板更换机械手的传动轴进行静力学以及响应面优化, 得到以下结论:

(1) 利用 ANSYS workbench 进行静力学分析, 得出在实际工况下的分析结果, 传动轴的最大应力和最大变形分别为 797.31 MPa、0.0365 mm, 结果均在设计要求范围内, 验证了原始设计的可靠性;

(2) 在 ANSYS workbench 的响应面优化模块中, 实现了传动轴的几何参数计算。通过对其进行优化, 得到的最大变形和最大应力分别减小 18.5%和 12%, 为未来类似传动轴的设计提供了有效参考;

(3) 通过多目标优化方法, 对传动轴的关键尺寸进行了调整, 显著提高了传动轴的刚度和强度, 优化设计方案满足了轻量化需求, 使得传动轴减重 1.8%, 保证了机械手在高负荷工况下的稳定性和使用寿命。

参考文献

- [1] 杨柳松, 赵魏, 胡同海, 等. 大型衬板机械手概况及进化趋势分析[J]. 矿山机械, 2020, 48(10): 57-61.
- [2] 杨溢, 耿洪臣. 磨机换衬板机械手的发展情况[J]. 中国重型装备, 2009(1): 44-46.
- [3] 吴辰, 侯红玲, 王飞. 基于 ANSYS 响应面法的发动机曲轴优化设计[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 6-11.
- [4] 施佳裕, 王忠, 殷文元. 基于弯扭复合的曲轴应力及响应面优化分析[J]. 机床与液压, 2020, 48(1): 116-120.
- [5] 吕泽苗. 基于 ANSYS 和 ADMAS 吊装输送机构传动轴的分析与优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(11): 164-

168.

- [6] 刘龙杰, 赵礼辉, 史成淼, 等. 基于响应面法传动直轴疲劳寿命优化[J]. 机械强度, 2022, 44(1): 215-224.
- [7] 刘军, 张宏, 黄华, 等. 基于响应面模型的泥浆泵曲轴结构优化设计[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(5): 879-885.
- [8] 姚行举, 于洁, 朱帅伦, 等. 高速重载下发动机曲轴失效分析与响应面优化设计[J]. 机床与液压, 2024, 52(19): 76-82.