



天津中德应用技术大学  
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 本科生毕业设计

航空发动机弹性小轴结构优化设计及分析

**Optimization Design and Analysis of Aeroengine Elastic Small  
Shaft Structure**

姓 名 刘灏楠

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程


指导教师 福巍

职 称 讲师

完成时间 2022年6月4日

# 天津中德应用技术大学

## 本科生毕业设计（论文）选题申报表

学 院	航空航天学院		申 报 人	姓 名	福巍		
专 业	飞行器制造工程			技术职务	正高	副高	中级
题目名称	航空发动机弹性小轴结构优化设计及分析						
题目类型	其他	题目来源	其他项目				
课题来源、背景及意义	<p>首先根据学院现有涡喷-6 航空发动机实物教具并结合学生兴趣能力，制定弹性小轴优化题目。涡喷-6 航空发动机是我国迄今为止生产数量最大的航空发动机，是中国首型超音速航空发动机。目前在我校 E4 航空航天学院三楼发动机实训中心有十台退役涡喷-6 航空发动机供学生学习使用。由于涡喷-6 在研发时期我国制造、装配工艺不成熟，许多零部件安装方式及位置不合理，在拆卸维修过程中极其不便捷，所以对其弹性小轴部分进行优化。使其在原有设计基础上进一步优化性能，提升维护便利性。</p>						
任务及要求	<p>在各大文库网站搜索近年关于航空发动机弹性小轴的资料，要求阅读 20 篇以上中文资料以及 10 篇以上英文资料。根据所查资料与自己的创意以及我国现阶段设计生产能力，用 SOLIDWORKS 软件绘制出各零部件模型，并进行模拟装配工作，要求结构合理可靠，并记录过程。反复检查系统中有无不合理之处，如各零部件配合间隙是否合理、各零部件尺寸是否符合航空标准、整个弹性小轴是否符合航空发动机外形轮廓等。对优化后的弹性小轴进行受力分析，对比结果是否可以达到理想状态。反复进行细节优化。详细记录优化过程及结果。</p>						
工作条件	<p>装有 SOLIDWORKS 软件的计算机、E4-3 发动机实训区，涡喷-6 航空发动机，量具，自习教室等。</p>						
知识与能力要求	<p>发动机原理与构造，钳工基础，装配工艺，自学 SOLIDWORKS 软件操作书籍，具有阅读英文论文的能力。</p>						
<p>系（教研室）审查意见：</p> <p style="text-align: center;">同意</p> <p style="text-align: center;">负责人(签名)：  2022 年 12 月 2 日</p>							



天津中德应用技术大学  
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 毕业设计（论文）任务书

题 目：航空发动机弹性小轴结构优化设计及分析

学 院：航空航天大学

专 业：飞行器制造工程

学生姓名：刘灏楠

学 号：18414020313

起止日期：2021年12月3日~2022年6月3日

指导教师：福巍

任务书下达日期： 2021 年 12 月 3 日

## 任务书填写要求

1. 毕业设计（论文）任务书由指导教师根据各课题的具体情况填写，经专业负责人审查签字后生效。此任务书应在毕业设计（论文）开始一周内填好并发给学生；
2. 任务书内填写的内容，必须和学生毕业设计（论文）完成的情况相一致；
3. 任务书内有关“学院”、“专业”等名称的填写，应写中文全称，不能写数字代码。学生的“学号”要写全号（如：16014010101）；
4. 有关年月日等日期的填写，应当按照国标 GB/T 7408—94《数据元和交换格式、信息交换、日期和时间表示法》规定的要求，一律用阿拉伯数字书写。如“2004 年 3 月 21 日”或“2004-03-21”。
5. 本毕业设计（论文）课题成果的要求，内容要具体化和数量化。如“毕业设计（论文）一套；A0 号装配图纸 1 张；A2 号电气控制原理图纸 2 张；实物样机 1 台；产品 2 件”等。

# 毕 业 设 计（论 文）任 务 书

## 1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

通过实训课程对 WP6 传动装置弹性小轴部件的拆卸和安装，捋清传动装置的基本结构以及工作原理，实训中发现 WP6 弹性小轴的安装及啮合情况无法明确发动机是否能正常运转，发现目前 WP6 弹性小轴的维修、拆卸及组装非常繁琐，大大影响了飞机发动机的维修效率及成本，对维修人员的专业技能要求过高。因此优化弹性小轴的结构，简化其安装方式及位置，提高工作效率，加强结构刚度、强度以及维修拆装方便等性能，经探讨研究现对 WP6 弹性小轴进行系统优化及分析。

## 2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

工作内容：

1.分析弹性小轴安装位置、方式的不足，提出改进方案

首先对弹性小轴进行一比一 3D 建模，分析系统中结构的不足之处、及其优缺点。

2.优化弹性小轴结构分析

对弹性小轴进行初步优化分析并进行 3D 建模，对比优化前后系统，对初步优化分析查漏补缺。发现优化后系统结构进行改进，进行二次优化。

3.优化后与模型对比分析

将最终优化系统与原系统进行总体的 3D 仿真对比分析，从某些方向进行入手如强度情况，最终测试得出最优方案。

## 3. 毕业设计（论文）课题成果（包括毕业设计论文、图表、实物样品等）：

毕业设计 1 套

# 毕 业 设 计（论 文）任 务 书

## 4. 推荐参考资料:

- [1] 马晓娟.涡喷发动机附件传动装置的多目标优化设计研究[D].西北工业大学.
- [2] 武三栓,李群力.某型发动机附件传动装置结构改进的研制[C]//中国航空学会.中国航空学会,2010.
- [3] 闫晓军,王建军,洪杰,等.典型航空发动机结构对比与分析[M].北京航空航天大学出版社,2011.
- [4] 李超,江平,栗晖,等.附件箱传动装置及其具有的航空发动机 Gear and accessories box has its aircraft engine: CN, CN202194728 U[P]. 2011.
- [5] 袁培益.论航空发动机的一个新领域——微型涡轮发动机[C]//中国航空学会第一届小型发动机,第二届直升机动力与传动装置学术讨论会. 1995.
- [6] 孙大心,白宏伟.一种航空发动机附件恒速传动装置:.
- [7] 王帮艳.提升中央传动装置工作可靠性的研究[J].科技风, 2015.
- [8] Paul Seidenmanx, David J.Spanovich,孙立.航空发动机的性能发展趋势[J].航空维修与工程, 2010(3):2.
- [9] 张伟,总主编.航空发动机[M].航空工业出版社.
- [10] 刘长福,主编.航空发机构造[M].国防工业出版社,1989.
- [11] 章永锋,航空发动机设计手册[M]航空工业出版社, 2001

所在专业审查意见:

同意

负责人: 姚莹涛

2021年 12月 6日



天津中德应用技术大学

Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

## 本科生毕业设计（论文）开题报告

题 目：航空发动机弹性小轴结构优化设计及分析

学 院：\_\_\_\_\_ 航空航天学院 \_\_\_\_\_

专 业：\_\_\_\_\_ 飞行器制造工程 \_\_\_\_\_

学生姓名：\_\_\_\_\_ 刘灏楠 \_\_\_\_\_

学 号：\_\_\_\_\_ 18414020313 \_\_\_\_\_

起止日期：\_\_\_\_\_ 2021 年 12 月 3 日—2022 年 6 月 3 日 \_\_\_\_\_

指导教师：\_\_\_\_\_ 福巍 \_\_\_\_\_

开题日期： 2022 年 3 月 5 日

## 一、开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

### （一）国内外研究（应用）情况

国外很重视附件传动的发展，并且做了远景规划。美国政府为保持在航空技术方面的领先地位，委托美国国家研究委员会、工程和技术系统委员会、航空航天局、航空技术委员会编写了“二十一世纪的航空技术”一文。该报告提出了在 2000~2020 年期间美国的航空科学技术方面必须发展的技术和所应采取的措施。在关于“推进技术”一章中明确指出，二十一世纪先进技术发动机的动力传输系统将采用无接触的电磁轴承代替传统的滚动轴承，在高速转子上安装电起动机、发电机，用全电气化附件取代传统的机械传动附件，使发动机的动力传输系统由传统的机械传动向全部电气化传动发展。实现这种革新的动力传输系统，可使发动机重量减轻 10%~15%，发动机性能提高 5%<sup>[3]</sup>。

航空发动机传动系统是带动发动机及飞机附件工作的重要子系统，一旦出现故障将会对整机的安全性和稳定性产生极大的影响。然而，受到长期测绘仿制工作模式的影响，承研单位对传动系统研制的相关技术研究不足，发动机研制及列装后仍不断发生传动系统故障 B3，成为型号研制“拖、降、涨”的重要因素之一<sup>[4]</sup>。

在上世纪五十年代我国引进苏联米格-19 型战斗机，经过仿制，形成歼-6 系列，涡喷 6 的原样机即是前苏联米格-19 飞机的动力装置。从 1962 年开始，成都发动机公司也试制该机，同年 9 月制成。在 1964~1982 年期间，进行了大量改进。涡喷-6 也是我国迄今为止生产数量最大的航空发动机，作为我国“元老级”的航空发动机，到目前为止对我国航空发动机的多项研究仍具有参考意义。在我国的航空发动机研制中，发动机附件传动系统的研究目前处于探索阶段，并无太大的进展，导致 WP6 发动机附件传动系统落后于主机发展。其中 WP6 弹性小轴的安装及啮合情况无法明确发动机是否能正常运转，发现 WP6 弹性小轴的维修、拆卸及组装非常繁琐，大大影响了 WP6 发动机的维修效率及成本，因此本次研究将针对 WP6 航空发动机传动系统的弹性小轴部分进行优化分析。

### （二）课题的目的和意义

在科技日新月异、蓬勃发展的脚步下，我国航空发动机的研制也在不断的探索中寻求发展与进步，为踏上建成航空强国的伟大征途，各型号层出不求的飞机也应运而生，这也标志着航空领域的质的飞跃。而航空发动机作为飞机的“心脏”，有着“工业之花”美誉的它正是需要我国攻克难题的重心，因此航空发动机部分结构的优化迫在眉睫。

航空发动机的传动装置更是其的关键技术，反观 WP6 的传动装置，追求了上下锥齿的吻合安全性、和力学的高弹性，但却忽略了安装和维修的便捷性，无法权衡好各方面的需求，这也直接影响了航空发动机的维修效率和成本。

正是 WP6 因为弹性小轴在拆装过程中会受到多方面的制约，传动装置弹性小轴的优化将更有可能在航空发动机领域掀起新的热潮和技术变革，现在也备受国内外的关注。

为简化 WP6 传动装置弹性小轴的拆卸及安装,明确安装后的齿轮啮合情况是否能保证飞机涡扇连接端的正常运转,打破折中和权衡的制约,减少 WP6 传动装置安装过程中的成本,提高工作效率为该次课题的主要目的。

### (三) 主要内容

研究内容 1:WP6 发动机弹性小轴结构分析及设计;

研究内容 2:弹性小轴模型的建立及优化;

研究内容 3:弹性小轴结构优化前后数据对比;

研究内容 4:对改进后的结构进行仿真受力优化对比。

通过大量文献深入研究,为提高弹性小轴的安装便捷性和稳定性,同时减少使用疲劳,增加使用寿命,现使用 solidworks 对弹性小轴改进后的结构进行建模,经过对原结构的分析以及对其进行相应构造的调整,将原对称轴端齿轮设计更换为非对称结构,将其一段齿轮的一字形凸台更改为圆弧形结构更加便于安装,同时在同一侧的齿轮上开通凹槽,将凹槽进行倒角,加入卡簧,增加轴身的安装固定性及安装准确性。结构设计后对其整体进行仿真受力优化分析,来验证结构是否可靠。


### (四) 参考文献

- [1] 董红涛,江平,粟晖,等. 附件箱传动装置及其航空发动机:, CN102269059A[P]. 2011.
- [2] 章永锋, 航空发动机设计手册[M]航空工业出版社, 2001
- [3] 周忠锋,石山. 附件传动装置锥齿轮装配调整方法浅析[J]. 航空维修与工程, 2016(2):3.
- [4] 李超, 江平, 粟晖,等. 附件箱传动装置及其航空发动机 Gear and accessories boxes its aircraft engine: CN, CN202194728 U[P]. 2011.
- [5] 刘庆东,史妍妍,崔洋,刘晓松.航空发动机传动系统技术成熟度评价方法的应用[J]航空发动机,2019,45(01):92-96.DOI:10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.01.017.
- [6] 孙大心,白宏伟. 一种航空发动机附件恒速传动装置:
- [7] 张伟,总主编.航空发动机[M].航空工业出版社.
- [8] 刘长福,主编.航空发动机构造[M].国防工业出版社,1989.
- [9] 王帮艳. 提升中央传动装置工作可靠性的研究[J]. 科技风, 2015(1):40-40.
- [10] SHI Yanyan, L Lin, KONG Xiangfeng. Study on the steady state thermal analysis method of accessory transmission system[C//2012 2nd International Conference on Materials Science and Information Technology.Xi'an :China Science and Technology Exchange Association, 2012:8-12.

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021.12.3- 2021.12.10	前期准备工作，查找、收集文献、了解相关的理论及研究成果。	掌握毕设的相关理论知识，确定大致的设计方向。
2021.12.10- 2021.12.15	收集资料文献，整理归纳总结，深度分析相关文献，确定研究方向，完成开题报告。	完成开题报告。
2021.12.15- 2022.1.31	按照要求与设计方完成弹性小轴的结构模型的搭建，并完成论文初稿。	结构模型完成，完成论文初稿。
2022.1.31- 2022.2.28	完成整体模型建立，对结构进行有限元分析，并修改完善论文。	整理模型建立完成，完成分析报告。
2022.2.28- 2022.4.1	论文的撰写和完善，模型进行优化。	完成论文撰写，模型进行最后的优化，中期答辩。
2022.4.1- 2022.5.20	确定论文终稿，完成PPT,准备最终答辩。	论文终稿，答辩PPT。
2022.6.1- 2022.6.4	最终答辩。	完成答辩。
完成课题的 现有条件	1. 具备良好的绘图能力，对 WP6 的结构有较好的了解。 2. 教室具有 WP6 实体教具。 3. 对机械结构的理解能力较高。 4. 具有优秀的动手实操能力。	
指导教师 意见	指导教师: <u>  <u>  福  巍  </u>  </u> <u>  2022  </u> 年 <u>  3  </u> 月 <u>  5  </u> 日	
开题答辩 小组意见	组  长: <u>  <u>  刘  金  利  </u>  </u> <u>  2022  </u> 年 <u>  3  </u> 月 <u>  5  </u> 日	

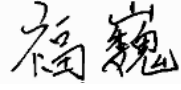
天津中德应用技术大学  
本科生毕业论文（设计）的声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名： 

2022年6月3日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过论文的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

学位论文指导教师签名： 

2022年6月3日

## 摘 要

子系统和整体都是相互依存共生的，航空发动机中也同样成立。现代航空发动机的功率和附件转速的逐年提高，传动系统方面也提出了更高的要求，高转速的附件传动系统不仅能提供更高的功率，在加强推重比方面也有更好的成效。

该篇论文是针对涡轮喷气式发动机进行传统系统的优化和改进，下文该发动机简称涡喷-6。经过完善前期准备工作并清楚了其整体构造之后，对传动系统进行了细致的拆装，此过程中发现它是主要由中心传动装置和外部传动装置两部分组成。通过文献的查阅以及与指导教师的沟通学习中发现涡喷-6 传动系统由于当时的技术条件限制和国家的迫切需求使得目前其仍有不足之处可进行优化改进。经与导师沟通后，最终决定对涡喷-6 传动系统中的弹性小轴进行结构优化设计及分析，通过 Solidworks 三维制图软件，绘制弹性小轴原结构和优化改进后结构的模型。将原有的弹性小轴的对称轴体结构更改为非对称结构，通过齿轮间的啮合定位进行连接。改变弹性小轴的凸台结构，改变轴端齿轮与传动系统的连接方式，通过卡簧配合进行连接。

经过本次毕业设计的学习和有关实验的论证，我将从涡喷-6 航空发动机出发由浅入深，由点到面的对一系列相关航空发动机的工作原理有更深层次的认知和理解。通过分析原弹性小轴和改进优化后弹性小轴的结构利弊，对比出结构调整后的优势和必要性，最终利用有限元分析来判断实验方案是否可行。

**关键词：**弹性小轴；齿轮啮合定位；凸台结构；卡簧配合

## ABSTRACT

Subsystems and the whole are interdependent and symbiotic, and the same is true in aeroengines. With the increasing power and accessory speed of modern aero-engine year by year, the transmission system also puts forward higher requirements. The accessory transmission system with high speed can not only provide higher power, but also have better results in strengthening the thrust weight ratio.

This paper is to optimize and improve the traditional system of turbojet engine, which is called turbojet-6 for short. After completing the preliminary preparations and clarifying the overall structure, the transmission system was carefully disassembled and assembled. During this process, it was found that it was mainly composed of central transmission device and external transmission device. Through literature review and communication with instructors, it is found that the turbojet 6 transmission system still has some disadvantages and can be optimized and improved due to the limitations of technical conditions at that time and the urgent needs of the country. After communicating with the tutor, it was finally decided to carry out the structural optimization design and analysis of the elastic small shaft in the turbojet-6 transmission system, and draw the original structure and the optimized and improved structure model of the elastic small shaft through the SolidWorks three-dimensional drawing software. The original symmetrical shaft structure of the elastic small shaft is changed into an asymmetric structure, which is connected through the meshing and positioning between the gears. Change the boss structure of the elastic small shaft, change the connection mode between the shaft end gear and the transmission system, and connect through the snap ring.

After the study of this graduation project and the demonstration of relevant experiments, I will have a deeper understanding of the working principles of a series of related aero-engines from the turbojet-6 aero-engine. By analyzing the advantages and disadvantages of the original elastic small shaft and the improved and optimized elastic small shaft, the advantages and necessity of the structure adjustment are compared. Finally, the finite element analysis is used to judge whether the experimental scheme is feasible.

**Key words:** Elastic small shaft; Gear engagement; Boss structure; Snap ring fit

## 目 录

第一章 绪论.....	2
1.1 课题背景及意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 本文的研究内容和方向.....	3
第二章 总体方案介绍.....	4
2.1 传动系统弹性小轴简介.....	4
2.2 发动机传动系统的组成.....	4
2.3 设计思路和综合考量.....	4
2.4 研究过程概述.....	5
第三章 传动系统结构分析及优化.....	6
3.1 弹性小轴三维建模.....	6
3.1.1 弹性小轴建模及 Solidworks 建模功能介绍.....	6
3.1.2 弹性小轴及其联动零部件简易配合.....	9
3.2 弹性小轴结构优化.....	11
第四章 原模型及改进模型的仿真.....	14
4.1 Solidworks 中 Simulation 插件介绍.....	14
4.2 弹性小轴的热力学分析.....	14
4.2.1 弹性小轴热力学分析过程.....	14
4.2.2 热力学仿真数据对比.....	19
4.3 弹性小轴静应力分析.....	20
4.3.1 弹性小轴静应力分析过程.....	20
4.3.2 静应力仿真分析结果对比.....	26
4.4 弹性小轴优化材料静应力分析过程.....	27
4.4.1 静应力仿真分析对比.....	32
4.4.2 仿真计算结果分析.....	32
第五章 不足和展望.....	34
参考文献.....	37
致 谢.....	38

## 第一章 绪论

### 1.1 课题背景及意义

在科技日新月异、蓬勃发展的脚步下，我国航空发动机的研制也在不断的探索中寻求发展与进步，为踏上建成航空强国的伟大征途，各型号层出不求的飞机也应运而生，这也标志着航空领域质的飞跃。而航空发动机作为飞机的“心脏”，有着“工业之花”美誉的它正是我国需要攻克难题的重心，因此航空发动机部分结构的优化迫在眉睫。高技术，高投入、高风险、高壁垒是航空发动机行业的几大标志性特性，其中技术的高壁垒使得我国一直处于孤军奋战，闭门造车的困境中，研发难度及成本也非常之大，同时我国在航空发动机方向的研究资源也受到限制，高精尖工业技术基础薄弱，想要短时间赶超也并非易事，其次设计经验短缺导致无法保证发动机的每一次改革创新都在原基础上更为精进。由此可见，中国发动机事业仍任重道远<sup>[1]</sup>。

本次论文针对涡喷-6 航空发动传动系统的弹性小轴进行更深层次的挖掘和分析。飞机的起动系统、滑油系统、液压系统、燃油系统等主要附件都是由发动机转子通过附件传动装置来带动的。航空发动机传动装置一般由内部齿轮箱和外部齿轮箱两部分组成<sup>[2]</sup>。其中弹性小轴起到了连接上下齿轮箱进行联动的作用，有着一点之力带动整机之效，因此通过优化其上下两端结构来加强齿轮刚度和耐磨，增加轴端凹槽和卡簧配合、由对称结构更换为非对称结构来提高安装准确性，从而减少传动装置的疲劳，提高弹性小轴的使用寿命。

### 1.2 国内外研究现状

国外很重视附件传动的发展，并且做了远景规划。美国政府为保持在航空技术方面的领先优势，委托美国国家研究委员会、工程和技术系统委员会、航空航天局、航空技术委员会编写了“二十一世纪的航空技术”一文。该报告提出了在 2000~2020 年期间美国的航空科学技术方面必须发展的技术和所应采取的措施。在关于“推进技术”一章中明确指出，二十一世纪先进技术发动机的动力传输系统将采用无接触的电磁轴承代替传统的滚动轴承，在高速转子上安装电起动机、发电机，用全电气化附件取代传统的机械传动附件，使发动机的动力传输系统由传统的机械传动向全部电气化传动发展。实现这种革新的动力传输系统，可使发动机重量减轻 10%~15%，发动机性能提高 5%<sup>[3]</sup>。

航空发动机传动系统是带动发动机及飞机附件工作的重要子系统，一旦出现故障将会对整机的安全性和稳定性产生极大的影响。然而，受到长期测绘仿制工作模式的影响，承研单位对传动系统研制的相关技术研究不足，发动机研制及列装后仍不断发生传动系

统故障 B3，成为型号研制“拖、降、涨”的重要因素之一<sup>[4]</sup>。

涡喷-6 是我国迄今为止生产数量最大的航空发动机，作为我国“元老级”的航空发动机，到目前为止对我国航空发动机的多项研究仍具有参考意义。在我国的航空发动机研制中，发动机附件传动系统的研究目前处于探索阶段，并无太大的进展，导致涡喷-6 发动机附件传动系统落后于主机发展。其中涡喷-6 弹性小轴的安装及啮合情况无法明确发动机是否能正常运转，发现涡喷-6 弹性小轴的维修、拆卸及组装非常繁琐，大大影响了涡喷-6 发动机的维修效率及成本，因此本次研究将针对涡喷-6 航空发动机传动系统的弹性小轴部分进行优化分析。

### 1.3 本文的研究内容和方向

研究内容 1:涡喷-6 发动机弹性小轴结构分析及设计；

研究内容 2:弹性小轴模型的建立及优化；

研究内容 3:弹性小轴结构优化前后数据对比；

研究内容 4:对改进后的结构进行仿真受力优化对比。

通过大量文献深入研究，为提高弹性小轴的安装便捷性和稳定性，同时减少使用疲劳，增加使用寿命，现使用 Solidworks 对弹性小轴改进后的结构进行建模，经过对原结构的分析以及对其进行相应构造的调整，将原对称轴端齿轮设计更换为非对称结构，将其一段齿轮的一字形凸台更改为圆弧形结构更加便于安装，同时在同一侧的齿轮上开通凹槽，将凹槽进行倒角，加入卡簧，增加轴身的安装固定性及安装准确性。结构设计后对其整体进行仿真受力优化分析，来验证结构是否可靠。

## 第二章 总体方案介绍

### 2.1 传动系统弹性小轴简介

我校教学实验室中的涡喷-6 航空发动机传动系统的弹性小轴是本次的主要研究对象,研究之初需对结构本身有充足的了解以及对相关知识有一定深度的掌握,通过图书馆书籍查阅,网上文献的参考学习,再通过实训实操中对涡喷-6 航空发动机传动系统的拆卸,明晰传动系统是由哪几部分组成,各部分的位置及其各自的作用,对与弹性小轴相连接的组件的尺寸进行记录,并据此构建三维模型。以下将简要概述涡喷-6 航空发动机的历史背景。

经查阅文献、图书馆查阅相关资料获悉,涡喷-6 系列发动机是中国生产的第一个轴流式单转子带加力燃烧室的涡轮喷气发动机,于 1966 年 5 月正式被定名为“涡喷-6 型发动机”<sup>[5]</sup>。1959 年 3 月,国家鉴定委员会鉴定验收、批准投产,但到 1961 年 10 月才通过了全寿命(即 100 小时)试车考核,此后方开始实际批生产。但由于批量投入生产前忽略了对其薄弱环节的细致研究分析,导致其出现多次重大事故,经 1970 年沈阳航空发动机厂的不懈努力,再次将涡喷-6 发动机的首翻期提高到 200 小时<sup>[6]</sup>。

### 2.2 发动机传动系统的组成

航空发动机传动系统是一个多级数、多分支、含非平行轴的齿轮耦合复杂转子系统,由于齿轮啮合的作用,各单根转子的振动已不再是独立的,而是彼此产生了耦合。将发动机转子的功率,转速传输到附件并驱动附件以一定的转速和转向工作的齿轮轮系和转动轴的组合体成为附件传动装置<sup>[7]</sup>。

航空发动机传动系统包括两个主要部件,分别是中心传动装置和外部传动装置。下面简单介绍各部分的功能。

**中心传动装置:** 将发动机转子的转动变为与发动机轴线相垂直的转动,以便将发动机转子的一部分功率传递到发动机外。

**外部传动装置:** 将垂直于发动机转子轴线的转动变为轴向的转动,并将传递到发动机外的功率分配给各附属系统<sup>[8]</sup>。

传动系统是航空发动机的重要子系统,发动机驱动附件及飞机中需要驱动的附件均需由它来带动工作的,一旦传动系统出现故障将会对飞机的安全性和飞行的稳定性造成极大影响,甚至可能导致战斗机的动力丧失<sup>[9]</sup>。

### 2.3 设计思路和综合考量

本次论文针对涡喷-6 航空发动机传动系统中弹性小轴的结构优化设计及分析进行展

开，因该系统在飞机的稳定飞行及安全可靠性方面有着举足轻重的作用，所以在设计优化方案时，需从以下几点考虑入手：

(1)寿命耐用性：传动系统的弹性小轴在连接压气机转子和传动装置上起着至关重要的作用，因此要保证其寿命的稳定性。

(2)安装便捷性：弹性小轴的拆装在实际操作中的表现不太理想，为提高生产及维修效率应考虑结构改进，提高维修便捷性。

(3)安装准确性：将对称结构设计为非对称结构，增加安装的确定性。

(4)环境适应性：在不同的飞行环境中飞机都要保证能够稳定飞行，如高空氧气、高温、低温、噪声、气压、振动、喘振甚至高山、雷电、鸟撞飞机等多变环境下均适用。（实验环境和经费有限，需在真机情况下展开进行）

(5)适航性：通过航空器全寿命周期内的设计、制造、试验、使用、维护和管理各个环节来实现和保持的。

## 2.4 研究过程概述

先查阅涡喷-6 航空发动机的有关资料文献做好前期准备工作，接下来需单独对弹性小轴部分记录实际尺寸。通过拆卸分离可得知传动系统主要由中心传动装置及外部传动装置两部分构成。通过 Solidworks 三维建模，将弹性小轴原模型及优化改进模型绘制出来，参考以往相关文献及书籍，确定研究方向，并与导师商议研究方向是否正确可行，最终前后模型进行结构比较，分析利弊，得出结论。

## 第三章 传动系统结构分析及优化

### 3.1 弹性小轴三维建模

#### 3.1.1 弹性小轴建模及 Solidworks 建模功能介绍

美国 Solidworks 公司推出的功能强大的三维机械设统一 Solidworks 计软件系，1995 年制造完成至今，其易用性、优异的性能和创新性种种好处获得了机械工程师的一致好评，在同类软件的激烈竞争中独占鳌头，是三维机械设计软件的规范。

Solidworks 主要有草图绘制、装配模块、零件设计、钣金设计、工程图模块、模具设计、运动仿真等。本章内容主要应用零件设计、装配模块两个方面。

创建和编辑三维实体模型是创建模块的范畴之内。在大多数情况下，创建三维实体模型后利用软件进行产品设计和开发是该软件的主要用途，因此零件模块也是最基本和最核心的模块。利用 Solidworks 软件进行三维实体造型的过程，实际上就是零件和模块进行各种类型创建的过程。这些特征之间即可单独成立，也可根据某种参考关系相互依存，例如各特征之间存在的父子关系等<sup>[10]</sup>。

零件间的相对位置关系大多通过装配模块来建立，进一步构成复杂的装配体。其特点如下：部件定位方法更加清晰易懂，部件间的位置关系的设置更加方便。系统提供了十几种配合方式，通过对部件添加多个配合，可以准确把部件装配到位。

通过 Solidworks 三维建模软件并参照实际测量的真机的相关结构尺寸绘制模型，以下为弹性小轴及其连接件的三维建模过程，实物原图如下图所示：



弹性小轴实物原图

(1) 启动 Solidworks 三维绘图软件，先从弹性小轴的轴身绘制入手。选中原点画出矩形，矩形尺寸为样机测绘的实际数值并给与标定，关闭草图界面。将平面模型旋转拉伸，得到圆柱体（40\*400 mm）。

(2) 制作轴端齿轮，首先通过草图绘制除三个圆形，分别为齿根圆、分度圆和齿顶圆。

(3)随后开始绘制齿轮轮廓,使用样条曲线命令绘制,根据齿轮轮廓大致绘制图案,如图 3-1。

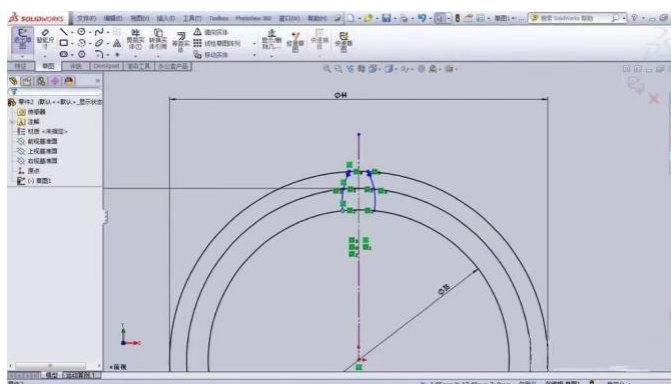


图 3-1 轴端齿轮轮廓线

(4)使用剪裁实体指令,将多余的线条剪切掉,将分度圆线条删除。

(5)点击左上角“特征”菜单里面的“拉伸凹凸/基台”命令,齿轮厚度设定为 40mm,如图 3-2 所示。

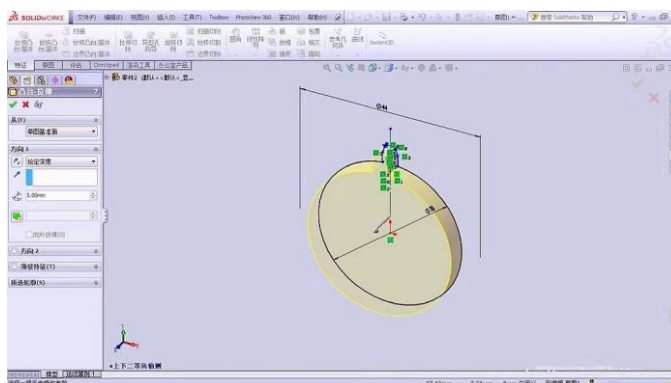


图 3-2 齿轮拉伸

(7)选择“特征”菜单里的“线性阵列”选项,选择“圆周阵列”“轴阵列”选择面一,齿数选择 25,如图 3-3 所示。

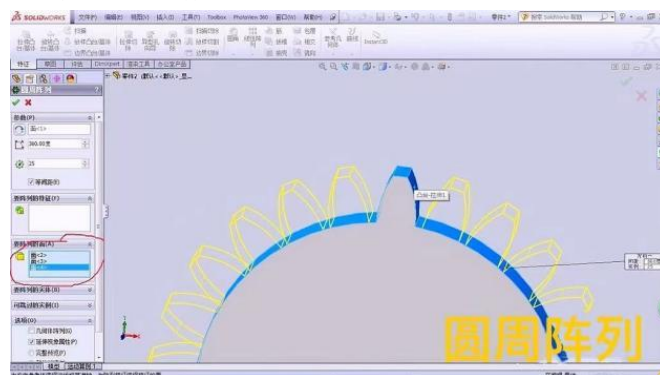


图 3-3 齿轮圆周阵列

(8)选择要阵列的面,我选择了已画好的齿轮的三个面,分别是两侧面和齿顶面。

(9) 选择齿轮的一个断面，点击“草图绘制”画所示草图，然后点击特征里的拉伸切除选项，结果如图 3-4 所示。

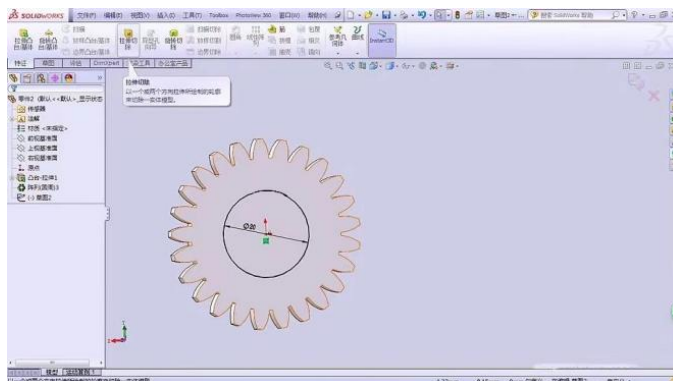


图 3-4 齿轮拉伸切除

(10) 最后点击确定，完成齿轮绘制，结果如图 3-5 所示。

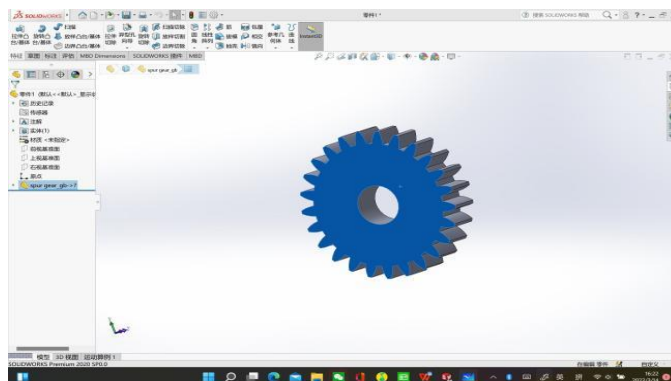


图 3-5 齿轮绘制完成

(11) 完成齿轮和轴身配合，完成弹性小轴模型构建，结果如图 3-6 所示。

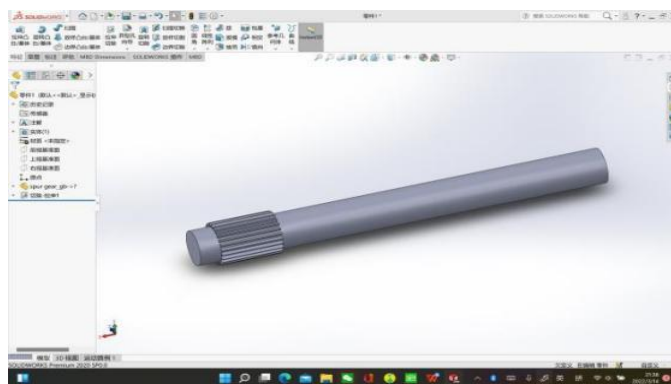


图 3-6 弹性小轴轴身构建

(12) 正视于凸台面，于中心点画出对称线，点击“拉伸切除”构造一字型凸台结构，凹槽深度为 40mm，宽度为 60mm，结果如图 3-7 所示。

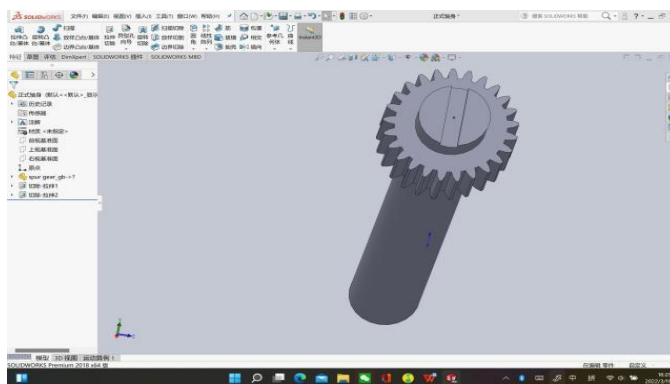


图 3-7 弹性小轴凸台构建

(13) 从零件库中调取与轴身尺寸吻合的齿轮。

(14) 打开“草图绘制”选项，正视于齿轮面，点击“转化实体引用”将齿轮外圈的轮廓线转换为实体。

(15) 退出草图，点击草图进行复制。

(16) 打开轴身零件图，将复制的齿轮草图粘贴到界面上。

(17) 将齿轮草图与轴心关系设置为同轴心。

(18) 点击“拉伸凸台”选项，将齿轮拉起，与另一端齿轮同等高度，完成轴身零件图的绘制，为后期轴身的静应力分析及热力学分析做好基础。

### 3.1.2 弹性小轴及其联动零部件简易配合

弹性小轴是连接压气机转子和传动装置的主要部件，因此需将上下连接的零部件简易的画出，配合轴身转动，完成整套模型的构建。

(1) 启动 Solidworks 绘制出传动装置的金属外壳。在前视基准面中绘制传动装置外部金属壳体的模型。

(2) 利用拉伸切除，沿外部金属壳的平面草图的 Y 轴局部界面切除 40mm 深，结果如图 3-8 所示。

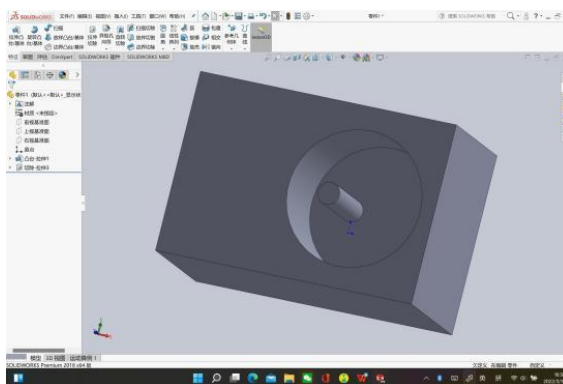


图 3-8 联动零部件壳体结构

(3) 同上画出同齿数齿轮，在前视基准面上创建并绘制草图，选择装配选项，将壳体凹处的轴身面与齿轮内侧面进行配合，结果如图 3-9 所示。

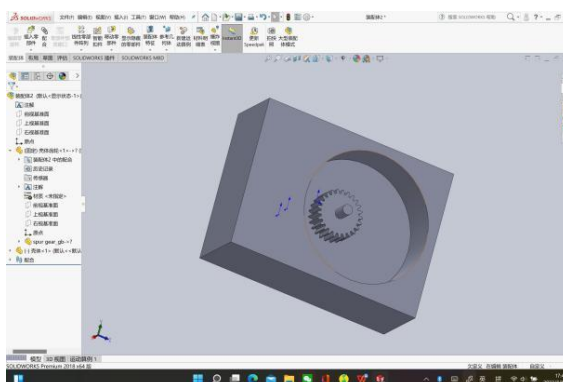


图 3-9 壳体齿轮配合模型

(4) 将壳体底部开口，选择前视基准面，点开草图绘制，底部通过拉伸基础，构造一字型凸台，结果如图 3-10 所示。

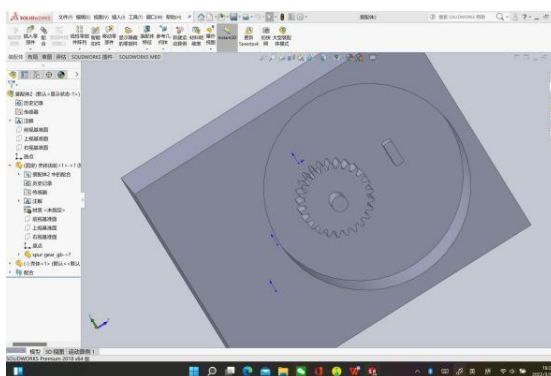


图 3-10 增加配合轴体的凸台

(5) 插入轴身零部件，将轴端齿轮的齿顶与壳体配合齿轮的齿根配合，选择相切，结果如图 3-11 所示。

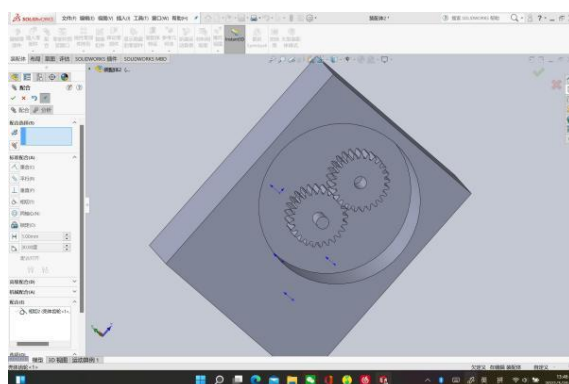


图 3-11 轴端齿轮与壳体配合示意图

## 3.2 弹性小轴结构优化

本人在大四上学期的发动机拆装实践课程中才深入的了解到了发动机的构造以及弹性小轴的应用原理。在拆卸以及判断安装是否准确的过程中发现其构造仍有改进的空间，能够提高安装的效率和准确性，因此在弹性小轴的构造上进行深入的研究。根据国外成熟机型的相关卡扣构造产生灵感，将在原有的基础上，在轴端齿轮处开凹槽，通过安装卡簧来提高安装准确性，并将轴端的一字型凸台结构更改为圆弧形结构，安装时更方便嵌入。

根据原有结构的受力分析，参考国内外文献的同时结合目前成熟机型的弹性小轴结构，与导师探讨后对其进行优化改进。

(1) 首先从零件库中调取与轴身尺寸吻合的齿轮。

(2) 打开“草图绘制”选项，正视于齿轮面，点击“转化实体引用”将齿轮外圈的轮廓线转换为实体。

(3) 退出草图，点击草图进行复制。

(4) 打开轴身零件图，将复制的齿轮草图粘贴到界面上。

(5) 将齿轮草图与轴心关系设置为同轴心。

(6) 点击“拉伸凸台”选项，将齿轮拉起，与另一端齿轮同等高度，完成轴身零件图的绘制，为后期轴身的静应力分析及热力学分析做好基础。

(7) 对圆柱凸台进行“圆角”命令，圆角  $d=15\text{mm}$ ，结果如图 3-12 所示。

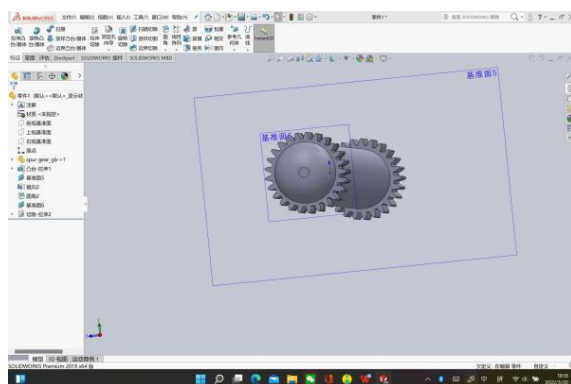


图 3-12 轴端圆弧凸台模型

(8) 在 Toolbox 中点击“GB”选项，选择“垫圈和挡圈”中的“挡圈”，选择轴用弹性挡圈，结果如图 3-13 所示。

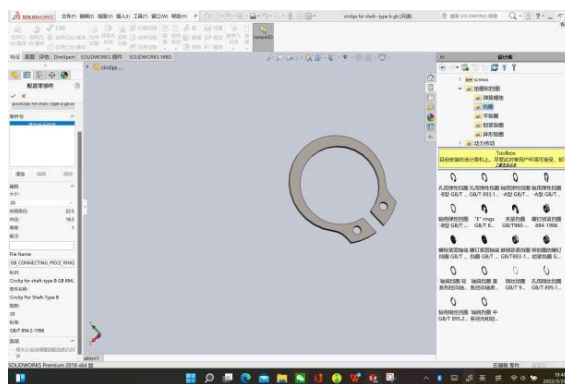


图 3-13 轴用弹性挡圈

(9)再对轴端齿轮构建挡圈凹槽，找到轴身零部件，点击轴端凸台面，新建参考面，凸台圆心绘制圆为  $R=15\text{mm}$ 、使其完全包含凸台，选择拉伸切除命令，沿 Y 方向，根据机械设计手册中标准数据拉伸  $10\text{mm}$ ，完成结果如图 3-14 所示。

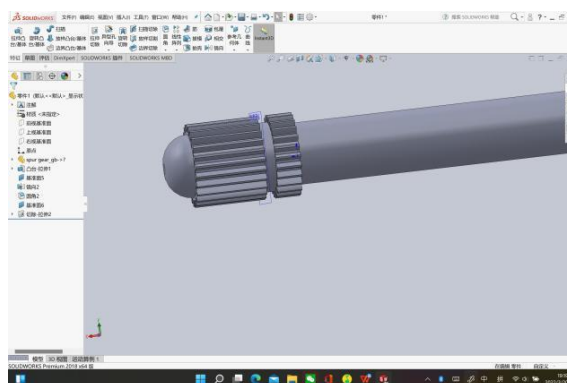


图 3-14 挡圈凹槽

(10) 将卡簧和轴端开的凹槽配合，完成结果如图 3-15 所示。

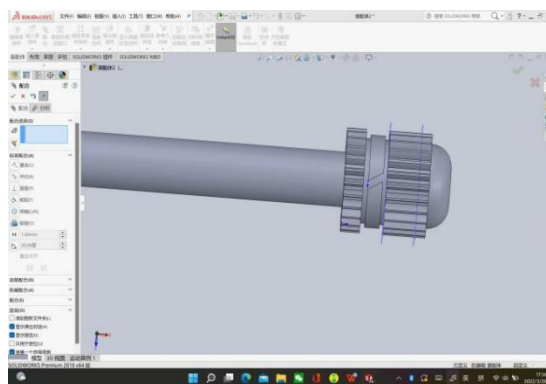


图 3-15 卡簧配合

(11) 在壳体底部开圆弧型凹槽，与轴端圆弧凸台配合，方便轴体嵌入，完成结果如图 3-16 所示。最后将弹性小轴与壳体配合，将轴端齿轮的齿根与联动装置齿轮的齿尖相配合，得到如图 3-17 所示。

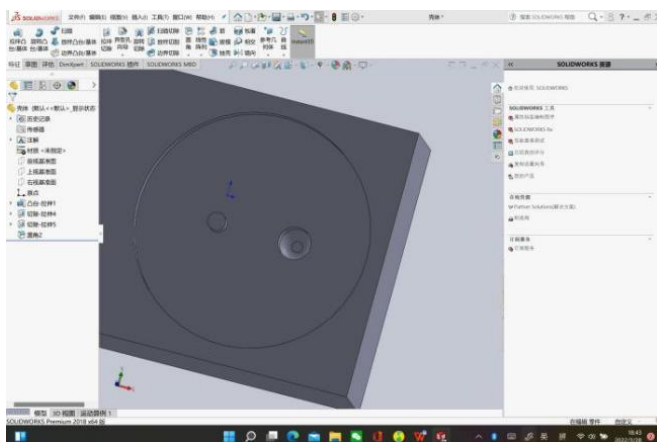


图 3-16 壳体凹槽模型

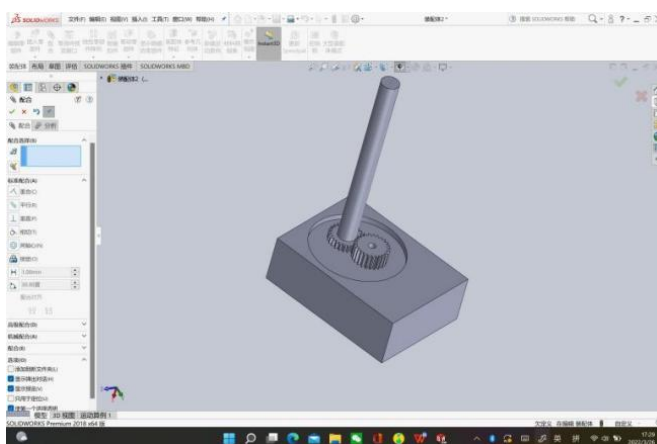


图 3-17 弹性小轴与壳体配合

## 第四章 原模型及改进模型的仿真

### 4.1 Solidworks 中 Simulation 插件介绍

本章节将通过 Solidworks 软件对弹性小轴进行结构对比以及数据分析，SW 是达索系统下的一个子公司，该集团提供涵盖整个产品生命周期的系统，包括设计、工程、制造和产品数据管理等各个领域中的最佳软件系统，是世界上第一个基于 Windows 开发的三维 CAD 系统。

该章主要利用 Simulation 插件来满足我的实验需求，涉及静应力分析和热力学分析两个模块。热力学分析和静应力分析中均涵盖了材料的选择、结构网格的性质划分与选择、几何面的固定、数值的定义和作用平面的选择。Simulation 作为软件整体下的一个分支插件，使从建模到分析一体化，更加容易操作。不同实验所需的数据分析，Solidworks 大致都可以满足。比如，做热力学分析、静力学分析，疲劳测试以及屈服强度分析等。因此可以通过此软件来完成我的毕业论文中所需的实验数据支撑。

通过大二大三对 Solidworks 的学习，平时自己的应用、科技立项等的使用中发现该软件的便利性和实用性，在数据分析这方面有着特有的优势。应用该软件能够很好的帮我完成论文中的静应力分析和热力学分析，得出来优化前后模型的数据并进行对比，能够说明优化模型的可行性，为理论提供依据。

### 4.2 弹性小轴的热力学分析

由于弹性小轴本身的作用就是联动装置转动运行，摩擦中会产生热量，机械机构在温度的变化下会有不同的表现，如：高温振动下不同齿轮啮合的吻合性、高温环境不同温度材料的膨胀性、高温运动过程中材料产生协调变形的配合性等。所以对弹性小轴进行热力学分析很有实际意义。

#### 4.2.1 弹性小轴热力学分析过程

第一步需选择定义结构分析过程的材料，通过查阅以往的数据显示：弹性小轴使用材料为可铸造铁。是上世纪 50、60 年代应用最广的发动机零件材料，通过查询可铸造铁的蠕变温度及其长期工作的温度环境，对原弹性小轴和优化后的弹性小轴在不同温度下进行热力学分析对比实验。

弹性小轴的使用温度为(-50~+300)°C，根据涡喷六航空发动机振动图谱，通过查询资料，通过蠕变温度选取几个代表性的几个观测点-50°C、0°C、+50°C、+100°C、+150°C、+200°C和+300°C。根据以上设置的几个观测点进行热力学分析。

在热力学仿真分析中设置原弹性小轴工作环境温度为 $-50^{\circ}\text{C}$ 时，结果如图 4-1 所示。

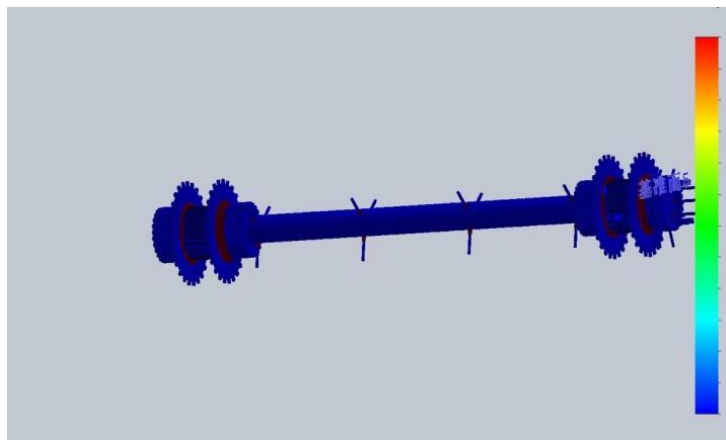


图 4-1 原弹性小轴 $-50^{\circ}\text{C}$

在热力学仿真分析中设置改进后弹性小轴工作环境温度为 $-50^{\circ}\text{C}$ 时，结果如图 4-2 所示。

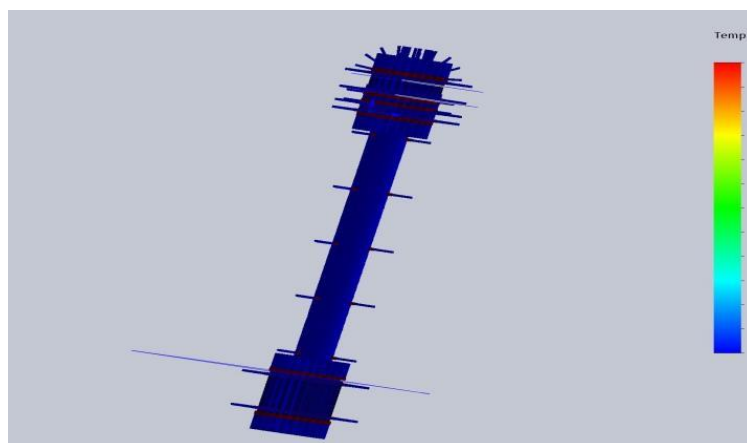


图 4-2 改进弹性小轴 $-50^{\circ}\text{C}$

在热力学仿真分析中设置原弹性小轴工作环境温度为 $0^{\circ}\text{C}$ 时，结果如图 4-3 所示。

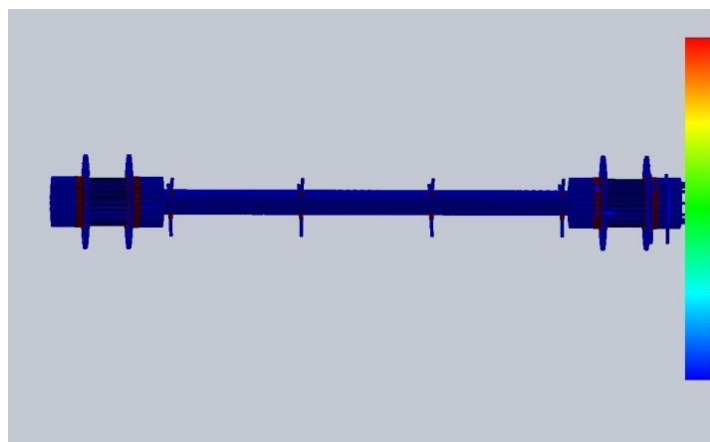


图 4-3 原弹性小轴 $0^{\circ}\text{C}$

在热力学仿真分析中设置改进后弹性小轴工作环境温度为  $0^{\circ}\text{C}$  时，结果如图 4-4 所示。

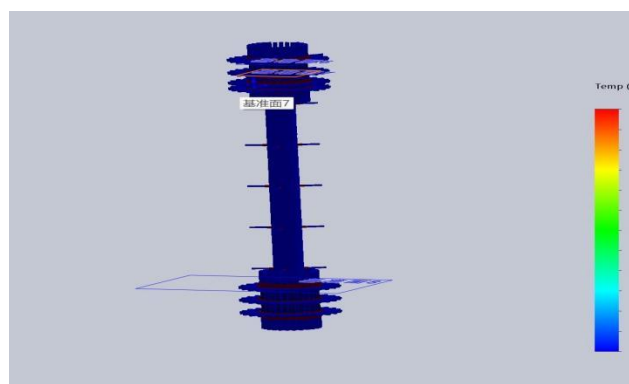


图 4-4 改进弹性小轴  $0^{\circ}\text{C}$

在热力学仿真分析中设置原弹性小轴工作环境温度为  $+50^{\circ}\text{C}$  时，结果如图 4-5 所示。

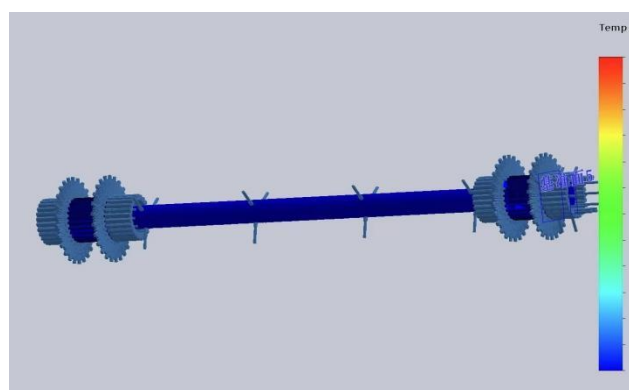


图 4-5 原弹性小轴  $50^{\circ}\text{C}$

在热力学仿真分析中设置改进后弹性小轴工作环境温度为  $+50^{\circ}\text{C}$  时，结果如图 4-6 所示。

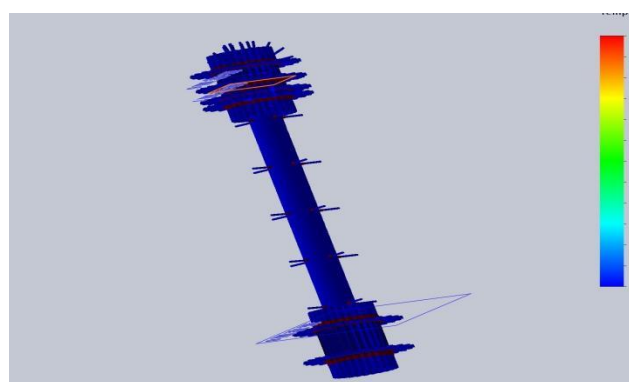


图 4-6 改进弹性小轴  $50^{\circ}\text{C}$

在热力学仿真分析中设置原弹性小轴工作温度为+100℃时，结果如图 4-7 所示。

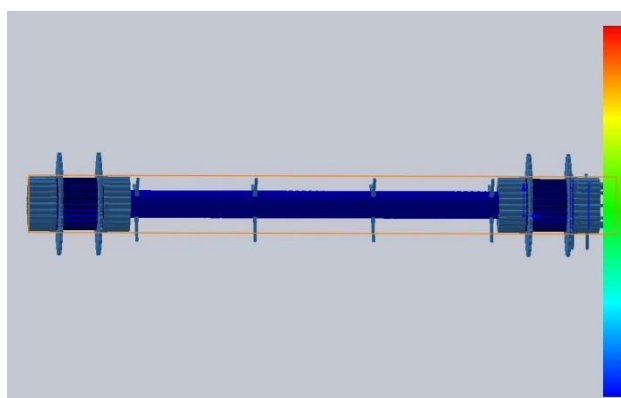


图 4-7 原弹性小轴 100℃

在热力学仿真分析中设置改进后弹性小轴工作温度为+100℃时，结果如图 4-8 所示。

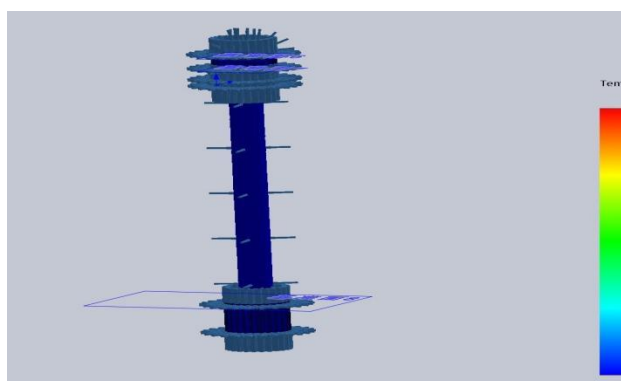


图 4-8 改进弹性小轴 100℃

在热力学仿真分析中设置原弹性小轴工作温度为+150℃时，结果如图 4-9 所示。

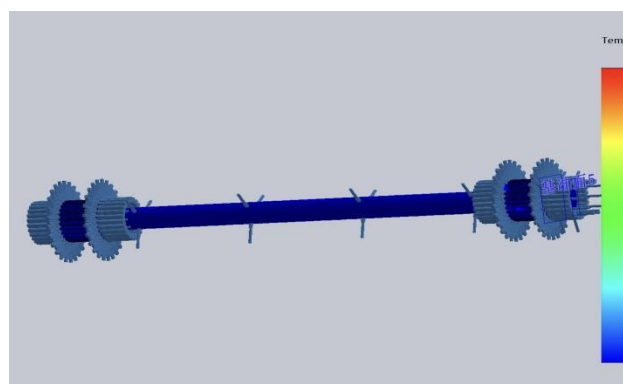


图 4-9 原弹性小轴 150℃

在热力学仿真分析中设置改进后弹性小轴工作温度为+150℃时，结果如图 4-10 所示。

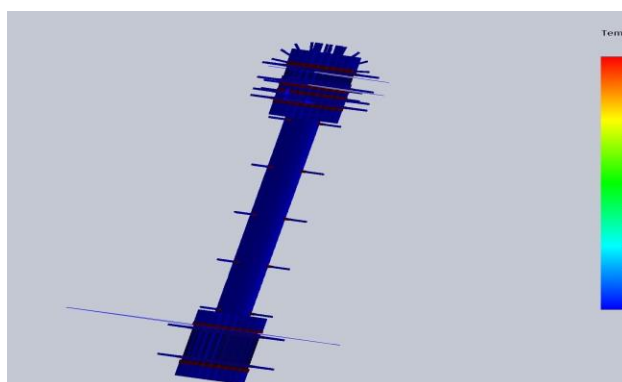


图 4-10 改进弹性小轴 150℃

在热力学仿真分析中设置原弹性小轴工作温度为+200℃时，结果如图 4-11 所示。

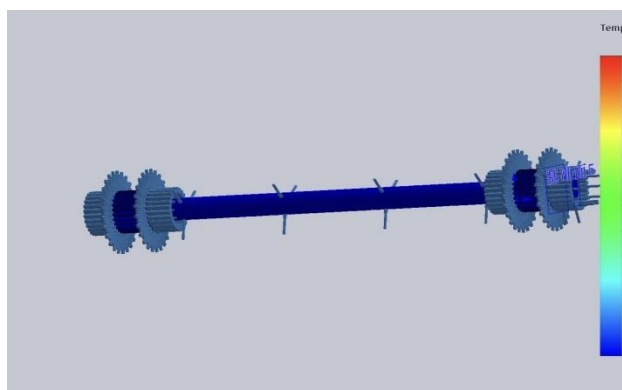


图 4-11 原弹性小轴 200℃

在热力学仿真分析中设置改进后弹性小轴工作温度为+200℃时，结果如图 4-12 所示。

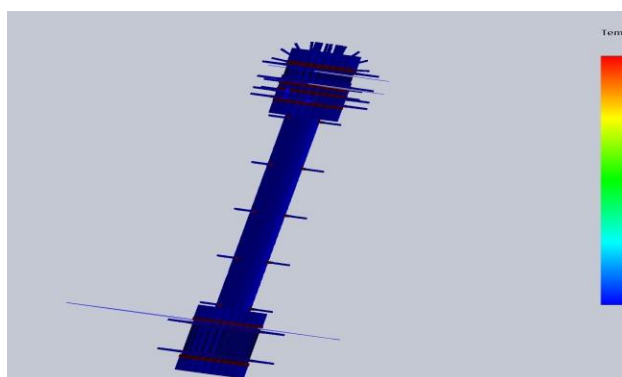


图 4-12 改进弹性小轴 200℃

在热力学仿真分析中设置原弹性小轴工作温度为+300℃时，结果如图 4-13 所示。

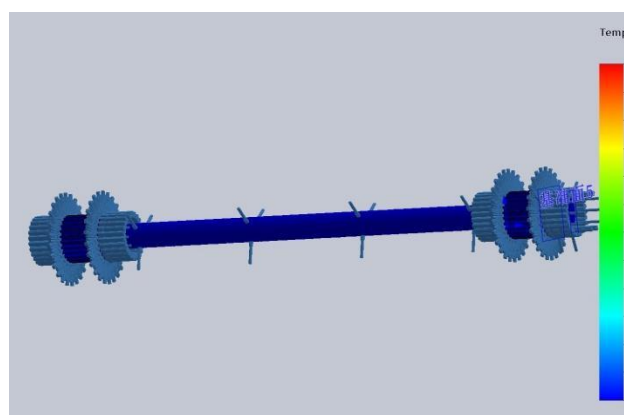


图 4-13 原弹性小轴 300℃

在热力学仿真分析中设置改进后弹性小轴工作温度为+300℃时，结果如图 4-14 所示。

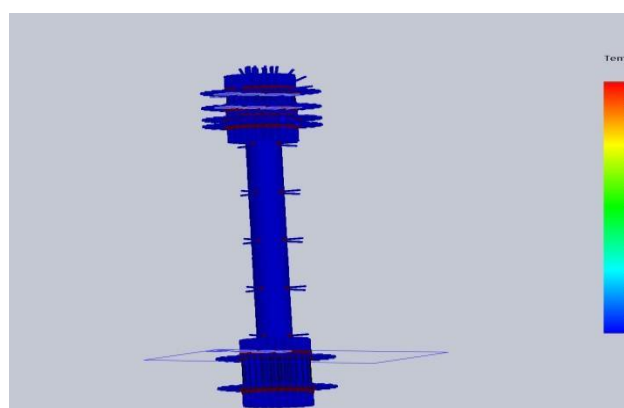


图 4-14 改进弹性小轴 300℃

#### 4.2.2 热力学仿真数据对比

根据弹性小轴的工作温度范围和选用材料的蠕变温度，分别将弹性小轴以及改进后弹性小轴设置在-50℃、0℃、+50℃、+100℃、+150℃、+200℃和+300℃的工作温度下，利用 Simulation 进行热力学的有限元分析，数据结果见表 4-15 所示。

表 4-15 热力学数据对比

温度和 三维架构	-50℃	0℃	+50℃	+100℃	+150℃	+200℃	+300℃
原三维架构 (mm)	2.234e+ 02	2.734e+ 02	3.235e+ 02	3.735e+ 02	4.236e+ 02	4.736e+ 02	5.737e+ 02
改进三维架 构 (mm)	2.197e+ 02	2.698e+ 02	3.288e+ 02	3.730e+ 02	4.357e+ 02	4.750e+ 02	5.763e+ 02

### 4.3 弹性小轴静应力分析

在航空发动机传动系统中弹性小轴有着不可或缺的作用。弹性小轴连接着传动装置和压气机转子，从发动机启动到稳定运行的过程之中，一方面要承受飞机的振动，高速旋转以及疲劳载荷，又要在各种情况下都保证能够正常运转抽取轴功率，所以对弹性小轴进行静态特定状态下的静应力仿真分析颇具实际意义。

#### 4.3.1 弹性小轴静应力分析过程

经过查阅以往涡喷-6 航空发动机手册，拟定弹性小轴在静态载荷下的观测实验点 0-1000N，扭矩承受力为 100-500N·m。由此静态载荷力选取 0N、200N、400N、600N、800N、1000N。扭矩承受力为 100N·m、200N·m、300N·m、400N·m、500N·m。根据控制变量原则，六组数据依次对应得出不同工作环境下的受力情况。

在静应力仿真分析中当原弹性小轴静态载荷力设置为 0N,扭矩承受力依次设置为为 100N·m、200N·m、300N·m、400N·m、500N·m 时，结果如图 4-16 所示。

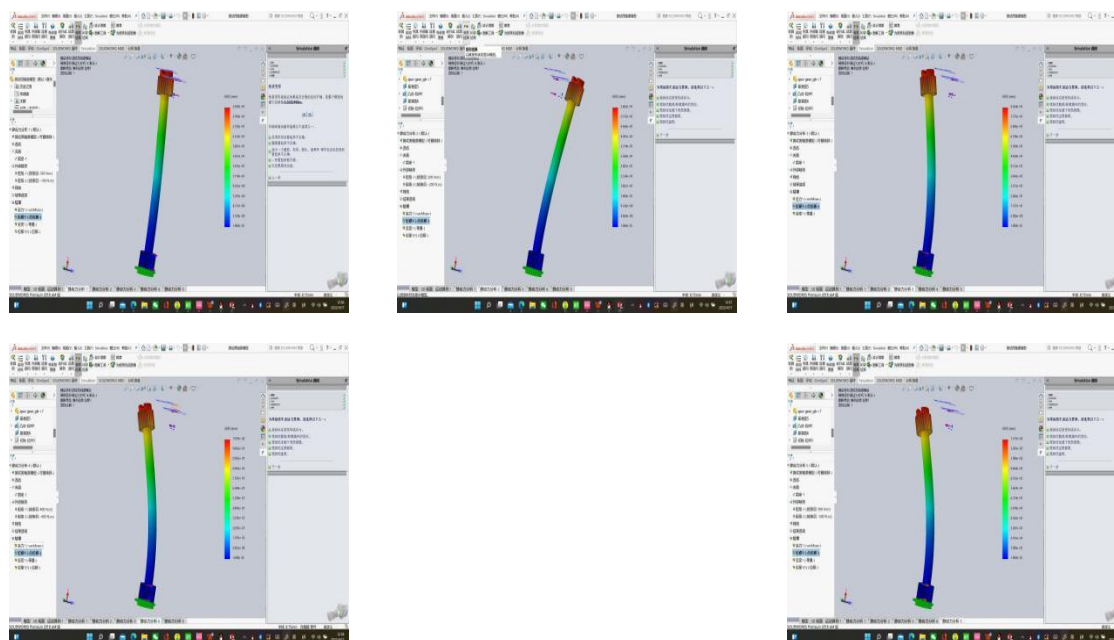


图 4-16 原模型 0 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 0N,扭矩承受力依次设置为为 100N·m、200N·m、300N·m、400N·m、500N·m时,结果如图 4-17 所示。

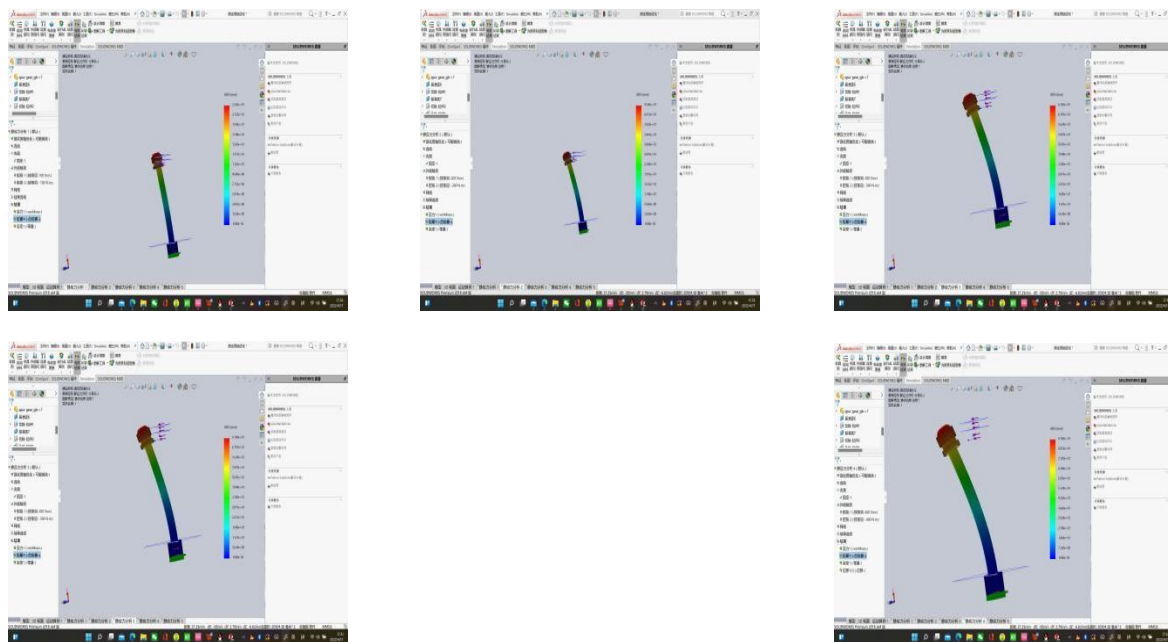


图 4-17 改进后模型 0 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴静态载荷力设置为 200N,扭矩承受力依次设置为为 100N·m、200N·m、300N·m、400N·m、500N·m时,结果如图 4-18 所示。

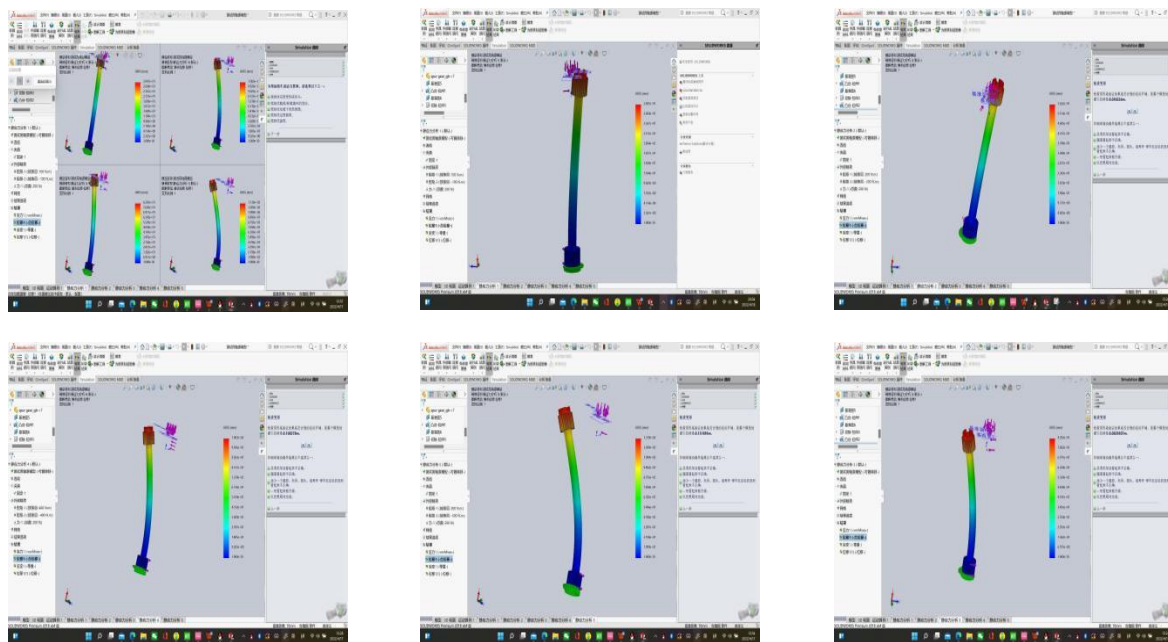


图 4-18 原模型 200N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 200N,扭矩承受力依次设置为为 100N · m、200N · m、300N · m、400N · m、500N · m 时，结果如图 4-19 所示。

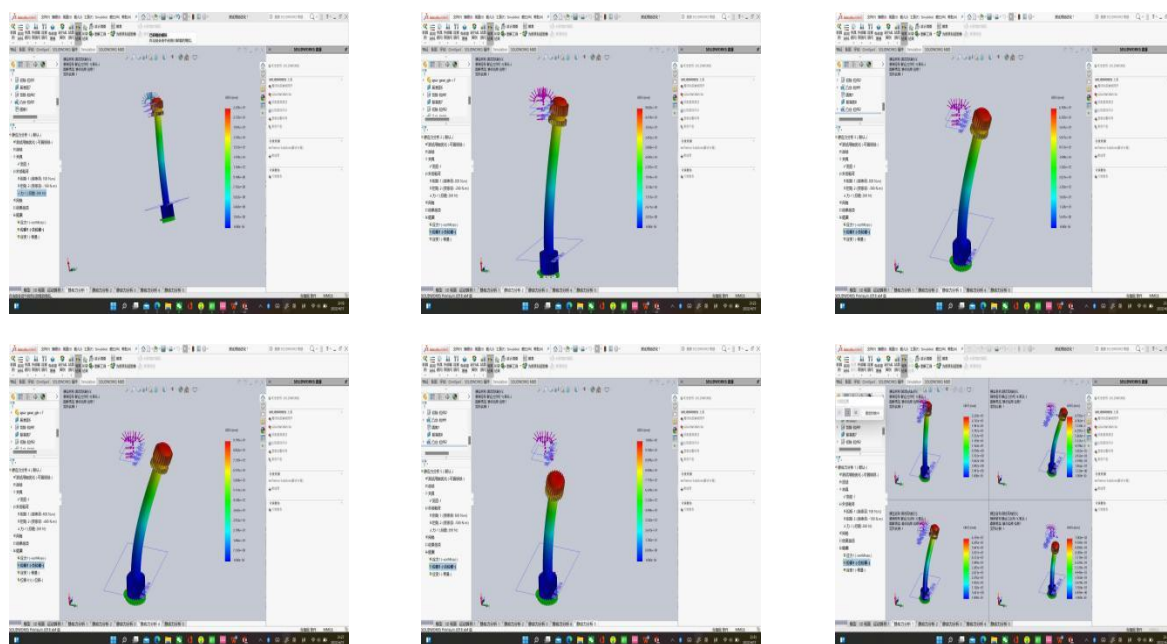


图 4-19 改进后模型 200N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴静态载荷力设置为 400N,扭矩承受力依次设置为为 100N · m、200N · m、300N · m、400N · m、500N · m 时，结果如图 4-20 所示。

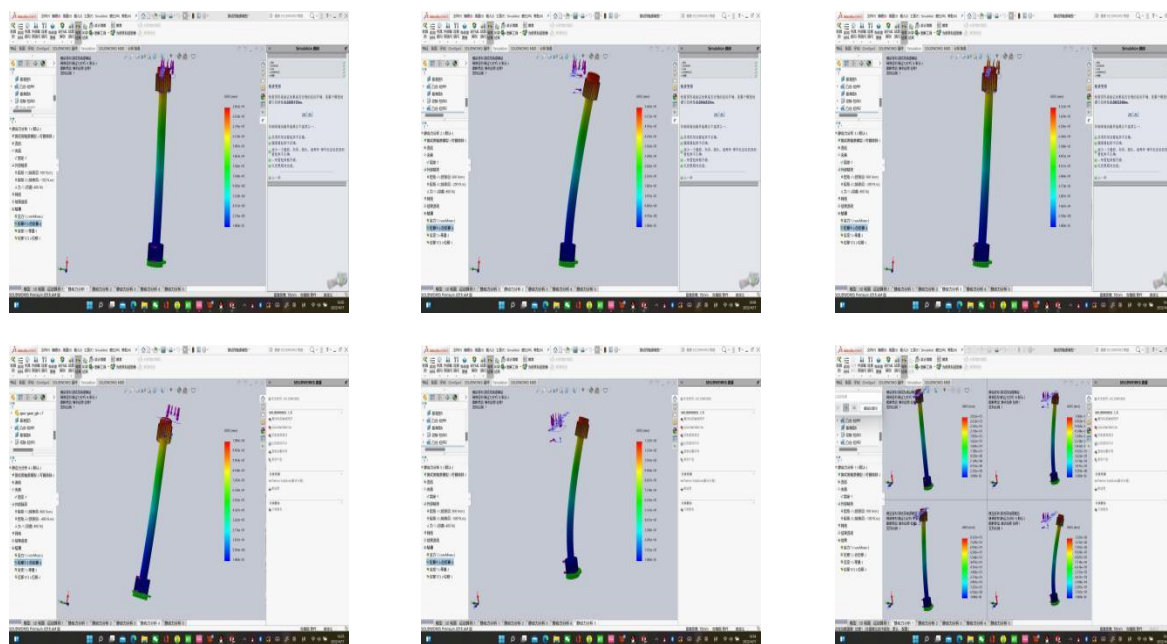


图 4-20 原模型 400N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 400N,扭矩承受力依次设置为为  $100\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $200\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $300\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $400\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $500\text{N}\cdot\text{m}$  时,结果如图 4-21 所示。

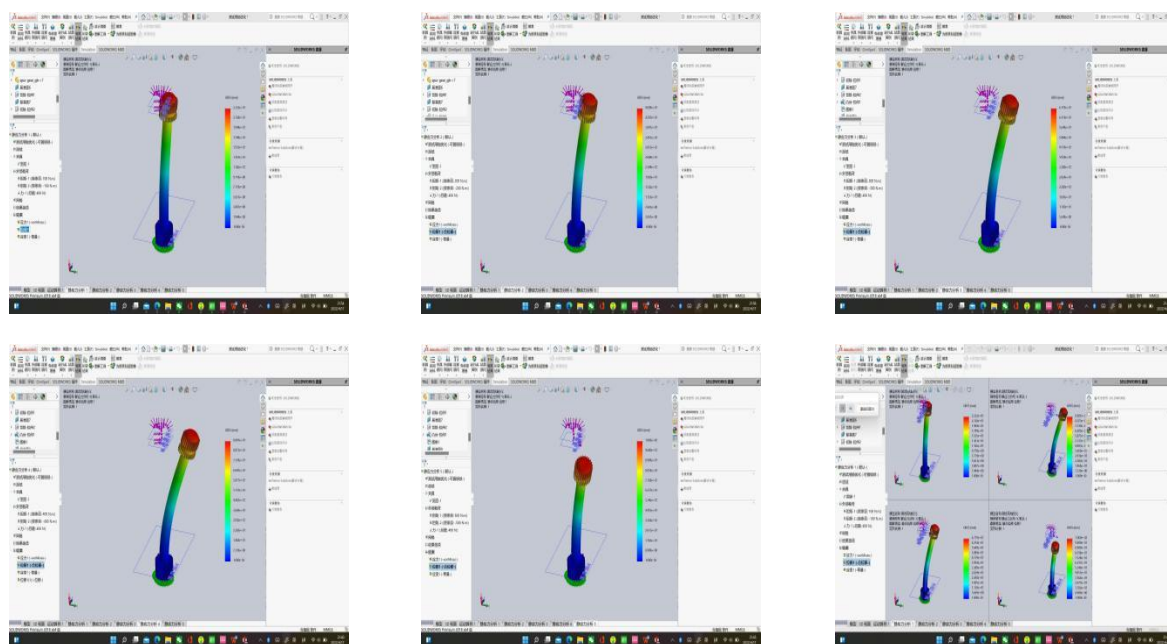


图 4-21 改进后模型 400N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴静态载荷力设置为  $600\text{N}$ ,扭矩承受力依次设置为为  $100\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $200\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $300\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $400\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $500\text{N}\cdot\text{m}$  时,结果如图 4-22 所示。

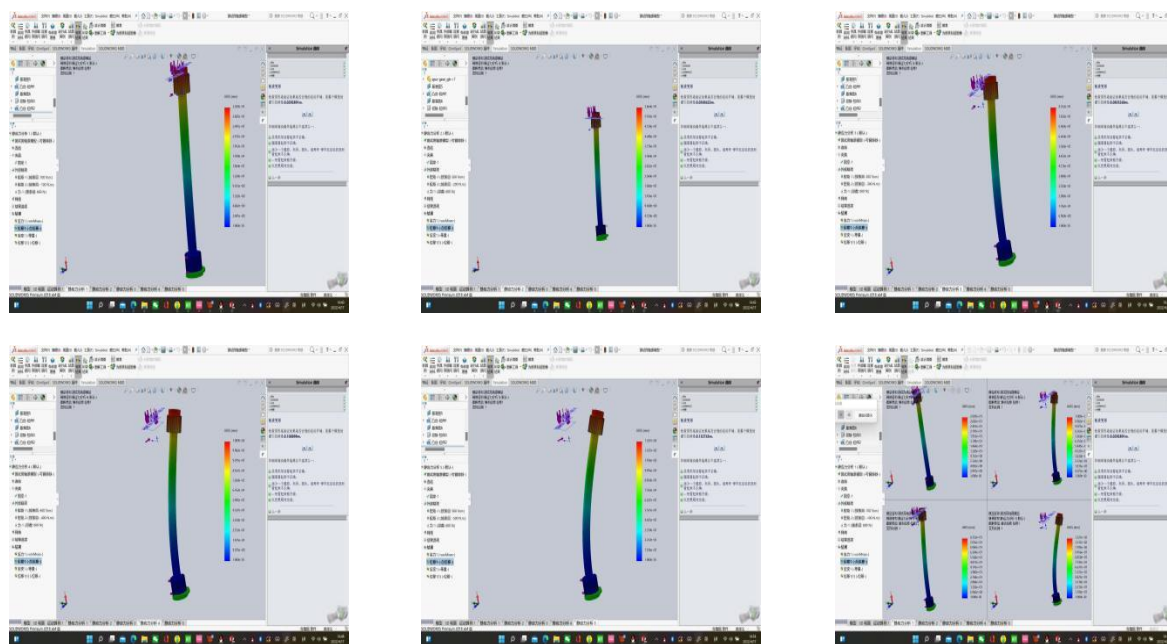


图 4-22 原模型 600N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 600N,扭矩承受力依次设置为 100N · m、200N · m、300N · m、400N · m、500N · m 时, 结果如图 4-23 所示。

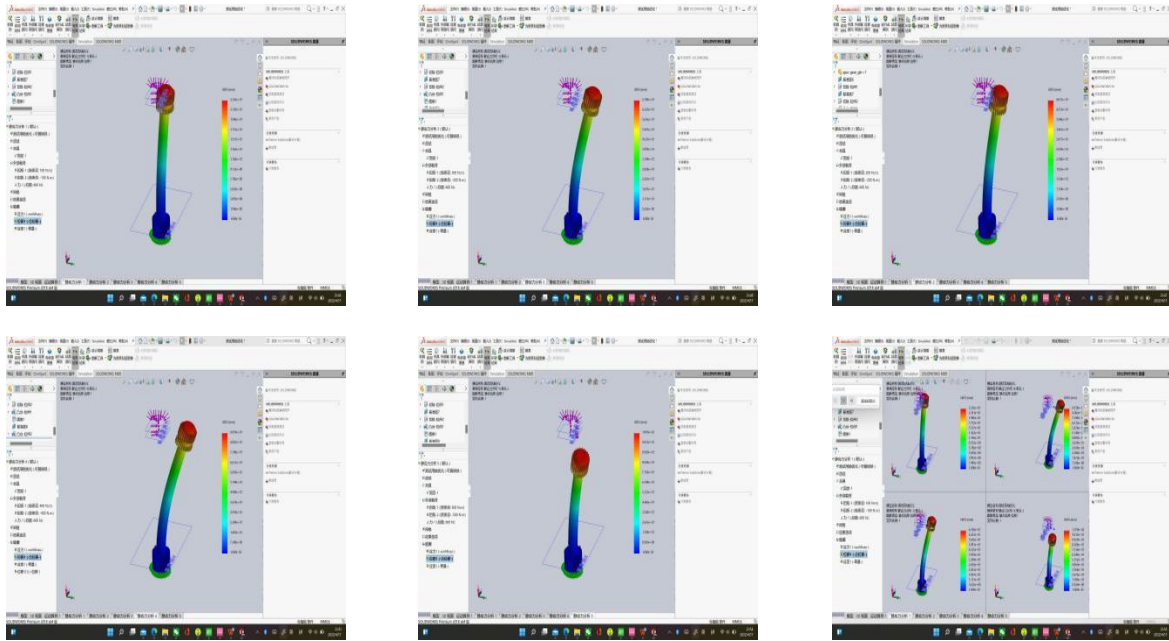


图 4-23 改进后模型 600N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴静态载荷力设置为 800N,扭矩承受力依次设置为 100N · m、200N · m、300N · m、400N · m、500N · m 时, 结果如图 4-24 所示。

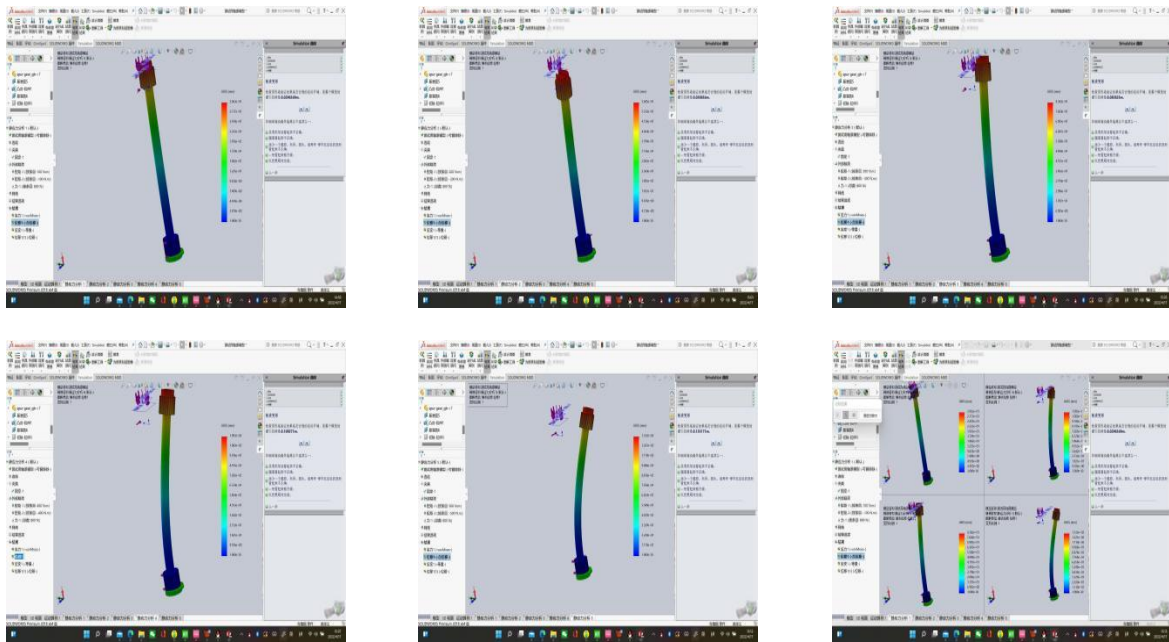


图 4-24 原模型 800N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 800N,扭矩承受力依次设置为 100N · m、200N · m、300N · m、400N · m、500N · m 时,结果如图 4-25 所示。

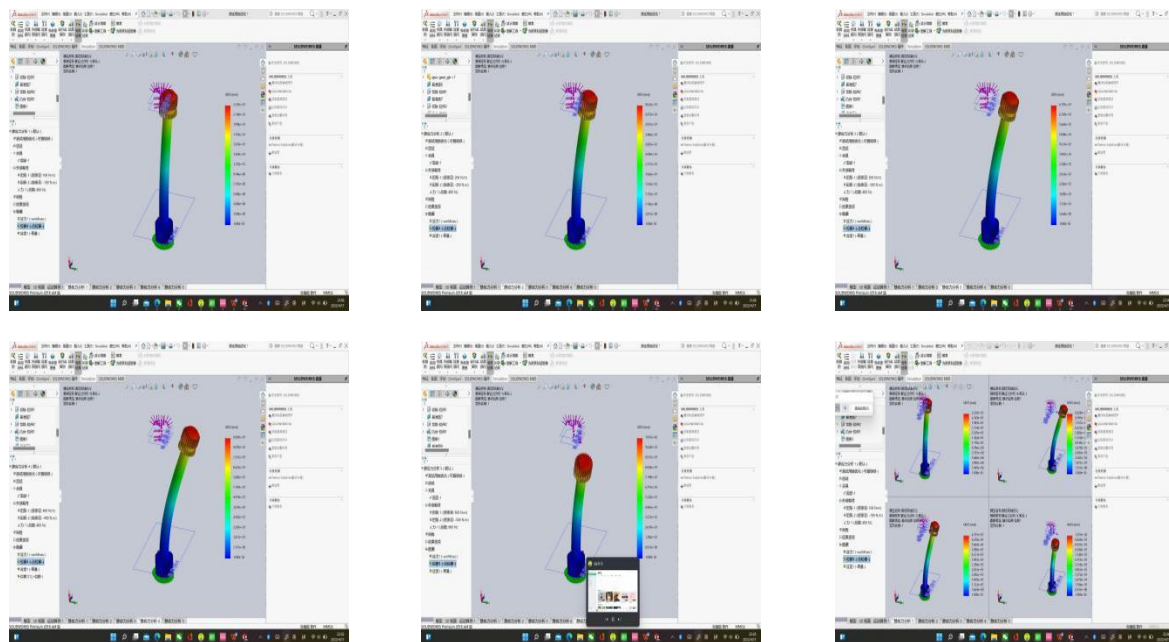


图 4-25 改进后模型 800N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴静态载荷力设置为 1000N,扭矩承受力依次设置为 100N · m、200N · m、300N · m、400N · m、500N · m 时,结果如图 4-26 所示。

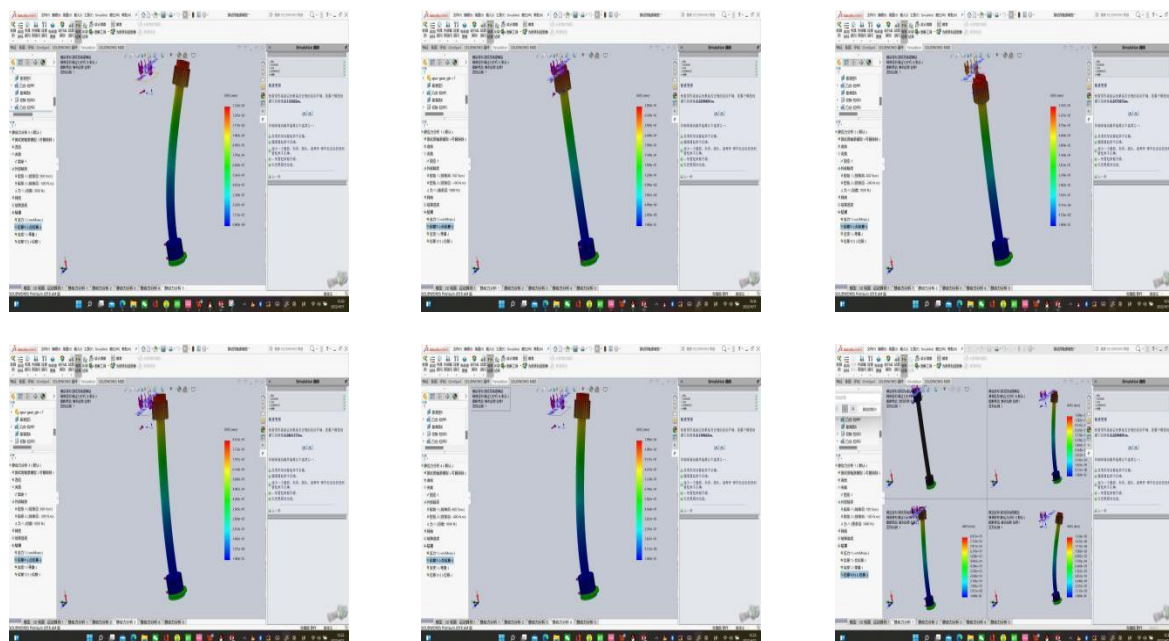


图 4-26 原模型 1000N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 1000N,扭矩承受力依次设置为 100N · m、200N · m、300N · m、400N · m、500N · m 时，结果如图 4-27 所示。

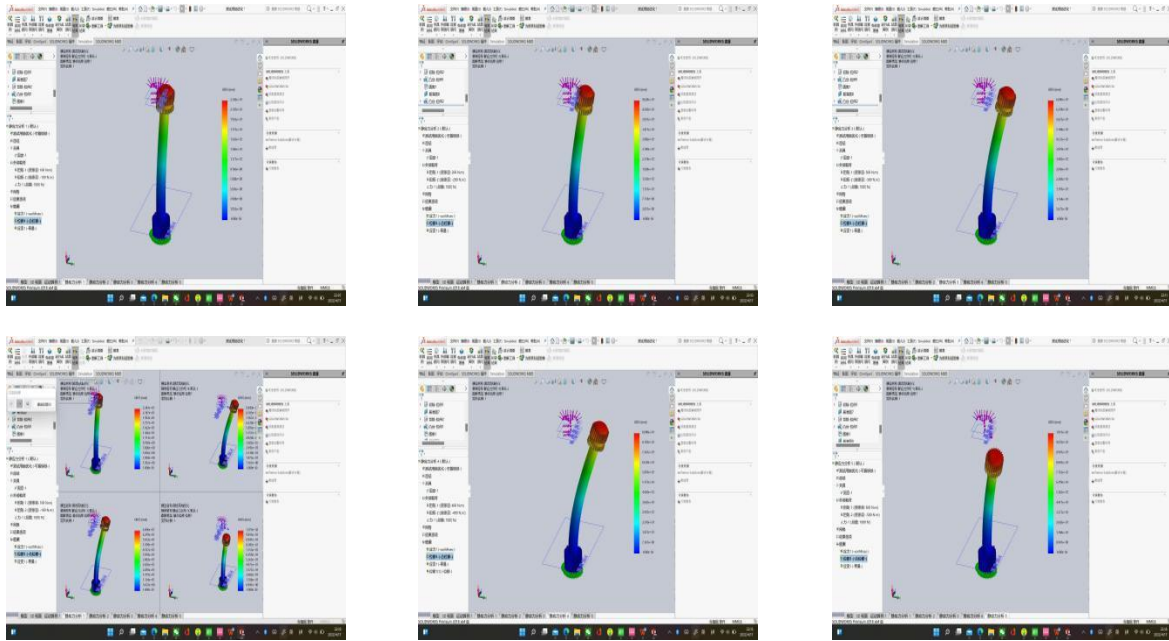


图 4-27 改进后模型 1000N 静态承载力对应不同扭矩的位移量

### 4.3.2 静应力仿真分析结果对比

根据控制变量原则，为对比材料更换前后的数据变化。仍分别将原弹性小轴以及改进后弹性小轴静态载荷力为 0N、200N、400N、600N、800N、1000N 及对应扭矩为 100N · m、200N · m、300N · m、400N · m、500N · m 的数值设定条件下，使用 Simulation 进行静应力仿真数据对比，实验数据见表 4-28。

表 4-28 力学对比分析

模型与力值	0N、 100N · m	0N、 200N · m	0N、 300N · m	0N、 400N · m	0N、 500N · m
原结构 (mm)	2.803e+01	5.602e+01	8.264e+01	1.078e+02	1.315e+02
改进结构 (mm)	2.362e+01	4.596e+01	6.760e+01	8.784e+01	1.067e+02

表 4-28 力学对比分析 (续)

模型与力值	200N、 100N · m	200N、 200N · m	200N、 300N · m	200N、 400N · m	200N、 500N · m
原结构 (mm)	2.841e+01	5.622e+01	8.293e+01	1.083e+02	1.319e+02
改进结构 (mm)	2.329e+01	4.602e+01	6.769e+01	8.795e+01	1.068e+02

表 4-28 力学对比分析 (续)

模型与力值	400N、 100N · m	400N、 200N · m	400N、 300N · m	400N、 400N · m	400N、 500N · m
原结构 (mm)	2.852e+01	5.643e+01	8.323e+01	1.086e+02	1.323e+ 02
改进结构 (mm)	2.332e+01	4.609e+01	6.779e+01	8.807e+01	1.069e+02

表 4-28 力学对比分析 (续)

模型与力值	600N、 100N · m	600N、 200N · m	600N、 300N · m	600N、 400N · m	600N、 500N · m
原结构 (mm)	2.929e+01	5.664e+01	8.352e+01	1.089e+02	1.327e+02
改进结构 (mm)	2.336e+01	4.615e+01	6.788e+01	8.818e+01	1.070e+02

表 4-28 力学对比分析 (续)

模型与力值	800N、 100N · m	800N、 200N · m	800N、 300N · m	800N、 400N · m	800N、 500N · m
原结构 (mm)	2.963e+01	5.685e+01	8.382e+01	1.093e+02	1.332e+02
改进结构 (mm)	2.339e+01	4.622e+01	6.797e+01	8.829e+01	1.072e+02

表 4-28 力学对比分析 (续)

模型与力值	1000N、 100N · m	1000N、 200N · m	1000N、 300N · m	1000N、 400N · m	1000N、 500N · m
原结构 (mm)	2.999e+01	5.707e+01	8.413e+01	1.096e+02	1.336e+02
改进结构 (mm)	2.342e+01	4.628e+01	6.806e+01	8.840e+01	1.073e+02

#### 4.4 弹性小轴优化材料静应力分析过程

经科技发展,应用材料也在逐渐更替为更轻、更耐疲劳强的、耐热性更好的,经与指导教师研究探讨并结合现代多个成熟机型的弹性小轴材料,选用铸造合金钢进行优化的静应力的分析对比,因铸造合金钢的蠕变温度要高于铸造铁,因此只在静应力方面进行二次数据分析。弹性小轴的静态载荷需承受 0-1000N,扭矩承受力为 100-500N。静态载荷力选取 0N、200N、400N、600N、800N、1000N。扭矩承受力为 100N · m、200N · m、300N · m、400N · m、500N · m。根据一一对应原则,六组数据依次对应出了不同工作环境下的受力情况。

通过上述铸造铁的静应力分析可得知，扭矩和静态载荷力作用于弹性小轴轴身都是同向的影响弹性小轴的变形程度，并未出现极端数值导致变形程度异常的现象。因此此次优化只选择五个对应参考点进行分析对比，即可得知更换材料后轴身变形程度的大致范围。

在静应力仿真分析中当原弹性小轴承受力设置为 0N、扭矩承受力依次设置为  $100\text{N} \cdot \text{m}$  时，结果如图 4-29 所示。

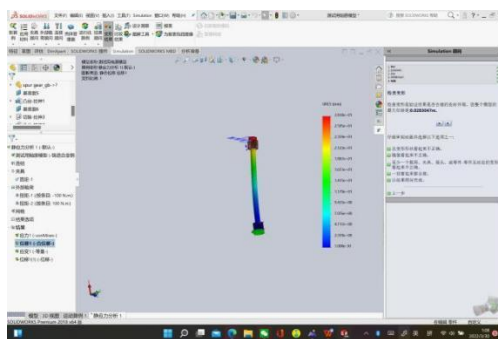


图 4-29 原模型仅承受  $100\text{N} \cdot \text{m}$  扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 0N、扭矩承受力依次设置为  $100\text{N} \cdot \text{m}$  时，结果如图 4-30 所示。

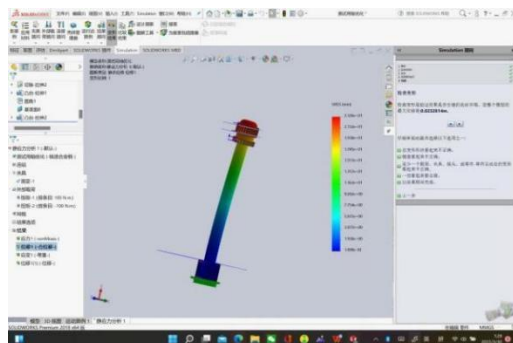


图 4-30 改进后模型仅承受  $100\text{N} \cdot \text{m}$  扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴承受力设置为  $200\text{N}$ 、扭矩承受力依次设置为  $200\text{N} \cdot \text{m}$  时，结果如图 4-31 所示。

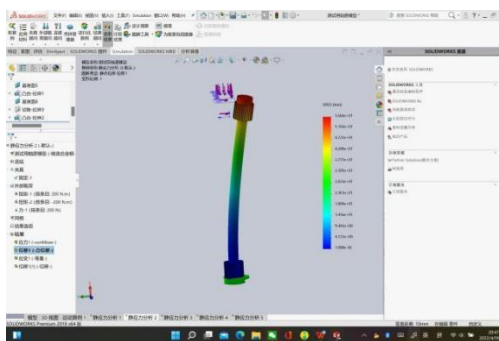


图 4-31 原模型承受  $200\text{N}$  静态载荷力、 $200\text{N} \cdot \text{m}$  扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 200N、扭矩承受力依次设置为 200N·m 时，结果如图 4-32 所示。

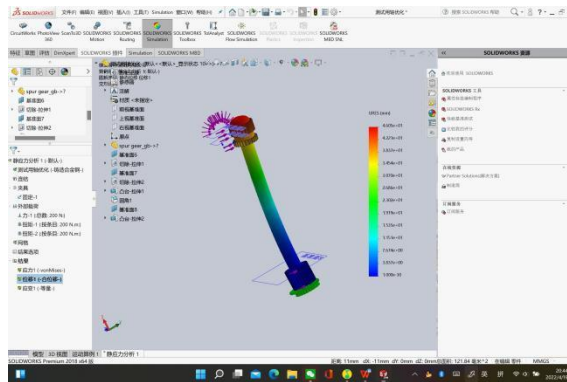


图 4-32 改进后模型承受 200N 静态载荷力、200N·m 扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴承受力设置为 400N、扭矩承受力依次设置为 200N·m 时，结果如图 4-33 所示。

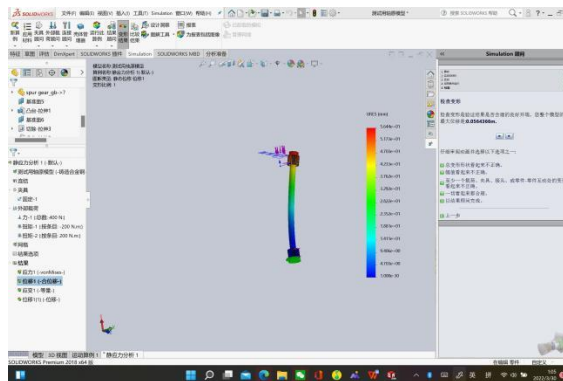


图 4-33 原模型承受 400N 静态载荷力、200N·m 扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 400N、扭矩承受力依次设置为 200N·m 时，结果如图 4-34 所示。

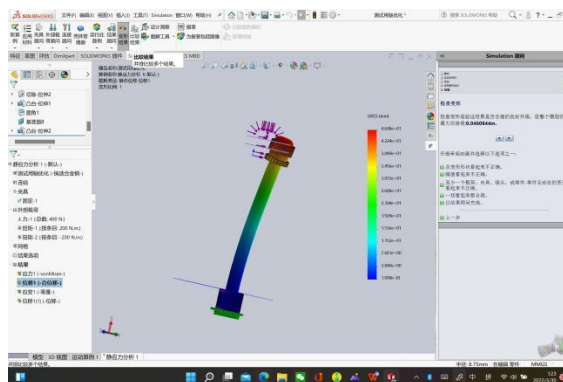


图 4-34 改进后模型承受 400N 静态载荷力、200N·m 扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴承受力设置为 600N、扭矩承受力依次设置为 300N·m 时，结果如图 4-35 所示。

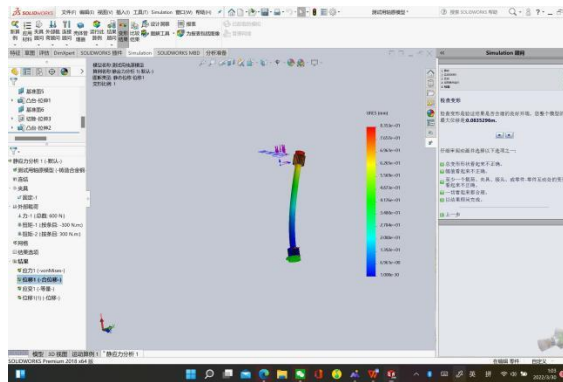


图 4-35 原模型承受 600N 静态载荷力、300N·m 扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当改进后弹性小轴承受力设置为 600N、扭矩承受力依次设置为 300N·m 时，结果如图 4-36 所示。

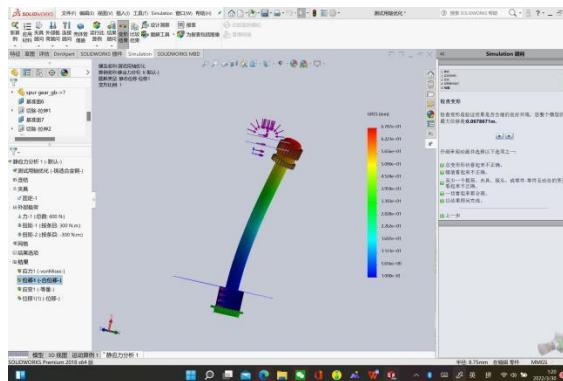


图 4-36 改进后模型承受 600N 静态载荷力、300N·m 扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴承受力设置为 800N、扭矩承受力依次设置为 400N·m 时，结果如图 4-37 所示。

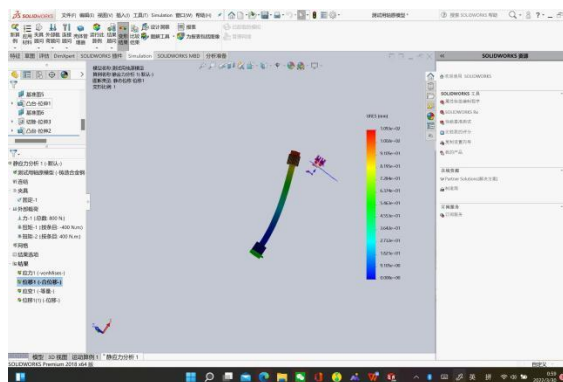


图 4-37 原模型承受 800N 静态载荷力、400N·m 扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原改进后弹性小轴承受力设置为 800N、扭矩承受力依次设置为  $400\text{N} \cdot \text{m}$  时，结果如图 4-38 所示。

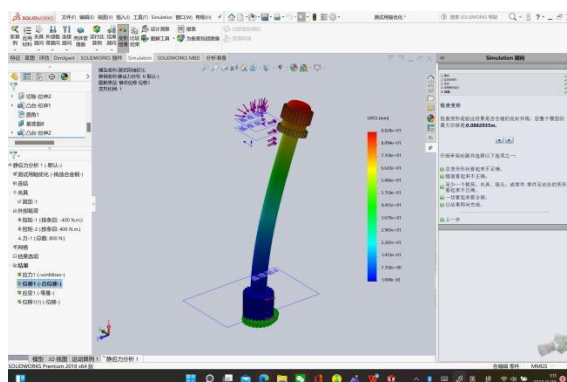


图 4-38 改进后模型承受 800N 静态载荷力、 $400\text{N} \cdot \text{m}$  扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原弹性小轴承受力设置为 1000N、扭矩承受力依次设置为  $500\text{N} \cdot \text{m}$  时，结果如图 4-39 所示。

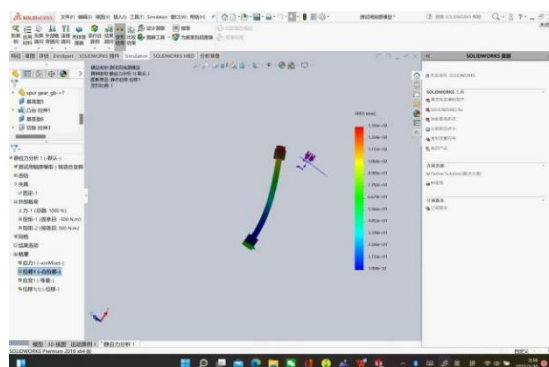


图 4-39 原模型承受 1000N 静态载荷力、 $500\text{N} \cdot \text{m}$  扭矩的位移量

在静应力仿真分析中当原改进后弹性小轴承受力设置为 1000N、扭矩承受力依次设置为  $500\text{N} \cdot \text{m}$  时，结果如图 4-40 所示。

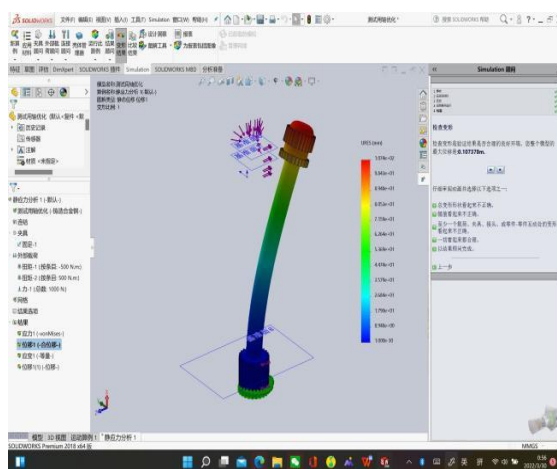


图 4-40 改进后模型承受 1000N 静态载荷力、 $500\text{N} \cdot \text{m}$  扭矩的位移量

#### 4.4.1 静应力仿真分析对比

根据所做的实验数据,分别将原弹性小轴以及优化弹性小轴在承受力为 0N、200N、400N、600N、800N、1000N 及扭矩为 100N·m、200N·m、300N·m、400N·m、500N·m 的数值设定条件下,通过 Simulation 组件进行静应力仿真数据对比。实验数据见表 4-41。

表 4-41 力学对比分析

模型与力值	0N、 100N·m	200N、 200N·m	400N、 200N·m	600N、 300N·m	800N、 400N·m	1000N、 500N·m
原结构 (mm)	2.830e+01	5.666e+01	5.644e+01	8.353e+01	1.093e+02	1.336e+02
优化结构 (mm)	2.326e+01	4.605e+01	4.608e+01	6.787e+01	8.829e+01	1.073e+02

#### 4.4.2 仿真计算结果分析

表 4-42 热力学数据分析

三维架构与温度点	-50℃	+150℃	+300℃	能否适用
原架构 (mm)	2.175e+02	4.236e+02	5.737e+02	是
优化架构 (mm)	2.197e+02	4.357e+02	5.763e+02	是

表 4-43 铸铁静应力数据分析

三维架构与实验值	0N、 100N·m	600N、 300N·m	1000N、 500N·m	能否符合
原架构 (mm)	2.830e+01	8.352e+01	1.336e+02	是
优化架构 (mm)	2.326e+01	6.788e+01	1.073e+02	是

表 4-44 铸造合金钢静应力数据分析

三维架构与实验值	0N、 100N·m	600N、 300N·m	1000N、 500N·m	能否符合
原架构 (mm)	2.830e+01	7.935e+01	1.235e+02	是
优化架构 (mm)	2.325e+01	6.335e+01	1.014e+02	是

针对上述表 4-42、4-43 和表 4-44 数据,得出如下分析

因原始涡喷-6 在工作过程中发动机温度会急速升高，温度过高对其中的零部件也会产生相应的影响，选择铸造铁、铸造合金钢两种材料进行静应力分析，因合金钢的蠕变温度要高于铁，所以只要铸造铁在设置不同的相应温度下能够正常工作即可，无需对合金钢进行热力学分析，最终分析数据可以得出以下结论：

- (1) 改进前后的模型在不同温度下都能够满足发动机正常的工作状态。
- (2) 铸造铁和合金钢两种材料都能满足不同温度的要求。
- (3) 超过 150℃后改进后模型的由温度引起的变化要略微大于原模型。
- (4) 通过 Solidworks 的数据分析对比验证，无论是原铸造铁还是铸造合金钢，无论是原模型还是改进后的模型都在受力下发生了程度大小不同的轻微变形。
- (5) 通过同种材料的原模型和改进后模型的受力分析对比可得知，前后的弯曲变形程度相差不大，几乎可判定改进后材料的更改并没有给本身构造的受力情况带来影响。
- (6) 通过数据可以得出，静态载荷力的大小对轴身的形变量影响不大，轴身的位移量主要是扭矩大小的体现。
- (7) 静态载荷力的增加对轴身产生的轻微变形和扭矩递增产生的效果相同，并未出现极端数值对形变量产生反向作用的情况。
- (8) 通过数据可以得出，扭矩大小在 200N·m-300N·m 的范围内，原模型和改进后模型的位移量相差最小，数据比较稳定，是正常工作状态下数据的体现。
- (9) 通过数据可以得出，改进模型因轴端齿轮出开凹槽，以至受扭矩范围变小，位移量也相应的变小。
- (10) 通过不同种材料同种构造的静应力分析数据对比可得知，铸造合金钢的变形程度要比铸造铁的程度小，与此同时合金钢的优点也在它的质轻、高强、耐腐蚀。而现代飞机非常注重本体轻盈，使得材料替换后的好处数不胜数。
- (11) 因考虑到飞机在工作工程中给弹性小轴带来的疲劳、磨损，也要定期的进行维护。
- (12) 综合数据分析对比，总结出以上论点，但极端情况不涵盖在内。

## 第五章 不足和展望

因受到疫情的影响、发动机实际的复杂性以及实验的约束，采用模拟仿真验证的方法来进行实验。航空产业作为一种耗资巨大、变量参数多的复杂系统工程，其设备的安全、可靠是必须要考虑的因素。虚拟现实在大幅提高制造效率的同时，显著降低了人为失误发生的概率。在飞机设计过程中，应用虚拟现实技术提前开展性能仿真演示、人机工效分析、总体布置、装配与维修性评估，能够及早发现、弥补设计缺陷，实现“设计-分析-改进”的闭环迭代，达到缩短开发周期，提高设计质量和降低成本的目的<sup>[11]</sup>。对于中国航空工业来说，乘搭迅猛发展的虚拟现实技术快车，是其走向信息化、智能化的必由之路，也是推动中国制造 2025 的必由之路。因此通过模拟仿真验证能够很大限度的给航空工业带来便利和保障<sup>[12]</sup>。

根据上述模拟仿真数据的对比分析（见图 5-1）可以看出优化后的模型与预期相差不大，能够满足发动机的工作要求，而高新材料的引用也有着显著的成效，不仅仅是力学的高弹性、高韧性表现优越，质轻、耐腐蚀带来的好处也同样可观，可以看出工业的发展也少不了材料的更迭换代。在此基础之上与指导教师的分析与探讨中发现仍有更好的方式来取代原有结构，但由于疫情原因，线上沟通导致相关实验都无法按常进行，因此无法通过设备和真机来进行实际验证，得出有力的理论依据的支撑。

在进行热力学仿真和静应力仿真时，选用的材料为可锻铸铁和铸造合金钢。查询资料可知选用材料的特性，如下表 5-1 所示。

表 5-1 材料特性表

材料与特性	弹性模量/GPa	蠕变温度/Kelvins
可锻铸铁	1.52e+02	9.73e+02-1.22e+03
铸造合金钢	2.05e+02	7.23e+02

上述各组数据有力支撑了优化改进后弹性小轴理论的可行性，但此方案仍有一点不足是每次维修、拆装弹性小轴都需要备有弹性垫圈，如若出现备件不足的情况，有可能会因此误工，降低工作效率。为此还有另一种设计方案，新的设计理念和模型构造可以避免此类问题的发生，第二种思路为应用弹珠固定卡扣的方式，理论上如若按照正确方式安装后，弹珠会掉落到下端壳体设计的凹槽中，而判断方式则是用旋紧盖是否能顺利扭下去作为辨别安装是否安装正确的依据。该方案的优点是能够提高更换维修弹性小轴的便捷性，便于机务排查故障和检测。类似的方案在很多成熟机型的附件传动系统中

也得到了广泛的运用，得到了验证。但不足之处是由于疫情影响没有得以验证，得到真实机型的实验数据。本次实验也是仅仅针对静态部分做出模拟，而动态部分和特殊情况下例如喘振等由于时间原因，难度较大并未设计，对发动机振动耦合其他复杂的因素也并未考虑在内，只是一个理想的状态下进行的仿真验证，存在一定的局限性和片面性。希望在后续的工作学习中继续去探索深究，此思路我也会在今后有契合的时机再次去做相应的实验，得出论据，与现有优化模型再次进行比对，对该课题进行不断的学习和思考。

根据之前的设计理念和优化的出发点从以下几个方面去优化弹性小轴的性能：

- (1) 在寿命耐用性上，将轴端的一字型凸台结构更改为圆弧形凸台结构，通过减少发动机启动时骤增扭矩带来的轴身变形，来增加弹性小轴的寿命。
- (2) 安装和维修的便捷性上，通过增加轴端的凹槽和卡簧的双重配合，可以有效地增加安装和维修的效率，大大增加便捷性。
- (3) 安装的准确方面，原轴身安装后，安装是否准确只能通过能否转动涡扇来判断，而改进后则可以卡簧“咔”的声响来判断，准确且便捷。
- (4) 环境的适应上只其日常的工作温度环境下设置了相应的低温、高温仿真分析，均符合正常工作需求。而其他如霉雨、盐雾、冲击、振动等，新型材料的铸造合金钢的各项指标均优于原材料。

根据以上数据分析可得出，改进后的模型及更换的材料符合适航条件。基于以上的数据分析，并在目前先进的成熟机型中取其精华，去其糟粕，站在巨人的肩膀上回头对涡喷-6 航空发动机传动装置中与弹性小轴密切相关的部分进行更深一层的优化和更改，可以得出以下的结论：

- (1) 经数据对比可看出，铸造合金钢的表现要明显优于铸造铁，现如今为了降低飞行器本身重量，满足飞机高速飞行的需要，钛合金、高温合金相继的得到应用，弹性小轴为传动轴部件，钛合金的强度高、机械性能、韧性、抗腐蚀都有着凸出的表现，更能胜任该零部件的选择，随着新型材料的研制和应用，相信也会有更好性能、更符合要求的材料替换。
- (2) 考虑到飞机飞行中的一些特殊情况如：气流波动、飞机喘振等都会给飞机发动机带来较为严重的颠动、可在弹性小轴轴端与传动装置和压气机转子处添加防震垫，减少因极端情况对弹性小轴产生不可逆的破坏。同时也能够在正

常的飞行状态中减少挤压力骤增产生的微小变形。

- (3) 弹性小轴和传动装置处的连接会因高强度的工作环境从而产生一定的疲劳和磨损，介于弹性小轴处于进气道处，经查阅上世纪五十年代手册得知弹性小轴的工作环境温度环境约为 $-50^{\circ}\text{C}$ 到 $300^{\circ}\text{C}$ 之间，工作温度相对较低，可以加入航空高温润滑脂，通过减小摩擦阻力来减少磨损和疲劳损耗，增加弹性小轴的使用寿命。
- (4) 弹性小轴结构的优化和材料的改进，只在受力和装配两个方面进行优化和变更，并不影响整体附件系统正常的工作状态。
- (5) 实验环境、疫情不可抗等因素的限制，以及自身学识有限度使得无法考虑一些特殊情况，如飞机喘振、高温状况下的弹性小轴的结构变化，材料的加工精度，日常维护也存在不确定性，对发动机震动耦合等复杂情况并未考虑在内。

## 参考文献

- [1] 董红涛, 江平, 粟晖, 等. 附件箱传动装置及其航空发动机: CN102269059A[P]. 2011.
- [2] 王帮艳. 提升中央传动装置工作可靠性的研究[J]. 科技风, 2015(1):40-40.
- [3] 周忠锋, 石山. 附件传动装置锥齿轮装配调整方法浅析[J]. 航空维修与工程, 2016(2):3.
- [4] 李超, 江平, 粟晖, 等. 附件箱传动装置及其航空发动机 Gear and accessories box has its aircraft engine: CN, CN202194728 U[P]. 2011.
- [5] 刘庆东, 史妍妍, 崔洋, 刘晓松. 航空发动机传动系统技术成熟度评价方法的应用[J]. 航空发动机, 2019, 45(01):92-96. DOI:10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.01.017.
- [6] 孙大心, 白宏伟. 一种航空发动机附件恒速传动装置:
- [7] 张伟, 总主编. 航空发动机[M]. 航空工业出版社.
- [8] 刘长福, 主编. 航空发机构造[M]. 国防工业出版社, 1989.
- [9] 章永锋, 航空发动机设计手册[M]航空工业出版社, 2001
- [10] SHI Yanyan, L Lin, KONG Xiangfeng. Study on the steady state thermal analysis method of accessory transmission system[C//2012 2nd International Conference on Materials Science and Information Technology.Xi'an :China Science and Technology Exchange Association, 2012:8-12.
- [11] JR. L. Fax: Optimization Applied to Mechanisms and Mechanical Components [J]. ASME 1947(7):65
- [12] Chesner. David R., Kremer. John M. Generalized equations for sprag one-way clutch analysis and design, Proceedings of the 1998 SAE International Congress & Exposition, 1998:173—184

## 致 谢

“工学者，巧心，劳力，造器物。”

行文至此，也预示着大学的生活已然走到了尾声，回首四年过往，历历在目，是初入校园的欣喜，是初入职场的昂扬。曾经历最寻常的事情此时却更戳人心弦。

“饮其流时思其源，成吾学时念吾师。”至此论文完成之际，谨向我的指导老师福巍老师致以最诚挚的谢意和最崇高的敬意，感谢老师两年来的教诲。您的悉心点拨，耐心指导常让我有“山重水复疑无路，柳暗花明又一村”的感觉，毕业在即，祝您身体健康，合家欢乐，一切顺利。

“何当共剪西窗烛，却话巴山夜雨时”。大学四年期间，我的室友们一直是我快乐的源泉，无数个夜晚的深夜畅谈，生活中的互帮互助，最后到喝着啤酒醉醺醺的说到“苟富贵，勿相忘”，让我觉得竟有些恍惚，好像回到了第一天见面的拘谨，也好像经此一别，有缘方可再见。在此感谢我的四位室友，给我了一段难忘快乐的大学时光。

“若问闲情都几许？一川烟草，满城风絮，梅子黄时雨”。此处要感谢我的小朋友，给予我精神上鼓励和力所能及的帮助，希望小朋友可以继续无忧无虑的度过大学时光，学业顺利，考证过过过，我们齐头并进，早日把小边牧搞到手。

“可怜天下父母心”，请允许我在告别学习生涯之时，向父母致以最诚挚的谢意与感恩，你们的哺育之恩，爱护之情，谆谆教导，都是我遇到坎坷、困境最后照亮路途的一束光，感谢你们，祝你们身体健康、万事顺意。

最后，希望我们都能奔向自己光明前途和美好生活当中，一路生花。