



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

## 本科生毕业设计

航空发动机点火装置固定方式优化设计及分析

**Optimization Design and Analysis of Fixed Method of Aero Engine  
Ignition Device**

姓 名 刘红艳

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06月03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

航空发动机点火装置固定方式优化设计及分析

**Optimization Design and Analysis of Fixed Method of Aero Engine  
Ignition Device**

姓 名 刘红艳

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06月03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	航空发动机点火装置固定方式优化设计及分析						
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，制定点火装置优化题目。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 航空航天实训大楼三楼发动机实训室有十台退役涡喷-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，所以对其点火装置部分进行优化。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点火装置的资料，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、整个点火装置是否符合航空发动机外形轮廓等。对优化后的点火装置进行受力分析，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	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。						
知识与能力要求	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。						
系（教研室）审查意见：同意							
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">               负责人(签名): _____           </div> <div style="text-align: right;">             2021 年 12 月 5 日           </div> </div>							



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：航空发动机点火装置固定方式优化设计及分析

学 院：航空航天学院

专 业：18 飞行器制造工程

学生姓名：刘红艳

学 号：18414030108

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）开始前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

航空发动机是航空器飞行的动力，也是航空事业发展的推动力，是飞机性能、可靠性和成本的决定因素，航空发动机的发展对冶金、机械、电子、仪表等行业的发展具有重要的带动作用 and 促进作用。为了保证航空发动机能顺利启动，需要启动系统和点火装置相互协调工作，点火系统是发动机启动和再启动的关键部件，其工作特性和能力将直接影响发动机启动和再起动的成功与否，甚至整个发动机的安全，所以点火系统一旦出现问题要立即检修。航空发动机点火器主要由电源、高能点火器、高压导线和点火电嘴组成。

航空发动机电点火系统的点火装置，根据使用的低压电源不同，高能点火器分为直流高能点火器和交流高能点火器两种。直流高能点火器又分为断续器控制和晶体管控制两种。按电路结构的不同，航空发动机电点火装置又分为机电式、混合式。

在飞机制造、发动机的制造中，连接技术是制造技术的重要组成部分，也是现代工业不可或缺的环节。航空器所用的连接技术主要有焊接技术、机械连接和粘接技术三类组成。焊接技术广泛用于航空发动机结构中，焊接的工作量占发动机制造总工时的 10%左右。胶接技术主要用于连接不同材料、不同厚度、二层或多层结构，其中胶接蜂窝胶接结构及金属层板结构在大飞机上的应用前途宽广。机械连接工艺是指利用紧固件将零件连接起来的过程和方法，常用的机械紧固件主要有螺栓、螺钉和铆钉。螺纹连接以普通螺栓、螺钉连接为主要形式，应用最广。通过对 WP6 发动机点火系统部件进行拆卸，深入了解点火系统中点火装置安装固定方式，发现点火装置是由两个长方体组成，并由一块有减轻孔的长方形壁板与发动机相连，点火装置采用连接方式为机械连接，安装板与发动机通过螺栓连接，由于航空发动机的使用环境特殊，要求紧固件连接可靠和有足够的寿命，能经的起苛刻环境变化和载荷的变化，同时要求紧固件尽可能轻。随着航空发动机结构件整体化的发展，使用的紧固件数量将有所减少，但对其设计要求越来越高。点火装置采用螺栓连接优点是拆装方便，结构简单，可以增加预紧力防止松动，缺点是有可能导致各个螺栓的受力无法达到完全均匀一致，受发动机高温、振动影响，连接处容易松脱、变形，从而造成损失，减少使用寿命，并造成后期增加维修成本及维修难度，螺栓本身没有防锈涂层。经过综合分析，发动机点火装置固定方式缺点很多，通过实践决定针对 WP6 点火装置安装固定方式进行主要分析，在安装固定方式方面进行优化改进，改变点火装置的连接方式，提高点火装置与发动机的连接强度以及维修拆装方便等性能。

## 2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

工作内容：

### 1. 分析点火装置安装固定方式的不足

首先对原点火装置安装固定方式进行一比一 3D 建模，分析固定方式的不足。

### 2. 优化点火装置安装固定方式分析

对点火装置安装固定方式进行初步优化分析并进行 3D 建模，对比优化前后安装方式，对初步优化分析查漏补缺。发现优化后固定方式进行改进，进行二次优化。

### 3. 优化后与模型对比分析

将最终优化固定方式与原固定方式进行总体的 3D 仿真对比分析，比如连接强度等性能测试得出最优方案。

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）：

(1) 毕业设计 1 套

4. 推荐参考资料：

- [1] 浅谈航空发动机起动与点火系统[J]. 肖维东. 科技视界 . 2016(14)
- [2] RB211-535E4 Line and Base Maintenance
- [3] 航空发动机电点火系统现状与发展趋势[J]. 李奕新, 谭航, 杨水银. 燃气涡轮试验与研究 . 2015(06)
- [4] Tom Brisken. Technology for a new century of aviation. [N/OL] General Electric, 2006.
- [5] A&P Technology Powerplant Textbook [M]. Jeppesen Sanderson, 2003..
- [6] 梁尚清, 苏爱民. 航空结构螺栓连接预紧力设计研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(09):24-27.
- [7] 机械连接技术[J]. 航空制造技术, 2016(19):63.
- [8] 吴天德. 国外航空发动机电点火装置发展现状及趋势[J]. 民用飞机设计与研究, 1996(01):5-6.
- [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] 杨韶. 航空发动机螺栓连接优化设计方法研究[D]. 电子科技大学, 2009.
- [12] 乔乔, 李晓秀, 周江伟, 金福艺. 螺栓连接预紧力对结构疲劳性能的影响[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(03):166-172.

所在专业审查意见： 同意

负责人： 姚莹莹

2021 年 12 月 4 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) 课题的目的及意义

航空发动机是航空器飞行的动力,同时也是航空事业发展的推动力,它对飞机的性能、可靠性和成本有着至关重要的作用。航空发动机可以顺利启动需要启动系统和点火装置两个部分相互配合,其中点火系统是发动机启动和再启动的关键部件,它的工作能力和特性将直接影响发动机是否可以成功启动,甚至影响整个发动机的安全。通过对 WP6 发动机点火装置的拆装,发现点火装置安装固定方式采用了螺栓连接,由于航空发动机的使用环境特殊,需要经的起苛刻环境和载荷变化,所以要求紧固件连接可靠并有足够的寿命。但螺栓连接容易受发动机高温、振动影响导致螺栓松脱、变形、从而减少寿命,造成损失。本课题旨在改变点火装置安装固定方式,把螺栓连接变为卡扣连接。卡扣连接优点为劳动强度高、方便拆卸、便于维修。

### (二) 国内外研究现状及发展趋势

航空发动机点火装置由电源、高能点火器、高压导线和点火电嘴组成。航空发动机点火装置根据电路形式分为电子式和机械式,应用都很广泛。

国外现状:目前,俄制大型航空发动机起动点火装置,前级主要采用机械振子逆变升压变压器、后级采用气体放电管作为放电开关的电路形式;欧美制大型航空发动机起动点火,前级主要采用半导体功率管逆变升压、后级采用气体放电管或功率半导体作为放电开关的电路形式;小型航空发动机、起动机、辅助动力装置等的起动点火装置,均采用半导体功率管逆变升压、气体放电管作为放电开关的电路形式。而欧美由于掌握了耐高温半导体功率器件技术,所以已将可变频率能量的点火装置应用在现役飞机上。欧美展开的固态点火装置研发为点火装置实现变能、变频、诊断等功能奠定了基础,目前美国的一些军用发动机辅助动力装置及民用发动机,已采用了固态点火装置。<sup>[1]</sup>

国内现状:从 20 世纪 60 年代到目前为止,我国基本满足了航空发动机的需要,但由于在产品的设计、制造、试验和基础技术等各个方面还没有完整的体系,尤其是在材料、元器件、工艺等工程化技术方面与国外相比有很大差距,并且我国点火系统的电磁兼容性研发工作开展得较晚。目前,国内大型航空发动机点火装置,基本采用机械振子逆变升压变压器实现逆变升压、采用气体放电管作为放电控制开关的电路形式,只有在一些工作环境温度较低的小型发动机、辅助动力装置、起动机上,采用半导体功率管升压电路。

我国近年来也开展了固态点火系统、等离子点火系统、变能变频点火系统的预研工作,并完成了大量的试验验证。但由于国内耐高温半导体器件技术进步缓慢,暂时不能为我国大型航空发动机提供质量小、体积小、寿命长、电磁兼容性好的固态点火装置及变能变频点火装置。<sup>[1]</sup>

发展趋势:航空发动机点火系统的发展趋势与航空发动机的发展两者紧密相连,随

着对飞机战斗性能的提升，对发动机有了更高的要求，同时也对点火装置有了提出新的要求：可靠性高、体积小、寿命长，变频变能电点火系统是未来主要发展方向。

### （三）课题主要研究内容

本课题主要研究点火装置安装固定方式，从安装固定方式方面降低点火装置出现问题的概率。

本课题的主要研究内容分为以下四个方面，内容如下：

1. 拆装 WP6 发动机后，查阅与点火系统和机械连接的相关文献，分析现有螺栓连接的优缺点；
2. 对现有的点火系统进行拍照测量，使用 SolidWorks 进行建模并进行静应力分析；
3. 通过静应力分析后，参考相关文献资料，在安装固定方式上进行改进优化设计；
4. 优化后的安装固定方式进行静应力分析，得到结论后对报告作出总结。

### （四）参考文献

- [1] 李奕新, 谭航, 杨水银. 航空发动机电点火系统现状与发展趋势[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(06):49-54.
- [2] 肖维东. 浅谈航空发动机起动与点火系统[J]. 科技视界, 2016(14)
- [3] 吴天德. 国外航空发动机电点火装置发展现状及趋势[J]. 民用飞机设计与研究, 1996(01):5-6.
- [4] 机械连接技术[J]. 航空制造技术, 2016(19):63.
- [5] 乔乔, 李晓秀, 周江伟, 金福艺. 螺栓连接预紧力对结构疲劳性能的影响[J]. 失效分析与预防, 2021, 16(03):166-172.
- [6] 林京, 张博瑶, 张大义, 陈敏. 航空燃气涡轮发动机故障诊断研究现状与展望[J/OL]. 航空学报:1-15[2021-12-05]
- [7] 任刚强. 航空发动机点火系统故障诊断方法研究[D]. 中国民航大学, 2012.
- [8] Czarnigowski Jacek, Jakliński Piotr, Karpiński Paweł. Comparison of dual and single spark ignition in operation of a large piston aircraft engine[J]. International Journal of Engine Research, 2021, 22(9):
- [9] Tom Brisken. Technology for a new century of aviation. [N/OL] General Electric, 2006.
- [10] A&P Technology Powerplant Textbook [M]. Jeppesen Sanderson, 2003.

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021.11.22- 2021.11.28	拆装 WP6 发动机，查阅航空发动机点火装置安装固定方式相关文献，了解相关知识。	掌握毕设相关基本知识以及大体思路。
2021.12.1- 2021.12.15	撰写开题报告和任务书，与导师讨论模型的构建。	完成开题报告的撰写及前期模型构思。
2021.12.15- 2022.1.15	几何模型的构建。	完成几何模型的构建。
2022.1.20- 2022.2.10	结构分析及几何模型优化。	完成结构分析与几何模型优化
2022.2.15- 2022.3.5	撰写论文初稿	完成论文初稿
2022.3.10- 2022.4.25	进行论文中期检查、查重，修改论文	论文定稿
2022.5.1- 2022.5.20	论文外审	完成论文外审
2022.5.25- 2022.6.3	为毕业答辩做准备，准备答辩 PPT 进行答辩	完成答辩 PPT 和答辩
<b>完成课题的现有条件</b>	1. 能够熟练运用 SolidWorks 三维建模 2. 可以使用 simulation 进行静应力分析 3. 具备机械设计、机械制造相关知识	
<b>指导教师意见</b>	同意 指导教师：_____  _____ 2022 年 3 月 5 日	
<b>开题答辩小组意见</b>	同意 组 长：_____  _____ 2022 年 3 月 5 日	

**天津中德应用技术大学**  
**本科生毕业设计（论文）的声明**

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（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，本毕业设计（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。对本设计（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。本毕业设计（论文）原创性声明的法律責任由本人承担。

学位论文作者签名：刘红艳

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：福巍

2022 年 6 月 3 日

## 摘 要

航空发动机是航空器中不可或缺的一部分，没有发动机给飞机提供飞行的动力，飞机就不能顺利的飞行。点火系统是航空发动机的核心部分，它是发动机启动的重要部件，点火装置一旦出现问题，会影响到整个飞机的安全。

本次航空发动机点火装置固定方式优化所使用的发动机类型为学校提供的涡轮喷气式发动机，简称涡喷 6。在对点火装置进行拆装时，发现用来固定点火装置的螺栓少了很多，螺栓连接有可能导致各个螺栓的受力无法达到完全均匀一致，受发动机高温、振动影响，连接处容易松脱、变形，从而造成损失，减少使用寿命，并造成后期增加维修成本及维修难度，所以认为可以换一种连接方式。经过与导师的沟通，决定对涡喷 6 发动机安装固定方式进行优化，先对涡喷 6 发动机点火装置使用 SolidWorks 绘图软件进行三维建模，着重突出点火装置与发动机的连接方式。改变其原有螺栓连接方式为滑轨式连接、附件包与卡扣式连接方式，滑轨式连接采用泡沫树脂隔热方式隔热减震；附件包通过把点火装置与加力点火装置放在一个盒子里与发动机相连，盒子里填充热绝缘材料进行隔热减震，卡扣式则通过弹簧进行减震。

此次毕业设计将让我更进一步的认识涡喷 6 航空发动机，明白发动机点火装置的重要性。最后，对三种优化后的安装固定方式与原固定方式进行比较，验证其安装固定方式可行性，选择最优的一种方案进行受力分析。

**关键词：**点火装置；滑轨式；附件包；卡扣式

## ABSTRACT

Aero engine is an indispensable part of aircraft, without engine to provide power for aircraft flight, aircraft can not fly smoothly. Ignition system is the core part of aero-engine, it is an important part of engine start, once the ignition device problems, will affect the safety of the entire aircraft.

The engine type used for the fixed method optimization of the aero-engine ignition device is the turbojet engine provided by the school, referred to as turbojet 6. In ignition device for disassembling, found the bolts used to fix the ignition device is much less, the stress of the bolt connection can lead to various bolts can't achieve full uniform, affected by the engine heat, vibration, joint easy to loose, deformation, resulting in the loss, reduce the service life, and cause the late increase the maintenance cost and maintenance difficulty, So we thought we could use another connection. After communication with my supervisor, I decided to optimize the installation and fixing method of the turbojet 6 engine. First, I used SolidWorks drawing software to conduct 3D modeling for the ignition device of the turbojet 6 engine, focusing on the connection mode between the ignition device and the engine. The original bolt connection mode is changed to slide rail connection, accessory bag and buckle connection mode, slide rail connection adopts foam resin heat insulation mode heat insulation shock absorption; The accessory pack is connected to the engine by placing the ignition and afterburner in a box filled with thermal insulation for shock absorption, and the snap type with springs for shock absorption.

This graduation project will give me a further understanding of turbojet 6 aero engine and the importance of engine ignition device. Finally, the three optimized installation and fixing methods were compared with the original fixing methods to verify the feasibility of the installation and fixing methods, and the optimal one was selected for force analysis.

**Key words :** Ignition device ; Slide rail connection ; Accessory bag ; Snap-on type

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 论文选题背景.....	1
1.2 国内外研究现状分析.....	1
1.3 论文的研究内容.....	2
第二章 总体方案介绍.....	3
2.1 课题研究对象简介.....	3
2.2 发动机点火装置的组成.....	3
2.3 设计注意事项.....	3
2.4 研究过程简述.....	4
第三章 点火装置安装固定方式分析及优化.....	5
3.1 Solidworks 三维软件介绍.....	5
3.2 点火装置安装固定方式三维建模.....	5
3.3 点火装置结构优化.....	7
第四章 原模型及优化模型仿真结果对比.....	14
4.1 点火装置热力学分析.....	14
4.2 点火装置静应力分析.....	23
4.3 仿真计算结果分析.....	59
第五章 不足和展望.....	63
参考文献.....	64
致 谢.....	65

# 第一章 绪论

## 1.1 论文选题背景

众所周知，航空器想要顺利飞行需要有设备为它提供飞行的动力，而航空发动机就是航空器飞行的动力装置。航空发动机不仅代表着一个国家科技水平的高低，还直接的决定了一个飞机的可靠性及性能。目前，世界上可以独立研制高性能军用发动机的国家只有美、俄、英、中等少数几个国家，民用领域则由美、英两国垄断，技术工艺门槛较高<sup>[1]</sup>。由于发动机的工作环境比较特殊，导致很多零件长时间处于高温、高压、强烈震动的状态下，经常承受高负荷和热冲击，所以其零部件容易出现故障。启动发动机需要启动装置与点火装置相配合，点火装置由控制面板、点火激励器、点火电缆、点火电嘴四个部分组成<sup>[1]</sup>。而点火装置也是发动机众多容易出现故障零件里的一个，通过实训课对涡喷 6 发动机点火装置进行拆装以后，发现点火装置采用的螺栓连接有很多不足之处，通过查找资料发现螺栓连接受力无法达到一致，并且连接处容易松脱，所以决定将从发动机点火装置连接方面降低发动机出现问题的概率。

本次论文研究的发动机机型为涡喷 6 航空发动机<sup>[3]</sup>。涡喷 6 发动机是中国第一个超音速发动机，是以前苏联米格-19 飞机的动力装置为原样机发展形成，属于轴流式单转子带加力燃烧室的涡轮喷气式发动机，也是我国迄今为止生产数量最大的航空发动机。我国发动机的研制始于上世纪六十年代，起步偏晚一些，经历了国外引进结合自主研发到自主研发为主，最后为建立了相对完整的研制生产体系，具备了各类发动机的系列研制生产能力。

## 1.2 国内外研究现状分析

当下在飞机安装固定方面有四大类连接方式，分别为铆接、焊接、胶接与螺栓连接。在飞机制造方面，装配连接是否可靠直接决定了飞机抗疲劳的性能，只有先进的连接技术才能保证航空器的可靠性。现代航空器对连接技术的要求为：质量稳定，高强度，长寿命，高可靠性<sup>[7]</sup>。

美国的飞机通常要求有较好的维护性，所以美国多数飞机采用抱轴的连接方式，即推力销子通过抱轴装置与机身结构相连，此种连接方式连接复杂，传递力的方式不直接，对于抱轴的可靠性要求较高，结构效率较低，优点为安装维护方便。俄罗斯多数在飞机结构上采用安装推力销的方式，此种连接方式传递力直接，缺点为安装时发动机不易对准推力销的孔的位置，需要专用工具，且推力销与机身安装孔为小间隙配合，安装时衬套容易受损伤<sup>[5]</sup>。

在涡喷 6 发动机中点火装置采用螺栓连接，螺栓连接属于可拆卸连接，其优点为耐磨损、连接强度高，缺点为连接处容易松脱、变形。

### 1.3 论文的研究内容

本论文主要通过 SolidWorks 建模软件对点火装置安装固定方式进行建模，之后查阅资料进行安装固定方式的更改，通过建模软件把优化后的模型进行建模，并且对优化后的安装固定方式进行静应力分析与热应力分析。将原模型与改进模型的受力分析结果进行对比，选择出最优的一种方案。对优化后的模型还需进行减震隔热的填充物的查找，对查找出来的填充物进行比较，选择最适合的填充物放置在点火装置中，查阅发动机的工作环境温度，进行热应力分析。

针对涡喷 6 点火装置安装固定方式的优化，本论文主要研究以下三个方面：

研究内容 1. 针对原涡喷 6 点火装置安装固定方式进行优化，查阅资料，寻找新的安装固定方式进行建模。

研究内容 2. 对新的安装固定方式填充物进行资料查阅，对减震隔热放入填充物进行比较，寻找最优的一种填充物。

研究内容 3. 对优化后的三种安装固定方式与原安装固定方式进行静应力分析与热应力分析并对比分析形成初步结论。

## 第二章 总体方案介绍

### 2.1 课题研究对象简介

本次论文研究对象为学校发动机实训课所提供的涡喷 6 发动机。涡喷 6 发动机是歼 6，强五飞机的动力装置，是第二代涡轮喷气发动机，为引进米格-19 双发超音速战斗机生产线和配套发动机机型。1985 年由前苏联提供发动机全套资料，中国独立完成制作。其主要特点为采用单转子轴流式压气机和环管型燃烧室。是产量最大国产航空发动机，总产量高达 29316 台。

为了更深入理解发动机点火装置连接方式的设计因素，需要在拆装完成以后查阅机械连接方面文献，深入了解每一种连接方式的优缺点，思考哪一种可以更好的应用在发动机上。之后对原点火装置进行数据的测量，用三维建模软件把模型绘制出来，根据之前查到的文献绘制新的改进模型，对它们进行静应力和热应力分析，将分析后的结果以表格形式做出对比，查看是否满足强度要求。

### 2.2 发动机点火装置的组成

无论哪一种发动机，在启动时都需要点火装置进行点火，目前电火花点火在飞机上应用较多，因为电火花点火，操作起来简单方便，安全性和可靠性较高<sup>[2]</sup>。

点火装置作用：产生电火花，点燃混合气，为飞机提供飞行的动力。

常用的电点火系统分为高压电感系统、低压电感系统、高压电容系统、低压电容系统四种<sup>[4]</sup>。

航空发动机的点火装置由电源、高能点火器、高压导线、点火电嘴、起动喷嘴等组成。

高能点火器：高能点火器作用是将飞机电源或地面电源转化为高压电，供电嘴点火使用。高能点火器又分为直流高能点火器和交流高能点火器，目前国内的直流高能点火器基本上都是采用振子式和晶体管式的设计方法<sup>[2]</sup>。

高压导线：将点火器输出的高压脉冲传送至燃烧室的点火电嘴。

点火电嘴：产生电火花，点燃混合气，利用高电压击穿电极间的气体绝缘层，从而产生点火所需电弧的一种电火花点火设备<sup>[2]</sup>。主要由中心电极、侧电极和绝缘体等构成。

起动喷嘴：在发动机起动时，将燃油呈雾状喷入起动喷油点火器内以保证迅速燃烧，由接管嘴和喷嘴组成。

点火系统工作原理：对于涡轮喷气式发动机的点火系统，通常是把机上的直流电或交流电，经高压点火器转变为高压交流电或高压直流脉冲，通过高压传输导线向电嘴传输电能以产生电火花<sup>[4]</sup>。

### 2.3 设计注意事项

本次论文的研究发动机机型为学校实训拆装所提供的涡喷 6。主要研究内容为涡喷 6 发动机点火装置安装固定方式，对该点火装置安装固定方式进行改进设计，更换新的连接

方式。点火装置在发动机启动时有着不可替代的作用，没有点火装置发动机就无法启动，所以在改进安装固定方式时，需要考虑以下因素：

**隔热性：**航空发动机的工作环境为长时间处于高温、高压的状态下，经常承受高负荷和热冲击，所以要求点火装置有很好的隔热性能。

**减震性：**发动机工作时处于强烈震动状态下，所以在更改连接方式时需要注意是否需要添加减震物。

**连接方式：**更改发动机连接方式，需要考虑到连接质量是否稳定，是否会对点火装置点火时产生影响，由于工作环境的特殊，还需考虑连接强度是否高，寿命是否有原连接方式寿命长。

**材料的选取：**添加填充物需要适合飞机发动机工作环境温度，并且减震物或填充物不可以影响点火装置工作，长时间高温环境下要注意材料的抗疲劳性。

## 2.4 研究过程简述

首先先在课堂上学习航空发动机理论知识，在理论知识的基础上，对学校现有的涡喷 6 发动机进行拆装，深入了解发动机的每个组成部分。在整体拆装一次有了大概了解之后，着重对点火装置进行拆装，对点火装置进行拍照，用卡尺对点火装置进行测绘，测绘完成以后，利用 SolidWorks 进行点火装置原安装方式进行建模，并在建模完成以后，查阅机械连接方式相关方案，在与导师沟通后，挑选出可以用在点火装置与发动机相连的连接方案，之后继续进行新方案的建模。新方案建模完成以后，对原有连接方式与改变后的连接方式进行静应力分析和热应力分析，并对分析结果进行对比，将分析后的结果体现在最后的论文中。

## 第三章 点火装置安装固定方式分析及优化

### 3.1 SolidWorks 三维软件介绍

本章内容会对以前所绘制的模型进行静应力分析和热应力分析，这些分析将用到 SolidWorks 建模软件进行分析，SolidWorks 是一个以设计功能为主的 CAD/CAE/CAM 软件，设计过程比较简便而方便的软件之一，能够提供不同的设计方案，减少设计过程中出差错的概率，SolidWorks 具有学习简单，操作方便简单的特点，可以在短时间内装配好大型设计并且可以动态的查看动态图，也可以很准确的查找出装配是否存在间隙问题或干涉问题。SolidWorks 不仅可以绘制零件三维图，还可以在三维零件图绘制成功以后进行拖拽做出三视图的工程图、爆炸图或剖视图。

本章内容会用到 SolidWorks 软件里的建模功能与 Simulation，simulation 里包括频率分析、应力分析、热分析、扭曲分析和热应力分析，本次只需要用到静应力分析和热力学分析，静应力分析是为了查看结构是否满足强度要求，热力学分析是为了查看其状态的变化规律，需要确定温度场、位移、应变和应力场，因为之前有 SolidWorks 建模课和 CAD 绘图课，SolidWorks 既可以绘制三维建模图也可以绘制二维图，用起来也简单方便，并且可以满足自己论文所有需要用到的模块组件，所以选择了用 SolidWorks 来帮助自己完成论文模型部分和应力分析部分。

### 3.2 点火装置原安装固定方式三维建模

#### 3.2.1 点火装置原安装固定方式三维建模



原涡喷 6 点火装置安装固定方式图片

本次利用 SolidWorks 三维建模软件建模，下面介绍涡喷 6 的点火系统的点火装置建模过程：

1. 首先打开三维建模软件 SolidWorks 进行点火装置外壳的绘制，根据在实训课所测量的真实数据进行建模，其点火装置外壳为两个长方体（210mm\*72mm，120mm\*90mm），绘

制完成后对长方形进行拉伸，其拉伸长度为 65mm 与 67mm。

2. 对拉伸完成的点火装置进行抽壳，抽壳壁厚为 2mm，对点火装置盖子部分进行螺纹孔绘制，绘制后进行圆角处理。

3 点火装置绘制一个电源进口与四个电源出口，加力点火装置绘制两个电源出口，并对点火装置整体进行圆角处理，如图 3-2-1 所示。

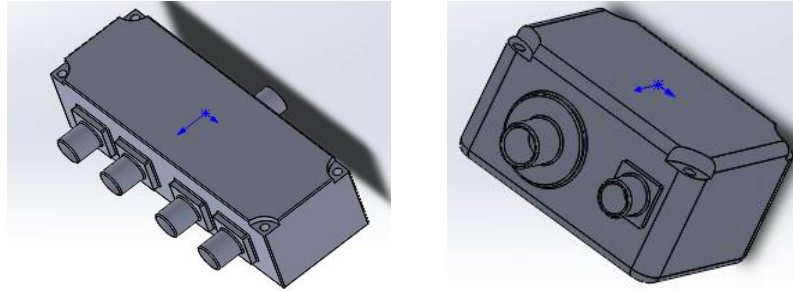


图 3-2-1 点火装置图片

4. 新建零件，绘制点火装置的螺栓，螺栓为六角形螺栓。

5. 按比例缩小绘制发动机筒壁, 建立圆形草图（直径为 500mm），对发动机筒壁进行抽壳，壁厚为 5mm，在发动机筒壁上绘制连接处与连接板相连，进入草图后，画一个与连接板尺寸一样的矩形，对其进行拉伸，拉伸长度为 480mm，拉伸后对连接板进行螺纹孔绘制，如图 3-2-2 所示。

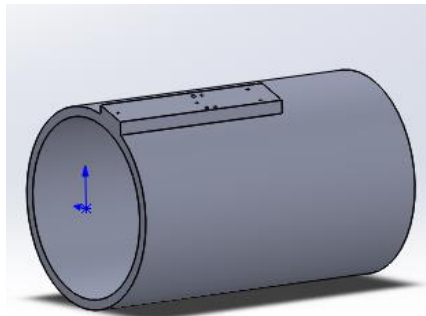


图 3-2-2 发动机筒壁图片

6. 绘制点火装置与发动机筒壁连接的两个连接板（44.5mm\*8mm、15mm\*8.7mm），进行拉伸，拉伸高度为 0.5mm，对照实物画出孔的位置，并根据所测量尺寸的不同绘制不同尺寸的螺栓孔，对其进行圆角处理（R=1mm），如图 3-2-3。

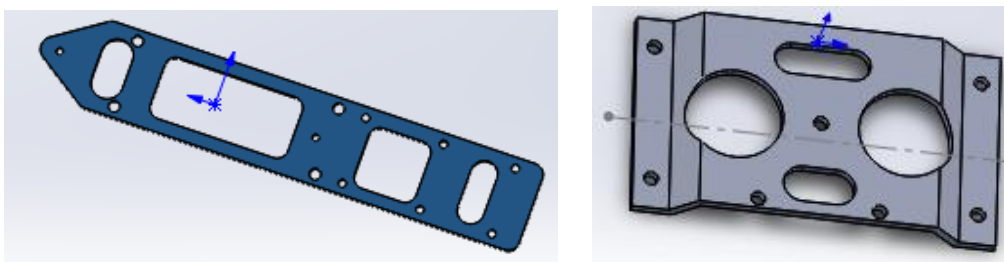


图 3-2-3 点火装置连接板

7. 接下来是点火装置与发动机相连的管路图，所有电源口配相应的管路，如图 3-2-4 所示。

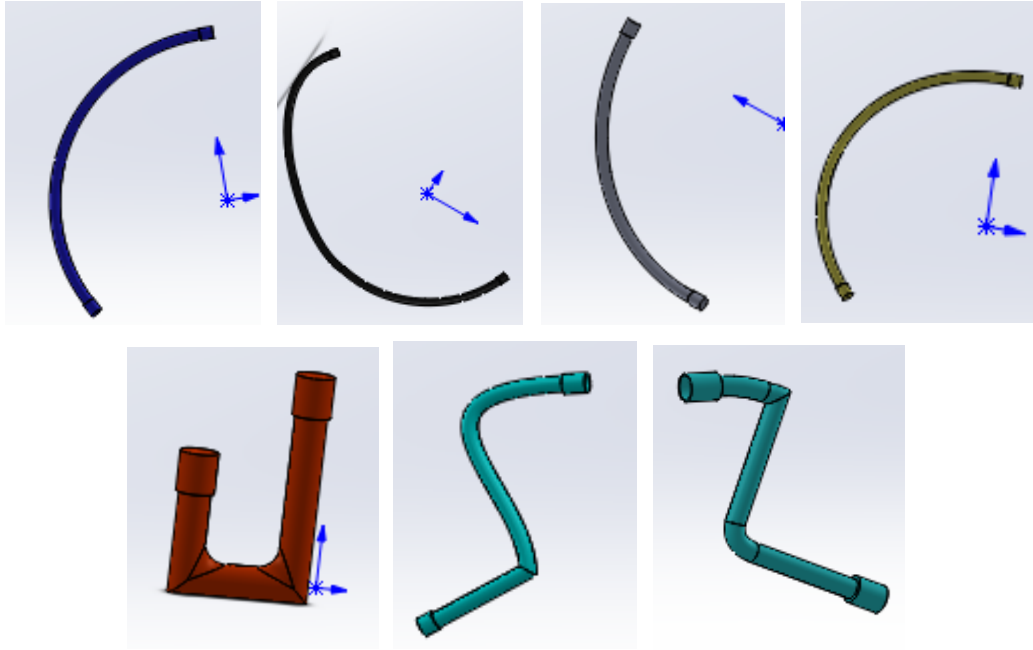


图 3-2-4 管路图

8. 接下来对点火装置、发动机筒壁与管路进行装配，因为发动机通过螺栓使点火装置与发动机连接，所以需要使用螺栓进行装配，对装配后的装配图进行干涉检查，经检查后，配合无干涉，如图 3-2-5 所示。

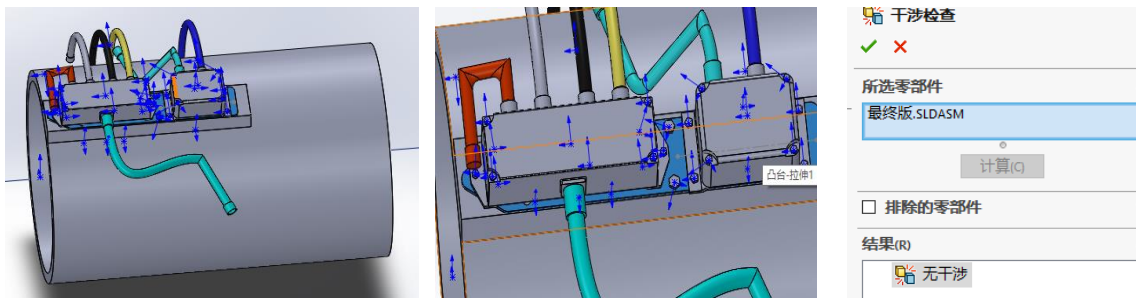


图 3-2-5 螺栓装配图

### 3.3 点火装置安装固定方式优化及分析

在大四上学期开了发动机课，分为理论学时和实践学时，在理论课时老师详细的讲解了发动机的每个部分，后期有一周的拆装涡喷 6 实训，在第一次拆装的时候，发动机每个部分自己都有参与拆装，在第二次拆装点火装置时发现用来固定点火装置的螺栓少了很多，由此想到螺栓连接有可能导致各个螺栓的受力无法达到完全均匀一致，受发动机高温、振动影响，连接处容易松脱、变形，所以在与老师沟通后决定选择点火装置方面的课题，

更改连接方式。在自己查阅相关资料和寻求老师帮助以后，想到了三种方案，第一种是通过塑料盒的盖子想到的滑轨式连接，第二种是书包式，把两个点火装置都放在一个盒子里，在盒子的空隙处填充轻盈的热绝缘物质起到减震隔热作用，第三种为卡扣式，通过卡扣上的弹簧进行减震作用。



### 3.3.1 点火装置滑轨式安装固定方式

因只对原模型的安装固定方式进行更改，故所有改动均在原模型上进行。

首先对点火装置与加力点火装置进行更改，把原有的螺栓连接变成滑轨式连接。进入草图后按照想法进行滑轨槽的绘制，绘制形状为“T”形，绘制结束后进行拉伸切除，如图 3-3-1 所示。

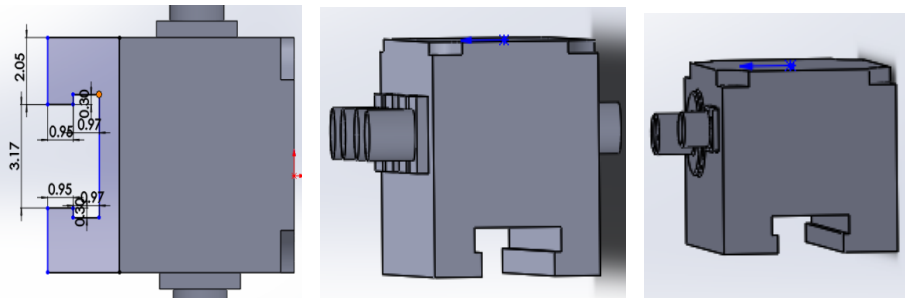


图 3-3-1 点火装置滑轨图

2. 其次对发动机筒壁进行更改，把原有连接板改变成滑轨式，绘制形状为反“T”形，绘制结束后进行凸台拉伸，与点火装置的滑轨槽进行连接，在发动机滑轨前端加挡板设计，对点火装置起到固定的作用，如图 3-3-2 所示。

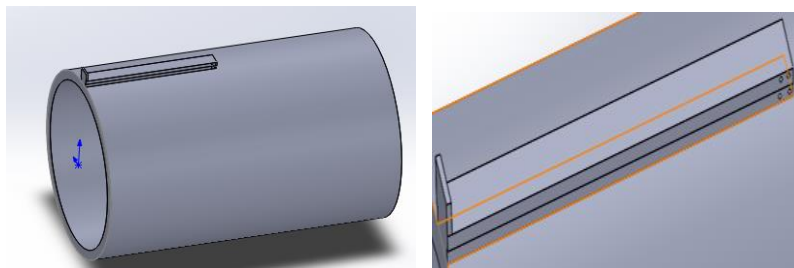


图 3-3-2 发动机筒壁滑轨

3. 点火装置、加力点火装置与发动机筒壁更改完成后，对点火装置与加力点火装置进行后端固定，经过充分的考虑，决定采用端盖形式固定，并用长螺栓与点火装置固定，如图 3-3-3 所示。

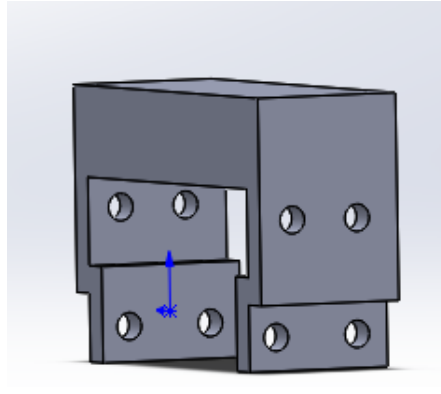


图 3-3-3 端盖

4. 所有零件完成绘制后，对其进行装配，装配后进行评估干涉检查，经检查后，无干涉，如图 3-3-4 所示。

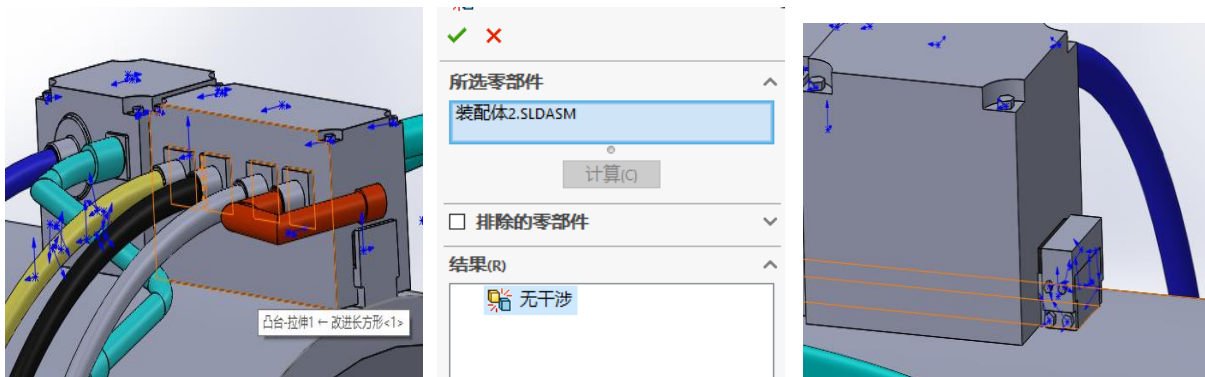


图 3-3-4 滑轨式装配图

5. 因为发动机特殊的工作环境，所以在进行安装方式更改时需要考虑如何隔热减震，需要放置减震隔热物质，如图 3-3-5 所示。

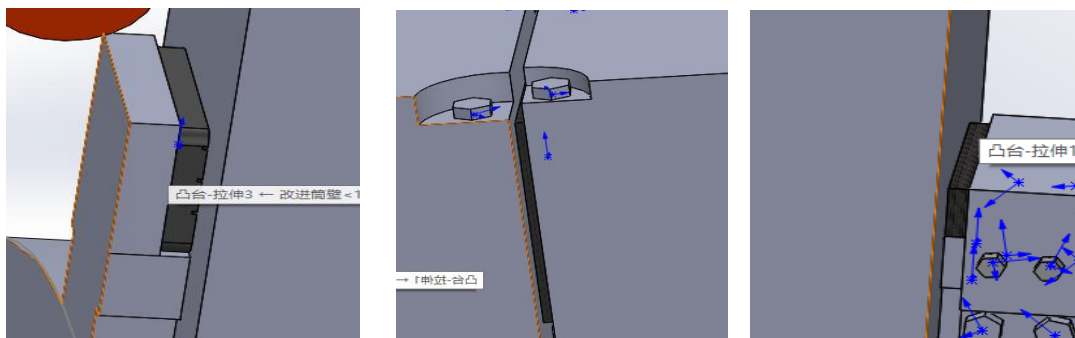


图 3-3-5 减震隔热物

### 3.3.2 点火装置附件包安装固定方式

1. 首先绘制放置点火装置的盒子，进入草图，绘制 500mm\*140mm 的矩形，之后进行拉伸 85mm。
2. 对盒子进行抽壳，抽壳壁厚为 1.5mm。
3. 在盒子里面根据点火装置尺寸绘制点火装置卡槽，卡槽为“L”型，数量为 8 个，对卡槽进行圆角处理，如图 3-3-1。

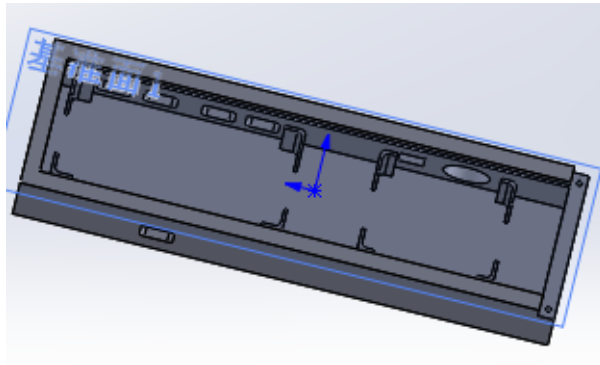


图 3-3-1 点火装置盒子

4. 接下来绘制盒子的盖子，盖子画成“T”字形，便于与盒体装配。
5. 由于后期装配，需要在盖子上绘制卡槽用来固定点火装置盒体，草图绘制矩形 6mm\*5mm 的凹槽，之后进行拉伸切除命令。
6. 在需要固定盖子的端部进行螺纹孔的绘制，并绘制相应的螺栓，如图 3-3-2 所示。

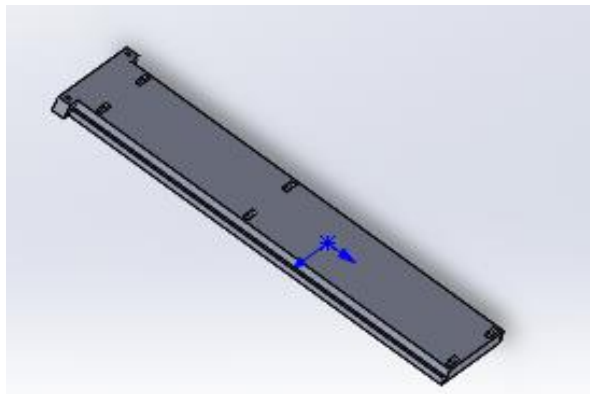


图 3-3-2 点火装置盖子

7. 接下来是绘制用来连接点火装置盒体和发动机连接的卡扣，首先进入草图画出想要卡扣的形状，并在卡扣上绘制与凹槽相配的卡扣，如图 3-3-3 所示。

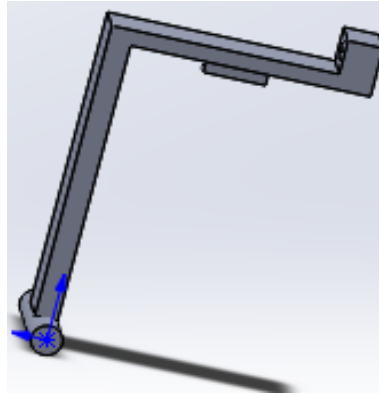


图 3-3-3 点火装置卡扣

8. 待所有零件绘制完成后，对所有零件进行组装并检查是否干涉，附件包减震隔热方式是通过放热绝缘填充物达到效果，结果如图 3-3-4 所示。

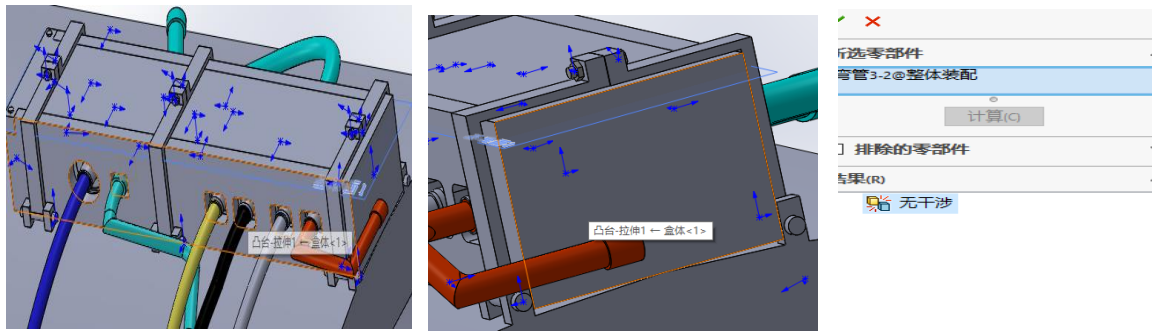


图 3-3-4 装配图

### 3.3.3 点火装置卡扣式安装固定方式

卡扣式连接方式是在附件包连接方式的基础上更换箍环连接为卡扣式连接，接下来介绍卡扣式连接。

1. 首先绘制与发动机连接的卡扣，先根据点火装置的大小绘制与之尺寸大小相同的可以通过螺栓连接固定在点火装置上的卡扣，如图 3-3-1 所示。

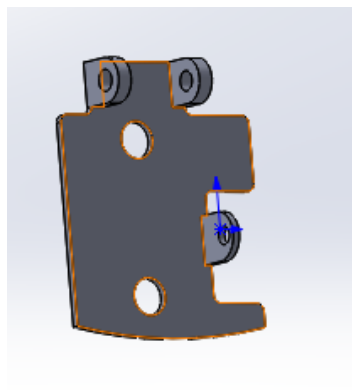


图 3-3-1 卡扣示意图

2. 其次绘制与卡扣相连的搭扣，搭扣通过弹簧与卡扣连接，弹簧起到减震作用，通过卡扣的大小确定搭扣的尺寸，结果如图 3-3-2 所示。

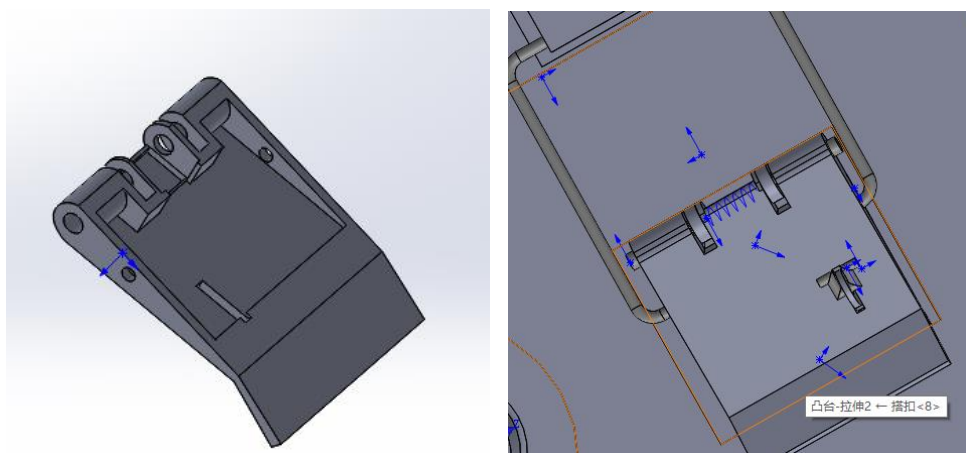


图 3-3-2 搭扣示意图

3. 把卡扣与搭扣进行装配，装配后无干涉，继续在发动机筒壁画出可以与挂钩相连的挂扣，并画出挂钩，如图 3-3-3 所示。

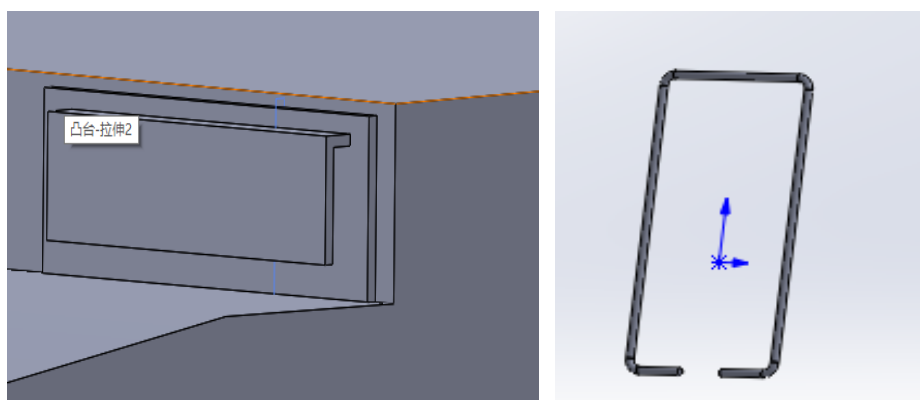


图 3-3-3 挂扣与挂钩示意图

4. 在发动机凸起的台上进行开槽，对点火装置前后起到固定作用，如图 3-3-4 所示。

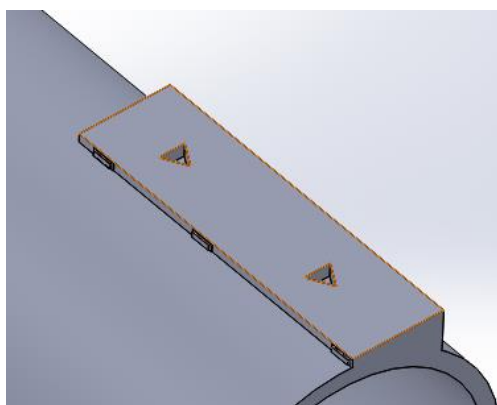


图 3-3-4 开槽示意图

5. 为了进一步加固连接，建立与锁子相像的锁紧结构，结果如图 3-3-5 所示。

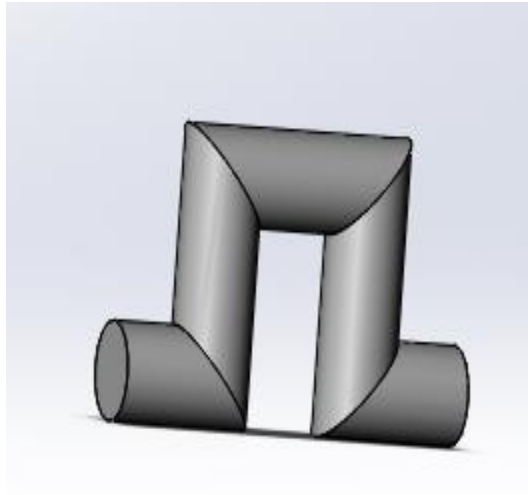


图 3-3-5 锁芯

6. 对零件进行装配，发现无干涉，如图 3-3-6 所示。

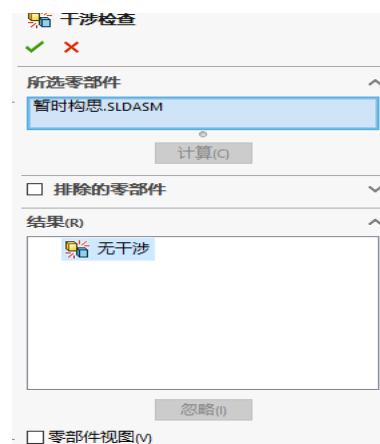
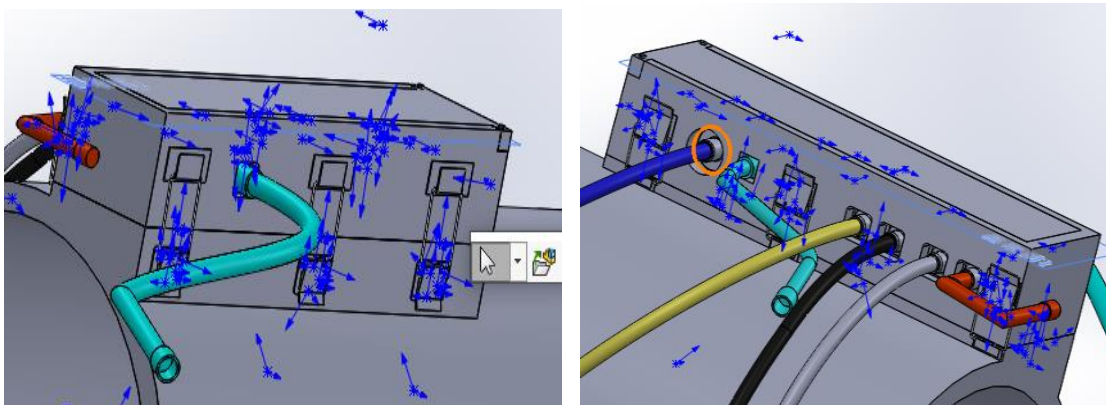


图 3-3-6 装配图

## 第四章 原模型及改进模型仿真结果对比

### 4.1 点火装置热力学分析

点火装置安装在发动机启动部分,同时也是启动装置最核心的一个部分,是决定发动机能否成功点火的因素。涡喷 6 点火装置长期处于高温的环境下,因此有必要对点火装置进行热力学分析,分析其温度对其相关的线路的老化,材料的疲劳等综合因素。



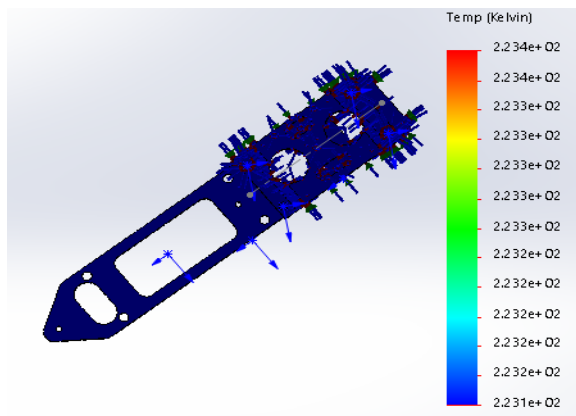
点火装置安装部位

#### 4.1.1 点火装置热力学分析

首先先对每一个安装固定方式进行材料的选择,通过查阅文献资料了解到涡喷 6 点火装置的外壳由 3A21 航空铝合金制作,3A21 牌号是新牌号,LF21 是它以前用的牌号,在本次热力学仿真使用新材料镍铬合金进行分析。

点火装置的使用温度为 $-50^{\circ}\text{C}$ - $300^{\circ}\text{C}$ 左右,在对安装固定方式进行热力学分析时,使用测试的温度分别为 $-50^{\circ}\text{C}$ 、 $50^{\circ}\text{C}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$ 、 $150^{\circ}\text{C}$ 和  $300$  摄氏度,热应力分析使用软件为 SolidWorks。

当原点火装置安装固定方式使用温度为 $-50^{\circ}\text{C}$ 时,对安装固定方式进行热应力分析,得出结果如图 4-2-1 所示。





当箍环点火装置安装固定方式使用温度为 $-50^{\circ}\text{C}$ 时,对安装固定方式进行热应力分析,得出数据如图 4-2-5 所示。

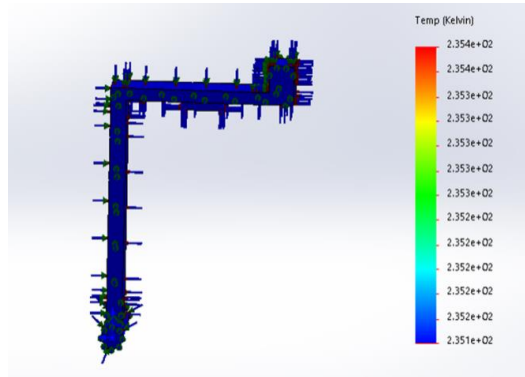


图 4-2-5 箍环温度 $-50^{\circ}\text{C}$

当原点火装置安装固定方式使用温度为 $+50^{\circ}\text{C}$ 时,对安装固定方式进行热应力分析,得出结果如图 4-2-6 所示。

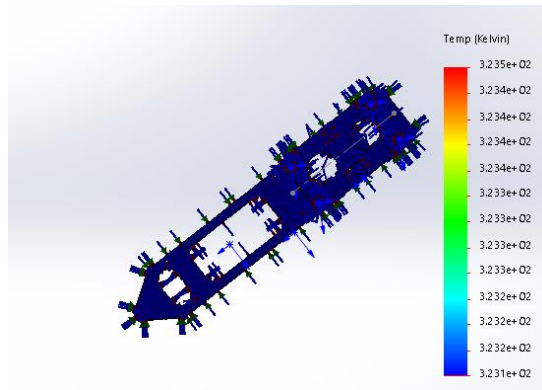


图 4-2-6 原点火装置底板温度 $+50^{\circ}\text{C}$

当滑轨点火装置安装固定方式使用温度为 $+50^{\circ}\text{C}$ 时,对安装固定方式进行热应力分析,得出结果如图 4-2-7 所示。

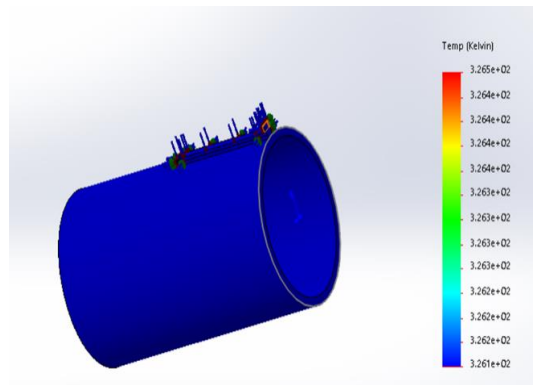


图 4-2-7 滑轨温度 $+50^{\circ}\text{C}$

当卡扣点火装置使用温度设置为+50℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-8 所示。

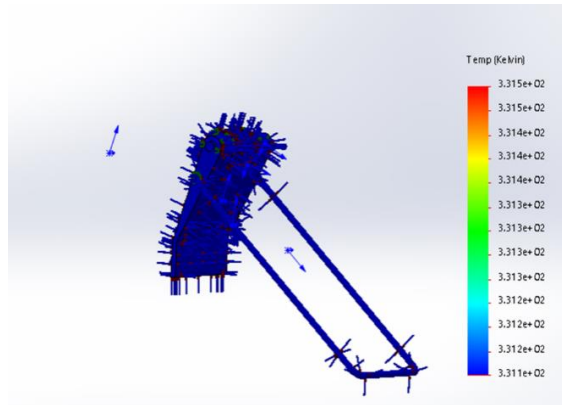


图 4-2-8 卡扣温度+50℃

当附件包火装置使用温度设置为+50℃时，对安装固定方式进行热力仿真计算，得出数据如下图 4-2-9 所示。

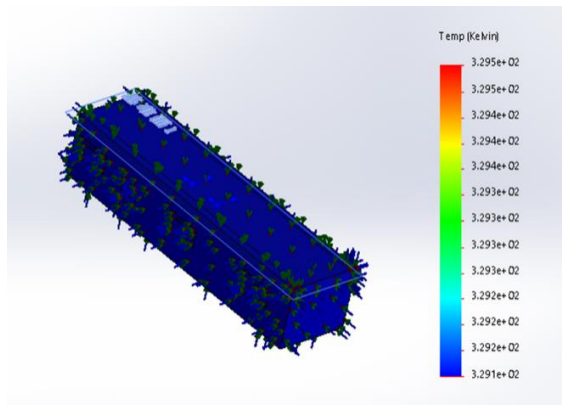


图 4-2-9 附件包温度+50℃

当箍环点火装置使用温度为+50℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-10 所示。

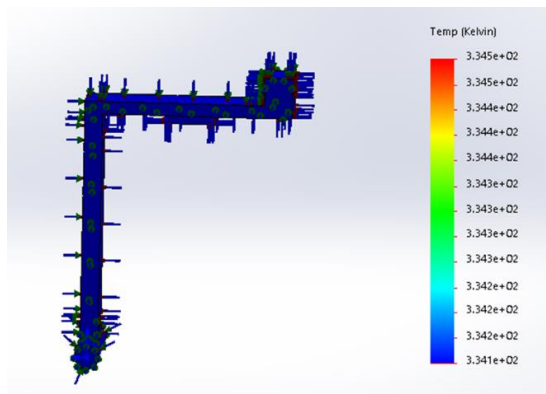


图 4-2-10 箍环温度+50℃

当原点火装置使用温度为 100℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-11 所示。

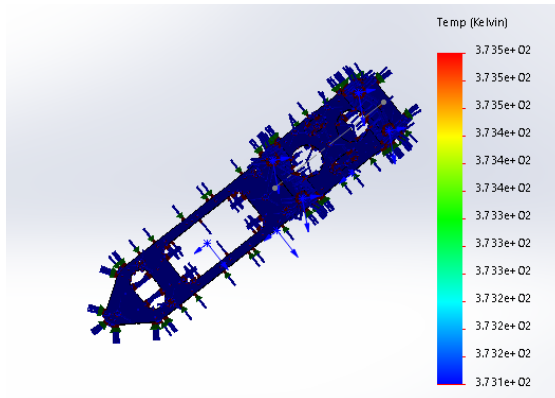


图 4-2-11 原点火装置底板温度+100℃

当滑轨点火装置使用温度为 100℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-12 所示。

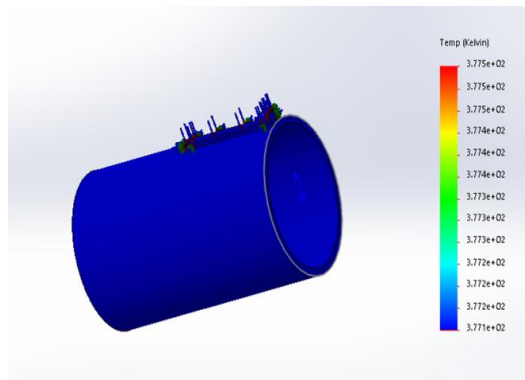


图 4-2-12 滑轨温度+100℃

当卡扣点火装置使用温度为 100℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-13 所示。

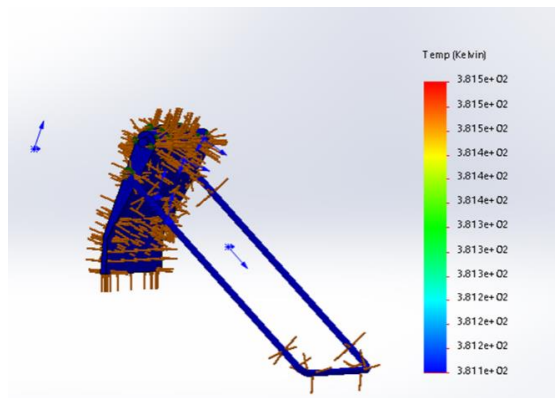


图 4-2-13 卡扣温度+100℃

当附件包点火装置使用温度为 100℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-14 所示。

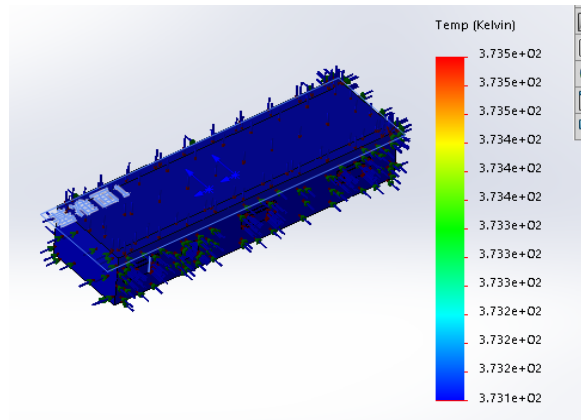


图 4-2-14 附件包温度+100℃

当箍环点火装置使用温度为 100℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-15 所示。

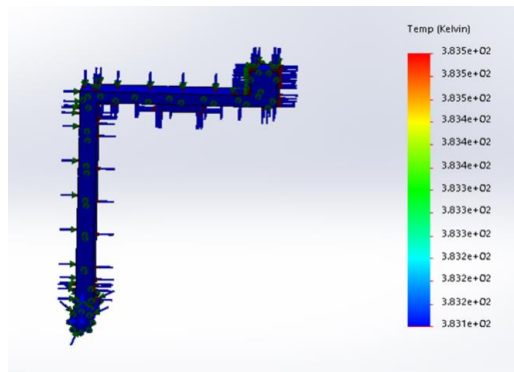


图 4-2-15 箍环温度+100℃

当原点火装置使用温度为 150℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-16 所示。

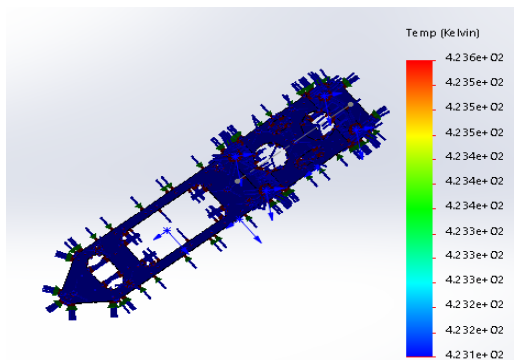


图 4-2-16 原点火装置底板温度+150℃

当滑轨点火装置使用温度为 150℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-17 所示。

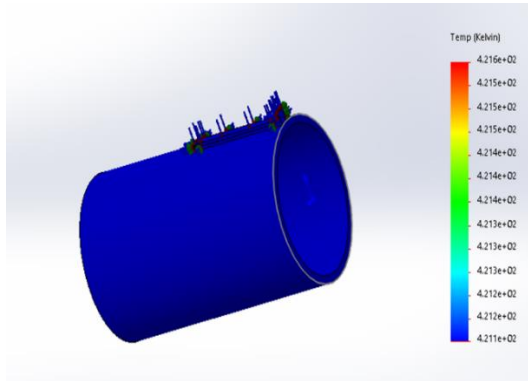


图 4-2-17 滑轨温度+150℃

当卡扣点火装置使用温度为 150℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-18 所示。

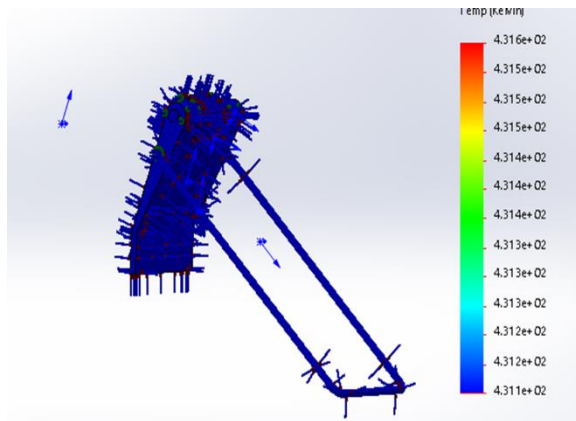


图 4-2-18 卡扣温度+150℃

当附件包点火装置使用温度为 150℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-19 所示。

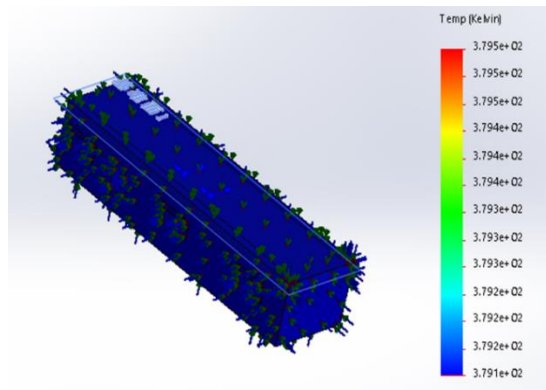


图 4-2-19 附件包温度+150℃

当箍环点火装置使用温度为 150℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-20 所示。

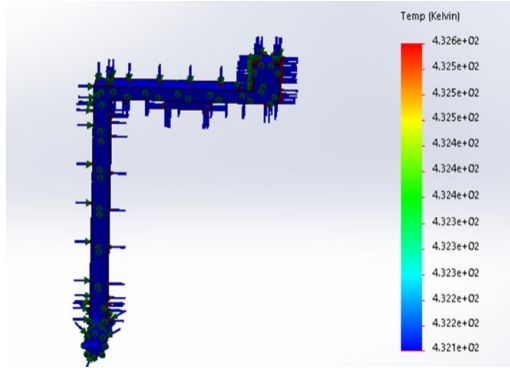


图 4-2-20 箍环温度+150℃

当原点火装置使用温度为 300℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-21 所示。

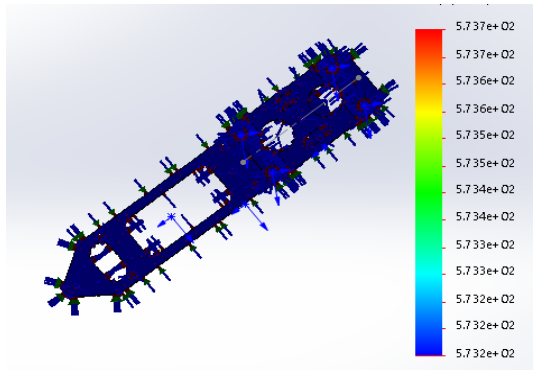


图 4-2-21 原点火装置底板温度+300℃

当滑轨点火装置使用温度为 300℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-22 所示。

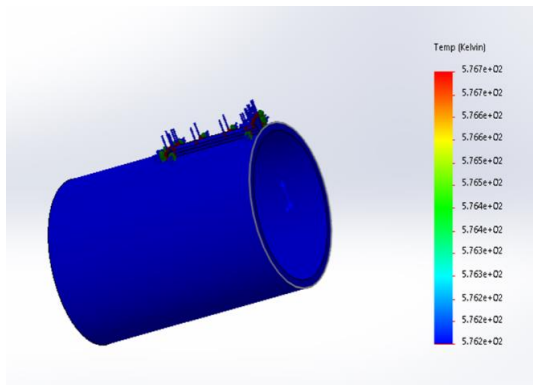


图 4-2-22 滑轨温度+300℃

当卡扣点火装置使用温度为 300℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-23 所示。

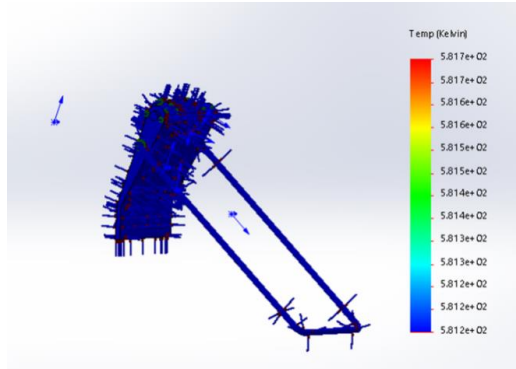


图 4-2-23 卡扣温度+300℃

当附件包点火装置使用温度为 300℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-24 所示。

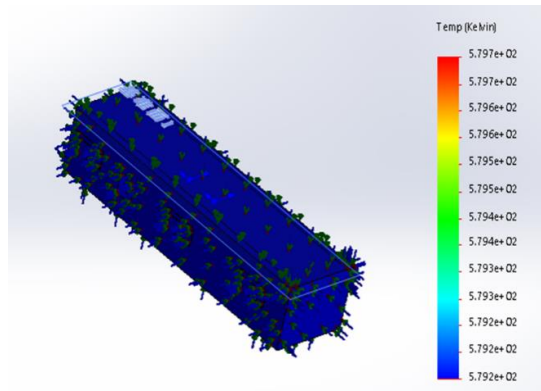


图 4-2-24 附件包温度 300℃

当箍环点火装置使用温度为 300℃时，对安装固定方式进行热应力分析，得出结果如图 4-2-25 所示。

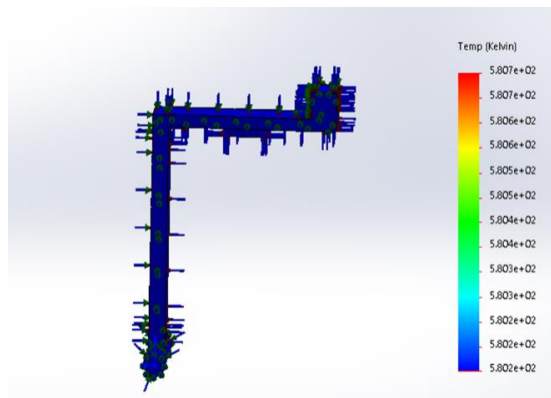


图 4-2-24 箍环温度+300℃

## 4.2.2 热力学仿真数据对比

根据上一节所做的热应力数据图，数据图使点火装置安装固定方式分别处于 $-50^{\circ}\text{C}$ 、 $50^{\circ}\text{C}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$ 、 $150^{\circ}\text{C}$ 与 $300^{\circ}\text{C}$ 的环境下，之后观察原模型与各个改进后的模型的热应力变化趋势，做出结果对比图，数据见表 4-2。

表 4-2 热力学结果对比分析

模型与温度	$-50^{\circ}\text{C}$	$+50^{\circ}\text{C}$	$+100^{\circ}\text{C}$	$+150^{\circ}\text{C}$	$+300^{\circ}\text{C}$
原模型	2.234e+02	3.235e+02	3.735e+02	4.236e+02	5.737e+02
滑轨模型	2.322e+02	3.265e+02	3.775e+02	4.216e+02	5.767e+02
卡扣模型	2.314e+02	3.315e+02	3.815e+02	4.316e+02	5.817e+02
附件包模型	2.284e+02	3.295e+02	3.795e+02	4.296e+02	5.797e+02
箍环模型	2.354e+02	3.345e+02	3.835e+02	4.326e+02	5.807e+02

通过热应力表格里的数据对比，可以看出滑轨的安装固定方式数据与原模型的底板安装固定方式数据最接近，在某些温度点滑轨模型优于原模型，其次是附件包安装固定方式，卡扣安装固定方式，最后是箍环安装固定方式。考虑到发动机工作环境不止是受高温影响，还有强烈震动影响，应该综合发动机的高温、高震动两个环境因素，所以后续需要继续做静应力分析。

## 4.3 点火装置静应力分析

点火装置在发动机中起到点燃发动机的作用，点火装置安装在发动机机匣上，容易受发动机工作时产生的热辐射以及强烈震动的影响，强烈震动会导致发动机零部件容易变形，所以需要静应力分析查看更改后的安装固定方式是否满足强度要求、刚性要求、适航性要求和稳定性要求，在本章内容中只做静态下的静应力分析。

### 4.3.1 点火装置静应力分析过程

在静态载荷中，通过查找资料<sup>[错误!未找到引用源。]</sup>，在某一静态载荷情况下点火装置安装固定方式承受的力的范围为 40N-100N，选取 40N、60N、80N、100N 四个点作为实验点，按照涡喷 6 发动机的震动图谱，分别选取 10N.m、30N.m、50N.m、70N.m、90N.m 五个力矩点进行实验。

当原点火装置安装固定方式的安装板承受力为 40N 时，设置力矩为 10N.m，对安装板进行力学分析，得出结果如图 4-3-1 所示。

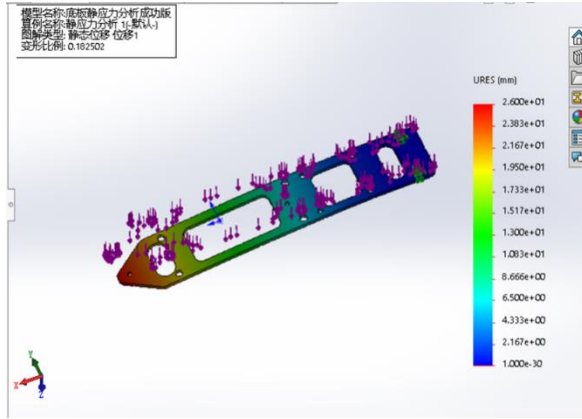


图 4-3-1 底板力 40N 力矩 10N.m

当原点火装置安装固定方式的安装板承受力为 60N 时，设置力矩为 10N.m，对安装板进行力学分析，得出结果如图 4-3-2 所示。

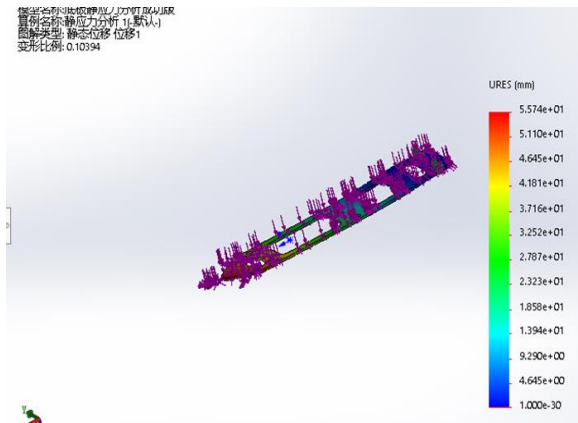


图 4-3-2 底板力 60N 力矩 10N.m

当原点火装置安装固定方式的安装板承受力为 80N 时，设置力矩为 10N.m，对安装板进行力学分析，得出结果如图 4-3-3 所示。

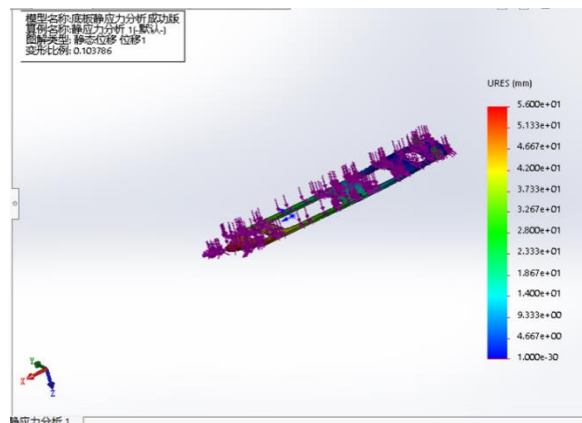


图 4-3-3 底板力 80N 力矩 10N.m

当原点火装置安装固定方式的安装板承受力为 100N 时，设置力矩为 10N.m，对安装板进行力学分析，得出结果如图 4-3-4 所示。

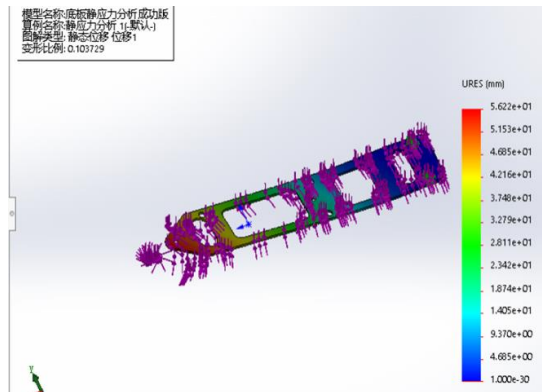


图 4-3-4 底板力 100N 力矩 10N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 40N 时，设置力矩为 10N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-5 所示。

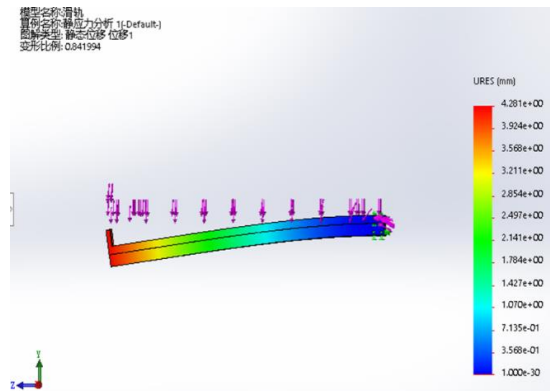


图 4-3-5 滑轨力 40N 力矩 10N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 60N 时，设置力矩为 10N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-6 所示。

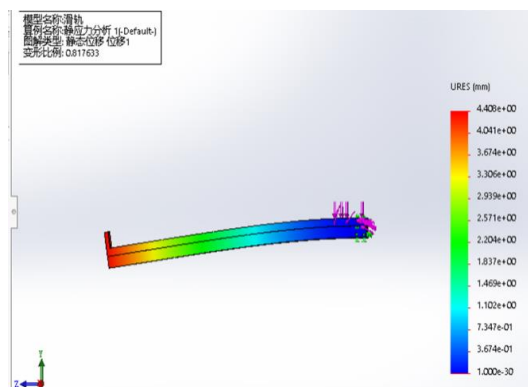


图 4-3-6 滑轨力 60N 力矩 10N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 80N 时，设置力矩为 10N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-7 所示。

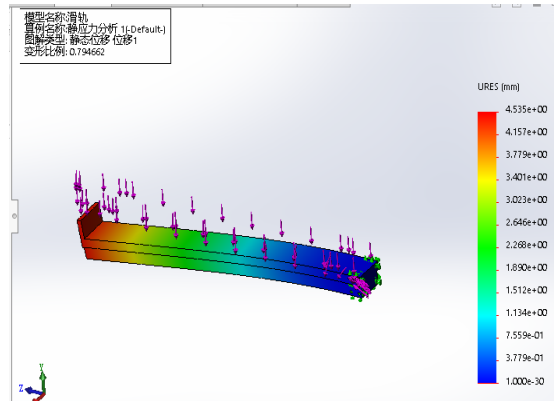


图 4-3-7 滑轨力 80N 力矩 10N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 100N 时，设置力矩为 10N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-8 所示。

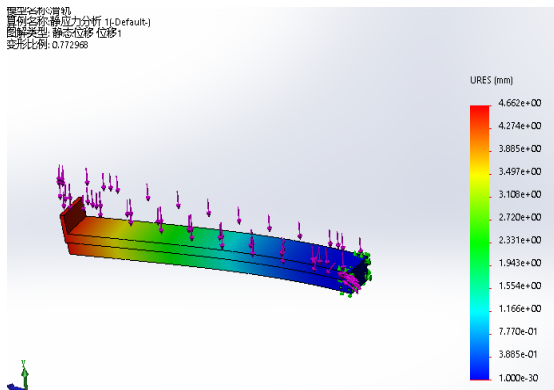


图 4-3-8 滑轨力 100N 力矩 10N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 40N 时，设置力矩为 10N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-9 所示。

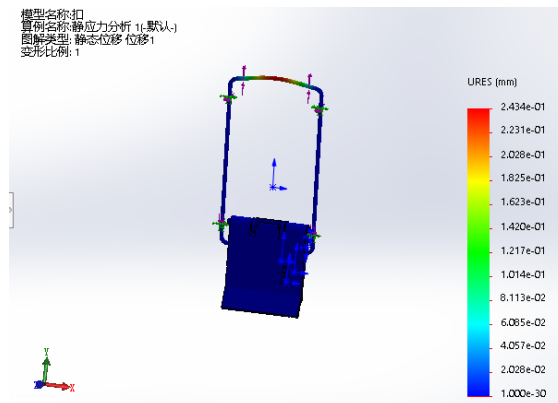


图 4-3-9 卡扣力 40N 力矩 10N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 60N 时，设置力矩为 10N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-10 所示。

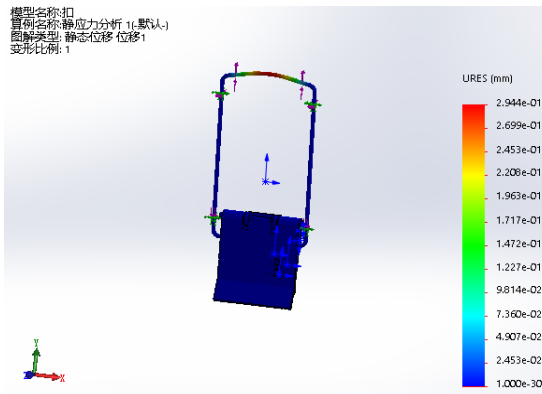


图 4-3-10 卡扣力 60N 力矩 10N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 80N 时，设置力矩为 10N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-11 所示。

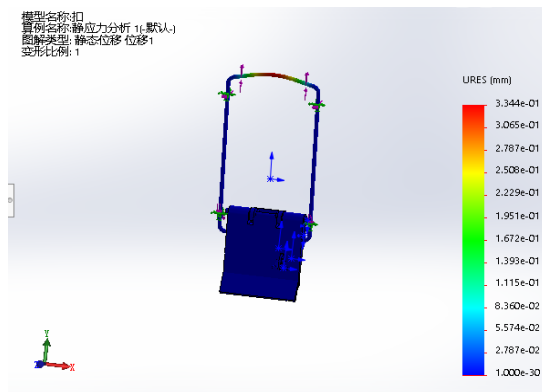


图 4-3-11 卡扣力 80N 力矩 10N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 100N 时，设置力矩为 10N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-12 所示。

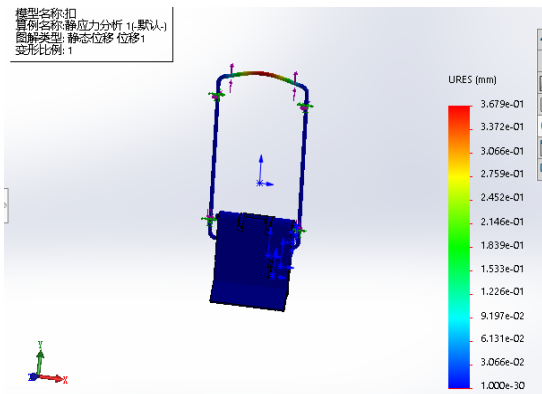


图 4-3-12 卡扣力 100N 力矩 10N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 40N 时，设置力矩为 10N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-13 所示。

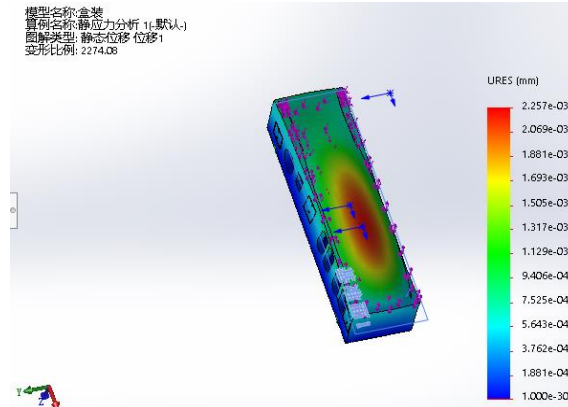


图 4-3-13 附件包力 40N 力矩 10N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 60N 时，设置力矩为 10N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-14 所示。

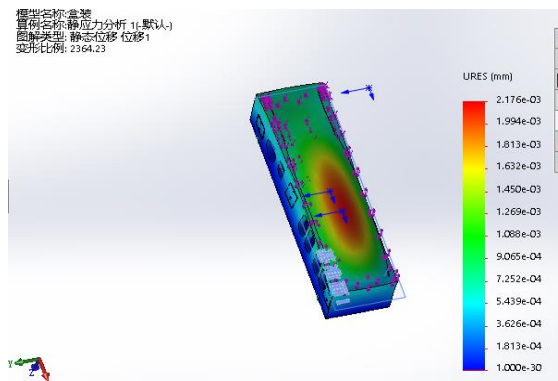


图 4-3-14 附件包力 60N 力矩 10N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 80N 时，设置力矩为 10N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-15 所示。

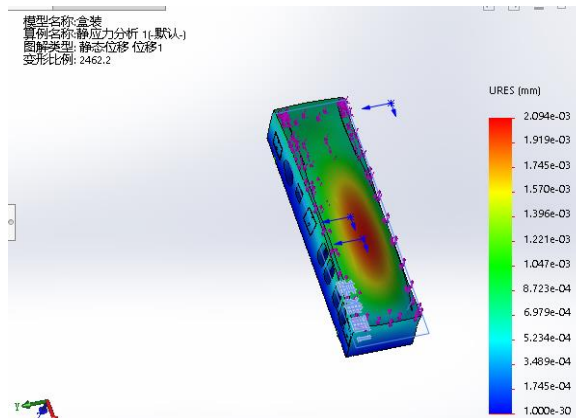


图 4-3-15 附件包力 80N 力矩 10N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 100N 时，设置力矩为 10N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-16 所示。

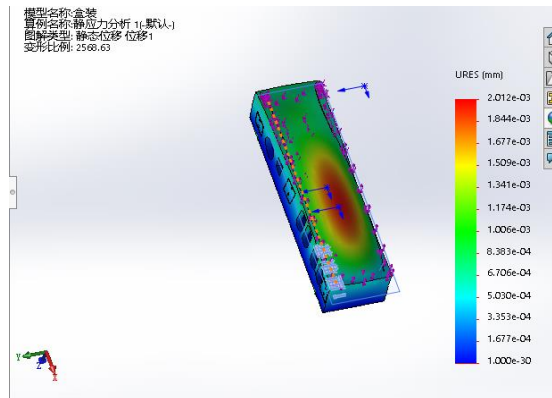


图 4-3-16 附件包力 100N 力矩 10N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 40N 时，设置力矩为 10N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-17 所示。

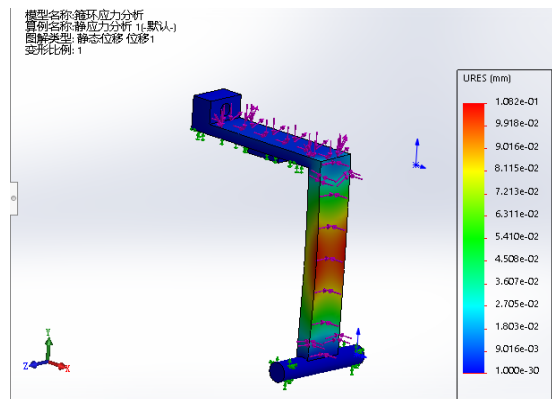


图 4-3-17 箍环力 40N 力矩 10N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 60N 时，设置力矩为 10N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-18 所示。

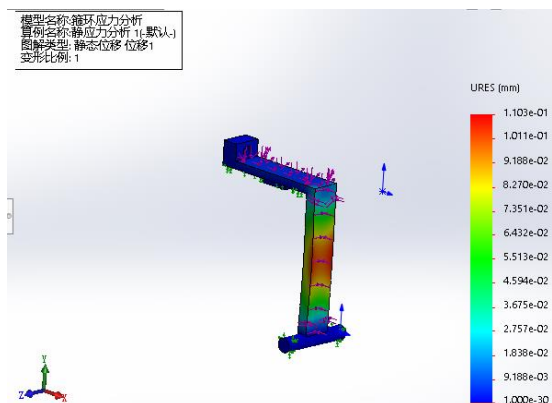


图 4-3-18 箍环力 60N 力矩 10N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 80N 时，设置力矩为 10N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-19 所示。

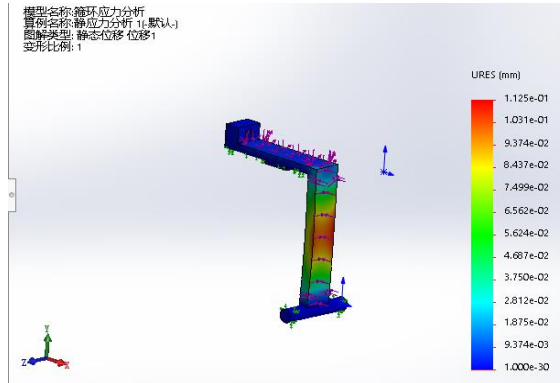


图 4-3-19 箍环力 80N 力矩 10N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 100N 时，设置力矩为 10N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-20 所示。

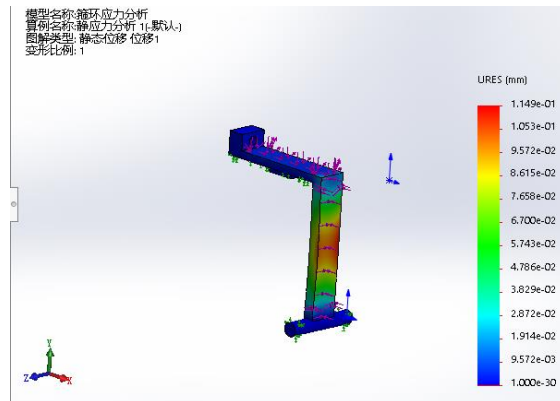


图 4-3-20 箍环力 100N 力矩 10N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 40N 时，设置力矩为 30N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-21 所示。

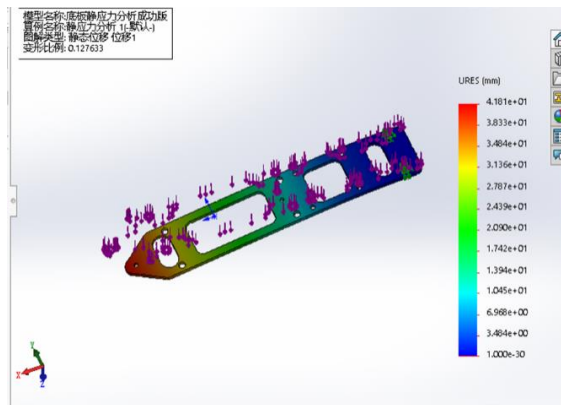


图 4-3-21 底板力 40N 力矩 30N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 60N 时，设置力矩为 30N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-22 所示。

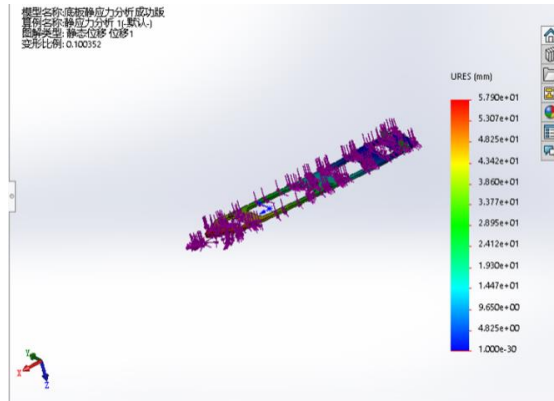


图 4-3-22 底板力 60N 力矩 30N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 80N 时，设置力矩为 30N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-23 所示。

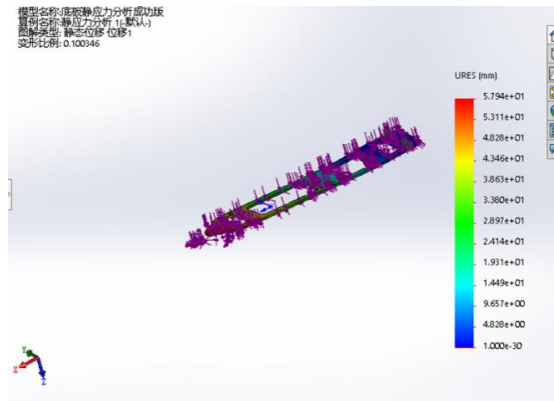


图 4-3-23 底板力 80N 力矩 30N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 100N 时，设置力矩为 30N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-24 所示。

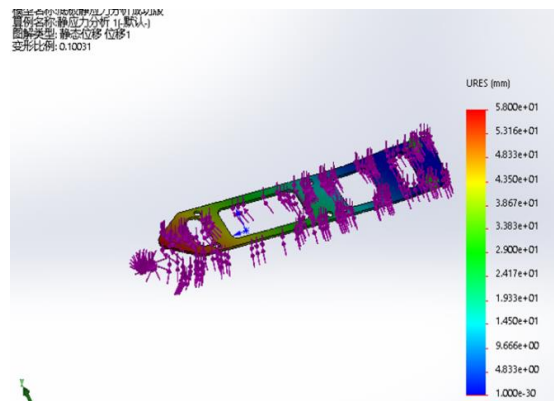


图 4-3-24 底板力 100N 力矩 30N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 40N 时，设置力矩为 30N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-25 所示。

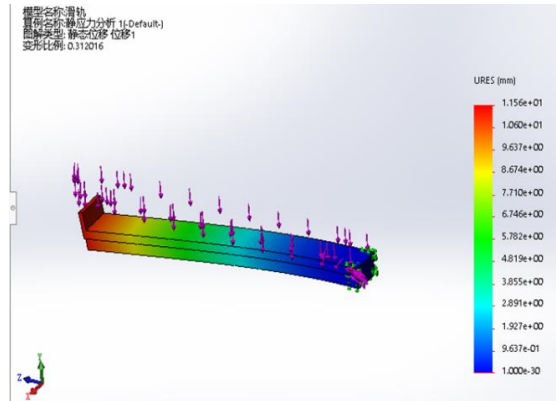


图 4-3-25 滑轨力 40N 力矩 30N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 60N 时，设置力矩为 30N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-26 所示。

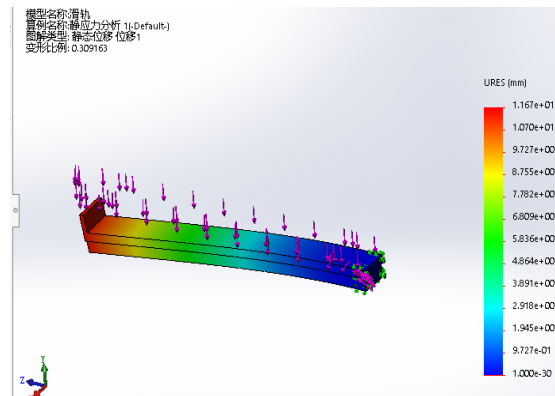


图 4-3-26 滑轨力 60N 力矩 30N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 80N 时，设置力矩为 30N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-27 所示。

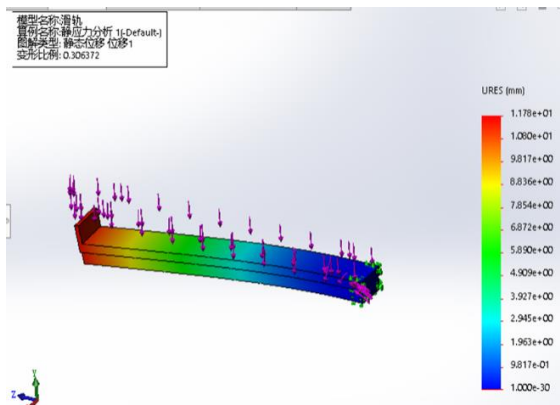


图 4-3-27 滑轨力 80N 力矩 30N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 100N 时，设置力矩为 30N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-28 所示。

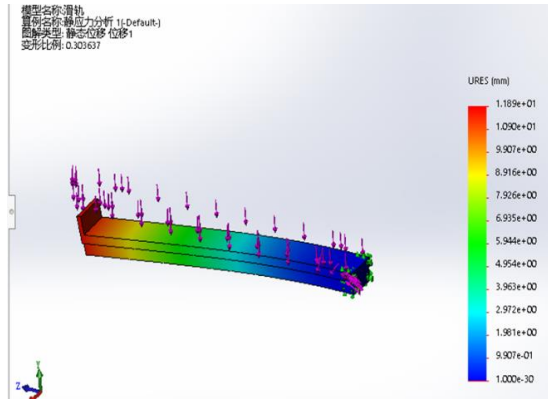


图 4-3-28 滑轨力 100N 力矩 30N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 40N 时，设置力矩为 30N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-29 所示。

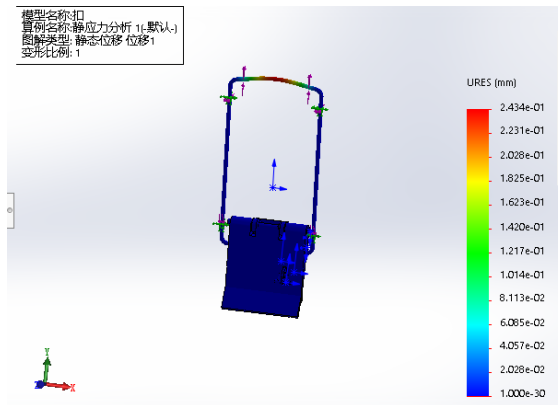


图 4-3-29 卡扣力 40N 力矩 30N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 60N 时，设置力矩为 30N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-30 所示。

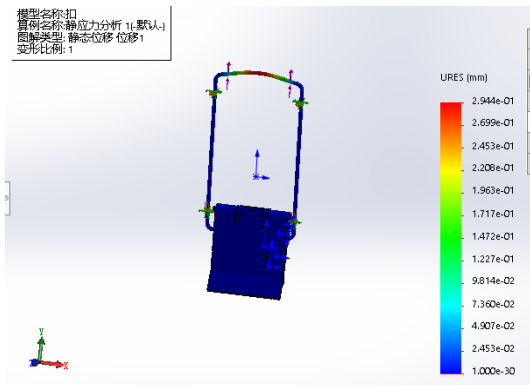


图 4-3-30 卡扣力 60N 力矩 30N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 80N 时，设置力矩为 30N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-31 所示。

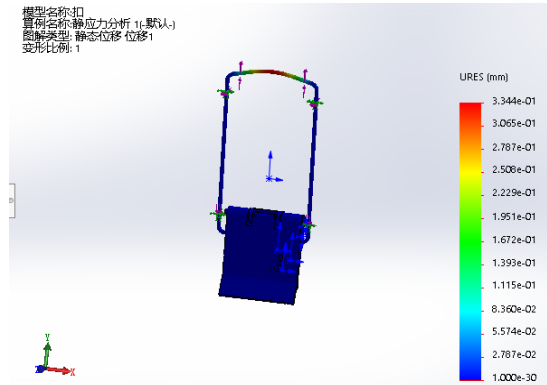


图 4-3-31 卡扣力 80N 力矩 30N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 100N 时，设置力矩为 30N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-32 所示。

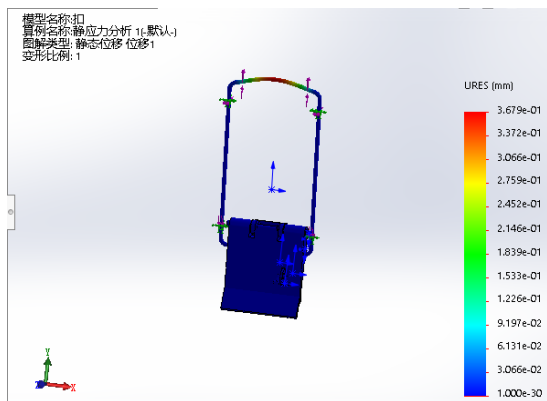


图 4-3-32 卡扣力 100N 力矩 30N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 40N 时，设置力矩为 30N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-33 所示。

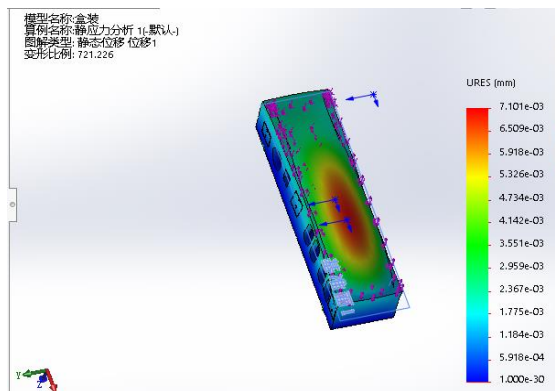


图 4-3-33 附件包力 40N 力矩 30N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 60N 时，设置力矩为 30N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-34 所示。

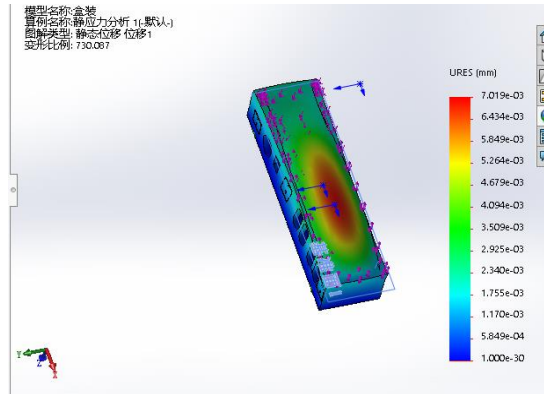


图 4-3-34 附件包力 60N 力矩 30N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 80N 时，设置力矩为 30N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-35 所示。

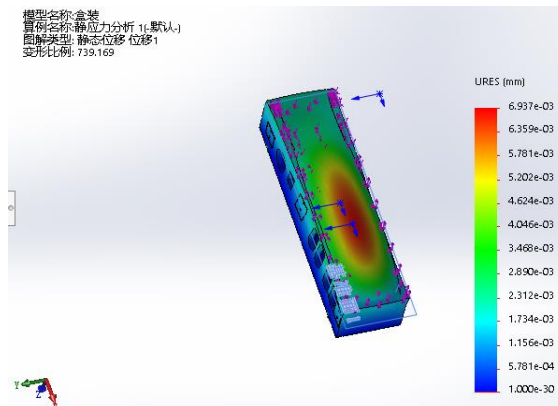


图 4-3-35 附件包力 80N 力矩 30N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 100N 时，设置力矩为 30N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-36 所示。

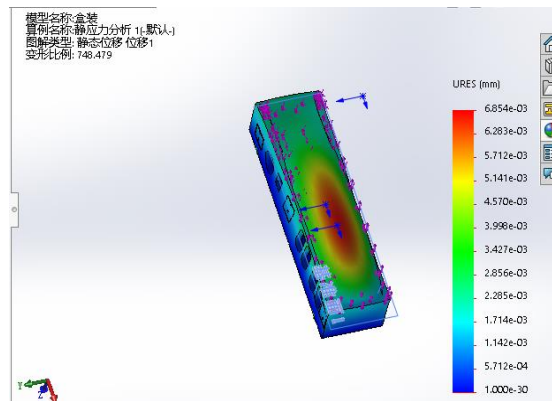


图 4-3-36 附件包力 100N 力矩 30N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 40N 时，设置力矩为 30N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-37 所示。

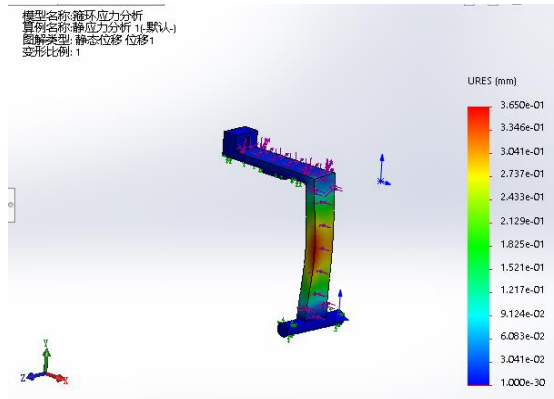


图 4-3-37 箍环力 40N 力矩 30N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 60N 时，设置力矩为 30N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-38 所示。

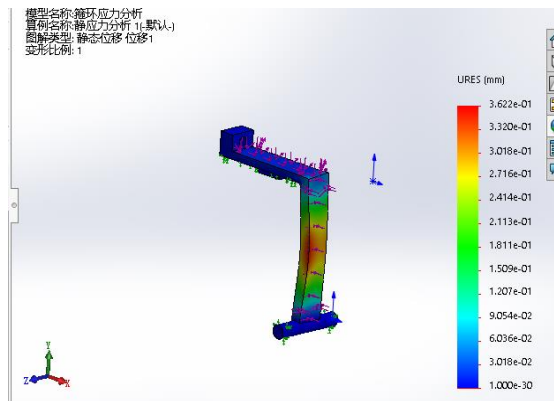


图 4-3-38 箍环力 60N 力矩 30N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 80N 时，设置力矩为 30N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-39 所示。

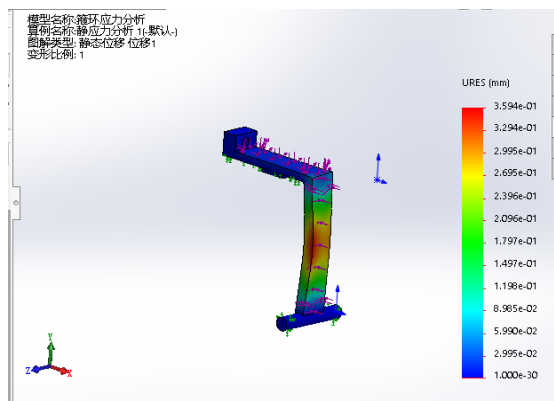


图 4-3-39 箍环力 80N 力矩 30N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 100N 时，设置力矩为 30N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-40 所示。

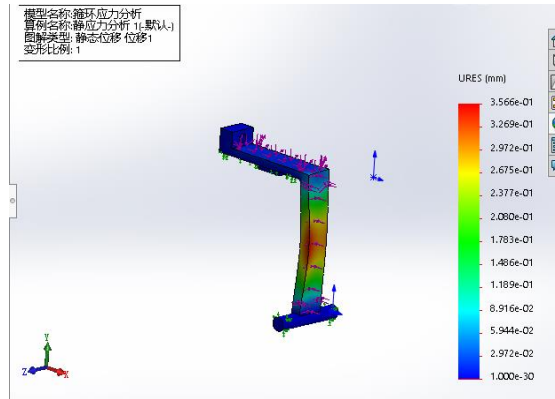


图 4-3-40 箍环力 100N 力矩 30N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 40N 时，设置力矩为 50N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-41 所示。

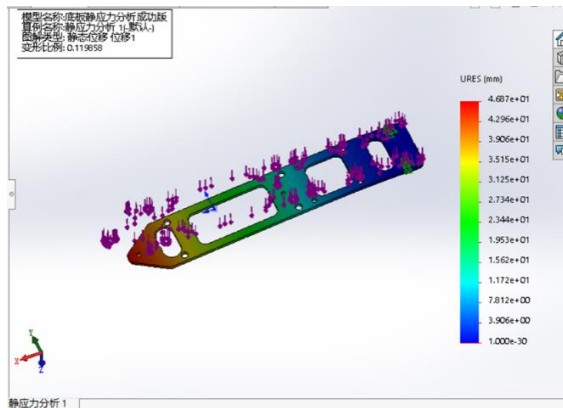


图 4-3-41 底板力 40N 力矩 50N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 60N 时，设置力矩为 50N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-42 所示。

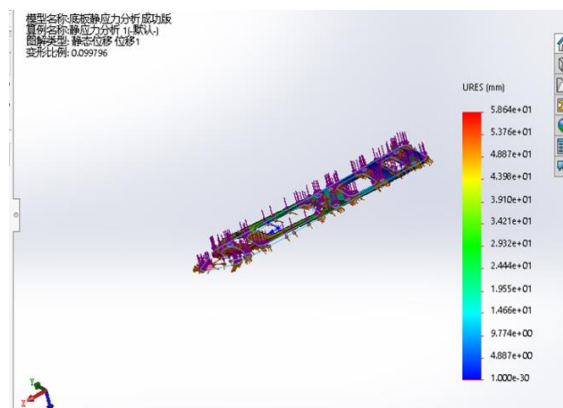


图 4-3-42 底板力 60N 力矩 50N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 80N 时，设置力矩为 50N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-43 所示。

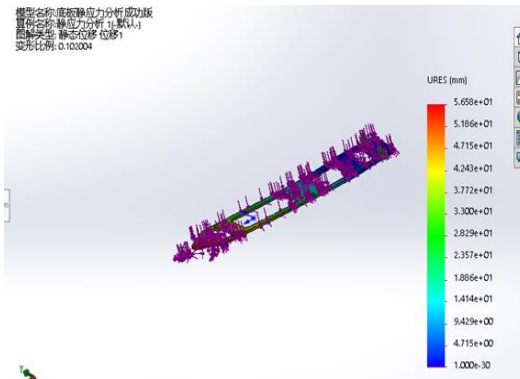


图 4-3-43 底板力 80N 力矩 50N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 100N 时，设置力矩为 50N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-44 所示。

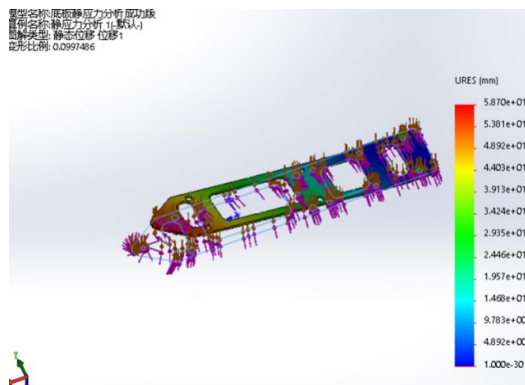


图 4-3-44 底板力 100N 力矩 50N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 40N 时，设置力矩为 50N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-45 所示。

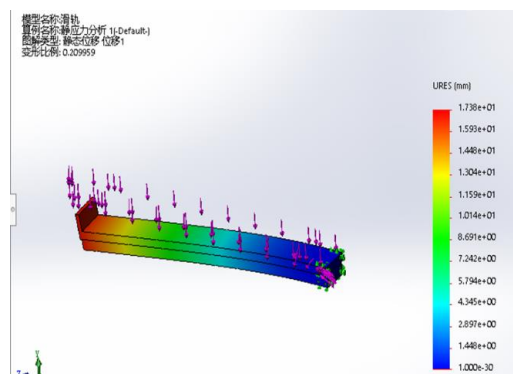


图 4-3-45 滑轨力 40N 力矩 50N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 60N 时，设置力矩为 50N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-46 所示。

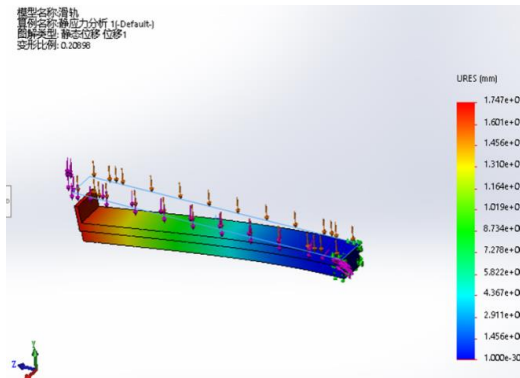


图 4-3-46 滑轨力 60N 力矩 50N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 80N 时，设置力矩为 50N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-47 所示。

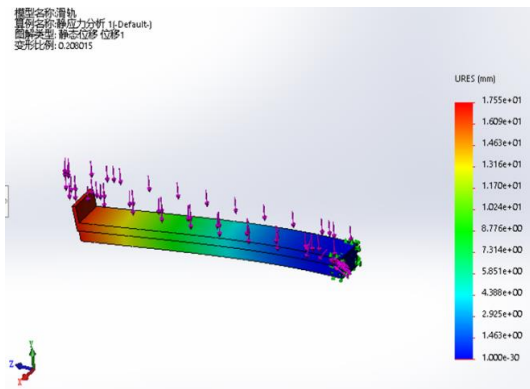


图 4-3-47 滑轨力 80N 力矩 50N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 100N 时，设置力矩为 50N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-48 所示。

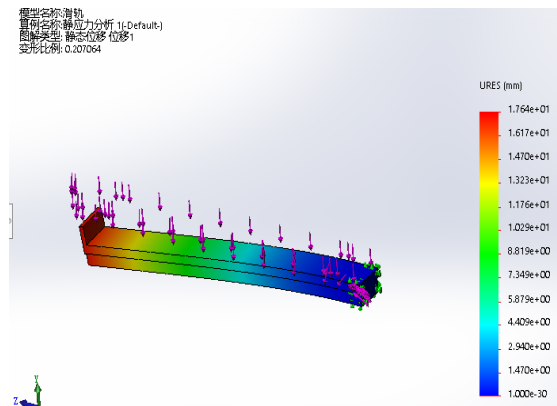


图 4-3-48 滑轨力 100N 力矩 50N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 40N 时，设置力矩为 50N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-49 所示。

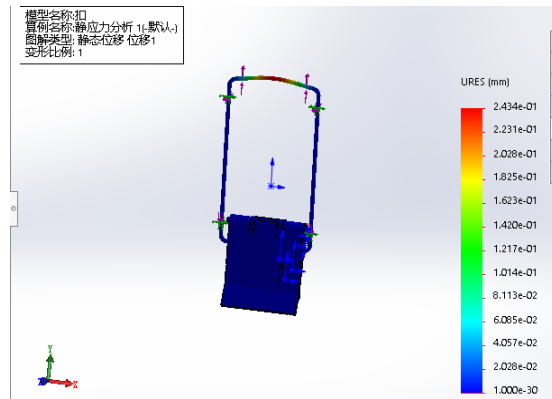


图 4-3-49 卡扣力 40N 力矩 50N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 60N 时，设置力矩为 50N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-50 所示。

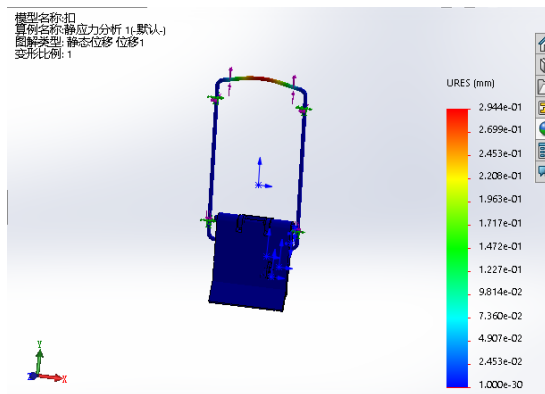


图 4-3-50 卡扣力 60N 力矩 50N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 80N 时，设置力矩为 50N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-51 所示。

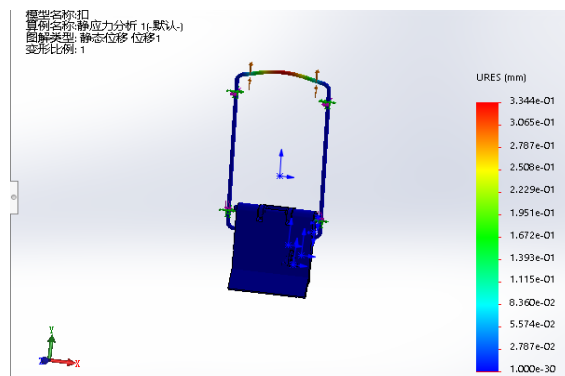


图 4-3-51 卡扣力 80N 力矩 50N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 100N 时，设置力矩为 50N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-52 所示。

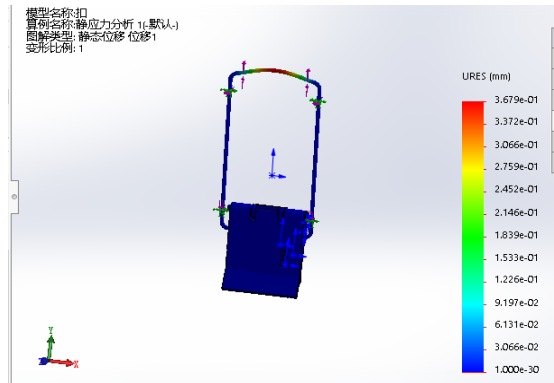


图 4-3-52 卡扣力 100N 力矩 50N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 40N 时，设置力矩为 50N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-53 所示。

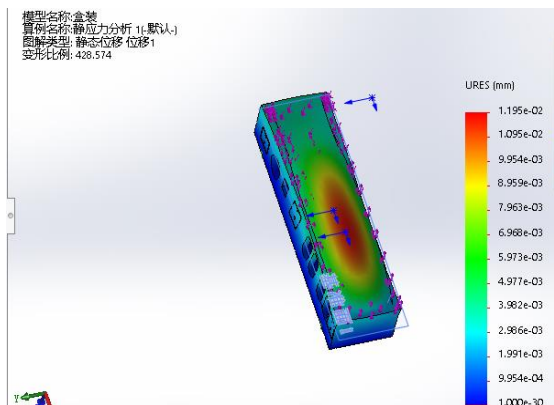


图 4-3-53 附件包力 40N 力矩 50N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 60N 时，设置力矩为 50N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-54 所示。

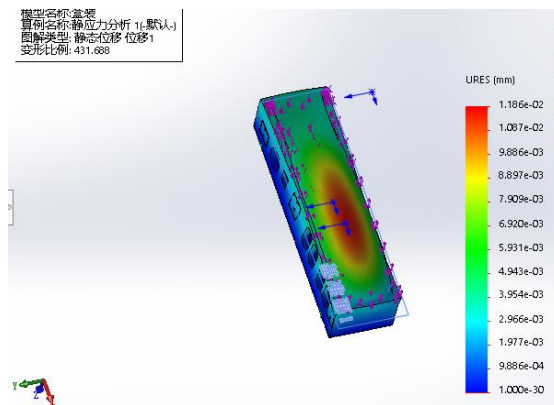


图 4-3-54 附件包力 60N 力矩 50N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 80N 时，设置力矩为 50N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-55 所示。

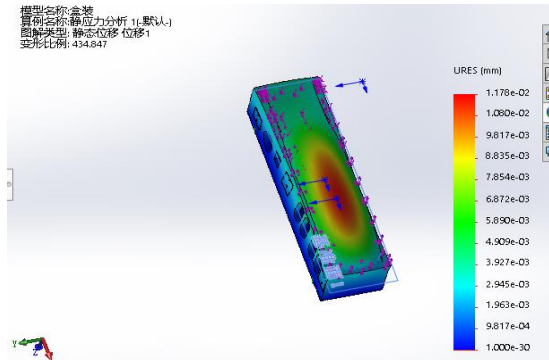


图 4-3-55 附件包力 80N 力矩 50N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 100N 时，设置力矩为 50N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-56 所示。

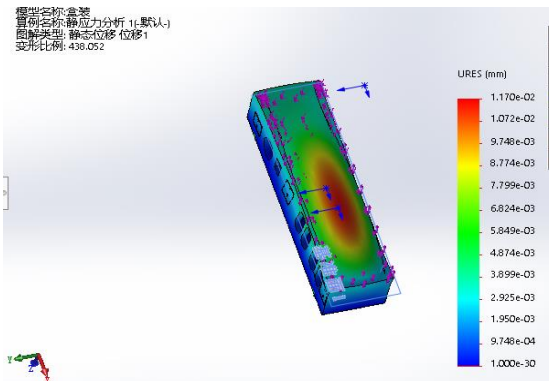


图 4-3-56 附件包力 100N 力矩 50N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 40N 时，设置力矩为 50N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-57 所示。

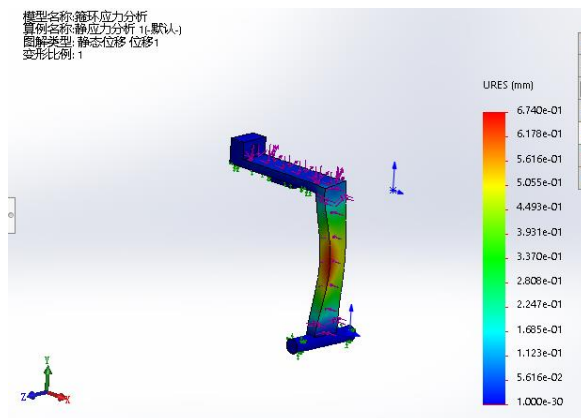


图 4-3-57 附件包力 40N 力矩 50N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 60N 时，设置力矩为 50N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-58 所示。

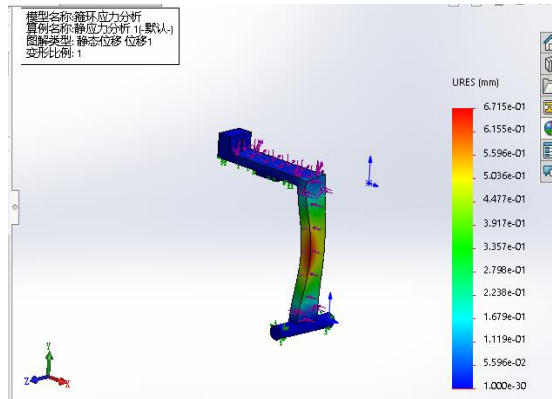


图 4-3-58 附件包力 60N 力矩 50N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 80N 时，设置力矩为 50N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-59 所示。

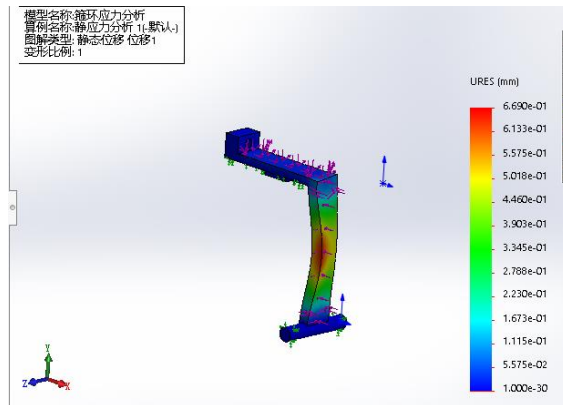


图 4-3-59 附件包力 80N 力矩 50N.m

当箍环点火装置安装固定方式的箍环承受力为 100N 时，设置力矩为 50N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-60 所示。

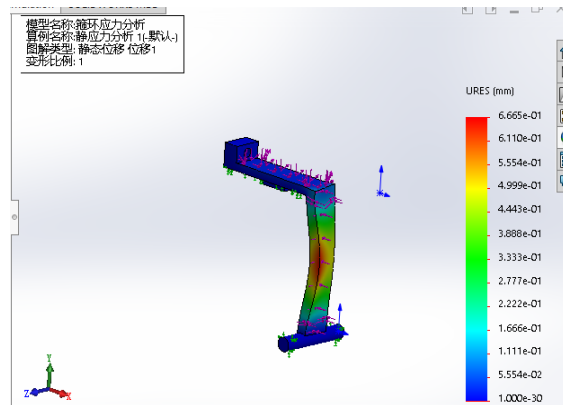


图 4-3-60 附件包力 100N 力矩 50N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 40N 时，设置力矩为 70N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-61 所示。

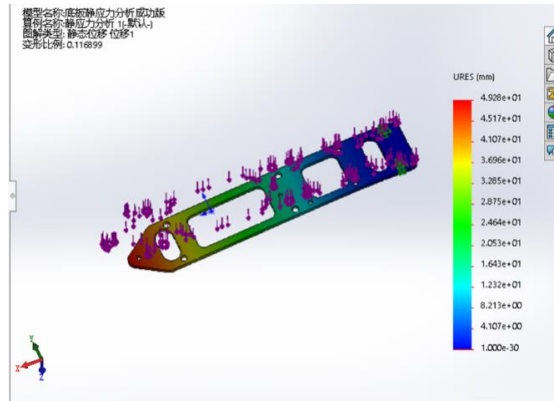


图 4-3-61 底板力 40N 力矩 70N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 60N 时，设置力矩为 70N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-62 所示。

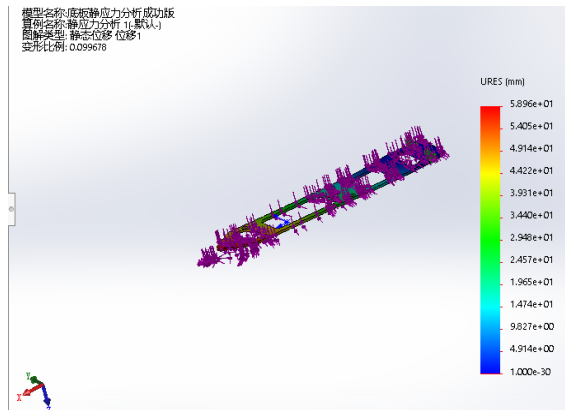


图 4-3-62 底板力 60N 力矩 70N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 80N 时，设置力矩为 70N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-63 所示。

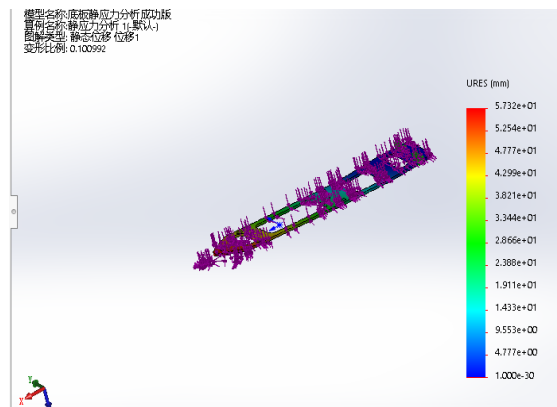


图 4-3-63 底板力 80N 力矩 70N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 100N 时，设置力矩为 70N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-64 所示。

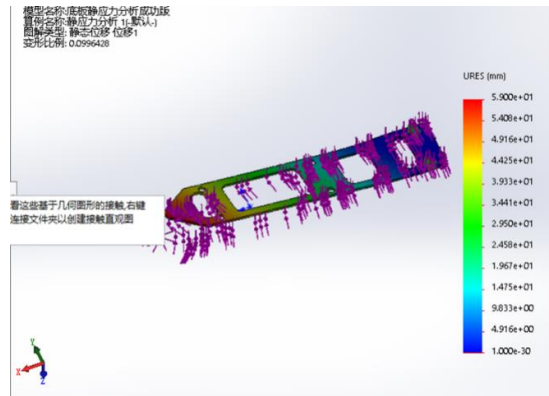


图 4-3-64 底板力 100N 力矩 70N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 40N 时，设置力矩为 70N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-65 所示。

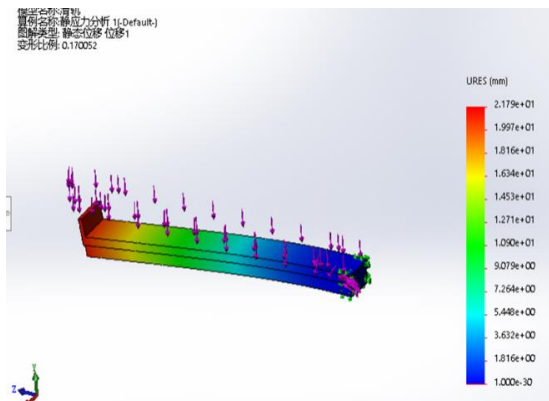


图 4-3-65 滑轨力 40N 力矩 70N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 60N 时，设置力矩为 70N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-66 所示。

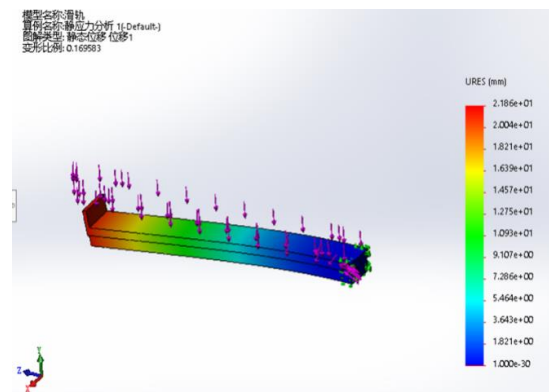


图 4-3-66 滑轨力 60N 力矩 70N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 80N 时，设置力矩为 70N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-67 所示。

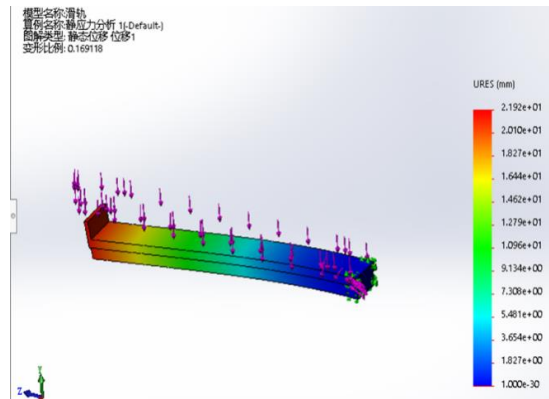


图 4-3-67 滑轨力 80N 力矩 70N.m

当滑轨点火装置安装固定方式的滑轨承受力为 100N 时，设置力矩为 70N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-68 所示。

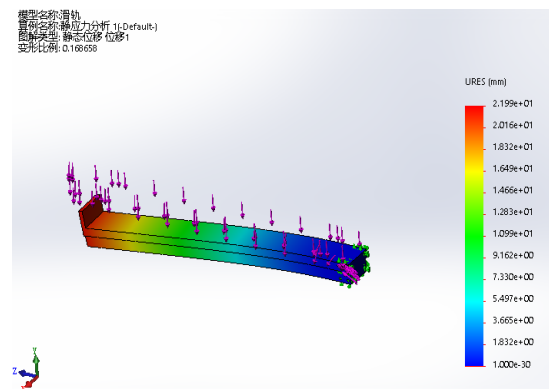


图 4-3-68 滑轨力 100N 力矩 70N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 40N 时，设置力矩为 70N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-69 所示。

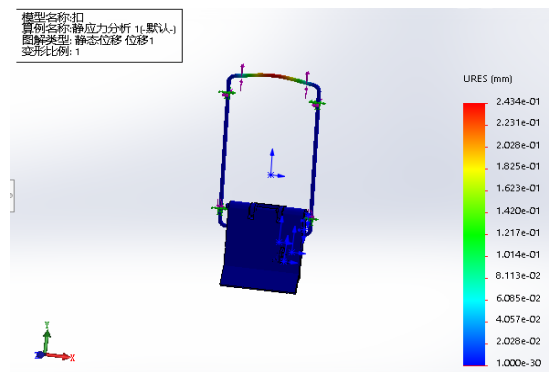


图 4-3-69 卡扣力 40N 力矩 70N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 60N 时，设置力矩为 70N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-70 所示。

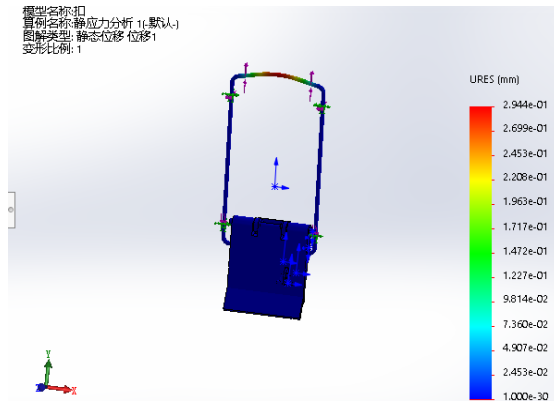


图 4-3-70 卡扣力 60N 力矩 70N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 80N 时，设置力矩为 70N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-71 所示。

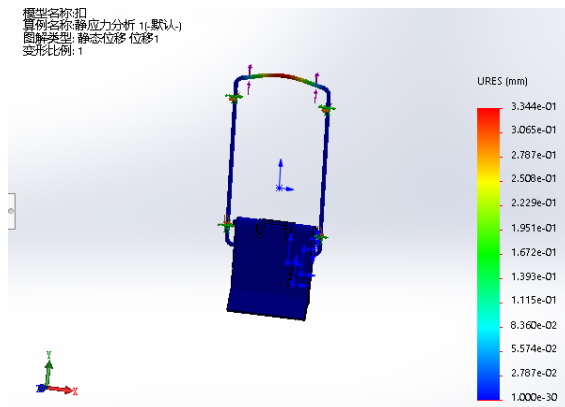


图 4-3-71 卡扣力 80N 力矩 70N.m

当卡扣点火装置安装固定方式的卡扣承受力为 100N 时，设置力矩为 70N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-72 所示。

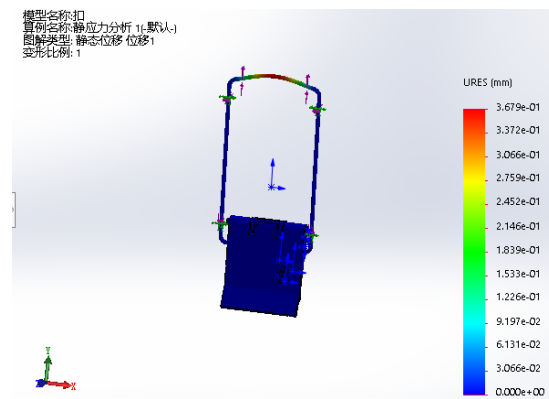


图 4-3-72 卡扣力 100N 力矩 70N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 40N 时，设置力矩为 70N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-73 所示。

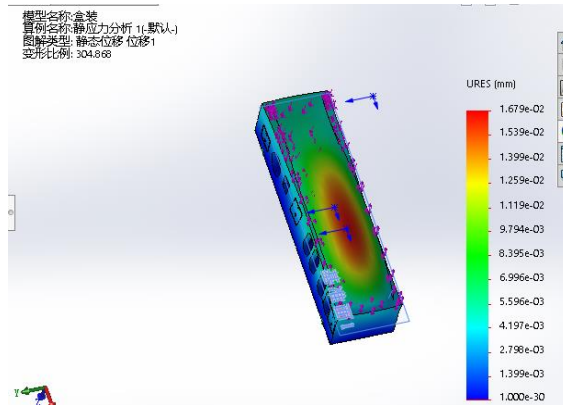


图 4-3-73 附件包力 40N 力矩 70N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 60N 时，设置力矩为 70N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-74 所示。

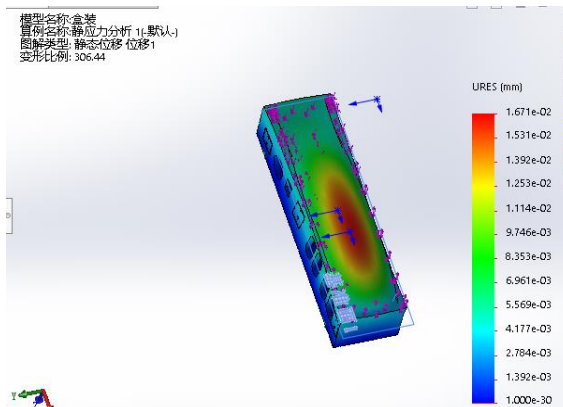


图 4-3-74 附件包力 60N 力矩 70N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 80N 时，设置力矩为 70N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-75 所示。

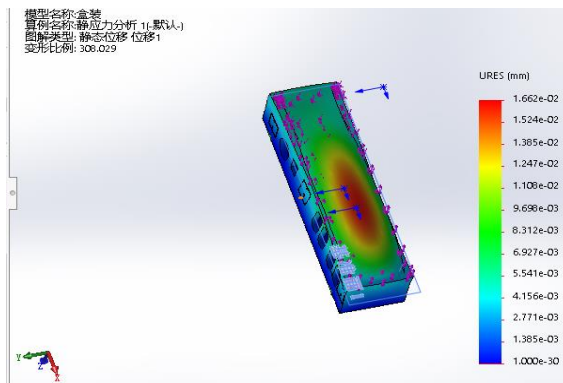


图 4-3-75 附件包力 80N 力矩 70N.m

当附件包点火装置安装固定方式的附件包承受力为 100N 时，设置力矩为 70N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-76 所示。

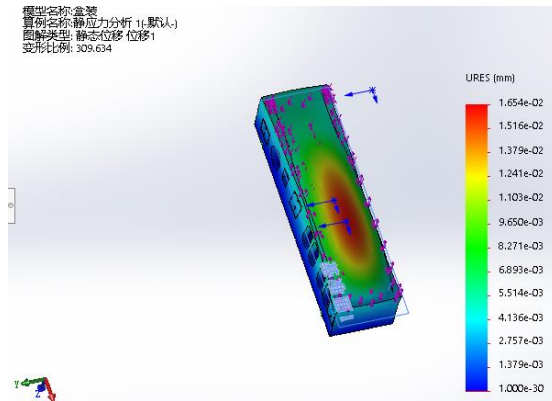


图 4-3-76 附件包力 100N 力矩 70N.m

当箍环点火装置安装固定方式承受力为 40N 时，设置力矩为 70N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-77 所示。

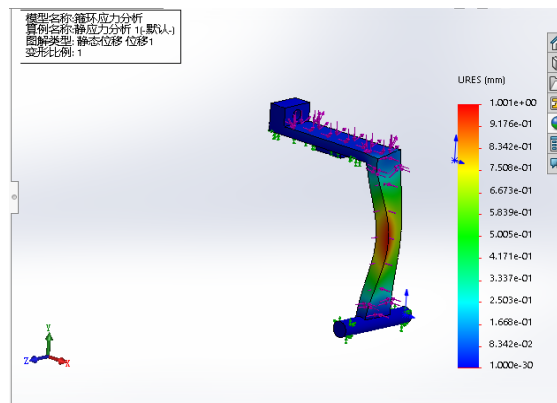


图 4-3-77 箍环力 40N 力矩 70N.m

当箍环点火装置安装固定方式承受力为 60N 时，设置力矩为 70N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-78 所示。

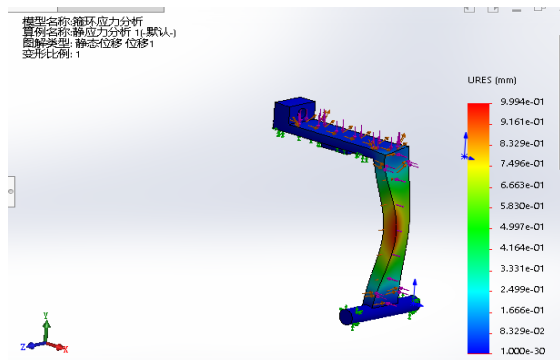


图 4-3-78 箍环力 60N 力矩 70N.m

当箍环点火装置安装固定方式承受力为 80N 时，设置力矩为 70N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-79 所示。

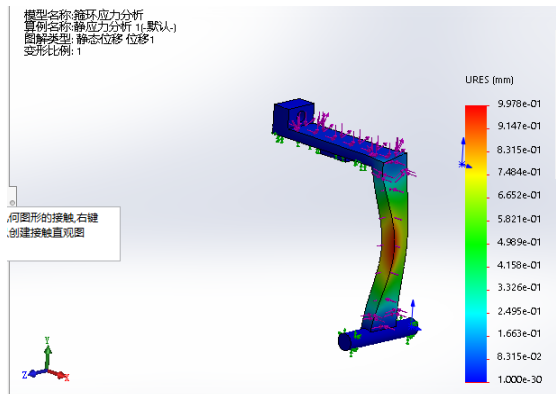


图 4-3-79 箍环力 80N 力矩 70N.m

当箍环点火装置安装固定方式承受力为 100N 时，设置力矩为 70N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-80 所示。

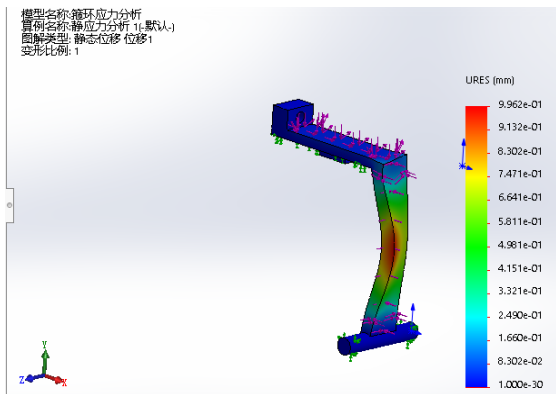


图 4-3-80 箍环力 100N 力矩 70N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 40N 时，设置力矩为 90N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-81 所示。

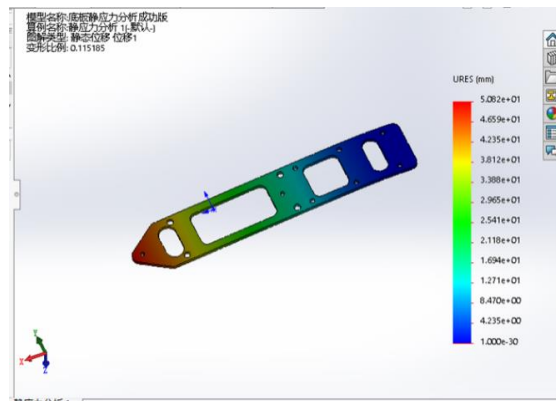


图 4-3-81 底板力 40N 力矩 90N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 60N 时，设置力矩为 90N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-82 所示。

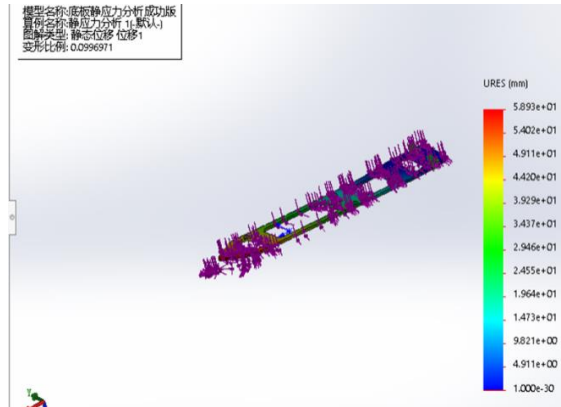


图 4-3-82 底板力 60N 力矩 90N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 80N 时，设置力矩为 90N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-83 所示。

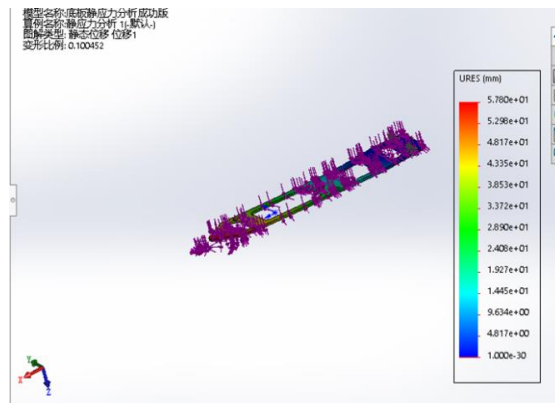


图 4-3-83 底板力 80N 力矩 90N.m

当原点火装置安装固定方式的底板承受力为 100N 时，设置力矩为 90N.m，对底板进行力学分析，得出结果如图 4-3-84 所示。

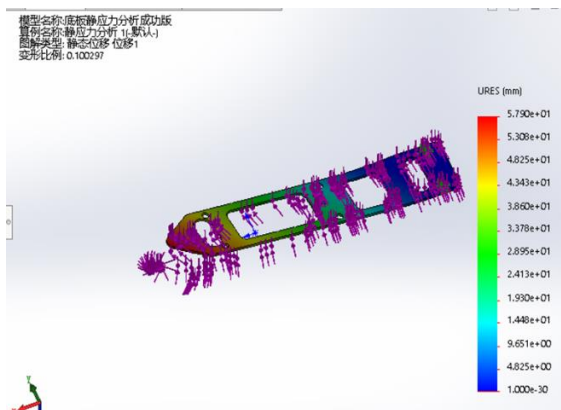


图 4-3-84 底板力 100N 力矩 90N.m

当滑轨点火装置安装固定方式承受力为 40N 时，设置力矩为 90N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-85 所示。

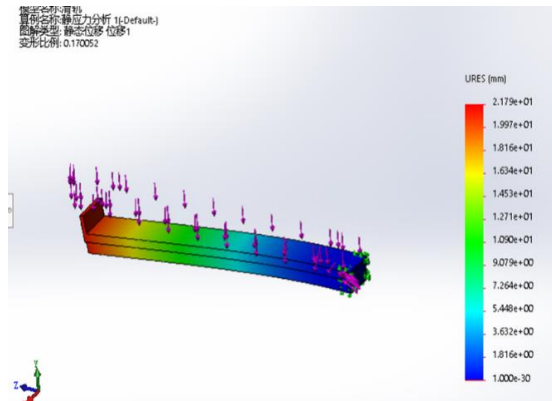


图 4-3-85 滑轨力 40N 力矩 90N.m

当滑轨点火装置安装固定方式承受力为 60N 时，设置力矩为 90N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-86 所示。

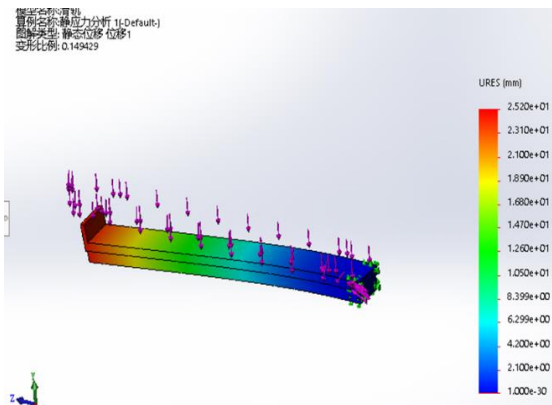


图 4-3-86 滑轨力 60N 力矩 90N.m

当滑轨点火装置安装固定方式承受力为 80N 时，设置力矩为 90N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-87 所示。

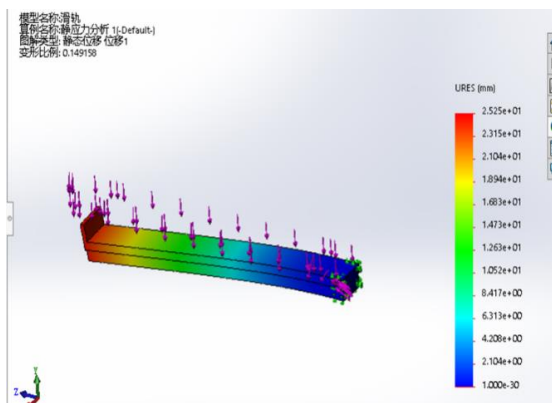


图 4-3-87 滑轨力 80N 力矩 90N.m

当滑轨点火装置安装固定方式承受力为 100N 时，设置力矩为 90N.m，对滑轨进行力学分析，得出结果如图 4-3-88 所示。

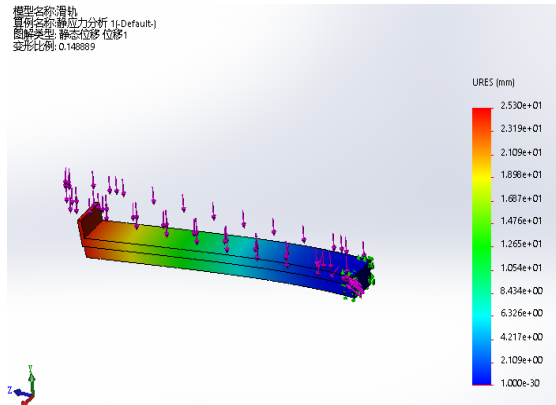


图 4-3-88 滑轨力 100N 力矩 90N.m

当卡扣点火装置安装固定方式承受力为 40N 时，设置力矩为 90N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-89 所示。

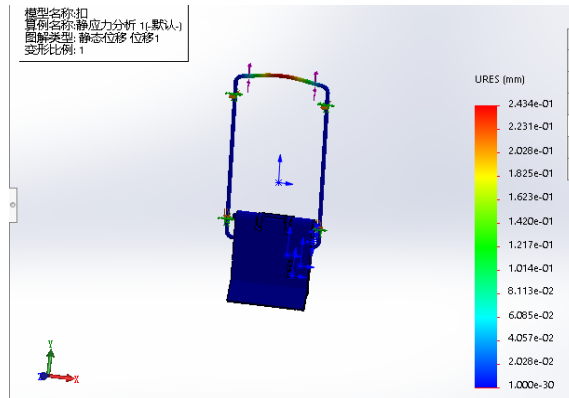


图 4-3-89 卡扣力 40N 力矩 90N.m

当卡扣点火装置安装固定方式承受力为 60N 时，设置力矩为 90N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-90 所示。

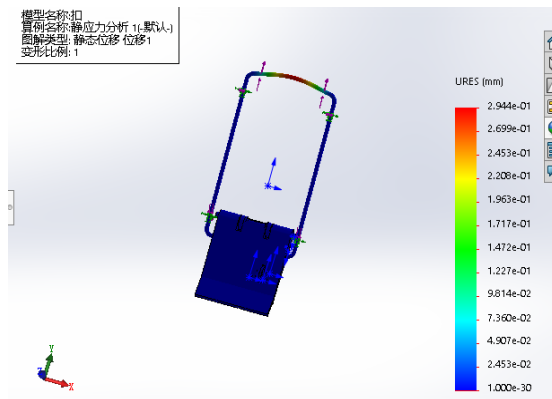


图 4-3-90 卡扣力 60N 力矩 90N.m

当卡扣点火装置安装固定方式承受力为 80N 时，设置力矩为 90N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-91 所示。

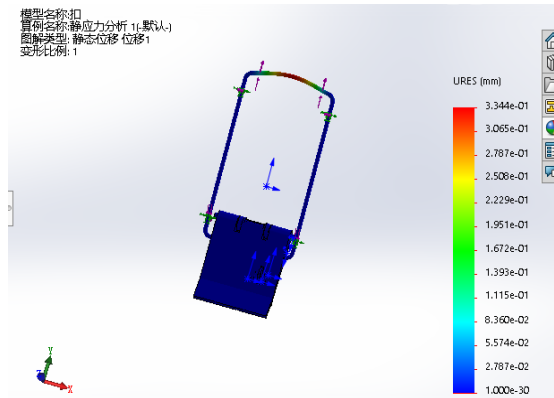


图 4-3-91 卡扣力 80N 力矩 90N.m

当卡扣点火装置安装固定方式承受力为 100N 时，设置力矩为 90N.m，对卡扣进行力学分析，得出结果如图 4-3-92 所示。

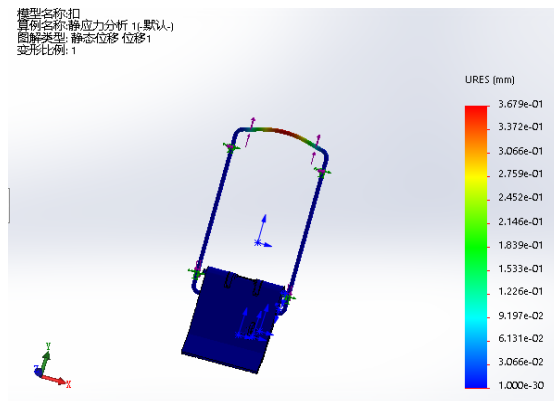


图 4-3-92 卡扣力 100N 力矩 90N.m

当附件包点火装置安装固定方式承受力为 40N 时，设置力矩为 90N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-93 所示。

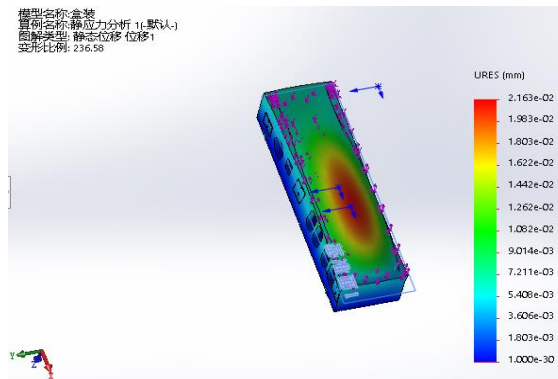


图 4-3-93 附件包力 40N 力矩 90N.m

当附件包点火装置安装固定方式承受力为 60N 时，设置力矩为 90N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-94 所示。

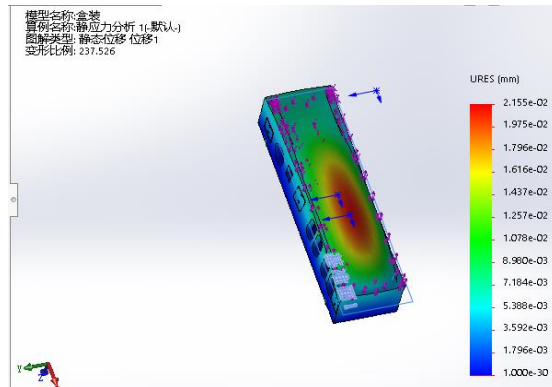


图 4-3-94 附件包力 60N 力矩 90N.m

当附件包点火装置安装固定方式承受力为 80N 时，设置力矩为 90N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-95 所示。

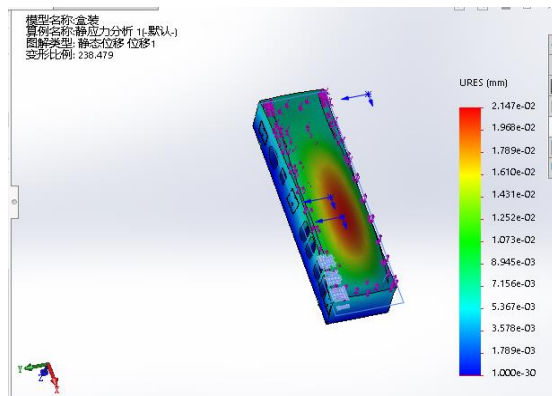


图 4-3-95 附件包力 80N 力矩 90N.m

当附件包点火装置安装固定方式承受力为 100N 时，设置力矩为 90N.m，对附件包进行力学分析，得出结果如图 4-3-96 所示。

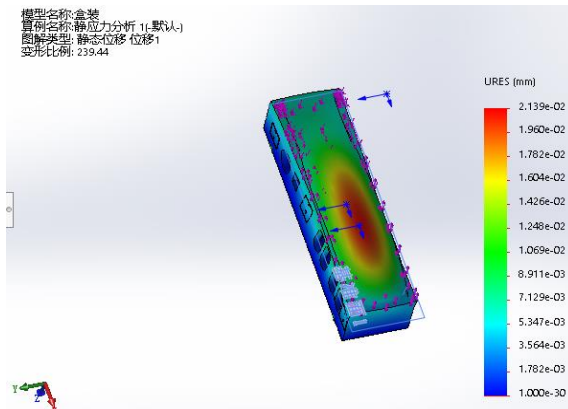


图 4-3-96 附件包力 100N 力矩 90N.m

当箍环点火装置安装固定方式承受力为 40N 时，设置力矩为 90N·m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-97 所示。

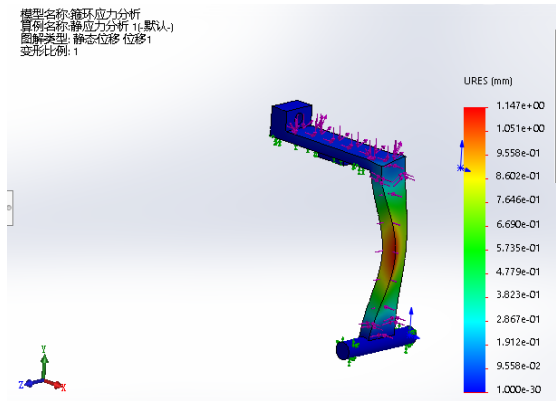


图 4-3-97 箍环力 40N 力矩 90N·m

当箍环点火装置安装固定方式承受力为 60N 时，设置力矩为 90N·m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-98 所示。

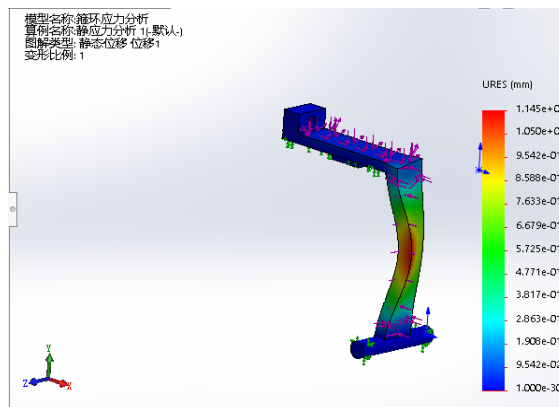


图 4-3-98 箍环力 60N 力矩 90N·m

当箍环点火装置安装固定方式承受力为 80N 时，设置力矩为 90N·m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-99 所示。

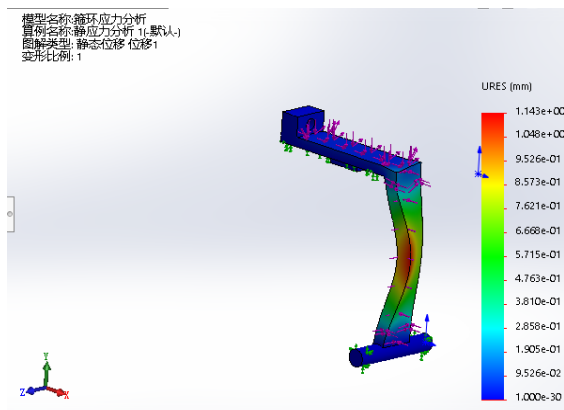


图 4-3-99 箍环力 80N 力矩 90N·m

当箍环点火装置安装固定方式承受力为 100N 时，设置力矩为 90N.m，对箍环进行力学分析，得出结果如图 4-3-100 所示。

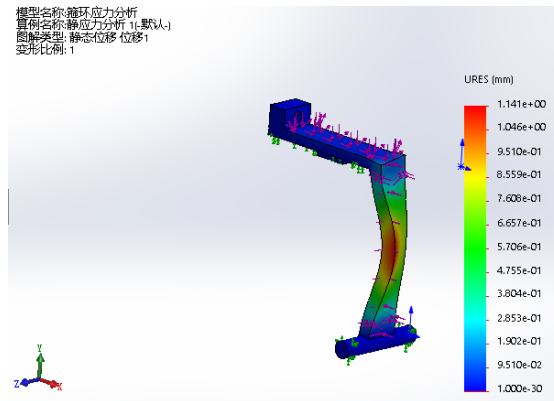


图 4-3-100 箍环力 100N 力矩 90N.m

### 4.3.2 静应力仿真分析对比

按照上一节所做的实验内容，分别将五种连接方式在力为 40N、60N、80N、100N，力矩为 10N.m、30N.m、50N.m、70N.m、90N.m 的条件下进行应力测试，应力测试结果见下表。

表 4-2 40N 静力学对比分析

力矩与模型	10N.m	30N.m	50N.m	70N.m	90N.m
原模型	5.545e+01	4.181e+01	4.687e+01	4.928e+01	5.082e+01
滑轨	4.281e+00	1.156e+01	1.738e+01	2.179e+01	2.525e+01
卡扣	2.434e-01	2.434e-01	2.434e-01	2.434e-01	2.434e-01
附件包	2.257e-03	7.101e-03	1.195e-02	1.679e-02	2.163e-02
箍环	1.082e-01	3.650e-01	6.740e-01	1.001e+01	1.147e+01

表 4-3 60N 静力学对比分析

力矩与模型	10N.m	30N.m	50N.m	70N.m	90N.m
原模型	5.574e+01	5.790e+01	5.864e+01	5.896e+01	5.893e+01
滑轨	4.408e+00	1.167e+01	1.747e+01	2.186e+01	2.520e+01
卡扣	2.944e-01	2.944e-01	2.944e-01	2.944e-01	2.944e-01
附件包	2.176e-03	7.019e-03	1.186e-02	1.671e-02	2.155e-02
箍环	1.103e-01	3.622e-01	6.715e-01	9.994e-01	1.145e+01

表 4-4 80N 静力学对比分析

力矩与模型	10N. m	30N. m	50N. m	70N. m	90N. m
原模型	5.600e+01	5.794e+01	5.658e+01	5.732e+01	5.780e+01
滑轨	4.535e+00	1.178e+01	1.755e+01	2.192e+01	2.525e+01
卡扣	3.344e-01	3.344e-01	3.344e-01	3.344e-01	3.344e-01
附件包	2.094e-03	6.937e-03	1.178e-02	1.662e-02	2.147e-02
箍环	1.125e-01	3.594e-01	6.690e-01	9.978e-01	1.143e+00

表 4-5 100N 静力学对比分析

力矩与模型	10N. m	30N. m	50N. m	70N. m	90N. m
原模型	5.622e+01	5.800e+01	5.870e+01	5.900e+01	5.790e+01
滑轨	4.662e+00	1.189e+01	1.764e+01	2.199e+01	2.530e+01
卡扣	3.679e-01	3.679e-01	3.679e-01	3.679e-01	3.679e-01
附件包	2.012e-03	6.854e-03	1.170e-02	1.654e-02	2.139e-02
箍环	1.148e-01	3.566e-01	6.665e-01	9.962e-01	1.141e+00

上述所有静应力仿真分析都是基于新材料镍铬合金进行，从静应力表格分析中，可以看出原模型安装固定方式与更改后的安装固定方式都发生了一定的位移变化，由于发动机工作环境受强震动及温度变化的影响，在不同力与力矩配合下考虑到发动机实际工作状是受负载荷的影响，既受到温度的影响又受到震动的影响，所以在安装过程中需要考虑综合因素的影响，在上述表格中，原模型底板和滑轨式安装固定方式位移数据是可以接受的，因为在后期还需配合相应的减震措施，在本论文里选择减震隔热物质进行减震隔热。

#### 1.4 仿真计算结果分析

由于附件包连接方式与滑轨式连接方式需要涉及到热绝缘物质，需要在网上查阅相关文献资料，对热绝缘填充物质进行对比。

表 4-6 填充物种类

种类与温度	石棉	软木	硅石	泡沫树脂	橡胶垫
	500-1500℃	100-300℃	600-1600℃	100-1000℃	100-350℃

石棉材料可以承受 500–1500℃ 的高温，放在 700–800℃ 的烈火中会逐渐出现软化现象，具有高度耐火性、高抗张强度，电绝缘性和绝热性，质量可靠，性能稳定等优点，但是石棉被很多国家禁用，对人体有很大伤害，在 2017 年出现在国际癌症研究机构公布的致癌清单里<sup>[10]</sup>。

软木材料可以承受的高温为 400–470℃，属于常温和低温隔热材料，具有非常好的弹性，软木可以起到减震的作用，有良好的密封性，隔热性，无毒无味，比重小，不易燃烧、防潮等优点，但是软木材料抗压能力较差，而且清理起来比较麻烦，价格略贵<sup>[10]</sup>。

硅石材料可以承受的高温为 600–1600℃，属于高温隔热材料，具有良好的气密性和结构刚度，但其缺点为抗热震稳定性低。

泡沫树脂材料可以承受的高温为 100–1000℃，属于低温防潮要求较高的隔热材料，质地轻盈，隔热性能好，比强度高，可以吸收冲击载荷，对温度、湿度变化适应较强，减震效果也较好。

橡胶垫材质可以承受的高温为 100–350℃，防震强度高，缺点为易受温度、油质或各种化学溶剂影响导致老化。

在查阅资料时得知涡喷 6 点火系统外壳使用的金属为 3A21 航空铝合金，属于防锈铝，所以在对安装固定方式材料选择方面选择了比 3A21 航空铝合金性能更好的材料镍铬合金 Cr20Ni80，3A21 铝合金强度略低，塑性较好，镍铬合金主要性能特点为强度高、耐腐蚀性好，耐高温性能也较好，下面是材料对比表格。

表 4-7 合金材料性能表

材料与力学性能	3A21 合金	Cr20Ni80
最高使用温度 (°C)	550	1200
抗拉强度 (MPa)	120–160	≥650
屈服强度 (MPa)	90–150	≥175
延伸率%	16	≥20
中泊松比	0.33	0.34
比热 J/(kg·k)	1000	440
热导率 W/(m·k)	162	14

表 4-8 热力学数据分析

温度与模型	-50℃	+50℃	+100℃	+150℃	+300℃	是否符合设定要求
原模型	2.234e+02	3.235e+02	3.735e+02	4.236e+02	5.737e+02	是
滑轨	2.322e+02	3.265e+02	3.775e+02	4.216e+02	5.767e+02	是
卡扣	2.314e+02	3.315e+02	3.815e+02	4.316e+02	5.817e+02	是
附件包	2.284e+02	3.295e+02	3.795e+02	4.296e+02	5.797e+02	是
箍环	2.354e+02	3.345e+02	3.835e+02	4.326e+02	5.807e+02	是

表 4-6 40N 静应力数据分析

力矩与模型	10N.m	30N.m	50N.m	70N.m	90N.m	是否满足使用要求
原模型	5.545e+01	4.181e+01	4.687e+01	4.928e+01	5.082e+01	是
滑轨	4.281e+00	1.156e+01	1.738e+01	2.179e+01	2.525e+01	是
卡扣	2.434e-01	2.434e-01	2.434e-01	2.434e-01	2.434e-01	否
附件包	2.257e-03	7.101e-03	1.195e-02	1.679e-02	2.163e-02	否
箍环	1.082e-01	3.650e-01	6.740e-01	1.001e+01	1.147e+01	是

表 4-7 60N 静应力数据分析

力矩与模型	10N.m	30N.m	50N.m	70N.m	90N.m	是否满足使用要求
原模型	5.574e+01	5.790e+01	5.864e+01	5.896e+01	5.893e+01	是
滑轨	4.408e+00	1.167e+01	1.747e+01	2.186e+01	2.520e+01	是
卡扣	2.944e-01	2.944e-01	2.944e-01	2.944e-01	2.944e-01	否
箍环	1.103e-01	3.622e-01	6.715e-01	9.994e-01	1.145e+01	否

表 4-8 80N 静应力数据分析

力矩 模型	10N.m	30N.m	50N.m	70N.m	90N.m	是否满足使用要求
原模型	5.600e+01	5.794e+01	5.658e+01	5.732e+01	5.780e+01	是
滑轨	4.535e+00	1.178e+01	1.755e+01	2.192e+01	2.525e+01	是
卡扣	3.344e-01	3.344e-01	3.344e-01	3.344e-01	3.344e-01	否

表 4-9 100N 静应力数据分析

力矩 模型	10N.m	30N.m	50N.m	70N.m	90N.m	是否满足使用要求
原模型	5.622e+01	5.800e+01	5.870e+01	5.900e+01	5.790e+01	是
滑轨	4.662e+00	1.189e+01	1.764e+01	2.199e+01	2.530e+01	是
卡扣	3.679e-01	3.679e-01	3.679e-01	3.679e-01	3.679e-01	否

通过上面表格热应力分析结果、静应力分析结果与减震隔热材料对比,可以得到如下结论:

考虑到发动机的工作环境为高温、高压、高振动,而石棉材料由于会引发人类疾病,对人体健康造成很大危害,硅石材料抗热震稳定性低,橡胶材料遇到高温容易老化,软木和泡沫树脂两种材料都可以隔热保温,但是泡沫树脂在吸收冲击载荷和对温湿度变化方面适应能力较强,而发动机工作环境多变,泡沫树脂更适合作为填充物来为点火装置减震隔热,所以最后在填充物方面选择泡沫树脂。

在热应力分析结果中,只对安装结构方面进行了改进,未对材料进行更改,所有改进安装固定方式全部采用镍铬合金,镍铬合金材料性能表见表 4-7,每种安装固定方式分别在 $-50^{\circ}\text{C}$ 、 $50^{\circ}\text{C}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$ 、 $150^{\circ}\text{C}$ 、 $300^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行热力学的对比。三种安装固定方式的热应力结果都在材料的各项力学范围内,符合设计要求。

在静应力分析结果中,只对安装结构方面进行了改进,未对材料进行更改,所有改进安装固定方式全部采用镍铬合金,在力为 40N,力矩为 30N.m 时,附件包安装固定方式的位移数据为  $7.101\text{e}-03$ ,超出了材料的力学范围,不符合设计要求;卡扣安装固定方式在相同的力、不同的力矩下所得到的位移数据全部一样,不符合设计要求;在力为 40N 时附件包安装固定方式和卡扣安装固定方式都不符合设计要求,固不采用这两种方式。在力为

60N 时，力矩为 79N.m 时，箍环的位移数据值为  $9.994e-01$ ，从结果图可以看出箍环发生了严重的形变，不在上述材料力学范围内，固排除掉箍环安装固定方式。排除掉的各种安装固定方式都在某几个力矩值下不符合设计方案，但是其他几个力矩值下也符合设计要求。滑轨式安装固定方式在不同力、不同力矩下的位移数值都在材料力学性能范围内，并且各项位移数值远远都比原安装固定方式的数据小，通过与其他几个安装固定方式相比，滑轨安装固定方式是一个很好的选择方案。

通过表格数据分析以后得到上述结论，特殊情况除外。

## 第五章 不足和展望

由于疫情期间，无法回到学校在老师的指导下进行实践，并且自己学识有限，能力不足以及学校现有材料不足，无法考虑到是否满足适航性之类的要求，航空发动机涉及到点火装置安装固定方式的参考文献较少，加之个人还有实习，所以时间比较紧迫，无法把自己的想法做出很理想的状态，在很多内容的表达上也存在着不当之处。

根据第四章所做的内容分析，每一种安装固定方式的热应力分析都在材料力学范围内，符合设计要求。静应力分析做出的结果和理想中的结果偏差较大，在静应力分析表格中，附件包安装固定方式在不同的力的状态下，力矩为 30N.m 时位移数值偏大，并且发生了一定的形变，不符合设计要求；而箍环安装固定方式和卡扣安装固定方式都是以附件包安装固定方式为基础，在附件包安装固定方式上更改其余连接方式，由于箍环安装固定在不同的力、力矩值为 70N.m 时超出了材料的力学范围，并且箍环发生了严重的变形，不符合设计要求，但是在其他力矩值的状态下，这两种安装固定方式也符合设计要求。最后选择了滑轨式安装固定方式，同时配合减震隔热物质达到理想状态。

看到静应力分析结果后，察觉到自己在建模初期只急于考虑如何更改连接方式，对于发动机的环境要求也只是考虑到如何减震隔热，并没有想到要注意大气压力、湿度、适航性等类似相关因素，在安装固定方面也没有注意到空气力学方面的问题，比如附件包的绘制，附件包绘制完成以后是一个长方体，有空气快速流过时受到的阻力较大，存在一定的气动阻力，在高速或超音速飞机上甚至会出现激波阻力，这些都是建模时所没有考虑到的问题。

在改进优化散热方面，后期考虑到如果点火装置表面有喷漆图层，是否散热性能、耐磨性能会更好；在设计气动外形方面应该更多选择，比如选择更接近飞机外形的流线型；在连接方面是否可以把铆接换成焊接，换成焊接以后，焊接增加的重量是否还符合要求，这些都是以后还需要进一步去学习知识。

航空发动机是一个很复杂的系统工程，在后期如有机会接触到航空发动机类的工作，会更加认真的学习发动机相关知识，提升自己的能力，完善自己论文部分的展望。

## 参考文献

- [1] 肖维东. 浅谈航空发动机起动与点火系统[J]. 科技视界, 2016(14):31-32.
- [2] 李奕新, 谭航, 杨水银. 航空发动机电点火系统现状与发展趋势[J]. 燃气涡轮试验, 2015, 28(06):49-54.
- [3] Andoga Rudolf et al. The Use of Ethanol as an Alternative Fuel for Small Turbojet Engines[J]. Sustainability, 2021, 13(5):2541-2541.
- [4] 吴天德. 国外航空发动机电点火装置发展现状及趋势[J]. 民用飞机设计与研究, 1996(01):5-6.
- [5] 刘亚军, 刘道庆. 浅析现代战斗机发动机安装连接形式[J]. 飞机设计, 2010, 30(05):27-30. DOI:10.19555/j.cnki.1673-4599.2010.05.007.
- [6] 梁尚清, 苏爱民. 航空结构螺栓连接预紧力设计研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(09):24-27.
- [7] 机械连接技术[J]. 航空制造技术, 2016(19):63.
- [8] Xudong Shi, Gangqiang Ren, Jianli Li, Shengbiao Zhang. Fault Diagnosis Method Research of Aircraft Ignition System based on Waveform Image Matching[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(C).
- [9] 边靖洲, 车延博, 冯宝国. 一种航空发动机稳频高能点火器[J]. 应用科技, 2015, 42(05):14-18.
- [10] Peter C. Gasson. High Temperature Materials and Mechanisms[J]. The Aeronautical Journal, 2014, 118(1208).
- [11] 张鹏, 朱强, 秦鹤勇, 沈文涛. 航空发动机用耐高温材料的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(11):27-31+37.
- [12] 李翔, 李雪罡, 张萌. 浅谈航空发动机材料和工艺安全性评估[J]. 中国设备工程, 2020(06):88-90.

## 致 谢

时光荏苒，转眼到了毕业季，大学四年的生活即将结束。这四年的生活让我收获了很多。完成毕业论文的一刻，心中百感交集，既有终于完成了论文再也不用上课、害怕期末考试的喜悦，也有对自己四年快乐的校园生活的不舍，还有对毕业后初入社会的迷茫，更多的是感谢陪伴在我身边给予过我帮助的每一个人。

首先感谢我的毕业设计指导老师，在我写论文时很耐心的一遍一遍对我提出的问题进行解答，从论文选题到完成论文老师也投入了很大的精力，因为我自己能力有限，总是向老师寻求帮助，老师用他渊博的学识为我解答问题，告诉我很多注意事项。同时也感谢那些曾经授予我知识的每一位老师，因为有你们的付出我才可以学到很多有用的知识。感谢我身边的同学尤其是我的室友，是她们陪伴了我大学四年，见证了我四年内的变化。感谢我的父母，他们是我坚强的后盾，虽然在上学时在家里的时间较短，但是是我不管何时遇到困难都可以躲避的避风港。

大学四年的生活，自己把自己应该完成的任务也都已经完成，虽然过程很艰辛，但是结果是好的。

最后感谢各位专家、学者能在百忙之中抽出宝贵的时间对论文进行评审，内容存在表达不当的地方，恳请各位专家批评指正。