



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

本科生毕业设计

SR22 飞机发动机整机建模与原理仿真
SR22 Aircraft Engine Modeling and Simulation

姓 名 潘波涛

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 魏志民

职 称 讲师

完成时间 2022 年 6 月 3 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

SR22 飞机发动机整机建模与原理仿真
SR22 Aircraft Engine Modeling and Simulation

姓 名 潘波涛

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 魏志民

职 称 讲师

完成时间 2022年6月3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	魏志民
专 业	飞行器制造工程		技术职务	中级
题目名称	SR22 飞机发动机整机建模与原理仿真			
题目类型	自拟	题目来源	其他项目	
课题来源、背景及意义	<p>SR22 是西锐公司生产的一款高性能单发通用飞机，多年来一直是全球最为畅销的单发 4 座飞机。中共中央印发《国家综合立体交通网规划纲要》，纲要提出发展低空经济，让通航先飞起来。在可以预见的未来，通用航空产业将迎来高速发展的契机，以活塞发动机为动力的通航飞机仍将占据主力。SR22 飞机发动机为水平对置六缸航空活塞发动机，活塞平均分布于曲轴两侧，使得发动机高度降低，长度缩短，具有减轻发动机质量等优点。</p> <p>活塞发动机被广泛运用于航空发动机培训领域，但是由于发动机实验成本高、难度大等原因，高校针对航空发动机的教学局限于理论教学，无法让学生切身掌握到发动机的工作原理，极大地影响了专业人才培养质量。本课题利用 UG 软件对 SR22 发动机整机进行模型设计，并对其工作原理进行仿真，可用对发动机教学中对学生进行拆装前的熟悉了解过程，同时能使学生不受限制了解与复习活塞发动机的构造与原理，从而提高发动机的培训效率。</p>			
任务及要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 查阅相关文献，研究 SR22 水平对置六缸活塞发机构造与工作原理 2. 对活塞发动机的各类零部件结构和外形尺寸进行分析 3. 使用 UG 对其发动机进行整机模型设计 4. 根据活塞发动机工作原理进行仿真 5. 书写论文 			
工作条件	电脑、UG 软件、SR22 发动机整机、各类测量工具			
知识与能力要求	具有较好的航空发动机知识、掌握水平对置六缸航空活塞发动机工作原理、熟练使用 UG 软件、具有较好的工程设计能力。			
系（教研室）审查意见： 无				
负责人(签名)： <u>张健</u> 2021 年 11 月 28 日				

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

SR22 是西锐公司生产的一款高性能单发通用飞机，多年来一直是全球最为畅销的单发 4 座飞机。中共中央印发《国家综合立体交通网规划纲要》，纲要提出发展低空经济，让通航先飞起来。这是低空经济首次写入国家规划，具有标志性意义。在可以预见的未来，通用航空产业将迎来高速发展的契机，以活塞发动机为动力的通航飞机仍将占据主力。SR22 飞机发动机为水平对置六缸航空活塞发动机，活塞平均分布于曲轴两侧，使得发动机高度降低，长度缩短，具有减轻发动机质量等优点。现如今，活塞发动机正向着“汽车改”—研制路线能有效降低活塞发动机研制周期和成本、功重比上有效改进突破采用航空煤油或柴油上得到青睐、轻量化等趋势发展。

活塞发动机被广泛运用于航空发动机培训领域，但是由于发动机实验成本高、难度大等原因，高校针对航空发动机的教学局限于理论教学，无法让学生切身掌握到发动机的工作原理，极大地影响了专业人才培养质量。本课题利用 UG 软件对 SR22 发动机整机进行模型设计，并对其工作原理进行仿真，可用对发动机教学中对学生进行拆装前的熟悉了解过程，同时能使学生不受限制了解与复习活塞发动机的构造与原理，从而提高发动机的培训效率。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

研究内容 1:

文献查阅法检索课题相关的技术资料 and 文献资源;

研究内容 2:

研究学习水平对置六缸航空活塞发动机结构组成与工作原理;

研究内容 3:

测量结构尺寸，利用 UG 完成水平对置六缸航空活塞发动机整机建模;

研究内容 4:

水平对置六缸航空活塞发动机工作原理仿真设计;

研究内容 5:

书写毕业设计论文一篇。

要求:

详细了解水平对置六缸航空活塞发动机的整体构造与工作原理，掌握 UG 等相关建模软件的使用方法，并书写一篇毕业设计论文。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

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）：

毕业设计论文一篇

4. 推荐参考资料：

- [1] 高光良,樊丁,戚学锋.航空发动机机械液压控制器建模及仿真技术研究[J].计算机仿真,2006(01):62-64+84.
- [2] 郑君.通用航空活塞发动机现状及发展趋势探讨[J].内燃机与配件,2020(19):196-198.
- [3] 魏武国,冯浩阳.水平对置四缸航空活塞发动机曲轴模态分析[J].科技创新导报,2019,16(27):9-11.
- [4] 卢东亮,郑君,胡崇波,卞少春.通用航空活塞发动机的发展现状研究[J].内燃机与配件,2019(08):64-66.
- [5] 卢磊,曾繁星,高平远,张磊.基于航空领域的活塞发动机的发展和应用[J].山东工业技术,2018(09):9.
- [6] 马勇波.航空活塞发动机曲轴修理参数标准研究[J].科技创新导报,2018,15(10):17-18.
- [7] 俞凯凯,徐惊雷,葛建辉.论虚拟仿真实验在航空发动机教学中的重要性——以南京航空航天大学航空发动机原理虚拟仿真实验平台为例[J].高教学刊,2021,7(16):83-87.
- [8] 李翱.中国通用航空产业发展研究[D].中国民用航空飞行学院,2014.
- [9] 姜琨久.基于UG软件汽车变速箱顶盖砂型模具设计及其制造[D].哈尔滨理工大学,2014.
- [10] 郑毅锋.发动机曲轴三维设计与运动仿真[J].机械工程师,2021(09):52-54.
- [11] Engineering - Mechanical Engineering; Investigators from School of Mechanical Engineering Report New Data on Mechanical Engineering (Optimization and Simulation of a Voice Coil Motor for Fuel Injectors of Two-stroke Aviation Piston Engine)[J]. Journal of Transportation,2019:
- [12] Safety Engineering; Study Data from Z.J. Pan and Colleagues Update Understanding of Safety Engineering (High cycle fatigue analysis for oil pan of piston aviation kerosene engine)[J]. Journal of Engineering,2015:
- [13] Mengyao BAO,Shuiting DING,Guo LI.Identification of key factors affecting the failure of aviation piston engine turbochargers based on an improved correspondence analysis-polar angle-based classification[J].Chinese Journal of Aeronautics,2021,34(05):466-484.

所在专业审查意见：

同意

负责人：张健

2021年12月3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： SR22 飞机发动机整机建模与原理仿真

学 院： 航空航天大学

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 潘波涛

学 号： 20414040202

起止日期： 2021 年 12 月 3 日-2022 年 6 月 3 日

指导教师： 魏志民

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）

1、课题的目的意义：

活塞发动机被广泛运用于航空发动机培训领域，但是由于发动机实验成本高、难度大等原因，高校针对航空发动机的教学局限于理论教学，无法让学生切身掌握到发动机的工作原理，极大地影响了专业人才培养质量。本课题利用 UG 软件对 SR22 发动机整机进行模型设计，并对其工作原理进行仿真，可用对发动机教学中对学生进行拆装前的熟悉了解过程，同时能使学生不受限制了解与复习活塞发动机的构造与原理，从而提高发动机的培训效率。

2、国内外研究情况：

航空发动机是当代工业技术发展的结晶，是工业技术“皇冠上的明珠”，对国民经济起着战略性的作用。随着民用航空的发展，航空发动机技术日新月异，新设计构造不断涌现。但是长期以来，由于人才短缺、基础薄弱等原因，我国航空发动机技术始终与国外先进国家存在着较大的差距。因此，培养高素质、创新型的航空发动机人才对促进我国航空发动机技术发展至关重要。在国外，已经对该领域做了很多深入的研究工作，取得了许多成果。Randall W A 单独研究了航空发动机的模拟并申请了专利。Rudnik R 等人对高旁路发动机集成的数值模拟进行了深入探讨。Decastro J 等人在商用航空发动机的模拟上开发了具有高保真的仿真系统，取得了不错的模拟训练效果。

在国内，虽然起步较晚，但在一直努力发展着。在 2017 年，董琦立等人发明一种飞机发动机模拟教学系统及方法，通过数据仿真子系统与三维模型构建子系统相结合的方式，在教学过程中能够直观地展示飞机发动机的运行状态，有利于改善飞机发动机的教学环境，提高教学效率。高颖等人开发了基于 VR 的航空发动机虚拟教学实验系统设计，该系统通过对某航空发动机提供虚拟装配及拆卸、模化教学实验、模型流场的动态显示及发动机试车等实验系统，将学生的视、听积极性充分调动起来，使学生可获得身临其境的感受和体会。在 2013 年，刘振侠等人开发了基于三维交互和视景仿真的航空虚拟教学实验系统。杨姣发表了基于 Unity3D 的航空发动机虚拟现实设计与研究。许志国等人发表了航空发动机虚拟教学实验系统研究。实践教学是航空发动机教学工作中的重要一环，这些发明对促进学生了解发动机内部复杂结构、理解相关理论知识起着重要作用，有效的克服了传统教学实验成本过高、操作困难等问题。

本课题主要分析研究 SR22 飞机水平对置六缸航空活塞发动机结构组成和工作原理，利用 UG 软件对其进行整机建模与原理仿真，在加强自身本科知识领域基础上推动学院教学质量的提升。

3、发展趋势：

SR22 是西锐公司生产的一款高性能单发通用飞机，多年来一直是全球最为畅销的单发

4座飞机。中共中央印发《国家综合立体交通网规划纲要》，纲要提出发展低空经济，让通航先飞起来。这是低空经济首次写入国家规划，具有标志性意义。在可以预见的未来，通用航空产业将迎来高速发展的契机，以活塞发动机为动力的通航飞机仍将占据主力。现如今，活塞发动机正向着“汽车改”——研制路线能有效降低活塞发动机研制周期和成本、功重比上有效改进突破采用航空煤油或柴油上得到青睐、轻量化、可靠性和安全性等趋势发展。

4、课题主要研究内容：

- (1) 文献查阅法检索课题相关的技术资料 and 文献资源；
- (2) 研究学习水平对置六缸航空活塞发动机结构组成与工作原理；
- (3) 测量结构尺寸，利用UG完成水平对置六缸航空活塞发动机整机建模；
- (4) 水平对置六缸航空活塞发动机工作原理仿真设计；
- (5) 书写毕业设计论文一篇。

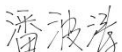
5、参考文献：

- [1] 高光良,樊丁,戚学锋.航空发动机机械液压控制器建模及仿真技术研究[J].计算机仿真,2006(01):62-64+84.
- [2] 郑君.通用航空活塞发动机现状及发展趋势探讨[J].内燃机与配件,2020(19):196-198.
- [3] 魏武国,冯浩阳.水平对置四缸航空活塞发动机曲轴模态分析[J].科技创新导报,2019,16(27):9-11.
- [4] 卢东亮,郑君,胡崇波,卞少春.通用航空活塞发动机的发展现状研究[J].内燃机与配件,2019(08):64-66.
- [5] 卢磊,曾繁星,高平远,张磊.基于航空领域的活塞发动机的发展和应用[J].山东工业技术,2018(09):9.
- [6] 刘振侠,高文君,张丽芬.航空发动机虚拟教学实验系统的建设与应用[J].价值工程,2013,32(11):181-182.
- [7] 杨姣. 基于 Unity3D 的航空发动机虚拟现实设计与研究[D].西华大学,2018.
- [8] 高颖,钟啸,许志国,郑涛.基于VR的航空发动机虚拟教学实验系统设计[J].系统仿真学报,2008(11):2925-2930.
- [9] 许志国. 航空发动机虚拟教学实验系统研究[D].西北工业大学,2007.
- [10] 董琦立,戴黎明,陶霁. 一种飞机发动机模拟教学系统及方法[P]. 四川省: CN107038309B,2021-04-06.
- [11] Randall W A, Rider A J. Aircraft engine simulation: US, US3031776[P].1962.
- [12] Rudnik R , Rossow C C , Geyr H F V . Numerical simulation of engine/airframe integration for high-bypass engines[J]. Aerospace Science & Technology, 2002, 6(1):31-42.
- [13] Decastro J, Litt J, Frederick D. A Modular Aero-Propulsion System Simulation of a Large Commercial Aircraft Engine[J].2008.

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021.12.03-2022.01.20	制定研究方案	合理、科学
2022.01.21-2022.02.12	测量 SR22 活塞发动机部件尺寸， 研究学习水平对置六缸航空活塞 发动机结构组成与工作原理	掌握水平对置六缸活塞发动 机结构组成与工作原理
2022.02.13-2022.03.30	利用 UG 完成水平对置六缸航空 活塞发动机整机建模	完成 SR22 飞机发动机的部 件建模并装配
2022.03.31-2022.04.10	水平对置六缸航空活塞发动机工 作原理仿真设计	完成 SR22 飞机发动机的工作 原理仿真
2022.04.11-2022.04.30	撰写论文	完成论文撰写
2022.05.01-2022.06.03	论文查重与答辩	完成论文查重与答辩
完成课题的现有条件	SR22 飞机发动机整机、电脑、知网文献	
指导教师 意见	同意开题 指导教师： <u>魏志民</u> <u>2022</u> 年 <u>3</u> 月 <u>5</u> 日	
开题答辩 小组意见	同意开题 组 长： <u>姚冀涛</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）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名： 

2022年6月3日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（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。

毕业设计（论文）指导教师签名： 

2022年6月3日

摘 要

航空活塞发动机以其功重比大且经济性好的优势被广泛应用于各类通航飞机和支线客机中,因此多数航空维修院校和培训机构均已购置相关航空活塞发动机作为维修学员的培训设备,但由于发动机占地面积大、易耗损、台套数及课时有限等原因,导致航空活塞发动机的培训课程或项目无法达到理想的效果,学员对活塞发动机的组成和工作原理一知半解,导致在进行实操过程中也更易出现安全风险事件,影响了航空维修技术人才的培养质量。针对以上问题,本课题选取 SR22 飞机航空活塞发动机作为研究对象,构建航空活塞发动机数字模型并对其工作原理进行运动仿真,课题成果可直接应用于真实的航空活塞发动机培训中以有效提高培训效果。

本文首先阐述了国内外教研机构对于仿真训练代替或补充实物训练的研究现状,详细介绍了水平对置六缸航空活塞发动机的组成和工作原理,然后对 SR22 飞机水平对置六缸航空活塞发动机的数字模型进行了构建,利用 UG 软件对 SR22 发动机整机进行模型设计,将发动机的活塞、连杆、曲轴、气缸、机匣和螺旋桨以及整流罩、螺钉螺母等依次进行模型设计,之后通过 UG 进行数字仿真,模拟发动机真实的运行状态,并最终制作出一套发动机真实工作原理运行仿真多媒体资源。

关键字: 三维建模; 虚拟仿真; UG; 活塞发动机

ABSTRACT

Aviation piston engine is widely used in all kinds of navigable aircraft and regional jets due to its advantages of large power-to-weight ratio and good economy. Therefore, most aviation maintenance colleges and training institutions have purchased relevant aviation piston engines as training equipment for maintenance students. However, due to the engine covers a large area, easy to wear out, the number of sets and limited class hours. As a result, aviation piston engine training courses or projects can not achieve ideal results, and students have a little understanding of the composition and working principle of piston engine. And in the process of practical operation, safety risk events are more likely to occur, which affects the training quality of aviation maintenance technical personnel. In view of the above problems, SR22 aircraft piston engine is selected as the research object in this paper, a digital model of aviation piston engine is constructed and its working principle is simulated. The research results can be directly applied to the real aviation piston engine training to improve the training effect effectively.

This paper first describes the research status of simulation training to replace or supplement physical training in teaching and research institutions at home and abroad, and introduces in detail the composition and working principle of horizontal opposition six cylinder aviation piston engine. Then the digital model of SR22 aircraft horizontal six cylinder aircraft piston engine is constructed. UG software is used to model SR22 engine, the piston, connecting rod, crankshaft, cylinder, casing, propeller, fairing, screw and nut of the engine are designed in turn. Then through UG digital simulation, simulate the real running state of the engine, and finally make a set of real engine working principle running simulation multimedia resources.

Key words: Three-dimensional modeling; Virtual simulation; UG; Piston engine

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 选题背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 国外研究现状.....	2
1.2.2 国内研究现状.....	2
1.3 本文研究内容.....	2
第二章 航空活塞发动机及建模工具介绍.....	4
2.1 航空活塞发动机的组成和工作原理.....	4
2.2 UG 建模工具介绍.....	5
2.3 本章小结.....	6
第三章 航空活塞发动机整机模型设计.....	7
3.1 航空活塞发动机的主要零件设计.....	7
3.1.1 活塞模型设计.....	7
3.1.2 曲轴模型设计.....	8
3.1.3 连杆模型设计.....	9
3.1.4 机匣模型设计.....	9
3.1.5 活塞缸模型设计.....	13
3.1.6 螺旋桨和整流罩模型设计.....	15
3.2 航空活塞发动机的装配过程.....	18
3.2.1 曲轴的装配.....	19
3.2.2 连杆的装配.....	19
3.2.3 活塞的装配.....	20
3.2.4 活塞缸的装配.....	20
3.2.5 螺旋桨和整流罩的装配.....	21
3.2.6 紧固件的装配.....	22
3.2.7 总装配.....	22
3.2.8 SR22 航空活塞发动机的渲染.....	23
3.3 本章小结.....	24
第四章 SR22 航空活塞发动机原理仿真.....	25
4.1 航空活塞发动机运动原理仿真介绍.....	25
4.2 航空活塞发动机运动原理仿真过程.....	25

4.3 本章小结.....	27
结论.....	28
参考文献.....	29
致 谢.....	30

第一章 绪论

1.1 选题背景及意义

SR22 是西锐公司生产的一款高性能单发通用飞机，它可以在 200 米或 8000 米的高度飞行，最大飞行距离可达 2000 公里，最高巡航速度可达每小时 340 千米。然而，不凡的速度和高度并不是最重要的，对于航空业来说，安全是第一步。而 SR22 把它做到极致——整机降落伞。当空中发生人力无法挽回的险情时，一枚微型火箭就会在飞机顶部发射，它通过四条索带与飞机相连，当绳索绷紧时，火箭中的降落伞将自动打开，在它的帮助下可实现安全着陆。所以 SR22 多年来一直是全球最为畅销的单发 4 座系列飞机。

通用航空作为中国民航业的两翼之一，在经济发展、社会公共服务等方面发挥着不可替代的作用，能够有效带动相关产业的发展，助推产业结构升级。中共中央印发《国家综合立体交通网规划纲要》，纲要提出发展低空经济，让通航先飞起来、热起来，积极推动实现通用航空发展由部门行为转为政府行为，由行业行为转为社会行为已得到明确。这是低空经济首次写入国家规划，具有标志性意义。在可以预见的未来，通用航空产业将迎来高速发展的契机，以活塞发动机为动力的通航飞机仍将占据主力。航空活塞发动机具有油耗低、结构简单、技术成熟、价格便宜、使用维护费用低以及使用寿命相对较长，而且通用航空对于活塞发动机的速度限制不易明显。SR22 飞机发动机为水平对置六缸航空活塞发动机，活塞平均分布于曲轴两侧，使得发动机高度降低，长度缩短，具有减轻发动机质量等优点。现如今，活塞发动机正向着高强度，高耐磨，高精密，低膨胀，轻量化，环境友好化，智能化，结构复合组合化、“汽车改”一研制路线能有效降低活塞发动机研制周期和成本、功重比上有效改进突破采用航空煤油或柴油上得到青睐等趋势发展。

现如今虚拟仿真教学在教育信息化中占有越来越重地地位。虚拟仿真教学的实施对提高学生综合设计与创新能力，提高教师队伍教学能力、拓展实践领域、丰富教学内容、降低实操过程中的安全风险等有很大的帮助，同样也可以有效解决航空维修院校和培训机构传统教学实践过程中出现的培训设备成本太高、占地面积大、易损耗、台套数及课时资源有限和发动机培训课程无法达到理想效果等问题。虚拟仿真教学已成为国内外教育界对传统教学进行改革、提升航空维修技术人才培养质量的重要举措，是现代教育重要的引领手段之一，因此备受世界各国教育界的关注。

1.2 国内外研究现状

航空发动机是当代工业技术发展的结晶，是工业技术“皇冠上的明珠”，在国民经济中发挥着战略性作用。随着民用航空的发展，航空发动机技术日新月异，新设计构造不断涌现。然而，长期以来，由于人才短缺、基础薄弱等原因，我国航空发动机技术与国外先进国家一直存在着较大差距。所以，培养高素质、创新型的航空发动机人才对促进我国航

空发动机技术发展十分重要。

1.2.1 国外研究现状

在国外，对虚拟仿真技术的研究起步较早，应用较为广泛。已经对该领域做了很多深入的研究工作，取得了许多成果。Randall W A^[1]单独研究了航空发动机的模拟并申请了专利。Rudnik R^[2]等人对高旁路发动机集成的数值模拟进行了深入探讨。Decastro J^[3]等人在商用航空发动机的模拟上开发了具有高保真的仿真系统，取得了不错的模拟训练效果。

1.2.2 国内研究现状

在国内，虽然起步较晚，但在一直努力发展着。在 2017 年，董琦立^[4]等人发明一种飞机发动机模拟教学系统的专利，该系统包括数据仿真子系统和三维模型创建子系统，通过两个系统相结合的方式，在教学过程中能够直观地展示飞机发动机的运行状态，有利于改善飞机发动机的教学环境，提高教学效率。在近几年，高颖^[5]等人发布了基于 VR 的航空发动机虚拟教学实验系统设计期刊，该系统通过对某航空发动机提供虚拟装配及拆卸、模化教学实验、模型流场的动态显示及发动机试车等实验系统，利用 VR 技术进行与虚拟空间实时交互，将学生的视、听积极性充分调动起来，使学生可获得身临其境的感受和体会。在 2013 年，刘振侠^[6]等人发布了开发基于三维交互和视景仿真的航空虚拟教学实验系统，该系统能够实现发动机模拟装配、发动机结构展示、发动机工作机理演示、发动机模拟试车等功能，对促进我国航空动力技术人才培养具有重要意义。在近几年，杨姣^[7]发表了基于 Unity3D 的航空发动机虚拟现实设计与研究硕士论文，在相关专业技术参数基础上利用 UG NX 软件构建了发动机三维模型，并实现了发动机整机装配，之后利用 3Ds Max 软件为模型增添光照及材质特殊效果，在此基础上利用 Unity 3D 创建了航空发动机虚拟场景，为民航机务人员培训发挥重大积极作用。在近几年来。许志国^[8]等人发表了航空发动机虚拟教学实验系统研究硕士论文，该系统面向大中院校航空发动机专业的教学，科研和发动机设计而研究开发的具有较高实用价值。实践教学是航空发动机教学工作中的最重要一环，这些发明对促进学生了解发动机内部复杂结构、理解相关理论知识起着重要作用，有效的克服了传统教学实验成本过高、操作困难等问题。

1.3 本文研究内容

活塞发动机被广泛运用于航空发动机培训领域，但是由于发动机实验成本高、占地面积过大、台套数资源有限等原因，以及高校针对航空发动机的教学过于局限于理论教学，无法让学生充分掌握发动机的组成和工作原理，这些都极大地影响了航空维修人员的培养质量。本课题首先分析研究 SR22 飞机水平对置六缸航空活塞发动机结构组成和工作原理，利用 UG 软件强大的三维实体建模、装配功能及模拟仿真功能，完成 SR22 发动机整机三维模型设计与虚拟装配。运用 UG 软件的数字仿真功能对发动机进行了运动原理仿真，模拟

发动机真实运行状态。可用于对发动机教学中对学生拆装前的熟悉了解过程，同时能使学生在不受限制了解与复习活塞发动机的构造与原理，规范实验操作过程，提高教学水平，拓展学生实践能力，开阔思维眼界，确保学生安全，降低教学成本，从而提高发动机的培训效率。在加强自身本科知识领域基础上推动学院教学质量的提升。

第二章 航空活塞发动机及建模工具介绍

2.1 航空活塞发动机的组成和工作原理

航空发动机分为活塞式航空发动机和喷气式航空发动机以及火箭发动机，而喷气式发动机又分为燃气涡轮发动机、涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机、涡轮轴发动机、螺旋桨风扇发动机以及冲压发动机。

燃气涡轮发动机是目前应用最普遍的航空发动机，它主要由进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管组成，其中压气机、燃烧室和涡轮是涡轮发动机的核心。燃气涡轮喷气发动机的速度快、推力大、适合高速飞行，但燃油耗油率高，经济性差；涡轮螺旋桨发动机在低亚声速飞行时效率较高，耗油低，经济性好。



图 2-1 水平对置航空活塞发动机

活塞式航空发动机是一种燃烧汽油的往复式内燃机。如图 2-1 所示。它主要由气缸、活塞、连杆、曲轴、螺旋桨、机匣、进气/排气活门组成。它通过活塞缸中的活塞将充分燃烧的混合气体的内能转化成活塞通过连杆带动曲轴转动的机械能，将活塞的往复直线运动转换成曲轴的旋转运动，曲轴的旋转动能带动螺旋桨的高速转动。从而产生推力。

活塞发动机每个循环包含四个冲程——进气冲程、压缩冲程、膨胀冲程和排气冲程。活塞在气缸内最上位置为上死点位置；活塞在气缸中最低位置为下死点位置。在进气冲程中，活塞从上死点移动到下死点，进气门开启，排气门关闭，汽油与空气的雾化混合气被向下移动的活塞吸入气缸；在压缩行程中，活塞从下死点移动到上死点，进、排气门关闭，混合气体在气缸内被压缩。靠近上死点处，由安装在气缸头部的火花塞点燃；在膨胀行程中，混合气被点燃后，产生可以膨胀的高温高压燃气，将活塞从上死点推至下死点。在这

一行程中，燃烧气体中所含的内能转化为活塞运动的机械能，并通过连杆传递给曲轴，变为驱动螺旋桨的动力；在排气行程中，活塞从下死点运动到上死点，排气门开启，将废气活塞排出缸外。当活塞再次到达上死点的时候，排气活门关闭，此时就完成了四个行程的循环。

为满足动力的需求，航空发动机通常由多个气缸组成，多个缸体同时工作，驱动曲轴和螺旋桨旋转，以提供足够的动力。根据缸体的数量和排列形式分为三种：多缸星型发动机、多缸水平对置发动机、多缸 V 型布置发动机。无论采用哪种形式，都必须保证活塞运动与曲轴运动的协调性，在运动中不能相互牵制。

2.2 UG 建模工具介绍

UG 的全称是 Unigraphics NX，是 Siemens PLM 软件公司生产的产品工程解决方案，它能够为用户提供产品设计和加工的数字模型和验证方法。它功能强大，能够容易实现各种复杂实体和形状的创建。

UG 具有三个设计层次：结构设计、子系统设计和组件设计。使用 NX 建模，用户可以快速建立和完善复杂的产品模型形状，并使用高级的渲染和视觉化工具，最大程度地满足设计理念的审美要求；NX 还具有高性能的机械设计和绘图功能，为设计制造提供高性能和灵活性，以满足客户设计任何复杂产品的需求；NX 还可以以数字方式模拟仿真、确认和优化产品及其开发过程，通过仿真和优化，可以提高产品质量，减少实物样机的时间与成本；UG NX 最重要的一点是，它具有强大的参数变量设计和编辑能力，为零部件的快速高效设计提供软件支持，也有助于实现零件的系统化建模。现如今将 UG 普遍应用于汽车智能制造、模具成型制造、航空航天制造、机械零部件等行业领域。如图 2-2 所示为 UG 软件的主要界面。

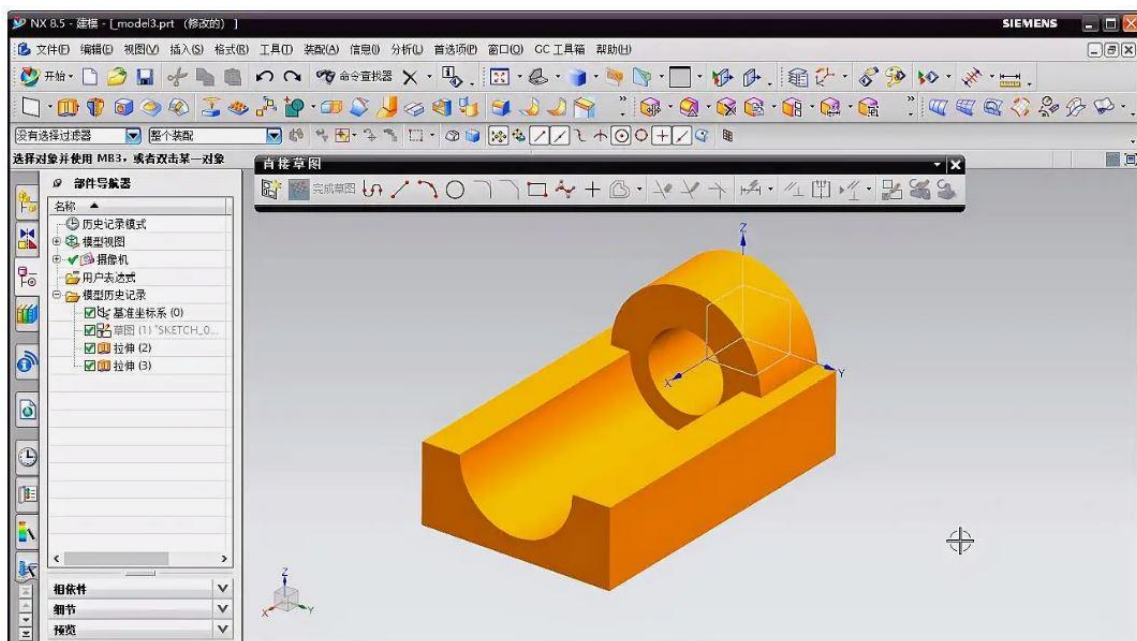


图 2-2 UG 主界面

2.3 本章小结

本章通过对航空活塞发动机的结构组成和工作原理与 UG NX 的建模、装配、原理仿真的功能进行了介绍，以及 UG 软件在生活中广泛应用，特别是在航空航天与机械领域方面的运用。由于本课题对 SR22 航空活塞发动机建立三维模型，主要应用于教学课程方面，比较注重模型设计的完整性和多样性，所以选择使用 UG 作为建模软件。

第三章 航空活塞发动机整机模型设计

本文建立的是非工作状态下的活塞发动机的模型，目的用于院校教学培训，提高教学效率，促进学生更加直观的认识。依据专业测量工具获得发动机主要部件的详细尺寸，并通过查询相关发动机资料，获得各零部件之间的装配关系；并且在不影响发动机整体结构特征的基础上对一些非必要零部件进行简化处理。总之是基于一种以零件变为部件、以部件变为构件的原则进行模型的建立的。

首先通过依次建立活塞、曲轴、连杆、机匣、活塞桶、整流罩、螺旋桨等零部件的模型，之后将他们依据装配关系装配成整机，再进行局部外形优化，加强紧固件的装配，接着对发动机进行赋予材质，进行相应的渲染处理，使模型设计的更加真实。

3.1 航空活塞发动机的主要零件设计

3.1.1 活塞模型设计

第一步是活塞的建模过程。具体包括活塞本体、活塞顶部的支撑#字形支撑体和活塞销。依据活塞的尺寸参数创建草图。之后对所做草图选中曲线进行回转命令，角度 360° ，指定矢量为 Y 轴，指定点为原点，如图 3-1 所示。

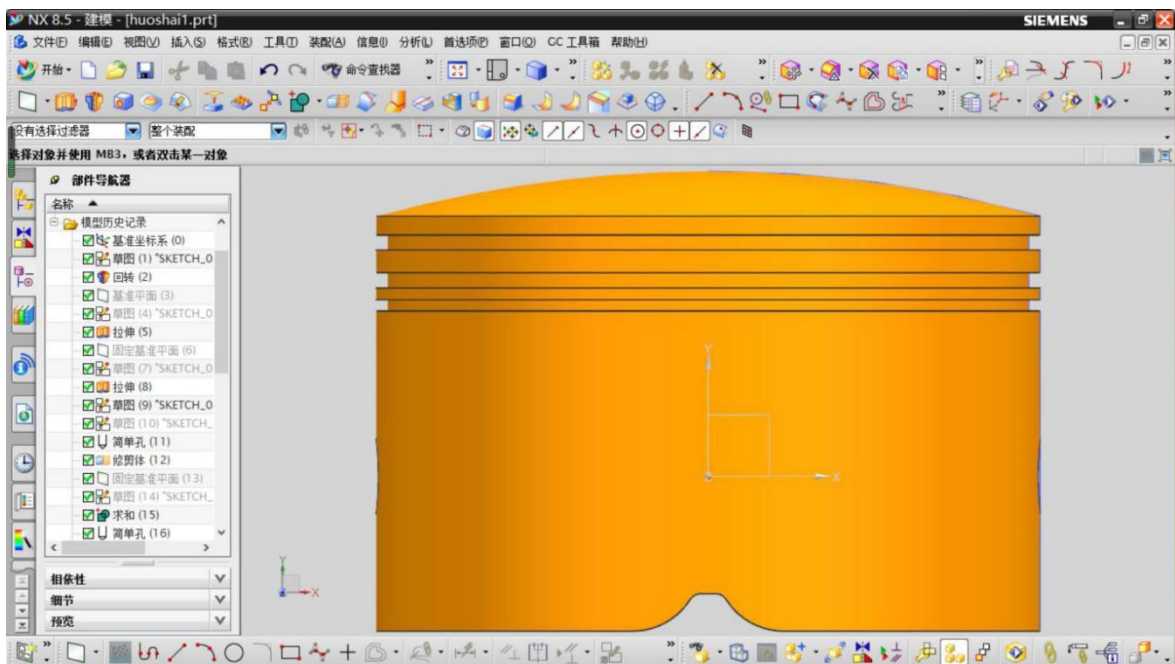


图 3-1 活塞实体

接着进行活塞顶部的支撑#字形支撑体和活塞销的两端连接处的草图绘制并且实体拉伸命令创建和阵列特征命令。之后对两处连接端进行打简单孔，布尔运算选择求差，以及对面与面、边与边的交界处进行面倒圆 5mm、边倒圆 2mm。并绘制活塞销的草图，进行拉伸命令，并且和活塞内两处连接端进行简单装配在一起。如图 3-2 所示。

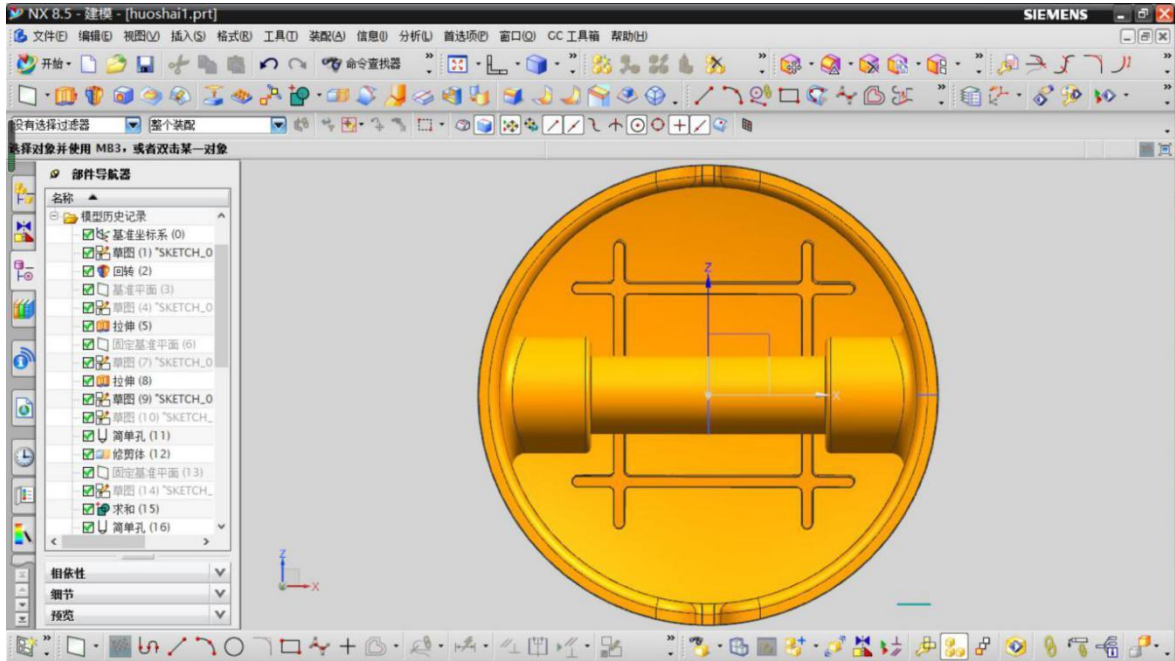


图 3-2 完整活塞建模实体

3.1.2 曲轴模型设计

第二步是曲轴的建模过程。具体结构包括曲轴前自由端、连杆轴颈、主轴轴颈、曲柄和曲轴后端部，其中主要部分曲拐由连杆轴颈、主轴颈和曲柄三部分组成。由于它们的草图都是规则图形，故不做展示。接着是依据所作草图对曲轴前自由端和曲柄进行执行拉伸命令。并对所拉伸实体进行减轻重量与美观性设计，通过修剪体命令，选择合适的目标与工具，用绘制片体来修剪实体达到目的。如图 3-3 所示。

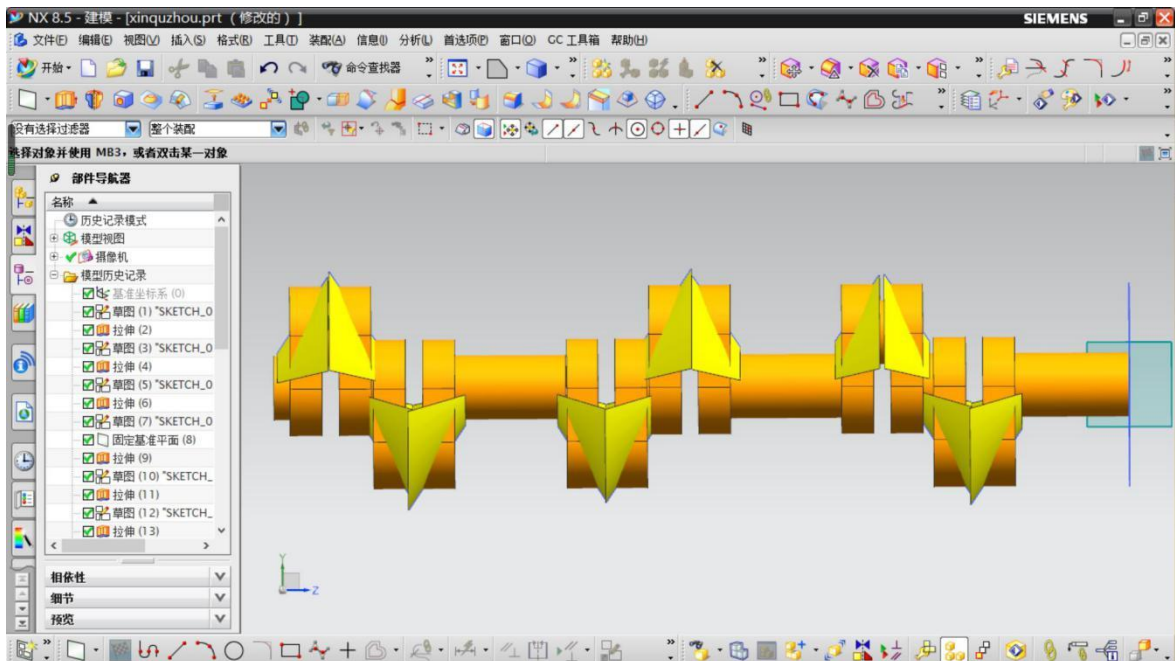


图 3-3 实体修剪视图

接着是主轴颈和曲柄的实体创建，以前面建立的实体为基准平台进行继续模型创建。按照曲轴的真实运行原理对剩余的两组曲拐进行实体创建以及最后的曲轴后端部的实体拉伸。如图 3-4 所示。

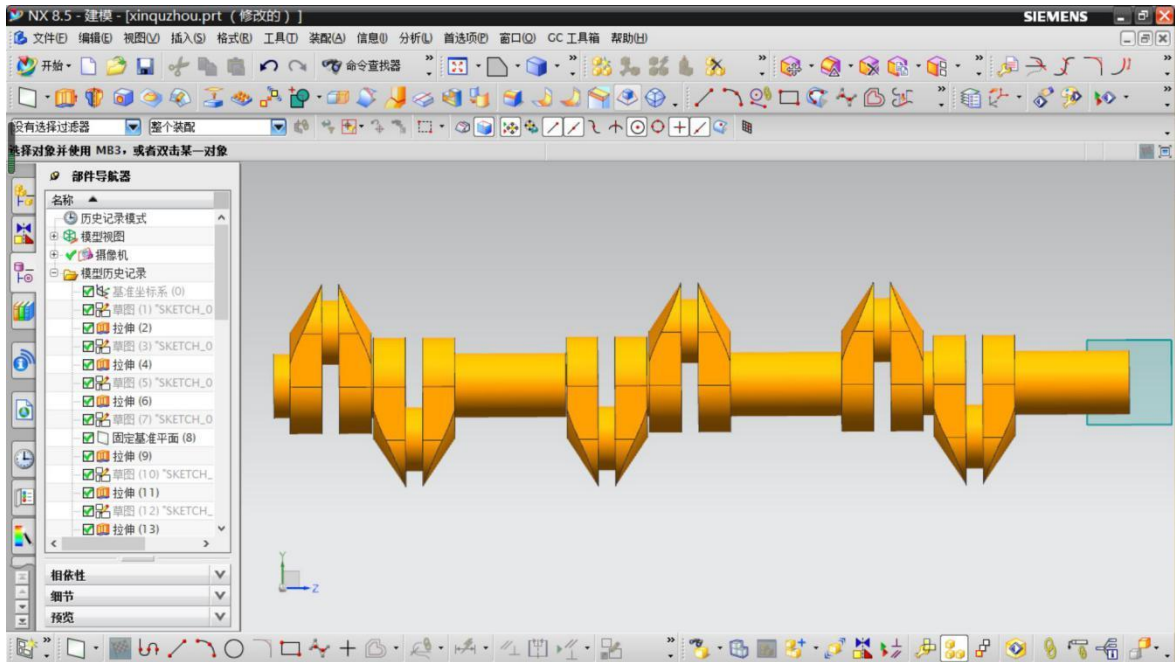


图 3-4 曲轴整体创建实体

3.1.3 连杆模型设计

第三步是连杆的建模过程。具体结构由活塞相连接的连杆一端、曲轴相连接的另一端以及杆身所组成。将活塞的直线往复运动转换成曲轴的旋转运动。连杆的创建草图将分为三部分进行，这样就可分别执行拉伸命令，得到想要的模型。创建完草图之后进行两组执行拉伸命令，杆身的拉伸要置于两端最中心，并与两端实体进行相交。由于两部分建模实体存在交错部分导致无法使其成为一个整体，所以需要对其相交部分进行求差命令。求差命令之后对连杆杆身进行减重设计，对所创建的三部分执行求和命令，成为整体，并对连杆进行整体优化。由于设计过程不太耗时，故不做图形展示。

3.1.4 机匣模型设计

第四部是机匣的建模过程。机匣是航空活塞发动机的主要基本结构骨架，不仅为其他部件提供了安装平台，而且是各种作用力的承载者。

机匣由于是发动机中最大的部件基座，所以相应的约束条件也较多。依照所绘草图进行执行拉伸命令。拉伸命令之后，选择所需要移除面，然后进行抽壳命令。如图 3-5 所示。

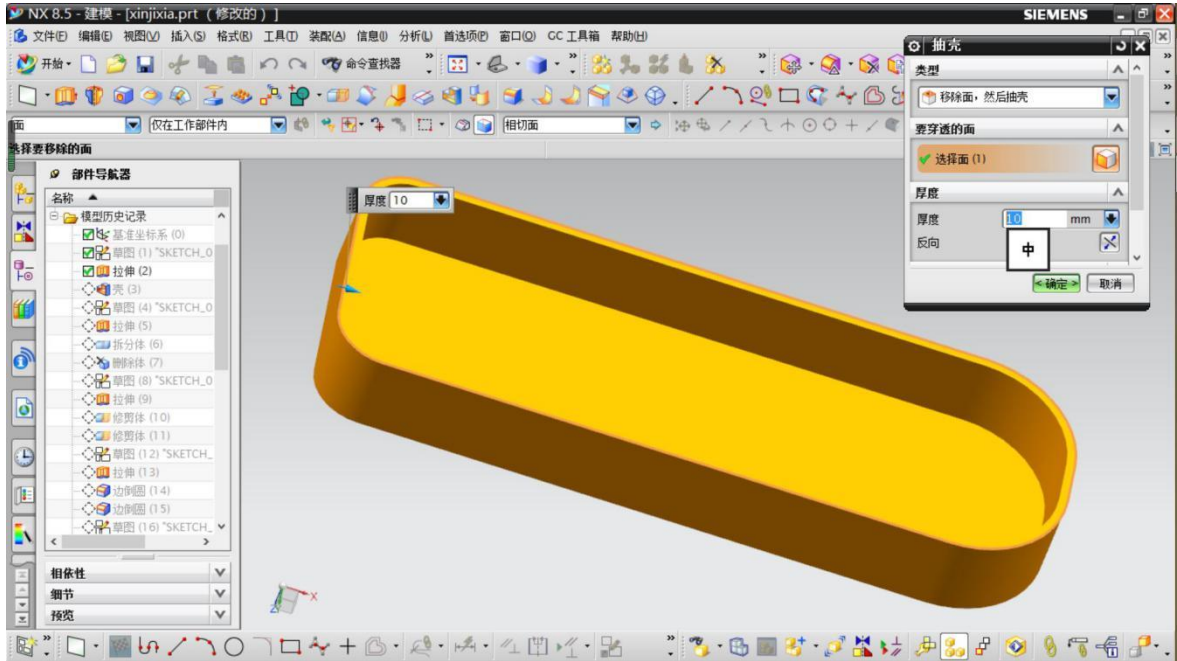


图 3-5 机匣抽壳实体

接下来进行机匣顶部曲面的设计，通过绘制草图得到与曲面基本外形相符的过渡体，之后执行拉伸命令与机匣形成交错，为接下来的拆分体命令和删除体命令做准备。

通过拆分体命令将抽壳后的整体拆成想要的两部分，再执行删除体命令将两体交错处的上部进行删除，选择适当要删除和要保留的实体，如图 3-6 所示。

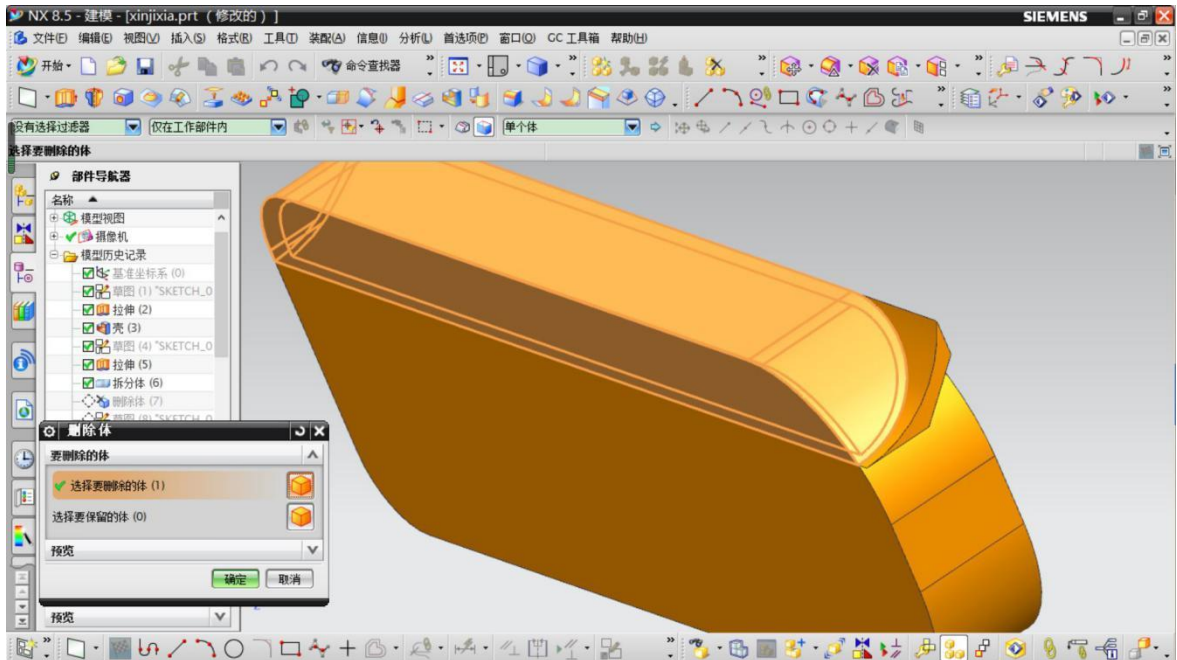


图 3-6 机匣修剪实体

再次绘制片体将多余实体修剪完成，如图 3-7 所示。

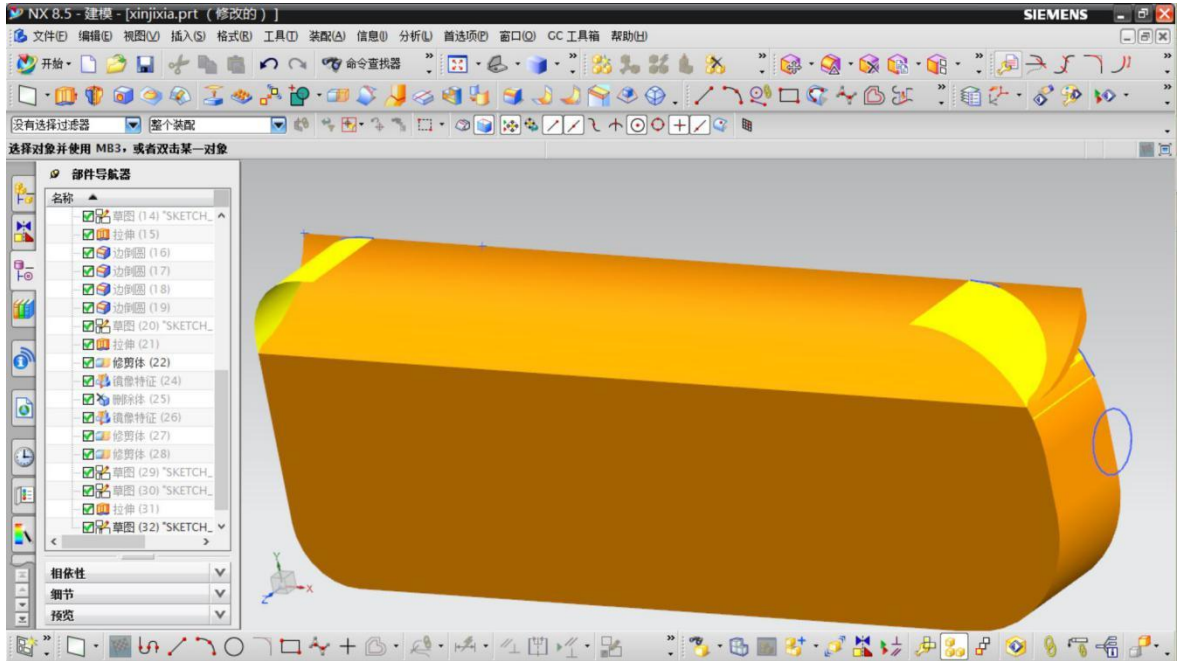


图 3-7 机匣修剪实体

将修剪完成的片体进行隐藏，并对其他地方进行优化，如图 3-8 所示。

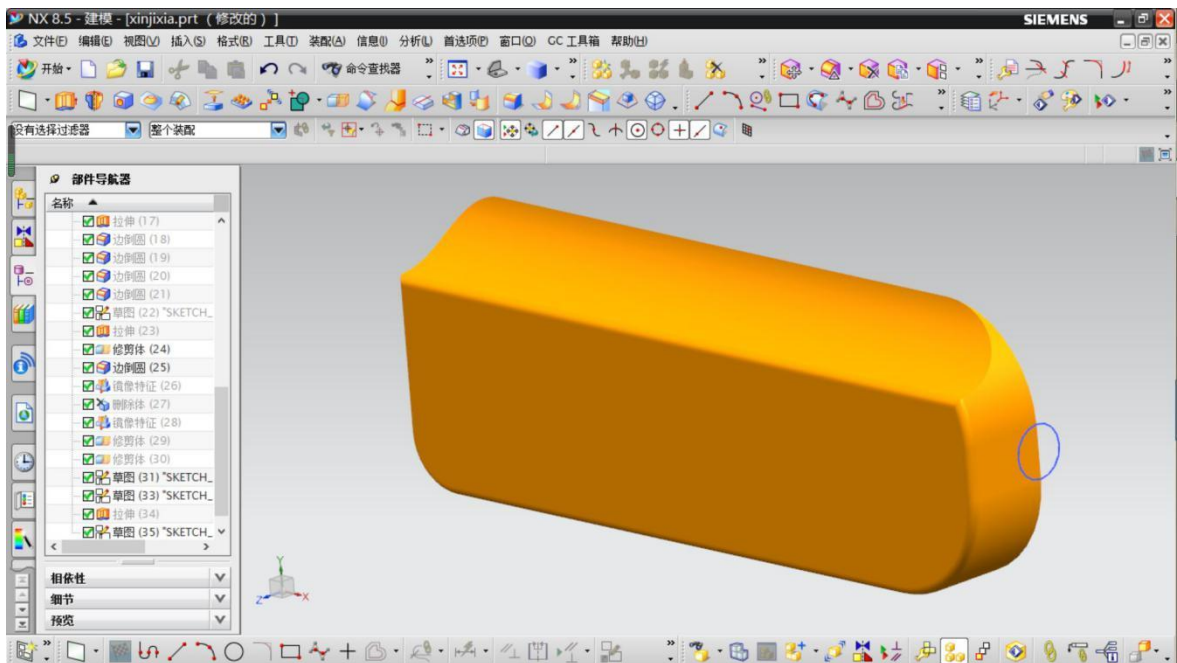


图 3-8 机匣优化实体

机匣顶部外形完成之后绘制机匣外围台沿草图，以用于紧固件的安装处，并且执行拉伸命令与确定螺栓的具体位置。如图 3-9 所示。

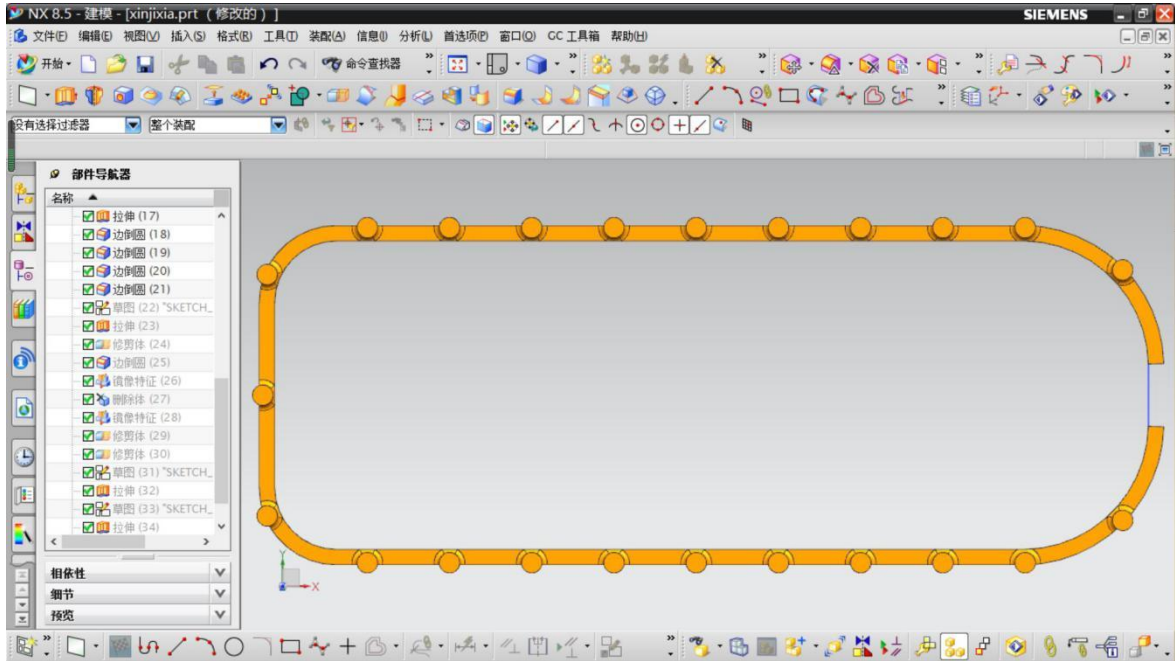


图 3-9 机匣外围台沿实体

接着执行镜像特征命令，选择上面创建的实体特征与片体修剪特征，以中心原点所在平面为基准镜像平面。

镜像特征命令完成之后就完成连杆在机匣内部带动活塞往复运动所需要的侧身孔草图的绘制与执行拉伸命令并进行布尔运算中的求差运算。由于 SR22 水平对置活塞航空发动机是六缸，所以需要六个大孔。最后需要进行特征的整体优化，例如包括边倒圆、布尔运算中的求和运算等优化步骤。如图 3-10 所示。

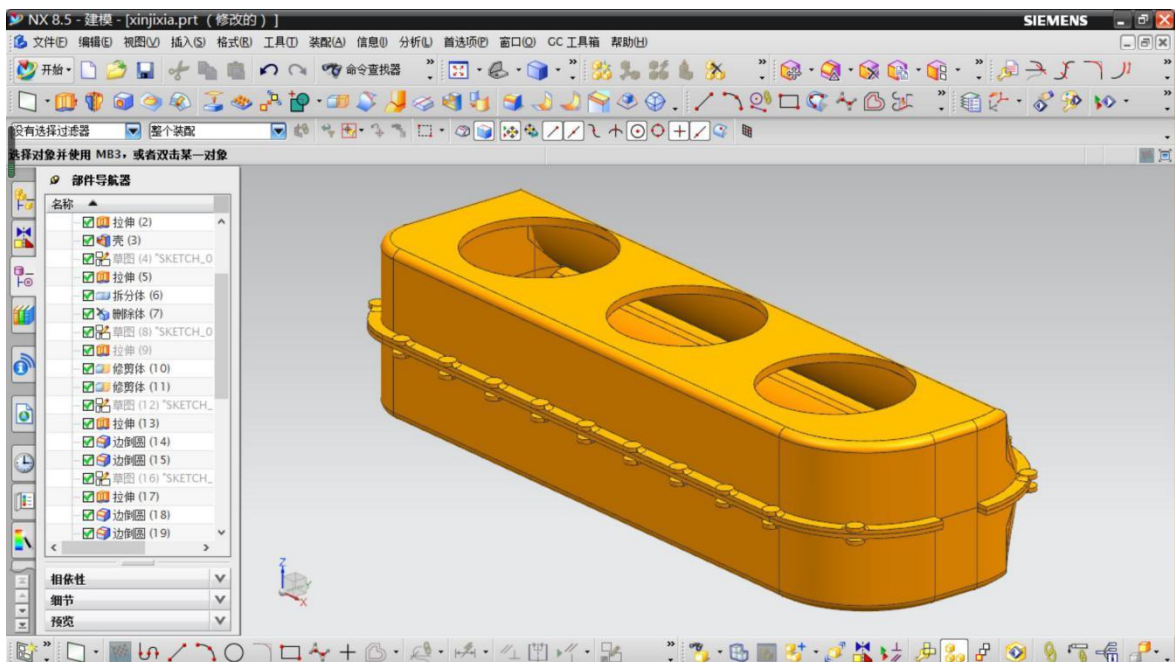


图 3-10 机匣整体创建实体

3.1.5 活塞缸模型设计

第五步是活塞缸的建模过程。活塞缸通过活塞所进行的直线往复运动将压缩的燃烧混合油气的热能转换成机械能。活塞缸的模型是依照从下至上的方法进行模型建立的。靠近机匣为下方。首先对活塞桶的整体草图进行绘制，包括紧固件安装台沿的草图绘制、缸体与散热片、气门室体与气门室端盖的草图绘制，以及散热片的草图绘制，如图 3-11 所示。

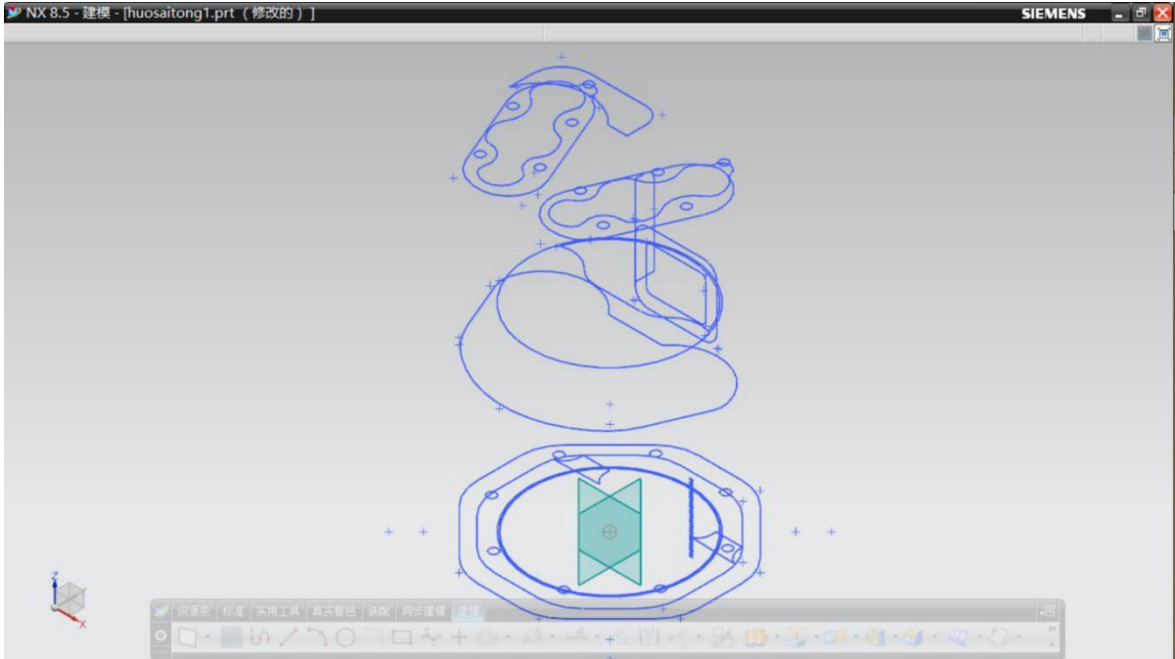


图 3-11 活塞桶整体草图绘制

将紧固件安装台沿和缸壁的草图进行拉伸命令。如图 3-12 所示。

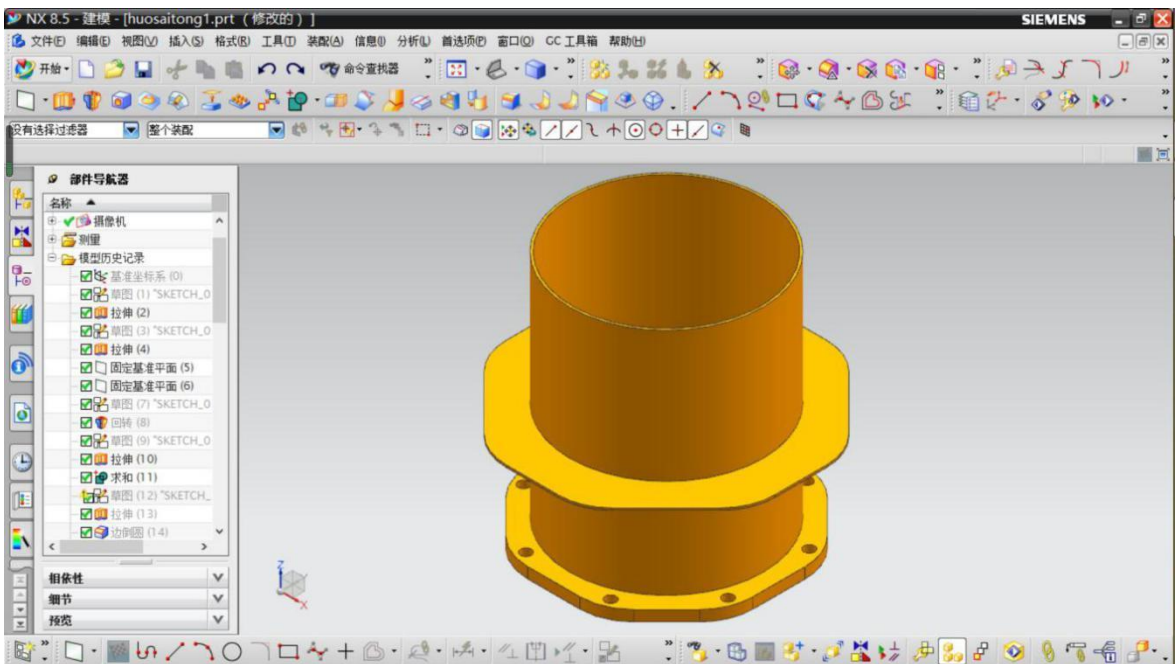


图 3-12 缸壁实体

在中间缸体的基础上进行散热片的实体创建，以缸体的垂直基准面为草图绘制面，之后按照草图要求进行执行回转命令。散热片分为两类，靠近机匣的散热片较小，而靠近点火的位置散热片较大，间隙较宽。大散热片是通过草图绘制与阵列特征所获得，在阵列特征中指定缸体的参考原点，选择阵列定义线性布局，指定固定矢量，输入数量与节距参数就可得到所需特征。如图 3-13 所示。

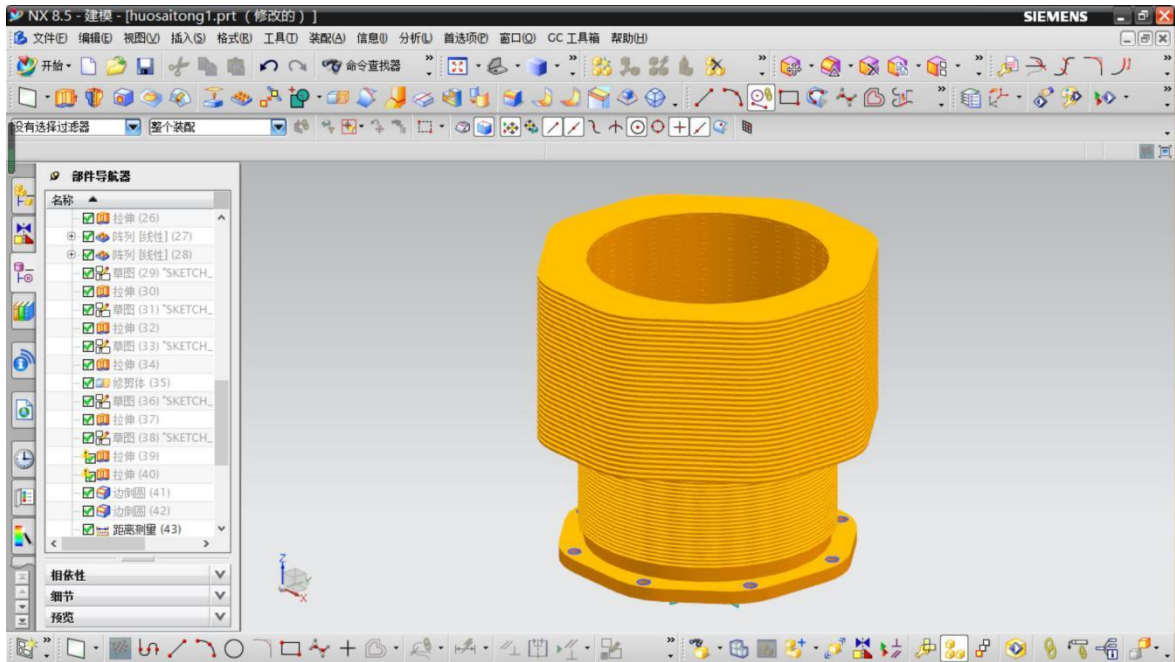


图 3-13 散热片创建实体

接着就是气门室的实体创建。通过建立草图、执行拉伸命令与抽壳命令。同时绘制气门室的纵横方向散热片与油管接入座的草图，然后进行拉伸命令、阵列特征命令等。在气门室的外表面的基础上进行气门室端盖的模型建立，以及紧固件螺纹孔的出现。如图 3-14 所示。

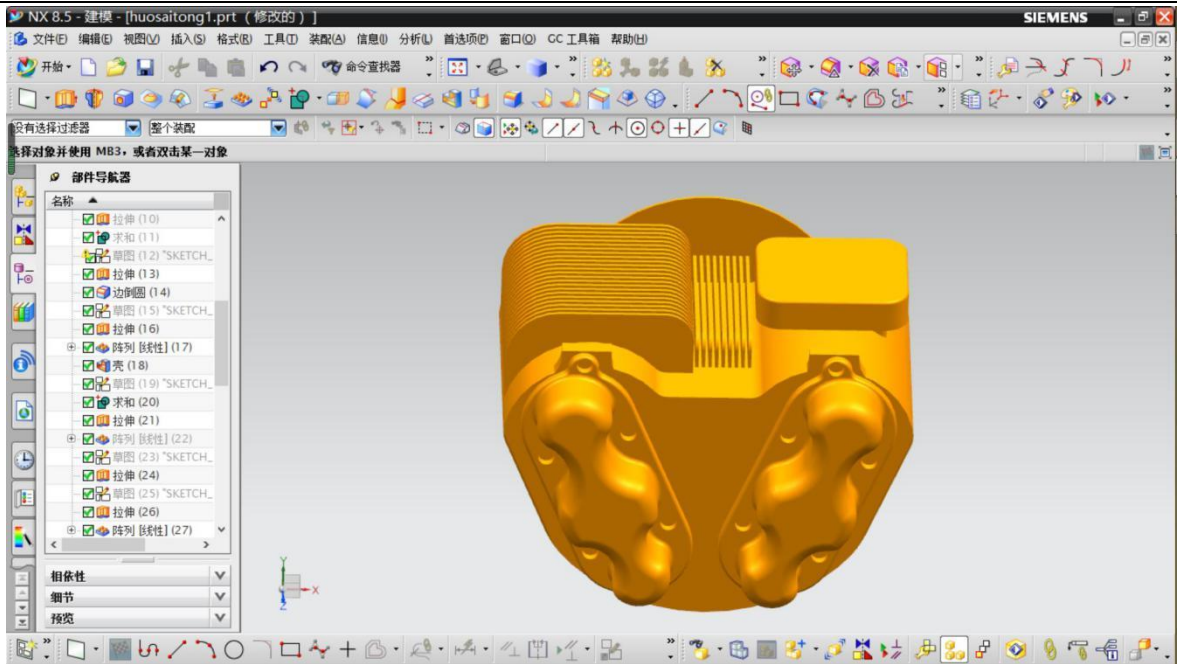


图 3-14 气门室创建实体

最后将紧固件安装台、缸体、散热片、气门室等进行简单优化并装配在一起，如图 3-15 所示。

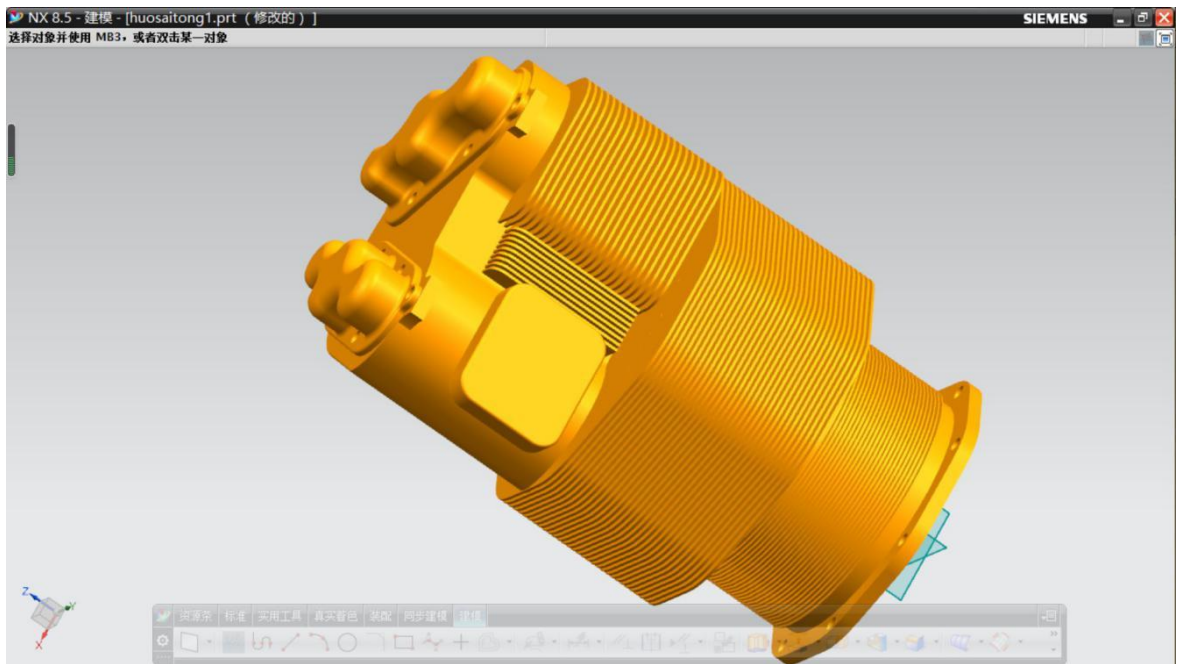


图 3-15 活塞缸创建实体

3.1.6 螺旋桨和整流罩模型设计

第六步是螺旋桨和整流罩的建模过程。对于螺旋桨实体创建，草图绘制不是关键，而片体与实体的相互修剪才是关键。首先绘制草图并执行拉伸命令，创建一个长形椭圆实体，之后绘制形状约束片体进行修剪。如图 3-16 所示。

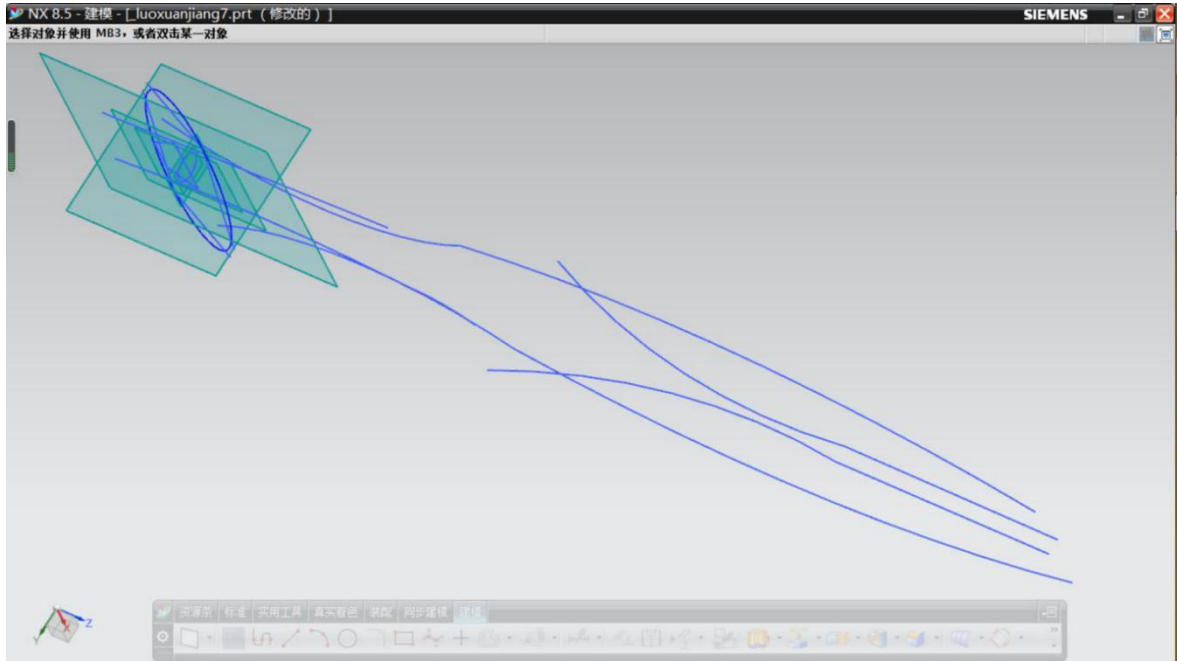


图 3-16 修剪片体草图初步绘制

之后根据所绘草图执行拉伸命令，创建修剪片体，修剪原则秉承着先旁边后上下地原则进行长形椭圆修剪。如图 3-17 所示。

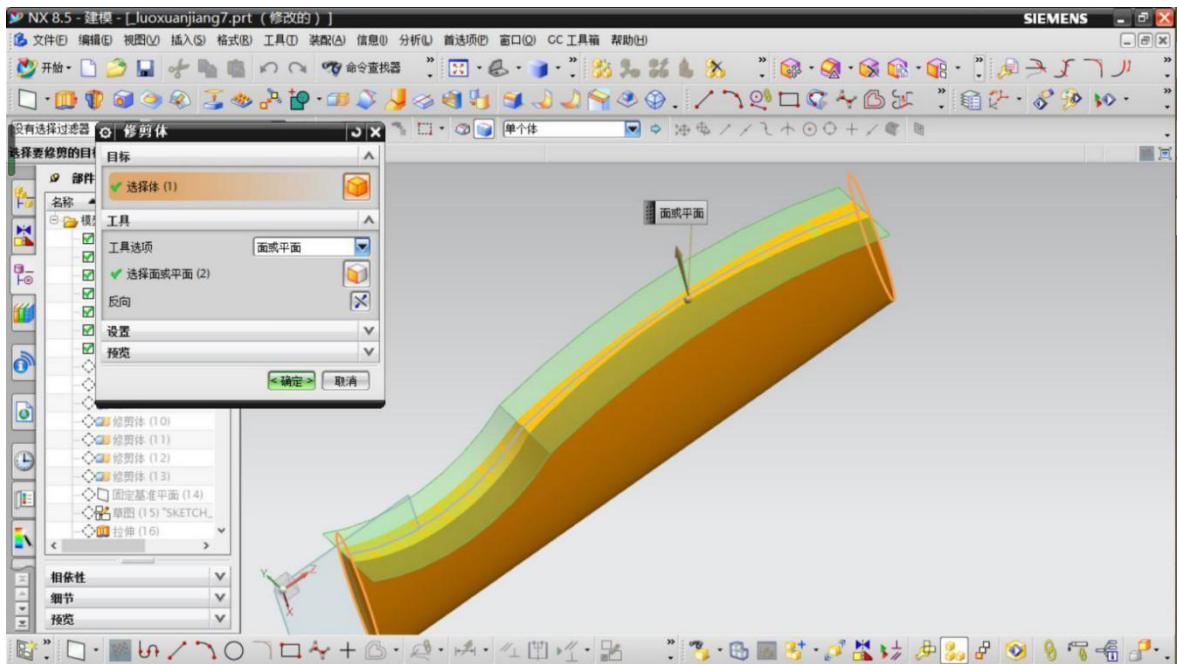


图 3-17 片体修剪

接着对其进行上下修剪，使其同螺旋桨形状更为地相像。如图 3-18 所示。

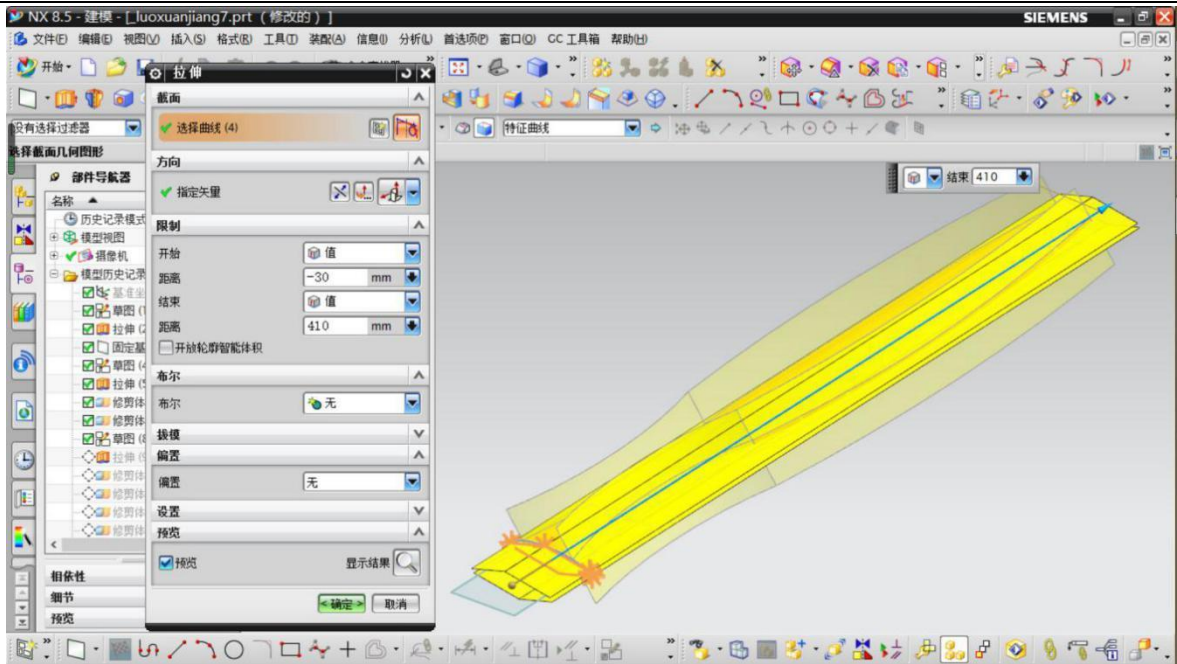


图 3-18 片体修剪

接着继续对实体进行充分的外形片体修剪，如图 3-19 所示。

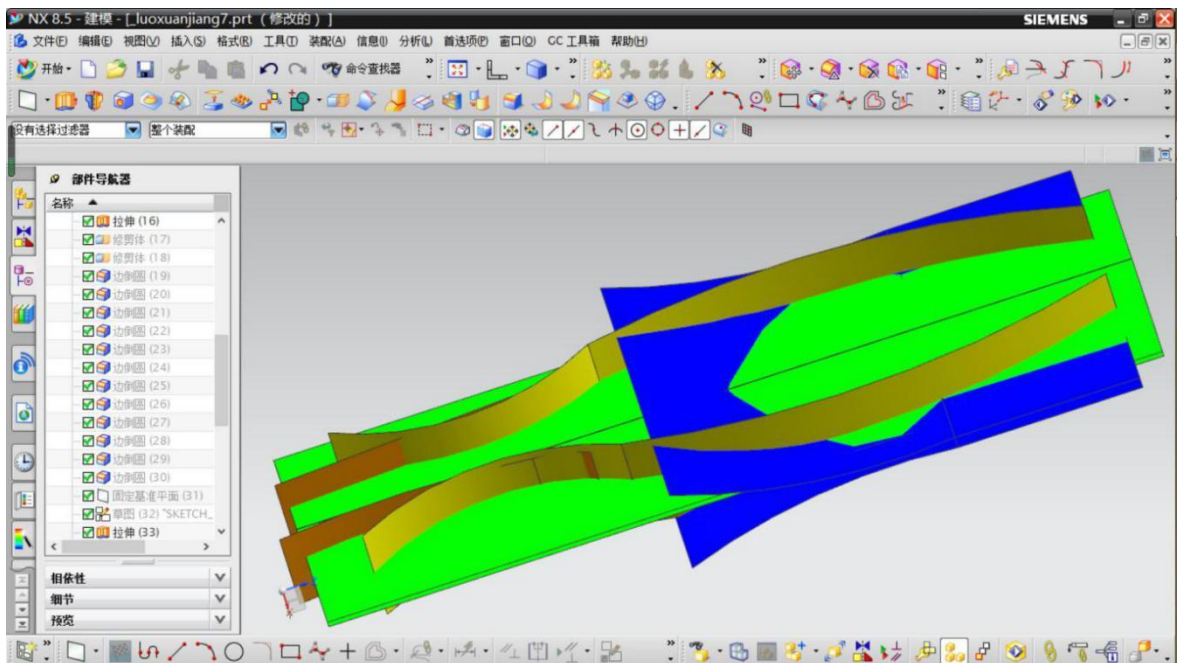


图 3-19 所有外形片体修剪

所有片体对椭圆实体修剪完成后，将多余片体进行去除和隐藏，之后进行整体优化设计。如图 3-20 所示。

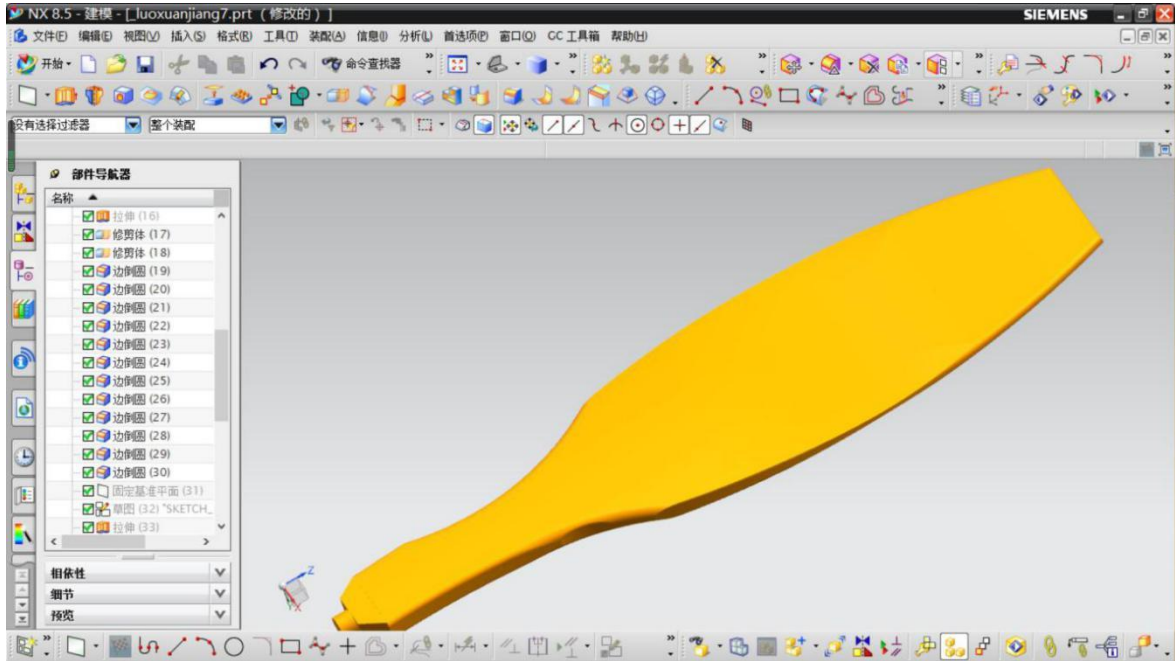


图 3-20 螺旋桨整体优化实体

接下来是整流罩的建模过程,由于航空活塞发动机的速度较低,所以整流罩要求偏低。通过绘制草图,进行执行回转命令形成实体,再进行抽壳命令和阵列特征命令,在阵列特征中使用旋转轴和可选的径向间距参数定义布局。如图 3-21 所示。

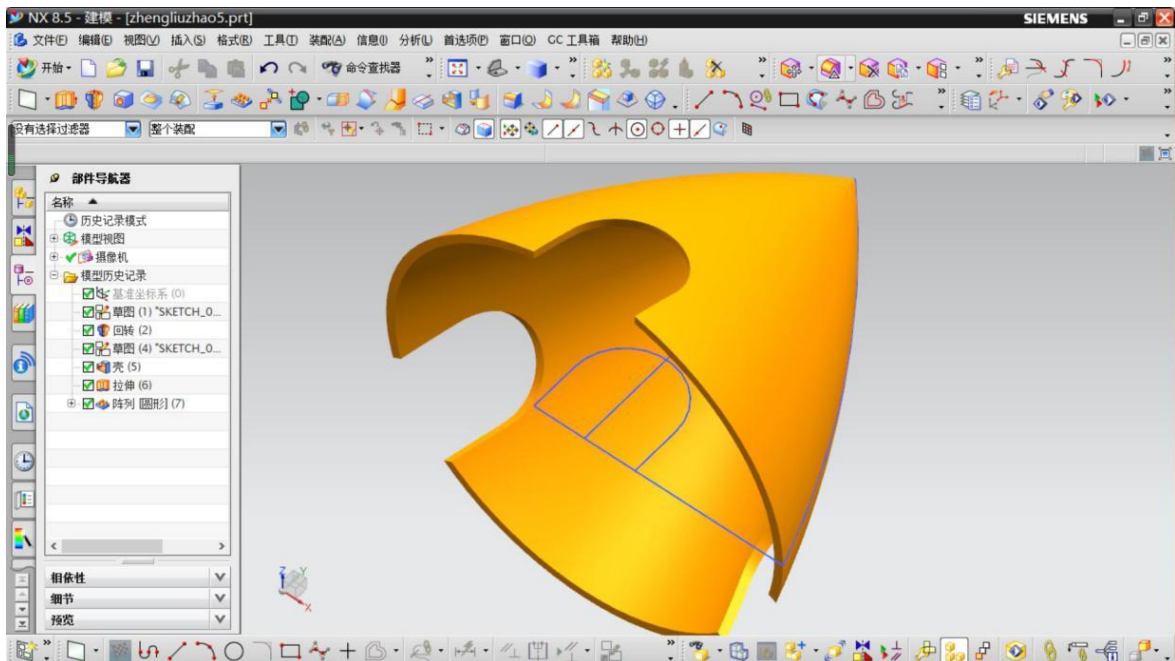


图 3-21 整流罩实体模型

3.2 航空活塞发动机的装配过程

将发动机各个部件模型进行装配,先将曲轴装入机匣内,接着将连杆和曲柄接触对齐,然后将活塞中的活塞销与连杆接触对齐,之后再再将活塞缸装在机匣侧面,和装配完成

的活塞形成紧密契合，最后是螺旋桨和整流罩在机匣前端的装配。这就是 SR22 活塞发动机整机模型的总体装配过程，具体过程如下。

3.2.1 曲轴的装配

装配第一步，通过添加组件命令，选择所需部件将曲轴通过具体装配约束命令的固定类型装配在机匣最中间的位置。如图 3-22 所示。

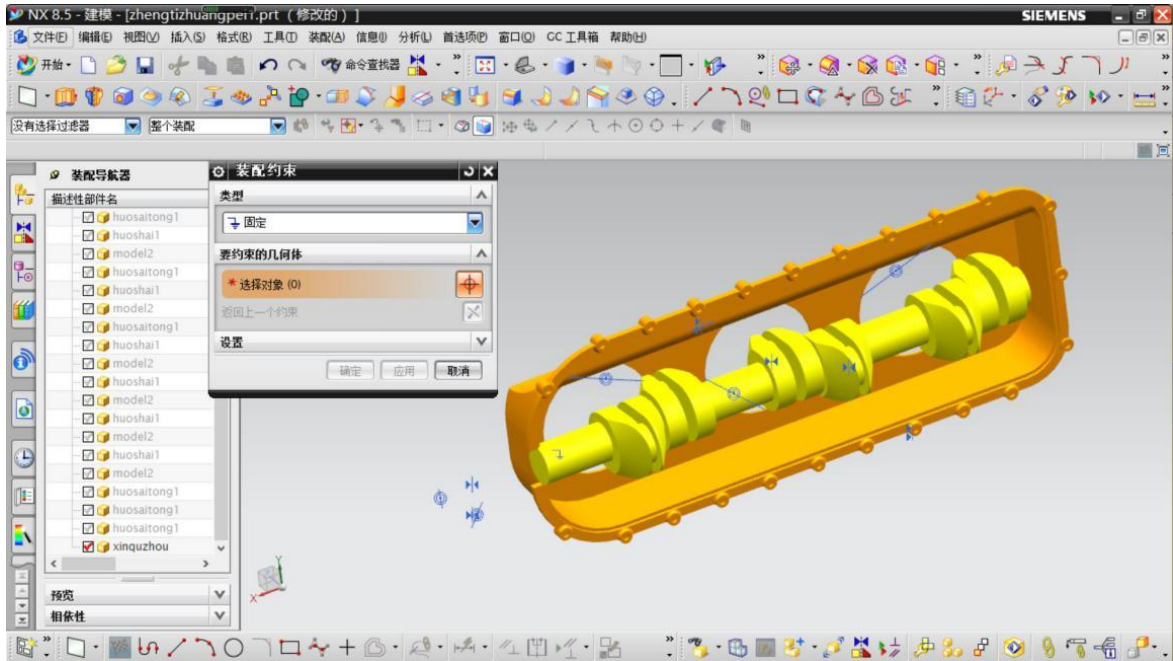


图 3-22 曲轴与机匣的装配

3.2.2 连杆的装配

装配第二步为连杆通过装配约束命令的同心类型或者接触对齐类型装配在连杆轴颈上，也可通过移动组件命令进行位置的适当微微调整，以寻求连杆的最佳位置，以便活塞更好的作往复运动的位置。连杆与曲轴之间的装配关系至关重要，两者的旋转运动有所不同，曲轴是绕着自身旋转，而连杆是通过曲轴的带动进行运动，故它们之间的装配关系较为复杂。如图 3-23 所示。

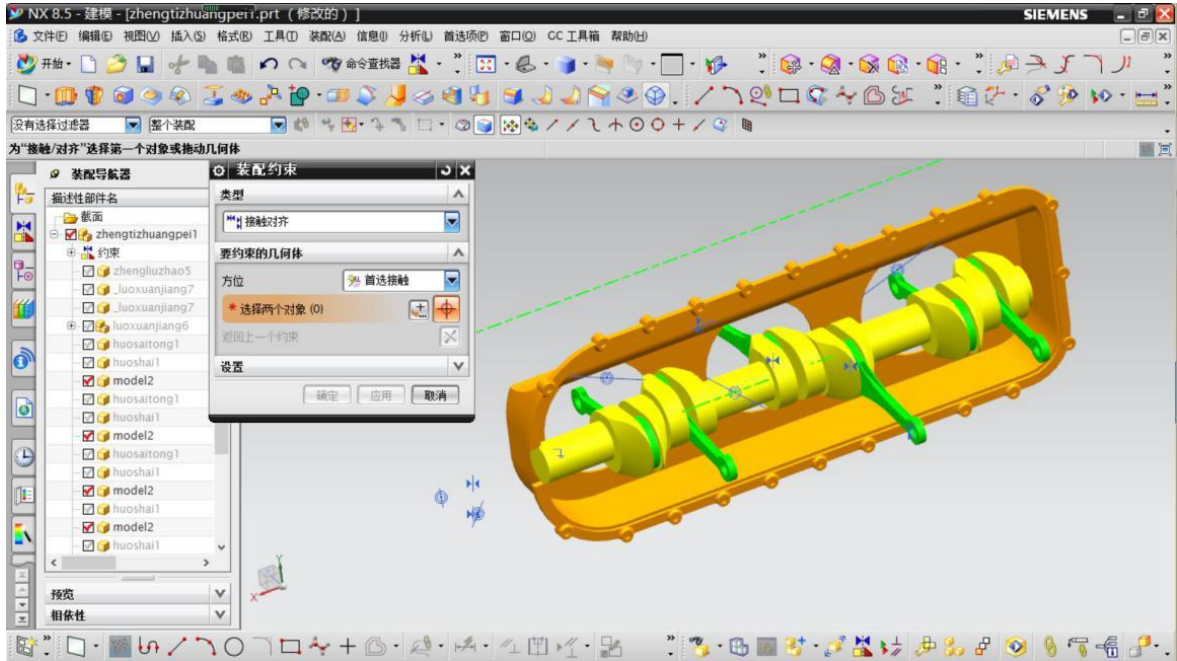


图 3-23 连杆与曲轴的装配

3.2.3 活塞的装配

装配第三步是通过装配约束命令的同心与接触对齐类型将活塞与连杆装配在一起,装配时一定要连杆位于活塞销正中心,并且活塞的理想位置是它的圆心与机匣外侧大孔的圆心同心、活塞与机匣侧面处于平行状态。如图 3-24 所示。

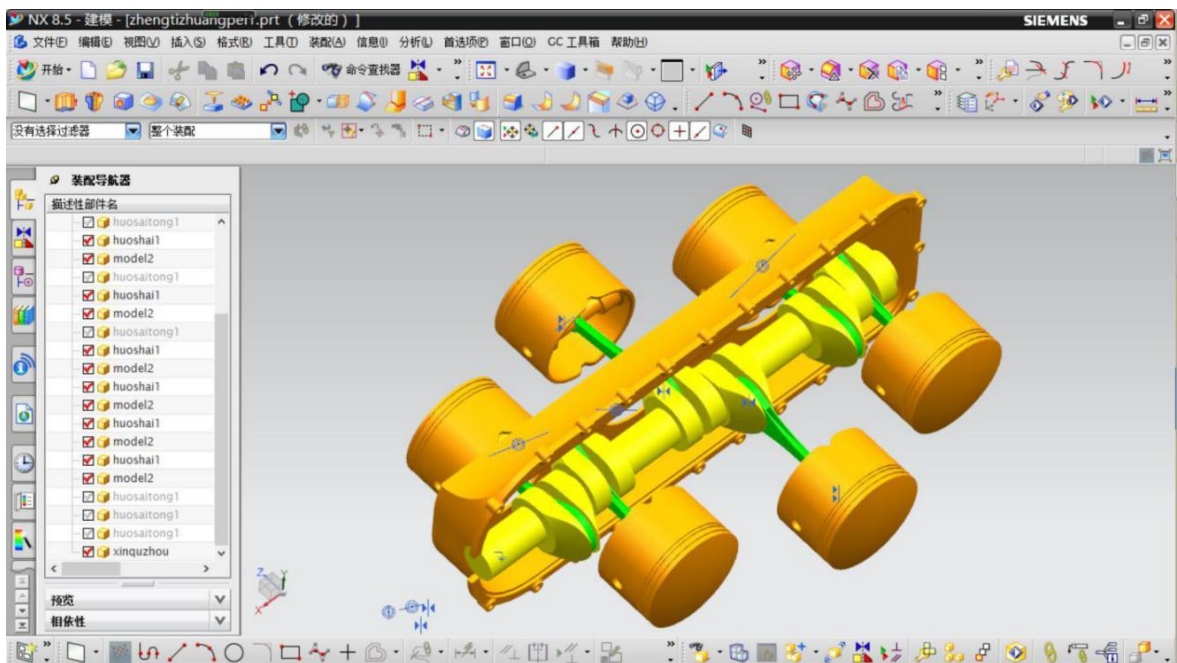


图 3-24 活塞与连杆的装配

3.2.4 活塞缸的装配

装配第四步是通过装配约束命令中的同心类型,将活塞缸的圆心与机匣侧身的大孔圆

心所同心就可恰当地装配在一起。如图 3-25 所示。

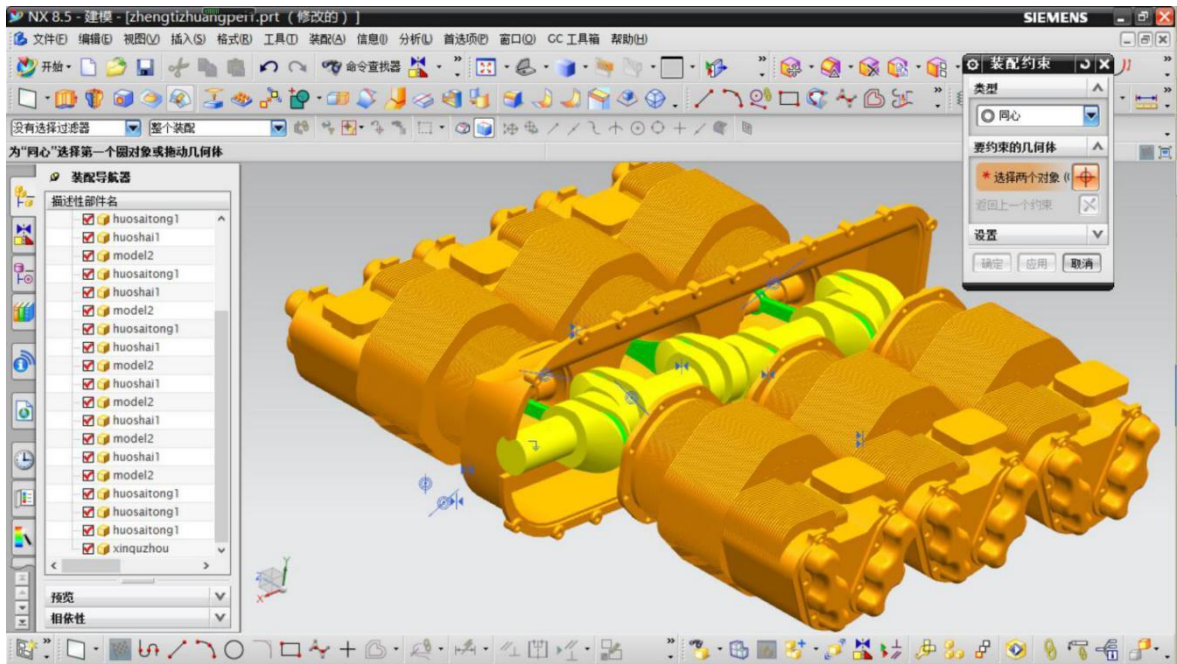


图 3-25 活塞缸的装配

3.2.5 螺旋桨和整流罩的装配

装配第五步为螺旋桨和整流罩的装配,首先需要把一个螺旋桨通过装配约束命令中的接触对齐类型装配在主轴上,其他两个螺旋桨可以通过阵列特征做到三个螺旋桨均匀分布。接着通过同心类型将整流罩装配在以主轴为中心的发动机最前端。如图 3-26 所示。

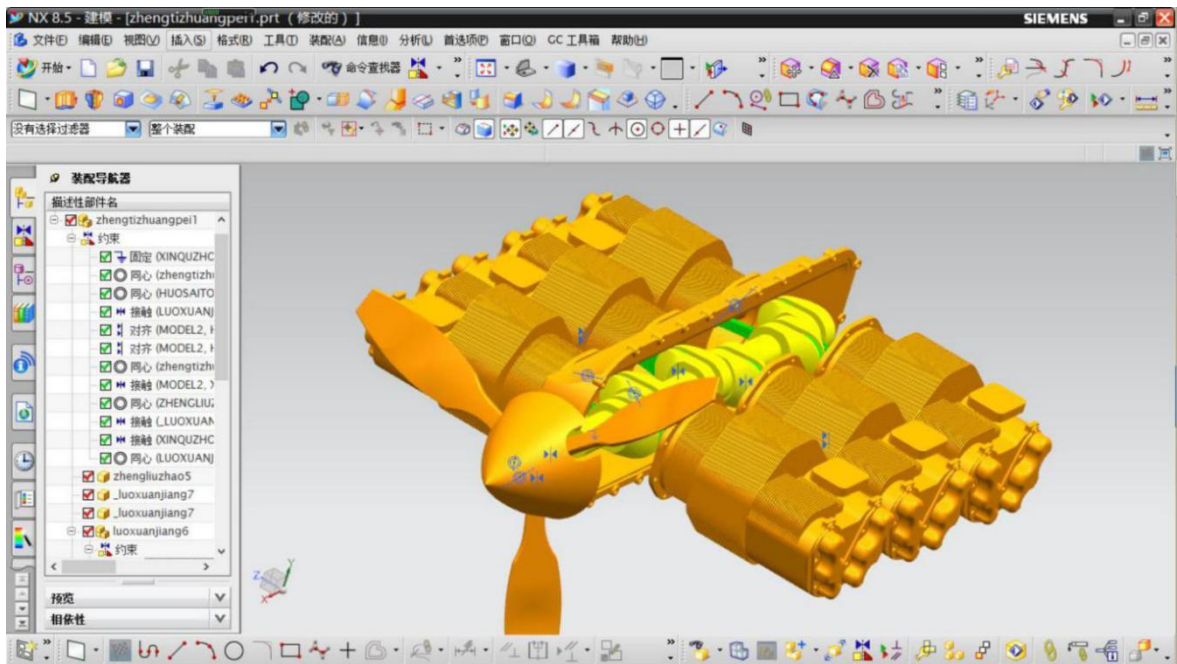


图 3-26 螺旋桨与整流罩的装配

3.2.6 紧固件的装配

在整体优化中主要是为发动机的各连接部位进行紧固件的装配,在 UG 软件中的重用库中选择合适的 GB 螺栓进行过盈装配。再将一些角度过小的部件端进行二次圆角与倒角处理。如图 3-27 所示。

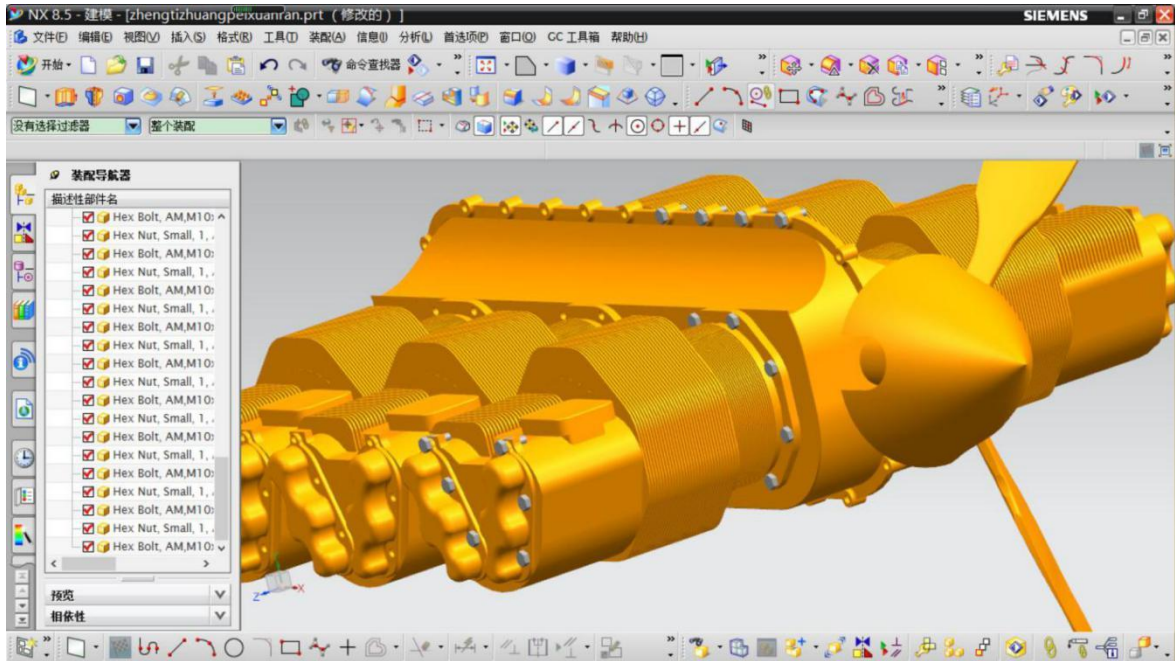


图 3-27 紧固件的装配

3.2.7 总装配

最后发动机的总体装配基本完成。如图 3-28 所示。

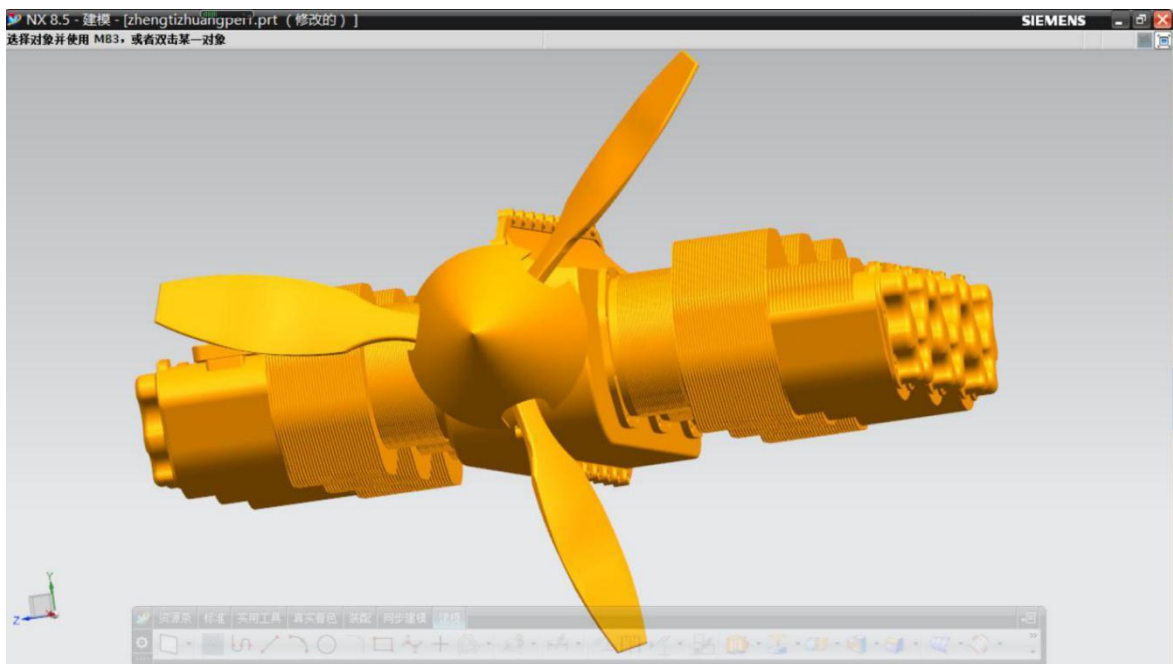


图 3-28 总装配图

紧接着将发动机总装配模型进行全剖视图界面,可以更全面的观看模型内部结构的构造,如图 3-29 所示。

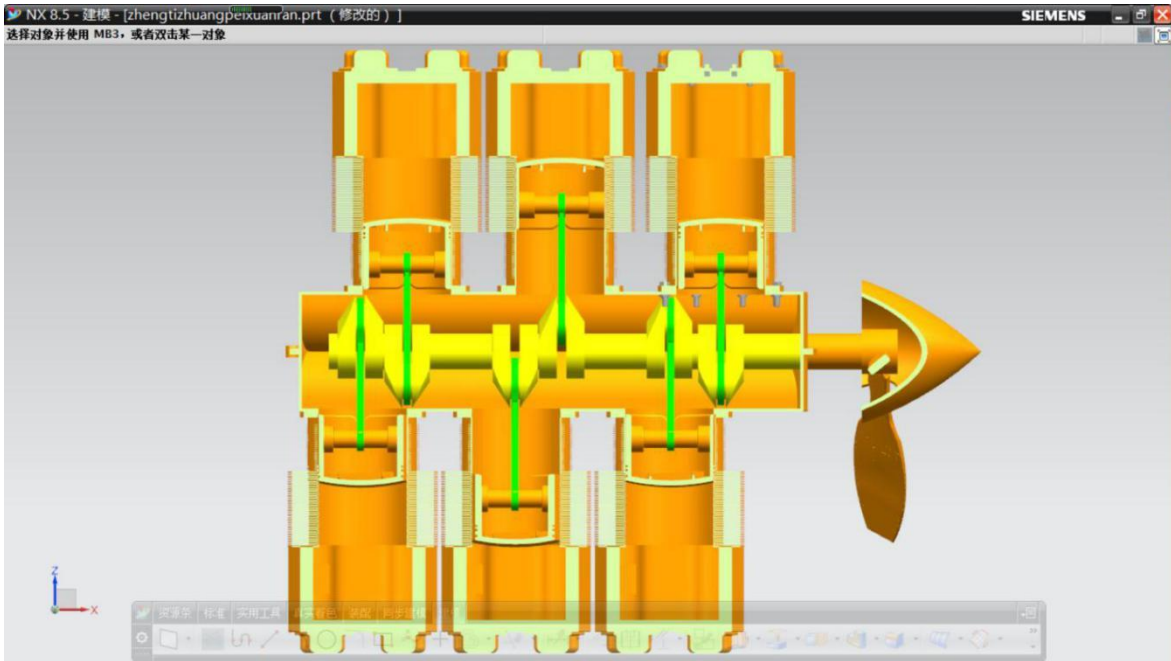


图 3-29 总剖视图

在全剖视的基础上进行爆炸图的执行,将所设计的发动机基本零部件展现出来,能够更全面的了解到发动机模型的设计具体途径。如图 3-30 所示。

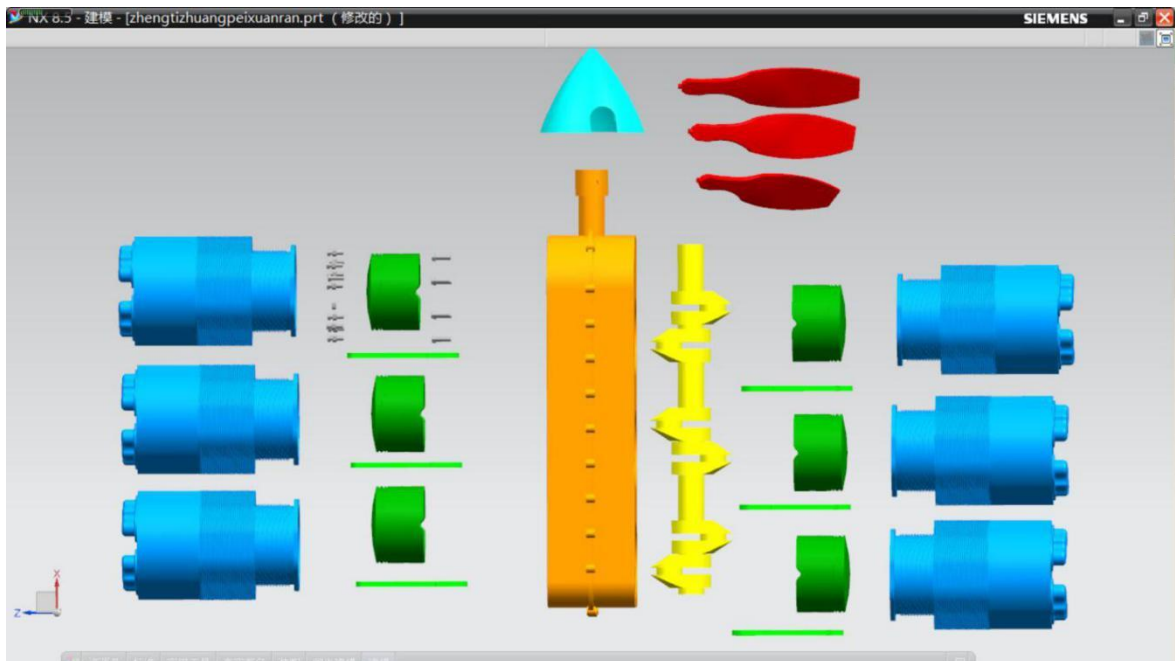


图 3-30 总爆炸图

3.2.8 SR22 航空活塞发动机的渲染

在 UG 软件中建模应用模块中的视图里的可视化选项,在可视化选项中执行真实艺术

外观任务命令。然后在系统材料中选择所需要的铝合金的金属材料与螺旋桨和整流罩所需要的白色漆色。如图 3-31 所示。

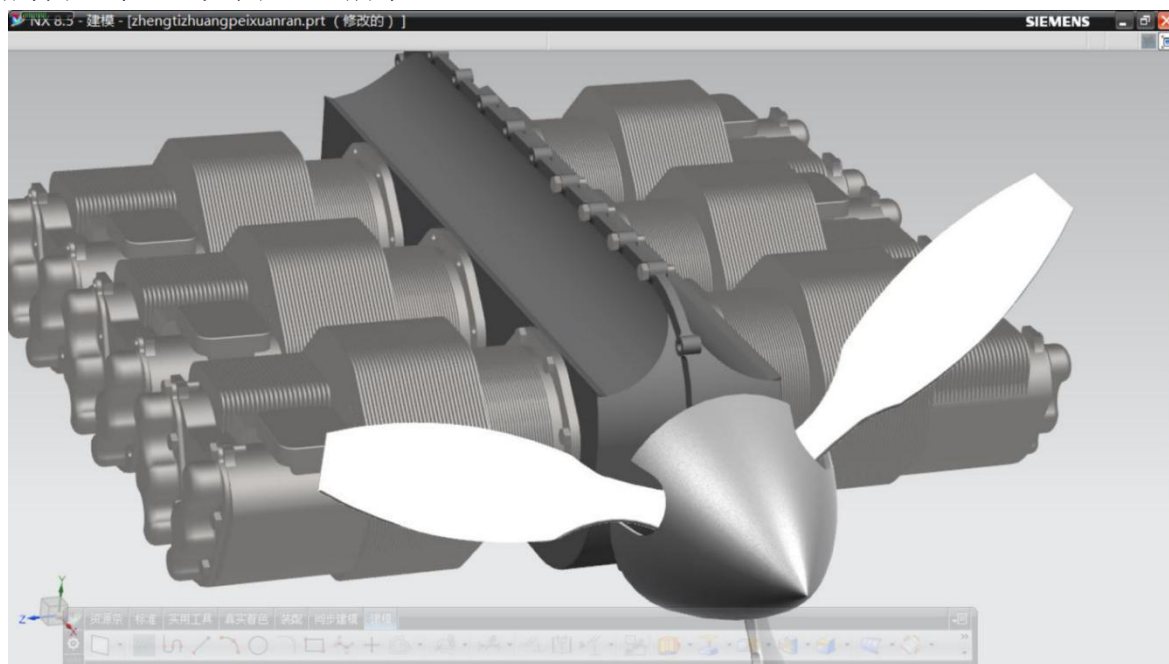


图 3-31 渲染实体

3.3 本章小结

本章通过对 SR22 航空活塞发动机的各个零部件的模型建立，将它们从零件到部件、部件再到构件的原则装配在一起，成为一个航空活塞发动机整机模型，再通过紧固件的装配以及剖视图和爆炸图的创建，并且进行了真实渲染以及最后的优化处理，使之成为了一个真正意义上的航空活塞发动机总装配模型实体。

第四章 SR22 航空活塞发动机原理仿真

4.1 航空活塞发动机运动原理仿真介绍

运动原理仿真是通过将静态三维实体模型转化成模拟仿真动画，也可以叫数值模拟，将其真实的工作原理更有效的展现出来，有力的避免了静态的单一性，特别是对于本课题目的地充分有力性。运动仿真首先就是建立一个运动仿真文件 motion，之后对构建的运动模型的每个零件设置连杆特性，连杆代表了实际中的杆件，具有相应的属性，在连杆特性的基础上对每两个连杆之间设置运动副、传动副或者添加载荷，使两个连杆接触而又保持某些相对运动的可动连接，再进行运动参数的设置，提交运动仿真模型数据，解算运动仿真，最后运动结果的数据分析与输出。

4.2 航空活塞发动机运动原理仿真过程

在建立 motion 的前提下对各个零件添加连杆对象，连杆对象分为固定连杆和可移动连杆，除机匣和活塞缸为固定连杆，没有相对运动之外，活塞连杆、曲轴、螺旋桨和活塞都是可移动连杆。之后就可在连杆的基础上设置运动副，运动副分为旋转副、滑动副、柱面副、螺旋副、球面副、平面副等。先将曲轴主轴、螺旋桨和连杆分别设置为旋转副，连杆的旋转副不光要和曲轴的连杆轴颈设置旋转副，还需要设置活塞销的旋转副，并且定义对应的啮合连杆，指定相同的原点和矢量。每一个活塞连杆都需这样，让其形成互相配合。接着设置活塞缸的滑动副，指定活塞缸的原点。所有的运动副都要有通一的指定矢量——右手定则。在让其解算之前还要设置驱动，为机构的主动件提供动力的来源，在运动副上设置驱动，并指定位置、速度或加速度与时间的函数关系。最后以运动学/动力学类型、时间 20s、步数为 200、指定垂直向下的重力方向为方案进行解算。求解之后就可播放仿真动画以检验模型实况。如图 4-1 所示。

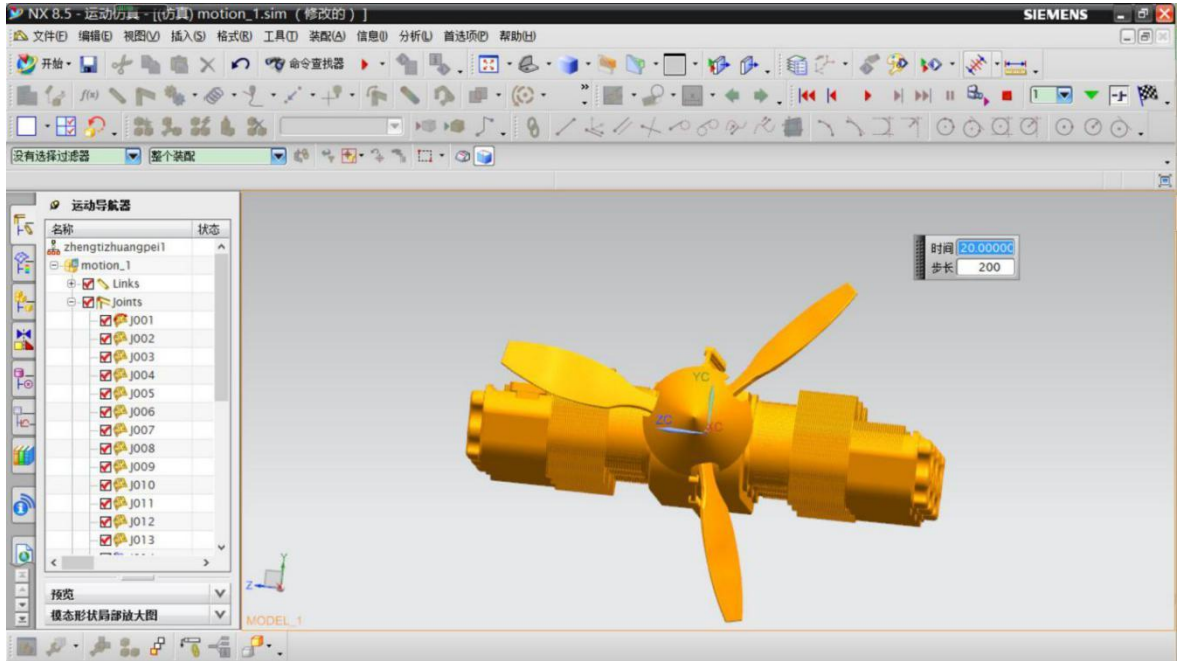


图 4-1 仿真实体图

根据求解结果，通过活塞位移和速度的相关参数进行仿真之后的数据分析。如图 4-2 和 4-3 所示。

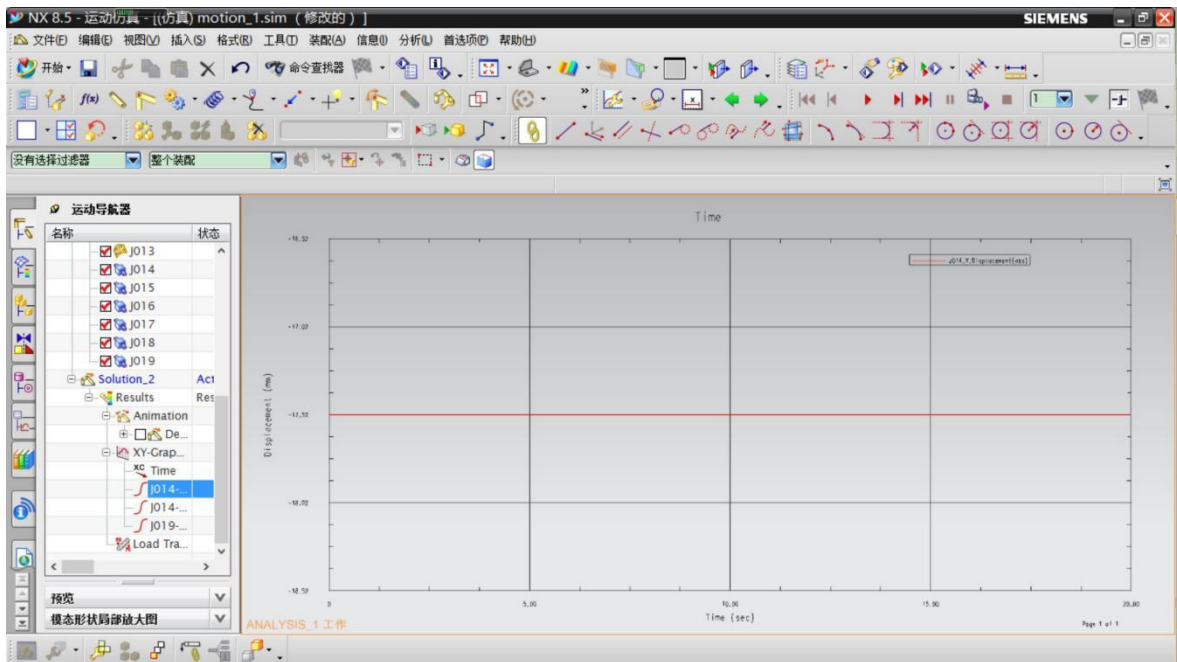


图 4-2 位移图像

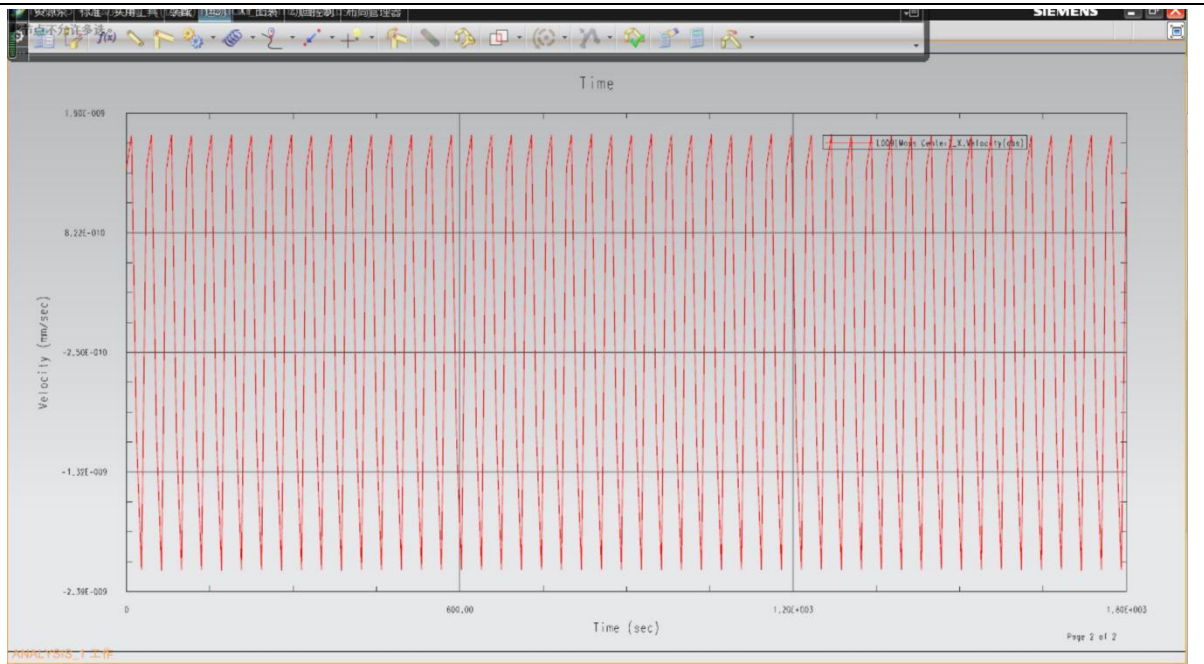


图 4-3 速度图像

4.3 本章小结

本章通过 UG 的强大功能，对发动机模型进行了运动原理仿真，使得用于教学培训的模型越来越真实，以便直接或间接应用于真实的航空活塞发动机培训中来有效提高培训效果。

结论

总结

随着科学技术的迅猛发展,虚拟仿真技术已经成为了当今世界计算机领域中发展最迅速的一项包含多种学科的综合技术,已经迅速渗透在经济、国防、工业、教育领域等多方面中。本文将虚拟仿真技术应用于传统的航空活塞发动机理论教学课程中,来解决航空活塞发动机的培训课程无法达到理想效果、学生对发动机的组成和工作原理不够明晰导致在实操过程中易出现安全风险事件、培训效率太低等问题。故让学生更清晰、容易地观看并理解航空活塞发动机的构造和工作原理、提升培养质量。本文所做的工作和取得的成果如下:

1. 利用建模仿真软件 UG,对 SR22 航空活塞发动机各零部件进行了三维模型设计和整机装配,完成了一套航空活塞发动机主要部件的三维模型;
2. 对 SR22 航空活塞发动机的主要部件进行了真实渲染,使其颜色材质更加逼近真实的实物模型;
3. 对 SR22 航空活塞发动机进行工作原理仿真,制作多媒体资源一套。

展望

SR22 航空活塞发动机模型绘制和工作原理仿真是一个工作量大,细节较多,需要不断完善的工作,由于本人能力有限,经验不足,不能做到面面俱到,故三维模型和工作原理仿真还有许多不足,希望在未来的工作中进一步完善。

1. 由于时间和经验不足,工作量较大,很多细节被忽略,没有做到最精细,例如一些小孔、缝隙和配件,特别是发动机上部的管道与线路没有进行绘制,这些细节将会影响到模型的精确度和真实感,但由于软件和电脑的影响,模型越精细,运行越困难,应寻找一种更好的优化方式。
2. 发动机上部的连接管路线路和发动机的附件部分没有进行绘制,希望后面进一步完善,完成一个完整的发动机整机模型。

参考文献

- [1] Randall W A, Rider A J. Aircraft engine simulation: US, US3031776[P].1962.
- [2] Rudnik R , Rossow C C , Geyr H F V . Numerical simulation of engine/airframe integration for high-bypass engines[J]. Aerospace Science & Technology, 2002, 6(1):31-42.
- [3] Decastro J, Litt J, Frederick D. A Modular Aero-Propulsion System Simulation of a Large Commercial Aircraft Engine[J].2008.
- [4] 董琦立,戴黎明,陶霁. 一种飞机发动机模拟教学系统及方法[P]. 四川省: CN107038309B, 2021-04-06.
- [5] 高颖,钟啸,许志国,郑涛. 基于 VR 的航空发动机虚拟教学实验系统设计[J]. 系统仿真学报, 2008(11):2925-2930.
- [6] 刘振侠,高文君,张丽芬. 航空发动机虚拟教学实验系统的建设与应用[J]. 价值工程, 2013, 32(11): 181-182.
- [7] 杨姣. 基于 Unity3D 的航空发动机虚拟现实设计与研究[D]. 西华大学, 2018.
- [8] 许志国. 航空发动机虚拟教学实验系统研究[D]. 西北工业大学, 2007.
- [9] 高光良,樊丁,戚学锋. 航空发动机机械液压控制器建模及仿真技术研究[J]. 计算机仿真, 2006(01):62-64+84.
- [10] 郑君. 通用航空活塞发动机现状及发展趋势探讨[J]. 内燃机与配件, 2020(19):196-198.
- [11] 魏武国,冯浩阳. 水平对置四缸航空活塞发动机曲轴模态分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(27): 9-11.
- [12] 卢东亮,郑君,胡崇波,卞少春. 通用航空活塞发动机的发展现状研究[J]. 内燃机与配件, 2019(08):64-66.
- [13] 卢磊,曾繁星,高平远,张磊. 基于航空领域的活塞发动机的发展和应用[J]. 山东工业技术, 2018(09):9.

致 谢

历经几个月的时间，在魏志民讲师的帮助下终于完成毕业论文的撰写。首先，十分感谢指导老师对我的悉心教导。在毕设过程中，魏老师对我的每一步过程都进行了专业性的指导，从设计思路与方向，到建模环境与路径，再到总体结构与完善都始终认真负责的提出大量指导建议，并纠正我的错误，让我在毕设之路上少走了许多弯路，并在论文修改方面也是持之以恒地进行指导。所以，没有您的耐心指导，我的毕设不会这么顺利的完成。在这个严重疫情的背景下，老师不光在毕业设计专业技能上进行认真指导，还在生活和精神上对我给予了许多鼓励。在此过程中，我除了学习了许多的专业技能，还和您学到了勇于钻研的精神与严谨的态度，十分感谢您。

由衷的感谢航空航天学院的各位领导、老师在我毕设过程中的支持与指导。

谢谢所有帮助过我的老师与同学，谢谢你们。