



南京航空航天大学攻读博士学位研究生

课题论证报告

航空发动机整机振动中的转静耦合机理分析及应用研究

学生：屈美娇

导师：陈果 教授

专业：载运工具运用工程



1

选题依据

2

课题研究方案

3

研究基础

4

研究计划进度及效果预测

课题来源

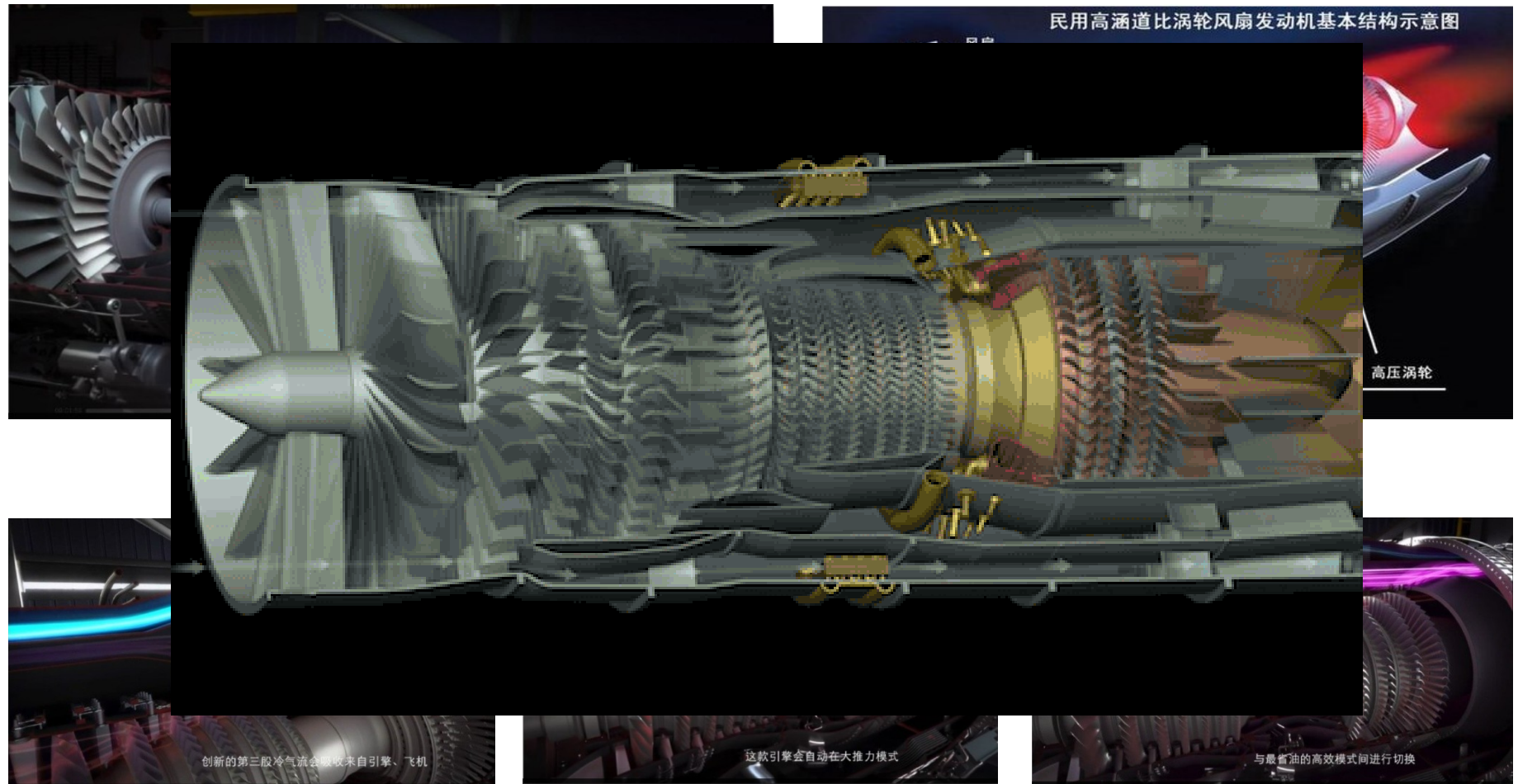
- [1] 装备预先研究项目：航空发动机不同心度控制标准的制定方法研究
- [2] 中航工业沈阳发动机设计研究所项目：整机振动故障建模、仿真与信号分析系统
- [3] 南京航空航天大学创新实验竞赛培育项目：安装条件下航空发动机转静耦合场测试技术及系统开发

三代机

四代机

发动机机型	研制国家	配套机型	最大推力/daN	推重比
AL-31F	俄罗斯	苏-27系列	12258	7.14
F110-GE-129	美国	F-16C、F-15C	12899	7.28
M53-P2	法国	幻影2000系列	9500	6.56
太行	中国	歼10、歼11	13200	7.5
F119-PW-110	美国	F/A-22	15670	10
太行改造型	中国		15500	9.5

美国第六代航空发动机-----自适应循环发动机（AVET）



薄壁机匣

- 机匣结构刚性减弱，机匣振型
- 机匣结构传递振动，转子系统边界条件复杂

弹性支承

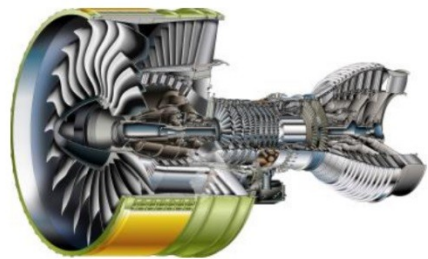
- 调节系统临界转速，出现刚体振型
- 吸收振动能量，减振，降低转子应变能

安装节

- 安装不完全刚性
- 安装节结构前后、水平垂直方向不对称



静子结构和转子结构产生不同程度的耦合振动，研究整机振动，认识弄清耦合振动机理势在必行。



影响
规律

- 定量评估转静耦合
- 分析转静耦合影响因素
- 研究影响因素对转静耦合影响规律

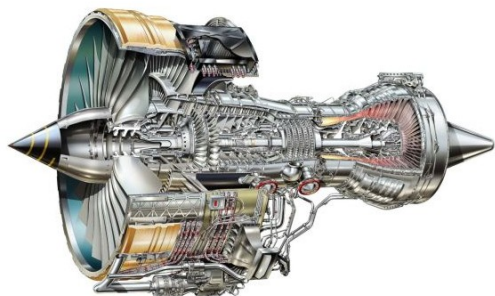
转静
耦合

转静
间隙

- 研究转静耦合对转静间隙的影响规律
- 定量评估各截面叶尖间隙
- 控制优化转静间隙

传力
路径

- 研究转静耦合对传力路径的影响规律
- 转子和故障在机匣测点上的响应灵敏度
- 为机匣测点的选择提供理论依据
- 飞机-航空发动机的振动隔离问题



航空发动机整机振动建模技术的研究现状

(1) 集总质量模型

将连续转子和机匣模型简化为集总质量模型，建立整机动力学模型。

优点：模型简单、容易求解非线性动力学问题；

缺点：模型逼真度很差、不能模拟实际航空发动机整机振动固有特性。

代表文献：

- [1] 闻邦椿, 武新华, 丁千, 韩清凯. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M]. 科学出版社, 2004
- [2] 陈果, 李成刚, 王德友. 航空发动机转子-滚动轴承-支承-机匣耦合系统的碰摩故障分析与证, 航空动力学报 [J], 2008, 23 (7):1304-1311
- [3] 陈果, 李成刚, 王德友. Nonlinear Dynamic Analysis and Experiment Verification of Rotor-Ball Bearings-Support-Stator Coupling System for Aeroengine with Rubbing Coupling Faults, Journal of Engineering for Gas Turbines and power [J], 2010, 132:022501-1—022501-9
- [4] 刘献栋, 李其汉, 王德友. 具有转静件碰摩故障双转子系统的动力学模型及其小波变换特征. 航空动力学报, 2000, 15(2): 187-190
- [5] 张振波, 马艳红, 李骏, 洪杰. 带有支承不同心转子系统的动力响应[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2321-2328
- [6] 李明. 平行不对中转子系统的非线性动力学行为. 机械强度, 2005, 27(5):580-585
- [7] 袁惠群, 闻邦椿, 王德友, 刘叔伦. 滚动轴承-转子-定子系统的碰摩故障分析. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(3):244-247

航空发动机整机振动建模技术的研究现状

(2) 传递矩阵法

利用子单元之间的传递矩阵建立动力学模型。包括：传递矩阵法、Riccati传递矩阵法。各种改进的传递矩阵法，如子结构传递矩阵法、传递矩阵-阻抗耦合法、传递矩阵-直接积分法。

优点：方法成熟、经典、应用广泛、可以计算复杂转子-支承系统的稳态不平衡响应；

缺点：模型逼真度较差、难于实现复杂整机系统建模，难于求解非线性动力学问题。

代表文献：

- [1] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册（第19分册）-转子动力学及整机振动[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [2] 苏民, 戴远建. 复杂转子整机振动计算[J]. 热能与动力工程. 1988, 3(6): 46-50.
- [3] 项松, 王克明. 用子结构传递矩阵法计算航空发动机转子—支承系统动力特性[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2005, 22(4):1-3.
- [4] 黄太平, 罗贵火. 转子动力学优化设计[J]. 航空动力学报, 1994(2):113-116.

航空发动机整机振动建模技术的研究现状

(3) 整机实体有限元方法

利用商用软件实现航空发动机结构部件的三维数模导入、自动网格划分、有限元自动建模，最终得到航空发动机整机实体有限元模型。

优点：模型逼真度很高、方法成熟、建模方便、能够计算航空发动机整机固有振动特性、稳态不平衡响应以及瞬态响应等；

缺点：计算量很大、难于求解非线性动力学问题。

代表文献：

- [1] 杨喜关, 罗贵火, 唐振寰, 等. 高维反向旋转双转子系统的建模方法及动力特性[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3):585-595.
- [2] 缪辉, 王克明, 翟学, 等. 反向旋转双转子系统动力学特性的有限元分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2011, 28(4):27-32.
- [3] 边杰, 梅庆, 臧朝平, 等. 一种无样机的航空发动机转子有限元建模方法[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2015(2):389-396.
- [4] 陈萌, 马艳红, 刘书国. 航空发动机整机有限元模型转子动力学分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(9): 1013-1016

航空发动机整机振动建模技术的研究现状

- (1) 简单的Jeffcott 转子模型常被用来研究强非线性转子动力学问题，计算效率较高，但是无法定量模拟整机振动；
- (2) 复杂的真实整机模型通常被用来研究临界转速和不平衡响应、能够定量分析实际的航空发动机整机振动，但是其计算效率很低，且难于处理非线性问题；
- (3) 航空发动机整机振动故障分析未充分提取机匣振动信号特征，并建立其与故障之间的关联性，仿真分析难于应用于振动控制和故障诊断。

航空发动机转静间隙测试及控制技术研究现状

(1) 航空发动机转静间隙测试研究

叶尖间隙的在线实时测量是全主动间隙控制技术的关键。对于叶尖间隙的测试方法主要有接触式、涡流式、阻抗式、X射线式、电容式、光学式、微波式、射流式等。

目前发展的测试技术非常多，其难点主要在于转静间隙的实时跟踪，及恶劣测试环境等。

代表文献：

- [1] Chana K S, Cardwell M T, Sullivan J S. The Development of a Hot Section Eddy Current Sensor for Turbine Tip Clearance Measurement[C]// ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013:V004T06A001-V004T06A001.
- [2] 张娜, 黄春峰. 航空发动机叶尖间隙测量技术[J]. 航空制造技术, 2010(13):41-45.
- [2] 熊宇飞. 航空发动机转子叶尖间隙测量[C]// 2003年航空实验技术学术交流会. 2003.
- [3] 胡延青, 申秀丽. 航空发动机叶尖径向间隙研究进展综述[J]. 航空发动机, 2014, 40(1):60-67.

航空发动机转静间隙测试及控制技术研究现状

(2) 转静间隙控制技术

1) 被动间隙控制，即通过冷却气流对机匣进行冷却；2) 机械式间隙控制，是利用某些复杂机械结构使机匣平移以调整叶尖间隙的技术；3) 热力式间隙控制，是通过控制机匣热膨胀控制叶尖间隙的方法；4) 全主动间隙控制技术，是采用在线测量叶尖间隙，形成一个完整的闭环控制技术。

目前的方法多是基于单个截面进行叶尖间隙的控制，从整机振动角度出发的研究较少。

代表文献：

- [1] Pinero H M, Peroulakis G N. Gas turbine engine case for clearance control: US, US 8434997 B2[P]. 2013.
- [2] Davis T M, Duguay B. Gas turbine engine rapid response clearance control :WO/2015/069328[P]. 2015.
- [3] Tillman D, Gage R, Barrett R. Gas turbine engine turbine blade tip active clearance control system and method: , EP2873813[P]. 2015.

发动机传力路线研究现状

(1) 统计能量分析法(SEA)方法

从能量观点分析和研究振动与噪声的方法。它以子系统为基础，避开了解对复杂数理方程的求解，用统计的方法研究系统各部分之间能量的传递和平衡，是解决复杂系统宽带高频动力学问题的一个有力的工具。

优点：简单易行，适用于高频、密集模态的复杂结构；

缺点：对于复杂结构难于获得SEA参数，分析所需的非保守、弱耦合条件难于满足，不能预测子系统的某个局部位置的精确响应。

代表文献：

- [1] Chen S M, Wang D F, Zan J M. Interior Noise Prediction of the Automobile Based on Hybrid FE-SEA Method[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2011, 2011(1):34-35.
- [2] 孔宪仁, 张红亮. 基于ERA的统计能量分析参数确定方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(11):1-5.
- [3] Mace B R, Shorter P J. ENERGY FLOW MODELS FROM FINITE ELEMENT ANALYSIS[J]. Journal of Sound & Vibration, 2000, 233(3):369-389.

发动机传力路线研究现状

(2) 经典传递路径分析TPA (Transfer Path Analysis)

将系统简化成“源-路径-响应点”的模型，用传递函数表示激励力和响应点之间的关系。

优点：将转子系统和静子系统分开，大大减小了计算量，提高了计算效率；

缺点：需要拆除激励源，容易造成错误的边界条件。

代表文献：

[1] Kim S J, Yang H I, Lee S K. Prediction of Interior Noise Based on Hybrid TPA[J]. Sae International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, 2009, 2(1):1440-1448..

[2] 李传兵, 徐小敏, 王新文, 等. 传递路径分析法(TPA)进行车内噪声优化的应用研究[C]// 2010年LMS中国用户大会. 2010.

[3] 韩旭, 郭永进, 管西强, 等. 动力总成引起的轿车乘员室结构噪声传递路径分析与控制[J]. 机械强度, 2009, 31(4):537-542..

飞机与航空发动机之间的隔振研究现状

目前的主要方法是将发动机振动考虑为不可变因素，通过在飞机和航空发动机之间添加不同材质和结构的阻尼系统实现隔振目的。采用不同的建模形式模拟发动机，最终设计隔振器减小航空发动机到飞机振动的传递。这些研究多是考虑航空发动机振动特性不可改变，孤立地研究隔振系统，从航空发动机本身的振动特性出发的研究较少。

代表文献：

- [1] Baklanov V S. Low-frequency vibroisolation mounting of power plants for new generation airplanes with engines of extra-high by-pass ratio[J]. Noise & Vibration Worldwide, 2008, 308(10):709–720.
- [2] Rancourt D, Whiteford G P, Lemire J. A Systematic Approach to Evaluate the Effectiveness of Engine Mount Systems. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference Norfolk, Virginia, 2003.
- [3] 陈永辉, 王会利, 苏尔敦, 等. 涡桨发动机橡胶隔振器设计方法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(20):5889-5893.

以上研究存在的问题：

1

缺乏对航空发动机整机振动所表现出的
耦合振动机理的认识

航空发动机整机振动的转静耦合关系对整机临界转速、航空发动机通过安装节传递到飞机上的振动、转静间隙以及从转子到机匣测点的传递路径具有重要影响，认识弄清转子与静子机匣的耦合关系，对于调整和优化整机临界转速、隔离航空发动机的振动、控制叶尖-机匣转静间隙、研究转子故障在机匣测点的灵敏度、转子系统故障诊断和机匣测点布置等均具有重要意义。

4

孤立地研究隔振系统，从航空发动机本身的振动特性出发的研究较少



1

选题依据

2

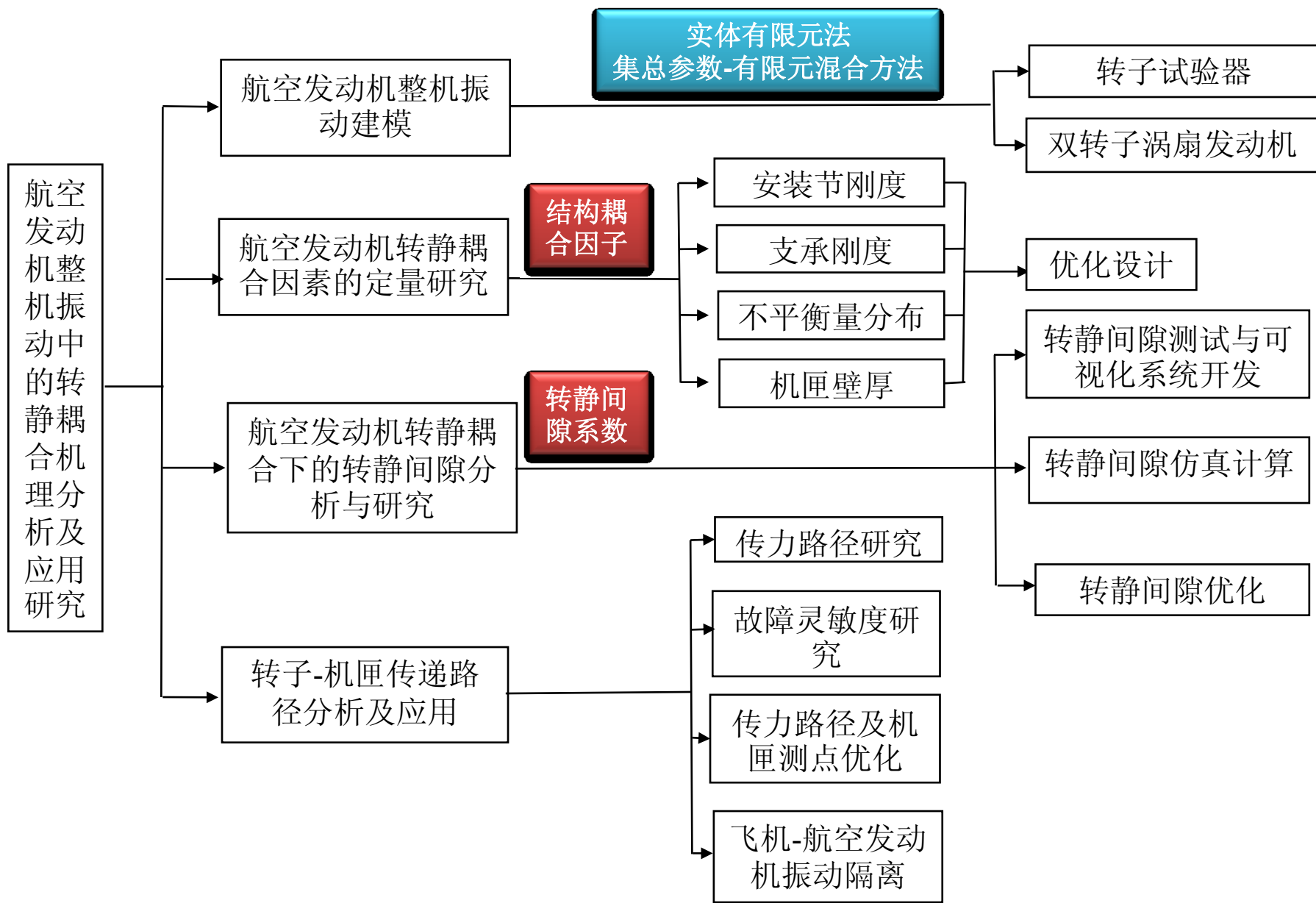
课题研究方案

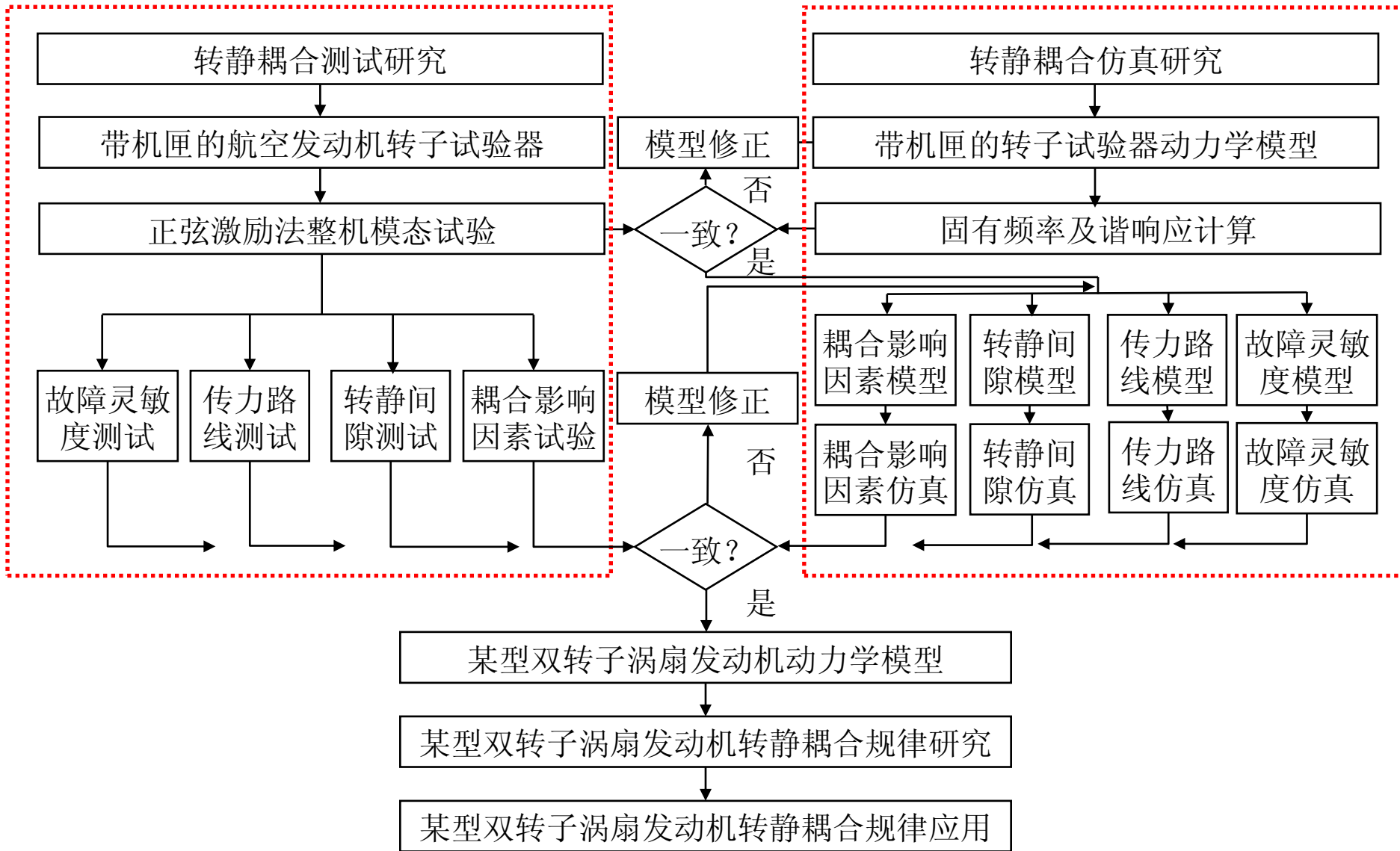
3

研究基础

4

研究计划进度及效果预测





1. 航空发动机整机振动建模：研究内容

研究对象

1) 带机匣的航空发动机转子试验器

采用仿真和试验结合的方式，探究及验证研究方法，保证研究方法的可靠性。

2) 某型双转子涡扇发动机

进行规律探究，为真实发动机的设计和试验技术提供一定的参考。

建模方法

1) **实体有限元方法**：进行动力特性仿真计算，仿真线性特性规律。

2) **集总质量-有限元混合建模方法**：进行非线性故障分析。

1. 航空发动机整机振动建模：实施方案

实体有限元建模

基于UG的三
维实体建模

可以对复杂结构建立精细模型，使得结构高度相似。

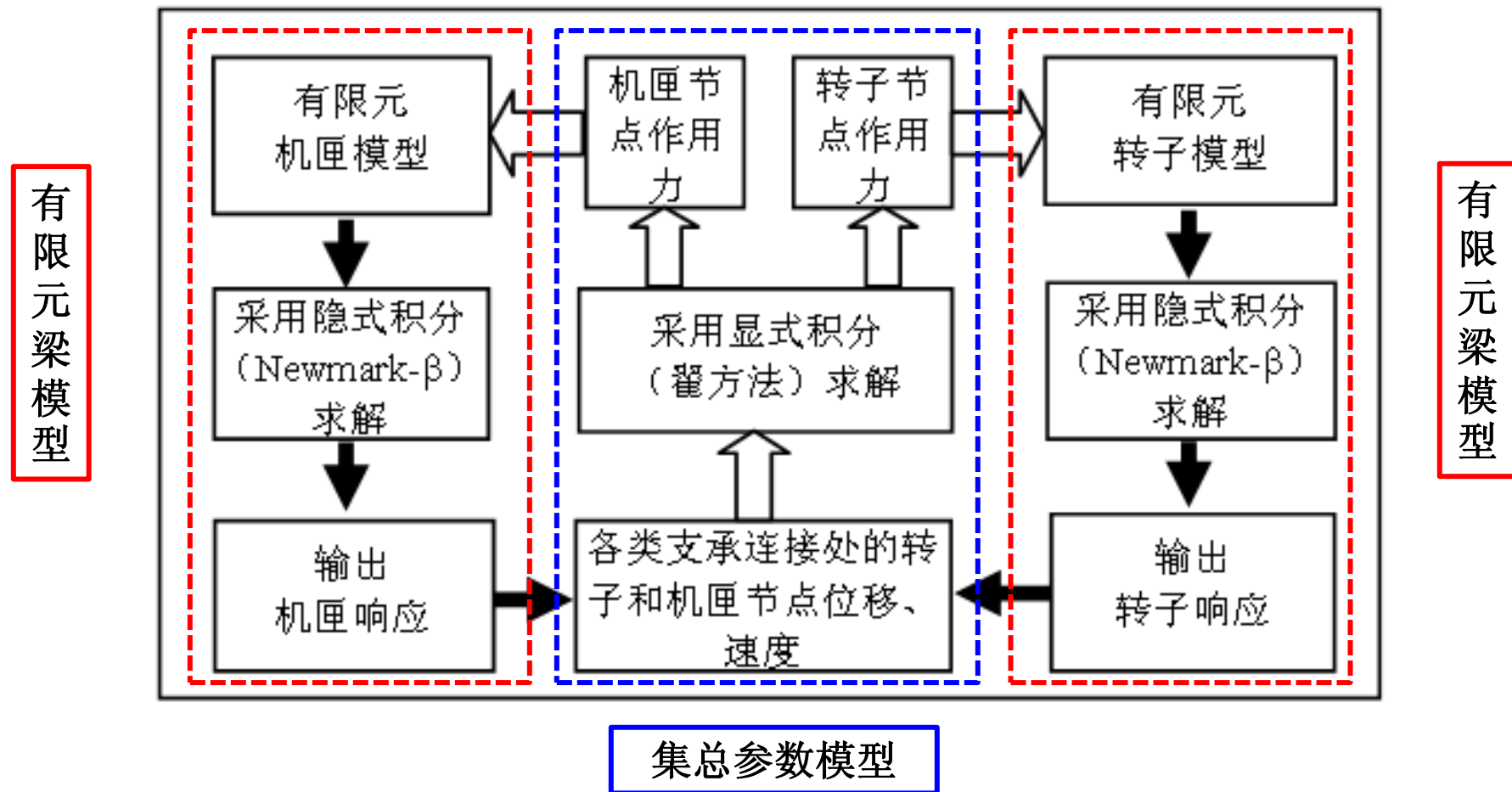
基于
HYPERMES
H的网格划分

可以手动划分网格，精确控制网格规模、网格疏密、网格质量。

基于ANSYS
的有限元分析

对于线性动力学系统具有较高的求解精度。

集总参数-有限元混合模型建模及求解



2. 航空发动机转静耦合因素的定量研究：研究内容

1) 定义转静耦合因子

实现转静耦合程度的定量评估。

2) 研究转静耦合因子影响因素及影响规律

研究航空发动机转静耦合振动规律，并为实际航空发动机转静耦合分析提供思路、方法和步骤。

影响
因素

- 1) 安装节刚度；
- 2) 支承刚度；
- 3) 不平衡量分布；
- 4) 机匣壁厚

2. 航空发动机转静耦合因素的定量研究：实施方案

定义第 i 阶模态振型中的转静耦合因子 C_i 为：

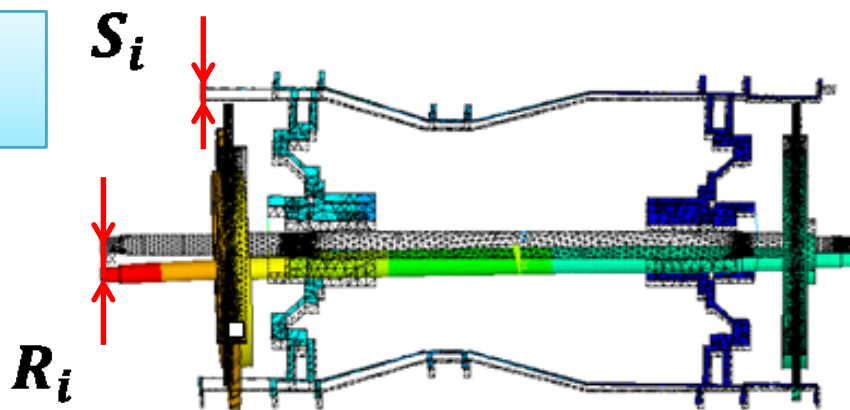
$$C_i = \pm \frac{|S_i|_{\max}}{|R_i|_{\max}}$$

转静耦合因子

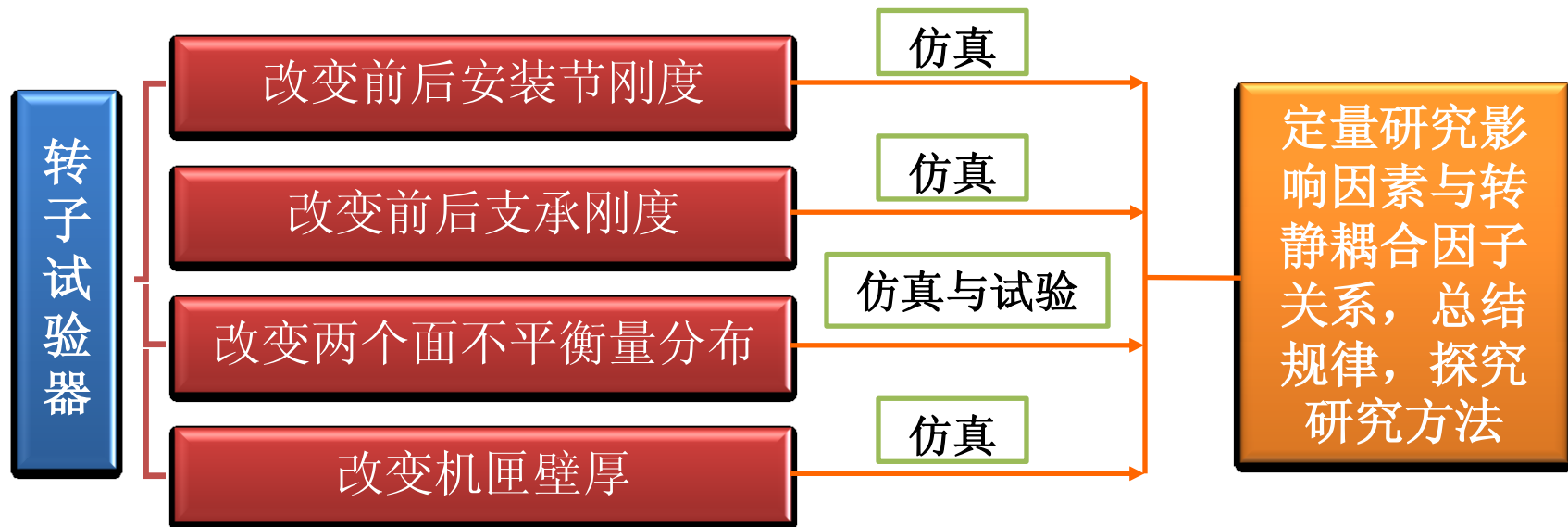
其中，转子静子同相振动为正，反相为负，转静耦合因子为1时，转静耦合程度最大。

静子各截面处的模态振型分量绝对值中的最大值

转子各截面处的模态振型分量绝对值中的最大值



影响因素分析



某型双转子涡扇发动机



基于转静耦合因子, 实现结构优化

3. 航空发动机转静耦合下的转静间隙分析与研究：研究内容

1) 定义转静间隙系数

定量评估各个截面处的转静间隙，同时判断转静子结构是否发生碰摩及碰摩程度。

2) 转静间隙的测量技术研究及可视化系统开发

基于电涡流传感器，实现截面转静间隙的测试，同时基于OPENGL实现转静间隙测试的可视化系统开发。

3) 转静间隙优化及控制

通过调整转静耦合关系，改善转子机匣变形不协调，优化转静间隙，为判断转静碰摩的发生位置提供理论依据，为避免碰摩故障提供解决方案。

3. 航空发动机转静耦合下的转静间隙分析与研究：实施方案

定义转静间隙系数 T_a ，即为截面 a 处，静子结构和转子叶片模态振型分量绝对值之比，其中，同相振动为正，反相振动为负：

$$T_a = \pm \frac{|S_a|}{|R_a|}$$

转静间隙系数

转静间隙等于1，则不发生碰摩；转静间隙系数远离1越多，则该截面发生转静碰摩的危险性越大。

3. 航空发动机转静耦合下的转静间隙分析与研究：实施方案

定义转静间隙系数 T_a ，即为截面 a 处，静子结构和转子叶片模态振型分量绝对值之比，其中，同相振动为正，反相振动为负：

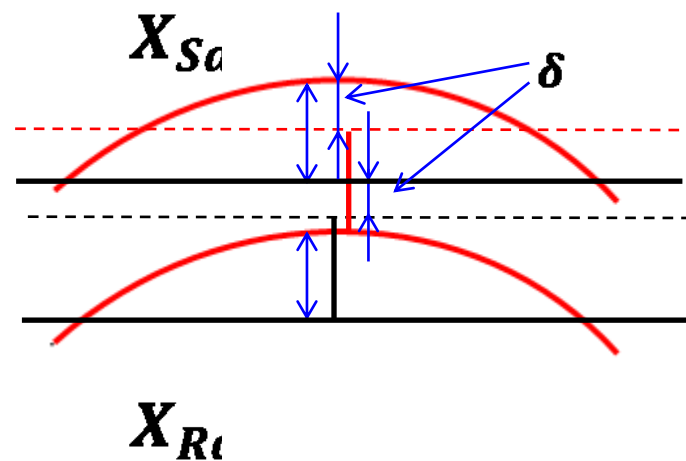
$$T_a = \pm \frac{|S_a|}{|R_a|}$$

转静间隙系数

碰摩临界条件

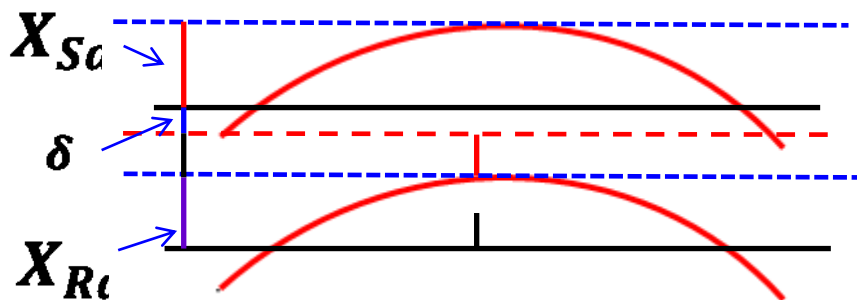
同相振动： $X_{Ra} + \delta = X_{Sa}$

反相振动： $X_{Ra} - \delta = X_{Sa}$



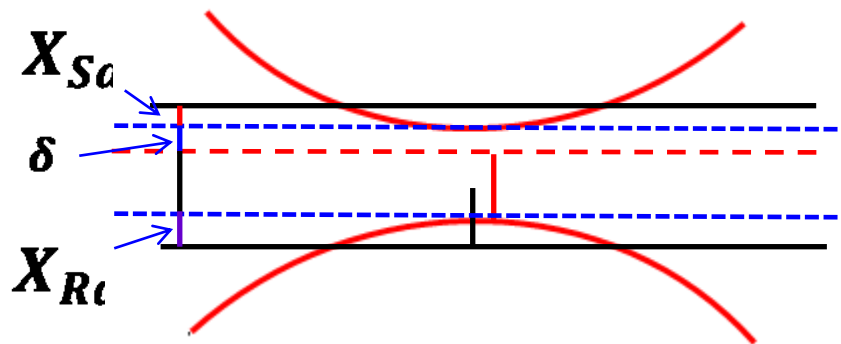
3. 航空发动机转静耦合下的转静间隙分析与研究：实施方案

同相振动

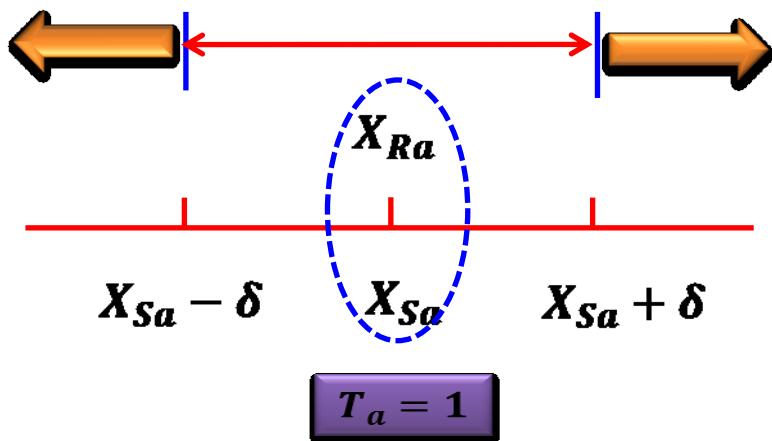


同相振动: $X_{Ra} + \delta = X_{Sa}$

反相振动



反相振动: $X_{Ra} + \delta = -X_{Sa}$



转静间隙等于1，则不发生碰摩；转静间隙系数远离1越多，则该截面发生转静碰摩的危险性越大。

3. 航空发动机转静耦合下的转静间隙分析与研究：实施方案

定义转静间隙系数 T_a ，即为截面 a 处，静子结构和转子叶片模态振型分量绝对值之比，其中，同相振动为正，反相振动为负：

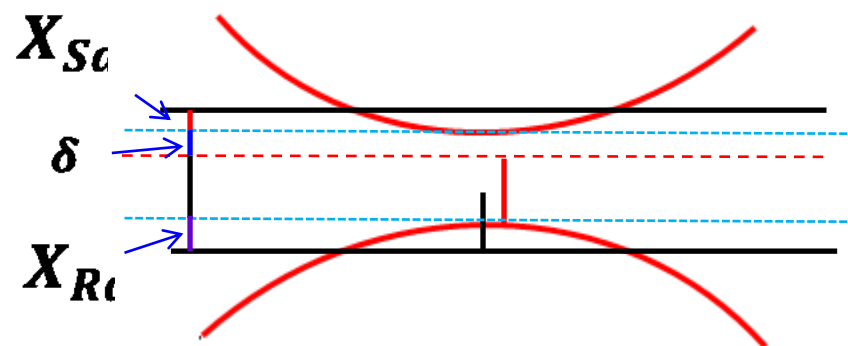
$$T_a = \pm \frac{|S_a|}{|R_a|}$$

转静间隙系数

碰摩临界条件

同相振动： $X_{Ra} + \delta = X_{Sa}$

反相振动： $X_{Ra} - \delta = X_{Sa}$



3. 航空发动机转静耦合下的转静间隙分析与研究：实施方案

定义转静间隙系数 T_a ，即为截面 a 处，静子结构和转子叶片模态振型分量绝对值之比，其中，同相振动为正，反相振动为负：

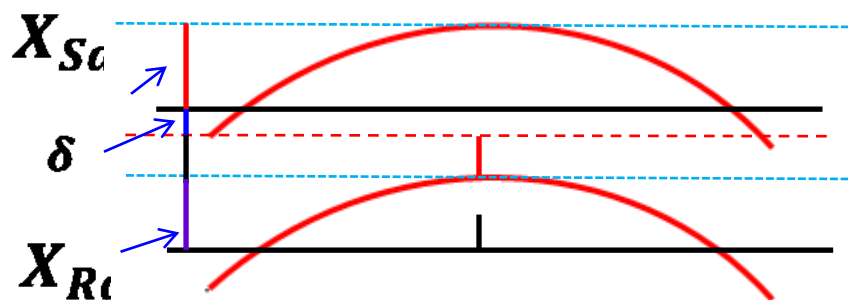
$$T_a = \pm \frac{|S_a|}{|R_a|}$$

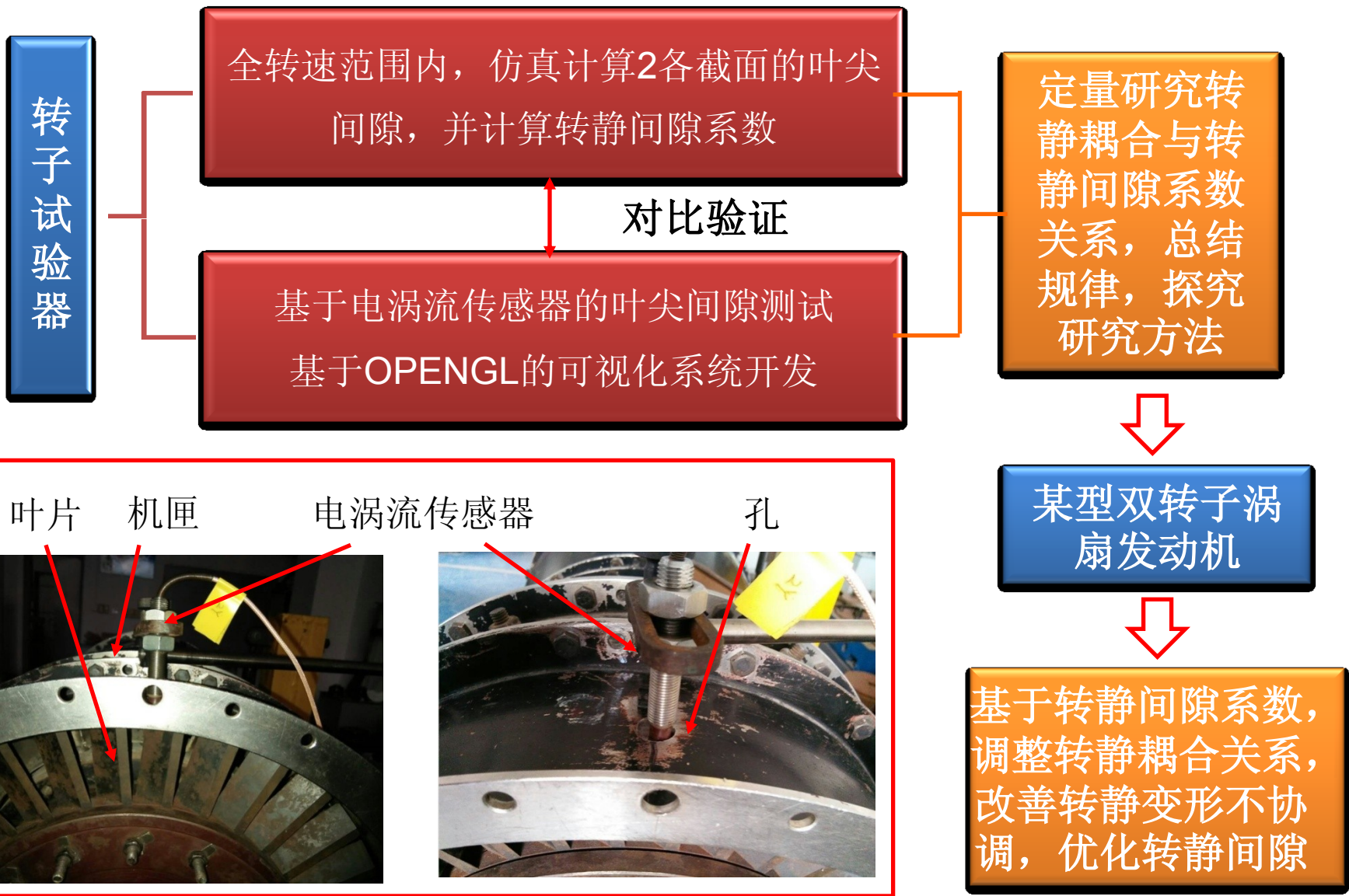
转静间隙系数

碰摩临界条件

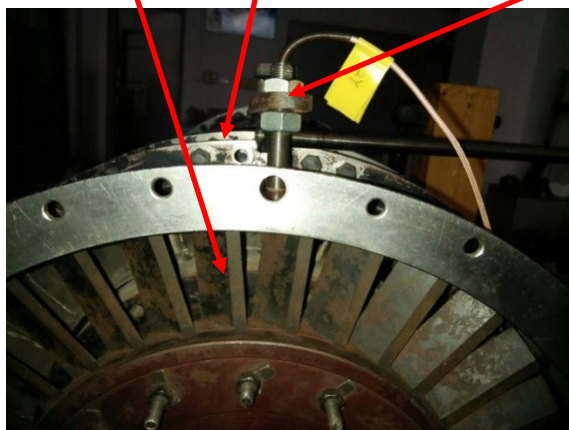
同相振动： $X_{Ra} + \delta = X_{Sa}$

反相振动： $X_{Ra} - \delta = X_{Sa}$





叶片 机匣 电涡流传感器 孔



4. 转子-机匣传递路径分析方法研究及其应用：研究内容

1) 探究转子-机匣传递路径分析方法

通过响应分析，研究一种直观分析转子-机匣传力路径的方法。

2) 机匣测点对故障的灵敏度分析

基于转静耦合关系，定量分析各种故障信息在传递过程中的损失，为机匣测点传感器的布置、信号处理和特征提取方法，以及故障的可诊断性提供依据。

3) 飞机-航空发动机振动隔离研究

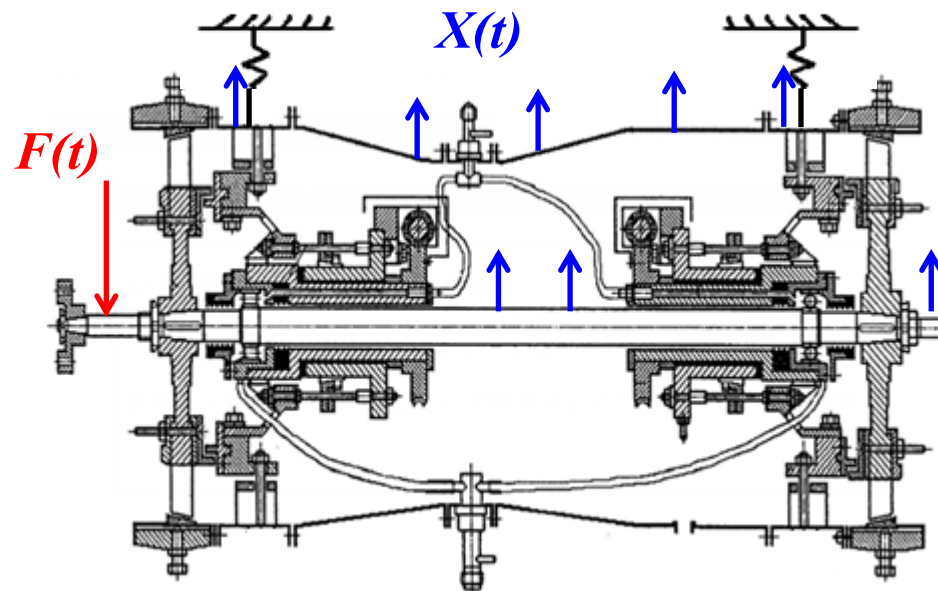
应用机匣测点对转子信号的灵敏度研究方法，从发动机振动角度，通过调节转静耦合关系，降低安装节位置振动，实现从振源上实现飞机-航空发动机的振动隔离。

4. 转子-机匣传递路径分析方法研究及其应用：实施方案

1) 探究转子-机匣传递路径分析方法

在转子给定点施加一个冲击力，通过数值仿真研究，得到机匣测点的瞬态冲击响应，研究机匣测点对转子激励点不同频率成分的衰减程度。

对各位置响应进行归一化处理，从而分析激励的传递路径。



4. 转子-机匣传递路径分析方法研究及其应用：实施方案

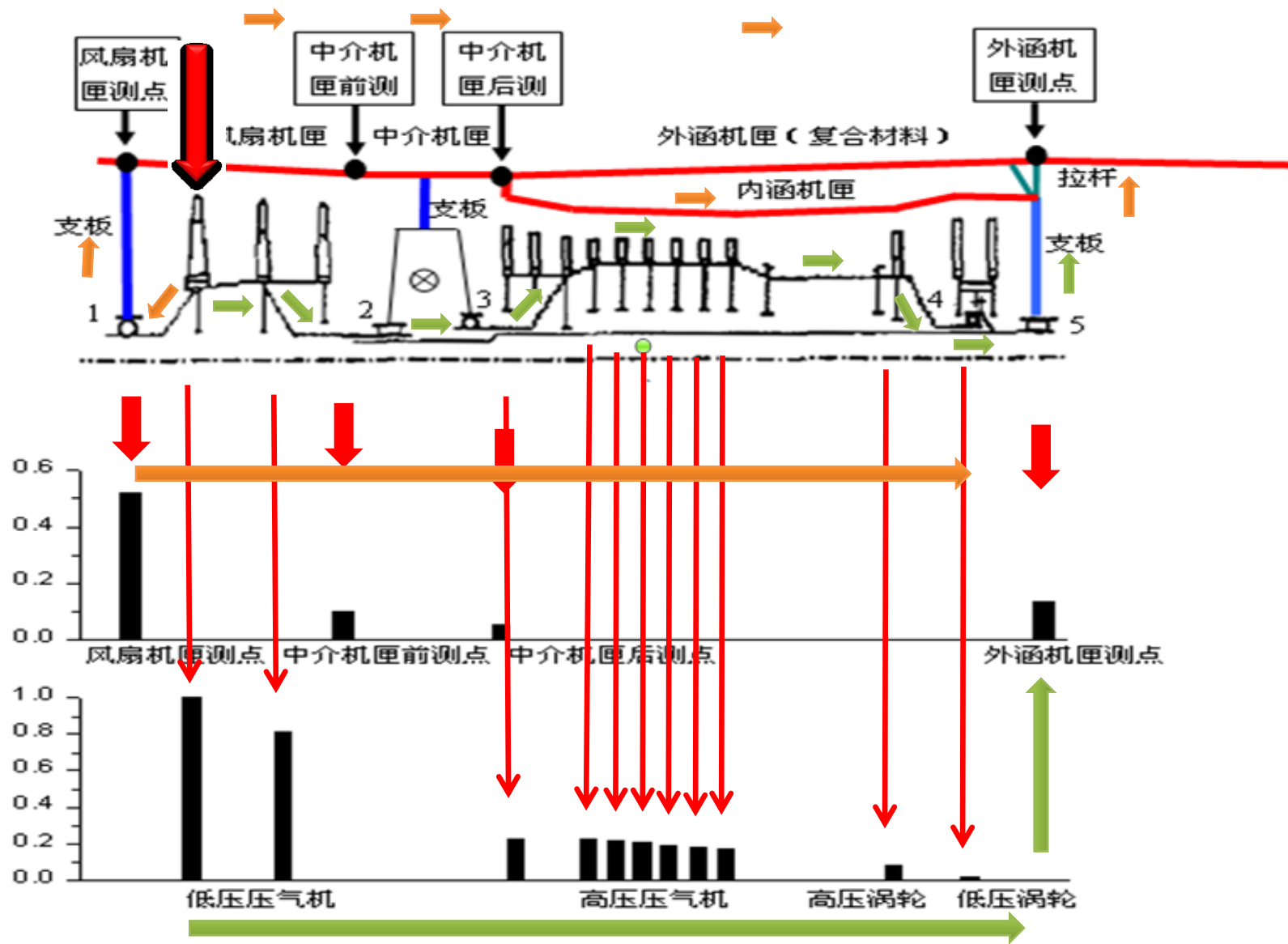
2) 机匣测点对故障的灵敏度分析

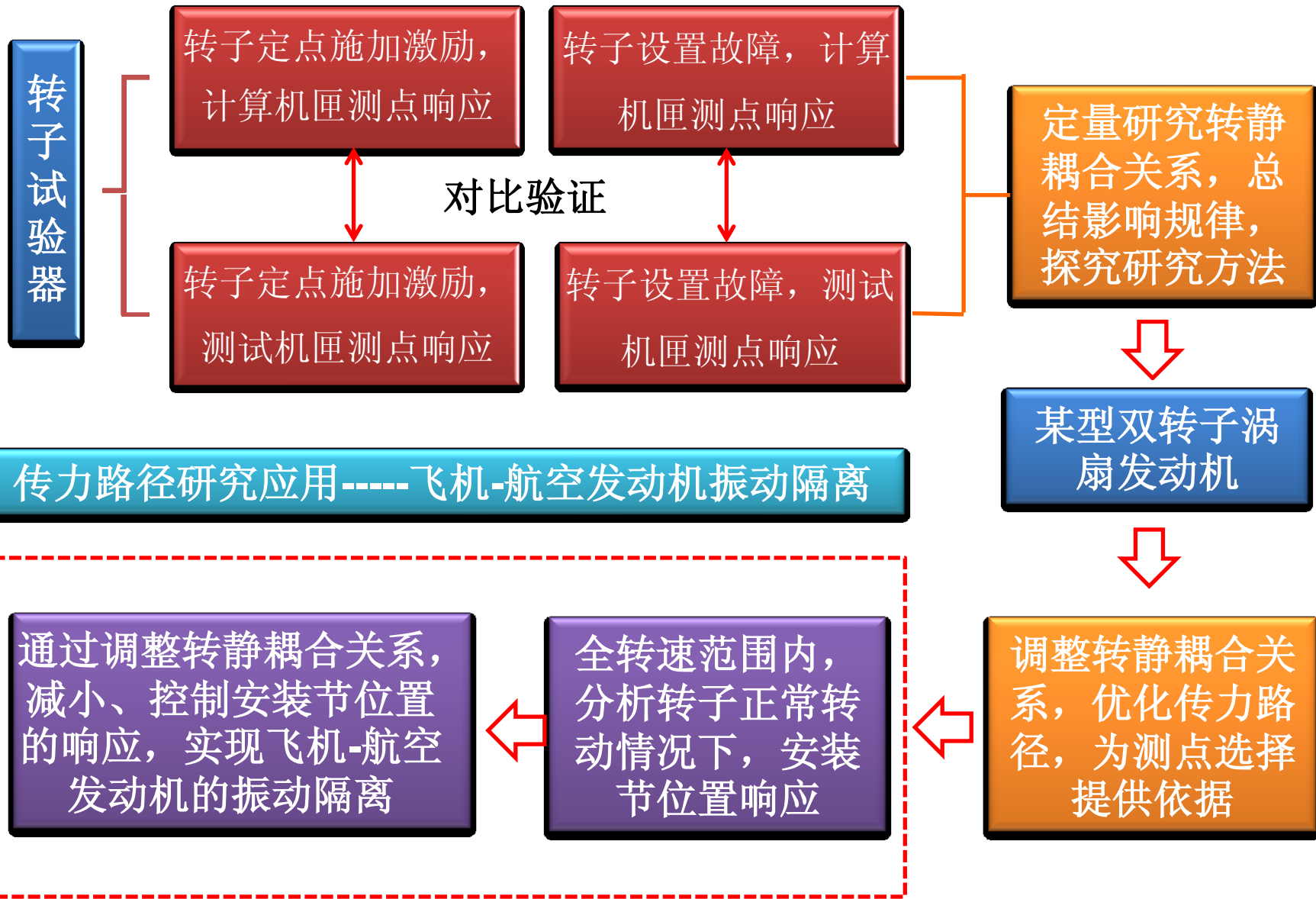
基于航空发动机整机振动模型，将典型的故障模型，如转子质量偏心、转子截面不同心、转子不同轴、滚动轴承故障等典型故障施加于整机振动模型中，通过仿真计算得到机匣响应，并将转子响应与机匣响应进行比较，得到不同频率下的振动衰减程度，为各类故障诊断的测点选择提供依据。

故障
类型

- 1) 不平衡量分布；
- 2) 碰摩故障；
- 3) 不对中故障；
- 4) 转子不同心故障；
- 5) 轴承故障

第1级风扇叶片不平衡量







1

选题依据

2

课题研究方案

3

研究基础

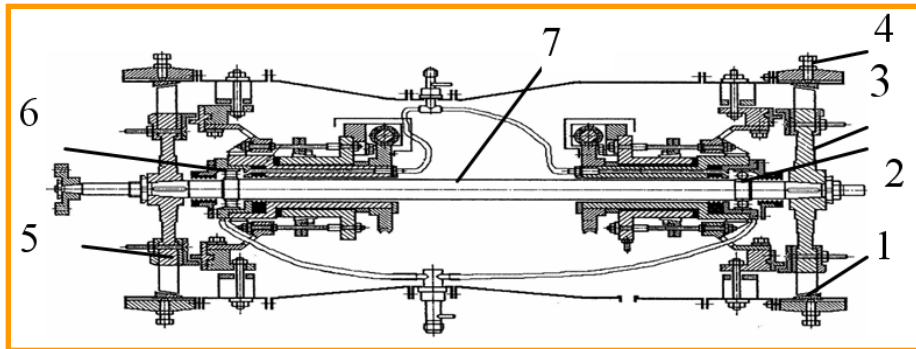
4

研究计划进度及效果预测

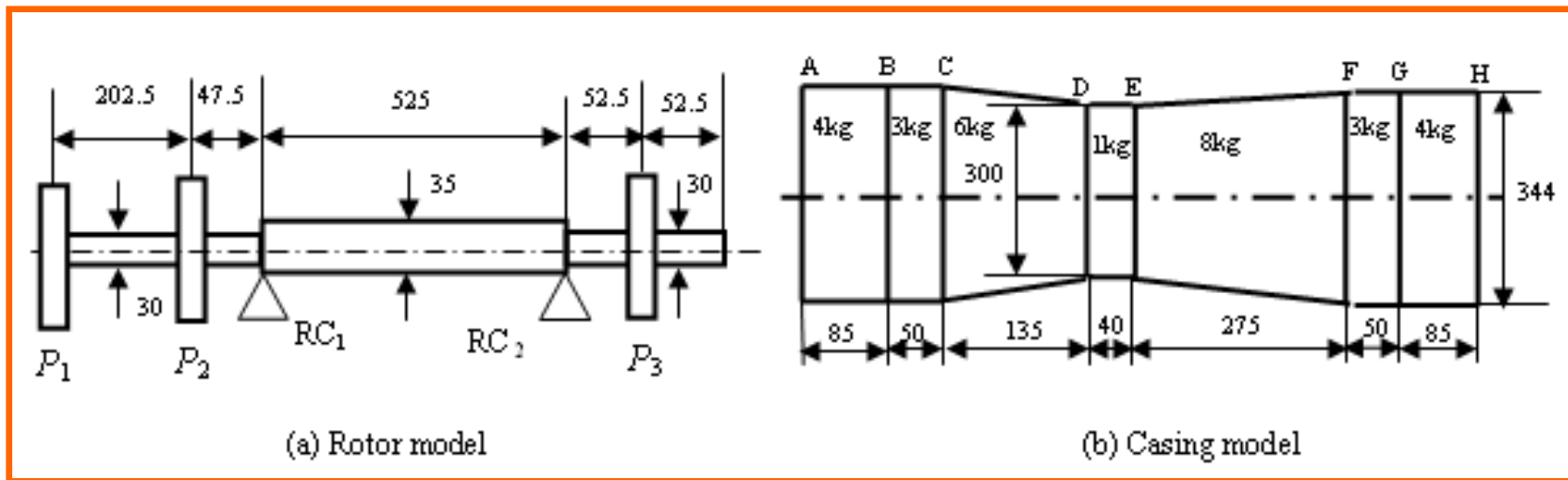
试验条件：1) 带机匣的航空发动机转子试验器



航空发动机转子试验器实物图



航空发动机转子试验器剖面图



航空发动机转子试验器仿真模型图

试验条件：2) 测验设备



HEV-500激振器



JM-04冲击力锤



NI USB-9234采集卡



SZGB-11型光电转速传感器



F001B压电式力阻抗传感器



B&K加速度传感器



CWY-DO-502 电涡流位移传感器



TXY-II型同心度测量仪

试验条件：3) 航空发动机整机振动测试分析软件EVDYNA (部分界面)

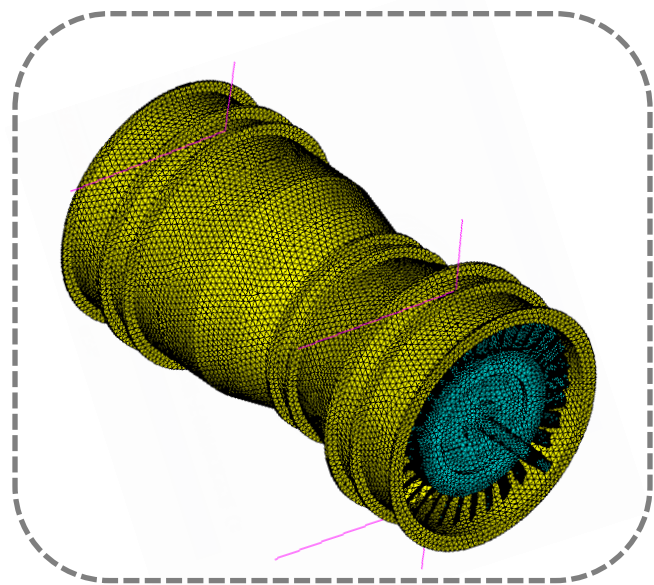
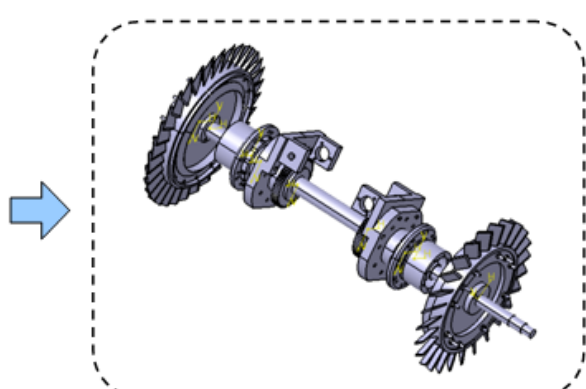
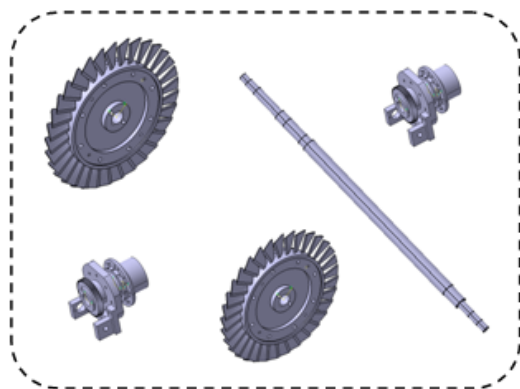
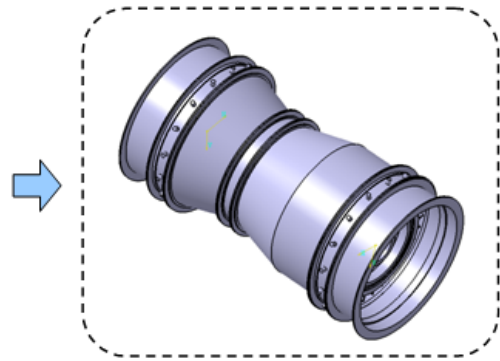
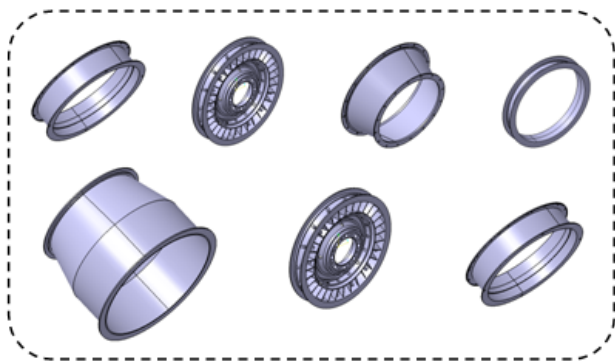
The screenshot displays the EVDYNA software interface with several overlapping windows:

- 转子参数设置 (Rotor Parameter Settings):** A dialog box for configuring rotor parameters.

弹性模量:	207000000
外径:	0 m
长度:	0 m
比例阻尼 a:	5
节点 i 坐标:	0
- 主界面 (Main Interface):** Features a menu bar (工程, 动力学分析, 图形显示, 动画显示, 结束仿真, 动力学参数设置, 外部激励, 故障设置, 系统设置, 数据读入, 查看, 帮助, 退出) and a toolbar with icons for opening projects, modal analysis, response analysis, speed tracking, simulation, graphics, animation, stopping simulation, dynamic parameters, external excitation, fault building, closing project, and software help.
- X向位移时间波形 (X-direction displacement time waveform):** A plot showing displacement in micrometers (um) over time in seconds (s). The y-axis ranges from -40 to 40 um, and the x-axis ranges from 0 to 0.17 s. The plot shows a complex, oscillatory waveform.
- 整机振型 (Whole engine vibration mode):** A plot showing displacement in micrometers (um) versus axial length in meters (m). The y-axis ranges from -300 to 300 um, and the x-axis ranges from -1 to 3.5 m. The plot shows multiple modes of vibration along the engine's length.
- 右侧控制面板 (Right-side control panel):** Contains simulation parameters:
 - 转速 (r/min): 转速1: 3552, 转速2: 11287
 - 积分步长: 1.5e-005 s
 - 计算时间: 稳定计算时间/s: 0.2, 计算时间/s: 1, 显示时间/s: 0.4
 - 显示波形选取: 位移, 速度, 加速度
 - 方向: X, Y, 绕X, 绕Y
 - 显示波形选取: 结构: 转子, 部件: 低压转子2, 部位: 1: 支承2
 - 振动大小: 最大值: 45.57 um, 最小值: -48.84 um, 幅值谱: 47.2 um
- 底部表格 (Bottom table):** A table listing unit numbers and their corresponding elastic modulus values.

单元编号	弹性模量
1	1.0900e+0
2	1.0900e+0
3	2.0300e+0
4	2.0300e+0
5	2.0300e+0
6	2.0300e+0
7	2.0300e+0
8	2.0300e+0
9	2.0300e+0
10	2.0300e+0
11	2.0300e+0
12	2.0300e+0
13	2.0300e+0
14	2.0300e+0

已完成工作：1) 转子试验器三维实体有限元建模



已完成工作：2) 屈美娇，陈果，冯国全. 《安装节刚度对发动机整机耦合振动的影响分析》，《航空动力学报》。（已录用）

主要研究内容

对带机匣的航空发动机转子试验器进行了整机模态试验

利用试验器的模态试验结果对有限元模型进行了修正和验证

定义了转静耦合因子

研究了安装节刚度对试验器转子静子耦合程度的影响



1

选题依据

2

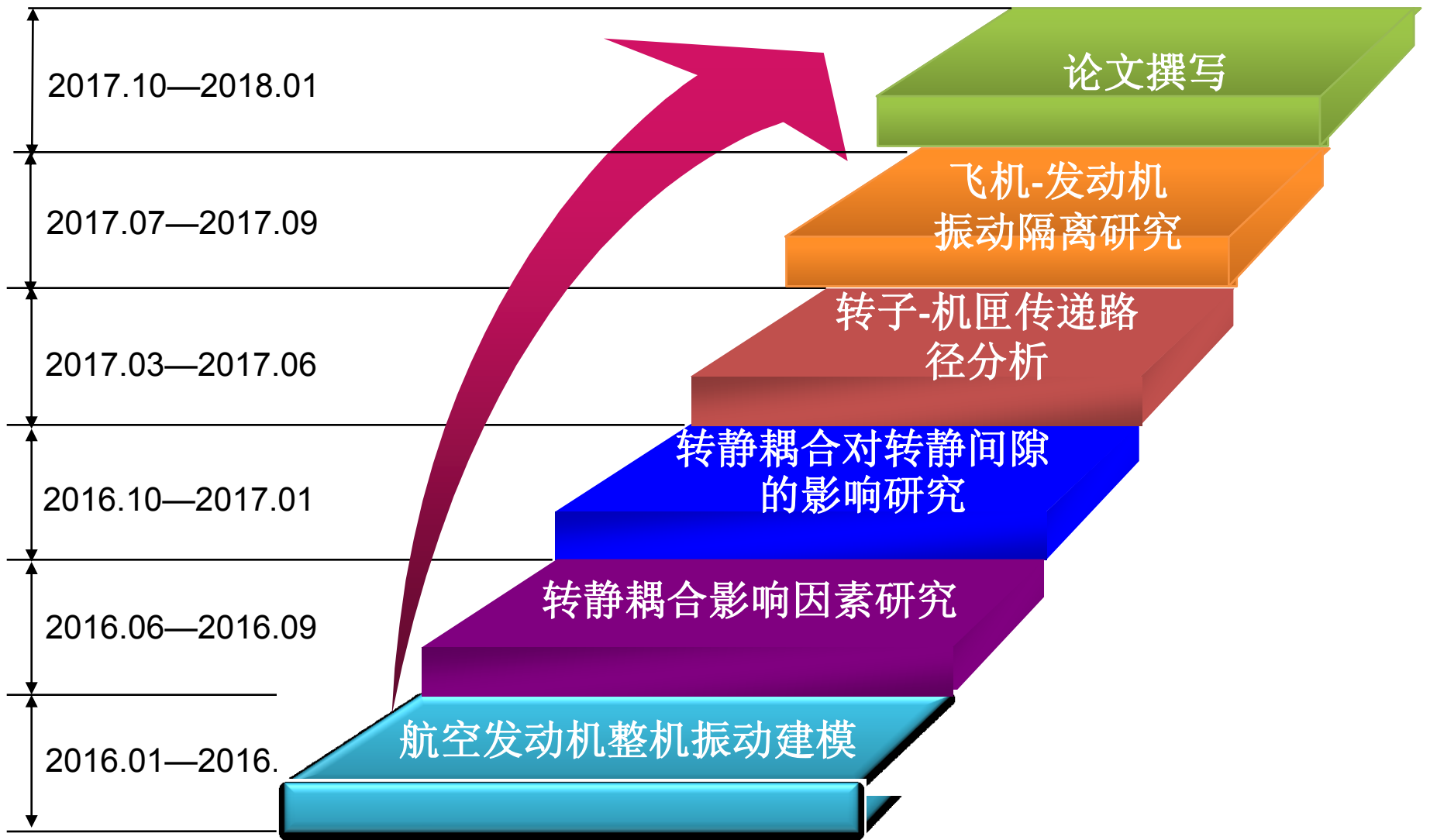
课题研究方案

3

研究基础

4

研究计划进度及效果预测



1

建立航空发动整机振动模型，研究定量分析转静耦合的方法，提出控制转静耦合的措施

2

研究转静耦合与转静间隙的关系，提出通过控制转静耦合控制转静间隙的方法，并提出测试转静间隙的方法

3

提出转子激励点到机匣测点的传递路径分析方法，研究转子故障激励下的机匣响应，为故障诊断和机匣测点布置提供理论依据

4

基于转子-机匣传递路径分析的研究，探究飞机-发动机的振动隔离问题，提出从减小安装节位置振动角度出发的飞机-发动机振动隔离方法



谢谢各位老师
敬请提出宝贵意见