

涡轮增压器浮环轴承润滑性能及可靠性研究

第九届内燃机可靠性技术国际研讨会

2020.11.1

同济大学汽车学院

发动机节能与排放控制研究所

倪计民 博士、教授/博导

email: njmwjyx@hotmail.com

Tel: 021-69589980, 69584650

M.T.: 13916141614, 18341552266 (微信)

内容:

1. 涡轮增压器浮环轴承润滑性能

1.1 研究背景

1.2 研究方法

2. 关于产品可靠性

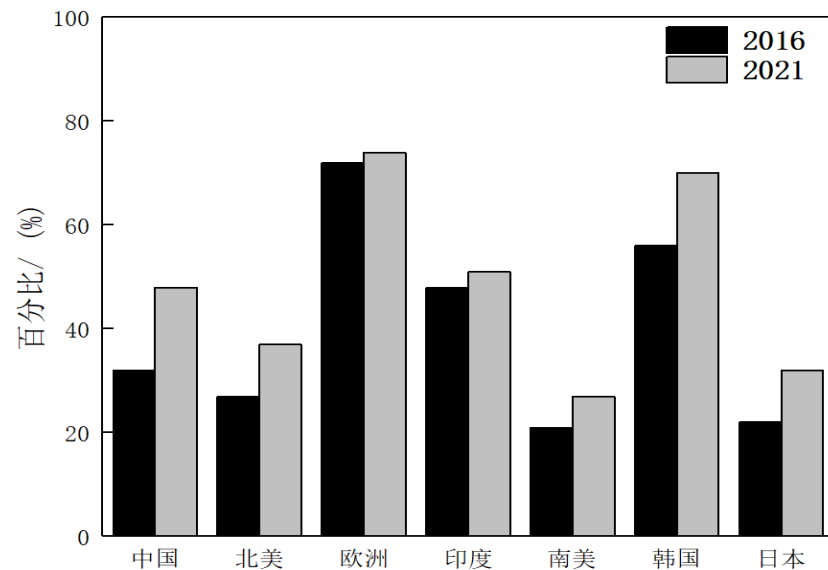
1. 研究背景

汽车工业面临挑战：

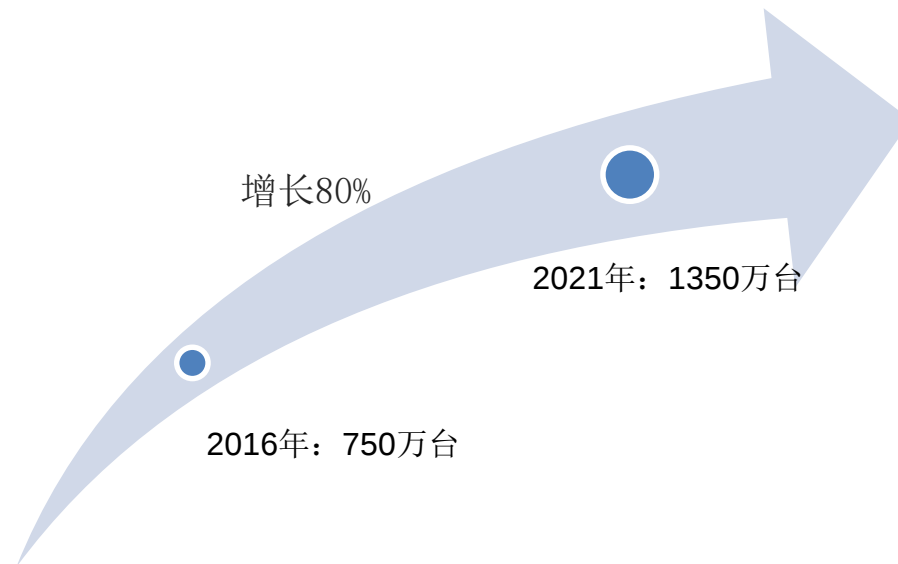
- 汽车保有量持续增长
- 石化能源消耗加剧
- 环境污染问题严重
- 排放标准日益严格

涡轮增压器优势：

- 提高发动机动力性
- 改善发动机燃油经济性
- 改善排放性能
- 已成为国内外研究的重要方向之一



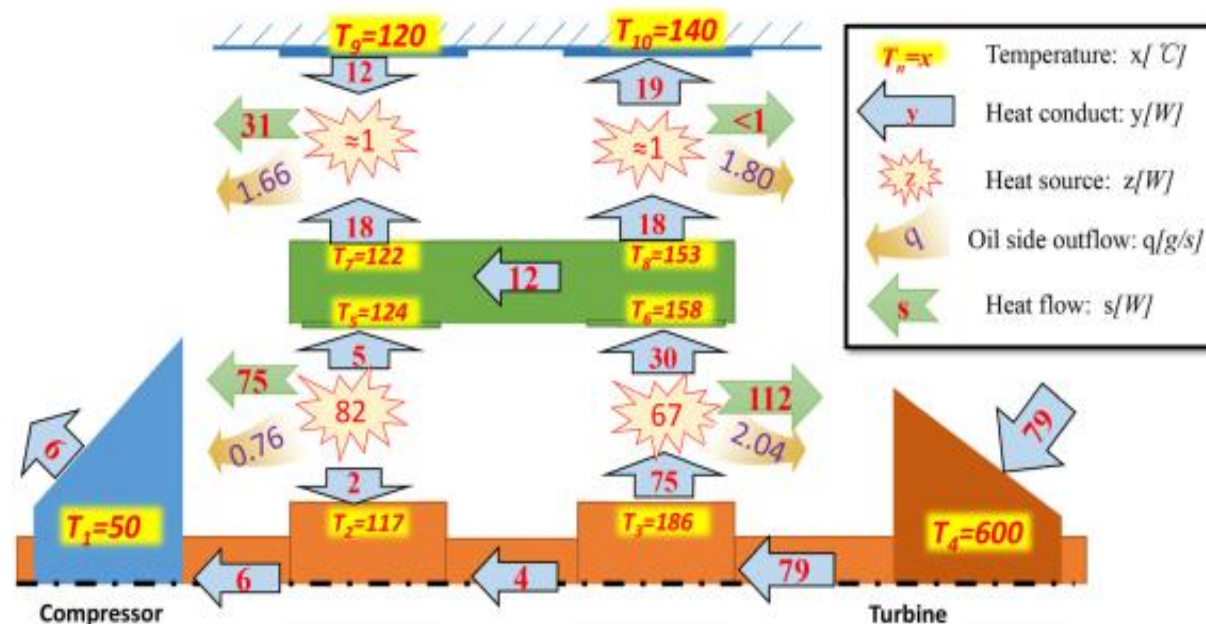
全球各地区车用涡轮增压器装机率预测



中国增压器装机量预测

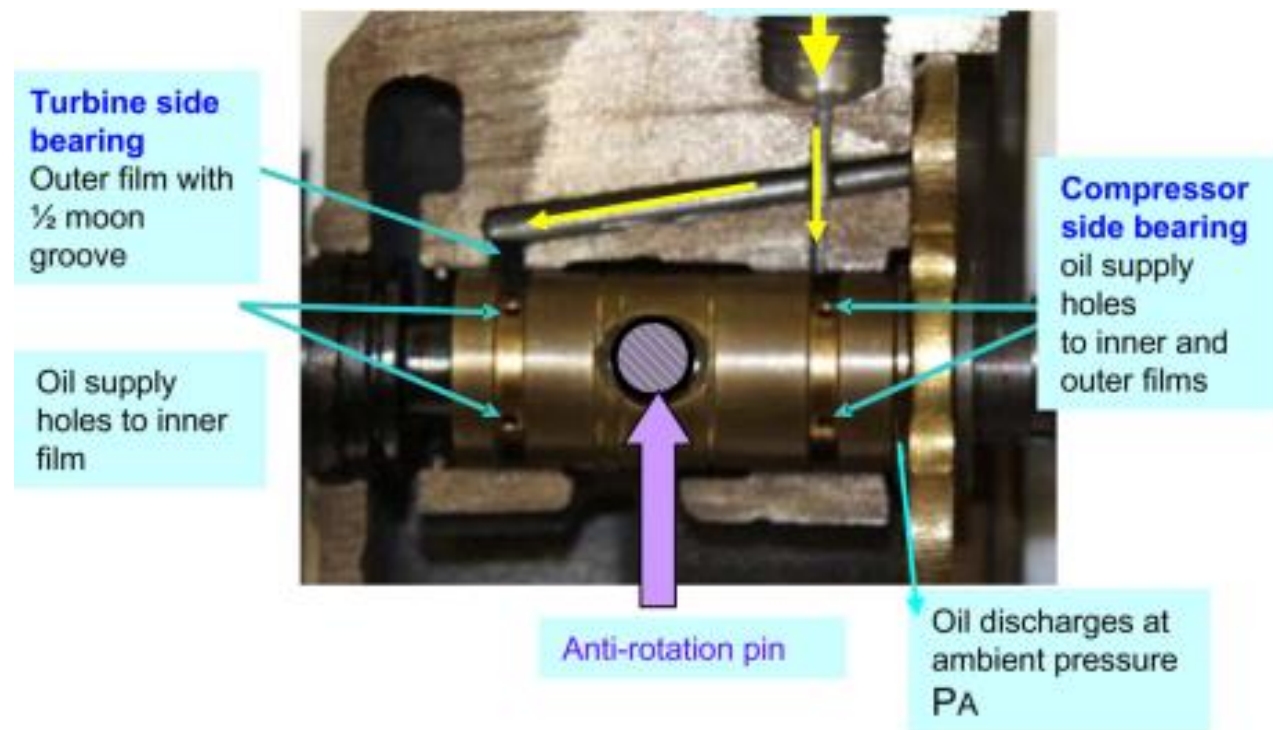
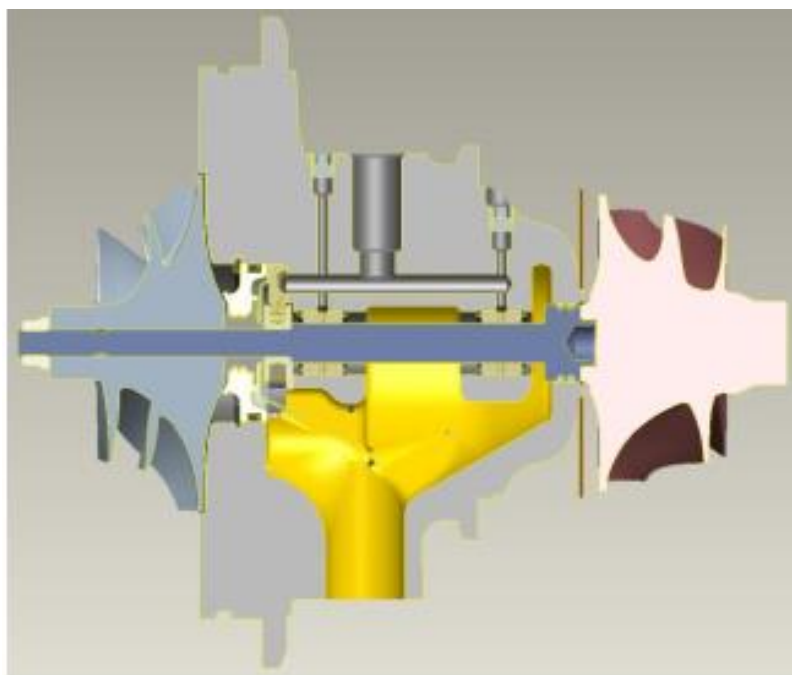
1. 研究背景

- 浮环轴承润滑性能和转子动力学研究意义
 - 润滑故障占涡轮增压器失效故障的70%，而浮环轴承是润滑系统的主要运动部件和主要润滑部件之一；
 - 浮环以一定速度旋转，减小了轴颈与轴承座之间的相对速度，减小摩擦功率；
 - 浮环轴承有双层油膜，降低了轴承温度；直接关系到增压器可靠性；



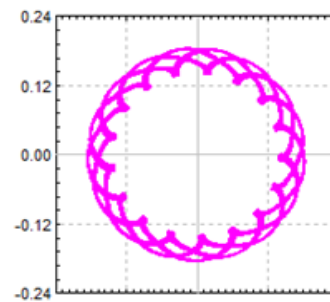
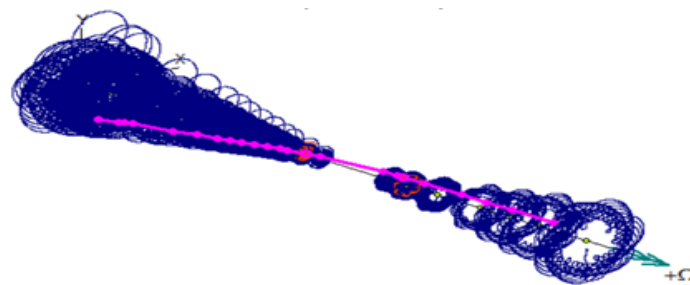
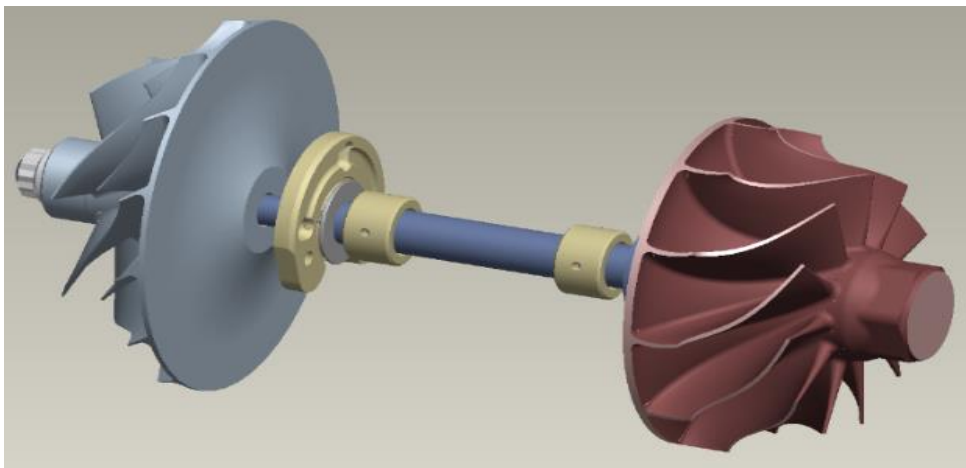
1. 研究背景

- 准确预测浮环轴承润滑性能是增压器可靠性的关键问题之一
 - 浮环轴承润滑性能关系到涡轮增压器的可靠性和使用寿命；
 - 浮环轴承润滑性能对增压器的散热冷却有直接影响；
 - 涡轮增压器浮环轴承润滑性能的分析是深入研究油膜动态系数、稳定性和转子动力学的基础；



1. 研究背景

- 准确预测转子动力学是增压器可靠性的关键问题之一
 - 转子是涡轮增压器的核心部件；
 - 转子正常运行离不开浮环轴承的支撑；
 - 涡轮增压器工作转速高达200000r/min以上； 涡端温度高；



轴心轨迹复杂

1. 研究背景

目前增压器轴承润滑和动力学研究中存在问题

未能将浮环轴承润滑技术与转子动力学结合并进行深入研究

将涡轮增压器转子-轴承系统中的润滑油黏度设为常值，这忽略了传热对浮环轴承润滑性能的影响

只采用低温气体驱动涡轮进行探究涡轮增压器转子动力学特性。

本项目的创新点及解决办法

浮环轴承-轴承与润滑技术

增压器转子-经典转子动力学

转子-轴承系统

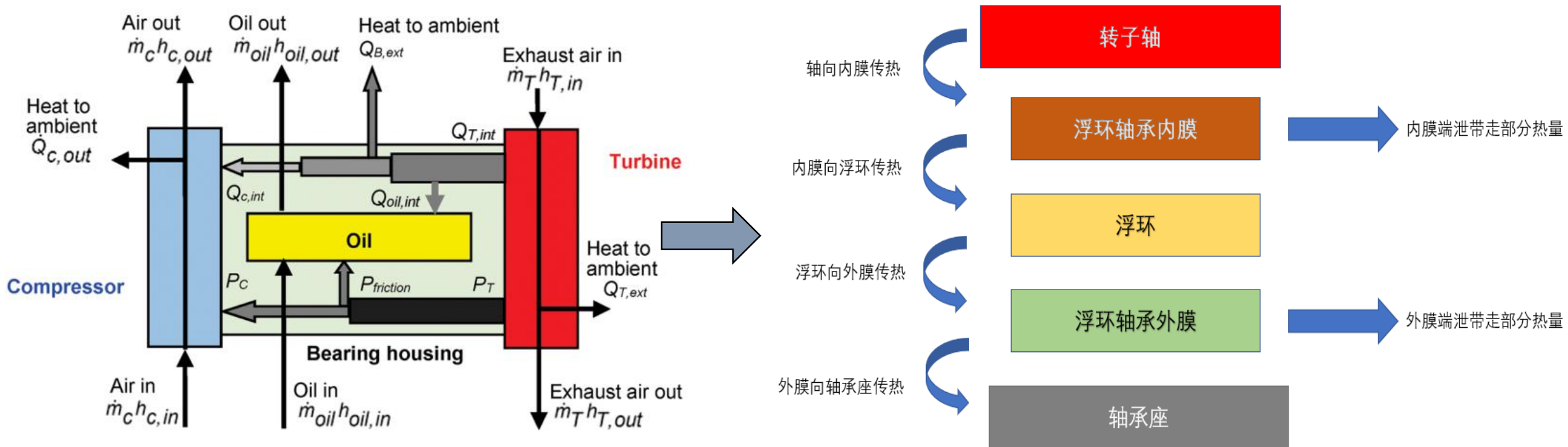
传热

计入了高温废气的传热以及浮环轴承摩擦所产生的热量，从而获得了较为准确的浮环轴承润滑性能。

采用高速动平衡机获取较为准确的不平衡数据，采用多功能试验台架对涡轮增压器进行热吹试验。

2. 研究方法

轴承体及浮环轴承传热计算



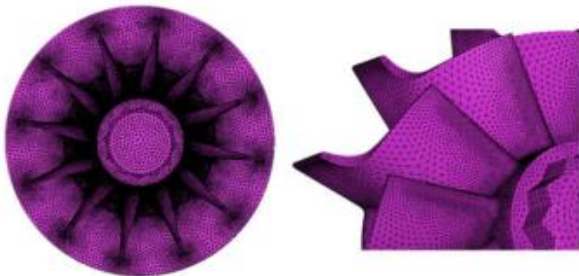
增压器整机传热示意图

2. 研究方法

轴承体及浮环轴承传热计算



(a) 进气流道网格模型

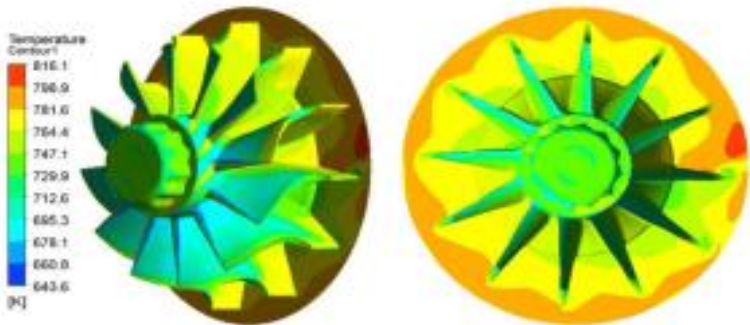


(b) 叶轮流道网格模型

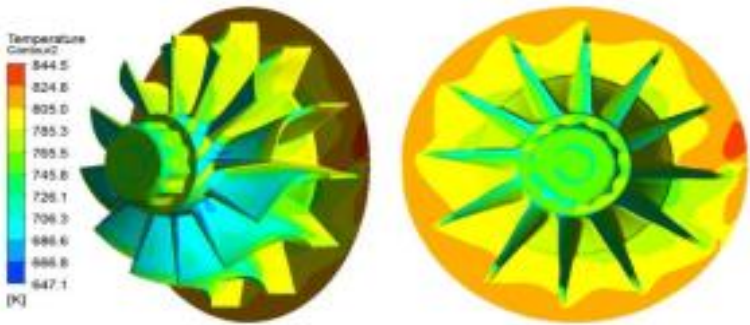


(c) 出口流道网格模型

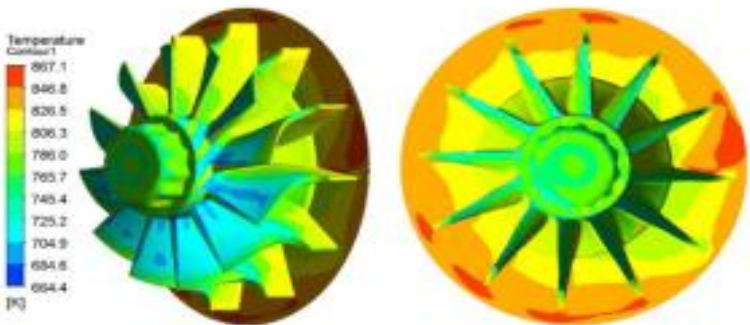
流体域网格划分



(a) 增压器转速 90000r/min 叶轮表面及背盘温度分布



(b) 增压器转速 100000r/min 叶轮表面及背盘温度分布



(c) 增压器转速 110000r/min 叶轮表面及背盘温度分布

叶轮表面及背盘温度分布

2. 研究方法

轴承体及浮环轴承传热计算



(a) 隔热罩空气夹层网格模型



(b) 轴承体网格模型

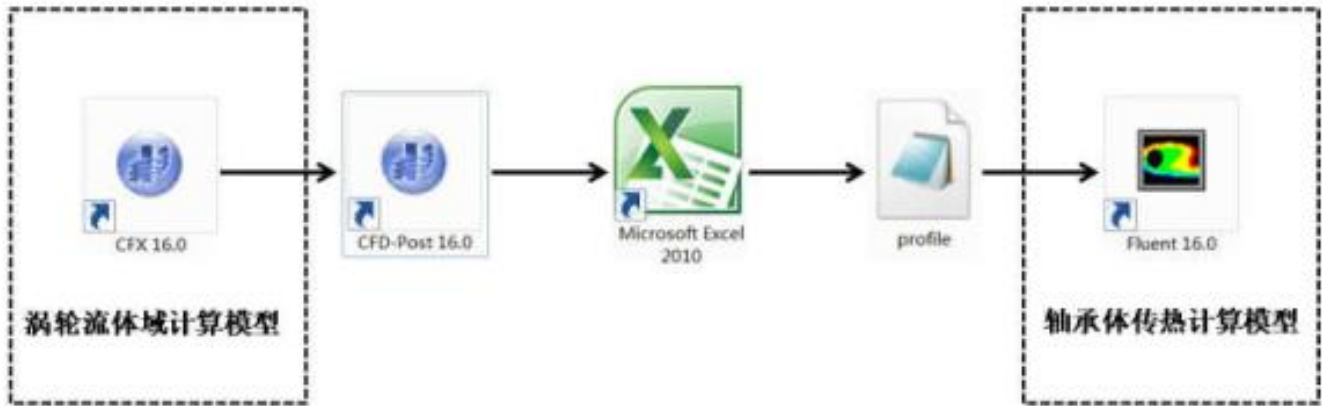


(c) 转子轴网格模型



(d) 润滑油网格模型

网格模型



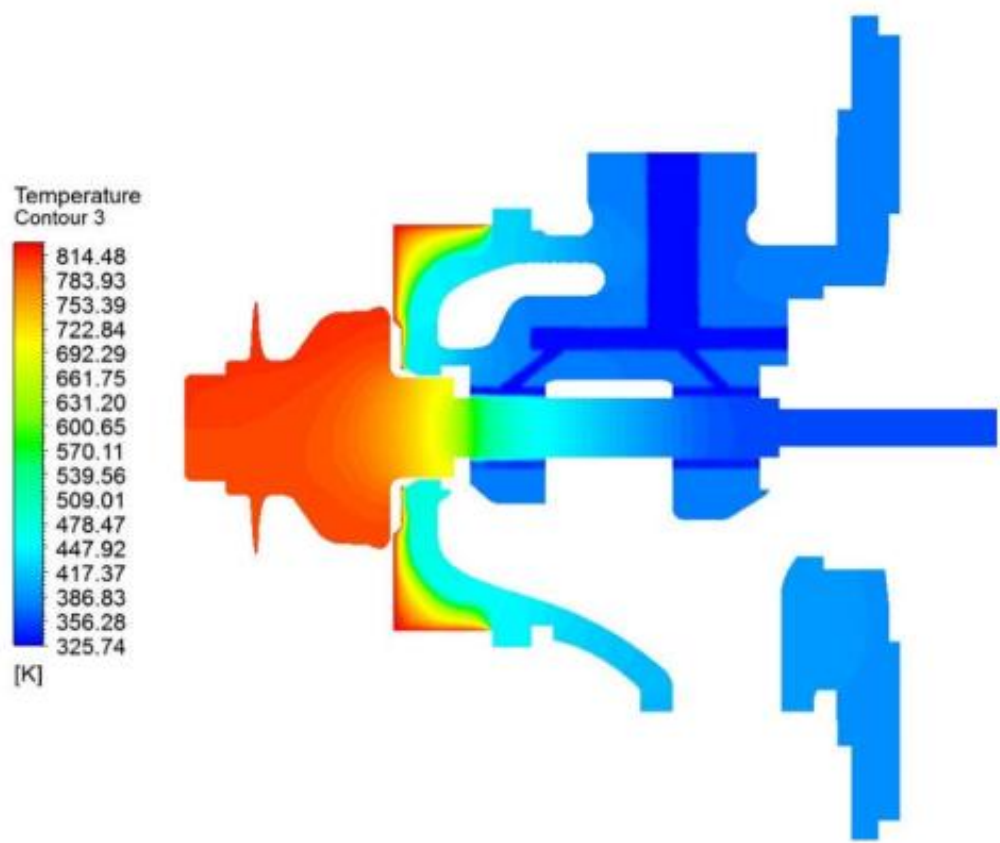
温度数据传递示意图

轴承体边界条件设定

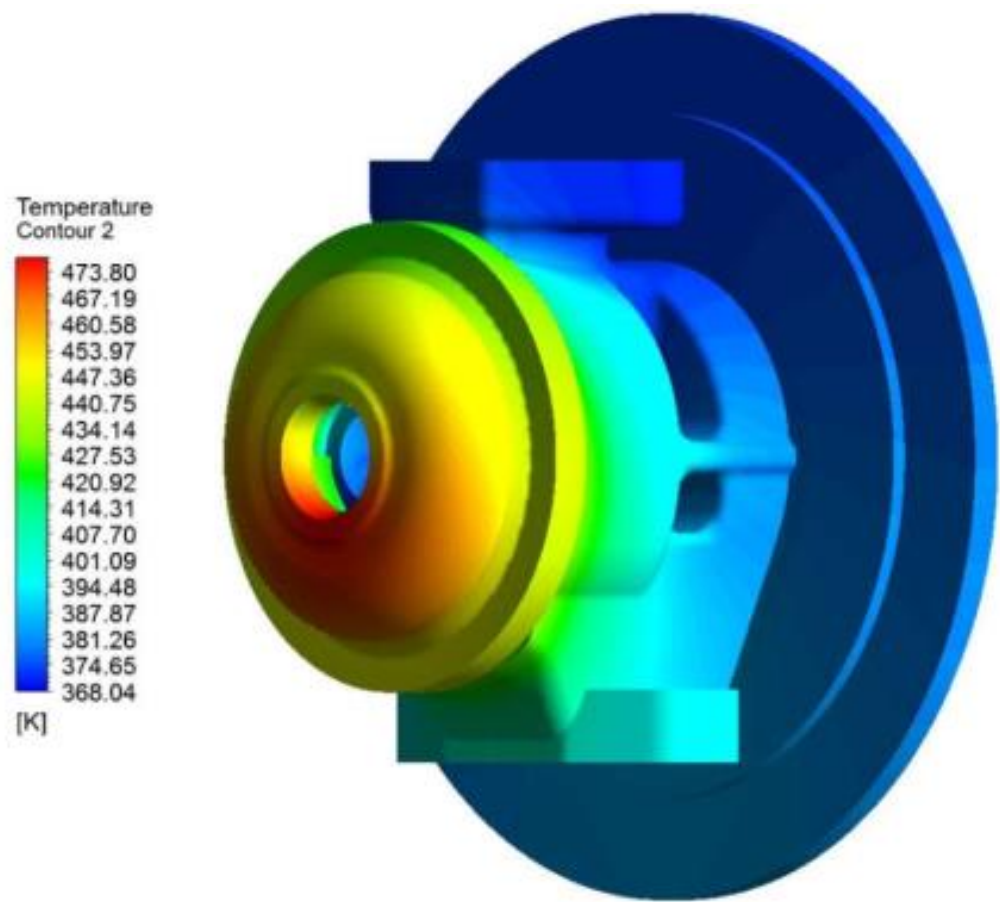
计算域	边界面	参数设定
隔热罩空气夹层	隔热罩-空气夹层接触面	温度设为叶盘背面平均温度
	空气夹层-轴承体接触面	设置 interface，热传递为流固共轭传热
轴承体	轴承体-空气夹层接触面	
	轴承体-润滑油接触面	设置 interface，热传递为流固共轭传热
润滑油	润滑油-轴承体接触面	
	润滑油入口	入口压力：0.25MPa；入口温度：328.15K
	润滑油出口	出口压力：5000Pa
	润滑油-转子轴接触面	设置 interface，热传递为流固共轭传热
转子轴	转子轴-润滑油接触面	
	叶轮表面	通过.profile 文件定义表面温度
	其余壁面	设置与大气自然对流换热，环境温度为 300K， 传热系数为 15W/(m ² ·K)

2. 研究方法

轴承体及浮环轴承传热计算



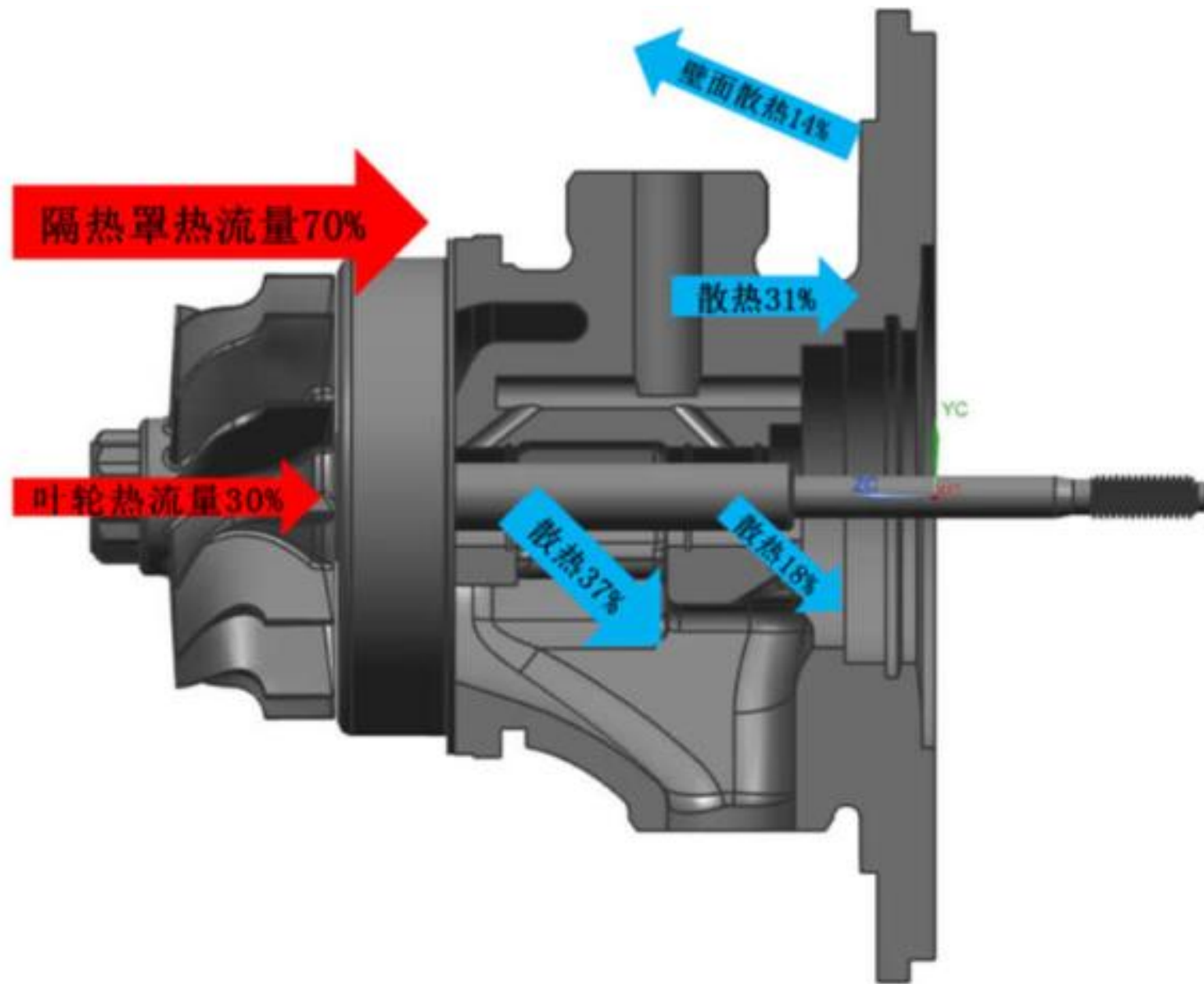
轴承体切面温度分布云图



轴承体外表面温度分布云图

2. 研究方法

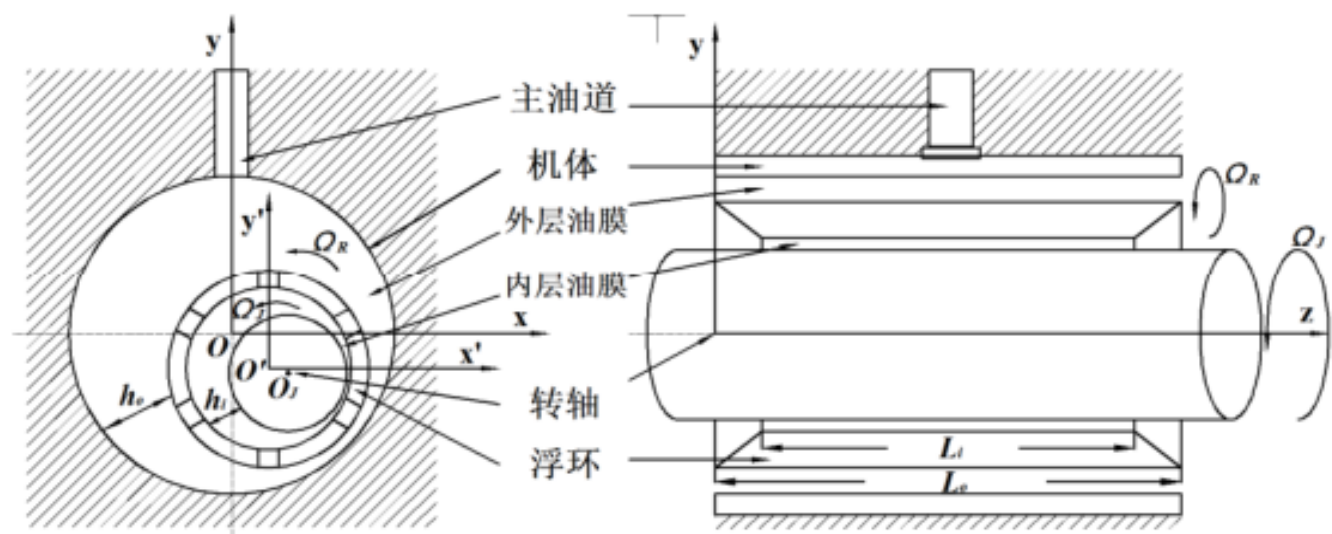
轴承体及浮环轴承传热计算



轴承体传热比重示意图

2. 研究方法

浮环轴承润滑性能计算



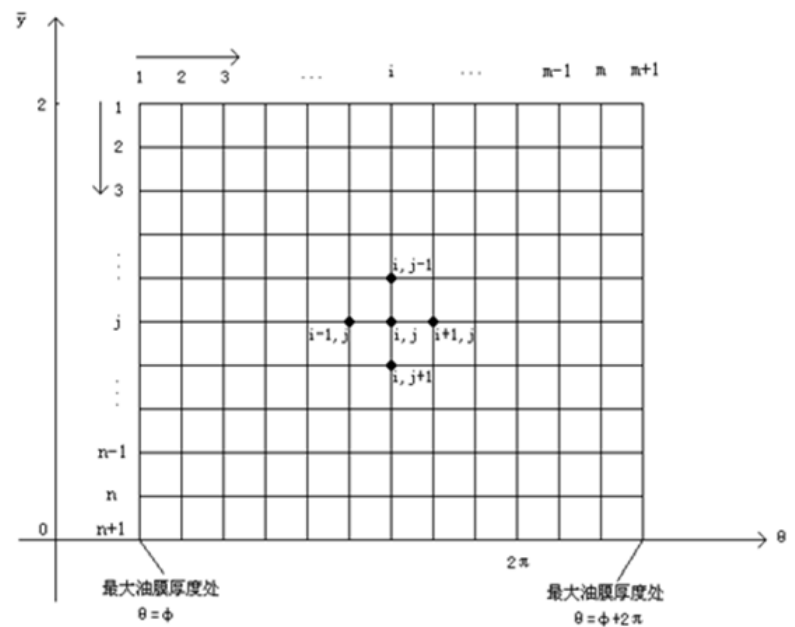
内膜

$$\frac{\partial}{R_i^2 \partial \theta_i} \left(\frac{h_i^3}{12 \mu_i} \frac{\partial p_i}{\partial \theta_i} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h_i^3}{12 \mu_i} \frac{\partial p_i}{\partial y} \right) = \frac{R_J \Omega_J + R_i \Omega_R}{2} \frac{\partial h_i}{R_i \partial \theta_i}$$

外膜

$$\frac{\partial}{R_o^2 \partial \theta_o} \left(\frac{h_o^3}{12 \mu_o} \frac{\partial p_o}{\partial \theta_o} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h_o^3}{12 \mu_o} \frac{\partial p_o}{\partial y} \right) = \frac{R_o \Omega_R}{2} \frac{\partial h_o}{R_o \partial \theta_o}$$

内外层油膜承载力
内外层油膜摩擦力矩
内外层油膜摩擦功耗
端泄流量



浮环轴承上的网格划分

* 计入浮环传热的浮环轴承润滑与传热性能研究

浮环轴承润滑性能计算

压力边界条件:

内膜压力边界条件

$$p_i(\theta_i, 0) = p_i(\theta_i, L_i) = 0$$

$$p_i(\theta_{i1}, y) = 0$$

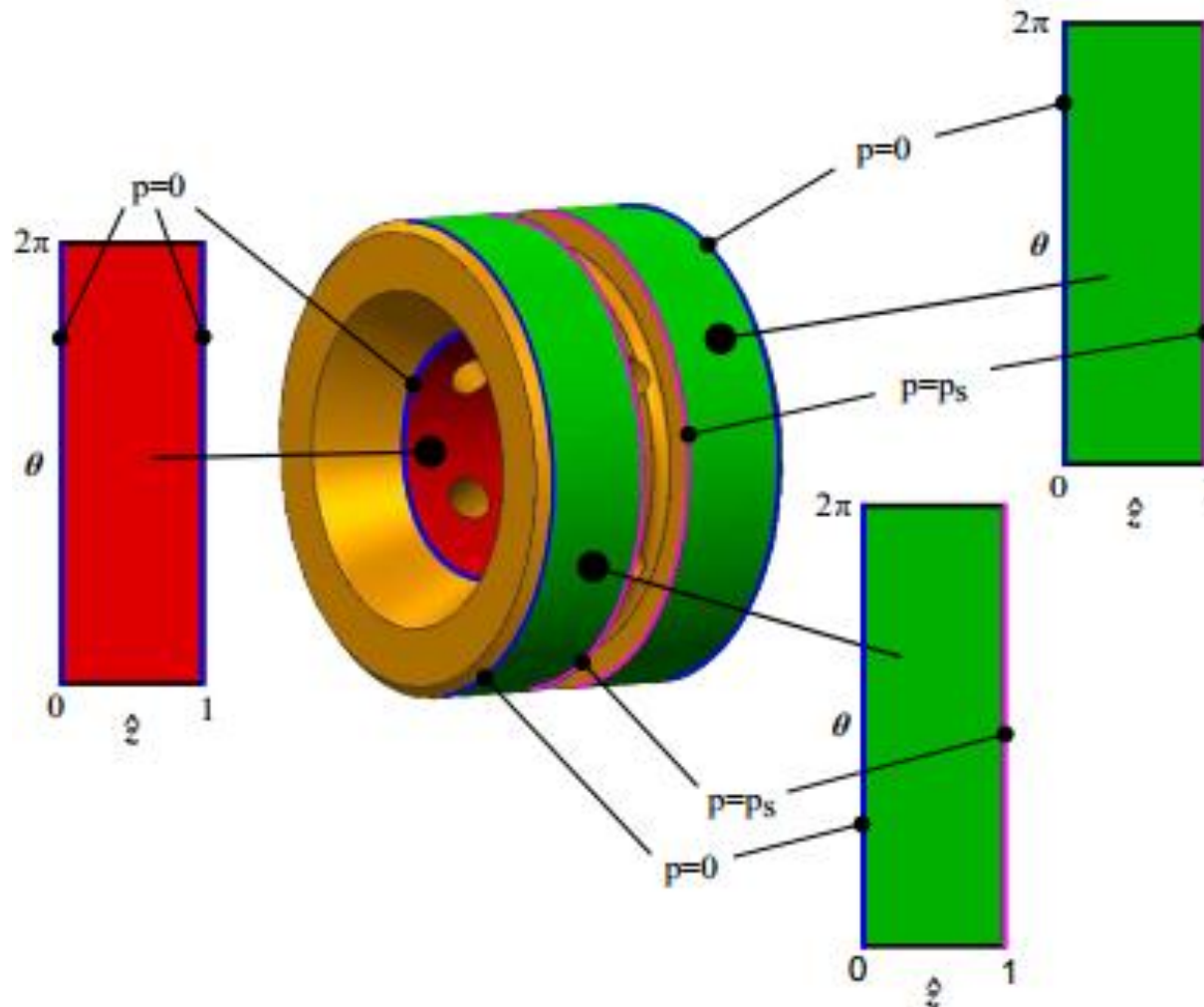
$$p_i(\theta_{i2}, y) = \frac{\partial p(\theta_{i2}, y)}{\partial \theta} = 0$$

外膜压力边界条件

$$p_o(\theta_o, 0) = p_o(\theta_o, L_o) = 0$$

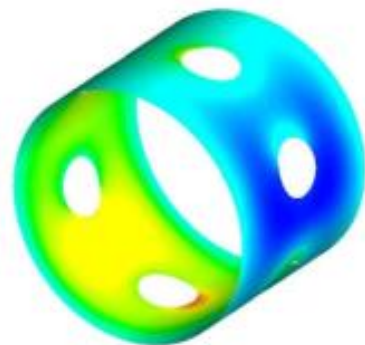
$$p_o(\theta_{o1}, y) = 0$$

$$p_o(\theta_{o2}, y) = \frac{\partial p(\theta_{o2}, y)}{\partial \theta} = 0$$

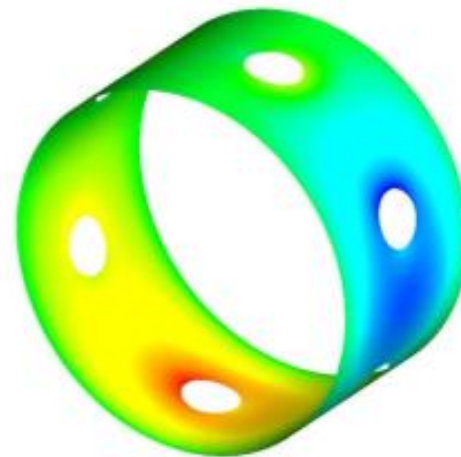
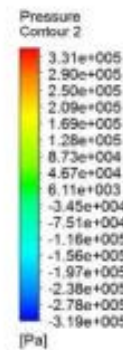


2. 研究方法

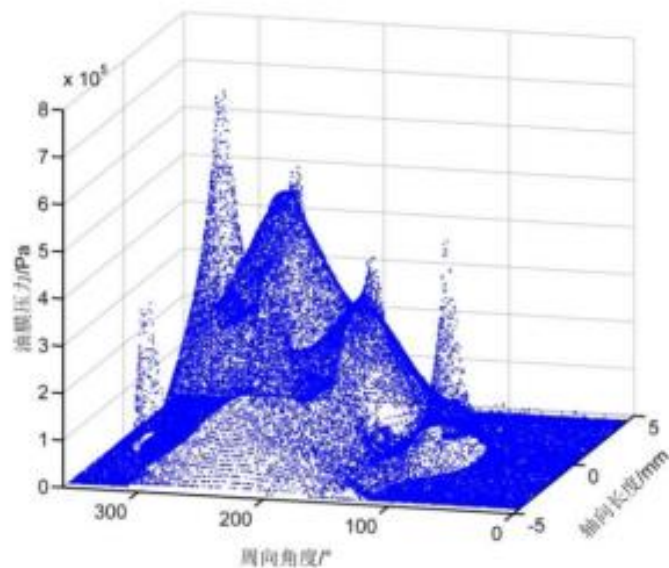
浮环轴承润滑性能计算



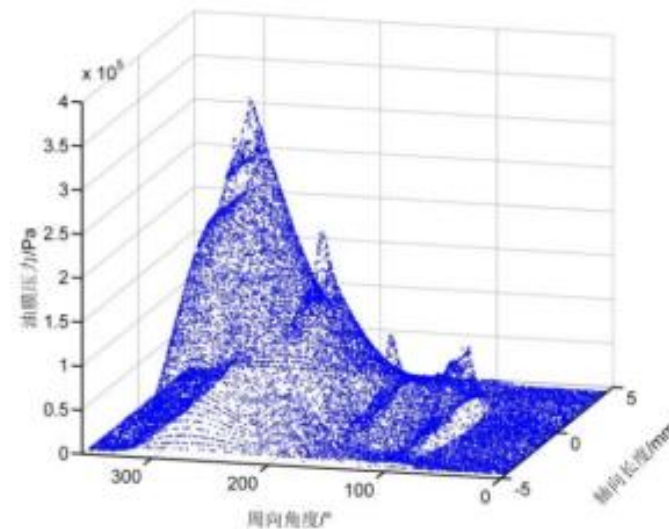
(a) 90000r/min 内膜压力云图



(b) 90000r/min 外膜压力云图



(c) 90000r/min 内膜压力周向分布



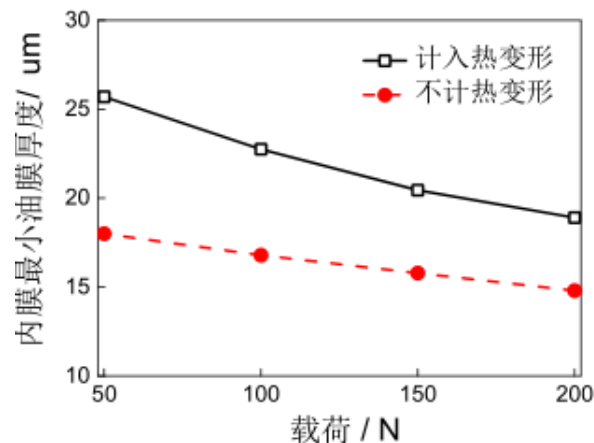
(d) 90000r/min 内膜压力周向分布

90000r/min时，浮环轴承内外膜压力分布

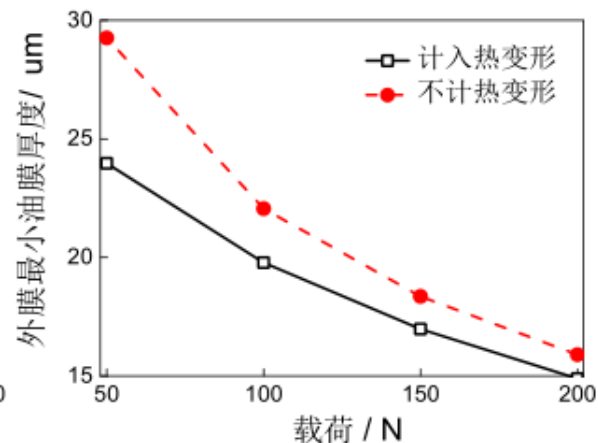
2. 研究方法

浮环轴承润滑性能计算

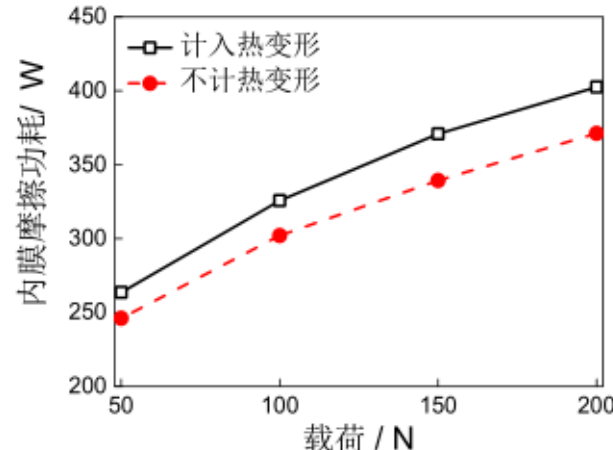
计入与不计热变形，内外膜最小油膜厚度、摩擦功耗和端泄流量随载荷的变化关系



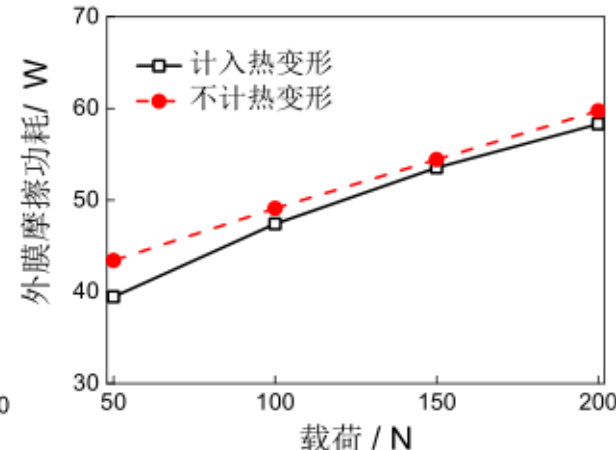
(a) 内膜最小油膜厚度



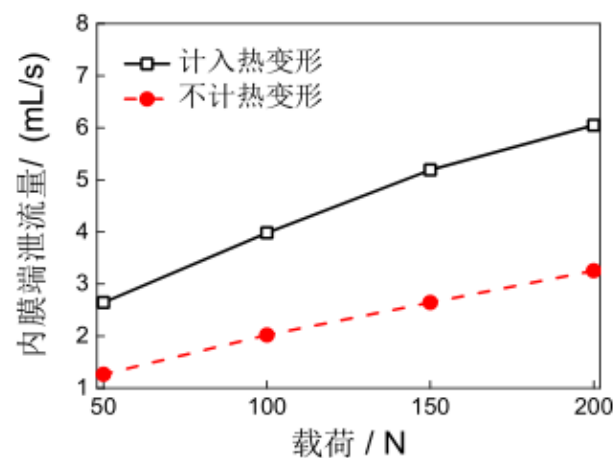
(b) 外膜最小油膜厚度



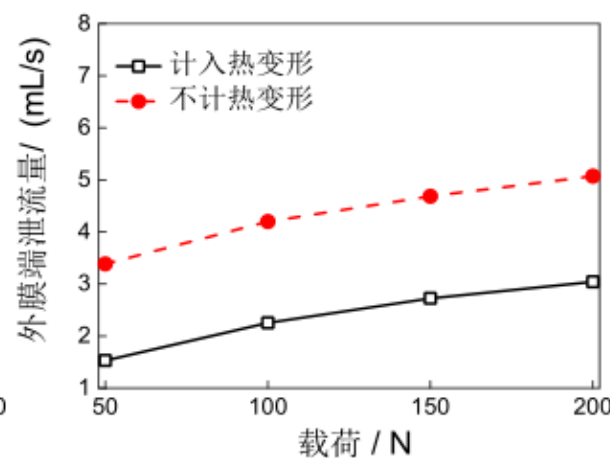
(c) 内膜摩擦功耗



(d) 外膜摩擦功耗



(e) 内膜端泄流量

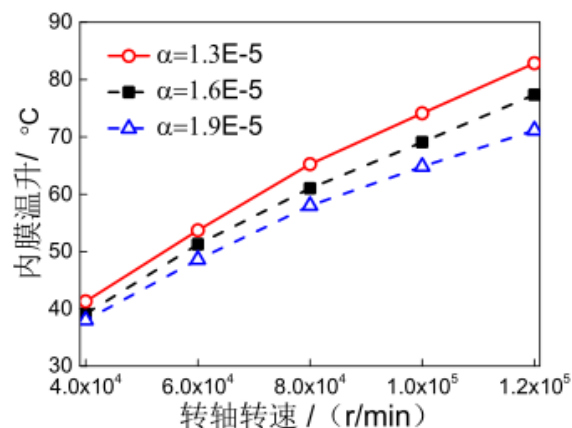


(f) 外膜端泄流量

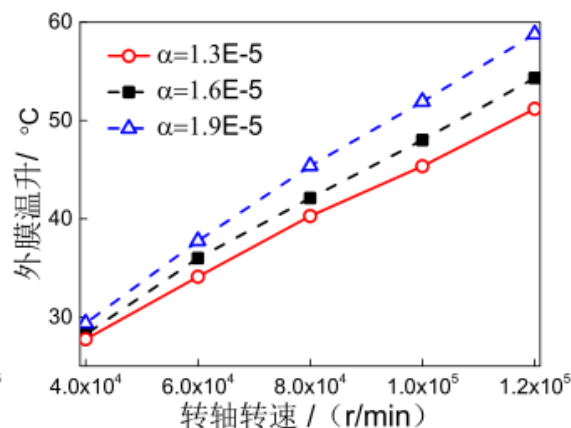
2. 研究方法

浮环轴承润滑性能计算

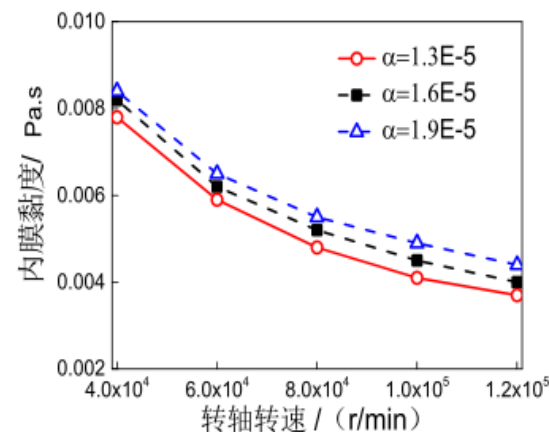
热膨胀系数对内外膜温升、黏度和间隙热变形比例的影响



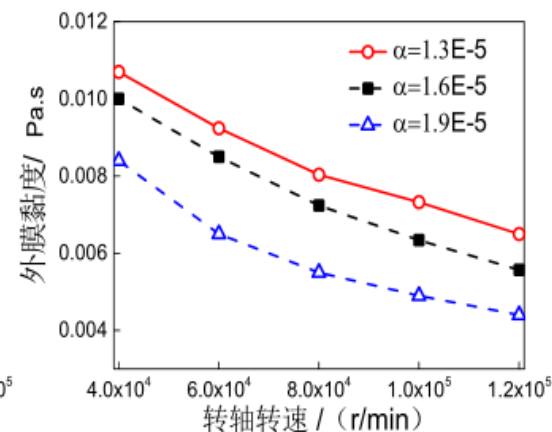
(a) 内膜温升



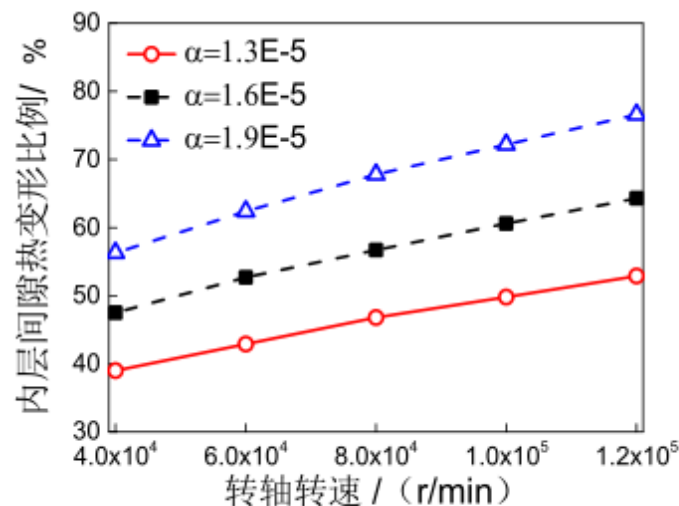
(b) 外膜温升



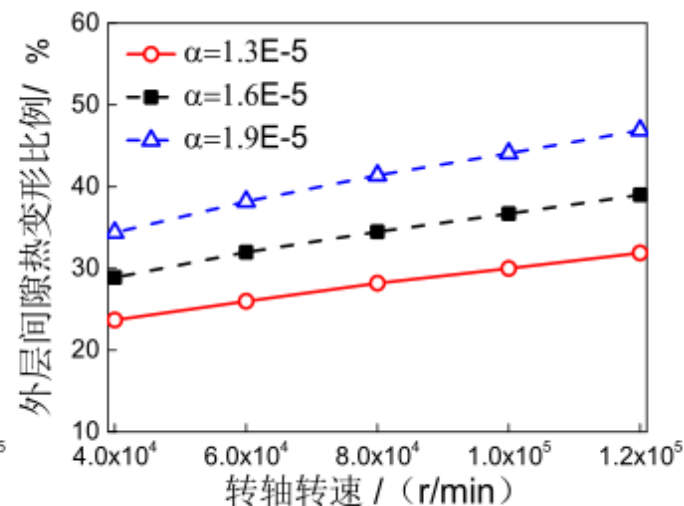
(c) 内膜黏度



(d) 外膜黏度



(e) 内层间隙热变形比例

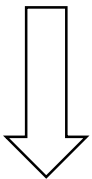


(f) 外层间隙热变形比例

2. 研究方法

浮环轴承润滑性能计算

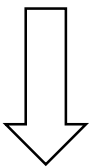
内外层油膜的黏度



受温度影响

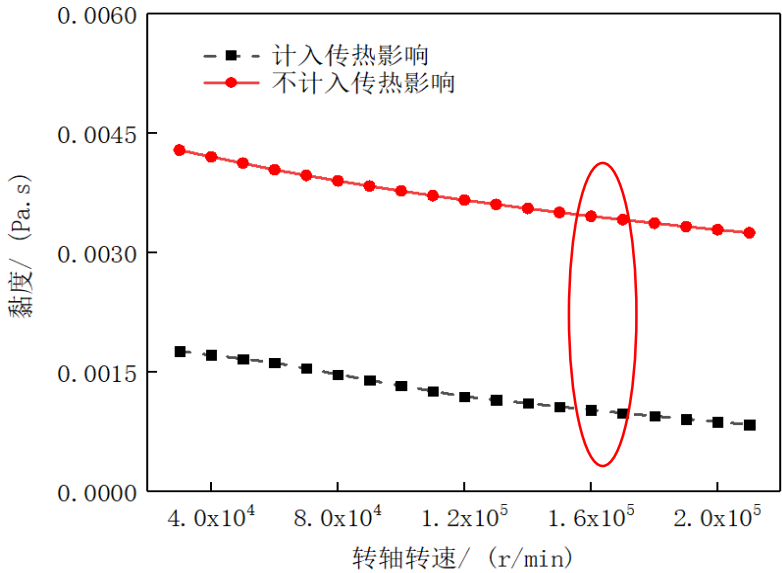
$$F_i = f_i(\Omega_J, \Omega_R, c_i, \mu_i, e_J, \dot{e}_J)$$

$$F_o = f_o(\Omega_R, \Omega_R, c_o, \mu_o, e_R, \dot{e}_R)$$

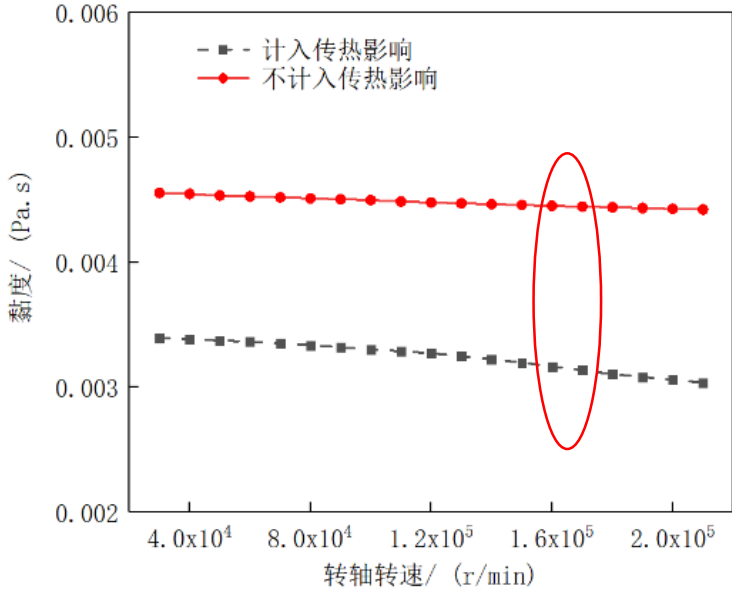


刚度、阻尼

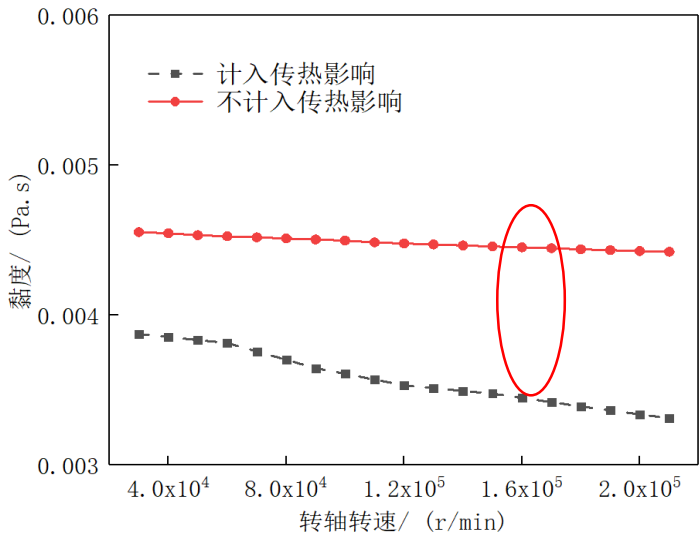
转子动力学特性



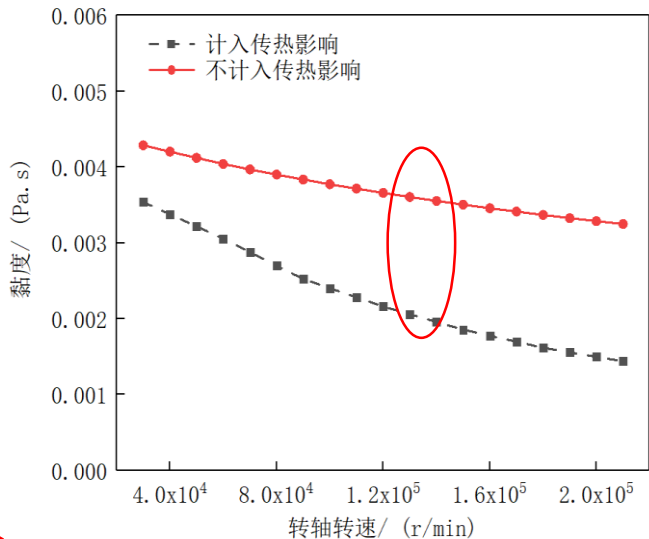
浮环轴承内膜黏度 涡轮端



浮环轴承外膜黏度 黏度差异较大



浮环轴承内膜黏度 压气机端

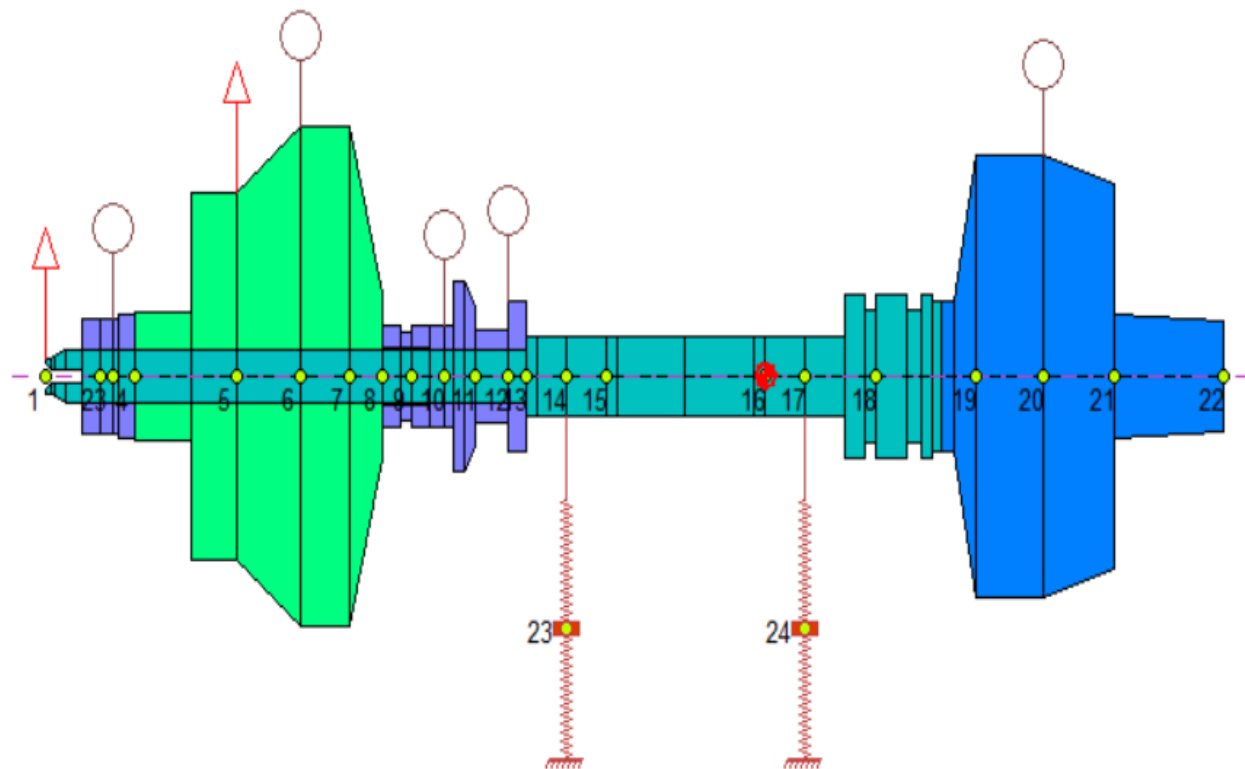


浮环轴承外膜黏度

2. 研究方法

转子动力学计算

涡轮增压器转子—浮环轴承动力学模型

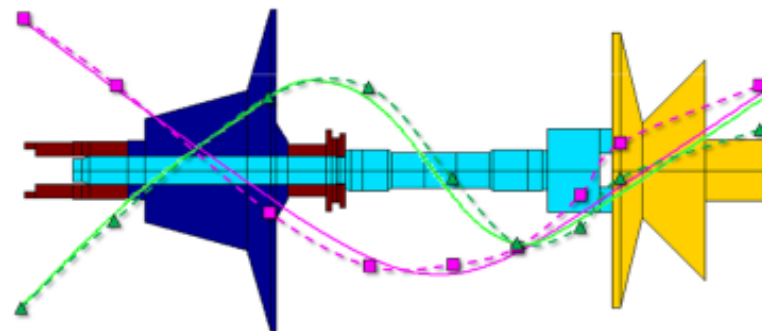


动力学方程

$$M\ddot{x} + (C + G)\dot{x} + Kx = F(t)$$

$$F(t) = F_{ub}(\Omega_J, t) + F_s + F_i(x, \dot{x}, t)$$

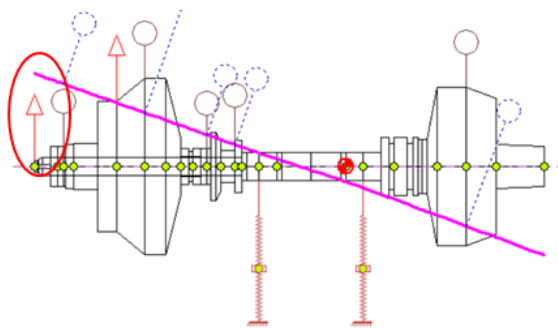
Newmark积分法



2. 研究方法

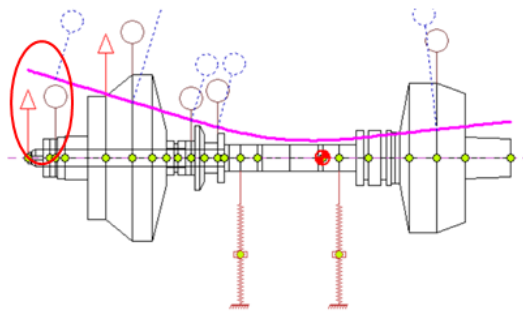
转子动力学计算

临界转速与振型

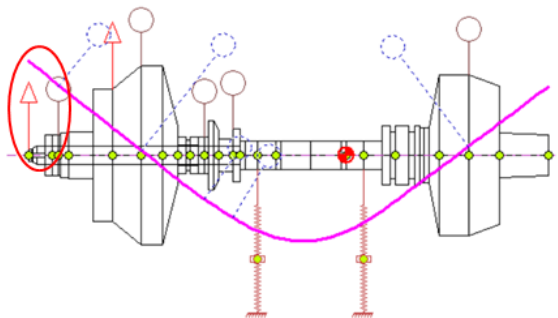


一阶临界转速(22685r/min)及振型

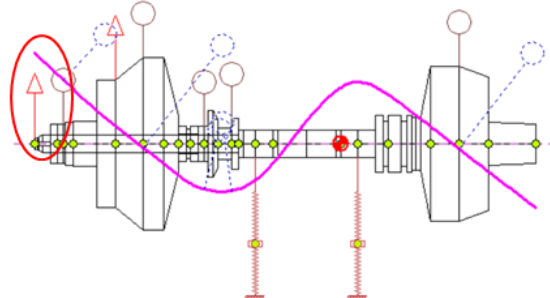
- 压气机端螺母振动最大
- 可以作为后续观测点



二阶临界转速(53432r/min)及振型



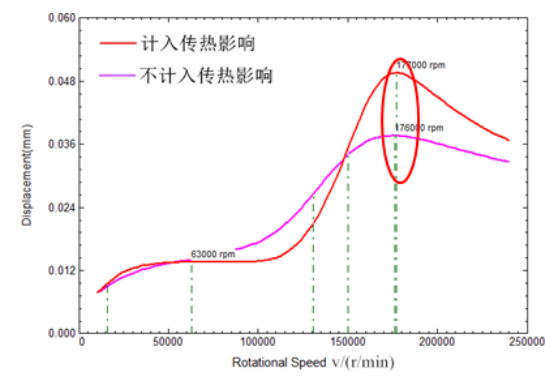
三阶临界转速(227360r/min)及振型



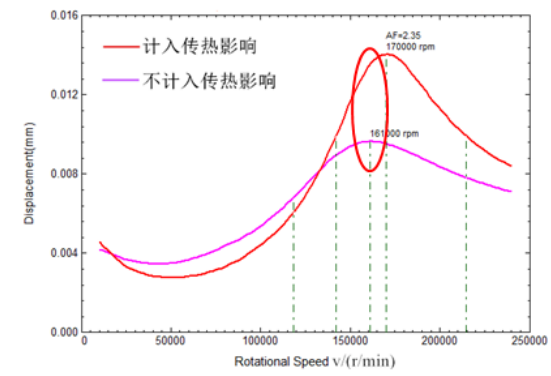
四阶临界转速650450r/min及振型

不平衡响应分析

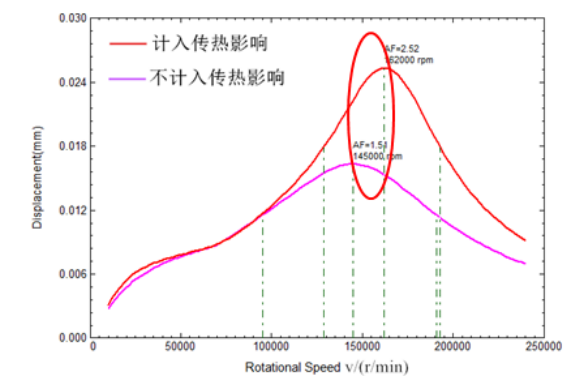
- 计入传热影响时，振动更加剧烈，振幅更大



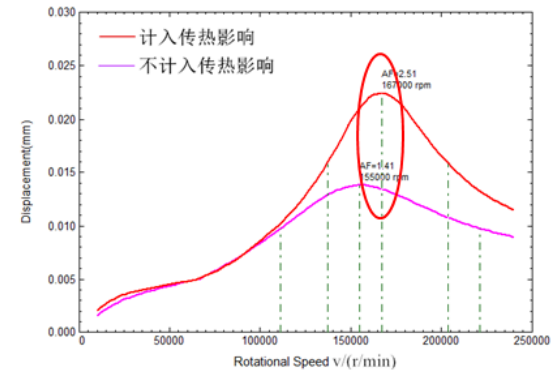
压端螺母



涡端螺母



压端轴承

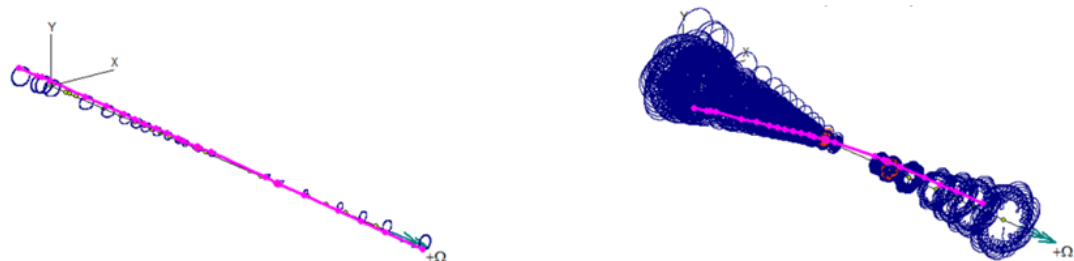


涡端轴承

2. 研究方法

转子动力学计算

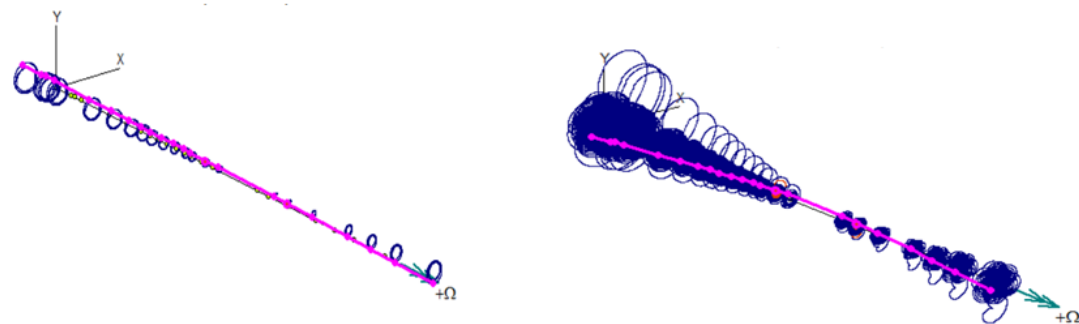
转子轴运动轨迹



(a) 10000r/min

(b) 150000r/min

计入传热影响时转子的运动轨迹（涡端轴承）

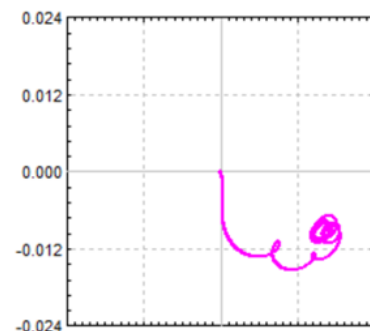


(a) 10000r/min

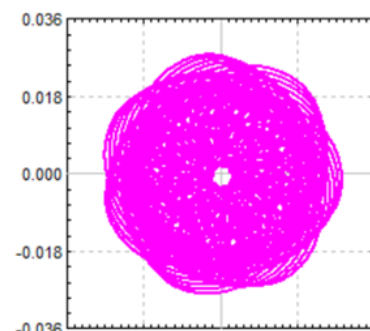
(b) 150000r/min

不计入传热影响时转子的运动轨迹（涡端轴承）

转子轴心轨迹

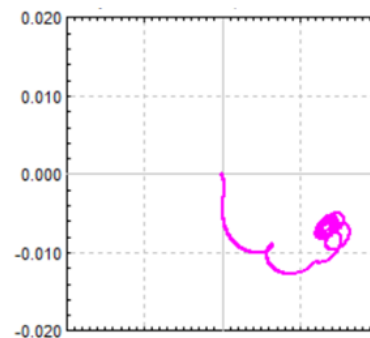


(a) 10000r/min

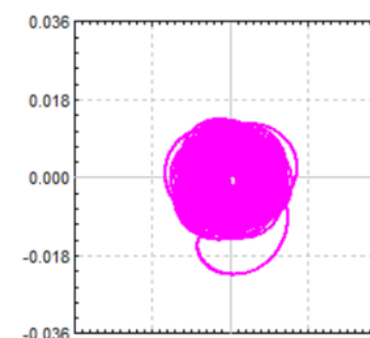


(b) 150000r/min

计入传热影响时转子轴心轨迹（涡端轴承）



(a) 10000r/min



(b) 150000r/min

不计入传热影响时转子轴心轨迹（涡端轴承）

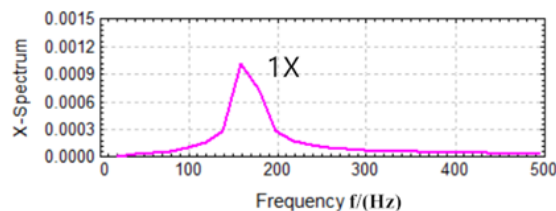
➤ 计入传热影响时，振动更加剧烈，振幅更大

2. 研究方法

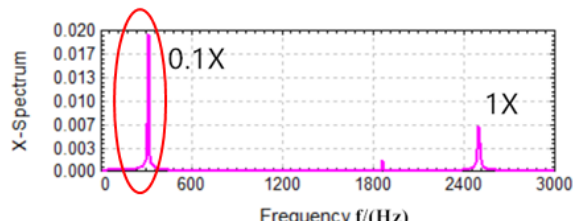
转子动力学计算

频谱图

计入传热影响时，次同步振动更明显

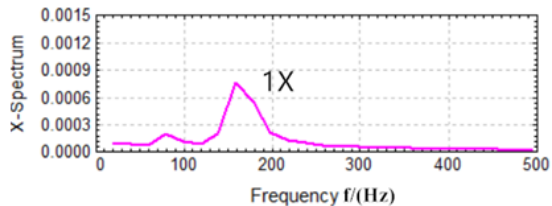


10000r/min

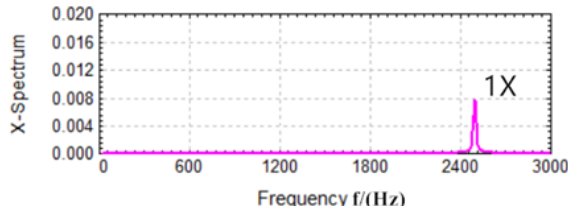


150000r/min

计入传热影响时转子在涡端轴承的频谱图（涡端轴承）



10000r/min



150000r/min

不计入传热影响时转子在涡端轴承的频谱图（涡端轴承）

1X（工频）：同步振动

0.1X-0.3X：外膜涡动

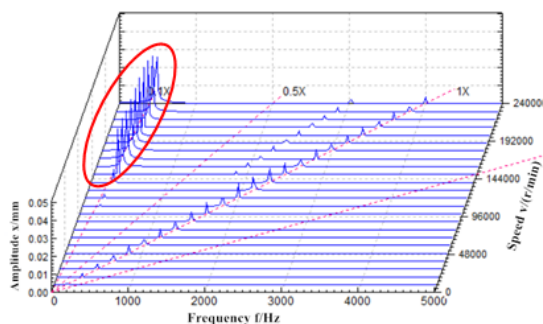
0.25X-0.7X：内膜涡动

次同步振动

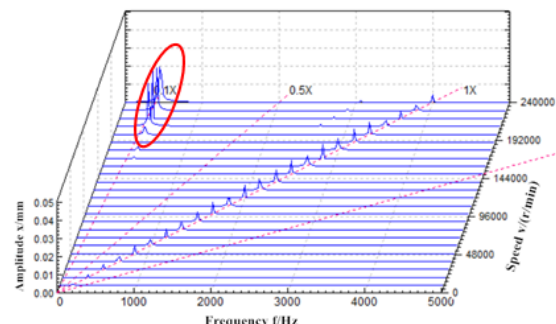
瀑布图

计入传热影响时，次同步振动更早地出现了且更剧烈

因此，计入传热影响时分析转子动力学是非常有必要的

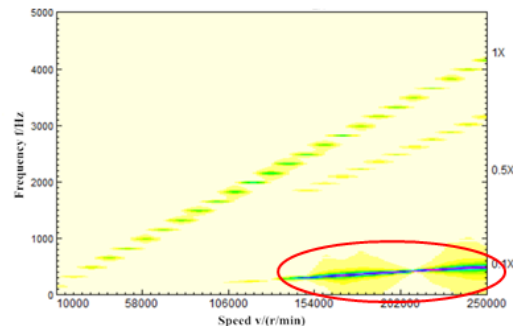


计入传热影响

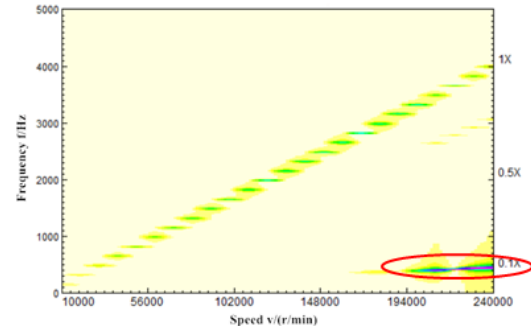


不计入传热影响

计入与不计入传热影响时转子在涡端轴承的瀑布图（涡端轴承）



计入传热影响

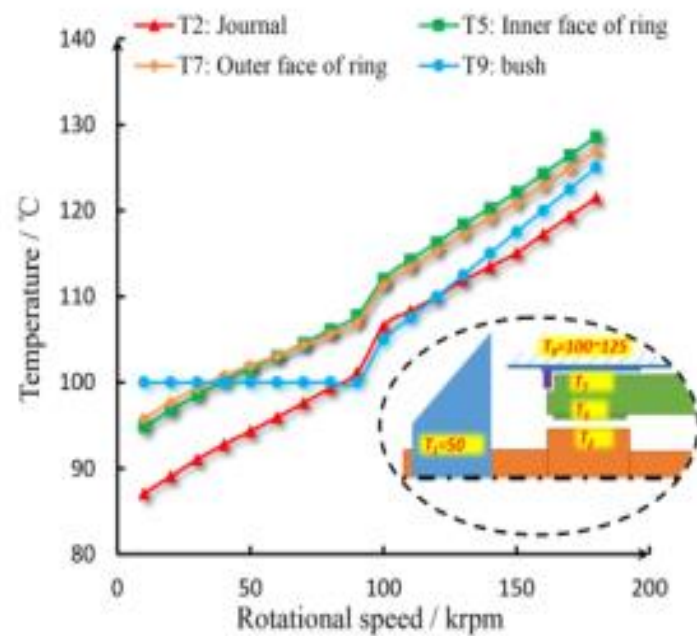


不计入传热影响

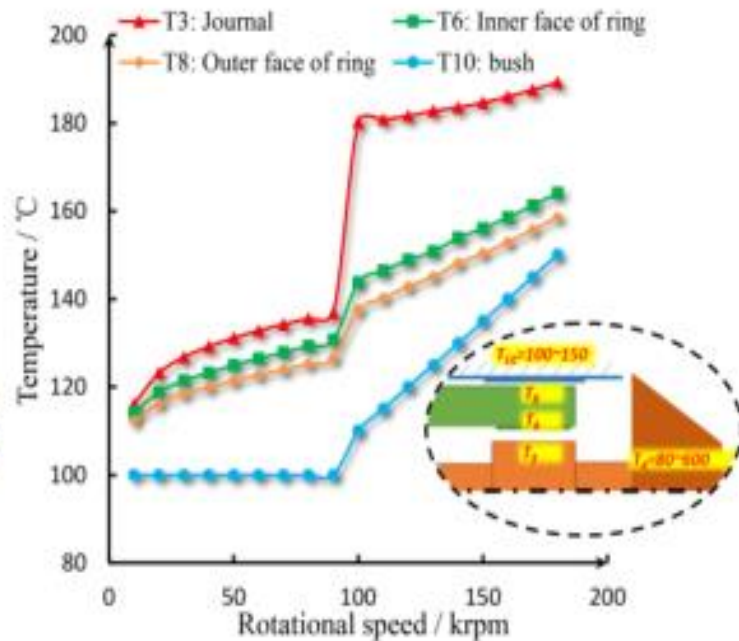
计入与不计入传热影响时转子在涡端轴承的瀑布图（涡端轴承）

2. 研究方法

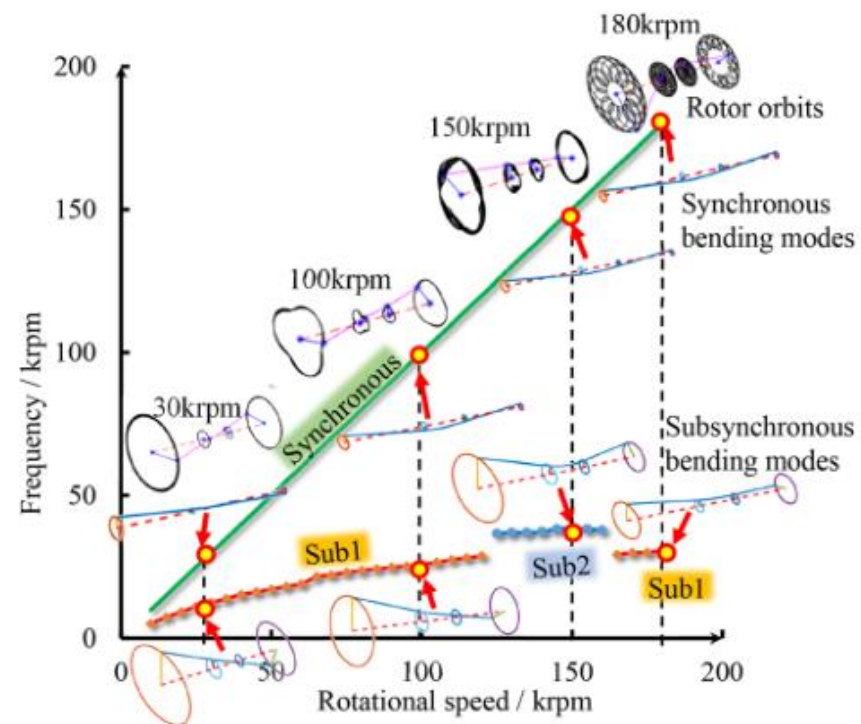
转子动力学计算



(a)

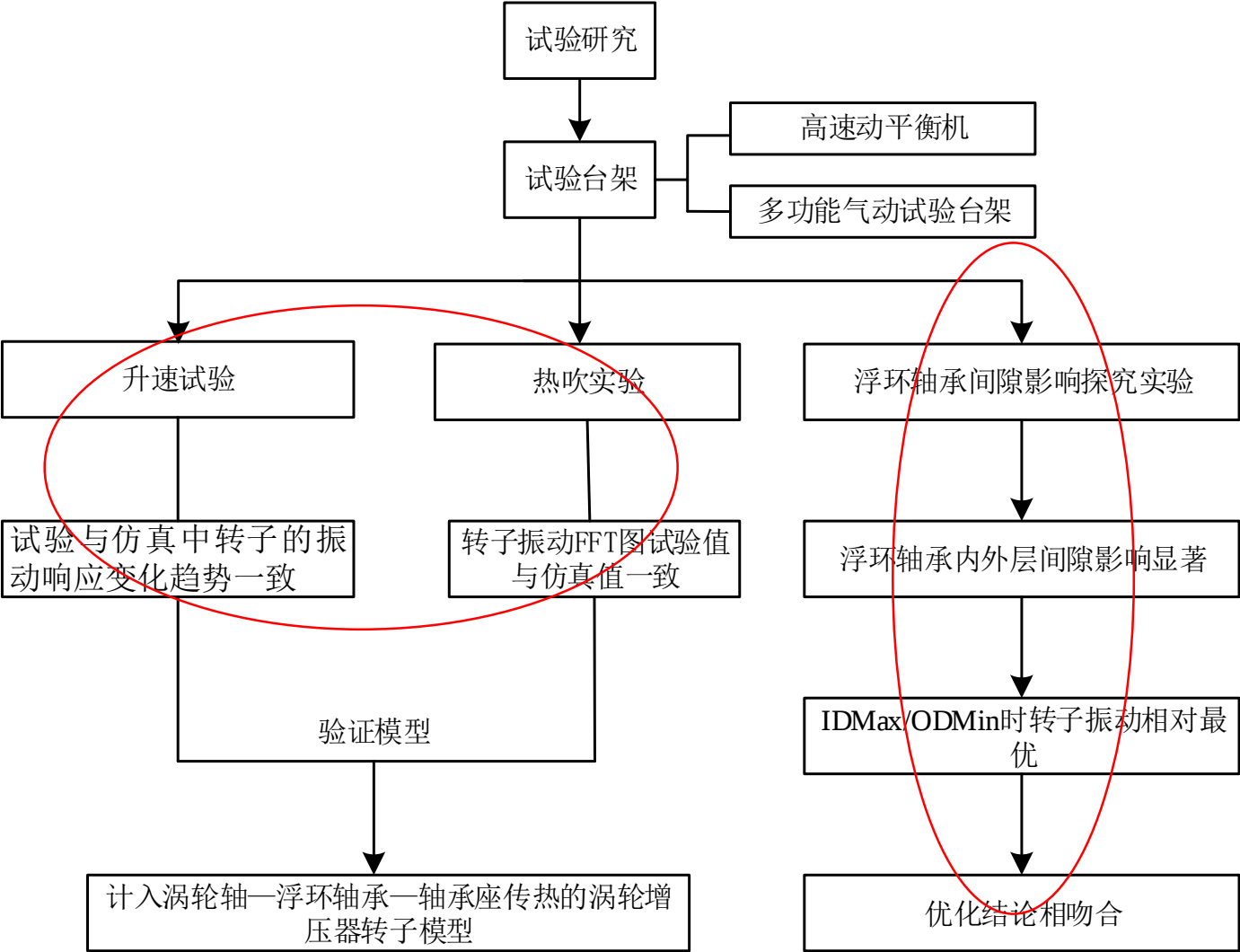


(b)

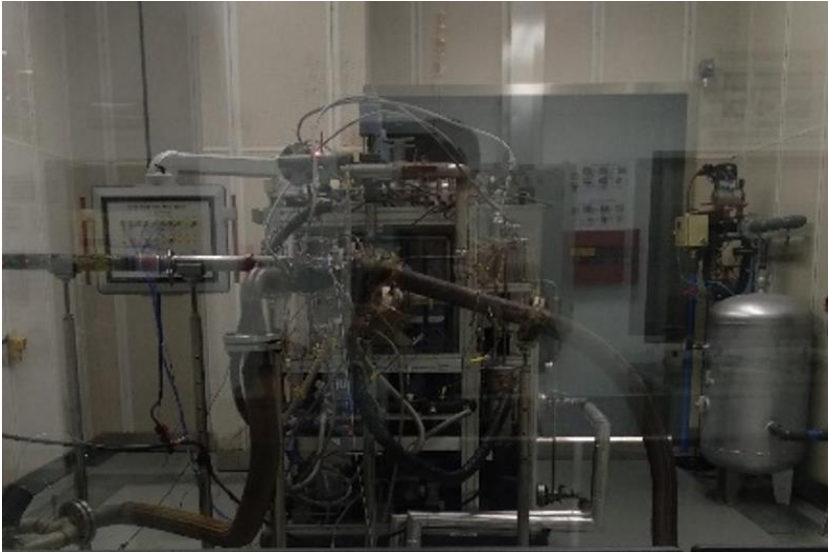


2. 研究方法

转子动力学试验



高速动平衡机

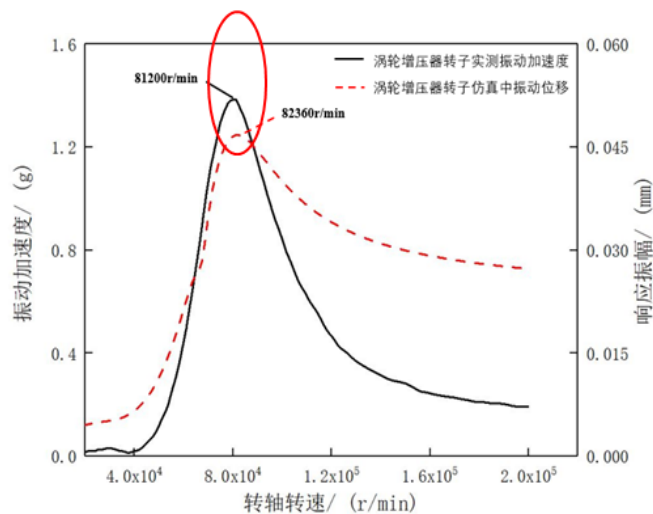


多功能气动试验台架

2. 研究方法

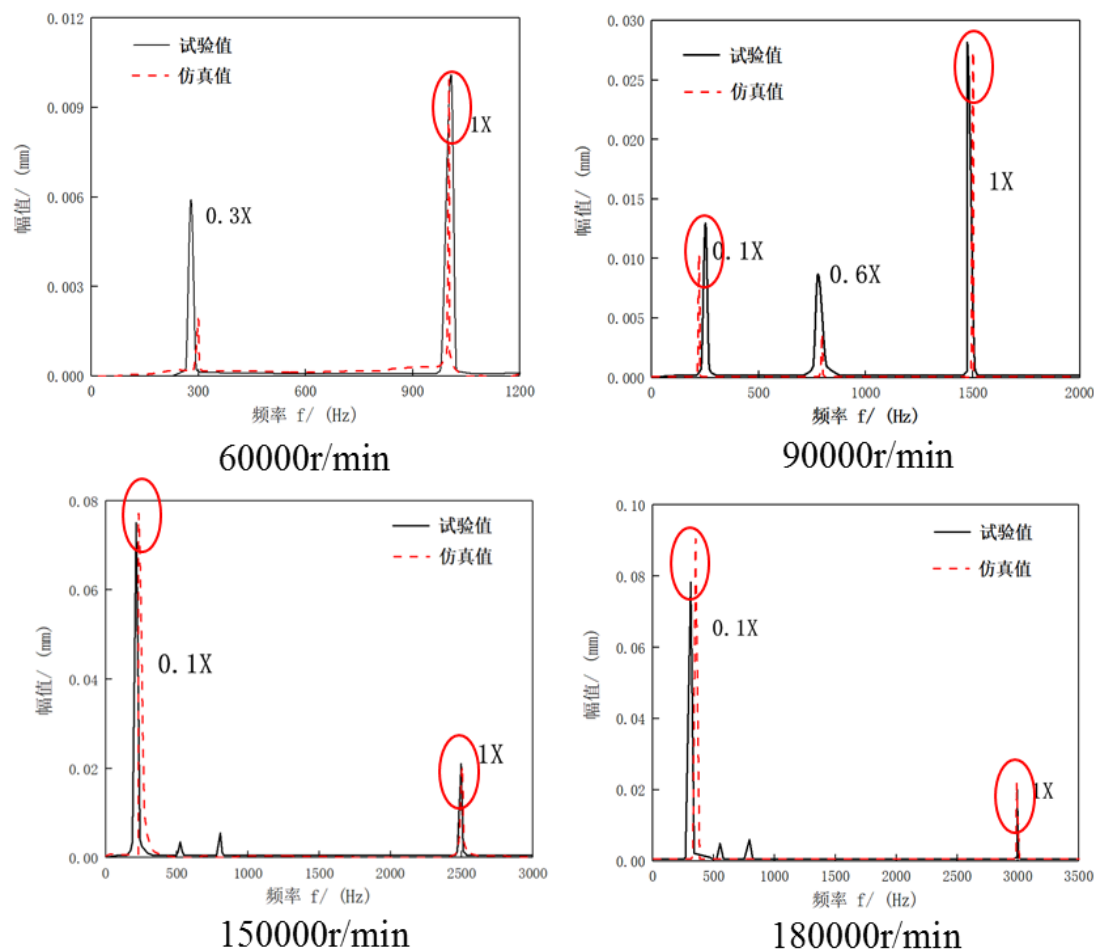
转子动力学试验

涡轮增压器转子有限元模型标定



误差仅为1.43%

涡轮增压器转子压端螺母振动FFT图试验值与仿真值对比



- 不平衡响应基本一致
- 整体振动分量分布接近
- 各转速下0.1X振动最大误差为10%左右
- 模型得以验证

2. 关于产品可靠性

(以增压器为例、凤城增压器产业、凤城市挂职经历)

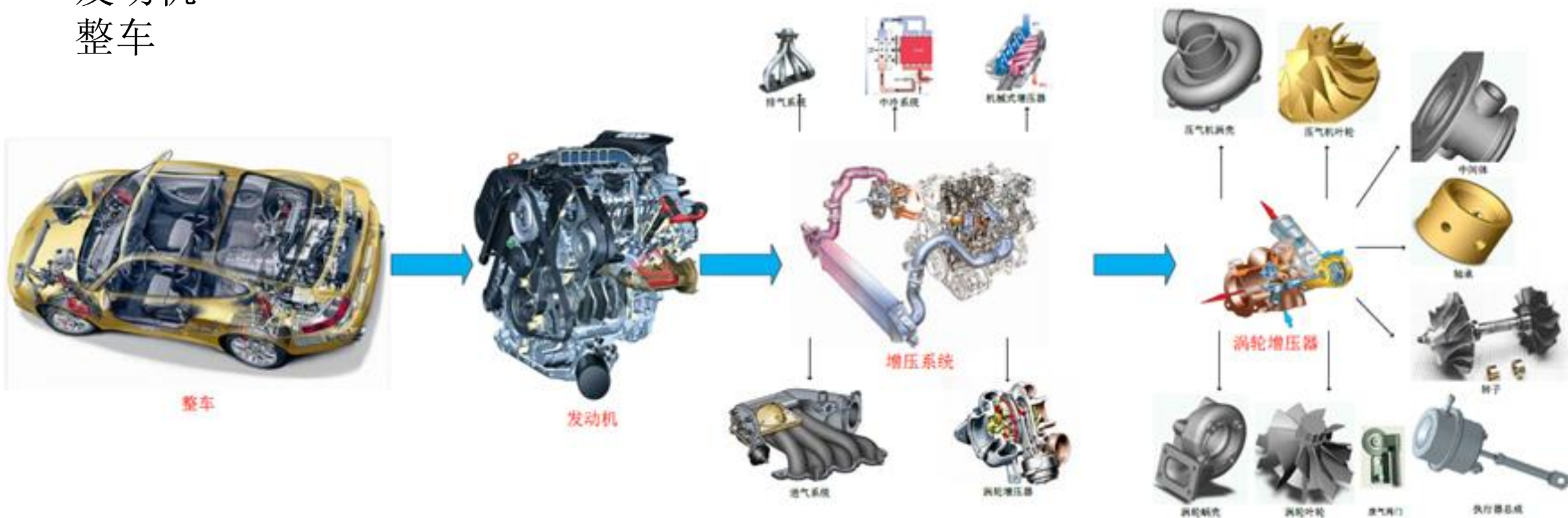
可靠性 (全产业链)

单个零部件

组件：轴、轮-壳、增压器、增压系统

发动机

整车



2.关于产品可靠性

可靠性 — 企业的生命

可靠性保证：材料 - 基础、设计 - 求精、工艺、配套技术（叶轮-压壳）

基础研究

流程和方法

内燃机先进技术译丛

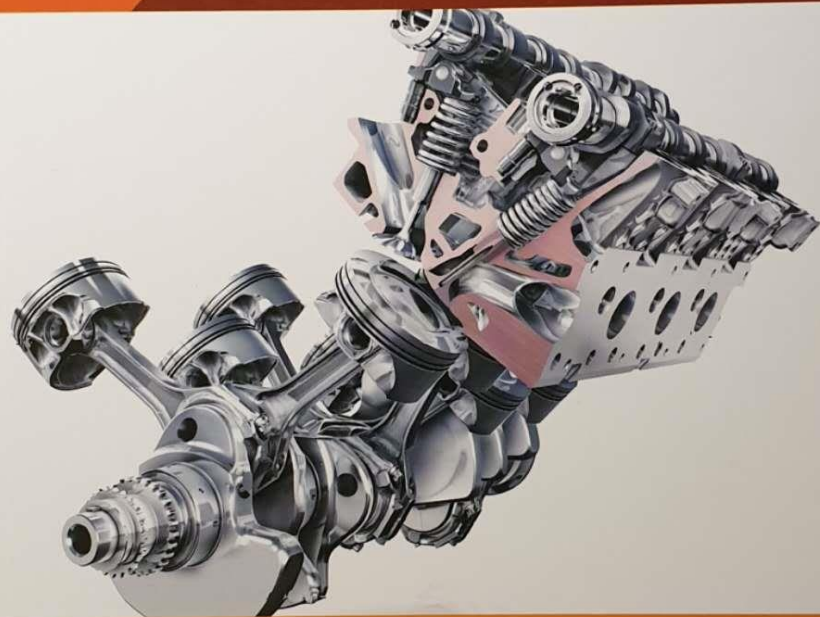
内燃机损伤

——损伤及成因

Motorschäden

恩斯特·格罗伊特 (Ernst Greuter)
[德] 斯特凡·齐马 (Stefan Zima) 著
维尔纳·霍夫曼 (Werner Hoffmann)

倪计民团队 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

目 录

丛书序	
译者的话	
中文版前言	
第4版前言	
第3版前言	
第1章 引论	1
第2章 发动机	6
2.1 主要性能和特性	6
2.2 运行条件	8
2.2.1 发动机设计方案	8
2.2.2 发动机功率和功率下降	10
2.3 发动机运行特性	15
第3章 损伤的定义和概念	33
第4章 损伤的原因	38
4.1 耗损	38
4.2 技术缺陷 (产品缺陷)	39
4.2.1 设计缺陷 (规划缺陷)	39
4.2.2 材料缺陷	42
4.2.3 制造缺陷	42
4.3 运行缺陷	43
4.3.1 过载	43
4.3.2 运行条件的改变	44
4.3.3 操作缺陷	44
4.4 人作为损伤的成因	47
第5章 关于损伤的解释	50
5.1 损伤类型	50
5.1.1 通过机械载荷造成的损伤	50
5.1.2 强力断裂	52
5.1.3 振动断裂	53
5.1.4 通过热载荷造成的损伤	57
5.1.5 通过在含水介质中腐蚀造成的损伤	59
5.1.6 通过摩擦载荷造成的损伤	61
5.2 损伤分析	68
5.2.1 现场察看	68
5.2.2 损伤零部件的保护	69
5.2.3 机械装置与损伤有关的数据的调查	69
5.2.4 损伤形成过程	70
5.2.5 损伤的精确描述	72
第6章 发动机损伤	74
6.1 概述	74
6.2 内燃机的基本结构和功能	80
6.3 零件和部件损伤情况——损伤分析	94
6.3.1 冷却系统和发动机冷却	94
6.3.2 润滑系统和润滑油回路	112
6.3.3 换气过程和换气装置	137
6.3.4 燃烧、点火和燃料	170
6.3.5 气缸盖	228
6.3.6 曲轴箱及其构件和附件	261
6.3.7 活塞	278
6.3.8 连杆	346
6.3.9 曲轴	355
6.3.10 曲柄连杆机构轴承	364
6.3.11 配气机构和附件传动机构	403
6.3.12 飞轮和离合器	418
参考文献和资料来源	432
图片来源	436

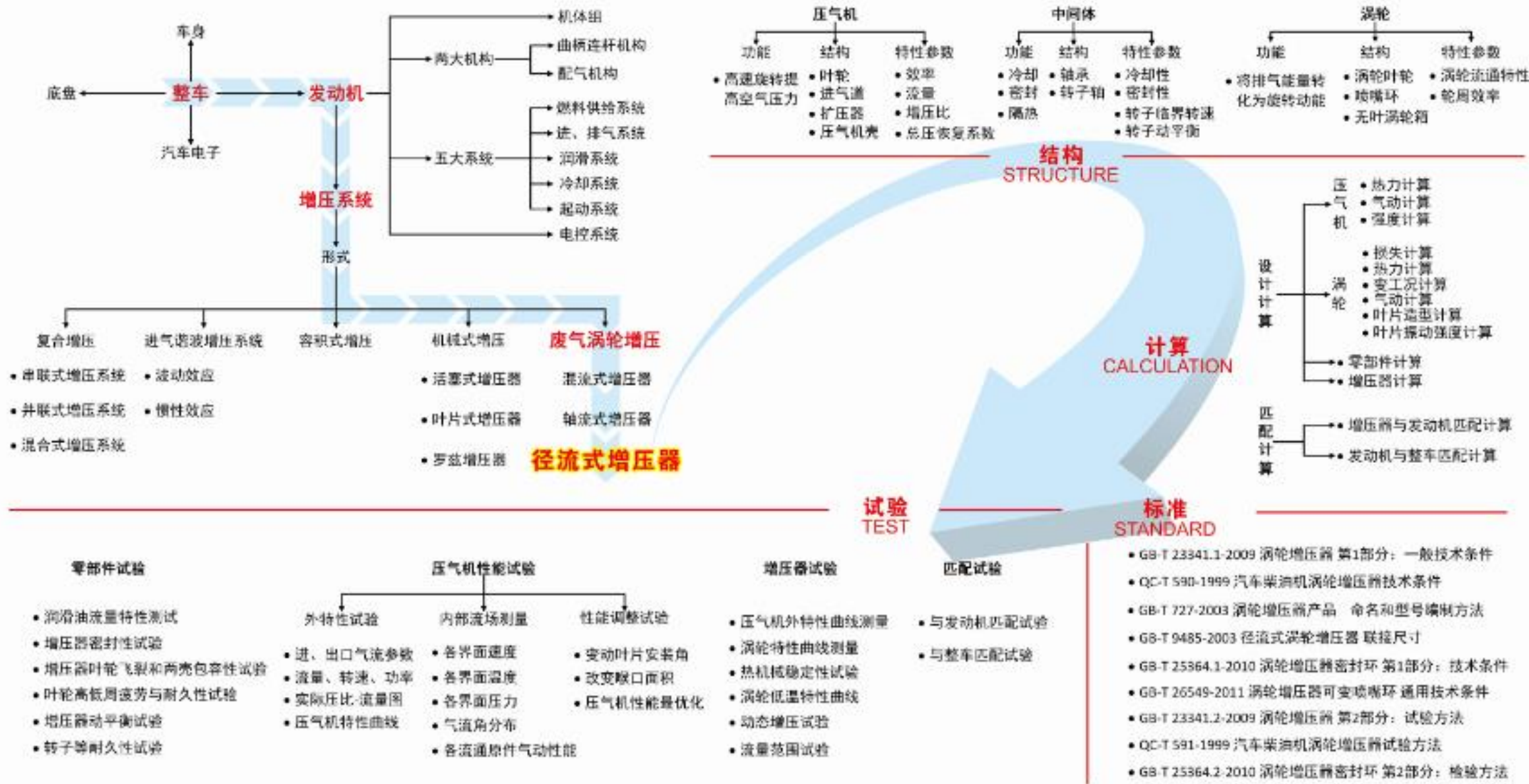
■ 本团队研究成果（学位论文、译著）（不包括发表的论文）

基于凤城市增压器企业产品研发的本团队学生学位论文

序号	姓名	备注	学位论文题目
1	叶	08博	基于CAE技术的发动机产品开发流程研究及应用
2	陈	10博	车用柴油机VNT-VEGR系统的开发研究和性能优化
3	杜	10博	车用发动机DoE方法及应用的基础问题研究
4	王	12博	基于整车性能要求的涡轮增压器匹配及压气机优化设计研究
5	李	14博	计入多影响因素的涡轮增压器浮环轴承润滑机理研究
6	范	14博	轴向气动力学（进行中）
7	陈	12直博	电驱动增压技术+米勒循环
8	高	07中德硕	改进乘用车循环油耗计算精度的研究
9	吴	09汽车硕	基于发动机匹配的涡轮增压器压气机优化设计
10	石	10汽车硕	废气涡轮增压器与发动机的匹配技术和方法研究
11	严	11汽车硕	车用增压汽油机增压器配置及应用性能优化
12	何	11汽车硕	车用发动机涡轮增压器压气机性能研究
13	高	12级硕士	基于参数化的增压器涡轮叶形优化设计
14	刘	12级硕士	涡轮增压器与汽油机全工况匹配及废气旁通阀开度研究
15	沙	12级硕士	涡轮增压汽油机瞬态响应特性分析与优化
16	张	13级专硕	增压器废气旁通阀对增压汽油机瞬态响应特性的影响研究
17	李	14级硕士	车用涡轮增压器压气机叶轮结构有限元分析
18	白	15级硕士	车用涡轮增压器轴承体三维温度场数值分析与试验研究
19	高	16硕	轴向气动力学
20	金	16硕	壳体结构强度
21	黄	17硕	电驱动增压器技术

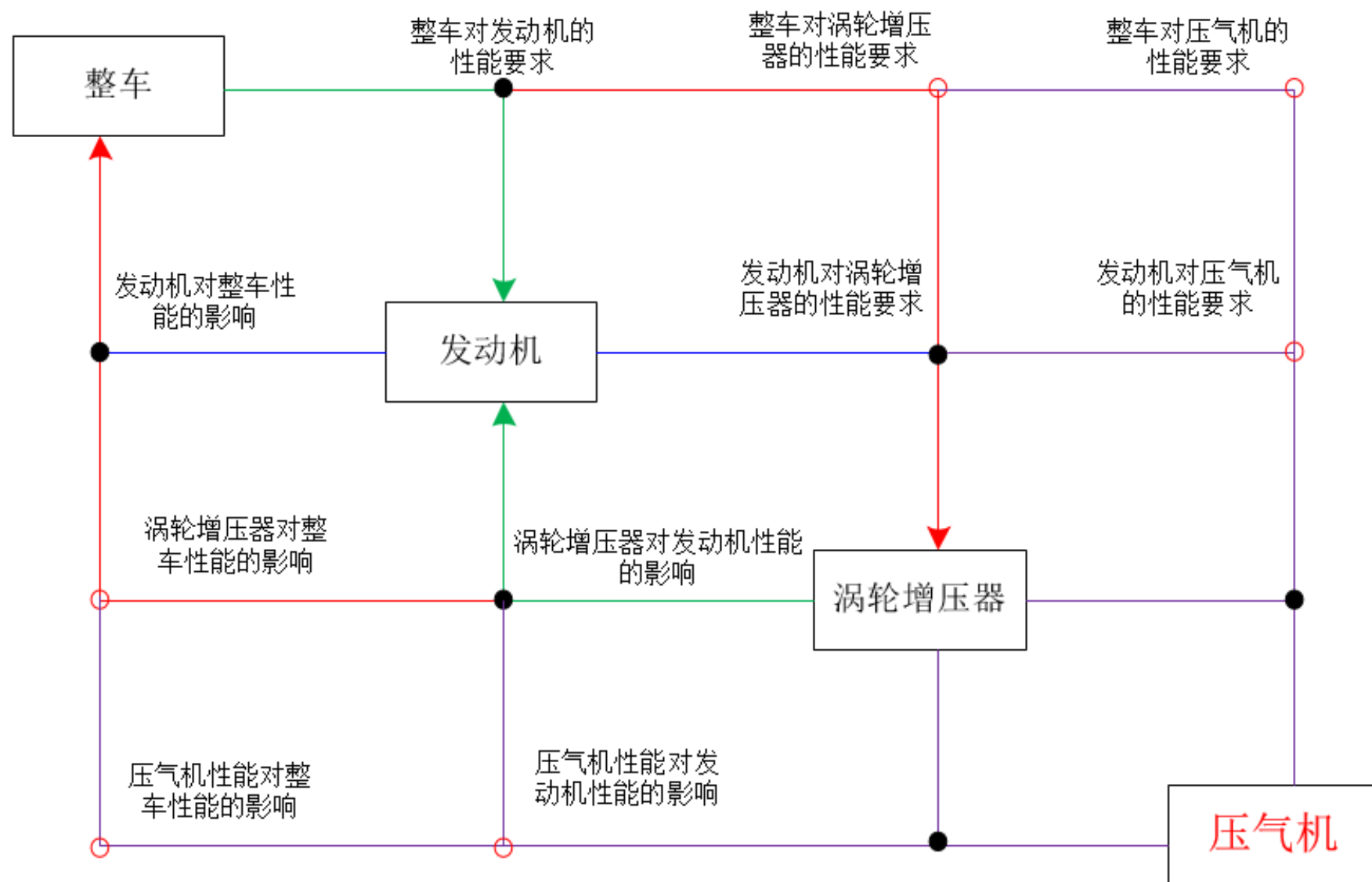
内燃机增压-基础、计算和设计，Pucher教授著，倪计民团队译，机械工业出版社，2018.7

整车-发动机-增压器设计开发CAE



■ 基于整车性能的增压系统正向设计（所有内容来自团队的研究项目）

- 整车动力总成
- 发动机性能
- 增压器性能及可靠性



谢 谢！