

航空发动机转子动力学计算软件开发

于磊,钟易成,李丽

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:为打破国外技术封锁,摆脱对 Matlab 等闭源计算平台的依赖,采用 C++ 语言开发航空发动机转子动力学计算软件 RDyn,基于一维梁单元模型和二维轴对称等参单元模型实现多种动力学特性求解功能,具有良好的前后处理可视化交互界面。利用 Nelson 转子模型,将自研软件的计算结果与商业软件进行对比。结果表明:其误差较小,验证了软件的正确性与实用性。

关键词:航空发动机;转子动力学;有限元;软件开发

中图分类号:V231.9;TP311.52 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0128-04

Software Development of Aeroengine Rotor System Dynamics

YU Lei, ZHONG Yicheng, LI Li

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to break the foreign technology blockade and get rid of the dependence on closed source computing platform such as Matlab, the aeroengine rotor dynamics calculation software RDyn is developed by using C++ language. Based on 1D beam element model and 2D isoparametric element model, the software realizes multiple dynamic characteristics solving functions with good visual interaction interface for pre and post processing. The Nelson rotor model is used to compare the calculation results of self-developed software with those of commercial software. The results show that the calculation error between the self-developed software and commercial software is small, which verifies the correctness and practicability of the developed software.

Keywords: aircraft engine; rotor dynamics; finite element; software development

0 引言

转子系统是航空发动机的核心部件,其高速旋转带来的振动问题一直是制约航空发动机可靠性和寿命的重要问题之一。转子动力学主要关注旋转机械及其支承系统的平衡、振动与稳定性问题。对于航空发动机来说,需要避免工作转速范围内存在临界转速,并且要留有一定的裕度(一般要在 20% 左右)^[1],防止发动机在临界转速附近产生共振,同时尽量消除加工及装配误差带来的影响,故需要对转子系统的动力学特性进行细致的分析和精心的设计。

航空发动机的转子动力学特性研究主要有试验和数值模拟等方法,其中数值模拟研究的平台大多采用国外成熟的工业 CAE 软件如 ANSYS^[2]、SAMCEF^[3]等。由于前期技术积累和重视程度不足及用户范围小等原因,我国工业软件长期被国外垄断,处于被“卡脖子”的状态。近年来,随着重视程度的提高,越来越多的研究人员开始投身于工业软件国产化研究中^[4]。国内方面针对转子动力学特性的研究大多采用国外商业软件,或针对某些具体问题编写基于 Matlab 等第三方平台的数值计算程序。独立研发转子动力学软件的团队较少。近年来,国外对我国部分学校机构的 Matlab 等工业软件进行了技术封锁,限制了部分软件的使用。因此,摆脱第三方闭源平台,开发独立

可视化的转子动力学有限元软件的需求越来越强烈。

1 系统架构

1.1 转子动力学有限元动力学方程

转子动力学有限元方法的实质是采用离散方法求解转子系统的动力学方程,其一般形式如下:

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + C\dot{\mathbf{u}}(t) + K\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: M 为系统惯性矩阵; C 为系统阻尼矩阵; K 为系统刚度矩阵; F 为外力矩阵; \mathbf{u} 为系统位移向量。对于典型转子系统来说,上式中的系数项可以根据转子部件和振动因素分解为

$$\begin{cases} M = M_r + M_b \\ K = K_r + K_b + K_d \\ C = C_r + C_b + \Omega G \end{cases} \quad (2)$$

式中:下标“r”代表转动部件;下标“b”代表转子支承; K_d 为阻尼引起的附加刚度矩阵; G 为陀螺矩阵; Ω 为转速。

1.2 总体框架与主界面

根据转子系统动力学有限元方程求解需求,构建软件总体框架。软件总体分为 GUI 界面、前处理模块、后处理模块和求解器模块等 4 大模块组成,由 Qt 整合各个模块的内容。软件整体框架如图 1 所示。

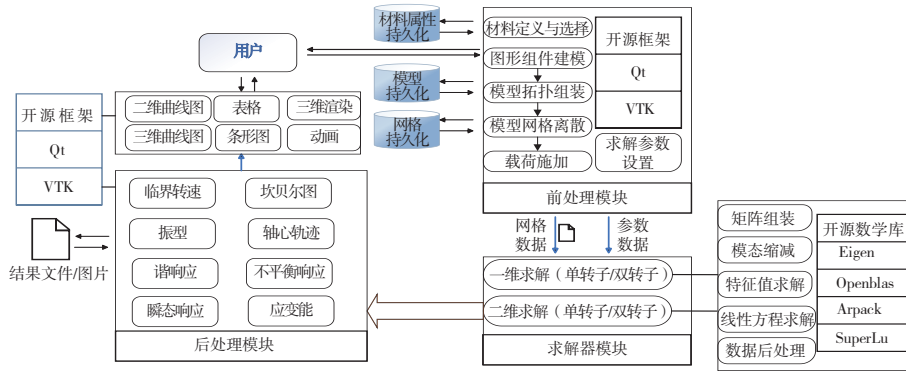


图 1 软件整体框架

转子动力学软件主界面如图 2 所示。主界面分为 5 个功能部分,采用 QDockWidget 派生类嵌套分割生成。图形每个部分包含其对应的管理类,实现该部分的对应功能。用户可以拖动 DockWidget 改变所选择区域的位置。

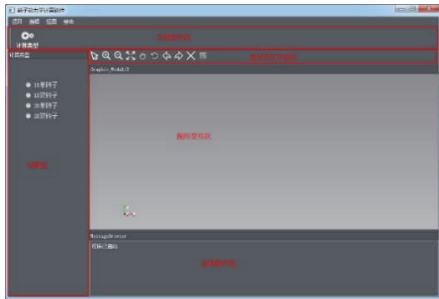
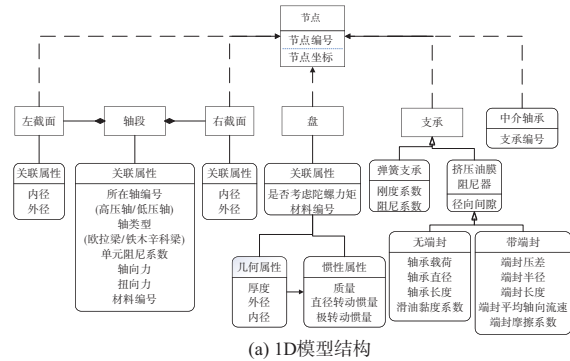
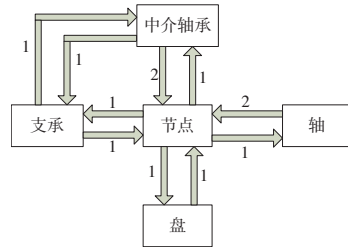


图 2 转子动力学软件主界面

对于一维模型系统,模型组件主要包括节点、轴段、集中质量盘、支承等。各个组件通过节点编号实现模型装配,进而将各个组件的单元矩阵组装成系统的整体矩阵。一维模型组件定义、属性及关联关系、拓扑关系如图 4 所示。



(a) 1D模型结构



(b) 1D模型组件拓扑关系

图 4 1D 模型结构及组件拓扑结关系

1.3 求解器架构

软件求解器主要分为两大功能的实现,分别是一维转子系统计算与二维转子系统。在整体架构上,两种求解都含有相似的架构,即读取模型数据、模型单元矩阵计算、转子系统模型组装及整体矩阵计算、动力学方程求解、后处理操作。求解器整体流程图如图 3 所示。

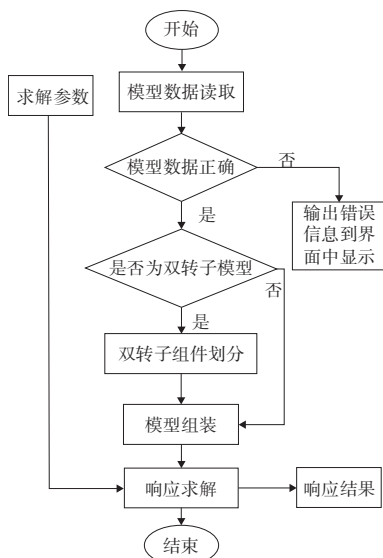


图 3 转子动力学求解流程

二维求解器以网格及支承文件作为模型的输入。其中网格文件参考 ANSYS 的 .ANS 文件格式。网格文件中包含网格节点、网格单元等参数。在求解器中定义网格体系。网格体系包含节点、单元等。网格体系的基本架构如图 5 所示。

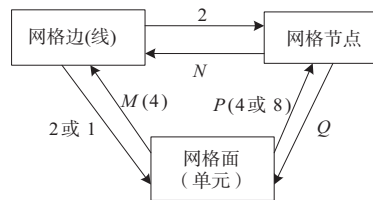
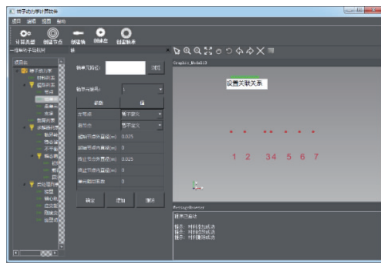


图 5 网格体系架构

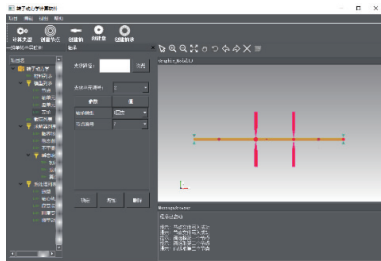
2 前后处理系统实现

2.1 前处理界面实现

1D 前处理模块主要针对 1D 转子系统模型和求解参数进行前处理,主要包括节点、轴段、盘、支承等模型组件的增删改查和动态装配。1D 建模界面如图 6 所示。



(a) 创建轴



(b) 创建轴承

图 6 1D 模型建模界面

模型组件的拾取由 VTK^[5] 的 vtkPropPicker 类实现。组件的拖动、拓扑选取功能类由 vtkInteractor Style Rubber Band3D 的派生类实现。在该类中重写鼠标交互方法,实现模型图形的装配交互。模型的装配流程如图 7 所示。

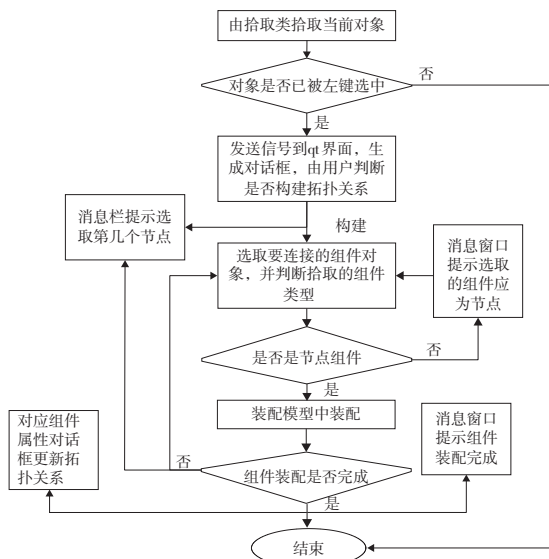


图 7 模型装配流程图

二维模型网格的创建可以采用自定义网格划分的形式,也可以导入 ANSYS 生成的 .ANS 格式的网格。由于采用轴对称等参单元,本文的网格体系以几何模型剖面的一半尺寸设计。自定义网格划分需要选择网格单元类型

(包括 4 节点四边形单元和 8 节点四边形单元),输入网格单元尺度(设置最小网格单元的大小),然后分四步进行网格划分。1) 基于几何模型,将其划分为多个四边形块。2) 根据每个四边形块的 U 向、 V 向长度以及网格单元尺度,计算 U 向、 V 向的网格节点数量。3) 根据该节点数量对该四边形块进行网格划分,并对所有的节点及单元进行编号,建立拓扑关系。4) 对块与块之间的共用节点进行去重,形成整体网格。网格生成如图 8 所示。

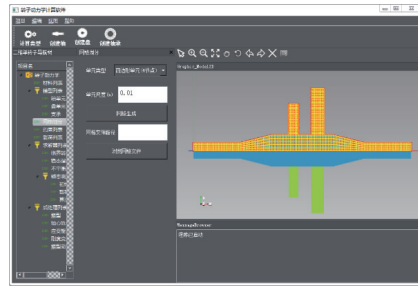


图 8 网格生成

2.2 后处理界面

计算后处理显示功能包括临界转速表与坎贝尔图、振型后处理、轴心轨迹图、谐响应、不平衡响应、应变能等。图形显示功能主要包括二维曲线图、三维曲线图、模型渲染图、柱状图等。2D 曲线图和柱状图主要采用 VTK 中的 vtkChartXY 实现,如图 9 所示。

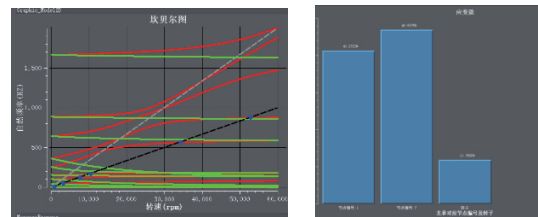


图 9 二维曲线图与柱状图

振型的计算结果可以采用三维曲线和三维渲染模型显示,如图 10 所示。其中三维渲染图使用 vtkTubeFilter 类,以计算出振型曲线作为中心线,设置振型曲线不同位置的半径,拉伸出圆柱体。针对空心轴,需要根据内径与外径生成两根轴,然后,对两根轴进行布尔运算,获取到最终的空心轴,实现三维模型重构。



(a) 三维曲线 (b) 三维模型渲染

图 10 振型图

3 算例验证

3.1 一维模型计算结果验证

采用文献[6]论文中的算例验证转子动力学软件 1D 单转子系统计算准确性。转子系统模型材料为钢,其密度为 7806 kg/m^3 ,弹性模量为 207 GPa ,泊松比为 0.3。ANSYS 和自研软件建立的模型图形如图 11 所示。模型分为 19 个

节点。其中第5个节点上含有一集中质量盘。该盘的质量为1.401 kg,直径转动惯量为 $0.001\ 36\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,极转动惯量为 $0.002\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。在第11节点和第15节点装有支承轴承,两个轴承的 k_{xx} 和 k_{yy} 刚度都为 $4.38\times 10^7\text{ N/m}$ 。

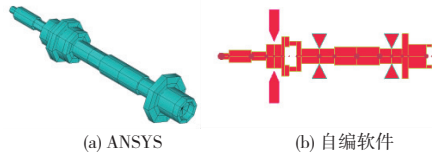


图 11 算例模型图形

文献[6]中 Nelson 转子的前三阶临界转速计算结果如表 1 所示,自编软件与 ANSYS 计算结果的最大误差为-1.04%,小于 5%,最大误差在三阶正进动的位置。二阶反进动的误差最小,误差为 0.07%。

表 1 一维模型临界转速

条件	临界转速/(r/min)		
	ANSYS	自编软件	误差/%
一阶反	15 404	15 386	-0.12
一阶正	17 042	17 019	-0.13
二阶反	46 509	46 542	-0.07
二阶正	49 806	49 858	-0.10
三阶反	64 779	64 364	-0.64
三阶正	95 828	94 832	-1.04

图 12 为 ANSYS 和自编软件获得的 Campbell 图。由图可知,转子的正反进动特性基本一致。自编软件计算结果与 ANSYS 结果非常相近,这说明自编软件计算结果满足工程计算精度要求。

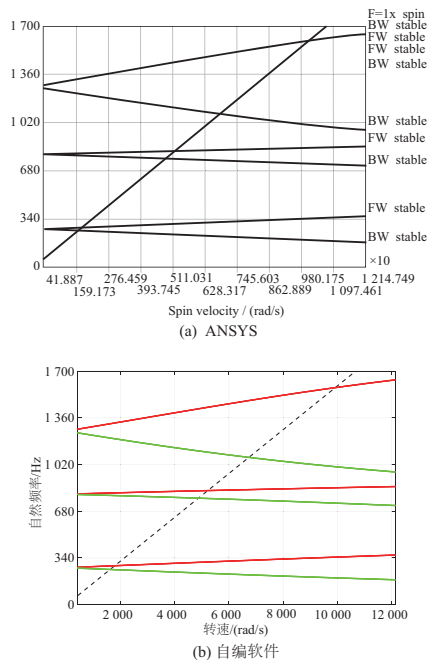


图 12 ANSYS 软件与自编软件的 Campbell 图

一阶正进动临界转速下对应的振型如表 2 所示。自编软件采用 3D 图形渲染的方式与 ANSYS 计算结果进行

对比。自编软件图形中的方框为转子未变形时的图形边界。由表 2 可以看出,转子在前三阶正进动转速下表现均为弯曲振型,自编软件的振型与 ANSYS 的计算结果弯曲趋势基本一致。

表 2 一维系统振型图

振型	ANSYS	自编软件
一阶正进动		
二阶正进动		
三阶正进动		

3.2 二维模型计算结果验证

二维算例转子系统模型与一维一致,其对称面网格如图 13 所示。为排除网格对计算结果的影响。自编软件采用 ANSYS 生成的网格进行计算,保证对比计算的网格一致。

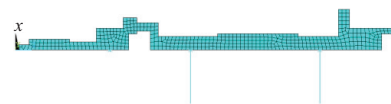


图 13 Nelson 转子二维网格模型

二维模型前三阶临界转速计算结果如表 3 所示,对比 ANSYS 的 solid272 单元计算结果与自编软件的结果可以看出,自编软件计算出的临界转速比 ANSYS 计算得到的较小,最大误差在第三阶正进动位置,相对误差为-1.22%。最小误差位于二阶正进动位置,误差为-0.3%。

表 3 二维模型临界转速

条件	临界转速/(r/min)		
	ANSYS	自编软件	误差/%
一阶反	15 205	15 037	-1.10
一阶正	16 919	16 773	-0.86
二阶反	45 403	45 091	-0.69
二阶正	48 898	48 751	-0.30
三阶反	61 595	61 155	-0.71
三阶正	91 135	90 025	-1.22

(下转第 143 页)

3 结语

本文运用数值模拟方法进行了液氢涡轮泵的仿真,探究了叶片前缘积叠线构型在不同流量工况下对离心轮性能的影响,得到了以下结论。

1) 未考虑空化时,标准与小流量工况的压头分别较大流量工况增大 74% 及 120%, 而效率则减小了 4% 及 28%。较低的流量会导致更严峻的工作条件。

2) 压头和效率在大流量工况下随积叠线倾斜度上升,而在小流量工况下则随之下降。对积叠线的倾斜调整能使冲角沿叶高减小,改善小流量工况下的空化性能。

3) 标准流量下,倾斜角 θ 的取值在 $55^\circ \sim 80^\circ$ 时该泵体具有较好的抑制空化能力。此时冲角在叶根与叶尖较小,最高可使空泡体积减小 67.9%, 但继续增大 θ 则会促使空化发生。

参考文献:

- [1] 朱一骁,王申,白雪蕊. 国内高校重点实验室火箭发动机发展现状[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):206-207,225.
- [2] 季斌,程怀玉,黄彪,等. 空化水动力学非正常特性研究进展

及展望[J]. 力学进展,2019,49(0):428-479.

- [3] 陈尧. 基于 CFD 的低比转速离心泵叶轮多目标优化设计与实验[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [4] 项乐,陈晖,谭永华,等. 液体火箭发动机诱导轮空化热力学效应研究[J]. 推进技术,2020,41(4):812-819.
- [5] KIM J, SONG S J. Visualization of rotating cavitation oscillation mechanism in a turbopump inducer [J]. Journal of Fluids Engineering, 2019, 141(9):091103.
- [6] ZHOU F M, WANG X F. The effects of blade stacking lean angle to 1400 MW canned nuclear coolant pump hydraulic performance[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 325:232-244.
- [7] YAN P, LI S Y, YANG S, et al. Effect of stacking conditions on performance of a centrifugal pump [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(2):689-696.
- [8] CSOMOR A, WARREN D. Small, high pressure liquid hydrogen turbopump [M]. Washington: NASA-Lewis Research Center, 1977.
- [9] 张亚太,陈晖,项乐,等. 基于正交优化设计的诱导轮空化性能研究[J]. 推进技术,2020,41(2):343-352.

收稿日期:2022-01-19

(上接第 131 页)

ANSYS 计算出的坎贝尔图与自编软件计算出的坎贝尔图如图 14 所示。可以看出,坎贝尔图的正负进动计算结果一致。

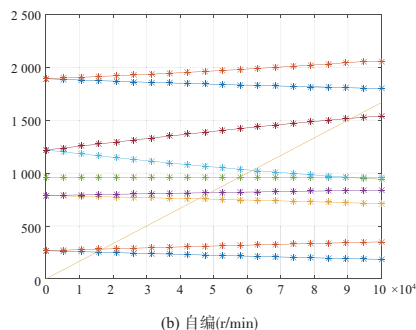
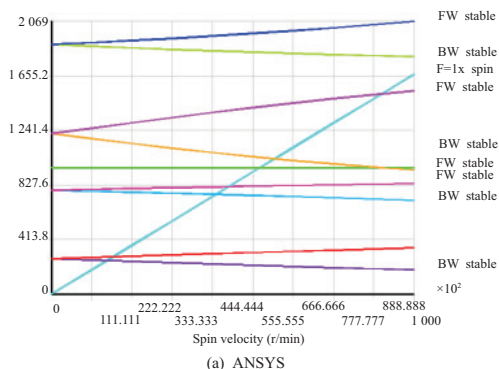


图 14 ANSYS 软件与自编软件计算出的二维模型的 Campbell 图

4 结语

本文基于一维梁单元和二维轴对称单元构建了转子

系统的有限元求解平台,并验证了其计算的正确性。

1) 构建了转子系统的动力学模型,实现了临界转速、振型等动力学特性的求解。并通过与 ANSYS 软件计算结果对比,验证了固有特性的正确性。自编软件计算出的 Nelson 转子一维转子系统前三阶临界转速误差在 -1.04% 以内,二维转子系统前三阶临界转速误差在 -1.22% 以内。

2) 基于 Qt+VTK 框架实现了较为完善的软件前处理功能。构建了材料属性定义模块。完成了模型组件的建模、拾取、装配等功能开发。针对二维模型,实现了网格划分、ANS 网格读取等功能。

3) 实现了较为强大的后处理功能。针对后处理需求,实现了曲线图、柱状图、渲染图等多种后处理功能开发。后处理模块结果显示直观清晰,显示效果美观。

参考文献:

- [1] 廖明夫. 航空发动机转子动力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2015.
- [2] THOMPSON M, THOMPSON J M. ANSYS mechanical APDL for finite element analysis[M]. [S.l.]:s.n.: 2017.
- [3] 于晓凯,徐俊,谢鹏飞,等. 基于 Samcef Rotor 和 Cobra 的某滚动轴承-转子系统固有频率分析[J]. 智能制造,2017(8):38-41.
- [4] 周建君,许俊海,范青山,等. ABAQUS 二次开发在自冲铆接模拟中的研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):146-148.
- [5] 申超群,高静. 基于 VTK 的 SRM 断面图像三维重建系统构建[J]. 计算机仿真,2016,33(3):90-94.
- [6] ZORZI E S, NELSON H D. The dynamics of rotor-bearing systems with axial torque—a finite element approach[J]. Journal of Mechanical Design, 1980, 102(1):158-161.

收稿日期:2022-02-10