

## 航空发动机整机振动可视化仿真

李旭鹏, 陈 果

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 航空发动机整机振动可视化仿真技术是整机振动与分析的重要组成部分, 通过将计算仿真和实验数据进行动画显示, 可以动态地观察到转子系统的振动, 转静间隙的变化规律, 以及容易产生转静碰摩的部位, 从而更加方便地评估发动机振动状态, 诊断发动机故障。为了突出整机振动可视化重点, 依据有限元梁模型构建二维显示模型, 并基于面向对象的方法, 建立了航空发动机可视化的部件与整机模型。模型的建立与修改方便容易, 同时利用仿真数据驱动动画模型, 直观有效地展示了航空发动机整机振动过程。

**关键词:** 航空发动机; 整机振动; 计算机图形学; 可视化技术

中图分类号: V239; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1671-654X(2013)01-0110-03

## Visualization Simulation for Aero-engine Vibration

LI Xu-peng, CHEN Guo

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aero-engine vibration visualization simulation technique is the important part of the whole machine vibration and analysis. Using dynamic display simulation and experimental data, we can dynamically observe the rotor system vibration, the change rule of rotor-stator clearance and the locations rubbing, and thereby more easily evaluate engine vibration state, diagnosis engine vibration faults. In order to stand out the visual focus of the whole machine vibration, and the object-oriented method is used to establish the aero-engine visual components and whole machine model, which is easier to model and modify, and at the same time, the data is used to drive animation model, and it displays aero-engine machine vibration.

**Key words:** aero-engine; whole-machine vibration; compute graphics; visualization

### 引言

科学计算可视化技术 (Visualization in Scientific Computing) 是在 20 世纪 80 年代后期提出并发展起来的一个新的研究领域, 运用计算机图形学将科学计算过程中或最终结果转换为图形图像展现出来, 目前正广泛应用于气象学、石油勘探、转子结构力学、分子生物学、医学、有限元分析等领域。科学计算可视化将极大地提高科学计算数据的处理速度和质量, 实现科学计算工具和环境的现代化。

对于振动数据进行可视化, 可以增加人们对结构振动状态的理解, 便于了解结构振动的状态。目前国外著名的商业有限元软件, 如 ANSYS、NASTRAN、ABAQUS、MARC、ADINA 等, 均具有较强的图形及动画显示能力, 在国内也有许多研究者实现了振动仿真数据的可视化<sup>[1-2]</sup>。

航空发动机作为飞机的心脏, 其整机振动状况关系到飞机的安全和舒适度, 转静碰摩是目前航空发动机普遍存在的故障, 也有众多学者从理论上分析了其振动原因<sup>[3]</sup>, 从而为有效地诊断和预防碰摩故障提供了理论依据, 但是目前基于碰摩的故障的动画仿真, 整机振动的可视化技术研究较为少见。鉴于此, 本文为降低建模难度, 提高建模效率, 突出可视化重点目标, 依据有限元梁模型, 实现了转子、机匣等关键部件的二维图形模型的建立, 并基于面向对象的方法, 定义了模型的成员变量和函数, 为发动机部件建模提供了重要途径。最后本文采用了 Microsoft Visual C++ 6.0 和 OpenGL<sup>[4-7]</sup> 实现了航空发动机整机振动建模与动画仿真, 并开发了航空发动机整机振动可视化建模与动态显示系统 Aero-Engine Vibration Visible Modeling and Dynamic show system (EVADS), 并用实例验证了系统。

收稿日期: 2012-09-06

基金项目: 国家安全重大基础研究项目资助(613139)

作者简介: 李旭鹏(1988-), 男, 山西阳城人, 硕士研究生, 主要研究方向为航空发动机可视化建模。

### 1 某型航空发动机结构简图及其可视化目标

图1为某型航空发动机结构简图,包括低压压气机转子、低压气机叶片(3级)、低压涡轮转子、低压涡轮叶片(2级)、高压转子、高压压气机叶片(9级)、高压涡轮叶片、前支板、中支板、后支板、拉杆、风扇机匣、中介机匣、外机匣及内涵机匣。其中,低压压气机转子通过支点1和支板支承在风扇机匣上,通过支点2和支板支承在中介机匣上,低压压气机转子和低压涡轮转子通过套齿联轴器联接。低压涡轮转子通过支点5和后支板支承在内涵机匣上,内涵机匣与外涵机匣间通过拉杆连接。高压转子前支承端通过支点3和中支板支承在中介轴上,后端通过支点4(中介轴承)支承在低压涡轮转子上。

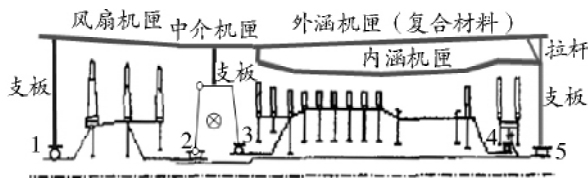


图1 某型航空发动机结构简图

根据航空发动机整机振动特征,提出可视化主要目标为:

- 1) 航空发动机整机转子-支承-机匣的纵截面显示,从纵向观察发动机的转静间隙;
- 2) 发动机关键横断面显示,其中包括多支点变形,转子-盘-叶片-机匣的转静间隙显示;
- 3) 转轴中心线(轴心)的二维动态显示。

### 2 系统架构

在本文中采用了面向对象的编程思想。通过建立航空发动机整机模型,用二维简化图来动画显示航空发动机。其中通过数据导入,使用振动数据调用OpenGL库函数来驱动仿真模型产生动画,系统架构如图2所示。

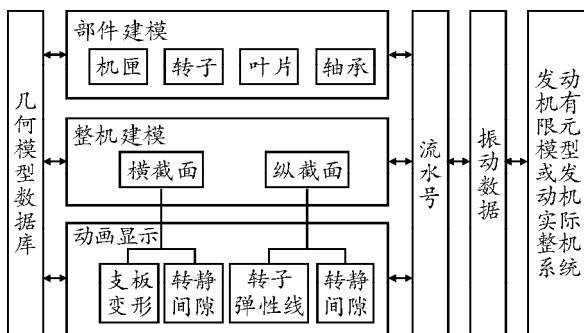


图2 系统架构图

航空发动机主要由机匣、支板、转子、叶片、轴承组成。本文建立了一个航空发动机二维图形模型,模型由一系列有代表性的图形单元组成。系统将一个图形单元定义为单元模型的对象,首先建立单部件模型,并保存于几何模型数据库。当系统输入模型部件后,根据部件的相对坐标有机地组合为一个模型整体,通过各个部件的位置矢量,以流水号建立图形模型与有限元模型的联系,将模型数据与计算数据一一对应起来。振动数据则直接从数据文件读出,并保存在内存中,驱动模型产生动画显示。

### 3 面向对象的航空发动机部件图形建模

为了避免三维复杂建模,实现部件振动特征,航空发动机的部件用了简图方式建模。航空发动机模型主要由机匣、叶片、支板轴承、安装节组成。为了完成数据输入,建立一个仿真的航空发动机二维的图形模型,模型由一系列的代表性的单元组成。系统将输入的数据存入对应的数据库。

在部件纵截面建模时采用面向对象的建模方法,将每个部件考虑为一个对象,每个对象有线型、顶点对应的流水号、颜色、线宽等。并可以通过模型设置动态修改模型顶点坐标。

以高压涡轮叶片为例,该部件建模过程如图3所示,图4为建模界面。首先,需要创建高压转子模型设置的类 CSetHPTBDlg,其中包含成员变量:颜色选择(m\_ComboColor),线型选择(m\_ComboLineType),线宽选择(m\_ComboLineWidth),位置坐标(m\_dX,m\_dY,m\_dZ),顶点流水号(m\_iCNo)。然后将模型存入数据库中,高压转子模型数据库的类为 CSetHPTBSet,其中包含成员变量:颜色(m\_sColor),线型(m\_sLineType),线宽(m\_sLineWidth),顶点坐标(m\_dX,m\_dY,m\_dZ),顶点坐标 m\_iCNo。高压转子模型数据结构类 CMyHPTB,其中包含成员变量:颜色(m\_sColor),线型(m\_sLineType),线宽(m\_sLineWidth),顶点坐标(m\_dX,m\_dY,m\_dZ),顶点流水号(m\_iCNo)。

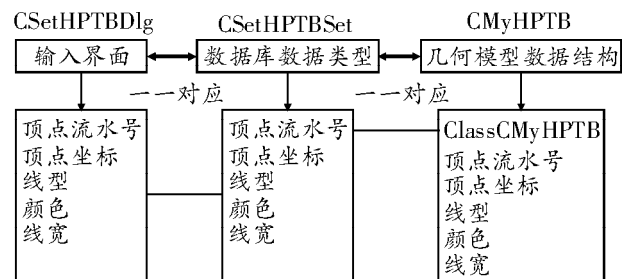


图3 模型建模图

当系统确定输入各个部件后,按照序号得到相应的图形单元,根据各个部件的建立顺序将部件进行排列起来,且根据各部件的既定的物理坐标和相对坐标有机地组合成一个模型整体。当系统可视化显示时,从数据库中读取相应数据,在各个部件建模完成后,将各部件的数据模型进行显示,即可得到整机振动纵截面模型和横截面简图。

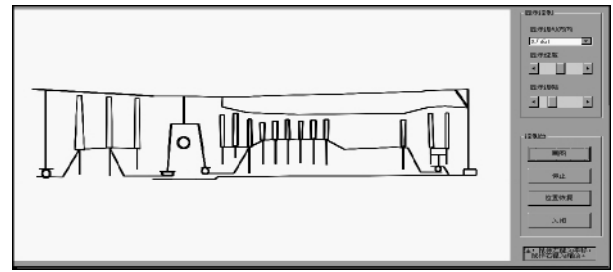


图 5 航空发动机模型纵截面振动图

### 4 应用实例

首先通过导入仿真或实验获得的振动数据,将振动数据导入模型,通过流水号来获得相应模型编号,在相应的模型中,通过控制模型顶点坐标数据的振动变化,实现航空发动机的整体模型的横截面、纵截面。软件实现的流程图如图 4。

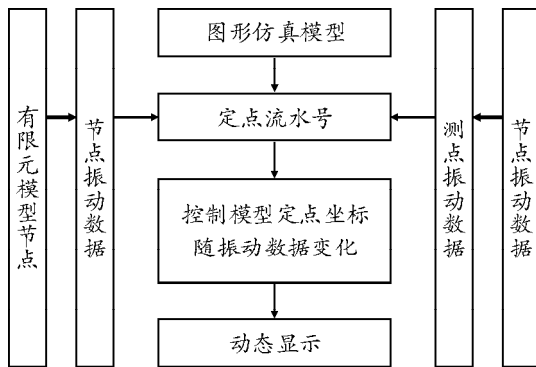


图 4 软件流程图

转子系统的运动微分方程为:

$$M_s \ddot{q}_s + (C_s - w\dot{G}_s) \dot{q}_s + k_s q_s = Q_s$$

式中  $Q_s$  为系统广义外力向量;  $M_s$  为系统质量矩阵;  $G_s$  为系统阻尼矩阵;  $k_s$  为系统刚度矩阵;  $C_s$  为系统阻尼矩阵;  $q_s$  为系统广义位移。通过求解系统响应即可获得每个节点的位移。利用节点为位移即可驱动图形仿真模型,产生动画。

软件的整体模型横截面振动显示如图 5。同时当图形振动时可以通过速度与振幅的滑块来相应的调整振动显示的速度与振幅。并可显示  $x, y$  方向的振动,和某个部位的振动。

### 5 结论

本文建立了航空发动机整机振动可视化的模型,并与有限元计算模型进行了连接,实现了计算数据的可视化动态显示,包括纵截面的整机振动显示,横截面的支板变形,转静间隙显示以及转子弹簧弹性变形线的动态显示等功能,本文研究工作将为航空发动机整机振动的计算可视化提供重要思路和方法。

### 参考文献:

- [1] 王波,唐海龙,仲如浩. 可视化航空发动机性能仿真[J]. 航空动力学报,2009,24(3): 602-607.
- [2] 张亮,雷勇,刘明涛. 基于三维可视化技术的航空发动机试验舱设计[J]. 测控技术,2011,30(12): 91-94.
- [3] Chen G, Li C G, Wang D Y. Nonlinear Dynamic Analysis and Experiment Verification of Rotor-Ball Bearing-Support-Stator Coupling System for Aeroengine with Rubbing Faults[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2010,132: 1-9.
- [4] 和平鸽工作室. OpenGL 高级编程与可视化系统开发: 系统开发篇[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [5] 孙家广,杨长贵. 计算机图形学基础教程[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社,2009.
- [6] Edward Angle 著. OpenGL 编程基础[M]. 第三版. 段菲,译. 北京: 清华大学出版社,2008.
- [7] Richard S Wright Jr, Michael Sweet. OpenGL 超级宝典[M]. 第五版. 付飞,李艳辉,译. 北京: 人民邮电出版社, 2012.