

doi: 10.7690/bgzdh.2022.06.010

Φ5 m 立式风洞尾旋试验 3 维场景复现软件

成 垒, 颜 来, 宋 晋, 孔 鹏

(中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为直观展示风洞尾旋试验结果, 提高数据的利用率, 基于 OpenSceneGraph 3 维渲染引擎设计一款软件。以模型数模与位置、姿态角、舵偏角等数据为输入, 将尾旋试验过程 3 维复现, 并可自由调整观察视角、控制渲染速度、导出尾旋动画。结果表明: 该软件已成功应用于气动中心 Φ5 m 立式风洞尾旋试验, 有效提升试验效率和数据分析体验。

关键词: Φ5 m 立式风洞; 尾旋试验; 3 维场景渲染

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

3D Scene Reproduction Software for Spin Test in Φ5 m Vertical Wind Tunnel

Cheng Lei, Yan Lai, Song Jin, Kong Peng

(Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to visually display the wind tunnel spin test results and improve the utilization of data, a software is designed based on OpenSceneGraph 3D rendering engine. With the input of model data, position, attitude angle and rudder deflection angle, the spin test process can be reproduced in three dimensions, and the viewing angle can be adjusted freely, the rendering speed can be controlled, and the spin animation can be derived. The results show that the software has been successfully applied to the aerodynamic center Φ5 m vertical wind tunnel spin test, which effectively improves the test efficiency and data analysis experience.

Keywords: Φ5 m vertical wind tunnel; spin test; 3D scene rendering

0 引言

尾旋是飞机在超临界迎角范围出现绕其纵轴的自转后, 在气动力、惯性力及重力的共同作用下, 一方面绕其自身 3 根体轴旋转, 另一方面沿半径很小的螺旋形轨迹自发下降的运动^[1]。飞机尾旋状态是很危险的飞行状态, 极易出现意外事故。研究飞机尾旋的主要手段是风洞试验, 如在气动中心低速所 Φ5 m 立式风洞开展的飞机尾旋试验^[2-5], 使用几何相似、动力学相似的缩比模型, 利用无线电舵机控制舵偏角, 将模型投入风洞试验段后, 在气流作用下, 飞机以设定好的舵面偏转策略进入尾旋运动状态, 通过计算机控制舵机实施尾旋改出操纵, 考核飞机尾旋改出效果。整个试验过程中通过相机进行全程录像, MEMS 传感器测量模型姿态角^[6-8], OptiTrack 系统测量模型质心位置^[9], 试验人员通过计算飞机平均迎角、旋转速率、尾旋半径等特征量评价尾旋模型特性, 并通过查看录像评估飞机尾旋改出情况。

目前这种尾旋试验数据分析方法, 用于定量分析的位置、姿态角数据与判断尾旋试验情况的录像

数据缺乏有效关联, 数据分析不直观, 并且不便于查看尾旋改出操纵响应情况, 试验数据利用不充分。为方便、直观、高效地分析尾旋试验数据, 开发了一套尾旋试验 3 维场景复现软件, 实现试验数据的可视化与综合运用。

1 软件设计要求

尾旋试验场景如图 1 所示。

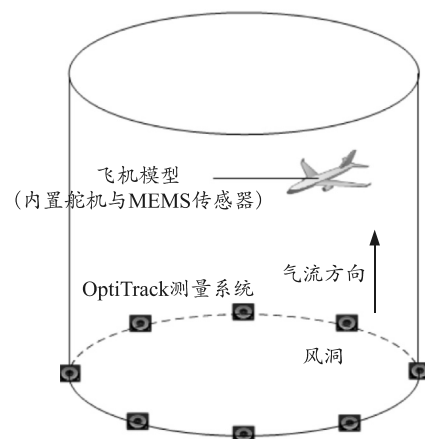


图 1 Φ5 m 立式风洞尾旋试验场景

软件设计目标是基于试验中获取的位置、姿态

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-04-28

作者简介: 成 垒(1988—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事风洞测控技术、风洞视觉测量技术研究。E-mail: dalishx@qq.com。

角、舵偏角等信息，以及模型数模文件，将整个尾旋过程进行 3 维渲染。要求实现的基本功能：

- 1) 读取并显示数字模型，支持 CATIA 设计软件输出的文件格式，能够对试验模型进行 3 维展示；
- 2) 读取模型位置、姿态角、舵偏角信息，结合试验模型数模，逐帧进行试验 3 维场景渲染，复现尾旋试验过程；
- 3) 可以同时多视角观察模型 3 维场景复现过程，视角可自由切换，并且复现过程可暂停、快放或慢放；

4) 模型尾旋试验 3 维场景复现过程可以动画形式导出。

2 软件设计方法

2.1 软件平台和运行环境

2.1.1 软件平台

选用微软基础类库 (microsoft foundation class, MFC) 作为软件框架平台，MFC 是微软公司提供的的一个类库^[10]，以 C++类的形式封装了 Windows 应用程序接口 (application programming interface, API)，开发人员可以使用预设的控件搭建软件界面。选用 OSG (OpenSceneGraph) 作为 3 维渲染引擎^[11-12]，OSG 是一个基于工业图形标准 OpenGL 的高层次图形开发 API 接口，负责模型 3 维场景构建和 3 维场景复现过程的实现。

2.1.2 运行环境

软件运行的硬件环境为 x86 兼容机，软件环境为 Windows 7 操作系统，开发工具为 Visual studio 2010，使用 C++编写。

2.2 软件界面及功能说明

3 维场景复现软件主界面如图 2 所示，主要由模型显示区和参数设置区组成。模型显示区共有 3 个：第 1 显示区为自由视角图，可通过鼠标操作自由调节观察视角，该区域同时显示模型位置、姿态角、舵偏角等信息；第 2 显示区为正视图；第 3 显示区为仰视图。参数设置区包括模型配置文件导入，数据文件导入，渲染过程控制等功能。

模型配置文件为文本文件，每 3 行为一组 (忽略空行或以“#”开头的行)，依次为数模标识、数模文件路径、初始位置姿态参数。其中，数模标识定义如表 1 所示，数模文件和初始位置姿态参数由数模设计软件给出。典型的模型配置文件如图 3 所示。

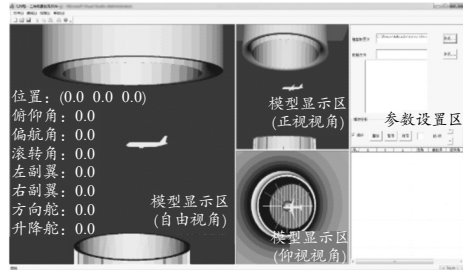


图 2 3 维场景复现软件主界面

表 1 数模标识定义

序号	模型名称	标识
1	风洞主体	windtunnel_model
2	试验模型	main_model
3	左副翼	left_a
4	右副翼	right_a
5	方向舵	model_r
6	升降舵	model_e



图 3 模型配置文件格式

数据文件的格式如图 4 所示。每一行的数据为该时刻模型位置姿态信息和各个舵面的角度信息，数据记录了尾旋试验过程和舵面操作情况。2 行数据对应时间间隔由 MEMS 传感器和 OptiTrack 测量系统采样周期确定。

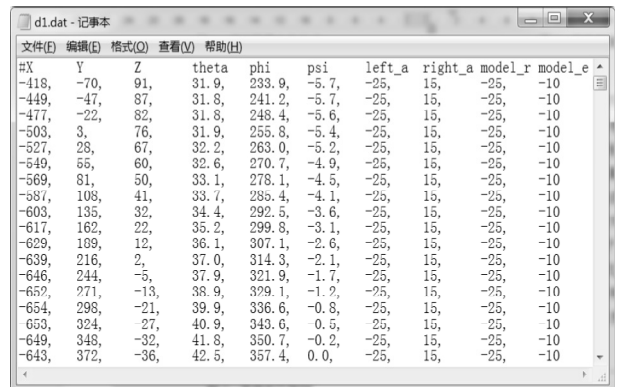


图 4 数据文件格式

软件使用时，先准备好模型数模文件、初始位置姿态信息等，编辑生成模型配置文件；准备好由 OptiTrack 测量系统和 MEMS 传感器提供的尾旋试验模型位置姿态数据及模型舵面操作数据，编辑生成数据文件。分别导入模型配置文件和数据文件，即可开始 3 维场景复现。根据需要可在第 1 显示区使用鼠标操作自由调节观察视角，可在参数设置区进行 3 维渲染控制、导出 3 维场景动画等。

2.3 关键技术点

2.3.1 软件框架

采用 MFC 单文档模式搭建了软件主体框架，使用窗口分割类 CSplitterWnd 2 次分割主显示区域，形成总体 3 列、中间 2 行的布局，前 2 列 3 个窗口连接 CView(视图类)用于 3 维场景显示，第 3 列一个窗口连接 CDialog(对话框类)用于参数设置。软件框架如图 5 所示。

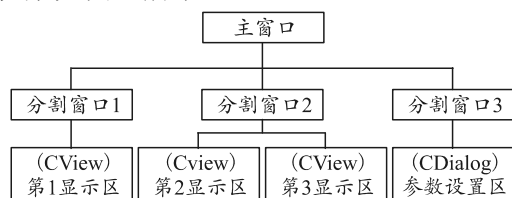
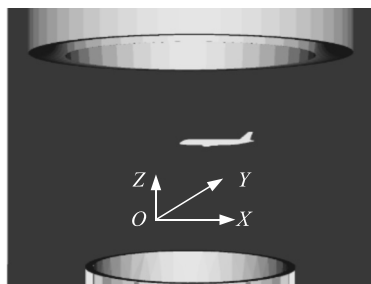


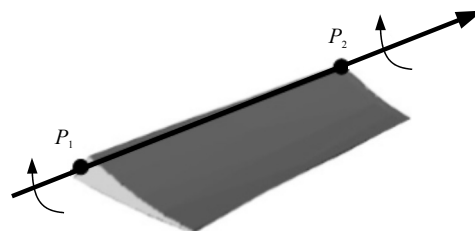
图 5 软件框架

2.3.2 3 维场景坐标系

尾旋试验 3 维场景主要包括风洞模型、飞机模型、左右副翼、方向舵及升降舵等部件模型，针对各自特点，在 3 维场景渲染时，使用 2 个坐标系。对于风洞模型和飞机模型，使用绝对坐标系描述其位置、姿态；比如，将风洞试验段中心定义为坐标轴原点，从试验大厅面向风洞试验段，向右为 X 轴正方向，向上为 Z 轴正方向，Y 轴由右手坐标系确定。对于飞机部件，包括左右副翼、方向舵、升降舵等，由于在尾旋试验过程中，舵面与飞机模型之间仅存在绕旋转轴旋转的相对运动，使用相对坐标系描述其偏转状态更为方便。尾旋试验 3 维场景坐标系如图 6 所示。



(a) 使用绝对坐标系描述风洞和飞机模型位置姿态



(b) 使用相对坐标系描述舵面偏转状态

图 6 尾旋试验 3 维场景渲染时坐标系的使用

2.3.3 3 维场景结构

软件使用了 OSG 中典型的“3 维场景树”结构，根节点为 Group 类的实例，下设的风洞、飞机模型主体、飞机模型部件等子节点均为 PositionAttitudeTransform 类的实例，该类型可以设置位置姿态参数，用于 3 维场景的展示与动画的实现。飞机模型部件作为飞机模型主体的子节点，在 3 维场景渲染时，其实际位置姿态将叠加飞机模型主体的位置姿态信息，这为正确渲染舵面偏转状态提供了保证。尾旋试验 3 维场景结构如图 7 所示。

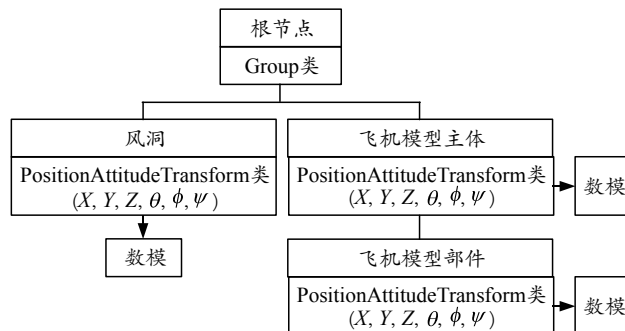


图 7 3 维场景结构

2.3.4 3 维场景动画

OSG 中提供了丰富的场景动画渲染工具，根据尾旋试验场景复现的需要，选用了 OSG 中的路径动画。路径动画类为 osg::AnimationPath，开启路径动画的关键步骤是设置一系列的路径关键点，调用函数为 void insert(double time, const ControlPoint&)，其中 time 为时间。ControlPoint 类型为该时刻的模型位置姿态信息，其构造函数为 ControlPoint(const Vec3d& position, const Quat& rotation)，其中：Vec3d 类为 3 个 double 型(双精度浮点型)变量组成的向量，用于表示模型位置；Quat 为 4 个 double 型变量组成的 4 元素，用于表示模型姿态角。

尾旋试验 3 维场景复现包括飞机模型主体的尾旋动画和飞机舵面偏转的动画，需要为飞机模型主体和每一个舵面创建一个动画类 osg::AnimationPath 的实例，然后解析数据文件，并

将位置姿态参数设置到相应模型的动画实例。对于模型主体动画实例，数据文件中已经提供了全部六分量的位置姿态信息，直接使用函数 `void insert(double time, const ConstrolPoint&)` 进行设置，其中 `time` 设置为数据的采样时间间隔，由 MEMS 传感器和 OptiTrack 测量系统采样周期确定；对于模型舵面动画实例，数据文件中仅提供了偏转角，但得益于 3 维场景“父”-“子”节点的结构设计，舵面将自动继承飞机模型主体的位置姿态信息，在设置时，只需使用偏转角和模型配置文件中给出的旋转轴(模型舵面转轴 2 个端点确定的向量)，同样使用 `insert` 函数进行设置。

构建好路径动画实例后，将其传递给动画更新回调的构造函数 `AnimationPathCallback` 创建动画更新回调实例，再使用节点更新回调函数 `setUpdateCallback` 将其传递给 `PositionAttitudeTransform` 节点，即完成整个路径动画设置过程。函数调用流程如图 8 所示。

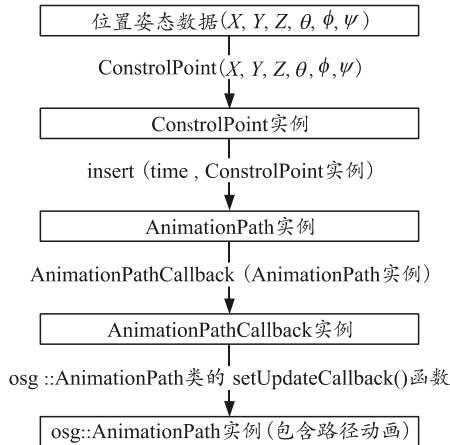


图 8 3 维场景动画实现的函数调用流程

2.3.5 3 维场景渲染流程

解决各项关键问题后，即可开始 3 维场景渲染。渲染流程分初始化与运行 2 部分，初始化部分完成 3 维场景构建、观察视角设置、动画路径和动画实例创建，该部分只执行一次。运行部分主要工作是根据设置内容渲染 3 维 3 场景，并在渲染每一帧动画均检测一次参数设置，执行暂停、加速、减速、循环等渲染过程控制，或导出动画的命令，直至完成尾旋试验渲染过程。3 维场景渲染流程如图 9 所示。

3 试验验证

使用某飞机尾旋试验数据，测试软件运行情况。飞机进入、改出尾旋的舵面角度及改出时间如表 2 所示。

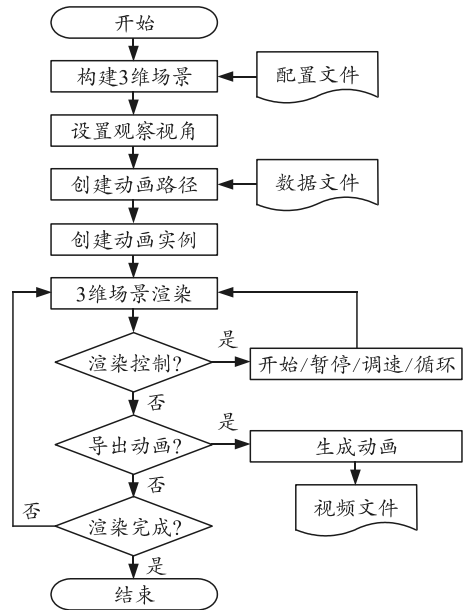
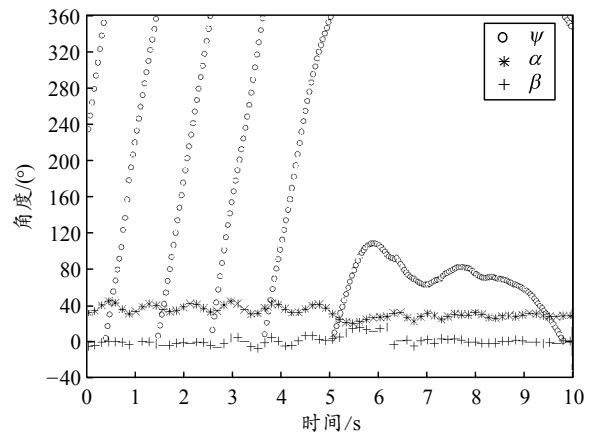


图 9 3 维场景渲染流程

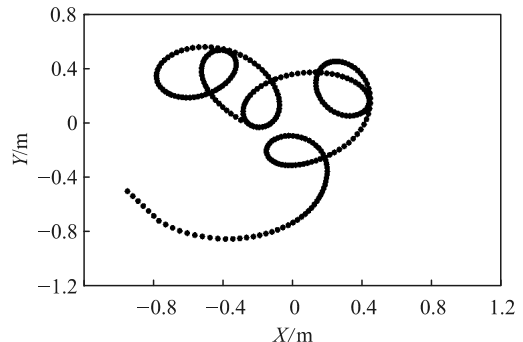
表 2 进入/改出尾旋舵面角度

项目	左副翼/(°)	右副翼/(°)	方向舵/(°)	升降舵/(°)	时间/s
进入	-25	15	-25	-10	0
改出	15	-25	25	15	4

使用 OptiTrack 系统和 MEMS 传感器测量模型位置、姿态角，采样频率 20 Hz，采集时长 10 s，结果如图 10 所示。



(a) MEMS 传感器测量的姿态角数据



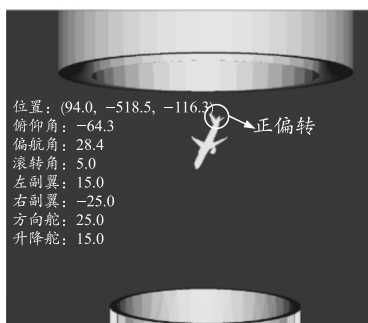
(b) OptiTrack 测量系统采集的位移数据

图 10 飞机尾旋试验结果

试验开始时,飞机处于稳定尾旋状态,系统发出改出命令飞机改出尾旋状态。使用尾旋试验复现软件,导入试验数据,渲染 3 维场景,截取尾旋改出前后 2 帧典型试验场景如图 11 所示。



(a) 尾旋改出前试验场景



(b) 尾旋改出后试验场景

图 11 尾旋试验 3 维场景复现结果

图 11(a)为稳定尾旋时的场景,图 11(b)为尾旋改出后的场景。3 维场景渲染时,舵面颜色为红色表示“正偏转”,绿色表示“负偏转”,黑色表示“零偏转”。使用 3 维场景复现软件分析尾旋试验数据,直观、高效,应用取得了较好效果。

4 结束语

风洞试验能力与试验水平的不断提高,表现之一一是试验越来越精细化,关注的试验数据愈发全面、细致,对数据分析的要求也越来越高。综合运用信息化、数字化和多媒体技术,全面、直观地展示试验结果将有效提高试验效率,减轻试验人员压力。

随着计算机性能的不不断提高,实时渲染尾旋试

验场景是下一步努力的方向。MEMS 传感器和 OptiTrack 系统具备最高 200 Hz 的采样频率,搭配高性能计算机,完成软件适配,即可实时渲染试验场景,若能顺利实现,必将进一步提升数据分析的体验,进而提高试验水平。

参考文献:

- [1] 李永富,陈洪.研究尾旋的风洞试验技术[M].北京:国防工业出版社,2002:1-10.
- [2] 祝明红,王勋年,李宝,等. $\Phi 5$ m 立式风洞尾旋试验技术[J].实验流体力学,2007,21(3):49-53.
- [3] 祝明红,杨洪森,王勋年,等.立式风洞尾旋技术改进及试验验证(英文)[J].实验流体力学,2011,25(5):94-98.
- [4] 马军,宋晋,刘蓓,等.立式风洞全视场尾旋姿态测量技术研究[J].实验流体力学,2016,30(6):66-70.
- [5] 宋晋,马军,蒋敏,等.基于立体视觉系统的风洞尾旋试验测量方法研究[J].计算机测量与控制,2011,19(11):2646-2648.
- [6] ADVANCED NAVIGATION. Orientus Reference Manual [EB/OL]. 2013: 1-57. <https://www.advancednavigation.com/products/spatial-dual>.
- [7] 宋晋,蒋敏,李睿,等.基于 MEMS 传感器的风洞尾旋姿态测量研究[J].兵工自动化,2016,24(12):1-13.
- [8] 蒋敏,宋晋,李睿,等.组合式航姿参考系统在尾旋测量中的应用[C]//空气动力学学会测控技术六届六次测控学术交流论文集.2015(9):240-243.
- [9] 宋晋,马军,唐领,等.基于 OptiTrack 系统的风洞加油机锥套变形测量研究[C]//第十七届中国航空测控技术年会.2020:166-169.
- [10] JEFF P. 北京博彦科技发展有限公司,译. MFC Windows 程序设计[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2007:569-626.
- [11] 王锐,钱学雷. OpenSceneGraph 3 维渲染引擎设计与实践[M]. 北京:清华大学出版社,2009:225-246.
- [12] 肖鹏,刘更代,徐明亮. OpenSceneGraph 3 维渲染引擎编程指南[M]. 北京:清华大学出版社,2010:289-307.