

# 基于虚拟设计制造技术的 FL-9 风洞模型架车开发<sup>\*</sup>

## Development of FL-9 Wind Tunnel Model Support Carriage Based on Virtual Design and Manufacturing Technology

中航工业空气动力研究院 李周复 李 强 董国庆  
哈尔滨北方特种车辆制造有限公司研究院 司丽丽 崔 晶

**[摘要]** FL-9 风洞是“十五”国家批准建设的大型航空科研基础设施,模型架车是其核心设备。以该风洞模型架车开发研制为背景,运用制造业信息化技术,构建了虚拟设计制造平台,此平台具备网络系统支持下的设备三维数字化设计、计算机辅助分析、工艺设计、可视化及三维交互等功能;并建立了设计制造信息化体系,实现了设计制造全过程信息分类代码的规范和统一。基于此平台开发的模型架车经 2 年的研制已全面建成并试车成功。

**关键词:** 虚拟设计制造 三维数字化设计 有限元分析 模型架车系统

**[ABSTRACT]** FL-9 low-speed compressed-air wind tunnel is one big aeronautical infrastructure which belongs to the tenth five-year plans. The model support carriage is the core of wind tunnel. The virtual design manufacturing platform is established by using the informationization technology of manufacturing industry in the background of the model support carriage. Under the support of network system, the platform integrates 3D digital design, computer-aided analysis and computer-aided process design function and so on. The informationization standard system for the design and manufacturing of model support carriage is established. The information classification code of the whole procedure of product design and manufacturing is normalized and unified. During two years' development, the model support carriage based on the platform has been completely established and successfully accomplished the first green test.

**Keywords:** Virtual design manufacturing 3D digital design Finite element analysis Model support carriage system

随着科学技术的发展,特别是计算机性能的不断提

高以及计算机技术对各行业的渗透,各技术领域的思维、观念和方法不断得以更新。基于现有性能优良的风洞模型架车系统所建立的传统设计、制造准则与方法也相应发生了根本性的改变<sup>[1]</sup>。大型风洞模型架车系统的设计、制造属于单件生产类型,结构复杂、大型件多且加工工艺要求特殊,给设计、制造及生产组织带来了许多问题,如架车结构的整体综合强度刚度要求高、执行机构的传动精度及稳定性要好、生产周期长等。

虚拟制造(Virtual Manufacturing)是虚拟现实(Virtual Reality)技术在制造业中的应用,是产品设计制造的真实过程在虚拟环境中的映射<sup>[2-3]</sup>。从本质上讲,虚拟设计开发是将产品从概念设计到投入使用的全过程(产品的生命周期)在计算机上构造的虚拟环境中虚拟地实现,其目标不仅是对产品的物质形态和制造过程进行模拟和可视化,而且是对产品的性能、行为和功能以及产品实现的各个阶段中的实施方案进行预测、评价和优化。基于虚拟设计制造技术开发大型风洞模型架车系统可显著地降低成本,提高设计质量和生产效率。

### 1 风洞模型架车系统虚拟设计平台

大型风洞模型架车系统虚拟设计制造平台将产品设计、工艺、制造和技术标准等环节集成为一体,形成了产品的设计、工艺、制造的标准流程,实现了高效率、高质量的协同工作,平台框架如图 1 所示。

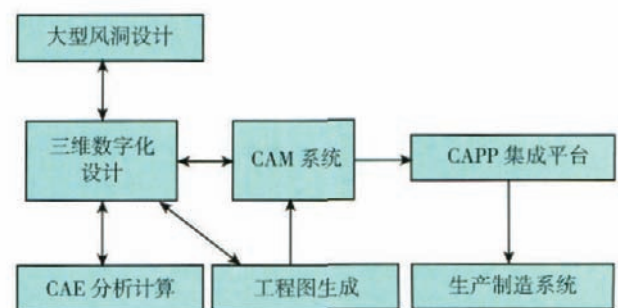


图1 风洞模型架车系统设计平台框架

Fig.1 Design frame of wind tunnel support carriage

<sup>\*</sup> 总装备部预研基金(HK5703)、航空科学基金(2009ZD27005)项目。

### 1.1 风洞模型架车系统的三维实体设计

本项目以三维数字化设计软件 Pro/E 为开发平台。目前,机械设计正向着高设计效率、低设计成本、优良可靠性和一次成型的目标方向发展。作为一个集 CAD/CAM/CAE 于一体的优秀软件,Pro/E 强大的实体“参数化、全相关”造型、机械设计、模拟装配和静态干涉检验、机构分析和动态干涉检验、动力学分析、强度分析、加工制造等功能能够充分满足本项目的要求。

### 1.2 CAE 计算分析

由于风洞模型架车系统结构复杂、承受载荷大,缺少成熟的设计经验,许多关键的设计系数尚难以确定,常规的设计方法已无法适应其设计要求。作为模型架车关键件的模型支杆是主要承载部件。

模型支杆是连接试验模型与架车驱动系统的桥梁与纽带,因此在模型架车的设计过程中必须对模型支杆进行刚强度的计算。通过有限元计算,可得到支杆的应力及变形分布及其数值,在设计时可定量分析支杆的刚强度。另外,在风洞试验过程中也可动态模拟应力变化情况,为架车系统的可靠性设计打下基础。

### 1.3 CAM 系统开发

在开发 CAM 系统过程中,将企业的物力和人力资源也包括在内,通过计算机直接或间接地联系,在生产设备的管理、控制和使用方面有效地应用计算机技术。其中包括了企业经营管理工作在内的整个生产过程,即监测控制等直接应用和生产支援方面的间接应用。整体框架如图 2 所示。

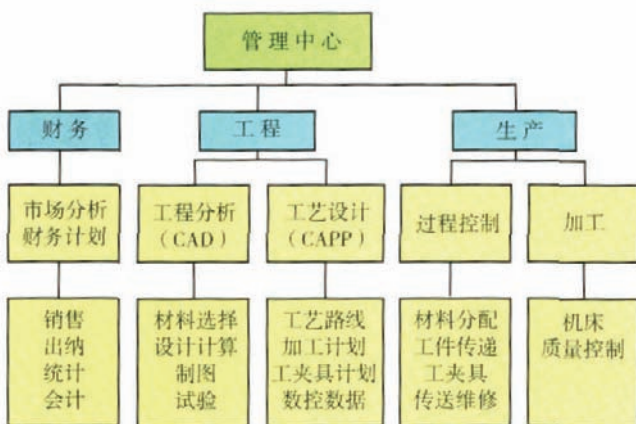


图2 计算机辅助制造系统分级结构  
Fig.2 Hierarchical structure of CAM system

该 CAM 系统具备如下特点:

- (1) 高效率。最大限度地减少零件在车间的停留时间及在机床上的等待时间;
- (2) 适应性。系统在较大范围内适应加工对象的变化;

(3) 灵活性。采用分级结构,系统可由小到大逐步发展;

(4) 可靠性。保证系统的正常运行。

应用该 CAM 系统加快了物流和信息流,缩短了生产周期,提高了生产效率。加工过程的自动化提高了生产质量,制造方式的柔性化提高了企业的应变能力,从而增强了市场竞争力。

### 1.4 面向风洞模型架车系统集成化 CAPP 系统开发

针对大型风洞模型架车系统二次开发的 CAPP 框架系统采用建立在成组技术基础上的检索修订式,立足于检索库存中该类零件族主样的工艺规程,然后进行修订。成组技术通过零件分类编码系统,将零件归并成族。修订可以由人机交互的方式进行,也可以由计算机自动进行。

整个 CAPP 系统包括 6 个模块和若干个库,见图 3。

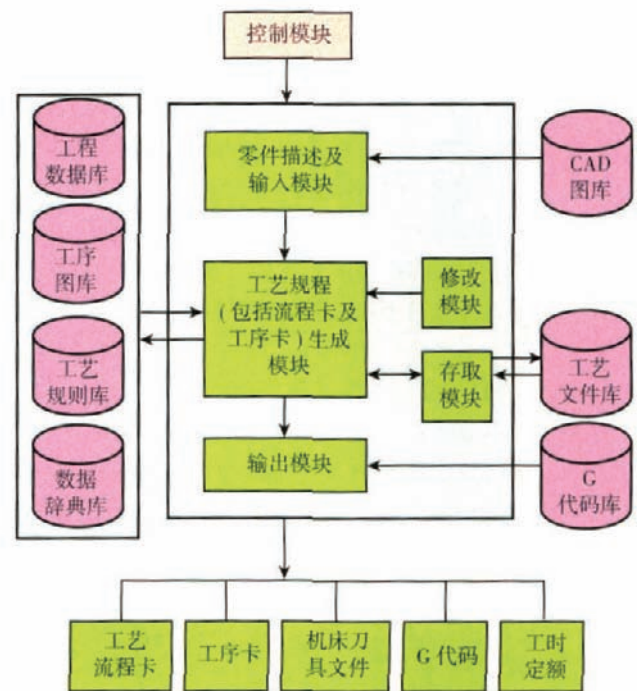


图3 CAPP系统的组成  
Fig.3 CAPP system composition

·输入模块:零件的信息来自 CAD 转换信息接口或来自人工输入。

·工艺规程模块:包括生成表头,毛坯选择,加工方法选择,工序安排,机床、刀具、夹具选择,切削参数查询或优化计算,工序图生成,刀具加工轨迹生成,NC 指令生成,工时成本计算等子模块。

·输出模块:输出工艺流程卡、工艺规程、工时定额、刀具轨迹、模拟显示、NC 信息、工序图以及其他工艺文件。

- 修改模块: 进行现有工艺文件的修改。
- 存取模块: 对已有工艺规程的再现及新工艺规程的存放。
- 控制模块: 对整个系统进行控制与管理。

## 2 FL-9 风洞模型架车系统开发

FL-9 低速增压风洞是“十五”国家批准建设的、根据国家航空工业跨越式发展提出的一项具有战略意义的大型航空、科研基础设施,而模型架车系统是该风洞的重要组成部分。在航空、航天等领域中,风洞试验模型的模型架车系统是进行实物仿真的关键硬件设备,在飞行器的风洞试验研制过程中起着极为重要的作用。仿真测试的模型架车系统可以模拟飞行器在空间实际飞行时的各种姿态,实现  $\alpha$  角(俯仰角)和  $\beta$  角(偏航角)2 个角位移的连续、稳定和精确调整,复现其运行时的运动学和动力学特征,从而可以对飞行器的制导系统、控制系统及其相应器件的性能进行反复测试,获得重要的试验数据。模型架车系统性能的优劣直接关系到仿真和测试试验的可靠性和置信度,是保证航空、航天型号产品和武器系统的精度和性能的基础<sup>[4-6]</sup>。

基于本课题所构建的风洞模型架车系统虚拟设计平台,中国航空工业空气动力研究院针对 FL-9 低速增压风洞提出的具体要求,设计开发了腹撑、尾撑 2 套风洞模型架车系统。本文以尾撑模型架车系统为例加以阐述。

### 2.1 尾撑模型架车系统设计要求、方案和原理

结合 FL-9 低速增压风洞总体设计要求,制定了 FL-9 风洞尾撑模型架车系统角度调整范围、精度和角速度,设计指标如下:

- 俯仰角  $\alpha$ : 调整范围  $-90^\circ \sim +35^\circ$ , 调整精度  $\pm 1'$ , 角速度  $\omega_\alpha = 1^\circ/\text{s}$ ;
- 偏航角  $\beta$ : 调整范围  $\pm 30^\circ$ , 调整精度  $\pm 2'$ , 角速度  $\omega_\beta = 1^\circ/\text{s}$ ;
- 主轴转角  $\gamma$ : 调整范围  $\pm 180^\circ$ , 调整精度  $\pm 2'$ 。

FL-9 低速增压风洞尾撑模型架车系统简图如图 4 所示。该系统主要由大弯刀、主轴、摇臂和尾支杆构成。模型和应变天平安装在尾支杆上,尾支杆与主轴上的摇臂连接,全部机构都安装在大弯刀上。 $\alpha - \beta$  支撑机构的尾支杆、主轴和大弯刀可以分别绕各自的旋转中心旋转一定的角度,尾支杆轴线与机构主轴轴线间有一初始预置角度  $\theta$ 。其中尾支杆和主轴可以旋转  $360^\circ$ ,大弯刀可以旋转  $\pm 17^\circ$ 。模型试验时,通过大弯刀带动主轴在风洞纵向对称面内绕大弯刀的旋转中心旋转,主轴绕其自身轴线旋转,尾支杆带动模型绕其自身轴线(模型体轴的 X 轴)反转,实现模型试验所需的俯仰角  $\alpha$  和

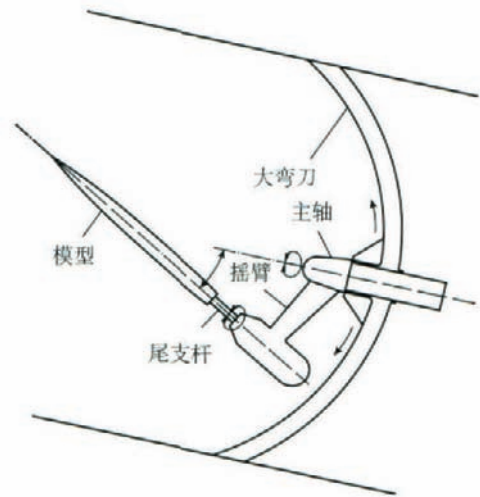


图4 尾撑架车系统简图

Fig.4 Drawing of sting support carriage

偏航角  $\beta$ 。这种方案的优点是:保持模型的升力面始终向上不变;由于大弯刀的剖面始终保持顺气流的方向,沿气流方向尺寸较大,有足够的刚度,而阻塞截面却很小。

### 2.2 架车三维建模及虚拟装配

运用参数化三维设计软件 Pro/E 完成了尾撑模型架车系统的建模,在此平台上可以随时计算出零件的体积、面积、质心、质量、惯性矩等,并且不论在 2D 或 3D 图形上作尺寸修改,其相关的 2D 或 3D 实体模型及装配、制造等也自动修改<sup>[7]</sup>。在虚拟装配过程中,将整个架车系统分为几个子装配,子装配完成后,再按照它们之间的相互位置关系最终创建架车系统的整体装配模型。共建立三维实体模型 1883 个,完成了 FL-9 低速增压风洞尾撑模型架车系统的虚拟设计与装配。图 5 为架车系统三维虚拟装配总图。装配后还进行了机构模



图5 尾撑架车系统虚拟装配图

Fig.5 Virtual assembly of sting support carriage

拟运行、干涉分析仿真等,为后期制造过程提供一定的依据,预测可能出现的问题。

## 2.3 尾撑支杆有限元分析

### 2.3.1 实体模型的建立

根据尾撑支杆工程图,在 Pro/E 中建立尾撑支杆实体模型。为了后续分析方便,在保证计算结果准确性的前提下,对尾撑支杆的实体模型进行了必要的简化。简化原则是:保持总体结构不变,保留危险部位的细节结构。具体简化方法为:略去不必要的圆角,略去工艺结构,忽略细节特征(如倒角)、不重要区域的小孔及小尺寸细节结构等,简化非危险区域的小尺寸细节结构。

### 2.3.2 有限元模型的建立

有限元模型的建立是进行有限元分析的第 1 步,也是最关键的一步,它包括:将在 Pro/E 中建立的尾撑支杆实体模型导入到 ANSYS10.0 协同仿真环境中,并对原模型进行检查和修改;选择合适的网格划分方案,控制单元规模和网格质量等。

AWE 提供了 Pro/E 软件的接口程序,可以直接将 Pro/E 中建立的几何模型导入。利用 AWE 提供的智能网格划分功能对腹撑支杆实体模型进行了网格划分。智能网格是一种更佳的自由网格,可对复杂模型直接划分,避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时各部分网格不匹配带来的麻烦<sup>[8]</sup>。根据软件中 Mesh Control 中的 Method 功能来控制所用网格的单元形状,用 Sizing 功能来控制所划网格的尺寸大小。单元类型选用 Solid186,支杆的有限元模型共有 102 547 个节点和 31 400 个单元,有限元模型如图 6 所示。



图6 尾撑支杆有限元模型  
Fig.6 Finite element model of sting shaft

### 2.3.3 计算结果与分析

根据尾撑支杆的设计和力学分析要求,结合力学分析用尾撑支杆的设计参数,计算出尾撑支杆在各种工况下的受力大小,将力和力矩施加到相应的位置。

在 AWE 的仿真模块 (Simulation) 中对支杆的有限元模型施加约束和载荷,进行求解,得到各工况下支杆的应力和变形结果。本设计中尾撑支杆的材料为 30CrMnSiA,其许用应力为 415MPa。图 7 为尾撑支杆的应力云图和变形云图。

从图 7 中可以看出:尾撑支杆的薄弱环节为支杆上

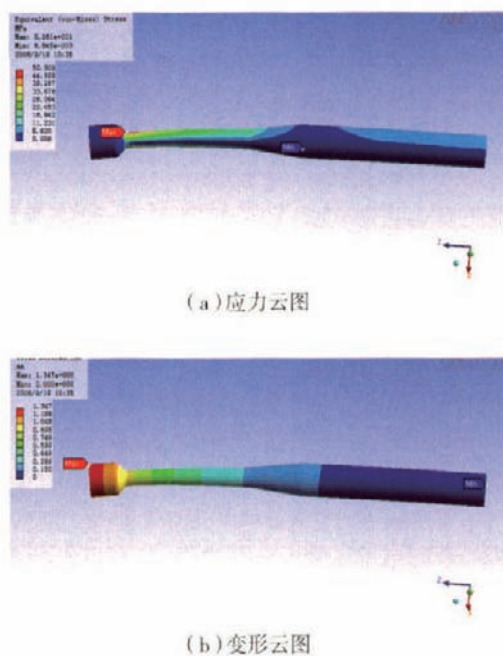


图7 尾撑支杆的应力云图和变形云图  
Fig.7 Stress and strain cloud diagram of sting shaft

部的等直段,其最大应力发生在等直段与模型接头的过渡圆角处,最大变形发生在模型接头处,考虑到分析过程中的模型简化、在加载过程中对气动力和气动力矩的等效方式以及模型简化后应力集中的影响,实际的应力和变形应该较小。从各工况下的应力云图可以看出,支杆均满足强度要求。支杆的最大变形量发生在最大攻角工况下,其大小为 5.14mm。

## 2.4 架车的生产制造

基于本课题所构建的虚拟制造平台,完成了实际制造生产过程的各个组成部分(包括生产准备、生产实施、生产管理全部过程)的有机结合,实现了柔性化、自动化和集成化,达到了高效率、高质量、低成本、短周期和灵活生产的目的。FL-9 风洞模型架车实物如图 8 所示。



图8 FL-9风洞模型架车  
Fig.8 Model support carriage in FL-9 wind tunnel

(下转第 84 页)

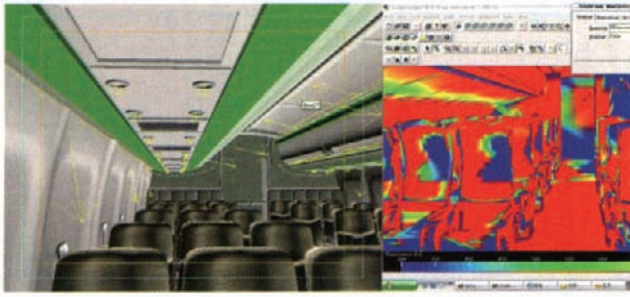


图6 整体灯光布局图及照度检测示意

Fig.6 Overall arrangement of lights and the illumination checking



图7 软件计算过程截图

Fig.7 Screenshot of calculating process of the software

## 6 结束语

先进的内饰设计理念和技术的提高民航客机设计先进性、增强市场竞争能力的重要保障。对它的内饰设计方案的评价也是一个需要综合诸多学科的一个非常复杂的过程。本文在对这一过程进行分析和总结的基础上,确定了比较全面的评价指标,并引入 Fuzzy-AHP 法,确定各个指标的权重,最终通过编程实现了对飞机客舱内饰设计的多层次阶层结构的多级模糊评价,避免了评价中的主观随意性。

### 参考文献

[1] 冯雷 范玉青. 飞机技术虚拟样机技术与实现. 航空制造技术, 2004, (10):88-91.

[2] Tai-Chang H. Evaluating the writing quality of aircraft maintenance technical orders using a quality performance matrix. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007,37: 605-613.

[3] 冉承新, 凌云翔. AHP—Fuzzy 在仿真系统可信度综合评价中的应用. 计算机仿真, 2005, 22(8):59-61.

[4] Zeki A, R.G. Özdemir. A fuzzy AHP approach to evaluating machine tool alternatives. Intell Manuf, 2006,17:179-190.

[5] 李雄伟. 基于 Fuzzy-AHP 的通信网安全评价方法研究. 军事通信技术, 2005, 26(2):6-9.

[6] Saaty, T. L. Decision Making, Scaling, and number crunching. Decision Science, 1989,20: 404-409.

(责编 阳光 小颖)

(上接第 75 页)

## 3 结束语

应用虚拟设计制造技术可提高架车系统的设计质量,简化甚至取消实物样机的制造过程,缩短开发周期,降低制造成本。其中虚拟装配打破了以往“设计-制造(装配)-评价”和“实物验证”的封闭式空间模式,改善了装配关系的滞后检验,避免了不必要的浪费,在设计阶段就验证了零件之间的配合和可装配性;运动仿真干涉分析能够对架车的各个运动部件进行性能评价,加强了设计的逼真性、可靠性和精确性。此外,合理的集成化 CAM、CAPP 保证了制造过程的顺利实施,大大缩短了制造周期。建成后的 FL-9 低速增压风洞架车系统经过模型风洞试验测试,整个架车的刚度、强度、角度定位精度完全满足设计要求。

### 参考文献

[1] 刘政崇. 风洞结构设计. 北京: 中国宇航出版社, 2004.

[2] 陈定方, 罗亚波. 虚拟设计. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[3] Ji Ping, Choi A C K, Tu Lizhong. VDAS: a Virtual Design and Assembly System in a Virtual Reality Environment. Assembly Automation, 2002, 22(4):337-342.

[4] 恽起麟. 风洞实验. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[5] 郑亚青, 林麒, 刘雄伟. 低速风洞绳牵引并联支撑系统的机构与模型姿态控制方案设计. 航空学报, 2005(11): 774-778;

[6] 竹朝霞, 惠增宏, 金承信. NF-3 风洞尾支撑机构及其测控系统的研制. 流体力学试验与测量, 2003(09):47-50.

[7] 林勇志. Pro/Engineer 野火版基础教程. 北京: 人民邮电出版社, 2004.

[8] 小飒工作室. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(责编 小颖)

(上接第 79 页)

## 3 结束语

本课题研究了提取涡轮叶片的叶身截面线生成工程图和自动标注尺寸的方法,提高了二维制图的效率,所提取的叶身外型截面线参数能直接在后续的工程分析阶段和制造过程中使用,进而缩短产品研制周期,也为涡轮叶片的二维制图的进一步研究奠定基础。

### 参考文献

[1] 张再德. 复杂 UG 工程图转换成 AutoCAD 工程图的方法. 机械制造, 2006,44(498):41-42.

[2] 宋玉旺, 席平. 特征造型技术的涡轮叶片参数化设计. 北京航空航天大学学报, 2004,30(4):321-324.

[3] 宋玉旺, 胡毕富, 席平. 基于特征的航空发动机涡轮叶片参数化设计. 航空制造技术, 2007,11:73-78.

[4] 侯永涛, 丁向阳. UG/Open 二次开发实例精解. 北京: 化学工业出版社, 2007.

(责编 淡蓝)