

基于 CATIA 的固体火箭发动机系统中的 三维参数化设计

李亦¹, 殷延祥¹, 杨余旺¹, 鞠玉涛², 裴锦华³

(1. 南京理工大学 计算机科学与技术学院, 南京 210094; 2. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094;
3. 南京航空航天大学 无人机研究院, 南京 210016)

摘要: 为了提高固体火箭发动机系统的动态交互能力, 方便用户直观地了解固体火箭发动机的内部结构, 结合 CATIA 强大的三维建模能力, 完成了该系统中最重要三维参数化设计; 以 VC++ 为编程环境, 运用 CATIA 自动化对象编程 (V5 Automation) 提供的二次开发接口, 实现了固体火箭发动机系统中的三维绘图模块, 同时介绍了两种在 VC 框架内动态显示 CATIA 三维模型的方法; 实践证明, 该系统能够快速确定固体火箭发动机外形尺寸、标志量等设计参数, 为固体火箭发动机的初步设计提供有效的帮助。

关键词: 固体火箭发动机; CATIA; 三维参数化; 二次开发; 设计参数

3D Parameter Design of Solid Rocket Motor System Based on CATIA

Li Yi¹, Yin Yanxiang¹, Yang Yuwang¹, Ju Yutao², Pei Jinhua³

(1. Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Department of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
3. Research Institute of Unmanned Aircraft, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: For improving the dynamically interactive ability of solid rocket motor system, making it easy and visual for users to know the internal structure of solid rocket motor, combined with powerful 3D modeling capabilities of the CATIA, this system complete the 3D parameter design, which is the most important in it. Based on VC++ programming environment, using the secondary development interface provided by CATIA automation object programming (V5 Automation), realized the 3D drawing module in solid rocket motor system, at the same time, introduce two methods of dynamic display CATIA 3D model in VC framework. Practice has proved, this system can quickly determine the design parameters of solid rocket motor such as appearance size, logo, provide effective help for preliminary design of solid rocket motor.

Key words: solid rocket motor; CATIA; 3D Parameter; secondary development; design parameters

0 引言

在固体火箭发动机研制过程中采用计算机辅助设计, 不仅可快速完成设计, 而且还能提高设计水平。早在 20 世纪 60 年代末, 美国就开始尝试将计算机技术应用于固体火箭发动机设计。随着电子技术和计算机技术的不断发展, 计算机辅助设计 (CAD) 技术日趋成熟, 市场上出现了许多大型 CAD 应用软件, 如 CATIA、UG、Pro/Engineering、Solid Works 等, 作为通用软件, 他们有着无比的优越性, 从产品建模, 有限元分析, 图形输入输出处理到交互性都比较完善。CATIA 源于航空航天工业, 是航空、航天、汽车以及电子工业领域中的主流 CAD 软件^[1]。本文介绍的固体火箭发动机系统就利用了 CATIA 强大的建模能力和参数化设计。

目前国内也建立了一些固体火箭发动机组成部分的 CAD 系统, 如装药 CAD 系统、喷管 CAD 系统, 这些系统过多的侧重于性能计算与方案论证, 而本文则将主要介绍利用 CAT-

IA 编程实现固体火箭发动机整体系统中三维参数化设计。该系统能够快速实现固体火箭发动机中燃烧室、前封头和喷管等外形结构的参数设计, 并轻松绘制出三维方案图纸, 为整个固体火箭发动机的初步设计提供帮助。

本文介绍了以 VC++ 6.0 为编程工具, 以 CATIA V5R21 为软件平台, 以 CATIA 提供的自动化对象编程 (V5 Automation) 为接口, 实现了固体火箭发动机系统中三维参数化设计。同时, 介绍了两种在 VC 框架内动态显示三维模型的实现方案, 且给出了两种方案下实现的效果图。

1 固体火箭发动机中 CATIA 的参数化设计

1.1 CATIA 的二次开发技术

CATIA 是法国达索系统公司开发的 CAD/CAE/CAM 一体化软件, 在世界 CAD/CAE/CAM 领域中处于领先地位。CATIA 被广泛应用于航空航天、机械制造、电子、电器等行业。由于各行业应用的重点不同, 要想发挥 CATIA 的强大功能必须进行必要的二次开发^[2]。CATIA 为用户提供了二次开发的接口和开放式的内部命令集合, 给用户的二次开发带来了方便。

CATIA 提供了多种二次开发的接口, 其中包括自动化对象编程 (V5 Automation) 和开放的基于构件的应用编程接口 (CAA), 通过这些接口可以开发出适用于任何用户所需要的特殊功能。CAA 的实现, 是通过提供的快速应用研发环境

收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-02-28。

基金项目: 总装预研基金 (9140A05010113xxx); 江苏省科技支撑计划 (BE2012386); 国防基础建设项目。

作者简介: 李亦 (1990-), 男, 硕士, 主要从事火箭模型及其发动机方向的研究。

RADE 和不同的 API 接口程序来完成的; Automation 技术^[3]是建立在 COM 基础之上, 其核心是允许一个应用程序操作另一个应用程序。在这里, 我们利用 Automation 技术和建立进程外应用程序的方法进行二次开发工作。

Automation 技术包括两个方面: server 和 client。Automation server 是一个实现了 Dispatch 接口的 COM 组件, 而 Automation client 是一个通过 Dispatch 接口与自动化服务器进行通信的 COM 客户。如把 CATIA 看成一个 server, 我们编制的应用程序则是 client。通常客户程序使用 VBScript 或 VBA 语言开发, 而且宏录制时的脚本语言更适用于 VB 程序, 但是它并没有局限于 Visual Basic 体系的语言中, 这里我们选择 VC++ 作为客户程序的开发语言。

1.2 固体火箭发动机中三维模型的实现

1.2.1 固体火箭发动机中三维绘图模块

固体火箭发动机^[4]设计是一项复杂的系统工程, 包括热力计算、装药设计、内弹道分析、外弹道分析、三维绘图模块等等, 其中与 CATIA 有关联的就是三维绘图模块。三维绘图模块是对发动机本体结构的设计, 发动机的本体结构又包括燃烧室结构设计模型、喷管结构设计模型和前封头结构设计模型, 对于各个模型的设计我们既需要有参量的输入, 又需要有图形的输出。这里我们先给每个模型都设定一组初始的设计参数, 用户可以在系统中修改参数来改变模型的三维模型, 最后再以三维格式 (如 stl、3dxml) 保存文件, 并作为方案图纸输出, 同时也方便了对模型的再打开操作。固体火箭发动机中三维绘图模块如图 1 所示。

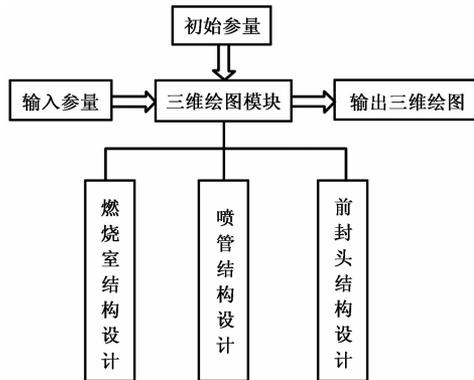


图 1 固体火箭发动机中三维绘图模块

1.2.2 固体火箭发动机系统与 CATIA 连接模块

固体火箭发动机系统是在 VC 环境中实现的, VC 与 CATIA 之间的通信则需要通过进程外的访问来调用 CATIA 内部对象, 它首先要连接到 CATIA 上, 如果 CATIA 没有启动还必须先启动它。下面是连接 CATIA 的步骤:

- (1) 在系统工程中引入类型库;
- (2) 获取 Application 对象 m_app;
- (3) 当 CATIA 已经运行时, 用 GetObject 方法连接到 CATIA 即可;

(4) 如果 CATIA 没有运行时, 要用 CreateObject 方法启动 CATIA, 然后再按 (3) 步骤连接。

```

HRESULT hr;
hr=m_app.GetObject("CATIA.Application");
if (FAILED(hr)){
    
```

```

hr=m_app.CreateInstance("CATIA.Application");
}
    
```

为了系统界面的简洁美观大方, 我们运行系统时, CATIA 平台画面并不允许显示, 只是在后台运行, 如果想要直观地显示 CATIA 需要加上一句话:

```

m_app->PutVisible(VARIANT_TRUE);
    
```

1.2.3 CATIA 编程实现固体火箭发动机中三维模型

由前面已知, 固体火箭发动机中三维模型包括了燃烧室、喷管和前封头的结构设计, 每个结构在 CATIA 中都作为零件文档, 我们要用 CATIA 提供的内部对象, 在 VC 环境中编程实现各三维模型。以下是在零件设计编程中要用到的几个重要的 API。

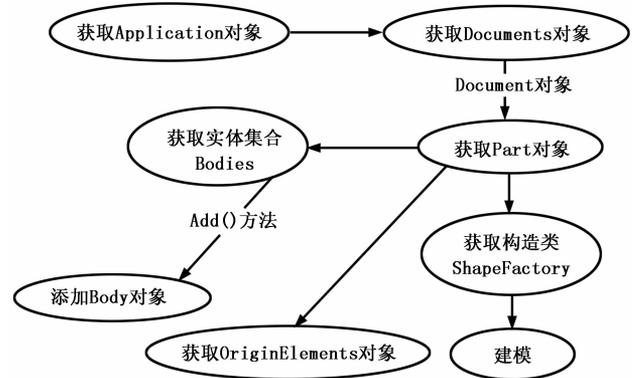


图 2 零件设计编程

对于 API 更加详细的介绍我们可以在 CATIA 的安装路径下 (... /CATIA/B17/intel _ a/code/bin) 找到 V5Automation.chm 帮助文件。查找帮助文件就可以知道各个类的属性和方法, 以及类之间的联系, 然后就能够编写出固体火箭发动机中三维模型的零件, 以下是零件编写的一般过程。

Part 是零件文档最上层的对象, 它的对象 Bodies 是零件文档中所有实体对象的集合, 可通过它进一步获得 Body 对象, 而 Body 包含了操作零件文档所需的大部分重要的属性、方法和对象。OriginElements 和 Sketches 都是 Part 对象的一个属性, 前者描述了零件文档的三维轴系统, 后者是草绘对象的集合, 它们用于在某个平面画出草图, 草图是构成三维图形的基础。ShapeFactory 是实体特征的构造器, 作为草图到三维实体模型的构造。在获得三维实体模型的过程中, 最重要的就是要设置好 Constraints, 它是实体模型参量的约束, 只有规范好的约束才能实现固体火箭发动机各结构的三维参数化设计。下图 3 是用 VC 编写、在 CATIA 中实现的燃烧室的三维模型效果图, 喷管和前封头三维模型的编写也是类似的。

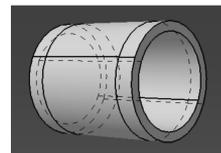


图 3 燃烧室的三维模型

图 3 中设定的约束有前段螺纹长、后段螺纹长、燃烧室壁厚、燃烧室外径和燃烧室全长, 这些约束要作为后面参数化设计的依据。

1.3 固体火箭发动机中的三维参数化实现

对于固体火箭发动机的三维参数化，最初想到的是每次修改参量进行参数化绘图时，我们都可以利用 CATIA 编程实现三维图形的再生。可是这样有两个缺陷：第一，虽然 CATIA 编程可以实现三维模型，可是编写各个模块需要很多的类对象，除了它们之间关系容易混乱之外，每次三维图形的再生成都要执行一连串很长的代码，效率低下^[5]；第二，三维图形的再生成从本质上说并不是参数化设计，它只是间接的改变了三维图形。为解决上述缺陷，采取了下面的方法：先利用 CATIA 画出各结构的三维模型并保存，通过 VC 访问 CATIA 读取模型，这用来解决第一个缺陷，然后读取设定的约束并修改，这用来解决第二个缺陷，最终实现固体火箭发动机的三维参数化设计。图 4 就是整个参数化设计的流程图。

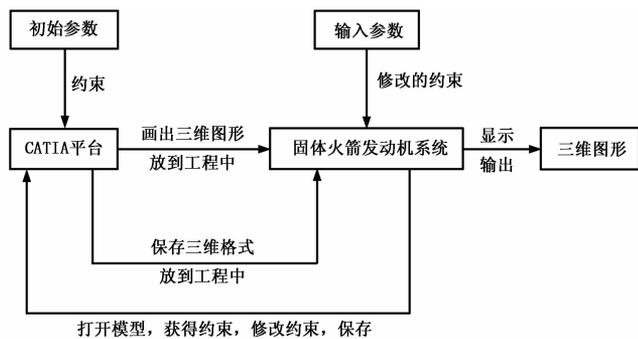


图 4 固体火箭发动机的三维参数化流程图

用 CATIA 编程的方式实现的固体火箭发动机各结构的三维模块复杂而烦琐，同时效率低下，为此，我们可以根据初始参量来设定必要的约束并在 CATIA 环境中先画出三维模型，然后在 VC 中用 CatiaExportData 方法保存图形，用 CatiaOpen 方法读取图形。

在 CATIA 中画三维模型的时候，最重要的是设置合理的约束。在模型所有的约束中，有的约束是图形生成必须要设定的，有的约束则是用来参数化设计的，这样就需要我们找到正确的约束。Parameters 是与图形约束参数相对应的 CATIA 自动化对象，通过一个循环，准确的找到需要参数化修改的约束的索引，然后用 CatiaItem 方法以及索引得到约束对象，再对约束对象用 CatiaValuateFromString 方法修改约束值，一旦约束值被修改了，固体火箭发动机中的三维模型也会随之改变。值得注意的是，在 VC 中传递给约束对象的约束值需要缩小 1 000 倍才能和 CATIA 里尺寸单位一致。

输入参数和修改三维模型，是在固体火箭发动机系统中操作，并在后台的 CATIA 里实现的，用户只需和系统交互不必了解在 CATIA 中的具体实现过程。实践证明，此种参数化设计能够做到修改参数实时改变三维模型。

另外，我们还需要处理模型更新时可能抛出的异常，如果模型更新失败，恢复原模型并返回错误代码给主调程序；如果模型成功更新，保存模型文件，可以作为输出，也方便以后程序对模型的打开操作。

2 固体火箭发动机系统中动态显示 CATIA 三维模型

在实现参数化设计的过程中，三维模型都是在 CATIA 环境中实现的，而 CATIA 在后台运行，实际上我们是看不到

的，同时也为了界面友好，风格一致的原则，我们将每次在 CATIA 里面确定的三维模型保存起来，然后用 VC 读取，动态显示在系统界面中。动态显示除了能够以三维视角显示模型，还要求我们能对它做一些简单的操作，包括放大缩小、拖动、平移以及旋转。鉴于三维图像动态显示的复杂性，我们首先想到的是利用 OpenGL 强大的图形系统功能。另外，还介绍了一种简单的方法，它用到了达索系统公司最新推出的 3DXMLPlayer 浏览控件^[6]。

2.1 OpenGL 动态显示三维模型

OpenGL 能够绘制点、线和多边形。应用这些基本的形体，可以构造出几乎所有的三维模型。同时，OpenGL 也能够用来描述三维模型，通常是借助于模型的多边形顶点。

CATIA 保存三维模型文件有多种格式，这里将它保存为 stl 格式。stl 文件是一种用许多空间小三角形面片逼近三维实体表面的数据模型，stl 模型的数据通过给出组成三角形面片的 3 个分量（用于确定三角面片的正反方向）及三角形的 3 个顶点坐标来实现，一个完整的 stl 文件记载了组成实体模型的所有三角形面片的法向量数据和顶点坐标数据信息。stl 是三维模型常用的文件格式，利用 C++ 标准库中提供的文件流读取及字符串操作等功能，结合 OpenGL 中三角面片绘制的编程技术，我们可以实现对 stl 文件的读取和显示。

在 VC 中配置好 OpenGL 环境，创建一个基类是 Cview 的类 CRightView，此类用于读取 stl 文件并显示三维模型。读取时，利用 C++ 标准 IO 库的 ifstream 类型定义对象并绑定 stl 文件，再用标准库 string 类型中的 getline 逐行读取绑定的 stl 文件，然后对读入的数据进行是否为顶点信息的判断，存储其中的顶点信息；显示时，我们利用 OpenGL 函数库中提供的直接渲染三角面片的方法 glBegin (GL _ TRIANGLES) 和 glEnd ()。在 CRightView 类中还要添加鼠标操作的消息，在消息中实现对三维模型的动态显示，包括滑动鼠标滚轮可以放大缩小模型、点住鼠标左键上下左右移动可实现旋转、点住鼠标右键可以实现平移等等。因为是参数化设计，我们要在系统界面中分割窗口，左边用来进行参数化输入，右边用 CRightView 类显示。

2.2 3DXMLPlayer 控件动态显示三维模型

2005 年，达索系统公司推出了一种完全建立在 XML 基础上的 3D 图形格式标准——3dxml，并允许用户将 CATIA 中三维模型保存为 3dxml 格式。与现存的许多其他 3D 图形格式相比，3dxml 格式的文档体积大大减小，可以节省 90% 的存储空间，同时文档播放时的加载速度也加快了。3DXML 文档可通过 3DXMLPlayer 进行加载播放。3DXMLPlayer 浏览控件可以动态显示三维模型，用户可以旋转，放大缩小模型，并可以隐藏或显示部分组件，使用时只需将 CATIA 文件另存为 3dxml 格式，然后添加到 3DXMLPlayer 中即可浏览。这种动态显示三维模型的方法较第一种用 OpenGL 简单，实现起来也很方便。

3 结语

通过对固体火箭发动机中各模型参数的数学分析和建模，实现了其参数化设计和图形绘制功能，而且给出了两种方案实现在 VC 框架内动态显示 CATIA 的三维模型。由于精力与时间有限，对于用 CATIA 编程作图的技巧还需提高，三维模型

效果也有待改进, 固体火箭发动机里各模型之间关系联系的还不够紧密, 但利用该软件, 能很方便的为固体火箭发动机的提供初步设计。最后, 该系统用到了 CATIA、VC++ 6.0 和 OpenGL 等软件, 对于学习混合编程大有裨益。

参考文献:

[1] Roys G P. User's manual for solid propulsion optimization code [Z]. Thikol, Corp, 1981.
 [2] 胡 挺, 吴立军. CATIA 二次开发技术基础 [M]. 北京: 电子工

业出版社, 2006.

[3] 彭 欢. 基于 V5 Automation 的 CATIA 二次开发技术研究 [J]. 电子机械工程, 2012, (2): 61-64.
 [4] 侯志勇. 固体火箭发动机试验数据分析处理软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, (8): 1934-1936.
 [5] 董师颜, 张兆良. 固体火箭发动机原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
 [6] 高运奎, 李召华, 吕勤云. 基于 CATIA 二次开发的发动机喷管外形参数化设计 [J]. 机电产品开发与创新, 2012, (4): 106-107.

(上接第 1579 页)

出, 线缆对高频信号的衰减非常严重, 200 MHz 处衰减为 15.27 dB。小于 HOTLINK 传输链路容许的最大 24.08 dB 的衰减值。即 $L=15.27$ dB, $M=T-L=24.08$ dB-15.27 dB=8.81 dB, 且大于 5 dB 余量, 因而通信正常, 可靠性较高。

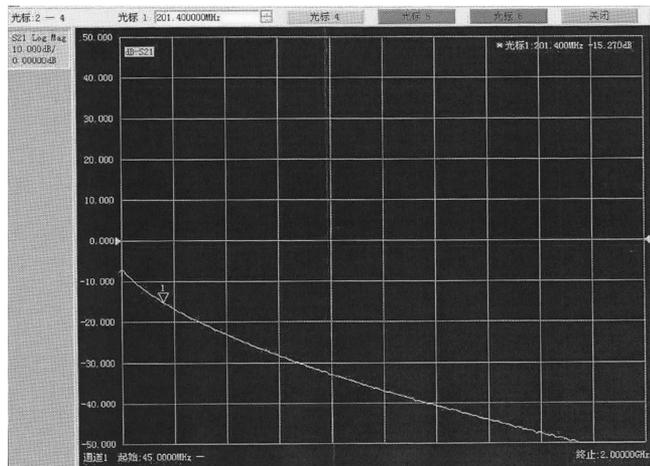


图 5 40 m 长线衰减实际测量结果

若将线缆长度调整为 60 m, 由于长线衰减为 $60 \text{ m} \times 0.50 \text{ dB/m} = 30 \text{ dB}$, 则链路余量 $M=T-L=24.08 \text{ dB}-30 \text{ dB}-1.2 \text{ dB}=-7.12 \text{ dB}$, 系统余量小于 0, 模型计算结果表明, 链路无法正常工作。通过存储器子系统进行实际测量, 发现通信异常, 测量链路衰减, 结果为 200 MHz 频点处衰减约为 25 dB, 大于 HOTLINK 传输链路容许的最大 24.08 dB 的衰减值, 从而会导致通信异常。

4 应用情况

本文提出链路计算模型及链路特性测量方式已经应用于某飞行器存储器子系统长线链路的设计。

4.1 系统长线链路计算

该存储器子系统飞行器上电缆同轴选用的是 SFF-50-1.5-1 型号, 长度为 20 m, 地面电缆选用的是 SFF-50-5-1 型号, 长度为 40 m, 存储器下载数据从采编控制器共经过 9

对接插件。

则飞行器上电缆衰减 $L_1=20 \text{ m} \times 0.5 \text{ dB/m} = 10 \text{ dB}$;

地面电缆衰减 $L_2=40 \text{ m} \times 0.15 \text{ dB/m} = 6 \text{ dB}$;

$L_4=9 \text{ 对} \times 0.30 \text{ dB/对} = 2.7 \text{ dB}$;

系统链路余量 $M=T-L=24.08 \text{ dB}-10 \text{ dB}-6 \text{ dB}-2.7 \text{ dB}=5.38 \text{ dB} > 5 \text{ dB}$, 系统链路通信正常, 可靠性较高。

4.2 系统长线链路测试

采用 AV3629 高性能矢量网络分析仪对系统长线衰减特性进行测试, 测量设备连接示意图见图 4。扫频的起始频率受测量仪器限制, 45 MHz 为其最低值, 因此将扫频起始频率设为 45 MHz。考虑到高速数字信号的边沿受高次谐波影响, 因此将扫频的终止频率设为 2 GHz。200 MHz 处衰减约为 16.08 dB。小于 HOTLINK 传输链路容许的最大 24.08 dB 的衰减值, 即 $L=16.08 \text{ dB}$, $M=T-L=24.08 \text{ dB}-16.08 \text{ dB}=8 \text{ dB}$, 且大于 5 dB 余量, 通信可靠性较高。

5 小结

介绍了存储器子系统长线链路的设计模型, 实现了链路设计指标闭合, 通过引入射频通路测试方法, 即采用了矢量网络分析仪进行链路衰减测试, 验证了链路设计结果。本文提出的完成链路的设计方法, 取代了以往搭建实际测试链路的过程, 节省了经费及设计周期, 可广泛应用于高速数据长线传输的链路设计。

参考文献:

[1] 翟亚东. 基于 CF 卡的飞行试验数据记录器的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (10): 1384-1385.
 [2] 王立恒. 遥测设备通用测试台中长线传输模块的设计与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2009.
 [3] 王瑞张. 高速信号长线传输 [J]. 仪表技术与传感器, 2010, (6): 51-53.
 [4] 闫富景. HOTLINK 串行信号的一种长线传输电路设计 [J]. 微计算机信息, 2007, 23 (8): 273-275.
 [5] 鄢若韞. 数据传输系统中 PECL 电平的接口设计 [J]. 微计算机应用, 2008, 29 (8): 109-112.