

# 轴对称矢量喷管多刚体动力学自动建模开发

何江军<sup>1</sup>,王汉平<sup>1</sup>,张少军<sup>1</sup>,金文栋<sup>2</sup>,巩明<sup>1</sup>

(1.北京理工大学 宇航学院,北京 100081; 2.中国航空工业集团 沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)

**摘要:**根据轴对称矢量喷管UG三维装配模型,参考简化模型和手动建模过程并编写了ADAMS宏命令,定制了划分不同模块的自动建模界面;顺序操作自动建模界面并添加等效燃气载荷,自动建立了矢量喷管多刚体动力学模型;对比0 Km、0 Ma中间状态下0°、10°、20°矢量偏转角时3个A8作动筒X方向载荷叠加曲线验证矢量喷管自动建模的可行性和便捷性;该研究将指导实物试验,优化产品设计,为其他类似复杂机构的自动建模提供重要借鉴。

**关键词:**轴对称矢量喷管;多刚体动力学;自动建模;ADAMS

**本文引用格式:**何江军,王汉平,张少军,等.轴对称矢量喷管多刚体动力学自动建模开发[J].四川兵工学报,2015(3):67-70.

**Citation format:**HE Jiang-jun, WANG Han-ping, ZHANG Shao-jun, et al. Automatic Multi-Rigid-Body Dynamics Modeling Development of Axial-Symmetric Vectoring Exhaust Nozzle[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(3):67-70.

中图分类号:V233.7;TJ02

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)03-0067-04

## Automatic Multi-Rigid-Body Dynamics Modeling Development of Axial-Symmetric Vectoring Exhaust Nozzle

HE Jiang-jun<sup>1</sup>, WANG Han-ping<sup>1</sup>, ZHANG Shao-jun<sup>1</sup>, JIN Wen-dong<sup>2</sup>, GONG Ming<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** According to the axial-symmetric vectoring exhaust nozzle(AVEN) 3D assembly model in UG, the ADAMS macro commands were wrote and the automatic modeling interface which was divided into different modules was designed referring to simplified model and manual modeling procedure. The multi-rigid-body dynamics model of AVEN was completed automatically by sequentially operating the automatic modeling interface and adding the equivalent gas loads. The automatic modeling of AVEN is feasible and convenient which was verified through contrasting the superimposed curves of three A8 actuators' loads along X axis at 0 degree, 10 degree and 20 degree vector angle in the condition of 0Km, 0Ma intermediate state. The study will guide prototype experiment, optimize product design and provide important reference for similar automatic modeling of other complex mechanism.

**Key words:** AVEN; multi-rigid-body dynamics; automatic modeling; ADAMS

轴对称矢量喷管(AVEN)能够大幅提高战斗机的隐身性、机动性、敏捷性和短距离起落能力<sup>[1]</sup>,是各个国家目前研究的热点。该装置构成零部件多、结构复杂、机构自由度高,是一种高度欠约束系统<sup>[2]</sup>。因此,目前针对AVEN的建模仿真工作均只能手动完成,尚未有公开文献报道关于AVEN的自动建模的研究情况。本文旨在AVEN的多刚体自动建模

界面开发,在AVEN简化模型的基础上,人为地把AVEN建模过程分成多个模块来依次进行,通过操作各个模块关联的设计变量对话框修改相应的建模参数,协调促进仿真实验的顺利进行。这有助于对AVEN实物试验时可能出现的各种情做出全面的预测,并且对产品的设计、优化和改进起到良好的指导作用。根据微调建模参数修正仿真结果来改进产

品结构,将大大加速研发进度,节约人力物力成本。

## 1 基本建模思路

由于 AVEN 机构零件较多,自动建模需在简化模型和手动建模的基础上发展完成,其主要建模思路流程如图 1 所示。



图 1 AVEN 多刚体动力学模型自动建模流程

## 2 AVEN 结构与运动分析

AVEN 装置为双 Stewart 平台驱动的复杂空间机构,该双 Stewart 平台由 A8 收敛调节环和 A9 转向控制环组成<sup>[3-4]</sup>。A8 收敛调节环上有十几组凸轮机构用来和收敛骨架上的特殊圆弧面配合,收敛骨架与收敛调节片前后铰接。A8 收敛调节环由 6 个驱动作用筒同步控制,在凸轮和特殊圆弧面的配合下,收敛调节片跟随收敛骨架一起完成收敛段的收扩运动。

A9 转向控制环的 3 个驱动作用筒互呈 120° 周向分布,由定心装置限制在与机匣轴线平行的 3 个导轨上,其异步动作可引起 A9 转向控制环的偏转,进而带动三角拉杆、扩张支架和扩张调节片完成扩张段喷口的偏转,实现矢量控制的作用(图 2)。收敛段和扩张段的连接是通过具有十字转接功能的扩张头部完成的。

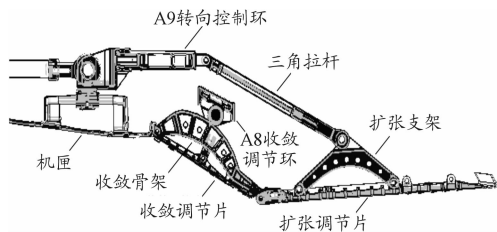


图 2 AVEN 的截面

## 3 ADAMS 宏命令编写

要想实现如此复杂机构的自动建模,首先应该通过 ADAMS 提供的 cmd 宏命令功能建立 AVEN 多刚体系统模型,再循序渐进,实现自动建模界面的开发。在通过宏命令

AVEN 建立模型时,根据分析需要确定相关的关键变量,并将这些关键变量设置成可变的设计变量。在分析时,只需要改变这些设计变量值的大小,AVEN 虚拟样机模型即可自动更新。

### 3.1 初步建模

首先,将 UG 软件中的 AVEN 零件图分别以 parasolid 格式按建模顺序编号命名导出并放置在指定位置的文件夹中。为方便后续建模,所有零件均选取在装配位置,而诸如收敛调节片、扩张头部、扩张调节片等沿加力筒体中心轴对称布置的多组零件只选取典型位置的单个零件导出。然后,在 ADAMS2012 软件中,新建 Nozzle 模型、定义单位和重力、选择工作路径<sup>[5]</sup>。在 UG 中量取需要设置成设计变量的各类尺寸,包括零件几何尺寸、约束点坐标尺寸等,将这些尺寸按建模顺序编写成逐条的设计变量 cmd 宏命令。

设计变量 cmd 宏命令与建模 cmd 宏命令一一对应。每一条建模 cmd 宏命令主要包含以下子命令:读入 parasolid、重命名 part、复制 part、移动 part、创建 marker、创建 joint。有些宏命令里还需要添加合并 part、重命名 solid、创建 contact、创建 spring damper 等子命令,具体应该添加或者省略哪些子命令视 AVEN 模型零件衔接需要而定。为方便建模分析,需要给各 part 重新命名和统一编号。针对不同的零件,以构成该零件的汉语拼音或汉语拼音的首字母的组合加上编号来为其命名,为便于识别,每个拼音的首字母均大写。为便于对零件定位、观察和分析,选择典型位置的零件作为 1 号零件,比如将 Z 轴负向穿过的调节片设定为 1 号调节片,将 Y 轴正向穿过的 A8 作用筒设定为 1 号作用筒等。复制 part、移动 part 时,只需要将其余  $n-1$  组零件在 1 号零件的重叠位置以宏命令的方式复制完成,再沿加力筒体中心轴逆时针每旋转  $360^\circ/n$  放置一组零件,其中  $n$  为该类零件的总数。创建 marker 时,参考需要建立 joint 的类型和方位来合理命名,确保是辨识度高的名称即可;创建 joint 时,参考  $i$  marker、 $j$  marker,主要命名为  $i$  part- $j$  part\_编号或者  $i$  part 编号- $j$  part 编号的形式。

### 3.2 简化建模

#### 3.2.1 树状建模原则

建模过程中除喉道密封片与收敛密封片铰接位置(该处难以相对其他典型位置进行定位)外都采用树状建模原则来逐步循序推进,具体而言就是,先建立与 ground 相关联的零件约束,以这些零件为树干,再构建与树干相关联的零件约束,以此类推逐步完善 AVEN 的建模。为完善树状逻辑表述,借助 LOC\_RELATIVE\_TO 和 ORI\_RELATIVE\_TO 函数将末端零件的 marker 与前端的已被参数化的 marker 参数关联,这样使整个模型形成形式和逻辑上的树状结构<sup>[2]</sup>。

#### 3.2.2 过约束问题

AVEN 机构整体上是一个高度欠约束的机构,但其局部环节却会存在过约束,尤其是当机构形成封闭的回路时常常如此。ADAMS 本身的自由度解算和约束检测工具能够剔除一些构型简单的机构过约束,但是当系统过于复杂时,其自动剔除过约束可能会使动力学解算出现不合理的现象,这时

需要人工干预消除过约束问题<sup>[2]</sup>。以立式协同装置为例,按照机构实际的约束情况,(从发动机尾部看去)左右长杆之间、右侧长杆和右侧短杆之间均为铰链约束。但是,如果在 ADAMS 中按实际理想约束建模的话,由于这些零件形成了封闭的回路系统,ADAMS 会认定其过约束。因此,经过反复修改验证后将左右长杆之间、右侧长杆和右侧短杆之间的铰链约束分别改为球铰约束和圆柱副约束,使机构正好不出现过约束。进一步细分,ADAMS 建立立式协同装置约束的方式是:左侧长杆和右侧长杆、左侧长杆和左侧销钉、右侧长杆和右侧销钉之间是球铰约束,右侧长杆和右侧短杆之间是圆柱副约束,左侧长杆和左侧短杆、块轴和左右两侧短杆之间是铰链约束。立式协同装置具体的约束示意图如图 3 所示。

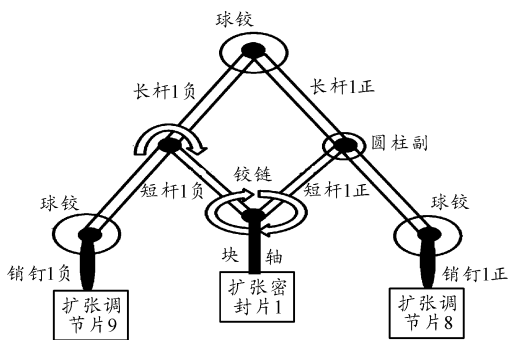


图 3 立式协同装置约束示意图

### 3.2.3 接触和弹簧阻尼器

为使 AVEN 模型最大限度地接近实际约束情形,在一些特定连接位置需要建立特定约束。A8 收敛调节环滚子在运动中始终与收敛骨架上表面相接触,在 ADAMS 中二者之间的约束建为线高副接触约束;收敛密封片与收敛调节片、喉道密封片与收敛密封片之间没有明显直接的约束形式,但是 ADAMS 仿真要求二者之间一直接触,建为点面接触约束;扩张密封片与扩张调节片之间不便建立接触点,建为实体接触约束。为了使扩张密封片和扩张调节片在仿真过程中始终贴合在一起,仅凭实体接触约束是不够的,还需要人为地在立式协同装置块轴和扩张密封片之间添加一个拉压弹簧阻尼器、在卧式协同装置盒座和左右曲杆之间添加同样大小的两个扭转弹簧阻尼器<sup>[6]</sup>。

## 4 自动建模界面开发

自动建模界面的定制在 ADAMS 主菜单界面中完成,将界面风格设为经典模式,以方便后续对话框的放置。新建名为 database 的数据库,并在其下创建名为 dialog 的对话框数据库和名为 variable 的设计变量数据库。把对话框和设计变量与模型独立开来,这样不仅方便对对话框和设计变量查看修改,而且利于对模型进行操作,更重要的是删除原模型并新建模型时原对话框和设计变量的数据得以保留。在 dialog 对话框数据库下创建名为 Nozzle\_Toolbox 的总对话框,并合理放置在 ADAMS 主界面中<sup>[7]</sup>。如图 4 所示,人为地把

AVEN 建模过程分成 JLTT(加力筒体)、SLTJP(收敛调节片)、SLGJ(收敛骨架)、KZTB(扩张头部)、KZTJP(扩张调节片)、KZZJ(扩张支架)、SJLG(三角拉杆)、A9Huan(A9 环)、A9HSG(A9 活塞杆)、A9TT(A9 套筒)、A8Huan(A8 环)、A8HSG(A8 活塞杆)、A8ZDT(A8 作动筒)、KongZhiGuiLv(控制规律)、SLMFP(收敛密封片)、HDMFP(喉道密封片)、KZMFP(扩张密封片)共 17 个模块。

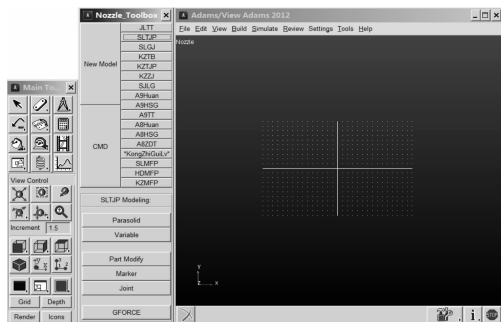
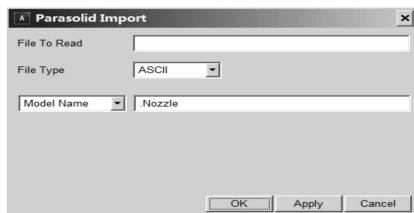


图 4 Nozzle\_Toolbox 主对话框

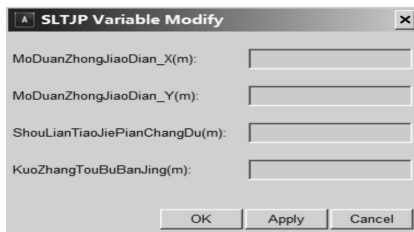
New Model 按钮集成了删除原模型新建模型的 cmd 宏命令,CMD 按钮指向 Command Import 对话框用以导入额外操作的 cmd 宏命令。New Model 和 CMD 两个按钮右侧按建模顺序紧密布置着前述 17 个模块的按钮,每一个按钮指向集中放置在对话框下部的各自对应的 container,单击不同按钮可以自由切换到相应的 container,每一个 container 包含着建立该模块的自动建模 cmd 宏命令集成按钮。以 SLTJP(收敛调节片)为例,其名为 SLTJP Modeling 的 container 下包含以下宏命令集成按钮:Parasolid、Variable、Part Modify、Marker、Joint、GFORCE,通过单击即可实现各自功能。如图 5(a)、(b)所示,Parasolid 按钮指向统一的 Parasolid Import 对话框读取并导入相应的 parasolid 文件;Variable 按钮指向 SLTJP Variable Modify 对话框,该对话框与 variable 设计变量数据库采用交互式的方式进行数值传递:它首先读入相关设计变量在 variable 设计变量数据库中的值并显示在数值输入框里,然后在数值输入框里可以对各设计变量的值进行修改,修改后的值返回给 variable 设计变量数据库中的相关设计变量;Part Modify 按钮集成了重命名为收敛调节片 1、复制并移动其他十几组收敛调节片的 cmd 宏命令;Marker 按钮集成了建立起始端中铰点和末端中铰点的 cmd 宏命令;Joint 按钮集成了创建加力筒体与收敛调节片之间的圆柱副约束的 cmd 宏命令;GFORCE 按钮是针对热态多刚体动力学建模而设计的,其功能是在末端中铰点处建立与收敛调节片所承受的燃气载荷等效的 gforce 集中力,其赋值则借助 ADAMS 二次开发功能编写 gfosub 子程序来实现<sup>[8]</sup>。\* KongZhiGuiLv \* 按钮指向为 A8、A9 作动筒添加驱动的 container,这部分内容可以分成 State Variable 和 Motion 两个模块。如图 5(c)所示,单击 State Variable 按钮,首先调用 if cond = (! db\_exists(" ")) 语句在 nozzle606 模型数据库里创建 D8(喷喉直径)、D9(喷口直径)、Delta9(矢量偏转角)、Theta9(方位角)等状态变量,

然后弹出 State Variable Modify 对话框,提供修改 D8、D9、Delta9、Theta9 这 4 个基础状态变量的方程输入框,并与 Nozzle 模型数据库里的状态变量进行数据交互。单击 Motion 按钮,通过其集成的 cmd 宏命令直接创建 A91、A92、A93、A81、A83、A85 这 6 个 translational motion。

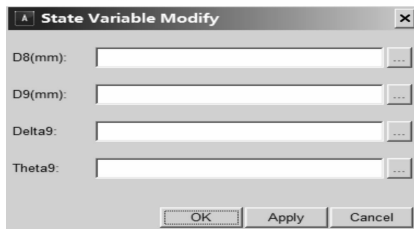
这样,通过顺序操作自动建模界面并添加等效燃气载荷,就可以自动建立 AVEN 多刚体动力学模型。



(a) Parasolid Import



(b) SLTJP Variable Modify



(c) State Variable Modify

图 5 Nozzle\_Toolbox 子对话框

## 5 仿真计算及结果分析

自动建模界面可以便捷快速地完成 AVEN 建模工作,通过对话框输入不同的变量可以切换不同的 AVEN 模型、不同的仿真工况。仿真计算时 AVEN 多刚体动力学模型进入状态的时间为 0.2 s, 偏转周期为 0.5 s, 计算 2 个时间周期, 整个计算时间为 1.2 s, 计算步长为 0.001 s, 求解器为 WSTIFF, 计算线程为 8 个。计算硬件为 intel 酷睿 i7 四核 CPU, 主频 3.6 GHz, 睿频 3.8 GHz, 内存 32G-DDR3-1600 MHz<sup>[4]</sup>。

图 6 展示了 0 km、0Ma 中间状态下输入 0°、10°、20° 矢量偏转角时 3 个 A8 作动筒 X 向载荷叠加曲线。可以看出, 在同一工况下, 3 个 A8 作动筒 X 向载荷叠加随着矢量偏转角的增大而增加, 矢量偏转平稳后载荷叠加曲线的微小波动主要由密封片和调节片的接触引起。从上可知, 该套 AVEN 自动建模软件是便捷可行的; 同时, 通过自动建模界面修改其他零件尺寸参数或者状态变量参数可以得到相应的受载特

性曲线, 对比不同的状态变量参数所得的受载特性曲线可以指导 AVEN 实物试验, 对比不同的零件尺寸参数所得的受载特性曲线可以优化 AVEN 参数设计。

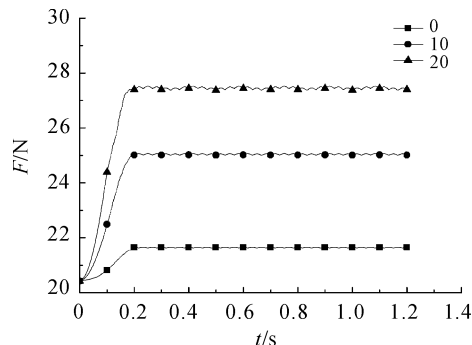


图 6 0°、10°、20° 偏角下 3 个 A8 作动筒 X 向受载叠加特性

## 6 结束语

本文在 AVEN 原始模型的基础上, 首先简化模型、手动建模, 然后将手工建模的操作过程编写成 ADAMS 宏命令, 进一步定制自动建模界面, 通过自动建模界面建立 AVEN 模型并实现仿真计算, 对比不同参数的载荷曲线优化 AVEN 模型、指导 AVEN 实物试验。全套方法可为其他类似复杂机构的自动建模提供重要借鉴。

## 参考文献:

- [1] 王莉, 袁茹, 王三民, 等. 温固耦合下轴对称推力矢量喷管驱动机构的运动精度分析[J]. 机械科学与技术, 2008(6): 752-756.
- [2] 王汉平, 张煜冰, 杨鸣. 轴对称推力矢量喷管冷态多柔体动力学仿真[J]. 航空动力学报, 2011(11): 78-81.
- [3] 王玉新. 喷气发动机轴对称推力矢量喷管[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [4] 王林鹏, 王汉平, 杨鸣, 等. 复杂空间机构热态刚柔耦合多体动力学建模[J]. 四川兵工学报, 2013(9): 2427-2432.
- [5] 王鑫, 武建新. 轴对称推力矢量喷管动力学仿真与分析[J]. 机械设计与制造, 2013(10): 106-109.
- [6] 石博强, 申焱华, 宁晓斌, 等. ADAMS 基础与工程范例教程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [7] 胡礼, 易忠路, 龚成斌, 等. 基于 ADAMS/Car 的二次开发和应用[J]. 计算机辅助工程, 2014(1): 82-84.
- [8] 陈立平, 张云清, 任卫群, 等. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.