

文章编号:1000-8055(2011)11-2427-06

轴对称推力矢量喷管冷态多柔体动力学仿真

王汉平¹, 张煜冰², 杨 鸣¹

(1. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081;

2. 北京机电工程研究所 11 室, 北京 100078)

摘 要: 采用实体板壳单元对矢量喷管关键部件进行了柔性化, 基于机构的树状参数化处理技巧和 MSC. ADAMS 软件的宏命令批处理技术构建了矢量喷管的多柔体动力学仿真模型, 模型中使用点线约束简化了部分接触约束, 极大减小了计算规模. 仿真了机构的冷态同步、摇头和摆头等工况, 获得了机构各环节的受载和动态特性. 研究工作对于矢量喷管的热态仿真及其虚拟设计和虚拟实验具有重要指导意义.

关 键 词: 轴对称推力矢量喷管; 多体动力学; 航空发动机; 虚拟样机; MSC. ADAMS 软件

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Flexible multi-body dynamics simulation of cold state axial-symmetric vectoring exhaust nozzle

WANG Han-ping¹, ZHANG Yu-bing², YANG Ming¹

(1. School of Aerospace Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

(2. The 11 th Department,

Beijing Institute of Mechatronic Engineering, Beijing 100078, China)

Abstract: The crucial parts of axial-symmetric vectoring exhaust nozzle (AVEN) were meshed into flexible bodies with solid-shell elements. A flexible multi-body dynamics model of AVEN was built based on MSC. ADAMS command batch processing technique and tree-shape parametric technique. A part of contact constraints in the dynamics model were simplified with point-curve constraints to reduce the computational size. By means of simulation of shaking and swinging movement of the AVEN on normal temperature condition, the loading and dynamic characteristics of the mechanism were achieved. Provided an important reference for virtual design and virtual experiment of AVEN.

Key words: axial-symmetric vectoring exhaust nozzle (AVEN); multi-body dynamics; aero-engine; virtual prototype; MSC. ADAMS software

轴对称推力矢量喷管(AVEN)可实现全方向矢量推进, 且易于改装, 目前广为战斗机所采用^[1]. 由于该喷管装置构成部件多(800 多个)、结构复杂、部件间大部分约束依靠接触实现, 是一种高度欠约束的复杂机构^[2-5], 受计算条件的限制, 以前对其性能的了解很大程度上都依赖台架试车

试验, 这样很难全面获取机构中各环节的受载和动态特性, 同时周期长、费用高、人力物力消耗巨大^[6]. 鉴于此, 本文对 AVEN 的关键部件采用实体板壳予以柔性化处理, 并借助 MSC. ADAMS 软件构造了该喷管机构的多柔体动力学仿真模型, 同时对冷态试车的同步作动、异步摇头和异步

收稿日期:2010-11-16 修订日期:2011-06-23

作者简介:王汉平(1971—),男,湖北天门人,副教授,博士,主要从事动力学及振动控制方向研究. E-mail:whp161@bit.edu.cn

摆头状态进行了仿真,获得了喷管机构各环节的受载和动态特性数据,这对于新产品的简化建模、热态特性仿真、机构动态特性的获取以及新产品研发的加速都具有重要的理论指导意义。

1 关键受载部件的柔性化

AVEN 呈轴对称布局,结构零件多,运动关系复杂,进行柔性化处理时只选择了对动态特性影响较大的收敛调节片、收敛密封片、扩张调节片、扩张密封片、A8 环和 A9 环六大部件。前四个部件均为板筋结构,采用板壳单元比较合适,但常规板壳单元无法表达实体轮廓,这在 ADAMS 软件中无法构建柔性体接触,而若用实体单元,要反映其刚度特性,在厚度方向至少应当有四层以上的网格才行,这样每个部件的网格数将非常大,无论是对柔性体的生成还是多柔体模型的仿真都将

是巨大的挑战,为此本文选用实体板壳单元来离散化这四个部件^[7],这既确保了有限元(FE)模型具有普通板壳单元的精度,又极大程度减小了计算规模,同时还能保留实体轮廓,以方便柔性体接触的建模。网格处理工具是 HyperMesh^[8],使用的是 ANSYS 软件中的 SSH190 单元,柔性化部件的有限元模型见图 1。柔性化过程是:在 HyperMesh 中构建零件的接口点,设置接口点为质量很小的 MASS21 单元,并在铰接孔面节点与接口点之间构建 ECRIG 单元,实现铰接孔面节点与接口点之间的刚性耦合,然后将有限元模型导出,用 ANSYS 软件直接生成 ADAMS 软件可以使用的模态中性文件(.mnf),最后用 ADAMS 软件中的 Rigid to Flex 命令用模态中性文件替换对应的刚性体来实现多体模型的柔性化建模^[9]。

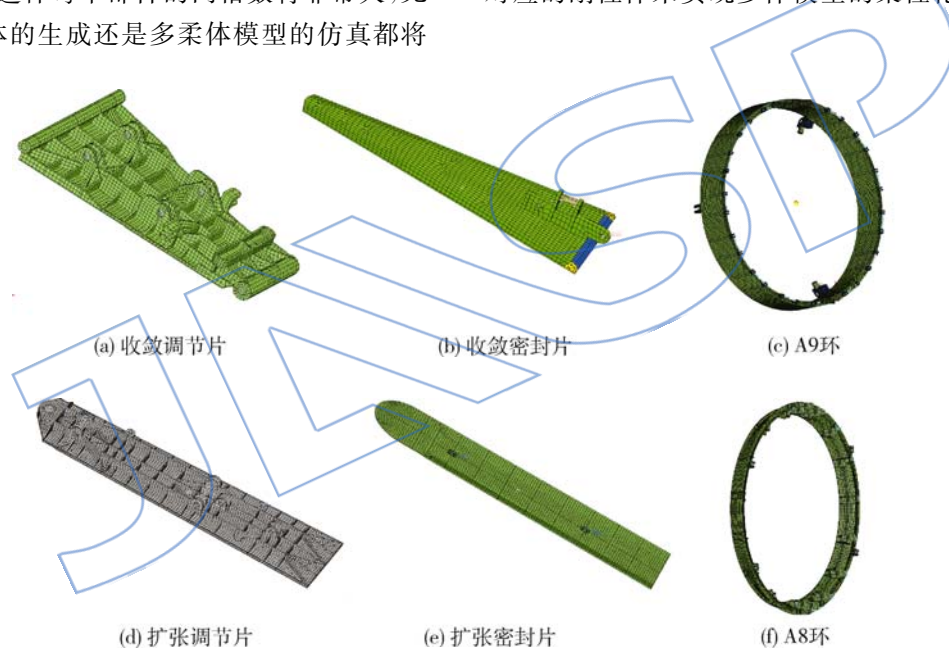


图1 关键部件有限元模型

Fig. 1 FE model of crucial parts

2 冷态多柔体动力学模型^[10-12]

为方便 AVEN 机构的多柔体动力学建模,本文在导入 AVEN 的三维实体模型之后,对无相对运动的零件进行了合并操作,最后将 800 多个零件合并为 552 个部件,并根据周向循环对称的特性,对相同的循环零件用同一名称予以命名,并按照逆时针顺序在名称中添加编号以示区别;建模过程采用树状顺序装配原则来逐步向前推进,具体方法是先建立与 ground 相关联的部件约束,这些部件就相当于树干,然后再构建与树干相关联的零部件的约束,依此逐步推进全模型的建模。为

完善这种树状的逻辑表述,在建模过程中采用了参数化技术,就是将树状结构中末端零部件上的 Marker 用树状结构中前端零部件上的 Marker 予以参数化表述,即借助 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一个形式和逻辑上的树状结构,如此操作比较容易保证整个模型的完整性和一致性,树状参数化模型示意图 2;在进行树状建模的推进过程中,每向前推进一步,都要进行仿真验证,保证每一步建模的正确、可靠,考虑到模型的周向循环对称,建模过程中充分使用了

ADAMS 软件所提供的 MACRO 命令,以及规范化的命名策略,很方便就可以添加同类的 ADAMS 软件单元(包括 Marker 定义及其参数化、约束定义等);柔性体的建模采用替换加阵列方式予以实现,具体操作就是采用 Rigid to Flex 命令按质心对齐分别用相应的柔性体替换 1 号收敛调节片、1 号扩张调节片、8 号收敛密封片和 8 号扩张密封片,替换之后对接口参考点进行参数化,保证接口点的 Marker 满足约束建模的方向要求,之后采用柔性体复制和旋转进行阵列,生成其他柔性体,这样操作的主要原因是 1 号调节片和 8 号密封片姿态刚好同 Y 轴垂直,Marker 的调整比较方便,而且阵列后的柔性体接口点 Marker 都能保持约束所需要的方位要求。

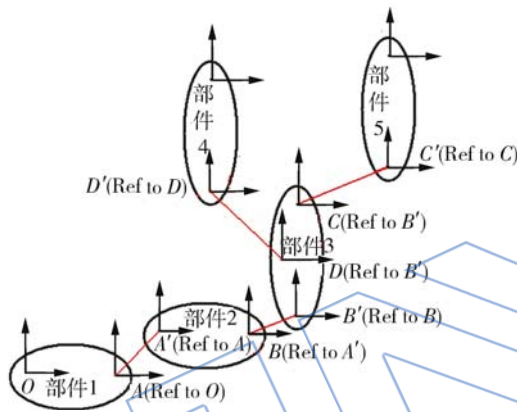


图 2 树状参数化过程的示意图

Fig. 2 Schematics of tree-shape parametric procedure

模型中的柔性体接触非常多,包括骨架与 A8 环之间、收敛调节片与收敛密封片之间、收敛调节片与压紧片之间、扩张调节片与扩张密封片之间、喉道密封片与扩张密封片之间,总计 120 对实体接触,如若按正常接触建模计算量将非常巨大,根据仿真状态估算,采用酷睿 I7-945 Intel CPU (central processing unit) 的电脑大约要花费 680 天,这就使该模型仿真对工程的指导作用大为降低;为缩小计算规模,本文将骨架与 A8 环之间的接触简化为了高副约束,将喉道密封片与扩张密封片的接触简化为了两个点面接触,而将收敛调节片与压紧片之间的接触则简化为了点线约束,由于点线约束的构建,这使收敛调节片、压紧片和收敛密封片之间产生过约束现象,为解决这种过约束问题,本文将压紧片与收敛密封片之间的约束由实际的铰链约束改为了圆柱副约束,同时在压紧片与收敛密封片之间构造了一个双向接触约束来限制压紧片与收敛密封片之间的位置关系,

这样模型中机构的运动关系与实际机构完全一致,不同之处是,实际结构是靠压紧片与收敛调节片滑槽之间的接触间隙来调整机构以保证不出现卡死现象,而仿真模型是借助圆柱副的轴向平移位移来对机构运动进行调整,避免出现过约束,如此处理之后模型的计算规模就降到了可以承受的程度;另外,机构中的立式协同装置(见图 3)是封闭的铰链环,存在过约束现象,尽管 ADAMS 软件具有自动消除过约束功能,但是,其自动消除过约束的功能有时会导致模型出现局部欠约束或局部约束不符合实际物理样机的现象,因此,文中采用手工方式来进行约束修改,以便消除 ADAMS 软件模型中的过约束现象,同时又能保证模型的运动状态与实际物理样机一致。按照实际样机约束情况,长杆与耳座、长杆与长杆、长杆与短杆、短杆与转球均为理想铰链约束,但实际上因为这些构件形成了封闭的环形结构,ADAMS 软件认定其是过约束,通过人为调整,最终将长杆与长杆之间的铰链约束改为球铰,耳座与长杆之间的铰链约束改为了球铰,短杆 2 与转球之间的铰链约束改为了圆柱副,这样再进行模型验证,就没有过约束了,最终多体动力学模型见图 4。

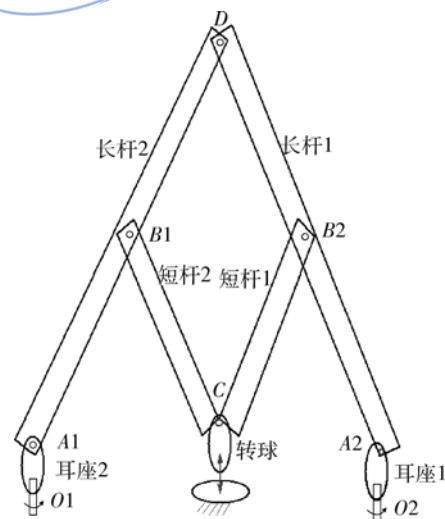


图 3 立式协同机构的约束简图

Fig. 3 Constrains schematic of vertical cooperative mechanism

3 仿真结果分析

本文分别对 AVEN 模型进行了同步作动、异步摇头和异步摆头工况仿真,异步工况下, A9 环作动筒行程分别选取了 ± 30 , ± 40 , ± 50 mm 三种情况,这样累计同步工况、三种异步摇头工况和三

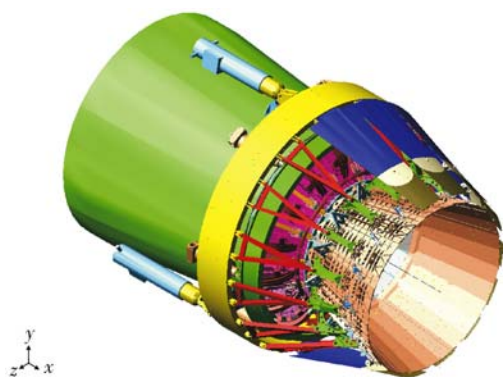


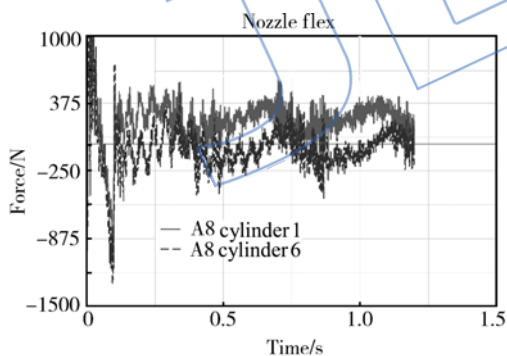
图 4 AVEN 多柔体模型

Fig. 4 Flexible multi-body dynamics model of AVEN

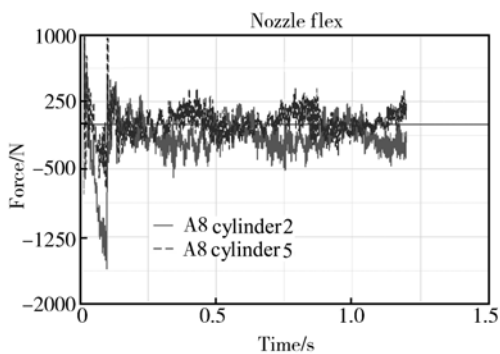
种异步摆头工况共计 7 种仿真工况, 每种工况的驱动均按余弦处理, 周期为 0.4 s, 仿真三个时间周期, 采用 Intel 酷睿 I7-975 CPU, 12 GB 内存的计算机进行仿真, 每种工况所需仿真时间若为 8 d, 计算量较大。

由于数据量比较大, 在此仅以 A9 环作动行程为 ± 30 mm 的异步摇头工况为例进行图示, 而其他工况, 则列表表示。

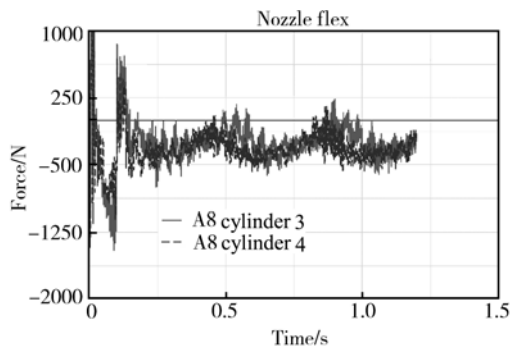
图 5 分别图示了 ± 30 mm 行程异步摇头工况下 A8 环作动筒 1 和 6, 2 和 5, 3 和 4 的驱动载荷时间历程, 从中可以看出, 驱动载荷具有一定的波动周期, 并且曲线中带有明显的毛刺, 驱动载荷稳



(a) 作动筒 1,6 载荷



(b) 作动筒 2,5 载荷



(c) 作动筒 3,4 载荷

图 5 ± 30 mm 行程异步摇头工况下 A8 环各作动筒驱动载荷时间历程Fig. 5 Load curves of every actuating cylinder of A8 ring in the case of ± 30 mm stroke asynchronous shaking movement

定后的正向最大为 500.0 N, 负向载荷最大为 -520.1 N。

图 6 是 A9 环作动筒的驱动载荷的时间历程, 从中不难看出驱动载荷曲线总体上呈现余弦波动形式, 而在总趋势之上还附加有一个高频的波动成分, 驱动的最大正向载荷为 3329.8 N, 负向的最大载荷为 -3832.6 N, 且 A9 环作动筒 1 的载荷波动偏向负轴, 而作动筒 2, 3 的载荷波动偏向正轴, 这是重力作用使然。

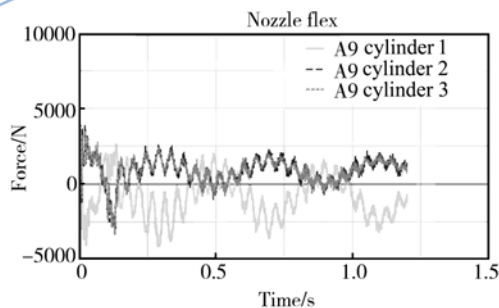
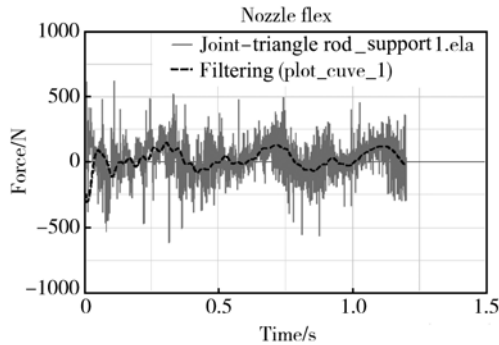
图 6 ± 30 mm 行程异步摇头工况下 A9 环各个作动筒驱动载荷时间历程Fig. 6 Load curves of every actuating cylinder of A9 ring in the case of ± 30 mm stroke asynchronous shaking movement

图 7 是三角拉杆 1 分别与支架 1 的球铰约束 X, Y, Z 向以及总的载荷, 可以看出载荷特性的周期性几乎被毛刺所覆盖; 其中只有 Z 向载荷周期明显, 而载荷的最大方向在 X 向, 最大值约为 500 N, 而 Y, Z 方向则仅 200 N。

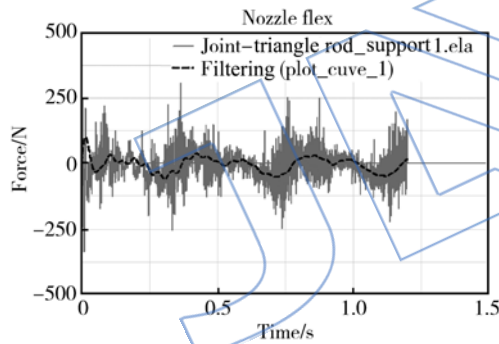
A8, A9 环作动筒载荷以及三角拉杆载荷出现明显毛刺状态的原因有两点: 一是载荷本身比较小, 容易受噪声干扰; 其二是机构中的接触过

多,因为机构运动过程中过多的接触将产生实际的接触噪声,同时在接触的仿真模拟中,还存在数值模拟的噪声,实际噪声和数值噪声的共同影响,最终导致了载荷的毛刺状态。

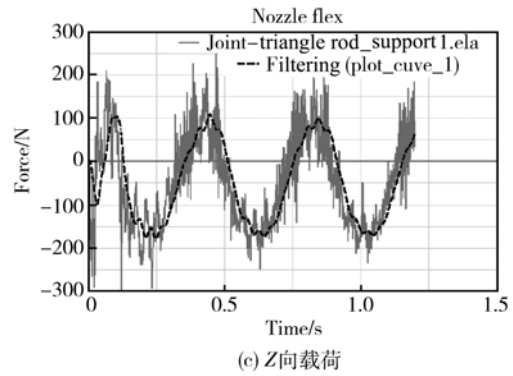
图 5~图 7 所示的轴对称推力矢量喷管作动过程是异步摇头过程,也就是说 A9 环将带动矢量喷管作周期摇头运动,由此可以推断,A9 环、A8 环的驱动载荷以及三角拉杆受力将是一个周期波动过程,仿真结果的趋势刚好符合这种规律,这表明模型具有一定的可信性。



(a) X向载荷



(b) Y向载荷



(c) Z向载荷

图 7 ± 30 mm 行程异步摇头工况下三角拉杆 1 与支架 1 球铰的载荷时间历程

Fig. 7 Load curve of spherical joint between No. 1 triangle rod and No. 1 support in the case of ± 30 mm stroke asynchronous shaking movement

从表 1 中可以看出,针对相同类型的异步工况 A9 环的行程越大,载荷越大,而同步工况载荷较小。

喉道变化呈现正弦变化,考察峰值特性,在 X 轴向的变形为 0.03 mm,在 Y 轴的变形为 0.05 mm,在 Z 轴的变形为 0.0055 mm,总的最大变形为 0.058 mm;扩张喷管的变形同样呈现正弦变化,考察扩张调节片 1 短杆接口点相对于支杆前接口点在 X,Y,Z 方向最大变形量,在 X 轴向的变形为 0.025 mm,在 Y 轴的变形为 0.17 mm,Z 轴的变形为 0.225 mm. 同样,随着行程的增大,变形愈发剧烈. 总体来说收敛调节片和扩张调节片变形均比较小,这主要有三点原因:

表 1 不同工况下仿真的最大载荷特性

Table 1 Maximum load characteristics of several simulation cases

载荷特性		异步摇头/mm			异步摆头/mm			同步作动
		30	40	50	30	40	50	
A8 环作动筒载荷	正向最大值/N	500	639	3389	735	806	2968	935
	负向最大值/N	-520	-813	-1809	-545	-622	-1545	-759
A9 环作动筒载荷	正向最大值/N	3329	3932	4781	2608	2794	3330	370
	负向最大值/N	-3832	-4507	-4715	-4170	-5232	-5899	-500
三角拉杆载荷	X 向最大值/N	500	500	750	400	500	620	260
	Y 向最大值/N	200	200	250	150	240	250	120
	Z 向最大值/N	200	350	450	200	180	250	130

1) 机构本身受载较小,因为冷态试车过程机构的受载主要是惯性载荷,喷管机构中的这种分布载荷相对于调节片结构而言较小;

2) 收敛调节片、扩张调节片本身刚度比较强,这可从柔性化后的频率特性看出,分别 533 Hz 和 280 Hz,频率较高,说明其刚性较好;

3) 收敛调节片与骨架的连接方式以及扩张调节片的支撑方式有利于加强其刚度特性。

4 结 论

采用实体板壳单元对轴对称推力矢量喷管机构的关键部件进行了柔性化处理,这样在保证模态精度、减小计算规模的同时又保留了结构实体,方便了刚-柔、柔-柔接触建模;模型中的部分接触成功采用点线约束予以简化处理极大程度减小了计算规模;轴对称推力矢量喷管机构的冷态同步、冷态异步仿真验证了建模方案的可行性,仿真结果表明模型可信,为轴对称推力矢量喷管机构的热态仿真提供了强有力的支撑,也对轴对称推力矢量喷管机构的虚拟设计和虚拟实验具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 方昌德. 飞机推力矢量技术发展综述[J]. 航空科学技术, 1998(2):10-12.
FANG Changde. Overview of thrust vector technique for airplane[J]. Journal of Aeronautic Science and Technology, 1998(2):10-12. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 梁春华,张仁,沈迪刚. 国外航空发动机推力矢量喷管技术的发展研究[J]. 航空发动机,1998(1):49-55.
LIANG Chunhua, ZHANG Ren, SHEN Digang. The development of foreign aeroengine vectoring exhaust nozzle [J]. Aeroengine, 1998(1):49-55. (in Chinese)
- [4] 杨玉颖. 航空轴对称推力矢量控制技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2000.
YANG Yuying. Study on control technique of aeroengine axial-symmetric vectoring exhaust nozzle [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000. (in Chinese)
- [5] Van der Veer M R, Strykowski P J. Counterflow thrust vector control of subsonic jets: continuous and bistable regimes[J]. Journal of Propulsion and Power, 1997, 13(3): 412-420.
- [6] GAO Yang, BAI Guangchen, YU Linchong. Simulation and reliability analysis of axisymmetric vectoring exhaust nozzle flexible mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(2):175-178.
- [7] 张煜冰. 轴对称推力矢量喷管多柔体动力学仿真[D]. 北京:北京理工大学,2010.
ZHANG Yubing. Study on flexible multi-body dynamics simulation for axial-symmetric vectoring exhaust nozzle [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 于开平,周传月,谭惠丰. HyperMesh 从入门到精通[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [9] 张朝晖,李树奎. ANSYS 11.0 有限元分析理论与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [10] 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.
- [11] 邢俊文. MSC. ADAMS/Flex 与 AutoFlex 培训教程[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [12] MSC Software. MSC. ADAMS/View 高级培训教程[M]邢俊文,译. 北京:清华大学出版社,2004.