

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.12.009

# 基于 FlexRay 总线的无人机飞行控制计算机

王琴, 陈欣, 吕迅宏

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 为解决 CAN 总线通信带宽受限问题, 设计基于 FlexRay 总线无人机飞行控制计算机。通过研究飞行控制计算机的网络结构和内部通信机制, 完成样例计算机硬件平台、内部通信方案设计, 实现内部通信软件的开发, 并以实例进行通信测试与结果分析。结果表明: FlexRay 总线相对 CAN 总线在实时性、通信速率和效率上具有优越性, 能满足样例飞行控制计算机内部信息交互的实时性和数据量的要求。

**关键词:** FlexRay; CAN; 飞行控制计算机; 通信; MFR4310

**中图分类号:** TJ85 **文献标志码:** A

## Flight Control Computer Based on FlexRay Bus for UAV

Wang Qin, Chen Xin, Lu Xunhong

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics &amp; Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** For the problem that CAN (controller area network) bus communication bandwidth is limited, a new bus is introduced and a uninhabited aerial vehicle (UAV) flight control computer is designed based on the FlexRay bus. By studying the network structure and internal communication mechanism of the flight control computer, the design of computer hardware platform, internal communication data frame format and synchronization mechanism are completed, and the internal communication software is developed. Actual test proves that FlexRay bus has great advantages over CAN bus in real time, communication speed and efficiency, which satisfies the requirements of real-time information exchange and huge data quantity inside the sample flight control computer.

**Keywords:** FlexRay; CAN; flight control computer; communication; MFR4310

### 0 引言

目前无人机飞行控制系统中的分布式结构飞行控制计算机多采用 CAN 作为内部通信总线<sup>[1]</sup>, 其数据通信的实时性与可靠性得到了充分验证。随着新型高性能无人机系统的发展, 对飞行控制计算机的功能与性能要求越来越高。在这种发展趋势下, 计算机内部通信总线上的负载情况越来越重, 而 CAN 总线的数据传输率是 1 Mbit/s, 数据传输效率本身就不高, 小于 60%<sup>[2]</sup>, 已经不能满足新型飞行控制计算机的要求, 因此需要寻求一种新总线通信技术解决制约分布式结构飞行控制计算机发展的瓶颈问题。FlexRay 作为一种新型总线网络, 具有数据传输速率高、可靠性高和实时性好等优点<sup>[3]</sup>, 能满足大容量实时通信需求。因此, 笔者根据新型分布式结构飞行控制计算机对内部通信总线信息传输的需求, 研究、设计了基于 FlexRay 总线样例飞行控制计算机硬件平台、内部通信方案, 并完成了内部通信软件的开发。

### 1 FlexRay 特性<sup>[4-6]</sup>

CAN 总线于 1986 在美国的 SAE 大会上由德国

BOSCH 公司首次提出, 用于汽车内部数据通讯。随着 CAN 应用的不断扩展, 其在工业过程控制、机械制造、航空航天等其他领域也得到了广泛的应用<sup>[7]</sup>。FlexRay 作为一种新型的高速串行总线标准, 已经在宝马 X5、X6 和 7 系列轿车上都获得了成功的应用。根据 FlexRay 的技术特点, 对比 CAN 的发展历程, 可以预计 FlexRay 的应用也将扩展到工业控制、航空航天等其他领域上。与 CAN 总线相比, FlexRay 在数据传输率、确定性、可靠性等方面有以下优势:

1) 单通道的数据传输率最快可达 10 Mbit/s, 当采用双通道冗余传输时最快可达 20 Mbit/s, 是 CAN 总线的 10~40 倍。

2) 支持双通道传输, 而 CAN 总线只有一个通道, 没有冗余。

3) 媒体接入控制采用时分多址的方式, 数据通信具有确定性。

4) 支持多种网络拓扑结构, 包括总线型、星型及单双通道混合型等多种拓扑结构。

5) FlexRay 提供分布的时钟同步, 同步过程包括相位校正和频率校正, 还包括帧头和帧尾的 CRC 校验过程, 安全性高。

收稿日期: 2011-08-14; 修回日期: 2011-09-30

基金项目: 由“飞行器自主控制技术教育部工程研究中心(南京航空航天大学)”资助。

作者简介: 王琴(1987—), 女, 湖南人, 硕士研究生, 从事飞行控制计算机设计与研究。

6) 提供了大量配置参数, 如通信周期的持续时间、消息长度等, 可以支持对系统进行调整, 以满足特定应用的需求。

数据帧是数据在网络中传输时的一个数据单元。FlexRay 数据帧由头段(header segment)、负载段(payload segment)和尾段(trailer segment)3 个部分组成, 如图 1。

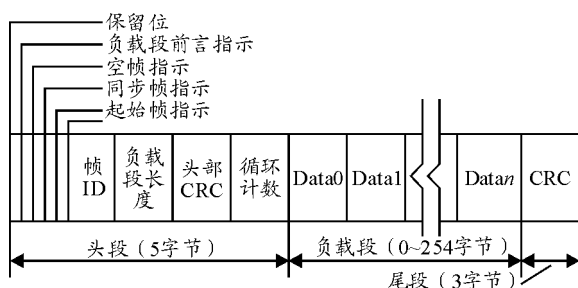


图 1 FlexRay 帧结构

头段共有 5 个字节, 共 40 位。前 5 位分别保留位、负载段前言指示、无效帧指示、同步帧指示和起始帧指示, 其中负载段前言指示用来指明帧的负载段的向量信息, 在静态帧中, 该位指明的是 NWVector; 在动态帧中, 该位指明的是信息 ID。接着是帧 ID(11 位), 用于识别该帧和该帧在时间触发帧中的优先级; 负载段长度(7 位), 用于指示一帧数据中能传送的字数。头部 CRC(11 位), 用于检测传输中的错误; 周期计数(6 位), 每一次通信开始时, 所有节点的周期计数器增加 1。

负载段是该帧用来传送数据的部分。FlexRay 负载段的长度可达 254 个字节。当该帧以静态段传输时, 负载段中的 Data0~Data12 部分常用作网络管理向量; 而以动态段传输时, 负载段中的 Data0 和 Data1 可设置消息 ID, 以用于过滤数据。

尾段只含有单个数据域, 即一个 24 位的 CRC, 用于对头段、负载段的帧信息进行校验。在 CRC 校验中, 负载段的前 6 个字节为海明距离。若有效数据部分超过 248 个字节, 海明距离则为 4 个字节, 编码校验的检错和纠错也相应改变。

从 FlexRay 数据帧格式可看出, 在无位填充的理想情况下, 其有效数据传输效率可高达 96.9%。然而在实际 FlexRay 数据帧传输的过程中, 不可避免地要增加一些填充位, 包括 3~15 位的帧起始序列(TSS)、1 位帧开始序列(FSS)、2 位字节开始序列(BBS)、2 位帧结束序列(FES), 其中 BBS 是每个字节填充一次<sup>[8]</sup>, 此时 FlexRay 数据帧的有效数据传输效率可达 77.0%; 而 CAN 总线在无位填充的

理想情况下, 最大仅为 59.26%。若考虑位填充, 最坏的情况下要填充 24 位, 此时的有效数据传输效率只有 48.48%<sup>[2]</sup>。由此可见, FlexRay 总线的数据传输效率远高于 CAN 总线。

## 2 样例飞行控制计算机总体结构设计

分布式结构飞行控制计算机由 CPU 单元、串口通信接口单元、模拟量接口单元和开关量接口单元等 4 个功能单元组成。由于 FlexRay 通信控制器提供 3 种可选择的硬件主机接口: HCS12 接口、异步存储器接口和 MPC 接口。其中 HCS12 接口直接连接飞思卡尔的 HCS12 系列微处理器; 异步存储器接口用于连接异步微处理器; MPC 接口用于连接飞思卡尔 MPC5xx 和 MPC55xx 系列微处理器<sup>[9]</sup>。在这所有功能单元微处理器都采用 C8051F120 单片机。各个功能单元通过底板上的冗余 FlexRay 总线(速率 10 Mbit/s)进行信息传输, 构成的总线型网络拓扑结构如图 2。

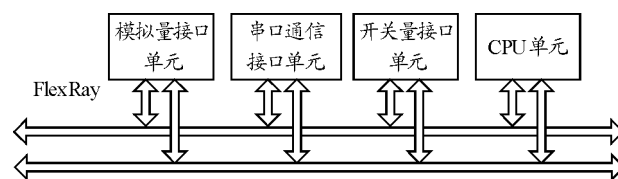


图 2 飞行控制计算机 FlexRay 网络结构

样例飞行控制计算机中, CPU 单元负责飞行控制律解算、控制逻辑解算和冗余管理等功能, 为系统的主控单元; 其他功能单元则负责特定接口的输入输出信息传输, 包括各种信号的采集、预处理与输出, 为系统的从属功能单元。CPU 单元上的微处理器与其他机载系统数据交互的过程就构成了飞行控制计算机的接口信息交互体系。其通信过程为:

- 1) 开关量、模拟量和串口量 3 种类型信号的采集、预处理和输出过程;
- 2) CPU 单元微处理器和其他功能单元的 FlexRay 通信过程。

## 3 内部总线通信协议设计

### 3.1 总线上数据流统计

无人机飞行控制软件主要划分为信息管理模块、传感器融合模块、遥控遥测模块、地面检测模块、飞行控制与管理模块、FlexRay 总线通信模块、信息采集模块、信号输出模块和硬件驱动模块。其功能的实现是由分布在飞行控制计算机各功能单元上的软件协同工作来完成的, 为了保证软件的实时

性，需要将软件功能模块合理地分配到各个功能单元上。分配情况如下：

CPU 单元：信息管理模块、传感器融合模块、遥控遥测模块、地面检测模块、飞行控制与管理模块、FlexRay 总线通信模块和硬件驱动模块；

串口通信接口单元：串行信号采集、输出模块、通信模块和硬件驱动模块；

模拟量接口单元：模拟量采集模块、数据处理模块、输出模块、通信模块和硬件驱动模块；

开关量接口单元：开关量采集模块、数据处理模块、输出模块、通信模块和硬件驱动模块。

把 CPU 单元发送数据给其他功能单元叫做下行数据；其他功能单元发给 CPU 单元数据叫做上行数据。从总线上传输数据的大小综合来考虑，为了提高总线的效率，选择数据帧负载段的长度为 32 个字节。统计各个功能板上各种信号的更新周期共有 5 ms、10 ms、20 ms、40 ms 和 50 ms 4 种，故通信协议设计中把 5 ms 作为基本通信周期，200 ms 作为系统周期。当功能板上的信号在基本通信周期中传输的时未更新，则发送标志位，提示接收节点数据还未更新，继续利用上一周期的数据进行处理；若已更新完毕则传输已更新数据。在 200 ms 的系统周期内各功能板之间的交互数据统计如下：

串口通信接口单元：上行数据流量为：520 帧（其中数据 123 帧，标志位 397 帧），下行数据流量为：240 帧（其中数据 38 帧，标志位 202 帧）；

模拟量接口单元：上行数据流量为：80 帧（其中数据 40 帧，标志位 40 帧），下行数据流量为：80 帧（其中数据 40 帧，标志位 40 帧）；

开关量接口单元：上行数据流量为：40 帧（其中数据 20 帧，标志位 20 帧），下行数据流量为：40 帧（其中数据 20 帧，标志位 20 帧）。

### 3.2 基于 FlexRay 时间调度方式

飞行控制计算机的数据采集和输出都具有周期性，而 FlexRay 是基于时间触发的总线访问方式，正好符合系统要求。每个通信周期包含静态段、动态段、符号窗口和网络闲置时间 4 段。为了简化研究，只用到静态段，它是基于严格的时分多址 (TDMA) 的访问控制方式。根据总线上的数据流量和数据更新周期，把 5 ms 作为一个通信周期。静态段配置了 60 个静态时隙，在每个通信周期中只用了 28 个时隙，故可只用其中的奇数时隙，剩余时隙便于总线上新增信号使用。数据传输率选取 10 Mbit/s，

数据帧的长度为 40 字节，加上数据帧编码时 TSS、FSS、BSS 和 FES 段，则传输一帧数据大约需要 40 μs，则选取静态时隙为 50 μs，每个时隙可传输一帧数据；动态段占用了 22 个微时隙；符号窗口设为 14 μs；网络闲置时间长度为整个周期减去静态段和符号窗口后剩下的长度，用来进行相位校正和频率校正。具体的调度方式见图 3。

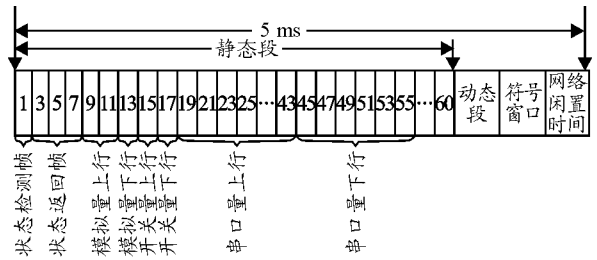


图 3 飞行控制计算机 FlexRay 时间调度方式

飞行控制计算机的通信机制为：

- 1) 每个通信周期的 1 号静态时隙开始时，CPU 单元发送状态检测信号；
- 2) 每个通信周期静态段的 3、5、7 号时隙用于传输状态检测返回信号；
- 3) 每个通信周期静态段的 9、11 号时隙用于模拟量上行数据调度，13 号时隙用于模拟量下行数据调度；
- 4) 每个通信周期静态段的 15 号时隙用于开关量上行数据调度，17 号时隙用于开关量下行数据调度；
- 5) 每个通信周期静态段的 19~43 号中的奇数时隙用于串口量上行数据调度，45~55 号中的奇数时隙用于串口量下行数据调度；
- 6) 每个通信周期在网络闲置时间处进行时钟校正，完成了时钟级同步过程；
- 7) 上下行数据都采用标准的基于时间的静态调度方式。

## 4 通信测试与结果分析

为了验证上文设计的通信机制的可行性，在硬件平台上进行了实验验证。

### 4.1 FlexRay 节点硬件组成

FlexRay 节点结构总共有 3 种模式：微处理器 (MCU)+通讯控制器 (CC)+总线驱动器 (BD)、微处理器+总线驱动器和和微处理器。笔者采用的是 MCU+CC+BD 模式。各功能板微处理器都为 C8051F120，通信控制器统一采用 MFR4310，总线驱动器统一采用 TJA1080[10]，节点网络结构见图

4, 各个 FlexRay 节点以总线型网拓扑结构挂在总线上, 见图 2。

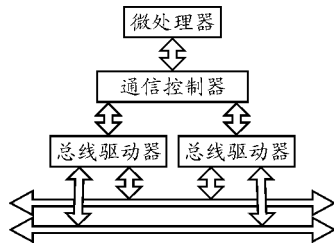


图 4 FlexRay 网络节点结构

### 4.2 FlexRay 初始化

软件的初始化将其硬件结构配置成 FlexRay 集群中的一个节点, 具体的 FlexRay 初始化流程图如图 5, 初始化 FlexRay 模块时, 包括完成 FlexRay 模块配置、通信集群协议参数配置和信息缓冲器配置。需要经过对相应的寄存器进行配置和各缓冲区和 FIFOs 初始化, 并设置回调函数和初始化计时器等操作才得以完成。

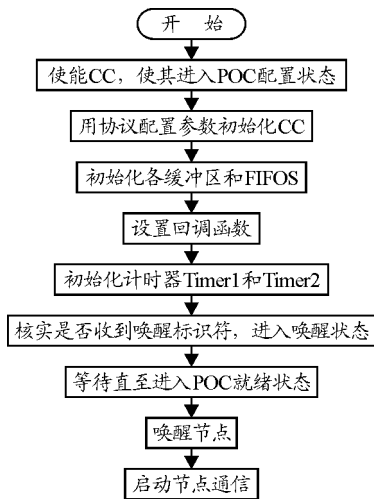


图 5 FlexRay 初始化流程

### 4.3 FlexRay 通信流程

一旦节点被唤醒并且完成了初始化, 它就能在发出相应的主机控制命令之后进入启动程序。FlexRay 集群的启动包括 4 个过程: 初始化->监听->冷启动->同步<sup>[11]</sup>。冷启动节点监听自己的 2 个通道, 判断是否有其他的节点正在进行传输。如果没有, 此节点就会成为主冷启动节点并开始传输。主冷启动节点首先在 2 个通道上发送无格式的符号, 以此来告知其他节点, 本节点正在作为主冷启动节点启动 FlexRay 集群。节点启动完成后, 开始数据通信, 流程如图 6。根据所设计的 FlexRay 总线通信协议, 当各个功能板上传数据未更新时, 发送中断请求产生后, 则调用发送子程序, 将事先设置好

的标志位上传到总线, 若数据更新完毕, 则将更新完毕的数据信息上传到总线; 当从总线上接收到数据时, 则调用相应的接收子程序, 完成数据读取。

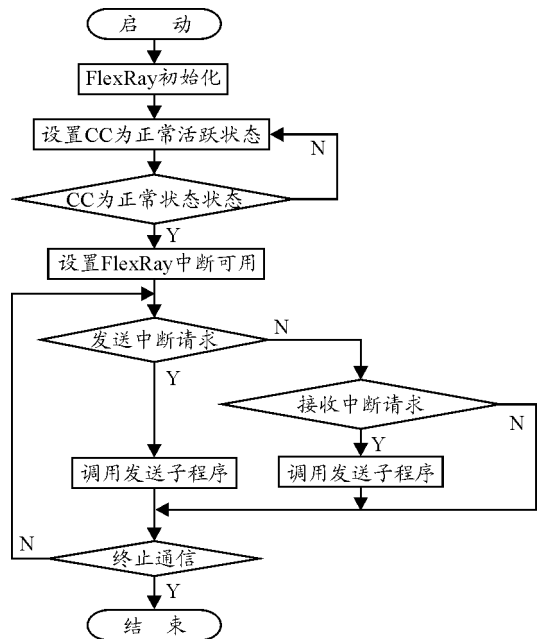


图 6 通信流程图

### 4.4 FlexRay 测试结果

在实验过程中, 系统中各个 FlexRay 节点都对接收到的数据帧数、丢帧数和发生错误次数进行计数, 并通过串口把数据输出, 经过长达 12 h 的测试 (6 h 常温和 6 h-45℃ 的低温), 发现丢帧数和错误次数都为 0, FlexRay 总线传输的可靠性得以证明。

实验能够按照设计的方案进行数据的调度与传输完成相应的功能, 测的 FlexRay 总线的波形如图 7。

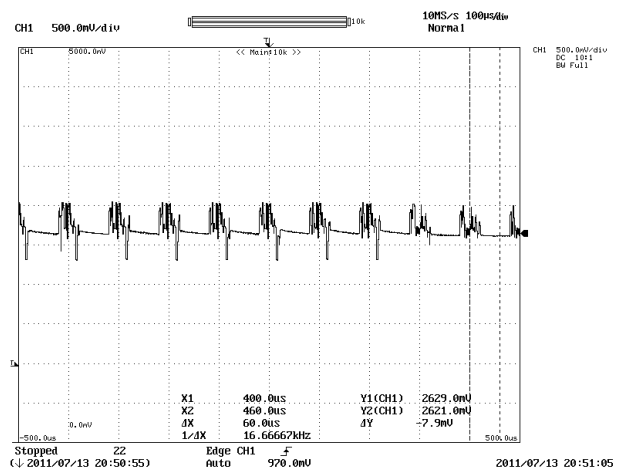


图 7 FlexRay 总线波形

从图 7 可以看出, 每个 50 μs 的静态时隙能传输 1 帧数据, 包含 32 个字节, 所占宽度约为 40 μs,

而利用 CAN 总线进行数据传输时，其数据传输率为 1 Mbit/s，故传输一标准格式的数据帧大概需要 130 μs，在一个系统周期(200 ms)内，飞行控制计算机各个功能单元传输所有数据所占的总线时间都大大缩短，总线上的负载由原来 CAN 总线的 70% 下降为 20%左右，总线负担大大减小，传输效率高，并且无人机飞行控制计算机的控制律解算周期也提高了一倍，控制精度得到了大大提高。实验结果证明：该总线与 CAN 总线相比性能更优越，并且该通信机制的设计也能满足飞行控制计算机的实时性要求。

### 5 结论

实际测试验证了 FlexRay 相对 CAN 在实时性、通信速率和效率上的优越性，满足了样例飞行控制计算机内部信息交互的实时性和数据量的要求，为以后在飞行控制计算机上用 FlexRay 总线替换现有的 CAN 总线的工程化实现打下了基础。

### 参考文献：

[1] 张兵, 陈欣, 吕迅站. 基于 CAN总线的分布式无人机实时仿真设备研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6): 1587-1590.  
 [2] 刘勇, 韩辰, 佟为明. 一种新的 CAN 总线位填充方案[J]. 现场总线, 2008(5): 36-39.

\*\*\*\*\*

(上接第 24 页)

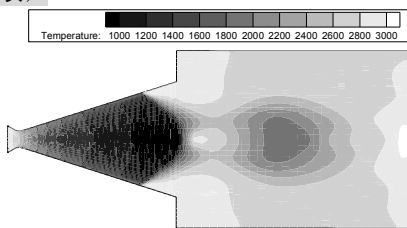


图 6 3 MPa 入口总压下流场静温分布

### 4 结束语

分析结果证明：大面积比喷管在火箭发动机启动、关机过程中，会产生流动分离现象，从而引起内流场的压强、温度等流动参数突变，对喷管的推力稳定性产生不利影响并可能烧蚀喷管。因此，在高空大面积比喷管设计中，应避免产生大的分离流动，并充分考虑由于流动分离引起的喷管烧蚀，以保证喷管的推力稳定性和热防护性能。

### 参考文献：

[1] Frey M, Hagemann G. Status of flow separation prediction in rocket nozzles[R]. AIAA 98-3619.

[3] Sri Kanajan, Jeffrey Abell. Sensitivity Analysis on Flexray Dynamic Segment Design Parameters[C]. Madrid, Spain: 2009 Fourth International Conference on Systems and Networks Communications, 2009.  
 [4] 李佳, 田光宇, 钮翔, 等. FlexRay 网络通信延迟时间分析[J]. 清华大学学报, 2007, 47(8): 1343-1347.  
 [5] 牛志刚, 肖昆, 王建林, 等. FlexRay 总线在电力系统继电保护装置中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 73-77.  
 [6] FlexRay Consortium. FlexRay communications system protocol specification, Version 2.1, Revision A[EB/OL]. 2005. www.flexray.com.  
 [7] Lin C E, Yen H M. Reliability and stability survey on CAN-based avionics network for small aircraft[C]. Crystal City, Virginia: Proceedings of the 24th Digital Avionics Systems Conference, 2005(2): 1-8.  
 [8] Minkoo Kang, Kiejin Park, Bongjun Kim. Determining the Size of a Static Segment and Analyzing the Utilization of In-Vehicle FlexRay Network[C]. Busan, Korea: IEEE. Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, 2008.  
 [9] Freescale Semiconductors. MFR4310 FlexRay communication controllers reference manual Rev.2 [EB/OL]. 2008. www.freescale.com.  
 [10] NXP Semiconductors. TJA1080A FlexRay transceiver preliminary data sheet Rev. 02. [EB/OL]. 2008-08www.nxp.com.  
 [11] Jianmin Duan, Liang Zhu, Yongchuan Yu. Research on FlexRay Communication of Steering-by-Wire System[C]. Harbin, China: Proceedings of IEEE Int. Conference on Control, Automation and System, 2009.  
 [2] Wang T S. Transient Three-dimensional analysis of side load in liquid rocket engine nozzles[R]. AIAA 2004-3681.  
 [3] Yonezawa K, Yokota K, Tsujimoto Y, et al. Three-dimensional unsteady flow simulation of compressed truncated perfect nozzles[R]. AIAA 2002-3991.  
 [4] 武晓松, 陈军, 王栋. 固体火箭发动机气体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 2-3.  
 [5] 林震, 王长辉, 刘宇, 等. 喷管分离流动及其侧向载荷[J]. 北京: 北京航空航天大学, 2010, 36(3): 307-310.  
 [6] Kwan W, Stark R. Flow separation phenomena in subscale ale rocket nozzles[R]. AIAA 2002-4229.  
 [7] 王艺杰, 鲍福廷, 杜佳佳. 固体火箭发动机喷管分离流动数值模拟及试验研究[J]. 西安: 西北工业大学, 2010, 33(4): 406-408.  
 [8] 吕忠波, 叶书贵, 杜立民. 微型固体火箭发动机壳体模态分析[J]. 四川兵工学报, 2010, 30(5): 36.  
 [9] 陈林泉, 侯晓. 喷管分离流场计算[J]. 中国航天工业总公司四院四十一所, 1996, 19(4): 18-23.  
 [10] 孙得川, 李江, 等. 影响喷管流动分离的因素[J]. 西安: 西北工业大学, 2000, 21(2): 19-22.  
 [11] 刘亚冰, 王长辉, 徐晓勇. 喷管分离流动与侧向载荷定常数值模拟[J]. 北京: 北京航空航天大学, 2008, 23(11): 2114-2118.