

# 基于 Simulink/RTW 的冲压发动机 控制系统半实物仿真

尤裕荣, 徐中节, 逯婉若

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 基于 Matlab/Simulink 软件开发平台, 建立了冲压发动机控制系统的数学模型, 通过 TLC 将仿真模型自动转化成 C 代码, 提高仿真速度, 并利用 Real-Time Windows Target 实现了仿真软件的实时运行。利用该仿真软件, 实现了冲压发动机控制系统半实物仿真试验, 对冲压发动机的供油控制规律进行仿真研究, 验证了所采用的控制规律、控制算法的可行性。

**关键词:** Simulink/RTW; 冲压发动机控制系统; 半实物仿真

**中图分类号:** V430

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2008) 05-0049-05

## Semi-physical simulation on ramjet control system based on simulink/RTW

You Yurong, Xu Zhongjie, Lu Wanruo

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Based on Matlab/Simulink developing platform, the ramjet control system mathematical model was developed. Simulation model was transformed into C code by TLC and the computing rate was improved, also real time operating of the simulation software was obtained by using Real-Time Windows Ramjet Target. Semi-physical simulation test for ramjet engine control system was conducted with this simulation software. The control law and methods were proved feasible through ramjet fuel supply law simulation study.

**Key words:** Simulink/RTW; ramjet control system; semi-physical simulation

收稿日期: 2008-05-22; 修回日期: 2008-06-16。

作者简介: 尤裕荣 (1978—), 男, 工程师, 研究领域为发动机燃油控制系统设计与仿真。

## 0 引言

随着导弹性能要求的不断提高,冲压发动机控制系统的调节规律也越来越复杂,控制技术由传统的机械液压控制向数字式电子控制发展。在数字电子控制系统的研究过程中,数字仿真和半实物仿真试验可以避免联合动力试验存在的高能耗和高风险,避免真实发动机可能导致对产品和试车台产生的灾难性后果。

一般的冲压发动机控制系统仿真可分为纯数字仿真阶段和半实物仿真阶段。半实物仿真平台的研制除了设计和构建半实物仿真的硬件平台之外,一个工作量很大的内容就是开发半实物仿真软件。传统的半实物仿真软件开发都是由开发人员手工编写仿真代码,工作量大且容易出错。

对于一般的开发过程,虽然能在纯数字仿真阶段使用 Matlab 等仿真软件开发仿真模型,但是到了半实物仿真阶段还需要人工把在纯数字仿真阶段使用的仿真模型编译成可以被仿真机实时执行的代码而不能直接利用数字模型。Matlab 的 RTW (Real Time Workshop-实时工作空间)能够实现这一功能。使用基于 Matlab/RTW 的实时仿真方法将大大减少仿真软件的开发量、避免各种手工编写代码出现的错误、缩短半实物仿真平台的开发周期。

## 1 冲压发动机控制系统的半实物仿真试验

冲压发动机燃油供应控制半实物仿真试验系统如图 1 所示,主要由供油系统、燃油调节器、电子控制器以及仿真机等组成。

该仿真平台主要由两部分组成,即硬件环境和软件环境。

### (1) 硬件环境

仿真机采用配置内存为 1G Bytex2、CPU 主频为 3.2GHz×2 芯片的 HPxw6200 工作站。半实物

仿真系统电气接口设备包括 A/D、D/A、串行口和电连接器等。A/D 卡接收实物系统的控制输入信号,作为发动机系统的输入相关状态参数;而 D/A 输出的信号为发动机的各种状态参数,作为综合控制器的输入信号,根据控制规律与控制算法,经控制器计算处理后驱动调节器。

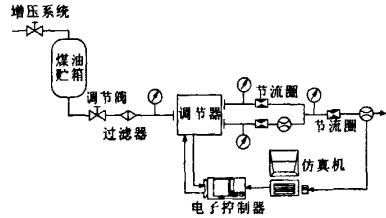


图 1 半实物仿真试验系统

Fig.1 System of semi-physical simulation experiment

A/D 采集卡选用 NI 公司的 PCI-6024E 模数转换卡。D/A 卡采用 NI 公司的 PCI-6713 数模转换卡。A/D、D/A 卡均插入仿真机扩展插槽中。

### (2) 软件环境

一个半实物仿真平台系统的设计首先要解决的问题有两个,即计算机与数据采集卡的接口问题和程序实时性的保证问题。仿真软件基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建。

关于实时仿真软件与硬件接口问题,RTW 可支持多种类型的 I/O 设备,包括本文所采用的 NI 公式的 PCI 系列板卡,因此不必编写 I/O 驱动程序。如果采用不支持的板卡,设计者需要自己编写驱动。RTW 是利用将 Simulink 模块编译为 C 代码的方式来提高程序运行速度,从而保证其实时性。

## 2 冲压发动机控制系统建模

### 2.1 冲压发动机数学模型

为了满足实时仿真要求,需要建立简化的冲压发动机实时仿真模型。这里将冲压发动机按其气动热力过程划分为进气道、燃烧室和尾喷管,并将发动机划分为若干特征截面进行建模,图 2

为冲压发动机各截面示意图。

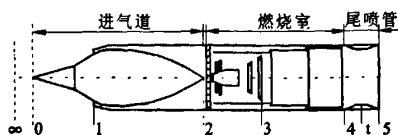


图2 冲压发动机各截面划分示意图

Fig.2 Diagram of ramjet model section segregated

在建立冲压发动机数学模型时,作如下假设:

(1) 认为气流为无粘性、准一元管流,进气道、喷管中为绝热过程。

(2) 气体状态采用理想气体状态方程描述,并按定比热计算,空气比热比 $k=1.4$ ,燃气比热比 $k_g=1.33$ 。

(3) 认为燃烧室前段中只有供油量的变化而不释放热量,后段则释放热量而无供油量的变化。

(4) 考虑燃烧延迟,将燃油流量转化为推力过程加入延时环节来近似描述动态过程,其中喷管的膨胀效率取0.98。

由供油至冲压发动机产生推力之间的延迟时间,即燃烧延迟时间 $\tau$ ,可以将输出燃油流量通过一个延时环节滞后来模拟,这样供入燃烧室的燃油流量( $q_f$ )随时间( $t$ )的变化规律为

$$q_f(t)=q_i(t+\tau) \quad (1)$$

根据以上所作简化与假设,通过对主要特征截面热力参数计算,从而得到冲压发动机数学模型。

## 2.2 导弹数学模型

对于冲压发动机的控制来说,可将导弹飞行弹道视为质点弹道进行模拟。因此,在建立导弹的数学模型时,将导弹看作在铅垂面内的可控质点运动。同时,为了满足实时计算的快速性要求,避免在仿真求解过程中攻角的迭代运算,将常规的导弹速度与倾角运动方程转换为沿弹体轴向和径向的速度方程来表示,而导弹的合成速度以及

攻角可以通过简单的代数方程计算得到,由此可得到导弹的运动方程

$$M \frac{du}{dt} = F - X \cos \beta + Y \sin \beta - Mg \sin \zeta \quad (2)$$

$$M \frac{dw}{dt} = Mg \cos \zeta - X \sin \beta - Y \cos \beta \quad (3)$$

$$v = \sqrt{u^2 + w^2}, \beta = \tan^{-1} \left( \frac{u}{w} \right), \zeta = \beta + \theta \quad (4)$$

式中, $M$ 为导弹质量; $v, u, w$ 分别为导弹飞行速度及其沿弹体轴向与径向速度分量; $F, X, Y$ 分别为发动机推力及阻力与升力; $\beta, \zeta, \theta$ 分别为攻角、俯仰角与弹道倾角; $g$ 为重力加速度。

## 2.3 冲压发动机控制规律

冲压发动机工作性能的好坏,在很大程度上决定于它的控制系统的品质。控制系统以不同的供油规律来保障导弹相应的飞行弹道,而导弹的飞行弹道是靠发动机控制系统对供油规律的严格控制来保证的。

本控制系统的控制方案为液体冲压发动机在助推器作用下加速到一定飞行马赫数后转级启动,在加速段按等余氧系数( $\alpha$ )控制,在加速过程中,控制器根据测得的大气来流参数计算出飞行马赫数,并与设定巡航马赫数进行比较,若飞行马赫数小于设定巡航马赫数,仍按加速规律供油,若飞行马赫数大于设定巡航马赫数时,转入等 $Ma$ 控制。

在等 $\alpha$ 控制时,控制系统以随动方式进行控制,而在等 $Ma$ 控制时,实现闭环镇定控制,采用PID控制算法。

### (1) 加速段控制规律

在加速段按等 $\alpha$ 进行控制时,控制系统以随动方式进行控制,根据总体设计要求,按下式供油

$$q_f = \frac{q_a}{\alpha L} \quad (5)$$

式中, $q_f$ 为所需的燃油流量; $q_a$ 为进气道捕获的进气量; $L$ 为进气量与燃油量的化学当量比。

在等  $\alpha$  控制阶段, 由理论计算得到所需求发动机输入流量, 通过调节器位移传感器反馈的流量与理论油量进行比较, 从而对实际输出的燃油流量进行控制。

### (2) 巡航段控制规律

巡航段采用等  $Ma$  数控制规律, 其控制精度为  $|Ma_c - Ma| \leq 0.01$ ,  $Ma_c$  为巡航马赫数。另外, 为了防止在巡航过程中, 由于供油量的过多或过少而造成不稳定现象, 需要对供油作最大和最小量限制。在等  $Ma$  控制时, 考虑采用增量式 PID 算法控制燃油流量。PID 控制算法如下

$$\Delta q_f(k) = A \Delta Ma(k) - B \Delta Ma(k-1) + C \Delta Ma(k-2) \quad (6)$$

式中,  $A = K_p + K_i + K_d$ ,  $K_p$  为比例系数、 $K_i$  为积分系数、 $K_d$  为微分系数;  $B = K_p + 2K_d$ ;  $C = K_d$ 。

### 2.4 仿真软件设计

冲压发动机控制系统实时仿真软件的设计和开发过程是基于 Matlab/Simulink 开发平台, 以 Matlab 软件及其内部 Simulink 和 Stateflow 软件包和 RTW 实时工具箱为基础进行的。

利用 Matlab/Simulink 能够快速实现纯数字仿真的同时, 最重要的是它可以快速高效产生实时代码, 通过 Simulink/RTW (Real-Time Workshop) 将纯数字仿真使用的数学模型编译成可以被实时仿真机执行的代码, 而传统的半实物仿真软件开发都是由开发人员手工编写仿真代码, 工作量大且容易出错。

因此, 使用基于 Matlab/Simulink 的实时仿真方法将大大减少仿真软件的开发量、避免各种手工编写代码出现的错误、缩短半实物仿真平台的开发周期。

利用该软件可以实现冲压发动机离线仿真以及实时仿真, 使用 Real-Time Windows Target 可以生成 C 代码, 经过编译及链接后, 通过 PC 机的 I/O 接口和硬件联接, 便可用后续的燃油供应控制系统电子控制器实现快速原型仿真以及整个系统的半实物仿真。

## 3 半实物仿真试验

在进行半实物仿真试验之前, 通过建立燃油调节器与控制器数学模型, 结合冲压发动机与导弹数学模型, 对燃油调节与控制系统进行数值仿真, 以初步确定相关的控制参数, 为进一步开展半实物仿真试验提供依据。

在半实物仿真试验过程中, 先由仿真机通过运行计算导弹-发动机数学模型, 模拟导弹飞行过程, 根据飞行状态参数, 通过控制规律和控制算法计算发动机所需油量, 作为理论流量信号通过 D/A 转换接口传给综合控制器, 综合控制器通过计算处理输出对应的信号对燃油调节器的输出流量进行控制, 同时将燃油调节器角位移传感器电压信号作为流量反馈信号, 通过换算得到的燃油流量作为燃油调节器供入发动机的流量, 通过 A/D 转换接口输入到仿真机内的发动机模型, 由此计算产生推力使导弹飞行状态改变, 并根据新的飞行状态参数通过控制规律计算下一时刻需求的流量, 输出到综合控制器, 形成模拟导弹飞行过程的发动机整个闭环控制系统仿真。

本次试验仿真时间长于 140s, 试验结果与数值仿真结果比较如图 3 所示。

数值仿真的结果与半实物仿真的结果比较可知, 在加速段基本上都比较吻合, 在进入巡航段后, 两者相差较大, 这主要是由于数值仿真中的燃油调节器、控制器等数学模型考虑不是很全面, 与实际情况相差很大, 这样采用相同的 PID 控制参数, 势必造成两种仿真的结果相差较大, 同时也将导致马赫数变化也相差很大。

数值仿真与半实物仿真的结果都表明, 冲压发动机由加速转巡航时, 其飞行马赫数有较大的超调, 马赫数超调量大小与转巡航过渡过程 PID 控制参数是相关的, 若 PID 参数取值不合适, 则超调量及超调时间都将增加, 因此, 可选取适合的控制参数将超调量减到最小。

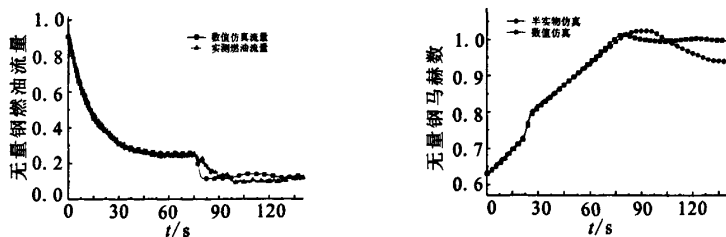


图 3 燃油流量和马赫数的数值仿真与半实物仿真结果比较

Fig.3 Semi-physical and numerical simulation results comparison on fuel flow rate and Mach number

## 4 结论

基于 Simulink 仿真平台, 利用 RTW 工具箱提供的实时运行功能, 建立了冲压发动机控制系统半实物仿真软件, 利用该软件对冲压发动机控制系统成功地进行了半实物仿真试验, 表明了所采用的等  $\alpha$ 、等  $Ma$  控制规律, 能够有效地实现对冲压发动机的控制, 同时也验证了该半实物仿真软件的可靠性及可行性。该软件平台具有可扩展性, 在利用其平台进行半实物实时仿真时, 可以添加物理部件和模块而无需作大量改动, 为半实物仿真的研究及系统故障诊断工作打下了坚实的基础和提供了有力的支持。

## 参考文献:

[1] 谢光华, 孟丽, 薛恩, 等. 液体冲压发动机控制系统半实

物仿真[J]. 推进技术, 2001(6): 451-453.

[2] 吴成富, 段晓军, 吴佳楠, 等. 基于 Matlab 和 Vx Works 的无人机飞控系统半物理仿真平台研究[J]. 西北工业大学学报, 2005(3): 337-340.

[3] 樊晓丹, 孙应飞, 李衍达. 一种基于 RTW 的实时控制系统快速开发方法[J]. 清华大学学报(自然科学版). 2003(7): 895-898.

[4] 王宁强, 刘向东, 陈振, 等. 基于 MATLAB 的卫星姿态控制半物理实时仿真平台 [J]. 系统仿真学报, 2005(7): 1617-1620.

[5] 刘兴洲. 飞航导弹动力装置[M]. 北京: 宇航出版社, 1992.

[6] 张有济. 战术导弹飞行力学设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1998.

[7] 任凤升, 谢光华. 液体冲压发动机数字电子控制系统[J]. 推进技术, 2002(2): 8-10.

[8] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[9] 陈阳, 高芳, 张振鹏, 等. 气动薄膜调节阀控制系统工作过程的动态仿真[J]. 火箭推进, 1998, 24(7): 28-34.

(编辑: 陈红霞)