

文章编号: 1000-8055(2004) 03-0383-04

小型涡喷发动机数控调节器的半实物仿真

程 涛

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 介绍了某小型涡喷发动机数控调节器的半实物仿真试验系统的设计, 以及软件和硬件的试验配置。半实物仿真试验对涡喷发动机控制系统的稳态和瞬态性能进行了校正和验证。试验完成了发动机数控调节器在地面和空中起动、停车功能的检验; 自动加、减速功能, 稳态调节性能的校正和校验; 评价了发动机空中起动, 按理论弹道飞行过程的调节性能。最后, 给出了部分的仿真试验曲线。

关键词: 航空、航天推进系统; 涡喷发动机; 半实物仿真; 发动机模型; 数字式控制

中图分类号: V231

文献标识码: A

Hardware in the Loop Simulation of Minitype Turbojet Engine Digital Control Regulator

CHEN G Tao

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract This paper covers the designs of Hardware in the Loop Simulation (HILS) testing of minitype turbojet engine digital control regulator, and hardware and software configurations. The HILS tests check up the transient and steady state performances of the engine control system. The tests correct and verify the capability of engine digital control regulator ground start and air start, stopping, automatic accelerating and decelerating, and steady state regulation. Also the tests evaluate the adjusting capability of air start, and flying along the ballistic trajectory. Finally some test results are presented.

Key words aerospace propulsion system; turbojet engine; hardware in the loop simulation; engine model; digital control

发动机控制系统的主要目的是提供最大的推力, 最小的燃油消耗; 控制发动机在喘振边界内安全可靠地运行, 保护转速、温度、压力等状态参数不超出工作极限。为了在整个飞行包线内发挥发动机的最佳性能, 使用数字式电子控制器代替液压机械式控制器成为未来的发展方向。本文建立

了一个半实物仿真试验系统, 可以实现小型航空发动机数字式电子控制系统的试验研究

仿真技术是发动机控制系统设计和开发的关键技术。在设计的初始阶段, 离线、非实时的面向纯软件的仿真用于开发和试验控制律和控制器的初始参数。当实际控制系统元件完成以后, 下一步

收稿日期: 2003-06-10; 修订日期: 2003-09-18

作者简介: 程涛 (1964-), 男, 山东莱州人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院副教授, 主要从事航空发动机控制和半实物仿真试验的研究。

设计验证阶段就是进行半实物仿真试验。通过半实物仿真试验可以提供更高的置信度,确保更大的安全性和缩短研制的试验周期。半实物仿真试验的主要目的是微调控制器的参数,检验和验证控制系统的硬件和软件是否满足设计的性能要求。

1 仿真系统的组成

在半实物仿真试验中,仿真计算机中实时运行数学模型,模拟真实发动机的工作状态,系统中使用的其它控制元件都为实际硬件。发动机数控调节器的半实物仿真试验的结构原理图如图 1 所示。

1.1 综合控制计算机

- 综合控制计算机主要负责以下任务:
- (1) 控制数字式电子控制器和发动机仿真计算机的工作,负责仿真试验的开始和停止。
 - (2) 空中飞行弹道参数的模拟,通过 D/A 输出卡将飞行参数,高度和马赫数,输出给仿真计算机用于发动机状态参数的计算。
 - (3) 通过串口通讯向电子控制器发出加、减速的指令信号,以及设定过渡过程的稳态转速值。
 - (4) 监控低压燃油系统的燃油压力和温度信

号,监控模拟伺服电机的转速是否超出设定值,一旦超出立刻发出停车信号,中止试验进行检查处理。

1.2 仿真计算机

仿真计算机配置为 III 工控机, CPU 主频为 600 MHz,内存为 256M,配备了 A/D、D/A 采集卡,数字 I/O 卡。其主要任务是运行发动机仿真模型程序,计算、输出和记录发动机的状态参数 (n , P_1^* , T_1^* , P_2^* , T_4^*),控制伺服电机的转速与发动机当前的转速相匹配,同时接受综合控制计算机输入的飞行参数和开始、停止试验指令,以及流量转换装置的输入。

1.3 数字式电子控制器

数字式电子控制器配置为 PC/104,包括 CPU 模块、A/D 和 D/A 模块、I/O 模块。控制器上运行发动机控制系统的控制软件,采集由发动机仿真计算机输出的发动机状态参数 (n , P_1^* , T_1^* , P_2^* , T_4^*),按给定的调节计划,输出脉冲信号控制步进电机的运转。同时通过串口与综合控制计算机进行通讯。

1.4 机械液压执行机构

机械液压执行机构由齿轮泵、计量活门、安全

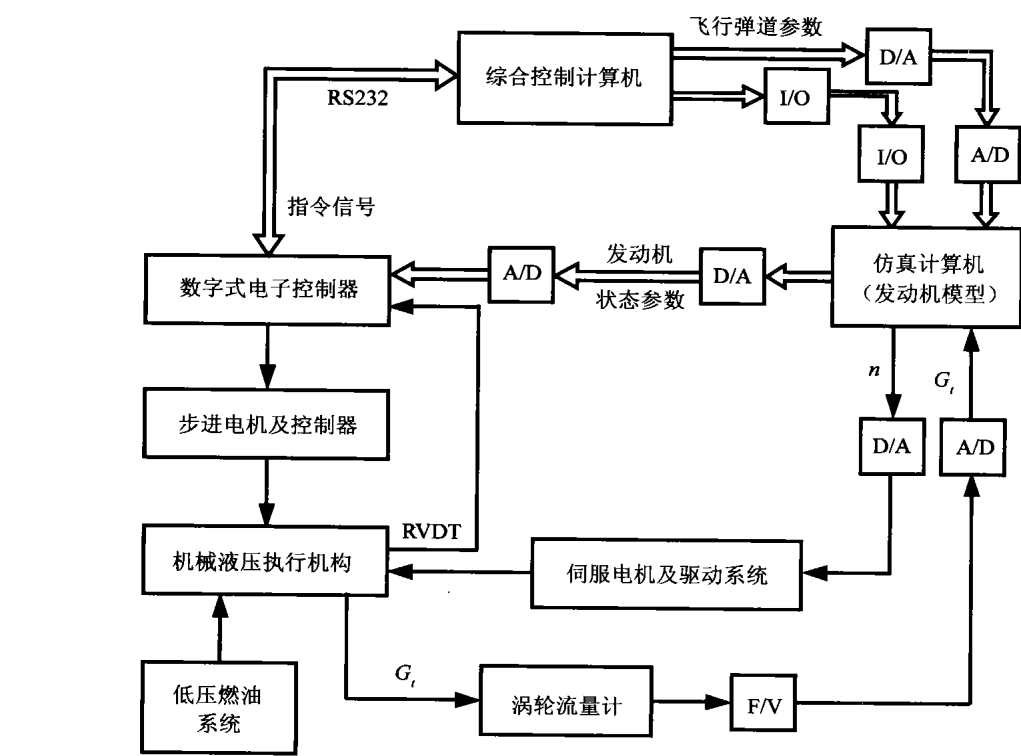


图 1 半实物仿真试验的组成原理图

Fig. 1 Block schematic of HILS testing

活门、压差活门和增压活门等组成。齿轮泵由伺服电机带转供油,步进电机带动计量活门油门杆旋转控制燃油流量,经涡轮流量计测量输入发动机仿真计算机。

1.5 步进电机及控制器

步进电机及控制器接收数字式控制器发出的脉冲信号,带动机械液压执行机构的计量活门油门杆旋转,控制燃油调节器输出相应的燃油,燃油流量经测量和转换输入仿真计算机。

1.6 伺服电机及驱动系统

伺服电机及驱动系统通过电机控制器控制伺服电机的转速模拟发动机的工作,通过联轴器驱动机械液压执行机构的齿轮泵工作。

1.7 低压燃油系统

低压燃油系统为发动机控制器提供一定流量和压力的燃油。主要包括试验台控制面板、压力、流量、温度显示表、油箱、增压泵和带转电机、压力和流量控制阀、冷却器、油滤和管路等。

2 软件设计

为了保证半实物仿真试验能可靠地进行,操作系统采用了 Windows 2000 中文版,控制软件的开发采用了 LabWindows/CVI^[1]。试验选用某公司的 DAQ 卡,在 LabWindows/CVI 环境下实现了数据的采集和输出。软件对数据的采集和数据的显示、记录采用了多线程编程^[2]。

试验控制软件可以实时显示燃油流量、发动机转速、压气机出口总压、涡轮后总温、发动机进口温度和压力,以及飞行高度和飞行马赫数的变化曲线和瞬时值,同时以文件的形式保存在计算机的硬盘上,试验结束后,通过另一程序可以离线复现试验的整个过程。

仿真试验用发动机是一个单转子小型涡喷发动机。根据参考文献[3],建立了发动机的数学模型。模型包括转子惯性引起的动态一阶模型与确定稳定工作点及小偏差状态的非线性模型的组合,适用于高度和马赫数同时变化的飞行包线内的实时半实物仿真。

模型的输入为燃油流量、飞行速度、飞行高度。由于对发动机进口温度和进口压力的模拟在技术实现上有一定的困难,仿真实验中,在模型计算中,发动机进口温度和进口压力采用理论计算数值。模型的输出量为发动机转速、压气机出口总压和涡轮后总温。

3 半实物仿真试验

综合控制计算机控制仿真试验的开始和停止工作。机械液压执行机构输出的燃油由高精度涡轮流量计测量后转换为 DC 信号,经多功能 DAQ 卡输入仿真计算机作为发动机模型的输入量。飞行高度和马赫数根据理论飞行轨迹,由时间坐标插值计算后直接输入给发动机模型。发动机模型的输出量,发动机转速经一定的传动比换算后转换为 DC 信号,输入到伺服电机控制器的模拟端口,控制伺服电机按一定的速度转动。伺服电机带动机械液压执行机构的齿轮泵转动。发动机模型的输出量 \dot{P}_2^* , \dot{T}_4^* 以及 \dot{P}_1^* , \dot{T}_1^* 转换为 DC 信号直接输入给数字式电子控制器,控制机械液压执行机构输出相应流量的燃油。

(1) 检验发动机数控调节器在地面和空中状态的自动起动、停车功能;超温、超转的保护功能。

综合控制计算机同时向模型计算机和电子控制器发出试验起动指令,模型计算机起动发动机模型程序,电子控制器按程序控制步进电机驱动机械液压执行机构开始供油,在规定的时间内使发动机达到地面或空中慢车转速,说明地面或空中起动成功;同样,综合控制计算机发出停车指令后,电子控制器按程序控制发动机从慢车转速下降为零转速,说明停车成功。在起动过程中,发动机出现超温、超转情况,电子控制器要进行停车保护;在飞行过程中,则不进行保护。

(2) 校验发动机数控调节器地面起动和加速、减速的调节性能。

发动机起动到地面慢车转速以后,综合控制计算机发出加速指令,电子控制器控制步进电机驱动机械液压执行机构加速供油,发动机转速加速到 $80\% n_{\max}$,并控制发动机在此转速下稳定一段时间。然后,发动机转速加速至 $96\% n_{\max}$,稳定一段时间后,发动机转速再加速至 $100\% n_{\max}$ 。发动机在 $100\% n_{\max}$ 转速下稳定一段时间后,转速减至 $80\% n_{\max}$,稳定一段时间后减至地面慢车转速。地面加、减速调节过程如图 2 所示。

(3) 验证发动机数控调节器空中起动,按理论弹道飞行过程的性能。

首先,选定导弹飞行包线内的某条典型理论弹道,由综合控制计算机发出空中起动指令,发动机起动到空中慢车转速,稳定一段时间后,综合控制计算机发出投放指令,导弹按理论弹道飞行,高度和马赫数同时发生变化,此时电子控制器控制

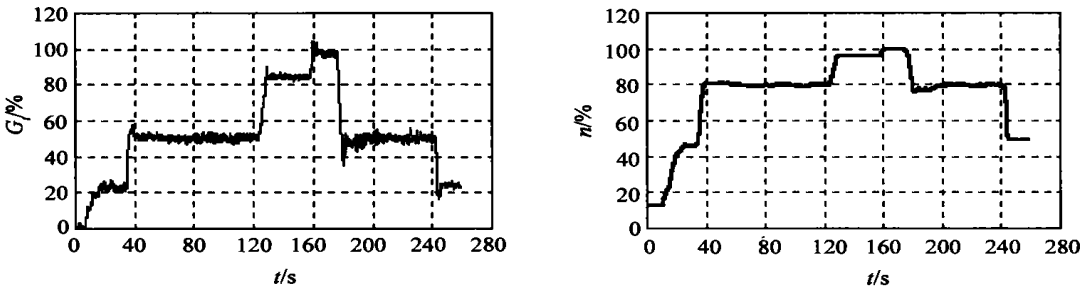


图 2 地面起动、加、减速调节过程

Fig. 2 Ground start, acceleration and deceleration tune-up process

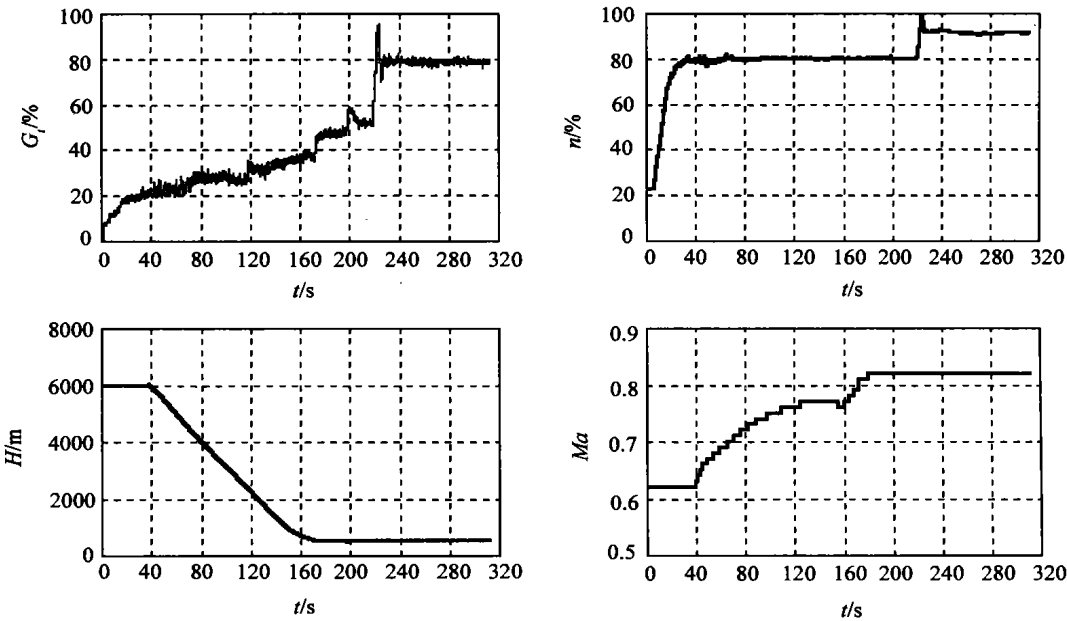


图 3 空中 6 000 m 起动、飞行过程

Fig. 3 Air 6 000 m start, flight process

发动机等转速工作,下滑至某一高度时,综合控制计算机发出转级指令,电子计算机控制发动机加速至 $96\% n_{max}$,然后导弹进入平飞段,以最大速度低空飞行。图 3 为空中 6 000 m 起动,按理论弹道飞行的调节过程。

通过试验记录数据的处理分析,地面起动过程比机械液压调节器的起动要求可以提前 30 s 完成,加、减速过程的时间比机械液压调节器的要求都有不同程度的提高 (1~ 5 s),稳态调节精度比机械液压调节器要求的调节精度范围减小 50 r/min。

4 结 论

通过对某型小型涡喷发动机数控调节器的半实物仿真试验,完成了发动机的地面起动、稳态调

节和加、减速调节性能的验证和评价,以及飞行包线内发动机控制系统的总体性能的评价。数控调节器与机械液压式调节器相比,在加、减速时间及调节精度上相应有所提高。半实物仿真试验台可以用于其它型号小型发动机数字式燃油控制器的半实物仿真试验和教学研究。

参考文献:

[1] NI Corporation. Labwindows/CVI User Manual [Z]. USA: NI Corporation, 1998.
[2] NI Corporation. Building Multithreading Application with LabWindows/CVI [R]. USA: NI Corporation, 1998.
[3] Harrison R A, Yates M S. Gas Turbine Fuel Control Systems for Unmanned Applications [R]. England: Dowty & Smith's Industries Controls Limited, 1985.