

并行处理发动机/控制系统半实物仿真^①

谢光华 曾庆福 马存宝

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 以高速微信号处理器 TMS320C30 为阵元机, 研制了 8 阵元总线并行处理计算机系统, 建立了涡轴发动机非线性仿真模型, 仿真模型在并行处理机上并行计算实现实时。该实时仿真器通过输入输出接口与涡轴发动机的实际控制系统进行连接, 组成涡轴发动机/控制系统半实物闭环系统, 并进行了稳态和动态仿真。

主题词: 涡轮轴发动机, 发动机控制, 并行处理, 半实物仿真

分类号: V235.12

PARALLEL PROCESSING HARDWARE-IN-THE-LOOP SIMULATION OF AN ENGINE AND CONTROL SYSTEM

Xie Guanghua Zeng Qingfu Ma Cunbao

(Dept. of Aeroengine, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: A bus parallel processing computer system which contained eight processing units was made out. The TMS320C30 digital signal micro processor was chosen as the processing unit. A nonlinear real-time simulation model was also provided, which was runned on the multi-computer parallel processing system in order to obtain that the model could be calculated on-line. The above simulator was connected with a real control system of a turboshaft engine through the input and output interfaces of which close-loop system of a turboshaft engine and control system was comprised. The semi physical simulation of the system at steady-state and dynamic conditions was completed.

Subject terms: Turboshaft engine, Engine control, Parallel processing, Semi physical simulation

1 引 言

发动机实时数字仿真作为控制系统研制和调试工具发挥着日益重要的作用^[1]。由于实时性对运行速度有近乎苛刻的要求, 当计算机运算速度不是很快时, 常采用简化模型、在线插值或线性状态空间模型等方法, 以提高模型运算速度, 但将对精度造成一定损失。采用并行处理技术, 可以大大提高运算速度, 在运算速度与计算精度的折衷中就可以追求更高的精度^[2~6]。本文以高速微信号处理器 TMS320C30 为阵元机研制了 8 阵元总线并行处理计算机系统, 将未作进一步简化的发动机非线性气动热力学模型进行适当“分割”, 实现了并行计算,

① 收稿日期: 1998-03-13, 修回日期: 1998-05-29

并通过输入输出接口与真实控制系统连接,完成了半实物仿真试验。

2 涡轴发动机/控制系统半实物仿真系统

涡轴发动机/控制系统实时半实物仿真系统分四部分:(1) 试验台:为供油系统动力源及其调速控制、测量系统和控制执行机构;(2) 发动机数字仿真器;(3) 监测系统;(4) 试验对象为发动机机械液压控制系统或数字电子控制系统。

2.1 发动机实时仿真器

2.1.1 并行处理计算机系统

主控计算机通过两个 PC 总线扩展卡分别控制输入/输出管理计算机和并行处理计算机。并行处理计算机采用当前多处理器设计的最新成果——多端口存储器共享结构,设计成阵元机组件式并行总线。阵元机采用 Texas 仪器公司生产的数字信号处理器 TMS320C30,具有每秒能执行 3300 万次浮点运算的能力 (33MFLOPS)。输入/输出管理计算机管理模/数转换 (A/D)、数/模转换 (D/A)、频率/电压转换 (F/V) 和电压/频率转换 (V/F),输入/输出数据通过双端口共享存储器与主控计算机进行交换。针对并行处理计算机系统设计的软件完成存储单元测试、输入/输出通道测试及量程调整、各阵元程序与数据加载、多 CPU 的调度与启停管理、动态数据与曲线显示和试验数据存储与转换等功能。

2.1.2 涡轴发动机并行计算模型

发动机的气动热力学模型为用迭代方法求解发动机在“准平衡”概念下构造的非线性方程组:

$$f_i(x_1, \dots, x_n) = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

当变量初猜值偏离配平值时,按流量连续和功率平衡等条件计算由初猜值引起的残差 ϵ_i :

$$f_i(x_{10}, \dots, x_{n0}) = \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

在迭代过程中采用 Broyden 迭代算法对变量值进行刷新,直到满足控制精度。

$$X^{k+1} = X^k - J_k^{-1} \epsilon^k \quad (3)$$

式中 J 为 Jacobi 矩阵。在并行处理计算机系统上实现发动机模型的并行计算,需要对模型算法进行“分割”。本文以 Jacobi 矩阵元素的计算为出发点来分割模型算法。

用差分法计算 Jacobi 矩阵元素时,第 i 行 j 列元素为:

$$\frac{\partial f_i(X)}{\partial X_j} \approx \frac{f_i(X + \Delta X) - f_i(X)}{\Delta X_j}, \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2, 3 \end{matrix} \quad (4)$$

其中, $\Delta X_j = [0 = \Delta x_j \dots 0]^T$ ($j=1, 2, 3$)。 $f_i(X)$ 在计算残差时已算出, $f_i(X + \Delta X_j)$ 由第 j 个变量增量后进行计算,同列的 3 个元素可由一次调用发动机气动热力计算过程求出,各列元素之间没有计算数值的依赖关系。因此 $f_i(X + \Delta X_j)$ 的 3 列元素可以由 3 个处理机并行计算, $X + \Delta X_j$ 的赋值由主处理机进行分配,采用 Broyden 算法的并行计算程序。

2.2 旋翼负载模型

在涡轴发动机建模中,负载的转矩变化主要考虑为旋翼的转矩变化。由于直升机旋翼的转矩随旋翼转速和旋翼总矩变化,而旋翼转速又是动力涡轮转速的函数,因此涡轴发动机负载模型可以表示为动力涡轮转速和旋翼总矩的函数。在目前还不能取得直升机旋翼特性的情况下,发动机的负载采用近似公式来计算。参照文献 [1] 所给出的结构组成、功率级别都相近的 T700 涡轴发动机负载模型,经参数调整构成模型发动机的负载模型:

$$Q_{ld} = [50.843 \cdots LDS \times (0.0835 - 0.1018 \times LDS)] \times (Np/Np_{ref})^2 \times 0.40666 \quad (5)$$

其中 Q_{ld} 为发动机负载转矩, LDS 为旋翼总矩杆角度, Np 为动力涡轮转子转速, Np_{ref} 为动力涡轮转子设计转速。

3 半实物仿真试验

在上述涡轴发动机/控制系统半实物闭环系统上进行的实时仿真试验,其中控制系统为模型发动机的机械液压控制器,主控计算机采用一台 PC486 微机,输入/输出管理计算机采用一台 PC386 微机,仿真帧周期控制在 15ms。A/D 采集板和 F-V-F 频率电压转换板均为自行设计, A/D 采样频率为 20kHz, D/A 采用研华公司 HK-37A 输出控制板。

3.1 稳态点试验

当旋翼总矩变化非常缓慢时,发动机工作状态将沿共同工作线移动。发动机在共同工作线上每一状态都应能稳定工作,当 LDS 稳定在某一数值,发动机工作状态也稳定在共同工作线上某一点。而且当 LDS 给一扰动再恢复,发动机工作状态也应由偏离位置回到初始位置。在半实物仿真试验中对上述情况都进行了仿真。图 1 为 LDS 给一扰动的情况,扰动量为 $+5^\circ$ 。

3.2 动态过程调试

在半实物仿真试验中,当 LDS 在一段时间内由慢车角度 41° 推到最大角度 90° ,旋翼负载增加,旋翼需用功率大于发动机模型动力涡轮转子输出轴功率,动力涡轮转子转速有所下降,为保持发动机动力涡轮转子转速恒定,燃油控制器增加供油量,发动机燃气涡轮转子加速,反之当 LDS 减小时,旋翼负载减小,旋翼需用功率小于发动机模型动力涡轮转子输出轴功率,燃油控制器减少供油量,发动机减速。发动机加、减速过程如图 2。

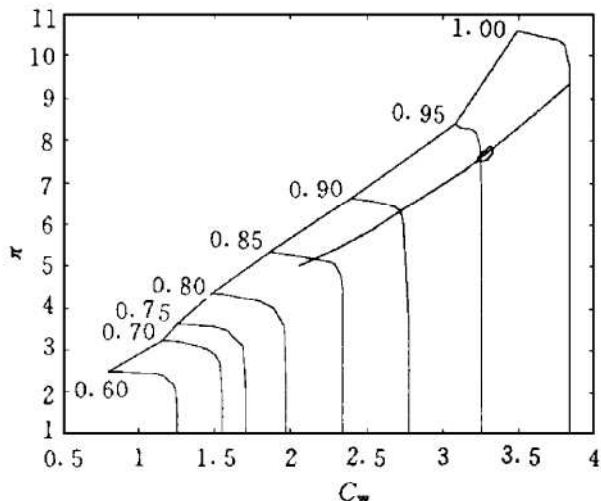


Fig. 1 The steady-state condition simulation

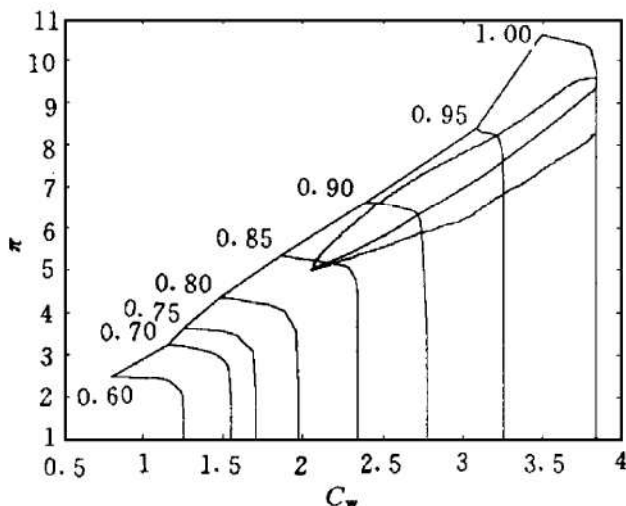


Fig. 2 The dynamic condition simulation

4 讨 论

由于目前模型发动机还处于研制阶段,发动机各部件试验还不足以提供准确的部件特性,文中涡轴发动机仿真器除压气机部件为试验特性外,其它部件都是采用部件的通用特性加修正因子的方法来进行计算,非设计状态与真实发动机试车数据有一定偏差,但最大误差不超过 5%,这同样可以作为发动机控制器进行同步设计和调试的依据。

在半实物仿真试验中,由于电-气转换环节响应迟滞时间超过 400ms,气压变化缓慢,燃

油控制系统供油量也随之变化缓慢,从而使得发动机加、减速过程响应缓慢,而且容易引起振荡,于是我们考虑采用伪微分反馈控制方案,如图 3。通过仿真表明,回路采用伪微分反馈控制,效果较好,对动态特性有很大改善,响应迟滞时间缩短到了 20ms 左右,从而解决了响应滞后问题。

发动机的气动热力学模型在并行处理计算机系统上实现实时,仿真帧周期为 15ms,既满足了实时性的要求,同时因为发动机模型未做进一步简化,仿真精度有了较大程度的提高,为发动机控制系统试车前的精确调试提供了可能,可以进一步降低试验费用和风险,成为控制系统研制以及发动机状态监控、故障诊断的重要工具。

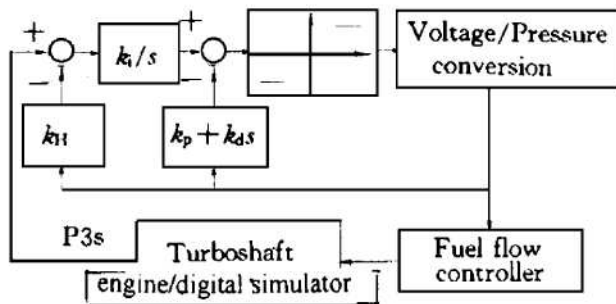


Fig. 3 Voltage/pressure conversion loop pseudo-derivative feedback control

参 考 文 献

- 1 Hart C E, Wenzel L M. Real-time hybrid computer simulation of a small turboshaft engine and control system. NASA-TM-83579, 1984.
- 2 Ballin M G. A high fidelity real-time simulation of a small turboshaft engine. NASA-TM-100991, 1988.
- 3 Litt J S, Delaat J C, Merrill W C. A microprocessor-based real-time simulator of a turbofan engine. NASA-TM-100889, 1988.
- 4 Mclaughlin P W. Parallel processor engine model program. NASA-CR-174641, 1984.
- 5 Daniele C J, Mclaughlin P W. The real-time performance of a parallel, nonlinear simulation technique applied to a turbofan engine. Proceedings of the 1984 SCS Multiconference, 1984.
- 6 Milner E J, Arpasi D J. Simulating a small turboshaft engine in a real-time multiprocessor simulator (RTMPS) environment. NASA-TM-87216, 1986.