

文章编号:1000-8055(2010)01-0213-05

基于非线性系统平衡流形的某型 涡扇发动机建模研究

胡卫红^{1,2}, 李述清³, 孙健国¹

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 第二炮兵驻第 31 研究所 军事代表室, 北京 100074;
3. 第二炮兵工程学院 303 教研室, 西安 710025)

摘 要: 基于非线性系统平衡流形式建模理论, 直接利用涡扇发动机试车数据, 通过辨识计算, 建立了各主要状态参数与燃油流量和高压转子转速的状态方程关系式, 由此建立了某型涡扇发动机的实时动态仿真模型。并且仿真结果与试验吻合好, 且其单步计算耗时较短, 从而为该涡扇发动机开展实时性仿真、进一步完善发动机性能分析和改进其控制系统设计奠定了良好的基础。

关 键 词: 非线性系统; 平衡流形; 涡扇发动机; 建模; 实时仿真
中图分类号: TP15 **文献标识码:** A

Real-time simulation model for a turbofan engine based on nonlinear system equilibrium manifold theory

HU Wei-hong^{1,2}, LI Shu-qing³, SUN Jian-guo¹

- (1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. The Second Artillery Military Delegation in the 31st Research Institute,
Beijing 100074, China;
3. The Second Artillery Engineering College Staff Room 303, Xi'an 710025, China)

Abstract: Based on the nonlinear system equilibrium manifold theory, a simplified real-time simulation model for a turbofan engine was developed. According to the engine test data, an engine model, which could represent the states space equation between the engine corrected-states and the corrected fuel and corrected rotate speed, was presented. And a set of simulating result was accordant with the engine test result. In all, the work in this paper shows well trait about applicability, precision and real-time simulation of this real-time simulation model for a turbofan engine. And this model is very suit to the early research for the control systems of the aero-engine.

Key words: nonlinear system; equilibrium manifold; turbofan engine; modeling; real-time simulation

发动机实时建模的发展, 一直是在简化程度与精度要求之间作适当的折衷^[1]。目前常用的部

件法所建立的模型精度高, 它可在全包线内模拟发动机的稳态和动态特性, 但它往往也需要精确

收稿日期: 2009-01-08; 修订日期: 2009-07-21

作者简介: 胡卫红(1970-), 男, 湖南娄底人, 高级工程师, 研究方向为弹用涡扇发动机控制。

的部件特性数据作支撑,且算法复杂,计算耗时长,难以适用于实时性要求较高的场合;基于气动热力部件特性的模型,需要迭代计算次数多因而往往也不难实现快速的计算.一般为了让模型满足实时计算要求,需要对部件特性或计算方法作适当的简化^[2],而这样的简化又会损失一定的计算精度.在工程实际中由于受到仿真时间的限制,因此大量采用分段线性化模型来代替非线性模型,以实现实时性计算^[2-4].

国内部分学者对压气机特性及涡轮特性进行了线性化处理,并通过适当降低非线性方程组的维数,建立了简化的实时模型,在一定程度上提高了模型的计算速度.但同时它也降低了模型的精度,而且所建立的简化模型仍然是建立在部件特性数据基础之上的^[2].文献[2]根据某型发动机地面稳态数据和动态数据,建立了航空发动机简化数学模型.其基本方法是:根据各参数与燃油流量的对应关系,采用插值法,建立稳态模型;根据发动机各状态参数的变化量与剩余燃油流量,拟合计算动态系数,并建立各状态参数的变化量与剩余燃油流量间的对应关系.

国内外建模通常也采用总体法^[4].总体法模型忽略了发动机内部的工作过程,但在实时性和工程化方面具有良好的可操作性.该方法需要大量的试车数据以满足仿真精度要求,但试车数据往往不能满足飞行模拟机所要求的飞行状态和参数范围.部件法模型可以模拟飞行模拟机所要求的大部分飞行状态和参数,因此可为总体法模型提供充足的试验数据.文献[4]中认为当该发动机的喷管处于临界或超临界工作时,可将所关注的相似性能参数看作高压转子换算转速的单值函数,于是根据试验数据通过插值或拟合方法即可获得各相似性能参数随高压转子换算转速的变化规律,以此来进行发动机仿真.

平衡流形展开模型具有线性变参数模型的特征,可以应用理论成熟的增益调度方法进行控制器设计^[5-7].其中文献[8]给出了平衡流形展开模型基本形式.

本文旨在基于非线性系统平衡流形式建模理论,根据发动机各状态相似参数的变化量与相似燃油流量偏差量和高压转子相似转速偏差量,拟合计算一系列动态系数,并建立各状态参数的变化量与相似燃油流量偏差量和高压转子相似转速偏差量间的对应关系,由此建立某型涡扇发动机的简化动态仿真模型.通过试车过程仿真对比,试验与仿真结果吻合很好,且其单步计算耗时较短,为该型发动机性能分析和实时仿真及其控制系统设计奠定了良好的基础.

1 非线性系统平衡流形建模理论

设一个 m 维输入、 p 维输出的 n 阶的非线性系统表示为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x, u) \end{cases} \quad (1)$$

其中 f 和 h 为定义在 $\mathbf{R}^n$ 上的光滑向量场, $u \in \mathbf{R}^m$, $y \in \mathbf{R}^p$, $x \in \mathbf{R}^n$ 分别为系统输入向量、输出向量和状态向量.非线性系统的平衡流形是指集合

$$\{(x_e, u_e, y_e) | f(x_e, u_e) = 0, y_e = h(x_e, u_e)\} \quad (2)$$

平衡流形实际上反映了系统的稳态工作点(即状态量和输入、输出量的稳定点)的集合.对于非线性系统,其平衡流形可以参数化为^[9]

$$\begin{cases} x_e = x_e(\alpha) \\ u_e = u_e(\alpha) \\ y_e = y_e(\alpha) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\alpha \in \Gamma \subset \mathbf{R}^l$ 可以取作系统输入和状态的函数.于是, Γ 可视为非线性系统空间上的一个子集.

系统在 $\alpha \in \Gamma$ 上的小偏差近似线性化族可以表示为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} [x - x_e(\alpha)] = A(\alpha) [x - x_e(\alpha)] + B(\alpha) [u - u_e(\alpha)] \\ y - y_e(\alpha) = C(\alpha) [x - x_e(\alpha)] + D(\alpha) [u - u_e(\alpha)] \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} A(\alpha) &= \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{[x_e(\alpha), u_e(\alpha)]}, B(\alpha) = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right|_{[x_e(\alpha), u_e(\alpha)]} \\ C(\alpha) &= \left. \frac{\partial h(x, u)}{\partial x} \right|_{[x_e(\alpha), u_e(\alpha)]}, D(\alpha) = \left. \frac{\partial h(x, u)}{\partial u} \right|_{[x_e(\alpha), u_e(\alpha)]} \end{aligned}$$

由式(4),式(1)描述的非线性系统在平衡流形上展开以后,系统的小偏差线性化族依旧还是一个非线性系统.显然,平衡流形上 α 对应的状态 $[x_e(\alpha), y_e(\alpha), u_e(\alpha)]$ 反映了发动机一定稳定工作状态,而状态系数 $A(\alpha), B(\alpha), C(\alpha), D(\alpha)$ 实质是反映了在 α 对应状态附近,状态和输入对的系统的线性影响程度.

对于涡扇发动机,其正常动态变化过程中系统输入和状态基本上都在系统的平衡流形附近.从式(4)可以看出系统的平衡流形是系统状态空间上的一个子流形,并且其维数一般等于系统输入空间的维数,而低于整个状态空间的维数.因此在平衡流形附近研究系统特性不仅能够极大地简化问题的复杂性,而且可保证足够的稳态精度.

$$\begin{cases} \frac{dn_{hc}}{dt} = K_{11}(n_{hc}) \cdot [n_{lc} - n_{lc0}(n_{hc})] + K_{12}(n_{hc}) \cdot [q_{mfc} - q_{mfc0}(n_{hc})] \\ \frac{dn_c}{dt} = K_{21}(n_{hc}) \cdot [n_{lc} - n_{lc0}(n_{hc})] + K_{22}(n_{hc}) \cdot [q_{mfc} - q_{mfc0}(n_{hc})] \\ y_{ic} = y_{ic0}(n_{hc}) + k_{i1}(n_{hc}) \cdot [n_{lc} - n_{lc0}(n_{hc})] + k_{i2}(n_{hc}) \cdot [q_{mfc} - q_{mfc0}(n_{hc})] \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$n_{hc} = n_h \cdot \sqrt{288.15 / T_1^*}, n_c = n_l \cdot \sqrt{288.15 / T_1^*},$$
$$q_{mfc} = q_{mf} \cdot (1.033 / p_1^*) \cdot \sqrt{288.15 / T_1^*}$$

分别是发动机 n_h, n_l 的换算值, p_1^*, T_1^* 分别是发动机进口气流总压、总温; y_{ic} 为表示其他状态量的换算值(如 $p_{2cor}^* = p_2^* \cdot (1.033 / p_1^*)$, $T_{35cor}^* = T_{35}^* \cdot (288.15 / T_1^*)$ 等); $K_{ij}(n_{hc}), k_{ij}(n_{hc})$ 是需要求解的各系数项; $q_{mfc0}(n_{hc}), n_{lc0}(n_{hc}), y_{ic0}(n_{hc})$ 分别是 q_{mfc}, n_{lc}, y_{ic} 所对应的平衡流形.

利用某型号涡扇发动机非线性模型,采用小偏差动态响应拟合方法^[10],容易获得不同 $n_{hc}^s(s = 1, 2, \cdots, N)$ 情况下系数 K_{ij}^s 和 k_{ij}^s 的值.通过拟合得到关系式 $K_{ij}(n_{hc}^s)$ 和 $k_{ij}(n_{hc}^s)$,带入式(5),继而建立起发动机平衡流形模型.

3 仿真分析

试车过程仿真,更能全面反映模型模拟发动机实际各种工况调节过程的性能,这对检验模型性能是有很有效的,也是很有必要的.

下面针对发动机实际工况调节过程,给出两组发动机地面试车测量结果与仿真计算结果的对比,主要发动机状态参量变化情况,及仿真计算误差百分比如下列图 1 和图 2 所示.

2 涡扇发动机平衡流形建模

对于涡扇发动机,在不考虑热惯性及容积动力学特性的影响下,只有高、低压转子是储能元件,因此可选高压转子转速 n_h 和低压转子转速 n_l 作为模型的状态量,并用换算转速考虑在来流条件下对发动机工作状态的影响.在没有附加能量输入时,模型的输入量为燃油流量 q_{mf} ;模型的输出量为压气机出口总压 p_2 、高压涡轮后总温 T_{35} 等.

考虑到 n_h 对涡扇发动机的工作状态影响最大,且能够明显表征发动机工作状态,所以将式中取参数 $\alpha = n_{hc}$.在使用换算后的变量之后,涡扇发动机在平衡流形附近展开的数学模型就可以将式表示成如下形式:

以上仿真计算时间步长都取为 0.01 s,与试车过程测量装置采样时间间隔相同.本文计算使用电脑基本配置:CPU 为 Celeron(R) 2.66 GHz,内存为 512 MB,操作系统为 WinXP.利用 Matlab/ Simulink 建模,进行仿真计算,计算耗时如表 1 所示.

表 1 仿真计算耗时
Table 1 Time-consuming of simulation

试验编号	试验历时/s	计算耗时/s	平均单步计算耗时/s
I	1050	18.68	0.00017
II	430	5.07	0.00012

通过上面对发动机试车过程测量数据与仿真计算结果的比较可以看出,模型仿真结果与试车结果吻合较好,对于状态量 n_h, n_l 的仿真精度可达到 1%,2%以内,对于输出量 p_2 和 T_{35}^* 的仿真精度总体达到 4%以内.在计算实时性方面,平均单步计算耗时在 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ s 之间,相比实际采样时间间隔 0.01 s 要小得多.因此该模型在准确性和实时性方面完全可作为对发动机特性分析及其控制系统设计仿真分析的基础.

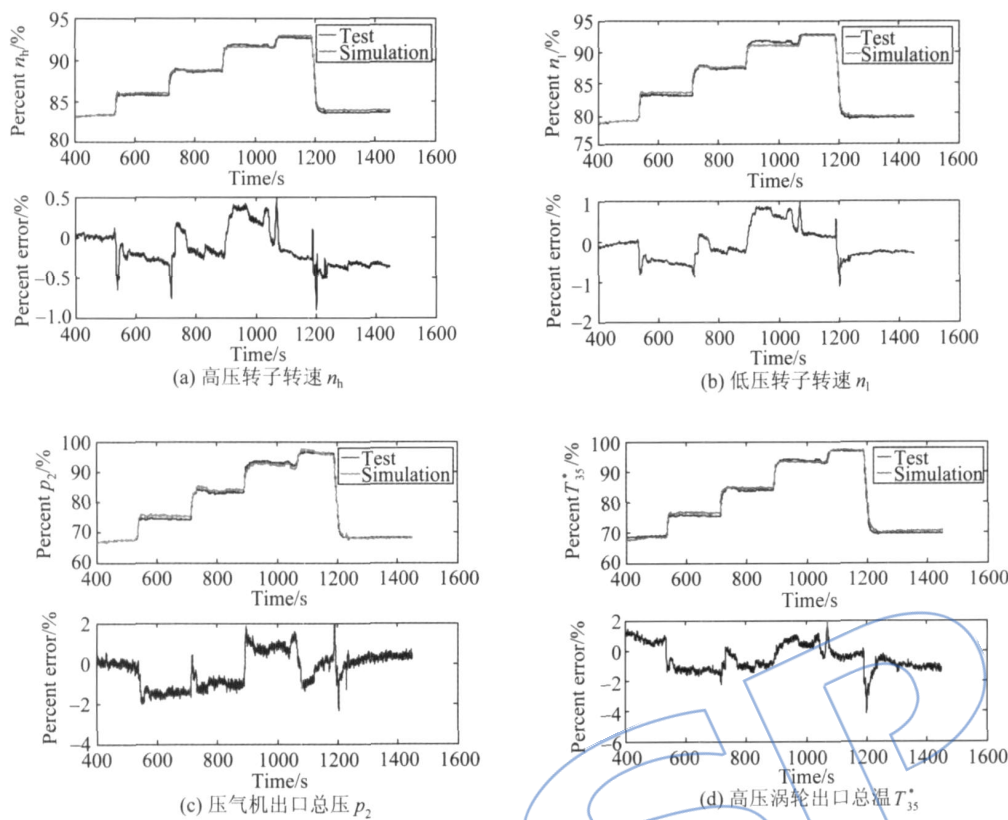


图1 仿真试验 I
Fig. 1 Turbofan engine test simulation I

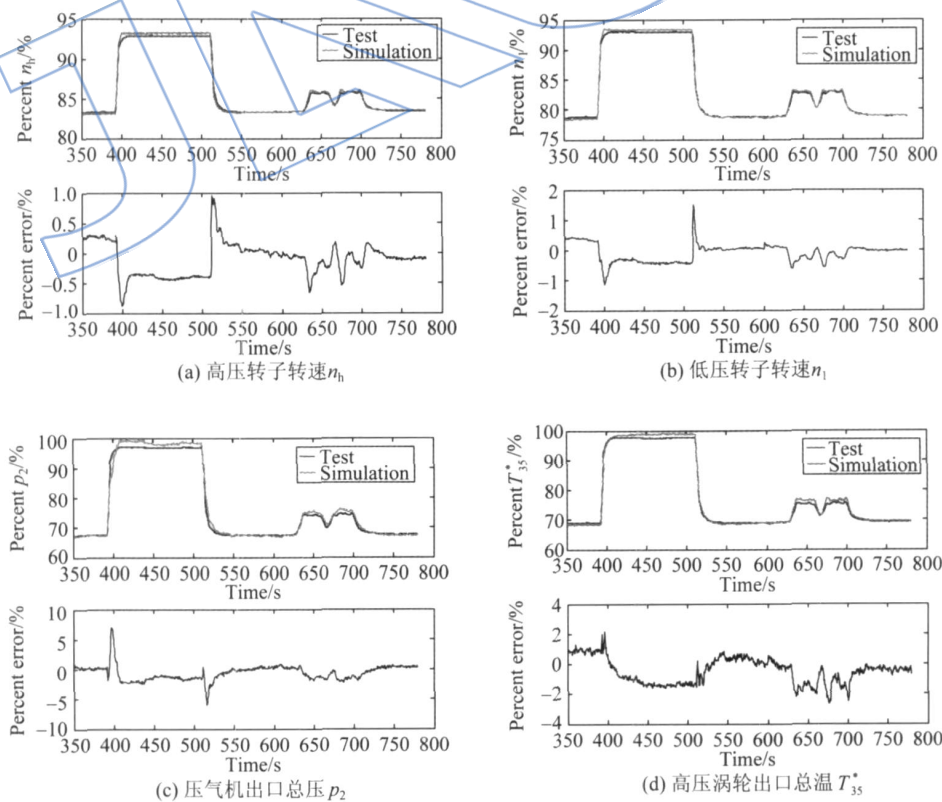


图2 仿真试验 II
Fig. 2 Turbofan engine test simulation II

4 结 论

本文基于非线性系统平衡流形式建模理论,建立了某型涡扇发动机简化实时模型,建模时无需详细的部件特性数据,仅根据试车数据,可快速地建立发动机的简化模型.文中对两次试车过程分别进行了仿真计算,所得结果与试车测量值吻合好,表现出该模型具有良好的计算精度和实时计算性能.

参考文献:

- [1] 孙健国. 面向 21 世纪航空动力控制展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 97-102.
SUN Jianguo. Prospects of aeroengine control development in the early time of the 21st century[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 16(2): 97-102. (in Chinese)
- [2] 周文祥, 黄金泉, 黄开明. 航空发动机简化实时模型仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 251-255.
ZHOU Wenxiang, HUANG Jinquan, HUANG Kaiming. Real-time simulation system for aeroengine based on simplified model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 37(2): 251-255. (in Chinese)
- [3] 杨蔚华, 孙健国. 发动机实时建模技术的新发展[J]. 航空动力学报, 1995, 10(4): 402-406.
- [4] 陈敏, 唐海龙, 张津. 某型双轴加力涡扇发动机实时性能仿真模型[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 13-17.
CHEN Min, TANG Hailong, ZHANG Jin. Real-time performance simulation of a mixed-flow two-spool augmented turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 13-17. (in Chinese)
- [5] Daniele C J, Krosel S M, Szuch J R, et al. Digital computer program for generating dynamic turbofan engine models [R]. NASA TM-83446, 1983.
- [6] Rugh W J, Shamma J S. Research on gain scheduling[J]. Automatica, 2000, 36(10): 1401-1425.
- [7] Breikin T V, Arkov V Y, Kulikov G G. Regularisation approach for real-time modeling of aero gas turbines [J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(4): 401-407.
- [8] 于达仁, 隋岩峰. 非线性系统平衡流形展开模型[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2415-2418.
YU Daren, SUI Yanfeng. Expansion model based on equilibrium manifold for nonlinear system[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(9): 2415-2418. (in Chinese)
- [9] Stilwell D J, Rugh W J. Interpolation of observer state feedback controllers for gain scheduling[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(6): 1225-1229.
- [10] 冯正平, 孙健国. 航空发动机小偏差状态变量模型的建立方法[J]. 推进技术, 2001, 22(1): 54-57.
FENG Zhengping, SUN Jianguo. Modeling of small perturbation state variable model for aeroengines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(1): 54-57. (in Chinese)