

单轴航空涡扇发动机数学模型辨识*

赵 琳, 樊 丁, 陕薇薇

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 依据某型单轴航空涡扇发动机试车数据辨识建立了发动机的全包线、全工况实时动态数学模型。由于试车数据所含噪声较大, 辨识方法采用了先建立稳态模型, 进而建立实时动、静态数学模型的方法, 这种方法可以通过辨识稳态点来消除噪声。验模表明, 所建模型精确度很高, 且能准确反映发动机性能, 并满足实时性需求。

关键词: 涡扇发动机; 数学模型辨识; 稳态数学模型; 实时数学模型; 飞行包线

中图分类号: V231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2008) 06-0733-04

Single-spool turbofan engine model identification

ZHAO Lin, FAN Ding, SHAN Weiwei

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract A method application to identify single-spool turbofan engine model was described. The steady model was established. Then the dynamic model was presented. This method can avoid the noise disturbance effectively. Using other experimental data to check out the model, the result indicates that the precision in model is high. The model can reflect the engine performance accurately with real-time.

Key words Turbofan engine; Model identification; Steady model; Real-time model; Flight envelope

1 引 言

传统的部件特性建模方法需要基于发动机的部件特性及机械、气动关系构建非线性方程组, 进而进行大量迭代计算来求解该非线性方程组, 获得发动机性能数据^[1,2]。与部件法建模相比, 辨识建模的方法比较简单, 无需获得发动机的部件特性, 所获得的数学模型还具有求解快速的优点。不过, 发动机毕竟是一种非常复杂的热力机械系统, 其工作过程是非线性的。因此, 要使用辨识建模这种线性方法来建立准确的发动机数学模型, 就必须从发动机原理出发, 结合发动机试车数据, 构建合理的数学结构, 才能建立起符合发动机原理, 正确反映发动机性能的数学模型。

目前, 国外的发动机建模理论已经十分丰富, 对于仿真机理建模的研究十分深入, 机载模型的研究也达到了可应用的阶段。而国内的建模技术尚未达到这一水平, 至今仍尚未形成一套完整体系的、权威的关于变几何涡扇发动机性能数值仿真程序。并且多

是采用部件法建模, 难以作为实时模型使用^[3,4]。

被辨识的单轴航空涡扇发动机相对一般的航空涡扇发动机而言, 结构比较简单、工作范围比较窄, 其结构示意图如图 1 所示。因此, 适宜使用辨识建模方法获得该型发动机的数学模型。验模结果表明, 本文根据试车数据辨识建立的该型发动机的全包线、全工况实时动、静态数学模型符合发动机工作原理, 能够实时、高精度反映发动机性能。

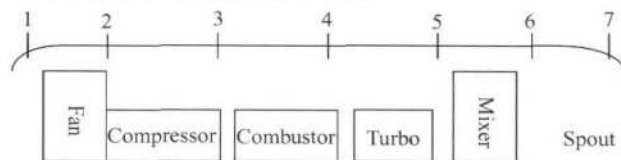


Fig. 1 Framework of one-spool turbofan engine

2 试车数据分析

辨识建模的方法是基于所测的输入输出实验数据来得到与所测系统等价模型的方法^[3]。这种方法

* 收稿日期: 2007-09-08 修订日期: 2008-04-17。

作者简介: 赵 琳 (1979—), 女, 博士生, 研究领域为发动机控制。E-mail: echo_cam@126.com

对于测量的输入输出数据精确度要求比较高。而我们得到的发动机试车数据的测量噪声很大,无法得到准确的发动机动态信息。如图1所示,当发动机转速 n 从80%上升至85%时,供油量 W_f 的稳态值从67%增加至78%,增加了11%。但是,由于测量噪声的原因,发动机在稳态时,供油量测量值的峰-峰值之差就可达到8%。在这样大的测量噪声下,很难得到准确的可以反映发动机性能的有效信息,如神经网络、支持矢量机等辨识方法就很难在这种情况下应用。我们采用了如下方法进行辨识建模。

3 建模方法及模型结构

在建模方法上,采用了先建立发动机稳态模型,再建立动态模型的技术路线。

对于单转子涡扇发动机,发动机的输入量为:供油量 W_f 和大气条件。一般而言,大气条件指进气总温 T_1^* 、进气总压 p_1^* 。根据工程经验,本文还考虑了动压 ϕ 对发动机性能的影响。发动机的输出量为转速 n 、风扇后温度 T_2 、压气机后压力 p_3 及涡轮后温度 T_5 。由于所获得的 T_5 试车数据存在严重的测量误差,无法用于辨识建模,所以,所建模型只输出 n 、 T_2 、 p_3 三个参数。对于 T_5 ,模型只是简单输出按固定涡轮焓降的计算值。

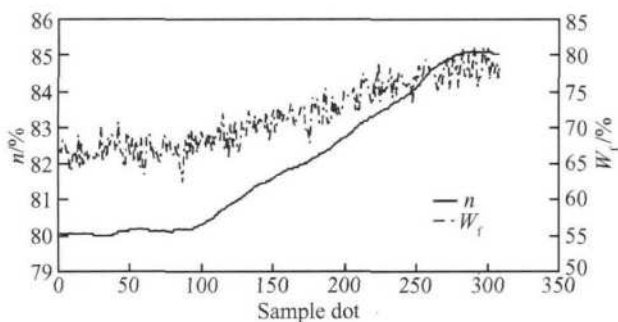


Fig. 2 Rotate speed and fuel test information

经多种方法、多种方式试辨识后发现,压气机后压力 p_3 与进气总压 p_1^* 之比、风扇后温度 T_2 与进气总温 T_1^* 之差这两个输出参数与换算转速 n_{cor} 之间具有确切的函数关系,且符合发动机工作原理。所以,在建立 P_3 和 T_2 的模型时,是以发动机换算转速而非供油量作为输入变量。

3.1 稳态模型建立方法

本文采用了有限脉冲响应函数模型作为所辨识的发动机的稳态点辨识模型。有限脉冲响应模型可以用下式表示^[5]

$$y(t) = g_1 u(t-1) + g_2 u(t-2) + \dots + g_n u(t-n) \quad (1)$$

式中 $y(t)$ 为当前输出, $\{u(t-1), u(t-2) \dots u(t-n)\}$ 为输入序列, 而 $\{g_1, g_2 \dots g_n\}$ 即为待求的模型参数。这里,求解的目的不是为了根据已知的输入输出序列求得未知的模型参数,而是要根据已知的动态信息求得稳态信息。所以,还需对该模型函数进行相应的处理。在进行稳态模型辨识时,假设:在小偏差范围内,发动机模型是线性的。因此,在进行各稳态工作点辨识时,就需要确定相应的“基准点”,在基准点附近的小偏差范围内,发动机工作特性是线性的。根据这个假设,模型(1)变为

$$y(t) - y_0 = g_1(u(t-1) - u_0) + g_2(u(t-2) - u_0) + \dots + g_n(u(t-n) - u_0) = \sum_{i=1}^n g_i u(t-i) - g_0 u_0 \quad (2)$$

式中 $g_0 = \sum_{i=1}^n g_i$, y_0 , u_0 为“基准点参数”。把已知的输入输出序列代入上式,建立方程组求解,则可以解得模型参数 $\{g_0, g_1, \dots, g_n\}$ 及基准点 y_0 , u_0 。有限脉冲响应函数模型的滤波效果很好,使用这种方法辨识稳态点,可以滤掉动态信息中的噪声,从而求得准确的稳态信息。另外,在建立关于 T_2 , p_3 的稳态模型时,作为输入参数的转速 n 是换算转速,即 $n_{cor} = n / \sqrt{T_1^*}$ 。

根据辨识获得的稳态点,即可拟合出发动机在相应大气条件下的稳态数学模型。在已知条件为发动机稳态输入输出参数和大气条件,未知条件为稳态模型参数量值的情况下,可以建立相应的方程组并进行求解。而得到建立发动机稳态模型所需要的全部信息。

根据发动机相似原理可知,各截面压力随进气总压等比例变化,进气总压越大,各截面压力越大。各截面压力变化使空气流量随之变化,从而导致发动机需油量变化。即进气总压变化,使得供油量、压气机后压力随之变化。这个变化是等比例的。从而,令

$$W_f = W_f^* p_1^* \quad (3)$$

$$p_3 = p_3^* p_1^* \quad (4)$$

可以消除 p_1^* 对模型的影响。 p_1^* 对风扇后温度 T_2 的影响则需另行辨识。

分析试车数据并进行试辨识可知, T_1^* 对模型的影响是非线性的。经过进行多次试辨识和验证,采用了双线性模型模糊叠加拟合。 ϕ 对模型的影响可以简化为线性。结合式(3)、(4)可建立如下所示方程

组来求解发动机的稳态模型参数

$$W_i^j[i] = W_0^j[i] + a_0[i] \phi^j + a_1[i] \cdot \Delta T_1^{*j} \cdot h_1 + a_2[i] \cdot \Delta T_1^{*j} \cdot h_2 \quad (5)$$

$$p_3^j[i] = p_{30}^j[i] + b_1[i] \cdot \Delta T_1^{*j} \cdot h_1 + b_2[i] \cdot \Delta T_1^{*j} \cdot h_2 \quad (6)$$

$$\Delta T_2^j[i] = \Delta T_{20}^j[i] + c_1[i] \cdot \Delta T_1^{*j} \cdot h_1 + c_2[i] \cdot \Delta T_1^{*j} \cdot h_2 + c_3[i] \cdot p_1^{*j} \quad (7)$$

式中 h_1, h_2 为双线性模糊化系数, 有

$$\begin{cases} h_1 = 0, h_2 = 1 & (T_1 \leq 270 \text{ K}) \\ h_1 = 1, h_2 = 0 & (T_1 \geq 300 \text{ K}) \\ h_1 = \frac{(T_1 - 270)^2}{(T_1 - 270)^2 + (300 - T_1)^2}, h_2 = 1 - h_1 & (270 < T_1 < 300) \end{cases}$$

式中 $W_i^j[i]$ 指第 j 组试车数据中第 i 个转速下对应的供油量值, $\Delta T_1^* = T_1^* - 288.13$, $\Delta T_2^* = T_2^* - T_1^*$ 。{ $W_0, p_{30}, T_{20}, a, b, c$ } 为未知模型参数。求解 (5) ~ (7) 式即可求得稳态模型的所有未知参数。这里求解了转速从 0% ~ 100% 的每一个整数转速下所对应的未知参数值。使用时, 只需进行线性插值即可求得任意输入参数下的输出值。

3.2 动态模型建立方法

影响发动机动态模型的主要因素包括发动机的转动惯量、发动机的气动容积效应、燃烧滞后以及测量数据所包含的传感器特性等。由发动机原理及试车数据可以初步辨识出, 供油量与转速的动态关系可近似为惯性环节, 则时间常数为需要辨识的最重要参数。

在得到以转速为输出, 以供油量、进气总温、进气总压、动压为输入的稳态模型后, 以这一稳态模型为

基础, 建立一阶惯性环节, 其数学模型可表示为

$$G(s) = \frac{K}{T_s s + 1} \quad (8)$$

则可以得到系统动态模型。其中 K 值即为 3.1 节中所求取的输入输出参数关系。根据发动机原理可知, 影响时间常数的主要因素有当前转速与进气总压。同一台发动机, 转速越大时, 时间常数越小, 惯性越小; 进气总压越大时, 时间常数越大, 惯性越大。根据这一原理, 对发动机动态过程进行了辨识。经过多次试辨识, 最终得到了时间常数随转速变化的关系。并发现总压与时间常数近似呈比例关系。

在建立以 p_3, T_2 为输出, W, T_1^*, p_1^*, ϕ, n 为输入的动态模型时, 考虑到其稳态的函数关系可表示为: $p_3 = f_1(n_{cor})$, $\Delta T_2 = f_2(n_{cor})$, 而动态过程中, p_3, T_2 这两个参数随转速变化的惯性相对于它们的测量传感器的惯性来说要小得多。所以, 在模型中, 单独考虑了测量传感器 (信号传递通道) 的惯性——在发动机模型后, 串联了表征测量传感器特性的一阶惯性环节。

另外根据试车数据辨识建立了起动过程模型, 经检验, 起动模型符合发动机原理。

4 模型检验

图 3~图 6 为一组地面台架试车数据检验模型参数的对比图, 其中虚线 a 为试车数据, 实线 b 为模型输出。图中给出了发动机转速从 90% 升至 93%, 再降至 85% 的动、静态过程。图 3 为转速对比图, 图 4 为转速的绝对误差 Er 图。由图 3~4 可知, 模型与真实发动机转速的绝对误差不超过 1%。图 5、图 6 为 p_3, T_2 对比图。从图中可看到, p_3 误差 $\leq 2\%$, T_2 误差 $\leq 3\%$ 。

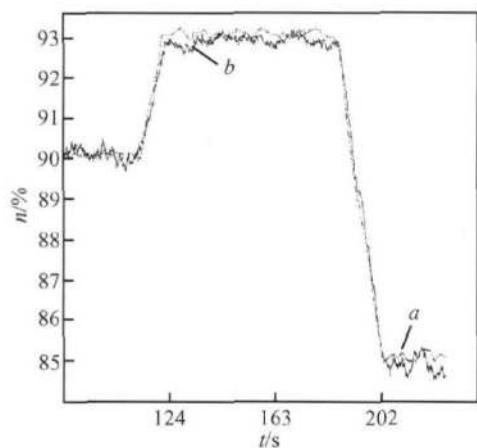


Fig. 3 Comparison of test n and model output n in ground

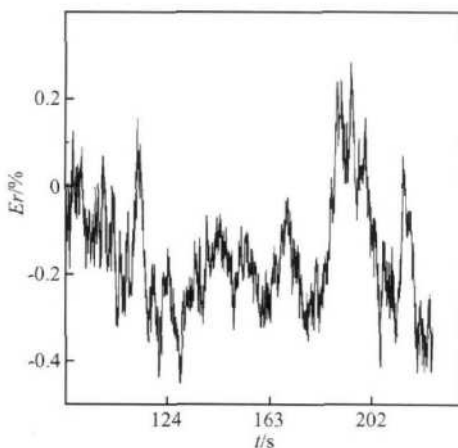


Fig. 4 Error of n in ground

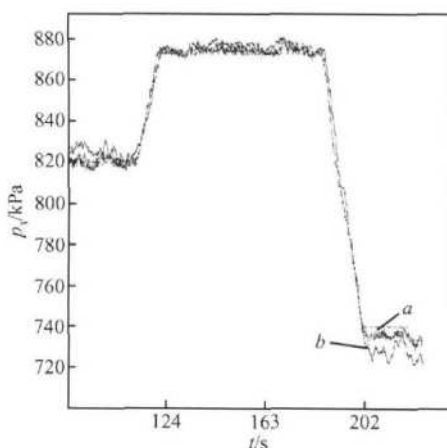


Fig. 5 Comparison of test p_3 and model output p_3 in ground

图 7~图 10 为一组高空台试车数据检验模型参数的对比图。图中给出了高度从 4 km 降至 2 km, 马赫数从 0.7 降至 0.45, 转速从 80% 升至 85%, 再至 93%, 最后降至 75% 的动、静态过程。图 7~图 8 为

转速对比图及转速绝对误差图。可以看到, 除试车数据本身的野点外, 转速的误差小于 3%。图 9~图 10 为 p_3 , T_2 对比图。 p_3 , T_2 误差 $\leq 3\%$ 。

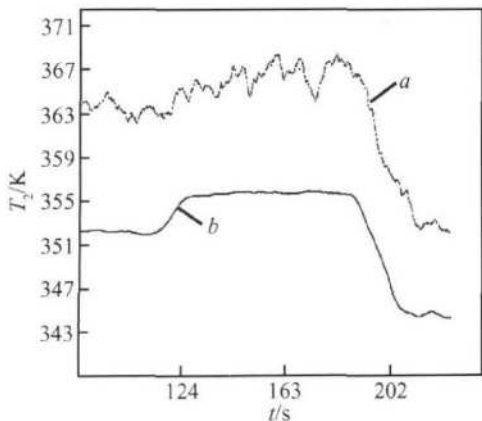


Fig. 6 Comparison of test T_2 and model output T_2 in ground

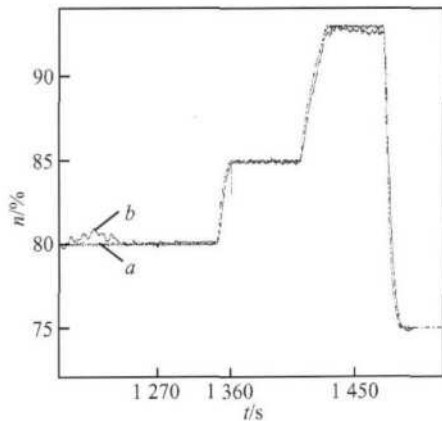


Fig. 7 Comparison of test n and model output n in high altitude

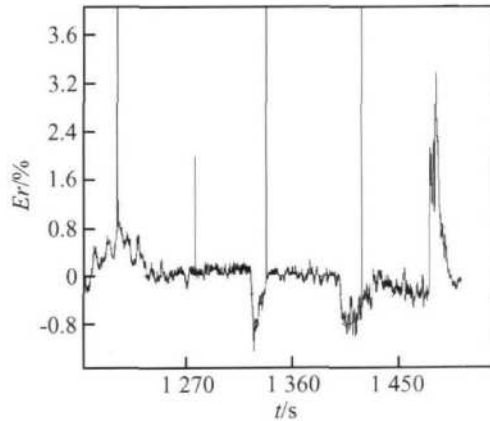


Fig. 8 Error of n in high altitude

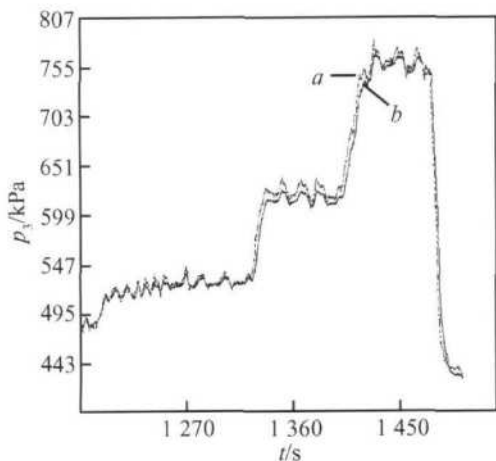


Fig. 9 Comparison of test p_3 and model output p_3 in high altitude

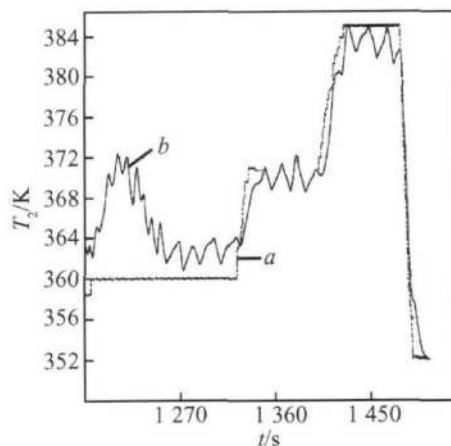


Fig. 10 Comparison of test T_2 and model output T_2 in high altitude

5 结 论

本文使用先建立稳态模型, 在稳态模型基础上建立动态模型的方法对多组试车数据进行了辨识建模。所建立模型精确度较高, 尤其是转速, 达到了稳态误差 $\leq 1\%$, 动态误差 $\leq 3\%$ 。风扇后温度及压气机后压力精度稍差, 稳态误差 $\leq 3\%$, 动态误差 $\leq 5\%$ 。

参考文献:

- [1] 郝英, 彭鸿博. 航空涡轮发动机建模技术研究[J]. 中国民航学院学报, 2003, 21(4).

- [2] 卓刚. 航空发动机智能建模与故障诊断研究[D]. 南京航空航天大学, 2004.
- [3] Morelli Eugene, Klein V ladislav. Application of system identification to aircraft at NASA langley Research Center[J]. *Journal of Aircraft*, 2005, 42(1).
- [4] Szuch J R. Advancements in real-time engine simulation technology[R]. NASA TM 82825, 1980.
- [5] 朱豫才. 过程控制的多变量系统辨识[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005.

(编辑: 郭振伶)