

发动机实时建模技术的新发展

南京航空航天大学 杨蔚华** 孙健国

【摘要】 本文从发动机控制的角度,对国内外近十几年来发动机实时建模技术的研究成果作了概要综述,评述了几类实时建模的方法,特别是自适应技术在机载实时模型建模过程中的应用,并指出将来实时模型的主要发展方向是自适应模型和智能化建模技术。

主题词: 航空发动机 实时仿真 自适应控制 模型问题

分类号: TP15

1 前言

建模历来是自动控制领域的重要分支,作为被控对象的航空发动机,由于复杂的气动热力过程,在发动机控制系统的研制中,其数学模型一直是人们研究的重要课题。发动机原理及发动机控制的专家们从不同的角度提出了各种不同的建模方案^[1-7],用于不同的场合及发动机控制系统研制的不同阶段。现代飞机的发展对发动机及发动机控制系统的要求越来越高,尤其是发动机数控技术的应用,对发动机数学模型提出了各种新的要求。纵观发动机数学模型的发展历程,可以认为主要是解决模型精度与实时性的矛盾,也即既要保证模型有足够的精度,又要使模型简洁,计算工作量小,以满足实时控制及实时故障诊断等要求。非实时的精确的气动热力模型的建模技术在国际上已发展得相当成熟了,在发动机提交给用户时,都会同时提交精确的气动热力模型。在国内也已基本掌握了该建模技术^[4],但由于国内基础研究做得不够,例如缺少足够精确的发动机部件特性数据等,使得所建数学模型的精度仍不尽如人意。

国外 70 年代就已开始研究建立发动机实时数学模型^[3],文献[1]对 80 年代以前的发动机建模技术做了很好的综述,而在这以后的近 10 年来,发动机实时模型的建模技术又有了许多新的发展,尤其是现代控制理论和优化技术在发动机数控中的应用以及解析余度技术的发展,往往需要具有自适应能力的机载的发动机实时模型,使发动机模型随时与实际发动机相一致。飞行/推进系统综合控制和推力矢量控制的发展,使得在一个帧周期中的计算工作量大大增加,对发动机模型的实时性提出了更高的要求,以致提出了超实时模型的概念。发动机实时模型正扮演着越来越重要的角色。本文就发动机实时模型建模技术的发展,特别是近 10 年的新发展作一概要的综述。

2 实时模型建模技术

建立实时模型的方法很多,以下介绍几种主要的方法。

2.1 简化的部件级实时模型

简化部件级模型的建模方法与详细部件级模型相同,只是忽略了一些次要的气动热力特性,在算法上采用了一些近似和简化的方法,以减少计算量。对部件级详细模型简化时,一般有以下几个方面。(1)忽略容积效应,这种忽略对模型精度的影响,在大多数应用场合是可以接受的。(2)将部件特性曲线(如压气机特性线等)用不高于三次的多项式或其他函数来拟合,避免了特性的插值计算。各种发动机的部件特性有各自特点,所选择的拟合方法也不同。可以直接对部件特性曲线进行拟合,也可对特性线进行坐标变换,使之成为近似直线后再拟合,如F404发动机等用出口折合流量代替进口折合流量进行变换^[2]。(3)降低计算复杂性,减少计算量。如将压气机的温比近似成压比的分段线函数,避免幂指数运算;燃烧室温度与油气比关系拟合成复合函数,消除插值求取焓值等^[5]。(4)将微分方程转换成差分方程或降低龙格库塔法的阶次,减少解转子动力学方程的时间^[2]。(5)采用Newton-Raphson法求解代数方程组时,尽可能减少循环迭代次数,甚至只迭代一次,其条件是初猜值必须非常接近方程组的解,也可采用改进的Newton-Raphson计算方法^[8]。

大量计算分析与试验表明,高温涡轮部件金属吸放热动力学是一种低频特性,其动态特性在建模中必须予以考虑。80年代以来,国外有关建模的文献几乎都考虑涡轮吸放热动力学,而至今国内所发表的文献几乎都忽略了涡轮吸放热动力学,这将为加快模型的动态响应速度而造成建模误差,开展这项工作的困难不在于建立动态方程,而是如何针对不同的发动机选取合适的系数。

简化的部件级模型简化到什么程度,取决于对计算速度和应用场合的精度要求,做为实时模拟与仿真,上述一些简化方法是可取的。

2.2 发动机状态变量模型

当采用现代控制理论或优化技术进行发动机控制时,往往需要以状态方程形式表示的发动机模型或称状态变量模型。状态变量模型是在飞行包线内发动机选定工作点附近的线性模型,它用状态方程和输出方程来表示。

$$\dot{\Delta X} = A \cdot \Delta X + B \cdot \Delta U, \quad \Delta Y = C \cdot \Delta X + D \cdot \Delta U$$

这里 $\Delta X = X - X_0 \in R^n$, $\Delta Y = Y - Y_0 \in R^m$, $\Delta U = U - U_0 \in R^r$, X 是状态变量, Y 是输出变量, U 是控制量, 而 X_0 , Y_0 , U_0 是选定工作点处上述三个量, A ($n \times n$)、 B ($n \times r$)、 C ($m \times n$)、 D ($m \times r$) 是对应于选定工作点的系数矩阵。

上述模型中 A 、 B 、 C 、 D 动态系数矩阵必须以精确的发动机气动热力非线性模型为基础,常用所谓的偏导数法,逐个求出矩阵中的每个元素^[9,10],并采用非线性回归,分段线性化,曲线拟合方法,把状态变量模型扩展到可模拟加减速过渡过程以至全飞行包线。

采用系统辨识技术^[11-13],用详细的发动机非线性仿真或直接从发动机的试验数据辨识出发动机状态变量中的系数矩阵或时间序列模型中的参数矩阵。用这种方法可直接辨识出各种环境下发动机各种过渡态的状态变量模型。

上述两种实时模型的主要难点在于要使模型在全飞行包线内,在发动机不同转速区间的加减速过程中,以至遭遇加速时,以及在不同的供油规律及不同的输入量作用下,都能达到满意的精度。有的文献给出了用复杂的非线性回归的分析方法进行矩阵元素修正的过程,但在飞行包线的某些点和某些转速区间的加减速过程中,其精度尚不能令人满意。

2.3 用并行处理系统的硬件实时模型^[14, 15]

用这种方法的发动机数学模型本身一般并不简化, 而是采用多处理器并行系统来实时完成复杂的运算。由于没有对精确的气动热力模型进行简化, 运算精度比较高, 将它用于地面半物理仿真试验十分有效。但是由于需要硬件环境支持, 成本较高, 尤其是尺寸重量上的限制, 使之不能用于机载实时模型。

3 机载实时模型建模技术

机载实时模型主要在近 10 年来得到了很大的发展, 并仍然是当前的前沿研究课题, 受到同行专家的普遍关注。由于发动机的制造和装配误差, 建模中的近似假设以及发动机使用期中部件的磨损, 部件性能的蜕化等, 可能使得模型与实际发动机严重失配而不能使用, 为解决模型失配问题, 往往要求机载实时模型能自动进行修正, 以使模型随时与发动机相匹配, 机载实时模型主要有以下几种。

3.1 发动机部件跟踪滤波器^[16-18]

部件跟踪滤波器(CTF)不仅能修正模型与发动机之间参数的稳态误差, 还能在发动机过渡过程中进行动态误差修正。实际发动机输出参数的偏差经过一阶延迟环节滤出稳态误差, 模型偏差中除去这个稳态误差便是动态误差。延迟环节时间常数的选择取决于动态误差的频谱, 以有效地分离出动静误差为准。状态校正环节的作用是通过修正发动机状态变量而使动态误差最小, 这个环节使用了发动机状态变量模型和 Kalman 滤波方法。部件校正环节的作用是通过修正模型的部件特性或稳态输入输出关系, 使稳态误差最小。输入修正环节的作用是修正模型输入量以减小稳态误差, 这时的模型输入量与实际发动机输入量之间可能存在偏差, 这个偏差是由执行机构和传感器的误差引起的。部件跟踪滤波器模型是一种具有自校正功能的实用型自适应模型, 它除了具有实时模型的一般功能外, 还能综合用于实时检测发动机数控系统传感器及执行机构的故障, 非常适用于发动机数控系统的解析冗余技术^[16, 17], 同时也可用于发动机性能寻优控制系统飞行/推进系统综合控制中。

3.2 Stammatis 的自适应模型^[19]

这种模型目前尚不具备实时性, 但它是一种有代表性的自适应模型。发动机模型表示为非线性方程组 $f_i(X, Y, U, V) = 0, i = 1, 2, \dots, n$, 其中 X 为状态向量, Y 为输出变量, U 为控制量,

V 是干扰输入量。采用迭代算法解上述方程组时, 构造代价函数 $c = \sum_{i=1}^n \alpha e_i^2$ (α 是权系数, e_i 是

解 $f_i = 0$ 方程时的误差, 于是解方程 $f_i = 0$ 就等价于非线性规划问题 $\min \sum_{i=1}^n \alpha e_i^2$ 的解)。

Stammatis 自适应建模方法是根据测量数据来修正模型特性线的计算结果, 缩小其与真实值的差距。文献[20]以 Stammatis 模型为基础, 每隔若干个帧周期给实时模型提供根据发动机输入及输出值计算的修正因子, 对实时模型的特性线逐步进行修正, 从而提出了自跟踪模型的概念, 显著提高了 Stammatis 自适应模型的实时性, 但由于对模型修正的周期较长, 仍难以实时修正动态误差。Stammatis 的自适应模型涉及比较复杂的非线性规划问题, 计算量庞大, 只能进行离线仿真计算, 进行测量数据的事后处理, 目前不能作为实时模型。

3.3 Luppold 自适应模型^[21]

Luppold 等提出的自适应模型是基于 Kalman 滤波技术的参数估计与自校正模型, 它分

为四个部分。稳态模型(SSM),为简化的部件级模型或是以公式表格形式给出的发动机稳态参数计算值,该模型计算量很小。状态变量模型(SVM),是用状态方程和输出方程表示的模型,它提供发动机动态过程参数的计算值,同时也是Kalman滤波方程的基础。Kalman滤波与估计环节,它是以模型输出量和发动机输出量之间的偏差作为滤波方程的残差,对发动机稳态参数和部件特性的变化量进行滤波和估计,这些估计量将做为对稳态模型参数计算值的修正依据。模型修正环节(CEM),以Kalman滤波器估计的部件特性变化量及静态参数的最优估计值,对发动机稳态参数进行修正,修正后的值作为整个发动机自适应模型的输出。滤波与修正的算法如下。Kalman滤波方程是

$$\hat{\Delta \dot{X}} = A \cdot \hat{\Delta X} + B \cdot \Delta U + K \cdot (\Delta Y - \hat{\Delta Y}) \quad , \quad \hat{\Delta Y} = C \cdot \hat{\Delta X} + D \cdot \Delta U$$

其中 $\hat{\Delta X}$ 、 $\hat{\Delta Y}$ 为状态量和输出量的估计值, K 为滤波增益矩阵,除状态变量模型中所选取的状态变量和输出变量外,还将发动机部件特性的变化量增广为状态量或输出量与其它发动机参数一并估计,因为这些变化量是不能直接测量到的。CEM的修正方程是 $\Delta y = F \cdot \Delta u$,其中 Δu 是发动机变化量的估计值, F 是修正系数矩阵, Δy 是整个自适应模型的输出参数。文献[21]称,上述性能参数估计算法已经成熟,提请认真考虑用于下一代发动机控制和诊断系统中。目前Luppold自适应模型主要用于飞行/推进系统性能寻优控制和控制系统传感器故障诊断技术中。

3.4 其 他

发动机实时模型建模方法不只是上述几种,建模技术向着同时提高模型的快速性和精确性方向发展,在做法上,一是改进原有建模方法中的算法,二是改变模型的整个结构。作为机载实时模型,计算速度是主要矛盾,这时模型应在满足使用要求的精度的条件下尽可能简化,以减少计算量。下面介绍两种特殊的实时模型。(1)超实时模型。在推力矢量控制中,一个帧周期中的计算量大大增加,对模型的实时性提出了更高的要求,发动机采用了更简化的数学模型,稳态模型以表格数据形式存储在计算机中,动态特性用油门速率限制器及低通滤波器来近似描述,构成所谓超实时模型,该模型还应考虑由推力矢量引起的轴向推力损失。(2)发动机喘振模型。80年代中后期以来,发动机喘振模型有了很大发展^[22-24],主要用于发动机防喘控制系统的数字仿真,以研究并设计防喘控制系统。发动机含喘振的动态模型的主要特点是需要压气机进喘后的特性,在建模中必须考虑发动机各部件间容腔的容积动力学,考虑容腔中气体质量及能量的积累与释放,这是引起喘振不可缺少的因素。喘振模型不仅能模拟喘振工况,也能模拟非喘振工况,能模拟发动机在各种诱喘条件下进喘退喘过程中发动机各状态参数的动态响应,而发动机含喘振的实时模型则是基于通常的发动机部件级实时模型,以及从非实时发动机喘振模型所获得的发动机喘振响应曲线或发动机喘振试验曲线而构成的一种实时模型^[25],它可用于发动机防喘控制系统的半物理仿真试验。

近年来由于人工智能和神经网络等技术的发展,为发动机实时建模提供了新的手段。采用人工智能或神经网络的非线性算法,可提高模型自校正及自适应的实时性,从而保证实时模型较高的精度,这对发动机控制系统解析冗余技术研究有特别重要意义。

结束语 发动机实时模型的发展一直是在简化程度与精度要求之间作适当的折衷。将先进的控制算法用发动机控制及控制系统故障诊断,对实时模型精度的要求很高,过于简化的模

型不能满足精度要求,而自适应模型能够提高模型精度,同时减少了计算时间。自适应模型中的稳态模型可大大简化,其精度的损失可通过自适应校正来补偿。自适应校正采用了 Kalman 最优估计等递推算法,计算量小,有效地解决了速度与精度的矛盾。采用最优估计的方法还可估计出发动机不能直接测得的参数,这对现代控制算法在发动机控制系统中的应用是有益的。自适应模型是很有发展前途的实时模型,它将成为今后发动机建模技术的重要方向,而自适应与智能化相结合的建模方法,有可能成为建模技术一个新的研究方向。

参 考 文 献

- 1 Szuch J R. Advancements in Real- Time Engine Simulation Technology. NA SA TM - 82825, 1980
- 2 French M W. Development of a Compact Real- Time Turbofan Engine Dynamic Simulation. SA E 821401
- 3 Szuch J R, Seldner K. Real- Time Simulation of F100- PW - 100 Turbofan Engine Using the Hybrid Computer. NA SA TM - X- 3261, 1975
- 4 管彦深. 双转子加力涡喷发动机数学模型研制报告. 1987
- 5 刘尚明, 王雪瑜, 朱行健. 双轴涡喷发动机的实时模拟. 航空动力学报, 1991, 6(3)
- 6 赵子元, 姚华, 李维业. 发动机简化数学模型及数字仿真研究. 航空动力学报, 1993, 8(2)
- 7 Ballin M G. A High Fidelity Real- Time Simulation of a Small Turbo shaft Engine. NA SA TM - 100991
- 8 邹介棠. 燃气轮机性能数字仿真中的 Newton- Raphson 法的改进. 上海交通大学学报, 1990, 24(3)
- 9 辛子龄. 涡扇发动机线性矩阵模型的形成. 中国航空科技文献, HJB- 860372
- 10 Sain M K, Peozkowski J L, Melsa J L. A lternative for L inear M ultivariable Control. National Engineering Consortium, NC, 1978
- 11 Mervill W. Identification of M ultivariable High Performance Turbofan Engine Dynamic from Closed Loop Data. IFAC Identification and System Parameter Estimation Conference, 1982
- 12 樊思齐, 荣向军, 李树人, 辛晓文. 利用飞行试验数据对发动机参数估计的研究. 航空动力学报, 1993, 8(2)
- 13 姚俊京. 航空发动机模型参数的辨识研究. [学位论文]. 南京航空航天大学, 1991
- 14 Crow M L, Ilie M. Parallel Algorithm for Large Scale Power System Dynamic Simulation. 1987
- 15 曾庆福, 张燕东, 管彦深. 并行处理双转子发动机实时仿真. 航空动力学报, 1993, 8(4)
- 16 Harold B, Vizzini R W. Analytical Redundancy Technology for Engine Reliability Improvement. SA E 861725
- 17 兰春贤, 孙健国. 基于部件跟踪滤波器的解析冗余度技术. 航空动力学报, 1994, 9(3)
- 18 孙健国, 兰春贤. 发动机部件跟踪滤波器的研究. 中国航空学会第三届动力年会, CA SS 93- P- 085
- 19 Stamatidis A, Mathioudakis K, Papailioudis K D. Adaptive Simulation of Gas Turbine Performance. ASME Transaction, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1990, 112
- 20 张燕东, 程炳洵. 航空发动机自跟踪模型. CSAA 93- P127
- 21 Luppold R D, Roman J R, Gallops G W, Kerr L J. Estimating In- Flight Engine Performance Variations Using Kalman Filter Concepts. AIAA 89- 2584
- 22 Chung K, Leany K R, Collins T P. A Turbine Engine Aerodynamic Model for In- Stall Transient Simulation. AIAA 85- 1429
- 23 孙健国, 胡世民, 姜彩红, 孙万峰. 双转子涡轮发动机脉冲切油防喘控制研究. 航空学报, 1993, 14(1)
- 24 胡世民, 孙健国, 姜彩红, 王宝辉. 双转子发动机含喘振的动态模型. 航空学报, 1991, 12(2)
- 25 杨蔚华, 孙健国, 胡世民. A Real- Time Dynamic Model for Dual Spool Turbo- Jet Engine with Post- Surge Capability. Measuring Measurement & Control, C, 1996, 54(2)