

航空发动机启动过程建模方法研究

刘同胜 刘建勋

(空军第一航空学院 河南·信阳 464000)

中图分类号:G642

文献标识码:A

文章编号:1672-7894(2011)10-086-03

摘要 笔者针对启动建模和启动特性计算问题,简要评述了现有的几种较为典型的启动建模仿真方法,包括基于简单三段积分法的建模方法、基于稳态共同工作线的建模方法和基于部件匹配技术的建模方法,并对它们进行了对比,指出了各自的优缺点和适用范围,最后给出了一种新的基于辨识技术的建模方法。

关键词 航空发动机 涡扇 启动过程 建模 数值仿真

Studying the Method of Engine Start Process Modeling //
Liu Tongsheng, Liu Jianxun

Abstract For the subject of start modeling and characteristics calculation, several typical simulation methods currently developed is reviewed in brief, including three phases respective integral method, steady general working line method, components matching technique and the modeling methods based on system identification techniques. The trait and applying occasion of each method are given.

Key words aero-engine; turbofan; start procedure; modeling; numerical simulation

Author's address First Air Force Aviation University, 464000, Xinyang, He'nan, China

1 引言

启动过程是发动机能够顺利进入正常工作的前提,启动性能的好坏是衡量航空发动机综合性能的一项重要指标。在过去的几十年,国内外关于航空发动机非线性动力学模型的研究已经取得了很大的进展,但是对于航空发动机慢车转速以下的启动过程,曾有很长一段时期都没有受到足够重视。上世纪80年代以来,随着高性能战斗机的发展和对其快速出动能力要求的不断提高,以及仿真技术的进步,人们对航空发动机启动性能模拟的考虑越来越多,研究也越来越频繁,有些研究成果对于推动发动机启动过程建模技术的发展具有重要意义。总结国内外已有的研究工作可以发现,对启动过程建模方法的研究主要集中于4种方法,可以归为两大类:基于气动热力学的建模方法和基于辨识技术的建模方法^[1-10]。本文将详细分析这两类方法,并指出它们的优缺点。

2 基于气动热力学的启动建模

2.1 简单三段积分法

这种方法建立在经验基础上,近似假定压气机所需扭矩和涡轮提供的扭矩与高压转子转速的 m 次方(m 取2或3)呈正比或线性关系,是一种最简单的启动过程建模方法,也是工程上比较常用的方法^[12]。其基本思想为:

(1)启动机提供的扭矩与转速近似呈线性关系,即:

$$T_{qs0} = T_{qs0} - b n_H$$

式中: T_{qs0} 为启动机的初始扭矩值; b 为常数,它和启动机的类型有关。

(2)忽略启动过程中传动附件和克服摩擦所需的阻力矩,并将带动压气机旋转所需要的扭矩考虑为与转速的平方成正比,即:

$$T_{qr} = C \cdot n_H^2$$

(3)将涡轮提供的扭矩简单地考虑为与转速呈线性关系,即:

$$T_{qr} = \frac{C \cdot n_H^2}{n_r - n_1} (n_H - n_1)$$

式中: n_r 为当前供油量条件下涡轮与压气机的功率平衡转速。为了计算方便,通常根据启动过程第二、三阶段供油规律的不同,对 n_r 进行分段取值。

(4)根据启动过程的功率(或扭矩)平衡方程,采用三段积分法仿真出高压转子转速的变化规律和启动时间。

(5)对低压转子转速和涡轮后燃气温度,分别建立相应的简化模型进行仿真计算。比如影响涡轮后燃气温度的主要因素有燃烧室油气比特性、高压转子转速上升的快慢等,通常将它们简化考虑为惯性环节或比例环节。

这种方法能够用来分析计算启动过程中的高压转子转速和涡轮后燃气温度等参数的变化规律,优点是实现起来比较简单,对不同的发动机具有一定的通用性,仿真结果可以为启动过程分析和指导启动试验提供一定的参考。但是,这种方法有明显的缺点,例如没有考虑外界大气条件对启动过程剩余功率的影响;无法对发动机各部件之间的气动热力参数建立明确的定量关系;无法仿真出压气机喘振裕度等信息;只能用来对启动过程做初步的分析,无法对发动机启动过程中各部件之间的气动热力参数建立精确的定量关系。

2.2 基于稳态共同工作线的建模方法

这种方法是以发动机高压转子在低转速下的部件特性关系为依据建立的一种启动过程仿真模型^[3,4],它相当于在高压压气机的特性图中添加了一条辅助线,作为启动过程的稳态共同工作线,在此基础上迭代求解出实际的启动过程过渡态的共同工作线。其建模和仿真的思想如下:

(1)高压压气机

在发动机的高转速区域选取一个参考工作点,将高压压气机的特性参数分别表示为转速的函数:

$$\begin{aligned} \frac{W_{acr}}{(W_{acr})_R} &= K_{\varphi} \frac{n_{Hacr}}{(c n_{Hacr})_R} \\ \frac{l_c / \sqrt{T_2^*}}{(l_c / \sqrt{T_2^*})_R} &= K_{\psi} \frac{n_{Hacr}^2}{(n_{Hacr}^2)_R}, \\ \frac{\eta_c}{(\eta_c)_R} &= K_{\eta c} \frac{n_{Hacr}}{(n_{Hacr})_R}, \end{aligned}$$

式中 K_{φ} 、 K_{ψ} 和 $K_{\eta c}$ 为经验系数,这三个系数的确定依赖于高压压气机稳态特性的试验数据;下标 R 代表参考稳

态工作点。

增压比 π_c 、 P_c 功率和扭矩 T_{qc} 等参数也可以由上面三个关系式求解得到。在启动过程中, 发动机并不是工作在稳定状态, 因此由上面公式确定的高压压气机特性参数只是作为启动过程仿真时的初猜值。

(2) 燃烧室

燃烧室的主要性能参数是燃烧效率和燃烧室总压损失。其中燃烧室总压损失用总压损失系数 σ_b 来代替, 并考虑为常数。燃烧效率是燃烧室的空气负荷参数 Ω 和油气比 f 的函数:

$$\eta_b = F\left(\frac{\Omega}{\Omega}, f\right), \Omega = \frac{m}{\rho^{1.8} V_b e^{T/540}}$$

式中 m 、 ρ 和 T 分别为燃烧室进口的空气流量、压力和温度; V_b 为燃烧室的体积。燃烧效率随空气负荷参数和油气比变化的函数关系可分解为:

$$\eta_b = K\eta_b(\Omega) \cdot \eta_{br} - \Delta\eta_b(f)$$

式中 η_{br} 是已知参考点的燃烧效率; $K\eta_b$ 和 $\Delta\eta_b$ 可以由试验数据总结得出。

(3) 高压涡轮

根据启动过程中发动机工作的特点, 高压涡轮落压比 π_T 与高压压气机增压比 π_c 之间存在如下比例关系:

$$\frac{\pi_T}{(\pi_T)_R} = K_R \frac{\pi_c}{(\pi_c)_R}$$

$$\text{或} \quad \frac{\pi_T - 1}{(\pi_T)_R - 1} = K_R \frac{\pi_c - 1}{(\pi_c)_R - 1}$$

式中 K_R 是压气机设计压比的函数。

换算流量 W_{gcr} 、效率 η_T 与落压比 π_T 之间的关系分别表示为:

$$\frac{W_{gcr}}{(W_{gcr})_R} = f\left(\frac{\pi_T - 1}{(\pi_T)_R - 1}\right),$$

$$\frac{\eta_T}{(\eta_T)_R} = K_{\eta T} \frac{\pi_T - 1}{(\pi_T)_R - 1}$$

(4) 考虑低压转子影响的修正

当考虑低压转子对发动机启动的影响时, 对高压压气机进口的空气温度和压力按如下表达式进行修正:

$$\frac{\delta_m - 1}{\delta_R} = K_\delta \frac{n_{Hcor}}{(n_{Hcor})_R}, \quad \frac{\theta_m - 1}{\theta_R} = K_\theta \frac{n_{Hcor}}{(n_{Hcor})_R}$$

式中 δ_m 和 θ_m 为无因次化的高压压气机进口压力和温度, δ_R 和 θ_R 为参考点上无因次化的进口压力和温度, K_δ 和 K_θ 为经验常数。

(5) 启动过程动态匹配计算

启动过程的动态匹配计算主要是根据高压涡轮和高压压气机的流量匹配原理, 通过迭代求解得出。具体实现步骤为: ①选择参考点, 已知参考点的换算流量、换算转速、压气机功和效率; ②给定高压转子换算转速, 初步计算该转速下压气机的换算流量、压气机功和效率等参数; ③计算压气机的增压比, 然后根据燃烧室供油规律计算油气比, 从而计算出燃烧效率。同时, 根据压气机的增压比计算涡轮的落压比, 由涡轮特性图得到涡轮进口换算流量和效率; ④根据燃烧效率计算涡轮前燃气温度, 并根据燃烧室总压损失计算涡轮进口气流总压, 又由于涡轮和压气机的流量是匹配的, 因此从另一途径也可以得到涡轮进口的换算流量; ⑤判断由两种途径得到的涡轮进口换算流量是否相等, 如果不相等则返回修正压气机的效率和换算流量; ⑥通过迭代运算,

最终确定出发动机启动过程中的瞬态共同工作点, 从而计算出当前转速下的剩余功率, 由此可以得到下一时刻的转速值; ⑦按上述步骤不断递推, 即可得到启动过程过渡态的共同工作线, 计算出较为详细的启动性能。

2.3 基于部件匹配技术的建模方法

这种仿真模型与基于稳态共同工作线仿真模型的最大区别在于, 它是一种基于低转速部件特性的模型, 利用常规的部件匹配原理来确定发动机启动过程的共同工作线, 其具体实现思想与发动机加速过程的仿真基本上是相同的。过去这种方法只能应用于发动机慢车转速以上的性能计算中, 近年来气动热力学的进一步发展使其应用于启动过程的研究成为可能^[5-8]。

为了采用部件匹配技术对启动过程进行仿真, 必须从零转速附近到慢车转速的风扇、高压压气机、高压涡轮、低压涡轮的特性, 还需要燃烧室的特性以及一些经验数据。发动机的每个部件都要有各自的计算模块, 各模块之间按照机械动态平衡、气动热力动态平衡进行联系, 各部件的计算模块必须集成在一启, 进行迭代运算。该方法从原理上容易理解, 但实现起来却是非常复杂的。比如低转速下发动机部件特性的获取是一个难题, 对于启动性能计算来说, 部件特性(尤其是燃烧室特性和压气机、涡轮特性)对于发动机工作的影响是非常大的, 为了得到比较准确的结果, 这方面需要解决的问题很多。

由于在建模时所考虑的因素较多, 因此这种方法理论上能够得到比较全面且准确的仿真结果。但针对具体的某一台或某一种型号的航空发动机, 该方法在实际应用时存在很大困难, 并且有些困难几乎是无法克服的。比如启动过程的热损失问题、燃烧室的燃烧效率问题等。因此, 采用这种方法进行启动过程仿真时, 同样必须做很多简化, 而有些简化势必导致仿真结果的误差增大。

3 基于辨识技术的启动建模

为了克服基于气动热力学方法建立启动模型时存在的困难, 另一种途径是采用辨识技术。近几年, 机器学习理论在启动过程建模中的应用取得了一些初步的成果。姜涛、李应红等(2002)^[9]率先尝试用 RBF 神经网络对启动过程进行了辨识建模研究, 虽然所进行的研究工作还不够细致和深入, 但却为启动过程建模提供了一个新的思路。刘建勋、李应红等(2005)^[10]较深入地研究了发动机启动过程的辨识建模方法及其在启动性能估算中的应用问题, 文中给出了启动模型的通用状态空间描述形式, 在模型的描述中综合考虑了大气条件、供油规律、启动机特性及负载特性等因素的影响, 并采用低、高压转子转速和涡轮后燃气温度作为状态变量, 将启动模型表示为如下形式:

$$\begin{cases} n_l(k+1) = f_1(v(k), u(k)) \\ n_H(k+1) = f_2(v(k), u(k)) \\ T_3^*(k+1) = f_3(v(k), u(k)) \end{cases}$$

式中 $v = [n_l, n_H, T_3^*]^T$ 为状态向量; $u = [T_0, P_0, N_{gr}, m_f]^T$ 为输入向量; n_l, n_H 分别为低、高压转子转速; T_3^* 为涡轮后燃气温度; T_0, P_0 分别为大气温度和大气压力; T_{gr}, T_{gr} 分别为启动机扭矩和负载阻力矩; m_f 为燃烧室供油量。

以上述描述形式为基础, 结合启动试验数据, 采用人工智能中的神经网络或支持向量机技术可以较为有效地进行模型辨识。而根据辨识得到的启动模型, 即可进行启动性能估算, 方法为已知某些大气条件下涡扇发动机启动过程中

的起动机扭矩、负载阻力矩和主燃烧室供油量特性,再给定高、低压转子转速和涡轮后燃气温度的初始值,通过采用模型逐次递推的方式,估算出这些大气条件下发动机起动过程参数随时间的变化情况。估算过程可以描述为输入大气条件 T_0, p_0 , 根据当前时刻的 $m_f(k), T_{qc}(k), T_{qs}(k)$ 以及 $n_L(k), n_H(k)$ 和 $T_3^*(k)(k=1,2,3,\dots)$, 由辨识模型计算得到下一时刻的输出 $n_L(k+1), n_H(k+1)$ 和 $T_3^*(k+1)$, 将这些输出与 $m_f(k+1), n_{qm}(k+1)$ 和 $T_{qs}(k+1)$ 一起再次作为模型的输入, 不断迭代求解后一时刻的输出, 依此不断进行下去, 就得到了发动机起动性能的估算结果。

基于辨识技术的起动过程仿真方法的优点是仅需利用少量试验数据, 就可以解决各种不同大气条件、不同供油规律或起动机功率条件下发动机起动性能估算问题, 且具有较高的准确性, 不需要过多地依赖经验和部件试验数据, 易于实际应用。但是, 它的缺点也是比较明显的: 在缺少发动机整机起动试验数据的情况下, 无法得到状态空间模型, 因而也就不能在设计阶段进行起动过程的数值仿真或估算发动机起动性能, 只能用于发动机使用过程中的起动性能计算。

4 结论

由于航空发动机起动过程的高度非线性和复杂性, 国内外已有的起动过程仿真模型均不同程度地存在一定的缺点。因此, 在具体解决某一实际问题时, 应根据需要选择不同的起动过程建模方法。同时, 针对具体问题, 还需要将上述几种方法进行综合应用。比如采用后三种方法时, 通常会遇到很多无法解决的困难, 且对于某一台发动机所采用的

~~~~~  
(上接第 80 页)

束缚, 但他又继承了“感于哀乐, 缘事而发”的精神。

曹操生活在东汉末年, 时局混乱, 作为一名有着雄心壮志的男子, 他南征北战, 早已习惯了东奔西走的生活, 而这种生活也带给他对世事更为清楚的思考。一统中原是他最大的报复, 他的一生也都和这个理想不可分割, 如此壮志也在他的各个时期的诗词中得到极致的展现。以他的《观沧海》为例:

东临碣石, 以观沧海。  
水何澹澹, 山岛竦峙。  
树木丛生, 百草丰茂。  
秋风萧瑟, 洪波涌起。  
日月之行, 若出其中;  
星汉灿烂, 若出其里。  
幸甚至哉, 歌以咏志。

该诗作于建安十二年, 时值曹操打败袁绍班师回朝时写成的一首佳作。该诗一开场就给读者一种宏大的气场, 让人感受到作者当时一种豪迈的心境。“秋风萧瑟”一句点名时间, 即作者写诗时正值秋季, 然而该诗并未延续传统的诗风, 撇开其衰落破败的景象写道“树木丛生, 百草丰茂”, 不仅如实地反映了自然景观更是曹操此时心境的真实写照: 战斗获得胜利, 距离自己统一中原的报复又更进一步。诗人临碣石观沧海, 心中充满对统一天下的憧憬, 胸中涌起以天下为己任的情怀像洪波一样起伏激荡, 此时不仅是内心的激动, 更是对之后道路的憧憬和自信。因此, 该诗丝毫没有感伤的情调, 有的只是奋进的精神。在诗人看来, 虽然时值秋季这样一个惹人愁绪的季节, 但是所有的事物又都别有一番景致, 重要的不是环境、季节或者天气如何, 重要的是

仿真参数有时不能推广应用于同一类型的其他发动机; 而采用第一种方法时, 则无法考虑大气条件的影响, 且结果准确度不高。为此, 需要对不同的方法进行折中, 提出新的更为实用的起动过程建模方法, 以使其更适合于工程应用。

#### 参考文献

- [1] 路建明. 涡扇发动机起动过程数学模型、特性及控制研究[D]. 西安: 空军工程大学硕士学位论文, 2005.
- [2] 雷勇, 柳共青, 于德会. 飞行模拟训练器中发动机起动过程模型的建立和仿真[J]. 航空计算技术, 2000, 30(2).
- [3] Agrawal R K, Yunis M.A Generalized Mathematical Model to Estimate Gas Turbine Starting Characteristics[J]. Journal of Engineering of Power, January, 1982: 104.
- [4] 屠秋野, 唐狄毅. 涡扇发动机起动模型及起动控制规律的研究[J]. 推进技术, 1999, 20(2).
- [5] Chappell M A, McLaughlin P W. An Approach to Modeling Continuous Turbine Engine Operation from Start-up to Shutdown[R]. AIAA, 91-2373, 1991.
- [6] 王占学, 乔谓阳, 李文兰. 基于部件匹配技术的涡扇发动机起动过程数值模拟[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4).
- [7] 黄开明, 周剑波, 刘杰. 涡轴发动机起动过程的一种气动热力学实时模型[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5).
- [8] 黄向华, 郑绪生. 基于逐级叠加法的航空发动机起动模型研究[J]. 航空学报, 2005, 26(5).
- [9] 姜涛, 李应红. 基于动态 RBF 网络的发动机起动过程模型辨识[J]. 航空动力学报, 2002, 17(3).
- [10] 刘建勋. 涡扇发动机起动过程的学习机模型和动态控制研究[D]. 西安: 空军工程大学博士学位论文, 2005.
- [11] 李应红, 刘建勋. 基于支持向量机的涡扇发动机起动性能估算研究[J]. 航空学报, 2005, 26(1).

编辑 杨呈祥

一个人的心境。一份乐观向上、自信满满的心境比任何外在条件都重要得多, 这才是生活的关键所在。

#### 3 异曲同工之妙

欣赏二人的诗作, 我们可以发现两人都善于运用自然景物来抒发自己的情怀, 将自己的一腔热血和豪情壮志隐含于这些看似平常的景物之中。天气的阴晴变化不再是普通的自然景观, 百草的衰败也有着另一番景致, 它们都被赋予了更深层次的意义。

作为一名纯粹的文学家, 朗费罗的诗更多地体现了对人类的一种终极关怀, 让所有人都能找到前进的动力。诗人善用各种形象的比喻将自己的乐观态度寓意其中, 从而冷静地审视、理解现实的严峻, 文辞利落且格调清新。

与之相比, 曹操的诗显得更加恢宏有力, 直抒胸臆, 将自己的一腔豪迈之情, 拼搏与不服输的精神用最简练、直接的语言表达出来, 让人顿时充满对生活的勇气与奋发向上的动力。诗文辞简, 慷慨悲凉而沉郁雄健。

因此, 虽然风格迥异, 两人却都把对生命炙热、浓烈的爱蕴藏于不同的诗风之中, 让读者体会到犹如燃烧的焰火一般对生活的积极态度。

#### 参考文献

- [1] Lay Parini, Brett C. Millier. The Columbia History of American poetry[M]. Cambridge: Columbia University Press, 2004.
- [2] 杨胜兰. 语言和思想的共鸣——朗费罗诗歌《潮起潮落》之评析[J]. 新西部: 下半月, 2008(7).
- [3] 巩平. 曹操《步出夏门行·观沧海》赏析[J]. 北京宣武红旗业余大学学报, 2003(2).

编辑 孙静