

基于试车数据的航空发动机起动过程建模

杨帆, 樊丁, 彭凯, 王旺元

(西北工业大学动力与能源学院, 陕西西安, 710072)

摘要 根据某型航空涡轴发动机起动过程工作原理, 结合该型发动机试车数据, 采用转子动力学特性与数值模拟相融合的方法, 创新地提出了一种估算起动过程稳态燃油流量的算法, 基于该算法提出并建立了航空涡轴发动机起动过程数学模型, 编制了相应的计算程序, 并与该型发动机的试车数据进行了对比分析。结果表明, 所建立的该型航空涡轴发动机起动过程数学模型所给出的数值计算结果与试车数据具有较好的一致性, 该航空涡轴发动机起动过程数学建模方法具有一定的通用性。

关键词 航空发动机; 起动; 试车数据; 稳态燃油流量

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.001

中图分类号 V263.4⁺5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0001-04

Modeling of An Aero-engine in Starting Process Based on the Test Data

YANG Fan, FAN Ding, PENG Kai, WANG Wang-yuan

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

Abstract: According to the working principle of a certain aviation turboshaft engine starting process, a novel algorithm is proposed to estimate the 'steady-state fuel flow' of starting process by combining with test data of this engine and merging rotor dynamics and numerical simulation. Based on this algorithm, a new method is presented to establish a mathematical model of turboshaft engine starting process, and the corresponding computer program is prepared and the simulation results are compared with the engine test data. The results show that the numerical results given by the created mathematical model of starting process are of good agreement with test data. The proposed mathematical modeling method of the turboshaft engine starting process is of some versatility.

Key words: aero-engine; starting process; test data; steady-state fuel flow

航空发动机起动是一个非常复杂的非平衡、非线性的动态气动热力学过程, 涉及到起动机、供油系统、点火系统和发动机各个部件的协同工作, 需要考虑诸多因素, 且对相关因素的影响很敏感, 因此, 较难建立起动过程模型^[1-4]。20世纪60~70年代, 美国NASA开始了航空发动机数学模型的研究, 并在慢车以上状态的发动机动态过程数值仿真取得了实质性进展, 开发了动态通用发动机性能计算程序

DYGENG, 能以较高精度模拟多型发动机稳态性能。

航空发动机起动过程建模基本方法是通过慢车以下状态部件特性的外插方法, 采用常规的部件模型进行匹配仿真。国内相关研究主要依靠试验技术, 数值模拟方法也是采用通用部件特性外延方法的模型。为克服基于通用模型的计算误差, 本文采用了发动机转子动力学特性与数值模拟融合的方法。

收稿日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50906071)

作者简介: 杨帆(1974—), 男, 重庆人, 博士生, 主要从事航空发动机控制研究。

E-mail: bobopro@163.com

法,对某型航空涡轴发动机起动过程进行数学建模^[5-8]。

1 发动机起动过程数学模型

航空涡轴发动机通常有2种起动模式:动力涡轮滞止不动;动力涡轮自由转动。本文仅研究前一种情况。

由于转子在低速时很难通过试验获得压气机、涡轮等部件的部件级特性,而通过 β 线外推法、指数平衡外推法等估计方法获得的特性曲线缺乏准确性。发动机在低转速时,还存在燃烧效率低、热交换过程复杂等特点,所以部件法难以建立高精度的起动过程数学模型。

从另一个角度来看,发动机转子的基本动力学模型为:

$$\frac{\pi I d n_g}{30 dt} = \Delta M \quad (1)$$

式中: I 、 ΔM 分别为发动机转子的转动惯量和剩余力矩。

在发动机起动过程中,起动电机和燃烧室燃烧产生的燃气对发动机做功,因此有:

$$\Delta M = M_{\text{mtr}} + M_{w_f} \quad (2)$$

式中: M_{mtr} 为起动电机对发动机提供的扭矩; M_{w_f} 为燃烧室燃气产生的扭矩。通过试车数据获得 M_{mtr} 和 M_{w_f} 的特性,即可建立发动机转子的起动过程数学模型。

1.1 起动电机扭矩特性

在发动机起动过程中, M_{mtr} 随发动机转速 n_{g_x} 的变化规律可近似为线性关系,即:

$$M_{\text{mtr}} = M_{\text{mtr},0} + K n_g \quad (3)$$

式中: $M_{\text{mtr},0}$ 为转速 n_g 为0时的起动电机扭矩; K 为与起动电机有关的常数。

发动机冷转起动时,不点火、不供油,仅由起动电机带转。此时,发动机燃烧室不工作,压气机所消耗的功由起动电机提供,因此,冷转起动过程的发动机转子动力学方程为:

$$\frac{\pi I d n_g}{30 dt} = M_{\text{mtr}} - M_{\text{cmp}} \quad (4)$$

式中 M_{cmp} 为发动机负载扭矩,即压气机扭矩。

发动机冷转起动结束后,起动电机停止工作,转入停车状态,此时,发动机涡轮做功能力很低,可近似认为涡轮功为0,发动机转子的动力学方程为:

$$\frac{\pi I d n_g}{30 dt} = -M_{\text{cmp}} \quad (5)$$

式(5)表明,发动机冷转停车过程中,没有功率输入,发动机转子仅仅是消耗功率,最终转子转速降

为0。因此,根据试车过程的冷转起动数据和停车过程数据,利用式(4~5),即可获得发动机起动电机的扭矩特性。

1.2 燃气扭矩特性

M_{w_f} 的产生是由于供给发动机的燃油多于发动机在该转速下稳定运行时所需的燃油,但慢车状态以下发动机不可能稳定工作,因此为了便于研究问题而引入“稳态参数”。

不同的起动供油控制规律将得到不同的起动过程燃气扭矩,同一转速时,不同控制规律对应的燃气扭矩不同,同一转速时的燃油流量 w_f 也各不相同。

由式(1~3)可知,当获得 M_{mtr} 后,利用发动机起动过程数据可求得起动过程燃气产生的扭矩^[9]。

以2组控制规律为例,设某一转速 n_{g_x} 时:控制率1在 n_{g_x} 时的燃油流量为 w_{f1} ,燃气产生的扭矩为 $M_{w_{f1}}$;控制率2在 n_{g_x} 时的燃油流量为 w_{f2} ,燃气产生的扭矩为 $M_{w_{f2}}$; $w_{f1} \neq w_{f2}$, $M_{w_{f1}} \neq M_{w_{f2}}$;令 n_{g_x} 时的稳态燃油流量为 w_{f0} ,稳态时燃气产生的扭矩 $M_{w_{f0}}$ 应为0,则:

$$\begin{aligned} \frac{w_{f1} - w_{f0}}{w_{f2} - w_{f0}} &= \frac{M_{w_{f1}}}{M_{w_{f2}}} \Rightarrow \\ w_{f0} &= \frac{w_{f1} M_{w_{f2}} - w_{f2} M_{w_{f1}}}{M_{w_{f2}} - M_{w_{f1}}} \end{aligned} \quad (6)$$

利用式(6),即可获得不同转速 n_{g_x} 时的稳态燃油流量特性。因此,发动机燃烧室燃油所产生的剩余力矩为:

$$M_{w_f} = K_{w_f} (w_f - w_{f0}) \quad (7)$$

式中: K_{w_f} 为发动机剩余力矩系数; w_f 为起动过程中实际燃油流量; w_{f0} 为发动机稳态燃油流量。

2 计算结果与分析

利用某型涡轴发动机试车数据,采用第1节的建模方法,建立该型发动机的起动过程模型。发动机冷转过程数据见图1。

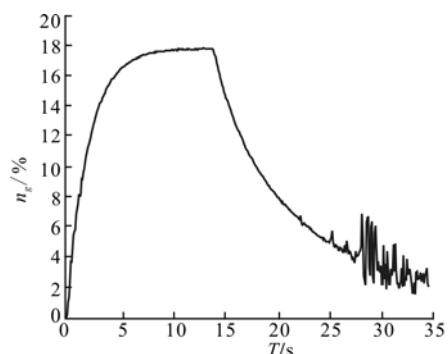


图1 发动机冷转起动过程

Fig. 1 The dry motoring of aero engine

采用式(5)求解冷转停车过程发动机转子特性, 见图 2 中虚线, 可见低转速时压气机扭矩与转速 n_g 基本呈线性关系, 随着转速 n_g 的增高, 扭矩呈二次方增加; 利用冷转起动过程数据, 采用式(4), 求解起动电机扭矩特性, 见图 2 中实线。

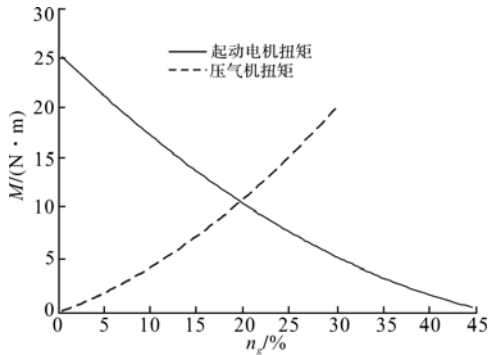


图 2 压气机扭矩特性和起动电机扭矩特性

Fig. 2 The moment characteristics of compressor and motor

现有 2 组不同供油规律的起动转速曲线, 见图 3, 对应的起动供油曲线, 见图 4。其中, 供油规律 1 为闭环 n_g 控制, 即 $\omega_f \rightarrow \dot{n}_g = \text{const}$; 供油规律 2 为开环油气比控制, 即 $\omega_f / p_2 = f(n_{g\text{-cor}})$ 。

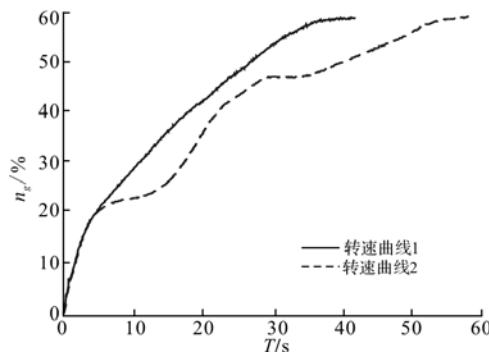


图 3 2 组起动转速曲线

Fig. 3 The rotating speed curve of two control programs

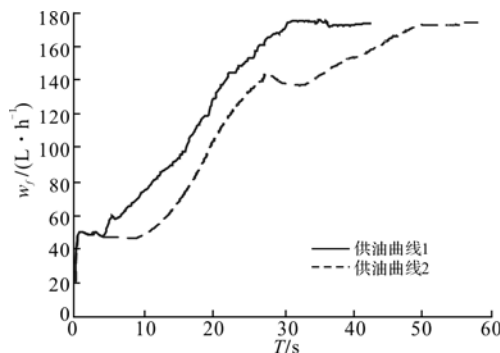
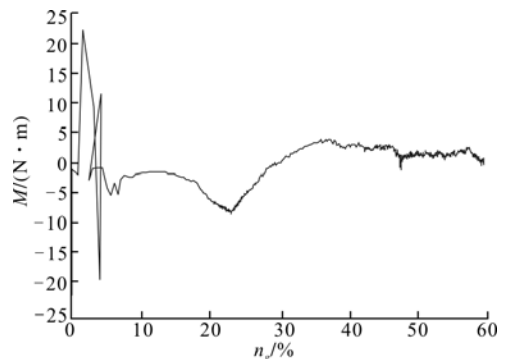


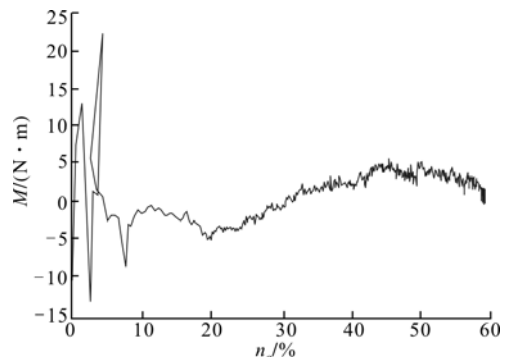
图 4 2 组起动供油曲线

Fig. 4 The fuel supply curve of two control programs

将起动电机扭矩特性带入 $\frac{\pi I d n_g}{30 dt} = \Delta M = M_{\text{mtr}} + M_{w_f}$, 即可求得燃气产生的扭矩 M_{w_f} , 见图 5。



(a) 供油规律1燃气扭矩特性



(b) 供油规律2燃气扭矩特性

图 5 两组起动供油规律燃气扭矩

Fig. 5 The gas moment characteristics of two control programs

该型发动机在 $n_g = 12.5\%$ 时点火, 当 $n_g = 42\%$ 时起动电机脱开, 故 $n_g < 12.5\%$ 的数据不予采信。由图可知, 2 组供油规律在 $n_g < 30\%$ 范围内, 燃气扭矩小于 0, 表明此时发动机涡轮输出功率小于压气机功率, 必须靠起动电机带转, 发动机才能加速, 当转速 $n_g = 42\%$ 后, 发动机燃气产生的扭矩完全可独立加速发动机转子。

采用图 5 求得的燃气扭矩随转速的变化规律, 及 2 组燃油流量随转速变化的试车供油曲线, 利用式(2~6), 可得到发动机稳态燃油流量, 见图 6。

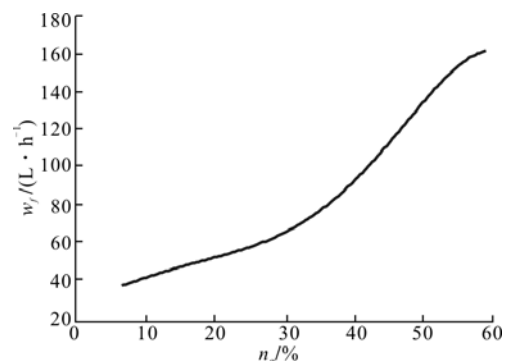


图 6 起动过程稳态燃油流量

Fig. 6 The steady fuel flow rate of starting process

利用求得的起动电机扭矩特性和燃气扭矩特性,采用发动机试车供油线对上述两组试车过程进行了对比仿真,见图7,图中横轴均为时间(s),纵轴均为 n_g 转速(%),其中,模型误差 $\leq 2\%$,在2.0 GHz主频的计算机上一个计算周期耗时 $\leq 40 \mu\text{s}$ 。

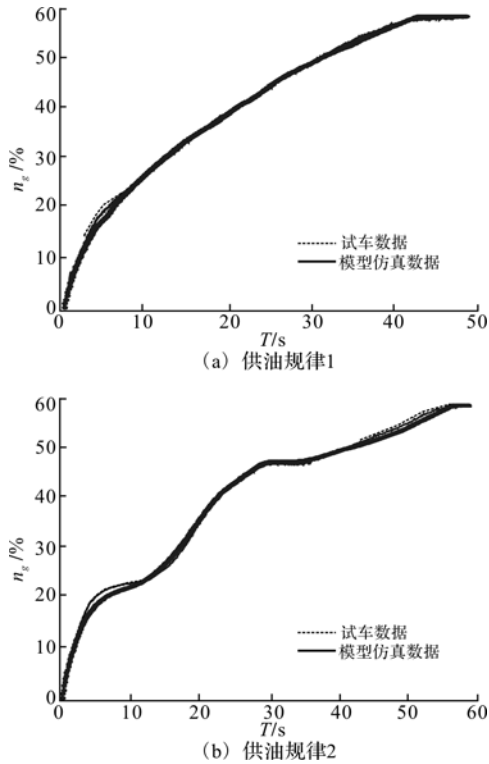


图7 起动过程仿真

Fig. 7 The simulation of starting process

3 结语

本文研究了航空涡轴发动机起动过程中发动机转子的力学特性,提出了一种新的利用试车数据建立航空涡轴发动机起动过程数学模型的方法,创新地提出了估算“起动过程稳态点”,基于此导出航空涡轴发动机起动过程数学建模新方法。仿真结果表明,利用本文方法构建的航空涡轴发动机起动过程非线性数学模型的误差 $\leq 2\%$,在2.0 GHz主频的计算机一个计算周期耗时 $\leq 40 \mu\text{s}$,达到了超实时的效果。综上所述,本文的航空涡轴发动机起动过程数学建模方法具有较大工程应用和理论价值。

参考文献(References):

- [1] Sexton W R. A method to control turbofan engine starting by varying compressor surge valve bleed[D]. Virginia: Virginia polytechnic institute and state university, 2001.
- [2] 江勇,周宗才,桑增产,等.发动机高原地面启动实验初步研究[J].推进技术,2003,24(6):547-549.

- JIANG Yong, ZHOU Zongcai, SANG Zengchan, et al. An engine-starting test on the highland ground[J]. Journal of propulsion technolgy, 2003, 24(6): 547-549. (in Chinese)
- [3] 刘建勋,王剑影,李应红,等.某型发动机起动模型的支持向量机辨识及应用[J].推进技术,2004,25(5):401-404.
- LIU Jianxun, WANG Jianying, LI Yinghong, et al. An identification model of aeroengine starting based on support vector machine and its application[J]. Journal of propulsion technology, 2004, 25(5): 401-404. (in Chinese)
- [4] 李凡玉,李军,江勇,等.改善发动机高原地面起动性能的实验研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(5):25-29.
- LI Fanyu, LI Jun, JIANG Yong, et al. Experimental investigation on improvement of engine-starting performance on plateau ground[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(5): 25-29. (in Chinese)
- [5] Marsilio R. A computational method for gas turbine engines[R]. AIAA 2005-1009.
- [6] French M W. Development of a compact real-time turbofan engine dynamic simulation[R]. SAE-821401, 1982.
- [7] 赵连春,杰克·马丁利.飞机发动机控制——设计、系统分析和健康监视[M].北京:航空工业出版社,2011.
- ZHAO Lianchun, Mattingly Jack D. Aircraft engine controls: design, system analysis, and health monitoring[M]. Beijing: Aviation industry press, 2011. (in Chinese)
- [8] 王曦,程茵.国外航空推进控制技术的发展[J].航空发动机,2009,35(3):4-6.
- WANG Xi, CHENG Yin. Development of thrust control technology for foreign aero engine [J]. Aero-engine, 2009, 35(3): 4-6. (in Chinese)
- [9] 纪仓圃.某型航空涡轴发动机控制系统设计与验证技术研究[D].西安:西北工业大学,2013.
- JI Cangdun. Research on control system design and verification for one turbo-shaft engine[D]. Xi'an: Northwestern polytechnical university, 2013. (in Chinese)

(编辑:徐敏)