

文章编号: 1000-8055(2007)08-1320-05

计算涡扇发动机风车起动特性的辨识模型

张东方, 李应红, 尉询楷
(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对高空风车条件下涡扇发动机起动性能估算问题, 提出了运用约简遗传规划算法进行模型结构自动选择的思路, 对基于约简遗传规划的风车起动模型进行了研究. 以某型涡扇发动机为例, 运用该算法对给定条件下该型发动机的风车起动过程进行了建模仿真, 得到了起动过程的估算结果. 将估算结果与试验数据对比, 验证了方法的正确性、可行性.

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 涡扇; 风车状态; 起动; 约简遗传规划

中图分类号: V233.1

文献标识码: A

Research on identification model of turbofan windmilling starting characteristics based on parsimonious genetic programming

ZHANG Dong-fang, LI Ying-hong, WEI Xun-kai

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to solve the problem of turbofan starting characteristics estimation under windmilling condition, an approach to automatic selection of model structure via Parsimonious Genetic Programming (PGP) was presented. The engine windmilling starting model based on PGP was also studied. The starting characteristics of a certain turbofan under windmilling condition were modeled and simulated by this method. It is proved to be correct and feasible if the estimation results are compared with the experimental data

Key words: aerospace propulsion system; aero-engine; turbofan; windmilling; start; parsimonious genetic programming (PGP)

航空发动机的风车状态是指发动机空中停车、燃烧室熄火或不工作时, 发动机转子在空气动力、转子惯性和阻力矩的共同作用下, 短时间稳定在某一转速的亚稳定状态. 航空发动机的风车起动是在风车状态下进行的, 建立发动机风车起动工况的合理模型是确定可靠点火点的关键所在. 然而, 由于风车工况是发动机存在强烈非线性的非设计工况, 长期以来该工况模型的建立都依赖于大量的先验知识. 近年来, 现代机器学习理论的发展为涡扇发动机风车起动非线性过程的建模分

析提供了一个新的途径.

1 发动机起动建模技术研究现状

为了更好地开展航空发动机起动控制规律的研究, 近年来, 国内外积极开展航空发动机起动特性的建模工作, 在发动机非线性辨识建模研究方面取得了一定的研究成果. 文献[1]在十组风车工况试验数据的基础上建立了涡喷发动机风车工况的神经网络模型, 并利用人们的先验知识对模型进行修正, 该模型取得了较好的效果, 但仍然存在

收稿日期: 2007-02-06; 修订日期: 2007-04-20

作者简介: 张东方(1979-), 男, 河南南阳人, 博士生, 研究方向为航空发动机建模与控制, 电子邮箱: zdf0918@yahoo.com.cn.

泛化能力不足的问题.文献[2]将RBF网络应用于航空发动机的起动特性建模,这种方法矢量化特征较好,但局部极值和中心节点的选择问题仍然没有解决.文献[3-4]将数据辨识技术成功应用于发动机起动特性建模,辨识方法不需要考虑复杂的物理、化学过程,仅依靠试验获得的输入输出数据,就可以获得一个能够表征复杂过程的模型,获得的模型也具有很好的推广性,非常适合复杂过程建模.文献[5]将遗传规划(GP)用于复杂过程的建模,但是经典的遗传规划产生的模型十分复杂,很难走向工程应用.为改善遗传算法,去除遗传算法可能产生的结构复杂又对误差减少率影响不大的项,提高遗传算法的收敛速度,得到简化、准确的线参数模型,结合正交最小二乘便于评价函数项贡献的特点,文献[6]给出了将正交最小二乘算法与遗传算法相结合的约简遗传规划(PGP)算法.该方法克服了一般辨识技术中结构选择和参数估计的困难,是一种新的模型结构自动选择方法.

本文研究了约简遗传规划算法^[6]在航空发动机风车起动性能估算中的应用问题,起动试验数据仿真结果验证了该方法的可行性.

2 约简遗传规划算法

2.1 适应度函数的选取

由于经典遗传算法经常产生十分复杂的模型,需要在模型的精度和复杂度上权衡;因此,约简遗传算法中采用一种具有惩罚项的适应度函数^[6]:

$$f_i = \frac{r_i}{1 + \exp(a_1(L_i - a_2))} \quad (1)$$

其中, f_i 是适应度值, r_i 是关联系数, L_i 是树的节点数, a_1 、 a_2 是惩罚函数的参数.采用公式(1)可以获得较为理想的模型,但实际应用中,获得的模型经常会过参数化,包含不必要的复杂项.该算法采用正交最小二乘方法(OLS)直接去除复杂和不必要的函数项.

2.2 PGP 算法描述

遗传规划是进化算法的一种,首先算法会产生一组个体形成初始种群,然后在每个迭代过程中,计算个体的适应度,根据适应度选择个体配对进行重组,实施直接复制,交叉,变异等遗传操作产生新个体,实施精英策略进行替换,最终产生新一代种群.约简遗传规划算法是正交最小二乘算

法与GP相结合的结果,其算法描述如下:

第一步,设置GP参数,产生初始种群;

第二步,对当前种群实施OLS简化策略,包括:①将种群个体分解成为子树,得到基本函数项;②根据OLS计算函数项错误下降率;③根据OLS域值,去除冗余函数项;

第三步,设置GP算法参数,随机产生初始种群;

第四步,计算适应度,采用轮盘赌选择重组配对个体,选择概率为 $P_i = \frac{f_i}{\sum f_i}$;

第五步,对选定的配对个体实施直接复制,交叉,变异三种操作.设定变异概率为 P_m ,交叉概率为 P_c ,则直接复制的概率为 $1 - P_m - P_c$.直接复制将选定个体直接保留到下一代,变异则在选定的树结构随机选定部位产生支树随机替换.交叉在选定两个父个体间进行,先随机确定交叉点并将各自的树结构分隔开,然后进行交换,从而产生两个新个体.常用的交叉方式一般有两种,一种是采用单点交叉,另外一种是采用两点交叉;

第六步,设定一定的代沟(Generation Gap),实施精英替换策略,最终生成新种群.例如设定代沟 $P_{gap} = 0.9$,则表示有90%的老个体将被新产生的优良个体替换,只有10%的优良老个体被保留到新种群,这样有利于保持种群的多样性;

第七步,判断是否满足停机准则,若满足转到第五步,否则转到第二步;

第八步,输出最优模型集,结束.

3 基于约简遗传规划的某型涡扇发动机风车起动特性辨识模型

以某型涡扇发动机为例,以该发动机在5 km,8 km和10 km三个高度,每个高度下分别以飞行表速550(km/h),600(km/h),650(km/h)进行空中风车起动试验所得的试验数据为训练对象,运用约简遗传规划算法对其进行建模仿真,并采用飞行高度分别为5 km,8 km和10 km时,以飞行表速1 000(km/h)进行空中风车起动所得的试验数据进行验证,为保证验证所用的工作点参数也适用于所建立的模型,训练和验证所用的参数均为不补氧、不切油的条件下成功起动时的试验数据.

建立模型首先要确定发动机起动模型的输入状态变量和输出变量.为了使估算结果与试验数据有可比性,本文将发动机风车特性模型的输入

量选为飞行条件 (H, Ma) ,输出量选为发动机的风车状态下发动机进口总温和高、低压转子转速 (t_{1t}, n_1, n_2) ;将发动机风车性能模型的输入量选为 $(H, t_{1t}, n_1, n_2, Ma)$,输出量选为风车起动的时间和过程中低压涡轮后燃气的最高温度值 $(t,$

$t_{56t})$,上述模型的输入输出参数与试验过程中所采集到的参数相同.

确定了输入、输出和影响因素之后 ,就可以分别建立发动机风车特性模型和起动性能模型如下:

$$\begin{cases} n_1(k+1) = f_1(x_1(k)) \\ n_2(k+1) = f_2(x_1(k)) \\ t_{1t}(k+1) = f_3(x_1(k)) \end{cases}, x_1(k) = \begin{bmatrix} H(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & H(k-n_d-n_b) \\ Ma(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & Ma(k-n_d-n_b) \\ y(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & y(k-n_d-n_a) \\ e(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & e(k-n_d-n_e) \\ t_0 & & & p_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} t(k+1) = f_4(x_2(k)) \\ t_{56t}(k+1) = f_5(x_2(k)) \end{cases}, x_2(k) = \begin{bmatrix} H(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & H(k-n_d-n_b) \\ n_1(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & n_1(k-n_d-n_b) \\ n_2(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & n_2(k-n_d-n_b) \\ t_{1t}(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & t_{1t}(k-n_d-n_b) \\ Ma(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & Ma(k-n_d-n_b) \\ y(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & y(k-n_d-n_a) \\ e(k-n_d-1) & \cdots & \cdots & e(k-n_d-n_e) \\ t_0 & & & p_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 为非线性映射函数. n_d 为延迟, $x_1(k), x_2(k)$ 表示模型输入量; (t_0, p_0) 为大气条件; n_b, n_a, n_e 分别对应输入、输出和误差的阶数, y 表示模型输出量, e 是误差.

采用前述 GP 算法对线参数模型进行优选. 考虑到起动过程的复杂性, 本文采用了三种运算符集 $\{+, *, \sqrt{}\}, \{+, *, \wedge\}$ 和 $\{+, *\}$ 下的起动特性自动建模, 分别对应模型一、模型二和模型三.

为了尽可能消除由于数据物理量或数量级引起的误差, 本文采用的一种典型数据处理变换方法, 通过变换将数据变换到区间 $[0.2, 0.8]$ 之间.

$$x'_k = \frac{0.6(x_k - \min(x_k))}{\max(x_k) - \min(x_k)} + 0.2$$
$$y'_k = \frac{0.6(y_k - \min(y_k))}{\max(y_k) - \min(y_k)} + 0.2 \quad (4)$$

PGP 算法经多次试验统计, 如表 1 所示的设置可以取得满意的结果, 为了证明该方法的适用性, 本文将三个模型的估算结果与验证所用试验数据进行了对比, 所得结果如图 1~5 所示(由于在中等飞行速度和飞行高度的风车状态下, 发动机工作参数只决定于飞行马赫数^[7], 因此图中横坐标均选为 Ma (飞行马赫数)), 误差分析结果如表 2 所示, 其中表内数据为最大误差值与其对应试验值的比值.

表 1 GP 算法设置

Table 1 GP settings

GP 参数	设定值
种群大小	100
进化代数	30
代沟	0.8
交叉概率	0.8
变异概率	0.2
最大树深度	3
OLS 域值	0.000 1
惩罚因子 (a_1, a_2)	(0.5, 45)

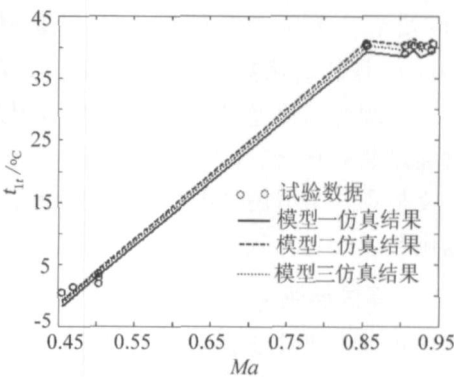


图 1 风车状态发动机进口温度特性

Fig1 Inlet total temperature characteristics in windmilling

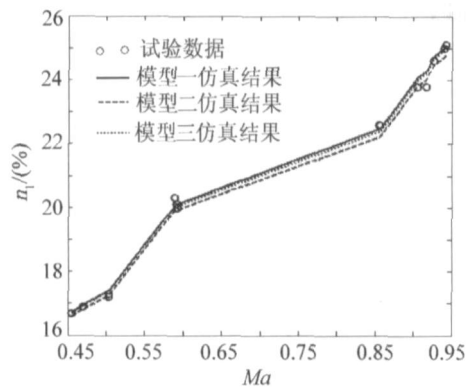


图 2 风车状态低压转子转速特性

Fig2 Low pressure rotor rev characteristics in windmilling

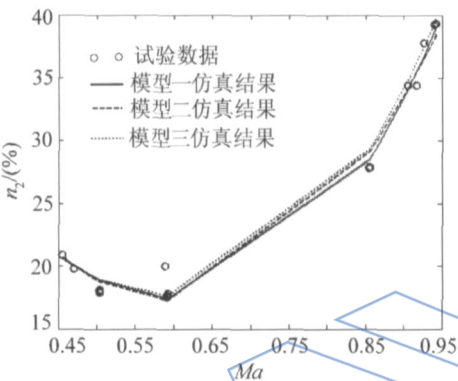


图 3 风车状态高压转子转速特性

Fig3 High pressure rotor rev characteristics in windmilling

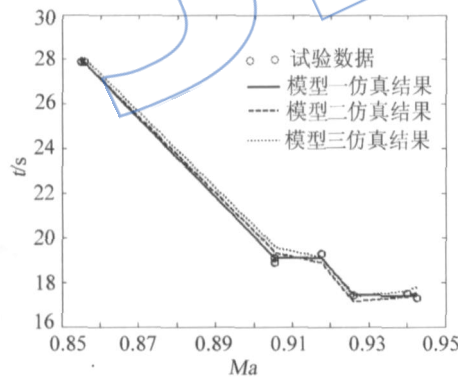


图 4 风车起动时间特性

Fig4 Time characteristics in windmilling start

表 2 误差分析表

Table 2 Error analysis table

误差	$t_{1r}/^{\circ}\text{C}$	$m_1/(\%)$	$n_2/(\%)$	t/s	$t_{56r}/^{\circ}\text{C}$
模型一	0.054 8	0.020 7	0.129 1	0.011 0	0.034 8
模型二	0.058 1	0.020 2	0.135 2	0.022 4	0.042 8
模型三	0.047 3	0.017 0	0.117 9	0.035 4	0.063 3

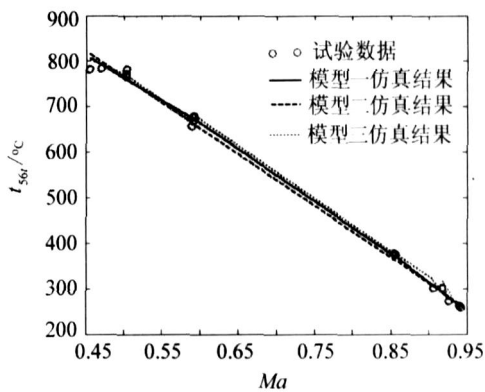


图 5 风车起动低压涡轮后排气温度最大值特性

Fig5 Max total temperature characteristics out of low pressure turbine in windmilling start

综合以上分析可知,三个 PGP 模型的估算结果与试验数据都达到了较好的一致性.其中,对于该型发动机的风车状态参数,模型三的仿真结果要优于其它两个模型.而对于风车起动特性参数,模型一的仿真精确度更高一些.这些仿真结果对不同飞行条件下起动性能的分析有一定的参考价值,而且,所得的模型随着试验数据的丰富还可以进一步完善.

4 结 论

本文在分析航空发动机风车特性和风车起动性能估算研究中,提出了运用约简遗传规划算法进行涡扇发动机风车起动特性自动建模方法,这种研究思路综合进行系统结构辨识与参数估计,避免了传统的结构辨识与参数估计独立的缺陷,利用实际的涡扇发动机风车起动试验数据进行了分析和验证.实验结果表明,在缺乏系统结构信息的情况下,该方法可以获得较为满意的结果,对于航空发动机风车起动特性的研究具有一定的借鉴意义.

本文受国家自然科学基金与民航联合研究基金(60672179)的资助

参考文献:

[1] 武志文,于达仁,牛军,等.基于 ANFIS 的涡轮发动机风车工况建模仿真[J].推进技术,2005,26(4):162-166.
WU Zhiwen, YU Dayen, NIU Jun, et al. Turbojet modeling and simulation in windmilling based on ANFIS[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(4): 162-166.

[2] 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):381-384.
JIANG Tao, LI Yinghong. A dynamic identification model of aeroengine starting progress based on the RBF network [J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3): 381-384.

- [3] 李应红,刘建勋.基于支持向量机的航空发动机起动性能估算研究[J].航空学报,2005,26(1):32-35.
LI Yinghong,LIU Jianxun. Turbofan engine starting characteristics estimation based on support vector machines[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica,2005,26(1):32-35.
- [4] 尉询楷,李应红,王剑影,等.基于支持向量机的航空发动机辨识模型[J].航空动力学报,2004,19(5):684-688.
WEI Xunkai,LI Yinghong,Wang J Y,et al. A novel aero-engine identification model based on Support Vector Machines [J]. Journal of Aerospace Power,2004,19(5):684-688.
- [5] Stephan Winkler,Michael Affenzeller,Stefan Wagner. New methods for the identification of nonlinear model structures based upon Genetic Programming techniques [DB/OL]. <http://citeseer.ist.psu.edu/634350.html>,2005.
- [6] LI Yinghong,WEI Xunkai. Linear-in-parameter models based on parsimonious genetic programming algorithm and its application to aero-engine start modeling[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2006,19(4):295-303.
- [7] 韩同来. 涡扇发动机起动性能模拟[D]. 西安:西北工业大学,2005.