

文章编号: 1000-8055(2005) 05-0853-04

基于非线性预测的发动机 转速限控方法

宋志平, 韩崇昭, 魏瑞轩

(西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 研究对发动机最大转速进行非线性预测限制的方法。将发动机动态过程描述为二阶的 Volterra 级数模型, 并由此建立它的非线性闭环预测模型。根据输入约束和控制目标, 提出转速预测限制的滚动控制算法。对此进行了仿真, 在超量的加速供油下, 得到了预测限制的供油变化线和转速变化线。与比例反馈限制方法比较表明, 预测控制方法能够解决燃烧延迟和发动机转子惯性的影响, 准确实现转速限制, 且其控制算法的计算量小, 能符合实时性要求。

关键词: 航空、航天推进系统; 非线性模型; 发动机控制; Volterra 级数; 预测控制

中图分类号: V23.7

文献标识码: A

Method of Restricting Aero-Engine Maximum Rotor Speed Based on Nonlinear Predictive Control

SONG Zhi-ping, Han Chong-zhao, WEI Rei-xuan

(School of Electronics and Information Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Restricting the engine maximum rotor speed based on nonlinear forecast was studied. The dynamic process was described by the Volterra series model, and then the nonlinear close loop forecast model was established. According to the input constraints and control objective, the roll control algorithm of rotor speed forecast restriction was proposed. The simulation was carried out. The forecast restriction curve of fuel flow change versus rotor speed under the excess fuel flow during acceleration was obtained. Compared with the proportion feedback restriction, the forecast restriction can be used to avoid the affection of fuel burning delay and engine inertia, and to realize the rotor speed restriction accurately. As the volume of calculation is less, it fulfills the real time requirement.

Key words aerospace propulsion system; nonlinear model; aeroengine control;
Volterra series; predictive control

航空发动机控制系统的一个重要组成是极限状态限制器, 如某发动机, 其最大状态的控制主要由综合调节器中的3个限控通道 (T_4^* , n_1 , n_2) 组合

实现。对于这些限制器而言, 常用的控制方法是反馈控制: 根据状态变量的超限量, 调整供油通道的回油量, 实现限制。这种方法有缺陷, 由于发动机

收稿日期: 2004-10-22 修订日期: 2005-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助 (60304004)

作者简介: 宋志平 (1973-), 男, 山东荣成人, 西安交通大学电子与信息工程学院博士后, 主要从事航空发动机控制研究。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

燃烧延迟及发动机转子惯性的影响,在供油动态变化时,限制容易“不及时”,从而引起状态的超限,而极限状态的超限是危险的。在高空时候,由于燃烧延迟较长,转子惯性系数相对大,这一问题更加突出。

根据预测控制的特点^[1],预测控制可以实现延迟及惯性情况下的及时控制。可对发动机的预测控制而言,有两个问题不易解决,首先,发动机是非线性系统,常用的预测控制内部模型是脉冲响应的线性模型,因而需要研究发动机的非线性预测模型;其次发动机的快速性要求预测控制

$$n_L(t) = \sum_{k=0}^{\infty} = n_{L0} +$$
$$\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{q_1=0}^2 \dots \sum_{q_k=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_{q_1, \dots, q_k}(\tau_1, \dots, \tau_k) \prod_{i=1}^k u_{q_i}(t - \tau_i) d\tau_i \quad (1)$$

其中:

$u_1(t) = w_f(t) - w_{f0}$, $u_2(t) = T_1^*(t) - T_{10}^*$
 $h_{q_1, \dots, q_k}(\tau_1, \dots, \tau_k)$ 为低压转子转速与输入间的第 k 阶 Volterra核, w_{f0} 和 T_{10}^* 为选取的基准点,基准点的选取,可根据限制器的工作范围而定

由于高阶的 Volterra核收敛,取 2阶的 Volterra核为最高阶次,以系统记忆长度为 M ,截尾误差为 $e(k)$ 且考虑进气温度为慢变低频的特性,则可假设记忆长度内 T_1^* 不变,令:

$$w_f'(t) = w_f(t) - w_{f0}$$
$$T_1^*(t) = T_1^*(t) - T_{10}^*$$

则可建立以 w_{f0} , T_{10}^* 和 n_{L0} 为基准点的离散简化发动机 Volterra模型:

$$n_L(k) = n_{L0} + n_L^1(k) + n_L^2(k) + e(k) \quad (2)$$

其中:

$$n_L^1(k) = \sum_{m=0}^{M-1} h_{w_f}(m) w_f'(k-m) + h_{T_1^*} \cdot T_1^{*s}$$
$$n_L^2(k) = \sum_{m_1=0}^{M-1} \sum_{m_2=0}^{M-1} h_{w_f, w_f}(m_1, m_2) w_f'(k-m_1) w_f'(k-m_2) +$$
$$\sum_{m=0}^{M-1} h_{w_f, T_1^*}(m) w_f'(k-m) T_1^{*s} + h_{T_1^*, T_1^*} \cdot T_1^{*s} \cdot T_1^{*s}$$

式 (2)模型的核可以通过辨识获得^[6, 8]。

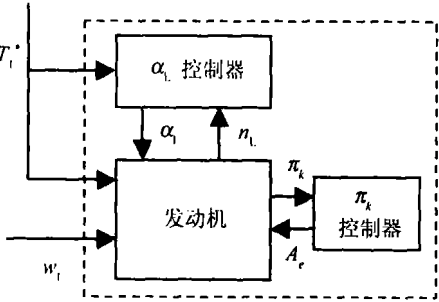


图 1 发动机输入参数相关性示意图

Fig. 1 The pertinence of areoengine input parameter

算法必须具有快速性。近年来出现了一些非线性预测控制^[2~4]和发动机预测控制研究,但其模型准确性和算法快速性还是不能很好的满足发动机实时控制要求。本文中以转速极限限制为内容,研究发动机的非线性预测限制方法。

1 预测模型

以发动机的非线性 Volterra级数模型^[5~7]为系统的预测模型。考虑供油量 w_f ,进气温度 T_1^* 为输入,低压转速 n_L 为输出,则发动机动态的非线性 Volterra模型为:

实际发动机有其它的输入量,如喷口临界面积 A_e ,导流叶片的调整角度 τ_L, τ_H 等,需要注意的是,这些参数若不是独立的输入变量,则不应作为式 (1)中的输入。对于某些发动机,其最大状态附近的某些参数关系如图 所示

图 1中,独立的输入只有油量 w_f 和进气温度 T_1^* 。此时辨识的 Volterra 模型对象为虚框所示部分。

令实际输出 $\bar{n}_L(k)$,则由比例-微分项构成的反馈量为: $(c+1)\bar{n}_L(0) - c\bar{n}_L(-1)$,其中, c 为比例、微分项的权值系数。则由式 (2)可构造闭环预测模型为:

$$\begin{aligned} \hat{n}_L(k) = & n_L^1(k) + n_L^2(k) - (c+1) \cdot [n_L^1(0) + n_L^2(0) - n_L(0)] + \\ & c \cdot [n_L^1(-1) + n_L^2(-1) - n_L(-1)] \\ & (1), k] \end{aligned} \tag{3}$$

2 预测控制方法

2.1 控制目标与计划

闭环的系统的预测限制结构关系如图 2

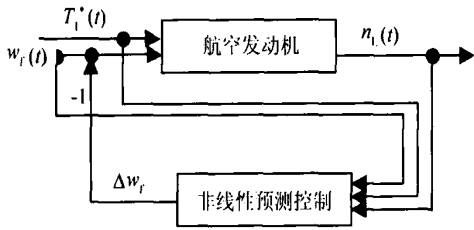


图 2 低压转速的预测限制结构关系图

Fig. 2 The structure of predictive controller to rotor rev

其中：供油 w_f 为可控输入， $w_f(t)$ 为未限制前的供油量（通常由机械控制器近似提供）， $\Delta w_f(t)$ 为控制量， $\bar{w}_f(t) = w_f(t) - \Delta w_f(t)$ 为实际供油量； $n_L(t)$ 系统输出。

转速限制的控制目标为 $n_L(t) \leq n_{Lmax}$ 。控制计划为：确定下一个时刻的最小控制量（回油量） $\Delta w_f(1)$ ，若以实际输入 $\Delta w_f(1) = w_f(1) - \Delta w_f(1)$ 为起始，构造一条满足输入约束的供油下降参考线，并以之为未来输入，则满足预测目标 $n_L(t) \leq n_{Lmax} (t > t_0)$ 。

一般预测控制中，需要构造输出参考轨迹，在转速限控中，则需要构造输入的下降参考线。所谓输入下降参考线，是在保证燃烧室、压气机及喷嘴等部件的稳定工作的限制条件下，采用的一条供油减少参考线。由于控制量 $\Delta w_f(1)$ 是滚动确定的，因而输入下降参考线的选取有很大的容差性，是可以经验选取的。本文中不妨简化为供油变化约束的 $\bar{w}_f'(t) < D$ ，取：

$$\begin{aligned} w_f^k(t) \Big|_0^f = & \\ w_f(t_0) - k \cdot [w_f(t_0) - w_f(t) \Big|_0^f] \end{aligned}$$

为柔化因子 $k (0 \leq k \leq 1)$ 下的供油下降线。将以 $\bar{w}_f(1)$ 为起始的离散供油下降线序列表示为 $S[\bar{w}_f$

预测未来的转速是否超过限制，所需要预测的未来时间段不须超过记忆长度，并且由于转速变化的连续性，也不需要对其内的所有离散点都进行检测，这在计算上是浪费的。一般只需要进行 3 点预测检验即可满足要求，通常取 $(0.1f, 0.3f, 0.6f)$ 时刻为检测点。

2.2 控制算法

定义超限量 $M(n_L) = \max [n_L(\frac{f}{k}) - n_{Lmax}]$ ，令 $|\bar{w}_f(1) - \bar{w}_f(0)| \leq D_{w_f}$ 符合输入约束，则预测控制的逻辑关系为：若 $\Delta w_f(1) = 0$ ，即有 $M(n_L) \leq 0$ ，则 $\Delta w_f(1) = 0$ ；若 $\Delta w_f(1) = D_{w_f}$ ，有 $M(n_L) \geq 0$ ，则 $\Delta w_f(1) = D_{w_f}$ ；其它情况下，则在 $0 \sim D_{w_f}$ 下搜索一个最小的 $\Delta w_f(1)$ ，满足 $M(n_L)$ 。具体算法过程如下：

(1) 令 $\bar{w}_f(1) = \bar{w}_f(0) + D_{w_f}$ ，构造 $S[\bar{w}_f(1), k]$ ，根据预测模型，得到 $M(n_{L1})$ 。若 $M(n_{L1}) < 0$ 则，控制量：

$$\begin{aligned} \Delta w_f(1) = & \Delta w_f(0) + w_f(0) - \\ & w_f(-1) + D_{w_f} \end{aligned}$$

进行 (4)；否则，进行 (2)。

(2) 令 $\bar{w}_f(1) = \bar{w}_f(0) - D_{w_f}$ ，构造 $S[\bar{w}_f(1), k]$ ，得到 $M(n_{L2})$ 。若 $M(n_{L2}) > 0$ 则，控制量：

$$\begin{aligned} \Delta w_f(1) = & \Delta w_f(0) + w_f(0) - \\ & w_f(-1) - D_{w_f} \end{aligned}$$

进行 (4)；否则， $x_1 = 0, x_2 = D_{w_f}$ 进行 (3)。

(3) 令：

$$x_3 = (x_2 - x_1) \frac{M(n_{L1}) + M(n_{L2})}{M(n_{L1}) - M(n_{L2})}$$

$$\bar{w}_f(1) = \bar{w}_f(0) - x_1 - x_3$$

构造 $S[\bar{w}_f(1), k]$ ，得到 $M(n_{L3})$ 。若 $|M(n_{L3})| < X$ 则：

$$\Delta \bar{w}_f(1) = 2w_f(0) - w_f(-1) - \bar{w}_f(1)$$

进行 (4)；否则，迭代本步。

(4) 若 $\Delta w_f(1) < 1$ ，则 $\Delta w_f(1) = 0$ ，以 $\Delta w_f(1)$ 为下一时刻的控制量，进行滚动控制。

3 简 例

令发动机非线性状态模型为：

$$\begin{aligned} \dot{n}_L(t) = & -4.46n_L(t) + 1.95n_H(t) - 0.56 \cdot n_H(t) \cdot n_H(t) + 0.38w_f(t - 0.2) - \\ & 0.02T_i^*(t) + 0.33w_f(t - 0.2) \cdot T_i^*(t) \end{aligned}$$

$$\dot{n}_H(t) = -0.60n_L(t) + 2.08n_H(t) - 0.2 \cdot n_H(t) \cdot n_H(t) + 0.44w_F(t - 0.2) - 0.037\dot{T}_1^*(t) + 0.20w_F(t - 0.2) \cdot \dot{T}_1^*(t)$$

$$\Delta w_F(t) = kb \cdot [n_L(t) - 1.0]$$

$$[n_L(t) > 1.0]$$

模型考虑 0.2 s 的燃烧延迟和一定的转子惯性,以 $w_F = 0.7 \text{ kg/s}$, $T_1^* = 288 \text{ K}$, $n_L = 0.9$ 为基准点,建立 2 阶的 Volterra 模型,计算如式 (3) 的闭环非线性预测模型,模型步长取 0.05 s,记忆长度取 1.5 s,取 $k = 0.5$ 令机械控制器提供的半程加速供油变化曲线如图 3 中曲线 1 所示, (加油量存在适当的超调,实现加速的快速性),此时进气温度为 $T_1^* = 270 \text{ K}$ 按照预测控制算法,进行预测控制器的仿真,得到如下的结果

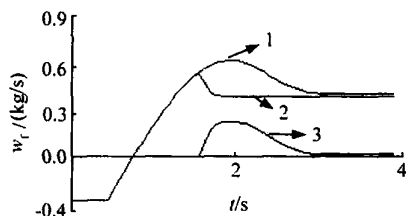


图 3 半程加速供油曲线及其预测控制回油线

Fig. 3 Curves of the feed oil and the remove oil by forecast control

(1) 回油控制量如图 3 中曲线 2 所示,实际供油量如曲线 3 所示。而预测控制后的实际转速如图 4 中 1 所示。表明对于存在纯延迟和一定惯性的非线性系统,这种预测限制算法,能够实现较准确的转速限制。其中, k 的选取是经验的,在一定范围内变化对控制结构影响小,但若 k 过小,则转速变化不能实现快速性, k 过大,则控制的供油变化易于“剧烈”,且对模型误差的容忍性下降。

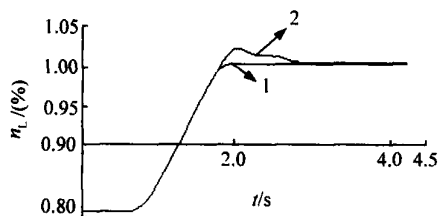


图 4 预测控制的转速变化和比例反馈控制的转速变化

Fig. 4 Curves of the feed oil and the remove oil by forecast control

(2) 若采用一般的比例反馈限制算法,即:

(某型发动机实际采用的),对本例而言,仿真表明,较优的反馈比例为,此时的转速控制曲线如图 4 中曲线 2 所示,依然存在转速超限,无法实现准确的限制。这是由燃烧延迟和转子惯性导致的。

(3) 仿真表明,本例中,每步的最大预测计算量不超过 $2 \cdot 10^4$ 倍的双精度浮点数乘法的计算量,计算量不大,能够满足实时计算要求。

4 结束语

本文建立了基于 Volterra 级数的发动机的非线性预测模型,并提出预测控制算法。控制效果较好且计算量不大。这种预测控制方法适合于在高空或高空条件下的发动机最大状态转速控制。

参考文献:

- [1] 席裕庚. 预测控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [2] 杨建军, 刘民, 吴澄. 基于遗传算法的非线性模型预测控制方法 [J]. 控制与决策, 2003, 2: 141~ 144.
YANG Jian-jun, LIU Min, WU Cheng. Genetic Algorithm Based Nonlinear Model Predictive Control Method [J]. *Control and Decision*, 2003, 2: 141~ 144.
- [3] 张智焕, 王树青. 基于多模型 pH 非线性过程的预测控制 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2002, 1: 29~ 31.
ZHANG Zhi-huan, WANG Shu-qing. Predictive Control of pH Nonlinear Process Based on Multiple Model [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2002, 1: 29~ 31.
- [4] DING Bao-Cang, XI Yu-Geng, LI Shao-Yuan. Stability Analysis on Predictive Control of Discrete-Time Systems with Input Nonlinearity [J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2003, 29(6): 827~ 834.
- [5] Panicker T M, Mathews V J. Parallel-Cascade Realizations and Approximations of Truncated Volterra Systems [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1998, 46(10): 2829~ 2832.
- [6] 魏瑞轩. 基于 Volterra 级数模型的非线性系统辨识及故障诊断方法研究 [D]. 陕西 西安: 西安交通大学, 2002.
- [7] Evans C, Rees D, Jones L, et al. Periodic Signals for Measuring Nonlinear Volterra Kernels [J]. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(2): 362~ 371.
- [8] 曹建福, 韩崇昭. 非线性系统理论及应用 [M]. 陕西 西安: 西安交通大学出版社, 2001.