

航空发动机智能控制器应用研究

西北工业大学 王镛根* * 张西锋

【摘要】 本文设计了一个智能控制器,用于航空发动机稳态小偏离与瞬态大偏离控制,数字仿真研究表明,它比模糊控制及PID控制具有更好的控制性能。

关键词: 航空发动机 智能控制 模糊控制 PID控制

1 前言

先进飞机的发动机的设计趋势向着更高的推重比、低的耗油率、高可靠性和使用灵活性目标推进。这导致了发动机控制系统的复杂性,主要表现在发动机要测量、调节和控制的参数和变量的数目大大增多,因而常规的机械液压式控制不能完成未来飞机推进系统的要求,取而代之的是全权限数字电子控制系统。70年代初,美国等国家开始将最优控制理论用于航空发动机控制系统的研究,尤其是数字计算机的迅速发展,使得最优控制理论在航空发动机上的应用变为现实。然而古典控制理论和最优控制理论有一个缺陷,即必须知道控制对象的精确数学模型,虽然自适应控制、鲁棒控制等控制方法不需要被控对象的精确数学模型,但它要求对被控对象进行在线辨识或设计控制器,算法复杂,运算量大。

自动控制与人工智能结合而形成的智能控制能够把控制理论与专家在控制过程中所积累的经验和知识相结合,用直觉推理的方法对被控对象进行有效的控制,它不仅降低了对被控对象模型的要求,同时也能发挥专家的经验和知识。因此对于象航空发动机这样复杂的对象,智能控制不失为一种有效的控制方法。

2 被控对象数学模型

被控对象为某型双转子涡轮喷气发动机,取状态变量为高低压转子转速 n_h 、 n_l ,输入变量为供油量 m_f ,设尾喷口面积保持不变,则简化的发动机模型为:

$$\dot{n}_l = f_1(n_l, n_h, m_f) \quad , \quad \dot{n}_h = f_2(n_l, n_h, m_f) \quad (1)$$

经线性化处理和无因次处理后成为^[1]:

$$\delta \dot{n}_l = \bar{A}_1 \delta n_l + \bar{A}_2 \delta n_h + \bar{B}_1 \delta m_f \quad , \quad \delta \dot{n}_h = \bar{A}_3 \delta n_l + \bar{A}_4 \delta n_h + \bar{B}_2 \delta m_f \quad (2)$$

(2)式即为该型发动机简化的数学模型。模型中参数的具体求法如下:用部件法建立发动机从自始转速到最大转速的动静态数学模型^[2];在计算过程中先建立发动机的流量连续方程和两个转子的功率平衡方程,然后求其加速过程中的共同工作点。由于各部件的工作参数未知,故可选取一组参数作为试取参数,并由这些参数利用热力计算方法和部件特性插值法求出其它参数;若这些参数满足动态共同工作方程,则算出此加速共同工作点,若不满足,则重

新试取。此过程相当于求解一组非线性方程, 用 $n+1$ 阶残量法求解, 线性化间隔为 112r/min (低压转子转速), 该方法对初值要求不严, 收敛速度较快。

3 航空发动机智能控制系统设计

航空发动机智能控制系统中智能控制器包括了特征辨识和特征记忆、特征模型、控制模型、推理机和规则库等。

3.1 特征模型

智能控制研究最基本的途径之一是“仿智”, 即模仿在该领域有经验专家的智能。在人参与的控制过程中, 有经验的操作者常常不是依赖于对象的数学模型而是根据系统动态特征依靠积累的经验和技术进行推理, 在线确定或变换控制策略, 这些反映系统运动状态的所有动态信息特征构成了系统的特征模型, 它是智能控制器应有的先验知识。

航空发动机转速回路控制要求有高的动、静态品质, 因此, 我们建立的特征模型应用了三维动态信息空间 $e(k)$ 、 $\dot{e}(k)$ 和 $\ddot{e}(k)$ 。特征模型集合 M 为:

$$M = [M_1, M_2, \dots, M_{12}]$$

其中 M_i 为第 i 个特征状态, 它对于三维动态信息空间的某一区域:

$$M_1: e(k) \geq e_{\max} \quad , \quad M_2: e(k) \leq -e_{\max} \quad , \quad M_3: \dot{e}(k) = 0$$

$$M_4: e(k) \cdot \dot{e}(k) < 0 \cap \dot{e}(k)/e(k) \geq -c_1 \cap \dot{e}(k) < 0 \cap \ddot{e}(k) < -c_2$$

$$M_5: e(k) \cdot \dot{e}(k) < 0 \cap \dot{e}(k)/e(k) \geq -c_1 \cap \dot{e}(k) < 0 \cap \ddot{e}(k) \geq -c_2$$

$$M_6: e(k) \cdot \dot{e}(k) < 0 \cap \dot{e}(k)/e(k) \geq -c_1 \cap \dot{e}(k) > 0 \cap \ddot{e}(k) > -c_2$$

$$M_7: e(k) \cdot \dot{e}(k) < 0 \cap \dot{e}(k)/e(k) \geq -c_1 \cap \dot{e}(k) > 0 \cap \ddot{e}(k) \leq -c_2 \quad (3)$$

$$M_8: e(k) \cdot \dot{e}(k) < 0 \cap \dot{e}(k)/e(k) < -c_1 \quad , \quad M_9: e(k) \cdot \dot{e}(k) \geq 0 \cap \dot{e}(k) < 0 \cap \ddot{e}(k) < 0$$

$$M_{10}: e(k) \cdot \dot{e}(k) \geq 0 \cap \dot{e}(k) > 0 \cap \ddot{e}(k) > 0$$

$$M_{11}: e(k) \cdot \dot{e}(k) \geq 0 \cap \dot{e}(k) > 0 \cap \ddot{e}(k) < 0 \quad , \quad M_{12}: P(M) = \sum_{i=1}^{11} M_i$$

式中 c_1 、 c_2 是阈值, 由仿真时调试确定。为了防止系统出现失控现象, 特征模型应包含系统动态过程所有可能的状态, 其中 M_{12} 就是为此目的而设计, 其中 $P(M)$ 表示为整个动态信息空间。

3.2 特征辨识和特征记忆

特征辨识是智能控制器对采样信息在线处理, 确定系统当前处于何种特征状态的过程, 而特征记忆是指智能控制器的一些反映前期决策与控制效果的特征量和反映控制任务要求以及被控对象性质的特征量的记忆, 本文采用的主要特征记忆量有 λ_1 : e_{mi} 误差的第 i 次峰值; λ_2 : u_{in} 前期智能控制器输出量的保持值; λ_3 : e_a 误差的第 i 次过零速率; λ_4 : t_{em} 误差峰值的间隔时间。

采用特征记忆的主要优点是抓住系统动态过程的主要特征, 可作为自适应和自学习的依据, 记忆效率高, 占用存储单元少。特征模型和特征辨识是智能控制的前提, 只有识别出系统当前处于什么特征运动状态, 才能采用相应的控制策略。

3.3 控制策略 (控制模态)

人的控制策略是灵活多变的, 不仅对象不同控制策略有异, 即使同一对象在不同的动态响应下或在不同的控制要求下控制策略也会不同, 这种不断变化的策略的控制方式叫多模态控制, 本文设计的控制模态集为:

$$u = [u_1, u_2, \cdots, u_6]$$

其中 $u_1: u(k) = u_{\max}$, $u_2: u(k) = -u_{\max}$, $u_3: u(k) = u(k-1)$, $u_4: u(k) = u_0 + K[Kie(k) + Kde(k)]$, $u_5: u(k) = u_0 + K[Kie(k) - Kde(k)]$, $u_6: u(k) = u(k-1) + K[e(k) - e(k-1)] + Kie(k)/T + Kd[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$ 。式中 $u(k)$ 为智能控制器的第 k 次输出量, u_0 为控制器输出量在误差过零时的保持值, K 、 K_i 和 K_d 为常数, T 为采样周期。

3.4 推理机

当识别出系统目前处于什么样的运动状态, 而决定采取相应的控制作用是由推理机完成的。采用正向推理的方法, 可由常用的产生式规则描述: IF 状态 THEN 操作; 具体的推理关系

$$\Omega = [W_1, W_2, \cdots, W_{12}] \quad (4)$$

其中 W_i : IF M_i THEN u_{ij} 。而 i 与 j 的关系如下: i 为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12, j 为 1、2、4、3、4、3、4、5、4、4、6、4。具体的推理过程是这样的, 当系统通过特征辨识而得到特征状态时, 将其与规则库的知识相匹配, 得到匹配成功的结果, 从而通过控制模式计算出控制量, 作为发动机的输入量。

4 数字仿真研究

4.1 智能控制

用前面设计的智能控制器对某型航空双转子涡轮喷气发动机分别在巡航状态的小偏离以及从自始转速到最大转速的大偏离的加速过程进行了数字仿真研究, 先通过单纯形法寻优, 在保持 ITAE 性能指标为最小的条件下, 有关参数为:

$$K, K_i, K_d = 0.0005, 0.006, 0.4 \quad (5)$$

$$K, K_i, K_d = 0.002, 0.008, 0.6 \quad (6)$$

(5) 式是巡航状态的参数, (6) 式是加速过程的参数。仿真结果分别如图 1 和图 2 所示 (图中

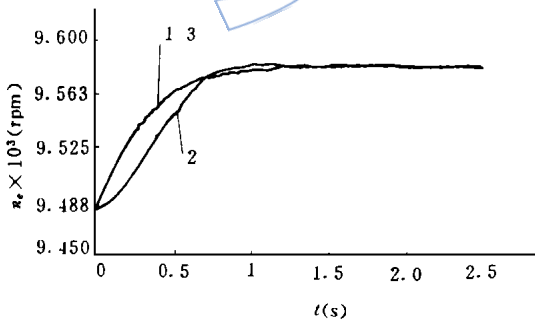


图 1 某型发动机稳态控制

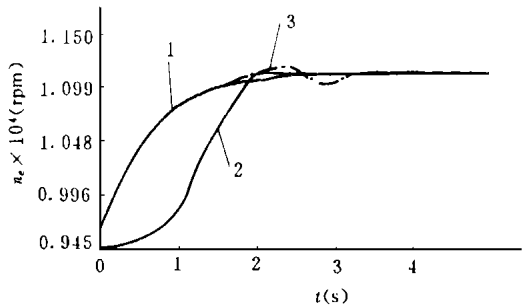


图 2 某型发动机加速控制

1—智能控制, 2—模糊控制, 3—PI 控制)。

4.2 智能控制与模糊控制及 PI 控制的比较

文献 [2] 将模糊控制用于前述的发动机取得了较好的结果, 其稳态 (巡航状态) 和加速过程的仿真结果也分别表示在图 1 和图 2。

PID 控制是人们常用的一种控制算法, 为了防止高频微分干扰, 本文采用 PI 控制, 其递推形式如下:

$$u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1) + (T/T_i)e(k)] \quad (7)$$

其中 T 为采样周期, K_p 和 T_i 分别为比例系统和积分系数。由于发动机在加速过程中, 模型的参数是变化的, 因此设计的 PI 控制器的参数也随之而变。根据每个小偏离模型经寻优后得出不同状态下的 PI 控制器参数如下: n_1 (r/min) 为 9482、9594、9705、9817、9928、10040、10152、10264、10375、10487、10598、10710、10821、10933、11044 时 K_p 为 0.002、0.0021、0.0022、0.0022、0.0022、0.0023、0.0025、0.0023、0.0024、0.0023、0.0022、0.0024、0.0024、0.0026、0.0027, T_i 为 52.0、58.7、73.5、78.5、85.5、95.2、87.4、53.0、52.0、38.0、43.0、30.2、23.5、13.5、5.50。

稳态和加速过程的 PI 控制的数字仿真结果也分别表示在图 1 和图 2 中。

从上述仿真结果可看出, 除了小偏离控制 (稳态点附近) 时 PI 控制效果与智能控制效果十分接近以外, 其余情况下, 模糊控制与 PI 控制都不如智能控制。在小偏离情况下, 模糊控制快速性不如智能控制, 在大偏离情况下, 模糊控制和 PID 控制快速性都不如智能控制。模糊控制在小偏离和大偏离情况下在系统稳定时都有小振荡现象, 最大瞬时振荡值 $\Delta n_1 = n_1 - n_{1\text{稳}}$ 为 $\pm 20 \text{ r/min}$ 。智能控制之所以比模糊控制与 PI 控制优越是因为智能控制虽然在某一个模态下也是比例、微分和积分的组合, 但是在整个控制过程中, 它却是一个多模态的智能控制, 它不仅具有 PID 控制的特点还结合了专家的智能, 从理论上讲也优于 PID 控制。而模糊控制是一种简单的智能控制, 它由于受到量化级数限制而使控制品质受到影响, 另外模糊控制器由于不具备积分作用, 很难消除静差, 在平衡点附近常有小振荡现象。

5 结 论

设计了一个智能控制器, 用于某型双转子涡轮喷气发动机的巡航状态小偏离加速和从自始转速加速到最大转速的大偏离加速过程。数字仿真研究表明, 智能控制优于模糊控制和 PI 控制。另外作者还研究了智能控制和抗干扰的仿真试验。在系统输出端附加白噪声 N (0.30^2) 情况下, 发动机低压转子转速的最大瞬时误差只有 32 r/min , 是稳定工作时的 0.22% , 说明智能控制具有一定的抗干扰能力。还研究了对于同一动态信息空间, 特征模型划分对控制品质的影响, 仿真结果表明, 特征模型划分得细些有利于控制品质, 而并不会带来计算上的麻烦。

参 考 文 献

- 1 张西锋. 智能控制在航空发动机控制中的应用研究: [学位论文]. 西北工业大学, 1993
- 2 罗恩科. 航空发动机转速模糊控制系统研究: [学位论文]. 西北工业大学, 1992

(责任编辑 王庆康)