

变论域自适应模糊控制在航机发电中的应用

郑 宏¹, 徐红兵¹, 朱贵平²

(1. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054; 2. 中石油塔西南石化厂, 新疆 塔里木 844804)

摘要: 航机发电系统是一个时变、非线性、强干扰、模型复杂, 燃料供应不确定性大的复杂系统, 应用传统的控制方法往往难于达到满意的控制效果. 变论域自适应模糊控制具有对模型无准确要求、响应快速、精度高、鲁棒性好、适应性强等优点. 本文将变论域自适应模糊控制器用于航机发电机组的调节与控制中. 首先详细的论述了控制器的结构设计、伸缩因子的选择方法, 然后给出了具体的控制算法; 最后给出的现场试验及试运行结果表明该控制算法在航机发电中切实可行, 效果令人满意.

关键词: 变论域; 自适应模糊控制; 伸缩因子; 航机发电

中图分类号: T273.2 **文献标识码:** A

Adaptive fuzzy control based on variable universe and its application to aero engine turbine power generator

ZHENG Hong¹, XU Hong-bing¹, ZHU Gui-ping²

(1. College of Automation Control, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China;

2. South-west Petrochemical Plant of Tarim, PetrChina, Tarim Xinjiang 844808, China)

Abstract: Aero engine turbine power generator is a typical nonlinear and time-varying system with intense disturbances, high uncertainty and model complexity. It is difficult to achieve a good performance by traditional control methods. Adaptive fuzzy control method based on variable universe has advantages such as no need for exact models, fast response, and high precision and strong robustness. In this paper, the control algorithm is applied to an aero engine turbine power generator. Firstly, the corresponding structure design and contraction-expansion factor selection of the controller are provided in details, and then the control law is given. Finally, by the field test and trial production, it is proved that the control scheme is reliable and effective.

Key words: variable universe; adaptive fuzzy control; contraction-expansion factor; aero engine turbine power

1 引言(Introduction)

航空发动机是一种典型的“时变、非线性、强干扰、模型复杂”的系统, 对它的控制问题一直吸引着控制领域的专家、学者的研究, 而且也取得了一定的进展和研究成果, 但至今也没有一个公认的系统模型, 这给那些依赖系统模型进行控制的方法带来了困难. 而将其改造为燃气轮机后, 作为航机发电机组的动力装置, 与同步发电机协同工作又引入了一系列不确定性的因素. 本文研究了利用石油伴生气、瓦斯气、煤层气、天然气等作燃料的航机发电机组的控制问题. 由于所用的燃料热值不稳定, 压力波动大, 这给发动机的调节控制带来了诸多新的问题. 其中一个非常关键的问题是在如此众多的不确定因素下如何快速、准确、稳定可靠地调节阀位, 以保证

机组在启动时不超温、无喘振; 达到平衡转速时控制精度高, 便于并网; 在并网后可以根据要求跟踪功率(或频率); 在突然甩负荷时机组不熄火不停机, 也不会超速很多并能快速稳定.

文献[1]中首次提出了变论域的思想, 并指出在规则形式不变的情况下, 论域随着误差变小而收缩, 而论域的收缩相当于增加了规则, 从而提高系统的控制精度. 变论域模糊控制器实际上就是一种在线根据误差调整论域的自适应模糊控制器. 文献[2]中论证了3输入单输出模糊控制器自动具备模糊控制器与PID调节器关于“前期”与“后期”的切换功能, 而且是一种“无触点”式的“软边界”的“软切换”; 不必再搞两套控制器进行硬性的切换. 基于这种思想, 结合航机发电机组控制的需求, 本文将变

论域自适应模糊控制应用于航机发电控制中.

2 变论域自适应模糊控制器设计(Adaptive fuzzy controller based on variable universe design)

航机发电机组的控制主要包含有速度调节、温度控制、功率调节环节等. 这里以航机发电机组的速度调节为例, 探讨如何将变论域自适应模糊控制器应用于该系统. 下面首先给出航机发电系统的经典速度调节系统的结构框图, 如图1所示.

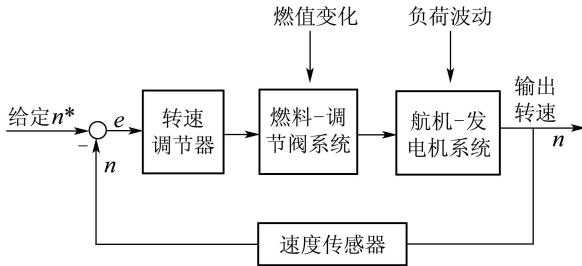


图1 航机发电机组经典转速调节框图

Fig. 1 Structure of classical speed regulation for aero-engine power

2.1 控制器结构设计(Structure design of controller)

利用变论域自适应模糊控制器的优势, 设计基于变论域自适应模糊控制的转速调节器结构如图2所示.

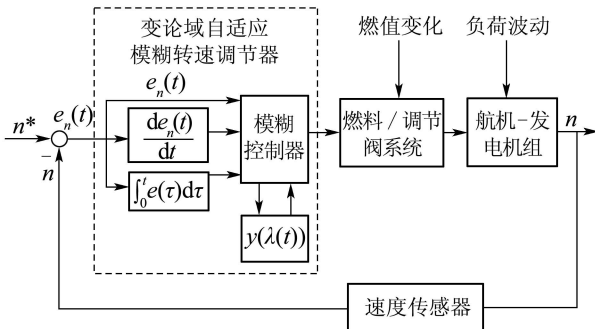


图2 变论域模糊自适应转速调节器框图

Fig. 2 Structure of adaptive fuzzy rotor-speed regulator with variable universe

为了达到满意的控制精度, 输入量取: 1) 转速偏差 $x(t) = e_n(t)$; 2) 转速偏差的变化率 $y(t) = de_n(t)/dt$; 3) 转速偏差的累积 $z(t) = \int_0^t e_n(\tau) d\tau$. 特别指明, 该积分项用于消除余差. 这里设: $X = [-E, E]$, $Y = [-EC, EC]$, $Z = [-EI, EI]$, 为模糊控制器的输入论域, $V = [-U, U]$ 为输出论域, $A = \{A_i\}_{1 \leq i \leq p}$, $B = \{B_j\}_{1 \leq j \leq q}$, $C = \{C_s\}_{1 \leq s \leq r}$, $D = \{D_{ijs}\}_{1 \leq i \leq p, 1 \leq j \leq q, 1 \leq s \leq r}$ 分别为 X, Y, Z, V 上的模糊划分; x_i, y_j, z_s, u_{ijs} 分别为 A_i, B_j, C_s, D_{ijs} 的峰点, 满足条件 $-E \leq x_1 < x_2 < \dots < x_p \leq E, -EC \leq$

$y_1 < y_2 < \dots < y_q \leq EC, -EI \leq z_1 < z_2 < \dots < z_r \leq EI, -U \leq u_{111} < u_{112} < \dots < u_{pqr} \leq U$. 形成推理规则库:

If x is A_i and y is B_j and z is C_s then u is D_{ijs} .

根据文献[2], 这类3输入单输出模糊控制器可以表示为如下的插值函数:

$$u(t) \triangleq F(x(t), y(t), z(t)) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{s=1}^r A_i(x(t)) B_j(y(t)) C_s(z(t)) u_{ijs}. \quad (1)$$

2.2 伸缩因子设计(Contraction-expansion factor design)

所谓变论域是指论域可以分别随着变量 x, y, z , u 的变化而自行调整, 记 $X = [-\alpha(\rho)E, \alpha(\rho)E]$ 等, 这里 $\alpha(\rho)$ 称为伸缩因子. 一般地, 伸缩因子满足对偶性、避零性、单调性、协调性、正规性[3]. 输入论域的伸缩因子的常见形式有[4]

$$\alpha(\rho) = 1 - \lambda \exp(-k\rho^2), \lambda \in (0, 1), k > 0, \quad (2)$$

$$\alpha(\rho) = \left(\frac{|\rho|}{E} \right)^\tau, \tau \in (0, 1). \quad (3)$$

式中: ρ 可为 $x(t) = e_n(t), y(t) = \frac{de_n(t)}{dt}, z(t) = \int_0^t e_n(\tau) d\tau$ 3个输入量, 其量化值分别为 E, EC, EI ; τ, κ, λ 为可调参数.

输出论域的伸缩因子为

$$\beta(t) = K_i \sum_{i=1}^n P_i \int_0^t e_n(\tau) d\tau + \beta(0). \quad (4)$$

其中: K_i 和 P_i 为可调参数, n 为输入变量的个数, 单输入 $n = 1$, 双输入 $n = 2$, 3输入 $n = 3$ 依次类推. $\beta(0)$ 根据实际情况调整, 一般情况取 $\beta(0) = 1.0$. 其他形式的输出论域的伸缩因子有

$$\beta(x, y, z) = \left(\frac{|x|}{E} \right)^{T1} \left(\frac{|y|}{EC} \right)^{T2} \left(\frac{|z|}{EI} \right)^{T3}, \quad (5)$$

$$\beta(x, y, z) = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{|x|}{E} \right)^{T1} + \left(\frac{|y|}{EC} \right)^{T2} + \left(\frac{|z|}{EI} \right)^{T3} \right]. \quad (6)$$

其中: $0 < T1, T2, T3 < 1$. 由于误差和误差变化率及累积误差存在着内在关系, 在实际应用中, 通常式(5)(6)可以变换为简单的形式, 如 $\beta(y)$ 或 $\beta(z)$.

变论域通常有种等价的解决办法: 1) 直接将输入论域和输出论域乘以对应的伸缩因子, 该方法由于需要将论域上的各点都乘以伸缩因子, 处理较困难; 2) 将 E, EC, EI 分别除以对应的伸缩因子, 输出 Δu 乘以对应的伸缩因子; 3) 将量化因子 k_E, k_{EC}, k_{EI} 分别除以对应的伸缩因子, 比例因子 Ku 乘以对应的伸缩因子. 2) 3) 两种处理方法相

对简单和容易实现, 本文采用了3)的方法。

k 越大, $\alpha(x)$ 越大, 且 $\alpha(x)$ 变化也越剧烈; λ 越大, $\alpha(x)$ 越小, 但 $\alpha(x)$ 变化越剧烈。论域压缩越明显, 系统响应速度越快^[4]。因此, 通过选择较小的 k 和较大的 $\alpha(x)$, 可以提高系统的响应速度。当然, k 和 $\alpha(x)$ 的选择需要综合考虑系统的各项性能指标, 而不应该盲目追求某一项性能指标的提高。

2.3 3输入单输出变论域自适应模糊控制器的差分格式(Differential format of three-input and single-output adaptive fuzzy controller based on variable universe)

为便于编程, 这里给出3输入单输出的变论域自适应模糊控制器的差分形式: 设 kT ($k = 0, 1, 2, \dots$)为采样时刻点, T 为采样周期, 作如下的常规近似处理:

$$y(t) = \frac{de_n(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \triangleq \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T}, \quad (7)$$

$$z(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \sum_{i=0}^k e(k) \triangleq \sum_{i=0}^k e(kT)T. \quad (8)$$

这里为了书写方便, 记 $e(kT)$ 为 $e(k)$ 。同时, 取伸缩因子分别记为: $\alpha(x)$, $\beta(y)$, $\gamma(z)$, 因为在应用系统中的燃料调节阀为位置式电液伺服阀, 因此具体给出位置式差分算法。

对形如图2, 式(1)的3输入单输出的变论域模糊控制器具有如下的位置式算法:

$$\begin{aligned} u(k+1) = F(x(k), y(k), z(k), k) = & \sum_{s=1}^p \sum_{t=1}^q \sum_{n=1}^r \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{m=1}^r (A_i(x(k)/\alpha(k)) A_s \alpha(k) x_i(0); \\ & B_j(y(k)/\beta(x(k), y(k))) B_t(\beta(x(k), y(k))) y_j(0); \\ & C_m(z(k)/\gamma(x(k), y(k), z(k))) \\ & C_n(\gamma(x(k), y(k), z(k))) z_m(0); u_{stn}(0)). \end{aligned} \quad (9)$$

此外, 当满足 $x(k) \rightarrow 0, y(k) \rightarrow 0$, 且 $z(k) \rightarrow 0$ 时, $u(k+1) \rightarrow 0$ 。

3 现场试验(Field test)

为了检验所设计变论域自适应模糊控制器的控制性能及效果, 在生产现场进行了试验, 试验条件及试验方法如下:

3.1 试验条件(Test condition)

a) 控制对象: 航机发电机组, 其中航空发动机为WJ6系列, 经改造为T3-20型燃气轮机, 额定功率2750 kW, 同步发电机的额定功率250 kW。

b) 燃料: 石油伴生气(含有部分油污、水分等杂质), 压力为0.6 MPa~1.2 MPa, 有波动。

c) 调节阀: 电液伺服阀(± 8 mA)。

d) 转速传感器: PA-150(脉冲输出)。

3.2 试验要求、步骤及内容(Test demands, steps and contents)

a) 试验要求:

1) 在启动过程中, T_4 (发动机涡轮尾喷温度)不能超过650℃;

2) 为防止喘振, 在发动机转速为9278 r/min~10051 r/min之间必须快速通过;

3) 整个启动过程不能超过120 s;

4) 记录并保存每秒的各个参数(燃气压力、调节阀位移、转速、 T_4 温度、有功功率等)数据。

b) 试验内容及步骤:

1) 由启动机(60 kW的直流电机)将发动机带动到转速1030 r/min左右后, 打开调节阀点火;

2) 由启动机与燃机共同出力升速至5670 r/min左右(对应发电机480 r/min), 启动机自动脱开;

3) 由燃机独立将转速升至慢车(暖机)转速10030 r/min运行30 s, 对应发电机885 r/min;

4) 慢车30 s后升速至平衡转速12087 r/min, 对应发电机转速1000 r/min;

5) 并网发电, 将负荷调整到额定值的90%, 此处取1800 kW, 甩掉全部负荷、不熄火、不停机, 快速将转速调整到平衡转速1000 r/min。

4 试验结果及分析(Test results and analysis)

4.1 试验数据及曲线(Test data and cures)

通过上位机监控软件将试验过程中记录的数据绘制成曲线, 这里只给出转速与 T_4 温度的曲线, 如图3。

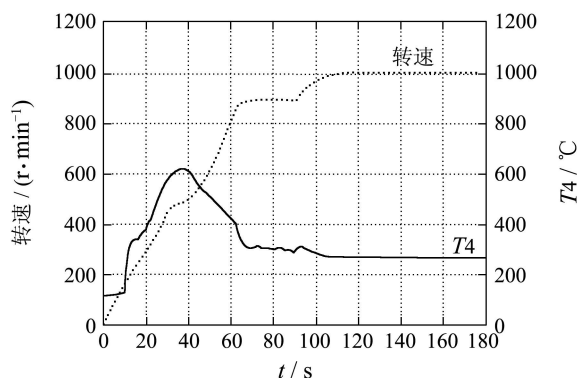


图3 启动过程中转速和 T_4 曲线

Fig. 3 Rotor speed and T_4 cures during starting process

4.2 试验结果分析(Analysis of test results)

由记录数据可见:

1) 整个机组的启动过程在105 s之内完成, 达到了快速启动的要求;

2) 整个启动过程过渡平稳, 在达到1000 r/min时, 几乎无超调;

3) 发动机 T_4 温度在启动加速前段(0~40 s)快速上升, 到转速升至500 r/min, 900 r/min左右时分别关

闭五、八级活门, T4显著回落;

4) 在平衡转速1000 r/min点, 并网前记录的转速最大值为1006 r/min, 最小值为995 r/min, 偏离中心值为

$$\delta_+ = \frac{n_{\max} - n_{\text{nom}}}{n_{\text{nom}}} = \frac{1006 - 1000}{1000} = 0.6\%, \quad (10)$$

$$\delta_- = \frac{n_{\text{nom}} - n_{\min}}{n_{\text{nom}}} = \frac{1000 - 995}{1000} = 0.5\%. \quad (11)$$

5) 在机组90%额定负载情况下突然甩掉负荷, 如图4, 转速超速, 由记录数据计算偏离中心百分比为

$$\widehat{\delta}_+ = \frac{n_{\max} - n_{\text{nom}}}{n_{\text{nom}}} = \frac{1016 - 1000}{1000} = 1.6\%. \quad (12)$$

超速远小于规定的3%的限定^[5], 而且系统在控制规律作用下30 s之内快速恢复到平衡转速状态;

6) 另外的压力波动试验表明, 系统能够在压力0.6 MPa~1.2 MPa范围内波动时正常启动及并网发电.

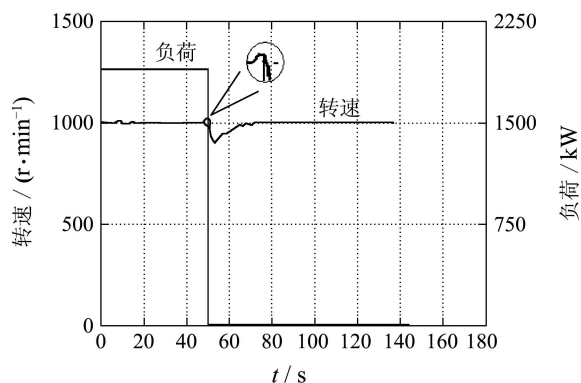


图4 突然甩负荷转速曲线

Fig. 4 Rotation speed at load rejection suddenly

5 结论(Conclusion)

针对具有时变、强非线性、强干扰、模型复杂, 燃料供应不确定性大的航机发电系统, 本文采用了基于变论域思想的自适应模糊控制, 它不需要依靠精确的数学模型, 可以产生非线性控制动作, 不但具有较好的鲁棒性, 而且具有较高的控制精度和自适应性能. 现场试验及试生产运行结果表明: 应用了该控制算法的航机发电机组启动快速、过渡平稳、几乎无超调, 在突然甩负荷时机组不熄火不停机、超速小、稳定快, 适应能力强, 具有很好的应用前景.

参考文献(References):

- [1] 李洪兴. Fuzzy控制的本质与一类高精度Fuzzy控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(6): 868–872.
(LI Hongxing. The essence of fuzzy control and a kind of fine fuzzy controller[J]. *Control Theory & Applications*, 1997, 14(6): 868–872).
- [2] 李洪兴. 模糊控制器与PID调节器的关系[J]. 中国科学(E辑), 1999, 29(2): 136–145.
(LI Hongxing. The relationships of fuzzy controller and PID controller[J]. *Science in China(E)*, 1999, 29(2): 136–145.)
- [3] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学(E辑), 1999, 29(1): 10–20.
(LI Hongxing. Variable universe adaptive fuzzy controller[J]. *Science in China(E)*, 1999, 29(1): 10–20.)
- [4] 李洪兴. 非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制[J]. 中国科学(E辑), 2002, 32(2): 211–223.
(LI Hongxing. Variable universe stable adaptive fuzzy control of non-linear system[J]. *Science in China(Ser E)*, 2002, 32(2): 211–223.)
- [5] 姜伟, 赵士航. 燃气轮机结构原理、结构与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
(JIANG Wei, ZHAO Shihang. *Theory, Structure and Application of Gas Turbine*[M]. Beijing: Science Book Concern, 2002.)

作者简介:

郑宏 (1970—), 男, 讲师, 在职博士研究生, 主要研究方向为新能源领域的自动检测与控制技术, E-mail: macrozheng@uestc.edu.cn;

徐红兵 (1966—), 男, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制及智能故障诊断, E-mail: hbxu@uestc.edu.cn;

朱贵平 (1965—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化, E-mail: zhugp-txn@petrochina.com.cn.