

文章编号:1000-8055(2013)06-1415-05

具有积分限制的单神经元 PID 控制算法

曲 涛, 郝彬彬

(中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 提出了一种抗积分饱和的变参数 PID 单神经元二次性能寻优算法。在 PID 结构简单的基础上, 兼有神经元自适应修正能力和二次性能寻优的特点, 当积分出现饱和时, 通过控制逻辑自动抑制偏差的积分, 从而提高了变参数 PID 算法的鲁棒适应性。以某双轴发动机喷口为被控对象, 对模型参数以 50% 的变化进行了控制性能的仿真。结果表明: 变参数 PID 单神经元二次性能寻优算法具有较强的鲁棒稳定性和鲁棒性能, 动态过程的最大超调量被抑制在 5% 以内, 动态调节时间仅为 0.6 s。所提出的性能寻优 PID 算法可以满足航空发动机的控制需求。

关 键 词: 抗积分饱和; 性能寻优; 单神经元; 比例-积分-微分 (PID); 自适应

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Single-neuron PID control arithmetic with integral restriction function

QU Tao, HAO Bin-bin

(Shenyang Engine Design and Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: A variable parameter quadratic performance seeking PID (proportion integration differentiation) control algorithm capable of anti-integral windup was presented. In addition to structural simplicity of PID, the algorithm features self-adaptive adjustment ability of neuron and quadratic performance seeking characteristics; the integration of error could be reduced automatically by control logic in the occurrence of integral windup, thus improving robustness and adaptability of variable parameter PID algorithm. The nozzle of a two-spool turbofan engine was taken as a controlled object, control performance simulation was conducted with model parameters varying within 50% range. The results show that variable parameter quadratic performance seeking PID control algorithm features relatively high stability and robustness, the maximum overshoot of dynamic process is reduced within 5%, the settling time is only 0.6 s. Simulation results show that the presented performance seeking PID control arithmetic can satisfy the requirement of aero-engine control.

Key words: anti-integral windup; performance seeking; single-neuron;
proportion integration differentiation (PID); self-adaptation

在航空发动机几何位置回路控制的设计中, PID 控制器以其结构简单、鲁棒性好、易于整定等

收稿日期:2012-08-20

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130617.0940.201306.1415_027.html

基金项目:国家自然科学基金(61233302)

作者简介:曲涛(1979—),男,辽宁沈阳人,工程师,主要从事航空发动机控制系统设计及试验验证技术研究。

优点,被广泛地采用.但由于被控对象通常具有时变和非线性的特点,采用固定的控制参数很难在所有状态都获得满意的控制效果.本文受到常规PID控制器的启发,利用具有自学习和自适应能力的单神经元,从机理上构成单神经元自适应PID控制器^[1-2].通过单神经元权值的自学习来达到PID控制器的比例、积分和微分系数的调节功能.这种用于控制的单个神经元算法,不但结构简单,而且能适应环境变化,具有较强的鲁棒性,近年来在各行各业开始了应用研究^[3-10].大部分的文献均是针对单神经元PID控制算法开展应用研究,分别针对各自控制需求进行了适应性修改.文献[8-10]分别研究了单神经元PID算法在航空发动机控制领域的应用,其中文献[8]研究了一种没有二次性能指标优化的单神经元PID控制算法,文献[9-10]研究了具有二次性能寻优的单神经元PID解耦控制算法.然而,这些文献都没有考虑到积分饱和现象的影响.对于一种自适应PID控制算法,如果忽略了积分饱和现象的影响,则很难在航空发动机控制回路中获得满意的控制品质.本文应用单神经元实现了具有积分限制功能的二次性能寻优PID控制算法,给出了MATLAB的仿真实现^[11-13],结果表明采用单神经元实现的自适应PID控制算法可以获得良好的控制品质.

1 单神经元PID控制

常规PID控制是针对系统偏差的一种比例、积分和微分控制的方法^[14].连续PID的控制如式(1)所示

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

其相应的增量式数字PID控制如式(2).

$$\Delta u(k) = K_i e(k) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (2)$$

式中 K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微系数, $K_i = K_p T_s / T_i$, $K_d = K_p T_d / T_s$, T_s 为采样周期.对于式(2),只要调整好比例、积分、微分系数,就可以进行简单有效的控制.

单个神经元控制器的控制表达式为

$$\Delta u(k) = \omega_1 e(k) + \omega_2 [e(k) - e(k-1)] + \omega_3 [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3)$$

比较式(2)和式(3),可以看出两种形式完全相同,所不同的只是式(2)中的系数 K_p , K_i , K_d 整定好之后就不变了,而式(3)中的系数 ω_1 , ω_2 , ω_3 可以通过神经元的自学习能力来进行自调整.因此,可以认为单神经元PID控制相当于一种在线自整定的PID控制器.这里神经元的学习功能是将无监督的Hebb学习规则和有监督的Delta学习规则相结合^[15],通过自组织进行关联搜索来产生控制信号.其规范化的学习算法如式(4)所示:

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + \\ & K \frac{\sum_{i=1}^3 \omega_i(k) x_i(k)}{\sum_{i=1}^3 \omega_i(k)} \\ \omega_1(k+1) &= \omega_1(k) + \eta_1 e(k) u(k) x_1(k) \\ \omega_2(k+1) &= \omega_2(k) + \eta_2 e(k) u(k) x_2(k) \\ \omega_3(k+1) &= \omega_3(k) + \eta_3 e(k) u(k) x_3(k) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\omega_i(k)$ 为对应于输入 $x_i(k)$ 的加权值, η_i 为学习速率系数, K 为神经元的比例系数, $u(k)$ 为控制器输出, $e(k)$ 为系统误差, $r(k)$ 和 $y(k)$ 分别表示 k 时刻的参考输入和输出, $e(k) = r(k) - y(k)$.神经元PID控制器的输入为

$$\begin{aligned} x_1(k) &= e(k) \\ x_2(k) &= e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) &= e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{aligned} \quad (5)$$

图1为单神经元PID控制系统结构.

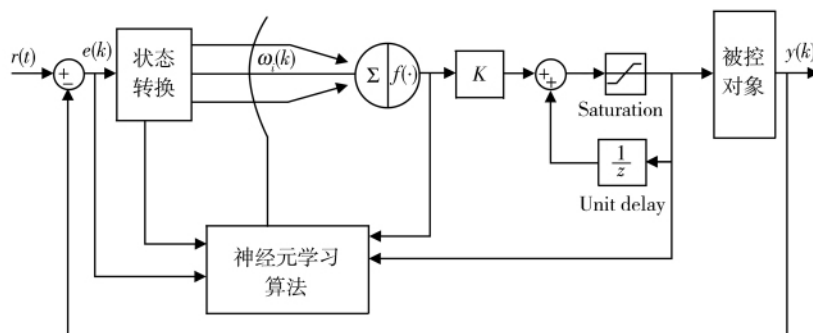


图1 单神经元PID控制系统结构

Fig. 1 Single-neuron PID control system block diagram

由此构成单神经元 PID 控制实质上为一变系数的比例-积分-微分复合控制器. $K \cdot \omega_i(k) / \left| \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) \right|$ 为对应的 PID 系数, $i=1$ 对应积分系数 K_i , $i=2$ 对应比例系数 K_p , $i=3$ 对应微分系数 K_d . 由于加权的系数求取过程应用了归一化的处理方法, 因此 K 值反映 3 个系数的真实大小, 是重要的参数. 通过自身的学习过程, 相应改变控制参数, 因此该算法具有很强的鲁棒性.

2 具有抗积分饱和功能的单神经元性能寻优 PID 算法

采用如下的二次性能指标:

$$J = \frac{1}{2} [r(k) - y(k)]^2 \quad (6)$$

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) x_i(k) / \left| \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) \right| \\ \omega_1(k) = \omega_1(k-1) + \eta_i K \cdot e_i(k) \cdot x_1(k-1) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k-1)} \cdot m \\ \omega_2(k) = \omega_2(k-1) + \eta_p K \cdot e(k) \cdot x_2(k-1) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k-1)} \\ \omega_3(k) = \omega_3(k-1) + \eta_d K \cdot e(k) \cdot x_3(k-1) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k-1)} \\ e_i(k) = e(k) \quad |e_i(k)| \leq e_{\text{limit}} \quad m = \begin{cases} 1 & \text{others} \\ 0 & |u(k)| \geq u_{\text{limit}} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中 η_i , η_p , η_d 分别为积分、比例、微分的学习速率. 与常规的单神经元寻优算法相比, 式(9)式加入了积分限制, 当误差过大时限制积分项的增长速度, 当控制饱和时, 积分项保持前值. 由于 $\partial y(k) / \partial u(k)$ 不易获得, 采用 $\text{sgn}[\partial y(k) / \partial u(k)]$ 代替, 所带来的误差可由 η_i 补偿.

3 仿 真

双轴发动机是现阶段飞机推进系统最普遍的动力装置之一, 发动机稳定状态的控制可以为转速控制或者压比控制. 本文依据文献[16]发动机落压比控制模型进行仿真, 其传递函数为

$$G(s) = \frac{0.56 \cdot (110s + 550)}{s^2 + 460s + 550} \quad (10)$$

输入为燃油流量, 其单位是 kg/s.

对发动机落压比进行控制. 采用具有二次性能寻优的单神经元 PID 控制算法, 使用 Simulink 搭建仿真模块进行仿真.

可调参数选取为 x_c , K , u_{limit} , e_{limit} , X_{itei} , X_{itep} , X_{ited} 具体参数设置如下:

式中 $r(k)$ 和 $y(k)$ 分别表示 k 时刻的参考输入和输出, $e(k) = r(k) - y(k)$, 表示 k 时刻的误差.

按照梯度下降法修正网络的加权系数 $\omega_i(k)$, 即按 $J(k)$ 对加权系数的负梯度方向搜索调整有

$$\Delta \omega_i(k) = -\eta \frac{\partial J(k)}{\partial \omega_i(k)} \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(k)}{\partial \omega_i(k)} &= e(k) \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial \omega_i(k)} = \\ &= -K \left[e(k) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \right] \cdot x_i(k) \end{aligned} \quad (8)$$

因此有

$$\begin{aligned} x_c &= [10 \quad 10 \quad 20]; \\ K &= 2.5; \\ X_{\text{itei}} &= 10, \% \text{ 积分微分学习速率}; \\ X_{\text{itep}} &= 40, \% \text{ 比例学习速率}; \\ X_{\text{ited}} &= 52, \% \text{ 微分学习速率}; \\ u_{\text{limit}} &= 40; \\ e_{\text{limit}} &= 0.2; \end{aligned}$$

通过采集到状态空间的数据, 得到的单神经元 PID 控制仿真结果, 当设定不同初始值 $x_c = [20 \ 30 \ 20]$ 时, 其控制效果无明显变化, 具体结果见图 2. 表明该算法对初始的参数设定具有一定的鲁棒性. 图 2 中纵坐标 R_{ep} 表示发动机落压比.

由于 $K \cdot \omega_i(k) / \left| \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) \right|$ 为对应的 PID 系数, 该算法中 K 对算法学习速率影响最大. 由于 $\omega_i(k) / \left| \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) \right|$ 是归一化的权值, 其取值在 $[-1, 1]$ 之间, 当 K 值设置过小时, 则得到的 PID 参数在优化的过程中选取的范围也小, 收敛速度慢, 响应时间长. 如图 3 所示, K 值分别从 0.5 逐

渐增大到 4, 超调量从 9.1% 降低到 2.5%, 调整时间从 2.9 s 降到 0.5 s. 当 K 值选取较大数值时, 内部的寻优算法可以在大范围内进行寻优, 综合得到一个比较合适 PID 参数. 但 K 值的选取并不是越大越好, 过大的 K 值反而会造成系统的超调量增大, 在稳态调整时出现小幅度摆动. 如图 4 所示, 当 K 值依次取 10, 20, 30 时, 系统的超调量逐渐增大, 依次为 3.3%, 4.16%, 5%.

由于发动机模型在飞行过程中是时变的, 假设在整个飞行包线内, 落压比回路被控对象的模型存在 50% 的建模误差. 当被控对象的增益从 50% 增益变化到 150% 增益时, 采用常规 PID 控制, 系统的超调量依次为 1.7%, 6.7% 和 9.1%, 如按 ± 0.01 作为落压比控制回路的稳态误差带, 则调整时间分别为 0.74, 0.84 s 和 2.36 s. 采用常规定数 PID 控制在被控对象的增益发生变化时, 系统超调量和调整时间都发生了较大的变化, 仿真曲线见图 5.

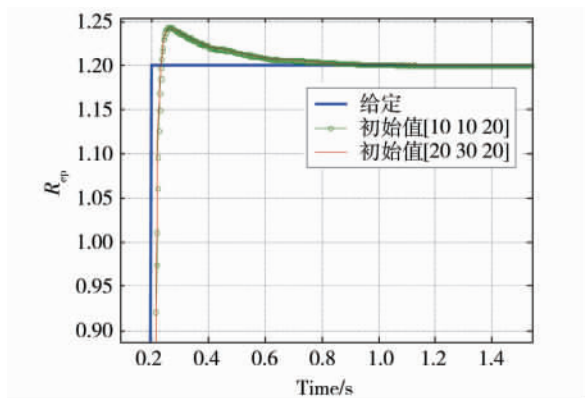


图 2 控制效果仿真曲线

Fig. 2 Control performance simulation curves

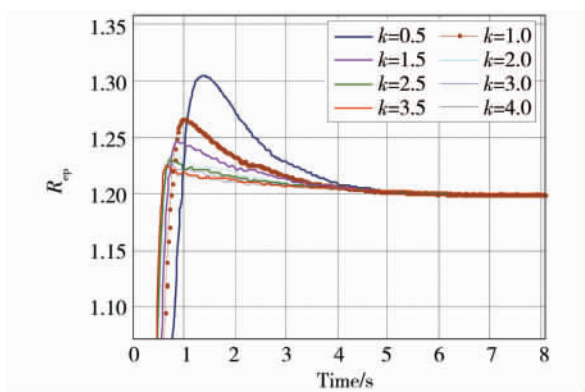


图 3 选取较小的 K 值的仿真曲线

Fig. 3 Control performance simulation curves when K is smaller

当被控对象的增益发生变化时从 50% 增益变化到 150%, 采用本文的单神经元性能寻优算法控制效果见图 6, 系统的超调量依次为 3.2%,

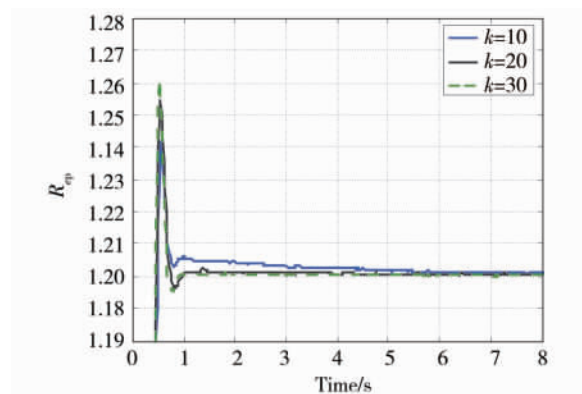


图 4 选取较大 K 值的仿真曲线

Fig. 4 Control performance simulation curves when K is larger

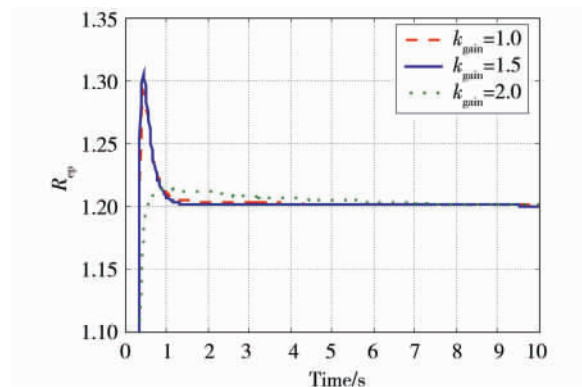


图 5 被控对象增益变化时常规 PID 控制仿真曲线

Fig. 5 Conventional PID control performance simulation curves with changing gain of controlled object

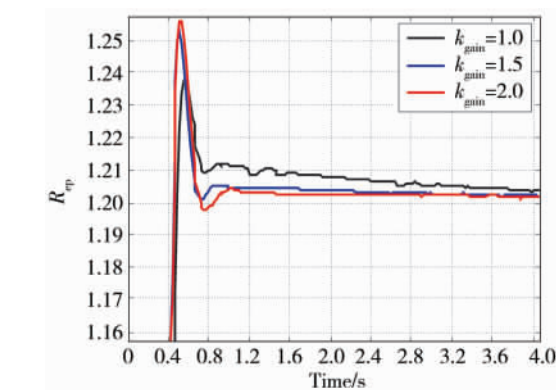


图 6 被控对象增益变化时神经元性能寻优算法仿真

Fig. 6 Quadratic performance seeking PID control performance simulation curves with changing gain

4.4% 和 4.7%。如按 ± 0.01 作为落压比控制回路的稳态误差带,则调整时间依次为 0.56, 0.48 s 和 0.48 s。可以看出,当被控对象的增益发生 50% 的变化时,系统的调整时间和超调量变化很小,仍能达到满意的控制品质。

4 结 论

本文介绍了常规 PID 和单神经元自适应 PID 之间的联系,针对航空发动机工作范围广,飞行包线内被控对象的数学模型大幅度变化,以及在实际系统中经常出现的积分饱和现象等问题,采用常规固定参数的 PID 控制很难获得满意的动态品质。研究了具有积分限制功能的单神经元自适应 PID 算法。采用系统误差作为二次性能寻求的目标函数,进行了仿真分析。当被控对象的增益系数以及初始寻优参数发生变化时,提出的算法仍能获得较好的控制品质,算法对具有自适应修正 PID 参数的能力,能适应航空发动机控制系统的需求,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 徐中,孙伟,刘晓冰.单神经元自适应 PID 控制器的研究[J].大连理工大学学报,1999,39(5):667-672.
XU Zhong, SUN Wei, LIU Xiaobing. Research of single-neuron adaptive PID controller[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39(5): 667-672. (in Chinese)
- [2] 张世杰,曹喜滨.基于单神经元自适应 PID 控制的航天器大角度姿态机动[J].上海航天,2003,20(6):9-14.
ZHANG Shijie, CAO Xibin. Single neuron adaptive PID control of spacecraft large angle attitude maneuvers[J]. Aerospace Shanghai, 2003, 20(6): 9-14. (in Chinese)
- [3] Yabutea T, Yamada T. Neural networks controller characteristics with regard to adaptive control[J]. IEEE Trans. Sys. Man and Cybern, 1992, 22(1): 170-177.
- [4] ZHANG Dongyan, LIU Yaqiu, CAO Jun. Application of single neuron adaptive PID controller during the process of timber drying[J]. Journal of Forestry Research, 2003, 14(3): 244-248.
- [5] XU Zhenyu, KONG Weina. Design and simulation of single neuron adaptive PID controller[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2011, 2(2): 188-190.
- [6] ZHU ZengHui, SUN HuiYing. Application of PID controller based on BP neural network in export steam's temperature control system[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2011, 2(1): 84-87.
- [7] SUN Shaoyuan. Application of single neuron adaptive PID regulators with auto-tuning gain in industrial parameter (pressure) closed-loop process control systems[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 1999, 6(2): 152-153.
- [8] 徐建国,张天宏.微型涡轮发动机燃油闭环控制起动方法[J].航空动力学报,2012,27(3):701-706.
XU Jianguo, ZHANG Tianhong. Start-up method of turbine engine with closed-loop fuel flowrate control[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 701-706. (in Chinese)
- [9] 马静,王镛根.航空发动机的单神经元双变量解耦控制[J].计算机工程与应用,2009,45(14):228-231.
MA Jing, WANG Yonggen. Aeroengine dual-variable decoupling control with single neuron[J]. Computer engineering and Applications, 2009, 45(14): 228-231. (in Chinese)
- [10] 杨磊,吴勇,武卫,等.基于单神经元 PID 的航空发动机解耦控制[J].微计算机信息,2010,26(1-1):57-59.
YANG Lei, WU yong, WU Wei, et al. Aeroengine controller based on neural network PID[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(1-1): 57-59. (in Chinese)
- [11] 薛定宇.控制系统仿真与计算机辅助设计[M].北京:机械工业出版社,2005:145-240.
- [12] 张世韬,杨风,郝骞.单神经元 PID 控制器研究及仿真[J].机械工程与自动化,2009(3):69-70.
ZHANG Shitao, YANG Feng, HAO Qian. Research and simulation of single neuron PID controller [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2009(3): 69-70. (in Chinese)
- [13] 林瑞全,邱公伟.基于 S 函数的神经元 PID 控制器 SIMULINK 仿真模型[J].中国仪器仪表,2001(6):4-5.
LIN Ruisong, QIU Songwei. Simulink simulation model of neuron PID controller based on S-function [J]. China Instrumentation, 2001(6): 4-5. (in Chinese)
- [14] 肖冰,王印松,杨光军.一种基于专家调节增益的单神经元 PID 控制[J].自动化技术与应用,2003,22(4):4-16.
XIAO Bing, WANG Yinsong, YANG Guangjun. A single neuron PID control based on expert [J]. Techniques of Automation and Applications, 2003, 22(4): 4-16. (in Chinese)
- [15] 刘金琨.先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [16] Ja L C, Mattingly J D. 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.