

一种计算动词 PID 控制器设计的改进*

朱晟, 王中杰, 刘勇, 夏宝亮

(同济大学控制科学与工程系, 上海, 200092)

摘要: 随着计算动词理论不断发展, 其应用也逐渐受到人们的关注。动词 PID 控制器正是这一理论实际应用的产物。文献中已对动词 PID 控制器作了初步研究, 但在动词控制规则的制定和参数整定方面存在不足。本文提出了一种新的动词控制规则制定方法, 同时给出了明确的动词 PID 参数优化方法。改进后的动词 PID 控制器具有更简单、响应速度更快和稳态精度更高等特点。

关键词: PID 控制器; 动词控制; 智能控制

An Improvement of the Design of Computational Verb PID-Controllers

ZHU Sheng, WANG Zhongjie, LIU Yong, XIA Baoliang

(Department of Control Science and Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract: With the continuous development of the computational verb theory, its application has received more attention. Verb PID controller is a production of the application of computational verb theory. Primary effort has been made to investigate verb PID controller, but there are some shortages in rules setting and parameter optimization. Here new verb rules are proposed and definite optimization of the parameters of verb PID is made. The improved verb PID controller is much easier and has faster response and better steady precision than before.

Keywords: PID-Controller; verb control; intelligent control

1 引言

在工业控制的控制器中, PID 控制器占了很大的比重。PID 控制器是最早出现的控制器类型, 由于其结构简单, 各个控制器参数有着明显的物理意义, 调整方便, 所以这类控制器很受工程技术人员的欢迎, 应用广泛。

随着控制理论的发展, 出现了许多分支, 如专

家系统、模糊逻辑、神经网络、灰色系统理论等智能控制方法, 它们又和传统的 PID 控制策略相结合, 派生出各种新型的 PID 控制器, 大大改进了传统 PID 控制器的性能, 使 PID 控制器焕发出新的活力。动词 PID 控制器^[1]也正是在这一情况下产生的。

由于原有的动词 PID 控制器设计在规则制定和参数调整上存在不足, 因此本文对此作了改进。改进后的动词 PID 控制器在动词控制规则上更能符合实际误差变化情况, 相应的 PID 参数的调整系数设定也更为合理, 能根据实际情况自动调整 PID 的各参数值, 使系统能够获得良好的控制品质。

* 国家自然科学基金项目 (70201004)、上海市青年科技启明星计划 (04QMX1429) 资助

2 计算动词理论简介^[2, 3]

计算动词理论是由我国旅美学者杨涛在模糊理论的基础上提出的。他提出,信息科学未来最大的挑战是如何将“直觉”嵌入到机器智能中去,即将人类智能中的非理性部分嵌入到机器智能中去,这里的“直觉”指的是一种无需有意识进行推理的认知能力,它与人类智能中的理性部分(静态信息)相反,是一种动态信息。为了能够将这种动态信息嵌入到机器智能中去,就必须对该动态过程进行建模,而在描述动态性上,人类语言是目前为止最综合、最具柔性和自适应性最强的建模工具。由于人类语言从广义上可划分为名词和动词两类,而模糊正是一种基于名词的计算,在描述动态性上存在一定的不足,因此杨涛提出了计算动词的概念,以更好地解决这一问题。

动词控制是应用动词集合理论,以动词语言变量和动词逻辑推理为基础的一种计算机数字控制的方法,提供一种实现基于知识(规则)的,甚至是语言描述的控制规律的机理。

动词控制的基本原理是在专家经验和相关领域知识的基础上,总结出若干条以 IF(条件) THEN(作用)形式表示的动词控制规则,构成描述具有不确定性复杂对象的动词关系,通过被控对象的输出误差和误差变化以及动词关系的推理,合成获得控制量,从而对系统进行控制。

与模糊相比,模糊系统只是提供一种形容词和名词的计算框架,是一种名词性质即静态的计算平台,而动词系统提供的是一种动词性质即动态的计算平台。模糊控制只是根据当前采样得到的输出误差和误差变化情况,对模糊控制器中的控制参数按照一定的模糊控制规则做出相应的调整,是一种静态的控制策略;动词控制不仅根据当前采样得到的输出误差,还利用当前时刻之前的一个时间段内的输出误差情况,对这一段时间内的误差及其变化做出评测,然后对动词控制器中的控制参数按照一定的动词控制规则做出相应的调整,是一种动态的控制策略。

由于动词控制是在全局的角度上对系统输出误差变化曲线进行描述,制定相应的动词控制规则,更能正确反映误差的实际变化情况,获得更好的控制效果,而且减少了动词控制规则的规则数,减少了存储资源的浪费。动词控制也是一种智能控制算法,因而对于被控对象具有良好的适应性。

动词控制系统包括:被控对象、动词化、动词推理、动词规则库、解动词化等几个模块,详见图1所示^[2]。

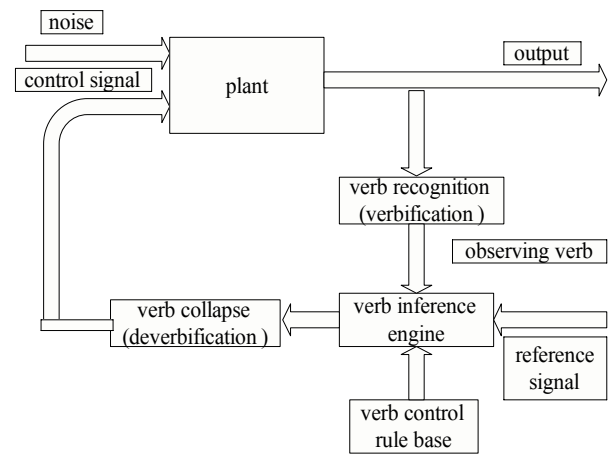


图1 典型动词控制系统方框图

3 动词PID控制器的设计

PID控制器的控制量的表达式一般是:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

为实现计算机控制,对上式离散化后得到:

$$u(k) = K_p e(k) + TK_i \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{K_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (3.2)$$

动词PID控制器的参数整定是根据实际误差e的变化曲线和规则中误差e的变化曲线的相似度,计算出相应的参数调整值,不断对 k_p 、 k_i 、 k_d 进行调整,使得被控对象具有良好的动态和静态性能。

根据常规PID控制器的结构图,可以得到动词PID控制器的结构如图2所示^[1]。

本文在文献[1]的基础上,给出了一组新型的动词控制规则,并明确给出了PID参数优化方法,最

后形成了完整的动词 PID 控制器设计方法。

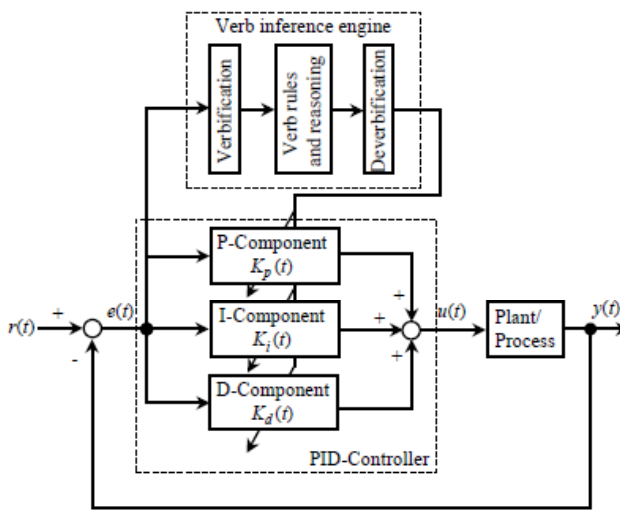


图2 动词 PID 控制器结构图

3.1 动词 PID 控制器参数的设计原则

从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等方面考虑, k_p 、 k_i 、 k_d 的作用如下:

(1) 比例系数 k_p 的作用是加快系统的响应速度, 提高系统的调节精度。 k_p 越大, 系统的响应速度越快, 系统的调节精度越高, 但容易产生超调, 甚至会导致系统不稳定。 k_p 取值过小, 则系统响应速度缓慢, 会降低调节精度。

(2) 积分系数 k_i 的作用是消除系统的稳态误差。 k_i 越大, 系统的静态误差消除越快, 但 k_i 过大, 在响应过程的初期会产生积分饱和现象, 从而引起响应过程的较大的超调。若 k_i 过小, 将使系统静态误差难以消除, 影响系统的调节精度。

(3) 微分系数 k_d 的作用是改善系统的动态特性, 其作用主要是在响应过程中抑制偏差的变化, 对偏差变化进行提前预报。但 k_d 过大, 会影响过程提前制动, 从而延迟调节时间。

k_p 、 k_i 、 k_d 的调节规则如下:

(1) 当偏差较大时, 选择适当大的 k_p 、 k_d , 使系统快速上升, 但是又不会产生过大的超调; 当偏差进入小范围时, 适当减小 k_p 、 k_d , 以提高稳态精度。

(2) 在响应的初期, k_i 应取较小的值, 以避免

积分饱和; 随着偏差的减小, 应适当地增大。

3.2 动词 PID 控制器的设计

为了便于说明, 利用所设计的动词 PID 控制器对式 (3.3) 所示的二阶系统进行控制, 使其稳态输出达到 $y(\infty)=10$ 。

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \quad (3.3)$$

3.2.1 定义误差绝对值 $|e|$ 的模糊集

根据误差变化曲线在不同时间段上所对应的曲线间的相似性, 以及模糊集区间的对称性, 对误差 e 的模糊集定义可转化为对误差绝对值 $|e|$ 的模糊集定义, 其定义为 $\{ZO, PS, PM, PB\}$ 。

根据已知条件, 可以得到 $|e| \in [0, \max|e|]$ ($\max|e|=10$), 将该数值区间选取适当的隶属度函数按照前面定义的模糊集进行划分, 得到四个模糊区间。在本文中选用下面的隶属度函数:

$$\mu_{PB}(|e|) = \max(0, 1 + (\frac{|e|}{\max|e|} - 1) - |\frac{|e|}{\max|e|} - 1|)$$

$$\mu_{PM}(|e|) = \max(0, 1 + (\max|e| - 0.5) - 3|\frac{|e|}{\max|e|} - 0.5|)$$

$$\mu_{PS}(|e|) = \max(0, 1 - 4|\frac{|e|}{\max|e|} - 0.25|)$$

$$\mu_{ZO}(|e|) = \max(0, 1 - 4|\frac{|e|}{\max|e|}|)$$

(3.4)

3.2.2 建立动词控制规则

根据上述定义的模糊集和误差变化情况, 以及 PID 参数整定规则, 建立下列七条动词控制规则:

(1) IF $|e|$ stays big, THEN k_p increases, k_i decreases, k_d increases;

(2) IF $|e|$ becomes from big to medium, THEN k_p increases, k_i decreases, k_d increases;

(3) IF $|e|$ becomes from medium to small, THEN k_p decreases, k_i decreases, k_d decreases;

(4) IF $|e|$ becomes from small to zero, THEN k_p decreases, k_i increases, k_d decreases;

(5) IF $|e|$ becomes from zero to small, THEN k_p increases, k_i increases, k_d increases;

(6) IF $|e|$ becomes from small to medium, THEN k_p increases, k_i increases, k_d decreases;

(7) IF $|e|$ becomes from medium to big, THEN k_p

increases, k_i decreases, k_d decreases.

3.2.3 k_p 、 k_i 、 k_d 初始值的整定

对 k_p 、 k_i 、 k_d 的初始值整定采用传统 PID 参数整定方法中的齐格勒-尼柯尔斯规则, 即对被控系统施加一单位阶跃信号, 其输出响应用带延迟的一阶惯性环节来近似, 根据响应曲线在拐点处的切线, 确定出延迟时间 τ 和一阶惯性环节的时间常数 T , 根据公式 (3.5) 求得 k_p 、 k_i 、 k_d 的初始值。

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{1.2T}{\tau} \\ k_i &= \frac{k_p}{T_i} = \frac{k_p}{2\tau} = \frac{0.6T}{\tau^2} \\ k_d &= k_p T_d = 0.5k_p \tau = 0.6T \end{aligned} \quad (3.5)$$

根据上述方法, 求得 k_p 、 k_i 、 k_d 的初始值分别为: $k_p = 5.3$, $k_i = 2.84$, $k_d = 2.47$ 。

3.2.4 动词推理

(1) 建立规则的数学描述

为了计算需要, 必须将动词规则的语言描述转化为相应的数学表达式。采用如下的动词规则数学描述^[1]:

$$\mathcal{E}_{become(state1, state2)}(t) = \begin{cases} \mu_{state1}(x(t)), t \in [0, \frac{T_\omega}{2}] \\ \mu_{state2}(x(t)), t \in [\frac{T_\omega}{2}, T_\omega] \end{cases} \quad (3.6)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mu_{state1}(x(0)) &\geq \mu_{state1}(x(\frac{T_\omega}{2})); \\ \mu_{state2}(x(\frac{T_\omega}{2})) &\leq \mu_{state2}(x(T_\omega)); \\ \mu_{state1}(x(0)) &\approx 1, \mu_{state2}(x(T_\omega)) \approx 1. \end{aligned} \quad (3.7)$$

为了能用计算机编程实现, 对上述的规则数学描述离散化。在此选用数据窗口长度为 $2n$, 并满足 $T_\omega = 2nT$ 。同时, 为了简化计算, 选用满足式 (3.7) 条件的线性方程作为规则的具体实现。因此, 七个动词控制规则所对应的数学描述如下^[4]:

$$\mathcal{E}_{stay}^{big}(i) = 1 - \frac{0.1i}{2n}, i = 1, \dots, 2n \quad (3.8)$$

$$\mathcal{E}_{become(big, medium)}(i) = \{\mathcal{E}_{become}^{big}(i), \mathcal{E}_{become}^{medium}(i)\}$$

$$\mathcal{E}_{become}^{big}(i) = \begin{cases} 1 - \frac{0.5i}{n}, & i = 1, \dots, n \\ \text{未定义}, & i = n+1, \dots, 2n \end{cases}$$

$$\mathcal{E}_{become}^{medium}(i) = \begin{cases} \text{未定义}, & i = 1, \dots, n \\ 0.5 + \frac{0.5(i-n)}{n}, & i = n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (3.9)$$

其余五条规则其数学描述与公式 (3.9) 相同, 在此就不一一列出了。

(2) 计算相似度 S

采用文献[4]中的相似度计算公式, 如下所示:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{observe}^{state1}(k) &= \mu_{state1}(|e(k)|); \\ a1 &= \sum_{i=1}^n [\mathcal{E}_{become}^{state1}(i) \wedge \mathcal{E}_{observe}^{state1}(k-2n+1+i)]; \\ a2 &= \sum_{i=n+1}^{2n} [\mathcal{E}_{become}^{state2}(i) \wedge \mathcal{E}_{observe}^{state2}(k-2n+1+i)]; \\ b1 &= \sum_{i=1}^n [\mathcal{E}_{become}^{state1}(i) \vee \mathcal{E}_{observe}^{state1}(k-2n+1+i)]; \\ b2 &= \sum_{i=n+1}^{2n} [\mathcal{E}_{become}^{state2}(i) \vee \mathcal{E}_{observe}^{state2}(k-2n+1+i)]; \\ \varpi &= 2 \min(\frac{a1}{b1+b2}, \frac{a2}{b1+b2}); \\ S(become(state1, state2), observe) &= \frac{a1+a2}{b1+b2} \varpi \end{aligned} \quad (3.10)$$

$2n$ 为数据窗口长度, $e(k)$ 为误差的当前采样值, $state1$ 和 $state2$ 为 $|e|$ 的四个模糊区间, 与用语言描述的规则中的状态相对应。

将当前误差绝对值 $|e|$ 的变化情况与规则所描述的情况进行匹配计算, 即将当前时刻与之前 $2n-1$ 个时刻的采样值代入公式 (3.10) 进行计算, 得到 7 个相似度值, 然后采用最大值原理选取相似度值, 与该值相对应的规则即我们所采用的控制规则。

(3) k_p 、 k_i 、 k_d 的实时计算

受文献[4]启发, 动词 PID 控制器的参数 k_p 、 k_i 、 k_d 均按如下公式进行实时调整。

$$\begin{aligned} k_p(k+1) &= k_p(k) + \alpha_p \cdot S \\ k_i(k+1) &= k_i(k) + \alpha_i \cdot S \\ k_d(k+1) &= k_d(k) + \alpha_d \cdot S \end{aligned} \quad (3.11)$$

α_p 、 α_i 、 α_d 表示 k_p 、 k_i 、 k_d 的调整系数, 其值是根据经验以及动词控制规则来给定的, 不同规则所对应的 α_p 、 α_i 、 α_d 值也有所不同。该值选取是否合适, 对控制品质有很大的作用。对于本文中的二阶被控系统, 作者给出了以下一组值:

- rule 1 $\alpha_p = 0.6, \alpha_i = -0.05, \alpha_d = 0.05$;
- rule 2 $\alpha_p = 0.3, \alpha_i = -0.05, \alpha_d = 0.03$;
- rule 3 $\alpha_p = -0.05, \alpha_i = -0.02, \alpha_d = -0.12$;
- rule 4 $\alpha_p = -0.02, \alpha_i = 0.3, \alpha_d = -0.04$;
- rule 5 $\alpha_p = 0.02, \alpha_i = 0.3, \alpha_d = 0.01$;
- rule 6 $\alpha_p = 0.03, \alpha_i = 0.05, \alpha_d = -0.03$;
- rule 7 $\alpha_p = 0.03, \alpha_i = -0.03, \alpha_d = -0.03$ 。

4 仿真结果及比较

对改进的动词 PID 控制器进行仿真研究。图 3 和图 4 分别为动词 PID 控制器与常规 PID 控制器的仿真结果。图 5^[1]和图 6 分别为改进前与改进后的误差曲线。

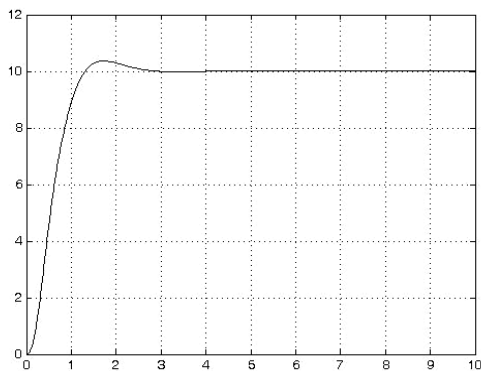


图 3 动词 PID 控制器仿真结果

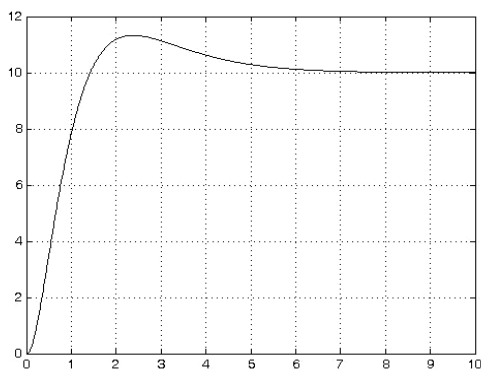


图 4 常规 PID 控制器仿真结果

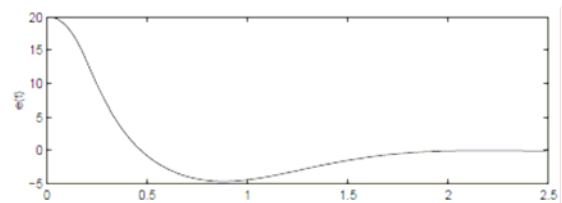


图 5 改进前的误差曲线

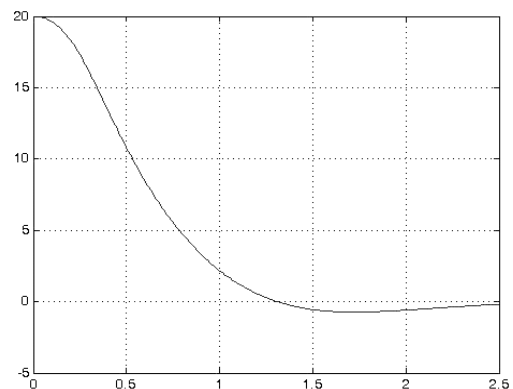


图 6 改进后的误差曲线

根据图 3 和图 4 的比较可以看出, 动词 PID 控制器比常规 PID 控制器能更快地进入稳态, 超调量明显下降, 其它性能指标也有相应的提高。这是因为动词 PID 控制器属于动态控制, 具有预测的功能, 能够提前校正系统相应的偏差。

根据图 5 和图 6 的比较可以看出, 改进后的动词 PID 控制器比改进前的动词 PID 控制具有更小的超调量, 从而说明动词控制规则与参数整定对系统响应具有很大的影响。

5 结束语

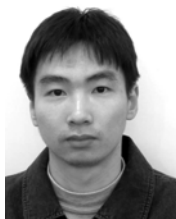
动词 PID 控制器改善了传统 PID 控制器的品质, 它能用简单的人类语言实现复杂的控制过程。在动词 PID 控制器的设计中, 关键在于动词控制规则和 PID 参数调整系数设置的合理性, 如果设置合理, 就能有效地提高动词 PID 控制器的性能, 否则会产生相反的效果。

仿真表明, 本文改进后的动词控制规则是合理的, 调整系数的选取是合适的, 利用齐格勒-尼柯尔斯规则整定动词 PID 参数的初始值是切实有效的。重要的是, 本文给出了完整的动词 PID 控制器设计

方法, 为系统控制提供了新的依据。

参考文献

- [1] T. Yang. Architectures of computational verb controllers: Toward a new paradigm of intelligent control[J]. International Journal of Computational Cognition, June 2005, 3(2): 74-101.
- [2] T. Yang. Advances in Computational Verb Systems[M]. Huntington, NY: Nova Science Publishers, Inc., May 2001.
- [3] T. Yang. Computational Verb Theory: From Engineering, Dynamic Systems to Physical Linguistics, volume 2 of YangSky.com Monographs in Information Sciences[M]. Tucson, AZ: Yang's Scientific Research Institute, Oct. 2002.
- [4] T. Yang. Applications of computational verbs to the design of P-controllers[J]. International Journal of Computational Cognition, June 2005, 3(2): 52-60.
- [5] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.9.



朱晟, 同济大学控制科学与工程系硕士研究生, 主要研究方向为智能控制。



王中杰, 于东北大学获控制理论与控制工程博士学位, 2000年至2002年在同济大学控制科学与工程系博士后流动站做博士后研究, 同年出站后留校任教, 现任同济大学控制科学与工程系副教授、硕士研究生导师。研究方向为复杂过程的建模、优化与调度, 网络控制等。