

文章编号 1004-924X(2003)05-0537-06

带自调整函数的模糊控制器 在直流电机调速系统中的应用

任维政, 盛立峰, 陈月岩
(长春工业大学 自动化系, 吉林 长春 130012)

摘要:提出一种带自调整函数的模糊控制器与二元函数的 Lagrange 插值算法相结合的控制算法,并将该算法应用于直流电机调速系统。自调整函数为指数函数,根据控制对象的具体情况和要求的不同,自调整函数中各参数可通过键盘进行调试。插值算法采用分片双二次 Lagrange 插值算法,调速实验结果表明了该控制算法的合理性和有效性。

关键词:自调整函数;模糊控制;二元插值;直流调速

中图分类号:TP273.4; TM33 **文献标识码:**A

Application of Fuzzy controller with self-adjusting function for DC motor speed-regulating system

REN Wei-zheng, SHENG Li-feng, CHEN Yue-yan

(Department of Automation, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: A control algorithm, which combines the fuzzy controller with self-adjusting function with the binary function Lagrange interpolating algorithm and is used in a DC motor speed-regulating system is discussed. The type of self-adjusting function is an index function. According to different instances and requests. The parameters in self-adjusting function can be adjusted from the keyboard using the burst double Lagrange interpolating algorithm. This control algorithm has been proved to be reasonable and effective.

Key words: self-adjusting function; fuzzy control; binary interpolating; DC speed-regulating

1 引言

在工业过程控制系统中,被控对象往往存在着结构和参数的不确定性、纯滞后或非线性耦合等特性,难以用准确的数学模型描述,因此用常规线性控制算法难以满足电机调速性能要求。模糊控制不依赖于对象的深层次知识,而是通过输入、

输出信息进行仿人思维的一种智能化的控制技术。但在过程实际应用中,对于时变参数非线性系统,模糊控制所依赖的控制规则却缺乏在线自学习或自调整能力。目前在模糊控制规则的自学习或自调整技术方面已开展了许多研究工作,设计有不同类型的模糊控制器,如带有自调整因子的模糊控制器、参数模糊自整定 PID 控制器和自适应模糊控制器等^[1]。

本文将模糊控制技术引入电机调速系统,设计了带自调整函数的模糊控制器。该模糊控制器具有控制算法简单、动态响应快、较少受电机参数影响以及具有自适应功能等特点。但因该模糊控制器输出的控制变量是离散的,故本系统又引进了二元函数的 Lagrange 插值算法以便获得连续精确的控制变量,从而消除控制器的调节死区和静差。

2 系统控制原理

系统控制原理如图 1 所示。系统采用带有自调整函数的模糊控制器和二元函数的 Lagrange 插值算法来实现对直流电机转速进行控制。

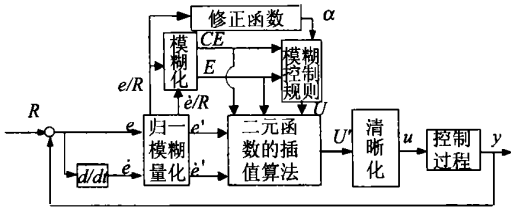


图 1 系统控制原理图

Fig. 1 Theory frame graph of the system

为使本系统能够快速精确地对直流电机进行调速,建立一个修正函数。当偏差大时,对偏差的影响给予较大的权重,以尽快消除偏差,提高响应速度;当偏差较小时,为避免系统的超调,对偏差变化的影响给予较大的加权,以尽快进入稳态^[2]。故修正函数 选择为

$$= k \left| \frac{e}{R} \right|^p, \quad (1)$$

式中, e 为系统偏差; R 为系统的设定值; p, k 为待定参数。通过设置合理的 p, k 值,修正函数 可以根据偏差 e 的变化,灵活调整模糊控制规则。

本系统的模糊控制规则的形式为

$$U = \begin{cases} < E >, & |E| \leq E_m \\ < E + (1 - a) CE >, & E_w < |E| < E_m \\ < a E + (1 - a) CE + E >, & |E| \leq E_w \end{cases}, \quad (2)$$

式中, α 为修正函数, a 为偏差积分权系数, E_m, E_w 为偏差的阈值^[3] ($E_m > E_w$)。图 2 给出了修正函数 与归一化偏差 (e/R) 和参数 p, k 之间的关系。为加强 CE 的作用,取参数 $p \in [0.5, 3]$, 参数 k 的取值范围与 p 有关。为使偏差初值较大时过

程响应加快,取 $k > 1$,但当 $|E| = E_m$ 时,应满足 $(1 - a) > 1$,故由式(1) 可求出 k 的取值范围为

$$1 < k \leq \left| R/E_m \right|^p, \quad (3)$$

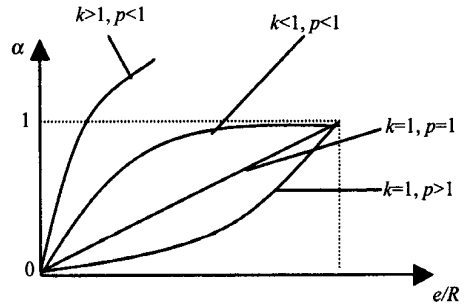


图 2 修正曲线

Fig. 2 Correction curve

在本系统中,设定值 R , 参数 p, k 通过键盘设定和调节。偏差集合 E 及偏差变化率集合 CE 的模糊集为 { 负大, 负较大, 负中, 负较小, 负小, 零, 正小, 正较小, 正中, 正较大, 正大 }。偏差集合 E 及偏差变化率集合 CE 的论域为

$$\{ E \} = \{ -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5 \}, \quad (4)$$

$$\{ CE \} = \{ -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5 \}, \quad (5)$$

则归一模糊量为

$$E = \begin{cases} 5 \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.8 \\ 4 \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.5 \\ 3 \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.3 \\ 2 \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.1 \\ 1 \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.03 \\ 0 \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.03 \end{cases}, \quad (6)$$

$$CE = \begin{cases} 5 \operatorname{sgn}(\dot{e}), |\dot{e}/R| & 0.3 \\ 4 \operatorname{sgn}(\dot{e}), |\dot{e}/R| & 0.2 \\ 3 \operatorname{sgn}(\dot{e}), |\dot{e}/R| & 0.15 \\ 2 \operatorname{sgn}(\dot{e}), |\dot{e}/R| & 0.08 \\ 1 \operatorname{sgn}(\dot{e}), |\dot{e}/R| & 0.02 \\ 0 \operatorname{sgn}(\dot{e}), |\dot{e}/R| & 0.02 \end{cases}, \quad (7)$$

$$e = \begin{cases} 5 \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.8 \\ (5 - (0.8 - e/R)/0.3) \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.5 \\ (4 - (0.5 - e/R)/0.2) \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.3 \\ (3 - (0.3 - e/R)/0.2) \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.1 \\ (2 - (0.1 - e/R)/0.07) \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.03 \\ 0 \operatorname{sgn}(e), |e/R| & 0.03 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\dot{e} = \begin{cases} 5 \operatorname{sgn}(e), |\dot{e}'/R| < 0.3 & \\ (5 - (0.3 - \dot{e}'/R)/0.1)\operatorname{sgn}(e), |\dot{e}'/R| < 0.2 & \\ (4 - (0.2 - \dot{e}'/R)/0.05)\operatorname{sgn}(e), |\dot{e}'/R| < 0.15 & \\ (3 - (0.15 - \dot{e}'/R)/0.7)\operatorname{sgn}(e), |\dot{e}'/R| < 0.08 & \\ (2 - (0.08 - \dot{e}'/R)/0.6)\operatorname{sgn}(e), |\dot{e}'/R| < 0.02 & \\ 0\operatorname{sgn}(e), |\dot{e}'/R| < 0.02, & \end{cases} \quad (9)$$

当设定值 R , 参数 p, k 确定后, 由式(1) ~ (9) 可生成模糊控制表即函数 $U = f(E, CE)$ 函数表。

按以上方法获得的控制变量 u 是离散的, 可能造成控制器的调节死区和无法消除稳态误差。为此, 引进了二元函数的 Lagrange 插值算法。由二元函数的 Lagrange 插值公式得

$$U = f(e, \dot{e}) = \sum_{k=0}^n \sum_{r=0}^m l_k(e) l_r(\dot{e}) f(e_k, \dot{e}_r), \quad (10)$$

式中

$$l_k(e) = \prod_{t=0, t \neq k}^n \frac{e - e_t}{e_k - e_t}, \quad (11)$$

$$\tilde{l}_r(\dot{e}) = \prod_{t=0, t \neq r}^m \frac{\dot{e} - \dot{e}_t}{\dot{e}_r - \dot{e}_t}, \quad (12)$$

理论和实践都证明高次插值是不可取的, 因此本系统选用分片双二次插值。设

$$e_t = e_0 + i h \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (13)$$

$$\dot{e}_t = \dot{e}_0 + j h \quad j = 0, 1, \dots, m, \quad (14)$$

$h > 0, \quad h > 0$, 当 (e, \dot{e}) 给定后, 且 (e, \dot{e}) 满足

$$e_t - \frac{h}{2} < e < e_t + \frac{h}{2}, \quad 1 \leq i \leq n - 1, \quad (15)$$

$$\dot{e}_t - \frac{h}{2} < \dot{e} < \dot{e}_t + \frac{h}{2}, \quad 1 \leq j \leq m - 1, \quad (16)$$

应选择 (e_k, \dot{e}_r) ($k = i - 1, i, i + 1, r = j - 1, j, j + 1$) 为插值点, 相应的插值多项式为

$$U = f(e, \dot{e}) = \sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{r=j-1}^{j+1} l_k(e) \tilde{l}_r(\dot{e}) f(e_k, \dot{e}_r), \quad (17)$$

式中

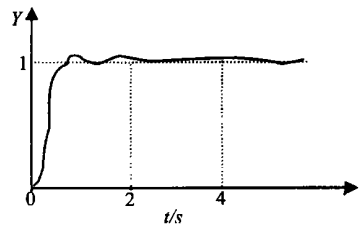
$$l_k(e) = \prod_{t=i-1, t \neq k}^{i+1} \frac{e - e_t}{e_k - e_t}, \quad k = i - 1, i, i + 1, \quad (18)$$

$$\tilde{l}_r(\dot{e}) = \prod_{t=j-1, t \neq r}^{j+1} \frac{\dot{e} - \dot{e}_t}{\dot{e}_r - \dot{e}_t}, \quad r = j - 1, j, j + 1, \quad (19)$$

如果 $e = e_1 - \frac{h}{2}$ 或 $e > e_{n-1} + \frac{h}{2}$, 则在式(15)中

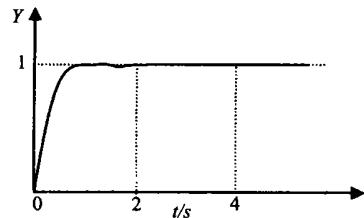
取 $i = 1$ 或 $i = n - 1$; 如果 $\dot{e} = \dot{e}_1 - \frac{h}{2}$ 或 $\dot{e} > \dot{e}_{m-1} + \frac{h}{2}$, 则在式(16)中取 $j = 1$ 或 $j = m - 1$ 。

采用插值算法后, 相当于在论域内的分档趋近于无穷大。这样不仅能满足由式(1) ~ (9) 可以生成模糊控制规则表, 而且还在控制规则表相邻分档之间以线性插值方式补充了无穷个新的、经过细分的控制规则, 完善了原有的控制规则, 从根本上消除了调节死区和量化误差, 克服了由于量化误差而引起的稳态误差和稳态颤振现象。图 3 中(a)为不采用插值算法阶跃响应仿真曲线; (b)为采用插值算法的阶跃响应仿真曲线。本系统采用直流脉冲宽度调制(PWM)方式控制电枢端电压, 从而达到控制电机转速的目的。通过霍尔元件, 采用 M/T 法对电机的转速进行检测, 并把转速反馈给单片机从而形成对电机转速的闭环控制。



(a) 不采用插值算法阶跃响应

(a) Step response without interpolating algorithm



(b) 采用有插值算法阶跃响应

(b) Step response with interpolating algorithm

图 3 阶跃响应仿真曲线

Fig. 3 Step response artificial curve

3 系统硬件设计

本系统由控制电路、主电路和转速检测电路组成。控制电路以 89C51 单片机为核心, 包括键盘显示电路、看门狗电路等, 主电路采用 H 型可逆 PWM 变换器电路^[4], 转速检测电路由霍尔元件和倒向器构成。系统硬件原理图如图 4 所示。

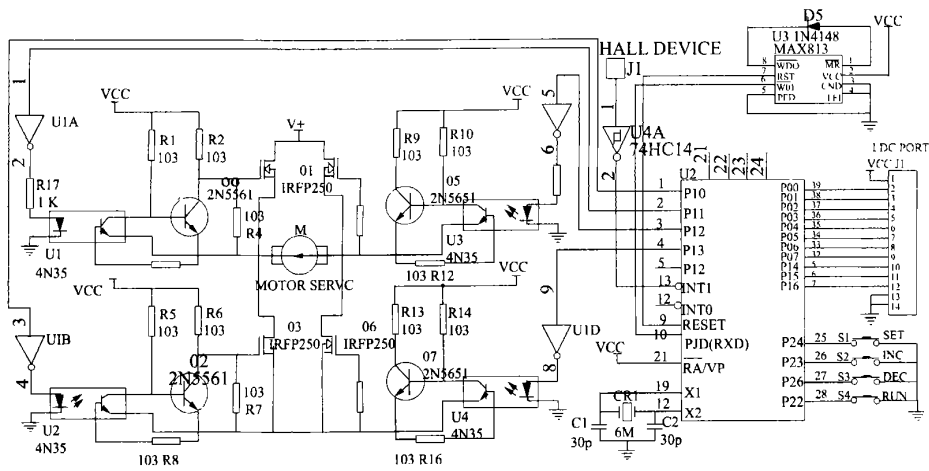


图 4 系统硬件原理图

Fig. 4 Hardware theory of the system

4 系统软件设计

软件设计采用模块化结构,主要由监控主程序模块、运算程序模块、检测算法程序模块、控制算法模块构成。如图5所示,监控主程序模块包括

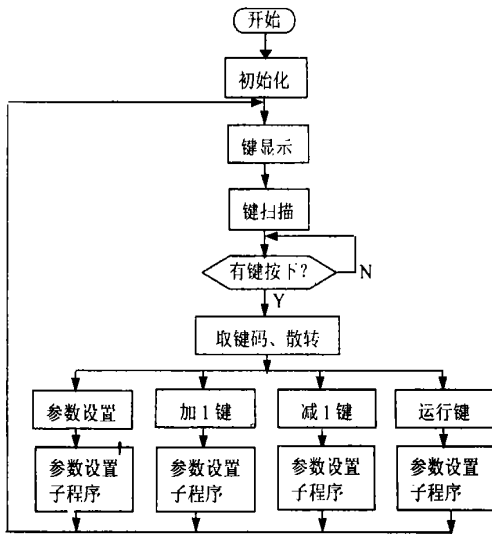


图 5 监控主程序流程图

Fig. 5 Main program flow diagram

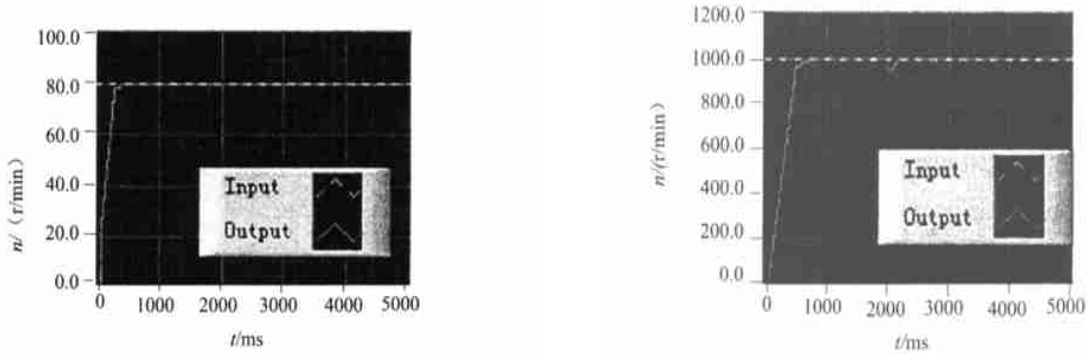
初始化管理、键盘显示管理、中断管理及时钟管理;运算程序模块主要实现浮点数处理和数学运

算等功能^[5];检测算法程序模块用于实现 M/T 法测速,反馈电机转速,形成闭环控制;控制算法模块用于生成模糊控制表和二元函数插值计算。

系统在完成初始化后,通过键盘输入设定值 R 及参数 p, k 。参数 $p \in [0.5, 3]$, k 的取值范围为 $1 \leq k \leq |R/E_m|^p$ 。参数 p, k 的值可根据现场情况进行调试,以达到最佳调速效果。

5 实验结果分析及结论

实验采用的电机是由天津安全电机有限公司生产的 130SZK05 型宽调速直流伺服电机,额定电压为 47 V,额定转矩为 0.6 N·m,额定电流为 5.7 A,额定转速为 3 000 r/min。如图 6(a)所示,当输入转速 $n = 80$ r/min 时,起动时间短,无超调,无堵转现象;如图 6(b)所示,当输入转速 $n = 2 700$ r/min 时,上升时间 $t_r = 0.6$ s,调节时间 $t_s = 1.1$ s,超调量 $\% < 1.8\%$ 。图 6(a)与(b)对比可知,调速比可达到 1:30 以上;图 6(c)为输入转速 $n = 1 000$ r/min 且在 $t = 1$ s 时加入阶跃扰动的调速结果。图 6(d)的实验条件与图 6(c)一样,采用数字 PI 控制算法^[6]的调速结果。由图 6(c)与图 6(d)中的实验曲线可知,该控制算法起动时间短且无超调。加扰动后,转速波动小,转速无静差,鲁棒性强,控制品质优于数字 PI 控制算法。

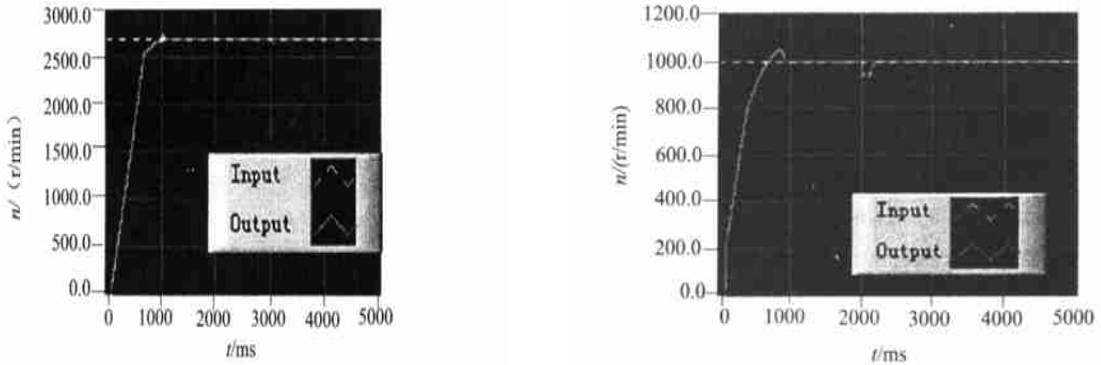


(a) $n = 80 \text{ r/min}$ 时的调速结果

(a) Speed-regulating result with $n = 80 \text{ r/min}$

(c) 加扰动量时的调速结果

(c) Speed-regulating result with disturbance



(b) $n = 2700 \text{ r/min}$ 时的调速结果

(b) Speed-regulating result with $n = 2700 \text{ r/min}$

(d) 加扰动量采用 PI 控制算法的调速结果

(d) Speed-regulating result of PI control algorithm with disturbance

图 6 实验结果

Fig. 6 Experiment result

本系统的研制对于提高精密仪器、精密机床、家用电器等领域的直流电机的调速精度和响应速度具有一定的实用价值。

参考文献:

[1] 张清华. 一种带智能积分的自调整因子模糊控制器[J]. 工业仪表与装置, 1996, 5(6): 23-25.
 ZHANG Q H. A self-tuning factor fuzzy logic controller with intelligent integration[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 1996, (6): 23-25. (in Chinese)

[2] MIR S, ELCULUK M E. Fuzzy implementation of direct self control of inductance machines [J]. *IEEE Trans on Industry Application*, 1994, 30(3): 729-735.

[3] 刘国荣, 阳宪惠. 模糊自适应 PID 控制器[J]. 控制与决策, 1995, 10(6): 558-562.
 LIU G R, YANG X H. Fuzzy adaptive PID controller[J]. *Control and Decision*, 1995, 10(6): 558-562. (in Chinese)

[4] 文孟莉, 周湘杰. 8098 单片机控制的 PWM 直流调速系统[J]. 电气自动化, 2001, 23(5): 12-14.
 WEN M L, ZHOU X J. A PWM DC SR system controlled by 8098[J]. *Electrical Automation*, 2001, 23(5): 12-24. (in Chinese)

[5] 刘伟. 直流电机在微电子领域中的应用[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 311-314.
 LIU W. Application of DC motor in microelectronics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(4): 311-314. (in Chinese)

- [6] 张志远,万沛霖. 具有复合模糊控制的智能型电动机调速系统研究[J]. 电气自动化,2001,(5):4-6.
ZHANG Z Y. WAN P L. Research on the intelligent electric motor SR system with compound fuzzy control [J].
Electrical Automation, 2001,(5):4-6. (in Chinese)

作者简介:任维政(1974-),男,吉林人,长春工业大学自动化系硕士研究生,主要研究方向:检测技术与仪器,E-mail:albert-ren@sohu.com;

盛立峰(1965-),男,吉林人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究方向:电力电子及电力传动,检测技术与仪器,微弱信号检测,E-mail:masslf@sina.com;

陈月岩(1973-),女,吉林人,长春工业大学自动化系硕士研究生,主要研究方向:电力电子及电力传动。

欢迎订阅《光机电信息》(月刊)

《光机电信息》是一份为工程师、研究者、科学家和技术专家提供国内外有关光学、光电子学和精密机械综合消息的月刊。它从技术和商业两方面报道和分析上述领域的最新研究进展和发展趋势,其特点是信息量大且传播速度快。

完整的报道范围

《光机电信息》以全方位的视角瞄准国际前沿,紧盯国内外光机电领域发展的热点和焦点,每期以专题形式发布。主要报道光学、光电子学、光电工程、精密机械、激光、光通信、光学仪器、发光学、显示技术、医用光学、光学材料、微纳技术、微机械系统(MEMS)、先进加工制造技术等诸多读者感兴趣的领域。

有效的报道内容

《光机电信息》是国内致力于光电子领域的工程师、管理人员、科学家、研究者和技术专家的必读之物。《光机电信息》每月都会向其所服务的产业提供以下栏目:各种专题报道、市场纵横、科技简讯、产品放送、设计与应用和专题信息长廊等。

广告投资的最好选择

《光机电信息》是一份每月发行量达5 000余份的资深杂志,这意味着每年有数 10 万人次的顶级工程师和研究人员阅读《光机电信息》。您的广告会被所有《光机电信息》的读者看到。请抓住机遇,扩大贵公司在中国市场的知名度。

欲投放广告于《光机电信息》 请按下列地址联系

联系人:高晓萍

传 真:(0431)5682346

电 话:(0431)6176853

地 址:长春市东南湖大路 16 号 邮 编:130031

E-mail:xxfw@ciomp.ac.cn