

管捆成形电液系统自学习粗糙—模糊 PID 控制研究

倪 敬 项占琴 潘晓弘 吕福在

(浙江大学现代制造工程研究所 杭州 310027)

摘要: 针对浙江大学研制的智能管捆成形电液位置伺服系统,应用粗糙集数据分析的理论,提出一种有自学习能力的粗糙—模糊 PID 控制方法。该方法无需人为经验干预,可以直接根据从数据中提取的规则,将输入映射到输出子空间来进行控制规则的动态自学习。把这种方法应用于管捆成形电液位置伺服系统的同步跟踪控制,实际的运行结果表明,该方法明显优于常规模糊 PID 控制,并能获得满意的稳态和动态单缸位移跟踪和双缸同步控制精度。

关键词: 电液管捆成形 粗糙集数据分析 自学习粗糙—模糊 PID 控制

中图分类号: TK271

0 前言

由浙江大学研制的智能电液管捆成形系统^[1]是可按程序设定要求,自动将重载钢管分层成排的堆垛成规定形状(正六边形,三角形等)并打捆包装的智能机械。由于钢管的重载性(管最长 15 m,单管最大质量 780 kg),成形系统采用了电液伺服控制和电磁吸盘控制方案。系统使用了两竖直液压缸(间距 6.6 m)提升管排、两水平液压缸(间距 16 m)水平前后移送管排来实现管捆的成形。

目前对管捆智能成形这类电液位置伺服控制系统研究的文章很多。模糊控制^[2]、自适应控制^[3]和变结构控制^[4]是最常用的控制策略。但是模糊控制的控制规则过分依赖经验知识库,缺乏系统细致描述和自学习能力;自适应控制又因其难以保证系统的大范围稳定而限制它的应用范围;变结构控制由于存在如何选取消除抖动边界层问题,使其在实际工程中比较难于应用。由此,文献[5]采用了基于运行性能评价的双控制器式的模糊 PID 控制方案,通过在线运行时控制规则的自学习,较好的解决了单缸位移跟踪和双缸同步控制的稳态误差问题。但其动态性能还有待改善,还有其控制规则的产生和优化完全依赖于性能评估器,这使得性能评估计算显得十分烦杂,很容易导致系统无法响应,甚至造成安全事故。

近年来,许多学者将粗糙集数据分析方法(RSDA)

和传统的 PID 控制器设计结合起来,以粗糙规则监督和调节控制器的参数,取得很好的控制效果^[6-7]。这里将把粗糙集的数据简化能力用于模糊控制的规则提取、前件结构和输出参数的决策来建立一种具有自学习能力的粗糙—模糊控制方法,并把这种方法应用于实际电液管捆成形控制,获得了满意的控制效果。

1 问题描述

由于水平回路和竖直回路相类似,以下叙述均以竖直液压缸系统为例。根据文献[5]采用的控制器,常规模糊 PID 控制器结构如图 1 所示,其中的专家控制器提供运行过程中的在线控制参数调整、每次运行的性能评估和初始参数智能设定功能。其中在线参数调整信息系统包括 6 个条件属性:两个单缸的跟踪位移误差 e_1 和 e_2 、两个单缸的跟踪速度误差 v_1 和 v_2 、一个双缸的相对位置误差 $e_s=e_2-e_1$ 和一个双缸的相对速度误差 $e_v=v_2-v_1$; 6 个决策属性:两缸控制参数的增量(%),分别为: ΔK_{P1} , ΔK_{I1} , ΔK_{D1} ; ΔK_{P2} , ΔK_{I2} , ΔK_{D2} 。性能评估信息系统的条件属性包括与在线参数调整系统对应的 6 个条件属性的均值以及 1 个评价结果决策属性。初始参数设定信息系统包括 7 个条件属性:钢管的炉号、批号、每层管支数、单管最大质量、层最大管长、外径、壁厚; 3 个决策属性分别为两缸的初始控制参数(两缸采用一组相同的值)。因此,自学习粗糙—模糊 PID 控制器一方面要为实时参数调整设计尽可能简化和优化的系统控制规则,以便于其实时控制实现(硬件系统

为西门子 S7-300 PLC：AD 时间 10 ms，控制间隔 30 ms)；另一方面要对每次运行结果做性能评估，为初始参数设置提供便利。

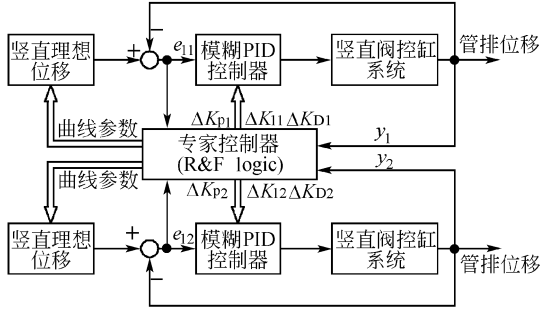


图 1 基于性能评估的两级控制器结构简图

2 自学习粗—模 PID 控制器设计

该控制器结合了粗糙控制和模糊控制的优点，其自学习功能主要是通过应用 RSDA，结合粗糙信息测度预测理论^[9]，并以此建立的规则匹配度和适应度概念实现的。

2.1 粗糙集数据分析方法

设信息系统 $I = \langle U, \Omega, V_q, f \rangle$, $q \in \Omega$, 其中 U 是论域； Ω 为属性集合； V_q 为属性值的值域集合； f 为信息函数， $f_q: U \rightarrow V_q$ 。

定义 1^[8]： $x, y \in U$, 对于 $Q \subseteq \Omega$, R_Q 是 U 上的一个等价关系，如果满足 $x R_Q y \Leftrightarrow (\forall q \in Q) (f_q(x) = f_q(y))$ ，则称 R_Q 是 x, y 的一个不可分辨关系。

定义 2^[8]： 设 $P, Q \subseteq \Omega$ ，如果等价关系 R_Q 定义的每一个等价类都属于等价关系 R_P 定义的等价类，则称 P 依赖于 Q ，记作： $Q \rightarrow P$ 。

依赖关系 $Q \rightarrow P$ 表达了如下规则：假设 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_r\}$ 对每一个 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ，其中 $t_i \in V_{q_i}$ ，唯一决定了属性值集合 $d = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$ ，其中 $d_i \in V_{p_i}$ ，即

$$(\forall x \in U)[(f(x, q_1) = t_1, \dots, f(x, q_n) = t_n) \Rightarrow f(x, p_1) = d_1, \dots, f(x, p_r) = d_r]$$

如何在保持 $Q \rightarrow P$ 成立的前提下，得到规则的最小化简，就是 RSDA 所要解决的问题，在此引用了参考文献^[9]的粗糙信息测度预测化简方法。

定义 3^[11]：粗糙隶属函数。元素 α 在关系 R 下对集合 X 的粗糙隶属函数为

$$\mu_X^R(\alpha) = |XI[\alpha]_R| / |[a]_R \quad (1)$$

式中 $|\cdot|$ 表示集合中元素的个数； $[a]_R$ 为包含元素 α 的等价类，显然， $0 \leq \mu_X^R(\alpha) \leq 1$ 。

2.2 规则的匹配度和适用度

利用 RSDA 的化简方法，从原始数据中提取出 m 条 $Q \rightarrow P$ 规则，其中第 i 条规则 R_i 为

R_i : 如果 $f(x, q_1) = t_{i1}, \dots, f(x, q_n) = t_{in}$

则 $f(x, p_1) = d_{i1}, \dots, f(x, p_r) = d_{ir}$

其中 $t_{ij} \in V_{q_j}, d_{ik} \in V_{p_k}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots,$

$n; k = 1, 2, \dots, r$ 。

对于一组输入 $I = [I_1, I_2, \dots, I_n]$ ，定义函数

$$g_i(k) = \begin{cases} 1 & I_k = t_{ik} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$ 。则输入 I 与第 i 条规则的匹配度可定义为

$$C_i = \frac{\sum_{k=1}^n g_i(k)}{n} \quad (3)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, m$ ，它表明了输入 I 与第 i 条规则的匹配程度。

规则是从数据中提取出来的，但各个规则的可靠程度是不一样的，这里用粗糙隶属函数来表示规则的可靠程度，并和匹配度相结合得出规则的适用度。根据粗糙隶属函数的定义，对于第 i 条规则第 j 个属性值相对于结论等价类 X 的粗隶属函数为

$$\mu_X^{q_j}(t_{ij}) = \frac{|XI[t_{ij}]_{q_j}|}{|[t_{ij}]_{q_j}|} \quad (4)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; X = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{ir}]_P$ 。 $\mu_X^{q_j}(t_{ij})$ 越大说明由属性值 t_{ij} 推出结论的可能性越大； $\mu_X^{q_j}(t_{ij}) = 1$ 说明当 $f(x, q_j) = t_{ij}$ 时，结论肯定成立。于是输入 I 对于第 i 条规则的适用度 μ_i 为

$$\mu_i = \max\{\mu_X^{q_1}(t_{i1})g_i(1), \mu_X^{q_2}(t_{i2})g_i(2), \dots, \mu_X^{q_n}(t_{in})g_i(n)\} \quad (5)$$

2.3 控制器设计算法

控制器的具体实现是基于系统的输入输出数据的，具体设计过程大致分为如下三步。

(1) 数据离散化处理。在进行 RSDA 之前首先应将连续的数据量化，即对于连续的数据进行适当的区间划分，并将划分结果用 1, 2, ... 表示。这里采用模糊 C -mean 聚类方法，对输入数据进行聚类，从而实现连续数据的离散化。这里需要注意的一点是，假设所获得的数据是合理的，本身是不矛盾的，即没有输入完全相同而输出相差很远的，则聚类以后形成的决策表应该是一致的。如果发生不一致的情况，则是由于聚类区间划分不当造成的。这时需

要分析不一致规则产生的原因,并对相应的区间进行再划分或合并,直至所形成的规则完全一致为止。

(2) 基于粗糙集的数据分析。① 数据过滤:数据过滤作为 RSDA 的准备工作,目的是滤掉对所有规则都不必要的属性,为进一步化简作准备。文献[10]给出了一种基于二值信息系统的数据过滤方法,并证明了该方法能在不改变信息系统依赖性的前提下,增强规则的统计特性。这里引用了这种数据过滤方法。② 利用 RSDA,化简决策表消除冗余的属性和属性值,这里引用了文献[11]的化简方法。

(3) 模糊前件辨识和优化(模糊化)。根据得到的规则,选用梯形分布曲线,进行输入空间的优化模糊划分。文献[12]具体讨论了成员函数的优化划分方法,这里引用了这种方法。

(4) 对模糊输出(解模糊)的决策。利用式(3)计算各条规则中的匹配度,这时最适合的规则可能不止一个,设其下标集合为 $F=\{r_1, r_2, \dots, r_k\}$, 对应的决策为 $D=\{D_{r_1}, D_{r_2}, \dots, D_{r_k}\}$ 。然后用对应决策输出分别计算适用度 $\{\mu_{r_1}, \mu_{r_2}, \dots, \mu_{r_k}\}$, 最后求取输出

$$O = \frac{\sum_{i \in F} \mu_i \times f_i(\mathbf{I})}{\sum_{i \in F} \mu_i} \quad (6)$$

式中 $f_i(\mathbf{I})$ 为第 i 条规则的模糊输出。

以上分析方法构造了如图 2 所示的 R&F 自学习控制系统,将此系统复合到图 1 的控制器结构中,就构成了提出的控制器。

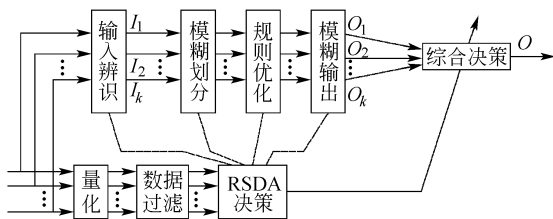


图 2 基于 RSDA 的 R&F 自学习决策系统

3 控制器设计实例

对本文的三个信息决策系统来说,在线参数调整决策系统是系统控制的关键,它直接控制着各个比例阀,影响着系统的可靠运行,因此其决策规则应是简单、可靠且易实现的。分析在线参数调整决策系统,具体控制实现举例如下,取调试过程中使用的 70 条数据为规则产生数据。

(1) 各属性的离散化处理。首先要对各连续属性进行聚类分析,聚类结果得到等价类的区间划分如表 1 所示。其中 $\Delta K_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 表示 6 个参数区间划分。经规则的一致性检验后,发现存在矛盾规则,因此需要在聚类的基础上再进一步划分区间,最终在消除矛盾规则后得到较为理想的区间划分。

(2) 粗糙集数据分析。首先进行数据过滤,消除不必要的属性和属性值。过滤后条件属性减少为 3 个,决策属性为 4 个;条件属性值由原来的 37 个减少为 13 个。接着按 RSDA 消除完全相同的规则,再对每条规则化简不必要的属性值,最终得到如表 2 所示的 13 条规则。至此,已经从系统中提出了关键的规则。

(3) 模糊前件辨识。根据 RSDA 分析的结果对模糊空间进行重新划分,确定特定的成员函数形式。以上工作都是可以在实时控制之前完成,下载到工业 PLC 的 CPU 里。

(4) 模糊决策输出。一般情况下,控制器应对 3 个输入进行离散化,后根据式(2)计算 $g_i(k)$, 然后根据式(4), (5)求每条规则的适用度 μ_i , 再利用模糊输出和式(6)求取控制输出。但是实际实时参数调整时,由于受到 PLC 运行速度的限制,可求输入的一个最佳匹配规则 $\max\{C_i\}$, 然后直接根据最佳规则将输入映射到输出上。

以上是对在线参数调整系统的自学习控制设计介绍,另外两个信息系统辨识和决策设计与此相类似,这里就不再重复叙述。

表 1 各连续属性等价类划分区间

变量	聚类后的等价类划分区间	消除不一致规则后的等价类区间
e_1	$\leq -10, (-10, 0), [0, 10], [10, 20], [20, 30], \geq 30$	$\leq -5, (-5, 5), [5, 10], [10, 20], [20, 30], [30, 40], \geq 40$
e_2	$\leq -10, (-10, 0), [0, 10], [10, 20], [20, 30], \geq 30$	$\leq -5, (-5, 5), [5, 10], [10, 20], [20, 30], [30, 40], \geq 40$
v_1	$\leq -15, (-15, 0), [0, 15], \geq 15$	$\leq -15, (-15, -5), [-5, 5], [5, 15], \geq 15$
v_2	$\leq -15, (-15, 0), [0, 15], \geq 15$	$\leq -15, (-15, -5), [-5, 5], [5, 15], \geq 15$
e_3	$\leq -20, (-20, -10), [-10, 0], [0, 10], [10, 20], \geq 20$	$\leq -20, (-20, -10), [-10, -5], [-5, 5], [5, 10], [10, 20], \geq 20$
e_4	$\leq -15, (-15, 0), [0, 15], \geq 15$	$\leq -15, (-15, -5), [-5, 5], [5, 15], \geq 15$
ΔK_i	$\leq -10, (-10, -5), [-5, 0], [0, 5], [5, 10], \geq 10$	$\leq -10, (-10, -5), [-5, 0], [0, 5], [5, 10], \geq 10$

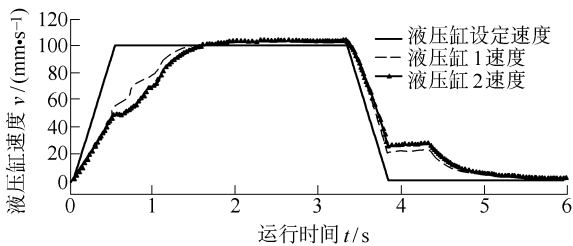
表 2 控制参数在线调整的决策规则

编号	位移跟踪误差 e_1	相对位移误差 e_s	相对速度误差 e_v	比例增益增量 ΔK_{P1}	积分增益增量 ΔK_{I1}	比例增益增量 ΔK_{P2}	积分增益增量 ΔK_{I2}
1	*	1,7	*				
2	3,4	*	2,3,4	4	0	4	0
3	3,4	*	5	0	0	4	0
4	3,4	*	1	4	0	0	0
5	5,6	*	2,3,4	5	3	5	3
6	5,6	*	5	0	0	5	3
7	5,6	*	1	5	0	4	0
8	*	6	2,3,4	4	3	5	3
9	*	2	2,3,4	5	3	4	3
10	*	6	5	0	0	5	3
11	*	2	5	4	0	4	0
12	*	6	1	4	0	4	0
13	*	2	1	5	3	0	0

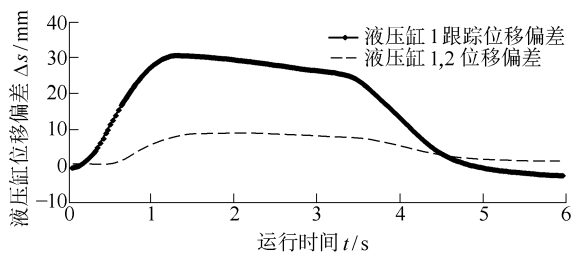
注：“*”表示略去的属性值，编号 1 时系统同步误差过大，切断阀输入。

4 试验研究

基于表 2 给出的在线控制参数调整决策，并根据初始控制参数设定决策，对外径 177.8 mm，层最长管长 11 010 mm，单管最大质量 432 kg，支数 3，采用初始参数 K_p 为 2.5， K_i 为 0.3， K_d 为 0.1，进行了实际管捆成形控制试验。从图 3 可以看出，采用常规的模糊 PID 控制，虽然可以获得较好的稳态单缸跟踪和双缸同步跟踪性能。但是单缸动态位移跟踪仍有明显的滞后无法克服，其动态跟踪误差将近最大 40 mm；双缸的速度跟踪在加速段和减速停止段也还存在明显的响应滞后。



(a) 液压缸 1,2 运行速度曲线

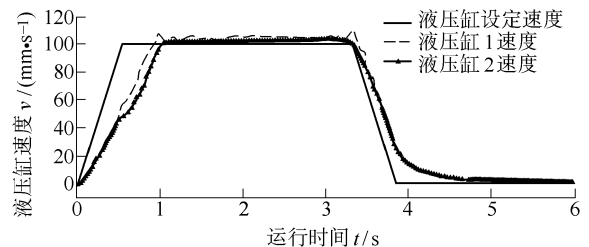


(b) 液压缸 1 位移跟踪偏差和两缸同步偏差曲线

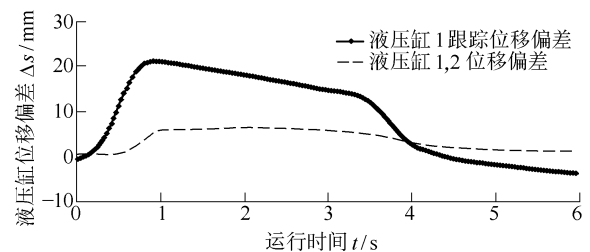
图 3 常规模糊 PID 控制的实际运行曲线

采用提出的二级控制器，控制参数实时的进行

调整，如数据记录显示，两缸 PID 控制参数在加速段 K_p 由 2.50 增加至 5.25 而后稳定在 3.0， K_i 在 0.15~0.30 之间， K_d 为 0.1 不变。正是由于 K_p 的变大，使得液压缸响应的速度得以提高而使速度和位移曲线的滞后得以改善；另外增加 K_p ，为了防止超调 K_i 做了适当的减小，最终使得单缸动态跟踪位移最大误差控制在 20 mm 以内，双缸位置动态最大误差控制在 10 mm 以内，如图 4 所示。因此，可以说自学习粗糙—模糊 PID 控制明显的优于传统模糊 PID 控制，能获得满意的动态的单缸位移跟踪和双缸同步控制精度。



(a) 液压缸 1,2 运行速度曲线



(b) 液压缸 1 位移跟踪偏差和两缸同步偏差曲线

图 4 二级控制器的实际运行曲线

5 结论

对管捆智能成形的电液位置同步伺服控制，采

用了所提出的一种基于 RSDA 的自学习粗糙—模糊 PID 控制方法, 获得了满意的单缸跟踪和双缸同步性能。这种控制方法利用粗糙集理论的知识自发现能力, 对模糊控制中的模糊规则提取、前件辨识和输出决策进行优化, 即用 RSDA 提出的规则来优化模糊控制模型, 构造了参数自学习的模型, 从而更加细致的描述了实际系统。实际的运行结果表明该方案的应用, 可以有效地简化在线参数更新规则以及输出算法, 提高单缸位移的跟踪和双缸同步控制的动态精度; 同时也可以简化初始控制参数的辨识和决策。目前, 基于该控制算法的智能管捆成形系统已在天津钢管公司的生产线上投入实际运行。

参 考 文 献

- [1] 倪敬, 项占琴, 吕福在, 等. XCX100 钢管自动成形机的研制和开发[J]. 钢铁, 2005, 40(5): 54-57.
- [2] YU S J, DUAN S L, WU J H. Study of fuzzy learning control for electro-hydraulic servo control systems[C]// Proceedings of the Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Xi'an, 2003: 591-595.
- [3] 朱宝, 吴荣珍, 熊瑞平, 等. 电液位置伺服系统的模糊免疫自适应 PID 控制的研究[J]. 中国测试技术, 2004(1): 19-21.
- [4] BONCHIS A, CORKE P I. Variable structure methods in hydraulic servo systems control[J]. Automatica, 2001 (37): 589-595.
- [5] 倪敬, 项占琴, 潘晓弘, 等. 钢管捆自动成形机的电液比例控制研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 40(3): 317-321.
- [6] PETERS J F, ZIAEI K. Generating rules in selecting controller gains: a combined rough sets/fuzzy sets approach[C]//Proc. IEEE Fuzzy Sets and Systems, 1998: 233-236.
- [7] PETERS J F, SOHI N. Coordination of multi-agent systems with fuzzy clocks[J]. Research and Application, 1996(4): 73-78.
- [8] DÜNTSCH I, GEDIGA G. Statistical evaluation of rough set dependency analysis[J]. International Journal of Human Computer Study, 1997, 46(5): 589-604.
- [9] DÜNTSCH I, GEDIGA G. Uncertainty measures of rough set prediction[J]. Artificial Intelligence, 1998, 106: 109-137.
- [10] DÜNTSCH I, GEDIGA G. Simple data filtering in rough set systems[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 1998, 18(1-2): 93-106.
- [11] 王珏, 苗夺谦, 周育键. 关于 Rough Set 理论与应用的综述[J]. 模式识别与人工智能, 1996, 9(4): 337-344.
- [12] 黎明, 张化光, 何希勤. 基于粗糙集的模糊模型辨识方法[J]. 东南大学学报, 2000, 21(5): 480-483.

ROUGH-FUZZY PID CONTROL AND ITS APPLICATION TO AUTO-SHAPING MACHINE

NI Jing XIANG Zhanqin PAN Xiaohong
LÜ Fuzai

(Institute of Modern Manufacturing Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: An approach of rough-fuzzy control, which uses rough set data analysis to upgrade fuzzy PID control, is presented for the electro-hydraulic servo position system in pipe bundle shaping process. The input to the model is mapped into the output subspace by using rules acquired from RSDA, then the output of the system is approximated in the subspace. On the basis of RSDA, modeling and analysis of actual pipe bundle shaping control process is provided. Compared with conventional fuzzy PID control, this method takes on better dynamic running performance with simple control arithmetic.

Key words: Electro-hydraulic bundle shaping

Rough set data analysis

Self-learning rough-fuzzy PID control

作者简介: 倪敬, 男, 1979 年出生, 博士研究生。研究方向为机电一体化。主持或参加科研项目 5 项, 其中的管捆智能成形系统研制工作属国内首创, 合同额 600 万元。

E-mail: nijing2000@163.com