

文章编号 1004-924X(2008)07-1230-06

基于粗糙集模糊控制的微孔钻削在线监测

杨兆军¹, 李 雪¹, 陈淑芬²

- (1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025;
2. 南京邮电大学 信息材料与纳米技术研究院, 江苏 南京 210003)

摘要:提出了一种基于粗糙集模糊控制的微孔钻削在线监测方法,克服了当模糊系统输入维数高时,系统模糊规则过多,计算过于复杂的缺点。在 Matlab 环境下,应用构造好的模糊系统对主轴电机三相电流信号进行实时数据处理,获取隐含微细钻头磨损状态的信息值,对微孔钻削过程进行在线监测实验。结果表明,当监测阈值设定为 76.7 时,可以有效地避免微细钻头的折断。该方法可降低制造成本,提高生产效率。

关键词:微孔钻削;粗糙集;模糊控制;在线监测

中图分类号:TG506.5;TP277 **文献标识码:**A

On-line monitoring micro-size drilling based on rough set fuzzy control

YANG Zhao-jun¹, LI Xue¹, CHEN Shu-fen²

- (1. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;
2. Institute of Advanced Materials, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: For online monitoring micro-size drilling, a fuzzy control method based on rough set was developed to improve original control method on too many fuzzy rule numbers and complicated calculations for a high-dimensional input fuzzy system. With processing data on line by a created fuzzy system for a spindle motor's 3-phase current signal on the Matlab platform, the connotative wear state information of micro-size drill was obtained for on-line monitoring micro-size drilling process. The results show that the breakage of micro-size drill will be effectively avoided when the monitoring threshold value is 76.7. This method has important significance for reducing the cost of manufacture and improving the productivity.

Key words: micro-size drill; rough set; fuzzy control; on-line monitoring

1 引言

在微细钻孔中,微钻头极易折断,并造成工件

报废。如何避免钻头折断是长期困扰微孔钻削加工的技术难题^[1-2]。钻头折断的根本原因在于磨损后钻削力增大,达到了所能承受的极限。因此,通过钻削力在线监测来预测微钻头折断、实时报

警换刀是一种行之有效的方法^[3-4]。例如:通过可靠性实验,找出微钻头折断时的钻削力极限值的分布规律,进而建立基于可靠性的钻削力监测模型来实施对微钻头钻削力的在线监测,收到了较好的效果^[5]。但这种方法需要的样本容量大,过程复杂。在钻削过程中,钻头的磨损状态具有模糊性、不确定性,而模糊控制技术是不依赖于对象的深层次知识,通过输入输出信息进行仿人思维的一种智能化的控制方法;粗糙集方法则能有效分析和处理大量经验数据,并从中发现隐含知识,揭示潜在的规律,二者结合特别适合于在线监测。考虑到目前的微孔钻床大多采用低电压、大电流的主轴电机,钻削力的变化会直接导致主轴电机电流的变化。为此,本文以主轴电机三相电流为监测对象,对微孔钻削加工中微钻头的状态进行模糊判别,适时报警换刀,避免钻头折断。通过主轴电机电流来监测刀具状态不需要对现有的设备做较大的改动,实施起来相对简单、方便。

2 粗糙集模糊系统

本文利用粗糙集方法获取模糊控制规则,进行微孔钻削在线监测的模糊控制。

2.1 粗糙集理论^[6-7]

粗糙集理论是波兰学者 Z. Pawlak 于 1982 年提出的,它为处理不确切的、不完整的信息提供了一种新的数学工具。粗糙集是模拟人的抽象逻辑思维,其要点是将知识与分类联系在一起,直接从给定问题的描述集合出发,通过不可分辨关系和不可分辨类确定给定问题的近似域,从而找出问题的内在规律。本文将用到粗糙集理论的如下概念。

一个知识表达系统可表示为:

$$S=(U,A,V,f), \quad (1)$$

式中, S 为知识表达系统, U 为非空有限元素组成的论域, A 为非空有限属性集合, $A=C \cup D$,子集 C 和 D 分别称为条件属性和决策属性集合, $C \cap D = \Phi$, V 为属性值域, $V = \bigcup_{a \in A} V_a$, V_a 表示属性 $a \in A$ 的范围, f 为一信息函数,表示对每一个 $a \in A$, $x \in U$, $f(x,a) \in V_a$ 。这种描述方式使得知识表达系统可以用二维表格来表示,称为决策表。

P 在 U 上不可分辨关系定义为:

$$IND(P) = \{ (x,y) \in U \times U, \forall a \in P, f(x,a) = f(y,a) \}, \quad (2)$$

式中, x,y 表示论域 U 中的对象, P 表示属性。

U/P 表示论域中相互不可分辨的对象组成的集合。

2.2 规则提取

令三相电机的第 i 相电流用模糊语言变量的模糊集合 C_i 来表示,即:

$$C_i = \{1,2,3,4,5\} \quad (i=1,2,3),$$

集合中,1 表示非常小;2 表示小;3 表示中;4 表示大;5 表示非常大。

输出量钻头磨损状态用模糊语言变量的模糊集合 dws 来表示,即:

$$dws = \{1,2,3,4,5\}$$

集合中,1 表示初步磨损,2 表示正常磨损,3 表示可接受磨损,4 表示严重磨损,5 表示钻头失效。

设 $C = \{C_1, C_2, C_3\}$ 是条件属性, $D = \{dws\}$ 是决策属性。整个模糊控制规则可用模糊控制规则表(决策表)来描述,如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Tab.1 Fuzzy controlling rules

序号	C_1	C_2	C_3	dws	序号	C_1	C_2	C_3	dws
1	1	1	1	1	28	2	3	4	3
2	1	1	2	1	29	2	4	3	3
3	1	2	1	1	30	3	4	2	3
4	1	1	3	1	31	3	3	4	4
5	2	1	1	1	32	3	4	3	4
6	1	3	1	1	33	4	3	3	4
7	3	1	1	1	34	3	4	4	4
8	1	2	2	2	35	4	3	4	4
9	2	2	1	2	36	4	4	3	4
10	2	1	2	2	37	4	4	4	4
11	2	2	2	2	38	3	4	5	4
12	2	2	3	2	39	3	5	4	4
13	2	3	2	2	40	4	5	3	4
14	3	2	2	2	41	4	3	5	4
15	1	2	3	2	42	5	3	4	4
16	1	3	2	2	43	5	4	3	4
17	3	2	1	2	44	4	5	5	5
18	3	1	2	2	45	5	4	5	5
19	2	1	3	2	46	5	5	4	5
20	2	3	1	2	47	4	4	5	5
21	2	2	3	2	48	4	5	4	5
22	2	3	2	2	49	5	4	4	5
23	3	2	2	2	50	5	5	5	5
24	3	3	2	3	51	3	5	5	5
25	2	3	3	3	52	5	3	5	5
26	3	2	3	3	53	5	5	3	5
27	3	3	3	3					

对于一个决策表来说,并非所有的条件属性和规则都是必要的,有些是多余的,去除这些属性和规则不会影响原来的分类效果。

2.2.1 属性约简

采用计算差别矩阵和差别函数^[8]的方法化简。

条件属性 C 的 U 中的所有等价类 $C_{ij} (j=1, 2, \dots, 5)$ 为:

$$U/C_1 = \{C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}\} \\ = \{\{1, 2, 3, 4, 6, 8, 15, 16\}, \{5, 9, 10, 11, 12, 13, 19, 20, 21, 22, 25, 28, 29\}, \{7, 14, 17, 18, 23, 24, 26, 27, 30, 31, 32, 34, 38, 39, 51\}, \{33, 35, 36, 37, 40, 41, 44, 47, 48\}, \{42, 43, 45, 46, 49, 50, 52, 53\}\}, \quad (3)$$

$$U/C_2 = \{C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}\} \\ = \{\{1, 2, 4, 5, 7, 10, 18, 19\}, \{3, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 21, 23, 26\}, \{6, 13, 16, 20, 22, 24, 25, 27, 28, 31, 33, 35, 41, 42, 52\}, \{29, 30, 32, 34, 36, 37, 38, 43, 45, 47, 49\}, \{39, 40, 44, 46, 48, 50, 51, 53\}\}, \quad (4)$$

$$U/C_3 = \{C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{35}\} \\ = \{\{1, 3, 5, 6, 7, 9, 17, 20\}, \{2, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 18, 22, 23, 24, 30\}, \{4, 12, 15, 19, 21, 25, 26, 27, 29, 32, 33, 36, 40, 43, 53\}, \{28, 31, 34, 35, 37, 39, 42, 46, 48, 49\}, \{38, 41, 44, 45, 47, 50, 51, 52\}\}, \quad (5)$$

$$U/C = \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \dots, \{53\}\}. \quad (6)$$

决策属性 D 的 U 中所有等价类 dws_j 为:

$$U/dws = \{dws_1, dws_2, dws_3, dws_4, dws_5\} \\ = \{\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}, \{8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23\}, \{24, 25, 26, 27, 28, 29, 30\}, \{31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43\}, \{44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53\}\}. \quad (7)$$

根据差别矩阵,对所有的元素进行合并,计算出差别函数为:

$$\Delta = C_1 \wedge C_2 \wedge C_3.$$

因此,原决策表的属性约简为: $\{C_1, C_2, C_3\}$, 没有冗余属性。

2.2.2 规则约简

进行规则约简时,通过比较规则的重要度,即假设去除一条规则的某属性值,看决策值有无冲突。如果有冲突,则去除的属性不是冗余,如果没有冲突,则该属性在该规则中是冗余。

例如对第一条规则,决策类为:

$$dws_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}, \\ C_{21} \cap C_{31} = \{1, 5, 7\} \subset dws_1, \\ C_{11} \cap C_{31} = \{1, 3, 6\} \subset dws_1, \\ C_{11} \cap C_{21} = \{1, 2, 4\} \subset dws_1. \quad (8)$$

故第一条规则冗余为 C_1, C_2, C_3 。

对于第二条规则,决策类为:

$$dws_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}, \\ C_{21} \cap C_{32} = \{2, 10, 18\} \subset dws_1, \\ C_{11} \cap C_{32} = \{2, 8, 16\} \subset dws_1, \\ C_{11} \cap C_{21} = \{1, 2, 4\} \subset dws_1. \quad (9)$$

故第二条规则的冗余为 C_3 。

同理可计算其余各条规则,对相同规则进行合并之后,得到约简后的极小规则表如表 2 所示。

表 2 极小规则表
Tab.2 Minimal rules

序号	C_1	C_2	C_3	dws	序号	C_1	C_2	C_3	dws
2	1	1	×	1	29	2	4	×	3
5	×	1	1	1	30	×	4	2	3
6	1	×	1	1	31	3	×	4	4
8	×	2	2	2	32	3	4	3	4
9	2	2	×	2	33	4	×	3	4
10	2	×	2	2	35	4	3	×	4
15	×	2	3	2	37	4	4	4	4
16	1	3	2	2	38	3	4	5	4
17	3	2	1	2	42	5	3	4	4
18	3	1	2	2	43	5	4	3	4
19	2	1	3	2	44	×	5	5	5
20	2	3	1	2	45	5	×	5	5
24	3	3	2	3	46	5	5	×	5
25	2	3	3	3	47	4	4	5	5
26	3	2	3	3	48	4	5	4	5
27	3	3	3	3	49	5	4	4	5
28	2	×	4						

说明:表中符号“×”表示冗余的规则。

由表 1 和表 2 可以看出,原模糊控制规则表共有 3 个条件属性,53 条规则, $3 \times 53 = 159$ 个条件属性元素,而约简后的极小决策表有 3 个条件

属性,33 条规则,83 个条件属性元素,从而简化了模糊规则。

2.3 模糊控制器

模糊控制由于其无需建立被控对象精确的数学模型,有较强的鲁棒性,易于形成专家的知识等突出优点,成为一种很有前途的控制算法^[9-10]。本文模糊控制系统的实现主要是通过 Matlab 模糊控制工具箱(模糊控制器)来完成。模糊控制器主要由输入模糊化、模糊推理规则、输出反模糊化等组成。这里设定输入变量的隶属度函数为等腰三角形,设定输出变量的隶属度函数为等腰梯形;采用粗糙集对模糊控制器进行属性约简和规则约简(见本文 2.2);模糊规则采用极大运算;解模糊化则采用重心法。

3 钻削实验

3.1 实验系统

实验在数控微孔精密钻床上进行,钻床采用低电压、大电流的高速无刷电主轴。为进行主轴电机电流在线监测,构建了图 1 所示的主轴电机电流在线监测系统。其中霍尔电流传感器采集主轴电机三相电流后,经 NI6013 数据采集卡(16 位、200 kHz)传输到工控机,然后经工控机进行数据处理。实验中选择主轴转速为 15 000 r/min,主轴进给脉冲当量为 0.002 5 mm/p,工件材料为 1.5 mm 厚的不锈钢,钻头直径 $\Phi 0.5$ mm,进给速度为 40 mm/min。

系统采集的数据经数字滤波去除其干扰信

号,然后输入到模糊控制器进行在线监测。其监测过程是:将实时采集的主轴电机三相电流信号输入到模糊控制器,系统输出与给定的监测阈值(从表 3 模糊控制器输出中选取)做比较,若输出小于阈值则继续钻削,若输出大于等于阈值则报警退刀。

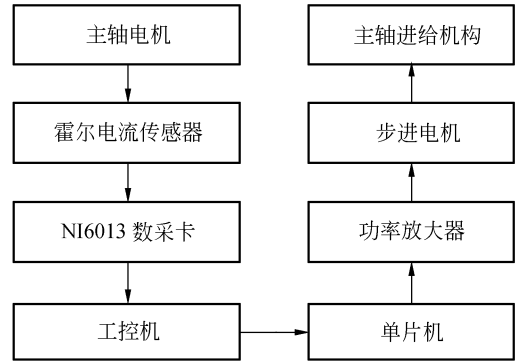


图 1 主轴电机电流在线监测系统

Fig. 1 On-line monitoring system of spindle motor's current

3.2 学习样本

在上述实验条件下,取 25 支钻头进行钻削实验,每支均钻削至折断为止,记录其钻削过程中的由霍尔电流传感器输出的电压值。然后抽取 25 组正常钻削时的电压值和这 25 组折断时的电压值作为模糊控制器的输入(传统的基于可靠性的方法,是建立在求得微小钻头寿命概率分布函数基础上的。所以只能取每支钻头折断时的数据作为样本,因此所需的样本容量大,过程复杂)。表 3 为 50 组样本及模糊控制器的输出。

表 3 学习样本及模糊控制器输出

Tab. 3 Samples and fuzzy controller outputs

序号	第一相电压 值/mV	第二相电压 值/mV	第三相电压 值/mV	系统输出	序号	第一相电压 值/mV	第二相电压 值/mV	第三相电压 值/mV	系统输出
1	8.778	6.701	7.581	30.1	26	16.204	10.737	11.471	76.7
2	8.426	6	6.749	29.7	27	16.458	11.795	9.971	76.8
3	11.104	8.209	9.264	52.8	28	16.265	10.072	11.982	77.2
4	10.563	9.085	10.589	53.4	29	16.37	10.782	11.877	78
5	9.25	7.395	8.26	30.7	30	16.49	11.611	12.055	78.3
6	9.282	6.882	8.148	33.5	31	17.313	11.693	10.122	78.2
7	8.83	6.905	7.045	31.6	32	16.422	11.031	10.746	78.5
8	8.689	6.743	6.692	31.8	33	16.632	11.23	10.151	78.6
9	9.148	6.868	7.252	30.2	34	16.643	10.972	11.625	78.8
10	10.325	7.496	8.013	31.8	35	16.731	11.031	10.193	79

续表 3

序号	第一相电压 值/mV	第二相电压 值/mV	第三相电压 值/mV	系统输出	序号	第一相电压 值/mV	第二相电压 值/mV	第三相电压 值/mV	系统输出
11	11.29	8.283	8.48	37.7	36	16.506	11.672	10.971	79.2
12	12.058	8.914	9.579	53	37	17.034	11.232	10.249	79.6
13	8.387	6.271	6.477	28.3	38	16.827	11.342	11.983	80
14	8.804	6.675	6.578	29.8	39	16.846	11.455	10.301	80.2
15	11.187	7.738	7.575	34.4	40	16.748	11.134	10.376	81.1
16	10.803	8.404	8.972	47.3	41	17.082	11.503	12.022	82.2
17	9.754	7.202	7.014	30.1	42	17.085	11.146	12.221	83.1
18	8.09	6.056	6.558	28.9	43	15.62	11.239	12.558	83.1
19	7.356	5.105	5.674	18.4	44	17.106	11.672	12.671	84.8
20	10.62	8.105	9.195	52.8	45	15.409	11.15	12.63	84.2
21	10.212	7.306	7.718	33.8	46	17.122	12.625	10.977	84.8
22	11.547	8.717	9.408	51.7	47	17.13	11.191	12.625	84.9
23	9.425	6.895	7.651	31.5	48	19.036	13.74	13.112	88.1
24	7.795	5.929	7.254	29	49	18.863	13.978	12.014	87.6
25	9.281	6.937	7.906	32.3	50	18.754	12.5	14.588	87.6

3.3 监测实验

根据表 3 的数据,另取 40 支钻头分为两组,每组 20 支。用模糊控制器进行在线监测实验,适时报警退刀。实验结果如表 4 所示。表中第一组取本文 3.2 学习样本中的 20 支,不进行在线监测,第二组取阈值为 76.7,第三组取阈值为 80.2。每支钻头均钻到报警退刀为止。

表 4 钻削实验结果

Tab. 4 Experimental results

实验组序号	每支钻头平均钻孔数	钻头折断数
1	74	20
2	45	0
3	58	12

结果表明,当监测阈值为 80.2 时,有 12 支钻头在未报警退刀时发生了折断;当监测阈值为 76.7 时,20 支钻头均未发生折断。

4 结 论

(1)以霍尔电流传感器为测量元件,以主轴电机三相电流为监测对象,既能很好地反映钻削过程中钻头磨损状态,又不因加装测力仪而改变工艺系统刚度,实施起来简单方便。

(2)将粗糙集理论与模糊控制技术相结合,利用粗糙集理论从数据样本中获取约简的规则集作为模糊控制规则,从而使模糊控制器的规则数减少,简化了模糊控制器的结构。

参考文献:

- [1] YANG ZH J, CHEN Y H, YANG Y H. Study on the life distribution of micro-drill[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2002, 216(B3): 301-305.
- [2] CHEONG M S, CHO D W, EHMANN K F. Identification and control for micro-drilling productivity enhancement [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39: 1539-1561.
- [3] LI X L, LI H X, GUAN X P. Fuzzy estimation of feed-cutting force from current measurement—a case study on intelligent tool wear condition monitoring[J]. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. Pt C. Appl. Rev.*, 2004, 506-512.
- [4] 杨兆军, 杨永海, 贾庆祥, 等. 通过钻削力监测预报微钻头折断的研究[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(5): 477-480.
YANG ZH J, YANG Y H, JIA Q X, et al.. Prediction of micro drill break through thrust monitoring[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 477-480. (in Chinese)

- [5] YANG ZH J, TAN Q CH, E SH J. On-line monitoring of drilling torques of micro-drills[J]. *Journal of Engineering Manufacture*, 2004, 218(B3):1735-1740.
- [6] 曾黄麟. 粗糙集理论及其应用[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1996.
ZENG H L. *Theoretical Aspects and Applications on Rough Set* [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1996. (in Chinese)
- [7] 冯丽, 邱家驹. 粗糙集理论及其在短期电力负荷预测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(6):60-63.
FENG L, QIU J J. Rough set theory and its application in short-term load forecasting[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2004, 16(6):60-63. (in Chinese)
- [8] WALCZAK B, MASSART D L. Rough sets theory[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1999, 47:1-16.
- [9] 张微敬, 欧进萍. 基于粗糙集理论的结构振动模糊控制[J]. 振动工程学报, 2005, 18(4):406-411.
ZHANG W J, OU J P. Fuzzy control of structural vibration based on rough set theory[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2005, 18(4):406-411. (in Chinese)
- [10] 张庆, 程维明, 沈耀宗, 等. 模糊控制在橡胶硫化温度控制中的应用[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4):385-387.
ZHANG Q, CHENG W M, SHEN Y Z, et al.. Fuzzy temperature control for microwave vulcanization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4):385-387. (in Chinese)

作者简介:杨兆军(1956—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,研究方向为制造过程的计算机测控技术。

李雪(1978—),男,黑龙江青冈人,博士研究生,研究方向为智能监测与控制技术;E-mail:lxlx9721@tom.com

陈淑芬(1978—),女,河北乐亭人,讲师,主要从事有机电致发光器件、有机太阳能电池的制备及机理研究。

●下期预告

Φ1.2 m F/1.5 抛物面主镜补偿器

陈强^{1,2}, 袁家虎¹, 伍凡¹, 高平起¹, 吴高峰^{1,2}

(1. 中国科学院成都光电技术研究所, 四川成都 610209;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

用于Φ1.2m F/1.5主镜面形检验的补偿器,需要补偿0.087mm的非球面度,并实现0.033λ(RMS)面形检测要求。详细介绍了该补偿器的设计、误差分析、加工、标校及最终主镜检测的情况;用于主镜检测前用计算全息(CGH)对补偿器标校显示:补偿器产生的抛物面面形误差为0.012λ(RMS),二次曲面常数K的误差0.0064%;主镜最终的补偿检测结果为:面形0.027λ(RMS),二次曲面常数K的误差0.0306%,与分析的结果相符合。结果表明,补偿器设计合理,建立的误差分析原则和方法可行,加工质量可靠,这将为更大口径高陡度非球面主镜的补偿检验奠定坚实基础。