

文章编号 1004-924X(2010)03-0662-08

微细电火花加工放电状态逐级映射检测

张玲瑄, 贾振元, 任小涛, 郑新毅

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要:为解决微细电火花加工过程中由于频繁出现的放电信号严重畸变、放电状态不稳定甚至突变等造成的放电状态难于准确检测的技术难点,在分析和研究传统的微细电火花加工放电状态检测方法的基础上,结合系统辨识和模糊逻辑理论,提出了微细电火花加工放电状态逐级映射检测原理和方法。对实时采集到的极间电压和电流信号,通过模糊运算判别采样点的放电状态,再将采样点放电状态值映射为放电状态矢量,并对该矢量进行统计得到“短路率”和“火花/电弧率”,经过模糊推理辨识出各分析周期的放电状态。实验表明,该检测方法准确性高、运算量低且运算速度快,与平均电压法相比,效率提高 22.2%。检测结果可为微细电火花放电加工过程的实时控制提供系统放电状态的反馈输入,保证了加工控制系统的稳定性和准确性。

关键词:微细电火花加工;放电状态检测;模糊逻辑;逐级映射检测

中图分类号:TG661 **文献标识码:**A

Successive mapping detection of micro EDM discharge state

ZHANG Ling-xuan, JIA Zhen-yuan, REN Xiao-tao, ZHENG Xin-yi

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology
of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To measure precisely the discharge state and overcome the shortcomings of the distortion of discharge signals and the instability of discharge state, the principle and method of successive mapping detection were proposed combined with the system identification and fuzzy control after analysis on traditional discharge state detection methods in micro Electrical Discharge Machining(EDM). For real-time collected gap voltage and current signals in the process, the fuzzy operation was used to identify the discharge state of a sampling point and then to map the sampling point discharge state value into sampling point discharge state vector. Furthermore, the vector was counted to obtain the “Short rate” and “spark/arc rate” and the fuzzy reasoning was used to identify the discharge state of each cycle. Test results show that the presented detection method has highly accuracy and is able to identify data and operate fast. Compared with that of the average voltage detection method, the efficiency has been increased by 22.2%. Detection results can provide feed back inputs of the system discharge states for the real-time control of the discharge process, which ensures the stability and accuracy of the process-

收稿日期:2008-11-26; **修订日期:**2008-12-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50575033);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20090041110031)

ing control system.

Key words: micro Electrical Discharge Machining(EDM); discharge state detection; fuzzy logic; successive mapping detection

1 引言

世界范围内产品的日益小型化和精密化,使精密和微细加工技术受到广泛重视。微细电火花加工作为精微加工制造领域的有效加工手段之一,其关键性技术的研究已经成为精密和微细加工领域的一个重要研究方向。其中,对放电状态的准确检测是实现微细电火花加工过程精确控制的前提条件,同时也是加工工艺效果和产品质量的重要保障^[1]。

微细电火花加工的放电状态主要包括空载(开路)、火花放电、过渡电弧、稳定电弧和短路等五类^[2]。放电状态是对电火花加工过程实施准确控制的主要依据,直接决定了加工质量、加工效率和电极损耗等工艺指标的优劣。

微细电火花加工过程中的放电状态呈现显著的非平稳性、非线性以及放电信号内部耦合等特征。实践证明,在实际加工过程中仅依靠传统方法对当前放电状态进行检测^[3]很难对加工过程实施有效、实时和精确的控制,并且随着放电状态检测输出与实际放电状态输出误差的逐步增大,会进一步导致放电状态和控制系统的双重不稳定,使预定的工艺目标难以实现,严重时甚至会导致控制系统崩溃。近年来,有众多学者在电火花加工放电状态检测方面做了大量研究工作,取得了一系列基于模糊逻辑等方法的智能化放电状态检测成果^[4-6];同时,也在电火花加工放电状态模型建立和电火花微细加工工艺参数优化等方面做出了有益的探索^[7-10]。但是长期以来,对微细电火花加工过程的物理特征本身的研究还显得比较薄弱,特别是对微细电火花加工放电状态检测方面缺乏深入的理论与应用研究,因而未能对微细电火花加工的稳定控制提供足够的理论指导和技术

支持。

本文在分析和研究传统的微细电火花加工放电状态检测方法的基础上,结合系统辨识和模糊逻辑理论,提出了微细电火花加工放电状态逐级映射检测原理和方法,实验证明该方法实时性强,准确可靠。

2 逐级映射检测方法的基本原理

目前,在电火花加工放电状态的传统检测方法中,以平均电压检测法最为实用,并且该方法在实际电火花加工系统中的应用也最为广泛。但是,由于实际加工中经常调整脉冲宽度和脉冲间隔等电参数,会对间隙平均电压的大小产生影响,所以必须实时调整伺服参考电压值,才能较为正确地反映间隙放电状态,并且伺服参考电压值通常需要通过实际加工进行校验,每组电参数的伺服参考电压常常需要一一设置,工作量相当大。更为重要的是,在微细电火花加工过程中,由于脉宽一般很窄,电源能量十分微弱,因此间隙平均电压的幅值极低,使平均电压检测法的准确性及可靠度大大降低^[11]。

结合对微细电火花加工放电状态的检测理论及相关方法的深入细致研究,本文提出了一种基于模糊逻辑的微细电火花加工放电状态逐级映射检测方法。其基本原理如图1所示,具体过程为:对加工过程中实时采集到的间隙电压和间隙电流两路信号应用基于模糊逻辑^[12-13]的多传感器数据融合方法,实现采样点放电状态判别,再将采样点放电状态值映射为采样点放电状态矢量,并在每个放电状态分析周期内对该矢量进行统计,以统计得到的“短路率”和“火花/电弧率”为输入,经过模糊推理^[14],辨识出各分析周期的放电状态。

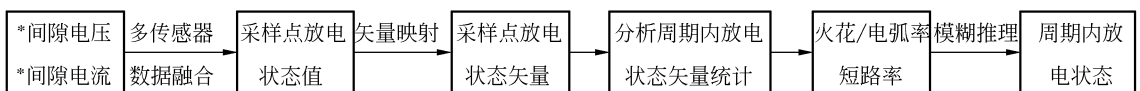


图1 采样点放电状态逐级映射检测方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of discharge state successive mapping detection method for sampling points

3 放电状态的逐级映射检测

3.1 采样点的放电状态判别

微细电火花加工放电状态逐级映射检测系统的输入量为加工过程中实时检测得到的间隙电压 U 和间隙电流 I , 两路输入信号均采用梯形隶属度函数表示。用低、中、高和超高四个模糊语言描述输入电压, 低和中两个模糊语言描述输入电流。输入电压和输入电流的论域由实际加工参数具体确定, 例如: 输入电压论域为 $[0 \text{ V}, 160 \text{ V}]$ 、输入电流论域为 $[-5 \text{ A}, 10 \text{ A}]$ 时, 结合加工经验和各自模糊语言的分类准则, 得到采样点输入隶属度函数, 如图 2 所示。

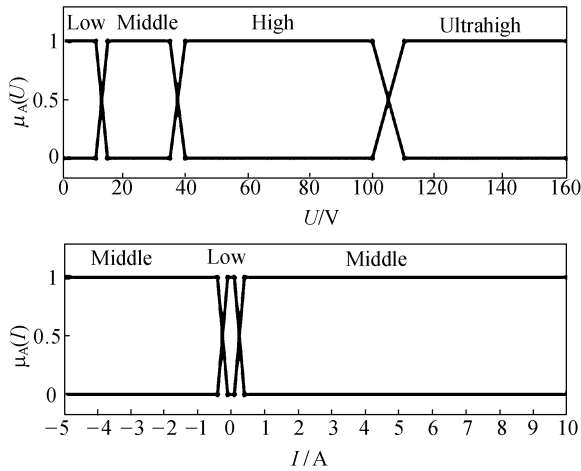


图 2 采样点输入隶属度函数

Fig. 2 Input membership functions for sampling points

使用三角形隶属度函数表达采样点的短路、火花/电弧、脉冲间隔(脉间)和开路等四类状态, 如图 3 所示。

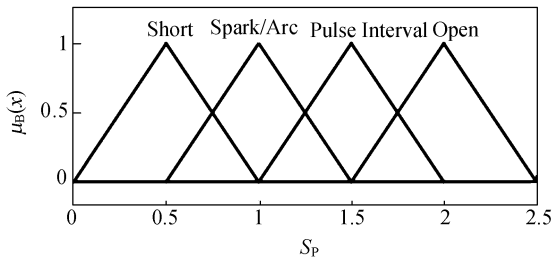


图 3 采样点输出隶属度函数

Fig. 3 Output membership functions for sampling points

根据电火花加工放电状态分类及其特征, 并

结合大量的实际加工经验, 制定如表 1 所示的模糊逻辑规则。

表 1 采样点放电状态模糊逻辑规则

Tab. 1 Fuzzy logic rules for discharge states of sampling points

电流	电 压			
	低	中	高	超高
低	脉间	火花/电弧放电	开路	开路
中	短路	火花/电弧放电	火花/电弧放电	火花/电弧放电

使用输入变量隶属度的最小化运算, 对模糊推理的前提隶属度进行计算, 算法为:

$$\mu_i(U, I) = \min\{\mu_{A_1^i}(U), \mu_{A_2^k}(I)\}, \quad (1)$$

式中: $\mu_i(U, I)$ 为第 i 条规则的前提隶属度; $\mu_{A_1^i}(U)$ 为输入 U 的第 j 项模糊集 A_1^i 所对应的隶属度; $\mu_{A_2^k}(I)$ 为输入 I 的第 k 项模糊集 A_2^k 所对应的隶属度。

模糊推理算法的模糊蕴涵关系也使用最小化形式。采用重心算法^[15]进行去模糊化处理, 如式(2)所示, 得到数据融合后的输出量, 即: 采样点的放电状态值 S_p , 以此实现采样点放电状态的判别:

$$S_p = \frac{\sum_{i=1}^R b_i^q \int_{\hat{Y}_q} \mu_{B_i^q}(y_q) dy_q}{\sum_{i=1}^R \int_{\hat{Y}_q} \mu_{B_i^q}(y_q) dy_q}, \quad (2)$$

式(2)中, R 为规则数, \hat{B}_i^q 为模糊蕴涵集, $\mu_{B_i^q}$ 为与 \hat{B}_i^q 相关的隶属度函数, Y_q 为输出论域, y_q 为输出论域 Y_q 中的输出值, b_i^q 为第 i 条规则下输出隶属度函数面积的中心。

3.2 采样点放电状态值的矢量映射

设采样点共有 n 种放电状态, 将采样点判别状态值空间 Ω 按照放电状态划分为 n 类, 记为 E_m ($m=1, 2, \dots, n$), 子类 E_m 是对父类 Ω 的完全划分, 则有:

$$E_t \cap E_r = \Phi \text{ and } \bigcup_{m=1}^n E_m = \Omega \quad t, r=1, \dots, n, \quad (3)$$

使用单位矢量表示采样点的放电状态, 则 n 维单位矢量 p_j (第 j 个元素为 1, 其余元素为 0) 可以表示 n 种放电状态, 例如: 本文中的 $n=4$, p_j 为 4 维单位矢量。如果第 w 个采样点的放电状态值 a_w 满足:

$$a_w \in E_m \quad w \in N, \quad (4)$$

则对一般的 n 维单位矢量 p_j 有式(5)的映射关系成立:

$$a_w \rightarrow p_j = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^T, \quad (5)$$

式(5)中,第 j 个元素取值为 1,其余元素的值为 0。于是每个采样点的放电状态值与其放电状态一一对应,完成从采样点放电状态值到放电状态矢量的映射过程。

3.3 分析周期内的放电状态矢量统计

按照实际所需的放电状态分析周期长度将采样点放电状态矢量依次序分组,记每组点数为 M ,按照式(6)分别对每组映射矢量求和:

$$P_k = \sum_{j=1}^M p_j \quad k = 1, \dots, L'. \quad (6)$$

得到第 k 个以分析周期为单位的放电状态和矢量 P_k ,分别记原始采样点长度为 N 、以分析周期为单位的放电状态和矢量的序列长度为 L' ,则有 $L' = N/M$ 。

由于脉间为放电停歇阶段,所以在以分析周期为单位的采样点放电状态矢量求和过程中不予考虑;分别按照式(7)、(8)统计“短路率”和“火花/电弧率”

$$DL_k = \frac{P_{DL}^k}{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq MJ}}^n P_m^k} \quad k = 1, \dots, L, \quad (7)$$

$$HHDH_k = \frac{P_{HHDH}^k}{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq MJ}}^n P_m^k} \quad k = 1, \dots, L, \quad (8)$$

式中: L 为去掉脉间的“以分析周期为单位的放电状态和矢量”(放电状态序列)的长度; DL_k 为放电状态序列在第 k 个点的短路率; $HHDH_k$ 为放电状态序列在第 k 个点的火花/电弧率; P_m^k 为放电状态序列在第 k 个点的第 m 维值; n 为原始采样点的放电状态类别数; P_{DL}^k 为放电状态序列在短路维数空间的值; P_{HHDH}^k 为放电状态序列在火花/电弧维数空间的值; P_{MJ}^k 为放电状态序列在脉间维数空间的值。

3.4 分析周期内的放电状态辨识

使用模糊逻辑方法对“分析周期内各点的放电状态”(以下简称“放电状态”)进行辨识。模糊系统输入量“短路率”、“火花/电弧率”以及输出量“放电状态”的隶属度函数如图 4 和图 5 所示,相应的模糊逻辑规则如表 2 所示;模糊推理的前提

隶属度仍取输入模糊变量隶属度最小化的形式,模糊蕴涵关系也使用最小化算法;应用重心法进行去模糊化处理,得到逐级映射检测系统的放电状态输出序列。

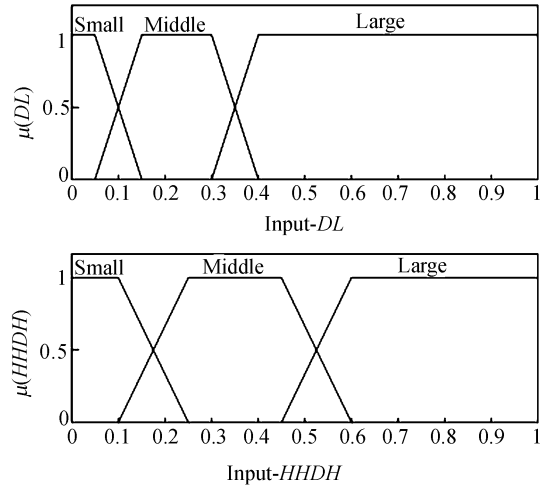


图 4 输入变量隶属度函数

Fig. 4 Membership functions of input variables

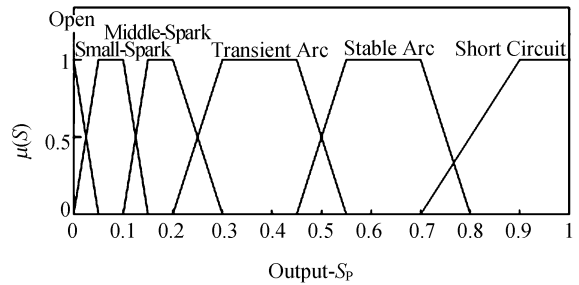


图 5 输出变量隶属度函数

Fig. 5 Membership functions of output variables

表 2 分析周期的放电状态模糊逻辑规则

Tab. 2 Fuzzy logic of discharge states in unit of analysis cycle

短路率	火花/电弧率		
	小	中	大
小	开路	小火花	中火花
中	小火花	中火花	瞬态电弧
大	稳态电弧	短路	短路

4 放电状态逐级映射检测实验

由于不同的电极材料加工同一种工件时的放电状态不同,若本文提出的放电状态逐级映射检

测方法的检测结果能如实地反映出这种差异,则可证明其准确性。大量的加工实验表明该方法能够正确反映信息,是准确可靠的,现以两组加工实验为例予以说明。实验设置:电极直径为 0.1 mm,正极性加工,工件材料为铝,工作液为煤油,采用高低压复合加工方式,脉宽 5 μ s,脉间 25 μ s,加工频率 33 kHz,电容 4 700+2 200 pF,采样频率为 2 MHz。

第一组实验电极材料选用黄铜,图 6 和图 7 为加工过程实时采集到的一组间隙电压和间隙电流信号,作为逐级映射检测系统的输入序列。图 8 为经过多传感器数据融合后,判别得到的采样点放电状态值 $S_p(k)$ 。

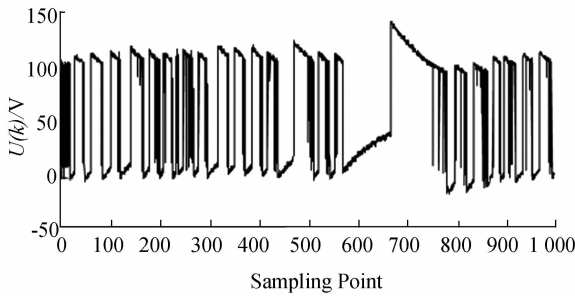


图 6 采样点间隙电压信号

Fig. 6 Gap voltage signals of sampling points

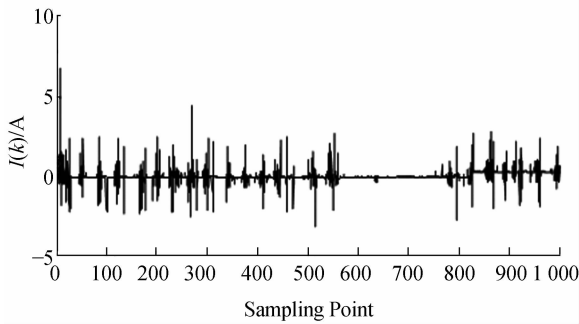


图 7 采样点间隙电流信号

Fig. 7 Gap current signals of sampling points

图 9 和图 10 为经过采样点放电状态值的矢量映射和分析周期内的放电状态矢量统计而得到的以分析周期为单位的放电点的“短路率”和“火花/电弧率”;经过分析周期内的放电状态辨识,得出如图 11 所示的长度为 200 点的放电状态输出值。

第二组实验电极材料选用紫铜,重复上述过程,最后得到长度为 200 点的放电状态输出值如

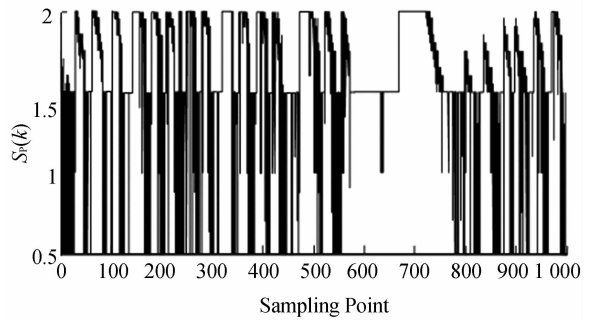


图 8 采样点放电状态值

Fig. 8 Discharge state values of sampling points

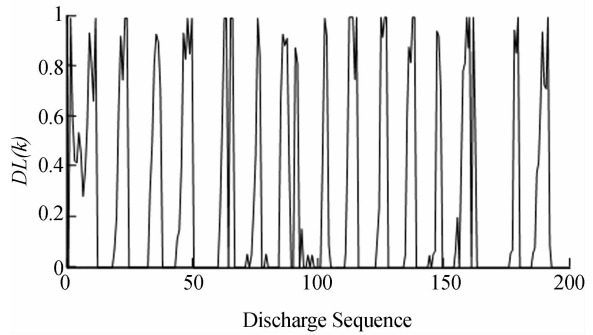


图 9 放电序列的“短路率”

Fig. 9 The “short rate” of discharge sequence

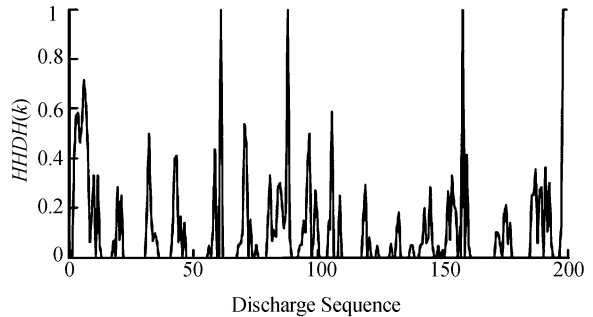


图 10 放电序列的“火花/电弧率”

Fig. 10 The “spark/arc rate” of discharge sequence

图 12 所示。

由经验可知,电火花加工中用黄铜加工铝材工件的加工效果很好,放电现象很明显,火花多且连续,火花/电弧率比例较大;而用紫铜加工铝时,放电现象不强烈,相应的火花/电弧率比例较小。对比图 11 和图 12 可见,图 12 中处于火花/电弧状态的采样点数目明显减少,这正是由于采用紫铜电极后,加工效果变差,放电现象不明显,火花/电弧现象较少的缘故。实验表明,该方法的检测

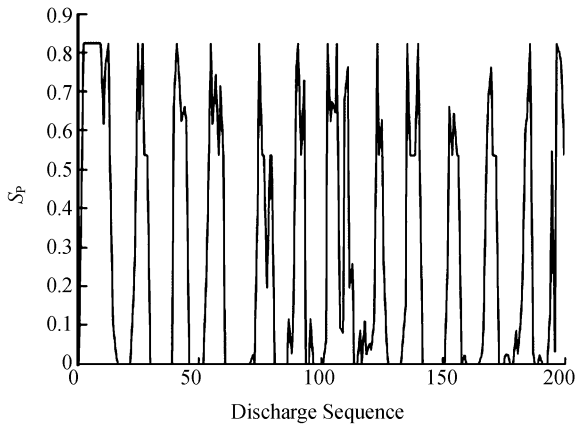


图 11 放电序列的放电状态输出值(实验 1)

Fig. 11 Discharge state value output of discharge sequence (test 1)

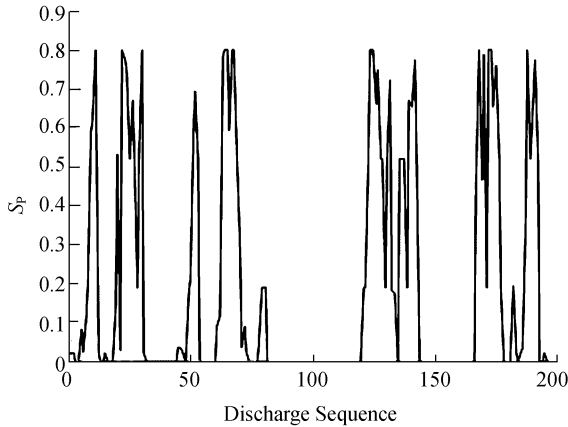


图 12 放电序列的放电状态输出值(实验 2)

Fig. 12 Discharge state value output of discharge sequence (test 2)

结果能够实时并且正确地反映出实际的加工放电情况。

在上述实验设置条件下采用黄铜电极加工厚度为 1 mm 的铝板,第一组用传统的平均电压检测法进行加工,第二组用本文提出的逐级映射检

测法进行加工,实验结果分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 第一组实验结果

Tab. 3 Experiment results of group 1

孔序号	1	2	3	平均值
加工时间 t/min	9.50	9.28	9.32	9.37

表 4 第二组实验结果

Tab. 4 Experiment results of group 2

孔序号	4	5	6	平均值
加工时间 t/min	7.32	6.97	7.57	7.29

对比表 3 和表 4 可见:应用本文提出的放点状态逐级映射检测方法比应用传统的平均电压检测法的加工时间缩短 2.08 min,加工效率提高 22.2%。由此可见,采用本文提出的微细电火花放电状态逐级映射检测方法运算速度快,实时性好,准确可靠,可使加工效率明显提高。

5 结 论

本文在对传统的微细电火花加工放电状态检测方法进行分析和研究的基础上,针对微细电火花加工过程中的高频放电、微能放电、复杂干扰及放电信号畸变严重等实际加工情况,提出了一种基于模糊逻辑的微细电火花加工放电状态逐级映射检测方法。实验证明,本文提出的放电状态逐级映射检测方法准确可靠,具有运算量低、运算速度快和准确性高等优点,与传统的检测方法相比,加工效率提高 22.2%。该检测方法不但为放电加工过程的实时控制提供了系统放电状态的反馈输入,同时也为进一步开展微细电火花加工放电状态预测的研究提供了良好的前提保证。

参考文献:

[1] 周明.微细电火花加工放电状态辨识与预测的理论和方法[D].大连:大连理工大学,2005.

ZHOU M. *The methodology of discharging-state identification in micro electrical discharging ma-*

ching (micro EDM) [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)

[2] WANG W M, RAJURKAR K P, AKAMATSU K. Digital gap monitor and adaptive integral control for auto-jumping in EDM [J]. *Manuf. Sci. and Eng.*, ASME; 1995, 117(2): 253-258.

- [3] RAJURKAR K P, WANG W M. Improvement of EDM performance with advanced monitoring and control systems [J]. *Manuf. Sci. and Eng.*, ASME:1997,119(4b):770-775.
- [4] BOCCADORO M, DAUW D F. About the application of fuzzy controllers in high-performance die-sinking EDM machines[J]. *Ann. CIRP*:1995,44(1):147-150.
- [5] TARNG Y S, JANG J L. Genetic synthesis of a fuzzy pulse discriminator in electrical discharge machining[J]. *Intell. Manuf.*,1996,7(4):311-318.
- [6] TARNG Y S, TSENG C M, CHUNG L K, A fuzzy pulse discriminating system for electrical discharge machining[J]. *Mach. Tools Manuf.*,1997,37(4):511-522.
- [7] LIU H S, TARNG Y S. Monitoring of the electrical discharge machining process by abductive networks[J]. *Adv. Manuf. Technol.*,1997,13(4):264-270.
- [8] LIN C L, LIN J L, KO T C. Optimisation of the EDM process based on the orthogonal array with fuzzy logic and grey relational analysis method[J]. *Adv. Manuf. Technol.*,2002,19(4):271-277.
- [9] 贾振元,周明,杨连文.电火花微小孔加工工艺参数的优化研究[J].*机械工程学报*,2003,2:106-112.
- JIA ZH Y, ZHOU M, YANG L W. Study on the optimization for electrical discharge machining micro and small hole [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*:2003,39(2):106-112. (in Chinese)
- [10] 贾振元,顾丰,王福吉.基于信噪比与灰关联度的电火花微小孔加工工艺参数的优化[J].*机械工程学报*,2007,7:63-67.
- JIA ZH Y, GU F, WANG F J. Parameter optimization of EDM micro-and-small holes based on signal-to-noise and grey relational grade [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,2007,43(7):63-67. (in Chinese)
- [11] 耿春明,赵万生,赵家齐,等.电火花加工中间隙放电状态检测的一种新方法[J].*电加工与模具*,2001,3:27-29.
- GENG CH M, ZHAO W S, ZHAO J Q, et al.. A new method of testing spark states of the gap in EDM[J]. *Electromachining & Mould*, 2001, 3:27-29. (in Chinese)
- [12] 诸静.模糊控制理论与系统原理[M].北京:机械工业出版社,2005.
- ZHU J. *Fuzzy control and system principle*[M], Beijing: China Textile Press,2005. (in Chinese)
- [13] 杨兆军,李雪,陈淑芬.基于粗糙集模糊控制的微孔钻削在线检测[J].*光学精密工程*,2008,16(7):1230-1235.
- YANG ZH J, LI X, CHEN SH F. On-line monitoring micro-size drilling based on rough set fuzzy control[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1230-1235. (in Chinese)
- [14] 刘曙光,魏俊民,竺志超.模糊控制技术[M].北京:中国纺织出版社,2001.
- LIU SH G, WEI J M, ZHU Z CH. *Fuzzy Control Technology* [M]. Beijing: China Textile Press, 2001. (in Chinese)
- [15] PASSINO K M, YURKOVICH S. *Fuzzy Control* [M]. Menlo Park: Addison Wesley Longman Inc.,1998.

作者简介:



张玲瑄(1984—),女,辽宁沈阳人,博士研究生,主要从事微细电火花加工放电状态检测与机床伺服控制方向的研究。E-mail: amyindut@hotmail.com



任小涛(1982—),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要从事机电一体化、电火花状态辨别、电火花机床运动控制等方面的研究。E-mail: ritter0302@hotmail.com



郑新毅(1982—),男,辽宁凌源人,博士研究生,主要从事机电一体化、电火花加工、数控技术等方面的研究。E-mail: zhengxinyi9@sina.com

导师简介:



贾振元(1963—),男,辽宁朝阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事机械制造、测试技术与仪器、机电控制、功能材料及其微执行器应用等方面的研究。E-mail: jzyxy@dlut.edu.cn

●下期预告

CUDA 架构下的液晶自适应波面数值解析

李大禹^{1,2},胡立发²,穆全全^{2,3},曹召良^{2,3},
夏明亮^{2,3},李抄^{2,3},刘肇楠^{2,3},宣丽²

1. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所(筹),江苏苏州 215163;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033;
3. 中国科学院研究生院,北京 100039)

利用 CUDA 进行了液晶自适应光学波面数值解析的加速计算。针对高分辨率液晶自适应光学系统,介绍了液晶自适应光学的波面数值解析算法,论述了 CUDA 的通用架构;建立了 CUDA 实现波面数值解析的编程模型,在此模型中引入了并行线程的有效利用,全局存储器的高效访问和数据直接回写 3 种优化方案。最后,给出了 GPU 与 CPU 的实验对比结果。结果表明: CUDA 计算分辨率为 512×512 , Zernike 多项式为 35 项的波面数值解析需时不到 1 ms, 计算速度是传统 CPU 波面数值解析的几十倍。