

文章编号 1004-924X(2010)02-0426-08

用正交试验分析电参数对小孔圆柱度的影响

郑新毅, 贾振元, 任小涛, 王福吉

(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 116024)

摘要:为实现电火花加工小孔圆柱度误差的合理控制,通过工艺试验研究了放电参数与小孔圆柱度间的规律。提出了多截面直角坐标测量方法,用线切割对已加工小孔的工件进行轴向和径向切割,以产生反映小孔特征的母线基准和圆基准;然后,用万能工具显微镜对这两个基准上的特征点进行测量,最终实现小孔圆柱度的定量评定。在此基础上,采用正交试验研究了放电参数(开路电压、电流,脉宽,脉间,抬刀周期)对小孔圆柱度的影响。结果表明,脉宽对圆柱度的影响最为显著,开路电压次之,其余 3 个参数的影响较弱;实验获得了以圆柱度误差最小为评价目标的一组放电参数:开路电压 110 V,电流 0.6 A,脉宽 150 μs ,脉间 120 μs ,抬刀周期 1+2 s。验证实验得到了平均半径为 0.301 84 mm 的小孔,其圆柱度误差为 0.021 mm,说明用该方法控制电火花加工小孔的圆柱度是有效的。

关键词:电火花加工;小孔;放电参数;圆柱度评定;正交试验

中图分类号: TG661 文献标识码: A

Analysis on effect of discharge parameters on cylindricity of small holes by orthogonal experiments

ZHENG Xin-yi, JIA Zhen-yuan, REN Xiao-tao, WANG Fu-ji

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

Abstract: In order to control the cylindricity errors of small holes machined by Electrical Discharge Machining (EDM), the relations between the electrical parameters and the cylindricity of small holes was studied by technologic experiments. In the course of studying, a multi-cross section measuring method in a Cartesian coordinate was proposed. The Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) was used to cut the processed workpieces in axial and radial directions to obtain the generatrix datum and circle datum of machined small holes, then the characteristic points of two data were measured by an universal tool microscope, and the cylindricity quantitative evaluation of the small holes was realized. Based on the method above, an orthogonal experiment was carried out, and the effect of some main electrical parameters (voltage, current, pulse duration, pulse interval and tool-lifting) on the cylindricity of small holes was studied. The results indicate that the pulse width affects cylindricity most distinctly, the voltage comes second, and the effect of rest parameters show a bit weaker. A sets of discharge parameters are achieved to purchase the least cylindricity error, which are $V=110\text{ V}$, $I=$

收稿日期:2008-11-25;修订日期:2009-04-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50575033);辽宁省高校重点实验室支持计划资助项目(No. 20060132)

0.6 A, $t_{\text{on}}=150 \mu\text{s}$, $t_{\text{off}}=120 \mu\text{s}$ and tool-lifting time=1+2 s. In the experiment, a small hole with a average radius of 0.301 84 mm can offer the cylindricity of 0.021 mm, which means the presented method is effective to control the cylindricity of the small holes machined by EDM.

Key words: Electrical Discharge Machining(EDM); small hole; discharge parameter; cylindricity evaluation; orthogonal experiment

1 引言

近年来,随着产品的小型化和高集成化,在各种材料的零件上加工微小孔的情况越来越多。例如:化纤喷丝板的孔径为3~2 100 μm ,深径比在0.2~30,喷丝板材料为不锈钢、钼或铂;柴油机喷油嘴的孔径为80~100 μm ,深径比为3~5,材料为合金钢;涡轮叶片上的冷却孔直径一般为400 μm ,深径比为100,材料为铬镍铁合金;医疗器械上的小孔直径大都为300 μm ,深径比为10,材料多为钛合金;另外打印机、CSP、GBA等产品上应用的孔径多在50~1 600 μm ,深径比为4~25,材料为GFRP、多层铜电路板、液晶聚合物等。目前,电火花机床是加工微小孔的主要设备之一,但电火花加工的小孔具有典型的“喇叭”特征,且放电参数值选择过大还会出现形状畸变,严重影响小孔零件的使用精度。对于这些微小孔,检测其尺寸精度、形状精度、位置精度以及表面粗糙度是非常重要的^[1]。其中,圆柱度误差能全面反映孔的综合误差状况^[2],尤其对于柴油机喷油嘴这一类小孔,限制其圆柱度误差是十分必要的^[3]。因此,在小孔电火花加工过程中研究圆柱度误差的合理、有效控制势在必行。圆柱度误差的主要来源有两个方面:一方面是电极的形状误差复映在工件上,这可以通过对电极进行监控与测量实施控制^[4];另一方面是由放电参数导致的放电间隙变化产生的。

在电火花加工过程中脉冲放电具有随机性和波动性的特点^[5-6],这使得放电参数与加工质量间存在某种统计学规律。Puertas分析了加工参数对表面质量的影响,并建立了一个数学模型选择最优的加工条件^[7]。施维分析了电火花线切割的加工质量,阐述了提高加工尺寸精度的放电参数选择方法^[8]。用信噪比与灰关联度的方法进行电火花小孔加工多目标的优化是目前研究的热点^[9],其原理是基于研究目标与放电参数间的规

律性。同样,在电火花小孔加工过程中控制孔的圆柱度误差,也可以研究放电参数与圆柱度误差间的关系,进行放电参数优选。但是进行上述研究的基础是对小孔圆柱度的定量评定。由于目前的测量技术还不完善,对于直径1 mm以下小孔的圆柱度的定量误差评定很困难。实际生产中只能采用塞规进行小孔圆柱度的定性评定,无法进行定量分析。

为找到电火花加工中电参数对圆柱度的影响规律,实现小孔圆柱度误差的有效控制,本文首先提出了一种多截面直角坐标方法,测量并评定出小孔的圆柱度误差。然后,通过正交试验对电火花加工的小孔进行圆柱度误差分析,揭示放电参数对小孔圆柱度的影响规律,从而选择出满足圆柱度误差要求的最佳放电参数组合,以提高小孔的加工质量。

2 小孔圆柱度误差评定的测量方法

测量孔圆柱度误差的有效手段为圆柱度仪,但是测量小孔圆柱度误差时,由于目前圆柱度仪的测头太大无法进入小孔内部,故不可行。但无论使用什么手段,在测量圆柱度误差时,必须同时具备两个基准:圆基准和直线基准。由此本文提出用多截面直角坐标法进行小孔圆柱度的测量:首先对要测量的小孔进行母线标定;然后把小孔工件切成多层,被标定的母线与每层都产生一系列交点;然后分别测量每层上所有交点的直角坐标值,最后综合多个截面的坐标点进行圆柱度评定。

2.1 小孔母线标定

应用多截面法测量圆柱度时,必须保证各个截面上同一位置的点在同一条母线上,为保证这个直线基准采用线切割进行母线标定。标定方法为:用小于孔直径的电极丝穿过小孔,先定位到孔中心,然后从中心沿径向向外加工,直到电极丝切入孔壁,这样就产生了一条切痕,如图1所示。每

条切痕上产生两条母线 A 和 B , 当把工件切成多层后, 各层上同一位置的点 a_1, a_2, a_3 一定属于母线 A, b_1, b_2, b_3 一定属于母线 B 。用线切割对小孔内壁做母线标定时, 电极丝的加工轨迹可以布置成三角形、四边形、五边形和六边形等几种, 依次可以得到 6、8、10 和 12 条母线, 如图 2 所示。

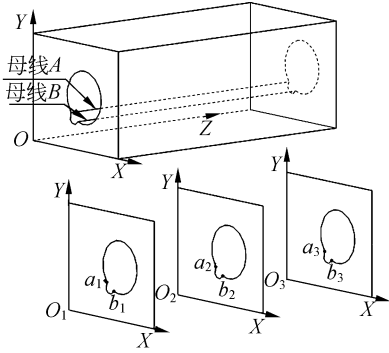


图 1 母线标定原理

Fig. 1 Principle of generatrix calibration

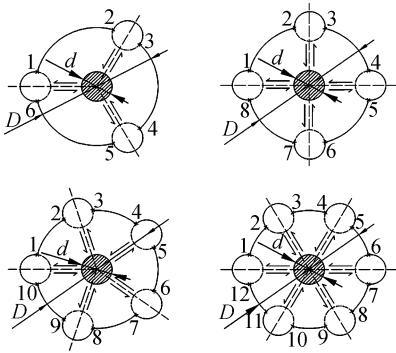


图 2 母线标定轨迹

Fig. 2 Path of generatrix calibration

本文用直径 0.4 mm 电极进行小孔电火花加工, 然后在 Sodick AP200 线切割机床上用直径 0.1 mm 黄铜丝做母线标定。这里容易影响测量精度的是丝的垂直度, 只有线切割丝与轴线一致, 切出的割痕才能反映孔的母线特征, 所以需要用标准块通过精心调整尽可能降低丝的倾斜度。而且对于厚度只有 2 mm 的工件, 这种误差是极其微小的, 所以线切割机床产生的误差完全可以忽略。为使尽可能多的点参与圆柱度评定计算, 在此情况下选择六边形切割方式。这样每个孔产生 12 条母线, 在每层截面的圆周上就产生了 12 个测点。图 3 为切割完成后一个截面的显微照片。

母线标定的前提是小孔的轴线必须与工件

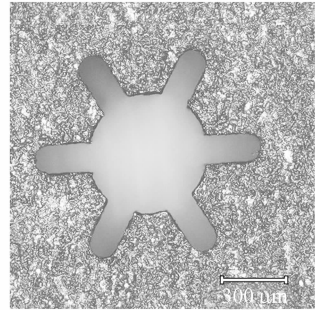


图 3 母线标定实例

Fig. 3 Example of generatrix calibration

表面垂直, 因为线切割丝的方向定位也是通过工件表面实现的, 只有丝与轴线尽可能重合才能保证切出来的割痕与母线一致。实际上, 在电火花小孔加工过程中, 只要确保圆柱形的电极与工件表面垂直, 则加工出的孔的轴线也一定与工件表面垂直。即圆柱度误差只由孔的“腰形”、“鼓形”或“锥形”引起, 不产生轴线方向偏差。

2.2 沿轴线获得多截面

小孔的母线被标定后, 下一步就对工件进行分层以实现多截面。激光和线切割都是常用的切片工具^[10], 由于线切割的定域性好、割痕毛刺小, 所以该操作仍然采用线切割进行。在上述线切割设备上, 通过调整上下导丝嘴的位置使电极丝与工件的表面始终保持平行, 然后将工件依次切成许多平行的薄片, 这样就保证了小孔圆柱度测量时圆基准的精度。在实际测量过程中, 为方便计算一般取三个截面即可反应小孔的腰鼓形或锥形特征, 这也是电火花加工小孔的圆柱度误差的主要来源。由于加工实例的工件厚度为 2 mm, 所

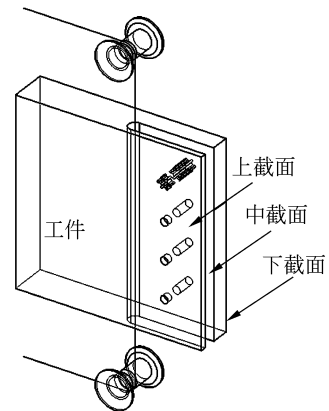


图 4 用线切割对工件分层

Fig. 4 Workpiece stratified by WEDM

以仅做一次分层切割,且电极丝切割位置偏向工件一侧,使工件厚度的 1/2 处正好产生一个截面,再综合上下两个表面就得到了三个测量截面:上截面、中间截面和下截面,如图 4 所示。

2.3 标定点数据测量

在得到每个截面及上面的标定点后,用万能工具显微镜依次测量三个截面上各点的直角坐标值。万能工具显微镜的定位精度为 $1\ \mu\text{m}$,读数精度为 $0.1\ \mu\text{m}$,在读数前要对工件进行精确调整并牢牢固定,在读数过程中必须保持工作台的稳定,这样才能保证小孔测量数据的准确性。测量前在工件每个截面上选定一个基准点(例如:角点),将此基准点和所有标定点的坐标测量完成后,计算出该截面上所有点对基准点的相对坐标。

3 圆柱度误差评定

3.1 测量数据预处理

所有截面的标定点测完后,将测点数据进行存储处理。每个截面上以基准点为坐标原点的平面直角坐标系及各坐标系下点的坐标如图 5 所示:点 $a_1 \sim a_{12}$ 处于 $X_1 a Y_1$ 坐标系;点 $b_1 \sim b_{12}$ 处于 $X_2 b Y_2$ 坐标系;点 $c_1 \sim c_{12}$ 处于 $X c Y$ 坐标系。由于三个截面的坐标原点都属于工件的同一条边,所以以 c 为坐标原点 \overline{cba} 为 z 向建立三维直角坐标系,给 $a_1 \sim a_{12}$ 每个点增加第三个坐标 $z=2$;给 $b_1 \sim b_{12}$ 每个点增加第三个坐标 $z=1$;给 $c_1 \sim c_{12}$ 每个点增加第三个坐标 $z=0$ 。三维直角坐标系 $c-XYZ$ 下的所有测点如图 6 所示,在此三维直角坐标系下,即可根据测得的三个截面的数据进行圆柱度误差计算。

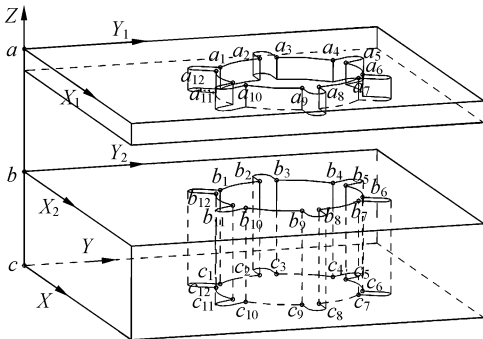


图 5 三个截面的测点

Fig. 5 Measuring points of three sections

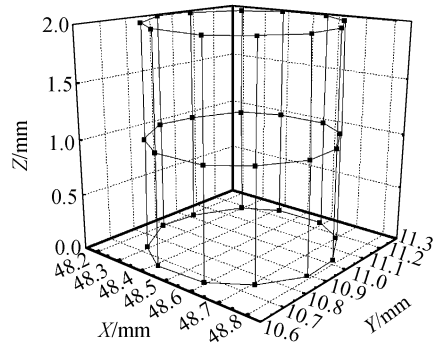


图 6 三维直角坐标系下各测点

Fig. 6 Each point in 3D Cartesian coordinate system

3.2 圆柱度误差计算

进行圆柱度误差计算的评定准则有:最小区域法(MZC)、最小二乘圆柱法(LSC)、最大内切圆柱法(MIC)、最小外接圆柱法(MCC)。其中最小二乘法具有较好的鲁棒性^[2],故选择它作为圆柱度计算的评定准则。在空间直角坐标系中,假设 Z 轴方向与孔的轴线方向一致,评定圆柱度误差时需要将实际圆柱面与理想圆柱面比较。设:理想轴线为 L ,轴线起始点坐标为 (a, b, c) ,轴线方向矢量为 (l, m, n) ,则轴线方程为:

$$\frac{x-a}{l} = \frac{y-b}{m} = \frac{z-c}{n} \quad (1)$$

因轴线起点在 XOY 平面上且方向与 Z 轴方向一致,所以 $c=0, n=1$ 。则孔上 36 个标定点 $P(x_i, y_i, z_i)$ 至轴线 L 的距离为:

$$R_i = \sqrt{(x_i - lz_i - a)^2 + (y_i - mz_i - b)^2} \quad (2)$$

其中: $i=1, 2, \dots, 36$ 。

最小二乘法评定圆柱度误差实际上是寻找包容被测实际圆柱面的理想圆柱面,且各测点距离理想圆柱面轴线的径向距离与理想圆柱面半径之差的平方和最小,目标函数定义为:

$$f = \sum_{i=1}^n (R_i - R)^2 = \sum_{i=1}^n [\sqrt{(x_i - lz_i - a)^2 + (y_i - mz_i - b)^2} - R]^2$$

求解最优参数 (a, b, l, m, R) 使目标函数 f 最小,即可得到圆柱度误差和此时孔的轴线方程。对于上述方程的求解是一个寻优问题,在圆柱度误差求解过程中比较有效的数值求解算法有拟牛

顿法、单纯形搜索法、单纯形线性规划法、粒子群优化法等^[11-14]。由于拟牛顿法的收敛速度最快,故选择拟牛顿法进行求解。可解得小孔理想圆柱半径 R^* , 轴线起点坐标 (a^*, b^*, c^*) , 轴线的方向矢量 (l^*, m^*, n^*) , 最后计算出孔的圆柱度误差。

4 工艺试验

虽然解决了小孔圆柱度误差的定量评定,但是该方法对孔的测量是破坏性的,必须通过大量试验得到规律并指导生产才有实际应用价值。且电火花加工小孔时,放电参数与孔的加工质量间确实存在规律,因此通过合理的工艺试验,揭示放电参数与小孔圆柱度误差的关系,得到优化的参数组合。

4.1 正交试验的设计

为考察放电参数对小孔圆柱度的影响规律,设计如下正交试验进行分析。工艺试验条件:电极材料为紫铜实心圆柱电极,直径 0.4 mm;工件材料为厚度 2 mm 的 45# 碳钢板;试验机床为 Sodick A50 电火花成型加工机床。考虑到为以后微孔加工的圆柱度测量提供借鉴,特选用实心电极,加工过程中无冲抽油、电极不旋转,且假设电极为理想的圆柱不存在误差复映。

试验主要考察开路电压、峰值电流、脉宽、占空比、抬刀时间几个电参数对圆柱度误差的影响规律,为方便试验占空比用脉宽与脉间的比值代替。试验的因素和水平如表 1 所示,选择 $L_{25}(5^6)$ 正交表共进行 25 组试验,每组试验做三次^[15]。

表 1 正交试验因素和水平

Tab. 1 Factor and level of orthogonal test

	A	B	C	D	E
	开路电压	峰值电流	脉宽	脉宽/ 脉间	抬刀周期
	U/V	I/A	$T/\mu s$		(s)
1	80	0.3	50	5	1+2
2	90	0.6	100	4	1+3
3	100	0.9	150	2	2+5
4	110	1.2	200	5/4	3+6
5	120	1.5	250	1	4+8

4.2 正交试验及结果的方差分析

所有小孔加工完后采用上文所述方法进行圆柱度误差测量与评定,取每组试验结果平均值进行分析,结果见表 2。由于试验的影响因素是多种多样的,主要因素变化的同时随机因素也发生变化,为了在试验中判断出主要因素对结果的影响效应,对正交试验的结果进行方差分析^[15]。由表 3 的分析结果可见:电火花小孔加工过程中放电参数对小孔圆柱度误差的顺序依次为:脉宽、开路电压、峰值电流、脉宽/脉间、抬刀周期;脉宽对小孔圆柱度误差的影响显著;此加工环境下圆柱度误差最小的试验方案组合: $A_4 B_2 C_3 D_3 E_1$ 。

表 2 试验方案及结果

Tab. 2 Test scheme and results

实 验	列号(因素)						圆 柱 度
	A 开路电 压 U/V	B 电 流 I/A	C 脉 宽 $T/\mu s$	D 脉 宽/ 脉 间	E 抬 刀 周 期 s	F 空 列	
1	80	0.3	50	5	1+2	1	0.026 8
2	80	0.6	100	4	1+3	2	0.038 7
3	80	0.9	150	3	2+5	3	0.037 3
4	80	1.2	200	5/4	3+6	4	0.047 9
5	80	1.5	250	1	4+8	5	0.157 9
6	90	0.3	100	2	3+6	5	0.022 8
7	90	0.6	150	5/4	4+8	1	0.025 2
8	90	0.9	200	1	1+2	2	0.031 3
9	90	1.2	250	5	1+3	3	0.061 6
10	90	1.5	50	4	2+5	4	0.039 5
11	100	0.3	150	1	1+3	4	0.022 7
12	100	0.6	200	5	2+5	5	0.031 1
13	100	0.9	250	4	3+6	1	0.043 7
14	100	1.2	50	2	4+8	2	0.029 0
15	100	1.5	100	5/4	1+2	3	0.044 9
16	110	0.3	200	4	4+8	3	0.023 8
17	110	0.6	250	2	1+2	4	0.027 3
18	110	0.9	50	5/4	1+3	5	0.026 2
19	110	1.2	100	1	2+5	1	0.040 5
20	110	1.5	150	5	3+6	2	0.029 9
21	120	0.3	250	5/4	2+5	2	0.111 0
22	120	0.6	50	1	3+6	3	0.026 6
23	120	0.9	100	5	4+8	4	0.036 8
24	120	1.2	150	4	1+2	5	0.028 2
25	120	1.5	200	2	1+3	1	0.028 9

表3 正交试验方差分析表

Tab.3 Variance analysis of orthogonal test

方差来源	离差平方和 S	自由度 f	平均离差平 方和 MS	统计量 F	临界值			显著性	最优方案
					$F_{0.1}(4,4)$	$F_{0.05}(4,4)$	$F_{0.01}(4,4)$		
A 开路电压	3.282×10^{-3}	4	8.205×10^{-4}	2.165 447	4.11	6.39	16		A ₁
B 峰值电流	2.646×10^{-3}	4	6.616×10^{-4}	1.745 967	4.11	6.39	16		B ₂
C 脉宽	9.566×10^{-3}	4	2.392×10^{-4}	6.411 84	4.11	6.39	16	* *	C ₃
D 脉宽/脉间	2.568×10^{-3}	4	6.419×10^{-4}	1.694 11	4.11	6.39	16		D ₃
E 抬刀方案	2.310×10^{-3}	4	5.774×10^{-4}	1.523 954	4.11	6.39	16		E ₁
F 试验误差	1.516×10^{-3}	4	3.789×10^{-4}						
总和	0.021 89	24							

5 实验验证

为保证小孔圆柱度误差的重现性和可行性,对优选方案进行实验验证。保持上述加工环境(电极直径与材料、工件材料、工作液成分以及深径比等非电参量)不变,用得到的最优放电参数进行加工:开路电压为110 V、峰值电流为0.6 A、脉宽为150 μ s、脉间为120 μ s、抬刀周期为1+2 s。然后用本文提出的方法进行圆柱度误差测量,共加工了5个孔,得到的小孔半径分别为:0.301 8, 0.301 3, 0.301 5, 0.302 6, 0.302 1 mm,平均半径为0.301 84 mm;相应的圆柱度分别为:0.022 0, 0.021 4, 0.020 9, 0.020 5, 0.020 2,平均圆柱度为0.021 0。实验证明了优选的放电参数得到圆柱度的结果是最优的。

6 结 论

基于放电参数对电火花加工小孔质量影响的规律性,设计了0.4 mm紫铜电极加工45#碳钢板的正交试验对放电参数进行分析。提出了多截面直角坐标测量法对已加工的小孔进行测量,并评定圆柱度误差。得到了电火花小孔加工中放电参数对小孔圆柱度的影响规律:放电参数对圆柱度误差影响的强弱程度依次为脉宽、开路电压、峰值电流、脉宽/脉间、抬刀周期;以圆柱度误差最小为目标的放电参数组合为:开路电压110 V,电流0.6 A,脉宽150 μ s,脉间120 μ s,抬刀周期1+2 s,并通过实验得到了圆柱度为0.021的小孔,说明本文提出的方法是有效的。

在电火花加工中,对特定加工环境下得到的小孔进行圆柱度分析,通过大量试验得到一组优化的放电参数,用此组参数加工出的孔的圆柱度误差能满足公差要求,对指导生产有理论意义和实际应用价值。

参考文献:

- [1] ONIKURA H, ONISHI O. Effect of ultrasonic vibration on performance of micro drilling into difficult-to-machine materials[J]. *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, 2004, 48(10): 551-553.
- [2] VENKAI AH N, SHUNMUGAM M S. Evaluation of form data using computational geometric techniques—part II: cylindricity error[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,

2007, 47(7-8): 1237-1245.

- [3] 翁煜, 杨云. 柴油机喷油嘴零件加工工艺探索[J]. *金属加工(冷加工)*, 2002(8): 26-28.
- WENG Y, YANG Y. Process technology of diesel nozzle[J]. *Machinist Metal Cutting*, 2002(8): 26-28. (in Chinese)
- [4] 郭锐, 赵万生, 李刚, 等. 微细电火花加工的微细电极在线检测[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 998-1003.
- GUO R, ZHAO W S, LI G, et al.. Micro electrodes on-line measure in micro EDM[J]. *Opt.*

- Precision Eng.*, 2006, 14(6): 998-1003. (in Chinese)
- [5] COGUN C, SAVSAR M. Statistical modeling of properties of discharge pulses in electric discharge machining[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1990, 30(3): 467-474.
- [6] 元利伟, 楼乐明, 李明辉. 放电通道的波动性与电火花加工机理[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(7): 989-992.
- QI L W, LOU L M, LI M H. Mechanism of electrical discharge machining and wave characteristics of plasma channel[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2001, 35(7): 989-992. (in Chinese)
- [7] PUERTAS I, LUIS CJ, ÁLVAREZ L. Analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, MRR and EW of WC - Co[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153-154: 1026-1032.
- [8] 施维. 电火花线切割加工质量分析及提高加工质量的方法[J]. 煤矿机械, 2005(4): 84-86.
- SHI W. Analysis of process quality and methods to improve process quality in WEDM[J]. *Coal Mine Machinery*, 2005(4): 84-86. (in Chinese)
- [9] 贾振元, 顾丰, 王福吉, 等. 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, 43(7): 63-67.
- JIA Z Y, GU F, WANG F J, *et al.*. 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)
- [10] 崔建丰, 赵晶, 樊仲维, 等. 厚硅片的高速激光切片研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 829-834.
- CUI J F, ZHAO J, FAN ZH W, *et al.*. Study on LD-pumped Nd:YAG laser cutter for silicon wafer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 829-834. (in Chinese)
- [11] SHANNO D F. Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization[J]. *Mathematics of Computing*, 1970, 24: 647-656.
- [12] WEBER T, MOTAVALLI S, FALLAHI B, *et al.*. A unified approach to form error evaluation[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(3): 269 - 278.
- [13] MURTHY T S R, ABDIN S Z. Minimum zone evaluation of surfaces[J]. *International Journal Machine Tools Design and Research*, 1980, 20(2): 123-136.
- [14] 崔长彩, 黄富贵, 张认成, 等. 粒子群优化算法及其在圆柱度误差评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 256-260.
- CUI CH C, HUANG F G, ZHANG R CH, *et al.*. Research on cylindricity evaluation based on the Particle Swarm Optimization(PSO)[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 256-260. (in Chinese)
- [15] 郑少华, 姜奉华. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- ZHENG S H, JIANG F H. *Experimental Design and Data Processing*[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2004. (in Chinese)

作者简介:



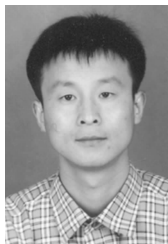
郑新毅(1982—),男,辽宁朝阳人,博士研究生,2003年、2006年于大连交通大学分别获学士、硕士学位,主要从事电火花加工技术的研究。E-mail: zhengxinyi9@sina.com



贾振元(1963—),男,辽宁朝阳人,博士、教授、博士生导师,1984年、1987年、1990年于大连理工大学分别获学士、硕士、博士学位,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



任小涛(1982—),男,安徽亳州人,硕士研究生,2007年于大连理工大学获学士学位,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



王福吉(1974—),男,辽宁大连人,博士、副教授,2000年、2003年于南方冶金学院分别获学士、硕士学位,2005年于大连理工大学获博士学位,主要从事超磁致伸缩材料执行器及其关键技术的研究。E-mail: wfjsll@dlut.edu.cn

(本栏目编辑:李树军)

● 下期预告

空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的设计

郑耿峰^{1,2},张 柯¹,韩双丽¹,金龙旭¹,梁 伟³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039;3. 空军航空大学,吉林 长春 130022)

提出了一种空间时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)相机动态成像地面检测系统的设计和实现。设计的系统用于模拟相对空间飞行器的地面像移,验证了 TDICCD 相机的像速匹配能力和动态成像质量。本系统采用精密转台和偏流转台模拟卫星绕地球运动和卫星受地球自转影响而在不同纬度产生不同的偏流运动。精密转台用永磁力矩电机驱动,在控制方法上采用锁相锁频伺服控制策略,稳速精度达到 0.029 7%。偏流转台用步进电机控制,偏流角的平均转角速率约 0.02°/s,偏流角位置的数据引导跟踪精度优于±5'。所设计系统的精度满足 TDICCD 相机动态成像检测的指标要求。该系统已在某型号空间可见光相机的研制中获得了应用。