

探测精密零部件加工裂纹的声发射实时监测仪

郑耿峰^{1,2}, 马舜峰^{1,2}, 金龙旭¹

(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)

摘要: 为了提高航天航空精密零部件加工设备的可靠性、安全性, 缩短研制周期, 提出了一种实时监测精密零部件加工过程产生裂纹的方法, 并根据此方法, 研制了一台基于 TI 公司最新浮点数字信号处理器 TMS320F28335 的精密零部件裂纹实时监测仪的样机。考虑在线实时监测的需要, 采用了基于声发射(AE)技术的方案。介绍了裂纹实时监测方法的总体方案及其相应系统的硬件组成, 描述了数字信号处理算法, 并对裂纹实时监测仪样机进行了试验验证。试验结果显示, 研制的样机能达到无漏检, 误检率为 1.2%, 验证了本文所提方法的有效性。

关键词: 声发射技术; 精密零部件; 金属裂纹; 实时监测

中图分类号: TG115; TB51 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111901.0153

Acoustic emission real-time detecting instruments for metal cracks in machining exact details

ZHENG Geng-feng^{1,2}, MA Shun-feng^{1,2}, JIN Long-xu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To improve the reliability and security of machining exact details in space equipment and to shorten their developing periods, a real-time detecting method for the metal cracks in machining exact details was presented. According to this method, a prototype machine of real-time detecting instrument for the cracks of exact details based on a float digital signal processor TMS320F28335 was developed. In consideration of online real-time detecting, the Acoustic Emission(AE) technique was adopted in the method. The general scheme for detecting metal cracks in real time was introduced and the hardware composition and software algorithm corresponding to the system were analyzed in detail. Finally, the verification experiments to the prototype machine of real-time detecting instrument were carried out. The experimental results show that the prototype machine has high performance. Its false detecting ratio reaches 1.2% and has no missing cracks, which validates that the AE real-time detecting

ting method for the crack detecting is efficiency.

Key words: Acoustic Emission(AE) technique; exact detail; metal crack; real-time detect

1 引言

精密金属零部件在加工过程中,常会发生零部件损伤的现象。尤其当零部件在进行热处理工序之后的加工,由于材料不均匀性和热处理不稳定性引起热后工件弯曲差异,有时会发生断裂现象。产生的微小裂纹在允许的范围内,不会对零件性能造成影响,但若没及时检测出来,将对产品成本、整机性能及研制周期造成重大的负面影响。特别是在航天航空领域,一些精密零部件往往造价昂贵,由于要求的加工精度高,加工周期也较长,一旦无法及时准确地将允许范围内的微小裂纹检测出来,不仅会大大增加项目的成本,还会因个别零部件而影响整个研制周期。即使可以在加工过后对零部件进行裂纹检测,也将降低生产效率。因此,研究精密零部件加工过程的裂纹实时监测方法具有很大的意义。

常规的对裂纹无损检测方法主要有超声探伤、射线探伤、涡流探伤、磁粉探伤和渗透法探伤等。常规的无损检测中多是以某种方式向被测对象发出特定信号,然后再由仪器检测被测对象对该信号的反应,从中识别缺陷存在。因此,上述的常规检测方法无法在加工过程中进行实时检测,只能在加工结束后再对零部件进行检测来判断是否存在裂纹。声发射技术(Acoustic Emission, AE)是一种新型的无损检验技术^[1-4]。AE定义为物体或材料内部迅速释放能量而产生瞬态弹性波的一种物理现象,其信号表示为一个或多个AE事件经传感器接收并经系统处理后以某种形式出现的电信号^[5],通过采集和分析一般金属物体产生裂纹时发出的声波信号可判断裂纹的存在及趋势。相对于常规的无损检测方法,应用声发射技术对精密零部件裂纹进行检测具有以下优点:检测时通过对零部件外加应力,可实现动态检测,可更客观地评价加工过程中零部件的安全性和可靠性;声发射灵敏度高,检查覆盖面积大,不会漏检,可以远距离监测;检测可在零部件加工过程中进行。

本文基于声发射技术,提出了一种航天航空设备精密金属零部件加工过程的裂纹实时监测方法。通过检测伴随材料变形、断裂应力改变而放出的AE波,对其相关参数进行分析评价,从而检测裂纹的产生。基于所提出的裂纹AE实时监测方法,研制了精密零部件裂纹AE实时监测仪的样机。最后,通过实验分析,验证了本文提出的零部件裂纹实时监测方法的有效性。

2 金属裂纹声发射信号特征分析

金属裂纹声发射信号所在的频段一般为100~300 kHz,中心频率为150 kHz左右^[6]。图1为自动校直机对精密金属零部件进行试验所得的金属裂纹声发射信号的时域图。

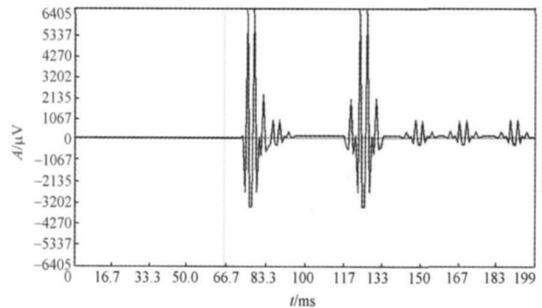


图1 金属裂纹声发射信号时域图

Fig. 1 Amplitude-time plot of metal crack AE signal

由图1可知,金属裂纹声发射信号为一瞬态信号,持续时间大约为几毫秒到几百毫秒。为了进一步明确该信号的频率特征,下面用能量分析法对该信号进行分析。

在不同频段声发射信号对应的能量分布不同,由此可反映声发射信号源及干扰噪声的不同特征。因此,可选择声发射信号的能量特征参数——能量系数(不同频段的能量同信号总能量的比值)来表征声发射信号的特征^[7]。基于上述原理,利用Matlab软件编写相关程序对上述信号的能量进行分析,所得的各频段的能量系数如表1所示。

表 1 金属裂纹声发射信号能量系数表

Tab.1 Energy coefficients of metal crack AE signals

信号段数	频率段/ kHz	能量系数/(%)
1	0~ 50	0.008 0
2	50~ 100	0.071 2
3	100~ 150	0.130 8
4	150~ 200	0.707 0
5	200~ 250	0.071 1
6	250~ 300	0.003 7
7	300 以上	0.008 2

从表 1 可以看出, 金属裂纹声发射信号主要集中在信号第 2、第 3、第 4 和第 5 频段。但第 2 频段可看作低频噪声, 真正有价值的信号集中在第 3、第 4 和第 5 频段, 其能量占信号总能量的 90.89%。据此也验证了相关文献所述的金属裂纹声发射信号所在频段为 100~ 300 kHz, 中心频率为 150 kHz 左右的结论。

3 AE 实时监测系统方案及硬件组成

3.1 裂纹 AE 实时监测方法的总体方案

在精密零部件加工过程中, 采用裂纹 AE 实时监测设备对零部件进行在线实时裂纹监测。声发射传感器采集的电信号经过前置放大器放大后, 先进行硬件滤波, 滤波后的信号通过 AD 进入 DSP 数字信号处理系统, 经过数字滤波、特征参数提取和对参数的分析评价等一系列数字信号处理后, 判断零部件是否出现裂纹。用于精密零部件加工过程的裂纹 AE 实时监测方法的总体方案结构框图如图 2 所示。

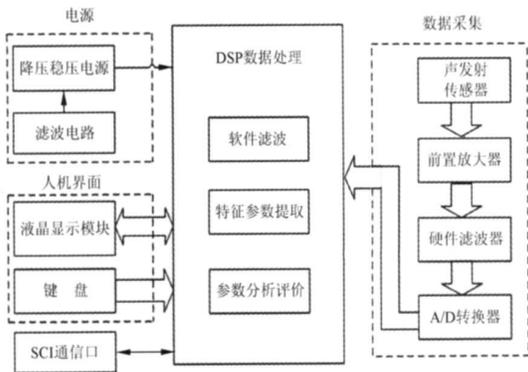


图 2 AE 实时监测系统结构框图

Fig. 2 Scheme of AE real-time detection for metal crack

由于声发射以被动检测的方式进行动态监测, 同时被检信号微弱, 声发射传感器敏感, 因此采集到的声发射信号混杂着电气噪声、机械噪声及外界环境噪声等大量的噪声^[8-9]。所以, 剔除噪声, 还原出真实有效的声发射信号, 在本裂纹实时监测方案中是最为重要的环节。本方案在多处对信号进行了滤波, 选择特定频率响应的声发射传感器和前置放大器, 同时使用了硬件滤波器, 三者构成了对 AE 信号的硬件粗滤波部分; 在信号处理器中编写软件滤波算法, 实现了对信号的精确数字滤波。

3.2 裂纹 AE 实时监测系统的硬件组成

由图 2 总体方案结构框图可以看出, 裂纹 AE 实时监测系统中与裂纹 AE 信号相关的硬件组成主要有声发射传感器、前置放大器、硬件滤波器、AD 转换器和数字信号处理器。

声发射检测需要通过传感器把声发射信号转换成电信号。各种测量表明, 声发射信号的频率分布与材料或构件的具体特性有关, 其范围可从次声波到超声波, 考虑到低频机械噪声的干扰及高频传播的衰减, 通常声发射传感器的使用频率为 20 kHz~ 2 MHz。根据相关研究及小节 2 的分析可知, 金属的裂纹声发射信号检测的使用频率多在 100~ 300 kHz。因此, 本系统采用北京鹏翔科技有限公司出产的 PXR15 传感器, 谐振频率 150 kHz, 10 dB 频率带宽 100~ 300 kHz, 灵敏度 > 65 dB。

传感器输出信号的电压有时低至微伏数量级, 这样微弱的信号, 若经过长距离的传输, 信噪比必然要下降。因此, 在靠近传感器处设置了前置放大器, 将信号提高到一定程度。本方案采用北京鹏翔公司出产的 PXP A 声发射前置放大器。PXR A 声发射前置放大器具有体积小、抗撞击、高带宽、低噪音等特点, 其带宽为 100~ 300 kHz, 增益为 40 dB, 噪音电平 < 10 V。

硬件滤波器选用集成滤波芯片 MAX275。MAX275 是美国 MAXIM 公司生产的通用型连续时间有源滤波器, 内含两个独立二阶有源滤波电路, 可分别同时进行低通和带通滤波, 也可通过级联实现四阶有源滤波, 可实现巴特沃斯型、贝塞尔型及切比雪夫全通型滤波器。中心频率/截止频率可达 300 kHz。MAX275 无需时钟电路, 因此与开关电容滤波器相比, 噪声更低, 动态特性更

好。MAX275 不需外接电容, 只需外接电阻, 可实现频率从 100 Hz~ 300 kHz 的低通或带通滤波。其中心频率、转折频率、 Q 值、放大倍数均可通过外接电阻加以确定, 参数调整十分方便。由于是单片结构, 高频工作时基本不受杂散电容的影响。

A/D 模块选择 ADI 公司的 AD7865。AD7865 是一款 14 bits 快速 A/D 转化芯片, 其采样周期为 2.4 μ s, 可通过软件或硬件方式选择转换通道, 可选的信号输入范围有: 10 V, 5 V, 2.5 V, 0~ 5 V, 0~ 2.5 V, 其高速并行输出接口可与 3 V 数字信号处理器的接口直接相连。

数字信号核心处理芯片采用 TI 公司最新生产的 32 位浮点 DSP TMS320F28335。其主频最高能达到 150 MHz (6.67 ns 的时钟周期), 片上有 256 K 16 位的 FLASH, 34 K 16 位的 SRAM, 8 K 16 位的 BOOT ROM 和 1 K 16 位的 OTP ROM^[10-11], 其处理速度和内部存储器的容量能满足本方案数字信号处理的要求。

4 AE 数字信号处理算法

4.1 软件滤波算法及 DSP 实现

目前有多种软件滤波算法用于对信号噪声的抑制^[12-13], 但鉴于数字滤波器设计简单、有效, 且具有效果好、参数易调的优点, 同时考虑到本系统需要线性相位和稳定性, 因此本项目采用有限冲激响应数字滤波器对金属裂纹声发射信号进行数字滤波消噪。

有限冲激响应滤波器设计, 主要是对其相关性能参数进行设置, 包括响应类型、设计方法、滤波阶数、频率特性、幅度特性等。

本文先根据之前分析的金属裂纹声发射信号特征设置滤波器参数, 利用 Matlab 软件工具 FDA Tool 设计有限冲激响应滤波器。

从表 1 可知信号金属裂纹声发射信号主要集中在信号第 2、第 3、第 4 和第 5 频段, 但第 2 频段由于受外界噪声干扰较大, 且噪声能量只占总能量的 0.071 2%, 为了消除噪声, 可将 100 kHz 以下的信号直接滤除。第 6、7 频段的能量仅占总能量的 0.011 9%, 也可直接滤除。第 3、4、5 频段直接反映了金属裂纹声发射信号的特征, 包含了真正有价值的信息, 滤波后应该保留。因此, 设定有

限冲激响应数字滤波器的参数如下:

(1) 响应类型: 带通;

(2) 设计方法: 等纹波;

(3) 滤波阶数: 最小阶数;

(4) 相位延迟: 最小原则;

(5) 频率特性: 采样频率为 700 kHz, 带通频率为 100 kHz 与 250 kHz, 带阻频率为 80 kHz 与 270 kHz;

(6) 幅度特性: 通带纹波 $A_{\text{pass}} = 1$ dB, 阻带衰减 $A_{\text{stop1}} = 60$ dB, 阻带衰减 $A_{\text{stop2}} = 60$ dB。

根据上述滤波器参数, 通过 FDA Tool 设计的有限冲激响应滤波器的幅度-频率图和相位-频率图如图 3 和图 4 所示。

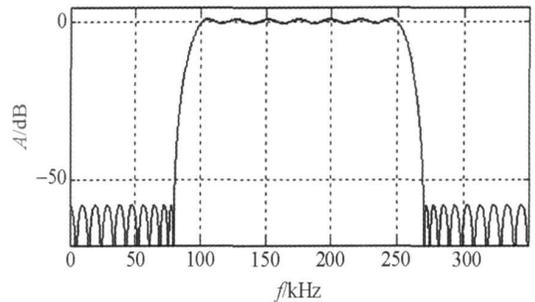


图 3 有限冲激响应滤波器幅值-频率图

Fig. 3 Amplitude-frequency plot of FIR filter

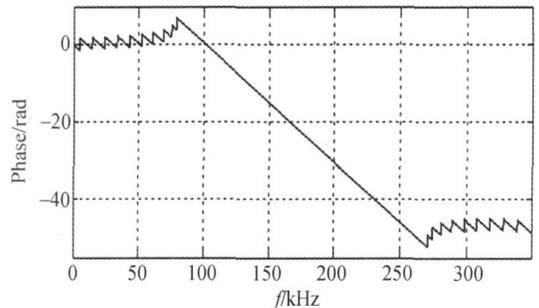


图 4 有限冲激响应滤波器相位-频率图

Fig. 4 Phase-frequency plot of FIR filter

在 Matlab 环境中将图 1 的金属裂纹声发射信号通过上述设计的滤波器, 对滤波后的信号进行频谱分析, 得到图 5 所示的幅值-频率图。

由图 5 可得, 小于 100 kHz 和大于 250 kHz 的信号基本被滤除, 能量幅值明显降低, 能满足数字滤波的要求。其滤波器的阶数为 36, 至此可得到 36 阶的滤波器系数。

由有限冲激响应滤波器的原理^[14]可得, 滤波

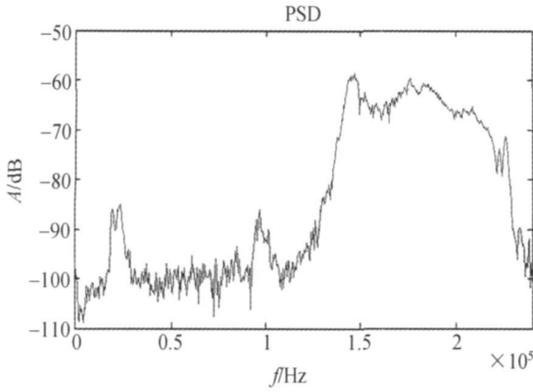


图 5 滤波后的金属裂纹声发射信号幅值-频率图
Fig. 5 Amplitude-frequency plot of filtered metal crack AE signal

4.2 特征参数提取算法

本方案提取裂纹声发射信号的特征参数为一次采集的振铃个数和信号总能量。

图 6 为标准声发射信号简化波形参数定义。

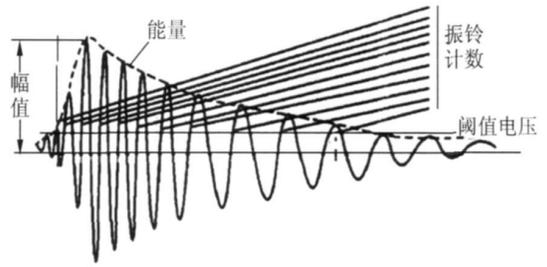


图 6 声发射信号简化波形参数定义

Fig. 6 Definition of AE signal parameter

器的输出

$$y[k] = \sum_{p=0}^{35} h[p] x[k-p], \quad (1)$$

式中, $h[p]$ 为滤波器的系数序列, $x[k-p]$ 为经 AD 采样后的输入序列。

为提高系统的实时性, 本文设计了一种改进算法。由于有限冲激响应滤波器具有对称性, 即

$$h[p] = h[35-p] \quad p=0, 1, 2, \dots, 17, \quad (2)$$

根据式(2), 公式(1) 改写如下:

$$y[k] = \sum_{p=0}^{17} h[p] \{x[k-p] + x[k-(35-p)]\}. \quad (3)$$

从式(1)和式(3)可以看出, 相对式(1), 式(3)的运算在加法量不变的情况下减少了一半的乘法量, 大大提高了系统的实时性能。

实时滤波在 DSP 上的实现过程如下:

(1) TMS320F28335 初始化, 分配两块 36 个单元的数据空间 FirCoef[18] 和 Input[36], FirCoef[18] 存放 FIR 滤波器的前 18 个固定值系数, Input[36] 存放 AD 采样后的输入数据。初始化 Input[36] 全部为 0, 采样开始后依次存入数据。

(2) 开始滤波, 先将 Input 空间中高低地址对应的数据相加, 即 Input[i] + Input[35-i] ($i=0, 1, 2, \dots, 17$), 再与 FirCoef 空间的数据对应相乘, 最后把 18 个乘积进行累加, 所得的值即为滤波器的输出。

(3) 当 FIR 滤波器的下一个输入到来时, 将 Input 空间中的数据依次移位, 再将最新的输入值存入 Input[0], 然后重复(2)的操作, 直到达到设定的采样点数。

4.2.1 一次采集的振铃计数

振铃计数是最通用的声发射评估参数。当一个事件撞击传感器时, 它使传感器产生振铃, 所形成的超过阈值的电信号的每一次振荡均被计为一个振铃计数。振铃计数就是越过门槛信号的振荡次数。

在系统中, 将信号与设定的阈值进行比较, 超过阈值的信号被拾取, 同时, 计数器加 1, 最后得出一次采集的振铃总个数。

4.2.2 一次采集的总能量

声发射信号的能量与声发射波形的面积成正比, 可用均方电压 V_{ms} 来进行声发射信号的能量测量, 也可直接测量声发射信号波形的面积。

一个信号 $V(t)$ 的均方电压定义如下:

$$V_{ms} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t V^2(t) dt}, \quad (4)$$

式中, t 为平均时间, $V(t)$ 为随时间变化的信号电压。

根据电子学理论, 可知 V_{ms} 随时间的变化正比于声发射信号的能量变化率, 声发射信号在 $t_1 \sim t_2$ 时间内的总能量 E 可由下式表示:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} V_{ms} dt. \quad (5)$$

能量的测量方式有 3 种: 测量单位时间的能量为能量率; 测量从实验开始到某一阶段的能量为总能量; 测量每个事件所包含的能量。本方案

测量的是一次采集的总能量, 根据上述理论, 具体操作如下:

(1) 找出包络线: 首先计算出所有采样点的幅值的平方值连线, 得到一条检波包络线;

(2) 计算能量: 再计算该线与 X 轴之间的面积得到一次采集的总能量。式(6)中 $f(n)$ 是包络线的函数, 自变量 n 的范围是 $0 \sim N$ 。(其中 N 是一次采集的总采样点个数, 定为 1 024 点)

$$E = \sum_{n=0}^N f(n) \quad 1 = \sum_{n=0}^N f(n) . \quad (6)$$

4.3 特征参数分析评价算法

本系统方案中, 特征参数的分析评价规则为: 当一次采集的振铃个数和信号总能量均大于其各自的基准设定值, 即判定精密金属零部件出现裂纹。

振铃计数阈值的取值方法: 阈值是直接影响振铃计数器计数值的因素, 阈值太高则计数拾取的脉冲数减少, 灵敏度减弱, 易出现漏判; 阈值太低, 则计数拾取的脉冲过多, 灵敏度增强, 也影响生产效率。一般可根据零部件材料、热处理状况综合判定, 在规定范围取合理值。

振铃计数和总能量的基准设定值按如下方法设定:

先屏蔽其中一个分析评价参数, 对另一个参数初设一个较小初始值, 进行模拟实时监测试验, 裂纹 AE 实时监测系统报警后, 用其他的探伤设备对精密零部件进行检查, 判断是否出现裂纹, 若无裂纹, 则初始设定值增大 1 倍, 反复实验上述过程, 直至裂纹 AE 实时监测系统与其他可靠的探伤设备判断一致, 则该值为临界值。将这个值减少 5%, 即为实际设定值; 另一个参数的基准设定值以同样的方法确定。

5 试验结果分析

5.1 试验平台

根据上述的方案, 研制了用于精密零部件加工过程的裂纹 AE 实时监测仪的样机。图 7 为样机及其连接线缆的简化模型图。在液压式门型自

动校直机的配合下进行了零部件加工的在线实时裂纹监测试验。图 8 为所使用的校直机。

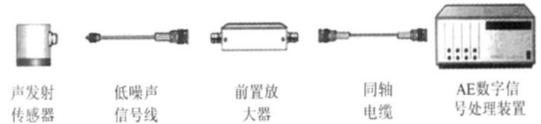


图 7 裂纹 AE 实时监测仪样机的简化模型图

Fig. 7 Simplified model of prototype machine

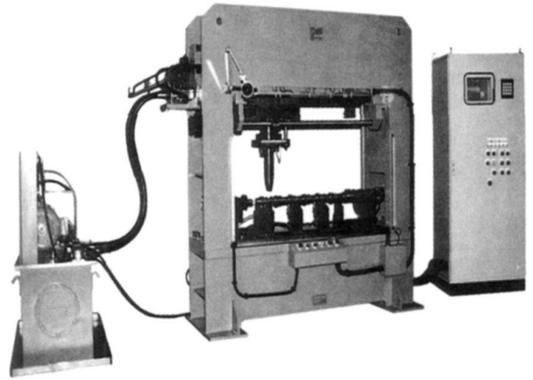


图 8 配合试验的校直机

Fig. 8 Cooperated aligning machine

5.2 试验结果

用自动校直机对精密零部件样品进行拉伸试验, 裂纹 AE 实时监测仪样机进行在线实时裂纹监测, 以 50 个零部件为一组(不重复使用), 共进行 10 组试验。再通过磁粉探伤手段检验, 进行对比, 验证裂纹 AE 实时监测仪样机的漏检率和误检率。

表 2 为第二组零部件监测试验得到的有裂纹零部件的 AE 信号参数。表 3 为 10 组精密零部件样品的 AE 在线实时裂纹监测的试验结果。

表 2 金属裂纹声发射信号特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of metal crack AE signals

序号	振铃个数	振铃基准	信号能量	能量基准
1	23	9	2.376 5	1.23
2	12	9	1.360 2	1.23
3	15	9	1.552 3	1.23
4	29	9	2.020 1	1.23
5	11	9	1.523 8	1.23

表 3 零部件裂纹监测试验结果

Tab. 3 Experimental results of crack detection

组数	零部件总数	样机检测	实际有裂纹	误检	漏检
		有裂纹零件数	零件数	件数	件数
1	50	12	12	0	0
2	50	5	5	0	0
3	50	18	16	2	0
4	50	9	9	0	0
5	50	12	12	0	0
6	50	6	6	0	0
7	50	8	7	1	0
8	50	10	8	2	0
9	50	16	15	1	0
10	50	15	15	0	0

由表 3 可得, 在 10 组总共 500 个精密零部件的 AE 在线实时监测试验结果中, 无漏检, 误检的个数为 6 个, 误检率为:

$$= \frac{6}{500} \times 100\% = 1.2\%$$

上述结果表明, 用于精密零部件加工过程的

AE 裂纹在线实时监测系统能达到无漏检, 误检率小于 2%, 满足了在线实时监测的性能要求, 同时也验证了精密零部件裂纹实时监测方法的有效性。

6 结 论

为提高航天航空设备的可靠性、安全性和研制周期, 减少研制成本, 本文提出了一种用于精密金属零部件加工过程的 AE 裂纹在线实时监测方法, 并基于提出的方法研制了一台用于精密金属零部件加工过程的 AE 裂纹在线实时监测仪的样机, 且对样机进行了试验验证。试验结果表明, 此监测系统具有良好的性能, 能满足在线实时监测的应用需要, 得到的结果验证了本文所提出方法的有效性。本方法虽是针对航天航空设备的裂纹实时监测而提出, 但同样能适用于工业上的零部件裂纹在线监测。这种在线实时监测方法及其相应系统的设计思想对相关的工程设计也具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] RAVINDRA H V. Some aspects of acoustic emission signal processing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 109: 242-247.
- [2] KAPHELE MANINDRA R, ANDY T. Source location of acoustic emission waves for structural health monitoring of bridges[C]. *Infrastructure Research Theme Postgraduate Student Conference*, 2009.
- [3] VERSTRYNGE E, LGNOUL S, SCHUEREMANS L, et al. . Application of the acoustic emission technique for assessment of damage accumulation in masonry[J]. *Restoration of Buildings and Monuments*, 2008, 14(3): 167-178.
- [4] FAVIER B, GODFERD F S, CAMBON C. Modeling the far field acoustic emission of rotating turbulence[J]. *Journal of Turbulence*, 2008, 00(00): 1-14.
- [5] ASTM E1316-1996, Terminology for Nondestructive Examination[S].
- [6] 李光海, 刘时风. 声发射信号分析及进展[R]. 哈尔滨: 第十届声发射技术研讨会, 2004.
- [7] 付元杰. 基于时频能量分析的声发射特征信号的提取方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [8] DUNEGAN H L, HARRIS D O. Acoustic emission, a new nondestructive tool[J]. *Ultrasonics*, 1969, 7(7): 160-166.
- [9] TERCHI A, AU Y H J. Acoustic emission signal processing[J]. *Measurement and control*, 2001, 4(8): 240-244.
- [10] TEXAS INSTRUMENTS. TMS320x28xx, 28xxx DSP Reference Guider[R]. *Literature Number:*

SPRU566H. June 2003-Revised March 2009.

- [11] TEXAS. INSTRUMENTS. TMS320F28335, F28334, F28332, F28235, F28234, F28232 Digital Signal Controllers [Z]. (Rev. F).
- [12] 张学明, 张振娅, 戴明, 等. 机载设备 IRIG-B(AC) 码的滤波及其数字相位补偿[J]. 光学 精密工程. 2009, 17(1):213-219.
- ZHANG X M, ZHANG ZH Y, DAI M, *et al.*. Filtering and digital phase compensation of IRIG-B (AC) code in airborne equipment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):213-219. (in Chinese)
- [13] 崔长彩, 张耕培, 张彬, 等. 小波滤波及奇异性分析在表面形貌评定中的应用[J]. 光学 精密工程,

2009, 17(9):2255-2260.

- CUI CH C, ZHANG G P, ZHANG B, *et al.*. Application of wavelet filtering and singularity analysis to evaluation of surface roughness [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2255-2260. (in Chinese)
- [14] 丛玉良, 王宏志. 数字信号处理原理及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 163-186.
- CONG Y L, WANG H XZH. *The Principle of Digital Signal Processing and its MATLAB Implementation* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 163-186. (in Chinese)

作者简介:



郑耿峰(1983-), 男, 福建泉州人, 博士研究生, 研究方向为自适应建模与控制。E-mail: GF_Zheng83@gmail.com



马舜峰(1984-), 男, 河南漯河人, 博士研究生, 研究方向为数字信号处理与图像压缩编码。E-mail: mashunfeng@yahoo.com.cn

导师简介:



金龙旭(1965-), 男, 朝族, 吉林延吉人, 研究员, 博士生导师, 2003 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 研究方向为空间相机智能控制。E-mail: jinlx@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑: 李树军)