

扫描探针显微镜的隔振技术研究*

邱熹程, 傅惠南, 巫立东

(广东工业大学, 广东广州 510090)

摘要: 扫描探针显微镜 (SPM) 等超精密加工与检测仪器容易受到外界环境微小振动等干扰, 致使仪器在通常条件下无法达到要求的指标。为此, 结合主动隔振和被动隔振技术研究对外界微小振动扰动有效隔离方法。以本原纳米仪器有限公司制作的 CSPM4000 扫描探针显微镜作为实验对象进行试验, 探讨利用主动隔振系统来降低超精密仪器对于外部试验环境的苛刻要求, 进而改善超精密仪器的试验性能。实验结果显示隔振试验装置具有较好的隔振效果, 可满足使用要求。

关键词: SPM; 被动隔振; 磁阻尼; 主动隔振

中图分类号: TH742 文献标识码: A 文章编号: 1009-9492 (2008) 09-0030-03

1 前言

SPM 自上世纪八十年代发明以来^[1], 极大的促进了人类微观技术的发展, 它让人们观察测量样品表面纳米级的表面形貌, 探测物质表面单个原子分子的排列, 实现在纳米尺度下进行单个原子分子的搬运^[2]、去除、添加和重组^[3]进而构造出新的物质。

然而, 外界环境的振动却严重制约着 SPM 等超精密仪器^[4-7]的进一步发展, 直接决定着 SPM 纳米亚纳米级分辨率在普通实验室环境下能否实现。因此, 超精密仪器的隔振问题已经引起了人们的足够重视。Uwe Stobener^[8-11]等在高性能测量仪器受外界振动干扰的影响下对隔振装置建模、参数辨识和控制策略进行研究, 就隔振前后蓝宝石表面形貌图可知其能较好的消除外界干扰, 但这种隔振系统结构相对复杂, 传感器和致动器布置上存在不可避免的耦合问题, 造价成本也高, 因此商品化后不利于推广; Ji-a-Yush Yena^[12]等在大行程扫描探针显微镜上利用 Mallock 结构采用离散滑模控制得出其隔振效果优于传统的提前量型控制, 但作者采用的 Mallock 几何结构复杂, 难以加工批量化; Wensheng Hua^[13]等针对低频振动在水平方向和倾斜方向的耦合特点通过“修正”传感器, 用优化的 FIR 滤波从水平加速度中分离倾斜方向噪音达到了较好的效果, 但其结构模型非常复杂, 而且传感器布置也存在耦合问题; Huai-San Wang^[14]用音圈电机作致动器, 配合一个 PID 控制器有效的减小了特定频率范围的振动, 但音圈电机伺服控制是一个难点; Ryuhei Sugahara^[15]用压电致动器设计制作了一个主动隔振系统应用在粒子对撞项目

上, 从而满足了在主要的直线加速器部分的隧道边墙稳定到几十个纳米、垂直方向作用区域到亚纳米的要求。

以上主动隔振系统虽然达到了一定的隔振效果, 但是却存在一定的不足, 要么系统过于复杂, 要么成本过高, 不利于主动隔振技术的推广和应用。本文探讨采用由弹簧悬挂机构组成的被动隔振系统以及采用主动隔振技术措施达到隔振目的的方法。

2 隔振系统结构及原理

设计的隔振系统包括被动隔振和主动隔振两个部分, 其中被动隔振采用悬挂式结构并设计了一个涡流耗能阻尼结构; 主动隔振由传感器、控制器和致动器三个部分构成。原理框图如图 1 所示。

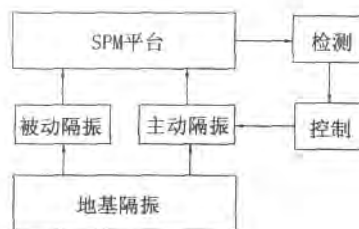


图 1 隔振系统原理图

2.1 被动隔振

被动隔振主要设计了一个涡流耗能阻尼器, 阻尼器由一块环形永久磁铁、两块铁板和一个铝环组成, 其结构如图 2 所示, 其原理是根据楞次定律, 感应电流的效果总是

* 国家自然科学基金 (编号: 50675037); 广东省科技计划项目 (编号: 2003B12002)

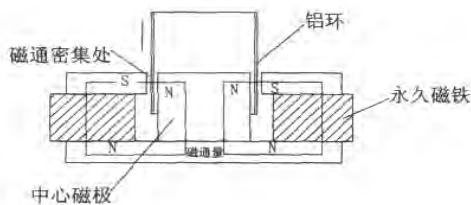


图 2 涡流耗能阻尼器结构

反抗引起感应电流的原因，也就是阻碍导体在磁场中的相对运动。如图 2，在永久磁铁的磁路中，设计框架与中央磁极间狭长的空隙使磁感应强度得到了很大的增强。在狭长的空隙中放置铝环，铝环固定在减振系统的托盘下，当托盘带动铝环上下运动时，铝环切割磁感线，从而在铝环中产生感应电流（涡流），磁场作用于这个电流，将阻碍铝环的运动，即产生阻尼力，从而消耗振动的能量。当切割磁力线的速度越快，磁通量变化越快，金属的电阻越小时，效果越发明显，系统的耗散能力愈强。实验结果表明这种阻尼装置拥有较好的阻尼效果。

在被动隔振的基础上实施主动隔振，这是因为被动隔振系统具有低通滤波特性。由于被动隔振系统的低通滤波性质，即对于高频段振动能取得较大幅度的振动隔离，但是对于低频或超低频其作用微弱，因此有必要进行主动隔振研究以消除低频振动干扰。

2.2 主动隔振

为了有效的发挥被动隔振与主动隔振的优势，在被动隔振的基础上设计制作主动隔振系统，即在振动控制过程中，根据所检测到的振动信号，应用一定的控制策略，进而实时反馈驱动致动器对目标控制，达到抑制或消除振动的目的。主动隔振通常由传感器、控制器和致动器组成。传感器是振动主动控制系统中的重要元件，其作用是检测系统的变量及扰动，为控制器提供确定控制系统性能的信息或与系统响应有关的控制信号；致动器是实现主动控制的重要环节。其作用是向系统施加控制信号，以按照所需方式改变被控系统的响应。由于考虑致动器需要具有良好

的可控性能，还要求形式紧凑、轻质、低价、持久耐用以及具有较高的可靠度，选用电磁致动器；控制器是主动振动控制中的一个非常关键的部分，直接输出反馈就是将传感器的信号经过增益放大后直接送到对应致动器来进行控制。直接输出反馈可以避免独立模态空间控制方法中的模态溢出，不稳定等问题而且可以保证所有的模态均是稳定的。Balas^[16]认为只要符合相关条件就能够保证直接输出反馈的控制系统呈稳定状态。因此，控制器设计采用直接输出反馈。

振动主动控制的原理图如图 3 所示。

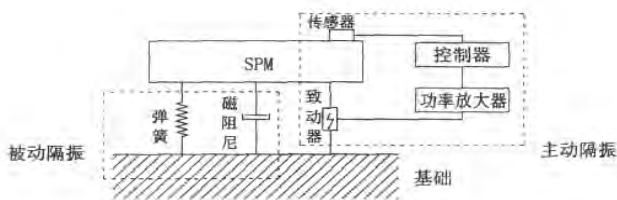


图 3 振动主动控制示意图

3 SPM 振动主动控制试验研究

激振设备采用北京测振仪器厂 JZ-1 型激振器，江苏扬中绿扬电子厂 YB1600P 系列功率函数信号发生器，测振设备为北京测振仪器厂的磁电式传感器 CD-1，本文仅就垂直方向的振动进行研究，激励和振动测量都在 CSPM4000 型 SPM 悬挂机构的基座上进行。

3.1 被动隔振系统的激励与响应

CSPM4000 型 SPM 隔振采用的简单弹簧悬挂，为了检验涡流耗能机构的耗散效果对悬架弹簧进行拉伸试验，实验中分别给 SPM 悬架上一初始位移（1cm 和 2cm）然后迅速放开，由于悬架采用三根软弹簧悬挂 SPM，如果采取下压弹簧获取位移的方式就不可避免造成 SPM 在水平方向的摆动，因此采用砝码加重方式替代，1cm 位移相当于 150g 砝码重力，2cm 位移相当于 300g 砝码重力，从 Tektronix 的 TDS1000 系列数字存储示波器上可以观察到 SPM 的振动情况。分别在无阻尼和磁阻尼的情况下进行了试验。

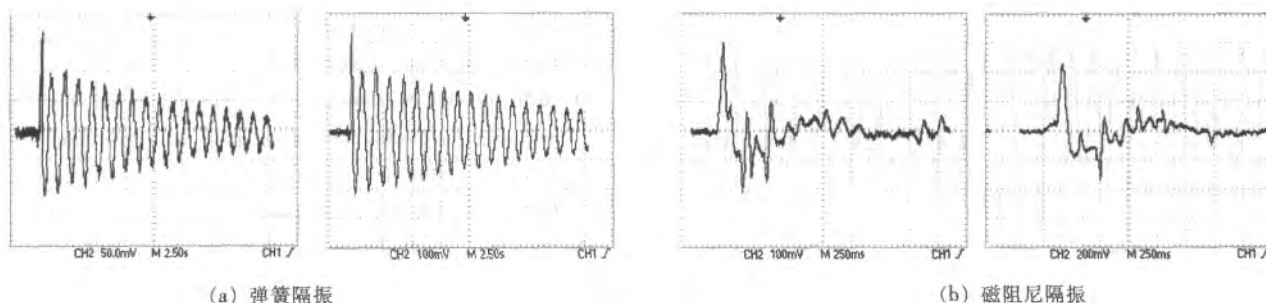


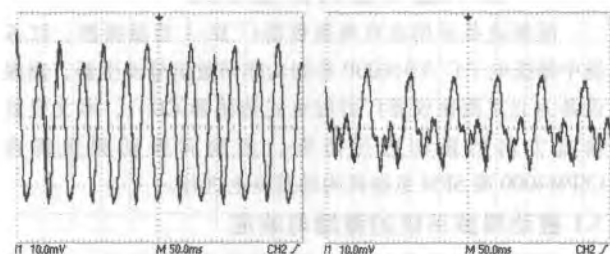
图 4 被动隔振的激励与响应

从图 4 被动隔振的激励与响应波形图可以看出, 在弹簧减振时, 当施加 1cm 位移 20.5s 内振动衰减了 84.9%, 在加了磁阻尼的情况下, 振动在 1.65s 内衰减幅度达到 99%, 显然, 磁阻尼在振动衰减过程中起了很大的作用。从磁阻尼波形图看来, 在磁阻尼情况下振动 1.48s 隔振效果能够达到 99%, 而同样时间内弹簧减振只能衰减 65% 左右, 然后一直处于振荡过程, 衰减逐渐趋于平缓。磁阻尼减振过程中系统在外激励后很快趋于平稳, 尔后出现些微振荡, 分析是由于平台水平方向摆动。因此由隔振效果图可知磁阻尼耗能装置能起到较好的隔振效果。

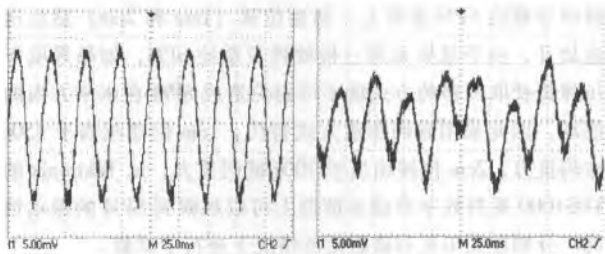
3.2 主动隔振系统的激励与响应

为了研究 0~100Hz 频率范围内的主动隔振情况, 采用 YB1600P 系列功率函数信号发生器驱动 JZ-1 型激励器, 分别给系统施加 14Hz、34Hz、54Hz 正弦激励, 然后接入振动主动控制系统进行隔振, 其隔振效果图如图 5 所示。

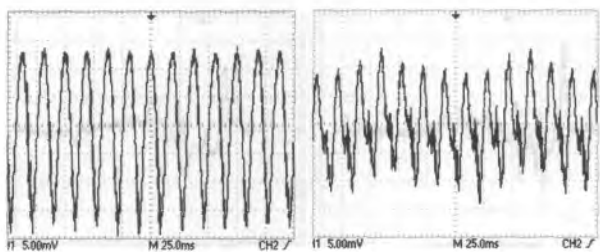
依据图 5 可知, 采用直接反馈方式的主动隔振装置能较好的降低低频激励干扰, 某些波段减幅高达 86.7%, 14Hz 激励下的波形图某些时间段减幅较小, 34Hz、54Hz 正弦激励下波形图主瓣中心偏离中心线认为主要是水平方



(a) 14Hz 正弦激励



(b) 34Hz 正弦激励



(c) 54Hz 正弦激励

图 5 主动隔振的激励与响应

向摆动所致, 对于悬挂式弹簧隔振系统, 很容易产生水平方向摆动干扰, 因此研究水平方向振动干扰对于今后隔振结构改进有着重要意义。

4 结论

针对纳米测试技术实验室的振动干扰特点, 采取把振动被动控制的高频滤波和振动主动控制的低频滤波特性相结合的方式隔离外界振动干扰起到了较为有效的实验效果。

(1) 实验表明, 被动隔振中设计的涡流耗能阻尼器能较好的隔离外界冲击位移激励;

(2) 主动隔振较好的隔离了低频振动干扰;

(3) 本文仅对垂直方向振动进行研究, 由试验可知水平方向振动干扰也不容忽视, 因此结构改进是今后研究重点。

参考文献:

- [1] 袁哲俊. 纳米科学与技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [2] HIA S W. Engineering of single molecules with a scanning tunneling microscope tip [J]. Superlattices and Microstructures, 2002, 31 (1): 63-72.
- [3] 袁哲俊. 使用 SPM 的纳米级加工技术新进展 [J]. 纳米技术与精密工程, 2004, 2 (1): 45-49.
- [4] 郭安薪, 徐幼麟, 李惠. 高科技厂房精密仪器工作平台的微振混合控制 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24 (1): 161-165.
- [5] Y.L. Xu, A.X. Guo. Microvibration control of coupled high tech equipment-building systems in vertical direction [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43: 6521-6534.
- [6] Y.L. Xu, Z.C. Yang, J. Chen, et al. Microvibration control platform for high technology facilities subject to traffic-induced ground motion [J]. Engineering Structures, 2006, 25: 1069-1082.
- [7] Eugene I. Rivin. Vibration isolation of precision equipment [J]. Precision Engineering, 1995, 17: 41-56.
- [8] Uwe Stobener, Halcyonics GmbH. Active vibration isolation for highly sensitive measurement equipment [A]. Adaptic Congress [C]. Gttingen, May 2006.
- [9] Brad M. Beadle, Stefan Hurlbaeus, Lothar Gaul, et al. Active control strategies for vibration isolation [J]. Solid Mechanics and its Applications, 2005, 130: 91-100.
- [10] B.M. Beadle, S. Hurlbaeus, U. Stobener, et al. Modeling and parameter identification of an active anti-Vibration system [A]. SPIE International Symposia in Smart Structures & Materials/NDE [C], San Diego, March 2005.
- [11] T. Müller, S. Hurlbaeus, U. Stobener. et al. Modeling and control techniques of an active vibration isolation system [A]. International Modal Analysis Conference IMAC XXIII [C], Orlando, 2005.

(下转第 52 页)

解方程组 (11), 可以求出 $m+1$ 个待定系数。 b_j ($j=0, 1, \dots, m$)。在上式中, m 为设定的多项式阶次, 其值范围为 $0 \leq m \leq n$ 。在 (11) 式中当 $m=0$ 时, 有 $b_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k$, 即这时求得的趋势项为常数, 故当 $m=0$ 时的趋势项为信号采样数据的算术平均值。当 $m=1$ 时为线性趋势项, 当 $m \geq 2$ 时, 这时为曲线趋势项。在实际振动信号数据处理中, 通常要根据实际情况确定 m 的值, 来对采样数据进行多项式趋势项消除的处理。

信号 (7) 经过积分后并消除趋势项所得的一次积分和二次积分图形如图 3 和图 4 所示。

5 算法在工程实例中的应用

上述振动加速度信号数据的处理方法在我所液压实验台振动测试中取得了成功, 在液压实验台的振动轴上布置了传感器, 进行实验测得的振动加速度信号经过去直流、积分并去趋势项后所得波形和原波形的对比图如图 5、图 6 所示, 其中图 5 为经过一次积分后的速度信号, 从图 5

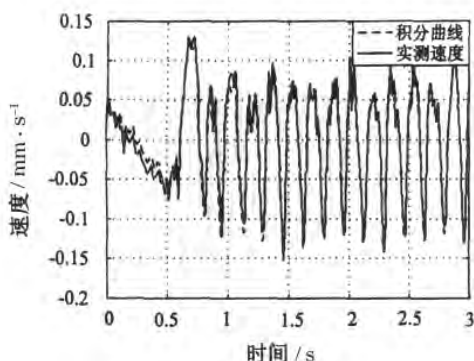


图 5 一次积分信号与实测速度信号

中可以看出积分所得的信号与实际信号吻合度比较好, 图 6 为经过二次积分后的位移信号, 由于经过了 2 次积分误差的积累, 导致了误差扩大。

6 结论

振动加速度测量在故障诊断中有重要的作用, 但实际

(上接第 32 页)

- [12] Jia-Yush Yena, Kuo-Jung Lana, John A. Kramar. Active vibration isolation of a large stroke scanning probe microscope by using discrete sliding mode control [J]. *sensors and actuators*, 2005, 21 (1): 243-500.
- [13] Wensheng Hua, et al. Low-frequency active vibration isolation for advanced LIGO [A]. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering* [C]. 23-24 June 2004.
- [14] Huai-San Wang, et al. Active Vibration Suppression Scheme of Magnet Girders [A]. *International workshop on mechanical engineering design of synchrotron radiation equipment and instrumentation* [C]. 2006 May 24-26, Egret Himeji,

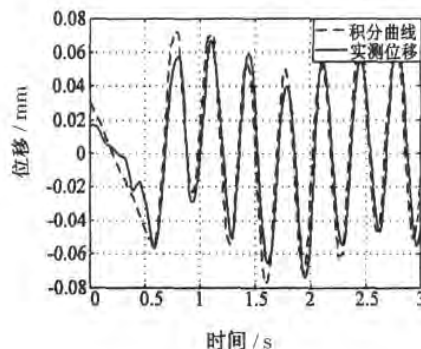


图 6 二次积分信号与实测位移信号

所测得的振动加速度信号是有直流分量和干扰的, 如果不去除干扰就进行积分, 积分后得到的曲线必然和实际曲线不吻合, 因此我们需要将信号中的直流分量和干扰噪声去掉再进行积分。本文采用的消噪、去除信号中的趋势项和积分方法通过实验证明是比较实用的。

参考文献:

- [1] 胥永刚. 机械故障诊断中振动参量转换的波形基线修正算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2001, 24: 9-10.
- [2] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [3] Jose G.T Ribeiro, Jaime T.P de Castro & Jose L.F.Freire. New improvements in the digital double integration filtering measure displacements using accelerometers [J]. pp.538-542.
- [4] Jose G.T Ribeiro, Jaime T.P de Castro & Jose L.F.Freire. Filtering in frequency domain to avoid time aliasing [J]. pp.689-695.
- [5] C.C.Smith, J.F.Dahl, R.Joe Thornhill. The Duality of leakage and aliasing and improved spectral analysis techniques [J]. *Journal of Dynamic, Systems, Measurement, And Control*, Vol.118, pp. 741-747, December 1996.

第一作者简介: 李东文, 男, 1977 年生, 贵州遵义人, 硕士研究生。研究领域: 机电系统动态测试与故障诊断。

(编辑: 梁 玉)

Hyogo, Japan.

- [15] Ryuhei Sugahara, et al. Performance of an active vibration isolation system [A]. *Proceedings of the 8th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA 2004)* [C]. 4-7 Oct 2004, Geneva, Switzerland.
- [16] M. J. Balas. Direct Velocity Feedback Control of Large Space Structures [J]. *Journal of Guidance and Control*, 1979, 2 (3): 252-253.

第一作者简介: 邱熏程, 男, 1982 年生, 湖南人, 硕士研究生。研究领域: 微纳米加工与检测。

(编辑: 梁 玉)

08-09-13 An Algorithm for Cylindricity Error with Sampling Points in Rectangular Spatial Coordinates

LONG Zhou, LIU Zhong-tu, ZONG Zhi-jian (Centre of Advance Design Technology, School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou510006, China)

Abstract: According to the definition of cylindricity error in the national standards, a mathematical model for CMM is developed to evaluate the cylindricity error by least square method in the rectangular coordinates, the optimization and the initial values calculation methods are also presented. In the model, the position and the gradient of the cylinder are discretionary. The origin of coordinates can be randomly selected. There are no special requirements for sampling points. It's advantageous to programme and it can be used to calculate errors of other complicated forms. This method proves that it can converge to an overall optimal and steady result. The algorithm has been applied to the GMeasure1.0 software developed by our lab.

Key words: rectangular coordinate; cylindricity error; mathematical model; least square method; optimization calculation method; initial values

08-09-20 Discussion about the Method of Processing Ellipse in the CNC Lathe

YANG Tao(Department of mechanical-electrical, Dazhou Vocational and Technical College, Dazhou635001, China)

Abstract: Macro program obtains the widespread application in the numerical control processing, takes Huazhong century star HNC-21T numerical control system as the example, introduces Macro program and roughing composite cycle instruction G71 unifies the turning ellipse two methods, from this may promote to other such as parabolas, the hyperbolic curve and so on non-round equation curve processing.

Key words: CNC lathe; Macro program; roughing composite cycle; ellipse

08-09-22 Study the Positioning Control of the Tool Magazine in the Machine Centre

TAO Song-qiao (The department of Mechanical Engineering, Wuhan Technical College of Communications, Wuhan430065, China)

Abstract: Realizing the positioning control of the tool magazine is the premise of the tool transmitting the action. The traditional positioning control of mechanic and electric control can not resolve the problem of the turning inertia. The text presents an improving positioning control scheme by making use of PLC procedure and CNC function.

Key words: APT; tool magazine; positioning control; PLC

08-09-24 The Design of Bluetooth Access Point Device

WANG Ji-feng, XIAO He(Automation College, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing400065, China)

Abstract: The problem of industrial wireless communication is discussed. A Bluetooth Access Point Device, which can communicate with other wireless field device, is designed by using C8051F020 and Bluetooth chip BCM-05. The hardware and software design of the embedded device is proposed.

Key words: C8051F020; wireless access point; Bluetooth

08-09-27 Experimental Research on Electrochemical Micromachining

HAN Zi-ping, YU Zhao-qin, GUO Zhong-ning, MO Bing-hua (Guangdong University of Technology, Guangzhou510006, China)

Abstract: Based on Electrochemical etching, a micro electrode with $80\mu\text{m}$ in diameter and $3000\mu\text{m}$ in length has been developed. The micro column electrode and the micro helical electrode have been used in the experiment respectively. Experimentation indicates that micro helical electrode has faster machining rapidity and less machining clearance of hole and groove than micro column electrode. Helical structure helps the reduction of electrolysis outcome in the machining clearance, heightens the machining efficiency and precision as well as the stability of machining process.

Key words: electrochemical etching; electrochemical micromachining; helical electrode

08-09-30 Research on Vibration Isolation Technology of Scanning Probe Microscope

QIU Xi-cheng, FU Hui-nan, WU Li-dong(Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou510006, China)

Abstract: Scanning probe microscope (SPM) and other ultra precise machining and detective equipment are easily influenced by micro vibration disturbance in environment, leading to achieve the target required difficultly in common condition. Therefore, effective isolation method is investigated by combining active and passive vibration isolation technology for out small disturbance. Taking CSPM4000 scanning probe microscope produced by Benyuan nano instrument Co., Ltd as object, it is investigated to use active vibration isolation for reducing strict requirement in exterior experimental environment, and to improve experimental performance of ultra precise instruments. Then experimental results show that vibration isolation devices act obvious effect and satisfy requirement.

Key words: SPM; passive vibration isolation; magnetic damping; active vibration isolation

08-09-33 Analysis on Cause Factors of Multi-Hole Sheet Flanging Wrap and Springback

WANG Zhi-xing, RUAN Feng, CAI Zhi-xing, LIANG Yong-mei(Department of mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou510640, China)

Abstract: This paper uses Dynaform to simulate the factors affecting the wrap and springback, using fitting to get the rule curve of various factors on wrap and springback, and analyzes the reasons for the wrap and springback of multi-hole sheet flanging. And this paper provides use and reference for enterprise's production of multi-hole sheet flanging.

Key words: sheet; multi-hole sheet flanging; warp; springback; factor

08-09-36 Effect of Different Numerical Methods to Solve the Nonlinear Response

WANG Yi¹, ZHENG Nan², JIANG Zhi-qiang¹, YANG Yong-feng³ (1. School of Mechanical-Electrical Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou450015, China; 2. Division of Sci-Res of Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou450015, China; 3.School of mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an710072, China)

Abstract: In order to get the validity methods to solve the nonlinear rotor dynamics equations, central difference, Nemark- and Runge-Kutta methods are employed to solve the Duffing system and cracked rotor system. These systems responses of multi-period, quasi-period and chaos are studied. The three methods calculation results nearly are the same when the responses are multi-period and quasi-period. When the responses are