

DOI: 10.7652/xjtuxb201303004

结合面参数的超声检测方法研究

杜飞, 洪军, 李宝童, 罗增, 许颖

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710054, 西安)

摘要: 为提高超声检测结合面参数的精度,有效去除超声探头聚焦区域的模糊效应,以球-板接触为例对超声检测结合面的方法进行了研究。利用聚焦超声探头扫描球-板接触区域得到了反射率矩阵,并对反射率矩阵进行误差估计,采用最小约束二乘滤波对反射率矩阵进行反卷积,结合构建的反射率-压力曲线,得到了球-板接触的名义接触区域及接触压力分布。利用商业有限元软件建立了球-板接触的有限元模型,以验证所提出的最小约束二乘滤波反卷积的有效性。研究结果表明,与现有维纳反卷积相比,采用最小约束二乘滤波反卷积得到的结合面接触压力分布与有限元模型结果更为吻合,能有效提高超声检测结合面参数的精度。

关键词: 结合面;超声检测方法;反卷积

中图分类号: TH117.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)03-0018-06

Contact Parameter Estimation with Ultrasonic Method

DU Fei, HONG Jun, LI Baotong, LUO Zeng, XU Ying

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To improve accuracy of ultrasonic method for detecting joint parameters and remove the blurring effect from ultrasound focal zone, a new deconvolution approach is developed and a sphere plate contact is measured by ultrasonic method as an applying case. The ultrasound reflection map is obtained via scanning the joint surface by a focused ultrasound probe, the error of the ultrasound reflection map is estimated accurately, and the constrained least square filter is used for deconvolution of the reflection map, then the contact pressure is obtained with the reflection coefficient-pressure calibration curve. A finite element model of the sphere plate contact is established to verify the effectiveness. The results show that the contact pressure calculated by the proposed approach is in good agreement with the finite element model results, and is more accurate than that by the common deconvolution with Wiener filtering.

Keywords: joint surface; ultrasonic method; deconvolution

超声波是检测结合面参数的有效方法^[1],当一个超声脉冲发射到结合面时,由于结合面不是完全接触,因此超声脉冲会部分被反射。根据超声脉冲反射信号幅值,可计算超声脉冲的反射率,反射率的大小可以反映被检测区域的接触状况。利用超声探头对结合面进行扫描,可以得到整个结合面的反射

率矩阵,该矩阵可以直接反映名义接触面积。利用反射率-压力校正曲线可以得到结合面的压力分布^[2-3], Massimiliano 利用超声方法^[4-5]实现了对螺栓结合面、火车轮轨结合面的接触压力分布的准确检测。利用超声波反射率,根据弹簧模型^[6]可以直接得到结合面的刚度,Gonzalez 等人利用超声检测

收稿日期: 2012-06-04。 作者简介: 杜飞(1984—),男,博士生;洪军(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50935006)。

网络出版时间: 2012-12-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121218.0923.004.html>

方法及微观接触模型^[7],对喷砂处理表面的接触刚度特性进行了研究。

由于聚焦超声探头的焦点较小,因此一般利用聚焦探头对结合面进行扫描来提高检测精度,但是聚焦超声探头的声束不能严格地汇聚为一点,声压在最大值处的附近区域保持一定的幅度,因此超声检测的精度受到了限制,为消除模糊效应^[8],Dwyer 等人提出利用直接逆滤波对反射率矩阵进行反卷积处理^[2,9],但在反射率矩阵噪声较大时,反卷积效果较差。Francesco 等人提出了利用维纳滤波对反射率矩阵进行反卷积^[3,8],该方法可以较好地抑制噪声的影响,有效地消除模糊效应,但需要估计反射率矩阵的信噪比,以实现准确的反卷积,因此 Francesco 又提出了一个循环迭代程序来确定信噪比。Zhao 等人在研究超声 C 扫描进行无损检测^[10]时,提出了利用点扩散函数能量谱的最大幅值来确定反射率矩阵的信噪比。

目前,常用的维纳滤波器未考虑反射率矩阵中噪声的影响,不能对信噪比进行准确估计,因此采用维纳滤波器反卷积的效果并不理想。针对该问题,本文以球-板接触为例,对超声检测结合面参数的方法进行了研究。为有效去除模糊效应,本文提出了一种新的反卷积方法,该方法对实验提取的反射率矩阵进行了准确的噪声估计。由于约束最小二乘滤波仅需要反射率矩阵噪声的方差与均值即可得到最优的反卷积结果^[11],因此利用约束最小二乘滤波对反射率矩阵进行了反卷积。与维纳滤波反卷积的对比结果表明,本文提出的方法可以有效地提高超声检测结合面参数的精度。

1 超声反射率矩阵的提取

1.1 超声波检测结合面参数的理论基础

在 2 种材料的界面处,超声波将产生反射,超声波反射的比例取决于 2 种材料的声阻抗,在垂直入射情况下,反射波的幅值与入射波幅值的比值,即反射率为

$$R = \frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{1}$$

式中: A_r 、 A_i 分别为界面处超声波的反射波和入射波幅值; Z_1 、 Z_2 分别为 2 种材料的声阻抗。例如,在钢与空气界面,由于钢的声阻抗远大于空气的声阻抗($Z_1 \gg Z_2$),因此超声波几乎全部被反射(99.998%),对于材料相同的界面(如钢-钢界面),在完全接触的情况下,超声波则全部被透射($Z_1 = Z_2$)。

由于工程应用中材料界面均较为粗糙,因此接触界面中存在着微小空气间隙,如图 1 所示。在这些微小空隙处,超声波被反射回去,随着接触界面压力的增加,这些空隙的数量、大小随之减小,接触界面被反射的超声波减少。因此,结合面上一点的超声波反射率反映了该点的接触状态,利用聚焦超声探头对结合面扫描而得到的反射率矩阵,可以直接反映该结合面接触区域的形状和大小。

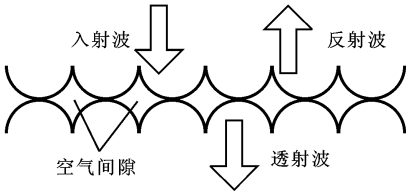
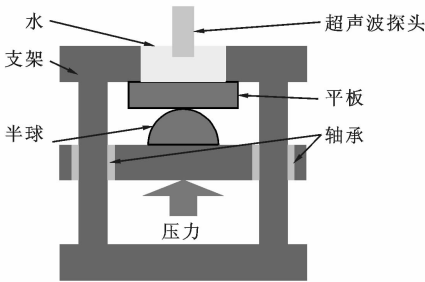


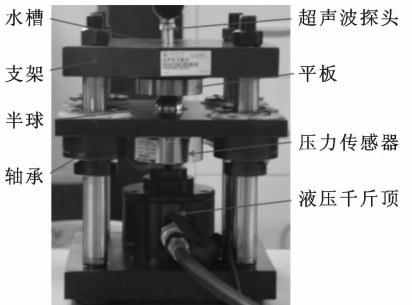
图 1 粗糙表面的接触示意

1.2 超声检测装置与试件

以球-板接触为例,来说明构建反射率的提取方法。如图 2 所示,采用图 2 所示的压力加载装置对结合面施加法向压力,为保证球与平板间无切向力,支架采用了直线运动轴承。采用 Panametrics 15 MHz 水浸式聚焦超声波探头、Panametrics 5800 PR 超声脉冲发射接收器,获得反射接受超声脉冲信号。采用 Tektronix MSO4000 混合信号示波器,采集超声波脉冲发射接收器接收到的超声波模拟信号,并开发 LabVIEW 程序,使电脑自动存储示波器采集的超声回波信号(通过 USB 数据线相连)。



(a) 实验示意图



(b) 实验装置

图 2 球-板接触的实验示意图及实验装置

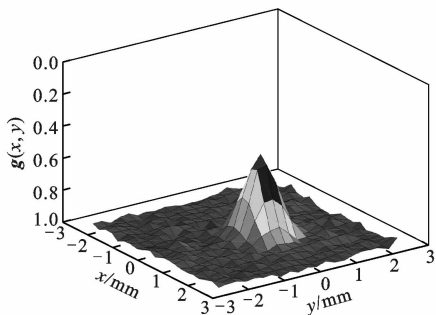
实验中采用了试件直径为 40 mm 的光滑半球体,材料均为 45 号钢,钢板厚为 17 mm,试件的表面粗糙度均为 0.8,布氏硬度为 303。

1.3 超声反射率矩阵的提取

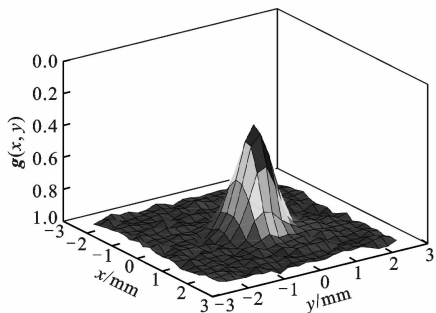
为检测球-板接触面,须利用超声波聚焦探头对结合面进行逐点扫描,通过计算每个扫描点的反射率,得到整个结合面的反射率矩阵,反射率矩阵可以直接反映结合面的名义接触面积。

实验前,须用丙酮清洗被测试件,以保证试件表面光滑且无杂质,实验用水应保证无杂质、无气泡,并调整探头高度及角度,使超声波探头的焦点位于结合面上。实验时,利用图 2 中所示的液压千斤顶将压力施加到半球的平面上,然后利用二维精密运动平台及超声波探头对结合面进行扫描,扫描区域为 5 mm×5 mm,间隔为 0.25 mm。在球与平板未接触时检测参考信号,分别对扫描信号及参考信号做快速傅里叶变换(FFT),并选取 10 MHz 频率处的幅值按照式(1)计算超声波的反射率。在 10 MHz 频率处,超声波探头的焦点直径为 1.2 mm(-6 dB)^[12],此直径处的声压为中心点声压的 0.5 倍。

当施加的力为 500、800 N 时,球-板结合面的超声波反射率矩阵如图 3 所示。反射率矩阵 $g(x, y)$ 直接反映了名义接触面积,其中反射率小于 1 的区域为半球与平板的接触区域。



(a) 500 N 下



(b) 800 N 下

图3 球-板接触的反射率矩阵

2 反射率-压力校正曲线的构建

如图 4 所示,为了计算结合面压力,需要通过实验来构建反射率-压力校正曲线。本文采用直径 8 mm 的圆盘与一个平板接触,材料及表面形貌与球-板接触试件相一致。为减小应力集中,对圆盘进行倒圆角处理,此外,计算反射率时采用的频率须与球-板接触实验中采用的频率相一致。

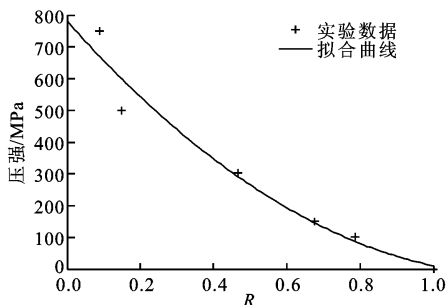


图4 反射率-压强校正曲线

3 超声反射率矩阵的反卷积

为减小超声探头焦点的影响,可以通过提高超声频率等方法来减小超声探头的焦点直径,但是超声频率过高会导致超声脉冲幅值过快衰减,因此不适用于工件较厚的情况。利用反卷积方法对反射率矩阵进行处理是提高检测精度的有效途径^[8-9]。

3.1 模糊效应的数学模型

以 $g(x, y)$ 表示实验提取的反射率矩阵,由超声探头焦点导致反射率矩阵产生的模糊效应数学模型为

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) + n(x, y) \quad (2)$$

式中: $f(x, y)$ 为理想反射率矩阵(无模糊效应); $n(x, y)$ 为实验中产生的加性噪声矩阵; $h(x, y)$ 为点扩散函数矩阵,其物理意义为超声波探头在聚焦区单位面积反射体反射信号的幅值^[10],一般利用 ASTM E1065 标准通过实验的方法确定; x, y 分别为超声探头扫描平面的横纵坐标。利用超声波探头对直径 1.5 mm(水中波长的 10 倍)的钢球进行二维扫描,为减小噪声,利用三维高斯函数对扫描结果进行拟合,得到

$$h(x, y) = a + b \exp(-0.5(((x-c)/d)^2 + ((y-c)/d)^2)) \quad (3)$$

式中: a, b, c, d 均为拟合参数。

3.2 约束最小二乘滤波反卷积

根据模糊效应的数学模型,目前通常采用维纳滤波器对反射率矩阵进行反卷积,以消除模糊效应。理想反射率矩阵的傅里叶变换可根据下式计算

$$F(u,v) = \left[\frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + A} \right] G(u,v) \quad (4)$$

式中: $H(u,v)$ 为傅里叶变换的点扩散函数; $H^*(u,v)$ 为 $H(u,v)$ 的复共轭; $G(u,v)$ 为 $g(x,y)$ 的傅里叶变换; A 为噪声与功率谱密度之比。 A 值太小会导致计算得到的噪声过大, A 值太大则会导致反卷积效果不理想,而噪声与理想反射率矩阵均为未知量,因此 A 较难确定。Francesco等人提出先确定一个初始的 A 值^[3,8],然后利用 $h(x,y)$ 与 $f(x,y)$ 进行卷积,并与 $g(x,y)$ 相比较,若每个测量点的差值均小于5%,则求得 A 值。Zhao等人提出^[10]

$$A = (K |H_{\max}|)^2 \quad (5)$$

式中: $H_{\max}$ 为点扩散函数能量谱的最大幅值; K 为噪声抑制系数,其大小同样取决于反射率矩阵中的噪声幅值,取值范围为0.1~0.6。

由于不能准确估计 $f(x,y)$ 的功率谱,因此文献[3,10]的方法不能准确地确定 A 值,这样会影响反卷积效果,导致该方法不能有效提高超声检测的精度。约束最小二乘滤波仅需要 $g(x,y)$ 的噪声方差与均值就能得到最优的反卷积结果^[11],噪声可以通过钢-空气界面进行估计。在图3所示的反射率矩阵中,反射率为1左右的是钢-空气界面,因为反射率理论值为1。因此,反射率矩阵噪声的均值与方差分别为

$$u_\eta = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L n(l) \quad (6)$$

$$\sigma_\eta^2 = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L [n(l) - u_\eta]^2 \quad (7)$$

式中: $n(l)$ 为钢-空气界面的反射率噪声; L 为样本容量。根据最小二乘滤波器的计算,可得

$$F(u,v) = \frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + \gamma/|Q(u,v)|^2} G(u,v) \quad (8)$$

式中: γ 为噪声的调整参数; $Q(u,v)$ 为平滑矩阵。通过傅里叶变换,得到高通算子

$$q(x,y) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

γ 的调整方法为^[11]选择初始值,令残数向量为

$$r(x,y) = g(x,y) - h(x,y) * f(x,y) \quad (10)$$

若

$$\sum_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sum_{y_{\min}}^{y_{\max}} \|r\|^2 < MN[\sigma_\eta^2 + u_\eta^2] - \alpha \quad (11)$$

则增加 γ 值,若

$$\sum_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sum_{y_{\min}}^{y_{\max}} \|r\|^2 > MN[\sigma_\eta^2 + u_\eta^2] + \alpha \quad (12)$$

则减小 γ 值。

式(11)、式(12)中: α 为精确因数; M 、 N 为 $r(x,y)$ 的行数与列数。

4 结果与讨论

4.1 有限元模型

为验证本文方法的有效性,采用商业有限元软件 ANSYS 建立了球-板接触的有限元分析模型。由于试件表面粗糙度较低,因此模型均为光滑表面。针对球-板接触为轴对称的问题,采用二维轴对称模型进行分析,有限元模型中接触区域的单元尺寸为0.0146 mm,接触单元采用 CONTA172、TARGE169 单元。材料的弹性模量为 2.1×10^5 MPa,泊松比为0.29,模型中采用双线性运动硬化来模拟材料的塑性行为。材料的切向模量为弹性模量的10%,硬度^[13]为

$$W = 2.8Y \quad (13)$$

式中: Y 为屈服强度。如图5所示,有限元模型的边界条件为:对板的底面施加固定约束,对球-板模型的中心线施加轴对称约束。对球先施加延 y 轴负方向0.001 mm的刚性位移,然后将位移约束删除,再施加压力载荷,以保证计算的收敛。

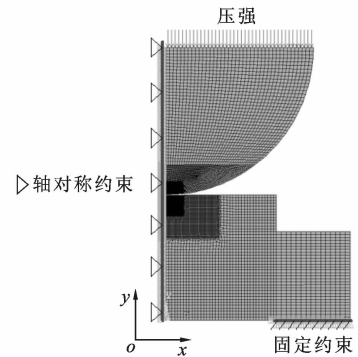


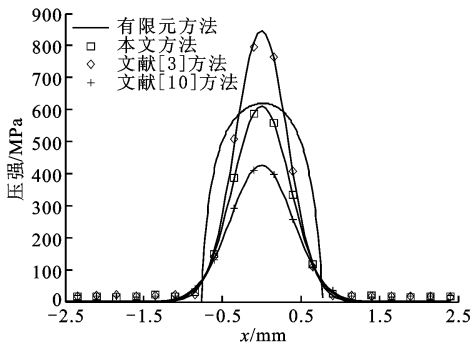
图5 球-板接触的有限元模型

4.2 结果对比

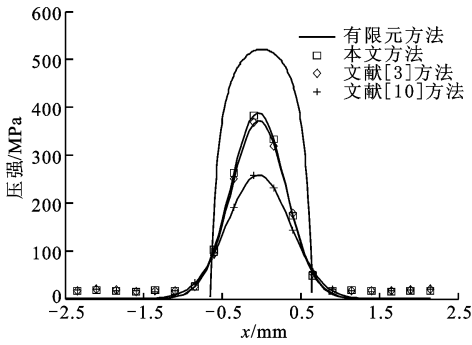
利用本文提出的方法对实验提取的反射率矩阵进行反卷积,用有限元模型计算的压力分布进行验证。图6为分别在500、800 N下,球-板接触压力分布的对比,为便于比较,取过接触区域中心的一条线

上的数据进行对比。利用式(11)、式(12)计算噪声方差与均值时,样本容量为 290,利用式(5)计算时,由于反射率矩阵的信噪比无法确定,因此 K 的取值只能根据经验选取,本文中取 $K=0.2$ 。

如图 6 所示,采用高斯函数对实验数据进行了拟合,图 6、表 1 的对比结果可见,利用本文提出的方法对实验提取的反射率矩阵经反卷积后,得到的球-板接触压力分布曲线与有限元模型结果最为接近,表明本文提出的方法可以得到更为准确的接触参数。



(a)500 N 下



(b)800 N 下

图 6 球-板接触的压强分布曲线

表 1 球-板接触区域中心压强误差的对比

P/N	压强误差/%		
	文献[3]方法	文献[10]方法	本文方法
500	28.6	50.4	25.4
800	-36.6	31.2	1.3

如图 6、表 1 所示,当球-板接触区域边缘处压力曲线的斜率为无限大时,超声检测结果比较平缓,这是因为采用维纳滤波、约束最小二乘滤波都会将高频信号滤除。由图 6a 及表 1 还可以看出,当施加 500 N 时,3 种反卷积方法得到的中心点压力均与有限元结果相差较大,这是因为此时中心点的反射率太小(仅为 0.2 左右)所致。Quinn 等人认为,反射

率太小会存在较大的误差^[14],并建议在检测时应选择合适的探头来保证反射率在 0.77 左右。因此,为提高反射率,可选择中心频率较高的探头,以提高检测精度。

5 结 论

(1)本文以球-板接触为例,对超声检测结合面参数进行了研究,提出了一种新的超声反射率矩阵的反卷积方法。该方法先通过对反射率矩阵进行误差估计,然后利用最小约束二乘滤波对反射率矩阵进行反卷积,来有效去除模糊效应,提高超声检测的精度。

(2)通过建立的球-板接触有限元模型,验证了所提出方法的有效性。将本文提出的方法与现有的维纳滤波反卷积方法进行对比发现,利用本文提出的方法得到的结合面接触压力分布与有限元模型结果更为吻合,由此表明了本文方法的有效性。

(3)超声波检测压力分布与有限元模型结果并不完全一致,例如,接触区域边缘处有限元模型结果的斜率为无限大,而超声检测结果比较平缓,这是因为采用维纳滤波、约束最小二乘滤波均会将高频信号滤除所致。

参考文献:

[1] MASSIMILIANO P, FRANCESCO A, FRANCESCO G. Distribution of contact pressure in wheel-rail contact area [J]. Wear, 2002, 253(1/2): 265-274.

[2] DWYER-JOYCE R S, QUINN A M, DRINKWATER B W. Experimental procedure for mapping Hertzian contacts [J]. Science in China: Series A, 2001, 44: 423-430.

[3] FRANCESCO A, MASSIMILIANO P, FRANCESCO G. Evaluation of nominal contact area and contact pressure distribution in a steel-steel interface by means of ultrasonic techniques [J]. JSME International Journal Series C, 2003, 46(1): 297-304.

[4] MASSIMILIANO P, ANTONIO B. Application of an ultrasonic technique to assess contact performance of bolted joints [J]. Transactions of the ASME: Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(1): 175-185.

[5] MASSIMILIANO P, BRUNO L, ANTONIO B. Simultaneous subsurface defect detection and contact parameter assessment in a wheel-rail system [J]. Wear, 2008, 265(11/12): 1837-1847.

[6] DRINKWATER B W, DWYER-JOYCE R S, CAWLEY P. A study of the interaction between ultrasound

- and a partially contacting solid-solid interface [J]. Proceedings of Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1996, 452(1955): 2613-2628.
- [7] GONZALEZ-VALADEZ M, BALTAZAR A, DWYER-JOYCE R S. Study of interfacial stiffness ratio of a rough surface in contact using a spring model [J]. Wear, 2010, 268(1/2/3/4): 373-379.
- [8] FRANCESCO A, MASSIMILIANO P. Assessment of nominal contact area parameters by means of ultrasonic waves [J]. Transactions of the ASME: Journal of Tribology, 2004, 126(4): 639-645.
- [9] DWYER-JOYCE R S, DRINKWATER B W. In situ measurement of contact area and pressure distribution in machine [J]. Tribology Letters, 2003, 14(1): 41-52.
- [10] ZHAO J, GAYDECKI P A, BURDEKINZ F M. Investigation of block filtering and deconvolution for the improvement of lateral resolution and flaw sizing accuracy in ultrasonic testing [J]. Ultrasonics, 1995, 33(3): 187-194.
- [11] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理 [M]. 第2版. 阮秋琦, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 210-214.
- [12] Panametrics Inc. Ultrasonic transducers technical notes [EB/OL]. (2011-06-10) [2012-04-04]. <http://www.olympus-ims.com/zh/ultrasonic-transducers/>.
- [13] TABOR D. The hardness of metals [M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1951.
- [14] QUINN A M, DRINKWATER B W, JOYCE-DWYER R S. The measurement of contact pressure in machine elements using ultrasound [J]. Ultrasonics, 2002, 39(7): 495-502.

(编辑 管咏梅)

(上接第17页)

参考文献:

- [1] ABELE E, ALTINTAS Y, BRECHER C. Machine tool spindle units [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 781-802.
- [2] 章云, 梅雪松, 邹冬林, 等. 应用动力学模型的高速主轴无试重动平衡方法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 34-37.
- ZHANG Yun, MEI Xuesong, ZOU Donglin, et al. Model-based balancing method for high-speed machine tool spindle without trial weights [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(7): 34-37.
- [3] ZHOU Shiyu. Modeling, estimation, and active balancing of speed varying rotor system [D]. Michigan, USA: University of Michigan, 2001.
- [4] VAN-DE VEGTE J. Continuous automatic balancing of rotating systems [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1964, 6(3): 264-269.
- [5] DYER S W, HACKETT B K, KERLIN J. Electromagnetically actuated rotating machine unbalance compensator: US, 5757662 [P]. 1998-05-26.
- [6] MOON J D, KIM B S, LEE S H. Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficients [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(9): 978-987.
- [7] NAKAMOTO K, ADACHI K, SHIRASE K. Proposal of real-time balancing mechanism using magnetic fluid for machine tool spindle [C]// The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems. Tokyo, Japan; CIRP, 2008: 387-390.
- [8] ZENG Sheng, WANG Xixuan. The electromagnetic balancing regulator and the automatic balancing system [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 209(1): 5-13.
- [9] 李晓冬, 王立威, 冀清发. 径注式砂轮在线液体平衡装置的研究 [J]. 兵工学报, 2004, 25(3): 326-329.
- LI Xiaodong, WANG Liwei, JI Qingfa. Study on radial online liquid equilibrator for the grinding wheel [J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(3): 326-329.
- [10] 黄立权, 王维民, 苏奕儒, 等. 基于电磁自愈力的转子自动平衡方法与实验研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 208-212.
- HUANG Liquan, WANG Weimin, SU Yiru, et al. Rotor automatical balancing method and test based on electromagnetic self-recovery force [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 208-212.
- [11] 马石磊, 裴世源, 王琳, 等. 采用新型电磁动平衡装置的动平衡研究 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(3): 21-26.
- MA Shilei, PEI Shiyuan, WANG Lin, et al. Dynamic balancing with online electromagnetic balancing device [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(3): 21-26.
- [12] 梅雪松, 章云, 张东升, 等. 喷液式高速主轴在线自动平衡系统: 中国, CN102095554A [P]. 2011-06-15.
- [13] 周仁睦. 转子动平衡原理、方法和标准 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1992: 74-76.

(编辑 管咏梅)