

引文格式: 张仕海, 朱冶诚. 薄盘工件不平衡量在线测算及去重试验研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(11): 102-106.

ZHANG Shihai, ZHU Yecheng. Research on unbalance vector online measuring and weight removing method for thin-disc workpiece[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(11): 102-106.

薄盘工件不平衡量在线测算及去重试验研究*

张仕海^{1,2}, 朱冶诚²

(1. 天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津 300222;

2. 天津职业技术师范大学, 天津 300222)

[摘要] 基于薄盘类零件具有较大径厚比, 且不平衡量可以看作分布在一个平面内的特点, 提出一种基于夹载工件前后机床主轴不平衡振动信号的变化而间接、在线测算薄盘类工件不平衡量的方法。基于附加不平衡振动检测系统、复合数控机床的主轴准停、刀具定位及去重控制等功能, 提出薄盘工件不平衡量在线去重校正的理念。通过试验证实了工件不平衡量在线测算及校正的可行性。本研究可以在无动平衡机的条件下实现薄盘工件不平衡量的在线测算与去重校正, 在节省工件平衡成本、提高工件平衡效率与加工精度等方面具有参考价值。

关键词: 薄盘工件; 不平衡量; 在线测算; 在线去重; 机床主轴

Research on Unbalance Vector Online Measuring and Weight Removing Method for Thin-Disc Workpiece

ZHANG Shihai^{1,2}, ZHU Yecheng²

(1. Tianjin Key Laboratory of High Speed Cutting and Precision Machining, Tianjin 300222;

2. Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222)

[ABSTRACT] Based on the fact that the unbalance vector of the thin-disk part with large diameter-thickness ratio can be regarded as distributed in one face, the measuring and calculating methods for the unbalancing vector of thin-disc workpiece are proposed according to the vibration change of machine tool spindle before and after the workpiece is clamped. Based on the extra unbalance vibration measuring system, the functions of spindle exact stop, tool positioning and weight moving control of composite numerical control machine tools, the concept of online weight moving correction for the unbalance thin-disk workpieces is proposed. The feasibility of unbalance vector online measurement and correction for thin-disc workpiece is verified by experiments in the paper. The research can be used to online measure and correct of the unbalance thin-disk workpiece without dynamic balancing machine, and it has certain reference value in saving workpiece balance costs, improving workpiece balance efficiency and machining accuracy.

Keywords: Thin-disc workpiece; Unbalance vector; Online measurement; Online weight removing; Machine tool spindle

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.11.102

薄盘类零件是回转机构上常用的零部件类型之一, 该类零件具有较大的径厚比, 即使很小的不平衡质量也可能形成较大的不平衡量。关于薄盘类零件的平衡主要有两种方法: (1) 在专用的动平衡机上进行工件不平衡量的检测, 然后在数控机床或其他校正设备上进行不

平衡量的校正^[1]。该方法的检测与校正环节分离、设备成本较高、平衡效率较低, 同时工件的反复装卡也会带来一定的安装误差。(2) 20世纪50年代出现的全自动动平衡机实现了不平衡量检测和校正工艺的集成, 提高了工件的平衡效率和精度^[2-3]。该方法仍需要较高的设

* 基金项目: 天津市教委科研计划(2017KJ1110); 天津市自然科学基金(22JCYBJC01640)。

备成本,也不能实现工件加工与平衡工艺的集成。基于薄盘工件结构特点,提出工件加工、不平衡量的在线测算与去重校正三工序集成的理念,并从理论上、技术上探讨了方法的可行性。

理论上,基于夹载工件前后机床主轴不平衡振动信号的变化,以及不平衡激励与振动响应之间影响系数的线性可逆原理,可以实现工件不平衡量在线测算。影响系数法属于转子动平衡技术中经典的试验方法,目前应用的关键在于影响系数精度提高及其自适应问题。Dyer等^[4]提出了一种利用指数加权平均法来减少测量噪声和系统非线性影响的递归在线系统辨识方法,提高了影响系数的自适应性。Zhang^[5]提出了一种基于层次贝叶斯方法的自动动态影响系数标定和在线更新方法。樊红卫等^[6]通过引入增益因子提高平衡迭代过程稳定性,并引入遗忘因子实现影响系数在线估计,构建了单平面在线自适应平衡算法的数学模型。相关研究在一定程度上解决了因转子系统动力学特征参数发生改变而导致原来测算的影响系数不准确问题。

技术上,现代复合数控机床(如车铣复合)具备主轴准停、刀具定位、精确去重等功能,再附以不平衡振动检测与分析系统,完全满足工件不平衡量的在线去重要求。工件不平衡量在线去重技术包括去重建模和去重控制。去重建模是通过数学模型将工件不平衡量转化为指定位置的待去重体积,进而计算刀具的进给量和轨迹。刘健等^[7]考虑去重质量在转子周向、径向、轴向的分布,以及圆周上分布的槽对实际去除不平衡量的影响,建立较精确的R型铣削去重模型,以去除金属量最少为目标函数,建立了单排刀具和多排刀具的V型铣削去重模型。曾胜等^[8]提出一种V型铣刀切削去重简化模型及基于此模型运用线性插值方式的去重切削控制方案,其包括切削去重建模和实时参数化插值两部分。殷苏民等^[9]根据转子的齿槽分布对铣削量和铣削方位产生的影响,建立数学模型,用Newton迭代求解,对相位误差进行修正,并对相应的幅值误差进行补偿。刘冰^[10]以车铣复合机床对不平衡薄盘工件的去重应用为目的,建立了适用的内(外)圆弧铣削去重模型。去重控制是在工件指定位置去除适当材料的过程,具体实现需要根据数控机床功能来设计。

1 基于影响系数的薄盘工件不平衡量在线测算与校正方法

1.1 薄盘工件不平衡量在线测算

本研究选取的薄盘类工件具有较大的径厚比(≥ 5),工件不平衡量可以看作分布在同一平面内。因此,可将工件不平衡量等效到机床卡盘的端面上,基于

单平面影响系数线性可逆原理,通过测量主轴空载及带工件条件下不平衡振动的变化而间接测算工件不平衡量,该方法的基本原理与步骤如下。

(1)在主轴的适当位置处设置振动检测点,调整主轴转速至平衡转速 n ,在卡盘不带工件的情况下测量主轴振动及基准信号,以平衡转速为基频,提取主轴初始不平衡振动信号,设其向量为 \vec{v}_0 。

(2)将试重工件(已知不平衡量的向量为 \vec{U})装于卡盘上锁紧,调整主轴转速至平衡转速 n ,重新测量并提取主轴不平衡振动信号,设其向量为 \vec{v}_1 ,则工件所处端面相对于测点的影响系数表示为

$$\vec{R}=(\vec{v}_1-\vec{v}_0)/\vec{U} \quad (1)$$

试重试验后,初始参数 \vec{v}_0 及影响系数 \vec{R} 可作为控制参数,用于工件不平衡量的在线估算。如设卡盘带工件后实测不平衡振动信号向量为 \vec{v}_2 ,则基于影响系数线性可逆原理,可计算出工件不平衡量为

$$\vec{U}_s=(\vec{v}_2-\vec{v}_0)/\vec{R} \quad (2)$$

理论上,基于式(2)不平衡量的测算,在薄盘工件上适当位置施加反向不平衡量 $-\vec{U}_s$ 即可实现工件不平衡量的在线校正。

1.2 校正误差分析

(1)测量误差分析。受不平衡振动信号测量与计算误差、影响系数测量与计算误差等因素的影响,工件不平衡量逆向测算值与真实值之间不可避免地存在一定的误差。以不精确的测量值作为校正目标,校正后必然会残余一定的不平衡量。设薄盘工件不平衡量的实际值及在线测算值分别为 $\vec{U}_1=U_1\angle\alpha_1$, $\vec{U}_2=U_2\angle\alpha_2$,则工件不平衡量校正后的残余不平衡量形成原理,如图1(a)所示。

由图1(a)中的向量关系可以计算出工件不平衡量校正后的残余不平衡量幅值 U_{rel} 为

$$\begin{aligned} U_{rel} &= \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2\cos\Delta\alpha_1} \\ &= U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 - 2\frac{U_2}{U_1}\cos\Delta\alpha_1} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\Delta\alpha_1=\alpha_2-\alpha_1$ 。

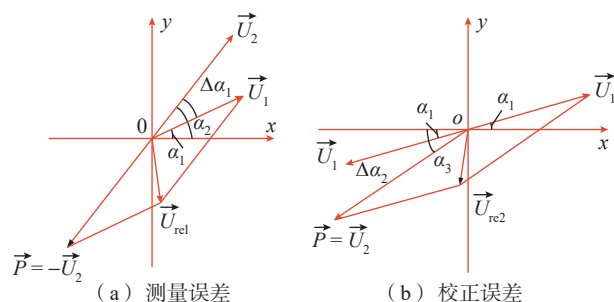


图1 测量与校正误差分析

Fig.1 Measuring and correcting errors analysis

(2) 校正误差分析。工件不平衡量在线校正主要在数控机床上直接进行,其校正误差主要来源于去重建模过程中的理想化所产生的计算误差、工件材料不均匀性及密度差异、去重过程中所产生的控制误差等。设工件理论所需校正量为 $-\vec{U}_1$,实际的校正量为 $\vec{U}_3=U_3\angle\alpha_3$,则工件校正后的残余不平衡量形成原理如图 1 (b) 所示。由图 1 (b) 中的向量关系可以计算出工件校正后残余不平衡量的幅值 U_{re2} 为

$$U_{re2} = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 - 2U_1U_3\cos\Delta\alpha_2}$$

$$= U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 - 2\frac{U_3}{U_1}\cos\Delta\alpha_2}$$
(4)

式中, $\Delta\alpha_2=\alpha_3-\alpha_1$ 。

由式(3)和(4)可以看出,如果 $\Delta\alpha_1\approx 0$, $\Delta\alpha_2\approx 0$,说明测量和校正的方位误差较小。由于去重属于不可再生校正,此时应防止过大校正而对工件造成不可修复性的损伤。

当 $\Delta\alpha_1$ 与 $\Delta\alpha_2$ 数值较大时,相位误差对校正后工件残余不平衡量幅值的影响是主要的,该现象可称为误校正。

在实际应用中,工件不平衡量的测算及校正误差总是相互叠加的。

2 薄盘工件不平衡量在线测算及校正试验

2.1 试验系统设计

为便于对薄盘工件的不平衡量进行调控,设计如图 2 (a)和(b)所示的阶梯状薄盘工件,图 2 (a)中 A_1 为工件不平衡量模拟调节面, A_2 为工件不平衡量模拟校正面, A_1 、 A_2 平面内等效不平衡量的调整均通过 4 组径向均匀分布的螺栓-螺母组件来实现。每个螺栓-螺母组件的螺栓拧入工件相应的螺纹孔内,并通过锁紧螺母实现组件锁紧,调节两个扁螺母距离薄盘工件中心的距离,即可实现该轴不平衡量的调节。

图 2 (a)所示工件具有较大的径厚比, A_1 、 A_2 平面内的不平衡量可以等效于一个平面中,其不平衡量的调节和校正原理如图 2 (c)所示。设将调节螺母组 q_2 外移一定距离,其所产生的不平衡量可以通过调节螺母组 Q_3 、 Q_4 的合成不平衡量进行校正。

图 2 (c)中 \vec{q}_1 、 \vec{q}_2 、 \vec{q}_3 、 \vec{q}_4 分别为 A_1 面内 4 组调节螺母所产生的不平衡量, \vec{Q}_1 、 \vec{Q}_2 、 \vec{Q}_3 、 \vec{Q}_4 分别为 A_2 面内 4 组调节螺母所产生的不平衡量, \vec{Q}_{12} 、 \vec{Q}_{34} 分别为合成不平衡量。基于向量合成原理可得不平衡量调节与校正之间向量关系为

$$\vec{q}_2 - \vec{q}_4 = \vec{Q}_{34} - \vec{Q}_{12}$$
(5)

理论上,分别对 A_1 、 A_2 平面内 4 个方向上调节螺母

进行适当调节,即可在 360° 范围内对工件不平衡量进行模拟调节和校正。模拟车床主轴基本结构制作的试验系统如图 3 所示。图 3 中主轴系统由主轴、卡盘、前/后支撑等单元构成,主轴系统通过联轴器与伺服电机输出轴直接相连,伺服驱动系统可实现电机+主轴系统转速的调控。薄盘工件的夹持柄穿入卡盘中心孔内,并被卡盘卡爪紧固夹持。通过两个电涡流位移传感器分别监测主轴前后端振动信号,通过电磁接近开关监测主轴

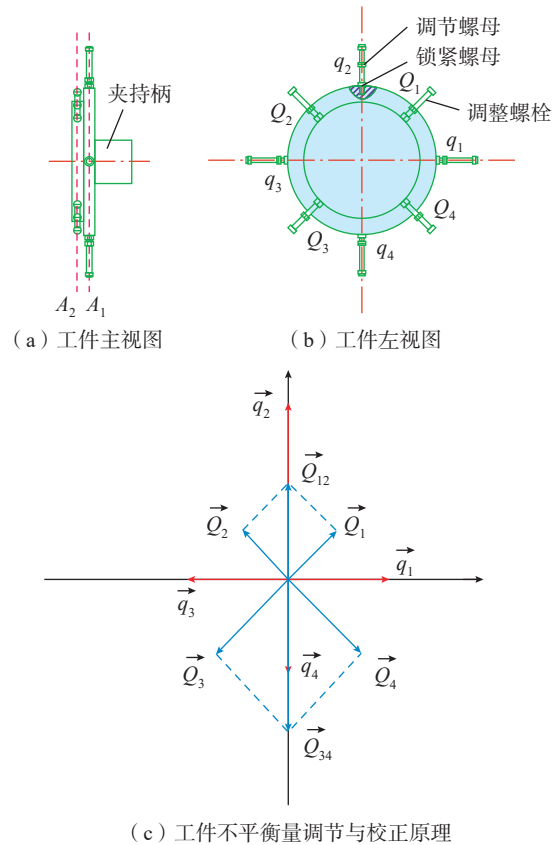


图 2 薄盘工件及其不平衡量调节机构

Fig.2 Thin-disc workpiece and its unbalance vector adjusting mechanism

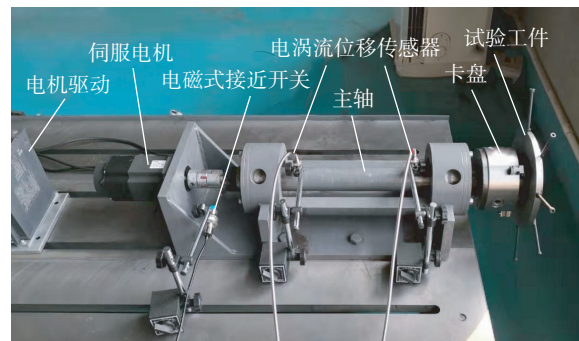


图 3 工件不平衡量在线测算与校正试验系统

Fig.3 Testing and correcting experimental system of unbalancing thin-disc workpiece

基准信号,所有传感器信号均通过信号采集卡采集(NI PCI-4472)。

2.2 校正试验

为便于信号分析,试验中实施整周期信号采样。基于单平面动平衡原理,仅通过一个测点即可逆向测算工件不平衡量。通过试验测算,前端测点振动对工件不平衡量的激励比较敏感,这里将主轴前端振动信号作为分析与控制的目标。

考虑到试验的安全性,这里以 900 r/min 作为平衡测试转速。图 4 为主轴空载条件下,传感器所监测的整周期信号。采用最小二乘法^[11]拟合主轴前端不平衡振动信号为 $11.324 \mu\text{m} \angle -42.77^\circ$ 。该不平衡振动主要是由主轴本体不平衡、卡盘及其与主轴连接不平衡、联轴器不平衡、安装不平衡、电机轴及电机安装不平衡、基准附加物等复合而成。

为测算工件不平衡相对主轴振动测点的影响系数,这里将 A_1 平面内与基准同方向的螺栓拧出 5 mm,并在动平衡机上测量工件不平衡量为 $14.52 \text{ g} \cdot \text{cm} \angle 0^\circ$ 。在平衡转速下所监测的主轴前端振动信号如图 5 所示。

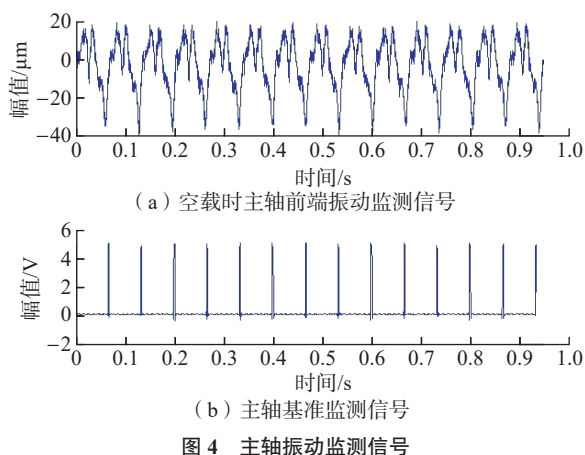


Fig.4 Vibration monitoring signals of spindle

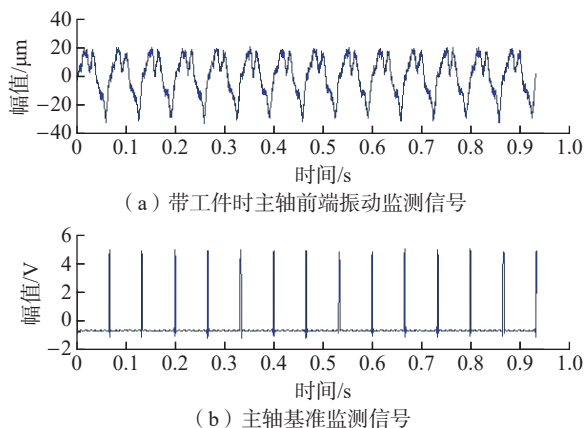


图 5 工件-主轴耦合振动监测信号
Fig.5 Vibration monitoring signals of spindle with workpiece

为使试验数据具有一定的持续性和规律性,这里随机选取 5 组试验数据并计算影响系数(表 1)。由表 1 可以看出,5 次试验的不平衡振动信号及影响系数的测算值均存在一定的差异,说明信号测量与计算过程中存在一定的误差。

为考察工件不平衡量的逆向测算精度,这里改变试重方向,即将 A_1 平面内与基准反向的调节螺母拧出一定距离,在动平衡机上测量工件不平衡量为 $14.52 \text{ g} \cdot \text{cm} \angle 180^\circ$ 。重新进行试验并测算工件的等效不平衡量,测算结果如表 2 所示。

表 2 中的测算误差等于工件不平衡量的理论值与测算值的向量差。根据表 2 测算结果,调整 A_2 平面内相应的调整螺母,实现对工件不平衡量的校正。工件不平衡量的校正结果如表 3 所示。

表 3 中的校正误差等于校正后的残余不平衡量减去测算误差。等效校正量等于表 3 中的校正误差减去工件不平衡量的理论值。分析表 2 和 3 数据可得出以下结论。

(1) 基于主轴加载工件前后不平衡振动信号的变化,可以相对精确地估算出薄盘工件的不平衡量。

(2) 由于信号测量和分析存在一定的误差,致使工件不平衡量存在一定的测算误差,且同一时段内的测算误差相对稳定。

表 1 选取的 5 次试验数据及影响系数

Table 1 Experimental data and influence coefficient of 5 times

| 试验序号 | 初始不平衡振动 / ($\mu\text{m} \angle^\circ$) | 试重后不平衡振动 / ($\mu\text{m} \angle^\circ$) | 影响系数 / ($\mu\text{m} / (\text{g} \cdot \text{cm} \angle^\circ)$) |
|------|--|---|--|
| 1 | 11.315 $\angle -42.97$ | 17.745 $\angle -39.93$ | 0.425 $\angle -30.46$ |
| 2 | 11.135 $\angle -42.32$ | 17.779 $\angle -38.14$ | 0.444 $\angle -27.08$ |
| 3 | 11.112 $\angle -42.83$ | 18.008 $\angle -38.87$ | 0.460 $\angle -28.62$ |
| 4 | 11.352 $\angle -43.66$ | 18.128 $\angle -39.23$ | 0.453 $\angle -27.88$ |
| 5 | 11.199 $\angle -43.31$ | 17.463 $\angle -38.73$ | 0.419 $\angle -26.25$ |

表 2 工件不平衡逆向测算结果

Table 2 Reverse calculation results of workpiece unbalance vector

| 序号 | 重新试重后不平衡振动 / ($\mu\text{m} \angle^\circ$) | 不平衡量测算值 / ($\text{g} \cdot \text{cm} \angle^\circ$) | 测算误差 / ($\text{g} \cdot \text{cm} \angle^\circ$) |
|----|---|---|--|
| 1 | 5.967 $\angle -66.73$ | 14.9 $\angle -170.18$ | 2.546 $\angle 86.35$ |
| 2 | 5.681 $\angle -67.35$ | 15.477 $\angle -171.61$ | 2.393 $\angle 70.69$ |
| 3 | 5.727 $\angle -68.18$ | 15.542 $\angle -170.82$ | 2.612 $\angle 71.63$ |
| 4 | 5.853 $\angle -67.87$ | 15.286 $\angle -170.20$ | 2.658 $\angle 78.21$ |
| 5 | 5.983 $\angle -66.16$ | 14.774 $\angle -170.46$ | 2.45 $\angle 88.84$ |

表3 工件不平量的校正
Table 3 Correction of workpiece unbalance vector

| 序号 | 残余不平衡振动 / ($\mu\text{m} \angle^\circ$) | 残余不平衡量 / ($\text{g} \cdot \text{cm} \angle^\circ$) | 校正误差 / ($\text{g} \cdot \text{cm} \angle^\circ$) | 等效校正量 / ($\text{g} \cdot \text{cm} \angle^\circ$) |
|----|--|--|--|---|
| 1 | 11.431 \angle -27.42 | 7.252 \angle 83.12 | 4.712 \angle 81.38 | 15.923 \angle 17.01 |
| 2 | 11.65 \angle -28.53 | 6.553 \angle 74.44 | 4.168 \angle 76.59 | 16.009 \angle 14.67 |
| 3 | 11.481 \angle -40.39 | 1.43 \angle 41.41 | 1.553 \angle -80.76 | 14.849 \angle -5.93 |
| 4 | 11.702 \angle -30.94 | 6.07 \angle 75.41 | 3.418 \angle 73.23 | 15.848 \angle 11.92 |
| 5 | 11.827 \angle -40.02 | 2.145 \angle 35.25 | 2.089 \angle -35.44 | 16.267 \angle -4.27 |

(3)在工件残余不平衡量检测后,可以通过在线校正的方式减少工件残余不平衡量,其校正精度受不平衡量测量和校正误差的双重影响。

3 结论

论文围绕薄盘类工件不平衡量在线测算及模拟校正开展了试验研究,对实际应用具有以下指导性意义。

(1)通过对盘类工件加工过程中不平衡量的在线测算,可以实时监控工件不平衡量的变化状态,减少因工件装卡不当、加工工序错误等问题而导致工件不平衡量异常变化。

(2)通过对多工件加工后残余不平衡量在线测算,可以在无动平衡机等专用测试设备条件下对工件平衡质量进行实时评估。

(3)工件不平衡量在线校正可以在无动平衡机等专用校正设备条件下,对工件加工后的残余不平衡量实施校正,可以进一步挖掘数控机床潜能,节省盘类工件动平衡成本。

参考文献

[1] 伍良生,李俊,肖毅川,等.基于盘状加工件在线动平衡技术的研究[J].北京工业大学学报,2011,37(6):811-815.
WU Liangsheng, LI Jun, XIAO Yichuan, et al. Online dynamic balancing technique basing on discal work[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(6): 811-815.

[2] WANG Q X, WANG F. A new vibration mechanism of balancing machine for satellite-borne spinning rotors[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(5): 1318-1326.

[3] ZHANG S H, ZHANG Z M, YAN L W. Recent researches and patents on dynamic balancing methods and devices for rotor system[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2016, 9(3): 222-229.

[4] DYER S W, NI J. Adaptive influence coefficient control of single-plane active balancing systems for rotating machinery[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(2): 291-298.

[5] ZHANG J. Hierarchical Bayesian calibration and on-line

updating method for influence coefficient of automatic dynamic balancing machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(6): 876.

[6] 樊红卫,智静娟,史必佳,等.转子自适应主动平衡算法及电磁平衡头单盘平衡试验[J].西安交通大学学报,2018,52(8):15-21,29.

FAN Hongwei, ZHI Jingjuan, SHI Bijia, et al. Adaptive rotor balancing algorithm and single-disk rotation test for electromagnetic balancer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(8): 15-21, 29.

[7] 刘健,潘双夏,杨克己.全自动动平衡机去重建模与智能规划[J].组合机床与自动化加工技术,2005(7):1-4,19.

LIU Jian, PAN Shuangxia, YANG Keji. Model building and intelligent programming system for electric motor armatures automated balance correction[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2005(7): 1-4, 19.

[8] 曾胜,刘忠,任意.用于电动机转子的全自动平衡机V型铣削去重建模研究[J].机械工程学报,2010,46(7):187-192.

ZENG Sheng, LIU Zhong, REN Yi. Modeling study of V-shaped milling unbalance correction of automatic balancing machine for motor armature[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(7): 187-192.

[9] 殷苏民,江煜,陆文俊,等.转子动平衡机的R型铣削去重建模研究[J].组合机床与自动化加工技术,2014(9):39-41,45.

YIN Sumin, JIANG Yu, LU Wenjun, et al. Modeling study of R-shaped milling unbalance correction of balancing machine for rotor[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(9): 39-41, 45.

[10] 刘冰.加工中的盘类工件不平衡量在线测算与去重技术研究[D].天津:天津职业技术师范大学,2018.

LIU Bing. Online calculation and weight removal technology for unbalance of workpiece in processing[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2018.

[11] ZHANG S H, ZHANG Z M. Research on the field dynamic balance technologies for large diesel engine crankshaft system[J]. Shock and Vibration, 2017, 2017: 1-10.

通讯作者:张仕海,教授,博士,研究方向为转子动力学及动平衡技术。

(责编 古东)