

# 基于电力测功和压电陶瓷加载系统的高速电主轴可靠性试验台设计

呼 焯, 杨兆军, 宋靖安, 朱 岩, 王 凯, 方 杰, 侯雨辰

吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022

**摘要** 高速数控机床的工作性能首先取决于高速主轴的性能。设计了一种基于电力测功加载系统和压电陶瓷加载系统的高速电主轴可靠性试验台,它能够完成转速为 18000r/min 以上的电主轴可靠性试验;实现高速电主轴的性能指标测试,如电主轴温升控制,主轴的径向跳动和轴向窜动等的测试;采用电力测功加载系统及压电陶瓷加载系统模拟主轴受力状况(包括径向力、轴向力与扭矩),实现电主轴的动态加载实验与测试;检测试验过程中的各种故障,记录试验过程中试验信息,并可进行查询,通过采集的参数数据进行可靠性分析,为提高电主轴的可靠性提供了定量数值评估平台。

**关键词** 电主轴;可靠性;电力测功加载系统;压电陶瓷加载系统

**中图分类号** TH6

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.01.005

## Design of a Reliability Test Platform for High-speed Motorized Spindles Based on Power Dynamometer and Piezoelectric Loading Systems

HU Ye, YANG Zhaojun, SONG Jing'an, ZHU Yan, WANG Kai, FANG Jie, HOU Yuchen

College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

**Abstract** The performance of the high-speed motorized spindle strongly affects the performance of the high-speed CNC machine tool. To improve the MTBF level of a high-speed CNC machine tool, it is of great importance simulating the real working condition of the motorized spindle and developing a reliability test platform. In this paper, a reliability test platform for high-speed motorized spindles is designed based on power dynamometer and piezoelectric loading systems. The reliability test of the motorized spindle can be carried out with a rotation speed over 18000r/min; the performance indices of the high-speed motorized spindle can be determined, such as the performance of the temperature rising control, the radial runout and the axial play of the motorized spindle; with the power dynamometer and piezoelectric loading systems, the loading condition of the spindle can be simulated, including the radial force, the axial force and the torque, and the dynamical loading test of the motorized spindle can be carried out; the failures during the test can be detected; the information of the test can be recorded, and the reliability analysis can be made according to the data collected from the test, providing a quantitative evaluation platform for improving the reliability of the motorized spindle.

**Keywords** motorized spindle; reliability; power dynamometer loading system; piezoelectric loading system

### 0 引言

高速电主轴因其独特的结构特点与高性能被广泛应用在高速数控机床、加工中心中,它能够满足高速切削时“高速度、高精度、高可靠性及小振动”的要求,在车削、铣削、磨削等诸多领域均有涉及,尤其是在高精密仪器关键功能部件的

制造方面也有其不可替代的作用。随着科技的不断进步,人们在运用电主轴的同时,也在追求更高性能的电主轴技术。总的来说,电主轴的研究正在向高可靠性、节能性、高精度、高加工效率、环保性、智能化的方向发展,而电主轴的可靠性研究成为其中首要攻破的难关。

收稿日期:2011-11-16;修回日期:2011-12-20

基金项目:国家科技重大专项(2010ZX04014-011)

作者简介:呼焯,博士研究生,研究方向为机械装备可靠性,电子信箱:huyanyiren@126.com;杨兆军(通信作者),教授,研究方向为数控装备可靠性,球面渐开线齿轮加工及装备,电子信箱:yzj@jlu.edu.cn

关于电主轴的可靠性研究, 大多都是空载运转或静态加载, 不能模拟电主轴在实际加工中的工作状况。在实际切削时普通的铣刀受到切削力, 理论上分为轴向力和径向力, 在试验中, 采取等效的方法将其分为等效径向力、等效轴向力和 1 个等效的扭矩, 并施加在加载棒(模拟刀具)上。铣刀在实际切削时, 刀具材料、工件材料、切削速度等都会对切削力的大小产生影响, 而且在切削时产生高频振动。电主轴所能承受的最大转矩为  $9.15\text{N}\cdot\text{m}$ , 据此计算出最大切削力约为  $960\text{N}$ ; 根据电主轴的额定转速为  $18000\text{r}/\text{min}$  计算得出, 切削力的变化频率最少为  $300\text{—}350\text{Hz}$ 。利用加载棒模拟刀具, 由于高速转动, 力不能直接加在加载棒上, 需要在加载棒上增加轴承单元。这样就可以比较真实地模拟实际加工, 在实验室就可以对高速电主轴进行可靠性试验和测试, 通过试验和测试提高电主轴的平均无故障时间(MTBF)水平。

### 1 高速电主轴可靠性试验台设计

作为一种高速加工设备, 电主轴在高速切削时如果受到较大的扰动就有可能对其工作性能产生影响, 这种影响甚至有可能是破坏性的。因此在进行动态加载时, 需要根据高速电主轴的抗扰动能力和主轴的实际转速范围, 设计专用的主轴静动刚度加载测试装置。本文从机械接触式加载的角度提出了加载测试方法。

#### 1.1 电主轴实际工况中的受力分析

高速电主轴在实际加工过程中, 在刀具与工件接触时, 工件受到来自刀具径向力和轴向力的作用。同时, 刀具与工件在径向和轴向因接触而产生摩擦力, 这 2 个摩擦力对主轴中心形成摩擦阻转矩。抵抗摩擦阻转矩的能力反映了高速电主轴的转矩输出能力及其带负载能力的大小, 且在加载过程中主轴径向变形和轴向变形的程度是高速电主轴径向刚度和轴向刚度的体现, 在测试时, 需要将两者加以区别, 独立测试和计算。本文试验平台选用洛阳轴研科技股份有限公司研发的 170XDS30 Q22 型数控铣用电主轴, 其输出特性曲线如图 1 所示, 基本电参数为

$$\begin{aligned} f_1: n_e &= 23000\text{r}/\text{min}, f_c = 383.33\text{Hz}, U_c = 380\text{V}, P_c = 22\text{kW}, I_c = 39\text{A}, \\ M_c &= 9.15\text{N}\cdot\text{m} \\ f_2: n_m &= 30000\text{r}/\text{min}, f_m = 500\text{Hz}, U_m = 380\text{V}, P_m = 22\text{kW}, I_m = 40.5\text{A}, \\ M_m &= 7\text{N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

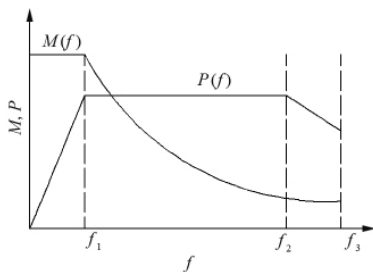


图 1 扭矩  $M$ 、功率  $P$  与频率  $f$  之间的关系

Fig. 1 Relationship between torque, power and frequency

其中,  $n_e, f_e, U_e, P_e, I_e, M_e$  分别为频率为  $f_1$  时所对应的转速、频率、电压、功率、电流和扭矩;  $n_m, f_m, U_m, P_m, I_m, M_m$  分别为频率为  $f_2$  时所对应的转速、频率、电压、功率、电流和扭矩。

电主轴在实际工况中所受的力即为切削力。切削力的大小和方向受到切削过程中许多因素的影响, 是不固定的。为了便于分析测量, 将切削力分解为 3 个相互垂直于坐标轴方向的分力或力矩表示, 如图 2 所示, 图中  $F$  为切削力;  $F'$  为切削力反作用力;  $F_c$  为圆周力;  $F_v$  为垂直力;  $F_z$  为纵向分力;  $V_c$  为圆周切削速度。

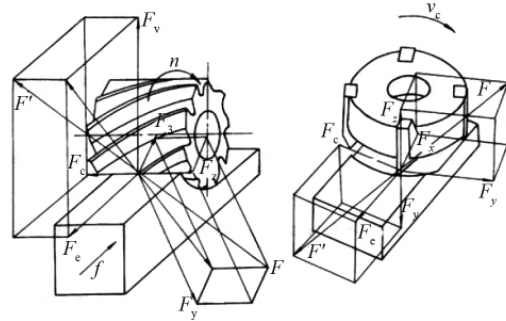


图 2 切削力分解示意图

Fig. 2 Decomposition of the milling force

圆周力为

$$F_c = \frac{C_F a_p^{x_F} f_z^{y_F} a_e^{u_F} Z}{d_0^{q_F} n^{\omega_F}} \quad (1)$$

其中,  $C_F, x_F, y_F, u_F, q_F, \omega_F$  为系数;  $a_p$  为背吃刀量;  $f_z$  为每齿进给量;  $a_e$  为切削宽度;  $Z$  为铣刀齿数;  $d_0$  为铣刀直径;  $n$  为铣刀转速。

扭矩为

$$M = \frac{F_c d_0}{2 \times 10^3} \quad (2)$$

按照经验公式, 背吃刀力和进给切削力按立铣、硬质合金刀加工碳素结构钢、逆铣估算。

背吃刀力, 进给切削力, 主切削力分别为

$$F_x = (0.2\text{—}0.3)F_c \quad (3)$$

$$F_z = (0.35\text{—}0.4)F_c \quad (4)$$

$$F_y = (1.0\text{—}1.2)F_c \quad (5)$$

将电主轴的额定转矩代入式(2)中, 即电主轴在低速恒扭矩状态下工作时所受的切削力最大, 按 HSKE-40 刀柄标准, 取  $d_0=20\text{mm}$ , 求出  $F_c=915\text{N}$ , 然后估算出  $F_x=288.75\text{N}$ ,  $F_z=915\text{N}$ ,  $F_y=343.125\text{N}$ 。为了模拟真实工况, 需要添加的轴向力, 即  $F_z=343.125\text{N}$ , 加载的径向力为  $F_x$  和  $F_y$  的合力, 其值为  $960\text{N}$ 。如果需要过载试验, 按过载系数为 1.2 倍计算, 则轴向力  $F_z=412\text{N}$ , 径向力为  $F_y=1150\text{N}$ 。

如果电主轴在高速状态下工作, 输出扭矩会大大减小, 即电主轴所受到的切削力很小。如电主轴采用立铣加工方式, 用硬质合金刀具加工碳素结构钢, 转速为  $15000\text{r}/\text{min}$ , 计算  $F_c$  时其各参数为  $C_F=119, x_F=1.0, y_F=0.75, u_F=0.85, q_F=-0.13, \omega_F=0.73$ 。由于各项系数都较小, 所以计算结果很小, 基本扭矩

都在  $0.5N \cdot m$  以内,此时  $F_z=18.75N$ ,  $F_x$  和  $F_y$  的合力为  $56N$ 。因此,动态加载时轴向力要能够在  $18.75\text{—}343.125N$  之间任意调节,径向力要在  $56\text{—}1047N$  之间任意调节。扭矩可以在  $9.15N \cdot m$  以内调节。

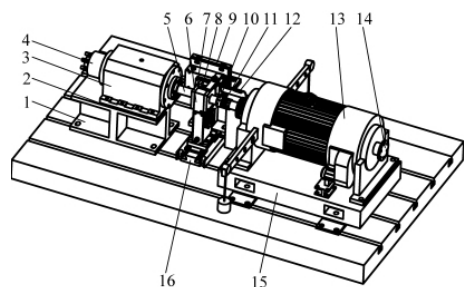
由于电主轴在实际切削时会有一定的振动频率,在动态加载时,需要给径向力与轴向力一定的变化频率。由于目前国内还没有人能够给出电主轴在实际切削时的振动频率,所以本文拟定径向力与轴向力的振动频率  $\leq 300Hz$  (按照电主轴  $18000r/min$  计算,  $f=18000r/min/60s=300Hz$ )。

## 1.2 加载系统结构设计

能够实现动态加载的成型设备很多,如伺服液压系统、电磁激振器、伺服电机、电力推杆、压电陶瓷驱动器、非接触式电磁加载。但考虑到目前没有能够完全满足本试验台加载要求的成型产品,综合各方面因素,选用压电陶瓷驱动器作为本试验的加载设备。设备型号为 Pst500 VS18,参数如下:最大伸长量为  $25\mu m$ ,长度为  $42mm$ ,静电容量为  $340nF$ ,静态刚度为  $90N/\mu m$ ,最大振动频率为  $22kHz$ ,最大出力为  $5000N$ 。

为了满足试验台操作要求,为驱动器配以模块化电源,包括多路电源模块、功率放大模块和显示与接口模块。多路电源模块用来同时驱动两根压电陶瓷驱动器进行加载,功率放大模块用来放大加载信号,显示与接口模块用来提供 PC 操作界面及显示窗口。

为了弥补压电陶瓷驱动器在加载方面的不足,设计相应的预加载机构与调节机构,试验台的整体结构如图 3 所示。



1—底座;2—垫片;3—夹持;4—电主轴;5—加载棒;6—轴承加载单元;7—轴向加载单元;8—油口;9—支架;10—摆臂;11—弹性联轴器;12—防护罩;13—电力测功机;14—法兰盘;15—底座;16—滑板

图 3 试验台整体结构

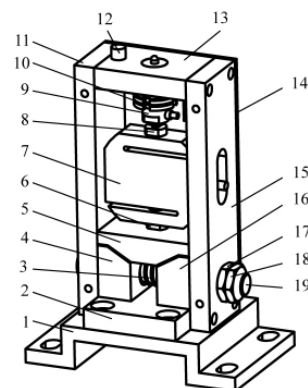
Fig. 3 Structure of the test platform

试验台的主要结构设计如下。

### (1) 径向加载系统。

径向加载系统中嵌入压电陶瓷驱动器,同时施以预加载荷,以弥补其加载时移动距离小的缺点。采用滚动轴承结构将主轴的高速转动与动态加载相结合,通过压力传感器和位移传感器采集加载数值和变形数值,控制单元则根据加载数值和变形数值的变化控制加载压力。在避免高速电主轴在高速运转状态下直接加载时因机械接触所产生的摩擦热和机械磨损对测试精度影响的同时,实现高速电主轴连续、稳定动态加载和实时测量。该装置的设计使得主轴的静动刚度加

载方便,测量精度高。其具体结构及加载原理如图 4 所示。



1—底座;2—下底板;3—弹簧;4—移动滑块(无螺纹);5—连接滑块;6—双头螺柱;7—拉压力传感器;8—双头螺柱;9—压电陶瓷驱动器;10—散热片;11—左挡板;12—定位螺栓;13—上挡板;14—后盖板;15—右挡板;16—移动滑块(有螺纹);17—锁死螺母;18—防松螺母;19—调整螺栓

图 4 径向加载装置结构原理图(去除前挡板与风扇后)

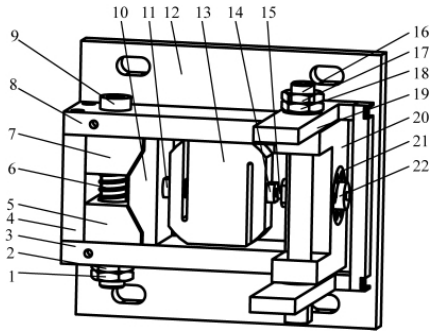
Fig. 4 Structure of the radial loading device (the front board and the fan are removed)

加载径向力时,首先使用扭矩扳手(或普通扳手)以及配套的连接件适度旋转调整螺栓,使两个移动滑块向中间移动。由于结构对称,连接滑块受到 1 个向上的合力,连接滑块与拉压力传感器之间用双头螺柱连接,连接滑块向上推动拉压力传感器,传感器上用双头螺柱连接压电陶瓷驱动器,连接后用锁死螺母拧紧,这样压电陶瓷驱动器会向上移动一定距离。由于压电陶瓷驱动器的输出头(圆头)顶在轴承加载单元下端的浅圆槽内,这样就给整个径向加载装置施加了一定的预加载荷,并可以消除装置内部的间隙,以免消耗压电陶瓷驱动器的加载距离。虽然驱动器功率较小,但也有一定的发热量,因此需要运用冷却装置对其进行散热。如图 4 中的前后两端盖板上均设计有通风口,且为不对称设计,使冷却风能够在装置腔体内充分循环制冷。前盖板的外部带有风扇,初步选用台式电脑 CPU 用的冷却风扇。因为台式电脑 CPU 的模块一般功率在  $150W$  以上,而其正常工作温度在  $48^\circ C$  左右,按照压电陶瓷驱动器  $5W$  的功率,其冷却效果完全可以满足要求。在压电陶瓷驱动器的外部设计有散热片,与风扇配合使用冷却效果最佳。由于加载棒与轴承套有一定重量,设计时将整个径向加载装置放置在加载棒的下端,实现加载的同时,也可起到辅助支撑的作用。整个径向加载装置安装在径向滑板上(图 3),使整个装置可以在横向及纵向做任意移动,方便加载时调整位置,以免增加附加转矩。

### (2) 轴向加载系统。

轴向加载系统的设计结构与径向加载系统类似,其具体结构及加载原理如图 5 所示。

加载轴向力时,首先使用扭矩扳手(或普通扳手)及配套的连接件适度旋转调整螺栓,使 2 个移动滑块向中间移动。



1—防松螺母;2—锁死螺母;3—右挡板;4—底面挡板;  
5—移动滑块(有螺纹);6—弹簧;7—移动滑块;8—左挡板;  
9—调整螺栓;10—连接滑块;11—双头螺柱;12—底座;  
13—拉压力传感器;14—双头螺柱;15—锁死螺母;16—支撑杆;  
17—防松螺母;18—锁死螺母;19—摆臂;20—支撑板;  
21—散热铜套;22—压电陶瓷驱动器

图5 轴向加载装置结构原理图(去除前挡板与风扇后)

Fig. 5 Structure of the axial loading device (the front board and the fan are removed)

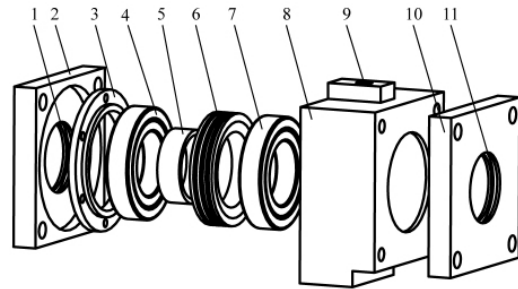
由于结构对称,连接滑块受到1个向上的合力,连接滑块与拉压力传感器之间用双头螺柱连接,连接滑块向上推动拉压力传感器,传感器上用双头螺柱连接压电陶瓷驱动器,连接后用锁死螺母拧紧,这样压电陶瓷驱动器会向上移动一定距离。由于压电陶瓷驱动器的输出头(圆头)顶在轴向加载装置的摆臂(图3)下端顶板上,摆臂上端与轴承单元的挡块接触,这样就给整个轴向加载装置施加了一定的预加载荷,并可以消除装置内部的间隙,以免消耗压电陶瓷驱动器的加载距离。虽然驱动器功率较小,但也有一定发热量,因此需要运用冷却装置对其进行散热。图5中盖板上设计有通风口,盖板的外部带有风扇,在压电陶瓷驱动器的外部有散热铜套,与风扇配合使用,铜套周围有通风口,使冷却效果更佳。整个径向加载装置安装在轴向滑板上(图3),使整个装置可在横向及纵向任意移动,方便加载时调整位置,以免增加附加转矩。

由于装置内部摩擦力与连接件的刚度比较复杂,如果采用扭矩扳手进行调节,应预先进行试验并绘出预加载荷与调整螺栓扭矩的关系曲线,以便在进行加载试验时有数据可依。

(3) 轴承加载单元。

轴承加载单元包括1对角接触球轴承、轴承套以及密封结构。角接触球轴承为陶瓷球轴承,在主轴高速运转时产生的摩擦热较小,可靠性较高。如图6所示,左侧轴承的内圈顶在加载棒轴肩上,内圈另一侧通过套筒顶在右侧轴承内圈,两轴承的外圈分别顶在顶圈和轴承套上,轴承单元一侧通过轴肩定位,另一侧通过轴向加载系统的摆臂结构压紧;套筒外的分油盘起均匀分配润滑油的作用,两端盖和密封圈起密封、防尘作用。

轴承套底面有1个定位圆头滑槽,1个面积较小的浅圆槽,浅圆槽位于加载棒轴线正下方。径向加载压电陶瓷驱动器的输出头从外壳伸出,加载径向力时顶在浅圆槽内。径向加载



1—防尘槽;2—端盖;3—顶圈;4—角接触球轴承;5—套筒;  
6—分油盘;7—角接触球轴承;8—轴承套;9—油口;  
10—端盖;11—防尘槽

图6 轴承加载单元结构图

Fig. 6 Structure of the bearing loading unit

系统外壳顶面还有1个短销,与定位圆头滑槽配合,可与轴承套在轴向方向有相对运动,同时限制了轴承套绕轴线的转动。

(4) 扭矩加载方案。

电主轴在实际加工过程中,刀具与工件接触时,刀具与工件在径向和轴向因相互接触而产生摩擦力,这两个摩擦力对主轴中心形成摩擦阻转矩,而抵抗摩擦阻转矩的能力反映了电主轴的转矩输出能力及其带负载能力的大小。借鉴电机的性能检测方法,选用测功机作为负载对电机进行加载,且根据电机的功率和转速大小,选用不同型号和种类的测功机以实现转矩的加载。由于电主轴的机电能量转换原理与电机相同,在进行转矩测试时,选用测功机作为负载。

(5) 测功机的选用。

选用测功机时,首先需要查看被测电主轴的输出功率、额定频率、磁极对数等,然后分别计算高速电主轴的额定输出转矩、最大输出转矩与同步转速等。同步转速为

$$n_1 = \frac{60f}{p_m} \quad (6)$$

其中,  $f$  为额定频率;  $p_m$  为磁极对数。

高速电主轴的额定转速约为

$$n_N \approx n_1 \times 0.97 \quad (7)$$

额定输出转矩值为

$$T_N = 9550 \frac{P_{2N}}{n_N} \quad (8)$$

其中,  $T_N$  为额定输出转矩;  $P_{2N}$  为额定功率。

依据经验公式估计高速电主轴的最大输出转矩为

$$T_{max} = 2T_N \quad (9)$$

如果电主轴说明书中已经给出同步转速及额定扭矩等,也可按其给出的值进行计算(本试验平台所用数据为电主轴说明书中给出的数据)。由此可以根据高速电主轴的同步转速、输出功率、额定转矩与最大转矩值,再结合上述各种类型测功机的特点,考虑安全、高效、经济、长期稳定运行的原则,根据需要选用满足要求的测功机。

由于本试验平台对测功机的转速及功率要求较高,在考虑到经济性与实用性,目前国内能够满足要求的测功机只有

异步测功机。本文选用 DLG22 型电力异步测功机,其转速最高能够达到 23000r/min,功率最大可以达到 22kW。测功机的部分测量参数如表 1 所示。

表 1 具体测量参数名称、范围、精度

Table 1 Names, ranges and accuracies of the measured parameters

序号	测量参数	测量范围	测量精度
1	转速(测功机)/(r·min <sup>-1</sup> )	0—18000	±1
2	扭矩(测功机)	0—23N·m	优于±0.3%FS
3	功率	0—22kW	计算值

## 2 检测项目及指标

作为高速加工设备,电主轴的加工性能受到很多因素的影响,如高速轴承的稳定性、动平衡、冷却润滑及其制造与装配的精度等。在做高速电主轴的可靠性试验时,必须对电主轴的各项参数进行实时监测,才能了解其在工作状态下加工性能的变化情况,并收集其故障数据,提出解决方案。主轴的检测项目一般有几项。(1) 电主轴的温升。一般无法直接测量,但是主轴的温升可以体现在前轴承端盖的温升上,因此采用检测前轴承端盖的温度间接检测主轴和轴承的温升。(2) 主轴的转速与转矩变化。一般采用电转速与转矩传感器测量,而本试验台中,这两种传感器被集成在电力测功机中。(3) 电主轴的径向跳动、轴向跳动机回转精度是体现电主轴加工精度的重要指标,本试验台采用高分辨率的电涡流传感器着重检测。(4) 主轴壳体的震动与噪声是主轴各方面性能的综合体现,本试验台采用一体化速度振动变送器与智能噪声仪分别对其检测。上述通过传感器采集的数据会存入计算机中进行可靠性分析,生成模拟曲线与检测报告。实时检测这些参数对预防故障、分析故障,以及提高主轴的可靠性具有重要意义。本试验平台需要检测的项目及指标如表 2 所示。

表 2 电主轴可靠性试验台检测项及相应的传感器

Table 2 Test items and corresponding sensors of the test platform for the motorized spindle

检测项	检测指标	传感器
转速	最高转速 30000r/min	霍尔式速传感器(测功机内部集成)
转矩	最大转矩 0—9.15N·m	电阻应变式拉压力传感器(测功机内部集成)
端部温升	运行 4h 后外壳温升 ≤25℃	JWB/C 型温度变送器(WZC 型)
轴向位移	≤0.002μm	电涡流传感器(RP6600/6600XL 系列)
径向跳动	≤0.002μm	电涡流传感器(RP6600/6600XL 系列)
机壳振动	≤2mm/s(30000r/min 时)	一体化速度振动变送器
噪声	30000r/min 运行时噪声 ≤80db(A)	BR-N201 智能噪声仪

## 3 控制部分设计

控制系统包括数据采集系统和数据处理系统。试验台可检测电主轴的径向跳动、轴向窜动、回转精度、温升、振动、噪声等可靠性数据,这些数据通过高精度位移传感器、温度传感器、振动传感器、噪声传感器进行检测,使用数据采集卡采集并传输至工控机进行处理,如图 7 所示。数据处理系统可对可靠性数据进行分析、显示、存储、打印,并根据可靠性数据是否超标对主轴和加载系统进行反馈调节和操作。例如,当出现故障时,即可靠性数据为故障数据,工控机报警,并控制电主轴和相应加载装置停机。

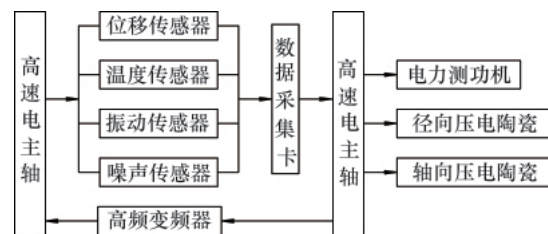


图 7 试验台控制系统

Fig. 7 Control system of the test platform

## 4 结论

本文建立了基于电力测功加载系统和压电陶瓷加载系统的高速电主轴可靠性试验台,可以同时实现扭矩、轴向力和径向力的动态加载。从生产现场采集电主轴在加工过程中的受力数据或受力曲线,输入可靠性试验台系统,可以模拟出主轴所受的实际工况。通过控制系统收集故障数据,然后做故障数据分析,寻找主轴故障的预防和处理办法,最终提高电主轴的可靠性。

## 参考文献 (References)

- [1] 康辉民. 高速电主轴静态性能分析与实验检测技术 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
Kang Huimin. Static and dynamic performance analysis and experimental detection of high speed motorized spindles [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [2] 王超, 王金. 机械可靠性工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.  
Wang Chao, Wang Jin. Mechanical reliability engineering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998.
- [3] 《机床设计手册》编写组. 机床设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.  
Editorial group of machine tool design handbook. Machine tool design handbook[M]. Beijing: China Machine Press, 1996.
- [4] Jia Y Z, Shen G X, Jia Z X, et al. Equivalent fatigue load in machine tool probabilistic reliability[J]. *International Journal of Fatigue*, 1993, 15(6): 473-477.
- [5] Jia Y Z, Jia Z X. Fatigue load and reliability design of machine tool components[J]. *International Journal of Fatigue*, 1993, 15(1): 47-52.

(责任编辑 安莹, 刘志远)