DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.01.004

应用 BP 神经网络分析电主轴频率可靠性灵敏度

杨 周, 刘盼学, 王 昊, 张义民

(东北大学 机械工程与自动化学院,沈阳 110819)

摘 要: 为研究结构参数变化对电主轴抗共振性能的影响,采用 ANSYS 有限元分析软件,建立某电主轴的参数化模型,并进行模态分析;将 ISIGHT 软件集成 ANSYS,筛选出电主轴重要的几何参数和材料参数作为设计变量,并使用优化的拉丁方抽样方法随机抽取足够的样本;利用 BP 神经网络拟合出电主轴低阶固有频率与各随机变量的函数关系,建立电主轴频率的可靠性极限状态方程;采用改进的一次二阶矩方法得到电主轴的频率可靠度和可靠性灵敏度,并以 Monte-Carlo 方法对计算结果进行验证. 结果表明:电主轴的密度、弹性模量及总长度的均值和标准差对电主轴频率可靠度影响显著;利用 BP 神经网络构建的频率可靠性功能函数较合理;改进一次二阶矩方法能够比较准确、有效地分析频率可靠性灵敏度,且比 Monte-Carlo 方法效率更高.

关键词: 电主轴;抗共振;模态分析;ISIGHT;BP 神经网络;可靠性

中图分类号: TH133.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2017)01-0030-07

Frequency reliability-based sensitivity analysis of motorized spindle by BP neural networks

YANG Zhou, LIU Panxue, WANG Hao, ZHANG Yimin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: To study the anti-resonance of motorized spindle influenced by variations of structural parameters, the structure of one motorized spindle is parameterized firstly using ANSYS and then the modal analysis is carried out. With the ISIGHT platform integrated into ANSYS, several significant geometric and material parameters of the motorized spindle system are selected out as design variables to obtain sufficient samples by Optimal Latin Hypercube method. To fit the function between the low-order natural frequency and the random variables, the BP neural networks are constructed and the reliability limit state equation of the motorized spindle frequency is obtained. Subsequently, the frequency reliability and sensitivity of the motorized spindle, calculated with updating first order second moment method (AFOSM), are verified by Monte-Carlo method. The results show that the density, elastic modulus and the total length of the motorized spindle significantly affect the frequency reliability, in terms of the mean and standard deviation. Meanwhile, the reliability limit state equation constructed by the BP neural networks is relatively rational. The AFOSM to analyze the frequency reliability-based sensitivity is comparatively precise and with higher efficiency than Monte-Carlo method.

Keywords: motorized spindle; anti-resonance; modal analysis; ISIGHT; BP neural networks; reliability

电主轴作为高速数控机床的核心部件,其静态特性和动态特性直接影响机械加工的精度、加工表面的质量和机床的可靠性、稳定性[1-3]. 当电主轴的工作频率接近电主轴的固有频率,产生共振现象,最终导致电主轴甚至整个机床破坏;共振产生的噪声还会危害操作者的健康[4-5]. 所以,有必要对电主轴进行动力学分析,并研究其频率可靠性. 张德龙[6]采用点估计方法对电主轴静刚度进行了可靠性灵敏度分析,但点估计方法不适合解决一些相关变量的可靠性问题;何雪浤等[7]应用响应面法研究了电主轴刚度可靠性,但是只考虑了几何参数对可靠度的影响;蒋彦收[8]利用 Ansys/PDS 模块采用 Monte-Carlo 方法研究了电主轴的抗共振可靠性和敏感参数,但是 Monte-Carlo 方法需要在样本量非常大时得到精确解,不仅计算量大,而且非常耗时.

本文采用 ANSYS 软件建立了电主轴系统的参数化模型;由 Block Lanczos 模态分析方法提取了系统前 5 阶的固有频率及振型;考虑到电主轴几何参数和材料参数的变化会引起电主轴固有频率的改变,进而导致电主轴工作时发生共振,需要对电主轴的频率可靠度进行计算,将 ISIGHT 软件和 ANSYS 软件多次集成,

收稿日期: 2015-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(51135003, 51205050, U1234208);"高档数控机床与基础制造装备"重大专项(2013ZX04011011);教育部新教师基金(20110042120020);中央高校基本科研业务费专项资金(N150304006);机械系统与振动国家重点实验室开放课题(MSV201402);辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2014030)

作者简介: 杨 周(1979—),女,博士,副教授;
张义民(1958—),男,博士生导师, 长江学者特聘教授

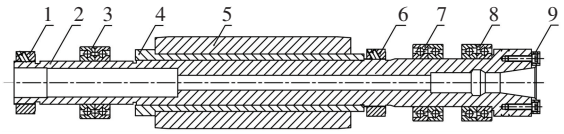
通信作者: 杨 周, yangzhou@mail.neu.edu.cn

先对随机变量筛选，再以 BP 神经网络拟合出电主轴低阶固有频率与各变量的函数关系，建立关于低阶固有频率与临界频率的极限状态方程；采用改进一次二阶矩方法对电主轴频率可靠性灵敏度进行了分析.

1　电主轴的结构分析及简化

一般情况下，电主轴系统是将电机与机床主轴设计为一体，构成无外壳电机. 空心转子装配在机床的主轴上，使得机床主轴成为电机转子；同时，定子装配在主轴单元的壳体内部，使壳体成为电机座，内装式电动机直接驱动机床主轴[9].

电主轴中的壳体、定子、外围部件对系统工作时的共振特性影响不大，在分析时可以忽略，而只考虑旋转组件，如主轴、电机转子、锁紧螺母等，见图 1.



1、6—锁紧螺母；2—主轴；3—后轴承组；4—过盈套筒；5—电机转子；7—1 号前轴承组；8—2 号前轴承组；9—平键

图 1　旋转组件

Fig.1　Rotary components

本文研究的电主轴的主轴为阶梯轴，内部中空，电机转子通过过盈套筒安装在主轴上. 电主轴由三组角接触陶瓷球轴承支承，前轴承有两组，每组由两列轴承串联安装，后轴承有一组轴承.

为方便参数化建模，更准确地分析电主轴的实际情况，对主轴单元和轴承单元进行以下简化：

1）在主轴达到最高转速时，电机转子与过盈套筒、过盈套筒与轴体之间仍旧是过盈配合形式，将三者等效为同密度的材料，进行一体化处理. 同时，对主轴前端通过螺钉与轴体结合在一起的平键以及前后轴承锁紧螺母，也作同样处理；2）忽略局部细节特征，如倒角、小孔、螺纹、退刀槽及变化不太大的阶梯轴等；3）将阶梯度不大主轴的内孔简化成孔径相同的当量内孔，并将主轴前端的内部锥孔作直孔处理.

简化后的主轴单元结构如图 2 所示，同时也需要对轴承单元进行以下简化：

1）前后轴承简化成径向可压缩的弹簧单元，弹性支承的支点在主轴轴线与轴承接触线的交点处，见图 3；2）认为所有轴承都没有角刚度，仅有径向刚度，并视刚度为一定的常数；忽略轴承的转速及荷载对刚度的影响.

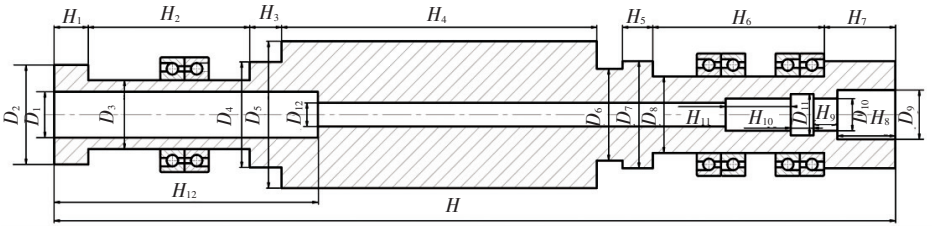


图 2　主轴单元结构简图

Fig.2　Simplified spindle system structure

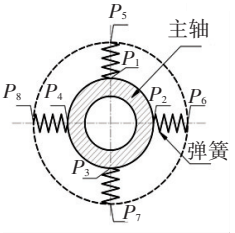


图 3　轴承简化模型

Fig.3　Simplified bearing mode

前后轴承为 FAG 公司超精密高速主轴轴承，型号分别为 XCB7010.E.T.P4S、XCB7009.E.T.P4S，采用轻预紧方式，接触角均为 25°. 轴承的径向刚度 K(N/m) 按公式(1)[10]计算：

$$K = 1.772\ 36 \times 10^7 K_m (Z^2 D_b)^{1/3} \cdot \cos^2\alpha/(\sin^{1/3}\alpha)(F_{a0})^{1/3}. \quad (1)$$

式中：Z 为滚动体数目；D_b 为滚动体直径(m)；α 为接触角(°)；F_{a0} 为轴向预紧力(N)；K_m 为材料修正系数，陶瓷球轴承取 1.3.

经计算，前后轴承的径向刚度分别为：$K_s = 201.84\times10^6$ N/m，$K_t = 185.17\times10^6$ N/m. 轴承径向方向，可以视作并联弹簧系统，轴承刚度的一半即是相应系统每个弹簧的刚度.

2　电主轴的模态分析

2.1　模态分析的运动方程

由达朗贝尔原理，可以建立多自由度的动力学基本方程：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}}(t) + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{q}}(t) + \boldsymbol{G}\boldsymbol{q}(t) = \boldsymbol{F}(t).$$

式中：$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵，$\boldsymbol{C}$ 为阻尼矩阵，$\boldsymbol{G}$ 为刚度矩阵，$\ddot{\boldsymbol{q}}(t)$ 为加速度列向量，$\dot{\boldsymbol{q}}(t)$ 为速度列向量，$\boldsymbol{q}(t)$ 为节点位移列向量，$\boldsymbol{F}(t)$ 为激振力列向量.

由于一般电主轴结构的阻尼较小，研究中忽略阻尼对电主轴固有频率和振型的影响. 当 $\boldsymbol{F}(t)=0$，$\boldsymbol{C}=0$ 时，便可得到主轴系统的无阻尼自由运动微分方程：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}}(t) + \boldsymbol{G}\boldsymbol{q}(t) = \boldsymbol{0}. \quad (2)$$

设解为

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{\varphi}\sin(\lambda_0 t + \theta). \quad (3)$$

式中：$\boldsymbol{\varphi}$ 为振幅列矩阵，λ_0 为系统的固有频率，θ 为初相位. 式(3)带入式(2)，有

$$(\boldsymbol{G} - \omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{0}. \quad (4)$$

求解式(4)的特征值和特征向量，即求得电主轴的固有频率与振型.

2.2 电主轴参数化模型的建立

为使仿真模型更加准确,在有限元分析软件 ANSYS 中直接进行参数化建模. 主轴材料为 20 CrMnTi,弹性模量 $E_m = 2.12 \times 10^{11}$ N/m^2,密度 $D_m = 7\ 860$ kg/m^3,泊松比 $P_m = 0.289$. 主轴选用 SOLID185 实体单元,轴承采用 COMBINE14 弹簧单元.

首先,建立主轴的旋转截面,把不规则的图形分割成多个四边形. 然后,借助 MESH200 单元对截面进行映射网格划分,由于 MESH200 单元只辅助网格划分,没有荷载、实常数、自由度以及材料特性,不影响模型计算结果,所以建完模型后可忽略此单元. 沿中心轴线旋转即可以生成三维实体模型,同时生成体网格. 这样划分的网格有规律,单元数量少,分析也较准确. 建立弹簧单元,图 4 为最终的电主轴参数化有限元分析模型,该模型共有 67 029 个单元和 74 736 个节点.

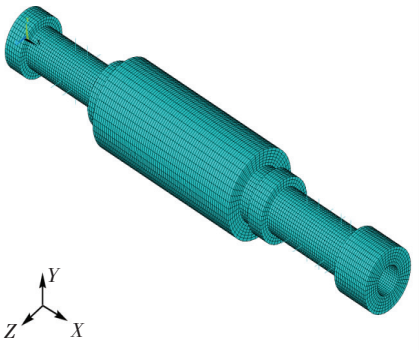


图 4 电主轴有限元分析模型

Fig.4 FEA model of the motorized spindle

2.3 基于 ANSYS 的电主轴模态分析

根据电主轴的工作情况添加以下边界条件:前端轴承限制主轴的轴向位移,要对每个前轴承的内部 4 个节点(P_1、P_2、P_3、P_4)分别施加轴向约束;为防止温度升高引起电主轴变形,后轴承为游动端,对其内部 8 个节点不限制约束;对于弹簧另一端的 4 个节点(P_5、P_6、P_7、P_8),前后轴承都采取完全约束.

电主轴系统的振动可以看作各阶振型的线性叠加,而主轴系统的动态特性主要取决于低阶振型,所以分析电主轴的振动特性时,通常提取前 5 ~ 10 阶模态参数. 本文在动力学模型的基础上,选用 Block Lanczos 模态提取法,得到了前 5 阶固有频率和振型.

电主轴的频率和转速的关系为

$$\eta = 60\lambda.$$

其中:η 为转速(r/min),λ 为频率(Hz).

电主轴共振时的转速称为临界转速,各阶振型与对应的临界转速如表 1.

表 1 电主轴的前 5 阶固有频率、对应振型和临界转速

Tab.1 The first five natural frequencies, vibration modes and critical speeds of motorized spindle

阶次	频率/Hz	振型	临界转速/(r · min^{-1})
1	0	膨胀、扭转	0
2	794.17	一阶 Z 向弯曲	47 650.20
3	794.17	一阶 Y 向弯曲	47 650.20
4	1 465.00	一阶 Y 向摆动	87 900.00
5	1 465.00	一阶 Z 向摆动	87 900.00

由于没有限制主轴的轴向转动自由度,所以主轴的第 1 阶模态为电主轴的转动,频率为零. 第 2 阶、第 3 阶固有频率相等,为式(4)的一对重根,是电主轴的最低固有频率,其振型都为一阶弯曲. 此时,电主轴的临界转速为 47 650.20 r/min,对于 4、5 阶也如此.

通常电主轴工作时最高转速要小于其最低临界转速的 75%. 本文电主轴的最高转速为 33 000 r/min,<35 737.65 r/min,可以认为电主轴模型是合理的. 在电主轴的设计制造过程中,尺寸参数和材料参数会有一定的变动,而较小的变化也会使电主轴的固有频率发生很大的变化;同时,33 000 r/min 与 35 737.65 r/min 相差不是很大,在实际工作时电主轴发生共振的机率会增加,因此有必要对电主轴的频率可靠度进行计算,并分析出可靠性敏感的参数.

3 电主轴频率可靠度的功能函数的拟合

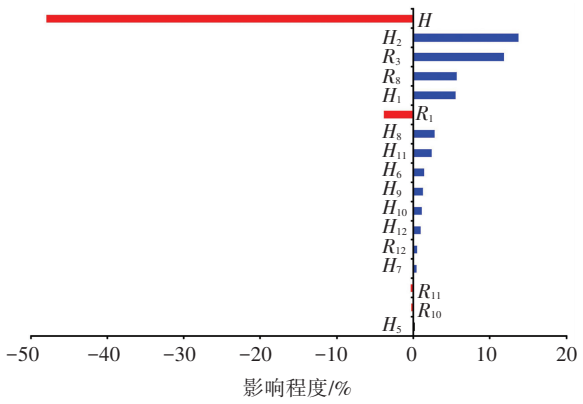
3.1 基于 ISIGHT 随机变量的筛选和样本数据库的构建

电主轴的结构设计尺寸数目较多,而部分尺寸参数的变化对电主轴的频率可靠性影响不明显,所以在计算可靠度时可以忽略这些参数. ISIGHT 软件提供了实验设计(DOE)的优化算法,可以控制多变量参数,对实验过程进行实时监控[11-12]. 利用 ISIGHT 软件集成 ANSYS,选取主要设计参数 H、H_1、H_2、H_5 ~ H_{12} 以及 R_1、R_3、R_8、R_{10} ~ R_{12},采用优化的拉丁方方法进行 DOE 实验设计. 本文中各随机参数服从正态分布,随机变量的标准差和均值的关系为

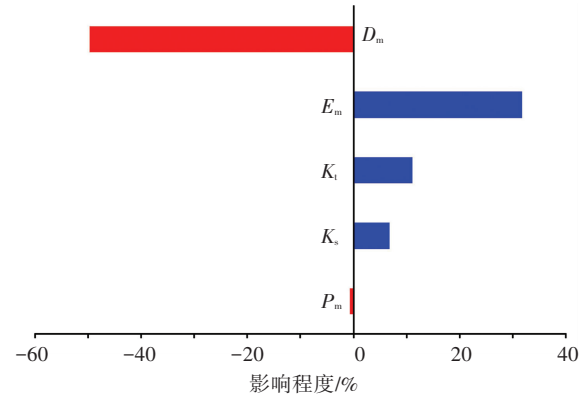
$$\sigma_x = z \cdot \mu_x.$$

式中:σ_x 为标准差,μ_x 为均值,z 为变差系数. 若无试验数据,可根据公差标准确定几何参数的变差系数,一般将公称尺寸的 0.001 5 倍作为设计公差,若公差水平由 3σ 原则确定,则 z 取 0.00 5;对于材料参数,z 取 0.05[13-14]. 以 $\mu_x \pm \sigma_x$ 原则设定各变量的上下限,抽取 300 组样本,分析 Pareto 贡献率图 5(a),

确定影响固有频率的主要尺寸参数有 H、H_2、R_3，其中，H_2 和 R_3 对最低固有频率是正影响，H 对最低固有频率是负影响. 同理，将材料参数：密度 D_m、弹性模量 E_m、泊松比 P_m、前轴承的刚度 K_s 以及后轴承的刚度 K_t 作为随机变量，进行分析，如图 5(b)，可知前 3 位参数为 D_m、E_m、K_t. 然后，再用类似的方法，以 H、H_2、R_3、D_m、E_m、K_t 为随机变量，得到含有 500 组样本的数据库. 应用 BP 神经网络，对 6 个变量与最低固有频率之间的关系进行拟合.



(a) 几何参数对最低阶固有频率的影响程度



(b) 材料参数对最低阶固有频率的影响程度

图 5　Pareto 贡献率图

Fig.5　Pareto plot of the parameters

3.2　基于 BP 神经网络函数的拟合

BP 神经网络输入层参数是上文提到的 6 个变量，输出层参数为电主轴系统最低固有频率. 通常，若隐含层节点数足够多，并且隐含层采用 Sigmoid 函数，一个隐含层就可以使神经网络以任意精度逼近所需函数[15]. 因此本文只采用一个隐含层，BP 神经网络输入层的节点数为 6，输出层节点数为 1. 隐含层节点数的初始值可通过如下经验公式[16]估计：

$$Q = \sqrt{G + L} + s.$$

式中：Q 为隐含层的节点数，G 和 L 分别为输入层与输出层节点数，s 为 1 ~ 10 之间的整数. 以提高训练精度、减小拟合误差、缩短训练时间、避免出现“过拟合”现象为原则，采用试凑法进行多次拟合实验，最终选取 Q = 27.

BP 神经网络的结构见图 6，最低固有频率 Y 与随机变量 $\boldsymbol{X}$ 之间的函数关系可表示为

$$Y = F(\boldsymbol{X}) = \psi\left(b_\theta + \sum_{j=1}^{Q} v_j \varphi\left(b_j + \sum_{i=1}^{G} w_{ij} x_i\right)\right).$$

式中：w_{ij} 为输入层到隐含层的网络连接权值；v_i 为隐含到输出层的网络连接权值；b_j 为隐含层的阈值；b_θ 为输出层的阈值；$\varphi(\cdot)$ 为隐含层的传递函数，本文选用 Sigmoid 函数；$\psi(\cdot)$ 为输出层的传递函数，选用 Purelin 线性函数.

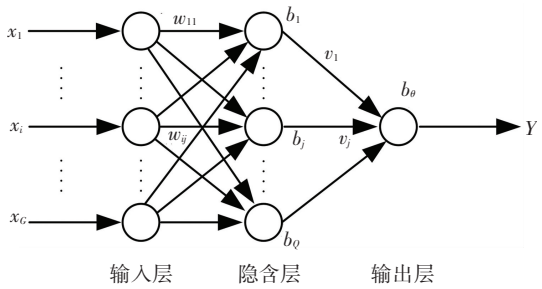


图 6　BP 神经网络结构

Fig.6　Structure of BP networks

将 3.1 节收集到的 500 组数据随机划分成 400 组训练样本和 100 组测试样本，先进行函数拟合，后进行测试. 训练过程曲线如图 7 所示，在第 1 000 次训练后样本的均方误差达到了 $9.999\ 7\times10^{-6}$；从图 8 可以看到，训练后网络实际输出接近期望输出，误差较小，网络拟合效果较理想，训练出的函数精度较高；图 9 反映了测试过程期望输出数据和实际输出数据的对比，由误差图 10 可知，测试数据相对误差也很小. 因此，拟合出来的函数可以用于构建功能函数，进而计算电主轴的可靠度以及可靠性灵敏度.

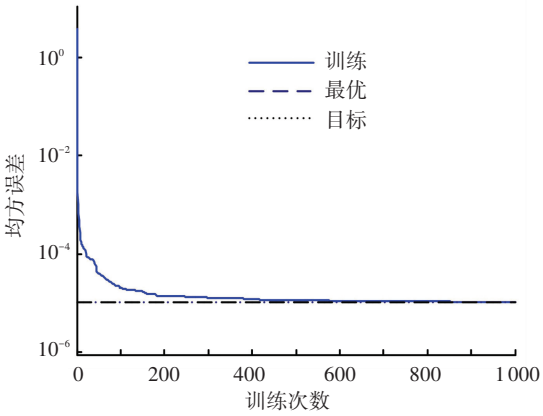


图 7　神经网络训练过程误差变化

Fig.7　Change of error to achieve the target precision value in training phase

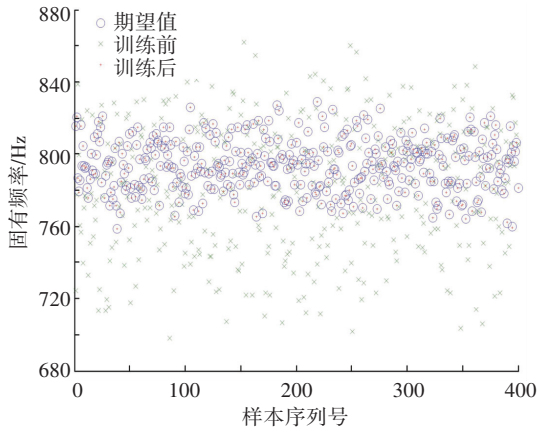


图 8 训练阶段期望值和响应值的对比

Fig.8 Contrast between the expected data and actual output data in training phase

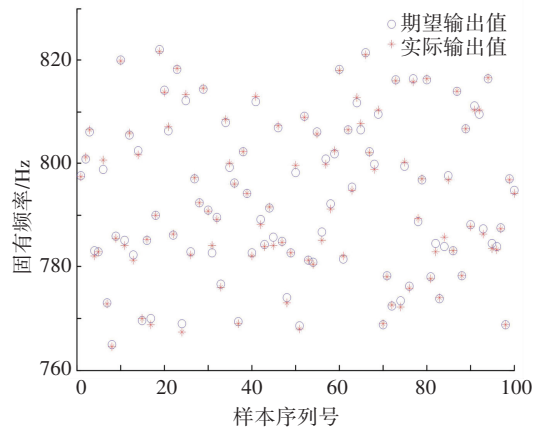


图 9 测试阶段期望输出值和实际输出值的对比

Fig.9 Contrast between the expected data and actual output data in testing phase

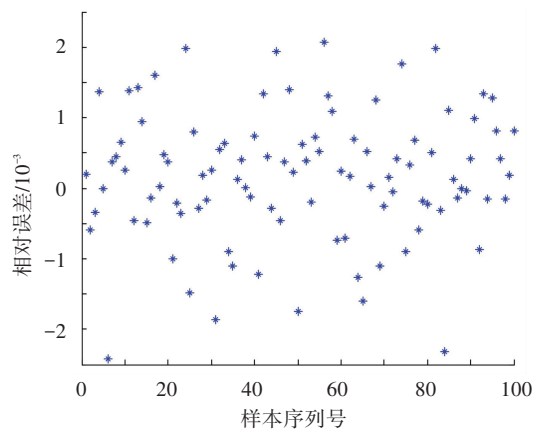


图 10 测试误差的分布

Fig.10 Distribution of the testing errors

4 电主轴频率可靠性灵敏度的分析

4.1 改进的一次二阶矩方法和 Monte-Carlo 方法

设结构的极限状态函数,即功能函数为

$$g(\boldsymbol{X}) = g(x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots x_n).$$

式中:$\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, \cdots, x_n)^{\mathrm{T}}$ 是影响功能的相互独立的基本随机变量,n 为随机变量的数目. 当 $g(\boldsymbol{X}) > 0$ 时,结构可靠;当 $g(\boldsymbol{X}) < 0$,结构失效;当 $g(\boldsymbol{X}) = 0$ 时结构处在极限状态下,且将 $g(\boldsymbol{X}) = 0$ 称为极限状态方程. 通常,功能函数可定义为响应量与阈值的差,即

$$g(\boldsymbol{X}) = r(\boldsymbol{X}) - r^*.$$

式中 $r(\boldsymbol{X})$ 为响应量,用来描述位移、应力、振动特征量等系统行为特征. 因电主轴的最高转速为 33 000 r/min,对应频率为 550 Hz,即阈值 $r^* = 550$,则功能函数可以表示成

$$g(\boldsymbol{X}) = r(\boldsymbol{X}) - 550 = 0.75F(\boldsymbol{X}) - 550. \quad (5)$$

此函数为非线性函数,可靠性指标 β 可以表示为

$$\beta = \mu_{g(X)}/\sigma_{g(X)}.$$

其中 $\mu_{g(X)}$、$\sigma_{g(X)}$ 分别为函数(5)的均值和标准差.

若随机变量服从正态分布,可靠度 R 可表示为

$$R = P_{\mathrm{r}} = 1 - P_{\mathrm{f}} = \Phi(\beta).$$

式中:P_{r} 为可靠概率,P_{f} 为失效概率,$\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数.

改进的一次二阶矩方法(AFOSM)[17] 与一次二阶矩方法(FOSM 法)相似,都是将功能函数线性展开求可靠度. 当功能函数非线性程度较高时,FOSM 法得到的解精度不高,有时甚至是错误的. 而 AFOSM 法将失效域中最可能失效点(设计点)作为展开点,又能考虑随机变量分布的实际情况,适合求解非线性功能函数问题.

若设计点为 $\boldsymbol{X}^* = (x_1^*, x_2^*, \cdots, x_n^*)^{\mathrm{T}}$,将功能函数以 Taylor 公式展开后,可得

$$\mu_{g(X)} \approx g(\boldsymbol{X}^*) + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial g(\boldsymbol{X}^*)}{\partial x_i}(\mu_{x_i} - x_i^*),$$

$$\sigma_{g(X)}^2 \approx \sum_{i=1}^{n} [\partial g(\boldsymbol{X}^*)/\partial x_i]^2 \sigma_{x_i}^2,$$

$$\beta = \frac{g(\boldsymbol{X}^*) + \sum_{i=1}^{n} \dfrac{\partial g(\boldsymbol{X}^*)}{\partial x_i}(\mu_{x_i} - x_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left[\dfrac{\partial g(\boldsymbol{X}^*)}{\partial x_i}\right]^2 \sigma_{x_i}^2}}.$$

可靠度 R_{AF} 对相互独立随机变量的可靠性灵敏度表达式分别为

$$\frac{\partial R_{\mathrm{AF}}}{\partial \mu_{x_i}} = -\frac{\partial P_{\mathrm{f}}}{\partial \beta_{\mathrm{AF}}}\frac{\partial \beta_{\mathrm{AF}}}{\partial \mu_{x_i}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{g(X)}} \cdot \exp[-0.5(\mu_{g(X)}/\sigma_{g(X)})^2] \cdot \partial g(\boldsymbol{X}^*)/\partial x_i,$$

$$\frac{\partial R_{\mathrm{AF}}}{\partial \sigma_{x_i}} = -\frac{\partial P_{\mathrm{f}}}{\partial \beta_{\mathrm{AF}}}\frac{\partial \beta_{\mathrm{AF}}}{\partial \sigma_{x_i}} = -\frac{\mu_{g(X)}\sigma_{x_i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{g(X)}^3} \cdot \exp[-0.5(\mu_{g(X)}/\sigma_{g(X)})^2] \cdot (\partial g(\boldsymbol{X}^*)/\partial x_i)^2.$$

对应的量纲一的灵敏度可由式(6)、(7)计算:

$$S_{\mu_{x_i}} = \partial R_{\mathrm{AF}}/\partial \mu_{x_i} \cdot (\sigma_{x_i}/R_{\mathrm{AF}}), \quad (6)$$

$$S_{\sigma_{x_i}} = \partial R_{\mathrm{AF}}/\partial \sigma_{x_i} \cdot (\sigma_{x_i}/R_{\mathrm{AF}}). \quad (7)$$

采用 Monte-Carlo 计算结构可靠度的基本思想是：建立随机变量 $\boldsymbol{X}$ 的联合概率密度分布函数 $f_{\tilde{X}}(\boldsymbol{X}) = f_{\tilde{X}}(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，之后抽取大量随机样本 $\boldsymbol{X}_\tau (\tau = 1, 2, \cdots, N)$，分别计算功能函数值 $g(\boldsymbol{X}_\tau)$，然后统计 $g(\boldsymbol{X}_\tau) \leqslant 0$ 的样本数 N_f，则失效概率的估计值为

$$\hat{P}_f = N_f / N.$$

设失效域 $T = \{\boldsymbol{X} \mid g(\boldsymbol{X}) \leqslant 0\}$，失效域指示函数为 $I_T(\boldsymbol{X})$，当 $\boldsymbol{X} \in T$ 时，$I_T(\boldsymbol{X}) = 1$；反之，$I_T(\boldsymbol{X}) = 0$. $E[\cdot]$ 为数学期望函数，R_{MC} 为可靠度. 对于相互独立的正态分布随机变量，均值和标准差的可靠性灵敏度表示成

$$\frac{\partial R_{MC}}{\partial \mu_{x_i}} = -E\left[\frac{I_T(\boldsymbol{X})}{f_{\tilde{X}}(\boldsymbol{X})} \frac{\partial f_{\tilde{X}}(\boldsymbol{X})}{\partial \mu_{x_i}}\right] = \frac{1}{N} \sum_{\tau=1}^{N} I_T(\boldsymbol{X}_\tau)(\mu_{x_i} - x_i)/\sigma_{x_i}^2,$$

$$\frac{\partial R_{MC}}{\partial \sigma_{x_i}} = -E\left[\frac{I_T(\boldsymbol{X})}{f_{\tilde{X}}(\boldsymbol{X})} \frac{\partial f_{\tilde{X}}(\boldsymbol{X})}{\partial \sigma_{x_i}}\right] = \frac{1}{N} \sum_{\tau=1}^{N} I_T(\boldsymbol{X}_\tau) \frac{1}{\sigma_{x_i}} [1 - ((x_i - \mu_{x_i})/\sigma_{x_i})^2].$$

对应的量纲一的灵敏度可由式(8)、(9)计算：

$$S_{\mu_{x_i}} = \partial R_{MC} / \partial \mu_{x_i} \cdot (\sigma_{x_i} / R_{MC}), \tag{8}$$

$$S_{\sigma_{x_i}} = \partial R_{MC} / \partial \sigma_{x_i} \cdot (\sigma_{x_i} / R_{MC}). \tag{9}$$

4.2　频率可靠性灵敏度的分析

本文随机变量 $\boldsymbol{X} = [x_1, \cdots, x_i, \cdots, x_6] = [D_m, E_m, H, H_2, K_t, R_3]$. 在 MATLAB 中，分别采用两种方法对电主轴频率可靠度及可靠性灵敏度进行计算，结果见表 2 和图 11～14.

表 2　可靠度计算结果

Tab.2　Results of reliability calculation

方法	β	R
改进的一次二阶矩	2.585 5	0.995 1
Monte-Carlo	2.604 5	0.993 6

注：本文中 Monte-Carlo 方法抽样 10^6 次.

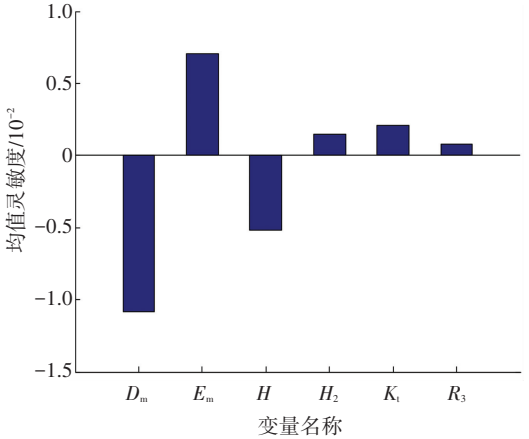


图 11　采用 AFOSM 方法的量纲一的均值灵敏度

Fig.11　Dimensionless sensitivity of mean by AFOSM

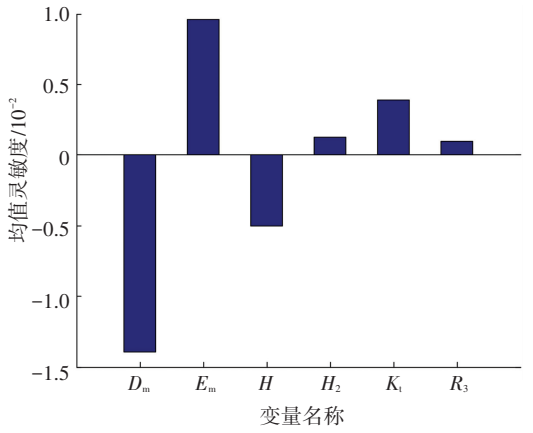


图 12　采用 Monte-Carlo 方法的量纲一的均值灵敏度

Fig.12　Dimensionless sensitivity of mean by MCS

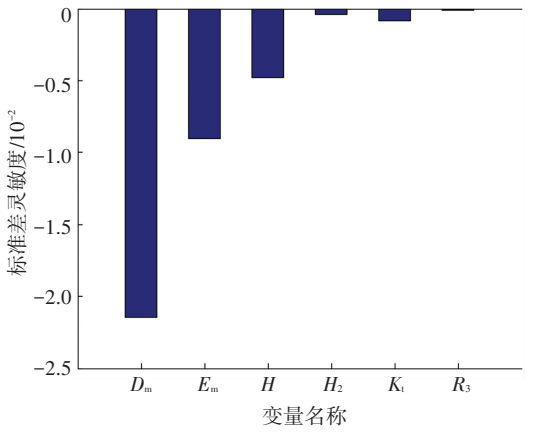


图 13　采用 AFOSM 方法的量纲一的标准差灵敏度

Fig.13　Dimensionless sensitivity of standard deviation by AFOSM

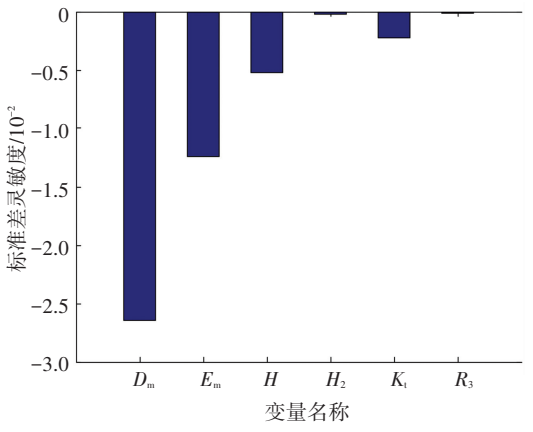


图 14　采用 Monte-Carlo 方法的量纲一的标准差灵敏度

Fig.14　Dimensionless sensitivity of standard deviation by MCS

从表 2 中的可靠度指标 β 值可以看出，改进一次二阶矩方法计算出的可靠度和 Monte-Carlo 方法计算的结果很接近，说明改进一次二阶矩方法计算的结果较准确，且系统是可靠的.

由图 11、图 13 可知，D_m、E_m、H 的均值和标准差对可靠度影响较显著；E_m、H_2、K_t、R_3 均值的增加和 D_m、H 均值的减少均会使电主轴系统趋于可靠；6 个

变量参数标准差的增加都会使电主轴系统趋于不可靠;在所有变量参数中,D_m 的均值和标准差影响最大,E_m 次之,R_3 的影响最小.

对比两种方法计算的灵敏度结果可知,相同参数对可靠度的影响程度和影响性质基本一致. 因此,由改进一次二阶矩方法计算的可靠性灵敏度结果正确,同时再次验证了神经网络拟合的函数较合理.

在电主轴设计制造过程中要严格控制可靠度敏感的参数 D_m、E_m,保证电主轴总长度 的加工精度;可适当调整相应值,进行电主轴的参数优化,以改善电主轴的性能.

5 结 论

1)本文基于有限元法对电主轴参数化建模后进行模态分析,由结果可知,电主轴工作时最高转速与其最低临界转速的75%相差不大. 当电主轴的几何参数和材料参数变化时,电主轴共振的可能性增加,因而对影响电主轴共振特性的参数进行了可靠性分析.

2)将 ISIGHT 软件和 ANSYS 软件集成,采用优化的拉丁方方法进行实验设计,建立了电主轴最低固有频率与系统随机变量的数据库. 采用泛化能力较好的 BP 神经网络,拟合了对应的函数关系,并以此构建出了电主轴频率的功能函数.

3)采用改进一次二阶矩方法计算了电主轴频率可靠度和可靠性灵敏度,并使用 Monte-Carlo 方法验证了计算结果的正确性. 因 Monte-Carlo 方法需要在样本量非常大时才能得到精确解,不仅计算量大,而且非常耗时; 而改进一次二阶矩方法避免了其局限性,提高了分析效率.

4)根据可靠性灵敏度的计算结果,分析了各随机变量的均值与标准差对电主轴系统频率可靠度的影响情况,对电主轴优化设计和改善电主轴性能具有一定的指导意义.

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. DOI:10.1016/j.cirp.2010.05.002.

[2] LIU D, ZHANG H, TAO Z, et al. Finite element analysis of high-speed motorized spindle based on ANSYS[J]. Open Mechanical Engineering Journal, 2011, 5(1): 1-10. DOI: 10.2174/1874155X01105010001.

[3] MAEDA O, CAO Y, ALTINTAS Y. Expert spindle design system[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(4): 537-548. DOI:10.1016/j.ij machtools.2004.08.021.

[4] 张义民. 机械振动学漫谈[M]. 北京:科学出版社,2010: 57-67.

[5] 田华. 数控机床高速电主轴结构设计及性能分析[D]. 成都:四川大学, 2006. DOI: 10.7666/d.y993861.
TIAN Hua. The construction design and general performance analysis of high-speed motorized spindle which used in NC machine[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. DOI: 10.7666/d.y993861.

[6] 张德龙. 基于点估计的电主轴可靠性灵敏度分析和可靠性稳健设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
ZHANG Delong. Reliability sensitivity analysis and reliability robust design of electric spindle based on point estimation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.

[7] 何雪浤, 蒋彦收, 朱孟兵. 基于响应面法的高速电主轴刚度可靠性分析[C]//2011 年全国机械行业可靠性技术学术交流会暨第四届可靠性工程分会第三次全体委员大会论文集. 大同: 中国机械工程学, 2011.

[8] 蒋彦收. 高速电主轴可靠性分析与研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011. DOI: 10.7666/d.J0124055.
JIANG Yanshou. Research and analysis of reliability for high-speed motorized spindle[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. DOI: 10.7666/d.J0124055.

[9] 张伯霖, 张志润, 肖曙红. 超高速加工与机床的零传动[J]. 中国机械工程, 1996, 7(5): 37-41.
ZHANG Bolin, ZHANG Zhirun, XIAO Shuhong. Ultra-high speed machining and zero transmission of machine tools. [J]. China Mechanical Engineering, 1996, 7(5): 37-41.

[10] 戴曙. 机床滚动轴承应用手册[M].北京:机械工业出版社, 1993: 150-219.

[11] LIAO H, FAN J, WANG R, et al. Multidisciplinary optimization technology research on typical turbine assembly structure[C]// ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Montreal: American Society of Mechanical Engineers, 2014: V001T01A012. DOI:10.1115/IMECE2014-37473.

[12] 陈辰, 段富海. 基于 ANSYS 和 ISIGHT 的 EHA 作动筒结构分析与优化[J]. 机电工程技术, 2014 (4): 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2014.04.022.
CHEN Chen, DUAN Fuhai. Structural analysis and optimization of the action cylinder of EHA based on ANSYS and ISIGHT [J]. Mechanical & Electrical Engineering technology, 2014(4): 80-84. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2014.04.022.

[13] 张义民. 汽车零部件可靠性设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000: 138-141.

[14] 王洪建. 基于 NSGA-Ⅱ的变速器齿轮系多目标可靠性优化设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010. DOI: 10.7666/d.y1680971.
WANG Hongjian. Multi-objective reliability optimal design of transmission gear train based on NSGA-Ⅱ[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. DOI: 10.7666/d.y1680971.

[15] CYBENKO G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function[J]. Mathematics of control, signals and systems, 1989, 2(4): 303-314. DOI: 10.1007/BF02551274.

[16] 傅荟璇, 赵红. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 83-97.

[17] 赵国藩,金伟良,贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000:21-52.

(编辑 杨 波)