

两种工况下电主轴热误差的组合预测模型

雷春丽^{1,2}, 芮执元^{1,2}, 刘军^{1,2}, 冯瑞成^{1,2}

(1. 兰州理工大学数字制造技术与应用省部共建教育部重点实验室, 730050, 兰州;

2. 兰州理工大学机电工程学院, 730050, 兰州)

摘要: 为了有效地提高数控机床电主轴热变形模型的预测精度,在 2 种典型工况下,根据电主轴结构热变形的产生机理,提出了一种基于模糊逻辑的组合预测模型. 该模型综合了由自回归分析理论和灰色系统预测理论所建立的热误差模型,采用模糊逻辑选取权值,使各单项预测模型能够扬长避短,从而增强了组合预测模型的泛化能力. 通过对电主轴热变形工况下的实验结果与计算结果的比较表明,在单项预测模型中的工况 1 下,灰色系统预测模型的相对误差较小(6.9%),在工况 2 下,自回归预测模型的相对误差较小(12.1%),而组合预测模型在 2 种工况下的相对误差分别为 2.2%和 8.9%. 因此,组合预测模型具有较高的精度和较强的鲁棒性.

关键词: 热误差;组合预测模型;电主轴;鲁棒性

中图分类号: TG659 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0050-05

Thermal Error Combined Forecasting Model on Motorized Spindle under Two Operating Conditions

LEI Chunli^{1,2}, RUI Zhiyuan^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, FENG Ruicheng^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology and Application, Lanzhou University of

Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Mechanical & Electronic Engineering,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: According to the generation mechanism of motorized spindle thermal deformation, the combined forecasting model based on the fuzzy logic is proposed under two typical working conditions. The model can be expected to improve the forecasting accuracy by autoregressive analysis and grey system theory combined with different weight. The combined model synthetically employs the above methods and makes the best use of each of them. The experimental results show that under the two operating conditions, the smaller relative error in single forecasting model is 6.9% and 12.1% respectively, however, the relative prediction error of combined model is respectively 2.2% and 8.9%, which demonstrates the higher precision and stronger robust of the intelligence combination forecasting model.

Keywords: thermal error; combined forecasting model; motorized spindle; robustness

在精密和超精密加工过程中,机床各零部件由于温度场分布不均衡会发生不同程度的热变形. 大量研究表明,热误差占影响被加工零件精度总误差的 70%,其中最大热误差源为电主轴单元^[1]. 国内

外许多学者研究了减小热误差的方法,一致认为无论是误差防止法还是误差补偿法,均需要建立精度高且鲁棒性强的热误差预测模型,但误差建模是误差控制中最复杂和困难的工作,无论是通过经典物

理学原理建立解析方程,还是运用有限元等数值计算方法进行较为精确的热变形机理分析,在实现上都较为困难.因此,通过各种数学理论建立经验模型,并通过实验验证的方法颇受研究者的青睐.常用的单项建模方法有:多元线性回归法^[2]、多项式回归法^[3-4]和神经网络法^[5]等.单项建模方法虽然在一定程度上能精确地预测热变形的发展趋势,但毕竟涉及到的信息量有限,因此预测的精确度还有待提高.为了更全面、更系统地研究热变形机理,从不同角度、运用不同的理论分析热误差已成必然.有文献表明,将不同的建模方法加以组合,考虑各个方法的特点,会得到更高的预测精度和鲁棒性^[6-11].然而,文献中的混合模型大多数只是将不同建模方法简单的叠加,并未在混合模型中真正地发挥各自的优势.对于热误差,现有文献建立的模型均是仅对一种加工情况进行预测或补偿,并未同时考虑2种工况下电主轴热误差的不同变化趋势,故泛化能力较差.根据不同工况的电主轴热误差的变化趋势,结合单项预测方法的优点,本文提出了分别采用自回归模型(AR)和灰色系统模型(GM)来预测热变形,然后采用模糊逻辑推理的方法,对单项模型的预测值进行权值分配来建立组合预测模型,从而使预测结果能更好地与实际工况相吻合.

1 电主轴热误差预测建模方法

1.1 自回归建模方法

将系统观测所得并按照时间顺序排列的数据称为时间序列数据,记为 $\{x_t, t=1, 2, \dots, n\}$, n 为数据个数.假设一个变量在某时刻 t 的取值(记为 x_t)仅与它在 t 以前的取值 $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}$ 具有线性关系,而在 $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-p}$ 的已知条件下, x_t 与 x_{t-j} ($j=p+1, p+2, \dots, t-1$)无关,自回归分析模型可以表示为

$$x_t = \sum_{k=1}^p a_k x_{t-k} + e_t \quad (1)$$

式中: a_k 为自回归系数; p 为模型的自回归阶数; e_t 为零均值的白噪声序列.

建立自回归分析模型时,首先要将原始序列进行平稳化和零均值化处理,然后进行模型识别、模型定阶和参数估计,通过模型检验后,最后得出预测模型.

1.2 灰色系统建模方法

灰色预测理论具有建模数据量小、短期预测中优势突出等特点^[12],因此本文采用此方法来预测电

主轴的短期热变形.设有原始数据序列 $\{x_i^{(0)}\} = \{x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}\}$,为了弱化随机干扰的影响,通过累加生成运算(AGO)得到新序列

$$x_k^{(1)} = \sum_{j=1}^k x_j^{(0)}, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

则灰色预测模型GM(1,1)的白化方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (3)$$

式中: a 为发展灰数; u 为灰色作用量.令原始数据序列的子序列为

$$Y = [x_2^{(0)} \ x_3^{(0)} \ \dots \ x_n^{(0)}]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x_1^{(1)} + x_2^{(1)}) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x_2^{(1)} + x_3^{(1)}) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x_{n-1}^{(1)} + x_n^{(1)}) & 1 \end{bmatrix}$$

记 a, u 为待估参数向量 A 的元素,即 $A=[a \ u]^T$,利用最小二乘法求解可得

$$A = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (4)$$

将 A 代入时间响应函数中,得到

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = \left(x_1^{(0)} - \frac{u}{a}\right)e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (5)$$

式(5)亦称为灰色模型,由它做一次累减运算,可得还原模型

$$\hat{x}_{k+1}^{(0)} = \hat{x}_{k+1}^{(1)} - \hat{x}_k^{(1)} = (1 - e^a) \left(x_1^{(0)} - \frac{u}{a}\right)e^{-ak} \quad (6)$$

1.3 组合建模方法

组合建模方法是指在多个单项预测模型的基础上,根据实际情况,给各模型预测值分配不同的权值系数,以得到组合预测模型.组合预测法综合利用各种单项预测方法提供的信息,使各单项预测模型能够扬长避短,因此组合预测模型比单项预测模型有更高的预测精度.

设原始采样数据序列为 $\{x(t), t=1, 2, \dots, n\}$,运用 m 种方法预测未来时段 $n+1, \dots, N$ 的值,假定第 k 种方法对未来时段的预测值为 $\hat{x}_k(t)$.基于 l 种不同理论的组合预测模型,先分别采用 l 种预测理论对预测数据序列进行建模,再对未来时段进行预测,得到的预测值分别为 $\hat{x}_1(t), \hat{x}_2(t), \dots, \hat{x}_l(t)$.最后,组合预测模型根据具体情况给各预测值分配权值,其数学表达式为

$$\hat{x}_k(t) = \sum_{i=1}^l w_i \hat{x}_i(t) \quad (7)$$

式中 $w \in [0, 1]$, 且 $\sum_{i=1}^l w_i = 1$. 针对不同工况, 各单项预测模型的权值不应是简单的算术平均值, 而应根据工况来实时调整, 并可以取 $[0, 1]$ 之间的任意值.

本文的组合预测模型是基于自回归分析理论和灰色系统理论, 得到的预测值分别为 $\hat{x}_{AR}(t)$ 和 $\hat{x}_{GM}(t)$, 结合各单项预测模型的特点和优势, 组合模型给各单项预测值分配不同的权值. 组合模型的数学表达式为

$$\hat{x}_k(t) = w \hat{x}_{AR}(t) + (1 - w) \hat{x}_{GM}(t) \quad (8)$$

电主轴热变形系统具有非线性、时滞等特点, 而模糊逻辑不依赖于被控对象的数学模型, 能克服不确定性、不精确性、非线性、时变和时滞等因素的影响, 因此本文采用模糊逻辑方法来选取权值.

2 电主轴热误差测量

在电主轴实验中, 主轴轴向的热伸长比径向热变形的变化幅度大, 因此本文仅研究主轴的轴向热变形. 径向热误差分析机理与轴向相同.

本文主要分析实际运行中的 2 种典型工况, 具体运行如下: ①连续式运转时, 速度为 3 000 r/min, 持续 4 h 运转; ②递进式运转时, 速度从 0 r/min 开始, 以步长为 1 000 r/min 递增运转至 3 000 r/min, 然后从 3 000 r/min 开始, 以步长为 1 000 r/min 递减运转至 0 r/min, 每间隔 10 min 变速一次.

电主轴由于高速切削和散热条件差, 使得主轴整体温度升高, 产生热变形, 最终反映到刀具与工件间的相对位置发生改变. 此外, 文献[13]指出, 基于位移的热误差模型比基于温度的模型有更好的精度和鲁棒性, 因此本文预测模型中以热变形为变量, 实验主要测量主轴的轴向热位移.

电主轴热变形测量是在自主开发的电主轴实验平台上进行的. 实验测试系统中采用 LMS SCADAS 数据采集系统和 TESTLAB 软件分析系统, 采用非接触式电涡流位移传感器 EddyNCDT 3010-M 测量主轴刀具端的轴向位移, 标定后的测量精度等级为 I 级. 电主轴热变形实验装置布局示意图如图 1 所示.

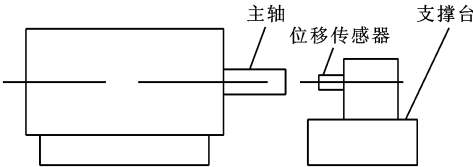
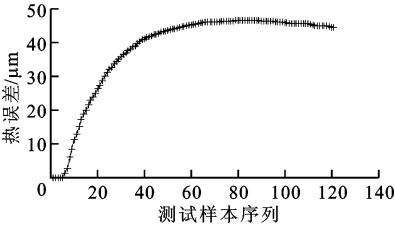


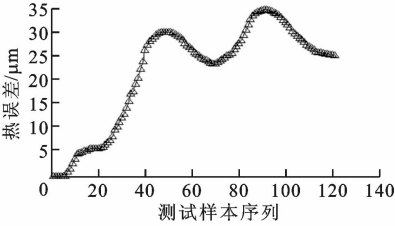
图 1 电主轴热变形测量示意图

3 组合模型预测分析

本文所述的 2 种单项预测方法在电主轴热变形模型预测中各有优势: 灰色预测模型包括了一般线性回归和指数函数回归的内容, 对系统的趋势性成分反映比较灵敏; 自回归动态模型能充分地反映动态加工过程中的随机性成分. 组合预测模型将二者的优点结合起来, 并通过模糊逻辑法分配权值, 使组合预测值与实际工况能很好地吻合. 电主轴热误差测量实验中每 2 min 采集一次样本, 2 种工况分别采集 121 个样本, 其中前 90 个用来训练模型, 后 31 个样本用于模型预测. 热误差变化趋势如图 2 所示.



(a) 工况 1



(a) 工况 2

图 2 不同工况下的主轴热误差变化图

首先, 根据前述各预测理论分别用自回归分析建模法和灰色系统 GM(1, 1) 建模法对电主轴的热误差序列建模; 然后利用训练好的模型预报未来的 31 个时刻值; 最后采用组合预测模型对热误差序列进行建模和预测, 其中加权系数由模糊逻辑技术获得. 模糊逻辑推理的步骤为: 精确输入量的模糊化、模糊规则和模糊推理, 输出量的非模糊化^[14-15].

本文将单项模型的预测值 $\hat{x}_{AR}$ 和 $\hat{x}_{GM}$ 作为模糊逻辑函数的输入参数 (x_1, x_2), 分配权值 w 为输出, 输入输出的隶属度函数均采用三角形隶属度函数. 根据专家的理论知识与总结的实践经验建立了控制规则, 模糊决策采用 mamdani (min-max) 决策法. 最后, 采用重心法将输出量非模糊化. 模糊逻辑函数的输入、输出隶属度函数分别如图 3~图 5 所示. 其中, PS、PB、S、B、M 分别代表正小、正大、小、大、中. 模糊控制规则制定如下:

如果 $x_1、x_2$ 为 PS,则 w 为 B;
如果 x_1 为 PS, x_2 为 PB,则 w 为 M;
如果 x_1 为 PB, x_2 为 PS,则 w 为 M;
如果 $x_1、x_2$ 为 PB,则 w 为 S.

以上设计是一个模糊推理系统,通过该模糊推理系统可以得到需要计算的组合预测模型中的权值.不同工况下各模型的预测值与实测值的拟合曲线如图 6 所示.

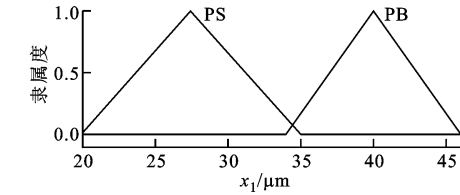


图 3 输入参数 x_1 的隶属度函数

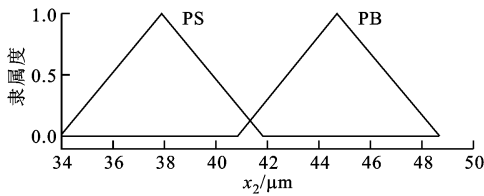


图 4 输入参数 x_2 的隶属度函数

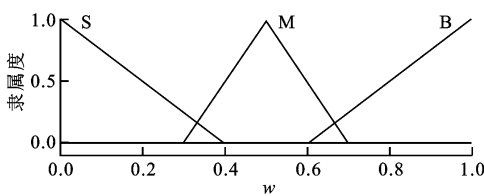


图 5 分配权值的隶属度函数

由图 6 可见,在不同工况下,与单独使用自回归分析方法和灰色系统理论模型所得的预测值相比,组合预测模型的预测值与实测值拟合得更好.从图 7 中可看出,工况 1 中自回归分析和灰色系统理论模型的预测误差分别被控制在 $8.095\ 9\ \mu\text{m}$ 和 $|-3.075\ 3|\ \mu\text{m}$ 以内,组合预测模型的预测误差被控制在 $|-0.983\ 5|\ \mu\text{m}$ 以内.在工况 2 中,自回归分析和灰色系统理论模型的预测误差分别被控制在 $3.853\ 9\ \mu\text{m}$ 和 $|-11.4\ 783|\ \mu\text{m}$ 以内,组合预测模型的预测误差控制在 $2.960\ 7\ \mu\text{m}$ 以内.同时,从图 7 中还可看出,对于不同工况,组合预测模型均可得到较高的预测精度,这是因为通过模糊逻辑技术强化了各单项预测模型的优势,同时弱化了它们的不足之处.将不同预测模型的预测信息加以合理组合,从而有效地提高了组合预测模型的预测精度.

在 2 种工况下,基于模糊逻辑的组合预测模型

和基于算术平均法的组合预测模型的比较如图 8 所示.由图中可看出:在工况 1 中,2 种组合模型的最大预测误差分别为 $0.983\ 5\ \mu\text{m}$ 和 $2.877\ 7\ \mu\text{m}$;在工况 2 中,2 种组合模型的最大预测误差分别为 $2.960\ 7\ \mu\text{m}$

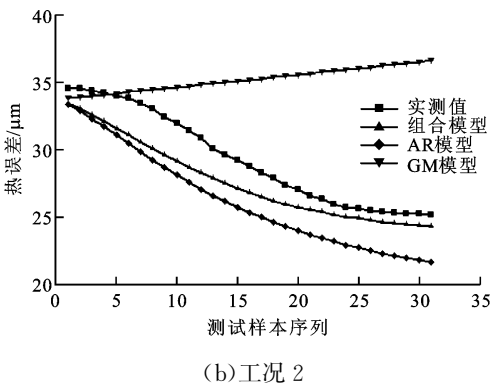
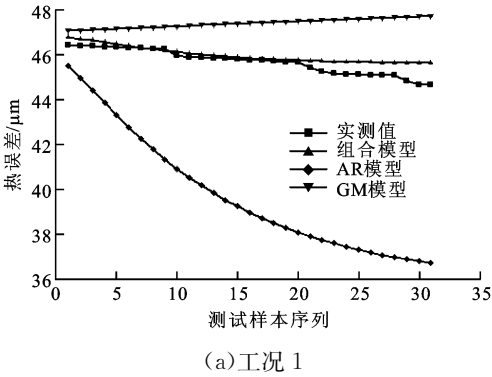


图 6 热误差模型的预测与实测曲线的比较

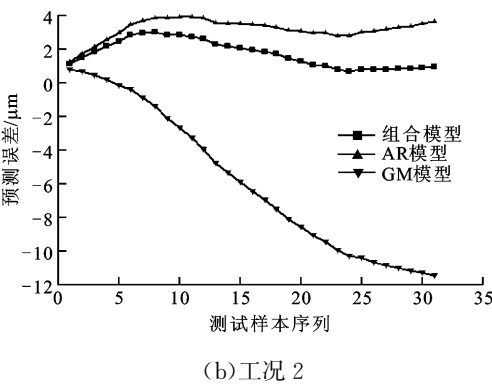
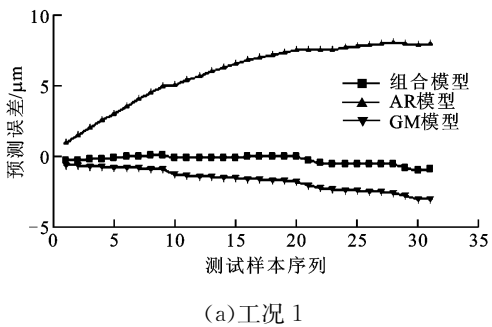


图 7 3 种模型的预测误差曲线的比较

和 $-3.9518\ \mu\text{m}$,此结果表明,不同工况下,基于模糊逻辑方法的组合预测模型比基于算术平均法的组合模型预测精度更高,并且稳健性更强。

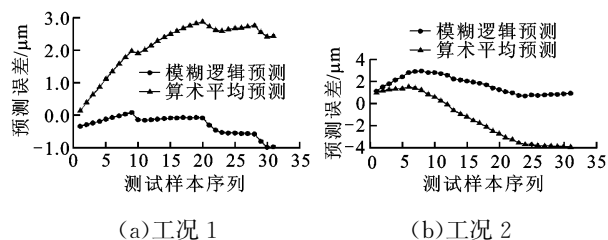


图8 2种组合预测模型的预测误差曲线的比较

4 结 论

为了减少电主轴的热误差,必须建立高精度和强鲁棒性的热误差预测模型.本文提出了一种智能组合预测模型,该模型中包括具有较强趋势性预测的灰色系统理论和具有较强随机性预测的自回归理论,并通过模糊逻辑来自动调节不同预测值的权值,使组合模型在不同工况下的预测值都更接近于实际值.本文通过对连续式运转和递进式运转2种典型工况的预测和分析,表明本文的基于模糊逻辑组合预测模型的精度较高,泛化能力较强,从而为电主轴、数控机床应用于各种不同工况的热误差预测和误差控制提供了一条新思路。

参考文献:

- [1] BRYAN J B. International status of thermal error research [J]. Ann CIRP, 1990,39(2): 645-656.
- [2] JIE Z. Robust thermal error modeling and compensation for CNC machine tools[D]. America, Michigan, USA: The University of Michigan, 2008.
- [3] CHEN J S, YUAN J X, NI J, et al. Real-time compensation for time-variant volumetric error on a machining center [J]. Journal of Engineering for Industry, 1993, 115(4): 472-479.
- [4] DONMEZ M A, BLOMQUIST D S, HOCKEN R J, et al. A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation [J]. Precision Engineering, 1986,8(4): 187-196.
- [5] LEI Chunli, RUI Zhiyuan. Thermal error modeling and compensating of motorized spindle based on improved neural network [J]. Advanced Materials Research, 2010, 129/130/131: 556-560.
- [6] AGALHAES M H, BALLINI R, MOLCK P, et al. Combining forecasts for nature streamflow prediction [C]// 2004 Annual Conference and Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004:390-394.
- [7] CAGDAS H A, EROL E, UFULK Y. Forecast combination by using artificial neural networks [J]. Neural Processing Letters, 2010,32(3):269-276.
- [8] 谈小龙,徐卫亚,刘大文,等.高边坡变形的组合预测模型及其应用 [J].水利学报,2010,41(3):294-299. TAN Xiaolong, XU Weiya, LIU Dawen, et al. Hybrid prediction model for high slope displacement and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(3):294-299.
- [9] 王维强,牛振东,曹玉娟,等.基于 ARMA-TS-GARCH 有限混合模型的交通数据分析 [J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(5):1860-1864. WANG Weiqiang, NIU Zhendong, CAO Yujuan, et al. Analysis of traffic data based on ARMA-TS-GARCH finite mixture model [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(5):1860-1864.
- [10] 李永祥,杨建国,郭前建,等.数控机床热误差的混合预测模型及应用 [J].上海交通大学学报,2006, 40(12): 2030-2034. LI Yongxiang, YANG Jianguo, GUO Qianjian, et al. The application of hybrid prediction model to thermal error modeling on NC machine tools [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(12): 2030-2034.
- [11] 曾勇红,王锡凡,冯宗建.基于混合自回归滑动平均潜周期模型的短期电价预测 [J].西安交通大学学报,2008, 42(2): 184-188. ZENG Yonghong, WANG Xifan, FENG Zongjian. Short term forecast of electricity price based on mixed autoregressive moving average and hidden periodic model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(2): 184-188.
- [12] 傅立.灰色系统理论及其应用 [M].北京:科学技术文献出版社,1992:1-13.
- [13] CHEN J S, HSU W Y. Characterization and model for the thermal growth of a motorized high speed spindle [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003(43):1163-1170.
- [14] ANTONIO V. Fuzzy logic based set-point weight tuning of PID controllers [J]. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1999,29(6):587-592.
- [15] LEE J H, LEE J H, YSNH S H. Thermal error modeling of a horizontal machining center using fuzzy logic strategy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2001, 3(2):120-127.

(编辑 管咏梅)