

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.01.005

基于灰色系统的小型精密机床热误差模型

徐洋,茅健*

(上海工程技术大学机械工程学院,上海 201620)

摘要:为减少热误差对数控机床加工精度的影响,文章利用灰色系统研究热误差建模。初步分析机床热源后,应用灰色关联度分析结合模糊分类方法优化得到13组关键温度测点,结合小型精密五轴机床处于实际加工状态时的实验数据,应用GM(1,N)灰色结构进行建模。将实际数据与拟合数据进行对比分析,结果表明此灰色系统模型具有计算方法成熟、鲁棒性强的特点,适用于机床热误差研究。

关键词:数控机床;灰色系统;测点优化;热误差建模

中图分类号:TG659 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2016)01-0019-04

Small Precision Machine Tool Thermal Error Model Research Based on Grey System

XU Yang, MAO Jian*

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, 201620, China)

Abstract: In order to reduce the impact of thermal error of CNC machine tools machining precision, the grey system was adopted to study the thermal error modeling. After the preliminary analysis of the heat source to machine tools, gray correlation analysis and fuzzy classification method were applied to obtain the 13 groups critical temperature measuring points, the experimental data was combined with small precision five-axis machines in the actual processing status, GM(1, N) gray structure was used to model. Comparative analysis of actual data and fitting data, it is concluded that the grey system model has the characteristics of mature calculation, robust, suitable for machine tool thermal error, etc.

Key words: CNC machine tools; grey system; optimization of measuring points; thermal error model

近年来,高精密加工零件市场的需求量日益提高,精密及高精密数控机床加工中心的精度要求也逐年增长。在影响机床精度因素中,热误差所占比例随着加工精度的提高,可达到60%~70%^[1],成为影响零件精度的主要误差因素。因此,快速有效地控制热误差是提高机床加工精度的重要方法^[2]。目前,国内外学者对如何控制机床的加工误差作了大量的研究,并提出了许多有效控制机床误差的方法:J. Lee提出将神经网络应用于机床热误差建模中,使得机床误差补偿技术更进一步^[3-4]。Srivastava在五轴加工中心上建立了基于HTM方法的误差模型^[5]。Hong提出了基于系统模型适应方法的热误差模型^[6]。但对于处理复杂

机械零件的加工过程中,机床的温度变量会产生耦合,给热误差分析的精度和鲁棒性带来困难,此外精密机床的热误差变化较为复杂,多数变量具有非线性特征,所需的热误差建模方法要求具有处理非线性数据的能力。

灰色系统模型对于处理热误差建模中普遍存在的不确定性和随机现象具有理论指导意义^[7]。对于解决已有信息和未知信息的建模问题,有着很好的拟合和预测效果,弥补了传统离散模型的不足,并且具有较快的建模和计算速度。本文将对基于灰色系统理论应用于小型精密机床的热误差建模进行分析,并结合实际测量对比拟合结果。

收稿日期:2015-06-09;修回日期:2015-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51175322)。

作者简介:徐洋(1991),女,黑龙江宝清人,硕士研究生,主要研究方向为精密机床加工精度及热误差分析。E-mail:811276496@qq.com

1 基于灰色系统的热误差模型建立

1.1 机床温度测点的优化

机床的热误差研究中,由于温度场分布的复杂性和时变性,关键温度测点的选取是一个难点。为获得准确的温度场需要布置大量温度传感器,这大大增加了工作量及试验成本。此外机床各温度变量之间存在耦合关系,影响了热误差分析中模型鲁棒性。利用灰色理论建立灰色关联模型,分析温度对热误差的影响程度,按照一定的准则对温度变量进行筛选。并结合模糊聚类分析对所选择的温度测点进行相关性的筛选,避免在热误差模型中温度变量产生共线问题,得到最终热误差模型的温度测点。

设 $T_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 为一组原始数据,为避免数据处理时出现温度变化大测点掩盖小测点的情况,本文通过公式(1)进行量纲化数据变换,得到新的数据

$$T'_i = \frac{T_{imax} - T_i}{T_{imax} - T_{imin}} \quad (1)$$

引入时间变量 k , 设有热位移数据 $x_1^{(k)} = \{x_1^{(k)} | k = 1, 2, \dots, m\} = \{x_1^{(1)}, x_1^{(2)}, \dots, x_1^{(m)}\}$ 以及 $N - 1$ 个温度测点数据 $T_i^{(k)} = \{T_i^{(k)} | i = 2, 3, \dots, N; k = 1, 2, \dots, m\}$, 则有

$$\zeta_{1i}(k) = \frac{|x_{1min}^{(k)} - T_{imin}^{(k)}| + \rho |x_{1max}^{(k)} - T_{imax}^{(k)}|}{|x_1^{(k)} - T_i^{(k)}| + \rho |x_{1max}^{(k)} - T_{imax}^{(k)}|} \quad (2)$$

称 $\zeta_{1i}(k)$ 为 k 时刻温度测点数据 $T_i^{(k)}$ 与热位移数据 $x_1^{(k)}$ 的相关系数。式中 $\rho \in [0, +\infty]$ 为分辨系数,一般取 0.5。但实际计算中 $\zeta_{1i}(k)$ 信息过于分散,不便于比较,故把各个时刻的关联系数集中为一个平均值

$$r_{1i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \zeta_{1i}(k), \quad (3)$$

表示热误差数列 $x_1^{(k)}$ 与温度测点数列 $T_i^{(k)}$ 的相关度。

利用模糊聚类分析法获得模糊相似矩阵 $R = (r_{ij})_{(N-1) \times (N-1)}$ 时,采用相关系数法,设 $\{T_2, T_3, \dots, T_N\}$ 为 $N - 1$ 个温度变量集合,且其中第 i 个温度变量的 m 个观测值可表示为 $T_i = \{T_i^{(1)}, T_i^{(2)}, \dots, T_i^{(m)}\}$, 则有

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (T_i^{(k)} - \bar{T}_i)(T_j^{(k)} - \bar{T}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (T_i^{(k)} - \bar{T}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^m (T_j^{(k)} - \bar{T}_j)^2}}; \quad (4)$$

$$\bar{T}_i = \frac{\sum_{k=1}^m T_i^{(k)}}{m}; \quad \bar{T}_j = \frac{\sum_{k=1}^m T_j^{(k)}}{m}.$$

\bar{T}_i, \bar{T}_j 表示第 i, j 个温度变量的平均值。通过灰色关联度 r_{1i} 的大小选取对机床热误差影响较大的温度变量,利用模糊相似矩阵 R 的大小进行温度变量的模糊分类,以达到优化建模所用温度测点的目的。

1.2 灰色系统模型

灰色系统可以在实验数据很少及未知系统概论分布的情况下通过计算得到系统内在规律。在建模过程中,利用关键温度测点数据和热误差数据建立 GM(1, N) 模型^[8]。

设有 N 个数列,令机床热误差值序列为 $x_i^{(0)}, N - 1$ 个关键温度测点序列为 $T_i^{(0)} (i = 2, 3, \dots, N)$, 对 $T_i^{(0)}$ 做累加生成可得

$$T_i^{(1)} = \{T_i^{(0)}(1), \sum_{m=1}^2 T_i^{(0)}(m), \dots, \sum_{m=1}^n T_i^{(0)}(m)\}. \quad (5)$$

由此可以建立 GM(1, N) 模型:

$$x_1^{(0)}(k) + az_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i T_i^{(1)}(k);$$

$$z_1^{(1)}(k) = 0.5x_1^{(1)}(k - 1) + 0.5x_1^{(1)}(k). \quad (6)$$

式中: $k = 1, 2, \dots, N; a$ 为发展系数, b_i 为灰作用量。设 a 和 b_i 构成系数矢量 $A = (a, b_2, b_3, \dots, b_N)^T$, 由 $N - 1$ 项热误差数据构成的矢量 $Y_N = (x_1^{(0)}(2), x_1^{(0)}(3), \dots, x_1^{(0)}(N))^T$ 。则有

$$Y_N = BA. \quad (7)$$

利用两点滑动平均的思想,最终可以得到矩阵

$$B = \begin{bmatrix} -z_1^{(1)}(2) & T_2^{(1)}(2) & \dots & T_N^{(1)}(2) \\ -z_1^{(1)}(3) & T_2^{(1)}(3) & \dots & T_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -z_1^{(1)}(n) & T_2^{(1)}(n) & \dots & T_N^{(1)}(n) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

根据最小二乘法可得到模型系数矢量

$$A = (B^T B)^{-1} B^T Y_N. \quad (9)$$

根据灰色理论 GM(1, N) 的近似时间响应式可表达为:

$$\hat{x}_1^{(1)}(k + 1) = [x_1^{(0)}(1) - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i T_i^{(1)}(k + 1)] e^{-ak} + \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i T_i^{(1)}(k + 1); \quad (10)$$

$$\hat{x}_1^{(0)}(k + 1) = \hat{x}_1^{(1)}(k + 1) - \hat{x}_1^{(1)}(k). \quad (11)$$

式中: e 为自然指数。

由式(9)计算可得到 GM(1, N) 模型系数矢量代入式(10)可计算得出 $\hat{x}_1^{(1)}$ 序列,利用式(11)进行累减还原即可得到机床热误差的预测值。

2 热误差模型的分析应用

灰色系统理论已经被广泛应用于社会、经济、农业、气象和军事等领域,能够解决日常生活中的实际问题。随着信息技术的快速发展,方便快捷的灰色系统软件应用更广泛地推进了灰色系统的发展和升级。本文将灰色系统建模过程应用于小型数控机床热误差中,通过实测数据结合模型分析,得出拟合效果较为理想的热误差模型。

2.1 机床热误差测量

OPS650 高速加工中心是采用固定工作台的龙门式结构的精密机床,机床可配置 T 型工作台加工大型工件(三轴加工),也可配置高精度的 A/C 轴工作台对

中小零件的复杂曲面进行五轴加工,只需 1 天时间就可将机床从三轴加工转为五轴加工^[9],是现代精密加工机床的一个代表。本文在机床热误差测量中应用五轴加工状态,对热误差及温度测点进行测量。结合灰色关联模型和模糊聚类分析法在机床的 13 个关键温度测点^[10]位置布置温度传感器:X,Y,Z 轴螺母 T_1, T_2, T_4 和导轨选取 3 点温度 T_5, T_6, T_9 ,电机温度 T_3 ,主轴前向轴承上 3 点温度 T_8, T_{10}, T_{12} ,后轴承上 2 点温度 T_7, T_{13} ,机床床身温度 T_{11} 。为了尽可能多地获得机床在动态工作中各个温度测点的数值,实验对加工过程进行测量,每分钟进行 1 次采样,总共采集 150 组数据。部分采样点的关键温度输出值如表 1 所示。

表 1 关键温度测点的部分采样

Table 1 Critical temperature measuring point sampling

采样时间/min	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$T_3/^\circ\text{C}$	$T_4/^\circ\text{C}$	$T_5/^\circ\text{C}$	$T_6/^\circ\text{C}$	$T_7/^\circ\text{C}$	$T_8/^\circ\text{C}$	$T_9/^\circ\text{C}$	$T_{10}/^\circ\text{C}$	$T_{11}/^\circ\text{C}$	$T_{12}/^\circ\text{C}$	$T_{13}/^\circ\text{C}$
10	15.20	15.17	19.40	15.19	15.19	15.18	15.67	16.67	15.20	15.87	15.17	15.37	16.37
20	15.46	15.34	21.80	15.43	15.43	15.45	16.70	17.70	15.46	16.90	15.34	16.40	17.40
30	15.76	15.58	24.20	15.64	15.66	15.70	17.54	18.54	15.76	17.74	15.58	17.24	18.24
40	15.88	15.78	25.60	15.88	15.88	15.87	18.61	19.61	15.88	18.81	15.78	18.31	19.31
50	15.98	15.97	26.70	15.99	15.98	15.98	19.67	20.67	15.98	19.87	15.97	19.37	20.37
60	16.16	16.16	27.70	16.13	16.16	16.16	20.42	21.42	16.16	20.62	16.16	20.12	21.12
70	16.32	16.32	28.70	16.30	16.32	16.31	20.75	21.75	16.32	20.95	16.32	20.45	21.45
80	16.44	16.44	29.70	16.42	16.43	16.43	21.02	22.02	16.44	21.22	16.44	20.72	21.72
90	16.51	16.51	30.01	16.51	16.51	16.51	21.38	22.38	16.51	21.58	16.51	21.08	22.08
100	16.59	16.59	30.54	16.59	16.59	16.60	21.78	22.78	16.59	21.98	16.59	21.48	22.48
110	16.67	16.67	30.73	16.67	16.67	16.69	21.84	22.84	16.67	22.04	16.67	21.54	22.54
120	16.77	16.77	30.86	16.77	16.77	16.77	21.98	22.98	16.77	22.18	16.77	21.68	22.68
130	16.84	16.84	30.99	16.84	16.84	16.84	22.13	23.13	16.84	22.33	16.84	21.83	22.83
140	16.92	16.92	31.28	16.92	16.91	16.92	22.23	23.23	16.92	22.43	16.92	21.93	22.93
150	17.00	17.00	31.60	17.00	17.00	17.00	22.30	23.30	17.00	22.50	17.00	22.00	23.00

同时,利用球杆仪 QC20-W 对机床 OPS650 进行热误差测量同样获取 150 组热误差值用于模型建立和比较分析。测量结果如图 1 所示。

2.2 灰色系统模型分析

结合以上所述 150 组数据,进行模型验证,通过公式计算,可以得出:系统发展系数 $a = 0.1707$;驱动项 $b = \{-1.922\ 812, -0.473\ 910, 0.006\ 734, 0.099\ 840, -0.451\ 121, -0.038\ 358, 0.438\ 905, 0.035\ 987, 0.151\ 033, -0.075\ 800, 4.563\ 818, 1.794\ 530, -0.006\ 744\}$,最后代入公式(6)可以得到灰色系统机床热误差拟合模型。应用 MATLAB 软件对原始数据以及灰色系统拟合模型进行对比如图 2 所示。

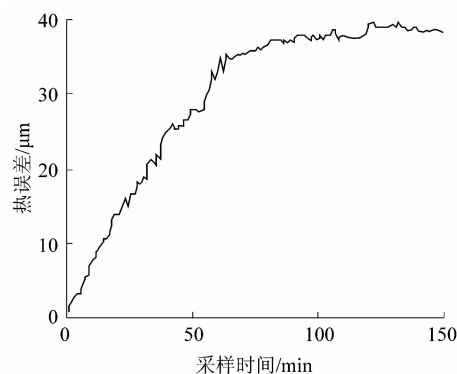


图 1 机床热误差输出示意图

Figure 1 Output schematic diagram of machine tools thermal error

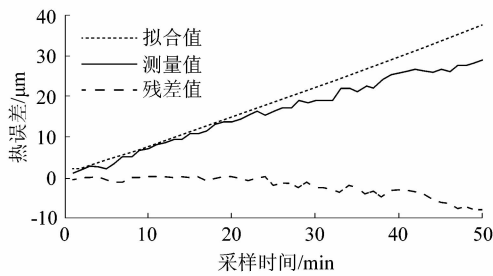


图2 机床热误差模型拟合效果对比图
Figure 2 Contrast figure of machine tools thermal error model fitting effect

图2中取拟合50组采样点为例进行模型拟合分析,不难看出:①模型对于机床热误差在变化区域的拟合效果比较理想,残差值基本围绕零轴分布。②灰色模型从理论上讲是建立一个近似的一阶微分方程^[11],在整体的角度上对模型进行拟合分析。因此,在机床达到热平衡状态区域,模型的拟合效果不尽理想,但残差波动趋于平稳,对于热误差实际测量情况,可以认为机床的热误差测量值和拟合值曲线走势基本一致,从另一个角度验证了灰色系统对于机床热误差建模的研究价值。

3 结语

1) 小型五轴精密机床的热误差变化较为复杂,多数变量具有非线性的特征,本文应用灰色系统处理热误差建模中的数据非线性、不确定系统问题和随机过程现象,实现了“少信息建模”。

2) 在模型数据拟合后观察可知对于上升区域的机床温度场,模型的拟合效果较好;在热平衡状态区域拟合效果并不理想,但波动趋于平稳。因此模型在热稳定区域可以考虑寻找另一优化方法相结合,更为准确地实现热误差拟合,此设想可在下一步研究中进行

(上接第18页)

向移动,使风机送出的气流射程与风机至垂直风道之间的距离相匹配。2套装置结合运用可实现空气流光滑顺畅地流入干燥室垂直风道内,消除气流碰撞和涡流等不利因素,使通过板材堆垛水平气道上下风速趋于均匀。

2) 对常规干燥室和优化后的干燥室送风气流速度进行数值模拟,结果表明优化后的干燥室各水平气道内气流速度趋于均匀,气流速度总均方差 $0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与常规干燥室相比,气流速度均匀性提高了70%。

参考文献:

[1] 张晓明. 木材干燥的节能途径[J]. 林业劳动安全, 2002, 15(2):

深入探索。

3) 该灰色系统模型相对于其他建模方法而言,算法较为成熟,且对原始数据要求比较低,适用于各种复杂加工环境,并能够推广到其他机床的热误差建模中,具有一定的研究价值。

参考文献:

[1] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Error compensation in machine tools—a review Part II: thermal errors [J]. International journal of machine tools & manufacture, 2000, 40(9): 1257–1284.
 [2] WECK M, MCKEOWN P, BONSE R, et al. Reduction and compensation of thermal error in machine tools [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 1995, 44(2): 589–597.
 [3] LEE J, KRAMER B M. Analysis of machine degradation using a neural network based pattern discrimination model [J]. Journal of manufacturing systems, 1993, 38(2): 379–387.
 [4] VELDHUIS S C, ELBESTAWI M A. A strategy for the compensation of errors in five-axis machining [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 1995, 44(1): 373–377.
 [5] SRIVASTAVA A K, VELDHUIS S C, ELBESTAWI M A. Modeling geometric and thermal errors in a five-axis CNC machine tool [J]. International journal of machine tools and manufacture, 1995, 35(9): 1321–1339.
 [6] YANG Hong, NI Jun. Adaptive model estimation of machine-tool thermal errors based on recursive dynamic modeling strategy [J]. International journal of machine tools & manufacture, 2005, 45(1): 1–11.
 [7] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 189–224.
 [8] 张毅, 杨建国. 基于灰色理论预处理的神经网络机床热误差建模[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 134–139.
 [9] 第十一届中国国际模具展模具评定评述专家组. 第十一届中国国际模具技术和设备展览会现代模具制造技术及设备评述[J]. 模具工业, 2006, 32(9): 1–9.
 [10] 杨建国. 数控机床误差综合补偿技术及其应用[D]. 上海: 上海交通大学, 1998: 38–47.
 [11] 闫嘉钰, 杨建国. 灰色 GM(X, N) 模型在数控机床热误差建模中的应用[J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1297–1300.

36–38.

[2] 张璧光, 谢拥群. 木材干燥的国内外现状与发展趋势[J]. 干燥技术与设备, 2006, 4(1): 7–14.
 [3] 季洪伟. 木材干燥不均匀的设备原因[J]. 木材加工机械, 2012(2): 50–51.
 [4] 艾沐野, 战剑锋, 曹军, 等. 目前我国木材干燥生产中几个问题刍议[J]. 林业机械与木工设备, 2012, 40(9): 15–17.
 [5] 陈忠东, 林海, 崔玉权, 等. 常规木材干燥缺陷及产生的原因[J]. 林业机械与木工设备, 2006, 34(7): 50–51.
 [6] 严平, 曹伟武, 施胜辉. 木材干燥烘房循环气流引导供风系统新技术应用研究[J]. 上海理工大学学报, 2012, 34(5): 487–490.
 [7] 严平, 曹伟武, 钱尚源, 等. 干燥窑用风机自动回转供风系统的研制[J]. 木材工业, 2005, 19(2): 25–27.
 [8] 闫一野, 刘美爽. 木材干燥窑内风速与流场均匀性的数值模拟[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(6): 134–136.