

基于各向异性材料的低能耗热流控制模块研究^{*}

王璞玉, 胡旭晓^{*}, 周 洁, 杨克己
(浙江大学 现代制造技术研究所, 浙江 杭州, 310027)

摘要:为改善应用于超精密加工系统的热控制模块能耗大的状况,设计了一种低能耗热流控制模块。模块的导热体基于各向异性纳米复合材料制作,输入热流从导热体非主方向通入,控制热流从主方向通入,从而优化了热流传导路径,机理上实现了低能耗。使用热网络法对模块建模,并依据实验数据对模型进行了修正。最后利用模型分析了关键参数对模块控制性能的影响,并提出了在控制策略中进一步减小能耗的方法。实验结果表明,热控制模块能耗减小在 50% 左右。

关键词:各向异性;热流控制;热网络;低能耗

中图分类号: TG502. 15; TH142

文献标志码: A

文章编号: 1001 - 4551(2011)07 - 0798 - 04

Low-energy heat control unit study based on anisotropy composite

WANG Pu-yu, HU Xu-xiao, ZHOU Jie, YANG Ke-ji

(Institute of Modern Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption of heat control unit used in ultra-precision machining system, a low-energy heat control unit was designed based on anisotropy nano composite. In this unit, control flow was accessed through the heat conductor's principle direction, while input flow was accessed through the non-principle direction. Therefore heat conducting circuit was optimized and energy reduction was realized in theory. The unit was modeled using thermal network theory and the model was updated according to experiment data. The influence to the unit's control performance was analyzed by considering some key parameters. Further energy reduction method in control strategy was presented in the end. Experiment results show energy reduction of heat control unit is about 50%.

Key words: anisotropy; heat control; thermal network; low energy consumption

0 引 言

超精密加工技术是机械制造最主要的发展方向之一,目前制约其发展的主要因素是加工误差。统计表明:在超精密加工领域因热变形引起的误差占 40% ~ 70%^[1]。特别是超精密加工系统向模块化和组合式发展,其各功能部件间的热流传递愈加复杂,热对精度的影响更为明显^[2]。借助热控制模块优化系统的热流场,进而控制系统的温度场是解决热对精度影响的一种有效方法。目前已经研制的热控制模块主要可分为被动式和主动式两类。前者无需外热源,如用于电

子芯片散热的微管道和热管散热模块^[3],用于功能部件连接处的隔热模块和导热模块^[4]。此类被动型热控制模块虽能耗低,但可控性差。后者引入了外热源,如用于功率器件冷却的基于半导体制冷器的零广义热阻控制模块^[5],应用于功能部件连接处的主动热流控制器等^[6]。此类主动型热控制模块虽可控性好,但一般能耗较大,以至于控制热流与输入热流之间的热耦合效应明显,并且干扰环境温度,这些因素都限制了其在超精密机电系统功能部件联接处的深入应用^[7]。比如主动型热流控制器在应用于高性能七轴五联动磨削机床 Z 方向二级进给部件的联接处时便无法满足

收稿日期:2010 - 12 - 07

基金项目:国家重大科技专项资助项目(2009ZX04014 - 026 - 04);博士学科点专项科研基金资助项目(200803350028);浙江省重大科技专项资助项目(2008C01026 - 1)

作者简介:王璞玉(1986 -),男,山东泰安人,主要从事热态特性方面的研究。E-mail: coke1986@163.com

通信联系人:胡旭晓,男,副教授,硕士生导师。E-mail: Huxuxiao@zju.edu.cn

控制要求。

为解决这些问题,本实验对主动式热流控制器进行了改进,设计了一种低能耗的热流控制模块。

1 低能耗实现机理及各向异性导热体的制备

主动式热流控制器的导热体一般由均质材料制成,如碳化硅颗粒增强铝,在导热体某个方向通入输入热流,输出热流也在同一方向输出,在与其垂直的方向通入控制热流,通过自动调节控制热流的大小完成对输出热流大小的控制。低能耗热流控制模块对此做了改进,采用各向异性材料制作导热体,在热阻较小的主方向通入控制热流,与主方向垂直的非主方向通入输入热流,从而优化热流传导路径,减小热耦合,用较小的控制热流达到控制效果,在机理上实现低能耗。

碳纳米管是一种纳米级无缝管状结构的碳素材料,其导热性能非常优越且具有一维轴向性,即较强的各向异性。在其主方向的轴向导热性能较好,与轴向垂直的非主方向导热性能较差^[8]。由于碳纳米管具有这些特性,以其为添加相的纳米复合材料在各种传热场合中应用广泛。本实验中的导热体采用碳黑和碳纤维为基体,定向碳纳米管阵列为添加相合成的复合材料制备,外形大小为35 mm×25 mm×8 mm,其中长方向为其主方向。

2 传热模型的建立

2.1 热网络法理论基础

热量传递作为一种常见的能量转移过程,其发生是因为存在不平衡势差,即过程驱动势。在电量转移中,过程驱动势即电势差,过程阻力即电阻,过程的转移量为电流。与此对应,热传导中过程驱动势即温度差,过程阻力即热阻,转移量即热流。根据傅里叶导热定理,热流的计算式为:

$$q = \lambda A \frac{dT}{L} \quad (1)$$

式中: λ —导热系数, W/(m·K); L —热流传导路径的长度, m; A —热流传导路径通过的横截面积, m²; dT —温度差, K。

由传热学相关理论^[9]可知,传导热阻 R_c 和对流热阻 R_v 的计算模型分别为:

$$R_c = \frac{L}{\lambda A}; R_v = \frac{1}{\alpha A} \quad (2)$$

式中: α —对流换热系数, 单位为 W/(m²·K)。

在传热过程中,任何有质量的物体都会储存或释放热能,与电路中的储能元件电容相对应,这种储能元

件就是热容。其计算式为:

$$C = m \cdot c \quad (3)$$

式中: m —导热体的质量, 单位为 kg; c —导热体材料的比热容, 单位为 J/(kg·K)。

由于温度较低,故不考虑热辐射。通过合理的选择节点,热路可以完全等效成电路,将热问题转化成电问题,这就是基于热电相似性的热网络法的原理^[10]。热网络法在处理传热问题时简单可行且边界条件易处理,本实验采用热网络法对热流控制模块进行建模。

2.2 模型的建立及参数的计算

低能耗热流控制模块的结构如图1所示,导热体的一侧加热流 q 作为控制热流,底面通入 q_0 作为输入热流(采用半导体制冷器热面模拟真实热源)。为避免不必要的热损失,模块前后两面均用绝热材料覆盖,即前后面绝热,其余各面未通热流部分与环境进行热交换。模块的初始温度和环境温度均为 298 K。将导热体均分为 15 块,取各块中心点作为 1 个节点(标记为 1~15)。在 q 和 q_0 的作用下,模块的各块之间进行热传递。

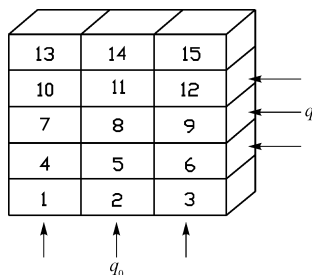


图1 低能耗热流控制模块结构图

将如图1所示的物理模型转化为与之等效的热网络模型如图2所示。

模块中通入热流的面与周围环境无热交换,故只有传导热阻无对流热阻; q 和 q_0 等效为独立热流源; R_x 和 R_y 分别表示各子块在主方向和非主方向上的对流热阻。模块中各参数的取值如下:

$$\begin{aligned} x &= 0.035 \text{ m}; y = 0.025 \text{ m}; z = 0.008 \text{ m}; \\ \lambda_1 &= 49.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}; \lambda_2 = 6.6 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}; \\ m &= 0.015 \text{ kg}; c = 696 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}; \\ \alpha &= 40 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}. \end{aligned}$$

式中: x, y, z —导热体的长宽厚; c —导热体材料的比热容; m —导热体的质量; λ_1 和 λ_2 —主方向和非主方向的导热系数; α —对流换热系数。热网络中各热阻、热容值计算如下,其余未列出热阻按已列出对应类型推算:

$$R_1 = \frac{5x}{6\lambda_1 yz}; R_2 = \frac{3y}{10\lambda_2 xz}; R_x = \frac{5}{\alpha yz}; R_y = \frac{3}{\alpha xz};$$

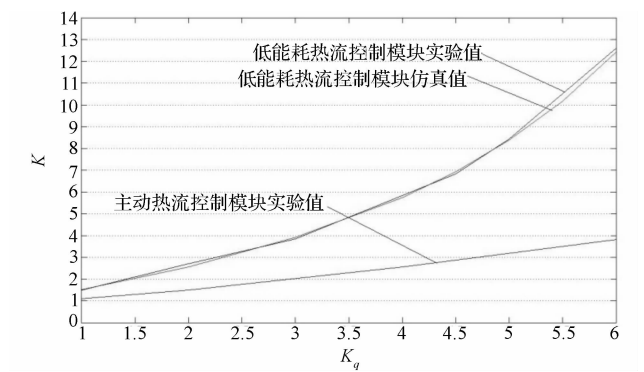


图5 控制性能对比图

低能耗的目标。具体的能耗降低数据如表1所示。 K 小于4的范围内,能耗降低在50%左右, K 越大,能耗降低越明显。但为保证控制精度,倍数不宜过大。

表1 两种模块能耗对比

放大倍数 K	主动型 K_q	低能耗型 K_q	能耗降低/(%)
1.0	0.98	0.50	48.97
1.5	2.00	0.99	50.50
2.5	3.99	1.97	50.63
3.9	6.08	2.99	50.82

5 关键参数改变对控制性能的影响

热网络模型的建立,可计算出低能耗热流控制模块任一子模块任何时间内的温度变化情况,因此可以方便地仿真出关键参数变化对模块控制性能的影响。

5.1 对流换热系数的影响

对流换热系数 α 对模块控制性能的影响如图6所示。

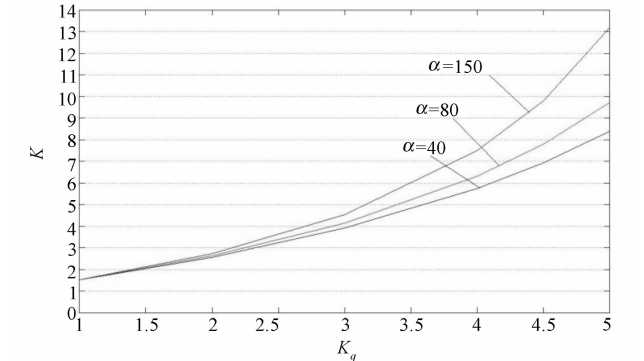


图6 α 对模块控制性能的影响

5.2 导热系数的影响

保持材料主方向和非主方向导热系数的比率 K_λ 不变,导热系数的变化对模块控制性能的影响如图7所示。

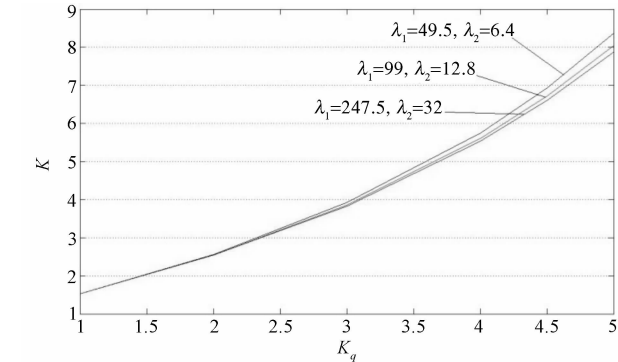


图7 导热系数变化(K_λ 不变)对模块控制性能的影响

5.3 主方向与非主方向导热系数比率的影响

非主方向导热系数不变, K_λ 改变的影响如图8所示。

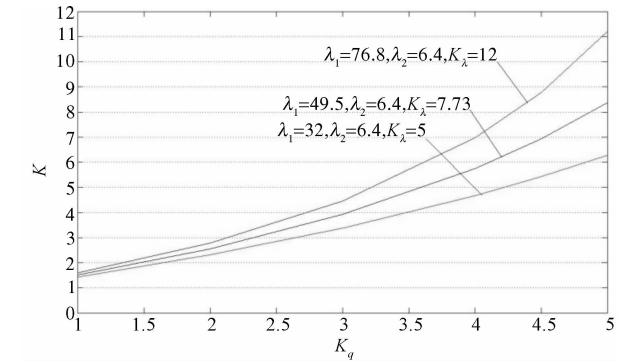


图8 K_λ 变化对模块控制性能的影响

6 结束语

本研究设计了一种低能耗的热流控制模块,并得出了以下结论:

(1)使用热网络法并考虑接触热阻对低能耗热流控制模块建立的模型是有效的,模型的仿真值与实测值吻合良好。

(2)对同一输入热流达到相同的控制效果,低能耗热流控制模块的控制热流比主动型热流控制器小,可控范围内能耗降低在50%左右,基本达到了低能耗的目标。可用于高性能七轴五联动磨削机床,光刻机,原子力显微镜等要求实现超精密加工或检测的机电系统。

(3)一些关键参数的改变对模块的控制性能均有影响。导热系数增大, K 有轻微减小,但变化不大; α 增大, K 有相应增大; K_λ 对控制性能的影响显著, K_λ 越大则 K 越大; α 和 K_λ 是影响模块控制性能的主要参数。

(4)制备各项异性更为明显,即 K_λ 更大的导热体是降低热流控制模块能耗的较好方法。因此,需研究更好的材料复合方法,优化复合材料内热流传递路径的各向异性,使得模块的性能得到提高。

(下转第830页)

实际检测波形如图 3 所示。1 号线为驱动电路输出信号,纵向一格为 10 V,2 号线为信号发生器输出信号,纵向一格为 10 mV。横坐标一格为 50 μ s。

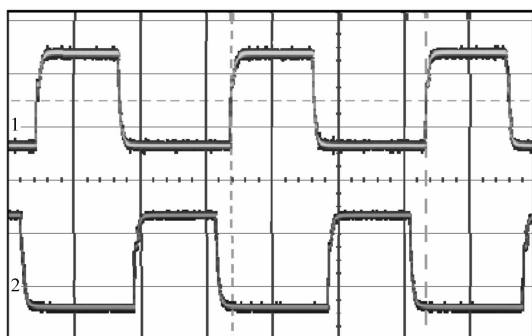


图 3 占空比为 42.5% 时实际驱动输出波形

从图中可以看到,应用 μ C/OS-II 的控制系统能准确根据采样信号控制 DSP 输出,能够满足各种焊接工艺要求。

4 结束语

本研究介绍了 μ C/OS-II 嵌入式操作系统移植到 NB-500 型 CO₂ 气体保护焊机控制系统中的方法并根据实际功能设计应用了实时任务,提高了控制系统的稳定性。通过实验测试,验证了控制系统的有效性。

嵌入式操作系统的应用,简化了编程过程,提高了开发效率,降低了研发成本,并为后续各种焊接工艺和智能控制算法的应用提供一个良好的软件平台。

参考文献 (References):

- [1] 殷树言,刘嘉. 数字化焊机发展趋势[J]. 现代制造, 2005(5):34-35.
- [2] 黄石生,何永,李阳. μ C/OS-II 及其在机器人焊接系统中的应用[J]. 电焊机,2005,35(6):6-8.
- [3] KOVACS-VAJNA Z M. Implementation of porting RTOS μ C/OS-II to ARM[J]. **Computer Engineering**, 2000, 22(11):1266-1276.
- [4] STALLINGS W. Operating Systems: Internals and Design Principles[M]. America: Prentice Hall, 2004.
- [5] 陈文杰,陈善本,林涛. RTOS 在数字化焊接电源中的应用前景[J]. 电焊机,2004, 34(9):29-34.
- [6] LABROSSE J J. μ C/OS-II The Real-Time Kernel [M]. R&D Technical Books, 1998.
- [7] LABROSSE J J. 嵌入式实时操作系统 μ C/OS-II [M]. 邵贝贝,译. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.
- [8] 钟汉如,郭建飞. 基于 μ C/OS-II 无刷直流电机控制的研究[J]. 微计算机信息,2007,23(2):49-51.
- [9] 谢中赛,金志华,余世明. 基于 μ C/OS-II 的自动售货机控制系统[J]. 机械电子工程,2009,26(1):36-37.

[编辑:张翔]

(上接第 801 页)

(5) 为进一步减小能耗和热耦合,模块可使用半主动控制策略。输入热流变化时,不调节控制热流大小,而是通过自动改变模块的参数来稳定控制性能。 α 对模块控制性能影响较大,其自动调节也比较方便,因此采用对流换热系数作为关键参数的半主动控制策略可以进一步的应用以减小能耗和热耦合,这将是下一阶段的主要研究方向。

参考文献 (References):

- [1] WECK M. Reduction and compensation of thermal error in machine tools [J]. **Annals of CIRP**, 1995, 44(2):589-597.
- [2] 曹骏,胡佩俊,应济. 基于接触热阻的主轴热特性有限元分析[J]. 机电工程,2008,25(2):20-22.
- [3] 赵小林,易定秋. 微热管散热技术研究现状与发展趋势探析[J]. 湖南工业大学学报,2007,21(1):71-73.
- [4] LIU Wen-jun, PILEGGI L, ASHEGHI M, et al. An Electronic Packaging Design for Reduction of Thermal Interface Resistance[C]//Proceedings of the Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena and Emerging

Technologies in Electronic Systems, ITherm,2006:525-528.

- [5] MARUYAMA S, NINO E, RUOCCO G. Analysis of a thermoelectrical device for active heat transfer control [J]. **International Journal of Thermal Sciences**, 2001, 40(10):911-916.
- [6] 顾志桦. 基于复合材料的主动热流控制器的研究[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院,2006:20-90.
- [7] LEE C W, KIM S W. Ultra-precision stage for alignment of wafers in advanced microlithography [J]. **Precision Engineering**, 1997, 21(2-3):113-122.
- [8] 祝春华,王端阳. 碳纳米管材料导热性能的实验研究[J]. 广东化工,2007,34(8):5-9.
- [9] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,1998.
- [10] 阴继翔. 比拟法在《传热学》教学中的应用[J]. 太原理工大学学报,2001,19(3):64-66.
- [11] 陈振林,孙中泉. 半导体制冷器原理与应用[J]. 微电子技术,1999,27(5):63-65.
- [12] 沈军,马骏,刘伟强. 一种接触热阻的数值计算方法[J]. 上海航天,2002,19(4):33-36.

[编辑:张翔]