

基于直接液体冷却的 GMA 温控方法研究^{*}

李佳琪^{1,2}, 邬义杰^{1,2*}, 张 雷^{1,2}, 王 彬^{1,2}

(1. 浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江大学 流体传动与控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:为了给超磁致伸缩执行器(GMA)提供恒温的工作环境以保证输出精度,针对传统间接冷却温控系统热效率较低的问题,基于直接液体冷却原理,提出了一种可应用于弯曲型微位移执行器的新型高热效率 GMA 温控方法,及提出了新型的卡盘式温控腔体结构。仿真结果表明,多层油道的直接冷却温控方法将磁致伸缩材料(GMM)的温升范围由传统间接冷却温控方式的 $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升到 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内,新的温控方法和热结构为 GMM 材料进一步的开发和应用研究提供了设计方向和依据。

关键词:超磁致伸缩材料;超磁致伸缩执行器;温度控制;卡盘式

中图分类号:TH14;TH39;TG65

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)07-0779-05

Research on temperature controlling for GMA based on direct liquid cooling

LI Jia-qi^{1,2}, WU Yi-jie^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, Wang Bin^{1,2}

(1. Institute of Modern Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to provide a stable working temperature for giant magnetostrictive actuator(GMA), thereby ensuring its high-precise-output, aiming at improving the thermal efficiency of traditional temperature controlling method, a novel high thermal efficiency temperature controlling method as well as a new chuck-style thermal structure, were proposed for flexure type GMA on the basis of direct liquid cooling principle. Simulation results show that the novel direct liquid cooling method with multi-layer oil tunnels could provide a temperature disturbance range of $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ for giant magnetostrictive material(GMM) compared with previous results of $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ by the traditional method, and the novel temperature controlling method and thermal structure will shed light on further application research and development utilizing GMM.

Key words: giant magnetostrictive material(GMM); giant magnetostrictive actuator(GMA); temperature control; chuck style

0 引 言

超磁致伸缩材料(GMM)是指在常温下可产生显著磁致伸缩效应的一类智能材料,其饱和磁致伸缩系数一般大于 $3.0 \times 10^{-5}[1]$ 。超磁致伸缩执行器(GMA)是利用 GMM 材料制成的执行器,具有变形输出大、能量转换效率高、承受负载能力强、动态稳定性好等优点。

可用于精密加工、精密定位、驱动马达^[2]、高速开关阀^[3]等领域。

GMA 的位移输出是由电磁线圈产生的磁场所驱动控制的,而线圈产生的热量会严重影响其工作精度。GMM 的线性热膨胀率达 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}[4]$,而且磁致伸缩率随温度也产生变化。如果没有构建有效的温控系统,GMM 材料不仅自身会产生热膨胀变形,在相同的驱动磁场下也会产生较大的输出差异。因此,需要

收稿日期:2010-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975256);国家教育部博士点基金资助项目(20070335204);浙江省自然科学基金重点资助项目(Z1080537)

作者简介:李佳琪(1987-),男,内蒙古乌兰察布人,主要从事 GMA 温控等方面的研究。E-mail: LJQzju@gmail.com

通信联系人:邬义杰,男,博士,教授,博士生导师。E-mail: wyj1116@zju.edu.cn

将驱动线圈产生的热量导出使其冷却,为 GMA 提供恒温的工作环境。

按照冷却剂与被冷却器件之间的配置方式分类,冷却方法可分为:直接冷却—冷却剂与被冷却元件直接接触;间接冷却—发热元件通过将热量传导到设备外壳或者外部热交换器之后再由冷却剂吸收热量。基于间接冷却原理,贾振元等^[5]设计了使用冷却水箱导出热量的 GMA 温控装置;唐志峰等^[6]提出了两种分别采用水循环腔体和水腔铜管相结合的温控系统,将 GMA 的温度变化控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。郭义杰等^[7]提出了采用相变材料进行温度控制并得到了 GMA 温度变化在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内的实验结果。

弯曲型 GMA 是指将 GMM 材料嵌入智能镗削刀杆的适当部位,在电磁线圈的磁场驱动下使 GMM 材料产生磁致变形,从而使刀杆发生弯曲的智能构件加工系统。赵兵、郭义杰等^[8]提出了应用于弯曲型 GMA 的间接水冷与相变相结合的温控方式。

为了提高 GMA 的动态响应,往往希望减少驱动线圈外形尺寸从而减小线圈的电感。这样就导致线圈电阻值增大,发热功率也增加,而温控装置的安装空间反而减小,这给温控系统带来了新的考验。传统 GMA 温控基本全部使用间接冷却的温控方式,线圈与冷却液体不直接接触,从发热元件到冷却液体的总热阻较大,而总换热面积较小,这使得传统冷却方式下 GMA 的温度变化仍处于较大的 $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,很难满足日渐提高的 GMA 温控需求。针对上述不足,本研究在吸取传统温控系统优点的基础之上开展了研究,采用直接冷却式散热,提出了基于直接液体冷却的新型 GMA 温控方式,并提出了卡盘式的新冷却腔体结构。

1 直接液体冷却 GMA 温控系统

1.1 温控系统总体方案设计

根据传热基本方程式:

$$\Phi = Ak\Delta t \quad (1)$$

式中: Φ —热流量, k —传热系数, A —换热面积, Δt —传热温差。

可见强化传热的基本途径是增加传热系数、增大接触面积和加大传热温差。而经过多层导热壁的总传热系数可计算为:

$$k = \frac{1}{\sum \frac{1}{h_i} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum \frac{1}{h_{ci}}} \quad (2)$$

式中: h_i —各流固界面的表面传热系数, δ_i —各层导热壁厚度, λ_i —各层导热壁的导热系数, h_{ci} —各固体相接

触层的接触热阻。

本研究根据对传统间接冷却的 GMA 温控系统(如图 1 所示)进行分析可知,可通过以下途径提高冷却系统的热效率:

- (1) 减小线圈骨架内外壁之间的导热热阻 h ;
- (2) 减小线圈与线圈骨架之间的接触热阻 h_c ;
- (3) 增大冷却液与固体材料相接触的换热面积 A 。

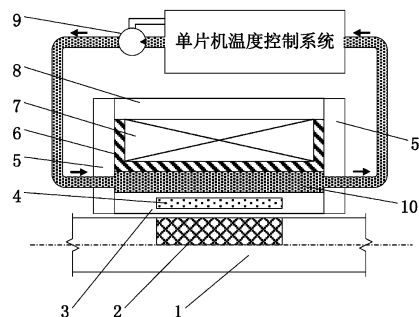


图 1 传统间接液体冷却 GMA 温控系统

1—镗刀刀杆;2—GMM 材料;3—相变材料支架;
4—相变材料;5—端盖;6—线圈骨架;7—线圈;8—外层套筒;9—水泵;10—冷却水腔体

根据传热学理论,参考工程实践中大型变压器强油冷却系统的相关经验,在保持 GMA 部件整个外型尺寸不变的前提下,本研究提出了采用变压器油作为冷却液体的直接液体冷却 GMA 温控系统,如图 2 所示。

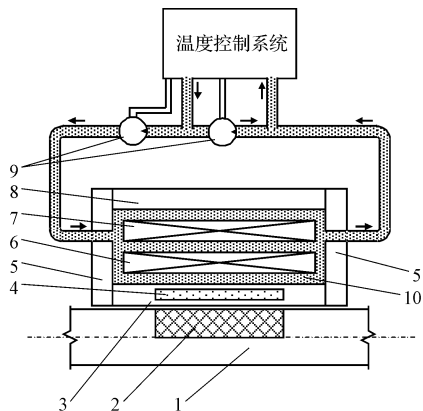


图 2 直接液体冷却 GMA 温控系统

1—镗刀刀杆;2—GMM 材料;3—相变材料支架;
4—相变材料;5—端盖;6—内层线圈;7—外层线圈;
8—外层套筒;9—水泵;10—冷却液腔体

该系统使用绝缘的变压器油作为冷却液体,将线圈拆分为两层,且具有以下特点:

- (1) 线圈与冷却液体直接接触,去除了线圈骨架内外壁之间的导热热阻 h ,如图 3 所示;
- (2) 线圈浸润在冷却液体中,消除了传统系统中

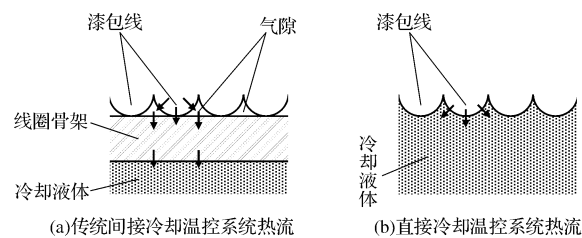


图3 直接冷却温控系统与传统间接冷却温控系统热流比较

由于气隙产生的线圈与线圈骨架之间的接触热阻 h_c , 如图3所示;

(3) 采用多层油道设计,大大增加了换热面积 A 。
基于以上3点优势,新型直接冷却 GMA 温控方式大幅提高了传热系数,具有更高的热效率。

1.2 温控系统热结构设计及优化

1.2.1 驱动线圈结构设计

传统间接液体冷却系统的线圈骨架未开有油道,线圈直接缠绕在骨架上。直接液体冷却 GMA 温控系统的线圈骨架做出了相应的设计改动。首先须在线圈骨架的两个挡板上,分别沿圆周向加工两层,每层各 n 个均匀分布的弧形孔道。在相应位置均布 n 条截面为 $h \times b$ 的撑条,从而形成一层油道。在撑条外包裹可浸入油的菱格上胶绝缘纸,如图4(a)所示。本研究参考工程中强油冷却变压器线圈系统的制造过程,将线圈分为两层。在第1层绝缘纸之外缠绕内层线圈,并在内层线圈外铺设第2层 n 根截面为 $h \times b$ 的撑条。撑条在两层线圈之间形成一层油道,使得线圈整体浸润在冷却液体内部。为使油流均匀,避免局部流速过大,本研究设置了挡油板,如图4(b)所示。

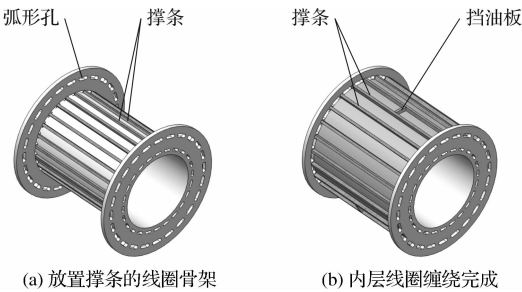


图4 直接液体冷却 GMA 温控系统线圈骨架设计

之后同样包裹绝缘纸,并进行外层线圈的缠绕,最终完成具有多层油道的直接液体冷却 GMA 驱动线圈绕组。

1.2.2 温控系统结构设计优化

分析可见,在传统间接冷却温控系统中,线圈的热量仍可流经线圈骨架两端、外层套筒、端盖,通过刀杆侧隙空气层传递给刀杆及 GMM。为克服这一缺陷,本研究对传统温控系统进行了热结构优化改进,设计了具有4层油道的冷却腔体,并采用了卡盘式的线圈固

定方式。

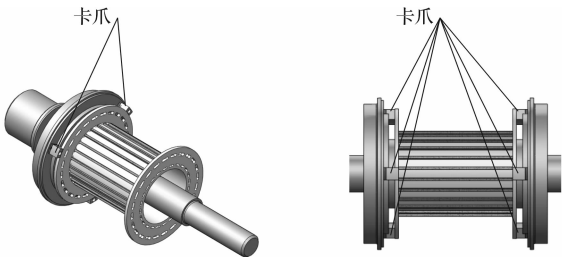


图5 卡盘式直接液体冷却 GMA 温控腔体结构

本研究首先将3个卡爪固定在一侧的端盖上,并将线圈骨架的一端嵌入卡爪,如图5(a)所示。之后将线圈骨架的另一端采用相同方式安装,呈卡盘式分布的6个卡爪将线圈骨架固定并使其悬置在冷却液内部,如图5(b)所示。

具有4层油道的卡盘式温控系统结构设计突破了传统温控系统的线圈固定方式。绝缘的变压器油从一侧端盖入口进入线圈,在多个热交换面上与浸润在油中的线圈直接接触,进行热交换之后从另一侧流出带走热量。其整体结构如图6所示。

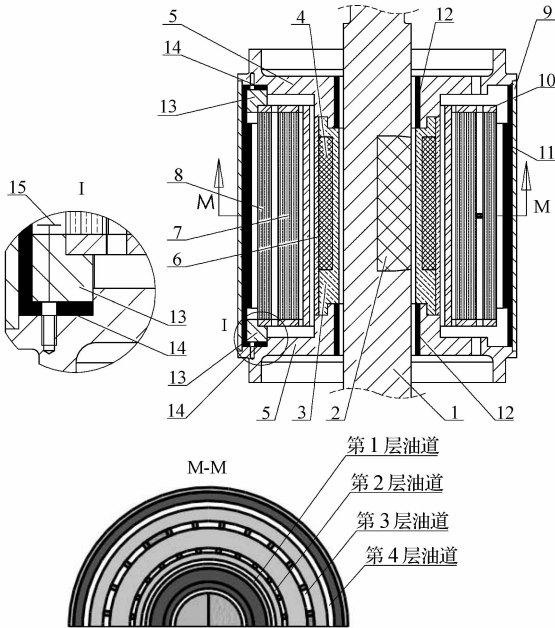


图6 卡盘式直接液体冷却 GMA 温控系统

1—锉刀刀杆;2—GMM 材料;3—相变材料内支架;4—相变材料;5—端盖;6—相变材料外套筒;7—内层线圈;8—外层线圈;9—外层套筒;10—线圈骨架;11—外层隔热材料;12—内层隔热材料;13—卡爪;14—卡爪隔热垫;15—卡爪固定螺栓

在具有4层油道的卡盘式温控系统结构中,线圈骨架采用两组类似于机床三爪卡盘的结构进行固定,使整个线圈浸润于冷却液体当中,热量从线圈的各个表面流向冷却液。卡爪使用螺纹连接固定在端盖上,卡爪与端盖之间放置隔热材料。同时在外套筒之内放置隔

热材料并使其与外层线圈之间形成第 4 层油道。设计完成后整个部件的外形尺寸与传统温控方式保持相同。

2 FEA 建模及仿真

2.1 建立计算流体力学热传导模型

假定 GMA 各零部件均为各向同性材料,建立在笛卡尔坐标系内的三维 GMA 热传导模型遵循基本导热微分方程:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (3)$$

式中: ρ —微元体的密度, c —比热容, λ —导热系数, τ —时间, $\dot{\Phi}$ —单位体积内热源在单位时间中的生成热。

温控系统的热传导问题是一个对流换热的问题,其热传导模型在数学上可以转化为相应的偏微分方程组。然而由于求解偏微分方程组的复杂性,工程中往往需要借助数值方法来求出问题的近似解。本研究采用计算流体力学工具 Solidworks Flow Simulation 进行有限元分析计算,该软件可在液体流动、热传递、流体力多场交互环境下进行分析,在国内外应用在电子设备热分析设计等领域^[9]。建立模型时须将各种金属材料以及 GMM 材料等各部件的材料热物理属性导入模型中^[10],流体边界条件由计算确定。

2.1.1 流体模型建立

本研究首先需要确定冷却液体的热物理属性(如表 1 所示),变压器油是天然石油中经过蒸馏、精炼而获得的一种分馏产物,这种矿物绝缘油的主要成分是烷烃等化合物,在模型中导入其密度、粘度、热导率、比热等物理参数^[11]。

表 1 冷却液体的热物理属性

冷却介质	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力粘度 $\eta / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	比热 $c / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	热导率 $\lambda / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$
水	992.2	6.529×10^{-4}	4 179.6	0.631
变压器油	895.0	9.845×10^{-3}	1 841.8	0.128

冷却液体的流量是流体边界条件的一部分。在传统间接冷却温控方式中,冷却液体为水,冷却水的循环量按下式计算:

$$V_w = \frac{Q}{\Delta t_w \rho_w c_w} \quad (7)$$

式中: Δt_w —水的容许温升,避免过高,取 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; ρ_w —水的比重, 992 kg/m^3 ; c_w —水的比热, $4\,179.6\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

计算得 $V_w = 1.50 \cdot 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$ 。在新的直接冷却温控方式中,冷却液体为变压器油,变压器油的循环量同样按照式(4)计算。油的容许温升 Δt_{oil} 取 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; ρ_{oil} 为油的比重取 895 kg/m^3 , c_{oil} 为油的比热,取 $1\,841.8\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。计算可得 $V_{\text{oil}} = 3.77 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.1.2 相变材料

相变材料种类繁多,在保证相变温度的情况下,本研究尽可能选择相变潜热较大的材料。根据设计经验,与传统间接温控方式相同,本研究以 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为主要原料,配制相变点为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$,融化潜热为 118.19 kJ/kg 的相变材料。因相变材料温控层仅起到稳定工作点的作用。而在按照式(7)计算的冷却液体循环量下,冷却能力足以保证相变材料不会全部转化为液体而失效,故本研究依据设计尺寸填充等量相变材料 80 g 。

2.2 传统间接液体冷却温控系统的仿真

为了便于比较分析,本研究先对传统间接冷却温控方式进行仿真。设定线圈最大热损功率 Q 恒定为 311.1 W ,环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,通入冷却液体为水。设定相变材料相变点为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$,通入冷却水温也为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冷却水的循环量采用式(7)的计算结果。本研究设定 GMM 的温度为收敛目标,仿真结果如图 7 所示。

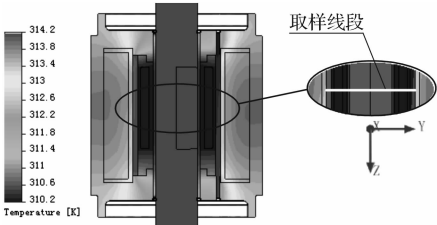


图 7 传统间接液体冷却 GMA 温控系统仿真结果

为便于量化比较,本研究在中心剖面上垂直于 GMM,平行于 Y 轴的方向上,做出 70 mm 长,中心对称的取样线段,并利用 XY Plots 功能作出该线段上的温度分布曲线,如图 8 所示;利用 Surface Plots 功能作出 GMM 材料的表面温度分布,如图 9 所示。

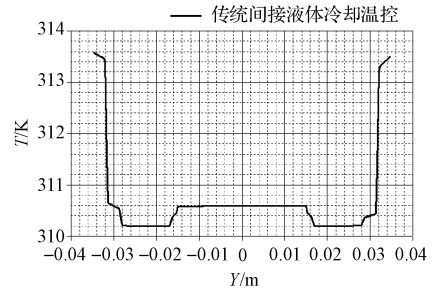


图 8 传统间接冷却方式在白色温度取样线段上的温度分布

由图 8、图 9 可知,在传统间接冷却方式下,GMM 温度两侧较高,中间较低,呈对称状。这是由于冷却液体与 GMM 之间热阻较大,温控热效率较低,故 GMM 的温度受线圈热量影响而升高。由于未采用卡盘式的热结构,线圈热量大量经由线圈骨架两端以及套筒、端盖,从两侧传导到 GMM。GMM 材料的最高温度约为

310.6 K (37.4 ℃),温度变化范围在 ±0.4 ℃。

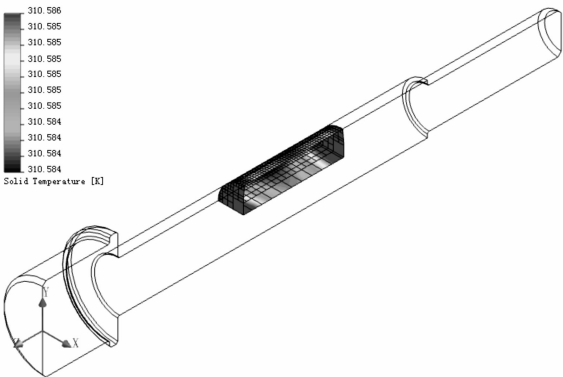


图 9 传统间接冷却方式下的 GMM 材料表面温度分布

2.3 直接液体冷却温控系统仿真

本研究根据直接冷却温控方式的设计,将两层线圈的总功率设为 311.1 W,每层各 155.5 W,不改变环境温度、相变材料相变点等参数及边界条件、收敛目标,将通入冷却液体设定为 37 ℃ 的变压器油。变压器油的循环量采用式(7)的计算结果,对具有 4 层油道的直接冷却温控系统进行计算流体力学仿真,其结果如图 10 所示。

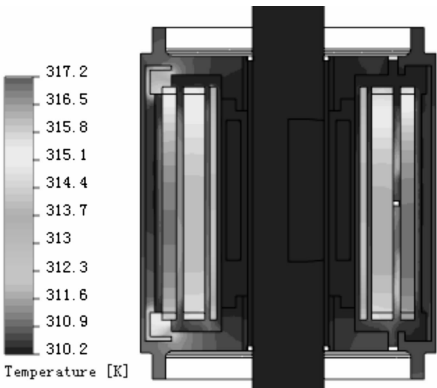


图 10 直接液体冷却 GMA 温控系统仿真结果

由图可见,在采用直接冷却温控方式和优化热结构的情况下,线圈的热量绝大部分完全被冷却液带走,端盖的温度大幅降低,线圈的热量经由线圈两端以及外套筒向 GMM 传导的路径被冷却液体所隔绝,温控效果大幅提升。同样为了对温控效果进行量化对比分析,在相同的取样线段上做出温度曲线,如图 11 所示;并做出 GMM 材料的表面温度分布,如图 12 所示。

由图 11、图 12 可知,由于采用直接冷却和卡盘式的线圈固定方式温控热效率较高,线圈产生的热量较少传导至 GMM 上,故冷却液体温度对 GMM 温度的影响占主导地位,GMM 温度大幅降低。而冷却液体在沿 Z 轴正方向流动的过程中,吸收线圈热量,温度逐渐升高,从而使得 GMM 温度在 Z 轴正方向上呈上升趋势。在直接液体冷却温控方式以及卡盘式热结构下,GMM 温度为 310.18 K (36.98 ℃),突破性地将 GMM 温度变化控制在 ±0.02 ℃,大幅降低了温升。

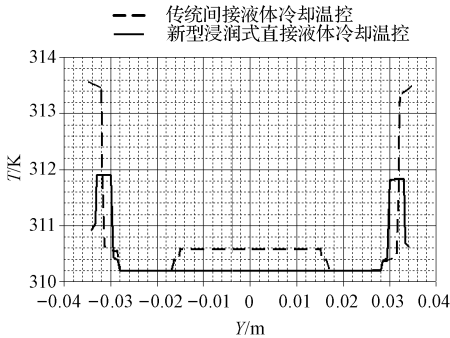


图 11 传统温控方式与直接冷却方式在取样线段上的温度对比

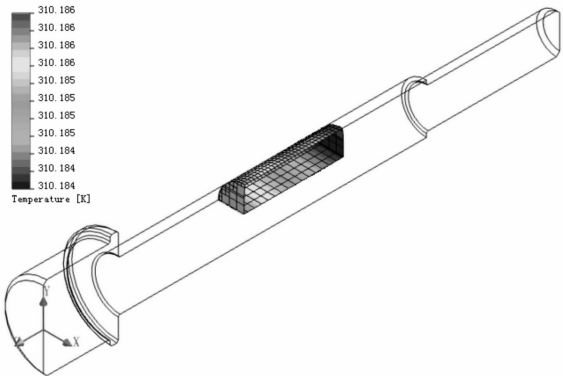


图 12 直接液体冷却方式下的 GMM 材料表面温度分布

3 结束语

本研究在综合分析现有研究成果的基础之上,在原理上提出了 GMA 温控新方法,并对结构进行了优化,设计了具有多层油道的新型直接液体冷却系统:①将传统的间接冷却方式改为直接冷却,并对 GMA 温控结构进行了改进,提高了温控的热效率;②采用多层油道分布式散热,摒弃了传统冷却方式中的单一换热面,有效降低了 GMM 的工作温度;③采用卡盘式线圈骨架固定方式,从根本上隔绝了线圈热量向刀杆以及 GMM 的传播,大幅提高了 GMA 温度变化控制的精度。这些创新点直接提高了温控系统热效率,放宽了 GMA 的设计约束,提高了设计灵活性。且方案具有原理性,可适用于不同的腔体及线圈尺寸。更好的温控效果对 GMM 材料的工程应用将起到积极的作用,为进一步的深入研究打下基础。

参考文献 (References) :

[1] 郭义杰. 超磁致伸缩材料发展及其应用现状研究[J]. 机电工程,2004,21(4):55-59.
[2] CAO Z, CAI J. Design of a giant magnetostrictive motor driven by elliptical motion[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2005,118(2):332-337.

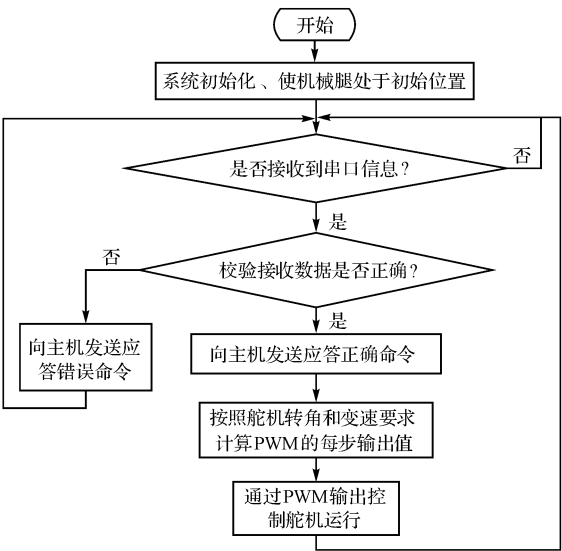


图 5 主控电路软件流程图

表 3 系统性能分析统计表

测试项目	测试次数	测试结果
系统平均响应时间	100	0.50 s
系统运行误差	100	1.80°
系统运行出错次数	100	0

通过表 3 可以看出,当测试次数为 100 次时,系统的平均响应时间为 0.50 s,系统平均运行误差为 1.80°,系统运行出错次数为 0 次。

5 结束语

多关节机械腿的运动控制系统具有机械结构简单、体积小、控制方便等特点,其人性化的界面设计使操作更加便捷。本研究从硬件系统和软件系统两个方

面介绍了此多关节机械腿,对其中的关键技术进行了研究,给出了设计方案和设计结果,证明了此系统具有性能稳定、运行精确等特点,可用于教学演示、学生实验等场合。

参考文献 (References):

[1] 李世其,刘 洋. 多关节轻型机械臂的设计研究[J]. 航天器工程,2009,18(3):48-52.

[2] 汪 洋,李 斌. 蛇形机器人控制系统的设计与实现[J]. 机器人,2003,25(6):491-494,500.

[3] 谭景伟. 柔性机械臂逆动力学问题的分析和求解[J]. 机电产品开发与创新,2010(3):35-36,31.

[4] ZHU Hai-hong, XIE Ming, LIM M K. Modular Robot Manipulator Apparatus[P]. PCT/SG00/OO02,2000.

[5] LI Ming-jian. Toward Single Motor Driven Biped Robot [D]. Singapore:School of Mechanical and Aerospace Engineering Nanyang Technological University,2005.

[6] 邹 璇,李德华. 多关节机械臂的坐标模型和参数标定[J]. 光学精密工程,2001,9(3):252-256.

[7] OKAZAKI A, SENOO T, IMAE J, et al. Real-time optimization for cleaner-robot with multi-joint arm[C]// Networking, Sensing and Control, 2009. ICNSC 09. International Conference on, 2009:26-29.

[8] 朱小娟,江兴盟. 利用 LPC213X/214X 系列单片机的 PWM 功能实现对舵机的控制[J]. 济源职业技术学院学报,2007,9(6):17-20.

[9] 周立功. 深入浅出 ARM7—LPC2300[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.

[10] 叶 重,孔凡让. 基于 AVR 的蛇形机器人舵机控制[J]. 机械与电子,2009(12):68-70.

[编辑:张 翔]

(上接第 783 页)

[3] 孟爱华,吕福在,程耀东. 基于超磁致伸缩致动器的脉冲喷射开关阀建模与仿真[J]. 机械工程学报,2009,45(8):303-307.

[4] 辰巳義和,大嶽和之,高橋良太,等. 超磁歪アクチュエータの熱膨張補償の検討[J]. 日本応用磁気学会誌,2009,33(5):421-424.

[5] 贾振元,杨 兴,郭东明,等. 超磁致伸缩材料微位移执行器的设计理论及方法[J]. 机械工程学报,2001,37(11):46-49.

[6] 唐志峰. 超磁致伸缩执行器的基础理论与实验研究[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院,2005.

[7] 郭义杰,徐 杰. 超磁致伸缩执行器热误差补偿及抑制方法研究[J]. 工程设计学报,2005,12(4):213-218.

[8] 赵 兵,郭义杰,赵章荣,等. 弯曲型超磁致伸缩执行器温控系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2008(8):12-14.

[9] YUNG K C, LIEM H, CHOY H S, et al. Thermal performance of high brightness LED array package on PCB[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2010,37(9):1266-1272.

[10] JANOCHA H. Unkonventionelle Aktoren: Eine Einführung [M]. München: Oldenbourg,2008.

[11] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T1094-2008 电力变压器用绝缘油选用指南[S]. 北京:中国电力出版社,2008.

[编辑:张 翔]