

人工肌肉作动器的制备及其视觉测控系统研究

贺红林^{1,2} 汪 良¹ 占晓煌¹ 刘文光¹

1. 南昌航空大学, 南昌, 330063

2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州, 310027

摘要:为制作离子聚合物—金属复合材料(IPMC), 基于全氟磺酸液制出厚达 0.5mm 基体膜, 在利用还原法在膜表沉积出铂电极后, 制成动力达 22.5mN 的 IPMC。研制出 IPMC 视觉测控系统, 并通过视觉采集部件捕捉其电致动图像, 引入区域平均法和 Roberts 算子进行图像滤噪与锐化, 采用灰度阈值法从图像中分割出 IPMC 轮廓并提取其末端位移。设计出 IPMC 控制电路, 进行了 IPMC 功能特性与控制实验。研究表明, 增大 IPMC 膜厚可增大其输出动力, 采用 PI 控制可使 IPMC 末端位置跟踪误差控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 之内。

关键词:离子聚合物—金属复合材料; 制备; 视觉测控系统; 机电特性; PI 控制器

中图分类号: V211.1

文章编号: 1004—132X(2011)20—2460—06

Research on Preparation and Measuring—control Technique for Actuator Powered by Electroactive Polymers

He Honglin^{1,2} Wang Liang¹ Zhan Xiaohuang¹ Liu Wenguang¹

1. Nanchang Hangkong University, Nanchang, 330063

2. The State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract: To develop theoretical instructions for application of ionic polymer—metal composite (IPMC) artificial muscle, a nafion—membrane with thickness of 0.5mm was made by sol—gel method. An IPMC actuator being capable of generating 22.5mN of thrust was prepared by plating a couple of platinum electrodes on dual—surfaces of the membrane. A visual measuring—control system was built for the actuator, and a CCD vision acquisition component used to capture the bending images of the IPMC was employed in the system. The 8—bit field average method and Roberts operator are utilized to smooth and sharpen the images. The gray threshold comparison method is used to extract the IPMC's contour and tip displacement. A driving circuit was designed for the IPMC's motion control. Experiments about the electromechanical—coupling characteristics and control characteristics of the IPMC were made. It is concluded that the thrust of the IPMC will increase largely as long as its thickness increases. It is also shown that the displacement error of the IPMC tip can be controlled within $\pm 0.5\text{mm}$ by a closed—loop PI control method.

Key words: ionic polymer—metal composite actuator; preparation; measuring—control system; electromechanical coupling characteristic; PI controller

0 引言

人工肌肉是在电场、浓度、温度、pH 值、磁场、光强等多种因素作用下能产生显著变形的新概念功能材料^[1-2]。在各种人工肌肉中, 电致动聚合物(EAP)是一类在外电场诱导下通过改变内部结构产生弯曲、伸缩、束紧、扭变或膨胀等机械行为, 从而实现牵引、紧固等机械功能的高分子聚合物, 因其致动量大、响应快、机电转换效率高而倍受研究者关注^[3]。通电即产生变形的 EAP 有

离子型和电子型等两大类, 每一类都具有与另一类互补的优势与不足。在各种离子型 EAP 中, 最具代表性的是金属与离子型聚合物的合成物(Ionic polymer—metal composite, IPMC), 这种材料的电致动特性建立在其内部带电水合阳离子扩散运动基础上, 在较低电压(小于 10V)作用时, 它就可产生明显弯曲变形, 且有质轻、柔韧的特点, 在航空航天、仿生、软性机械致动器、智能传感器、医疗器件等方面具有广阔应用前景。IPMC 已成为精密致动领域内的研究热点^[4-5]。然而, IPMC 作为一类新型高分子功能材料, 目前国内、外针对它的研究, 总体上处于探索阶段, 其技术还远未成熟。迄今为止, 国内外甚至连一个稍微规

收稿日期: 2010—11—29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50865009); 江西省教育厅重点科技项目(GJJ10024); 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF—201006)

范一点的 IPMC 制备方法都尚未制订出来,更谈不上对其做深入的应用研究^[6]。为此,开展 IPMC 制备的基础研究,探索 IPMC 的精密测控技术,构成了 IPMC 研究的重要方面。在此背景下,本文致力于 IPMC 制备技术的研究,进而探索其机电特性及测控技术。

1 IPMC 溶液成膜制备

1.1 基体膜制备^[6]

取 50mL 体积分数为 5% 的 Nafion 溶液放入烧杯,利用加热、加压蒸发法将溶液浓缩至 15mL。为保证膜质地均匀、膜表面不出现裂缝,需往烧杯中添加一定量的二甲基砷溶液,并将其置于超声振荡器中振荡 10min,使溶液混合均匀并去除溶液中的气泡,然后再用滴管将混合液小心滴加到烘箱内的模具中。为保证膜厚均匀,需校准模底的水平度。在 70℃ 恒温条件下将模具内溶液加热 4h,就会在模具内形成一层较厚的膜。考虑到此时膜中存在一定残余应力,故需进行去应力热处理:将模具放在 140℃ 烘箱中保持 2h,接着关掉电源,待模具完全冷却后将其从烘箱中取出,再向模具内注热水以便将膜从膜具内取出。采取此法制备的膜厚为 0.5mm。

1.2 表面粗化

基体膜表面必须附着金属薄层电极才能对其施加电场。为使电极与膜间产生足够的附着强度,必须增大电极与基体膜之间的微观接触面积^[7]。为此,需用细砂打磨膜表面,使膜表面形成大量微观凸凹结构。打磨后的表面残留有大量的硬质颗粒、屑质,其存在直接影响制备成败,为此需用超声清洗法将其去除,再将膜分别放入双氧水和硫酸溶液中加热以除去附着污物,加热温度宜在 60~70℃ 之间。此后,将膜放入去离子水中多次漂洗,以去除膜中非功能性离子。最后,在通风、阴凉环境中将膜晾干。

1.3 离子交换

为给 IPMC 电极的化学沉积提供充足的还原离子,需将电解液中金属离子基体膜内的 H^+ 进行交换,其做法是:先将经预处理的膜置于稀硫酸 (0.1mol/L) 中 1h,使 H^+ 侵入膜内部;然后,将基体膜浸泡于 $[Pt(NH_3)_4]Cl_2$ 溶液 24h,使 H^+ 与 $[Pt(NH_3)_4]^{2+}$ 交换。由于基体膜内吸附了大量铂离子,故其刚度明显增大。

1.4 电极沉积

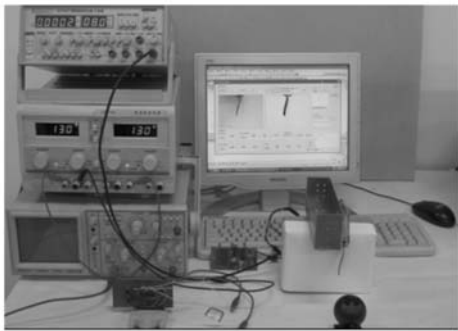
电极沉积利用化学还原法将含铂溶液中的铂离子还原到膜表面^[7]。为了实现电极沉积,首先

需将经离子交换的膜移至盛有去离子水的烧杯,再将烧杯置于 40℃ 的温水中进行水浴;然后,每隔 30min 左右的时间向杯中滴加体积分数为 5% 的 $NaBH_4$ 溶液 2mL 以便在基体引起还原反应。第一次滴加 $NaBH_4$ 后,基体膜由透明变为淡褐色,并在表面产生大量小气泡;随着 $NaBH_4$ 的不断添加,膜的颜色越来越深,当滴加超过 4 次时,膜变为银白色并产生金属光泽;继续添加 $NaBH_4$ 直至无气泡产生。为使膜表面的电极分布均匀,需向烧杯中加入 2mL 分散剂 (PVP-K30 溶液),并对溶液进行轻微搅拌。搅拌头绝对不能触碰到膜,否则制出的 IPMC 不可用。为了加快还原,在电极沉积过程中可使水浴箱温度升至 60℃。这样便制备出 IPMC。

2 IPMC 测控系统构建

2.1 系统的构成

为进行 IPMC 的机电特性测试与控制,必须构建其测控系统。由于 IPMC 动力输出较小、刚度低,构建系统时,为保证测控精度,必须尽量避免传感器的机械作用所引入的测量误差,因此 IPMC 运动状态测试宜采用非接触法。为此构建图 1 所示的视觉测控系统。该系统由 IPMC 夹持器、微力测试单元、视频采集单元、信号发生单元、驱动器、运动控制器和 PC 机组成。



(a) 硬件构成



(b) 软件界面

图 1 IPMC 视觉测控系统

在进行测试时,信号发生器输出的信号送至驱动器,经驱动器进行功率放大后,施加在 IPMC

上,驱使 IPMC 产生机械变形。视频采集单元捕捉 IPMC 运动并将采集图像快速送入 PC 机,计算机对图像进行处理后提取 IPMC 特征参数。进行控制时,系统配置成图 2 所示的控制结构,计算机根据 IPMC 末端位移与期望值间的偏差确定控制量,并通过运动控制器将其输出至驱动器后,驱使 IPMC 做预期运动。此控制结构的优点在于,它可将视觉重构任务从执行机构分离,从而简化系统,但这样会增加系统计算量。考虑到 IPMC 采样周期较长,采用此结构是可行的。

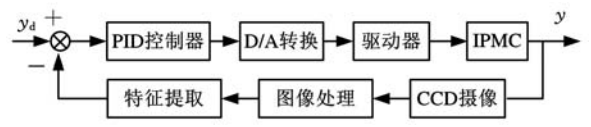


图 2 IPMC 视觉控制伺服系统

2.2 变形量的视觉采集

采集的图像是否清晰并符合处理要求,直接影响到 IPMC 测试结果的正确性。为了保证采集质量,本文选用数字式高速 CCD 传感器对 IPMC 进行图像采集,这既能保证 IPMC 测控所需的足够分辨率,也使系统能将所采集的 IPMC 动态图像迅速地转换为数字信号并输入计算机以提高系统的实时性。视频捕捉软件功能的实现,主要利用 VFW 提供的 AVICAP 构件组,即通过调用 AVI-CAP 中的 CapDriverConnect ()、CapPreviewRate() 等多个视频捕获函数完成^[7]。图 3 给出了本文实现的视频捕获软件流程,它主要包括捕获结构的初始化、捕获窗构建、捕获窗与相关硬件链接、捕获操作实施等步骤。

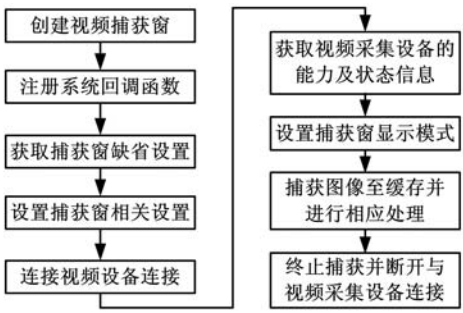


图 3 IPMC 视觉采集软件实现流程

2.3 视觉图像预处理

受 IPMC 的阴影、光照等多种条件的影响,采集到的 IPMC 图像中通常包含有大量的噪声与畸变。为便于稳定地进行图像处理以提取 IPMC 的真实轮廓信息,需去除这些噪声。为此,对所采集的图像进行了平滑和锐化处理,前者的目的在于滤噪。考虑到采集到的 IPMC 图像前景色较淡、背景色单一、对比度小,为提高其信噪比,采用了

区域平均法对其进行平滑处理,实现方法是:设处于图像中第 i 行第 j 列的像素 (i,j) 在平滑处理前的灰度为 $F(i,j)$ 。以该像素为中心通过向四周扩散生成点集 A_k ,如图 4 所示。 A_k 集内像素数 $L_k=8$ 。区域平均即对图中每个像素 (i,j) 均用 A_k 内像素灰度的均值进行替换。 (i,j) 像素经区域平均后,其灰度值为

$$G(i,j) = \sum_{(i,j) \in A_k} F(i,j)/L_k \tag{1}$$

$$A_k = \{(i-1,j-1), (i,j-1), (i+1,j-1), (i-1,j), (i+1,j), (i-1,j+1), (i,j+1), (i+1,j+1)\}$$

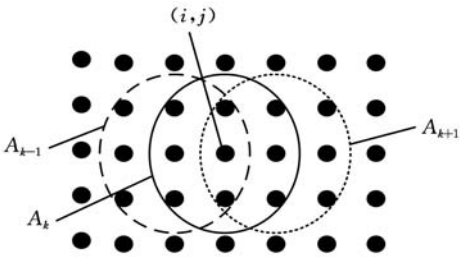


图 4 像素点领域生成示意图

试验中发现,进行平滑处理虽能有效地滤除图像内噪声,但也带来了图像模糊化问题。为能在图像中突显 IPMC 的轮廓,图像平滑后,还对图像进行了锐化处理,即通过对图像进行梯度模运算实现图像的锐化。为此,针对 IPMC 图像的像素灰度 $f(x,y)$,分别定义如下梯度矢量和梯度模:

$$G_{\text{rad}}(f(x,y)) = (\partial f/\partial x, \partial f/\partial y)^T \tag{2}$$

$$GM(x,y) = |G_{\text{rad}}f(x,y)| = \sqrt{(\partial f/\partial x)^2 + (\partial f/\partial y)^2} \tag{3}$$

式(3)的求梯度模操作中涉及微分运算,这种运算在数字图像上实施起来很不方便。为此,本文在对 IPMC 图像进行梯度模运算时,采用 Roberts 算子代替式(3)中的微分运算,即令

$$GM(i,j) = \{[f(i,j) - f(i+1,j+1)]^2 + [f(i+1,j) - f(i,j+1)]^2\}^{1/2} \tag{4}$$

为提高运算速度,还对式(4)进行简化,即

$$GM(i,j) = |f(i,j) - f(i+1,j+1)| + |f(i+1,j) - f(i,j+1)| \tag{5}$$

一旦求得各像素梯度模,即可根据需要生成不同梯度的增强图像,比较简单的做法就是直接采用梯度模替代像素的灰度,但这样会使图像仅显示灰度变化较陡峭的边缘轮廓,并且会导致原 IPMC 图像中的灰度变化较平缓及灰度较均匀的区域全部变成黑色。为此本文对该做法进行一定的改进,采用所谓灰度阈值法,即

$$g(i,j) = \begin{cases} GM(i,j) & GM(i,j) > T \\ f(i,j) & \text{其他} \end{cases} \tag{6}$$

式中, T 为非负灰度阈值。

本文试验表明,如果 T 选取合理,则既可保证 IPMC 轮廓突出,又不会破坏原灰度变换平缓区的背景。

2.4 IPMC 图像分割

要从图像中识别出 IPMC 轮廓并提取其末端位移信息,必须对图像进行分割。图像分割的最大困难在于图像的模糊性及其噪声干扰性。前面已对 IPMC 图像进行了平滑和锐化处理,基本滤除了图像中的噪声,这就使图像分割变得相对简单。图像分割的方法有边界法和区域法。考虑到 IPMC 图像的目标前景与背景间的关系相对简单,特别是其前景区和背景区中像素的灰度变化不大,本文采用区域法进行图像分割。图像分割的基本思路是:先确定一个灰度阈值,然后将每个像素的灰度值与该阈值进行比较,再根据比较的结果把像素划分为前景和背景。上述三个步骤中,最关键的是要确定适当的阈值。为了确定阈值,本文的视觉测控软件中加入了对 IPMC 图像的直方图分析模块,即通过直方图法确定当前图像应采用的阈值。

2.5 控制单元设计

在实现 IPMC 末端位置控制时,利用计算机内的控制算法确定的控制值为数字量,但 IPMC 只能受控于模拟量,为此需将数字控制量转换为模拟量。特别是,为能实现 IPMC 在正反两个方向上的运动控制,还需使模拟量具有双极性。为实现该功能,设计了图 5 所示的运动控制电路。当该电路工作时,PC 机输出的数字控制量经并口送入 ADC0832 进行 D/A 转换,转换所得的模拟信号再分别经过运算放大器 A1、A2 进行信号放大和信号偏置。该电路中,A2 实现电流偏置,并通过 U_{REF} 提供偏移电流。在确定 U_{REF} 极性时,需保证偏置电流方向与 A1 输出电流方向相反。由于阻值的设计满足 $R_4 = R_3 = 2R_2$,这使偏移电流恰好为 A1 输出电流的一半。根据该电路参数易知 A2 的输出为

$$U_2 = -2U_1 - U_{REF} \tag{7}$$

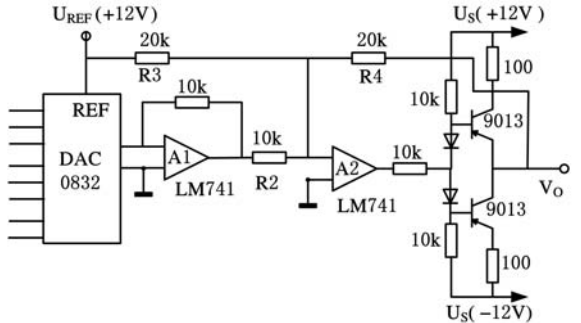


图 5 IPMC 运动控制电路

显然,当 A1 的输出电压 U_1 在 $0 \sim 10V$ 内变动时,如果取 $U_{REF} = 10V$,则根据式(7)易知运放 A2 的输出处于 $-10V \sim 10V$ 之内。这样,A2 的输出便具有正负双极性。考虑到 A2 的输出电流很小,无法驱动 IPMC 作动器,因此,在 A2 后面还引入了基于 LM9013 推挽的功放电路,以提高电路驱动能力。图 6 给出了电路的数字输入与模拟输出间关系,两者间具有较好的线性关系。

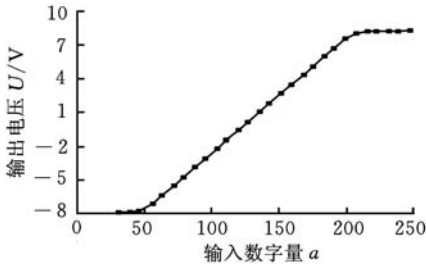


图 6 运动控制电路输入输出特性

2.6 测控软件设计

在构建硬件测控系统的同时,本文基于 VC++ 环境编制出 IPMC 的测控软件系统。该软件系统主要包括图像捕捉、图像平滑、边缘检测、图像标定、机电测试和运动控制等模块。其中,图像标定(量取)是指在进行测控试验前,需通过定标件的图像采集,建立 IPMC 的实际位置与图像像素位置间的对应关系;机电测试的功能在于测取 IPMC 瞬态响应和位置跟踪特性;运动控制则用于实现 IPMC 的闭环控制。在实现图像标定前,需调用图像捕捉、边缘检测模块以提取参考基准。系统的软件界面如图 1b 所示。

3 机电特性试验

3.1 动力特性

为便于分析 IPMC 的机电耦合特性并对其进行控制,从所制备的 IPMC 中截取尺寸为 $50mm \times 14mm$ 的小片作为试验样品。本文在所搭建的测控平台上通过微力测力器测取了 IPMC 末端输出动力,其结果如图 7 所示。从图 7 可看出,IPMC 输出动力随驱动电压升高而增大,并且 IPMC 厚度增大时,其机械输出动力也将大幅度增大。例如本文制成的大厚度 IPMC,其输出动力高达 $22.5mN$ 。

3.2 瞬态响应

进行瞬态试验时,PC 机经控制器向 IPMC 输出高电平的阶跃信号,经过一定的时间后,再向 IPMC 输出低电平,与此同时,CCD 传感器采集 IPMC 的运动状态。图 8 给出了 IPMC 在 $5V$ 阶跃电压作用时的末端位移响应。由图 8 可见,

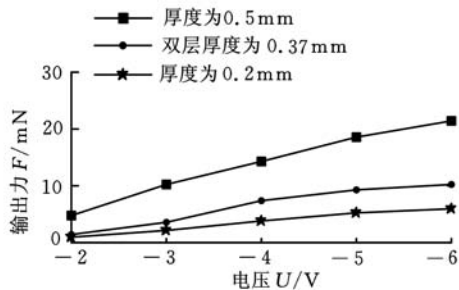


图 7 末端输出动力与驱动电压关系

IPMC 刚上电时,其变形量迅速增大,经过 7s 左右的时间即达到稳定值 41mm,响应较快。当电压由 5V 跃变为 0 时,IPMC 的变形开始回复,经 30s 左右的时间后,其变形量基本上恢复为 0。回复速度比上升速度低得多的原因是,回复只建立在自由离子扩散基础上,而上升过程则是电场牵引和离子扩散共同作用的结果,且电场牵引占主导。试验中还发现响应速度与所施加电压的幅值关系很大,电压越高,响应越快。

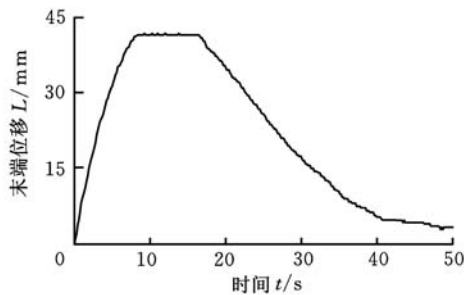


图 8 IPMC 的瞬态特性

3.3 激励特性

采用同频的方波、三角波、正弦波对 IPMC 进行激励,图 9 给出了试验结果。可见,电压幅值对 IPMC 变形影响很大,增大电压,IPMC 变形量及末端位移增大,并且当电压幅值较小时,变形量增大较缓,电压达到一定值时,变形迅速增大且出现峰值,在此基础上继续增大电压幅值则位移不增反减。造成上述现象的原因可能是,当电压过低时,IPMC 内电场太弱,不足以牵引自由态离子到电极区;当电压增大时,牵引力增大,离子迁移率增加致使 IPMC 变形量迅速增大;当电压增至一定值时,IPMC 内所有自由态离子全部移至电极附近,使变形量达到峰值;进一步增大电压时,因 IPMC 内没有更多的可供迁移的离子,故变形量不再增加。造成变形量不增反降的原因可能是驱动电压过高造成了 IPMC 的内部出现水解和过热,从而导致 IPMC 迅速变干。还可看出,激励的波形对 IPMC 电致量有较大影响,幅值相同时,方波激出的变形量最大,正弦波、三角波激出的变形量较接近,其原因是方波激励时,IPMC 持续处于

峰值电场作用,有利于提高自由态离子迁移速度和迁移率,从而有利于增大变形量。

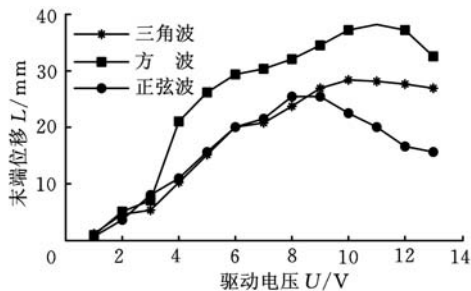


图 9 激励幅值与 IPMC 变形间关系

图 10 给出了末端位移与激励信号频率间的关系。由图 10 可见,当激励信号频率处于较低频段(0~1Hz)时,末端位移较大;随着激励频率的增加,末端位移呈不断减小的趋势。造成低频激励变形幅值大的原因是,此时 IPMC 具有足够的时间完成离子迁移而使迁移变得充分;驱动频率较高时,离子单向迁移时间短,迁移不充分,造成变形量小。该试验表明,IPMC 具有低频驱动性,也意味着在频率较小时,频漂将对其工作产生较大影响;当工作频率较大时,频漂对其变形基本上不产生影响。

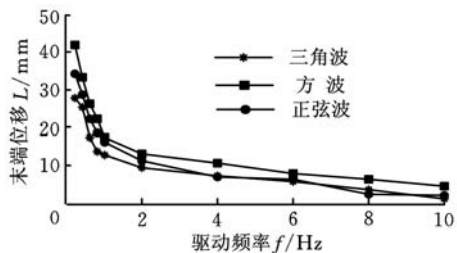


图 10 激励信号频率与 IPMC 变形量间关系

IPMC 在正弦激励作用下的位移跟踪情况如图 11 所示。可见,在开环状态下,IPMC 虽具有一定的末端位移跟踪能力且其跟踪周期与激励周期相同,但是其跟踪过程并不稳定,跟踪精度低。开环位置跟踪精度不高主要是因为 IPMC 刚度过低、鲁棒性较差。

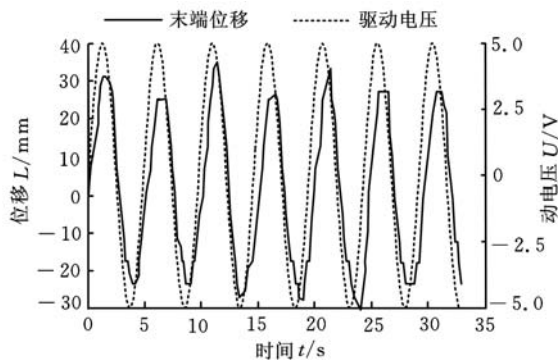


图 11 IPMC 的开环位置跟踪曲线

3.4 闭环跟踪控制

由于 IPMC 开环控制误差较大,因此这种方法不适用于对 IPMC 的运动精度有较高要求的应用场合。要实现 IPMC 的精密控制,必须在其上引入闭环控制^[8-9]。为达此目的,本文构建图 2 所示 IPMC 控制逻辑,并引入改进 PI 控制律

$$u(k) = \begin{cases} K_P e(k) + K_I \sum_{i=0}^n e(i) & |e(k)| \leq e_\Delta \\ u_\Delta & |e(k)| > e_\Delta \end{cases} \quad (8)$$

式中, $e(k)$ 为 IPMC 末端位置偏差; K_P 、 K_I 为比例系数和积分系数; e_Δ 为偏差界限; u_Δ 为控制阈值。

在式(8)中,P 控制项 $K_P e(k)$ 是根据 IPMC 的末端位移的偏差成比例地确定控制作用的,其作用在于减小控制误差。当 K_P 取值较大时,可加快响应,但过大则会造成测控系统失稳。I 控制项 $K_I \sum_{i=0}^n e(i)$ 的作用在于消除 IPMC 末端位置的静态误差。PI 控制器设计的关键在于确定 K_P 和 K_I 的值,为此,可采用解析法、试验法和试凑法。但是,考虑到本文未建立 IPMC 的控制模型,因此只能通过试凑法来确定 K_P 和 K_I 。图 12 给出了 IPMC 的闭环控制结果。可以看出,在频率不大的条件下,PI 控制能实现较高精度的位移跟踪,其跟踪位置偏差不超过 $\pm 0.5\text{ mm}$ 。

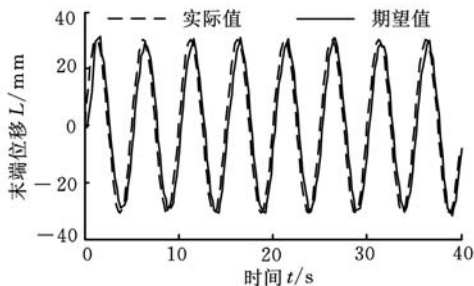


图 12 闭环控制末端位移跟踪曲线

4 结论

(1)采用凝胶法制出厚达 0.5mm 的 IPMC 基体膜,利用化学还原法在基体膜表沉积出铂电极后制成 IPMC 电致动人工肌肉。该人工肌肉的输出动力为 22.5mN。研究表明,适当增大基体厚度,可大幅提高 IPMC 的输出动力。

(2)构建了 IPMC 的机电耦合测控系统,引入视觉采集系统捕捉 IPMC 的运动状态,采用图像平滑、锐化和分割等技术提取 IPMC 的弯曲变形轮廓及其末端位移。研究表明,视觉测控技术适于 IPMC 机电测试与控制。

(3)设计出 IPMC 控制电路,引入闭环 PI 控

制实现了高精度的 IPMC 位置跟踪控制,并使控制误差控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 范围之内。

参考文献:

[1] Yoseph Bar-Cohen. Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges [M]. Washington D C: SPIE Press, 2004.

[2] Shahipoor M, Kim K J. Ionic Polymer-metal Composites: III. Modeling and Simulation as Biomimetic Sensors, Actuators, Transducers, and Artificial Muscles[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(6):1362-1388.

[3] Kothfra C, Donald T L. Bandwidth Characterization in the Micropositioning of Ionic Polymer Actuators [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(1):3-13.

[4] Kim B, Ryu J, Jeong Y, et al. A Ciliary Based 8-Legged Walking Micro Robot Using Cast IPMC Actuators[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Taipei, 2003:2940-2945.

[5] 罗玉元,李朝东,张国贤.基于离子聚合物金属复合结构(IPMC)的柔性致动器研究[J].中国机械工程,2006,17(4):410-413.

[6] Shahipoor M, Kim K J. Ionic Polymer-metal Composites: V. Industrial and Medical Applications[J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(1):197-214.

[7] 唐运军,唐华平,殷陈锋.一种离子交换树脂金属复合材料(IPMC)的力学参数测定[J].高技术通讯,2007,17(5):508-511.

[8] 占晓煌. IPMC 人工肌肉作动器的制备及其机电特性研究[D].南昌:南昌航空大学,2011.

[9] Bhat N D, Kim Won-jong. Precision Position Control of Ionic Polymer Metal Composite[C]//Proceeding of the 2004 American Control Conference. Boston, 2004:740-745.

[10] 曾祥进. 基于开放式软件平台的机器人视觉伺服研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.

(编辑 张 洋)

作者简介:贺红林,男,1967 年生。南昌航空大学航空制造工程学院教授、博士,浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室访问学者。主要研究方向为精密驱动技术和机电控制技术。发表论文 40 余篇。汪 良,男,1985 年生。南昌航空大学航空制造工程学院硕士研究生。占晓煌,男,1984 年生。南昌航空大学科技学院助教。刘文光,男,1978 年生,南昌航空大学航空制造工程学院讲师、博士。