

形状记忆合金鼓包的挠度控制研究*

陈兴, 张琛, 季宏丽, 裘进浩

(南京航空航天大学航空学院机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

[摘要] 激波控制鼓包 (Shock Control Bump, SCB) 是一种被动式的减小激波阻力的方法。针对近年来提到的可变挠度鼓包, 提出具有双程记忆效应的形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 鼓包, 可以通过控制 SMA 鼓包的温度改变其挠度, 优化 SCB 的减阻性能。为了达到精确控制挠度的目标, 提出了一种基于 Preisach 理论的温度-挠度迟滞模型。对鼓包进行基于该模型的 PID 控制, 试验结果表明该模型可用于 SMA 鼓包的挠度控制中, 4 个目标点的最大相对误差为 5.17%, 优于无模型的 PID 控制。

关键词: 形状记忆合金; Preisach 理论; 迟滞模型; PID 控制; 激波控制; 鼓包

Research on Deflection Control of Shape Memory Alloy Bump

CHEN Xing, ZHANG Chen, JI Hongli, QIU Jinhao

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The shock control bump (SCB) is a passive method of reducing shock drag. Aiming at the deflection-changing bump mentioned in recent years, a shape memory alloy (SMA) bump with two-way memory effect was proposed, which can change deflection by controlling temperature, optimizing the drag reduction performance of SCB. In order to achieve the goal of precise control of deflection, a temperature-deflection hysteresis model based on Preisach theory was proposed. PID control based on the model was conducted, the experimental results show that the model can be applied to the deflection control of SMA bumps, the maximum relative error of the four target points in the experiment is 5.17%, which is better than the PID control without this model.

Keywords: Shape memory alloy; Preisach theory; Hysteresis model; PID control; Shock control; Bump

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2020.08.080

激波控制鼓包 (Shock Control Bump, SCB) 是一种流动控制技术, 在减小激波阻力的同时具有不附加黏性阻力的特点^[1]。鼓包的外形极大影响减阻的效果, 很多研究者根据飞行条件研究鼓包的最佳设计参数。Qin 等^[2]将鼓包分为三维和二维两种, 三维鼓包边界全贴合于机翼表面, 二维鼓包是部分贴合, 比较了两者的减阻效果。李沛峰等^[3]利用 CFD 仿真计算, 系统阐述了鼓包的位置、高度和长度对激波弱化的影响。

但是固定式鼓包的设计参数, 如高度、位置等固定, 在无激波阻力时鼓包会破坏机翼原有的设计结构, 反而会增加飞行阻力。Jlinks 等^[4]设计了一种可变挠度的鼓包, 采用一块 0.6mm 厚的铝制薄板, 利用 80N 的力驱动器可以产生 13mm 的挠度行程, 而且可以随时根据飞

行条件进行挠度的优化。聂瑞等^[5]提出了形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 鼓包, 通过仿真研究, 鼓包升温时挠度变大, 降温时挠度变小, 在相变过程中的挠度变化可达长度的 4%。温度驱动式的鼓包相比于力驱动的鼓包, 驱动器设计更为容易, 但是在温差过大时耗能会很严重。在飞行器巡航过程中一般环境温度可达 -50°C, 如果利用环境温度使鼓包为凸起状态, 而仅在起飞和降落过程中加热鼓包使其变平则可以大大减少耗能。因此, 一个升温挠度变小、降温挠度变大的鼓包更加符合实际应用。

SMA 的驱动控制一般采用闭环控制, 其反馈量一般有温度、位移、电阻 3 种。电阻反馈一般用在小型的嵌入式驱动器中, 以便于系统的集成^[6]。对驱动位置

* 基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (NE2015001); 国家自然科学基金资助项目 (51875277)。

的控制精度要求高时,可采用位移反馈^[7]。由于丝的精确温度获取不易,采用温度反馈不多见,但对加热速率关心的控制可采用温度反馈^[8]。SMA的控制策略一般分为有模型控制和无模型控制。无模型控制一般是利用PID控制或结合智能控制的PID联合控制。Ahn等^[9]结合模糊控制和PID控制策略,用试验证明了其可以成功地进行SMA丝的位置控制,且效果较单独的PID控制更好。Ahola等^[10]将抗饱和PI控制与神经网络控制进行比较,两种方法各有优缺点。有模型控制即先对SMA丝的温度-位移迟滞效应进行建模,常采用Preisach模型^[11]和Prandtl-Ishlinskii(PI)模型^[7]两种,然后根据逆模型进行控制。有模型控制和无模型控制都可以进行稳态控制,需要快速跟踪控制时适合采用有模型控制,无模型控制的优点在于控制算法较为简单,适合在计算资源不丰富的情况下使用。

驱动器中使用的多为SMA丝,可以通过电流来加热,响应速度快,且散热容易。SMA鼓包是板状材料,只能采用接触式和辐射式的加热方式,驱动速度慢,相变导致的宏观位移变化也比较复杂,因此板状SMA的驱动控制研究较少。SMA丝作为驱动器一般需要设计额外的传动装置,SMA鼓包则不需要,SMA鼓包的优点是一体性好,因此对其进行驱动控制研究也有重要的意义。

本文针对具有双程记忆效应的SMA鼓包,建立了温度-挠度的迟滞模型,并用试验验证了应用该模型可以提高挠度的控制效果,为SMA鼓包的驱动控制提供了一种思路,同时也为验证SMA鼓包可以应用在SCB上打下了基础。

1 SMA鼓包简介

SMA鼓包的材料是Ni50.1Ti49.9,半径60mm,厚度0.55mm,变形区的半径为40mm。经过训练可获得双程记忆效应,即在通过施加压力使鼓包产生弯曲,再进行高低温循环数10次,如图1所示。

关于训练的详细说明可参考文献[12]。将训练好的鼓包安装在平台上,凸起的面朝上,如图2所示。以鼓包在 -20°C 时的中心点位置为零参考点,在外界环境温度不变、不施加外载荷的条件下,鼓包的温度和中心点挠度的关系如图3所示,可回复位移约为1.2mm,占鼓包长度的1.5%。图3中曲线的I~II段和III~IV段是鼓包的相变阶段,0~I段和II~III段是鼓包的热膨胀阶段,相变温度分别为 $A_s=50^{\circ}\text{C}$, $A_f=120^{\circ}\text{C}$, $M_s=62^{\circ}\text{C}$, $M_f=5^{\circ}\text{C}$ 。

鼓包在真实的应用环境中会承受外加载荷并受到环境温度的影响。非均匀温度场会改变鼓包在升降过程中的挠曲线,但不影响鼓包的最大变形能力^[13]。随

着鼓包表面压强的增加,鼓包的变形性能会逐渐衰减。对于一个0.55mm厚度的SMA鼓包,在鼓包的上表面承受4000Pa压强时,鼓包的最大变形能力会衰减12.5%,衰减之后的变形能力依然可以满足激波控制的要求^[13]。

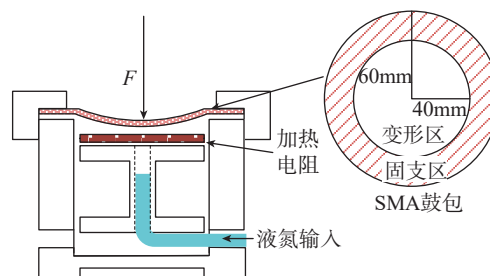


图1 SMA鼓包训练示意图

Fig.1 Training diagram of SMA bump

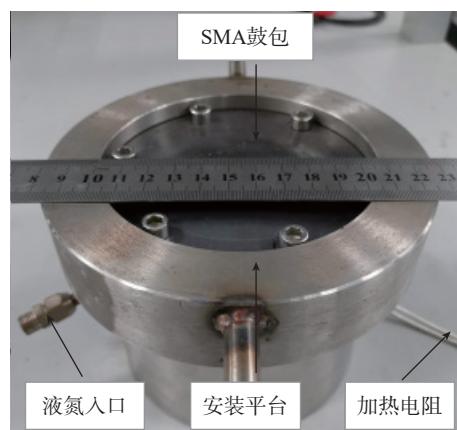


图2 SMA鼓包的安装

Fig.2 Installation of SMA bump

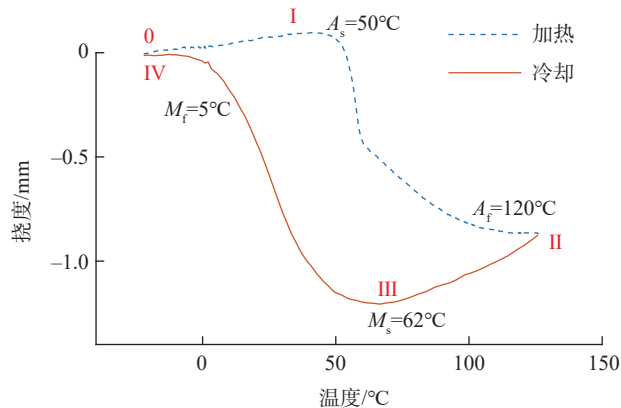


图3 SMA鼓包中心点挠度与温度的关系

Fig.3 Relationship between temperature and deflection of center point of bump

2 SMA 鼓包的迟滞模型

迟滞现象是指系统输出不仅与当前的系统输入有关,而且与系统的历史输入极值有关的一类现象。具体表现为系统的输入与输出并非一一映射关系。在 SMA 鼓包中,迟滞现象即表现为温度与挠度之间的多映射关系,如图 3 所示。

2.1 Preisach 理论

Preisach 模型常被用来描述压电^[14]、SMA 材料^[15]的迟滞行为。Preisach 模型由一系列连续的双稳态单元组成,如图 4 所示。 $\gamma_{\alpha\beta}$ 是一个基本的迟滞算子,可由矩形状的环表示, α 和 β 分别表示输入的上下切换值,即表示一个双稳态,当输入值大于 α 时, $\gamma_{\alpha\beta}$ 值为 1,当输入值小于 β 时, $\gamma_{\alpha\beta}$ 值为 0。数学表达式可以写作:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} [u(t)] d\alpha d\beta \quad (\alpha \geq \beta) \quad (1)$$

式中, $\mu(\alpha, \beta)$ 表示密度函数; $u(t)$ 表示输入量。

假设一个系统的输入量从 0 开始变化,其 Preisach 模型的几何解释如图 5 所示。

三角形表示 Preisach 平面, $\gamma_{\alpha\beta}$ 和 (α, β) 在三角形内具有一一对应关系,密度函数 $\mu(\alpha, \beta)$ 在内部为非负函数,在外部取 0。当输入量增加到 α_1 时,其对应的 Preisach 平面以 $\alpha=\alpha_1$ 为分界线, S^+ 表示 $\gamma_{\alpha\beta}$ 为 1, S^- 表示 $\gamma_{\alpha\beta}$ 为 0。当输入量下降到 β_1 时,会产生一条竖直方向的分界线 $\beta=\beta_1$,此时 S^+ 的面积会缩小。当输入量增大到 α_2 时,此时的分割线为 $\alpha=\alpha_2$ 。由此可发现规律,即输入量上升时会产生水平分割线,下降时会产生竖直分割线。由此可得,在任意一个瞬时,输出表达式可以写作:

$$y(t) = \iint_{S^+} \mu(\alpha, \beta) \gamma[u(t)] d\alpha d\beta + \iint_{S^-} \mu(\alpha, \beta) \gamma[u(t)] d\alpha d\beta = \iint_{S^+} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2)$$

式(2)表明,Preisach 模型的输出与三角形 S^+ 的动态划分有关,即与输入量的极值有关。

2.2 数值实现

由于式(1)的 Preisach 模型是一个双积分式,其中基本算子的数量是无限的,为了节省计算资源和满足实时控制的需求,一般要进行离散处理。文献 [16] 提供了一种思路,首先定义等价函数:

$$F(\alpha, \beta) = y_\alpha - y_{\alpha\beta} \quad (3)$$

式中, y_α 是输入量为 α 时的输出; $y_{\alpha\beta}$ 是输入量由 α 单周下降到 β 时的输出,又称一次下降曲线。

由图 5 中的(b)可得,密度函数在 S^+ 区域的积分就是输入量为 α_1 和 β_1 时的输出差值。即:

$$\iint_T \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = F(\alpha_1, \beta_1) \quad (4)$$

图 6 是一个典型的输入变化时的 S^+ 区域的动态划分,其中图 6 (a) 表示输入最终减小为某一个值 $u(t)$,图 6 (b) 表示输入最终增加到某一个值 $u(t)$ 。 S^+ 可

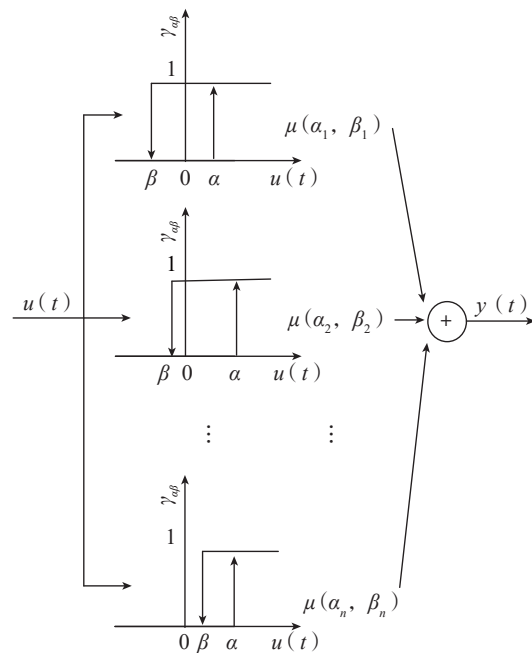
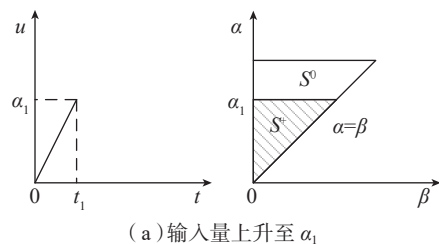
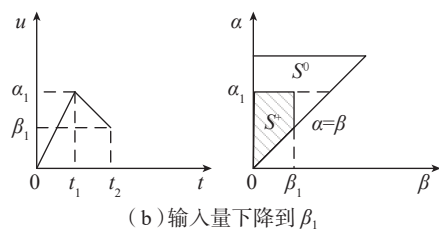


图4 Preisach 模型原理

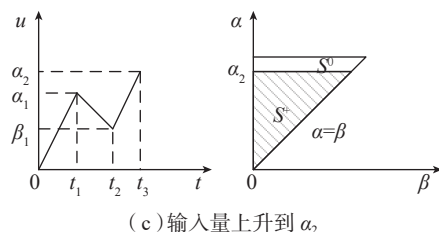
Fig.4 Principle of Preisach model



(a) 输入量上升至 α_1



(b) 输入量下降到 β_1



(c) 输入量上升到 α_2

图5 Preisach模型的几何解释

Fig.5 Geometric interpretation of Preisach model

由一系列的 Q_k 组成,表达式可以写作:

$$\iint_{S^0} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \sum_{k=1}^{n(t)} \iint_{Q_k} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (5)$$

Q_k 面积即可以表示为 $T(M_k, m_{k-1})$ 和 $T(M_k, m_k)$ 面积之差:

$$\iint_{Q_k} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \iint_{T(M_k, m_{k-1})} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{T(M_k, m_k)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (6)$$

又因为:

$$\iint_{T(M_k, m_{k-1})} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = F(M_k, m_{k-1}) \quad (7)$$

$$\iint_{T(M_k, m_k)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = F(M_k, m_k) \quad (8)$$

由式(6)、(7)、(8)可得:

$$\iint_{Q_k} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k) \quad (9)$$

由式(2)、(5)、(9)可得:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] \quad (10)$$

由图 6 (a) 可得,当输入量最终增加至某一个值 $u(t)$ 时,有 $m_n = u(t)$,式(10)可以写作:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + F(M_n, m_{n-1}) - F(M_n, u(t)) \quad (11)$$

若输入量最终减小到某一个值 $u(t)$ 时,有 $M_n = m_n = u(t)$,式(10)可以写作:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + F(u(t), m_{n-1}) \quad (12)$$

由以上分析得,可以用一系列离散的的一次下降曲线来近似表示系统的输出。

2.3 模型辨识

通过 2.2 节的讨论,将一节下降曲线中的端点温度离散处理,用试验的方式可获取各个离散温度下的一次下降曲线^[17]。对 Preisach 平面进行以下网格的划分:

$$\begin{cases} [\alpha_i] = [-20, 50, 52, 54, 58, 60, 70, 80, 90, 120] \\ [\beta_i] = [-20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 120] \end{cases} \quad (13)$$

则一共为 110 个网格点,排除 α 、 β 的 35 个网格点,实际需要测量 75 组数据。设鼓包在马氏体相变结束温度以下为负饱和状态,在奥氏体相变结束温度以上为正饱和状态。从负饱和状态开始升温,分别测量每个离散温度对应的格点上的 $F(\alpha, \beta)$,通过 MATLAB 中的线

性插值将网格点细分,每 1°C 设置一个网格点,可以得到 Preisach 平面,如图 7 所示。

3 SMA 鼓包的挠度控制系统设计

3.1 PID 控制

PID 控制是一种线性控制方法,它根据目标值 $r(t)$ 和实际输出值 $y(t)$ 构成控制偏差 $e(t)$,即 $e(t) = r(t) - y(t)$,对偏差 $e(t)$ 进行比例、积分、微分运算,将 3 种运算结果相加,得到控制输入 $u(t)$ 。图 8 是 PID 控制的原理。

PID 控制在连续时间域的表达式为:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{e(t)}{dt} \right] \quad (14)$$

式中, k_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

数字控制系统是一种采样控制,只能根据采样时刻的偏差值计算控制量,因此式(14)不能直接用于数字控制系统,需要进行离散处理。以一系列的 kT (T 为周期)代表连续时间 t ,可近似得到以下用于实时数字控制系统的离散化的 PID 表达式:

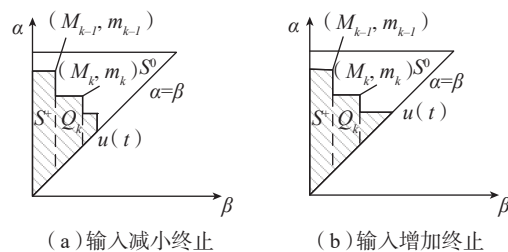


图6 Preisach模型的动态划分
Fig.6 Dynamic division of Preisach model

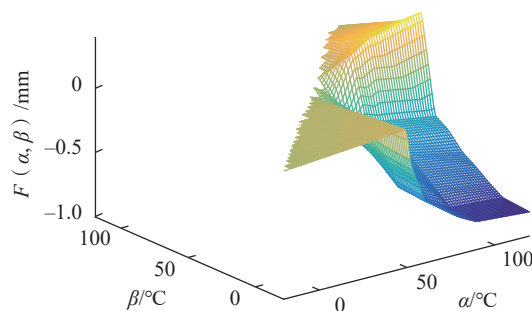


图7 插值得到的Preisach平面
Fig.7 Interpolated plane of Preisach

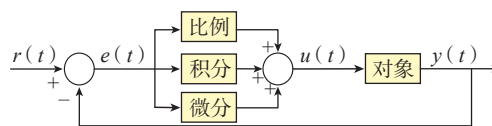


图8 PID控制原理
Fig.8 Principle of PID control

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j)T + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (15)$$

式中, k_p 为比例系数; k_i 为积分系数, $k_i = k_p/T_i$; k_d 为微分系数, $k_d = k_p T_d$; $u(k)$ 为第 k 次采样时控制器输出; $e(k)$ 为第 k 次采样时刻输入控制系统的偏差值; $e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次采样时刻输入控制系统的偏差值; T 为采样周期。

3.2 控制系统设计

图 9 是控制流程的示意图。

利用 PXI 系统搭建了控制平台,全部的试验装置及连接如图 10 所示。

传感器使用热电偶采集温度,激光位移传感器采集位移,两者通过相应的采集卡将信号传输给控制器。控制器是一台计算机,在其上运行 LABVIEW 软件,对采集的数据进行 PID 计算并输出相应控制量,一路通过 PID 计算得到 u_1 信号控制加热,另一路通过开关量 u_2 控制冷却。驱动器分为加热驱动器和冷却驱动器,分别采用两根电阻加热棒辐射加热和液氮喷气冷却。利用采集卡 PXIE-4300 采集位移信号, PXIE-4353 采集温度信号,其中参与 PID 反馈运算的是位移信号, NI-9264 是用来输出两路控制的信号。

鼓包的 LABVIEW 程序中温度误差和位移误差同时参与 PID 计算,只有两类误差均为 0,才会停止输出控制量,防止当位移误差不再变化时,温度变化导致热膨胀产生。图 11 是三维鼓包的 LABVIEW 控制程序的结构。

4 试验结果

控制试验仅针对在外界温度保持不变(30°C)、鼓包不承受外加气动载荷的条件下进行。设此时的挠度值为 0,根据图 7 的 Preisach 平面,按照极值点尽量少的准则,可根据目标位置确定温度变化的过程,如表 1 所示。图 12 是 Preisach 平面的动态划分。

利用 Z-N 整定法确定 PID 参数,在试验中记录挠度和温度数据,挠度和温度数据分别如图 13 和 14 所示。

图 15 展示了控制过程中挠度和温度的关系。阶段 4 的曲线较其他 3 个阶段不平缓,这是由于鼓包表面的冰霜的凝结与消融过程所导致。

当不考虑温度与挠度之间的关系时,可利用挠度反馈的 PID 控制进行试验,图 16 比较了无模型控制和有模型控制的效果,有模型控制的稳态误差和超调量均有不同程度的减小。

表 2 展示了有模型控制和无模型控制过程中的部分时域性能指标,其中有模型控制的最大相对误差为第

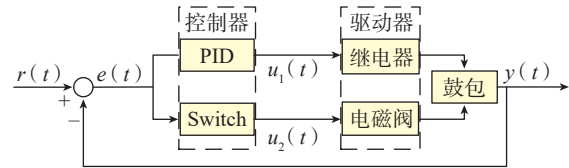


图9 控制系统的流程图
Fig.9 Flow chart of control system

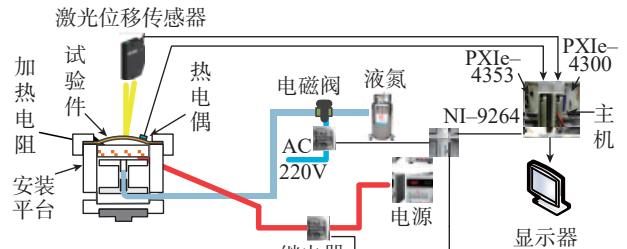


图10 试验仪器
Fig.10 Experimental apparatus

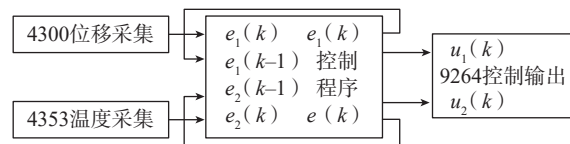


图11 LABVIEW程序结构
Fig.11 Program structure of LABVIEW

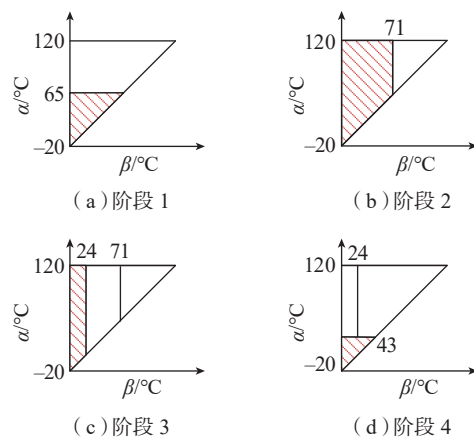


图12 控制目标的Preisach平面动态划分
Fig.12 Dynamic division of Preisach planes for control targets

表1 控制目标
Table 1 Control targets

阶段	位置变化 /mm	几何解释
1	0~0.6	$F(65, -20) = -0.6$
2	-0.6~1.2	$F(120, -20) - F(120, 71) = -0.81 - 0.38 = -1.19$
3	-1.2~0.6	$F(120, -20) - F(120, 24) = -0.81 - (-0.21) = -0.60$
4	-0.6~0	$F(43, -20) = 0.01$

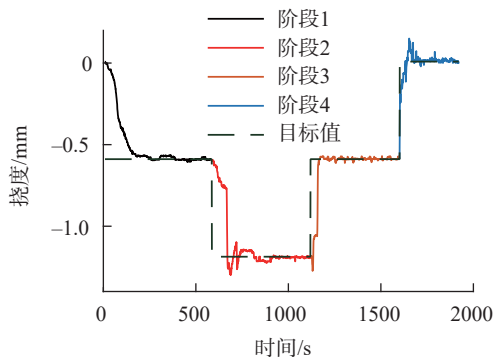


图13 挠度随时间的变化

Fig.13 Deflection change over time

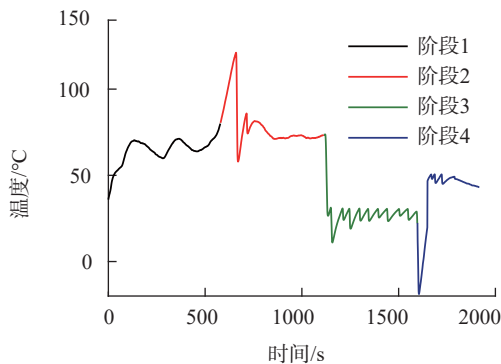


图14 温度随时间变化

Fig.14 Temperature change over time

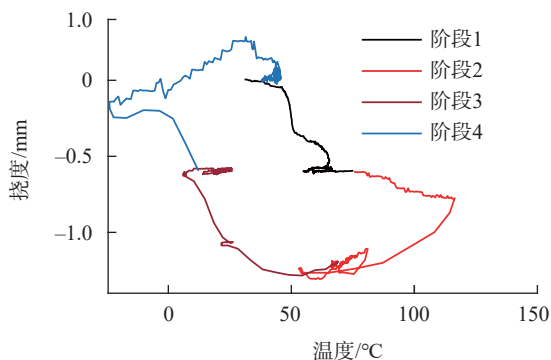


图15 挠度与温度的关系

Fig.15 Deflection vs temperature

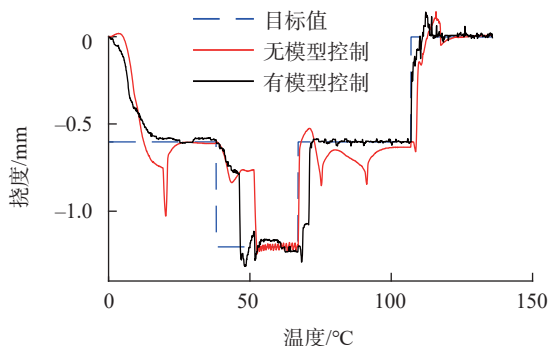


图16 有模型和无模型控制对比

Fig.16 Comparison of control with and without a model

表2 时域性能指标

Table 2 Time domain performance index

	阶段	峰值时间 /s	稳态误差 /mm	相对误差 /%
有模型控制	1	253	0.013	2.17
	2	100	0.012	2.00
	3	66	0.017	2.83
	4	53	0.031	5.17
无模型控制	1	242	0.028	4.67
	2	126	0.024	4.00
	3	56	0.044	7.33
	4	58	0.032	5.33

4 阶段的 5.17%，无模型控制的最大相对误差为第 4 阶段的 7.33%。

5 结论

本文以被动式的激波控制鼓包为应用背景,提出了具有双程记忆效应的 SMA 鼓包,并在不承受外加气动载荷的室温环境下对其进行了挠度控制,研究表明:

(1) 经过训练后的具有双程记忆效应的 SMA 鼓包,可实现通过控制温度以改变挠度,可恢复变形达到鼓包长度的 1.5%;

(2) 利用 Preisach 模型可以建立 SMA 鼓包温度—挠度的迟滞模型,得到目标挠度和目标温度的对应关系;

(3) 在迟滞模型的基础上,利用挠度和温度的双目标 PID 控制可以对鼓包的挠度进行精确控制,且比无模型的单目标 PID 控制效果更好。

参考文献

- [1] STANEWSKY E, DÉLÉRY J, FULKER J, et al. Drag reduction by shock and boundary layer control[M]. Berlin: Springer, 2002.
- [2] QIN N, WONG W S, LEMOIGNE A. Three-dimensional contour bumps for transonic wing drag reduction[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2008, 222(5): 619–629.
- [3] 李沛峰, 张彬乾, 陈迎春, 等. 减小翼型激波阻力的鼓包流动控制技术[J]. 航空学报, 2011, 32(6): 971–977.
LI Peifeng, ZHANG Binqian, CHEN Yingchun, et al. Wave drag reduction of airfoil with shock control bump[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6): 971–977.
- [4] JINKS E R, BRUCE P J, SANTER M J. Adaptive shock control bumps[C]//Proceedings of 52nd Aerospace Sciences Meeting. Reston: AIAA, 2014.
- [5] 聂瑞, 裘进浩, 季宏丽, 等. 自适应鼓包气动构型优化与结构概念设计[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(9): 1896–1905.
NIE Rui, QIU Jinhao, JI Hongli, et al. Aerodynamic configuration optimization and structural concept design of adaptive bump[J]. Journal

of Engineering Thermophysics, 2017, 38(9): 1896–1905.

[6] AUERSWALD C, SENF B, MEHNER J, et al. Closed loop control for shape memory alloy actuators[C]//Proceedings of 11th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. New York: IEEE, 2014.

[7] FENG Y, RABBATH C A, HONG H, et al. Inverse hysteresis control for shape memory alloy micro-actuators based flap positioning system[C]//Proceedings of American Control Conference (ACC). New York: IEEE, 2010.

[8] KOLYVAS E, KOVEOS Y, TZES A. On the interaction of temperature-sensing, shape memory alloy dynamics, and control design for a bending actuator[C]//Proceedings of 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). New York: IEEE, 2014.

[9] AHN K K, NGUYEN B K. Position control of shape memory alloy actuators using self tuning fuzzy PID controller[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2006, 4(6): 756–762.

[10] AHOLA J, MAKKONEN T, NEVALA K, et al. Comparison of position control algorithms of embedded shape memory alloy actuators[C]//Proceedings of International Conference on Mechatronics. ICM, 2009.

[11] AHN K K, KHA N B. Internal model control for shape memory alloy actuators using fuzzy based Preisach model[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 136(2): 730–741.

[12] LUO H Y, ABEL E W. A comparison of methods for the training of NiTi two-way shape memory alloy[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6): 2543–2549.

[13] 郝林. 形状记忆合金鼓包力学特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

HAO Lin. Research on mechanical properties of shape memory alloy bump[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[14] 陈远晟. 压电驱动器的迟滞非线性建模与控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

CHEN Yuansheng. Hysteresis modeling and nonlinear control of piezoelectric actuators[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[15] 刘旺中, 陈照波, 侯守武, 等. 基于 Preisach 理论的形状记忆合金温度-位移迟滞仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 83–87.

LIU Wangzhong, CHEN Zhaobo, HOU Shouwu, et al. Simulation on modeling of temperature-displacement hysteresis in SMA based on Preisach theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(16): 83–87.

[16] JI K H, PARK H J, PARK Y W, et al. Hysteresis modeling and compensation in a magnetostrictive actuator[J]. Proceedings of the International Society for Optical Engineering, 2013, 8689(43): 10413–10420.

[17] MAYERGOYZ I D. Mathematical models of hysteresis[J]. Physical Review Letters, 1986, 56(15): 1518–1521.

通讯作者: 季宏丽, 博士, 教授, 研究方向为智能材料与结构的减振降噪, E-mail: jihongli@nuaa.edu.cn.

(责编 思齐)

(上接第79页)

CAI Wenfeng, ZHOU Huiqun, YU Fengli. Current status and development trend of epoxy resin carbon fiber reinforced composites forming process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 61(10): 54–57.

[4] 陈丽敏, 焦婷, 雷安民, 等. 新型双马结构胶 J299 性能试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(6): 97–100.

CHEN Limin, JIAO Ting, LEI Anmin, et al. Properties test study of new kind of bismaleimide resin J299[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 97–100.

[5] 孙文博, 马玉娥. 填充物、胶膜和 Z-pin 对复合材料 T 型接头强度影响对比 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(1): 110–116.

SUN Wenbo, MA Yu'e. Effects of adhesive, filler and Z-pin on strength of composite T-joint[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(1): 110–116.

[6] 乔海涛, 邹贤. 复合材料胶接技术的研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(2): 11–14.

QIAO Haitao, ZOU Xian. Progress of composite bonding technique[J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40(2): 11–14.

[7] 马海全, 王倩妮, 钱雷, 等. 胶接结构破坏模式及失效机理 [J]. 失效分析与预防, 2012, 7(3): 162–166.

MA Haiquan, WANG Qianni, QIAN Lei, et al. Damage mode and failure mechanism of cementing structure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(3): 162–166.

[8] 耿立艳. 纳米 SiO₂ 改性环氧树脂及其复合材料低温力学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

GENG Liyan. Study on EP resin modified nano-silica and mechanical properties of composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[9] 曲春艳, 王德志, 冯浩, 等. 双马来酰亚胺基碳纤维复合材料胶接用结构胶膜 [J]. 航空制造技术, 2007, 50(S): 118–122.

QU Chunyan, WANG Dezhi, FENG Hao, et al. A structural adhesive film for bonding of carbon fibers reinforced bismaleimide matrix composites[J]. High Performance Composite Structure Manufacturing Technology, 2007, 50(S): 118–122.

[10] HUANG Y D, ZHANG Z Q, TONG Z, et al. Interfacial monitoring during the processing of carbon fiber/PMR-15 polyimide composites[J]. Journal of Materials Process Technology, 1993, 37(1–4): 559–570.

[11] LIN T K, WU S J, LAI J G, et al. The effect of chemical treatment on reinforcement/matrix interaction in Kevlar-fiber/bismaleimide composites[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(9): 1873–1878.

[12] 李国丽, 彭公秋, 王迎芬, 等. T700 级碳纤维 /QY9611 双马树脂复合材料界面性能研究 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(15): 93–97.

LI Guoli, PENG Gongqiu, WANG Yingfen, et al. Interfacial properties of T700 grade carbon fibers/QY9611 BMI matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(15): 93–97.

通讯作者: 雷安民, 硕士, 工程师, 主要从事复合材料结构强度研究, E-mail: boymin1983@163.com.

(责编 思齐)