

# 形状记忆合金智能复合材料自修复中 传感与控制方法研究

朱玉田

(同济大学机械工程学院 上海 200092)

萩原一郎 毛利泰裕

(东京工业大学大学院机械科学科 东京 152-8552 日本)

摘要：对于埋入形状记忆合金丝的智能材料，提出了通过监测电阻的变化来传感外应力引起的应变、判断基材的损伤情况，同时使用参考形状记忆合金丝补偿温度引起的应变，消除传感误差。在结构自修复过程中，由于环境温度、热对流和热辐射条件以及加热电流强度不同等因素致使形状记忆合金的温度状态难以确定，为了尽快让裂缝闭合、在最短时间促成形状记忆合金的相变并防止因过热而烧毁基材或形状记忆合金丝，提出了一种基于电阻变化率反馈的动态自传感加热方法，可以实时监测相变的起始点和结束点，有效地防止过热。试验结果与理论分析吻合良好。

关键词：形状记忆合金 智能材料 自修复 应变传感 加热控制

中图分类号：TP271 TB39

## 0 前言

20 世纪末发展起来的智能材料或称机敏材料，由于其可以根据外部环境或内部条件的变化，做出自适应调整，始终使结构处于最佳状态，因而受到了极大的关注。形状记忆合金(SMA)以其独特的物理性质、优异的力学性能，成为智能材料的常用元件之一。近年来，基于形状记忆合金的智能材料在结构的自修复、振动和噪声的主动控制、机器人等方面取得了一定的应用<sup>[1,2]</sup>。

对于使用 SMA 的智能材料，一方面可以把 SMA 用作传感器件，利用它的电阻、应力、应变等参量的变化来传感外力、温度等的变化，为控制提供输入量；另一方面，还把它用作驱动器件，通常用电加热法促使其相变，产生回复动作，达到驱动目的。在结构的自修复等应用场合下，可以将 SMA 丝或膜片埋入基体，通过对其电阻的监测，判断损伤情况并通过加热 SMA 来修复受损部位。

SMA 的电阻与合金成分、温度、应力和应变等参数有关，通过简单地测量电阻作为裂缝损伤的判断<sup>[3]</sup>，必然会存在很大的误差。为此，提出了通过监测 SMA 电阻的相对变化、同时通过使用参考 SMA 补偿温度引起的应变这一方法来传感外应变，

判断基材的损伤程度。

在结构自修复过程中，为了尽快让裂缝闭合，希望 SMA 的相变速度越快越好，这就需要大的加热电流。但如果不控制好加热时间，很容易引起过热，从而使周围材料甚至自身燃烧或熔化，并会破坏其本身的形状记忆特性。特别是当环境温度、热对流条件等不确定时，使用开环加热控制难以准确地确定加热时间。使用外加温度传感器方式<sup>[4]</sup>可以有效控制加热过程，但需要额外的传感器件且存在安装等问题。为此，提出了一种基于电阻变化率反馈的动态自传感加热方法，可以使嵌有形状记忆合金的结构或者驱动器件安全而快速地动作。

## 1 传感方法

由于 SMA 具有极好的超弹性，将 SMA 丝埋入基材后，在外力作用下，即使基材发生较大的裂缝甚至断裂，SMA 丝也不会被拉断，因此，使用 SMA 本身作为外应力或应变传感器是可行的。

当构件产生裂缝后，位于裂缝处的 SMA 将随裂缝张开位移增加而产生局部变形，使其内部电阻值发生变化。随着裂缝不断扩展及外载的不断加大，裂缝处 SMA 的变形也不断加大，相应地，其电阻值也不断提高，通过测量电阻值的变化量，可以判断监测出裂缝的大小。当构件的裂缝达到需要控制的范围时，控制系统将 SMA 通电加热，它的内部

就产生恢复效应,通过收缩驱动裂缝闭合,实现裂缝的主动控制。

在外力作用下,SMA 丝受力伸长,电阻随之增加。由于 SMA 的电阻率较大,故通过监测电阻的变化,可以很好地判断受力状态。

对应于外应力引起的应变,略去高阶微量,SMA 电阻的变化可表达为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(1+2n)e}{1-2ne} \quad (1)$$

式中  $u$  ——泊松比  
 $e$  ——线应变

由于  $2ne = 1$ ,该式表明电阻的变化与应变成近似线性关系。

另一方面,SMA 的电阻还受温度的影响,电阻的变化可表达为

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(1+2n)e_T + \Delta r_c(T)/r_c(T)}{1-2ne_T} \quad (2)$$

式中  $e_T$  ——温度引起的线应变  
 $r_c(T)$  ——电阻率-温度函数

由于  $e_T$  和  $r_c(T)$  均为非线性函数,且需使用温度变量,为了不增加额外的温度传感器件,使用一根不受外力作用的 SMA 丝作为参考电阻,结合式(1)和(2),可得由应变和温度引起的电阻变化

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(1+2n)e}{1-2ne} + \frac{\Delta R_r}{R_r} \quad (3)$$

式中  $R_r$  ——参考电阻

由此可得外应力引起的应变与电阻之间的关系式

$$e = D/(1+2n+2nD) \quad (4)$$

式中  $D = \Delta R/R - \Delta R_r/R_r$

据此,通过轮流监测每根 SMA 丝电阻的变化,得知基材在相应位置的应变变量,当它达到一定数值后,即说明该处受损并可能或已经有裂缝出现,通过加热使该处的 SMA 丝收缩,即可修复裂缝。

试验使用的复合板如图 1 所示,板材仅在箭头所示的方向上受力,参考用 SMA 丝不受力,只传感基材的温度。SMA 的电阻由所施加的测量电压和电流根据欧姆定律算出,电路如图 2 所示。



图 1 试验用复合材料

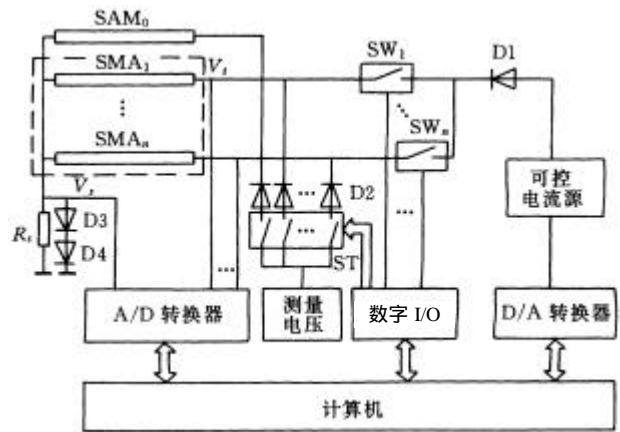


图 2 试验配置显示图

试验结果显示,SMA 经过时效处理后,内部不存在 R 相(中间相)时,不同温度引起的应变都较为接近,而对于不经过时效处理的 SMA,由于 R 相的存在,不同温度引起的应变离散性大,但不论 R 相的存在与否,使用参考电阻法可以有效地补偿温度引起的应变,能够较精确地传感外力所引起的应变变量。

## 2 加热控制方法

损伤的自修复就是对 SMA 进行加热,通常通以一定的电流,依靠电热促使其产生相变,由 SMA 的回复力使裂缝闭合。使用大电流加热可以加快自修复速度,但容易引起过热。而当环境温度、热对流条件等不确定时,很难确定合适的加热电流和加热时间,故检测相变进程、控制加热过程尤为重要。

SMA 的电阻直接受相变过程中各相含量的影响,故可以通过对电阻的监测来判断相变的进程。但是,它不仅与温度密切相关,还与其热处理方法有直接关系<sup>[5]</sup>,另外在多次相变循环过程中也有改变<sup>[6]</sup>。此外,当存在 R 相时,在相变过程中,电阻的变化比不存在 R 相时大,并且对于相变循环次数的增加,电阻随温度变化的重复性较差。因此,电阻与温度不能视为一成不变的某种对应关系。

图 3 为典型 SMA 的电阻率与温度关系曲线,由图可知,不论是否存在 R 相,其电阻率—温度曲线在相变结束时都会有明显的拐点出现。为此,在加热过程中,实时监测并计算电阻的变化,可以准确地判断拐点的出现,从而控制加热过程,实现快速加热且不会引起过热。

为了建立电阻与温度的精确表达式,这里将两相的电阻率均视为温度的函数。

加热时

$$r_c^+(T) = r_{cA}(T) + I^+(T)[r_{cM}(T) - r_{cA}(T)] \quad (5a)$$

冷却时

$$r_e^-(T) = r_{eA}(T) + I^-(T)[r_{eM}(T) - r_{eA}(T)] \quad (5b)$$

式中  $r_{eA}, r_{eM}$ ——奥氏体及马氏体的电阻率，由试验测得，与温度成线性关系

$I^+(T)$ ——加热过程中马氏体的体积分数比例

$$I^+(T) = \begin{cases} 1 & T \leq T_{As} \\ 0 & T \geq T_{Af} \end{cases}$$

$T_{As}, T_{Af}$ ——马氏体到奥氏体相变开始和结束温度

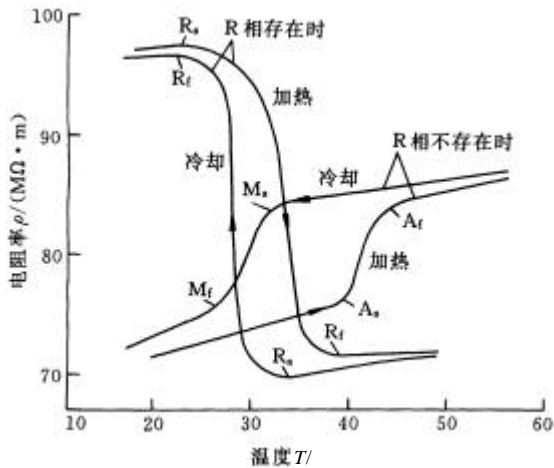


图 3 典型 TiNi 合金的电阻率 - 温度特性曲线

类似地， $I^-(T)$ 为冷却过程中马氏体的体积含量比例，且  $T \geq T_{Ms}$  时  $I^-(T) = 0$   $T \leq T_{Mf}$  时  $I^-(T) = 1$ 。其中  $T_{Ms}$  和  $T_{Mf}$  分别表示奥氏体到马氏体相变开始和结束时的温度。这里，使用下式计算  $I(T)$  [7]

$$\text{加热时} \quad I^+(T) = \frac{1}{2} [\cos(k_A)^{n^+} p + 1] \quad (6a)$$

$$\text{冷却时} \quad I^-(T) = \frac{1}{2} [\cos(k_M)^{n^-} p + 1] \quad (6b)$$

$$\text{式中} \quad k_A = \frac{T - T_{As}}{T_{Af} - T_{As}} - \frac{|s|}{C_A(T_{Af} - T_{As})}$$

$$k_M = \frac{T - T_{Mf}}{T_{Ms} - T_{Mf}} - \frac{|s|}{C_M(T_{Ms} - T_{Mf})}$$

$C_A, C_M$ ——加热和冷却时应力随温度变化曲线的斜率，由试验测得，通常  $C_A \approx C_M$

$s$ ——外应力

$n^+, n^-$ ——用于吻合试验值的常数，通常  $n^+ \approx n^- = 1$

将式(6a)、(6b)代入式(5a)、(5b)并对温度求导，得

$$\frac{\partial r_e^+}{\partial T} = \frac{1}{2}(D_A + D_M) + \frac{p[r_{eA}(T) - r_{eM}(T)]}{2(T_{Af} - T_{As})} \times \sin k_{Ap} - \frac{1}{2}(D_A - D_M) \cos k_{Ap} \quad (7a)$$

$$\frac{\partial r_e^-}{\partial T} = \frac{1}{2}(D_A + D_M) + \frac{p[r_{eA}(T) - r_{eM}(T)]}{2(T_{Ms} - T_{Mf})} \times \sin k_{Mp} - \frac{1}{2}(D_A - D_M) \cos k_{Mp} \quad (7b)$$

式中常数  $D_A = \frac{\partial r_{eA}}{\partial T}$  和  $D_M = \frac{\partial r_{eM}}{\partial T}$  分别为奥氏体和马氏体电阻率随温度变化的斜率。取  $n^+ = n^- = 1$ 。

实际应用中，检测量通常是电阻，对于加热过程，电阻对温度的归一化变化率可以表达为

$$\frac{\partial R^+}{R \partial T} = \partial \left[ \frac{r_e^+(T) l(T)}{S(T)} \right] / \partial T = \frac{\partial r_e^+}{r \partial T} + [1 + 2n(1 - ne_a)] \frac{\partial e_a}{\partial T} = \frac{\partial r_e^+}{r \partial T} + [1 + 2n(1 - ne_a)] \left[ a + \frac{bp \sin k_{Ap}}{2(T_{Af} - T_{As})} \right] \quad (8)$$

式中  $l$ ——SMA 丝长度， $l = l_0(1 + e_a)$

$S$ ——SMA 丝截面积， $S = p r_0^2(1 - ne_a)^2$

$l_0$ ——SMA 丝原始长度

$r_0$ ——SMA 丝原始半径

$e_a$ ——总应变

$$e_a = e + a(T - T_0) + b[1 - I^+(T)]$$

$e$ ——外应变

$a$ ——线膨胀系数

$b$ ——相应变系数

由于温度是未知量，因而电阻随温度的变化率不能直接得到。然而对应于一定的加热电流，忽略 SMA 丝两端的不均匀性，温度与时间的关系可以由下式表达

$$c_v(T) \frac{\partial T(t)}{\partial t} = -\frac{2h}{r}(T - T_0) + r_e(T) \left( \frac{I}{A} \right)^2 \quad (9)$$

式中  $h$ ——热对流系数

$r$ ——SMA 丝的半径

$A$ ——SMA 丝的截面积

$I$ ——加热电流

$T_0$ ——环境温度

$c_v(T)$ ——比热容，考虑到相变过程中的潜热，使用下式计算 [8]

$$c_v(T) = c_{v0} + q \frac{\ln 100}{|T_{As} - T_{Af}|} \times \exp \left[ -\frac{2 \ln 100}{|T_{As} - T_{Af}|} \left| T - \frac{T_{As} + T_{Af}}{2} \right| \right] \quad T_{Mf} \leq T \leq T_{Ms}$$

$$c_v(T) = c_{v0} + q \frac{\ln 100}{|T_{Ms} - T_{Mf}|} \times \exp \left[ -\frac{2 \ln 100}{|T_{Ms} - T_{Mf}|} \left| T - \frac{T_{Ms} + T_{Mf}}{2} \right| \right] \quad T_{As} \leq T \leq T_{Af}$$

$c_{v0}$ ——无相变时的比热容

$q$ ——常数，相变过程中的总潜热， $q =$

$$6.18 \times 10^7 \text{ J/m}^3$$

由式(8)和(9)可以得到电阻变化率与时间的隐式关系式

$$\frac{\partial R}{R \partial t} = \frac{\partial r_c^+}{r \partial T} + [1 + 2n(1-n e_a)] \left[ a + \frac{b \pi \sin k_{AP}}{2(T_{Af} - T_{As})} \right] \times \left[ \frac{-2h}{c_v(T)r} (T - T_\infty) + \frac{r_c^+(T)}{c_v(T)} \left( \frac{I}{A} \right)^2 \right] \quad (10)$$

再代入由式(9)得到的温度对时间的表达式,即可得到电阻率变化率对时间的显式表达式。由于解析式过于繁杂,这里仅给出数值解。

对应于试验时所使用的材料,各参数的取值为:  
 $T_{As} = 313$ ,  $T_{Af} = 335$ ,  $T_{Ms} = 293$ ,  $T_{Mf} = 263$ ,  
 $C_A = C_M = 13.5 \text{ MPa/K}$ ,  $D_A = D_M = 1.1 \times 10^{-9} \text{ } \Omega/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  
 $r_{cA}|_{T=80} = 8.9 \times 10^{-7} \text{ } \Omega/\text{m}$ ,  $r_{cM}|_{T=20} = 6.5 \times 10^{-7} \text{ } \Omega/\text{m}$ ,  
 $C_{v0} = 5.44 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ,  $r = 2 \times 10^{-4} \text{ m}$ ,  
 $h = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $I = 1.0 \text{ A}$ 。

对应于加热过程,计算结果如图 4 所示。电阻的变化率在  $T = T_{As}$  对应时间轴的 1.2 s 处由最小值开始增大,在  $T = T_{Af}$ , 对应时间轴的 5.3 s 处又到达最小值。

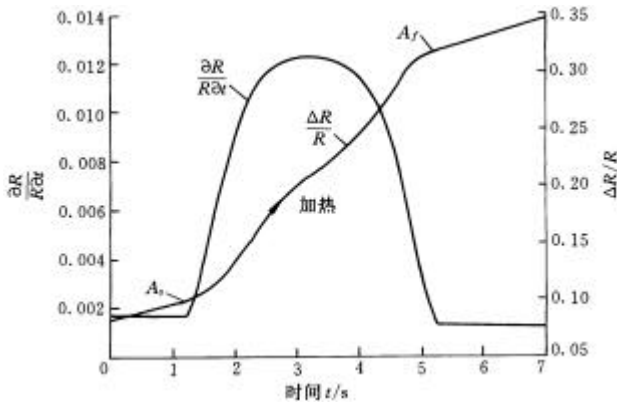


图 4 Ti-Ni SMA 电阻的变化率随时间变化曲线

### 3 试验验证

为了验证该动态自传感加热控制方法的有效性,搭建了如图 2 所示的电路。主要由形状记忆合金、固态继电器、电流源、电压源、A/D、D/A 转换器及计算机等组成。试验使用了 NI 公司的数据采集卡和 Labview 软件。SMA0 用于温度参考, SMA1 ~ SMA $n$  为埋入基材内的合金丝。固态继电器组 SW1 ~ SW $n$  用于控制各 SMA 丝加热电流的通断,模拟开关 ST 用于向 SMA 丝顺序施加测量电压,二极管 D1 和二极管组 D2 用于防止逆流, D3、D4 用于旁路加热电流,保护取样电阻。D/A 转换器的输出电压加至可控电流源,产生所需要的加热电流。

在损伤传感阶段, SW1 ~ SW $n$  全断开, ST 顺序闭合,由 ADC 读取各 SMA 丝上所加的测量电压  $V_t$  和电流取样电阻  $R_s$  上的压降  $V_s$ ,根据欧姆定律得到其电阻值,即

$$R = R_s (V_t - V_s) / V_s \quad (11)$$

由式(4)确定外应变大小,当某根 SMA 丝的应变达到一定数值(试验时取 0.02)后,说明该处有裂缝出现,实施加热修复过程。

在加热修复阶段,对应的 SW 闭合,电流加至形状记忆合金进行加热。片刻之后, SW 断开,相应的 ST 闭合,施加测量电压,根据式(11)计算此刻的电阻值,然后再计算其相对变化率,即  $\Delta R / R \Delta t$ 。重复该加热 - 检测过程,根据图 4,若由最小开始增加,说明相变开始,若再次变为最小,则说明相变已经结束,即可断开加热电流。

试验时使用了长 0.35 m、 $f$ 0.4 mm 的 Ti-Ni 形状记忆合金丝,加热电流为 1.0 A,每次加热时间  $\Delta t$  为 100 ms。ADC 的采样频率为 200 kHz,在检测阶段,取 10 次采样的平均值计算 SMA 的电阻,故检测过程大约耗时 60  $\mu$ s,由于其远小于加热时间,故可以忽略其间的断电冷却作用。试验结果如图 5 所示,与计算结果吻合良好。在后续的试验中,加热电流分别取 1.5 A 和 2.0 A,相变结束时间缩短至约 1.0 s 和 0.5 s,控制电路动作正常。

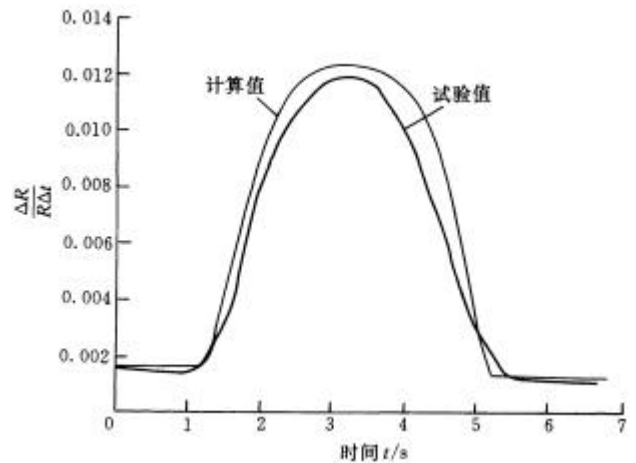


图 5 试验结果

### 4 结论

在由埋入 SMA 丝构成的智能材料中,一方面可以用 SMA 丝作为传感器件,通过监测其电阻的变化,可以得到外应力引起的应变大小,使用温度参考 SMA 丝可以有效补偿环境温度引起的热应变,提高传感精度;另一方面,还将 SMA 丝用作驱动器件,通过加热方式促使其收缩,修复基材的裂缝。

在加热控制过程中，使用动态自传感加热控制方法可以实时监测相变过程中电阻的变化，探明相变的起始和结束。通过理论分析和试验验证，该加热控制方法准确、有效。它具有以下优点。

(1) 可以使用大加热电流以加快相变过程，缩短动作时间。对于结构自修复使用的智能复合材料，可确保其快速地执行修复动作，防止损伤的进一步扩大。

(2) 在相变结束时能够及时地切断加热电流，可以有效地防止过热，保证驱动器件的可靠性和基材的安全。

(3) SMA 的动作不再受环境温度、热对流及热辐射条件等的影响。可用于环境温度、热对流及热辐射条件等不确定或变化快的航空、航天领域及水下设备。

实际应用过程中，图 2 所示的硬件结构可以使用单片微控制器或专用集成电路来代替，以便降低成本、缩小体积。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Q, Levy C. Active vibration control of elastic beam by means of shape memory alloy layers. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5 : 400 ~ 406
- 2 Yoshiyuki N, Masakatsu F, Yuji H. Hitashi's robot hand. *Robotics Age*, 1984, 6 : 18 ~ 20
- 3 Wu X D, Fan Y Z, Wu J S. A study on the variations of the electrical resistance for NiTi shape memory alloy wires during the thermo-mechanical loading. *Materials and Design*, 2000, 21 : 511 ~ 515
- 4 Kuribayashi K. Improvement of the response of an SMA actuator using a temperature sensor. *Int. J. Robotics Research*, 1991, 10(1) : 13 ~ 20
- 5 Uchil J, Mohanchandra K P, Ganesh Kumara K, et al. Study of critical dependence of stable phases in Nitinol on heat treatment using electrical resistivity probe. *Materials Science and Engineering*, 1998, A 251 : 58 ~ 63
- 6 Wu X D, Wu J S, Wang Z. The variation of electrical resistance of near stoichiometric NiTi during thermo-mechanic procedures. *Smart Materials and Structures*, 1999, 8 : 574 ~ 578
- 7 Liang C, Rogers C. A one-dimensional thermo-mechanical constitutive relations for shape memory materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1990, 1 :

207 ~ 234

- 8 Bhattacharyya A, Lagoudas D C, Wang Y, et al. On the role of thermoelectric heat transfer in the design of sma actuators: theoretical modeling and experiment. *Smart Materials and Structures*, 1995, 4 : 252 ~ 263

## RESEARCH ON SENSING AND CONTROL OF SHAPE MEMORY ALLOY EMBEDDED IN INTELLIGENT MATERIAL

Zhu Yutian

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Hagiwara Ichiro Yasuhiro Mohri

(Department of Mechanical Engineering and Science, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8552, Japan)

**Abstract :** For intelligent materials embedded with shape memory alloy (SMA) wires, a method based on checking the resistance variation of the SMA is proposed. By this method, the strain caused by tensile load can be measured and the damage of the matrix be estimated. The strain caused by the temperature effect is compensated; hence the sensing error is eliminated by using a reference SMA wire. During the self-repair process, generally the temperature state of SMA wires embedded in composites is uncertain due to the ambient temperature, the heat convection, the heat radiation or the external current inputted for heating, to suppress the crack(s) by inducing the SMA phase transformation as fast as possible but not to overheat or burn the matrix or the SMA itself, a dynamic heating/self-sensing method which can detect the beginning and the ending of the SMA phase transformation based on the feedback of the SMA resistance variation is proposed and verified in laboratory experiments. Analytical solutions are compared favorably with the experimental data.

**Key words:** Shape memory alloy Intelligent material

Self-repair Strain sensing Heating control

作者简介：朱玉田，男，1967 年出生，博士后，副教授。主要研究方向为机电控制与自动化、模拟/数字信号处理、声学/振动测量分析系统。

E-mail : yutianzhu@hotmail.com