

文章编号 1004-924X(2014)04-0963-07

## 镍钛诺合金涡卷弹簧的力学建模与测试

吴佳俊<sup>1,2</sup>, 王帮峰<sup>3\*</sup>, 芦吉云<sup>3</sup>, 顾莉莉<sup>1,2</sup>

- (1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016;
3. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**以非接触式形状记忆合金平面涡卷弹簧为例,研究了此类元件的作动原理,建立了镍钛形状记忆合金涡卷弹簧的力学模型。以普通平面涡卷弹簧的计算方式和形状记忆合金的相变方程本构模型为基础,建立了形状记忆合金涡卷弹簧的力学模型,获得了预紧扭力、激励温度、输出扭力和转角位置之间的关系表达式,并且通过两组测试验证了该力学模型和关系表达式。在对激励温度和扭力输出的关系测试中,模型计算值对测试值的确定系数为0.669,最小误差为2.4%,最大误差为215.9%;在对转角位移和扭力的关系测试中,计算值与测试值的确定系数为0.336,最小误差为48.9%,最大误差为350.0%。测试显示,力学模型的计算值与测试的数据具有类似的表征形式。

**关键词:**镍钛诺形状记忆合金;平面涡卷弹簧;形状记忆本构方程;扭力驱动器

**中图分类号:**TG139.6;TH135.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0963

## Mechanical modeling and tests of nitinol spiral spring

WU Jia-jun<sup>1,2</sup>, WANG Bang-feng<sup>3\*</sup>, LU Ji-yun<sup>3</sup>, GU Li-li<sup>1,2</sup>

- (1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
  2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
  3. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)
- \* Corresponding author, E-mail: bfwang@nuaa.edu.cn

**Abstract:** By taking non-contact nitinol Shape Memory Alloy(SMA) spiral springs for examples, this paper explores the activer principle of this kinds of spiral springs and estallishes a mechanical model for the spiral springs. On the basis of the calculation method of an ordinary plane spiral spring and the constitutive model of phase transformation equation for the SMA, a mechanical model of SMA spiral spring was established, and the relationship among the preload, motivate temperature, output torsion and the angular displacement was obtained. Then, the mechanical model was validated by practical measurements. In the temperature and torsion relationship testing, the coefficient of determination between test value and calculated value is 0.669, the minimum error rate is 2.4% and the maximum error rate is 215.9%. In the angular displacement and torsion relationship testing, the coefficient of

收稿日期:2013-12-05;修订日期:2014-01-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075207);航空科学基金资助项目(No. 2011ZA52013);江苏高校优势学科建设工程资助项目

determination between test value and calculated value is 0.336, the minimum error rate is 48.9% and the maximum error rate is 350.0%. The results show that the test results and calculated value have the similar form of representation.

**Key words:** nitinol Shape Memory Alloy(SMA); plane spiral spring; shape memory constitutive equation; torsion actuator

## 1 引言

目前,智能材料已广泛应用于各行业领域<sup>[1-3]</sup>,而形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)则是智能材料中具有代表性的驱动元件之一。自上世纪 70 年代以来,对 SMA 材料本构模型的建立和工程应用一直是各国学者的研究热点。

就本构模型而言,以相变方程为基础的 Brinson 方程为最典型模型<sup>[4]</sup>。Brinson 模型是建立在 Tanaka 的指数型相变方程<sup>[5]</sup>以及 Liang 等建立的余弦型相变方程<sup>[6]</sup>之上的,主要特点是将 SMA 的马氏体体积分解为温度诱发和应力诱发两部分,克服了指数型、余弦型相变方程不能描述 SMA 从孪晶马氏体向非孪晶马氏体转变的局限性。周博等在 Brinson 工作的基础上,建立了形状记忆因子<sup>[7,8]</sup>的概念,统一了 SMA 材料的超弹性和形状记忆效应现象,使得本构方程更易于使用。

在应用方面,SMA 具有高力-质量(体积)比,适合作为致动材料使用。同时,SMA 可以忽略其致动元件的质量,而且能够在无重力条件下工作,具有安静、清洁、无摩擦等特点,因此有着良好的空间应用前景。目前 SMA 在航天领域的应用主要为两方面:一是将天线等设备在发射状态时压缩为小体积便于装载,进入空间后恢复原有形状进行工作;二是将其作为致动元件,对空间机构上的某些运动部件进行驱动。目前研究人员以 SMA 作为致动元件所设计的驱动设备有以下几种典型装置:于东等人通过链轮和链条,实现了将 SMA 丝材的直线伸缩变形转变为旋转运动后对外输出扭力<sup>[9]</sup>;Kai Yang 以弹性棒体内置两根 SMA 丝的方式,制成了一种新式的嵌入式 SMA 弯曲驱动器<sup>[10]</sup>;陶宝祺、熊克等将 SMA 丝与薄壁圆管相结合,构成了扭力管驱动器<sup>[11]</sup>;Liuke Xia 等以差动 SMA 驱动器为动力源,制作了微型的无阀泵<sup>[12]</sup>。Barbarino 等以 SMA 对连续弹性体进行驱动,实现了对机翼后缘的形状控制<sup>[13]</sup>。

对于输出直线位移的 SMA 驱动元件,研究人员通过将其制备成螺旋弹簧的形式,使扭转变形转化为直线位移,增加了 SMA 元件的直线变形行程,使其实用性大为增加;而对于输出旋转位移的 SMA 驱动装置,以上提出的几种驱动器都有着需要运动转换机构以及运动行程偏小等缺点。涡卷弹簧作为一种典型扭力的存储释放装置,应用非常广泛,例如微机电中的电刷、真空短路器中的储能机构、起重器中的制动缓冲器等,而在航天领域中,太阳能帆板展开动作是由铰链中的平面涡卷弹簧提供动力<sup>[14]</sup>。本文提出的 SMA 平面涡卷弹簧,以涡卷弹簧收放形式进行预紧和扭力输出,结构简单且可直接输出扭力。

目前,此类 SMA 涡卷弹簧元件尚未得到国内外研究人员的重视,其理论研究与应用研究等均处于起步阶段。本文以非接触式 SMA 平面涡卷弹簧为例,尝试解释此类器件的作动原理、研究影响其性能与主要参数之间的关系、建立这一类型元件的本构模型,为进一步研究与应用这一类器件提供简洁快速的性能计算方式。

## 2 SMA 卷簧的力学模型

将厚度为  $h$ ,宽度为  $b$  的镍钛诺形状记忆合金带材制作成为平面涡卷非接触式卷簧(以下简称 SMA 卷簧),涡线起始端半径为  $R$ ,在初始自由状态时,卷簧的节距为  $p$ ,圈数为  $n$ 。

对于普通弹性材料的涡卷弹簧,JB/T 7366-1994 给出了计算方式<sup>[15]</sup>:

$$\phi = \frac{Tl}{EI}, \quad (1)$$

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (2)$$

$$l = 2\pi nR + 4\pi np, \quad (3)$$

式中: $\phi$  为应变转角,  $T$  为扭力,  $E$  为弹性模量,  $I$  为截面惯性矩。  $l$  为变形段长度。

SMA 材料性能受到应力与温度的明显影响,

因此在建立 SMA 卷簧的力学模型时,应选用合适的本构模型。

### 2.1 SMA 材料的本构模型

本文使用的 SMA 合金材料的本构模型以周博等提出的形状记忆因子模型和 Brinson 提出的一维相变本构模型为基础,其表达式为:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E(\varphi)} + \epsilon_L \eta + \xi(t - t_0), \quad (4)$$

式中:  $\epsilon$  代表应变变量,  $\sigma$  代表应力,  $\varphi$  代表材料中的马氏体体积分数,  $\epsilon_L$  为材料的最大可回复应变,  $\eta$  为形状记忆因子,  $t$  为温度, 下标 0 代表初始状态。  $E(\varphi)$  表示对于 SMA 材料, 弹性模量  $E$  与马氏体体积分数  $\varphi$  有关, 其计算方式为:

$$E(\varphi) = E_A + \varphi(E_M - E_A), \quad (5)$$

式中:  $E_M$  代表马氏体的弹性模量,  $E_A$  表示奥氏体的弹性模量。

Brinson 在文献[4]中给出了马氏体体积分数  $\varphi$  的计算方式; 周博在文献[7, 8]中给出了形状记忆因子  $\eta$  计算方式。

由孪晶马氏体向非孪晶马氏体转变, 且温度低于马氏体起始相变温度时:

$$\eta = \eta_0 + (1 - \eta_0) \frac{\sigma - \sigma_s^{cr}}{\sigma_f^{cr} - \sigma_s^{cr}}, \quad (6)$$

$$\varphi = 1. \quad (7)$$

在向奥氏体相变, 且温度高于奥氏体起始相变温度时:

$$\eta = \eta_0 \frac{\sigma - \sigma_{Af}}{\sigma_{Af} - \sigma_{As}}, \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{2} \cos \left[ \frac{\pi(t - A_s - \sigma/C_A)}{A_f - A_s} \right] + \frac{\varphi_0}{2}, \quad (9)$$

式中:  $\sigma$  代表应力,  $\sigma_s^{cr}$  为马氏体起始转变临界应力,  $\sigma_f^{cr}$  为马氏体终止转变临界应力,  $\sigma_{As}$  为奥氏体起始转变应力,  $\sigma_{Af}$  为奥氏体终止转变应力,  $A_s$  为奥氏体起始相变温度,  $A_f$  为奥氏体终止相变温度,  $C_A$  为奥氏体相变温度-临界应力系数, 下标 0 代表初始状态。

奥氏体起始转变应力  $\sigma_{As}$  和奥氏体终止转变应力  $\sigma_{Af}$  的计算方式为:

$$\sigma_{As} = \begin{cases} C_A(t - A_s), & t > A_s \\ 0, & t \leq A_s \end{cases}, \quad (10)$$

$$\sigma_{Af} = \begin{cases} C_A(t - A_f), & t > A_f \\ 0, & t \leq A_f \end{cases}. \quad (11)$$

### 2.2 SMA 卷簧的力学模型

参考式(4), 建立 SMA 卷簧的力学模型:

$$\Delta\psi = \Delta\psi_E + \Delta\psi_\eta + \Delta\psi_t, \quad (12)$$

式中: 卷簧转角变形量  $\Delta\psi$  可看做扭力产生的弹性变形, 为  $\Delta\psi_E$ 、材料在应力下发生相变引起的可恢复塑性变形  $\Delta\psi_\eta$  以及温度变化引起的热膨胀变形  $\Delta\psi_t$  的叠加。

对 SMA 卷簧力学模型作以下假设以降低计算量和简化表达式:

(1) 以一维形变假设为基础, 描述 SMA 卷簧的变形过程, 且设定材料在拉伸与压缩时具有相同的弹性模量与最大可回复应变。

(2) 变形过程中材料所有物理参数处处相同。

(3) 材料为纯弯曲应变且截面形状不变。

(4) 由于热膨胀引起的应变远小于扭力产生的弹性应变和材料相变应变, 因此忽略等式中的第 3 项。

(5) SMA 卷簧变形段的长度不变。

基于以上 5 点假设, 将式(12)改写为:

$$\psi - \psi_0 = \frac{l}{I} \left[ \frac{T}{E(\varphi)} - \frac{T_0}{E(\varphi_0)} \right] + \frac{2l\epsilon_L}{h} (\eta - \eta_0). \quad (13)$$

在 Brinson 提出的本构方程中, 马氏体体积分数  $\varphi$  是一个关键的计算参数, Brinson 将其定义为关于应力和温度的函数, 因此在构建 SMA 卷簧的近似力学模型时, 需要求得变形过程中卷簧的应力状态。

将 SMA 卷簧的变形视作受弯矩  $T$  的作用下发生的纯弯曲变形, 截面平均弯曲应力  $\bar{\sigma}$  为截面应力的绝对值之和的平均值。设结构中中性层不变, 应力自中性层沿厚度  $y$  方向线性增加, 则:

$$|T| = \left| 2b \int_{-\frac{1}{2}h_0}^{\frac{1}{2}h_0} \sigma(y) y dy \right|, \quad (14)$$

$$\bar{\sigma} h = 2b \int_0^{\frac{1}{2}h} |\sigma(y)| dy. \quad (15)$$

将式(15)代入式(14), 得到截面平均弯曲应力为:

$$\bar{\sigma} = \left| \frac{3T}{bh^2} \right|. \quad (16)$$

将式(16)代入式(6、8、9), 可得到在不同状态下的形状记忆因子  $\eta$  的马氏体体积分数  $\varphi$ 。

## 3 SMA 卷簧的驱动性能计算

对 SMA 卷簧而言, 其输入分别是预紧扭力和受激励温度, 输出是载荷扭力和转角位置。

将 SMA 卷簧的工作过程分为初始状态、预紧状态、待用状态、受激励输出状态 4 个阶段。

(1) 在初始状态各参数以下标 0 表示。温度低于马氏体起始相变温度  $t_0 < M_s$ , 扭力  $T_0 = 0$ ; 马氏体体积分数  $\varphi_0 = 1$ , 记忆因子  $\eta_0 = 0$ , 应变转角  $\psi_0 = 0$ 。

(2) 在预紧阶段的各参数以下标 1 表示。温度  $t_1 = t_0 < M_s$ ; SMA 卷簧在预紧扭力  $T_1$  作用下的变形角为  $\psi_1$ 。

$$\varphi_1 = \varphi_0 = 1, \quad (17)$$

$$\eta_1 = \frac{3T_1 - 6h^2\sigma_s^r}{(\sigma_f^r - \sigma_s^r)bh^2}, \quad (18)$$

$$\psi_1 = \frac{T_1 l}{E_M I} + \frac{2\varepsilon_L l \eta_1}{h}. \quad (19)$$

为了确保 SMA 卷簧产生可恢复变形且不失效, 预紧扭力应满足:

$$\frac{1}{3}bh^2\sigma_s^r \leq T_1 \leq \frac{1}{3}bh^2\sigma_f^r. \quad (20)$$

(3) 在待用阶段的各参数以下标 2 表示。保持温度  $t_2 = t_0 < M_s$ , 将预紧扭力卸去后  $T_2 = 0$ , SMA 卷簧恢复弹性变形后, 残余变形转角为  $\psi_2$ 。

$$\varphi_2 = \varphi_0 = 1, \quad (21)$$

$$\eta_2 = \eta_1 = \frac{3T_1 - bh^2\sigma_s^r}{(\sigma_f^r - \sigma_s^r)bh^2}, \quad (22)$$

$$\psi_2 = 2\varepsilon_L l \frac{3T_1 - bh^2\sigma_s^r}{(\sigma_f^r - \sigma_s^r)bh^3}. \quad (23)$$

(4) 在受激励输出状态的各参数以下标 3 表示。将温度升高至  $t_3 > A_s$  时, 卷簧产生形状回复, 对外输出扭力  $T_3$  和转角位移  $\psi_3$ 。

因为应力变化是由马氏体向奥氏体转变过程中马氏体与奥氏体弹性模量的差距所导致, 因此有约束条件:

$$T_3 \leq \frac{1}{3}bh^2\sigma_{A_s}. \quad (24)$$

同样原因, 在回复过程中, 不应发生奥氏体逆向转化为马氏体的状况, 因此有约束条件:

$$T_3 \leq \frac{1}{3}bh^2\sigma_{M_s}. \quad (25)$$

满足式(24)、(25), 并且  $T_3 \leq \frac{1}{3}bh^2\sigma_{M_f}$  时:

$$\varphi_3 = \frac{\varphi_2}{2} \cos \left[ \frac{\pi(t_3 - A_s - 3T_3/C_A bh^2)}{A_f - A_s} \right] + \frac{\varphi_2}{2}, \quad (26)$$

$$\eta_3 = \eta_2 \frac{3T_3/bh^2 - \sigma_{M_f}}{\sigma_{A_s} - \sigma_{M_f}}, \quad (27)$$

$$\psi_3 = \frac{T_3 l}{E(\varphi_3)I} + \frac{2\eta_3 \varepsilon_L l}{h}. \quad (28)$$

当  $T_3 < \frac{1}{3}bh^2\sigma_{M_f}$  时, 材料相变为全奥氏体:

$$\varphi_3 = 0, \quad (29)$$

$$\eta_3 = 0, \quad (30)$$

$$\psi_3 = \frac{T_3 l}{E_A I}. \quad (31)$$

将输出应变角度  $\psi_3$  与待用应变角度  $\psi_2$  的差值视作卷簧元件的输出转角位移  $\lambda$ :

$$\lambda = \psi_2 - \psi_3. \quad (32)$$

在满足式(24)、(25), 并且当  $T_3 \geq \frac{1}{3}bh^2\sigma_{M_f}$

时, 将式(21~23)、(26~28)代入式(32)得:

$$\lambda = F(T_1) - G(T_1, T_3) - \frac{6T_3 l}{bh^3 \{E_A + (E_M - E_A)[H(t_3, T_3) + 1]\}}, \quad (33)$$

式中:

$$F(T_1) = \frac{6\varepsilon_L T_1 l - 2\varepsilon_L bh^2 \sigma_s^r}{(\sigma_f^r - \sigma_s^r)bh^3}$$

$$G(T_1, T_3) = \frac{2\varepsilon_L / (3T_1 - bh^2\sigma_s^r)(3T_3 - bh^2\sigma_{M_f})}{(\sigma_f^r - \sigma_s^r)(\sigma_{A_s} - \sigma_{M_f})b^2 h^5}$$

$$H(t_3, T_3) = \cos \left[ \frac{\pi}{A_f - A_s} \left( t_3 - A_s - \frac{3T_3}{C_A bh^2} \right) \right]$$

在满足约束条件(24)、(25), 并且当  $T_3 < \frac{1}{3}bh^2\sigma_{M_f}$  时, 将式(21~23)、(29~31)代入式(32)得到:

$$\lambda = \varepsilon_L l \frac{3T_1 - bh^2\sigma_s^r}{(\sigma_f^r - \sigma_s^r)bh^3} - \frac{12T_3 l}{E_A bh^3}. \quad (34)$$

式(33)、(34)即是 SMA 卷簧的转角输出位置  $\lambda$  与扭力  $T_3$ 、激励温度  $t_3$  预紧扭力  $T_1$  的关系表达式。

## 4 测试与算例

### 4.1 测试对象与测试系统

SMA 卷簧元件连同转轴、轴承支座以及安装底座等一起构成测试对象, 如图 1 所示。

测试系统如图 2 所示。利用蜗轮蜗杆自锁性特点, 系统可将 SMA 卷簧的转角变形量有效控在任意位置。以 WAN-5 型扭力传感器记录测试对象的输出扭力; 以 E6B2 编码器作为角位移传感器记录测试对象的转角变形量; 以恒温水浴锅控制温度。

选用镍钛诺合金作为 SMA 卷簧的制备材

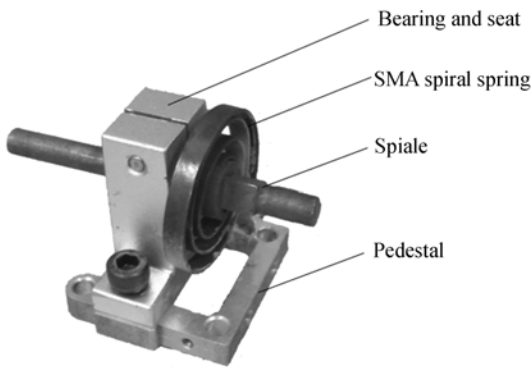


图 1 SMA 卷簧测试对象

Fig. 1 Testing Sample of SMA spiral spring

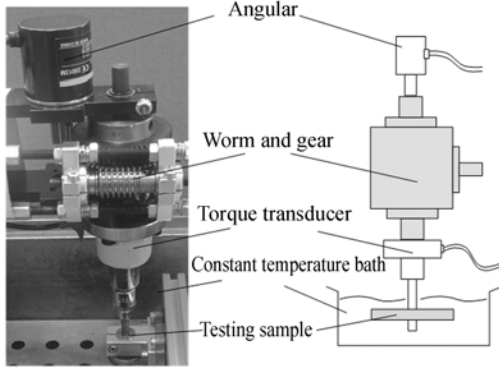


图 2 SMA 卷簧测试系统

Fig. 2 Test system of SMA spiral spring

料,材料的性能参数以及卷簧的几何结构参数如表 1 所示。

表 1 SMA 卷簧的材料及结构参数

Tab. 1 Materials and structure parameters of SMA spiral spring

$M_s/^\circ\text{C}$	$M_f/^\circ\text{C}$	$A_s/^\circ\text{C}$	$A_f/^\circ\text{C}$	$E_M/\text{GPa}$	$E_A/\text{GPa}$
27	22.5	35	55	22	50
$C_M/\text{MPa} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$		$C_A/\text{MPa} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$		$\sigma_s^{\text{cr}}/\text{MPa}$	$\sigma_f^{\text{cr}}/\text{MPa}$
8		17		35	150
$\epsilon_L/\%$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$R_s/\text{mm}$	$p/\text{mm}$	$n_b$
5.5	6.50	0.83	3.00	5	3.5

### 4.2 测试过程

测试过程中,激励温度以  $t_{en}$  表示、预紧扭力以  $T_{pre}$  表示、输出扭力以  $T_{ex}$  表示,其物理意义与第 3 章中的  $t_1$ 、 $T_1$ 、 $T_3$  一致。实验的具体过程为:

(1)将 SMA 卷簧在自由状态下加热至  $80^\circ\text{C}$  (高于  $A_f$ ),缓慢降温至  $20^\circ\text{C}$  (低于  $M_f$ )。此过程

反复 3 次以上以确保材料处于全孪晶马氏体状态。

(2)将环境温度设定为  $20^\circ\text{C}$  (低于  $A_s$ ),依据式(20)的约束条件,将 SMA 卷簧预紧至  $270^\circ$ ,  $T_{pre}$  为  $0.069\text{ N}\cdot\text{m}$ 。释放约束后其残余应变为  $214^\circ$ 。将测试对象与测试系统连接。

(3)将水浴温度从  $30^\circ\text{C}$  (低于  $A_s$ )开始,以约  $2^\circ\text{C}/\text{min}$  速度升温,记录水浴激励温度  $t_{en}$  与扭力  $T_{ex}$  数值,将测试记录的数值与式(33)、(34)计算获得的数值对比,结果如图 3 所示。

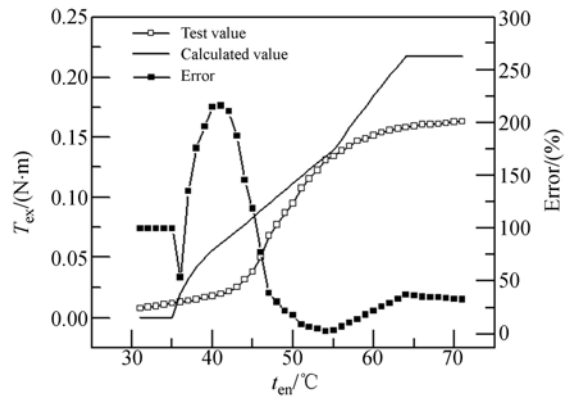


图 3 SMA 卷簧扭力和激励温度的关系

Fig. 3 Relationship between torsion of SMA spiral spring and temperature

(4)待扭力输出数值  $T_{ex}$  稳定时,保持激励温度  $t_{en}$  不变( $70^\circ\text{C}$ )。通过限位装置,将 SMA 卷簧的转角位移以  $3^\circ/\text{s}$  增大,记录转角位移  $\lambda$  与扭力输出  $T_{ex}$  的数值。将测试记录的数值与按式(33)、(34)计算获得的数值对比,结果如图 4 所示:

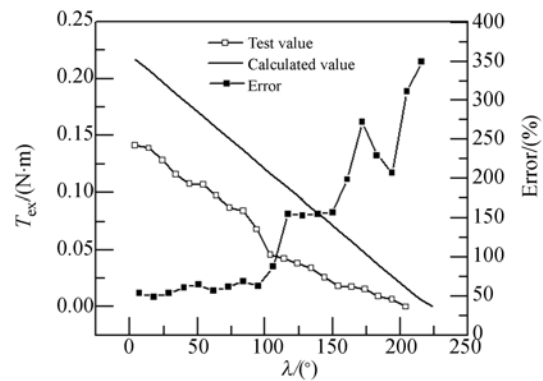


图 4 SMA 卷簧扭力和转角位移的关系

Fig. 4 Relationship between torsion of SMA spiral spring and angular displacement

### 4.3 误差分析

在预紧阶段,弹性变形量小于计算量,约  $122^\circ$ ,但残余应变误差较小,约为  $10^\circ$ 。

激励温度  $t_{en}$  与输出扭力  $T_{ex}$  的计算值与测试数值的误差率曲线如图 3 中所示。最大误差率为在  $41^\circ\text{C}$  时的  $215.9\%$ ,最小误差率为在  $54^\circ\text{C}$  时的  $2.4\%$ ;对于两组数据整体而言,理论计算值对测试值的确定系数 R-Square 为  $0.669$ 。

转角位移  $\lambda$  与扭力输出  $T_{ex}$  的计算值与测试数值的误差率曲线如图 4 中所示。最大误差率为在转角位移  $194^\circ$  时的  $350.0\%$ ,最小误差率为在转角位移  $14^\circ$  时的  $48.9\%$ ;对于两组数据整体而言,理论计算值对测试值的确定系数 R-Square 为  $0.336$ 。同时由于材料已相变为全奥氏体,弹性模量为常数  $E_A$ ,测试对象的转角位移与扭力输出值应为线性关系。图 4 中,模型计算值的斜率为  $-9.9 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}/(^\circ)$ ;测试数据点的拟合直线斜率为  $-7.7 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}/(^\circ)$ 。

除了测试仪器以及个人误差外导致模型的计算值与测试值误差的主要原因有以下几点:

(1)JB/T 7366-1994 对于卷簧的基本力学模型是基于多圈数卷簧的假设,对于圈数较少的卷簧计算时,会产生一定的误差。

(2)现有的 SMA 材料的本构模型相对实际情况描述存在误差。

(3)SMA 卷簧的力学模型是建立在全部材料的变形方式为纯弯曲小变形的假设下,同时又忽略了温度变化引起的热膨胀,这些假设可以简化计算过程,但与实际情况存在差别。

针对以上的误差产生原因,以下几点可作为减少误差的改进工作。

### 参考文献:

[1] 黄俊,张建辉,王守印. 多级“Y”型流管无阀压电泵的原理与试验验证[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 423-430.  
HUANG J, ZHANG J H, WANG SH Y. Theory and experimental verification on the valveless piezoelectric pump with multistage Y-shape tubes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 423-430. (in Chinese)

(1)进行更多实验,导入关于卷簧圈数对力学模型影响的修正系数。

(2)建立大变形、非纯弯曲的变形模型。

(3)不再默认带材中各部分的应力和应变相同,着重于讨论应力应变的分布规律。

(4)不再忽略温度引起的热膨胀因素对力学模型的影响,尤其是在卷簧圈数较多,材料长度较长的情况下。

(5)对 SMA 材料的基本参数进行补充,尤其是需要区别 SMA 材料的弹性模量与最大可恢复形变在拉伸与压缩状况下的不同。

(6)将力学模型中的一维 SMA 本构方程以三维本构方程代替。

(7)以有限元法作为数值计算方法,为建立的理论模型的提供验证手段。

## 5 结 论

本文将 SMA 带材制备成卷簧形式,可以在预紧后受温度激励时,直接对外输出扭力而不必通过运动转换机构。本文中的测试对象的最大扭力值超过  $0.16 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,最大转角位移超过  $200^\circ$ ,表明此类驱动元件具有研究价值和应用前景,有望在进一步的研究和发展后,能在航空航天、精密仪器等领域得到应用。以 JB/T 7366-1994 中普通卷簧的计算方式和 Brinson 以及周博提出的 SMA 相变本构模型为基础,建立了 SMA 卷簧的力学模型。通过测试,对力学模型的有效性进行了验证。测试显示,力学模型的计算值与测试的数据具有相同的表征形式。

[2] 温建明,马继杰,曾平. 压电旋转驱动器制作及性能测试[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 131-136.  
WEN J M, MA J J, ZENG P. Machining and functional testing of piezoelectric rotary actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 131-136. (in Chinese)

[3] 张立,王帮峰,周勇. 纸盆结构在压电式合成射流驱动器上的应用[J]. 中国机械工程, 2013, 24(002): 149-152.  
ZHANG L, WANG B F, ZHOU Y. Application of

- cone structure on piezoelectric synthetic jet actuator [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24 (002):149-152. (in Chinese)
- [4] BRINSON L. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1993, 4 (2):229-242.
- [5] TANAKA K. A thermomechanical sketch of shape memory effect: one-dimensional tensile behavior [J]. *Res. Mech.*, 1986,18 (3):251-263.
- [6] LIANG C, ROGERS C. One-dimensional thermo-mechanical constitutive relations for shape memory materials [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1990,1 (2):207-234.
- [7] 周博,王振清,梁文彦. 形状记忆合金的细观力学本构模型[J]. *金属学报*, 2006,42 (9):919-924.  
ZHOU B, WANG ZH Q, LIANG W Y. A micro-mechanical constitutive model of shape memory alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006,42 (9): 919-924. (in Chinese)
- [8] 周博,刘彦菊,冷劲松. 形状记忆合金的宏观力学本构模型[J]. *中国科学: G 辑*, 2009,(7):998-1006.  
ZHOU B, LIU Y J, LENG J S. A macro-mechanical constitutive model of shape memory alloys[J]. *China Ser. G*, 2009,(7):998-1006.
- [9] 于东,张博明,金龙学. 形状记忆合金旋转驱动器结构设计方法[J]. *机械工程学报*, 2010,(14):91-94.  
YU D, ZHANG B M, JIN L X. Structural design method of rotation gear actuated by shape memory alloys [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010,(14):91-94. (in Chinese)
- [10] YANG K. Research and application of new inserted shape memory alloy actuators [J]. *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, 2010, 57 (8): 2845-2850.
- [11] 熊克,陶宝祺,姚恩涛. 形状记忆合金扭力驱动器的力学模型和实验研究[J]. *航空学报*, 2001,22 (4):379-381.  
XIONG K, TAO B Q, YAO E T. Mechanical model and experimental analysis on shape memory alloys torsion actuator [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001,22 (4):379-381. (in Chinese)
- [12] XIA L, WANG F, LU J. A valveless micropump driven by differential SMA actuator[C]. *International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*, 2007:64230Y-1-7.
- [13] BARBARINO S, AMEDURI S, PECORA R. Wing chamber control architectures based on SMA: numerical investigations[C]. *Proceedings of SPIE International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*, 2007:64231E.
- [14] 孙京. 太阳翼铰链平面涡卷弹簧参数设计[J]. *航天器工程*, 2000,(3):37-43.  
SUN J. Parameters design of spiral spring in solar panel [J]. *Spacecraft Engineering*, 2000,(3): 37-43. (in Chinese)
- [15] JB/T 7366 平面涡卷弹簧设计计算[S]. 1994.  
JB/T 7366 Design and calculation of plane scroll spring[S]. 1994. (in Chinese).

#### 作者简介:



吴佳俊(1984—),男,上海人,博士研究生,2006年于南京航空航天大学获得学士学位,主要研究方向为智能材料、自适应结构以及柔性变体机构优化。  
E-mail: wujiajun@live.cn



王帮峰(1970—),男,甘肃兰州人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为结构健康监测、自适应结构以及信号处理技术。E-mail: bfwang@nuaa.edu.cn