

文章编号: 1000-8055(2010)09-2023-07

一种低速连续旋转 SMA 电机的设计与试验

刘 颖, 闫晓军

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 利用形状记忆合金(SMA)的记忆特性设计了一种低转速、可连续旋转的电机; 利用 Liang-Roger 本构模型进行了 SMA-弹簧的旋转位移驱动器的设计以及电机扭矩和转速的设计; 完成了 SMA 电机的机械结构设计; 完成了控制规律设计; 进行了性能试验。研究表明, 在试验温度 27℃下, 用 6V 恒压电源驱动的 SMA 电机实现了连续旋转, 转速为 0.03 rad/min。SMA 电机转速低, 扭矩大, 功率密度高, 可连续旋转, 有很大的工程应用潜力。

关 键 词: 形状记忆合金(SMA); 低转速; 连续旋转; SMA 电机

中图分类号: V423

文献标识码: A

Design and experimental study of a SMA motor with low speed and continuous rotation

LIU Ying, YAN Xiaojun

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A continuously rotating motor actuated by shape memory alloys (SMA) wires was designed, which rotates with a low speed and high torque. Liang-Roger constitutive model was used to design the SMA wire spring actuator. Based on the actuator, the mechanical structure and control system were designed. Finally the motor was tested and it shows that: the SMA motor can rotate continuously with the speed of 0.03 rad/min under 6V constant power supply at 27℃. It is concluded that the new motor, which is actuated by SMA wires owning the characteristics of low rotating speed, high torque and high power density, has a potential use in industry application.

Key words: shape memory alloys; low speed; high torque; continuous rotation; SMA (shape memory alloys) motor

工业上需要低转速、连续旋转的驱动装置实现机构运动, 如医用 X 光机的床身翻转, 太空舱门的关闭, 以及大型机械手关节的旋转等。而传统的电磁感应电机由于转速高, 需与齿轮、蜗轮蜗杆等减速机构配套输出动力, 其结构复杂, 体积、质量大, 功率密度低^[1]。

针对传统电机所存在的问题, 目前已发展了三类可连续旋转的低速电机, 其一为超声波电

机^[2], 其优点为结构简单, 功率密度高, 但其输出功率低; 其二为液压电机^[3], 其优点为扭矩大, 效率高, 但其功率密度低, 目前主要应用在大型地面机械上; 其三为由传统的电磁感应电机结合减速器发展而来的谐波原理低速电机^[4]以及利用定转子齿槽效应引起的气隙磁导变化来进行工作的永磁低速同步电机^[5], 其转速依然在 100 rad/min 以上, 不能直接输出动力。

收稿日期: 2009-08-03; 修订日期: 2009-12-09

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项资金(200351); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-06-0178)

作者简介: 刘颖(1984-), 男, 北京延庆人, 硕士生, 主要从事智能材料结构方向的研究。

如果要开发一种低速输出的新型电机, 驱动源应该具备如下两个特征: ①低速输出; ②高功率密度, 而形状记忆合金(shape memory alloys, 简称 SMA) 具有非常高的功率密度^[6], 普通的 SMA 功率密度大于 1000 W/kg (先进微小电机的功率密度为 $70 \sim 100 \text{ W/kg}$ 左右, 只有 SMA 驱动源的 $1/10$), 并且它的响应速度相对较低, 容易实现低速输出。

SMA 丝拉伸至弹性形变范围以外卸载后不能恢复到原始长度, 此称为残余变形。具有残余变形的 SMA 丝被约束后, 对其加热, 将由低温下的马氏体相转化为高温状态的奥氏体相^[7], 并回复到原始长度, 并在相变过程中能够产生巨大的回复力^[8]。NiTi 合金是 SMA 的一种, 其在残余应变 2% 左右回复性能极为出色, 疲劳寿命可达上万次^[9], 是良好的制作 SMA 驱动装置的材料。利用此特性配合普通合金弹簧制成的 SMA 弹簧偏置驱动器集控制器与传感器于一体, 大幅减轻了质量, 减小了体积, 提高可靠性。

目前国内外的研究主要集中于利用此特性制成驱动器以产生弯矩及正拉力, 其中以正拉力居多, 而利用此特性产生连续扭矩的研究还鲜见报道^[10]。

因此, 本文通过合理的机构设计, 把 SMA 巨大的相变力转换为扭矩输出, 制成一种能量密度高、输出扭矩大、能够连续旋转的电机。SMA 电机克服了传统电机由减速器所带来的质量大、噪声大等问题, 相比超声波电机, 其输出扭矩大, 而相比于液压电机, 其功率密度高, 有深远的应用前景。

1 原理设计

本文提出的低速、可连续旋转 SMA 电机利用 SMA-弹簧旋转位移型偏置机构作为驱动器, 把 SMA 丝回复过程的直线运动转化为旋转运动, 实现扭矩的输出; 并利用摩擦棘轮机构使驱动器的输出扭矩以间歇运动的形式施加在主轴上; 通过同轴分列式结构, 配以一定的控制规律, 实现电机的连续旋转以及扭矩的连续输出。

驱动器机构简图如图 1 所示, 其中中介盘和主轴可做相对旋转运动, 而摩擦棘轮和主轴固接。其工作过程分为两个部分, ①控制系统发出指令, 对经预拉伸的 SMA 丝通电加热, 达到相变温度后, SMA 丝开始回复, 回复力大于弹簧的初始拉力, SMA 丝长度缩短, 以 O_1 为轴心, 带动中介盘

沿 C 向转动, 实现功率的输出, 并拉动弹簧至工作拉力; ②通电结束后, SMA 丝温度下降, 发生逆相变, 回复力消失, 弹簧拉动中介盘沿 D 向转动, 并把 SMA 丝拉伸到装配状态下的长度, 其本身也恢复到初始长度, 机构恢复到初始状态, 从而完成一次作动。

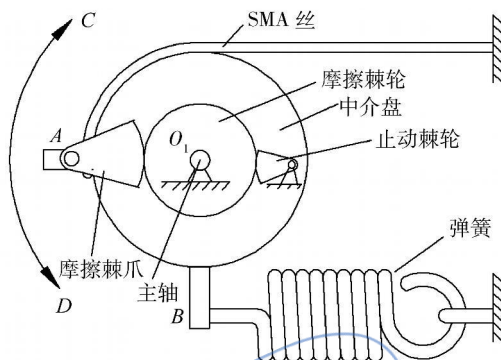


图 1 SMA 电机原理图

Fig. 1 Sketch of SMA motor

在过程①中, 中介盘带动摩擦棘爪首先使其与摩擦棘轮呈啮合状态, 然后带动摩擦棘轮沿 C 向继续旋转, 从而带动主轴实现扭矩输出; 在过程②中, 摩擦棘爪对摩擦棘轮沿 D 向有滑动摩擦力, 从而使其与止动棘爪啮合, 保持静止状态, 不随中介盘沿 D 向转动, 从而实现了主轴以间歇运动形式输出扭矩。

把上述系统串联在一起, 形成同轴分列式结构, 如图 2 所示, 其中每一组系统都有独立的驱动器系统与摩擦棘轮系统, 共用一根主轴, 其摩擦棘轮都与主轴固接, 因此, 在其中一组作动时, 其他组的摩擦棘爪就充当了止动棘爪的角色。在控制系统的作用下, 间隔一定时间, 对 SMA 丝依次通电, 便可实现主轴的连续旋转和扭矩的连续输出。

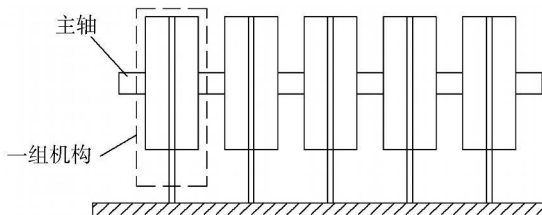


图 2 同轴分列式结构原理图

Fig. 2 Sketch of coaxial rows type

2 关键技术参数设计

通过对 SMA 电机原理上的分析, 可以看出, 为了使电机实现稳定、可靠的工作, 需要对驱动器

系统、摩擦棘轮系统以及控制规律进行详细设计, 本文将对驱动器系统和控制规律进行理论上的分析, 而摩擦棘轮系统也是电机设计中的重要部分, 因其设计理论比较成熟^[1], 本文不再赘述。

2.1 SMA 单体驱动器设计

SMA 单体驱动器设计是 SMA 电机设计的重要环节, 其直接影响到电机的扭矩、转速以及消耗的功率、驱动器的组数等参数。本文首先对设计方法进行分析, 根据设计方法, 进行扭矩和转速的参数设计。

2.1.1 设计方法

影响机构扭矩输出主要有三方面的参数: SMA 丝的性能参数, 安装长度 L 和残余应变 ε , 弹簧的设计参数以及弹簧的放大系数 R , 如图 1 所示, 其中 R 的定义为

$$R = O_1B/O_1A \tag{1}$$

影响机构转速的参数为 SMA 丝加热到高温奥氏体相的时间 t_1 以及冷却到低温马氏体相的时间 t_2 。

在外部换热条件与 SMA 丝高温回复应力一定的情况下, SMA 丝径越粗, 高温回复力越大, 而冷却时间越长, 反之则高温回复力低, 冷却时间短, 综合考虑高温回复应力与冷却时间, 本文采用丝径 0.5 mm, 含 Ni 量 50.6% 的 NiTi 合金丝, 并用 Liang-Roger 本构模型描述图 1 中 SMA-弹簧的相互作用关系。其中, SMA 丝的性能参数可以通过试验测定与计算得到; 为了保证电机长时间工作的可靠性以及 SMA 丝反复作动的一致性, 选取 SMA 残余应变 $\varepsilon = 2\%$, 在电机外形尺寸一定的情况下, SMA 丝的安装长度 L 越长, 则驱动器每次作动转过的角度越大, 因此, 应尽量增大 L ; 在 SMA 残余应变 ε 与 SMA 丝安装长度 L 一定的情况下, 结合 SMA 的性能参数, 利用 Liang-Roger 模型可以得到不同弹簧刚度系数与放大系数的乘积 kR 的情况下, SMA 所产生的回复应力与温度以及位移的关系, 之后根据驱动器的设计要求以及机构的安装要求确定弹簧的设计参数和放大系数; 结合以上结论, 利用对流换热原理得到两个时间参数 t_1 和 t_2 。

2.1.2 驱动器扭矩参数设计

驱动器有两个工作状态, 其一为经预拉伸的 SMA 加热回复, 并拉动弹簧至工作状态, 驱动器输出扭矩为 SMA 高温回复力的扭矩与弹簧作用力的扭矩之差; 其二为弹簧拉动加热回复完毕的 SMA 至屈服状态, 弹簧恢复到安装状态, 由此便

可得出 SMA-弹簧驱动器的设计准则为: 弹簧的安装载荷大于 SMA 的屈服力, 弹簧的工作载荷小于 SMA 的高温回复力。

弹簧的设计参数取决于 SMA 的性能参数, 其中 SMA 的屈服应力相对稳定, 则弹簧的安装载荷容易确定, 而 SMA 的高温回复应力和弹簧的刚度 k 以及比例系数 R 的乘积 kR 密切相关, 其中, 为了得到弹簧的设计参数与比例系数, 本文采用 Liang-Roger 模型^[12]对 SMA 的高温回复应力进行预测, 其控制回复模型如式 (2) 所示

$$(\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_0) = \phi(T - T_0) + \Omega(\xi - \xi_0) \tag{2}$$

其中

$$\phi = \frac{\Theta}{1 + \frac{2sD}{kRL}}, \quad \Omega = \frac{\Omega}{1 + \frac{2sD}{kRL}}$$

SMA 在升温过程中应力与温度关系表示为

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} \phi(T - T_m) + \bar{\sigma}_0, & A_s^o \geq T \geq T_m \\ \phi(T - A_s^o) + \Omega(\xi - \xi_0) + \bar{\sigma}_{1s}, & A_f^o \geq T \geq A_s^o \\ \phi(T - A_f^o) + \bar{\sigma}_{1f}, & T \geq A_f^o \end{cases} \tag{3}$$

其中 σ 为应力, σ_0 为初始应力, T 为温度, T_0 为初始温度, ξ 为马氏体含量, ξ_0 为初始马氏体含量, Θ 为热弹性系数, Ω 为相变系数, s 为 SMA 丝横截面积, D 为弹性模量, k 为弹簧刚度, R 为放大系数, L 为 SMA 丝原始长度。

通过计算结果可得到在弹簧刚度系数 k 为 10 N/mm, R 为 1.44 的情况下的高温回复力与时间的变化曲线如图 3 所示, SMA 丝输出的最大扭矩为 1272 N·mm, 因此可确定弹簧的工作载荷, 弹簧的作用行程为 SMA 丝回复长度, 从而在一定安装空间要求下, 可设计出与 SMA 丝相匹配

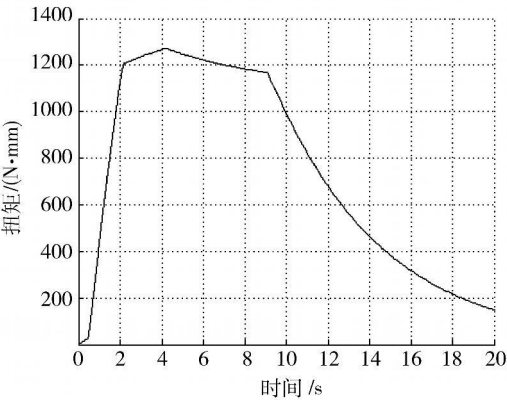


图 3 驱动器 SMA 输出扭矩随时间变化设计曲线
Fig. 3 Theoretical torque output of SMA motor
versus time

的弹簧,之后根据弹簧的工作载荷与行程便可求得驱动器的最大输出载荷为 $1008\text{N} \cdot \text{mm}$.

2. 1. 3 驱动器转速参数设计

SMA-弹簧单体驱动器中的 SMA 丝加热回复输出载荷的时间为 t_1 , SMA 冷却时间为 t_2 . t_1 和 t_2 之和为驱动器的工作周期, 其中, t_1 决定了驱动器输出扭矩时的转速, 在驱动器工作行程一定的情况下, t_1 越小, 在此时间段内, 电机的转速越快; t_2 决定了驱动器中的 SMA 丝的加热间隔, 为了使 SMA 电机的连续旋转, 在其工作过程中, 必须保证至少一组 SMA-弹簧单体驱动器在工作, 其他驱动器处于未工作状态或者工作完毕后的冷却状态, 因此, 在能够保证 SMA 电机连续转动的前提下, t_2 越小, 所需的 SMA-弹簧驱动器的组数越少. 所以, 驱动器的工作周期决定了电机的转速以及 SMA-弹簧单体驱动器的组数. 其中, t_1 也与 SMA-弹簧驱动器的组数相关, t_1 变大, 留给其他组驱动器冷却的时间也变长, 所需的 SMA-弹簧驱动器的组数也相应减少, 因此, 合理的分配 t_1 和 t_2 在工作周期中所占的比例也是 SMA 电机设计中的重要因素.

SMA 丝的电阻率很大^[13], 故通电加热可在 0.1 s 的数量级内达到奥氏体相变结束温度以上, 在外界环境温度不变的情况下, 加热时间越长, 冷却时间就越长, 相应的单体工作周期变长, 为了缩短 SMA 电机单体的工作周期, 特求得最短的加热时间 t_1 . 在地面环境下, t_1 只和表面传热系数 h 、加热电流 I 有关, 温度和时间关系如式(4)所示

$$t_1 = - \tau_{\text{ln}} \left(1 - \frac{T - T_0}{T_f} \right) \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} T_f = \frac{I^2 R_{\text{heat}}}{\pi d h} \\ \tau = \frac{d \rho c}{4 h} \end{cases} \tag{5}$$

冷却过程遵循规律如下:

$$t_2 = - \tau_{\text{ln}} \left(\frac{T - T_0}{T_i - T_0} \right) \tag{6}$$

其中 T 为加热温度, T_0 为环境温度, I 为加热电流, R_{heat} 为 SMA 电阻, d 为 SMA 丝径, ρ 为密度, c 为 SMA 的比热容, h 为表面传热系数, T_i 为冷却过程的初始温度.

由式(4)和式(6)可以得到 SMA 加热和冷却温度-时间的理论曲线, 如图 4 所示.

根据 Liang-Roger 模型, 结合式(4)和式(6)与胡克定律, 应用软件编程可得到 SMA-弹簧驱

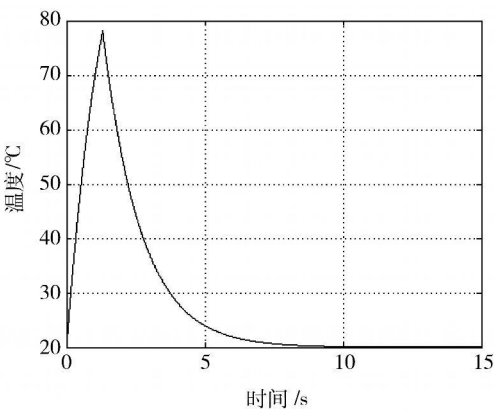


图 4 SMA 丝温度-时间示意图
Fig. 4 Temperature of SMA versus time

动器的转动角度-时间曲线, 如图 5 所示, 并与试验进行对比. 其中连续曲线为理论曲线, 星点为试验曲线. 通过对比理论与试验曲线, 可以看出通电 4.2 s 左右, 驱动器转动角度达到最大值, 转动角度为 14° 左右, 其驱动器输出扭矩也为最大值.

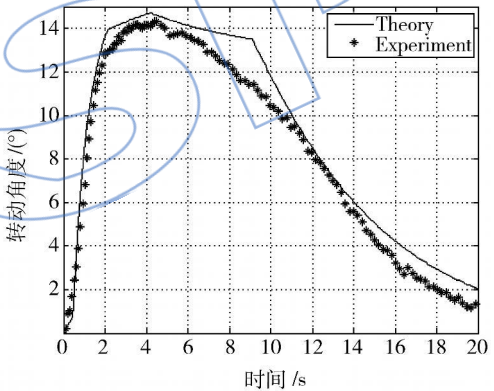


图 5 时间与转角的计算与试验对比曲线
Fig. 5 Calculation results and experimental data of angle versus time

机构转动角度达到位移最大值的同时, 扭矩也达到最大值, SMA 丝完成马氏体相变, 因此此刻温度控制在马氏体相变结束温度 M_f 左右, SMA 丝能够完成回复, 在这种情况下, t_1 为最小值, 因此热量为最小值, 冷却效果最好. 由此可得出 SMA 电机的最短加热时间 t_1 为 4.2 s 以及相应的 t_2 为 15 s, 从而得到 SMA 电机的工作周期为 20 s.

因此, 可以确定保证 SMA 电机连续旋转的驱动器组数为 4 组, 为了提高电机连续转动的可靠性, 本文所采取的驱动器的组数为 5 组.

2. 2 控制规律设计

良好的控制规律设计是实现电机连续、稳定

运转的重要保证, 本文对电机采取开环控制, 用脉冲调宽^[14] (PWM) 的方法实现加热功率调节. 其控制系统简图如图 6 所示, 给定加热时间 t_1 , 组与组之间的间隔时间 t_3 , 占空比 PWM, 即可控制电机的扭矩输出方式, 其中控制 t_1 大小可控制 SMA 驱动器转动的角度; 改变 t_3 大小可控制电机输出扭矩的大小及持续情况; 控制 PWM 大小可改变最佳加热时间 t_1 .

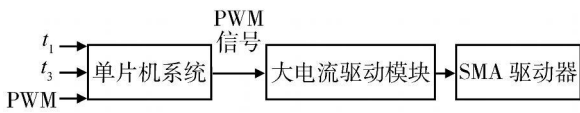


图 6 SMA 电机控制系统简图

Fig. 6 Schematic diagram of SMA motor's control system

本文以控制 t_3 为例, 来说明通过改变控制参数来改变电机的扭矩输出方式, 其参数如表 1 所示, 图 7~ 图 10 分别对应为 t_3 为 4. 2, 2. 1, 0. 63, 0 时的扭矩与时间的关系. 图 7 表示优先保证电机连续旋转的情况下, 扭矩输出为类阶跃力, 图 8 表示为电机扭矩输出 $1\,200\text{ N}\cdot\text{mm}$ 可维持在 7 s 左右, 图 9 表示电机输出扭矩连续上升至 $4\,500\text{ N}\cdot\text{mm}$ 后, 阶跃下降, 图 10 表示优先保证电机扭矩, 五组驱动器同时作动, 电机最大输出扭矩为

表 1 控制规律参数列表

Table 1 Parameters of control rules

t_1	t_3	PW M
4. 2	4. 2	1
4. 2	2. 1	1
4. 2	0. 63	1
4. 2	0	1

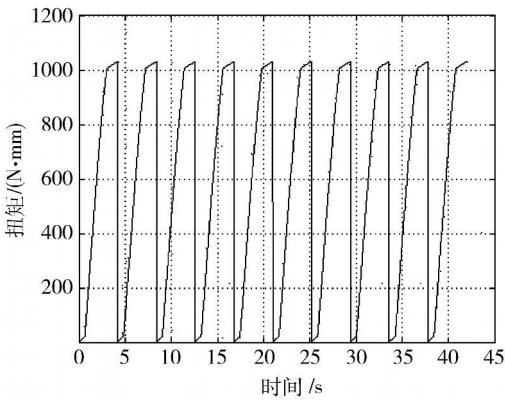


图 7 $t_3 = 4.2$ 时扭矩和时间的关系

Fig. 7 Torque versus time ($t_3 = 4.2$)

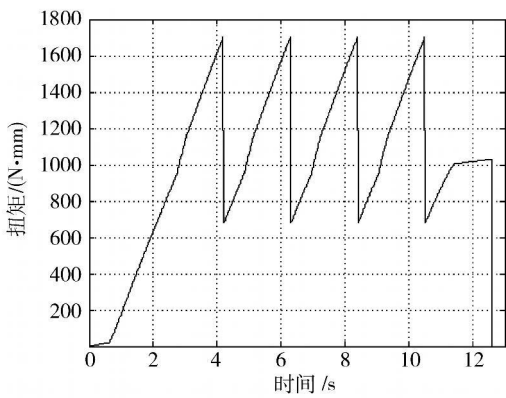


图 8 $t_3 = 2.1$ 时扭矩和时间的关系

Fig. 8 Torque versus time ($t_3 = 2.1$)

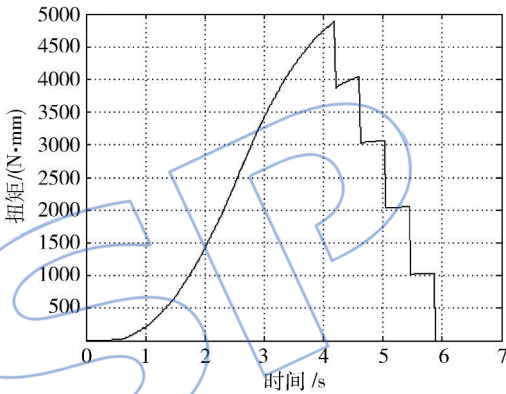


图 9 $t_3 = 0.63$ 时扭矩和时间的关系

Fig. 9 Torque versus time ($t_3 = 0.63$)

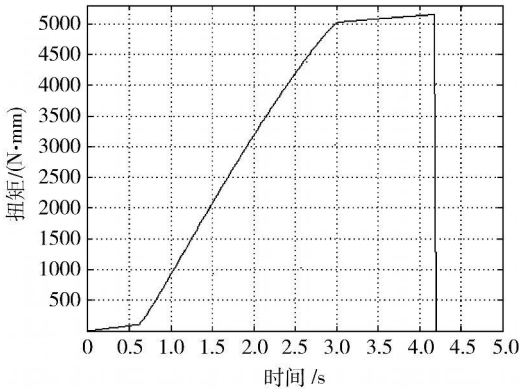


图 10 $t_3 = 0$ 时扭矩和时间的关系

Fig. 10 Torque versus time ($t_3 = 0$)

$5040\text{ N}\cdot\text{mm}$. 因此, 可根据不同应用场所更改电机控制参数以得到不同的输出扭矩.

3 试验测试

为了检验理论设计的可行性, 根据设计方案, 完成控制电路的搭接与一套电机的加工与装配, 之后进行电机的测试工作.

首先进行单组的 SMA-弹簧驱动器的转角测

试,试验装置如图 11 所示,试验条件如下:实测温度为 27℃;SMA 丝的加热装置采用 6V 的恒压电源;测量转角采用 2500 分度的编码器,测量精度为 0.144°,电机主轴通过联轴器与编码盘相连,转速计能够测量编码盘的速度以及转角;电机其他组的摩擦棘爪脱开,以使在第 1 节中所提过程②中的主轴可随中介盘旋转,在测量过程中获得过程②的角度与时间的关系;SMA 丝通过控制系统与恒压电源相连.对其中一组驱动器通电, t_1 为 4.2s,便得到主轴输出转角与时间的关系曲线如图 5 所示,试验表明,驱动器转角能达到 14°,与理论值比较接近.

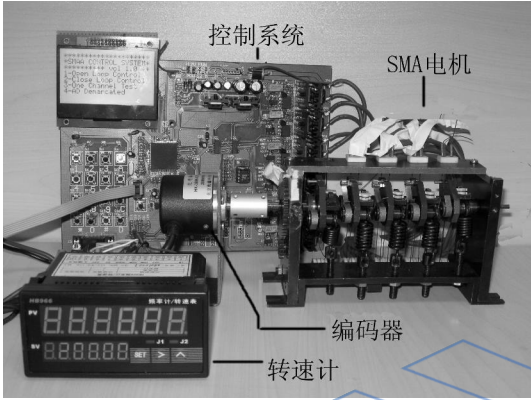


图 11 试验装置图

Fig. 11 Photo of test device

其次为了实现电机的连续旋转,进行多组驱动器通电试验,温度条件、加热条件以及转速计安装与单组驱动器试验一致.通电时间为 t_1 为 4.2s,间隔时间 $t_3=4.2$ s, PWM=1,试验时间为 27s,主轴输出转角与时间的关系如图 12 所示,试验表明,电机能够实现连续旋转,并且主轴能够实现恒定转速输出,电机的平均转速为 1.8(°)/s,也即 0.03 rad/min.

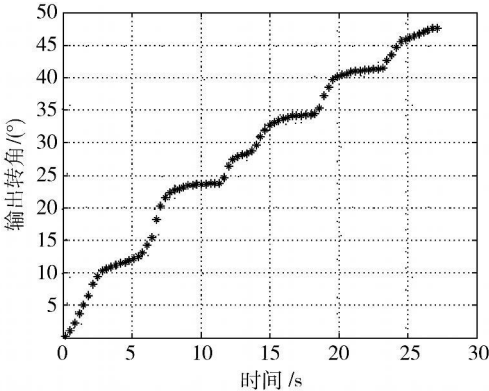


图 12 SMA 电机连续旋转时输出转角与时间的关系

Fig. 12 Angle versus time of SMA motor's continuous rotation

试验表明,SMA 电机能够连续旋转,转速相对恒定.试验过程中也暴露了一些问题亟待解决:摩擦棘轮机构在工作的初始阶段有打滑现象,使得驱动器的扭矩没有完全传递到主轴上;因为主轴较长,且开有键槽,在弹簧和 SMA 丝共同对主轴的径向力的作用下,主轴沿周向的刚度存在差异,导致其在转动过程中存在阻转扭矩.

4 结 论

通过理论与试验研究,设计了一种新型的低速连续旋转 SMA 电机.在试验温度 27℃下,用 6V 恒压电源驱动的 SMA 电机实现了连续旋转,转速为 0.03 rad/min.

参考文献:

[1] 唐苏亚.微电机新产品开发和应用前景展望[J].微特电机,1997(5):33-37.
TANG Suyu. Prospects of new micro-motor's development and application [J]. Small and Special Electrical Machines, 1997(5): 33-37. (in Chinese)
[2] 张绣望,叶淑彬.超声波电机应用领域拓展探讨[J].科技资讯,2006(31):20-21.
ZHANG Xiuwang, YE Shubin. Development of ultrasonic motor applications[J]. Science and Technology Information, 2006(31): 20-21. (in Chinese)
[3] 唐德威,罗昌杰,邓宗全.多圆柱齿轮液压马达的性能[J].机械工程学报,2007,43(11):119-124.
TANG Dewei, LUO Changjie, DENG Zongquan. Multi-spur gear hydraulic motor performance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 119-124. (in Chinese)
[4] 胥全迎,冯彬.捷达超低速电机获奖[J].机械工程师,2001(8):66.
XU Quanying, FENG Bin. Jetta's award-winning ultra-low-speed motor[J]. Mechanical Engineer, 2001(8): 66. (in Chinese)
[5] 郭显光,顾杰.永磁低速同步电动机的应用技术[J].微电机,2003,36(6):45-47. (in Chinese)
WU Xianguang, GU Jie. Low-speed permanent magnet synchronous motor application technology[J]. Micromotors Servo Technique, 2003, 36(6): 45-47. (in Chinese)
[6] 杨凯,辜成林.形状记忆合金电机的研究与应用[J].微特电机,2001(6):16-19.
YANG Kai, GU Chenglin. Some new progress on the research and application of the shape memory alloy actuator [J]. Small and Special Electrical Machines, 2001(6): 16-19. (in Chinese)
[7] 田青超,吴建生.变温下 NiTi 合金相变热力学特征[J].上海交通大学学报,2001,35(5):65-654.
TIAN Qingchao, WU Jiansheng. Characterstics of phase transformation thermodynamics for NiTi wires under non

isothermal conditions[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(5): 651-654. (in Chinese)

[8] Prahiad H, Chopra I. Experimental characterization of NiTi shape memory alloy wires under complex loading conditions[C]//Proceedings of the SPIE Smart Structures and Integrated Systems. Newport Beach, CA, USA: SPIE, 1999, 3668: 604-614.

[9] 李艳锋, 米绪军, 高宝东, 等. TiNi 基形状记忆合金的疲劳行为研究现状[J]. 材料导报, 2007, 21(6): 84-86.

LI Yanfeng, MI Xunjun, GAO Baodong, et al. Research progress in the fatigue behavior of TiNi based shape memory alloys[J]. Materials Review, 2007, 21(6): 84-86. (in Chinese)

[10] 杨凯, 辜承林. 形状记忆合金电机研究与应用中的若干新发展[J]. 微电机, 2000, 33(2): 32-35.

YANG Kai, GU Chenglin. Some new progress on the research and application of the shape memory alloy actuator[J]. Micromotors Servo Technique, 2000, 33(2): 32-35. (in Chinese)

[11] 殷鸿梁, 朱邦贤. 间歇运动机构设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.

[12] Chen Liang. The constitutive modeling of shape memory alloys [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1990.

[13] 崔迪, 李宏男, 宋钢兵. NiTi 形状记忆合金电阻特性研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(5): 567-573.

CUI Di, LI Hongnan, SONG Gangbing. Study on electrical resistance properties of NiTi shape memory alloy[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5): 567-573. (in Chinese)

[14] 呼卫军, 周军. 可重复使用运载器 RCS 修正脉冲调宽算法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 313-316.

HU Weijun, ZHOU Jun. Research on revised pulse wide modulation of reaction control system for reusable launch vehicle[J]. Journal of Rockets & Missiles and Guidance, 2006, 26(4): 313-316. (in Chinese)