

车载仪表用电机驱动控制系统的研究

罗海 易映萍

(上海理工大学 上海 200093)

摘要: 针对汽车仪表上面指针需平稳地转到目标位置、精确地反映车况信息,基于汽车仪表用步进电机 6405 R475,提出一套驱动控制系统。介绍了该汽车仪表用步进电机的分步、微步驱动原理,并搭建微步驱动模型。然后具体分析了该汽车仪表用电机不归 0 对后续控制的影响,并对归 0 的过程进行了设计。最后对抛物线形 S 曲线的数学模型进行了分析,并基于该 S 曲线对该汽车仪表电机在转动过程中进行算法规划。通过实验证明,该套控制系统能够满足设计需求。

关键词: 汽车仪表用电机;微步驱动;归 0;抛物线形 S 曲线

中图分类号: TM383.6;TN874 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Research in drive control system of vehicle stepper motor

Luo Hai Yi Yingping

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: According to that indicator should move to target location precisely and smoothly, a drive control system is put forward based on vehicle stepper motor 6405 R475. Substep driving principle and microstep driving principle of the vehicle stepper motor are introduced, and a microstep driving model is designed. And then no return to zero of the vehicle stepper motor impact on the follow-up control is analyzed, and the process of return zero has carried on the design. Finally, the parabolic S curve mathematical model is analyzed, and the algorithm plan based on the parabolic S curve is built for the vehicle stepper motor's acceleration and deceleration control. Experimental results show that this system of control can meet need for design.

Keywords: vehicle stepper motor; microstep driving; return to zero; parabolic S curve

1 引言

汽车仪表作为驾驶者和汽车交互的一个重要媒介,因此对汽车仪表实时反应车况信息的精确性以及可视化的要求非常之高^[1-2]。指针作为汽车仪表上的重要部件,它由汽车仪表用电机驱动,目前步进电机常用到的驱动方式分为分步驱动和微步驱动方式,虽然分步驱动方式简单,但它相对于微步每一步转动的角度过大,精度不够高,为了保证仪表指针反应相应车况信息的精确性高,本文将采用微步控制^[3-4]。但是能够使得后续控制达到精确的前提是,归 0 要做到精确。为了使得仪表指针精确平稳地达到目标位置,关键是确保仪表步进电机在转动过程中频繁地启停、改变转速、改变转动方向时不发生失步、过冲的现象,这些现象与步进电机的加减速控制曲线密切相关^[5],目前常用的步进电机加减速算法曲线有梯形曲线、指数曲线、S 型曲线^[6-7]。梯形曲线的速度曲线不光滑、加速度存在突变,该

算法用于仪表步进电机的控制时噪声大、稳定性差;指数曲线的速度曲线光滑,但加速度仍存在突变,不适用于高精度的场合;S 曲线稍显复杂,但它的速度曲线光滑、加速度连续,该算法能保证步进电机在运行过程中速度和加速度没有突变,可以减少冲击和失步的现象,提高电机运行的平稳性^[8]。常用的 S 曲线是抛物线形 S 曲线和三角函数曲线,两者都能保证电机运行的平稳性,但三角函数曲线的加加速度曲线也连续,使得它相对于抛物线形 S 曲线的算法实现难度加大^[9],因此本文将采用抛物线形 S 曲线。

本文将用 SONCEBOZ 公司的 6405 R475 这款仪表用步进电机作为被控对象,验证汽车仪表用步进电机的驱动控制算法。

2 6405 R475 驱动原理和驱动模型

6405 R475 是一个两相的步进电机,它的极对数为 5,转速比为 1:36,转子每分步转动 18°,每微步转动 3°,指针

每分步转动 0.5°, 每微步转动 0.083°。

2.1 6405 R475 分步工作原理分析

6405 R475 分步工作时候, 它里面转子停靠的位置如图 1 所示。图 1 中的 1、2、3、4 分别表示转子停靠位置 1、位置 2、位置 3、位置 4。1P、1M、2P、2M 是该步进电机的 4 个输入端口。

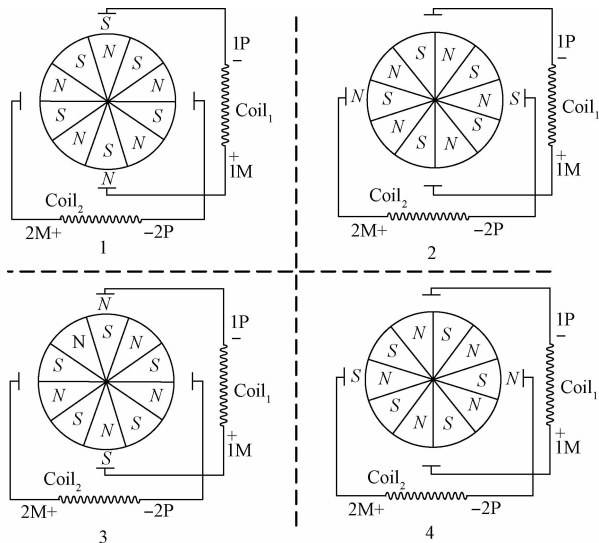


图 1 6405 R47X 分步工作时候转子停靠的 4 个位置

当给 V_{Coil_1} 通正电、 V_{Coil_2} 不通电时, 合成磁场方向竖直向上, 转子停靠的位置如图 1 的位置 1 所示。当给 V_{Coil_1} 不通电、 V_{Coil_2} 通正电, 合成磁场方向水平向右, 转子停靠的位置如图 1 的位置 2 所示。当给 V_{Coil_1} 通负电、 V_{Coil_2} 不通电时, 合成磁场方向竖直向下, 转子停靠的位置如图 1 的位置 3 所示。当给 V_{Coil_1} 不通电、 V_{Coil_2} 通负电, 合成磁场方向水平向左, 转子停靠的位置如图 1 的位置 4 所示。当按顺序 1→2→3→4→1 每跳变一个位置, 转子顺时针转动转动一分步, 即 18°。当按顺序 4→3→2→1→4 每跳变一个位置, 转子逆时针转动一分步, 即 18°。

2.2 6405 R475 微步工作原理分析

由电机 6405 R475 的内部结构决定了它的一个分步最多分成 6 个微步。图 2 表示定子线圈 $Coil_1$ 和 $Coil_2$ 的电压波形, 并且标出了图 1 中位置 1、2、3、4 对应线圈 $Coil_1$ 和 $Coil_2$ 的电压大小。

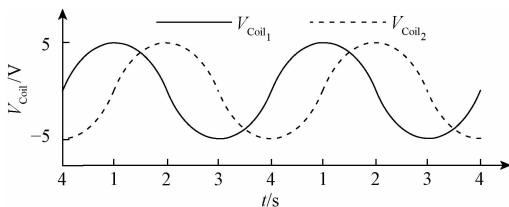


图 2 定子线圈电压波形

将每一分步分成 6 微步, 即 4 与 1、1 与 2、2 与 3、3 与 4

间都各分成 6 段, 分解后的波形如图 3 所示。

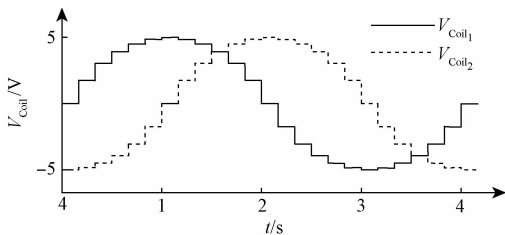


图 3 定子线圈电压分解后的波形

图 3 中正弦波的每一阶梯都对应着一个微步, 也对应着一个正弦值。对于图 3 中 $Coil_1$ 电压波形, 第 1 个阶梯对应着 $\sin 0^\circ$, 第 2 个阶梯对应着 $\sin 15^\circ$, ..., 第 n 个阶梯对应着 $\sin[15^\circ(n-1)]$ 。对于图 3 中 $Coil_2$ 电压波形, 第 1 个阶梯对应着 $\sin(-90^\circ)$, 第 2 个阶梯对应着 $\sin(15^\circ-90^\circ)$, ..., 第 n 个阶梯对应着 $\sin[15^\circ(n-1)-90^\circ]$ 。每一阶梯的电压大小是通过给 1P、1M、2P、2M 4 个端口一定的占空比的 PWM 波实现, 这些 PWM 波通过线圈滤波, 便得到对应每阶梯的电压大小。 $n++$ 或则 $n--$ 都对应着 PWM 波占空比变化一次, 对应着转子转动 3° , 也就对应着指针转动 0.083° 。

由此看, 微步相对于分步每一步转动的角度小很多, 使得微步驱动相对于分步驱动在汽车仪表电机的驱动控制过程中更加精确。

2.3 6405 R475 微步驱动模型的搭建

在图 3 中, 位置 4→1→2→3→4 这一个正弦周期中, 它分为 24 微步, 规划每一小段中 4 个端口的 PWM 波^[10]。线圈电压 $V_{Coil} = 5\sin(2\pi n/24)$, 其中 $0 \leq n \leq 23$ 。当 $0 \leq n \leq 11$ 时 $V_{Coil} \geq 0$, 当 $12 \leq n \leq 23$ 时 $V_{Coil} \leq 0$ 。将 V_{Coil+} 、 V_{Coil-} 各分成 24 段, 如式(1)、(2)所示。

$$V_{Coil+} = \begin{cases} 5, & 0 \leq n \leq 11 \\ 5 + 5\sin(2\pi \times \frac{n}{24}), & 12 \leq n \leq 23 \end{cases} \quad (1)$$

$$V_{Coil-} = \begin{cases} 5 - 5\sin(2\pi \times \frac{n}{24}), & 0 \leq n \leq 11 \\ 5, & 12 \leq n \leq 23 \end{cases} \quad (2)$$

那么 V_{Coil+} 、 V_{Coil-} 对应的 PWM 占空比如式(3)、(4)所示, 从这两个式子可以看出 $D_{V_{Coil+}}$ 和 $D_{V_{Coil-}}$ 相位相差半个正弦周期。

$$D_{V_{Coil+}} = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq 11 \\ 1 + \sin(2\pi \times \frac{n}{24}), & 12 \leq n \leq 23 \end{cases} \quad (3)$$

$$D_{V_{Coil-}} = \begin{cases} 1 - \sin(2\pi \times \frac{n}{24}), & 0 \leq n \leq 11 \\ 1, & 12 \leq n \leq 23 \end{cases} \quad (4)$$

按式(4)制定一套正弦表, 各端口将从不同的 n 值对应的点开始取值^[11-13]。

6405 R475 的 4 个端口取值规则需满足: 1P 端

(V_{Coil-})与1M端(V_{Coil+})相差12微步。2P端(V_{Coil-})与2M端(V_{Coil+})相差12微步。 V_{Coil_1} 与 V_{Coil_2} 相差6微步。

本文通过出固定周期为 $64 \mu s$ 的 PWM 波来驱动该步进电机,1P端、1M端、2P端、2M端对应的1组PWM波决定步进电机合成磁场方向,即决定转子停靠位置,并且这1组PWM波个数决定了合成磁场在该位置的维持时间,即决定电机转速。

3 归0

3.1 未归0的误差分析

针对电机 6405 R475,如果没有归0过程,直接将指针手动拨到0刻度点,这时候是不知道转子的位置,即开始给脉冲时候正弦表中的 n 只能随机取。开始让指针顺时针转动,设定给1M端口的第1组脉冲时,正弦表中的 n 从 $n = 12$ 开始取,且此时转子在 $n = n_1 (0 \leq n_1 \leq 23)$ 对应的位子。若给第一组脉冲时候指针顺时针转动,则存在 $(|12 - n_1| - 1) \cdot 0.083^\circ$ 的固定误差;若指针不动或则逆时针转动,存在 $(|n_1 - 12| + 1) \cdot 0.083^\circ$ 的固定误差。总的来说,如果没归0过程,则存在 $[0^\circ, 1^\circ]$ 的固定误差。

3.2 归0过程设计

归0的过程总共分为以下3个步骤:

- 1) 先让合成磁场逆时针旋转 a 微步,在逆时针旋转过程中,转子与磁场将同步,同步后会继续旋转。
- 2) 完成步骤1)后,指针的停靠位置分两种情况:停靠在止停位置(转子与磁场不同步);停靠在偏离止停位置 $(0, 1^\circ]$ 范围内(转子与磁场同步)。以上步骤的目的,就是确保指针停靠在止停位子的 1° 范围内。
- 3) 让合成磁场顺时针转动 b 微步到达0刻度,转动过程中转子与合成磁场必定会同步。
- 4) 通过手动拨指针去调节指针止停位置偏离0刻度的角度,使得完成以上步骤后指针能够恰好停到0刻度位置。

此时程序内部也会记住合成磁场的位置,使得后续控制指针达到目标位置更加精确。

4 抛物线形S曲线的分析及算法规划

4.1 抛物线形S曲线数学模型分析

完整的抛物线形S曲线总共分为7段,如图4所示,加速阶段包含3段,即加加速段、匀加速段、减加速段;匀速阶段就只有匀速段这一段;减速阶段也包含3段,即加减速断、匀减速段、减减速段。其中 $\beta_1 \leq \beta_{max}$ 、 $\omega_1 \leq \omega_{max}$,即图4中的最大加速度 β_1 小于等于指针的理论最大加速度,最大速度 ω_1 小于等于指针的理论最大速度。

在图4中,角加速度 $j(t)$,它随时间的变化关系如式(5)所示。

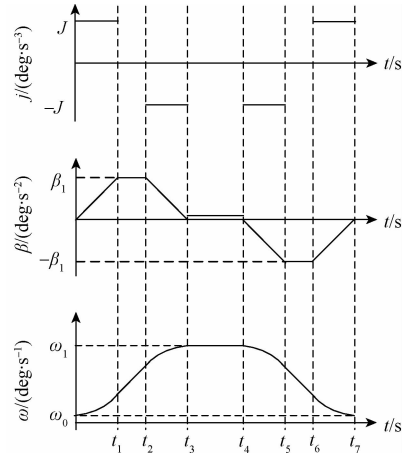


图4 完整的7段S型曲线关系

$$j(t) = \begin{cases} J, & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0, & t_1 < t \leq t_2 \\ -J, & t_2 < t \leq t_3 \\ 0, & t_3 < t \leq t_4 \\ -J, & t_4 < t \leq t_5 \\ 0, & t_5 < t \leq t_6 \\ J, & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (5)$$

从图4中可以看出,角加速度是连续的,没有突变,并且角加速度 $\beta(t)$ 随时间的变化如式(6)所示。

$$\beta(t) = \begin{cases} Jt, & 0 \leq t \leq t_1 \\ \beta_1, & t_1 < t \leq t_2 \\ \beta_1 - J(t - t_2), & t_2 < t \leq t_3 \\ 0, & t_3 < t \leq t_4 \\ -J(t - t_4), & t_4 < t \leq t_5 \\ -\beta_1, & t_5 < t \leq t_6 \\ -\beta_1 + J(t - t_6), & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (6)$$

角速度曲线也连续,形状近似与S形,且角速度 $\omega(t)$ 随时间的变化如式(7)所示。

式(7)中的 ω_0 表示电机的启动角速度; ω_{t_1} 、 ω_{t_2} 、 ω_{t_3} 、 ω_{t_4} 、 ω_{t_5} 、 ω_{t_6} 的大小分别 $\omega(t_1)$ 、 $\omega(t_2)$ 、 $\omega(t_3)$ 、 $\omega(t_4)$ 、 $\omega(t_5)$ 、 $\omega(t_6)$ 。

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega_0 + \frac{1}{2}Jt^2, & 0 \leq t \leq t_1 \\ \omega_{t_1} + \beta_1(t - t_1), & t_1 < t \leq t_2 \\ \omega_{t_2} + \beta_1(t - t_2) - \frac{1}{2}J(t - t_2)^2, & t_2 < t \leq t_3 \\ \omega_{t_3}, & t_3 < t \leq t_4 \\ \omega_{t_4} - \frac{1}{2}J(t - t_4)^2, & t_4 < t \leq t_5 \\ \omega_{t_5} - \beta_1(t - t_5), & t_5 < t \leq t_6 \\ \omega_{t_6} - \beta_1(t - t_6) + \frac{1}{2}J(t - t_6)^2, & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (7)$$

文献[9]也提出了抛物线形S曲线也有4段型、5段型、6段型,它们和七段式的抛物线形S曲线数学模型分析类似,这里就不赘述了。

4.2 抛物线形S曲线算法规划

在实际驱动汽车仪表电机6405 R475时,要将4段、5段、6段、7段抛物线形S曲线结合使用^[9]。仪表上的指针目标位置获取大部分都是通过CAN总线来获取,比如车速表,含车速信息的报文发送周期为 $T=10\text{ ms}$,驱动车速表对应的电机时,控制的核心就是MCU接收到车速信息后,尽可能地在获得下一个车速(下一个指针目标位置)时,指针到达本次目标位置^[14-15]。控制它的详细流程图如图5所示,图中的BAT ON表示电池上电、IGN ON和IGN OFF分别表示汽车点火和熄火,回0表示汽车熄火时指针回到0刻度位置。

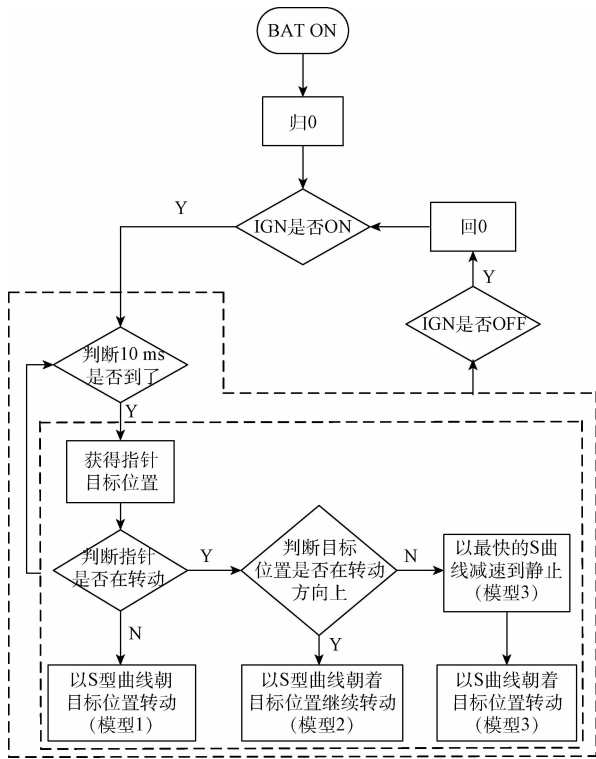


图5 控制流程

该加减速控制采用单步规划,即当从CAN总线接收到目标位置(θ'_{target}),以当前角速度去转动第1微步,然后去规划第2微步开始时的状态(角加速度 β 、角速度 ω 、离目标位置更新时间 t_{leave} 、以当前角速度角加速度在 t_{leave} 转过的角度 θ_{turn} 、当前位置相对于0刻度的角度 θ 、角度差 $\Delta\theta$ 、该微步将用的时间 Δt 、当前角加速度 j),转完第1微步以第2微步开始的角速度去转动第2微步,然后规划第3微步开始的状态,这样一直循环,直到下一个目标位置到来。

在规划角速度、角加速度时不能超过它们的最大值。

另外用于以下运算的目标位要通过滤波函数滤波得来, $\theta_{target} = (1-\lambda) \cdot \theta_{target_{last}} + \lambda \cdot \theta'_{target}$,其中 $\theta_{target_{last}}$ 表示上次运算出的目标位子, λ 表示权重参数($0 < \lambda \leq 1$)。

在算法规划的时候,规定角速度、角加速度、角加速度、转过角度为正表示方向为指针的顺时针方向、为负表示指针的逆时针方向。在某1微步开始时候的状态的运算如下:

角加速度 β 的运算如式(8)所示,其中 β_{last} 、 j_{last} 、 Δt_{last} 分别表示上个微步开始时的角加速度、上个微步开始时的角加速度、上个微步的转动时间。

$$\beta = \beta_{last} + j_{last} \cdot \Delta t_{last} \quad (8)$$

角速度 ω 的运算式子如式(9)所示,其中 ω_{last} 表示上微步开始时的角速度。

$$\omega = \omega_{last} + \frac{1}{2} \cdot (\beta + \beta_{last}) \cdot \Delta t_{last} \quad (9)$$

离目标位置更新时间 t_{leave} 的运算如式子(10)所示,其中 $t_{leave_{min}}$ 表示上微步开始时候离目标位置更新时间。

$$t_{leave} = t_{leave_{min}} - \Delta t_{last} \quad (10)$$

以当前角速度、角加速度做匀变速运行,算出指针在离目标位置更新时间内将转动的角度 θ_{turn} 如式(11)所示。

$$\theta_{turn} = \omega \cdot t_{leave} + \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot t_{leave}^2 \quad (11)$$

相对于指针0刻度的当前位置角度 θ 运算如式(12)所示,其中 θ_{last} 表示上微步开始时候的当前位置角度, θ_{1usteg} 表示1微步的对应的角度大小。

$$\theta = \begin{cases} \theta_{last} + \theta_{1usteg}, & \omega_{last} > 0 \\ \theta_{last} - \theta_{1usteg}, & \omega_{last} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

当前位置和目标位置的角度差 $\Delta\theta$ 如式(13)所示。

$$\Delta\theta = \theta_{target} - \theta \quad (13)$$

该微步将用的时间 Δt 运算如式(14)所示。

$$\Delta t = |\theta_{1usteg} / \omega| \quad (14)$$

对于当前角加速度 j 的运算,是根据 θ_{turn} 、 $\Delta\theta$ 之差去给 j 赋合适的值。

对于图5的模型1,分为以下2种情况。

1)若 $|\Delta\theta| < \theta_{1usteg}$,则不转动;若 $\theta_{1usteg} \leq |\Delta\theta| \leq \omega_0 \cdot T$,以角速度 $\omega = \Delta\theta / T$ 匀速运行,到目标位置。

2)当 $\Delta\theta > \omega_0 \cdot T$ 时,此时 $\omega = \omega_0$ 、 $\beta = 0$ 、 $t_{leave} = 10\text{ ms}$,然后根据式(11)~(14)算出其余参数,若 θ_{turn} 与 $\Delta\theta$ 关系满足式(15)则 $j = 0$,并且以当前的角速度 $\omega = \omega_0$ 一直匀速运行到目标位置;若不满足式(15),则 $j = J$ 。第2微步及后续微步开始时参数都根据式(8)~(15)算出,直到目标位置更新。

$$|\Delta\theta - \theta_{turn}| < \theta_{1usteg} \quad (15)$$

当 $\Delta\theta < -\omega_0 \cdot T$ 时,此时 $\omega = -\omega_0$ 、 $\beta = 0$ 、 $t_{leave} = 10\text{ ms}$,然后根据式(11)~(14)算出其余参数,若 θ_{turn} 与 $\Delta\theta$ 关系满足式(15)则 $j = 0$,并且以当前的角速度 $\omega = -\omega_0$ 一直匀速运行到目标位置;若不满足式(15),则 $j = -J$ 。

第2微步及后续微步开始时参数都根据式(8)~(15)算出,直到目标位置更新。

对于图5中的模型2,在更新指针目标位置的时候,可能上1微步还没运行完成,则继续完成上1微步的运行,并计算出获得新目标位置后的第1微步开始状态 $t_{leave} = T - \Delta t'$ ($\Delta t'$ 表示更新目标位子到上1微步结束时的时间),第1微步开始的其余状态可采用式(8)、(9)、(11)~(14),此时 θ_{turn} 、 $\Delta\theta$ 若满足式(15),则 $j = 0$; 若满足式(16),则 $j = J$; 若满足式(17),则 $j = -J$ 。然后通过式(8)~(17)推算出第2微步开始时的状态,直到目标位子更新。

$$\Delta\theta - \theta_{turn} \geq \theta_{1usteg} \quad (16)$$

$$\theta_{turn} - \Delta\theta \geq \theta_{1usteg} \quad (17)$$

对于图5的模型3,在更新目标位置后的第1微步的开始状态参数运算(j 除外)和模型2一样,这就不赘述了,如果 $\Delta\theta < 0$ 时,若不满足式子(15),则 $j = -J$,若满足式(15),则 $j = 0$; 如果 $\Delta\theta \geq 0$ 时,若不满足式(15),则 $j = J$,若满足式(15),则 $j = 0$ 。第2微步及后续微步开始时候的状态参数运算与第1微步的运算一样,但 t_{leave} 的运算采用式(10),直到目标位置更新。

5 实验研究

基于以上的理论分析,设计了一台实验样机,选用飞思卡尔的 SPC5645SVLT 做主控 MCU,6405 R475 做被控电机。设定归0过程中 $a = 3\ 720$ 、 $b = 60$,权重参数 $\lambda = 0.315$ 、启动转速 $\omega_0 = 34.75$ ($^\circ$)/s(即 417 ustep/s)、最大角速度 $\omega_{max} = 330$ ($^\circ$)/s、 $\beta_{max} = 1\ 000$ ($^\circ$)/s²、最大角加速度 $J = 2\ 200$ ($^\circ$)/s³。并且该实验用到的车速表中,当车速每变化 1 km/h 对应着指针转动 1.15 $^\circ$ 。

车速从 0 ~ 10 km/h 变化时候,两相电压波形如图 6 所示。车速从 10 ~ 0 km/h 变化时候,两相电压波形如图 7 所示。图 6、图 7 中,1 号通道对应信号表示 V_{Coil_1} ,M 信号表示 V_{Coil_2} ,每个阶梯所占时间的增加与减少变动平滑,无突变,即指针转速变化平滑,并且指针刚好运行了 11.5 $^\circ$,刚好达到目标位子。

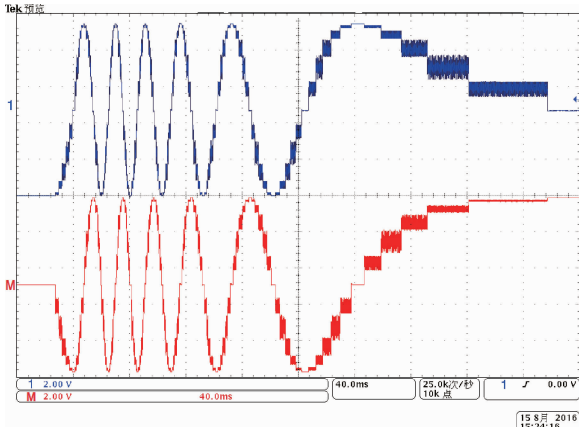


图6 车速从 0 ~ 10 km/h 变化时两相电压波形

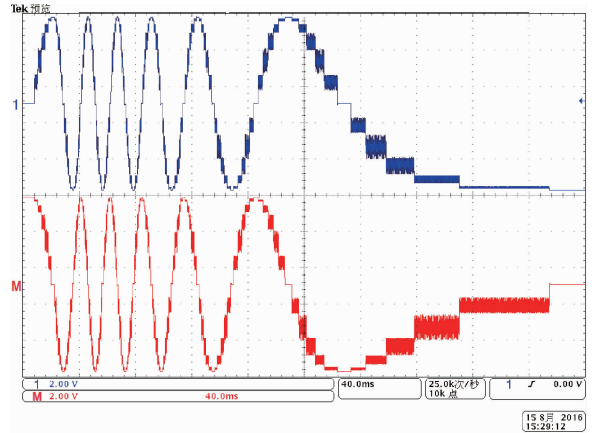


图7 车速从 10 ~ 0 km/h 变化时两相电压波形

车速从 20 ~ 200 km/h 变化时候,目标车速突然切换成 20 km/h,在切换那刻 V_{Coil_1} 波形如图 8 所示。同样可以看出每个阶梯所占时间的增加与减少变动平滑,无突变,即指针转速变化平滑。

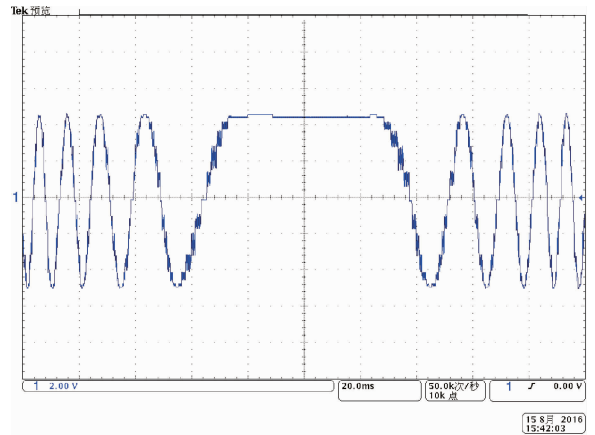


图8 车速从 20 ~ 200 km/h 变化时,突然切换成 20 km/h 时 V_{Coil_1} 波形

6 结 论

从实验中指针停靠位置精确,可以看出归0做的精准,还有在转动过程中没有出现失步的现象;另外图 6~图 8 的波形反映出指针转动过程平滑。因此得出采用该套控制系统,即经过精确归0后,采用的微步驱动和抛物线形 S 曲线算法相结合的控制能够使得指针精确达到目标位置,并且转动平滑。

参考文献

- [1] 宋伟,张文杰,张家齐,等. 基于指针区域特征的仪表读数识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 50-58.
- [2] 贾云涛,胡耀元,张建永,等. 基于 MATLAB 的改进

- 仪表测量精度的研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9):44-46.
- [3] 张新荣,徐保国. 基于正弦细分驱动技术的步进电机控制系统设计[J]. 电测与仪表, 2010, 47(8): 69-72.
- [4] 郑宇. 步进电机细分控制的单片机实现[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2012, 30(2): 106-109.
- [5] 姜德美,谢守勇,甘露萍. 步进电机启动控制算法设计[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2007, 29(5): 128-132.
- [6] 蔡锦达,郭振云,许智. 基于 Cortex-M3 的 S 型加减速控制[J]. 控制工程, 2016, 23(2):206-210.
- [7] 李锡文,姜德美,谢守勇. 步进电动机加速运行控制研究[J]. 微电机, 2007, 40(10):45-47.
- [8] 崔洁,杨凯,肖雅静,等. 步进电机加减速曲线的算法研究[J]. 电子工业专用设备, 2013(8):45-49.
- [9] 杨超,张冬泉. 基于 S 曲线的步进电机加减速的控制[J]. 机电工程, 2011, 28(7):813-817.
- [10] 舒大松. 基于 STC 单片机的 SPWM 步进电机细分控制研究与实现[J]. 制造业自动化, 2011, 33(6): 92-102.
- [11] 王辉堂,颜自勇,陈文芾. 基于带 PWM 模块单片机的步进电机细分驱动技术[J]. 国外电子测量技术, 2007, 26(3):9-11.
- [12] 刘玉章,李贤涛. 基于 dsPCI33F 的高可靠步进电机细分驱动系统[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(4): 85-90.
- [13] 李军科,吴建军,杨国华. 基于 DSP 的步进电机细分驱动系统设计[J]. 电测与仪表, 2011, 48(8):83-86.
- [14] 王跃飞,胡京津,韩江洪,等. 基于 EDF 的汽车 CAN 网络动态调度机制设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8):819-826.
- [15] 王瑾. 基于 DSP 和 CAN 总线的步进电机控制系统研究[J]. 电子测量技术, 2009, 32(1):112-115.

作者简介

罗海,在读硕士研究生,研究方向为汽车仪表。

E-mail:math_nice@163.com

(上接第 124 页)

作者简介

赵全,1991 年出生,北京化工大学在读硕士研究生,主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: 2014200761@mail.buct.edu.cn

林伟国,1968 年出生,博士,教授,主要研究方向为生产过程智能检测与安全预警。

E-mail: linwg@mail.buct.edu.cn