

基于LabVIEW的电动汽车自动转向系统设计测试

对电动汽车自动转向系统进行了研究和设计,该系统是无刷直流电动机在低电压(12 V)、低转速和大扭矩场合的应用。基于无刷直流电动机的数学模型,综合运用PID控制技术和DSP实现电动机的双闭环控制,利用传感器技术和电动机驱动技术来控制无刷直流电动机的位置、速度。应用SX4300传感器于汽车的转向柱,对转向盘的转向角度进行实时检测;结合LabVIEW虚拟仪器技术,通过串行通信接口对所设计的自动转向器系统进行实车测试。实验证明设计的系统稳定性高、实时性强,测试准确度达到99.2%,软件界面友好,能满足快速测试和设计自动转向系统的需要。

段建民 李龙杰 杨 晨 战宇辰/北京工业大学智能测控研究所



段建民/教授

随着自动控制技术的发展,无人驾驶取得了很大进步,其中作为关键技术之一的自动转向技术水平也在不断地提高,在一些民用和高危领域,无人驾驶车辆可以替代人完成工作;随着不可再生能源的日益枯竭,新能源汽车的重要地位日益突出,电动汽车成为将来汽车发展的必然趋势。同时作为无人驾驶汽车操控系统的核心部分转向器,也在实现电动汽车的自动驾驶领域起着关键的作用。

当今的汽车转向系统从最初的纯机械式、液压式、电液式及线控转向系统,逐步实现了到电动助力转向系统的过渡。经过几代的发展,电动助力转向系统由于取消了液压管路,不存在液压油泄漏的环境污染问题;同时其助力特性规则可通过软件进行改变,所以广泛

使用在现代车辆上,尤其是电动汽车上。但是电动助力系统还没有完全脱离开人对方向盘的操作,也没有实现自动转向器的功能。

无刷直流电动机具有运行可靠、结构简单以及方便维护等特点,同时具有调速性能好、运行效率高和无励磁损耗等诸多优点,因此无刷直流电动机在电动汽车转向上的应用日益受到重视。目前欧洲、美国和日本等汽车发达地区和国家的汽车转向电动机大多都采用无刷电动机提供动力,而中国在这方面还处于劣势,亟需开发。本文基于NI公司的LabVIEW软件,利用无刷直流电动机控制技术和传感器技术设计了自动转向系统,结合LabVIEW软件强大的数据处理功能和快捷的可视化编程,加快了系统的研发和测试进程,也取得了很好的实车效果。

自动转向系统结构及工作原理

自动转向系统(Automatic Steering System, ASS)是在电动助力转向的基础上进行改进的,并结合LabVIEW软件实现。汽车转向系统主要由转向盘、角度传感器、转向柱总成、转向电动机、转向控制器和机械连接的减速机构等部分组成,如图1所示。

汽车转向器是通过施加于方向盘上的转矩经齿轮变速和万向节的方向变换,将做圆周运动的力转变为牵引车轮左右摆动的力,使车轮与车体形成一定的角度,并使车辆完成方向转变的运动

关键词/Keywords

自动转向系统(ASS) ·
无刷直流电动机 ·
PID控制 ·
LabVIEW ·
传感器 ·

北京市自然科学基金资助项目(KZ20041000501)。

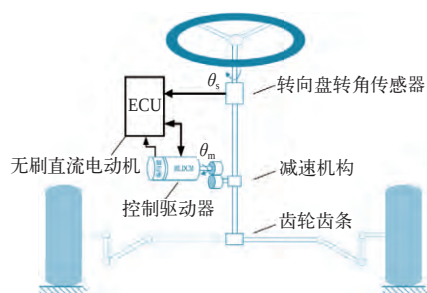


图1 ASS系统硬件结构

过程。转向器的硬件系统由无刷直流电动机、驱动控制器、旋转编码器、转角传感器和上位机等部件组成，硬件连接如图2所示。

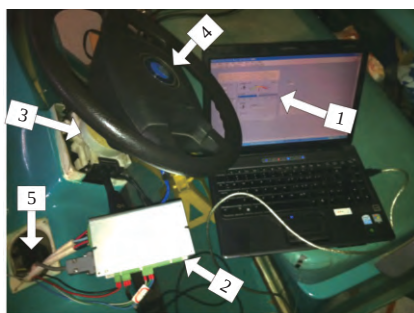


图2 转向器硬件实物

1—上位机 2—驱动控制器 3—转角传感器 4—转向盘
5—电动机、编码器及其他

驱动控制器为全数字DSP伺服驱动器，采用RS 232串口通信，波特率为9 600 bit/s，有两个±10 V带内部滤波模拟量输入端口，典型的10-bit 20 kHz PWM，带可编程序设置频率；逻辑电源（DC+12 V）与电动机电源（DC+12 V）单独供电。

旋转编码器为欧姆龙公司出产的型号为E6B2的编码器，2 000线，DC+5 V供电。

转角传感器为BI公司出产的型号为SX4300的传感器，其量程为-720°~+720°，输出信号为0~+5 V，其中P1位置输出线性度偏差为±1.5%，P3位置输出准确度为±3%。

上位机通过RS 232串行通信接口连接驱动控制器，驱动控制器功能是采集转角信号并发送给上位机程序，同时也对无刷直流电动机进行驱动和位置控制。自动转向系统通过LabVIEW程序进行电动机位置的控制和转角信号值的计算，进而

实现初始回正控制和转向控制功能。

无刷直流电动机控制系统的实现

1. 无刷直流电动机模型

为了方便建模和分析，对无刷直流电动机作如下假设：①线性电动机的磁路，即不计饱和、剩磁。②对称的定子三相绕组，且定子绕组为集中绕组，相对直轴和交轴分别对称的转子结构。③转子空间磁动势沿圆周设计为梯形分布。④暂不考虑气隙磁场受电枢反应的影响。基于以上假设，可以将无刷直流电动机等效为图3所示。

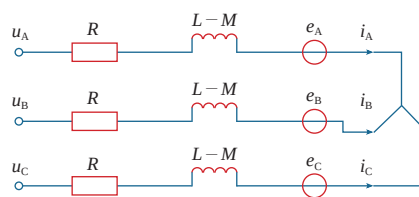


图3 无刷直流电动机等效电路

根据图3可以得出电动机的线电压方程式，即

$$\begin{pmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & -R & 0 \\ 0 & R & -R \\ -R & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_A - e_B \\ e_B - e_C \\ e_C - e_A \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， u_{AB} 、 u_{BC} 和 u_{CA} 为定子绕组三相线电压； i_A 、 i_B 和 i_C 为定子绕组三相电流； e_A 、 e_B 和 e_C 为定子绕组三相反电动势； $L-M$ 为每相定子绕组的等效电感； R 为每相定子绕组电阻。

本文所用的无刷直流电动机功率为240 W，极对数为3，扭矩常数为0.037 6 N·m/A，电动机和驱动的相阻抗为0.215 9 Ω，电动机和驱动的相感抗为0.231 9 mH。

2. 系统主电路和驱动电路

无刷直流电动机的控制系统利用输入的直流电源（12 V）经过滤波电路滤除谐波，再经三相桥式逆变电路变换为交流电输出来驱动无刷直流电动机，并采用PWM占空比调节转速。其整个硬件系统以DSP芯片为核心，包括DSP外围电路、主电

路、IGBT驱动电路、保护电路及信号检测等部分,硬件系统的设计中还有对谐波抑制电路的设计。

无刷直流电动机采用电子换相的方式替换有刷电动机的换向器。根据是否有转子位置传感器,可将其分为有位置传感式和无位置传感式两种。有位置传感器的无刷电动机主要是通过旋转编码器来检测转子的位置;无位置传感器的无刷电动机是通过检测与电动机转子位置有关的变量并通过计算获得转子位置。其中反电动势法是比较常用的方法之一,由于反电动势是模拟信号,很容易受到干扰而导致扭矩波动甚至使换相出错,所以本文采用的是有位置传感器的无刷直流电动机。

3. PID控制器的设计

PID控制器是一种按照真实值与给定值的偏差比例、积分和微分进行控制的调节器,也是连续系统中应用最为广泛、技术比较成熟的一种控制器。PID控制器具有结构简单、参数易于调整的优点。理论分析及实际运行经验证明,在对相当多的被控对象运用PID控制器进行控制时,能够取得比较满意的效果。因此,本文选用PID控制方法设计车辆自动转向控制器。

在模拟调节系统中,PID控制算法的表达式为

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dx}] \quad (2)$$

式中, $u(t)$ 为电动机转速信号; $e(t)$ 为转角偏差; K_p 为比例系数; T_i 为积分系数; T_d 为微分时间常数。

为了提高系统的可靠性,现代电动机控制系统一般使用数字式PID控制器。因此,连续性PID算法不能直接使用,需要对式(2)进行离散化处理,得到离散PID控制率的差分方程为

$$\begin{aligned} u(k) &= K_p[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1))] \\ &= K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d (e(k) - e(k-1)) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, K_i 为积分系数; K_d 为微分系数; T 为采样周期; $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 为第 k 、 $k-1$ 采样时刻输入的偏差值。通过对三个参数的调整,运用试凑法达到

一个比较满意的控制效果。电流环的 $K_p = 1.118$, $K_i = 0.1013$;位置环的 $K_p = 1.346$, $K_i = 0.3673$, $K_d = 48.97$ 。

4. 传感器

使用的旋转编码器线数为2 000线,供电电压为DC+5 V,工作原理为增量式,读出方式为接触式,与电动机的转轴相连接,可为电动机提供换相位置的检测,也可以测量电动机的速度和位置信息。

电动机位置以内部位置单位IU表示的编码器计数脉冲,负载位置以SI单位表示,即

$$\text{负载位置(SI)} = \frac{2\pi}{4 \times \text{编码器线数} \times T_r} \times \text{电动机位置(IU)} \quad (4)$$

式中,编码器线数为旋转编码器每一转的线数; T_r 为在以IU单位表示的电动机位置与以SI单位表示的负载位置之间的变化率。

采用BI公司生产的型号为SX4300的角度传感器,其线性度好、可靠性高,被广泛应用在汽车转角的测量方面。其理论测量范围为 $-720^\circ \sim +720^\circ$,供电电压为+5 V,P1是斜率为 $\pm 36^\circ/\text{V}$ 的三角波,P3是阶梯为 $360^\circ/\text{V}$ 的T形波。根据图4所示的角度传感器典型位置输出,利用以下公式可以方便地计算出所测量的角度。

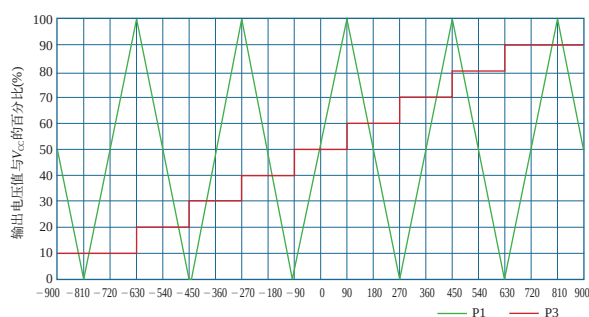


图4 角度传感器典型位置输出

设方向盘转角为 θ_s° ,则①若P3在0.7~1.2之间,则 $\theta_s = (5 - P1) \times 180/5 - 630$ 。②若P3在1.3~1.7之间,则 $\theta_s = P1 \times 180/5 - 450$ 。③若P3在1.8~2.2之间,则 $\theta_s = (5 - P1) \times 180/5 - 270$ 。④若P3在2.3~2.7之间,则 $\theta_s = P1 \times 180/5 - 90$ 。⑤若P3在2.8~3.2之间,则 $\theta_s = (5 - P1) \times 180/5 + 90$ 。⑥若P3在3.3~3.7之间,则 $\theta_s = P1 \times 180/5 + 270$ 。

⑦若P3在3.8~4.2之间, $\theta_s = (5 - P1) \times 180/5 + 450$ 。

基于LabVIEW的自动回正控制与转向控制的实现

自动回正是汽车转向器在上电初始时刻使车轮自动回正到正方向的功能, 主要控制是通过LabVIEW软件编程实现。具体过程如下: 首先驱动控制器读取模拟输入I/O口的转角传感器P1和P3端输出的模拟量, 经A-D转换成数字量后, 由上位机通过串口RS 232通信读取, 再通过LabVIEW程序进行计算, 得到当前方向盘的角度值 θ_s° , 然后将 $-\theta_s^\circ$ 结合写命令字, 以及和校验位一同通过串口发送控制器, 经驱动控制器的PID调节使转向车轮能转回原点(即前轮坐标系的y轴正方向), 如果角度传感器检测到没有转到 0° , 则比较与目标角度的差值, 再次重复上面的操作, 直到达到要求即可。其流程如图5所示。

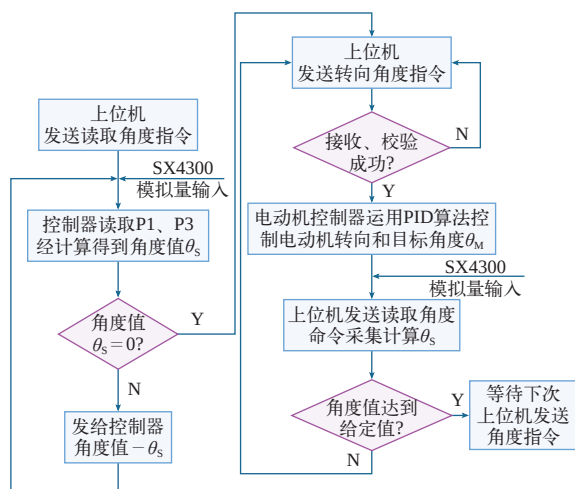


图5 自动回正流程

上位机用LabVIEW软件横向滚动条来模拟发送的期望转动角度值(范围是 $-540^\circ \sim +540^\circ$, 即方向盘从左极限位置到右极限位置共三圈), 运用式(5)计算得到电动机所需转动的期望角度值, 然后通过RS 232串口通信来发送转向指令, 转向指令由写控制字、转向数据和校验位组成。在控制器接收并校验正确之后, 通过PID调节器对电动机转动方向和目标位置进行调节控制; 接着

再将转角传感器所采集到的实际转向角度和给定角度值进行比较, 如果未达到给定角度, 则再次发送位置差值指令给控制器并进行调整, 重复上述过程。

$$\theta_M = \theta_s \lambda \frac{r_2}{r_1} \quad (5)$$

式中, θ_M 为电动机旋转角度值; θ_s 为方向盘旋转角度值; λ 为旋转编码器脉冲数与所对应电动机位置的的比例关系(如编码器线数为2 000线, 则

$\lambda = \frac{4 \times 2\,000}{360} \approx 22$); r_1 为电动机侧齿轮半径; r_2 为转向器侧齿轮半径。

LabVIEW界面和程序框图如图6所示。LabVIEW前面板主要分为四大块: ①串口参数模块, 包括COM端口的选择、波特率、数据位和停止位等参数。②功能选择模块, 包括读角度功能和发送转向角度命令功能。③转向角度值输入模块, 此模块可以得知转向盘角度的范围是 $-540^\circ \sim +540^\circ$ 。④角度值显示模块和数据缓冲区, 用来显示计算得出的 θ_s 角度值和监测数据接收情况有无异常。

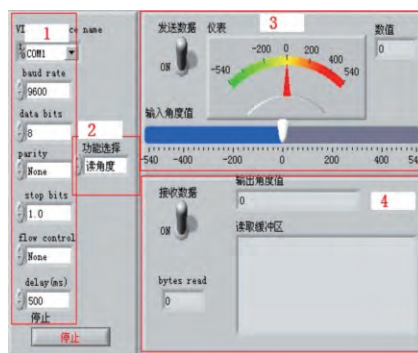
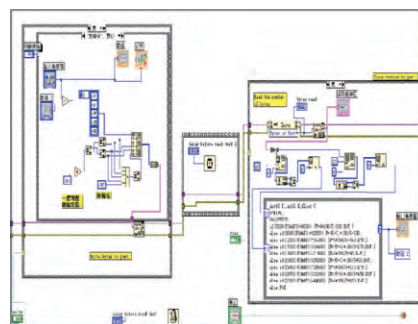


图6 LabVIEW界面和程序框图

LabVIEW程序框图主要通过可视化编程和C语言

言混合编程的方法来编写。通过RS 232串口通信方式来读角度和发送转向值命令，以及对发送的命令进行组合、校验，实现自动回正方向和进行转向盘控制操作、测验。

实验结果与分析

本实验采用的是东风品牌型号为EQ8041系列的电动汽车，其重量为780 kg，电动机功率为3 000 W，车速为25~30 km/h，装载重量为500 kg，最小转弯半径为6 m。

测试实验为原地转向实验，此时转向阻力最大，实验场地为水泥路上，摩擦系数为0.673 4，分别对自动转向系统的转向电动机电流环的电流、目标位置跟踪性能、方向盘达到目标位置准确度及快速性进行了实验，实验结果如图7所示。

图7a为自动转向系统的无刷直流电动机电流环电流测试实验结果，经试凑法得 $K_p = 1.118$ 、 $K_i = 0.101\ 3$ ，图中红线为参考电流幅值10 A的阶跃信号，黄线为电动机电流，蓝线为对应的参考电压，由图可以看出调节时间约为3 ms，稳定后无超调量；图7b为位置跟随实验结果，经试凑法得 $K_p = 1.346$ 、 $K_i = 0.367\ 3$ 、 $K_D = 48.97$ ，可以看到经过短暂的调整后，负载位置可以很好地跟随目标位置，且很好地达到快速位置跟随的效果；图7c为方向盘的目标位置实验，循环进行左右三圈的旋转实验可以看到，在测试的过程中，负载位置与参考位置能很好地实时跟随，在达到目标三圈时，实际达到约2.976圈，偏差约为0.8%，基本可以达到实际需要。

结束语

本文所设计的自动转向器充分利用了无刷直流电动机在低电压（12 V）时的大扭矩特性，在电动助力转向的基础上进行电动汽车自动转向器的设计，对车辆的本体结构改造较少。软件采用LabVIEW可视化与C语言的混合编程，编程周

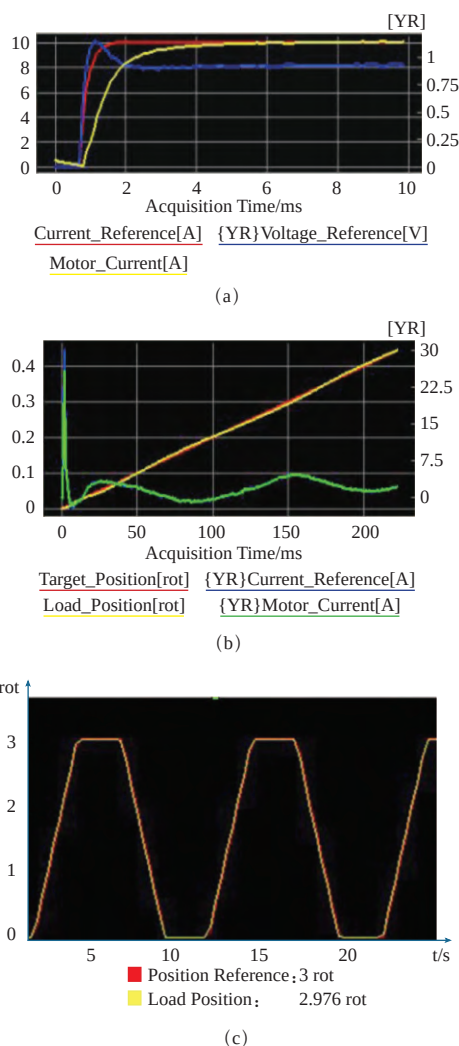


图7 实验测试结果

期短，经实验验证性能可靠度高。通过实车跟踪给定的实时性和准确性实验，在转向盘转角突然给定时，该系统可以快速反应，满足实时性的要求；从图7也可以看出准确性得到了保障，准确度达到99.2%，可以很好地满足转向系统的准确度要求。本系统具有反应快速、性能可靠等优点，运用本文的设计可缩短在原有的电动助力转向上的自动转向开发和测试时间。

本设计的实现为轻型电动汽车无人驾驶的自动转向、自动泊车以及在紧急情况下车辆自主转向避险的测试和研究提供了很好的基础和思路。

(收稿日期：2014-11-13) EA