

智能车转向系统的研究及设计

段建民, 杨 晨, 李龙杰, 战宇辰

(北京工业大学 智能测控研究所, 北京 100124)

摘要: 设计了一套适合无人驾驶智能车 BJUT-IV 的转向系统; 该系统转向电机采用奇瑞 A3 电子式助力转向系统 (EPS) 的转向电机; 增量式光电编码器对转向电机的位置以及转速进行检测; 汽车转向柱上安装 SX4300 转角传感器, 对方向盘的旋转角度进行检测; 该系统采用 RS-232 实现控制器与上位机之间的相互通信; 实验证明, BJUT-IV 智能车可以在阻力最大条件下快速准确地实现转向动作; 该转向系统设计合理、稳定性高、实时性强; 同时, 转向系统的成功应用为今后智能车底层控制奠定基础。

关键词: 智能车; 电子式助力转向系统; 底层控制

Research and Design of Intelligent Vehicle Steering System

Duan Jianmin, Yang Chen, Li Longjie, Zhan Yuchen

(Institute of Intelligent Measurement and Control, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Design a steering system for the Intelligent Vehicle, BJUT-IV. The system uses the steering motor of the Chery A3 electronic power steering system (EPS); using incremental encoder to detect the steering motor's position and speed; SX4300, a kind of steering angle sensor, installed on the BJUT-IV to detect the steering wheel rotation angle. Between PC and the controller use RS232 to communicate. Experiments show, BJUT-IV can be realized steering rapidly and accurately under the condition of maximum resistance. The steering system design is reasonable, high stability and strong real-time. At the same time, the successful application of steering system is a foundation of intelligent car bottom control in the future.

Keywords: intelligent vehicle (IV); EPS; lower control

0 引言

智能车主要分为环境感知、规划决策、底层控制 3 个模块^[1]。底层控制分为横向控制和纵向控制。其中, 横向控制是指对智能车转向系统进行控制。目前, 电子控制式电动助力转向系统 (EPS) 已经广泛应用到普通车辆中, 因为其具有较好的操纵性、安全性、轻便性以及节能性等优点。然而, 对于无人驾驶的智能车而言, 传统的电子控制式电动助力转向系统中的转向电机功率过小, 控制方法也有所不同。所以本文作者设计了一套以电子控制式电动助力转向系统为基础的转向系统, 并制定了相应的控制策略。

最终设计好的转向系统安装在 BJUT-IV 智能车平台上, BJUT-IV 整车参数如表 1 所示。

表 1 BJUT-IV 整车基本参数 (mm)

总长	总宽	总高	最小转弯半径
3 160	1 400	1 860	5 000

1 EPS 系统的结构和工作原理

目前汽车上配置的助力转向系统有 3 类^[2]: 机械式液压力转向系统、电子液压力转向系统、电动助力转向系统, 也就是我们常说的 EPS (electronic power steering)。

EPS 主要是由扭矩传感器、电子控制单元 ECU、助力电机、减速器、机械转向器几部分组成^[3]。电动助力转向系统如图 1 所示。

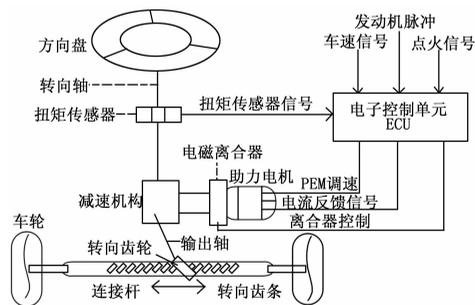


图 1 电动助力转向系统

对于普通家用轿车, 当驾驶员转动方向盘时, 力矩传感器会感知方向盘的力矩以及旋转方向, 通过 AD 模数转换器将力矩传感器的模拟信号转换为数字信号, 之后传递给 EPS 的控制单元, 经过运算、处理后, 控制单元将控制信号发送给助力电机以实现转向的辅助功能。

2 智能车转向系统的设计

转向系统主要的硬件包括: 奇瑞 A3 电动助力转向系统、ISD720D 全数字 DSP 伺服驱动器、欧姆龙公司生产的 E6B2-CWZ6C 增量式旋转编码器, 以及 BI Technologies 公司生产的 SX-4300 转矩转角传感器。

对于普通车辆, 当要实现转向动作时, 相当于驾驶员与转向电机同时“出力”。而对于无人驾驶的智能车辆来说, 智能车在完成转向动作时, 完全依靠助力转向电机的力量, 尤其是在智能车低速行驶、甚至静止时, 轮胎所受阻力很大, 因此智

收稿日期: 2014-09-12; 修回日期: 2014-10-17。

基金项目: 北京市教委重点项目和北京市自然科学基金项目。

作者简介: 段建民 (1959-), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事为车辆环境信息融合、道路识别、自动驾驶技术、嵌入式汽车电子控制技术、网络化监控技术和智能化仪器仪表方向的研究。

能车对于助力转向电机的功率需要有一定的要求。

目前在 EPS 中应用的电机主要分为有刷直流电机 (brushed DC motor) 和无刷电机 (brushless motor)^[4] 两大类。虽然直流电机拥有技术成熟, 成本较低等优点, 但是由于电刷和机械换向器之间存在摩擦, 影响了电机的精度和可靠性; 同时, 在换向时会产生火花, 引发无限电干扰。所以, 对于电动助力转向应用无刷电机的研究也逐渐成为热点。

无刷电机主要包括永磁同步电机、直流无刷电机和异步电机。3 种无刷电机性能比较如表 2 所示。

表 2 三种无刷电机性能比较

项目	永磁同步电机	无刷直流电机	异步电机
电机效率	高	高	较低
电机转矩脉动	小	大	小
电机力矩惯量比	较大	大	小
功率密度	高	高	低
控制系统复杂性	较复杂	简单	复杂
成本	高	高	低
低速特性	好	差	差
位置传感器精度	高	低	高

通过比较 3 种无刷电机, 永磁同步电机具有效率高, 精度高等优点, 适合应用在智能车的转向系统中。同时, 经过反复试验, 对于 BJUT-IT 智能车来说, 想要实现静止时转向, 即轮胎所受阻力最大时, 转向电机的功率要保证在 200 W 以上, 因此, 我们选用奇瑞 A3 上的电动助力转向电机, 它是一台永磁同步电机, 同时它的输出功率也达到了我们的需求。

奇瑞 A3 电动助力转向系统中的电子控制单元 ECU 需要相应车型的一些信息才能够实现转向的控制。我们去掉了电子控制单元, 采用了泰科智能伺服技术有限公司研发的 ISD720A 控制板对转向电机进行控制。

ISD720D 是一个全数字 DSP 伺服驱动器。它集电机驱动、运动控制、PLC 功能为一体的控制板, 可以对直流无刷电机、交流无刷电机、直流有刷电机进行控制, 拥有模拟量和数字量输入以及数字输出, 同时可以实现 RS232 以及 CAN 等通讯协议。

同时为了提高分辨率, 并且能够准确地获取电机转子的位置信号, 我们用增量式光电编码器替换了 A3 助力转向的霍尔传感器。

增量式编码器是利用光电转换输出 3 组矩形波脉冲, 分别为 A、B、Z。其中 A、B 两组脉冲信号在相位上相差 90°, 通过利用 A、B 两路输出波形的上升沿, 可以判断出增量式光电编码器的转动方向。每转输出一个 Z 相脉冲代表零位参考位, 即每输出一个 Z 脉冲代表增量式编码器旋转一个圆周^[5]。增量式光电编码器输出脉冲如图 2 所示。编码器还有一个十分重要的参数, 就是编码器的线数, 也就是编码器码盘上的狭缝条纹数 n, 它定义了编码器能够分辨的最小角度 $\alpha = 360^\circ / n$ ^[6]。

虽然, 通过编码器的 A、B、Z 三相脉冲可以很轻松地计算出转向电机的转速以及位置信息, 但是为了得到方向盘的初始角度, 需要通过安装在转向轴上的一个转角传感器获得。

SX-4300 采用变电阻式测量原理, 不仅可以测量绝对角度和相对角度, 还可以测量转矩。当转向轴旋转时, SX-4300 转矩转角传感器会输出两个相位相差 90° 的三角波, 一

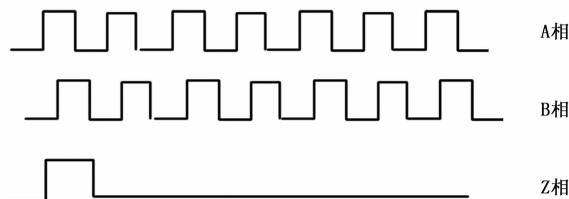


图 2 增量式光电编码器输出脉冲

个阶梯波, 和两个转矩信号。其中三角波输出电压范围是 0~VCC, 周期为 180°, 可以用来测量相对转角; 阶梯波等分成 9 段, 每段大小为 180°, 每段输出电压增加 10%, 与三角波结合可测量绝对转角。SX-4300 输出波形如图 3 所示。

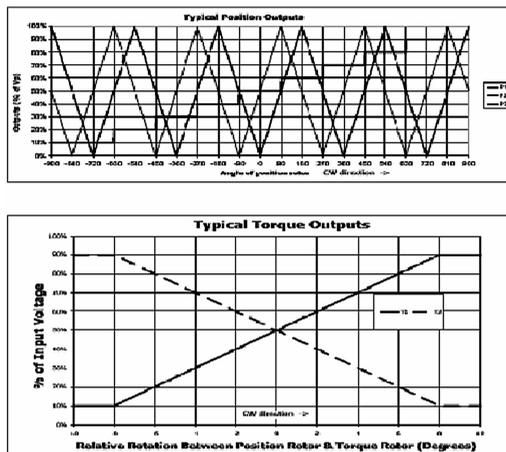


图 3 SX-4300 转矩转角传感器输出波形

因为 SX-4300 转矩转角传感器应用在 BJUT-IV 智能车上, 所以无需转矩的测量, 因此在实际应用中, 我们只用到了一个三角波和一个阶梯波来测量转向轴的绝对角度值, 并且根据 BJUT-IV 智能车转向轴的最大旋转角度, 最终我们将转角测量范围定义在 $-540^\circ \sim +540^\circ$ 。而具体的角度位置可以根据如下公式进行计算得出:

- 1) 若 $P_3 = 0.7 \sim 1.2$ 之间, $F = (5 - P_1) * 180^\circ / 5 - 630^\circ$
- 2) 若 $P_3 = 1.3 \sim 1.7$ 之间, $F = P_1 * 180^\circ / 5 - 450^\circ$
- 3) 若 $P_3 = 1.8 \sim 2.2$ 之间, $F = (5 - P_1) * 180^\circ / 5 - 270^\circ$
- 4) 若 $P_3 = 2.3 \sim 2.7$ 之间, $F = P_1 * 180^\circ / 5 - 90^\circ$
- 5) 若 $P_3 = 2.8 \sim 3.2$ 之间, $F = (5 - P_1) * 180^\circ / 5 + 90^\circ$
- 6) 若 $P_3 = 3.3 \sim 3.7$ 之间, $F = P_1 * 180^\circ / 5 + 270^\circ$
- 7) 若 $P_3 = 3.8 \sim 4.2$ 之间, $F = (5 - P_1) * 180^\circ / 5 + 450^\circ$

其中 P_1 为三角波, P_3 为阶梯波, F 为方向盘转角。

3 控制策略

助力转向的控制主要分为两个部分: 上电回正控制和转角控制。采用 PID 控制, 因为 PID 控制器是一种比较经典、可靠的控制器, 具有算法简单, 易于编程等优点^[7]。通过试凑法, 得出控制器 PID 参数为:

$$K_p = 1.346, K_i = 0.3673, K_d = 48.97$$

由于编码器检测到的初始角度为上电后的角度, 在实际应用过程中, 车轮的位置是随意的, 如果不人为规定一个初始角

度，编码器初始角度就是随机的，转向系统的角度就很难控制，因此规定车轮偏角为 0° 时为智能车的初始角度。上电后，转角传感器首先检测到转向轴的当前角度，并将该角度值发送给上位机，上位机将当前角度值与规定的初始化角度值进行比较，差值为 e ，然后发送回零指令给控制器，控制器控制转向电机运转，使转向系统回归到规定零点，即轮胎偏角为 0° ，完成初始化工作。初始化完成后，每次上位机发送的希望角度其实是编码器检测角度值加上差值 e ，经过这一补偿处理后，就可以很好地实现转向地控制。图 4 为转向控制原理框图。

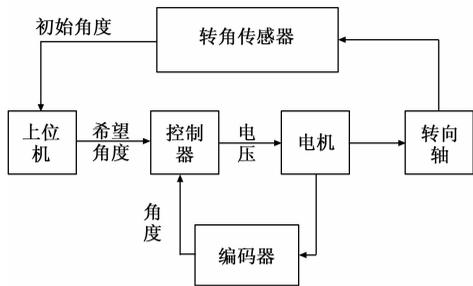


图 4 转向控制原理框图

4 软件设计

软件主要负责接收与发送转向角度信息，控制板接收角度信息后驱动转向电机。

编程环境为 VS2008。界面包括串口、接收区、发送区、智能车实时状态检测区。同时添加一个滑动条控件，控件初始位置为 0° ，本程序可以通过手动输入期望角度对转向电机进行控制，也可以通过拖动滑动条进行控制，滑动条范围为 $-540^\circ \sim +540^\circ$ 。软件界面如图 5 所示。

上位机发送检测初始角度数据后，控制器回送转角传感器信号给上位机，然后进行上电回正控制，之后进行转向控制。转向控制程序流程图如图 5 所示。

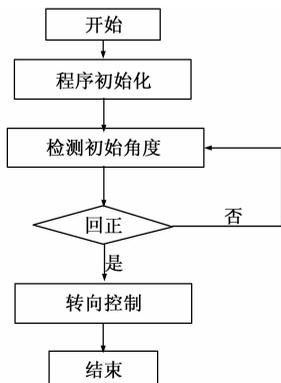


图 5 转向控制流程图

5 实验结果与分析

转向系统设计完成后，将其安装在 BJUT-IV 智能车上，通过实验分别对转向电机电流环以及转向的准确度进行测试。

图 6 为转向电机电流环测试结果。3 条曲线分别为 10A 的阶跃信号、参考电压和电机电流。由图可知，其调节时间为 3 ms。图 7 为位置曲线，通过曲线可知，当参考位置设为 3 圈时，电机实际转动约 2.976 圈，误差为 0.8%。电机转动圈数与车轮旋转角度比为 0.55:1，即电机每旋转 0.55 圈，车轮

旋转一度，因此，当车轮打满时，误差约为 0.285° ，对于实际应用无影响。

实验表明，该转向系统可以快速并且准确实现智能车的转向工作。

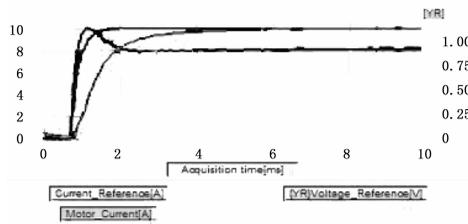


图 6 转向电机电流环测试结果

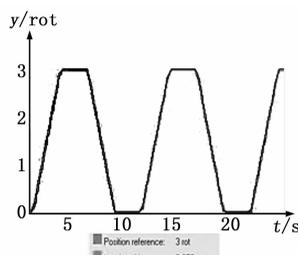


图 7 位置曲线

6 总结

目前，关于电动助力转向的研究已经十分成熟，然而针对无人驾驶的智能车转向系统的设计以及应用等问题还有待进一步的研究。当智能车在静止时，轮胎所受阻力最大，因此，转向电机能否正常运转是选择转向电机的一个重要指标。奇瑞 A3 转向电机可以实现包括低速以及静止等阻力较大情况下的转向工作。同时为了提高角度测量的精确度，我们采用了转角传感器和增量式编码器。通过实验，验证了该转向系统可以迅速并准确地达到智能车转向要求。

由于智能车的底层控制是一个整体的控制系统，转向动作往往要根据路面情况以及车速等信息来控制转向电机的转速及角度，本文中仅仅对智能车转向系统进行了设计，并实现了转向系统的独立控制，因此在今后的研究过程中将进一步实现与智能车其他模块相融合等工作。

参考文献:

[1] Bacha A, Bauman C, Faruque R, et al. Odin: team victor tango's entry in the DARPA urban challenge [J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25 (8): 467-492.
 [2] 谭群林. EPS 电动助力转向系统的软硬件设计 [J]. 电子产品世界, 2013 (10): 50-53.
 [3] 孙运全, 张华, 项伟, 等. 多参量汽车电动助力转向控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013 (9): 2471-2473.
 [4] 胡建锋. 基于永磁同步电机的电动助力转向系统设计 [D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
 [5] 于海, 万秋华, 王树洁, 等. 光电轴角编码器误差检测技术的发展动态 [J]. 光电子技术, 2013 (3): 145-150.
 [6] 姜义. 光电编码器的原理与应用 [J]. 传感器世界, 2010 (2): 16-19.
 [7] 向丹, 迟永滨, 李武波, 等. 电动助力转向系统控制策略及其仿真研究 [J]. 控制工程, 2013 (2): 254-258.