

# 电动助力转向装置性能试验台设计

申红明<sup>1,2</sup>, 冯 军<sup>2</sup>, 杨永杰<sup>2</sup>

(1. 南通大学 杏林学院, 江苏 南通 226007; 2. 南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:**为了研究电动助力转向(Electric Power-assisted Steering, EPS)装置的性能以及 EPS 电子控制系统(ECU), 设计了电动助力转向装置性能试验台. 在转向阻力矩模型的基础上, 通过对伺服电机的力矩控制, 构建了转向阻力矩半实物模拟系统. 测控系统由西门子 CPU224XP 和 MCGS 嵌入式构成, 用 PLC 集成的高速脉冲输出功能为 ECU 提供速度信号, 光电编码器与高速计数器组合测量转向盘转角, 特征信号的采集由模拟量扩展模块 EM235 完成. 试验结果表明, 该试验台能完成 EPS 的各项性能试验, 并有助于 ECU 控制算法的调试和验证.

**关键词:** 电动助力转向装置; 性能试验; 试验台

中图分类号: U467.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2012)01-0018-05

## Design of a Test Bench for Electric Power-Assisted Steering System Performance

SHEN Hong-ming<sup>1,2</sup>, FENG Jun<sup>2</sup>, YANG Yong-jie<sup>2</sup>

(1. Xinglin College, Nantong University, Nantong 226007, China;

2. School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** A test bench for electric power-assisted steering system performance is designed to cooperate with the development of electronic control unit (ECU). Based on the reactive steering torque model, a hardware-in-the-loop simulation system is developed by making a servo motor operate on torque mode. The measure and control system consist of the Siemens CPU224XP and Embedded MCGS. The PTO integrated in PLC generates the velocity signal for ECU, and the steering angel is measured by the encoder and the HSC. The extended mode EM235 is used to acquire the analog signal. The test result indicates that the bench can complete the required performance test, and is beneficial to tuning and validating the control algorithm.

**Key words:** electric power-assisted steering system; performance test; test bench

与传统的液压助力转向相比, 电动助力转向 (Electric Power-assisted Steering, EPS) 具有耗能低、结构简单和环保等优点, 并能够改善汽车的操纵性

能, 是未来动力转向的发展趋势<sup>[1]</sup>. 通过电子控制单元(ECU)对助力电机的精确控制, EPS 可以减小转向操纵力、提供良好的转向路感同时提高转向系统

收稿日期: 2011-11-09

基金项目: 南通市社会发展计划项目(HS2011015); 南通大学杏林学院科研基金项目(2010K119); 南通大学自然科学基金项目(10Z022)

作者简介: 申红明(1980—), 男, 讲师, 硕士, 主要从事汽车电子和现代测试技术的研究. E-mail: shmcn@qq.com

的回正特性。然而,基于装车试验的EPS开发,需要消耗大量的人力和物力,且开发周期长<sup>[2]</sup>。而通过台架性能试验可以掌握EPS的基本特性,并有助于控制系统的测试和调试,台架虽然不能精确模拟实际路面行驶工况,但通过试验台可以模拟转向阻力的变化规律,从而设计EPS的助力特性,研究电机的控制规律以及参数的调整,分析EPS的综合性能和控制参数变化对EPS综合性能的影响,能为后续实车试验提供一些基本参数和算法,可以降低实车路试的危险性和研究成本<sup>[3]</sup>。

为了对EPS总成性能测试并配合EPS的控制系統,本文设计了电动助力转向装置性能试验台,包括半实物转向阻力模拟装置和测控系统,为EPS性能试验和控制系统设计、调试提供平台。

## 1 系统结构

图1为EPS性能试验台的结构示意图。在试验过程中,PLC为ECU提供行驶速度信号,EPS便在相应的车速工况下,伺服电机工作在力矩模式,工控机根据设定的参数、转向盘的转角和行驶速度,控制伺服电机输出的转向阻力矩,模拟实际的转向阻力矩,PLC采集各种需要的信号,并在人机界面上显示各种特性曲线。

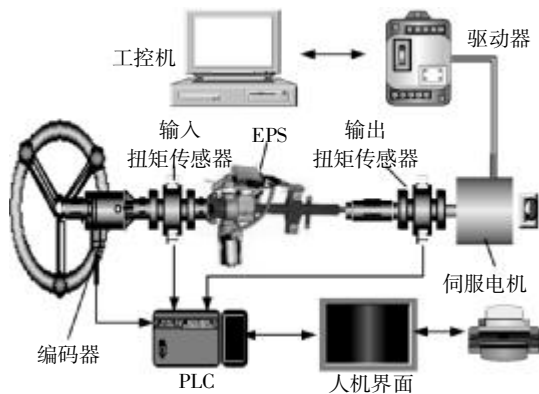


图1 EPS性能试验系统的结构示意图

## 2 转向阻力矩模拟

转向阻力矩主要由侧向力与主销后倾距之积形成的侧向力回正力矩及侧向力与轮胎拖距之积形成的轮胎自回正力矩构成<sup>[4]</sup>。转向阻力模拟不仅要能输出不同工况下转向盘的转向阻力矩,还应能

够输出性能测试要求的脉冲、阶跃和周期性变化等特殊阻力矩。文献[5]采用弹簧模拟轮胎的回正力矩,该方法模拟的回正力矩只与转向盘的转角有关,没有考虑速度对回正力矩的影响,与实际工况差距较大,具有一定的误差;文献[6]采用磁粉制动器产生回正力矩,但不能模拟转向盘转速为零时的工况,能在试验台上完成的试验受到限制;文献[7]设计了液压系统模拟转向阻力,但由于液压系统的响应滞后性,实时控制困难。本文采用半实物方法模拟转向阻力矩,即工控机根据行驶速度和转向盘的转角、车辆动力学模型和轮胎模型计算得到理论转向阻力矩,再控制伺服电机输出相应阻力矩。

### 2.1 行驶转向阻力矩

汽车在行驶过程中转向时,除转向系统的摩擦外,转向阻力矩主要由轮胎与地面接触产生,因此轮胎对整车动力学有着很大的影响作用。轮胎模型主要有经验模型、物理模型和半经验模型,其中半经验方法中的Fiala模型考虑了复杂的胎体变形,精度较高且适用范围广,本文选用了“Fiala-桥石”表达式,又称“桥石”表达式,其中车辆的侧向力计算式<sup>[8]</sup>为

$$\frac{F_y}{F_z \mu} = \begin{cases} \lambda - 0.066 8 \lambda^2 - 0.103 2 \lambda^3 & \lambda < 1.54^\circ \\ 1.006 3 & \lambda \geq 1.54^\circ \end{cases} \quad (1)$$

轮胎的回正力矩为

$$\frac{M_a}{F_z \mu L_r} = 0.274 9 \lambda - 0.095 \lambda^2 - 0.087 2 \lambda^3 + 0.035 3 \lambda^4, \lambda \leq 2^\circ \quad (2)$$

$$M_a = \frac{0.225 8 F_z \mu e}{\lambda - 0.32}, \lambda > 2^\circ \quad (3)$$

式中:

$F_y$ ——轮胎侧向力;

$M_a$ ——回正力矩;

$\mu$ ——路面附着系数;

$F_z$ ——垂直载荷,  $F_z = mgl/l$ ;

$L_r$ ——轮胎印迹长度(假设印迹是长方形的);

$\lambda$ ——无量纲侧偏角,  $\lambda = (K \tan \alpha)/F_z \mu$ ;

$K$ —— $\alpha = 0$ 时轮胎的侧偏刚性;

$\alpha$ ——轮胎侧偏角。

通过“Fiala-桥石”公式可以分别求得轮胎的回正力矩和侧向力,但这需要首先对前轮的侧偏角以及所受的垂直载荷进行分析,轮胎的侧偏角模型<sup>[9]</sup>为

$$\alpha = \beta + \frac{l_f \gamma}{V} - \delta \quad (4)$$

式中:

- $\alpha$ ——前轮侧偏角;
- $\beta$ ——质心侧偏角;
- $\gamma$ ——横摆角速度;
- $\delta$ ——前轮转向角,  $\delta = \delta_{sw} / N$ ;
- $\delta_{sw}$ ——转向盘转角;
- $N$ ——转向系的传动比;
- $l_f$ ——质心至前轴的距离.

其中,质心侧偏角  $\beta$  和横摆角速度  $\gamma$  需要通过分析车辆操纵动力学得到.当车辆在平坦路面以恒定的速度行驶时,车辆运动可以简化成具有横向和横摆 2 个运动自由度,即单轨操纵动力学模型<sup>[9]</sup>,车辆横向运动为

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = C_f \delta - (C_f + C_r)\beta - (C_f l_f - C_r l_r) \frac{\gamma}{V} \quad (5)$$

车辆在侧向力作用下的横摆运动可用下式表示:

$$I \dot{\gamma} = C_f l_f \delta - (C_f l_f - C_r l_r)\beta - (C_f l_f^2 + C_r l_r^2) \frac{\gamma}{V} \quad (6)$$

式中:

- $m$ ——车辆总质量;

- $I$ ——车辆横摆惯量;
- $C_f$ ——前轮侧偏刚度;
- $C_r$ ——后轮侧偏刚度;
- $l_r$ ——质心至后轴的距离.

### 2.2 原地转向或低速转向阻力矩

原地转向工况下,转向阻力矩起主要作用的是轮胎与地面之间的滑动摩擦力矩和转向系统的内摩擦力矩等,精确计算这些力矩是非常困难的.文献[10]给出的半经验公式来计算汽车在沥青或者混泥土路面上的原地转向阻力矩  $M_R$ .

$$M_R = \frac{f}{3} \sqrt{\frac{F_z^3}{p}} \quad (7)$$

式中:

- $f$ ——轮胎与路面间的滑动摩擦系数,一般取0.7;
- $F_z$ ——转向负荷(N);
- $p$ ——轮胎气压(MPa),

低速转向时的阻力矩与原地转向时情况相近,近似用原地转向阻力矩表示.

### 2.3 转向阻力矩控制

转向阻力矩控制框图如图 2 所示,工控机采集行驶速度和转向盘转角,由车辆动力学模型和轮胎模型计算出目标转向阻力矩的大小和方向,控制模块根据扭矩传感器的反馈量采用 PID 控制策略控制伺服电机的输出力矩.

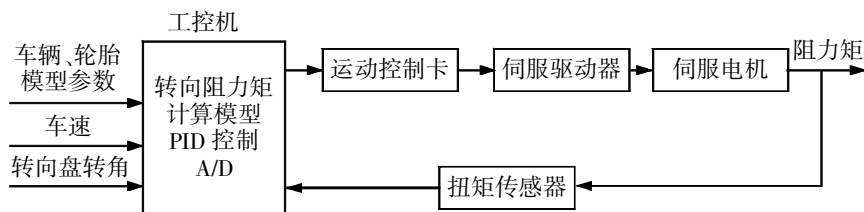


图 2 转向阻力矩控制框图

## 3 测控系统

测控系统主要由传感器、变送器、数据采集模块、PLC 以及人机界面组成,系统通过 PLC 实时采集各类传感器传输的信号,再由人机界面对数据采集模块的通道值进行实时处理,以报表和曲线的形

式显示,从而实现 EPS 性能测试.测控系统的主要功能包括速度信号模拟和特征信号的采集,根据试验要求,所要采集的信号有转向盘转角、转向盘力矩、助力电机电流、转向阻力矩. CPU 224XP CN 集成了 14 输入/10 输出共 24 个数字量 I/O 点, 18 kB 字节程序和数据存储空间, 3 路 20 kHz 双向高速

计数器, 2路独立的 100 kHz 高速脉冲输出, 2个 RS485 通信编程口, 具有 PPI/MPI 通讯协议和自由方式通讯能力, 能够满足系统的测控要求. MCGS 嵌入版向用户提供了极大的应用灵活性和系统开放性, 在测控化领域有着广泛的应用, 它可以通过操作画面对数据进行监控, PLC 中的变量通过设备组态和连接可以在 MCGS 中使用, 选择 MCGS 嵌入版作为人机界面可节省工程时间.

### 3.1 速度信号模拟

EPS 工作过程中需要使用车辆的行驶速度作为 ECU 的输入信号, 所以性能试验系统必须设计速度信号模拟装置. 车速传感器的输出信号一般为脉冲信号, 且幅值为 12 V, 频率 0~120 Hz 无级可调, 占空比 50%. CPU224XP 内置的高速脉冲发生器, 其发出的频率最大为 100 kHz, 足够产生出符合要求的速度模拟信号. 脉冲输出指令(PLS)用于在高速输出(Q0.0)上控制脉冲串输出(PTO), PTO 按照给定的脉冲个数和周期输出一串方波. PLS 指令从控制寄存器 SMB67 中读取数据, 使程序按照其存储值控制 PTO0 发生器, 包括模式选择、时间基准的选择、功能允许等. 本系统要求输出连续脉冲, 只需要通过 SMW68 控制 PTO0 的周期值, 即应用 PTO/PWM 发生器的单段管线功能, 其部分语句程序表如下:

```
MOVW VW0, SMW68 //输出脉冲周期(可变)
MOVB 16#89, SMB67 //置脉冲输出功能的控制
                        位, 时间基准 1ms
PLS  0 //起动脉冲输出(Q0.0)
```

### 3.2 转角测量

转向盘转角采用增量式光电编码器将转角转换为脉冲电信号, A 和 B 输出的脉冲个数与被测角度成线性关系, 通过对脉冲个数计数就能计算出转向盘的转角. 本系统选择光洋(KOYO)公司的 TRD-J1000-RZ 光电编码器, 其分辨率为 1 000P/R, 其输出的脉冲信号与 PLC 的高速计数器输入端相连, 通过高速计数指令 HDEF 指定高速计数器 HSC0 为 A/B 相正交计数器(模式 9), 并占用输入端 I0.0、I0.1, 另外, 还需将 HSC0 的计数值通过变量计算实时转化为对应角度数值输出值.

### 3.3 模拟量采集

需采集的模拟信号有电机电流、输入扭矩、转向阻力矩. 电流的检测采用霍尔传感器 CSM100LA; 采用动态扭矩传感器 SL06-20AB 和 SL06-100A 测量输入输出扭矩. 由于扭矩传感器的输出信号比较微弱, 需经变送器才能被使用; 选择具有 4 输入 12 位的模拟量扩展模块 EM235 采集传感器信号, 为防止其它外部信号干扰, 因此将不用一组的正负端子进行短接. 此外, 还应用 DIP 开关设置对 EM235 的输入量程进行配置, 为此本系统设置为 -10~+10 V 量程. 需要注意的是, 模拟量的数据格式为一个字节, 所以地址必须从偶数字节开始.

### 3.4 MCGS 组态及其与 PLC 的通信

组态软件涉及到动画制作、与 PLC 设备的连接通讯、报警输出、报表曲线显示等多项组态操作. 实时数据库中设置系统变量, 如速度信号频率、电机电流、转向盘转角等. 本设计使用父子设备驱动结构形式, 使用串口为父设备, 使用挂载在串口上的 PLC 为子设备, 并在基本属性中设置 PLC 的地址和通信方式. 设备组态过程中还需将模拟量输入通道和实时数据库中的数据对象连接起来, 在用户窗口组态各种特性曲线通过实时曲线构件和历史曲线完成.

## 4 性能试验

针对某转向柱助力式 EPS, 设定了一组与之匹配的车辆操纵动力学模型参数后, 运行转向阻力模拟程序, 工控机根据转向角和车辆速度实时控制伺服电机的输出力矩模拟转向阻力矩, 在电动助力转向装置试验台上根据《汽车电动助力转向装置技术条件与台架试验方法》的规定转动转向盘对 EPS 进行助力特性试验. 图 3 为在不同车速下测得的助力特性曲线. 试验结果表明所开发的试验台测量的数据可靠, 能够满足 EPS 的性能试验要求.

## 5 结束语

电动助力转向性能试验台能够模拟与行驶速度、转向角相关的转向阻力矩, 与实际工况相符,

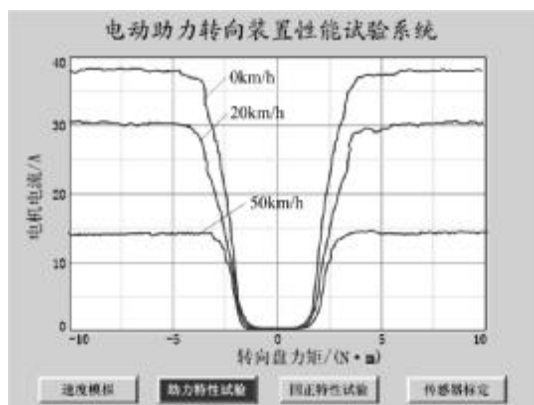


图3 助力特性试验曲线

由 PLC 和 MCGS 嵌入版可快速构建测控系统, 准确采集输入扭矩、转向盘转角、转向阻力扭矩、电机电流等特征参数, 实现对 EPS 的性能试验, 并且有助于控制算法的开发. 实际使用表明, 该性能试验台操作方便、效率高、测试精度能满足要求.

#### 参考文献:

[1] Kim Ji-Hoon, Song Jae-Bok. Control logic for an electric power steering system using assist motor[J]. Mechatronics, 2002, 12(3):447-459.

- [2] 施国标, 林逸, 陈万忠, 等. 汽车电动助力转向试验台测控系统开发[J]. 测控技术, 2005, 24(3):23-25.
- [3] 翟绍春, 闵新和, 黄志坚, 等. 汽车电动助力转向装置试验台测控系统的研究与开发[J]. 机床与液压, 2008, 36(12):141-143.
- [4] 刘照, 杨家军, 廖道训. 车速对汽车转向力矩的影响分析[J]. 中国机械工程, 2005, 16(8):748-751.
- [5] 梁伟强. 电动助力转向试验台开发[J]. 机电工程技术, 2008, 37(7):68-70.
- [6] 刘照. 汽车电动助力转向系统动力学分析与控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学机械科学与工程学院, 2004.
- [7] 王海洋, 陈昕. 汽车电动助力转向阻力模拟试验台研究[J]. 辽宁工学院学报, 2005, 25(6):400-402.
- [8] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.
- [9] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [10] Mitschke M. 汽车动力学: C 卷[M]. 陈荫三, 译. 北京: 人民交通出版社, 1997.

(责任编辑: 仇慧)