

文章编号: 1002-0268 (2005) 10-0147-04

电动汽车电动液压式动力转向系统的控制

黄 勇, 陈全世, 仇 斌, 陈伏虎

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了实现燃料电池电动客车的动力转向功能, 提出了直流电机通过联轴机构直接驱动油泵的电动液压式动力转向系统。通过建立电机电压与油泵流量、电机电流与油泵压力的数学模型, 设计了具有恒压和恒流复合输出特性的电机控制器。在恒压特性作用下, 油泵流量恒定; 在恒流特性作用下, 实现了油泵流量和压力的自适应控制, 避免了油液溢流现象。结果表明, 系统工作稳定、能量效率高, 在燃料电池电动客车上获得了成功的应用。

关键词: 动力转向; 电机驱动; 油泵; 流量控制

中图分类号: U463

文献标识码: A

Control of Electro-hydraulic Power Steering System in Electric Vehicle

HUANG Yong, CHEN Quan-shi, QIU Bin, CHEN Fu-hu

(State Key Laboratory of Automobile Safety and Energy Conservation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to achieve power steering function in fuel cell bus, an electro-hydraulic system is proposed, where the pump is directly driven by a DC motor through an axis coupler. On the base of the control models between motor voltage and oil flow, also motor current and oil pressure, a motor controller with a composite output characteristic of both constant voltage and constant current is designed. Under the action of the constant voltage, the oil flow is kept constant, while the oil flow and pressure are adaptively controlled by the constant current, avoiding oil flow through surplus valve, obtaining stable process with high energy efficiency. The system has been applied successfully in fuel cell bus.

Key words: Power steering; Driven by motor; Pump; Flow control

动力转向系统是现代汽车的重要组成部分。根据动力源的性质, 转向系统分为液压式和电动式两种类型。液压式动力转向系统结构可靠、技术成熟, 在燃油汽车中获得广泛的应用: 它由燃油发动机提供动力, 通过皮带驱动油泵, 向转向机构提供油液。当驾驶员转动方向盘时, 油液压力通过转向机构作用到车轮上, 实现动力转向功能。在电动汽车中, 没有燃油发动机, 由动力电池(锂离子电池或氢燃料电池等)为车辆驱动系统提供能量。这时, 车辆的动力转向可以采用电动式动力转向系统(EPS), 它是近年来出现的一种新型的动力转向系统, 由扭矩传感器、车速

传感器、控制器、电动机和减速机构等组成。当驾驶员转动方向盘时, 控制器检测出反映驾驶员施力大小的操纵杆扭矩信号, 结合当前的车速值, 经过一定的控制算法驱动电机, 使电机输出相应的力矩, 经齿轮、齿条等机构将力作用到车轮上, 实现动力转向功能^[1]。在 EPS 中, 电机只在车辆转向时工作, 在车辆直行过程中基本上不消耗能量, 具有节能、高效的特点; 而且, EPS 结构紧凑、尺寸较小, 适合安装在小轿车等对空间尺寸要求较高的场合, 但是, 这种系统成本高、控制的软硬件结构都比较复杂, 还没有在载重汽车和大型客车中得到实际应用。

收稿日期: 2004-07-02

基金项目: 国家十五“863”计划电动汽车重大专项资助项目(2001AA501212)

作者简介: 黄勇(1969-), 男, 福建福州人, 工学博士, 主要研究方向为电动汽车电气系统与电磁兼容。(huangyev@mail.tsinghua.edu.cn)

为了实现电动大客车的动力转向功能,在保留传统液压式转向器结构的基础上,本文提出了一种由直流电机通过联轴机构直接驱动油泵的新型液压式动力转向系统,直流电机由动力电池通过电机控制器驱动。这种电动-液压混合式动力转向系统保持了传统液压转向机构技术成熟和产品可靠的优越性,便于推广应用;而且,通过调节电机电压和电流可以控制油泵流量和压力,能够避免传统液压转向系统中发动机高速运行时油泵流量过大导致的油液溢流现象,从而提高转向系统的能量效率和可靠性。此外,由电机控制和驱动的特点还便于实现动力转向系统的线传控制(Steering-By-Wire),结合车速信号可以进一步实现转向力矩的非线性控制,在电动汽车领域具有广阔的应用前景。

1 电动液压系统的控制模型

电动液压式转向系统的基础是电机驱动油泵的电机-油泵一体化机构,如图1所示。电机输出轴与油泵转动轴通过联轴机构实现刚性连接,电机转速等于油泵转速。对于一定型号的车辆及其转向器,最大油泵流量设计值是确定的^[3],当设定较高的电机转速时,选取较小排量的油泵就可以满足油泵的流量要求,从而减小了油泵的空间尺寸。图1中的油泵体积只有同级别燃油汽车油泵体积的一半左右。

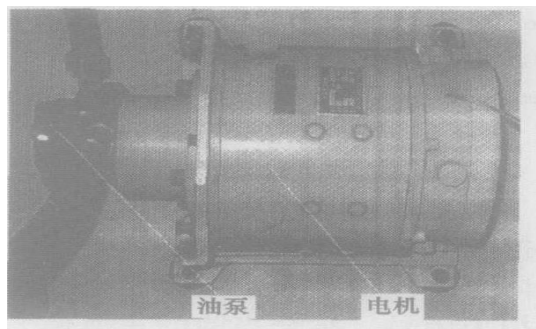


图1 车载的电机-油泵一体化结构

在燃油汽车中,发动机转速 n 与油泵流量 Q 之间的关系如图2所示^[2]。其中,曲线 a 表示油泵的实际流量,它随着发动机转速的提高而线性增大;曲线 b 表示在车辆行驶过程中,随着发动机转速的增大或车速的提高,对油泵流量的理论需求:当车辆低速运行时,油泵流量基本保持不变,保证足够的动力转向效果;当车辆高速运行时,油泵流量应随着车速的提高有所减小,使司机在驾驶过程中保持一定的路感,保证车辆的操纵稳定性。从图2中可以看出,发动机转速越高,油泵的实际流量越大于理论流量,使得油泵压力增大,当压力大于溢流阀动作压力时,部分油

液流量通过溢流阀返回油箱,这部分流量对车辆转向没有直接的贡献,造成能量的浪费、使油液温度升高,降低了液压式动力转向系统的能量效率。

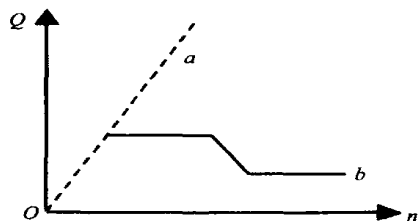


图2 发动机转速-油泵流量关系图

在电动液压式转向系统中,由于电机和油泵刚性连接的特点,电机电参数和油泵液压参数之间存在着定量关系,它是实现液压系统控制的理论基础。油泵流量 Q 和工作压力 p 是油泵的两个主要液压参数。对于排量为 q 的油泵,电机转速 n 与 q 、 Q 之间的关系为

$$Q = q \times n \quad (1)$$

电机电枢回路的电阻压降很小,忽略不计。可以认为电机输入电压 U 在数值上等于电机电枢的感应电势

$$U = C_e \times \Phi \times n \quad (2)$$

其中, C_e 、 Φ 为与电机有关的常数。

代入(1)式,得到

$$Q = \frac{q}{C_e \times \Phi} \times U \quad (3)$$

从(3)式可见,油泵流量与电机电压成正比。结合车速信号,实时地调节电机电压,就可以控制油泵流量、使之按照图2中曲线 b 的规律变化,满足动力转向对油泵流量的实际需要。

电机的输出力矩 M 可以表示为

$$M = C_T \times \Phi \times I_a \quad (4)$$

其中, C_T 为与电机有关的常数; I_a 为电枢电流。

则电机输出功率 P_e 为

$$P_e = M \times n \quad (5)$$

当电机驱动油泵、将电机输出的机械能通过油泵转化为油液的液压能时,产生的液压功率 P_1 为

$$P_1 = p \times Q \quad (6)$$

设电机输出功率转化为液压功率的转化效率为 η

$$P_1 = \eta \times P_e \quad (7)$$

将(1)、(4)、(5)和(6)式代入(7)式,得到

$$p = \frac{\eta \times C_T \times \Phi}{q} \times I_a \quad (8)$$

当油泵在实际使用的流量范围 (8.64~15.84L/min) 与压力范围 (4~12MPa) 内工作时, 分别测量和计算电机输出功率 P_e 及对应的液压功率 P_l 。试验结果表明, 功率转化效率 η 均大于 97%, 接近于 1, 可以看成常数。因此, 在 (8) 式中, 可以认为油泵工作压力 p 基本上与电机电枢电流 I_a 成正比, 对 I_a 采取限流措施, 就限制了油泵的最大工作压力, 实现了油泵工作压力的电子控制, 与传统液压系统中油泵压力通过溢流阀的机械限压方法相比, 提高了液压转向系统的可靠性。在这套系统中, 关键技术是根据上述控制模型, 开发电机-油泵控制器, 实现油泵流量与压力的控制。

2 电机-油泵控制器

根据电机电压与油泵转速的线性关系、以及油泵流量与车速的理论关系, 设计了电机电压与车速关系曲线, 如图 3 所示。当车速较低时, 电机电压为 U_1 , 保证较大的油泵流量与足够的动力转向效果; 当车速大于 v_1 时, 为了使司机在驾驶过程中保持一定的路感, 应该降低转向过程的助力效果, 通过车速的负反馈作用, 使得电机控制器的输出电压随车速的增加而下降、直到车速 v_2 对应的较小电机电压值 U_2 和油泵流量。这种基于车速反馈的油泵变流量设计方法能够兼顾车辆低速运行的转向动力性和高速运行的稳定性。在电机-油泵控制器中, 电机采用永磁励磁方式直流电机, 电机控制器主电路为直流斩波电路形式, 电路结构简单、工作可靠、器件成本低; 控制电路采用电流内环和电压外环的双闭环控制方式, 电机的动态响应快, 同时, 能够有效地控制电机的最大电流和输出力矩, 提高控制系统的稳定性和可靠性。

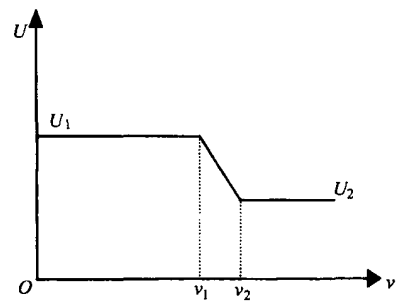


图 3 电枢电压 U -车速 v 关系曲线

电机控制器如图 4 所示, 其外特性如图 5 所示, 由恒压 ab 段和恒流 bc 段组成, 它决定了电机的机械特性和转向时油液流量与压力的变化过程。

当车辆不发生转向时, 油泵压力和电机电流很

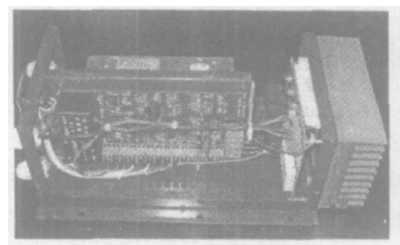


图 4 电机控制器

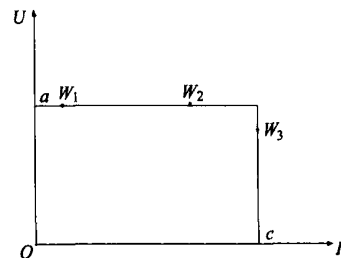


图 5 电机控制器的外特性

小, 电机工作在 ab 段上的 W_1 点, 电机电枢电流和输出功率较小。恒压 ab 段的电压值根据图 3 中的车速大小决定, 在 ab 段上, 电机电压保持不变, 转向系统表现为常流量液压系统。当车辆发生转向时, 由于液压油路流向的变化, 油泵转动阻力增大, 为了克服油泵转动阻力, 电机电流和输出力矩增加, 以保证恒定的电机电压和油泵流量, 电机工作点在 ab 段上从 W_1 点沿 ab 方向移动至 W_2 点。当电机电流增大到上限值时, 电机工作在控制器外特性的恒流 bc 段上, 电机电流和输出力矩保持恒定, 保证了油泵工作压力不变。这时, 如果继续转动方向盘, 油泵和电机的转动阻力有进一步增大的趋势, 由于电机输出力矩不变, 导致电机电压和转速自动下降, 油泵流量也相应降低, 这时, 电机工作点沿恒流 bc 段下降到 W_3 点。在电机控制器外特性的作用下, 电机电压受到自适应控制, 以保持油泵工作压力不变。这样既保证了动力转向的需要, 也保证了液压系统工作的可靠性。当车辆恢复直线行驶时, 液压油路流向得以恢复, 油泵压力下降, 电机旋转的阻力减小, 在电机输出力矩的作用下, 电机和油泵转速增加, 电机电压增大, 电机工作点从控制器外特性的 bc 段回到 ab 段。在整个转向过程中, 油泵流量和压力只受到电机控制器外特性的控制, 不再需要机械溢流阀的作用, 避免了油液溢流造成的能量损失, 提高了转向系统的能量效率。

3 实验研究

3.1 参数标定

为了标定电机电参数和油泵液压参数之间的关

系,建立了电机-油泵试验台,同时采集了电机电压、电流值和油泵压力、流量值。电机电压采用 KV300 型霍尔式电压传感器测量;电机电流采用 KA50T 霍尔式电流传感器测量。在油泵出油回路中安装节流阀,通过调节节流阀的开度来控制油泵出油口的工作压力,采用 HEM-IP4 型压力传感器及数字压力表测量油泵出油口的压力;采用 LWF-3 型涡轮流量传感器和 YZJ-8 型流量积算器测量油泵流量。通过数据统计分析,得到

$$p = 0.662 \times I_a \quad (9)$$

$$Q = 0.0519 \times U \quad (10)$$

其中, p 为油泵压力, MPa; I_a 为电机电枢电流, A; Q 为油泵流量, L/min; U 为电机电枢电压, V。

试验表明,当油泵流量达到 16L/min 时,可以满足快速转向过程的助力实时性要求;当设定油泵的最大工作压力为 9MPa 时,可以满足转向过程的助力效果。根据 (9) 式和 (10) 式,设定图 5 中 ab 段电压给定值为 310V、 cb 段电流给定值为 13.5A。

3.2 车辆试验

在车辆转向试验过程中,测得电机电流与电压波形如图 6 所示。不发生转向时,电机输出功率为 108W,转向过程的电机最大输出功率为 3.59kW,前者仅为后者的 3%,动力转向系统的功率消耗主要发生在转向过程。发生转向时,电机电压保持不变,电

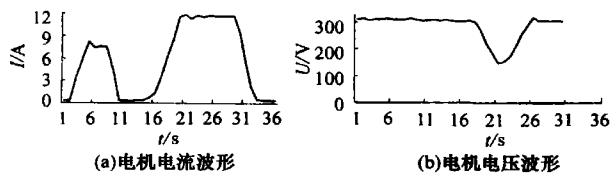


图 6 转向过程的电机电流与电压

(上接第 131 页)

5 结语

产品质量是工程建设质量的前提和保障。随着全社会质量意识的不断加强,产品检测和产品认证的范围和力度将随之不断加大。道路预成形标线带是与道路交通安全密切相关的一种产品,其检测技术的研究和应用,将会推动产品质量和工程质量整体水平的提高,对道路交通安全十分有益。

参考文献:

- [1] JT/T 493-2003, 道路预成形标线带 [S].
- [2] ASTM D4505-01a, Standard Specification for Preformed Retroreflective

机电流增大,电流大小与驾驶员转动方向盘的施力大小的变化规律基本一致;结束转向时,电流减小。

进行原地转向试验时还发现,随着转向过程,电机电流达到最大值、电机电压由 302V 降低到 150V、电机功率从 3.59kW 降低到 1.76kW,油泵流量减小,但工作压力保持在最大值,保证了动力转向效果;结束转向时,电机电流减小、电压上升。

上述试验结果表明,电机-油泵控制器实现了本文提出的控制思想,取得了很好的控制效果。该项成果在 2003 年清华大学牵头研制的燃料电池城市客车上获得了成功的应用。

4 结论

(1) 电动液压式转向系统是实现电动汽车动力转向的新方法。

(2) 油泵流量和压力受电机控制器外特性的控制。通过调节电机电压控制油泵流量;通过电机的恒电流控制,实现了油泵流量的自适应变化和油泵压力的控制。

(3) 与传统液压式转向系统相比,电动-液压系统不再需要机械溢流阀的作用,提高了转向系统的能量效率和可靠性。

参考文献:

- [1] Murray, et. al. All-electric Design Smartens Steering [J]. Boston: Design News, 1994, 49 (15): 89-90.
- [2] Yoshitomo, et. al., Development of Energy-saving Pump for Hydraulic Power Steering [J]. JSAE Review, 1997, 18: 310-313.
- [3] 朱家琰, 鲁达. 汽车与工程机械液压传动 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1984.
- [4] Murray, et. al. All-electric Design Smartens Steering [J]. Boston: Design News, 1994, 49 (15): 89-90.
- [5] Yoshitomo, et. al., Development of Energy-saving Pump for Hydraulic Power Steering [J]. JSAE Review, 1997, 18: 310-313.
- [6] 朱家琰, 鲁达. 汽车与工程机械液压传动 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1984.
- [7] Pavement Marking Tape for Extended Service Life [S].
- [8] ASTM D4592-01a, Standard Specification for Preformed Retroreflective Pavement Marking Tape for Limited Service Life [S].
- [9] GB/T 1631-1996, 道路交通标线质量要求和检测方法 [S].
- [10] JT/T 280-1995, 路面标线涂料 [S].
- [11] GB/T 2918-1988, 塑料试样状态调节和试验的标准环境 [S].
- [12] GB 2893-2001 (neq ISO 3864-1984), 安全色 [S].
- [13] ASTM D6628-2001, Standard Specification for Color of Pavement Marking Materials [S].
- [14] ASTM D 4060-95, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser [S].
- [15] ASTM D1000-99, Standard Test Method for Pressure-Sensitive Adhesive-Coated Tapes Used for Electrical and Electronic Applications [S].
- [16] ASTM E303-93, Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester [S].