

电控/电动液压助力转向控制技术研究现状与展望

解后循 高翔

【摘要】 综述电控液压助力转向控制技术的控制策略、方法及其特点。常规电控液压助力转向技术提高了车辆高速转向路感及动态响应,但存在助力特性固定、能量消耗大等缺点。电动液压助力转向技术将成熟的电动机驱动技术与液压伺服技术相结合,在提高高速路感及动态响应的同时,具有节能、环保的优点。建议采用综合控制,进一步提高电动液压助力转向系统的节能、动态响应及自适应能力。

关键词: 汽车 电控液压助力转向 电动助力转向 综述

中图分类号: U463.4 **文献标识码:** A

Review and Prospect of Electro-hydraulic Power Steering Research from the Viewpoint of Control

Xie Houxun Gao Xiang
(Jiangsu University)

Abstract

The control strategies, methods and characteristics for electro-hydraulic power steering were surveyed. It was discussed and summarized that the conventional electro-hydraulic power steering could improve driver's high speed road feel and vehicle's dynamics. Combining technology of electric motor drive with hydraulic servo, electric powered hydraulic power technology has the characteristics of improvement on driver's road feel, energy economy and environmental protection. The integrated control can farther improve the electric powered hydraulic steering system's energy economy, dynamic response and self-adaptability, which presents one of the developing directions of electro-hydraulic power steering.

Key words Vehicle, Electro-hydraulic power steering, Electric power steering, Prospect

引言

液压助力转向系统是保证汽车行驶安全的关键部件,能够降低驾驶操舵力,改善驾驶性能。目前用于轻型汽车的电动助力转向系统,结构复杂,该技术仍处于研究开发阶段,缺乏成熟的技术^[1~4],可靠性差,且会丧失习惯的液力感觉和路感;而液压助力系统具有出力大、转向感觉平顺、可靠安全的优点^[5]。对于中等功率(500~1 000 W)和大功率的伺服机构,液压方案仍为最佳选择^[6]。

本文对电控液压助力转向控制技术的现状进行探讨,并对今后发展方向进行展望。

1 传统液压助力转向技术概况及其问题

目前,液压助力转向技术是车辆上应用的主流助力转向技术,主要有齿轮齿条式和循环球式。图1为齿轮齿条式传统液压助力系统的基本组成。

传统液压助力转向系统的助力特性是由转向伺服转阀及油泵供油量决定的。当一个转向助力系统设计定型后,阀口和扭杆的参数固定,对于常流量系统,其助力特性是固定的。在设计助力转向系统时,若保证汽车在泊车时提供足够的助力,就必然导致在高速时助力过大,失去路感。解决这一问题的方法都是采用折中调和的方案,不能使所有工况都达到

理想状况。随着汽车技术及高速公路的快速发展,汽车车速的提升,这一矛盾越来越突出;另外,对助力转向系统提出了节能的要求。

2 电控变助力转向的控制策略及其特点

在传统液压助力转向系统的基础上,增加电子控制部分对系统流量或转阀的相关参数进行调节,改变助力转向系统的助力特性,达到随车速的提高降低系统的助力,可以提高汽车高速时的操纵性能和路感。

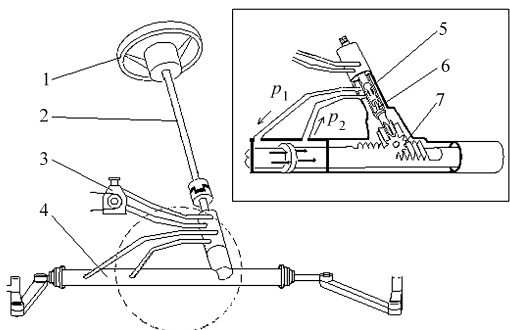


图 1 传统液压助力转向系统原理图

Fig. 1 Principle sketch of conventional hydraulic power steering system

1. 方向盘 2. 转向轴 3. 助力泵 4. 助力缸 5. 转阀 6. 扭杆
7. 齿轮齿条

2.1 电磁节流阀流量调节式变助力转向

转阀的阀口可认为是薄壁小孔,根据小孔流量方程,转向助力压力为

$$p_s = \frac{Q_s^2}{2n^2 C_d^2 S_1^2(\theta)} \quad (1)$$

式中 p_s ——压力 Q_s ——油泵供油量

$S_1(\theta)$ ——阀口有效面积 C_d ——流量系数

可见改变通过转阀的流量可以改变转向压力,从而改变助力。

文献[7]介绍了电子可变量孔助力转向系统(EVO)。这种系统是在传统助力转向系统的油泵上采用电子可变量孔,通过调整孔的通流截面大小来控制油泵流量。使系统的流量随着车速的提高而降低,转向助力油压随着降低,从而使高速时路感得到提高。

Hirotsugu Yamaguchi 等^[8]采用在常流量系统的高压油路和低压回路之间加上一个旁通电磁阀,电控单元控制电磁阀的可变阀口大小来控制流量,从而使流向转阀的流量得到调节。由于系统油压随转向操纵力大小变化,在旁通阀内集成一个压力补偿阀,使得压力的变化不影响通过旁通阀流量;该转向系统引入车速和方向盘角速度联合控制,微处理控制提供到转阀的供油量为

$$Q_s = Q_v + Q_w - Q_g \quad (2)$$

式中 Q_v ——车辆行驶速度确定的供油量

Q_w ——方向盘角速度确定的供油量

Q_g ——通过计算行驶速度和方向盘角速度确定的供油量

以上两种变助力转向系统,虽然方法不同,但都是随着车速的提高,适当减小流向转阀的油量,使得在不同车速下的转向操作具有适当的助力增益,提高了中高速转向路感。该方法虽然提高了驾驶的路感,却急剧降低了转向系的刚度^[9]。高速时的低刚度将会引起方向盘转动到车轮的运动滞后和损失。低速时方向盘大转角转动,这一运动的滞后和损失比较小,不易引起注意;而高速时的方向盘小转角转向需要快速精确,这种滞后和损失将会变得非常清晰^[10]。

2.2 转向阀扭转刚度调节式变助力转向

为了使高速时转向路感强且快速精确,需要在降低助力增益的同时,适当提高转向系的刚度,以提高转向系统的动态响应性能。

文献[9,11]分别对齿轮齿条式和循环球式传统液压助力转向系统的刚度进行了分析,齿轮齿条式转向系统的刚度表达式为

$$\frac{dF}{d\theta} = \frac{1}{r} \frac{k_t k_r}{k_t + k_r} + \frac{dp}{da} \frac{A k_r}{k_t + k_r} \quad (3)$$

式中 k_t ——转阀的扭转刚度

k_r ——转向轴刚度 r ——小齿轮半径

dp/da ——转阀压力增益

由于高速时 dp/da 较小,从式(3)可知 k_t 对转向系的刚度影响较大。

文献[10,12]分别对转阀式和滑阀式助力转向系统采用液力反馈调节技术进行了研究。通过油压反力室使转阀的阀套和阀芯的相对运动阻力随车速提高而加大。该技术一方面可以使阀芯、阀套的相对运动量减小,即阀口面积变化减小,压力增益降低;另一方面,由于阀芯转动阻力增大,间接增大了扭杆的刚度,提高了高速时转向系统的动态性能,使节流阀流量调节式的缺点得到克服。

文献[7]介绍了典型的电控液力反馈式助力转向系统。系统通过分流阀和由车速信号控制的电磁阀对油压反力室的油压进行控制,起到了降低高速助力增益及提高转阀扭转刚度的作用。另外反力有助于阀芯的回正,使方向盘的回正感得到加强。但是该调节技术,由于反力面间的接触,增加了转向系统的摩擦力,使转向助力死区增大,驾驶员的路感受到影响^[13],增加了控制难度,降低了系统可靠性。

2.3 转向阀阀口参数调节式变助力转向

通过控制手段使转向阀口参数随着车速变化而变化,系统的压力增益特性将会发生变化,从而达到变助力的目的。

文献[14]介绍了林肯 Continental 1988 可变助力转向系统。助力泵提供恒定的流量到转向。转向圆周上的 4 组阀口,2 组用于低速,其余 2 组高速阀口由电磁阀控制。

由式(1)可知,阀口有效面积 $S_1(\theta)$ 的变化对转向的压力增益具有较大的影响。低速时,由于只有 2 组阀口工作,阀口有效面积较小,所以压力增益较高;高速时,4 组阀口参与工作,阀口有效面积有较大提高,所以压力增益较低。通过电磁阀控制高速阀口随车速提高而加入工作,即可以实现车速敏感型的变助力转向。

由于低速时,转向灵敏度高,可以采用高刚度的扭杆,从而使高速时系统具有较高的等效刚度,且该方法没有增加系统的摩擦力,转向路感信息较真实。

John Baxter 等^[15]介绍的 Bishop 公司推出的电控可变助力转向器,系统通过电磁阀,增加或降低系统低压回路的背压,背压推动阀套克服弹簧力沿轴向移动;阀套和阀芯的轴向相对移动,改变了阀口面积参数,阀口有效面积变化,从而使阀的特性发生改变,达到与文献[14]同样变助力的效果。但阀口的形状较复杂,加工难度高。

3 电动液压助力转向技术

如何提高助力转向系统性能,降低系统能耗已成为日益关注的问题。常规电控液压助力转向技术虽然实现了助力特性的改变,提高了高速时的转向路感,但仍具有以下缺点:①助力液压泵由发动机驱动,在汽车行驶的整个阶段流量恒定,造成大量的能源浪费。②电磁阀成本高,导致系统成本过高,所以常规电控液压助力系统主要应用于高级轿车。③由于电磁阀精度高,其对液压油的品质及过滤条件要求高,导致维护成本提高。

电动液压助力转向技术将油泵由发动机驱动改为电动机驱动,使油泵的运行状态与发动机脱离,可单独控制。根据车辆的运行状态实时控制电动机的转速,达到提高系统性能及降低能耗的双重效果。

3.1 中位开式电动液压助力转向

初期的研究采用直流电动机轴联液压泵,电动机转速由车速信号控制,采用 PWM 驱动方式。

控制的理论基础为:对于排量为 q 的油泵,忽略系统泄漏,电动机电压 U 与流量 Q 之间的关系为

$$Q = qU / (C_e \Phi) \quad (4)$$

式中 C_e, Φ ——与电动机有关的常数

可见控制电动机的端电压就控制了油泵的输出流量。

文献[16]介绍了前轴负荷小于 6 000 kN 车辆的电动液压助力转向系统。系统用车辆的速度信号对电动机转速进行控制,采用开环方式;在控制器中嵌入固定算法,可靠性较好。在市区和公路上行驶系统能耗为发动机驱动油泵系统的 35%。

该系统虽然实现了变助力转向功能,但没有考虑特殊驾驶工况,如紧急避让、障碍行驶等。且由于系统采用车速作为控制参数,在非转向工况,电动机仍以正常转速运转,输出液压油到转向系统;而转向工况只占车辆行驶工况的很小比例,大部分时间车辆处于直行或轻微转向工况(不需助力),系统造成的能量浪费还较严重。

为了提高节能效率,文献[17]采用车速和方向盘转速作控制参数。在非转向工况,电动机以比转向工况更低的备用工况转速运转;转向工况,系统根据车速及方向盘转速信号控制电动机从备用工况迅速转入转向工况。文献对紧急避让工况系统的响应进行了仿真;系统响应迅速,助力平稳,可以满足助力要求。由于在非转向工况,电动机转速维持在很低的水平,消耗能量很少,系统的能源利用率有较大提高。但研究没有对备用工况电动机转速的选择做分析,对系统的设计缺乏实际的指导意义。

3.2 中位闭式电动液压助力转向

中位开式系统在非转向工况时,电动机仍然正常运转或以备用工况运转,需要一定量的液压油,造成一定的能源浪费。为进一步提高能源利用率,Keji Suzuki 等^[2]设计了基于闭心伺服阀的电动液压助力转向系统,并在前轴载荷为 8 000 kN 的车辆上进行了装车试验。系统在不转向时的平均能耗为 17 W,比开式系统小得多。

文献[18]对中位开式和中位闭式电动液压助力系统进行了仿真和比较,认为开式系统具有传统液压助力手感好、变助力及改造容易等优点,但节能效果不如闭式系统;而闭式系统输出流量变化大,手感较差,且由于增加蓄能器,提高了系统复杂性。

3.3 电动液压助力转向的控制方法

电动液压助力转向的控制目标为:提高高速时的操纵性能;降低系统的能量消耗。

早期的电动液压助力转向系统采用车速单一控制信号,开环控制,可靠性高,如文献[16]所述,但精确性不高。然而液压系统具有的较强非线性、油液的粘度变化、运行部件的磨损等对系统的性能有较大影响,随着对系统动态响应及助力精确性要求的提

高,开环控制已不能满足要求。Vladimir V Kokotovic 等^[19]提出采用自适应控制方法对电动机进行控制,同时将车速、车辆侧向加速度及偏移速度等车辆状态参数考虑进去,采用多参数综合反馈控制提高车辆操纵性能,实现对助力的精确控制。

4 总结与展望

电控液压助力转向技术是在传统液压助力转向技术的基础上发展起来的,主要解决车辆高速时的操纵路感和动态响应以及能源消耗。

常规电控液压助力技术解决了操纵路感和动态响应,但仍具有能量消耗大、成本高的缺点。电动液压助力转向技术既具有传统液压助力转向技术成

熟、大助力、可靠及手感好的特点,又具有电动机的高效率、易控制的优点。通过调速电动机来实现高动态节能型液压动力源已成为电液伺服控制的重要发展方向^[20~21]。

电控液压助力转向系统今后的主要研究方向为:①开展电动机与液压泵的匹配研究,进一步提高系统效率。②改进控制算法以适应系统的非线性,提高系统的动态性能,节约能量。③开发适宜中重型车辆使用的大功率、高响应电动液压助力转向系统。④对系统采用车速和转向速度、横向加速度、前轴重力等多种信号的综合控制,进一步提高路感,减轻驾驶员负担,实现精确转向等。

参 考 文 献

- 何仁,李强,郭孔辉. LQG 理论的电动助力转向系统最优控制[J]. 农业机械学报,2007,38(2):17~21.
- 高勇,陈龙,袁传义,等. 电动助力转向系统回正控制研究[J]. 农业机械学报,2007,38(5):6~10.
- 申荣卫,林逸,台晓虹,等. 电动助力转向系统建模与补偿控制策略[J]. 农业机械学报,2007,38(7):5~9.
- 张增年,陈无畏,郁明. 电动助力转向系统神经网络变结构控制器[J]. 农业机械学报,2007,38(7):1~4.
- Kelji Suzuki, Yoshiharu Inaguma, Kyosuke Haga, et al. Integrated electro-hydraulic power steering system with low electric energy consumption[C]. SAE Paper 950580, 1995.
- 王占林. 近代电气液伺服控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- 王绍■,夏群生,李建秋. 汽车电子学[M]. 北京:清华大学出版社,2005:263~265.
- Hirotsugu Yamaguchi, Sadahiro Takahashi, Makoto Miyoshi, et al. Development of an electrically-controlled power-steering system[C]. SAE Paper 841198, 1984.
- John Baxter. Analysis of stiffness and feel for a power-assisted rack and pinion steering gear[C]. SAE Paper 880706, 1988.
- Adams F J. Power steering "road feel"[C]. SAE Paper 830998, 1983.
- 苗立东,夏长高,高翔. 循环球式液压助力转向系统分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2002,23(3):50~53.
- Masao Nishikawa, Yoshihiko Toshimitsu, Takashi Aoki. A speed sensitive variable assistance power steering system [C]. SAE Paper 790738, 1979.
- 黎启柏,谢卓伟,高佑方. 恒流转阀式动力转向器的动态和静态特性研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 1997,25(11):74~79.
- Duffy J J. 1988 Lincoln continental variable-assisted power steering system[C]. SAE Paper 880707, 1988.
- John Baxter, Geoffrey P Dyer. Bishop VARIATRONIC™ power steering system[C]. SAE Paper 880708, 1988.
- Forbe J E, Baird S M, Weisgerber T W. Electrohydraulic power steering——an advanced system for unique applications[C]. SAE Paper 870574, 1987.
- Aly Badawy, Dieter Fehlings, Alexander Wiertz, et al. Development of a new concept of electrically powered hydraulic steering[C]. SAE Paper 2004-01-2070, 2004.
- 李一染. 汽车转向助力系统的节能研究[D]. 太原:太原理工大学,2002.
- Vladimir V Kokotovic, John Grabowski, Viral Amin, et al. Electro hydraulic power steering system[C]. SAE Paper 1999-01-0404, 1999.
- 权龙. 基于可调速电动机的高动态节能型电液动力源[J]. 中国机械工程, 2003,14(7):606~609.
- 田原,吴盛林. 无阀电液伺服系统理论研究及实验[J]. 中国机械工程, 2003,14(21):1 822~1 823.