

基于 AMESim 的电动液压助力转向系统的仿真研究

王 军, 陈 勇

(淮阴工学院 交通工程学院, 江苏 淮安 223003)

摘要:根据电机转速对转向性能的影响,确定电机转速与方向盘转速和车速的对应关系。利用仿真软件 AMESim 建立电动液压助力转向系统的仿真模型,包括方向盘输入模型、液压机械模型、轮胎模型和电机控制模型。其中设置方向盘输入为力输入和角输入两种输入端口,采用等效节流阀模拟转向,轮胎与地面的转向阻力使用齿条两端加载等效滑动摩擦力来模拟,电机控制使用转速环、电流环双闭环 PID 控制方法。通过三种典型工况的仿真,量化分析控制方法对车辆转向性能的影响,包括转向轻便性、路感、助力响应速度以及稳定性,仿真结果验证了控制方法的有效性,并为控制方法的优化提供了依据。

关键词:电动液压助力转向;仿真;电机转速控制;转向性能;AMESim

中图分类号:U463.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2010)04-0053-05

近几年来,电动液压助力转向系统发展很快,但是国内的研究还处于探索阶段。电动液压助力转向系统(EHPS)是在液压助力转向系统的基础上发展起来的,沿用传统液压力转向器的组件^[1],但是不再以发动机驱动转向油泵,而是使用电动机驱动,切断转向系统与发动机之间的联系,不但使转向系统方便布置,而且只要控制策略合理,比原液压助力转向系统在转向性能和节约能耗两方面都有显著的提高。

1 EHPS 控制方法的制定

电动液压助力转向系统读取车辆行驶速度信号和方向盘转速信号确定电机目标转速,控制电机电压使其按要求的转速运行,电机驱动定排量的转向齿轮油泵,输出一定流量的液压油,液压油流入助力缸推动活塞帮助驾驶员转向。显然,合理控制电机转速是其控制方法的核心。

1.1 分析电机转速对转向性能的影响

1.1.1 电机转速对转向轻便性和路感的影响

电机转速越快,油泵输出的液压油流量越大,那么在一定方向盘转矩即一定转向开度和一定车速即一定转向阻力的前提下,流向助力缸的液压

油流量越大,在助力缸活塞上能够产生的压力就越大,因此会增大作用在齿条上的助力,反之则会减小助力。助力越大,方向盘转矩越小,转向轻便性越好;助力越小,驾驶员就能更直接的感受路面状况,路感越好。

1.1.2 电机转速对助力响应速度和稳定性的影响

电机转速越快,油泵输出的液压油流量越大,在转向开度和转向阻力一定的前提下,流向助力缸的液压油流量越大,这样就能在更短的时间内在助力缸活塞上建立起足够大的压力推动活塞运动,助力响应速度越快;活塞从静止到以某一速度运动的过程要慢于压力建立的过程,存在助力超调的现象,需要一段时间才能稳定下来,油泵输出的液压油流量越小,助力超调越小,波动越小,稳定性越好。

综上所述,电机转速越高,轻便性越好,助力响应越快;电机转速越低,路感越好,助力稳定性越好。

1.2 确定控制目标

在车辆低速行驶时,转向阻力大,为了节省驾驶员体力提高驾驶舒适感,应提高电机转速使转向轻便;高速行驶时,为了提高驾驶的安全性,应

收稿日期:2010-10-19

基金项目:淮安市科技支撑计划(工业)(HAG2010040)

作者简介:王军(1967-),男,江苏宿迁人,讲师,硕士,主要研究方向为车辆工程。

适当降低电机转速加强路感。

当方向盘转速快时,例如突然遇到障碍物急打方向盘时,应提高电机转速加快助力响应,顺利避开障碍物;当方向盘转速慢时,应适当降低电机转速,使助力变化平稳,手力波动小,避免了转向“时重时轻”的现象。

1.3 确定电机转速与方向盘转速和车速的关系

控制电机转速与车速成反比变化,与方向盘转速成正比变化。设定它们的对应关系如图 1。

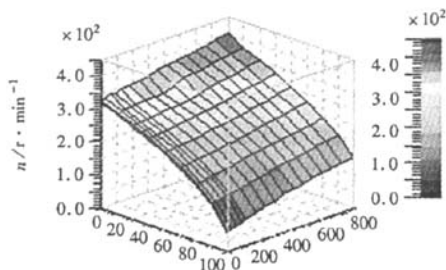


图 1 电机转速随行驶车速和方向盘转速变化图

Fig. 1 Motor speed vs vehicle speed and steering speed

2 EHPS 仿真模型的建立

仿真模型包括:驾驶员输入模型、液压机械模型、轮胎模型和电机控制模型。

2.1 驾驶员输入信号模型的建立

驾驶员操纵转向盘时对转向盘的输入可以看作有两种方式^[2],即角输入与力输入。在实际驾驶中既有角输入又有力输入,有时则以一种为主,如装有动力转向器的汽车以低速行驶时,操纵转向盘的力很轻,却可能有很大的转向盘转角输入,汽车的运动纯粹是由几何关系决定的,这时基本上是角输入;而在高速公路上以高速行驶时,可能出现的转向盘转角很小,汽车上却仍作用有一定的侧向惯性力,这时主要是通过力输入来操纵汽车的。

因此在本仿真中,方向盘输入分别设置了角输入和力输入两种输入端口,在车辆处于低速时使用角输入端口输入,高速时则使用力输入端口输入。

2.2 液压机械模型的建立

主要说明转阀模型的建立。使用具有适当刚度的扭转弹簧仿真模块来模拟扭杆,在扭杆的上下端分别安装一个角位移传感器模块,把这两个

模块输出信号之差作为扭杆变形量信号,再把这个信号传输给转阀模型,在本仿真中,转阀模型是通过 4 个节流阀来模拟的,节流阀开度由扭杆变形量信号所决定。由转阀开口面积与扭杆变形角关系^[3]:

$$A_1 = A_3 = L_1 \cdot W_1 + W_2 \cdot (L_2 + R_{FX}(\theta_1 - \theta_2)) \quad (1)$$

$$A_2 = A_4 = W_1(L_1 + L_2 + R_{FX}(\theta_1 - \theta_2)) \quad (2)$$

式中: A_i (i 为 1-4)是阀口面积; W_1 是短切口轴向长度, W_2 是阀口的轴向长度; L_1 是短切口的宽度, L_2 是阀芯处于中位时阀口预开间隙的宽度; R_{FX} 是阀芯与阀套的配合半径。

可得节流阀开口面积与扭杆变形量关系如图 2 所示,由于该转阀存在短切口结构,因此图 2 并不是对称的。

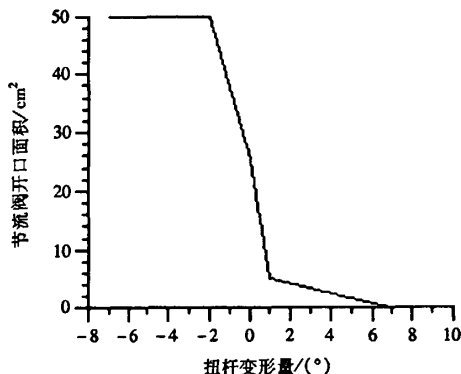


图 2 阀口面积与扭杆变形量关系图

Fig. 2 Orifice area vs torsion bar distortion

在扭杆模型上施加的转矩越大,则扭杆变形量越大,节流阀开度就越大,在电机转速不变的前提下,进入助力缸的油液流量就越大。液压油进入助力缸在活塞上产生的压力,与驾驶员的手力一起共同克服轮胎与地面的摩擦阻力使车轮发生转动。

2.3 轮胎模型的建立

利用 AMSim 中的质量模块和弹性阻尼模块来模拟轮胎,利用齿条两端安装的摩擦块的滑动摩擦力模拟转向阻力。这个滑动摩擦力是随着车速信号变化而变化的,即随着车速的变化转向阻力发生变化。

转向阻力随车速变化的函数关系推导如下:随着行驶速度的变化会影响前轴载荷的变化^[3]:

$$G_z = G \left(\frac{b}{L} \cos \alpha - \frac{h_g}{L} \sin \alpha \right) - \left(\frac{G}{g} \frac{h_g}{L} + \frac{\sum I_v}{Lr} + \right.$$

$$\frac{I_{fz} i_o}{L_r} \frac{du}{dt} - \frac{1}{2} C_{Df} A \rho u^2 - G \frac{rf}{L} \cos \alpha \quad (3)$$

式中: G_z 为前轴载荷, b 为质心到后轴的距离, L 为轴距, h_g 为质心高度, G 为车重, α 为坡度, $\frac{G}{g} \frac{du}{dt}$ 为平移质量惯性力, $\frac{\sum I_{fz} du}{L_r dt}$ 为惯性阻力偶矩, $\frac{I_{fz} i_o}{L_r}$ 为发动机飞轮惯性力偶矩, C_{Df} 为升力系数, A 为迎风面积, ρ 为空气密度, u 为汽车行驶速度, r 为车轮半径, f 为滚动阻力系数。

为了方便起见, 假设地面没有坡度即 $\alpha = 0$; 忽略惯性阻力偶矩和发动机飞轮惯性力偶矩; 滚动阻力偶矩产生的部分 $G \frac{rf}{L}$ 甚小, 忽略不计。那么:

$$G_z = G \frac{b}{L} - \frac{G}{g} \cdot \frac{h_g}{L} \cdot \frac{du}{dt} - \frac{1}{2} C_{Df} A \rho u^2 \quad (4)$$

地面阻力矩公式^[4]:

$$M_D = \frac{\mu}{3\sqrt{P}} \sqrt{G_z} \quad (5)$$

式中: μ 为地面阻力系数, P 为轮胎气压。

这样根据齿轮齿条和转向直拉杆等的机械传动关系可以将 M_D 换算为阻止齿条移动的等效阻力 F_f , 设换算系数为 λ , 则:

$$F_f = \lambda \cdot M_D = \lambda \cdot \frac{\mu}{3\sqrt{P}} \sqrt{G \frac{b}{L} - \frac{G}{g} \cdot \frac{h_g}{L} \cdot \frac{du}{dt} - \frac{1}{2} C_{Df} A \rho u^2} \quad (6)$$

在仿真中设定轮胎仿真模块中的滑动摩擦力按照上述关系式随车速信号变化, 从而模拟汽车行驶过程中转向阻力随行驶速度的变化。

2.4 电机控制模型的建立

根据电机调速准确和响应迅速的要求^[5], 确定电机控制电压。

为了满足调速准确的要求, 需要分析电机电压与电机转速在不同负载的情况下, 它们的函数关系:

$$\omega = \frac{U_d - L \frac{dI_d}{dt} - RI_d}{K_d} \quad (8)$$

式中 K_d 为电机的反电动势常数。

当汽车以不同车速行驶时, 转向阻力是不同的, 由于电机电流与负载成线性关系, 因此电流也就不同, 电枢电阻的压降随电流改变, 这样反电动势在不同车速下是不同的, 也就是说电机电压与

电机转速的关系是随着车速变化而改变的, 为了满足电机调速准确的要求, 使用了转速闭环控制的方法。

为了满足电机响应迅速的要求, 从两个方面来分析提高电机响应速度的方法。

① 从电机的自身特性来分析提高电机的响应速度的方法, 电机响应达到要求的转速需要一定的时间, 通过对电动机机械部分受力分析, 可以得到:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_l - f\omega}{J_m} \quad (9)$$

式中: J_m 为电机与油泵的转动惯量; T_m 为电动机电磁转矩, 这里即是电机的控制输入; T_l 为电动机来自油泵的负载; f 为电机粘性阻尼系数; ω 为电机的角速度。

通过上式可以看出, 在电动机输入转矩和油泵负载一定的前提下, 电机的响应速度与转子转动惯量和粘性阻尼系数有关, 因此减小转子转动惯量和粘性阻尼系数, 可以加快电机响应。

② 从电机的控制方法方面来分析提高电机的响应速度的方法, 在转速闭环控制的基础上增加一个电流环, 实现对电机的双闭环控制。电机输出转矩是由电流决定的, 而提高电机输出转矩相当于增大了电机转速变化的加速度, 因此引入电流闭环控制可缩短电机调速过程所耗的时间。

3 仿真计算及结果分析

根据建立的 EHPS 系统仿真模型在 AMESim 中进行仿真, 仿真参数见表 1。

3.1 低速转向轻便性分析

通过对双扭线工况进行仿真, 分析车辆的低速转向轻便性。仿真时车辆分别保持 10 km/h、20 km/h、40 km/h 的车速, 沿双扭线轨迹行驶。根据 1.1 节的分析, 此时方向盘输入主要是角输入, 仿真中使用角输入端口, 设定方向盘转角按正弦曲线变化, 幅值为 1 150°, 频率为 0.33 Hz。

仿真得到转向盘转矩和转向盘转角的关系曲线, 如图 3 所示。

通常以转向盘最大转矩来评价转向轻便性, 如表 2 所示, 3 种车速下的方向盘转矩均未超过 4 Nm, 也就是说最大手力在 10 N 左右, 可以满足低速转向轻便的要求。

3.2 高速转向路感分析

通过对蛇形工况进行仿真, 分析高速转向路

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters of simulation

参数名称	参数值
整备质量/kg	1 080
轮胎型号	175/65 R14
前轴载荷/kg	770
车轮最大转角(内/外轮)/(°)	37.2/32
齿条最大输出负荷/N	6 410
油缸内径/m	0.038
齿条直径/m	0.022
齿条行程/m	0.134 ± 0.001
总圈数	3.58 ± 0.1
小齿轮直径/m	0.006
方向盘直径/m	0.36
齿条的螺旋齿形角/(°)	20
线角传动比	37.4
油泵公称排量/ml · r ⁻¹	1.5
油泵流量/L · min ⁻¹	6
最大工作压力/Mpa	8.5
电机功率/kw	0.5
电机转子转动惯量/kg · m ²	0.000 2
电机电枢电阻/Ω	0.568 1 ~ 0.568 5
电机电枢电感/H	0.000 2
电机工作电压/v	12
电机最高转速/r · min ⁻¹	4 000

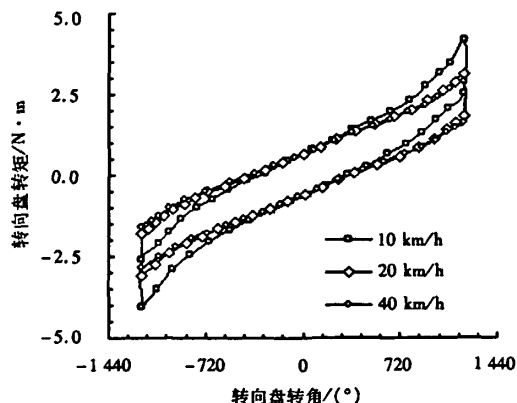


图 3 转向盘转矩 - 转向盘转角曲线

Fig. 3 Handwheel Torque - Steering angle

感。仿真中汽车分别保持 60 km/h、80 km/h、100 km/h 的速度作正弦曲线的蛇形行驶,正弦运动的周期为 5 s,最大侧向加速度为 0.2 g。根据 1.1 节的分析,此时方向盘输入主要是力输入,仿真中使用力输入端口,设定方向盘转矩按正弦曲线变化,幅值为 5 N · m,频率为 0.2 Hz。

仿真得到转向盘转矩和侧向加速度的关系曲线,如图 4 所示。

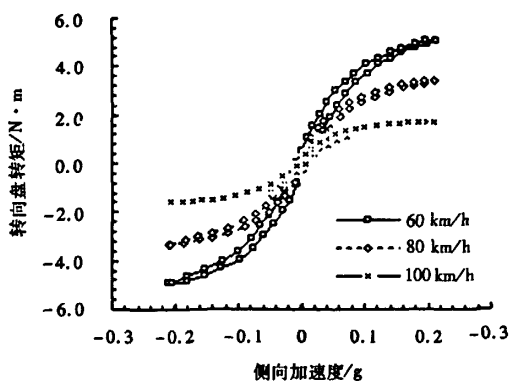


图 4 转向盘转矩 - 侧向加速度曲线

Fig. 4 Handwheel Torque - Lateral Acceleration

通常用侧向加速度为 0.1 g 处的方向盘转矩梯度来评价高速转向路感,如表 2 所示,随着车速的提高,方向盘转矩梯度逐渐变大,路感逐渐加强,当车辆以 100 km/h 的速度行驶时,转矩梯度高达 13.82/g,表明路感良好。

表 2 轻便性与路感仿真结果

Table 2 Simulation results of steering portability and road feel

	最大方向盘转矩 /N · m	0.1 g 处的方向盘 转矩梯度/N · m · g ⁻¹
1	3.8	13.82
2	3.1	7.65
3	2.9	5.29

3.3 助力响应性和稳定性分析

仿真中设定车速为 50 km/h,分别以 120 deg/s、360 deg/s、500 deg/s、720 deg/s、800 deg/s 的转速匀速旋转方向盘。仿真得到液压助力在各种方向盘转速下的变化曲线,即助力响应特性曲线。如图 5 所示。

以响应时间(助力第一次到达稳态值所用的时间)和超调量(最大助力/稳态值 × 100%)表示助力响应性和稳定性。如表 3 所示,急打方向盘时,响应时间均在 0.2 s 以内,最大超调量也不超过稳态值的 10%,表明助力响应性和稳定性良好。

4 结语

根据提高车辆转向性能的要求,合理确定了

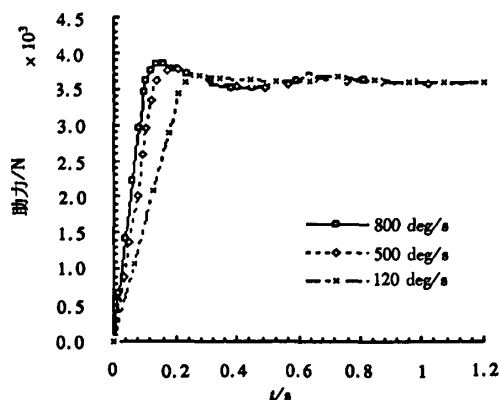


图5 不同方向盘转速下助力变化曲线

Fig.5 Assist force on the rack with several steering speed

表3 响应性与稳定性仿真结果

Table 3 Simulation results of response and stability

	1	2	3	4	5
响应时间/s	0.23	0.17	0.15	0.13	0.11
超调量	1.08	1.06	1.05	1.03	1.02

电机转速与方向盘转速和车速的对应关系。应用软件 AMESim 建立了电动液压助力转向系统 EHPS 的仿真模型,比较精确的对车辆低速转向轻便性、转向助力响应性和稳定性进行了量化分析,验证了控制策略在提高车辆转向性能方面的有效性,为今后控制方法的优化提供了依据,但是在模型中并未加入悬架系统,因此目前对高速转向路感的量化分析不够准确。

参考文献:

- [1] 何仁,李强. 汽车线控转向技术的现状与发展趋势[J]. 交通运输工程学报,2005(6):68-72.
- [2] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [3] 耿国庆. 电动液压助力转向系统设计与研究[D]. 镇江:江苏大学,2006.
- [4] 唐宇明. 汽车转向制动系统设计[M]. 南京:东南大学出版社,1995.
- [5] 苗立东,何仁. 基于相位补偿的电动助力转向系统控制方法[J]. 交通运输工程学报,2007(2):37-42.

Simulation Studies of Electro Hydraulic Power Steering Based on AMESim

WANG Jun, CHEN Yong

(Transportation Engineering College Huaiyin Institute of Technology, Jiangsu Huaian 223003, China)

Abstract: Properly controlling electro hydraulic power steering system can improve steering performance. The relation of motor speed, vehicle speed and steering speed is gained, according to the influence of motor speed on the steering performance. The simulation model of EHPS is created by AMESim, which mainly includes the driver input, hydraulic mechanism, tyre and the control of motor. The force and angle input is set in the driver input model. Rotary valve is simulated by four orifices. The steering resistance between tyre and ground is simulated by the coulomb friction on two tips of the rack. The method of double closed-loops PID is used to control the motor. The influence of the control strategy on the steering performance is realized by the simulations of three typical situation, which includes steering portability, road feel, the speed of assist force response and its stability. The results of simulation validate the availability of the control strategy, which is the basic of optimization.

Keywords: electro hydraulic power steering; simulation; the control of motor speed; steering performance; AMESim

(责任编辑:沈建新;校对:张英健)