

C-EPS电动助力转向系统开发

陈创和 黄 陆

海南海马汽车有限公司 海南 海口 570100

摘要: 本文主要从整车入手, 根据C-EPS助力工作原理, 重点研究转向基础策略算法与实际应用, 对主机厂在C-EPS开发与实际应用具有一定的指导意义。

关键词: C-EPS; 助力特性; 控制策略; 标定

1 引言

人们对汽车安全性、舒适性要求越来越高, 及电动助力转向系统的显著优点: 1.紧凑、重量轻; 2.低能耗; 3.优越的操纵性能(回正性、跟随性等); 4.拓展性强(实现车道保持、自动驾驶等功能)。电动助力转向系统已经成为现代汽车不可缺失的一部分。

2 工作原理

C-EPS的控制器接收扭矩信号、车速信号、方向和转速信号、发动机转速信号、IG电信号等, 经计算所需电流大小, 最后经过功率驱动电路来控制电机的转动, 电机的转动扭矩通过涡轮蜗杆减速增扭矩结构作用到转向轴上, 转向轴上的力矩通过齿轮齿条式转向器转化为转向横拉杆的轴向力, 通过左右横拉杆做往复运动使车轮转向。

3 C-EPS 转向系统参数匹配

本文以一轿车为例, 研究C-EPS在设计过程中的匹配计算方法。参数如下:

满载前轴载荷G (Kg); 1010

胎压P (MPa); 0.22

路面摩擦系数f; 1.0

电机额定扭矩I (Nm); 4.47

涡轮蜗杆减速比 i_1 ; 20.33

转向器线角传动比 i_2 (mm/rev); 49.93

有效力臂n; 108.7

3.1 所需最大齿条力

汽车在原地打方向盘时所需齿条力是最大的, 比车辆行驶中所需的齿条力大2-3倍。在本文中, 我们采用半经验公式(1)计算齿条力。经计算, 所需最大齿条力 F_{max} 约为7088N。

$$F_{max} = \frac{fi}{3n} \sqrt{\frac{G^3}{P}} \dots\dots(1)$$

i 为安全系数(取1.1)。

3.2 C-EPS电机助力性能校核

在选择助力电机时需详细计算电机扭矩, 余量过大, 电机的效率利用低, 成本越高; 余量过小, 助力不足。一般乘用车C-EPS电机扭矩设计最大富余量不小于8%。各工况下, 经计算可得所需齿条力以及转向系统可提供的齿条助力如表1, 最大齿条力的富余量为18%。满足要求。

表1 C-EPS电机助力性能计算

项目	车速 km/h	齿条行程 %	齿条力 N	方向盘转速 °/s	手力 Nm	齿条可助力 N
停车	0	100	7088	300	4	8373
低速	10	50	3544	500	4	6500
高速	>30	40	2835	800	10	4235

4 C-EPS 电机控制策略算法设计

EPS控制算法是EPS系统的核心技术, EPS控制算法包含多方面的内容。各个公司的EPS控制算法有所不同, 但基础的控制算法大同小异。

4.1 C-EPS基础助力控制策略算法

根据基础助力特性的曲线形状特征, 一般电动助力转向系统的基础助力特性可分为三种类型:

- 1、直线型助力特性: 逻辑简单, 路感强度为恒值, 转向轻便性与路感关系难以协调好;
- 2、曲线型助力特性: 逻辑复杂, 路感强度不为恒值, 转向轻便性与路感关系调整比较复杂;
- 3、折线型助力特性: 路感强度不为恒值, 协调轻便性与路感关系较为理想的方法。

因此现在市场上搭载C-EPS基本上是采用折线型助力特性, 如图1。

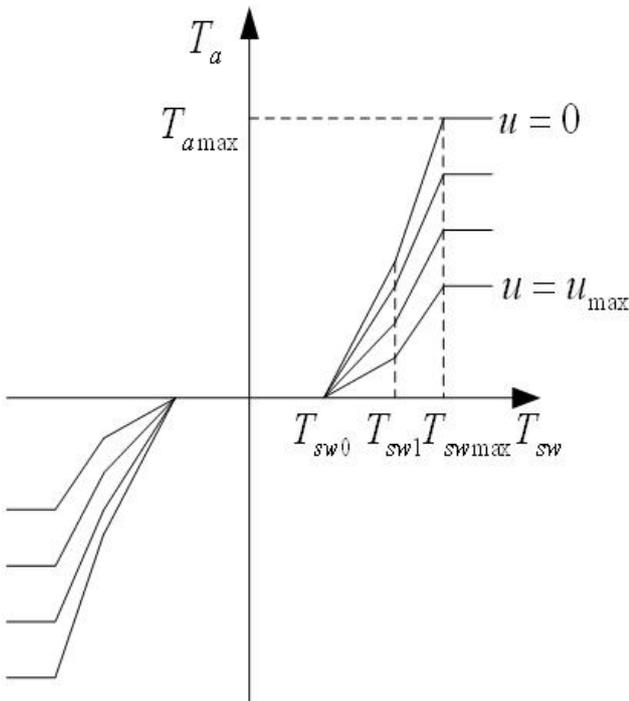


图1 折线型助力特性曲线

图1中方向盘力矩和助力矩均有正负之分，是考虑到汽车左右转向时的区别。方向盘力矩的大小一定，助力矩的大小就为一定值。下面仅讨论正方向时的情况。图1中助力特向曲线可以分成三个区， $T_{sw} \geq T_{swmax}$ 区为恒助力区， $T_{sw0} \leq T_{sw} < T_{swmax}$ 区为正常助力区， $0 \leq T_{sw} < T_{sw0}$ 区为无助力区。

该助力特性曲线函数表示如下：

$$T_a = \begin{cases} 0 & 0 \leq T_{sw} < T_{sw0} \\ K_1(u) \cdot (T_{sw} - T_{sw0}) & T_{sw0} \leq T_{sw} < T_{sw1} \\ K_2(u) \cdot (T_{sw} - T_{sw0}) + K_1(u) \cdot (T_{sw1} - T_{sw0}) & T_{sw1} \leq T_{sw} < T_{swmax} \\ f(u) \cdot T_{max} & T_{sw} \geq T_{swmax} \end{cases} \dots\dots (2)$$

式中， $K_1(u)$ 、 $K_2(u)$ 分别为两段助力特性曲线的车速感应系数，随车速增加而减小；为助力特性曲线梯度由 $K_1(u)$ 变为 $K_2(u)$ 时的方向盘输入力矩。

4.2 C-EPS回正及阻尼控制策略算法

汽车高速行驶过程中，车辆自身回正能力较强；在低速行驶过程中，车辆自身回正能力较弱，为弥补以上缺陷，调整转向回正力与阻尼的关系让驾驶员感到舒适。C-EPS中的回正与阻尼控制算法是通过补偿电机电流，提高车辆的回正性能。

算法： $T_{RD} = K_p \cdot \partial + K_1 \cdot \int \partial dt + K_D \cdot \frac{d\partial}{dt} \dots\dots (3)$

低速时，选择PI控制，令微分系数为零，让电机提供

回正力矩，则可以简化为：

$$T_{RD} = K_p \cdot \partial + K_1 \cdot \int \partial dt$$

高速时，选择PD控制，令积分系数为零，让电机提供阻尼力矩，则可以简化为：

$$T_{RD} = K_p \cdot \partial + K_D \cdot \frac{d\partial}{dt}$$

主动阻尼或回正力矩 T_{RD} ；方向盘的转角 ∂ ；阻尼补偿系数 K_D ；惯量补偿系数 K_I 。 K_p 、 K_I 和 K_D 根据车速设定不同常数。车速升高， K_p 和 K_I 变小， K_D 而变大。

4.3 C-EPS电机补偿控制算法

电机控制算法中，阻尼、惯量以及摩擦等补偿控制算法是电机的一个修正性控制算法，

是在基础助力控制算法的基础上对电机输出力矩的修正，这些控制算法的目的是修正电机的自身惯量、阻尼以及机械摩擦对电机输出力矩的影响。

4.3.1 电机惯量

电机惯量控制补偿力矩算法公式：

$$T_I = K_I \cdot \frac{d\omega_M}{dt} \dots\dots (6)$$

其中， K_I 为电机惯量补偿系数，与车速成反比； T_I 为电机惯量补偿力矩； ω_M 为电机转速。

4.3.2 电机阻尼

电机阻尼控制补偿力矩算法公式：

$$T_D = K_D \cdot \omega_M \dots\dots (7)$$

其中， K_D 为电机阻尼补偿系数，与车速成反比； T_D 为电机阻尼补偿力矩； ω_M 为电机转速。

4.3.3 电机摩擦

电机摩擦控制补偿力矩算法公式：

$$T_F = K_F \cdot \text{sgn}(\omega)_M \dots\dots (8)$$

其中， K_F 为电机的摩擦补偿系数，与车速成反比； T_F 为电机的摩擦补偿力矩； $\text{sgn}(\omega)_M$ 为电机的转动方向。

4.4 力矩微分控制

电机补偿控制是根据电机运动学来对电机提供修正补偿力矩的，而力矩微分控制是在基础助力控制的基础上附加的一个修正控制功能，是根据车速和转向盘力矩的变化率来对基础助力进行修正补偿，将可以获得更加良好的控制效果。

力矩微分控制算法公式：

$$T_{TD} = K_{TD} \cdot \frac{dT_{HW}}{dt} \dots\dots (9)$$

其中, K_{TD} 为力矩微分控制系数, 与车速成反比; T_{TD} 为微分控制修正力矩; T_{HW} 为转向盘力矩。

4.5 最大电流控制算法 (过热保护)

在驾驶员频繁操作方向盘时, 电机的温度短时间内会有个大幅度提高, 为了保护电机, 必须设计电流保护算法, 即电机或者控制器温度达到一定值时, 对电流进行限制, 算法公式如下:

$$I_{max} = f_D(T_{emp}) \dots \dots (10)$$

式中, I_{max} 为电机最大电流; T_{emp} 为电机或者控制器温度, f_D 为限定系数。

5 C-EPSC 空间硬点布置

转向系统的硬点设计对转向力矩波动性影响比较大, 从而影响驾驶员的舒适度。

一般转向系统硬点设计时, 尽量使转向管柱上轴轴线与中间轴轴线夹角 (α_1)、中间轴轴线与转向器输入轴轴线夹角 (α_2) 相等, 且两个夹角不大于 30° , 使整个转向系统力矩波动在 $\pm 5\%$ 范围内。某车型硬点A (1874.4, -378.6, 1169.1), B (1392.4, -369.4, 912.7), C (1167.1, -221.9, 684.6), D (1122.7, -182.0, -526.9), 经计算验证, 最大力矩波动值1.02%, 满足设计要求。如图2所示。

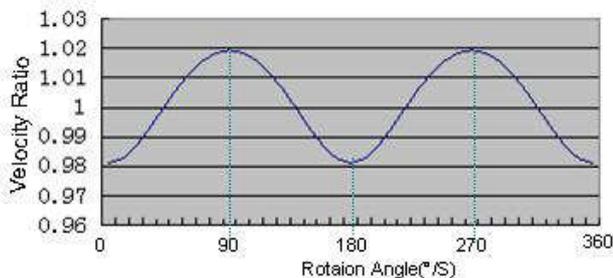


图2 管柱力矩波动示意图

6 C-EPSC 转向系统标定

标定是在EPS转向系统匹配及布置完之后进行的。匹配是设计初期对电机及转向器参数的初选。标定是结合整车工况, 对各项控制策略算法的参数调试, 整车厂会根据各项客观试验及不同的驾驶员给出的主观评价来形成最终的标定参数, 从而形成最佳的转向手力及驾驶舒适度。各个整车厂的标定方式不同, 本文主要介绍基础的标定方法。

6.1 客观试验

6.1.1 原地与低速转向力调试

原地方向盘转速 90deg/s , 全程转向 (中间位置—左极限—右极限—中间位置), 分别以5、15、 30km/h 车速行驶, 左右均打到极限位置。要求全程转向力不大于 4Nm (轿车)。

在此试验中, 技术人员主要对EPS低速基本助力曲线参数及电机摩擦补偿参数进行调试, 从而确定低速基本助力特定曲线形状。即对式 (2) 和式 (8) 中的 $K_1(u)$, $K_2(u)$, $f(u)$, K_f 进行标定, 式 (2) 中的, T_{sw0} , T_{sw1} , T_{swmax} 为初步匹配时根据经验已经选定, 一般不做调整, 调整完后的最终试验曲线形状如图3:

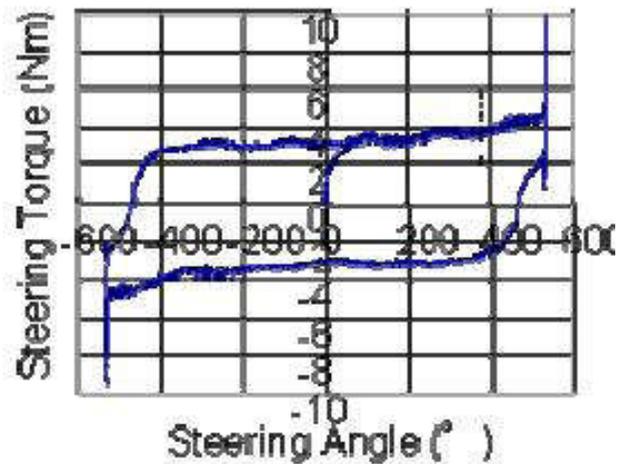


图3 转向手力与方向盘转角的关系

6.1.2 低速回正调试

车速 20km/h , 左转或右转向 180° , 放开方向盘, 让方向盘自动回正。要求在3~4秒之内, 转向回正率在80%以上。

在此试验中, 技术人员主要对EPS回正以及阻尼控制算法中的参数进行调试。即对式 (4) 的, K_p , K_f 两个参数进行调试。调试完后的最终试验曲线如下图4:

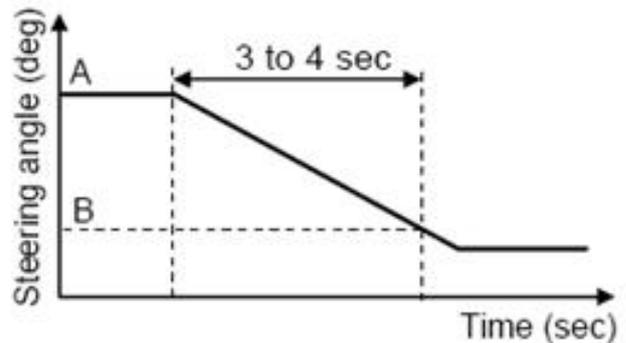


图4 方向盘转角与时间的关系图

6.1.3 转向瞬态输入调试

车辆在 80km/h 车速, 以 600deg/s 输入 60° 转向角度, 测试车辆方向盘无控制下回正的收敛性, 要求车辆左右摆动次数小于6次。

在此试验中, 技术人员主要调整的参数是回正控制策略参数和电机阻尼控制策略参数。即对式 (5) (6) (7) 的参数, K_p , K_D , K_f 进行标定。调整完后的图形

如图5。

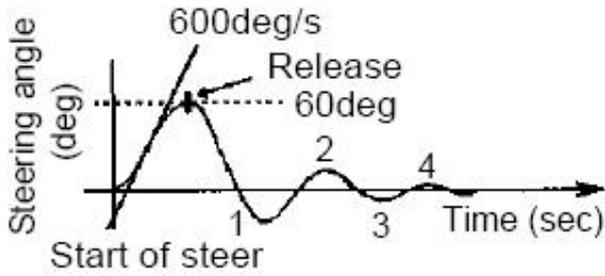


图5 车辆摆角与时间的关系图

6.1.4 8字形回转力测试

车轮中低速绕半径为20m的8字形回转，完成5个以上的循环。要求手力在3~4Nm之间，无力矩突变现象。

在此试验中，技术人员主要调整的是力矩微分控制参数。即对式(9)的 K_{TD} 进行标定。

6.1.5 过热保护试验

原地全行程打方向盘(中间位置—左极限—右极限—中间位置，属于一个循环)。要求在12个循环内，CEPS不能启动过热保护功能。

在此试验中，技术人员主要的是标定允许通过的最

大电流，即对式(10)中的 f_D 进行标定。

6.2 主观试验

6.2.1 中心感较好；

6.2.2 低速转向轻便；

6.2.3 高速转稳定性好；

6.2.4 转向响应快；

6.2.5 转向平顺性强。

主观评价没有标准，属于细微标定，每个驾驶员的驾驶感觉不同(一般3~4人)，得出的结论也不尽相同。技术人员需要根据各个公司的评论员给出的评价，对电机摩擦补偿控制，电机惯性补偿控制，电机阻尼控制及力矩微分控制参数进行细微调节。才能得到比较满意的驾驶感觉。

参考文献

[1] 雷琼红.汽车电动助力转向系统(EPS)技术现状和发展趋势分析[J],机械工程师,2009,9,53.

[2] 邓利军,张璘,王书贤.EPS系统助力特性与控制策略研究,襄樊学院,2010,1-3.

[3] 殷春芳,汪少华,赵锦波.汽车EPS助力特性比较研究,江苏大学,2009,25,6-2.