

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.11.000

# 基于改进 $H_\infty$ 算法的线控转向系统仿真研究

朱凌俊, 于苏楠, 刘晓帆, 赵鼎成

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 针对汽车线控转向系统的鲁棒性问题, 对汽车线控转向的原理和结构方面进行了研究; 对汽车线控转向的动力学模型进行了建立以及简化; 对汽车线控转向控制系统进行了分析与设计。以  $H_\infty$  运算为基础, 利用反求法, 避开了加权函数的选择, 通过观察  $H_\infty$  运算中 S/T 奇异值曲线, 运用符合线控转向鲁棒性能要求的预期 S/T 曲线逆转了该闭环系统, 构建出了闭环传递函数, 提出了一种基于改进  $H_\infty$  算法的线控转向系统。通过对线控转向系统的时间域和频率域的分析, 以及线控转向系统模型干涉和参数扰动下的仿真结果分析, 验证了改进  $H_\infty$  算法的控制策略的准确性。研究结果表明, 基于改进  $H_\infty$  算法的线控转向系统在保证了鲁棒稳定性的前提下, 具有更好的响应性能; 并且改进的控制器有比传统的控制器有更好的鲁棒性。

**关键词:** 线控转向; 鲁棒性;  $H_\infty$  运算

中图分类号: U467.13; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)11-1382-06

## Simulation of steering by wire controller based on improved $H_\infty$ algorithm

ZHU Ling-jun, YU Su-nan, LIU Xiao-fan, ZHAO Ding-cheng

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of robust performance in the vehicle steering by wire (SBW) system, the principle and structure of SBW was researched, then the simplified SBW model was built up. The SBW control system was analyzed and designed, which is based on  $H_\infty$ , using reverse method to avoid the choice of weighting function, by observing S / T singular value curve in the operation of the  $H_\infty$ , in line with the use of SBW robust performance as expected requirements rod S / T curve of the reversing loop system, the closed loop transfer function was constructed, then, a SBW based on an improved  $H_\infty$  algorithm was advanced. The accuracy of an improved  $H_\infty$  algorithm control strategy was tested through the analysis of SBW in time and frequency domains and the the simulation result under the interference and parameter perturbation. The results indicate that the SBW based on an improved  $H_\infty$  algorithm has a stable robust performance, which has a better response performance, and the improved controller has a better robust performance than before.

**Key words:** steering by wire (SBW); robust;  $H_\infty$  algorithm

## 0 引 言

近年来,随着电子和控制技术的不断发展,汽车电动助力转向系统迅速发展。各种电力转向系统的应用改善了车辆转向角的转动特征、转向灵敏性特征以及转向平稳性特征<sup>[1-2]</sup>。然而,现在的转向系统仍处于机械连接阶段,转向性能随着速度、转向角以及路面与轮胎附着条件的改变具有非线性时变特征。为了使车辆沿着预订路线行驶,司机必须调整他们自身,因此增

加了司机的身心负担,尤其是非职业司机,他们难以适应这种调整<sup>[3]</sup>。因此,各国的研究者正在研究新技术来解决以上转向系统的问题。在这种情况下,线控转向应运而生。该项新技术已经引起了广泛的关注及大量的研究,如法国雪铁龙公司的概念车,德国克莱斯勒汽车公司的概念车 8129,韩国起亚公司的概念车以及 2011 年德国航天中心和交通科学技术研究协会设计的试验车辆 FASCarll。除此之外,汽车零部件生产商,车辆设计公司以及很多大学都在研究线控转向。

研究线控转向控制策略的主要目的在于研究车辆运行时以及在道路复杂条件下,如何保持车辆平稳性、车辆追踪以及防干扰的能力。目前,有大量的控制策略应用于线控转向,其中几个典型的案例已经获得了一定的效果,如 PID, LQG, H $\infty$  等等<sup>[4-5]</sup>。来自加拿大的学者 Zames 在研究设计目标的不合理性以及 LQG 的干扰极限中,提出了 H $\infty$  的控制思路<sup>[6]</sup>。经过 20 多年的发展,H $\infty$  控制理论已经成为成功解决鲁棒控制问题的理论系统之一。其中加权函数的选择起到了关键作用,其能够直接决定线控转向性能的好坏。然而,一位优秀的工程师设计线控转向的经验对于加权函数的选择非常重要,这需要工程师进行大量重复的微积分计算<sup>[7]</sup>。这些问题都给线控转向 H $\infty$  控制器的设计带来巨大的困难。

本研究对 H $\infty$  控制运算进行改进,通过反求法来避开加权函数的选择。本研究对 H $\infty$  运算中 S/T 奇异值曲线的研究和观察,以 H $\infty$  运算为基础,构建闭环传递函数,然后运用符合线控转向鲁棒性能要求的预期 S/T 曲线逆转闭环系统。这是一种从工程意义上简化的 H $\infty$  回路成形的算法。其物理概念清晰,解题过程相当简单,最终的控制器阶数很低。S/T 曲线和阶跃响应的仿真结果显示,改良后的 H $\infty$  运算的鲁棒性和平稳性都要比传统的好很多。

## 1 线控转向的动力学模型及其分析

线控转向采用的是线传控制技术,把信号传送到电子控制装置,然后通过电子控制装置传送的命令去控制转向执行程序集来完成转向命令,最后司机能够意识到驾驶意图。线控转向去除了传统的机械连接。理论上,其能自由地设计角度和力的转向特性,也能提供设计转向特性的广大空间,具有巨大的应用市场以及无限的发展潜能。

### 1.1 线控转向原理

笔者研究的线控转向结构原理图如图 1 所示。主要分为方向盘总成、控制器以及前轮转向总成。方向盘总成包括方向盘、方向盘力矩转角传感器、电机减速器、电机驱动器、方向盘回正力矩电机(路感电机)等,其主要功能是将驾驶员的转向意图(通过测量方向盘转角)转换成数字信号传递给控制器,同时接收控制器送来的力矩信号产生方向盘回正力矩以提供给驾驶员相应的路感信息。转向执行总成包括前轮转角扭矩传感器、转向电机驱动器、转向电机及相关传感器等,其主要接受控制器的命令,由转向执行电机控制转向

车轮转角,实现驾驶员的转向意图。除了机械硬件之外,线控转向和传统的转向系统最直接的差异就在于线控转向具有 3 种功能的控制器:控制路感电机,控制前轮转角以及对整个系统主要部件的容差控制<sup>[8]</sup>。控制器对采集的信号进行分析处理,判别汽车的运动状态,向方向盘回正力矩电机和转向执行电机发送指令,保证各种工况下都具有理想响应。

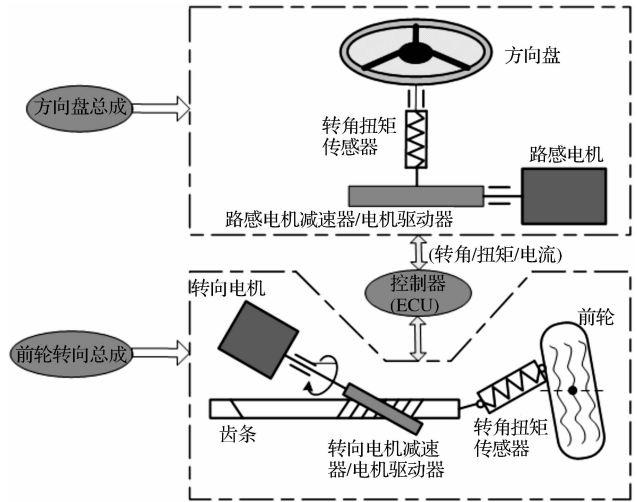


图 1 线控转向结构原理图

### 1.2 线控转向的动力学模型

线控转向受力示意图如图 2 所示。根据图 2,线控转向可分为两部分,路感装置以及方向盘仿真的受力原理图如图 2(a)所示。操纵方向舵装置的受力原理图如图 2(b)所示。

在图 2(a)中,动力学方程如下:

$$I_h \ddot{\delta}_h + D_h \dot{\delta}_h + f(\delta_h, \dot{\delta}_h) = T_h - T_{hr} \quad (1)$$

$$I_m \ddot{\delta}_m + D_m \dot{\delta}_m + f(\delta_m, \dot{\delta}_m) = T_m - T_{mr} \quad (2)$$

$$T_{is} = k_{is}(\delta_h - i_{fw}x_r) + D_{is}(\dot{\delta}_h - i_{fw}\dot{x}_r) \quad (3)$$

在图 2(b)中,动力学方程如下:

$$I_f \ddot{\delta}_f + D_f \dot{\delta}_f + k_f \delta_f + f(\delta_f, \dot{\delta}_f) = T_f - T_{fr} \quad (4)$$

齿条传动模型与传统的转向系统模型相似,表示如下:

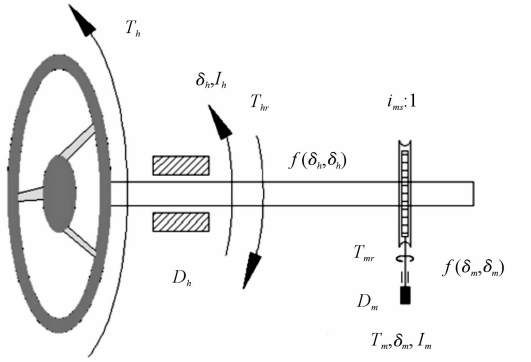
$$m_r \ddot{x}_r + b_r \dot{x}_r + f(x_r, \dot{x}_r) = T_r/r_\rho - F_r + F_d \quad (5)$$

式中: $m_r$ —一架及其质量, $b_r$ —一阻尼系数, $x_r$ —一架的位移, $T_r$ —作用于小齿条的反作用扭矩, $F_r$ —转向阻力, $F_d$ —随机干扰阻力, $i_{fw}$ —电机的减速比。

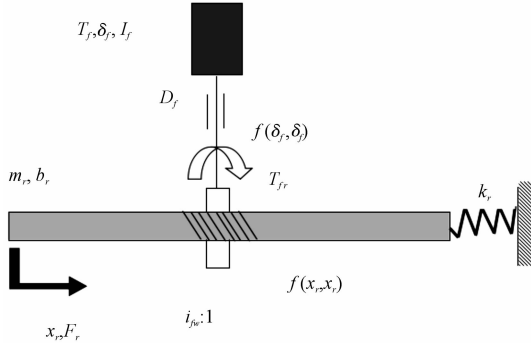
根据线控转向结构和力的条件,可以得出以下结论:

$$T_{mr} = T_{hr}/i_{ms}, T_w = i_{fw} T_f; T_{hr} = T_{is}, T_r = \rho T_{is}。$$

其中: $\rho$ —转向系数, $i_{ms}$ —电机的减速比模拟驾驶的感觉。



(a) 路感配置以及方向盘仿真的力原理图



(b) 操纵方向舵装置的力原理图

图 2 线控转向受力示意图

$I_h, D_h, D_m$ —方向盘的转动惯量,转向柱的阻尼系数和运动模拟驾驶的感觉; $T_h$ —方向盘的转向扭矩; $T_{tr}$ —方向盘的阻力扭矩; $T_{ts}$ —由扭转传感器测量的抵抗扭矩; $T_m, T_{mr}$ —力矩电机输出的转矩和阻力; $\delta_h, \delta_m$ —方向盘的角度和电动机模拟驾驶的感觉; $f(\delta_h, \dot{\delta}_h), f(\delta_m, \dot{\delta}_m)$ —方向盘装置非线性干摩擦阻力和电机的转矩模拟驾驶的感觉; $I_f$ —执行电机的转动惯量; $D_f$ —执行电机的阻尼系数; $\delta_m$ —执行电机的角度; $T_f$ —执行电机的输出转矩; $T_{fr}$ —执行电机的阻力扭矩; $f(\delta_f, \dot{\delta}_f)$ —转向执行电机非线性干摩擦的阻力

基于上述方程,可以得出线控转向的动力学方程:

$$i_{fw}(D_{ts}\ddot{x}_r + k_{ts}x_r) + T_h = I_h \ddot{\delta}_h + (D_h + D_{ts})\dot{\delta}_h + k_{ts}\delta_h + f(\delta_h, \dot{\delta}_h) \quad (6)$$

$$r_\rho m_r \ddot{x}_r + (r_\rho b_r + \rho_0 D_{ts} i_{fw}) \dot{x}_r + \rho_0 k_{ts} i_{fw} x_r + f(x_r, \dot{x}_r) = \rho_0 (D_{ts} \ddot{\delta}_h + k_{ts} \delta_h) - F_r + r_\rho F_d \quad (7)$$

### 1.2 简化模型和分析

转向阻力主要来自路面、轮胎和转向系统内部摩擦。由于轮胎材料、结构、压力、垂直载荷和工作条件的影响,轮胎和路面的作用非常复杂,系统的内部摩擦也相当复杂。因此上述因素导致转向阻力具有明显的非线性特征。本研究作的总体分析可以不必考虑其精度模型转向系统的转向阻力,只要掌握前角和道路阻力扭矩之间的关系。当基于线控转向时,本研究可以

假设前角和道路阻力扭矩之间的关系是线性的,等效线性弹簧,其刚度为  $K_r$ 。

以下是其表达式:

$$F_r = K_r x_r \quad (8)$$

式中: $f(x_r, \dot{x}_r)$ —线控转向的非线性干摩擦力矩,其值总是很小,可以忽略它。

所以,线控转向的动力学方程简化后是:

$$T_h + k_s i_{fw} x_r = I_h \ddot{\delta}_h + D_h \dot{\delta}_h + k_s \delta_h \quad (9)$$

$$r_\rho m_r \ddot{x}_r + r_\rho b_r \dot{x}_r + (\rho_0 k_{ts} i_{fw} + r_\rho K_r) x_r = \rho_0 k_s \delta_h \quad (10)$$

可以通过拉普拉斯变换得到下面的关系式:

$$X_r(s) = \rho k_{ts} \delta_h(s) / P(s) \quad (11)$$

$$X_r(s) = \rho k_s T_h(s) / Q(s) \quad (12)$$

$$\delta_h(s) = P(s) T_h(s) / Q(s) \quad (13)$$

式中: $X_r(s), \delta_h(s), T_h(s)$ — $x_r, \delta_h, T_h$  的拉普拉斯变换。 $P(s), Q(s)$  的表达式如下:

$$Q(s) = u_4 s^4 + u_3 s^3 + u_2 s^2 + u_1 s + u_0 \quad (14)$$

$$P(s) = r_\rho m_r s^2 + r_\rho b_r s + u_5, u_0 = k_s r_\rho b_r \quad (15)$$

$$u_1 = D_h (\rho k_s i_{fw} + r_\rho K_r) + k_s r_\rho K_r \quad (16)$$

$$u_2 = k_s r_\rho m_r + D_h r_\rho b_r + I_h u_5 \quad (17)$$

$$u_3 = r_\rho (b_r I_h + m_r D_h) \quad (18)$$

$$u_4 = r_\rho m_r I_h, u_5 = \rho k_s i_{fw} + r_\rho K_r \quad (19)$$

## 2 鲁棒性控制系统的分析和设计

### 2.1 线控转向控制系统

根据动力学模型的分析,本研究可以得出的系统框图如图 3 所示。

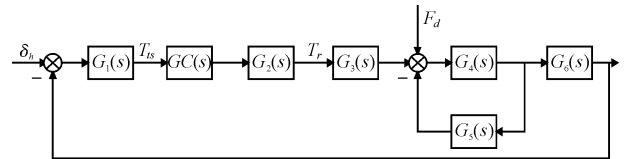


图 3 线控转向系统框图

线控转向系统框图中各部分的传递函数如表 1 所示。

表 1 线控转系传递函数

$G_1(s) = k_{ts}$	$G_2(s) = \rho$	$G_3(s) = 1/r_\rho$
$G_4(s) = 1/(m_r s^2 + b_r s)$	$G_5(s) = K_r$	$G_6(s) = i_{fw}$

线控转向实际上是一个角度控制系统。控制器根据输入和输出之间的差异角度(即扭矩传感器信号),控制功率电动机提供电源。然而,道路和工作条件会影响传感器的输出信号,扭矩传感器中有噪音,所以扭矩信号应该调整到电动机控制器转移前,确保信号可

以反映驾驶员的驾驶意图,电力马达可以准确提供电力。假设控制器调整函数为  $C(s)$ 。首先,本研究应该输入方向盘转角  $\delta_h = 0$ ,并将原系统框图转换为标准的 H $\infty$  反馈结构如图 4 所示。

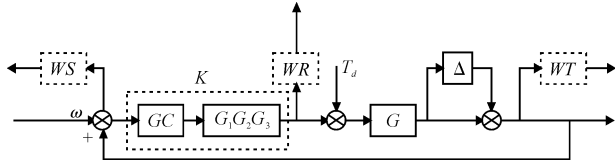


图 4 控制器框图

$T_d$ —随机干扰; $\Delta$ —含有不确定参数和非结构性的不确定性的模型摄动; $WS, WR, WT$ —3 个额外的加权函数,用来抑制干扰,限制控制变量、提高性能; $\omega$ —来满足标准的控制结构的虚拟输入

整个系统的控制器:

$$K(s) = G_2(s) \cdot G_3(s) \cdot GC(s)$$

控制对象:

$$G(s) = G_1(s) G_4(s) G_6(s) / (1 + G_4 G_5(s))$$

据线控转向仿真参数:

$$\rho = 4, k_{is} = 121 \text{ Nm/rad},$$

$$r_p = 0.0088 \text{ m}, i_{fw} = 20, m_r = 5.28 \text{ kg},$$

$$b_r = 326.6 \text{ N/(m/s)}, K_r = 39951.6 \text{ N/m}.$$

可以获得特定的传递函数表达式:

$$G_1(s) = 121,$$

$$G_2(s) = 4,$$

$$G_3(s) = 1/0.0088,$$

$$G_4(s) = 1/(5.28s^2 + 326.6s),$$

$$G_5(s) = 39951.6,$$

$$G_6(s) = 20.$$

所以,最终可以计算控制对象为:

$$G(s) = 2420 / (5.28s^2 + 326.6s + 39951.6)$$

## 2.2 改进的 H $\infty$ 鲁棒控制算法

本研究可以通过优化 H $\infty$  空间性能指标的无限规范,从 H $\infty$  鲁棒控制理论中,获得具有鲁棒性能的控制器的<sup>[9]</sup>。H $\infty$  鲁棒控制理论提供了一些可用来解决系统的鲁棒控制问题方法,例如模型可能在一定范围内存在不确定性和外界干扰信号。不确定性模型包括两个部分:一个是非结构性不确定性的不确定性即高频未建模的动态特性,另一个是模型参数的不确定性。建模一般使用一个可组装的不确定性对象代表对象模型。该种装置可以是结构化或非结构化。非结构化乘法不确定性是上述两种不确定性的统一表达,其表达式如下:

$$G'(s) = G(s)(1 + \Delta) \quad (20)$$

一般来说,乘法扰动  $\Delta$  具有高通特性。更重要的是,本研究不要求显示基于 H $\infty$  的标准框架下的关于  $\Delta$  的表达式,需要了解的是  $\|\Delta\|_{\infty}$  相应的极限值。H $\infty$  混合灵敏度控制策略塑造封闭的传递函数,如通过增益直接成形算法的灵敏度函数和补灵敏度函数,本研究可以在可能出现在开环增益成形时消除高峰值。从而取代加权函数  $\Delta$  的影响,并确保通过  $\|\Delta\|_{\infty}$  加权函数  $WT(s)$ ,为优化问题提供了极大的灵活性。这里笔者选择上限  $\Delta$  作为加权函数,并保证  $WT(s)$  模型受到扰动时的系统鲁棒性,然后就可以摆脱原来的扰动模型的  $\Delta$ ,即  $\Delta = 0$ ,而且反干扰和信号跟踪能力可以通过加权函数得到保证。但在这个过程中关键的是加权函数的选择,其直接决定了控制系统的性能。为获得预期的加权函数,设计师必须通过大量重复迭代的大型微积分计算以及其自身积累实践的经验来做出选择,这也是没有捷径可言<sup>[10]</sup>。

在 H $\infty$  电路混合灵敏度奇异值成形控制的基础上笔者观察和研究 S/T 的曲线,从实际工程意义出发,根据带宽频率,高频渐近线的斜率,最大奇异值,然后回过头来改变控制器 K,构建互补灵敏度函数 T。通过 S 和 T 之间的相关性,本研究间接地确定了灵敏度函数 S 的形状,然后保证了系统的鲁棒性能。

假设带宽频率闭环要求是  $1/T_1$ ,为使 T 的构造比较容易,这里的转角频率近似为带宽频率,高频渐近线的频率是  $20n \text{ dB}$ ,n 是一个整数,其范围从 1~3,当 n 过大时,控制顺序将上升,这种现象对控制器不利,并且控制效果改善不明显。为了保证系统跟踪目标值与非静态的差异,选择最大奇异值等于 1,然后构造补灵敏度函数 T 如下:

$$T = 1 / (T_1 s + 1)^n = GK / (1 + GK) \quad (21)$$

控制器理想的 S/T 的曲线:

$$K = 1 / [(T_1 s + 1)^n - 1] G \quad (22)$$

这个求解过程是很容易的,避免了很多迭代演算上的加权函数,并且其是一个基于工程意义上简化的 H $\infty$  回路成形算法。

## 2.3 线控转向控制系统的设计

为了保证系统跟踪参考信号  $w$  与非静态的差异,本研究选择最大奇异互补灵敏度函数值等于 1。系统的带宽决定了响应速度(即线控转向系统中要求的大质量响应速度),所以,这里带宽的值不小于  $100 \text{ rad/s}$ 。

为了抑制如传感器的噪声等不确定的信号所产生的控制误差的影响,以及保证系统的鲁棒性能,本研究选择高频渐近线的斜率等于  $-60 \text{ dB/dec}$ 。因此,这三阶惯性系统频谱曲线最大奇异值 1 由 T 的单数值曲

线构成。为了计算方便,角频率近似等于带宽频率,得到下式:

$$\frac{1}{((1/100)s + 1)^3} = \frac{G(s)K(s)}{1 + G(s)K(s)} \quad (23)$$

这是线控转向的控制器:

$$K(s) = \frac{5.28s^2 + 326.6s + 39951.6}{0.00242s^3 + 0.726s^2 + 72.6s} \quad (24)$$

然后调节控制器如下:

$$K'(s) = \frac{657039.8671(s + 6000)(s^2 + 61.86s + 7567)}{(s + 0.5)(s + 481.2)(s + 5984)(s + 1.404e004)} \quad (26)$$

然后调节控制器如下:

$$G'(s) = \frac{K'(s)}{G_2(s)G_3(s)} = \frac{1445.4877(s + 6000)(s^2 + 75s + 3616)}{(s + 561.1)(s + 1618)(s + 5980)(s + 0.5)} \quad (27)$$

### 3 控制系统模拟与分析

通过改进的 H $\infty$  算法设计的控制器是一个三阶控制器,而传统的 H $\infty$  控制器通过设计选择加权函数是一个四阶控制器。

通过模拟和分析两种控制器的影响,本研究可以得到前轮角度的单位阶跃响应曲线如图 5 所示。根据该曲线,当没有控制器作用时,单位阶跃响应是 0.138 s 以及超调量是 63.8%,当改进 H $\infty$  控制时,稳定时间是 0.075 s,当传统的 H $\infty$  混合灵敏度控制器作用时,稳定时间为 0.082 s。这表明在保证了鲁棒稳定性的前提下,改进的 H $\infty$  控制器具有更好的响应性能。

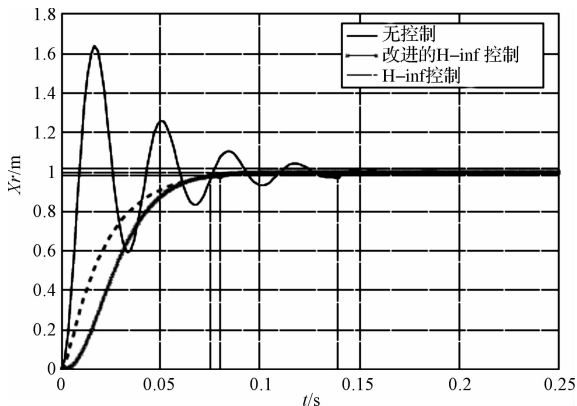


图 5 机架位移阶跃响应曲线

由上述两种方法所设计的控制器的闭环频谱分析,可以得到的频谱图如图 6 所示。根据图 6 中两种不同类型的控制器都可以得到 S/T 曲线的预期曲线

$$GC(s) = \frac{K(s)}{G_2(s)G_3(s)} = \frac{5.28s^2 + 326.6s + 39951.6}{1.1s^3 + 330s^2 + 33000s} \quad (25)$$

与普通 H $\infty$  混合灵敏度控制策略进行比较(选择文献加权函数<sup>[6]</sup>中),本研究选择的 H $\infty$  混合灵敏度的 3 个参数: WS = 15/(s + 0.5), WR = 0.01, WT = 58(s + 30)/(s + 6000),使得设计 H $\infty$  混合灵敏度控制器为对象的过程中 G(s)变得更容易。然后,可以得出结论如下:

的形状,当改进的 H $\infty$  控制工程作用时,系统的灵敏度函数的增益是 0.316%,在低频时,闭环环路的闭合斜率为 -60 dB/dec,当传统的 H $\infty$  控制作用时,系统的灵敏度函数的增益是 1.13%,在低频时,闭环环路的闭合斜率为 -40 dB/dec。所以其表现并不像改进的 H $\infty$  控制器一样完美。

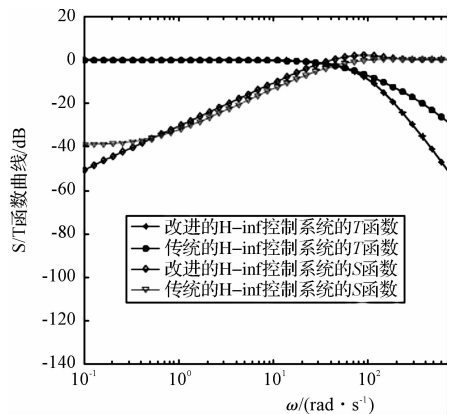


图 6 线控转向的频谱曲线

### 4 结束语

本研究主要论述了线控转向系统的动态建模,以及分析和合理的简化。为了避免大量迭代演算,本研究提出了一种新的方法来设计一种改进的 H $\infty$  控制器,并设计控制器的线控转向系统。通过本研究设计改进的控制器与传统控制器来做比较,由闭环频谱和仿真结果的曲线表明,本研究提出的方法简单而有效,并且改进的控制器具有比传统的控制器更好的鲁棒稳定;由干扰阶跃响应表明,采用改进后的控制器具有较

(下转第 1424 页)

本文引用格式:

朱凌俊,于苏楠,刘晓帆,等. 基于改进 H $\infty$  算法的线控转向系统仿真研究[J]. 机电工程,2014,31(11):1382-1386,1424.

ZHU Ling-jun, YU Su-nan, LIU Xiao-fan, et al. Simulation of steering by wire controller based on Improved H $\infty$  Algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(11):1382-1386,1424.

[2] 马鸿鹄. 配电网的重构与无功优化[D]. 西安:西安理工大学水利水电学院,2012.

[3] 王林川,梁 峰,李 漫,等. 含有分布式电源配电网重构算法的研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5):41-50.

[4] JIANG D, BALDICK R. Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,1996,11(2):890-897.

[5] 王建勋,刘会金,陈 兴. 应用自适应微分进化算法的配电网综合优化[J]. 电网技术,2011,35(8):168-173.

[6] DE OLIVEIRA M E, OCHOA L F, PADILHA-FELTRIN A, et al. Network reconfiguration and loss allocation for distribution systems with distributed generation[C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin-America, 2004 IEEE/PES. IEEE, 2004: 206-211.

[7] 赵晶晶,李 新,彭 怡,等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J]. 电网技术,2009,33(17):162-166.

[8] 李 强. 配电网无功优化与管理系统[D]. 长沙:湖南大学电气与信息工程学院,2009.

[9] 黄立文. 电网电压监控分析系统研究与实现[J]. 机电工程技术,2013(08):152-154,22.

[10] 谢开贵,肖 畅. 计及负荷不确定性的无功优化模型与算法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(4):18-29.

[11] 毕鹏翔,刘 健,张文元. 以提高供电电压质量为目的的配网重构[J]. 电网技术,2002,26(2):41-43.

[12] 纪 震,廖惠连,吴青华. 粒子群算法及应用. [M]. 北京:科学出版社,2009.

[13] 石嘉川. 基于模糊评价的配电网多目标优化研究[D]. 济南:山东大学电气工程学院,2007.

[14] 麻秀范,张粒子. 基于十进制编码的配网重构遗传算法[J]. 电工技术学报,2004,19(10):65-69.

[15] 王守相,王成山. 现代配电系统分析 1 版. [M]. 北京:高等教育出版社,2007.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

李 梁,袁 军,高一凡,等. 计及电动汽车充电站的配电网综合优化研究[J]. 机电工程,2014,31(11):1420-1424.

LI Liang, YUAN Jun, GAO Yi-fan, et al. Comprehensive optimization for distribution network with the electric vehicle charging station[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(11):1420-1424.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1386 页)

好的鲁棒性;由参数摄动的情况下所采取的仿真结果表明,新的控制器仍然可以保持系统的稳定。综上所述,该控制器的设计完全满足控制要求。

参考文献(References):

[1] HAGGAG S, ALSTROM D, EGELJA C S. A Modeling, control, and validation of an electro-hydraulic steer-by-wire system for articulated vehicle applications [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**,2005,10(6):688-692.

[2] STANTON N A, MARSDEN P. From fly-by-wire to drive-by-wire; safety implications of automation in vehicles[J]. **Automotive Engineering**,2001,109(9):102-106.

[3] CHOI S, ALONSO J J, KROO H M. Two-level multi-fidelity design optimization studies for supersonic jets[J]. **Journal of Aircraft**,2009,146(3):776-790.

[4] OH S W, CHAE H C, YUN S C, et al. The Design of a controller for the steer-by-wire system[J]. **JSME international Journal Series C**,2004,47(3):38-44.

[5] AMRLLEIN M, KREIN P T. Dynamic simulation for analy-

sis of hybrid electric vehicle systems and subsystems interactions, including power electronics [J]. **IEEE Transactions on, Vehicular Technology**,2005,154(3):825-836.

[6] CHEN Xiang, YANG Tie-bao, CHEN Xiao-qun. A generic model-based advanced control of electric power-assisted steering systems[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**,2008,16(6):1289-1300.

[7] 杨 琳,赵书强.  $H_{\infty}$  PSS 设计中加权函数的选择及模型降阶[J]. 华北电力大学学报,2003,30(2):15-19.

[8] 杨文兴,杨俊智,周 强. 汽车线控转向系统的现状及关键技术研究[J]. 机械制造,2013,51(9):79-81.

[9] PAOLO F, FRANCESCO B, JAHAN A. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems [J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2007, 15(3):566-580.

[10] SELAMAT H, YUSOF R, GOODALL R. M. Self-tuning control for active steering of a railway vehicle with solid-axle wheel sets[J]. **IET Control Theory and Applications**, 2008,5(2):374-383.

[编辑:洪炜娜]