

合肥工业大学

《控制工程基础》大作业



学院(系): 汽车与交通工程学院

专 业: 车辆工程

学生姓名: 孔令鸣 学号: 2019214782

电动助力转向系统控制方法的研究

学号：2019214782

姓名：孔令鸣

班级：车辆工程 19-5 班

【摘要】文章首先对汽车的转向机构进行控制系统的基本组成作分析，然后进行数学建模，通过合理简化得到了转向机构的传递函数，并对系统进行时域分析、频域分析、稳定性分析、误差分析，利用 MATLAB/Simulink 画图展示，最终得到的转角闭环控制器响应速度快，控制精度高的结论。

【关键词】电动助力转向 二阶振荡系统 控制工程 MATLAB

0 引言

想法源自汽车构造第 23 章转向系第 6 小节电动助力转向系统，如图 1 汽车构造课件所示，通过课上赵林峰老师所播放的 EPS 演示视频可以清楚地看出，在不同车速下，有助力和没有助力的情况下转向时的路感会有所不同，尤其是处于辅助动力系统开始起作用的车速附近时，对手感会有显著的影响，是一个明显的控制系统，后面对其进行具体分析。本文以汽车的转向机构为研究对象，建立基于 MATLAB/Simulink 的数学模型研究其特性。

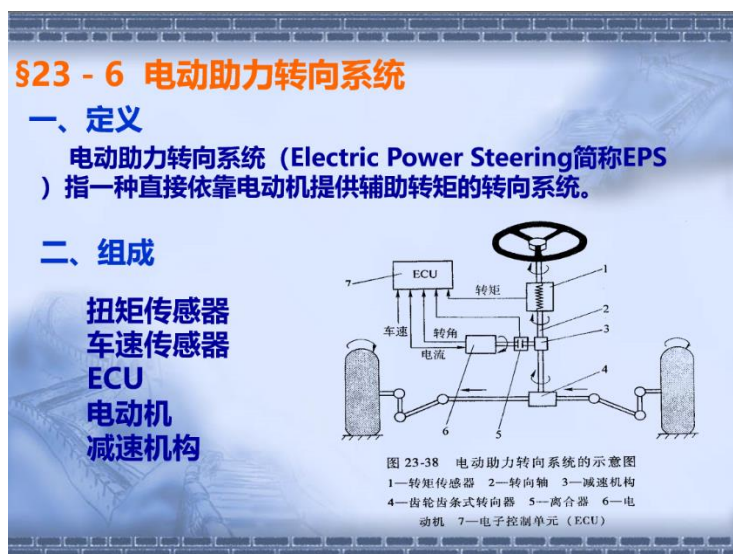


图 1 汽车构造课件

1 介绍

电动助力转向 (Electric power Aided Steering, 简称 EPS) 系统是一种直接依靠电动机提供辅助转矩的动力转向系统, 是为了满足人们对驾驶轻便性的要求而产生的。EPS 系统目的是使驾驶员在驾车过程中安全舒适、省力而又不损失驾驶“路感”、转向机构对方向盘变化反应迅速、准确, 并且要求能抑制路面随机干扰、

各种汽车内部振动及噪声。

电动助力转向系统主要包括机械式转向器、转矩传感器、减速机构、离合器、电动机、电子控制单元（ECU）和车速传感器等。图 2 电动助力转向系统示意图为电动助力转向系统示意图。转矩传感器 1 通过扭杆连接在转向轴 2 中间。当转向轴转动时，转矩传感器开始工作，把两段转向轴在扭杆作用下产生的相对转角转变成电信号传给电子控制单元（ECU）7，ECU 根据车速传感器和转矩传感器的信号决定电动机 6 的旋转方向和助力流的大小，并将指令传送给电动机，通过离合器 5 和减速机构 3 将辅助动力施加到转向系统（转向轴）中，从而完成实时控制的助力转向。它可以方便地实现在不同车速下提供不同的助力效果，保证汽车在低速转向行驶时轻便灵活，高速转向行驶时稳定可靠。

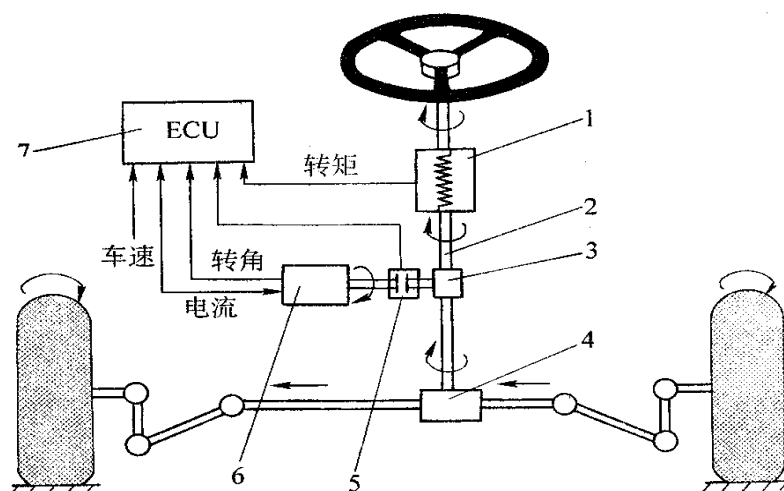


图 23-38 电动助力转向系统的示意图

1—转矩传感器 2—转向轴 3—减速机构
4—齿轮齿条式转向器 5—离合器 6—电动机 7—电子控制单元（ECU）

图 2 电动助力转向系统示意图

汽车的发展对驾驶的操作性、稳定性及舒适性等都提出了很高的要求：在方向盘无转向输入扭矩时，电动助力系统不助力；而当在方向盘有转向输入扭矩时，电动助力系统就必须快速而平稳地随输入扭矩的大小给以转向助力，在任意时刻电机输出到转向系某一构件上的转速必须与转向盘输出至同一构件的转速相等，而转矩必须与转向盘的最佳操纵力相匹配。

2 控制系统的基本组成

典型的反馈控制系统包括给定环节、测量环节、比较环节、放大运算环节、执行环节、被控对象等，如图 3 典型的反馈控制系统环节。

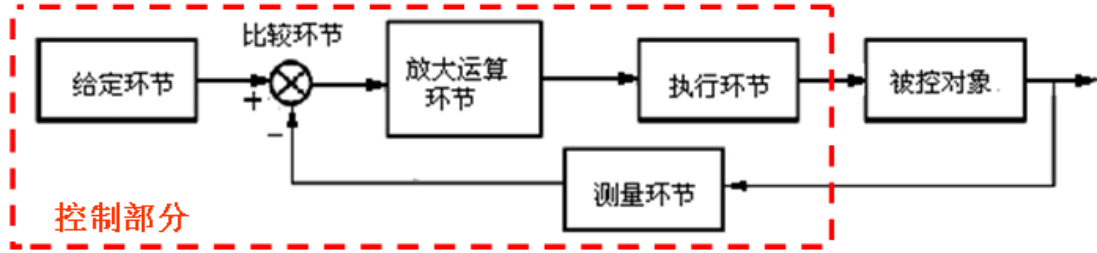


图 3 典型的反馈控制系统环节

由于 EPS 转角系统有反馈回路，系统的输出对系统有控制作用，故该系统为闭环控制系统，如图 4 EPS 转角闭环系统。

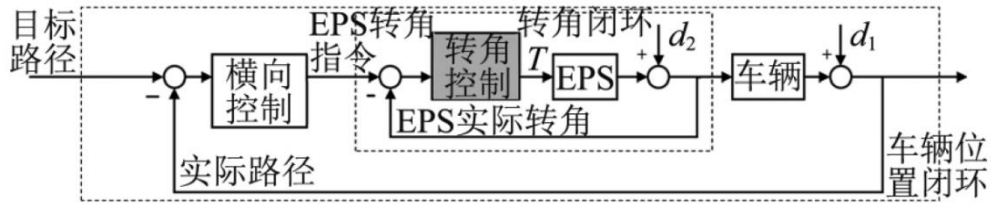


图 4 EPS 转角闭环系统

3 系统数学模型的建立

根据电动助力转向系统的结构，可将电动助力转向系统分为转向盘与转向输入轴、转向输出轴、齿条及电机四大组件。电动机的助力转矩作用在转向输出轴上。

由于机械转向机构由很多具有弹性和阻尼特性的质量元件或惯量元件组成，且其中含有摩擦力等非线性环节，在进行系统建模时，完全考虑所有元件的特性会使系统模型非常复杂，同时也是不必要的。考虑到系统的基本特性是由低频元件决定的，建模时将机械转向系统进行了适当的简化。假设转向机构中各项摩擦力均为 0，电机助力与转向盘上的手力成正比，EPS 采用直线型助力特性。考虑转向轴、电动机轴的转动惯量、弹性和阻尼，考虑齿条的阻尼，并将两侧车轮到齿条端的部件简化成一线性弹簧，两侧弹簧的总刚度为 K_r ，并认为弹簧另一端固定不动，两侧车轮和齿条等效为一当量质量，简化各部分组件之间的杆系、万向节、球头等机械连接，将系统模型进行简化，得到如图 5 电动助力转向系统结构示意图所示的简化模型。

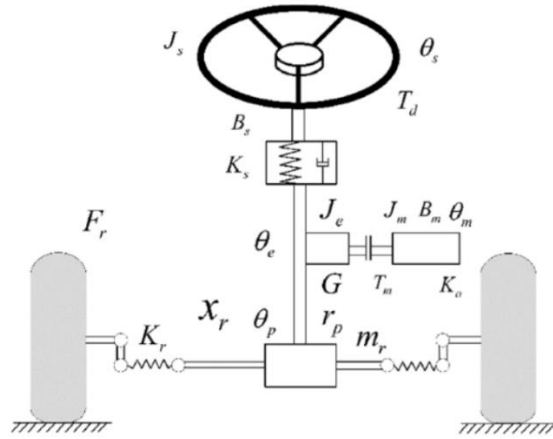


图 5 电动助力转向系统结构示意图

图中各参数如下表 1 转向系统参数表 所示。

符号	参数名称	数值	单位
K_c	传感器扭杆刚度	135	N·m/rad
J_c	转向盘转动惯量	0.086	kg·m ²
b_c	转向轴阻尼系数	0.05	N·m·Sec/rad
J_{cl}	下转向柱转动惯量	0.02	kg·m ²
b_{cl}	下转向柱阻尼系数	0.05	N·m·Sec/rad
K_m	电机转动刚度系数	130	N·m/rad
J_m	电机转动惯量	0.0024	kg·m ²
C_m	电机阻尼系数	0.032	N·m/rad
m_r	齿条质量	1.83	kg
b_r	齿条阻尼系数	7.9	N·s/m
G	减速器减速比	16.5	
r_p	小齿轮半径	0.0068	m

表 1 转向系统参数表

另： θ_c 为转向轴转角， θ_e 为转向小齿轮转角， x_r 为齿条位移， T_d 为转向盘输入转矩， θ_m 为助力电动机转角， T_m 为电机电磁转矩， T_w 为转向小齿轮和齿条的相互作用力， T_{sen} 为扭矩传感器的检测转矩， F_r 为轮胎回正力矩在齿条上的等效作用力。

转向盘及转向输入轴：

$$J_c \ddot{\theta}_c + b_c \dot{\theta}_c + T_{sen} = T_d$$

扭矩传感器是根据转向盘转角与下转向输出轴间的转角差为测量对象,因此可以将其简化为一根扭转弹簧,刚度为 k_c ,不计质量和阻尼。则可得检测转矩:

$$T_{sen} = k_c(\theta_c - \theta_e)$$

转向输出轴:

$$J_{cl}\ddot{\theta}_e + b_{cl}\dot{\theta}_e = T_{sen} + GT_a - T_w$$

齿条:

$$m_r\ddot{x}_r + b_r\dot{x}_r = T_w/r_p - F_r$$

电动机:

$$J_m\ddot{\theta}_m + C_m\dot{\theta}_m + K_m(\theta_m - G\theta_e) = T_m$$

转向小齿轮转角: $\theta_e = x_r/r_p$, 代入齿条公式, 得

$$m_r r_p^2 \ddot{\theta}_e + b_r r_p^2 \dot{\theta}_e = T_w - F_r r_p$$

联立转向输出轴和转向小齿轮转角公式, 可得

$$(m_r r_p^2 + J_{cl})\ddot{\theta}_e + (b_r r_p^2 + b_{cl})\dot{\theta}_e = T_{sen} + GT_a - F_r r_p$$

令 $J_e = m_r r_p^2 + J_{cl}$ 、 $b_e = b_r r_p + b_{cl}$, 则

$$J_e\ddot{\theta}_e + b_e\dot{\theta}_e = T_{sen} + GT_a - F_r r_p$$

电机输出助力转矩:

$$T_a = K_m(\theta_m - G\theta_e)$$

由上述计算分析可知, 输入为轮胎在齿条上的等效作用力 F_r 、电机电磁转矩 T_m 及转向盘输入扭矩 T_d , 输出为转向盘转角 θ_c 、齿条位移 x_r , 及检测转矩 T_{sen} 。

假定 EPS 采用直线型助力特性, 电机助力与转向盘上的手力成正比, K 为助力系数且它的值随车速的增大而减小, 查阅相关文献, K 的数值如下表 2 各车速下助力系数 所示。

车速 V (km/h)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$K(V)$	3.48	2.96	2.70	2.35	2.05	1.71	1.47	1.29	

表 2 各车速下助力系数

当 $v=30\text{km/s}$ 时, $K=2.35$ 。对以上各公式进行拉氏变换, 消去质量体间的相互作用力部分, 可以得到车速 $v=30\text{km/s}$ 时转向盘转角和手施加的力矩之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{\theta_h(s)}{T_h(s)} = \frac{372.7}{21.25 + 7.446s + s^2}$$

即对汽车的转向机构进行数学建模, 然后通过合理简化可得到转向机构能近

似为二阶振荡系统，下对该传递函数进行各项分析。

4 时域分析

车速 $v=30\text{km/s}$ 时转向盘转角和手施加的力矩之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{\theta_h(s)}{T_h(s)} = \frac{372.7}{21.25 + 7.446s + s^2}$$

Simulink 模型建立如下：

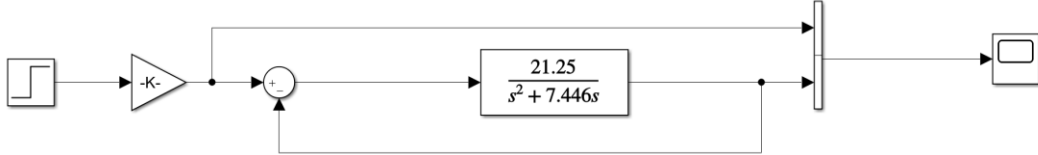


图 6 Simulink 模型

4.1 单位阶跃响应

由下列分析可知，系统响应平稳，振荡现象很小。

$$w_n = \sqrt{21.25} = 4.6098 \text{ rad/s}$$

$$\xi = \frac{7.446}{2w_n} = 0.8076 > 0.707$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} = 1.1556 \text{ s}$$

$$M_p = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \times 100\% = 1.35\%$$

单位阶跃输入时，可认为

$$e_{ss} = 0$$

MATLAB 代码如下：

```
num=[0,0,372.7];
den=[1,7.446,21.25];
step(num,den);
grid on;
xlabel('Time');
ylabel('Amplitude');
title('单位阶跃响应曲线');
```

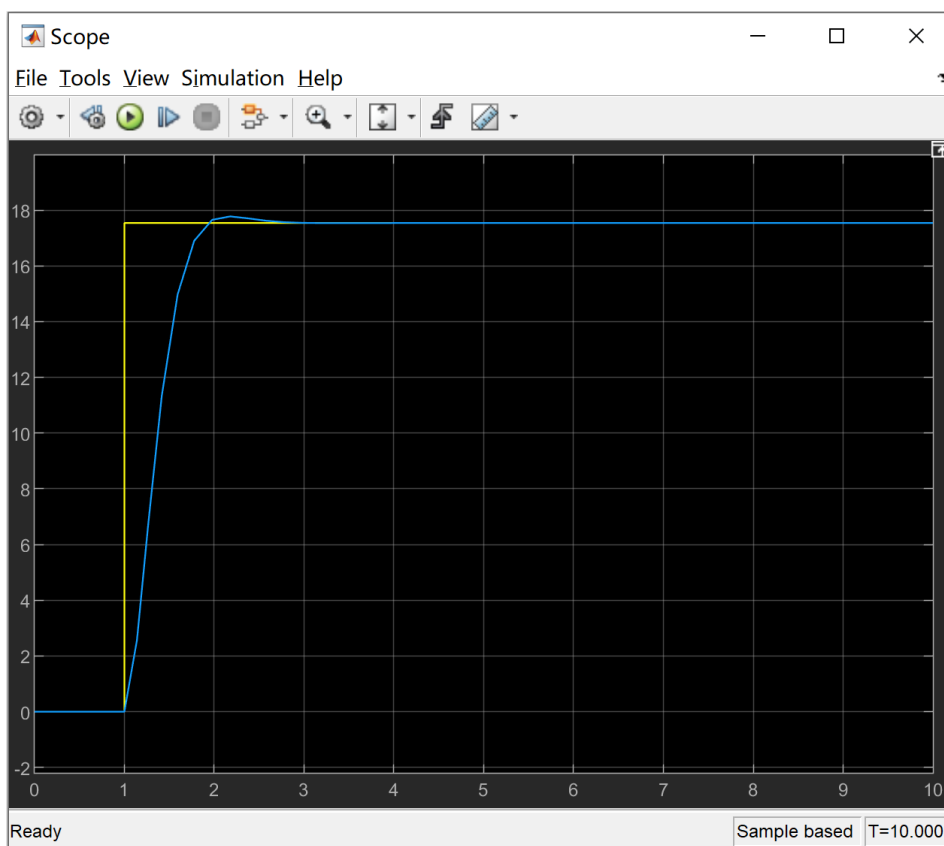
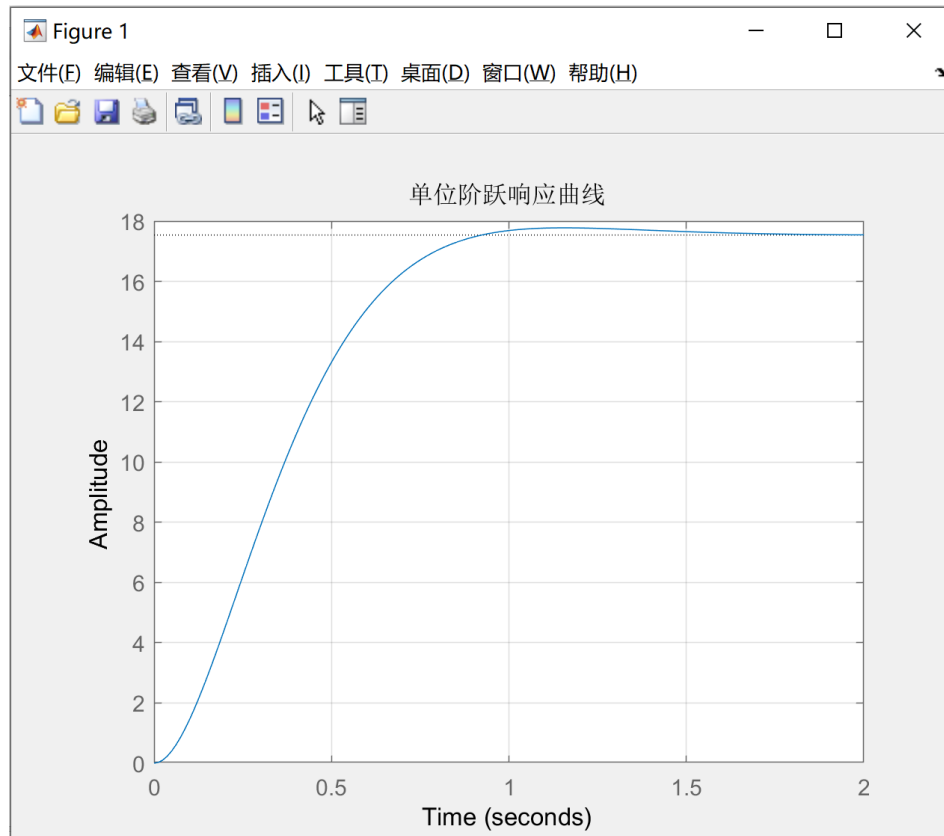


图 7 单位阶跃响应曲线（上为 matlab 输出，下为 simulink 输出，后同）

4.2 单位脉冲响应

在单位恒速输入时，可认为 e_{ss} 为一常数值。

MATLAB 代码如下：

```
num=[0,0,372.7];
den=[1,7.446,21.25];
impulse(num,den);
grid on;
xlabel('Time');
ylabel('Amplitude');
title('单位脉冲响应曲线');
```

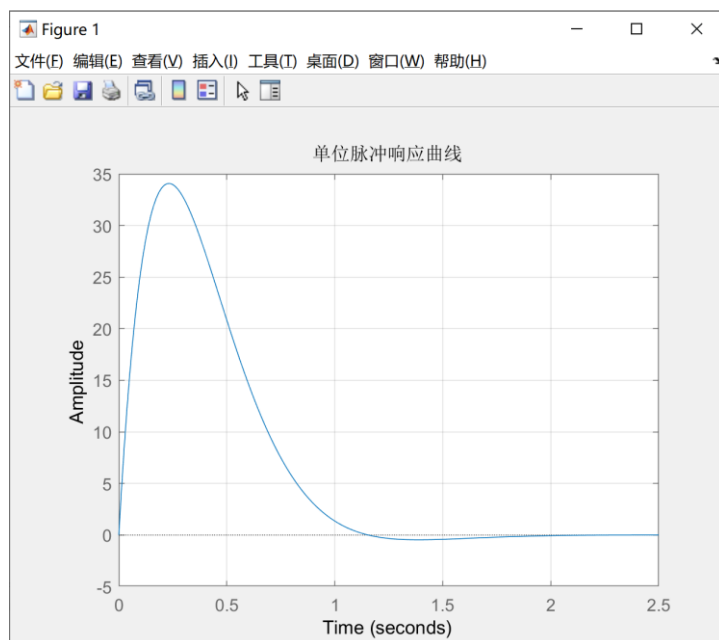


图 8 单位脉冲响应曲线

4.3 单位斜坡响应

MATLAB 代码如下：

```
num=[0,0,0,372.7];
den=[1,7.446,21.25,0];
t=0:0.01:100;
step(num,den);
grid on;
xlabel('Time');
ylabel('Amplitude');
```

title('单位斜坡响应曲线');

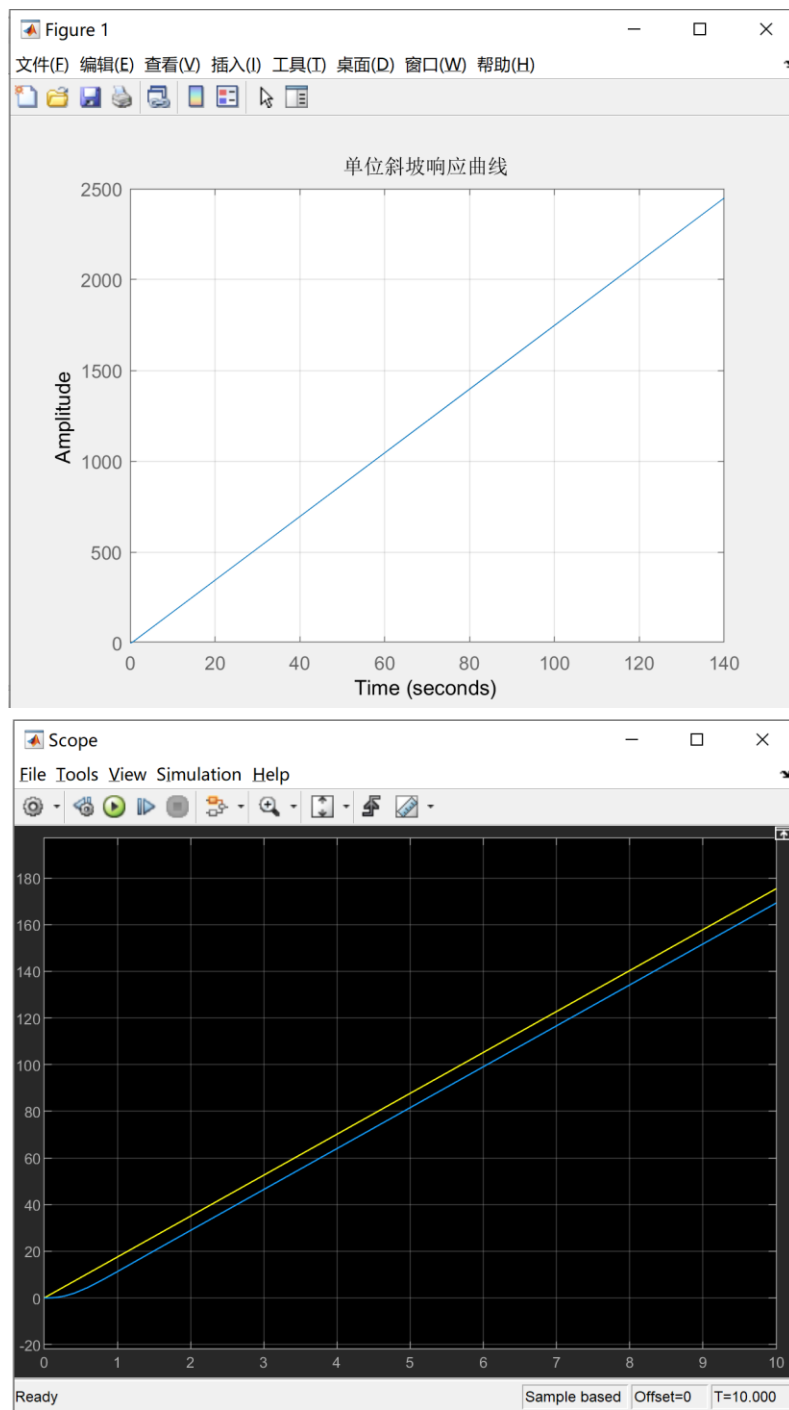


图 9 单位斜坡响应曲线

4.4 其他类型响应

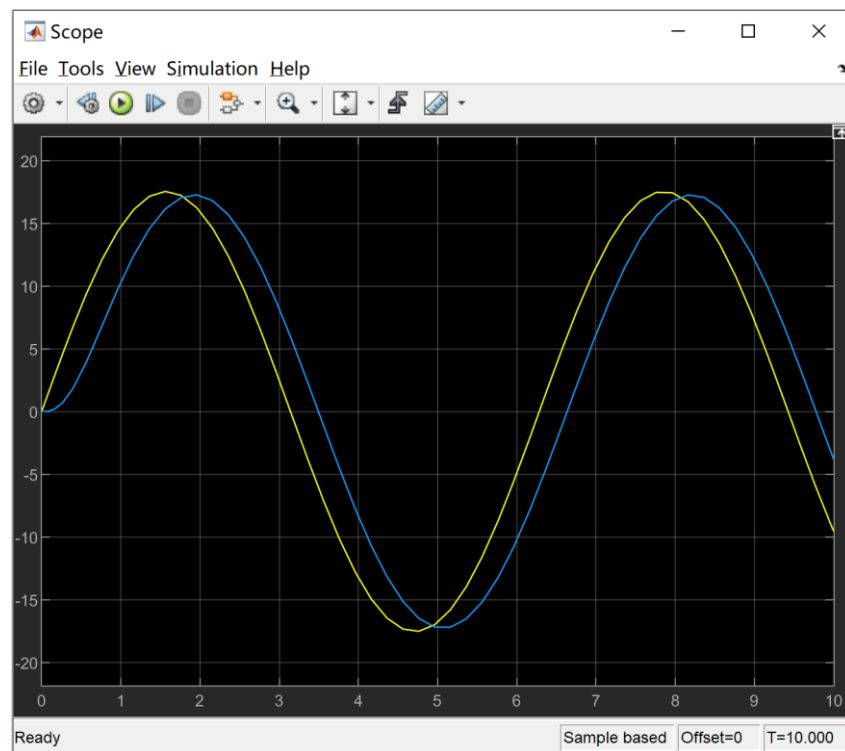


图 10 正弦函数响应曲线

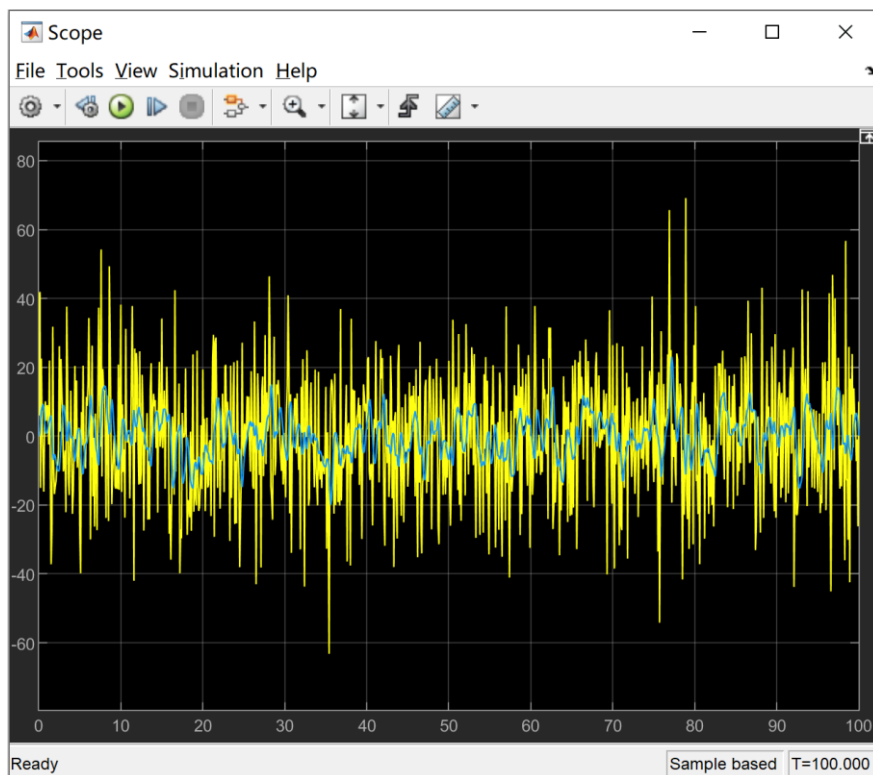


图 11 有限带宽白噪声响应曲线

5 频域分析

5.1 系统 Nyquist 图

MATLAB 代码如下：

```
num=[0,0,372.7];  
den=[1,7.446,21.25];  
nyquist(num,den);  
grid on;  
title('系统 Nyquist 图');
```

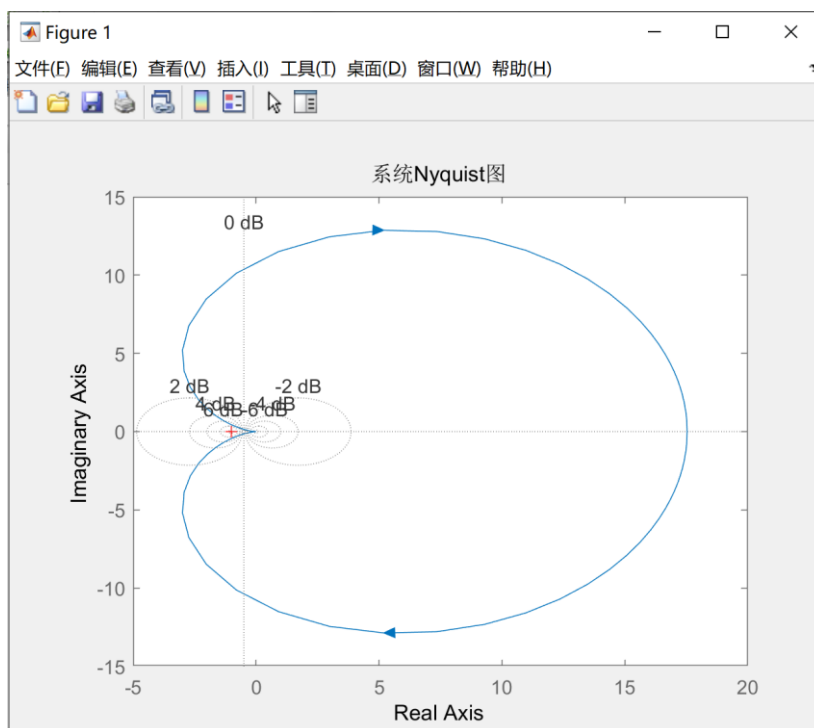


图 12 系统 Nyquist 图

5.2 系统 Bode 图

MATLAB 代码如下：

```
num=[0,0,372.7];  
den=[1,7.446,21.25];  
bode(num,den);  
grid on;  
title('系统 Bode 图');
```

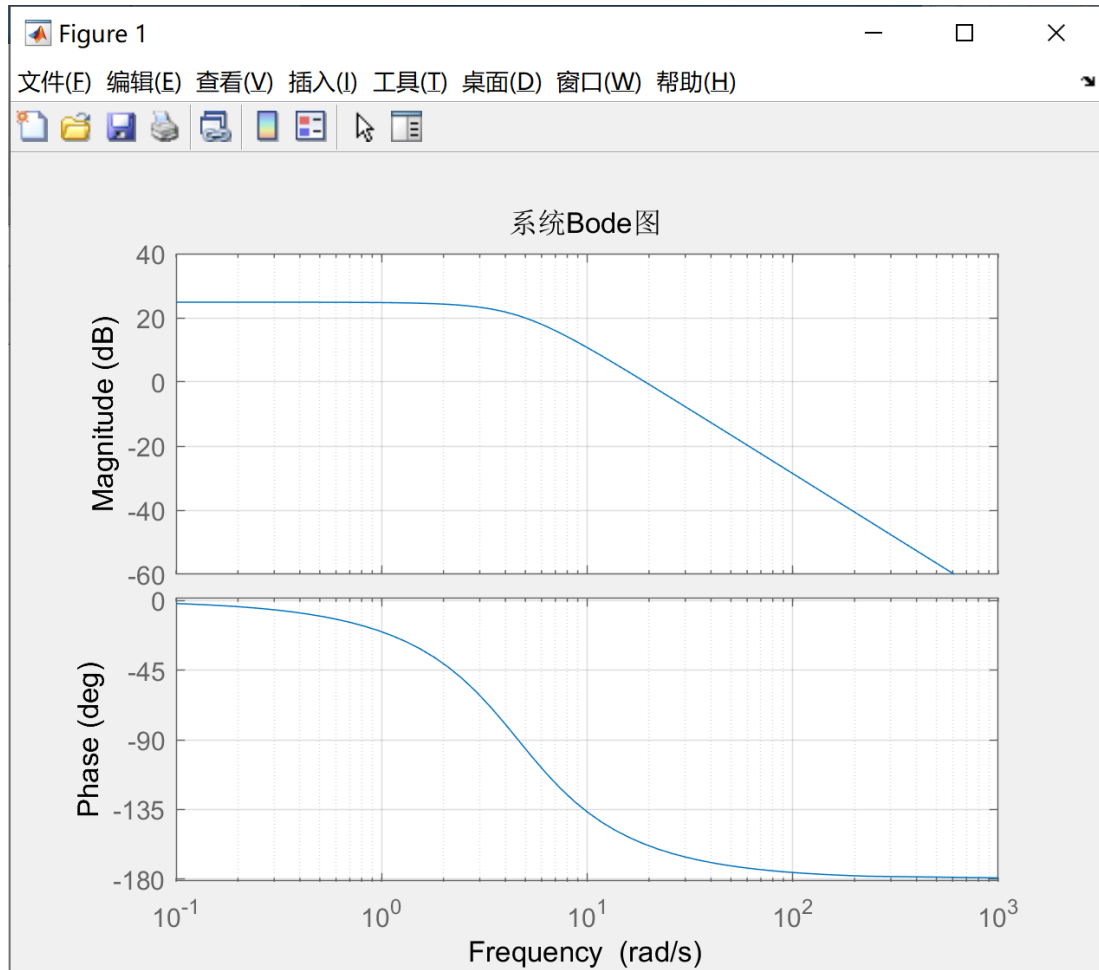


图 13 系统 Bode 图

5.3 系统尼柯尔斯图

MATLAB 代码如下：

```
num=[0,0,372.7];
den=[1,7.446,21.25];
nichols(num,den);
grid on;
title('系统 Nichols 图');
```

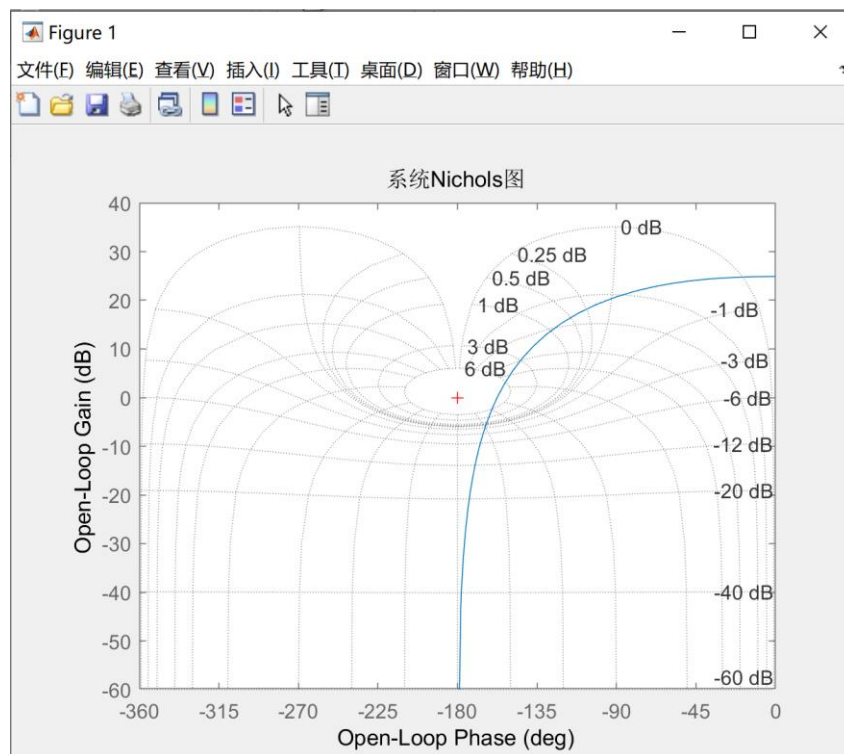


图 14 系统 Nichols 图

5.4 幅值裕度 G_m 与相位裕度 P_m

MATLAB 代码及结果见图 15 幅值裕度与相位裕度。

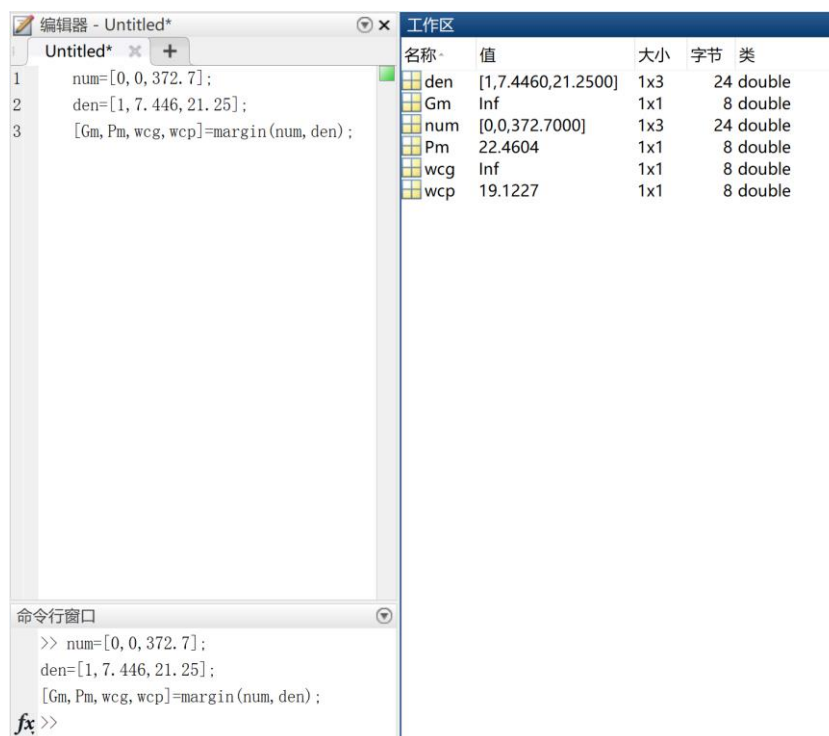


图 15 幅值裕度与相位裕度

6 稳定性分析

由闭环传递函数得系统的特征式为 $s^2 + 7.446s + 21.25 = 0$ 。而低阶系统的劳斯稳定判据：二阶系统 $D(s) = a_0s^2 + a_1s + a_2 = 0$ ，需 $a_0 > 0$ ， $a_1 > 0$ ， $a_2 > 0$ 。

即根据 Routh（劳斯）稳定判据，该系统稳定。

7 稳态误差

如图 16 系统方块图 所示，该系统为二阶振荡系统，且系统稳定。此时将增益 k 看作输入的一部分，在系统方块图中不予考虑。

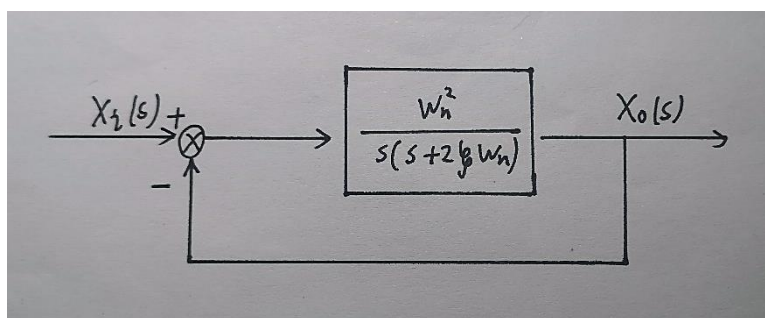


图 16 系统方块图

由于是单位反馈系统，偏差即是误差。另外，该系统为 I 型系统，

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\zeta\omega_n)} = \frac{\frac{\omega_n^2}{2\zeta}}{s\left(\frac{1}{2\zeta\omega_n}s + 1\right)}$$

且由前面计算可知

$$\omega_n = \sqrt{21.25} = 4.6098 \text{ rad/s}$$

$$\xi = \frac{7.446}{2\omega_n} = 0.8076$$

系统开环	系统的输入		
	单位阶跃输入	单位恒速输入	单位恒加速输入
0型系统	$\frac{1}{1+K}$	∞	∞
I 型系统	0	$\frac{1}{K}$	∞
II 型系统	0	0	$\frac{1}{K}$

表 3 不同输入作用下系统的稳态偏差

由表 3 不同输入作用下系统的稳态偏差 可得：

单位阶跃时，

$$e_{ss} = 0$$

在单位恒速输入时,

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v} = \frac{1}{K} = \frac{2\zeta}{\omega_n} = \frac{2 \times 0.8076}{4.6098} = 0.3504$$

在单位恒加速输入时,

$$e_{ss} = \infty$$

即系统不能跟随恒加速输入。

8 总结

本文首先建立了转向机构的数学模型,然后通过合理简化得到转向机构可以近似为二阶振荡系统的结论。通过上述分析,可知电动助力转向系统转角闭环控制器响应速度快,控制精度高,所采用的控制策略能够取得了良好的实际控制效果。

经过对车速 $v=30\text{km/s}$ 时电动助力转向系统 EPS 控制方法的研究,详细分析了转向盘转角和手施加的力矩之间的关系,将已经学完的《控制工程基础》课程知识应用于自身专业实践,扩展了思维,提高了动手能力,对计算机工具 MATLAB/Simulink 的运用更加熟练,加强了课程交叉意识,并对车辆工程本身专业有了进一步了解,之后可以进行更详细、更有创新的模型建立和性能分析。

9 参考文献

- [1]. 董景新.控制工程基础(第4版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2015
- [2]. 陈家瑞.汽车构造(第3版) [M].北京:机械工业出版社, 2009.2
- [3]. 谢刚. 汽车电动助力转向系统的设计与控制技术研究[D].四川大学,2006.
- [4]. 马相飞,张旭,王印,武星.商用车循环球式 EPS 系统建模及仿真分析[J].汽车实用技术,2021,46(13):57-59.DOI:10.16638/j.cnki.1671-7988.2021.013.018.
- [5]. 程昆朋,张效宇,赵祥磊,马骁.智能汽车转向机构转角闭环控制方法[J].上海汽车,2019(11):41-43+52.