



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105759614 B

(45)授权公告日 2018.05.18

(21)申请号 201610170063.0

CN 104699891 A,2015.06.10,

(22)申请日 2016.03.23

CN 104698844 A,2015.06.10,

(65)同一申请的已公布的文献号

CN 104503246 A,2015.04.08,

申请公布号 CN 105759614 A

CN 105093936 A,2015.11.25,

US 7921192 N,1993.03.15,

(43)申请公布日 2016.07.13

审查员 张姗姗

(73)专利权人 江苏大学

地址 212013 江苏省镇江市京口区学府路
301号

专利权人 江苏罡阳转向系统有限公司

(72)发明人 江浩斌 龚晓庆 宋海兵 耿国庆

唐斌 谢军 王春宏 谭国强

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

(56)对比文件

CN 104950674 A,2015.09.30,

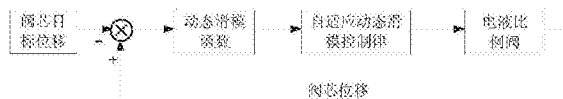
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种电液比例阀阀芯位移自适应动态滑模控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种电液比例阀阀芯位移自适应动态滑模控制方法,建立自适应动态滑模控制器,包括构建动态滑模函数,设计动态滑模控制律,并将其作为电液比例阀阀芯位移控制输入,利用李亚普诺夫稳定性理论设计外界干扰和不确定因素的自适应律,验证控制系统的稳定性。本发明利用自适应动态滑模控制方法,能够克服系统不确定因素和外界干扰等问题,削弱系统抖动,具有很强的鲁棒性,良好的动态、稳态品质,能很好实现对电液比例阀阀芯位移的精确控制,保证跟踪误差快速收敛到零。



1. 一种电液比例阀阀芯位移自适应动态滑模控制方法,其特征在于,包括以下步骤:
步骤1,建立电液比例阀的数学模型,电液比例阀的数学模型为:

$$\begin{cases} U = k_u u_e = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e \frac{dx_v}{dt} \\ k_e = B_g \pi DN \\ F = k_i * i \\ F = m \frac{d^2 x_v}{dt^2} + B \frac{dx_v}{dt} + kx_v + F_f \end{cases}$$

其中U为线圈电压, k_u 为放大器增益,R线圈和放大器总内阻,L为线圈电感, k_e 为线圈速度感应反电动势系数, B_g 为气隙磁感应强度,D为线圈直径,N为线圈绕线匝数, k_i 为比例电磁铁电流—力增益,i为电流,F为电磁铁线圈在衔铁上的力, x_v 为阀芯位移,m为阀芯质量,B为粘性阻尼系数,k为弹簧刚度, F_f 为液动力与摩擦力外界干扰;

步骤2,建立电液比例阀的状态方程,定义状态变量 $E = [x_1, x_2, x_3]^T = [x_v, \dot{x}_v, \ddot{x}_v]^T$,其中 x_1, x_2, x_3 分别代表电液比例阀阀芯位移,速度和加速度,将建立的电液比例阀的数学模型通过拉普拉斯变换,得到电液比例阀的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f(x) + g(x)u + d(t) \\ y = x_1 \end{cases}$$

其中, $f(x) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$, $a_1 = -\frac{kR}{mL}$, $a_2 = -\frac{BR + kL + k_i k_e}{mL}$, $a_3 = -\frac{mR + BL}{mL}$, $g(x) = \frac{k_i k_u}{mL}$, u为控制量, $d(t) = -\frac{RF_f + LF_f}{mL}$ 为外界干扰和不确定性因素,假定d(t)有界, $|d(t)| \leq d$;

步骤3,建立基于李亚普诺夫函数设计电液比例阀阀芯位移的自适应动态滑模控制器:

3.1,定义跟踪误差 $e = x_1 - x_d$, x_d 为阀芯的目标位移;

3.2,根据步骤2建立的状态方程,设计滑模函数为: $s = k_1 e + k_2 \dot{e} + \ddot{e}$;其中, k_1, k_2 为常数且满足 $p^2 + k_2 p + k_1$ 为Hurwitz, p为Laplace算子; \dot{e}, \ddot{e} 分别是跟踪误差的一阶、二阶导数;进一步构建动态滑模函数为: $\sigma = \dot{s} + \beta s$,其中, β 为正常数;

3.3,采用等速趋近律,用d的估计值 \hat{d} 代替d,设计自适应动态滑模控制律:

$$\begin{aligned} \dot{u} = & -\frac{1}{g(x)} [\beta k_1 \dot{e} + (k_1 + \beta k_2) \ddot{e} - (k_2 + \beta) \ddot{x}_d - x_d^{(4)} \\ & + (k_2 + \beta) f(x) + (k_2 + \beta) g(x)u + \dot{f}(x) \\ & + \dot{g}(x)u + (k_2 + \beta) \hat{d} + \varepsilon \operatorname{sgn}(\sigma)] \end{aligned}$$

其中, ε 为大于0的正数;

3.4,定义李亚普诺夫函数: $V = \frac{1}{2} \sigma^2 + \frac{1}{2} \tilde{d}^2$;其中,d估计值误差 $\tilde{d} = \hat{d} - d$;

3.5,设计自适应律为: $\dot{\hat{d}}=(k_2+\beta)\sigma$;系统到达并保持滑模状态 $\sigma=0$,线性滑模函数 s 将在有限时间内到达并保持二阶滑模状态 $\dot{s}=s=0$,之后系统状态 x 将渐近收敛到0,得知系统稳定。

2.根据权利要求1所述的一种电液比例阀阀芯位移自适应动态滑模控制方法,其特征在于,所述 $k_1=100, k_2=18, \beta=2, \epsilon=50$ 。

一种电液比例阀阀芯位移自适应动态滑模控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及到一种用于电控液压助力转向系统领域的电液比例阀阀芯位移自适应动态滑模控制方法。

背景技术

[0002] 随着汽车工业的进步和经济水平的提高,人们对车辆的操稳性、安全性和节能性提出了越来越高的要求。目前,大部分重型车辆普遍使用传统的液压助力转向系统(HPS),其在低速时虽然能够提供良好的助力,满足轻便性的要求,但是其助力特性比较单一,不随车速变化而变化,而车辆的转向阻力矩随着车速的增加而减小,这就导致车辆在中高速行驶时,助力过大,产生方向盘“发飘”的问题,此时驾驶员“路感”较差,影响了车辆的操稳性和安全性。

[0003] 为此,提出了一种电液比例阀式电控液压助力转向系统(ECHPS),它是在传统HPS液压油泵与助力油缸之间的回路中并联一个装有电液比例阀的旁通支路,ECU根据车速信号和转向盘转角/转矩信号,控制电液比例阀阀芯位移以改变旁通流量,车速越低,阀芯位移越小(开度越小),导致旁通流量越少,助力越大;随着车速的增加,阀芯位移也增加,提供的助力随之减小,实现随速可变助力特性,满足低速时转向轻便性和高速时良好的“路感”要求。

[0004] 汽车转向时,电液比例阀式ECHPS系统提供的助力大小是否合适,取决于电液比例阀阀芯位移是否能够实现准确控制,使其精确跟踪到目标阀芯位移。电液比例阀式ECHPS系统是非线性系统,系统参数存在一定的不确定性,且电液比例阀内部存在液动力和摩擦力等外界干扰,这些会影响到电液比例阀阀芯位移出现不稳定现象和误差,是阀芯位移控制的主要问题。

[0005] 滑模控制具有对参数变化及扰动不灵敏,较好的鲁棒性等优点得到广泛的运用,而传统滑模控制选取的是线性滑模面,对于一些复杂的、控制要求较高的非线性系统,线性滑模面具有一定的局限性,且存在抖振。

发明内容

[0006] 针对电液比例阀式ECHPS系统中的电液比例阀,提出了一种自适应动态滑模控制方法,能解决电液比例阀阀芯位移控制过程中参数不确定性、外界干扰等问题,削弱抖振,具有较强的鲁棒性,使得跟踪误差快速收敛到零(即电液比例阀阀芯位移快速跟踪目标值)。实现本发明的技术方案如下:

[0007] 一种电液比例阀阀芯位移自适应动态滑模控制方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤1,建立电液比例阀的数学模型,电液比例阀的数学模型为:

$$[0009] \quad \begin{cases} U = k_u u_e = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e \frac{dx_v}{dt} \\ k_e = B_g \pi DN \\ F = k_i * i \\ F = m \frac{d^2 x_v}{dt^2} + B \frac{dx_v}{dt} + kx_v + F_f \end{cases}$$

[0010] 其中U为线圈电压, k_u 为放大器增益, R线圈和放大器总内阻, L为线圈电感, k_e 为线圈速度感应反电动势系数, B_g 为气隙磁感应强度, D为线圈直径, N为线圈绕线匝数, k_i 为比例电磁铁电流-力增益, i为电流, F为电磁铁线圈在衔铁上的力, x_v 为阀芯位移, m为阀芯质量, B为粘性阻尼系数, k为弹簧刚度, F_f 为液动力与摩擦力等外界干扰;

[0011] 步骤2, 建立电液比例阀的状态方程, 定义状态变量 $E = [x_1, x_2, x_3]^T = [x_v, \dot{x}_v, \ddot{x}_v]^T$, 其中 x_1, x_2, x_3 分别代表电液比例阀阀芯位移, 速度和加速度, 将建立的电液比例阀的数学模型通过拉普拉斯变换, 得到电液比例阀的状态方程:

$$[0012] \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f(x) + g(x)u + d(t) \\ y = x_1 \end{cases}$$

[0013] 其中, $f(x) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$, $a_1 = -\frac{kR}{mL}$, $a_2 = -\frac{BR + kL + k_i k_e}{mL}$, $a_3 = -\frac{mR + BL}{mL}$, $g(x) = \frac{k_i k_u}{mL}$, u为控制量, $d(t) = -\frac{RF_f + LF_f}{mL}$ 为外界干扰和不确定性因素。假定d(t)有界, $|d(t)| \leq d$;

[0014] 步骤3, 建立基于李亚普诺夫函数设计电液比例阀阀芯位移的自适应动态滑模控制器:

[0015] 3.1, 定义跟踪误差 $e = x_1 - x_d$, x_d 为阀芯的目标位移;

[0016] 3.2, 根据步骤2建立的状态方程, 设计滑模函数为: $s = k_1 e + k_2 \dot{e} + \ddot{e}$; 其中, k_1, k_2 为常数且满足 $p^2 + k_2 p + k_1$ 为Hurwitz, p为Laplace算子; \dot{e} , \ddot{e} 分别是跟踪误差的一阶、二阶导数; 进一步构建动态滑模函数为: $\sigma = \dot{s} + \beta s$; 其中, β 为正常数;

[0017] 3.3, 采用等速趋近律, 用d的估计值 \hat{d} 代替d, 设计自适应动态滑模控制律:

$$[0018] \quad \begin{aligned} \dot{u} = & -\frac{1}{g(x)} [\beta k_1 \dot{e} + (k_1 + \beta k_2) \ddot{e} - (k_2 + \beta) \ddot{x}_d - x_d^{(4)} \\ & + (k_2 + \beta) f(x) + (k_2 + \beta) g(x)u + \dot{f}(x) \\ & + \dot{g}(x)u + (k_2 + \beta) \hat{d} + \varepsilon \operatorname{sgn}(\sigma)] \end{aligned}$$

[0019] 其中, ε 为大于0的正数;

[0020] 3.4, 定义李亚普诺夫函数: $V = \frac{1}{2} \sigma^2 + \frac{1}{2} \tilde{d}^2$; 其中, d估计值误差 $\tilde{d} = \hat{d} - d$;

[0021] 3.5, 设计自适应律为: $\dot{\hat{d}} = (k_2 + \beta) \sigma$; 系统到达并保持滑模状态 $\sigma = 0$, 线性滑模函

数 s 将会在有限时间内到达并保持二阶滑模状态 $\dot{s}=s=0$ ，之后系统状态 x 将渐近收敛到0，得知系统稳定。

[0022] 进一步，所述 $k_1=100$ ， $k_2=18$ ， $\beta=2$ ， $\varepsilon=50$ 。

[0023] 本发明的有益效果：

[0024] (1) 本发明利用动态滑模结合自适应控制，对电液比例阀阀芯位移进行控制。在Matlab/Simulink中搭建整个控制系统模型，通过大量的实验验证发现，设置控制器参数如下： $k_1=100$ ， $k_2=18$ ， $\beta=2$ ， $\varepsilon=50$ ，则该控制算法能解决控制系统中参数不确定性、外界干扰等问题（如参数摄动，电液比例阀内部存在摩擦力和液动力等各种干扰），大大削弱了抖振，具有较强的鲁棒性，良好的动态、稳态品质，能使电液比例阀阀芯位移快速精确跟踪目标值，避免电液比例阀出现滞环、死区等现象。

[0025] (2) 本发明在重型车辆转向系统的应用中具有良好的前景，很好的解决了转向“轻”与“灵”的矛盾，提高车辆的操纵性和安全性。

[0026] (3) 本发明利用自适应动态滑模控制方法，能够克服系统不确定因素和外界干扰等问题，削弱系统抖振，具有很强的鲁棒性，良好的动态、稳态品质，能很好实现对电液比例阀阀芯位移的精确控制，保证跟踪误差快速收敛到零。

附图说明

[0027] 图1为电液比例阀式ECHPS系统结构图；

[0028] 图2为电液比例阀结构简图；

[0029] 图3为电液比例阀阀芯位移控制策略图；

[0030] 图4为在Matlab/Simulink中所搭建电液比例阀阀芯位移的自适应动态滑模控制模型；

[0031] 图5为高速转向时自适应动态滑模和PID控制效果对比图；

[0032] 图6为某一车速工况下，外界干扰发生变化时，自适应动态滑模和PID控制效果对比图。

具体实施方式

[0033] 下面结合附图对本发明作进一步的详细说明。

[0034] 一种电液比例阀阀芯位移自适应动态滑模控制方法，具体步骤如下：

[0035] 步骤一：建立电液比例阀的数学模型

[0036] 如图1所示，在传统HPS液压油泵与助力油缸之间的回路中并联一个装有电液比例阀的旁通支路，当汽车转向时，ECU根据车速信号和转向盘转角/转矩信号驱动电源使线圈通电，产生电磁力，阀芯在电磁力作用下向右运动，此时阀芯的槽口与阀体上的出油孔形成通路，使得进入阀芯内部的油液从节流阀口流出，然后流回储油罐，即旁通流量，以此实现可变助力特性。所设计的电液比例阀，阀芯的最大位移为2mm。车速越高，电磁线圈中电流越大，阀芯所受电磁力越大，阀芯的位移也越大，从而旁通流量越大，即系统助力越小。在原地转向时，阀芯的位移最小，提供的助力最大。

[0037] 如图2所示，发明专利201410583893.7中介绍了电液比例阀的基本结构，通过分析电液比例阀中线圈电流动态特性和输出力动态特性以及阀芯受力，建立电液比例阀的数学

模型为:

$$[0038] \quad \begin{cases} U = k_u u_c = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e \frac{dx_v}{dt} \\ k_e = B_g \pi DN \\ F = k_i * i \\ F = m \frac{d^2 x_v}{dt^2} + B \frac{dx_v}{dt} + kx_v + F_f \end{cases}$$

[0039] 其中U为线圈电压, k_u 为放大器增益, R线圈和放大器总内阻, L为线圈电感, k_e 为线圈速度感应反电动势系数, B_g 为气隙磁感应强度, D为线圈直径, N为线圈绕线匝数, k_i 为比例电磁铁电流-力增益, i为电流, F为电磁铁线圈在衔铁上的力, x_v 为阀芯位移, m为阀芯质量, B为粘性阻尼系数, k为弹簧刚度, F_f 为液动力与摩擦力等外界干扰。

[0040] 步骤二: 建立电液比例阀的状态方程, 定义状态变量 $E = [x_1, x_2, x_3]^T = [x_v, \dot{x}_v, \ddot{x}_v]^T$, 其中 x_1, x_2, x_3 分别代表电液比例阀阀芯位移, 速度和加速度, 将建立的电液比例阀的数学模型通过拉普拉斯变换, 得到电液比例阀的状态方程:

$$[0041] \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f(x) + g(x)u + d(t) \\ y = x_1 \end{cases}$$

[0042] 其中, $f(x) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$, $a_1 = -\frac{kR}{mL}$, $a_2 = -\frac{BR + kL + k_i k_e}{mL}$, $a_3 = -\frac{mR + BL}{mL}$,

[0043] $g(x) = \frac{k_i k_u}{mL}$, u为控制量, $d(t) = -\frac{RF_f + LF_f}{mL}$ 为外界干扰和不确定性因素。假定d

(t) 有界, $|d(t)| \leq d$ 。

[0044] 步骤三. 基于李亚普诺夫函数设计电液比例阀阀芯位移的自适应动态滑模控制器:

[0045] 为了实现装有电液比例阀式ECHPS系统车辆操稳性和安全性, 提出“原地转向时提供最大的助力, 随着车速的升高, 提供的助力逐渐减小”的控制要求。且在重型车辆实际行驶过程中, 该系统存在各种不确定因素(参数变化)和外界干扰(液动力和摩擦力), 为此, 提出了利用自适应动态滑模控制方法对电液比例阀阀芯位移进行控制, 控制策略如图3所示, 控制器设计过程如下:

[0046] 1、定义跟踪误差 $e = x_1 - x_d$, x_d 为阀芯的目标位移。

[0047] 2、根据步骤2建立的状态方程, 设计滑模函数为: $s = k_1 e + k_2 \dot{e} + \ddot{e}$; 其中, k_1, k_2 为常数且满足 $p^2 + k_2 p + k_1$ 为Hurwitz, p为Laplace算子, \dot{e} , \ddot{e} 分别是跟踪误差的一阶、二阶导数。

[0048] 对s求导, 得:

$$[0049] \quad \begin{aligned} \dot{s} &= k_1 \dot{e} + k_2 \ddot{e} + \ddot{\ddot{e}} \\ &= k_1 \dot{e} + k_2 \ddot{e} - \ddot{x}_d + f(x) + g(x)u + d(t) \end{aligned}$$

[0050] 构建动态滑模函数为: $\sigma = \dot{s} + \beta s$; 其中, β 为正常数。当 $\sigma = 0$ 时, $\dot{s} + \beta s = 0$ 是渐近稳定的一阶动态系统, s趋于0。

[0051] 3、采用等速趋近律 $\dot{\sigma} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(\sigma)$ ，用d的估计值 \hat{d} 代替d，设计自适应动态滑模控制律：

$$\begin{aligned} \dot{u} = & -\frac{1}{g(x)} [\beta k_1 \dot{e} + (k_1 + \beta k_2) \ddot{e} - (k_2 + \beta) \ddot{x}_d - \dot{x}_d^{(4)} \\ & + (k_2 + \beta) f(x) + (k_2 + \beta) g(x) u + \dot{f}(x) \\ & + \dot{g}(x) u + (k_2 + \beta) \hat{d} + \varepsilon \operatorname{sgn}(\sigma)] \end{aligned}$$

[0053] 其中， ε 为大于0的正数。

[0054] 4、定义李亚普诺夫函数： $V = \frac{1}{2} \sigma^2 + \frac{1}{2} \tilde{d}^2$ 其中，d估计值误差 $\tilde{d} = \hat{d} - d$ 。

[0055] 5、设计自适应律为： $\dot{\hat{d}} = (k_2 + \beta) \sigma$ ，将上面得到的控制律 \dot{u} 代入 $\dot{\sigma} = \dot{s} + \beta \dot{s}$ ，得：

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} = & -(k_2 + \beta) \tilde{d} - \varepsilon \operatorname{sgn}(\sigma) \\ \dot{V} = & \sigma \dot{\sigma} + \tilde{d} \dot{\tilde{d}} \\ = & \sigma [-(k_2 + \beta) \tilde{d} - \varepsilon \operatorname{sgn}(\sigma)] + \tilde{d} [\dot{\hat{d}} - \dot{d}] \\ = & \sigma [-(k_2 + \beta) \tilde{d} - \varepsilon \operatorname{sgn}(\sigma)] + \tilde{d} [(k_2 + \beta) \sigma] \\ = & -\varepsilon |\sigma| \leq 0 \end{aligned}$$

[0058] 根据李雅普诺夫稳定性定理，系统到达并保持滑模状态 $\sigma = 0$ ，线性滑模函数s将会在有限时间内到达并保持二阶滑模状态 $\dot{s} = s = 0$ ，之后系统状态x将渐近收敛到0，所以系统稳定。

[0059] 如图4所示，为在Matlab/Simulink中所搭建电液比例阀阀芯位移的自适应动态滑模控制模型，虚线左半部分是自适应动态滑模控制器模型，右半部分是电液比例阀数学模型。阀芯位移的实际量与期望位移作差得到位移的跟踪误差，作为控制器的输入，通过控制器运算，得到等效控制量u，控制阀芯位移，以此形成一个闭环控制。

[0060] 如图5所示，将参数设定为： $k_1 = 100, k_2 = 18, \beta = 2, \varepsilon = 50$ ；高速转向时，转向系统需提供最小的助力，即阀芯位移最大，此时阀芯目标位移为0.002m。在高速转向时，将自适应动态滑模与PID对阀芯位移控制效果进行对比，发现自适应动态滑模控制收敛速度比PID控制快，鲁棒性更好。其他不同车速工况下阀芯位移控制效果，都如高速转向工况下相似，在这里就不一一列出。

[0061] 在某一工况下，0.33s的时候，参数摄动或者外界干扰发生突变（假定这个工况下阀芯目标位移为0.0013m），在此情况下，如图6所示，自适应动态滑模控制能很好的解决系统的不确定性和外界干扰，大大削弱了抖振，控制系统具有良好鲁棒性。

[0062] 总之，本发明的一种用于电控液压助力转向系统(ECHPS)中的电液比例阀阀芯位移自适应动态滑模控制方法。建立自适应动态滑模控制器，包括构建动态滑模函数，设计动态滑模控制律，并将其作为电液比例阀阀芯位移控制输入，利用李亚普诺夫稳定性理论设计外界干扰和不确定因素的自适应律，验证控制系统的稳定性。本发明利用自适应动态滑模控制方法，能够克服系统不确定因素和外界干扰等问题，削弱系统抖振，具有很强的鲁棒性，良好的动态、稳态品质，能很好实现对电液比例阀阀芯位移的精确控制，保证跟踪误差

快速收敛到零。

[0063] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示意性实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不一定指的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何的一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

[0064] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,本领域的普通技术人员可以理解:在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由权利要求及其等同物限定。

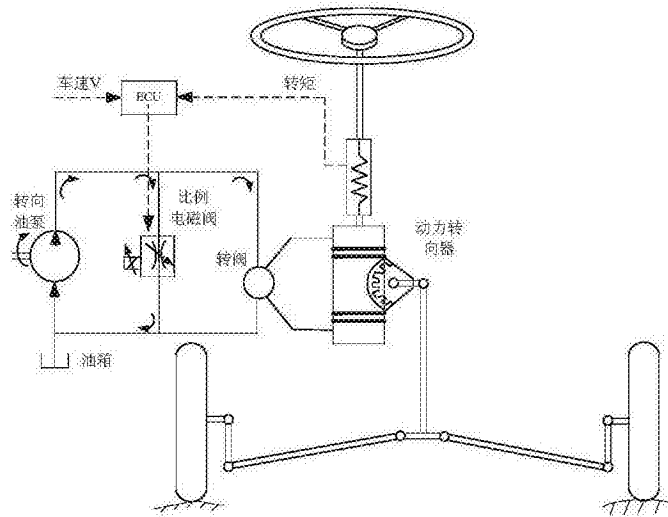


图1

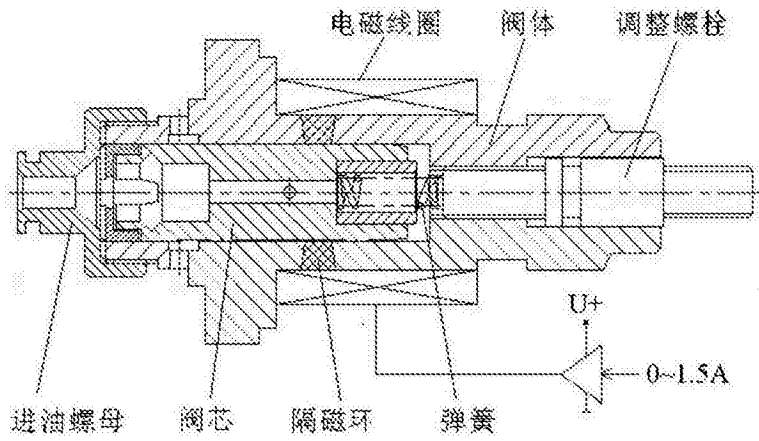


图2

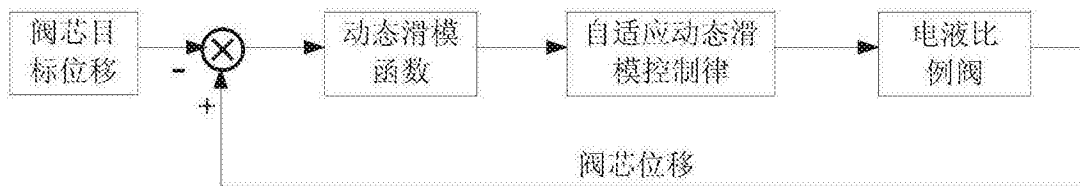


图3

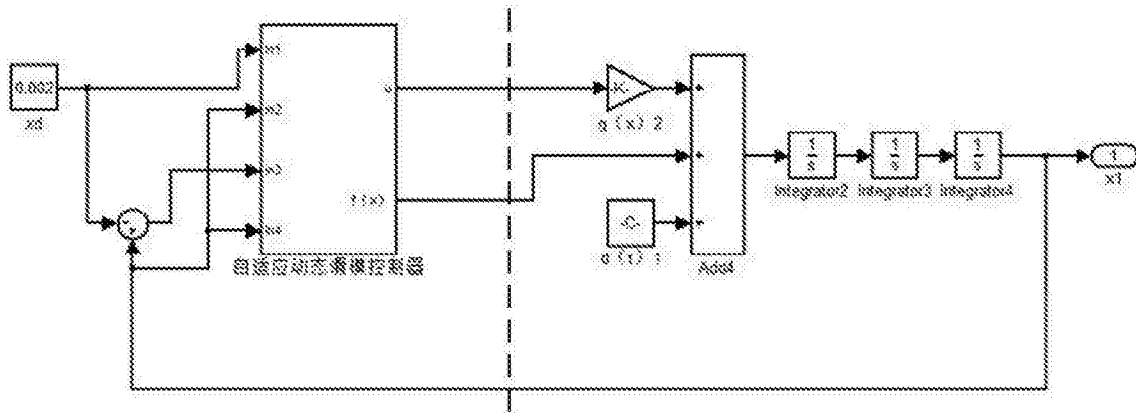


图4

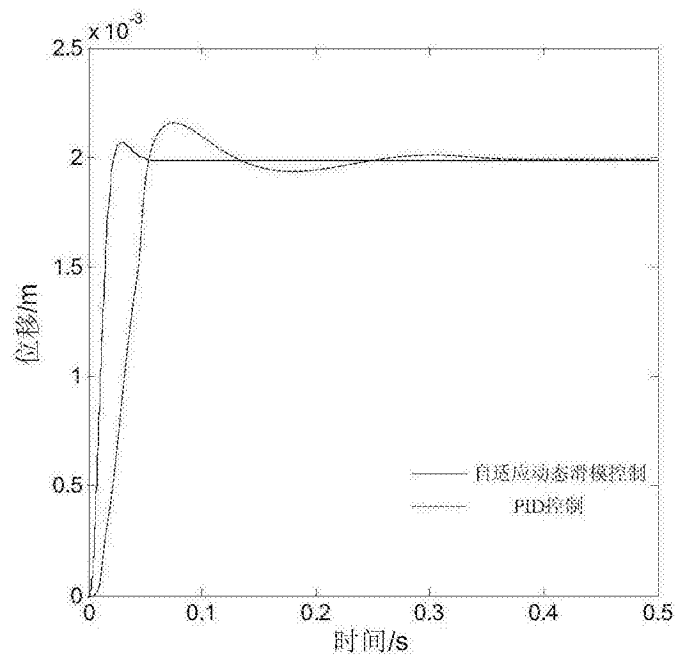


图5

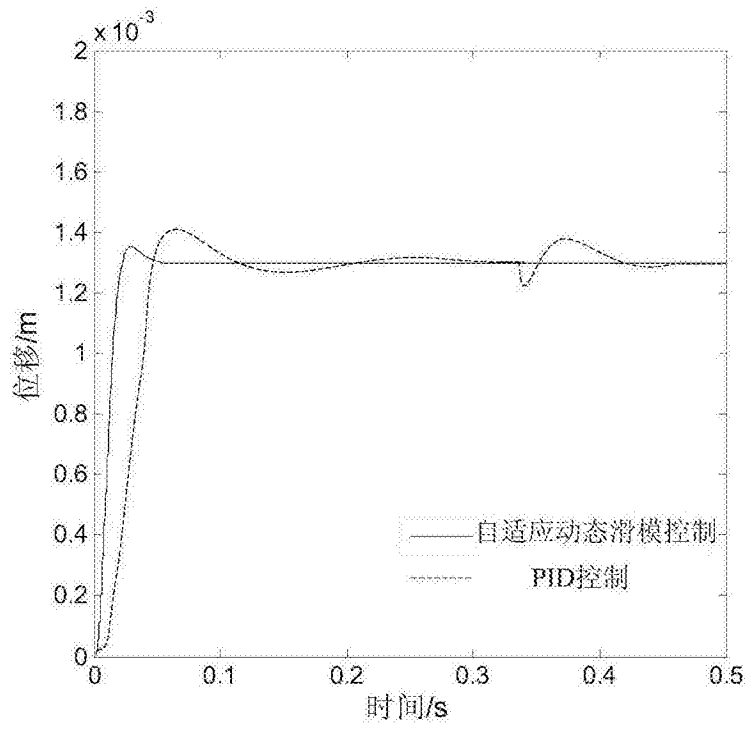


图6