

非线性控制在磁悬浮系统中的应用*

肖劲伟 尹力明

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

摘要 用滑模变结构控制原理设计磁悬浮系统非线性控制器,并在磁悬浮球装置上进行了试验,结果证实这种控制器具有完全的鲁棒性、良好的参数适应性,设计方法也有广泛的适用性。悬浮系统的刚度有显著的提高。

关键词 磁悬浮;非线性控制器,滑动模态,变结构;鲁棒性

分类号 U292.91

Non-linear Systems Theory Applied to Magnetic Suspension Systems

Xiao Jinwei Yin Liming

(Department of Automatic Control, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract An experiment has been made on the device of magnetic suspending ball to test the effect of the controller designed according to the theory of variable structure control system. The result proves that this kind of controller has the better robusticity of robust and increases the rigidity of the suspension system. And it is easier to design the controller using the theory of variable structure control systems. Further more this theory can be applied to on all kinds of systems.

Key words magnetic suspension system, Non-linear controller, variable structure system, sliding mode, robust

磁悬浮系统作为非线性多变量的不稳定系统,其大多数控制系统对参数变化不能很好地适应,由此带来了系统不稳定、刚度较小等一系列的问题。为了研究变结构控制对磁悬浮系统的作用,掌握变结构控制原理在磁悬浮系统的应用技术,在磁悬浮球系统上进行试验研究。试验研究的主要内容包括系统参数的测定、控制器的设计以及系统的调试。该系统已在二自由度磁悬浮轴承上进行了初步应用。

1 悬浮模型

以磁悬浮球系统为对象来研究悬浮控制器的设计,假设在 (δ_0, i_0) 附近的小范围线性化模型为^[1]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{y0} y - F_{i0} i + F_z; L \frac{di}{dt} + R i = L_{y0} \frac{dy}{dt} + u \quad (1)$$

这里, m 是钢球质量, F_z 为干扰力, L 为电磁铁电感, u 为电磁铁线圈电压, i 为电磁铁电流, F_{y0} 为电磁力在平衡位置对位移的偏导数, F_{i0} 为电磁力在平衡位置对电流的偏导数, L_{y0} 为 L 在平衡位置对位移的偏导数, R 为线圈电阻。

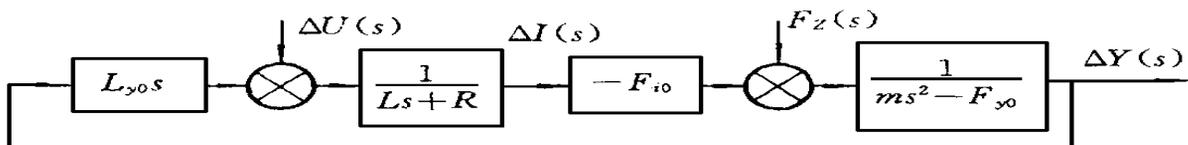


图1 悬浮系统结构框图

Fig. 1 Structure of suspending system

未校正系统截止频率 $\omega = 362.5\text{Hz}$, 相位裕度 $\gamma = -61^\circ$; 系统不稳定, 必须引入校正装置。

* 1999年5月15日收稿
第一作者: 肖劲伟, 男, 1975年生, 硕士生

2 滑模变结构控制器设计方法

滑模变结构控制是变结构控制系统的一种控制策略^[2,3,4]。这种控制策略与常规控制的根本区别在于控制的不连续性,即一种使系统结构随时间变化的开关特性。这种控制特性可以迫使系统在一定条件下沿规定的状态轨迹作小幅度高频率的上下运动,即滑动模态或滑模运动。滑模变结构控制方法可以用于各种线性或非线形系统。

对于磁悬浮球系统,其闭环传递函数为三阶系统,令: $x_1 = y$, $x_2 = \frac{d}{dt}y$, $x_3 = \frac{d^2}{dt^2}y$,于是得到状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} u \quad (2)$$

取线性切换函数 $s = c_1x_1 + c_2x_2 + x_3$,为满足滑模的可达性和存在性条件,有 $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{ds}{dt} = 0$,即有 $\frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial X} \frac{dX}{dt} = C(A X + B u)$,取常值切换控制 $u = \begin{cases} k_1, s > 0 \\ k_2, s < 0 \end{cases}$,必须有:

$$\frac{ds}{dt} = \begin{cases} -a_3x_1 + (c_1 - a_2)x_2 + (c_2 - a_1)x_3 + bk_1 < 0, s > 0 \\ -a_3x_1 + (c_1 - a_2)x_2 + (c_2 - a_1)x_3 + bk_2 > 0, s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

故使滑模条件成立的状态变量 x_1, x_2, x_3 处在一定的范围内,所以只有在下列两个平面之间的区域才存在滑模:

$$\begin{aligned} L_1: & -a_3x_1 + (c_1 - a_2)x_2 + (c_2 - a_1)x_3 + bk_1 = 0 \\ L_2: & -a_3x_1 + (c_1 - a_2)x_2 + (c_2 - a_1)x_3 + bk_2 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

为使切换面 $s = 0$ 全部是滑模区,平面 L_1 及 L_2 必须平行于切换面 $s = 0$,由平行条件 C 应满足:

$$\frac{-a_3}{c_1} = \frac{c_1 - a_2}{c_2} = \frac{c_2 - a_1}{1} \quad (5)$$

在切换面上有 $s = 0$,且 $\frac{ds}{dt} = 0$,则 $\frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial X} \frac{dX}{dt} = C(A X + B u) = 0$,可以得到等效控制

$$u^* = -[CB]^{-1}CA X = -\frac{1}{b}[-a_3x_1 + (c_1 - a_2)x_2 + (c_2 - a_1)x_3] \quad (6)$$

滑模运动方程:

$$\frac{dx_1}{dt} + c_2 \frac{dx_1}{dt} + c_1x_1 = 0 \quad (7)$$

为保证滑模运动的稳定,此方程的根必须要在左半平面,同时为了使系统具有最大的滑模区,参数 c_1, c_2 的选取也必须满足方程(7)。从系统的滑模运动方程可以看出,滑模运动是与系统的参数无关的,因此系统具有较大的参数自适应性。

3 具体控制器实现

具体实验中状态变量 x_1 由位移传感器得到,而 x_2 和 x_3 需要由 x_1 微分得到,因此可以考虑引入二阶超前网络,实现速度和加速度的测量,超前环节中取 $T_1 \gg T_2, T_3 \gg T_4$,在中频段,二阶超前环节可近似表示为 $K(T_1T_3s^2 + (T_1 + T_3)s + 1)$ 。设平衡位置有偏置电压 $U_0 = 6V, k_1 = 13V, k_2 = -13V$,采用单管功放,开关管为绝缘栅双级晶体管,使用 IGBT 专用驱动芯片 EXB841,变结构控制工作频率为 30kHz 。

由实验结果得到系统刚度为: $400\text{g}/0.3\text{mm} = 1333\text{kg}/\text{m}$,实现稳定悬浮,使用同一装置,用超前校正网络做控制器刚度仅为 $571.4\text{kg}/\text{m}$ 。

4 试验结果的讨论

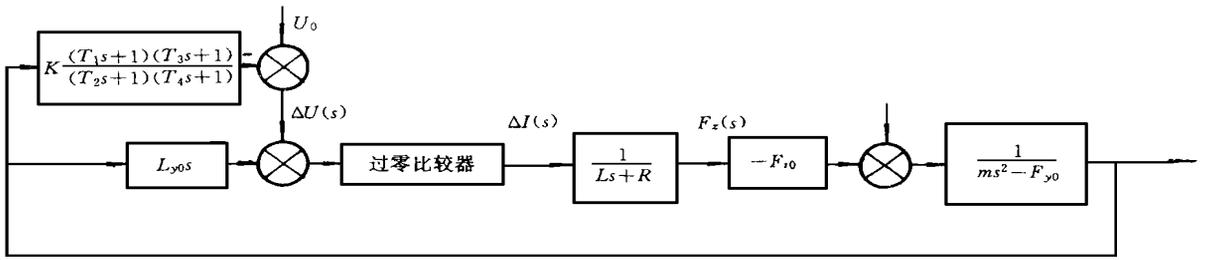


图2 校正系统结构框图

Fig.2 Structure of adjusted suspending system

4.1 变结构控制的特性优于其他的控制

变结构控制方法特点是控制信号的非连续性。在该控制作用下,系统状态在开关曲面附近来回穿梭而且使系统结构在不断变化,按到达条件趋近原点,具有滑动模态。根据系统模态方程,在滑动模态下运动方程与系统的摄动与外界干扰无关。这种不变性与鲁棒性不同,是完全意义上的无关性,故这种系统具有更加良好的自适应性,能够适应系统参数的较大的变化。

4.2 系统刚度有很大的改善

根据系统刚度定义:

$$K_r = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{F_z(s)}{Y(s)} = \frac{F_{i0}K}{R + K_i} - F_{y0} \quad (8)$$

由系统变结构特性, $u = \begin{cases} k_1, & s > 0 \\ k_2, & s < 0 \end{cases}$, 在系统切换函数 s 在 0 的附近有微小变化, 则控制信号就能达到最大或最小, 可以认为开环增益 k 为变化的, 且 K_r , 故 K_r ; 而经典控制器开环增益 k 为一定值, 其刚度必然要小于前者。

4.3 控制信号的频率特性不同

变结构控制曲线不同, 控制信号为方波, 在悬浮体的质量发生改变时, 幅值不发生改变, 而信号的频率随着质量的增加而变大。

由公式 (1)、(3)、(4) 可以看出, 悬浮质量增大导致滑模区 L_1, L_2 的范围变狭窄, 从而由滑模运动方程 (7) 知, 系统在切换面上的来回穿梭运动加剧, 导致控制频率上升, 有效地抑制了系统的低频振动。

4.4 系统过渡过程平稳

在阶跃信号作用下, 系统响应如图 5 所示, 调整时间 $T_s = 0.005s$, 峰值时间 $T_p = 0.002s$, 超调量 $\sigma\% = 35\%$, 可见系统具有良好的动态性能和悬浮稳定性。

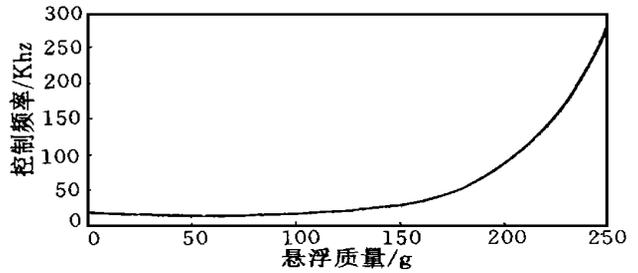


图3 控制频率与悬浮质量关系曲线

Fig.3 Relationship between control frequency and suspending weight

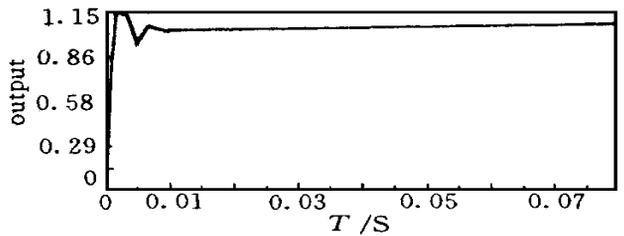


图4 系统阶跃响应曲线

Fig.4 Response of step signal

参考文献

- 1 刘明俊. 于明祁. 自动控制原理. 长沙: 国防科技大学出版社
- 2 J. - J. E. 斯洛廷, 李卫平. 应用非线性控制. 北京: 国防工业出版社
- 3 高为炳. 变结构控制理论基础. 中国科学技术出版社
- 4 姚琼荃等. 变结构控制系统. 重庆大学
- 5 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法. 北京: 科学出版社