

文章编号: 1001- 2486(2008) 06- 0129- 05

磁通密度反馈在磁悬浮系统中的应用*

刘恒坤, 郝阿明, 常文森

(国防科技大学 磁悬浮技术研究中心, 湖南 长沙 410073)

摘要: 对于磁悬浮列车的悬浮控制, 如果取悬浮间隙、电磁铁速度以及电流为状态变量进行反馈控制, 在实验中控制参数的稳定区间较小, 不易寻找控制参数的稳定区间, 而且控制参数之间的影响比较严重; 采用悬浮间隙、电磁铁速度以及磁通密度作为状态变量进行反馈控制的方法可以解决上述问题, 便于实际的调试工作。仿真结果证明了第二种方法的有效性。

关键词: 磁悬浮系统; 磁通密度反馈; 电流环

中图分类号: TP273; U237; U266.4 文献标识码: A

Application of Magnetic Flux Feedback into Magnetic Suspension System

LIU Heng kun, HAO A ming, CHANG Wen sen

(Engineering Research Center of Maglev, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: It is not easy to find a set of control parameters to stabilize the magnetic suspension system when the suspension clearance, velocity of electromagnet and current are taken as the feedback state variables, and control parameters affect each other. To tackle those problems, the suspension clearance, velocity of electromagnet and magnetic flux are taken as the state variables. It is easy to find the stable control parameters in experiment when this method is taken. Simulation proves the validity of the second control method.

Key words: magnetic suspension system; magnetic flux feedback; current loop

磁悬浮系统的用途非常广泛, 比如磁悬浮列车、磁悬浮轴承、磁悬挂天平、磁悬浮隔振^[1]等。磁悬浮列车以其特有的优势引起了广泛的注意。稳定悬浮是磁悬浮列车无接触运行的关键。关于磁悬浮列车稳定悬浮的方法很多, 一种最常见而有效的方法是状态反馈法^[2-3]。通常进行反馈控制的状态包括悬浮间隙、电磁铁的速度以及电磁线圈中的电流。在实验中发现, 采用这几个状态变量进行反馈控制时, 不易找到使得系统稳定的控制参数值, 控制参数之间影响较大, 而且往往在进行内环(电流环)调试时, 系统的动态性能容易受到控制参数变化的影响, 这从另外一个角度说明了这种方法抗干扰能力较差。为了保持状态反馈方法容易实现这一优势, 同时能够解决上述问题, 本文采用了运用磁通密度反馈来代替电流反馈的方法, 起到了一定的效果。

1 模型建立

磁悬浮列车系统在悬浮方向包括二次系(主要是指空气弹簧部分)、悬浮系统、轨道系统。由于二次系的固有频率与磁悬浮闭环系统的频率相差较大(一般在 10 倍以上)^[4], 因此这里忽略二次系对系统动态性能的影响; 另外, 由于本文重点并非轨道对系统性能的影响, 这里假设轨道的刚度无穷大, 忽略其在系统动态调节过程中的形变。关于轨道对系统性能的影响, 文献[5]有详细的描述。磁悬浮列车单点悬浮系统的模型示意图如图 1 所示。

* 收稿日期: 2008- 02- 17

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAG02B05); 国家自然科学基金资助项目(60874015)

作者简介: 刘恒坤(1975—), 男, 讲师, 博士。

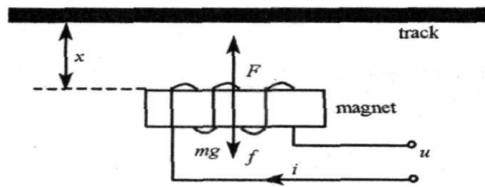


图1 磁悬浮系统示意图

Fig. 1 Sketch of magnetic levitation system

图1中各符号的物理意义: x 表示电磁铁和轨道面的间隙, m 表示电磁铁的质量, F 表示悬浮力, mg 表示电磁铁的重量, N 表示电磁铁的线圈匝数, S 表示电磁铁的极面积。

单点磁悬浮系统的模型如下^[5]:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = g - \left(\frac{k}{m}\right) \left(\frac{i}{x}\right)^2 \\ u = Ri + \left(\frac{2k}{x}\right) i - \left(\frac{2ki}{x^2}\right) \dot{x} \end{cases} \quad (1)$$

其中, k 为电磁常数。

$$k = \mu_0 N^2 S / 4 \quad (2)$$

为了在系统中引入磁通密度作为变量, 将模型(1)中的电流用磁通密度表示, 其中电流和磁通密度的关系为:

$$i = \left(2x / N\mu_0\right) B \quad (3)$$

将电流的表达式(3)代入到模型(1)中, 可以得到系统模型的另外一种形式:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = g - \left[S / m\mu_0\right] B^2 \\ u = \left[R / N\mu_0\right] Bx + NS \left[dB / dt\right] \end{cases} \quad (4)$$

本文的目的是考察磁通密度反馈在磁悬浮系统中作用, 实际上是考察它相对于电流反馈的优势, 为此本文只是采用普通的状态反馈方法对系统进行控制。首先将模型(1)系统在平衡点附近线性化, 对于模型(1), 系统线性化以后为

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = \Delta y \\ \Delta \dot{y} = \frac{2g}{x_0} \Delta x - \frac{2}{x_0} \sqrt{\frac{kg}{m}} \Delta i \\ \Delta \dot{i} = \sqrt{\frac{mg}{k}} \Delta y - \frac{Rx_0}{2k} \Delta i + \frac{x_0}{2k} \Delta u \end{cases} \quad (5)$$

对于模型(4), 在平衡点附近展开得:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = \Delta y \\ \Delta \dot{y} = -c_2 \Delta B \\ \Delta \dot{B} = -c_1 \Delta x - \frac{c_1 x_0}{B_0} \Delta B + \frac{1}{NS} \Delta u \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$c_1 = 2RB_0 / \mu_0 SN^2 \quad (7)$$

$$c_2 = 2B_0 S / m\mu_0 \quad (8)$$

2 磁通密度反馈和电流反馈的比较

2.1 电流反馈的作用

对于磁悬浮系统的悬浮控制, 通常可以采取双环控制的方法, 即电流环和位置环分别进行控制的方法, 电流环的作用是加快电磁线圈中的电流跟踪速度, 使得系统的电流响应尽可能快地跟踪设定值。实验中, 在进行电流环设计时, 通常是针对某一个固定悬浮间隙而言, 此时的电流环方程, 也就是方程组

(5)的第3个方程中的 $\Delta y = 0$, 此时这个方程的形式如下:

$$\Delta \dot{i} = -\frac{Rx_0}{2k} \Delta i + \frac{x_0}{2k} \Delta u \quad (9)$$

这里电流环只是以简单的比例反馈进行设计, 此时的控制量为:

$$\Delta u = \Delta u - c_i \Delta i \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)可得:

$$\Delta \dot{i} = -\frac{Rx_0}{2k} \Delta i - c_i \frac{x_0}{2k} \Delta i + \frac{x_0}{2k} \Delta u \quad (11)$$

由式(9)求出电流环的开环传递函数:

$$G_1(s) = \frac{1/R}{\left[2k/Rx_0\right]s + 1} \quad (12)$$

由式(9)求出电流环的闭环传递函数:

$$G_2(s) = \frac{1/\left[R + c_i\right]}{\left[2k/\left[Rx_0 + c_ix_0\right]\right]s + 1} \quad (13)$$

比较式(12)和式(13)可以看出, 电流反馈减小了电流环传递函数的时间常数, 也就是加快了电磁线圈中电流的上升速度。

下面考察电流反馈对整个系统的影响, 当系统控制量只进行电流反馈时, 由式(10)和式(5)可以求出系统的闭环特征方程:

$$\lambda^3 - \frac{x_0}{2k} \left(R + c_i\right) \lambda^2 - \frac{g}{k} \left(R + c_i\right) = 0 \quad (14)$$

而当系统中没有加入电流反馈时, 系统的特征方程为:

$$\lambda^3 - \frac{x_0}{2k} R \lambda^2 - \frac{g}{k} R = 0 \quad (15)$$

从特征方程(15)可以看出, 原系统存在不稳定极点, 是不稳定的, 即它在复平面的右半平面有根存在, 假设这个极点根为:

$$\lambda_i = a > 0$$

也就是说, 将这个根代入到式(15)满足:

$$a^3 - \frac{x_0}{2k} R a^2 - \frac{g}{k} R = 0 \quad (16)$$

容易得出, 当采用电流反馈后, 由式(16)和式(14)可知:

$$a^3 - \frac{x_0}{2k} \left(R + c_i\right) a^2 - \frac{g}{k} \left(R + c_i\right) < 0 \quad (17)$$

比较式(16)和式(17)可知, 在采用电流反馈后, 系统的不稳定极点向远离虚轴的方向移动, 这样不利于系统的稳定, 加快了系统的发散速度。

接下来再分析采用位置、速度和电流反馈时, 控制参数的稳定范围, 当控制量取如下形式时:

$$\Delta u = c_p \Delta x + c_v \Delta y - c_i \Delta \dot{i}$$

可以求出使得系统稳定的控制参数的范围如下^[4]:

$$c_v > 0, \quad c_i > -R, \quad R_i \sqrt{\frac{mg}{k}} < C_P < \frac{Rx_0}{2k} c_v + R_i \sqrt{\frac{mg}{k}} \quad (18)$$

其中, $R_i = R + c_i$ 。

2.2 磁通密度反馈的作用

与电流反馈同样的道理, 对系统进行磁通密度环和位置环分别控制, 在进行磁通密度环设计时, 忽略间隙变化率的影响, 则式(6)的第三个方程为:

$$\Delta B = -\frac{c_1 x_0}{B_0} \Delta B + \frac{1}{NS} \Delta u \quad (19)$$

此时系统的传递函数

$$G_3(s) = \frac{B_0/c_1x_0NS}{(B_0/c_1x_0)s+1} \quad (20)$$

当采用取磁通密度反馈时, 即

$$\Delta u = \Delta u - c_b \Delta B \quad (21)$$

将式(21)代入式(19), 可以求出磁通密度环的闭环传递函数:

$$G_4(s) = \frac{B_0/c_1x_0NS + B_0c_b}{\left[\frac{1}{c_1x_0/B_0 + c_b/NS} \right] s + 1} \quad (22)$$

比较式(20)和式(22)可以看出, 磁通密度反馈能够减小磁通密度环的时间常数, 由于磁通密度和电流在相位上是完全一致的, 因此磁通密度反馈也就可以减小电磁中电流的上升时间, 起到电流环中的电流反馈等效的作用。

接下来考察磁通密度反馈对整个系统稳定性的影响。

由式(6)求出开环系统特征方程:

$$\lambda^3 - \frac{c_1x_0}{B_0}\lambda^2 - c_1c_2 = 0 \quad (23)$$

当采用磁通密度反馈之后, 将式(21)代入到式(6)就可以求出闭环系统的特征方程:

$$\lambda^3 + \left[\frac{c_1x_0}{B_0} + \frac{c_b}{NS} \right] \lambda^2 - c_1c_2 = 0 \quad (24)$$

与电流反馈同样的道理, 由式(23)可知, 原系统是不稳定的, 有不稳定极点, 而且可以假设这个不稳定的极点为

$$\lambda_1 = a > 0$$

而且满足

$$a^3 + \frac{c_1x_0}{B_0}a^2 - c_1c_2 = 0 \quad (25)$$

如果将这个极点代入到式(24), 明显得到

$$a^3 + \left[\frac{c_1x_0}{B_0} + \frac{c_b}{NS} \right] a^2 - c_1c_2 > 0 \quad (26)$$

也就是说, 当采用磁通密度反馈后, 系统的不稳定极点向着接近虚轴的方向移动, 减小了系统的发散速度, 这样有利于系统的稳定, 这是磁通密度反馈的一个优点。

接下来再分析采用位置、速度和磁通密度反馈时, 控制参数的稳定范围, 当控制量取如下形式时:

$$\Delta u = c_p \Delta x + c_v \Delta y - c_b \Delta B \quad (27)$$

将式(26)代入到式(6), 利用劳斯判据, 可以求出使得系统稳定的控制参数的范围:

$$c_v > 0, \quad c_b > -\frac{c_1x_0NS}{B_0}, \quad NSc_1 < C_P < NSc_1 + \frac{c_1c_vx_0}{B_0} + \frac{c_v c_b}{NS} \quad (28)$$

下面比较两种反馈方法作用下使得系统稳定的控制参数的范围。由于位置反馈稳定区间的上限比较复杂, 所以这里针对其下限来说明问题。当采用位置、速度和电流反馈时, 由式(18)可知, 如果要求系统稳定, 位置反馈参数的最小值为

$$c_{p \min 1} = R_i \sqrt{\frac{mg}{k}} \quad (29)$$

这个最小值会随着电流反馈的变化而变化, 即如果调节电流反馈系数时, 有可能引起位置反馈系数离开其稳定区间, 使得实验过程中, 稳定参数不太容易得到。

而采用位置、速度和磁通密度反馈时, 由式(28)可知, 使得系统稳定的位置反馈参数的最小值为

$$c_{p \min 2} = NSc_1 \quad (30)$$

可以看出, 使得系统稳定的位置反馈控制参数的最小值是固定不变的。这样, 在参数调节过程中, 如果需要改变磁通密度反馈的大小, 以达到提高磁通密度速度的目的, 不会影响到位置反馈的稳定区间的下限, 从而有利于在实验中寻找控制参数的稳定区间。

综上所述,利用磁通密度反馈不但可以起到电流反馈的作用,同时使得其他控制参数的调节相对容易,而且在进行内环(磁通环)调节时,对外环(位置环)的影响较小。

3 仿真结果

某磁悬浮列车系统单点系统参数如下:

$$N = 270, S = 0.021\text{m}^2, m = 273\text{kg}, R = 0.8\Omega, x_0 = 0.012\text{m}, B_0 = 0.278\text{T}$$

采用电流反馈时,取两组控制参数:

$$c_v = 25, c_i = 1, c_p = 4500 \text{ 和 } c_v = 25, c_i = 1.2, c_p = 4500$$

采用磁通密度反馈时,取两组参数:

$$c_v = 25, c_b = 200, c_p = 1500 \text{ 和 } c_v = 25, c_b = 500, c_p = 1500$$

两种控制方法的仿真结果如图 2 和图 3 所示。

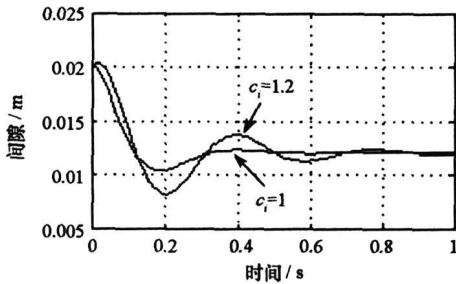


图 2 电流反馈控制仿真结果

Fig. 2 Simulate result of current feedback

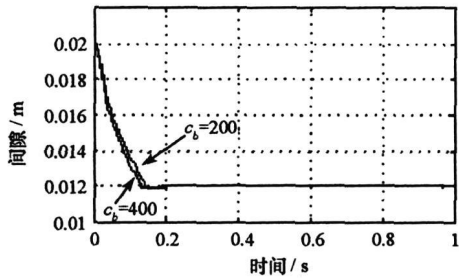


图 3 磁通密度反馈控制仿真结果

Fig. 3 Simulate result of magnetic flux feedback

从仿真结果图 2 可以看出,当采用位置、速度和电流进行反馈控制时,在电流反馈控制参数从 1 变化为 1.2 后,系统的动态性能受到严重影响。由此可以看出,电流反馈系数的可调范围是很小的。这也从一定程度上反映了在实际的实验过程中,如果采用这种方法,难以寻找到满意的控制参数。

从仿真结果图 3 可以看出,当采用位置、速度和磁通密度进行反馈控制时,很容易就可以得到使得系统稳定的控制参数,而且在磁通密度反馈变化很大的情况下,系统的动态特性没有发生多大的变化。从图形中也可以看出,系统的动态性能较前一种方法好。在采用两种方法进行仿真时,都只是在计算的稳定区间内任意取控制参数,由此可以看出,采用磁通密度反馈的方法,更加容易寻找到使得系统性能满意的控制参数。

4 结论

采用位置、速度和电流反馈时从仿真结果可以看出,参数稳定区域较小,在进行内环(电流环)调节时,外环(位置环)性能会受到很大的影响,甚至引起系统发散。

利用位置、速度和磁通密度进行反馈控制的方法,克服了前一种方法的不足,同时保持了其软件容易实现的优势。仿真结果表明,如果采用这种控制方法,参数稳定区域较大,很容易就可以得到使得系统动态性能满意的控制参数,而且控制参数变化对系统动态性能的影响不明显,在进行内环(磁通密度环)调整时,对外环(位置环)的性能影响较小。

参考文献:

- [1] Joo S J, Seo J H. Design and Analysis of the Nonlinear Feedback Linearizing Control for an Electromagnetic Suspension System[J]. IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., 1997,5(1): 135-144.
- [2] Tang J, Li X M. State Feedback Control of Single degree freedom Magnetic Suspension System[J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(5): 472-473.
- [3] Ding X P, Yang J Y, Sun R B. Magnetic Suspension System Based on Disturbance Observer PID Control[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(3): 288-290.
- [4] Liu H K. Research on Suspension Control Problems of EMS High speed Maglev Train Double Bogies Joir structure[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [5] Xie Y D. Research on the Dynamics Modeling and Simulation of EMS Maglev Train System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1998.