

文章编号 :1001 - 2486(2006)01 - 0094 - 04

磁浮列车悬浮控制器的电流环分析与优化设计*

李云钢 柯朝雄 程 虎

(国防科技大学 机电工程与自动化学院 湖南 长沙 410073)

摘 要 电流环是磁浮列车悬浮控制器的一个重要子系统。在分析 PI 型电流环及最速电流环的控制特点的基础上,设计了一种次速电流环控制器,它具有调节速度快、抗信号扰动能力强、对对象参数不敏感等优点。仿真表明次速电流环的调节速度和最速电流环相当,但在系统中存在干扰信号时,抖动会明显减小。实验表明,次速电流环调试方便,能结合悬浮控制子系统很好地完成悬浮任务。

关键词 磁浮列车;悬浮控制;PI 型电流环;最速电流环;次速电流环

中图分类号 TP273 **文献标识码** A

Analyzing and Optimizing Design of Current-Loop in the Magnetic Levitation Controller on Maglev Vehicle

LI Yun-gang, KE Zhao-xiong, CHENG Hu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The current-loop is a key subsystem of the magnetic levitation controller on maglev vehicle. Based on the analysis of controlling features of PI and time-optimal current-loop, the paper presents a design of hypo-time-optimal current-loop control system, which has the advantages of fast adjustment, strong anti-disturbance and insensitiveness to system's parameter. Simulation results show that the hypo-time-optimal current loop was as fast as the time-optimal current-loop and had less vibration when noise interfuses into the system. The experiment results indicate that the hypo-time-optimal current-loop can be regulated conveniently, and can also be successfully applied in magnetic levitation control system.

Key words maglev vehicle; levitation control; PI current-loop; time-optimal current-loop; hypo-time-optimal current-loop

悬浮控制技术是 EMS 型磁浮列车的核心技术之一,而电流环是悬浮控制系统的一个重要子系统,本文对此开展研究。磁浮列车由多个悬浮电磁铁共同支撑,因此其悬浮系统也是一个多点控制系统,但在磁浮列车实现中,都采用了结构解耦方法,从而将多点控制问题简化为单铁悬浮控制问题。就单铁悬浮控制而言,被控系统在线性化之后是一个三阶不稳定系统,早期的控制方法是采用两极超前或状态反馈控制,这些方法的共同特点是,为了改善悬浮效果,往往需要同时调节多个参数,而单个参数和悬浮效果之间的对应关系不明确。为了克服这个缺点,文献[1]引入电流环,将三阶的悬浮控制系统分解为一阶的电流环子系统和二阶的悬浮控制子系统,它们可以独立调试,从而大大降低了悬浮控制系统的调试难度。文献[1]还给出了一种鲁棒电流环的设计方法。本文从电流环的控制目标出发,深入研究电流环的设计方法。

电流环的控制目标是电磁铁的电流能够以最快的速度跟踪控制电压,又能将噪声限制在允许的范围内。此外,由于在调节过程中,电磁铁的等效电阻和电感都是在变化的,因此要求控制系统具有足够的鲁棒性。采用 PI 控制较易在快速跟踪和抑制噪声之间折中,而且便于实现,不足之处是它没有考虑控制约束。基于极大值原理的最速控制能处理控制量有约束的问题^[5],但系统中的随机扰动会导致控制量频繁切换,从而产生颤震。本文对这两种控制方法进行分析,然后将它们结合成次速控制器:在误差较大时,采用最速控制以提高快速性,在误差较小时采用 PI 控制,克服频繁切换的缺点,同时由于误

* 收稿日期:2005-09-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60404003)
作者简介:李云钢(1969—),男,副教授,博士。

差较小,由 PI 控制算法生成的控制量不会超过系统的允许值。仿真和实验表明,通过合理选择参数,次速电流环可以获得更好的性能。

1 PI 型电流环分析

电磁铁线圈的电压 - 电流方程为^[26]

$$u(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2\delta(t)} i(t) - \frac{\mu_0 N^2 A i(t)}{2\delta^2(t)} \dot{\delta}(t) \tag{1}$$

其中, μ_0 为空气中的磁导率, A 为有效磁极面积, N 为电磁铁线圈的匝数, R 为电磁铁线圈的电阻, $\delta(t)$ 为悬浮间隙, $u(t)$ 为控制电压, $i(t)$ 为电磁铁电流。为便于分析,将之写成等效电阻和等效电感的形式如下:

$$u(t) = R_f(t)i(t) + L_f(t)\dot{i}(t) \tag{2}$$

其中, $R_f(t) = R - \frac{\mu_0 N^2 A i}{2\delta^2(t)} \dot{\delta}(t)$, $L_f(t) = \frac{\mu_0 N^2 A}{2\delta(t)}$ 。

电磁铁的等效电阻 $R_f(t)$ 及等效电感 $L_f(t)$ 与悬浮间隙及其导数有关。简单分析时,认为 δ 为额定间隙, $\dot{\delta}$ 为 0, 将由该假设不成立引起的误差作为参数扰动, 此时, 等效电阻和等效电感为

$$R_0 = R, L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2\delta_0} \tag{3}$$

而系统可表示为如下一阶惯性环节:

$$G(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{R_0 + L_0 s} \tag{4}$$

由于电磁铁电阻较小而电感较大, 该惯性环节的时间常数很大。悬浮控制实验及分析表明, 该大惯性是影响悬浮稳定性及控制性能的重要原因之一, 因此通常引入电流反馈来加快电流响应速度。典型方法是采用图 1 所示的串联 PI 控制器, 并称该闭环控制系统为电流环。通过引入负反馈和串联 PI 控制, 扩展了系统频带, 电流将以较快的速度跟踪控制电压。因此, 可以将带宽 ω_b 作为系统的设计指标。

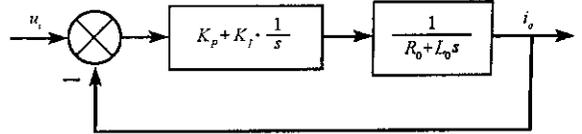


图 1 采用串联型 PI 控制的电流环
Fig.1 Current-loop series with PI controller

该系统的闭环传递函数为

$$\phi(s) = \frac{K_I + sK_P}{L_0 s^2 + (R_0 + K_P)s + K_I} \tag{5}$$

令 $20\lg|\phi(j\omega_b)| = -3^{41}$, 得

$$\omega_b = [(a + \sqrt{a^2 + b})/2L_0^2]^{1/2} \tag{6}$$

其中, $a = K_P^2 - 2R_0K_P - R_0^2 + 2L_0K_I$, $b = 4L_0^2K_I^2$ 。这里, $b > 0$, 且当 $\frac{K_P}{R_0} > \sqrt{2} + 1$ 时(为了取得较大的带宽, 通常取 K_P 较大, 因此该条件一般满足), $a > 0$ 。

下面研究 K_P 和 K_I 对带宽的影响。将 ω_b 对 K_P 、 K_I 分别求偏导, 得

$$\begin{cases} \frac{\partial \omega_b}{\partial K_P} = \frac{1}{2\omega_b L_0^2} [K_P - R_0] [1 + a/\sqrt{a^2 + b}] \\ \frac{\partial \omega_b}{\partial K_I} = \frac{1}{2\omega_b L_0} [1 + (a + 4L_0K_I)/\sqrt{a^2 + b}] \end{cases} \tag{7}$$

可见, 当 $K_P > (\sqrt{2} + 1)R_0$ 时, $\frac{\partial \omega_b}{\partial K_P} > 0$, $\frac{\partial \omega_b}{\partial K_I} > 0$ 。这表明 K_P 越大, ω_b 越大, K_I 越大, ω_b 越大。

为了获得特定的带宽, 可以仅采用比例控制, 此时 $\omega_b = [(K_P^2 - 2R_0K_P - R_0^2)/L_0^2]^{1/2}$; 也可以采用比例

积分控制。根据以上分析可知,引入积分控制 K_I 后,为了获得同样的带宽,可以采用较小的 K_P 。

比例控制易放大噪声,而积分控制对噪声有较好的抑制作用,由于引进 K_I 后可以用较小的 K_P 来获得较大的带宽,因此,比例积分控制与纯粹比例控制相比,具有既扩展频带又抑制噪声的作用。

2 最速电流环分析

从以上分析可知,PI型电流环没有考虑控制量的约束。实际控制电压总是有限的,比如,电源电压为 U_C ,在采用两电平电流驱动器的情况下,控制电压的取值范围通常为 $-U_C \leq u \leq U_C$ 。如果以最速响应作为控制指标,根据极大值原理,可得最速控制为 bang-bang 控制⁵¹,即

$$u(t) = \begin{cases} U_C, & \dot{x}(t) < i_0 \\ -U_C, & \dot{x}(t) > i_0 \\ R_0 i_0, & \dot{x}(t) = i_0 \end{cases} \quad (8)$$

其中 i_0 为电流目标值。

在此控制下,设电流初始值为 $\dot{x}(0)$,不妨假设 $\dot{x}(0) \leq i_0$ 。根据系统方程式(4),可求得电流响应为

$$\dot{x}(t) = \dot{x}(0)e^{-\frac{t}{\tau}} + U_C/R_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), t \geq 0 \quad (9)$$

其中 $\tau = L_0/R_0$ 为电磁铁开环时间常数。令 $\dot{x}(t_s) = i_0$,可得调节时间为

$$t_s = \tau \cdot \ln \frac{\dot{x}(0) - U_C/R_0}{i_0 - U_C/R_0} \quad (10)$$

由于式(10)是采用最速控制得到的调节时间,所以它是系统可能达到的最小调节时间。在考虑了系统的控制约束以后,系统的调节时间不是常数,它与电源电压 U_C 、电流初始值 $\dot{x}(0)$ 和电流目标值 i_0 都有关系。由式(10)可知,如果 $U_C/R_0 \gg \max(\dot{x}(0), i_0)$,那么调节时间 $t_s = 0$,这和经典控制分析的结果一致。同时,它又表明,在 U_C/R_0 有限的情况下,不管采用多大的增益,也不能取得无穷小的闭环时间常数,因此,经典PI控制通过不断增大增益 K_P 来减小时间常数是有局限的。

3 次速电流环仿真与实验

本文将PI控制与带缓和的最速电流环结合作为次速电流环控制器,其控制律为

$$u = \begin{cases} U_C, & \Delta i < -I_0 \\ -U_C, & \Delta i > I_0 \\ u_0 - K_P \Delta i - K_I \int \Delta i dt, & |\Delta i| < I_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\Delta i = \dot{x}(t) - i_0$, $\dot{x}(t)$ 为电磁铁的实际电流,由电流传感器测量并经A/D转换后送入数字控制器, i_0 为目标电流值,是电流环的输入指令,仿真和电流环单独实验时可根据需要给定,悬浮实验时由前级的悬浮控制算法产生, I_0 为电流误差带。

下面通过仿真来比较次速电流环与PI型电流环及最速电流环的控制效果。参数选取如下:对象标称值 $R_0 = 0.5\Omega$, $L_0 = 0.3H$,仿真中取三组值: $R_0 = 0.3\Omega$, $L_0 = 0.5H$; $R_0 = 0.25\Omega$, $L_0 = 0.75H$; $R_0 = 0.75\Omega$, $L_0 = 0.2H$ 。 $U_C = 280V$,电流误差带 I_0 取 $0.5A$,设叠加在信号测量点的随机噪声是均值为0,均方差为0.2的高斯白噪声⁷¹。

对于标称对象,令 $\frac{K_{PS} + K_I}{s} \cdot \frac{1}{R_0 + L_0 s} = \frac{K}{s}$,并令 $\omega_b = 314\text{rad/s}$,可得 $K_P = 94$, $K_I = 157$ 。 K_P 、 K_I 用于PI控制器仿真及式(11)的次速控制器仿真。

图2、图3分别给出了最速、次速控制器的控制效果。可以看出,最速和次速控制器的调节时间基本相同,但最速控制存在颤震,而次速控制较平稳;当对象摄动后,调节时间会发生变化,但由于最速控制体现在现有的控制能力下的最速调节方式,因此没有更好的方法可以进一步提高调节速度。利用PI

控制器仿真,在相同参数条件下,控制电压需要达到 6300V,远远超过了电源电压 280V,可见,不考虑控制电压约束的分析结果是不完善的。由此可见,次速控制既有最速控制调节速度快、鲁棒性好的优点,又能使得调节过程平稳,在有扰动的情况下不出现颤震。

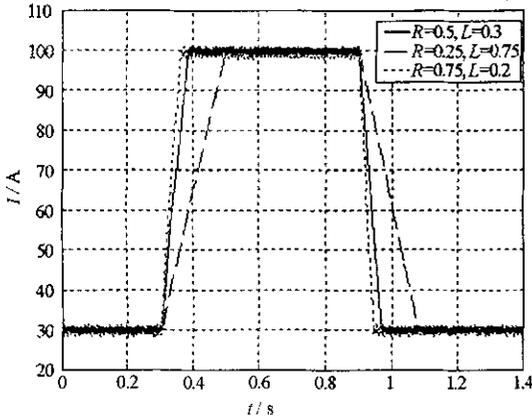


图2 最速控制电流环

Fig.2 Time-optimal current-loop

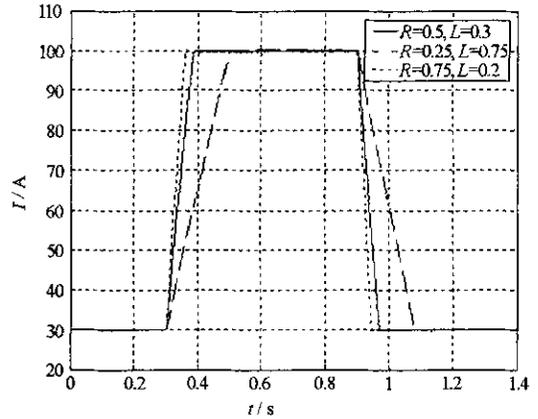


图3 次速控制电流环

Fig.3 Hypo-time-optimal current-loop

目前的磁悬浮控制系统多采用 DSP 或单片机的数字控制系统,次速电流环也由软件实现,其调试和实现步骤如下(1)结合测试的 R_0 、 L_0 根据带宽要求,确定 K_p 和 K_i (2)构造 PI 型电流环进行实验;(3)设置电流误差带 I_0 为某值,比如 0.5A 将 PI 型电流环改造为次速电流环(4)调试 I_0 的值,通过实验选取合适的误差带,具体方法是,如果调节速度慢,则减小误差带,如果出现颤震,则增大误差带。

基于电流环进行悬浮实验表明,采用最速控制时,由于斩波器的响应延迟及系统中的噪声,悬浮系统出现较大抖动,抖动频率随轨道情况不同具有一定的随机性;采用次速控制器时,悬浮系统不出现抖动,具有很好的适应性。

4 总结

电流环是磁浮列车悬浮控制器的一个重要子系统,经典方法是采用 PI 控制或 P 控制,分析表明,比例积分控制与纯粹比例控制相比,具有既扩展频带又抑制噪声的作用。在考虑到控制电压约束的条件下,最速型电流环具有最快的调节速度,但如果系统中存在噪声,输出将出现颤震。次速电流环将最速电流环和 PI 型电流环结合,它具有调节速度快、抗信号扰动能力强等优点。仿真表明次速电流环的调节速度和最速电流环相当,但在系统中存在干扰信号时,抖动会明显减小。实验表明,次速电流环调试方便,能结合悬浮控制子系统很好地完成悬浮任务。

参考文献:

- [1] 李云钢,常文森.磁浮列车悬浮系统的串级控制[J].自动化学报,1999,25(2).
- [2] 李云钢,常文森,龙志强.EMS 磁浮列车的轨道共振和悬浮控制系统设计[J].国防科技大学学报,1999,21(2).
- [3] 李云钢,陈强,张锐.磁悬浮列车数字式悬浮控制器应用研究[J].机车电传动,2002,4.
- [4] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:国防工业出版社,1990.
- [5] 解学书.最优控制理论与应用[M].北京:清华大学出版社,1986.
- [6] 李瀚荪.电路分析基础[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [7] 何仁斌.Matlab6 工程计算及应用[M].重庆:重庆大学出版社,2001.

