

平衡法在磁悬浮系统控制中的应用研究

Design of Balance Controller of Maglev System

李练兵 杨 鹏 孙鹤旭 (河北工业大学电气与自动化学院 300130)

Li Lianbing Yang Peng Sun Hexu (Hebei University of Technology, 300130 China)

摘要 本文提出了平衡法的控制思想,设计了平衡法磁悬浮控制器的基本方案,它使得单轴磁悬浮系统在其可控范围内始终在近似平衡状态的基础上进行调节,使系统获得了优良的大范围起动能力、起动平滑性和可靠性,以及优良的柔韧性和抗干扰能力,得到了理想的控制效果。

关键词: 磁悬浮, 平衡控制法, PID 控制

Abstract Based on the idea of Balancing Control Method, a novel schedule of balance controller for single-axis Maglev system is proposed, so that the system can be adjusted with a balance base at any position of its controllable range. The excellent large scope starting ability, the smooth and reliable starting properties, and good pliability and anti-disturbance property are achieved.

Keywords: Maglev, Balancing control method, PID control

1. 引言

单轴磁悬浮控制系统是研究磁悬浮控制方案的理想模型。磁悬浮控制器有多种设计方案^[1],包括 PID 算法, PI 状态反馈控制、H_∞鲁棒控制^[1]、模糊控制、滑模变结构控制^[3]、零功率控制^[4]等等。其中 PID 控制算法比较易于实现,并具有较强的参数适应能力,然而它却不能有效地提高系统的抗冲击性能和刚度,尽管采取变参数控制等改进措施,但难以获得理想的起动性能和动态性能,其参数的整定也比较困难。PI 状态反馈控制器具有较好的动态响应^[2],但在大起动范围时,由于参数的非线性问题使得控制效果仍不够理想。H_∞标准鲁棒控制器虽然具有良好的动态响应,但存在定位精度和可靠性问题^[1]。

因此,对于这种典型的非线性对象,考虑采用一种新控制思路:如果能在某一时刻输出与浮体重量相等的电磁力,就能使浮体的加速度在这一瞬间变成零,这样就使得浮体的位置和速度的调节可以在系统平衡的基础上进行适当调节。如果系统每一时刻都在浮体平衡的条件下进行调节,就能使浮体状态受到比较可靠的控制。这种控制思想在这里称为平衡法控制(Balancing Method)。

对于质量相对稳定的浮体,平衡法有较多的优点,特别是对浮体的位置控制平滑性方面要求较高

的场合平衡法有其独特的优点。

2. 平衡电压-位置曲线

2.1 平衡电流与平衡电压

要想实现平衡法控制,有必要知道浮体在任何一个可控位置达到平衡时所需要量的平衡电流。由电磁力方程^[1]

$$F(i, x) = \frac{\mu_0 AN^2}{4} \left(\frac{i}{x}\right)^2 = k \left(\frac{i}{x}\right)^2 \quad (1)$$

式中— F 为电磁吸力, μ_0 为空气导磁系数, A 为磁极面积, N 为电磁铁线圈匝数, i 为电磁铁绕组中的电流, x 为磁极表面与浮体的等效平面 S 的间隙^[1], k 为包含常数 μ_0 、 A 、 N 的电磁力常数。

可知当浮体受重力和电磁力平衡时,有

$$F(i, x) = mg \quad (2)$$

在浮体质量固定的情况下,浮体在每一个位置 x 都有一个平衡电流 i_{eq} 使浮体受力平衡。如果能获得这样一条平衡电流-位置曲线,就可以按这条曲线进行平衡控制。对于电压型受控电源,在不考虑到电磁线路过渡过程影响的情况下,可以近似认为平衡电流与电压间是线性关系,这样可以直接采用平衡电

压，建立平衡电压-位置曲线。

2.2 平衡电压-位置曲线的获得

平衡电压-位置曲线的获得主要有多种方法：可以通过式（1）及电磁场有限元计算来获得^[5]，可以直接通过实验测量，也可以通过已有控制程序进行动态平衡点捕捉。上述方法均为测量其静态平衡值，其中第三种方法最为简便实用，本文采用在 PI 状态反馈控制器进行位置控制的情况下动态平衡点捕捉算法获得平衡电压-位置曲线。PI 状态反馈控制器在可控范围内及小幅起动的情况下能够保持较好的稳定性。

首先将位置细分成若干个点，分别测量浮体在每一个点位平衡所需要的电压。当满足加速度 $a=0$ 时，该时刻的电压（电流）即可以近似认为是当前位置所需的平衡电压（电流）。具体采集方法可以使用多种采样策略获得。图 1 为实际测得的平衡电压-位置曲线。图 1 及后面各图中曲线的位置坐标均以距磁极 10mm 处的浮体起动位置为原点，即

Position=10mm-x

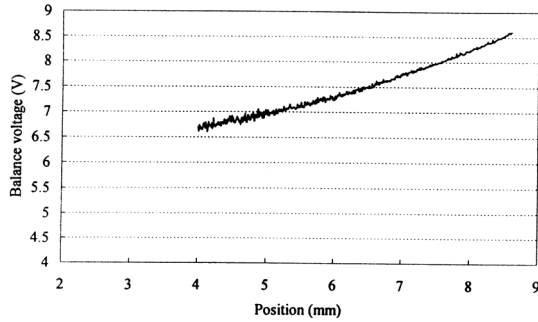


图 1 实际测得的平衡电压-位置曲线

Fig.1 The curve of balance voltage – position

在实际测量值中，由于系统位置传感器的检测误差、加速度计算的时间延迟，以及不可避免的各种噪声和扰动的缘故，尽管数据采集时经过了滤波，平衡曲线上仍然会出现很多毛刺，这样的曲线难以用于悬浮控制，必须对曲线进行平滑处理。

假设曲线所受到的干扰可以认为是平衡随机噪声，其数学期望为 0，而平衡曲线在小范围内认为是线性的，则包含噪声的信号可以表示为

$$u_n(x) = u_{eq}(x) + \xi \quad (3)$$

$$u_n(x) = u_{eq0}(x) + k_{eq}(x - x_0) + \xi \quad (4)$$

式中— $u_n(x)$ 为包含噪声的平衡电压， $u_{eq}(x)$ 为真实平衡电压值， x_0 和 u_{eq0} 表示曲线上可以认为是线性的某一小段上的一个参考点， ξ 为平衡随机噪声信号。考虑在由位置序列组成的曲线上 x 为中点一个小范围 $[x - c, x + c]$ 上对 $u_n(x)$ 进行积分可得

$$\begin{aligned} P(x) &= \int_{x-c}^{x+c} u_d(\tau) d\tau \\ &= \int_{x-c}^{x+c} [u_{eq0}(x) + k_{eq}(\tau - x_0) + \xi] d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

由于 ξ 为平稳随机干扰信号，其数学期望为 0，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \xi d\tau = 0 \quad (5)$$

这里当 c 值足够大时，可以近似认为

$$\int_{x-c}^{x+c} \xi d\tau = 0 \quad (6)$$

所以，式（4）变为

$$P(x) = 2c(u_{eq} - k_{eq}x_0) + k_{eq}2cx \quad (7)$$

从而得到平衡电压的真实值

$$u_{eq}(x) = \frac{P(x)}{2c} = u_{eq} + k_{eq}(x - x_0) \quad (8)$$

也就是通过积分对包含噪声的平衡电压进行平滑，这里由于是离散的电压序列，所以积分用累加代替。图 3 中实线为经过平滑处理后的平衡电压-位置曲线。该曲线表明，平滑过程改善了信号的单调性，所得到的平衡曲线可以用于控制。采用类似的方法，对曲线的斜率进行平滑处理，可以得到更为理想的平滑曲线，并可对曲线进行延展，以进一步得到如图 3 中虚线所表示的平滑曲线。

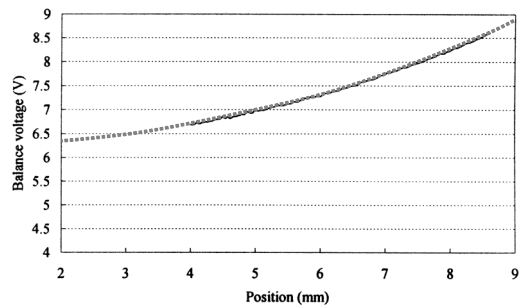


图 3 经过平滑处理后的平衡电压—位置曲线

Fig.3 The smoothed curve of balance voltage-position

平衡电压-位置曲线的自线校正功能

3. 基于平衡电压-位置曲线的平衡控制器设计

在实验和理论分析中我们认识到，传统的 PID 及 PI 状态反馈等算法的一个重要缺点是由于积分作用，使得控制量响应速度滞后。当受到较大的扰动时，控制量很容易出现积分饱和，在退饱和过程中，控制量的响应速度难以跟上浮体的运动，因而发生悬浮失控现象。平衡法的引入可以使浮体在可控范围内，首先在平衡电流或电压的作用下处于平衡状态附近，在此基础上加入适当的小幅调节量，即可使浮体向指定的方向运动。基于平衡电压-位置曲线平衡控制器结构如图 3 所示。

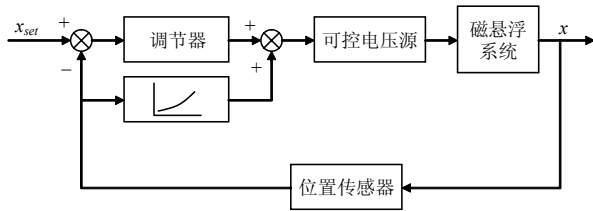


图 4 平衡法控制器方案

Fig.4 The control scheme of the controller using balance control method

在控制的动态过程中，会因为温度变化等多方面的原因导致系统参数的漂移，这使得事先采集的平衡电压与实际的平衡电压值之间产生偏差。因此当浮体接近设定位置时，还可以采用如下精确的平衡控制算法：

$$u_c = u_{eq}(x) + k_e e + k_v v + k_a a + \Delta u_{eq} \quad (9)$$

式中— $e = x_{set} - x$ 为当前位置与设定位置的偏差， v 、 a 分别为浮体的速度和加速度， k_e, k_v, k_a 分别为位置、速度、加速度的增益系数， Δu_{eq} 为平衡电压补偿项。

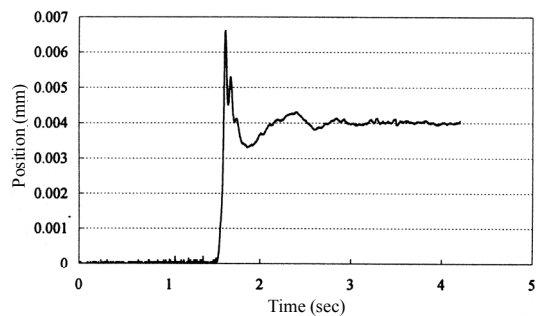
增加平衡电压补偿项的目的在于消除稳态误

差，补偿与实际平衡电压的偏差。它可由 PID 调节器的积分部分产生，也可采用其他补偿算法得到。尽管平衡法本身对浮体质量的变化具有敏感性，但实验表明在这一参数的一定变化范围内，平衡法有较强的适应能力。当质量变化较大时，系统依然能够保持平衡，只是抗扰动能力下降，需要对平衡电压-位置曲线重新测量。

对平衡电压-位置曲线的在线补偿是从根本上实现系统参数适应能力的方法，有多种算法可以方便地实现在线补偿，除浮体质量突然变化的情况之外，平衡曲线的补偿均可在线实现。本文篇幅所限不再讨论。

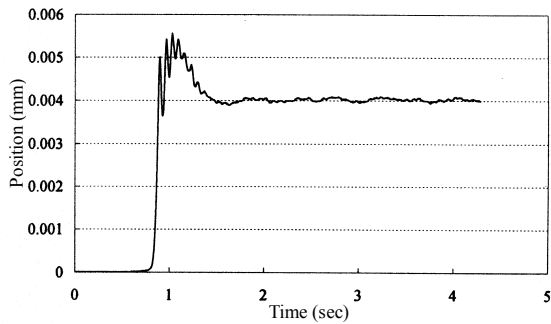
4. 实验结果及分析

平衡法实际控制曲线如图 5 所示。与文献[1]中 PID 控制、PI 状态反馈控制、H_∞鲁棒控制相比，平衡法控制器的具有优良的控制效果。在起动的性能方面，它具有起动平稳、可靠的优越性能。由于平衡法始终是在接近平衡状态的情况下进行调节，因此它可以做到比较平缓的起动。起动时的上升速度可以得到有效控制，超调量也可以通过调节参数来得到抑制，不再形成冲击形的超调，而是比较平缓的曲线；在抗扰能力方面，具有很强的稳定性，抗扰能力有显著提高，即便有较大的阶跃型扰动（如突加负载和突卸负载的情况下），控制器仍能使系统可靠地保持平衡，并始终保持较平滑的动态特性。平衡法的采用使得磁悬浮控制系统表现出稳定的柔韧性。对于刚度指标要求较高的系统，可以在平衡法的基础上，适当加入针对加载情况的智能控制策略得以实现。同时，平衡法作为一种控制思想可以在多种系统中发挥作用^[6]，有利于改善系统控制性能的平滑性、可靠性。



(a) 定参数 PID 算法的控制效果

(a) Experiment curve of position using PID controller



(b)定参数 PID 算法的控制效果

(b) Experiment curve of position using parameter-varied PID controller

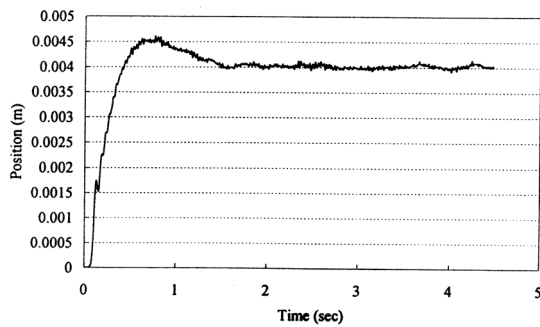


图 5 平衡法控制器的实际控制效果

Fig.5 Experiment result using balance controller

参考文献

- 1 李练兵。磁悬浮控制系统的研究。天津大学硕士论文，1999
- 2 李练兵，许镇琳，杨鹏。基于 PI 状态反馈控制的磁悬浮控制器设计。河北工业大学学报，1999 年第 2 期
- 3 K. Oguchi and K. Okada. Contactless Starting and Positioning of a Steel Ball in Single-Axis Magnetic Suspension Device by Variable Structure Control. Controller Design, 1992
- 4 Mimperi Morishita and Teruo Azukizawa. Zero Power Control of Electromagnetic Levitation System. Electrical Engineering in Japan, Vol. 108, No.3, 1988
- 5 Peng Yang, et al. Electromagnetic Field Calculation for a Magnetic Suspension System in High-Speed Rotation. CEFC'98 Tucson, Arizona, June 1-3, 1998
- 6 李练兵。永磁同步电动机多模态预测控制研究。河北工业大学博士论文，2003