

磁悬浮隔振系统设计与实现^{*}

龙志强 余龙华 尹力明 常文森

(国防科学技术大学自控系 长沙 410073)

摘要 本文介绍了磁悬浮控制技术的发展与应用情况。在建立系统动力学模型的基础上分析了隔振系统的基本特性,提出了应用加速度反馈来压低系统频带的方法。实验结果显示了该方案的有效性。

关键词 磁悬浮, 隔振控制, 实验分析

分类号 TP271

The System Design and Implementation of Magnetically Levitated Vibration Isolation

Long Zhiqiang She Longhua Ying Liming Chang Wensen

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

Abstract This paper introduces the development and application of magnetic levitated control technology. On the basis of inferring the dynamic equations of the model, the characteristics of the magnetically levitated vibration isolation system are analyzed. A method for reducing the bandwidth of system by applying feedback of acceleration is introduced, and it is proved by the experiment that the theoretical analysis is effective.

Key words magnetic levitation, vibration-isolation control, experiment analysis

磁悬浮技术是一种主动式的隔离技术, 它把支撑物体与被支撑的物体之间用磁场隔开而不发生机械接触。本文讨论的磁悬浮是电磁吸力型的, 通过间隙敏感器测量支撑与被支撑体之间的间隙, 并根据它来控制电磁铁电流, 从而达到控制间隙的目的。在实际应用中总是希望负载(通常是悬浮物的重量或过载加速度)的变动引起间隙的变化愈小愈好, 即系统刚度愈大愈好, 同时又希望基座的振动(如轨道变形、载体的振动、工业环境的影响)对

^{*} 国家“863计划”基金项目
1996年1月15日收稿

悬浮体运动的干扰愈小愈好,这就是隔振技术所要研究的基本问题^[1]。本文以一个被悬浮的圆柱体(如某电光学设备)为对象,来探讨磁悬浮隔振系统的一般特性。

1 系统动力学方程

1.1 坐标系

见图1磁悬浮隔振系统示意图: x_m, y_m, z_m ——悬浮体坐标系,原点 o_m 位于悬浮体质心; x_b, y_b, z_b ——支撑体坐标系,原点位于载体形体对称中心; x_l, y_l, z_l ——惯性坐标系。就研究振动而言,载体相对惯性系的角运动是缓慢的,悬浮体相对载体振动的角度是微小的,且绕 Z 轴运动是受限制的,假设 θ_x, θ_y 分别表示悬浮体绕 x_b, y_b 的转角(滚转角 θ_z 忽略不计)。考虑到 $\theta_z=0$,根据推导,悬浮体在 zy 平面内与 zx 平面内运动情况是相同的且相互独立,所以下只分析悬浮体在 zy 平面内的运动。

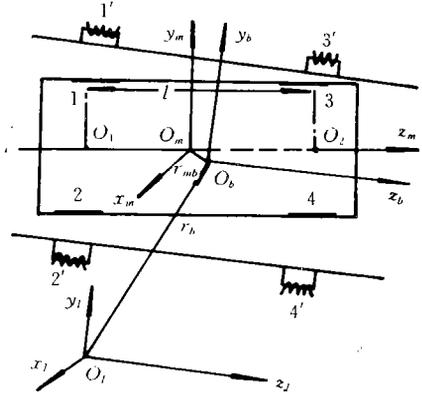


图1 磁悬浮隔振系统示意图

1.2 变量 $\Delta y, \theta_x$ 与电磁铁间隙之间的关系

如图1所示。1、2、3、4、1'、2'、3'、4'分别表示在悬浮体上的导磁体与载体上的电磁铁,它们之间的间隙分别用 $h_i(i=1,2,3,4)$ 表示。令 $\delta_{y_1}, \delta_{y_2}$ 表示相应导磁体在悬浮体上的几何中心 o_1, o_2 点偏离平衡位置的位移,可以看出:

$$\delta_{y_1} = (h_2 - h_1)/2 \quad (1)$$

$$\delta_{y_2} = (h_4 - h_3)/2 \quad (2)$$

而

$$\Delta y = \frac{(\delta_{y_1} + \delta_{y_2})}{2} \quad (3)$$

$$\theta_x = \frac{(\delta_{y_1} - \delta_{y_2})}{l} \quad (4)$$

由(3)、(4)可知,只要 $\delta_{y_1}, \delta_{y_2}$ 能够控制,悬浮体在 zy 平面内的 $\Delta y, \theta_x$ 就可以控制。

1.3 悬浮体的动力学方程

质心运动:

如图1所示悬浮体质心 o_m 的矢径 $\vec{r}_m = \vec{r}_b + \vec{r}_{mb}$,于是有

$$y_m = y_b + \Delta y$$

令 $f_{y_1}, f_{y_2}, f_{y_3}, f_{y_4}$ 分别表示电磁铁1'、2'、3'、4'对悬浮体的电磁吸力,则有

$$M(\ddot{y}_b + \Delta\ddot{y}) = \delta f_1 + \delta f_2 + \Delta p \quad (5)$$

式中, M ——悬浮体的质量, $\delta f_1 = f_{y_1} - f_{y_2}, \delta f_2 = f_{y_3} - f_{y_4}$ 。

Δp ——表示作用在悬浮体的干扰力(如负载变化等)。

绕质心运动:

设 l 表示电磁铁中心线沿 z 方向的距离,则有

$$J_s \ddot{\theta}_s = \frac{l}{2} (\delta f_1 - \delta f_2) \quad (6)$$

注意到式(3)、(4)，则式(5)、(6)可以写成

$$\delta \ddot{y}_1 + \ddot{y}_b = \frac{\delta f_1 \left(1 + \frac{0.25l^2 M}{J_x}\right)}{M} + \frac{\delta f_2 \left(1 - \frac{0.25l^2 M}{J_x}\right)}{M} + \frac{\Delta p}{M} \quad (7)$$

$$\delta \ddot{y}_2 + \ddot{y}_b = \frac{\delta f_1 \left(1 - \frac{0.25l^2 M}{J_x}\right)}{M} + \frac{\delta f_2 \left(1 + \frac{0.25l^2 M}{J_x}\right)}{M} + \frac{\Delta p}{M} \quad (8)$$

式(7)中 $1 + 0.25 * l^2 M / J_x$ 大于 $1 - 0.25 * l^2 M / J_x$ ，所以 o_1 的运动主要受 f_{y_1} 、 f_{y_2} 影响，而受 f_{y_3} 、 f_{y_4} 的耦合影响较小，并且这种耦合可通过解耦控制进行解耦^[6]。同样可分析 o_2 点的运动，并且考虑到单自由度悬浮与多自由度悬浮无本质区别，而且对于研究磁悬浮隔振机理而言，只考虑单自由度情况就可以了，所以以下的研究，都是针对一对电磁铁所产生的的一个方向的运动来说的。

2 隔振系统动态模型

2.1 电磁铁与电磁力

为了提高磁效率，减少电磁铁的质量和尺寸，以降低隔振系统有效载荷，我们采用 E 型结构的电磁铁，如图 2 所示。

在间隙远小于电磁铁截面积尺寸时，电磁铁 1'、2' 所产生的电磁吸力分别为：

$$f_1 = \frac{\mu_0 N^2 (I_0 - i)^2 S}{4(h_0 - y)^2}$$

$$f_2 = \frac{\mu_0 N^2 (I_0 + i)^2 S}{4(h_0 + y)^2}$$

而

$$\delta f(i, y) = f_1 - f_2 \quad (9)$$

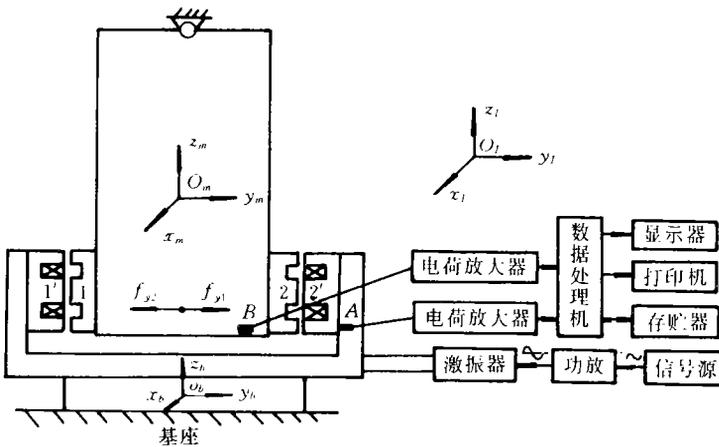


图 2 隔振实验系统示意图

式中 N, S, h_0, I_0 分别为绕组匝数、中间磁极截面积以及平衡时的空气间隙及平衡电流。 i, y 分别为调节电流及电磁铁间隙的变化量。

2.2 电压方程

电磁铁线圈电流 i 是由线圈两端的电压 Δu 产生的，可以导出：

$$\Delta u = Ri + L \frac{di}{dt} - L_y \frac{dy}{dt} \quad (10)$$

式中 R, L 分别表示线圈电阻与电感，且

$$L_y = \frac{\mu_0 N^2 (I_0 + i)}{2(h_0 + y)^2}, \quad L = \frac{\mu_0 N^2 S}{2(h_0 + y)}$$

2.3 动态模型

由图 2 可直接导出悬浮体在 y 方向的运动方程

$$\ddot{y}_m = \ddot{y} + \ddot{y}_b = \frac{(\delta f(i, y) + F_d)}{m} \quad (11)$$

式中 F_d 为干扰力， m 为悬浮体 A 的等效平动质量， y_m 表示悬浮体质心相对惯性空间的位移， y 表示电磁铁间隙相对平衡位置的变化量， y_b 表示载体的运动。

综上所述，隔振系统动态模型由方程(9)(10)(11)完成确定。对上述方程组在平衡点 (I_0, h_0) 利用泰勒级数展开法线性化可得

$$\begin{cases} m\ddot{y}_m = K_y y - K_i i + F_d \\ \Delta u = Ri + L \frac{di}{dt} - L_y \frac{dy}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

其中
$$K_y = \frac{\mu_0 N^2 S I_0^2}{h_0^3}, \quad K_i = \frac{\mu_0 N^2 S I_0}{h_0^2}, \quad L_y = \frac{\mu_0 N^2 S I_0}{2h_0^2}, \quad L = \frac{\mu_0 N^2 S}{2h_0},$$

并且 $K_y L = K_i L_y$ 。

若选择 $X^T = (\ddot{y}_m, y, \dot{y})$ 为状态变量，并取

$$F^T = [F_d, \ddot{y}_b, F_d], \quad Y^T = (\ddot{y}_m, y)$$

则可得(12)式的状态空间方程

$$\dot{X} = AX + BU + GF \quad (\text{设 } \Delta u = U) \quad (13)$$

$$Y = CX \quad (14)$$

其中
$$A = \begin{bmatrix} -R/L & RK_y/mL & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -K_i/mL \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} R/mL & 0 & 1/m \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

可以推导上述系统是完全能控能观的。此外还可以判断这是一个三阶不稳定系统，因此为使系统稳定必须采用反馈控制。

3 隔振控制器特性分析

对于磁悬浮隔振系统而言，要求被隔离的运动体既要衰减高频振动干扰信号，又能

高精度稳定跟踪低频运动信号。既要求系统低频刚度尽可能大，又要求高频刚度尽可能小，闭环系统频带尽可能窄^[2]。因而对隔振系统的控制应采用全状态反馈方式。

3.1 观测器设计

对于上文给出的三个状态变量 \ddot{y}_m 、 \dot{y} 、 y ， \ddot{y}_m 为悬浮体相对惯性空间的绝对加速度，可通过加速度计 B 测量， y 为电磁铁间隙，可通过固定在支撑体上的电涡流位移传感器测量出，速度信号可通过加速度计积分，但采用纯积分电路会出现积分饱和问题，而通过位置信号微分得速度量，则很容易引进高频干扰信号。为避免上述问题，在本文中， \dot{y} 是从观测器获取，可以采用一维状态观测器，也可以采用二维状态观测器观测 y 、 \dot{y} ，这样可以对位移 y 信号实现低通滤波，但又不影响系统跟踪的快速性。

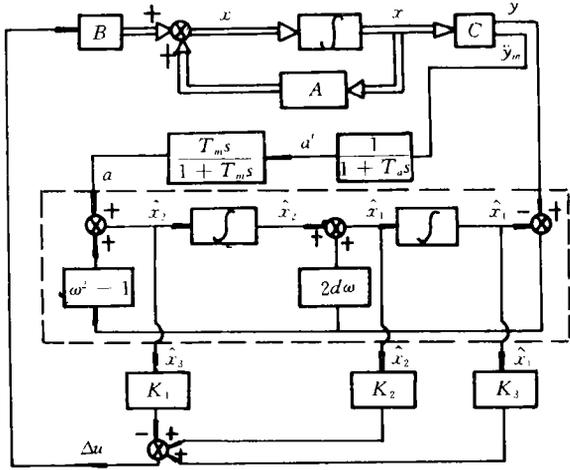


图3 闭环控制系统框图

观测器系统结构简图如图3虚线部分所示。

图中， $T_H s/(1+T_H s)$ 环节为一高通滤波器，主要是滤掉加速度信号中会引积分器饱和的直流分量，通常 $T_H=1\sim 2$ 秒，加速度采用挠性伺服加速度计测量，其频带宽度为1800Hz，则有 $a'=1/(1+T_H s)\ddot{y}_m$ ，其中 $T_H=8.8\times 10^{-5}$ 秒，此外，由图3可以写出观测量的表达式。

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + 2d\omega(y - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = a + (\omega^2 - 1)(y - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (15)$$

位置信号观测值写成传函形式

$$\hat{x}_1(s) = \frac{2d\omega s + \omega^2 - 1}{s^2 + 2d\omega s + \omega^2 - 1}y(s) + \frac{1}{s^2 + 2d\omega s + \omega^2 - 1}a(s),$$

这样可看出 $\hat{x}_1(s)$ 既可以对间隙变化低通滤波，而又不丢失系统真正的高频信号，也就是从观测器角度减小由于载体振动而引起的悬浮体高频振动，又不影响系统跟踪的快速性。此外，从图3还可以看出，该观测器另一个特点是便于实现，观测器本身构成的负反馈允许其实现电路用到纯积分器。观测器参数 $\omega=40$ ， $d=1$ 。

3.2 控制器设计

通过观测器分析，系统所有状态都能测量出，下面的问题就是如何确定反馈控制系数 K_1 、 K_2 、 K_3 ，从而使系统达到稳定悬浮并且满足隔振要求。当然完全可采用极点配置或线性二次性最优等方法来确定这三个系数^[2,3]，本文在此主要给出一种工程化的方法——分级设计简化分析方法。

由方程(12)可知，系统本身已带有一个不稳定正反馈(K_y)，而电压方程对应的惯性

环节 $\frac{1/R}{1+(L/R)S}$ 又增加了系统的不稳定性, 因此本文首先对电流内环进行校正, 使其等效成一个惯性时间常数很小 (ms 级) 的惯性环节, 加快了电流环响应速度, 且增加了其带宽。因此, 在分析系统低频特性时, 可将该环节等效成一个比例环节 K_r , 又考虑到结构特性参数 L_y 远小于 K_y , 所以略去 L_y 也是合理的, 因此 $i=K_r\Delta u$, 从而整个闭环系统被简化成一个二阶系统。接着分析系统外环, 外环反馈由位置、速度、加速度反馈构成, 如图 3 所示, 因此 $\Delta u=K_1\dot{X}_3+K_2\dot{X}_2+K_3\dot{X}_1$, 为了比较明确地看出各反馈参数的影响, 在分析时各观测值用真实值代替, 则

$$\Delta u = K_1\dot{y}_m + K_2\dot{y}_m + K_3y \quad (16)$$

由(12), (16)式, 可得

$$M\ddot{y}_m + K_v\dot{y}_m + K_p y_m = K_f y_b + F_d \quad (17)$$

式中 $M=m+K_a$, $K_v=K_2K_iK_r$, $K_p=K_3K_iK_r-K_y$, $K_a=K_1K_iK_r$ 。

首先讨论载体 (支撑体) 运动 y_b 的影响, 写成标准形

$$\ddot{y}_m + 2\omega_m\rho\dot{y}_m + \omega_m^2 = \omega_m^2 y_b \quad (18)$$

或者
$$H_1(s) = \frac{y_m(s)}{y_b(s)} = \frac{\omega_m^2}{s^2 + 2\rho\omega_m s + \omega_m^2} \quad (19)$$

式中
$$\omega_m^2 = \frac{(K_3K_iK_r - K_y)}{(m + K_1K_iK_r)}, \quad 2\rho\omega_m = \frac{(K_2K_iK_r)}{(m + K_1K_iK_r)},$$

$H_1(s)$ 为衰减度函数。

从上式知, $K_3 > K_y/(K_iK_r)$ 系统稳定, 加大 K_3 将提高系统带宽, 加大 K_1 将降低系统带宽。

其次, 讨论干扰力 F_d 的影响, F_d 一般用来表示悬浮体的重量变化和过载变化等, 由(17)式可以导出

$$H_2(s) = \frac{F_d(s)}{y_m(s)} = (m + K_1K_iK_r)s^2 + K_2K_iK_r s + K_3K_iK_r - K_y \quad (20)$$

因此
$$K_f = \lim_{s \rightarrow 0} H_2(s) = K_3K_iK_r - K_y$$

其中 K_f 表示系统静态刚度。

从上式可以看出, 当 K_3 增加时, 系统承载能力增强, K_f 增大, 但由(19)式知, 这样增加了系统带宽, 降低了系统对振动干扰信号的衰减度, 因此, 要达到尽可能多地衰减高频振动信号, 又同时能高精度跟踪低频运动的要求, 必须同时选择 K_1 , K_3 来满足。

4 实验结果及分析

磁悬浮隔振效果测试采用的是单频正弦稳态激振的测试实验方案, 其原理框图见图 2, 电磁铁支架与振动激振器刚性相连, 而且相对基座可以滑动。通过信号源人为给出不同频率的激振信号, 检测设备分别测出对应不同频率的两个加速度计 (A 与 B) 之比值, 即可知隔振效果。

悬浮体在稳定悬浮条件下, 线圈上偏置电流为 $I_0=0.5A$, $h_0=0.5mm$, 功耗为 7.5W, 悬浮体重 20kg, 确定反馈控制参数的依据是系统能承受 2g 过载(刚度 K_f 指标), 系统跟踪有用信号的带宽尽可能趋于 3Hz。下面给出几种参数组合下的衰减度曲线 H_1

($j\omega$)，实验结果如图 4 示，对应衰减度曲线 1、2、3 的 K_a 、 K_v 、 K_p 数据如下：

1. $K_a=80, K_v=800, K_p=1.18 \times 10^5$

2. $K_a=444, K_v=800, K_p=7.4 \times 10^4$

3. $K_a=694, K_v=800, K_p=8.9 \times 10^4$

从实验曲线可以看出，本文的设想是可行的，改变加速度反馈系数可以在系统刚度基本上不变的情况下，改善系统的频带。但实际问题远比上述简化的分析要复杂得多。事实上，系统不是一个简化的二阶系统，高频因素很多，如电磁线圈的时间常数、补偿网络的高频成分（加速表输出还要通过高、低通滤波器）。而且振动实验中的连接件，基座的弹性对系统实验结果都有影响。从图 4 可看出实验曲线的高频部分较复杂。

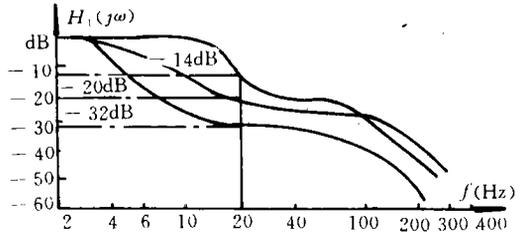


图 4 衰减度测试实验结果比较

5 结 论

(1) 针对有源磁悬浮隔振系统，可以有效地利用间隙信号和加速度信号使系统既有较好的刚度又有所希望的带宽。

(2) 与常规的机械隔振和材料隔振相比，有源磁悬浮隔振比较灵活，在结构确定以后，还可以通过改变电路参数使系统达到满意的性能。

(3) 从观测器推导过程可以看出，此观测器实质是利用位置传感器信号和加速计信号来对位置、速度信号进行观测，同时，加速度信号也得到了修正，它是速度信号观测量的直接微分，这样，观测量位置、速度、加速度都是以设定的速度和阻尼来逼近实际信号，具体设定由 d 和 ω 决定。

(4) 控制器设计和调试中，从工程化角度，采用分级设计的思想，从而降低隔振系统实际调试的难度，也可比较明确地得出各反馈控制系数和隔振效果之间的关系。

参 考 文 献

- 1 Jones D I, Owen R G. A Magnetically Levitated Anti-Vibration Mount. IEEE Trans. 1984 Mag-20 (5): 1687~1689
- 2 杨泉林. 状态反馈去耦原理在磁悬浮轴承设计中的应用. 自动化学报, 1988, 14(2): 88~95
- 3 龙志强, 余龙华, 常文森. 磁悬浮隔振系统的行为与分析. 国防科技大学学报, 1993, 16(3): 110~115

(责任编辑 张 静)