

磁悬浮隔振系统的行为与分析*

龙志强 余龙华 常文森

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

摘要 磁悬浮隔振是一种新型的主动式隔振技术。文中首先对磁悬浮隔振系统做一般性的说明,然后以自行研制的磁悬浮隔振试验装置为对象,分析了磁悬浮隔振的机理和特性;论述了磁悬浮隔振系统的建模和控制策略;最后对磁悬浮隔振系统运行与特性进行分析并给出了分析结果和仿真结果的比较。

关键词 磁悬浮, 主动式隔振

分类号 TP271

传统的隔振方法是用弹簧(包括空气弹簧)和隔振材料实现的。这种技术已广泛地应用于各种领域,取得了较明显的隔振效果,但对某些要求更高的隔振系统,这种传统的隔振技术就显得不尽如人意,主要问题是^{[1][2]}:

(1)它是一种被动式的隔振方法,系统对产生振动的部件与需要进行隔离振动的部件之间的相对速度响应将导致在转折频率处出现较大的谐振峰值。这种峰值不利于系统的正常工作。

(2)系统的带宽与刚度常常发生矛盾,也就是说系统定位精度与隔振效果往往不能同时满足。

为了克服这些矛盾,主动隔振技术是一种较好的途径。主动隔振的基本概念可用图1表示。

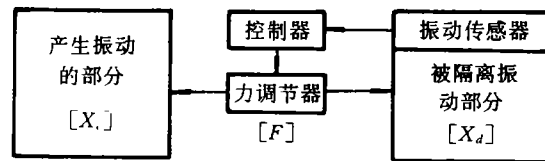


图1 主动式隔振技术示意图

这种主动隔振的基本描述方程为:

$$[K_s] \cdot [X_s] + [K_d] \cdot [X_d] = [F] \quad (1)$$

其中 $[K_s]$ 和 $[K_d]$ 为系数矩阵, $[X_s]$ 和 $[X_d]$ 为状态矩阵, $[F]$ 为调节力矩阵。从方程可以看出, $[X_s]$ 和 $[X_d]$ 的关系受 $[F]$ 的制约,因此通过对 $[F]$ 的主动调节就可以改善 $[X_s]$ 和 $[X_d]$ 的函数关系,从而可实现主动隔振的目标。

当采用磁悬浮技术实现力调节时,这种隔振方法就称为磁悬浮隔振(Magnetically Levitated Vibration Isolation)。为表述方便,文中将用MLVI表示磁悬浮隔振。据介绍^[2],美国和俄罗斯在此领域已作深入研究并在重力加速度测量仪、大型太空望远镜和空间拦截器中得到了实际应用。我国已开始这个领域的研究工作。本文作为对MLVI系统行为概念的研究,将着重考虑系统的一般结构、系统的建模以

* 国家863高技术资助项目
1993年2月18日收稿

及控制策略等，并对可行性进行探讨。

1 MLVI 系统结构

MLVI 系统通过磁力悬浮，将需要隔振的部分和产生振动的部分脱离机械接触，然后自动调节电磁力，使系统达到有关指标。磁力可由电磁铁系统提供，也可由永磁和电磁铁系统一起提供，于是就出现了全电磁主动控制式和永磁与电磁混合控制式两种方案。考虑到单自由度悬浮与多自由度悬浮无本质区别，对于分析 MLVI 系统的行为概念而言，只考虑单自由度情况就可以了。因此，作者制作了一个全电磁主动控制式的单自由度 MLVI 试验模型，其基本结构可表示如图 2。

图中，A 为需要隔离振动部分，称为对象；B 为产生振动的部分，称为基座；C 为衔铁；E 为电磁线圈；D 表示绝对空间； f_{y1} 和 f_{y2} 为电磁力，A 可以绕悬挂轴摆动，B 可以沿水平方向在一定范围内作往复运动。该模型的工作过程：激振器产生单频稳态正弦振动，由于激振器与基座固联，因此基座亦产生单频稳态正弦振动，而对象与基座通过磁力发生作用。由于磁力受控制器的调节，对象的振动状态将发生变化，这种变化是受控制器的控制规律制约的。我们希望这种制约满足：

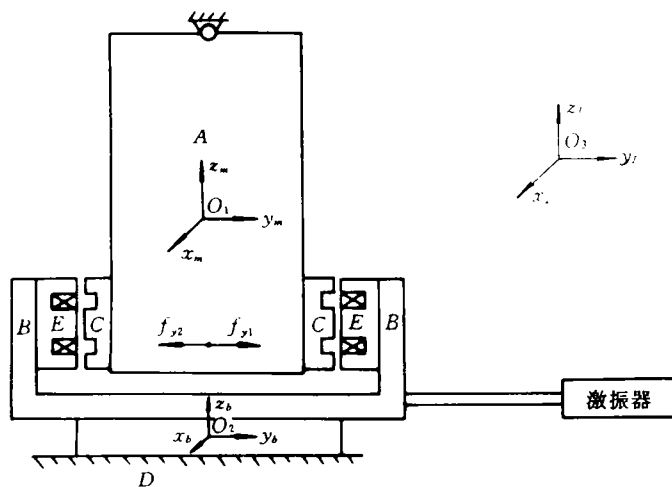


图 2 单自由度 MLVI 试验模型

当激振器作高频振动时，对象尽可能不振动；当激振器作低频运动时，对象尽可能跟踪这种运动。

2 MLVI 系统模型

首先引入坐标系 $O_1X_mY_mZ_m$ 、 $O_2X_bY_bZ_b$ 、 $O_3X_iY_iZ_i$ ，分别表示对象、基座及惯性坐标系。约定下列符号： y 表示在 Y_i 方向 A 相对于 $O_2X_bY_bZ_b$ 的位移； y_m 表示在 Y_i 方向 A 相对于 $O_1X_iY_iZ_i$ 的位移； h_0 表示静态平衡时 E、C 间的工作间隙； N 表示电磁线圈的匝数； R 表示电磁线圈的电阻； S 为磁极面积； μ_0 为真空磁导率； I_0 、 u_0 表示静态偏置电流和电压； u_1 、 u_2 表示左、右线圈的总电压； i 、 Δu 表示控制电流和控制电压； ψ_1 、 ψ_2 表示左右线圈的磁链； m 为 A 的等效平动质量。

现以 $O_3X_iY_iZ_i$ 为参考坐标系建立对象 A 的动力学方程：

$$m\ddot{y}_m = f_{y1} - f_{y2} \quad (2)$$

将 f_{y1} 和 f_{y2} 的表达式代入上式得：

$$m\ddot{y}_m = \frac{\mu_0 N^2 S}{2} \left[\frac{(I_0 - i)^2}{(h_0 - y)^2} - \frac{(I_0 + i)^2}{(h_0 + y)^2} \right] \quad (3)$$

对(3)式进行线性化处理得：

$$m\ddot{y}_m = K_y y - K_i i \quad (4)$$

其中 $K_y = \mu_0 N^2 S I_0^2 / h_0^3$ ， $K_i = \mu_0 N^2 S I_0 / h_0^2$ 。因为图 2 中的这对电磁线圈 E 按差动方式连接，所以 i 和 Δu 应满足如下关系：

$$u_1 = u_0 - \Delta u \quad i_1 = I_0 - i$$

$$u_2 = u_0 + \Delta u \quad i_2 = I_0 + i$$

又

$$u_1 = R i_1 + d\psi_1/dt$$

$$u_2 = Ri_2 + d\psi_2/dt$$

$$\phi_1 = N^2\mu_0S(I_0 - i)/(2(h_0 - y))$$

$$\phi_2 = N^2\mu_0S(I_0 + i)/(2(h_0 - y))$$

$$\Delta u = Ri + L_i di/dt - L_y dy/dt \quad (5)$$

$$L_i = \mu_0 N^2 S / 2h_0; \quad L_y = \mu_0 N^2 S I_0 / 2h_0$$

$$y_m = y + y_b \quad (6)$$

由(4)(5)(6)得出开环系统模型如图3所示:

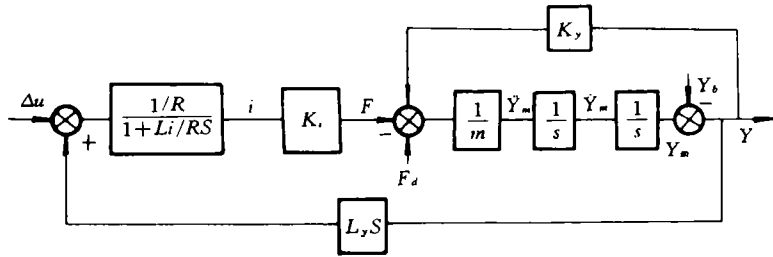


图3 开环系统模型

3 控制器设计与闭环系统特性分析

3.1 性能指标要求

MLVI系统与一般的磁悬浮系统要求不同,其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。也就是既要求系统的低频刚度尽可能大,又要求高频刚度尽可能小,闭环系统频带尽可能窄。由于控制回路中各环节参数 K_y 、 K_i 、 L_y 、 L_i 都随对象位置改变而呈非线性变化,因此希望系统的鲁棒性要好。由于工作间隙一般较小,故系统的阻尼特性要好,不允许系统动态过程有大的超调现象发生。

3.2 控制策略^{[4][5]}

从性能指标要求可以知道,MLVI系统的控制策略将具有一定的特殊性,一般的串联补偿或单一的并联反馈都不可能使问题得到全面解决。要保证系统的定位精度和承载能力,则应有合适的位置反馈;要保证系统有较好的隔振效果,则必须提高对象的惯量以压低系统频带;要保证系统良好的动态过程,则必须提供合适的阻尼。此外,为减小线圈的电磁滞后,可采用电流负反馈方法。

综合上述考虑,本系统拟采用多回路反馈控制方案。多回路包括位置环、速度环、加速度环和电流环。控制电压可表示如下:

$$\Delta u = K_p(S)y + K_v(S)\dot{y}_m + K_a(S)\ddot{y}_m - K_i(S)i \quad (7)$$

其中 $K_p(S)$ 、 $K_v(S)$ 、 $K_a(S)$ 均为PID调节器的某种形式。如何合理配置各回路参数或者是否能通过合理选择回路参数去实现前述性能指标将是下一步要讨论的关键问题。

3.3 闭环控制系统行为、特性分析

将控制器与开环系统结合则得到闭环控制系统的模型,如图4所示。

由图4经线性化处理可以得到如下两个关系式:

$$H_1(S) \triangleq y_m(S)/y_b(S) = \frac{-K_y \tau S + L_y K_r K_i + K_p K_r K_i - K_y - K_y K_r K_i}{m \tau S^3 + (K_r K_i K_a + m + m K_r K_i) S^2 + (K_r K_i K_v - K_y \tau) S + L_y K_r K_i + K_p K_r K_i - K_y} \quad (8)$$

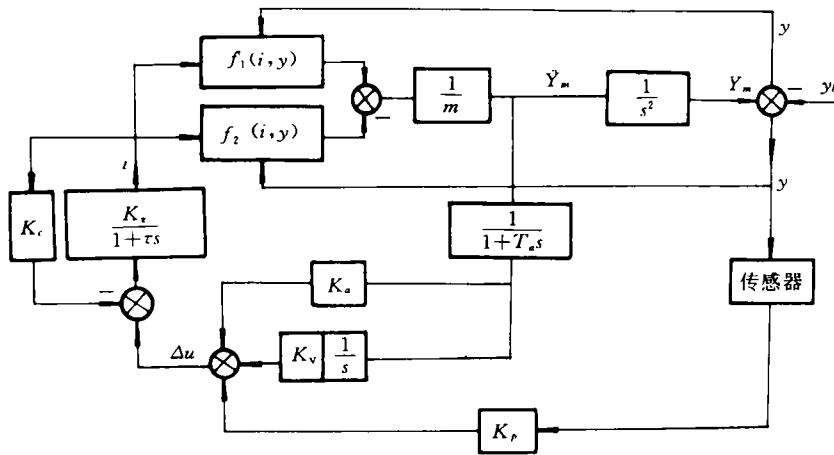


图 4 MLVI 闭环控制系统模型

$$H_2(S) \triangleq y_m(S)/F_d(S)$$

$$= \frac{1}{K_r K_c (K_a S^2 + (K_v + L_y) S + K_p) / ((1 + K_r K_c + \tau S) - K_y)} \quad (9)$$

其中 $H_1(S)$ 表示 y_m 对各种不同频率的基座运动 y_b 的响应; $H_2(S)$ 表示 y_m 对各种不同频率下的干扰 F_d 的响应。考虑到电流反馈控制回路的等效惯性时间常数很小, 只对系统高频区有作用, 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, 忽略 K_c 和 τ ; 又因为结构特性参数 L_y 远小于 K_p 和 K_v , 所以略去 L_y 亦是合理的。由此得到:

$$H_1(S) = \frac{K_r K_c K_p - K_y}{(m + K_r K_c K_a) S^2 + K_r K_c K_v S + K_r K_c K_p - K_y} \quad (10)$$

$$H_2(S) = \frac{1}{K_r K_c (K_a S^2 + K_v S + K_p) - K_y} \quad (11)$$

由(10)(11)两式得到有关性能指标的解析式:

$$\xi = \frac{K_r K_c K_v}{2 \sqrt{(m + K_r K_c K_a)(K_r K_c K_p - K_y)}} \quad (\text{系统阻尼比})$$

$$\omega_h = \sqrt{\frac{K_r K_c K_p - K_r K_c K_v}{m + K_r K_c K_a}} \sqrt{1 - 2\xi^2} + \sqrt{2 - 4\xi^2 + 4\xi^4} \quad (\text{闭环带宽})$$

$$K_f = \lim_{s \rightarrow 0} 1/H_2(S) = K_r K_c K_p - K_y \quad (\text{静态刚度})$$

根据 ξ 、 ω_h 、 K_f 三个表达式可得 K_p 、 K_v 、 K_a 和 K_f 、 ω_h 、 ξ 的关系如表 1 所示。

由表 1 可知, 通过调整 K_p 可以保证系统满足刚度要求; 通过调整 K_v 和 K_a , 可使系统在不出现谐振峰值同时, 解决刚度与带宽之间的矛盾。另一方面, 当对象的质量等参数变化或干扰变化时, 无须重新设计, 只要调整 K_p 、 K_v 和 K_a 就可满足性能指标的要求。

表 1

		K_f	ω_h	ξ
K_p	增加	增加	增加	减小
K_v	增加	不变	减小	增加
K_a	增加	不变	减小	减小

磁悬浮隔振器参数为: $m=20\text{kg}$, 线圈匝数 $N=$

311, 磁极截面积 $S=2.56 \times 10^{-4}\text{m}^2$ 。系统非线性仿真模型如图 4, 其中 $f_{1,2}(i, y)$ 不作线性化处理。下面给出两组结构参数: $h_0=0.5\text{mm}$ 、 $I_0=2.5\text{A}$ 和 $h_0=0.75\text{mm}$ 、 $I_0=3.6\text{A}$ 进行分析和仿真。

(1) $h_0=0.5\text{mm}$, $I_0=2.5\text{A}$

在系统横向过载 $2g$ 条件下, 取刚度 $K_f=1.96\times 10^6\text{N/m}$. 隔振器跟踪低频有用信号带宽 f_B 分别为 0.5Hz 和 1Hz , 参考文献[3]的设计方法, 控制器参数为:

A: $K_a=320$, $K_v=1418$, $K_p=8151$, 此时 $f_B=0.5\text{Hz}$

B: $K_a=80$, $K_v=709$, $K_p=8151$, 此时 $f_B=1\text{Hz}$

将系统参数及控制器参数代入图 4, 可以计算出在外加频率为 f 的等幅振动干扰 Y_b 的条件下 y_m 响应曲线, 其中 $Y_b=0.0003\sin 6.28ft$, f 为 0.2Hz 至 2KHz 量. 将不同频率值的 Y_b 代入图 4 进行仿真计算, 可以得到不同 f 下衰减度 $H=Y_m/Y_b$, 如图 5(a) 所示. 图中“·”对应的是第 A 组参数, “△”对应第 B 组参数计算结果.

根据(8)式, $H_1(S)=Y_m(S)/Y_b(S)$ 衰减度传输函数表达式可画出磁隔振器的衰减度曲线, 其中曲线 A 对应第 A 组参数, 曲线 B 对应第 B 组参数.

比较非线性仿真系统的计算结果和线性化后的仿真曲线可见, 两者对外加振动干扰的衰减度结果是较为一致的.

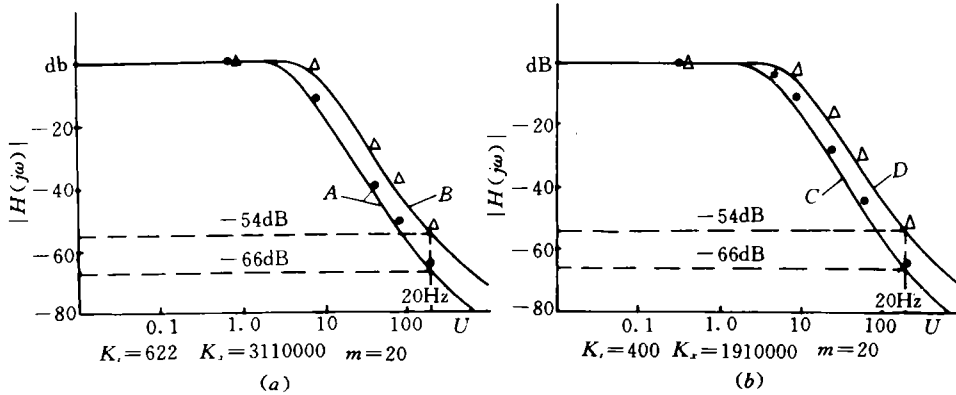


图 5

(2) $h_0=0.75\text{mm}$, $I_0=3.6\text{A}$

类似第一种情况分析, 可得两组基本参数:

C: $K_f=1.3\times 10^6\text{N/m}$, 对应 $K_p=8000$, $K_v=1500$, $K_a=290$, 跟踪有用信号带宽 $f_B=0.5\text{Hz}$

D: $K_f=1.3\times 10^6\text{N/m}$, $K_p=8000$, $K_v=750$, $K_a=75$, $f_B=1\text{Hz}$

将 C、D 两组参数分别代入图 4 进行仿真计算, 可得对不同频率干扰的衰减度 H , 如图 5(b), 其中, 图中“·”对应的是第 C 组参数, “△”对应的是第 D 组参数.

将 C、D 两组参数代入 (8) 式, 画出两条衰减度曲线如图 5(b), 其中曲线 C、D 分别对应 C、D 两组参数.

从(1)、(2)两组参数的分析可以看出: 该系统的非线性仿真和线性化的计算结果是相当一致的, 从而说明: 线性化的初步设计是合理的; 当参数 K_f 、 K_r 变化时, 可通过调整 K_p 、 K_v 、 K_a 以保证性能指标不变; 仿真曲线上没有出现谐振峰值, 并且刚度与带宽都符合要求. 这说明, MLVI 系统确实可以解决前言中提到的传统隔振方法的两大缺点.

4 结束语

本文阐明了单自由度全主动式 MLVI 的机理和特性, 并给出了仿真结果, 试验装置的测试结果与

分析、仿真结果吻合,说明线性化的分析方法是可行的。

从分析中可知,MLVI有如下特点:

- (1) 隔振效果好,频率响应曲线无尖峰。
- (2) 在结构确定之后,可通过改变电路参数调装隔振效果以达到性能指标。
- (3) 能较好地解决刚度与隔振效果之间的矛盾。

参 考 文 献

- 1 Kaplow C E, Velman J R. Application of an Active Local Vibration Concept to a Flexible Space Telescope System. AIAA paper 78-1311, Palo Alto, CA, August 1978
- 2 Jones D I, Owen R G. A Magletically Levitated Anti-Vibration Mount, IEEE Trans., Mag-20, 1984, (5): 1687~1689
- 3 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
- 4 田兰俊, 杨泉林, 常文林. 磁悬挂天平电磁铁与控制器设计. 气动实验与控制, 1990, 4(4): 60~67
- 5 B J Hamilton. Stability of Magnetically Suspended Optics in a Vibration Environment. SPIE Paper 295-21, San Diego Technical Symposium, August 1981

The System Behaviors and Analysis of Magletically Levitated Vibration Isolation

Long Zhiqiang She Longhua Chang Wensen

(Department of Automatic Control)

Abstract

Magnetically levitated vibration isolation(MLVI) is a new technology of active vibration isolation. this first paper gives a general explanation of MLVI. Then taking our successfully developed experimenal device produced successfully as the object, we analyse the mechanism and characteristics of MLVI; and discuss the modelling control—strategy of MLVI systems. And finally we analyse the system behaviors and characteristics of MLVI, draw out the conclusion and simulation results.

Key words magnetic levitation, active vibration isolation