



# 磁浮列车悬浮系统的串级控制<sup>1)</sup>

李云钢 常文森

(长沙工学院自动控制系 长沙 410073)

**摘要** 为了消除磁浮列车的轨道共振,必须设计鲁棒性较强的悬浮控制系统.将悬浮控制系统分解为电流环和悬浮子控制系统两个串行、解耦的子系统来考虑,并应用  $H_\infty$  控制理论设计了电流环控制器,用时域法设计了悬浮子系统的控制器,给出了所设计的控制器在一个单转向架磁浮列车上的悬浮试验结果.

**关键词** 磁浮列车,串级,电流环, $H_\infty$ 控制.

## CASCADE CONTROL OF AN EMS MAGLEV VEHICLE'S LEVITATION CONTROL SYSTEM

LI Yungang CHANG Wensen

(*Depart. of Automatic Control, Changsha Institute of Technology, Changsha 410073*)

**Abstract** To eliminate guideway resonance vibration in an EMS maglev vehicle system, a robust levitation controller should be designed. This paper divides a maglev control system into two serial-connected de-coupled sub-systems: current loop sub-system and levitation subsystem.  $H_\infty$  control theory is applied to the design of current loop controller while the time-domain method is applied to the design of the levitation controller. Testing results of the designed controllers for a whole size single bogie EMS maglev vehicle is given.

**Key words** EMS maglev vehicle, cascade control, current loop,  $H_\infty$  control.

## 1 引言

常导吸力型磁浮列车的悬浮控制技术已相当成熟,特别是在结构上采用磁轮或模块等控制概念,十分巧妙地实现了多个电磁铁的悬浮控制之间的解耦,以致于由多个电磁铁

1) 国家科技攻关计划资助项目.

共同悬浮的磁浮列车特性,主要取决于单个电磁铁(简称单铁)的控制特性.因此单铁控制系统的设计就变得十分关键了.如何使单铁控制系统有较满意的特性及较好的鲁棒性,至今仍是磁浮列车控制界比较关心的热点.特别是在我国这一工作还刚刚起步,这个问题的顺利解决将会十分有力地促进磁浮列车技术在我国的发展.

目前进行单铁的悬浮控制系统设计主要采用状态反馈法<sup>[1]</sup>.用这种方法,电磁铁的电流作为状态变量之一引入系统,和悬浮间隙以及电磁铁的加速度信号等一起起作用;因此,电流信号和其它信号之间会产生耦合,对电流的控制也不灵活、不方便.对电流信号的处理还有另一种方法,就是首先通过强电流反馈改善电磁铁的响应时间,然后采用频域法设计悬浮控制器;采用这种方法时,电流反馈的强度不易选择,较小时达不到应有的效果,较大时系统又会产生自激振荡.应用于磁浮列车,上述方法设计出来的悬浮控制器对参数的精度要求高,不便于优化,悬浮系统的稳定裕度小,磁浮列车和轨道之间容易出现共振.

针对单铁悬浮控制系统,提出串级设计的思想,将它分解为电流环和悬浮子系统两个子系统来考虑.电流环是悬浮子系统的执行环节,其设计 requirements 是输出电流在一定的频率范围内尽快跟踪悬浮控制器的输出电压,从而保证在设计悬浮控制器时,电流环可以看作一个比例环节,这样,便于设计鲁棒性很强的悬浮控制器.本文采用  $H_\infty$  理论设计电流环控制器,采用经典控制理论的时域方法设计悬浮控制器,实现由8个电磁铁共同悬浮的全尺寸单转向架磁浮列车的悬浮,并对系统的性能进行测试.

## 2 单铁悬浮模型及串级设计方案

设计悬浮系统时考虑图1所示的单铁悬浮模型.有关的符号如下:

$\mu_0$  为真空中的磁导率;  $g$  为重力加速度;  $m$  为悬浮体质量;  $A$  为有效磁极面积;  $N$  为电磁铁线圈匝数;  $R_0$  为电磁铁线圈电阻;  $u$  为控制电压;  $I$  为电磁铁线圈中的电流;  $F_m$  为电磁铁提供的电磁力;  $F_d$  为干扰力;  $\delta$  为电磁铁和轨道之间的间隙.

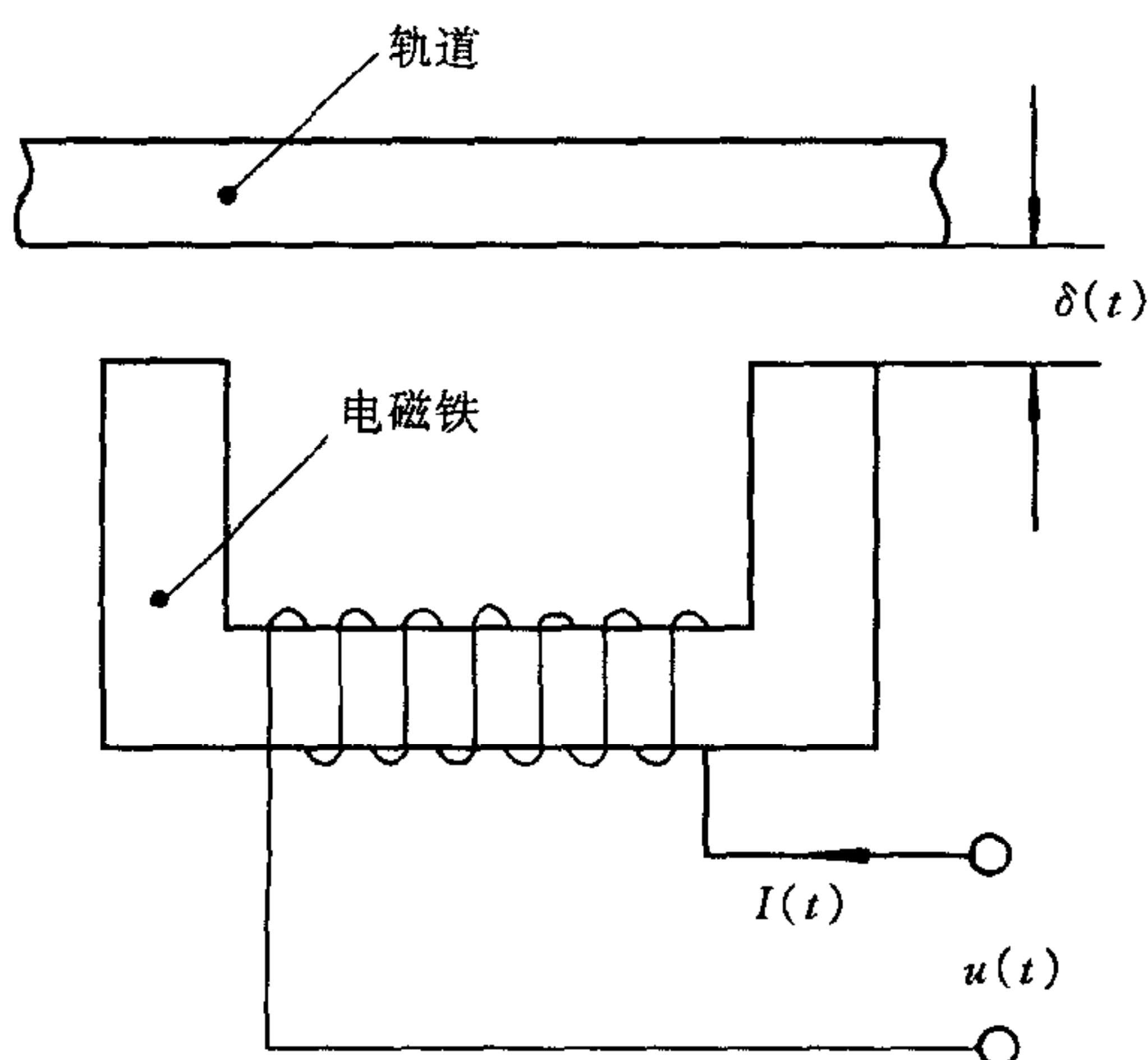


图1 单铁悬浮模型

忽略导磁体的磁阻,可以得到悬浮电磁铁的电压-电流方程

$$u = R_0 I + \frac{\mu_0 N^2 A}{2\delta} \dot{I} - \frac{\mu_0 N^2 A I}{2\delta^2} \dot{\delta}. \quad (1)$$

不考虑轨道的不规则性、轨道形变以及轨道的振动,则悬浮体的位移和悬浮间隙是一致的,根据牛顿第二定律,可得悬浮体的动力学方程为

$$m \ddot{\delta} = mg - F_m + F_d, \quad (2)$$

其中电磁力与悬浮间隙以及电磁铁线圈中的电流的关系为

$$F_m = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \frac{I}{\delta} \right]^2. \quad (3)$$

通常情况下,可以将方程(1—3)或者它们线性化之后的结果作为模型,进行悬浮控制器的设计.本文提出的串级设计方案是:从方

程(1)出发设计电流环控制器,使得控制之后的闭环系统在一定的频带内可以简化为

$$I(t) = u(t), \tag{4}$$

并从方程(2—4)出发,设计悬浮控制器.

### 3 $H_\infty$ 电流环设计与分析

考察方程(1),记  $R(t) = R_0 - \frac{\mu_0 N^2 A}{2\delta^2} \cdot \dot{\delta}$ ,  $L(t) = \frac{\mu_0 N^2 A}{2\delta}$ , 则被控对象可以表示为  $P(s) = \frac{1/R}{(L/R)s + 1} \cdot R(t)$ ,  $L(t)$  都是变化的. 假设  $R$  的变化范围为  $0.4 \sim 1.0\Omega$ ,  $L(t)$  的变化范围为  $0.1 \sim 0.5H$ , 分析表明,对象  $P(s)$  可由如下的不确定性模型描述

$$P(s) = (1 + \Delta W_2(s))P_0(s), \quad P_0(s) = \frac{1.75}{0.185s + 1}, \tag{5a, 5b}$$

$$W_2(s) = 1.65, \quad \|\Delta\|_\infty \leq 1. \tag{5c, 5d}$$

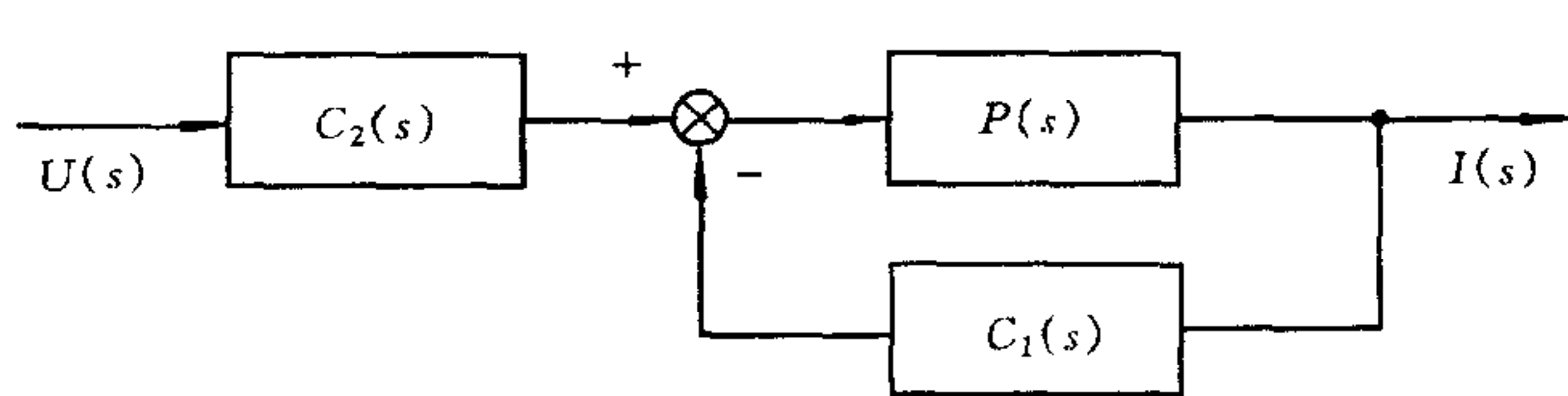


图2 电流环控制系统

选择图2所示的控制器  $C_1(s)$ ,  $C_2(s)$ , 并选择性能权为

$$W_1 = \frac{a}{T_1 s + 1}, \tag{6}$$

其中  $a$  是待定参数,  $T_1$  的选择与悬浮系统的频带有关. 悬浮系统的能耗当

控制系统的频带  $\omega_0 = \sqrt{2g/\delta_0}$  时达到最小<sup>[2]</sup>, 设计时取  $\delta_0 = 0.010m$ , 可得  $\omega_0 \approx 44.3$ . 闭环电流环在此频带内应近似为比例环节, 因此应取  $1/T_1 > 10\omega_0$ . 本文取  $T_1 = 0.001$ .

根据  $H_\infty$  控制器的设计算法可得, 使问题可解的  $a$  的最大值为  $0.782$ , 而当  $a = 0.782$  时, 可得模型匹配问题的容许解  $Q(s)$  以及相应的控制器为

$$Q(s) = \frac{(0.185s + 1)(0.217 \times 10^{-6}s^2 + 0.867 \times 10^{-3}s + 0.693)}{(2.90 \times 10^{-3}s + 3.20)(2.33 \times 10^{-3}s + 2.58)(\tau s + 1)}, \tag{7}$$

$$C_1(s) = \frac{Q}{1 - P_0 Q}$$

$$C_2(s) = \frac{(W_1/W_2)/(W_1(0)/W_2(0))}{P_0/(1 + P_0 C_1)}, \tag{8a, 8b}$$

其中式(7)中的  $\tau = \infty$ , 取  $\tau$  足够大即可.

将所得到的控制器  $C_1(s)$  和  $C_2(s)$  作用于系统  $P(s)$ , 并让  $R(t), L(t)$  取不同的值, 可以得到闭环系统的频率特性如图3所示. 从图3可以看出,  $R(t), L(t)$  在  $\pm 20\%$  的摄动范围内, 电流环闭环系统的频带为  $1000$  左右(角频率); 频带内的跟踪衰减小于  $3dB$ , 并在一定的频率范围内具有较好的线性度.

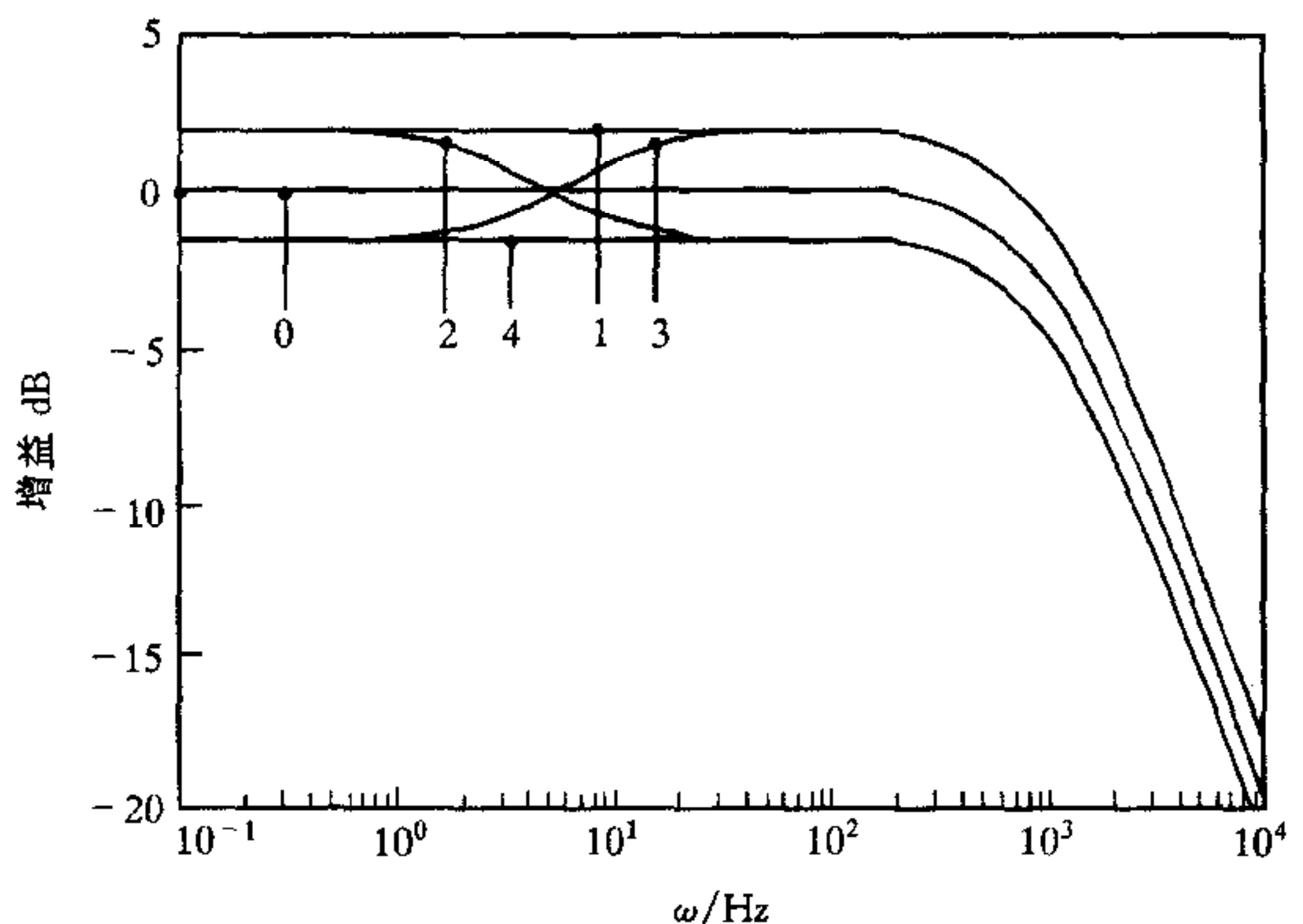


图3 电流环控制系统的频率特性

注 0: 标称对象  $R = R_0, L = L_0$

1:  $R = 0.8R_0, L = 0.8L_0$  2:  $R = 0.8R_0, L = 1.2L_0$

3:  $R = 1.2R_0, L = 0.8L_0$  4:  $R = 1.2R_0, L = 1.2L_0$

## 4 悬浮控制器的设计和实验结果

根据式(3)可得,在额定悬浮点  $\delta_0$  稳定悬浮时的电流  $I_0 = 2\delta_0 \sqrt{(mg)/(\mu_0 A)}/N$ . 令  $u_0 = I_0$ , 记  $\Delta\delta = \delta - \delta_0, \Delta I = I - I_0, \Delta u = u - u_0$ . 考虑到方程(4), 有

$$\Delta I = \Delta u. \quad (9)$$

将式(3)在  $(\delta_0, I_0)$  处进行 Taylor 展开, 取一次近似, 得

$$F_m \approx mg + C_{FI} \cdot \Delta I - C_{F\delta} \cdot \Delta\delta, \quad (10)$$

其中,  $C_{FI} = \frac{\mu_0 N^2 A I_0}{2\delta_0^2}$ ,  $C_{F\delta} = \frac{\mu_0 N^2 A I_0^2}{2\delta_0^3}$ .

将式(9), (10)代入式(2), 并注意到  $\Delta\dot{\delta} = \dot{\delta}, \Delta\ddot{\delta} = \ddot{\delta}$ , 得

$$m \cdot \Delta\delta - C_{F\delta} \cdot \Delta\delta + C_{FI} \cdot \Delta u = F_d. \quad (11)$$

选取控制器为

$$\Delta u = K_p \cdot \Delta\delta + K_D \cdot \Delta\dot{\delta} + K_A \cdot \Delta\ddot{\delta}, \quad (12)$$

那么闭环系统为

$$(m + C_{FI} \cdot K_A) \Delta\ddot{\delta} + (C_{FI} \cdot K_D) \Delta\dot{\delta} + (C_{FI} \cdot K_p - C_{F\delta}) \Delta\delta = F_d. \quad (13)$$

根据式(13)可知, 闭环系统的特征频率  $\omega_n$  和阻尼  $\xi$  满足

$$2\xi\omega_n = (C_{FI} \cdot K_D)/(m + C_{FI} \cdot K_A), \quad (14a)$$

$$\omega_n^2 = (C_{FI} \cdot K_p - C_{F\delta})/(m + C_{FI} \cdot K_A), \quad (14b)$$

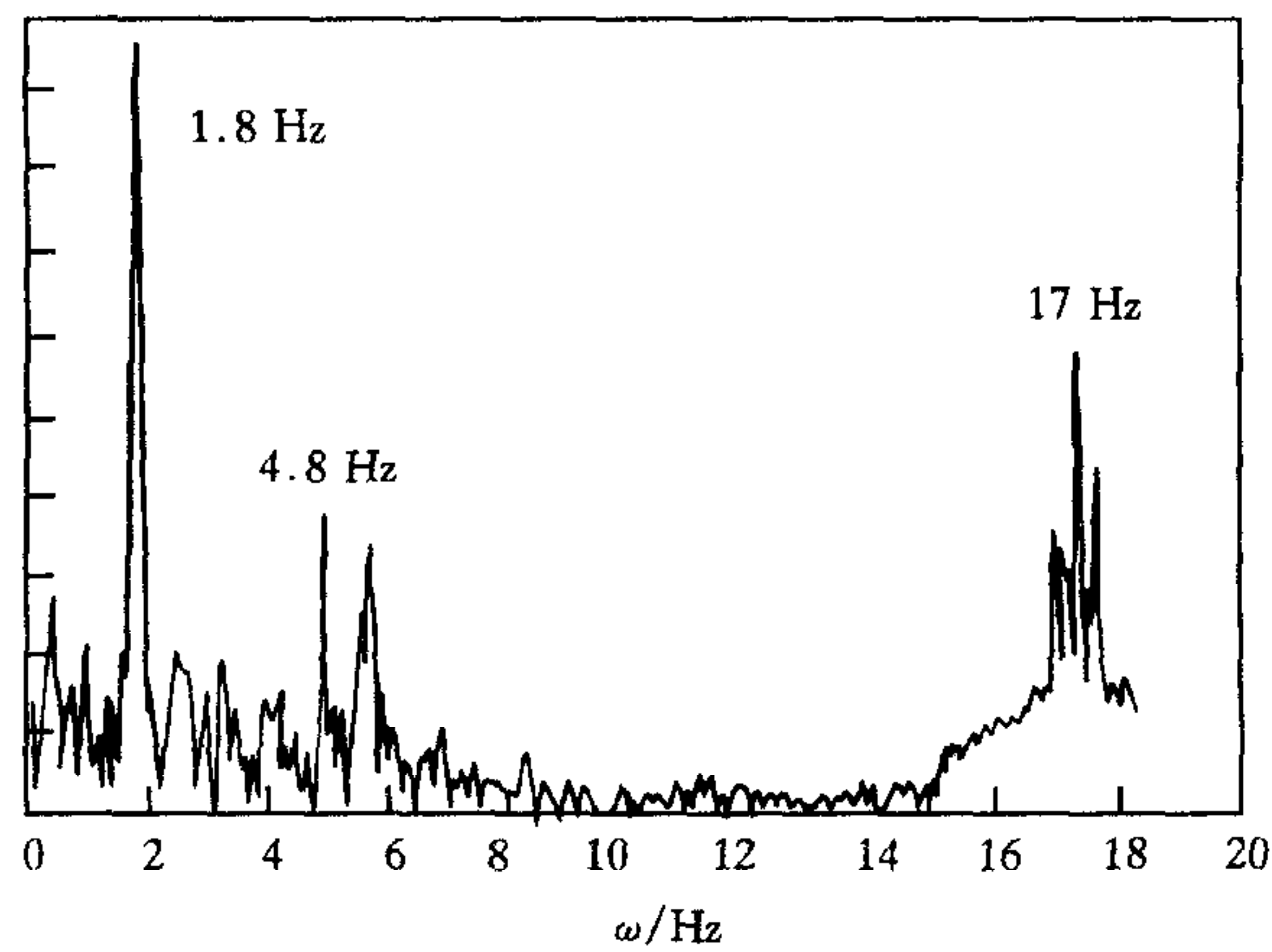
由式(14)可知, 引进加速度反馈相当于减小了  $\omega_n$ , 即压缩了系统的频带, 从而可以提高系统的抗干扰能力. 但加速度信号本身也会带来干扰, 因此,  $K_A$  不宜太大. 本文取

$$m + C_{FI} \cdot K_A = 1.2m, \quad \omega_n = \omega_0 = 44.3, \quad \xi = 2.0.$$

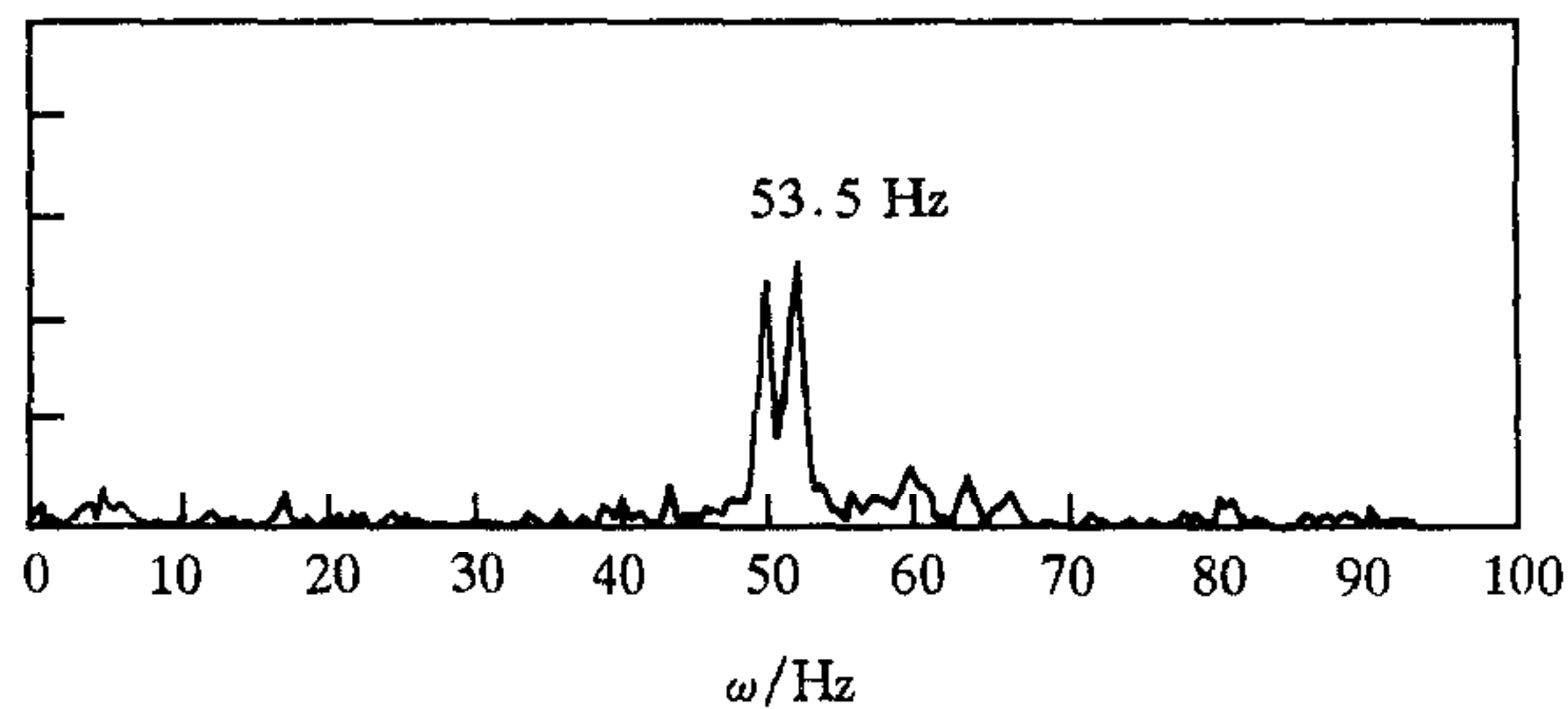
本文的电磁铁参数为  $N = 320$ ,  $A = 0.84 \times 0.028\text{m}^2$ ; 设计时, 悬浮质量的取值介于空载和满载之间, 取  $m = 500\text{kg}$ . 将参数代入式(14), 可得悬浮控制器为

$$K_p = 5602.45, \quad K_D = 276.09, \quad K_A = 0.26.$$

本文采用4套悬浮控制器和电流环组成的串行控制系统, 对由8个电磁铁支撑的全尺寸单转向架磁浮列车实施悬浮控制. 实验表明, 该转向架在空载3 500kg 至满载6 500kg 的范围内, 都能在静态条件下稳定悬浮以及在轨道上低速运行, 克服了磁浮列车中极其容易出现的轨道共振现象. 测试表明, 静态稳定悬浮时, 悬浮间隙的波动小于  $\pm 0.01 \times 10^{-3}\text{m}$ . 图4给出了实测的静态稳定悬浮条件下间隙信号的频谱. 分析和测试表明, 图4中的几个尖峰频率点分别是: 1.8Hz 是系统中积分器的特征频率; 4.8Hz 是悬浮系统的特征频率; 17Hz 是磁转向架中二次减震系统的固有频率; 53Hz 是电流环的特征频率. 可见, 电流环的特征频率和悬浮系统的特征频率相差10倍以上, 达到了设计要求.



(a) 频谱1



(b) 频谱2

图4 磁转向架静态悬浮条件下间隙信号的频谱

## 5 结论

本文提出的磁浮列车悬浮控制系统的串行设计方案大大降低了悬浮控制系统的设计和调试难度. 应用  $H_\infty$  控制理论设计的电流环, 很好地补偿了电磁铁的电感引起的大延迟, 使串行设计方案得以实现. 实验结果表明, 系统的稳定裕度大, 鲁棒稳定性强.

## 参 考 文 献

- 1 Sinha P K. Electromagnetic suspension; dynamics and control. , London, United Kingdom; Peter Peregrinus ltd. , 1987, 53—57
- 2 Gottzen, Brock K H, Schneider E, Pfefferl J. Control aspects of a tracked magnetic levitation high speed test vehicle. *Automatica* 1977, 13(3):205—223

**李云钢** 29岁, 博士. 现为国防科技大学讲师. 研究方向为磁悬浮列车控制理论.

**常文森** 64岁, 现为国防科技大学教授、博士生导师. 研究领域为磁悬浮列车控制理论及机器人技术.