

文章编号: 1001-2486(2005)04-0106-04

## EMS 型磁浮列车悬浮控制系统对爬坡能力的约束分析\*

李云钢, 常文森, 张 鼎

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:**分析 EMS 型磁浮列车的悬浮控制系统对爬坡能力的约束。首先基于系统开环传递函数和通用的悬浮控制器模型, 通过将其单实极点配置为闭环非主导极点, 将爬坡能力与控制系统的频带和阻尼等参数对应起来; 然后以圆曲线型缓和曲线为例, 分析得出坡道段的最大跟踪误差与行车速度的关系; 最后结合允许误差, 给出最小竖曲线与最大爬坡速度半径的关系。研究结果对实际工程具有一定的指导意义。

**关键词:**EMS 磁浮列车; 悬浮控制系统; 爬坡能力; 缓和曲线; 跟踪误差

**中图分类号:**TP273 **文献标识码:**A

## The Analysis of Levitation Control System's Restriction on the Grade Ability of EMS Maglev

LI Yun-gang, CHANG Wen-sen, ZHANG Ding

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

**Abstract:** The problem of levitation control system's restriction on the grade ability of EMS Maglev is analyzed. Firstly, based on the transform functions of the system and controller models, the relation between the grade climbing ability and frequency band and damp are corresponded by regulating the single-real pole to non-dominant pole. Secondly, the relation between the maximum tracking error and the moving velocity is analyzed based on the example of the circular transition curve. Finally, comparing the tolerable error, the relation between the minimum curve radius and the maximum climbing velocity is tabled at the end, which is significant to engineering.

**Key words:** EMS maglev vehicle; levitation control system; grade climbing ability; transition curve; tracking error

磁浮列车粗略分为电磁悬浮 (Electro-Magnetic Suspension, EMS) 和电动悬浮 (Electro-Dynamic Suspension, EDS) 两类, 我国目前主要研究 EMS 型磁浮列车。EMS 型列车通过其悬浮控制系统主动调节电磁铁的电流, 来控制轨道与车体之间的电磁吸力, 使车体与轨道脱离接触。可见, 悬浮控制系统是 EMS 列车的重要子系统之一, 它对列车的承载能力、轨道刚度和精度、乘坐舒适性等许多性能产生一定的约束。磁浮列车不依靠轮轨的黏着力来驱动, 因此爬坡能力很强, 由此使得它对选线的约束较小, 应用范围广, 然而爬坡能力受限于悬浮控制系统的调节能力和直线电机的驱动能力, 列车只能以低于某一极限值的速度进行爬坡运动, 有必要对磁浮列车的爬坡能力进行定量分析。目前尚未发现基于悬浮控制系统的特性来分析爬坡能力的文献。

### 1 悬浮控制系统对间隙输入响应

从控制电压至悬浮间隙的传递函数入手进行分析。由于重点关心闭环悬浮控制系统对竖曲线的响应, 开环传递函数中的建模误差可以由控制器进行一定的补偿, 因此, 根据物理意义粗略建模如下

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_0}{s^2(Ts + 1)} \quad (1)$$

参数含义和物理意义是:  $Y(s)$  是输出悬浮间隙的 Laplace 变换,  $U(s)$  反映电磁铁控制电压的 Laplace 变换;  $K_0$  为开环增益, 体现从电磁铁电流到其悬浮力的变换,  $1/s^2$  体现了从悬浮力 (或加速度) 到间隙的两

\* 收稿日期: 2005-04-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (03JJY3108)

作者简介: 李云钢 (1969—), 男, 副教授, 博士。

次积分,  $1/(Ts + 1)$  反映电磁铁线圈的惯性。

不妨设悬浮控制器为高速电流环补偿器  $C_1(s) = \frac{Ts + 1}{\tau_1 s + 1}$  和 PD 控制器  $C_2 = K_p + K_d \cdot s$  组成的串级控制<sup>[1]</sup>, 其中,  $\tau_1$  为电流环补偿之后的时间常数, 其值很小, 通过  $C_2$  的补偿得到所需要的闭环频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\xi$ 。那么闭环系统的传递函数为

$$\phi(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_d s + 1}{K_p}}{\frac{\tau_1}{K_0 K_p} s^3 + \frac{1}{K_0 K_p} s^2 + \frac{K_d}{K_p} s + 1} \quad (2)$$

其中,  $R(s)$  为由于外界条件变化导致的间隙改变量的 Laplace 变换, 是闭环系统的输入, 比如轨道升高而列车不升高, 悬浮间隙就将发生改变, 在此输入下, 悬浮控制系统将对之作出反应。考虑到通常用闭环频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\xi$  来表述系统的外特性, 将上式改写为

$$\phi(s) = \frac{\frac{K_d s + 1}{K_p}}{\left(\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1\right) \cdot (\tau_2 s + 1)} \quad (3)$$

其中,  $\tau_2$  为闭环非主导极点, 要求  $\tau_2 \ll \frac{1}{\xi \omega_n}$ 。分析表明, 取  $\tau_2 = \tau_1$  能满足悬浮控制的要求。

式(2)或式(3)就是悬浮控制系统对间隙输入的响应函数。

## 2 竖曲线输入函数分析

如图 1 所示, 设坡度为  $\alpha_0$ ,  $ab$  段为竖曲线的缓和曲线, 一般缓和曲线取正弦曲线或回旋曲线, 在竖曲线上, 不是通过超高来提供向心力, 因此其缓和段可取为圆曲线。比较而言, 圆曲线的情况最为严峻, 系统如果能通过圆曲线, 必能通过正弦曲线, 反之不然。因此, 本文选取圆曲线进行分析, 并设圆曲线半径为  $R$ 。列车在圆曲线运行时, 其所在位置与角度  $\alpha$  满足如下关系:

$$\alpha = \frac{V}{R} \cdot t \quad (4)$$

悬浮系统的输入是间隙的变化量, 也就是爬坡的高度, 因此, 在缓和段, 悬浮系统的间隙输入值为

$$r(t) = R(1 - \cos \alpha) = \frac{V^2}{2R} \cdot t^2 \quad (5)$$

其 Laplace 变换为

$$R(s) = \frac{V^2}{R} \cdot \frac{1}{s^3} \quad (6)$$

同时, 注意到在坡道段, 爬坡高度为

$$r(t) = V \sin \alpha_0 \cdot t \quad (7)$$

将缓和段和爬坡段视为两种情况分别进行分析, 因此, 将时间  $t$  从  $b$  点重新开始计算不会影响分析结果。式(7)的 Laplace 变换为

$$R(s) = V \sin \alpha_0 \cdot \frac{1}{s^2} \quad (8)$$

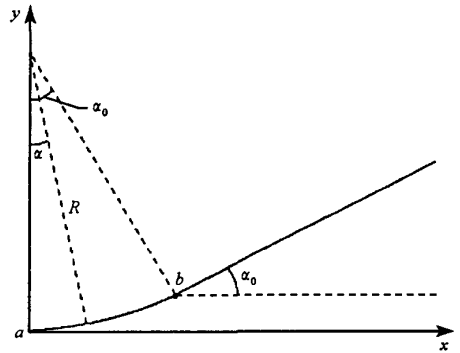


图 1 爬坡的圆曲线缓和段和坡道段

Fig. 1 Climbing on the circular transition curve guideway and sloping guideway

### 3 跟踪误差计算与分析

#### 3.1 稳态误差

在缓和段,对传递函数(3)和输入函数(6)进行分析可知,稳态误差计算符合终值定理使用的条件<sup>[2]</sup>。因此,跟踪的稳态误差计算如下:

$$\begin{aligned} e_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot [1 - \phi(s)] \cdot R(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{(\tau_1 s + 1) \cdot s^2}{K_0 K_p \cdot \left( \frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \right) \cdot (\tau_2 s + 1)} \cdot \frac{V^2}{R} \cdot \frac{1}{s^3} \\ &= \frac{V^2}{R} \cdot \frac{1}{K_0 K_p} \\ &= \frac{V^2}{R \omega_n^2} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,最后一个等式可以通过比较(2)式和(3)式,并假设  $\tau_2 = \tau_1$  得到。

根据坡道段的输入函数(7)式及其 Laplace 变换(8)式,很容易计算出在坡道段的稳态误差为零。

#### 3.2 最大跟踪误差

跟踪误差除了稳态部分以外,还包含瞬态部分。瞬态部分是幅值按指数  $\exp(-\xi\omega_n t)$  规律衰减、频率为  $\omega_n \sqrt{1-\xi^2}$  的正弦函数。如果  $\xi > 1$ ,那么误差将从零逐渐增加到稳态误差;当  $\xi < 1$  时,误差在增大的过程中会出现超调,即有时会大于稳态误差。最大超调量大致可如下计算:

$$\sigma\% = \exp(-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}) \times 100\% \quad (10)$$

此时,最大跟踪误差为

$$E_{\max} = \frac{V^2}{R\omega_n^2} (1 + \sigma) \quad (11)$$

例如,当  $\xi = 0.5$  时,超调比为 16.3%。

此外,由于在坡道段的稳态误差为零,也就是说,由于在缓和段跟踪不上  $t^2$  函数而产生的稳态误差,在缓和段结束以后将逐渐减小,最后变为零。因此,缓和段的最大误差就是爬坡过程中的最大误差。

#### 3.3 跟踪误差与速度及缓和曲线半径的关系

从(11)式可以看出,跟踪误差与速度的平方成正比,与缓和圆的半径成反比,与悬浮系统频率的平方成反比,与悬浮系统阻尼有一定关系。通常,悬浮系统的频率和阻尼与列车的结构有很大关系,并不能随意设计,悬浮控制系统的频率和阻尼一般取为

$$\begin{aligned} \omega_n &= 2\pi f = 62.8 \\ \xi &= 0.5 \end{aligned} \quad (12)$$

在此条件下,根据(11)式,计算出不同半径和速度下的最大跟踪误差,总结成表 1。

比如,某系统提出如下要求:悬浮控制系统由于爬坡导致的误差不得大于 2mm,由表 1 可以查出,速度为 200、300、400、500、600km/h 的情况下,最小竖曲线半径分别为 500、1500、2000、3000、4500m。由此可见,当爬坡速度小于 100km/h、曲线半径大于 1000m 时,悬浮间隙基本上不会受到轨道高程变化的影响(间隙变化小于 0.23mm),这与磁浮列车的低速实验结果相符,高速运行条件下的分析结果有待进一步验证。当然,这只是悬浮控制系统引起的约束,在实际应用中,还要考虑很多其它方面的约束。

表 1 最大跟踪误差与最小竖曲线半径及行车速度的关系  
(速度:km/h;半径:m;跟踪误差:mm)

Tab.1 Relations of maximum tracking error, minimum radius of erect curve and velocity  
(velocity: km/h; radius: m; tracking error: mm)

跟踪误差 半径	速度	100	200	300	400	500	600
	5500		0.04	0.17	0.37	0.66	1.03
5000		0.05	0.18	0.41	0.73	1.14	1.64
4500		0.05	0.20	0.46	0.81	1.26	1.82
4000		0.06	0.23	0.51	0.91	1.42	2.05
3500		0.07	0.26	0.59	1.04	1.63	2.34
3000		0.08	0.30	0.68	1.21	1.90	2.73
2500		0.09	0.36	0.82	1.46	2.28	3.28
2000		0.11	0.46	1.02	1.82	2.84	4.10
1500		0.15	0.61	1.37	2.43	3.79	5.46
1000		0.23	0.91	2.05	3.64	5.69	8.19
500		0.46	1.82	4.10	7.28	11.38	16.38

#### 4 总 结

本文分析 EMS 型磁浮列车的悬浮控制系统对列车爬坡能力的约束。首先分析了悬浮控制系统对间隙输入的响应特性,然后以圆曲线型缓和曲线为例,分析得出了缓和段的最大跟踪误差,研究表明它就是整个坡道段的最大误差,结合系统的允许误差,给出了最大爬坡速度与最小坡道半径的关系。本文研究结果对于 EMS 型磁浮列车的选线有一定的指导意义。

#### 参 考 文 献:

- [1] 李云钢,常文森,龙志强. EMS 磁浮列车的轨道共振与悬浮控制系统设计[J]. 国防科技大学学报,1999,(2).
- [2] 南京航空学院、西北工业大学、北京航空学院合编. 自动控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [3] 刘明俊,等. 自动控制原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.

