

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.06.025

高温超导磁浮列车非线性悬浮控制器的研究

王慧玲, 王莉, 程志强

(西南交通大学 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 磁悬浮系统是典型的非线性系统, 针对传统的悬浮系统控制方法中的系统稳定性问题, 采用反馈线性化方法建立了高温纯超导悬浮系统的非线性模型, 并设计了非线性控制器。仿真结果表明, 依据反馈线性化方法设计的非线性控制器具有良好的模型适应性和鲁棒性。

关键词: 高温超导; 非线性; 反馈线性化

中图分类号: TP391.9; TP273+.2 **文献标识码:** A

Research of High-Temperature Superconducting Maglev Nonlinear Suspension Controller

WANG Hui-ling, WANG Li, CHENG Zhi-qiang

(Key Laboratory of Magnet Suspension Technology & Maglev Vehicle Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The electromagnetic suspension system is a typical nonlinear system, aiming at the system stability problem in traditional suspension system control method, adopt feedback liner method to establish non-linear model of high-temperature superconducting system, then design the non-linear controller. The simulation result shows that the non-linear controller based on feedback liner method has good adaptability and robustness.

Keywords: High-temperature superconducting; Non-linear; Feedback linearization

0 引言

磁悬浮由于其“零接触”的特点, 能避免物体之间的摩擦和磨损, 延长设备的使用寿命, 并改善设备的运行条件。磁浮列车是一种新型的轨道交通工具, 相对轮轨交通而言, 具有噪声小、无污染、安全舒适等优点^[1]。随着超导材料的发展, 从降低悬浮功耗和增大悬浮气隙方面来看, 高温超导 EMS 悬浮方案比传统的常导材料具有优势, 正在成为研究热点。

磁悬浮系统是典型的非线性系统, 悬浮系统的控制技术是 EMS 型磁浮列车的关键技术之一。传统方法是采用在平衡点附近进行泰勒级数展开, 忽略高阶项, 得到系统的近似线性化模型, 再设计控制器。这种方法在扰动过大而引起系统偏离平衡点过大时, 系统的非线性得不到合适的补偿, 会影响悬浮系统的稳定^[2]。反馈线性化是全局线性化方法, 它通过状态反馈和输入变换得到一个与原来等价的并未舍弃非线性的线性化模型。再应用成熟的线性控制方法来设计控制器, 可以简化控制器的设计, 并且控制器具有更好的鲁棒性。故采用非线性反馈线性化方法, 以有效地解决该问题。

1 高温超导电磁悬浮系统的动态模型

电磁悬浮系统通常是多电磁铁结构, 每个模块的运动有 6 个自由度, 通过解耦, 电磁悬浮系统可以分解为单磁铁悬浮控制。高温超导单电磁铁悬浮系统的工作原理如图 1。对高温超导单电磁悬浮系统进行数学建模需要作如下假设^[3]:

- 1) 电磁铁磁路中铁磁材料的磁导率无穷大(即忽略铁芯和导轨中的磁阻) 磁势均匀降落在气隙上;
- 2) 忽略绕组漏磁通 (即 $\Phi_L=0$) ;
- 3) 假定作用面的刚度系数无穷大, 不考虑导轨本身的弹性振动或动态形变。

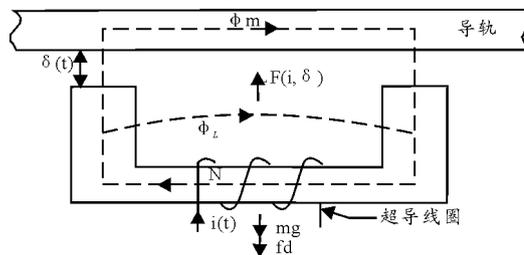


图 1 超导悬浮系统工作原理示意图

取重力方向为正方向, 并且忽略铁芯和导轨中

收稿日期: 2010-01-07; 修回日期: 2010-03-23
作者简介: 王慧玲 (1982-), 女, 河南人, 从事电磁悬浮控制技术研究。

的磁阻, 以及绕组的磁漏感。对系统中的物理量和参数做如下约定: mg 电磁铁的重力 (N), f_d 为扰动, $\delta(t)$ 为磁极与导轨间的气隙 (m), N 为超导线圈的匝数, A 为磁极面积 (m), Φ_m 为超导电流产生的主极磁通, μ_0 为空气磁导率, $i(t)$ 为超导线圈的电流, $F(i, \delta)$ 为瞬时电磁吸力 (N)。

超导悬浮系统的动态模型方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{\delta}(t) = mg + f_d - F(i, \delta) \\ F(i, \delta) = \frac{\mu_0 AN^2 i^2(t)}{4m\delta^2(t)} = \frac{K_f i^2(t)}{m\delta^2(t)} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $K_f = \frac{\mu_0 AN^2}{4}$,

选 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [\delta \ \dot{\delta} \ i]^T$ 作为系统的状态变量, 并采用超导线圈的电流作为控制对象, 原来的三阶系统可降阶为二阶系统。可以得到系统的非线性状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g + \frac{f_d}{m} - \frac{K_f i^2}{mx_1^2} \end{cases} \quad (3)$$

2 反馈线性化方法

2.1 输入-状态线性化

输入-状态线性化的主要思想是找到一个状态变换 $z = z(x)$ 与一个输入 $u = u(x, v)$ 变换, 使得原来的非线性系统变换为一个等效的线性系统, 记作 $\dot{z} = Az + bv$, 其中, v 是新引入的输入量, 再运用成熟的线性控制方法设计控制器。

对于仿射非线性系统^[4-5]:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad y = h(x) \quad (5)$$

给定 $x_0 \in X$, x_0 的一个临域 R , 如果在给定点 x_0 处具有相对阶 $r=n$, 其中 r 满足:

$$L_g L_f^n h(x) = 0; \forall x \in R, 0 \leq n \leq r-2 \quad (6)$$

$$L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0; \forall x \in R \quad (7)$$

采用反馈控制规律 $u = \alpha(x) + \beta(x)v$, 以及一个微分同胚映射, 有:

$$z = \Phi(x) = [h(x) \ L_f h(x) \ \dots \ L_f^{n-1} h(x)]^T \quad (8)$$

使得反馈系统 $\dot{x} = f(x) + g(x)\alpha(x) + g(x)\beta(x)v$, 在新的坐标 z 下变成一个线性系统: $\dot{z} = Az + Bv$

$$\begin{cases} y = Cz \\ \text{其中: } \alpha(x) = -\frac{L_f^n h(x)}{L_g L_f^{n-1} h(x)} \end{cases} \quad (9)$$

$$\beta(x) = \frac{1}{L_g L_f^{n-1} h(x)} \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T,$$

$$C = [1 \ 0]$$

2.2 超导悬浮系统的反馈线性化

超导悬浮系统的非线性状态空间方程为: $\dot{x} = f(x) + g(x)\alpha(x) + g(x)\beta(x)v, \quad y = h(x)$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ g + \frac{f_d}{m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_f}{mx_1^2} \end{bmatrix} i^2, \text{ 对照式 (5)}$$

$$\text{反馈控制律 } u = i^2, \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_f}{mx_1^2} \end{bmatrix},$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ g \end{bmatrix}, \quad h(x) = x_1 \text{ 能控性矩阵}$$

$$C_0 = [g, ad_f g] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_f}{mx_1^2} \\ -\frac{K_f}{mx_1^2} & \frac{2K_f x_2}{mx_1^3} \end{bmatrix} \text{ 验证可满足 2 个}$$

条件: 可控和对合, 则可以找到一组新的状态矢量 z , z_1 满足 2 个条件 $\nabla z_1 ad^n_f g = 0, n = 0, 1, \dots, n-2$, $\nabla z_1 ad^{n-1}_f g \neq 0$, 对照式 (6)、式 (7), 取

$$z(x) = \begin{bmatrix} z_1 \\ L_f z_1 \\ \dots \\ L_f^{n-1} z_1 \end{bmatrix}, \quad z_1(x) = x_1, \quad z_2(x) = L_f z_1 = x_2,$$

$$\text{对照式 (8)} \quad \alpha(x) = -\frac{L_f^2 z_1}{L_g L_f z_1} = -\frac{mx_1^2 g}{K_f},$$

$$\beta(x) = \frac{1}{L_g L_f z_1} = -\frac{mx_1^2}{K_f}, \text{ 对照式 (9)、式 (10), 采}$$

用超导线圈的电流作为输入，反馈控制律为：

$$u = i^2 = \alpha(x) + \beta(x)v = \frac{mx_1^2 g}{K_f} - \frac{mx_1^2}{K_f} v \quad (11)$$

$$\dot{z}_1 = z_2, \dot{z}_2 = g + \frac{f_d}{m} - \frac{K_f u}{mx_1^2} = v$$

在新的状态向量 z 和新的输入 v 的作用下，得到高温超导悬浮系统的等效线性化开环模型为：

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} f_d, \quad y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

取电流 i 作为输入，采用反馈控制律 $v = -KZ$ ，其中 $K = [K_1 \ K_2]$ ， $Z = [z_1 \ z_2]^T$ 则有：

$$i = \sqrt{u} = \sqrt{\frac{mx_1^2 [g + \frac{f_d}{m} + K_1(x_1 - c_0) + K_2]}{K_f}} \quad \text{对照式}$$

(11)，反馈线性化后高温超导悬浮系统框图如图 2。

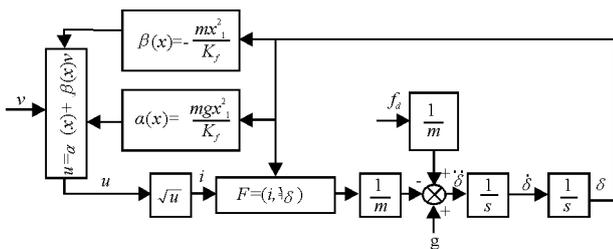


图 2 反馈线性化后高温超导悬浮系统框图

3 仿真分析与控制器的设计

用 Matlab/Simulink 工具箱进行仿真，高温超导悬浮试验台的参数如表 1。

表 1 高温超导悬浮试验台参数

名称	单位	参数
超导悬浮磁铁质量	kg	250
磁极面积	m ²	0.12×0.15
超导线圈匝数	匝	594
稳态气隙	m	0.015
超导线圈电流	A	16

注：此处超导电流值按磁路理论求得未考虑漏磁因素。

系统线性化后完全可控，可以通过任意极点配置方法来设计控制器，使闭环系统性能满足要求。调整时间 $t_s = 0.15 \text{ s}$ ，输出超调量 $\sigma \leq 5\%$ 。二阶系统的性能指标阻尼系数 $\xi \geq 0.690$ 和自然角频率 $w_n \geq 39$ 。取 $\xi = 0.707$ ， $w_n = 57$ ，反馈矩阵 k 通过极点配置的方法求得 $k = [3 \ 200 \ 80]$ 。

3.1 仿真结果

悬浮气隙的阶跃响应如图 3，从图 3 可以看出，悬浮系统能够跟踪给定的气隙值，超调很小，调整时间在 0.15 s 以内，符合控制器的性能要求，在 2 s 的时候给定一个阶跃扰动，悬浮系统可以很快稳定到新的平衡点。从图 4 可以看出超导线圈中的电流稳定在 16 A，悬浮气隙和电流在稳定点附近只有小幅波动。超导线圈的电流波形如图 4。

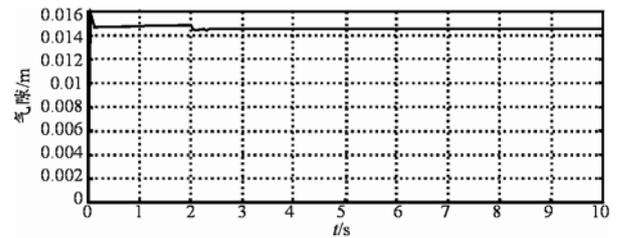


图 3 悬浮气隙的阶跃响应

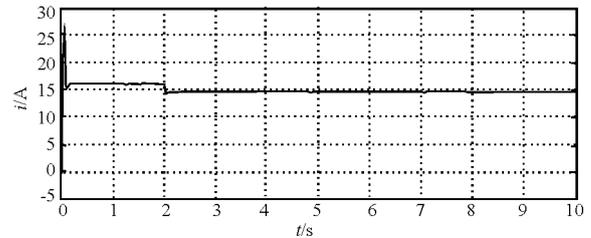


图 4 超导线圈的电流

4 结论

仿真结果表明，采用该控制策略的超导悬浮系统能够实现稳定悬浮，超导电流需要根据气隙变化而调节，在实际应用中还要考虑超导线材的失超因素。采取非线性反馈线性化控制方法的超导 EMS 系统有很好的鲁棒性，在高温超导悬浮系统中有很高的研究价值。

参考文献：

- [1] 刘德生, 李杰, 张银. 基于反馈线性化的 EMS 磁浮列车非线性悬浮控制器设计[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(2): 96-101.
- [2] 刘恒坤, 常文森, 余龙华. 磁浮列车的非线性自适应控制[J]. 兵工自动化, 2006, 25(1): 55-56.
- [3] 胥伟. 高温超导 EMS 磁浮系统的研究与实现[D]. 成都: 西南交通大学硕士论文, 2007.
- [4] 李殿璞. 非线性控制系统理论基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006.
- [5] 宣航. 基于反馈线性化的磁悬浮系统的控制方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.