

基于组合校正与黏着系数观测的高速列车黏着控制研究

秦金飞 杨中平 林飞

(北京交通大学 电气工程学院 北京 100044)

摘要:本文主要基于 CRH2A 牵引制动特性,探讨了高速列车黏着控制。建立了列车黏着理论动力学模型,基于一阶观测器时时估算路面黏着状态,利用最小二乘法计算黏着系数对蠕滑差的斜率,并提出了基于组合校正法和最优黏着控制结合的黏着控制策略,通过 MATLAB 仿真验证了该方法的可行性。

关键词: 高速列车 黏着控制 牵引力 制动力 黏着系数 蠕滑差

1 引言

随着京津、京沪、京广线的开通,高速列车作为一种交通工具已经慢慢的融入人们的生活。然而高速列车在运行过程中经常会出现空转滑行等现象,这不仅导致车轮擦伤、钢轨损伤,并且会给列车运行的时间及距离带来影响。如何有效的控制空转滑行现象的发生以及空转滑行后该如何及时的消除并进行合适的控制来弥补由于空转滑行带来的制动力/牵引力损失部分,保证列车准时准距离运行停车是高速列车运行必须解决的问题。本文主要为解决高速列车发生空转滑行时如何消除空转滑行现象,并保证列车有尽可能大的牵引力/制动力输出。首先根据列车动力学模型^[1],建立黏着系数的一阶观测器^[2]理论,并利用递归最小二乘法计算黏着系数对蠕滑差的导数^{[3][4]};针对由正常轨面运行到恶劣轨面时,不需要司机操纵牵引级位,同时保证较大牵引力输出,提出基于组合校正法^{[5][6]}与最优黏着控制^{[7][8]}(利用黏着系数对蠕滑差的导数)结合的改进型黏着控制。在前面的理论的基础上,基于动车组 CRH2A 的牵引制动特性及空转滑行控制策略,进行了 MATLAB 仿真研究及验证。

2 黏着系数的观测

2.1 列车黏着理论动力学模型

列车单轴动力学模型如图 1 所示,主要由车轮与电机、地面之间的相互作用:
电机滚动方程:

$$T_m - F_{wm} \cdot r_{g1} = J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (1)$$

车轮滚动方程:

$$F_{mw} \cdot r_{g2} - F_{adhesion} \cdot R = J_w \frac{d\omega_w}{dt} \quad (2)$$

列车平动方程:

$$F_{adhesion} - F_f(v_t) = M \frac{dv_t}{dt} \quad (3)$$

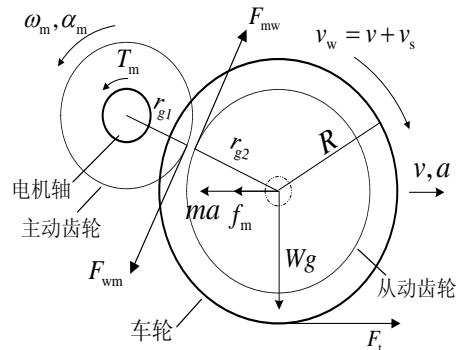


图 1 列车单轴动力学模型

将齿轮传递效率 $\eta_{gear} = F_{mw}/F_{wm}$ (牵引)及齿轮

传动比 $i_g = r_{g2}/r_{g1}$ 代入式 (1)、(2), 可得电机-车轮等效方程:

$$T_m - \frac{R}{\eta_{gear} \cdot i_g} \cdot F_{adhesion} = \frac{d\omega_m}{dt} \cdot \left(\frac{J_w}{i_g^2 \cdot \eta_{gear}} + J_m \right) \quad (4)$$

由于黏着系数 $\mu = F_{adhesion}/Mg$, 所以只需对黏着力 $F_{adhesion}$ 进行求解, 即可求得黏着系数。

2.2 黏着系数一阶观测器理论

令：

$$T_L = \frac{1}{\eta_{gear} \cdot i_g} \cdot \mu(v_s) MgR = \frac{1}{\eta_{gear} \cdot i_g} F_{adhesion} R \quad (5)$$

$$J_{equ} = \frac{J_w}{i_g^2 \cdot \eta_{gear}} + J_m \quad (6)$$

可以将式(4)转化为：

$$T_m - T_L = J_{equ} \frac{d\omega_m}{dt} \quad (7)$$

由于：

$$\hat{\mu}(v_s) = (\eta_{gear} \cdot i_g / MgR) \hat{T}_L, \quad \hat{\mu}(v_s)' = (\eta_{gear} \cdot i_g / MgR) \hat{T}_L'$$

可以知道只需要对负载转矩进行观测即可求得黏着系数。根据全维状态观测器原理：

$$\begin{aligned} \hat{x}' &= A\hat{x} + Bu \\ \hat{y} &= C\hat{x} + Du \end{aligned} \quad (8)$$

令：

$$\begin{aligned} \hat{y} &= \begin{bmatrix} \hat{T}_L \\ \hat{T}' \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} -aJ_m & 0 \\ -bJ_m & 0 \end{bmatrix} \\ x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} \omega_m \\ T_m \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

可得：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -a \\ 1 & -b \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} abJ_m & a \\ (b^2 - a)J_m & b \end{bmatrix} \quad (10)$$

从而建立求解负载转矩的一阶观测器模型，即可以时时观测列车利用黏着系数值。

3 黏着控制的改进及实现

3.1 黏着控制策略的改进

黏着控制一般分为两种不同的方向：(1) 事后控制，利用蠕滑速度阈值、加速度阈值进行空转滑行检测，当空转滑行发生时削减牵引力，进行事后控制，如组合校正法；(2) 事前控制，通过对黏着系数进行估计，时时观测列车运行状态，达到最优黏着控制，主要利用黏着系数对蠕滑差斜率为0判断列车的最佳运行控制^[9]。由于高速列车在正常运行过程中是按牵引级位控制的，只有在黏着情况恶劣特殊情况下（下雨等）最优黏着控制才能发挥作用。考虑上述因素，提出将组合校正法与最优黏着

控制结合，实现在干燥情况下，采用组合校正法，而只有在特殊情况下采用最优黏着控制。具体控制流程如下图2所示：

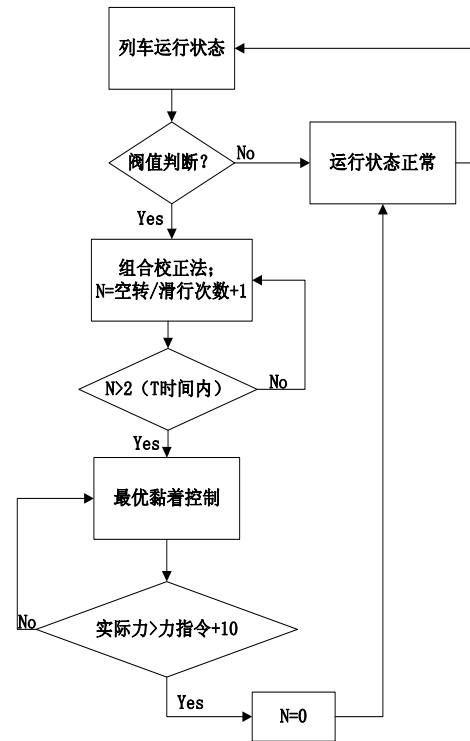


图2 改进型黏着控制策略

当列车发生滑行时，首先采用组合校正法进行控制，若在时间 T 内连续三次及以上发生空转滑行，则认为此时路面状态黏着恶化，进行最优黏着控制，实现尽可能发挥牵引力；当最优黏着控制得到的牵引力（实际力）大于牵引级位给定的指令值（力指令），则认为路面状态变好，跳出最优黏着控制，从而进入组合校正法进行黏着控制。

3.2 最优黏着控制策略

从理论上可以得到黏着系数对蠕滑差的导数：

$$\lambda = \frac{d\mu}{dv_s} \quad (11)$$

由于列车运行时利用黏着系数与蠕滑差存在一个最优值，该处所对应的黏着牵引力最大，此时 $\lambda = 0$ ，所以只需要保证列车运行时黏着系数对蠕滑差的求导为 0，就能保证最优黏着。由于黏着系数与蠕滑差的关系并没有显性函数的关系，所以利用黏着系数与时间的导数、蠕滑差对时间的导数间接求解。由于蠕滑差变化很小，导致在求解黏着系数与蠕滑差的导数时的除法中分母接近于 0，这是在除法中应极力避免的。故采用递归最小二乘法，原理如下：

$$\begin{cases} y[k] = \hat{\theta}^T[k]\phi[k] \\ \hat{\theta}[k] = \hat{\theta}[k-1] - \frac{P[k-1]\phi[k]}{1 + \phi^T[k]P[k-1]\phi[k]} \\ \quad * (\hat{\theta}[k-1]\phi[k] - y[k]) \\ P[k] = \frac{1}{\kappa} [P[k-1] - \\ \quad \frac{P[k-1]\phi[k]\phi^T[k]P[k-1]}{1 + \phi^T[k]P[k-1]\phi[k]}] \\ \kappa = \frac{1}{1 + \gamma\phi[k]^2} \end{cases}$$

令： $y[k] = \mu_s(v_s)$ ， $\hat{\theta}[k] = d\mu(v_s)/dv_s$ ， $\phi[k] = dv_s/dt$ 从而求得黏着系数对蠕滑差的导数 $\hat{\theta}$ 。就可以利用斜率为 0，通过 PI 控制实现最优黏着运行。

4 黏着控制策略改进的仿真验证

表 1 黏着系数模拟参数表

	a	b	c	d
0-50s	0.54	1.2	0.175	0.175
50-80s	0.54	1.2	0.105	0.105
80-130s	0.54	1.2	0.175	0.175
130-160s	0.54	1.2	0.105	0.105
160-200s	0.54	1.2	0.175	0.175

4.1 路面黏着状况的模拟

黏着系数与蠕滑差的关系，用公式 (12) 来模拟^[10]。采用表 1 参数进行模拟，如下图 3 所示。

$$\mu = c \cdot e^{-a \cdot v_s} - d \cdot e^{-b \cdot v_s} \quad (12)$$

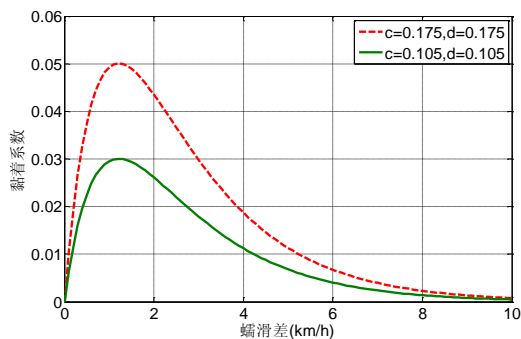


图 3 模拟黏着系数与蠕滑差的关系

4.2 改进型黏着控制的验证

仿真中采用 CRH2A 的牵引制动特性^[11]，只采用组合校正法进行仿真的结果如图 4、5 所示，其中图 4 为牵引级位转矩指令、黏着控制转矩输出指令、电机转矩输出的对比，图 5 为列车在 50~80s 发生空转时的车速与轮速。

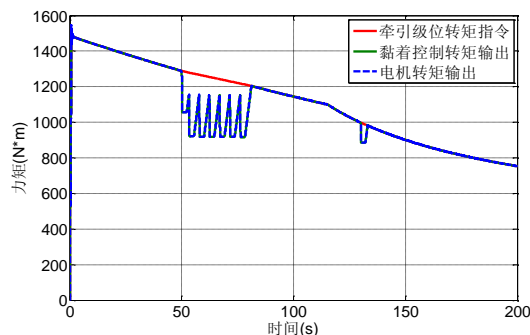


图 4 组合校正法的黏着控制的转矩

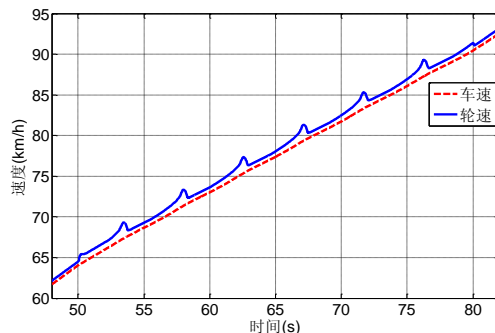


图 5 组合校正法的黏着控制的速度

采用上述改进的黏着控制方法，将组合校正法与最优黏着控制结合，路面黏着状况采用表 1 参数进行模拟。仿真结果如图 6、7 所示。

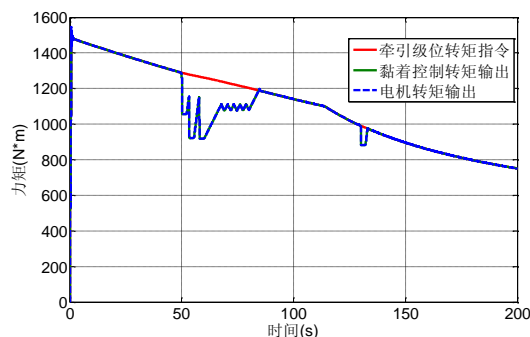


图 6 改进型黏着控制的转矩

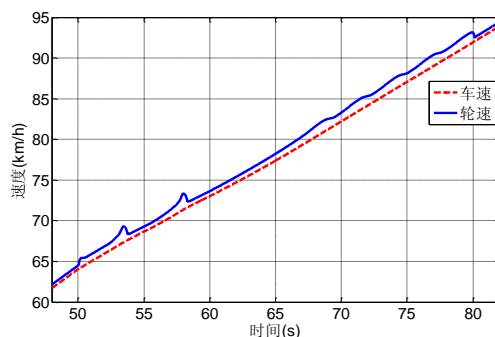


图 7 改进型黏着控制的速度

从图 6 可以看出列车运行在 50s 时由于路面状况发生恶化,空转现象发生,组合校正法动作,采用 $1000\text{N}\cdot\text{m/s}$ 的速度降低牵引力,直到轮速有下降趋势,然后电机转矩指令维持该值 3s 时间,列车没有再次发生滑行,所以以 $100\text{N}\cdot\text{m/s}$ 的速度恢复牵引力,由于在恢复的过程中牵引力再次超过黏着最大值,发生第二次滑行,所有过程与第一次滑行控制相同。当发生了三次滑行后,列车采用最优黏着控制策略,可以看出列车能够维持较高的牵引力。

根据:

$$\bar{F} = \left(\int_{t_1}^{t_2} F dt \right) / (t_2 - t_1) \quad (13)$$

可以求得在 $t_1 \sim t_2$ 的单位时间内的平均牵引力。对比图 4 和图 6,可以求得在发生空转的 30s 时间内采用组合校正法和改进型的控制方法得到的电机输出平均牵引力分别为 $992\text{N}\cdot\text{m}$ 和 $1044\text{N}\cdot\text{m}$,显然改进型的黏着控制优于组合校正法。同时对比图 5 和图 7 可以看到,组合校正法轮速一直发生较大的波动,而改进型黏着控制在前三次波动后,轮速波动很小。

所以改进型黏着控制策略在列车从正常轨面运行到恶劣路况时,不需要司机根据经验来调节列车牵引级位,就能够自动过度到最优黏着控制。实现在正常情况下按列车牵引级位运行,在黏着状态恶化时采用最优黏着控制,不需要牵引级位的调整,并发挥较大的牵引力。

5 结论

本文基于列车动力学模型建立了黏着系数观测理论,并利用最小二乘法计算黏着系数对蠕滑差的导数;针对轨面黏着状态正常下不需要最优黏着控制,采用列车牵引级位指令牵引力;在轨面状态恶化情况下,采用最优黏着控制,为了避免从正常轨面运行到恶化的轨面的带来的牵引级位调整,提出了基于组合校正法和最优黏着控制结合的黏着控制策略;基于动车组 CRH2A 实车参数,进行了 MATLAB 仿真研究,验证了改进型的黏着控制方法。

参考文献

[1] 陆峰,杨中平. 牵引电机负载模拟系统的转矩控制

方法[J]. 电气传动, 2010, 40(12): 52-56.

- [2] Kiyoshi Ohishi, Yasuaki Ogawa. Adhesion control of electric motor coach based on force control using disturbance observer [J]. *Advanced Motion Control*, 2000, 10(4): 323-328.
- [3] Hideo Sado, Shin-ichiro Sakai, Yoichi Hori. Road condition estimation for traction control in electric vehicle[J]. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1999, 2(21): 973-978.
- [4] 陈哲明, 曾京, 罗仁. 列车牵引粘着控制及其仿真[J]. *现代制造工程*, 2009, (6): 8-12.
- [5] Tadashi Hata, Satoshi Kadowaki, Norifumi Iida. Anti-slip re-adhesion control based on speed sensor-less vector control and disturbance observer for electric multiple units, Series 205-5000 of East Japan Railway Company[J]. *Industrial Technology*, 2003, 2(4): 772-777.
- [6] 廖双晴, 肖建, 黄景春. 机车黏着控制方法的研究现状综述[J]. *铁道机车车辆*, 2007, 27: 39-42.
- [7] Atsuo Kawamura, Keiichi Takeuchi, Takemasa Furuya. Measurement of the tractive force and the new adhesion control by the newly developed tractive force measurement equipment[J]. *Power Conversion Conference*, 2002, 2(2): 879-884.
- [8] Atsuo Kawamura, Takemasa Furuya. Maximum adhesion control for Shinkansen using the tractive Force Tester [J]. *Industrial Electronics Society*, 2002, 1(2): 567-572.
- [9] 刘杰, 石高峰, 蔡华斌. 电力机车粘着控制技术的相关问题及其研究现状[J]. *自动化信息*, 2010, (5):44-46.
- [10] 谷扬心. 高速列车制动力再分配方法的研究[D]. 北京交通大学硕士毕业论文, 2010.5.
- [11] 张曙光. CRH2A 型动车组(中国高速铁路技术丛书/和谐号 CRH 动车组技术系列)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.

作者简介

秦金飞 男, 1989 年生, 在读硕士研究生, 主要从事高速列车牵引传动系统的研究。