

地铁列车特殊线路采用小制动控制应用分析

何玉琴¹, 张勇¹, 张潜²

(1. 南京地铁建设有限责任公司 系统设备处, 江苏 南京 210017;
2. 中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京 210031)

摘要: 针对特殊轨道线路条件, 从粘着需求、控制方式、信号来源、限速值以及逻辑电路等方面阐述了小制动控制策略的应用。通过分别对采用纯空气制动和纯电制动模式的可行性及可靠性进行详细的理论分析, 说明小制动控制策略的合理和有效。

关键词: 特殊线路; 粘着; 制动控制; 限速; 地铁列车

中图分类号: U231

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.06.024

Application Analysis of Small Braking Control for Subway Train Special Line

HE Yuqin¹, ZHANG Yong¹, ZHANG Qian²

(1. Facility Division, Nanjing Metro Construction Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210017, China;
2. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210031, china)

Abstract: In view of the special track conditions, the application of the small braking control strategy was expounded from adhesive demand, control mode, the signal source, the speed limit value and logic circuit. With a detailed analysis of the feasibility and reliability of using pure air brake and pure electric braking mode, the small braking control strategy was indicated be reasonable and effective.

Keywords: special line; adhesive; braking control; speed limit; subway train

0 引言

我国城市轨道交通发展迅速, 地铁项目将越来越多, 城市拆迁阻力也将越来越大, 将会对轨道线路条件带来复杂多变的挑战。不同的线路条件对列车运行有不同的要求, 常见的线路条件有坡道、曲线、隧道、高架以及组合线路等等。本文旨在阐述如何确保在雨雪、霜冻等恶劣天气条件下列车以人工驾驶模式能安全地通过特殊的组合线路。

1 特殊线路条件

以南京地铁宁和城际项目为例, 该项目车辆 6 辆编组 (4 动 2 拖)、运营速度为 100 km/h, 正线正常运行中有一段长 507 m、坡度为 34.8‰ 的露天下坡线路, 在天下坡线路的末端设有半径 R 为 500 m 的曲线, 与

34.8‰ 下大坡道相连的是 13.546‰ 的下坡道, 该坡道结束后接 $R350$ 小曲线, 如图 1 所示。

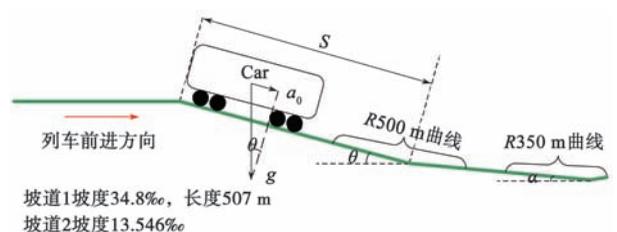


图 1 特殊组合线路示意图

从图 1 可以获知, $S=507\text{m}$, $R=500\text{m}$, $\tan\theta=0.0348$, 列车因自身重力导致的下坡加速度为 0.34 m/s^2 。

2 限速并施加小制动控制策略分析

为了确保列车运行安全, 必须保证列车在进入与离开 $R500\text{ m}$ 曲线时列车速度均不应高于 75 km/h ^[1], 进入 $R350\text{ m}$ 小曲线时速度不超过 60 km/h 。由于列车正常

运营速度为 100 km/h, 所以在进入大坡道前需提前限速或者在坡道上时施加制动。

经分析, 在长大坡道上, 列车因自身重力导致的加速度为 a_0 , 即使列车限速至 0 km/h 进入大坡道区, 若不施加制动, 自由下滑至第一坡道末尾时速度约 67 km/h ($v_i^2=2a_0S$), 至第二段坡道末尾, 速度约为 82 km/h, 超过 R350 m 限速值 60 km/h ($v_i^2-v_0^2=2a_2S$)。故为保证列车安全, 须在坡道上施加制动力。但该路段是露天的, 在雨雪天气下可用粘着比正常气候条件下要小很多, 若施加较大制动, 粘着需求值大于实际可用值时, 车辆将会出现打滑现象, 在坡道上受自身重力影响将会导致列车加速下滑, 有较大的超速风险。

鉴于安装撒沙装置的方案存在提高线路维护成本且使用频率较低以及车辆安装空间不足等客观因素, 该项目不宜采用在车辆上安装撒沙装置以提高轨道粘着的方案。为了降低滑行的风险, 同时避免列车加速下滑带来的安全隐患, 确定了限速并施加小制动的控制策略, 即: 在大坡道上施加不超粘着的微小制动力(为抵消 a_0 , 施加瞬时减速度为 $a_1=a_0=0.34 \text{ m/s}^2$ 的小制动力), 使列车以不超过 75 km/h 和 60 km/h 的匀速分别通过第一、第二段坡道, 离开坡道后, 解除该小制动。

2.1 最大可利用粘着分析

根据中国和日本对湿轨状态下的粘着研究^[2], 采用潮湿表面粘着系数公式 $\mu=13.6/(\text{运行速度}+85)$ 可知, 列车速度为 75 km/h 时的湿轨粘着系数最小为 0.085, 列车速度为 60 km/h 时的湿轨粘着系数最小为 0.094, 因此, 在任何工况下, 确保不发生滑行的最大可利用粘着系数为 0.085, 如果所需粘着系数不高于此值, 可确保车辆运行安全。

2.2 制动方式分析

正常情况下, 列车在平直道上施加常用制动时, 为充分利用电制动、降低闸片磨耗, 通常优先使用电制动, 但纯电制动对粘着的需求较高, 超粘着的风险较大。

下面分别计算纯空气制动和纯电制动这 2 种制动方式各车所需要的粘着系数。

根据该项目车辆实际称重数据可知: AW0 (列车空载载客) 时, 列车载重为 201 160 kg; AW2 (列车额定载客) 时, 列车载重为 291 760 kg; AW3 (列车超员载客) 时, 列车载重为 328 960 kg。由 $F_{\text{全车}}=m_{\text{全车}} \times a_1$ 可得各载荷整车所需小制动力 (相比整车载重, 转动惯量大小可忽略不计): AW0 时小制动力为 68 394 N; AW2 时小制动力为 99 198 N; AW3 时小制动力为 111 846 N。

为达到等磨耗效果, 采用制动力平均分配的原则, 根据 $\mu=F_{\text{单车}}/(m_{\text{单车}} \times g)$ (μ 为粘着系数), 计算出各车制动所需粘着。

①纯空气制动时, 可用粘着为 6 个车, 不同载重下的各车的粘着需求分配如表 1。

表 1 纯空气小制动时各车粘着需求分布

载荷	A	B	C	C	B	A
AW0	0.035 0	0.034 3	0.035 0	0.035 0	0.034 3	0.035 0
AW2	0.035 4	0.034 2	0.034 5	0.034 5	0.034 2	0.035 4
AW3	0.035 5	0.034 1	0.034 5	0.034 5	0.034 1	0.035 5

由表 1 可知, 纯空气制动所需理论上的最大粘着约 0.036, 但考虑到制动缸压力存在 $\pm 0.015 \text{ MPa}$ ($\pm 0.15 \text{ bar}$) 的固有偏差, 根据图 2 所示的单个制动缸压力与整车制动力间的换算函数曲线 (由 KNORR 公司提供), 可以分析出制动缸压力偏差引起的整车制动力、瞬时减速度、每辆车粘着需求的偏差, 对应的参数详见表 2。

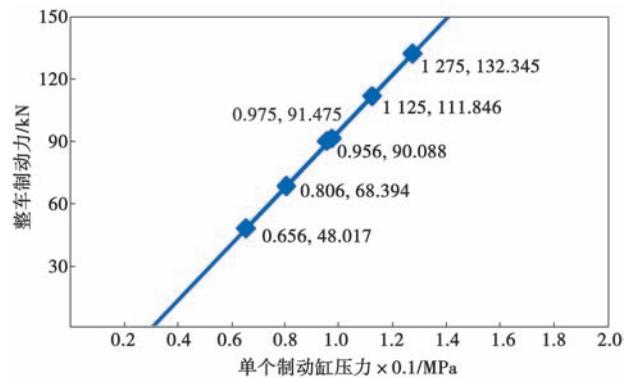


图 2 整车制动力与单个制动缸压力的换算曲线

表 2 不同载荷下制动缸压力偏差对应的参数

AW3 载荷下对应参数			
F_0 最低: 0.975	F 最小: 91.475	a_1 : 0.278	μ : 0.028
F_0 : 1.125	F : 111.846	a_1 : 0.340	μ : 0.035
F_0 最高: 1.275	F 最大: 132.345	a_1 : 0.402	μ : 0.041
AW0 载荷下对应参数			
F_0 最低: 0.656	F 最小: 48.017	a_1 : 0.239	μ : 0.025
F_0 : 0.806	F : 68.394	a_1 : 0.340	μ : 0.037
F_0 最高: 0.956	F 最大: 90.088	a_1 : 0.412	μ : 0.046

注: F_0 : 制动缸压力, 10^{-1} MPa ; F : 整车制动力, kN; a_1 : 瞬时减速度, m/s^2 ; μ : 粘着系数。

由表 2 可知, 在 AW0 载荷下制动缸压力偏大时, 粘着需求值最大 (0.046), 仍不超过许用粘着系数即湿轨最大可用粘着系数 0.085。

②纯电制动时, 可用粘着为 4 个动车, 不同载重下的各动车的粘着需求分配如表 3。

表 3 纯电小制动时各车粘着需求分布

载荷	A	B	C	C	B	A
AW0	0	0.051 5	0.052 3	0.052 3	0.051 5	0
AW2	0	0.051 2	0.051 8	0.051 8	0.051 2	0
AW3	0	0.051 2	0.051 8	0.051 8	0.051 4	0

由表 3 可知, 纯电制动时所需最大粘着系数约 0.053, 也小于许用粘着系数 0.085。

综上所述, 在长大坡道区间采用纯空气或者纯电制动的小制动方式理论上均可满足线路粘着条件要求。本着充分利用电制动、降低闸片磨耗的原则, 在长大坡道区间可采用电空混合形式的小制动控制方案, 从

而和线路其他区段保持一致, 即: 优先使用纯电制动, 当电制动不足时, 不足的部分由空气制动进行全车平均分配补偿。防滑保护策略也和线路其他区段一致, 即: 当电制动检测到动车车轮发生滑行时, 将给空气制动控制单元发送滑行信号, 空气制动控制单元监测该滑行信号持续的时间, 当持续时间超过 3 s 将切断电制动, 由空气制动系统进行防滑保护。

2.3 限速值的确定

基于上述分析, 在长大坡道上采用电空混合小制动控制方式, 理论上仅需要在长大坡道入口处限速 60 km/h, 在长大坡道上施加小制动, 方可保证列车匀速通过大坡道路段。为了保证足够的安全余量, 需要考虑最严苛的工况对列车速度的影响, 从而反推出进入坡道的限速值。

①考虑电制动滑行导致的速度增加量: 当列车在长大坡道上出现电制动滑行且无法及时纠正 (不超过 3 s) 时, 考虑最差情况, 即列车在电制动滑行的这 3 s 时间内无制动力施加, 处于自由下滑状态, 此时的下滑加速度为 a_0 , 3 s 内列车速度增加值 Δv_1 为 3.67 km/h ($\Delta v_1 = a_0 t$)。

②考虑施加纯空气制动时制动缸压力偏小使得瞬时减速度偏小, 列车加速下坡导致的列车速度增加量: 由表 2 可知, AW0 载重时, 偏差引起的最小瞬时减速度为 0.239 m/s^2 ($< a_0$, 列车将加速下坡), 此时实际加速度 $a_2 = a_0 - 0.239 = 0.101 \text{ m/s}^2$, 根据公式 $v_t^2 - v_0^2 = 2a_0 S$ (v_t 为 34.8% 坡道终点处列车的速度 75 km/h; S 为列车的行程) 推导出 $\Delta v_2 = v_t - v_0 = v_t - \sqrt{v_t^2 - 2a_2 \cdot S}$, 由此可知, S 越大, Δv_2 越大, 故取 $S = 507 \text{ m}$ 时, 可得 Δv_2 最大为 9.5 km/h。

综上, 雨雪天气下, 为了充分保证坡道上的行车安全, 取 Δv_1 和 Δv_2 的和作为坡道上速度的增量 Δv 的最大值, 即 13.11 km/h, 从而确定入口处的限速值 $v_0 \leq v_t - \Delta v = 75 - 13.11 \approx 62 \text{ km/h}$, 即: 列车应以不超过 62 km/h 的起始速度驶入坡道, 方可保证进入坡道末端 R500 m 小曲线段时的速度不超过 75 km/h。

由于正常运营时列车进入小曲线路段前也需要限速至 75 km/h, 与入坡道时限速引起的运营时间差别不会太大, 所以入坡道时限速 62 km/h 对列车运营的影响在可接受的范围内。进入第二坡道时由于坡道较小可减速通过。

2.4 坡道起点及终点位置信号的来源

经过对轨道交通技术及市场现状的比较分析, 采用“电子标签”装置获得坡道的地点和终点位置信

号, 成本低、效用高。详细方案见图 3。

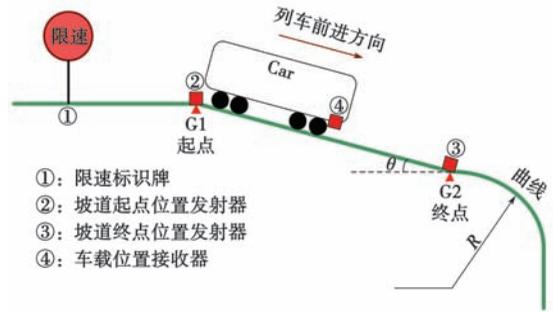


图 3 “电子标签”装置方案示意图

如图 3 所示, 在列车的头部底架部位安装车载位置接收器, 在坡道的起点、终点安装地面位置发射器, 当列车从左向右行驶时, 底架的车载位置接收器将能接收到地面发射器 G1 (起点位置)、G2 (终点位置) 发送的位置信号, 并输出硬线信号 S1 给车辆。

当列车根据限速牌指示提前限速后运行至坡道区段时, S1 信号输出为高电平, 车辆小制动控制电路通过该信号禁止牵引, 并施加微小制动。当列车离开该坡道运行时, S1 信号输出为低电平, 车辆小制动控制电路将会被复位。

2.5 小制动控制电路设计及接口分析

如图 4 所示, 经过限速后的列车行驶至坡道起点位置时, 车载接收器接收到地面发射器输出位置信号, 并将输出信号 S1 置为高电平 (持续至坡道终点), 从而使大坡道列车线带电并激活大坡道继电器 RPR, 继电器 RPR 的辅助触点将牵引列车线断开 (高有效)、制动列车线激活 (低有效)。当列车网络接收到大坡道列车线信号后, 结合牵引列车线和制动列车线状态, 通过 MVB 总线输出目标减速度为 a_1 的模拟量参考值信号给牵引和制动控制单元, 由牵引和制动系统根据参考值及指令信号施加电空混合小制动。当车辆到达大坡道终点时, S1 恢复为低电平, 车辆小制动控制电路失效, 小制动解除。

列车网络实时监视车载位置接收器的工作及故障

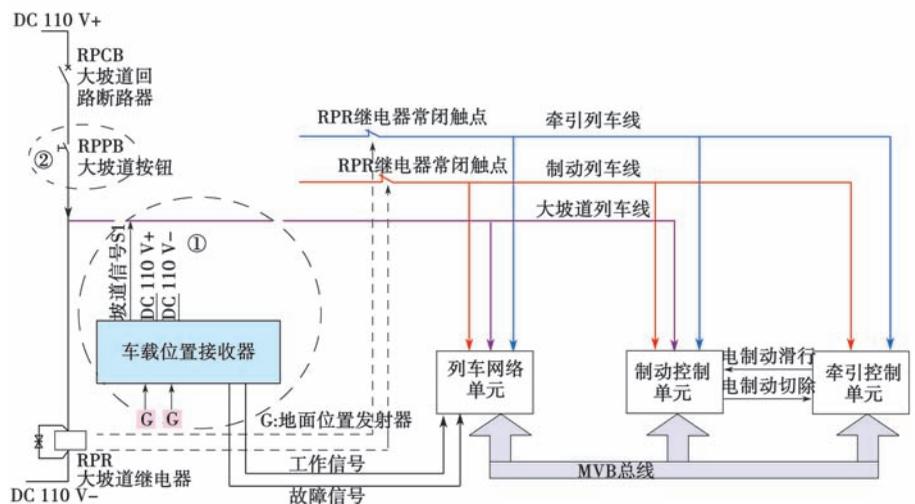


图 4 车辆小制动控制电路

(下转第 120 页)