

# 地铁列车空转打滑对信号系统控车性能的影响及处理措施

梁宇 张成国 汤梨园 赵宏伟

(卡斯柯信号有限公司, 200436, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 从地铁列车空转打滑的现象出发, 基于力学模型, 简述了空转打滑常用的判定方法和信号系统对其的处理措施。对加、减速时列车的定位误差进行了分析, 采用 Matlab 软件分析了列车空转打滑时打滑率和紧急保障制动率对行车的影响。结果表明, 通过地铁信号系统准确判定空转打滑并调整保障制动率, 可以达到合理控车的目标。

**关键词** 地铁; 列车; 信号系统; 空转打滑; 处理措施

**中图分类号** U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.037

## Influence of Metro Train Idling and Sliding on Signaling System and Treatment Measures

LIANG Yu, ZHANG Chengguo, TANG Liyuan, ZHAO Hongwei

**Abstract** Starting from the phenomenon of metro train idling and sliding, based on mechanical model, the common idling-sliding determination methods and the processing measures of the signaling system are described. The positioning error of the train during acceleration and deceleration is analyzed, and Matlab software is used to analyze the influence of the sliding rate and emergency guarantee braking rate on train running when the train is idling and sidling. The results demonstrate that, by metro signaling system accurately determining idling/sliding and adjusting guarantee braking rate, the goal of reasonable train control can be obtained.

**Key words** metro; train; signaling system; idling and sliding; treatment measures

**Author's address** CASCO Signal Ltd., 200436, Shanghai, China

地铁正朝着安全、高效、环保和舒适的方向快速发展, 不断促使信号与车辆等各专业密切配合、协同前进。信号系统对于复杂条件下列车的控车性能要求越来越高, 尤其是涉及行车安全的场景需要提前预判。列车空转滑行使导致车轮踏面擦伤,

如不控制损伤区域会持续恶化, 造成传动装置和走行部件的损坏<sup>[1]</sup>; 同时车轮和钢轨都会形成磨损产生强烈的、有冲击性的噪声, 引起列车车身的剧烈振动, 使得乘客乘坐舒适度下降<sup>[2]</sup>。列车空转打滑特别严重时, 还会使得线路失稳、列车降速、胀轨、出现冒进信号等事故。因此, 信号系统对于列车空转打滑的研究特别重要。

本文以雨雪天气条件下冰雪或浮锈、油污覆盖轨道等因素导致地铁列车出现空转打滑作为典型案例, 从信号系统的角度出发, 讨论列车空转打滑的判定与处理措施。

## 1 空转打滑力学模型与判定

列车牵引力大于轮轨间的最大静摩擦力时, 轮轨间的接触状态为悬空。当车轮的转动速度超过列车运行速度时, 列车就发生了“空转”现象<sup>[2]</sup>。当列车制动力大于轮轨间的黏着力时, 列车轮对处于滑行状态。在车轮不转动的情况下且被列车强行拖运一段距离, 即列车车轮速度的计算值小于列车实际运行速度时, 列车发生“打滑”现象<sup>[3]</sup>。

### 1.1 列车空转打滑力学模型的建立

在列车自重作用下, 轮轨的接触面会发生弹性变形。其中, 一部分弹性形变反作用转换为切向力  $F_T$ , 即黏着力; 另一部分弹性形变仅影响法向力。驱动轮所受的切向力推动轮子沿着轨道运行, 称为蠕滑<sup>[4]</sup>。在列车加速和减速过程中, 黏着力与法向力  $F_N$  的比值, 称为黏着系数。通过计算, 得到打滑率  $\lambda$ :

$$\lambda = (\nu - \omega\gamma) / \nu \quad (1)$$

式中:

$\omega$ ——角速度;

$\gamma$ ——半径;

$\nu$ ——列车实际速度。

图 1 为列车打滑率-黏着力关系曲线。由图 1 可见,随着  $F_T$  增大,接触面的滑动区增加及黏着区减小,导致车轮出现滚动和滑行,直至出现纯滑行现象。为最大程度利用轮轨黏着来得到列车最大的驱动力,信号系统需将打滑率控制在黏着峰顶附近,在打滑区内,远离非稳定区<sup>[5]</sup>。

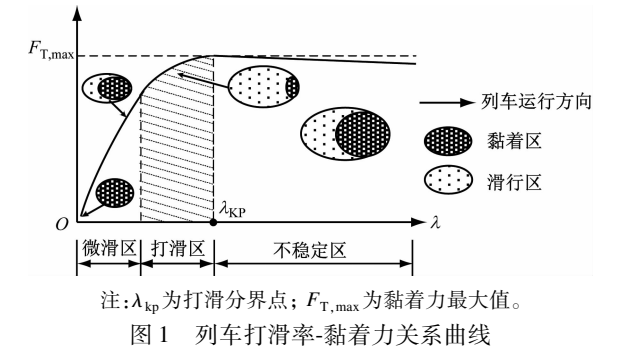


图 1 列车打滑率-黏着力关系曲线

Fig. 1 Relationship curve of train creep rate and adhesion force

根据 GM(通用汽车公司)开展的中低速列车在不同轨道上的运行试验,得出黏着特性数据。数据表明,在湿轨表面最大黏着出现在打滑率约为 15% 时。欧洲铁路研究所的研究报告显示,当配置防滑系统的车辆打滑率约为 15% 时,黏着系数达到最大值。地铁车辆大多采用典型值 15% 作为最大打滑率。

### 1.2 列车空转打滑的判定方法

列车在运行过程中充分利用黏着的同时,如何精确判定列车空转打滑至关重要。目前,列车空转打滑的判断方法主要有速度差、加减速速度、滑移率、减速度微分等方法,且上述方法中大多以固定的阈值为标准作为检测方法<sup>[6]</sup>。其中较为常用的空转滑行检测方法有加(减)速度检测法、速度差检测法和滑行率检测法<sup>[7]</sup>,具体见表 1。

表 1 列车空转打滑检测方法统计表

Tab. 1 Statistics of the detection method of train idling and sliding

传感器类型	检测方法	传感器及其工作原理	可靠性	工程应用
轮轴速度传感器	加速度阈值法	单个传感器,测量轮对速度变化率并取阈值	可靠性高、精度较高,忽略微弱空滑	广泛应用于信号系统
轮轴速度传感器	速度差检测法	两个及上传感器,通常以车轮速度和车速的差值超过设定阈值来判断是否打滑	可靠性较高,微弱空滑难以检测	较多应用于打滑控制系统
轮轴速度传感器	打滑率监测法	两个及上传感器,通过检测轮轨间的蠕滑率来判断是否打滑	可靠性高、精度高,低速易放大微小滑行	一般应用于打滑控制系统
轮轴速度传感器	加速度变化量法	单个传感器,测量轮对加速度的微分值	可靠性一般、精度低,传感器含噪声需进行滤波,车速较低存在漏判	少有应用
雷达	雷达测速法	至少 1 个雷达,安装角度、反射系数等需校正	低速多普勒效应不明显,可靠性差,高速时精度高	防撞系统和信号系统均开始配置
加速度计	加速度计测量法	至少 1 个加速度计,采用加速度数值	需结合初始速度输入进行积分换算,可靠性精度取决于初始速度输入和积分时间	试验探索中

## 2 列车空转打滑对于信号系统的影响

在地铁线路上铺设定位应答器,列车经过定位应答器时会被触发从而产生报文,车载信标天线通过获取的报文得到列车的绝对位置。列车实时定位计算需要考虑打滑,打滑率不仅影响信标布置,更重要的是影响保障制动率和定位误差。

### 2.1 列车空转打滑对保障制动率的影响

保障制动率是信号系统重要的输入参数,它是列车在预计可能出现的环境条件下和最不利的制动设备故障模式下,在轨道水平切向上能够实现的

最小紧急制动率<sup>[7]</sup>。列车发生打滑时,车辆的制动能力下降,紧急制动率随之降低。此时需调整信号侧对应的控车策略和紧急制动曲线,目的在于使列车平缓变速时保持安全间隔,同时避免车速过高或者防护距离不足等引起的紧急制动。

因此,对于保障制动率,信号系统需要车辆的防滑系统配合,合理利用轮轨黏着,降低实际的保障制动率,使其值与理论值相贴近,避免列车打滑时保障制动率偏离过大。同时针对保障制动率,信号系统可根据列车位置及电子地图定义的干轨与湿轨分别进行取值。例如,雨雪霜冻轨道条件极易

导致列车空转打滑,因此,列车在露天区域及其邻近区域的轨道建议使用湿轨保障制动率值,而地下区域的轨道则使用干轨保障制动率值。

## 2.2 列车空转打滑对定位误差的影响

信号系统采用的光电传感器通常安装于车轴上,发送器持续发光,编码盘的光栅随车轴同步转动,接收器通过将感应投过光栅的光信号转换成对应的脉冲信号来实现对列车的定位计算。每个齿轮脉冲内列车的走行距离  $d_{\text{cog}}^{[9]}$  为:

$$d_{\text{cog}} = (\pi D)/N \quad (2)$$

式中:

$D$ ——车轮直径;

$N$ ——车轮旋转 1 周时,速度传感器产生的脉冲数。

定义车辆最大轮径为  $D_{\text{max}}$ 、最小轮径为  $D_{\text{min}}$ ,则相应轮径单个齿轮脉冲走行的最大距离为  $d_{\text{cog,max}}$ ,最小距离为  $d_{\text{cog,min}}$ 。由于轮径变化导致列车位置不确定,定义轮对校准不确定比率  $R_{\text{Cal}}$  为:

$$R_{\text{Cal}} = d_{\text{cog,max}}/d_{\text{cog,min}} - 1 \quad (3)$$

当列车经过校准信标且校准条件满足后,信号系统导出编码里程计的校准常数,该值将作为标准车轮长度,并应用于列车车轮定位的计算。否则,CC(车载控制器)系统采用车轮轮径最大值参与列车定位计算。车轮正常运行距离  $S$  为:

$$S = (\pi DX)/n \quad (4)$$

式中:

$X$ ——编码里程计读取的脉冲总数;

$n$ ——车轮圈数,与脉冲数有关。

### 2.2.1 列车加速运行时的定位误差

列车加速运行时, $S$  的计算需要考虑列车发生打滑时的最大运行距离。最不利条件下,列车运行的最大距离需考虑列车最大运行滑移补偿和校准不确定值。列车加速时,编码里程计安装在制动轴上,不考虑列车空转,同时加速过程也不会出现打滑,因此滑移补偿贡献为 0,即列车加速时未打滑。列车加速时的最大定位误差  $S_{\text{Acc}}$  计算需考虑校准不确定率,则:

$$S_{\text{Acc}} = S(1 + R_{\text{Cal}}) \quad (5)$$

### 2.2.2 列车减速运行时的定位误差

信号系统通常将编码里程计设置在车辆制动轴上,故列车减速运行时滑移补偿不为零。列车减速运行时,在最不利的条件下,列车发生打滑时的最大运行距离与其正常运行距离有一定的差值,该

差值需考虑列车打滑及校准不确定值。通过打滑率、打滑校准及车轮校准不确定率,得到列车减速时的最大定位误差  $S_{\text{Dec}}$ 。

$$S_{\text{Dec}} = S[\lambda(1 + R_{\text{Cal}}) + R_{\text{Cal}}] + S \quad (6)$$

上述对于列车加速和减速时  $S_{\text{Dec}}$  的精确控制直接关系到行车安全。因此,信号系统应避免因定位误差导致的列车超出定位范围而触发紧急制动等危险场景。

## 3 列车空转打滑仿真分析

以成都地铁 17 号线黄石站—市五医院站高架区间为依托,采用 MATLAB 软件建模,对列车空转打滑进行仿真分析。仿真中采用列车运行速度较大的配套的轨道参数和车辆参数,如下:

1) 轨道参数:轨道最大 ATO 速度为 140 km/h,但是考虑到道岔扣件限速,最大 ATP 速度需为 130 km/h;12<sup>#</sup>道岔直向限速 160 km/h、侧向限速 50 km/h,9<sup>#</sup>道岔直向限速 120 km/h、侧向限速 35 km/h,站台限速 85 km/h;站台道岔区及折返区坡度为 29‰,站间最大坡度为 5‰。

2) 车辆参数:车长 187.23 m,旋转质量系数为 8.8%,空转/打滑系数为 15%,牵引切断时间为 0.3 s,制动施加时间为 1.8 s,最大牵引加速度为 1.18 m/s<sup>2</sup>,最大减速度为 -1.2 m/s<sup>2</sup>,紧急保障制动率为 1 m/s<sup>2</sup>。

### 3.1 打滑率对列车运行的影响

对不同打滑率下,列车在黄石站、市五医院站及其高架区间的运行进行仿真分析。

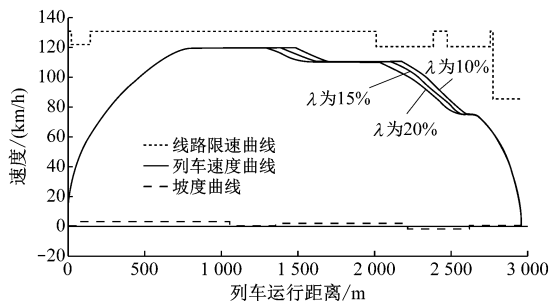
根据列车安全制动模型<sup>[10]</sup>,结合图 2,可以得出:紧急保障制动率不变的条件下,打滑率越小,ATO 控制列车运行越平稳;在降速制动时,列车也不需要提前减速;ATO 控车速度更接近最大 ATP 速度时,行车效率得以提高。打滑率过大会导致列车提前降速来应对制动,行车效率较低。因此建议轨道和车辆尽可能降低打滑率,这有利于信号系统平稳控制车速,从而提高运营效率。

### 3.2 保障制动率对列车运行的影响

打滑率为 15%,保障制动率分别为 0.88、0.78、0.70 的条件下,列车空转打滑仿真结果,如图 3 所示。

由图 3 可见,打滑率一定的条件下,紧急保障制动率越大,表明车辆的制动能力越好,同时信号系统对应的控车速度亦得到了提高。由此可见,列车

紧急保障制动率的提高,有利于信号系统控制车速,在一定程度上亦可提高运营效率。



注:0~80 m 时线路坡度为 0; 80~1 060 m 时线路坡度为 -29‰; 1 060~1 360 m 时线路坡度为 -3.2‰; 1 360~2 220 m 时线路坡度为 -17‰; 2 220~2 620 m 时线路坡度为 +25‰; 2 620~2 965 m 时线路坡度为 0; 图 3、图 4 同。

图 2 不同打滑率时的列车运行速度-保障制动率关系曲线  
Fig. 2 Relationship curve of rain running speed-guarantee braking rate at different sliding rates

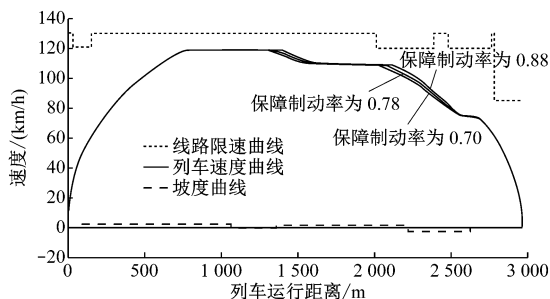


图 3 不同保障制动率时列车运行速度-距离关系曲线  
Fig. 3 Relationship curve of train running speed and distance at different guratantee braking rates

### 3.3 保障制动率和打滑率对列车运行的影响

根据仿真建模,对比分析列车打滑控制较差与控制正常的情况,见图 4。

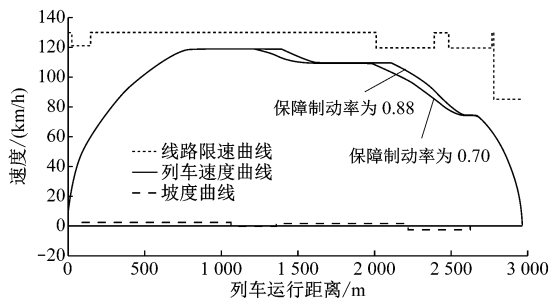


图 4 不同打滑率时列车运行速度-距离关系曲线  
Fig. 4 Relationship curve of train running speed and distance at different sliding rates

由图 4 可见,列车打滑严重且制动能力较差,使得信号系统控车速度降低,影响了行车效率,严重

时可能导致前后车追踪间隔失控。

计算列车运行距离时,信号系统如检测到打滑,会进行空转打滑的补偿。当 CC(车载控制器)检测到列车出现空转打滑持续一段时间后,CC 将判断列车丢失定位并触发 EB。空转打滑现象是车辆状况和轨道条件等因素综合产生的,影响信号定位误差计算补偿及空滑状态下的控车策略。

## 4 结语

1) 列车空转打滑现象的控制是目前车辆和信号专业的难点,直接关系到列车的安全控制和运行效率。预先识别容易打滑区域,提高保障制动率,降低列车空转打滑发生的概率,更加有利于信号系统控车。

2) 建议后续信号系统可根据列车是否打滑来调整保障制动率,与车辆、轨道等专业配合尽量避免长时间持续打滑的场景。

## 参考文献

- [1] 曹小龙,肖家河. 地铁列车空转滑行原因分析及应对措施研究[J]. 机电信息, 2018(21):33.  
CAO Xiaolong, XIAO Jiahe. Research on cause analysis and countermeasures of metro train spinning and sliding[J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(21):33.
- [2] 张大为. 地铁列车空转滑行故障原因及处理措施[J]. 中国高新技术企业, 2017(12):163.  
ZHANG Dawei. Causes and treatment measures of failure of metro train slipping and sliding[J]. China Hi-Tech Enterprises, 2017(12):163.
- [3] 赵磊,张小林. 列车测速定位误差的仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014(3):35.  
ZHAO Lei, ZHANG Xiaolin. Error simulation in train speed and position detection[J]. Urban Mass Transit 2014(3):35.
- [4] 康成伟,赵志强. 动车组防空转、防滑控制技术及策略选取浅析[J]. 铁道车辆, 2013(7):31.  
KANG Chengwei, ZHAO Zhiqiang. Analysis of EMU anti-sliding control technology and strategy selection[J]. Rolling Stock, 2013(7):31.
- [5] VAN TU PHAM. 地铁列车空转打滑智能检测方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2018.  
VAN TU PHAM. Research on intelligent detection method for train slide/slip[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.
- [6] 蔡焜,王长林,林颖. 基于多传感器的列车空转及滑行检测与校正方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015(1):22.

(下转第 199 页)