

# 基于供电能力的行车动态卡控方法

刘瑞娟<sup>1</sup> 林立<sup>2</sup> 何绪兰<sup>2</sup>

(1. 深圳地铁建设集团有限公司, 518038, 深圳; 2. 卡斯柯信号有限公司, 200071, 上海)

**摘要** [目的] 在城市轨道交通线路中, 牵引供电设施支持列车运行的数量具有上限。当前续列车故障或者繁忙线路列车追踪密度过高时, 可能导致供电臂负荷电流过大而引起电力开关跳闸, 从而严重影响运营。传统的 ATS (列车自动监控) 系统无法智能化掌握供电系统的实时运行情况, 需研究供电能力和行车的关系以实现行车动态卡控。[方法] 基于供电臂供电能力分析以及列车运行曲线, 提出一种行车动态卡控方法。通过对信号、供电、车辆和轨道等多专业数据进行融合分析, 并结合大数据电流曲线预测模型, 实现对供电负载能力的动态监测与预测。将预测的电流曲线与列车 ATO (列车自动运行) 运行曲线有机结合, 实时调整进入当前供电臂运行的列车数, 实现动态卡控列车运行。该方法在深圳地铁 16 号线上进行了实例验证。[结果及结论] 基于供电能力的行车卡控方法通过预测列车所需取流动态调整列车运行, 可有效避免因行车导致过负荷引起的供电系统跳闸故障, 在保证运营效率的同时, 提高了线路运营的安全性。

**关键词** 城市轨道交通; 供电臂; 供电能力; 行车动态卡控  
**中图分类号** U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.062

## Research on Dynamic Train Operation Control Based on Power Supply Capacity

LIU Ruijuan<sup>1</sup>, LIN Li<sup>2</sup>, HE Xulan<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Metro Construction Group Co., Ltd., 518038, Shenzhen, China; 2. CASCO signal Co., Ltd., 200071, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] In urban rail transit lines, the number of traction power supply facilities supporting train operation has an upper limit. Preceding train breakdown or overhigh train chasing density on busy routes may possibly result in overload current of the feeding section and power switch trip, seriously affecting train operation. The traditional ATS (automatic train monitoring) system is unable to intelligently control the real-time operation of the power supply system. Therefore, it is necessary to study the relation between power supply capacity and train operation to realize dynamic train operation control.

[Method] Based on power supply capacity analysis of the feeding section and the train running curve, a dynamic train

operation control method is proposed. Through fusion analysis of multi-disciplinary data such as signal, power supply, vehicle and track, and in combination with big data current curve prediction model, the dynamic monitoring and prediction of power supply load capacity is realized. The dynamic train operation control is achieved by combining the predicted current curve and the train ATO running curve, and adjusting the number of trains running in the current feeding section. The above method is verified as an example on Shenzhen Metro Line 16. [Result & Conclusion] The dynamic train operation control method based on power supply capacity dynamically adjusts the train operation by predicting the required current for trains, and can effectively avoid the power supply system tripping fault caused by the overload of train operation, improve the line operation safety while ensuring the operation efficiency.

**Key words** urban rail transit; feeding section; power supply capacity; dynamic train operation control

一些建设较早的受制于供电负载设计限制的城市轨道交通线路, 或者新的全自动运行线路, 由于列车运行密度很高, 均偶有发生进入一个供电臂的列车数量超过了牵引供电设施所能支持的列车数量<sup>[1]</sup>, 导致因负荷电流过大而引起电力开关跳闸。既有的 ATS (列车自动监控) 系统无法建立供电和行车的关联关系, 因此针对此类情况无法有效卡控列车运行<sup>[2-3]</sup>。本文提出行车动态卡控方法, 通过实时采集供电负荷及车辆取流情况, 结合 ATO (列车自动运行) 曲线及大数据历史电流曲线预测模型, 预测未来一定时间 (比如 1 min) 内供电臂可能的负荷情况, 实时动态卡控当前供电臂上运行的列车数, 防范因过多列车拥挤在同一供电臂内而引发电力跳闸故障。

## 1 行车动态卡控总体思路

行车动态卡控总体思路可以简略概要为数据采集、智能分析和决策控制。数据采集完成所需数据的收集, 主要包括以下 4 个方面的数据:

1) 供电数据。包括直流母线电压、接触网开关及闸刀状态、直流馈线开关电流、直流馈线开关过流保护定值、接触网公里标等数据。

2) 车辆数据。包括车辆取流、车辆称重等数据。

3) 信号数据。包括 ATO 运行曲线、信号公里标、列车实时位置、列车当前加速制动状态、运行图等数据。

4) 轨道数据。包括区间长度、坡度、曲率半径等数据。

行车动态卡控整体方案逻辑框架如图 1 所示。

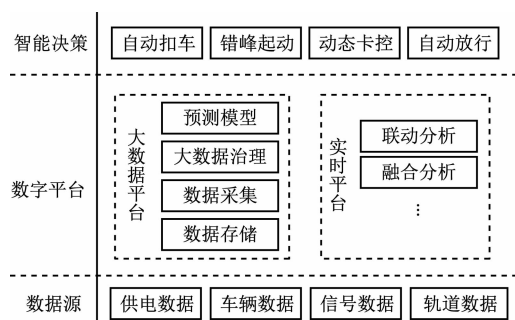


图1 行车动态卡控整体方案逻辑框架

Fig.1 Overall scheme logic framework of dynamic train operation control

智能分析结合供电、车辆、信号和轨道的基础数据,通过专业数据间的逻辑分析及大数据电流曲线预测模型,实现包括直流供电方式的动态分析、列车在具体某个区间不同载荷情况下的取流曲线分析、直流馈线开关的负载能力分析等功能,从而预测绘制某个区间在下一列列车进入该区间后可能的开关电流曲线。

决策控制采用智能分析结果对列车进行控制。当供电臂负荷能力不满足下一列列车进入该供电臂时,系统自动扣车,列车暂缓进入该供电臂;当发生阻塞时,进入该供电臂的列车错时起动,避免列车同时起动,以规避出现瞬时大电流冲击,实现根据供电能力有效进行动态行车卡控,避免可能发生的过流跳闸故障。

## 2 行车动态卡控实现方法

### 2.1 供电系统正常情况下跳闸原因分析

引起供电系统跳闸的原因很多,供电系统本身故障、外回路造成短路以及过负荷等均可能引起跳闸。基于供电能力提出的行车动态卡控方法仅探

讨如何避免因行车过负荷引起的跳闸。行车过负荷引起跳闸的直接原因主要有:

1) 同一供电臂上行驶列车数量过多且同时在加速。

2) 供电方式发生变化(如由双边供电降级为单边供电),或者过流保护定值发生变化,但运行图未随之调整。

3) 双边供电情况下供电臂内列车追踪太靠近一侧开关,由于供电臂电阻关系,会造成靠近一侧的开关电流值较大,而另一侧的开关电流值较小,容易引起靠近一侧的开关过流跳闸。示例如图 2 所示。



注:211、213—开关编号;T001、T002、T003—列车编号;S01—供电臂编号。

图2 列车追踪靠近 211 开关侧电力开关示例

Fig.2 Power switch example in the case of train tracking close to Switch 211

### 2.2 直流供电方式动态分析

通过对直流母线电压、接触网开关及闸刀状态、直流馈线开关电流、直流馈线开关过流保护定值等数据实时监视,对直流供电方式进行实时动态分析,包括判断接触网是否带电、判断当前供电方式(单边、双边以及大双边)、过流保护定值是否调整。

直流供电方式动态分析结果为后续绘制直流开关电流预测曲线提供了必要条件。

### 2.3 列车取流曲线绘制

信号系统中的 ATO 子系统实现列车的自动运行<sup>[4-5]</sup>,控制列车按运行图规定的走行时间行车,自动完成对列车的起动、加速、巡航、惰行、减速和停车的合理控制。区间走行时间误差不大于  $\pm 2\%$ 。因此,运行图基本决定了列车在一个区间按照 ATO 运行曲线正常运行时的列车取流曲线。这个特性为后续绘制直流馈线开关电流预测曲线提供了基础。ATO 运行曲线和列车取流曲线关系如图 3 所示。

实际运行情况往往更复杂。例如:列车称重不同导致列车取流大小有所区别;由于区间阻塞等原因造成列车未按照 ATO 曲线运行,需要对列车取流曲线进行实时绘制以获取更精确的列车取流曲线。

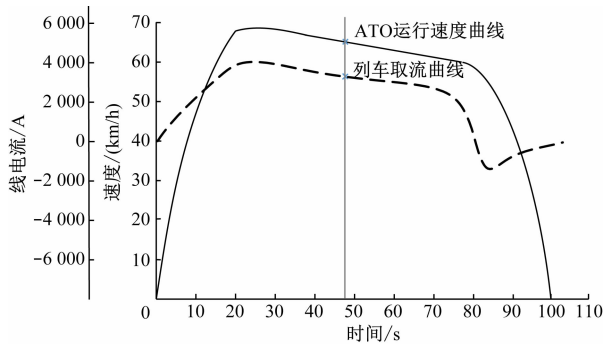


图3 列车ATO运行速度曲线和取流曲线

Fig.3 Train ATO operation curve and current curve

通过 TCMS (列车控制和管理系统) 采集列车实时线电流, 绘制具体某列车在具体某个区间不同称重下的取流曲线。采集值因网络传输因素一般会滞后 3 ~ 5 s, 可利用列车站间运行曲线和取流曲线的对应关系特性进行数据还原。例如, 当牵引切除 3 s 后采集到列车线电流变为 0, 则 3 s 就是滞后时间, 在绘制列车取流曲线时, 按照这个特性进行数据还原。具体滞后时间需在实际工程项目中进行测定。绘制好的列车取流曲线存于历史数据库中。

#### 2.4 直流馈线开关电流曲线预测

直流馈线开关电流值是可以通过 PSCADA (电力监控系统) 监测的, 但电流瞬时变化很大以及时间延迟的特性决定了不能用此数据作为判断是否允许下一列车进入本供电臂的条件。只能通过列车取流趋势预测当下一列车进入本供电臂后, 供电系统是否可能超负荷, 从而决定是否允许下一列车进入本供电臂。

绘制的线路中每列列车的取流曲线会存到大

数据平台, 车辆预测模型将其累计拟合成该列车在该供电臂的列车预测取流曲线。据此, 当列车在即将进入该供电臂或者处于该供电臂的时候, 根据现行 ATO 运行曲线, 去匹配该列车的预测取流曲线, 获取该位置、该列车的预测取流值, 匹配的条件包括车组号相同、运行区间相同、列车站间 ATO 运行曲线基本相同、列车称重基本相同。

根据供电臂内所有列车的预测取流值, 以及即将进入供电臂的列车预测取流值, 可预测供电臂电流曲线, 并预测供电臂具体开关的取流曲线。实际供电臂开关电流预测曲线需考虑双边供电的两个开关电流的动态分配, 进站侧开关电流  $I_j$  及出站侧开关电流  $I_c$  通过大数据拟合函数预测分配。大数据拟合分析计算  $I_j$  为:

$$I_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_j(m_{pm}, l_{tl}, w_{tw}, v_{j,i})$$

式中:

$f_j$ ——大数据拟合算法函数;

$m_{pm}$ ——车辆所处供电臂的供电模式;

$l_{tl}$ ——列车位置;

$w_{tw}$ ——列车称重;

$v_{j,i}$ ——车辆在该位置、该供电臂模式下的某次历史进站侧取流值;

$N$ ——历史时间段内的统计列车数。

根据图 2, A 站 211 开关和 C 站 213 开关给供电臂 S01 双边供电, 供电臂 S01 (A 站—C 站上行) 区间内已有 T001、T002 两列列车, 预计 1 min 后 T003 列车进入该供电臂, 供电臂开关电流预测模型推导计算原则如表 1 所示。

表 1 供电臂开关电流预测模型推导计算原则

Tab.1 Derivation calculation principle of the current prediction model for feeding section switch

预测时刻	车组号	预测列车运行位置	牵引状态	预测列车取流/A	预测 211 开关电流/A	预测 213 开关电流/A
9:00:00	T001	A 站公里标 +1 200 m	停 B 站	0	1 300	1 200
9:00:00	T002	A 站公里标 +200 m	牵引	2 500	1 300	1 200
9:00:03	T001	A 站公里标 +1 220 m	牵引	1 300	2 400	2 200
9:00:03	T002	A 站公里标 +250 m	牵引	3 300	2 400	2 200
9:01:00	T001	A 站公里标 +2 100 m	牵引	3 700	1 850	1 950
9:01:00	T002	A 站公里标 +1 100 m	制动	-1 000	1 850	1 950
9:01:00	T003	A 站公里标 +10 m	牵引	1 100	1 850	1 950
9:01:03	T001	A 站公里标 +2 150 m	牵引	3 760	2 500	2 600
9:01:03	T002	A 站公里标 +1 200 m	停 B 站	0	2 500	2 600
9:01:03	T003	A 站公里标 +60 m	牵引	1 600	2 500	2 600

#### 2.5 根据供电能力的动态行车卡控

将预测取流曲线与开关过流保护定值进行比

较, 如果在预测曲线中有可能超过过流保护定值的情况, 则后续列车自动扣车, 暂缓进入该供电臂; 如

果预测曲线中不会出现超过过流保护定值情况(同时考虑一定裕量),则后续列车允许自动进入该供电臂。

通过ATO运行曲线控制已进入供电臂列车在区间内均衡分布,防止列车聚集在双边供电的一侧开关;如果发生阻塞模式,除通过ATO运行曲线控制列车在区间均衡分布外,还可通过采取同一供电臂内列车错时起动方式,避免同时起动列车对供电系统造成冲击。

当按照双边供电能力卡控的供电臂内已进入可允许运行的最大列车数时,如果因为外界某些原因该供电臂突然降级为单边供电,供电臂内所有列车同时加速势必会造成供电系统过负荷,此时可以通过控制部分列车加速、部分列车制动的方式,或者停靠车站的列车暂缓发车等方式,待部分列车驶出该供电臂后,卡控该供电臂内列车在单边供电模式下运行。

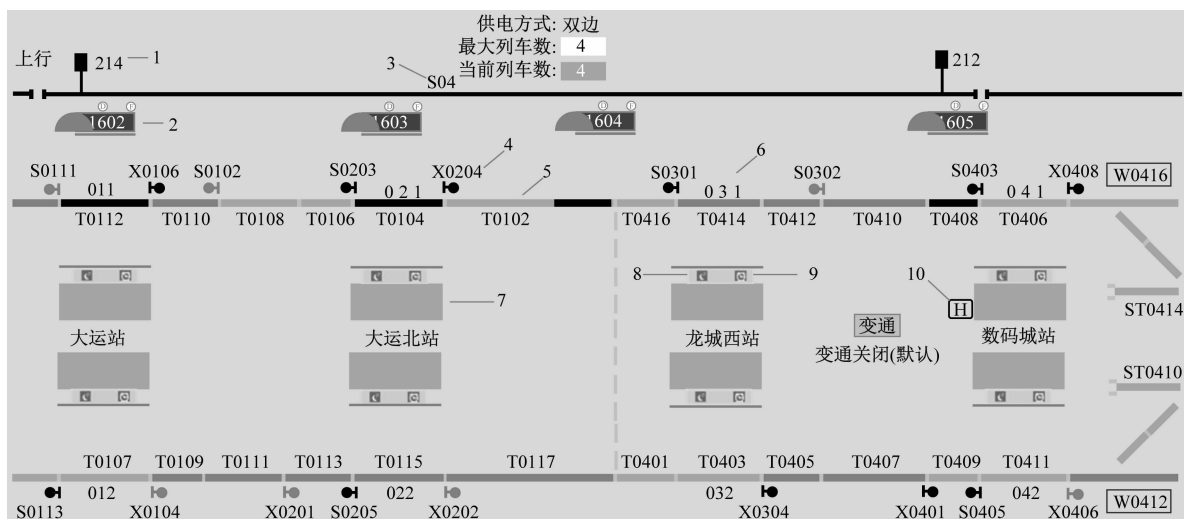
### 3 应用案例

基于供电能力的动态行车卡控方法已在深圳

地铁16号线得到实际应用,成功避免了可能因供电系统超负荷引起电力开关跳闸的故障,提高了运营安全,同时并未造成运营效率下降。

如图4所示,大运站—数码城站上行,由供电臂S04供电,系统根据已进入的1602次、1603次、1604次列车实时取流曲线,并结合1602次、1603次、1604次列车以及即将进入的1605次列车在S04供电臂内的历史取流曲线,绘制214、212开关的电流预测曲线。如果预测曲线不会超过开关的过流保护定值,则1605次列车被允许进入S04供电臂,此时被允许进入的最大列车数动态调整为4列。当1605次列车进入S04供电臂后,S04供电臂内运行列车达到最大数,系统在数码城站自动执行后续列车扣车。

当1602次列车驶出大运站,S04供电臂里面的列车数小于最大允许列车数4列,数码城站自动取消扣车。在某些故障情况下,例如图4中大运站214开关跳闸,S04供电臂变成单边供电,S04供电臂允许的最大列车数随之变化,系统按照新的最大允许列车数卡控列车运行。



注:1—电力开关及编号;2—车次窗及列车编号;3—供电臂编号;4—信号机及编号;5—小区段及编号;6—目的地号;7—车站站台;8—站台自动休眠禁止;9—站台自动唤醒禁止;10—站台扣车标志。

图4 基于供电能力行车卡控方法应用实例

Fig. 4 Application example of train operation control method based on power supply capacity

### 4 结语

基于供电能力的行车动态卡控方法通过对信号、供电、车辆和轨道多源数据的融合,结合实时和历史数据,基于业务逻辑以及大数据挖掘分析,实

现对供电系统负载能力的动态监测与预测,并通过供电系统负载能力与列车ATO运行曲线相结合,动态调整列车运行,有效避免了因行车引起过负荷造成供电系统跳闸的故障发生,是多专业信息融合联动的一个典型案例。

(下转第338页)



- 改进[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9): 2217.
- LIN Haixiang, LI Yangqing. Hidden-security-risk analysis and fault location improvement for high-speed railway switch[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(9): 2217.
- [2] 张友鹏, 江雪莹, 赵斌. 融合粗糙集与灰色模型的道岔故障预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(9): 2331.
- ZHANG Youpeng, JIANG Xueying, ZHAO Bin. Turnout fault prediction based on Rough Set and Grey Model[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2331.
- [3] 齐小民, 贺玉芹, 刘晓明. 道岔健康状态评估管理系统的研究应用[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(8): 21.
- QI Xiaomin, HE Yuqin, LIU Xiaoming. Research and application of switch equipment health assessment management system[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(8): 21.
- [4] 刘新发, 魏文军. 基于模糊聚类方法的 S700K 转辙机故障诊断[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2148.
- LIU Xinfu, WEI Wenjun. Fault diagnosis of S700K switch machine based on fuzzy cluster method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(9): 2148.
- [5] COBLE J, HINES J W. Identifying optimal prognostic parameters from data: a genetic algorithms approach[C]// Annual Conference of the PHM Society. San Diego: PHM Society, 2009: 1-13.
- [6] 许庆阳, 刘中田, 赵会兵. 基于隐马尔科夫模型的道岔故障诊断方法[J]. 铁道学报, 2018, 40(8): 98.
- XU Qingyang, LIU Zhongtian, ZHAO Huibing. Method of turnout fault diagnosis based on hidden Markov model[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(8): 98.
- [7] VAN DER MAATEN L, HINTON G. Visualizing data using t-SNE[J]. Journal of machine learning research, 2008, 9(11): 143.
- [8] BIAN C, YANG S, HUANG T, et al. Degradation state mining and identification for railway point machines[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 188: 432.
- [9] MINBASHI N, BAGHERI M, GOLROO A, et al. Turnout degradation modelling using new inspection technologies: a literature review[C]// Current Trends in Reliability, Availability, Maintainability and Safety. Cham: Springer, 2016: 49-63.
- [10] 徐婷, 温常磊, 张香, 等. 基于 GMM-CHMM 的城市道路换道行为识别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(1): 61.
- XU Ting, WEN Changlei, ZHANG Xiang, et al. Lane changing behavior identification of urban road based on GMM-CHMM[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(1): 61.
- [11] XIAO Q, FANG Y, LIU Q, et al. Online machine health prognostics based on modified duration-dependent hidden semi-Markov model and high-order particle filtering[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1): 1283.
- 收稿日期: 2023-09-01 修回日期: 2023-12-10 出版日期: 2024-06-10  
Received: 2023-09-01 Revised: 2023-12-10 Published: 2024-06-10  
• 通信作者: 刘伊敏, 工程师, septemberliu@126.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- transportation[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(8): 43.
- [4] 任培勇. 最优速度跟踪控制策略在地铁 ATO 系统中的应用研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(1): 25.
- REN Peiyong. Application of optimal speed tracking control strategy in metro ATO[J]. Modern Urban Transit, 2022(1): 25.
- [5] 张超群, 伦敏杰, 贺又林. ATO 模式下列车运行效率影响因素分析及优化[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(7): 82.
- ZHANG Chaoqun, LUN Minjie, HE Youlin. Analysis of influence factors of operating efficiency of train in ATO mode and optimization method[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(7): 82.
- 收稿日期: 2024-01-11 修回日期: 2024-03-10 出版日期: 2024-06-10  
Received: 2024-01-11 Revised: 2024-03-10 Published: 2024-06-10  
• 通信作者: 刘瑞娟, 高级工程师, lrj\_d@126.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 333 页)

## 参考文献

- [1] 雷小波. 铁路牵引供电应急能力计算方案[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 9.
- LEI Xiaobo. The calculation scheme for railway traction power supply emergency capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 9.
- [2] 李道德, 刘长利, 张韬. 高速铁路牵引供电故障对动车组运行影响及应急处置研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(11): 82.
- LI Dao-de, LIU Changli, ZHANG Tao. Influence of power supply failure of high speed railway traction on EMU operation and emergency response plan[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(11): 82.
- [3] 步兵, 滕昌敏, 陈尔超, 等. 城市轨道交通多车协作节能控制方法研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(8): 43.
- BU Bing, TENG Changmin, CHEN Erchao, et al. Research on method of cooperation among trains for energy saving in urban rail