

城市轨道交通全自动运行线路自动化 场段库线设计方案

李德宏¹ 柴娟²

(1. 卡斯柯信号有限公司, 200072, 上海; 2. 上海地铁维护保障有限公司, 200235, 上海//第一作者, 工程师)

摘 要 自动化场段是城市轨道交通全自动运行线路标准配置之一。基于 CBTC(通信的列车控制)的性能要求及 IEEE Std 1474.1:2004《CBTC 的性能和功能要求》所定义的安全制动模型计算得到的列车安全防护距离一般较大,由此导致自动化场段的库线(尤其是双列位停车库线)的设计长度较长,往往受到建设用地的制约。为此,基于能量监控禁止模型安全算法建立了列车自动入库的理论方法。该理论方法可在场段土建条件受限、导致库线长度不足时有效解决列车自动入库并精确停车的问题,还可用于指导全自动运行项目的自动化场段设计。

关键词 城市轨道交通; 全自动运行; 自动化场段; 库线设计; 精确停车

中图分类号 U29-39

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.11.017

Design of Automatic Depot Stabling Line for Urban Rail Transit FAO Line

LI Dehong, CHAI Juan

Abstract The automatic depot is one of the standard configurations of urban rail transit FAO (fully automatic operation) line. Based on the performance requirements of CBTC (communication based train control) and the safety braking model defined by the IEEE Std 1474.1—2004 standard "CBTC Performance and Functional Requirements", the calculated train safety protection distance is generally larger, leading to the design of a relatively longer stabling line length (especially the double-row stabling) in the automatic depot, that is often restricted by the construction land. Therefore, a theoretical calculation of train automatic warehousing is established through the safety algorithm of energy monitoring prohibition model. The theory can effectively solve the problems of train automatic warehousing and accurate docking when the civil construction conditions of the depot are limited and the stabling line length is insufficient, it can also guide the design of the automatic depot for FAO project.

Key words urban rail transit; FAO; automatic depot; sta-

bling design; accurate docking

First-author's address CASCO Signal Ltd., 200072, Shanghai, China

自动化的车辆段/停车场(以下简称“场段”)是城市轨道交通 FAO(全自动运行)项目的标准配置。但是由于场段的建设用地一般比较紧张,库线的设计长度受到的制约因素较多。FAO 模式下列车若要实现自动入库并精确停车的功能,必须配置一定长度的安全防护距离,以满足列车精确停车的相关要求。但是,按照常规的 ATP(列车自动防护)模型计算得到的安全防护距离较大,对于场段库线的设计而言,并不是最优方案。由于场段和正线的功能与作用有所不同,设置场段的目的是为了存车,场段内没有不涉及载客运营的业务,因此,可对库线采用不同于正线的特殊设计方案,以达到既能让 FAO 列车精确停车入库又尽可能减少库线长度的目的。尤其对于既有线路的场段改造项目,因既有库线一般不具备改造的条件,本文给出的库线设计方法可进行任何长度库线的列车自动防护设计,可在场段设计条件紧张的情况下完成库线设计任务,将场段改造为自动化场段。

1 传统的库线长度设计方案

列车以 FAO 模式停车时,根据 IEEE Std 1474.1:2004《CBTC 的性能和功能要求》定义的安全制动模型,列车需要的安全防护距离约为 15 m(不同的信号系统下该距离略有差异)。在工程实施过程中,该安全防护距离还会在此基础上留有一定的余量。如图 1 所示,以双列位停车库线为例,两列车的间距 d_1 应该保持在 20 m 以上才能满足需求;列车车端至车挡的距离 d_4 应该大于 20 m。一般取列车车端至出发信号机的距离 $d_3 = 5$ m。由此

可认为:以 ATO(列车自动运行)模式驾驶列车进入场段时,若要列车能够正确停入库线,对于双列位停车库线而言,令 d_2 为列车长度,则设计长度 $L_{\text{双}}$ 的计算式为:

$$L_{\text{双}} > 2d_2 + 45 \text{ m} \quad (1)$$

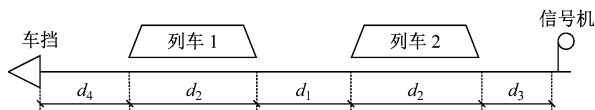


图 1 双列位停车库线长度设计

Fig. 1 Length design of double-row stabling line

如图 2 所示,可推导出单列位停车库线的设计长度 $L_{\text{单}}$ 的计算式为:

$$L_{\text{单}} > d_2 + 25 \text{ m} \quad (2)$$

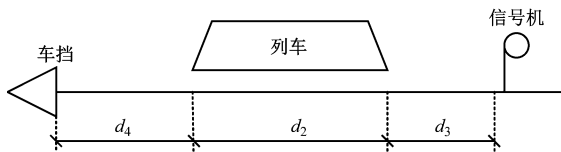


图 2 单列位停车库线长度设计

Fig. 2 Length design of signal row stabling line

但是,因场段建设用地的限制,实际库线长度难以满足上述设计方案要求的情况并不少见。针对场段库线长度不足情况下的列车自动入库问题,本文给出了一种能量监控禁止模型安全算法,并建立了列车入库计算模型。

2 能量监控禁止模型安全算法

2.1 建立列车自动入库的理论计算模型

能量监控禁止模型安全算法是指通过缩短列车的安全防护距离并控制列车入库时的运行速度,使得列车在入库过程中在允许的撞击速度下运行,在此基础上优化列车前方的安全限制点,进而解决列车自动入库精确停车问题。为了确保安全,采用该算法时,列车紧急制动下的触发速度(即车载信号系统实际计算的瞬时真实速度)由正常 ATP 防护下的线路限速转变为系统预设的低限速。

在计算列车紧急制动触发速度 v_{EB} 时,还需考虑线路参数对 v_{EB} 的影响。对 v_{EB} 影响较大的参数主要有线路高程差 ε_h (一般取常量 0.006 m) 和车辆旋转质量系数 R 。因此,在考虑这 2 个影响因素后可得:

$$v_{\text{LIMIT_E}} = \sqrt{v_{\text{LIMIT}}^2 - \frac{4g\varepsilon_h}{R}} \quad (3)$$

$$v_{\text{EB}} = (v_{\text{LIMIT_E}} - v_{\text{D}} - \Delta v_1) v_{\text{R}} \quad (4)$$

式中:

v_{LIMIT} ——车挡或车钩允许的最大撞击速度;

$v_{\text{LIMIT_E}}$ ——因线路高程差造成 v_{LIMIT} 的速度变化值;

g ——重力加速度;

v_{D} ——列车实施牵引切除及建立紧急制动过程中的速度增量;

Δv_1 ——ATP 车载软件 1 个计算周期 T 内速度的增加值;

v_{R} ——ATP 速度和 ATO 速度校准后的速率比,一般取 0.97。

式(4)中, v_{D} 需要考虑在列车牵引切除时间内列车以最大加速度运行时所造成的速度增量,以及由于坡度影响所造成的速度增量。设 t_1 为列车牵引切除时间, a_1 为列车最大牵引加速度,则根据运动学公式可知,列车牵引切除时间内的速度增量为 $t_1 a_1$ 。此外,在这个过程中,线路坡度的变化也会对速度变化产生影响,这主要是 g 在平行于线路坡度上的分量导致的。设 t_2 为列车制动的建立时间, a_2 为列车在线路最大坡度上的加速度,则根据运动学公式可知,在列车制动建立前,列车的速度增量为 $a_2(t_1 + t_2)$ 。因此, v_{D} 的计算式为:

$$v_{\text{D}} = t_1 a_1 + a_2(t_1 + t_2) \quad (5)$$

Δv_1 为列车实际运行时因牵引产生的速度增量。 Δv_1 也需考虑牵引和坡度的影响,其计算式为:

$$\Delta v_1 = 0.5T(a_1 + a_2) \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(4),可以得到 v_{EB} 的计算式为:

$$v_{\text{EB}} = \left[\sqrt{v_{\text{LIMIT}}^2 - \frac{4g\varepsilon_h}{R}} - t_1 a_1 - a_2(t_1 + t_2) - 0.5T(a_1 + a_2) \right] v_{\text{R}} \quad (7)$$

式(7)的函数模型即为危险点(如车挡)所能承受的最大撞击速度 v_{LIMIT} 与列车允许运行的最高紧急制动触发速度 v_{EB} 之间的关系。

2.2 基于理论方法对实际项目进行参数计算

CBTC(基于通信的列车控制)系统对 ATP 的安全防护计算已有标准的定义,本文不再赘述,仅以此作为库线设计长度对比的依据。表 1 为本文假设给定的典型车辆参数。基于表 1 的参数对实际项目中的 v_{EB} 进行计算,计算时选择场段内库线作为列车的停车区域,线路坡度按平坡(坡度值为 0)考虑。

基于表 1 的参数取值,式(7)中各变量的取值

表 1 ATP 安全防护计算所需的车辆参数取值

Tab.1 Value of vehicle parameters required for ATP safety protection calculation

参数	参数值
牵引切除延时/s	0.02
紧急制动建立所需延时/s	0.14
从紧急制动建立至全制动 10% 的延时/s	0.20
从紧急制动建立至全制动 90% 的延时/s	1.50
紧急保障制动率/(m/s ²)	-0.85
车辆最小制动加速度/(m/s ²)	-0.30
车辆最大牵引加速度/(m/s ²)	1.35
重力加速度 g 的斜坡分量/(m/s ²)	0.19
车辆最大轮径/m	0.84
车辆旋转质量/t	6
车辆满载质量/t	160
车辆空载质量/t	100

为： $R = 1.04$ ， $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ， $\varepsilon_h = 0.006 \text{ m}$ ， $t_1 = 1.52 \text{ s}$ ， $t_2 = 1.00 \text{ s}$ ， $a_1 = 1.35 \text{ m/s}^2$ ， $a_2 = 0 \text{ m/s}^2$ ， $T = 0.20 \text{ s}$ ， $v_R = 0.97$ ，式(7)可演变为：

$$v_{EB} = \sqrt{v_{LIMIT}^2 - 0.8(\text{km/h})^2} \times 0.97 - 7.7 \text{ km/h} \quad (8)$$

若 $v_{LIMIT} = 15 \text{ km/h}$ ，则 $v_{EB} = 6.82 \text{ km/h}$ 。按照此计算结果，对于双列位停车库线而言，只要将图 1 中两列车所停区段设置为能量监控禁止区域，并设置 $v_{EB} < 6.85 \text{ km/h}$ ，则不论 d_1 和 d_4 的长度如何，列车都可以实现自动入库并精确停车。

3 结语

本文给出了 FAO 项目自动化场段内库线长度设计的理论算法。该算法可以在场段土建条件紧张导致库线长度不足的情况下，实现列车自动入库并精确停车。更重要的是，在进行 FAO 项目自动化场段设计时，参考本文给出的算法进行库线配线设计，可有效地节省土建成本。

参考文献

[1] 陈绍文. 影响城市轨道交通全自动运行的技术要点[J]. 城市轨道交通研究, 2019(增刊2):43.
CHEN Shaowen. Key technological points affecting urban rail transit FAO system[J]. Urban Mass Transit, 2019(S2):43.
[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013:42.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013:42.
[3] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE standard for communications-based train control (CBTC) performance and functional requirements: IEEE Std 1474. 1: 2004[S]. New York: Rail Transit Vehicle Interface Standards Committee, 2004:34.

(收稿日期:2022-05-17)



轨道星空论坛第 1 期——高可靠车车通信技术研讨会活动顺利举办

2022 年 7 月 30 日,由国家自然科学基金项目“虚拟编组异质列车队列自主控制方法研究”课题组、上海市自然科学基金项目“轨道交通高可信车地协同与高可靠车车通信研究”课题组、上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室、上海轨道交通无人驾驶列控系统工程技术研究中心共同主办的“轨道星空论坛第 1 期——高可靠车车通信技术研讨会”在上海顺利召开。本期研讨会以“高可靠的通信技术”作为主题,业内专家共同探讨了通信技术未来的发展趋势,以及信息与控制系统对信号系统可能带来的变革。

来自于国家 6G(第六代移动通信技术)技术研发总体专家组、轨道交通控制与安全国家重点实验室、上海自主智能无人系统科学中心、上海大学轨道交通无线通信联合实验室、上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室、上海轨道交通无人驾驶列控系统工程技术研究中心的专家和相关负责人参加了本次研讨会。此外,参加会议的还有同济大学、西南交通大学等院校的学术带头人,以及上海申通地铁集团有限公司技术中心和华为技术有限公司的技术专家等,会上专家们发表了多个主题演讲。本次会议采用线上和线下相结合的方式,与会专家共同畅谈了轨道交通通信的前沿技术内容。会议全程进行了线上直播。

主题演讲结束后,专家们从学术研究和技术应用 2 个层面,就灵活编组下列车在线联挂/解编的无线重连、虚拟编组异质列车队列自主控制及自组网、列车控制系统未来可能的车车直连通信、适配信号系统的高可靠通信设计等内容开展了热烈的讨论。此次技术研讨会分享了通信技术的发展趋势和前沿技术,探讨了这些技术在轨道交通信息与控制系统中应用的可能性及应用新技术所需解决的问题,实现了产、学、研的结合,推进了理论成果的孵化输出,促进了前沿技术的产业化发展。

(卡斯柯信号有限公司供稿)