

# 有轨电车运行安全与信号技术标准\*

李 澍<sup>1</sup> 王 晨<sup>2</sup> 李思桦<sup>3</sup>

(1. 卡斯柯信号有限公司, 200070, 上海; 2. 成都地铁运营有限公司, 610081, 成都;

3. 成都轨道建设管理有限公司, 610081, 成都//第一作者, 工程师)

**摘 要** 在欧洲范围内, 尚未形成统一的有轨电车标准。正因如此, 有轨电车的有关技术经常会采用不完全适用的轻轨电车线路(Light Rail Tramway, 简为 LRT)标准。随着城市发展, 传统 LRT 的标准已无法满足现代有轨电车的建设。目前, 欧盟基于 CEN-ELEC GUIDE 26 和 M/486 正在编写有轨电车标准, 其主要参与国家包括法国、德国、英国等。介绍了法国 STRMTG 有轨电车标准, 结合 2016 年英国伦敦南部克罗伊登有轨电车事故案例, 说明 SIL(安全完整性等级)2 车载超速防护的重要性。

**关键词** 有轨电车; 信号系统; 技术标准; 超速事故; 车载防护

**中图分类号** U284.95:U482.1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.04.028

## Technical Standards for Tramway Operational Safety and Signaling System

LI Shu, WANG Chen, LI Sihua

**Abstract** No unified tram standards have yet been formed in the whole Europe. As a result of this, technologies related to tramway often adopt incomplete applicable criteria of LRT (light rail tramway). With the development of cities, the traditional LRT standards can not satisfy the tramway construction and operation requirements. Currently, EU is drafting the tramway standards based on the CEN CENELEC GUIDE 26 and Mandate 486, with the participation of France, Germany, UK and other member countries. In this paper, the French STRMTG tramway standards are introduced, and combined with the Croydon tram accident which happened in South London in 2016, the importance of SIL2 on-board over-speed control is emphasized.

**Key words** tramway; signaling system; technical standard; over-speed accident; on-board protection

**First-author's address** CASCO Signal Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

2017 年以前, 国内外都没有专用的有轨电车信号标准。欧洲有轨电车也因标准缺失发生了严重的运营事故。

2016 年 11 月 9 日英国伦敦南部克罗伊登, 1 列列车由 Lloyd Park 站驶向 Sandilands 站时, 在岔区弯道处侧翻并滑出 25 m, 超出限速牌位置 49 m<sup>[1]</sup>。经调查, 事故原因为超速行驶。列车以 73 km/h 速度驶出一段隧道后经过 94 m 到达曲线半径为 30 m 的岔区。列车进入曲线之前需从 80 km/h 降到 20 km/h。事故时天降大雨, 且线路环境影响驾驶员视线, 导致驾驶员在出事前 2.5 s 才施加制动。由于限速牌与限速区段一一对应, 车载设备也无提前预警信息, 故驾驶员全凭个人经验来判断何时需要减速。

可见, 目视行车模式不应由驾驶员承担全部行车责任, 而应由人与设备共同来完成行车任务, 结合城市环境等其他因素, 应由标准规范来指导有轨电车行车安全。

欧洲现行有轨电车标准为德国 BOStrab 技术标准(服务于德国、东欧、北欧)和法国 STRMTG 标准(服务于法国、南欧、中东)。这两套标准不仅包括了建设规范, 还包括了运营要求, 可全面指导有轨电车的实施。英国标准有轨电车的建设部分参考了德国 BOStrab 标准, 而运营部分参考了法国 STRMTG 标准。BOStrab 的 LRT(轻轨电车线路)标准<sup>[2]</sup>自 2006 年后没有更新。而近十年来, 机电设备发展快速。因此, 本文主要研究法国 STRMTG 标准。

STRMTG 标准已包含 26 个标准和 14 个技术指南, 并在持续增加。本文主要就 STRMTG 有轨电车信号标准进行相关研究, 其他专业相关标准不在本文讨论范围内。

\* 2018 年度上海市科委技术标准专项项目(18DZ2202600)

## 1 法国 STRMTG 有轨电车标准

法国 STRMTG 在 2017 年 10 月 17 日新发布了有轨电车动态信号标准<sup>[3]</sup> (以下简为“STRMTG 标准”)。该标准针对有轨电车驾驶员目视距离和信号系统进行了详细分析,并说明在某一场景如何确认驾驶员是否有能力完全对安全行车负责,需要信号设备如何管理。根据该标准的分析,有轨电车运营过程中的内外部风险包括外部因素、运营间隔过小(小于 2 min),以及驾驶员的反应能力与道路交通速度不符等。这些风险都可能对对有轨电车运营造成不可接受的危害。

STRMTG 标准明确了所有信号相关行车风险,包括:2 列运营列车正面相撞、2 列运营列车追尾、进路上共用 1 组道岔的 2 列列车侧冲、进路上不共用道岔的 2 列列车的侧冲、无岔的平交岔区列车侧冲、超速过岔出轨、道岔动作出轨及非可挤转辙机上的挤岔等。为了避免上述场景中的事故,需要从驾驶员目视行车的安全需求和信号系统的安全需求两方面进行相关研究。

### 1.1 驾驶员目视行车的安全需求

在目视驾驶情况下,驾驶员作为安全责任主体需负责确认列车间的安全间距,并根据轨旁信号灯提示行车,以防止同机动车、非机动车或行人发生碰撞。根据文献[3-4],在上述救援难度大且长度超过 100 m 的区段、运营间隔小于 2 min 区段,以及驾驶员视距小于制动距离、和列车行车速度大于 80 km/h 的情况,目视行车已经不再满足有轨电车安全运营需求,应增加 SIL(安全完整性等级)2 的车载安全防护,或采取限速措施来缩短制动距离。应研究驾驶员视线与制动距离的关系,以确保驾驶员在发现行车危险时可采取制动措施来安全停在风险点前。

根据 STRMTG 标准,列车制动距离为:

$$d_s = \frac{v_0^2}{2a} + v_0 t_r \quad (1)$$

式中:

$d_s$ ——列车制动距离;

$v_0$ ——列车初始速度;

$a$ ——列车制动率,根据 EN 134521,常规制动时  $a$  最大取  $1.2 \text{ m/s}^2$ ;

$t_r$ ——驾驶员反应时间与制动系统反应时间之和,根据 EN 134521,  $a = 1.2 \text{ m/s}^2$  时  $t_r$  取 1.5 s。

驾驶员可视距离为:

$$d_v = \frac{v_s^2}{2a} + v_s t_r \quad (2)$$

式中:

$d_v$ ——驾驶员可视距离;

$v_s$ ——当前限速。

列车速度与列车制动距离的关系如图 1 所示。

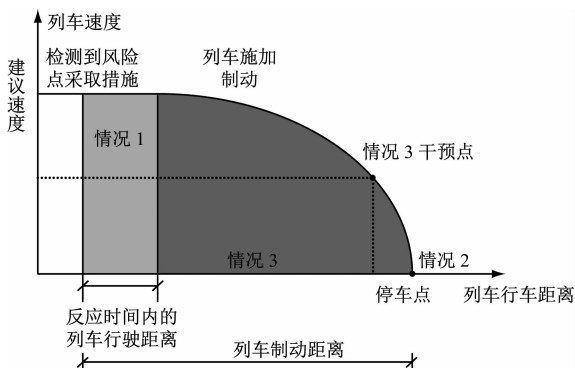


图1 列车速度与制动距离关系图

在图1中:

情况1:如果驾驶员反应距离大于系统紧急操作的距离,按照线路限速要求执行。

情况2:如果制动距离小于系统紧急操作的距离,则限速为0(直接输出紧急制动)。

情况3:在其他情况下,有

$$v_c = \sqrt{2a(d_s - d_v)} = \sqrt{v_{co}^2 - 2a(d_v - d_r)} \quad (3)$$

式中:

$v_c$ ——干预点撞击速度;

$v_{co}$ ——线路建议限速;

$d_r$ ——反应时间内列车行驶距离。

在紧急制动情况下,  $a = 2.8 \text{ m/s}^2$ ,  $t_r = 2.5 \text{ s}$ ,坡度  $i \leq 13\%$ 。 $i$  对列车制动率的影响为:

$$a_p = a - gi \quad (4)$$

式中:

$a_p$ ——坡度上列车的实际制动率。

当列车从高速区段进入限速区段时,应采取阶梯降速策略,而非直接大幅降速。如果只按线路轨道限速来直接设置降速,而没有分段引导降速,会导致驾驶员发现限速牌后来不及采取制动,或者制动不够平缓。

根据 STRMTG 标准,分段引导降速时,限速大于 50 km/h 段与相邻限速段的限速差值应小于 20 km/h,限速为 30 ~ 50 km/h 段与相邻限速段的限速差值应小于 15 km/h,限速为 20 ~ 30 km/h 段与相邻限速段的限速差值应小于 10 km/h,限速低于 20

km/h 段与相邻限速段的限速差值应小于 5 km/h。

### 1.2 信号系统安全需求

STRMTG 标准将有轨电车的信号分为间隔信号 (SGE)、路口交通信号 (SGC) 和岔区信号 (SGA)。通过这 3 种信号,有效规避了以下 3 个风险:① 列车追尾的风险;② 列车间冲突的风险(如 2 列运营列车追尾、进路上共用 1 组道岔的 2 列列车侧冲、进路上不共用道岔的 2 列列车的侧冲、无岔的平交岔区列车侧冲等风险);③ 道岔的安全风险(如道岔超速、道岔动作出轨、非可挤转辙机上的挤岔等风险)。STRMTG 标准还列举了 9 个存在风险的场景(站后折返、存车线、站前折返、无岔轨道直交路口、渡线、联络线、避让线、闭塞区段、单轨区段),并最终形成 7 条安全需求。其中,列车位置检测 (FS7) 为道岔动作管理 (FS1) 子功能需求,道岔位置控制 (FS2) 为道岔位置显示 (FS3) 子功能需求,管理列车间隔 (FS5)、列车位置检测 (FS7)、管理进路冲突 (FS4) 为管理列车授权 (FS6) 子功能需求。

### 1.3 安全完整性等级要求

根据 STRMTG 标准,有轨电车采用 SIL3 等级的联锁即可满足一般情况的要求。针对以下特殊情况,需要 SIL4 等级的联锁:① 救援困难。② 在驾驶员视线受阻且需要限速的区段。如列车运行最高速度大于 40 km/h,且有可能迎面相撞的区段;列车运行最高速度大于 30 km/h,且有可能侧冲相撞的区段。③ 发车密度高的线路,且其列车间隔小于 2 min。

列车的超速防护及闯红灯防护应达到 SIL2 等级要求。在非载客运行区域,即使存在列车出轨掉道的风险,该岔区也无需使用 SIL4 等级的联锁。国内项目一般都在正线岔区设置了反向信号机,且其直行股道的行车速度为线路限速。如果列车需载客在站前进行折返,则应采用 SIL4 等级联锁。针对清客后的站后折返区段、停车场及车辆段,使用 SIL3 等级的联锁即可。对远期规划行车间隔为 2 min 的有轨电车项目,应全线采用 SIL4 等级的联锁设备。经综合分析,SIL4 等级联锁和 SIL2 等级车载系统已成为主流趋势。

## 2 有轨电车车载驾驶员辅助防护系统

当驾驶员视线受阻、导致目视距离小于列车制动距离时,即使驾驶员在侦测到危险后立即采取制动措施,也无法完全保证行车安全。视线受阻的线路情况包括隧道、大弯道、大坡度及凹形纵断面线

路等情况。由于驾驶员无法依靠目视行车保证安全,且事故后果会很严重,因此需设计车载的驾驶员辅助防护系统,以在特殊情况下保护车辆。驾驶员辅助防护系统主要能防止列车闯过禁止信号,并能防止列车在特殊区段超速。

车载驾驶员辅助防护系统通过监控列车速度和前方信号机的禁止状态,能判断危险情况,并触发常规制动或紧急制动。

根据 RAMS(可靠性、可用性、可维护性和安全性)计算标准,驾驶员犯错误的概率 (THR) 为  $10^{-3}$ 。在目视行车模式下,即使轨旁信号设备达到 SIL4 等级,仍需增加车载驾驶员辅助防护系统。车载司机辅助防护系统每小时事故风险发生概率应为  $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。在驾驶员和车载自动化设备共同保证安全的情况下,只有驾驶员和车载设备同时失效,才能导致安全风险。二者同时失效的发生概率为  $10^{-3} \times 10^{-6} = 10^{-9}$ ,满足 SIL4 等级要求。按 EN 50126 标准,车载防护系统等级应为 SIL2。

### 2.1 线路固定限速功能

线路固定限速功能用于一段防护区域内,可确保列车不会超出永久限速 (PSR) 或临时限速 (TSR)。为实现该功能,需要在信标中烧录并定义限速区段的起点、限速区段的终点及限速区段中的限速值。每个限速区段的起点需布置 2 个冗余设置的信标。限速信息通过信标发送给车载设备。

### 2.2 动态超速防护功能

动态超速防护功能基于轨旁联锁信号机状态(道岔在定位、反位或禁止开放)实现。通过在进站信号机上游处等特殊道岔位置布置冗余的信标,轨旁联锁通过轨旁有源信标可向车载发送限速区段的起点、限速区段的终点,以及限速区段中的限速值等信息。其中,限速值按直股道、弯股道,以及禁止信号等工况分别取不同值。当道岔在反位时,运营规则要求列车通过曲线股道时应有限速,并应保证行车安全。在降级模式下,如果信号机发生故障,则驾驶员可以在信号机前停车;待获得调度员许可后,驾驶员长按“紧急制动”确认按钮后即可驶过信号机发生故障的岔区。

## 3 事故解决方案

### 3.1 限速场景分析

现以发生过事故的英国克罗伊登有轨电车线路为例,说明当驾驶员可视距离小于制动距离时,

怎样设置引导限速和全线路限速。

列车在进入曲线前的速度为 80 km/h,曲线限速为 20 km/h。当驾驶员看到限速牌时,距曲线仅 60 m,不满足行车安全需求。根据运营规范,需设置线路最高限速 70 km/h 的限速牌,并在 70 km/h 降速至 20 km/h 的区段中再设置 50 km/h 和 35 km/h 的过渡限速牌。

坡度为 0 时,根据式(1),一般常规制动  $a = 0.8 \text{ m/s}^2$ ,列车从 70 km/h 减速至 50 km/h 的运行距离为 145.0 m,从 50 km/h 减速至 35 km/h 的运行距离为 82.5 m,从 35 km/h 减速至 20 km/h 的运行距离为 54.5 m。

在常规制动情况下,驾驶员应能提前至少 150 m 观察到 50 km/h 的限速牌,提前至少 80 m 观察到 35 km/h 的限速牌,提前至少 60 m 观察到 20 km/h 的限速牌。

### 3.2 增加车载驾驶员辅助防护系统

当列车在隧道中或驾驶员因天气不良无法眺望到前方限速牌时,可采用车载驾驶员辅助防护方案,在轨旁增加限速信标用于辅助驾驶员。当列车超速时,可仅施加常规制动降低列车速度以防止出轨。如果常规制动无法将列车及时降低至安全速度以下,则应施加紧急制动。常规制动可随时缓解,而紧急制动只有在列车完全制动到速度为 0 后,才能缓解。

经计算,增加驾驶员辅助防护系统后,紧急制动距离远小于列车以正常运行速度常规制动的制动距离,其行车效率未降低。

## 4 结语

有轨电车标准应能满足现行运营环境需求。介绍了法国 STRMTG 标准,并分析了英国伦敦有轨电车事故的原因,提出设置自动化车载防护信号设备,以提高有轨电车的行车安全性。在国内有轨电车运营经验较少的情况下,可参考法国 STRMTG 标准,并增加适度的 SIL2 等级的有轨电车防护系统。此外,有轨电车运营过程中的线路限速设置,还需

要考虑驾驶员的视线情况及反应能力。相关线路限速规则和自动防护设备配置规则可参考本文所述,下一步将对列车自动防护在不同场景下的应用并和其他相关专业共同提高有轨电车的行车安全性上进行研究。

## 参考文献

- [1] CEN, Railway applications - Preparation of standards for urban rail systems design, construction, manufacture, operations and maintenance; CENELEC GUIDE 26 [S]. 1st ed. Brussels: CEN, 2013 (2013-06-01) [2018-01-01]. <https://www.cenelec.eu/standards/Guides/Pages/default.aspx>.
- [2] European Commission, Mandate for programming and standardisation addressed to the european standardisation bodies in the field of urban rail [R]. Brussels: European Commission, 2011 (2011-02-04) [2018-01-01]. <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/mandates/index.cfm?fuseaction=search.detail&id=471>.
- [3] STRMTG, Guide technique relatif à la sécurité des zones de manoeuvre de tramway [S]. Paris: STRMTG, 2017 (2017-10-17) [2018-01-01] <http://www.strmtg.developpement-durable.gouv.fr/les-guides-techniques-tramway-a150.html>.
- [4] STRMTG, Guide Technique Sécurisation des configurations des systèmes tramway avec perte de visibilité à distance de freinage [S]. Paris: STRMTG, 2012 (2012-03-21) [2018-01-01]. <http://www.strmtg.developpement-durable.gouv.fr/les-guides-techniques-tramway-a150.html>.
- [5] BOSTrab, Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOSTrab) [S]. Paris: BOSTrab, 2007.
- [6] ORR, Tramway principles & guidance [S]. 1st ed. London: ORR, 2018.
- [7] STRMTG, Actualité STRMTG Normalisation en Transports Guidés Urbains, Journée Tramway [R]. Paris: STRMTG, 2016.
- [8] RAIB, Rail Accident Investigation: Interim Report 2, Fatal accident involving the derailment of a tram at Sandilands Junction, Croydon [R]. London: RAIB, 2016.
- [9] UITP, Can Driver Assistance System (DAS) deliver safer LRT? UITP Workshop [R]. Vienna: UITP, 2015.
- [10] 李澍, 崔科. 有轨电车复杂平交路口的信号防护 [J]. 城市轨道交通研究, 2015 (增刊 1): 67.

(收稿日期: 2018-01-31)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: [tougao. umt1998. com](http://tougao. umt1998. com)