

高速磁浮列车运行控制系统列车定位的安全分析*

陈义军^{1,2} 徐中伟² 赵华华¹ 李章杨³ 楚彭子³

(1. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 为分析高速磁浮列车运行控制系统中列车定位的安全功能,简要分析了高速磁浮列车运行控制系统与车辆定位系统之间的接口关系,并基于故障树的方法刻画了列车运行控制系统列车定位的安全模型。基于安全模型所涉及主要安全防护过程,详细阐述了行车方向校验、列车速度信息校验、参考位置信息校验、相对位置信息校验,以及插入运行等核心功能的原理及实现过程。

关键词 高速磁浮列车; 列车运行控制系统; 列车安全定位

中图分类号 U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.011

Safety Analysis of Train Locating in High-speed Maglev Train Operation Control System

CHEN Yijun, XU Zhongwei, ZHAO Huahua, LI Zhangyang, CHU Pengzi

Abstract To analyze the safety function of train locating in high-speed maglev train operation control system, the interface relationship between high-speed maglev train operation control system and vehicle locating system is briefly analyzed. Safety model of train locating in the operation control system is described based on fault tree method. According to the safety model and the main safety protection procedures involved, principle and realization process of core functions such as verification of train driving direction, train speed information checking, train reference position and relative position information checking, as well as train insert-run are expounded.

Key words high-speed maglev train; train operation control system; train safety locating

First-author's address Maglev Transportation Engineering R & D Center, Tongji University, 201804, Shanghai, China

列车安全定位必须保证提供正确的列车位置信息,并具有高精密度^[1]。与传统轮轨列车不同,

高速磁浮列车使用了长定子直线电机驱动列车运行,故其通过检测长定子直线同步电机的齿槽数来获取相对位置信号,并通过检测轨道旁固定位置的定位标志板获取绝对位置信号,再将这两类信号结合形成完整的定位信息^[2]。

高速磁浮列车的定位系统通过冗余接口通道发送到列车运行控制系统的原始定位数据,必须经过安全防护,以满足速度曲线监控、停车点步进及强制停车等安全行为的需要。

从对磁浮列车定位技术的既有研究^[2-10]来看,高速磁浮列车运行控制系统列车定位的安全分析尚缺乏系统性研究。本文主要通过故障树的方法,刻画高速磁浮列车运行控制系统列车定位的安全模型,并详细分析安全模型涉及的主要安全防护过程。

1 列车运行控制系统与车辆定位系统的接口关系

磁浮列车的两节端车都有1套独立的定位系统。每套定位系统包括4个独立的定位通道,共同构成冗余结构。列车运行控制系统的车载子系统在两节端车各有1台VSC(车载安全计算机,即VSC1和VSC2),构成主备关系,并分别与1套定位系统对接。

VSC与每1个定位通道之间的通信方式是全双工串行通信接口。定位通道通过串行接口将定位信息传送给VSC。VSC对这些多通道定位数据进行校验处理后得到唯一、准确、安全的定位数据,再传送给列车运行控制系统的地面子系统。

每个定位通道包括1个用于获取相对定位信号的齿槽计数器,1个用于获取绝对定位信号的定位标志板读码器及1个用于向VSC传输定位数据的ORT(定位电子部件)。每个VSC均与4个定位通道相

* 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200602-02);上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1205803);上海市磁浮与轨道交通协同创新中心基金资助项目(20132223)

连。VSC 与单个定位通道的接口关系如图 1 所示。

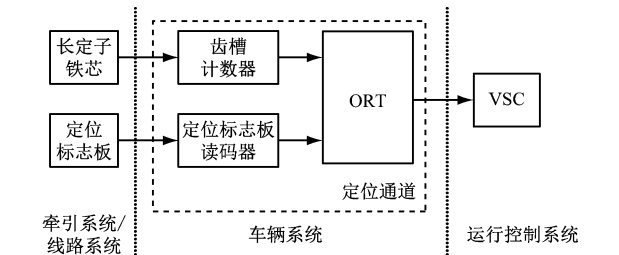


图 1 VSC 与单个定位通道的接口关系

Fig. 1 Interface relationship of VSC and single locating passage

按数据传输方向,VSC 与 ORT 的交互数据可分为 VSC →ORT 信息及 ORT →VSC 信息。

VSC →ORT 信息:当需要对定位通道进行初始化检查时,VSC 向定位系统发送测试指令,包括通道测试指令和定位系统测试指令等。

ORT →VSC 信息:包括列车位置、列车速度、列车运行方向及定位延时等信息。其中,列车位置信息包括反映相对位置的齿槽数信息和反映定位标志板(LRF)绝对位置的参考位置信息。参考位置信息用于校准列车在一段轨道移动累积的相对位置误差。

2 建立安全模型

本文采用故障树的形式,以定位系统不安全事

件作为顶事件,建立安全模型,如图 2 所示。对列车运行控制系统的 VSC 而言,判断定位系统处于安全状态的 2 个基本条件是:必须成功完成插入运行,且有效定位通道数大于 1。

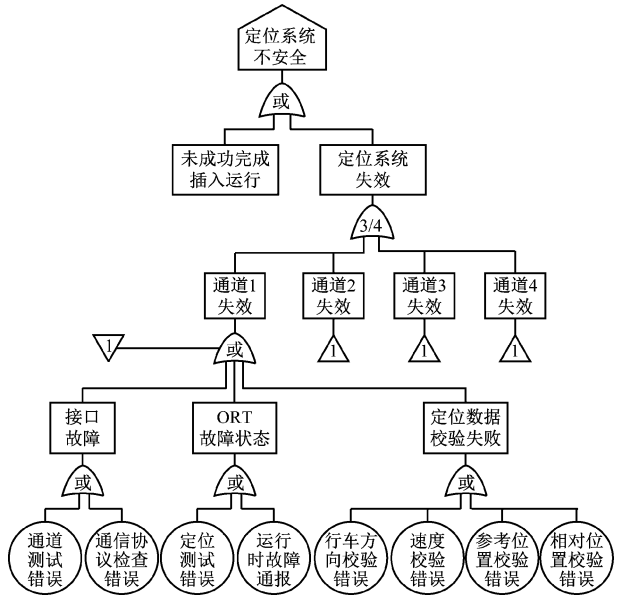


图 2 列车运行控制系统列车定位的安全模型

Fig. 2 Safety model of train locating in operation control system

定位系统中不安全状态所涉及的事件如表 1 所示。

表 1 定位系统中不安全状态所涉及的事件

Tab. 1 Events involved in unsafe states of the locating system				
事件分类	事件	事件原因	事件影响	事件类型
接口故障	通信协议检查错误	VSC 收发报文超时,接收报文的长度、校验码以及语法格式等错误	单通道失效,局部影响	底层事件
	通道测试错误	VSC 定位通道进入初始状态时检查接口通信时报错	单通道失效,局部影响	底层事件
ORT 故障	定位测试错误	VSC 启动时对定位通道执行测试时 ORT 报错	单通道失效,局部影响	底层事件
	运行时故障通报	ORT 在工作过程中出现故障时向 VSC 发送的即时信息	单通道失效,局部影响	底层事件
定位数据校验失败	行车方向校验错误	在 VSC 接收到的定位数据中,列车方向与进路方向不一致	单通道失效,局部影响	底层事件
	速度校验错误	在 VSC 接收到的定位数据中,列车速度超出速度安全范围	单通道失效,局部影响	底层事件
	参考位置校验错误	在 VSC 接收到的定位数据中,参考位置与进路预期的参考位置不一致	单通道失效,局部影响	底层事件
	相对位置校验错误	在 VSC 接收到的定位数据中,列车相对位移超出列车可能的移动范围	单通道失效,局部影响	底层事件
定位系统失效	定位系统失效	4 个冗余定位通道中至少 3 定位通道失效	定位系统不安全,全局影响	中间事件
未成功完成插入运行	未成功完成插入运行	插入运行未开始、正在进行中或插入运行失败	定位系统不安全,全局影响	中间事件

3 主要安全防护过程

3.1 行车方向信息的校验

VSC 对行车方向信息的校验是通过检查线路相关的行车方向、列车朝向及车辆相关的行车方向是否一致来实现的。

VSC 从 ORT 定位数据中获取线路相关的行车方向。线路相关的行车方向与参考位置的变化有关。参考位置里程增加的方向为线路方向相关的正方向,反之则为负方向。

列车朝向作为车辆参数数据,由列车运行控制系统在登录列车时指定,并由 VSC 保存。列车朝向指的是端车 1 的朝向,分为正方向和负方向。若端车 1 所在的里程大于端车 2 所在的里程,则列车朝向为正方向;反之,则为负方向。

车辆相关的行车方向由 VSC 从列车运行控制系统分区发送的设置列车运行方向命令中得到。车辆相关的行车方向指驾驶方向:端车 1 向前行驶为行驶方向向前,用 DD1 表示;端车 1 向后行驶为行驶方向向后,用 DD2 表示。

车辆相关的行车方向、列车朝向及线路相关行车方向的对照表如表 2 所示。

表 2 行车方向对照表			
Tab.2 Reference list of train driving direction			
4 种情况	车辆相关的行车方向	列车朝向	线路相关的行车方向
1	行驶方向向前 DD1	正	正
2	行驶方向向后 DD2	正	负
3	行驶方向向后 DD2	负	正
4	行驶方向向前 DD1	负	负

3.2 速度信息的校验及计算

VSC 根据 4 个相关联的 ORT 定位通道接收到的速度信息来确定车辆运行速度。通过判断速度值是否位于安全速度范围内,对每个 ORT 定位通道所接收速度信息进行校验。

安全的速度范围由最小车辆运行速度 v_{\min} 和最大车辆运行速度 v_{\max} 来确定,可能的实际速度则称之为公称速度 v_{nom} 。对速度信息的校验主要是检验 v_{nom} 是否位于 $[v_{\min}, v_{\max}]$,如图 3 所示。其中, v_{\max} 和 v_{\min} 是根据前一个测量周期对应的速度值,以及最大车辆加速度或最大制动加速度作线性外推(extrapolation)得到的。

对 1 个 ORT 通道而言,如果速度值不在安全速

度范围内,则标记通道失效。当 VSC 将各定位通道的速度组合起来形成 v_{nom} 时,失效的 ORT 通道将不参与计算。

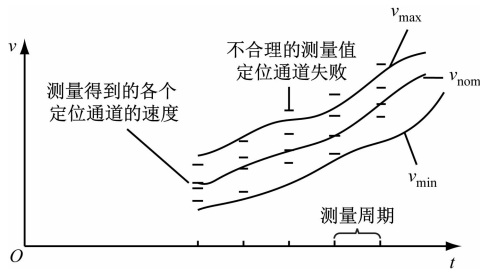


图 3 速度范围的确定
Fig. 3 Determination of speed range

3.3 参考位置信息的校验

在列车经过一组定位标志板时,由 ORT 中的读码器读取定位标志板的代码信息,然后作为参考位置的代码信息。

在预定进路时,VSC 保存相关的参考位置集合,然后 VSC 根据当前位置确定校验用的参考位置。对参考位置的校验就是判断确定出的参考位置与期望的参考位置是否相符,如图 4 所示。

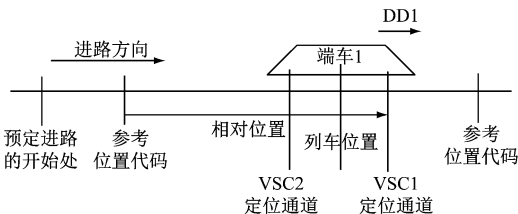


图 4 参考位置与相对位置
Fig. 4 Train reference location and relative location

当车辆通过参考位置时,VSC 根据 4 个 ORT 定位通道的数据生成参考位置代码。当 ORT 开始上电时,参考位置的代码为 0。ORT 需要完全通过定位标志板才会更新参考位置代码,在没有经过新的定位标志板的时候,发送上一次的参考位置代码。当有效的“故障-安全”定位通道通过相同的参考位置时,就称之为参考位置同步化,从而这个参考位置成为有效的参考位置。

在列车运行过程中,列车的一部分 ORT 通道在完全经过定位标志板后更新其参考位置,而另一部分 ORT 通道未经过定位标志板,仍为原参考位置。所以对该列车用于校验的参考位置应包含当前参考位置信息和下一参考位置信息。需判断 ORT 参考位置应为前一参考位置或下一参考位置;若满足该条件,则该参考位置有效,否则标记定位数据无效。

3.4 相对位置信息的校验

ORT 发送的相对位置数据以齿槽计数的形式表示。1 个齿槽的长度是固定的(上海磁浮列车示范运营线为 86 mm)。列车经过 1 组定位标志板后,齿槽计数会清零。相对位置代表列车在进路方向离开上一个定位标志板的距离,如图 4 所示。VSC 对相对位置信息的校验是需要为每个 ORT 通道计算 2 次测量瞬间的列车实际位移,再判断该位移是否在处于 1 个安全区间内。

列车相对位移范围的确定如图 5 所示。令 d_{nom} 表示公称距离, d_{max} 表示允许的最大距离, d_{min} 表示允许的最小距离,列车相关的运行方向为 DD1。

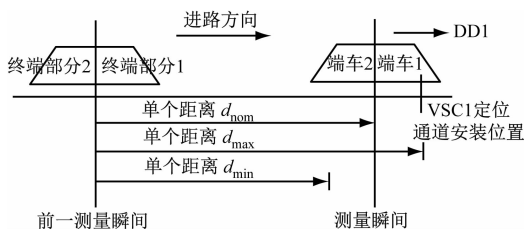


图 5 列车相对位移范围的确定

Fig. 5 Determination of train relative displacement range

计算 d_{nom} 需获取 2 次测量瞬间的列车位置信息。鉴于参考位置为定位通道安装位置的偏移距离,故需要将参考位置信息换算为列车中心点的绝对位置:

$$P = \begin{cases} P_{\text{init}} + S_r + S_d, & \text{参考位置编码为 0} \\ P_{\text{lrf}} + S_r + S_{\text{ort}} + S_d, & \text{参考位置编码不为 0} \end{cases}$$

式中:

P ——列车中心点的绝对位置,为非负数;

P_{init} ——初始列车登录位置或重定位时列车中心点的绝对位置,为非负数;

P_{lrf} ——定位标志板中心点对应的绝对位置,通过配置的工程数据查表获取,为非负数;

S_r ——相对位移,且 $S_r = \text{相对位置齿槽计数} \times 86 \text{ mm}$;

S_{ort} ——ORT 定位通道的安装位置到车辆中心的距离,每个定位通道的 S_{ort} 值是固定的;

S_d ——由定位延时造成的列车位置偏差; S_d 为列车速度乘以定位延时;当线路相关行车方向为正方向时 S_d 为正值,反之则 S_d 为负值。

S_{ort} 的正负取决于车辆朝向及 ORT 定位通道所属的端车;对于位于端车 1 的 ORT,如果列车朝向为正,则采用正号,否则采用负号;对于位于端车 2

的 ORT,如果列车朝向为正,则采用负号,否则采用正号。

假设在上一个测量周期的绝对位置为 P_0 ,当前的测量周期的绝对位置为 P ,则:

$$d_{\text{nom}} = |P - P_0|$$

判定数据有效性的检查条件为: d_{nom} 必须属于速度的安全区间 $[d_{\text{min}}, d_{\text{max}}]$, $P - P_0$ 的正负符号必须与线路相关行驶方向的正负符号相同。其中, $d_{\text{min}} = v_{\text{min}} \Delta t$, $d_{\text{max}} = v_{\text{max}} \Delta t$, v_{max} 和 v_{min} 分别是速度信息校验过程中获取的最大速度值和最小速度值, Δt 为 2 次测量瞬间的时间差。

若出现无效数据,则将产生该无效数据的定位通道标记为无效定位通道。VSC 判定数据的有效性后,有效定位通道的数据平均值即为最终的列车中心点的绝对位置 P 。

3.5 插入运行

在插入运行时,车辆必须通过并检测 2 个参考位置。在检测到第 2 个参考位置之前,还必须至少改变 1 次运行方向。这是为了查看方向确定功能是否已经失效。

插入运行有 3 种实现方式,如图 6 所示^[8]。

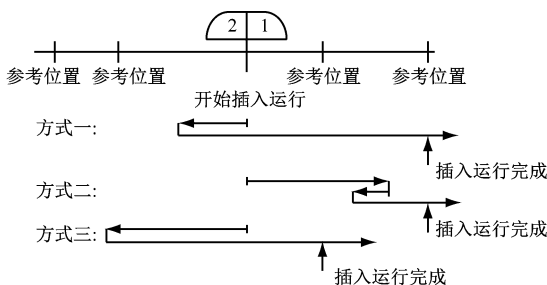


图 6 插入运行的实现方式

Fig. 6 Implementation mode of train insert-run

4 结语

对高速磁浮列车运行控制系统而言,列车定位功能是行车安全的关键性功能,其对磁浮列车的安全运行有着至关重要的影响。

车辆定位系统产生的定位信息只有在经过列车运行控制系统的安全检验后,才能保证位置信息、速度信息和行驶方向等定位信息是可信的。列车运行控制系统对定位信息中行驶方向信息的校验是通过车辆相关行车方向、线路相关行车方向及列车朝向来完成的,对速度信息的校验是通过判断速度值是否位于安全速度范围内来完成的,对参考

位置信息的校验是判断确定出的参考位置与期望的参考位置是否相符来完成的,对相对位置信息的校验是通过检查列车的位移是否处于一个安全区间内。

总之,只有满足足够数量的有效定位通道,并且成功完成插入运行的条件下,高速磁浮列车运行控制系统才认为定位系统处于安全状态,其生成和使用的定位数据是安全的、可信的。

参考文献

- [1] 李聪,王长林. 列车定位模块的故障模式及故障树分析[J]. 铁路计算机应用, 2012(7): 19.
LI Cong, WANG Changlin. Failure modes and fault tree analysis of train positioning module[J]. Railway Computer Application, 2012(7): 19.
 - [2] 郭小舟,王滢,王式雄. 高速磁悬浮列车定位测速系统[J]. 西南交通大学学报, 2004(4): 455.
GUO Xiaozhou, WANG Ying, WANG Shixiong. Location and speed detection system for high-speed maglev vehicle[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004(4): 455.
 - [3] 吴君尚,张辉. 上海磁浮示范运营线的列车定位系统[J]. 城市轨道交通研究, 2005(6): 87.
WU Junshang, ZHANG Hui. Train locating system of Shanghai maglev demonstration line[J]. Urban Mass Transit, 2005(6): 87.
 - [4] QIAN C, HAN Z, XIE W. Research on absolute positioning system for high-speed maglev train[C]//IEEE 2007 International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin: IEEE, 2007: 922.
 - [5] 陈正一. 磁浮列车定位系统的设计研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
CHEN Zhengyi. Design and research of maglev train positioning system[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
 - [6] 钦臻文. 磁浮列车定位信号传输和列车初始状态定位过程[J]. 城市轨道交通研究, 2015(5): 56.
QIN Zhenwen. Train locating signal transmission and the initial state of maglev train positioning process[J]. Urban Mass Transit, 2015(5): 56.
 - [7] ZHANG K, DONG D C, PAN H L. Safety and reliability of speed detection and location systems for high-speed maglev trains[C]//COTA. 15th COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston: American Society of Civil Engineers, 2015: 1810.
 - [8] ZHAO H H, CHEN Y J, LIAO Z M. Safety location function and its realization mechanism for high-speed maglev transportation systems[C]//COTA. 15th COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston: American Society of Civil Engineers, 2015: 207.
 - [9] CHEN Y J, ZHAO H H, YU Y, et al. Information flow analysis on operational control systems regarding high-speed maglev transportation[C]//COTA. 17th COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston: American Society of Civil Engineers, 2017: 1706.
 - [10] CHEN Y J, ZHAO H H, YU Y, et al. Information flow analysis on forced stop management of operation control system in high-speed maglev transportation[C]//COTA. 17th COTA International Conference of Transportation Professionals. Reston: American Society of Civil Engineers, 2017: 2017.
- (收稿日期:2020-08-28)
-
- (上接第 59 页)
- [2] HOY G, MORROW E, SHALABY A. Use of agent-based crowd simulation to investigate the performance of large-scale intermodal facilities: case study of Union Station in Toronto, Ontario, Canada[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2016, 2540: 20.
 - [3] LEE H Y. Integrating simulation and ant colony optimization to improve the service facility layout in a station[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2012(2): 259.
 - [4] 杨天阳,朱志国. 基于 Anylogic 的地铁车站通道设施设备规模与布局分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2017(1): 115.
YANG Tianyang, ZHU Zhiguo. Scale and layout analyses of subway station facilities based on Anylogic software[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2017(1): 115.
 - [5] 郭长弓,顾保南. 城轨站行人流线网络构建及走行时间计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014(3): 429.
GUO Changgong, GU Baonan. Network creation and travel time calculation of pedestrian flow in urban mass transit station[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014(3): 429.
 - [6] 郭长弓. 城市轨道交通车站行人流线网络生成与时间计算方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.
GUO Changgong. Network creation and travel time calculation of pedestrian flow in urban rail transit station[D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- (收稿日期:2021-10-03)