

一种适用于多列车虚拟编组控制系统的 列车定位误差估计方法*

范莹 温博为 王志卓

(交控科技股份有限公司, 100070, 北京)

摘要 **[目的]** 虚拟编组技术对列车定位精度和准确性的要求极高, 传统定位技术手段难以满足虚拟编组 SIL4 (安全完整性等级为 4 级) 的安全需求, 因此有必要对定位算法进一步研究, 估算出更加精确的定位误差包络, 缩短虚拟编组追车距离, 提高编组安全性。 **[方法]** 基于传统列车定位技术, 将定位过程拆分为列车测速、测距与初始定位 3 个部分, 基于定位过程各部分中所存在的误差因素, 提出一种新的列车定位误差包络计算方法, 采用数理推导的方式, 分别对各类误差因素进行推导计算, 得到定位过程各部分的上下界包络。 **[结果及结论]** 所提方法充分考虑了列车测速、测距与初始定位中的误差因素, 使得定位误差上下界包络更加精确, 降低传统定位误差计算的保守性, 同时所提方法能够满足 SIL4 要求, 满足虚拟编组控制系统在近距离追车场景下的安全需求, 并进一步缩短追车距离, 提高运输效率。

关键词 轨道交通; 列车定位; 虚拟编组; 定位误差

中图分类号 U284.48

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.049

A Train Positioning Error Estimation Method Suitable for Multiple Trains Virtual Marshalling Control System

FAN Ying, WEN Bowei, WANG Zhizhuo

(Traffic Control Technology Co., Ltd., 100070, Beijing, China)

Abstract **[Objective]** Virtual marshalling technology requires high precision and accuracy of train positioning, and traditional train positioning technologies are unable to meet the safety requirements of the virtual marshalling SIL4. Therefore, it is necessary to further study the positioning algorithm, estimate more accurate positioning error envelope, and shorten the train chasing distance in virtual marshalling to improve the marshalling safety. **[Method]** Traditional train positioning technologies divide the positioning process into train speed measuring, distance measuring and initial positioning. Based on the error factors existing in the three parts of the positioning process, a

new calculation method of train positioning error envelope is proposed. The upper and lower boundary envelope for the three parts of the positioning process are obtained by mathematical derivation and calculation of each type of the error respectively. **[Result & Conclusion]** The proposed method fully considers the error factors in train speed measuring, distance measuring and initial positioning, making the upper and lower boundary envelope of positioning errors more accurate and reducing the conservation in traditional positioning error calculations. Meanwhile, the proposed method can reach the safety level of SIL4, meet the safety requirements of virtual marshalling control system in train close chasing scenario, and further shorten the train chasing distance, improving transportation efficiency.

Key words rail transit; virtual train marshalling; train positioning; positioning error

传统列车硬连接编组的方式较为固定, 难以应对客流的动态变化, 会造成资源的浪费。近年来, 一种能根据客流实时变化来动态调整线路运力的列车虚拟编组技术应运而生, 受到了国内外的广泛关注^[1-3]。虚拟编组技术通过计算机技术来模拟、优化列车的编组, 以提高轨道交通的运输效率。虚拟联编的两列列车之间没有物理连接, 由控制器根据列车运行速度及间距等信息实时计算列车的控制输入。为使两列列车编组尽量紧密, 虚拟编组技术对列车定位精度和准确性的要求极高^[4-9]。

目前, 列车的定位测算主要由初始位置获取 (以下称为“过程 A”) 和区间位置计算 (以下称为“过程 B”) 两个过程组成:

过程 A: 列车经过铺设于轨面的应答器, 即可得到列车的初始位置 (或校正位置);

过程 B: 在两个相邻应答器之间的运行区间, 列车通过速度传感器获取列车的实时速度和加速度, 由控制器根据速度与加速度计算列车走行距离, 并

* 北京市科技计划项目 (Z231100003823027)

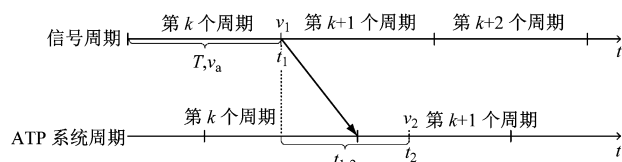
结合初始位置(校正位置)得到列车的实时定位。

过程 A 的初始定位误差来源主要为应答器的辐射范围、硬件安装偏差、通信延迟及控制器处理周期等;过程 B 的列车定位误差主要由速度传感器的精度和距离计算算法决定。此外,过程 B 的误差可以在下一次列车经过应答器时进行消除校正。

为了满足虚拟编组控制系统对列车定位精度要求和 SIL4(安全完整性等级为 4 级)的安全要求,本文以脉冲式速度传感器为例,在不考虑车轮空转与打滑的情况下,分别针对列车定位过程中存在的测速误差、累积测距误差及初始定位误差进行分析和优化,计算出 3 类误差所造成的定位参数上下界包络,降低传统误差计算的保守性,在有效保证虚拟编组运营的行车安全的前提下,缩短虚拟编组的追车距离。

1 测速误差

列车测速原理示意图见图 1。



注:ATP—列车自动防护; T —信号周期与 ATP 系统的周期时长;
 $v_{a,k}$ —第 k 个信号周期内的列车平均运行速度; t_{1-2} — t_1 到 t_2 时刻的时间间隔。

图 1 列车测速原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of train speed measuring principle

以第 k 个信号周期为起点,传统算法中的 t_2 时刻列车速度 v_2 为:

$$v_2 = v_{a,k} + at_{1-2} \quad (1)$$

$$v_{a,k} = \frac{N_{p,k}}{Q} \frac{\pi d}{T} \quad (2)$$

式中:

a —— t_{1-2} 期间内由加速度计获取的平均加速度;

$N_{p,k}$ ——第 k 个信号周期内速度传感器的脉冲数量;

Q ——速度传感器编码盘旋转一周的脉冲计数, $Q = 200 \times 2^n$, n 为速度传感器的通道数;

d ——轮径(直径)测量值。

然而传统算法算得的 v_2 是不准确的,与 t_2 时刻实际速度 v_2 仍存在偏差,主要由以下三方面造成:

①在实际测量中, N_p 、 d 和 a 均存在测量误差,直接

导致 v_2 计算值不准确;② $v_{a,k}$ 应使用 t_1 时刻的真实速度进行计算,现按 T 内的平均速度计算,故有误差;③在 t_{1-2} 时间内列车并非一定是匀加速运动,应考虑加速度变化所带来的影响。

由此可见,传统测速方法测速误差较大,无法满足虚拟编组对高精度定位的要求。为了适应虚拟编组中近距离追车的应用场景,必须要充分考虑所有误差因素所带来的影响,计算出 t_2 时刻最大测速误差的上界 $\bar{\Delta v}$ 和下界 $\underline{\Delta v}$,并通过上下界误差包络来保证近距离追车的安全性。

1.1 最大测速误差上界

第一步:根据最大测量误差对 v_a 进行补偿计算。由于速度传感器的脉冲波相在每个信号周期的首尾时刻都有可能产生跨压,因此速度传感器的最大测量误差 ΔN_p 为 2 个脉冲计数,即 $\Delta N_p = 2$ 。此外,定义轮径的最大值为 d_{\max} ,最小值为 d_{\min} ,最大测量误差为 Δd ,定义轮径调整参数 $D_1 = \max(d + \Delta d, d_{\max})$ 。结合式(2),可以得到补偿后的最大平均速度 $v_{a \max}$ 为:

$$v_{a \max} = \frac{N_p \pi D_1}{QT} + E_v \quad (3)$$

其中, E_v 为引入参数,且有:

$$E_v = \frac{\Delta N_p \pi D_1}{QT} \quad (4)$$

第二步:根据补偿后的最大平均速度 $v_{a \max}$ 计算 t_1 时刻的最大瞬时速度 $v_{1 \max}$ 。易知,无论列车在 T 内的速度曲线是如何动态变化的, T 内列车的平均速度和走行距离始终是恒定的,那么当且仅当列车以最大牵引加速度 a_{\max} 做匀加速运动时,列车运行速度在 t_1 时刻可达最大值 $v_{1 \max}$,有:

$$v_{1 \max} = v_{a \max} + \frac{1}{2} a_{\max} T \quad (5)$$

第三步:根据 $v_{1 \max}$ 计算 t_2 时刻的最大值 $v_{2 \max}$ 。考虑加速度计最大测量误差 Δa 和 t_{1-2} 时间间隔内列车加速度的动态变化,易知当且仅当列车以最大牵引加速度冲击率 r_{\max} 做匀变速运动时,列车运行速度在 t_2 时刻可达最大值 $v_{2 \max}$,即:

$$v_{2 \max} = v_{1 \max} + (a + \Delta a) t_{1-2} + \frac{1}{2} r_{\max} t_{1-2}^2 \quad (6)$$

最后,综合式(1)~式(6)可得, t_2 时刻测量速度 v_2 与实际速度 v_2 的最大测速误差上界 $\bar{\Delta v}$ 为:

$$\bar{\Delta v} = v_{2 \max} - v_2 = \frac{N_p \pi (D_1 - d)}{QT} + E_v +$$

$$\frac{1}{2}a_{\max}T + \Delta at_{1-2} + \frac{1}{2}r_{\max}t_{1-2}^2 \quad (7)$$

1.2 最大测速误差下界

定义轮径调整参数 $D_2 = \min(d - \Delta d, d_{\min})$, 同理计算可得, 最大测速误差的下界 $\underline{\Delta v}$ 为:

$$\underline{\Delta v} = v_2 - v_{2\min} = \frac{N_p \pi (d - D_2)}{QT} + \mathbb{E}_V + \frac{1}{2}a_{b\max}T + \Delta at_{1-2} + \frac{1}{2}R_{\max}t_{1-2}^2 \quad (8)$$

式中:

$v_{2\min}$ —— t_2 时刻的最小速度;

$a_{b\max}$ ——最大制动加速度;

R_{\max} ——最大制动加速度冲击率。

2 测距误差

列车测距原理示意图如图 2 所示。其中第 k 个信号周期为 t_{s0} 时刻到 t_{s1} 时刻, 其他周期以此类推; $N_{p,k}$ 和 $N_{p,k+1}$ 分别为第 k 和第 $k+1$ 个信号周期的脉冲计数; v_{a1} 和 v_{a2} 分别为第 k 和第 $k+1$ 个信号周期的平均速度; t_z 为 t_{s2} 时刻到 t_{a2} 时刻的时间间隔; a_3 为 t_z 时间内从加速度计获取的加速度测量值。 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别为 t_{s0} 至 t_{s1} 、 t_{s1} 至 t_{s2} 、 t_{s1} 至 t_{a1} 、 t_{a1} 至 t_{a2} 的测量距离, S 为 t_{s0} 到 t_{a2} 的累计测量距离。

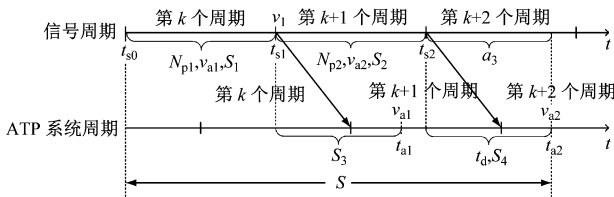


图 2 列车测距原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of train distance measuring principle

以第 k 个信号周期的初始为起点, 计算 S 为:

$$S = S_1 + S_2 + S_4 \quad (9)$$

$$S_1 = \frac{N_{p,k}}{Q} \pi d = v_{a1} T \quad (10)$$

$$S_2 = \frac{N_{p,k+1}}{Q} \pi d = v_{a2} T \quad (11)$$

$$S_4 = \left(v_{a2} + \frac{1}{2} a_{\max} T \right) t_z + \frac{1}{2} a_3 t_z^2 \quad (12)$$

上述 S 的计算方法同样存在测量不准确的问题, 为了保证近距离追车的安全性, 领头车与跟随车在计算 MA(移动授权) 和 EBI(紧急制动速度) 时还需要考虑测距误差的上界 $\bar{\Delta S}$ 与下界 $\underline{\Delta S}$ 冗余。

2.1 最大测距误差上界

最大测距误差上界满足:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta S} &= S_{\max} - S = (S_{1\max} - S_1) + \\ &\quad (S_{2\max} - S_2) + (S_{4\max} - S_4) = \\ &\quad \bar{\Delta S}_1 + \bar{\Delta S}_2 + \bar{\Delta S}_4 \end{aligned} \quad (13)$$

式中:

S_{\max} —— t_{s0} 至 t_{a2} 时刻的最大走行距离;

$S_{1\max}$ 、 $S_{2\max}$ ——第 k 个、第 $k+1$ 个信号周期内的最大走行距离;

$\bar{\Delta S}_1$ 、 $\bar{\Delta S}_2$ 、 $\bar{\Delta S}_4$ —— S_1 、 S_2 、 S_4 的最大测距误差上界;

$S_{4\max}$ —— t_{s2} 至 t_{a2} 时刻的最大走行距离。

从式(13)可以看出, 对最大测距误差上界 $\bar{\Delta S}$ 的计算可以转换为分别对 $\bar{\Delta S}_1$ 、 $\bar{\Delta S}_2$ 和 $\bar{\Delta S}_4$ 的计算。

第一步计算 $\bar{\Delta S}_1$ 。考虑 t_{s0} 到 t_{s1} 时刻(第 k 个周期)速度传感器的最大脉冲计数误差 $\Delta N_{p,k} = 2$, 将 Δd 及 $D_1 = \max(d + \Delta d, d_{\max})$ 代入式(10)可得:

$$S_{1\max} = \frac{N_{p,k} + \Delta N_p}{Q} \pi D_1 \quad (14)$$

进而可得 $\bar{\Delta S}_1$ 为:

$$\bar{\Delta S}_1 = S_{1\max} - S_1 = \frac{N_{p,k+1}}{Q} \pi (D_1 - d) + \frac{\Delta N_p}{Q} \pi D_1 \quad (15)$$

第二步计算 $\bar{\Delta S}_2$ 。类比第一步计算方法可得:

$$\bar{\Delta S}_2 = \frac{N_{p2}}{Q} \pi (D_1 - d) + \frac{\Delta N_p}{Q} \pi D_1 \quad (16)$$

第三步计算 $\bar{\Delta S}_4$ 。考虑 t_z 时间内的加速度计最大测量误差 Δa , 并假设 t_z 时间内列车以 r_{\max} 做匀变速运动, 当且仅当在此假设条件下可以得到:

$$S_{4\max} = v_{s2,\max} t_{1-2} + \frac{1}{2} (a_3 + \Delta a) t_{1-2}^2 + \frac{1}{6} r_{\max} t_{1-2}^3 \quad (17)$$

式中:

$v_{s2,\max}$ —— t_{s2} 时刻的最大瞬时速度。

与式(5)类似, 有:

$$v_{s2,\max} = \frac{N_{p,k+1} \pi D_1}{QT} + \mathbb{E}_V + \frac{1}{2} a_{\max} T \quad (18)$$

结合式(12)可得:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta S}_4 &= S_{4\max} - S_4 = \left(\frac{N_{p,k+1} \pi (D_1 - d)}{QT} + \mathbb{E}_V \right) t_z + \\ &\quad \frac{1}{2} \Delta a t_z^2 + \frac{1}{6} r_{\max} t_z^3 \end{aligned} \quad (19)$$

综合式(13)、式(15)、式(16)和式(19), 即可

得到最大测距误差上界。

2.2 最大测距误差下界

类似可得,最大测距误差下界为:

$$\Delta S = S - S_{\min} = (S_1 - S_{1\min}) + (S_2 - S_{2\min}) + (S_4 - S_{4\min}) = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_4 \quad (20)$$

其中:

$$\Delta S_1 = \frac{N_{p,k}}{Q} \pi (d - D_2) + \frac{\Delta N_p}{Q} \pi D_2 \quad (21)$$

$$\Delta S_2 = \frac{N_{p,k+1}}{Q} \pi (d - D_2) + \frac{\Delta N_p}{Q} \pi D_2 \quad (22)$$

$$\Delta S_4 = \left(\frac{N_{p,k+1} \pi (d - D_2)}{QT} + E_v \right) t_z + \frac{1}{2} \Delta a t_z^2 + \frac{1}{6} R_{\max} t_z^3 \quad (23)$$

3 初始定位误差

初始位置(或校正位置)是列车进行定位测算的原点,其自身的误差不可忽视。初始定位误差同测速误差及测距误差密切相关。目前轨道交通中列车的初始位置主要通过硬件设备应答器和 BTM (应答器传输模块) 取得,应答器和 BTM 是一组基于无线技术传输信息的设备,其自身存在一定辐射范围。BTM 接收应答器报文的辐射范围如图 3 所示,图中虚线是 BTM 接收应答器报文的实际辐射范围,但在虚线边缘位置可能接收报文不稳定,为了保证安全,ATP 系统会将此范围缩小至实线所示范围。

理论左沿: ATP 认为 BTM 会在此辐射点收到应答器报文

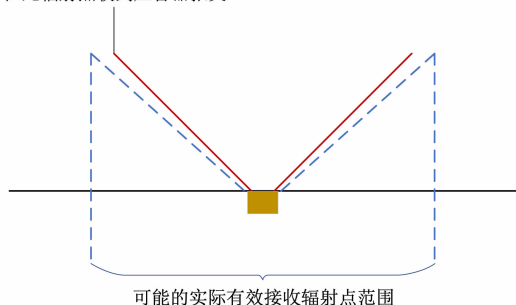


图3 BTM接收应答器报文的辐射范围示意图

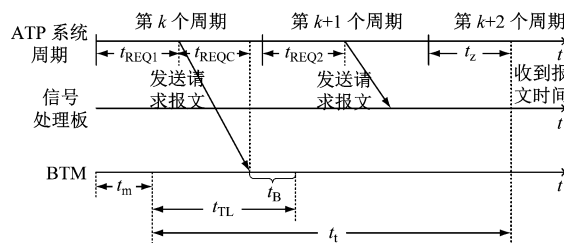
Fig.3 Radiation range diagram of BTM receiving balise message

初始定位的误差来源主要为以下3个方面:① 应答器与 BTM 安装误差,为固定值 D_s ;② 应答器辐射范围误差;③ 报文接收及处理延迟导致的走行距离计算误差。其中,列车初始位置通过接收应答

器报文获得,由于从发出报文到应用处理结束存在各类延迟,故需要计算在此类延迟中的列车走行距离。

3.1 应答器辐射范围误差

当列车经过应答器时,车载 BTM 会记录其第一次解析到应答器报文的时刻 t_r 。当车载 ATP 向其查询应答器报文时,BTM 会回复 ATP 从 t_r 到当前时刻的时间差 t_{TL} (见图4)。ATP 只知道 BTM 是在一定时间以前 (t_{TL} + BTM 到 ATP 的传输延迟) 第一次收到了应答器报文,但不知道 BTM 是在应答器辐射范围内的哪个空间点接收到的报文,所以 ATP 只能认为在辐射情况正常时,理论上是在图3中的“左沿”收到应答器报文。此外,从安全角度来说,ATP 还需要考虑 BTM 可能在整个“可能的实际有效接收辐射点范围”内收到应答器报文,传统初始定位方法是将应答器最大辐射范围 $D_{f\max}$ 作为初始位置误差,这导致初始定位的结果较为保守,对近距离追车应用场景造成了不小阻碍。



器报文后,除了解析报文中的位置信息以外,还需要计算整个报文接收过程延迟时间内列车的走行距离,两者结合便可以得到当前时刻列车的绝对位置,即列车初始位置。

报文接收过程如图 4 所示。

第一步 为了计算整个报文处理过程中的走行距离,需要计算出总延迟时间 t_t 。第 k 个信号周期开始时刻到 BTM 第一次接收到应答器报文的时间间隔为 t_m ,ATP 在第 k 个周期经过时间 t_{REQI} 向 BTM 发送请求报文,请求报文的传输时间为 t_{REQC} ,BTM 处理请求的时间为 t_B 。ATP 系统在第 $k+1$ 个周期经过时间 t_{REQ2} 向信号处理板发送请求报文,并最终在第 $k+2$ 个周期经过时间 t_z 接收到应答器报文。

由应答器报文收发过程可知,总延迟时间 t_t 为:

$$t_t = 2T + t_z - t_m \quad (25)$$

其中 t_m 须满足:

$$t_m = t_{\text{REQI}} + t_{\text{REQC}} + t_B - t_{\text{TL}} \quad (26)$$

第二步 计算 t_t 时间内列车的走行距离。图 6 为报文处理延迟时间内列车走行距离示意图。 t_y 为 ATP 系统周期与信号周期的周期差; t_{1j} 为请求报文发送时刻到第 k 个信号周期结束时刻的时间, t_{1j} 时间内列车的走行距离为 S_{1j} ; t_2 为第 $k+1$ 个信号周期的时间, t_2 时间内列车的走行距离为 S_2 ; $t_4 = t_y + t_z$, t_4 时间内列车的走行距离为 S_4 。

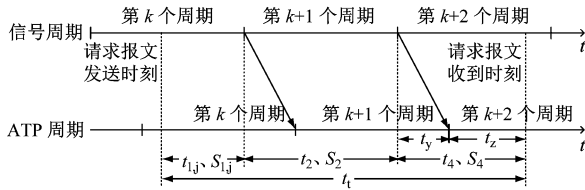


图 6 报文处理延迟时间内列车走行距离示意图

Fig. 6 Schematic diagram of train running distance during message processing delay time

由图 6 可知, t_t 时间内列车的总走行距离 S_t 满足:

$$S_t = S_{1j} + S_2 + S_4 \quad (27)$$

定义报文处理延迟时间内列车的最大走行距离为 $S_{t \max}$, t_{1j} 时间内的列车最大走行距离为 $S_{1j \max}$, ΔS_{1j} 为 S_{1j} 对应的最大测距误差上界,则初始定位走行距离最大测距误差上界 ΔS_Z 为:

$$\Delta S_Z = S_{\max} - S = (S_{1j \max} - S_{1j}) + (S_{2 \max} - S_2) +$$

$$(S_{4 \max} - S_4) = \Delta S_{1j} + \Delta S_2 + \Delta S_4 \quad (28)$$

其中 ΔS_2 和 ΔS_4 同式(16)和式(19)的结论一致,故只需对 ΔS_{1j} 作进一步分析即可。

第一段走行距离的测量值通常假设列车以均匀速度运动,即:

$$S_{1j} = \frac{N_p \pi d}{Q} \left(1 - \frac{t_{1j}}{T} \right) \quad (29)$$

当列车以 a_{\max} 作匀加速运动时,第一段走行距离取得最大值。结合式(5)可得:

$$\begin{aligned} S_{1j \max} &= v_{1 \max} t_{1j} - \frac{1}{2} a_{\max} t_{1j}^2 = \\ & \left(\frac{N_p \pi D_1}{QT} + E_v + \frac{1}{2} a_{\max} T \right) t_{1j} - \frac{1}{2} a_{\max} t_{1j}^2 = \\ & \frac{(N_p + \Delta N_p) \pi D_1}{QT} t_{1j} + \frac{1}{2} a_{\max} (T - t_{1j}) t_{1j} \end{aligned} \quad (30)$$

其中 $\Delta N_p = 2$ 。

结合式(28)一式(30)可得, S_{1j} 的最大走行误差上界 ΔS_{1j} 为:

$$\begin{aligned} \Delta S_{1j} &= S_{1j \max} - S_{1j} = \frac{(N_p + \Delta N_p) \pi D_1}{QT} t_{1j} + \\ & \frac{1}{2} a_{\max} (T - t_{1j}) t_{1j} - \frac{N_p \pi d}{Q} \left(1 - \frac{t_{1j}}{T} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

综合式(28)、式(31)、式(16)和式(19)即可得到初始定位走行距离最大测距误差上界。

同理,按照上述分析过程可以得到初始定位走行距离最大测距误差下界 ΔS_Z 为:

$$\Delta S_Z = \Delta S_{1j} + \Delta S_2 + \Delta S_4 \quad (32)$$

其中 ΔS_2 和 ΔS_4 与第 2.1 节式(22)和式(23)的结论一致,定义 ΔS_{1j} 为 S_{1j} 对应的最大测距误差下界, ΔS_{1j} 须满足:

$$\begin{aligned} \Delta S_{1j} &= S_{1j} - S_{1j \min} = \frac{N_p \pi d}{Q} \left(1 - \frac{t_{1j}}{T} \right) - \\ & \frac{(N_p - \Delta N_p) \pi D_2}{QT} t_{1j} + \\ & \frac{1}{2} a_{b \max} (T - t_{1j}) t_{1j} \end{aligned} \quad (33)$$

综合式(32)、式(33)、式(22)和式(23)即可得到初始定位走行距离最大测距误差下界。

4 结语

本文针对轨道交通列车虚拟编组应用场景,对列车定位过程中存在的测速误差、测距误差以及初始定位误差进行了详细分析与计算,给出了各个定

位过程中误差包络的上界和下界。本研究在河北北京智能制造基地试车线对该方法进行了工程验证。验证结果表明:在车速为 80 km/h 时,列车最短追车距离仅为 100 m,与采用原算法的追车距离相比,缩短量最高达 30 m。由此可见,该列车定位误差估算方法能够在保证 SIL4 安全等级的前提下有效缩短虚拟编组追车距离,有效降低传统误差包络上下界计算的保守性,为追车场景中领头车和跟随车的 MA 及 EBI 等参数计算提供依据。

参考文献

- [1] 唐涛, 罗啸林, 刘宏杰, 等. 城轨列车虚拟编组安全防护与运行控制技术研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(10): 31.
TANG Tao, LUO Xiaolin, LIU Hongjie, et al. Research review of the protection and operation technology for virtually coupled train sets in metros [J]. Science & Technology Review, 2023, 41(10): 31.
- [2] NOLD M, CORMAN F. Dynamic train unit coupling and decoupling at cruising speed: systematic classification, operational potentials, and research agenda[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2021, 18: 100241.
- [3] 刘宏杰, 唐涛, 张艳兵, 等. 城轨虚拟编组关键性能指标及技术探讨[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 28.
LIU Hongjie, TANG Tao, ZHANG Yanbing, et al. Discussion on the key performance indicators and technologies of virtual coupling in metros[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 28.
- [4] GALLO F, DI FEBBRARO A, GIGLIO D, et al. A mathematical programming model for the management of carriages in virtually

coupled trains[C] //2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Rhodes, Greece. New York: IEEE, 2020: 1.

- [5] PARK J, LEE B H, EUN Y. Virtual coupling of railway vehicles: gap reference for merge and separation, robust control, and position measurement[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(2): 1085.
- [6] DI MEO C, DI VAIO M, FLAMMINI F, et al. ERTMS/ETCS virtual coupling: proof of concept and numerical analysis[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(6): 2545.
- [7] ZHANG Z, SONG H, WANG H, et al. Cooperative multi-scenario departure control for virtual coupling trains: a fixed-time approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 8545.
- [8] WANG Q, CHAI M, LIU H, et al. Optimized control of virtual coupling at junctions: a cooperative game-based approach[J]. Actuators, 2021, 10(9): 207.
- [9] QUAGLIETTA E, WANG M, GOVERDE R M P. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020, 15: 100195.

· 收稿日期:2023-09-21 修回日期:2024-01-24 出版日期:2024-06-10
Received:2023-09-21 Revised:2024-01-24 Published:2024-06-10
· 第一作者:范莹,高级工程师,fanyingnew@163.com
通信作者:王志卓,助理工程师,wangzhizhuo@vip.qq.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 269 页)

- YANG Liwei, XING Wenwen, ZHANG Liping, et al. Evaluation of the health status of sewage pipeline system based on GA optimized BP neural network model[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(9): 123.
- [8] 邵威, 许厚棣, 金贤龙. 基于模糊准则的雷达健康评估方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(2): 152.
SHAO Wei, XU Houdi, JIN Xianlong. Research on fuzzy rules based health assessment method of radar[J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(2): 152.
- [9] 朱毅, 陈兴蜀, 陈敬涵, 等. 基于模糊综合评价模型的 DNS

健康度评估[J]. 信息安全, 2018(4): 65.

ZHU Yi, CHEN Xingshu, CHEN Jinghan, et al. DNS health assessment based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Netinfo Security, 2018(4): 65.

· 收稿日期:2023-10-30 修回日期:2024-01-25 出版日期:2024-06-10
Received:2023-10-30 Revised:2024-01-25 Published:2024-06-10
· 通信作者:李三江,高级工程师,86253160@qq.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