

城市轨道交通信号系统的典型测速定位方案比较

宋剑伟

(深圳地铁建设集团公司, 518035, 深圳 // 高级工程师)

摘要 针对城市轨道交通信号系统测速定位,详细分析了常用的轮轴速度传感器、多普勒雷达及加速度计的测速原理,并深入分析了各传感器的误差影响因素、失效模式以及传感器的复杂性。对目前常用的4种组合测速定位方案,从方案的测量精度、成本、系统可靠性、设备安装、安全性评估等方面进行了分析比较,给出了各种测速定位方案的优缺点。分析比较结果表明,速度传感器+加速度计+应答器的组合测速定位方案具有一定的发展优势。

关键词 城市轨道交通; 信号系统; 测速定位方案

中图分类号 U231.7; U284.48

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.04.007

Comparison of Urban Rail Transit Signaling System Train Velocity Measurement and Positioning Schemes

SONG Jianwei

Abstract Targeting the velocity measurement and positioning of urban rail transit signaling system, the measurement principle of commonly used wheel speed sensor, Doppler radar and accelerometer is analyzed in detail, and the measurement error factors, failure modes, and complexity of sensors are described in depth. Four typical train velocity measurement and positioning schemes are comparatively analyzed from aspects including measurement precision, costs, system reliability, equipment installation and safety evaluation. The merits and defects of each scheme are described. According to the analysis results, the scheme of combination of wheel speed sensor, accelerometer and transponder has the promising prospect.

Key words urban rail transit; signaling system; velocity measurement and positioning solution

Author's address Shenzhen Rail Transit Construction Group, 518035, Shenzhen, China

从基于轮轨式测速定位的城市轨道交通项目来看,大多数测速定位系统都是采用“轮轴速度传感器+非轮轴速度传感器+应答器”的多传感器配置方案^[1,5]。其中:轮轴速度传感器基于轮轴技术,通

常作为主要测速定位装置;非轮轴速度传感器主要用来处理空转或打滑时列车的测速定位问题;应答器一般用于列车定位初始化,并对列车进行重定位,用来减小列车的累积定位误差。然而,由于受各种传感器固有特性及测速定位方法等因素的制约,目前国内外常用的列车组合测速定位方案都有各自特点和不足^[1,5]。为满足城市轨道交通信号系统测速定位功能高精度、高安全可靠、低成本、易部署的要求,有必要从测量精度、成本、系统可靠性、设备安装及安全性评估等方面对各测速定位方案进行详细比较,从而得到具有发展优势的测速定位方案。

1 城市轨道交通典型测速定位方法

列车常用的测速方法可分为轮轴测速法和非轮轴测速法^[2]。运用发电机原理的测速发电机及运用光电变换的脉冲速度传感器,均采用轮轴测速法。利用多普勒效应的测速雷达、加速度计、交叉感应回线、计数轨枕、长定子齿槽检测等^[3],均采用非轮轴测速法。目前,大多数城市轨道交通项目是基于轮轨式的系统,故本文以轮轴速度传感器、多普勒雷达、加速度计为主要对象,从测量原理、误差影响因素、失效模式及传感器复杂度等方面对测速定位方案进行深入分析。

1.1 轮轴速度传感器

常用的轮轴测速传感器为运用发电机原理的测速发电机、运用光电变换的脉冲速度传感器。

当测速发电机与轮轴联接时,利用发电机所产生的电压频率与列车速度成正比,有:

$$v = \pi D f_d / Z \quad (1)$$

式中:

v ——列车速度;

Z ——发电机电极数;

D ——车轮直径;

f_d ——发电机产生的频率。

经过频率-电压变换,把 v 转换为电压,输出电压和转速成线性关系。当改变车轮旋转方向时,输出电压的极性将发生相应改变。

对于脉冲速度传感器,车轮每转 1 周,其发生器就会输出一定数量的脉冲或方波信号。脉冲或方波的频率与列车速度成正比:

$$v = \pi D f_m / N \quad (2)$$

式中:

N ——车轮旋转 1 周所计脉冲数;

f_m ——输出脉冲的频率。

受自身测量精度及机械安装等因素的影响,轮轴测速传感器的测量结果会有一定的误差。这类误差一般比较小。

轮轴测速传感器的主要误差是由车轮的空转打滑和轮径磨损造成的误差。这类误差通常较大。

对于轮轨制式轨道交通,当车轮和钢轨之间的摩擦力不足时,就会发生车轮空转或打滑的现象,进而导致实际测量的车轮速度与列车速度存在差异。这就是车轮空转打滑造成的误差。

列车在长期运行后,其测速轮径因磨损而不断减小,故用名义轮径计算出来的列车速度也与列车实际速度存在一定的误差。这就是轮径磨损造成的误差。这类误差累积后会影响到列车定位的精度。通过及时自动校准轮径的方法,可减少这类误差。

轮轴测速法的技术比较成熟,其测速传感器为通用的机电结构,测量方式简单,测量结果稳定可靠。但轮轴测速法由车轮空转打滑造成的误差比较大,尤其是在列车高速运行时,一次滑行造成的列车定位误差能达 10 m 以上,进而使列车速度的测量结果出现较大偏差。

1.2 多普勒雷达

多普勒雷达是利用多普勒效应来测量列车运行速度的方法。当发射源(或接收者)相对介质运动时,接收者接收到的电磁波的频率和发射源的频率不同,这种现象被称为多普勒效应。当发射源与接收者相向运动时,波被压缩,波长变短,频率变高;当二者相背运动时,效应相反。

多普勒雷达安装在列车底部,其始终向轨面发射电磁波,且发射角为 α ,如图 1 所示。

当列车速度为 v 时,雷达以速度 v 平行于反射面(轨道)运动,则雷达的发射波与接收波之间的频移 f_r 为^[4]:

$$f_r = f_2 - F = F \frac{v(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_1)}{c - v \cos \alpha_1} \approx F \frac{2v \cos \alpha}{c} \quad (3)$$

式中:

F ——雷达的工作频率;

c ——光速;

f_1 ——反射面接收到的波频率;

f_2 ——雷达接收到的波频率;

α_1 ——雷达电磁波的发射角;

α_2 ——雷达电磁波的入射角。

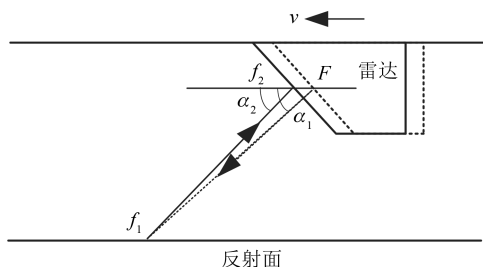


图 1 多普勒雷达工作原理

由于 $v \ll c$, $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \alpha$, 故 f_r 与 v 沿发射方向的分量大小成正比,进而可以计算出列车运行的速度。如果列车为前进状态,则反射的信号频率高于发射信号频率;反之,则低于发射信号频率。由此可确定列车的运动方向。

多普勒雷达测速方法属于非轮轴测速法,能有效克服空转和打滑等因素造成的误差,其技术也越来越成熟。但多普勒雷达易受雨雪天气、轨道积雪结冰及轨道反射面变化等外部环境条件的影响,且轨道不平整引起的振动及安装误差也会引起测量误差。多普勒雷达在列车低速运行($v \leq 5$ km/h)时,多普勒效应不明显,误差会比较大。此外,多普勒雷达内部软硬件相对比较复杂,其传感器失效模式及故障分析难度较大。

1.3 加速度计

城市轨道交通信号系统常用的加速度计是基于力平衡伺服原理的加速度传感器。当列车在运动方向上存在加速度时,加速度计的内部质量平衡块产生位移;将位移量用相关电路转化成电压输出,即可获得列车的加速度值。加速度计通常安装在车载机柜下方的车体上。应用加速度计可直接测量出车体的加速度,通过周期性测量列车的加速度,再根据以前累积下来的列车速度矢量和位置,即可计算前一段时间的列车总位移和当前速度:

$$v_k = v_{k-1} + aT_c \quad (4)$$

$$s_k = s_{k-1} + v_k T_c \quad (5)$$

式中:

a ——列车当前加速度;

v_k ——列车在第 k 周期的运行速度;

s_k ——列车在第 k 周期的累计位移;

T_c ——测速定位算法的处理周期。

加速度计内部结构简单,能直接测量列车车体的加速度信息,在短时间内具有较高的测量精度,可用于检测轮轴速度传感器的空转打滑状态。但加速度计测量结果受线路补偿坡度误差、加速度计安装误差、信号采集误差及测速算法误差等因素的影响^[5],会存在加速度测量误差。由于列车的速度和位移总在累加,故长时间误差累积后,加速度计的误差会变大。

2 组合测速定位方案

由于每一种测速传感器都有其固有的缺点,因此,单一的传感器无法完全满足城市轨道交通信号系统测速定位对安全性、精确性、实时性及应用环境的要求。采用速度传感器与多普勒雷达组合,或速度传感器与加速度计组合等多种定位技术组合,能通过融合多种信息方式来进行冗余互补。这样,一方面可以完成对速度的精确测量,另一方面可以检测列车车轮的空转打滑。利用轮轴速度传感器、多普勒雷达或加速度计能测量出列车的速度或加速度信息,进而根据时间计算出列车的位移,从而获得列车的相对定位信息。但定位误差会随着时间的积累,必须每隔一定距离对列车定位进行修正。因此,城市轨道交通测速定位方案除了配置测速装置,还需配置应答器等绝对定位装置。

目前,城市轨道交通信号系统典型的组合测速定位方案主要有速度传感器+多普勒雷达+应答器、速度传感器+加速度计+应答器、编码里程计+应答器及速度传感器+应答器等几种。

2.1 方案一

方案一为速度传感器+多普勒雷达+应答器方案。在列车每端的不同车轴上安装 2 个独立的速度传感器,以测量列车车轮的速度并进行相互校验;在列车每端分别安装 1 个多普勒雷达,与速度传感器完成冗余的列车速度和走行距离计算及验证;列车每端各设置 1 个应答器天线,用来接收地面应答器发送的报文,用于列车绝对定位计算。速度传感

器为主用速度测量设备。多普勒雷达作为辅助测速设备,主要用来检测列车空转和打滑,并进行测速误差修正,从而获得比较精确的速度及位置信息。

该测速定位方案技术比较成熟,工程项目应用比较广泛,线路上布置的应答器也相对较少。方案一主要存在以下问题:①测量结果受环境影响比较大,恶劣天气气候下会引起多普勒雷达的误差变大,甚至不可用;②多普勒雷达的相对价格较高,增加了整个车载系统的成本;③多普勒雷达的安装较复杂,增加了系统的实施及维护工作量;④多普勒雷达内部软硬件比较复杂,增加了车载测速算法安全评估的复杂性。

2.2 方案二

方案二为速度传感器+加速度计+应答器方案。在列车每端的不同车轴上安装 2 个独立的速度传感器,以测量列车车轮的速度并进行相互校验;在列车每端安装 2~3 个加速度计,用来测量列车的加速度信息,比较多个加速度计的测量结果,以确认输出的有效性,提供高可用性;在列车每端各安装 1 个应答器天线,用于列车绝对定位。在列车正常运行时,如没有发生车轮空转打滑,则车载控制器利用速度传感器的信息来计算列车的速度;如出现车轮空转打滑,则车载控制器根据空转滑行开始前的列车速度,利用加速度计进行补偿,来计算当前的列车速度和位置,待空转打滑结束后,再将速度和位移的测量切换回速度传感器。

该测速定位方案技术比较成熟。加速度计结构相对简单,易于安装,成本也相对较低,能提供比较精确的速度及位置信息,工程项目应用比较广泛。方案二主要存在以下问题:①加速度计在轨道不平整、列车过道岔或过曲线时,测量误差及噪声比较大,会引起测速系统误判断;②由于受线路补偿坡度误差、加速度计安装误差及信号采集误差等因素的影响,测速算法相对比较复杂;③加速度计虽价格低于多普勒雷达,但也增加了成本。

2.3 方案三

方案三为编码里程计+应答器方案。在列车头尾各安装 1 个独立的编码里程计,用于测量列车车轮的速度;在列车头尾各安装 1 个应答器天线,用于列车绝对定位。该测速方案一端仅需安装 1 个编码里程计。在编码里程计内部,外圈布置 3 个通道的传感器,用来测量速度及运行方向确认,内圈传感器用于齿数编码。通过比较内外圈测量结果的一

致性,可安全地计算列车的速度。如果 1 个齿损坏或未被任何传感器检测到,则所计量的齿数将无法与车轮的位置编码相对应,所测得的速度无效,从而实现安全速度测量。

编码里程计+应答器测速定位方案已在上海、北京、广州、深圳、郑州及成都等多个城市轨道交通项目中广泛应用,技术较成熟,其测速定位设备较简单,成本比较低。方案三主要存在以下问题:①方案采用了单一的测速设备,当出现空转/打滑时,补偿误差会比较大;如果通过在线路上布置较多的应答器来减少定位误差,则会增加应答器的成本;②方案采用了偏保守的处理方式,在气候潮湿的室外线路易受车轮空转打滑的影响。

2.4 方案四

方案四为速度传感器+应答器方案。在列车每端各安装 2 个速度传感器和 1 个应答器天线,对每端的 2 个速度测值进行比较及相互诊断,以确认速度测量值的有效性,当列车出现车轮空转打滑时,根据 2 个速度传感器的测量值进行补偿,以保证列车测速的安全可信;线路上每隔一定距离布置应答器,以减少列车累积的定位误差。

该定位方案已在基于轨道电路的固定闭塞及准移动闭塞的系统中获得应用,技术比较成熟,其测速定位设备较简单。方案四主要存在以下问题:①方案仅使用了轮轴速度传感器,当出现车轮空转打滑时,需进行较大误差补偿,从而影响了定位系统的追踪性能。②方案的速度及位置信息计算精确性一般,为获得较高的测速定位精度,需要在线路上布置较多的应答器加以误差修正,增加了应答器成本。

2.5 方案对比

表 1 为 4 种测速定位方案的对比。在测量精度方面:方案一和方案二使用了雷达或加速度计进行空转打滑的补偿,其测速误差通常可以控制在 3% 左右;方案三和方案四未设置专门的非轮轴传感器来检测车轮空转打滑,故需要进行相应的补偿,其测速误差最大可达 15%。在成本方面:方案一的多普勒雷达费用约为几万元,成本最高;方案三仅使用单个编码里程计,成本最低。在可靠性方面:方案一的雷达易受雨雪等环境的影响;方案三的单一编码里程计一旦发生故障,将会导致测速不可用;方案二和方案四的可靠性比较高。在设备安装方

面:方案一的雷达安装在车底,安装难度大、要求高;方案三和方案四设备少,易安装。在安全性评估方面:方案一的雷达内部结构及算法比较复杂,安全分析存在难度,而速度传感器和加速度计内部结构相对简单;方案四的传感器配置有利于安全评估。

每种测速定位方案有各自的优势和不足。从综合评估结果来看,方案二更具有发展优势。

表 1 各种测速定位方案对比

测速定位方案	测量精度	成本	可靠性	设备安装	安全性评估
方案一	高	高	中	一般	复杂
方案二	高	较高	高	较简单	较复杂
方案三	中	较低	中	简单	较复杂
方案四	中	中	较高	简单	中等

3 结语

本文对适用于城市轨道交通信号系统测速的常用传感器,从测量原理、误差影响因素、失效模式及传感器复杂度等方面进行了深入分析。每种传感器都有其固有的优势和不足,需要进行多种传感器组合。对速度传感器+多普勒雷达+应答器、速度传感器+加速度计+应答器、编码里程计+应答器、速度传感器+应答器这 4 种城市轨道交通信号系统典型的测速定位方案,从测量精度、成本、系统可靠性、设备安装、安全性评估方面进行了分析比较,结果表明,速度传感器+加速度计+应答器方案更符合城市轨道交通信号系统对测量精度、成本、可靠性、设备安装及安全性评估等方面的要求。

参考文献

[1] 辛骥,余力. TrainGuard MT 系统雷达测速故障探讨及解决方案[J]. 铁道通信信号,2014(8): 34.

[2] 谭星,张睿兴. 城轨系统中几种常用测速方法的误差与应用分析[J]. 铁道通信信号,2012(1): 60.

[3] 张世聪. 适用于磁浮列车的测速定位方法研究综述[J]. 铁道标准设计,2018(10): 186.

[4] 张振兴. 城市轨道交通中的列车定位方法[D]. 北京: 北京交通大学,2008.

[5] 蔡宗加. 城市轨道交通 CBTC 信号系统列车位置不确定性分析[J]. 城市轨道交通研究,2018(增刊1): 72.

(收稿日期:2020-09-18)