

基于多加速度计融合算法的列车运行坡度测量装置

徐明功<sup>1</sup> 吕 平<sup>2</sup>

(1. 青岛地铁集团有限公司,266101,青岛;2. 青岛市地铁十三号线有限公司,266555,青岛 // 第一作者,高级工程师)

**摘 要** 提出一种基于多加速度计融合的列车运行坡度测量装置。该装置通过不同角度的加速度计来测量列车的实时加速度,结合加速度计融合算法,可动态计算出列车所在位置的线路坡度值。该方法使得列车不依赖于精确定位和电子地图就可进行超速防护,提升了安全性和可用性,有利于推广应用到互联互通 CBTC(基于通信的列车控制)系统中。

**关键词** 轨道交通;列车;线路坡度测量;多加速度计融合算法

**中图分类号** U284.48<sup>+</sup>1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.06.033

Train Running Slope Measurement Device Based on Multi-accelerometer Fusion Algorithm

XU Minggong, LYU Ping

**Abstract** A train running slope measurement device based on multi-accelerometer fusion is proposed. The system measures the real-time acceleration of the train through accelerometers of different angles, and combined with the accelerometer fusion algorithm, the slope value of the train position can be dynamically calculated. By using this method, the train does not rely on precise positioning and electronic map for overspeed protection, which improves the security and availability of the system, and is beneficial for popularizing and being integrated into the interoperable CBTC system.

**Key words** rail transit; train; line slope measurement; multi-accelerometer fusion algorithm

**First-author's address** Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266101, Qingdao, China

列车的测速技术在列车运行控制系统中占据着重要的地位,直接关系到列车的安全运行。列车测速装置通常采用多传感器融合方式实现。轮轴速度传感器的测速原理是通过检测车轮的转动次数来精确计算车轮速度,当车轮空转或打滑时,该类传感器容易出现测速不准确的情况。此时,往往需要通过雷达或加速度计来辅助检测车轮的打滑

和空转。雷达安装在列车底部,基于多普勒效应,通过轨面反射多普勒波来计算列车运行速度,容易受到雨雪天气、地面积水、光源、碎石道床和整体道床之间转换等影响,且发生故障后的更换流程较为繁琐,可维护性较低。加速度计安装在车厢内部,基于非接触位移传感器计算列车加速度,不依赖列车运行环境,更有利于推广应用至互联互通城市轨道交通线路中。

利用加速度计测量加速度会受到列车所在线路坡度的影响,列控系统普遍通过列车定位和电子地图的结合来获取列车所在位置的实时线路坡度。本文提出一种不依赖电子地图的多加速度计列车运行坡度测量方法。

1 列车运行坡度测量装置的组成

本文所描述的基于多加速度计融合算法的列车运行坡度测量装置(见图 1)主要由 3 个加速度计、加速度计组合工装、A/D(模拟信号转换成数字信号)采集电路、微处理器、多加速度计融合算法等 5 部分组成。其中,3 个加速度计需要与加速度计组合工装配套使用,一起安装在列车车体上,确保加速度计的运动状态与列车车体一致。列车运行时,微处理器驱动 A/D 采集电路可实时采集 3 个加速度计的测量值,再将这些测量值输入多加速度计融合算法中,由融合算法计算得到列车所在位置的实时线路坡度。

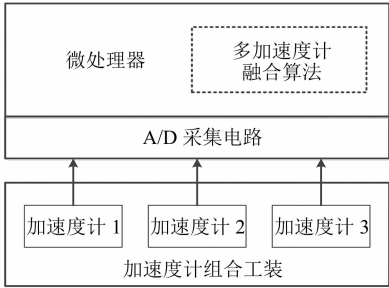


图 1 基于多加速度计融合算法的列车运行坡度测量装置构架

## 2 加速度计与加速度计组合工装

为满足多加速度计融合算法对加速度计测量时的安装要求,3 个加速度计需要与组合工装配套使用,配套后的加速度计工装模型如图 2 所示。

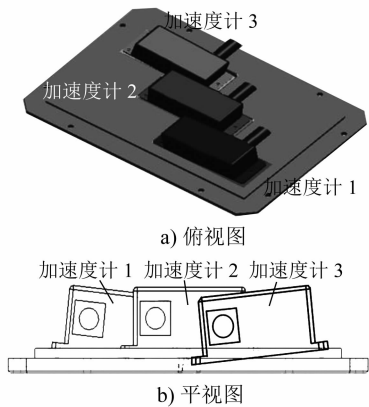
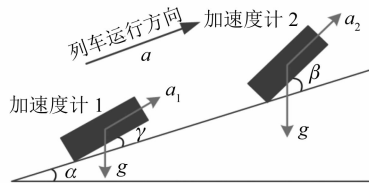


图 2 加速度计与组合工装配套安装后的示意图

组合工装将加速度计 1 设置为仰角安装,将加速度计 2 设置为水平安装,将加速度计 3 设置为俯角安装。其中,加速度计的俯仰角方向与其测量方向一致,加速度计的测量方向与列车运行方向一致。

## 3 多加速度计融合算法

带俯仰角安装的多个加速度计处于线路坡道时,其加速度值的测量示意如图 3 所示。



注:  $\alpha$  为列车所在位置的线路坡度值;  $g$  为重力加速度;  $\gamma$  为加速度计 1 相对于车体的安装倾角(通过组合工装实现);  $a_1$  为加速度计 1 的加速度测量值;  $\beta$  为加速度计 2 相对于车体的安装倾角;  $a_2$  为加速度计 2 的加速度测量值;  $a$  为列车在坡道上的实际加速度。

图 3 带俯仰角安装的加速度计处于坡道时的测量示意图

对于加速度计 1:

$$a_1 = a \cos \gamma + g \sin(\alpha + \gamma) \quad (1)$$

对于加速度计 2:

$$a_2 = a \cos \beta + g \sin(\alpha + \beta) \quad (2)$$

将式(1)乘以  $\cos \beta$ , 得到:

$$a_1 \cos \beta = a \cos \gamma \cos \beta + g \sin(\alpha + \gamma) \cos \beta \quad (3)$$

将式(2)乘以  $\cos \gamma$ , 得到:

$$a_2 \cos \gamma = a \cos \gamma \cos \beta + g \sin(\alpha + \gamma) \cos \gamma \quad (4)$$

将式(3)与式(4)相减并进行简化,得到:

$$\cos \alpha = \frac{(a_1 \cos \beta - a_2 \cos \gamma)}{[g \sin(\gamma - \beta)]} \quad (5)$$

根据式(5),通过加速度计 1 和加速度计 2 的测量值  $a_1$  和  $a_2$ ,以及两个加速度计的安装倾角  $\beta$  和  $\gamma$ ,就可以组合计算出列车当前所在位置线路坡度的余弦值  $\cos \alpha$ ,进而推算出  $\alpha$ 。

基于多加速度计融合的列车运行坡度测量装置共包含 3 个加速度计。在使用加速度计融合算法进行坡度计算时,需对这 3 个加速度计进行两两组合,得到 3 种组合配对方式,最后通过式(5)计算出 3 种组合的线路坡度计算结果。

3 个线路坡度计算结果需要进行三取二表决,表决原理如图 4 所示。

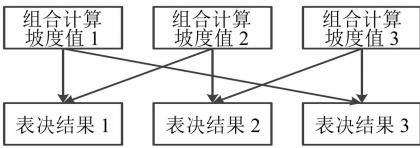


图 4 加速度计表决原理图

采用加速度计测量加速度时存在测量误差,使用加速度值进行坡度计算时亦会产生坡度计算误差。因此,在进行坡度计算值表决时,需考虑该允许误差。当坡度值之间的差值小于允许误差时,则认为表决通过;否则认为表决失败。表决结果将决定 3 个计算得出的坡度值在计算最终坡度值时的权重,权重计算方式如表 1 所示。

表 1 坡度值表决结果及其权重对应表

表决结果 1	表决结果 2	表决结果 3	坡度值 1 权重	坡度值 2 权重	坡度值 3 权重
✓	✓	✓	1/3	1/3	1/3
×	✓	✓	1/4	1/4	1/2
✓	×	✓	1/2	1/4	1/4
✓	✓	×	1/4	1/2	1/4
×	×	✓	1/2	0	1/2
×	✓	×	0	1/2	1/2
✓	×	×	1/2	1/2	0
×	×	×	0	0	0

将坡度值乘以其对应的权重,得到 3 个权重值,再将 3 个权重值加起来,则可得到最终的有效坡度值。需注意,当 3 个表决结果均为表决失败时,则本次坡度计算结果无效。

使用 3 个加速度计还可起到硬件冗余的效果。若 1 个加速度计出现故障时,列车运行坡度测量装置还可通过另外两个加速度计来计算坡度,因此,

整个装置的可用性和安全性可以得到保障。

4 试验验证

通过软件编程来验证多加速度计融合计算坡度的算法,得到的数据如表 2 和表 3 所示。

表 2 多加速度计融合算法的输入条件

$a/$ ( $\text{cm/s}^2$ )	坡度 千分数/ ‰	$\alpha/$ ( $^\circ$ )	$\gamma/$ ( $^\circ$ )	$\beta/$ ( $^\circ$ )	$g/$ ( $\text{cm/s}^2$ )	$a_1/$ ( $\text{cm/s}^2$ )	$a_2/$ ( $\text{cm/s}^2$ )
100.000	0	0.000 00	0	30	980	100.000	576.60
100.000	5	0.286 48	0	30	980	104.900	580.84
100.000	10	0.572 94	0	30	980	109.800	585.06
100.000	15	0.859 37	0	30	980	114.698	589.28
100.000	20	1.145 76	0	30	980	119.596	593.48
100.000	25	1.432 10	0	30	980	124.492	597.66
100.000	30	1.718 36	0	30	980	129.387	601.83

表 3 多加速度计融合算法的输出结果

$a_1 \cos \beta -$ $a_2 \cos \gamma$	$\sin(\gamma - \beta)$	$\cos \alpha$	$\alpha/$ ( $^\circ$ )	坡度千分数/ ‰
-490.000	-0.5	1.000 00	0.000 00	0
-489.994	-0.5	0.999 99	0.286 48	5
-489.976	-0.5	0.999 95	0.572 94	10
-489.945	-0.5	0.999 89	0.859 37	15
-489.902	-0.5	0.999 80	1.145 76	20
-489.847	-0.5	0.999 69	1.432 10	25
-489.780	-0.5	0.999 55	1.718 36	30

注:坡度千分数由多加速度计融合算法计算得到。

根据表 2 和表 3,使用多加速度计融合算法计算列车所在坡道的坡度值时,无论坡度如何变化,均能准确计算出该坡度值。

通过注入测量误差的方式来模拟加速度计在实测过程中的测量扰动,进一步通过软件编程验证多加速度计融合算法,得到的数据见表 4 和表 5。

注入加速度计测量误差后的坡度计算值与理论值的对比曲线如图 5 所示。

由表 4 和表 5 可知,为加速度计 1 注入 0.001  $\text{cm/s}^2$  的测量误差后,通过多加速度计融合算法计

表 4 注入测量误差后多加速度计融合算法的输入条件

$a/$ ( $\text{cm/s}^2$ )	列车所在 坡度的 千分数/‰	$\alpha/$ ( $^\circ$ )	$\gamma/$ ( $^\circ$ )	$\beta/$ ( $^\circ$ )	$g/$ ( $\text{cm/s}^2$ )	$a_1/$ ( $\text{cm/s}^2$ )	$a_2/$ ( $\text{cm/s}^2$ )
100.001	0	0.000 00	0	30	980	100.001	576.60
100.001	5	0.286 48	0	30	980	104.901	580.84
100.001	10	0.572 94	0	30	980	109.801	585.06
100.001	15	0.859 37	0	30	980	114.699	589.28
100.001	20	1.145 76	0	30	980	119.597	593.48
100.001	25	1.432 10	0	30	980	124.493	597.66
100.001	30	1.718 36	0	30	980	129.388	601.83

表 5 注入测量误差后多加速度计融合算法的输出结果

$a_1 \cos \beta -$ $a_2 \cos \gamma$	$\sin(\gamma - \beta)$	$\cos \alpha$	$\alpha/$ ( $^\circ$ )	坡度千分数/ ‰
-489.999	-0.5	1.000 00	0.107 72	1.880 11
-489.993	-0.5	0.999 99	0.306 06	5.341 81
-489.975	-0.5	0.999 95	0.582 98	10.175 23
-489.944	-0.5	0.999 89	0.866 10	15.117 41
-489.901	-0.5	0.999 80	1.150 82	20.088 23
-489.846	-0.5	0.999 69	1.436 14	25.070 66
-489.779	-0.5	0.999 55	1.721 73	30.058 94

注:坡度千分数由多加速度计融合算法计算得到。

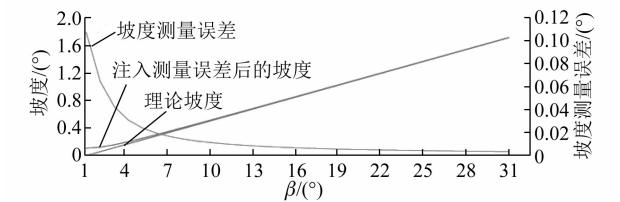


图 5 注入测量误差后的坡度与理论坡度对比图

算得到的坡度值会产生误差,但最大误差仅为 0.107 72  $\text{cm/s}^2$ ,且该测量误差是列车运行坡度测量装置可接受的。

综上所述,只要加速度计测量误差在一定范围内,本文提出的多加速度计融合算法即可满足城市轨道交通行业中的线路坡度测量需求。

5 结语

本文提出一种基于多加速度计融合的列车运行坡度测量装置,该装置通过 3 个加速度计的测量值和加速度计的安裝傾角,可实时计算出列车所在位置处的线路坡度值。通过三取二安全表决,使装置的安全性和可靠性得以提升。试验结果表明了该装置在城市轨道交通中的可行性。

参考文献

[1] 赵晓峰.城市轨道交通列车测速系统及算法比较研究[J].城市轨道交通研究,2015(11): 83.

[2] 冯智勇,曾瀚,张力,等.基于陀螺仪及加速度计信号融合的姿态度量测量[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011(4): 137.

[3] 张洋,周达天,刘宏杰,等.基于多传感器融合的列车测速定位方法[J].都市快轨交通,2011(4): 30.

[4] 黄涛,陈祥献,黄海.基于三取二冗余结构的安全计算机系统[J].计算机工程,2011(18): 254.

[5] 姬冰冰,买培培,苏涛.一种基于卡尔曼滤波的机车测速雷达算法[J].火控雷达技术,2009(1): 43.

(收稿日期:2019-10-24)