

文章编号: 1001 - 2486(2011)01 - 0109 - 06

## 高速磁浮列车测速定位系统的研究\*

吴峻, 周文武, 李璐

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**测速定位系统是高速磁浮列车牵引和运行控制基础,与轮轨列车的系统相比,存在着如悬浮间隙波动、长定子轨道接缝及非接触式绝对位置读码等可能影响系统正常运行的特殊问题。为了降低悬浮波动对相对位置检测的影响,提出了利用悬浮间隙归一化处理相对位置检测信号的方法,使输出统一变换为8mm悬浮间隙下的信号,达到了磁极相角精度 $2.8^\circ$ 的检测要求;为了降低轨道接缝对相对位置检测的影响,提出了一种基于自适应滤波预估的两路检测信号切换的方法,消除了轨道接缝导致的信号畸变,满足了相对位置检测要求;为了解决绝对位置非接触读取问题,分析了相应的电磁感应电路模型,提出了提高激励电压频率、幅值和降低发射线圈电阻等措施,满足了非接触读取绝对编码的要求。

**关键词:**高速磁浮列车;测速定位;悬浮间隙;轨道接缝;相对位置;绝对位置

**中图分类号:**U292.91 **文献标识码:**A

## Research on Speed and Position Detection System of High Speed Maglev Train

WU Jun, ZHOU Wen-wu, LI Lu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Speed and position detection system is the basis of propulsion and traction control for high speed maglev train. Compared with traditional railways, high speed maglev trains have some exclusive problems which can affect system proper working, such as levitating fluctuation, joint gap of long stator track and contactless reader for absolute position. To reduce detection error of relative position due to levitating fluctuation, a method utilizing levitation gap to normalize detection output into the one of 8mm levitation gap is proposed. It is found that it can satisfy the precision requirement of  $2.8^\circ$  for relative position detection. To reduce detection error of relative position due to joint gap of track, a switching method between two relative-position detections based on a predictive adaptive filter was adopted. As a result, it can avoid distortion and satisfy the precision requirement of relative position detection. To solve the problem of absolute position reader by contactless method, an equivalent model of electro-magnetic induction reader was analyzed. It is found that the frequency and amplitude of magnetic fields need be increased and the resistor of emit coils need be decreased. As a result, it can satisfy the absolute position detection requirement.

**Key words:** high speed maglev train; speed and position detection; levitation gap; joint gap of track; relative position; absolute position

常导高速磁浮列车作为一种以磁悬浮方式沿轨道高速运行的绿色交通工具,从牵引的角度看,它是一种直线同步牵引系统,在低速段,当直线电机反电势信号还不足够强时,需要有测速定位装置来获得准确的次级极相角信号来实现稳定的牵引控制,次级极相角的检测精度要求达到 $2.8^\circ$ 。另外,在车辆的运行控制过程中,车辆的定位检测分辨力要求达到1/4齿槽宽度和 $\pm 1$ 齿槽定位精度,速度要求满足0.1m/s分辨力。可见,高速磁浮列车的测速定位系统是车辆牵引和运行控制的

基础。

国内外对此进行了较广泛的研究,德国系统已经成功应用在上海浦东机场线。其中的绝对位置读码器通过电磁感应方式读取铺设在轨道上位置标志板的编码<sup>[1-4]</sup>,这是高速磁浮列车的特殊问题。车辆的相对位置检测依靠相对位置传感器敏感长定子轨道的齿槽结构来完成计数,很多旋转机械非接触测速系统广泛地采用了这种方法<sup>[5]</sup>,但是,不同的是,磁浮列车的相对位置传感器是车载装置,它与被测长定子之间的间隙随着

\* 收稿日期:2010-06-01

作者简介:吴峻(1973—),男,副教授,博士。

车辆浮动而浮动变化,并且长定子轨道是通过一段段长定子模块固定在轨道梁上拼接而成的,轨道梁间还存在较大接缝<sup>[6]</sup>,因此,作为相对位置传感器的被测体的长定子轨道并不是一个连续变化的齿槽结构体。这些因素增加了测速定位研究难度。文献[4,7-8]采用电感传感器对长定子齿槽周期进行计数,设计了利用速度线性插值实现齿槽周期细分法来解决定位精度问题,但这种方法适用于车辆匀速运行状态,当车辆变速运行时,就会产生较大的误差。文献[3,9]则利用了检测线圈等效电感近似于正弦变化的特点,采用反三角函数计算的方法实现高精度定位,但是它未能很好地解决悬浮间隙波动对位置检测的影响。此外,由于市场推广及技术保密等原因,解决磁浮列车速度位置检测系统过接缝问题的公开文献较少<sup>[10-11]</sup>。

### 1 测速定位系统的介绍

如图 1 所示,每套测速定位系统包括两个绝

对位置读码器、两个相对位置传感器、一套车载磁极相角处理单元、一套车载位置信息处理单元。在线路上,每隔大约 200m 设置一套按线路绝对位置信息编码的标志板,车辆通过标志板时,车载的绝对位置读码器读入标志板上的编码,确定列车的绝对位置。标志板之间的相对位置信息则利用相对位置传感器敏感长定子的齿槽变化,并且经磁极相角处理单元合成处理为 360°周期变化的极相角信号,经无线系统传输到地面牵引控制系统,牵引控制系统采用一定算法来控制定子绕组中电流,牵引车辆运行。另一方面,测速定位系统将处理合成车辆位置和速度信息,经车载安全计算机、无线传输单元传送给地面运行控制系统,运控系统利用这些信息控制车辆实现自动驾驶。

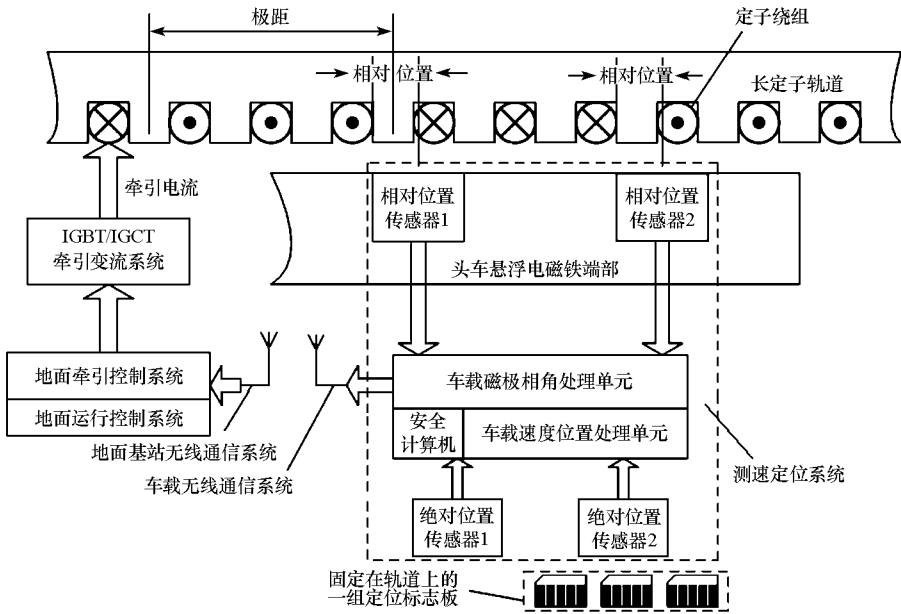


图 1 测速定位系统的组成

Fig. 1 Contributions of speed and position detection system

### 2 相对位置检测的问题及其解决方法

#### 2.1 相对位置检测原理和存在的问题

如图 2 所示,相对位置传感器由两路振荡电路组成,其中两只检测线圈沿轨道方向排列,之间错位 1/4 齿槽周期宽度,当相对位置传感器随车辆沿长定子轨道表面移动时,检测线圈的等效电感会发生周期变化,提取并细分这种变化,就可获

得车辆的位置和次级极相角信号。

由于相对位置传感器是车载装置,它与长定子之间的间隙会随着悬浮控制的调整而发生变化,而 8~14mm 的间隙属于正常的调整范围;另外,长定子轨道的接缝也将导致单个相对位置传感器测量信号出现较大畸变。这些都是影响相对位置检测精度的因素。

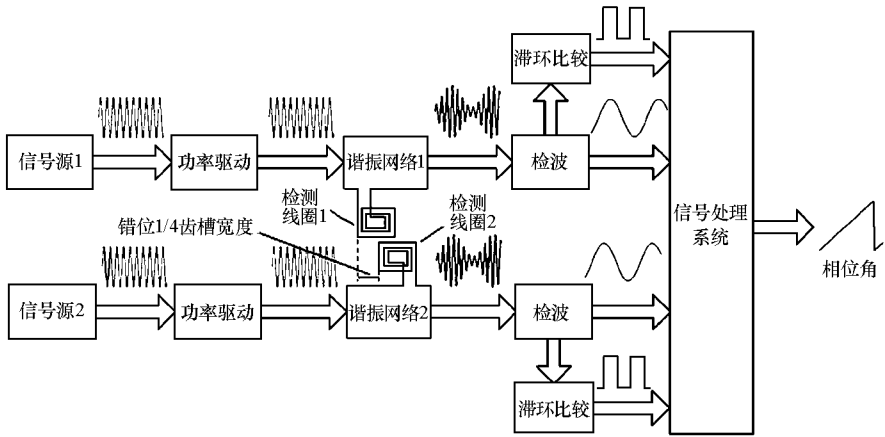


图 2 相对位置传感器的结构

Fig.2 Structure of relative position sensor

### 2.2 间隙波动对相对位置检测影响及其解决方法

可以直接利用反余弦函数法或查表线性插值法将检测线圈等效电感的变化转化为位置信息<sup>[3,9]</sup>,但这些方法有应用前提,即悬浮间隙需保持恒定。如图 3 所示,正常悬浮间隙调整对相对位置检测的检波输出幅值影响较大,若仍采用前述方法,相对位置检测就存在较大误差。通过分析发现,虽然不同间隙下信号幅值变化较大,但相位变化与其所处的长定子轨道位置仍一一对应,因此提取信号的相位变化信息或消除间隙波动对输出幅值影响就可解决问题。

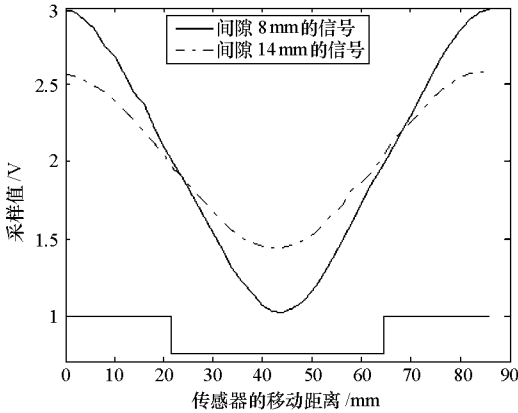


图 3 不同间隙下相对位置检测检波输出

Fig.3 Output of relative position sensor under different gap

本文采用消除悬浮间隙波动对输出幅值影响的方案。首先,采样获得悬浮间隙信号。由图 2、4 可知,相对位置检测的两路信号相差 90°,经过滞环比较后输出的两路方波也相差 90°,因此,利用信号 2 上升沿与下降沿来采样检测线圈 1 信号做差就可以获得悬浮间隙信号。在实际运行中悬浮系统在一个齿槽长度运行时间里不会进行大调整,因此,基于一个齿槽周期只提取悬浮间隙的方法不会引入较大误差,可以满足要求。其次,通过

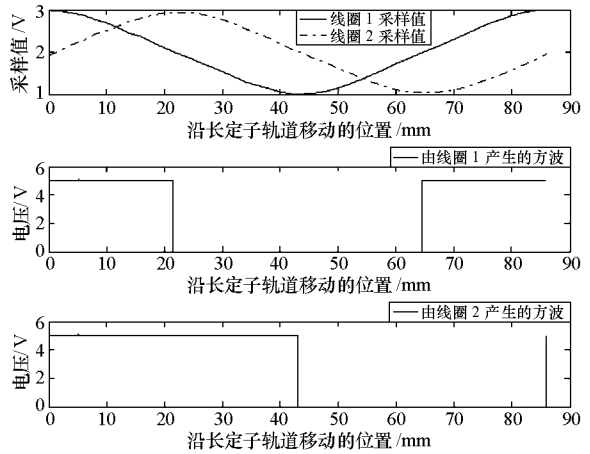


图 4 两路检波输出信号

Fig.4 Outputs of two demodulations

归一计算和查表插值法得到相对位置信息。为了简化表格数量,只建立悬浮间隙 8mm 条件下检测信号及其对应的位置数据表格,其它间隙下采样信号则通过归一变换运算转化为 8mm 间隙条件下的数据,最后通过查询获得相对位置信息。其中,变换系数通过离线标定获得 8mm 间隙下信号幅值与不同间隙下信号幅值之比得到(图 5)。图 6 为利用该法在标定台上分别对悬浮间隙 8mm 和 14mm 下的相对位置检测精度进行验证的结

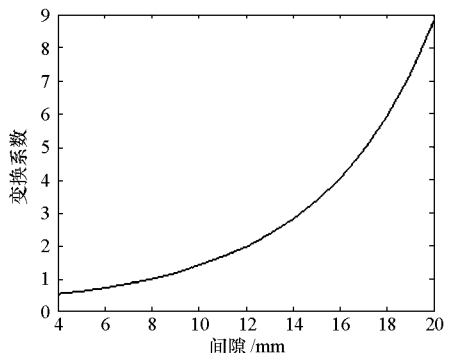


图 5 变换系数

Fig.5 Coefficients of conversion

果。可以看到,当检测间隙为 8mm 时,相对位置检测的精度达到 1°电角度;当检测间隙变为 14mm 时,相对位置检测的精度达到 1.4°电角度,满足了设计要求。

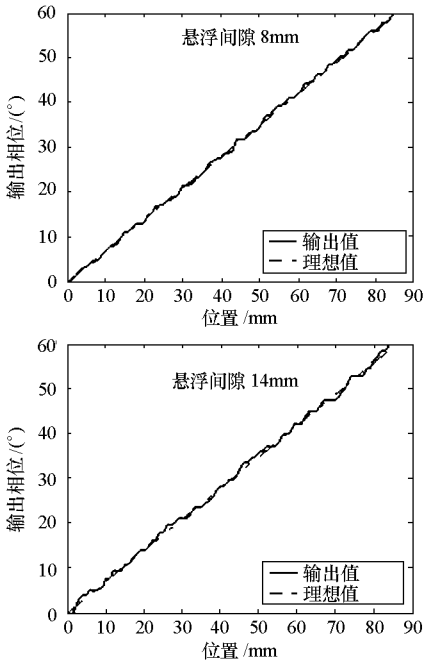


图 6 相对位置检测精度测试  
Fig.6 Test of relative position detection

### 2.3 轨道接缝对相对位置检测的影响及其解决方法

图 7 为过接缝时磁极相角输出,可以看出,信号存在着畸变,无法反映车辆真实位置信息。根据分析,每一套测速定位系统在车辆行进方向上间隔三个完整的齿槽周期宽度上布置了两只相对位置传感器,这两只传感器不可能同时过接缝,并且它们的间隔远大于轨道接缝宽度,因此,可以在系统的层面上通过两只传感器信号的切换,将处于轨道接缝下的传感器信号剔除,选择正常的信

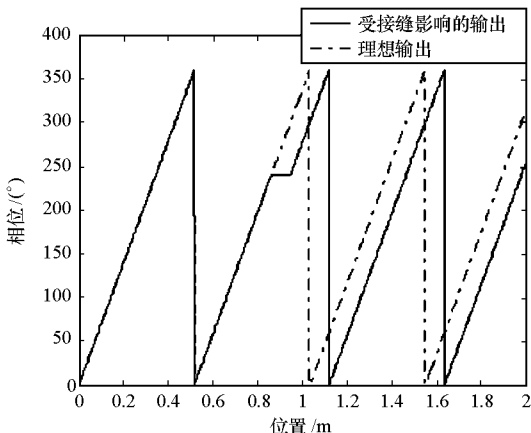


图 7 接缝对检测的影响  
Fig.7 Influence by track gap

号,来解决位置检测所面临的过接缝问题,但是,由于只有两只传感器可供选择,并且车辆的运行情况、线路情况以及传感器的安装等因素使得两路信号都不能一直表现为理想一致,特别是两只传感器都未处在接缝下时依然可能存在一定差异,所以,通过将两路信号的简单比较,是无法挑选出未受影响的传感器。

为了实现二选一的目标,可利用车辆的运行速度和加速度预估车辆的运行位置。由于车辆在运行过程中的速度和加速度总在变化,因此需要通过算法来观测获得准确的速度和加速度,在此基础上预估相对位置信息的变化趋势,然后以此作为选择传感器信号的依据。图 8 所示自适应滤波器以相对位置传感器的前  $N$  个实测位置数据  $p_N(k)$  作为输入,输出  $p'(k)$  则为当前位置  $p(k)$  的预估值,将实际位置与预估位置之间的差值  $e(k)$  作为反馈输入。利用最小均方自适应算法调整滤波器系数  $w(k)$ ,使得预估值不断逼近实际值,滤波器的最终输出作为选择有效传感器的依据。算法流程如下:

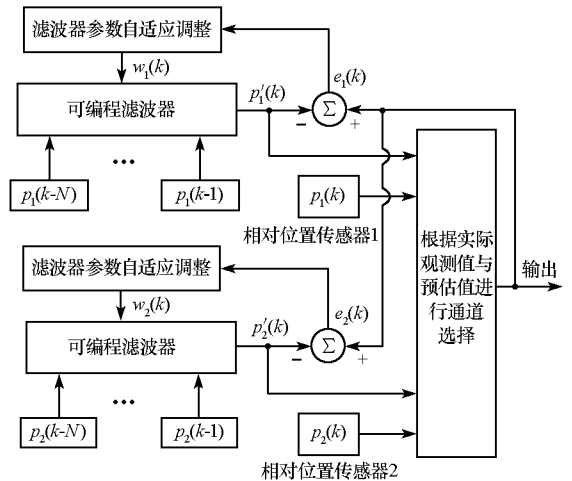


图 8 自适应滤波的选择

Fig.8 Choice of self-adaptation filter

- (1)取得  $p(k)$ , 以及前  $N$  个数据组成的向量  $p_N(k) = [p(k-N) \cdots p(k-1)]$  (1)
  - (2)根据自适应预估系数  $w(k)$  以及前  $N$  个实测位置数据  $p_N(k)$  计算  $p(k)$  的预估值  $p'(k) = w(k)p_N(k)^T$  (2)
  - (3)将实测位置  $p(k)$  与预估为  $p'(k)$  做差求出估计误差  $e(k) = p(k) - p'(k)$  (3)
  - (4)根据  $e(k)$  修正下一步的自适应预估系数  $w(k+1) = w(k) + 2\mu(k)x(k)e(k)$  (4)
- 式(4)中,  $\mu(k)$  为收敛因子,考虑到整个系统的稳定性与收敛快速性,取

$$\mu(k) = \frac{1}{2} \frac{1}{N(\max(p_N(k)))^2} \quad (5)$$

当预估误差在一定范围内时,滤波器即可正确预估当前的位置,此时可利用输出结果作为过接缝时选择切换相对位置传感器信号的依据。

由于制造和安装等因素,两路相对位置传感器信号必然存在着差异,这种差异与轨道接缝引入的信号畸变差异是不同的,因此需要改进算法如下:(1)当两路相对位置传感器信号之差在一定容限范围之内时,取其平均值作为输出。(2)当两路传感器信号之差超过一定容限之后开始进行是否过接缝判断。考虑到两路检测信号未受接缝影响时,两路检测信号差异不大,且差值固定,因此可以采用两组信号间差值的方差进行判别,当该方差小于两路传感器正常工作时输出信号的最大方差,即可认为该组传感器的输出未受接缝影响。(3)分别比较  $k$  时刻两路信号的实际输出值与预估,选择相差较小的一路作为正常信号进行输出。图 9 实线为利用该方法的实际输出信号,它未受轨道接缝的影响,表明了该方法的有效性。

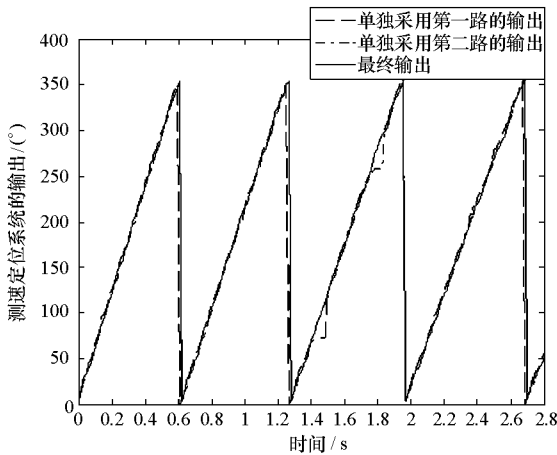


图 9 在过接缝时的实际输出  
Fig.9 Real output when passing through track gap

### 3 绝对位置读码的原理及其分析

#### 3.1 绝对位置读码原理

如图 10 所示,绝对位置读码器为 U 型结构, U 型结构两侧各有一一对应的发送线圈与接收线圈 10 只,其中 8 只大线圈为定位线圈,中间 2 只小线圈为读码线圈。当发送线圈通过高频电流激励时产生高频磁场,接收线圈上感应产生相同频率的电压信号,当绝对位置读码器中间通过定位标志板时,金属导电板上布置的窄缝可以使部分电磁场通过,在读码器的接收线圈上就会感应出电压信号,通过信号处理提取出绝对位置信息。

如图 11 所示,绝对位置利用窄缝相对于虚线的位置进行编码,偏向虚线左边的编码窄缝为二进制的“0”,偏向虚线右边的为二进制的“1”,则图 11 中所示的编码为“0110”。

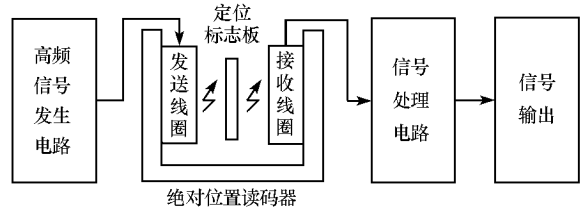


图 10 绝对位置读码器的结构  
Fig.10 Structure of absolute position reader

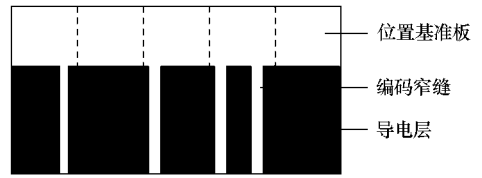


图 11 绝对位置定位标志板  
Fig.11 Fleet of absolute position

#### 3.2 绝对位置读码器的分析

发送线圈和接收线圈之间的关系可以通过建立如图 12 所示的空心变压器模型及其简化等效电路,其中,  $Z_{11} = R_1 + jX_{L1}$  为发送线圈阻抗,  $Z_M = jX_M$  为发送线圈和接收线圈之间的互阻抗,它的大小与线圈之间的定位标志板有关,  $Z_{22} = R_2 + j(X_{L2} + X_L)$  为接收回路阻抗。接收线圈需处理的有效信号为  $Z_{22}$  两端的信号。由于接收线圈两端的信号通过运放跟随电路,可认为它的等效阻抗很大,因此,接收线圈侧需要处理的信号为

$$\dot{U}_o = \frac{jX_M}{Z_{11}} \dot{U}_1 \quad (6)$$

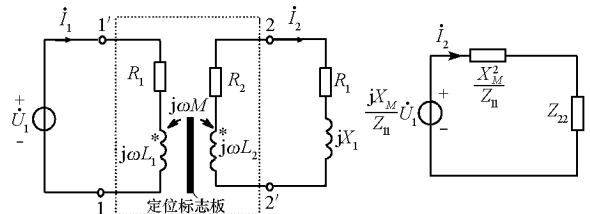


图 12 电路模型及等效电路  
Fig.12 Circuit model and equivalent circuit

接收端是根据判断  $|\dot{U}_o|$  在受到标志板遮挡和未受到遮挡时的变化来实现定位和读码的,这种变化代表了线圈之间的等效电感变化,因此需要放大这种等效电感的变化。根据(6)式,提高激励频率和电压、减少发射线圈电阻等手段能够有效增大  $|\dot{U}_o|$  的变化,这样就能提高绝对位置读码的准确度,满足了要求。

### 4 试验结果

图 13 为车辆启动运行时磁极相角信号,该信号从 0 开始平滑输出磁极相角信号,范围在  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。图 14 为车辆正反向运行切换时的磁极相角输出信号。图 15 为车辆的运行速度曲线,A1、A2、B1、B2 分别代表处于同一车辆不同侧的测速定位系统提供的速度信号。试验运行条件下,不论列车在悬浮和导向方向如何晃动,绝对位置读码器都能准确地给出列车的绝对位置信息。

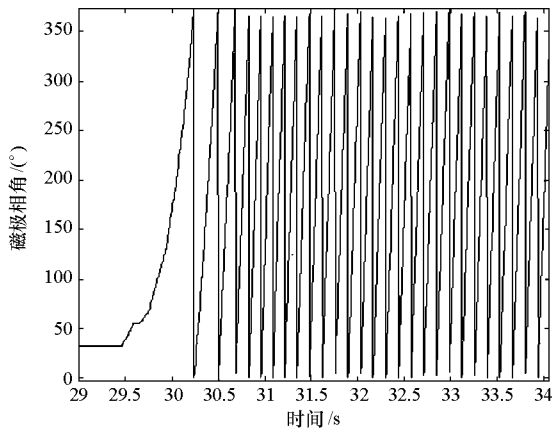


图 13 启动时的极相角信号  
Fig. 13 Phase output at startup

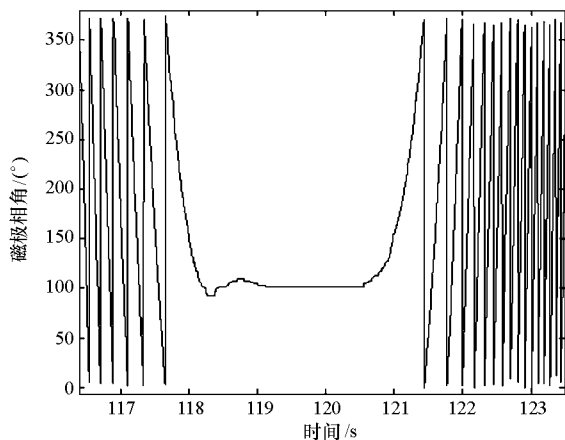


图 14 正反向切换时的磁极相角信号  
Fig. 14 Phase output when direction reversion

### 5 结论

高速磁浮列车测速定位系统是磁浮车辆系统的重要组成部分,由于它是车载设备且针对长距离直线轨道进行检测,所以车辆悬浮导向控制调整和轨道线路接缝对测速定位检测有明显影响。

利用悬浮间隙信号采样方法和变换计算,使检测信号统一归结到 8mm 间隙条件下输出,可简化计算,减少悬浮间隙波动对相对位置检测精度的影响,满足了磁极相角精度  $2.8^{\circ}$  的检测要求。

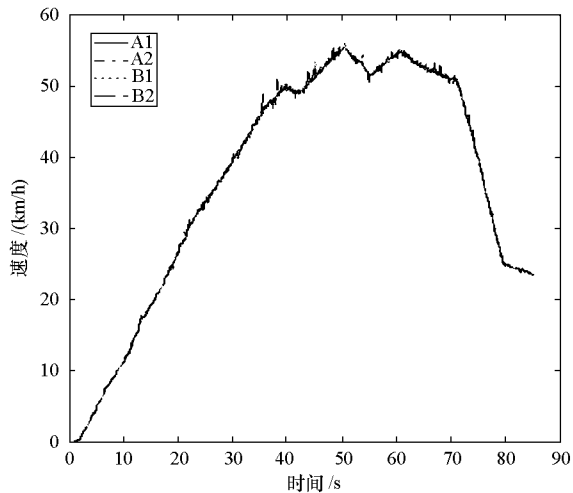


图 15 车辆的速度信号  
Fig. 15 Speed output of vehicle

为了消除长定子轨道接缝对位置检测的影响,设计一种自适应预估滤波方法来作为两路相对位置检测信号切换选择的依据,消除了轨道接缝对位置检测精度的影响。

分析电磁感应读码的数学模型,提出了提高激磁频率和电压、降低发射线圈电阻等手段来增大接收端电压信号幅值的变化,满足了读取绝对位置的要求。

### 参考文献:

- [1] 陈正一, 谢维达, 钱存元. 磁浮列车绝对定位系统[J]. 电力机车与城轨车辆, 2005, 28(6):8-10.
- [2] 王滢, 郭小舟, 王式雄. 磁浮列车绝对定位系统的研究[J]. 机车电传动, 2004 (3):33-36.
- [3] 钱存元, 韩正之, 邵德容, 等. 高速磁浮列车测速与定位系统的设计[J]. 计算机工程, 2005, 31(3):12-14.
- [4] 郭小舟, 王滢, 王式雄. 高速磁浮列车定位测速系统[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(4):455-459.
- [5] 王化祥, 张淑英. 传感器原理及应用[M]. 天津大学出版社, 1999.
- [6] Henning U, Long Stator Propulsion System of the TRANSRAPID Berlin-hanbur [ C ], The 15th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 1998: 274 - 279.
- [7] 郭小舟, 王滢, 王式雄. 一种准确检测直线同步电机动子位置的方法[J]. 机车电传动, 2004(4): 57-60.
- [8] 罗宏浩, 樊树江, 吴峻, 等. 一种高精度直线同步电机检相器的原理与设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20):143-146.
- [9] 钱存元, 韩正之, 邵德容, 等. 直线同步电机动子位置检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15):129-133.
- [10] 李璐, 吴峻. 高速磁浮列车定位传感器的研究设计[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7):1510-1513.
- [11] 李璐, 吴峻, 罗宏浩. 高速磁悬浮列车测速定位系统过接缝问题研究[J]. 铁道学报, 2009, 31(2):69-72.