

文章编号: 1001-2486(2003)04-0082-07

## 磁悬浮列车的定位和测速技术研究\*

龙志强, 李晓龙, 周文武, 刘曙生

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 在介绍磁悬浮列车定位和测速技术特点基础上, 着重论述了轨枕计数法、交叉感应回线法和脉宽编码感应式绝对定位法在磁悬浮列车定位测速中的应用, 给出了实现的原理与方法, 并分析了误差来源, 并介绍了相关试验结果。在以上分析的基础上, 结合我国磁悬浮列车的发展情况, 提出适合我国现阶段的定位测速方案。

**关键词:** 磁悬浮列车; 轨枕计数; 交叉感应回线; 绝对定位

中图分类号: TP206+.1 文献标识码: A

## Study on the Techniques of the Locating and Speed-measuring of the Aerotrain

LONG Zh-qiang, LI Xiao-long, ZHOU Wen-wu, LIU Shu-sheng

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

**Abstract:** The characteristics of the techniques of the locating and speed-measuring for aerotrain are introduced. Emphases are put on the applications of the counting method of the cross-tie and rail cable and the device for determining the absolute position to train locating and speed measuring. Principles and methods of these applications are given, and the source of error is analyzed. Based on these analyses, and taking the current status of maglev in our country into account, solutions of train location and speed measuring for the current stage are provided and relevant test results are given.

**Key words:** maglev train; taking count of cross-tie; rail cable; determining the absolute position

为实现磁悬浮列车的安全运营、精确定位和牵引方向的速度闭环控制, 必须在磁悬浮列车上安装列车测速和测位置的传感器系统。对于普通的轮轨铁路, 主要通过轨道电路和安装在车轮上的光电编码器确定列车的位置和速度, 由于磁浮列车没有轮子, 运行时车辆与轨道之间没有接触, 因此对磁浮列车的测速和定位不能直接引用传统铁路的测试方法, 必须研究出新的测速定位方法。

目前在国内外中低磁悬浮列车的测速和相对定位方法有“计数轨枕”、“交叉回线”和“雷达测速”。其中“轨枕测速”在国防科技大学 204m 实验线上已经成功应用, 并获专利; “交叉回线测速”已应用在德国 ICE 高速铁路、日本新交通车(胶皮轮的城轨车)、日本名古屋的 1.5km 长 HSST 磁悬浮列车试验线和 18.4km 的超导高速磁浮铁路山梨试验线上。本文在进行交叉感应回线的转台实验基础上, 在 204m 实验线上铺设交叉感应回线进行了应用实验; “雷达测速”是在列车上安装多普勒雷达测速设备, 雷达定时向地面设备发送微波, 并根据反射微波与入射微波的夹角、入射时间与发射时间以及雷达距地面的距离计算出列车运行速度。本文主要研究前两种方法。

应用交叉感应回线和轨枕计数进行测速定位只能实现列车相对定位, 而相对定位的误差会随着时间积累, 所以必须每隔一定距离就要对列车的位置进行修正。测定磁悬浮列车绝对位置的方法有“脉宽编码式定位”、“感应式定位”和“应答器方式定位”等。其中德国 TR 高速磁悬浮列车采用“感应式编码”实现绝对定位, “应答器方式定位”参考文献[1, 2], 本文主要研究作者所提出的“脉宽编码”定位方法, 该方法已经通过地面实验测试, 定位可靠。磁浮列车定位测速系统的各种方案详见图 1。

\* 收稿日期: 2003-01-10  
基金项目: 国家 863 高技术项目资助  
作者简介: 龙志强(1967-), 男, 副教授, 硕士。

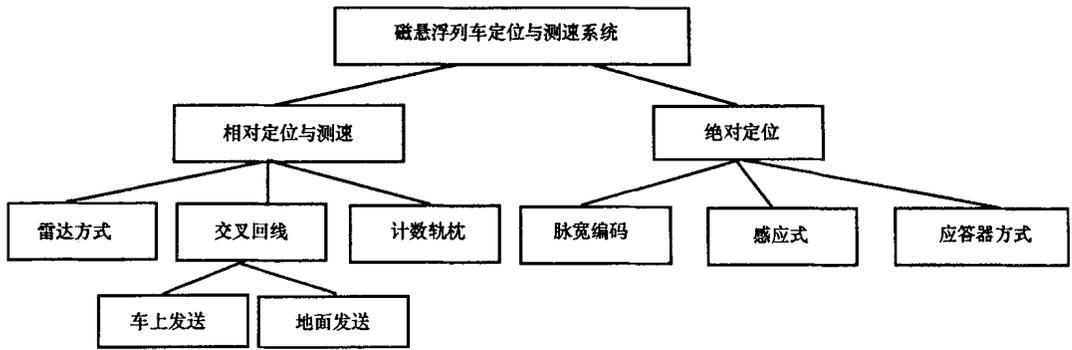


图1 磁浮列车定位测速系统各种方案

Fig. 1 Different projects of train locating and speed measuring

### 1 计数轨枕的测速和相对定位技术

“计数轨枕”的测速定位方法是利用计算机来采集列车单位时间  $t$  内通过轨枕(磁悬浮列车为钢枕)的数目  $n$ , 再结合每两根轨枕间距  $L$  (固定值, 1.2m), 即可测出列车已经过的里程  $S = n \times L$ , 可以算出列车的运行速度  $V = S/t$ , 通过车上布置的4个电感式接近开关传感器进行细分, 定位精度可达0.3m。

采用“鉴相”的方法来测定运行方向。列车运行方向不同时, 沿列车纵轴呈线性分布的两个接近开关经过同一个轨枕时的相位是不同的。利用这一特点, 只要测出这个相位差, 就可以确定列车的运行方向。

#### 1.1 硬件电路

接近开关输出的信号是开关信号, 难免会受到一些干扰, 主要表现为尖峰干扰, 这些尖峰会影响到测速的精度, 还会引起速度的跳变, 所以在测速时要尽量排除这些干扰, 即首先对开关输出信号进行预处理, 包括高频滤波、整形、隔离, 经过处理后的信号再进入单片机进行软件滤波, 就基本消除了干扰的影响。

通过检测单位时间内通过的枕木数的测速方法在列车行驶速度较慢时响应会很慢, 通过测频方法测速, 就可以提高速度检测的实时性和准确性。测量通过传感器之间的时间  $T$ , 则  $V = 0.3/T$  (m/s)。

#### 1.2 主要误差源分析及解决方案

经过实验和分析, 主要由于采用的是接近开关的测速定位的方法, 速度一定时, 当金属板经过接近式传感器时, 由于距离的不同(所用传感器能感应到的距离范围是0~4cm)或轨枕的宽度可能有差异, 相邻两个传感器所产生脉冲虽然周期相同, 但高低电平的占空比却不相同, 因此, 在何处采样是一个关键的问题。

对于上述问题, 当速度一定时, 列车距传感器的距离不同或者轨枕的宽度不大相同的情况如图2所示。由图明显可以看出: 列车经过相邻两个传感器的周期  $T_1$  与  $T_2$  相同, 但由于距传感器的距离不同, 高低电平的占空比不同, 即  $t_1$  与  $t_2$  不同。如果从脉冲的上升沿或下降沿进行采样, 时间的误差将会很大。经过大量的试验和分析可以得出, 从脉冲的中心采样, 所得结果将会准确一些, 误差是最小的。

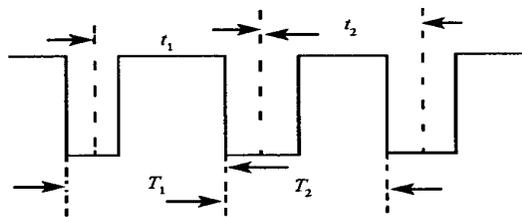


图2 脉冲周期采样点

Fig. 2 Periodic sampling points of pulse

## 2 交叉感应回线测速和相对定位技术

交叉感应回线法是利用电磁感应原理来检测磁浮列车的速度与位置。将交变电信号送到沿磁浮线路铺设的交叉感应回线,交叉感应回线按矩形环路逐一展开的方式铺设,而且相邻环路回线交叉且产生磁场方向相反。车运行时,车上的感应线圈接收感应回线磁场的变化来确定磁浮车运行速度和位置。

该系统主要由两部分组成:激磁部分与车载感应处理部分。激磁部分是用于连续发送高频振荡信号;感应处理部分则将感应到的信号处理成脉冲形式,由数字电路形成位置和速度参量。由图 3 可见,每个环路长 30cm,这样,当列车运行时,车载线圈在每一个轨间电缆的环路上将产生一个互感电压。

该互感电压信号是一个均值为 0,且与激磁信号同频率的高频振荡信号,必须经过检波、整形才能得到感应电压的包络,这个包络信号反映了车载线圈和交叉感应回线的环路之间的相对位置情况,经处理可得位置脉冲。位置脉冲和固定时间基准相比,得到速度信息。

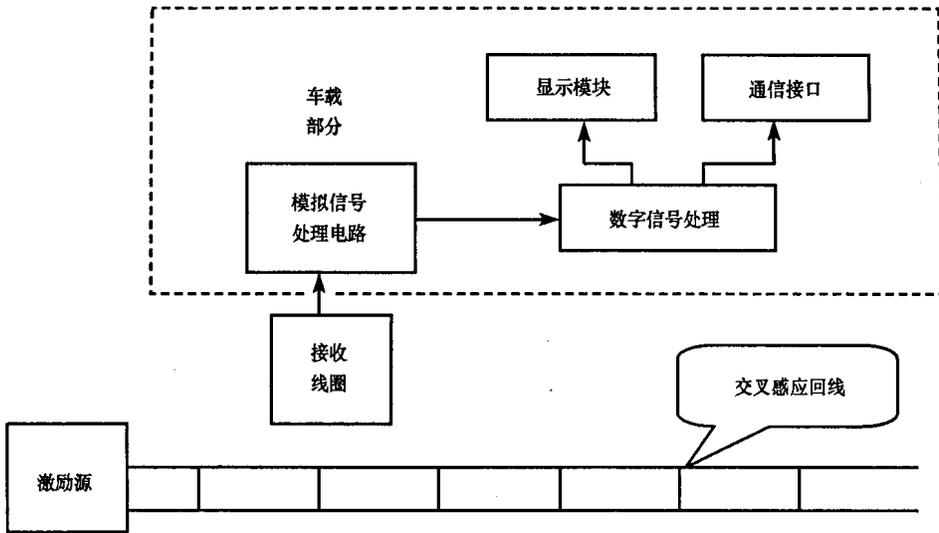


图 3 交叉感应回线基本原理图

Fig. 3 Basic principle of rail cable

### 2.1 激磁磁场的分析

通过对磁场强度、磁通量的计算,可以从理论上得到交叉感应回线和车载线圈之间的互感。根据电磁理论中似稳区的有关概念,如果观测点与源点的距离远远小于相应的电磁波波长,时变磁场的稳态响应可以按恒定磁场来计算。由于交叉感应回线通入的电流为几十千赫兹,其波长  $\lambda$  为几千米,另外,接收线圈和交叉感应回线间的距离  $h$  为 10cm 左右,因此很容易满足条件  $h \ll \lambda$ 。以下用恒定磁场的相关公式来计算时变磁场的场量。

设回路中每段导线在空间一点  $(x, y, h)$  产生的磁场在垂直回线回路方向的分量为  $B_{jz} (j = 1, 2, 3, 4)$ , 见图 4。

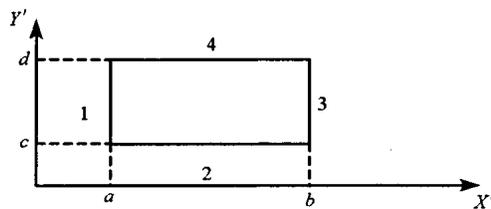


图 4 交叉感应回线单个回路示意图

Fig. 4 Single loop of rail cable

一路每段导线产生的磁场如下:

$$B_{1z} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(y' - y) |x - a|}{[(x - a)^2 + h^2] \sqrt{(x - a)^2 + h^2 + (y' - y)^2}} \Big|_{y'=c}^d \quad (1)$$

$$B_{2z} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(x' - x) |y - c|}{[(y - c)^2 + h^2] \sqrt{(y - c)^2 + h^2 + (x' - x)^2}} \Big|_{x'=a}^b \quad (2)$$

$$B_{3z} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(y' - y) |x - b|}{[(x - b)^2 + h^2] \sqrt{(x - b)^2 + h^2 + (y' - y)^2}} \Big|_{y'=c}^d \quad (3)$$

$$B_{4z} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(x' - x) |y - d|}{[(y - d)^2 + h^2] \sqrt{(y - d)^2 + h^2 + (x' - x)^2}} \Big|_{x'=a}^b \quad (4)$$

那么, 每个回路产生的磁场强度

$$B_{zi} = \sum_{j=1}^4 B_{jz} \quad (5)$$

那么空间某一点的磁场是所有回路在那点电磁场的叠加, 即

$$B_z = \sum B_{zi} \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 空间某点的电磁场的强度不但跟每个回路在那点产生的磁场有关, 而且还与其它回路有关, 因此, 空间某点的磁场强度的解析表达式很复杂。为了更直观了解电磁场的分布情况, 可以通过 MATLAB 进行磁场计算, 并画出相应的图形。

设交叉感应回线每个回路长  $l = 30\text{cm}$ , 宽  $w = 12\text{cm}$ , 通入电流  $I = 0.5\text{A}$ , 空间某点的距离交叉感应回线高为  $h$ , 交叉感应回线的回路个数为  $n$ 。图 5 是空间某点  $B_z(T)$  的各种分布情况。

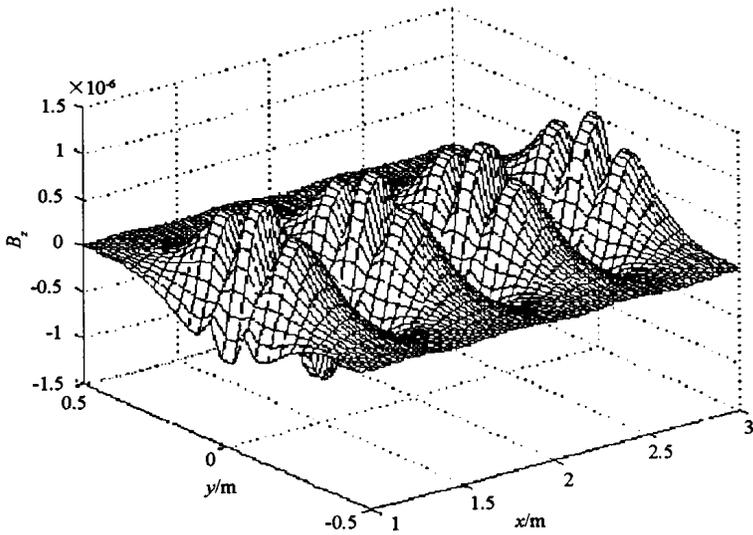


图 5  $h = 10\text{cm}$ ,  $n = 40$  时,  $B_z$  在空间的分布情况

Fig. 5  $B_z$  distance profile when  $h = 10\text{cm}$ ,  $n = 40$

从图 5 可以看出, 所有回路产生的电磁场在空间的磁场强度沿  $x$  方向按周期性变化, 在每个回路的中心上方电磁强度最大, 而且相邻两个回路的磁场(垂直于回路平面的磁场分量)刚好反向。

### 2.2 激磁电路和电磁感应

本文的激磁电路采用双 T 型 RC 振荡器, 该电路实现及调试较为简便, 产生的正弦波较为稳定, 选取合适的元件, 能够产生所需频率的正弦波。

车载线圈匝数为 100 匝, 线圈尺寸为  $80\text{cm} \times 80\text{cm}$ 。车载线圈感应信号如图 6 所示。车载处理电路是将车载线圈感应到的电压信号变成脉冲形式, 以便计算机统计和处理, 形成位置和速度量, 经比较后产生的方波用于计数, 该计数值经处理后变换成速度和相对位置信号。车载的处理电路要求有较强的抑噪能力, 以适应磁浮列车很强的电磁环境。

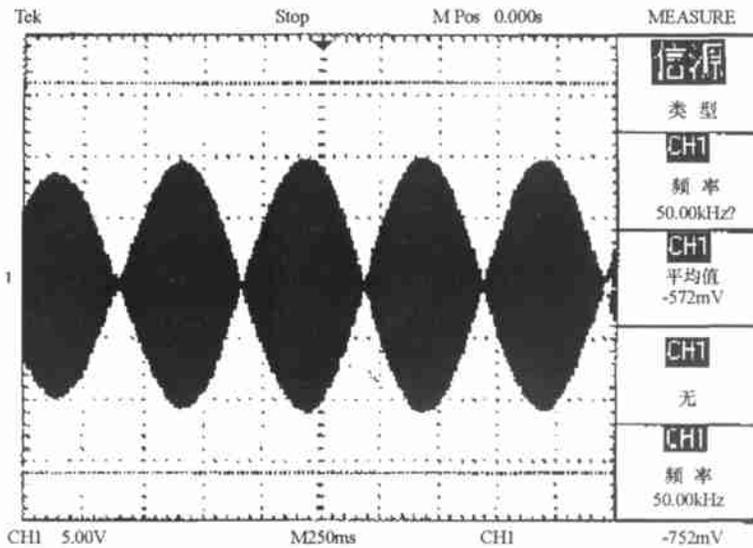


图 6 位置信号包络图  
Fig. 6 Waveform of location-signal

### 2.3 提高测速定位精度的方法

对于如图 3 所示的交叉感应回线环路, 增加线圈的个数(线圈 A、B、C), 假设交叉感应回线环路的距离为 30cm, 三个车载感应线圈的中心距为 20cm, 经合成后, 定位精度可达到 10cm。这样线圈间的感应电压信号的相位差为  $120^\circ$ 。

### 2.4 测速定位的冗余设计

测速定位系统的冗余设计包括两个层次: 车辆级和列车级。车辆级是指每一辆车中的测速定位系统冗余设计; 列车级是指各车厢之间相互备份形成冗余结构。

本文主要采用列车级的冗余设计, 在图 7 中可以看出, 3 辆车采用了 3 个测速定位通道, 可以采用三选二方法进行冗余度设计。

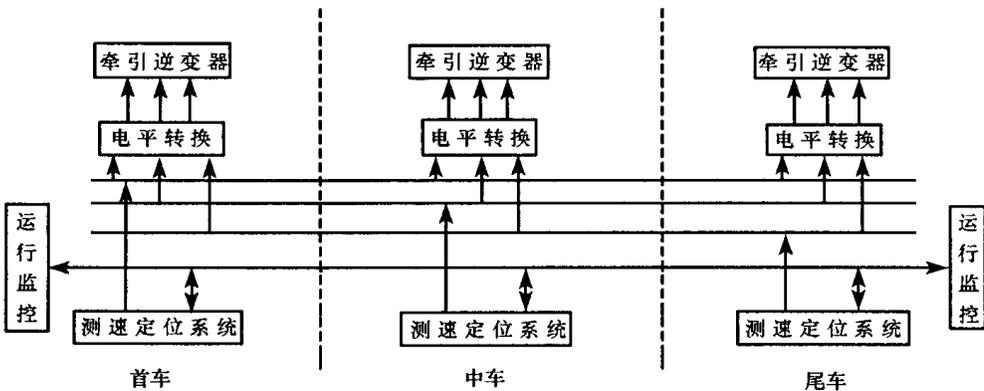


图 7 测速定位冗余设计方案  
Fig. 7 Redundancy design of speed measuring

## 3 脉宽编码感应式绝对定位技术

绝对定位传感器的工作原理是通过车载有源传感器(简称阅读器)对轨道沿线的无源位置标志板(简称标志板)进行扫描, 获得位置信息。标志板上的地址码是通过对标志板上的导电金属进行特殊处理实现的。标志板安装在轨道两旁的固定位置上。

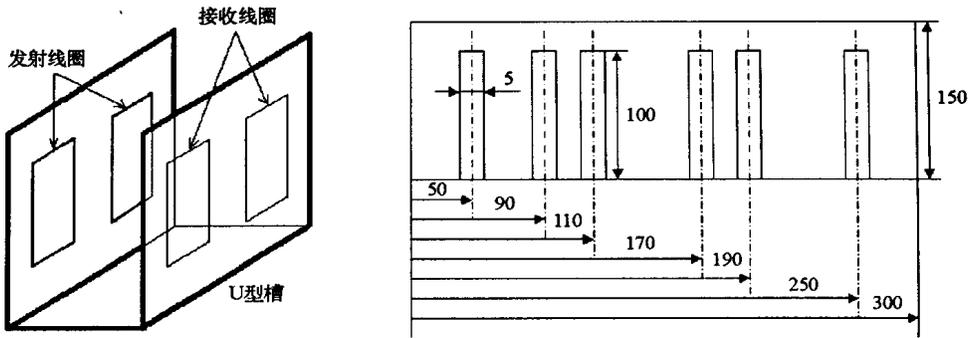


图8 车载阅读器和位置标志板示意图(单位:mm)

Fig.8 Reading device and sign board (unit: millimeter)

如图8所示,车载阅读器是一个U型槽,在两边的槽壁上对应地分布有1组线圈(图中的另一组线圈为系统冗余设计),线圈长10cm,宽2cm,由10匝铜绕组或印刷电路板制成。其中一边的线圈为发射线圈,另一边为接收线圈。位置标志板上的地址码是通过在金属板上刻槽来编制的。发射线圈通以一定幅值、一定频率的正弦交变电流  $i = I_m \sin(\omega t)$ 。根据电磁感应原理,另一个接收线圈上会产生感应电压  $e$ 。从能量角度分析,当有导电金属放入变化的磁场中时,在金属中将产生一定的电流(电磁涡流),会消耗一部分能量。同时,标志板对电磁波也有一定的反射作用。所以,标志板开槽位置所对的线圈产生的感应电压  $e_1$ ,比不开槽位置所对的线圈产生的感应电压  $e_2$  要大,存在  $e_1 > e_2$  的关系。取定一个参考电压  $V_{ref}$ ,满足  $e_1 > V_{ref} > e_2$  的关系。通过比较感应电压就可以确定线圈所对应的标志板区域是否开槽。

地址码是通过标志板上开槽的槽距不同来编制的。如图9所示,第一组槽距  $L_0$  作为标准参考槽距,二进制数据位的槽距  $L > L_0$  表示二进制1(记为  $L_2$ ),槽距  $L < L_0$  表示二进制0(记为  $L_1$ )。

地址识别原理如图9所示,当列车经过标志板时,首先标志板的边缘会遮挡线圈,产生一个低电平,作为起始信号,准备读数。经过第一组槽的间距时间是标准参考时间,以后依次记录通过后4组槽的间距时间  $T_1, T_2, T_3, T_4$ 。如果  $T_i > T_0$ ,则第  $i$  位地址位为1;如果  $T_i < T_0$ ,则第  $i$  位地址位为0( $i = 1, 2, 3, 4$ ),从而可以识别出标志板上的地址信息。

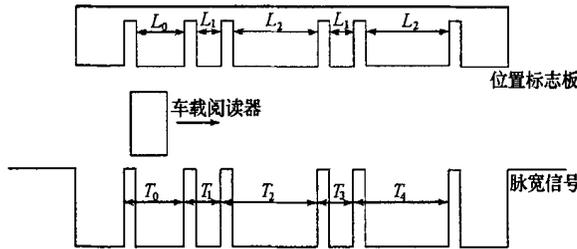


图9 读数原理示意图

Fig.9 Principle of reading

以第一个标准槽距所产生的脉宽时间  $T_0$  作为基准时间,使系统可以适用于列车在不同运行速度条件下的定位。以上分析是在假定列车匀速通过标志板的情况下进行的,当列车以一定加速度通过标志板时,可能造成系统误判。为了适应列车加速运行的要求,在选择槽距的时候就要保证  $L_2 > L_0, L_1 < L_0$  有一定裕量。

标准槽距  $L_0$  的选取要综合考虑系统的最快响应时间和标志板的长度,  $L_0$  过小会使系统无法分辨  $T_0$ , 过大会增加标志板的长度,对于大量投入使用不利。目前该定位器只应用于中低速磁悬浮列车的定位系统中,列车的运行速度为30km/h。对于列车高速运行时定位器的定位情况,本文作了初步的分析。假定列车以400km/h的速度(约110m/s)通过标志板,计算最小脉宽时间,可以得出  $t = 0.02/110 = 180\mu s$ 。接收电路主要使用了集成运放LF353,LF353的反应速率较快(13V/ $\mu s$ ),多级串联也可以忽略电路

的延迟。主要考虑包络检波电路的影响,以RC半波检波电路计算,发射信号的频率为500kHz,周期为 $2\mu\text{s}$ 。只要选取RC满足 $2\mu\text{s} < RC < 180\mu\text{s}$ 即可实现有效检波。数字电路的处理时间一般在十几 $\mu\text{s}$ 之内。从分析可以看出,在列车高速运行的情况下定位器同样可以准确定位。

### 3.1 绝对定位器的硬件实现

绝对定位器的硬件电路主要包括发射电路和接收判别电路。发射电路比较简单,主要是产生一定频率的正弦振荡信号,通过增益调节、功率放大后发射出去。接收电路主要是对感应接收到的小信号进行放大、滤波处理后通过包络检波电路滤除高频信号,提取低频变化的信号进行电压比较,得出数字脉冲信号。

### 3.2 系统的应用

每个标志板包含4位地址信息,可以4片组合使用,提供16位的二进制地址码,它们之间的间隔 $L$ 可以被列车上的传感器所检测,这种简单的编码方式可以用于列车的超速防护,通过改变两块标志板的间隔 $L$ ,使列车以不同的允许速度通过两个标志板时所需的时间一定,如果检测到通过时间小于设定时间时,认为是列车超速,从而启动紧急制动模式。如每隔100m放置一组标志板,可定位的线路长度为 $L = 100 \times 2^{16} = 6500\text{km}$ 。为了进一步保证定位数据的可靠性,可以在阅读器上安装两组线圈(如图8),两组线圈互为冗余,依次读取数据。

考虑列车双向行驶的需要,可以改造标志板,以标志板的右边缘为轴,镜像复制标志板即可。也可以在轨道两旁安装互为反向的标志板,列车以不同方向行驶时,读取不同侧边的标志板。

阅读器的发射频率为500kHz,发射电流0.5A。通过地面的模拟实验,证明该绝对定位方法是切实可行的,并且对该传感器的安装位置略做修改,也可将其用到轮轨铁路的绝对定位中去。

## 4 结束语

(1) 在前面的章节中已经提到过相对定位和绝对定位各有特点,将其组合使用可取长补短,形成一套完整的磁悬浮列车位置和速度测量系统。

(2) 计数轨枕的测速定位简单实用,已经在204m试验线上正式运行使用了1年多,列车定位精度达到30cm,但该方法要求轨枕间距恒定,给线路设计提出了要求。

(3) 交叉感应回线特别适用于磁悬浮列车,本课题首先在旋转试验台上对交叉感应回线法进行了理论和试验研究,并又在204m磁悬浮列车实验线上进行了工程实验验证,定位精度达到10cm,测速精度能满足运行要求,该方法主要为长线建设做准备。

(4) 车载阅读器通过测定经过标志板时电磁场的变化来读取标志板上的位置信息。较大功率的电磁波发射可以保证系统不受外界雨、雪以及电磁的干扰。系统完全独立工作,与列车运行状态无关。

(5) 长沙实验线已经应用了计数轨枕的测速和相对定位技术方案,对于交叉感应回线测速定位方案和脉宽编码式绝对定位器开展了原理技术研究,并通过了车载实验。

## 参考文献:

- [1] 吴汶麒. 国外铁路信号新技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000: 15-54.
- [2] 吴汶麒. 城市轨道交通信号与通信系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998: 94-126.
- [3] 杨建勇, 连级三. 磁悬浮列车定位测速及数据传输方法研究[J]. 铁道学报, 2001, 23(1).
- [4] 龙志强, 刘曙生, 陈 杨. 磁悬浮列车运行信号检测系统[J]. 电子技术应用, 2000, 26(10): 25-26.
- [5] 龙志强, 任永平, 刘曙生, 刘少克. 基于交叉感应回线的磁悬浮列车测速定位系统[J]. 传感器技术, 2001, 20(7): 51-55.