

高速磁悬浮列车运行控制与 传统轮轨列车运行控制的比较

吴丹

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 高速磁悬浮列车利用交流直线电机原理进行地面驱动, 它的运行由地面的运行控制系统进行控制。该系统比传统列车控制系统在组成和功能上更加复杂并且有更高的要求。本文对两个系统进行了比较, 指出了它们的异同点。

关键词: 高速磁悬浮; 运行控制系统; 列车控制

中图分类号: U292.917

A Comparison between Operation Control Systems for High-Speed Maglev Transportation and for Conventional Railway

WU Dan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The maglev train operation, with a linear motor having primary side on the ground, is controlled by computer on the ground. The operation control system is more complex and sophisticated in composition and function, compared with the conventional railway operation system. The similarities and differences between them are detailedly analyzed. The principle of propulsion of maglev is also introduced.

Keywords: high-speed maglev; operation control system (OCS); train control

CLC number: U292.917

0 引言

高速磁悬浮列车作为一种新型交通工具, 具有快捷、安全、舒适、无磨擦、低噪声、低能耗、易维护、无污染等优点。高速磁悬浮运行控制系统如同人的大脑, 负责安排整个交通系统安全可靠有效的运转, 使磁悬浮列车的特点充分展现出来。目前, 仅日本和德国对高速磁悬浮运行控制系统的研究技术比较成熟, 分别建立了山梨试验线(Yamanashi)和埃姆斯兰特(Enslard)(简称TVE)试验线, 并取得了试验成功。在国内, 随着上海磁悬浮试验线的建立, 对高速磁悬浮OCS的研究则刚刚起步。本文将OCS与传统轮轨列车自动控制系统(ATC)进行比较, 指出它们的异同点。

1 高速磁悬浮列车运行机理

高速磁悬浮列车的推力是利用交流同步直线电机(LSM)的原理产生的, 该电机与其对应的交流同步旋转电机结构、工作原理基本相似。它的转子是置于列车底部的直流激励的磁极, 定子为沿着线路轨道铺设的三相定子绕组, 设置在地面上的变频设备在线路上可分段给定子绕组供电, 当三相绕组通入三相对称正弦电流时, 在气隙中便形成正弦分布并以同步速度平移的行波磁场, 当磁场足够大时则吸引转子而使列车以同步速度行驶。只要安装在路边的变电所内的变频设备把电馈入长定子电缆中, 在线路上就会产生使列车移动的磁场, 而且频率越高, 移动的速度也越大。这个与转子电磁铁相互作用的交变磁场以什么方向移动列车取决于转子电磁铁对回线的极位。因此, 必须很精确的掌握这个极位, 允许误差小于12mm。推力由定子电

流的大小和相位决定。

由于一个变电所的供电能力有限,因此整个线路被分成数个供电分区,每个分区对应一个变电所,一个变电所只能给一辆列车供电。为提高系统的效率和功率因数,供电分区内的电缆又被分为一个个的小分区,只向有车运行的那个小分区供电,这样也可减小能耗,节约能源,但需要分区转换装置。

2 需求分析

磁悬浮运行控制系统的基本任务和传统轮轨列车类似,就是要根据运行计划,办理列车运行进路,保证进路正确安全;实时控制和监督列车运行速度,防止列车超速;调整列车追踪间隔,保证运行安全,提高运输效率;提供旅客服务信息,提高服务质量。这些要求在磁悬浮交通中由地面的运行控制系统自动完成,在轮轨交通中这些功能主要起辅助司机驾驶的作用。

3 系统的比较

轮轨列车自动控制系统(ATC)由列车自动驾驶系统(ATO)、列车自动防护系统(ATP)、列车自动监控系统(ATS)三部分组成,磁悬浮OCS的基本功能和ATC相似,也可以分为这几个部分。由于磁悬浮列车特殊的运行机理,对它的运行控制系统提出了特殊的要求,比如由同步控制产生的测速定位的精度要求、自动控制产生的大容量信息传输要求等。下面将从几个方面对两个系统进行比较。

3.1 列车定位和测速

无论是在高速轮轨铁路还是磁悬浮交通中,准确实时的定位测速对运行安全都至关重要。对磁悬浮交通而言它还是列车驱动的需要,这与磁悬浮列车的运行机理有关。磁悬浮列车采用的是长定子线性同步电机进行驱动和制动,驱动还是制动,取决于车上励磁相对于地面线圈产生的电磁回线的相位,当地面线圈产生的行波相位超前于车上励磁时,列车加速,反之则制动。因此要控制列车运行并保证最大的驱动和制动力,必须保证定位精确并且连续,要求定位误差小于12mm。另外,由于变电所仅向列车经过的区段供电,其供电区段的开关控制也要求高精度连续的位置检测。

传统轮轨列车测量列车速度和位置的方法有两类,第一类是利用各种轨道电路进行测速,第二类为非轨道电路列车检测法。非轨道电路法包括多普勒雷达收发机(如Balise)、卫星定位法(如GPS)、

多普勒雷达测速等。各种轨道电路由于其自身的优点在现代铁路中仍是使用最广泛的一种方式,但它的信息处理能力远不如非轨道电路法,无法满足高速列车运行对测速和定位的要求,所以一些控制系统利用全球定位系统(GPS)获取位置信息,以查询应答器(Balise)作为绝对位置参考点进行位置校正。

在磁悬浮交通中,由于磁悬浮列车与轨道完全无机械接触,无轨道电路可以利用,它的定位测速可以采用非轨道电路法以及根据磁悬浮特点研究的新方法。在德国TVE试验线上,采用了定子组齿槽定位和车辆位置增量数据采集系统进行定位。他们的原理是:

定子组齿槽定位充分利用了磁悬浮运行机理所具有的特点进行列车定位。如前所述,列车驱动利用长定子同步直线电机原理,电机的励磁磁铁安装在列车上,而嵌有三相线圈的定子排列在导轨上。电机的极距用 τ_p 来表示(德国TR列车为258mm,定子周期长度为516mm)。另外,为利用车辆运行给车辆电池充电,在每个励磁磁极中还集成了直线发电机的感应线圈。只要励磁线圈有励磁电流,列车悬浮状态运行,在直线电机感应线圈中感应出与周期长度为定子周期长度($2\tau_p = 516\text{mm}$)的交流电信号,这样就只要测定电流的频率 f ,则列车运行速度为:

$$V = 2 \times f \times \tau_p \times 3.6 = 1.8576f \text{ (km/h)}$$

这样累加经过的极距数,就可以确定列车的位置。为提高测速、定位精度,还通过检测电路测定感应交流电信号的相角。但是,定子组的齿槽定位法齿距(或测定相角)时存在一定误差,因此,这种方法存在一定的累计误差,为消除累计误差,德国TR列车还采用了车辆位置增量数据采集系统来提供列车的绝对位置信息(区段编号)来消除定子组齿槽定位法的误差。车辆位置增量数据采集系统通过车辆上的有源传感器系统对线路上位置固定的无源译码器(LRL)进行扫描获取编码器的编码信息。

日本高速磁悬浮的测速定位由测速定位系统完成,该系统由车载设备和地面设备组成,采用无线感应环线方式。其原理为:车载设备中的位置信号振荡器产生高频振荡信号,列车运行中通过车上的矩形线圈向地面矩形感应线圈发送信号,在列车经过的地面矩形感应线圈中感应出高频信号,由与地面感应线圈相连的定位器接收处理后测定列车的位置和速度,然后传给路边的控制中心,而不需

要从车上将位置速度信息传到地面,这种方式可以实现位置的连续测量,其测量精度很高,误差仅在几个毫米。另外采用漏泄同轴电缆作系统的冗余设备。

3.2 车地间的信息传输

无论轮轨交通还是磁悬浮交通,传输的信息大致可分为两类——安全信息和非安全信息,安全信息直接关系到列车的运行安全,因此它的信息的确定和传输一般采用冗余通道来保证安全,安全信息主要包括列车的位置和速度信息、速度限制信息、运行权限等,非安全信息包括旅客服务信息等。一般来说,系统的自动化程度越高,对信息传输的要求也就越高。

在轮轨交通中,对信息传输的要求有一个发展的过程。在固定闭塞的情况下,编码的轨道电路是列车进行中车上与地面信息传输的主要通道,轨道查询应答器、轨间电缆等作为列车位置参考点为列车提供绝对位置信息,列车的运行权限在列车通过定点位置时由地面以机车信号的形式发送给列车(或司机)。在这种情况下信息传输量相对较小,信息的传输属点式传输,而在基于无线通信的移动闭塞情况下,需要列车将位置和速度信息连续地传给无线闭塞中心(RBC),RBC再将运行权限和限速等信息发送给列车。为了满足信息传输需求并减少路边设备和设备成本,采用了无线传输(如GPS)为主,查询应答器为绝对位置参考点的信息传输方式。

对于磁悬浮列车,它的运行控制主要在地面,要求控制中心、地面设备和列车之间进行实时的双向通信,要求信息具有很高的实时性,列车的安全高速运行控制、大量设备的监控、优质的旅客服务信息等要求信息传输安全、可靠、高速、大容量。

日本山梨试验线车上与地面设备之间的通信采用多通道冗余方式来保证传输的可靠性,用于定位测速的轨间电缆作为主要的传输通道,数据传输的波特率为4800bps。用于地面向车上传输监控信息及遥感命令,列车的实时速度及位置监测在地面完成,由地面传输给车上的信息只是起监督的作用,用于紧急情况下控制列车紧急刹车。另外使用漏泄同轴电缆作为冗余通道,它的传输波特率为296bps,它可以实现车地双向通信,其原理是:漏泄同轴电缆是在同轴电缆外导体上开有一定形状和一定间距的槽,使电磁场的能量集中在同轴电缆的内外导线之间,部分能量可以从同轴电缆中的槽孔

泄漏到空间中,并和附近的移动电台天线耦合构成无线通道。同轴电缆外导体上开的槽可以有多种形状,各种形状在传输损耗和耦合损耗方面各不相同。另外设计了一种大容量的数据传输——45GHz的毫米波,用于取代漏泄同轴电缆,它允许采用比漏泄同轴电缆更高的频率、更大的带宽和更高的数据传输率,可以满足多媒体的应用。德国TVE试验线车地传输则采用的是38GHz毫米波无线传输系统。

3.3 列车追踪间隔控制及速度防护

在传统轮轨铁路中,闭塞的出现完全是为了保证列车安全运行间隔,防止发生列车碰撞。闭塞可分为固定闭塞和移动闭塞两种。固定闭塞就是将线路分成固定的区段,每个区段为一个闭塞分区,当分区内有列车占用时,其他列车不能进入,以避免发生列车碰撞,移动闭塞则是基于无线通信的一种技术,它的出现主要是为了保证列车安全的情况下提高线路行车密度。在移动闭塞情况下,后行列车的位臵不受固定区段的限制,只与前行列车的位臵有关,保证了列车最小运行间隔。

在磁悬浮交通中,列车运行间隔等于一个供电区段的长度,这是由一个变电所只能控制一辆列车决定的。其供电区段为一个闭塞分区(与轮轨铁路的闭塞概念相同),当供电区段有列车占用时,后行列列车不允许进入。分区开放条件不同,磁悬浮闭塞分区开放条件为:1)线路被清空;2)闭塞区间中没有列车占用;3)完成了分区间的电源切换。由于列车的驱动由列车经过的区段供电进行控制,在供电区段开关控制正常的情况下,后行列列车是无法闯入被占用区段的,这就在很大程度上避免了列车碰撞事件的发生。

无论ATC还是OCS都会对列车的最大速度进行监督,一旦发生超速将启动制动装置。传统列车的速度防护采用分级控制或速度模式曲线控制方式,模式曲线控制方式最符合列车制动过程,能进一步缩短列车运行间隔距离,是各国系统发展的共同趋势。模式曲线控制方式在不同的闭塞方式下有不同的距离—速度控制曲线。在移动闭塞情况下,控制的目标准离在前行列车所在位臵,因此这种情况能获得列车最小运行间隔。磁悬浮列车采用前行车所在闭塞分区的入口为目标点的速度距离模式控制方式,被称为准移动闭塞方式。

由于德国TR列车轨道采用高架结构,考虑到

(下转第88页)

不变的,因此对每周需求 λ 很小的货物采用直接递送策略是合适的,而对 λ 大的货物益采用前面论述的整合策略。

参考文献

- [1] Richard j. Tersine. 库存控制原理与物料管理(第二版)[M]. 白礼常、董其蔚,等译校. 北京:中国物资出版社,1990. 173-177.
- [2] Taylor & Karlin. An Introduction to Stochastic Modeling[M]. third edition, San Diego: Academic Press,1998:44.
- [3] Tijms, H. C. Stochastic Models: An algorithmic approach[M]. chichester, England: John Willy and Sons, 5
- [4] Sila Qetinkaya & chung-Yee Lee. Stock replenishment and shipment scheduling for vendor-managed inventory systems [J]. Management Science,2000,46(2):217-232.
- [5] 胡运权,郭耀焯. 运筹学教程(第一版)[M]. 北京:清华大学出版社,1998:139-149.
- [6] Bhat U. N. Elements of applied stochastic Processes [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984: 435-436.
- [7] 贾玉心. 概率论与数理统计[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2001:63-71.

(上接第81页)

危险情况下旅客的疏散,要求速度防护对最小速度进行监控。因此其防护速度曲线具有二维性,即限制速度为最小限制速度曲线与最大限制速度曲线之间的一个范围。限制最小速度是为了保证出现故障(如断电、火灾)时,列车有足够的动能和/或势能运行到停车点(设在车站与车站之间)或车站停下,以便乘客撤离。另外,还可保持电池必要的充电状态,以实现故障时安全悬浮和利用涡轮制动。

4 结束语

在中国,高速磁悬浮运行控制系统的研究还刚刚起步,有很多可以研究的领域,如精确的测速定位技术、高速大容量信息传输系统、故障-安全性计算机、运行控制仿真建模技术等。上海磁悬浮列车的建立给磁悬浮技术在中国的发展带来了很好的契机。同时,由于磁悬浮OCS与传统列车ATC具有很多相似之处,可以相互借鉴、相互促进。

参考文献

- [1] Hisana KUROBE. Train control system in yamanashi maglev test line[J]. QR of RTRI, 1996, 37(2):94-98.
- [2] Motoharu Ono. The operation control system for the yamanashi maglev test Line [J]. Hitachi Review, 1997,46(2):101-108.
- [3] Yoshinao YOKOTA. The maglev train protection systems and train position detection [J]. Quart Rep Of RTRI, 1994,35(3):185-191.
- [4] Hitoshi Tsuruga. Superconducting magnetic levitation transrapid systems on the yamanashi maglev test line [J]. Hitachi Review, 1997,46(2):89-94.
- [5] Blomerius Joachin. Transrapid 高速磁悬浮列车的安全性(Safety of high speed maglev trains of the transrapid type). 铁路工程师中文版,2001,7(1):14-18.
- [6] 毛俊杰. 高速铁路列车速度自动控制系统[M]. 北京:中国铁道出版社. 1994.
- [7] 刘华清,等编译. 德国磁悬浮列车 Transrapid[M]. 成都:电子科技大学出版社. 1999:59-95.