

磁悬浮列车的原理及应用

陆一娣

众所周知,传统的铁路列车都是依靠诸如蒸汽、燃油、电力等各种类型机车作为牵引动力,车轮和钢轨之间的相互作用作为运行导向,由铁路线路承受压力,借助于车轮沿着钢轨滚动前进的。而磁悬浮列车则是一种依靠电磁场特有的“同性相斥、异性相吸”的特性将车辆托起,使整个列车悬浮在线路上,利用电磁力进行导向,并利用直线电机将电能直接转换成推进力,来推动列车前进的最新颖的第五代交通工具。与传统铁路相比,磁悬浮列车有以下优点。

适于高速运行 磁悬浮列车最大特点在于它没有通常的轮轨系统,由于消除了与轮轨之间的接触,不存在由于轮轨摩擦及黏着所造成的诸如极限速度等影响列车运行的问题,速度可达 500 km/h 以上。

稳定安全 列车运行平稳,能提高旅客舒适度,由于磁悬浮系统采用导轨结构,不会发生脱轨和颠覆事故,提高了列车运行的安全性和可靠性。

污染小,易维护 磁悬浮列车在运行中既不产生机械噪声,也不排放任何废气、废物,对周边环境的污染极小,有利于环境保护,加上磁悬浮列车由于没有钢轨、车轮、接触导线等摩擦组件,可以省去大量维修工作和维修费用。

效率高 能充分利用能源、获得较高的运输效率。另外,磁悬浮列车可以实现全自动化控制,因此将成为未来最具有竞争力的一种交通工具。

磁悬浮列车的发展史

磁悬浮列车是大约二百年前斯蒂芬森的“火箭”号蒸汽机问世以来铁路技术最根本的突破。磁悬浮列车在今天看来似乎还是一个新鲜事物,其实它的理论准备已有很长的历史。磁悬浮技术的研究源于德国,早在 1922 年德国工程师赫尔曼·肯佩尔就提出了电磁悬浮原理,并于 1934 年申请了磁悬浮列车的专利。进入 70 年代以后,随着世界工业化国家经济实力的不断加强,为提高交通运输能力以适应其经济发展的需要,德国、日本、美国、加拿大、法国、英国等发达国家相继开始筹划进行磁悬浮运输系统的开发。而美国和前苏联则分别在七八十年

代放弃了这项研究计划,目前只有德国和日本仍在继续进行磁悬浮系统的研究,并均取得了令世人瞩目的进展。下面把各主要国家对磁浮铁路的研究情况作一简要介绍。

日本于 1962 年开始研究常导磁浮铁路。此后由于超导技术的迅速发展,从 70 年代初开始转而研究超导磁浮铁路。1972 年首次成功地进行了 2.2 吨重的超导磁浮列车实验,其速度达到每小时 50 千米。1977 年 12 月在宫崎磁浮铁路试验线上,最高速度达到了每小时 204 千米,到 1979 年 12 月又进一步提高到 517 千米。1982 年 11 月,磁浮列车的载人试验获得成功。1995 年,载人磁浮列车试验时的最高时速达到 411 千米。为了进行东京至大阪间修建磁浮铁路的可行性研究,于 1990 年又着手建设山梨磁悬浮铁路试验线,首期 18.4 千米长的试验线已于 1996 年全部建设完成。

德国对磁浮铁路的研究始于 1968 年(当时的联邦德国)。研究初期,常导和超导并重,到 1977 年,先后分别研制出常导电磁铁吸引式和超导电磁铁相斥式试验车辆,试验时的最高时速达到 400 千米。后来经过分析比较认为,超导磁浮铁路所需的技术水平太高,短期内难以取得较大进展,遂决定以后只集中力量发展常导磁浮铁路。1978 年,决定在埃姆斯兰德修建全长 31.5 千米的试验线,并于 1980 年开工兴建,1982 年开始进行不载人试验。列车的最高试验速度在 1983 年底达到每小时 300 千米,1984 年又进一步增至 400 千米。目前,德国在常导磁浮铁路研究方面的技术已趋成熟。

与日本和德国相比,英国对磁浮铁路的研究起步较晚,从 1973 年才开始。但是,英国则是最早将磁浮铁路投入商业运营的国家之一。1984 年 4 月,伯明翰机场至英特纳雄纳尔车站之间一条 600 米长的磁浮铁路正式通车营业。旅客乘坐磁浮列车从伯明翰机场到英特纳雄纳尔火车站仅需 90 秒钟。令人遗憾的是,在 1995 年,这趟一度是世界上唯一从事商业运营的磁浮列车在运行了 11 年之后被宣布停止营业,其运送旅客的任务由机场班车所取代。

磁悬浮列车的分类

(1) 按电磁铁种类 磁悬浮列车根据所采用的电磁铁种类可以分为常导吸引型和超导排斥型两大类。

常导吸引型 常导吸引型磁悬浮列车是以常导磁铁和导轨作为导磁体,用气隙传感器来调节列车与线路之间的悬浮间隙大小,在一般情况下,其悬浮间隙大小在 10 mm 左右,这种磁悬浮列车的运行速度通常在 300~500 km/h 范围内,适合于城际及市郊的交通运输。

超导排斥型 超导排斥型磁悬浮列车是利用超导磁铁和低温技术,来实现列车与线路之间悬浮运行,其悬浮间隙大小一般在 100 mm 左右,这种磁悬浮列车低速时并不悬浮,当速度达到 100 km/h 时才悬浮起来。它的最高运行速度可以达到 1 000 km/h,当然其建造技术和成本要比常导吸引型磁悬浮列车高得多。

(2) 按悬浮方式 磁悬浮列车按悬浮方式有电磁吸引式悬浮(electromagnetic suspension, EMS)和永磁力悬浮(permanent repulsive suspension, PRS)及感应斥力悬浮(electrodynamics suspension, EDS)。

EMS 该方式利用导磁材料与电磁铁之间的吸引力,绝大部分悬浮采用此方式。

PRS 这是一种最简单的方案,利用永久磁铁同极间的斥力,一般产生斥力为 0.1 MPa。其缺点为横向位移的不稳定因素。

EDS 依靠励磁线圈和短路线圈的相对运动得到斥力,所以列车要有足够的速度才能悬浮起来,大约为 100 km/h,它不适用于低速。

(3) 按列车的驱动方式

长转子、短定子异步直线电机驱动 这种电机的“定子”安装在车辆的底部,“转子”线圈安装在轨道上。它适合于低速运行。

长定子、短转子同步直线电机驱动 此方式是将电机的“转子”线圈装在车辆上,“定子”线圈装在轨道上。它适合于高速运行。

磁悬浮列车的原理

(1) 悬浮原理

磁浮有 3 个基本原理。第一个原理是当靠近金属的磁场改变,金属上的电子会移动,并且产生电流。第二个原理就是电流的磁效应。当电流在电线

或一块金属中流动时,会产生磁场。通电的线圈就成了一块磁铁。磁浮的第三个原理我们就再熟悉不过了,磁铁间会彼此作用,同极性相斥,异极性相吸。现在看看磁浮是如何作用的:磁铁从一块金属的上方经过,金属上的电子因磁场改变而开始移动(原理一)。电子形成回路,所以接着也产生了本身的磁场(原理二)。图 1 以最简单的方式来表达这个过程,移动中的磁铁使金属中出现一块假想的磁铁。这块假想磁铁具有方向性,因是同极性相对,因此会对原有的磁铁产生斥力。也就是说,如果原有的磁铁是北极在下,假想磁铁则是北极在上;反之亦然。因为磁铁的同极相斥(原理三),让磁铁在一块金属上方移动,结果会对移动中的磁铁产生一股往上推动的力量。如果磁铁移动得足够快,这个力量会大得足以克服向下的重力,举起移动中的磁铁。所以当磁铁移动时,会使得自己浮在金属上方,并靠着本身电子移动产生的力量保持浮力。这个过程就是所谓的磁浮,这个原理可以适用在列车上。如图 2,如果在列车的地板上安装一些磁铁,列车一开动(例如,可以收起的充气胎),就可产生向上的力量。这个时候,列车就像飞机在跑道上加速准备起飞。当向上的力量足够时,就可使得列车离开地面,浮在金属导轨之上。事实上,列车经过特别的设计,使得车厢在离地面 10~150mm 处。这样列车就可以飞速前进了。从以上的讨论可以发现磁浮列车的第一个优点。因为没有轮子和铁轨,它就没有轮轨间的摩擦力所造成的能量损失。如此一来,就少了一个传统列车的主要能量损耗来源。理论上,就只剩下风阻会影响列车的行车速度了。如果观察一下列车是怎样行进的,就可以发现磁浮列车的第二个优点。虽然同极性会相斥(用以产生浮力),但异性可以相吸。磁浮列车就是运用这个原理前进的。当列车下方导轨因电子运动而产生浮力的同时,两侧导轨的线路开始通电,产生另一组比列车稍前的磁铁。经过特殊安排,导轨上的南极会靠近列车上的磁北极。由于这股吸力,列车得以往前移动。通过调整导轨两侧的电流,得以让这股吸引磁力恰好落在列车前方。事实上,列车是陷在所谓的磁波或磁场之中。可以想象导轨两侧移动的磁铁产生一股波浪,列车就像骑在这浪头的冲浪者一样(图 3)。

下面介绍常导磁吸式(EMS)和超导磁斥式(EDS)列车的具体运行原理。

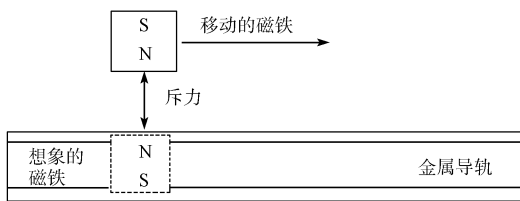


图 1 悬浮原理

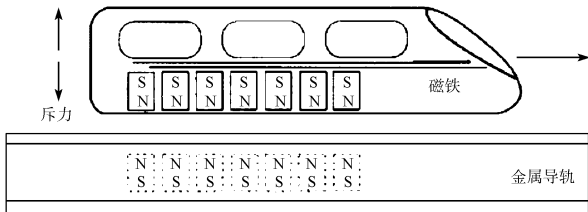


图 2 磁浮列车

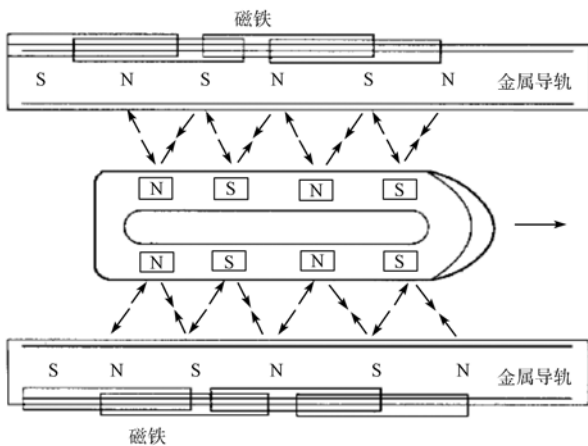


图 3 磁浮列车周围的磁波

常导磁吸式(EMS) 利用装在车辆两侧转向架上的常导电磁铁(悬浮电磁铁)和铺设在线路导轨上的磁铁,在磁场作用下产生的吸引力使车辆浮起,见图 4 所示。车辆和轨面之间的间隙与吸引力的大小成反比。为了保证这种悬浮的可靠性和列车运行的平稳,使直线电机有较高的功率,必须精确地控制电磁铁中的电流,使磁场保持稳定的强度和悬浮力,使车体与导轨之间保持大约 10 mm 的间隙。通常采用测量间隙用的气隙传感器来进行系统的反馈控制。这种悬浮方式不需要设置专用的着地支撑装置和辅助的着地车轮,对控制系统的要求也可以稍低一些。

超导磁斥式(EDS) 此种形式在车辆底部安装超导磁体(放在液态氦储存槽内),在轨道两侧铺设一系列铝环线圈。列车运行时,给车上线圈(超导磁体)通电流,产生强磁场,地上线圈(铝环)与之相切割,在铝环内产生感应电流。感应电流产生的磁场

与车辆上超导磁体的磁场方向相反,两个磁场产生排斥力。当排斥力大于车辆重量时,车辆就浮起来。因此,超导磁斥式就是利用置于车辆上的超导磁体与铺设在轨道上的无源线圈之间的相对运动,来产生悬浮力将车体抬起来的。如图 5 所示。

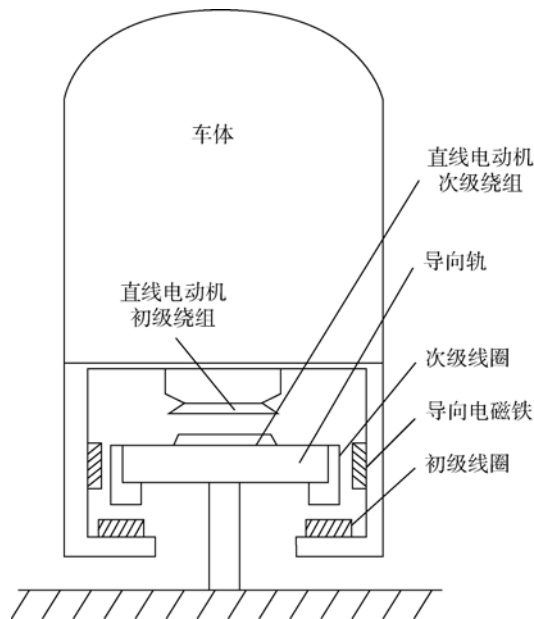


图 4 常导吸引式磁悬浮原理图

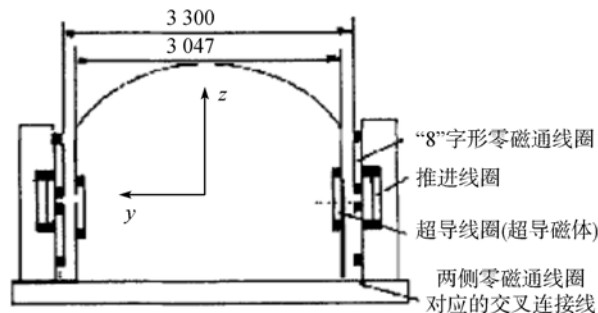


图 5 超导磁斥式磁悬浮原理图

由于超导磁体的电阻为零,在运行中几乎不消耗能量,而且磁场强度很大。在超导体和导轨之间产生的强大排斥力,可使车辆浮起。当车辆向下位移时,超导磁体与悬浮线圈的间距减小电流增大,使悬浮力增加,又使车辆自动恢复到原来的悬浮位置。这个间隙与速度的大小有关,一般到 100km/h 时车体才能悬浮。因此,必须在车辆上装设机械辅助支撑装置,如辅助支持轮及相应的弹簧支承,以保证列车安全可靠地着地。控制系统应能实现起动和停车的精确控制。

(2) 导向原理

磁悬浮列车利用电磁力的作用进行导向。现按常导磁吸式和超导磁斥式两种情况简述如下。

常导磁吸式的导向系统 与悬浮系统类似，是在车辆侧面安装一组专门用于导向的电磁铁。车体与导向轨侧面之间保持一定间隙。当车辆左右偏移时，车上的导向电磁铁与导向轨的侧面相互作用，使车辆恢复到正常位置。控制系统通过对导向磁铁中的电流进行控制来保持这一侧向间隙，从而达到控制列车运行方向的目的。

超导磁斥式的导向系统 可以采用以下 3 种方式构成：①在车辆上安装机械导向装置实现列车导向。这种装置通常采用车辆上的侧向导向辅助轮，使之与导向轨侧面相互作用(滚动摩擦)以产生复原力，这个力与列车沿曲线运行时产生的侧向力相平衡，从而使列车沿着导向轨中心线运行。②在车辆上安装专用的导向超导磁铁，使之与导向轨侧向的地面线圈和金属带产生斥力，该力与列车的侧向作用力相平衡，使列车保持正确的运行方向。这种导向方式避免了机械摩擦，只要控制侧向地面导向线圈中的电流，就可以使列车保持一定的侧向间隙。③利用磁力进行导引的“零磁通量”导向系铺设“8”字形的封闭线圈。当列车上设置的超导磁体位于该线圈的对称中心线上时，线圈内的磁场为零；而当列车产生侧向位移时，“8”字形的线圈内磁场为零，并产生一个反作用力以平衡列车的侧向力，使列车回到线路中心线的位置。

(3) 推进原理

磁悬浮列车推进系统最关键的技术是把旋转电机展开成直线电机。它的基本构成和作用原理与普通旋转电机类似，展开以后，其传动方式也就由旋转运动变为直线运动。

常导磁吸式磁悬浮 采用短定子异步直线电机。在车上安装三相电枢绕组，轨道上安装感应轨。采用车上供电方式。这种方式结构比较简单，容易维护，造价低，适用于中低速城市运输及近郊运输以及作为短程旅游线系统；主要缺点是功率偏低，不利于高速运行。其中 TR 型快速动车和上海引进的 Transrapid 06 号磁悬浮列车，以及日本的 HSST 型磁悬浮列车都采用这种形式。

超导磁斥式磁悬浮 采用长定子同步直线电机。其超导电磁体安装在车辆上，在轨道沿线设置

无源闭合线圈或非磁性金属板。作为磁浮装置的超导电磁线圈的采用，为直线同步电机的激磁线圈处于超导状态提供了方便条件。它们可以共存于同一个冷却系统，或者同一线圈同时起到悬浮、导向和推进的作用。高速长定子同步直线电机牵引系统的构成相对复杂。地面牵引系统，供电一个区间（长约 30km）区间又分成许多段（约 300~1 000 m），每段只有列车通过时供电，各段切换由触点真空开关完成。为使列车在段间不冲动，需两组逆变器轮流供电，其特点为大功率、高压、大电流。动力在地面的优势有路轨电机的功率强以及车辆的设计简化、重量轻。适用于高速和超高速磁悬浮铁路。日本和加拿大决定发展这种磁悬浮系统。

磁悬浮列车的现状

国际上有代表性的几种磁悬浮列车有：高速常导磁悬浮列车、低速常导磁悬浮列车以及高速超导磁悬浮列车。高速常导磁浮车为德国研制的 TR(transrapid)系列；低速常导磁浮车为日本研制的 HSST 系列；高速超导磁浮车为日本研制 MLU 系列。目前，世界磁悬浮列车技术领域，日本和德国两个国家占据领先地位。德国现拥有一条长 34.5 km 哑铃式的载人磁悬浮列车试验线，其最高运行速度可达 450 km/h，载客时车速则为 420km/h。目前，该条试验线上运行的磁悬浮列车是最新研制成功的 TR-08 型磁悬浮列车，它从启动到加速、减速直至停车绕试验线两圈不到 10min，平均速度为 300 km/h，人们乘坐时没有丝毫不舒服的感觉。日本在研制低速常导磁悬浮系列 HSST 之外，着重探索高速超导磁悬浮。目前已建成一条长度为 18.4 km 的超导磁悬浮列车试验线，其最高运行速度可达到 550 km/h。据有关专家介绍，日本之所以研究和发发展超导磁悬浮列车，是因为超导磁悬浮列车 100 mm 的悬浮间隙，比常导磁悬浮列车的 10 mm 悬浮间隙更能抵御地震灾害对列车运行的影响，而日本恰恰是多地震的国家。我国也掌握了磁悬浮列车的关键技术。“八五”期间科技部在国家科技攻关计划中安排了“磁悬浮列车重大关键技术研究”项目，支持组织了铁道科学院(组长袁维慈)、西南交通大学(组长连级三)、国防科技大学(组长常文森)与中科院电工所(组长徐善纲)四个小组，开展了常导低速磁悬浮列车的研制工作。先后研制成功多台试验车(图 6)，并积极推进在青城山与八达岭建设实用旅

游示范线。90年代中期还与德国合作，开展了高温超导磁悬浮列车的原理性研究，在中国科学院电工研究所建立了小型模型。后来在863计划支持下，西南交通大学等单位研制成功、比较有影响力的，有国防科技大学和株洲电力机车所合作，准备用于八达岭旅游线，长达2 km的低速常导磁悬浮；由西南交通大学研制的应用于成都青城山旅游区的国内第一条磁悬浮列车试验线。



图6 我国研制成功的磁悬浮车

2000年6月，中国上海市与德国磁浮国际公司合作，进行中国高速磁浮列车示范运营线可行性研究。同年12月，中国决定建设上海浦东龙阳路地铁站至浦东国际机场高速磁浮交通示范运营线。2001年3月正式开工建设。2002年12月31日，经过中德两国专家两年多的设计、建设、调试，上海磁浮运营线终于呈现在世界的面前。这条世界第一磁悬浮列车示范运营线——上海磁悬浮列车建成后，从浦东龙阳路站到浦东国际机场，三十多千米只需6~7分钟。上海磁悬浮列车是“常导磁吸型”（简称“常导型”）磁悬浮列车。是利用“异性相吸”原理设计，是一种吸力悬浮系统，利用安装在列车两侧转向架上的悬浮电磁铁，和铺设在轨道上的磁铁，在磁场作用下产生的吸力是车辆浮起来。列车底部及两侧转向架的顶部安装电磁铁，在“工”字轨的上方和上臂部分的下方，分别设反作用板和感应钢板，控制电磁铁的电流使电磁铁和轨道间保持1厘米的间隙，让转向架和列车间的吸引力与列车重力相互平衡，利用磁铁吸引力将列车浮起1厘米左右，

使列车悬浮在轨道上运行。这必须精确控制电磁铁的电流。悬浮列车的驱动和同步直线电动机原理一模一样。通俗地说，在位于轨道两侧的线圈里流动的交流电，能将线圈变成电磁体，由于它与列车上的电磁体的相互作用，使列车开动。列车头部的电磁体N极被安装在靠前一点的轨道上的电磁体S极所吸引，同时又被安装在轨道上稍后一点的电磁体N极所排斥。列车前进时，线圈里流动的电流方向就反过来，即原来的S极变成N极，N极变成S极。循环交替，列车就向前奔驰。稳定性由导向系统来控制。“常导型磁吸式”导向系统，是在列车侧面安装一组专门用于导向的电磁铁。列车发生左右偏移时，列车上的导向电磁铁与导向轨的侧面相互作用，产生排斥力，使车辆恢复正常位置。列车如运行在曲线或坡道上时，控制系统通过对导向磁铁中的电流进行控制，达到控制运行目的。上海磁悬浮列车时速430千米，一个供电区内只能允许一辆列车运行，轨道两侧25米处有隔离网，上下两侧也有防护设备。转弯处半径达8000米，肉眼观察几乎是一条直线；最小的半径也达1300米。乘客不会有不适感。轨道全线两边50米范围内装有目前国际上最先进的隔离装置。

有人说：“磁浮列车是自大约200年前斯蒂芬森的‘火箭’号蒸汽机车问世以来铁路技术最根本的突破。”这是一点都不为过的。应该说磁浮列车不仅仅是铁路技术的根本突破，更是现代交通工具的典范。

（江阴市教师进修学校 214400）

