

# MAS 制磁浮列车

## ——中国人发明的磁浮列车

魏乐汉

磁浮列车是最快的陆上交通工具,有“贴地飞机”之称。目前的最高速度为每小时 581 千米。磁浮列车具有节能、快捷等优点,是 21 世纪理想的陆上交通工具。任何一种交通工具都由支撑、导向和推进三要素组成,磁浮列车的独特之处在于不是用轮子而是用磁力支撑,大大减少了行驶阻力。



悬浮铁板(实为硅钢片叠层),3、4 为车载电磁铁。对 3、4 通以大电流时,可将列车吸离轨道梁上平面。但这种吸力并不稳定,要么吸合、要么分离。为此需通过位移传感器控制 3、4 中的电流,使吸力和列车重力平衡,其悬浮间隙为 10 毫米左右。

### 磁浮列车现状

磁浮列车的概念首先由德国的肯佩尔(Harman Kemper)在 1922 年提出,并于 1934 年取得专利。经过八十年的发展,已研发出 EMS、EDS、HSST 高温超导磁浮、磁浮飞机等不同类型(又称制式或系统)的磁浮列车,下面分别介绍它们的原理和结构。

**EMS 系统** EMS (Electro Magnetic Suspension) 系统,中文译为电磁制。其悬浮电磁铁由普通导线绕制,属常导型(相对超导而言)。因其靠电磁体的吸力将列车吸离地面,故又称吸力型(相对斥力而言)。德国热衷于 EMS 制的研发,并取得世界领先地位。上海浦东的磁浮列车就是从德国引进的全套 EMS 制技术,而且基本还是 1934 年肯佩尔专利的形式,不同之处在于将车厢由轨道下方移到上方。

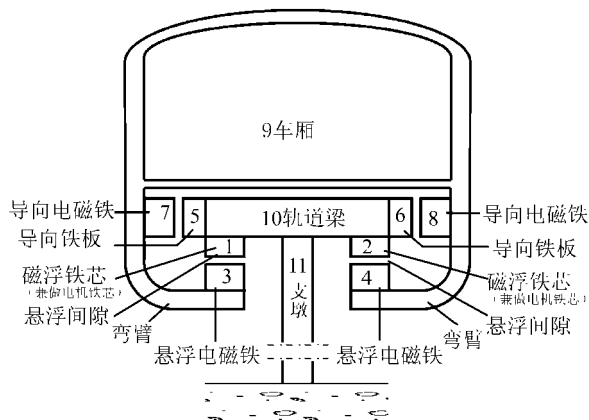


图1 EMS 制的悬浮和导向系统

EMS 制的悬浮原理很简单,图 1 为 EMS 制磁浮列车的横截面图。其中 1、2 为装在轨道梁下面的

悬浮铁板,通过控制系统保持悬浮列车的稳定。

EMS 制的导向控制与悬浮控制类似,也依赖于控制系统。图 1 中的 5、6 为装在轨道梁 10 侧面的导向铁板,7、8 为车载导向电磁铁。当列车向右偏时,导向位移传感器可控制 7、8 中的电流(增加 8 中的电流、减小 7 中的电流),将列车吸回中央。

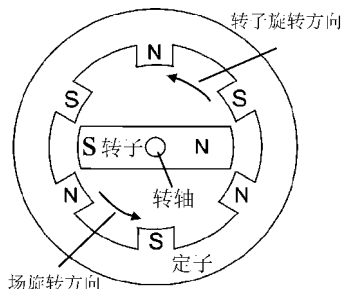


图2 旋转同步电机

EMS 制的推进系统采用长定子直线同步电机。普通三相电机中的定子会产生一个旋转磁场。若转子是一块磁体,定子的旋转磁场将带动转子同向同步转动(见图 2)。若定子沿母线剖开、展平后放在轨道梁下面,转子(磁体)装在车上,旋转磁场就变为直线移动磁场(称为行波磁场)。该磁场不是带动磁体(转子)旋转,而是带动磁体前进,进而带动与磁体相连的列车前进。由于定子线圈沿整条路轨铺设,

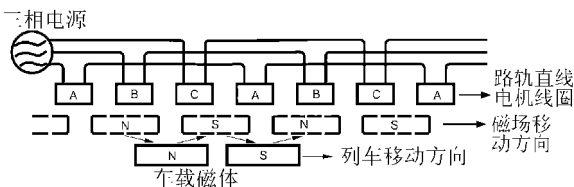


图3 直线同步电机推进原理

所以称为长定子直线同步电机(见图 3)。直线同步电机的运行需满足磁场移动速度要与列车同步,路轨磁场要在前面拉、在后面推车载磁体。由于列车速度是变化的,所以还要求长定子电源的频率、位相和电压幅度均可调节。

在 EMS 制中,上述悬浮铁板(图 1 中的 1、2)由硅钢片叠成,且横向开槽,三相线圈埋入槽中即构成直线同步电机的长定子。所以在 EMS 制中,悬浮列车和电机的铁芯是同一路轨铁芯,采用同一车载电磁铁悬浮和推进列车。

**EDS 系统** EDS(Electro Dynamics Suspension)由美国的鲍威尔(Powell)和丹比(Danby)于 1966 年提出。日本热衷于研发 EDS 系统,并在 EDS 制磁浮列车方面处于世界领先地位,目前磁浮列车速度的世界纪录就是日本用 EDS 制创造的。

EDS 制的悬浮原理基于以下物理现象:当一磁体在导体(或线圈)上方水平移动时,磁体和导体之间会产生斥力,此力即为悬浮力。EDS 制悬浮系统实际上是上述方法的改型:在一“U”字形轨道梁(槽)的侧壁上连续排布“8”字形线圈,其上下两部分缠绕方向相反。车载磁体在“8”字形线圈中点以下几十毫米的地方通过时,线圈下部的感生电流对车载磁体产生斥力,其垂直分量即为浮力。由于线圈上部绕向相反,线圈下部的感生电流流经上部时将吸引车载磁铁的磁场,其吸引力的垂直分量也会产生浮力(见图 4)。

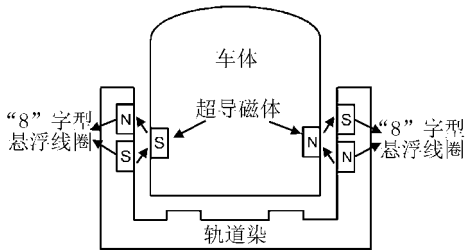


图 4 EDS 制磁浮列车的悬浮原理

为了浮起几十吨重的列车,车载电磁铁的磁场必须很强,普通电磁铁难以满足要求,因此 EDS 制选用磁通密度可达 5T 的超导线圈绕磁体,需用液氮冷却,技术复杂、造价偏高。另外,上述浮力随磁体移动速度(即列车速度)的增加而增加,时速在 150 千米以下时列车不能悬浮,只能靠车轮支撑助跑。

EDS 制的导向系统别具匠心,轨道两边相对的“8”字形悬浮线圈通过轨道底部以导线并联连接。列车向左偏时,左侧悬浮线圈中产生附加斥力、右侧

悬浮线圈产生附加吸力,使列车回到中央。列车向右偏时,与此类似。而列车在轨道中央行驶时,连接导线中则无电流,两侧线圈中无额外磁通产生,故称为零磁通导向。与悬浮系统类似,低速时导向力不足,需要装在车侧的轮子辅助导向。

EDS 制的推进系统与 EMS 制相同,转子为车上的超导磁体。因此 EDS 制的同一车载超导磁体可兼作悬浮、导向和推进之用,这正是其独到之处。由于 EDS 制的车载悬浮磁体是超导磁体,所以称为超导型(相对 EMS 制的常导磁体而言)。悬浮力为磁斥力,正因为是斥力型,所以磁场发散,车内磁场高达 20mT。这是 EDS 制的又一缺陷。

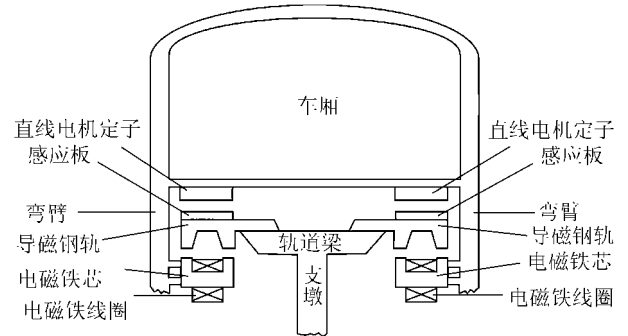


图 5 HSST 系统的横截面图

**HSST 系统** HSST(High Speed Surface Transport)系统被称为高速地面运输系统,也是德国发明的,日本从当时的联邦德国引进基础技术并做了进一步研发。其悬浮原理与 EMS 制相同,也是通过车载电磁铁吸引铁轨并加以控制实现悬浮。其悬浮高度亦为 10 毫米左右(见图 5)。与 EMS 制不同的是,HSST 系统的悬浮磁体能自动产生导向力(见图 6)。当列车偏离轨道中心时,电磁铁与轨道错开,产生的水平恢复力可将列车拉回中心。HSST 导向系统简单、节能,但导向力不大,因此不能用于高速。

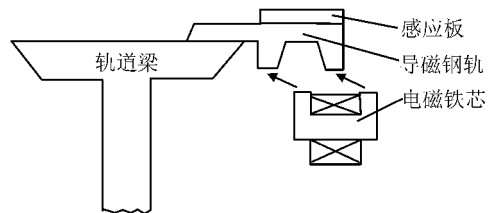


图 6 HSST 系统导向力的产生

与 EMS 和 EDS 制不同,HSST 系统用直线感应电机推进。它将普通三相异步电机的定子沿母线切开,放在列车底部,将转子(现在是导电平板,称为感应板)铺在轨道上表面,两者相对。对车载定子线圈通以三相交流电时,会产生一个移动磁场(普通电

机中产生的是旋转磁场)。该磁场在转子(感应板)中感生电流,电流和车载定子的磁场作用推动列车前进(见图5)。因为装在车上的定子较短,而转子(感应板)则铺满整条路轨,故又称短定子直线感应电机,以区别于长定子直线同步电机。

**高温超导磁浮列车** 这种磁浮列车利用超导体的抗磁性,将某极性(例如N极)向上的磁体铺于路轨,高温超导体YBCO( $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ )则置于列车底部并用液氮(77K)浸没而处于超导态,这时路轨磁体在超导体中的感生永久电流与路轨磁场相斥产生悬浮力。然而YBCO并非理想的第二类超导体,一部分磁通会进入超导体并被“钉扎”于超导体中。当列车偏离中心时,钉扎力会使列车复位。高温超导磁浮列车也采用直线同步电机推进。

其他磁浮列车还有美国的磁浮飞机和大连的补偿式永磁磁浮列车等。

### MAS制磁浮列车

MAS(Magnetic Array Suspension)制磁浮列车是上海师范大学魏乐汉教授发明的,于2006年初获国家发明专利,2004年上海国际工业博览会曾展出可乘6人的样车MAS3(见图照片)。MAS制磁浮列车的悬浮原理不同于其他任何系统。它是利用磁力线纵向抗拉伸、横向抗压缩的共同作用使列车悬浮。

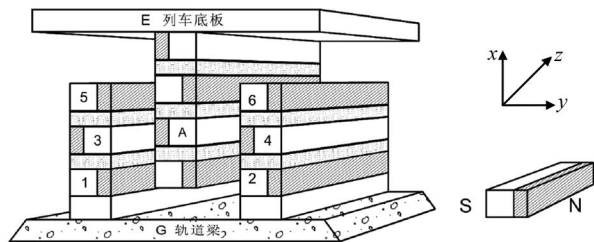


图7 MAS制悬浮磁阵列立体图

悬浮 列车底部布有车载永磁磁阵列,路轨则铺有路轨永磁磁阵列。车载磁阵列无接触地插入路轨磁阵列,形成悬浮系统(见图7)。现以磁条A为例,用相吸、相斥原理粗浅分析浮力的产生过程。虽

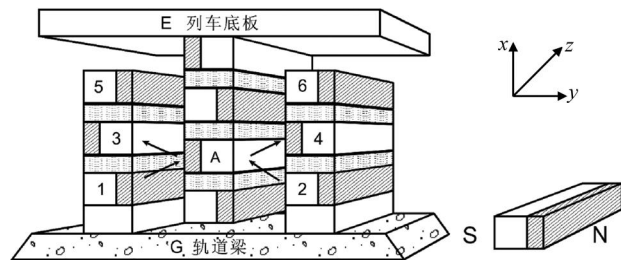


图8 列车下沉时受到的作用力

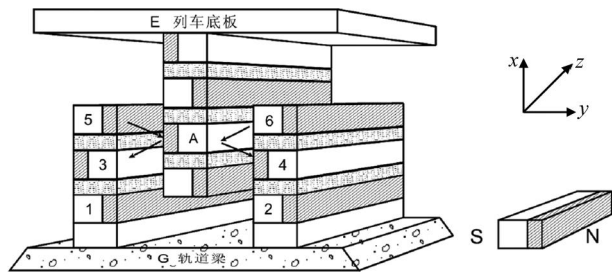


图9 列车上升时受到的作用力

然列车重量会造成车载磁阵列下沉(见图8),但由于A比路轨磁体3、4低,故受到3、4的向上吸力,同时受到路轨磁体1、2的向上斥力,四个力的垂直分量形成向上的悬浮力,阻止列车进一步下沉(其他车载磁体也受到类似的力)。列车上移(见图9)时则受向下的力作用。所以这种悬浮磁力是双向移动的,浮力将随磁阵列列数和层数的增加而成倍增长。实验证明,MAS制的单位面积浮力是EMS制和EDS制的3倍以上。而且由于MAS制采用永磁体,所以悬浮能耗为零。

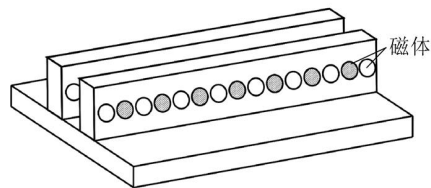


图10 磁咭条

推进 MAS制的推进系统也别具一格,相当于在路轨上安装机械齿条,在列车上安装机械齿轮,二者相互啮合,只要转动机械齿轮就能驱动

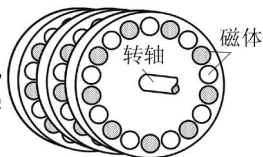


图11 磁咭轮

列车前进。它将均布磁体的磁咭条铺在路轨上(见图10),在列车底部安装均布磁体的磁咭轮(见图11)。磁咭轮被无接触地插入磁咭条中(图12)。驱动磁咭轮,其上的磁体和磁咭条上的磁体通过无机械接触的磁作用推动列车前进。这种推进系统比直线电机推力大、效率高、结构简单、造价更低。

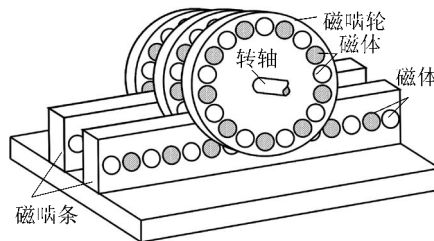


图12 MAS制磁浮列车推进系统

MAS制的悬浮系统在竖直方向(x方向)上很

各种磁浮列车性能比较

比较项目	EMS(德)电磁相吸式磁浮列车	EDS(日)电动相斥式磁浮列车	HSST(日)电磁相吸式低速磁浮列车	MAS(中)磁阵列制磁浮列车
悬浮方式	电磁吸引式	超导电磁感应相斥式	电磁吸引式	磁阵列间相互作用(创新)
每平方米悬浮力(吨/平方米)	15	15	15	>45
悬浮高度(毫米)	10	100	10	>30
悬浮稳定性	不稳	差	不稳	很稳定
悬浮耗能	大	大	大	不耗能
列车负载自重比	1/4	1/4	1/4	>8
推进系统	直线同步电机	直线同步电机	直线感应电机	磁齿轮-磁啮条(创新)
导向	电磁导向	零磁通导向	吸附磁力导向	机械导向或其他
路轨造价(亿元人民币/千米)	>5	>5	>4	<0.5
适宜运行速度范围(千米/小时)	300~500	500~550	<160	0~600
运行区域	城际	城际	市内	市内、城际
最高时速	550	581	300	600(预计)
知识产权归属	德国	日本	德国、日本	中国

稳定,沿路轨方向( $z$ 方向)可自由滑动,但左右( $y$ 方向)却不稳定。如图8所示,若车载磁体(磁体A所在磁列)由于某种原因向右偏移,则右侧路轨磁列(2、4、6)对车载磁列的吸力大于左侧磁列(1、3、5),列车就会加重右偏,最终被右侧轨道磁列吸住。因此,必须在 $y$ 方向上限制其偏离量。

MAS制的轨道截面为“U”字形,列车在“U”形槽中行驶。列车侧面装有导轮,导轮在“U”形槽侧壁上滚动,既引导列车沿路轨行驶,又限制列车在 $y$ 方向上的偏离量,这就是机械导向。导轮与侧壁接触会有摩擦力,但由于导向轮不承受列车重量,所以正压力 $N$ 和摩擦系数 $\mu$ 很小,故摩擦力 $F=\mu N$ 也很小,高速下的摩擦力远小于空气阻力。

从表中可以看出,MAS制的性能比其他系统更为优越。第一,铺在路轨上的永磁铁历经风霜雨雪、严冬酷暑,磁性不会退化。因为NaFeB磁体的磁通量在充磁后的最初几天内会衰退百分之几,但此后将基本不变,即使历经百年也不必再次充磁。第二,铺满磁体的路轨不会对环境造成磁污染。经实地测量,磁阵列200毫米以外的磁场强度接近地磁场,车内磁场也是如此。路轨上的永久磁铁不会吸附空气中的铁磁性尘埃,也不会吸住块状铁磁性物质。两年多的实践证明,即使附近有砂轮等产生铁磁性颗粒物的机器,二三米外的轨道亦无肉眼可见的铁磁性尘埃。这是由于MAS制的磁场较为封闭,不会主动吸引轨道外的铁磁性物体。当然,如果爬上高架轨道梁把铁块丢到路轨磁体上,则属于蓄意破坏,自然另当别论。第三,虽然路轨铺满磁体,但造价并不高。因为NaFeB磁性很强,所以磁体用量远少于

预期。就正式运行的轨道而言,每千米磁体重约16吨、价格约200万元,只占总造价的8%左右。

目前制造的MAS制磁浮样车长3.75米、宽1.52米、高2.1米,可乘6人,总重1.2吨,浮力高达10吨,以一个36V/10AH的电动自行车电池组即可驱动,节能优势可见一斑。MAS制磁浮列车具有自主知识产权,较其他磁浮列车的性能更为优异。但由于缺乏资金,产品转化进展缓慢。因此呼吁有识之士给予大力支持,使中国人自己发明、设计和制造的新一代交通工具——MAS制磁浮列车早日服务于大众。

(上海师范大学实验中心 200234)

#### 作者简介

魏乐汉,男,生于1938年,浙江诸暨人。1959~1968年就读于北京大学物理系,在此完成6年制本科和3年制研究生学业。1976~1988年于中国科学院合肥等离子体物理研究所任课题组长。1988年进入上海师范大学实验中心工作至今。

