磁悬浮列车

金能强

一、前言

衣食住行，人之必需。自古以来人类最大苦恼之一是人与货物的运输：横渡河流、穿越高山、遥远距离的行程等，想尽办法以节省时间和气力，让旅程更舒服。从步行手提、肩挑到用力拖拉，直至现代复杂的交通系统。

牛顿发现万有引力定律之前，人类就感知到地球引力的存在，人们发现，拖着重物比肩扛着省力。6千多年前人类建造了第一组轮子：木质实心的两个轮子、一根固定的穿过轮子中心的轴及架在其上的平台，车造出来，更省力了。繁体汉字“車”形象地表征了车的架构。车的出现极大地方便了人类的出行。

1825年世界上第一条铁路诞生，20世纪初飞机出现，人类可以陆海空立体交通出行。随着科技的进步，各种交通工具的速度、便捷、舒适度都大为提高。

1. 总旅行时间

人们出行总希望用最短的时间到达目的地，即旅行时间最短。所谓旅行时间等于主旅行时间与附加时间之和，通俗讲就是从（家）门到（目的地住处）门的时间。其中主旅行时间是旅客在旅途中所乘座的主要交通工具花费的时间，附加时间为旅途中花费在其他辅助交通工具上的时间，粗略统计结果附加时间：小汽车为零，高速铁路为1小时，飞机为2.5小时。图1给出不同速度下，旅行时间与旅行距离的关系。

从图旅行距离中可见，在2600 km距离内乘坐时速500 km的列车的旅行时间和乘时速700 km民航飞机（国内民用飞机常规速度）相当。如果再考虑到方便性、安全性、舒适性及节能、环保性，列车被选择的可能性会更高。

迄今轮轨列车最高运营速度为350 km/h，这样从

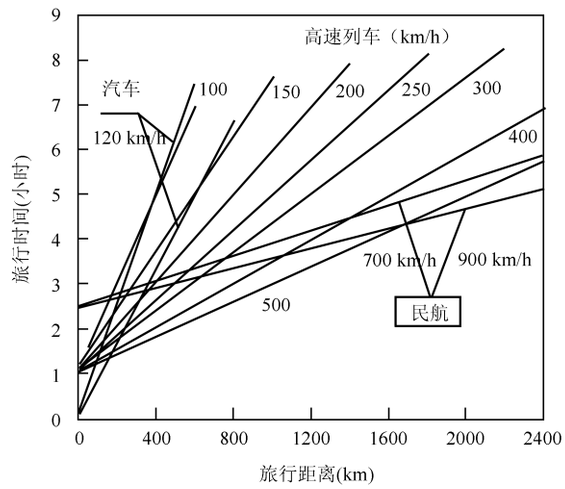

图1　不同速度下旅行时间与旅行距离的关系

速度连贯性考虑350 km/h和500 km/h间有个断档，用什么交通工具填充？

2. 轮轨列车的局限

轮轨列车是一种靠黏着力牵引的车辆，在速度上有局限性。首先，轮轨之间的黏着力制约了列车的高速运行，图2表示轮轨列车基本运行原理。钢轮架在铁轨上，支撑着车辆，凸起轮沿卡在铁轨间起导向作用，原动机（电动机、内燃机、蒸汽机）驱动轮轴转动、与其一体的轮子随之转动，列车依轮子在轨道上滚动而前行，靠的是轮子表面与铁轨表面的黏着力。黏着力不但随轮轨表面状况（如材料、表面光滑度、附着的雨、雪等）而变化，而且如图3所示，会随着速度增加而减小，与此同时列车的空气阻力却随着速度显著增加，当列车速度达到一定值时，牵引力与阻力相等，列车不可能再加速了。如冬天汽车在冰面上难以高速行驶一样，无论你如何加大油门，车轮老是打滑，车速快不起来。这一速度就是列车的最高运行速度，轮轨高速列车难以突破400 km/h的运营速度。

其次，当今高速轮轨列车几乎全靠电力牵引，以

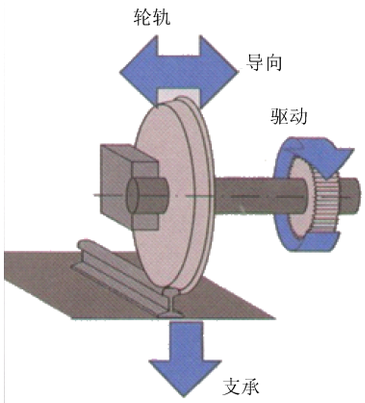

图 2　轮轨列车基本运行原理

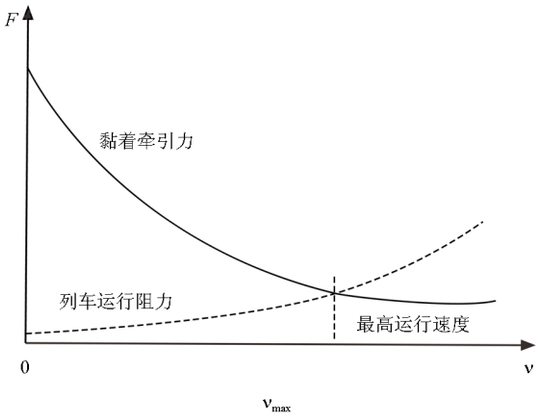

图 3　轮轨列车速度限制

电力驱动的列车，在车厢顶部安装有受电弓，又称受流器，受电弓与架设在其上方的供电导线（馈电线）接触，如图 4 所示。电流从地面供电站引导列车上，驱动电动机。为保证受电弓与供电导线良好接触，受电弓向上必须具备压力，车子运行时，受电弓与供电导线产生滑动摩擦，且接触压力会产生波动。如果受电弓发生离线现象，产生电弧，对受电弓与导线均产生烧蚀。速度增加时，受电弓离线率会迅速增加，电弧烧蚀现象严重。20 世纪 50 年代法国创造了时速 331 km 的列车试验速度。但试验运行了一千多千米后，受电弓完全烧坏了。经半个多世纪的努力，现在受流极限速度大约是 400 ～ 500 km/h。另一因素是安全制动，与牵引力一样，制动力靠的是黏着力，速度高时这个力小，制动距离要大，列车安全性受到影响，制约轮轨列车超高速化的因素还有：车辆本身结构、线路的平顺度、牵引功率加大、列车运行震动、噪声等。这些因素制约了轮轨列车的运行速度，上限值 350 km

图 4　轮轨列车受电弓

的时速是较为适当的。

轮轨列车牵引力是黏着力，但限制速度提高的也是黏着力，真是成也萧何败也萧何。可否用其他的力来支撑、导向、牵引呢？宇宙间有四种作用力：强力、弱力、电磁力、引力。电磁力和引力是长距离作用力，而且电磁力强度远远大于引力，因此科技工作者想到电磁力。同时，科技工作者也考虑到用气浮和水浮的形式来悬浮和驱动列车，但由于这两种方式都造成很大的环境污染，均未能被采用。

电磁力作用和引力作用一样，是场的作用，可以隔空，完全没有机械接触。恰似一个无形的手作用着：无声、无息、无污染、高强度、高速度，完全能满足高速、超高速的要求。

二、磁悬浮列车

磁悬浮列车是一种现代高科技轨道交通工具，它通过电磁力实现列车与轨道之间的无接触的悬浮和导向，再利用直线电机产生的电磁力牵引列车运行。

1922 年，德国工程师赫尔曼 • 肯佩尔（Hermann Kemper）提出了电磁悬浮原理，继而申请了专利。20 世纪 70 年代以后，随着工业化国家经济实力不断增强，为提高交通运输能力以适应其经济发展和民生的需要，德国、日本、美国等国家相继开展了磁悬浮运输系统的研发。其中德国和日本取得了世人瞩目的成就。

1. 磁悬浮——行驶无轮

磁悬浮力利用“同性磁极相斥，异性磁极相吸”的原理，使车体悬浮。产生磁场的有常导电磁铁、超

导电磁铁和永久磁铁，与之相作用的有超导体、强导磁体、金属导体，以上六种物体可以组合成多种磁浮方式。

悬浮方式按电磁原理可分为电磁式（EMS）和电动式（EDM）；按悬浮力性质可分为吸引式和推斥式；按励磁方式可分为常导式、低温超导式、高温超导式和永磁式。

目前较成功地应用在磁悬浮列车中的是：日本低温超导电动式磁悬浮 ML 系列技术；德国常导高速电磁式磁悬浮 TR 系列技术和日本常导中低速电磁式悬浮 HSST 系列技术；我国自主研发的常导中低速磁悬浮列车，技术与 HSST 基本相同。

2. 直线电机——飞行无翅

直线电机，顾名思义就是线性运动的电机，其基本原理和旋转电机一样，也是基于电磁场的作用而产生机械运动或发出电流，如图 5 所示。

将传统的旋转电机沿轴向切开、展直，即变成直线电机，只不过旋转电机定子中旋转磁场变成直线电机初级中的直线移动磁场，与次级磁场相互作用，产生直线牵引力，驱动车辆运动。原则上每种旋转电机都有与之相对应的直线电机，但从使用角度衡量，至今只有直线同步电机与直线异步电机比较适合用作磁悬浮列车的牵引电机。直线电机根据初级长度与驱动方式等分类。依据初级长度不同，可划分为长初级直线电机与短初级直线电机。目前较为成熟的采用直线电机驱动的磁悬浮列车中，常选择长初级直线同步电机和短初级直线异步电动机，这两种电机性能列表比较在表 1 中。

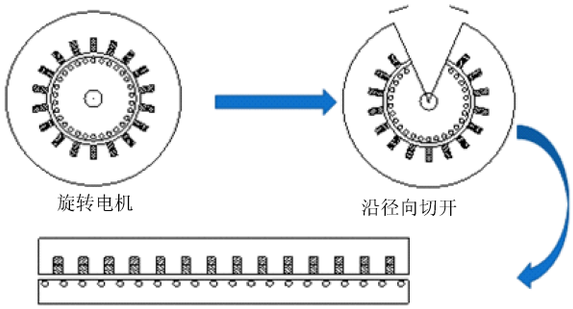

图 5　直线电机原理

表 1　两种直线电机的性能比较

性能	短初级直线异步电机	长初级直线同步电机
电机初级绕组安装位置	车上	地面线路上
功率因数	低	≈ 1
效率	低	高
控制难度	小	大
线路造价	低	高
是否需受流器	需要	不需要
典型应用	日本 HSST，加拿大及日本直线轮轨交通系统	德国 TR，日本 MLX，美国 Magplane，M3，GA

从表 1 中可见，短初级异步电机需要受流器供电，因此不适宜用在高速系统中。同步直线电机采用长初级形式，由地面供电无需受流器，其同步运行速度与初级直线移动磁场速度严格同步，如图 6 所示，移动磁场为电磁波，其行波速度：

$$v = 2f\tau$$

式中，f 为初级电流频率，τ 为磁极轴线距离（极距），当 f 和 τ 选取足够大时，行波速度将非常高，理论上可以达到光速，但对于磁浮车而言，受电源频率、电机结构及车型阻力等因素影响，地面运行磁浮车速一般不宜大于 600 km/h，然而即使是这一速度，已是飞机的飞行速度了。

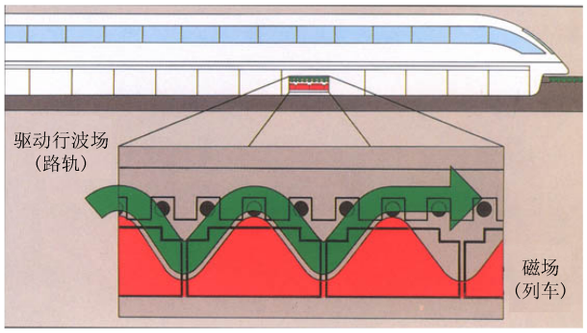

图 6　驱动行波磁场

三、日本高速磁悬浮列车

ML 高速磁悬浮车由日本铁道公司研制，采用低温超导电动式磁悬浮，无铁芯长初级直线同步电机牵引技术，列车的结构断面如图 7 所示，主要由车体、车载低温超导磁体和制冷器、轨道侧壁、安装其上的长初级三相绕组、用于磁浮与导向的 8 字形线圈及支持轮走行轨等构成。

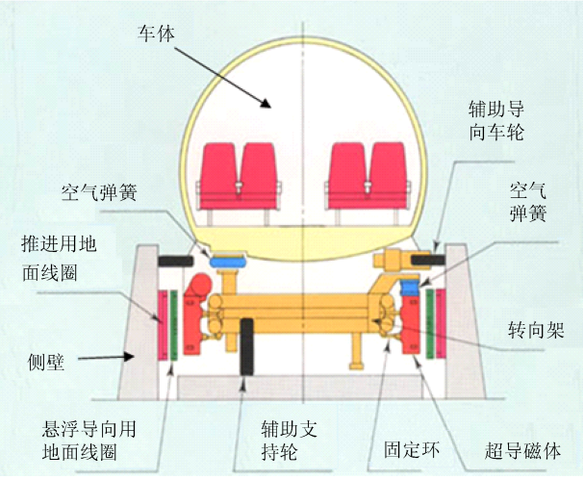

图 7　ML 高速磁悬浮车断面图

1. 磁悬浮原理

ML 系列采用超导励磁电动式磁悬浮方式，基本原理如图 8 所示，车辆悬浮力来自车辆的两个侧面，在地面轨道的相应侧面上，沿整个运行段，按设计的极距排列着 8 字形的短路线圈，当车辆高速通过时，超导磁体（其中心磁场强度高达 5 T）在 8 字形线圈中感生出电流，此电流在上侧线圈中产生一个与超导磁体异极性磁场，吸引磁体向上，下侧线圈则产生一个与超导磁体同极性磁场推斥磁体向上，合力使车辆受到一个向上的力，磁力足够大时克服重力使车辆悬浮，导向力产生原理类似，也是基于电磁感应原理。

当列车速度较低时产生的悬浮力不足以浮起车辆，需要依靠安装在转向架上的辅助车轮支撑；当速度提高，车辆逐渐浮起来。ML 系列悬浮高度约为 100 ～ 150 mm。

2. 驱动原理

如图 9 所示，ML 系列车辆两侧在两端都安装有

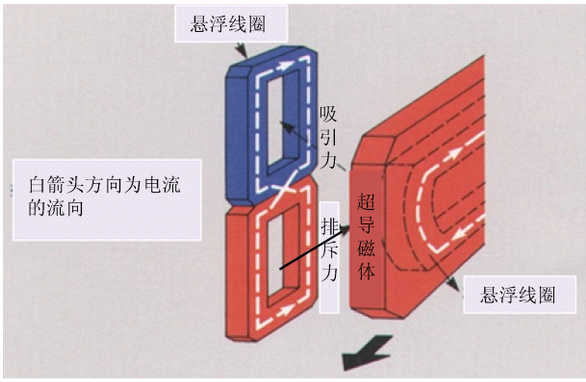

图 8　ML 磁悬浮悬浮原理

低温超导磁体，地面侧壁除安装有悬浮导向用的 8 字形线圈外，还安装有驱动用的三相绕组，三相绕组通上电流后就会产生移动磁场，这一磁场与超导磁体相互作用，产生吸引力和排斥力，合力为向前的牵引力，改变电流频率和大小，会改变牵引力的大小和车辆运行的速度，绕组通电顺序反相则会产生一个向后的制动力。

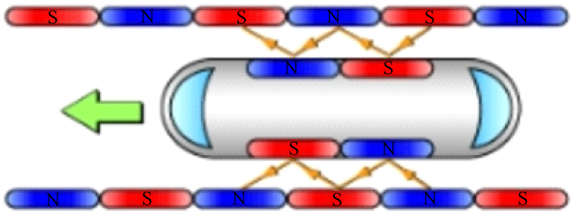

图 9　ML 磁悬浮驱动原理

3. 技术特点

ML 系列超导磁悬浮系统中：驱动、悬浮、导向都采用无铁芯的空心线圈。磁路中无铁芯，不存在饱和问题，但磁路磁阻增大许多，要产生相应的力，励磁场的励磁电流必须非常大。有必要采用超导线圈，同时由于无铁芯，磁通在三维空间是发散的，因此必须在励磁体周围安装上磁屏蔽装置，以防止漏磁场对人体和其他仪器仪表的侵害，尖端的低温超导技术是 ML 系统的核心。

悬浮与导向特点：为电动式悬浮，地面常导 8 字形线圈起到悬浮和导向作用的电流由车载磁体感应生成，所以悬浮和导向均为自稳定系统，无需控制。且悬浮气隙大，可高达 100 mm 以上，但车辆在低速及静止时需要辅助车轮支撑、导向。

驱动特点：采用地面长初级同步直线电机。地面供电，不存在前言中第 2 节所述受电弓引起的问题，可提供产生大推力的电能，并且由于极距较大，通以较低频率的电流就能得到较高的同步速度，2003 年就创造了 581 km/h 的世界纪录。

日本自 1970 年开始超导磁悬浮研究，经数十年，一直坚持研发。2005 年，日本超导磁悬浮铁路实用技术评估委员会，作出实用化的基础技术已经确立的评估结论，并计划在 2018 年完成确立与其他交通运输方式具备竞争力的超高速大运量磁悬浮铁路系统的实用化技术。

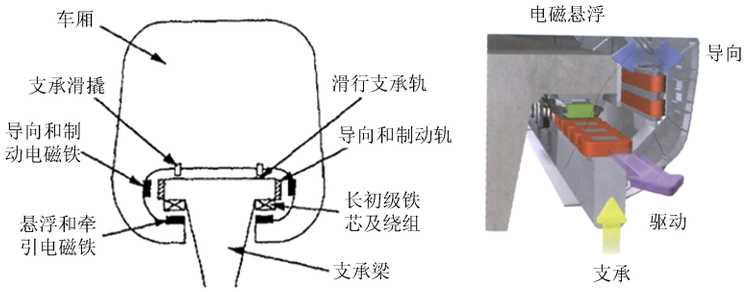

图 10　TR 磁悬浮结构

四、德国常导高速磁悬浮 TR 系统

图 10 是 TR 磁悬浮列车结构。主要组成部分有：地面上的支撑梁、导向和制动轨、长初级铁芯及绕组、滑行轨；车辆上的悬浮和牵引电磁铁、导向和制动电磁铁、支撑滑撬及车厢。

长初级沿 T 形支撑梁全线连续铺设，悬浮及牵引电磁铁既是同步电机的励磁极，又是悬浮用的电磁铁，滑撬和滑行轨用作非常状况下的紧急安全制动。

1. 磁悬浮原理

TR 磁悬浮系统为电磁式（EMS）。图 11 是列车控制原理图，基本的控制过程是：固定安装在悬浮电磁铁上的间隙传感器检测出间隙的大小，并结合车辆的速度、加速度等状态，间隙调节器控制励磁电流器调节励磁电流，也就是磁悬浮电磁铁电流的大小，保证稳定的磁浮，一般情况下磁浮间隙保持在 10±2 mm。励磁电流由车载蓄电池提供，直线发电机向蓄电池充电以保证蓄电池长期工作。

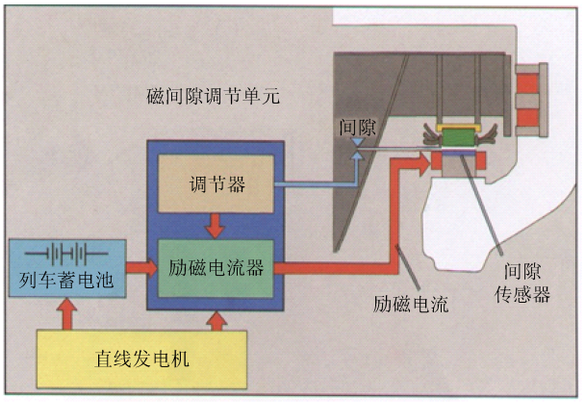

图 11　TR 磁悬浮控制原理

2. 导向原理

在车辆两个侧面安装有导向电磁铁，而在导轨的两侧端面安装有导向的铁轨，二者之间气隙为 10mm。当车辆处于正中心位置时，两边气隙和磁吸力相等，但方向相反，车辆处于平衡状态，一旦偏离中心，传感器则会检测出变化，通过改变两侧导向磁铁电流大小，即使气隙变小的一侧电流变小，使其吸力变小，而增大气隙变大一侧电流，使其磁吸力变大，使车辆向中心复原。

3. 驱动原理

TR 系统采用带铁芯的长初级直线同步电机驱动，初级直线同步电机在轨道下方沿全线铺设，通以三相电流会产生一个沿线路移动的行波磁场，这一磁场与车上的牵引电磁铁相互作用，驱动车辆。改变电流大小和频率，可以实现车辆从静止到额定速度之间的连续速度调节。

4. 技术特点

TR 系列采用电磁悬浮（EMS），因此在车辆静止时也能悬浮起来，由于间隙较小，约为 10mm，可采用常导励磁，如何保证列车在高速下仍能处于稳定的磁悬浮状态，车辆的控制技术是核心，德国先进的机械工业，极致的加工精度，同样也起到保证作用。

五、两种高速磁悬浮系统的比较

高速常导磁悬浮列车 TR 系列与低温超导磁悬浮列车 ML 系列，历经近半个世纪的研发，达到很高的技术水准。

1. 技术难度

超导磁悬浮列车需要车载低温系统给液氮制冷以使超导线圈保持超导态，车载低温技术是其难点。

常导磁悬浮列车的常导电磁铁的磁场控制是多因素、随机的，难度很高。

2. 磁场对环境的影响

超导体磁场是发散的，对车内主要是直流磁场影响，对车外当列车运行时是高速变化的磁场，当采用磁屏蔽措施后磁场减小到 0.37 ～ 1.33 mT，与常导磁浮列车相近，不会对旅客及线路周边人、物造成危害。

两个系列车，高速运行时均采用无接触方式的支撑、导向、驱动、制动和供电，消除了传统轮轨铁路的轮轨接触噪声和受电弓的空气噪声及电弧噪声，故磁悬浮列车噪声比轮轨列车噪声低很多。TR 系列磁悬浮列车在时速 450 km 时噪声与法国高速轮轨 TGV-A 列车在 300 km/h 时相近。

3. 能耗

两系统车能耗接近。500 km/h 速度下的座千米能耗 ML 系列为 89 W·h，而 TR07 的宽松座位时为 150 W·h，紧凑座位时为 75 W·h。TR 在 400 km/h 时能耗与高速轮轨 300 km/h 相当。

4. 安全性

从轨道特征看，TR 和 HSST 为车辆环抱导轨型，如图 12 和 13 所示，ML 车辆在“U”形导向槽中运行，如图 14 所示，不会发生脱轨、翻车等事故，长初级车辆采用地面分区段供电方式使列车不会发生追尾事故，充分的冗余设计保证了悬浮的可靠性，列车运行非常安全。

总之，两个系统由于均采用地面初级同步电机驱动，都具有爬坡能力强、曲线半径小、环境性能好、加速、制动能力强等优点。适用的运营速度范围在 400 ～ 550 km/h。为速度优先、旅行时间优先选择的交通工具，是长大干线旅客运输的优选。

图 12　TR 高速磁悬浮列车

图 13　HSST 中低速系悬浮列车

图 14　ML 超导高速磁悬浮列车

六、中低速磁悬浮列车

日本研发的 HSST（High Speed Surface Transport）中低速磁悬浮列车已建成了商业运行线，于 2005 年在爱知县丰田市作为市内公交线运营。

HSST 系列是作为城市与近郊连接线开发的，可以大幅度缩短通勤、就学的时间，速度定在 100 ～ 200 km/h，有比较广泛的区域适应范围。

1. 磁悬浮和导向原理

HSST 采用电磁式悬浮（EMS），如图 15 所示，F 型钢轨铺设在线路两侧，安装在车上的常导电磁铁为 U 字形，在 F 钢轨下方与之对应，约 8 ～ 10 mm 气隙与 F 形钢轨形成闭合磁路，当线圈中通以直流电时，产生磁通沿上述磁路闭合，在气隙中产生磁吸引力，这个力与车重平衡时，车辆就悬浮起来，气隙中

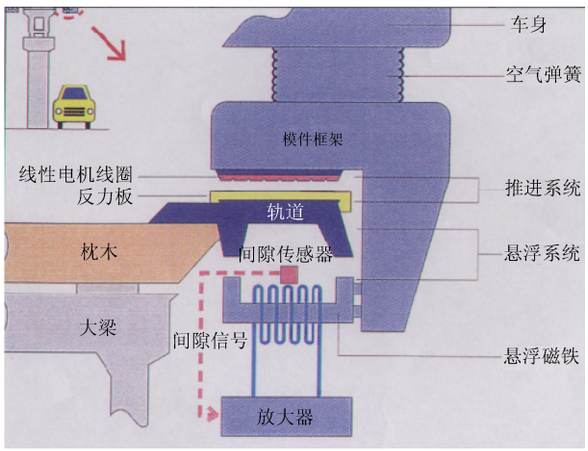

图 15　HSST 磁悬浮结构原理

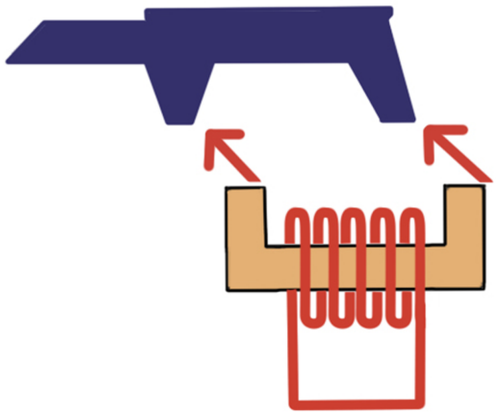

图 16　HSST 磁浮导向原理

安装有气隙传感器以调节气隙大小，保证在任何工况运行时气隙维持在（10±2）mm。

列车导向原理如图 16 所示，当列车偏离中心位置时，这时 U 字形磁铁与 F 形钢轨中心也随之发生横向移动，磁场发生扭曲，产生一个横向分力，使磁铁回复到磁阻最小即两中心重合的位置。

2. 驱动原理

HSST 采用车载短初级直线异步电机驱动方式。在 F 形轨道上放敷设有铜或铝的反应板，初级通以三相电流时产生一移动磁场，该磁场在反应板上感应出电流建立磁场，与初级磁场相作用产生牵引力或制动力。

短初级优点是轨道结构简单，控制方便，发车频率较高，造价较低，且磁悬浮带来的噪声低，使其适合作为市区通勤用车。短初级异步电机缺点是电机功率因数低、效率低，导致功率设备容量远大于电机输出功率。车载初级必须具备受流设备，因此车速不宜太快，作为市内及城郊的交通工具，100 ～ 200 km/h 的速度区间是适宜的。

七、上海磁悬浮线

我国地域广、人口多，适宜采用高速、大运量的交通工具。20 世纪末，德国 TR 高速磁悬浮铁路技术已达到商业应用程度，我国上海磁悬浮示范运营线采用 TR 技术，建成世界上第一条高速磁悬浮商业运营线，取得良好的运营业绩。

线路正线长 30 km，辅助线长 3 km，双线上下行折返，设 2 个车站，2 个牵引变电站，1 个运行控制中心和 1 个维修中心和车库。2003 年末开始全天候运营至今已安全可靠运行了近十年，验证了 TR 列车作为一种高速运营车辆的可行性。作为一个示范线，在线进行了一系列的科学实验，为我国将来推广高速磁浮线获取许多宝贵的数据和经验。

八、中国磁悬浮铁路的研究

1. 中低速磁浮铁路的研究

中国的磁悬浮铁路研究，始于 20 世纪 80 年代，初期主要进行小型磁悬浮系统和直线电机的研究。

国防科技大学、西南交通大学、铁道科学研究院主要开展磁悬浮研究，中国科学院电工研究所和浙江大学侧重于牵引直线电机的研究。

1992 年，“中低速磁悬浮列车关键技术研究”列入国家“八五”重点科技攻关计划，1998 年在铁道科学研究院内建成 6 t 单转向架电磁悬浮试验车，参加的研究单位有铁道科学研究院、国防科技大学、西南交通大学和中国科学院电工研究所。

2001 年西南交通大学研制的拟用在风景区作为旅游观光的磁悬浮车辆在长春客车厂竣工下线。

国防科技大学自 20 世纪 80 年代开始，一直从事磁悬浮系统的研究。1989 年研制成磁悬浮试验模型车。随后在长沙建成中低速磁浮列车试验线，开展了一系列相关试验。2006 年在唐山机车车辆厂内建成 2 km 的中低速磁悬浮列车试验线，开始进行中低速磁悬浮铁路工程化的综合实验研究，已取得了一系列的研究成果。为实际运营线的建设打下了基础。

中国科学院电工研究所在国内较早开展直线电机研究工作，对直线电机的特性、计算和设计方法进行了理论分析和试验研究，尤其是在直线电机所特有的电机端部效应方面做了有效的工作，出版了多本专著。研制出了多规格的中低速磁悬浮车牵引用直线异步电机，成功地应用在多种直线电机牵引车辆上。

2. 高温超导磁悬浮车

1997 年，中国科学院电工研究所与（下转 39 页）

都能自动识别，并把账单寄给我们。雾霾天气逐渐远离我们的城市，我们的天空重新回到蓝色。

互动的电网——智能电表就像我们的用电管家，通过它，我们能够随时随地控制家里电器工作和休息，并且分门别类地告诉我们家里每个电器的用电明细，查询哪个电器用的电量多、哪个电器最节能，清晰掌握我们电量使用情况。同时我们家里的电价会根据一天中不同时刻动态更新，比如用电高峰时段，电价会自动上扬，智能电表将会帮助我们提出最优的用电计划，制定合理的节能方案，引导我们在日常生活中节约能源，提高环保意识。

自愈的电网——智能电网通过进行连续不断的在线自我评估以预测电网可能出现的问题，发现已经存在的或正在发展的问题，并立即采取措施加以控制或纠正，构筑起自己的免疫系统和防线。当电网受到故障扰动、攻击或是自然灾害时，智能电网能够自动甄别故障类型和等级，定位故障地点，并采取必要措施防止故障扩散，并能够通过启动备用电厂等手段自我恢复。同时电网技术人员能够清晰地了解电网运行状况，在必要时候介入控制。在长时间故障和灾害情况下，我们能够通过建设在用户侧的分布式能源形成独立的微型电网，保障通信、金融等关键部门运转，维持社会稳定，并指挥抢险救灾。

这些仅仅是未来智能电网生活的冰山一角，在未来信息化带化、智能化、物联网、云计算等新兴技术的催生下，一个绿色、互动、高效、坚强的电网即将展现在我们眼前，为我们的社会提供更加便捷、安全、优质的能源供给。

5. 智能电网发展任重道远

智能电网能够实现电网运行的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全，全方位地支持和促进全国范围的资源优化配置以及新型能源发展方式和新型电能利用方式的进步，由此还能带动以 IT 为特点的其他相关产业和服务业的大发展，它将是一个必然的发展趋势。同时智能电网是一个庞大的系统工程，它不仅需要电力行业中装备制造、建设、发电、运营、科研等几乎所有专业单位的参与，也需要多行业、多学科、多领域的交叉，更需要政府主导和政策支持，这说明智能电网的发展和建设将会是前沿技术不断应用和集成，电网运行方式不断变革的长期过程。

（北京中国科学院电工研究所 100190）

（上接 30 页）德国大学合作，研制成小型高温超导磁悬浮车试验装置。采用地面初级同步直线电机牵引，地面永磁轨道与车载高温超导块磁悬浮形式。

2000 年，西南交通大学研制成载人高温超导磁悬浮车，采用地面初级异步电动机牵引，地面永磁轨道，车载高温超导块磁悬浮形式。

总的来看，世界各国高温超导磁悬浮车的研究基本上还停留在磁悬浮原理的研究上，距离实际运行车辆的研制还有很长的一段路要走。

九、结束语

将车辆悬浮在轨道上运行是人类的梦想，经过半个世纪的努力，这一梦想初步实现了。磁悬浮列车开始于德国、日本，他们有功于人类，但中国人让高速磁悬浮车驶出实验室，驶向社会大众，同样功不可没。

人类的追求永不停止，汽车、火车不是人类出行的永恒，磁悬浮列车同样也不会是交通工具的终结，现在他们相辅相成，将来也会共同发展。

（北京中国科学院电工研究所 100190）