

# 磁悬浮技术与磁悬浮列车

刘琳

(安徽冶金科技职业学院 马鞍山 243011)



随着上海磁悬浮线的全线开通,“磁悬浮”技术成为当前热点话题之一,并受到媒体的重视。磁悬浮列车的原理并不深奥。简单说是运用磁铁“同性相斥、异性相吸”的性质,使磁铁具有抗拒地心引力的能力,即“磁性悬浮”。科学家将“磁性悬浮”这种原理运用在铁路运输系统上,使列车完全脱离轨道而悬浮行驶,成为“无轮”列车,时速可达几百千米以上。跟飞机差不多了!这就是所谓的“磁悬浮列车”,亦称之为“磁垫车”。

## 一、“磁性悬浮”原理

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,人们称之为磁悬浮之父,并于1934年申请了磁悬浮列车的专利。

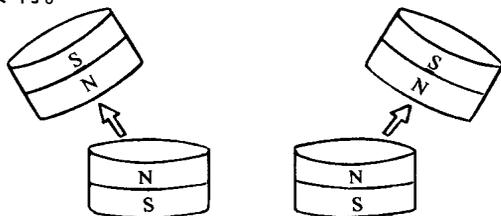


图1 同极性相互排斥

稍有物理知识的人都知道:把两块磁铁相同的一极靠近,它们就相互排斥,反之,把相反的一极靠近,它们就互相吸引。托起物体的神秘的悬浮力,其实就

是这两种吸引力与排斥力。斥力使物体悬浮不难理解(图1)。吸引力使物体悬浮是当物体向下的重力与向上电磁吸力平衡时,物体便处于悬浮状态(图2)。但是,利用一般的磁铁并不能把物体稳定地浮起。要是你将两块磁铁的N极相对,你会发现无法使一块磁铁稳定地浮在另一块上(图1)。所以,要把物体浮起并不如想像般简单。

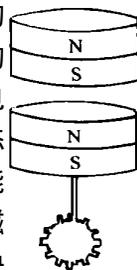


图2 异性相互吸引

## 二、磁悬浮技术的应用

磁悬浮技术主要应用在运载技术上。它不仅能够用于地面运载,也可以用于海上运载,还能用于垂直发射,美国就在试验用磁悬浮技术发射火箭。磁悬浮技术在直线驱动、低温超导、电力电子、计算机控制与信息技术、医疗等多个领域都有极重要的价值。概括地说,它是一种能带动众多高新技术发展的基础科学,又是一种具有极广泛前景的应用技术。

如利用磁悬浮技术可生产磁悬浮分子泵,用来产生洁净的高真空。轴承采用磁悬浮技术制成。它特点为无轴承磨损、抽速大、极限真空度高、可以任意角度安装、低噪音、低震动,高运行可靠性强、坚固耐用。类似产品还有磁悬浮轴承结构式电能表,磁悬浮天平等。利用磁悬浮技术还可以做成各种商品的展示架,例如使手机、化妆品、工艺品等呈凌空悬

一般车在碰撞时发生塑性变形,塑性变形深度  $x$  和有效碰撞速度关系是:  $v_e = 29.25x$

A 车有效碰撞速度是:  $v_{e1} = 29.25x_1 = 29.25 \times 0.35 = 10.24$

$$v_{e1} = [m_2 / (m_1 + m_2)] (v_{10} - v_{20}) = [m_2 g / (m_1 g + m_2 g)] (v_{10} - v_{20})$$

$$10.24 = [11 / (12 + 11)] (v_{10} - v_{20})$$

联合式得

$$v_{10} = 16.68 \text{ m/s} = 60.1 \text{ km/h} \quad v_{20} = -4.73 \text{ m/s} = -17 \text{ km/h}$$

同理 B 车有效碰撞速度是:  $v_{e2} = 29.25x_2 = 29.25 \times 0.4 = 11.7$

$$v_{e2} = [m_1 / (m_1 + m_2)] (v_{10} - v_{20}) = [m_1 g / (m_1 g + m_2 g)] (v_{10} - v_{20})$$

$$11.7 = [12 / (12 + 11)] (v_{10} - v_{20})$$

联合式得

$$v_{10} = 17.2 \text{ m/s} = 61.8 \text{ km/h} \quad v_{20} = -5.2 \text{ m/s} = -18.8 \text{ km/h}$$

则碰撞前 A、B 车速度分别为:

$$v_{10} = 60 \sim 62 \text{ km/h} \quad v_{20} = -17 \sim -19 \text{ km/h}$$

浮状态进行展示。

近几年,随着铁路高速化成为世界的热点和重点,铁路在各国交通运输格局中占有举足轻重的地位。法国、日本、俄国、美国等国家列车时速由 200 千米向 300 千米飞速发展。20 世纪末,德国、日本、法国等国家的高速铁路运营时速达到 360 千米。要使列车在如此高的速度下持续行驶,传统的车轮加钢轨组成的系统,已经无能为力了。所以,欧洲、日本现在正运行的高速列车,在速度上已没有多大潜力。要进一步提高速度,必须转向新的技术,这就是超常规的列车——磁悬浮列车。

### 三、磁悬浮列车是什么

磁悬浮列车是一种采用无接触的电磁悬浮、导向和驱动系统的磁悬浮高速列车系统。应用准确的定义来说,磁悬浮列车实际上是依靠电磁吸力或电动斥力将列车车厢托起悬浮于空中并进行导向,实现列车与地面轨道间的无机械接触,从根本上克服了传统列车轮轨粘着限制、机械噪声和磨损等问题,只是在离轨道 10mm 或 100mm 的高度快速“飞行”。再利用线性电机驱动列车运行。它的时速可达到 500 千米以上,是当今世界最快的地面客运交通工具,并且爬坡能力强、安全舒适、不燃油,污染少等优点。因为它采用高架方式,所以占地面积很小。

根据吸引力和排斥力的基本原理,故磁悬浮列车也有两种相应的形式:一种是利用磁铁同性相斥原理而设计的电磁运行系统的磁悬浮列车,它利用车上超导体电磁铁形成的磁场与轨道上线圈形成的磁场之间所产生的斥力,使车体悬浮运行的铁路。主要是以日本为代表的排斥式悬浮系统——EDS 系统,这种磁悬浮列车的悬浮气隙较大,一般为 100 毫米左右,速度可达每小时 500 千米以上。另一种则是利用磁铁异性相吸原理而设计的电力运行系统的磁悬浮列车,它是在车体底部及两侧到转向上的顶部安装磁铁,如图 3 所示,在 T 形导轨的上方和伸臂部分下方分别设反作用板和感应钢板,控制电磁铁的电流,使电磁铁和导轨间保持悬空运行,并使导轨钢板的吸引力与车辆的重力平衡,从而使车体悬浮于车道的导轨面上运行。悬浮的气隙较小,一般为 10 毫米左右。利用磁铁异性相吸原理而设计的磁悬浮列车主要是以德国为代表的常规磁铁吸引式悬浮系统——EMS 系统。

### 四、磁悬浮列车发展史

磁悬浮列车是自蒸汽机车问世以来铁路技术最根本的突破。磁悬浮列车在今天看似似乎还是一个新

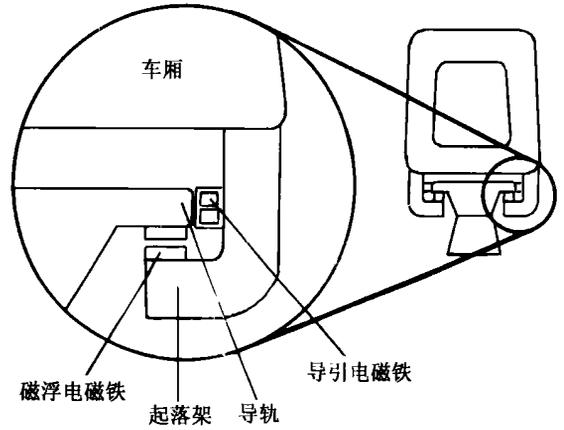


图 3 磁悬浮原理

鲜事物,其实它的理论准备已有很长的历史。早在 1922 年德国工程师肯佩尔首次考虑电磁悬浮铁路(电磁对车道的吸引原则)。1934 年肯佩尔申请了磁悬浮列车的专利(1934 年 8 月 14 日德国国家专利 643316)。1953 年肯佩尔写出科学报告《电磁悬浮导向的电力驱动铁路机车车辆》。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。

国际上磁悬浮列车有两个发展方向。一是利用常规电磁铁与一般铁性物质相吸引的基本原理,把列车吸引上来,称为常导型高速磁悬浮列车。主要是以德国为代表的常规磁铁吸引式悬浮系统——EMS 系统。另一个是以日本为代表的排斥式悬浮系统——EDS 系统,它使用超导体磁悬浮原理,使车轮和钢轨之间产生排斥力,使列车悬空运行。

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。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。

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排斥式试验车辆,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。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。1984 年 4 月,伯明翰机场至英特纳雄纳尔车站之间的磁浮铁路正式通车营业。令人遗憾的是,在 1995 年,这趟一度是世界上惟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。

目前,美国正在研制地下真空磁悬浮超音速列车。这种神奇的“行星列车”设计最高时速为 2.25 万千米,是音速的 20 多倍。它横穿美国大陆只需 21 分钟,而喷气式客机则需 5 小时。这项计划要求首先在地下挖出隧道,铺设 2 根至 4 根直径为 12 米的管道,然后抽出管道中的空气,使其接近真空状态,最后再用超导方式行驶磁悬浮列车。那时距离不再是阻碍人们团聚的因素。

经过了各国多年的试验研究以后,一般认为,短途磁悬浮运输速度一般为 200 千米/小时,用于连接机场和市中心;中程磁悬浮运输速度为 300 千米/小时,适用于城市间的运输;长途磁悬浮运输速度一般在 300 千米/小时以上,适用于远距离运输。

磁悬浮铁路从探索性的基础研究到进入实用性开发研究,经历了 20 多年。现在,各国已经公认它是一种很有发展前途的交通运输工具,适用于长、短途高速运输。其主要特点是不受气候影响、无噪音、无振动及磨损、不污染,可以通过 35 髓的大坡度和半径较小的曲线,能安全、迅速地运送旅客,大大缩短旅客乘车时间,时速可达 500 千米,运送一名旅客消耗的能量约相当于飞机的 60%。

已经投入可行性研究的磁悬浮铁路有:美国的洛杉矶—拉斯维加斯(450 千米)、芝加哥—米尔沃基(120 千米);加拿大的蒙特利尔—渥太华(193 千米);欧洲的法兰克福—巴黎(515 千米)、布鲁塞尔—巴塞尔(500 千米);澳大利亚的墨尔本—悉尼(810 千米);沙特阿拉伯的利雅得—麦加(880 千米);韩国的汉城—釜山(500 千米)等线路。

### 五、磁悬浮列车技术基础

磁悬浮铁路与传统铁路有着截然不同的区别和特点。在传统铁路上运行的列车,是靠机车作为牵引动力,以钢轨和轮缘作为运行导向设备,由铁路线路承受压力,借助于车轮沿着钢轨滚动前进的。如图 4 示。而在磁悬浮铁路上运行的列车是利用电磁系统产生的吸引力或排斥力将车辆托起,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。

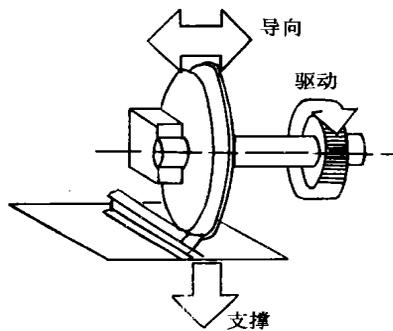


图 4 传统列车结构

根据磁悬浮列车上电磁铁的使用方式,磁悬浮铁路的基本制造方式可分为两大类,即:常导磁吸式(Electro Magnetic Suspension),简称 EMS;和超导磁斥式(Electro Dynamic Suspension),简称 EDS。两种制式的基本结构和工作原理互不相同。

磁悬浮列车主要由悬浮系统、推进系统和导向系统三大部分组成。尽管可以使用与磁力无关的推进系统,但在目前的绝大部分设计中,这三部分的功能均由磁力来完成。下面分别对这三部分所采用的技术进行介绍。

### 悬浮系统

目前悬浮系统的设计,可以分为两个方向,分别是德国所采用的常导型和日本所采用的超导型。从悬浮技术上讲就是电磁悬浮系统(EMS)和电力悬浮系统(EDS)。图 5 给出了两种系统的结构差别。

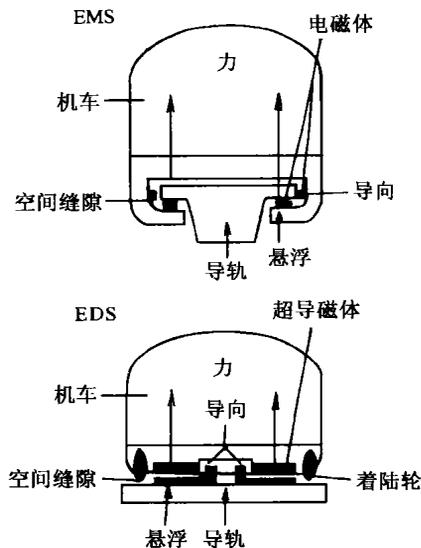


图 5 EMS 和 EDS 的结构差别

常导磁吸式,是一种吸力悬浮系统。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

现代物理知识

引力使车辆浮起(见图 3),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,以及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,才能使磁场保持稳定的强度和悬浮力,使车体与导轨之间保持 10~15 毫米的间隙。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。此外由于悬浮和导向实际上与列车运行速度无关,所以即使在停车状态下列车仍然可以进入悬浮状态。

超导磁斥式,此种形式应用了电磁感应的原理。在车辆底部安装超导磁体(放在液态氮储存槽内),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,呈“8”字形)与之相切割,当一辆列车快速驶过时,车两边的超导磁铁便会在线圈上感应出电流。巧妙的是,超导磁铁在“8”字形的线圈中心以下经过,因此“8”字形线圈下半部的磁通量改变比上半部大,感应出如图 6(b)所示的电流。“8”字形线圈下半部的磁极与超导磁铁的磁极相同,上半部则与之相反,结果是这两部分的线圈对超导磁铁产生的磁力,都有一个向上的分力。当向上分力大于车辆重量时,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,将车体悬浮起来的(如图 6 所示)。

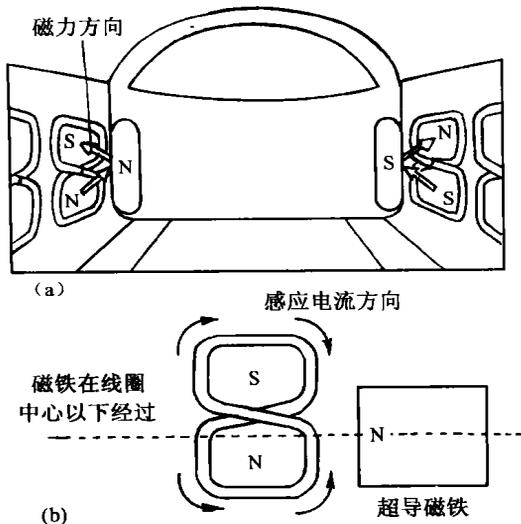


图 6 磁悬浮原理

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 100~150 毫米,

并能使列车运行保持平稳。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状态。这个间隙与速度的大小有关,由于“8”字形线圈只有在超导磁铁运动时才能感应出电流并产生磁性,因此当火车静止的时候,便不能浮起。所以,火车在启动时会首先靠轮子来滑行,直到产生的磁力足以承托火车的重量,才将轮子收起来,就好像飞机起飞一样。并且控制系统能够实现启动和停车的精确控制。

### 导向系统的导向原理

普通铁路列车的导向是靠车轮轮缘与钢轨之间相互作用实现的,而磁悬浮列车是利用电磁力的作用进行导向的。

常导磁吸式的导向系统,是在车辆侧面安装一组专门用于导向的电磁铁(如图 3 所示)。当车辆运行发生左右偏移时,车上的导向电磁铁与导向轨的侧面相互作用,产生一种排斥力,使车辆恢复到正常位置,和导向轨侧面之间保持一定的间隙。当车辆的运行状态发生变化时,例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,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磁斥力,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(如图 6 所示)。

(3) 利用磁力进行导引的“零磁通量”导向系统。即沿线路中心线均匀地铺设“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”字形的线圈内磁场不为零,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(如图 6 所示)。

### 推进系统的推进原理

磁悬浮列车由于悬浮起一定的高度,使车轮与

钢轨脱离,故不能依靠它们之间的摩擦力产生牵引力使车辆前进,而是采用一种叫做直线电动机的推进装置作为列车的牵引动力。

直线电机的推进原理是:当定子线圈接通三相交流电后,产生移动的磁场,沿轨道方向移动,转子线圈切割磁场产生感应电流,转子线圈在定子磁场中受电磁力作用,使定子和转子之间产生相对直线运动的推力,推动列车前进。推进力的大小取决于定子磁场的强度、转子线圈的电流以及线圈的长度。即利用直线电机将电能转换成推进力来推动列车前进。电能由沿线分布的变电所向地面导轨两侧的驱动绕组提供三相交流电。

在磁悬浮铁路上,直线电机的固定部分只能设置在地面上,运动部分放置在车辆上。其运动部分是转子还是定子,要根据不同形式的直线电机而定。并且尽可能使电磁耦合处在最佳的状态,从而获得最大的推进力。

#### 六、磁悬浮列车的优势及存在问题

作为目前最快速的地面交通工具,磁悬浮列车技术的确有着其他地面交通技术无法比拟的优势:

第一,它克服了传统轮轨铁路提高速度的主要障碍,发展前景广阔。第二,磁悬浮列车速度高,常导磁悬浮可达 400~500 千米/小时,超导磁悬浮可达 500~600 千米/小时。第三,磁悬浮列车能耗低,据日本研究与实际试验的结果,在同为 500 千米时速下,磁悬浮列车每座位千米的能耗仅为飞机的 1/3。据德国试验,当  $TR$  磁悬浮列车时速达到 400 千米时,其每座位千米能耗与时速 300 千米的高速轮轨列车持平;而当磁悬浮列车时速也降到 300 千米时,它的每座位千米能耗可比轮轨铁路低 33%。

尽管磁悬浮列车技术有上述的许多优点,但仍然存在一些不足:

(1) 由于磁悬浮系统是以电磁力完成悬浮、导向和驱动功能的,断电后磁悬浮的安全保障措施,尤其是列车停电后的制动问题仍然是要解决的问题。其高速稳定性和可靠性还需很长时间的运行考验。

(2) 常导磁悬浮技术的悬浮高度较低,因此对线路的平整度、路基下沉量及道岔结构方面的要求较超导技术更高。

(3) 超导磁悬浮技术由于涡流效应悬浮能耗较常导技术更大,冷却系统重,强磁场对人体与环境都有影响。

此外还有工程上的问题。首先,磁浮铁路的造

价十分昂贵。与高速铁路相比,修建磁浮铁路费用昂贵。据估计每千米造价约需 3~4 亿人民币。其次,磁浮铁路无法利用既有的线路,必须全部重新建设。由于磁浮铁路与常规铁路在原理、技术等方面完全不同,因而难以在原有设备的基础上进行利用和改造。

#### 七、磁悬浮列车在中国

我国从 70 年代开始进行磁悬浮列车的研制,经过中国铁道科学研究院、西南交大、国防科大、中科院电工所等单位对常导低速磁悬浮列车的悬浮、导向、推进等关键技术的基础性研究,已对低速常导磁悬浮技术有了一定认识,初步掌握了常导低速磁悬浮稳定悬浮的控制技术。继 1994 年西南交大成功地进行了 4 个座位、自重 4 吨、悬浮高度为 8 毫米、时速为 30 千米的磁悬浮列车试验之后。由铁科院主持、长春客车厂、中科院电工所、国防科技大学参加,共同研制的长为 6.5 米、宽为 3 米、自重 4 吨、内设 15 个座位的 6 吨单转向架磁悬浮试验车在铁科院环形试验线的轨距为 2 米、长 36 米、设计时速为 100 千米的室内磁悬浮实验线路上成功地进行了试验,并于 1998 年 12 月通过了铁道部科技成果鉴定。6 吨单转向架磁悬浮试验车的研制成功,为低速常导磁悬浮列车的研究提供了技术基础,填补了我国在磁悬浮列车技术领域的空白。

我国对磁悬浮铁路的修建很慎重,国务院决定先在上海浦东修建一条引进德国技术的磁悬浮列车商运示范线。上海磁悬浮线于 2000 年 6 月 30 日签署意向书,于 2002 年 12 月 31 日首次试运行。目前已投入到旅游观光使用。全程 31 千米,运行 7 分钟。运行时,磁浮列车与轨道间约有 10 毫米的间隙,这就是浮起的高度。除启动加速和减速停车两个阶段外,列车大部分时间时速为 300 多千米,达到最高设计时速 430 千米的时间有 20 多秒。开通后,乘客仅需 7 分钟就可从上海市区到达浦东国际机场。

作为新世纪上海交通建设的重点项目,上海磁悬浮列车既是连接机场和市区的大运量高速交通线,也是一条旅游观光线。是目前世界惟一条商业运营的磁悬浮列车。可以预见,随着超导材料和超低温技术的发展,修建磁浮铁路的成本可能会大大降低,技术及性能都会不断地提高。到那时,磁浮铁路作为一种快速、舒适的“绿色交通工具”,将成为 21 世纪人类理想的交通工具。