

交通未来：高温超导磁悬浮列车

邓自刚

(西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室 610031)

自人类诞生之际,人类对速度的追求便深埋于基因里。为了不断突破速度极限,人们孜孜以求,不断研究和探索更为强大、便捷的交通工具。伴随着工业革命的浪潮,人们的出行模式也在大幅革新。从时速20公里的马车演变到时速100公里的汽车,再到时速350公里的高铁、时速1000公里的飞机,它们每项都是一个时代的标志。其中,高铁作为现代化轨道交通建设的重大成果,历经多年飞速发展,成绩斐然,已然成为一张中国递给世界的“亮丽名片”。然而,轨道交通领域的研究并未就此停下脚步。后高铁时代,中国应如何继续领跑世界?在迈向更高速、更环保、更安全、更舒适的道路上,未来的交通工具又应如何变革?这一切,高温超导磁悬浮列车将给出答案。

一、磁悬浮：轨道交通速度追求的新范式

众所周知,高速列车依靠电机驱动,利用齿轮、轮轴等机构使车轮旋转,通过车轮与轮轨间接触产生的摩擦力带动列车运行。这种运行模式不可避免地会产生摩擦、磨损与噪声问题,轮轨黏着、弓网接触、蛇形失稳、运行噪音、空气阻力等均是制约高铁进一步提速的问题与挑战。

我们要如何变革,才能将这些问题解决,把速度提上来呢?答案是磁悬浮!与高铁相比,磁悬浮列车最大的不同在于没有车轮,却可以沿着轨道前进。这一切要归功于电磁力。车载磁体与地面轨道相互作用产生电磁力,使列车克服重力悬浮于轨道之上,并依靠沿轨道铺设的直线电机来驱动列车运行。该运行模式使得磁悬浮列车具有诸多优点,

其一是摆脱了传统轮轨接触,完全的悬浮会令其速度更快,阻力更小;其二是没有了轮轨接触,列车振动会减小,运行噪音将大大降低;其三是环保无污染,直线电机驱动列车运行,更加节能且无碳排放,环保性能更加优越。

直至目前,磁悬浮制式主要分为四种,分别为永磁悬浮、电磁悬浮、电动悬浮和超导钉扎悬浮,且这四种制式我国均有研究。然而,不同磁悬浮制式,它们的工作原理也存在差异。其中,永磁悬浮的原理最为简单,就是我们小时候玩过的磁铁,当磁铁极性相同的两端足够靠近时,就会产生强大的排斥力。永磁悬浮就是依靠永磁体之间同性相斥的原理实现悬浮的。这种制式结构简单,但是导向不稳定,需要在横向上限制位移才能实现静态悬浮。电磁悬浮的原理可形象解释为“电生磁”,它是依靠列车上电磁铁通电产生的磁场与导轨上铁磁材料之间的吸引力来实现悬浮的。目前上海浦东国际机场运营的磁悬浮制式就是这种,其最高时速已达到550公里。电动悬浮的原理为“动生电”,就像列车在轨道上“打水漂”,需要达到一定的速度才能脱离轨道悬浮起来。此制式以日本的低温超导电动车悬浮列车为代表,其最高时速已达603公里,它也是目前地面轨道交通工具最高速度记录的保持者。而超导钉扎悬浮顾名思义,超导材料会被无形的磁场牢牢“钉”在轨道上方。

二、高温超导钉扎磁悬浮

拿我国拥有全部知识产权的高温超导钉扎磁悬浮技术为例,其原理可形象地解释为“感生电”。它不用通电,当超导体所在位置磁场发生变化时,

在其内部就会产生感应电流,这个感应电流与外磁场相互作用就产生了悬浮力。高温超导磁悬浮被认为是一种非常神奇的磁悬浮技术,因为它既能悬浮,又能悬挂,就像图1所展示的那样!这一切都是源于超导材料自身的磁通钉扎特性。由于高温超导体属于非理想第II类超导体,相较于第I类超导体(也称为理想超导体)多了些“杂质”,我们把这部分“杂质”缺陷称为钉扎中心,如图2所示。永磁轨道的磁力线能穿透高温超导体,并被钉扎中心“抓”住。就像一个无形的弹簧一样,向下压超导体,它就会浮起来;若向上拉它,它就会被吸回去!这也使得高温超导磁悬浮具备了自稳定、自悬浮、自导向的优异特性。

介绍完高温超导磁悬浮的原理,大家或许会

问,什么是高温超导呢?实际上,高温超导是相对于低温超导而言的。超导材料想要进入超导态,就需要降温,那要降到多少才能够应用呢?1911年,荷兰莱顿大学的Onnes教授发现了金属元素Hg在液氮温度(4.2 K,零下268.95 °C),出现了零电阻的超导现象。1986年,镧钡铜氧材料被发现,它的临界温度为35 K(零下238.15 °C)。仅过了一年,美国休斯敦大学朱经武团队和中科院物理所赵忠贤团队分别独立发现首个液氮温区(77 K,零下196.15 °C)超导体——钇钡铜氧(YBCO),这种材料的临界温度为93 K(零下180.15 °C)。由于液氮温度,远高于液氦温度,且空气中氮气含量高达78.1%,而氦气在自然界中的储量跟氮气相比微乎其微,上述原因导致液氮的价格仅仅约为液氦的1/100。根

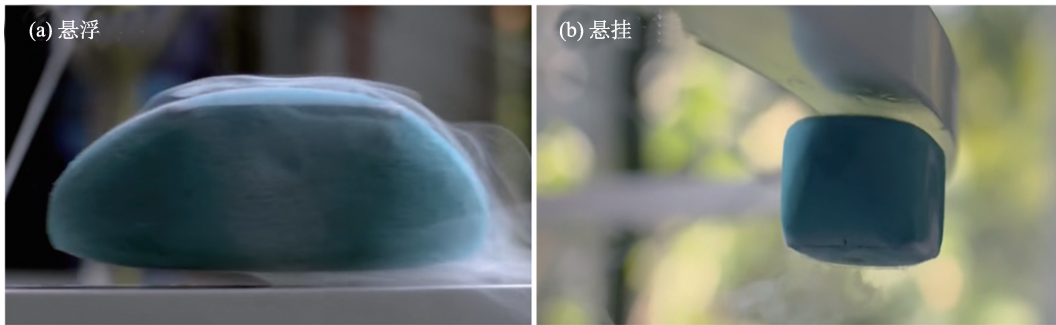


图1 装有高温超导材料的模型在永磁轨道上方悬浮及下方悬挂试验演示图

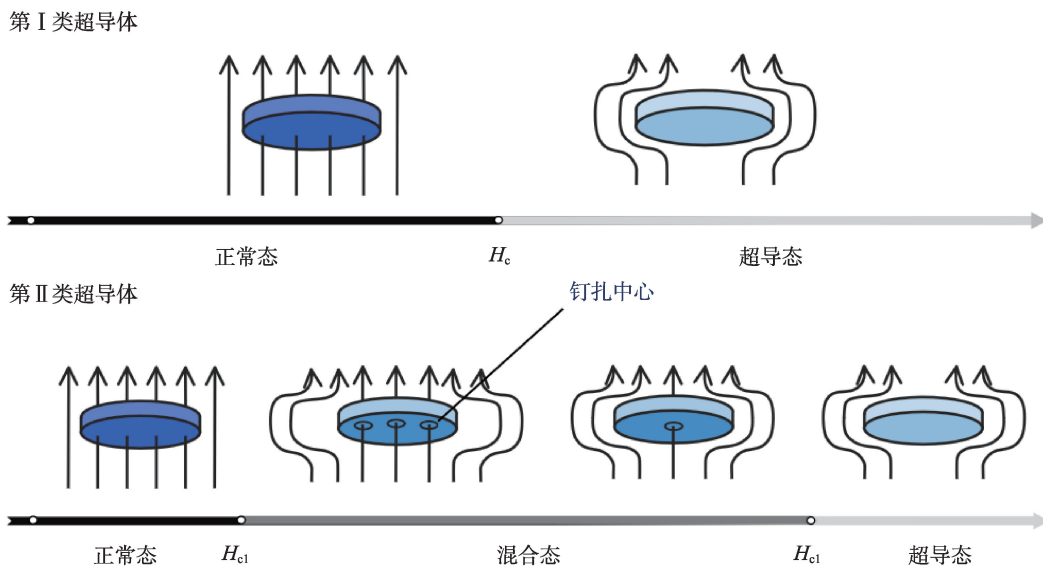


图2 第I、II类超导体在外磁场中磁力线分布示意图

据超导材料的临界温度,我们泛指能在相对更高温度下工作的超导体为高温超导体^[1],同理,在相对低温区下工作的超导体为低温超导体。能在液氮温度下工作的高温超导体如YBCO,相较于低温超导体,运行成本会大大降低!

三、高温超导磁悬浮列车可弥补高铁与航空之间的速度空白

如果将高温超导磁悬浮技术应用到列车上,将车轮改为悬浮装置,就得到了图3所示的高温超导磁悬浮列车。2021年1月13日,设计时速为620公里的世界首台高温超导磁悬浮工程化样车于四川成都西南交通大学成功下线^[2]。列车涵盖了车辆系统、悬浮系统、牵引系统、轨道系统等多个子系统。倘若按照“门到门”的概念计算实际出行时间,高温超导磁悬浮列车在服务1500公里运营里程范围内

具有一定的优势。它可以填补高铁和航空之间的速度空白,是现有交通网络的重要补充^[3]。

高温超导磁悬浮列车最大的优势在于悬浮、导向自稳定:无需外加悬浮及导向控制系统,依靠高温超导体固有的磁通钉扎特性即可实现稳定悬浮。从图4所示的结构示意图中可以看出,高温超导磁悬浮列车结构简约且充分一体化,且其运行仅依靠液氮冷却超导体,成本极低。列车的悬浮高度可达10~20毫米,浮重比可达到20,且在行进方向上无固有的磁阻力!由于永磁轨道产生的是静磁场,乘客也无需担心电磁辐射的问题。为了更好适配现有的交通线路,列车的断面布局与高铁一致,可利用现有的高铁土建技术。同时,采用“轨抱车”的设计,与悬浮导向自稳定的特性形成双重保险保护乘客安全。

然而,高温超导磁悬浮列车的工程化并不是一蹴而就的,这是科研工作者们坚持不懈研究多年的



图3 高温超导磁悬浮列车实物图

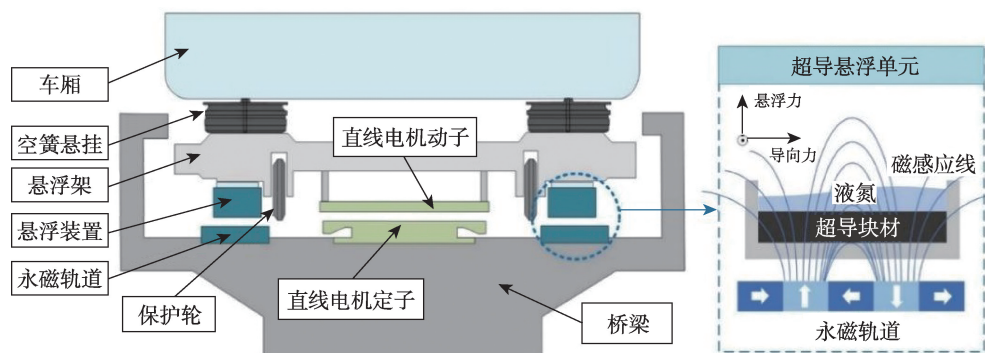


图4 高温超导磁悬浮列车断面结构示意图

结果。2000年12月31日,世界首辆载人高温超导磁悬浮实验车“世纪号”于西南交通大学研制成功,高温超导磁浮技术的原理可行性被验证。时光荏苒,二十年磨一剑,2021年承载着无数默默奉献科研工作心血时速620公里的工程化样车成功下线,不仅代表着该领域工程化技术的重大进展,还承载着研究团队的再创造一个世界记录的梦想!

四、真空管道高温超导磁悬浮列车 时速有望超过1000公里

磁悬浮技术虽然消除了传统列车的机械摩擦阻力,但仍存在制约其速度提升的因素,那就是空气阻力。当列车时速超过400公里时,空气阻力将占列车运行总阻力的80%以上。那么要如何降低空气阻力呢?基于真空管道的磁悬浮列车技术应运而生。真空管道的引入可以降低管道内部空气气压,大大降低列车运行时的空气阻力。超导磁浮加真空管道的组合将使列车时速有望超过1000公里。

其实,早在1904年,火箭之父罗伯特·戈达德便提出了真空管道运输的设想。不过碍于当时需求不足以及技术水平的限制,这个天马行空的想法未能得到实现。回到现在,随着人们对出行要求的逐步升高,再加上近几年磁悬浮技术的飞速发展,真空管道交通的概念又重新回到大众的视野。目前,对于真空管道的研究,正呈现中国、美国、欧亚等多方布局的全球格局。自2013年以来,真空管道磁浮交通发展迅速,国际上有7个国家,9家单位正在研发超级高铁方案,国内外竞争愈演愈烈。不过,这些方案大同小异,都是采用真空管道+磁悬浮+直线电机驱动,区别主要在于所选的磁悬浮制式。西南交通大学研究团队选择的方案便是我国原创的高温超导钉扎磁悬浮技术。真空管道交通系统的核心问题在于它的技术可行性验证。2004年沈志云院士提出并组织论证了真空管道磁悬浮交通的可行性,包含了低气压适应性与超高速适应性两个研究难点。

然而,任何科学研究都是需要分步实施,脚踏实地,一步一个脚印走出来的。故西南交通大学提

出了“三步走”战略,通过不同速度等级的实验平台来研究这项未来技术的可行性。首先是第一步,为了验证真空管道加高温超导磁悬浮的原理可行性,2014年,西南交通大学成功建成真空管道高温超导磁浮环行试验线“Super-Maglev”。如图5所示,它的载体是高温超导磁悬浮车,环形管道长度为45米,直径为2米,采用直线感应电机牵引和机械混合制动,实验极限时速为50公里。环行线实现了在0.029个大气压(相当于海拔约24000米),超导磁悬浮车连续运行10小时,验证了这项技术的原理可行性^[4]。到目前为止,环形线已安全运行了10年,接待参观超15000人次;第二步,为了提高速度,搭建了图6所示的直线型真空管道高速试验台。这里所用的模型比例为1:10,管道直径为4.2米,悬浮高度为10~20毫米,管道内最低气压为0.05个大气压(相当于海拔约20000米),最高实验速度可达每小时430公里。最后一步,为了进一步提升速度,现阶段西南交通大学正在搭建最高试验速度每小时1500公里的超高速试验平台。这个平台管道直径3米,线路长度1600米,真空度为0.005个大气压(相当于海拔35000米),模型比例1:8,将用于研究超高速和低气压环境下超导磁浮模型车的悬浮和稳定运行特性。

这种技术一旦研究成功,将会给人们出行带来前所未有的便利。以从成都到北京为例,采用磁悬浮加真空管道的出行方式,将只需1个多小时!如果乘坐高铁,要将近8个小时,飞机也要近3个小时。很显然,交通工具速度的提高可以节约更多的时间成本!



图5 “Super-Maglev”真空管道高温超导磁浮
环形线实物图



图6 直线型真空管道高速试验台实物图

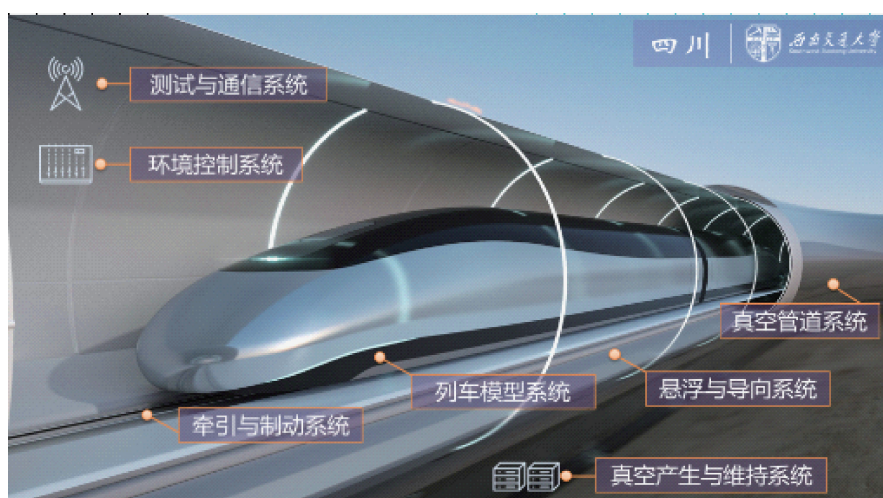


图7 真空管道超高速试验平台示意图

五、总结与展望

1904年,火车时速仅限于几十公里,而罗伯特便大胆预测提出速度可达每小时1000公里的交通方式。此设想在当时看似异想天开,甚至引发了大部分人对可行性的质疑,但罗伯特并没有因此放弃,他坚信自己的梦想,并始终用一句话激励着自己,这句话也同样激励着我们:昨天的梦想,将成为今天的希望,也将变成明天的现实。梦想是人类进步的动力,过去数十年间,科研人员不断努力探索,攻坚克难,围绕高温超导材料、磁悬浮技术、真空管道设计等领域进行了持续的深入研究,高温超导磁悬浮列车关键技术已经取得阶段性突破。梦想不

止,探索不息。让我们一同期待,高温超导磁悬浮列车会在不久的将来,承载着我们的梦想,驰骋在祖国大地上,并为人类的发展注入无限动力!

参考文献

- [1] 邓自刚, 张卫华. 高温超导磁悬浮或将引发交通运输的大变革 [J], 金融经济, 2016(11): 42-43.
- [2] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 张卫华. 磁悬浮列车发展现状与展望 [J], 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474.
- [3] 邓自刚. 高速磁浮 前景广阔(开卷知新)[N]. 人民日报, (2021-11-02) (20) <http://ent.people.com.cn/n1/2021/1102/c1012-32270865.html>.
- [4] 邓自刚, 张勇, 王博, 张卫华. 真空管道运输系统发展现状及展望 [J], 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 1063-1072.