

ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



News & Highlights

风驰电掣——磁悬浮列车稳步发展

Chris Palmer

Senior Technology Writer

2021年1月，最高时速为620 km的高温超导（HTS）磁悬浮列车在165 m长的轨道上进行第一次试运行，这是其首次在中国四川省成都市公开亮相[1]。这列21 m长的空气动力机车及其试验轨道均由轻质碳纤维制成，为中国高速铁路未来的发展奠定坚实的基础。

香港理工大学和美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校工程学教授及高速铁路规划、工程和运营专家Tsung-Chung Kao说：“尽管HTS技术不是一项巨大的革新，但重要的是他们真的在努力研发这项技术。”

20世纪初，美国人Robert Goddard和Emile Bachelet首次构想出由磁场力悬浮并向前推进的无摩擦列车，当时磁悬浮列车就已经被誉为铁路的未来[2]。然而直到20世纪30年代，德国工程师Hermann Kemper [2]将这一概念付诸实际，该技术才再次得以发展。几十年后，在20世纪60年代，美国科学家James Powell和Gordon Danby获得了磁悬浮列车技术的首批专利，其中一项是针对迄今为止开发的所有磁悬浮列车设计背后的线性电动机概念的专利[2]。

这些列车的磁悬浮系统分为两类：电动悬架（EDS）和电磁悬架（EMS）。20世纪70年代，日本工程师开始广泛开发EDS，其中，轨道和列车上的超导磁铁会施加相反的磁场，由此产生的排斥力将列车抬升到轨道上方。EMS的发展则主要由德国工程师推动，其通过磁引力以与EDS相反的方式工作。想象一下拿起一个巨大的“T”形块，你的手（列车）绕着木块（铁轨）螺旋移动。你指尖上的磁铁会被“T”形块下侧的磁铁吸引，这就是列车被抬起的原理。同时，大拇指内侧以及指关节的

磁铁会被“T”形块末端的磁铁吸引，从而为列车在沿轨道向前行驶时提供引导。无论是EDS还是EMS方案，列车都悬浮在轨道上方1~10 cm处。轨道中内置的带交流电的电动推进回路会产生磁场，该磁场既可以从前面拉动列车，也可以从后面推动列车。

尽管磁悬浮列车以超过600 km·h⁻¹的速度行驶，但乘客所感受到的颠簸会比传统钢轮式列车要少，原因是列车唯一的摩擦源是空气。磁悬浮列车的另一个优势是其安全性较高。行驶在同一条路线上的磁悬浮列车都能够以相同的速度行驶，因此它们不会追尾相撞。不过事故仍然可能发生：2006年，德国Transrapid公司制造的磁悬浮列车在试运行期间与一列维修车辆相撞，事故造成25人死亡；这也导致德国彻底放弃将该技术应用于国内项目[3]。另外，磁悬浮列车也不可能因转弯过快而脱轨——磁悬浮列车距离轨道壁的位置越远，将其移回原位的磁力就越强。此外，磁悬浮列车可以爬升高达10%的坡度，爬升高度是传统列车的两倍。

总的来说，有关磁悬浮列车的绝大多数概念在许多年前就已经被提出。Kao说：“磁悬浮列车的基本技术与50年前几乎相同，该技术已经非常完善了，能改进的方面非常有限。”

不过，这项技术最近在超导磁体方面得到了创新。中国运用EDS设计的新原型机，采用了一种新的超导磁体类型。传统的超导磁体需要用液氮冷却到-269℃，以产生比普通电磁体强10倍的强磁场，这对悬浮和推动列车来说是必需的一步。相比之下，2000年西南交通大学（SWJTU）的工程师在一列3.5 m长的原型机中首次应用

的HTS磁体[4]则使用更容易获得的液氮在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下实现超导，所需成本仅为液氮系统的1/50。

虽然中国拥有世界上最大的高速铁路网络，覆盖超过37 900 km，但中国目前只有3条磁悬浮线路正在运营。第一条是采用德国EMS技术的高速磁悬浮列车，于2003年推出，是世界上最长、历史最悠久的磁悬浮线路（图1）。列车最高时速为431 km，连接上海浦东机场与城市东侧龙阳路之间30 km的路段。另外两列采用中国EMS技术制造的磁悬浮列车的最高时速则较低。一列于2016年在中国湖南省长沙市开始运营，其轨道总长18 km，最高速度达到了 $160\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ [5]。另一列于2017年投入运营，在北京地铁某段9 km的路线上运行，最高时速为100 km [6]。



图1. 世界上最长、历史最悠久的磁悬浮线路，最高时速为431 km，横跨上海浦东机场与城市东侧龙阳路之间的30 km路段。图片来源：Alex Needham (public domain)。

西南交通大学的HTS创新是中国政府推动本土磁悬浮技术发展的一部分，目前还需要建造一些原型车以对该技术进行广泛测试。除了在成都亮相的超高速HTS原型车——西南交通大学、中国中车股份有限公司（CRRC）、中国中铁股份有限公司以及其他大学与公司的合作成果，另一个行驶速度超过 $600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的原型车也由类似的机构联合开发，并于2020年6月在同济大学的一条短测试线上成功运行[7]。西南交通大学的工程致力于更轻盈的设计，从而提供更好的操控感[8,9]。

Kao表示，阻碍建设更多磁悬浮线路的主要因素不是技术。他说：“这一挑战包含更多的可能是政治因素，其次是金融因素，最后才是技术因素。”目前，高速磁悬浮列车的成本比平均最高时速为350 km的传统子弹头列车高约20% [10,11]。但是由于磁悬浮列车的动力来源于磁场，而且它们的运动部件很少，因此它们产生的污染很小，需要更换的部件更少，需要的维护也更少。因此，支持者认为，从长远来看，磁悬浮线路比传统高

速铁路更具成本效益[12]。而反对者认为，为了实现列车和轨道之间的高精度对齐，维护复杂仪器的费用将增加，可能会抵消其他方面节约的成本[13]。

中国政府部门似乎相信这项技术足以推进两条更长的磁悬浮线路的建设：一条于2006年被首次提出，长164 km，连通上海和杭州，预计到2025年可以投入商业使用；另一条长110 km，主要在地下连接广州和深圳[14]。Kao说：“希望建设更多的线路使成本逐渐降低，这对中国市场来说绝对利好。”

据报道，中国还在湖北省建造了一条长200 km的真空密封隧道，以消除磁悬浮列车面临的空气阻力，这可能使列车的最高速度达到 $1000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ [15]。这种所谓的超回路由美国特斯拉公司和SpaceX公司的Elon Musk [16]提出：它需要一条极其笔直、平坦的通道，不过这可能会限制它的运行路线。

尽管有近十几个国家正在探索磁悬浮列车的方案，其中包括由CRRC [17]带头的几个国家，但韩国和日本是目前仅有的其他两个运营磁悬浮列车的国家。2015年，日本山梨县磁悬浮列车在25 km长的测试轨道上运行，创下了 $603\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的列车速度纪录（图2）[18]。以建造商业系统为目标开发磁悬浮技术的美国公司Maglev Technology的首席执行官Tony Morris说：“毫无疑问，这是一项技术奇迹，但它从未被运用于运载乘客的日常业务。”

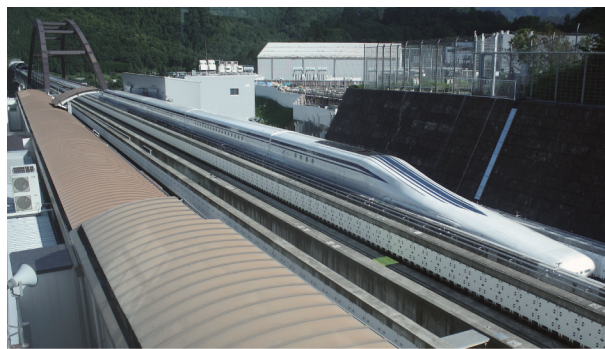


图2. 日本山梨县磁悬浮列车在25 km长的测试轨道上运行，在2015年创下了603 km的列车时速纪录。图片来源：Saruno Hirobano (public domain)。

Kao表示，建造具有商业可行性的磁悬浮线路的主要挑战可能是找到建造它们的合适地点。他说：“没有那么多路线可以在经济上支持这项技术。你要寻找需求极高的线路，比如纽约到华盛顿或东京到大阪。”

事实上，日本从2009年就开始建设跨越东京和名古屋之间距离为286 km的商业磁悬浮线路。该线路预计于2027年开通，最高时速为500 km，将在40 min内完成两个城市之间的通行，行程时间不到目前的一半[18]。

但该线路的成本估计接近 1.1×10^{10} 美元，部分原因是80%以上的路线需要穿过修建费用高昂的地下和山地隧道。日本希望到2045年能够修建完成东京到大阪的路线，将东京到大阪的550 km的行程时间缩短一半（一小时出头）[18]。

与中国一样，日本也希望向国外出售其高速铁路技术。在2013年访问美国期间，日本当时的首相安倍晋三建议使用日本的技术并由日本提供部分资金来推动纽约市和华盛顿特区之间的高速铁路建设[19]。安倍晋三在2017年再次向美国总统提出了这个想法[20]。但到目前为止，双方还没有达成任何协议。

Morris说：“如果谈论经济，这些项目中的每一个都需要数以亿计的运营成本补贴，并且可能需要数亿甚至更多的资本成本补贴，这些系统并不能产生利润。因此，即使技术已经存在，但如果你正在寻找的是财政或经济上的成功，那么你就还需要继续探索。”

References

- [1] Marcus L. China debuts train prototype that can hit speeds of 620 kilometers per hour [Internet]. Atlanta: CNN Travel; [updated 2021 Jan 18; cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://www.cnn.com/travel/article/china-high-speed-maglev-train-intl-hnk/index.html>.
- [2] Stix G. Air trains. *Sci Am* 1992;267(2):102–13.
- [3] Landler M. 25 die in crash of German high-speed train [Internet]. New York City: New York Times; 2006 Sep 23 [cited 2021 Apr 21]. Available from: <https://www.nytimes.com/2006/09/23/world/europe/23germany.html>.
- [4] Wang J, Wang S, Zeng Y, Huang H, Luo F, Xu Z, et al. The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world. *Phys C Supercond* 2002;378–381(Pt 1):809–14.
- [5] Briginshaw D. New Chinese inter-urban maglev train reaches 160 km/h [Internet]. New York: International Railway Journal; 2020 Apr 29 [cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://www.railjournal.com/rolling-stock/new-chinese-interurban-maglev-train-reaches-160km-h/>.
- [6] Zhang Y. Beijing's first maglev is to operate [Internet]. Beijing: China Daily; [updated 2017 Jun 13; cited 2021 Apr 8]. Available from: https://www.chinadaily.com.cn/china/2017-06/13/content_29726314.htm.
- [7] Burroughs D. CRRC successfully tests 600 km/h maglev train [Internet]. New York City: International Railway Journal; 2020 Jun 26 [cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://www.railjournal.com/fleet/crrc-successfully-tests-600km-h-maglev-train/>.
- [8] Deng Z, Zhang J, Wang W, Yuan Y, Lei W, Zhao J, et al. The new high-temperature superconducting maglev vehicle developed in ASCLab. In: Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD); 2020 Oct 16–18; Tianjin, China; 2020.
- [9] Wang K, Ma W, Luo S, Zou R, Liang X. Coupling vibration analysis of full-vehicle vehicle-guideway for maglev train. *Aust J Mech Eng* 2018;16(2):109–17.
- [10] Schach R, Naumann R. Comparison of high-speed transportation systems in special consideration of investment costs. *Transport* 2007;22(3):139–47.
- [11] High-speed ground transportation for America. Report. Washington, DC: US Department of Transportation, Federal Railroad Administration; 1997 Sep.
- [12] Yaghoubi H. The most important maglev applications. *J Eng* 2013;2013:537986.
- [13] Vuchic VR, Casello JM. An evaluation of maglev technology and its comparison with high speed rail. *Transp Q* 2002;56(2):33–49.
- [14] China plans to build tow 600 km/h maglev lines [Internet]. Beijing: Global Times; 2020 Sep 16 [cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://www.globaltimes.cn/content/1201072.shtml>.
- [15] Chan K. China laying tracks for 1000 km/h maglev trains [Internet]. Hong Kong: Asia Times; 2019 Oct 2 [cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://asiatimes.com/2019/10/china-laying-tracks-for-1000km-h-maglev-trains/>.
- [16] Hauser C. 29 minutes from New York to Washington? Elon musk teases a new hyperloop [Internet]. New York City: New York Times; 2017 Jul 20 [cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://www.nytimes.com/2017/07/20/business/elon-musk-hyperloop.html>.
- [17] Hawkins AJ. China is building a magnetic levitation train that can go an insane 373 mph [Internet]. New York City: The Verge; 2016 Nov 1 [cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://www.theverge.com/2016/11/1/13487382/maglev-train-china-crrc-speed-record>.
- [18] McCurry J. Japan's maglev train breaks world speed record with 600 km/h test run [Internet]. London: The Guardian; 2015 Apr 21 [cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://www.theguardian.com/world/2015/apr/21/japans-maglev-train-notches-up-new-world-speed-record-in-test-run>.
- [19] Pfanner E. Japan pitches its high-speed train with an offer to finance [Internet]. New York City: New York Times; 2013 Nov 18 [cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://www.nytimes.com/2013/11/19/business/international/japan-pitches-americans-on-its-maglev-train.html>.
- [20] Tsuruoka, D. All aboard the Shinzo Abe express to Trump Tower [Internet]. Hong Kong: Asia Times; 2017 Feb 13 [cited 2021 Apr 8]. Available from: <https://asiatimes.com/2017/02/aboard-shinzo-abe-express-trump-tower/>.