

我国发展磁浮交通的战略思考

严陆光

(中国科学院电工研究所 北京 100080)

〔摘要〕 从我国交通、城市化、能源、环保多方面的统一、协调和可持续发展的需求出发,在我国未来综合交通系统中,应大力发展节油洁净的电气化交通。上海磁浮示范线的建成与顺利运营,宣告了作为人类第六种交通运输方式的磁浮交通已经诞生,它将在我国综合交通发展中发挥应有的积极作用。从开拓应用、推进产业化与加强技术的研究发展等方面,提出了在我国积极发展磁浮交通的有关战略性思考和建议。

〔关键词〕 磁浮交通 产业化 研究发展

〔中图分类号〕 U2 F5

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2005)04-0020-05

CONSIDERATION FOR DEVELOPING THE MAGLEV
TRANSPORTATION SYSTEM IN CHINA

YAN Lu-guang

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Considering the unified, sustainable and coordinative development of the national future transportation system together with the energy, environment protection and urbanization requirement, it is important to develop vigorously the electric transportation systems. The successful construction and operation of the Shanghai Maglev Demonstration Line shows the birth of the maglev transportation as the sixth kind of the mankind transportation systems, the maglev will play important role in the future transportation systems. Some suggestions for active development of maglev transportation in China were put forward, including application, industrialization, research and development.

Key Words: maglev transportation, industrialization, R&D**CLC Numbers:** U2 F5**Document Code:** A**Article ID:** 1000-7857(2005)04-0020-05

1 引言

我国经济正处于腾飞阶段,全国上下都在为 2020 年全面实现小康积极努力,交通运输是其中一个重要方面。根据中央倡导的全面、协调、可持续发展的科学发展观,交通发展要努力使各种运输方式统一协调,也要与国家能源、环境与城市化的可持续发展相协调,为此,大力发展节油洁净的电气化交通有着重要意义^[1]。电气化交通中,刚刚诞生的磁浮交通,做为人类第六种运输方式,应该得到特别重视。

整个人类客运交通发展的历史,是速度不断提高的历史。传统轮轨铁路经过 100 多年的发展,其运营速度达到了 300 km/h,但进一步提高受到了轮轨粘着力和受电弓受流可靠性的限制。高速磁浮列车用电磁力将列车浮起而取消了轮轨机械的滚动接触,采用长定子同步直线电机将供电至地面线圈;取消了受电弓的机械滑动接触,实现了列车与地面没有机械接触、不带燃料的地面飞行。从 20 世纪 60 年代起,经过长期持续努力,整个技术已成熟到可建造实用运营线,最高运营速度可达 550 km/h。已经证实磁浮列车的主要优点与特点是:(1)克服了传统铁路提高速度的主要障碍,是当今唯一能达到 400 km/h 以上运营速度的地面交通工

具;(2)能耗低,噪音小,启动和制动快,爬坡能力强;(3)安全、舒适、维护少;(4)采用电力驱动,不燃油。它的发展使得人类地面客运的速度可望在 21 世纪中前期达到 500 km/h 的新水平^[2]。

我国从 20 世纪 80 年代后期起开始了磁浮列车工程的关键技术研究,90 年代中期以来又积极推进高速磁浮列车的发展,论证了我国磁浮交通需要高速磁浮列车,研究了我国的发展战略,取得了一定共识。特别是,2000 年决定中德合作建造全长 30 km 的上海浦东机场进城的示范运营线。该线于 2001 年 3 月 1 日正式开工建设,经过 22 个月,于 2002 年 12 月 31 日开始调试运行,达到了 430 km/h 的设计速度和 501 km/h 的最高速度,至 2004 年 8 月中旬已行驶了 100 万 km,载客 140 万人次,正式获准投入运营。它宣告了我国磁浮交通正式诞生,在世界上率先进入了实用。

上海线的建成与运营解决了近年来磁浮和轮轨之争的一些问题,为发展磁浮交通奠定了良好基础,主要是:(1)证实了高速磁浮列车确是人类唯一能达到 400 km/h 以上运营速度的地面载人客运交通工具,其技术确已成熟到可实际应用,具有良好的安全性;(2)创建了我国高速磁浮列车技

收稿日期:2004-11-18

作者简介:严陆光,男,1935~;北京 2703 信箱中国科学院电工研究所,中国科学院院士,乌克兰科学院外籍院士,第三世界科学院院士,主要研究方向为近代科学实验所需特种电工装备的研制和电工新技术的研究发展工作;E-mail: xinanlee@mail.iee.ac.cn

术研究的试验基地,全长 30 km 的上海线,可达到 500 km/h 的试验速度,使我国成为继德、日之后第三个具有这种试验能力的国家;(3)大大加强了我国有关的工程建设与研制队伍;(4)积累了中德合作共同开发的经验。

上海线的建成与运营也表明我国磁浮交通的发展进入了新阶段。前些年,我们主要致力于宣传磁浮列车的优越性与良好进展,研究了磁浮在我国交通中的战略地位^[3]、我国的需求^[4]与战略^[5],并引进技术,与国际合作建设试验运营线,在国际先进水平基础上组织自己的队伍,继续向上攀登。在新阶段中,我国应以发展磁浮交通为战略目标,在长大干线与城际和市内快速客运交通两方面,大力开拓应用,建设与运营实用线;与实用线建设紧密结合,大力推进成熟系统的产业化;加强有重大前景的新型系统的研究发展,力争在国家综合交通体系中,使磁浮交通逐步占有它应有的战略位置。本文就下阶段磁浮交通的发展提出以下建议。

2 做好科学比选,力争京沪高速线采用磁浮方案,进而使磁浮交通成为我国高速客运网的主导技术

磁浮交通高速的优越性表现在长大干线与民航竞争上最为明显。我国从 20 世纪 90 年代初开始就为建设全长 1 307km 的高速轮轨铁路(图 1)进行了积极准备。上海线的建成证明,除采用传统的轮轨方案外,京沪线采用磁浮方案也具有现实的可行性。两种方案的科学比较,及其对国家未来发展的意义,在最终决策选择时尤为重要。京沪高速线采用磁浮方案的意义主要有以下 3 个方面。(1)500 km/h 运营速度的高速磁浮线主要适用于长距离、大流量、大城市间的高速客运^[6]。京沪高速线全长 1 300 多 km,按旅行时间考虑,高速轮轨难以与民航竞争;而高速磁浮则可在 3 h 内到达,具有竞争力。(2)我国将在 21 世纪上半叶建成总长约

8 000 km 的高速客运专线网(图 2),大城市间距离大多在 1 000 km 以上,采用高速磁浮交通技术,有利于合理协调地安排未来交通系统的可持续发展,对保持轨道交通的骨干地位的意义特别重大。京沪高速采用磁浮方案,将使磁浮成为未来高速客运专线网的主导技术。(3)国际高速磁浮技术已成熟到可建实用运营线的程度,实用化与产业化是当前发展的主要任务,10 多年来的困难在于没有合适的工程来牵引。京沪高速线是我国实施高速专线客运的首选长大干线,也是 21 世纪前期全世界将投入建造的唯一长大干线,若采用磁浮方案,将能全面带动整个系统实现产业化,形成新兴的高技术产业,在率先建立前沿的新型高技术产业方面发挥重大作用。

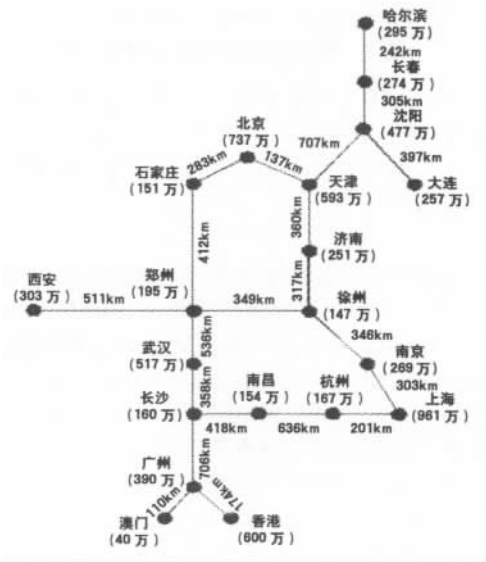


图 2 我国高速客运专线网示意图

鉴于上海高速磁浮交通示范运营线的顺利建成和京沪线采用磁浮方案的优越性,我们积极主张应决策京沪线采用磁浮方案^[6],不失时机地对下一阶段工作做出认真、全面的部署。但京沪线作为我国三峡后举世瞩目的重大工程项目,方案选择方面还存在重大争议,中央领导指示的“广泛听取意见、充分讨论,科学比选,提出方案”是完全正确的,我们十分拥护。

贯彻实施“科学比选”,近年来已有了一些比较科学的认识,应进一步广泛听取意见、充分讨论。目前已取得作为科学比选重要基础的较广泛的共识,主要是:(1)对于京沪线来说,高速轮轨与磁浮都是技术成熟的可行方案;(2)与民航比较,300 km/h 的高速轮轨在旅行距离 800 km 以内具有优势,而 500 km/h 的磁浮的旅行距离优势可达 1 500~2 000 km;(3)无论采用何种方案,京沪高速线的实施都必然是重大国际合作项目;(4)京沪高速线的建设与运营必须促进本地高新技术产业化的形成;(5)方案比选应充分考虑并纳入我国未来高速客运交通的发展战略。在各种讨论中,还存在一些重大争议与分歧,诸如造价、建设时机选择、拟定可供比选的建设方案,以及如何实现国际合作与本地化生产等,还需有针对性地深入探讨。为深化比选奠定可靠的科学实践基础,建议按两种技术各修建 1 条约 200~300 km 的有实用价值的先行线,取得技术性能、造价、运行维护成本,国际合作、国产化等方面可靠的科学依据^[6]。可喜的是,

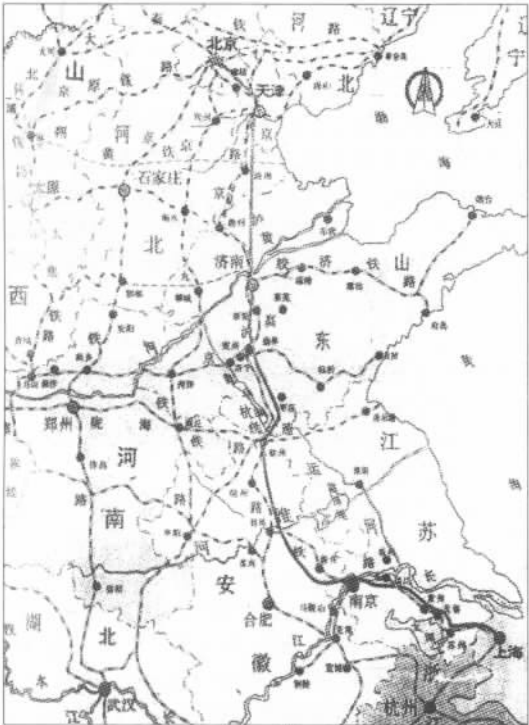


图 1 京沪高速铁路地理位置示意图

在磁浮先行线方面,已提出了修建长 170 km 的沪杭线(图 3)的建议,抓紧落实沪杭线的建设应是近期最重要的工作。



图 3 磁浮沪杭线地理位置图

对于我国磁浮交通的发展,最重要的是力争京沪高速线采用磁浮方案,从决定采用磁浮方案开始,我国将率先在世界上进入实用化与产业化,进而使磁浮交通成为我国高速客运网的主导技术。

3 积极开拓磁浮列车在城际和市内快速客运交通中的应用

虽然,磁浮列车的高速优点使其最适用于长距离、大流量的客运专线,但这种长大干线的需求全世界都很有限。从世界与我国快速交通的发展看,城际(指中心城市与卫星城之间,下同)与市内交通的需求要大得多,如我国的长江、珠江与京津唐三角洲地区。作为磁浮交通,美国、德国在积极研究这方面应用的可能性,上海示范线已为此奠定了良好的基础。作为城际与市内交通应用,速度为 100 km/h 的中低速磁浮列车的低噪声、高加速度、低能耗的优点使其在相同站间距离条件下,可以达到更高的运营速度及旅行速度,减少旅行时间,从而成为一种有竞争力的交通方式。我国在中低速磁浮列车方面已取得不少有工程实用意义的成果,具备可产业化的一些基本条件。作为磁浮交通的发展,我们应在长大干线和城际及市内交通两个方向上同时积极推进。

表 1 列出了我国部分城市轨道交通的规划情况^[7],可以看出,我国正面临着急剧发展的重大需求,17 个大城市现有轨道交通共 146 km,近期内将发展到 2 700 km。表 2 列出了德国对磁浮与轮轨列车在不同速度下噪音的测试结果,表明在相同城市噪音水平要求条件下,磁浮列车可运行至较高速度。至于加速度 a 的影响,磁浮列车可允许 $a \approx 1 \text{ m/s}^2$,而一般轨道交通在 $a \approx 0.2 \sim 0.3 \text{ m/s}^2$,列车从起动到运行速度 V 的加速距离 $L = V^2 / (2a)$,站间距离考虑到起动与制动的需要最少大于 $2L$ 。表 3 列出了设 $a = 1 \text{ m/s}^2$ 及 0.3 m/s^2 时,加速距离 L 与运行速度 V 间的关系,可见,在相同站间距离下,磁浮列车的运行速度比普通轨道交通高近两倍。

关于磁浮交通应用于城际及市内交通,目前还缺乏比较系统与深入的研究。要积极开拓这方面的应用,需要进行以下多方面的工作,主要有:(1)深入研究磁浮列车在城际与市内交通中应用的优越性,在与其它已有轨道交通认真比较的基础上,明确它的优势应用范围和在综合交通系统中的地位,以指导实际应用的发展;(2)深入参加到区域与市内轨道交通的规划与实施工作中去,选择合适的项目,逐步开展应用工作,特别应注意动员从事交通发展的同志了解与熟悉磁浮交通,进而使磁浮作为一种能融入综合

表 1 国内部分城市轨道交通规划及资金需求

城市名称	线路数	里程(km)			预计总投资 (亿元)	单位投资 (亿元/km)
		总规划	已建成	需建设		
北京	13	408	55	353	1 700	4.8
上海	21	780	65	715	3 000	4.2
广州	5	129	19	110	600	5.5
天津	3	75	7	68	135	2.0
深圳	13	362		362	1 800	5.0
武汉	7	212		212	800	3.8
南京	12	300		300	1 500	5.0
重庆	1	18		18	33	2.1
成都	1	23		23	30	0.1
杭州	2	50		50	152	3.0
西安	1	20		20	74	3.7
哈尔滨	1	17		17	30	1.7
长春	1	12		12	10	0.8
大连	2	50		50	30	0.6
郑州	1	12		12	10	0.8
沈阳	5	183		183	1 000	5.4
温州	3	50		50	120	2.4
合计		2 701	146	2 555	11 024	4.3

表 2 磁浮与轮轨列车驶过的噪声水平比较

运行速度(km/h)	轮轨铁路(1)	磁浮铁路(2)
100	72	—
160	79	70
200	83	73
250	88	78
280	89	81
300	91	83
400	—	91

注:(1)德国噪声研究所测试结果;(2)德国蒂森-克虏伯公司在德国 TVE 试验线上的测试结果。

表 3 加速距离 L 与加速度 a 及运行速度 V 间的关系曲线 $L = V^2 / 2a$

V km/h	40	60	80	100	150	200	300	400	500
$a = 1 \text{ m/s}^2$	0.062	0.139	0.247	0.386	0.868	1.543	3.473	6.173	9.645
$a = 0.3 \text{ m/s}^2$	0.206	0.463	0.823	1.286	2.894	5.144	11.57	20.58	32.15

系统发展的新型交通工具;(3)由于城际与市内交通一般不需要很高速度和有着多方面的实际需求,故可以根据实际需求发展多种磁浮系统,包括高速系统和低速系统。

在力争落实京沪高速磁浮线的同时,积极开拓在城际与市内快速客运交通中的应用,将使我国磁浮交通得到更加全面与迅速的发展。

4 与实用任务紧密结合,大力推进成熟系统的产业化

任何一种交通工具要能得到实际的应用,都必须是产业化的。刚刚诞生的磁浮交通要能得到应用、迅速发展,就必须建立相应的产业,推进产业化自然成为发展磁浮交通的重要部分。为推进产业化就需要:(1)对整个系统进行长期研究、试验与示范应用,证明是可以实际运营使用的;(2)有实际应用的需求进行有力的牵引。

从可用性与成熟性出发,当今世界上有 3 个系统具备了基本条件,即德国的 Transrapid(图 4)、日本的超导 MLX(图 5)与日本的 HSST(图 6)。德国 Transrapid 属于常导吸引式列车。安装在车上的常规电磁铁用于悬浮,同时也是同步直线电机的磁极。安装在 T-型樑上的长定子铁心和导向铁轨与车上导向电磁铁相互作用产生所需的导向力。在沿线

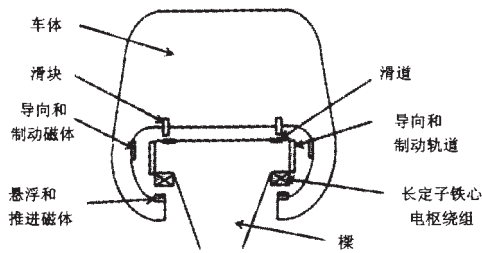


图4 德国 Transrapid 列车横截面图

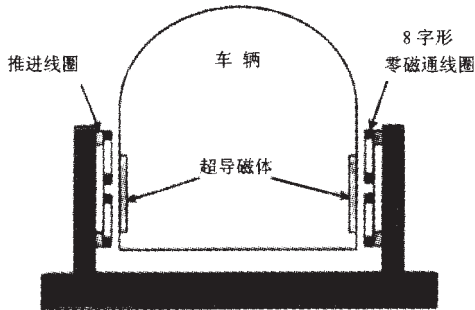


图5 日本 MLX 超导磁浮列车横截面图

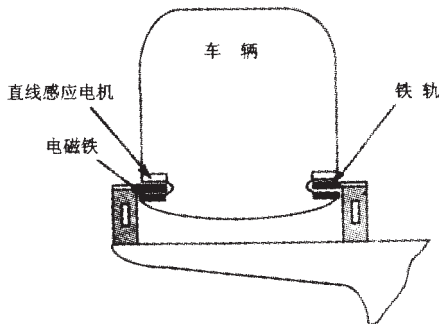


图6 日本 HSST 列车截面图

连续铺设的长定子铁心槽内三相电枢绕组中的电流与电机磁极相互作用产生所需的驱动力。供电采用几万 kW 级电力电子变频电源,实时切换到列车所在的区段上,按列车速度进行频率调节。为了精确控制列车的位置和速度,须将列车的位置与速度信息实时地传输至地面控制中心,采用最先进的信息与计算机控制系统。Transrapid 系统的优点在于采用传统电机原理、工艺成熟、与现有工业衔接较好、有铁芯的常导吸力悬浮和导向、漏磁小、运行效率高。其缺点是悬浮气隙小(1 cm)、导轨精度要求高、需要较复杂的控制系统。日本 HSST 也属于常导吸引式磁浮列车,但采用直线感应电机驱动,悬浮和导向磁铁与感应电机定子均在车上,地面上仅有产生感应涡流的厚为 3~4 mm 铝板的电机次级。由于定子在上,仍需变流器将动力电通过滑动接触引入车内。它属于中低速列车。日本超导 MLX 列车属于电动式磁悬浮系统,采用先进的低温超导磁体技术,悬浮气隙可达 10 cm,有不需主动控制的复杂反馈控制系统。这种方式在静止时不能悬浮,列车必须达到一定速度(约 100 km/h)后才能起浮。车上载有持续电流闭环运行的跑道型的二极超导磁体和封闭的低温液氮制冷系统,可产生最高 5 万 Gs 的强磁场。在 U 型线路的侧壁上,沿线连续安装了两组地面线圈,推进线圈为长定子同步直线电机的三相定子绕组,与超

导磁场相互作用产生所需的直线驱动力;另一组是 8 字型零磁通短接的线圈,其中感生的电流与超导磁场的相互作用产生所需的悬浮力,两壁上 8 字线圈的适当连接又可产生所需的导向力。与 Transrapid 系统类似,供电也采用几万 kW 级电力电子变频电源,车走到哪,电供到哪,频率与车速相协调;也采用先进的信息与计算机地面控制系统。

在我国,上海示范线采用 Transrapid 系统,已为其产业化莫立了较好基础;在 HSST 型中低速方面进行了长期的研究发展工作,国防科技大学与西南交通大学已研制成功试验车与线路,也有一定基础。与长大干线和城际与市内交通落实的建设、运营项目紧密结合,部署与推动有关产业化工作,是我国发展磁浮交通的重要方面。

磁浮交通产业化包括设计与总体集成、土建、车辆、牵引供电与控制通讯多个方面。有些已可以在现有产业基础上承担相应任务,逐步成长起来,如土建工程、电磁铁和电机定子铁芯、电缆、供电设备、变流设备等。当然根据技术要求,有些装备仍要引进技术、进行研制。有些则需依靠国际合作,引进与掌握技术,经过研制实现生产本地化,逐步形成新兴产业,主要包括总体设计与集成、车辆、控制与通讯等,在队伍培养、技术掌握、初始资金筹措方面更需特别关注,上述方面应列入国家高技术产业化计划,给予必要的支持与引导。

5 加强新型系统的研究发展

磁浮交通诞生不久,现有的系统无疑还有很多地方可以改进,如大家都感到 Transrapid 系统的气隙小(10 mm)与造价高。目前国内外有一些小组在从事一些新型系统的研发工作,随着国内发展磁浮交通的积极性上升,我国科技人员也开始了一些创新性的研发工作,加强新型系统的研发无疑也是发展磁浮交通的重要方面。

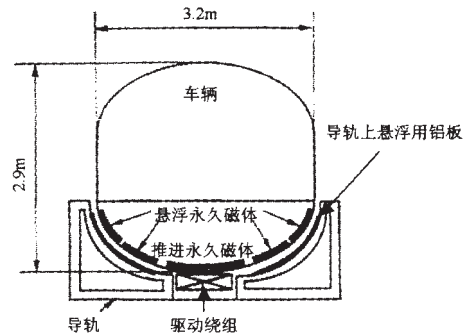


图7 Magplane 磁悬浮列车截面图

3 个成熟的磁浮交通系统的研发开始于上世纪 60 年代后期,那时认为现实可用的磁体系统只有电磁铁和低温超导磁体,经过几十年持续努力,两者均已达到了成熟可用的程度;但在此期间,因永磁体的发展,特别是 NdFeB 的出现,以及高临界温度超导材料的发现,人们就开始研究采用永久磁体及高温超导体的可能性,取得了一定进展。采用永久磁体的磁浮系统有 3 个方案:(1)在 Transrapid 或 HSST 系统的电磁铁中加入一定的永磁材料提供部份激磁所需的安匝,以减小电磁铁所消耗的功率或增大间隙;(2)车上与地面上均敷设永久磁体,依靠两者间的吸力或斥力实现悬浮与导向;(3)车上装有永久磁体,地面导轨上铺设悬浮用铝板,车辆运动时,依靠磁体与铝板中感生电流相互作用使车

电动汽车的现状和发展趋势

陈清泉¹ 孙立清²

(1. 香港大学 香港特别行政区 999077; 2. 北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

[摘要] 综述了世界范围内电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车当前的发展特点和规律。这 3 种电动汽车目前处在不同的发展阶段, 面临不同的问题, 并各自具有不同的发展策略。但是, 发展电动汽车的工程哲学及一些关键技术, 诸如先进电机驱动技术、能源技术、能源控制和管理技术、先进底盘和车体技术等是可共享的, 成为现代电动汽车的基础。最后总结了这 3 种电动汽车的市场前景。

[关键词] 电动汽车和混合动力电动汽车 电驱动 电传动 现状 发展趋势

[中图分类号] TM921.51 [文献标识码] A [文章编号] 1000-7857(2005)04-0024-05

PRESENT STATUS AND FUTURE TRENDS OF ELECTRIC VEHICLES

CHEN Qing-quan(C C Chan)¹ SUN Li-qing²

(1. University of Hong Kong, Hong Kong 999077; 2. Mechanical and Vehicular School, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The state of the art of battery electric vehicles, hybrid electric vehicles and fuel cell electric vehicles was reviewed. These three types of electric vehicles are presently at different stages of development, facing different challenges and require different strategies. However, they have common engineering philosophy and core technologies, such as advanced motor drive technology, energy resources, energy control and management, chassis and body, etc. The challenges of commercialization of three types of electric vehicles were summarized in the end of the paper.

Key Words: electric vehicles and hybrid electric vehicles, electric drives, present status, future trends

CLC Number: TM921.51

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)04-0024-05

收稿日期: 2005-02-28

作者简介: 陈清泉, 男, 1937~; 香港薄林道香港大学, 荣誉教授, 中国工程院院士、英国皇家工程院院士, 主要研究方向为电机、电力驱动及电动车的研究等; E-mail: ccchan@eee.hku.hk

悬浮, 图 7 为美国按此原理研制的 Magplane 示意图。采用高温超导体也有 3 个方案: (1) 使用高温超导导线绕制磁体取代 MLX 系统中的低温超导磁体, 使工作温度可以显著提高; (2) 使用高温超导块材经充磁后形成超导永久磁体, 取代 MLX 系统中的低温超导磁体, 为此要在块材的性能提高与尺寸增大方面做大量工作; (3) 在车上用高温超导块材, 地面上铺设永久磁体, 利用超导体的钉扎效应产生的斥力实现悬浮和导向。

经多次讨论, 大多数同志认为采用永久磁体沿线路铺设的方案在工程上是不能实施的, 因为磁浮列车不是磁浮轴承。磁浮轴承可将磁场置于封闭的有限空间内, 而磁浮列车若将磁场放在地面上, 形成几十至上千 km 长的有磁轨道, 其造价、安全性和工艺性都将难以接受。

对于各种新型方案的研究, 均应该予以鼓励和支持, 进行概念设计论证和小规模的原理性实验, 待证实其可行性与优越性, 并经过认真审定后, 才可进入工程研制。例如, 美国的 Magplane 方案已经过小规模试验及大量设计论证, 其主要科技人员麻省理工学院的 D. B. Montgomery 教授曾多次来我国, 希望能合作进行工程研制发展工作, 这是应该给予考虑的。

(十分感谢连级三教授审阅了本文, 并提出了一些重要的修改意见。)

参考文献 (References)

- [1] 严陆光. 大力发展节油洁净的电气化交通 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 1~9
 - [2] 严陆光, 徐善纲, 孙广生, 戴银明, 张瑞华, 武瑛. 高速磁悬浮列车的战略进展与我国的发展战略 [J]. 电工电能新技术, 2002, 21(4): 1~12
 - [3] 严陆光. 高速磁悬浮列车技术及其在我国交通中的战略地位 [J]. 科技导报, 1999(8): 34~37
 - [4] 严陆光. 中国需要高速磁悬浮列车 [J]. 中国工程科学, 2000, 2(5): 8~13
 - [5] 严陆光. 京沪高速线应采用磁浮方案 [J]. 科技导报, 2003(6): 8~11
 - [6] 严陆光. 关于京沪高速线方案的科学比选 [J]. 科技导报, 2004(1): 3~7
 - [7] 马健, 艾阳. 城市轨道交通的投资价值分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2003(4): 1~6
 - [8] 华允璋. 不应误导京沪高速铁路的方案抉择 [J]. 科技导报, 2004(1): 10~13
- (责任编辑 王宏章)