

文章编号: 0258 2724(2005)02-0133-05

关于我国发展真空管道高速交通的思考

沈志云

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 论述了我国发展真空管道高速交通的必要性和可行性. 就管道压强、遮挡系数及其关键技术等基本问题展开讨论. 重点论述我国发展真空管道高速交通的战略方针和技术方案. 提出采用高温超导磁浮导向, 同步线性电机牵引和低压强管道所组成的系统. 建议立即开始研究试验, 以期能于 2030 年前实现 600 ~ 1 000 km/h 超高速真空管道磁浮列车的商业运行.

关键词: 真空管道高速交通; 管道压强; 遮挡系数; 关键技术

中图分类号: U29 **文献标识码:** A

On Developing High-Speed Evacuated Tube Transportation in China

SHEN Zhiyun

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract The necessity and feasibility of evacuated tube high-speed transportation were discussed. The fundamental problems of this technology, e.g. pressure in the tube, coefficient of coverage and other related techniques, were analyzed in detail. More discussed were the strategy and technical choice of developing this kind of transportation in China. The system consisted of partial pressure in tube, high-temperature superconducting magnetic levitation and synchronous linear motor traction is proposed to be the variant of developing research, so that the 600 – 1 000 km/h high-speed evacuated tube train might be able to run commercially by 2030.

Key words evacuated tube high-speed transportation; tube pressure; coefficient of coverage; key techniques

在地表稠密大气层中运行的高速交通工具, 最高经济速度不超过 400 km/h^{1-3} . 然而, 实现更高速度确有客观需要, 也是交通科技工作者孜孜以求的梦想. 实现更高经济速度的一个可能的途径是采用真空管道. 笔者拟就此发表一些思考和观点, 以期引起我国有关部门、企业以及交通界学者工程技术人员的关注.

1 发展真空管道高速交通的必要性

限制地面高速交通最高经济速度的根本因素是稠密大气, 克服气动作用是地面高速交通的主要任务. 气动阻力与速度的二次方成正比, 气动噪音随速度七次或八次方而急增. 这是任何形式的交通工具都无法避免的客观规律.

文献 [1] 引用了德国磁浮列车和日本新干线轮轨列车实测的牵引曲线, 空气阻力所占比例如表 1 所示. 可见不管是磁浮还是轮轨列车, 当速度达到 400 km/h 以上时, 空气阻力所占比例将超过 80%. 低速下磁浮列车的空气阻力比例低于轮轨, 除说明其空气阻力可能较小外, 另外一种可能性是其空阻以外的阻力比轮轨的大. 总之, 80% 以上的能耗用于克服空气阻力, 应当认为是不经济的.

收稿日期: 2005-01-25

作者简介: 沈志云 (1929 -), 男, 教授, 中国科学院和中国工程院院士.

高速带来的噪音问题则更严重. 交通噪音的环保国家标准为距离铁路外侧轨道中心线 30 m 处所测得的噪音水平一般不得超过 70 dB^[4]. 噪音超标常成为限制速度的关键因素. 如上海浦东的常导磁浮列车, 速度达到 400 km/h 时, 噪音高达 89 dB. 在城镇或人口密集地区, 只能降速到 200 km/h 通过. 磁浮车的低噪音和振动只是在低速之下才有可能. 速度一高, 以气动噪音为主, 悬浮与否, 已经没有实质差别了.

既然高速的障碍来自周围介质——稠密大气, 根本途径只能是改变介质的密度. 正如高速水运那样, 水的阻力是大气的 13 倍, 使船脱离水面, 在空气中飞起来, 即水面效应飞船, 速度就可达到 300~400 km/h. 干线飞机巡航高度达到万 m, 也是为了摆脱地表稠密大气层的作用. 地面列车当然不能飞到万 m 高空, 但可以利用密闭管道, 降低管道内压强, 等于在列车周围创造低密度介质的环境, 以摆脱阻力与噪音的困扰. 理论上可实现任意高速度的运行. 事实上, 1934 年德国工程师肯佩尔获得世界第一个磁浮列车专利时, 就是这样想的. 他提出在真空隧道中运行磁浮列车, 速度达到 1 800 km/h. 半个多世纪以来, 人们总认为真空隧道难以实现, 极力探索在开敞大气中高速运行磁浮列车的道路, 可惜无一成功. 历史的结论很清楚, 必须回到肯佩尔的道路上来, 不回避真空管道, 才能实现 400 km/h 以上超高速交通的梦想.

有人会认为能实现 300 km/h 高速铁路就够了, 没有必要在地面追求更高的速度. 的确, 发展航空运输给长距离高速交通提供了很好的选择. 但是, 航空需要耗费大量高级汽油. 在石油资源日趋紧缺的今天, 作为科技任务, 已到了应当开始寻找第二种选择的时候了. 总有一天, 乘飞机会变成一般人难于负担的奢侈消费, 而超高速旅行的市场需求只会与日俱增, 经济安全的地面超高速交通将突显其市场魅力. 另外, 环保问题日益突出, 防止地球变暖, 控制温室气体排放势在必行.

综上所述, 发展环保洁净运输, 即地面超高速轨道交通, 从可持续循环经济的要求出发, 也是十分必要的. 由于研究开发管道真空高速运输这一复杂的新交通工具, 使之达到能够商业运营的程度, 需要 20~30 年时间, 能源和环保留给我们的时间已经不多, 立即开始研究已嫌过晚, 再也不能犹疑观望, 裹足不前了.

2 发展真空管道高速交通的可能性

单纯从技术上考虑, 让列车在密闭的、低压强的管道中高速运行, 不存在不可克服的困难. 何祚庥院士认为, 当代高能粒子加速器, 已能在长达几十 km 的真空管道里长期运行, 压强能长期维持在 0.1 Pa 甚至更低的范围. 真空管道高速交通所需要的压强可以提高到 10 kPa 量级, 所以在真空问题上, 不会存在原则性的困难 (见何祚庥院士向四川 (成都) 院士咨询服务中心和西南交通大学共同举办的“真空管道高速交通”院士研讨会提交的书面材料).

需要认真考虑的是技术经济方面的可行性, 以及建设成本和运营费用是否能为运输市场所接受. 从全球范围看, 真空管道高速交通尚无先例可资参照, 只有一些设想和初步估算. 不妨列举几例, 以窥一斑.

美国 ETT 公司提出小型分散的管道“汽车”模式^[5]. 每车设 4~6 个座位, 单独运行. 管内径与车外径之间相差很小, 2 根管道上下排列, 全自动控制, 管道内压强为 0.1 Pa. 运行几无阻力, 速度可达 600 km/h. 加速所用能量可在制动时回收. 估算的主要技术经济指标如下:

线路成本: 125 万美元/km;

车辆成本: 2.7 万美元/辆;

能耗: 单位能耗 J/(人·km) 只有汽车的 1%;

运能: 一条管道相当于 80 车道高速公路;

表 1 空气阻力在总阻力中所占的比例

Tab 1 Proportion of air resistance in total resistance %

列车种类及经济性	速度 $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$			
	200	300	400	500
德国磁浮列车 TR06	53	72	83	92
日本新干线轮轨高速列车 S-100 系	67	80	87	92
经济性	经济运行		不经济运行	

优点:安全,环保,方便,快捷.

比较接近常规铁路的方案是瑞士的真空隧道高速列车^[6],压强为 10 kPa 较易实现.速度定为 500 km/h,单向运能估计为 21.6 万人/a,单位能耗(J/(人·km))只有普通铁路的一半.全部处于地下,适宜于多山地区,这是瑞士多山国家实现地面高速的较好的方式.成本高、工期长是其主要缺点.

建设成本和运营费用取决于技术方案.美国堪萨斯大学建议的 PRT 低压管道磁浮列车^[7],就是在瑞士方案基础上加以改进形成的,压强为 20 kPa 改双隧道为地面管道,上下布置,车形改小.在功能相同的条件下,建设费用将比瑞士方案下降 37.5%.

人们关注长大管道抽成真空并加以保持所需的能耗.这种能耗由 3 部分组成:(1)维持管道低压强需要的能耗;(2)解决旅客乘降及列车到发引起的压强变化所需能耗;(3)线路(管道)泄漏带来的附加能耗.总的来说,并不像人们担心的那样高不可及.根据上述特定车型所做的计算^[5],采用 80%效率的压缩机,对长达 800 km 的管道保持 20 0, 10 0, 1 0 和 0.1 kPa 的压强,能耗为 3.6, 5.6, 8.4 和 9.2 TJ/a 或换算成单位能耗为 360~920 J/(人·km),不到 0.000 075 美元/(人·km).在地面管道中实现 20~30 kPa 的低压强所需能耗只有飞机达到并保持万 m 高度所需能耗的 1/40.

精心选择技术方案,降低造价和运行费用,将为真空管道高速交通带来现实的工程可行性.作为 21 世纪现代化交通运输,采用真空管道不仅是必要的,也是完全可能的.

3 真空管道高速交通的基本问题

优选技术方案,首先要对真空管道高速交通的基本问题有所了解,如压强与速度的关系、遮挡系数的确定和其他关键技术.

管道压强的选择是决定系统参数的首要问题.压强与速度直接相关,应当进行相应的基础研究,以科学地确定这种关系.飞机的商业运营提供了可靠标准:在 9 000~12 000 m 高空以 1 000 km/h 左右的速度飞行是最经济的.该处气压为 20~30 kPa,空气阻力随着速度提高而增加,但随压强降低而下降.图 1^[9]阴影区表示管道压强和列车运行速度的优选区.优选区之外为风阻和磁阻过大区.图中音速(1 224 km/h)附近为音障区(阴影区内的小三角形),应尽量避免.

图 1 表明,如果速度选为 600~1 000 km/h(双重阴影区),管道压强可取 10 kPa 左右,即可在地面创造 10 000~15 000 m 高空的运行环境.在工程上比较容易实现,如果能实现更低的压强,如 0.1 Pa 则等于在地面创造出宇宙空间,可实现技术所能达到的任意速度.不过要在长大管道中长期保持如此高度的低压强,运营费用将大大增加,不易为运输市场所接受.应当说明,图 1 只是就一种特定车型的计算结果,并非普遍适用.管道压强的选择与列车类型、管道结构、运营方式、密封技术、客流大小等因素相关.需要进行多方位研究,才能正确选择.

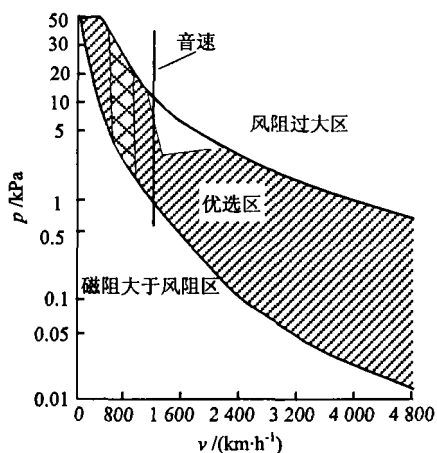


图 1 管道压强和运行速度的关系^[9]
Fig 1 Selection of speed and pressure in the tube

第 2 个基本问题是选定遮挡系数,即列车横截面与管道内截面之比.这是决定管道内径的主要因素.

遮挡系数 α (coefficient of coverage) 的概念来自铁路隧道设计.当高速列车通过铁路隧道时引起气压变化,最高可达 500~600 kPa.在无法改变大气密度条件下,只有加大隧道断面来控制(见表 2).

在低压管道中,对较高速度仍可取较大遮挡系数.如压强为 10~20 kPa 时,在 600~800 km/h 速度之下,仍可取 0.40~0.45.如使压强降低到 0.1 Pa,则 α 可取到 0.8~0.9 仅留运动空间即可.

表 2 不同速度下铁路隧道的遮挡系数
Tab 2 Coefficients of coverage for railway tunnels for different speeds of trains

速度 v (km·h ⁻¹)	隧道断面面积 m^2	遮挡系数 α
120~160	30	0.40~0.45
200~250	64	0.20~0.25
300~350	100	0.10~0.15

另一个影响 α 的因素是管壁阻力. 隧道内行车阻力比在开敞大气中大, 这就是管壁效应. 增大的幅度与车与管壁间的距离和管内气压相关. 在 $10 \sim 20 \text{ kPa}$ $\alpha=0.4$ 左右时, 管壁阻力约等于空气阻力. 加大 α , 管壁阻力将减小, 但由此带来建设及运营成本上升. 这也是一个需要优选的问题.

为了科学地确定最佳压强和遮挡系数, 必须开展真空空气动力学研究, 对于真空管道中高速列车的气动力学行为进行理论研究和试验, 找出各种因素对阻力影响的规律. 仿真计算的结果还应通过实物模型试验, 加以检验. 这些基础性研究是确定管道压强和遮挡系数的根据.

第3个基本问题是真空管道高速交通的关键技术. 列举如下:

- (1) 真空管道, 包括材料及结构设计、真空管道密封技术和道岔及登车桥技术;
- (2) 牵引电机, 包括同步线性牵引电机技术、移动磁场控制技术和电机主动悬挂技术;
- (3) 磁浮车, 包括悬浮、导向及其控制技术和多磁转向架车辆设计和车内气压控制技术.

在技术发展到今天的情况下, 解决这些问题, 应不存在原则上的困难. 有些技术已相当成熟, 如飞机用的舱内气压控制、常导磁浮列车用的同步线性电机及控制等. 有些可在现有新材料、新工艺及相关信息技术基础上开发, 如管道设计、低气压的建立和保持等. 有些新问题, 如道岔、登车桥等, 也不难试验开发. 最困难的是各种技术方案的优选和集成, 使构成的系统具有最佳性能和最大的工程可行性.

如前所述, 许多基本问题尚无定论, 许多方案比较尚缺乏根据, 国内外均无成熟系统可资参照. 这些因素决定着自主发展真空管道高速交通的战略方针.

4 我国发展真空管道高速交通的战略方针和技术方案

我国真空管道高速交通的战略定位应为 $600 \sim 1\,000 \text{ km/h}$ 超高速地面交通, 是目前地面高速交通的延伸和补充.

当前正在开发的轮轨高速铁路, 速度为 $300 \sim 350 \text{ km/h}$ 是现有铁路网提速的必然趋势. 上海浦东引进德国常导磁浮列车, 速度为 $400 \sim 450 \text{ km/h}$ 不失为磁浮列车技术工程化的大胆尝试. 这2项已列入我国中长期交通科技发展规划战略研究. 真空管道高速交通速度更高, 技术难度更大, 是交通应对几十年后能源、环保严重问题的重要措施, 将成为20~30 a以后交通运输市场的亮点. 就当前来说, 研究真空管道高速交通是最具前瞻性、前沿性的前期研究, 与其他高速交通的研究并行不悖, 相辅相成. 因此, 真空管道高速交通的战略方针应当是研究领先, 试验开路, 分阶段实现工程化, 以2020年拿出最优工程方案, 2030年开通首条运营线为目标. 对于真空管道高速交通这样的高技术项目, 必须进行多方案比较试验, 优选各个子系统的技术, 还要反复进行系统综合评估, 才能找出最佳结构方案及参数. 所以, 不能急功近利, 过早考虑实际工程实施, 盲目追求市场效应.

分阶段发展的初步设想是用5 a (2005~2010) 时间进行小比例模型研究, 主要是探讨压强、遮挡系数和速度之间的关系, 确定管道内径及车辆外部尺寸. 然后, 再用5 a 即在今后10 a (2005~2015) 之内, 进行全尺寸模型试验, 同时建造试验线路并进行运行试验. 总共大约需要15 a (2005~2020), 才能确定最佳的工程化方案. 在其后的10 a内 (2020~2030) 有望建成一条足够长度的运营示范线. 争取能在2030年以前开始商业运营.

关键是技术方案的选择. 应鼓励多单位参与, 各自选择1个或若干方案开展试验研究. 2020年进行全国性的方案评比, 取长补短, 共同确定一个最佳方案.

管道压强的基本选择有2种: 超低气压管道或低气压管道. 前者压强可取 1.0 Pa 或更低, 后者一般可取 $10 \sim 20 \text{ kPa}$ 各有短长, 通过对比分析才能决定取舍.

管道结构可以是圆形 (最省材料) 或在凹形整体道床上的半圆形; 双向管道可以并列, 也可以上下排列; 2管道之间可以分隔, 也可以相互连通, 以减小遮挡系数. 管道不一定都高架, 铺于地面可省支撑结构. 进入隧道时可利用隧道做真空管道, 以缩小隧道断面. 管道材料可选防漏水泥, 也可考虑钢板、塑料等新型建材. 管道内降低压强可选用高效率的抽风机, 沿管道建设自动抽气站. 抽气站间的距离和抽风机功率由计算确定.

关于道岔, 如采用非包边的磁浮车, 可通过导向机构的自动控制而避免辙岔的移动, 这样可使管道分

岔十分简单. 列车进出站可采用登车桥机构, 一端与车站开敞部分相通, 另一端与车门紧密贴合后, 开启车门, 即可供旅客上下.

列车选择的范围更大. 牵引动力看来采用大功率同步线性电机已成共识, 或可有更好的方案, 如超导牵引等. 悬浮及导向则可在更多可能方案中选择, 轮轨也是可以考虑的. 轮轨系统如不承担牵引(牵引仍用线性电机), 只用于支承和导向, 则在很高速度下也能很好工作. 用于货运的管道多采用滚轮支承就是一例. 当然采用磁悬浮将更方便. 磁浮技术种类繁多, 有常导、超导、高温超导、磁浮飞机、永磁补偿等等. 最近航天部第二研究院又推出气浮车技术, 他们发现航天器上使用的发汗冷却技术产生的推力, 可用来将车悬浮, 这也是一种可以考虑的方案.

从国内外磁浮技术的发展来看, 西南交通大学研制的高温超导磁浮车最有可能成为 600~1 000 km/h 超高速真空管道交通的载体. 这一技术利用常规永磁体的磁场在高温超导体中引起屏蔽电流实现悬浮, 导向由高温超导体钉扎中心对永磁导轨磁力线的钉扎作用实现. 悬浮高度和导向力一般不需要额外的自动控制系统, 悬浮距离大, 导向力强, 结构简单. 非包边结构便于采用半圆罩以形成管道. 缺点是用永磁轨道, 不便维修养护, 但在密闭的真空管道中运行, 就不存在这个问题了.

采用高温超导悬浮和导向, 同步线性电机牵引, 在 10~20 kPa 压强的管道中, 运行速度为 600~1 000 km/h 可以作为目前进行试验研究的一个基本方案.

没有行动任何战略方针都是空话. 实现超高速真空管道交通虽然是 20~30 以后的事, 但研发工作如不现在就启动, 再等多少年也只能是梦想. 如果本文能够引起社会的关注和学术界的支持, 展开讨论, 则是作者的最大希望了.

参考文献:

- [1] 沈志云. 高速磁浮列车对轨道的动力作用及其与轮轨高速铁路的比较 [J]. 交通运输工程学报, 2001 1(1): 1-6
- [2] 沈志云. 京沪高速铁路技术方案的探讨 [J]. 交通运输工程学报, 2001 1(2): 10-13
- [3] 沈志云. 对磁悬浮高速列车认识的两个错误观点 [J]. 交通运输工程学报, 2004 4(1): 1-2
- [4] 马大猷, 孙家麒, 程明昆, 等. 噪声与振动控制工程手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 137.
- [5] Evacuated Tube Transport Technologies Space Travel on Earth [EB/OL]. <http://www.et3.com/> 2004-05
- [6] GESTE Engineering Ltd. The Swissmetro/Eurometro transport system [EB/OL]. <http://www.swissmetro.com> 2004-11-19
- [7] Suppes G. J. A perspective on maglev transit and introduction of the PRT maglev [EB/OL]. <http://faculty.washington.edu/~7Ejbs/itans/suppes.htm> 2002-08-18 (中、英文编辑 刘 斌)

本刊设置“高端视点”栏目, 欢迎赐稿

为集中快速展示各学科著名学者的最新重要研究成果, 本刊决定自本期(2005年第 2 期)起开设高端视点栏目.

本栏目将主要刊登院士、各大学和研究机构的学科带头人以及在新兴和交叉学科中取得重要进展的研究人员的学术论文, 包括具有重要指导作用的综述性论文. 我们将采取特殊处理程序, 使论文在尽可能短的时间内发表. 希望本栏目能为读者和作者提供更好的服务, 并希望得到广大读者和学者的关心与支持, 欢迎赐稿.

作为本栏目的开篇, 本期刊登了中国科学院和中国工程院院士、机车车辆专家沈志云教授的论文《关于我国发展真空管道高速交通的思考》. 文中部分内容曾于 2004 年 12 月 18 日在四川(成都)院士咨询服务中心和西南交通大学共同举办的“真空管道高速交通”院士研讨会上宣读.

西南交通大学学报编辑部