

中國科學院物理研究所
Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences



超导基础理论和实验技术讲座

National Lab for Superconductivity Lecture Series

【第92期】

高速超导磁悬浮列车的研发历史与现状

赵勇

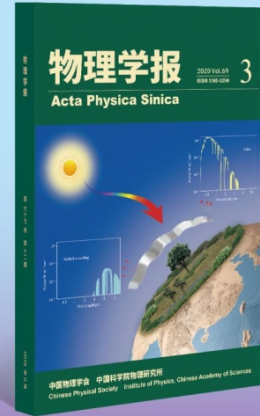
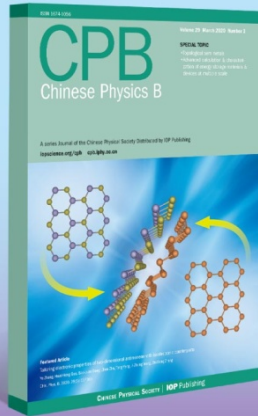
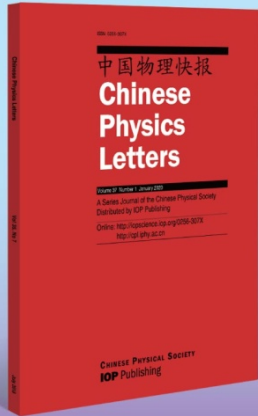
福建师范大学/西南交通大学



主办 中科院物理所超导国家重点实验室、学术服务部

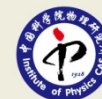
协办 《物理学报》 | CPL | CPB | 《物理》

与中国物理学同行

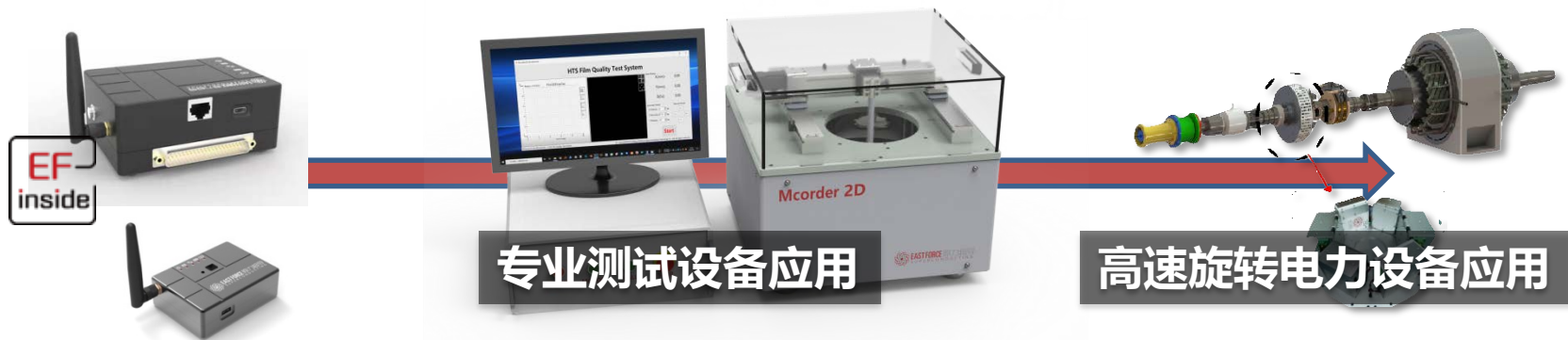


欢迎关注 欢迎投稿

- ▶ CPL, CPB 和《物理学报》被SCI收录, “中国科技期刊卓越行动计划”入选期刊。
- ▶ CPL的 Express Letters 栏目对标 PRL, 质量高, 发表快, 国际推广。接收邮件投稿:
zhaiz@iphy.ac.cn
- ▶ CPB和《物理学报》刊登中英文物理学优秀原创成果, 物理学前沿研究领域专题与综述。
- ▶ 《物理》是国内权威物理类中文科普期刊, 集学科大家之力, 为读者精心奉献高品质作品。



提供面向工业传感、人工智能、万物互联、实验室 高精度数据采集的采集、存储、分析全套解决方案



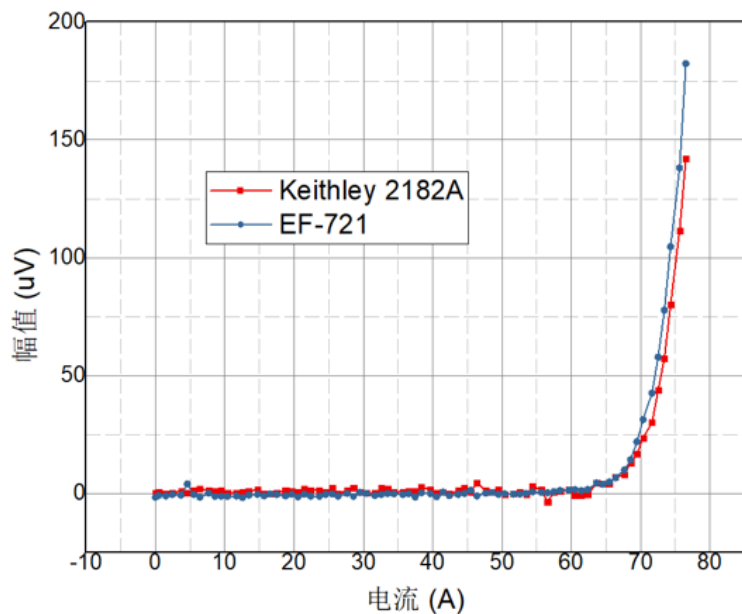
原力测控是北京原力超导旗下专注测控业务的子公司，位于郑州国家高新技术开发区内，其自主研发的多通道，高精度、无线传输**数据采集卡**，用于噪音抑制，高低压隔离、运动条件下的专业测试，已成功应用于各类测试设备。配套实验数据管理系统专用于实验数据全生命周期存储、调用、溯源。



领先的高温超导测试设备
及超导应用服务提供商



高速多通道无线采集卡



EF-721与Keithley比对试验

| 主要性能 | EF-721 | EF-621 | EF-521 | EF-722 |
|-------------|----------------------------------|----------------------------|--------|----------|
| 尺寸(mm) | 112*86*45 | | | 80*60*40 |
| 通道数量(差分) | 24/16路同步测量 | | 8路同步测量 | 8路同步测量 |
| 转换器类型 | 24bit | 16bit | | |
| 精度 | 0.03%FSR+3 μ v @100Hz | 0.05%FSR+400 μ v@100Hz | | |
| 采样频率 | 1000Hz | | | 10KHz |
| 增益 | 1/2/4/8 | | | |
| 量程(v) | \pm 5(可定制) | | | |
| 数据接口 | 无线Wifi/RJ45有线网口 | | | 无线Wifi |
| 多台组网功能 | 有 | | | |
| 耐冲击(瞬时) | 30V, 200ms | | | |
| 高压隔离模块耐压(V) | 1000RMS | | | |
| 供电方式 | 锂电池供电(5000mAh, 可工作至少6小时)/外部适配器供电 | | | |



中國科學院物理研究所
Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences



超导基础理论和实验技术讲座

National Lab for Superconductivity Lecture Series

【第92期】

高速超导磁悬浮列车的研发历史与现状



赵勇，本科和博士就读于中科大物理系，硕士就读于华中科大和中科院等离子体物理所。1988-1990年在浙江大学物理系任讲师和副教授；1990-2003年在新南威尔士大学材料学院任博士后、研究员、高级研究员和教授；2003年起在西南交大任首席教授、超导中心主任；2018年起在福建师大任教授。主要研究领域包括超导材料的制备技术、磁通钉扎特性、超导磁浮原理及应用。2004年获聘长江学者特聘教授，2005年获国家杰出青年基金。在JACS、PRB、APL等期刊发表论文200余篇，获国家发明专利授权60余项。

主办 中科院物理所超导国家重点实验室、学术服务部

协办 《物理学报》 | CPL | CPB | 《物理》

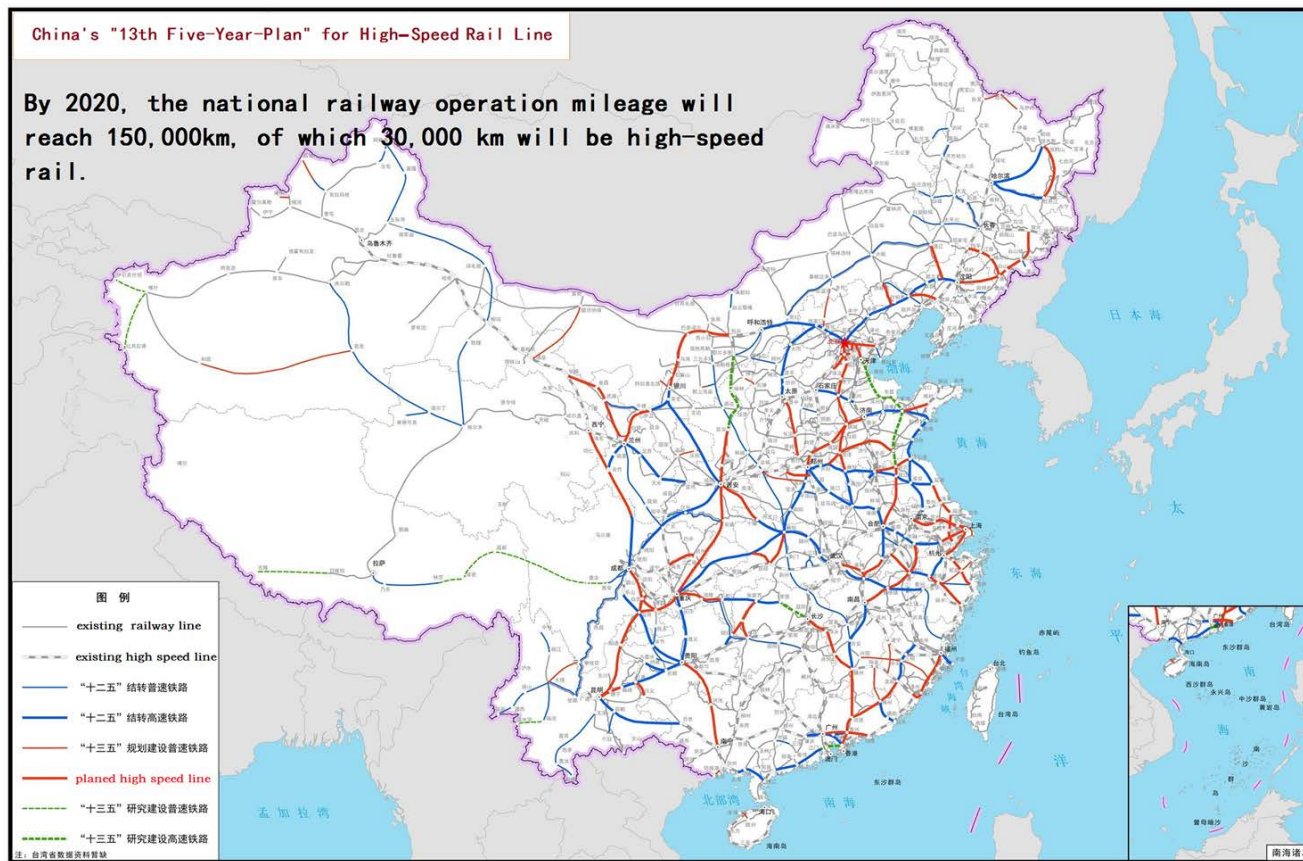
高速超导磁悬浮列车 的研发历史与现状

赵勇

福建师范大学/西南交通大学

2020年08月25日

背景：中国高速铁路发展迅速



中国幅员辽阔，人口众多，经济发展迅速，高速地面轨道交通有着巨大的发展潜力。目前，高速铁路已成为中国交通发展的一张名片。

**复兴号高铁以
350km/h运行**

背景：与通信相比，运输还需要加快前进的步伐

交通 - 各种**运输**与**邮电通信**的总称

——《辞海》

速度是交通永恒的主题！

1G: 模拟技术

2G: 实现了语音的数字化

3G: 以多媒体通信

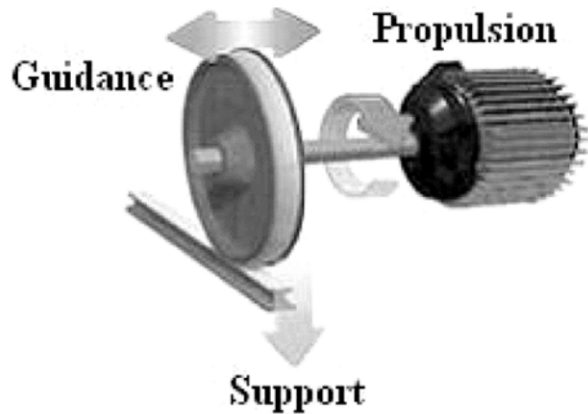
4G: 无线宽带时代

实现人人互联

5G: 高频传播

将使万物互联

通信已经实现了高速度，并且技术不断更新改进；
相比之下，运输的速度还远远落后于人们的期待。



轮子的三大作用

支撑 - 悬浮力

导向 - 悬浮导向力

牵引 - 直线驱动

磁浮列车：磁悬浮+直线驱动

轮子在人类的交通发展中扮演者重要的角色。轨道交通中轮子的三大要素为“**支撑、导向、旋转驱动**”。

磁悬浮列车实现无接触的轨道运输，具有如下优势：

- 速度快、爬坡能力强、转弯半径小
- 运行时噪声小、安全舒适
- 能耗低、污染小
- 无磨损、维护简单
- 运行速度具有广阔的上升空间

磁浮列车技术将取代轮轨高速，成为未来高速（或超高速）地面交通的主要选择，这已经从工程技术上进行了许多细致的讨论。在我们物理的角度，至少从下面两点可以看出，磁浮列车技术具有更大的潜力。

1. 磁浮摆脱了轮轨的物理接触，消除了接触摩擦，将降低能量消耗，并减少摩擦带来的材料损耗；
2. 直线驱动解除了轮轨圆周运动中高运行速度与高加速的耦合（圆周运动的离心加速度正比于线速度的平方，高速下离心力会破坏车轮），突破了运行速度上的一个限制。

主要内容

- 一、磁悬浮列车的分类与特点
- 二、超导磁悬浮的物理基础
- 三、超导磁悬浮列车的研发历史
- 四、超导磁悬浮列车的发展现状
- 五、几点展望

1.1 物理悬浮

采用“无接触”的方式克服重力，让微粒、固体或液体稳定地漂浮。



除了“障眼法”外，其他方面满足悬浮的定义。



不满足“无接触”条件。但超强膂力引人注目。



这是“真正的”悬浮。一旦吊绳断了后果很惨。

各种物理悬浮

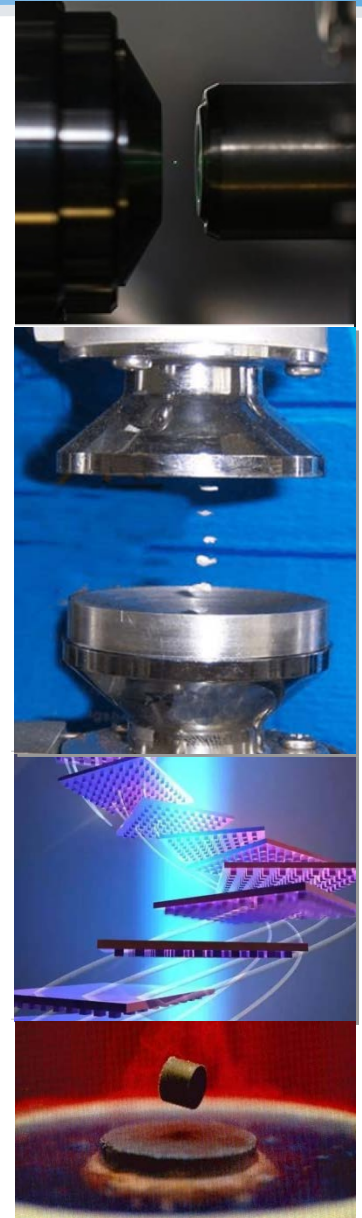
光悬浮： 利用激光将原子或微粒悬浮在空中；
类似还有光操纵、光驱动等技术

声悬浮： 利用声辐射力克服重力产生悬浮

$$F = \frac{5}{6} \frac{\pi P_m^2}{\rho \omega^2} \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right)^3 \sin(2kh)$$

气悬浮： 利用气流压力克服重力

电磁悬浮： 利用电磁力产生悬浮



1.2 磁悬浮列车分类

主要磁悬浮技术的类型：

电磁吸引磁悬浮：

利用磁铁（如电磁铁、永磁体）的吸引作用产生悬浮力；采用主动控制技术稳定磁悬浮系统。

电动感应（排斥）磁悬浮：

利用磁铁（如超导磁铁、永磁体）与感应线圈（或感应板）之间相对运动的排斥作用产生悬浮；利用力学平衡设计或线圈平衡设计获得系统的被动稳定性。

超导量子磁悬浮：

超导现象是一个宏观量子现象，利用超导抗磁特性产生的悬浮。主要有两种类型：

- 迈斯纳态悬浮-完全抗磁性悬浮
- 混合态悬浮-抗磁-磁通钉扎悬浮

磁悬浮列车的分类

按照磁浮原理分类：

电磁吸力型磁浮列车（EMS） - 依靠电磁铁的吸力产生悬浮

电磁感应型磁浮列车（EDS） - 依靠磁体相对金属板（或线圈）的运动产生悬浮

超导量子型磁悬浮列车（SQS） - 依靠超导抗磁特性产生悬浮

按照磁体材料类型分类

常导磁浮列车 - 利用铜或铝线圈作为磁浮磁体产生悬浮 e. g. EMS

永磁磁浮列车 - 利用永磁体产生悬浮 e. g. MagPlane

超导磁浮列车 - 利用超导材料制作的磁体产生悬浮 e. g. EDS

混合磁浮列车 - 利用上述几种材料制作的磁体进行混合搭配，永磁常导结合

按照速度范围分类

中低速磁浮列车 - 速度在100-260 km/h （城市交通）

高速磁浮列车 - 速度在400-600km/h （城际交通）

超高速磁浮列车 - 速度在600km/h以上 （国际交通）

超导磁悬浮列车：

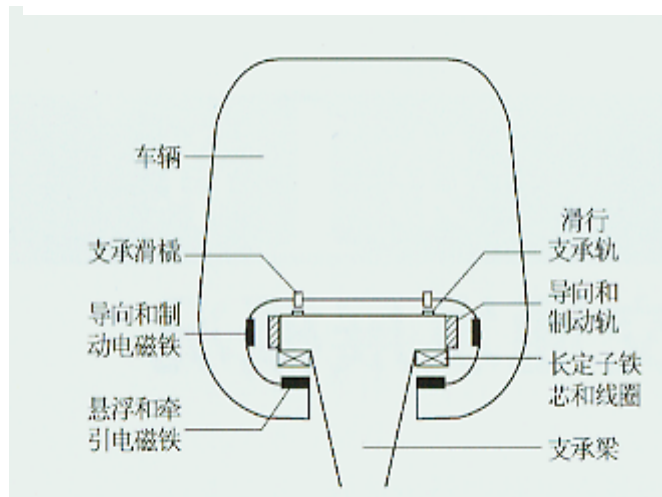
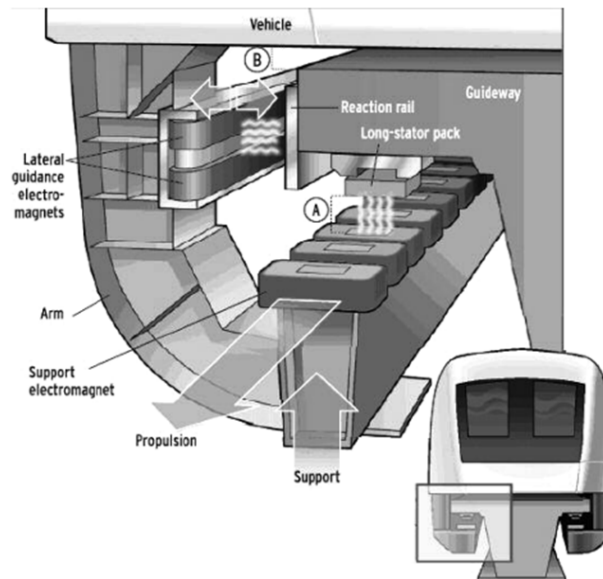
- 1) 使用超导磁体作为磁悬浮核心器件；
- 2) 利用超导性能作为磁悬浮基础。

1.3 目前主要的磁浮列车类型介绍

TransRapid 高速磁悬浮列车

特点:

- 德国原创
- 常导电磁吸引型
- 可静态悬浮，气隙~8 mm
- 悬浮和导向均需主动控制
- 长定子同步直线驱动
- 最高速度已达500km/h
- 自2003年已商业运行，430km/h

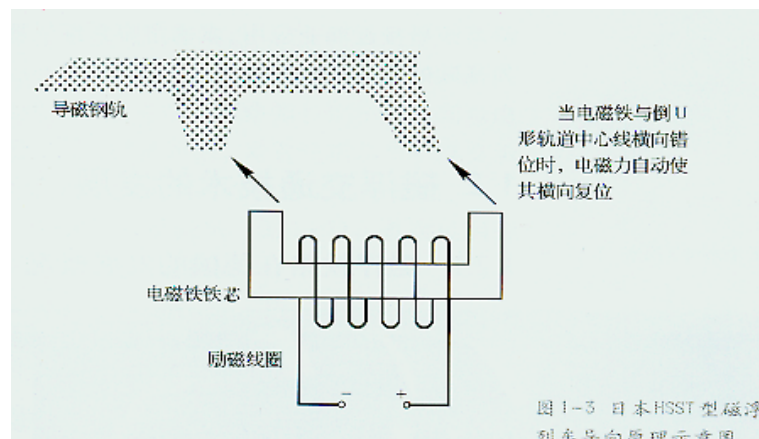
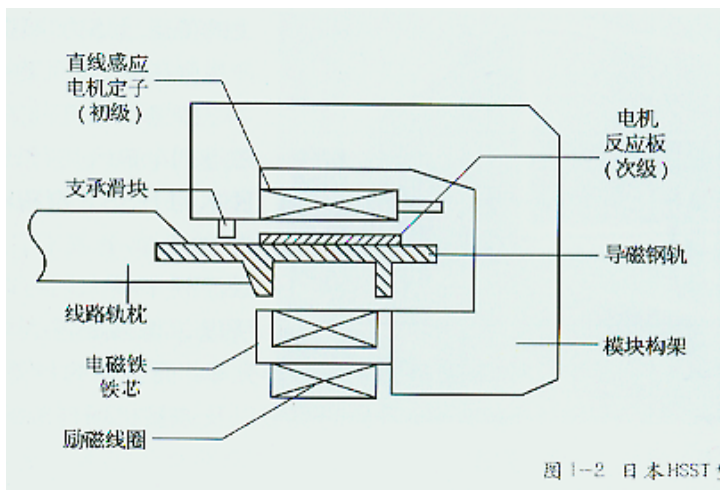


特点：

- 日本原创
- 常导电磁吸引型
- 可静态悬浮，气隙 $\sim 8\text{ mm}$
- 悬浮需主动控制，被动型导向
- 短定子异步直线驱动
- 最高速度 100 km/h
- 2005和2015分别在名古屋和长沙开通商业营运



长沙线



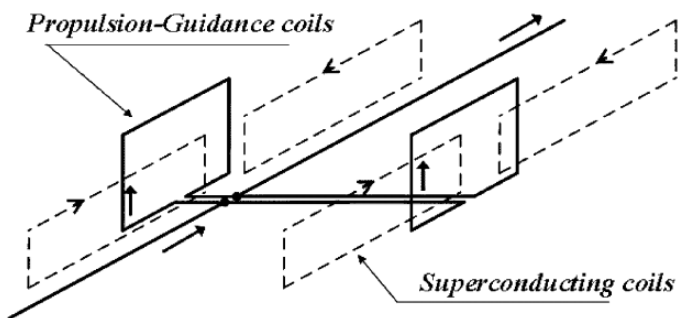
超导磁浮列车（MLX01型、L0型等）

特点：

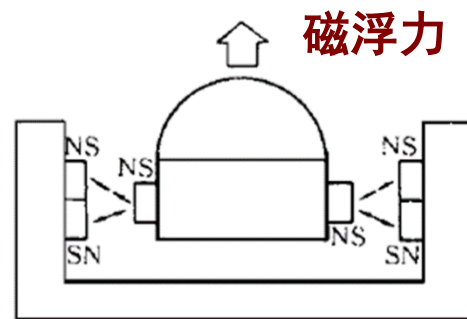
- 美国专利，日本开发
- 超导磁体动态悬浮，无静浮
- 被动型悬浮和导向（零磁通线圈感应圈）
- 长定子同步直线驱动，
- 目前最高速度达603km/h
- 计划2027年开通从名古屋-到东京的营运线（运行速度505km/h）



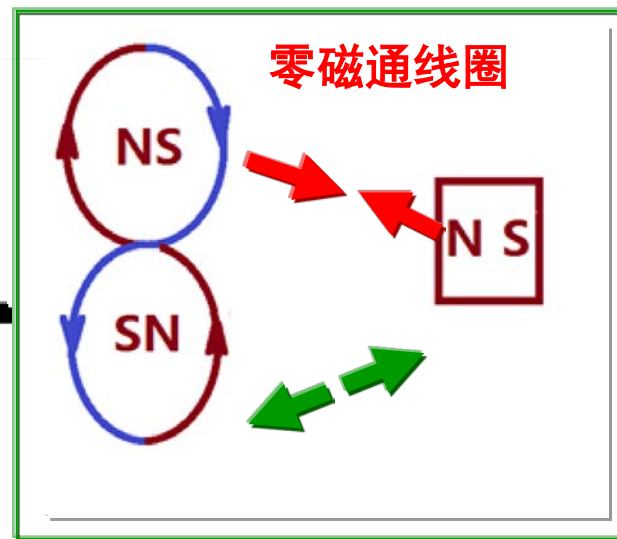
日本山梨试验线



被动导向



磁浮力



磁浮飞机 (Magplane)

- 特点:**
- 美国原创 (蒙哥马利)
 - 永磁电动感应磁浮
 - 金属感应板
 - 被动悬浮、无静态
 - “力学平衡+气动平衡” 导向
 - 长定子同步直线驱动
 - 运行速度~250km/h
 - 内蒙古煤矿区应用

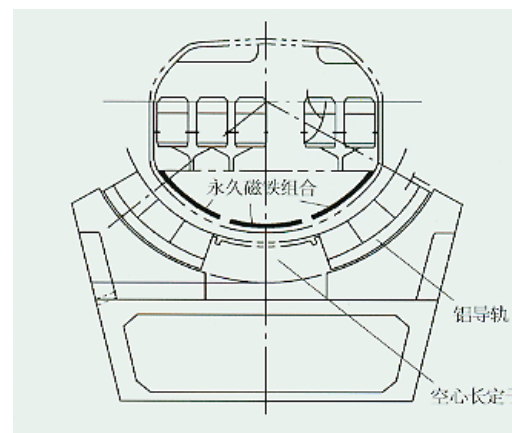
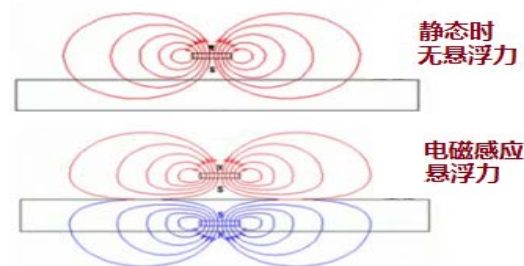
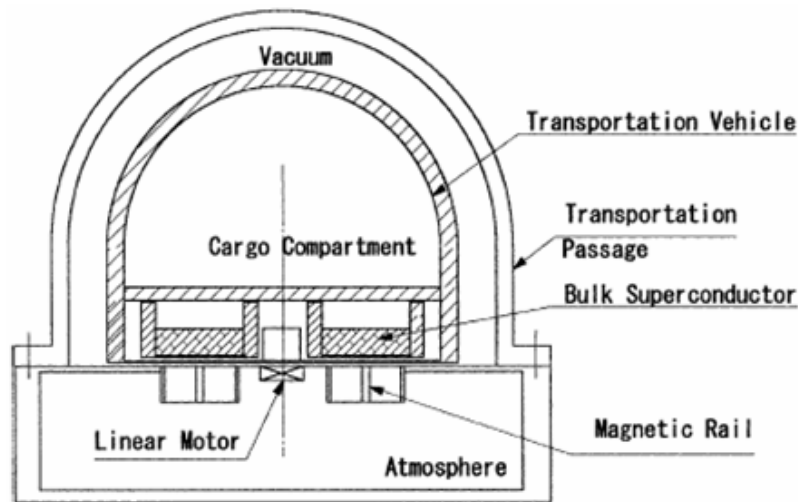


图1 2-0 永磁感应磁浮 400-500km/h 也可

- **中国原创**
- 非理想第II类超导体特性（超导量子磁悬浮）
- “自发的”的悬浮与导向性
- 除了维持低温所需能量外，静态悬浮和导向均不消耗能量
- 长定子异步驱动
- 目前**实验室速度**达到160km/h



西南交大载人磁浮车

主要内容

- 一、磁悬浮列车的分类与特点
- 二、超导磁悬浮的物理基础
- 三、超导磁悬浮列车的研发历史
- 四、超导磁悬浮列车的发展现状
- 五、几点展望

二、超导磁悬浮的物理基础

2.1 磁悬浮与磁悬浮系统的稳定性

处于静力场 $F(x, y, z)$ 中质点，如果在 (x_0, y_0, z_0) 点处于平衡态，则有：

$$F(x_0, y_0, z_0) = 0$$

如果

$$\nabla \cdot F(x_0, y_0, z_0) < 0 \quad (\text{稳定平衡})$$

$$\nabla \cdot F(x_0, y_0, z_0) > 0 \quad (\text{非稳定平衡})$$

Earnshaw 定理： 无电荷区间的静电场 $E(x, y, z)$ ，因此是既无源又无旋的场，即

$$\nabla \cdot E(x, y, z) = 0 \quad \nabla \times E(x, y, z) = 0.$$



$$E(x, y, z) = -\nabla\varphi(x, y, z)$$

处于场中的电荷 q 受力为： $F(x, y, z) = qE(x, y, z)$.

满足

$$\nabla \cdot F(x, y, z) = 0$$

静电场（或保守场）中的（带电）粒子不可能处于稳定平衡态！

Earnshaw 定理的推广：

对处于静电场 E 中、体积为 V 的电介质；或处于静磁场 H 中体积为 V 的磁介质，其受力分别可以表达为：

$$F_e = \frac{1}{2}(\epsilon_r - \epsilon_0) V \nabla E^2, \quad \epsilon \text{ 为介电常数}$$

$$F_m = \frac{1}{2}(\mu_r - \mu_0) V \nabla H^2 \quad \mu \text{ 为磁导率}$$

$$F_e > 0 \quad (\nabla \cdot \nabla E^2 > 0 \text{ 且 } \epsilon_r - \epsilon_0 > 0)$$

电介质粒子在静电场中不可能有稳定平衡

$$F_m > 0 \quad (\nabla \cdot \nabla H^2 > 0 \text{ 如果 } \mu_r - \mu_0 > 0)$$

铁磁或顺磁体在静磁场中不可能有稳定平衡。

$$F_m < 0 \quad (\nabla \cdot \nabla H^2 > 0 \text{ 如果 } \mu_r - \mu_0 < 0)$$

弱抗磁体、超导体、感应有涡流的导体在静磁场中可能有稳定平衡。

严格地说，上述理论仅仅适用于单粒子的静态悬浮！

2.2 超导体的电磁性质

超导体的两个基本特性：

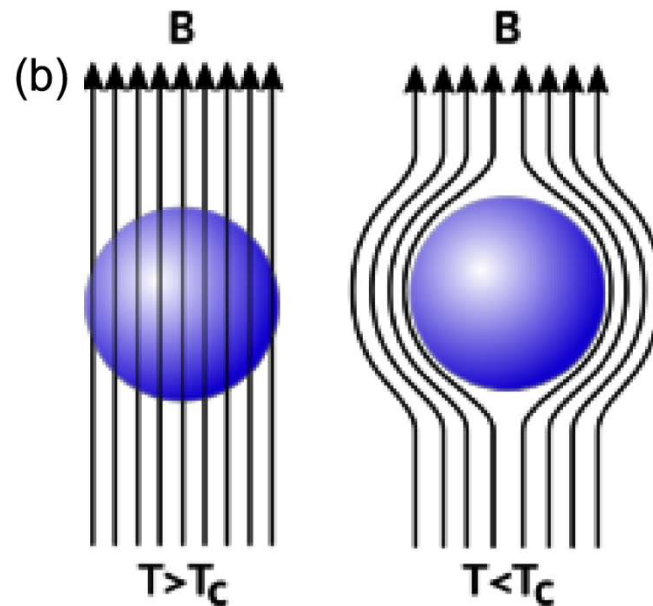
零电阻

$$\rho = 0$$

Meissner效应

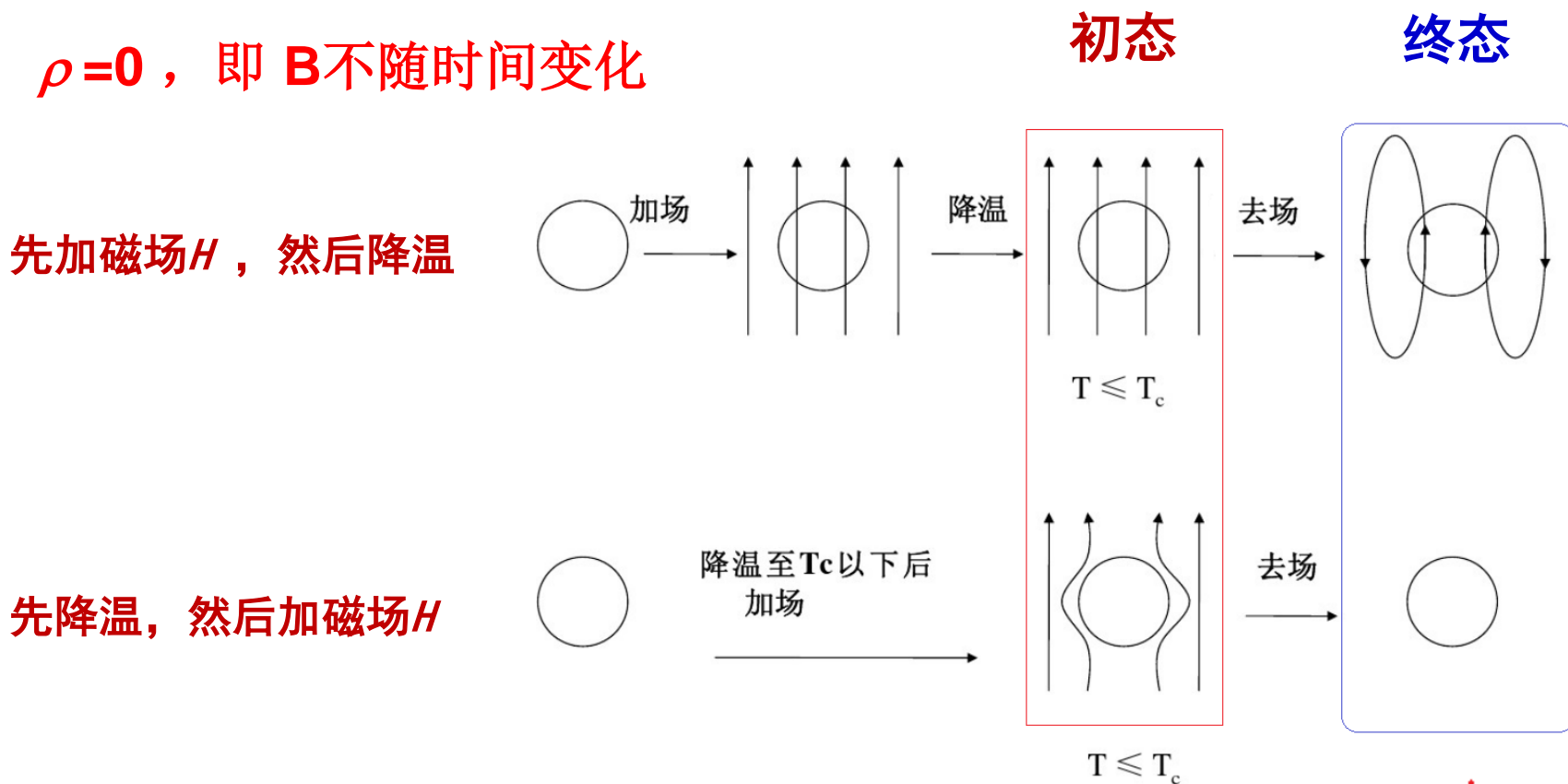
$$\mathbf{B} = 0$$

其中迈斯纳效应是超导体独有的特性，是超导宏观量子现象的体现。



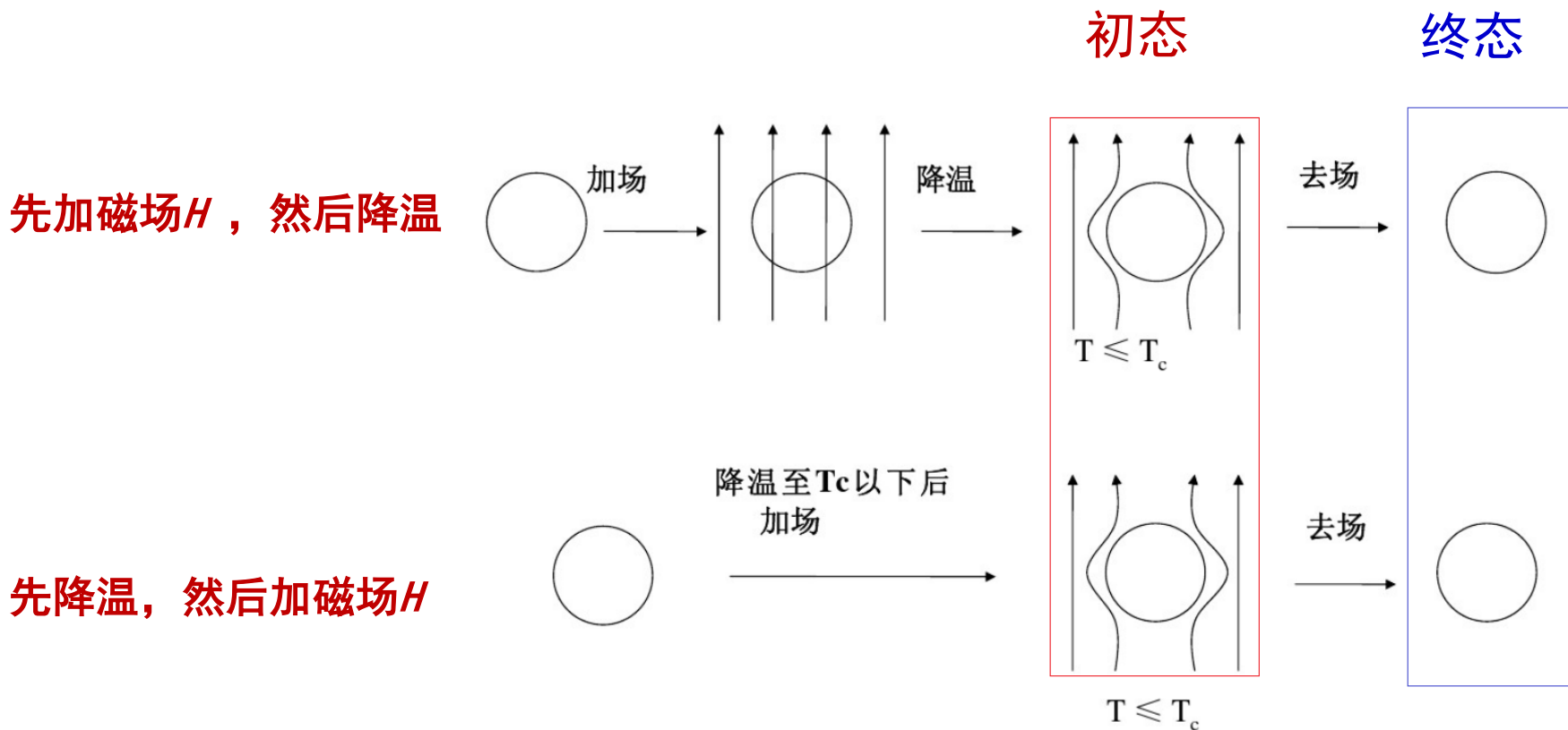
理想导体在磁场中的行为

$\rho = 0$ ，即 \mathbf{B} 不随时间变化



理想导体内部的磁通分布与加磁场的历史有关!

超导体在磁场中的行为



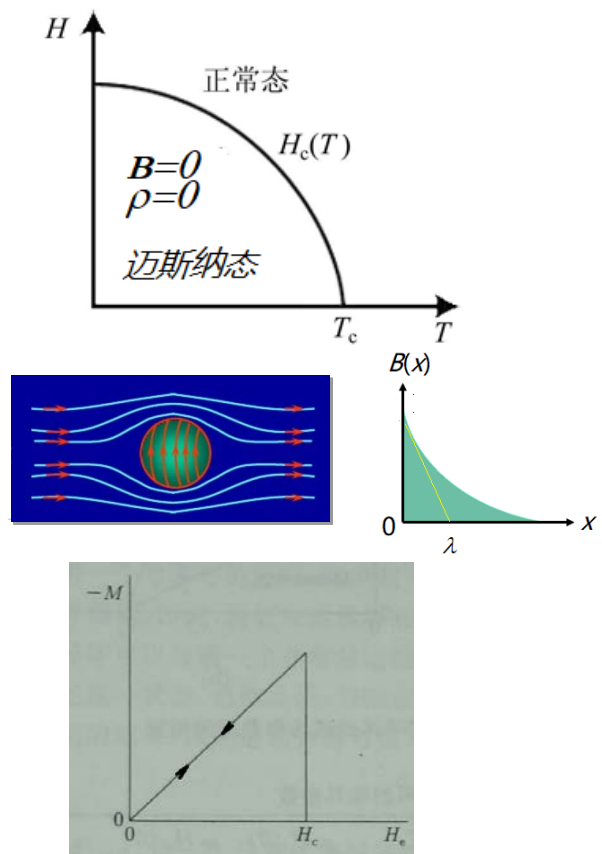
Meissner效应
-排磁通效应



超导体内部的磁通分布与加磁场的历史无关！ $B=0$

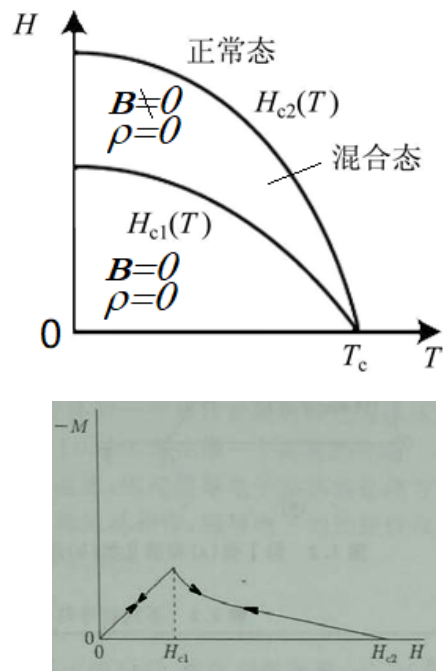
第一类和第二类超导体

第一类超导体



迈斯纳态：超导面电流分布在穿透深度为 λ 的空间范围，形成对外场的屏蔽。磁化曲线可逆。

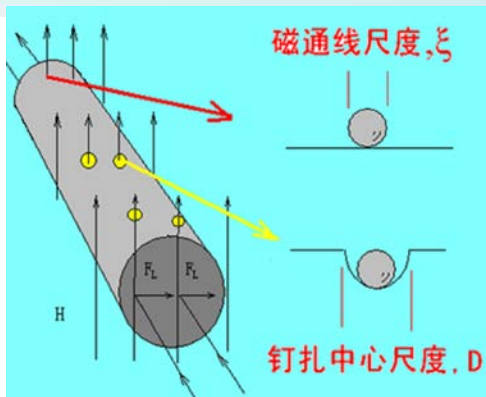
第二类超导体



混合态的磁通涡旋结构和磁通线点阵

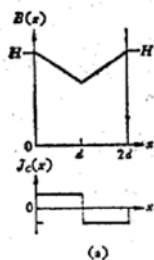
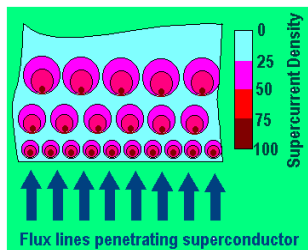
除有Meissner态以外，在 H_{c1} 和 H_{c2} 之间的磁场范围内存在混合态：磁场以磁通线形式部分穿透到超导体内部，形成磁通线点阵。每根磁通线携带磁通量 $\phi_0=h/2e$ 。对理想的第二类超导体，磁化曲线可逆。

磁通钉扎和非理想第二类超导体

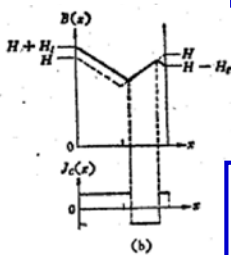
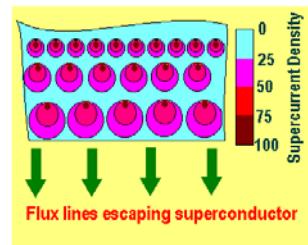


抵抗洛伦兹力

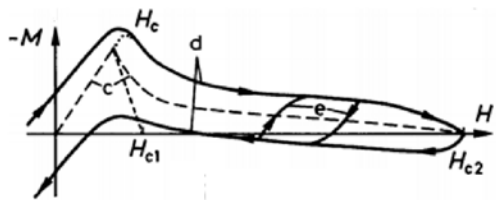
磁通钉扎： 超导体中的杂质颗粒、结构缺陷等对磁通线具有捕获作用，即钉扎中心。**非理想第二类超导体**含有大量的磁通钉扎中心。



体电流分布



反向流动的体电流

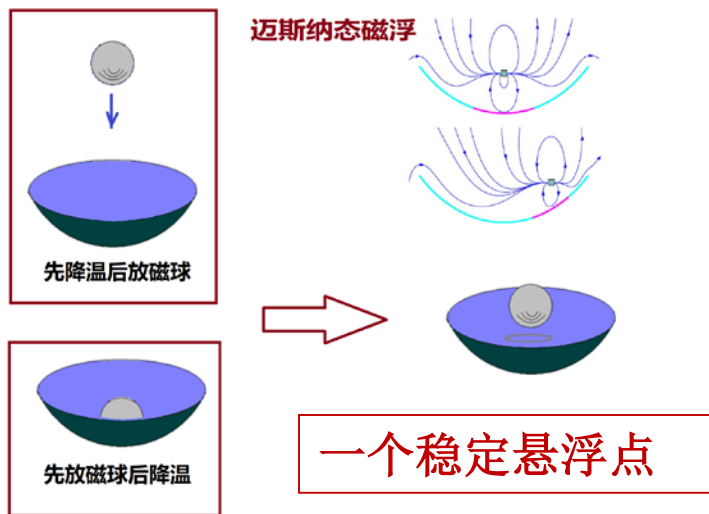


不可逆磁化曲线

磁通钉扎的后果：

- 1) 抵抗洛伦兹力，导致无损的传输电流。
- 2) 导致磁通密度的非均匀分布，体电流成为可能；
- 3) 磁通进入和退出超导体均受到阻碍，使得内场可以高于外场、且存在不均匀、或反向流动的体电流。
- 4) 导致不可逆的磁化曲线、以及磁滞、剩磁等。

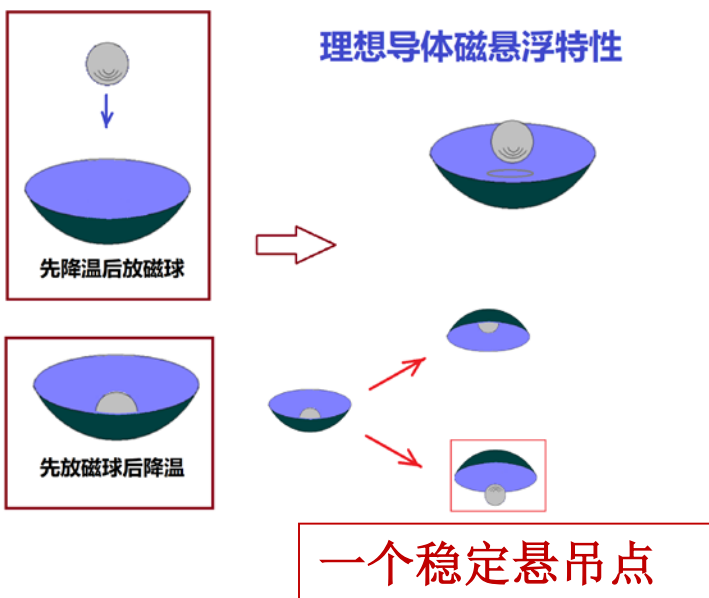
2.3 迈斯纳态的磁悬浮特性



迈斯纳态磁悬浮：

无论先放磁球后降温，还是相反，悬浮状态不变。

只有一个稳定平衡点，因为磁体与超导体之间以斥力为主。偏离平衡点的扰动将导致磁球在平衡点附近做弱阻尼震动。

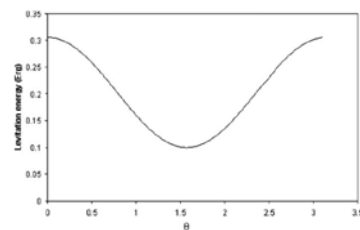
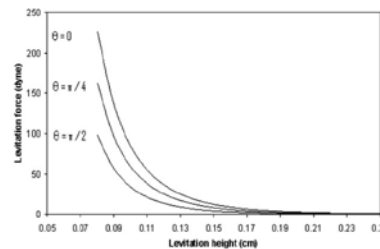
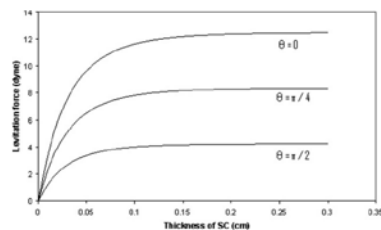
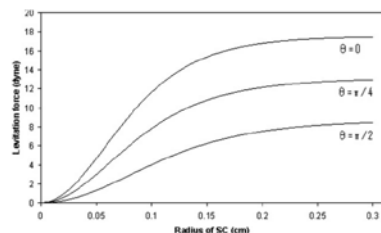
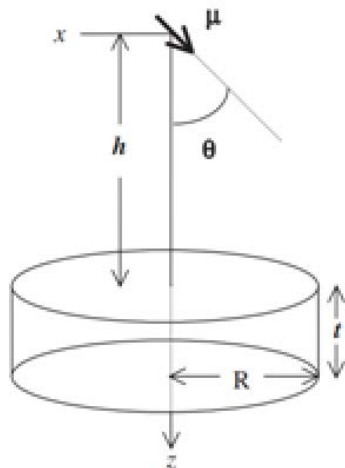


理想导体磁悬浮：

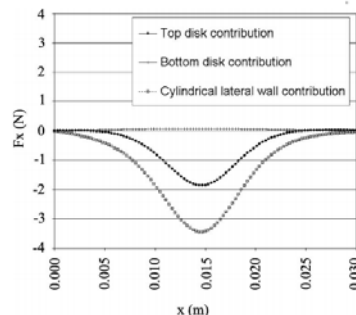
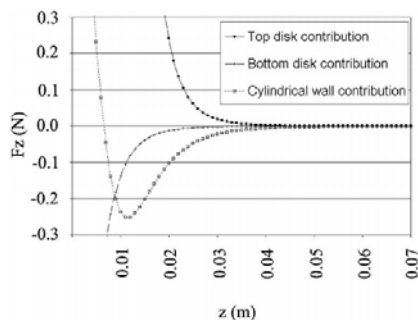
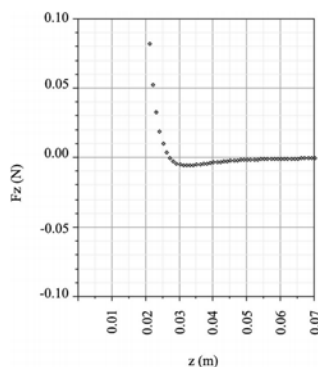
先降温后放磁球，磁浮行为与迈斯纳态磁浮类似。

先放磁球后降温，磁球或将与盘子粘在一起，或可产生一个稳定点悬吊。

2.3 迈斯纳态的磁悬浮特性 (续)



Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 1329–1331

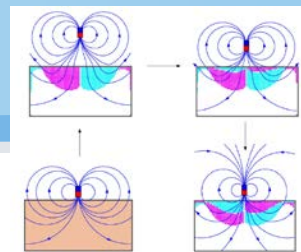


APPLIED PHYSICS LETTERS **91**, 142503 (2007)

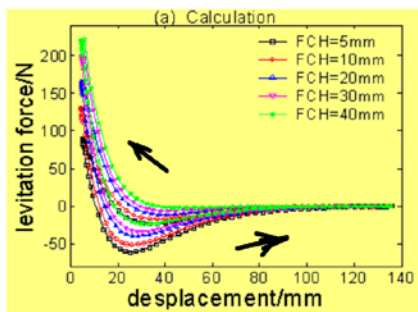
磁偶极子与超导圆柱体的相互作用计算表明。各种参数条件下均显示排斥相互作用。但也有人有一定边界条件也有得出排斥、吸引力共存的结论。

实验仅仅进行了浮力演示、定性研究。

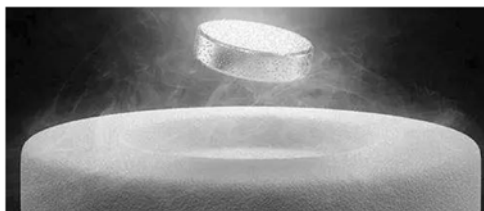
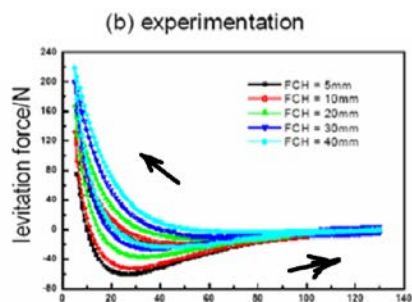
2.4 非理想第二类超导体的磁悬浮特性



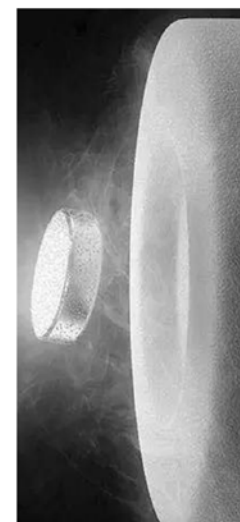
磁浮力呈显著的滞后特性



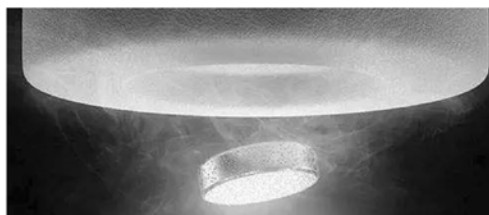
显著的磁浮力回滞和宽阔的吸引力区，导致第二类超导体磁浮具有连续多个稳定点。既可以悬浮、也可以悬吊、侧挂。



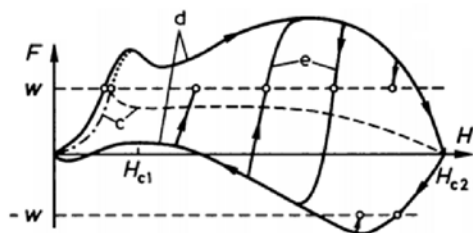
悬浮



侧挂（可以任意角度）

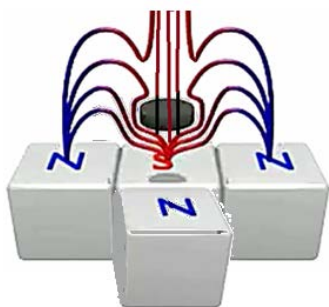


悬吊

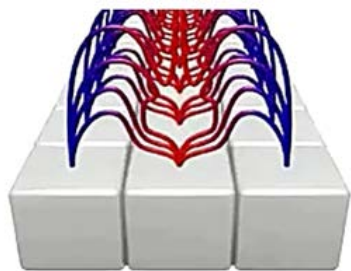
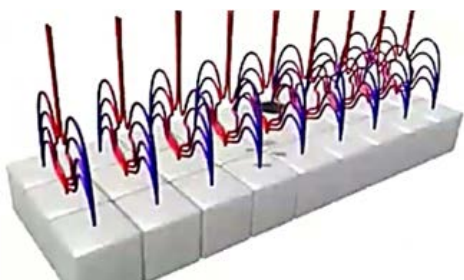


2.4 非理想第二类超导体的磁悬浮特性（续）

强烈的对初始磁化状态的“记忆”力

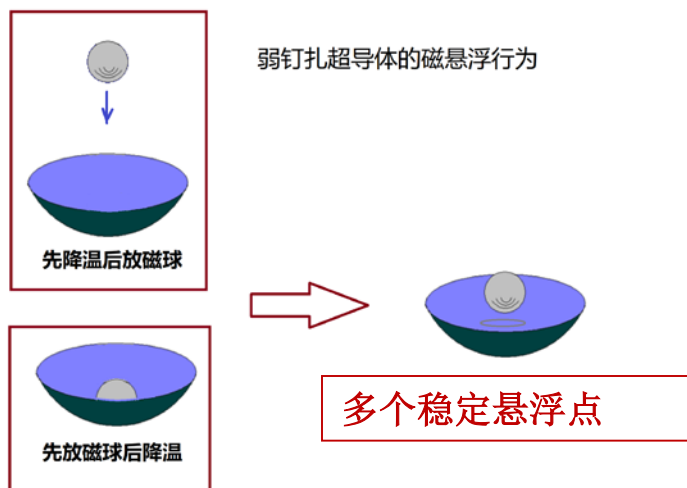


强烈的磁通钉扎导致超导体对初始磁化状态（外磁场位形）形成“记忆”，任何形式引起磁通量变化的扰动（如改变悬浮高度、姿态）将导致强烈的“反弹”，因此在高度非均匀外场中呈现出超强稳定性的悬浮。对悬浮位置、姿态保持牢固的“记忆”。



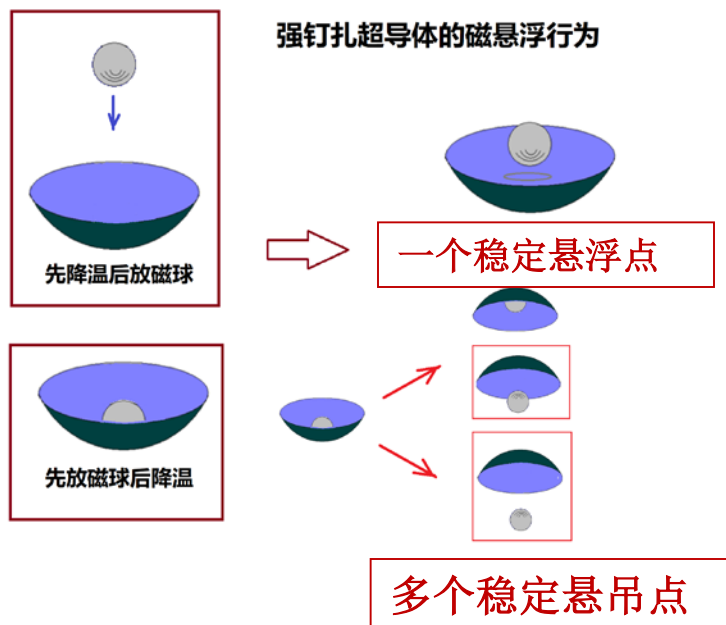
磁场位形“记忆”效应将使得超导体在等磁面上“无阻”运动，包括沿这具有相同磁场分布的方向运动或沿磁场分布对称轴的转动。即沿着等磁面运动不受阻力。

2.4 非理想第二类超导体的磁悬浮特性（续）



弱钉扎时磁悬浮行为

与迈斯纳态比较接近，但可以有连续多个稳定悬浮点



强钉扎时磁悬浮行为

与理想导体的磁悬浮行为相似，但可以有连续多个稳定悬吊点。

2.5 非理想第二类超导体的磁悬浮稳定性

由第二类超导体与永磁体构成的磁悬浮系统：

- 悬浮力和稳定性取决于在悬浮磁场中初始的磁化状态；
- 可以通过选取初始场冷高度、工作高度、悬浮姿态，在较大幅度内连续调整磁浮系统的最大磁浮力、导向力（稳定性的量度）；
- 稳定的静悬浮，并运动中保持高度稳定的悬浮状态
- 除维持低温状态外，不需要额外的能量供给；
- 自动的悬浮和导向（稳定性），无需主动控制

主要内容

- 一、磁悬浮列车的分类与特点
- 二、超导磁悬浮的物理问题
- 三、超导磁悬浮列车的研发历史
- 四、超导磁悬浮列车的发展现状
- 五、几点展望

3.1 超导磁悬浮技术的研发历程（欧美）

- 1945年，Arkadiiev首次悬浮15mm长的条型磁铁于铅超导盘上；
- 1953年Simon 等人成功研制出超导磁悬浮陀螺仪；
- 1963年，Powell提出了由两条超导轨道构成的悬浮车专利；
- 1966年，Powell和Danby提出将超导磁体置于车、次级感应线圈置于轨道的磁浮列车专利；（日本超导磁浮车雏形版）。
- 1969年，Guderjahn 等人建造了磁浮火箭发射装置（5km/s）；
- 1973年，Borcherts 等人提出线性同步直线驱动；
- 1972-75年期间，Canada建立了直径7.6米、速度达100km/h的旋转试验台，对同步驱动和超导磁浮进行研究；
- 1971-76年间，英国建立了长600 m的线路，将3米长、150公斤重的试验车用绳索牵引，达到了35 m/s（126 km/h）的速度；
- 1974-79年间，德国由西门子等建立了280米的线路，就导向和涡流牵拽问题进行了研究。磁浮车速度达100 km/h。

3.2 日本EDS超导磁浮列车的发展情况

- 1962年，日本开始超导磁浮交通的研究工作；
- 1972年，日本研制了第一辆电动磁浮原理车ML100（购买了美国专利）；
- 1977年，日本建成7km长超导磁浮列车宫崎试验线；
- 1979年，ML500型宫崎试验线不载人运行时速达到517km/h；
- 1980年，日本研制了MLU001型磁浮列车；
- 1991年，日本开始建设18.4km长超导磁浮列车山梨试验线；
- 1997年，MLX01型磁浮列车山梨试验线不载人速度达到550km/h；
- 1999年，MLX01型磁浮列车山梨试验线载人运行时速达到552km/h的世界纪录；了错车相对时速1003km/h的世界最高纪录；
- 2003年，MLX01型磁浮列车创造581km/h新纪录；
- 2015年，L0型系列磁浮车创造了603km/h的新纪录。

3.3 高温超导磁浮车速度进展一览

- 1990 美日学者率先制备出YBCO大块准单晶，提出非理想第二类超导体独特的磁浮性质，及其在磁浮车、轴承、飞轮方面的应用；
- 1996，中德学者合作，在3.5m直径环形轨道，获得6.5km/h速度；
- 2000，西南交大，在15.5m直线轨道，获得 1m/s^2 加速度；
- 2004，德国 IFW，在80米跑道型轨道上，获得20km/h速度；
- 2006，日本学者，在12米直径环形轨道上，获得42km/h速度；
- 2011，西南交大，在3m直径环形真空管道轨道上，获得24km/h速度；
- 2013，巴西，在200米直线轨道，获得7km/h速度；
- 2014，西南交大，6.5m直径跑道型真空管道轨道，50km/h
- 2016/1，西南交大，6.5m环形轨道真空管道轨道，侧挂磁浮，获得 102km/h；
- 2016/10，西南交大，6.5m环形轨道真空管道轨道，侧挂磁浮，获得 150km/h；
- 2016/12，西南交大，6.5m环形轨道真空管道轨道，侧挂磁浮，获得 160km/h；

主要内容

- 一、磁悬浮列车的分类与特点
- 二、超导磁悬浮的物理基础
- 三、超导磁悬浮列车的研发历史
- 四、超导磁悬浮列车的发展现状
- 五、几点展望

4.1 高温超导磁悬浮列车发展现状

我国高温超导磁悬浮技术的研究与国际同步，西南交通大学、中科院电工所等是国际上较早开展高温超导磁浮列车技术研发的单位。

迄今为止，德国、俄罗斯、巴西、日本均研制出类似的高温超导磁悬浮车样机。



西南交大世纪号

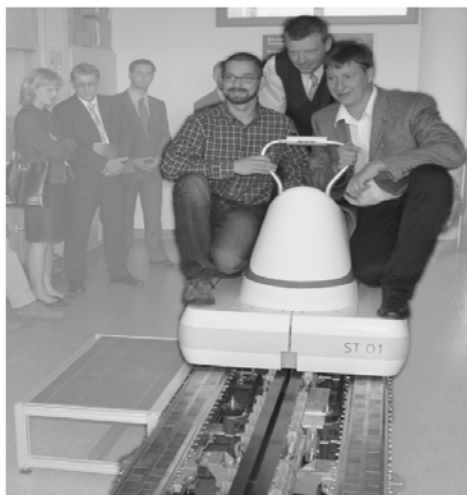


Fig. 1. The SupraTrans train at its first presentation at the IFW Dresden in September 2004.

德国SupraTrain



巴西Maglev-Cobra



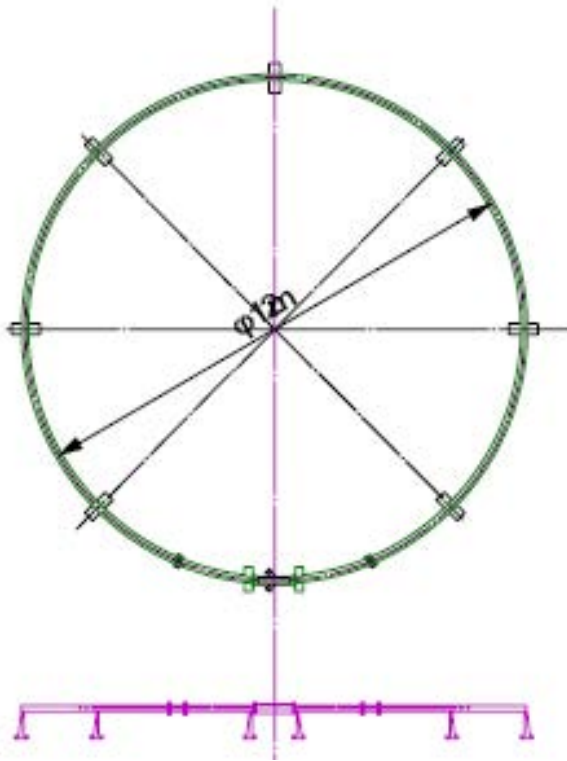
俄罗斯RussianMaglev

高温超导磁悬浮列车研究在巴西



目前，巴西建造了200米的高温超导磁悬浮轨道，完成了模块型的Maglev-Cobra车的设计，并测试了车的一个模块。该车由4个模块组成，承载30人。每个模块1.5米长，含6个磁悬浮单元。2013年，研究人员对该车在低速行驶下就其磁浮性能进行了测试。速度达7km/h.

高温超导磁悬浮列车研究在日本



2006年，日本建成了直径12米、长度38米的环形高温超导-永磁磁悬浮系统，运动速度达到42km/h.

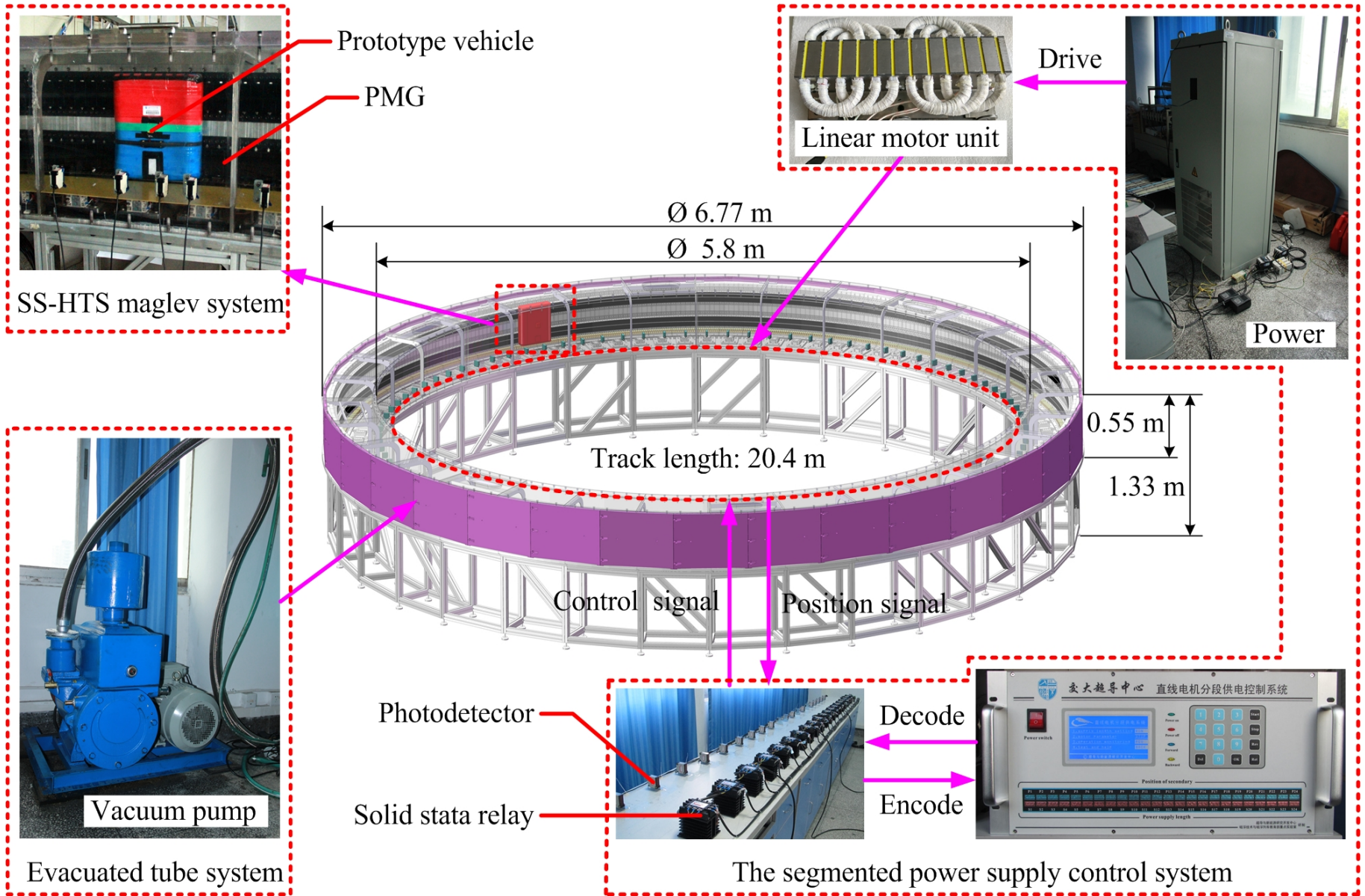
高温超导磁悬浮列车研究在中国

2000年，首辆载人高温超导磁悬浮试验车在西南交通大学诞生，向世人展示了高温超导块材巨大的应用潜力。该车在液氮温度77K工作，该实验车自重230kg，总悬浮重量为530kg，悬浮高度为23mm，液氮低温容器可连续工作6小时直线电机驱动。2016年，西南交大研制成功真空管道高温超导-永磁磁悬浮试验系统，模型车的设计速度为300km/h，目前已达到160km/h的运动速度。

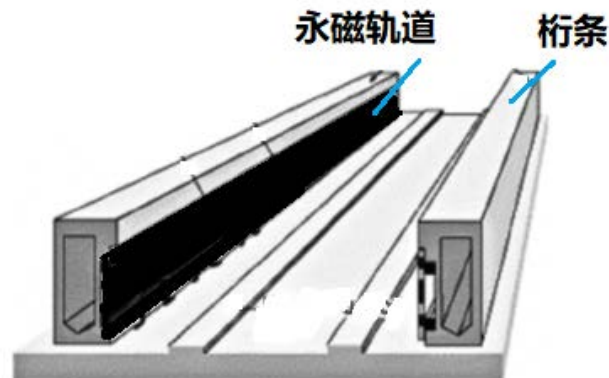
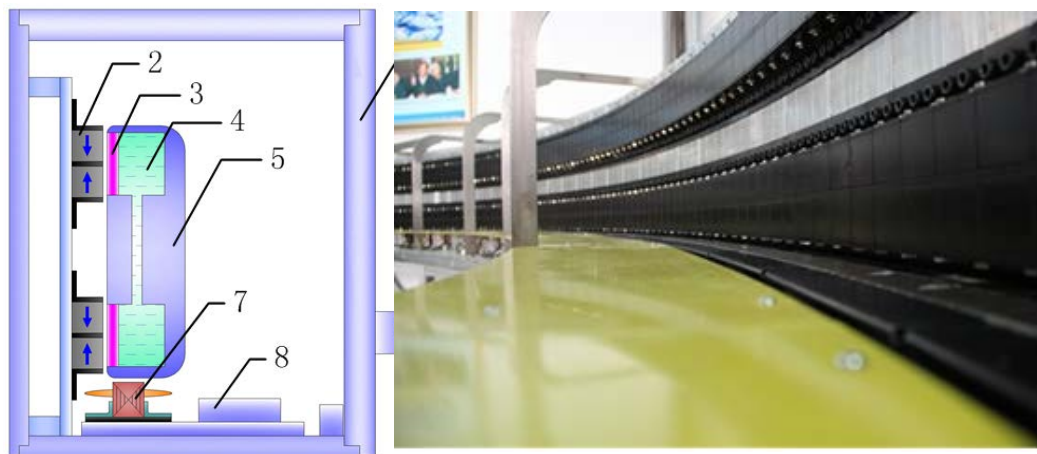


真空管道高温超导磁浮试验系统

4.2 侧挂悬浮型高温超导磁浮车



建立侧挂悬浮环线的意义：



- (1) 在实验室空间实现高速运行试验，大大节约资金和场地。
- (2) 以前需要建立几百米的线路才能实现几十公里时速的运行。
- (3) 便于实验观测；
- (4) 便于研究转弯性能；
- (5) 经阔展到双侧悬浮，就成为壁挂式磁浮列车。

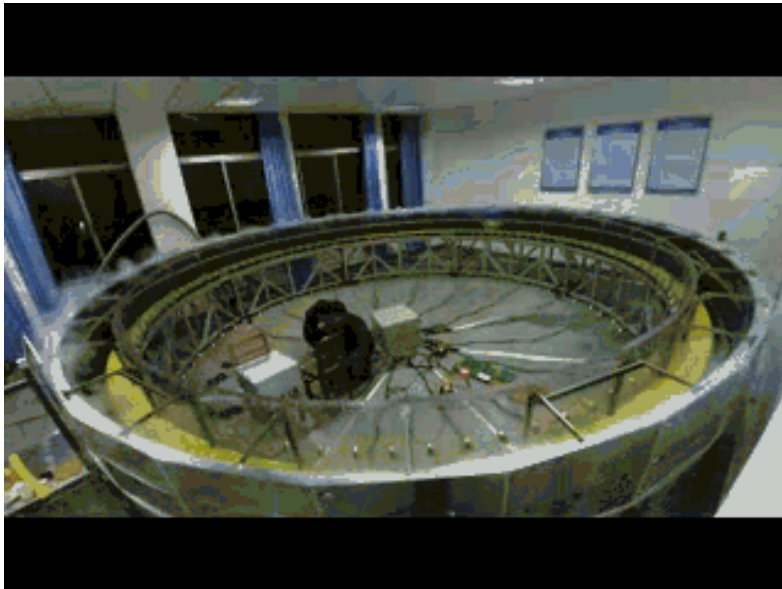
实验演示录像



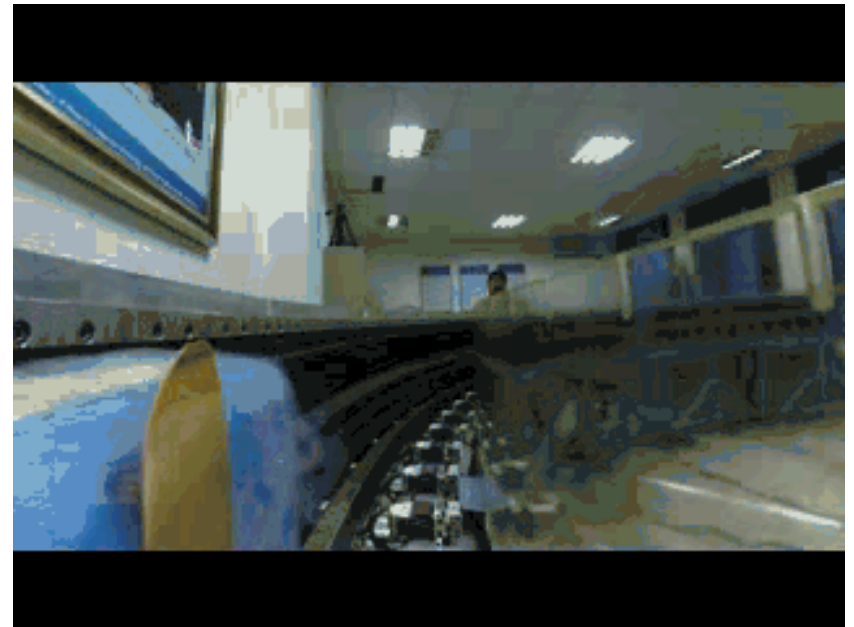
Speed at 20km/h



Speed at 50km/h



Speed at 72km/h



video on-board

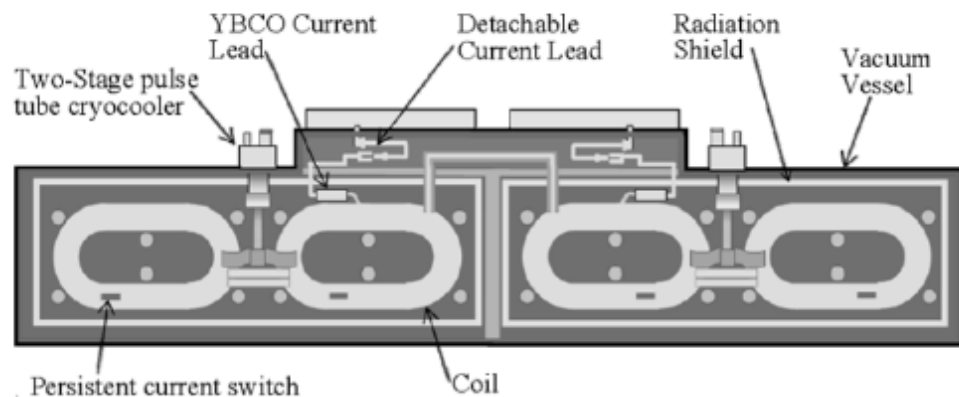
4.3 EDS超导磁浮车的发展现状

高温超导磁体磁浮车开发：

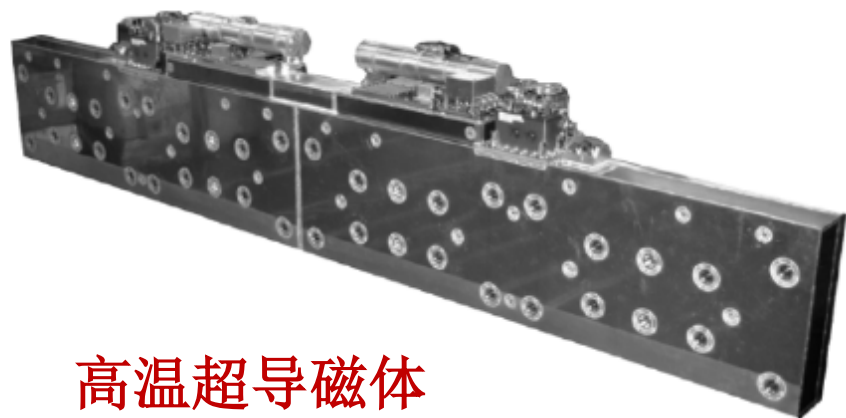
以低温超导磁体为基础，
以高温超导磁体为目标，降低运行成本。



山梨线上的低温超导磁浮车，其超导磁体用高温超导磁体取代。

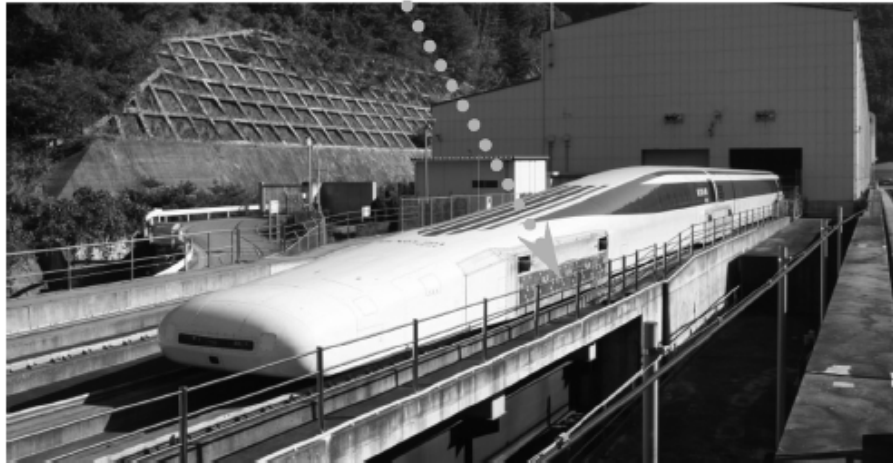
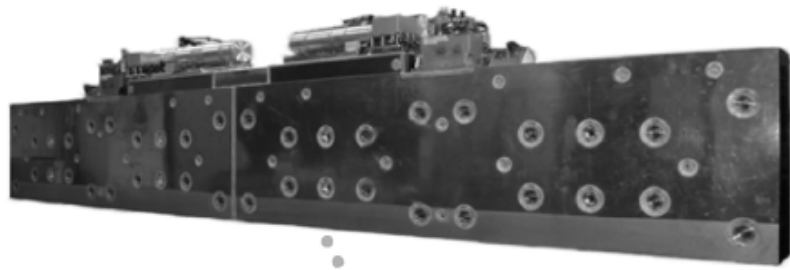


高温超导磁体内部结构



高温超导磁体

高温超导EDS型磁浮列车

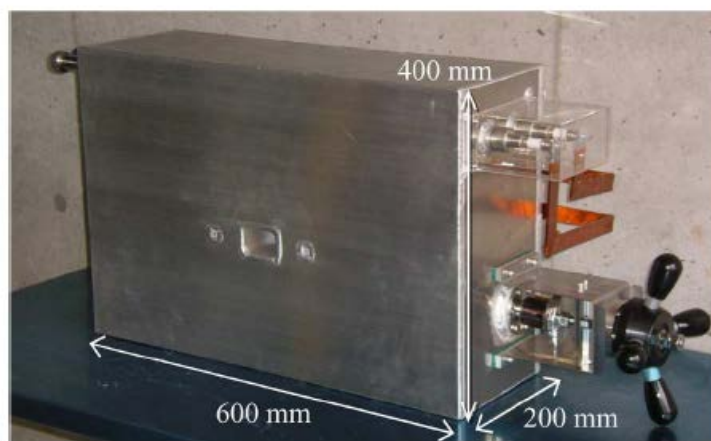
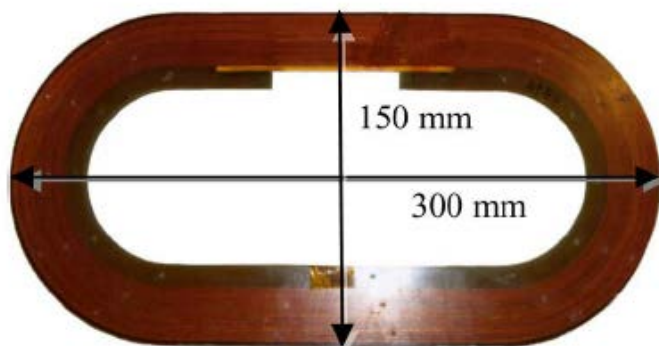


至从1999年，JR铁道公司开始了高温超导线圈磁体技术用于山梨试验线上的磁悬浮列车的研究。高温超导线圈磁体由4个Bi-2223/Ag带材高温超导线圈组成，通过两极GM脉冲制冷机传导冷却至20 K。高温超导线圈磁体工作于永久电流模式，工作时每天的损耗为0.4-0.7%/day，远小于运行过程当中所允许的最大损耗水平。

用HTS磁体推进的EDS磁浮列车

2005年12月2日创造了553.9 km/h的速度。在运行测试后，观察发现线圈电流的衰减率没有发生明显变化，这表明线圈的振动和变形并没有导致它在磁浮列车应用当中性能的降低。

日本铁道研究院正在开发利用第二代 (2G) 高温超导线材制备的Y系高温超导磁体用于EDS型超导磁浮列车上。其目标工作温度为50K。



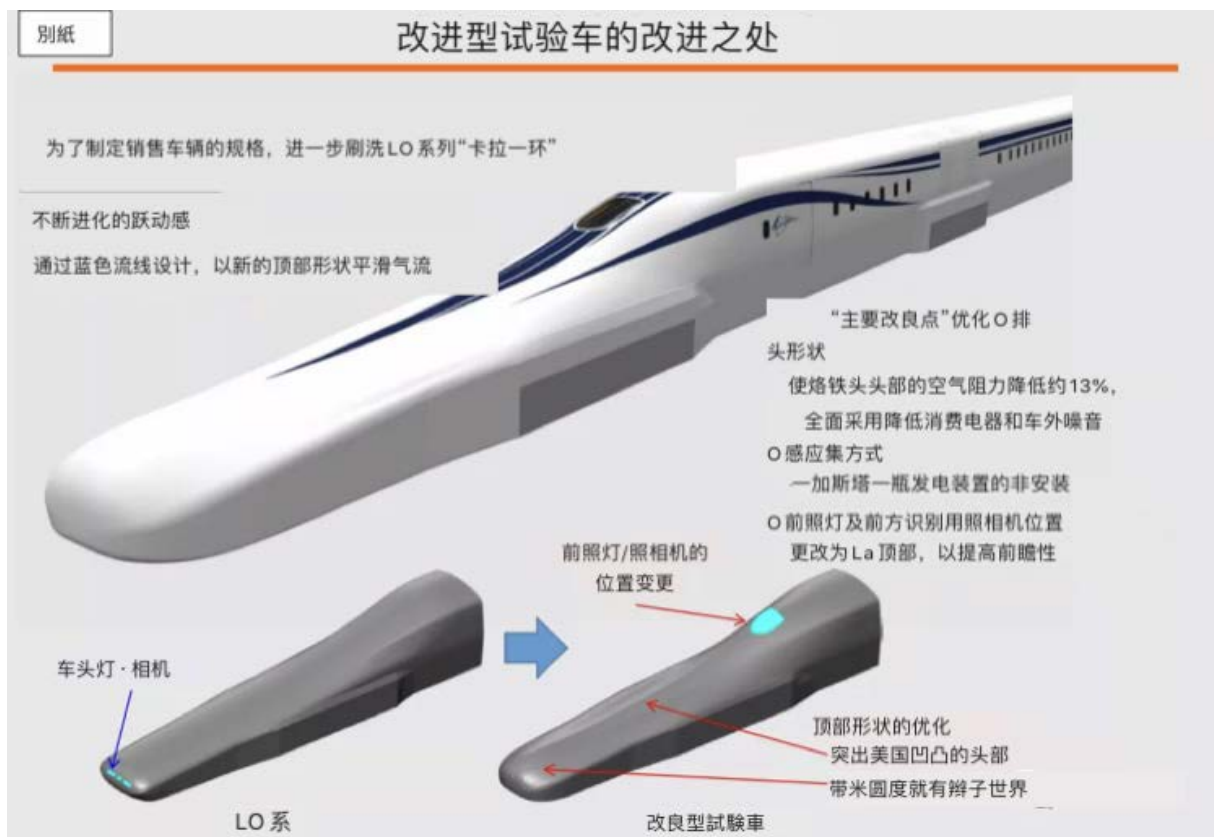
| | |
|-----------------------------|---|
| Tape type | RE-Ba-Cu-O(MOCVD) / Hastelloy |
| Width / Thickness | 4.1 mm / 0.1 mm |
| Min. I_c (@77 K, s.f.) | 112 A |
| Coil shape (pancakes) | Race-track (4 single pancekes) |
| Outer / Inner diameter | 150 mm / 100 mm |
| Straight length | 150 mm |
| Turns | 562 turns |
| Tape length | 400 m |
| Inductance | 97 mH |
| Rating current | 86 A |
| Magnet structure | Coil + Coil case + Radiation shield + Multi layer insulation + Outer vessel |
| Cooling method | Flow of gas He in cooling piping |
| Adsorbent | Activated carbon |
| Initial cooling temperature | < 20 K |
| Magnetization method | Closed current mode by mechanical switch |
| Mechanical switch | Material: Cu + In plating Area: 1100 mm ² Resistance: < 1 $\mu\Omega$ @ 77 K |
| Dimensions | W: 600 mm, T: 400 mm, D: 200 mm |
| Weight | 52 kg |

2011年，用于EDS磁浮列车的2G-HTS高温超导模型磁体研制成功，在50K温度下产生了1T场强的磁场。目前正在开发能在50K下产生5T的实用EDS磁浮列车超导磁体。

4.3 EDS超导磁浮车的发展现状（续）

进一步优化车辆设计：

优化机头设计，气动阻力降低13%；
改变前灯位置，提高安全性。
为商业营运做准备。



主要内容

- 一、磁悬浮列车的分类与特点
- 二、超导磁悬浮的物理基础
- 三、超导磁悬浮列车的研发历史
- 四、超导磁悬浮列车的发展现状
- 五、几点展望

5.1 磁浮交通正在被广泛接受

1、中低速磁浮：

名古屋运行15年

长沙线

北京1号线

广东清远

其他城市：武汉、成都…

2、高速磁浮

上海线运行13年（430km/h）

名古屋-东京（505km/h），286公里，2027年营运

名古屋-大阪，438公里，2045年营运

5.2 不同磁浮技术特点比较

| 日本超导磁浮列车系统 | 德国TR磁浮列车系统 |
|----------------------------------|---------------------|
| 侧壁电动感应悬浮，悬浮气隙100mm以上 | 电磁吸力悬浮，悬浮气隙8mm~10mm |
| 对线路和地形要求低 | 对线路的地质条件要求高 |
| 悬浮和导向自稳定，不需要控制 | 悬浮和导向需要闭环控制 |
| 具有更高的安全性（突然断电） | 存在突然断电时的悬浮崩溃 |
| 超导电磁铁无安全冗余 | 常导电磁铁存在安全冗余 |
| 再生制动，空气动力制动（高速紧急制动），盘形制动（低速紧急制动） | 再生制动，涡流制动（紧急制动） |
| 车对线路荷载相对集中 | 车对线路荷载连续分布 |
| 最高试验速度603km/h | 最高试验速度500km/h |
| 最高应用速度505km/h | 最高应用速度430km/h |
| 车辆轻 | 车辆重 |

日本超导磁浮列车系统

磁浮飞机比较

侧壁电动感应悬浮，悬浮气隙100mm以上

底部电动感应悬浮，气隙>10mm

采用复杂的超导磁体技术，技术上升空间大

采用永磁体和感应板，技术上升依赖材料

悬浮和导向自稳定，不需要控制

漂浮悬浮，需要轨道提供导向

安全性：依赖于磁体，与电力无关

安全性：与磁体和电力无关

线路复杂，车辆轻

线路极其简单，车辆更轻

再生制动，空气动力制动（高速紧急制动），
盘形制动（低速紧急制动）

再生制动，涡流制动（紧急制动）

车对线路荷载相对集中

车对线路荷载连续分布

最高试验速度603km/h，适合高速运载

最高试验速度~100km/h，适合中低速运载

车载系统复杂

车载系统简单

整体技术难度大

整体技术难度小

日本超导磁浮列车系统

高温超导永磁磁浮

侧壁电动感应悬浮，悬浮气隙100mm以上

底部超导量子悬浮，气隙~10mm

采用复杂的超导磁体技术，技术上升空间大

采用超导-永磁体，技术上升依赖材料

悬浮和导向自稳定，无静态悬浮

悬浮和导向自稳定，具有静态悬浮

安全性：依赖于磁体，与电力无关

安全性：与磁体和电力无关

线路复杂，车辆轻，无磁污染

线路极其简单，车辆轻，有磁污染

超导强磁场，制冷技术复杂

磁场较低，可采用多种制冷技术

车对线路荷载相对集中

车对线路荷载分散分布

最高试验速度603km/h，适合高速运载

最高试验速度~150km/h，适合中低速运载

车载系统复杂，速度越高承载力越大

车载系统简单，承载力随速度衰减

整体技术难度大，目前已趋成熟

整体技术难度小，仍然在开发之中

5.3 中国的磁浮规划

1) 中国的磁浮专项：

400km/h的常导高速磁浮

600km/h的常导-永磁混合超高速悬浮

进展非常迅速！未来与超导磁体技术结合，形成超导-常导磁悬浮



2) 超导电磁感应磁浮列车技术

从节能的角度考虑，超导磁浮比常导磁浮更具优势。

使用高温超导磁体是该技术最终的目标。

由于没有安全冗余，超导磁体技术是关键。

5.4 高温超导磁浮车

- 在磁浮原理和技术特征上，具有其他磁浮车不可比拟的天然优势。因此未来的潜力巨大！
- 结构简单、“自动”悬浮和导向性，提供了更高安全可靠。复合人类的期待！
- 自重轻，静态动态悬浮均不需要供能，耗能更低！
- 经与真空管道技术结合，达到完美的节能、环保、高速、安全。是未来超高速磁浮列车的首选！

谢谢光临和指教！