



西南交通大学  
Southwest Jiaotong University



文化超導

# 高温超导磁悬浮交通 研究进展

邓自刚



西南交通大学 牵引动力国家重点实验室

2016 年 4 月

# 目录

CONTENTS

1

磁悬浮定位

2

典型磁悬浮交通

3

高温超导磁悬浮交通特点

4

超导磁悬浮车研究进展

5

前景与展望



# 1

## 磁悬浮定位

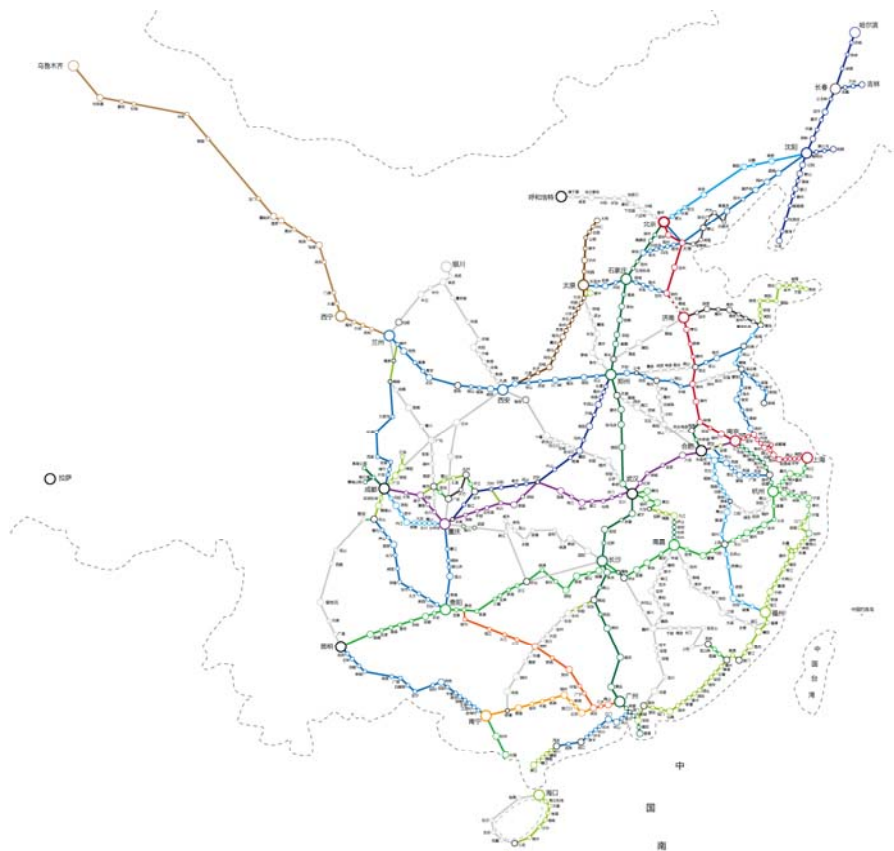
### 中国高铁

运营里程最长——**1.9万公里（2015年底）**  
占世界高铁历程的**60%以上**

世界运营铁路最高试验时速——**486.1公里**

世界标准最高的高速铁路——**京沪高铁**

世界第一条高寒高铁——**哈大高铁**



2008年至今，高铁从无到有，从弱到强，成绩举世瞩目



## 地面轨道交通最高速度

2015年4月21日，日本东海旅客铁道株式会社（JR东海公司）利用“L0系”超导磁悬浮列车进行了高速运行试验，达到了载人行驶每小时**603**公里。

磁悬浮中央新干线最高速度预计为每小时505公里，东京品川站至名古屋站之间的路段预定在2027年开始运营，并于2045年延长到大阪，实现全线贯通。

竞争压力



## カラーリング

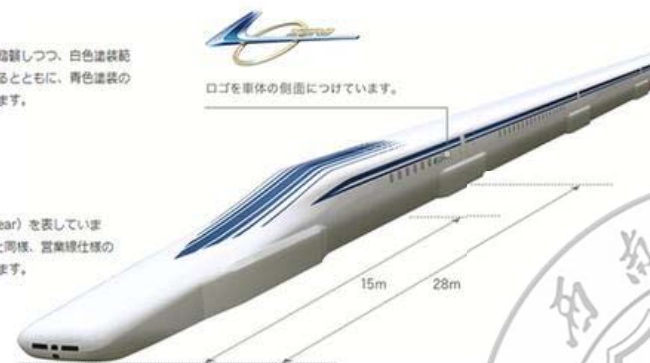
東海道新幹線のイメージを踏襲しつつ、白色塗装範囲を増やし軽快感を演出するとともに、青色塗装の配列で運動感を演出しています。

## 車両形式

L（エル）は、リニア（Linear）を表しています。0（ゼロ）は、新幹線と同様、営業線仕様の第1世代の車両を表しています。

## 先頭形状

- ・実験線（先行区間）に投入した先頭車をベースに、より滑らかな形状としました。
- ・先頭長はこれまでの試験結果を踏まえ、車内空間の確保と空力特性を考慮して15mとしています。



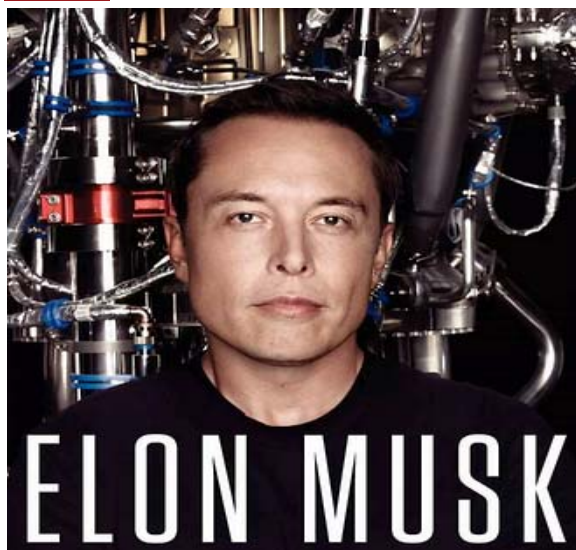
## 1

## 磁悬浮定位

## 真空管道新模式



艾伦·马斯克：超级高铁  
Hyperloop方案。



美国超级高铁研发公司 Hyperloop Transportation 近日宣布与斯洛伐克政府签订协议，这使得斯洛伐克有望成为首个使用这种未来交通工具的国家，预计时速可达760英里（约合1220公里）。





从日本低温超导磁悬浮和美国Hyperloop可以看出，当前轨道交通速度已提升到500km/h以上，并从研究走向工程化，预示着轨道交通新一轮竞争即将开始。

逆水行舟，不进则退  
发展迫在眉睫

磁悬浮定位：

**下一代高铁技术储备**



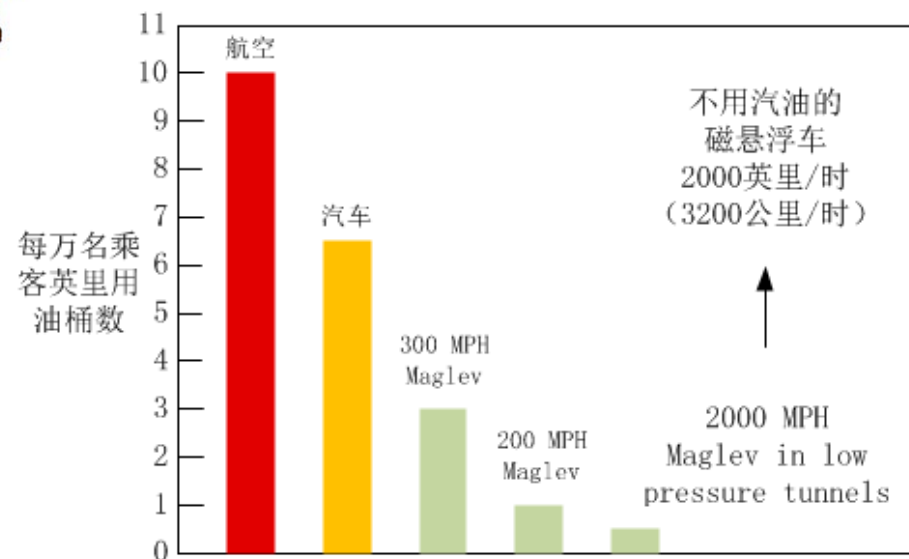
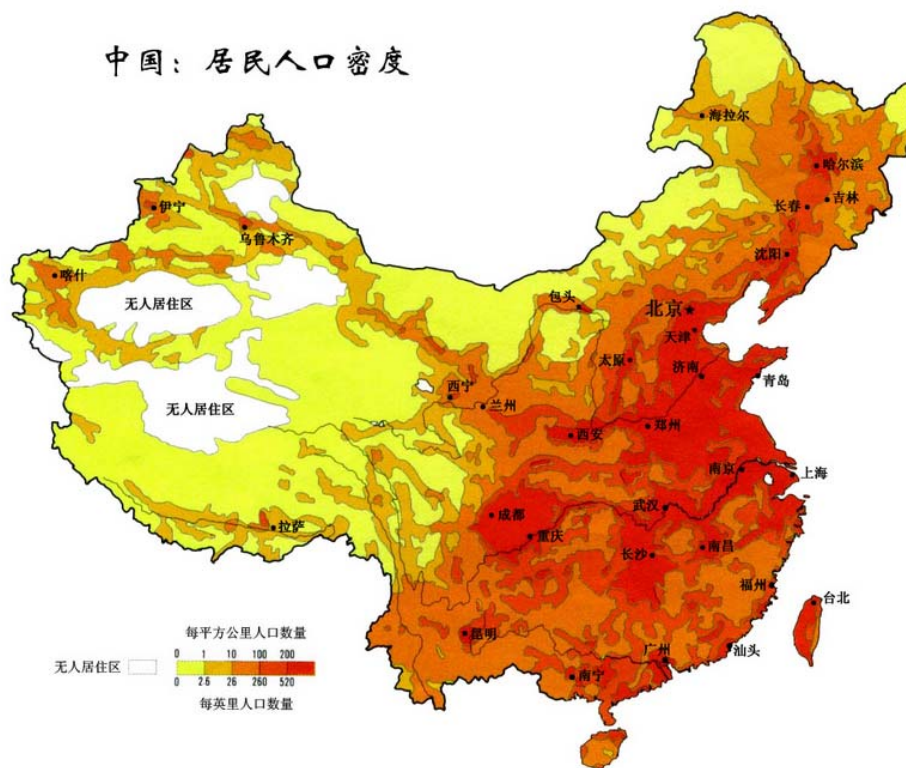
# 1

## 磁悬浮定位

我国国情：  
幅员辽阔、人口稠密

“中国更需要  
高速磁悬浮列车”

长距离、大城市间，绿色、环保、节能型交通



# 目录

CONTENTS

1

磁悬浮定位

2

典型磁悬浮交通

3

高温超导磁悬浮交通特点

4

超导磁悬浮车研究进展

5

前景与展望



2

## 典型磁悬浮交通

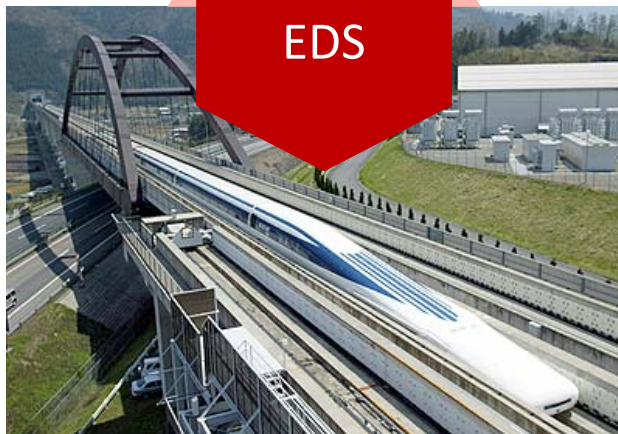
EMS



EMS :

**电磁制**，属 **常导型**，  
靠电磁体吸力实现悬浮，  
又称为 **吸力型**。

EDS



EDS :

**电动制**，当磁体在导体  
(或线圈)上方水平移动时，磁  
体和导体之间会产生斥力 实  
现悬浮，又称 **斥力型**。

Flux-  
pinning



Flux-pinning:

**磁通钉扎效应**磁悬  
浮，属超导磁悬浮，钉扎  
力提供悬浮与导向力，为  
**自稳定悬浮**。



## 2

## 典型磁悬浮交通

| 技术参数     | EMS     | EDS                    | Flux-pinning         |
|----------|---------|------------------------|----------------------|
| 开始时间     | 1934专利  | 1966专利                 | 90年代初开始<br>2001年中国专利 |
| 悬浮高度     | 8 mm    | 100 mm                 | <b>10-30 mm</b>      |
| 轨道精度     | 高       | 较高                     | 低                    |
| 悬浮控制     | 复杂      | 较复杂                    | <b>无</b>             |
| 悬浮耗量     | 静止时也耗电能 | 液氮，很贵                  | 液氮，很便宜               |
| 悬浮方式     | 可静止悬浮   | 高速时才悬浮                 | <b>可静止悬浮</b>         |
| 速度(km/h) | 450     | 603                    | >1000 (实验)           |
| 技术领先国家   | 德国      | 日本                     | 中国（西南交大）             |
| 商业化应用    | 上海浦东机场线 | 东京-大阪磁浮新干线，<br>2027年通车 | <b>尚未开展</b>          |

**Flux-pinning:** 利用高温超导体与永磁轨道的电磁作用及其自身钉扎作用实现悬浮和导向，且车轨结构和控制系统简单。

# 目录

CONTENTS

1

磁悬浮定位

2

典型磁悬浮交通

3

高温超导磁悬浮交通特点

4

超导磁悬浮车研究进展

5

前景与展望



3

# 高温超导磁悬浮交通特点

## A trapped field of 17.6 T in melt-processed, bulk Gd-Ba-Cu-O reinforced with shrink-fit steel

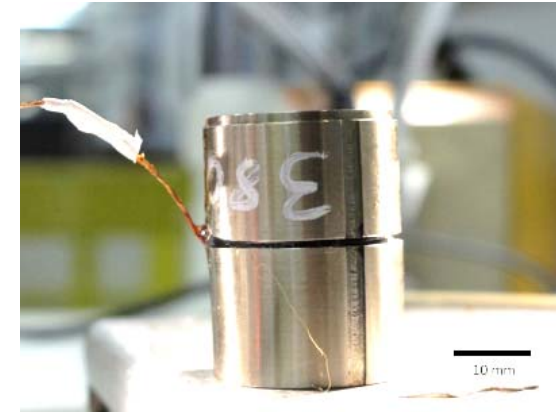
J H Durrell<sup>1</sup>, A R Dennis<sup>1</sup>, J Jaroszynski<sup>2</sup>, M D Ainslie<sup>1</sup>, K G B Palmer<sup>1</sup>, Y-H Shi<sup>1</sup>, A M Campbell<sup>1</sup>, J Hull<sup>3</sup>, M Strasik<sup>3</sup>, E E Hellstrom<sup>2</sup> and D A Cardwell<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Engineering, University of Cambridge, Trumpington Street, Cambridge CB2 1PZ, UK

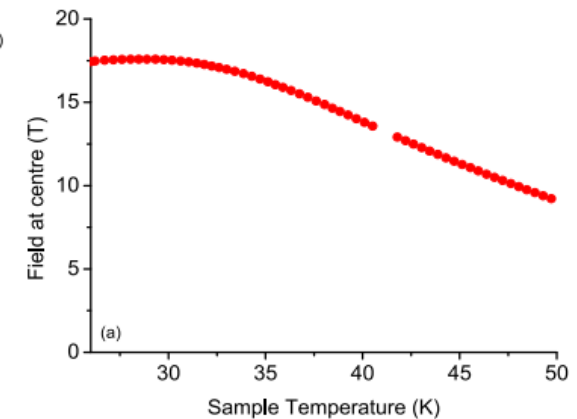
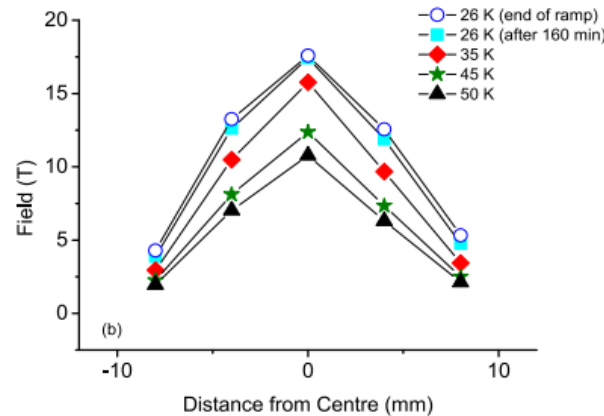
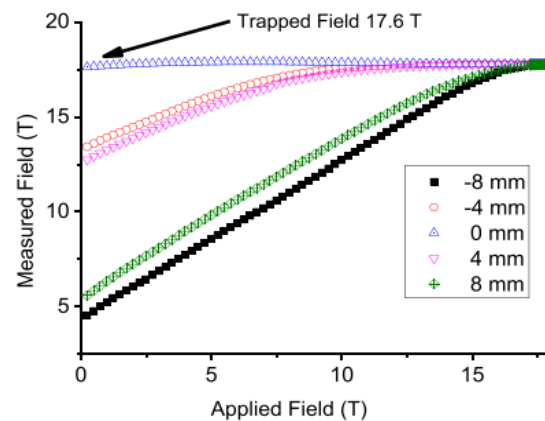
<sup>2</sup> Applied Superconductivity Center, National High Magnetic Field Laboratory, Florida State University,

2031 East Paul Dirac Drive, Tallahassee, FL 32310, USA

<sup>3</sup> Boeing Company, Seattle, WA, USA



Two GdBCO bulk , each Ø 24.15 mm and 15 mm high

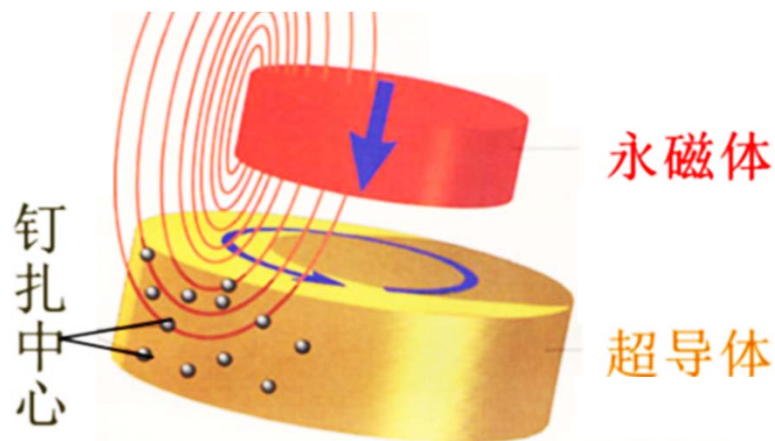
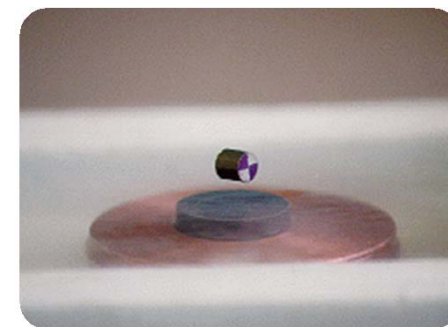


**强磁通  
钉扎特性**

英国剑桥大学在应用外场17.8 T、温度26 K环境下，实验捕获场高达**17.6 T**，刷新块材捕获场纪录



- 无源自稳定悬浮技术
- 悬浮与导向无需提供能量与复杂的控制
- 车轨结构更为简单可靠，可实现静止状态下悬浮
- “高温” 77K（液氮）比低温4.2K（液氦）容易实现得多

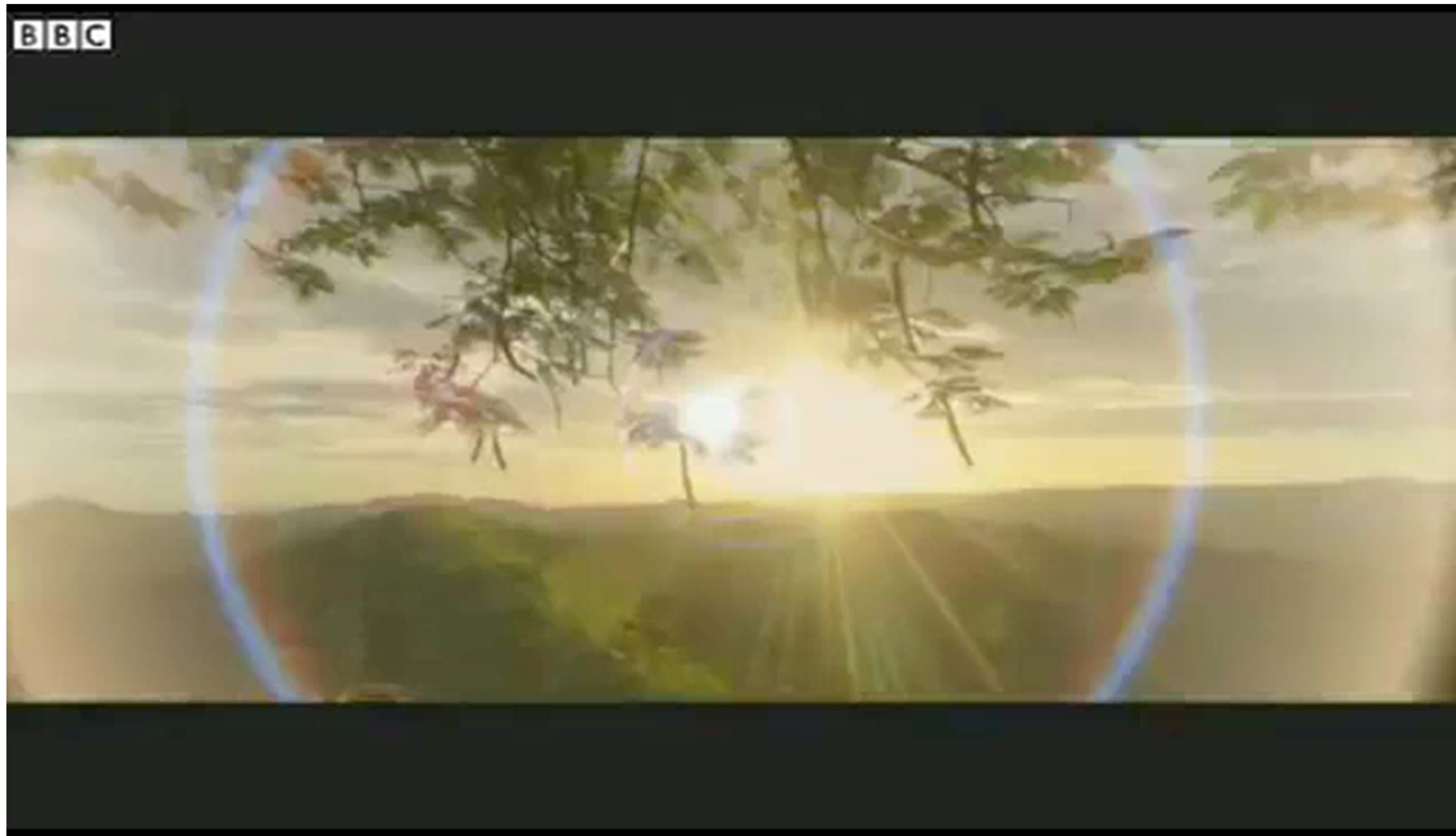


**悬浮：**利用常规永磁体的磁场，在高温超导体中感应 **屏蔽电流** 实现**悬浮**。

**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**导向**。

3

### 高温超导磁悬浮交通特点



# 目录

CONTENTS

1

磁悬浮定位

2

典型磁悬浮交通

3

高温超导磁悬浮交通特点

4

超导磁悬浮车研究进展

5

前景与展望



4

# 超导磁悬浮车研究进展

2000年12月，世界首辆载人  
高温超导磁悬浮车研制成功



1908年，荷兰莱登实验室实现氦气液化  
1911年，昂纳斯发现Hg在4.2 K出现超导现象  
1986年，镧钡铜氧被发现，零界温度35 K  
1987年，YBCO材料被发现，临界温度93 K



此后，各国也展开了相应车辆的  
研究

可行性验证  
(2000年)

载人实验车  
(2000-2004年)

短距离试验线  
(2009-至今)



4

## 超导磁悬浮车研究进展



4

## 超导磁悬浮车研究进展

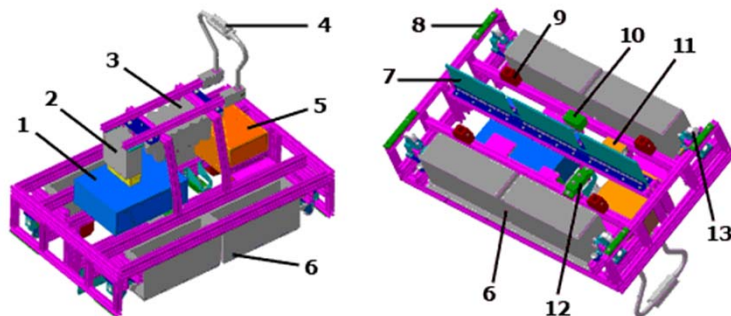


Germany

### "SupraTrans I"

#### Vehicle: Design

The vehicle consists of a self-carrying frame construction. Significant components are the carry and guiding system with four Cryostates, the vehicle part of the drive (traveller), the board energy supply system and the vehicle control.



from above

1. Boost / Buck converter
2. Inverter with brake circuit
3. Energy store
4. Handle with control console
5. On-board computer
6. Cryostates with High Temperature Superconductors

from below

6. Cryostates with High Temperature Superconductors
7. Traveller segment of the linear drive
8. Emergency sliding face
9. Adapter for centring pin of the lifting and fixing mechanism
10. Locating device
11. Insulation guard
12. vehicle-sided contacts for external energy supply
13. Transport caster



4

## 超导磁悬浮车研究进展



Germany

### "SupraTrans II"

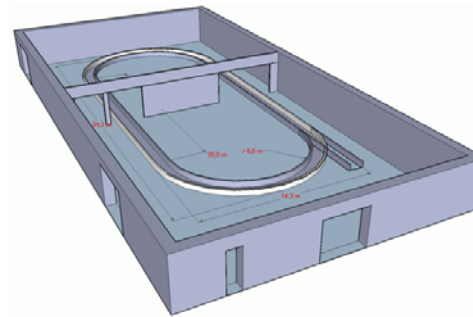
#### Specifications of the Test Drive Facility

##### Drive way

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| Track Gauge                        | 1,000 mm |
| Track length                       | 80 m     |
| Middle curve radius                | 6.5 m    |
| Mean flux density in the air space | 0.6 T    |
| Distance superconductor track      | 13 mm    |
| mechanical air gap below cryostat  | 10 mm    |

##### Vehicle

|                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| Length                       | 2,500 mm           |
| Width                        | 1,200 mm           |
| Total mass (incl. 2 persons) | 600 kg             |
| Superconductor material      | YBCO               |
| Max. power of the drive      | 3.4 kW             |
| Max. thrust force            | 600 N              |
| Max. acceleration            | 1 m/s <sup>2</sup> |
| Max. velocity                | 20 km/h            |





## Germany

### Drive

### 直线电机驱动

Actuation of the vehicle is implemented by means of a three-phase current-asynchronous linear motor in short stator arrangement whose primary part is fastened at the bottom of the vehicle. The accompanying secondary part is arranged as a reaction rail along the driveway.

The drive control occurs from the vehicle. The drive concept allows simultaneous and independent operation of multiple vehicles on the driveway.

### Energy supply

### 无接触电能传输

The energy supply of the vehicle is realised by an inductive transference system which is integrated in the driveway and transfers the energy required for operation continuously towards the vehicle. For this purpose easy mountable line conductors are fixed to the driveway, feeding the energy via the air gap to a collector located in the vehicle.

### Control system

The supervision and if necessary influencing of driving data relevant for security belongs to the duties of the control system, e.g.

- Detection of position and direction of travel (see Sketch)
- Observance of allowed maximum speeds of the vehicle or the track segment
- Reaction to the driving behaviour of other vehicles

### 位置、方向

### 最大速度、运行行为

For the vehicle control of SupraTrans II between two operation modes can be chosen:

- Automatic operation: In this mode enables an operating of the vehicle without driver.
- Manual driving mode: Control of the vehicle by a vehicle driver within the scope of the track parameters and track segments released by the control system

### 自动模式与手动模式切换



4

## 超导磁悬浮车研究进展



Russia

### МОДЕЛЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА С МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ ВТСП ЭЛЕМЕНТОВ

Р.И.Ильясов, Л.К.Ковалев, С.М.-А.Конеев, В.Н.Полтавец



2004年俄罗斯成功研制载  
人高温超导磁悬浮车

额定载客：2人  
系统无驱动装置





Brazil

“Maglev-Cobra”

## A Full Scale Superconducting Magnetic Levitation (MagLev) Vehicle Operational Line

G.G. Sotelo, R.A.H. de Oliveira, F.S. Costa, D.H.N. Dias, R. de Andrade, Jr., R.M. Stephan



The daily operation of this system in a 200 m test line will start in September 2014, by the time of the **22nd International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives (Maglev'2014)**.

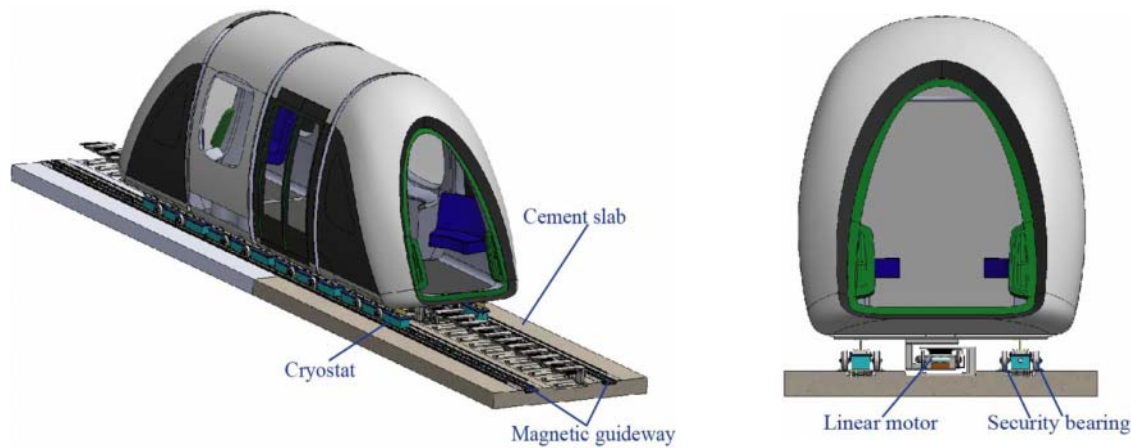


4

# 超导磁悬浮车研究进展



Brazil



The prototype, comprising **four 1.5 m long wagons**, will travel **a short test line of 200 meters**, connecting two buildings inside the campus of the Federal University of Rio de Janeiro. **Designed to transport up to 24 passengers.**

车体分为4节，每节车厢1.5米，总长6米；每节车厢额定载客6人，总人数24人；试验线全长200米，连接两座教学楼

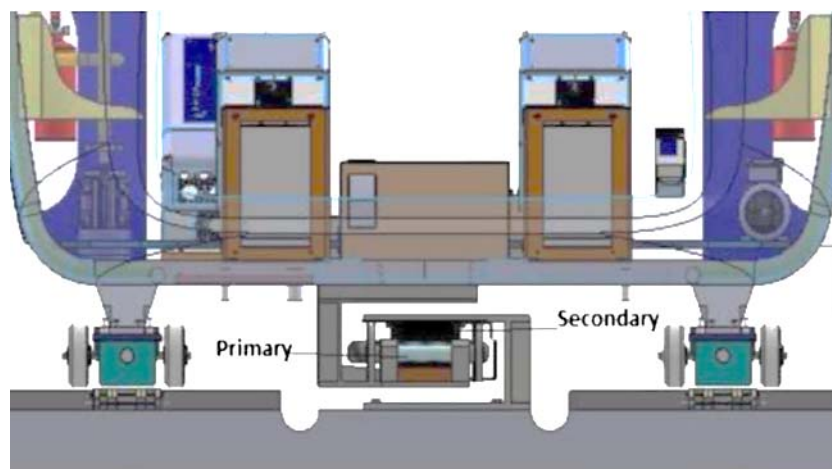


4

# 超导磁悬浮车研究进展

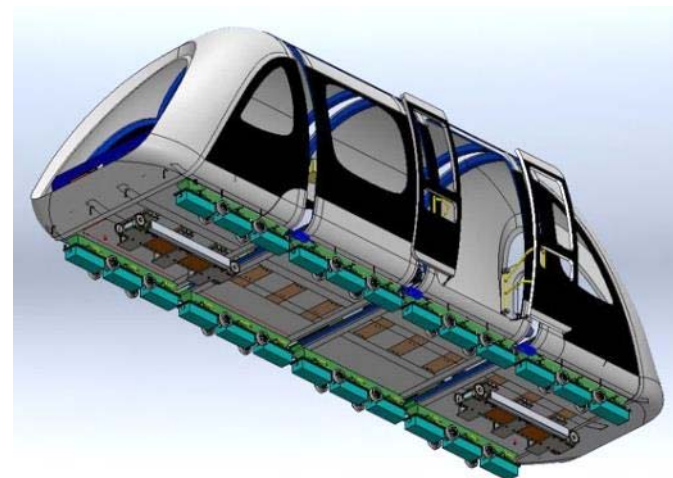


Brazil



Linear induction motor

| Parameters                    | Amplitude           | Unit           |
|-------------------------------|---------------------|----------------|
| Longitudinal Force Fx         | 900                 | N              |
| Frequency                     | 25                  | Hz             |
| Voltage                       | 420                 | V-Y connection |
| Current                       | 53                  | A              |
| Number of poles               | 6                   | Poles          |
| Material                      | Copper              | -              |
| Polar Pitch, $\tau$           | 1560                | mm             |
| Air gap                       | 10                  | mm             |
| Speed                         | 7.8                 | m/s            |
| Magnetic Flux                 | Longitudinal        | -              |
| Primary                       | 1270                | mm             |
| Secondary                     | 1510 (Each section) | mm             |
| <sup>1</sup> Protection Level | IP 00               |                |



驱动结构与传统形式不同，为“互”字形，可将直线电机法相力转化为额外悬浮力



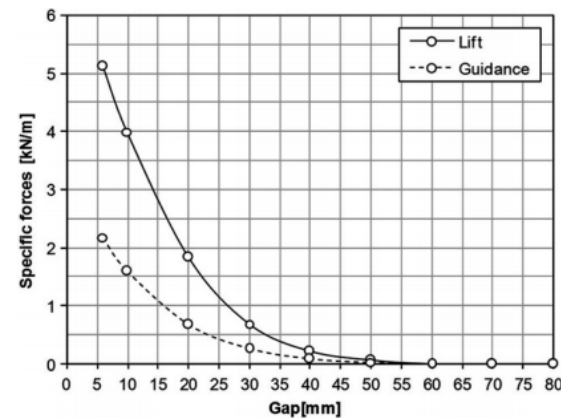
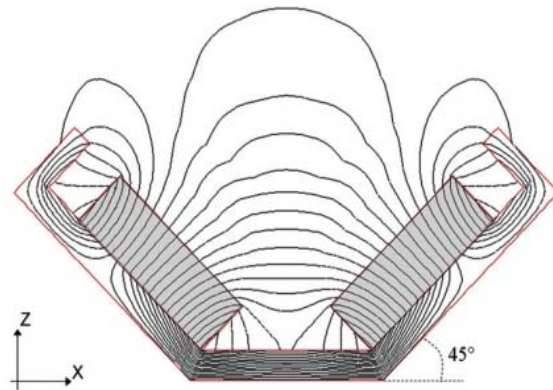
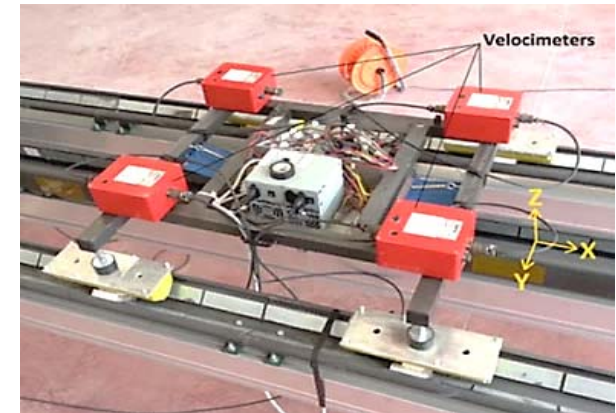
4

## 超导磁悬浮车研究进展



Italy

“UAQ4”



2008年意大利完成高温超导磁悬浮车研制，车辆为不载人型。

轨道与低温保持器均采用独特的V字形结构，整车配有4个低温保持器，由直线电机驱动。

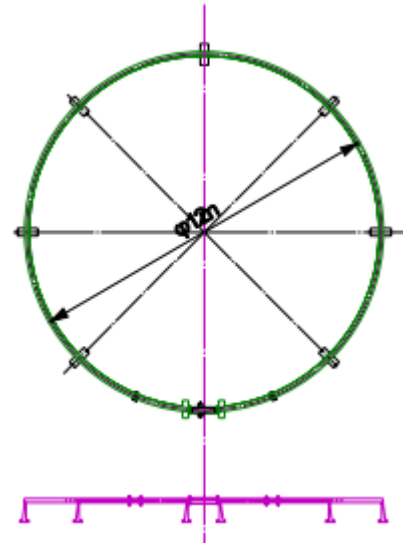
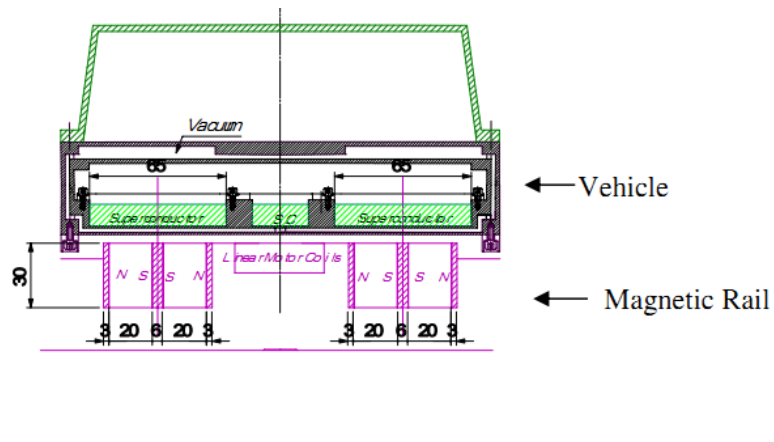


4

# 超导磁悬浮车研究进展



Japan



2005, the goods transportation system in National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) of Japan

2005年日本国家高级产业科学技术研究所 (AIST) 高温超导磁悬浮小模型车系统

圆形磁轨道直径12 m，长38 m，最高速度42 km/h



4

# 超导磁悬浮车研究进展



China

Century



Super-Maglev



- 1988年，成立低温与超导技术实验室；
- 1997年，国家863计划正式立项（863-CD080000）；
- 2000年12月，研制成功世界首辆载人高温超导磁悬浮实验车；
- 2012年11月，研制成功第二代高温超导磁悬浮车系统；
- 2013年2月，建成我国首条高温超导磁悬浮环形试验线。



4

## 超导磁悬浮车研究进展



China

“Century”



悬浮高度20 mm时，  
整车悬浮力635 kg，  
导向力198 kg



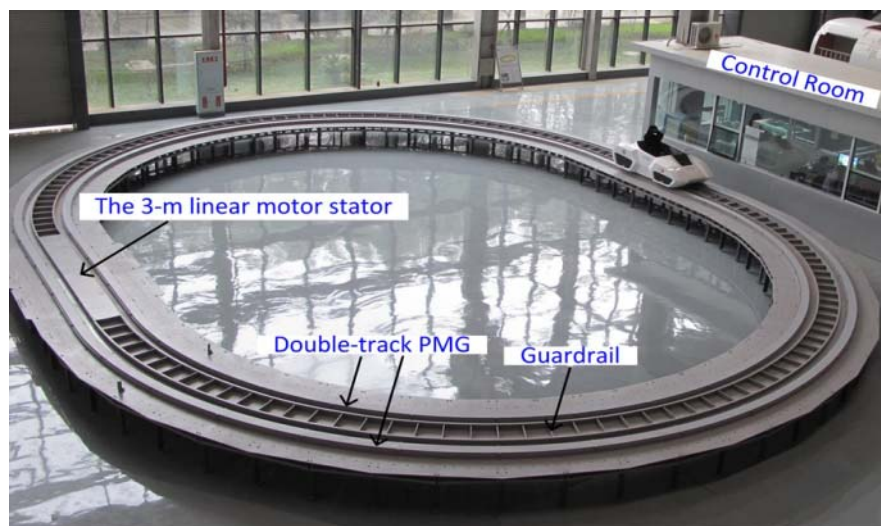
4

## 超导磁悬浮车研究进展



China

“Super-Maglev”



## 高温超导磁悬浮车运行监测系统

High-Temperature Superconducting Maglev Monitoring System

|                              |            |                                 |            |                                    |           |
|------------------------------|------------|---------------------------------|------------|------------------------------------|-----------|
| 实时速度<br>Real-time Velocity   | 11.30 km/h | 平均速度<br>Average Velocity        | 12.24 km/h | Tube Air Pressure 1<br>气压1(Press1) | 95.57 kPa |
| 悬浮高度<br>Levitation Height    | 17.95 mm   | 悬浮重量<br>Levitation Load         | 264.59kg   | Tube Air Pressure 2<br>气压2(Press2) | 95.43 kPa |
| 横向位移<br>Lateral Displacement | -1.61 mm   | 离心力<br>Centrifugal Force        | -0.01 N    | START / STOP                       |           |
| 距离站点<br>Distance to Station  | 9.73 m     | 总运行距离<br>Total Running Distance | 316.29 km  |                                    |           |



西南交通大学-牵引动力国家重点实验室  
Applied Superconductivity Laboratory  
Traction Power, Southwest



轨道：总长45米，双轨，两段3.6米直线，两段6米半径曲线

悬浮高度：10 ~ 20 mm

载重能力：1 t/m

驱动：一侧设有3米长异步直线感应电机

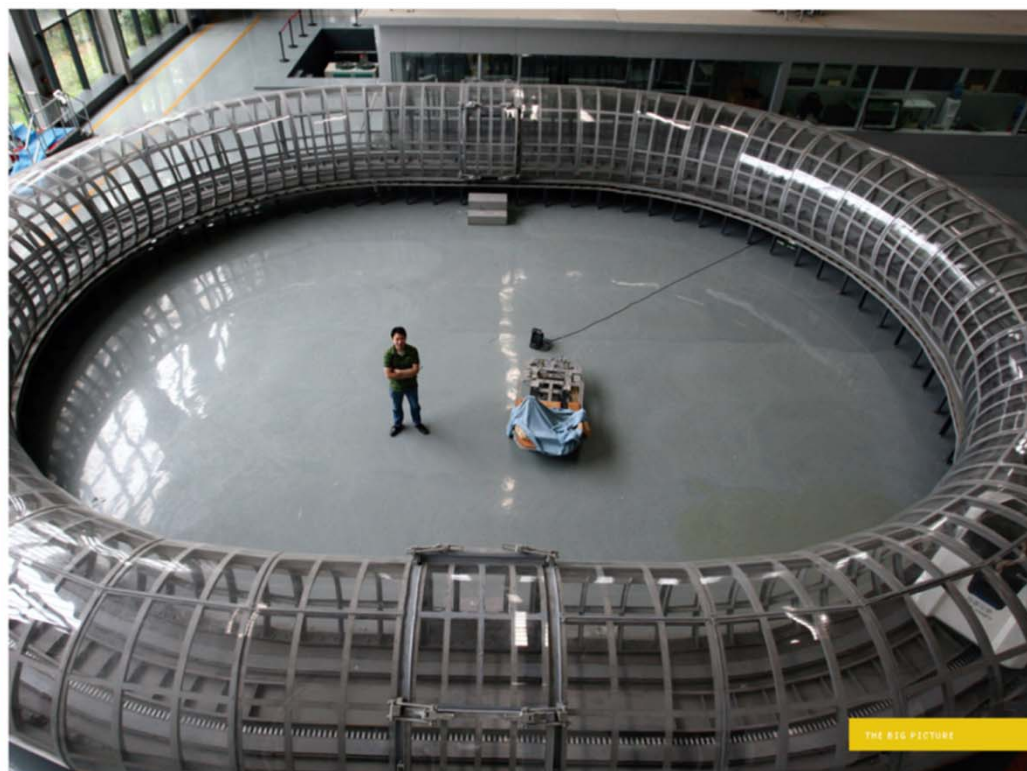
最大速度：25 km/h (载1人); 50 km/h (空载)



搭建了真空管道高温超导磁悬浮车试验平台，得到国内外媒体的广泛关注，包括IEEE Spectrum、BBC、ARTE、HKS等。

## 未来的轨道交通：高温超导列车及真空管道

利用车载高温超导体与永磁轨道相互作用起来，消除传统的轮轨接触和噪音；再将管道内的空气压力降到0.1个标准大气压，利用这些正是西南交通大学牵引动力国家重点实验室研制的高温超导磁悬浮列车极有可能刷新



### A SUPER CHUTE

THIS RING IS THE racetrack on which the future of ground transportation might be riding. Deng Zeping, a professor at Southwest Jiaotong University, in Chengdu, China, stands in the center of a prototype designed to test the latest turn in maglev (magnetic levitation) train technology. Right now, the best maglev trains reach speeds exceeding 400 kilometers (250 miles) per hour. Yeah, that's fast, but researchers like Deng are confident that the train cars, which are suspended above the tracks by powerful magnets, can go much faster. At these speeds, upwards of 80 percent of the energy meant to provide propulsive force is wasted battling air resistance. By placing a maglev train inside a vacuum tube, Deng says his team can virtually eliminate speed's enemy. At 10 percent of normal atmospheric pressure, such evacuated tube systems might allow maglev trains to rocket along guideways at 3,000 km (1,860 miles) per hour.

THE BIG PICTURE

NEWS

20 JUL 2014 | NORTH AMERICAN | SPECTRUM.IEEE.ORG

Image courtesy of Deng Zeping

SPECTRUM.IEEE.ORG | NORTH AMERICAN | JUL 2014 | 25

未来的地面交通工具应该是什么样的？它必须既节能、环保，又安全、舒适，最重要的是速度快。放眼望去，电动汽车和飞机或是存在不可控的安全问题，或是存

在噪声问题，似乎都不是完美的答案。而未来轨道交通领域则拥有一个更为理想的选择：高温超导磁悬浮列车。

高温超导磁悬浮列车是一种悬浮和导向不需要车载电源和控制的自稳

作者：邓自刚、张卫华

（邓自刚，西南交通大学牵引动力国家重点实验室副教授；张卫华，西南交通大学牵引动力国家重点实验室主任、教授）

图片：超导体技术研究所/西南交通大学



# BBC纪录片拍摄



# ARTE纪录片拍摄



@2015.3



# 国内外专家学者参观体验





China

## YBCO带材磁悬浮研究



### ➤ 高温超导块材：

现有高温超导磁悬浮车辆均使用高温超导块材，块材式悬浮方案已得到同行认可。



### ➤ 高温超导带材：

超导带材具有**更高临界电流密度优势**（高1~2数量级），和**使用更少的稀土材料**，带材是否可以实现同等载重能力悬浮有重要的应用研究价值。  
英国、巴西、日本等国已经开始研究。





China

## YBCO带材磁悬浮研究

### 超导带材悬浮优势

#### ➤ 造型自由

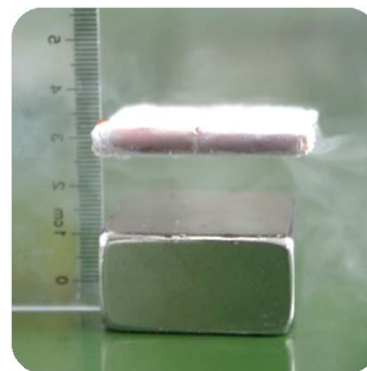
超导带材可以编织成各种所需要的造型

#### ➤ 不存在开裂损坏

YBCO块材由于是压制成型，故会存在开裂或者应力导致的损坏。超导带材编织成的块材，只要密封可靠，便不存在这样的问题。

#### ➤ 悬浮高度更高

超导薄膜的临界电流密度比超导块材临界电流密度高1-2个数量级。





China

## YBCO带材磁悬浮研究

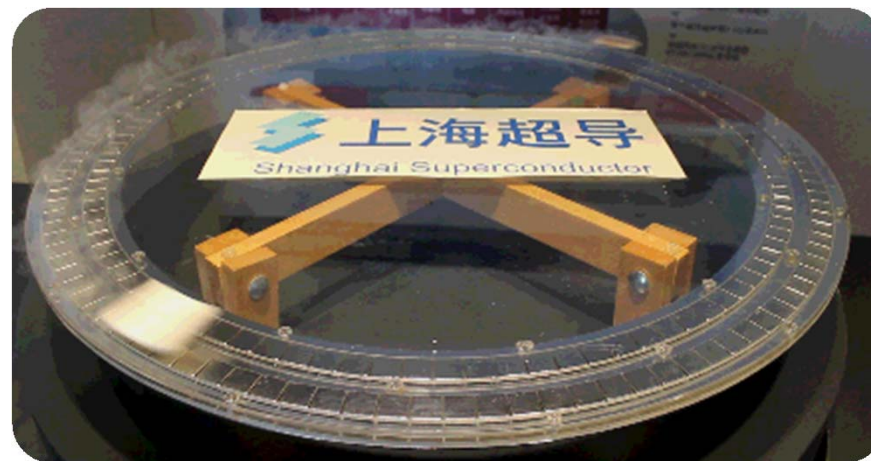
已经会同上海超导公司，对YBCO带材编制的超导磁悬浮块材进行了相关工艺探讨和研究。

➤ 磁悬浮稳定性

带材编织而成的磁悬浮块，YBCO分布更均匀，本身质量更低，悬浮更稳定。

➤ 下一步工作

同上海超导公司加强合作，采用不同掺杂工艺的带材，尝试不同的组合方式，验证重载悬浮的技术可行性和经济性，试图将现有超导悬浮系统载重能力再提高。



# 目录

CONTENTS

1

磁悬浮定位

2

典型磁悬浮交通

3

高温超导磁悬浮交通特点

4

超导磁悬浮车研究进展

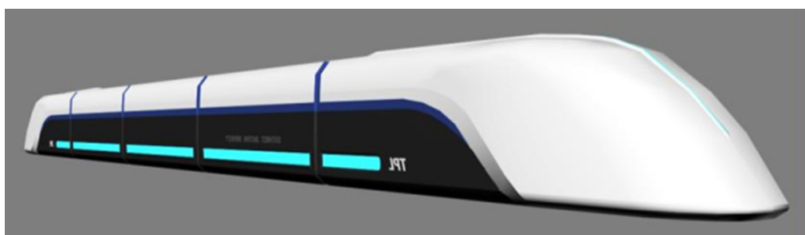
5

前景与展望



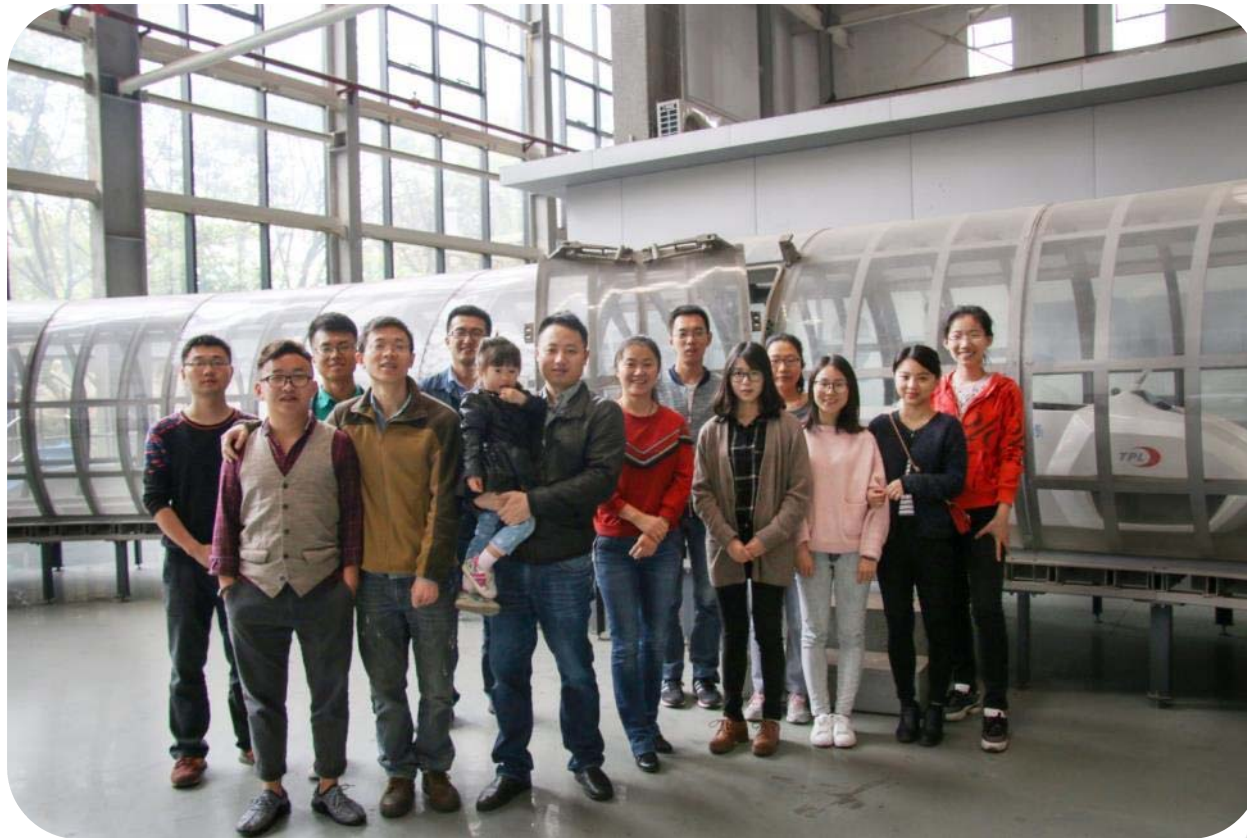
## 发展规划

一期5-10年：  
开敞式高温超导  
磁悬浮列车  
速度：600 km/h



二期10-15年：  
真空管道超高速高  
温超导磁悬浮列车  
速度：1000 km/h





THANKS

欢 迎 指 导

