

节能EV技术专辑



第 09 辑

# 电动汽车



〔日〕晶体管技术编辑部 编 EV编辑部 译

## 磁悬浮列车线性电机的研究

专题

- 超导磁悬浮列车的行驶原理
  - 非磁悬浮线性电机的驱动原理及应用
    - 降低EV赛车损耗的方法
- 2017年全日本大学生方程式大赛

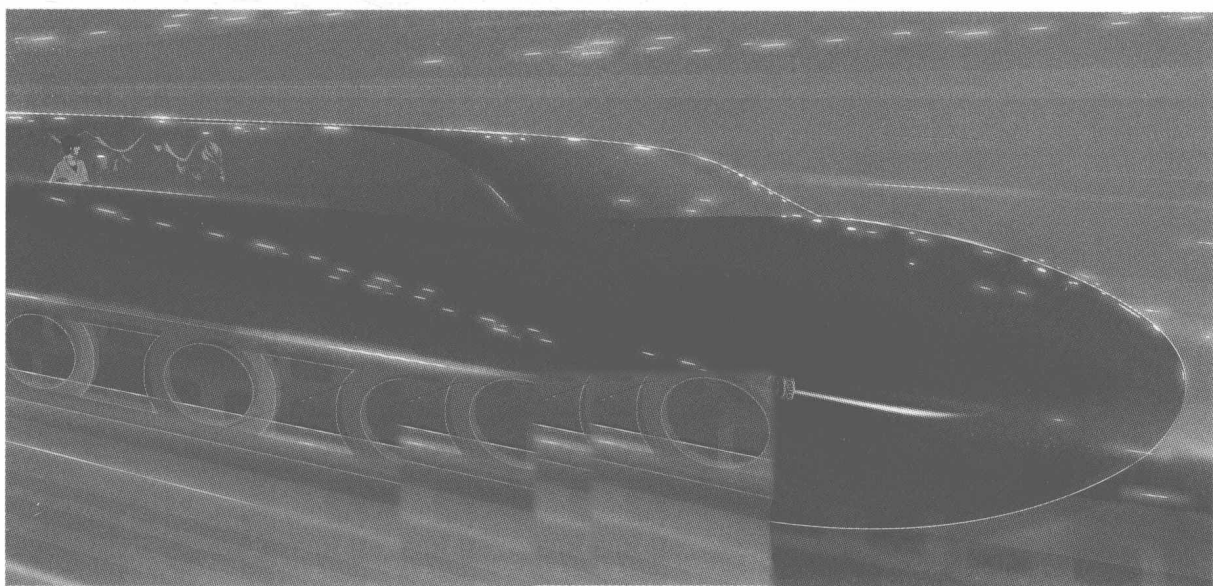


科学出版社

第 09 辑

# 电动汽车

〔日〕晶体管技术编辑部 编  
EV编辑部 译



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是《电动汽车》技术专辑的第9辑，主题是磁悬浮列车线性电机的研究，主要内容包括超导磁悬浮列车的行驶原理、日本超导磁悬浮列车的研发史和非磁悬浮线性电机的驱动原理及应用，介绍了日本节能形式比赛往届冠军的经验分享和针对比赛所做的车辆性能优化，承接第8辑的内容，介绍了自制EV的人性化设计和学生方程式EV的安全电路。

本书可用于本科、高职高专院校的电机、电子、汽车相关专业的教学，也可用作电动车行业的入职培训，以及创客、创新比赛的参考用书。

MOTOR エレクトロニクス/MOTOR Electronics No.9  
Copyright © 2018 by CQ Publishing all rights reserved.  
“MOTOR エレクトロニクス” (MOTOR ELECTRONICS) is Registered Trademark of CQ publishing (at Japan Patent Office) . Its use in the title of this book is licensed by a special agreement between CQ Publishing and China Science Publishing and Media Ltd.

图书在版编目（CIP）数据

电动汽车.第9辑/(日)晶体管技术编辑部编；EV编辑部译.—北京：科学出版社，2019.1

ISBN 978-7-03-059459-4

I.电… II.①晶… ②E… III.电动汽车—研究 IV.U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第255643号

责任编辑：杨 凯 潘玉卿 / 责任制作：魏 谨  
责任印制：张克忠 / 封面设计：MATHRAX 张 凌

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年1月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2019年1月第一次印刷 印张：8 1/2

字数：270 000

定价：58.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

# 目 录

## 专题 磁悬浮列车线性电机的研究

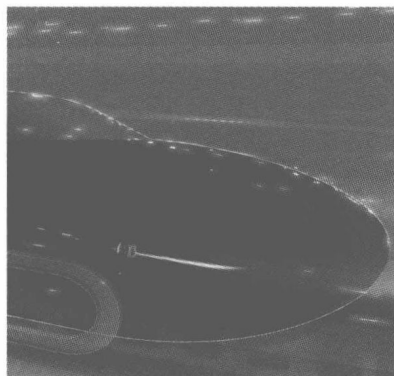
|                        |     |
|------------------------|-----|
| 超导磁悬浮列车的行驶原理 .....     | 001 |
| ——超导磁悬浮列车与高速线性电机       |     |
| 日本超导磁悬浮列车的研发史 .....    | 015 |
| ——实现列车安全高速运行的技术        |     |
| 非磁悬浮线性电机的驱动原理及应用 ..... | 026 |
| ——用于地铁的理由及今后的展望        |     |

## 解说

|                        |     |
|------------------------|-----|
| ECODEN冠军的奋斗历程 .....    | 047 |
| ——能源管理是关键              |     |
| 降低EV赛车损耗的方法 .....      | 076 |
| ——电机和控制器篇              |     |
| 停机电路 .....             | 091 |
| ——确保驾驶员和参赛人员的安全        |     |
| 2017年全日本大学生方程式大赛 ..... | 103 |
| ——日本终于也来到了EV居上的时代      |     |

## 连载

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 设计人性化接口 .....                  | 110 |
| ——试制车1号                        |     |
| 采用低损耗铁心与相电流控制达成目标距离，蝉联冠军 ..... | 119 |
| ——2017年CQ EV卡丁车筑波赛夺冠报告         |     |



## 超导磁悬浮列车的行驶原理

——超导磁悬浮列车与高速线性电机

[日] 村上雅人 小林忍 执笔 | 王玉婷 译

提及线性电机，很多人会想起仅需 1 小时就可以从东京到大阪的世界首辆超导磁悬浮列车。本文将介绍其中涉及的超导磁悬浮原理、高速线性电机运行原理等。

(编者按)

### 引言

#### ● 时速 500km，东京至大阪仅需 1 小时

超导磁悬浮 (Superconducting Maglev<sup>①</sup>) 列车指借助磁力悬浮车体，并以高速行驶的列车。世界首辆超导磁悬浮列车计划于 2027 年开通，日本中央新干线仅需 45min 就可以从东京到达名古屋 (图 1)。超导磁悬浮列车的研究工作最初由日本国营铁道技术研究所负责，中央新干线的开发主要由 JR 公司负责。

此线路计划于 2037 年实现 1 小时从东京到大阪。

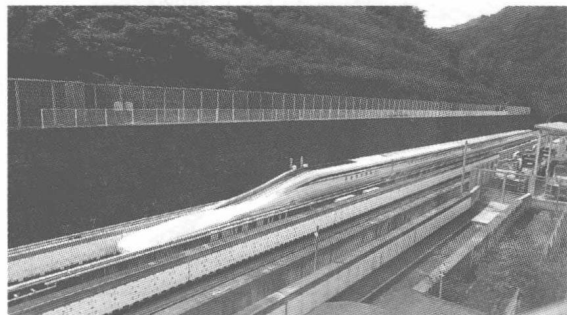


图 1 超导磁悬浮列车

日本山梨县的实验线路，时速可达 400km 以上 (总长 42.8km)，是中央新干线的一部分

### 建设超导磁悬浮列车

#### ■ 高速行驶原理

##### ● 高速行驶需要磁力

高速行驶是超导磁悬浮列车的最大特征，东京至大阪的用时不到目前新干线的一半。

超导磁悬浮列车利用磁悬浮实现高速行驶，不会用到车轮。

##### ● 利用磁体的引力和斥力

磁体具有 N 极和 S 极，同极相斥，异极相吸，利用磁极间的引力和斥力可实现行驶 (前进、制动)。

如图 2 所示，超导磁悬浮列车车头为 N 极。假设在列车前方放置磁体的 S 极，异极间产生的引力就会

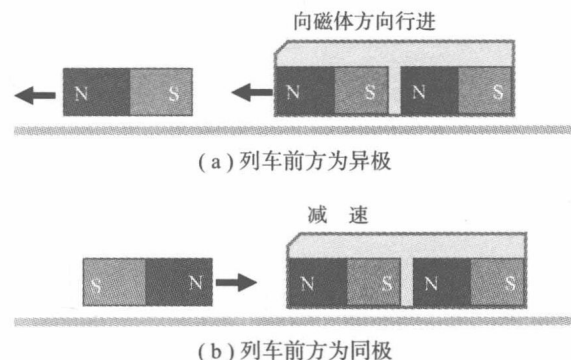


图 2 超导磁悬浮列车的行驶原理

列车车头为 N 极，如果在前方放置磁体的 S 极，列车前进；反之，列车减速

① SCMaglev 或 Superconducting Magnetic Levitation Railway, Maglev 为 Magnetic Levitation (磁悬浮) 的简写。

拉动列车，使列车前进。期间，加速度随磁体间距离的缩小而增大，相互吸附后加速度消失。

在列车前方放置磁体的 N 极时，同极间产生的斥力给列车施加与前进方向相反的加速度，列车减速，直至速度变为零，甚至后退。

● 控制列车前方磁极位置

调节并移动图2中前方磁体与列车磁体间的距离，就可以控制列车持续前进并改变加速度。这就是简单的线性驱动原理。

● 搭载大量线圈

移动车体前方的磁体，并控制其相对车体的位置十分困难，于是选用电磁体作为驱动磁体。

接通电流，电磁体就能产生磁力，切断电流，磁力也随之消失。如图3所示，通过开/关电磁体，可使磁体向前移动。

图4所示为利用电磁体开关切换的直线性驱动示意图。超导磁悬浮列车的行驶利用了此原理。

● 交流驱动

超导磁悬浮列车为交流驱动，利用交流相位差，切换 N 极和 S 极，与交流电机的运转原理相同。

图5所示为二相交流示例。相邻线圈交流相位差

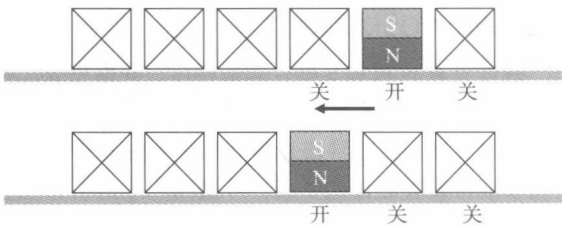


图3 线性驱动原理

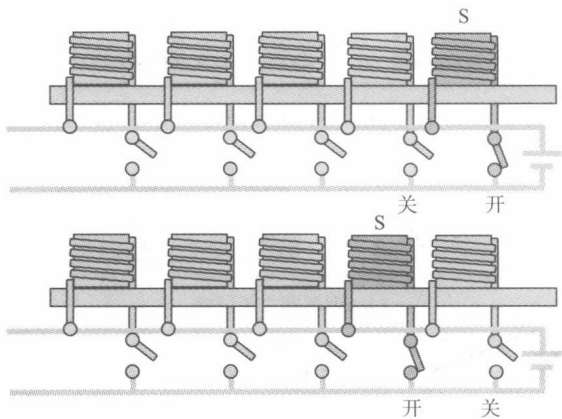


图4 直线性电机的示意图

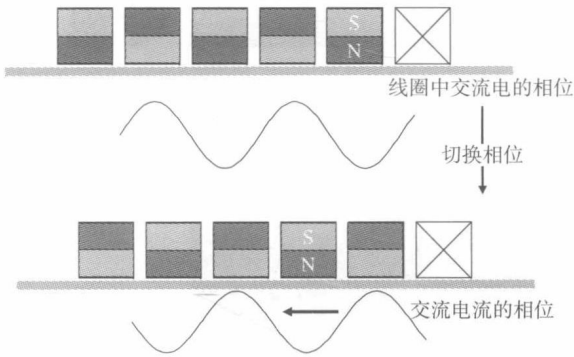


图5 利用交流电的线性驱动

为  $180^\circ$ ，磁极随交流周期变化进行切换，实现线性驱动。

实际上，超导磁悬浮列车为三相交流驱动，相邻线圈的相位差为  $90^\circ$ ，线圈 N、S 极为  $90^\circ$  旋转 ( $\uparrow \rightarrow \downarrow \leftarrow \uparrow$ )。

● 交流频率决定列车速度

利用交流电驱动超导磁悬浮列车时，交流频率决定了列车的速度。超导线圈的长度为 1.35m，一组线圈的长度是一个周期前进的距离，为 2.7m，。

利用三相交流电时，需要 3 个 ( $\uparrow \rightarrow \downarrow$ ) 地面线圈，每个线圈长度为 0.9cm。

如果频率为 50Hz，则相位在 1s 内反转 50 次。而超导线圈一个周期推进 2.7m，因此，1min 可前进  $2.7 \times 50 \times 60 = 8100 \text{ (m)} = 8.1 \text{ (km)}$ ，此时车速为 486km/h。

实际运行中，会有改变频率调节速度的情况。当行驶速度达到 500km/h 时，频率为 51.4Hz。

● 超导磁悬浮列车的电源

普通铁路中，电缆传输的电流通过变电站改变电压和频率后流向接触线，通过受电弓供给火车。

图6所示为超导磁悬浮列车电能传输系统。

电力公司传输的电先通过变电站，改变原有的电压、电流和频率。再利用逆变器改变交流频率，控制线性速度。

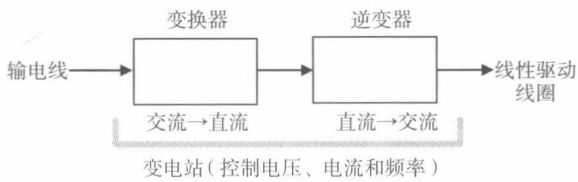


图6 超导磁悬浮列车的电能变换系统



■ 线性电机负责前进

由上文介绍的原理可知，线性电机位于车辆侧与地面设施侧。

● 线性电机的位置

普通列车的电机属于异步电机中的旋转电机，而线性电机属于线性驱动电机。线性电机也不仅应用于磁悬浮列车（专栏 A）。

如图 7 所示，线性电机中的励磁绕组（定子绕组）为线性排列，铺设长度需要与驱动长度（距离）相同，是一个巨大的结构。

● 车辆侧电机部分较小

车辆侧仅需搭载磁体，电机部分并不在车内。  
电机控制并不在车辆侧，而是在车辆外，控制车辆外的线路，并且不由车辆驾驶员控制。

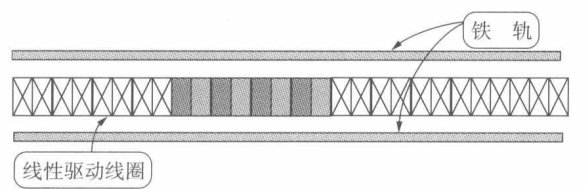


图 7 线性电机

专栏 A 使用线性电机的非悬浮车辆

◆ 普通列车采用的线性电机

由线性电机的驱动原理可知，线性电机不仅可用于悬浮车辆，也可用于使用车轮的车辆。世界各地已有利用线性电机的列车开始运营。

图 A.1 所示为轨道间铺设线性电机驱动线圈的轨道示意图。

普通列车（火车）内搭载旋转电机，并借助外部提供的电能运行。车内的驾驶员可以控制电机的转速，操作起动和行驶的速度。

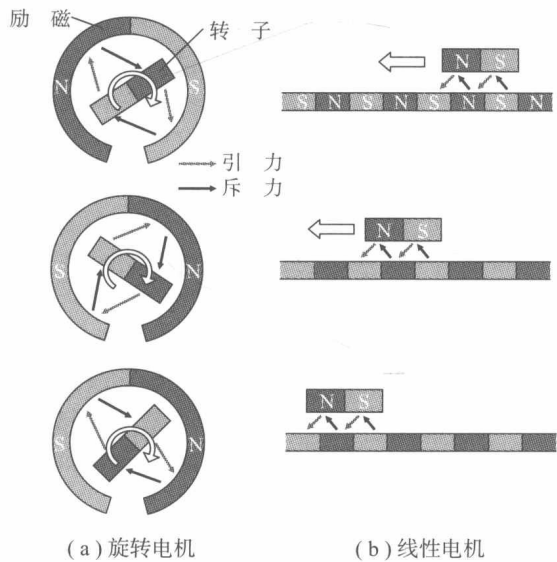


图 A.1 铁路中采用的线性电机  
普通列车车辆侧搭载磁体，地面轨道内侧放置驱动线圈便可实现线性驱动

◆ 线性驱动可缩小车辆体积

使用线性驱动的情况下，车辆仅搭载磁体。普通列车无需搭载超导磁体，搭载较小型的电磁体即可。因此，车辆体积变小、质量变小，用于地铁将会非常有优势。车辆体积缩小也就意味着地下隧道空间缩小，工程费用削减，同时也省去了驾驶员。

但必须铺设与铁路长度对应的线圈，又提高了建设成本。

因此，可以采用在地面铺设反应板，控制车上的电磁体，并利用电磁感应进行线性驱动的方法。但此方法的实现离不开驾驶员。

日本东京大江户线等线路采用此种方法。图 A.2 所示为大江户线采用的铁轨和线性驱动反应板的照片<sup>①</sup>。

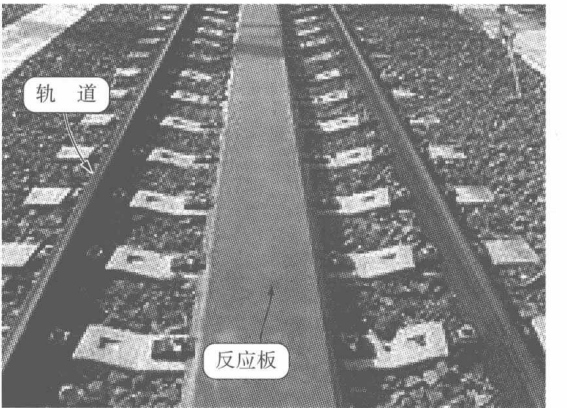


图 A.2 大江户线中的反应板  
铁轨和中心放置的线性驱动线圈

① 本书第 3 篇文章会讲解这种方法。——编者

## 超导磁悬浮列车的悬浮

### ● 悬浮 30t 的车辆

上文已简单介绍了线性驱动中应用的线性电机原理，也对磁悬浮原理进行了说明。但列车非常重，质量可达 20 ~ 30t。

### ■ 确保悬浮横向的稳定性

#### ● 斥力能否保证稳定性

如图 8 所示，利用磁力进行悬浮必须利用磁体同极相斥的原理。但这种悬浮并不稳定，很容易发生悬浮磁体磁极调转相吸。

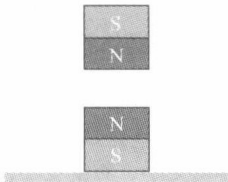


图 8 同极磁体相斥

利用这种特性悬浮物体，但这种磁悬浮并不稳定，悬浮磁体很容易脱离悬浮位置，并发生磁极调转，最终与下方磁体相吸

#### ● 确保横向稳定性

这种不稳定性遵循厄钉定理。不仅是磁力，电力、重力等不遵循平方反比定律的力及其合力，都无法使物体稳定悬浮。

因此，利用磁体进行悬浮时，为了确保横向的稳定性，需要额外施加牵引力。

### ■ 确保悬浮纵向的稳定性

#### ● 斥力产生的悬浮力

钕铁硼永磁体表面磁通密度可达 0.5T (Wb/m<sup>2</sup>)，是世界上磁力最强的磁体。同极相对时，每平方厘米可产生能够支撑 1kg 的力。即，10cm<sup>2</sup> 的正方形可支撑 100kg 的质量。

但磁力与距离的平方成反比。当列车悬浮到可行驶的高度时，悬浮力会突然减小。

### ■ 利用永磁体还是电磁体？

#### ● 利用引力

利用异极相吸解决此问题，如图 9 所示。

在地面的牵引轨道上铺设磁体，并在下方放置悬浮磁体，使磁体与列车相连，就可利用磁体间的引力使列车悬浮。

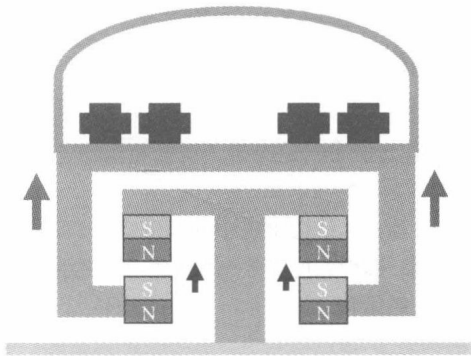


图 9 利用异极间的引力悬浮列车

#### ● 正常传导型使用永磁体和电磁体

利用上述原理的磁悬浮列车称为正常传导型磁悬浮列车。但永磁体的引力产生的悬浮力并不稳定，所以将上方的磁体换成电磁体，利用传感器控制电磁体中的电流，使悬浮高度保持稳定。中国上海的磁悬浮列车采用的就是这种磁悬浮方式，时速为 400km。

由于悬浮高度（磁体间的间隙）仅为 8mm，当列车高速行驶时，磁体间很有可能会发生接触。这种接触不造成磨损就不会发生事故，但无法保证不会磨损。

如果从保障生命安全的角度出发，则悬浮高度越大越好。

#### ● 地震国不使用永磁体

磁悬浮列车在地震国日本高速行驶时，足够的悬浮高度至关重要，悬浮高度达到 10cm 左右才能保证行驶时的安全。

日本在开发磁悬浮列车之际，考虑到要悬浮 20 ~ 30t 的列车，为了获得足够的悬浮高度，必须使用强力的磁体，排除了永磁体。

也有观点认为，可以图 9 为原理图，开发正常传导型磁悬浮列车。当然，任何一种技术都有利有弊。超导磁悬浮列车与正常传导磁悬浮列车的比较见表 1。

#### ● 使用电磁体产生强磁场

电磁体可能会产生比永磁体更强的磁场。

铜线圈可产生磁通密度为 5T 的大型磁场，但如果想使电磁体产生强磁场，就必须流通大电流，但铜、铝等金属线存在电阻，流通电流就会发热。虽然可以产生强磁场，但也有大电流引发线圈着火的情况。



表 1 正常传导磁悬浮与超导磁悬浮的比较

|      | 超导磁悬浮列车      | 正常传导磁悬浮列车 |
|------|--------------|-----------|
| 悬浮方式 | 超导磁悬浮列车异极排斥法 | 正常传导磁力吸引法 |
| 悬浮高度 | 约 10cm       | 约 0.8cm   |
| 停 止  | 非悬浮          | 悬 浮       |
| 最高速度 | 581km/h      | 430km/h   |
| 隧 道  | 有            | 无         |

● 强磁场的产生离不开线圈的冷却

为了使铜线圈产生强磁场，需要采用水冷。磁场越强，需要的冷却量就越大。实验电磁体可产生磁通密度为 1.5T，直径约为 1m 的磁场。此时就需要打开所有水道冷却线圈。

产生 1.5T 磁场的电磁体就需要教室般大小的冷却设备，质量也大得惊人。搭载这种大型电磁体和冷却设备的列车不可能悬浮起来。

■ 使用超导磁体

为了使列车悬浮高度达到 10cm，必须利用不发热的超导磁体，理由见表 1。

● 使用超导磁体产生 20T 磁场

超导导体电阻为零的现象。用含有超导体的金属线材制作线圈，在产生强磁场的同时不会造成发热。目前超导磁体产生的最大磁场可达 20T。

实际上，使用 NbTi（铌钛合金）就可以产生 5T 磁场。当然，能够产生更强的磁场更好。

● 电阻为零时的永久电流模式

超导磁体线圈不存在电阻，所以即使没有接收外部传输的电能也可继续产生磁场。这称为永久电流模式。

但超导磁体也存在一些课题。

● 课题 1：需要极低温度的液氮

如果不将温度降至临界温度 / 转移温度以下，金属就不能变为超导状态。也就是说，不进行冷却，超导磁体就无法变为超导状态。临界温度非常低，多数

情况下需使用液氮作为冷却剂，液氮的沸点为  $-269^{\circ}\text{C}$ 。

超导线材在电阻为零时不产生热量，但为了变为超导状态需要温度极低的环境。

● 课题 2：难以处理的昂贵液氮

液氮的处理非常困难，在空气中会很快蒸发，而且价格昂贵。

利用昂贵且难处理的液氮冷却列车上的超导磁体，可提高悬浮高度。这项技术非常难以实现，但为了将列车悬浮高度提高到 10cm，不得不利用超导的力量。

超导中的电磁感应现象

● 设置超导磁体

很多人存在对超导磁体磁悬浮的误解，认为地面侧与车辆侧的超导磁体相对并产生悬浮力，而且也常听说超导磁悬浮列车轨道上铺满超导磁体。事实并非如此。

超导磁体仅搭载于车辆侧，地面侧为普通磁体牵引轨道。

● 利用电磁感应悬浮列车

可利用电磁感应悬浮重型列车。

■ 电磁感应

● 闭合电路中的导体周围磁场变化产生电流

闭合电路中的导体周围的磁场变化会在导体内产生感应电流的现象称为电磁感应。

水力发电站、火力发电站、核电站都是利用电磁感应发电的。图 10 所示为电磁感应示意图。

● 发电原理

水力发电站使储存的水从高处落下转动水车。水车连接的磁体旋转，周围的铜线会产生感应电流。

火力发电站燃烧石油、核电站利用核能产生的热量，将水变为水蒸气，液体变为气体后体积膨胀，会对外界产生作用力，这个力使磁体旋转。脚踏发电机利用车轮上的旋转磁体发电。

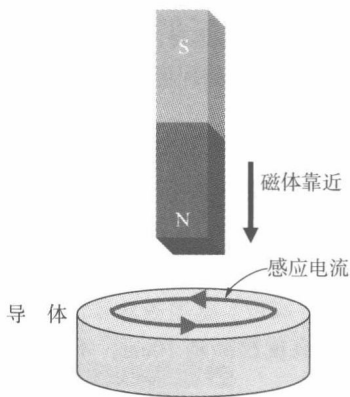


图 10 电磁感应原理  
闭合电路中的导体周围磁场发生变化，产生感应电流，感应电流流向导体。例如，磁体靠近由铜、铝等金属圆板时，会有电流流过金属板

■ 利用电磁感理解悬浮原理

● 楞次定律

楞次定律是指感应电流的效果总是反抗引起感应电流的原因。

磁体的 N 极靠近金属板时，感应电流遵循楞次定律，为了反抗磁体的靠近，感应电流形成的磁场使相对面变为 N 极。电流方向和产生的磁场的方向如图 11 所示。

● 电磁感应决定电流方向

磁体 N 极靠近金属圆板时，根据楞次定律，导体中会产生使其与磁体相对面变为 N 极的感应电流，图 10 所示的感应电流方向也如此。

● 电磁感应使铝制硬币移动

众所周知，铝制硬币并不会被磁体吸附，但强磁力磁体也可使其产生感应电流。

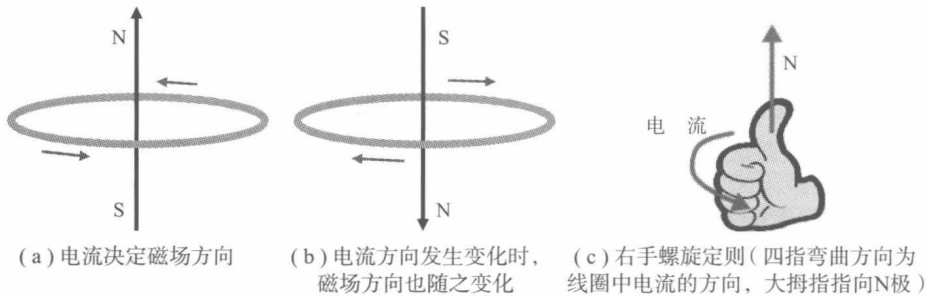


图 11 电流产生的磁场  
电流方向与产生的磁场的方向的关系

将硬币立起来并使其靠近强力磁体，会产生排斥现象（图 12）。根据楞次定律，为了不接近磁体，铝制硬币中产生了感应电流。

此时，如果靠近磁体 N 极，则硬币中产生使相对面为 N 极的感应电流；如果靠近 S 极，则在硬币中产生使相对面为 S 极的感应电流。这种原理也用于异步电机。

■ 利用超导体电磁感应产生的斥力悬浮

● 电流导致发热

普通金属存在电阻，电磁感应产生的电流会在瞬间衰减（因发热消耗能量）。因此，为了使电流持续流动，必须使磁体转动。发电站利用水力、火力使磁体旋转，产生电能。旋转停止，电能就会消失。因此，发电站需要不停工作。

● 感应电流即使流向超导体，损耗也为零

在无电阻的导体中，感应电流将无衰减地持续流动，斥力也会持续。因此，利用超导体进行电磁感应实验，可永久维持磁体靠近时的斥力。

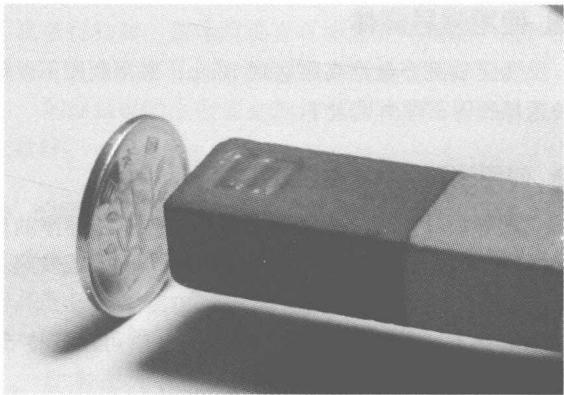


图 12 硬币被排斥

## ● 在超导体上悬浮永磁体

图 13 (a) 所示为用液氢 ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) 冷却的钇钡铜氧化物超导体上悬浮永磁体的实验。

观察图 13 (b), 可知永磁体的 N 极朝向超导体。于是, 超导体中产生使相对面为 N 极的感应电流。又因为超导体的电阻为零, 可永久流通感应电流, 持续维持斥力, 磁体可以持续悬浮。

## ■ 利用电磁感应产生的引力悬浮

### ● 电磁感应也可获得引力

此前都是利用斥力进行悬浮, 也可利用电磁感应获得引力 (图 14)。

如果磁体远离导体, 此时根据楞次定律, 导体中会产生阻止磁体远离的感应电流。例如, 使磁体 N 极远离导体时, 导体中会产生使相对面为 S 极的感应电流。

### ● 斥力、引力各司其职

由楞次定律可知, 当磁体接近导体时, 斥力发挥作用; 当磁体远离导体时, 引力发挥作用。遇到地震等外部干扰时, 超导磁悬浮列车也会因恢复力稳定悬浮。

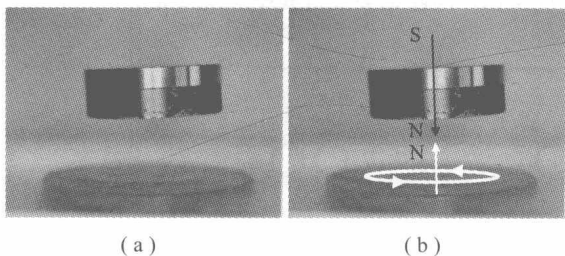


图 13 根据电磁感应和楞次定律进行的超导磁悬浮  
如果磁体靠近超导体, 超导体中就会产生感应电流。这种电流可持续产生斥力且不会衰减, 因此磁体可持续悬浮

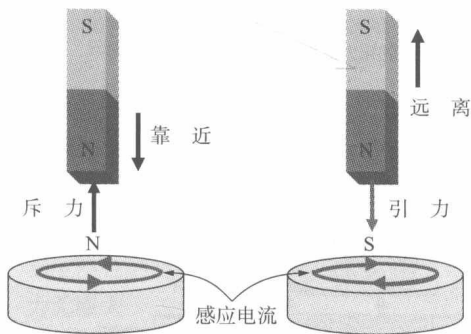


图 14 电磁感应与楞次定律  
靠近磁体产生斥力, 远离磁体产生引力

## ● 利用引力

磁体远离导体时, 感应电流瞬间减小, 引力很难被察觉。如果利用电阻为零的超导体, 感应电流不会发生变化, 引力会更易察觉。

如图 15 所示, 永磁体下方的超导体被电磁感应产生的引力牵引并悬浮在空中。超导体下方的铁环仅用于展示。

## ■ 超导磁悬浮列车的悬浮原理

### ● 高速移动时, 利用电磁感应产生的斥力悬浮

列车搭载的超导磁体产生强磁场, 在地面牵引轨道上运行时会产生感应电流, 并产生斥力。超导磁悬浮列车利用强磁场和斥力进行悬浮, 如图 16 所示。

首先在金属牵引轨道上放置磁体, 此时磁场并未

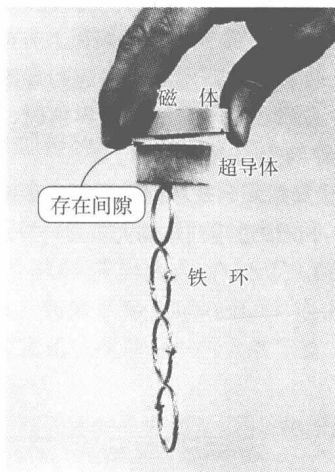


图 15 利用超导体电磁感应的引力进行悬浮实验  
利用永磁体与钇钡铜氧化物超导体间的电磁感应产生的引力进行磁悬浮

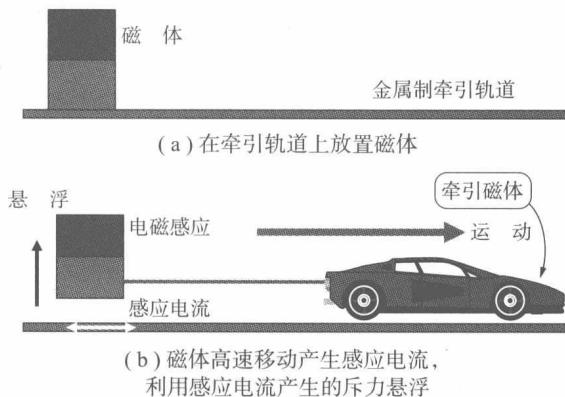


图 16 利用电磁感应的磁悬浮原理  
磁体在金属制牵引轨道上高速移动时, 感应电流会流过金属轨道, 磁体悬浮

发生变化，所以不会产生电磁感应。之后，牵引磁体，并提高速度。此时金属轨道中产生感应电流，磁体受到悬浮力影响。当磁体移动速度达到临界值时，电磁感应的悬浮力可以使磁体悬浮。

● 超导磁悬浮列车静止时不产生悬浮力

根据超导磁悬浮列车的原理，可知超导磁悬浮列车到站停车时并不能悬浮。

如图 17 所示，超导磁悬浮列车从车站出发时与普通列车相同，都是车轮驱动。但列车驱动为线性电机驱动，轨道侧悬浮线圈中的感应电流随着列车的加速而增大，当时速达到 140km 时，悬浮力使列车悬浮。之后，为减小空气阻力，车轮缩回。

● 悬浮 11t 的超导体装置

超导磁体可提供悬浮车辆所需的力，但并不保证可以悬浮数十吨的车辆。有必要进行实验验证。

如图 18 所示，在配置铜线圈的圆板上方放置超导磁体。为了不让两者接触，用绳子吊起超导磁体。旋转下方的圆板，当圆盘的转速达到临界值时，电磁感应产生的力可悬浮约 1t 的超导磁体。

由此可知，金属线圈间的相互作用可产生悬浮力，利用超导磁体，可获得悬浮列车的力。

● 以悬浮实验为契机

列车上搭载超导磁体行驶可获得使列车悬浮的悬浮力。超导磁体悬浮实验确认了这一理论的可行性。以此为开端，日本开始正式着手开发超导磁悬浮列车。

■ 利用超导磁体产生可悬浮 30t 车辆的磁场

● 悬浮 30t 车辆所需的力

超导磁悬浮是指利用感应电流的悬浮技术。感应电流由超导磁体的强磁场产生，感应电流的磁场产生斥力，使列车悬浮。

目前超导磁悬浮列车中采用的超导磁体表面附近的磁场的磁通密度为 5T，地面牵引轨道磁场的磁通密度为 1T。

● 1T 磁通密度产生的悬浮力

磁通密度 1T 的磁场产生的斥力大约为  $4\text{kg}/\text{cm}^2$ 。假设车体长 20m、宽 3m、地面的表面积为  $60\text{m}^2$ ，铺设超导磁体的面积占总面积的  $1/6$ 。由此可计算悬浮力为  $4 \times 10 \times 1002 = 4 \times 105 (\text{kg}) = 400\text{t}$ 。

计算结果看似不会产生问题，但磁力与距离的平方成反比，间隙也会在行驶中发生变化。所以，悬浮

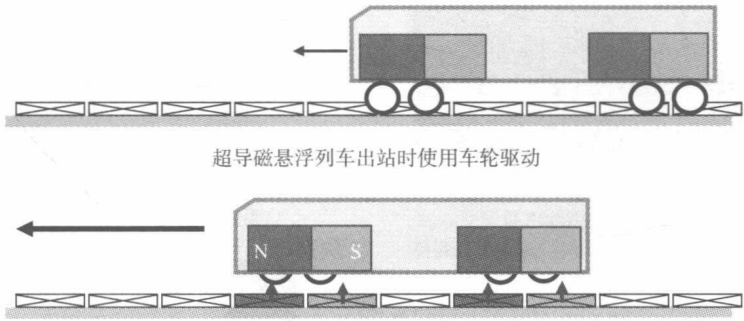


图 17 超导磁悬浮列车行驶时的悬浮  
当时速达到 140km 时，车辆可利用地面线圈中的感应电流产生的斥力进行悬浮，悬浮后收起车轮

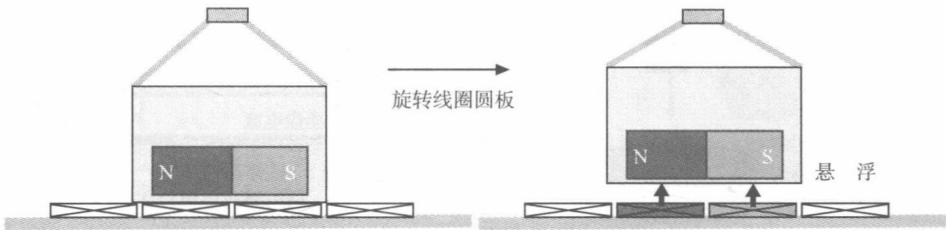


图 18 利用超导磁体悬浮的实验示意图  
旋转装有金属线圈的圆板，获得悬浮超导磁体的悬浮力

力越大越能保证安全。

超导磁体利用液氮进行冷却。液氮的沸点为  $-269^{\circ}\text{C}$ 。列车具备这种温度极低的条件才能实现超高速行驶。

## 超导技术实现强悬浮力

### ■ 超导科学史

#### ● 液氮冷却

超导指电阻变为零的现象，是荷兰低温物理学家卡末林·昂内斯（1853 ~ 1926）于 1911 年偶然发现的。

固态、液态、气态为物质的三态。水在  $100^{\circ}\text{C}$  以上为气态（水蒸气）， $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$  时为液态， $0^{\circ}\text{C}$  以下为固态（冰）。

低温下气体会液化，温度持续下降时甚至会变为固态。氧气在  $-183^{\circ}\text{C}$  时变为液态，到  $-219^{\circ}\text{C}$  时变为固态。氢气在  $-196^{\circ}\text{C}$  时变为液态， $-210^{\circ}\text{C}$  时变为固态。

低温物理学家昂内斯从事气体液化研究，成功液化了氩、氢等之后，于 1908 年世界首次成功液化了氦，温度为  $-269^{\circ}\text{C}$ （图 19）。

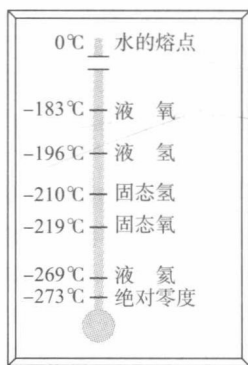


图 19 氦的熔点

氦是唯一一个常压无法变为固态的元素，高压下才会变成固态

#### ● 温度极低时金属的电阻

液体制冷能力远强于气体。昂内斯利用液氮进行低温实验确认温度极低时金属的电阻的变化情况，当时提出的假设有两种：

- 温度降至绝对零度时，电子无法移动，电阻变为无限大
- 温度降至绝对零度时，电子可自由移动，电阻近似为零

#### ● 超导现象的发现

含杂质的金属会影响实验结论。当时的提炼技术还不成熟，但可以提炼出高纯度的汞。所以选用汞进行实验。

昂内斯发现当温度降至  $-269^{\circ}\text{C}$  左右时，电阻变为零。

起初他以为实验发生了错误。但在进行了各种验证后，确认了电阻消失并将其命名为超导现象（图 20）。

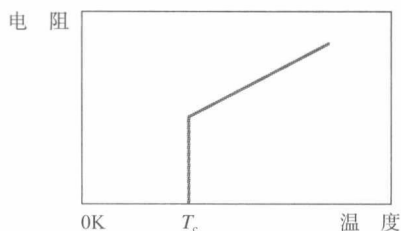


图 20 超导现象，金属电阻随温度的降低而减小，达到某温度（临界温度： $T_c$ ）时，电阻突然降至零

#### ● 发生超导现象的原因

科学家始终不能阐明超导现象发生的原因。因此，超导现象曾一度成为 20 世纪最大的固体物理之谜。

美国伊利诺伊大学的巴丁（Bardeen），库珀（Cooper）和施里弗（Schrieffer）提出了超导现象发生原因的理论。此理论以三人名字首字母命名，称为 BCS 理论。

电子与固体的晶格相互作用，由于这种相互作用，电子失去动能，产生电阻。如图 21 所示，根据 BCS 理论，电子成对运动，一个电子可以从原子那里收到另一个电子失去的动能。最终，电子并未发生能量损耗。

### ■ 昂内斯的梦想

#### ● 利用超导制作超强电磁体

因为超导体电阻为零，也许有人会想将其应用到发电站传输电能的输电线中。存在电阻就意味着损耗，但如果是超导体就不会发生这种情况。

发现超导时（1911 年），电远没有现在应用广泛。并不会出现如今这种因电能不足而困扰的情况。

昂内斯计划将超导现象应用到电磁体中。如前所述，如果使用普通导体金属材质线圈，受电阻影响，会产生热量，不能形成强磁体。

但是，利用无电阻的超导线材就不会产生热量，

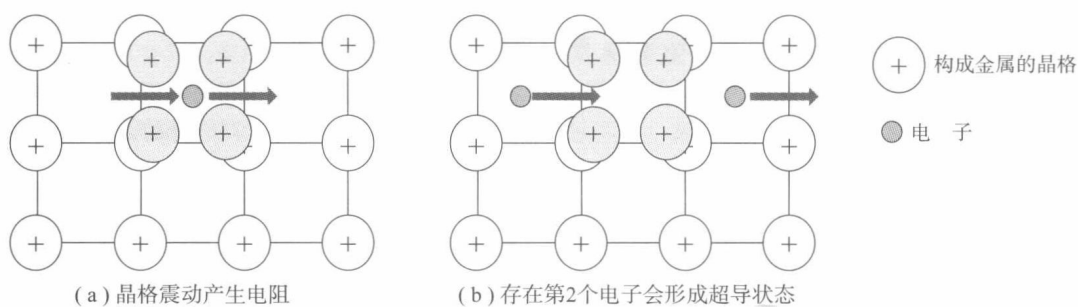


图 21 绝对零度下发生超导的原因

即使晶格在绝对零度不发生震动,也会发生 4 种情况:①电子在晶格中移动;②受库伦力的影响,电子与晶格相互作用;③电子移动吸引晶格靠近电子,产生图(a)所示的形变;④引起晶格震动,晶格夺走电子的能量。这就是电阻产生的原因  
观察图(b),假设在近处存在第 2 个电子,则会发生 3 种情况:①电子受正电荷的吸引,加速;②第 2 个电子弥补原电子失去的能量;③电子成对出现,最终返回无损耗的状态。这就是超导现象发生的原因

任何大电流都可流通。因此昂内斯希望能以此制出超强磁体。

## ● 磁场会破坏超导

遗憾的是昂内斯并没有实现这个梦想,因为磁场会破坏超导。虽然他用各种超导材料进行了实验,但可以承受的磁通密度最大仅为 0.1T。

磁通量无法进入超导体内。如图 22 所示,磁通量进入超导体好比将空心球体放入水中,水压升高会破坏水中的球体,磁通密度增加会破坏处于磁场中的超导现象。

## ● 昂内斯的遗憾

昂内斯持续探索可承受强磁场的超导材料,却毫无进展。终其一生,也没能实现制作超强磁体的梦想。

## ■ 发现新时代的超导体

昂内斯离世三十多年后,科学家终于发现了可以承受强磁场的新型超导体。

## ● 揭开超导体不耐磁场之谜

最初,超导体上有孔和缺口等,会导致某些奇怪

的行为。因其存在于非超导部分,所以即使磁场进入也不会产生问题。这并不是缺陷,而是有异于超导体本质的特征。

昂内斯发现的磁场并不能进入超导体,如果增加磁场,超导现象会消失。观察图 22(c)可知,磁场突然进入超导体中,会破坏超导。

始终保持超导纯度的超导体,称为第 1 类超导体。

## ● 耐磁场超导体的开发

如图 23 所示,新型超导体破坏一部分超导。将磁场引入被破坏的部分,缓和了磁压,也保留了大部分磁场。这种超导体称为第 2 类超导体。

进入第 2 类超导体中的磁场呈细线分布。超导体内里磁通量贯通。此部分超导被破坏,为正常传导。

## ● 发现耐强磁场的超导体

磁场变强,第 2 类超导体中的正常传导区域会扩大,磁通量也会增大。但只要还有超导部分,就可以利用超导体的零电阻特性。

正常传导磁通量进入第 2 类超导体也存在界限。这称为临界磁场( $H_c$ ),值取决于材料。

在液氮冷却状态下,NbTi(铌钛)合金可承受的

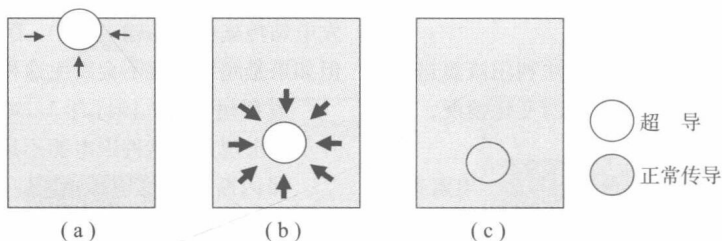


图 22 磁通量与超导的关系  
磁压升高会破坏超导使其变为正常传导



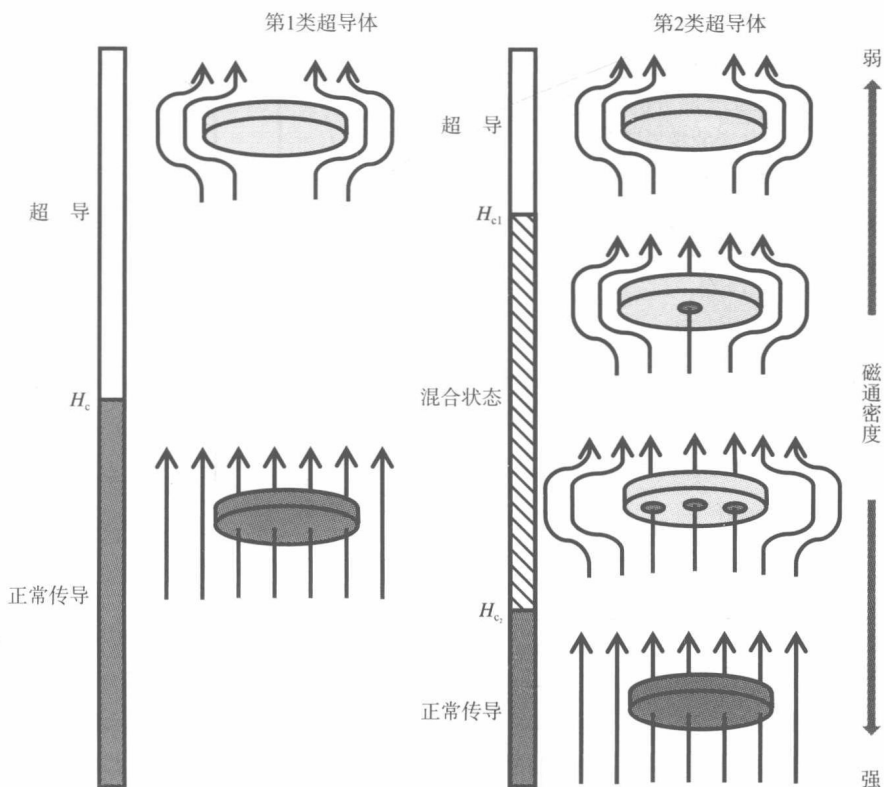


图 23 第 1 类超导体与第 2 类超导体的不同

磁通密度为 10T,  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  (铌锡化合物) 可承受的磁通密度甚至可达 20T。

## ■ 磁 阻

### ● 第 2 类超导体有电阻

耐超强磁场超导体的出现, 进一步接近了昂内斯的超强电磁体梦。

但此时又出现了新的问题, 磁场进入第 2 类超导体后, 接通电流会产生电阻, 但超导体理应没有电阻。

这可以说是电与磁的宿命。第 2 类超导体中残留强磁场是因为磁通量贯穿超导体, 缓和了磁压。磁通量通过部分的超导被破坏变为正常传导。

### ● 第 2 类超导体在强磁场中产生大量的热

电流在这种超导体中流动时, 磁场会受到洛伦兹力的影响。

磁通量通过的部分变为正常传导, 电阻不为 0。结果必然会产生热量。磁通密度越大, 磁通量越大, 产生的热量也相应地越大。

如果不对热量进行处理, 就会导致超导体温度持

续上升。超过临界温度时, 会破坏超导现象。

## ■ 第 2 类超导体的钉扎效应

### ● 磁通量进入正常传导部分, 避开超导部分

第 2 类超导体中存在电阻不属于超导自身的性质。但因电流与磁场 (磁通量) 的相互作用, 正常传导部分也会发生电磁感应, 并产生电阻, 导致发热。

只要阻止磁通量的移动, 就不会使正常传导部分发生电磁感应, 保持零电阻。

### ● 磁通量能否在超导体的正常传导部分移动

如图 24 所示, 可知电流流向超导体时, 正常传导部分的电子因通过的磁通量而产生洛伦兹力。如果磁场在正常传导部分移动, 因其为超导体, 所以仅在超导部分与正常传导粒子交叉的部分产生 (极小的) 电磁感应, 并从超导变为正常传导。

与正常传导交叉的部分的磁通量更为稳定。

### ● 正常传导状态下的磁通量难以移动

由图 25 (a) 可知, 只有超导时, 磁通量可以自

由移动。但如图 25 (b) 所示,当超导中包含正常传导部分时,磁通量在超导与正常传导交叉的部分的磁场难以发生变化。要想使正常传导部分的磁通量移动,就需要破坏与正常传导部分交叉的超导。

与用钉阻止磁通量的操作相似,这称为钉扎效应。产生钉扎效应的正常传导粒子称为钉扎中心。

● 磁通量大小

磁通量实际是随温度的变化而变化的。  
使钉扎中心大量分散到超导体并不容易。让有限的超导体分散于在强磁场中可作为钉扎中心的材料中更容易。

● 电阻为零,也有电流限制

电流增大,洛伦兹力也增大。因此,流通的电流也有界限,这个电流称为临界电流。  
在超导体内部发挥钉扎效应的普通导体,即钉扎中心,其分散程度决定临界电流的大小。  
原本,对超导体而言,内部混入普通导体(杂质)并不是一件好事。但如果没有杂质,又无法发生超导现象。

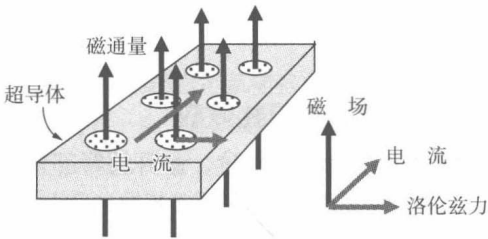


图 24 超导和正常传导混合状态下的电流和磁通量  
电流流过超导体,穿过磁通量时产生洛伦兹力,洛伦兹力指带电粒子切割磁通量时产生的力(弗莱明左手定则)

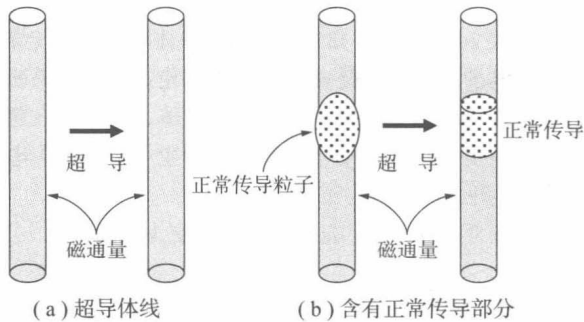


图 25 超导中的钉扎效应

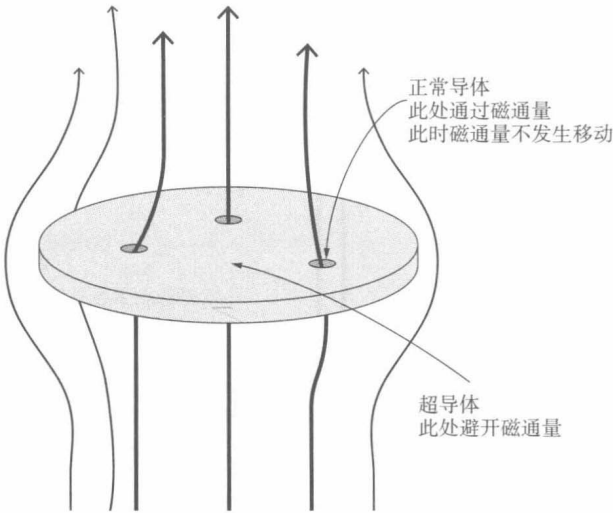


图 26 钉扎效应示意图

● 目前有 2 种超导磁体材料

目前超导磁体采用的是 Nb (铌) 和 Ti (钛) 的合金 NbTi 与 Nb 和 Sn (锡) 构成的化合物 Nb<sub>3</sub>Sn。  
NbTi 可以从超导 NbTi 母体中析出极细小 Ti。充分发挥钉扎效应。这种材料制成的超导磁体非常强。  
MRI 和超导磁悬浮列车采用的就是这种材料。

■ 淬 冷

● 超导线圈可流通多大电流

第 2 类超导体的出现和钉扎效应的发现,实现了超导磁体之梦。但是,在工业应用中必须注意安全性和稳定性。  
超导磁悬浮列车作为强磁体使用时,必须流通大电流(励磁)。此时,必须慢慢地增大电流。

● 量子化磁通量电流增大,发生移动

此时出现了新的问题,电流流通必然会产生磁场。超导体中量子化磁通量随电流的增大而增大。磁通量分布也随之变化。因此,电流增大时,磁通量从一个钉扎中心移动到另一个钉扎中心。  
磁通量的移动会引起励磁时的发热。

● 超导不耐热

在极低温度下才能实现超导。昂内斯研发超导体时,为实现超导利用液氮进行冷却。  
低温下的比热非常小,产生的热量很快传向超导材料。此时,需要利用液氮冷却剂散热。但如果散热

不够充分,热量会迅速扩展到超导体,导致温度上升。瞬间的温度升高会造成超导的破坏。

这种超导突然破坏的现象称为淬冷。淬冷与淬火类似,表示突然升温。

### ● 淬冷使超导线圈受损

淬冷会破坏超导,使线圈的功能失效。

因此,在超导磁体开发初期,为了不发生淬冷,需慢慢进行励磁,谨慎操作。边增大电流边观察其变化,确认未发生淬冷后,再继续增大电流,反复作业。

### ● 减小线径使散热更容易

解决淬冷问题需进行以下尝试。首先,必须将超导导线减小到极细(0.1mm 以下)。

利用传热系数高的金属铜等将其包裹,因铜的传热系数较高,可以立即吸收超导体的热量(图 27)。

线变细时,超导体中的电流也会变小。因此,必须将大量的细线捆扎成线束。

### ● 超导体线圈的多芯结构

图 28 所示为多芯结构的制作方法。首先,在粗铜管中制作一些孔,然后将 NbTi 超导体棒塞入其中。再改变这种铜管形状并进行机械加工,就形成了铜管中 NbTi 超导体呈细线状分布的多芯结构。

如果想使 NbTi 线变得更细,可以向空铜管中插入加工后满是 NbTi 的铜棒,再进行机械加工。这样,就形成了线更细的多芯结构。

### ● 解决淬冷问题,实现超导磁体

使用这种方法,制作出了即使高速励磁也不会发生淬冷的超导磁体。

超导磁悬浮列车最初也存在严峻的淬冷问题,但使用多芯结构可以解决这一难题。

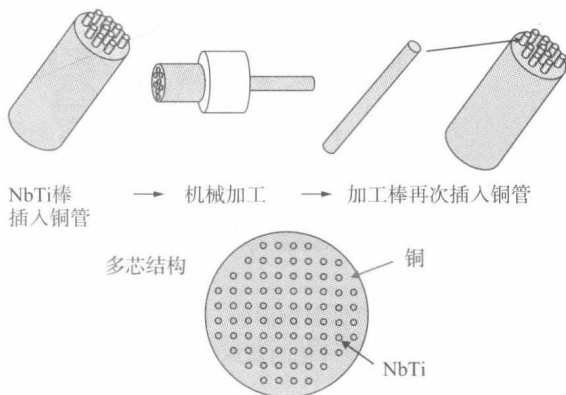


图 28 多芯结构的制作方法

## ■ 冷冻技术

### ● 不使用高温超导体的理由

超导体不进行冷却就无法发生超导。实际上,目前也发现了高温超导体,在液氮 $-196^{\circ}\text{C}$ 状态下即可发生超导。但超导磁悬浮列车采用的超导材料是 NbTi 合金,不使用液氮(沸点 $-269^{\circ}\text{C}$ )冷却就无法发生超导。

高温超导体由铜的氧化物构成。

如图 29 所示,将原料充入容易加工的金属管中并拉伸,最后经过热处理形成超导线材。

实际上,日本曾经做过搭载高温超导体的行驶实验。但在稳定性、可靠性以及成本方面都存在问题,远未达到正式投入超导磁悬浮列车的水平。因此,不得不继续使用需要液氮冷却的 NbTi 合金超导磁体。

### ● 使用液氮的原因

氮是元素名称,属于惰性气体。所有气体在常压下低温都会变成液体,温度持续下降,还会变为固体。但氮只有在高压下才能变成固体。其液化温度也低于其他元素。

### ● 液氮易汽化

液氮的汽化较为简单。利用液氮冷却超导磁体时,为了不使其汽化,需将液氮放置到图 30 所示的低温恒温器中。这是金属制造的保温瓶,通常分为 3 层。内部为液氮容器,四周覆有真空层,热量难以通过真空层;外侧为液氢层,温度为 $-196^{\circ}\text{C}$ 。保温瓶可使液氮保持低温,不发生汽化。

### ● 超导磁悬浮列车搭载冷凝机

超导磁悬浮列车必须搭载超导磁体,并且需持续

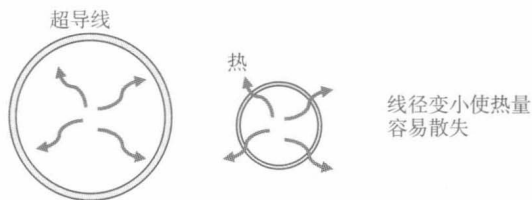


图 27 减小超导导线

线径变小则表面积增大,热量也容易散失