

高速超导磁浮铁道技术

目 录

一、 概述	1
二、 超导磁浮铁道的原理及特点	10
1、推进原理	11
2、悬浮原理	12
3、导向原理	15
4、技术特点	16
三、 车辆	17
1、车辆结构	17
2、超导磁铁	19
3、车载冷却系统	25
4、磁转向架	25
5、制动装置	28
6、车载电源	30
7、控制方式	31
8、舒适度	32
四、 轨道设施	33
1、轨道设备的结构方式	33
2、地面线圈	35
3、磁浮道岔	37
4、隧道	40
五、 供电系统	42
1、供电系统的构成	42
2、功率变换器	44

3、供电方式	50
4、电能消耗	50
六、运行系统	53
1、列车控制方式	53
2、位置检测方式	54
七、安全与环境	57
1、安全性	57
2、环境条件	60
八、附录	64
附录1、超导磁浮铁道车辆数据	64
附录2、东京—大阪超导高速磁浮中央线技术数据	68
参考文献	70

高速超导磁浮铁道技术

一、概述

磁浮铁道运输系统的开发工作是很早就开始了的，1922年德国人Hermann Kemper就提出了电磁悬浮原理，1934年公布了磁浮列车专利(DRP643316, 1934年8月14日)^[1]。这些都是基于普通电磁铁的吸引力，藉助自动闭环控制达到稳定悬浮的目的。1962年日本人着手高速悬浮铁道的研制工作^[2]，经过三代人的艰苦努力，建立了7公里的宫崎试验线，消耗了大量的人力和物力，克服和认识了一些关键技术。目前正在建设42.8Km实用化的山梨试验线。就磁浮技术的发展，在速度方面向高速和低速两个完全不同的方向发展着。根据速度和应用领域，磁浮铁道的研制方向，可分为低速、中速和高速三种方式(见表1.1)。开发低速磁浮的原因，1是传统地铁系统的造价急聚上升，在最近十年内几乎上涨10倍，2是由于电力电子技术和控制技术的发展，有可能克服

三类磁浮列车

表1.1

速度	125公里/小时以下	250公里/小时左右	500公里/小时以上
用途	市内交通，地下铁道	市郊运输，机场路	城间干线旅客运输
运量	2~2.5万人/小时	3~10万人/日	5~10万人/日以上
举例	英国伯明翰系统 日本HSST系统	HSST-200(日设计) B250(俄设计)	MLU001(日本) TR06(德国)

以往难于解决的技术难题。将磁浮技术应用于城市交通。由于无轮轨作用，减少了噪声污染，发挥了磁浮的优点。

高速磁浮运输的速度目标，原本订为400公里/小时，为与轮轨系有更大的竞争力，目前已将速度目标改为500公里/小时以上，以建立一种介于轮轨高速铁道(350公里/小时左右)与航空运输(800公里/小时~1000公里/小时以上)之间的一种高速、安全、无污染、舒适的21世纪未来的全新高速地表交通方式。

日本人从1962年就开始研究直线推进技术，随之着手研究超导悬浮技术，其理由是：

- 1、悬浮高度大，一般为100mm，因而对轨道的加工精度和整修工作要求不高。
- 2、排斥式自稳定悬浮系统，无需全域控制。
- 3、外部停电，只要有速度，车辆就不会突然落下来。
- 4、无须车载励磁电源。
- 5、超导线圈是空心的，因此车辆重量轻。

德国人于1974年，由西门子、AEG和BBC三家公司联合开发了“EET-01”型超导试验车⁽⁴⁾，经过四年的试验和比较，于1979年暂停了超导系统的研究，而把资金集中用于电磁悬浮系统的开发上，其理由是：

- 1、基于涡流效应的超导悬浮能耗大。
- 2、超导悬浮低速区制动运行条件不好。
- 3、起浮及落地系统，超导装置及冷却系统要占车辆重量的相当比重。
- 4、全速范围内的舒适度控制技术尚未解决。
- 5、强磁场对人体及其行包的电气影响尚不清楚。

因此，在高速磁浮铁道运输中，对常导与超导，电磁与电动，吸浮与排浮两大系统之间存在着激烈的竞争，两系统都在不断的

改进中。

超导磁浮铁道与普通高速铁道相比有如下优点：

1、工程费用低：由于可能在100%坡道上高速运行，对于选定的线路，可缩短隧道的建设长度及其开挖工程量。

2、方便乘客，舒适度好：因不依粘着作用，其时速达500公里/小时。悬浮运行无轮轨接触，故舒适度好。

3、运营及维护费用低：悬浮走行时对地面设备损伤小，维护费用低。在同一往返时间内，一列车及其司乘人员可往返两次。因而提高了生产效率，降低了运输成本。

4、公害小：车体处于悬浮状态，因而噪音低和振动小，同时无废气排出。

5、悬浮技术和推进技术可在时速为3500公里/小时远景管道磁浮中应用。

与航空运输相比超导磁浮运输有如下优点：

1、机场一般建在郊区，与市中心尚有一段距离，因而从门到门乘运时间，超导磁浮要比飞机乘运时间短。

2、与飞机相比，无噪声污染。

3、客室宽敞舒适。

4、与飞机相比，每人公里的能耗仅为一半。

5、磁浮有许多相关尖端技术，可带来许多尖端技术副产品。

因此，笔者认为专门介绍一下超导磁浮列车技术是有意义的。

日本超导磁浮铁道技术开发的经过，已有三十年的厂史，大致经过如下：

1964年东海道新干线开通，引起世界各国关注。然而还在这

两年前，在1962年，日本就开始了比东海道新干线更高速度的超高速铁路研究。为研究无粘着推进系统，在日本铁道研究所内，进行了同步速度为50km/h的双边式直线感应电动机推进试验。

1966年在国铁本部，铁道技术研究所等单位之内都设立了超高速铁路研究会，对高速化概念，高速方式及可能性进行研究。于1968年公布了包括有推进、支撑、导向为内容的高速铁道设计方案。这个方案的目标是东京一大阪，运行时间1小时，即最高速度500公里/小时。为与粘着驱动导向支撑接触受流相比，还研究了独立转向架空气悬浮、磁浮方式的工作特点，推进消耗电能及非接触受流等技术进行了研究，其结果认为采用地面一次方式，无接触受流最为合适。

与此同时，在研究所内，修建了400km/h小时试验装置，其直线感应电动机(LIM)为一次侧，圆盘为二次导体。在研究所内进行了高速特性，支撑方式，气浮磁浮，地上常导磁铁车上永久磁排斥型悬浮试验。此外还进行了各种直线感应电动机(LIM)高速试验，其结果表明，受端部效应的影响，短定子LIM电机在损失推力的同时，效率与功率因数的乘积仅有0.4~0.5。而且要保持直线电机有可用的特性，车上地下一次二次的间隙应在10mm左右。

气浮系统要求车上提供气源，且有在噪声和进隧道时气压变化问题。永磁方式存在地面磁铁的减磁措施问题。且增加自重，减小有效浮力、控制稳定区小也是个问题。

京谷好泰先生在东海道新干线达到满负荷运行的1969年，便从事高速铁路调查研究，提出了超导电动磁浮方式。这一方案的原理是美国布鲁克黑文国立研究所的Powell和Danly两人在196

6年全美机械学会(ASME)年会上发表的。由于超导技术及应用技术的快速发展,超导在磁浮铁道中应用的可能性被提到日事日程上来了。

1970年日本国铁在高速铁道研讨会上,发表了超导磁浮初期研究成果,同时在世界铁道首脑会议上公布了开展超导磁浮研究的信息。

基于上述理由,1971年3月7日日本国铁技术研究所组装了超导磁浮基础研究试验装置(图1.1)。超导悬浮试验表明了理论计



图1.1 超导磁浮基础试验装置

算和试验的一致性。从而开辟了与西德常导悬浮完全不同的系统。在这两大系统中,在系统组成、悬浮特性、开发方针上都有明显的不同。

1972年3月日本铁道研究所进行了超导磁浮同步电机LSM200型试验车的初步悬浮推进试验(图1.2)。同年10月为庆祝铁道开通100周年,公开了能乘4人,最高速度为60公里/小时的直线感应电动机的推进展示试验。试验车命名为ML100(图1.3)。

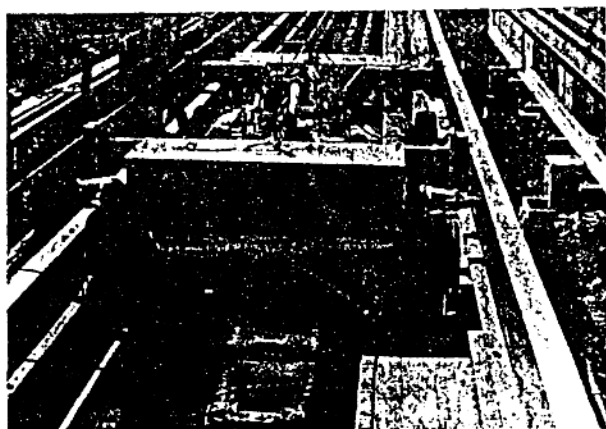


图1.2 LSM200超导试验车

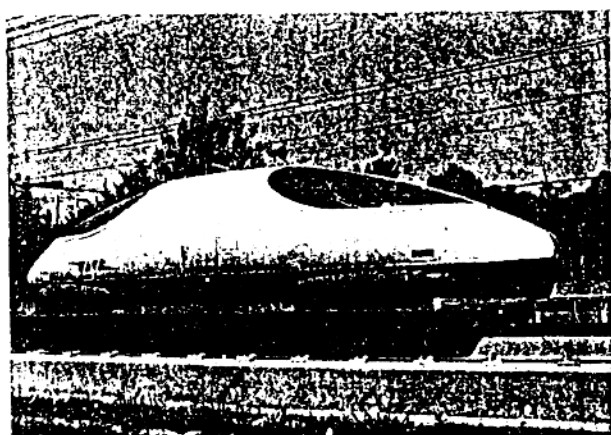


图1、3 ML100试验车

1973年进行了导向和推进两用方式的， 旋转速度为150km/h的稳定悬浮。1974年制造了地面为一次侧的同步电机推进，超导悬浮和导向ML100A试验车，并首次进行了非接触式悬浮走行试验(图1.4)。在国铁研究所内除进行走行试验外， 还利用超高速轨道试验装置、直线电机的地面变频试验装置、车辆运行位置检测装置进行了供电系统，交—交流变频器，位置检测，车辆控制、

空气动力学等基础分析和试验工作。图1、4示出ML100A完全非接触悬浮试验车。



图1.4 ML100A无接触受流悬浮试验车

于1974年，在国铁本部召开了悬浮铁道会议，确定建设以走行时速为500km/h的7km宫崎试验线。至1977年7月完成了1.3kmT型轨道线路，并用ML500型试验车开始试验。1979年线路延至7公里(图1.5)。在宫崎线内，ML500试验速度达517公里/小时(图1.6)为世界最高纪录。证实修建500km/h以上的超导磁浮铁道是可行的。

宫崎试验线平面图

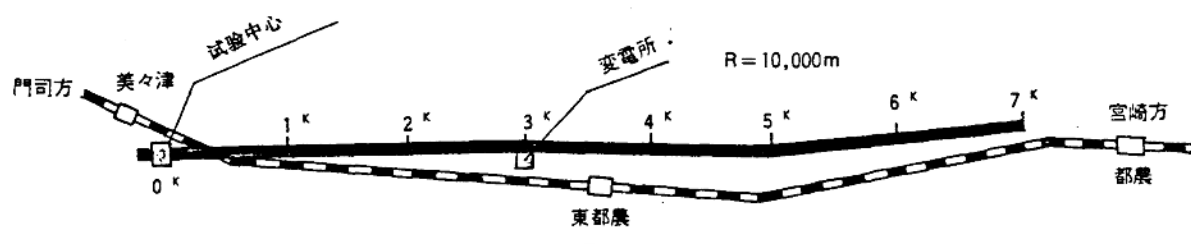


图1.5 7Km宫崎试验线

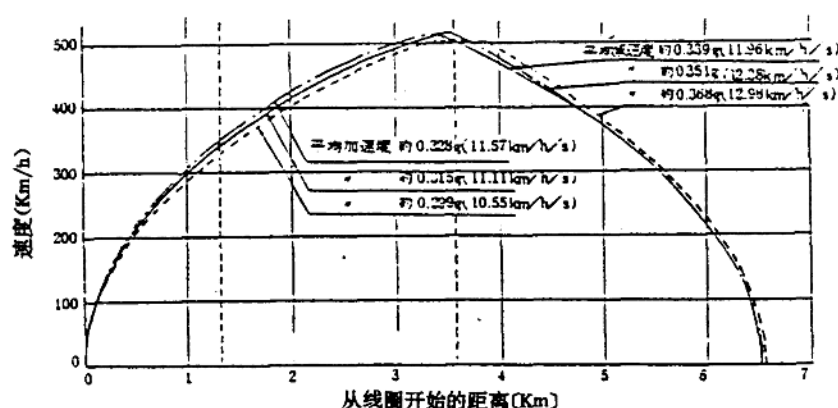


图1.6 517Km/h世界纪录



图1.7 在隧道内进行ML500试验

受运输省的委托，1979年1月在宫崎线中段架设350M长的模拟隧道，用ML500进行了走行试验(图1.7)，同年6月在ML500车上安装了氮冷却装置，名为ML500R(图1.8)。此后，由于载客的需要，加宽了车体。轨道断面由T形改为U形。1980年11月MLU001实验车(图1.9)开始走行试验。该车的特点是采用高性能超导线圈(图1.9)，并且悬浮，导向，推进采用同一个超导线圈，此外



图1.8 装有氦气冷却装置的ML500R试验车

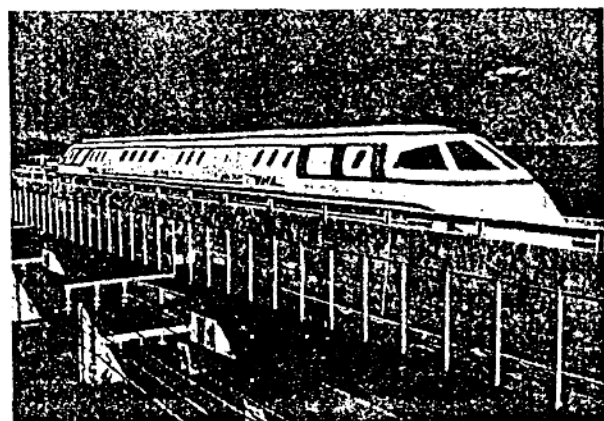


图1.9 车辆编号MLU001

还简化了超导磁铁的结构，减轻了重量和缩小了体积，改善了冷却装置的绝热性能，开发了轻型车载冷却装置。3辆编组走行速度达362Km/h，2辆编组走行速度达400Km/h。试验证实了平稳性、舒适性。校核了轨道加工允许偏差及感应受电等技术问题。至此，1号车乘客达10000人，走行试验往返7500次，总走行里程达40000公里。

1987年3月，在宫崎试验线开始了MLU002试验车走行试验。

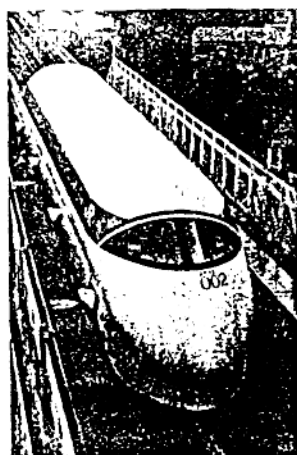


图1.10 MLU002 图1.11 MLU002N

MLU002车体长度22m，由于超导线圈性能的改善，线圈数目有所减少，并且采用集中布置。在1991年10月MLU002发生了全车烧毁的事故。此后又进行了MLU002N的制造(图1.11)。1993年1月开始制造MLU002N，其车长22M，高3.7M，宽3M，重20t，在7Km试验线内最高速度可达420Km/h。

为进行实用化，实现东京一大阪1小时运行的时速500KM/h目标。于1990年6月决定在山梨县建造48.2KM实用超导磁浮铁道试验线(图1.12)。总拨款3000亿日元，预计3年后开始通车试验。

二、超导磁浮铁道的原理及特点⁽⁴⁾

推进、悬浮和导向的原理。

在超导磁浮系统中，超导线圈装在车上，而与其相互作用产生推进、悬浮、导向功能的各种线圈都装在地面轨道内。藉助这些线圈的作用，使车上超导线圈产生推进、悬浮、导向力，其配

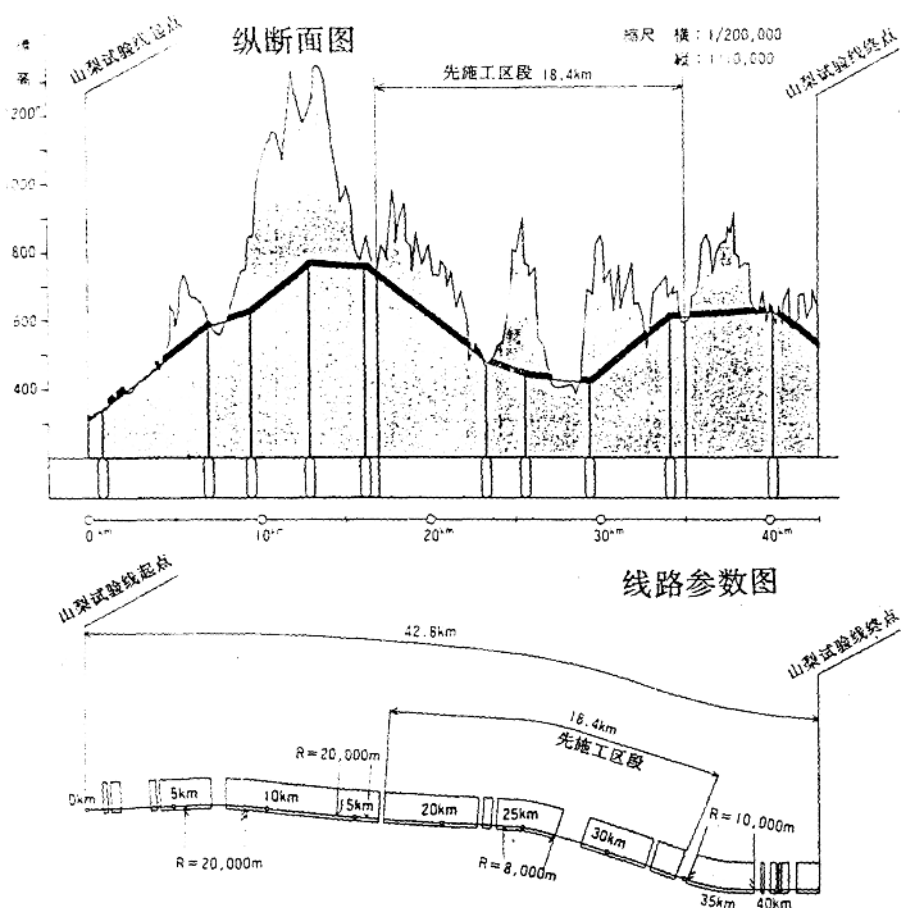


图1.12 山梨试验线

置图如图2.1所示。超导线圈装在车辆转向架框架的外侧，悬浮线圈设在地面上，推进与导向两用线圈也设在轨道的内侧。

1. 推进原理

采用直线同步电机 (LSM) 做为车辆的推进动力。安装在车上的超导线圈起励磁线圈作用。轨道内侧安装推进线圈起电枢的作用。由装设在变电所的变频装置向装在轨道内侧的推进线圈供电，如图2.2所示。随车辆运行使推进线圈内产生的涡流有所变化，

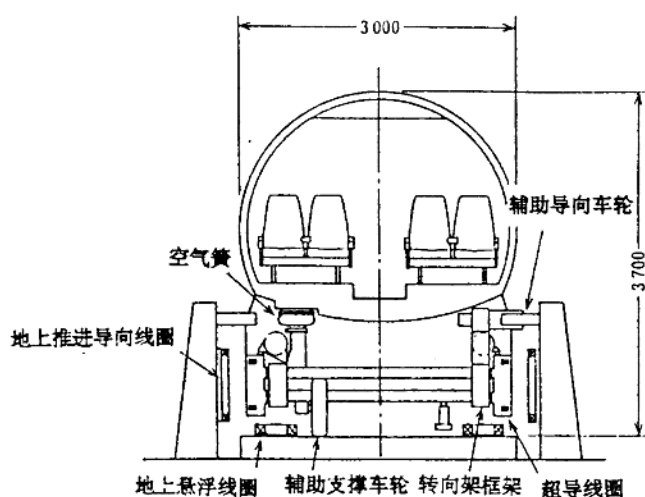


图2.1 宫崎试验线的车上及地面线圈布置图

对车辆的推进力加以控制。因为车辆的走行速度与供给推进线圈的电流频率成正比，其推力的大小又与该电流的幅值成正比，所以推进线圈电压的相位控制应与推进线圈的电流相位相同。检测地面轨道线圈与车上超导线圈的相对位置进行控制。如改变流通电流的方向，则会产生再生制动力，还可将车辆的动能送回给电网，也可采用电阻制动消耗制动能量。

2. 悬浮原理

超导悬浮也叫电动悬浮，如图2.3所示。与车辆超导线圈旁边放置有地面短路线圈（也称悬浮线圈）。车辆由直线同步电机推进。当车辆有了速度时，则与悬浮线圈相交链的磁通必有所变化，如同发电机原理一样，磁通变化在悬浮线圈内产生电流与超导线圈间发生作用，从而产生了排斥力，即产生悬浮力。同时，悬浮

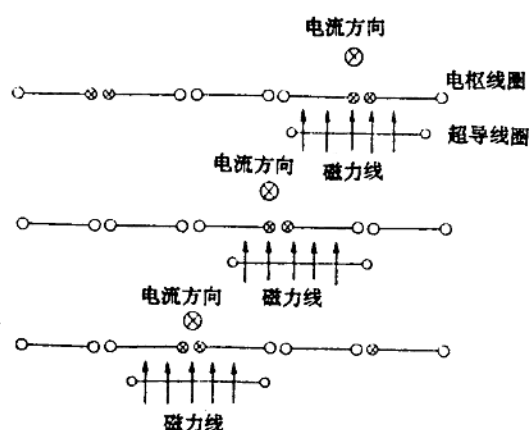


图2.2 推进线圈中的电流

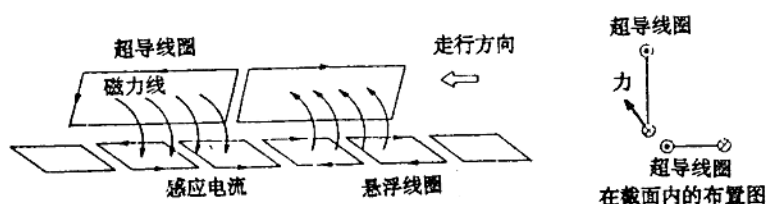


图2.3 悬浮原理

线圈也由于流过感应电流而产生焦耳热，从而消费能量。对车辆来说，这种能量消耗将以运行阻力(磁阻力)的形式表现出来。线圈的交链磁通、电流、电压的波形如图2.4所示。超导线圈与悬浮线圈的作用力，如图2.5所示。悬浮力随速度的增大而增大达到一定的速度后几乎成为定值，做为运行阻力的磁阻力却在某一速度下达到最大值，然后随速度的提高成反比下降、一定时间后相应的阻力及电能消耗成为定值。

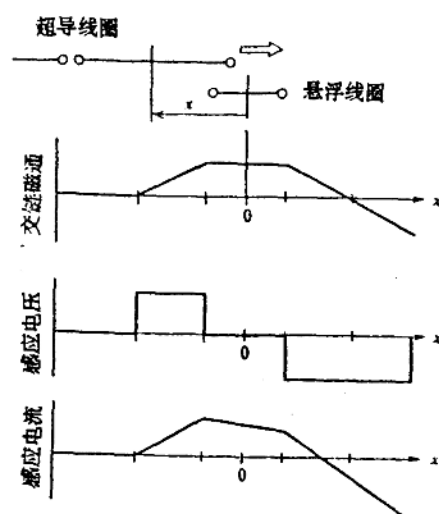


图2.4 悬浮线圈的感应电流

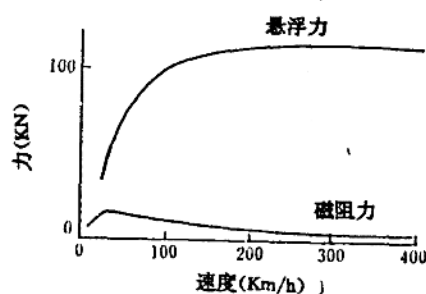


图2.5 悬浮特性图

悬浮力与磁阻力之比称为浮阻比。对一定的悬浮系统来说，希望浮阻比大些为好。减小线圈电阻可使磁阻力减小。另外，为保持一定的浮力，采用所谓零磁通法，便可在不减少浮力的条件下，减小线圈电流的磁阻力。零磁通的原理如图2.6所示。因为在这种方法中垂直布置超导线圈，且相对在悬浮线圈的中心线上下是对称的。故称这种方式为侧壁式悬浮方式。在“8”字形线

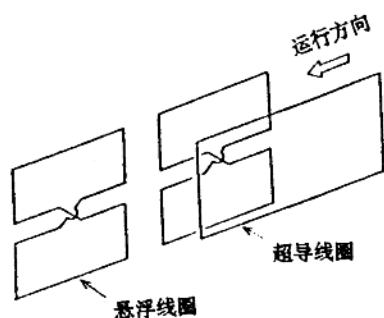


图2.6 零磁通悬浮原理及线圈的布置

图中，上下半部线圈的交链磁通将互相抵销，因而在线圈中无感应电流和悬浮力产生。向下移动超导线圈时，上下线圈间的交链磁通产生不均衡，交链磁通的差值与位移成正比。电流及浮力也与下降位移成正比。但另一方面，我们知道，悬浮线圈内部损耗与电流平方，即与位移的平方成正比。因此在“8”字形线圈中产生的悬浮力与磁阻力之比值仍与位移成反比。当位移很小时，则有良好的悬浮磁阻比。图2.7为宫崎试验线试验轨道的侧壁地面线圈外形。

3、导向原理

导向的原理与悬浮原理相同，只是使左右线圈产生力的方向相差 180° ，因而相对车辆中心线的任何左右位移，将产生回复力。如产生悬浮力一样，在没有左右位移时不产生回复力。宫崎线的导向线圈布置原理如图2.8所示。当车辆偏离中心位置时，左右两线圈的交链磁通将不一样，因左侧右侧电路相串接，于是产生了左右回复力，即导向力。