

# 磁悬浮和电悬浮

〔美〕 R. H. 弗雷泽 P. J. 基林森 G. A. 奥伯贝克 著

廖朝佩 李凤山 杨俊棋 译

浦迈俊 刘平彦 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书着重讨论了惯性制导和惯性导航系统中液浮惯性器件所用的磁悬浮支承,较系统地论述了磁悬浮的基本原理,设计,材料,试验调整及其发展应用,提供了大量的试验曲线并给出一些有源磁悬浮的控制线路原理图。书中对电悬浮问题进行了对比性的一般介绍。

本书可供从事惯性器件研制生产的科技人员和高等学校有关专业师生参考。

Magnetic and Electric Suspensions

Richard H. Frazier

Philip J. Gilinson, Jr.

George A. Oberbeck

The MIT Press

1974

\*

## 磁悬浮和电悬浮

〔美〕R. H. 弗雷泽 P. J. 基林森

G. A. 奥伯贝克 著

廖朝佩 李凤山 杨俊祺 译

浦迈俊 刘平彦 校

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850 × 1138<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 10<sup>13</sup>/<sub>16</sub> 270千字

1982年2月第一版 1982年2月第一次印刷 印数: 0,001—1,000册

统一书号: 15034·2260 定价: 1.35元

## 译 序

磁悬浮是提高液浮惯性仪表精度和稳定度的主要技术措施之一。国外，磁悬浮在惯性仪表中已获得了成功的应用。在国内，目前尚处于研制阶段，无疑它是液浮惯性仪表发展的方向之一。为了尽快适应我国惯性仪表的发展，我们翻译了这本书。

本书是根据美国一九七四年出版的德雷伯实验室（前身为麻省理工学院仪表实验室，从一九七三年七月一日起脱离该学院的归属而独立）R. H弗雷泽、P. J基林森、G. A奥伯贝克所著的《磁悬浮和电悬浮》一书译出。

这本书主要对近二十年来应用在惯性导航和惯性制导系统中的各种类型的磁悬浮，从基本原理、设计、材料、试验设备、试验调整以及发展应用等方面作了较为系统的分析与叙述，同时列举了大量的试验结果和试验曲线，对当前我国磁悬浮的研制有一定的参考价值。书中对电悬浮只作了对比性的说明，没有作为讨论的重点。从书中列举的应用实例看，显然，国外在导弹、空间飞行器以及舰艇的导航和制导系统中，广泛的采用了磁悬浮支承。这些导航和制导系统之所以获得了很高的精度和长时间的工作稳定性，是与惯性元件采用磁悬浮支承分不开的。几十年来，德雷伯实验室在磁悬浮的研制、应用方面取得了显著的成就，作者在本书中总结了他们在这方面的研究成果。

本书在翻译中，对认识到的技术上的错误已作了修改，以便读者在实际工作中参考。

由于译者水平有限，再加上实践更少，因此，译文难免会有错误和不妥之处，希望读者批评指正。

参加本书翻译工作的还有戎树壮、胡敏、张孝俊。

## 德雷伯●序

人类在争取生存和不断进步的斗争中已逐渐紧紧地依赖对外界环境的认识。不久以前,人们在满足人的需要和愿望的斗争中,还是通过感官来收集信息,并通过大脑来加工这些信息,然后通过体力劳动来应用这些信息的。在史前和有史以来至最近两世纪以前的漫长岁月里,人类的智能当时还远远不能适应改造客观世界的需要。但是,随着科学技术的发展,已大大改变了这种情况。现在,靠眼、耳、触觉和其他感官来收集信息已不能适应要求;在许多情况下,数据处理的复杂性和快速性也超过了人大脑的能力,而改造客观世界所需要的力和力矩也已远远超过了人的体力。

连接在提供计算结果的各指令元件和通用伺服执行机构之间的功率放大器已克服了后一种困难。电子技术和通信技术的发展,特别是数字计算机的发展提出了用具有适当容量和容许尺寸、重量、可靠性和成本的无生命装置来处理最复杂的表示信息的信号的问题。最近几年,由于用户对信息传递、处理和使用装置的迫切需要,信号处理子系统技术已有飞速发展,而且今后必将继续取得飞跃的发展。这种形势使我们确信,在所有的基本数据均用信号来准确地表示的情况下,总的系统性能通常将不受与这些信号有关的信息传递、处理和使用中的不完善性的限制。这种说法当然意味着,在所包括的任何设备中可以采用最新的技术。

在系统内部各种信号无严重误差的情况下,敏感元件的接收性能和输出性能方面的缺陷必然会限制总的系统性能。因此,必

须努力提高敏感元件的性能。

一般来说，任何敏感元件都受其所接收的输入量的作用并产生表示该输入的指定函数的输出信号。除有用输入量以外的其它输入量以及敏感元件内部可能产生的不希望有的分量都会给输出信号带来误差。这种影响通过信息处理子系统传递，从而降低了总的性能质量。

因此，随着信息处理技术的不断进步，必须继续不断地努力改进敏感元件的性能。敏感元件有很多种型式和涉及到各种情况，在不同情况下其输出信号误差又有各种不同的起因。某些误差是由热辐射或电磁辐射“噪声”引起的，通常采用低接收器温度和滤波技术来降低这类噪声。另一些误差则是由零件的机械公差，偏心率以及零件之间的接触摩擦所引起的。对于以处在加速度和重力场作用之下的刚体质量之间的相互作用为基础的敏感元件，在这些和其它可能的误差源中，减小零件的偏差最为重要。这种相互作用决定于牛顿动力学定律，这些定律在实际系统工作中所遇到的质量、加速度和重力场范围内是十分精确的。对于通常称之为加速度计的装置来说，输入量一般是线速度和重力场的变化。为测量角速度而设计的另一类仪表则以陀螺仪原理为基础。

所有上述各类敏感元件的性能都决定于精确的阻尼，而精确的阻尼则根据陀螺仪转子或不平衡质量产生的力确定。广泛采用的设计是一含有旋转转子或不平衡质量的圆柱形或球形部件。旋转运动的或平移加速度的和重力的牛顿定律反作用是理想的；实际问题是引入不引进误差力矩或误差力的方法来支接收元件。在敏感元件工作中甚至连最小的接触摩擦效应都是不允许的，但是，产生运动阻力的纯粘性摩擦却是很有用的，这种粘性摩擦阻力准确地正比于活动部件与其壳体之间的相对运动。这一事实使得有可能利用在粘性液体中的漂浮来有效地消除固体零件之间的全部接触。

这个原理约在二十五年前就已经提出，并已证明在成千上万

的实际仪表中是有效的。虽然在温度精确控制的情况下，漂浮能够大大地减小随机摩擦分量，并且能够提供积分所需要的与速度成正比的阻尼，但是，平衡和温度不可能没有一点误差，这就妨碍了敏感元件达到更高的性能。作用于要求消除全部接触摩擦的活动元件上的残余力只占元件总重量的很小一部分，然而，即使性能最好的敏感元件，这点残余力也总是存在的。

本书作者大胆地提出了在液浮仪表中用悬浮来消除全部接触摩擦的方法，虽然与被悬浮部件的总的重量相比，悬浮力是很弱的，但它却是获得理想工作性能的基础。悬浮的基本原理和设计细节是本书各章中要讨论的主要内容。力虽然很小，但为现代社会进步的需要所提供的先进技术能使仪表性能成数量级地提高。本书总结了过去二十多年来的富于想象力的概念、优良的工程和有效的技术。读者将发现本书的内容不仅是丰富的，而且像传奇故事那样有趣。

## 前 言(节译)

这本专著主要是介绍查尔斯·斯塔克·德雷伯实验室<sup>●</sup>在磁悬浮和电悬浮方面的研究情况。德雷伯实验室在这方面的研究对象主要是飞机、潜艇、导弹和航天飞行器制导系统中的元件的悬浮，但这些悬浮装置也可以用于其它许多方面，本书第十一章中介绍了其中的一些应用。很久以来，在别的地方，为了各种目的也研究了一些其它类型的悬浮。参考文献[1~35]介绍了迄今为止德雷伯实验室在制导元件悬浮方面研究的一般概况，对其它类型的悬浮，特别是快速旋转体悬浮的研究也提供了一些线索，德雷伯实验室虽然也正在研究快速旋转体的悬浮，但快速旋转体一般不是它所研究的悬浮的应用范围。

作者未曾打算列出一个总的参考书目，因为参考文献[35]很大程度上起到了直至1964年的参考书目的作用。[36]以后的参考文献几乎完全涉及德雷伯实验室的悬浮装置。第九章和第十一章叙述了近期的研究情况，特别是有源悬浮及其应用。本书中介绍了许多从前没有发表过的资料。对这一领域综合研究感兴趣的读者可以从参考文献[35]以及参考文献[24]所列举的书目中获得有益的启发。当然，感兴趣的读者会发现，一篇参考文献通常会引出其它一些参考文献，但是可能还有很多有价值的资料仍然藏在制造厂、实验室和其它从事这方面研究的研究机构的档案里。

作者感谢德雷伯实验室允许他们使用实验室技术文件和报告里的许多实例和大量材料，也感谢那些创作这些材料的人们（他们的姓名已在适当地方披露）。自从本书校样定稿以来，德雷伯

---

● 其前身是麻省理工学院仪表实验室。

## VIII

实验室已跟麻省理工学院脱离关系（一九七三年七月一日），实际上已进行了改组，且方向也稍有改变，虽然仍跟麻省理工学院保持着一定的互助关系，但实验室本身现在却是一个独立的非盈利公司。



## 目 录

第一章 绪论 .....	1
§ 1-1 有源悬浮和无源悬浮 .....	1
§ 1-2 德雷伯实验室的研制工作 .....	1
§ 1-3 力计算的基础 .....	2
§ 1-4 电路的影响 .....	7
§ 1-5 设计问题 .....	10
§ 1-6 小结 .....	10
第二章 理想的单轴无源磁悬浮 .....	11
§ 2-1 工作原理 .....	11
§ 2-2 第 1 种情况——电压源串联调谐情况下的力方程 .....	13
§ 2-3 电流和磁通密度 .....	15
§ 2-4 稳定工作的条件 .....	17
§ 2-5 静态电流 .....	18
§ 2-6 最大力（或峰值力）和刚度 .....	19
§ 2-7 位置信号 .....	28
§ 2-8 用微调电容法进行初始定位 .....	29
§ 2-9 小结 .....	32
第三章 单轴磁悬浮的其它调谐电路连接型式 .....	33
§ 3-1 电流源和电压源 .....	33
§ 3-2 第 2 种情况——电流源串联调谐 .....	34
§ 3-3 第 3 种情况——电压源并联调谐；第 4 种情况——电流源 并联调谐 .....	42
§ 3-4 第 3 (a) 种和第 4 (a) 种情况——理想化的并联调谐 .....	54
§ 3-5 位置信号和调整 .....	56
§ 3-6 绕组电容 .....	57
§ 3-7 小结 .....	58
第四章 单轴磁悬浮的电桥电路连接型式 .....	59

§ 4-1	第 5 种情况——无串联阻抗的电压源	59
§ 4-2	第 6 种情况——无串联阻抗的电流源	61
§ 4-3	第 7 种情况——电压源调谐的电桥电路	61
§ 4-4	第 8 种情况——电流源调谐的电桥电路	62
§ 4-5	支路电流和电压	62
§ 4-6	位置信号	63
§ 4-7	用微调电容法进行初始定位	64
§ 4-8	小结	65
<b>第五章</b>	<b>各种工作情况下性能的比较</b>	<b>66</b>
§ 5-1	恒幅正弦电压源或电流源	66
§ 5-2	气隙磁通密度的固定极限值	73
§ 5-3	其它的比较基础	89
§ 5-4	非正弦波激磁	95
§ 5-5	小结	100
<b>第六章</b>	<b>理想的单轴无源电悬浮</b>	<b>101</b>
§ 6-1	优点和缺点	101
§ 6-2	第 3' 种情况——电压源并联调谐; 第 4' 种情况——电 源并联调谐	102
§ 6-3	第 1' 种情况——电压源串联调谐; 第 2' 种情况——电 源串联调谐	105
§ 6-4	第 5' 种情况——电压源非调谐的电桥电路; 第 6' 种情况 ——电流源非调谐的电桥电路	110
§ 6-5	第 7' 种情况——电压源调谐的电桥电路; 第 8' 种情况 ——电流源调谐的电桥电路	113
§ 6-6	各种电路连接型式的性能比较	114
§ 6-7	非正弦波激磁	115
§ 6-8	磁悬浮和电悬浮的组合	117
§ 6-9	小结	118
<b>第七章</b>	<b>理想的多轴悬浮</b>	<b>119</b>
§ 7-1	两轴悬浮	119
§ 7-2	四极圆柱磁悬浮方程的推导	122
§ 7-3	八极圆柱磁悬浮方程的推导	126
§ 7-4	结构比较; 磁耦合的影响	129

§ 7-5	四极和八极磁悬浮的电路连接型式 .....	131
§ 7-6	三轴悬浮的组成 .....	138
§ 7-7	其它的三轴悬浮装置 .....	145
§ 7-8	其它极数的磁悬浮 .....	148
§ 7-9	两轴电悬浮 .....	151
§ 7-10	小结 .....	153
<b>第八章</b>	<b>材料的影响 .....</b>	<b>154</b>
§ 8-1	基本想法 .....	154
§ 8-2	对磁性材料性能的要求 .....	155
§ 8-3	磁性材料的处理 .....	157
§ 8-4	涡流效应 .....	160
§ 8-5	铁芯损耗对品质因数的影响 .....	165
§ 8-6	品质因数变化对方程的影响 .....	194
§ 8-7	铁芯损耗对电流和磁通密度的影响 .....	203
§ 8-8	磁化曲线的磁饱和及其它非线性的影响 .....	206
§ 8-9	磁悬浮力矩 .....	208
§ 8-10	电悬浮中类似的问题 .....	213
§ 8-11	小结 .....	214
<b>第九章</b>	<b>有源悬浮和混合悬浮 .....</b>	<b>216</b>
§ 9-1	历史背景 .....	216
§ 9-2	静态电流; 时间分割; 多路传输; 脉冲式工作 .....	219
§ 9-3	早期的基林森-斯科贝图洛悬浮的原理 .....	221
§ 9-4	现代的基林森-斯科贝图洛悬浮 .....	228
§ 9-5	斯科贝图洛时间分割系统 .....	234
§ 9-6	斯科贝图洛全交流有源悬浮 .....	239
§ 9-7	奥伯贝克相位反馈系统 .....	242
§ 9-8	脉冲式工作 .....	250
§ 9-9	莱斯脉冲抑制磁悬浮 .....	251
§ 9-10	赫思脉冲抑制磁悬浮 .....	257
§ 9-11	奥伯贝克脉冲抑制磁悬浮 .....	261
§ 9-12	改进的莱斯和斯科贝图洛系统 .....	264
§ 9-13	信号反馈方法概述 .....	264
§ 9-14	有源电悬浮 .....	266

§ 9-15	小结	267
<b>第十章</b>	<b>悬浮的试验和调整</b>	<b>268</b>
§ 10-1	磁路和电路的检查	268
§ 10-2	测试装置	270
§ 10-3	动态定中心或振动定中心	275
§ 10-4	浮子活动范围试验	279
§ 10-5	转子位置的漂移试验	279
§ 10-6	仪表组件的试验	280
§ 10-7	小结	280
<b>第十一章</b>	<b>发展和应用</b>	<b>281</b>
§ 11-1	磁路和电路的分用与共用的比较	281
§ 11-2	陀螺浮子的竖立问题	287
§ 11-3	磁悬浮在发射控制系统中的应用	290
§ 11-4	磁悬浮在制导和导航系统中的应用	292
§ 11-5	德雷伯式液浮仪表	294
§ 11-6	实际仪表组件	301
§ 11-7	悬浮振荡; 动态稳定性	313
§ 11-8	可能的应用和间接用途	316
§ 11-9	对深空间导航和其它引伸应用的未来要求	327
§ 11-10	小结	328
	<b>参考文献</b>	<b>329</b>

# 第一章 绪 论

在这一章中，我们将列举磁悬浮与电悬浮的各种类型，并说明本书讨论的范围和理论基础。

## § 1-1 有源悬浮和无源悬浮

磁悬浮和电悬浮的作用是利用磁场力或电场力使一物体沿着或绕着某一基准框架的一个轴或几个轴保持固定位置。这种悬浮通常是静态不稳定的。稳定可以通过如下两种办法来实现，一是连续地或断续地测量物体的位置，通过伺服装置迅速地控制力场，使物体相对其要求位置的偏移不超过允许的范围；二是通过调整激磁电路本身的参数。伺服控制悬浮叫做有源悬浮，而由调整其激磁电路参数来实现固有稳定的悬浮叫做无源悬浮。

对于有源悬浮，测量物体位置的方法很多，诸如各种电气或机械探测器，电桥网络中电参数或磁参数的变化、光束或其它方法。为了提高无源悬浮的刚度，或者，因为无源悬浮仅在偏离要求位置的一定范围内是稳定的，可以将伺服控制叠加在无源悬浮上。永磁悬浮至少可以沿一个轴以推斥方式稳定，因而是无源的，但是本书中将不讨论这种悬浮。不管是无源悬浮还是有源悬浮，都可能出现振荡，这种振荡根据情况，可以采用伺服装置，机械阻尼，电磁阻尼以及参数调态等方法来控制。

## § 1-2 德雷伯实验室的研制工作

有源悬浮和无源悬浮都有很多种型式和用途。如在序言中指出的，德雷伯实验室研制的悬浮主要是为了在飞行器的运动相当大的情况下，包括大加速度，振动和冲击等，使飞机、潜艇、导弹

和空间飞行器的制导系统中的元件相对于指定基准无摩擦地保持固定。因此，减小体积和重量，节省能量以及高度的可靠性和优良的性能是最主要的。被悬浮的元件通常浮在适当的液体中（这种液体还起阻尼作用），因此，悬浮问题要容易得多。如果元件需要连续旋转，使用这种液体一般就不合适，因而悬浮问题也就更困难些<sup>[16, 17]</sup>。悬浮的目的不是支承悬浮元件的重量，而是使悬浮元件克服微小的端部和侧边的偏心负载力（其他有关磁性元件和电气元件中固有的，或由温度梯度产生的）和飞行器运动的扰动所产生的大的惯性力，脱离其机械轴承，保持在中心位置。微小的偏心力会引起静态漂移，而由飞行器运动产生的大的惯性力会将悬浮元件推到其机械轴承上。

研制工作首先是从有源悬浮开始的<sup>[1, 2, 3, 7, 8]</sup>。由于所用的敏感回路和伺服回路的电子设备和电路的体积和重量都相当大，所以就放弃了原来的方案，而代之以更简单小巧的无源悬浮，这种无源悬浮只要对悬浮电路本身进行适当调谐就能实现自动稳定，但其恢复力和刚度却比有源悬浮的小<sup>[4~8]</sup>。现在，随着晶体管和其他固体器件以及集成电路日趋完善，已有可能大大减小敏感回路和伺服回路的体积和重量，因此为了在不增加辅助设备的体积和重量的情况下，利用其恢复力和刚度高的特点，设计重又返回到有源悬浮上来。有源悬浮可通过脉冲式工作，或通过具有其他功能或其他成分的时间分割以及消除或减小连续静态电流来大大节省能量。这将在第九章中讨论。有源悬浮早期阶段的研制工作由于设备已陈旧过时，不再详述，重点放在目前德雷伯实验室研制的有源和无源悬浮上，而早期的有源悬浮只作为目前应用的有源悬浮的发展历史简要地介绍一下。

### § 1-3 力计算的基础<sup>[36, 37]</sup>

在德雷伯实验室研制的悬浮中，气隙长度与横截面积的大小相比是很短的，通常只有几个密耳，因此，在能准确地预测性能

的计算精度范围内，边缘效应可以忽略不计。于是，基本分析比大气隙结构要简单得多<sup>[20,21]</sup>；在大气隙结构中，即使情况可以看成准静态的，也需要用场论来进行分析，而不能用电路理论来分析。虽然气隙表面可能是圆柱形或圆锥形的，但它们可以十分近似地当作平行平面气隙来处理，而不论气隙面的运动与磁力线方向平行，如图 1-1(a) 所示，还是与磁力线方向垂直，如图 1-1(b) 所示。

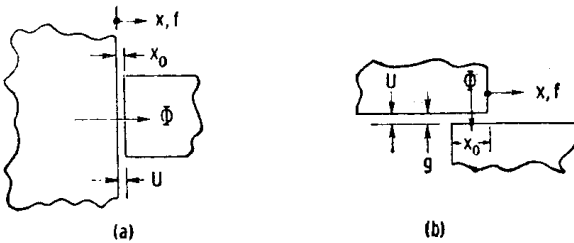


图 1-1 气隙面间的磁场拉力

(a) 平行于磁力线方向；(b) 垂直于磁力线方向。

对于图 1-1(a)，磁场拉力为

$$\begin{aligned}
 f &= -\frac{\Phi^2}{2} \frac{d\mathcal{R}}{dx} = \frac{\Phi^2}{2\mu A} = \frac{U^2}{2} \frac{d\mathcal{D}}{dx} = \frac{U^2}{2} \frac{\mu A}{(x_0 - x)^2} \\
 &= \frac{\mu \mathcal{H}^2 A}{2} = \frac{\mathcal{B}^2 A}{2\mu}
 \end{aligned} \quad (1-1)$$

而对于图 1-1(b)，

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{U^2}{2} \frac{d\mathcal{D}}{dx} = \frac{U^2}{2} \frac{\mu w}{g} = \frac{\mu \mathcal{H}^2 w g}{2} = -\frac{\Phi^2}{2} \frac{d\mathcal{R}}{dx} \\
 &= \frac{\Phi^2}{2} \frac{g}{\mu w (x_0 + x)^2} = \frac{\mathcal{B}^2 w g}{2\mu}
 \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中  $\Phi$  —— 气隙磁通量；

$\mathcal{R}$  —— 气隙磁阻；

$\mathcal{D}$  —— 气隙磁导 =  $\frac{1}{\mathcal{R}}$ ；

$\mu$  —— 气隙磁导率；

$A$ ——气隙横截面积，见图 1-1(a)；

$w$ ——气隙宽度，见图 1-1(b)；

$U$ ——气隙磁压降；

$\mathcal{H}$ ——气隙磁场强度；

$\mathcal{B}$ ——气隙磁通密度。

如果电场穿过相应的气隙，则电场拉力为

$$\begin{aligned} f &= -\frac{Q^2}{2} \frac{dS}{dx} = \frac{Q^2}{2\varepsilon A} = \frac{V^2}{2} \frac{dC}{dx} = \frac{V^2}{2} \frac{\varepsilon A}{(x_0 - x)^2} \\ &= \frac{\varepsilon \mathcal{E}^2 A}{2} = \frac{\mathcal{D}^2 A}{2\varepsilon} \end{aligned} \quad (1-3)$$

和

$$\begin{aligned} f &= \frac{V^2}{2} \frac{dC}{dx} = \frac{V^2}{2} \frac{\varepsilon w}{g} = \frac{\varepsilon \mathcal{E}^2 w g}{2} = -\frac{Q^2}{2} \frac{dS}{dx} \\ &= \frac{Q^2}{2} \frac{g}{\varepsilon w (x_0 + x)^2} = \frac{\mathcal{D}^2 w g}{2\varepsilon} \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中  $Q$ ——气隙表面的电荷量；

$S$ ——气隙倒电容 =  $\frac{1}{C}$ ；

$C$ ——气隙电容；

$\varepsilon$ ——气隙电容率；

$V$ ——气隙电压降；

$\mathcal{E}$ ——气隙电场强度；

$\mathcal{D}$ ——气隙电通量密度。

无论哪种气隙结构，都可用来使物体沿一个轴悬浮，如图 1-2~1-4 所示，或沿二个、三个轴悬浮，如图 1-5 和 1-6 所示。如果图 1-5(a) 和 1-6(a) 中转子的端部靠近定子的外孔中，除了借助于边缘通量外（假如转子的端部靠近定子的外侧），就不可能实现沿纵轴的定心作用，悬浮仅径向有效。图 1-1(a) 所示气隙结构的悬浮作用最硬，但位移范围很小；而图 1-1(b) 所示气隙结构的悬浮作用最软，但位移可相当大。因此，图 1-5(a) 和



1-6(a) 的悬浮作用径向较强，纵向较弱；而图 1-5(b) 和 1-6(b) 的悬浮特性则恰恰与此相反。然而，图 1-1(b) 的径向作用太弱，因此很少采用。所以，采取折衷办法，或者将气隙做成圆

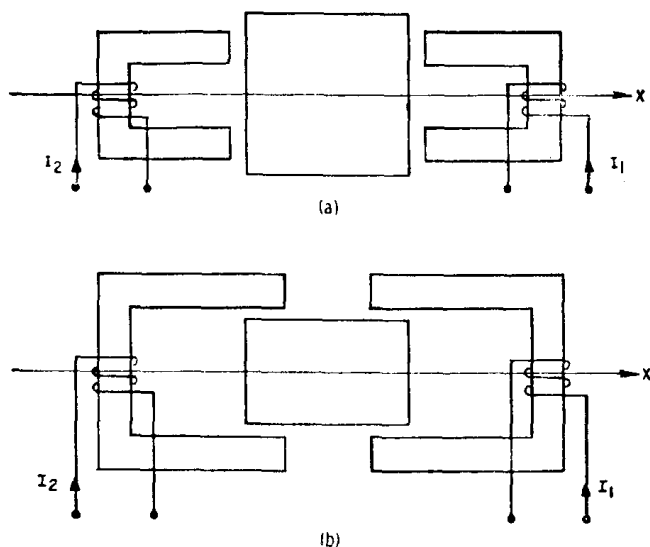


图1-2 单轴磁悬浮示意图

(a) 轴与磁力线方向平行；(b) 轴与磁力线方向垂直。

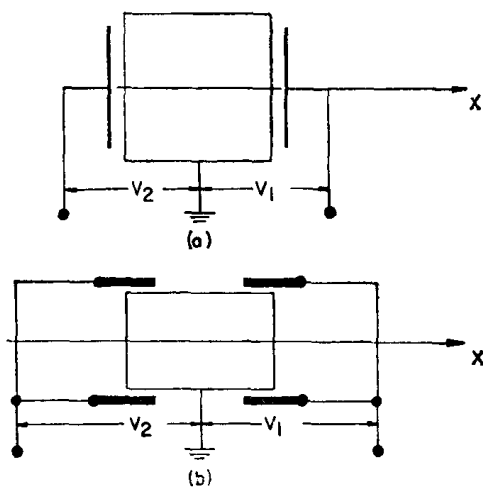


图1-3 与图1-2类似的单轴电悬浮示意图，悬浮元件接地