

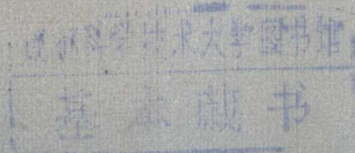
746038

501
0413

感应悬浮理论及其应用

论文集

谢元运 等译
韩柱亭 校



科学技术文献出版社重庆分社

感应悬浮理论及其应用

论文集

谢元运 等译

韩柱亭 校

科学技术文献出版社重庆分社

感应悬浮理论及其应用论文集

谢元运等 译

科学技术文献出版社重庆分社 出版

重庆市市中区胜利路91号

新华书店重庆发行所 发行

科学技术文献出版社重庆分社印刷厂 印刷

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 16 字数: 40万

1984年8月第一版 1984年8月第一次印刷

科技新书目: 73-219 印数: 2000

书号: 17176·369

定价: 1.65元

前 言

电磁悬浮是机电能量变换的一种特殊形式。严格地说,它是在没有接触性约束的条件下,由于包括电磁场在内的两个或更多个场力的作用,而使物体在空间处于稳定或似稳的一种状态。20世纪初,悬浮理论的奠基者们最先在实验中造成了物体在空间自由悬浮这一人类历史上长期视为神秘的现象。此后,由于悬浮现象所具有的无接触、无摩擦的特征,使它在许多有特殊要求的场合下,显示出极大的优越性。国外一些作者发表了相当数量的有价值的研究成果,并在如下的领域中已经付诸实践。

- 1). 用于高纯冶金,以避免熔炉的污染;
- 2). 用于自动化系统,作为机—电变送器与稳定器,或非电量检测装置;
- 3). 用于超高速回转装置,无摩擦、低噪音,轴承无需润滑,理论寿命极长;
- 4). 用于无接触支撑,如风洞中飞行器模型的支撑;
- 5). 高速大功率地面运载系统。

本书汇集了以感应悬浮为主的国外有关电磁悬浮的论文35篇,其中一些是悬浮理论奠基者的重要著作。有1939年的早期论文,也有1983年的新作,文中分别以场的与路的方法进行了理论分析或报告了实验研究结果,此外还有综述性文章。译者希望本书能了解电磁悬浮理论的发展与现状提供一些有价值的材料,以期对悬浮理论与技术在我国的应用与开发有所贡献。

在内容编排上,以空心感应圈与有铁心线圈中非磁性金属的感应悬浮为主,同时对铁磁材料在交变场中的谐振悬浮和在受控直流场中的似稳悬浮也予以重视。作为对比,也编入了一篇永磁悬浮和几篇感应电动器件等辅助性文章。鉴于高速运载系统上的磁悬浮近年来进展极大,已自成体系,故未予列入。

本书由谢元运副教授主译、徐荣杰、秦鹏、张安戈、赵元凯、王平、王承志、李力、韩柱亭等参加了本书的编译工作。全书由韩柱亭校审、本书的翻译工作得到重庆建筑工程学院赵兴仁同志帮助,谨此致谢。

由于水平有限,译文不妥之处,请读者不吝指教。

译者1983年10月

目 录

第 一 篇

通 论

电磁悬浮.....	(1)
电磁悬浮器.....	(20)

第 二 篇

非磁性金属在空心线圈的 交变磁场中的感应悬浮

固态金属与熔融金属的电磁悬浮.....	(23)
轴对称系统中电磁悬浮的计算.....	(32)
关于电磁悬浮的势阱描述.....	(41)
应用高频悬浮加热的金属真空蒸发.....	(52)
磁悬浮的稳定性.....	(55)
磁悬浮的必要条件.....	(67)
具有反接线圈的电磁悬浮装置悬浮力的研究.....	(69)
双轴系统磁悬浮理论.....	(79)
电磁悬浮装置的电磁场分析.....	(96)

第 三 篇

非磁性金属在有铁芯交变磁场中的感应悬浮

基于感应悬浮原理的电磁装置.....	(106)
感应悬浮变换器的运动方程式分析.....	(115)
应用感应悬浮原理的机电能量变换.....	(122)
基于感应悬浮原理的交流稳定器的工作精度.....	(128)
交流磁悬浮系统悬浮力的计算.....	(134)
交流磁悬浮系统悬浮力的计算.....	(142)

第 四 篇

铁磁材料在交流谐振场及受控直流场中的悬浮

电磁悬浮的新方法及其稳定.....	(151)
-------------------	-------

谐振电路悬浮器的一种新分析法.....	(161)
利用RLC谐振回路的磁悬浮装置的动特性分析.....	(170)
应用于风洞中的磁悬浮和平衡系统.....	(174)
吸引型磁悬浮系统的一个应用.....	(185)
具有晶闸管控制的磁悬浮.....	(188)
由 SmCo_5 制成的磁铁在恒定磁场中的自由悬浮.....	(190)

第 五 篇

磁谐振悬浮电动机及其他应用

电动轴承理论.....	(193)
磁悬浮静态特性的确定.....	(198)
新的结合：电动机——悬浮器.....	(207)
具有谐振调节电路的磁悬浮转子的最大定心力.....	(209)
具有谐振电路工作场的磁悬浮转子电动机计算方法的特殊性.....	(213)
在电动机工作场中磁谐振悬浮的动力学方程.....	(221)
异步电动机工作场中磁谐振悬浮动态稳定区域的研究.....	(231)
电磁控制元件动特性曲线的确定.....	(235)
具有可动绕组的感应电流调节器.....	(239)
关于具有多层电感器的感应——电动系统的研究.....	(243)
悬浮电磁铁的力学特性和电感的计算.....	(248)

电 磁 悬 浮

E. R. LAITHWAITE

提要 以前的关于感应悬浮的研究包括工作于工频的铁芯结构和工作于高频的简单线圈两个方面。前人的理论研究是过分简化的，而迄今为止的分析是基于场方程的全解的。这些方程的解是如此的复杂以致许多问题无法尝试，诸如一些涉及动态稳定性的问题。

本文探求一个介于两者之间的方法，借助工频系统的技术可将其推广到改进线圈的物理结构。对于分析，本文提出了基于等相位线的技术，它与移进场的模拟及等效电路一起被用来定性地估计包括动态稳定条件在内的系统的特性。这一新技术也可以用来研究磁阻起动的单相感应电机和单极电机。

在这里将参考近期的实验工作，对球、圆柱、圆环和矩形板的悬浮进行讨论。还讨论了悬浮系统及其应用于眼外科手术的金属吸引器的情况，对被悬浮或吸引的物体的尺寸的基本限制也作了讨论。

本文以对液态金属悬浮的简况的描述作为结语。

一、引 言

将悬浮与神奇的超自然现象联系在一起已有几个世纪了，尽管灵学家说它是神动或精神活动的一种形式，然而悬浮现象还是通过一些符合物理定律的方法实现了。悬浮的一个适当的定义是由Boerdijk在他的涉及这些问题的文集^[1]中给出的。这就是“如果一个物体相对于地球是稳定或随机平稳的，而且该物体和它周围物体的接触不是实质性的，则称该物体是被悬浮的”。这个定义排除了那些由于喷气漂浮的系统，实际的悬浮可以是、而且常常是在真空中进行的。

Boerdijk列出了各种可能的机理：

- (a) 重力；
- (b) 反应力；
- (c) 辐射场；
- (d) 稳恒电磁场；
- (e) 似稳电磁场。

关于(a)，他推论：即使用地球上最大密度的物质(铂铱合金)，也需其直径为地球直径0.24倍的球才能实现补偿地球的引力而作空间运行，所以这仅是空谈而无意义。

辐射场的应用也被指出是不现实的。因为被支撑物的每单位质量需要 $gc/2$ 的能，这里 g 是重力加速度， c 是光速。因而支撑1克质量需要大约1.5兆瓦。

(d)中所包括的是抗磁体或超导体在稳恒磁场中的悬浮及抗磁体、超导体或它们的结合的永磁悬浮。永磁体不能仅由另一个永磁体所单独支撑，而至少须有一个自由度被机械约束所消除。关于静态系统不稳定的基本理论是相互吸引或排斥的物体之间的力与它们之间的距离成反比。这一理论早已由Earnshaw所发现^[2]，而且已被麦克斯韦应用于电磁场。Braun-

bek^[4]推广了这一理论,他指出基本的不稳定性是因所用物质的 ϵ 和 μ 的值比它们在自由空间的值大。但在抗磁体和超导体方面Earnshaw的理论存在一个例外,在这种情况下 μ 的有效值几乎为零。后者的悬浮系统通常需要昂贵的设备。

除去需要物质连续爆炸的枪炮发射原理外,唯一能够在室温及合理的能量条件下提供较大质量的悬浮的是(c)项。Boerdijk又将此项分为两方面:

- (i) 交变磁场中的导电体的悬浮;
- (ii) 似稳磁场中的反馈系统的悬浮;

前一个是本文要论及的。

这里所涉及的力就是工程师们所说的感应力,它们与驱动传统感应电机转子的力有相同性质。我们仅希望通过类比来了解这一现象,而电气工程师在这方面有很高的技能。事实上,50年前的工程师们是如此地勤恳以致设计了很复杂的筒形带槽的电机。他们仅以电阻和电感组成了相当精确的等效电路,这些电阻电感除一个外都是常量。仅当要求更精确的计算时,如端部线匝漏磁,设计者才借助更精确的描述,如麦克斯韦方程。由于学生们有这样的想法,认为等效电路仅是一个粗略的近似,而麦克斯韦方程表达的才是准确的,我们有必要指出,旋转磁场和等效电路恰恰是磁场方程的很好的近似。当然方程是很有用的,但即使对很简单的结构,它们的应用也是很困难的。如果边界条件与槽和材料的 B/H 非线性有关,即使应用最现代的计算技术,应用麦克斯韦方程于传统的鼠笼电机实际上也是不可能的。

进一步说,当考虑一个相当复杂的问题时,使用磁场方程来计算一个给定结构的特性又是相当简单的。但要说出改变哪一尺寸来改善某一指标,一般说来则是困难的。

二、历史发展

早期发表的关于电磁悬浮的文献包括了用大量实验数据得出的各种公式,后来的文章则趋向致力于高频的不包含铁磁材料的系统,并且作者们给出了一些满足磁场方程的结构的研究结果。

最早的一篇关于工频磁场悬浮的文章是由Bedford、Peer和Tonks在1939年发表的^[5]。他们的圆柱形对称系统的截面图由图1示出。两个同心线圈A、B包围着铁磁的迭片骨架,这个系统在稳定的条件下能支撑一个导体圆盘或板。作者陈述道:两个线圈被这样联接以致在任一瞬时中都通过相反的电流。虽然没有特别说明,但这意味着两个线圈是反向串联的,作者试图通过画出有盘和没盘时的通量图来解释其作用原理,他们指出:在那些由于盘的存在而磁力线被迫从另外路径闭合的地方,将存在这样一个力作用在次级¹⁾上以使得磁力线重新扩散。这一说法不仅被用来解释升力,而且被用来解释克服倾斜和横向位移的静态稳定性。

人们可能批评这一解释,但他同时必须承认这一技术的简单性和作者的创造才能。他们使用辅助线圈安装在盘的周边来收集能量,而用这些能量来驱动安装在盘顶的辅助设备。

1952年一组美国人研究了悬浮和固态物体的感应冶炼,用的频率是10千赫的数量级^[6,7]。所用的线圈系统在图2示出,也是一个有一铅直对称轴的圆柱对称体,全部的线圈是串联的。线圈结构形式的演变过程没有被准确地弄清楚,但后来的作者们^[8]做了一些解释,他们正确地指出:虽然被支撑的物体有漂离轴线的趋势,但它仍能被一个单匝线圈所支撑。这些作

1) 指被悬浮物——译者注

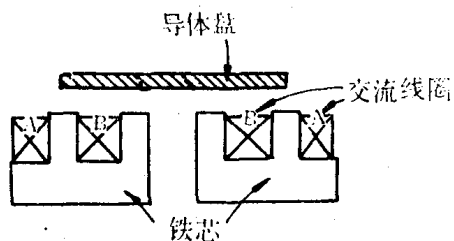


图1 Bedford, Peer和Tonks的原始悬浮系统

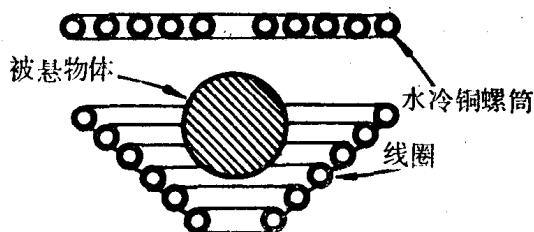


图2 Okress等人的高频系统

者们又说这种情况能够通过增加输入功率来补偿。然而当物体熔化时，它就不能保持在磁场中了。他们指出：理论推导和实验都表明可以通过在试样上面增添一线圈来弥补这现象。

后来的关于悬浮的全部文章都只是关于不包含任何铁磁材料的高频系统。美国人用作为基础的原线圈被后来的研究人员广泛地继承了，而且所记叙的实验目的都是金属的悬浮冶炼，以便获得没有坩埚污染的熔融金属。一些人发展了图2所示系统的分析方法，也改进了线圈的分布。最初的文章^[6]的作者由于分析的目的将系统分解为单匝线圈，并计算这样的单匝线圈和放在轴上一点的固态导体球之间的轴向力。他们的计算基础被陈述如下：“如果一个均匀的球被放在一个电磁场中，这个磁场空间分布是均匀的，并且以不高的频率按正弦规律变化，则由球中涡流引起的磁场与磁偶极子的磁场相同，随原磁场按时间交变，它的相位、振幅依赖于激磁的场强，球的半径，导磁率和电导率。球上所受净力为零。而如果磁场在空间分布是不均匀的，则球上所受的力可以通过用一个偶极子的代换来计算，这偶极子的极矩的计算可以象以前那样设它在球的中心。”作者承认这种方法只给出了一个近似解，但是详解可以从公式得到，看附录[11、1]。

图2所示的线圈由导管组成，管中通水冷却，当通以800安、9600赫的电流时，它能悬浮半磅的青铜，它的功耗没有给出，但可以估计悬浮几磅重的金属，大约需要50千伏安左右。

后来Brisley和Thornton^[9]分析了同样的系统，主要论及了竖直方向的稳定性，即在该情况下，由原线圈产生一个合力来抵制在轴上给定点处悬浮物所出现的微小位移的能力。值得注意的是，他们在计算中始终使用了一个无量纲的因子，它决定于装置部分的物理特性和尺寸。这一因子在近期发表的一篇文章^[10]中被定义为感应机构的品质因数，而极距被解释为悬浮球的半圆周。

Brisley和Thornton的公式比Okress的更复杂，可以从附录[11、2]中看到，而且详细地研究了诸如初级电流流过无限薄导体等假定。

Smith^[11]指出了早期研究人员的公式的复杂性，并给出了一个简单的方法。他用它由电感一位移变化率算出了轴向力 F_x ，即 $F_x = (\frac{1}{2})I_0^2(\partial L/\partial x)$ 。Smith使用了带有可变参数的等效电路转化了问题的研究，使用这一结果，他计算了导体球与放在其轴线上的线圈间的感应作用。他的计算包括了麦克斯韦方程的解。象早期的文章一样，他的文章只给出了作用于球的轴向力，而没有涉及横向稳定性和可能的任何轴向振荡的趋势。一个完备的关于悬浮系统的文献目录，包括早期文章的概述，被收在Geary的优秀作品中^[20]。

本文的主要目的之一是要研究处理感应悬浮装置及其联合系统的模拟方法。它将对稳定系统的设计有一般的指导意义，其中使用了与传统电机设计及研究中用的等效电路和旋转磁场相同的方法。因而它们的研究可以被说成是借助和推广了Bedford, Peer和Tonks的方法，而他们的文章是关于包含铁磁元件的工频感应悬浮的极少的几篇文献之一。我们希望所讨论

的技术至少能给出关于支配悬浮导体的稳定性、振荡与加热的透彻的定性机理，而且不需做冗长的计算。

三、移进场技术

Bedford等人的简单理论的主要缺点是只画出了交流系统的磁力线，这一般是无益的，因为所获得的图线只能表示一个瞬间的情况，而对导体的效果几乎不能推论，因为更有意义的是其后来磁通量的作用，由于磁通量一般地在空间不同点有不同时间相位，也就是说在各方向有各个行波。Barlow教授在最近的一篇文章^[12]中指出，行波技术可以成功地应用于感应型仪表的转矩的计算。

如果能够确定在导体材料占据的空间存在着行波，无疑将存在一个沿磁场运动方向作用于该导体上的力。而导体中任一电流都应在评价移进场的作用时予以考虑。

3.1 罩极作用

最有趣的感应过程之一是罩极的，它被普遍地用在单相电机的起动装置中。图3给出了一个普通的结构，在磁极上开一个槽，该部分磁极上套一个导体环。一个简单的、用来决定移进场方向的理论可陈述如下（首先假定不包含导体）：磁路A、B是并联的，它们被共同的原线圈所围绕。次级可以认为是与磁路B相联系，如同一个简单的变压器，其初级矢量图画在图4中。对于A磁路，激励电流 I_1 全部是有效的，而且它产生的磁通与 I_1 同相。这样 Φ_A 超前 Φ_B 。

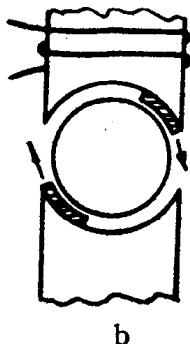
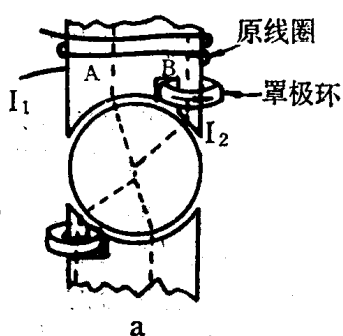


图3 罩极结构

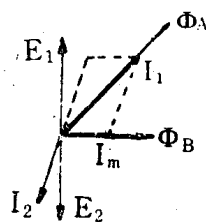


图4 罩极系统的矢量图

于是有一个移进磁场从主极部分移向罩极环，这相当于具有次级短路及开路的两磁路并联的变压器的作用。

图3b所示的罩极是由一个附在极表面的小导体片形成的，一般的罩极作用是将作用力作用在转子上（或者说是三次绕组）。人们通常未考虑由罩极作用产生的移进场也能够对罩极导体片本身产生一个作用力。但如果后者不是被机械地固定于极面上，它将被沿箭头方向排斥掉。直线感应电机没有横向稳定性就是这个原因。任何影响对称的位移都产生一个较大的罩极作用，这一作用将超出边缘，加大其位移，最终将其斥出。

基于罩极单独作用就可以解释Polonis, Butters和Parr^[8]所论及的由单个线圈所悬浮的球从轴线的漂移。任何离开轴线的偏差将导致随位移的大小沿与初始方向相同的方向更强的罩极作用，进而整个悬浮作用可以用传统的感应电机的理论通过简单的拓扑步骤来解释，其中包括罩极原理的应用。

图5解释了八个具体步骤。图5a给出了一个传统感应电机的截面图。图5b是用单相的带

有罩极环的定子绕组来代替多相定子绕组的第一步改进的截面图。图5c转子导体已被从槽中取出,代以连续的片状或杯形转子,在此结构中,因为转子铁芯不动,全部的力都作用于上述导体上,因而转子铁芯部分可以变为定子结构的一部分。

在图5d中,圆柱形结构已被展开为一个带有片状转子的直线罩极电机。在其片状转子中,旋转磁场已变为移进场。在图5e中,结构被重新弯成关于AB轴的(图5d中的)筒状,这次是定子绕组在里面。在图5f中,初级被减少为一个线圈和一个放置在它的竖直轴上的罩极

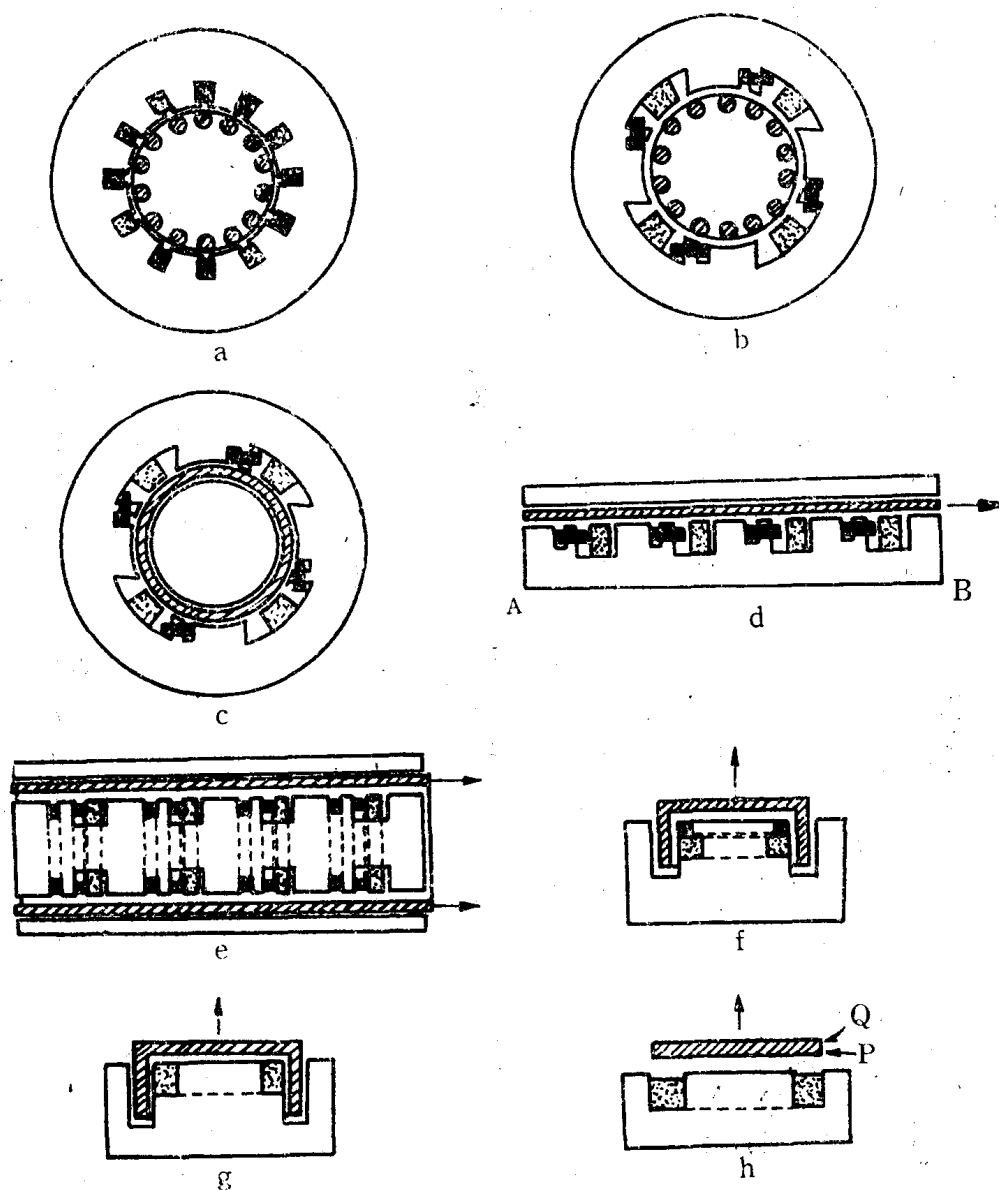


图5 三相鼠笼电机演变为悬浮系统的拓扑步骤

- a. 传统旋转电机
- b. 罩极旋转电机
- c. 杯型转子罩极电机
- d. 片状转子直线罩极电机
- e. 有对称磁通的筒式罩极电机
- f. 单线圈筒式罩极电机
- g. 基本悬浮器
- h. 圆板悬浮器

环，磁路通过下部闭合，而电路通过上边闭合。由于罩极下的磁场的运动方向总是从未罩部分到罩极环的，所以图5f的导体杯将受一个向上的力。在图5g中，通过它的下边缘效应，杯已被作为罩极环而起作用，这一作用实质上仍是移进场向上移动环状槽的作用。

因为磁通在槽口处的边缘效应，上述作用在槽顶上不能突然消失，因而电流和磁通在槽外的杯的这部分上发生相位改变。电流环绕着杯的边缘。理想情况下将没有任何绕其它轴的电流。如果拿掉杯的柱形边缘，以便只剩下圆形导体盘，如图5h所示，则环绕下边缘的电流（位置P）其相位将超前于Q层所示位置的上部的电流，并且升力是向上的，而且以传统感应电机的方式驱动该盘。

四、等 相 位 线

在涉及移进场的场合，研究磁通相位在估计感应性质方面是有用的。说明这样磁场系统的方法是平面上一组等位曲线，它表示系统的适当的截面。这些曲线是模拟地图上的等高线的。通过它们可以象表示山丘、洼地一样表示出放在磁场中的导体的情况。如果应用这样的惯例，标有一定正数的曲线对应于相位超前于零度或基准线，正如标有数字的说明高度的地图等高线。那么，导体将趋于沿斜率最大的线从大数运动到较小数，它表示电的“洼地”。这样模拟的限制是很清楚的。一个导体的存在将影响相位线的形状，而物体的存在不能影响地理的等高线图，除非这一物体的结构尺寸可以和地球相比。在感应的实用中，当被携入的导体是如此地小以致于它对磁场的影响可以被忽略（比如说品质因数小于0.1）。在这样的场合中模拟将会是更加完善。在相位图中我们有必要假设从 20° 移动到 10° 是走向“洼地”，而从 5° 到 355° 也是走下坡。

为了熟悉相位图，画出些我们所熟悉的感应系统的相位图是有益的。例如图6给出的是传统感应电机的气隙相位图。值得注意的，也是重要的一点是该图没有给出磁通密度和场强向量的方向的信息，因而它也不能表现感应力的幅值。这一技术的主要目的是指出自由导体将沿其运动的方向。图7给出了一个单相凸极感应电机，带有静止转子时的相位图。注意一个有趣的现象，在这种情况下，磁通的相位不是处处相等的，因而说在转子上没有转矩是不确切的。因为转子在每个凸极的边缘的作用象它自己的罩极环，所以各部分的侧拉力被表示出来了。A、C部分处于伸张状态，而B、D部分则处于压缩状态。因而定子凸极上必然有这

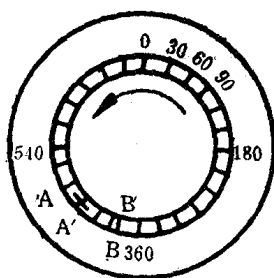


图6 一个悬浮器的等相位图

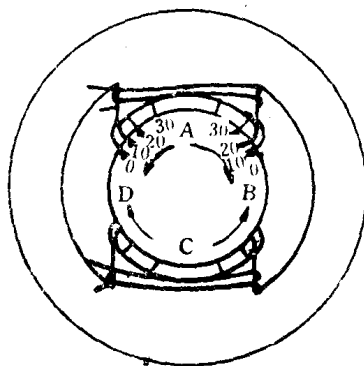


图7 单相感应电机的等相位图

些应力存在。通过画出图6、图7的相位图，可以知道等位线所涉及的磁通方向是辐射状的，这些相角可以使用一个测试线圈来测得。测试线圈的边放在诸如图6所示的AA'那样的一些

位置。一个放在 BB' 位置的测试线圈将测得切向漏磁通并且这一测试导致第二组等位线。如果第二组的任意一条曲线跨越第一组的一条具有不同相位值的线，那么，这一交点存在一个椭圆的旋转磁场。一般地，在转子和定子带槽的电机的气隙中，这种情况是很普通的。而且测试线圈可以由一个安装在轴承上的很薄的导体筒来代替（是如此地薄以致于不能干扰磁通的形状），当它转动时就可以获得结果了。这种局部效果无疑是造成传统电机的附加损耗的原因。

更特殊的情况显示在图8中。在图8a中一个小的导体板被放在由交流激磁的一个电磁铁的两板中间。等相位线在导体不存在的两极板间完全是空的。这是一个平面等高线。当导体板插入后，图形由图8示出。很小的导体板在A或B处将被迫向中间运动，极的中心将被有效地遮盖了。在图8b中，导体片被给予一横向位移，靠左边更大的变率¹⁾起了支配作用，而且

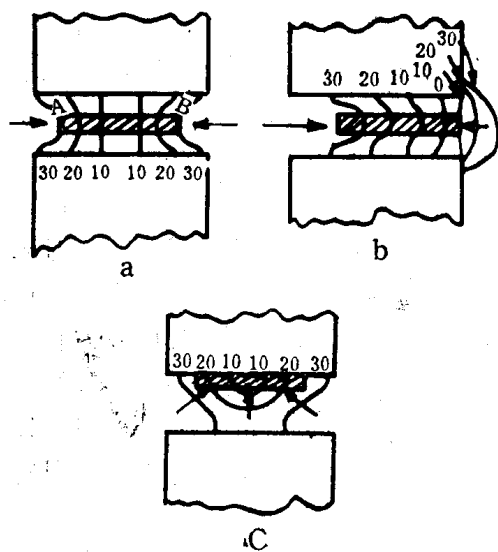


图8 作用在相反磁极间的导体上的作用力

导体片将因右移而增加变率差，以至最终被斥出。在图8c中，导体被竖直移动。相位图可以通过这样的讨论得出，如果磁极是相隔较远的，则靠导体板最近的磁极表面的罩极作用必将保持图8a所示的等相位线图形，而远离的磁极的表面必将是空的，而相位线必将象图示那样闭合。这马上可以看出：在导体板的中心部分，存在一个向上的移进场，试图迫使导体板靠在极面上，好象它是一个铁磁体一样。实验证实了这一预见。

4.1 磁阻起动电动机

磁阻起动电动机^[13]的情况可能是更有趣的。在这里，单相电动机的定子上

既没有辅助绕组也没有罩极环。每极形成阶梯状如图9所示。磁相位的分析将给出静态转矩的产生过程。它不是象图7所示的对称结构，转子导体对磁通的影响在上极的右端缘比在它的左端缘小，因为品质因数由于气隙的增加而下降。磁阻电机相对于大气隙和小气隙的两个磁路是并联的，它们有共同的激磁绕组，并且如果相对于每个磁路的矢量图被画出，好象它是一个分开的变压器，则这里的磁通的相位将是更接近于这种情况下的具有两磁路的变压器的初级电流的相位。从而右半部的磁通将滞后于左半部。

在一些电机中阶梯磁极与罩极环结合来提供三个不同的相位区，这类电机叫作三磁通电机。Veinott^[13]在叙述这些电机时援引了Baum^[14]的一篇文章，他借助于比附录[11.1]

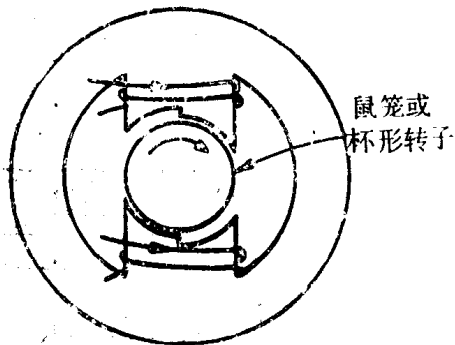


图9 带阶梯磁极的磁阻起动电机

1) 该变率指 $\frac{dx}{d\phi}$ ，——译者注，

和[11.2]中所引用的更麻烦的方程来预示了磁阻起动电机的运行特性。Veinott说：“这大概是一奇妙的矛盾事物，一台通常的电机，它的结构是最简单的，而它将是最难定量分析的。例如单相电机的结构比多相电机更简单，但是它更难分析和理解。磁阻起动电机比单极电机结构更简单，而它更难分析。为什么它能产生起动转矩确是一个不易明了的问题”。

再举一例，高频悬浮系统在结构上比磁阻起动电机更简单，而它意味这样一个悬浮系统的完全分析确实是一个棘手的问题。使用等位线的技术是一种模拟，它至少能对工作过程给出一个估价，虽然计算出某系统的相位图是不可能的，但可以用实验的方法画出相位图，而此图可以作为对初步结构作进一步改进的依据。在涉及液态悬浮时这可能是特别有用的。当一个固态物体被稳定悬浮时，它的不同部分可能受到不同方向的力，而且如果它被熔化，它将趋于被这些力所分裂开，导致稳定悬浮的中断。在固态的情况下，在较低的电流值和磁通时，通过固定于悬浮装置的次级，其等相位线可被容易地测出。用这种方法可以制成初级线圈的改进形式而大大减少供给系统的功率，其等相位线能表示出当次级熔化时的可能的性态。

通过一个离题的问题，即磁阻电机的两个有趣的发展，可以很好地说明感应系统的复杂性。图10示出一个磁阻起动电机的截面图。它的磁极阶梯已被渐增的气隙所代替。这产生了更均匀的相位变化，更接近多相电机的磁场。如果电机被设计为单极的，它对应着 360° 机械角度，如图11a所示，并且第二个这样的极被对称地排列放置，一个激磁线圈可以放在它们的中间。象图11.b的轴向截面图所示。转子和定子的磁路是完全对称的以便有对称的磁通回路。现在的问题是这一结构是否能象一个单极电机那样运行，在50赫供电时有6000转/分的空载转数。由于由气隙变化产生的总的相位变化不能超过 90° ，所以这电机最好能够被认为象一台整个外缘包含半个极距的短定子电机。因为没有磁通衰减部分^[15]，极限转速近似为 $12000n/(n+2)$ 转/分。这里 $n = \frac{1}{2}$ ，也就是空载转数在2400转/分。

关于制造能超过3000转/分的50赫无刷感应电动机已有过许多尝试，其中最明显的一个在图12中给出。一个开端直线电机定子被用来旋转一个导体筒。定子产生的磁场的线速度是极距的100倍（相当50赫供电时），而且可以按要求选择，只要圆筒形转子允许。通过选用足够大的极距和足够小的转子直径似乎可以达到几乎是任意值的转速，而实际中不能超过7000转/分。为画等相位曲线，我们做了一个实验。没有定子存在时，相位线是一系列等距平行直线，以适当角度从定子表面发出而趋于无穷远（虽然磁密随距离而指数衰减，但其相角在任一条线上却保持常量）^[16]。

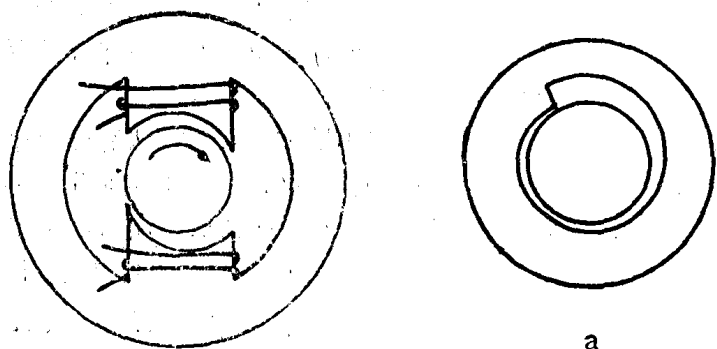


图10 带有连续气隙的磁阻起动电动机

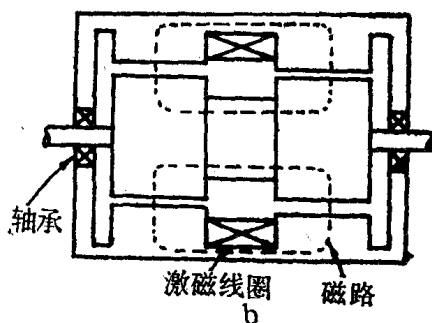


图11 单极磁阻起动电机

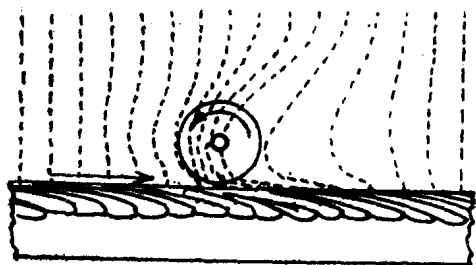


图12 3000转/分以上试验的相位图

当转子存在，并有2000转/分或更高的转数时，其相位图如图12所示。转子电流效应将改变相位线的形状，直到磁场以要求的3000转/分的速度在定子与转子之间行进时为止。类似单相电机的作用，作用在转子外缘上的显著的去磁效应、如同产生一个反转矩，使速度减低到该值以下。

五、稳定性

等相位线和移进场的概念也可以用来研究悬浮体的稳定性。我们可以看到一个在迭片铁芯中的线圈，如图5h所示，能够在圆形板上施加一个向上的力。还可以看到通过模拟罩极作用，盘的任意横向位移将激发向外的移进场。它将增强这一位移，而系统完全是不稳定的。稳定这个盘的一个方法是引入第二个线圈，它与第一个线圈同心，放在第二层横槽中，如图13所示。如果外部的线圈的电流相位超前内部线圈的电流相位，则可以建立一个向内的移进场，它抵制偏离中心位置的位移，特别当盘没有完全覆盖外层线圈时，如果有一个正确的相位关系，这一技术可能是完全有效的。但产生向内移进场的基本概念使各种不稳定系统产生了一种新的可能性。图13中的两个线圈可以认为是直线电机中相邻槽中的线圈，而且悬浮器的通过直径平面的截面，实际上与早期描述^[17]的对拖感应电机相同，它被设计成通过转速变化时，改变感应电机的转子动态阻抗的原理来产生振荡运动。悬浮系统的振荡性质的不稳定性不同于悬浮物直接被抛出去的不稳定性，因为它们有本质上的区别。试论动态不稳定性的文章以前尚未见。对于次级导体是运动的系统的精确分析一般地是更困难的，因为它涉及到附加于变压器电势上的速度感应电势。决定产生振荡的条件已是众所周知的，简言之，即品质因数 $Q < 1$ ，否则振荡将被阻尼。因此 $G < 1$ 是悬浮系统稳定的必要条件。 G 的值取决于等相位线间距。

在任何平面中可能发生直线振荡，或者是绕轴线的旋转振荡，并且如果物体的形态是不规则的，不同自振频率的几个振荡可能同时发生。

球是最容易振荡的形状，它可以横向、纵向或旋转振荡。圆盘可以倾斜地振荡，而矩形盘有五种可能形式的动态不稳定。因而悬浮系统的研究在很大程度上取决于试探方法是不足为奇的。

现在来阐述一些试验系统，它们以各自的方式构成。它们中间的一些特别是圆盘悬浮器的性态要求使用前述的方法。它们将按其可能性依次讨论如下。

六、实验系统

6.1 圆盘悬浮器

图13所示的50赫典型圆盘悬浮器是被用来考察稳定条件的。装置的尺寸为 $A = 5$ 吋、 $B = 1$ 吋、 $C = \frac{1}{2}$ 吋。

内部线圈有480匝15号标准线规的漆包线，外部线圈有440匝同样线。定子铁芯由220E

冲片组成，每片0.014吋厚，沿外边辐射形迭放。在这一装置中可控量是两线圈中的电流值和它们相对相位。我们发现，依靠这些控制量，盘子能够处于下面五种情况之一：

- (a) 稳定、水平悬浮；
- (b) 持续小幅度横向振荡，而盘不被抛出磁场；
- (c) 增幅横向振荡，直至盘被抛出；
- (d) 以一个倾角稳定悬浮，如图14.b所示；
- (e) 完全不稳定，立即倾斜和抛出。

虽然稳定条件随盘的尺寸变化，但只要盘的直径在内激磁线圈的外缘和外激磁线圈的内缘之间，就可以获得稳定悬浮。比内线圈的外径略小的盘子能够有一个稳定的水平悬浮，但不与定子轴线对中，而有图14.b所示的位置。当推一下时，盘能作圆周运动，如同按一个圆环轨道移动。

我们通过分别控制通到两个线圈中的电流，来研究给定尺寸的盘子的稳定悬浮条件。表示在图15、16、17中的结果是根据 Cashmore^[18] 的实验工作做出的。每个图均为对应一特定的内线圈电流值的二维曲线。横座标是外线圈的电流值，纵座标是电流间的相位差。阴影部分表示悬浮板在不同区域的状态。从稳定区向与条件 (b) 至 (e) 相应的其它区域的过渡是相当急剧的，而象 (b) 和 (d) 这样的其它的过渡却是很平缓的。在一个相当区域上倾斜和

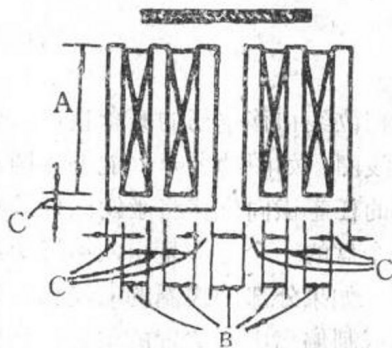
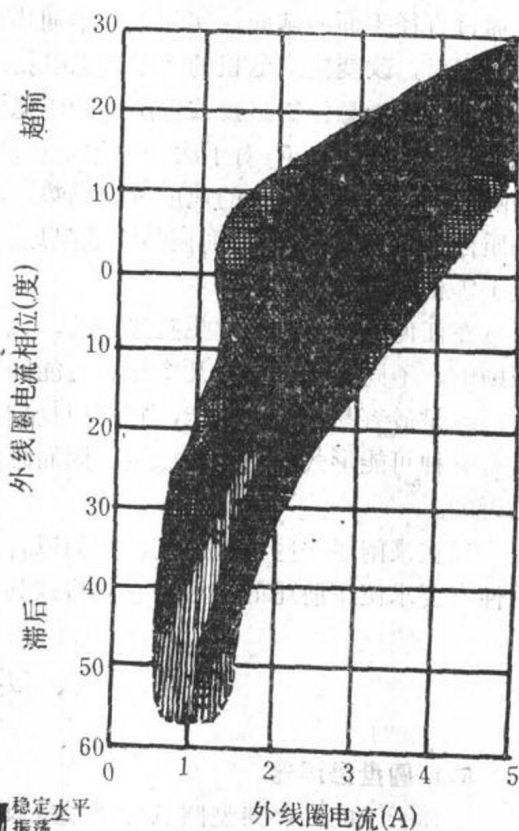


图13 圆盘悬浮器的布局



稳定水平
振荡
倾斜
不稳定

外线圈电流(A)

图15 对应10A恒定内线圈电流悬浮器的特性图

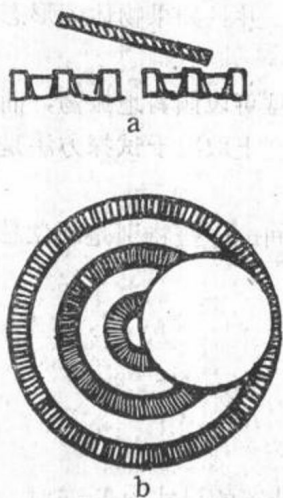


图14 不对称的稳定装置

a. 倾斜(侧视图)

b. 偏心、小盘水平(俯视图)

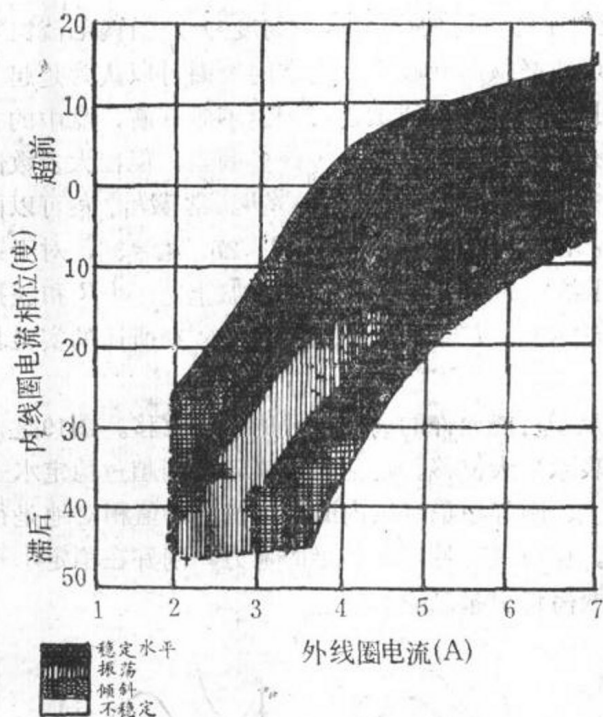


图16 对应12A恒定内线圈电流悬浮器的特性图

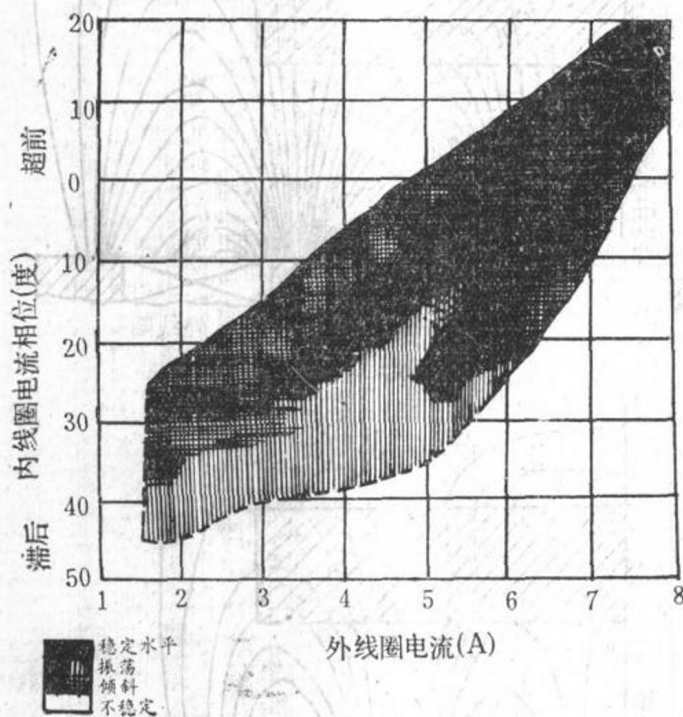
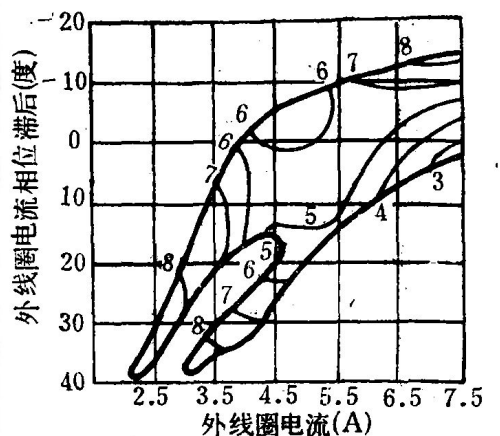


图17 对应14A恒定内线圈电流悬浮器的特性图

开始振荡的状态很少出现，没有列入上述情况。实际上定子结构不可能做得完全对称，而且上下振荡马上激发横向振荡。由这种方式激发的横向振荡区域在图中用暗线间的虚线表示。

在每个稳定域中，由曲线还能进一步标出盘的下面到定子表面的距离，如对应于图16的图18中所示。对于内线圈电流的一个特定值悬浮盘高度的变化不是很大的。假如盘是保持稳定状态，对于内电流的变化，则悬浮高度近似按内电流的平方根变化。对于一个给定的高度，



(曲线上的数字为1/16英吋的倍数)
图18 稳定区域内悬浮高度的分布

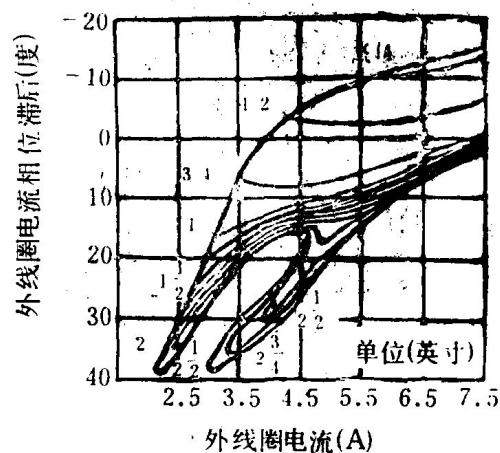


图19 稳定区内最大容许的横向位移的分布

振荡是同时发生的。当倾斜或振荡加剧以致板碰到定子时，曲线被虚线所截止。而条件 (c) 和 (e) 之间没有画出差别来，不可能说出很快被抛出是倾斜作用或是倾斜振荡运动的结果。在竖直方向