

# 电磁感应跳圈实验中跳圈跳起高度因素的探究

楚雄师范学院物理与电子科学系 王 春 王 昆 林

**【摘要】** 本文针对套在同一铁芯上的线圈与金属环, 当通以交变电流时金属环上方跳起、悬浮的现象进行分析探索。分析影响铝环在交变磁场中跳起高度的因素。定量分析表明, 在跳圈实验中, 铝环始终受到通电螺线管电流的平均安培力的作用, 其方向竖直向上, 而使铝环跳起一定的高度, 在交变磁场中铝环所跳起的高度与线圈匝数、电流的有效值等因素有关。

**【关键词】** 铝环; 通电螺线管线圈; 跳起高度; 悬浮

1831年著名的英国科学家法拉第首先发现了通过闭合回路所包围的面积磁通量发生变化时, 回路中就会产生感应电流, 这一现象被称为就电磁感应。电磁感应中变化的磁场会产生电场, 这个电场就叫做感应电场, 由感应电场引起的电动势叫做感生电动势, 因此产生的电流就把它叫做感生电流。

跳圈实验是电磁感应现象的一个著名的演示实验, 给带铁芯的螺线管线圈通入交流电源(220伏、50赫兹正弦交流电), 如实验原理图如图1所示,

表1 线圈匝数N=800 通电螺线管插入软铁棒

电压U (V)	铜环跳起高度	铝环跳起高度	通过的电流I (A)
160	0.618	0.223	1.545
170	0.656	0.237	1.642
180	0.695	0.250	1.738
190	0.747	0.264	1.832
200	0.788	0.279	1.932
210	0.827	0.293	2.028
220	0.867	0.307	2.125

表2 电压U=220V 通电螺线管插入软铁棒

通电螺线管匝数	铜环跳起高度 (m)	铝环跳起高度 (m)	通过的电流I (A)
1100	0.437	0.177	1.250
1000	0.587	0.207	1.575
900	0.707	0.267	1.950
800	0.867	0.307	2.125
700	0.987	0.347	3.505
600	1.337	0.437	4.700
500	2.037	0.507	7.700

螺线管上方的铝环会出现跳起后悬浮的现象。解释此现象不能只简单地用楞次定律和电磁感应定律来解释, 而还应该考虑铝环本身。铝环在交变磁场中产生了感应电流, 感应电流的相位比螺线管电流的相位落后, 定性说明铝环在一个周期内受到螺线管电流作用的安培力, 表现为斥力的时间大于表现为引力的时间, 铝环在每个周期内的平均安培力不为0, 而且平均安培力的方向向上, 因此铝环跳起, 铝环跳起原因与环中感应电流的相位有关。利用铝环中的感

应电流与感应电动势之间的相位关系, 从理论上导出: 作用在铝环上的平均安培力与铝环阻抗角的正弦成正比。进一步讨论位相差对相互作用力的影响, 定性说明铝环在一周期内的平均安培力小于零, 即铝环与线圈之间的作用力为斥力, 铝环受到平均排斥力而跳起。据调查资料, 铝环跳起高度可能与铁芯的相对磁导率、线圈的匝数、角频率、线圈电流的有效值、铝环的电感量、铝环的半径、铝环的电阻值、线圈与铝环间的互感系数等因素有关。铝环受到的平均安培力, 铝环跳起高度与什么因素有关呢? 针对这个问题, 本文定量分析了影响铝环在交变磁场中受力的作用而跳起的高度与线圈匝数、电流有效值的关系。

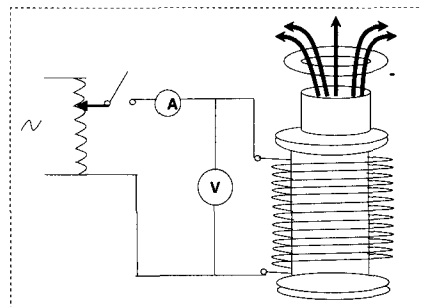


图1 实验原理图

视距攻击”。

### 4.3 CEC系统的组成

CEC系统实质上是一个利用计算机和通信技术构建的网络, 它把航母战斗群中各舰艇的目标探测系统、指挥控制系统和武器系统以及预警机等有机联系起来, 允许各舰以极短的延时共享各种探测器获取的所有数据, 从而使整个战斗群能高度协同地作战。该系统的核心设备是协同作战处理器(CEP)和数据分配系统(DDS)。

CEP用于处理由系统主舰和网络中各舰提供的数据, 通常与武器分系统的处理机连接, 以便及时、精确地进行协同作战。CEP具有足够的容量和运算能力, 以及与战斗群中所有作战系统相适应的接口。目前由30多台处理机组成, 每台处理机至少执行一项处理子功能。

DDS采用相控阵通信天线和大功率

行波管发射机, 能可靠、近实时地交换非配群体数据, 其传输能力比通常的战术数据链高几个数量级。

### 4.4 CEC系统的发展趋势

美海军正致力于CEC系统的小型化, 主要技术途径是发展通用设备组件(CES)。包括: 使用单片微波集成电路技术, 制造出性能好、重量轻、成本低、功耗小的相控阵通信天线; 使用专用集成电路技术, 减少系统的电路插件, 从而减小系统的体积和重量, 提高可靠性; 采用新一代微处理器技术, 提高系统的处理能力。同时, CEC系统技术将推广到各种指挥系统上, 以增强协同作战能力。美国各军种正在进行联合研究, 拟将CEC系统引入“爱国者”导弹系统、军级防空导弹系统、E-3预警机、战区高空防御/地基雷达系统等, 以形成一种真正“无缝隙”的战区防空反导体系。

使用GNSS的高精度、高可靠性、高完好性导航、定位、授时服务, 可以建立海、陆、空三军一体的协同作战能力系统。这个系统可以使战场上每个单位的作用最大化, 为信息化、数字化背景下的高科技战争服务。

### 参考文献

- [1] 谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 北京: 国防工业出版社(第2版), 2010(7).
- [2] 曹冲. 国际卫星导航的发展与决策[J]. 数字通信世界, 2006(9): 31-33.
- [3] 刘向阳. 我国卫星导航产业发展综述[J]. 有线电视技术, 2008(11): 58-64.
- [4] 叶利坤. 我国卫星导航产业发展战略研究[D]. 华中科技大学, 2009.
- [5] 赵琳. 卫星导航系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001: 2-14.

### 1. 原理及实验装置

跳圈实验是电磁感应现象的一个著名的演示实验，如图1所示。在圆柱形的直铁棒上绕一个多匝线圈，线圈接交流电源(通常是220伏、50赫兹正弦交流电)。将一轻质铝环套在铁棒上，接通开关，铝环便向上跳起，并悬浮在铁棒上方，故称跳圈或浮环实验。这个现象是铝环中的感应电流受线圈电流磁场作用的结果。

将磨光面向下的条形磁铁竖直放在U形铁芯的一个立柱上。然后再套上线圈以及铝环或铜环。把线圈匝数为0—1100匝的两端接上交流电源为220V，50HZ。演示时，接通电源，因为有交变的电流通过线圈中，在铝环或铜环中就产生了感生电流。感生电流的方向与原来的线圈中电流方向是相反的，因此感生电流产生的磁场与原线圈中的磁场方向相反，两者在交变电流的作用下相互排斥而使铝环跳起，而且一定情况下铜环或铝环可以悬浮在磁铁上。为了在通电瞬间铝环不会跳出，可以在磁铁顶面上放一教科书或用手挡住。这个实验也可以用楞次定律来解释：接通电源时，铝环或铜环的磁通量会增加，由楞次定律可知，铝环或铜环要向磁通量减少的方向运动，因此金属环只有向上跳了。

跳圈跳起的高度为h，跳圈受到的平均安培力为F，金属环的重力为mg，而金属环跳起高度h与它受到的平均安培力以及自身的重力有关系，根据能量守恒知道金属环受到的平均安培力越大跳起高度h就越高，而当平均安培力一定时，重力大的金属环跳起的高度h将减小，因此只要减少金属环的重力就可以使得它在平均安培力的作用下跳得更高。那么怎样才可以使得金属环受到的平均安培力增大从而增加金属环跳起高度h。由分析得金属环所受平均安培力F可能与铁芯的相对磁导率、线圈的匝数、角频率、线圈电流的有效值、铝环的电感量、铝环的半径、铝环的电阻值、线圈与铝环间的互感系数等因素有关。一周期内金属环所受的平均值：

$$\bar{F} = -\frac{nR\omega m_1 B_m \cos\alpha}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\varphi \leq 0 \quad (1)$$

$$(\bar{F} - mg)h = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

$$h = \frac{2\pi n^2 m_1 B_m \cos\alpha}{m\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin\varphi - \frac{2g}{v^2} \quad (3)$$

由于 $\bar{F} \leq 0$ ，说明F的方向竖直向上，对铝环表现为斥力。根据自身的能力和实验室的器材，本文采取控制变量的方法测量金属环跳起高度与电压值、线圈匝数、电流值、金属环之间的关系。

### 2. 实验探究

#### 2.1 跳圈实验中跳圈跳起高度与电

压的关系

由表1推测结果：根据欧姆定律可知 $I=U/R$ ，通电螺线管线圈匝数相同的情况下即总电阻的大小也相同，当螺线管两端电压增大时，那么通过线圈的电流也会变大，所以铝环受到的安培力也变大，从而使小铝环上升的高度也变大，相反地，当螺线管两端电压减小时，那么通过线圈的电流也会减小，所以铝环受到的安培力也减小，铝环上升的高度就小。这说明铝环上升高度与通电螺线管两端的电压大小有关，通电螺线管两端的电压越大，通过线圈的电流越大，铝环上升的越高。

#### 2.2 跳圈实验中跳圈跳起高度与通电螺线管匝数的关系

由表2推测结果：通电螺线管线圈匝数越少，通过的电流越大，铝环和纯铜环跳起高度越高。据欧姆定律可知 $I=U/R$ ，当通电螺线管匝数减少时，通电螺线管的电阻越小，那么通过通电螺线管线圈的电流越大，铝环和纯铜环受到的安培力就越；相反地，通电螺线管线圈匝数越多，通电螺线管的电阻越大，通过通电螺线管线圈的电流越小，铝环和纯铜环跳起的高度就越低。据欧姆定律可知 $I=U/R$ ，当螺线管线圈匝数增加时，通电螺线管的电阻越大，则电流越小，铝环和纯铜环受到的平均安培力就越小。

#### 2.3 在相同情况下，不同金属环跳起比较

表3 电压U=220V 线圈匝数N=800 通电螺线管插入软铁棒

环	跳起高度 (m)	通过的电流I (A)
铜环	0.867	2.125
铝环	0.307	2.125

由表3推测结果：两个体积相同的小环，在软铁棒上所处的位置从高到低依次为铜环——铝环。通过称量，我们得到两个环的重量从重到轻依次为铜环——铝环，实验结果发现为什么越重反而上升的越高呢？主要原因是重力不是起主导作用，起主导作用的是平均安培力。平均安培力的大小与通过通电螺线管的电流的大小有关，通过通电螺线管的电流越大，则金属环所受的平均安培力越大，从实验现象可以看出，铜环上通过的电流最大。根据安培力的计算公式 $F=BIL$ ，为了平衡重力，磁场强度可能大金属环也可以跳起在较低的位置，也可能小则金属环跳起在较高的位置。因此质量不同的铝环，悬浮高度是由本身的重力和安培力共同决定的。所以造成上升高度不同最根本的原因是材料的电阻率不一样，而在室温为18℃时，铝的电阻率比铜的电阻率大。根据电阻的计算公式和欧姆定律可以验证上

述结果。

#### 2.4 跳起高度与不同质量铜环的关系

表4 电压U=220V 线圈匝数N=800 电流通电螺线管插入软铁棒

铜环 (g)	跳起高度 (m)
30	1.024
50	0.867

由表4推测结果：从铜环自身的质量与跳起高度的比较发现，铜环跳起的高度与环的质量和体积有关系。体积增大则质量增大，但是跳起的高度可能增大也可能减小。因为跳起的铜环受到两个力的作用，一个是重力的作用，而另一个是由于线圈之间的互感和铜环本身的自感是金属环所受到的平均安培力作用。当铜环上跳起到一定高度时，铜环的受力会相对平衡，安培力大小和重力大小相等，方向相反。由安培力的计算公式得 $F=BIL$ ，即电流、通电螺线管的磁场强度和长度微元又乘积分的结果。长度较长的铝环，通过的电流会较小，为了和重力平衡，磁场强度可能大的时候铝环却跳起在较低的位置，磁场强度可能小的时候铝环却跳起在较高的位置。因此质量不同的铝环，悬浮高度是由本身的重力和安培力共同决定的。

### 3. 结束语

本文分别在不同电压，不同线圈的匝数下对铝环跳起高度和铜环跳起高度进行测量，对在相同条件下对不同的铝环和铜环跳起高度的测量并且进行了对比。并进一步对在相同条件下不同质量的铜环和铝环跳起高度的测量，最后得出实验结论。

### 参考文献

- [1]许智军.电磁学中的跳圈实验探究[J].通化师范学院学报,2010(10).
- [2]梁灿彬.电磁学[M].人民教育出版社,1980(12):12.
- [3]陈洪云,李迎.微机辅助跳圈实验现象研究[J].天津师范大学学报(自然科学版),2011(2).
- [4]程雷英.对跳圈实验分析的一点看法[J].实验教学与仪器,2000(12).
- [5]张德启.圈实验解析[J].济宁师专学报,2012(3).
- [6]孙学卿,吴均生.跳圈实验的解释[J].烟台师范学院学报,2011(2).
- [7]赵凯华.电磁学(上册)[M].北京:高等教育出版社,1998.

基金项目：国家及特色物理学专业项目（项目编号：12467）；云南省大学生创新性实验设计项目。

通讯作者：王昆林。