

# 浅谈环形天线 因数“N”

作者 / Virgil Leenerts ( W0INK )

编译 / 苏健

在设计环形天线时，大多数人都关注于尽可能提高环的有效面积，但在实际操作上存在一定限制。另一种改进方法就是改变匝数，让效果达到满意的程度。

环形天性在无线电发展的早期阶段就已经有所应用了。在考虑环形天线的设计方案时，匝数（N）非常重要，因为这是决定了环内电压和电流的因数之一，并因此决定了辐射效率。虽然本文并不会对环形天线的基础工作原理（在许多通用的课本和ARRL文献中都讲述了这其中的物理原理）作任何说明，但会根据数学分析和实验结果研究N在其中的作用。

通常，我们将小型环形天线定义为一个周长为 $0.1\lambda$ 或更小的环。如果环有好几匝，那么线的总长度就必须限制在 $0.1\lambda$ 或更小。由于这一限制，实际上小型环形天线的匝数就无法做到很大。

我最近做了一个项目就遇到了这样一个问题：设计小型环形天线时应该使用多大的匝数？根据公式，最明显的答案是，当匝数提升的时候，环形天线的电压或者电流也会随之提升。

小型环形天线的开路输出电压表达式如下：

$$\text{电压-开路} (V_{OC}) = 2\pi f \mu_0 H_0 N A$$

其中：

$f$  = 频率，单位 (Hz)

$\mu_0$  = 真空磁导率  $-4\pi \times 10^{-7}$  - 每米电感 (H)

$H_0$  = 施加的磁场 - 每米电流 (A)

N = 匝数

$$A = \text{环面积, 单位 (m}^2)$$

闭路输出电流可以用开路电压除以环的阻抗求得。环的阻抗是  $\sqrt{R_L^2 + X_L^2}$ ，其中  $R_L$  和  $X_L$  是环的电阻和电抗。如果我们假设  $R_L$  比  $X_L$  小得多，那么环的阻抗就是  $X_L$ 。

$$\text{电流-闭路} (I_{CC}) = 2\pi f \mu_0 H_0 N A \div X_L$$

初看这些公式，似乎匝数越多，就能得到更好的开路电压和闭路电流。但是，先别急着下定论，也许再仔细看看这个电抗式子，就能发现更多端倪了。

电感的电抗公式是  $X_L = 2\pi f L$ ，其中  $L$  是小型环形天线的电感。包括小型环形天线在内的所有物理电感的电抗都是根据电感的物理性质计算的，例如直径、电线尺寸，和形状。一般来说，如果有好几匝的话，最后的式子还要将结果乘以一个  $N^2$ 。这种算法其实就假设了这些匝都是互相耦合的，也就是通常的情况。现在，我们就能这样表示电感的电抗公式：  $X_L = 2\pi f N^2 L_{PT}$ ，其中  $L_{PT}$  就是电感或者环的每一匝的电感值。加入是非互相耦合的电感，或者间距较大的非互相耦合的环形天线，电感值的增加就相当于将电感串联起来，因此，每一匝的电感值都只需乘以一个  $N$  即可。非互相耦合电抗公式是  $X_L = 2\pi f N L_{PT}$ 。请注意，电感或者小型环形天线的电抗会受到各匝耦合状况的影响。



图1 单匝参考环形天线

你可能注意到了，只要改变各匝之间的间隙，就能调节空气磁芯电感的电抗（在VHF空气磁芯电感中是一种常见的做法），这是很有意思的。电抗最大的变化范围是  $N^2 \sim N^1$ （如果  $N$  是 4 的话，那么最大变动范围就是从 16 至 4，其因数为 4）。这就带来了通过改变各匝之间的间隙来调节环形天线的可能。

让我们回头看看开路电压和闭路电流公式，既然匝数是电抗公式中的关键部分，那么就可以将电抗替换成匝数。开路电压的公式是：  $V_{OC} = 2\pi f \mu_0 H_0 N A$ 。既然环的电抗并不在开路电压公式中，那么不管各匝是相互耦合还是非相互耦合，匝数的提升都会让

电压随之提升。环的电抗对于开路电压并没有影响。

现在，各匝相互耦合的环形天线的闭路电流公式就是这样的：

$$I_{MCC} = \frac{2\pi f \mu_0 H_0 N A}{2\pi f N^2 L_{PT}}$$

约分得：

$$I_{MCC} = \frac{\mu_0 H_0 A}{N L_{PT}}$$

现在，我们就发现各匝相互耦合的环形天线的闭路电流会随着匝数的增加而减小，比例为：

$$\frac{1}{N}$$

现在，各匝非相互耦合的环形天线的闭路电流公式就是这样的：

$$I_{NCC} = \frac{2\pi f \mu_0 H_0 N A}{2\pi f N L_{PT}}$$

约分得：

$$I_{NCC} = \frac{\mu_0 H_0 A}{L_{PT}}$$

你会发现，各匝非相互耦合的环形天线的闭路电流并不会随匝数增加而减小。

接收环形天线的开路电压输出通常会连接在高阻抗的放大器上，因此匝数越多，输出电压就越高。在对于环的电流敏感的场合下，例如电流变换器，增加匝数就会降低环内电流，而如果环的各匝并非互相耦合的话，就不会造成任何影响。

## 实际测试

数学公式只是一种工具，用来理解达到目标所涉及的各个要素，而公式只有得到了实际数据的验证，才能带来现实可靠的结论。

在我的实验中，测试信号由一个本地的400kHz NDB（全向无线电信标）飞机导航站提供。之所以选择这个导航站，是因为它只会发送字母“FN”，而且在每次识别之间都没有调制。ID的

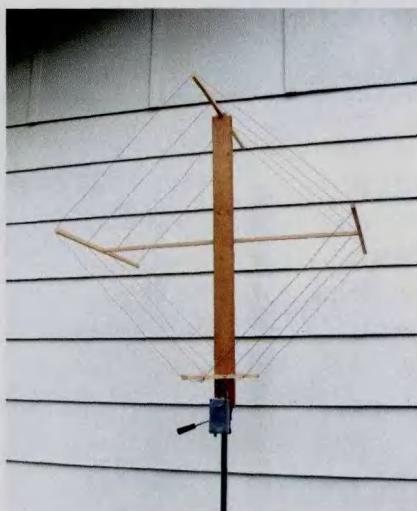


图2 四匝非互相耦合环形天线

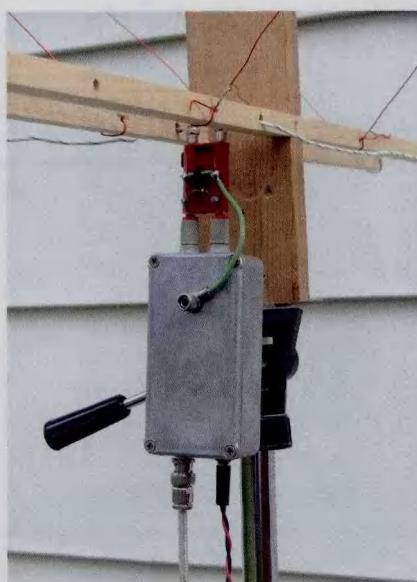


图3 放大器和电流变换器

间隔时间就相当于一个定死的载波间隔，可以进行稳定的测量。环形天线和设备在搭建上就考虑到了电压和电流测量的方便。这套实验设备包括以下：

- 单匝环形参考天线；
- 环形天线框，可适用于2~4匝；
- 大间距环形天线框，可适用于2~4匝；
- 高输入阻抗差动放大器——单位增益50Ω；
- 电流变换器；
- 同轴电缆——100英尺，RG-55。

矩形环形天线的框架的边长为635mm，面积为0.4m<sup>2</sup>。图1中所示的参考天线是和多匝天线分开来另外搭建的，方便经常地进行参考测量，确保测量过程尽可能地保持恒定。多匝互相耦合的环形天线是用一个类似的框架制成的。多匝非互相耦合的环形天线在搭建时，各匝之间的间距为230mm。图2所示是四匝的非互相耦合环形天线。

每个环形天线的环电感都经过了测量，这样就保证了实验数据的完整性。这一数据还可以用来验证多匝天线的各匝是否互相耦合或者非互相耦合。电感的测量是利用Boonton的63H-S2型电感桥进行的，测量频率为100kHz。

高阻抗差动放大器是用单一封装中的两个天线放大器进行的。其输出连接在变换器上，这样测得的就是两者的差值，因此就能忽略掉环形天线输出中的共模电压。图3所示的是带有电流变换器

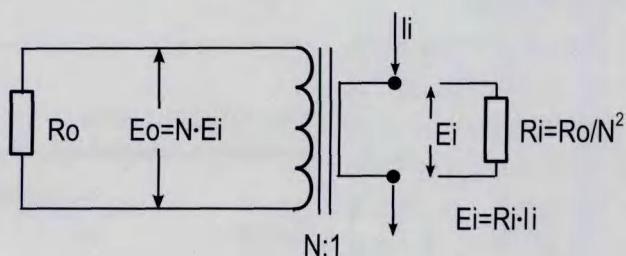


图4 电流变换器和设计公式

器的差动放大器。在测量电压时，就不需要使用电流变换器了，而差动放大器就直接连在环形天线上。

在测量电流时，就必需使用电流变换器，让变换器的输出电压与输入或者环的电流成比例。变换器的负载侧有30匝，共900Ω，带给环形天线的插入电阻为一欧姆。图4中给出了电流变换器的基本设计公式和示意图。这一电流变换器的铁芯是Fair-Rite的#5975000201，其AI为2200nH/T<sup>2</sup>。我将一道已知的电流插入一匝中，用频谱分析仪测量了输出电压，检查了一下变换器的性能。在这种电流变换器设计中，1μA环的电流 = 30μV输出。和目前任何电流变换器一样，你需要谨慎选择铁芯，让它在所需的频率和阻抗下能正常运作。

所有的电压测量都是用HP E4411B频谱分析仪进行的。

连接环形天线和频谱分析仪的电缆是双屏蔽层的RG-55电缆。由于单束电缆上的共模电流会导致测量误差，所以必需选用这种电缆。

### 单匝环形天线的测量

根据单匝环形天线的尺寸，可以算出400kHz下的阻抗为8.7Ω，而使用100kHz下的电感测得的400kHz电感在电感计中的读数为9.3Ω。根据测得的400kHz NDB信号中的3.7μV环电压和0.4μA环电流，该阻抗则为9.25Ω。测得的400kHz NDB信号中的环电压和电流可用作多匝环形天线的参考值。

### 多匝环形天线的测量

多匝环形天线的测量使用的同样是这个本地400kHz NDB导航站。为了将环形天线从2匝重新制作成4匝，这一测量过程耗费了一定的时间。我尽可能地确保天线处于相同的位置，而且在每天的相同时刻进行测量。而且，参考天线在每次重新制作多匝天线时都进行了重新测量，确保系统的稳定，并且不会随

表1 预计值和测量值 ( MC = 各匝互相耦合环形天线。NC = 各匝非互相耦合环形天线 )

	N=1匝参考	N=2匝	N=3匝	N=4匝
预计值	3.7 (参考值)	7.4 (参考值×2)	11.1 (参考值×3)	14.8 (参考值×4)
$V_{oc\mu} V$ (MC)				
测量值		7.5	12	15
$V_{oc\mu} V$ (NC)				
测量值		7.2	10	14
$I_{oc\mu} A \div N$				
预计值	0.4 (参考值)	0.2 (参考值/2)	0.13 (参考值/3)	0.1 (参考值/4)
$I_{oc\mu} A$ (MC)				
测量值		0.22	0.17	0.12
$I_{oc\mu} A \times 1$				
预计值	0.4 (参考值)	0.4 (参考值×1)	0.4 (参考值×1)	0.4 (参考值×1)
$I_{oc\mu} A$ (NC)				
测量值		0.34	0.37	0.33

表2 测量：互相耦合环形天线

	1匝	2匝	3匝	4匝
$X_L \propto N^2$				
阻抗	9.3Ω	32Ω	65Ω	113Ω
(根据100 kHz下 测得的阻抗算得)				
天线：电压/电流	9.25Ω	34Ω	70Ω	125Ω

表3 测量：非互相耦合环形天线

	1匝	2匝	3匝	4匝
$X_L \propto N$				
阻抗				
(根据100 kHz下 测得的阻抗算得)	9.3Ω	20Ω	33Ω	42Ω
天线：电压/电流	9.25Ω	21Ω	25Ω	45Ω

表4 N的效应 (#匝数)

	各匝相互耦合	各匝非相互耦合
V开路	xN	xN
I闭路	1/N	---

设备或者安装条件的变化而发生改变。表1给出了预期值与测量值。

在表1中，测得的电压和电流都很接近预期值，表明电压或电流的变化是匝数的函数。你可能注意到了，测得的数据并没有达到实验室的精度。但是，测得的数据的确表现出了我们所期望的电压和电流随匝数增加所发生的变化，符合本文之前所推算出的公式。也就是说，开路电压会以N的函数形式提高，而各匝互相耦合的环形天线的闭路电流会以1/N的函数形式降低。

我另外关心的一个方面就是对1匝至4匝的天线，在400kHz下电感的计算阻抗和根据400kHz的NDB信号测得的电压和电流所计算出的阻抗进行比较。表2给出了互相耦合情况下的比较结果，而表3则给出了非互相耦合情况下的比较结果。

表4总结了N对于环形天线的电压和电流的影响。对大部分环形天线的应用情况而言，我们需要将环调节到和一个电容共振，而这就牵涉到了Q因数。提高环形天线的Q就会提供环内的电压和电流，因为环的Q是开路和闭路公式的一个乘数。对开路电压而言，提高匝数和Q都会提升开路电压（ $Q \times N$ ）。而在各匝互相耦合时的闭路电流方面，增加Q就能提升电流，但匝数（1/N）会减弱电流。而在各匝非互相耦合时的闭路电流方面，增加Q可以提升电流，而匝数（N）也不会让电流减弱。之所以要提出Q这个因数，是因为Q通常很大（一般 $\geq 25$ ），足以掩盖N的影响。因此，如果匝数的变化引起了Q的变动，那么Q所引起的电流变化也自然会被匝数所影响。

环形天线比较常见的应用场合是作为接收天线，目前这是其主要的研究方向。然而，环形天线也可以用作发送天线，那么问题就来了，在发送环形天线中，匝数的变化会对远场造成什么变化呢。在接收环形天线公式中，磁场生成电压或者电流。而在发送的情况下，我

们则希望能够创造出一个磁远场，其大小足以满足实际应用的需要。计算环形天线的磁远场的公式为：

$$H_O = \frac{\pi I_0 N A}{r \lambda^2}$$

这一远场公式摘自John D. Kraus的《天线》一书。根据这一公式，我们注意到，如果假设电流和面积都保持恒定的话，远场会随着匝数的增加而直接增强。因此，如果N=2，那么可以算得磁场应该会增强6dB。

在测量接收环形天线时，我制作了一个发送测试环形天线和测量系统，来测量单匝和双匝的环形天线远场。我制作了两个边长280mm的矩形环形天线，一个单匝，一个双匝。环内电流通过连接在HP3320B生成器上的电流变换器产生。测取和环串联的0.1Ω电阻上的环内电流。0.1Ω电阻两端的电压则使用HP3400B电压计测量。通过测量环内电流，就能将生成器等级设置成与单匝和双匝环形天线的环内电流相同的值。这些环形天线就会在12.50 MHz的工作频率下与调谐电容发生共振。测量天线放置在距离发送天线环大约10米的位置。

单匝参考环相比双匝环，在发送时预计得到的接收信号应该会增强6dB。但是，一开始的测量结果却不遂人意，单匝环的信号增强程度大大超出预期。

原因在于，双匝环相比单匝环，其辐射效率有所提升。你可以在Constantine Balanis编写的《天线理论分析和设计》（*Antenna Theory Analysis and Design*）一书中找到相关探讨。在书中第171页上，Constantine这样写道：“要提升辐射效率的话，往往使用多匝环。我采用了这一章节中的计算方法。”

辐射效率的基本公式是：

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_L}$$

在辐射效率公式中， $R_r$  = 辐射阻抗，而 $R_L$  = 欧姆损耗。辐射阻抗会随N增加，而欧姆损耗随N增加。由于辐射阻抗增加速率“ $N^2$ ”要比欧姆损耗的增加速率“N”更快，所以对于小型环形天线来说，辐射效率会随匝数增加而提升。带有因数N的辐射效率公式为：

$$\eta = \frac{N^2 R_r}{N^2 R_r + N R_L}$$

计算出来的提升量为5dB。那么现在，预计的提升量就是N=2时的6dB和效率提升的5dB，总和的发送信号提升为11dB。而实验测得的接受信号增量为11.2dB。

## 结论

小型环形天线的面积通常在设计时，是如何达到最大性能的焦点。然而，面积存在实际局限性，而且在空间上往往也存在限制。在这种情况下，改变匝数也许就成了另一种获取所需性能的方法了。我提供了一种视角，在已知的数学公式中引入匝数，展现出它和环内电流与辐射效率的关系，告诉大家“N”是如何影响天线性能的。

PE

## 作者简介

Virgil Leenerts (W0INK)，是ARRL成员，以及科罗拉多州ARRL技术专家。他于1954年取得执照，并于1963年在伊利诺斯州大学取得BSEE。曾在惠普（Hewlett Packard）和安捷伦科技（Agilent Technologies）担任了38年的电子工程师，现已退休，不过业余时间依然是SCOM的工程师，设计电源和音频电路。他开过许多次面向业余爱好者的讲座，其中包括在2009年ARRL洛基山脉分部（Rocky Mountain Division）会议上关于开关电源的讨论。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>