

被低估的磁环 HF 天线概述

原文来自:

[The-Underestimated-Magnetic-Loop-HF-Antenna-version-1.1.pdf](#)

作者: Leigh Turner 呼号: VK5KLT

翻译: 探索者-377 email:11804685@qq.com 暂无呼号

看起来在业余无线电社区里被保护的最好的秘密之一是小型磁环天线在实践中相比于大型传统 HF 天线能够有多好。这篇文章的目的是传播一些关于成功自制环天线的实用信息,并计算环的关键特性和独特功能。磁性环形天线可以非常方便地容纳、隐藏在阁楼、屋顶、户外门廊、高层公寓的阳台、桌面或任何其它空间受限场所。

对于空间严格受限的场所,一个小但有效的 HF 天线对于许多业余无线电爱好者来说是仅次于圣杯的。这种追求和兴趣是非常强烈的,业余爱好者必须面对放弃他们最爱的业余爱好前景,因为他们从郊区住宅区搬到更小的有限空间,退休社区或其他社区,有严格的规则限制,以防止架设高架天线。尽管有这些强加限制,业余爱好者确实有实际可行的替代方法,继续积极使用室内隐蔽式或室外便携式和小磁环天线。本文讨论了如何让小天线可以提供完全可行的折中,使业余爱好者能够继续操作他们的 HF 站台,不需要任何之前的高塔或受欢迎的定向天线或笨重的 G5RV 天线或长线。如果采用良好的设计和结构,在最差的情况下,台站信号强度的实际差异将仅为 S 点。

任何人使用 Google 对磁环天线进行粗略调查,将很容易找到大量和让人困惑的丰富资料。本文将帮助读者了解经常相互冲突的信息的广泛多样性,以便促进实现所需实践知识的重要本质,使小环发挥其自身全部潜力。

一些(严肃)事实:

正确设计、构造、和定位的标称直径为 1m 的小环天线，等于并且经常优于除了 10m/15m/20m 的三波段定向天线之外的任何类型天线，比安装在地面适当波长高度上优化的单波段 3 单元定向天线来说，最坏的情况是 S 点(6dB)内。

磁环天线从 40 米到 10 米频段才算是真正进入自己的领域，经常以绝对惊人的性能竞争谁才是最好的传统天线。易于现场部署和固定位置调谐使其已经成为多年来在专业防御、军事、外交和船载 HF 通信链路中的常规天线，坚固和可靠在一般无线电通信覆盖范围内被认为是强制性的。在 80m 和 160m 频带上，小环天线的性能通常超过水平偶极子天线的性能，特别是部署在地面次佳高度处的天线。这是 HF 天线常见的限制。

与依靠地面反射的短垂直鞭状天线或全尺寸垂直天线相比，小环的实际优点是不依赖于地平面和地以实现有效操作。这个独特的特性对于在 80m 和 160m HF 频带上操作的受空间严格限制的小型天线具有特别深远的意义。

那么，如果小环是这么好的天线，为什么不是每个人都有有一个，取代他们的高塔和传统天线？自然和电磁学定律是不能违反的，用电小天线工作的唯一不可避免的代价是带宽窄。狭窄的瞬时带宽而不是低效率是基本的限制因素和使用小环天线的折中。

任何小型和紧凑(根据波长)天线必为窄带，并且需要在给定 HF 频带内调谐到所选的工作频率。磁环用户必须留意，在 7MHz 只有 10 或 20kHz 的带宽，或可略大于 0.2%。只要天线可以容易地调谐到能覆盖希望使用的频点范围。对于远程安装的天线或屋顶安装的天线，有一小部分聪明和即兴的火腿在整个频段实现这种调谐 QSY 敏捷性是很知名的，如图 15 和 16。

将小型垂直天线的效率与小环天线的效率进行比较，可以得到更容易控制的导体损耗、相关调谐电容中的欧姆损耗，小环辐射单元中的地面依赖性和地损耗减少。

小发射环(STL-Small Transmitting Loop)天线被定义为周长具有大于八分之一波长但略小于三分之一波长，这导致整个环路中的电流分布大致均匀，并且该结构表现为集总电感。与短垂直或偶极天线不同，环路在其末端处呈现感抗，因此可通过单一电容器

方便地实现调谐和匹配。环路自感可与电容谐振以形成高 Q 值并联调谐电路。天线 Q 值非常高，因为辐射电阻与环路的电抗相比较小，并且 VSWR 带宽非常窄。获得的高 Q 值告诉我们，环形天线不是有损和低效的。当在环路的谐振频率上施加功率时，除了在集总 I^2R 导体中吸收的部分之外，所有的功率都将被辐射，并且电容器损耗表现为热损耗。通过适当设计和仔细构造，这些串联等效电路损耗可以被忽略或者至少与环路的辐射电阻相比足够小，结果是产生高本征辐射效率和性能良好的小型 HF 结构天线。漂亮！

垂直方向的 STL 天线的 8 字形环形辐射图最大值在环的平面中，具有与环平面成直角的零点。垂直方向的环在接近地面时性能也完美。当水平安装时，天线方向图是全向的，具有向上和向下的零点。水平方向的环安装高度应大于波长，以防止显著的地面损耗，因此这种安装方向是不常见的。

流过环路辐射电阻的电流，致使 RF 功率被转换为电磁辐射。传播中的无线电波必须包含磁场和电场分量以使其存在。在 STL 中，通过使大量 RF 电流流过环形导体产生强磁场，该磁场又在空间中产生相应的电场，从而提供两个基本的 E 和 H 单元。这是术语“磁环”天线的起源。

然而，由于小环的辐射电阻与全尺寸谐振 $1/2$ 波长偶极子天线的辐射电阻相比非常小，因此获得损耗与辐射电阻的良好比率是实际环路设计和自制装置构造中唯一“棘手”和挑战性部分。

流过天线辐射电阻的电流的平方乘以该电阻时，确定实际辐射的功率。由于小环的辐射电阻相对低的值(几百毫欧)，需要大电流(几十安培)以使其甚至能够辐射中等功率。因此重要的是，与辐射电阻相比，所有的损耗必须保持尽可能的低，以便实现高效率，其中大部分天线输入功率被转换到辐射场中，而不是作为热损耗抵消掉。

通过使用大型分立定子(图 1)或类似的蝶式空气可变电容器结构，或尽可能选用真空可变电容器，可以在调谐电容中实现低损耗。然后可以通过以下方式控制导体损耗：用于形成环形单元的铜管直径的最佳选择、以及非常小心地注意电容器的低欧姆互连(例如用焊接方式或用银焊接头，用宽铜带等)。100 瓦的发射驱动功率，在环路导体和调谐电

容中有几十安培的射频电流和 VAR(Volt-Amps-Reactive 无功功率)能量 ,特别是在较低 HF 频带上的小环。

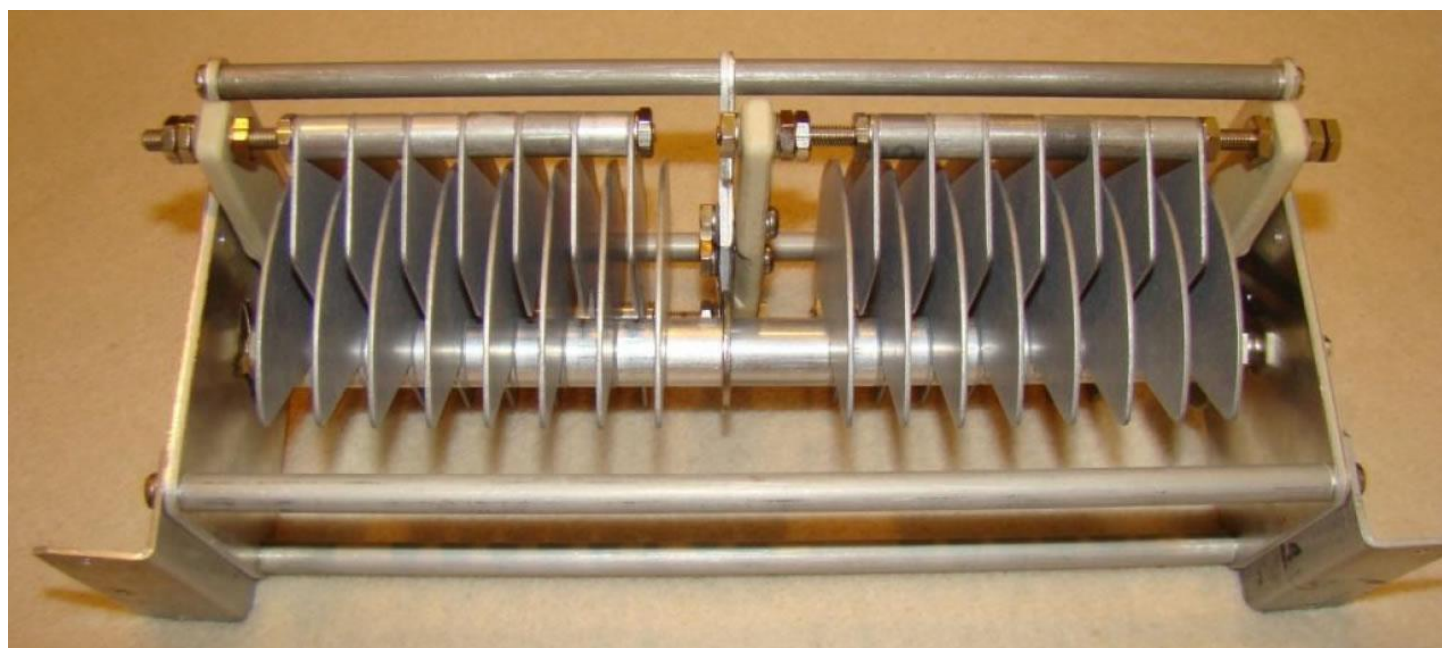


图 1 大型宽间距定子分离式空气可变电容器

在使用空气可变电容的情况下，通过将转子和定子板焊接到各自所在轴上来进一步最小化电容器损耗，以消除任何残余的累积接触电阻。当连接在环路末端时，蝶型结构技术潜在地消除了 RF 电流路径中的任何有损旋转触点。该结构允许使用转子板来执行两个分立定子部分之间的可变耦合，并且因此避免了转子摩擦触点的损耗。由于固定的定子板部分有效地串联，所以电容器的 RF 击穿电压额定值也加倍。考虑到环形天线是高 Q 值谐振电路的事实，在调谐电容器上可能存在几千伏的 RF 电压，并且必须采取适当的安全预防措施。当仔细选择适当的结构和调谐组件时，完全能够处理 400 瓦 PEP 或更大功率的小发射环天线是容易实现的。

对于空气可变电容，老式 mil-style 镀银黄铜定子和转子板结构比铝结构具有更低的损耗。 这些也可以自制。

图 2 和图 3 是低损耗真空可变电容器，用于在具有刻度控制的电容调谐环路单元中产生非常低的导体和电介质损耗，通常具有 36 个或更多的可旋转面横贯电容范围。

馈电和匹配：

虽然环形天线具有看似简单的外观，但它们是具有辐射模式和极化特性的复杂结构，这取决于它们是以平衡还是非平衡方式馈送。馈电和匹配环谐振的方法，地平面配置，以及环形元件本身的几何形状因子和物理比例都是用于实验的沃土。各种匹配方法包括串联电容，变压器耦合次级法拉第屏蔽环，简单非屏蔽耦合环，伽马匹配和环形电流互感器(CT)，每个都有各自的优点。



图 2 真空可变低损耗电容器



图 3 高耐压可变真空电容器

因为伽玛和法拉第馈电技术都很好，以上方法如何选择看个人喜好。但是，法拉第屏蔽次级环或位于底部中心对称平面(位于与调谐电容器直接相对的位置)的 CT 产生更好的环路电对称性和平衡，这有时又可提供更有利的更深的前侧比和零点模式。除了赋予轻微的不对称性模式外，伽玛匹配方法还可以在馈电同轴电缆的外部编织层上产生一些有害的共模电流流动，这可能需要阻塞和用铁氧体去耦巴伦隔离，以防止寄生馈送辐射和外部接收上的噪声拾取。还取决于在环路近场中导电物体的现场安装设置，其可以扰乱天线的对称性和平衡。

采用优雅简单的变压器耦合法拉第回路馈电方法， 50Ω 信号源仅馈送次级回路，没有其他耦合/匹配元件，因为没有反射的无功分量需要处理(主环在谐振时只出现纯阻性，只有串联的核心 R_{rad} 和 R_{loss} 单元)。主环路导体是大 RF 空气芯变压器的一个绕组，而由

同轴电缆馈送的小的单匝次级馈送环路是另一个绕组。

观察到该次级馈送环路的阻抗仅由其相对于初级谐振环的直径确定。环路直径比为 5:1 通常在主环路调谐的 10:1 或更大的频率范围内产生完美匹配。由于在谐振初级环路附近的高反应场，其高度集中切断小的未调谐馈送环路的磁通线，因此在初级环路和馈送环耦合电路之间发生简单的变压器行为。磁通量集中的程度是随着频率变化的调谐初级 Q 值的函数，即在最低工作频率下出现的最高 Q 值和最高频率出现的最低 Q 值。Q 值因数的这种变化，源于做为频率函数的主辐射环的损耗电阻和复数形式辐射电阻之和的变化。次级回路的有效馈电阻抗由其直径/面积比以及切割它的磁通线的数量控制；因此看到的次级回路中的阻抗将基本上与频率无关。可以直观地看出这一点，因为当馈送环相对于在最低工作频率下的波长非常小时，由于非常高的 Q 值，切割它的磁通线的数量很大，而当馈送环随着谐振频率的增加，成为工作波长的较大部分，由于较低的 Q 值，通量线的集中度降低。

以上描述可以有助于从概念的角度可视化发生的情况，并且有助于理解这种馈送方法是怎么回事。

如果追求纯粹的环模式和具有侧面深度零点的 8 字型对称辐射图，则完全平衡的法拉第变换器与其直径比为 5:1 的次级宽带阻抗匹配环将是馈电结构的优选选择。图 4 显示了法拉第馈送环的构造。通过使用 RG-213 或 LDF4-50 螺旋线圈来构造馈电环，达到了安装刚度。

其他方式的屏蔽/法拉第馈电环如图 5 中所示，为更简单的非屏蔽环路。环被放置在与顶侧调谐电容器正对的底部中心处，可以让同轴电缆外部编织层在其中心线处连接到环，也可以不，是可选的。直径也是主辐射环单元直径的 1/5。

环的平衡与否，对于抑制局部电场传输噪声是重要的。而小环天线主要是磁场响应，任何电不平衡导致的、在馈线上流动的、不期望的、共模电流，都可能让辐射模式图产生偏斜，并且会使电场灵敏度恶化，增加了局部噪声。这些外来馈电电流可以很容易地被阻断并且用铁氧体磁芯巴伦共模扼流圈消除，图 6 中给出了相关概念。

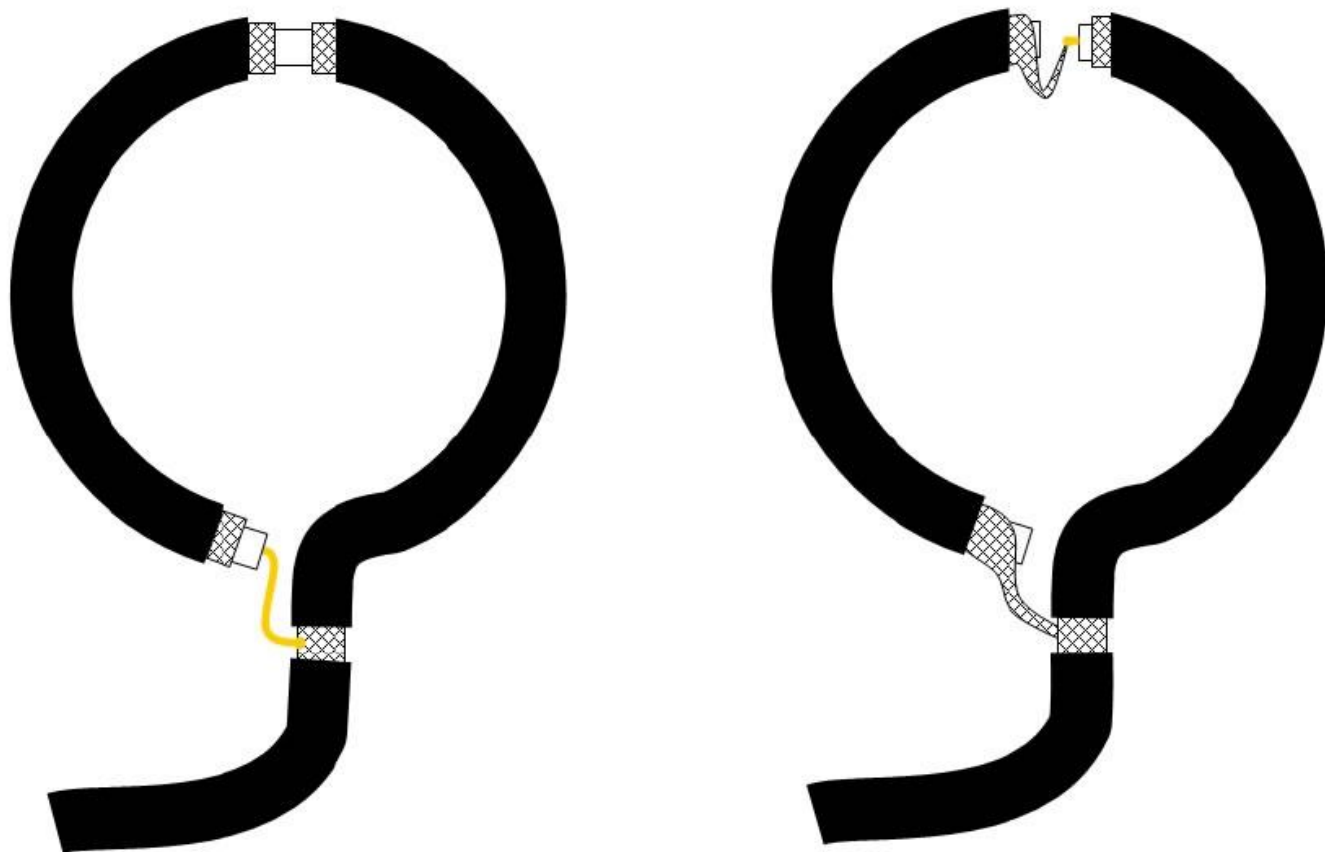


图 4 屏蔽法拉第环的替代结构

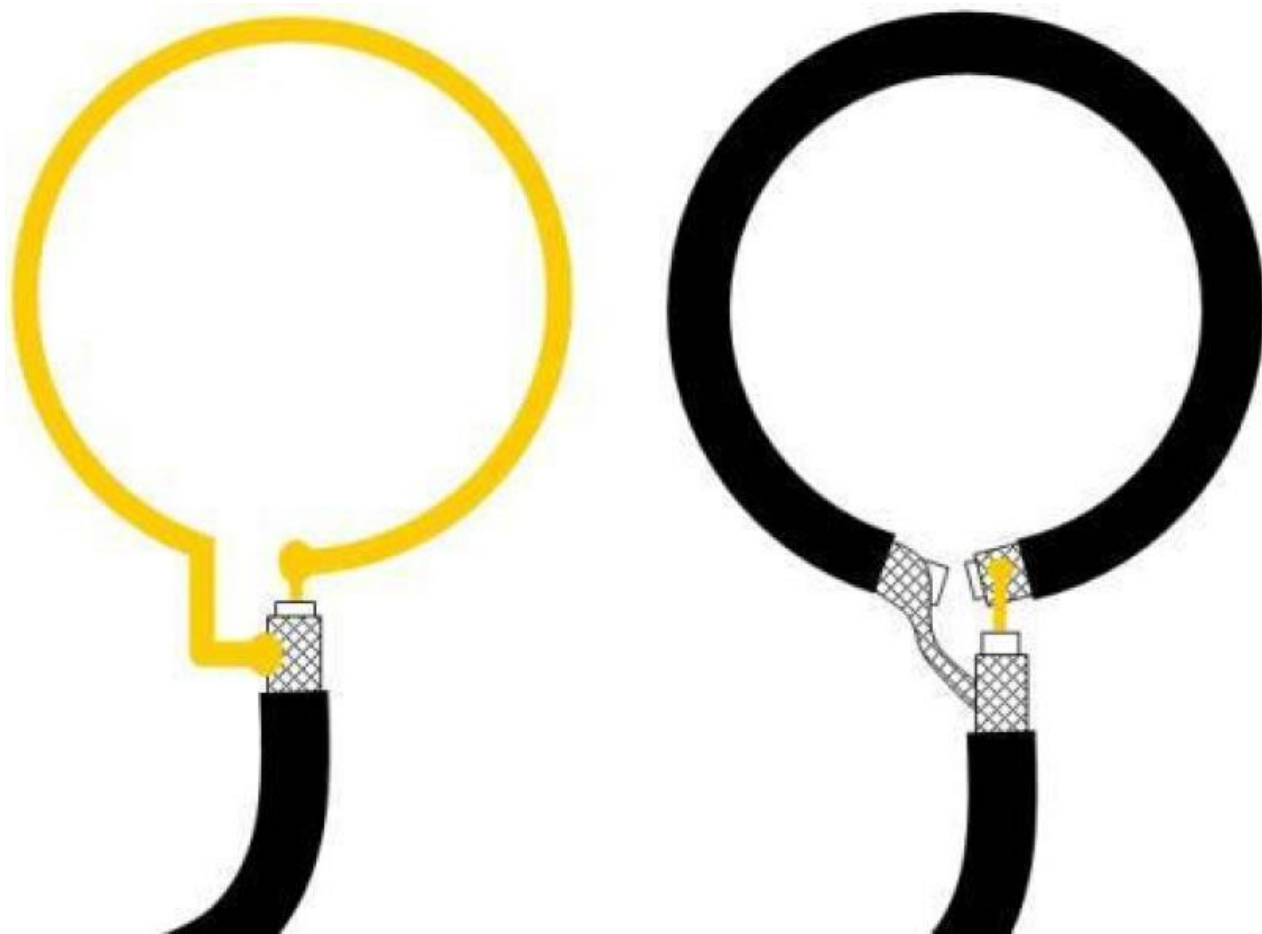
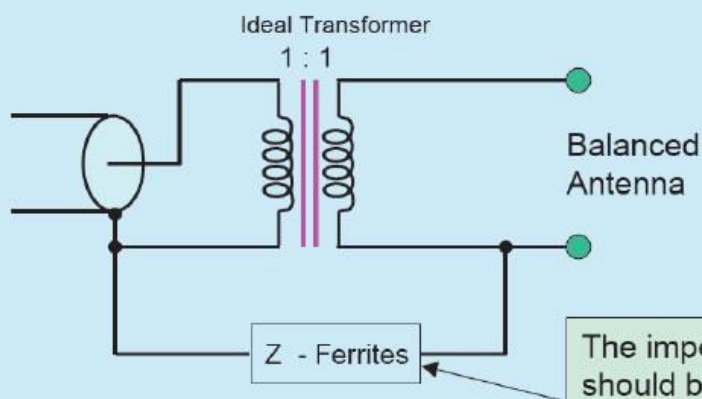
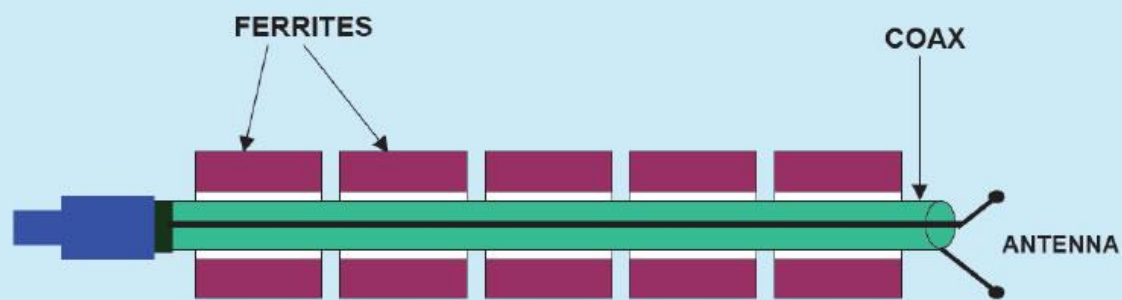


图 5 非屏蔽耦合环

1:1 CURRENT BALUN



Equivalent
Circuit at RF

图 6 共模扼流巴伦



图 7 多匝大功率共模扼流巴伦



图 8 简单的共模扼流结构

这里描述的各种同轴扼流巴伦，使用 Amidon 或等效铁氧体 43 ($\mu = 850$) 混合或 61 混合用于环形铁芯堆叠，并且放置在同轴电缆附近，其中同轴电缆连接到环路。

伽玛匹配方法见下面的图 10。它基本上是抽头自耦变压器，其中同轴馈电编织层连接到环路的中心中性点，中心导体经由同心可调伽马管连接到环路导体上的点，其中电压电流比匹配 50 欧姆。这种布置具有一些内在的不平衡和不对称性，并且与使用次级法拉第环匹配或电流互感器馈电获得的结果相比，轻微的辐射模式图偏移是伽马馈送妥协

的结果之一。



图 9 可替代的共模扼流结构

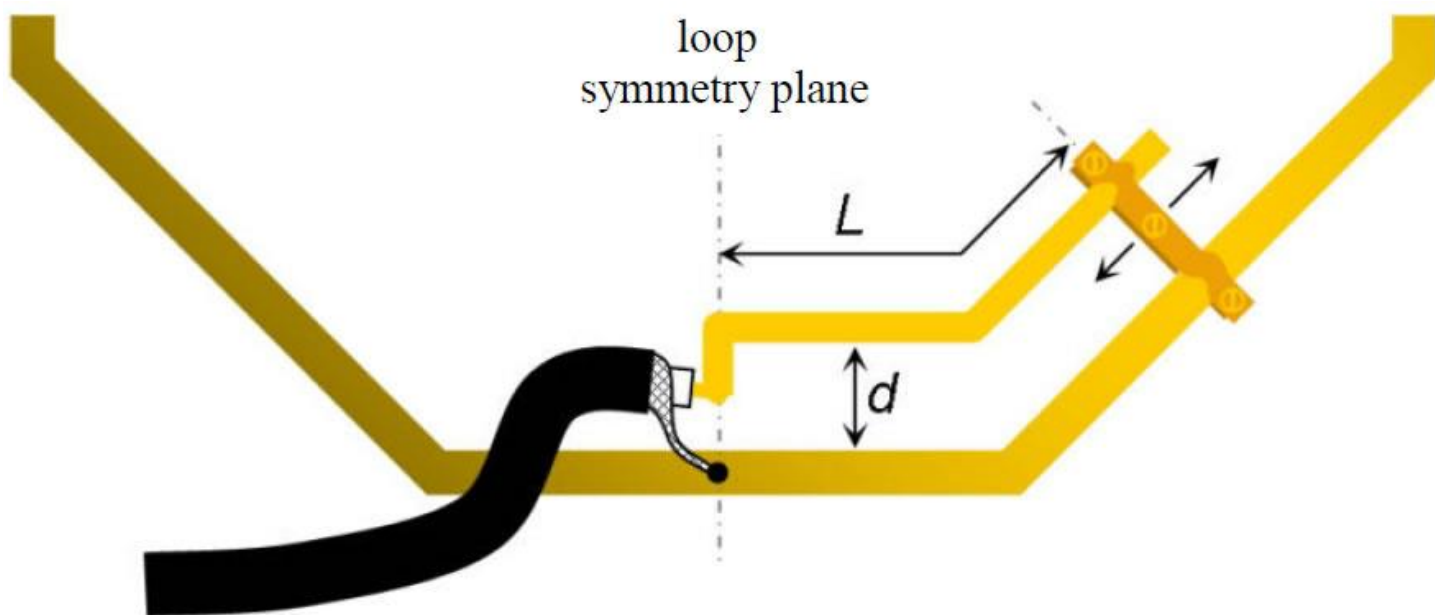


图 10 不对称伽玛匹配

上述几何参数和滑动短路带依靠经验可以在环谐振处实现完美的 1 : 1 VSWR。

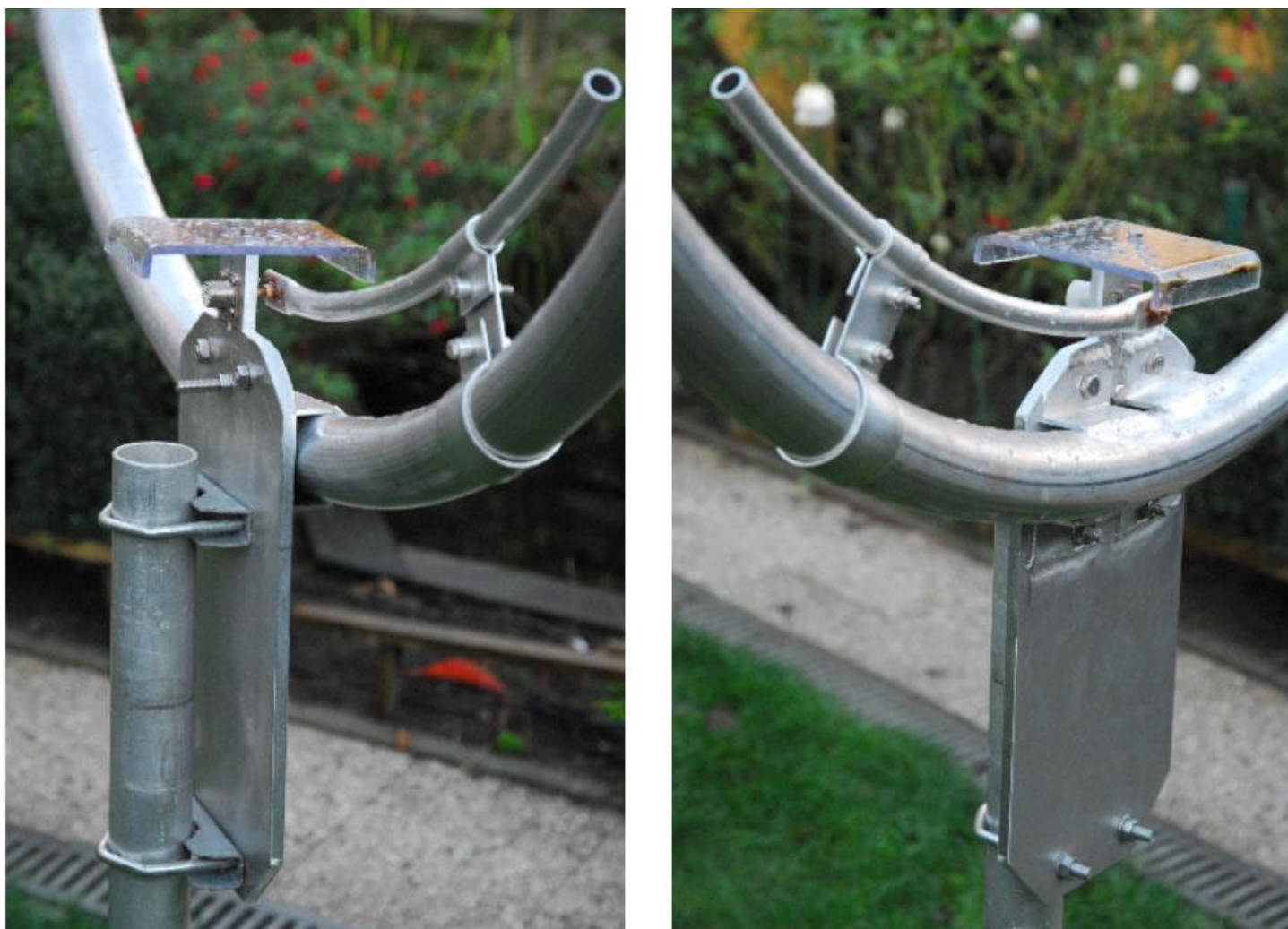


图 11 伽马馈电实施技巧

当使用电流互感器馈电方法时，当然必须尽量让环路的辐射电阻和总损耗电阻之和匹配到 50 欧姆馈电同轴电缆。根据环的尺寸和工作频带，环路馈送阻抗可以低至 50 至 100 毫欧，因此需要大约 1000 至 500 的阻抗变换比，或者匝数比 N 为 30:1 至 22:1。这个比率中的“1”仅仅是穿过环形铁心中心的导体。

像 Amidon FT-140-43(ID = 23mm)FT-240-43(ID = 35mm)的铁氧体环形线圈，是安装在直接与调谐电容相对的环形导体上，如图 12 所示。多匝初级绕组具有适当数量的匝数以匹配环路到 50 欧姆馈线。环形导体实际上是其自身的单匝次级绕组。为了正确操作，必须确保磁芯磁导率 μ 足够高，足以产生大于馈线阻抗两倍的初级电抗芯材料，

在工作频率下必须具有低滞后损耗。铁氧体 43 混合物具有 850μ ，能满足这个要求。当均匀分布的初级线圈由 1.5mm^2 的 PVC 绝缘铜线缠绕时，这种简单的馈电方法在 100 至 200W 驱动电平下工作良好。

1: N ratio CT

1:1 feed

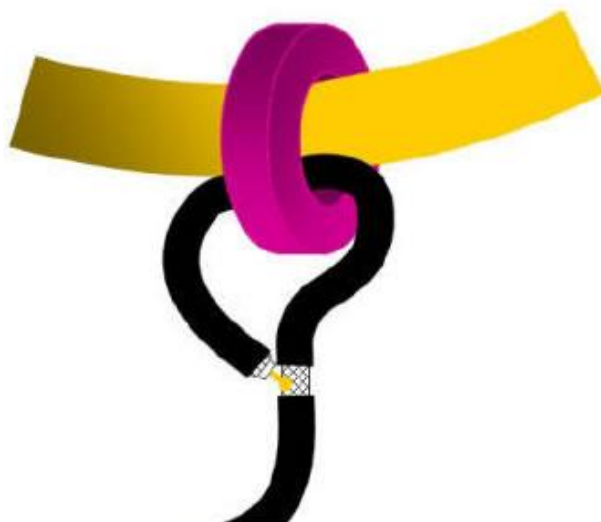
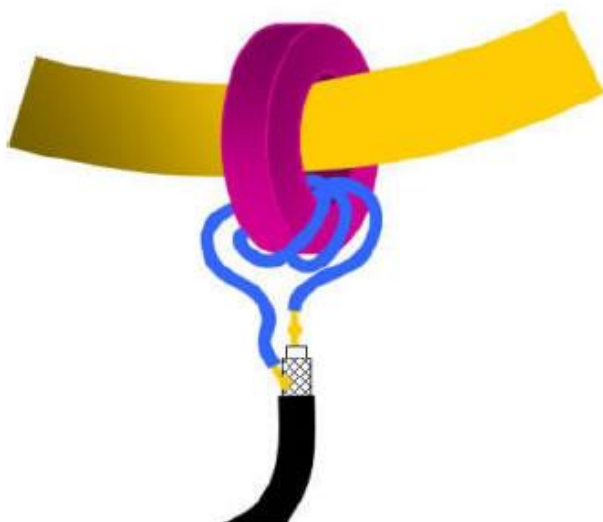


图 12 变压器耦合的概念和实际实现

在图 12 的右上侧的有趣变化是 1:1 变压器，其包括穿过环形磁芯的馈电同轴电缆的单匝环路。这种布置有效地将同轴电缆馈线的 50Ω 阻抗与环路非常低的欧姆阻抗串联，并且可能导致一些失配损耗。然而，更精确的多匝绕组 CT 技术将产生更好的结果。

环辐射特性：

小环天线具有至少两个同时激发的辐射模式：磁模式和电折叠偶极子模式。当环模式和偶极子模式辐射的比例被扭曲以实现相等的强度时，辐射图不对称性导致并能实现具有约 6dB 左右，典型前后比的、有用程度的单向性。

具有甜甜圈形状辐射图的小环展现出 1.5dBi 的典型平均地面增益，当安装在导电接地平面表面或短径向(每个径向的长度只需要为环直径的两倍)增益为 5 dBi。通过比较，安装在普通地面上方 $1/4$ 波长高度的大于 $1/2$ 波长水平偶极子天线长具有 5.12dBi 的增益，在普通地面上的 $1/4$ 波长垂直天线， 120° 度范围内，每 $1/4$ 波长长度上具有 2dBi 的增益。当仔细抑制由于在同轴电缆编织层上流动的共模电流导致的馈线辐射时，良好平衡的环，前侧比通常为 20 至 25dB。

然而，由于其独特的辐射模式，小环相对于任何其它天线具有一个非常显着的优点。如果垂直方向环的甜甜圈形状辐射波瓣图被直观地显示在地面上，则最大增益**同时**出现在低和高仰角处，在环平面中所有仰角都有同样良好的辐射，即，辐射在所有垂直角度，从地平线到天顶。因为环在低和高仰角处同时都有辐射，因此单个环可以替代水平和垂直偶极子天线。这在 160m，80m 和 40m 处是特别有利的，环将提供杰出的局部/区域覆盖，并且容易匹配，而且通常胜过用于长距离 DX 通联的 $1/4$ 波长垂直天线----非常好的通用天线。

小环辐射的能量在水平方向上垂直极化，在顶点水平极化。这很快意识到环具有为在长距离和短到中距离上的传输辐射和接收响应的独特性质。这是通过在前一种情况下的低角度垂直极化传播和在后一种情况下通过水平极化斜向入射传播来实现的。相比之

下，垂直单极天线仅对于低角度垂直极化传播是有用的，因为其在超过约 45 度仰角处展现零点和较差的响应与辐射。这种天线当然对于通过低角度天波跳跃传播的长距离通信或对于经由地波传播模式的短距离通信非常有用。

进一步对比，在地面高度仅仅一个波长(与理想化的自由空间相反或安装得非常高)的高度上的水平 $1/2$ 波长偶极子(或包括偶极子单元的波束阵列)直接在顶部(NVIS 较好 NVIS: Near Vertical Incidence Skywave 近垂直入射天波)显示最大极性响应，在水平线附近几乎零辐射。因此，在住宅情况下这种流行的“云加热器”天线作为隐蔽悬挂普遍存在的 G5RV，底端馈电天线，偶极子，倒 V 等对于 HF 无线电频谱中可能进行倾斜入射传播部分中的短到中距离通信是最有用的。

重要的是，应该注意，当小环与常规 20 米八木定向天线进行比较时，例如必须理想的被部署在至少一个波长(20m) 以上的地面高度，以便工作良好并实现趋向地平线的低起飞角，实现最佳无损远距离 DX 操作。

不幸的是，这种高度的天线塔在市政委员会和城市规划者管理的大多数住宅区是不切实际的。如果八木定向天线部署在较低的 10 米高度，则小环几乎总是优于定向天线。本作者永远不会被那些为获得潜在高性能八木 HF 定向天线而妥协地部署在不理想地面高度或安装在金属屋顶附近所取笑。该问题在 20 米以下的较低频带上情况更糟，由于天线高度过低而产生的高角度波瓣图方向根本不利于促进良好的 DX 通信。

与垂直安装/定向的环天线相比，环的底部不需要超过地面以上的环直径，这使其非常容易安装在有限的空间位置。当小环被安装到很高的高度时，性能没有显著的改进，最重要的大体上清除在靠近环天线周围和所期望辐射方向上的物体！将环安装在高架屋顶地面短桅杆上可产生出色的结果。

用于长距离 DX 传播路径的良好 HF 天线需要在低辐射角下发射大部分功率。高效率和恰当的垂直安装，恰当设置小磁环天线，比起一个大的安装在高塔上的多单元定向天线，情况还算不错。当然，定向天线比环天线在具有前向增益优势，可能有助于获取一些弱信号路径。

接收属性：

在典型的高噪声城市环境中，环天线几乎总是能在 HF 频带上比大的定向天线听到更多。小磁环天线(平衡的)主要响应于入射 EM 波的磁场分量，同时对电场分量几乎不敏感，这是环天线在接收时如此令人印象深刻的基本原因，戏剧性的是经常如此。它们会将弱信号从环境噪声中提取出来，当你从部署在郊区的垂直天线，偶极子天线或定向天线切换回来时，你将很可能接收到从未听到过的电台。

在传播的无线电波中，电场矢量的幅度比磁场矢量的幅度大 120π 或 26dB，该差异是由于自由空间的本征阻抗(377 欧姆 译者在未获得呼号前的小号 377 即来源于此)。另一方面，与人为噪声相关的感应场具有比正常辐射场(无线电波)大许多倍的电场分量。虽然偶极子天线或垂直天线对波的电场和磁场分量都敏感，但是小环仅响应于磁场分量，并且它总体上对不期望的人造噪声和传播大气干扰呈现高度的“盲目”拒绝。

因此，广泛使用的术语“磁环”天线含义是对输入的入射 EM 波分量的磁场区分。天线理论将环视为电共轭偶极子，即，环是“磁偶极子”，而普通偶极子是“电偶极子”。

明显的，小环天线在嘈杂的城市环境中通常将产生比水平偶极子高大约 10 至 20dB 的信噪比/SNR，并且当与垂直天线相比时甚至具有更大的 SNR 改善，导致这样的结果是因为人为噪声包括强电场分量和大部分垂直极化。SNR 是确定的可读性，而不是接收信号强度本身。缺失的强度可以由接收机的 AGC 系统无噪声地返回。

接收最重要的指标是信噪比，而不是天线的增益或效率。在 HF 频带，特别是在低中频部分，外部人造噪声，季节和太阳周期变化，银河/大气噪声是主要的。

磁环天线在接收模式中还具有另一个重要的实际优势。前面提到的高 Q 值谐振器在接收前端之前提供了非常窄的有选择性的波段频率带通滤波。包含天线本身的这种偶然预选器，在具有高功率广播站堵塞的较低 HF 波段上，提供了极大的、改进的、接收机性能，特别是当在区域中存在雷击和大气放电时。导致的不需要过载和相邻信道 QRM 干扰信号被拒绝或被严重衰减。

除了消除强信号过载和互调效应之外，滤波显著减少了馈送到接收前端由雷电感应产生的宽带脉冲能量，并且，在以前不可能用其它类型天线这种不利条件下接收时，仍然可以听到弱信号。

小环天线的这些综合特性使得它们在直接 A/B 比较测试期间通常非常显著的优于大偶极天线，八木天线或四波束天线。相对的，在发射模式下，天线的固有滤波行为选择性导致任何发射机谐波被大大衰减甚至不辐射。这可以帮助消除某些形式的 TVI 和 BCI。

关于效率和损耗的一些话：

与大多数天线系统一样，偏离完美的电对称性将导致电流在系统中不应该有电流的地方流动。这样的外部因素可以增加系统总损耗。对于环境损失，最困难的处理是将环与地面及其电气环境隔离，在低 HF 波段几乎是不可能的。这包括在同轴馈电电缆外部编织层和环天线附近的导体物体(例如管道和电缆)上流动的共模电流。

当环导体长度接近 0.25 波长时，STL 实现最大效率。与之对应的是最大的 VSWR 带宽和由于较高的辐射电阻和相关的较低的 Q 值而在调谐电容两端的最低电压。

效率受到环天线附近的物体捕获或吸收一些辐射能量的影响。例如，铁质材料(如钢铁)吸收的能量产生的涡流和磁滞损耗。

效率也是地球土壤电导率的函数。即使 STL 天线不需要径向辐射或接地平面，一旦辐射射频能量，它仍然遵守与所有其它类型的射频辐射器相同的电磁物理学定律。

更好的地面电导率通常导致更多的垂直极化信号反射(在远场中而不是在近场中)，因此与所需的较低的辐射仰角组合并加强直接路径信号。

当在高反射性表面或地表(例如盐水)附近操作时，垂直方向的小环可在某些条件下提供高达两倍的信号强度。这就是为什么垂直环是非常特殊的，作为一个收益，它不具有天线辐射模式(如垂直和短鞭状天线)中的零点劣势。

地面对环天线性能的影响：

当偶极子天线水平放置在地面上方时，其在地面中的“图像”具有相反的相位。因此，如果水平偶极子的地上高度减小到小于 $1/4$ 波长，则辐射电阻的快速减小以及由于在不完美地面内的损耗电阻快速增加导致功率耗散。对于部署在地面上不够高的偶极子天线的糟糕表现(对于任何业余无线电天线的广泛限制)，这是经典的祸不单行。

作为对比，地面上垂直方向的小环天线，其相关的射频振荡电流图像与环“同相”。因此，地面对垂直定方向小环天线的性能影响相对较小。事实上，由于电磁波的磁分量在地和其上空间之间的边界处是最大的，因此当环位于地面附近，在环的近距离感应场(环直径的 1 倍或 2 倍)之外时，环性能通常是最好的。然而，如果在发送/接收的方向上存在导电物体如电力线或建筑物，通常优先选择高处安装，这将为环提供对预期信号路径清晰通畅的视野。

在比较位于建筑物顶部的垂直鞭状天线和垂直小环性能时，可以说，相对于垂直和水平辐射模式，环通常会明显的赢家。这是因为凭借建筑物顶部驱动反射的鞭状天线，其辐射模式通常不具有任何精度的可预测性，因为垂直电流会在天线和大地之间的若干导电路径上向上和向下流动，每个路径以多个波瓣和零点形式形成了总的辐射模式。

然而，平衡环天线先天没有这样的问题，因为相对于垂直鞭状/单极天线，天线下面的地面不会形成支持地面返回电流缺少的一半天线电路。因此，环天线消除了多个对地电流路径。当然，由于地面(或水)上方的高度，环和鞭状天线都受到众所周知的干涉效应。

反射金属物大于波长约 $1/3$ 且在距离环天线小于约 2 个波长的距离处，可在各种频率下在给定方向上产生驻波“零点”。如果要将天线安装在金属屋顶的顶部，如果要避免在某些频率的某些方向上出现不期望的零点，应该考虑来自建筑物屋顶边缘的衍射干扰。

通常，最佳天线选址位置是在像这样的导电屋顶的边缘附近，朝向期望的一个或多个信号方向。

虽然在良好地面上的垂直方向环天线操作起来比在较差(有损)地面上更有效，但相对

于调整和馈送到地面或人造地面的垂直和小型鞭状天线来说，并不那么关键。在后一种垂直情况下，可达到的天线效率完全取决于地平面系统和地网的质量。

环天线的方向性：

通常认为垂直方向的环天线呈现双向模式，其中最大接收发生在环平面中。虽然这对于以非常低的仰角(小于约 10 度)到达的垂直极化天波信号以及对于地波信号而言是真实的，但对于接收高角度天波(大于约 30 度)，由于电离层内自由电子的“法拉第旋转”，其极化通常以相当随机的速率从垂直方向旋转到水平方向。

在超过 45 度角度处，环响应倾向偏移到相对于环平面达 90 度方位角的水平极化方式。因此，对于短距离通信链路，即小于约 500km，最佳接收通常发生在将环旋转 90 度，即环平面垂直于到达角方位。

在小于约 7MHz 频率下，小于约 500km 的路径上，不容易预测哪个方位会具有最佳夜间接收。这是由于天波和地波信号的普遍存在，这些信号的随机组合产生了相当严重的衰落。通常，试验和误差，是确定天线的哪个方向，将在最高平均信号强度和最棘手的衰落之间，产生最有利折衷的最佳解决方案。通常对于超过 500 至 1000 公里的距离，最佳取向是环平面与信号到达方向一致。

此外，在低仰角处，环天线表现出的侧面零点可用于“拉出”地面波信号，以减少同一时刻天波传播存在时的衰落。相比之下，垂直鞭状天线具有顶点零点，因此对于短距离和中等距离是无效的。

位于地面高度上小于约 0.15 波长的垂直环天线，在仰角平面中从顶点向下到几乎零度都具有极好的覆盖，使得该环在几乎任何距离范围内都是有用的。在高于约 20 度的仰角处，当接收天波信号时，环的方位角几乎是全向的。

对于普通地面上的环天线，与具有完美导电性的地面相反，在非常低的垂直角度即小于约 5 度，通常比完美地面上的可实现响应低 10dB 或更多。可能值得注意的是，紧

接在环下方的地面主要影响在高垂直角度处的响应，而在离天线大半径距离处的地面性能，倾向于表达在环平面中低垂直角处的环性能。

制作和安装问题：

没有质量好的、低损耗分离定子或蝶形或真空可变电容器所具有的、足够高的射频电压和电流额定值，制作磁环天线并期望它能产生令人印象深刻的潜力和结果，是相当徒劳的。在发射模式中，最小化所有来源的欧姆损耗是特别重要的。TIG (Tungsten Inert Gas Welding, 钨极惰性气体保护焊) 焊接叶片和在铝质分体式定子上焊接空气可调间隔片，可使电容器的欧姆损耗显著降低。

由于较短的转子，蝶形电容器比分离定子结构形式具有稍低的转子损耗。无论哪种情况下，两个定子通过宽铜带连接到环形导体的每一端。调谐电容器无疑是成功自制环天线项目中最关键的部分。在固定平行板或可变电容器的所有金属到金属连接表面上，TIG 焊接将确保欧姆累积损耗最低，尤其是随时间推移存在水分和表面氧化的情况下。

虽然更昂贵和更难找到，但真空可变电容器有很大的电容调谐范围，并且允许在比用空气可变电容器可实现的相当宽的频率范围上调谐环天线。真空可变电容器还具有比大多数空气可变电容器更低的本征损耗。高品质的 Jennings 真空可变电容器(图 2)和许多俄罗斯制造的等效品(图 13 和 14)可以在剩余无线电配件市场和 eBay 上找到，因为它们镀银面安装和硬夹固定，能确保连接到环形天线导体的接触电阻最低。在电容器端子和铜质环型导体之间的接口，绝对必须具有低接触电阻。消除每一毫欧以求达到最高的效率！

其它创造性装置也可用于制作高 VAR 额定低损耗电容器，例如长号，活塞或叉指式啮合板配置。固定值自制平行板电容器可以由废铜片和焊银垫片构成，并且通过较小的可变值调节单波段环中的带宽。空气总是优选的电介质，因为大多数其它材料具有高损耗。无论是真空还是空气可变或自制电容器，它们的机械轴都应可以方便的连接到减速

齿轮箱和电机驱动器，以便于屋顶或斜面阁楼安装的环方便的远程调谐。图 15 是使用容易获得的低成本材料，由 VK5JST 制作的创新型自制固定空气介电电容器堆叠+可变组合电容器，结合使用伺服电机驱动螺纹丝杠装置，实现可调带宽调谐的微调。电介质材料是来自当地超市或 XYL 厨房的厚聚乙烯面板。基于 VSWR 感测和自调谐伺服系统，天线调谐可以是手动或自动，以控制步进电机驱动。调谐电容器，让频带上的接收噪声达到最大峰值，环天线将获得合适的配置，以便在随后的发射接通时实现低 VSWR。



图 13 自制电容器夹具与焊银铜配件

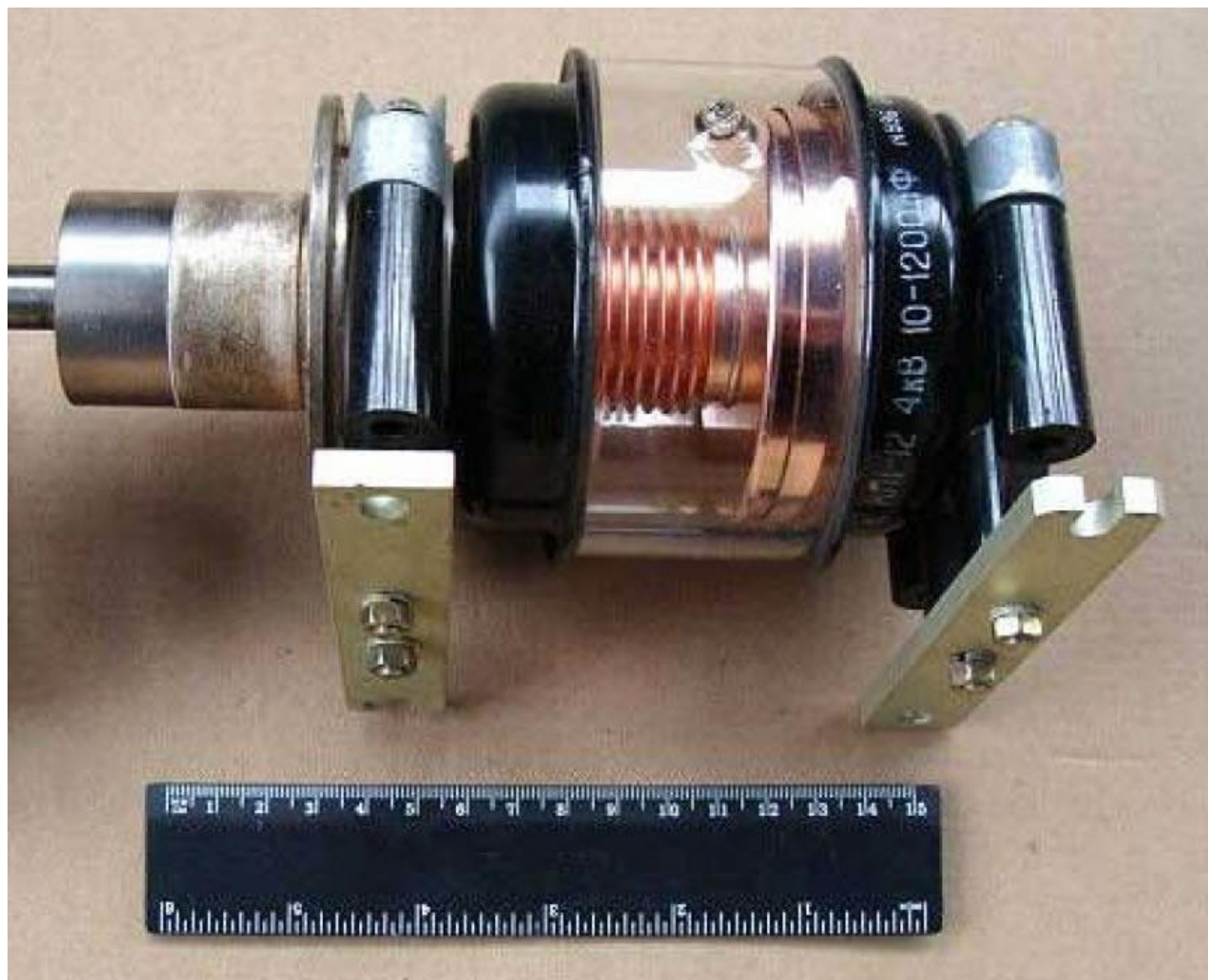


图 14 俄罗斯 Mil 型真空可变电容器与整体夹具

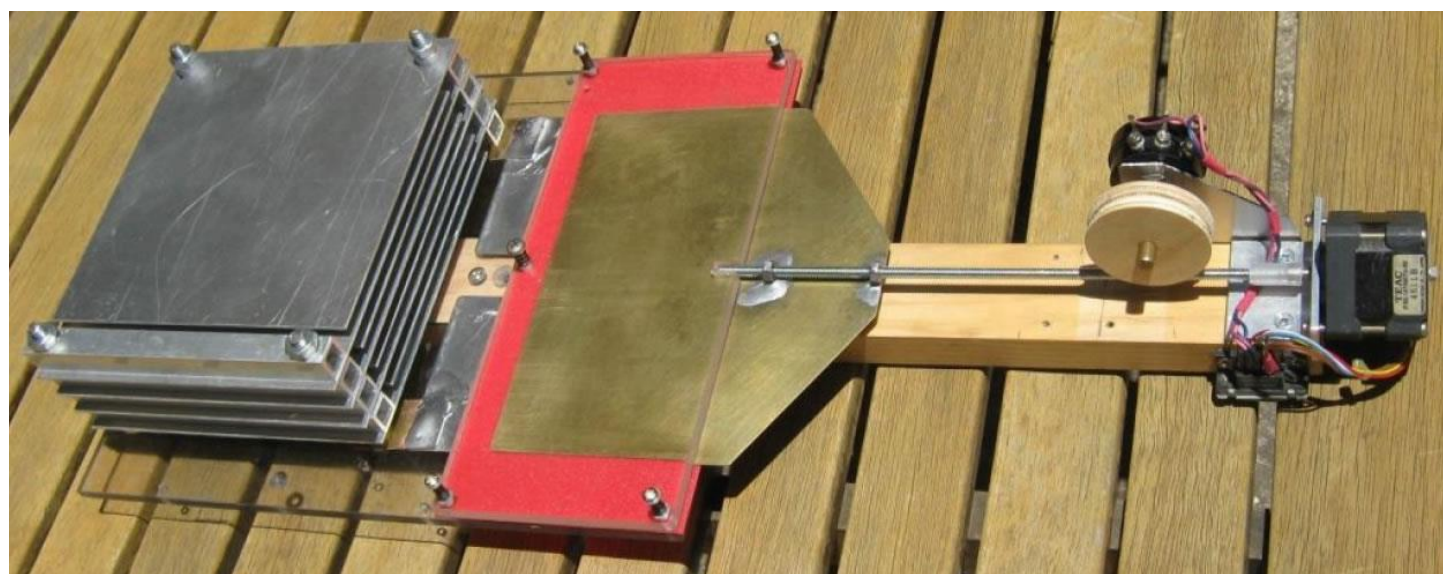


图 15 组合固定板+滑动叶片微调

调谐电机控制电缆应相对于环的两个半部对称布线，并且在环路区域外马上解耦和阻塞。将布线电缆穿过环路管道的内部，并且在与顶部调谐电容器直接相对的环路底部电中性点中钻出一个小孔，这是让控制电缆相对于 RF 保持屏蔽和电冷的好方式。

未能非常仔细地严格注意，关于消除所有来源的杂散损耗和做出错误的选址，如靠近黑色金属材料的制作细节，是小磁环天线有时不能达到其性能潜力的两个主要原因。伴随着不良的信号报告表现出无能。相反，良好制作/安装的环是绝对让人欢欣的。

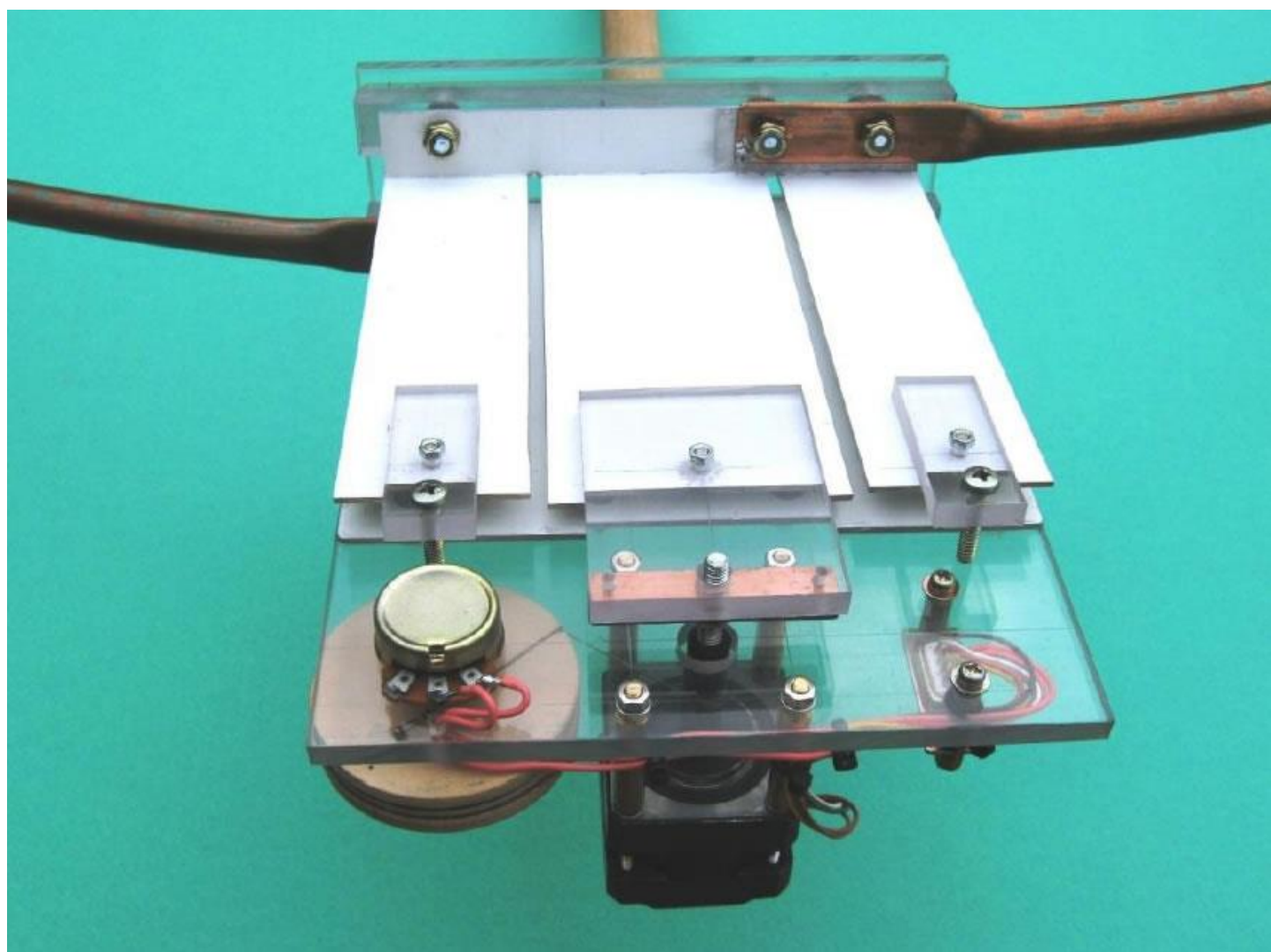


图 16 步进电机和丝杠驱动移动叶片空气可变电容

另一种自制电容器构造方法见图 16，其包括用于调谐 20m 单波段，标称直径 1m 的铜管环路的平行板空气可变电容。击穿电压和相应的功率处理水平由平行板襟翼叶片电容器，和/或 任何介入的电介质材料的气隙间隔确定。

用于最佳覆盖范围从 3.5MHz 到 30MHz，最受欢迎 HF 频谱部分的发射环天线，

最好能分成至少 2 个不同尺寸的环。如果还需要 160m，则 3 个尺寸的环是最好的。

标称直径为 0.9m 的环用于覆盖从 20m 到 10m 的所有靠上部分 HF 频带(也可能根据电容器最小/最大比率可调节到 30m)，以及用于覆盖 80m 到 30m 的靠下部分频带的 2m 直径环。为了获得 160m 的最佳操作和改进 80m 性能，应当考虑增加 3.4m 至 4m 直径的环。小环的辐射电阻和因此可获得的效率/辐射效率与其圆周长度的四次方成比例。

关于真空电容器的一个重要事情是，它们在其整个电容范围上没有均匀的 RF 电流额定值，但是在小板电极/它们的低容末端处较小。因此，需要将此特性考虑在设计计算中，并确保环在期望的调谐范围内，在其额定值内操作电容器。制造商如 ITT Jennings 提供了这些数据图。这是将环调谐/工作范围限制在标称 2 至 3:1 范围内的另一个比较好的原因，因此真空电容器始终工作在其最佳 VAR / RF 电流“最佳点”区域。真空电容器电流额定值的可取之处是它们是连续 RMS 电流，像 CW 操作、运行相对低占空比的 SSB 语音模式/ PEP 传输时可以很安全地超过。所有的真空电容都可以，只要不超过额定的玻璃/金属密封温度。这在实践中不可能发生，因为镀银的铜安装夹能效地散热并将热量转移到铜质环导体中。

单波段环路操作通常产生最佳结果，因为可以选择最佳环路电感对电容比。可以用固定值真空电容提供大部分调谐电容，然后并行地部署小得多的真空可变电容，以实现在感兴趣的整个频带上的精细微调“带宽”调谐，例如 40m 或 80m 等。

对于任何类型天线，频带顶端的 1.8 MHz 操作总是最困难的挑战，包括小环(典型尺寸为 0.02 波长)。但是它们对盛行信号的到来，空中性能仍然具有权威性。当缩小天线尺寸时，没有“免费午餐”(便宜)，因为自然空间波长还没有被物理定律重新定义小型化！因此，当与从 160m 全尺寸 1/2 波长水平偶极子天线可获得的性能相比时，这种小尺寸天线必须总是被放置在适当的角度。然而，大多数业余爱好者没有足够的住宅区大小和/或天线高度以容纳 160m 波长部分的偶极子天线，可以让其适当地工作，并具有良好的辐射效率和将辐射功率在有用方向上辐射的能力。类似地，160m 操作的合理高效和有效垂直不幸地超过了由地方议会和住宅建筑规范法规允许的高度。然后需要巨大的房产

以容纳广泛的径向系统。

在 160 / 80m 频带上，环的实际空中传输性能将高度取决于用作参考比较的天线。中心加载的移动鞭状天线或全尺寸谐振偶极子/单极子天线等等，以及使用什么路径，NVIS，地面波，天波等。制作环的导体直径由趋肤效应引起的损耗电阻决定，选择范围可从中等的 6mm 铜管到大孔径 100mm 铜管或铝管。用于制作磁环的常用导体直径是 20mm 和 32mm 软铜管。不需要厚壁管材，因为 RF 电流由于趋肤效应而被限制在导体表面。注意，辐射效率与环的大小无关。环天线效率由导体管直径及其导电性决定。

这个概念对许多人来说是违反直觉的。一个小环也会高效并且在 80m 和 160m 上非常有效地辐射功率，但是所得到的 L-C 比和存储的能量通常会使环的 Q 因子如此之高，以致产生不实用的窄的瞬时带宽，这对于 SSB 通联是没用的，其中大约 2 至 3kHz 的 VSWR 带宽是期望的最小值。

可实现的带宽与环的尺寸/直径大致成正比，Q 值与环直径成反比。根据其结构，标称 1m 直径的小环在 1.8 至 30MHz 频率范围内可以显示 90% 的固有辐射效率。

这种“内在”效率没有考虑可以从局部场吸收功率的外部/外部地面和环境损耗。这个非常明显的点可以凭经验观察到，因为你可以输送几百瓦的 CW 功率，环导体和调谐电容器保持冷却。如果小环表面上是低效的，它将用这种输入功率快速加热并熔化银焊接头。

铜管是制造环的优选材料，因为它具有比铝更高的导电性和更低的每单位长度的电阻。RF 损耗主要由趋肤效应和沿导体表面集中流动的 RF 电流产生的。通过使用大表面积(大直径)管道来形成环形导体而减轻损耗。

更大尺寸的半刚性螺旋同轴电缆，如 LDF550 / LDF650 / LDF750，当以 100 到 400 瓦的功率水平运行时，将方便地为更小直径的 20m 到 10m 的 HF 波段环制作提供优良的结构材料。整个螺旋电缆应将内部和外部导体在其末端连接在一起使用。

最佳环天线形状因子是圆形，因为它将产生最佳的封闭面积与周长比。辐射电阻与环面积成比例关系，而欧姆损耗与环周长/所有形状的周长成比例关系。方形环是最差的

形状因子，而八边形环(用直管和弯头制作)围绕比同一周长和欧姆电阻的正方形多 20% 的面积受益。

要注意的一个重点是小环的辐射电阻，因为辐射有效性与其圆周长度的四次方成比例。

大口径 2 英寸 LDF750 可以在较低的频带上使用，超过 1 kW。因电阻和电导率的关系，小环天线固有地显示非常低的辐射电阻，其与环路导体的欧姆电阻和来自连接和焊接的电阻竞争，包括调谐电容器连接。磁环天线通常具有大约 100 到 200 毫欧的辐射电阻。这意味着，由于接触不良导致每增加额外 1 毫欧，将使你的效率降低 1%。这就是为什么设计用于发射目的的专业磁环天线永远不会有机械触点，包括电容器板的一切都应该焊接或用银焊接。当馈送几百瓦的功率时，在环路和电容器中经受 60 安培或更多的 RF 循环电流并不罕见。

在环形天线的实际部署和选址中，当环路未被严格地部署在理想化的自由空间中时，存在影响辐射和损耗电阻的有益和有害类型的外在因素。

当环安装在完全导电的地平面反射器或铜径向线地网上时，产生增加有效回路面积的电镜像。这种增加又很大因素有利地增加了环的辐射电阻。这种情况是容易的。

相反，如果环放置在普通地(合理的反射器)上，则辐射电阻增加，但是反射损耗电阻引入也导致将无功近场能量耦合到有损耗地中的变压器效应。因此，将环安装到离开地面一定的最小距离是重要的，因为通过最小化本征环路导体损耗所获得的效率的增加可以被这种有害的接地电阻(外部因素)快速抵消。

类似地，当距离铁/铁质材料太近时，环的磁场近场将通过变压器行为引起材料 RF 电阻两端的电压，从而导致电流流动和相关的 I^2R 功率损耗。这种情况可能例如当环被安装在附近具有铁栏杆或混凝土钢筋等的公寓阳台上时出现。可以通过简单地将环定向成与受损害的铁或钢材料成直角来最小化有害影响。另一个损失分量是由于电流通过环和土壤表面之间的等效电容在土壤中流动。通过将环安装在至少一半或更多的环直径地面高度上，这种电容耦合效应再次被最小化。

地面损失包括两个部分，这是由于在地表下方的环境像中感应的电流引起的，其镜像环的电阻，与土壤电阻加上由于电流通过环和土壤表面之间的电容在土壤中流动的电阻，成比例关系。总的系统损耗以复杂的方式做为频率，环高度，土壤电阻和介电常数以及土壤 RF 表皮深度的函数而变化。

环形天线的变压器类比是很好的。HF 通信链路可以被可视化为相互的“空间变压器”，其中环路充当非常松耦合到远程发射天线的次级“绕组”。入射电磁波的磁场分量诱导小 RF 电流通过感应流入环路导体中，该感应又被高 Q 值的环路谐振器放大，其适当地阻抗匹配于同轴电缆传输线。

独立的发射环最好支撑在一个短的非金属桅杆上，例如一段 100mm 直径的 PVC 管和由塑料管道配件制成的基座脚。环也可以放置在旋转器驱动板上并通过转动以获得最佳信号强度或可以通过角度方向以消除特别糟糕的 QRM。

在发射时，必须注意不要触摸环，并且保持与环形天线磁场近场的安全距离，以确保符合人体暴露于 EM 场的电磁辐射/ EMR 标准。等于或大于一个或两个环直径的距离通常被认为是安全的场强区域。触摸环会导致射频皮肤灼伤，同时发射会非常不愉快，需要很长时间来愈合。



结论：

布丁的证明总是在吃饭时，所以倾向实验的业余爱好者被鼓励通过进入棚屋车间和制作一些自制环形天线以获得一些第一手的实践经验。这种经验验证的效能总是非常令人满意，特别是当一个优雅外观的 Lilliputian 环放在桌上，以适度的 50 瓦功率在 40 米或 20 米从遥远的美国或加拿大发射，VK 站可以获得固定的 5 和 9 QSO！我们最终寻求的是当频带对于 DX 打开时，任何类型任何时候都可靠的 HF 通联天线，简单地说，这意味着大部分施加到天线的 RF 以可用的方向和离去角有效的辐射。被低估的磁环天线很好地满足了这个基本标准。

精心设计和制作的小磁环天线可能是罕见的几个实例，不积跬步，无以致千里！

希望这些笔记的读者能够很好地了解磁环天线特性，并更好地指导同化那些正在考虑和构建一个(或两个)STL 天线项目时真正重要并需要考虑的因素。

© Leigh Turner VK5KLT

7 July 2009 / 更新于 28 November 2010

译注：可随意转载使用。发现翻译错误、概念错误总之任何错误请看在辛苦翻译的份上，不要吝啬，通知译者，给他一个学习的机会。