

## 引言

天线是通信系统非常重要的组成部分。根据定义，天线是用来将在导体上传输的射频信号转换为自由空间中的电磁波（发送模式），以及将射频电磁波转换为电信号（接收模式）的设备。

天线的选择对于发射-接收通信系统非常重要。天线必须能够有效地进行辐射或接收，这样就不会浪费所提供的电力。

本应用笔记介绍了在决定短距离设备应用中使用何种天线时要考虑的最重要参数。

本应用笔记的第一部分介绍了天线理论。讨论了主要的天线参数，如辐射方向图、增益、阻抗匹配、带宽、尺寸等。

本文档的第二部分介绍了不同的天线类型。

# 目录

<b>1</b>	<b>天线理论</b>	<b>4</b>
1.1	天线和辐射方向图	4
1.1.1	各向同性、定向和全向方向图	5
1.1.2	主要方向图	5
1.1.3	场区域	6
1.1.4	辐射方向图波瓣	7
1.2	辐射密度和强度	8
1.3	方向性	8
1.4	天线增益	8
1.5	天线效率	9
1.6	天线带宽	9
1.7	天线极化	10
1.8	输入阻抗	12
1.9	有效各向同性辐射功率	13
<b>2</b>	<b>用于低功率应用的天线</b>	<b>14</b>
2.1	线性天线	14
2.1.1	偶极天线	14
2.1.2	单极天线	15
2.1.3	环形天线	17
2.1.4	平面螺旋天线	18
2.1.5	立体螺旋天线	20
2.2	微带天线	21
2.3	陶瓷天线	23
2.4	缝隙天线	24
<b>3</b>	<b>天线的优缺点</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>参考</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>版本历史</b>	<b>28</b>

图片索引

图1. 用于天线分析的坐标系 ..... 4

图2. x - y平面全向天线方向图 ..... 5

图3. E和H平面辐射方向图 ..... 6

图4. 场区域 ..... 6

图5. 近场和远场区域 ..... 7

图6. 垂直、水平、3和椭圆偏振 ..... 11

图7. 圆极化 ..... 11

图8. 半波偶极天线的电压和电流分布 ..... 14

图9. 半波偶极天线的模型和辐射方向图 ..... 15

图10. 四分之一波长单极天线设计 ..... 16

图11. 倒L天线 ..... 17

图12. 倒F天线 ..... 17

图13. 螺旋天线 ..... 19

图14. 平面螺旋天线3D辐射方向图 ..... 19

图15. 立体螺旋天线实现 ..... 21

图16. 立体螺旋天线轴向模式3D辐射方向图 ..... 21

图17. 矩形微带天线 ..... 22

图18. 5.8 GHz贴片天线的实现和特性 ..... 23

图19. 陶瓷天线 ..... 24

图20. 缝隙天线实现和3D辐射方向图 ..... 24

# 1 天线理论

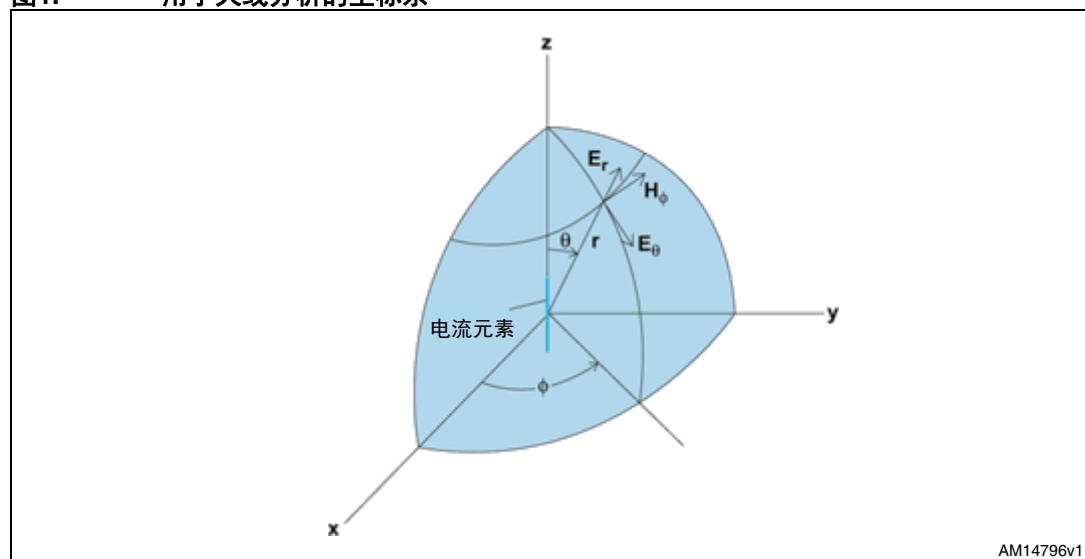
天线性能参数和用于描述天线的语言可能会令人困惑，有时甚至会产生误导。然而总体上来说还是有很多方法可以描述清楚好的天线系统有哪些东西构成，由于天线设计本身会包含各种目标需求之间的冲突，大多数的设计或多或少地都会反映出在各种属性或参数之间所做的折衷或权衡。因此，在设计之前重新查阅下天线的规格标准是至关重要的。在此过程中，如何使用更为完整和精确的术语变得尤为重要。多年来，为了标准化天线术语，已经做了很多努力。目前，事实上的天线术语标准是由美国电气和电子工程师协会（IEEE）制定的。因此本文档中涉及的相关天线参数也是依照此标准实施。

本文档的目的是给出天线参数简要、易懂的描述，如需更完整、严谨的论述，请读者参考“天线理论：分析和设计”一书[1]。

## 1.1 天线和辐射方向图

天线辐射方向图在IEEE标准中定义为“表征由天线产生的电磁场量的空间分布”。换句话说，天线辐射方向图或天线方向图被定义为天线的辐射特性的数学函数或图形表示，作为空间坐标的函数，如图1中所示。辐射特性包括功率通量密度、辐射强度、场强度和方向性相位或极化。

图1. 用于天线分析的坐标系



大多数情况下，辐射方向图是在远场区域中确定的，并且表示为方向坐标的函数。即是在球坐标系中，固定半径范围分布在 $\theta$ 和 $\phi$ 之间（参见图1）。

由于信息的三维特性，天线辐射方向图的解释可能是有问题的。辐射方向图的三维图的复杂性有时会使细节模糊不清。实际上，辐射图的三维图在呈现定量信息方面的价值有限。因此，通常会给出辐射方向图的二维“切面”。特别是，经常给出所谓的E和H平面的切面。

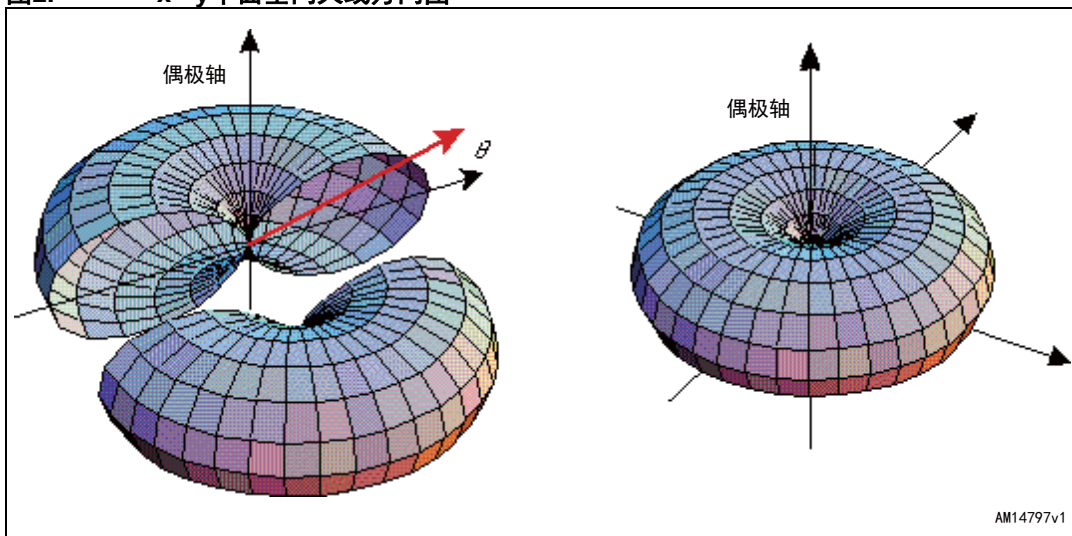
### 1.1.1 各向同性、定向和全向方向图

**各向同性**辐射体定义为在所有方向上具有同等辐射的“假想的”无损天线。虽然这种天线是理想的并且在物理上是不可实现的，但它对于实际天线的方向属性的表示具有参考作用。

**定向**天线是指在某些方向上具有比其他方向更高电磁波辐射或接受效率的天线。

**全向**天线定义为在给定平面中具有基本上无方向性的方向图，而在任意正交平面中具有方向性方向图的天线。全向方向图是一种特殊类型的方向图。在x-y平面中具有全向辐射方向图的天线的示例如图2中所示。

图2. x - y平面全向天线方向图



### 1.1.2 主要方向图

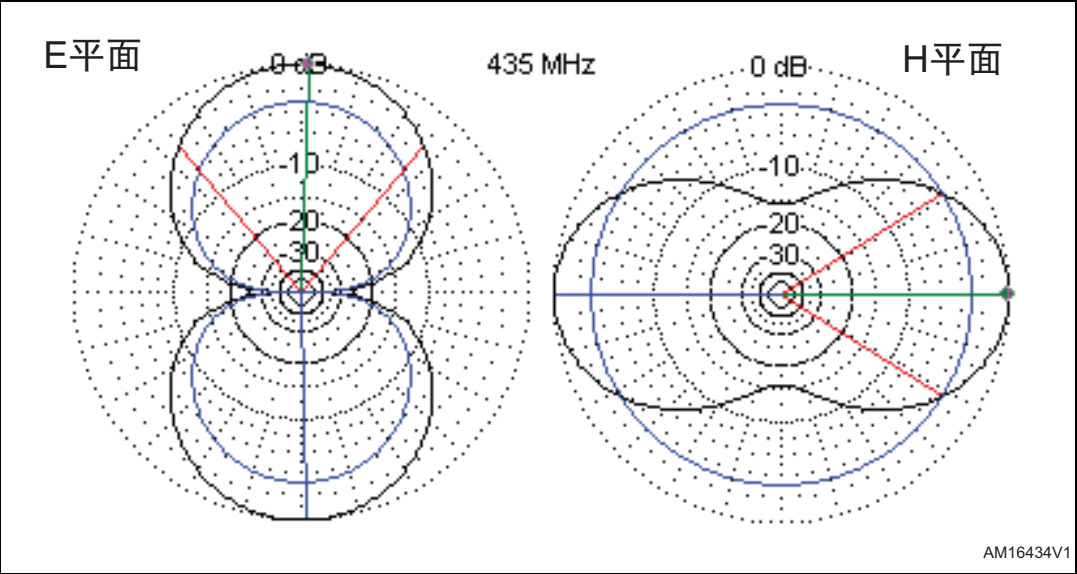
对于线性极化天线，其性能通常根据其主要的E和H平面方向图来描述。

E平面定义为包含电场矢量和最大辐射方向的平面。

H平面定义为包含磁场矢量和最大辐射方向的平面。

E和H平面是正交平面。通常仅检验三维辐射方向图的E和H平面切面就足够了。E和H平面辐射方向图的一个例子如图3中所示。

图3. E和H平面辐射方向图



1.1.3 场区域

辐射方向图的各个部分被称为波瓣，其可以被细分为主瓣、副瓣、旁瓣和后瓣。

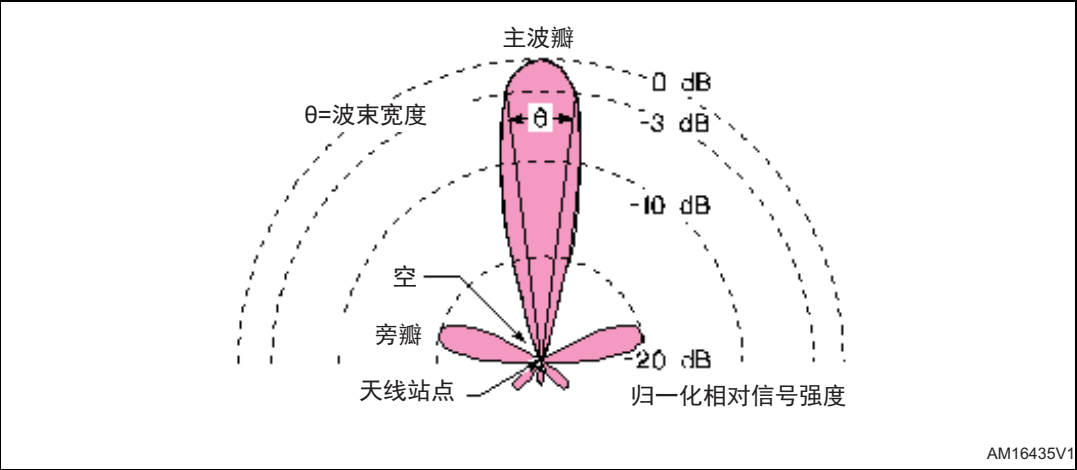
辐射波瓣是由辐射强度相对弱的区域界定的一部分辐射方向图。图 4展示了具有多个辐射波瓣的对称三维极性方向图。

主瓣（也称为主波束）定义为包含最大辐射方向的辐射波瓣。

除了主瓣以外的任何波瓣都是副瓣。副瓣通常代表不需要的方向上的辐射，这些副瓣应该最小化。

波束宽度是主瓣的半功率（-3dB，此时参考主瓣的峰值有效辐射功率）点之间的角度，以度表示。

图4. 场区域



### 1.1.4 辐射方向图波瓣

天线周围的空间通常细分为三个区域：

- 感应近场
- 辐射近场，也称为Fresnel区域
- 远场，也称为Fraunhofer区域。

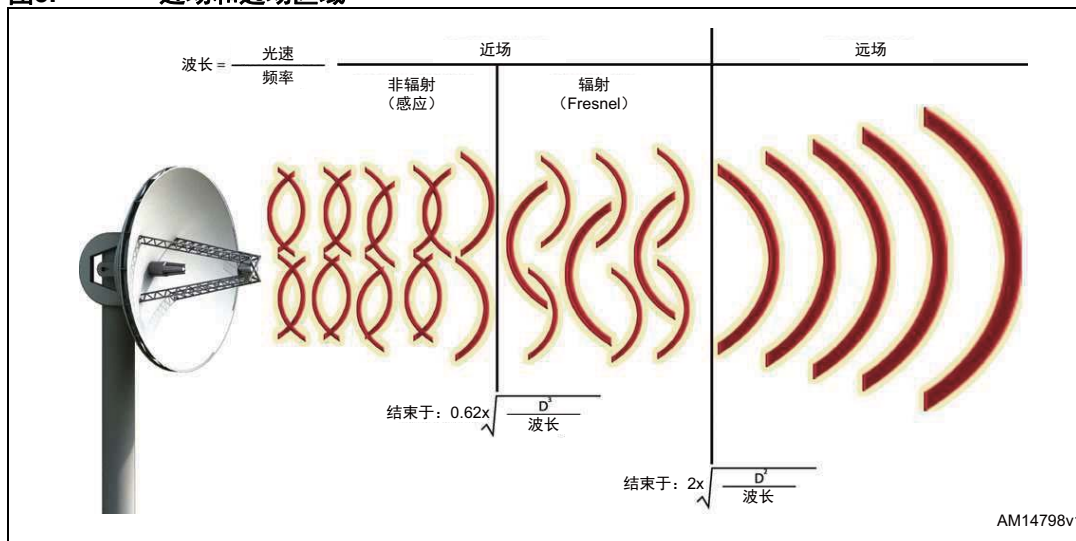
在天线的**感应近场区**中，非辐射场分量占主导地位。术语“感应近场”源于这样的事实：对于诸如电小偶极子等非谐振天线，感应功率在近场和场源之间，或近场和外部匹配网络之间循环，也有可能两种循环同时存在。严格的IEEE定义是“紧邻天线的近场区域部分，其中感应场占主导地位”。因此，对于类偶极子天线，该区域中的能量主要是电能或磁能。对于电小天线，感应近场取为延伸到距天线约 $R \sim \lambda / 2\pi$ 的距离。

在**辐射近场**中，辐射场占主导地位，但角视场分布取决于距天线的距离。严格的IEEE定义是“远场和近场区感应部分之间的那部分天线近场区，其中角视场分布取决于距天线的距离”。如果天线较大，则与波长相比，辐射近场的外边界取为 $R \sim 2D^2 / \lambda$ 。

天线的**远场区**是天线周围区域中，距离天线足够远、仅辐射场分量显著的区域。换句话说，远场是指天线场区中，角视场分布基本上与到天线区域中指定点的距离无关的场区。在远场中，场分量是正交的，并且能量在电、磁储能之间均分。

图 5中，显示了三个不同区域之间的分隔。

图5. 近场和远场区域



## 1.2 辐射密度和强度

电磁波用来通过无线介质或导引结构从一点到另一点传输信息。因此，可以很自然地假设功率和能量与电磁场相关。可以证明[1]与天线远场区中电磁场相关的功率密度是真实存在且占主导地位的，被称为**辐射密度**。

相反，给定方向上的**辐射强度**定义为每单位立体角从天线辐射的功率。辐射强度是远场参数，可以通过将辐射密度乘以距离的平方来获得。

## 1.3 方向性

天线的方向性定义为天线给定方向的辐射强度与在所有方向上的平均辐射强度的比。平均辐射强度等于天线辐射的总功率除以 $4\pi$ 。如果未指定方向，则暗指最大辐射强度的方向。

非常明显的是，对于各向同性源，其方向性是一致的，因为其功率在所有方向上均匀辐射。对于所有其他的源，最大方向性总是大于1。它是相对“品质因数”，表示与各向同性源相比的天线方向性。

## 1.4 天线增益

增益可能是最广泛使用的天线性能的描述符。但是，常用的不止一种定义或解释。大多数天线是无源器件，因此在放大器表现出功率增益的意义上来说，它是没有功率增益的。但是，从远距离接收器的角度来看时，特殊的天线可以在给定方向上比各向同性天线辐射出更多的功率。因此，增益被定义为给定方向上的强度与辐射强度的比，该辐射强度是在天线接收的功率是各向同性辐射功率的情况下获得的。对应于各向同性辐射功率的辐射强度等于天线接受（输入）的功率除以 $4\pi$ 。因此，理解这一点非常重要：“**无源天线的增益并不代表任何实际的功率增益**”。

增益有时也被引入到假想各向同性源之外的其他源。最常见的是，增益被引入到半波线性丝状偶极子中。如果增益参考的是各向同性源，则单位写为“dBi”。因此，如果增益参考的是半波偶极子天线，则单位写为“dBd”。增益dBd = 增益dBi - 2.15 dB。

增益狭义定义为，局部接收器使用完全效率（无损）各向同性天线在特定位置接收到特定强度所需的输入功率，与使用所讨论天线时所需输入功率的比。因此，在特定方向上具有3dB增益的天线要实现相同的强度，需要的功率与各向同性源相比是其一半。因此，可以看出，出于链路预算的目的，可以将天线增益与有源设备（如放大器）增益同样对待。

注意，天线辐射的总功率通过称作天线辐射效率的系数与总输入功率关联起来。辐射效率越高，传输或接收的能量越大。根据IEEE标准，增益不包括由阻抗不匹配（反射损耗）和极化失配（损耗）引起的损耗。因此，这意味着增益仅考虑同一天线的电介质和传导系统的损耗。反射损耗和极化失配是非常重要的损耗，通信系统的链路计算中需要对其进行考虑，以确定接收或辐射的功率。



## 1.5 天线效率

如果将天线作为从源接收功率并将其辐射到空间的设备，则辐射到空间的功率与从源接收的功率的比就是效率 ( $\eta_{\text{radiation}}$ )，有时称为辐射效率。它在IEEE参考文献中定义为天线辐射的总功率与天线从所连接发射器接收的净功率之比。天线接受但未辐射的功率以热量的形式耗散。

总天线效率 $\eta_o$ 用来考虑输入端和天线结构内的损耗。一般来说，总体效率可写为：

### 公式1

$$\eta_o = \eta_r \cdot \eta_c \cdot \eta_d$$

其中：

$\eta_o$  = 总效率（无穷小量）

$\eta_r$  = 反射（失配）效率 =  $(1 - |G|^2)$ （无穷小量）

$\eta_c$  = 传导效率（无穷小量）

$\eta_d$  = 介电效率（无穷小量）

$G$  = 天线输入端的电压反射系数 [ $G = (Z_{in} - Z_o)/(Z_{in} + Z_o)$ ]，其中 $Z_{in}$  = 天线输入阻抗， $Z_o$  = 传输线的特征阻抗]。

通常 $\eta_c$ 和 $\eta_d$ 很难估算。

在任何天线制造商的文献中都很少会公布辐射效率。这有几个原因：首先，辐射效率极难准确测量。其次，天线的辐射效率隐含在天线增益的完整规范中。

## 1.6 天线带宽

天线的带宽定义为天线的某些指标性能在符合某一特定标准的情况下，其正常工作的频率范围。带宽可以认为是中心频率（通常是偶极子的谐振频率）两侧的一段频率范围，其中天线特性在中心频率的可接受值范围内。

由于天线的特性不一定以相同的方式变化或甚至会受到频率的严重影响，因此没有唯一的带宽表征。每种情形下都设置了规范以满足特定应用的需要。通常，方向图和输入阻抗变化量之间存在差异。相应地，方向图带宽和阻抗带宽就用来强调这种差异。与方向图带宽相关的是增益、旁瓣电平和极化，而输入阻抗和辐射效率与阻抗带宽有关。

## 1.7 天线极化

天线在给定方向上的极化被定义为由天线发射的波的极化。没有说明方向时，则认为极化是最大增益方向的极化。实际上，辐射能量的极化随着相对天线中心的方向而变化，因此方向图的不同部分可以具有不同的极化。

辐射波的偏振定义为描述电场矢量的时变方向和相对幅度的电磁波特性；具体地说，是通过空间中固定位置处的矢量末端跟随时间变化的函数所描绘的图形，以及沿着传播方向所摹写的场景。然后，极化是由表示瞬时电场的箭头的终点描绘的曲线。

极化可以分为线性、圆形或椭圆形极化（参见图 6）。如果描述空间某点处电场的矢量（为时间的函数）总是沿直线方向，则该场被称为线性极化的（水平或垂直）。不过，通常电场轨迹的图是椭圆形，这种场被称为椭圆极化场。线性（见图 6）和圆形（见图 7）是椭圆极化的特殊情况，它们可以在椭圆分别成直线或圆时得到。描绘电场的图形以顺时针或逆时针方向显示。电场矢量的顺时针旋转指定为右旋极化，其逆时针旋转指定为左旋极化。

图6. 垂直、水平、3和椭圆极化

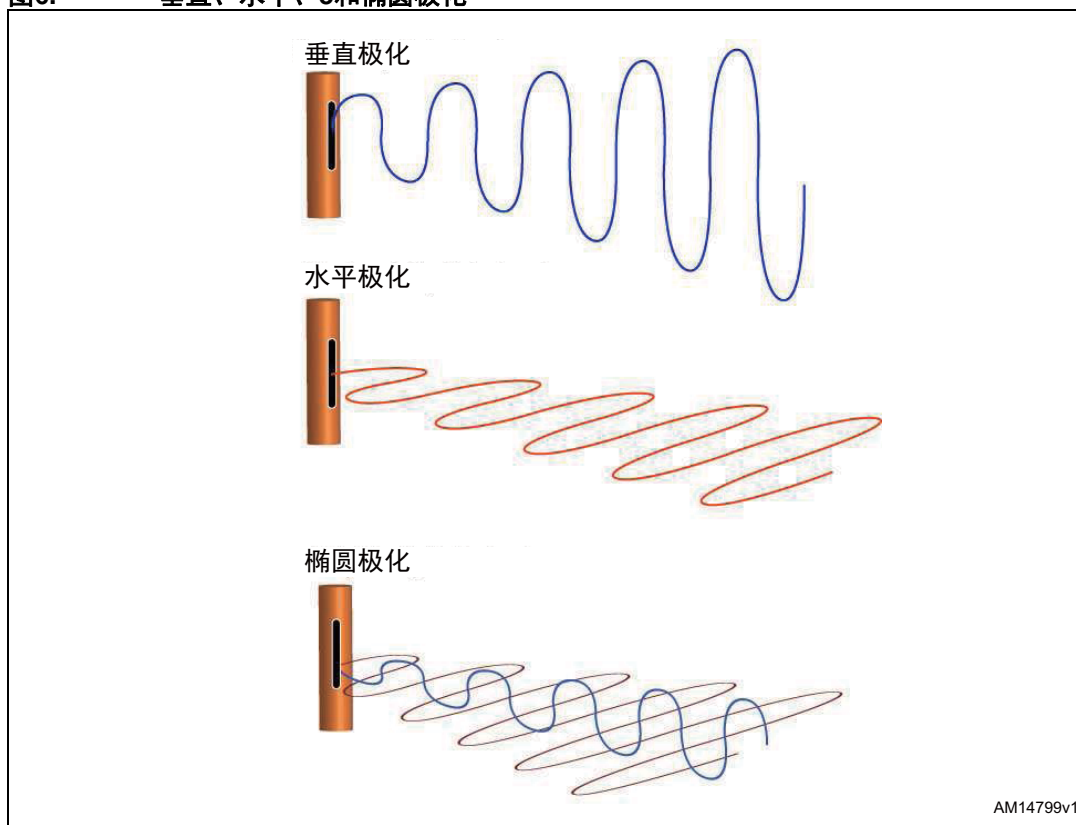
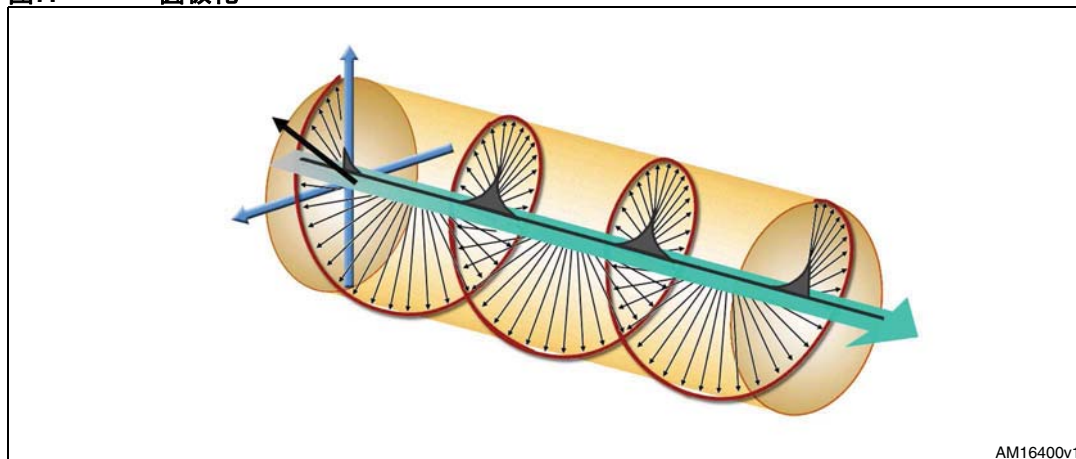


图7. 圆极化



如果接收天线的极化与输入（入射）波的极化不同，则由于极化损耗，从输入信号中获取的功率不是最大的。使用相同极化的天线，并且以不改变其特性的方式进行物理放置，这在通信系统中是非常重要的。如果天线是线性极化的，则不要将两个天线相互正交地放置，如果天线是圆极化的，则或同时右极化地或同时左极化地使用两个天线。

表 1 中显示了，将接收器天线接收的功率与发射天线发射的最大功率之比作为极化的函数。如果天线相同，则可以接收到全部发射功率，如果天线相反，例如TX中垂直而RX中水平，则接收的功率为零。

表1. 接收功率与最大功率之比

发射天线极化	接收天线极化	接收功率与最大功率之比	
		比值	比值[dB]
垂直	垂直	1	0
垂直	45度或135度	1/2	-3
垂直	水平	0	∞
垂直	圆形（右旋或左旋）	1/2	-3
水平	水平	1	0
水平	45度或135度	1/2	-3
水平	圆形（右旋或左旋）	1/2	-3
圆形（右旋）	圆形（右旋）	1	0
圆形（右旋）	圆形（左旋）	0	∞
圆形（右或左）	45度或135度	1/2	-3

## 1.8 输入阻抗

天线从源接收功率的能力取决于天线的输入阻抗。为实现最大功率传输，输入阻抗应与源的输出阻抗完全匹配。严格来说，为了实现最大功率传输，天线的输入阻抗必须是源输出阻抗的复共轭。基本上，所有射频源都呈现出其真实的输出阻抗，绝大多数射频源的输出阻抗为50Ω。标准的同轴电缆的阻抗也是50Ω，代表了一个很好的兼顾传输功率和损耗的折衷方案。另一方面，在一个宽频段上，天线的复输入阻抗与50Ω相差很大。

天线输入端的复反射系数为：

公式2

$$\Gamma = (Z_{\text{input}} - Z_0) / (Z_{\text{input}} + Z_0)$$

其中：

$Z_{\text{input}}$  = 天线的复输入阻抗

$Z_0$  = 源/系统阻抗

反射功率等于入射（前向）功率乘以复输入反射系数的幅度的平方。反射功率是提供给天线返回负载的总功率的一部分。

天线输入阻抗匹配的质量通常由两个参数之一来规定：回波损耗或驻波比（SWR），有时称为电压驻波比（VSWR）。回波损耗表示有多少入射功率没有被反射或没有从负载返回。它是反射系数大小的平方，通常以对数形式表示为：

#### 公式3

$$R.L. = 20\log_{10}(|\Gamma|)$$

例如，-3.0103 dB的回波损耗表示反射了一半的入射功率。通常，对于良好匹配来说，低于-10 dB的回波损耗都是可接受的，这种情况下，反射的信号少于1%。

驻波比定义为输入传输线上的电压最小值与最大值之比。它定义为：

#### 公式4

$$VSWR = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|)$$

VSWR描述输入匹配的一个效用是，当反射系数的大小以对数形式表示为从0到负无穷的范围时，VSWR的大小可以线性形式表示为从1到无穷大。所以，当匹配不是很好时，VSWR对于描述输入匹配特别有用。VSWR为5.83对应-3.01dB的回波损耗。良好匹配的天线，其VSWR低于2。

## 1.9 有效各向同性辐射功率

有效全向辐射功率（EIRP），也称为等效全向辐射功率，是在单一方向上测量的辐射功率量（即，针对固定的 $\Theta$ 和 $\Phi$ ）。

通常，对于天线辐射方向图测量，如果给出了单个EIRP值，那么这会是所有测量角度上最大的EIRP值。

EIRP也可以认为是完美的各向同性天线为得到测量值而需要辐射出去的功率量。

EIRP可能与无线电（ $P_t$ ）传输的功率、网络和失配损耗（L）以及天线增益（G）相关：

#### 公式5

$$EIRP = P_t - L + G$$

在构建场的区域中，规范可能会限制发射器的EIRP，以防止人员暴露在高功率电磁场中；不过，EIRP通常被限制为对相似频率上的服务产生的干扰最小。

## 2 用于低功率应用的天线

对于无线通信系统，天线是最关键的元件之一。良好的天线设计可以使系统设计变得轻松并提高整体系统性能。典型例子是电视，通过使用高性能天线可以改善整体广播接收。

天线的类型必须符合所处应用的需要，还必须经过调谐与发射器或接收器进行匹配。

这里给出了可用于低功率应用的各种天线类型的一些表格的介绍和简要讨论。

### 2.1 线性天线

对于许多应用来说，有线天线（线性或弯曲）是最古老、最简单、最便宜，并且在许多情况下用途最广泛的天线。它们对于外行人来说也是很熟悉的，因为它们几乎无处不在——汽车，建筑物，船舶，飞机，宇宙飞船等等。线性天线有各种形状，如直线（偶极子，单极子）、环形、螺旋等。

#### 2.1.1 偶极子天线

偶极子天线是一种无线电天线，可以由简单的电线利用中心馈电驱动元件来制成。它由两根金属线材导线组成，彼此成直线，两者之间间隔很小。射频电压施加到天线的中心处，在两个导体之间。从理论的角度来看，这些天线是最简单的实用天线。

半波偶极子天线是其他许多天线的基础，也可用作测量天线增益和辐射天线密度的参考天线。在谐振频率上，即偶极子长度等于半波长的频率上，我们会在天线中心的终端处获得最小电压和最大电流，如图 8 中所示；阻抗是最小的。这是一个简单的天线，向地平线（垂直于天线）辐射能量。由此产生的3D方向图看起来有点像圆环或百吉饼，天线位于孔中并向外辐射能量（参见图 9）。最强的能量辐射在垂直于天线的平面上。半偶极子的增益约为 2.2 dBi。

图8. 半波偶极天线的电压和电流分布

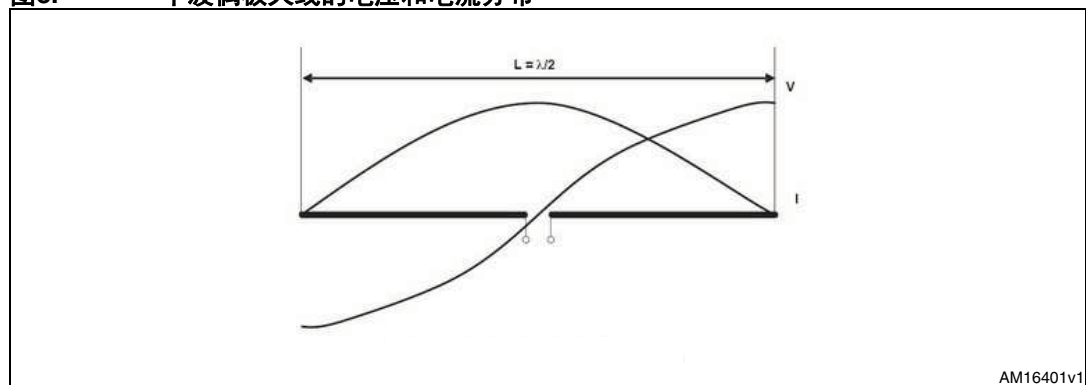
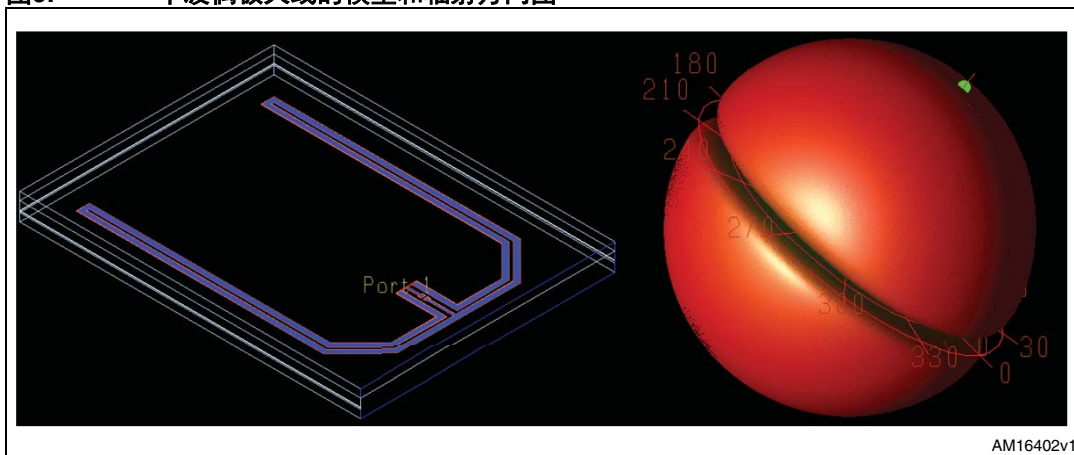


图9. 半波偶极天线的模型和辐射方向图



当频率非常低时，波长就会变得非常长，因此半波偶极天线是不可行的。这种情况下，可以使用短偶极天线。

短偶极天线是所有天线中最简单的。它是一条在其中心馈电的开路电线。“短”是相对于波长来说的。因此，上述偶极天线的绝对尺寸无关紧要，只有导线尺寸相对于操作频率的波长才重要。通常，如果偶极子的长度小于十分之一波长，则偶极子是“短”的。

中心馈电短偶极天线的方向性仅取决于极角分量的正弦 $\sin$ 值。它被计算为1.76 dB，对于可实现的天线而言是非常低的。

对于所有偶极型天线，短偶极天线的极化是线性的。当在x-y平面中进行评估时，该天线被描述为垂直极化，因为E场是垂直取向的。

### 2.1.2 单极子天线

单极子天线，也称为鞭状天线，是由半个偶极天线组成的天线，通常安装在某种接地层之上。

鞭状天线（像垂直偶极子）具有全向辐射方向图，在所有方位角方向（垂直于天线轴）上辐射等量的无线电功率，辐射功率随着天线轴上的仰角下降而下降直至为零。垂直单极天线广泛用于非定向无线电通信，其中发射机（或接收机）的方向是未知的或不断变化的，例如广播无线电、CB和业余无线电，甚至可用于蜂窝电话。这是因为它们在所有水平方向上都能够同等良好地进行传输（或接收）。

与所有电子元件一样，所有天线都具有至少两个连接点。在鞭形天线的情况下，即使接地平面区域仅仅是电路迹线和电池，也必须有接地线。鞭形天线和地平面结合在一起形成一个完整的电路。在鞭形天线和接地平面之间建立起电磁场，电流流过该电磁场，从而使电路完整。理想情况下，接地层应围绕鞭形天线的基部延展开至少四分之一波长或更多的波长。理想情况下，接地层也可以做得更小，但这会影响鞭形天线的性能。在设计天线时必须考虑接地层面积。

鞭形天线通常设计为谐振天线。因此，鞭形天线的长度由所用无线电波的波长决定。最常用的长度是四分之一波长，称为四分之一波长鞭。半波鞭形天线也很常见。

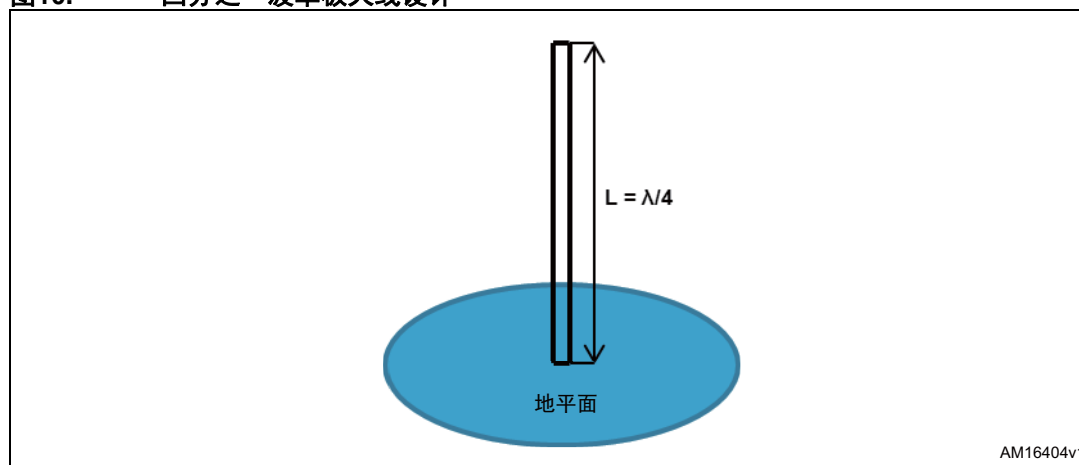


如果安装在完美接地层上，那么四分之一波长鞭形天线的增益比半偶极子的增益大3dB（线性表示下为两倍）。四分之一波单极天线的设计和实现如图10所示。

由于在横向或垂直于导线时辐射最大，因此垂直鞭形天线在除直线向的其他任何方向上都能实现理想的通信。垂直于鞭形天线的辐射方向图可以描述为全向的。然而，峰值辐射的方向从x-y平面变为从该平面抬起一个角度。在鞭形天线末端有一个“空”或信号最小值。

鞭状天线极化是垂直的，尽管如此，但在真实环境中，金属物体和地面之间会发生反射，可能导致水平和垂直极化信号都存在。

图10. 四分之一波单极天线设计



单极天线的一个简单替代方案是使其短于四分之一波长，并在鞭形基部附近添加一个电感器，以补偿所产生的容抗。这种类型的天线可以具有与全尺寸鞭形天线几乎等同的性能。

相对于偶极子，单极天线可以制作为印刷电路板（PCB）上的迹线。这在800 MHz以上的频率下非常实用。在较低频率下，全尺寸单极天线可能会太长。单极天线的长度比计算值短10%或20%，这取决于电路板的介电特性和厚度。

单极天线的衍生物是倒L和倒F天线，如图11和12所示。

在倒L型天线中，单极天线不是在其整个长度上垂直于地平面延伸，而是在一定距离后平行于地平面的弯曲。这有助于节省空间，但降低了辐射阻抗，因为散热器更接近地平面。需要额外的匹配电路以使低馈电阻抗与50Ω惯用传输线阻抗相匹配。

从倒L型天线的馈电点行进到其末端，我们会注意到电压是增加的（同时电流降低），在馈电点处是最大电压值，到末端时接近为零。这意味着如果我们如图11中所示为天线馈电，则天线阻抗最小，如果我们将馈电点移向末端则阻抗增加。倒F型天线是带有馈电抽头的倒L型天线，可提供更大的天线阻抗。如果天线在正确的位置进行抽头，则不需要额外的匹配电路。



图11. 倒L型天线

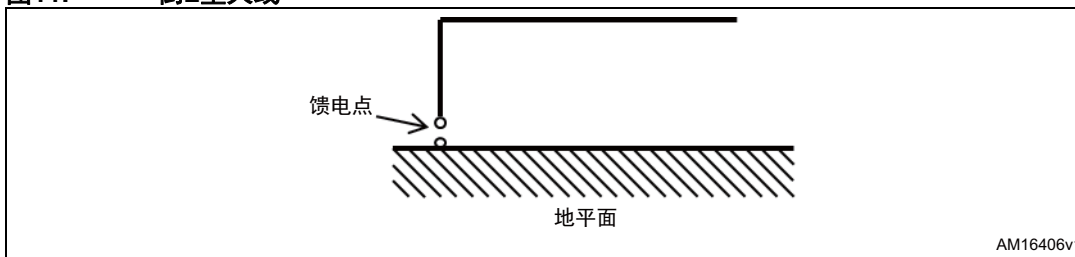
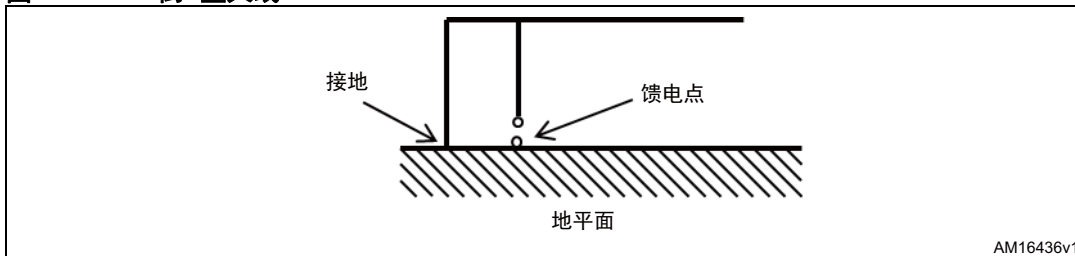


图12. 倒F型天线



### 2.1.3 环形天线

单匝环形天线是弯曲成闭合曲线形状的金属导体，例如圆形或方形，在导体中有间隙以形成端子。多匝环或线圈是匝相叠加的串联连接。环形是主要天线结构之一。

讨论环形天线可根据电气尺寸合理地划分。电小环形天线，总导体长度与自由空间中的波长相比较小的环（小于波长的十分之一左右）是实际中最常遇到的环形天线。例如，它们通常用作便携式无线电台的接收天线，用作无线电波导航的定向天线，或用作场强计的探测器。电大环形天线，特别是那些接近谐振尺寸的环（环的周长/波长 $\approx 1$ ）主要用作定向阵列中的元件。

小环形天线也称为磁环，因为其电气表现为线圈，由于其有限的尺寸，具有较小但不可忽略的辐射电阻。可以将其分析为直接耦合到近场区的磁场，而其本身是耦合到远场中的电磁波。具有电小周长的环形天线的辐射电阻较小，通常小于其损耗电阻。因此，它们是非常差的辐射器，很少用于无线电通信中的传输。当它们用于这样的应用中时，通常处于接收模式，例如便携式无线电台和寻呼机，在这些应用中天线效率不如信噪比那么重要。任何形状（圆形，椭圆形，矩形，正方形等）的电小天线的场方向图都类似于无穷小偶极子的场方向图，其具有垂直于环平面的零点，并且在沿着环平面具有其最大值。随着环的总长度增加，且其周长接近一个自由空间波长时，方向图的最大值从环平面移动到垂直于其平面的环轴。

通过增加（电气）其周长，可以增加环形天线的辐射电阻，并使其与实际传输线路的特征阻抗相当。增加环辐射电阻的另一种方法是在其圆周或周长内插入具有很高磁导率的铁氧体磁芯，它能提高磁场强度并因此提高辐射电阻。这种形式称为铁氧体环。

环形天线与单极天线完全不同，因为单极天线两端是有限的。这种情况下，与发射器（或接收器）相对的一端接地。使用一个电容器（替代线圈）将天线调谐到实际阻抗。

环形天线的优点是它不容易被近旁的手部移动导致失谐。除了增益较差之外，环形天线的另一个缺点是带宽较窄，这使调谐变得非常关键。

## 2.1.4 螺旋天线

螺旋天线属于频率无关天线类；这些天线带宽非常大。分数阶可高达30: 1。这意味着如果较低的频率是1GHz，则天线仍然可以处于30GHz的频带，以及其间的所有频率。螺旋天线的示例如图 13所示。

螺旋天线通常是圆极化的。螺旋天线辐射图通常具有垂直于螺旋平面的峰值辐射方向（参见图 14）。

螺旋天线广泛用于国防工业中的传感应用，其中需要不占用太多空间的大带宽天线。螺旋天线阵列用于1-18 GHz范围内的军用飞机。螺旋天线的其他应用还包括GPS，其中有优势的是具有右旋圆极化的天线。

最知名的螺旋天线是对数周期天线。这种天线，也称为等角螺旋天线，每个臂由极性函数定义：

### 公式6

$$r = R_0 e^{a\phi}$$

其中：

$R_0$  = 常数，控制螺旋天线的初始半径

$a$  = 参数，控制着平面螺旋天线延长的速度

图13. 螺旋天线

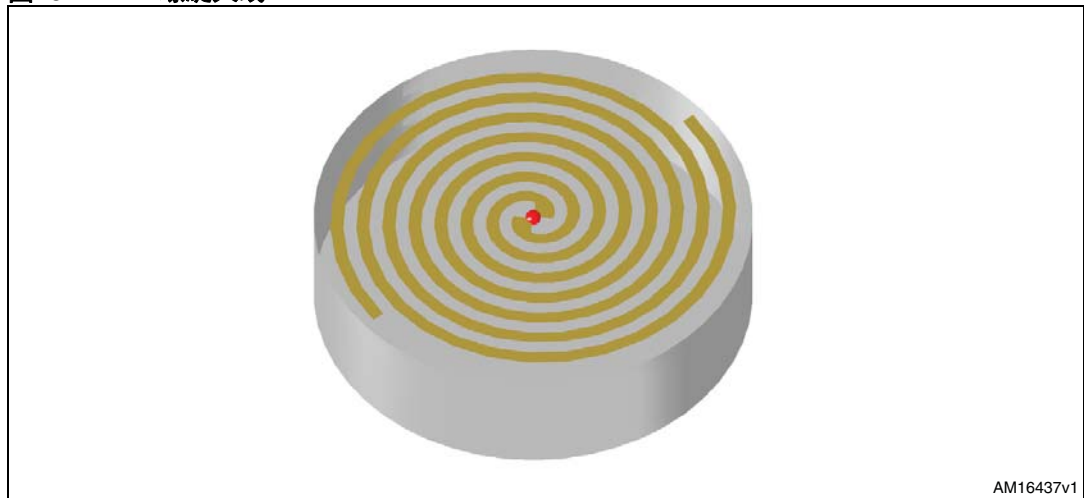
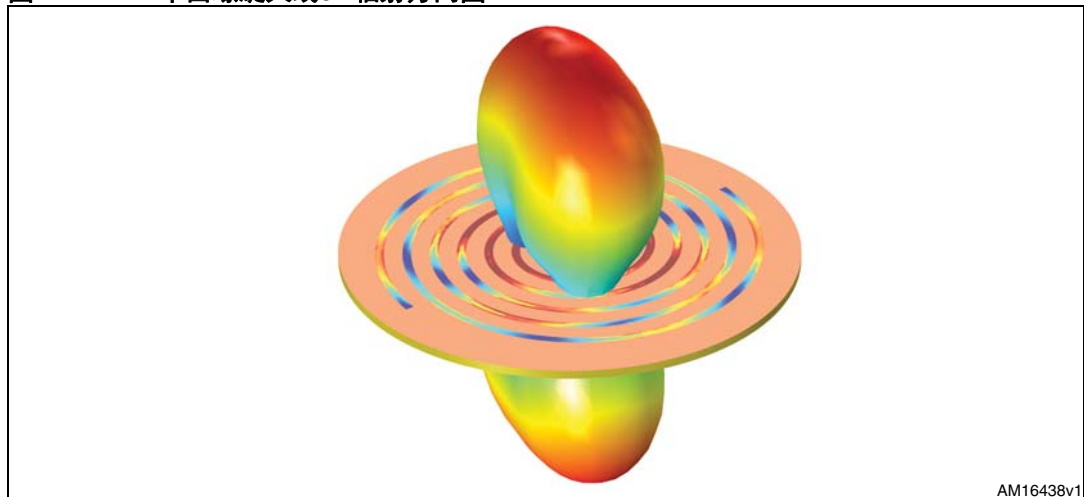


图14. 平面螺旋天线3D辐射方向图



平面螺旋天线的总长度（或外半径）决定了该螺旋天线的最低工作频率。通常在波长近似等于螺旋天线的周长时，平面螺旋天线的工作频率最低。

“a”参数，称为耀斑率，是平面螺旋天线随角度延长的速率。如果它太小，平面螺旋天线就会紧紧地缠绕在自身周围：在这种情况下，它的表现更像电容器，辐射很差。

馈电结构决定了工作频段的高频端。螺旋缠绕在自身上的紧密程度决定了适合平面螺旋天线的波长是多少，并且在此波长下仍能维持平面螺旋天线工作。当螺旋的最内半径等于 $\lambda/4$ 时，平面螺旋天线工作频带会出现最高频率。

平面螺旋天线的总长度（或外半径）决定了该螺旋天线的最低工作频率。通常在波长近似等于螺旋天线的周长时，平面螺旋天线的工作频率最低。

### 2.1.5 立体螺旋天线

电磁辐射器的基本、简单且实用的配置是以螺纹形式缠绕的导线形成螺旋线。在大多数情况下，螺旋线与地平面一起使用。

如 [图 15](#) 所示，螺旋线的几何结构通常由  $N$  圈、直径  $D$  和每圈之间的间距  $S$  组成。另一个重要参数是俯仰角  $\alpha$ ，它是由与螺旋线相切的线和垂直于螺旋轴的平面形成的角度。

立体螺旋天线可工作于两种主要模式：正常模式或轴向模式。

在正常工作模式中，由天线辐射的场在垂直于螺旋轴的平面中最大而沿其轴最小。要实现正常模式工作，螺旋的尺寸与波长相比通常是较小的。这些简单实用的天线主要是用来代替超大型天线。它们的尺寸减小了，因此非常适合用于移动和便携式通信系统。

很容易实现的一种更加实用的工作模式是轴向或端部点火模式。这种工作模式下，只有一个主瓣，其最大辐射强度沿着螺旋轴，如 [图 16](#) 中所示。小波瓣与螺旋轴存在斜角。为了激发这种模式，直径和间距必须是十分之几的波长。大多数情况下，天线与地平面结合使用，其直径至少为  $\lambda/2$ 。以轴向模式工作的立体螺旋天线会产生圆极化。无线电传输中，在发射天线和接收天线的相对取向不易控制的场合中经常使用圆极化，例如动物跟踪和航天器通信，或者在信号的极化可能改变的场合中使用圆极化。由于大型螺旋难以构建且难以操纵和瞄准，因此该设计通常仅在较高频率下使用。

图15. 立体螺旋天线实现

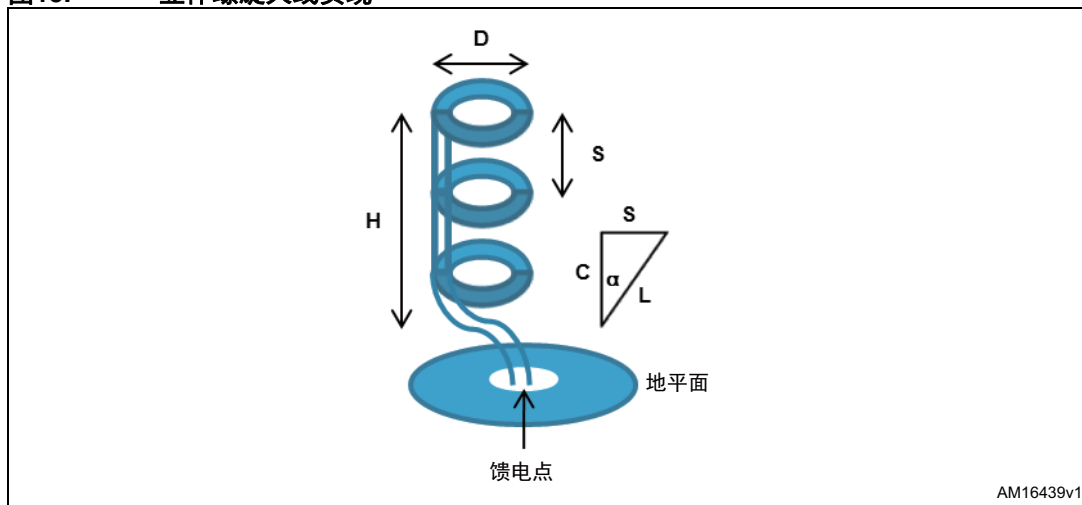
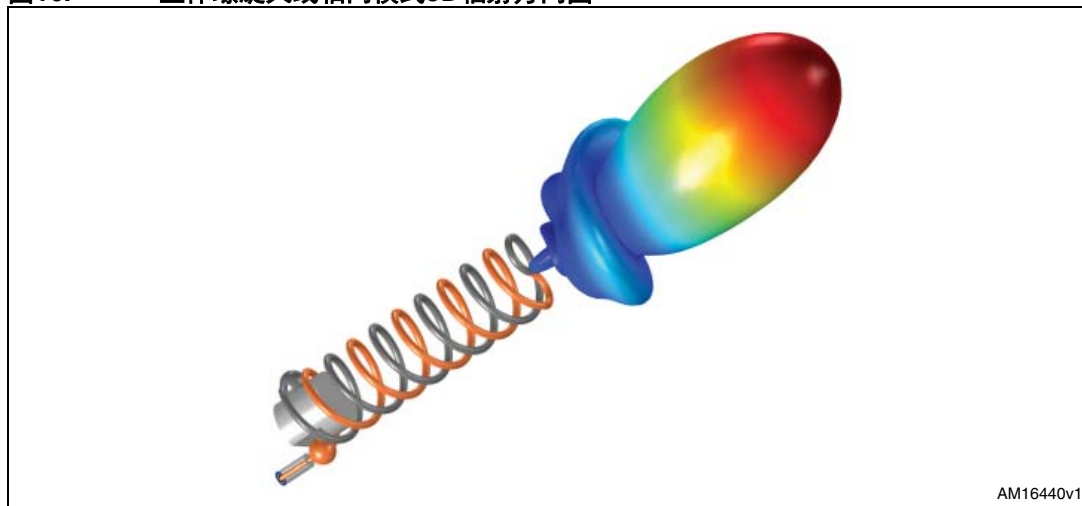


图16. 立体螺旋天线轴向模式3D辐射方向图



## 2.2 微带贴片天线

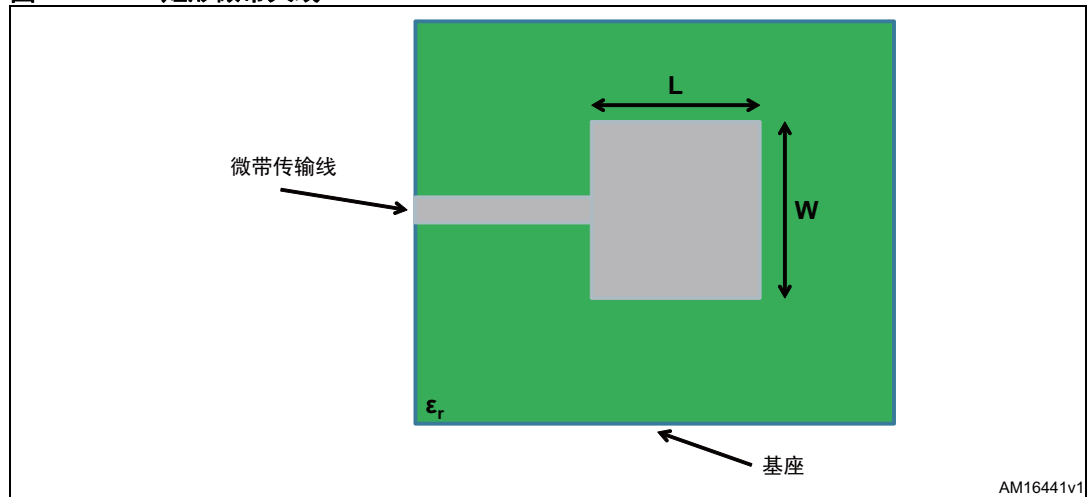
微带天线在20世纪70年代非常流行，主要用于空间应用。现在它们用于政府和商业应用。这些天线由接地基板上的金属贴片组成。金属贴片可以采用许多不同的配置；不过矩形和圆形贴片是最受欢迎的，因为它们易于分析和制造，并且具有良好的辐射特性。微带天线是小型天线，适合于平面和非平面表面，制造简单且便宜，安装在刚性表面时机械坚固。选择特定的贴片形状和模式时，它们在谐振频率、极化、方向图和阻抗方面是通用的。

微带天线的主要操作缺点是效率低、功率低、Q值高（有时超过100）、极化纯度差、扫描性能差、寄生辐射杂散、频率带宽非常窄，通常只有百分之一，至多有百分之几。

图 17 中是微带天线示例。贴片天线、微带传输线和接地平面由高导电金属构成。贴片的长度为 $L$ ，宽度为 $W$ ，并且位于厚度为 $h$ 、介电常数为 $\epsilon_r$ 的基板顶部。通常，厚度 $h$ 远小于工作波长，但不会比 $0.05$ 波长小太多。长度 $L$ 决定了工作频率；宽度 $W$ 控制输入阻抗。宽度越大，带宽越会增加。宽度还控制辐射方向图。贴片天线的方向性约为 $5 - 7$  dB。

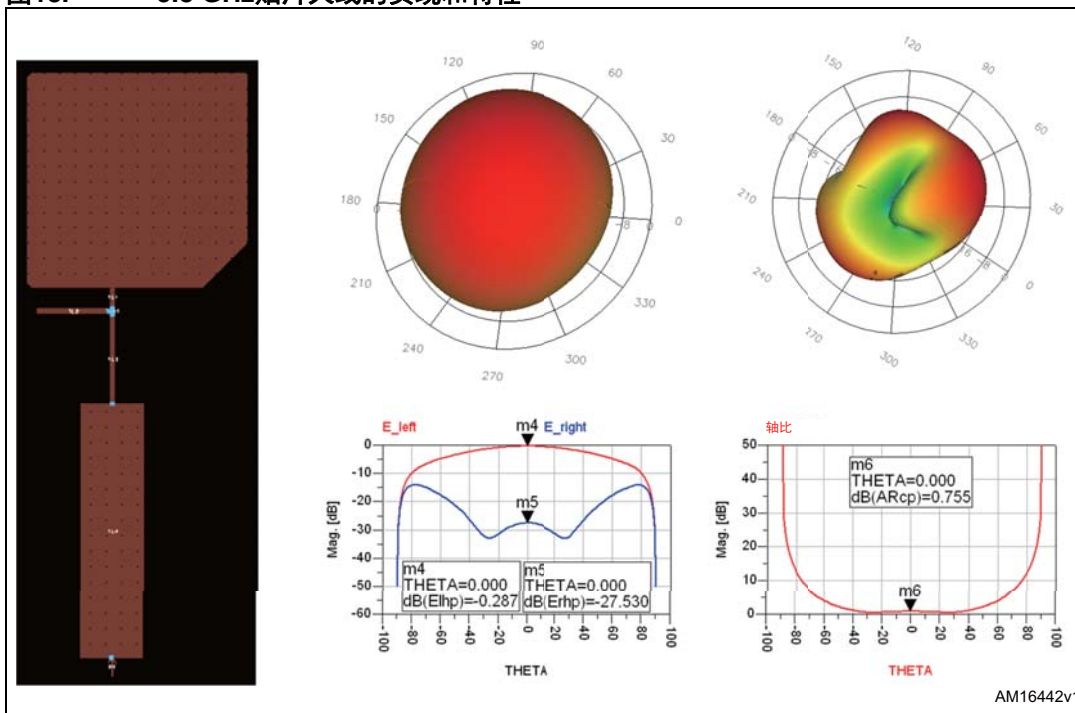
如果使用未修改的常规馈源，则贴片元件主要辐射线性极化波。不过，可以使用各种馈电布局或略微修改来获得圆形和椭圆形极化。图 18 中显示了一个 $5.8$  GHz左旋圆极化设计的贴片天线的示例，用于意大利和欧洲的收费系统。

图17. 矩形微带天线



AM16441v1

图18. 5.8 GHz贴片天线的实现和特性



## 2.3 陶瓷天线

最新进入天线领域的是陶瓷（芯片）天线。它们是由陶瓷材料制成的表面贴装器件。有几种类型的陶瓷天线，每种都有自己的特点。

陶瓷天线具有一些优势：它们是独立元件，尺寸小，可提供多种配置，靠近其他组件不会像跟踪天线那样造成严重失谐，与跟踪天线相比，它们受环境因素或人工操作员的影响较小，可以有灵活的调谐和测试选项，并且更容易引入设计更改。

也存在一些缺点：天线加物流的初始成本可能高于其他类型天线的成本，需要一定程度的射频专业知识才能实现最佳实施。

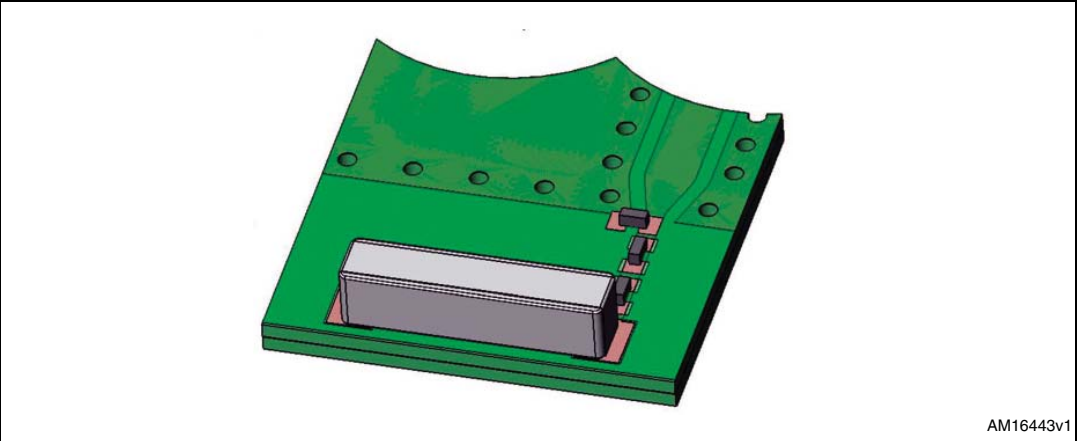
陶瓷天线可以设计为地面和离地两种类型，地面天线更高一些。用于天线的最佳陶瓷材料成分和所选择的电气规格通常取决于所需要的频率，这对尺寸会有所影响。陶瓷天线也可以根据应用使用匹配电路，可选的接地清除区域或粗调走线。

这种类型的天线可以适应小型电路板，并可以灵活地进行独特的设计布局。使用陶瓷天线可大大降低靠近其他元件或人而引起的可靠性和干扰问题。合并分立天线可以充分利用器件的全部可用高度，从而可以实现PCB面积较小的3D结构。

图 19 中是陶瓷天线示例。



图19. 陶瓷天线



2.4 缝隙天线

缝隙天线由金属表面组成，通常是一个平面，其中切入有孔或槽。用一个驱动频率将板子驱动为天线时，缝隙天线以类似于偶极天线的方式辐射电磁波。槽的形状和尺寸以及驱动频率决定了辐射分布方向图。

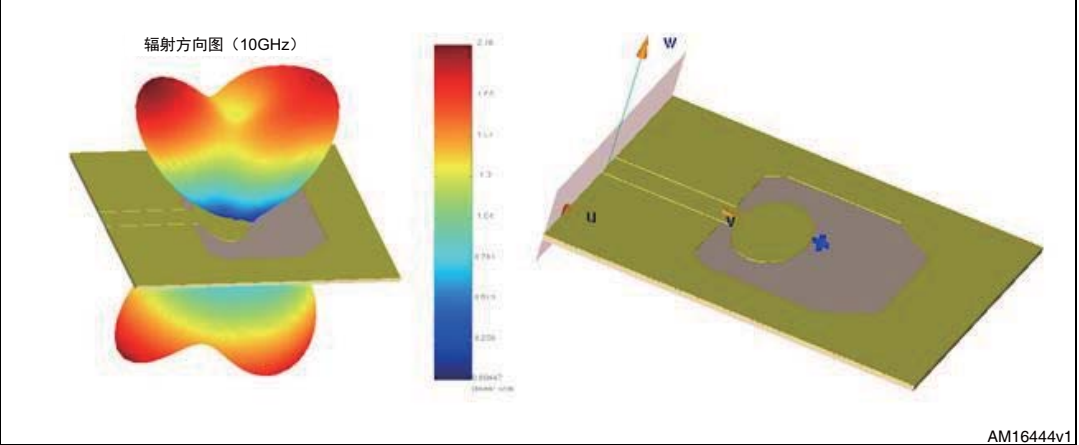
需要更好地控制辐射方向图时，缝隙天线通常用于UHF和微波频率段。缝隙天线很受欢迎，因为它可以从其要安装的任何表面切割出来，并且具有大致全向的辐射方向图（类似于线性天线）。缝隙天线的极化是线性的。插槽尺寸、形状以及切割天线腔的内容提供了多种设计变量，可用来调整性能的设计变量。

缝隙天线广泛用于雷达天线、扇形天线、手机基站，并且通常见于标准桌面微波源。

缝隙天线的主要优点是其尺寸小、设计简单、坚固，并且使用PC板技术可方便地适应大规模生产。

图 20中给出了缝隙天线的两个示例和相应3D辐射方向图。

图20. 缝隙天线实现和3D辐射方向图





### 3 天线优点和缺点

在天线理论之后，其中已经涵盖了天线最重要的参数，并且在描述了可以在sub-GHz带宽中使用的主要天线类型之后，这里给出了每种天线的主要优点和缺点描述。

- **偶极天线**：此天线是一个非常简单的芯片，具有良好的增益。主要缺点是低频时尺寸比较大。
- **鞭形天线**：此天线具有良好的性能，其尺寸低于偶极天线。良好的地平面是实现良好性能所必需的。
- **环形天线**：环形天线很便宜，并且不易受附近手部移动影响而失谐。它们的缺点是增益很差，带宽非常窄，很难调谐。
- **平面螺旋天线**：平面螺旋天线的尺寸低于鞭形天线，并且它是宽带的。反面来说，这些类型的天线难以馈电。
- **立体螺旋天线**：立体螺旋天线具有非常好的方向性，并且具有良好的增益。但是，它们的尺寸很庞大，并且容易受附近物体影响而失谐。
- **微带天线**：微带天线的优点是它非常便宜，并且结构简单、纤薄。其缺点是，它们在低频下尺寸非常大。
- **陶瓷天线**：陶瓷天线的优点是可作为独立元件，尺寸小并且受环境因素影响较小。主要缺点是成本高，性能一般，PCB尺寸和接地平面形状的匹配功能一般。
- **缝隙天线**：缝隙天线的优势是尺寸小、设计简单、稳健并且便于适应大规模生产。主要缺点是低频时的尺寸大，这使缝隙天线难以处理低于433MHz的频率。

表 2中总结了天线的优缺点。

表2. 天线类型的优缺点

天线类型	优点	缺点
偶极子天线	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 很便宜</li> <li>– 增益良好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 频率低于433 MHz时难以设计</li> <li>– 低频时尺寸较大</li> </ul>
鞭形天线	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 良好性能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 成本高</li> </ul>
环形天线	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 便宜</li> <li>– 不易受手部动作影响而失谐</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 增益较差</li> <li>– 带宽很窄</li> <li>– 难以调谐</li> </ul>
螺旋天线	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 尺寸比鞭形天线小</li> <li>– 宽带</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 难以馈电</li> </ul>
立体螺旋天线	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 方向性很好</li> <li>– 增益良好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 机械结构</li> <li>– 尺寸庞大</li> <li>– 易受附近物体影响而失谐</li> </ul>
微带天线	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 制造成本低</li> <li>– 结构简单、纤薄</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 频率低于433 MHz时难以设计</li> <li>– 低频时尺寸较大</li> <li>– 天线性能和调谐受PCB设计影响</li> </ul>

表2. 天线类型的优缺点（续）

天线类型	优点	缺点
陶瓷天线	<ul style="list-style-type: none"><li>- 分立元件</li><li>- 小尺寸</li><li>- 受环境因素影响较小</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- 成本高</li><li>- 中等性能</li><li>- PCB尺寸与地平面形状的匹配功能</li><li>- 频率低于433 MHz时难以设计</li></ul>
缝隙天线	<ul style="list-style-type: none"><li>- 大小</li><li>- 设计简洁</li><li>- 稳健性</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- 频率低于433 MHz时难以设计</li><li>- 低频时尺寸较大</li></ul>



## 4 参考

1. C. A. Balanis, 天线理论：分析和设计，第二版，John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997。

5 版本历史

表3. 文档版本历史

日期	版本	变更
2012年11月 23日	1	初始版本。

表4. 中文文档版本历史

日期	版本	变更
2018年10月 17日	1	中文初始版本。



**重要通知 - 请仔细阅读**

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对 ST 产品和 / 或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用，ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 徽标是 ST 的商标。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。本文档的中文版本为英文版本的翻译件，仅供参考之用；若中文版本与英文版本有任何冲突或不一致，则以英文版本为准。

© 2018 STMicroelectronics - 保留所有权利