# 学校里学不到的射频波导窍门和知识

## RF Waveguide Tips and Facts You Can't Learn in School

Pasternack，美国加州Irvine市

对于许多微波和毫米波应用而言，射频波导是导向传输技术的首选。与同轴或微带传输线相比，波导互连和波导器件可提供更低的插入损耗及更佳的电压驻波比（VSWR）。此外，由于波导器件功率处理和热处理能力高、结构坚固，因此其还是航空航天、军事以及科技等需要高功率及高性能的应用领域的极为理想的器件。然而，要想保证波导系统和波导互连能以最佳性能运行，有许多细微之处和易于遗忘的因素不能忽视。因此，要想在波导领域里纵横捭阖，必须掌握大量的专业知识。而且，由于很多技术依赖波导器件，尤其毫米波波导器件，因此高深的专业知识可以节省大量的时间和金钱。

### 类型、导模和频率特性

圆形、椭圆或矩形封闭波导的导电壁可促进导模电磁波的传播。每种波导器件均具有数种不同的导模（图1），而且每种波导器件的导模频率特性方程式均不同。对于矩形波导而言，TE10导模因衰减程度最低，因此最为常用。此外，矩形波导也往往是波导部件和组件中最常使用的类型。然而，当布线距离较长时，常使用圆形或椭圆波导连接。虽然波导器件能以多模方式运行，但由于各种导模之间的相互作用，将使得信号完整性劣于每种单模下的信号完整性（例如，当高次模之间发生倏逝波耦合时），因此这种方式并不理想。

波导频率下限为一个急性截止点，在该点上衰减程度随频率的下降指数级增大，从而使传输过程中断（表1）。大多数矩形波导的设计宽高比为2:1，从而可实现2:1的最大带宽比，即最高频率与最低截止频率的比为2:1。如此，波导器件即可承载微波击穿、介质击穿或次级电子倍增击穿发生前的最大功率。与此不同，圆形波导可传播的最大带宽比为1.3601:1，即最高单模频率与最低截止频率的比为1.3601:1。矩形波导的推荐工作频率为比截止频率高30%的频率以及比第二高次模截止频率低5%的频率。这些推荐值防止了在较低频率下发生频率分散，以及在较高频率下发生多模运行的情形。

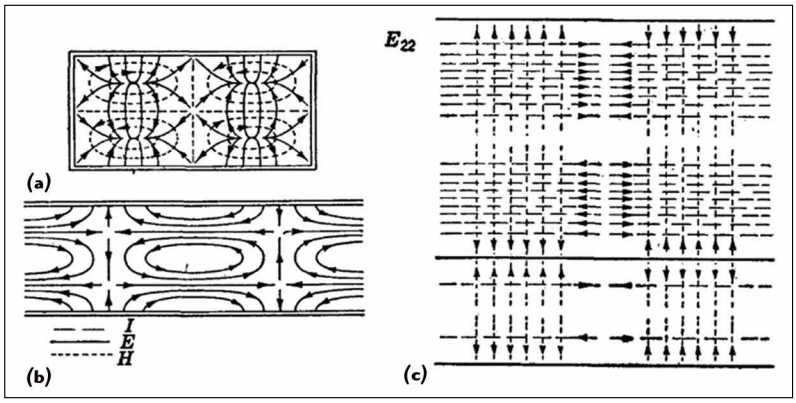


图1：矩形波导器件E22模式的场分布视图：横截（a），纵切（b）；表面（c）[1]。

即使当波导器件工作于上述推荐频率范围内，其整个带宽上的波群延迟和相位延迟也将占到光速的一个较大百分比（图2）。这与同轴传输线等TEM模传输线在工作频率下具有较为平坦的波群延迟不同。波群延迟内的非线性相位或大幅度变化可导致宽带宽雷达系统发生保真度误差，甚至导致宽带宽数字通信系统发生码间干扰。移相器等器件可用于对波导响应中的延迟、分量延迟和不等长布线进行校正。

当波导互连的长度较短时，插入损耗、相位延迟或VSWR将难以测量。短距离上的插入损耗和其他性能参数的值非常低，因此除了最高性能的矢量网络分析仪（VNA）之外，其他均将因超出测量能力而无法测量。这是因为上述插入损耗可仅为1dB的极小一部分，而其他VNA的动态范围可能不足以将其与噪声区分开来。

虽然波导器件一般都性能极高，但是有时同轴电缆布线反而更受青睐。例如，当需要发生多次插拔，或者布线较为紧密或复杂，或希望削减成本时，同轴电缆更为合适。在采用低噪声放大器（LNA）的系统中，可使用一段波导将射频能量从天线引入所述LNA的输入端，与此同时该LNA的输出端可与同轴端连接。这是因为LNA输入端上游发生的损耗对信噪比（SNR）和动态范围（DNR）影响最大。此外，高功率系统也可使用波导器件在输入和输出端传输高功率信号。总之，当对插入损耗和VSWR性能要求不高时，系统可同轴器件代替波导器件，以实现更低的成本。

### 电磁现象、趋肤效应和微波击穿

在某些频率和功率水平下，导体和电介质的电气和材料特性可发生改变并产生意想不到的效果。当微波频率较高时，将发生导体内电子朝表面迁移的现象，即所谓的趋肤效应（图3）。此外，如果功率水平太高，两导体之间的介质材料将离子化为导电材料，从而导致微波介质击穿。当产生趋肤效应时，随着波导器件内电磁波频率的增大，越来越多的电子朝波

表1
矩形波导X波段截止频率(22.86 × 10.16 mm)

| TEmn模截止频率 | | |
|---|---|---|
| m | n | F (GHz) |
| 1 | 0 | 6.562 |
| 2 | 0 | 13.123 |
| 0 | 1 | 14.764 |
| 1 | 1 | 16.156 |
| **TMmn模截止频率** | | |
| m | n | F (GHz) |
| 1 | 1 | 16.156 |
| 1 | 2 | 30.248 |
| 2 | 1 | 19.753 |

导器件内壁的表面迁移。由于导体内部的高频导电性比表面附近的高频导电性低，因此波导器件内壁对于波的传导比波导器件外壁更为重要。因此，趋肤效应是导体在高频下的损耗远大于其在低频下的损耗的重要原因。

对于非铁磁导体而言，其直流电阻比射频及微波频率下的电阻高出多倍。此外，对于镍、铁、钢等铁磁导体而言，磁导率越高，其交流电阻增幅越大。由于这些原因，常使用银和金等高导电性金属对波导器件内壁进行电镀——高频微波、高频毫米波以及高功

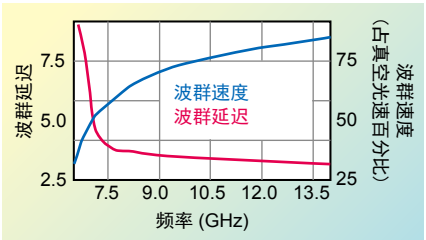


图2：WR90波群延迟和波群速度与频率关系图。

率应用中尤其如此。仅在1GHz的频率下，铜片内98%的电子就会迁入其表面附近数微米的区域内。在高频率的微波和毫米波下，大部分电子将迁入更小的区域，从而使得导体的表面条件极为重要。这表示，在一般情况下，最终形成于内壁上的镀层材料才是波导器件内对电磁传播有影响的唯一导电材料。因此，表面一致性和平滑度对于降低波导器件的总体射频损耗至关重要。

影响高频高功率系统的另一现象为电磁能诱发的波导器件导电壁之间的介质击穿，此现象可导致高能电弧。波导器件内产生的高能电弧又将导致极高功率的驻波，并产生有可能造成破坏的热量，或甚至剥去波导器件材料表面的金属镀层。导

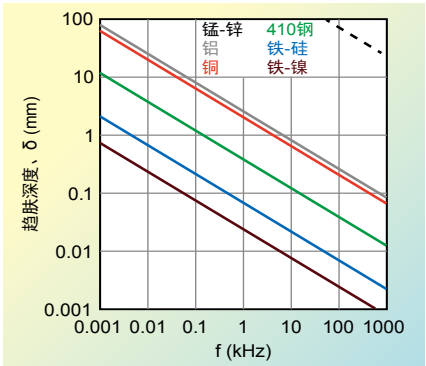


图3：趋肤深度越大的材料高频损耗越小。[2]

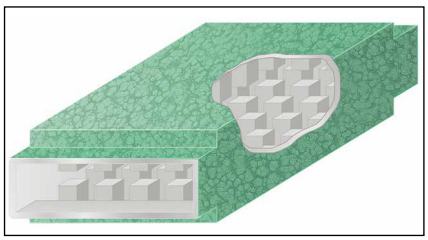

图4：在复杂的波导器件中，为了计算不同功率水平之间的差值，需要对材料特性进行预测。[4]

致微波击穿发生的功率阈值取决于介质特性、温度、导体间距离、频率以及波导器

件内气体介质的压力。对于高功率波导滤波器而言，带包覆金属的滤波腔间距对于次级电子倍增击穿的防止也非常重要[3]（图4）。波导系统内可注入具有更高击穿特性的气体，以提高导致微波击穿发生的功率阈值。此外，波导系统组装后，有时还使用干燥气体去除湿气，以防止发生可降低微波击穿阈值的结露及高湿度。为实现此目的，可使用带入气阀和出气阀的特制法兰。

表2　射频法兰扭矩/张力推荐值

| 螺钉尺寸 | 每英寸螺数 | 扭矩(英寸-磅) | 张力(磅) |
|---|---|---|---|
| 4 | 40/80 | 4.5/ 5.5 | 235/280 |
| 6 | 32/40 | 8.5/10 | 360/410 |
| 8 | 32/36 | 18/20 | 625/685 |
| 10 | 24/32 | 23/32 | 705/940 |
| 1/4" | 20/28 | 80/100 | 1800/2200 |
| 5/16" | 18/24 | 140/150 | 2540/2620 |
| 3/8" | 16/24 | 250/275 | 3740/3950 |
| 7/16" | 14/20 | 400/425 | 4675/4700 |
| 1/2" | 13/20 | 550/575 | 6110/6140 |

## 质量因素

结构和材料的质量对于波导系统性能，尤其微波频率波导系统和高功率波导系统的性能具有重大影响。由于微波和毫米波频率下容许的公差极小，此类波导器件的制造和评估可能会非常困难。为使毫米波器件和互连件实现所需的质量，必须对焊点实施仔细的目视检查，以保证其中不存在坑洞。在航天应用中，即使极其微小的坑洞也将导致射频能量自材料中泄露，从而导致损耗增大以及性能下降（图5）。波导器件对机加工公差的要求之所以极其高的原因不仅在于为了保证机械稳定性和强度，另一方面的原因在于射频性能取决于几何形状之间的精确关系以及波导器件内壁和法兰的镀层及平滑度。材料中的任何模痕或瑕疵都将导致损耗，VSWR下降，以及与其他波导器件的连接错位。

虽然有许多值得信赖的波导器件供应商提供高质量的器件，但是仍有一些商家，尤其是一些海外商家，为了缩减制造时间和减少成本而降低对加工技术的要求。这种寻求捷径的做法势必大大降低波导器件的质量和系统性能。任何错位，或者几何加工结构与设计参数不符之处，均可增加VSWR并导致法兰间发生射频泄露，从而增加维修和服务成本。以在波导法兰中钻制紧固孔为例，为了实现高精密对准，需在钻制之前将波导法兰附接至波导器件之上。然而，一些加工商的做法反而是在附接之前就对波导法兰钻孔。这将致使波导法兰孔与针对该波导尺寸和法兰类型设计的位置之间发生X-Y向移位及旋转移位。虽然这些误差可能小到无法通过目视辨别或无法经双卡尺测出，但仍可使用高精密X-Y测绘仪对孔的尺寸进行测量，并对部件进行评价。此外，还有一些高频微波和毫米波波导器件采用详细规范如MIL-DTL-3922标准所述的定位销（图6）。上述标准规定，较高频率下需使用0615号销，然而某些公司却仍旧使用标准库存的0612号销。虽然人眼无法辨别这些定位销之间的大小差异，但是这种错误使用定位销的做法终将导致错位的发生。

## 机械加工方面的考虑因素

除了压力窗以及一些垫片和护套材料之外，波导器件的剩余主体部分完全由导电金属制成。一般情况下，这意味着波导器件是由具备波导结构知识的技术人员利用加工设备制成的。在这些知识当中，一部分为物理学知识，例如，如何确定正确的弯曲半径和弯曲长度等；还有一部分是从试验、错误和故障排除等活动中获取的经验，例如，虽然普通的软波导可解决布线、错位及振动方面的难题，但是其射频性能，即插入损耗和VSWR一般欠佳。即使如此，当软波导某些部分的尺寸针对特定频率制造正确时，在极窄的带宽上其插入损耗和VSWR性能

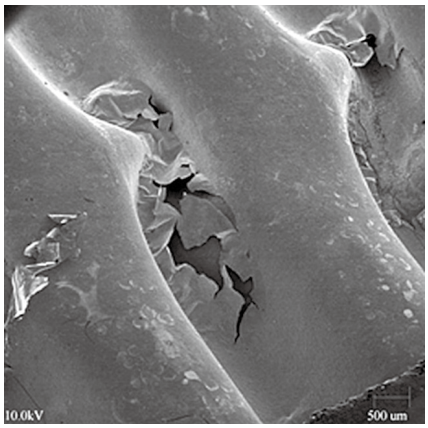


图5：镀层上的微小污染可导致失效。在NASA的火星勘测轨道飞行器（MRO）中，电镀效果欠佳的银层导致波导切换开关阵列失效。[5]

几乎可与硬波导相匹敌。此外，波导段上的机械应力常使得不同波导段之间相互脱节。因此，为了减少软波导段上机械应力的发生率，某些供应商还提供无需组装型的软波导。

对于扭波导和弯波导，可遵循一些极为简单的物理学规律，以使射频性能得到优化（图7）。在矩形弯波导当中，宽度方向上弯曲的波导可使电场发生变形，称为E平面弯波导，而高度方向上弯曲的波导可使磁场发生变形，称为H平面弯波导。为了实现最佳性能，弯波导所需的弯曲半径需大于最低目标频率所对应波长的两倍。此外，45度扭波导或锐角波导应遵循的简单规律在于，其外壁长度应为目标波长的1/4。当使用锐角波导时，输入输出信号将发生相位反转，而且其带宽比其他布线方案所受限制更多。在扭波导当中，为了实现完全反转，90度扭转的波导至少需要两个波长，而180度扭转的波导需要四个波长。在扭波导中，射频能量的偏振方向发生变化，而且根据系统要求，有时需要对此进行校正。

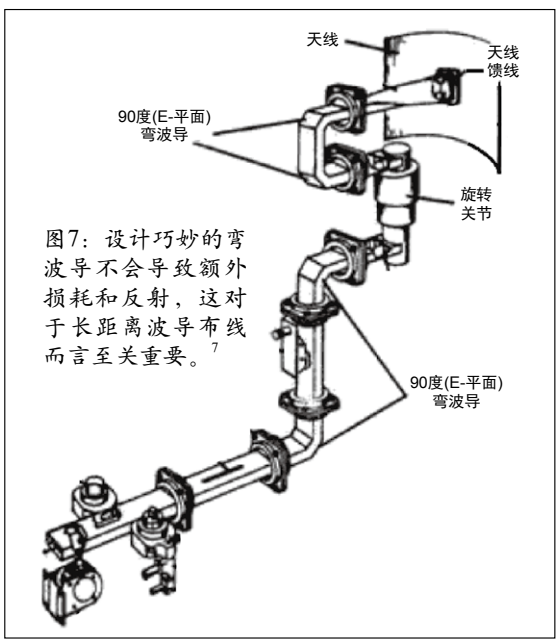


图7：设计巧妙的弯波导不会导致额外损耗和反射，这对于长距离波导布线而言至关重要。[7]

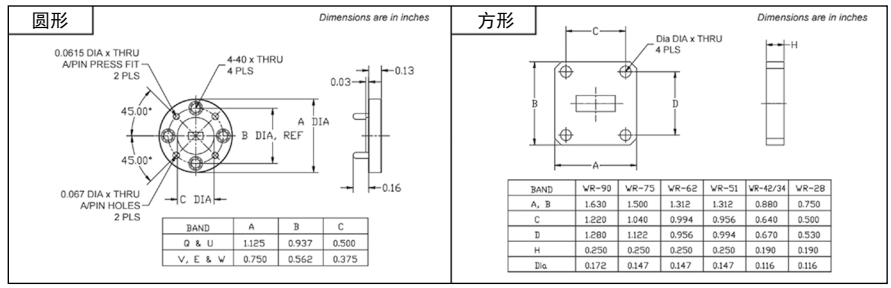


图6：MIL-DTL-3922标准对波导法兰尺寸的规定。[6]

由于多种波导产品上镀有一定量的黄金，因此成本是许多波导器件买家另一关注的因素。在高频微波和毫米波应用中，需要贵金属镀层来降低波导器件的损耗，然而需镀金的部位仅为波导器件内表面和法兰。波导器件外表面或低频波导器件上的镀金层纯粹是为了美观或防腐。此种情况下，使用成本低得多的钝化层便足以满足上述目的。

## 组装： 故障排除和处理

虽然波导器件和互连件多由较为硬质的金属制成，但是高频及航空应用中也使用一些易于刻痕的铝制和铜制波导器件。虽然在某些情况下刻痕可实现有用微调，但是其将显著改变波导性能或波导器件性能。此外，由于运输过程中发生的冲击和振动可使连接处发生错位，因此需使用正确的包装和运输方法防止发生此类不测事端。为了缓解运输和存储过程中发生的问题，有些供应商在运输时将组装好的波导器件固定于固定板上。

收货后对波导器件和连接件的进一步组装的精心程度也可影响其性能。常见的一个问题为波导法兰的安装。如果不使用垫圈，则每个法兰的表面都应保持清洁和平坦。任何擦伤，落灰或剥层都将导致因错位而发生射频泄露或性能受损。弯波导和扭波导存在的另一个问题，其可因冷热交变和机械应力而产生应力裂纹。波导器件的工作频率越高，系统性能对组装质量和操作精心程度越敏感。在法兰安装过程中，应该对其每个拐角处施加一致的给定扭矩（表2）。当波导器件的一个拐角处的扭矩比其他拐角处的扭矩高或低时，将导致小的缝隙，并进而损害VSWR和插入损耗性能，以及引起射频泄露。此外，当垫圈因老化或冷热交变而质量下降时，也将发生上述问题。在振动及高负载环境中，可使用螺钉。此外，只要不影响射频性能，可使用任何能保证稳定安装的方法，甚至包括用夹具将法兰夹紧。

当损耗或VSWR水平超出预定值时，最先采取的措施应该是追溯泄漏部位。实际操作时，无需将系统拆卸并检测每一连接处，而是使用检测探针在运行状态下对系统泄漏点进行扫描排查。由于射频泄露可产生高压，因此在此过程中，推荐的做法是，在使用探针检测的同时，检测人员应与波导系统保持合理距离，以防止直接接触时引发电弧。

## 结论

要实现波导器件低的插入损耗、优异的VSWR性能以及高的频率和功率处理能力需要更长的学习过程，以及精心的设计和组装。虽然波导器件所需的某些物理学知识可从好的书本中得到，但是其中所牵涉到的大量有关结构及系统设计方面的实用知识，除了经验丰富的波导制造商和系统设计团队之外，外界难以触及。■

参考文献
1. N. Marcovitz, “The Waveguide Handbook,” Isha Books, 2013.
2. Zureks, “Skin Depth by Zureks,” Wikimedia Commons, 2011, Retrieved from commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=13826795.
3. H. M. Wachowski, “Breakdown in Waveguides Due to the Multipactor Effect,” Aerospace Corp., 1964, Retrieved from www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/601069.pdf.
4. Spinningspark, “Waffle-iron filter,” Wikipedia, 2011, Retrieved from en.wikipedia. org/w/index.php?curid=33584290.
5. Jet Propulson Laboratory, “Contamination from Flaked Silver Plating Off Waveguides and Microwave Components,” 2008, Retrieved from llis.nasa.gov/lesson/1878.
6. Ducommun Technologies, 9. Technical Reference, Undated, Retrieved from www.ducommun.com/pdf/technicalReference.pdf.
7. Author unknown, “Radar Antenna Feed Waveguide,” NEETS Navy Electricity and Electronics Training Series, 1984, Wikimedia Commons, Retrieved from commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=37229829.
8. Cobham Defense Electronic Systems, Waveguide Component Specifications and Design Handbook, Edition #7. Retrieved from www.cobham.com/media/102942/cmt-waveguide-handbook-part-2.pdf