

圆柱形微带天线的复合材料设计

欧阳国恩 王有信

(材料科学和应用化学系)

摘要 本文介绍了满足微带天线使用温度要求的聚合物基复合材料设计的方法与过程。按照这种方法,设计并制造了一批微带天线产品,经高低温测试,证明都符合设计要求。

关键词 微带天线, 复合材料

1. 引言

微带天线是近十多年来发展并推广应用于高速飞行器的一种新型制导天线。它的显著特点是: 1. 外形轮廓与飞行器共形, 不影响空气动力性能; 2. 结构紧凑, 甚至能与弹体一道承受机械振动与冲击载荷; 3. 重量轻, 安装简便, 成本低廉; 4. 工作频带较窄, 发射效率较低。因此, 它在导弹遥测、武器引信、再入探测器等方面获得了实际应用。这是一类很有发展前途的天线。

在设计这类天线时, 需要对不同的介质材料进行研究。介质材料的介电常数和损耗角直接影响着天线的谐振频率和输入阻抗, 如果它能在给定工作频率范围内使天线总处在完善匹配状态, 则被认为是最理想的。但是介质材料的电性能同时受温度与频率的影响, 在绝对温差 200 度的航天飞行器的工作环境下, 难免偏离设计的天线频率并使匹配失调。因而有必要对天线介质材料的温度特性进行设计。

2. 微带天线材料要求

1973年 H·D·文歇尔^[1]提出微带天线的设想以来, 很多学者^[2-5]论述并发展了多种微带天线的设计方法与理论。其中对微带天线材料提到应注意如下几点: 1. 微带天线受尺寸的限制, 频带较窄, 其几何形状的所有谐振波数都与基板材料的介电常数有关; 2. 天线的工作频率随介质的介电常数变化而变化。对于给定介电常数的基材, 存在一个最佳的基片厚度。反之, 对于已定形状和基片厚度的天线则存在最佳的基材介电性能; 3. 有些因素如工作环境温度变化, 成型工艺不稳定等都将使介质的介电常数产

生微弱变动。它却使天线谐振频率产生移动。

表1介绍了常用基材的概况。它们不仅成型工艺复杂,而且不利于 -27°C 以下工作。

微带天线工作频率的移动与基材介电性能有如下关系式:

$$\frac{dF}{F_0} = -\frac{1}{2} \frac{d\epsilon_r}{\epsilon_r} \quad (1)$$

式中 F_0 为微带天线的理想谐振频率; dF 为谐振频率的移动量; ϵ_r 为基材的相对介电常数; $d\epsilon_r$ 为介电常数变化量;负号表示 dF 和 $d\epsilon_r$ 变化方向相反。当天线工作频率变动被预定为不大于2.5%时,若 $\epsilon_r=2.55$,则限定了 $d\epsilon_r$ 必须小于 ± 0.128 。

另一方面,微带天线的尺寸变化也将引起它谐振频率的移动。 L_0 表示它的特征尺寸,则

$$\frac{dF}{F_0} = -\frac{dL}{L_0} \quad (2)$$

表1 常用微带天线基底材料概况[1]

材 料	ϵ_r X-波段	$\text{tg}\delta$ X-波段	尺 寸 稳 定 性	适用温度范围 $^{\circ}\text{C}$
聚四氟乙烯(PTFE)	2.10	0.0004	可	$-27\sim 260$
玻璃布增强 PTFE	2.33	0.0015	良	$-27\sim 260$
短切玻纤增强 PTFE	2.17	0.0009	良	$-27\sim 260$
石英粉增强 PTFE	2.47	0.0006	优	$-27\sim 260$
高硅氧布增强聚苯乙烯	2.65	0.0005	优	$-27\sim 110$
瓷粉填充聚苯乙烯	3~15	0.0015	可	$-27\sim 110$
瓷粉填充硅树脂	3~25	0.0005	可	$-27\sim 268$
蓝宝石	9.0	0.0001	优	$-24\sim 371$
氧化铝陶瓷	9.7~12.5	0.0004	优	室温~1000
云母玻璃	7.5	0.002	优	$-27\sim 590$
聚烯烃	2.32	0.0005	差	$-27\sim 100$
蜂窝夹层结构	1.2~1.4	~	良	$-27\sim 160$
玻璃纤维增强 聚烯烃	2.45	0.001	可	$-27\sim 100$
聚苯醚	2.55	0.0004	差	$-27\sim 190$

如果该尺寸变化是由温度变化产生的,则

$$\frac{dL}{L_0} = \alpha_T dT \quad (3)$$

α_T 是基材的热膨胀系数; dT 是温度变化量。

仅考虑温度变化,引入 α_ϵ 为 ϵ_r 的温度系数。

$$\frac{d\epsilon_r}{\epsilon_r} = \alpha_\epsilon dT \quad (4)$$

温度变化将同时引起尺寸和介电常数变化, 由(1)~(4)综合效应可以表示为

$$\frac{dF}{F_0} = -\left(\alpha_T + \frac{1}{2}\alpha_\epsilon\right)dT \quad (5)$$

对于选定的材料, α_T 可通过实验测定; α_ϵ 可按公式

$$\epsilon_r = (C/2aF_0)^2$$

测定不同温度下的 ϵ_r 值, 然后按

$$\alpha_\epsilon = \Delta\epsilon_r/\Delta T$$

计算而得到[6]。少量原材料的 α_ϵ 可以

从文献查到。测量 α_ϵ 的试样可参照图1制作, 其中 a 为长度。

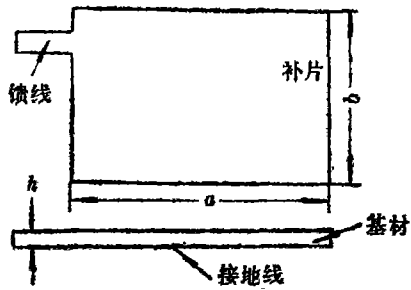


图1 测试 α_ϵ 的试样形状 (参考尺寸为: [6] $a=180\text{mm}$, $b=120\text{mm}$, $h=2\text{mm}$)

3. 微带天线的材料设计

方程(5)为微带天线材料设计提供了方向。选择材料的途径有两条: 一是热膨胀系数很小的材料; 二是 α_T 和 α_ϵ 符号相反的材料。当温度升高, 尺寸变大, 谐振频率向减少方向移动; 此时如果材料的 α_ϵ 为负值, 则产生的综合效应可以互相抵消一部分, 可限定 dF/F_0 的范围。

应该注意到, 每种材料的介电常数随温度变化均存在突变区, 突变区的突变量因材料而异。图2[1]和图3[7]可以看到, 聚四氟乙烯在 0°C 附近有一个突变区, 突变量达到 0.011; 某些介电常数大的铁电陶瓷, 虽然在某些温度区间 α_ϵ 比较小, 但在 $-20\sim 35^\circ\text{C}$ 之间突变, 绝对突变量约二万左右。选材要关心被选材料的介电性能的突变温度区, 尽量做到在使用温度范围内不发生突变[8、9]。否则在该处天线可能失效。

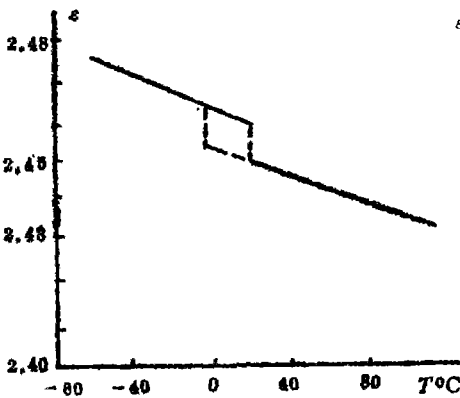


图2 聚四氟乙烯的 ϵ_r 随温度的变化[1]

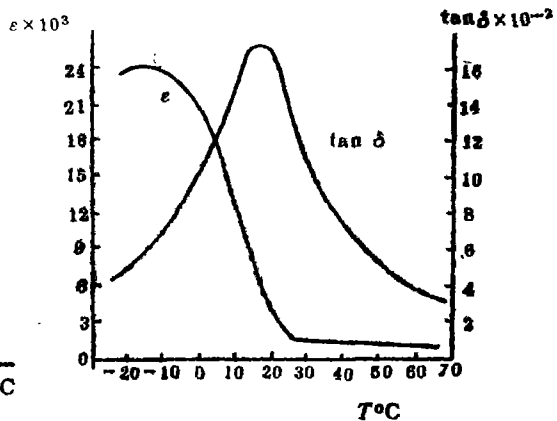


图3 [7]陶瓷配方的 ϵ 和 $\text{tg}\delta$ 随温度的变化

对于由几种成份组成的复合材料, 可以采用体积混合律计算其介电常数 ϵ_c [10]:

$$\epsilon_c^k = V_1 \epsilon_1^k + V_2 \epsilon_2^k + V_3 \epsilon_3^k + \dots + V_n \epsilon_n^k \quad (6)$$

其中 V 代表体积分数, 下标代表组份号; k 是一个由各成份分布形式决定的参数。当各成份排列成垂直于电场的迭层形式(串联)时, $k = -1$, 则(6)式为 $1/\epsilon_c = V_1/\epsilon_1 + V_2/\epsilon_2 + \dots + V_n/\epsilon_n$; 当各层并列时, 层的平面与电场方向一致, 则 $k = 1$, (6)式成为 $\epsilon_c = V_1\epsilon_1 + V_2\epsilon_2 + \dots + V_n\epsilon_n$; 当各成份完全均匀分布时, k 趋近于 0, 此时复合体的 ϵ_c 按下式:

$$\frac{d\epsilon_c}{\epsilon_c} \approx V_1 \frac{d\epsilon_1}{\epsilon_1} + V_2 \frac{d\epsilon_2}{\epsilon_2} + \dots + V_n \frac{d\epsilon_n}{\epsilon_n} \quad (7)$$

各层成份并列时, ϵ_c 的变化量按下式确定:

$$d\epsilon_c = V_1 d\epsilon_1 + V_2 d\epsilon_2 + \dots + V_n d\epsilon_n \quad (8)$$

显然, 复合材料的介电常数的变化既与各组份介电常数变化相关, 又决定于各组份的含量 V_i 。各组份材料的 α_T 、 α_s 和 ϵ_r 的数值可以通过实测或查阅资料获得, 只要已知微带天线的几何尺寸 L_0 和使用温度区间的跨度 ΔT , 就可以通过改变 V_i 的数值来设计天线所需的介电常数值, 又能保证天线的工作频率在温度变化时不致产生过大的偏移。这正是复合材料独具的一个优点^[11], 单相材料是不存在这一设计自由度的。

4. 微带天线材料设计实例

公式(5)可以表达成如下等效形式:

$$\frac{\Delta F}{F} = - \left(\alpha_T + \frac{1}{2} \alpha_s \right) \Delta T \quad (9)$$

其中复合材料的热膨胀系数可以近似表示为

$$(\alpha_T)_c = \frac{V_1 E_1 \alpha_1 + V_2 E_2 \alpha_2 + \dots + V_n E_n \alpha_n}{V_1 E_1 + V_2 E_2 + \dots + V_n E_n} \quad (10)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 分别为 1, 2, n 组份的热膨胀系数; E_1, E_2, \dots, E_n 分别为各组份的杨氏模量。

通过对若干种材料基本性能的测定, 从中选择三种编号为 1[#], 2[#], 3[#] 的单相材料做为复合材料的组份。它们在 n MHz 的室温性能如表 2。由公式(8)、(9)、(10)和表 3 的数据, 再考虑到归一化条件 $V_1 + V_2 + V_3 = 1$, 可以解出满足设计要求的各组份含量。现在有五个未知数: $(\alpha_T)_c, (\alpha_s)_c, V_1, V_2, V_3$, 只有四个方程。因此可以通过选定 V_1 (例如 $V_1 = 0.50$) 然后解出其它未知数。或者可以按照工艺上的方便, 先定出 V_i 的数值, 然后验算是否满足频率变化范围的要求, 如表 4 所示方法。

可以根据微带天线的形状选用成熟的复合材料成型工艺。如平板和复杂形状的天线用模压法, 圆柱形或锥形的天线采用缠绕法; 如下图所示方法, 将组份 2[#] 和 3[#] 预先制成为一定厚度的膜, 再按要求尺寸剪裁; 组份 1[#] 预先排成一定宽度的带或直接缠绕带状。在缠绕的同时用热风吹, 使 2[#] 和 3[#] 软化与 1[#] 粘结成一体。组份比例 V_1, V_2, V_3 靠膜厚和带厚控制。

图 5 是按照材料设计后制作成功的微带天线的实物照片。它是飞行器结构的一部份, 其发射极是用胶粘接的一整片铜箔。

表 2 π MHz 下三种入选材料的室温性能

组份材料	$\alpha_T (1/^\circ\text{C})$	$E(\text{GPa})$	ϵ_r	$\alpha_p (1/^\circ\text{C})$
1#	1×10^{-6}	22.6	4.7	7.2×10^{-5}
2#	4.0×10^{-5}	2.94	4.0	4.0×10^{-3}
3#	1.0×10^{-4}	0.29	2.5	-4.0×10^{-3}

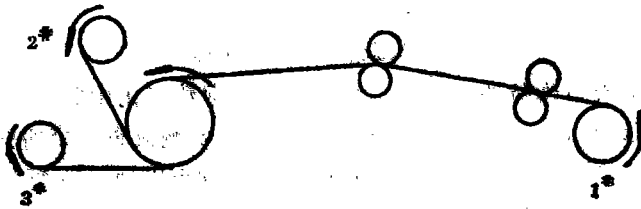


图 4 圆柱形微带天线缠绕成型示意图

假定天线预计工作温度区间宽度为 120 度, 适当选择元件, 可以调整在温度区间的中点上微带天线的谐振频率正好是 F_0 , 这样, 半个区间的宽度是 60 度。表 3 中的数据还没有达到 F_0 发生在区间中点的设想。实践证明, 按上述方法设计, 估算数据与实测结果相符。

测量的方法是在不同温度下恒温一小时, 然后测定产品的电压驻波系数 (VSWR) 的频率关系。电压驻波系数的最低点就是谐振频率点。表 4 所列结果可以看出, 材料设计基本满足了天线要求, 证明设计方法是可行的。在最低

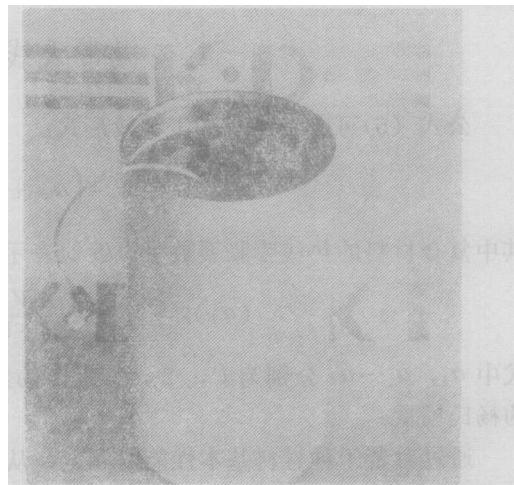


图 5 圆柱形微带天线的实物照片

表 3 材料设计简化估算值与实测值

样品号	项目	V_1	V_2	V_3	$\frac{\Delta F}{F_0}$ 估算值	$\frac{\Delta F}{F_0}$ 实测值
1		0.50	0.50	—	$\geq 3.24\%$	最大 6.45%
2		0.70	0.30	—	$\geq 3.75\%$	最大 5.80%
3		0.50	—	0.50	$\geq 5.88\%$	—
4		0.50	0.40	0.10	$\geq 3.72\%$	最大 4.5%
5		0.50	0.35	0.15	$> 2.52\%$	低温 3.2%
6		0.50	0.30	0.20	$\sim 1.5\%$	低温 2.5% 高温 0.65%

温度限频带变窄了,介电损耗较小,发射效率有所改善;而在温度上限点,介电损耗变大。

表 4 一只微带天线性能实测结果

室 温	$\epsilon_r = 3.10 \quad \tan\delta = 2.5 \times 10^{-2}$				
相对频率	0.98	0.99	1	1.02	1.03
VSWR	2.236	1.973	1.155	1.455	2.285
低 温	$\tan\delta = 1.25 \times 10^{-2}$				
相对频率	1	1.019	1.025	1.032	
VSWR	2.451	2.236	1.809	2.208	
高 温	$\tan\delta = 3.75 \times 10^{-2}$				
相对频率	0.98	0.995	1	1.02	
VSWR	2.78	1.131	1.715	2.449	

5. 结 论

复合材料可以设计的事实是经过从理论到实践反复证明了的。圆柱形微带天线的材料设计实践只是其中一个例子。但是复合材料的各组份的比例在工艺上较难准确控制,所以要保证每件产品的参数完全一致还很难做到。因此复合材料性能设计还要随着工艺的改进才能最终完全实现。从设计方法知,工艺上对组份含量控制越准确,产品性能的波动范围就越小。

参 考 文 献

- [1] K. R. CARVER, 微带天线技术专题技术译丛 No.32, 国防科技大学出版, 1983.4, P1—40 (张贤铎译)
- [2] J. Q. Howell, Microstrip Antennas, IEEE Trans. Antennas propagation Vol AP—23, No.1 (1975) P90
- [3] J.R. Jams, New Design Techniques for Microstrip Antennas, Arrays in proc 5th Europeam Micro Conf P102 (1975.9)
- [4] Y. T. LO, 微带天线的理论与实验。专题技术译丛 No32, 国防科技大学出版, 1983.4, P41 (张贤铎等译)
- [5] 张贤铎, 矩形微带天线的理论和实践, 国防科技大学科技报告 (1979.9)
- [6] 陈敬熊, 矩形微带天线谐振频率的确定及其在介质测量中的应用, 天线学报 No1 (1985) P4—12
- [7] 金琼, 高介电常数铁电瓷料的改性, 电子元件与材料 No.5(1984) P20
- [8] 小野重治, 高分子材料科学, 上海科技出版社出版。(1985) (林福海译)
- [9] 中国科技大学高聚物的结构和性能。科学出版社第一次印刷 (1981.10)
- [10] Г.И. 斯卡娜维。电介质物理学。高等教育出版社第一版 1958.9
- [11] 欧阳国恩, 论复合材料设计, 工程机械材料, No.6, (1983.6) P59~62

Design of the Composite Material Used in Cylindrical Microstrip Antennae

Ouyang Guoen Wang Youxin

Abstract

This paper describes the design method and process of polymer-matrix composite materials used in the microstrip antennae. The materials can meet the need for the temperature of microstrip antennae. A set of microstrip antennas products are designed and manufactured, using the method. Through the test in their high and low temperature, they have been proved to be in agreement with the designing.

KEY WORDS Microstrip antennae, Composite materials