

阻抗匹配技术在天线罩结构设计中的应用

蔡汝峰 张春波

(航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

文 摘 为解决飞行器高速飞行条件下天线罩在电结构设计中面临的力、热、电三方面的矛盾,本文应用阻抗匹配技术,通过在隔热层与承载层之间引入介电常数渐变匹配层,使天线罩在满足力、热性能的基础上,其电性能得到了显著提升。该技术的应用为天线罩传统电结构设计领域增添了一条可行的技术途径,可有效的解决耐高温等高性能天线罩的设计瓶颈问题。

关键词 天线罩,阻抗,透波系数

中图分类号:TN820.8+1

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.004

Application of Impedance Matching Techniques in The Structure Design of Radome

CAI Rufeng ZHANG Chunbo

(Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

Abstract In the hypersonic flight conditions, the radome will have to face the contradiction between the mechanical, thermal and electronics in electrical structure design. In order to solve this contradiction, this paper apply the impedance matching techniques, introduce the permittivity matching layer between the mechanical layer and the heat insulation layer. Using this technique, the electrical property have been significantly improved based on satisfying the mechanical property and the thermal property. The application of this techniques can provide a feasible technical way for traditional area of electrical structure design, and can effectively solve the bottleneck problem of designing high temperature radome and other high performance radome.

Key words Radome, Impedance, Power transmission coefficient

0 引言

飞行器天线罩位于飞行器的头部,既是飞行器气动外形的重要组成部分,又是透过电磁波的窗口和制导系统的保护装置^[1],所以天线罩在满足飞行器气动特性(力、热性能)的同时,还需具有优良的电性能。天线罩的电结构设计,是在飞行器的气动外形、力热要求、频率及天线与天线罩的几何位置关系等各项约束条件下进行的,其本质是分析电磁波通过天线罩介质壁时的反射、折射和传输特性,优化设计罩壁的结构形式和最佳厚度,使部分反射波相互抵消,从

而在给定方向上获得最大的功率传输性能和最小的相位畸变。

对于在高速飞行条件下的天线罩而言,由于急剧的气动加热,天线罩将会面临异常严酷的力、热环境,这就对天线罩的强度及隔热性能提出了严苛的要求。而天线罩的电性能与强度、隔热性能通常又是相互矛盾的,因此在上述条件下设计出满足力、热、电三方面性能要求的天线罩电结构是十分困难的,现已成为此类技术发展的瓶颈问题。

本文以高速飞行器为背景,应用阻抗匹配技

术^[2],分析了在承载层及隔热层之间引入介电常数渐变匹配层对电磁波传输特性的改善效果。

1 阻抗匹配理论

当电磁波进入介质时,可以把介质等效为传输线,应用微波传输线理论^[3]得出介质波阻抗为

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (1)$$

式中, μ 和 ε 分别为介质的磁导率和介电常数。空气(真空)的介电常数 $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$,磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$,故空气的本征波阻抗为

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi\Omega \quad (2)$$

根据传输线理论,可推导出电磁波由空气入射至单层介质材料表面所产生的反射系数为

$$\Gamma = \frac{\eta - \eta_0}{\eta + \eta_0} \quad (3)$$

从(3)式可以看出,波阻抗反映了介质对电磁波的阻碍程度。理想情况下,当介质的阻抗与自由空间的阻抗完全相等时,反射系数为零,电磁波将完全进入到介质层中。当然,这是一种理想情况的完全匹配,在工程应用中,可采用阻抗渐变的方法来减小介质层对电磁波的反射。

对于电磁波斜入射至分界面的情况,根据电磁波理论对平面波斜入射至双层介质平板的传输模型(图1)进行推导,可得出平行极化和垂直极化的波阻抗表达式。

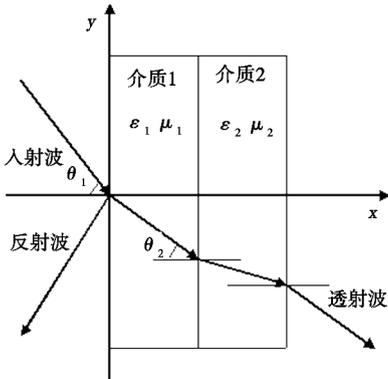


图1 电磁波斜入射传播模型

Fig. 1 Transmitting model of oblique incidence of electromagnetic wave

$$Z_{//1} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \cos\theta_1 \quad Z_{//2} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} \cos\theta_2 \quad (4)$$

$$Z_{\perp 1} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \frac{1}{\cos\theta_1} \quad Z_{\perp 2} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} \frac{1}{\cos\theta_2} \quad (5)$$

式中, $Z_{//1}$ 、 $Z_{\perp 1}$ 、 $Z_{//2}$ 、 $Z_{\perp 2}$ 分别为水平极化和垂直极化状态下介质1和介质2的波阻抗; ε_1 、 μ_1 和 ε_2 、 μ_2 分别为介质1和介质2的介电常数和磁导率; $\cos\theta_1$ 和 $\cos\theta_2$ 分别为电磁波对介质1和介质2的入射角。

对于天线罩罩壁而言,电磁波从空气到介质层再从介质层到空气进行传播,经过了不同的边界,此过程可等效为多层电介质壁的等效电路^[4],其实质是阻抗变换,如图2所示。在宽带天线罩的电结构设计中,常采用多层罩壁^[5](A夹层、B夹层、C夹层等)来拓展带宽,多层罩壁本质上是一个多阶梯式阻抗匹配器。即将单阶梯匹配器(单层罩壁)的较大阻抗突变分散成几个较小的突变,然后合理地选择突变平板的等效特性阻抗及厚度,使其产生的反射在一定频带范围内能部分抵消,从而达到有效展宽频带的目的。

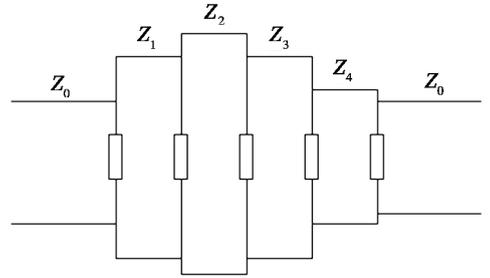


图2 多层介质壁的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of multilayer dielectric wall

2 设计应用实例

工作于厘米波频段高速飞行器天线罩一般采用外承载层加内隔热层结构,考虑到严苛的强度、隔热要求,外承载层和内隔热层的厚度均不低于12 mm。根据承载层的介电常数、最佳入射角及中心频点波长可以计算得出,承载层采用半波壁及全波壁厚度无法满足强度要求,采用三阶半波壁厚度则会引起透波性能的较大下降。

从阻抗匹配的角度来看,由于空气、外承载层、内隔热层介电常数的差异,电磁波在传输过程中将会在空气-外承载层,外承载层-内隔热层,内隔热层-空气的分界面上产生较大的反射,从而导致整体透波性能的降低,尤其是前两个界面。考虑到外承载层需抵抗严酷的气动加热,因此在外承载层与内隔热层之间引入介电常数渐变匹配层是较为可行的方案。同时,由于介电常数渐变匹配层可采用多孔陶瓷^[6]制成,具备一定的强度性能,因此在一定程度上可降低外承载层的厚度要求。考虑到工艺实现性,经设计优化和强度校核,匹配层可采用介电常数三层线性渐变结构。表1为引入匹配层结构与无匹配结构的厚度对比,图3给出了引入匹配层后罩壁等效平板透波系数

较之无匹配层结构的改善效果。

表 1 匹配层结构与无匹配层结构的罩壁厚度对比

Tab.1 Thickness contrast between those with matching layer and without matching layer

结构	材料组成	ϵ_r	$\text{tg}\delta/10^{-3}$	厚度/mm
引入匹配层	承载层(耐高温陶瓷)	3.2	5	10
	渐变层 a(多孔陶瓷)	2.75	5	2
	渐变层 b(多孔陶瓷)	2.3	5	4
	渐变层 c(多孔陶瓷)	1.85	5	2
无匹配层结构 1	隔热层(气凝胶)	1.4	5	12
	承载层(耐高温陶瓷)	3.2	5	16.8
	瓷)三阶半波壁	3.2	5	16.8
无匹配层结构 2	隔热层(气凝胶)	1.4	5	12
	承载层(耐高温陶瓷)	3.2	5	12
无匹配层结构 2	隔热层(气凝胶)	1.4	5	12
	承载层(耐高温陶瓷)	3.2	5	12

从图中的计算结果可以看出,在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 入射角区域(天线罩主要入射角分布),引入匹配层结构后的两种极化状态下的透波系数较两种无匹配层结构均有相当程度的提升,垂直极化状态平均提升约 10%,水平极化状态平均提升约 5%。

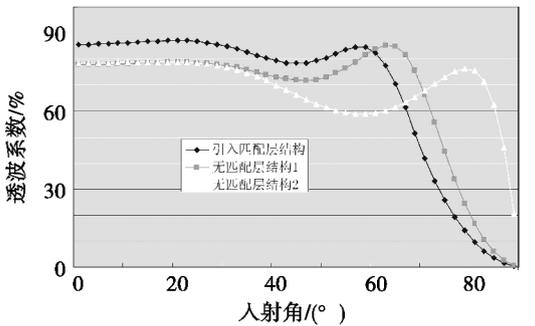
3 结论

应用阻抗匹配技术,通过某飞行器天线罩的设计实例,分析了在承载层及隔热层之间引入介电常数渐变匹配层对电磁波传输特性的改善效果及工程可行性。结果证明,匹配层的引入使天线罩在满足力、热性能的基础上,其电性能得到了显著提升,透波系数提升约 5% ~ 10%。该技术的应用可有效的缓解飞行器高速飞行条件下天线罩所面临的力、热、电三方面的矛盾,从而为此类高性能天线罩的设计研制提供了一条切实可行的技术途径。

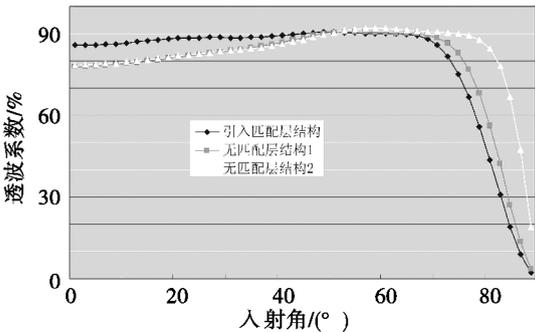
针对此技术途径,可继续开展匹配层参数多样化探索研究,如介质折射率线性变化,介电常数平方值线性变化等;与此同时还可进一步研究匹配层对宽频带、复合多模等天线罩电性能的改善效果,扩大应用范围。

参考文献

- [1] 戎华. 导弹天线罩技术简介[J]. 声学与电子工程, 2003(3):36-38
- [2] 田亚朋,张昌民,等. 阻抗匹配电路原理与应用[J]. 电子科技,2012,25(1):17-20
- [3] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995:16-45
- [4] 林为干. 微波网络[M]. 成都:成都电子科技大学出版社,1987:20-30
- [5] 杜耀惟. 天线罩电信设计基础[M]. 北京:国防工业出版社,1994. 93-129
- [6] 雷景轩,胡伟,等. 多孔石英陶瓷材料的制备与性能[J]. 陶瓷学报,2008,29(1):24-27



(a) 垂直极化



(b) 水平极化

图 3 等效平板透波系数与入射角的特性曲线

Fig.3 Curve of equivalent flat power transmission coefficient and incidence angle characteristic

(编辑 吴坚)