2019 年 12 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2019)06-1036-05

高功率微波宽带波导定向耦合器设计

张翠翠,王 益,王建忠

(中国工程物理研究院 计量测试中心,四川 绵阳 621999)

摘 要:为满足高功率微波测量需求,设计一种 X 波段宽带的波导定向耦合器。为达到宽带设计要求,该耦合器采用多孔耦合结构,利用切比雪夫分布函数得到每组耦合系数,同时修正耦合臂引入的截止衰减影响,根据耦合理论得到每组小孔的初始尺寸,最后基于软件优化后得到满足预期设计要求的宽带耦合器。根据仿真结果,该耦合器在 8.2~12.4 GHz 频带范围内的耦合度为40 dB,带内波动小于1 dB,方向性优于 30 dB,连续波功率容量达到 0.84 MW;实测耦合度为 38~39 dB,端口反射小于-20 dB,可满足 MW 级高功率微波脉冲测量系统的应用需求。

关键词:定向耦合器;宽带耦合器;多孔耦合;高功率微波

中图分类号:TN622⁺.2 文献标志码:A **doi**:10.11805/TKYDA201906.1036

Design of high power broadband waveguide coupler

ZHANG Cuicui, WANG Yi, WANG Jianzhong

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: To meet the demand of high power microwave measurement, a broadband waveguide directional coupler of X-band is presented. In order to achieve the requirements of broadband, a multi-hole coupling structure is adopted, which uses the Chebyshev function to get each coupling coefficient, and gets the initial diameter of each hole by hole-coupling theory. A broadband coupler meeting the design requirements is obtained through optimization with simulation software. According to the simulation results, the coupling coefficient of the system is 40 dB within 8.2–12.4 GHz, the in-band fluctuation is less than 1 dB, and the isolation is more than 30 dB, the measured coupling coefficient is 38–39 dB, the reflection is less than -20 dB, the power capacity is 0.84 MW, which is suitable for MW level high power microwave pulse measurement.

Keywords: directional coupler; broadband coupler; multi-hole coupler; high power microwave

定向耦合器是微波系统中应用最广泛的元件之一,它是一个四端口网络,可以看作是一种具有方向性的功率 分配器。耦合器在高功率微波测量系统中^[1-2]有广泛应用,如外场测量系统或在功率线测量系统中经常采用波导 耦合的方法从波导中耦合出部分微波。耦合器根据结构不同,可分为波导、微带等形式^[3];根据耦合方式不同可 分为小孔耦合、十字耦合、缝隙耦合等^[4-10]。采用十字耦合和缝隙耦合方式的主要缺点是频带窄,如文献[11]中 设计的 61 dB 十字耦合型耦合器带宽仅为 700 MHz,文献[12]中缝隙型微带耦合器为 1~2 GHz^[12],带内平坦度为 2 dB,带内波动较大。目前,耦合器理论普遍没有考虑由于耦合臂引入的截止衰减,本文分析小孔的耦合和截止 衰减情况,引入电场衰减和磁场衰减修正系数,准确得到各组小孔初始尺寸,有助于仿真优化和设计实现。

本文基于多孔耦合理论实现 X 波段宽带定向耦合器的设计,耦合器的频率范围为 8.2~12.4 GHz,耦合度为 40 dB±0.5 dB,方向性优于 30 dB,可满足 X 波段波导耦合测量的需求。同时基于本文的设计理论可实现多频段、 耦合量 20~60 dB 的耦合器设计,调节耦合孔数量可调节带内波动,达到较好的平坦度要求。

1 耦合器理论设计

1.1 单孔耦合分析

理想状态下,即耦合臂的厚度为零时,单孔耦合理论模型如图1所示。耦合孔窄边距离为d,设波导中只有

主模 TE₁₀存在,信号从输入端口输入,并令 a₁=1, 根据小孔耦合理论^[13],端口 2 和端口 3 输出分别为:

$$b_{2} = j \frac{2\pi}{ab\lambda_{g}} \left[-M_{x}H_{x}^{1}H_{x}^{2} + M_{z}H_{z}^{1}H_{z}^{2} - P_{y}E_{y}^{1}E_{y}^{2} \right]$$

$$b_{3} = j \frac{2\pi}{ab\lambda_{g}} \left[M_{x}H_{x}^{1}H_{x}^{2} + M_{z}H_{z}^{1}H_{z}^{2} - P_{y}E_{y}^{1}E_{y}^{2} \right]$$
(1)

式中: *a* 为波导宽边尺寸; *b* 为波导窄边尺寸; $\lambda_{g} = \lambda / \sqrt{1 - (0.5\lambda/a)^{2}}$ 为波导波长; M_{x}, M_{z} 分别为小 孔在 *x* 和 *z* 方向的磁极化率; *P_y* 为小孔电极化率; $H_{x}^{1}, H_{z}^{1}, E_{y}^{1}$ 和 $H_{x}^{2}, H_{z}^{2}, E_{y}^{2}$ 分别为主波导与副波导内小



Fig.1 Diagram of single hole coupling structure 图 1 单孔耦合结构示意图

孔中心处的场分量幅值; *M_x*, *M_z*, *P_y*都是小孔直径 *d*、信号波长 λ 及孔深 *t*(即耦合臂厚度)的函数。当孔径 *d* 与波 长相比足够小时,耦合臂的厚度 *t* 无限薄,可忽略不计,且孔距外界干扰物(波导臂)足够远时,*M*,*P* 可表述为式 (2),根据文献[14]可得到椭圆形、矩形等其他耦合孔的相关函数。

$$\begin{cases} M_x = M_z = M = d^3 / 6 \\ P_x = P = d^3 / 12 \end{cases}$$
(2)

经推导得到小孔耦合度为:

$$c = -20\lg|s_{13}| = -20\lg|b_3 / a_1| = -20\lg\left\{\frac{2\pi}{ab\lambda_g}\left\{\left[M - \left(\frac{\lambda_g}{\lambda}\right)^2 P\right]\sin^2\left(\frac{\pi x_0}{a}\right) + \left(\frac{\lambda_g}{2a}\right)^2 M\cos^2\left(\frac{\pi x_0}{a}\right)\right\}\right\}$$
(3)

式中: x₀为小孔距离波导窄臂的距离; s₁₃为从端口 1 到端口 3 传输参数。经推算 x₀=0.25*a* 时,小孔耦合度具有 最佳平坦特性。

当在有限厚度的耦合臂上开有圆孔耦合时,小孔可以等效为一小段圆波导,耦合波通过小孔后进行截止衰减, 根据矩形波导中的主模为 TE₁₀模,小孔的耦合模式为 TE₁₁和 TM₀₁两种模式。调研相关文献,圆波导截止衰减估 算有 Wheeler 公式、Barrow 公式、Stratton 公式等^[15],各公式之间差异不大。以 Stratton 公式为例,*A*,和*A*_m分别 为耦合 TE₁₁模式引入的电场截止衰减系数和磁场耦合 TM₀₁模式引入的磁场截止衰减系数,*A*,和*A*_m如式(4)所示:

$$\begin{cases} A_{\rm e} = \frac{2.405}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \times \frac{r}{2.405}\right)^2 \left(1 + \frac{\tau}{r}\right)} \\ A_{\rm m} = \frac{1.841}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \times \frac{r}{1.841}\right)^2 - \frac{\tau}{r}} \end{cases}$$
(4)

式中: **r**为趋肤深度; **r**为小孔半径。因此,可将小孔极化率修正为:

式中 C_E,C_H分别为由于耦合臂厚度衰减器引起的电场衰减和磁场衰减修正系数。根据修正公式可知,各小孔的耦合系数与耦合臂厚度、小孔直径以及频率等参数直接相关。

1.2 多孔耦合的相位叠加分析

采用单孔耦合时,根据小孔衍射理论,单孔耦合量的大小直接与耦合孔的大小与耦合孔位置相关,理论上很

难实现宽带耦合设计。为改善耦合器的带内平坦度和隔离度,普遍采用多孔耦合的方式。

当采用双孔耦合时,2个耦合孔的大小保持相同,双孔耦合的基本理论就是合理调节两孔的间距为*d*,使两 正向耦合信号同相叠加,同时在反方向上相位相反相互抵消。第1个小孔在副波导中激励起的反向波在–*d*/2处相 对幅度为 a_1^- ,耦合出的正向波在副波导传播到*d*/2时相对幅度值为 $a_1^+e^{-j\beta_2d}$;由第2个孔在副波导中激励起的正向 波在*d*/2处相对幅度为 $a_2^+e^{-j\beta_1d}$,其反向波在副波导再传播*d*距离后到达–*d*/2,此时的相对幅值为 $a_2^-e^{-j(\beta_1+\beta_2)d}$,由 于两孔大小相同, $a_1^-=a_2^-=a^-$, $a_1^+=a_2^+=a^+$ 。

取合理位置,两孔的耦合将在正向得到同相 叠加,同时在反向信号将会抵消,从而得到定向 耦合。当有多孔耦合时,见图 2,本文只考虑等 间距分布时的相位叠加原理。假定耦合孔足够 小,使得整个耦合区内入射波幅值并不受很大影 响,即耦合器件不影响微波系统的工作状态。

设耦合孔数为 N=2n, N 个小孔呈对称分布,





坐标设在对称中心。各对小孔的耦合强度分别为 $a_1^{\pm}, a_2^{\pm}, \dots, a_n^{\pm}$,入射波在主波导中朝正向传播,其相位常数设为 β_1 ,副波导中的模式为 β_2 ,可以得到入射波耦合到副波导中激励起的波经相位叠加后相对幅值为:

$$A^{\pm} = 2 \left| \sum_{k=1}^{n} a_k^{\pm} \cos \theta_k^{\pm} \right| \tag{6}$$

式中 $\theta_k^{\pm} = (\beta_1 \mp \beta_2) d_k / 2$ 。满足 $\theta_k^{+} = 2i_k \pi (i_k = 0, 1, 2 \cdots), \theta_k^{-} = (i_k - 0.5) \pi (i_k = 1, 2 \cdots)$ 时,所有正向波能获得同相叠加,所有反向波能相互抵消。

若耦合孔间距都等于 *S* 时,通过分析可知, $\phi_k^+ = (\beta_1 - \beta_2)S/2 = i\pi(i = 0, 1, 2\cdots)$ 时,两孔在正向同相相加; $\phi_k^- = (\beta_1 + \beta_2)S/2 = (i - 0.5)\pi(i = 0, 1, 2\cdots)$ 时,两孔信号将在反向抵消,从而得到定向耦合,由此可确定耦合孔间距 *S*。

1.3 基于切比雪夫函数的多孔耦合设计

在多孔耦合时,为了得到最佳的带内平坦度,可利用不同的分布函数来确定各耦合孔的耦合强度,比较常用 的分布函数有二项式分布和切比雪夫函数。

本文以切比雪夫函数为例来确定各耦合孔的耦合分布。根据平坦度的设计要求,确定切比雪夫函数的级数, 级数越高,耦合系数带内越平坦,波动越小。选定切比雪夫函数的级数后,可确定每个耦合孔的相对大小,耦合 孔耦合度的相对大小为(本次选定级数为4级8孔的方式):

$$\begin{cases} a_4 = (1/2)t^7 A_0 \\ a_3 = (7/2)A_0(t^7 - t^5) \\ a_2 = (7/2)A_0(2t^3 - 5t^5 + 3t^7) \\ a_1 = (7/2)A_0(6t^3 - 10t^5 + 5t^7 - t) \end{cases}$$
(7)

只要选定 t,所有耦合孔的耦合强度都可以用 A_0 表示。t的选取范围综合考虑耦合器带宽和隔离度,根据经验,选取 $t=1\sim1.5$ 之间综合性能较好。从而根据 A^+ 可求得参数 A_0 ,进一步可得到各项耦合系数 a_1,a_2,a_3,a_4 。基于单孔耦合理论可确定各小孔尺寸。

2 耦合器整体仿真设计及分析

设计 X 波段 BJ100 的 40 dB 波导耦合器,采用波导宽边、 4 级 8 孔耦合。耦合臂厚度为 2 mm,初始设计耦合孔半径大 小分别为 2.8 mm,2.6 mm,2.2 mm,1.6 mm,孔间距为 6 mm, 耦合孔距窄边距离为 0.25*a*,Matlab 理论计算耦合系数为 39.5~42.5 dB。



图 3 耦合器仿真模型

基于该初始值采用仿真软件进行优化, 仿真模型如图 3 所示, 优化后孔径的半径分别为 2.67 mm, 2.50 mm, 2.07 mm,

1.28 mm, 孔间距为 5.5 mm, 优化值与理论值的偏差主要考虑为小孔耦合时的截止衰减估算值与实际值的差异导致。优化后的耦合系数与隔离度见图 4, TE₁₀模式 8.2~12.4 GHz 内隔离度优于-70 dB, 方向性为 30 dB, 耦合系

第6期

数为 40.5~39.5 dB, 波动 1 dB 左右, 对于 TE₂₀模式的抑制大于 20 dB(即 TE₂₀模式下耦合系数大于 70 dB)。 当输入端口输入 0.84 MW 的高功率微波时,耦合器内的场分布如图 5 所示。从图中可以看出,耦合器的最 大电场在矩形波导内而非耦合孔处,最大场强为 30 kV/cm,达到空气击穿场强的临界值。因此,耦合器的最大 功率容量即为空气填充的矩形波导的功率容量 P_r=0.84 MW。当该耦合器用于高功率微波脉冲功率测量时,允许 功率有所提高,可满足 1 MW 高功率微波耦合测量。





Fig.5 Simulation of the coupler's electric field(input power 0.84 MW) 图 5 耦合器电场分布仿真结果(端口功率 0.84 MW)

3 实测结果及分析

基于仿真设计完成耦合器的加工,耦合器由4部分构成,主要包括上盖、下盖、中间腔体、吸收负载。中间 腔体独立可方便腔体中小孔的加工,控制小孔的位置、尺寸以及耦合臂厚度加工精确度和公差;吸收负载采用尖 劈结构,按照反射系数满足-20 dB 要求进行预期设计。吸收负载经烧制和打磨后成型,由于系统小型化需求, 耦合器的隔离端与直通端直接贴附吸收体,耦合器的加工实物如图 6 所示。基于网络分析仪 TRL 校准测得耦合 器的耦合量和端口反射系数(隔离度无法开展测量),从图 7 测量结果来看,耦合器的耦合系数波动为 1 dB,与设 计值一致;耦合系数整体降低 2 dB,考虑主要是耦合孔尺寸和耦合臂的厚度存在加工公差,导致耦合系数整体 有所降低;端口反射系数较仿真结果略差,主要是由于吸收负载材料特性及尺寸影响,以及加工的平整度和垂直 度控制不够,导致波导口连接面接触性能不好;另一方面考虑是隔离端与直通端的吸收体的反射(约为-20 dB), 直接引起耦合器的端口反射增大。



4 结论

本文基于切比雪夫分布函数完成一种矩形波导之间耦合的宽带定向耦合器的设计,该耦合器可实现全频带内 波动小于 1 dB。该定向耦合器设计理论可适用于开展矩形—圆形、圆形—圆形波导之间的耦合设计。本文设计 的耦合器,耦合臂厚度每增加 1 mm,耦合量增加 5 dB 左右;耦合臂厚度为 1 mm,耦合孔尺寸增大 1.4 倍,耦 合量可达到 20 dB;耦合臂厚度为 4 mm,耦合孔尺寸减小为 0.8 倍,耦合量可达到 60 dB,该多孔耦合设计方法 可用于 20~60 dB 耦合器的设计。由截止衰减系数可知,当耦合小孔的直径较小时,可适当增加耦合臂的厚度, 一定程度上可加大耦合孔的尺寸,便于设计、加工和实现,该方法在高频段及微带耦合器设计时能够达到较好的 效果。

参考文献:

- [1] 刘义. 高功率微波功率测量相关技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2010. (LIU Yi. Analysis of correlative technology on power measurement of high power microwave[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2010.)
- [2] 孙钧,胡咏梅,张立刚,等. 圆波导定向耦合器在高功率微波测量中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(6):063040.
 (SUN Jun,HU Yongmei,ZHANG Ligang, et al. Application of circular waveguide couplers in high power microwave measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(6):063040.)
- [3] 覃基伟,陈晓光. 定向耦合器的高功率微波小型化设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(1):56-59. (QIN Jiwei,CHEN Xiaoguang. Design of high-power small-size directional coupler[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(1):56-59.)
- [4] KONC O,MAASSEN D,RAUTSCHKE F,et al. Wideband substrate integrated waveguide Ku-band coupler[C]// 2016 21st International Conference on Microwave,Radar and Wireless Communications(MIKON). Krakow,Poland:IEEE, 2016:1-4.
- [5] ZHOU Y F,HU J,LIU S,et al. A terahertz-band branch waveguide directional coupler based on micro-machining[C]// IEEE International Conference on Communication Problem-Solving. Beijing:IEEE, 2015:223-226.
- [6] 祝远建,徐金平. E 波段和 F 波段波导 H 面 T 型缝隙耦合器[C]// 全国微波毫米波会议. 西安:[s.n.], 2009:241-243.
 (ZHU Yuanjian,XU Jinping. E-band and F-band H-plane waveguide tee junction slot coupler[C]// 2019 National Conference on Microwave and Millimeter Wave. Xi'an,China:[s.n.], 2009:241-243.)
- [7] 冯文杰,赵超颖,车文荃,等. 高选择性的宽带十字型耦合器:CN105720345A[P]. 2016-06-29. (FENG Wenjie,ZHAO Chaoying,CHE Wenquan, et al. High-selectivity cross-shaped wideband coupler:CN105720345A[P]. 2016-06-29.)
- [8] MOGHAVVEMI M, MAHABADI H A, ALIJANI F. Multi-hole waveguide directional couplers[J]. MPRA Paper, 2015:195–218.
- [9] KARIMABADI S S,ATTARI A R. X-band multi-hole directional coupler with folded substrate-integrated waveguide[J]. Electromagnetics, 2015,35(6):404-414.
- [10] 刘海旭. 一种高功率超带宽波导耦合器的设计方法[J]. 电光系统, 2016(4):30-32. (LIU Haixu. Design method of high power ultra wideband waveguide coupler[J]. Electronic and Electro-Optical Systems, 2016(4):30-32.)
- [11] 季彦婷,赵腊,朱乙平,等. X 波段高功率宽带波导定向耦合器设计[J]. 雷达与对抗, 2014(4):50-53. (JI Yanting, ZHAO La, ZHU Yiping, et al. Design of an X-band high-power wideband waveguide directional coupler. Radar & ECM, 2014(4): 50-53.)
- [12] 崔新红,蒙林,刘小龙,等.L 波段小型化同轴-共面波导定向耦合器[J].强激光与粒子束, 2013,25(10):2659-2662.
 (CUI Xinhong,MENG Lin,LIU Xiaolong,et al. Miniature L-band coaxial-to-CPW directional coupler[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(10):2659-2662.)
- [13] VOSS W A G. On Bethe-hole coupling in rectangular waveguide systems[D]. London, England: Queen Mary University of London, 1961.
- [14] 王文祥. 微波工程技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2014. (WANG Wenxiang. Microwave engineering technology[M].
 Beijing:National Defense Industry Press, 2014.)
- [15] 黄志洵. 截止波导理论导论[M]. 北京:中国计量出版社, 1981. (HUANG Zhixun. Introduction to cut-off waveguide theory[M]. Beijing:China Metrology Press, 1981.)

作者简介:



张翠翠(1984-),女,山东省枣庄市人,硕士, 工程师,主要从事微波器件测试及研制.email: cuicui_zhang@163.com. **王** 益(1986-),男,四川省绵阳市人,硕士, 工程师,主要从事微波毫米波测试、材料测试等.

王建忠(1974-),男,四川省大邑市人,硕士, 高级工程师,主要从事无线电计量及光学计量技 术研究.