

文章编号: 2095-4980(2016)02-0229-04

TE₀₁ 弯头切比雪夫设计方法

王 强¹, 郭 凯², 杨 春¹, 唐先发^{1*}

(1.中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999; 2.清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要: TE₀₁ 弯头在高功率微波系统装配中有着重要作用。随着高功率微波朝着高功率、大带宽方向发展, 对 TE₀₁ 弯头提出了高功率容量、更大工作带宽的需求。传统设计方法往往存在带宽较窄, 功率容量受限的问题。TE₀₁ 弯头设计难点在于存在 TM₁₁ 简并模。本文在椭圆波导解简并的基础上, 提出了 TE₀₁ 弯头切比雪夫设计方法。采用耦合波理论分析完成了弯头设计过程。仿真设计了 Ka 频段椭圆弯头结构, 长半轴为 7 mm, 短半轴为 5.25 mm。计算机仿真结果表明: 模式保留效率 95% 以上的频率范围从 32 GHz 到 45.1 GHz, 验证了设计方法的有效性。

关键词: TE₀₁ 弯头; 耦合波理论; 切比雪夫方法

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0229

Chebyshev design method for TE₀₁ bend

WANG Qiang¹, GUO Kai², YANG Chun¹, TANG Xianfa^{1*}

(1.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

2.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: TE₀₁ bends play an important role in the High Power Microwave(HPM) system. TE₀₁ bends should bear higher power and wider band width as the HPM develops towards higher power and wider band. TE₀₁ bends designed by traditional method have the disadvantages of narrow band and limited power capacity. The bottleneck of TE₀₁ bend design is the existence of TM₁₁, which is the degenerated mode of TE₀₁. In this paper, a Chebyshev design method based on the elliptical waveguide is proposed, and in the elliptical waveguide, the TE₀₁ and TM₁₁ are no longer the degenerated modes. The coupled mode theory is adopted to finish the design procedure. A Ka band TE₀₁ bend is theoretically designed, and the semi-major axis and semi-minor axis are 7 mm and 5.25 mm, respectively. Computer simulation results show that the frequency ranges from 32 GHz to 45.1 GHz(mode preserve efficiency keeps above 95%), and the effectiveness is verified.

Key words: TE₀₁ bend; coupled mode theory; Chebyshev method

回旋行波管具有高平均功率、宽带宽、高脉冲重频等优点, 在电子对抗领域有强烈的应用需求。回旋行波管的主要输出模式为圆波导 TE₀₁ 模, 在实际工程应用中, 常常需要设计 TE₀₁ 弯头器件, 以满足系统整体的装配要求。

TE₀₁ 弯头器件实现 TE₀₁ 模 90° 转弯传输, 然而由于圆波导中 TE₀₁ 模和 TM₁₁ 模为简并模, 如果不经合理设计, 弯曲圆波导中 TE₀₁ 模式将大幅转换为 TM₁₁ 模式, 简并模的存在大大增加了 TE₀₁ 弯头的设计难度。目前存在 3 种设计方法: a) 圆波导弯曲法: 在圆波导过模程度较小时, 通过设计合理的波导半径, 可采用四分之一圆弧来实现 TE₀₁ 模的转弯传输^[1], 然而合理的波导半径往往非常小, 因而功率容量受限。在波导半径不满足要求时, 可以通过迭代法提高中心频点转换效率^[2], 但该方法带宽不宽; b) 斜接弯头法^[3-4]: 该结构由模式变换段、斜接镜面和模式变换段三部分构成, 整个结构呈现 45° 对称。模式变换段的目的在于将 TE₀₁ 模式转换为 TE₀₁ 和 TE₀₂ 的混合模, 混合模满足斜接镜面处切向电场为 0 的边界条件, 从而可实现 TE₀₁ 模高效传输。在斜接镜面处入射电场和反射电场叠加, 提高了峰值场强, 因而降低了功率容量; c) 解简并法: 通过在波导内引入膜片^[5]或者将

收稿日期: 2014-11-13; 修回日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61401412)

*通信作者: 唐先发 email:sunfree2004@gmail.com

圆波导变为椭圆波导^[6], 改变 TE_{01} 模和 TM_{11} 模的传播常数使之不再相等, 从而实现 TE_{01} 模和 TM_{11} 模的解简并, 进一步实现 TE_{01} 弯头结构的设计, 但目前解简并设计思路发展并不成熟。本文介绍 TE_{01} 弯头的切比雪夫设计方法, 该方法基于解简并思路, 设计的结构具有较宽的带宽和较高的功率容量。

1 设计原理

椭圆波导中, TM_{11} 模式分裂为 TM_{11}^H 和 TM_{11}^L 两种模式, TM_{11}^H 模式极化方向平行于短轴, TM_{11}^L 模式极化方向平行于长轴, 且这 2 种模式的特征频率不同。随着圆波导逐渐变化为椭圆波导, TE_{01} 模式的特征频率逐渐与 TM_{11} 模式分离, 从而实现解简并。特征频率随着椭圆离心率的变化过程见图 1(a), TM_{11}^H 和 TM_{11}^L 的场图见图 1(b)。

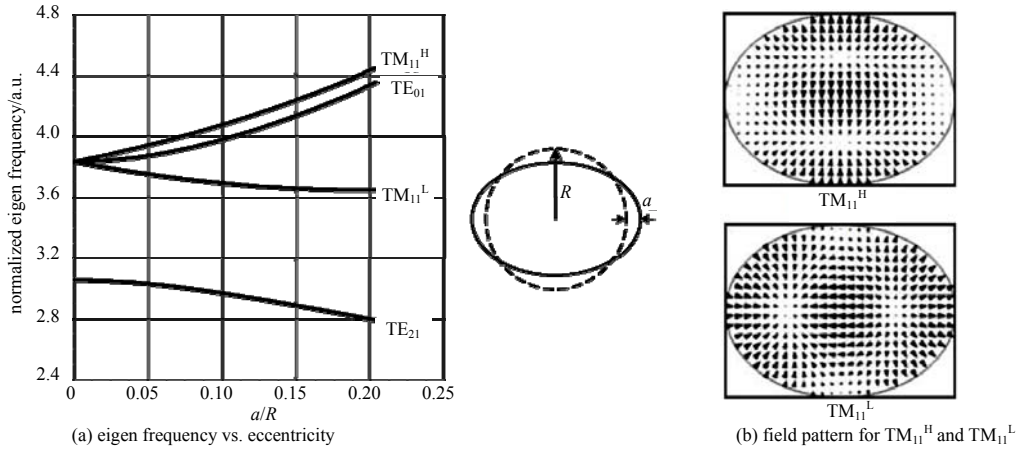


Fig.1 De-degenerate procedure of TE_{01} and TM_{11}

图 1 TE_{01} 与 TM_{11} 解简并过程

椭圆波导沿着短轴所在平面弯曲, 椭圆长轴垂直于弯曲曲面。在此弯曲椭圆波导中, 由波导耦合波理论^[7]得知, TE_{01} 模仅与 TM_{11}^L 模发生有效耦合, TM_{11}^H 模不参与模式耦合。其他参与耦合的模式还包括: TE_{21} 和 TE_{11} 等。但由于 TE_{01} 模与 TM_{11}^L 模具有较接近的特征频率, 从而具有较大的耦合系数, 因此可仅考虑 TE_{01} 模和 TM_{11}^L 模相互耦合的简化模型。不考虑反向模和波导损耗的两模耦合波方程组表达式如下:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j\beta_1 & jC \\ jC & -j\beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $A_{1(2)}$ 为 $TE_{01}(TM_{11}^L)$ 模的复幅度; $\beta_{1(2)}$ 为 $TE_{01}(TM_{11}^L)$ 模的相位常数; C 为耦合系数, 由文献[7]知, C 可写为模式相关的常数 c 与轴线弯曲曲率 κ 的乘积的形式: $C=c\kappa$; j 为虚数单位; z 为电磁波传播方向坐标变量。

在大过模波导中, $\beta_2 - \beta_1 \approx -(k_{c2}^2 - k_{c1}^2)/2k$, 其中 k 为自由空间波数, $k_{c1}(k_{c2})$ 为 $TE_{01}(TM_{11}^L)$ 模的截止波数。在弱耦合近似中, 弯头输出端 TM_{11}^L 模式幅度绝对值表达式如下:

$$|A_2(L)| = \left| \int_0^L c \cdot \kappa(z) \exp \left[j \left(-\frac{k_{c2}^2 - k_{c1}^2}{2k} \right) z \right] dz \right| \quad (2)$$

式中 L 为器件总长度。做如下变量替换(其中 k_0 为工作频率对应的波数):

$$\eta = \frac{k_0}{k} \quad (3)$$

$$2\theta = \frac{k_{c2}^2 - k_{c1}^2}{2k_0} \cdot L \quad (4)$$

$$\xi = \frac{k_{c2}^2 - k_{c1}^2}{2k_0} \cdot z - \theta \quad (5)$$

式中: η 为归一化频率倒数; θ 为变量替换之后的结构长度; ξ 为变量替换之后的电磁波传播方向坐标变量。新坐标系式(2)可重新写作:

$$|A_2(L)| = \left| \frac{2k_0}{k_{c2}^2 - k_{c1}^2} \cdot \int_{-\theta}^{\theta} c \cdot \kappa(\xi) \exp(-j\eta\xi) d\xi \right| \quad (6)$$

为得到宽带 TE_{01} 弯头设计, 式(6)可采用切比雪夫解:

$$\kappa(\xi) = \frac{I_0 \left[\theta \sqrt{1 - \left(\frac{\xi}{\theta} \right)^2} \right]}{2 \sinh \theta} \quad (7)$$

式中 I_0 为修正形 0 阶贝塞尔函数。得到曲率分布之后, 可得到 TE₀₁ 弯头器件的设计参数, 并设计出整个器件。

2 仿真结果

选择波导长半轴为 7 mm, 短半轴为 5.25 mm, $\theta=3\pi$ 。通过式(5)和式(7)可得到曲率随着弧长的函数变化关系, 从而可得到中心轴线结构, 横向尺寸和纵向尺寸均为 138 mm。将此结构在仿真软件中建模, 结构见图 2。该结构与四分之一圆弧结构有些类似, 但在拐角处曲率更大。

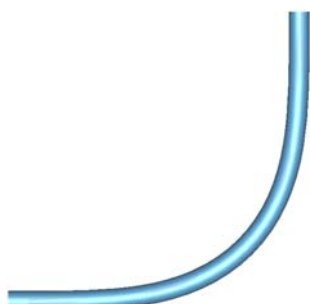


Fig.2 Structure of TE₀₁ bend
图 2 TE₀₁ 模椭圆弯头结构

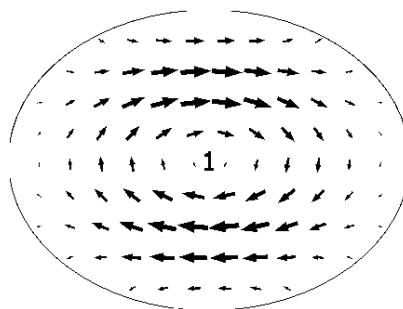


Fig.3 E field of elliptical TE₀₁ mode
图 3 椭圆 TE₀₁ 模电场图

设置椭圆波导 TE₀₁ 模式激励, 椭圆波导中的 TE₀₁ 模场见图 3。与圆波导 TE₀₁ 模相比, 在椭圆短轴方向场强更集中一些。采用仿真软件对此结构进行仿真, 计算得到的转换效率曲线见图 4。从图 4 看出, TE₀₁ 模保留效率高于 95% 的频带范围从 32 GHz 开始直到 45.1 GHz, 绝对带宽达到 13.1 GHz, 相对带宽达到 34%。在目前的 TE₀₁ 弯头设计中未见到如此大带宽的文献报道, 由此可见本方法的优越性。然而在本方法中, 并未考虑圆到椭圆以及椭圆到圆的变换段, 如果采用长轴直线过渡的方法进行设计, 圆到椭圆的转换效率并不太高, 带宽特性也并不太好。在后续工作中将继续开展宽带、高效、紧凑的圆到椭圆过渡段设计工作。

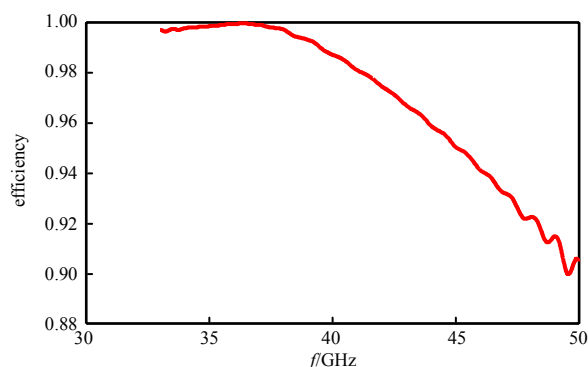


Fig.4 Conversion efficiency of TE₀₁ bend
图 4 TE₀₁ 模椭圆弯头转换效率

3 结论

本文对椭圆弯型 TE₀₁ 弯头结构进行了理论分析, 并利用切比雪夫方程进行了设计。设计了 Ka 波段的 TE₀₁ 弯头, 仿真结果表明, 保留效率 95% 以上的频带范围从 32 GHz 到 45.1 GHz, 绝对带宽达到 13.1 GHz, 相对带宽达到 34%。由此可见切比雪夫方法在用于宽带 TE₀₁ 弯头设计中的有效性。然而本工作中并未设计圆到椭圆过渡器件, 该器件如果采用长轴直线过渡法设计, 器件效率和带宽都将不太高, 影响整体性能。在后续工作中, 将继续开展高效、宽带和紧凑的圆到椭圆过渡器件的设计。

参考文献:

- [1] 袁成卫, 钟辉煌, 钱宝良. 高功率微波弯曲圆波导设计[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 254-259. (YUAN Chengwei, ZHONG Huihuang, QIAN Baoliang. Design of bend circular waveguides for high-power microwave applications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(2): 254-259.)
- [2] DENISOR G G, KALYNOVA G I, SOBOLEV D I. Method for synthesis of waveguide mode converters[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 2004, 47(8): 615-620.

- [3] DOANE D I, MOELLER C P. HE₁₁ mitre bends and gaps in a circular corrugated waveguide[J]. International Journal of Electronics, 1994, 77(4): 489–509.
- [4] 叶建, 王强, 唐先发, 等. 高功率 TE₀₁ 过模斜接弯头设计[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(6): 86–89. (YE Jian, WANG Qiang, TANG Xianfa, et al. Design of high power TE₀₁ overmoded miter bend[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(6): 86–89.)
- [5] 丁艳峰, 刘庆想, 张健穹. 过模圆转弯波导的设计与实验[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 2135–2140. (DING Yanfeng, LIU Qingxiang, ZHANG Jianqiong. Design and experiment study of overmode bend circular waveguide[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(8): 2135–2140.)
- [6] VIKHAREV A A, DENISOV G G, KUZIKOV S V, et al. New TE₀₁ waveguide bends[J]. J. Infrared Milli. Terahz Waves, 2009, 30(6): 556–565.
- [7] 黄宏嘉. 微波原理[M]. 北京: 科学出版社, 1965. (HUANG Hongjia. Microwave Theory[M]. Beijing: Science Press, 1965.)

作者简介:



王 强(1986–), 男, 湖北省石首市人, 博士, 研究方向为大功率宽带毫米波传输线. email: 383703313@qq.com.

郭 凯(1990–), 男, 河南省林州市人, 在读硕士研究生, 研究方向为天线设计.

杨 春(1973–), 男, 陕西省宝鸡市人, 博士, 研究员, 研究方向为天线设计.

唐先发(1976–), 男, 四川省乐山市人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为天线设计. email: sunfree2004@gmail.com.

(上接第 200 页)

- [5] JULIER S J, UHLMAN J K, DURRANT-WHITE H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(3): 477–482.
- [6] JULIER S J, UHLMAN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3): 401–422.
- [7] 李立春, 冉崇森, 魏峰. 采用改进遗传算法解决 TDOA 定位估计中的非线性优化问题[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(8): 971–973. (LI Lichun, RAN Chongsen, WEI Feng. An enhanced genetic algorithm for the nonlinear optimization in TDOA-based location[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(8): 971–973.)
- [8] 彭冬亮, 文成林, 薛安克. 多传感器多源信息融合理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 4–6. (PENG Dongliang, WEN Chenglin, XUE Anke. Multi sensor multi information fusion theory and its application[M]. Beijing: Sciences Press, 2010: 4–6.)
- [9] 侯惠芳, 刘素华, 杨铁军. 基于遗传算法和模拟退火算法的 TDOA 定位技术[J]. 计算机工程, 2008, 32(12): 172–175. (HOU Huifang, LIU Suhua, YANG Tiejun. TDOA location technique based on genetic algorithm and simulated annealing algorithm[J]. Computer Engineering, 2008, 32(12): 172–175.)
- [10] 岳嵌, 冯珊. 粗粒度并行遗传算法的计算性能分析[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(7): 107–110. (YUE Qin, FENG Shan. Performance analysis of the coarse-grained parallel genetic algorithms[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(7): 107–110.)

作者简介:



逯志宇(1989–), 男, 河北省秦皇岛市人, 硕士, 主要研究方向为信号分析与处理. email: zhiyulu1030@126.com.

王大鸣(1972–), 男, 郑州市人, 博士, 教授, 主要研究方向为移动通信.

王建辉(1983–), 男, 郑州市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为信号分析与处理.

王 跃(1986–), 男, 郑州市人, 硕士, 主要研究方向为无线通信与定位.