

---

文章编号：2095-4980(2014)03-0416-04

## 一种基于过模波导的高功率 8 mm 微波传输系统

童帆, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要：**过模波导是一种突破传统单模波导功率容量的波导结构。在高功率微波系统中，基于过模波导的模式过渡器和模式滤波器都是传输系统的关键器件。本文讨论了这些器件的理论设计依据，并设计了一套包括过模波导、模式过渡器、模式滤波器的 8 mm 高功率过模波导传输系统，其中，模式滤波器分别通过膜片和窄缝滤除高次模。并用 CST Microwave Studio 建模并仿真。仿真结果表明，该过模传输系统能够有效抑制高次模带来的谐振效应，提高微波的传输效率。

**关键词：**高功率微波；过模波导；模式过渡器；模式滤波器

中图分类号：TN814

文献标识码：A

doi: 10.11805/TKYDA201403.0416

## Design of a high-power 8 mm microwave transmission system based on over-moded waveguide

TONG Fan, LIU Chang-jun

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

**Abstract:** An over-moded waveguide is a kind of waveguide structure which breaks through the power capacity limitation of a traditional single mode waveguide. Mode transitions and mode filters based on over-moded waveguide are key components in a high power microwave system. The design theory of these components is discussed, and a set of 8 mm high-power over-moded microwave power transmission system is designed, including over-moded waveguides, a mode transition, and a mode filter. The mode filter can remove high order modes by sheet and slots. Modeling and simulation are performed by using CST Microwave Studio. The simulation results show that the over-moded transmission system suppresses the resonance of high order modes efficiently and therefore enhances the microwave power transmission efficiency.

**Key words:** high-power microwave; over-moded waveguide; mode transition; mode filter

在传统标准矩形波导设计中，为保证  $TE_{10}$  模式微波的单模传输，波导横截面的尺寸受到限制。矩形波导的峰值微波功率容量一般仅与横截面尺寸有关，例如 BJ-320(内截面尺寸 7.112 mm×3.556 mm)波导的理论峰值功率容量达到 112 kW<sup>[1]</sup>。在高功率微波连续波传输系统中，波导的平均功率容量是需要首要考虑的因素。矩形波导的平均功率容量，除受本身的尺寸影响外，还与波导损耗、环境温度及波导管壁允许的最高温度有关，平均功率容量往往迅速下降，例如 BJ-320 波导的平均微波功率容量仅为 0.99 kW。在高功率微波连续波系统中，迫切需要增加波导传输微波连续波的功率容量。过模波导指波导的横截面尺寸超过了传统单模传输的标准波导，是一种突破传统单模波导功率容量的波导结构，比利用真空波导或充惰性气体波导提高功率容量的方式更具有优越性。国外早在 20 世纪 60 年代就开展了一系列关于过模波导的研究，近年来，又研制出了许多基于过模波导的微波器件，如弯波导、定向耦合器、功分器、移相器等，并将用在下一代线性对撞机(Next Linear Collider, NLC)中<sup>[2]</sup>。相比之下，国内关于过模波导的研究还停留在一些基础性问题上，如过模波导的陷模谐振和模式纯度。在毫米波段，由于大功率回旋管等信号源的实现，过模波导作为一种高功率低损耗的传输线在微波能工业应用<sup>[3]</sup>中具有更加广泛的应用前景。然而过模波导的应用存在 2 个主要问题：a) 即使在高功率微波系统中，微波仍需从标准波导输入和通过标准波导输出到负载<sup>[4]</sup>；b) 由于过模波导内存在高次模式，可能出现谐

---

收稿日期：2013-12-22；修回日期：2014-02-28

基金项目：国家 973 计划资助项目(2013CB328902)；国家自然科学基金资助项目(61271074)；教育部新世纪人才基金资助项目(NCET-12-0383)

振现象，影响微波传输。针对这些问题，本文采用 BJ-100(内截面尺寸为 22.86 mm×10.16 mm)，作为过模矩形波导，设计了一套包括过模波导、模式过渡器、模式滤波器在内的 8 mm 过模传输系统。

## 1 模式过渡器的设计

波导模式过渡器是连接标准波导和过模波导的一类不规则过渡波导。通过横截面随纵向坐标连续变化，实现微波功率在标准矩形波导和过模波导之间的低耦合传输。从耦合波方程出发，设计低杂模的模式过渡器<sup>[5]</sup>。假设过渡器轮廓变化缓慢，在整个过渡器内所需考虑的模式都在截止频率以上，波导过渡器的设计简化为求解合适的耦合分布函数  $K(\xi)$ 。选择耦合分布函数  $K(\xi)$ ，满足在工作频率处由所要模式到主要杂模总的模式变换  $|W|$  小于一个规定的最大值  $W_{\max}$ 。模式过渡器的主要设计过程如下<sup>[6]</sup>：

计算耦合分布函数  $K(\xi)$  的甄别值  $D$ ：

$$D = \frac{W_{\max}}{\frac{2x_m x_n}{x_m^2 - x_n^2} \ln(\frac{a_2}{a_1})} \quad (1)$$

以最小的  $\theta$  值确定一个耦合分布函数  $K(\xi)$ ，使过渡器长度最短：

$$\int_{-\theta}^{\theta} K(\xi) \exp(-j\eta\xi) d\xi \leq D \quad (2)$$

计算过渡器轮廓曲线  $a(\xi)$  和整个过渡器长度  $L$ ：

$$\ln(\frac{a(\xi)}{a_1}) = \frac{x_m^2 - x_n^2}{2x_m x_n} C \int_{-\theta}^{\xi} K(\xi') d\xi' \quad (3)$$

$$L = \frac{2k_0}{x_m^2 - x_n^2} a_1^2 \int_{-\theta}^{\theta} (a_2/a_1)^{2 \int_{-\xi}^{\xi} k d\xi'} d\xi \quad (4)$$

对于给定的过渡器轮廓曲线，矩形波导渐变过渡耦合因子由式(4)推出：

$$C_{mn} = -\frac{1}{a} \frac{da}{dz} 2 \frac{x_m x_n}{x_m^2 - x_n^2} \quad (5)$$

式(1)~(5)中： $a_1$  和  $a_2$  分别为标准矩形波导竖边宽度和过模矩形波导的横边宽度； $x_n = \frac{n\pi}{2}$ ,  $x_m = \frac{m\pi}{2}$  分别代表主模和主要杂模在波导横截面横边上的半驻波数。

本文设计了一款具有较低模式激励及耦合的过渡器，见图 1，长度  $L=70$  mm，E 面轮廓由正弦曲线决定：

$$a(z) = a_1 + (a_2 - a_1) \sin^3(\frac{\pi z}{2L}) \quad (6)$$

式中： $a_1 = 3.556$  mm； $a_2 = 22.86$  mm。

## 2 模式滤波器的设计

过模传输系统通常会在发送端和接收端通过模式过渡器与标准波导连接，为在过渡器中传播的高次模构成了一段封闭区域。当这段封闭区域的电长度为某一高次模半波长的整数倍时，就会在这段封闭区域中发生陷模谐振。当高次模谐振时，会从主模吸取能量增加插损，降低过模传输系统的功率容量，甚至引起过压击穿。因此，需要使用模式滤波器抑制高次模的激励和传播。

裂缝式模式滤波器<sup>[7]</sup>利用在波导壁上开缝切割高次模的壁电流，影响模式的传输特性，适用于高功率微波过模波导传输系统。根据场结构和壁电流分布特点，可以将除主模  $TE_{10}$  以外的高次模分为 3 类，分别为  $TE_{m0}(m=2k, k \in \mathbb{N}^*)$ ,  $TE_{m0}(m=2k+1, k \in \mathbb{N}^*)$ ,  $TM_{mn}$ ,  $TM_{mm}(m \neq 0, n \neq 0)$ 。针对每类特点，设计相应结构加以滤除。

1)  $TE_{m0}(m=2k, k \in \mathbb{N}^*)$  模：在波导横壁中心处横向电流最大，而主模  $TE_{10}$  在横壁中心处横向电流为零，因此，在过模矩形波导横壁中心线上开一条纵向窄缝，滤除  $TE_{m0}(m=2k, k \in \mathbb{N}^*)$  模。

2)  $TE_{m0}(m=2k+1, k \in \mathbb{N}^*)$  模，主要是  $TE_{30}$  模会对主模造成较大影响。对于严重过模的过模波导， $TE_{30}$  模的壁电流分布与  $TE_{10}$  模类似，无法通过开窄缝或者插入膜片的方式滤除。模式定向耦合<sup>[8]</sup>是滤除该模式的一种行

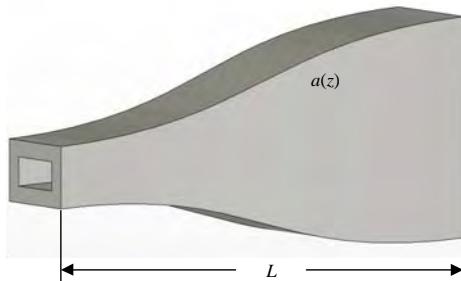


Fig.1 Structure of the mode transition  
图 1 模式过渡器结构

有效的方法，但会增加过模波导设计加工的复杂度，因此，通常选择横边宽度  $a \leq 1.5\lambda$  的过模矩形波导，限制该类高次模式的出现。

3)  $TE_{mn}$  和  $TM_{mn}$  ( $m \neq 0, n \neq 0$ ) 模：在波导竖壁上都有纵向壁电流，而主模  $TE_{10}$  在竖壁上只有横向电流。由于  $TE_{mn}$ ,  $TM_{mn}$  是简并模式存在，竖壁上的横向窄缝无法完全达到滤除效果，需要在横向裂缝前加入一块平行于波导横壁的纵向导体膜片。纵向膜片对主模  $TE_{10}$  没有影响，而  $TE_{mn}, TM_{mn}$  的场会随纵向膜片的加入而重新分布，破坏了  $TE_{mn}, TM_{mn}$  模的简并性而得到抑制。

本文设计的模式滤波器，如图 2 所示，纵向窄缝和横向窄缝宽度均为 1 mm，横向窄缝长度为 12 mm。为了尽量不影响主模  $TE_{10}$ ，横向窄隙间隔为 10 mm，共 11 条。裂缝式滤波器前由 30 mm 的纵向膜片破坏  $TE_{mn}, TM_{mn}$  模的简并性。由于选择 BJ-100 作为过模矩形波导，满足  $a \leq 1.5\lambda$  的横边限制，不需滤除  $TE_{m0}$  ( $m = 2k + 1, k \in \mathbb{N}^*$ ) 模。

### 3 过模传输系统的仿真

应用于高功率连续波传输的过模系统一般由过模波导、模式过渡器、模式滤波器共同组成，为了验证模式过渡器和模式滤波器在过模传输系统中的作用，仿真模型中的过模波导两端均通过模式过渡器连接到标准波导，使过模系统能够产生陷模谐振效应。整个过模传输系统是在 CST Microwave Studio 建模并仿真，激励模式为  $TE_{10}$  模，完整的仿真模型如图 3 所示，模式滤波器在输入端加入。

在仿真过程中，调整该过模系统参数，分析过渡器和滤模器对于过模系统的影响。图 4 显示当过模传输系统中没有加入模式滤波器时，系统出现强烈谐振。当过渡器的长度短，轮廓曲线变化过快，高次模的激发和耦合会更加严重，系统的损耗大。对模式过渡器轮廓曲线的优化虽然有助于提升过模传输系统的效率，但是能够抑制高次模谐振的模式滤波器对整个传输系统的性能提升起到了关键作用。当过渡器设计优化且加入模式滤波器后， $|S_{21}|$  曲线趋于平缓，系统的谐振现象基本被消除，损耗大幅度降低，使该过模传输系统能够达到实际应用中对功率容量和传输效率的要求。

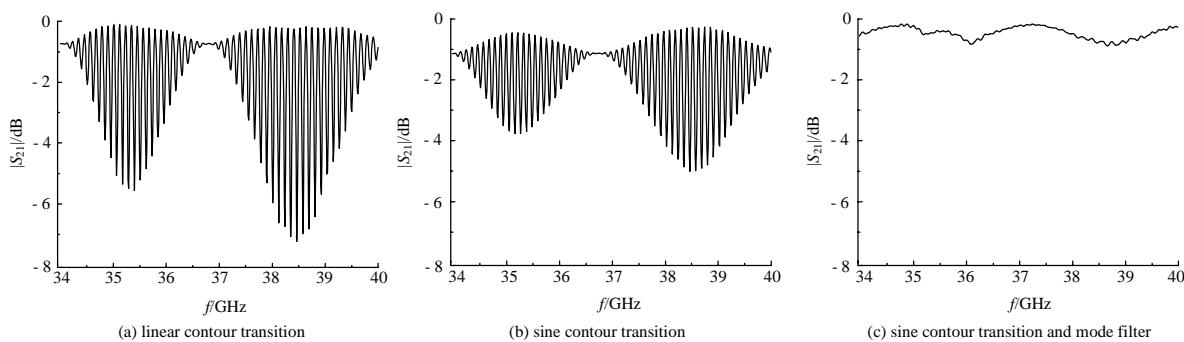


Fig.4 Simulated results for over-moded waveguide transmission system  
图 4 过模传输系统仿真结果

### 4 结论

讨论基于过模波导的大功率微波传输系统设计方法，设计了一套包括过模波导、模式过渡器和模式滤波器



Fig.2 Structure of the mode filter  
图 2 模式滤波器结构

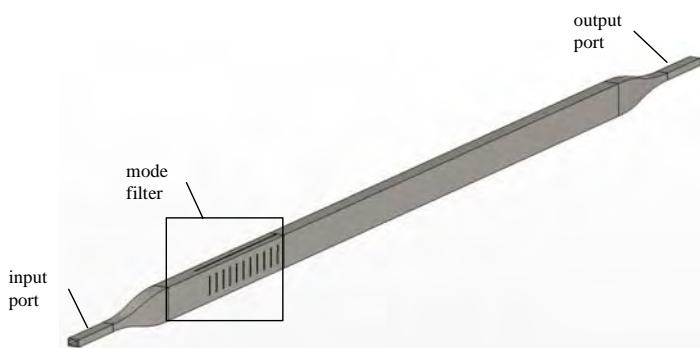


Fig.3 Over-moded transmission system  
图 3 过模传输系统模型

的8 mm过模传输系统。仿真验证，设计的模式过渡器和模式滤波器能够有效地减少高次模的激发，抑制高次模的谐振，提高了高功率微波过模传输系统的性能，使该系统能够用于高功率连续波微波传输，为基于过模波导的大功率合成的实现提供了可能。

#### 致谢

本文得到国家973计划(2013CB328902)、国家自然科学基金国家自然科学基金(61271074)和教育部新世纪人才项目(NCET-12-0383)的资助。

#### 参考文献：

- [1] 钱耀坤. 过模矩形波导用作低损耗高功率毫米波传输线[J]. 传输线技术, 1981(5):7-16. (QIAN Yao-kun. Overmoded Rectangular Waveguide used as a Low Loss and High Power Millimeter-wave Transmission Line[J]. Transmission Lines Technology, 1981(5):7-16.)
- [2] Nantista C D,Tantawi S G. Overmoded Rectangular Waveguide Components for a Multi-moded RF Power Distribution System[C]// The 7th European Particle Accelerator Conferences (EPAC 2000). Vienna,Austria:Amazon, 2000:26-30.
- [3] 刘长军,吴昕. 微波能工业应用研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(4):451-455. (LIU Chang-jun,WU Xin. Research progress on microwave energy industrial applications[J]. Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(4):451-455.)
- [4] Nantista C D. Overmoded Waveguide Components for High-Power RF[R]. Menlo Park,CA(US):Stanford Linear Accelerator Center, 2003.
- [5] 王依群,牛新建,刘迎辉,等. 8 mm波段圆波导TE11模式过渡器的设计[J]. 现代电子技术, 2011,34(18):77-79. (WANG Yi-qun,NIU Xin-jian,LIU Ying-hui,et al. Design of Circular Waveguide Tapers of TE11 Mode in 8 mm-band[J]. Modern Electronics Technique, 2011,34(18):77-79.)
- [6] Sporleder F,Unger H G. 波导渐变器过渡器和耦合器[M]. 钱耀坤,译. 北京:科学出版社, 1984:182-194. (Sporleder F, Unger H G. Waveguide tapers, transitions, and couplers[M]. Translated by QIAN Yao-kun. Beijing:Science Press, 1984: 182-194.)
- [7] 钱耀坤. 应用于过模矩形波导的裂缝式滤模器[J]. 传输线技术, 1984(1):1-5. (QIAN Yao-kun. Slotted-Filter for Over-Mode Rectangular Waveguide[J]. Transmission Lines Technology, 1984(1):1-5.)
- [8] Butterweck H. Mode Filters for Oversized Rectangular Waveguides[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1966,16(5):274-281.

#### 作者简介：



童帆(1989-),男,重庆市人,在读硕士研究生,主要研究方向电磁场与微波技术.  
email:tongfanscu@126.com.

刘长军(1973-),男,河北省邢台市人,博士,教授,主要研究方向为电磁场与微波技术理论.