

HT-7 托卡马克 ECRH 系统传输线设计*

杨 坤 方瑜德 张丽霞 杨长春 琚松青

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽, 合肥, 230031)

摘要 给出了用于 HT-7 超导托卡马克聚变实验装置的电子回旋共振加热 (ECRH) 系统大功率毫米波传输线的设计. 该传输线将回旋管输出的频率为 60GHz, 峰值功率 200kW, 脉冲宽度不大于 100ms 的毫米波传输数十米. 在传输过程中将最初的 TE_{02} 波转换为 TE_{01} 波, 再进一步转换至准线性 TE_{11} 波, 最终通过准光学天线将该毫米波以一定的角度发射到托卡马克等离子体中.

关键词 传输线, 毫米波, 电子回旋共振加热系统, 托卡马克.

DESIGN OF THE TRANSMISSION LINE FOR ECRH SYSTEM IN HT-7 TOKAMAK*

YANG Kun FANG Yu-De ZHANG Li-Xia YANG Chang-Chun JU Song-Qing

(The Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The design of the high-power millimeter-wave transmission line for Electron Cyclotron Resonance Heating (ECRH) system on the HT-7 Tokamak was given. The waves output from the gyrotron with peak power of 200kW, frequency 60GHz and pulse length around 100ms was transmitted for several tens of meters through this line. In the transmission process, the wave's mode was converted from initial TE_{02} -mode to TE_{01} and then to the semi-linear TE_{11} -mode by two-mode converters. In the end of the transmission line, the wave was coupled to the semi-optical antenna and then was launched into plasmas along a special angle.

Key words transmission line, millimeter waves, ECRH system, Tokamak.

引言

托卡马克电子回旋共振加热 (ECRH) 需使用功率很大 (百千瓦 - 兆瓦级) 的毫米波. 要满足如此大功率毫米波的传输, 不可避免地要使用过模波导传输系统. 同时为了满足托卡马克加热实验对控制波的极化方向和发射角度的需要, 微波必须以单一、低损耗的模式传播, 并最终成为线性或准线性偏振波. 除上述一般考虑之外, 还需考虑到波导尺寸的特殊选择和传输模式的选择与托卡马克系统需要的关系. 如整个传输系统的长度, 弯波导数量及发射部分的尺寸限制等.

1 系统与器件

HT-7 超导托卡马克装置的 ECRH 系统框图如图 1 所示, 该系统用一只美国 VARIAN 公司生产的 VGE-8060A 回旋管, 产生频率为 60GHz 的 TE_{02} 波,

输出微波功率为 200kW, 脉冲宽度可达 100ms. 由于 TE_{02} 波的辐射分布特性较差, 并且具有相对高的波导损失, 因此不宜于长距离波导传输. 但 TE_{02} 波易转换成 TE_{01} 波, TE_{01} 波不但波导损失较小而且易于进一步转成线偏振波. 因此在传输线上, 我们先用一个低损失的模式转换器将 TE_{02} 波转换成 TE_{01} 波.

由于滤波器的内径与模式转换器的内径不同, 因此需要在两者之间加一段过渡波导. 托卡马克上的 ECRH 实验需要微波模式为线极化的高斯模. 为了满足此需要, 我们在传输线的末端用另一个模式转换器将圆偏振的 TE_{01} 波转换成准线偏振的 TE_{11} 波, 并最终通过准光学的高斯天线将波发射到等离子体中去^[1]. 表 1 按照传输顺序给出了从回旋管到准光学天线之间各个器件的参数以及传输的模式. 本传输线所采用的 TE_{01} 和 TE_{02} 器件和槽纹 (弯) 波导等均由美国通用原子能公司提供.

由图 1 可见, 从回旋管输出的微波先经过打火

检测器.它是一段内径与回旋管输出窗口相同的圆(铜)波导($\Phi 6.35\text{cm}$),其内壁上一系列的小孔,通过光敏元件来探测回旋管窗口附近区域是否发生打火击穿^[2].打火检测器之后是电阻壁式模式过滤器,因为回旋管输出的微波主要是 TE_{02} 波,但也有其它模式的波存在.为了防止波导接头处打火,要滤掉 TM 型及其它 TE 型高次杂波.滤模器是一段中空柱状波导,内径为 6.35cm ,长度为 15cm ,具有较低的电导率($0.25\Omega/\text{cm}$).这段滤模器会损耗约 2% 的 TE_{02} 波,但是,它滤掉了几乎 17% 的杂波(包括 TE_{06} 和 TM_{11} 波),减少了反射到回旋管窗口处的功率,起到了稳定回旋管工作状态、保护回旋管的作用.

为连接内径不同的两段圆波导,我们采用 70cm 长的连续渐变式过渡波导,使波导内径由 6.35cm 过渡到 2.78cm .这段过渡波导的微波损耗仅为 0.1% 左右,可以忽略不计.而该过渡波导可能激发的杂波小于 1%.

出于测量微波功率的需要,在过渡波导后连接一个 TE_{02} 模双向定向耦合器.该耦合器的耦合度为 40dB ,隔离度约 50dB ,长度为 20cm .耦合器可将入射波和反射波信号分别送出,再经过衰减器和检波器输入计算机进行数据处理.

表 1 HT-7 ECRH 传输线系统主要部件
Table 1 Major components in HT-7 ECRH transmission system

器件	内径(cm)	模式
回旋管(输出窗口)	6.35	TE_{02}
打火监测器,滤波器	6.35	TE_{02}
过渡波导	6.35—2.78	TE_{02}
定向耦合器	2.78	TE_{02}
模式转换器	2.78	$\text{TE}_{02}-\text{TE}_{01}$
WC109 波导	2.78	TE_{01}
90°槽纹弯波导	2.78	TE_{01}
定向耦合器	2.78	TE_{01}
隔直器	2.78	TE_{01}
过渡波导	2.78—3.81	TE_{01}
陶瓷窗	3.81	TE_{01}
过渡波导	3.81—1.91	TE_{01}
模式转换器	1.91	$\text{TE}_{01}-\text{TE}_{11}$
准光学天线	—	准光学模

TE_{02} 波的传输损耗较大,必须要将其转换成损耗小的模式.对于过模圆波导系统, TE_{01} 波正是理想的选择.在整个传输线系统中,模式转换器是决定传输系统特性的极其重要的元件.对其基本要求是:可

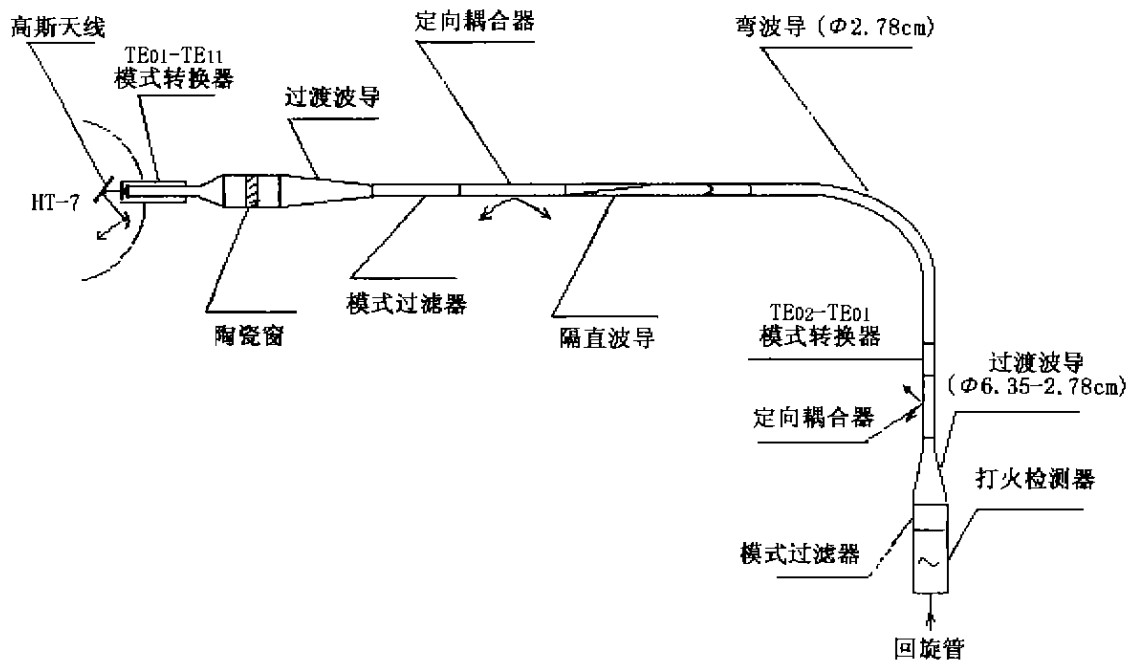


图 1 HT-7 上的 ECRH 传输线

Fig. 1 The transmission line for ECRH in HT-7

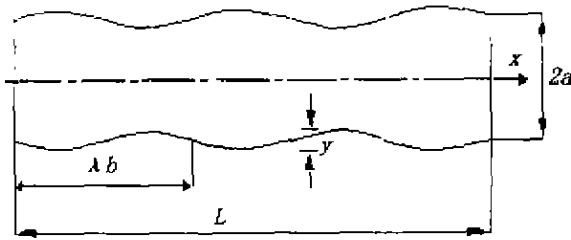


图2 TE₀₂-TE₀₁模式转换器,

L 约为 78cm,波导直径约为 2.78cm

Fig. 2 TE₀₂-TE₀₁ mode converter, L is about 78cm, the diameter of waveguide is about 2.78cm

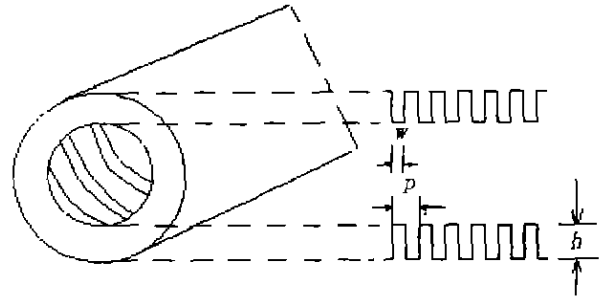


图4 槽纹圆波导示意图

Fig. 4 Schematic of corrugated circular waveguide

传输 100kW 级的微波,反射小,转换效率高,结构简单。早在本世纪 50 年代,H. G. Unger 经理论分析断言^[3]:TE₀₂波通过一个直径周期性变化的波导可能激发较大的 TE₀₁波,当周期选为某些特殊值时,TE₀₂模会连续不断地耦合到 TE₀₁模中。腊肠型的 TE₀₂-TE₀₁模式转换器正是基于这一原理。我们使用的 TE₀₂-TE₀₁模式转换器(见图 2)是将一段圆波导的直径作小幅度周期性的调整,当周期和幅度的选择适当后,经数周期即可将 TE₀₂波转化成为 TE₀₁波。因它的内径仅依过模波导直径作小幅度的变化,故它不会引起击穿问题和造成大的反射。它的转换效率可高达 99%。将圆极化的 TE₀₁波进一步转换为线极化的 TE₁₁波,可采用类似的扰动波导(见图 3),其转化效率在 95%左右。

TE₀₁波的 90°弯波导采用过模的槽纹圆波导(见图 4)。TE₀₁波在通常的弯波导中传播很难高效抑制模式转换。使用槽纹弯波导的目的是打破 TE_{0N}波和 TM_{1N}波之间的简并,同时也给整个系统带来机械方面的灵活性。但是,不幸的是槽纹的引入使得 TM₁₁波的相位常数与 TE₀₁的相位常数非常接近,因此必须设法破坏 TE₀₁-TM₁₁之间的简并。这就使正确选择槽纹波导的槽纹参数显得非常关键。

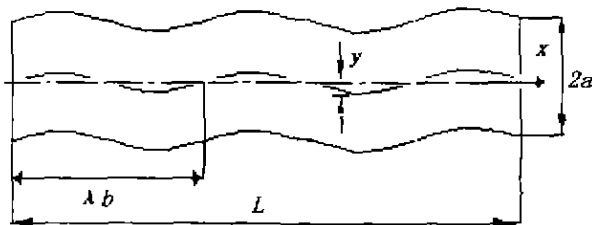


图3 TE₀₁-TE₁₁模式转换器,

L 约为 78cm,波导直径约为 1.91cm

Fig. 3 TE₀₁-TE₁₁ mode converter, L is about 78cm, the diameter of waveguide is about 1.91cm

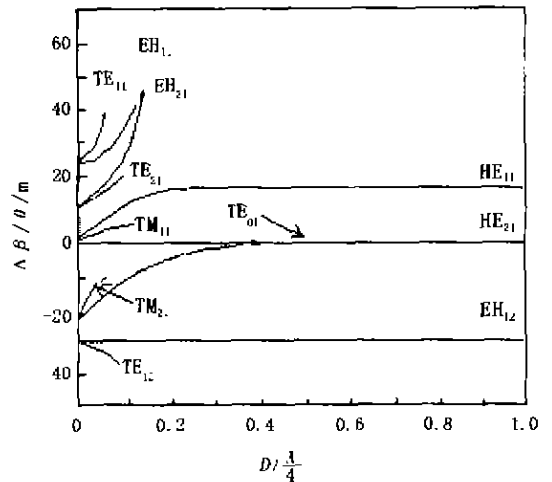


图5 槽纹波导的深度与各模式相移之间的关系

Fig. 5 Relations between corrugated waveguide depth and phase shift of different modes

方面,槽纹的深度必须足够大到 TE₀₁波不与 TM₁₁波发生简并,同时又要相对小,以避免与 HE₂₁波发生间接的耦合^[1](见图 5)。采用的槽纹弯波导参数

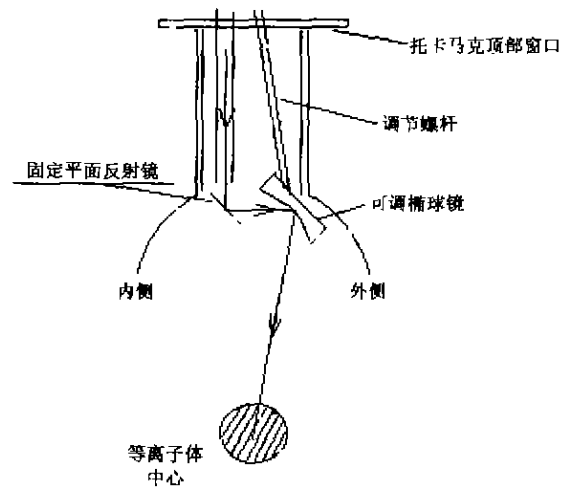


图6 HT-7 装置 ECRH 系统的天线

Fig. 6 Antenna of ECRH system in HT-7 tokamak

为:槽纹深度 0.625mm ,周期 1.5mm ,槽纹宽度略小于该周期的一半.弯波导弧长为 210cm 左右.该 90° 槽纹弯波导传输 TE_{01} 波的损耗小于 3% .在传输系统的末端是天线(见图6).天线采用准光学反射镜系统^[4],该系统由两面反射镜组成:一面是位置固定的平面镜,它的作用是将波导发射出来的 TE_{11} 波以一定的角度向另一面反射镜反射;另一面反射镜是镜面角度可以调节的椭球镜,它的作用是将由平面镜反射来的微波束转换为自由空间高斯束并以设定的角度发射进入等离子体.适当选择波导发射口和天线系统的相对位置即可实现高斯束向等离子体柱的某个特定区域发射.椭球镜是天线系统中最关键的器件.其设计基本原理是:椭球镜有两个几何焦点,我们使其中一个焦点落在平面镜的中心,而将另一个焦点放在等离子体柱的中心,以保证微波可聚束到该区域.

总的来说,从回旋管到天线的整个传输线系统,总长度不大于 40 米,理论估计其微波功率总传输损耗不大于 15% .

2 结语

本文叙述了HT-7托卡马克装置ECRH传输和发射系统设计的主要原理及主要部件.理论分析和计算表明,该系统可以低损耗地传输频率 60GHz 、峰值功率 200KW 、脉宽 100ms 的大功率毫米波,并使其以特定的模式发射到托卡马克等离子体中.至于它在实际使用中的性能,还有待在今后的实验中验证.

REFERENCES

- [1] Deane J L. Overmode waveguide components for the ECH on PDX. *Proc. 10th IEEE Symposium on Problems in Fusion Engineering*, Princeton, N.J., 1983, 1459—1464
- [2] Prater R, Moeller C P, Lin S H. Components and transmission systems for ECH. *Proc. 4th International Symposium on Heating in Toroidal Plasmas*, Roma, 1984, 2: 1454—1460
- [3] Unger H G. Circular electric wave transmission through serpentine bends. *B. S. T. J.*, 1957, **36**:1279—1291
- [4] Ikead Y. Conceptual design of ECH system for JT-60SU. *Proc. 17th IEEE/NPSS Symposium Fusion Engineering*, San Diego, 1997, **1**:437—440