

用于托卡马克低混杂波电流驱动的多结波导阵天线

胡玉民 赵海波 段修明 张晋雷

(清华大学工程物理系, 北京, 100084)

多结波导阵天线是为在中国科学院等离子体物理研究所的 HT-6B、核工业西南物理研究院的 HL-1 和 HL-1M 托卡马克(Tokamak)装置上进行低混杂波电流驱动(LHCD)实验用的, 已取得了一系列有价值的物理数据。文章着重介绍这类天线的物理和结构特性以及制造中的技术难点, 并简要介绍用 1×8 和 2×12 路多结阵天线分别在 HT-6B、HL-1M 托卡马克上进行的 LHCD 的实验结果。

关键词 托卡马克 多结波导阵天线 低混杂波电流驱动 $\frac{1}{2}\lambda_e$ 波导窗 微束氩弧焊

中图分类号 TL 612

托卡马克(Tokamak)核聚变研究装置的准稳态运行是实现核聚变反应堆发电的先决条件之一。低混杂波电流驱动(LHCD)在目前被认为是实现托卡马克准稳态工作的很有希望的一种手段。所谓 LHCD 是利用相位有一定分布的扁波导阵列组成的天线在感应放电结束后向托卡马克内被约束的等离子体中注入频率相当于等离子体低混杂波频率范围的微波功率, 主要通过微波与等离子体中的电子交换能量来维持等离子体电流; 或在感应放电过程中注入微波功率进一步驱升等离子体电流。低混杂波频率范围在现阶段的托卡马克装置中为 $0.5\text{—}5\text{ GHz}^{[1]}$ 。等离子体能维持的时间相当于注入微波功率的脉冲持续时间, 这个时间可以到几百 ms 甚至 s 量级或更长, 而不是感应驱动所产生的等离子体持续时间仅为 ms 量级。在这段较长的时间间隔内, 如果等离子体的温度和密度合适就可以产生聚变核反应。

1 波导阵天线的结构

用于 LHCD 的波导阵天线示于图 1。天线的发射端由一行或几行相位有一定分布而功率相等的扁波导阵组成。图 1 所示称为 2×4 天线阵。为了使结构紧凑, 目前一般采用多结波导阵天线, 即将矩形非标波导 E-面均匀分割成几路扁波导, 再通过收缩扁波导宽边尺寸以改变各路的相位。实验研究证明^[2]收缩波导宽边移相的方法是正确的, 理论设计值与实验测量值偏差不超过 $\pm 2^\circ$; 多结波导阵各路的功率分配基本上也是均匀的。这样的天线集功率分配与相移于

胡玉民: 男, 64 岁, 加速器物理与技术专业, 教授

收稿日期: 1997-04-25

一体,与各路用独立移相器的常规天线阵相比,馈线系统的结构因少了许多功率分配器和移相器变得很紧凑,工程量也小了许多,当然费用也可相应地大大减少。一般选用相邻两路间相位差为 90° ;这样天线还会呈现出良好的反射自调节特性,即使天线失配,天线对微波源的反射系数也不大,这对微波传输系统的设计以及提高微波功率的传输效率是很有利的。天线的物理性能与天线尺寸和等离子体参数等有关,这方面的优化设计是根据Brambilla理论来进行的。优化设计的原则是在特定的装置条件下获得尽可能窄且单向性好的发射功率谱,因为这有利于提高LHCD的效率。

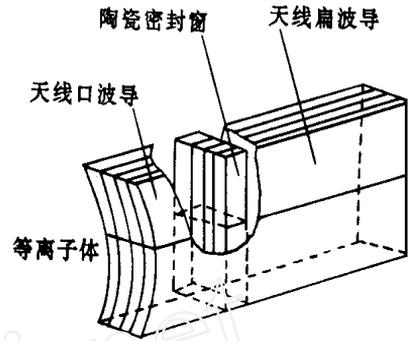


图1 由扁波导阵列组成的天线示意图

Fig 1 Schematic diagram of the waveguide array antenna

2 建造多结波导阵天线的技术难点

在1988—1995年间先后为中国科学院等离子体物理研究所HT-6B及核工业西南物理研究院HL-1和HL-1M托卡马克核聚变物理研究装置设计建造了3套多结波导阵天线,根据物理设计要求,其阵列数分别为 1×8 、 2×8 和 2×12 ,其中 2×12 与 2×8 阵列天线结构是相似的。图2是 1×8 和 2×8 阵列天线的实物照片。现分别介绍如下。

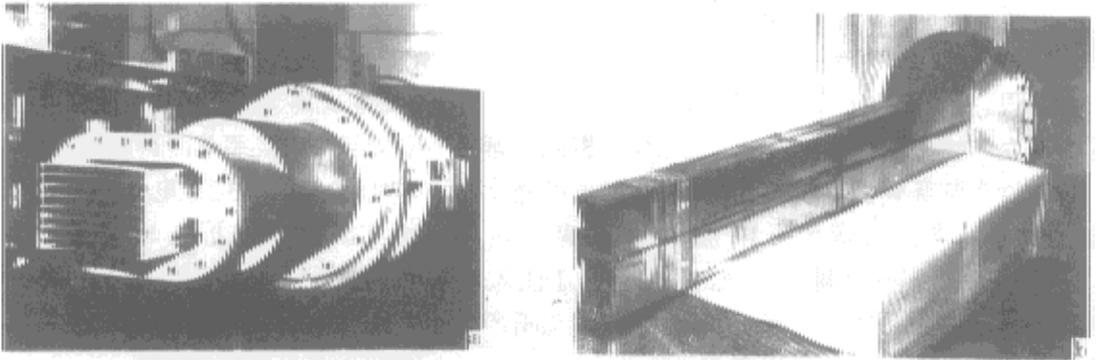


图2 多结波导阵天线实物照片

Fig 2 The photographs of the multijunction waveguide array antenna

(a)—— 1×8 路; (b)—— 2×8 路

2.1 1×8 阵列天线

图3是该天线的示意图。微波功率从BJ-22标准波导进入阻抗变换段,在这段中先由波导E-面将功率2等分,而后在相移部份再将其8等分,这样组成相邻相位差为 90° 的 1×8 路的天线阵,天线总长1025 mm,子波导截面为 $109.2 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。天线用1Cr18Ni9Ti不锈钢板条拼焊而成。天线本身处在真空部分,因此它的焊接无真空密封要求。为了减小各子波导和天线整体的变形,采用在大型真空炉中的钎焊工艺。因相邻两路具有公共宽面,所以焊接流程是一

路一路叠加上去的。该天线装在HT-6B托卡马克装置上,由磁控管馈入天线的微波脉冲功率为100 kW、脉宽为100 ms、频率为2450 MHz。

2.2 2×8阵列天线

图4是其略图。由速调管馈入天线的微波功率设计值为500 kW,脉宽从几百ms到500 ms,工作频率为2450 MHz,要求天线内承受功率密度约为5 kW/cm²,天线子波导截面为109.2 mm×7.5 mm,天线系统总长1696 mm。其中每4个子波导组成1只子多结阵,子阵内相邻二路间相位差为90°。由4个子多结阵组成2×8路多结阵天线。整个天线系统由天线端口、矩形波导窗、移相段和阻抗变换段4部分组成。

微波功率从速调管输出后在BJ-22标准波导段经1只3 dB功分器分为2路,再经过2只3 dB功分器分成4路,然后分别通过4路阻抗变换段进入4个天线子多结阵。因每个天线子多结阵是由4路相移子波导组成,所以它同时也起着4等分由阻抗变换器送来的功率,这样4个子波导阵就实现了把速调管输出功率16等分的要求。天线端口做成与等离子体圆截面相配的弧形以防止等离子体轰击,其曲率半径为230 mm。为了提高天线内承受高功率密度的能力,天线内部充以1.013×10⁵ Pa以上的干燥氮气或SF₆,为此天线近等离子体端接有16只矩形陶瓷密封窗,而4路BJ-22标准波导部分接有4只陶瓷盒形窗以保证天线内部与外部真空室有良好的真空密封。

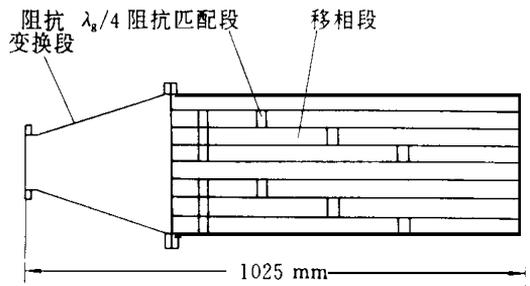


图3 1×8路多结波导阵天线略图

Fig 3 Schematic diagram of the 1×8 multijunction waveguide array antenna

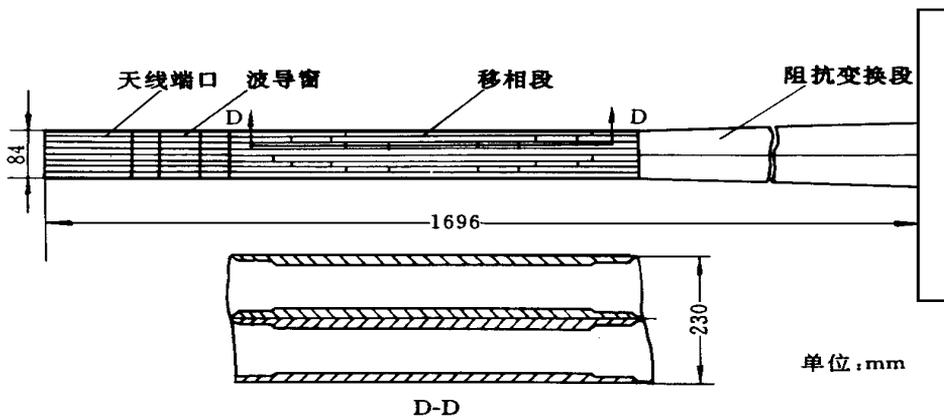


图4 2×8路多结波导阵天线略图

Fig 4 Schematic diagram of the 2×8 multijunction waveguide array antenna

建造该天线的技术难点主要是矩形陶瓷密封窗。由于天线结构的特点,采用 $\frac{1}{2}\lambda_g$ 矩形窗, λ_g 是充满陶瓷介质的截面为109.2 mm×7.5 mm扁波导中的波导波长,因为陶瓷块截面长宽

比很大,窗的焊接比圆的盒形窗困难得多,又因陶瓷的介电常数不易测准和焊接工艺对窗的微波特性的影响无法从理论上预知,窗的最后尺寸需配合模型实验来决定^[3]。本工作研制的 $\frac{1}{2}\lambda_c$ 陶瓷窗用的是95% Al_2O_3 ,窗体部分用电火花切割加工,并且设计了1套特种焊接工装,用氢炉焊接,焊接后的驻波比在2450MHz时小于1.1。其真空性能可以经受200的热冲击,漏率小于 $1.3 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$ 。另一难点是天线焊接,因为天线子波导是非标准波导,只能用单个零件焊接,又由于天线内部要充气,各部件要有耐压强度要求。本天线用不锈钢板条采用微束氩弧焊工艺制成,各部分的连接也用同样工艺,天线整体的真空漏率在 $1.3 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$ 以下。采用这一工艺的关键是焊接工装,国际上有采用电子束焊的工艺,工程量大得多。

2×8 阵列天线在HL-1托卡马克上经受了大于200 kW、100 ms微波功率的运行考验。 2×12 阵列天线安装在HL-1M托卡马克上,LHCD实验中已馈入850 kW、数百ms的微波功率。

3 LHCD 实验结果

图5(a)是HT-6B装置上1组典型的 I_{p1} 实验曲线, I_{p2} 是当驱动等离子体电流的感应场停止后在天线馈入微波功率条件下等离子体电流维持的情况。原则上等离子体电流维持时间决定于微波功率的持续时间,当然亦与等离子体密度等其他参数有关。图5(b)是在HL-1M上用 2×12 阵列天线做的1组典型曲线,从该曲线可见:微波功率不仅能维持等离子体电流,而且还能进一步驱升等离子体电流。

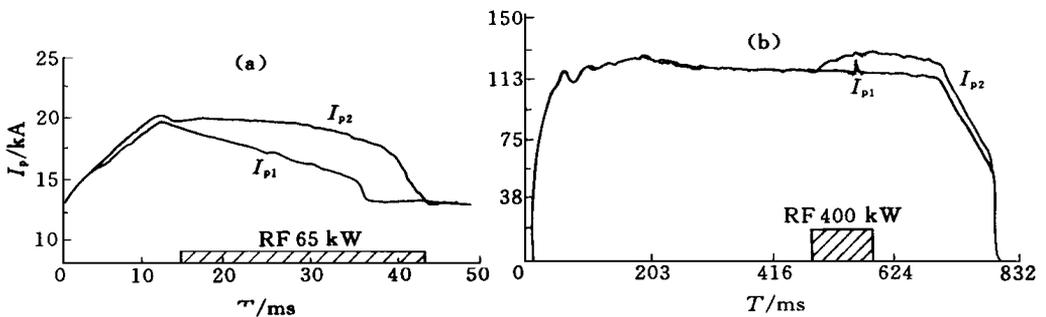


图5 多结波导阵天线在托卡马克装置上进行LHCD实验的波形图

Fig 5 The typical plasma current waveform driven by waveguide array antenna in the Tokamak

I_{p1} ——天线未注入微波功率; I_{p2} ——天线注入微波功率

(a)—— 1×8 路,在HT-6B上; (b)—— 2×12 路,在HL-1M上

((a)、(b)曲线分别由中国科学院等离子体所和核工业西南物理研究院提供)

4 结语

本工作用真空钎焊、微束氩弧焊2种工艺制作了3套LHCD用的多结波导阵天线,特别是 2×8 和 2×12 两套天线阵,因为其中包含有特种矩形陶瓷密封窗,工艺相当复杂。经实际应用证明:工艺上是安全可靠的,天线的设计和制造达到了物理设计的要求。它们已在我国托卡

马克核聚变物理研究装置上完成了一系列 LHCD 实验, 并还将继续用于 LHCD 的研究工作。

对中国科学院等离子体所刘岳修和核工业西南物理研究院李晓东、刘永 3 位研究员在 3 套天线建造过程中的有益讨论表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Fisch N.J. Theory of Current Drive in Plasmas Review of Modern Physics, 1987, 59(1): 175
- 2 赵海波. 多结波导阵天线模型的实验研究[硕士学位论文]. 北京: 清华大学工程物理系, 1989
- 3 胡玉民, 马 欣, 张荣华. 微波矩形陶瓷密封窗. 原子能科学技术, 1994, 29(5): 471.

THE MULTIJUNCTION WAVEGUIDE ARRAY ANTENNA FOR LOWER HYBRID CURRENT DRIVE IN THE TOKAMAK

Hu Yum in Zhao Haibo Duan Xiuming Zhang Jinlei

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

ABSTRACT

The paper describes the multijunction waveguide array antennas which used for lower hybrid current drive (LHCD) research in the HT-6B, HL-1 and HL-1M Tokamak facilities, they are placed in the Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences and Southwest Institute of Physics, respectively. A lot of valuable physical datum have been obtained. The physical and structural properties, and the main technical problems in manufacturing of antennas are reported in the paper. The typical LHCD experimental results are presented.

Key words Tokamak Multijunction waveguide array antenna Lower hybrid current drive (LHCD) $\frac{1}{2}\lambda_e$ microwave window Fine beam argon arc welding