

文章编号:1673-0062(2016)03-0053-04

EAST 2450 MHz LHCD 系统环行器结构设计

张立元^{1,2}, 郑 春³

(1.合肥科聚高技术有限责任公司,安徽 合肥 230031;2.合肥工业大学 机械与汽车工程学院,
安徽 合肥 230009;3.安徽三联学院 计算机工程学院,安徽 合肥 230601)

摘要:根据微波设计结果,结合 EAST 装置上 2450 MHz 低杂波电流驱动系统设计
要求,综合了材料选择、结构形式、密封要求、主动水冷和工艺方案等因素,采用整体
式设计完成低杂波系统环行器的结构设计.测试结果表明,自助研制产品已达到
国际先进水平.

关键词:EAST 装置;低杂波电流驱动系统;整体式;结构设计

中图分类号:TN621 **文献标识码:**B

Structural Design of Circulator for EAST 2450 MHz LHCD System

ZHANG Li-yuan^{1,2*}, ZHENG Chun³

(1.Hefei Kejugao Technology Co.,LTD,Hefei,Anhui 230088,China;
2.School of Mechanical and Automotive Engineering,Hefei University
of Technology,Hefei,Anhui 230009,China;3.School of Computer Engineering,
Anhui Sanlian University,Hefei,Anhui 230601,China)

Abstract: According to the result of microwave design, combining the design requirements
of the 2450 MHz lower hybrid current drive (LHCD) system on EAST Tokamak, the struc-
ture design of the circulator for LHCD system has been completed in the integral design
scheme, and the material selection, structure form, active water-cooling, sealing require-
ments, process scheme and other factors also have been considered in this design scheme,
The results of the test show that the performance of the independently developed circulator
has reached the international advanced level.

key words: EAST; lower hybrid current drive system; integral; structural design

低杂波是指在磁约束等离子体中以低混杂模 式传播的准静电波.低杂波电流驱动(LHCD,

收稿日期:2016-03-21

基金项目:国家重大科技基础设施基金资助项目(托卡马克核聚变实验装置辅助加热系统)

作者简介:张立元(1985-),男,安徽寿县人,合肥工业大学机械与汽车工程学院机械工程在职硕士研究生.主要研究
方向:机械工程与电物理结构分析、设计.

Lower Hybrid Current Drive)系统是磁约束热核聚变托卡马克装置十分重要的等离子体辅助加热方式之一,也是维持长脉冲等离子体和改善等离子体约束的重要手段之一^[1-4].

目前 EAST 装置^[5]在国家重大科技基础设施“托卡马克核聚变实验装置辅助加热系统”项目的支持下,已建成的 10 MW LHCD 系统,其中包含由初建时 2 MW^[6]升级至现在 4 MW 的 2450 MHz LHCD 系统(如图 1 所示),和 6 MW 4.6 GHz LHCD 系统.

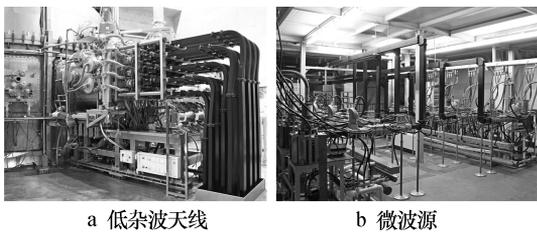


图 1 EAST 装置 2450 MHz LHCD 系统
Fig.1 2450 MHz LHCD system on EAST Tokamak

单路 LHCD 系统中(如图 2 所示),由速调管波源输出的微波功率,经各种传输器件传输至天线,进而馈入等离子体内.为保护速调管波源不受反射微波得损坏,在微波的传输路径上必须有一种高功率隔离器来隔离反射波的传输^[6].

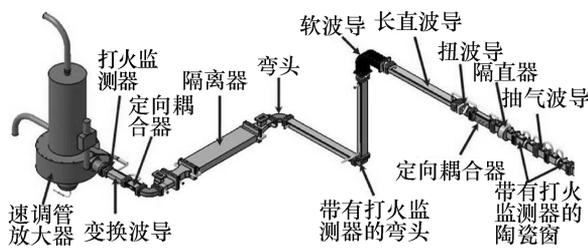


图 2 单路 LHCD 系统传输线示意图
Fig.2 The diagram of the single transmission line for LHCD system

现有传输线上使用的四端口环行器(如图 3 所示)就是一种使电磁波单向传输的器件.目前使用的高功率长脉冲环行器是由国外引进的产品,这种引进产品不仅价格昂贵、周期很长,并且在技术上也受制于人.随着国内磁约束聚变事业的发展需求,实现关键高功率微波器件自主研制生产显得愈加重要.

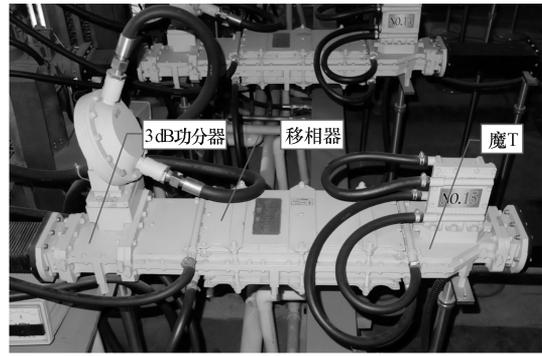


图 3 俄制高功率环行器
Fig.3 The high power circulator made in Russian

1 设计要求

四端口高功率铁氧体差相式环行器由 3 dB 功分器、移相器和魔 T 三部分组成^[7].应用于聚变托卡马克装置的高功率长脉冲微波系统中的环行器,工作时,需要承受数百千瓦乃至兆瓦的高峰值功率和脉冲时间长达数十分钟的高平均功率,随着工作频率的升高,由于期间截面尺寸的减小,其传输功率的密度亦变得更高,其插入损耗绝大部分来自移相段铁氧体片产生的微波损耗,而这些损耗全部转化为热量.如果这种热量不能很好地传出并被带走,器件的温度就会急剧升高,这不但影响器件性能及寿命,而且严重时还会影响整个微波系统的运行安全.高功率长脉冲环行器设计中,如何对其进行有效的冷却是其设计的重要研究内容.为防止微波传输击穿^[8],器件设计时还需考虑密封需求.

根据微波设计结果,移相器为双联波导,为了有效散热和缩短移相器长度,采用了 8 条铁氧体方案.图 4 为环行器微波结构图.

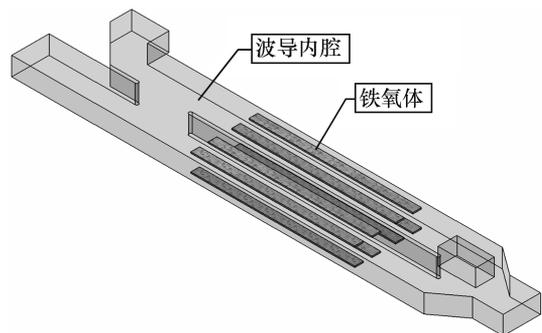


图 4 2450 MHz LHCD 系统环行器微波结构图
Fig.4 The microwave structure diagram of 2450 MHz LHCD system circulator

结合实际传输线设计要求:内部耐压不小于 0.2 MPa^[6],冷却水压力不高于 1.0 MPa。

材料选择:高功率微波器件需要良好的导电、导热性能,常用材料中一般选择无氧铜或者铝合金作为基材。分别用 TU1-R 和 6061-T6 为例,其材料性能如表 1。

表 1 无氧铜和铝合金材料性能对比表

Table 1 Comparing the material property between oxygen-free copper and aluminum alloy

	无氧铜 TU1-R	铝合金 6061-T6
抗拉强度 σ_b /MPa	195	290
导电率(293 K)/(%IACS)	101	43
热膨胀系数(293-373 K) α /($\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	17.0	23.6
电阻率(293 K)/($\text{n}\Omega \cdot \text{m}$)	17.241	40
导热系数(298 K) λ /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	391	167

可见相比于铝合金 6061-T6,无氧铜 TU1-R 拥有更加优良的导电和导热性能,结合材料加工特点,以及国内外对这种高功率长脉冲环行器材料的选择,本环行器设计时选用 TU1 为主体材料。

2 结构设计

图 2 所示的俄制环行器采用的是 3 dB 功分器、移相器和魔 T 分段分体式结构,由于装配误差将大大影响器件整体的传输效率,对于更高设计参数的环行器来说,分体式设计可能无法满足设计要求。因此,结合图 4 所示的微波结构,考虑到上下基本对称的结构,以及装配的方便性,本环行器结构设计为上下结构,将 3 dB 功分器、移相器和魔 T 进行整体式设计 and 加工,如图 5、图 6 所示。

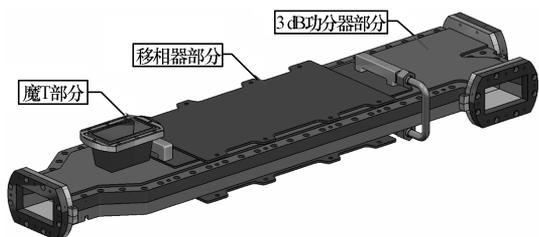


图 5 环行器总体结构图

Fig.5 The overall structural diagram of circulator

如图 6 所示,按照整体设计方案,环行器的主要零部件有:下部组件、上部组件、密封圈、磁体盖板、过渡法兰和跨接水管等,通过螺栓将各部分装

配成套。下面将依次分析每个零部件的结构。

2.1 下部组件

如图 6 所示,铁氧体条位于移相器位置,其反面设计水冷槽,为了保证散热效果,铁氧体条到水冷槽的间距不大于 2.5 mm,根据热分析结果,在冷却水供水压力 0.8~1.0 MPa 时,每条铁氧体对应的水槽截面积不小于 80 mm²即可满足散热需求,结合整体布局,设计为 12.5 mm×5 mm,足够冷却需求。为了保证环行器与相邻器件的连接强度,在三个端口位置焊接不锈钢法兰。各零件间通过焊接完成组装。

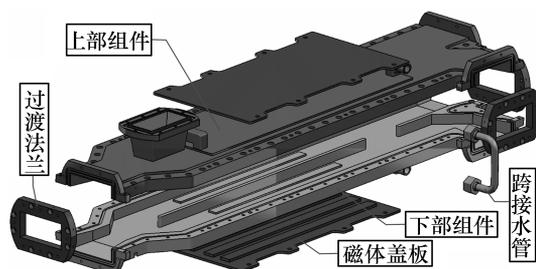


图 6 环行器总体结构分解图

Fig.6 The exploded diagram of overall structure for circulator

2.2 上部组件

如图 6,上部组件和下部组件基本相似,区别在于上部组件配有魔 T4 端口波导。主体结构上,下部组件设计了密封槽,而上部组件为与之配合的平面。

2.3 密封设计

在之前设计的 3.7 GHz 环行器(如图 7)上,上下部分间采用了金属丝密封^[9],虽然保证了上下之间的良好电接触性,但是由于上下间不能完全贴合而留下间隙,将影响微波传输效率,而且金属丝密封都是一次性的,不可重复使用,增加了成本,对操作人员的要求也较高。因此本次设计考虑保留金属丝密封设计方案,并增加非金属密封设计方案。

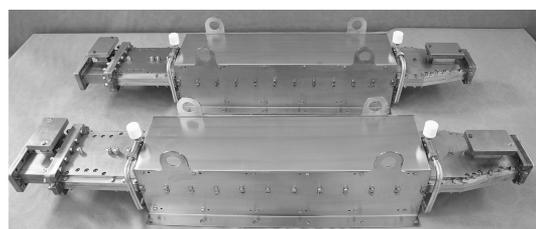


图 7 自主研制的 3.7 GHz LHCD 系统环行器

Fig.7 The independently developed 3.7 GHz LHCD system circulator

为了方便与相邻器件连接,在三组半法兰组

合法兰连接处增加了过渡法兰,这样可保证器件整体密封性。

2.4 磁体盖板

移相器部分的铁氧体片通过外加偏置磁场来调节其磁导率特性,进而调节波从移相器正向与反向传输的不同相位。根据微波设计,此处磁场由永磁体产生。为了可靠固定永磁体,设计了如图6所示的磁体盖板。

2.5 水冷管道设计

如前所述,上下组件的铁氧体对应位置都设计了冷却水槽,将水槽逐步汇流,并串联起来,可以简化外部供水管路,从而简化结构设计。水槽汇流与上下跨接设计如图6所示。

3 工艺要求

根据甘本祯《微波传输线设计手册》^[10]要求,器件内腔尺寸精度不大于 ± 0.17 mm。结合本次设计方案及微波传输对器件结构的要求,为保证上下贴合时错位量小于0.17 mm,实际零件加工时需要提高精度要求,故设计尺寸精度要求为 ± 0.08 mm。为防止器件打火,器件内壁光洁度不低于Ra 0.4,平面度不大于0.03 mm等。

因TU1材质较软,特别是整体设计时的上下主体的大平面槽型结构,加工制造时非常容易变形,本设计要求加工时在关键位置预留形状保持筋条,以确保器件结构形状稳定,并满足尺寸精度和形位公差要求。

目前2450 MHz LHCD系统环行器已完成生产制造,正在对其进行微波性能测试,如图8所示。

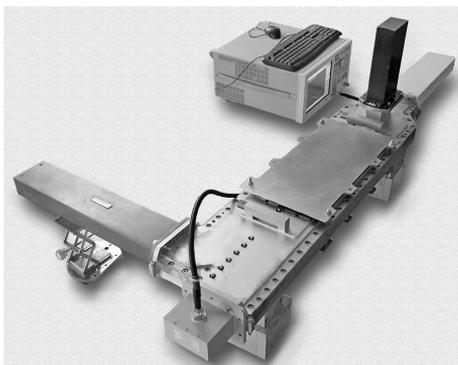


图8 测试自主研发的2450 MHz LHCD系统环行器

Fig.8 Test the independently developed
2 450 MHz LHCD system circulator

4 结论

随着国内微波器件研发技术及相关加工工艺水平的不断进步,相比于俄制分段分体式环行器,本环行器结构采用整体式设计布局,其加工、装配相对方便,且传输效率也大大提高。但对于整体结构环行器设计来说,其设计和加工的难点在于对密封和变形的控制上,本设计很好地解决了这两个技术难题,且产品在实际生产中得到了很好的验证,其完全满足整体器件的设计要求。

综合本环行器和3.7 GHz环行器的测试结果,表明自主研发的这种高功率长脉冲微波器件性能已达到国际先进水平,其研制的过程也推动了国内相关行业技术水平的发展。

参考文献:

- [1] Fisch N J. Confining a tokamak Plasma with rf-driven currents[J]. Physical Review Letters, 1978, 41(13): 873-876.
- [2] Dean S O, Callen J D, Furth H P, et al. Status and objectives of tokamak systems for fusion research[J]. Journal of Fusion Energy, 1998, 17(4): 289-337.
- [3] Kuang Guangli, Shan Jiafang, Xu Weihua, et al. A lower hybrid current drive system on the Super conductive tokamak HT-7[J]. Fusion Science and Technology, 1999, 36(2): 212-218.
- [4] 丁伯江, 匡光力, 刘岳修, 等. 低杂波电流驱动的数字模拟[J]. 物理学报, 2002, 51(11): 2557-2561.
- [5] Wu Songtao. The EAST team. an overview of the EAST project[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(5-14): 463-471.
- [6] 赵连敏, 单家方, 刘甫坤, 等. EAST 2MW/2450MHz 低杂波电流驱动系统综述[J]. 核电子学和探测技术, 2009, 29(5): 1143-1148.
- [7] 许越宁. 一种高功率铁氧体环行器结构设计[J]. 电子机械工程, 2011, 27(5): 19-21.
- [8] 贾华, 徐辉, 刘甫坤, 等. EAST 低杂波系统天馈线保护设计与实现[J]. 核聚变与等离子体物理, 2007, 27(3): 227-230.
- [9] 达道安. 真空设计手册[M]. 3版. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [10] 甘本祯. 微波传输线设计手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1981.