

CNIC-01346

SIP-0109

HL-1M 装置低杂波电流驱动系统 双管运行实验

饶 军 李晓东 刘 永 宣伟民 袁 勇
杨懋永 解丽凤

(核工业西南物理研究院, 成都, 610041)

摘 要

在 HL-1M 装置上,成功地完成了低杂波电流驱动的双管并联运行实验,进一步提高了各项工程技术指标。其中主要指标是:脉冲宽度 1000 ms (单管),输出微波功率 850 kW (双管)。在双管运行中主要解决了以下问题:利用低真空和充气措施解决打火、拉弧现象,保证微波功率的传输,系统传输效率达到 80% 以上;利用天线的移相结构和重新组装传输系统,满足实验的相位要求,耦合效率达到 85%。在开展物理实验的同时,对双管并联运行的工程问题进行了有益的探索。

Lower Hybrid Current Drive System Operated with Two Klystrons in the HL-1M Tokamak

(In Chinese)

RAO Jun LI Xiaodong LIU Yong XUAN Weimin
YUAN Yong YANG Maoyong XIE Lifeng
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

ABSTRACT

The lower hybrid current drive system on HL-1M was improved significantly in the past two years. The output power for one klystron was increased to 500 kW from previous 200 kW. In order to carry out LHCD experiments with higher RF power, the operation mode of the two klystrons in parallel was used. Some problems were solved, which involved frequency, balance of powers and phase control. With this operation mode, maximum output power of 850 kW was realized, and a series of experiment results were obtained.

引言

在 HL-1M 装置上,低杂波电流驱动 (LHCD) 工程系统 (简称低杂波系统) 经过数年来的不断完善和改进,在系统参数指标和性能方面得到了较大的提高^[1],有力地保证了 HL-1M 上 LHCD 物理实验的开展并取得一系列的研究成果。低杂波工程系统中自行研制的速调管单管输出微波功率达到 500 kW。为了在更高参数下开展相关的物理实验研究,我们以国际合作的形式,引进了意大利三支速调管。关于 1995 年在系统的各个子系统中全面开展了双管运行的准备工作,经过一年多的努力,1996 年在 HL-1M 装置上第一次进行了速调管双管运行的电流驱动实验,获得了许多颇具特色的实验结果^[2],首次达到 850 kW 的工程指标。本文就双管运行中低杂波工程系统的结构组成,需要解决的工程问题和调试实验结果作了简要介绍。

1 低杂波双管运行工程安排

提高微波输出功率是拓宽 LHCD 物理研究领域的需要,由于受作为微波源的速调管输出功率之限制,为提高总功率就必须采用双管或多管并联运行的方式,为此安排了低杂波双管实验系统。图 1 是该系统简明的结构示意图,主要由离破碎激励源、速调管、高压调制电源、辅助电源、传输线、天线和冷却等部分组成。另外,还包括微波功率测量、系统控制、过流保护等多项工作。基于多年的单管运行经验以及对系统性能的基本了解,为实现双管运行,我们主要解决了以下问题。

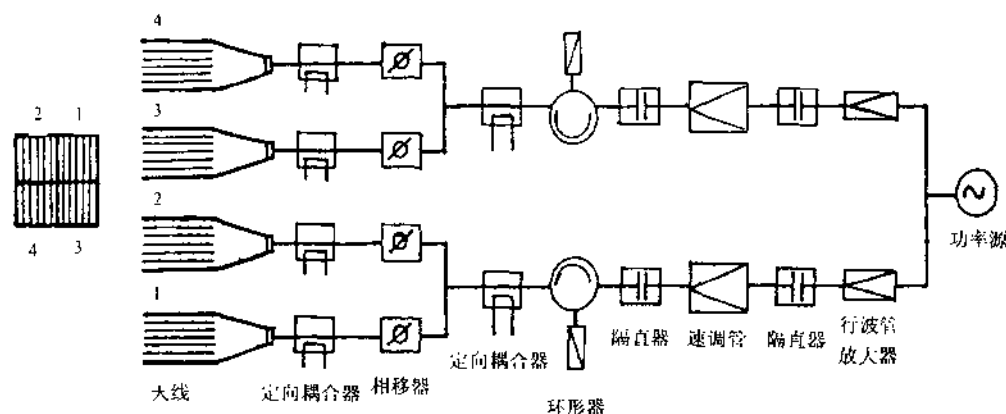


图 1 HL-1M 低混杂波电流驱动 (LHCD) 微波系统图

1.1 耦合天线

在 HL-1M 装置上使用的微波耦合天线为 2×12 多结天线阵^[3],四个微波输入口为田字型布局,上下两排相对独立而组成两组 12 列天线阵,两组天线阵分别由不同的速调管馈能,基本保证环向波谱不受双管相差的影响,最大限度地降低了系统对相差方面的要求,不仅保证了单管实验的开展,而且在双管乃至多管并联实验中,也从相位方面满足了实验要

求;同时,为开展多种组合性实验提供了可能性。天线采用陶瓷密封措施,构成独立的真空系统,充入气体,可以防止高功率击穿现象的发生。

1.2 传输线

随着微波输出功率的增加,对传输线和各种波导器件提出了更高的要求。单管实验结果表明,在传输系统充入氮气的情况下,能够抑制打火现象,可以通过的微波功率为 400 kW。然而,双管运行的微波功率为 1 MW 左右,因此,为提高微波功率传输能力采取了以下措施:

(1) 重新清洗和安装整个系统。要求每一个接头在满足电气性能接触良好的情况下,安装垫圈密封,形成一个低真空系统,保证能抽空到 10^{-1} 个大气压 ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$),再完成充气。

(2) 充气介质主要选用六氟化硫 (SF_6) 气体。资料表明该种气体的结构为正八面体,化学性能非常稳定,对波导器件等金属物质腐蚀性小,具有很高的绝缘性,其相对击穿电压是氮气的 2.7 倍。因此,足以满足低杂波双管运行的实验要求。

(3) 严格系统抽气规程。必须注意的是六氟化硫气体中如果混入空气,将使其电绝缘能力下降。因此,在抽气和充气过程中,要求反复操作三次以上。保证传输系统中六氟化硫所占比例在 90% 以上。

1.3 高压调制电源

速调管的高压是用由储能电容器组和高压调制器组成的电源提供的,该种电流具有较高的稳定性和补偿能力^[4]。其工作原理主要是利用调整管的调节能力,补偿由于电容放电而造成的电压下降,从而保证速调管上的高压稳定。该电源工作在脉冲状态,其输出参数 20 A/70 kV,具有光纤隔离输入口,在打火、过流等特别情况下,断开高压,保护整个低杂波系统。在双管实验中,独立使用两套这样的电源分别向速调管提供高压,并同时通过同步触发器打开激励源系统。

1.4 激励源

根据双管运行的需要,要求微波激励源具有两路 1.5 W 的信号输出,以及良好的频率稳定性和幅度稳定性。通过对激励源后级的改进,研制了一台行波管放大器,增添了隔离器和小型环行器等多种器件,防止可能出现的相互干扰现象和对激励源频率的影响,其原理如图 2 所示。激励源在 $2450 \pm 10 \text{ MHz}$ 的频率区间内可点频调节,输出能力达到每路 5 W 左右的微波功率。

1.5 辅助电源

辅助电源包括灯丝电源,磁体电源和钛泵电源。都是针对我国自行研制的速调管而设计的,由于本次双管实验采用由 Varian 公司生产的管子,辅助电源将依据参数不同面加以改变。

灯丝电源。该电源为交流供电的形式,由交流稳压、调压部分、控制和自保护以及灯丝隔离变压器构成。灯丝要求的供电参数为 11 A/15 V。使用时须缓慢地增加灯丝电流,确保管子的正常使用。

磁体电源。速调管的磁体由多组线圈串并联组成,每支速调管要求一组参数为 180 V/14 A 的恒流源供电,速调管实际工作在 12~14 A,140~170 V 的范围之内。

钛泵电源。钛泵电源的作用有两个方面,一是通过钛泵吸收管子内壁释放的气体,保

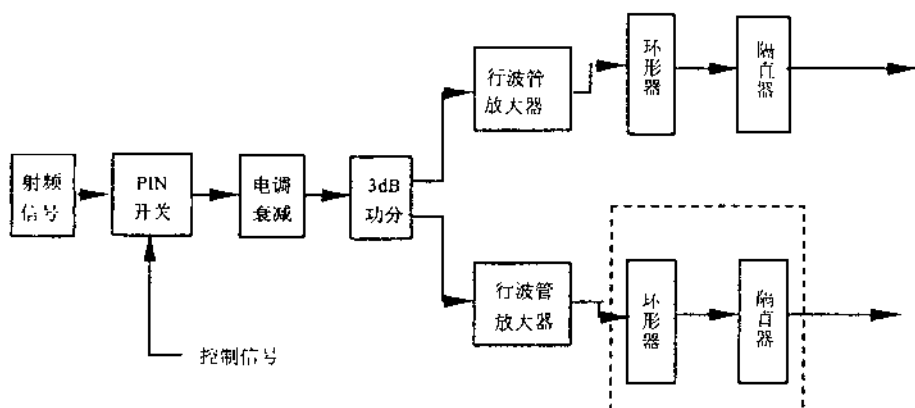


图2 激励源原理图

持真空性能；二是实验中检测速调管内部打火状态，实际使用钛泵在电源输出 3500 V 左右，可监测的电流在 $0 \sim 150 \mu\text{A}$ 。

1.6 冷却系统

双管运行的冷却采用自来水冷却方式，现场冷却水总流量为 $250 \sim 300 \text{ L/min}$ ，动态压力为 $1.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ ，每只管子有收集极，管体，磁体三路冷却水，双管运行中采用了两管串联供水的方案。测量数据和实验表明，冷却系统基本上满足速调管水冷参数的要求。同时，新安装了断水报警保护电路。

此外，围绕双管运行的基本要求，在微波测量，过流保护，打火保护，管体电流测量和控制等各个方面均作了必要的改进和提高。

2 速调管测试

在低杂波系统双管运行投入 HL-1M 装置实验之前，对现有的两支 Varian 公司生产的速调管分别进行了测试，各项技术指标与厂家给出的完全一致。测试安排如图 3 所示，利用检波晶体和功率计两路同时测量微波功率并相互检验。高压以 0.1% ($\Delta\tau = 500 \mu\text{s}$, $T = 500 \text{ ms}$) 的占空比调制脉冲供给管子，调试过程分为两个步骤：

2.1 静态调试

在无激励功率输入的情况下，加电测试速调管的工作状态，对灯丝、磁体、高压和束电流都做了扫描式测试。这样有利于正确地了解 and 掌握管于电性能，在实验中准确地设置工作点。调试中观察到静态管体漏电流很小，仅为 4.2 mA 。

2.2 动态调试

在加上激励源时，我们对管子各项参数和相互关系进行了测量，得到了激励功率饱和曲线（见图 4），随着电压的增加激励功率逐渐减少，饱和点随之下移，从 1.5 W 降低到 1 W 左右。图 5 是电压与输出功率的关系曲线，图 6 是速调管效率转化曲线，两者均和厂家指标吻合。实验表明：在频率为 2450 MHz ，激励功率 1.2 W 时，微波输出能力达到 500 kW 。管体电流最大为 5.7 mA 。工作频带宽度是 27 MHz ，在这个平坦区内，管子增益仍保持水

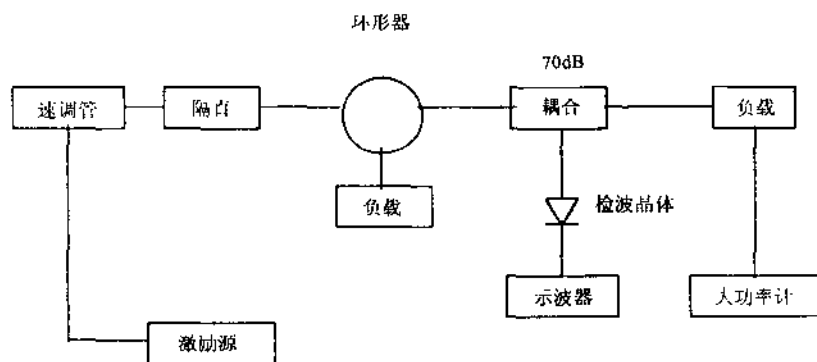


图3 速调管测试图

平的状态。同时，基本确定了管子的工作条件：

1"管灯丝电源：14.3 A/10.94 V，磁体电源：11 A/128 V。

2"管灯丝电源：16.7 A/10.9 V，磁体电源：12.1 A/150 V。

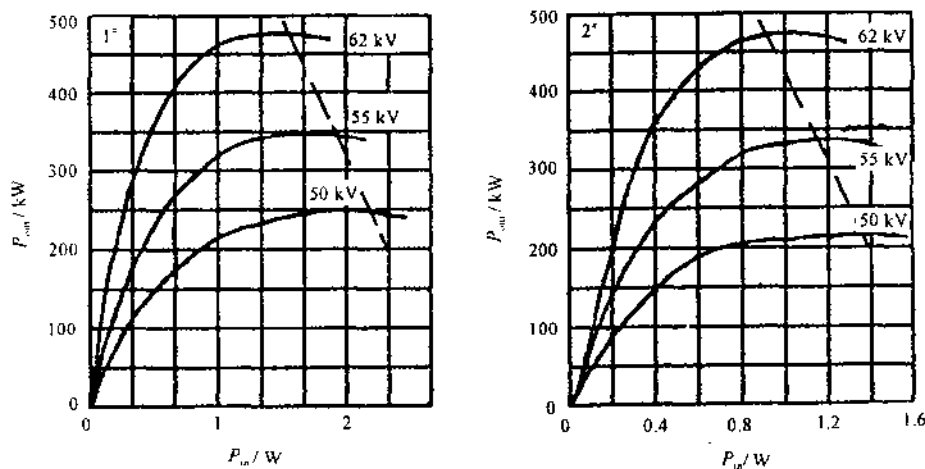


图4 微波输入输出曲线

3 双管运行实验

低杂波系统的双管运行在 HL-1M 装置上投入实验后，获得了满意的实验结果，低杂波系统也达到了预期的工程指标。我们分别在不同的脉宽情况下，开展了多种实验，系统微波输出功率达到 850 kW。通过对总波导和天线入口的相关测量和分析计算，低杂波系统的整个传输效率大约在 80% 左右。在实验中电流驱动效果非常显著，环压的下降和环电流的驱升都肯定的证明了这一点。相关的物理实验内容已有报告进行详细的分析^[2]。

另一方面，低杂波系统的状态随着装置等离子体密度、位移等参数的变化而变化，同

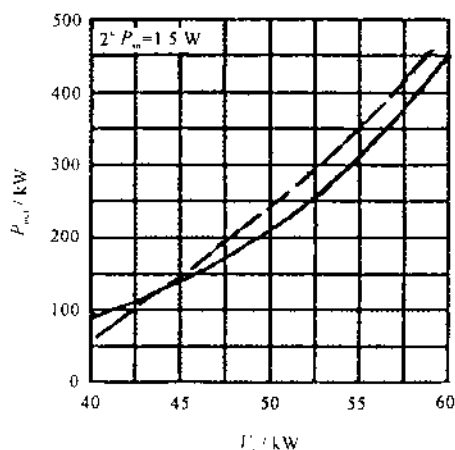


图5 电源功率曲线

---测量

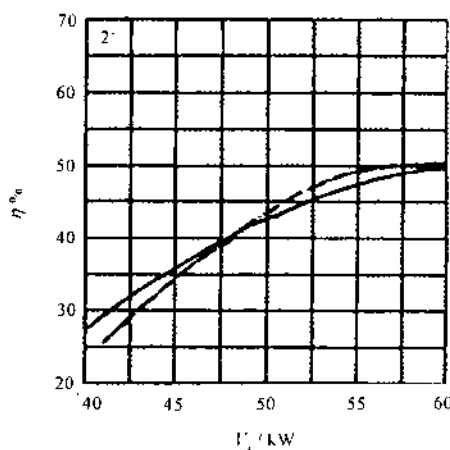


图6 电压效率曲线

---测量

时,针对双管运行中新出现的下列现象和问题,经过认真分析给以了解决。

3.1 功率平衡

低杂波系统的微波功率测量安排为六个点共十二路入射和反射信号,两路速调管输出功率,四路天线输入功率以及相对应的六路反射功率(图1),通过标定的检波晶体进行测量。以此为依据测量了整个低杂波系统的各种参数。速调管的输出功率有一定的差别,存在着较大的不平衡现象,两管相差30%~40%。根据厂家提供的参数,在饱和激励功率、频率和高压相同的条件下,功率增益相差2 dB左右,这是造成速调管输出功率不平衡的根本原因。调节激励微波功率可以解决不平衡问题。

3.2 系统相位与频率

相位问题是双管运行中的关键问题,微波与等离子体的耦合和微波相位密切相关。耦合天线上下两组的独立结构保证了本次双管实验的完成。在假定激励源,速调管微波输出时相位不发生变化,对传输系统进行了仔细的计算和安装,保证了两路独立的传输线具有相对一致的相位关系。

利用激励源在2450 MHz附近可以点频调节的条件,测量了双管同时运行时的速调管频率特性,表1给出了典型的测量结果。由此看到,在相同条件下两只速调管在频率变化时,输出功率产生相反的变化,这种情况暂称为“跷板”现象。从频率方面看,速调管频带宽度达到27 MHz,两只管子工作区完全重叠,不可能在频带内形成局部重叠的“双峰”情况,这样就很难解释“跷板”现象。因此,根据厂家提供的管子参数,在频率峰值范围内深入分析发现(见表1,表2)两只速调管在各自的带宽内增益随频率的变化而变化。这种变化由增益变化率(平坦度)表示,朝着相反的正负两个方面变化。所以,双管运行中随频率变化而出现的“跷板”现象,正是增益变化率叠加作用的结果。初步计算总增益变化率可达3 dB。选择适中的频率可以避免这种现象。

表 1 速调管频率、功率测量结果

频率/MHz	2450			2455			2460		
电压/kV	53	56	60	42	46	52	48	51	52
1 [#] 管功率/kW	280	300	350	65	120	240	260	320	380
2 [#] 管功率/kW	420	450	500	60	100	240	130	150	170

表 2 速调管频率增益表

频率/MHz	2450	2455	2460
1 [#] 增益/dB	51.5	50.8	52.9
2 [#] 增益/dB	53.3	50.8	49.3

4 结束语

在 HL-1M 上成功地进行了双管运行 LHCD 实验, 在实验运行中解决了一系列由于双管运行而带来的问题和困难, 运行参数分别达到了 850 kW 和 200 ms。在此基础上, 取得了一系列有特色的 LHCD 物理实验结果。

参 考 文 献

- 1 李晓东, 刘永, 饶军等. HL-1M 上低杂波电流驱动系统研制. 核工业西南物理研究院内部报告, 1996
- 2 LIU Yong, LI Xiaodong, RAO Jun, et al. Lower Hybrid Current Drive Experiments on HL-1M. in Proc. of IAEA TCM on Research Using Small Tokamak. Prague, Czech. Nov. 1996
- 3 刘永, 李晓东, 袁勇等. 用于 HL-1M 装置上 LHCD 的多结发射天线阵. 核聚变与等离子体物理, 1997, 17 (4): 41
- 4 宣伟民, 王明伟, 李晓东等. 双管用高压大功率调制器的并联运行. 核工业西南物理研究院内部报告, 1996