



·高功率微波技术·

基于量热法的大功率毫米波功率测量 及校准系统设计*

黄麒力¹, 胡林林¹, 马国武¹, 孙迪敏¹, 龚胜刚¹, 卓婷婷¹, 金 晓¹, 张翠翠²

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 在百千瓦或兆瓦级大功率毫米波系统中一般采用量热法对输出的毫米波功率进行测量。针对百千瓦级长脉冲大功率毫米波系统功率测量的需要, 开展了基于量热法的功率测量系统设计, 利用吸收负载将入射的毫米波能量转换为热量, 通过监测出入水口的温度和流量实现了大功率毫米波功率测量, 并开展了重复性测试。为了实现量值溯源, 提高测量系统的准确性, 开展了能量标准装置的设计, 并推导了能量测量误差。

关键词: 功率测量; 量热法; 校准; 高斯波束; 毫米波

中图分类号: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210501

Design of high power millimeter wave power measurement and calibration system based on calorimetry

Huang Qili¹, Hu Linlin¹, Ma Guowu¹, Sun Dimin¹, Gong Shenggang¹,
Zhuo Tingting¹, Jin Xiao¹, Zhang Cuicui²

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Metrology Testing Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In the high-power millimeter wave systems of hundreds of kW or MW, the output millimeter wave power is generally measured by calorimetry. According to the needs of power measurement of hundreds of kW long pulse high-power millimeter wave systems, a power measurement system based on calorimetry is designed in this paper. In the proposed design, the incident millimeter wave energy is converted into heat by absorbing load. By monitoring the temperature and flow at the inlet and outlet, the power measurement of high-power millimeter wave is realized, and repeated experiments are carried out. To trace the quantity value and improve the accuracy of the measurement system, the energy standard device is designed, and the system energy measurement error is deduced to calibrate the measurement systems.

Key words: power measurement, calorimetry, calibration, Gaussian beams, millimeter wave

托卡马克是最有望实现磁约束聚变的手段之一^[1-2]。在托卡马克装置实验中往往需要利用大功率毫米波进行电子回旋共振加热(ECRH)^[3]。ECRH系统是由大功率毫米波源、传输系统和发射天线等组成的大功率毫米波系统。功率参数是该系统的重要指标之一。为了准确获得装置对电子回旋共振加热的响应数据及评估大功率毫米波系统的性能指标, 需要对输出的毫米波功率进行准确的测量^[4]。

大功率毫米波系统的功率测量通常基于量热原理进行间接测量, 目前主要有两类方法: 一种是采用乙醇溶液作为吸收介质吸收入射的微波能量, 溶液将吸收的微波能量转换成热量, 引起溶液体积的变化, 通过测量体积变化来确定能量的大小。这种方法仅适用于以短脉冲方式工作的微波源。另一种是利用吸收介质吸收入射的毫米波, 将其转化为热能并通入流水带走热量, 通过检测出入水口的温度变化来实现功率测量。IFP, CCR, KIT 等国际研究机构以及 ITER 装置都基于第二种方法开展了大功率毫米波功率测试研究^[5-10]。虽然各研究机构的吸收负载、吸收

* 收稿日期: 2021-11-20; 修订日期: 2021-12-23

基金项目: 科工局技术基础项目 (JSJL2019212B006); 国家自然科学基金项目 (U1830201); 中国工程物理研究院创新发展基金项目 (CX2019038)

联系方式: 黄麒力, huangqilicaep@163.com。

通信作者: 孙迪敏, sundimin@caep.cn。

介质、结构形状等有所不同,但其所采用的测试方法都是流量量热法。国内研究机构,如中科院等离子体物理研究所^[4]、核工业西南物理研究院^[11]、中国科学技术大学^[12]、中科院电子学研究所^[13]、中国工程物理研究院应用电子学研究所等都开展了相关研究。其中,中科院等离子体物理研究所的徐伟业等人^[4]针对测量方法中入水口温漂会产生测量误差提出了一种温漂补偿办法以提高功率测量精度;核工业西南物理研究院的研究人员^[11,14]基于电热等效法设计了量热器作为功率测量的校准系统。上述研究都意识到功率测量的准确性对准确评估系统响应的重要性,但并未开展校准技术研究或未保证标准能量注入的准确性。针对磁约束聚变和大功率毫米波系统的应用需求,本文开展了大功率毫米波功率测量及校准系统的设计,测量系统基于量热法利用吸收负载将入射的毫米波能量转换为热能进行测量,校准系统基于电热等效法设计了能量标准装置对测量系统进行校准以实现功率参数量值溯源。

1 功率测量原理和测量系统设计

为了避免不同模式的反射,本文采用大尺寸的吸收负载,其工作原理如图1中所示,由波源输出的准TEM₀₀模式的毫米波从吸收负载入口处入射,被底部的反射镜反射到腔体四周的内壁上。内壁上设计有紧密缠绕的PTFE管作为冷却水路,利用水管内的冷却水作为吸收介质将毫米波能量吸收并转换为热量,并由冷却水带走热量,并通过监测出水、入水口的温度和流量实现对大功率毫米波能量的吸收和测量。其中出入水口的温度传感器采用PT100温度计,并在后端配有数据采集、处理和远程通信模块。吸收负载的测量模型可简化如图2所示。

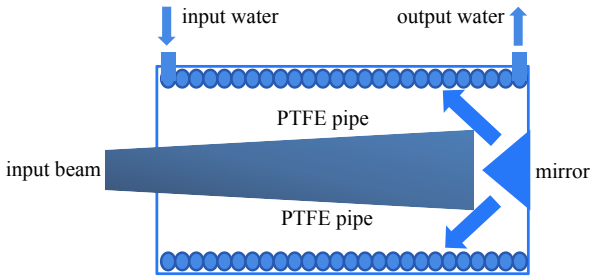


Fig. 1 Schematic arrangement of the dummy loads

图1 吸收负载示意图



Fig. 2 Schematic diagram of dummy load measurement model

图2 吸收负载测量模型示意图

图2中,位置1为入水口的温度传感器所在位置,位置2为出水口的温度传感器所在位置。对于位置2,从时间 $t_0 + \delta t$ 到 $t_0 + \delta t + \Delta t$,从位置1到位置2的能量增加为

$$W_{t_0+\delta t+\Delta t} = cm[T_{out}(t_0 + \delta t + \Delta t) - T_{in}(t_0)] \quad (1)$$

式中: c 为比热容; m 为流体的质量。对于位置2从时间 t_0 到 $t_0 + \Delta t$,总能量为

$$W_0 = cm[T_{out}(t_0 + \Delta t) - T_{in}(t_0 - \delta t)] \quad (2)$$

同样的,对于时间 t_0 到 t_i ,从位置1到位置2有

$$W = \sum_{i=0}^n W_i = \sum_{i=0}^n cm[T_{out}(t_i + \Delta t) - T_{in}(t_i - \delta t)] \quad (3)$$

当 Δt 趋近于0时

$$W = cF \int_{t_0}^{t_n} [T_{out}(t) - T_{in}(t - \delta t)] dt \quad (4)$$

式中: F 为流体的流速。

则平均功率为

$$P = \frac{W}{\tau_1} = \frac{cF}{\tau_1} \int_{t_0}^{t_n} [T_{out}(t) - T_{in}(t - \delta t)] dt \quad (5)$$

当 δt 很小时式(5)可以简化为

$$P = \frac{W}{\tau_1} = \frac{cF}{\tau_1} \int_{t_0}^{t_n} [T_{out}(t) - T_{in}(t)] dt \quad (6)$$

式中: $t_n = t_0 + \tau_1 + \tau_2$,其中 τ_1 是测试脉冲持续时间, τ_2 是在脉冲结束后出水口2与入水口1温差为零的时间。因此,已知出水口2与入水口1的温差、毫米波脉冲持续时间、水流量,就可以由式(6)计算得到平均功率。

2 能量标准装置设计

功率测量系统主要用于对大功率毫米波进行测量,但在实际测试过程中吸收负载中的热量损耗、环境温度变化等都会对功率测试的结果产生误差,因此应该将功率作为校准项目进行校准。本文采用电热等效法对测量系统进行功率参数校准,通过搭建能量标准装置对被校测量系统功率参数进行校准并可以实现量值溯源。校准系统示意如图3所示。

校准思路为标准能量装置通过对标准体积的水进行电加热,产生具有标准温度的水,该部分水存储热量为标准能量。存储标准热量的水对被校功率测量系统进行整体校准,以校准功率测量系统的流速系统和测温系统。具体为:通过对恒温水箱内的水进行加热,同时保证能量标准装置在作用时间内产生的热量与被校毫米波功率测量系统总吸收能量相当,待能量标准装置加热作用完成后,恒温水槽产生标准体积、标准温度的水,该部分水存储热量(相对于室温)为

$$Q_s = cm(T_s - T_0) = c\rho V_s(T_s - T_0) \quad (7)$$

式中: Q_s 是恒温水箱存储的热量; T_s 是恒温水槽中水的温度; T_0 是自来水温度; ρ 是水的密度; V_s 是恒温水槽的体积。

被校功率测试系统在空载状态下(即没有毫米波注入的情况),正常运行一段时间后打开恒温水槽的阀门,并进入被校功率测试系统。此时,被校功率测试系统测得入水口和出水口实时温度和实时流量,测得能量为

$$Q_m = \int c\rho T_1(t)S_1(t)dt - \int c\rho T_0(t)S_0(t)dt \quad (8)$$

式中: Q_m 是所测得的能量; $T_1(t)$ 为出水口温度; $S_1(t)$ 为出水口流速; $T_0(t)$ 为入水口温度; $S_0(t)$ 为入水口流速。

由式(6)和式(8)可知,被校系统能量测量误差为

$$\Delta Q = Q_m - Q_s \quad (9)$$

由此完成了对功率测试系统的校准。

标准能量校准溯源采用分参数溯源,积分中关键参数为温度与质量两项参数,可以向上溯源至计量机构以完成量值溯源。

3 实验结果

待测量系统加工完成后,利用现有的大功率毫米波源 HS-III 回旋管(输出功率约 400 kW)对系统开展了测试。波源 HS-III 输出的大功率毫米波直接输出至吸收负载内,由吸收负载内部的反射镜面反射至内壁上的水路吸收。测试系统对入射的 5 s 大功率毫米波典型的瞬时功率响应曲线如图 4 所示。可以看出,峰值瞬时功率近 150 kW,经过约 100 s 入水口水温平衡。经过式(6)计算后得到测试平均功率为 415.4 kW,毫米波脉冲长度由检波器测试得到,但此处并未考虑水流从入水口到出水口所需的时间。随后对吸收负载开展了 5 次重复测试,每次测试时保持波源电压、发射电流等参数不变,其测试结果如表 1 所示。

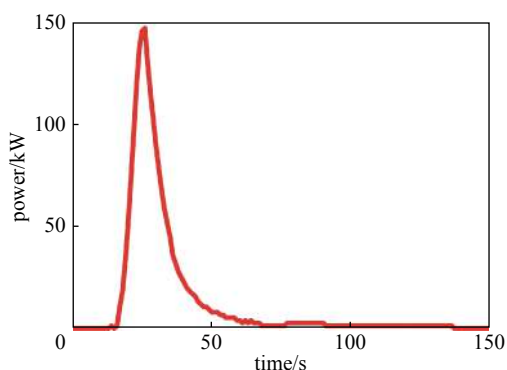


Fig. 4 Typical power response waveform of the dummy load

图 4 400 kW/5 s 吸收负载典型功率响应曲线

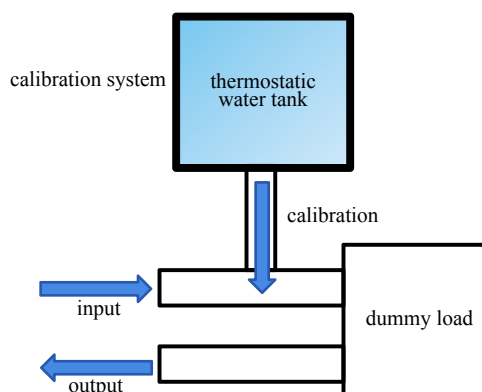


Fig. 3 Schematic diagram of calibration system

图 3 校准系统示意图

表 1 重复测试得到的功率
Table 1 Power measurement results by repeated experiments

No.	pulse width/s	power/kW
1	5	416
2	5	414
3	5	420
4	5	415
5	5	412

4 结 论

本文以量热法为基础开展了大功率毫米波功率测试系统设计,分析了吸收负载的测试过程,建立了吸收负载的功率测量模型。选定功率为校准项目,基于电热等效法开展了毫米波功率测量校准系统的设计,通过搭建能量标准装置对测量系统进行校准,并推导了被校系统能量测试误差。随后利用本课题组现有的大功率毫米波源对测量系统开展了测试,完成了400 kW/5 s长脉冲实验并进行了重复测试,平均测试功率为415.4 kW。接下来待校准系统加工完成后,将对测量系统进行校准并将对影响测试结果的因素开展研究。

参考文献:

- [1] Nusinovich G S, Thumm M K A, Petelin M I. The gyrotron at 50: historical overview[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, 35(4): 325-381.
- [2] Sykes A, Gryaznevich M P, Kingham D, et al. Recent advances on the spherical tokamak route to fusion power[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(3): 482-488.
- [3] 胡林林, 马国武, 孙迪敏, 等. 28 GHz/50 kW准光输出连续波回旋管[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 060101. (Hu Linlin, Ma Guowu, Sun Dimin, et al. A 28 GHz/50 kW continuous wave gyrotron with quasi-optical output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 060101)
- [4] Xu Weiye, Xu Handong, Liu Fukun, et al. Calorimetric power measurements in the EAST ECRH system[J]. *Plasma Science and Technology*, 2017, 19: 105602.
- [5] Bin W, Bruschi A, Takahashi K, et al. Validation experiments on the 2-MW CW 170-GHz load for the European ITER gyrotron[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(3): 501-511.
- [6] Bin W, Bruschi A, Cirant S, et al. Absorbing coatings for high power millimeter-wave devices and matched loads[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(9/10): 2510-2514.
- [7] Floristán M, Müller P, Gebhardt A, et al. Development and testing of 140 GHz absorber coatings for the water baffle of W7-X cryopumps[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86(9/11): 1847-1850.
- [8] Ives R L, Mizuhara M, Collins G, et al. Design and operation of a 2 MW CW, RF load for gyrotrons[C]//Proceedings of the 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2013: 1-2.
- [9] Ioki K, Hiranai S, Moriyama S, et al. Development of a dummy load and waveguide components for 1 MW CW gyrotron[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2016, 109/111: 951-955.
- [10] Schmid M, Erckmann V, Gantenbein G, et al. Technical developments at the KIT gyrotron test facility[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86(6/8): 518-521.
- [11] 陆志鸿, 易良碧, 白兴宇, 等. HL-2A装置ECRH系统的微波功率测量[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2008, 28(1): 54-59. (Lu Zhihong, Yi Liangbi, Bai Xinyu, et al. Power measurement of microwave for ECRH system on the HL-2A tokamak[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2008, 28(1): 54-59)
- [12] 吴大俊. EAST电子回旋加热高功率毫米波传输关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019. (Wu Dajun. Research of key technologies of high power millimeter wave transmission on EAST ECRH[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019)
- [13] 娄喆飞, 罗积润, 李文奇, 等. 适用于140GHz, 1MW回旋管的水负载反射镜面设计[C]//中国电子学会真空电子学分会第二十一届学术年会论文集. 2018. (Lou Zhefei, Luo Jirun, Li Wenqi, et al. Water loaded mirror design for 140GHz, 1MW Gyrotron[C]//Proceedings of the 21st Annual Academic Conference of Vacuum Electronics Branch of Chinese Institute of Electronics. 2018)
- [14] 王贺, 陆志鸿, 周俊, 等. HL-2A装置ECRH系统传输效率的测量研究[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2010, 30(3): 236-240. (Wang He, Lu Zhihong, Zhou Jun, et al. Transmission efficiency of the ECRH system on HL-2A tokamak[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2010, 30(3): 236-240)