

# 9 kHz~50 GHz 宽频带小功率校准系统

陈飞<sup>1</sup> 许传忠<sup>2</sup> 唐友东<sup>2</sup> 李文静<sup>2</sup>

(1. 海军航空装备计量监修中心 上海 200436; 2. 北京中玮科技有限公司 北京 100098)

**摘要:**为了满足 9 kHz~50 GHz 宽频带范围内不同接头功率传感器的高准确度校准需求,通过对采用热敏电阻座进行量值传递的校准方法和原理进行分析,提出了宽频带系统采用不同接头形式的标准热敏电阻座建立小功率校准装置的必要性,并针对系统中不同接头形式的标准热敏电阻座的连接问题设计了高准确度的多电桥热敏电阻功率计以节约成本。最后通过此系统不同接头形式的功率标准分别对不同接头形式的功率传感器进行校准实验和数据分析,证明了此系统的优越性能。

**关键词:**功率;校准系统;热敏电阻座;宽频带

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

## 9 kHz~50 GHz broadband low power calibration system design

Chen Fei<sup>1</sup> Xu Chuanzhong<sup>2</sup> Tang Youdong<sup>2</sup> Li Wenjing<sup>2</sup>

(1. Naval Aviation Equipment Measurement Supervision Center Shanghai 200436, China;

2. Beijing Zolwell Technologies Co., Ltd Beijing 100098, China)

**Abstract:** In order to meet the high accuracy calibration requirements for the power sensors with different joint forms in 9 kHz~50 GHz broadband, the calibration methods and principles which use thermistor to transfer quality values were analysed, and the necessity of using standard thermistor mounts with different joint forms to build the broadband calibration system was put forward. And in order to save the cost, a high accuracy multiple power bridges was designed to solve the connection problems of standard devices with different joint forms in the system. Finally, the calibration experiment and data analysis of using the power standard devices with different joint forms to calibrate the power sensors with different joint forms respectively were carried out, the superiority of this broadband system was proved.

**Keywords:** power; calibration system; thermistor mount; broadband

### 1 引言

射频微波和毫米波功率传感器广泛应用于航空、制造、通信等领域,如高速发展的半导体行业<sup>[1-2]</sup>,为了减少工艺过程控制、提高产品产量以及减少开发时间,要求很高的功率测量准确度,甚至在 18 GHz 频率范围内要求它们的功率测量准确度在 2% 内。目前商用的功率传感器主要分为热敏电阻、热电偶和二极管等形式,二极管、热电偶、热敏电阻这 3 种代表类型的功率传感器响应时间的长短不一:响应最快的为二极管,其次为热电偶,再次为热敏电阻。它们的频率范围覆盖 9 kHz~110 GHz,功率量程覆盖 100 pW~25 W。表 1 所示为目前市场上典型功率传感器产品的型号和厂商。

功率计量的主要目的是对功率传感器进行校准,以保

障功率量值传递的准确性。在传统的功率计量标准方法研究中,国家基准和最高计量标准均以测热方式的直流替代法(交替比较法)测量射频微波和毫米波功率,因该方法的量值复现性最好<sup>[3]</sup>;而在进行功率量值传递的过程中,世界上大部分国家和地区均采用热敏电阻进行量值传递的方法(传递标准法),因该方法可以将功率量值准确溯源至国家基准或最高计量标准<sup>[4]</sup>。

功率传感器校准的主要参数有校准因子( $K$ )和反射系数( $\Gamma$ )。被计量的功率传感器其校准因子的校准结果准确性对日渐需求高精度功率测量的领域非常重要,同时对各级功率计量标准的量值传递的一致性也会产生重要影响,尤其被计量的对象为功率计量标准的热敏电阻座<sup>[5-6]</sup>。下面将围绕采用传递标准法构建的宽频带小功率校准系统展开讨论和分析:从传递标准法的校准原理切

表1 典型功率敏感器产品型号和厂商

频率范围	输入接头形式和类型	型号 <sup>①</sup>	测量准确度或测量误差 <sup>②</sup>	厂商	
9 kHz~18 GHz	N型热敏电阻座	2505A/1505A/2505A/M1130A	0.8%~1.1%	Tegam	
		478B(10 MHz~10 GHz)	1.4%~2.1%	Keysight	
		8478B(10 MHz~18 GHz)	1.6%~3.2%	Keysight	
	N型热电偶敏感器	N8482A/N8483A/N8481A/N8482B /N8482B/N8481B <sup>①</sup> 、NRP-Z51	1.0%~8.0%	Keysight、R&S	
		N型二极管功率敏感器	E4412A/E9300A/E9301A/N1921A/ N1923A/U2000A/B/H、NRP-Z91/ NRP-Z11/Z21/Z22/Z23/Z24	2.0%~8.0%	Keysight、R&S
		3.5 mm 热敏电阻座	F1135B/M1135A	1.0%~2.5%	Tegam
10 MHz~ 26.5 GHz	3.5 mm 热电偶敏感器	N8485A /U8485A、NRP-Z52	1.2%~5.8%	Keysight、R&S	
	3.5 mm 二极管功率敏感器	E4413A/U2002A、NRP-Z31	2.2%~6.5%	Keysight、R&S	
10 MHz~ 40 GHz	2.92 mm 热电偶敏感器	NRP-Z55	1.5%~3.5%	R&S	
	2.92 mm 二极管功率敏感器	N1924A、NRP-Z85	3.0%~5.8%	Keysight、R&S	
10 MHz~ 50 GHz	2.4 mm 热敏电阻座	2510A/1510A	1.0%~4.0%	Tegam	
	2.4 mm 热电偶敏感器	N8487A/8487A/U8487A、NRP-Z56	2.0%~6.0%	Keysight、R&S	
	2.4 mm 二极管功率敏感器	8487D、NRP-Z86	3.5%~6.7%	Keysight、R&S	

注:①包括一些已经停产的8481A、8482B、8481H等;②准确度或测量误差主要指校准因子的扩展测量不确定度,它们具体的校准因子测量不确定度与量程、温度和频率范围相关,表格内数据为典型值

人,进行系统误差分析,找出误差的产生原因;根据分析结果建立一个覆盖不同接头形式的校准系统,更大程度上减小校准误差<sup>[7-8]</sup>;最后通过实验,对该宽频带系统的准确性指标进行数据验证与考核。此研究思路不局限于射频微波和毫米波频段,也可以为将来亚毫米波,甚至太赫兹功率方面的系统建标工作提供参考。

## 2 宽频带小功率校准系统分析

### 2.1 系统工作原理分析

采用传递标准法建立的宽频带小功率校准系统通常由一个三端口器件(定向耦合器或功分器)、功率传递标准座以及稳幅信号源组成。此系统一方面提供稳幅输出的低反射系数信号源,另一方面构建宽频带的量值传递系统;由于电阻式功分器更易满足宽频率范围的要求,所以一般使用对称性良好的功分器作为功率传递标准座的三端口器件。图1所示为宽频带小功率校准系统组成。

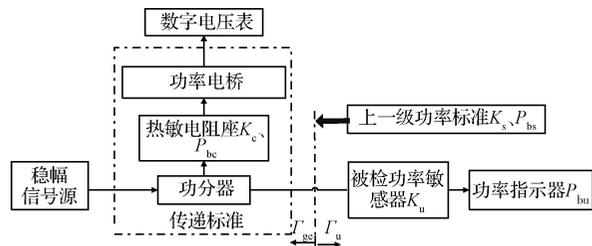


图1 宽频带小功率校准系统组成

图1所示系统组成包括传递标准、稳幅信号源以及被校功率计等设备。其中传递标准为功分器与热敏电阻座

组成的通过式传递标准座,它们的配套测量设备为功率电桥和数字电压表;稳幅信号源提供稳定幅度输出且较纯净(可忽略谐波分量和杂波影响)的输出信号。

由热敏电阻座和功分器组成的传递标准座,其校准因子 $K_c$ 定义是:从功分器端口3入射到热敏电阻座中的替代功率 $P_{bc}$ 与从功分器端口2入射到无反射负载上的功率 $P_o$ 之比。因此,将标准功率计(上一级功率标准)连接到传递标准的测试端口2,标准功率计的直流替代功率记为 $P_{bs}$ ,假设标准功率座的校准因子为 $K_s$ ,输入的反射系数为 $\Gamma_s$ ,入射到标准功率座的微波功率 $P_m$ 为:

$$P_m = \frac{P_o}{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2} \quad (1)$$

式中: $P_m$ 为入射到标准功率座的功率,mW; $P_o$ 为信号源传输到无反射负载上的功率,mW; $|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2$ 为失配因子,其中, $\Gamma_{ge}$ 为等效源反射系数<sup>[9]</sup>, $\Gamma_s$ 为上一级标准功率计的反射系数。

根据功率传递标准的校准因子的定义可知:

$$K_c = K_s \frac{P_{bc}}{P_{bs}} \frac{1}{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2} \quad (2)$$

式中: $K_c$ 为传递标准功率座的校准因子; $P_{bs}$ 为上一级标准功率座的直流替代功率,mW; $P_{bc}$ 为传递标准功率座的直流替代功率,mW; $K_s$ 为上一级标准功率座的校准因子; $M$ 为失配因子。 $M = |1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2$ , $\Gamma_{ge}$ 为等效源反射系数, $\Gamma_s$ 为上一级标准功率计的反射系数。

图1中所示的校准系统用于校准被校功率敏感器,被校功率敏感器的校准因子 $K_u$ 由传递标准量传得到,其计算公式为:

$$K_u = K_c \frac{P_{bu}}{P_{bc}} |1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2 \quad (3)$$

式中:  $K_c$  为传递标准功率座的校准因子;  $P_{bu}$  为被校功率敏感器的功率指示器读数, mW;  $P_{bc}$  为传递标准功率座的直流替代功率, mW;  $|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2$  为失配因子,  $\Gamma_{ge}$  为等效源反射系数,  $\Gamma_u$  为被校功率敏感器的反射系数。

## 2.2 系统误差分析

由式(3)所建立的数学模型, 根据测量不确定度的传播律理论, 被校功率敏感器校准因子的校准结果的不确定度分量主要有传递标准功率座的校准因子引入的测量不确定度; 传递标准功率座的直流替代功率引入的测量不确定度; 被校功率敏感器的直流替代功率引入的测量不确定度; 由标准源和被校功率敏感器端面的失配引入的测量不确定度<sup>[10]</sup>。由环境温度等各种变量对系统测量准确度的随机影响归为 A 类评定方法。

其中传递标准功率座的校准因子引入的测量不确定度分量由上一级计量标准机构的计量工作标准决定; 传递标准功率座的直流替代功率引入的测量不确定度分量取决于本级计量标准的热敏电阻功率计或功率电桥的测量准确度; 标准源和被校功率敏感器端面的失配引入的测量不确定度分量主要由等效源输出端面的反射系数的模值和被校功率敏感器输入端面的反射系数模值决定<sup>[11-13]</sup>。

## 3 建立不同接头形式的小功率标准装置必要性

在图 1 所示的宽频带小功率校准系统中传递标准与被校功率敏感器的端面(或称校准端面)之间没有介入其他器件(如转接头、衰减器等)。如果中间介入了其他器件, 如图 2 所示, 在计算被校功率敏感器的校准因子的式(3)就变为:

$$K_u = K_c \frac{P_{bu}}{P_{bc}} \frac{|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_{in}|^2 |1 - S_{22} \Gamma_u|^2}{|S_{21}|^2} \quad (4)$$

式中:  $K_c$  为传递标准功率座的校准因子;  $P_{bu}$  为被校功率敏感器的功率指示器读数, mW;  $P_{bc}$  为传递标准功率座的直流替代功率, mW;  $\Gamma_{ge}$  为等效源反射系数;  $\Gamma_u$  为被校功率敏感器的反射系数;  $\Gamma_{in}$  为转接头的输入反射系数;  $S_{22}$  为转接头的输出反射系数;  $S_{21}$  为转接头的正向传输系数。

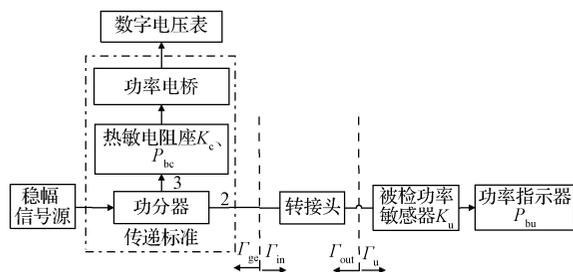


图 2 带有转接头的传递标准法功率敏感器校准系统

由式(4)可知, 被校功率敏感器的校准因子的测量不确定度不仅与传递标准座的测量参量有关, 还与转接头引入的插损、输入输出反射系数等的测量参量有关<sup>[14]</sup>。实

际应用中, 转接头的插损和反射系数的测量常常被忽略; 即使对采用的转接头参量进行校准, 其校准结果的测量误差也会对被校功率敏感器校准因子的测量准确度产生较大影响。由此可见, 被校功率敏感器的接头与传递标准的输出接头一致, 传递标准与校准端面之间不使用转接头, 可以减少转接头的测量参量引入的测量误差, 从而提高功率校准系统的测量准确度。

## 4 建立宽频带小功率校准系统

### 4.1 高准确度的功率替代电桥

作为宽频带小功率传递标准座的 N 型、3.5 和 2.4 mm 热敏电阻座仅有一对吸收射频微波和毫米波功率的热敏电阻(单个热敏电阻阻值为 100 Ω, 分别为记为  $R_1$  和  $R_2$ ), 它们均可以组成对射频微波和毫米波信号输入端面为 50 Ω 的阻抗系统(两个热敏电阻并联), 对直流输入端面为 200 Ω 的阻抗系统(两个热敏电阻串联), 如图 3 所示。

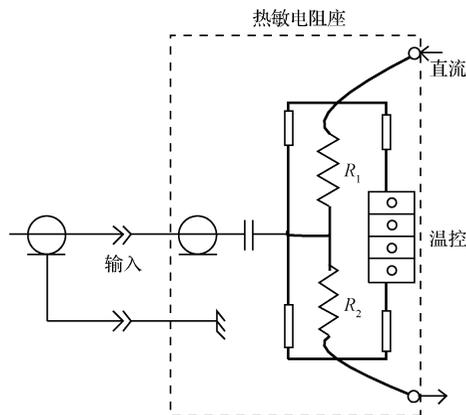


图 3 热敏电阻座的结构原理

由图 3 可知, 热敏电阻座的直流功率替代电桥必须满足:

1) 对传递标准热敏电阻座进行加热控温, 使  $R_1$  和  $R_2$  电阻所在腔体环境保持稳定的温度, 防止外部环境温度对  $R_1$  和  $R_2$  的影响, 而且  $R_1$  和  $R_2$  吸收的射频微波和毫米波功率不会使腔体产生温度波动;

2) 构建四线法电阻电桥测量原理, 建立自动平衡电桥, 通过  $R_1$  和  $R_2$  吸收的射频微波和毫米波功率的变化通过直流电桥替代变化, 实现高准确度的直流替代功率测量。

高准确度的热敏电阻功率电桥原理如图 4 所示。

当运算放大器( $U_1$  或  $U_2$ ) 检测到桥臂上的电压不平衡后, 会驱动晶体管( $Q_1$  和  $Q_2$ ) 自动调整。运算放大器  $U_2$  两输入端的电压差非常小, 与参考运算放大器  $U_1$  具有相同的特性, 这样将使流过热敏电阻座的电流与流过精密电阻臂的电流相等。

由于热敏电阻具有负温度系数的特性, 当吸收功率

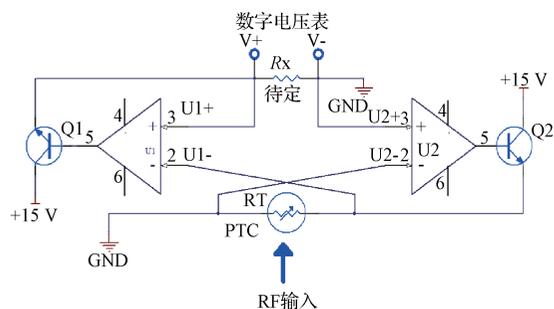


图4 热敏电阻功率电桥电路原理

后,会使电压发生变化,就会使电桥发生不平衡。当电桥中热敏电阻臂的电阻值变化时,运算放大器  $U_1$  会检测到  $U_{1+}$  和  $U_{1-}$  的压差,如果要使  $U_{1+}$  和  $U_{1-}$  相等,必须保持热敏电阻臂与精密电阻臂两端的电压相等。同时,自平衡电桥电路的结构使整个电桥的电流相同。既然电压与电流均相同,两个桥臂的电阻阻值也相同。因此,当热敏电阻座吸收射频功率,且温度稳定后,精密电阻两端电压的变化与热敏电阻吸收的射频功率大小成比例。

采用该方法设计的热敏电阻功率电桥的替代功率测量准确度达到  $\pm 0.006\%$ ;为使宽频带的小功率校准系统满足不同接口形式的传递标准座的使用,一般设计为多电桥形式,称为多电桥热敏电阻功率计。

图5和6所示分别为双电桥热敏电阻功率计的连接示意图及实物图。

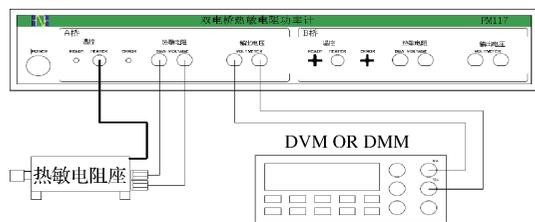


图5 双电桥热敏电阻功率计连接示意图



图6 双电桥热敏电阻功率计连接实物图

#### 4.2 用高准确度功率替代电桥建立的宽频带小功率校准系统

在  $9\text{ kHz}\sim 50\text{ GHz}$  频率范围内的功率传感器主要分布在  $9\text{ kHz}\sim 18\text{ GHz}$ 、 $10\text{ MHz}\sim 26.5\text{ GHz}$ 、 $10\text{ MHz}\sim 50\text{ GHz}$  这3个频段,分别对应 N 型、 $3.5\text{ mm}/2.92\text{ mm}$ 、 $2.4\text{ mm}$  的同轴接头类型。为校准这些功率传感器,采用的标准热敏电阻座的输入接头分别为 N 型、 $3.5\text{ mm}$ 、 $2.4\text{ mm}$ ,并用多电桥热敏功率计作为标准热敏电阻座

的直流替代部分,建立一套频率覆盖  $9\text{ kHz}\sim 50\text{ GHz}$  的宽频带小功率校准系统,如图7所示。其中校准结果可以通过软件写入具有可擦写功能的被校功率敏感器的 EEPROM 中。

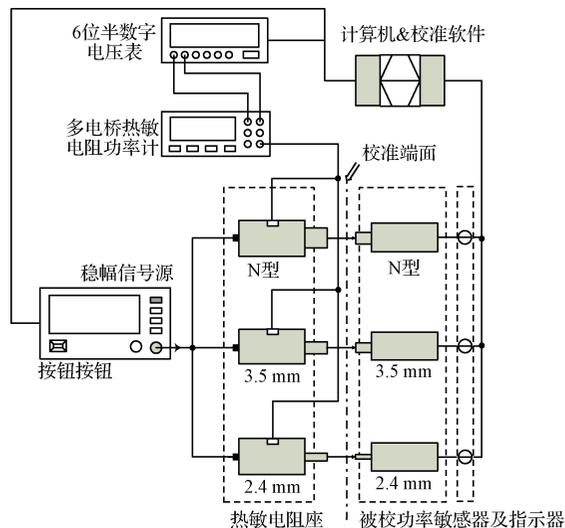


图7  $9\text{ kHz}\sim 50\text{ GHz}$  宽频带小功率校准系统连接示意图

#### 4.3 校准数据及分析

各级计量标准的核查标准大部分采用稳定性且量值复现性能好的热电偶功率敏感器,针对图7所示系统选用了6家单位的 N 型和  $3.5\text{ mm}$  接头热电偶功率敏感器作为校准样品。校准工作流程为:将 N 型和  $3.5\text{ mm}$  热电偶功率敏感器分别接入如图7所示系统进行校准,并分别在  $1$ 、 $18$ 、 $26.5\text{ GHz}$  3个频率点做校准;每一个频率点的校准因子结果均取10个以上校准值的平均值。

表2 N型样品在  $1\text{ GHz}$  频率点的校准数据 (%)

样品	出厂数据	N型标准	$3.5\text{ mm}$ 标准	$2.4\text{ mm}$ 标准
1#	98.8	98.6	95.1	94.6
2#	98.7	98.6	95.3	95.1
3#	98.9	98.5	95.7	94.5
4#	98.6	98.3	95.8	95.1
5#	98.8	98.7	95.7	93.7
6#	99.0	98.4	95.9	94.2

表3 N型样品在  $18\text{ GHz}$  频率点的校准数据 (%)

样品	出厂数据	N型标准	$3.5\text{ mm}$ 标准	$2.4\text{ mm}$ 标准
1#	93.1	92.9	92.1	91.1
2#	92.5	92.4	91.8	91.2
3#	93.4	93.3	92.2	91.3
4#	92.7	92.6	91.5	90.7
5#	92.5	92.2	91.3	91.0
6#	93.2	93.1	92.0	91.2

表4 3.5 mm 样品在 1 GHz 频率点的校准数据 (%)

样品	出厂数据	N 型标准	3.5 mm 标准	2.4 mm 标准
1#	99.7	98.5	99.6	97.6
2#	98.8	97.3	98.7	96.8
3#	99.5	98.1	99.3	97.3
4#	99.4	98.5	99.2	96.9
5#	99.1	98.1	98.8	98.2
6#	99.7	98.9	99.6	97.6

表5 3.5 mm 样品在 18 GHz 频率点的校准数据 (%)

样品	出厂数据	N 型标准	3.5 mm 标准	2.4 mm 标准
1#	97.6	95.1	97.4	94.4
2#	97.5	94.9	97.1	95.0
3#	97.8	95.3	97.5	94.5
4#	97.2	94.7	97.0	93.8
5#	97.3	94.9	97.2	93.6
6#	97.4	95.0	97.1	93.0

表6 3.5 mm 样品在 26.5 GHz 频率点的校准数据 (%)

样品	出厂数据	3.5 mm 标准	2.4 mm 标准
1#	95.9	95.7	93.2
2#	95.5	95.3	93.4
3#	95.1	94.9	94.1
4#	95.4	95.2	92.2
5#	96.1	95.9	92.5
6#	95.6	95.3	93.1

从以上各表数据表明,N型接头的功率敏感器校准因子的出厂数据更接近N型标准的校准数据,而3.5 mm接头的功率敏感器校准因子的出厂数据更接近3.5 mm标准的校准数据,为了获得更高的校准结果准确度,对于校准不同类型接头的功率敏感器应该采用相对应接头形式的功率标准。即使在理论上可以对不同转接头的插损、反射系数进行测量分析以及误差修正,但是因插损、反射系数等引入的测量误差还是比较大,不利于提高宽频带小功率校准系统的校准测量准确度。

## 5 结论

采用多电桥热敏电阻功率计组建不同接头形式的小功率校准系统,可以满足9 kHz~50 GHz宽频带小功率校准系统建立的要求并有效节约成本,为计量校准实验室提供了宽频带、高准确度、低成本建标的选择途径。同时,使用不同形式的标准对同一敏感器进行校准和数据分析,为各级计量标准实验室的日常计量校准工作提供了可参

考依据,并为更高频率校准工作的开展提供了思路。

## 参考文献

- [1] 安立公司. 安立公司成功完成了 GCT 半导体公司 LTE-Advanced 单芯片 4×4MIMO 测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 621.
- [2] 胡海涛, 钟明琛, 陈大为, 等. 可测性设计测试向量低功耗设计方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 46-50.
- [3] 刘欣萌. 高频和微波功率基准及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [4] DONG R, QUAN R, HOU F, et al. New research trends on high-precision time transfer technology[J]. Instrumentation, 2015(4).
- [5] BOTELLO-PEREZ M, GARCIA-RUIZ I. Development of a direct comparison system for radiofrequency power calibration transfer from 10 MHz to 18 GHz[C]. Precision Electromagnetic Measurements, IEEE, 2012: 730-731.
- [6] 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.
- [7] 郝绍杰, 韩晓东. 矢量网络分析仪硬件性能对测量结果的分析[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1): 28-32.
- [8] 刘军. 一种多端口矢量网络分析仪误差校准简化方法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(9): 29-33.
- [9] SHIMAOKA K. A new method for measuring accurate equivalent source reflection coefficient of three-port devices[C]. Precision Electromagnetic Measurements, IEEE, 2010: 589-590.
- [10] 陈彬. 微波功率测量中消除失配误差的方法[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(10): 14-16.
- [11] 崔孝海, 曲璐. 蒙特卡罗方法在微波功率测量不确定度分析中的应用[J]. 计量学报, 2008, 29(1): 77-79.
- [12] 苏立轩. 宽带国家功率基准测量系统研究[D]. 北京交通大学, 2007.
- [13] 苟元潇, 林茂六, 傅佳辉. 67GHz 宽带谐波相位参考及其定标技术[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7): 1488-1496.
- [14] 朱军, 李健一, 王增浩. 低反射系数等效信号源的测试方法研究[J]. 中国测试技术, 2008, 34(3): 34-36.

## 作者简介

陈飞, 1980 年出生, 高工, 主要从事计量保障技术研究。

E-mail: zolwell@163.com