

基于微波辐射原理的污秽绝缘子检测仪研制*

黄敬尧¹, 孙明浩², 汪芳宗¹, 张超¹

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002 2 郑州供电公司, 郑州 450006)

摘要: 用微波辐射计对绝缘子进行测量, 根据所测目标天线不同的温度, 反演出被测目标的辐射亮温, 进而推出绝缘子的污秽程度。研究内容具体包括: 微波辐射计定标; 辐射计反演系统的研制; 通过实验完成绝缘子污秽物的辐射特性与等值盐密、空气相对湿度、盐雾电导率等量值的关系, 分析污秽程度与辐射能量之间的关系, 从而找出污秽预警阈值。

关键词: 微波; 污秽绝缘子; 检测仪

中图分类号: TM 855

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2011)06-0067-04

Polluted Insulator Detector Development and Application Based on the Principle of Microwave Radiation

HUANG Jing-yao¹, SUN Ming-hao², WANG Fang-zong¹, ZHANG Chao¹

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China

2. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450006, China)

Abstract The study is to use microwave radiometer to measure the insulator. Depending on the target antenna temperature measured, we can inverse the measured brightness temperature of the radiation target. Furthermore, the degree of contamination of insulators is derived. Specific research includes microwave radiometer calibration, radiometer inversion system. We complete the radiation characteristics of pollutants on insulators and find its relationship with ESDD, air relative humidity, salt fog conductivity and other parameters by experiments. By analyzing the relationship between pollution condition and radiation energy, we find the contamination warning threshold.

Key words microwave; polluted insulator; detector

0 引言

在输电系统中, 绝缘子常因受到盐分、泥土、煤灰、SO₂ 等其他物质污秽的影响而使绝缘强度降低, 进而发生污闪, 造成停电事故, 这已成为电力系统中的难题。如果能够有效地测定污秽度和性质, 在一定程度上就能有效避免停电事故的发生, 从而提高电力安全生产水平, 减少对国民经济建设的影响。

应用微波技术^[1]对电气设备在线监测及故障分析是一项行之有效的技术手段。该项目主要利用 8mm 微波辐射计对绝缘子污秽程度进行有效的检测。

1 系统原理及构成

微波辐射计是一种能测量物体热电磁辐射的高灵敏度的微波噪声功率接收机, 可利用目标在微波段的辐射特性差异来探测目标。当辐射计天线扫描绝

缘子目标时, 天线温度为:

$$T_B(\theta, \varphi) = T_0 \varepsilon(\theta, \varphi) \quad (1)$$

式中 T_B 为天线温度; T_0 为实际温度; θ 为入射角 (常称为观测角); φ 为方位角; $\varepsilon(\theta, \varphi)$ 为目标在 (θ, φ) 方向的发射率。

绝缘子上有污秽物时, ε 就会随着污秽量和污秽性质发生变化, 最终导致辐射计的输出发生变化。根据以上原理, 先在实验室中根据国家标准选取等值附盐密度 (ESDD) 来与 ε 对应得到与一定量的污秽对应的特定天线温度, 进而在现场通过测量绝缘子的天线温度来判断绝缘子的运行状况。

所设计的微波辐射计如图 1 所示。包括天线、微波开关、参考负载、高频前端、平方律检波器、低频放大器模块组成。各部分的功能如下:

微波开关在数控单元的时序控制下, 负责将天线

* 湖北省自然科学基金资助项目 (2010CDB 10801)

输出或匹配负载的输出与接收机前端相连。高频前端由混频器、本地振荡器、中频放大器组成,对接收信号进行混频和功率放大。平方律检波器用于检出中频波形的包络,其输出与加在它上面的电压振幅的平方成正比。因此,平方率检波器的输出与加在接收机输入端的信号功率成正比,保证了辐射计输出电压与输入源噪声温度的线性关系。由于高频前端没有采用射频放大器,检波后输出电压很微弱,故检波器的输出需经低频放大器放大和滤波^[2](滤除高频成分)后,再送数控单元进行采集和处理,并将测得的物体亮度^[3]送液晶模块显示。

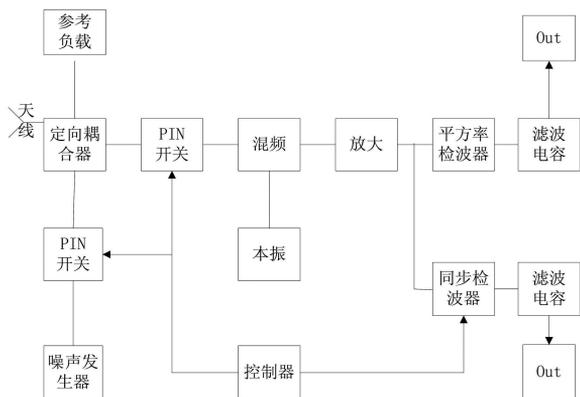


图 1 辐射计原理图

Fig 1 Rad im eter schematic

辐射计工作于两种状态,一种为调制及同步检波状态,另一种为非调制平方率检波状态,以下分别叙述其工作原理。

(1) 调制及同步检波输出状态测量工作原理

此时,噪声振荡器 NGD 不开, ATT 开关打开,目标信号经天线至定向耦合器,定向耦合器不输入噪声,只作为天线与调制器(PIN)开关连接用。输入信号进入调制器 PIN 开关后,调制器 PIN 开关作用为:一半周期为天线输入的测试信号,另一半为比较负载输入信号。输入信号和比较负载信号经混频器与本振差频,混频器输出至中频放大器放大,中频放大器输出信号经同步检波器检波,在同步检波器中,检测出天线输入的待测信号与比较负载的信号。经滤波器(相当于积分器)输出被测的信号直流成份,此时已减去噪声信号。

(2) 平方率检波输出状态

此时噪声振荡器 GND 不开, ATT 不开,被测信号 T。直接从天线至定向耦合器调制开关至混频器,在混频器中,天线输出信号与本振混频,经中频放大器、平

方率检波器输出直流电压 U_{dc} :

$$U_{dc} = C_d GKB (T_s + T_m) \quad (2)$$

若平方率检波器输出经过隔直电容后,系统噪声对应的直流被隔离 $T_m = 0$, 输出信号为:

$$U_{\sim} = C_d GKB T_s \quad (3)$$

$$\text{则: } T_s = \frac{U_{\sim}}{C_d GKB} \quad (4)$$

测量时使用的是调制及同步检波输出状态。

2 关键电路设计

2.1 低频放大电路的设计

对毫米波辐射计而言,因其测量的是物质辐射能量,进入辐射计的信号都非常的微弱。由于我们高频前端采用的是混频中放程式,没有配前置射频放大器,因而信号经高频前端和平方律检波后,其输出电压非常小,均为毫伏级。

为提高辐射计的灵敏度,放大倍数越大,单片机的测量将更为准确,但对输出电压进行直接放大,又必须考虑 A/D 采用芯片 TLC2543 的正常工作电压和每一采集通道所能承受的最大电压(为 6.8V)。因此所设计的电路除了考虑多级放大外,还必须考虑补偿,让放大后的电压在 A/D 芯片承受的范围。所设计的电路原理图如下图 2 示。

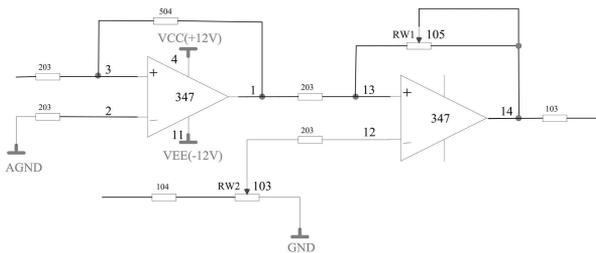


图 2 低频放大原理图

Fig 2 Schematic of lw - frequency amplification

采用 LF347N 来进行放大电路设计,因一片 374 含有 4 个运算放大器,电路采用二级放大,另外两路备用。同时通过调整芯片 12 脚的输入电压来对整个放大电路进行补偿,达到控制输出电压的目的,却不影响输入、输出电压的放大倍数。由图 2 可见,低频放大电路的放大倍数:

$$A = \frac{5 \times 10^5}{2 \times 10^4} \times \frac{R_{w1}}{2 \times 10^4} = 1.25 R_{w1} \times 10^{-3} \quad (5)$$

R_{w1} 的变化范围为 0~1MΩ, 所以放大倍数 A 的最大值为 1250 倍。如不采用补偿电路,按上述的平方律检波输出电压范围 16~20mV, 直接进行放大,则输出的电压不仅让放大器处于饱和状态不能工作,而且输出电压

远超出 A/D 转换芯片工作范围,会烧毁芯片。为保证单片机采集的电压灵敏度(即辐射计输入电压微小的变化,单片机均能检测到),通常要求低频放大倍数为 1000 倍左右,相当于平方率检波后的输出电压每变化 1mV,经低频放大器后,电压变化为 1V。

2.2 模数转换电路的设计

为满足多频对极化毫米波辐射计多路输入的要求,选用 TI 公司的 TLC2543 作为主控板的 A/D 转换芯片。TLC2543 是 12 位串行模数转换器,使用开关电容逐次逼近技术完成 A/D 转换过程。由于芯片工作电压不可能是长期稳定的 5V,为了提高辐射计输出测量的准确度和精度,从而保证辐射测量灵敏度,这里利用了 TLC2543 的基准电压设定功能,设计了模拟量输入范围设定调整电路,采用电阻分压的方式设定采集基准电压值。采用 TI 公司生产的 TL431 来设计此恒压电路。如图 3 所示的电路。

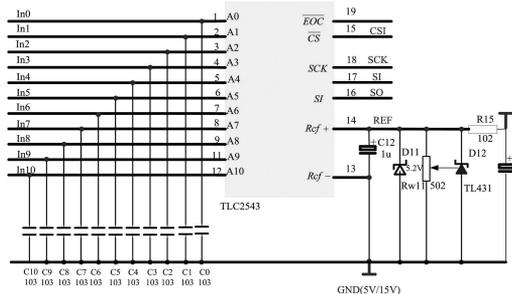


图 3 TLC2543 输入电路和恒压电路图
Fig 3 Input circuit and constant voltage circuit of TLC2543

需要注意的是,在选择电阻时必须保证 TL431 工作的必要条件:通过阴极的电流要大于 1mA。

TLC2543 与单片机接口采用 4 线 SPI 串行接口,三个控制输入端分别为片选 (CS)、输入输出时钟 (CLK) 及数据输入端 (DI),片内的 14 通道多路器可以选择 11 个输入端的任何一个或 3 个内部自测电压中的一个,且采样保持是自动完成的,转换结束后“EOC”输出变高,转换结果由三态输出端 (DATA OUT) 输出。

2.3 天线设计

卡塞格伦天线^[4]由三部分组成(见图 4):即主反射器、副反射器和辐射源。其中主反射器为旋转抛物面,副反射面为旋转双曲面。在结构上,双曲面的一个焦点与抛物面的焦点重合,双曲面焦轴与抛物面的焦轴重合,而辐射源位于双曲面的另一焦点上。它是由副反射器对辐射源发出的电磁波进行的一次反射,

将电磁波反射到主反射器上,然后再经主反射器反射后获得相应方向的平面波波束,以实现定向发射。

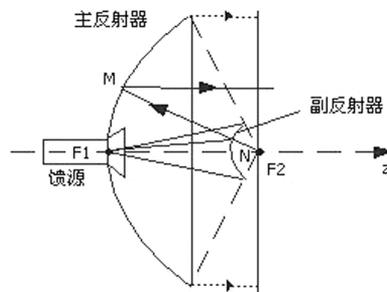


图 4 卡塞格伦天线图

Fig 4 Cassegrain antenna patterns

当辐射器位于旋转双曲面的实焦点 F1 处时,由 F1 发出的射线经过双曲面反射后的射线,就相当于由双曲面的虚焦点直接发射出的射线。因此只要是双曲面的虚焦点与抛物面的焦点相重合,就可使副反射面反射到主反射面上的射线被抛物面反射成平面波辐射出去。

3 辅助工作

3.1 微波辐射计定标

定标是利用辐射计去接收一个微波辐射特性精确已知的定标源的辐射信号,进而构造出辐射计输出电信号与接收到的辐射量值之间精确定量关系。辐射计定标^[5]技术大体分为两种:分步定标法和整体定标法。通常采用两点定标法进行整体定标,即选取一个高温点和一个低温点即完成整体定标。用常温“黑体”和浸在液氮中的“黑体”作为定标源,当天线对着常温“黑体”时,天线口面温度为常温 T_0 ,天线对准低温源时,天线口面温度略高于液氮沸点温度 T_c ,考虑多种误差, T_c 取 80K。天线波束中心轴线的入射角为 30° 。

在本项目中,一次定标的定标方程为:

$$T_B = - 82.3U + 308 \quad (6)$$

式中 T 为被测物体辐射亮温(单位为 K); U 为辐射计输出直流电压(单位为 V)。

3.2 辐射计反演系统

由于微波辐射计的测量输出是通过定标方程换算后得到目标的温度,天线温度是视在温度分布用天线方向图加权的积分,要得到其亮度温度首先必须解这个积分方程从天线温度中得到目标的视在温度,而天线温度是天线波束内入射到天线口面视在温度分布的加权平均,它既与视在温度的分布有关,又与天线类型有关。对于旁瓣电平甚低的笔形波束天线,则旁瓣的影响可以忽略不计,天线温度可近似表

示为视在温度,但对于主波束宽的天线,视在温度在波束内随 (θ, φ) 方向变化,天线所具有的平滑效应使辐射角输出的天线温度与视在温度有很大差别,从而使得天线温度分布不同于被测的亮度温度分布。要想得到视在温度的近似值,除了选用锐波束低旁瓣的天线外,还可以对天线温度数据进行反演而得到。

3.3 数字处理系统的软件实现

由于进行反演计算的计算量比较大,一般要进行傅立叶变换及其反变换等复杂的数学计算,因此需要选用 DSP 信号处理芯片^[6]或是 ARM 系列的微处理器作为核心处理芯片。并对其编程,以完成如下的功能:

(1) 数据采集功能:通过对模数变换芯片 TLC2543 的时序控制,读取其各通道转换后的电压值,同时按芯片时序要求,读取“一总线”数字测温芯片 DS18B20 的测量温度值;

(2) 增益和本机噪声的补偿算法:根据第二章推导的纯软件补偿算法,对辐射计的系统增益和本机噪声按开关动作时序进行补偿计算,求出补偿后的天线温度值;

(3) 定标温度的设置和存储:通过对 K1~K5 按键的响应及 X5045 的访问,完成定标温度的设置和存储;

(4) 控制功能:按第二章的微波开关动作时序要求,完成对微波开关的控制,同时完成对定时器和显示器检测控制;

(5) 通信功能:按帧格式的要求,对所发送和接收的信息分别进行组帧和提取;检测总线的收发状态,对 75LBC184 进行收发控制,并按接收的命令进行相应操作。

4 现场测试数据及分析

从表 1 看出,同一变电站积污情况大致相同,其辐射计输出电压值基本相同。从表 2 看出,同一设备在经雨水冲洗后,辐射计输出电压值较高,即辐射亮温较小。从表 3 看出,辐射计能很好检测、区分设备污秽程度;设备污秽程度高,则辐射计输出电压值较小;反之则反。

表 1 鲁庄 220kV 变电站测试结果

Tab 1 220kV substation test results in village Lu

标注码	设备名称	电压 /V	备注
1-1	鲁 221B 相北侧 横绝缘子	2 178	合成绝 缘子
1-2	220kV 北母线 A 相支瓷瓶	2 117	
1-3	220kV 北母线 B 相支瓷瓶	2 146	

表 2 鲁庄 220kV 变电站测试结果

Tab 2 220kV substation test results in village Lu

标注码	设备名称	电压 /V	备注
1-6	鲁备 1 甲 C 相南柱	1.932	下小雨前
1-8	鲁后 1 甲 A 相南柱	2.514	下小雨后

表 3 峡窝变电站测试结果

Tab 3 Substation test results in Xiaowo

标注码	设备名称	电压 /V	备注
3-1	110kV 北母西侧 B 相 CT	2.611	未喷涂
3-1	窝鹿 1A 相 CT	3.505	新喷涂

参考文献

- [1] 张瑜, 郝文辉, 高金辉. 微波技术及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006 180-201.
- [2] David M. Pozar. 微波工程 (第三版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006 325-378.
- [3] 聂建英, 李兴国, 娄国伟. 毫米波辐射探测目标亮温的估计 [J]. 微波学报, 2003 19(20): 24-28.
Nie Jian-ying, Li Xing-guo, Lou Guo-wei. Millimeter Wave Radiation Detection Target Brightness Temperature Estimates [J]. Microwave, 2003 19(20): 24-28.
- [4] 殷际杰. 微波技术与天线 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [5] 彭树生, 李兴国. 8mm 测量辐射计定标方法的研究 [J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(4): 279-284.
PENG Shu-sheng, LI Xing-guo. Calibration Method of 8mm Measuring Radiometer [J]. Infrared and Millimeter Waves, 1997, 16(4): 279-284.
- [6] 张雄伟. DSP 芯片的原理与开发应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009 59-102.

作者简介:

黄敬尧 (1965-), 男, 副教授, 硕导, 主要从事过程控制与电力电子等方面的研究工作. Email: jhuang@ctgu.edu.cn
 孙明浩 (1975-), 男, 河南郑州人, 郑州供电公司上街供电局, 总工程师, 主要研究方向: 电力企业基层培训、电网建设及安全运行。
 汪芳宗 (1966-), 男, 教授, 硕导, 从事电力系统分析与控制, 配电系统自动化, 电工新技术及应用研究. Email: fwang@ctgu.edu.cn
 张超 (1986-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子与嵌入式系统的研究工作. Email: jude@163.com

收稿日期: 2011-05-02
(杨长江 编发)