

## 基于 AD8302 的简易阻抗测量仪\*

任庆芳 宋 智 薛严冰

(大连交通大学电气信息学院 大连 116028)

**摘 要:** 针对目前商业化的阻抗分析仪价格昂贵的现状,用双定向耦合器和幅相检测芯片 AD8302 设计了一款简易的阻抗测量仪。双定向耦合器用来构成反射计电路,分离出输入信号和反射信号;AD8302 用来测量两路信号的幅度增益和相位差。将两部分结合后通过测反射系数求得负载阻抗。在 75~85 MHz 频率范围内测量了贴片电阻的阻抗值,实部的最大相对误差为 3.8%,虚部呈现了较小的电抗值。测量结果表明该简易阻抗测量仪可以实现较高频率范围内阻抗的初步测量。

**关键词:** 双定向耦合器;AD8302;反射系数;负载阻抗

**中图分类号:** TH867 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:**

## Simple impedance meter based on AD8302 chip

Ren Qingfang Song Zhi Xue Yanbing

(Institute of electrical information, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** For the situation that the current commercial impedance analyzer is expensive, this paper designed a simple impedance meter with a dual directional coupler and an amplitude and phase detection chip AD8302. Dual directional coupler is mainly used to constitute reflectometer circuit, separating the input signal and the reflected signal; AD8302 is mainly used to measure these two signals' amplitude gain and phase difference. After combining the two parts, to get load impedance by measuring the reflection coefficient. By measuring the chip resistor during the frequency of 75~85 MHz and receiving that its maximum relative error of real part is 3.8%, imaginary part presents a smaller reactance. The results show that the simple impedance meter can achieve impedance measurement preliminary.

**Keywords:** dual directional coupler; AD8302; reflection coefficient; load impedance

## 1 引言

电子行业中阻抗特性是一个十分重要的物理量,它的测量是电学领域最基本的测量之一。阻抗测量的方法主要有电桥法、谐振法、伏安法和网络分析法。目前国内外商品化的阻抗分析仪<sup>[1]</sup>十分昂贵,对小型的实验室而言制作一款简易的阻抗测量仪十分必要。

AD8302<sup>[2]</sup>是美国 ADI 公司于 2001 年 10 月推出的用于 RF/IF 幅度和相位测量的首款单片集成电路,其在简易阻抗测量仪中的应用研究已经取得了一定的进展。徐晓林等人<sup>[3]</sup>针对雷达接收的回波信号与发射信号,用 AD8302 芯片设计出了宽频带幅度比和相位差的测量系统,并在 25MHz 条件下进行了测试;Qizheng Gu 等人<sup>[4-5]</sup>针对自适应控制匹配网络提出了一种新颖的负载阻抗测量的算法;方舜宇等人<sup>[6]</sup>设计出一种新型微波大功率的双定向耦合器,并对其进行了优化。从上述研究工作可以看出:虽然用

AD8302 幅相检测芯片实现阻抗测量是一种有效方案,但研究的频率比较低,而本文研究的频率相对比较高。为了产生该芯片实现阻抗测量的两路输入信号(入射和反射信号),引入了双定向耦合器<sup>[7]</sup>。目前关于该芯片与双定向耦合器结合的研究也比较少。

本文设计了一款简易的阻抗测量仪,主要由两部分构成,一部分是由 AD8302 芯片构成的幅相检测电路,用于测量幅度增益和相位差;另一部分是构成反射计电路的双定向耦合器。通过电磁仿真软件设计出双定向耦合器的器件结构并用网络分析仪测试其 S 参数。将双定向耦合器与幅相检测电路结合制作出测量仪,在 75~85 MHz 的频率范围内,分别对 51  $\Omega$  和 100  $\Omega$  的贴片电阻进行测试,并对实验结果进行了分析。

## 2 系统总体构成

系统基本组成:信号源、反射计电路、幅相检测电路和

收稿日期:2015-04

\* 基金项目:国家自然科学基金(61201092)、辽宁省自然科学基金(201202015)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013047)

• 106 •

被测元件,如图1所示。

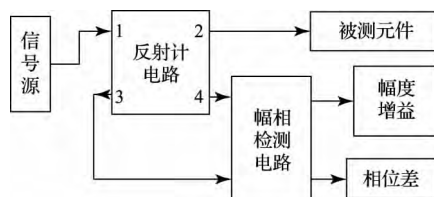


图1 系统原理框图

系统工作原理:信号源产生激励信号,通过一个四端口反射计电路的2端口送入被测元件,同时将反射计电路3和4端口产生的信号送入幅相检测电路,可以测得反射系数的模值和相位,根据反射系数与被测元件阻抗的关系,计算出负载阻抗。从图1可以看出:该阻抗测量系统最重要的就是反射计电路和幅相检测电路两部分,它们的准确性很大程度上影响着最终测量结果的准确性。

### 3 关键电路的设计

#### 3.1 幅相检测电路的设计

传统的幅相检测电路大多采用中小规模集成电路,具有电路复杂、测量精度低、使用频率范围窄等缺点,本文选择的AD8302芯片可实现高精度的幅相检测。该芯片能同时测量从低频到2.7 GHz频率范围内两输入信号之间的幅度比和相位差,进行幅度测量时动态范围可扩展到60 dB,相位测量时动态范围则可达180°。它主要有测量、控制和电平比较3种工作方式。测量模式的原理图如图2所示。

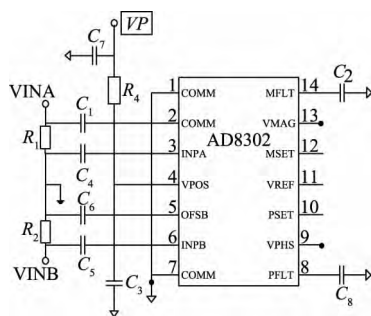


图2 AD8302的测量模式

图中 $V_{MAG}$ 为幅度比较输出, $V_{PHS}$ 为相位比较输出。当芯片输出引脚13和9直接与芯片反馈设置输入引脚12和10相连时,芯片的测量模式将工作在默认的斜率和中心点上,其幅度和相位差测量方程式如下:

$$V_{MAG} = V_{SLP} \log(V_{INA}/V_{INB}) + V_{CP} \quad (1)$$

$$V_{PHS} = V_{\phi} [|\phi(V_{INA}) - \phi(V_{INB})| - 90^\circ] + V_{CP} \quad (2)$$

式中: $V_{INA}$ 和 $V_{INB}$ 分别为A、B两通道的输入信号幅度, $V_{SLP}$ 为斜率; $\phi(V_{INA})$ 与 $\phi(V_{INB})$ 分别为A、B两通道的输入信

号相位, $V_{\phi}$ 为斜率。幅度增益和相位差的理论响应曲线如图3所示。

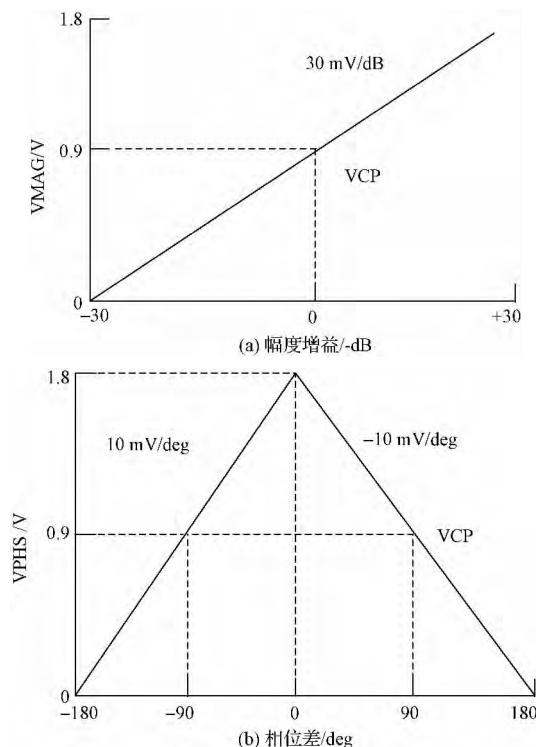


图3 AD8302幅度增益和相位差曲线

#### 3.2 反射计电路的设计

构成反射计的电路有多种,常见的有定向耦合器<sup>[8-10]</sup>、电桥法和六端口反射计,本文设计的阻抗测量仪工作频率为75~85 MHz,相对比较高,适合采用定向耦合器构成。定向耦合器是一个互易的四端口网络,结构如图4所示。信号由1端口输入,2端口输出,3端口是耦合端口,4端口是隔离端口,当信号加在输入端时,理想情况下可以在2和3端口输出两个幅度信号。

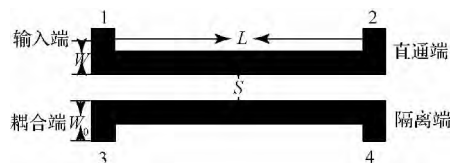


图4 单定向耦合器

从图中可以看出,定向耦合器的参数主要包括线宽 $W$ 、线长 $L$ 和线间距 $S$ 。图中 $W_0$ 是50 Ω等效微带线的线宽,当中心频率固定时, $W_0$ 也是固定的。这些参数决定了定向耦合器的主要技术指标:耦合度、隔离度、插入损耗和工作带宽。

本文通过电磁仿真软件ADS设计了一款工作于75~85 MHz的双定向耦合器,介质材料为FR4介质基板(介电常数 $\epsilon_r=4.4$ ,厚度 $h=1.5$  mm,导体带厚度 $T=0.035$  mm,

$\tan \delta = 0.02$ ,  $Hu = 1.0 \times 10^3$  mm,  $cond = 4.1 \times 10^7$ ), 为了满足 AD8302 输入信号幅值的要求, 耦合器指标耦合度  $C < -15$  dB, 隔离度  $D < -25$  dB 设计过程如下:

1) 在已知特性阻抗  $Z_0 = 50 \Omega$  的条件下, 根据式(3)可以求得耦合器的电压耦合系数  $k$ :

$$k = 10^{-C/20} \quad (3)$$

2) 利用奇偶模阻抗与特性阻抗的关系

$$Z_{oe} Z_{oo} = Z_0^2 \quad (4)$$

得到奇、偶模特性阻抗:

$$Z_{oo} = Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \quad (5)$$

$$Z_{oe} = Z_0 \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \quad (6)$$

3) 将以上参数和 FR4 基板参数带入到 ADS 中, 得到耦合器的参数:  $W = 2.732$  mm,  $S = 2.669$  24 mm,  $L = 113.905$  mm。

双定向耦合器由两个背靠背的单定向耦合器级联组成, 用于产生入射波和反射波, 结构如图 5 所示。当输出端口 2 连接  $50 \Omega$  匹配负载时, 输入端口 1 的信号能量全被负载吸收, 传输线上没有反射波; 反之当端口 2 负载不匹配时, 就会有部分或者全部的信号能量被反射回来, 传输线 1~2 上同时存在两个电磁波相向传播, 这时就可以分别在 3 和 4 端口检测到耦合过来的入射波和反射波。将上述  $W$ 、 $S$  和  $L$  的值带入到 ADS 的原理图, 并设置  $L_2 = 1.5$  mm, 生成版图之后进行仿真, 根据仿真结果对  $S$  参数进行优化, 优化后  $W$ 、 $S$  和  $L$  分别为:  $W_1 = 2.254$  79 mm、 $S_1 = 0.422$  57 mm 和  $L_1 = 155.025$  mm。

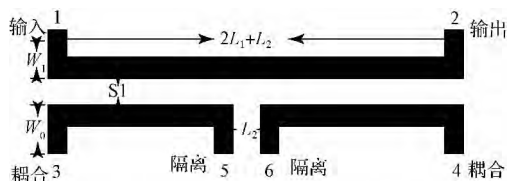


图 5 双定向耦合器

## 4 实验结果与分析

### 4.1 耦合器的仿真与实测结果比较

用 FR4 覆铜板实际制作出双定向耦合器, 用 AV36580A 矢量网络分析仪测量了耦合器的  $S$  参数。测试时将 1、3 和 4 端口分别用同轴线与 SMA 头连接, 2、5 和 6 端口选用  $51 \Omega$  贴片电阻进行阻抗匹配, 仿真结果和测量结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出: 仿真的  $S$  参数与实测结果的变化趋势一致, 表明了仿真研究的有效性。图 6(a) 中实测  $S_{11}$  整体

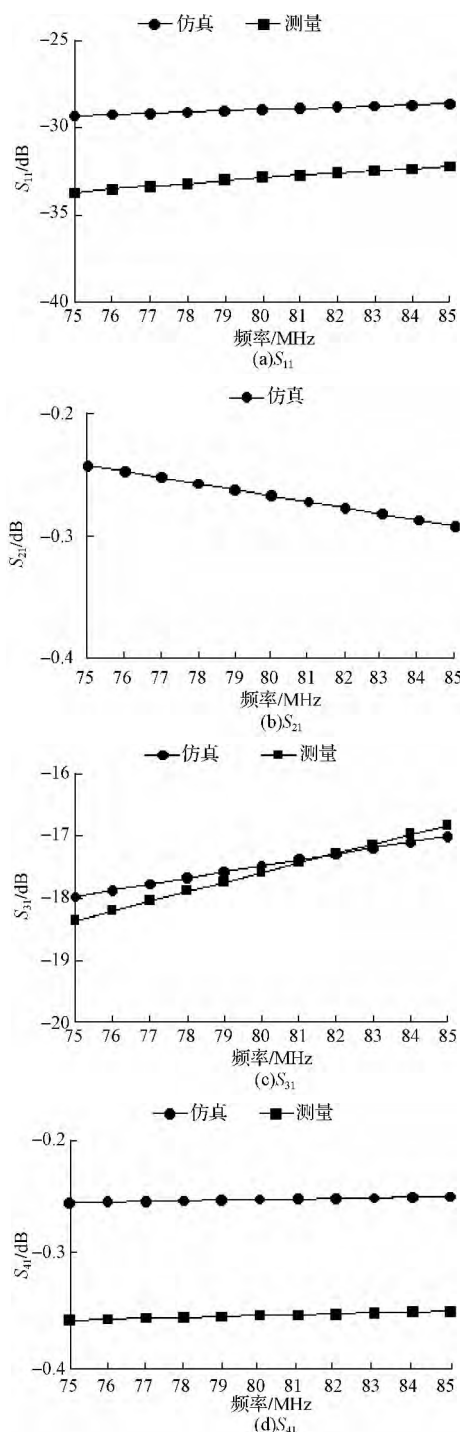


图 6 双定向耦合器的仿真与实测比较

小于  $-30$  dB, 耦合器输入端口匹配良好; 图 6(b) 中  $S_{21}$  在整个频带范围内均大于  $-0.3$  dB, 传输损耗非常小; 图 6(c) 中实测  $S_{31}$  在中心频率  $80$  MHz 的耦合度为  $-17.58$  dB, 整个频带最大值与最小值相差  $1.3$  dB, 耦合平坦度高; 图 6(d) 中实测  $S_{41}$  在整个频率范围内为  $-50$  dB 左右, 说明双定向耦

合器的隔离度很好。测量结果表明,设计的双定向耦合器可用于简易阻抗测量仪。

4.2 负载阻抗的测试与分析

测试系统如图 7 所示:用 EE1482 信号源产生 75~85 MHz 的入射信号,送入双定向耦合器输入端口 1,将待测负载接入输出端口 2。将耦合器输出的两路信号分别接入幅相检测电路的输入端(引脚 2 和 6),并用 DSO5034 双踪示波器观察输出信号的幅值是否符合芯片的输入要求。在输出引脚(13 和 9)测量出反射系数的模值和相位对应的电压值,代入图 3 所示的响应曲线,可以计算出反射系数。反射系数与负载阻抗满足下述关系

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \tag{7}$$

式中:特性阻抗  $Z_0$  为 50  $\Omega$ 。根据测得的反射系数  $\Gamma_L$ ,

即可计算出负载阻抗  $Z_L$ ,该值作为测量值。

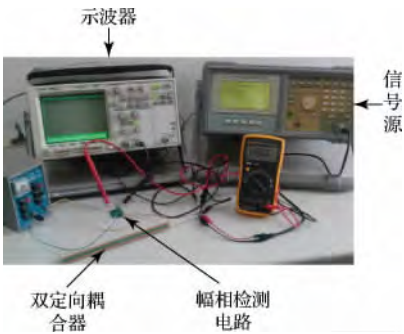


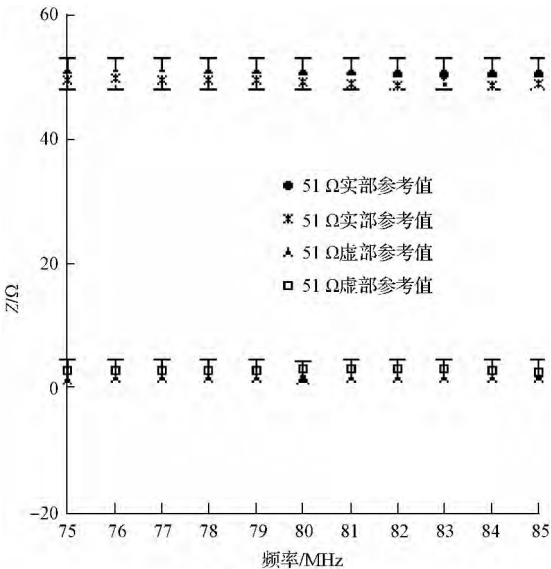
图 7 测试系统

分别选取 51  $\Omega$  和 100  $\Omega$  贴片电阻作为待测负载,测得反射系数的模值相位对应的电压值如表 1 所示。

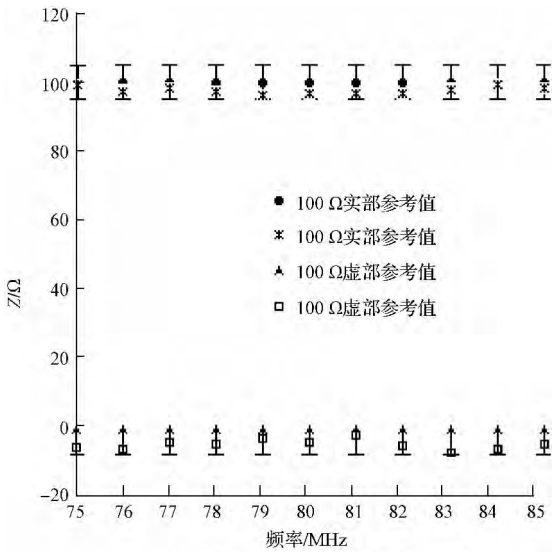
表 1 加待测负载时 AD8302 的 13 和 9 脚测量电压

		频率/MHz										
		75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
51 $\Omega$	13 脚	0.043	0.048	0.044	0.056	0.059	0.067	0.071	0.083	0.078	0.060	0.059
	9 脚	0.825	0.854	0.843	0.835	0.825	0.796	0.767	0.706	0.715	0.698	0.687
100 $\Omega$	13 脚	0.612	0.608	0.61	0.609	0.608	0.608	0.611	0.613	0.617	0.611	0.606
	9 脚	1.756	1.759	1.745	1.747	1.736	1.745	1.732	1.698	1.748	1.776	1.731

把表 1 中的测试数据代入公式(1)、(2)和(7),得到负载阻抗测量值。为衡量测试仪的测试精度,将 Agilent E4991A 阻抗分析仪的测量结果作为参考值,结果如图 8 所示。



(a) 51  $\Omega$  实部虚部参考值与测量值



(b) 100  $\Omega$  实部和虚部参考值与测量值

图 8 51  $\Omega$  和 100  $\Omega$  实部虚部参考值与测量值

从图 8 可以看出:1) 测量的实部和虚部与理论值相比虽然有一定的偏差,但在整个频率范围内曲线的走势相对

还是比较平稳的。2)  $51\ \Omega$  实部在整个频率范围最大值为  $49.6\ \Omega$ , 最小值为  $48.5\ \Omega$ , 最大相对误差为  $3.5\%$ ; 虚部最大值为  $3.6\ \Omega$ , 最小值为  $3.1\ \Omega$ , 呈现感抗性。3)  $100\ \Omega$  实部在整个频率范围内最大值为  $99.3\ \Omega$ , 最小值为  $96.52\ \Omega$ , 最大相对误差为  $3.8\%$ ; 虚部最小值为  $-7.9\ \Omega$ , 最大值为  $-3.64\ \Omega$ , 呈现容抗性。

对测量结果进行分析, 产生误差的原因可能有两方面: 一是在  $75\sim 85\ \text{MHz}$  频率范围内, 幅相测试外围电路的元器件受分布参数的影响, 不再是纯电感或电容, 影响了幅相测试的精度。另一方面, 制作的双定向耦合器的两个耦合端口之间本身存在一定的相位差, 附加的相位差对最终的测试结果也可能产生一定的误差。

## 5 结 论

设计了一款简易的阻抗测量仪, 由反射计电路双定向耦合器和 AD8302 幅相检测电路两部分构成。重点介绍了用 AD8302 实现阻抗测量、设计双定向耦合器的方法。用制作的简易阻抗测量仪对  $51\ \Omega$  和  $100\ \Omega$  贴片电阻进行测试, 实部最大相对误差分别为  $3.5\%$  和  $3.8\%$ , 虚部受分布参数的影响较大, 在测量频率范围内表现为较小的感抗值和容抗值。测试结果说明该简易阻抗测试仪可以在较高频段实现阻抗的初步测量。

## 参考文献

- [1] 李文强, 黄刚, 杨录. 大量程全自动阻抗测量仪研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 859-865.
- [2] 何源. 基于 AD8302 的 X 波段瞬时频率测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2011, 34(2): 66-68.
- [3] 徐晓林, 刘四新, 屈义平. 宽频带幅度比和相位差测量系统的设计[J]. 电子设计工程, 2010, 18(2):

9-11.

- [4] GU Q, DE LUIS J R, MORRIS III A S, et al. An analytical algorithm for pi-network impedance tuners[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2011, 58(12): 2894-2905.
- [5] GU Q, MORRIS A S. A new method for matching network adaptive control[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(1): 587-595.
- [6] 方舜宇, 朱守正. 一种新型微波大功率双定向耦合器的设计[J]. 真空电子技术, 2013(5): 37-40.
- [7] 左海亮, 殷兴辉. 网络分析仪中反射计的双定向耦合器的设计和优化[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(24): 7175-7179.
- [8] 童俊.  $30\sim 150\ \text{MHz}$  宽带双定向耦合器的设计与实现[D]. 华中科技大学, 2013.
- [9] 唐旭英. 双耦合谐振回路选频特性仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3): 42-46.
- [10] 窦建华, 徐兰天, 杨学志. 测量匹配网络 S 参数的转换模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(2): 191-196.

## 作者简介

任庆芳, 1989 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为通信理论及关键技术。

E-mail: 1090958898@qq.com

宋智, 1978 年出生, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为电路理论、宽带匹配。

薛严冰, 1973 年出生, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为半导体气体传感器。

(上接第 105 页)

- [3] 王岩. 扭矩测量方法现状及发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2010, 38(1): 24-26.
- [4] 狄长安. 火炮手轮操作力测量装置设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(12): 1148-1153.
- [5] 徐健. 基于单点虚拟振动功率的发动机转速测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 103-106.
- [6] 苏永生. 基于 LabVIEW 的旋转轴转速测量方法[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(1): 103-106.
- [7] 吴俊才. 霍尔磁力测速仪[J]. 咸宁学院学报, 2010, 30(6): 17-19.
- [8] 贺才军. ZigBee 技术无线传感器网络在工业监控系统中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.

- [9] 张家念. GPRS 无线通信在电力监控装置的应用[J]. 铁道运营技术, 2014, 20(3): 46-47.
- [10] 于涛. 浅析基于 GPRS 的嵌入式环保数据采集系统[J]. 数字技术与应用, 2010(10): 105.
- [11] 罗映冰. 基于 GPRS 技术的计算机远程监控系统的研究与实现[J]. 中国科技信息, 2010(2): 96-97.

## 作者简介

张健, 1983 年出生, 中级工程师, 2009 年毕业于西南石油大学化工过程机械专业, 硕士研究生, 现工作于中石油川庆钻探公司安检院。

Email: wy2002709@163.com.