

基于窄带物联网的土壤墒情监测系统

杨卫中¹ 王雅淳¹ 姚瑶¹ 赛景波²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

摘要: 为了实时、准确监测土壤含水率,设计了一套基于窄带物联网的土壤墒情监测系统。系统探头采用圆环柱体结构,通过探头中分频器的输出频率测出土壤含水率,并对电容式土壤水分传感器进行了标定。利用恒温箱进行了环境温度对土壤含水率测量精度的影响分析,表明分频频率与温度呈现良好的线性关系,温度变化1℃,探头中分频频率变化0.138 6 kHz,从而得到温度补偿方程。在50.4~65.5℃和-18.0~23.6℃的环境中进行土壤含水率测量实验,结果显示,系统在较高温、较低温的环境下仍可以稳定、可靠运行。

关键词: 土壤墒情; 传感器; 窄带物联网; 传感器标定; 温度补偿

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0243-05

Soil Moisture Monitoring System Based on Narrow Band Internet of Things

YANG Weizhong¹ WANG Yachun¹ YAO Yao¹ SAI Jingbo²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Moisture content is the most direct and necessary index to analyze and judge agricultural drought, realize water-saving irrigation and hydrological forecast. In order to grasp the information of soil moisture content in time and accurately, a soil moisture monitoring system based on narrow band internet of things (NB-IoT) was designed. Circular cylinder was adopted by the probe of the system. The moisture content of soil was measured by the output frequency of the frequency divider in the probe, and the capacitive soil moisture sensor was calibrated. The calibration experiment of the sensor showed that the calibration curve adopted the cubic polynomial curve of the output frequency of the sensor, and the correlation was good, and the determination coefficient can reach 0.985 1. The influence of environmental temperature change on the measurement accuracy of soil moisture content was analyzed with a thermostat, and the temperature change of 1℃ and the frequency division of the probe was 0.138 6 kHz, a first order linear equation was obtained to compensate the influence of ambient temperature on the frequency output of the sensor. Soil moisture content was measured at 50.4~65.5℃ and -18.0~23.6℃. The results show that the system can run stably and reliably at high temperature and low temperature.

Key words: soil moisture content; sensor; narrow band internet of things; sensor calibration; temperature compensation

0 引言

墒情是分析判断农业旱情、实现节水灌溉和水文预报最直接和必要的指标。目前常用的墒情测量方法有干燥法、张力计法、中子法、近红外法和介电法等^[1-3]。

其中,介电法利用土壤的介电特性,间接实现土

壤含水率的测量,是一种快速、有效、可靠、简便的方法^[4]。随着信息技术的快速发展,物联网(Internet of things, IoT)在农业领域的应用日益广泛,其中窄带物联网(Narrow band internet of things, NB-IoT)是IoT领域的一个新兴技术,它支持低功耗设备与广域网的蜂窝数据连接,也被称为低功耗广域网。相比于蓝牙、ZigBee等短距物联网通信技术,NB-

IoT 具有覆盖范围广、支持设备连接能力强、低功耗、低成本的优点^[5-8],是农业物联网的优选技术方案。

本文以介电法为基础,采用基于高频振荡电容测量法设计多深度土壤水分剖面传感器^[9-13],设计基于 NB-IoT 的土壤墒情监测系统。

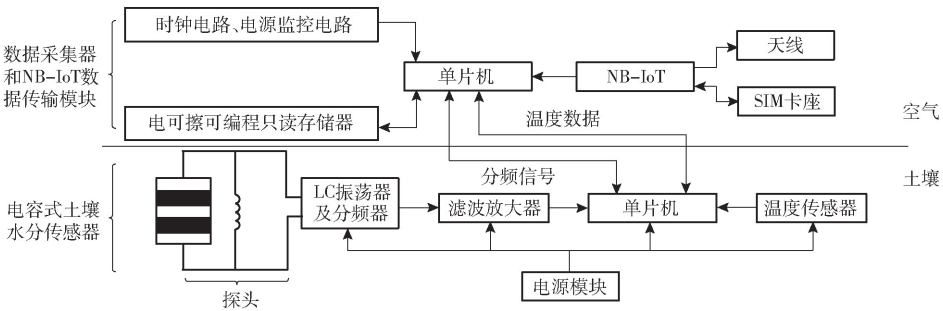


图 1 NB-IoT 土壤墒情监测系统原理图

Fig.1 Principle diagram of soil moisture monitoring system based on NB-IoT

电容式土壤水分传感器由探头和测量电路组成。探头为由绝缘材料加工而成的圆柱体,多个探头通过连接管相连接可组成多深度的测量系统,如图 2 所示。探头结构如图 2a 所示,一组直径 33 mm、高 20 mm 的不锈钢环、套在探头的圆柱体上,间距 10 mm,组成一个环形电容。测量电路内置于圆柱体中,通过铜线经由过孔与探头外的环形电容相连接。PVC 连接管如图 2b 所示,共有 100 mm 和 200 mm 两种规格,两端的内螺纹恰好与探头的外螺纹相匹配,可以连接在一起,二者可根据实际测量深度需要组合,满足不同作物根区深度的土壤水分测量^[14],组合后的传感器如图 2c 所示,最上面的圆台用来放置数据采集传输模块。

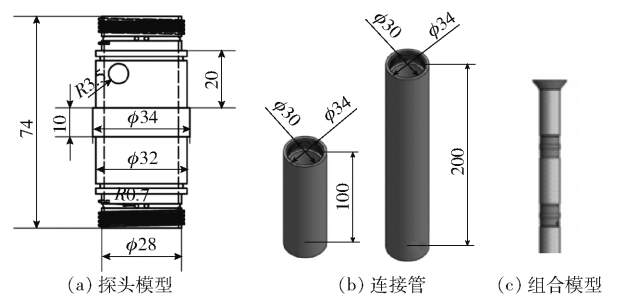


图 2 电容式土壤水分传感器

Fig.2 Sensor and PVC connecting pipe model

电容式土壤水分传感器测量土壤含水率的原理是,随着土壤含水率的变化,环形电容两极板周围介质(土壤)的介电常数发生变化,从而引起环形电容的电容值发生改变。因此,可将探头视为一个可变电容,将这个可变电容接在 LC 振荡电路中,振荡频率将随土壤含水率变化而改变^[15-16]。根据并联谐振理论,振荡器的振荡频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$,其中 L 是 LC 振荡电路中电感器的电感, C 是探头环形电容器

1 系统结构及原理

窄带物联网土壤墒情监测系统结构如图 1 所示。由电容式土壤水分传感器、数据采集器和 NB-IoT 数据传输模块组成。

的电容,该电容与环形极板板间距离、板的正对面积以及周围土壤的介电常数等因素有关,所以探头的尺寸结构一定时,振荡器输出的频率仅与土壤的介电常数有关,而土壤的介电常数与土壤含水率具有确定关系。因此,通过测量振荡频率可间接测量出土壤含水率。

测量电路由电源电路、LC 振荡器、分频器、滤波放大器、单片机、温度传感器组成。其中 LC 振荡器采用 MC12148 集成高频振荡器电路,可将由土壤含水率变化引起的环形电容改变量转换成频率信号输出。MC12148 振荡器工作频率可达 1 100 MHz。前人的研究表明,介电法土壤含水率测量会受到土壤电导率的影响,其影响程度与其测量频率段有关,频率越高所受影响越小,但频率过高集肤效应明显,电路开发难度急剧增加。综合考虑,将输出频率控制在 80 ~ 110 MHz 范围内^[17];为了便于后续电路的频率测量,采用 MC12018 分频器对振荡器的输出进行 128 分频,并且以方波形式输出,输出端为差分输出方式;单片机对分频器的输出进行计数,然后根据传感器标定曲线计算与之对应的土壤含水率,并输出到采集传输模块。测量电路采用了单片机系统,主要基于以下两点考虑:①简化测量电路的研发。②虽然每个传感器都有自己独有的标定方程,但数据计算由单片机在传感器内完成,降低数据采集传输模块的计算复杂度,实现系统的模块化和标准化设计。STC8F2K08S2 单片机是一款抗干扰能力超强、高速、低功耗、价廉的 8051 单片机,满足系统的设计要求^[18-19]。

数据采集传输模块由单片机、电源监控电路、时钟电路、电可擦可编程只读存储器 (Electrically erasable programmable read-only memory, EEPROM)

以及 NB-IoT 模块组成。电源监控电路采用 TI 公司的 TPS3803-01 芯片。当电源电压小于 3.1 V 时芯片向单片机发送低电量保护信号,提醒用户及时更换电池;时钟电路采用飞利浦公司的时钟/日历芯片 PCF8563,为系统提供实时的时间/日历,用于按设定时间唤醒处于休眠省电状态下的单片机;EEPROM 采用 AT24C256 芯片,存储空间为 32 KB,采用 I²C 总线与单片机通信。利用其电擦除、可编程、失电后数据不丢失的特性实现单片机采集数据(采集时间、土壤含水率、温度)在线实时保存。单片机也可访问 EEPROM 查看历史数据;NB-IoT 模块采用 BC-95 模组实现,BC-95 是一款高性能、低功耗的 NB-IoT 无线通信模块,其尺寸仅为 23.6 mm × 19.9 mm × 2.2 mm,能最大限度地满足终端设备对小尺寸模块产品的需求,BC-95 采用先进的集成电路设计工艺,仅在一片 BC-95 上就可以完成窄带物联网的收发功能。通过串口接收单片机采集到的土壤含水率数据、温度数据以及电池状态,通过天线发射至指定服务器。用户可登陆中国电信物联网开发平台实时查看数据以及历史数据。NB-IoT 工作频段为 Band 5。接收频率为 869~894 MHz,发射频率为 824~849 MHz,中心频率为 854 MHz。

2 传感器性能实验

2.1 传感器标定实验

标定是传感器开发中的一个重要环节。干燥法测量含水率准确度较高,各行业一般用其结果作为含水率分析的标准^[20-21],本文采用干燥法对传感器进行标定。

本次实验测试土样取自中国农业大学东校区校园内(40.012 227°N,116.364 829°E),为砂质壤土。选好土壤后,先用孔径为 3 mm 的土筛过筛,再用孔径为 1 mm 的土筛二次过筛,完全去除土样中的石子、草根等杂质。筛选后的土壤盛放于不锈钢托盘置于干燥箱内干燥,干燥箱温度为 105℃,干燥时间 12 h 以上。干燥后取出托盘,自然冷却至室温(20℃)。准备 7 个内直径为 15.5 cm、高度为 26 cm 的空桶,标注 1~7 号。向 1~7 号空桶内各放入约 4.5 kg 干燥后的土壤(约 3 500 mL),制成 1~7 号土柱。首先将 1 号土柱内的土壤倒入不锈钢盆内,用电子秤称不锈钢盆和盛放其中的土壤质量。一边用喷壶向土壤表面喷水,一边用铁铲搅拌土壤使水土混合均匀,直至不锈钢盆和土壤质量增加 200 g(即向盆内添加水的质量),充分拌匀后再将土壤放回 1 号土柱,回填时在土柱中央附近放置测量导管。整个过程中应尽量减少土壤的损失,以降低测量误差。

重复相同的操作,2~7 号土柱内的土壤加水量分别为 400、600、800、1 000、1 200、1 400 g。将各土柱内土壤压实,用密封袋密封,静置 24 h 以上,使得土壤内水分进一步充分均匀,如图 3 所示。

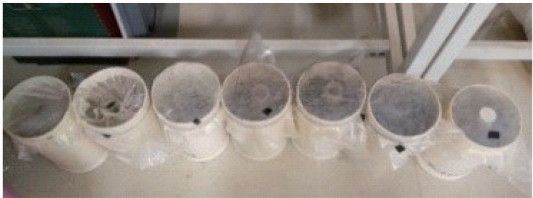


图3 密封好的1~7号土柱
Fig.3 Sealed soil columns of No.1~7

将传感器探头缓慢插入 1 号土柱导管,使探头完全置于土壤中,查看并记录传感器探头的测量值。将探头缓慢从导管中取出,在水平方向略微旋转一个角度,再次将探头插入导管,记录测量值。如此重复 5 次完成 1 号土柱的测量,得到了 5 个测量值。对 2~7 号土柱依相同过程完成测量。

用环刀分别从 1~7 号土柱内取约 100 mL 土壤(环刀体积为 100 mL),分别放入 1~7 号铝盒中(铝盒质量为 20 g),如图 4 所示。



图4 盛放1~7号土柱中土的1~7号铝盒
Fig.4 Aluminum specimen boxes of No.1~7 filled with soil sample of soil columns of No.1~7

用电子秤测量 1~7 号铝盒质量 m_{li} ($i=1,2,\dots,7$)。然后将 7 个铝盒放入干燥箱内,以 105℃ 干燥 12 h 以上,至 7 个容器质量不再变化。干燥完毕后,再用电子秤测量 1~7 号容器质量 m_{2i} ($i=1,2,\dots,7$)。土壤含水率计算公式为

$$\omega = \frac{m_{li} - m_{2i}}{m_{2i} - 20} \times 100\% \tag{1}$$

7 个土样的含水率以及探头对相应土样测量的频率(分频后)如表 1 所示。

表1 采用干燥法测量结果及传感器测量值
Tab.1 Measurement results by drying method and sensor

参数	土柱/铝盒编号						
	1	2	3	4	5	6	7
土壤含水率/%	5.71	11.44	13.65	18.95	24.16	27.04	29.97
频率均值/kHz	838.9	786.9	734.0	698.1	677.2	657.8	671.7

由表 1 测量结果可知,1~6 号土柱测量值单调下降,而 7 号土柱的测量值却出现上升。进一步探究发现,6 号土柱所用导管内径比其他土柱的导管

内径略小,测量时探头紧密贴和导管,环形电容极板间介质的空气成分少,测量值偏低。所以在拟合标定曲线时去除该测量值。用 Matlab 对数据进行三次多项式拟合,得到标定曲线如图 5 所示。

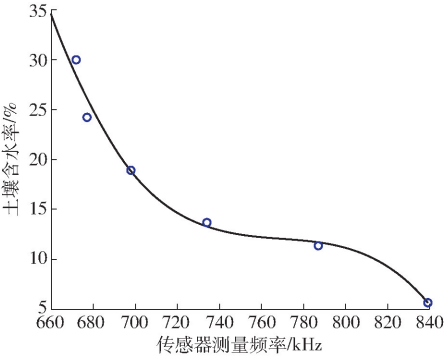


图 5 传感器标定结果

Fig. 5 Sensor calibration results

由图 5 可以得出传感器的三次多项式拟合方程为

$$S = -0.000\,016\,21f^3 + 0.037\,41f^2 - 28.8f + 7\,406$$

(2)

式中 S ——土壤含水率, %

f ——传感器中分频器的输出频率, kHz

可以得出测量结果与土壤含水率有较好的相关性,其决定系数 R^2 达到 0.985 1。

2.2 温度对传感器输出的影响

由于振荡器的振荡频率易受环境温度的影响,会引起测量误差,这是该方法的主要缺点之一^[22]。为了有效解决这一问题,本系统中设计了一个温度传感器,通过测量环境温度对误差进行补偿。

将传感器电路板放入 DGBELL 型恒温箱,分频器输出和电源用导线引出恒温箱。打开电路板电源,开启恒温箱,将温度设为 10℃,用示波器测量分频器的输出频率,待示波器显示的分频信号频率保持不变后,记录分频信号频率。恒温箱稳定以 5℃ 间隔递增,重复上述实验过程直至 40℃。实验结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,分频频率与温度之间呈现良好的线性关系,决定系数 R^2 达到 0.993 1。随着温度的上升,分频频率逐渐增加。温度变化 1℃,电路板的分频频率变化为 0.138 6 kHz。因此得到以下补偿过程:设温度为 t 时,测得的分频频率为 f' ,

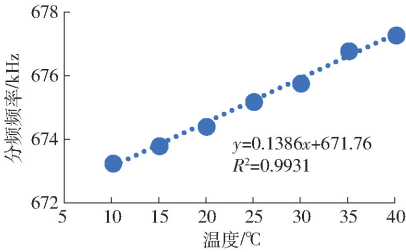


图 6 分频频率受温度变化的影响

Fig. 6 Frequency response to temperature change

则温度补偿后,得到分频频率为

$$f = 0.138\,6(t - 20) + f'$$

(0℃ ≤ t ≤ 40℃) (3)

温度和频率补偿是针对测量电路硬件所处环境及测量条件的改变而进行的,与被测对象无关。因此,对于不同的土壤含水率补偿方法依然有效。

2.3 极端温度测试

为了适应在实际应用中外界变化的天气,本文对系统在极端温度下的工作进行了测试。

首先进行高温测试。连接传感器探头和 NB-IoT 电路板。锂电池连接 NB-IoT 电源端口,为其提供电源。采集间隔时间设置为 3 min。开启电暖气,将传感器探头、NB-IoT 电路板和锂电池放置在电暖气旁,传感器探头距离电暖气约为 10 cm。温度为 50.4 ~ 65.5℃ 时系统可以稳定运行。

然后进行低温测试。连接传感器探头和 NB-IoT 无线通信电路板。锂电池连接 NB-IoT 电源端口,为其提供电源。采集间隔时间设置为 3 min。将传感器探头、NB-IoT 电路板和锂电池放置冰箱内。温度从 23.6℃ 逐渐降低到 -18.0℃,系统仍然可以正常运行。

3 结论

(1)设计了一套基于窄带物联网的土壤墒情监测系统,可以实现对土壤墒情信息的实时监测。

(2)传感器标定实验表明,采用传感器输出频率的三次多项式标定曲线,相关性较好,决定系数 R^2 达到 0.985 1。

(3)实验得到了环境温度对传感器分频频率输出影响的补偿方程,该方程为一阶线性方程。

(4)极端环境温度运行实验显示,系统在较高温(50.4 ~ 65.5℃)和较低温(-18.0 ~ 23.6℃)环境下均能正常工作。

参 考 文 献

[1] 段爱旺, 孟兆江. 作物水分信息采集技术与采集设备[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 6-14.
DUAN Aiwang, MENG Zhaojiang. Present situation of techniques and equipments of monitoring crop water status [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2007, 9(1): 6-14. (in Chinese)

[2] 肖武, 李小昱, 王为, 等. 土壤水分含量测量方法的研究进展[C]//中国农业工程学会学术年会, 2007.

- XIAO Wu, LI Xiaoyu, WANG Wei, et al. Advances in soil water content surveying research[C]//Academic Annual Meeting of China Society of Agricultural Engineering, 2007. (in Chinese)
- [3] Standards Association of Australia. Methods of testing soils for engineering purposes[M]. North Sydney: The Association, 1977.
- [4] 王一鸣. 基于介电法的土壤水分测量技术[C]//中国农业工程学会学术年会, 2007.
- [5] WANG Y P E, LIN X, ADHIKARY A, et al. A primer on 3GPP narrow band internet of things (NB - IoT) [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 55(3):117 - 123.
- [6] 何泽鹏. 基于蜂窝的窄带物联网(NB - IoT)技术性能及应用[J]. 广东通信技术, 2017(3):44 - 45.
- [7] ANGALVEDHE N, RATASUK R, GHOSH A. NB - IoT deployment study for low power wide area cellular IoT[C]//2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2016.
- [8] ADHIKARY A, LIN X, WANG Y P E. Performance evaluation of NB - IoT coverage[C]//Vehicular Technology Conference. IEEE, 2017.
- [9] 李加念, 洪添胜, 冯瑞珏, 等. 基于真有效值检测的高频电容式土壤水分传感器[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8):216 - 221. LI Jianian, HONG Tiansheng, FENG Ruijue, et al. High-frequency capacitive soil water content sensor based on detecting of true root mean square[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8):216 - 221. (in Chinese)
- [10] VELÁZQUEZ-MARTÍ B, GRACIA-LÓPEZ C, PLAZA-GONZALEZ P J. Determination of dielectric properties of agricultural soil[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(1):119 - 125.
- [11] 张治国, 谢运祥, 袁兆梅. 并联谐振变换器的电路特性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(4):33 - 38. ZHANG Zhiguo, XIE Yunxiang, YUAN Zhaomei. Analysis of circuit characteristics of parallel resonant converter[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(4):33 - 38. (in Chinese)
- [12] 高志涛, 刘卫平, 赵燕东, 等. 多层土壤剖面复合传感器设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1):108 - 117. GAO Zhitao, LIU Weiping, ZHAO Yandong, et al. Design and performance analysis of composite sensor for multilayer soil profile[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):108 - 117. (in Chinese)
- [13] 杨绍辉, 杨卫中, 王一鸣. 土壤墒情信息采集与远程监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9):173 - 177. YANG Shaohui, YANG Weizhong, WANG Yiming. Remote collecting and monitoring system of soil moisture content information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9):173 - 177. (in Chinese)
- [14] 闫华, 邢振, 薛绪掌, 等. 土壤剖面水分传感器探头仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10):249 - 256. YAN Hua, XING Zhen, XUE Xuzhang, et al. Simulation and experiment verification of profile soil moisture sensor probe [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):249 - 256. (in Chinese)
- [15] 李小菲. LC 无源湿度传感器研究及实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.
- [16] 王新忠, 刘飞, 韩旭. 土壤理化特性对土壤剖面水分传感器性能的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11):97 - 101. WANG Xinzong, LIU Fei, HAN Xu. Influence of soil physical and chemical properties on performance of soil profile moisture sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11):97 - 101. (in Chinese)
- [17] 王晓雷, 任学军, 胡敬芳, 等. 附加电阻高频电容法土壤水分传感器的研究[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(6):689 - 692. WANG Xiaolei, REN Xuejun, HU Jingfang, et al. Research of soil water content sensor using a high frequency capacitance with an additional resistor [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008, 42(6):689 - 692. (in Chinese)
- [18] 关大陆. 基于 STC8A8K64S4A12 和 AD590 的远程测温系统[J]. 辽宁科技学院学报, 2017, 9(1):1 - 2, 88. GUAN Dalu. Remote temperature measurement system based on STC8A8K64S4A12 and AD590 [J]. Journal of Liaoning Institute of Science and Technology, 2017, 9(1):1 - 2, 88. (in Chinese)
- [19] 崔国丽, 车喜龙. 基于 STC12C5A60S2 与 AD620 的小信号采集系统[J]. 电子设计工程, 2012, 20(11):112 - 114. CUI Guoli, CHE Xilong. STX12C5A60S2 and AD620-based acquisition systems for small signal [J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(11):112 - 114. (in Chinese)
- [20] 苏祎. 对烘干法水分分析原理的研究[J]. 中国计量, 2009(12):67 - 70.
- [21] 吴日峰, 李润奎, 刘生根, 等. 不同原理土壤水分传感器的室内外标定方法及对比测试研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(13):6048 - 6050. WU Rifeng, LI Runkui, LIU Shenggen, et al. Research of calibration methods and contrast tests of soil moisture sensors with different working principles[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2013, 41(13):6048 - 6050. (in Chinese)
- [22] 杨红霞, 曹新亮. 湿度传感器温度补偿法的研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(5):18 - 20. YANG Hongxia, CAO Xinliang. Study on temperature compensation method for humidity sensor. [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(5):18 - 20. (in Chinese)