



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114088769 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 25

(21) 申请号 202111265407.3

(22) 申请日 2021.10.28

(71) 申请人 西安理工大学

地址 710048 陕西省西安市碑林区金花南路5号

(72) 发明人 郭会军

(74) 专利代理机构 西安弘理专利事务所 61214

代理人 王奇

(51) Int. Cl.

G01N 27/00 (2006.01)

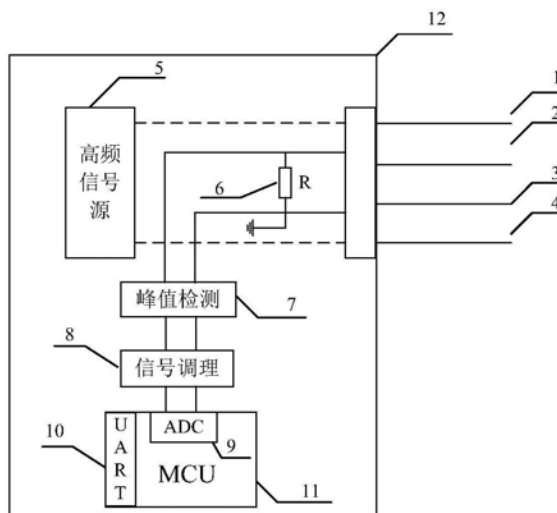
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器及其工作方法

(57) 摘要

本发明公开一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,包括依次成排设置的第一探针、第二探针、第三探针和第四探针,第一探针的末端与第四探针的末端之间连接有高频信号源,第二探针的末端与第三探针的末端之间连接有峰值检测电路,峰值检测电路依次连接有信号调理电路和微控制器,第二探针的末端与第三探针的末端之间还连接有检测电阻。本发明还公开一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器的工作方式,本发明解决了现有技术中存在的精准度较低、测量工作复杂的问题。



1. 一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,其特征在于,包括依次成排设置的第一探针(1)、第二探针(2)、第三探针(3)和第四探针(4),所述第一探针(1)的末端与第四探针(4)的末端之间连接有高频信号源(5),所述第二探针(2)的末端与第三探针(3)的末端之间连接有峰值检测电路(7),所述峰值检测电路(7)依次连接有信号调理电路(8)和微控制器(11),所述第二探针(2)的末端与第三探针(3)的末端之间还连接有检测电阻(6)。

2. 如权利要求1所述的一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,其特征在于,所述信号调理电路(8)和微控制器(11)通过ADC模数转换模块(9)连接。

3. 如权利要求2所述的一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,其特征在于,所述ADC模数转换模块(9)内置于微控制器(11)内,所述微控制器(11)还包括UART串行通讯口(10)。

4. 如权利要求1所述的一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,其特征在于,所述第一探针(1)、第二探针(2)、第三探针(3)和第四探针(4)为方形探针。

5. 如权利要求2所述的一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,其特征在于,所述第一探针(1)第二探针(2)、第三探针(3)、第四探针(4)、高频信号源(5)、检测电阻(6)、峰值检测电路(7)信号调理电路(8)、ADC模数转换模块(9)和微控制器(11)均固定在壳体(12)内,所述第一探针(1)第二探针(2)、第三探针(3)的第四探针(4)末端固定在壳体(12)上,所述第一探针(1)第二探针(2)、第三探针(3)的第四探针(4)的针头伸出壳体(12)外,所述UART串行通讯口露在壳体(12)外。

6. 一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器的工作方式,其特在于,采用上述一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器进行水分检测,步骤包括:

步骤1,将第一探针(1)、第二探针(2)、第三探针(3)和第四探针(4)插入待检测土壤,通过高频信号源(5)向第一探针(1)的与第四探针(4)施加高频电场,使检测电阻(6)产生感应电压;

步骤2,感应电压峰值检测电路(7)采集检测电阻(6)的峰值电压并通过信号调理电路(8)、ADC模数转换模块(9)传入微控制器(11)中;

步骤3,控制器(11)通过计算得到体积含水量并经过UART串行通讯口(10)输出。

7. 如权利要求6所述的一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器的工作方式,其特在于,所述步骤1具体的为:

步骤1.1,将第一探针(1)、第二探针(2)、第三探针(3)和第四探针(4)插入待检测土壤;

步骤1.2,通过同轴电缆连接高频信号源(5),将高频正弦信号施加在第一探针(1)和第四探针(4)之间,高频信号源(5)产生的信号可表示为

$$E=M \sin \omega t \quad (1)$$

式中E表示电场强度,表示M信号幅值, ω 表示角频率,t表示时间,信号频率大于50MHz;

第一探针(1)和第四探针(4)之间将产生高频电场并穿透土样这种电介质,由于静电感应原理第二探针(2)产生电荷,公式为:

$$Q(t)=\epsilon_r \epsilon_0 A E \quad (2)$$

式中 ϵ_r 表示土壤和水混合物的相对介电常数,它是一个随着含水量变化而变化的缓变量, ϵ_0 为自由空间介电常数,A为第二探针(2)的表面积。

步骤1.3,由于感应电荷Q(t)随时间变化,第二探针(2)和第三探针(3)之间就会有感应

电流 i_t 流过,在检测电阻(6)上就会因此产生感应电压,公式为:

$$U_1 = R \cdot i_t \quad (3)$$

其中 U_1 为感应电压, i_t 为感应电流, R 为检测电阻(6)的阻值。

8.如权利要求7所述的一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器的工作方式,其特征在于,所述步骤3中计算公式为:

$$\delta = \frac{\Delta U \cdot K_2}{K_1 - \Delta U} \quad (4)$$

上式中, ΔU 为土壤含水量变化引起的电压变化量,计算公式为:

$$\Delta U = U_{1m} - U_{sm} \quad (5)$$

其中 U_{1m} 为待测土体中的感应电压峰值, U_{sm} 为干土中的感应电压峰值;

K_1 和 K_2 是相关物理量,公式为:

$$Bh(\epsilon_w - \epsilon_s)\epsilon_0 M \omega R = K_1 \quad (6)$$

$$\frac{1}{\alpha} = K_2 \quad (7)$$

其中 M 为高频信号的幅值, ω 表示高频信号的角频率, $\epsilon_r \epsilon_s$ 分别表示水和土壤的相对介电常数, ϵ_0 为自由空间介电常数, R 为检测电阻(6)的阻值, h 为探针的宽度。

一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器及其工作方法

技术领域

[0001] 本发明属于土壤环境信息采集技术领域,涉及一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,涉及采用该传感器的工作方法。

背景技术

[0002] 土壤水分测量被用于理解和掌握土壤中水分运动过程、规律和机理,它不仅广泛应用于土壤学、生态学、水资源与环境等相关研究领域,而且也是实现智能灌溉和精准灌溉的前提和基础。在智能灌溉和精准灌溉中,对水的使用实施了闭环控制方式,这就需要借助传感器对土壤中的水分分布情况实时测量。

[0003] 土壤水分测量的方法可分为介电常数和介电常数两大类。非介电常数类方法包括烘干法和中子法,其中烘干法精度最高,但是不能用于实时测量,而中子法虽然精度高实时性好,但是存在极大的辐射风险,不适宜大面积推广。介电常数类方法包括时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)、频域反射法(Frequency Domain Reflectometry, FDR)、驻波法(Standing wave ratio, SWR)、电容法和电阻法。其中电阻法和电容法实时性好,但是精度较差且对土壤适应性差;TDR和FDR测量精度高但是价格高昂,不利于推广使用;SWR精度不及TDR和FDR,但是其成本仍然制约着其大面积推广应用。综合各种因素分析,实践当中仍然是认为以介电常数类方法最有推广前途。智慧农业和精准灌溉中对水的使用采取闭环控制,需要精度能保证、实时性好、可靠且价格便宜适于推广的水分测量方法。但是现有水分测量方法中,尚无法完全满足智慧农业和精准灌溉对水分检测的需求。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,解决了现有技术中存在的精度度较低、测量工作复杂的问题。

[0005] 本发明所采用的技术方案是:

[0006] 一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,包括依次成排设置的第一探针、第二探针、第三探针和第四探针,第一探针的末端与第四探针的末端之间连接有高频信号源,第二探针的末端与第三探针的末端之间连接有峰值检测电路,峰值检测电路依次连接有信号调理电路和微控制器,第二探针的末端与第三探针的末端之间还连接有检测电阻。

[0007] 本发明的特点还在于:

[0008] 信号调理电路和微控制器通过ADC模数转换模块连接。

[0009] ADC模数转换模块内置于微控制器内,微控制器还包括UART串行通讯口。

[0010] 第一探针、第二探针、第三探针和第四探针为方形探针。

[0011] 第一探针第二探针、第三探针、第四探针、高频信号源、检测电阻、峰值检测电路信号调理电路、ADC模数转换模块和微控制器均固定在壳体内,第一探针第二探针、第三探针的第四探针末端固定在壳体上,第一探针第二探针、第三探针的第四探针的针头伸出壳体外,UART串行通讯口露在壳体外。

[0012] 本发明的另一目的是提供一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器的工作方式，步骤包括：

[0013] 步骤1，将第一探针、第二探针、第三探针和第四探针插入待检测土壤，通过高频信号源向第一探针的与第四探针施加高频电场，使检测电阻产生感应电压；

[0014] 步骤2，感应电压峰值检测电路采集检测电阻的峰值电压并通过信号调理电路、ADC模数转换模块传入微控制器中；

[0015] 步骤3，控制器通过计算得到体积含水量并经过UART串行通讯口输出。

[0016] 步骤1具体的为：

[0017] 步骤1.1，将第一探针、第二探针、第三探针和第四探针插入待检测土壤；

[0018] 步骤1.2，通过同轴电缆连接高频信号源，将高频正弦信号施加在第一探针和第四探针之间，高频信号源产生的信号可表示为

$$[0019] \quad E = M \sin \omega t \quad (1)$$

[0020] 式中E表示电场强度，表示M信号幅值， ω 表示角频率，t表示时间，信号频率大于50MHz；

[0021] 第一探针和第四探针之间将产生高频电场并穿透土样这种电介质，由于静电感应原理第二探针产生电荷，公式为：

$$[0022] \quad Q(t) = \epsilon_r \epsilon_0 A E \quad (2)$$

[0023] 式中 ϵ_r 表示土壤和水混合物的相对介电常数，它是一个随着含水量变化而变化的缓变量， ϵ_0 为自由空间介电常数，A为第二探针的表面积。

[0024] 步骤1.3，由于感应电荷Q(t)随时间变化，第二探针和第三探针之间就会有感应电流 i_t 流过，在检测电阻上就会因此产生感应电压，公式为：

$$[0025] \quad U_1 = R \cdot i_t \quad (3)$$

[0026] 其中 U_1 为感应电压， i_t 为感应电流，R为检测电阻的阻值。

[0027] -步骤3中计算公式为：

$$[0028] \quad \delta = \frac{\Delta U \cdot K_2}{K_1 - \Delta U} \quad (4)$$

[0029] 上式中， ΔU 为土壤含水量变化引起的电压变化量，计算公式为：

$$[0030] \quad \Delta U = U_{1m} - U_{sm} \quad (5)$$

[0031] 其中 U_{1m} 为待测土体中的感应电压峰值， U_{sm} 为干土中的感应电压峰值。

[0032] K_1 和 K_2 是相关物理量，公式为：

$$[0033] \quad Bh (\epsilon_w - \epsilon_s) \epsilon_0 M \omega R = K_1 \quad (6)$$

$$[0034] \quad \frac{1}{\alpha} = K_2 \quad (7)$$

[0035] 其中M为高频信号的幅值， ω 表示高频信号的角频率， ϵ_w 和 ϵ_s 分别表示水和土壤的相对介电常数， ϵ_0 为自由空间介电常数，R为检测电阻的阻值，h为探针的宽度。

[0036] 本发明的有益效果是：

[0037] 本发明一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器，提出了一种新的基于高频电场静电感应原理的土壤含水量在线测量方法，是对现有的包括时域反射、频域反射、驻波法、电容法和电阻法在内的介电常数类测量方法的有益补充。传感器的探头由4支平板形状

探针构成,且均由印制板制成,结构上非常简单。同时基于高频电场静电荷感应原理的测量方法,极大地降低了对于信号处理硬件和算法的要求,从而降低了成本,而且测量结果采用UART串口输出的方式也便于使用。

附图说明

[0038] 图1是本发明一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器的结构图;

[0039] 图中,1.第一探针,2.第二探针,3.第三探针,4.第四探针,5.高频信号源,6.检测电阻,7.峰值检测电路,8.信号调理电路,9.ADC模数转换模块,10.UART串行通讯口,11微控制器,12.壳体。

具体实施方式

[0040] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行详细说明。

[0041] 本发明一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器,如图1,包括依次成排设置的第一探针1、第二探针2、第三探针3和第四探针4,第一探针1的末端与第四探针4的末端之间连接有高频信号源5,第二探针2的末端与第三探针3的末端之间连接有峰值检测电路7,峰值检测电路7依次连接有信号调理电路8和微控制器11,第二探针2的末端与第三探针3的末端之间还连接有检测电阻6。

[0042] 信号调理电路8和微控制器11通过ADC模数转换模块9连接。ADC模数转换模块9内置于微控制器11内,微控制器11还包括UART串行通讯口10。

[0043] 第一探针1、第二探针2、第三探针3和第四探针4为方形探针。

[0044] 第一探针1第二探针2、第三探针3、第四探针4、高频信号源5、检测电阻6、峰值检测电路7信号调理电路8、ADC模数转换模块9和微控制器11均固定在壳体12内,第一探针1第二探针2、第三探针3的第四探针4末端固定在壳体12上,第一探针1第二探针2、第三探针3的第四探针4的针头伸出壳体12外,UART串行通讯口露在壳体12外。

[0045] 本发明的另一方案一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器的工作方式,步骤包括:

[0046] 步骤1,将第一探针1、第二探针2、第三探针3和第四探针4插入待检测土壤,通过高频信号源5向第一探针1的与第四探针4施加高频电场,使检测电阻6产生感应电压;

[0047] 步骤2,感应电压峰值检测电路7采集检测电阻6的峰值电压并通过信号调理电路8、ADC模数转换模块9传入微控制器11中;

[0048] 步骤3,控制器11通过计算得到体积含水量并经过UART串行通讯口10输出。

[0049] 其中步骤1具体的为:

[0050] 步骤1.1,将第一探针1、第二探针2、第三探针3和第四探针4插入待检测土壤;

[0051] 步骤1.2,通过同轴电缆连接高频信号源5,将高频正弦信号施加在第一探针1和第四探针4之间,高频信号源5产生的信号可表示为

$$E = M \sin \omega t \quad (1)$$

[0053] 式中E表示电场强度,表示M信号幅值, ω 表示角频率,t表示时间,信号频率大于50MHz;

[0054] 第一探针1和第四探针4之间将产生高频电场并穿透土样这种电介质,由于静电感

应原理第二探针2产生电荷,公式为:

$$[0055] \quad Q(t) = \varepsilon_r \varepsilon_0 A E \quad (2)$$

[0056] 式中 ε_r 表示土壤和水混合物的相对介电常数,它是一个随着含水量变化而变化的缓变量, ε_0 为自由空间介电常数,A为第二探针2的表面积。

[0057] 步骤1.3,由于感应电荷 $Q(t)$ 随时间变化,第二探针2和第三探针3之间就会有感应电流 i_t 流过,在检测电阻6上就会因此产生感应电压,公式为:

$$[0058] \quad U_1 = R \cdot i_t \quad (3)$$

[0059] 其中 U_1 为感应电压, i_t 为感应电流,R为检测电阻6的阻值。

[0060] 步骤3中计算公式为:

$$[0061] \quad \delta = \frac{\Delta U \cdot K_2}{K_1 - \Delta U} \quad (4)$$

[0062] 上式中, ΔU 为土壤含水量变化引起的电压变化量,计算公式为:

$$[0063] \quad \Delta U = U_{1m} - U_{sm} \quad (5)$$

[0064] 其中 U_{1m} 为待测土体中的感应电压峰值, U_{sm} 为干土中的感应电压峰值。

[0065] K_1 和 K_2 是相关物理量,公式为:

$$[0066] \quad Bh(\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega R = K_1 \quad (6)$$

$$[0067] \quad \frac{1}{\alpha} = K_2 \quad (7)$$

[0068] 其中 M 为高频信号的幅值, ω 表示高频信号的角频率, ε_w 和 ε_s 分别表示水和土壤的相对介电常数, ε_0 为自由空间介电常数,R为检测电阻6的阻值,h为探针的宽度。

[0069] 本发明的原理为:

[0070] 在检测土壤含水量时,可定义比值形式的土壤质量含水量 δ 为

$$[0071] \quad \delta = \frac{\beta V_w}{\alpha V_s} \quad (8)$$

[0072] 式中, V_w 和 β 分别为水分的体积和密度, V_s 和 α 分别为干土的体积和密度。令探针的长度和宽度分别为 B 和 h ,第一探针1和第二探针2之间的间距为定值 d 。对于第一探针1和第二探针2之间的待测含水土体,可将其视为分布在第一探针1和第二探针2之间的长方体干土体和水体,干土体和水体具有相同的宽度 B 和高度 d ,其长度分别为 B_s 和 B_w ,且满足 $B = B_w + B_s$,则干土体的体积 V_s 和水体的体积 V_w 可分别表示为:

$$[0073] \quad V_w = B_w dh \quad (9)$$

$$[0074] \quad V_s = B_s dh \quad (10)$$

[0075] 将(9)式和(10)式同时带入(8)式可得:

$$[0076] \quad \delta = \frac{\beta B_w dh}{\alpha B_s dh} = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{B_w}{B - B_w} \quad (11)$$

[0077] 当干土体和水体的体积单位均为立方厘米时,水的密度 β 为常数 $1\text{g}/\text{cm}^3$,则上式可简化为:

$$[0078] \quad \delta = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{B_w}{B - B_w} \quad (12)$$

[0079] 由于(2)式中 ε_r 为缓慢变化变量,所以求解感应电流时可将其视作常数,即:

$$[0080] \quad \frac{dQ(t)}{dt} = \varepsilon_r \varepsilon_0 A \omega \cos \omega t \quad (13)$$

[0081] 基于上述分析对于土壤做电介质的部分产生的感应电流为:

$$[0082] \quad i_s = A_1 \varepsilon_s \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t \quad (14)$$

[0083] 其中 $A_1 = B_s h$,同时对于水做电介质的部分产生的感应电流为:

$$[0084] \quad i_w = A_2 \varepsilon_w \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t \quad (15)$$

[0085] 其中 $A_2 = B_w h$,则总感应电流 i_t 为二者之和,即:

$$[0086] \quad \begin{aligned} i_t &= \frac{dQ(t)}{dt} = i_s + i_w = A_1 \varepsilon_s \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t + A_2 \varepsilon_w \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t \\ &= A_1 \varepsilon_s \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t + A_2 \varepsilon_s \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t + A_2 \varepsilon_w \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t - A_2 \varepsilon_s \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t \\ &= (A_1 + A_2) \varepsilon_s \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t + A_2 (\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t \\ &= B h \varepsilon_s \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t + A_2 (\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t \\ &= (B h \varepsilon_s \varepsilon_0 M \omega + A_2 (\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega) \cos \omega t \end{aligned} \quad (16)$$

[0087] 上式中 $B h \varepsilon_s M \omega \cos \omega t$ 为幅值为常数的余弦信号, $A_2 (\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega \cos \omega t$ 的幅值则随 A_2 而变化。

[0088] 则检测电阻6两端的电压为:

$$[0089] \quad U_1 = R \cdot i_t \quad (3)$$

[0090] 在步骤2的基础上,土壤含水量引起的峰值电压变化量 ΔU 可表示为:

$$[0091] \quad \Delta U = U_{1m} - U_{sm} \quad (5)$$

[0092] 进一步若定义:

$$[0093] \quad \Delta U = A_2 (\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega R \quad (17)$$

[0094] 由(10)式可推出:

$$[0095] \quad B_w = \frac{\alpha \delta B}{1 + \alpha \delta} \quad (18)$$

[0096] 带入(5)式可得:

$$[0097] \quad \begin{aligned} \Delta U &= B_w h (\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega R = \frac{\alpha \delta B}{1 + \alpha \delta} h (\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega R \\ &= B h (\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega R \cdot \frac{\alpha \delta}{1 + \alpha \delta} \end{aligned} \quad (19)$$

[0098] 令:

$$[0099] \quad B h (\varepsilon_w - \varepsilon_s) \varepsilon_0 M \omega R = K_1 \quad (6)$$

$$[0100] \quad \frac{1}{\alpha} = K_2 \quad (7)$$

[0101] 则:

$$[0102] \quad \Delta U = K_1 \cdot \frac{\delta}{K_2 + \delta} \quad (20)$$

[0103] 由(18)式进一步可推出质量含水率与感应电流变化量之间的关系为:

$$[0104] \quad \delta = \frac{\Delta U \cdot K_2}{K_1 - \Delta U} \quad (4)$$

[0105] 上式中 K_1 和 K_2 是与土壤类型有关的物理量， ΔU 为土壤含水量变化引起的电压变化量，最后再根据土壤容积含水量与体积含水量的关系即可确定出土壤体积含水量 $\theta_v = \delta \cdot \alpha$ 。

[0106] 通过上述理论推导和分析，可知基于高频电场电荷感应原理进行土壤水分测量是完全可行的，也是一种可以在线进行土壤水分测量的新方法。

[0107] 实施例1

[0108] 根据上述一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器，设置参数为，探针长度 $B=15\text{cm}$ ，宽度 $h=1\text{cm}$ ，探针之间间距 $d=3\text{cm}$ ，检测电阻 $R=10\ \Omega$ ，精度 0.1% ，高频信号源幅值 $M=5\text{V}$ ，频率 50MHz ，12位模数转换ADC，参数 $K_1=0.016$ ，参数 $K_2=0.38$ 。并采用上述一种高频电场电荷感应式土壤水分传感器的工作方式进行水分检测，本实施例配置6种不同含水量的土样进行测量，并且与烘干法的测量结果进行了对比，如表1所示。

[0109] 表1土样测试对比结果

土样编号	1	2	3	4	5	6
本发明方法(%)	7.17	11.92	17.43	20.43	22.86	26.72
烘干法(%)	7.46	11.51	18.25	20.86	22.52	26.35
相对误差%	-4	3.6	-4.5	-2	1.5	1.4

[0111] 在土壤含水量测量方法中，烘干法尽管实时性差，但是精度是最高的，因此对比实验中以烘干法结果作为土样体积含水量的真值，是从表1可以看出，本发明方法的最大相对误差为 1.5% ，最小为 -4.5% ，能够被用于自动灌溉系统，从而实施对用水的闭环控制。

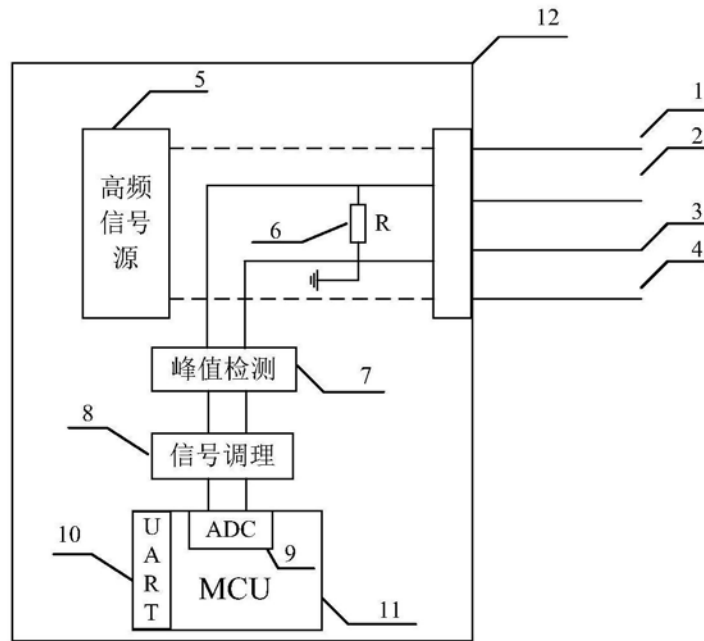


图1