

摘要：在不断推进的工业自动化进程中，湿度的测量越来越受到人们的重视。如何进行又好又便捷的湿度测量，在于高科技的不断开发和进步，可以大量生产价廉物美的湿度传感器产品。由于CMOS 数字电路的广泛应用，很多高技术传感器产品通常都是数字信号输出。然而在工业自动化的具体实施中，和以往一样非常需要高抗干扰、高可靠性的模拟信号输出，比如 4~20 mA 的二线制工业标准的电流输出。本文通过对一个数字信号输出的湿度传感器 HTU21P 和一个专用的电压电流转换集成电路 AM462 的介绍，提出了一种将湿度传感器数字化输出转换为 4~20 mA 的二线制工业标准的电流输出的简便方法。

关键词：湿度传感器；二线制工业标准电流输出；电压电流转换

中图分类号：TN911.7

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2019)02-0028-05

收稿日期：2019-01-14

# 数字化湿度传感器输出 4-20mA 工业标准电流的简单方法

N.Rauch<sup>1</sup> 施林生 (译)<sup>2</sup>

1. analog microelectronics GmbH 公司，德国 MAINZ；2. 上海芸生微电子有限公司，上海 201108

## 一、引言

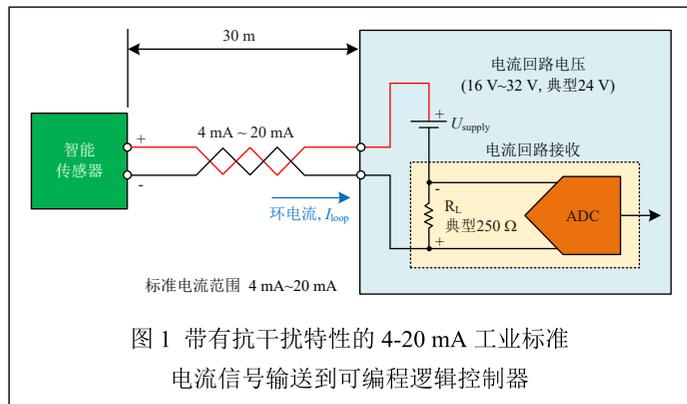
在一个充满电磁干扰的环境中传输信号或者要远距离传输信号时，人们往往采用标准化的电流来传输信号。如果一个电流回路（电流环）作为传感器的信号（图 1），它就可以传递所希望的电流而与导线的长短（电阻大小）和接触电阻大小无关。

这就是说，所传递的信息（电流信号）不会受到外界设施的影响。一方面通过低阻抗的输入端接受电流信号，另一方面通过

接地悬浮（所谓的虚地）的电流回路（电流回路的输出阻抗和接受采集信号设备的输入阻抗是串联的电流回路）与电压传输信号相反，电流传输信号受到电磁干扰的影响相当小。在图 1 中，传感器产生一个与测量值相关联的电流信号  $I_{loop}=4\text{ mA}\sim 20\text{ mA}$ 。作为可编程逻辑控制器的接收器是通过一个负载电阻  $R_L$  采集电流信号后得到一个电压信号  $V_L$ ，这个电压信号就是可编程逻辑控制器所需要的输入信号。

## 二、智能湿度传感器 HTU21X 系列

湿度传感器 HTU21X 系列<sup>[1]</sup>是由电容湿度敏感元件、温度传感器以及信号处理电路经过集成组成的。电容湿度敏感元件是电解质高聚物薄膜，在薄膜两侧分别有电极引出构成一个电容传感器，它的电容



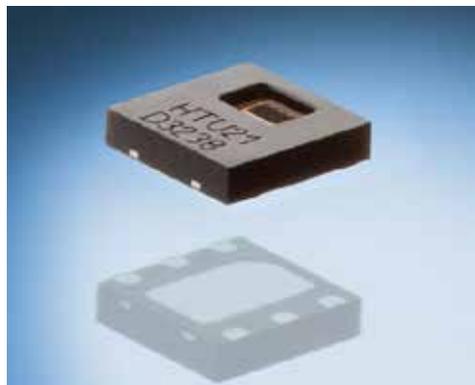


图2 湿度传感器 HTU21D (正反面图)

大小与湿度成正比关系。同时在电路中集成了由半导体材料的带隙构成的温度传感器。人们不仅可以通过这个温度传感器对湿度传感器进行温度补偿，也可以由这个独立的温度传感器监测所处位置的温度情况。

由于每个湿度传感器都是单独进行校准和温度补偿的，因此在湿度 20 %RH~85 %RH 的范围内，HTU21X 系列湿度传感器可以达到  $\pm 2$  %RH 的较高精度。在湿度范围 5 %RH~90 %RH 可以达到最高  $\pm 5$  %RH 的精度。原则上该系列湿度传感器可以在整个湿度范围 0 %RH~100 %RH 中使用。

HTU21X 系列采用的是  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  的 QFN 封装（主要用于回流焊），厚度为  $0.9\text{ mm}$ ，有带聚四氟乙烯滤网盖或不带滤网盖之分。图 2 所示为 HTU21D，其输出的是包含湿度和温度的 I<sup>2</sup>C 数字信号。HTU21P 输出的是 PWM 调制脉宽信号，该信号经过一个简单电路处理可以变为一个模拟的电压信号。

### 三、电压 - 电流转换集成电路 AM462

图 3 所示为由电压 - 电流转换集成电路 AM462<sup>[2]</sup> 构成的典型的二线制 4-20 mA 工业标准

电流输出电路。其中，AM462 是一个相对独立的模块化组成的带有多级放大和多种附加功能和保护功能的电压电流转换集成电路。各个电路模块通过相应的引脚可以单独使用。因此，AM462 提供了多种功能组合以及灵活应用的可能性。

**运算放大器 OP1:** OP1 是一个高输入阻抗的接受单端接地电压信号（0 V~5 V 之间）的运算放大器。放大倍数由二个外接电阻调准。OP1 的输出级可以通过合适的负载阻抗调准输出为零的零点电压信号。OP1 的输出电压最大值是有限制的，这样可以使下一级的输入电路受到保护；

**电压电流转换模块 V/I:** V/I 模块可以将输入的电压信号转换成大小可调的 0 mA~20 mA 电流输出。V/I 输出级输出控制外接三极管的电压并驱动三极管输出电流。三极管外接是考虑将电热耗散功率远离集成电路。输出电流的零点和满度值可以通过外接的二个分压电路进行调准；

**参考电压源:** 参考电压源可以给外接的元器件比如传感器或微处理器供电，最大输出电流可达 10 mA，VREF 输出电压通过管脚 VSET 可调，输出 5 V 或 10 V 电压；VSET 接地为 10 V，空为 5 V；

**运算放大器 OP2:** 附加的运算放大器 OP2 可以作为电流源或电压源来使用。OP2 的正相输入端接在内部

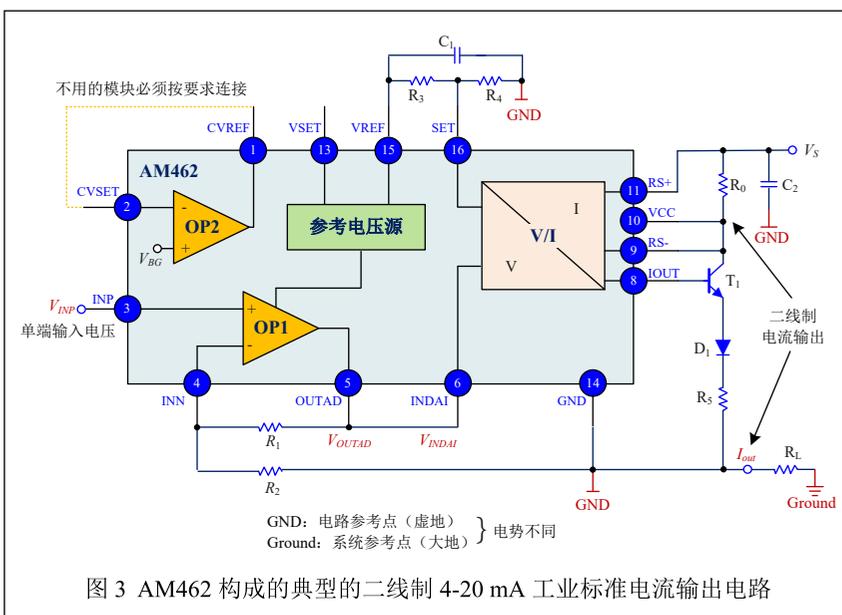


图3 AM462 构成的典型的二线制 4-20 mA 工业标准电流输出电路

置的恒定电压  $V_{BG}$  ( $=1.27\text{ V}$ ) 上。通过 1~2 个电阻的调准可以得到不同的恒电流或者恒电压输出。

此外, AM462 还具有内置的输入级的过压保护、电源极性反向保护、输出电流限制保护等等一系列防止集成电路烧坏的保护功能。用极少的外接元器件实现了一个工业标准的受到保护的输出级。

#### 四、电路计算

湿度传感器 HTU21P 输出 PWM 脉宽调制信号, 和专用电压 - 电流转换电路组合, 可以制成一个输出 4-20 mA 的工业标准二线制电流信号的湿度变送器。

与相对湿度  $RH$  相对应的电流信号  $I_{out}$  可以根据以下公式来确定:

$$RH = \left[ \frac{I_{out} - 4\text{mA}}{16\text{mA}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

##### 1、PWM 脉宽调制信号的模拟电压转换

首先需要将传感器 HTU21P 输出的 PWM 脉宽调制信号通过一个低通滤波器转换成模拟电压信号, 然后通过 AM462 转换成电流信号。为了使转换后的模拟电压信号上的纹波电压更小, 选择二级  $\pi$  型低通滤波器, 如图 4 所示。图 4 中二级  $\pi$  型低通滤波器可以使纹波电压与输出电压  $V_{TP}$  之比小于 0.5%。

根据生产厂家的说明<sup>[1]</sup>, 脉冲宽度  $T_{PW}$  与相对湿度的关系由以下公式给出:

$$RH = -6 + 125 \frac{T_{PW}}{T_F} (\%RH) \quad (2)$$

其中,  $T_F$ —湿度传感器给出的一个循环周期 ( $T_{F(\text{typ})} = \frac{1}{120\text{Hz}} = 8.333\text{ms}$ )。

经过低通滤波器后的电压信号是  $V_{TP}$ , 有:

$$V_{TP} = \frac{T_{PW}}{T_F} V_{DD} \quad (3)$$

由式 (2)、(3) 得到:

$$V_{TP} = \frac{RH + 6}{125} V_{DD} \quad (4)$$

借助于 AM462 上的运算放大器 OP2 可以做成一个高度稳定的恒压源 3 V ( $V_{DD}$ ) 给湿度传感器供电, 如图 4 所示。根据 AM462 的产品说明书<sup>[2]</sup>,  $V_{DD}$  大小可以通过调整电阻  $R_6$  和  $R_7$  的比值来实现:

$$V_{DD} = 1.27\text{V} \left( 1 + \frac{R_6}{R_7} \right) \quad (5)$$

如果  $V_{DD}=3\text{ V}$ , 可取  $R_7=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_6=14\text{ k}\Omega$ , 计算出  $V_{DD}=3.048\text{ V}$ 。查阅 E24 电阻系列阻值, 取  $R_6=13\text{ k}\Omega+1\text{ k}\Omega=14\text{ k}\Omega$ 。则湿度传感器输出的最小电压值 (0%RH) 和最大电压值 (100%RH) 分别为:

$$V_{TP\text{min}} = \frac{RH + 6}{125} V_{DD} = \frac{6}{125} \times 3.048 = 0.146\text{V}$$

$$V_{TP\text{max}} = \frac{RH + 6}{125} V_{DD} = \frac{100 + 6}{125} \times 3.048 = 2.585\text{V}$$

##### 2、电压 - 电流信号转换电路的计算

如图 4 所示, 取检测电阻  $R_0=30\ \Omega$ 。对应相对湿度 0%RH 和 100%RH 的电流信号应该是  $I_{\text{min}}=4\text{ mA}$  和  $I_{\text{max}}=20\text{ mA}$ 。根据 AM462 产品说明书<sup>[2]</sup> 中公式 (6),

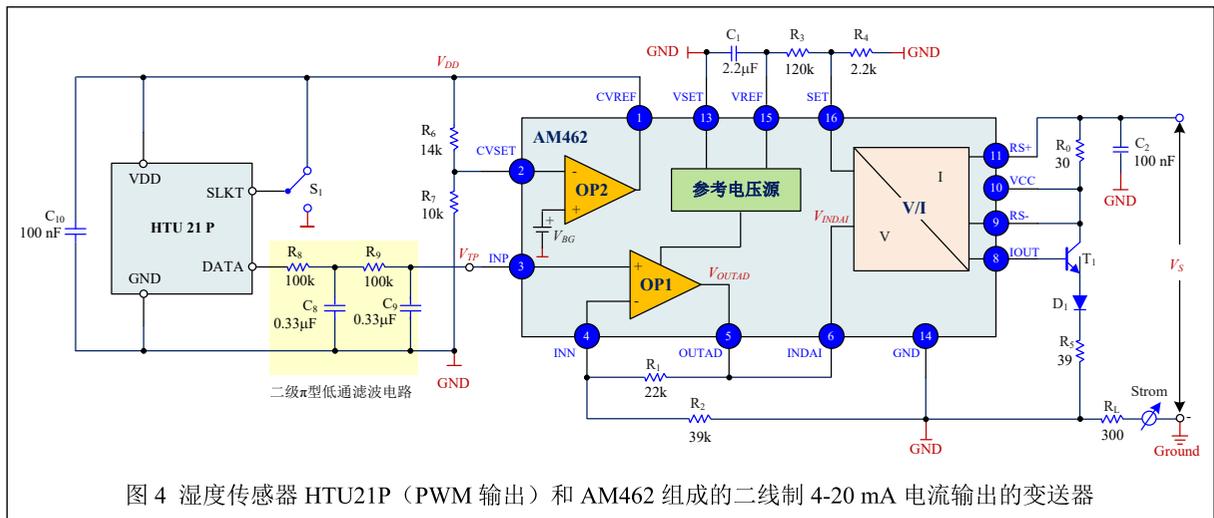


图 4 湿度传感器 HTU21P (PWM 输出) 和 AM462 组成的二线制 4-20 mA 电流输出的变送器

运算放大器 OP1 的放大倍数  $G$  为:

$$G = 8R_0 \frac{I_{\max} - I_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} = 8R_0 \frac{I_{\max} - I_{\min}}{V_{TP\max} - V_{TP\min}} = 8 \times 30 \times \frac{(20 - 4) \times 10^{-3}}{2.585 - 0.146} = 1.574 \quad (6)$$

同时, OP1 的放大倍数是由  $R_1$  和  $R_2$  的比值决定<sup>[2]</sup>:

$$G = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (7)$$

当然, 2 个电阻的和最好满足:  $20 \text{ k}\Omega < R_1 + R_2 < 200 \text{ k}\Omega$ 。这里  $R_1$  取值  $22 \text{ k}\Omega$ , 则  $R_2 = 38.3 \text{ k}\Omega$ 。查阅 E24 电阻系列阻值, 取  $R_2 = 39 \text{ k}\Omega$ 。此时  $G = 1.564$ 。

则在 V/I 模块管脚 6 的输入电压最大值及最小值为:

$$V_{INDA\min} = GV_{TP\min} = 1.564 \times 0.146 \text{ V} = 0.228 \text{ V}$$

$$V_{INDA\max} = GV_{TP\max} = 1.564 \times 2.585 \text{ V} = 4.043 \text{ V}$$

根据 AM462 产品说明书<sup>[2]</sup>中的公式(2), 输出电流  $I_{out}$  为:

$$I_{out} = \frac{V_{in}}{8R_0} + I_{set} \quad (8)$$

则在相对湿度为 0 %RH 时, 有:

$$I_{set} = I_{out} - \frac{V_{in}}{8R_0} = 4\text{mA} - \frac{0.228\text{V}}{8 \times 30\Omega} = 3.050\text{mA}$$

根据 AM462 产品说明书<sup>[2]</sup>中的公式(5)有:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{V_{REF}}{2R_0 I_{set}} - 1 \quad (9)$$

AM462 管脚 13 接地使 AM462 上的参考电压源输出 10 V,  $R_4$  取值  $R_4 = 2.2 \text{ k}\Omega$  并满足  $20 \text{ k}\Omega < R_3 + R_4 < 200 \text{ k}\Omega$ , 则计算得到:

$$R_3 = R_4 \left[ \frac{V_{REF}}{2I_{set}R_0} - 1 \right] = 2.2\text{k}\Omega \times \left( \frac{10\text{V}}{2 \times 3.050\text{mA} \times 30\Omega} - 1 \right) = 118\text{k}\Omega$$

这里, 取值  $R_3 = 120 \text{ k}\Omega$ 。

负载电阻取  $R_L = 300 \Omega$ , 稳定保护电阻取  $R_5 = 39 \Omega$ 。

以下是整个电路中的元器件取值情况:

AM462:

$$R_0 = 30 \Omega \quad R_1 = 22 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 39 \text{ k}\Omega \quad R_3 = 120 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 2.2 \text{ k}\Omega \quad R_5 = 39 \Omega \quad R_6 = 14 \text{ k}\Omega \quad R_7 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = 300 \Omega$$

二极管: 1N4148

三极管: 直插 BD139 或贴片 BCX54/55/56

二级  $\pi$  型低通滤波器:

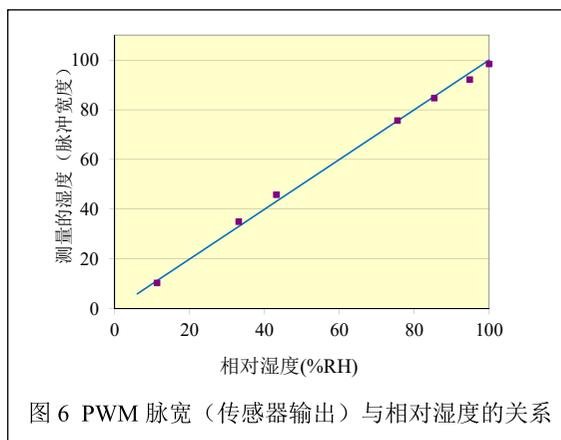
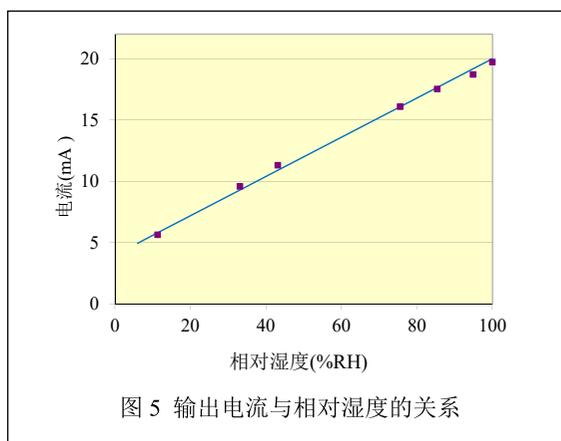
$$R_8 = R_9 = 100 \text{ k}\Omega, \quad C_8 = C_9 = 0.33 \mu\text{F}$$

通过计算得到的数据肯定会与实际测量的值有微小的偏差, 这个可以通过在放大电路上的 2 个电阻  $R_1$  或者  $R_2$  和零点偏置电路上 2 个电阻  $R_3$  或者  $R_4$  上并联电阻作一个微小调准来纠正。

## 五、测量结果

这里做了一个实验性的测试。湿度传感器安置在一个隔热的容器中, 容器里面的湿度和温度可以进行调整。以下所给出的湿度关系曲线都是在室温中进行。图 5 是输出电流和相对湿度的关系曲线, 图 6 是传感器的 PWM 调制脉宽输出和相对湿度的关系曲线。

通过 6 组传感器变送电路的测量, HTU21P+AM462 的组合给出了非常满意的结果: 在  $10^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$



的温度范围内，每个测量点经过 5 min 的稳定时间，经过在 20 %RH~80 %RH 湿度范围内的测量和计算，得到的湿度测量误差在 3.0 %F.S. 之内。

## 六、总结

温湿度传感器的使用不仅仅局限在某个单一的行业，原则上可以在所有人们需要知道温湿度的地方使用或者控制它。

在工业厂矿的环境中，为了克服较强的电磁干扰以及连接监控设备需要相对较长的电缆接线，使用工业标准的二线制电流变送器是一个简单有效的方法。本文介绍了通过一个半成品的湿度传感器和专用变送集成电路的组合实现这一方案的基本思想。

本文介绍的变送器电路原则上也同样适合其他方面的传感器，只要它们的输出信号有 PWM 脉宽调制或者有单端对地电压信号就可以通过这个专用变送集成电路转换成工业标准的电流输出的变送器。

本文资料由上海芸生微电子有限公司提供。

## 参考文献

- [1] TE Connectivity. HTU21 湿度传感器说明书 [EB/OL]. <http://www.amsys.de/sheets/amsys.de.htu21p.pdf>
- [2] Analog Microelectronics. 电压电流转换集成电路 AM462 的产品说明书 [EB/OL]. [http://www.analog-micro.com/\\_pages/ics/am462/am462\\_data\\_sheet.pdf](http://www.analog-micro.com/_pages/ics/am462/am462_data_sheet.pdf)

## A Simple Method to Output 4-20 mA Industrial Standard Current for Digital Humidity Sensors

Author: N.Rauch<sup>1</sup>, Translator: SHI Lin-sheng<sup>2</sup>

- (1. *Analog Microelectronics GmbH, Germany, MAINZ*;
2. *Shanghai Yunsheng Microelectronics Ltd., Shanghai 201108, China*)

**Abstract:** Humidity measurement has been paid more and more attention in the process of industrial automation. How to make good and convenient humidity measurement depends on the continuous development and progress of high technology, which can mass-produce cheap and fine humidity sensors. The wide application of CMOS digital circuits makes many high-tech sensors output

digital signals usually. However, the analog signal outputs with high anti-interference and high reliability are very necessary as before in the implementation of industrial automation, such as 4-20 mA two-wire industrial standard current output. Based on the introduction of a digital humidity sensor HTU21P and a special voltage-current conversion IC AM462, a simple method to convert the digital output of humidity sensor into the 4-20 mA two-wire industrial standard current output is proposed in this paper.

**Key words:** humidity sensor; two-wire industrial standard current output; voltage-current conversion

## 作者简介

Norbert Rauch: 德国 AMG 公司，德国物理博士，研究方向为压力传感器和信号处理。

翻译: 施林生，上海芸生微电子有限公司，高级工程师，研究方向为压力传感器和信号处理。

通信地址: 上海市金都路 3000 号 1422 室

邮编: 201108

邮箱: [zzhiyun@126.com](mailto:zzhiyun@126.com)