

通过 AM462 将来自 MCU 的 PWM 脉宽调制信号变送成工业标准的电流输出 4-20mA

本文介绍了一个简单的信号转换变送电路，即如何将 PWM 脉宽调制信号转换变送为工业标准的电流信号（4-20mA）。它描述了将一个微处理器 MCU 与模拟工控网相连接，把 MCU 的数字信号传递到过程控制系统中去的方法。

做一个简单的变送电路前提是要有一个由微处理器 MCU 输出的 PWM 脉宽调制信号，一个低通滤波器和一个电压电流转换电路。

除了 D/A 转换电路的方法外，这里介绍的是通过一个低通滤波器将微处理器 MCU 的 PWM 数字信号转换成电流信号以及计算和确定电路各参数的方法。

工业标准 4-20mA 电流输出的变送集成电路 AM462 作为电压电流转换电路将在此作为三线制方式举例说明。

注意：下面的介绍对于 AMG 公司生产的所有电压电流转换集成电路（AM400, AM402, AM422, AM442, AM460 和 AM462）理论上都是适用的，也可以用于二线制电流输出方式。

以工业上的典型应用为基础（图 1），比如要把采集到的检测信号在经过微处理器 MCU 处理以后再传输到工控网上的接收电路上去，通常是采用可靠的电流传输方法。但经常有人会提出这样一个问题，怎样才能将数字信号即简单又准确地转换成合适的电流信号比如 0-20mA 或 4-20mA 呢？

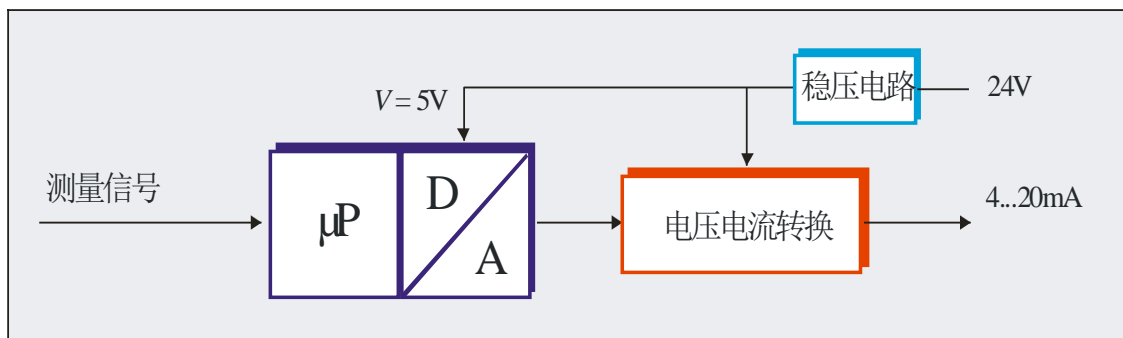


图 1：典型的工业应用：微处理器 MCU 与工控网通过 4-20mA 电流传输相连

本文就这个问题进行了回答并通过例子给出了具体的电路参数的计算和确定方法。

D/A-转换电路

在很多应用中，人们可以很容易找到各种合适的低价的微处理器 MCU。这些微处理器可以对采集的信号进行校准，线性化，控制，也可以对测试通道或类型进行识别。它们内部的程序和进程都是以数字信号进行的，但它们的结果要进行信号数据传递并为工业上所用却经常必须转换成模拟信号。

通过 AM462 将来自 MCU 的 PWM 脉宽调制信号变送成工业标准的电流输出 4-20mA

在一个工业控制系统中，数据通讯系统要求有一个模拟电流 4-20mA 输出信号，那么依次就要对测量信号转换一直到电流信号的转换。首先测量信号要放大，通过 A/D 转换成数字信号，在微处理器 MCU 处理后再重新转换成合适的模拟电压信号（D/A 转换），然后该电压经滤波再转换成电流并调整到所希望的电流输出值。

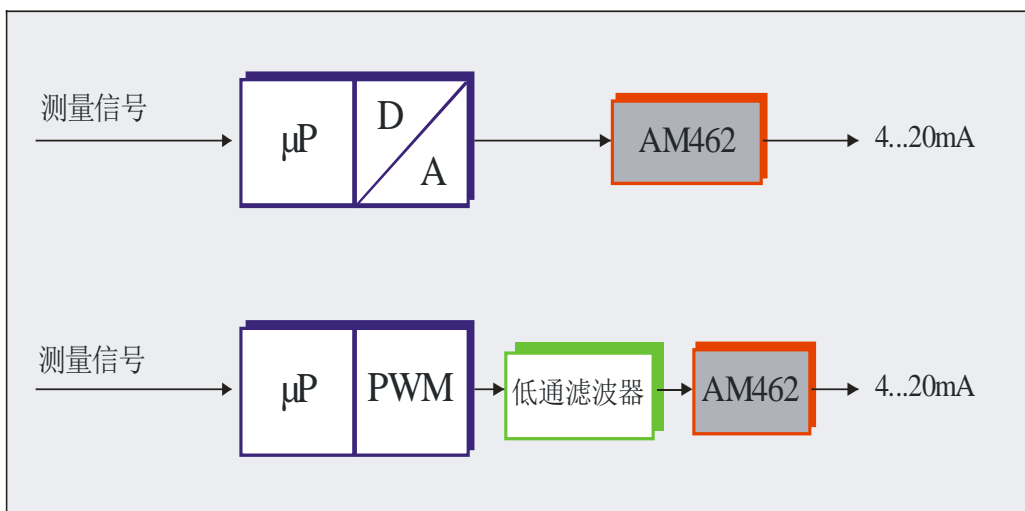


图 2：应用 AM462 将测量信号转换成 4-20mA 电流输出的多种可能性

如果一个 D/A 转换电路是集成在微处理器 MCU 电路里（图 2），那么前提是经转换输出的电压信号是足够光滑的（滤波），并且它的分辨率足够高以满足测量精度的要求，然后还需要将该电压信号转换成所希望的电流输出值。这时需要一个电压控制的电流源电路或一个现成的集成电路比如 AM462，它可以简单地直接与 D/A 转换电路相连输出电流信号[2]。

如果在微处理器 MCU 中没有 D/A 转换电路并且由于费用问题不允许再添加 D/A 转换电路时，就必须采用其它方法将数字信号转换成模拟电压信号。通常在微处理器 MCU 中集成有一个硬件式的可输出 PWM 脉宽调制信号的端口，利用它可以将数字信号转换成所希望的电流信号。PWM 脉宽调制信号是一种矩形波，它的开启时间 t_p 与一个周期 T 的比是根据数字信号变化而变化的（见图 3）。

如果在微处理器 MCU 中即没有 D/A 转换电路也没有硬件式的可输出 PWM 脉宽调制信号的端口，比如一些低成本的 RISC 芯片就是这样，那么也可以通过软件方式产生这个 PWM 信号并通过编程让一个 I/O 输出端作为 PWM 信号的输出端。对此可以使用一个由时钟控制的中断程序来实现。

在一个周期 T 内，通过软件方式使输出端产生一个开启和关闭的 PWM 信号，它的脉冲宽度 t_p 是与数字化的测量信号值相关联的。微处理器 MCU 的 I/O 输出端通常输出的

通过 AM462 将来自 MCU 的 PWM 脉宽调制信号变送成工业标准的电流输出 4-20mA

是分立的具有脉冲频率 $f = 1/t_{clk}$ 的电压值 U_1 ($U_1=3.3V$ 或 $5V$) 并与 PWM 信号相适应，所以此时 PWM 信号的脉冲幅值即振幅就是 U_1 。

开启时间 t_p 和周期 T 的比值 t_p/T 可看作为占空比或工作比（图 3）。占空比的变化是与经微处理器处理的测量信息相关的。如果该信息具有 10 位的分辨率，那么周期 T 满足： $T= 1024 t_{clk}$ 。

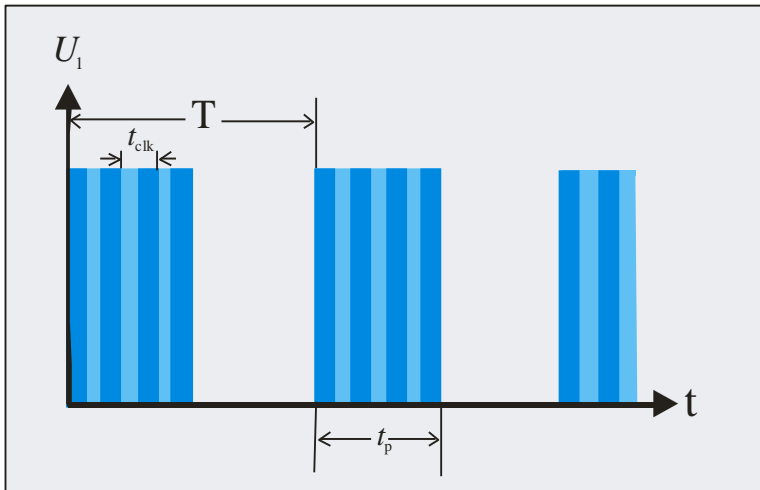


图 3: PWM 脉冲宽度 t_p 定义示意图

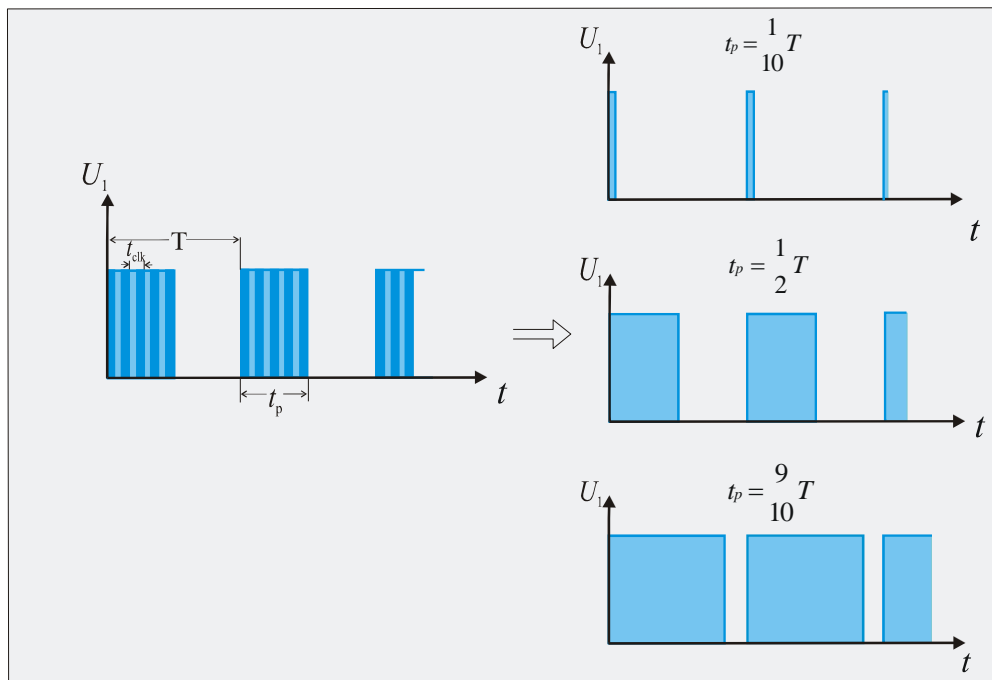


图 4: PWM 信号的不同占空比

通过 AM462 将来自 MCU 的 PWM 脉宽调制信号变送成工业标准的电流输出 4-20mA

例子:

如果一个十六进制的信息为 006A，微处理器的脉冲时间为 $t_{\text{clk}} = 1\mu\text{sec}$ ，那么可得到相应的脉冲宽度为 $t_p = 106\mu\text{sec}$ 的 PWM 信号，此时 CPU 的基频频率不分频。如果微处理器有 10 位的分辨率，可以得到占空比为（图 4）：

$$\frac{t_p}{T} = \frac{106}{1024} \cong 0,10$$

滤波电路

下面描述的滤波电路和元器件数值的计算是基于在输出端输出的是经微处理器处理后的 PWM 脉宽调制信号。

为了将 PWM 信号转换成模拟电压信号，通常由一个低通滤波器将信号进行算术平均值处理取得的。此时 PWM 信号必须满足这个准静态的条件： $f_m \ll f_p$ （ f_m = 测量值的变化， $f_p = 1/t_p$ ），可以通过一个滤波电路将 PWM 信号转换成模拟电压信号（见图 5）。

这个来自微处理器 MCU 的矩形波 PWM 信号 U_1 通过低通滤波器得到一个平均值的模拟电压信号 U_2 ，它是与占空比 t_p/T 成正比的。计算公式如下：

$$U_2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} U_1(t) dt \longrightarrow U_2 = U_1 \frac{t_p}{T}$$

经过滤波的 PWM 信号即 U_2 再继续转换成工业标准的电流输出（4...20mA）。如果占空比 t_p/T 为 0.5，则输出的模拟电压值是算术平均值为 2.5V，如果系统的输出幅值是 5V 的话（ U_1 ）。

上面的式子中还没有涉及到滤波电路的参数计算和信号转换时相关的误差问题。接下来的问题是：如何来确定低通滤波器的电气参数，这个参数是与转换精度直接相关的？或者说，怎样做才能使 PWM 信号在转换成电流信号时所带来的误差是几乎可以忽略的，对低通滤波器所计算确定的电气参数在此起了一个什么作用？

通过 AM462 将来自 MCU 的 PWM 脉宽调制信号变送成工业标准的电流输出 4-20mA

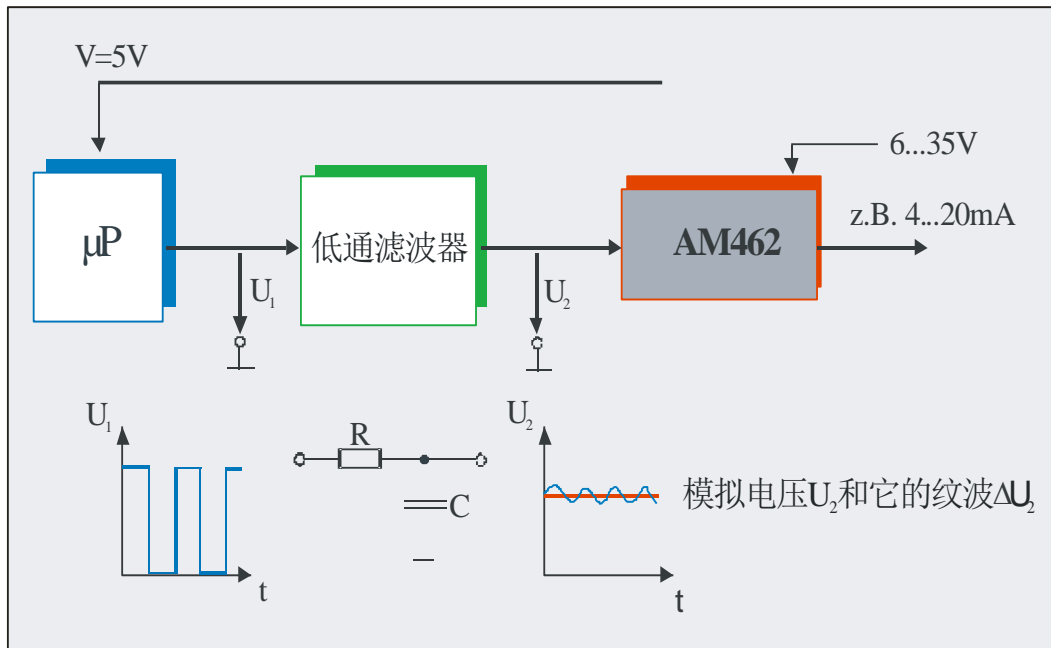


图 5: 带有 PWM 信号输出的微处理器 MCU 和电压电流转换电路 AM462 连接方式

低通滤波器的参数计算

原则上所需要的低通滤波器只要在模拟电压转换时不产生或产生很小的误差就可以了，就是说，来自低通滤波器的干扰即纹波应该尽可能的小。

PWM 信号的振幅是 U_1 ，经滤波输出的模拟电压 U_2 和它的纹波为 ΔU_2 ，在满足条件 $\Delta U_2 \ll U_1$ 的情况下，当占空比 tp/T 为一半时，即

$$tp = \frac{1}{2}T \quad (1)$$

U_2 的纹波 ΔU_2 将为最大 $\max \Delta U_2$ ，公式如下，

$$\max \Delta U_2 = \frac{U_1 \cdot T}{4 \cdot R \cdot C} \quad (2)$$

该公式说明，纹波电压不仅与 PWM 信号的振幅 U_1 和周期 T 有关，也与低通滤波器的电阻和电容值有关。

从低通滤波器的电阻 R 和电压电流转换电路 AM462 的输入偏置电流 (I_{INPUT}) 可得出转换电路的输入失调电压 U_{Off} ，该失调电压也是导致电流输出误差 ΔI_{out} 的重要部分。

$$U_{Off} = I_{INPUT} \cdot R \quad (3)$$

通过 AM462 将来自 MCU 的 PWM 脉宽调制信号变送成工业标准的电流输出 4-20mA

从失调电压式子(3)和纹波电压式子(2)中可以看出,电阻 R 所起的作用正相反,所以在计算低通滤波器的 R 和 C 时,会涉及到一个相同意义上的最佳选择问题。实际上计算时的边界条件要求此二部分误差应该相等 ($U_{off} = \max \Delta U_2$)。

由式子(2)和(3)得出最佳电阻值 R 为:

$$R = \frac{\max \Delta U_2}{I_{INPUT}} \tag{4}$$

由(2)式得出电容 C 为:

$$C = \frac{I_{INPUT} \cdot T \cdot U_1}{4 \cdot \max \Delta U_2^2} \tag{5}$$

在边界条件预先给出的情况下,即当失调电压和纹波电压二个误差相等时确定了低通滤波器 R 和 C 的值。与前面理论计算无关,在电路设计时还必须考虑电容的损耗 $\tan \delta$ 和温度系数对系统性能的影响,当然还有体积的大小和成本等问题。

低通滤波器的截止频率 f_g (3dB),通过它能够将 PWM 信号的变化 f_m (测量值的变化)传递转换的,由下面的式子得出:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \tag{6}$$

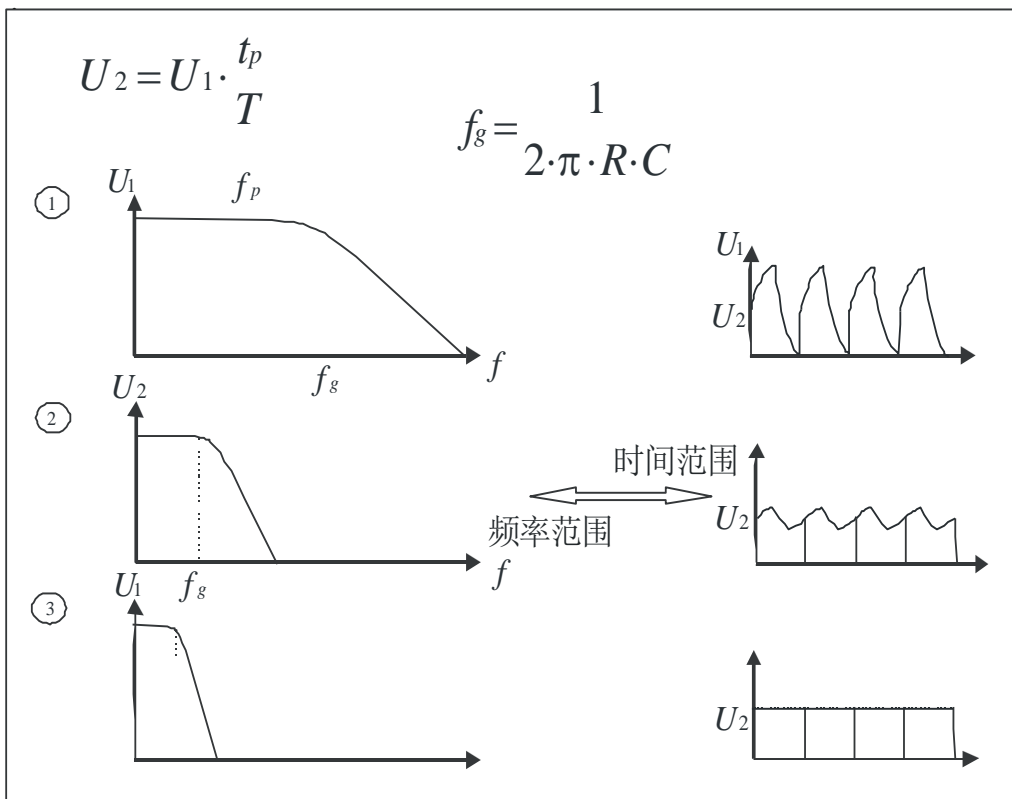


图 6: 纹波电压与低通滤波器的截止频率 f_g 的关系

通过 AM462 将来自 MCU 的 PWM 脉宽调制信号变送成工业标准的电流输出 4-20mA

从图 6 可以看出，纹波电压和低通滤波器的截止频率是互相关联的物理量。要纹波电压小，也就要低通滤波器的截止频率小。

由式子 (4) 和 (5) 得出：

$$f_g = \frac{2 \cdot \max \Delta U_2}{U_1 \cdot T \cdot \pi} \quad (7)$$

可以看出用纹波电压 $\max \Delta U_2$ 可以得出低通滤波器的截止频率 f_g 。

例子： $t_{\text{clk}} = 1\mu\text{sec}$ ， $T = 1024 t_{\text{clk}}$ ，纹波电压误差 $\max \Delta U_2$ 要求为 0.1%，失调电压误差同样为 0.1%，PWM-振幅 = 5V，AM462 输出电流信号为 $I_{\text{out}} = 4 \dots 20\text{mA}$ ，AM462 输入偏置电流 $I_{\text{input}} \approx 10\text{nA}$

将数据代入式子 (4) 和 (5) 计算得出：

$$R = \frac{5\text{mV}}{10 \cdot 10^{-9} \text{A}} = 500\text{k}\Omega \text{ 和 } C = \frac{10 \cdot 10^{-9} \text{A} \cdot 5\text{V} \cdot 1024 \cdot 10^{-6} \text{sec}}{4 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \text{V}} = 512\text{nF}$$

将 R 和 C 的值代入式子 (7) 得出低通滤波器的截止频率 f_g ：

$$f_g = \frac{2 \cdot 5\text{mV}}{5\text{V} \cdot \pi \cdot 1024 \mu\text{sec}} = 0,62\text{Hz}$$

作为附加条件，必须注意低通滤波器的截止频率 f_g 要小于 f_{it} ， f_{it} 是电压电流转换电路的传递频响，AM462 的传递频响约为 50kHz。

由于 AM462 是模拟集成电路，所以输出信号可达到的精度仅仅依赖于 PWM 信号也就是微处理器的脉冲频率。

如果要求更小的纹波电压，可用应用更好和复杂的滤波电路如 Tschebyscheff-, Bessel-或者 Butterworth-滤波电路。

补充：通过一个频响较快的光电耦合放大器，将 PWM 信号进行电气隔离，隔离电压视光电耦合放大器而定。然后将光电耦合放大器输出的 PWM 信号经低通滤波器滤波后再通过 AM462 进行电压电流变送处理。光电耦合放大器的工作电源由 AM462 直接提供。

通过 AM462 将来自 MCU 的 PWM 脉宽调制信号变送成工业标准的电流输出 4-20mA

AM462 – 工业通用的电压电流变送集成电路

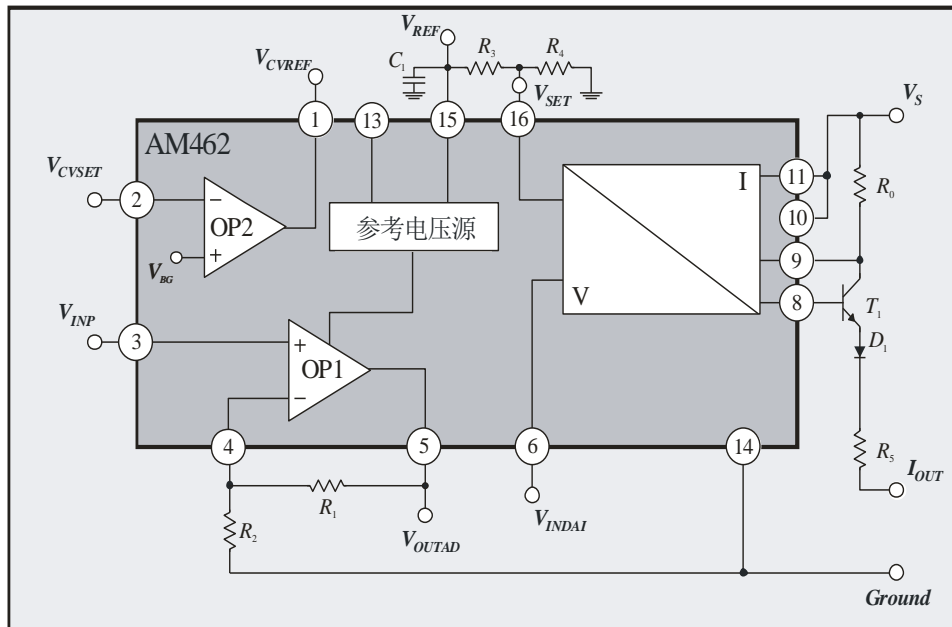


图 7: AM462 的 3-线制 4-20mA 电流变送输出电路

AM462（图 7）是一个多级放大和带有多种附加功能和保护功能的电压电流变送集成电路，它具有很大的使用灵活性，满足多种功能的应用要求。该集成电路以模块化的方式集成了各个功能模块，它们可以单独使用也可以相互连接组合使用。

下面简要介绍 AM462 的各个功能模块情况：

1. 前置放大级

AM462 的前级是一个运算放大器 OP1。输入的单端接地信号可以从 0 至 5V，并且在单电源情况下，能达到几乎为零的零点输出。运算放大器 OP1 具有信号过载饱和功能，可使输出电压限定在参考电压之下，对后级达到过载保护的的目的。

2. 电压电流转换级（V/I—转换）

通过 V/I—转换级，使输入电压信号转换成标准电流信号比如 0/4...20mA 输出。通过外接的三极管 T1 驱动输出电流，使电热耗散功率远离了集成电路。电流输出的范围比如零点和满度输出可通过二个外接的电阻进行简单调整（图 7）。当然可以通过微处理器进行数字调整，使 PWM 信号在小范围内调整，达到调整电流输出的目的，也省去了电位器。

3. 恒压源输出

AM462 带有一个 5V（通过管脚 VSET 设置也可以输出 10V）的恒压源，它可提供最大输出电流达 10mA，可作微处理器和其它外部电路比如传感器的工作电源。

通过 AM462 将来自 MCU 的 PWM 脉宽调制信号变送成工业标准的电流输出 4-20mA

4. 可作恒流源输出的运算放大器 OP2

附加的运算放大器 OP2 既可作恒流源也可作恒压源来使用，输出电流也可达 10mA。

运算放大器 OP2 的正相输入端已接在电路内部的固定电压 V_{BG} ($=1.27V$) 上，调整二个外接电阻就可获得各种恒压或恒流输出。

总之，AM462 有一个内置电压过载保护的运算放大器 (OP1)，一个集成的输出极性保护的电压电流 (V/I) 转换的输出级，同时还有输出电流限制保护功能，可以保护当外接负载为零时的输出级不被损坏，所以，AM462 是一个典型的工业通用的电压电流转换变送集成电路。

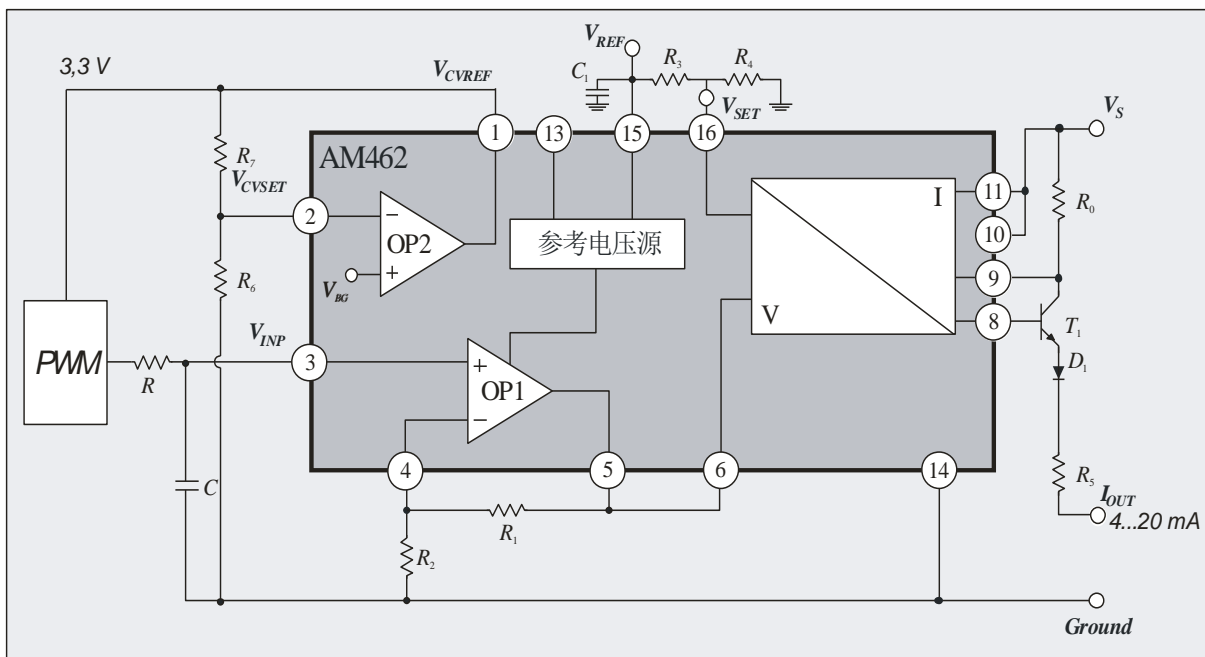


图 7：通过 AM462 将 PWM 信号变送为 3-线制的 4-20mA 电流输出信号

总结

微处理器 MCU 的数字信号，比如它的脉冲频率和 I/O 输出电压即 PWM 信号预先给定，那么用一个简单的低通滤波器和一个电压控制的电流源（比如 AM462）就可以转换变送成 4-20mA 的电流输出信号。本文详细讨论和计算了低通滤波器的电路参数。通过所给出的公式很容易使转换电路与具体的应用边界条件相符合。

本文给出的应用举例是 3 线制的 4-20mA 变送电路，也可以简单地变成 2 线制的 4-20mA 变送电路[1]，只要在 2 线制工作情况下总工作电流不超过 4mA 并对转换电路的电流信号不产生影响。

通过 **AM462** 将来自 **MCU** 的 **PWM** 脉宽调制信号变送成
工业标准的电流输出 **4-20mA**

参考文献:

所有参考资料参见网站: www.analogmicro.de 和 www.sym-china.com

- [1] 电压电流转换集成电路的产品说明书: AM400, AM402, AM422, AM442, AM460
- [2] 产品说明书 AM462 中的应用举例
- [3] 科技文章 PR1012: 2 线制的电压电流变送电路应用
- [4] 应用文章 AN1010: 将输出为 0.5-4.5V 的压力传感器变送成 2 线制 4-20mA 电流输出