



传感器与放大器设计



任何仪器都需要利用传感器对检测目标进行测量。传感器直接输出的信号一般比较微弱,常常需要进行放大。本章主要讲述智能仪器数据采集通道中传感器和放大电路的工作原理及其设计、选用方法,并通过实例分析介绍其应用。

3.1 概述

国际电工委员会(IEC)把传感器定义为:“传感器就是测量系统中的一种前置部件,它把输入变量转换为可供测量的信号”。部分学者认为“传感器是包括承载体与电路连接的敏感元件”。现代智能仪器领域中应用的传感器可以是敏感元件(如热电偶),也可以是变送器(如直接输出标准信号的压力传感器),目前基本都趋于按照国家标准规范使用传感器这一名称。

传感器输出信号常常需要进行信号调理(signal conditioning)。在传统的仪器中,信号调理的任务较复杂,除了实现物理信号向电信号的转换、小信号的放大、滤波外,还有诸如零点校正、线性化处理、温度补偿、误差修正和量程切换等,这些操作统称为信号调理,相应的执行电路统称为信号调理电路。在智能仪器数据采集通道中,许多原来依靠硬件实现的信号调理任务都可通过软件来实现,这样就大大简化了数据采集通道的结构。

本章主要针对传感器和前置放大器的选取和设计进行阐述。

3.2 传感器

传感器是数据采集通道的第一道环节,是对被测信号的拾取,也是决定整个测试系统性能的关键环节之一。对于一项测量任务,首先要能够有效地从被测对象中取得能用于处理的信息,因此传感器在整个智能仪器中作用十分重要。由于传感器技术的发展非常迅速,各

种各样的传感器应运而生,所以大多数时候智能仪器的设计者,一般只需从现有传感器产品中正确地选用即可。在某些特殊使用场合,无法选到合适的传感器,则需自行设计制造传感器。

3.2.1 传感器组成

传感器包括敏感元件、转换元件、调理电路和辅助电源。传感器的一般组成如图 3.1 所示。

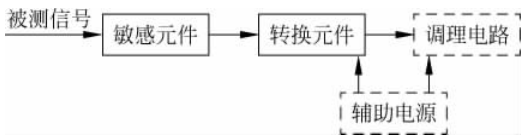


图 3.1 传感器的一般组成

敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件的输出转换为适合处理或传输的电参量或电信号的部分。由于转换元件的输出既可能是电参量(电阻、电容、电感等),也可能是电信号(电压、电流、电功率等),一般都很微弱,通常需要借助辅助电源以及信号调理电路,对信号进行放大、运算、调制等,因此辅助电源和调理电路有时也作为传感器的一部分。

图 3.2 所示为应变式加速度传感器,测量垂直方向的加速度。当加速度变化时,质量块 2 的惯性力改变,导致应变梁 1 变形,应变片 3 电阻发生变化。在这里,质量块 2 是敏感元件,应变片 3 是转换元件。将被测量转化为对应的电信号,并对其进行放大等处理的电路就是信号调理电路(图中未画出)。

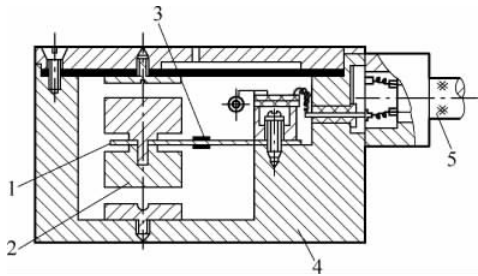


图 3.2 应变式加速度传感器结构

1—应变梁；2—质量块；3—应变片；4—壳体；5—引线

3.2.2 传感器分类

传感器的种类、规格十分繁多,因此对传感器进行科学分类十分必要。传感器的分类方法很多,常用的分类方法有：按被测物理量分类；按传感器工作原理或信号转换原理分类；按传感器与被测量间能量关系分类等。

传感器按被测物理量分类是以传感器测量对象的物理属性为依据,将传感器分为位移

传感器、速度传感器、加速度传感器、温度传感器、力/力矩传感器、流量传感器以及其他形式的传感器(如 CO 传感器、湿度传感器、接近开关等)。

按工作原理或信号转换原理可将传感器分为结构型和物性型两类。所谓结构型传感器是指根据传感器的结构变化来实现信号的传感。例如电容式传感器是依靠改变电容极板的间距或作用面积实现电容值的改变;变阻器式传感器是利用电刷的移动而改变作用电阻丝的长度从而改变电阻值的大小。物性型传感器则根据传感器敏感元件材料本身物理特性的变化来实现信号的转换。例如压电加速度传感器是利用了传感器中石英晶体的压电效应等。

传感器也是一种换能元件,它把被测量转换成一种具有规定精度的其他量或同种量的其他值。根据传感器与被测对象之间的能量转换关系将传感器分为能量转换型和能量控制型。能量转换型传感器又称为有源传感器,直接由被测对象输入能量使传感器工作,属于此类传感器的有热电偶温度传感器、压电式传感器、弹性压力传感器等。能量控制型传感器又称为有源传感器,依靠外部提供辅助能源工作,由被测量控制该能量的变化,如电阻应变式传感器等。

表 3.1 列出了常用传感器的一些基本类型。

表 3.1 常用传感器的基本类型

传感器类型	作用原理
一、机械类	
A. 接触轴,轴销,指销	位移—位移
B. 弹性元件	
1. 测力杆	
a. 拉/压式	力—直线位移
b. 弯曲式	力—直线位移
c. 扭曲式	力矩—角位移
2. 测力环	力—直线位移
3. 布尔登管	压力—位移
4. 膜盒	压力—位移
5. 膜片	压力—位移
C. 质量块	
1. 振动质量块	加力作用—相对位移
2. 摆	重力加速度—频率或周期
3. 质量块	力—位移
4. 液柱	压力—位移
D. 热式	
1. 热电偶	温度—电位
2. 双金属材料(包括玻璃中的水银)	温度—位移
3. 热敏电阻	温度—阻抗变化
4. 化学相位	温度—阻抗变化
5. 压力温度计	温度—压力

续表

传感器类型	作用原理
E. 液气式	
1. 静力型	
a. 浮子	液位—位移
b. 密度计	密度—相对位移
2. 动力型	
a. 测流孔	流速—压力变化
b. 文丘里管	流速—压力变化
c. 皮托管	流速—压力变化
d. 叶片	速度—力
e. 透平机	线速度—角速度
二、电气类	
A. 电阻式	
1. 接触型	位移—阻抗变化
2. 变长度导体型	位移—阻抗变化
3. 变面积导体型	位移—阻抗变化
4. 导体尺寸变化型	应变—阻抗变化
5. 导体电阻率变化型	温度—阻抗变化
B. 电感式	
1. 变线圈尺寸型	位移—电感变化
2. 变气隙型	位移—电感变化
3. 变铁芯材料型	位移—电感变化
4. 变铁芯位置型	位移—电感变化
5. 变线圈位置型	位移—电感变化
6. 动圈式	速度—感应电压变化
7. 动磁铁式	速度—感应电压变化
8. 动铁芯式	速度—感应电压变化
C. 电容式	
1. 变气隙式	位移—电容变化
2. 变极板面积式	位移—电容变化
3. 变介电常数式	位移—电容变化
D. 压电式	位移—电压或电压—位移
E. 半导体结	
1. 结阈值电压	温度—电压变化
2. 光电二极管	光强—电流
F. 光电式	
1. 光生伏特型	光强—电压
2. 光导型	光强—电阻变化
3. 光子发射型	光强—电流
G. 霍尔效应式	位移—电压

对于一种被测量,常常可以选用多种传感器进行测量。例如测量温度的传感器有热电偶、热电阻、热敏电阻、半导体 PN 结、IC 温度传感器、光纤温度传感器等。因此,在都能满足测量范围、精度、使用条件等情况下,应侧重考虑成本的高低、相配电路是否简单等因素进

行取舍,尽可能选择性能价格比高的传感器。

近年来,传感器有了较大发展,其中对智能仪器有较大影响的有:

1. 标准化输出型传感器

国际电工委员会将直流电流信号 4~20mA 和直流电压信号 1~5V 确定为过程控制系统用模拟信号标准。我国从 DDZ-Ⅲ型电动仪表开始采用这一国际标准信号制,仪表传输信号采用直流 4~20mA,联络信号采用直流 1~5V,即采用电流传输、电压接收的信号系统。

为了与 A/D 转换的输入要求相适应,传感器厂家开始设计、制造一些专门与 A/D 转换器相配套的大信号输出传感器。通常是将传感器单元和调理放大电路做成一体,即传感器+变送器的形式,使传感器能直接输出 0~5V、1~5V、0~10V 或 4~20mA 的信号,现在市场上流行的传感器输出大多为标准信号。智能仪器的数据采集通道中应尽可能选用大信号传感器,这样可以省去小信号放大环节,直接对传感器输出信号滤波后进行 A/D 转换送入微机,或通过 V/F 转换、光电隔离送入微机,如图 3.3 所示。从图中可以看出采用大信号输出传感器的两路数据采集电路,要比采用小信号输出传感器的简洁的多。对于大电流输出,只要经过简单 I/V 转换即可变为大信号电压输出。

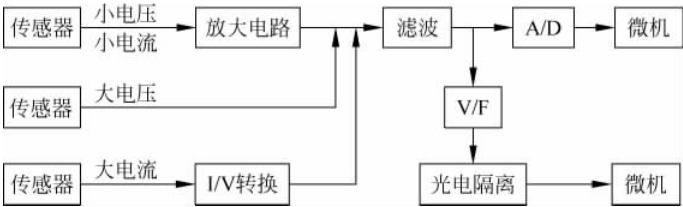


图 3.3 输出标准信号传感器与仪器连接结构

根据变送器输出信号类型,传感器可分为电流输出型、电压输出型和频率输出型。智能仪器设计过程中,需要正确匹配传感器的信号输出类型和信号调理电路的输入接口类型。表 3.2 所列为市场上某型号压力传感器参数。

表 3.2 某压力传感器参数

测量范围	-0.1~600MPa 可选
精度等级	0.5%满量程(Full Span,FS)(标准)、0.25%FS(高精度)
电流输出信号	4~20mA
电压输出信号	0~10V、0~5V、0.5~4.5V、1~5V
频率输出信号	200~1000Hz
供电电压	直流+24V、直流+12V、直流+5V、直流 9~36V; mV 信号直流+10V(直流 5~12V)

2. 数字式传感器

数字式传感器是把被测参量转换成数字量输出的传感器,它是传感技术和微电子技术综合的产物,是传感器的发展方向之一。数字式传感器能直接把输入量转换成数字量输出,例如光栅式传感器、磁栅式传感器、码盘、谐振式传感器、转速传感器、感应同步器等,或者对传感器输出的模拟电压经 V/F 转换成频率信号。从广义上说,所有模拟式传感器的输出都可经过数字化(例如采用模数转换器)而得到数字量输出。

数字式传感器具有测量精度高、抗干扰能力强、便于远距离传送等特点。此外,采用数

字式传感器时,传感器输出如果满足 TTL 电平标准,则可直接接入微处理器的 I/O 接口或中断入口。如果传感器输出不是 TTL 电平时,则须进行电平转换或放大整形处理。一般信号进入单片机的 I/O 接口或扩展 I/O 接口时,还需要通过光电耦合器隔离,如图 3.4 所示。

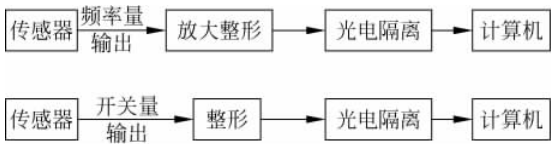


图 3.4 频率量及开关量输出传感器的使用

3. 模拟集成传感器

模拟集成传感器是采用硅半导体集成工艺而制成的传感器,因此亦称硅传感器或单片集成传感器。模拟集成传感器是在 20 世纪 80 年代问世的,它是将传感器集成在一个芯片上、可完成测量及模拟信号输出功能的专用 IC。模拟集成传感器的主要特点是功能单一、测量误差小、价格低、响应速度快、传输距离远、体积小、功耗低、不需要进行非线性校准、外围电路简单。

传感器的集成过程包括将传感器与适合的信号调节电路、终端和接口连接器组合配对。同时需要决定是否现有封装能够容纳当前装配件,或是基于应用空间和环境要求,采用定制封装。定制封装可能集成一个或多个传感器及其他元件,以创造更高级别的装配件,如用于血液分析机和呼吸机中的压力传感器。

4. 智能传感器

智能传感器是将传感器、信号调理电路与微型计算机等集成在一块芯片上,其特征是将传感技术和信息处理技术相结合,使其除了具有感知的本能外,还具有逻辑判断、信息处理等功能。智能传感器可以输出数字信号,带有标准接口,能接到标准总线上,实现数字通信功能,具有精度高、稳定性好、可靠性高、测量范围宽、量程大等特点。

智能压力传感器 MSC1211 的硬件结构如图 3.5 所示,由压力传感器、温度传感器、微处理器、电源模块和输出模块构成。其中,电源模块为系统提供 3.3V 的模拟电压和 2.7V 的数字电压。该传感器带 24 位 Σ - Δ 型 A/D 转换器和 16 位 D/A 转换器的微处理器,其内部包括程控增益放大器、多路转换开关、数字滤波和信号校准电路等。图 3.6 所示为 MSC1211 与传感器模块及主机的接口电路,其中压力信号由采用恒流源供电的压阻式传感器输出,其供电电源由 MSC1211 提供,不需要外接电源。压力传感器信号采用差动输入方式时,AIN4 作为正向输入端,AIN5 作为负向输入端。温度传感器信号采用单端输入方式。

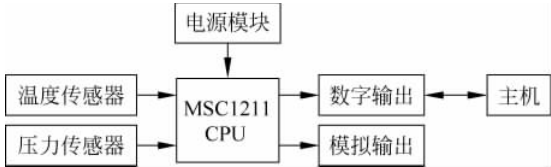


图 3.5 智能压力传感器的结构框图

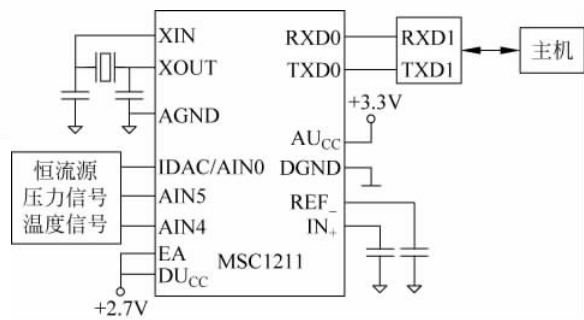


图 3.6 MSC1211 与传感器模块及主机的接口电路

当压力传感器信号进入 A/D 转换器后,其内部程控增益放大器根据输入压力信号的范围自动设置增益,并对压力信号进行模数转换及数字滤波。CPU 从温度芯片读取温度信号,并从闪存存储器(FLASH)中读取零点和线性度校正系数来进行温度补偿及非线性校正,然后根据量程范围进行量程转换并送至 D/A 转换器,从而输出相应的电压值。

压力信号由微处理器设置为数字输出模式或模拟输出模式,模拟输出模式无须数字通信线路,而数字输出模式可进行双向通信。该系统通过 RS-232 标准接口与主机通信,如向主机发送测量数据、接收主机发出的控制指令、进行参数设置及校准操作等。

5. 网络传感器

1997 年 9 月,国际电气电子工程师协会(The Institute of Electrical and Electronics Engineers,IEEE)颁布了通用网络化传感器标准,即 IEEE1451.2。IEEE1451.2 提供了将传感器和变送器连接到网络的接口标准,主要用于实现传感器的网络化。IEEE1451.2 标准采用通用的 A/D 或 D/A 转换装置作为传感器的 I/O 接口,将各种传感器模拟量转换成标准规定格式的数据,连同传感器电子数据表(transducer electronic data sheet,TEDS)一起与标准规定的网络适配器(network capable application process,NCAP)连接。如此,数据可以按网络规定的协议接入网络。该标准结构模型提供了一个连接智能变送器的接口模型(smart transducer interface module,STIM)NCAP 的 10 线标准接口——变送独立接口(transducer independence interface,TII)。

IEEE1451.4 标准以其更简单、实用的应用得到了行业重视。IEEE1451.4 标准通过定义不依赖于特定控制网络的硬件和软件模块来简化网络化传感器的设计,这也推动了含有传感器的即插即用系统的开发。基于 IEEE1451 标准的网络传感器结构如图 3.7 所示。

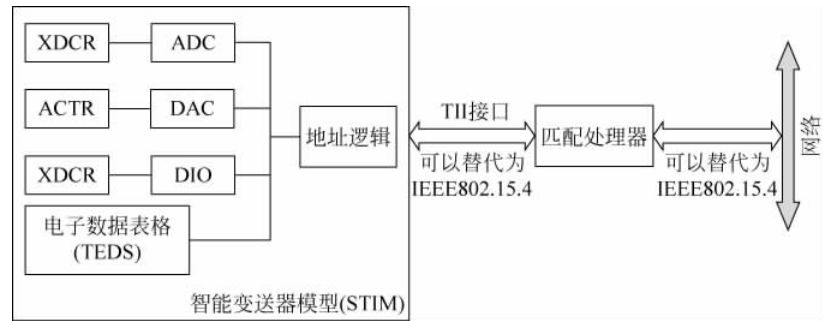


图 3.7 IEEE1451 智能传感器结构

3.2.3 传感器的选择

传感器的选择及其在系统中的配置对于智能仪器实现其系统总体功能十分关键。选择传感器时应根据智能仪器总体功能,选择适用于测量任务的传感器种类、信号传输方式、体积大小和装配方式等。当用单个传感器检测某个局部位置的运作状况时,传感器功能及操作都相对简单。而当需要将多个传感器组合检测时,便存在着如何将这些传感器有机集成为一个智能检测系统的问题。

智能仪器对传感器的主要技术要求如下:

(1) 具有将被测量转换为后续电路可用电参量或电信号的功能,转换范围与被测量实际变化一致;

(2) 转换精度符合整个测试系统根据总精度要求而分配给传感器的精度指标,转换速度应符合整机的动态要求;

(3) 能满足被测介质和使用环境的特殊要求,如耐高温、耐高压、防腐、抗振、防爆、抗电磁干扰、体积小、质量轻和不耗电或耗电少等;

(4) 能满足用户对可靠性和可维护性的要求。

选用传感器的主要方法如下:

1. 类型

要进行一个具体的测量工作,首先要考虑采用何种原理的传感器,这需要分析多方面的因素之后才能确定。因为即使是测量同一物理量,也有多种原理的传感器可供选用,哪一种原理的传感器更为合适,则需要根据被测量的特点和传感器的使用条件考虑。

2. 精度

精度是传感器的一个重要的性能指标,是整个测量系统测量精度的一个重要环节。传感器的精度越高,其价格越昂贵,因此,传感器的精度只要满足整个测量系统的精度要求就可以,不必选得过高。这样就可以在满足同一测量目的的诸多传感器中选择比较便宜和简单的传感器。

如果测量目的是定性分析,选用重复精度高的传感器即可,不宜选用绝对量值精度高的;如果是为了定量分析,必须获得精确的测量值,就需选用精度等级能满足要求的传感器。

3. 灵敏度

当测试装置的输入 x 有一增量 Δx ,引起输出 y 发生相应变化 Δy 时,定义:灵敏度 $S = \Delta y / \Delta x$ 。通常,在传感器的线性范围内,希望传感器的灵敏度越高越好。因为灵敏度较高,与同一被测量对应的输出信号的值较大,有利于信号处理。但要注意的是,传感器的灵敏度高,外界噪声也容易混入,影响测量精度。因此,要求传感器在具有较高灵敏度的同时还应具有较高的信噪比,尽量减少从外界引入的干扰信号。

4. 频率响应特性

传感器的频率响应特性决定了其保持不失真测量的被测量的允许频率范围。如果被测

量中含有超过传感器不失真响应频率范围之外的分量,则传感器无法精确测出该分量。若传感器的固有频率高,则频带宽,可测的信号频率范围就宽,而由于受到结构特性的影响,机械惯性也较大。

在动态测量中,应保证传感器的动态响应特性满足要求。实际传感器对于被测量的响应总有一定延迟,对于变化过快的被测量会产生较大误差,因此,希望传感器的响应延迟时间越短越好。

5. 线性范围

传感器的线性范围是指输出与输入成正比的范围。从理论上讲,在此范围内,灵敏度保持定值。传感器的线性范围越宽,则其量程越大,并且能保证一定的测量精度。在选择传感器时,当传感器的种类确定以后,首先要看其量程是否满足要求。实际上,任何传感器都不能保证绝对的线性,其线性度也是相对的。当所要求测量精度比较低时,在一定的范围内,可将非线性误差较小的传感器近似看作线性的,这会给测量带来极大的方便。

6. 稳定性

传感器使用一段时间后,其性能保持不变的能力称为稳定性。影响传感器长期稳定性的因素除传感器本身结构外,主要是传感器的使用环境。因此,要使传感器具有良好的稳定性,传感器必须要有较强的环境适应能力。在选择传感器之前,应对其使用环境进行调查,并根据具体的使用环境选择合适的传感器,或采取适当的措施,减小环境的影响。传感器的稳定性有定量指标,超过使用期后,在使用前应重新进行标定,以确定传感器的性能是否发生变化。在某些要求传感器能长期使用而又不能轻易更换或标定的场合,所选用的传感器稳定性要求更严格,要能够经受住长时间的考验。

此外,选择传感器还应考虑被测位置对传感器体积的要求、测量方式(接触式还是非接触式)、信号的引出方法(有线或是无线)、传感器的来源(国产还是进口)和价格等。

3.2.4 传感器的应用技术

信号输出形式不同的传感器,其应用方法也不同。下面根据标准信号输出的不同形式,介绍传感器的应用方法。

1. 电压输出型和电流输出型传感器

表 3.3 是常见传感器的信号输出和接口类型。从表中可以看出,电流型标准信号输出为 $4\sim 20\text{mA}$,输出线型为两线制,有电源+和输出+两个输出线;电压型标准信号输出为 $0\sim 5\text{V}$ 和 $0\sim 10\text{V}$,输出线型为三线制,有电源+、输出+以及它们的公共端,即电源- / 信号-。由于 $0\sim 5\text{V}$ 和 $0\sim 10\text{V}$ 型传感器在没有信号时传感器输出为 0,分不清传感器是正常工作还是故障,因此常见的还有 $1\sim 5\text{V}$ 和 $1\sim 10\text{V}$ 电压输出型传感器,这种传感器输出为 0 时即为故障状态。

表 3.3 常见传感器的输出及接口类型

输出类型	功能	线色/线号	图例	输出类型	功 能	线色/线号
DIN 赫斯曼 4~20mA	电源+	红色/1		DIN 赫斯曼 0~5V 0~10V 1~5V 1~10V	电源+	红色/1
	输出+	黑色/2			输出+	蓝色/3
					电源- /输出+	黑色/2
航空插头 4~20mA	电源+	红色/2		航空插头 0~5V 0~10V 1~5V 1~10V	电源+	红色/2
	输出+	黑色/1			输出+	蓝色/1
					电源- /输出+	黑色/3
格兰防水 4~20mA	电源+	红色		格兰防水 0~5V 0~10V 1~5V 1~10V	电源+	红色
	输出+	黑色			输出+	蓝色
					电源- /输出+	黑色

电压输出型和电流输出型传感器在选购时要注意查看参数,若定制需要向厂家说明,不同输出类型传感器常用的接线方式如图 3.8 所示。

2. 频率输出型传感器

频率输出型传感器在输出量程内,输出信号值与一定的频率范围呈线性关系,如煤矿用瓦斯浓度传感器、煤矿用温度传感器等,由于输出信号传输距离远,因此在智能仪器和工业测控领域得到广泛应用。表 3.4 为某公司生产的 GWD100 型矿用温度传感器参数表,从表中可以看出,测量温度范围 0~100℃,对应的输出频率范围 200~1000Hz,同时还具备电压和电流型信号输出。测量时,只要测量当前传感器输出频率,通过线性方程即可求得当前测量的温度。

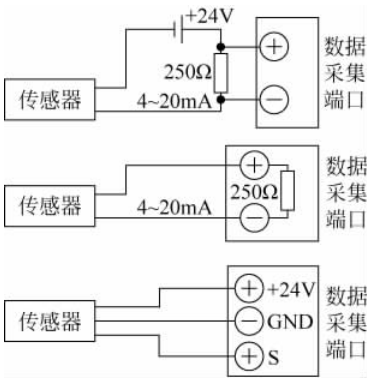


图 3.8 电流和电压输出型传感器常用接线方式

表 3.4 GWD100 型矿用温度传感器参数

型号	GWD100
工作电压	直流 9~24V
测量范围	0~100℃
适用对象	煤矿井下危险场所环境温度
基本误差	≤±2.5%(FS)
响应时间	≤10s
输出信号	200~1000Hz/4~20mA/1~5V

举例来说,表 3.4 所示的 GWD100 型矿用温度传感器,如果当前温度是 50℃,该如何计算传感器通过频率输出、电流输出和电压输出的值?

在传感器量程范围内,传感器输出与被测温度呈严格线性关系。

1) 频率输出信号

由表 3.4 可知,0~100℃范围内,传感器输出的频率(方波)为 200~1000Hz,由于传感