

SMART（智能型）压力传感器

将压敏电阻压力传感元件与微型计算器和数字信号处理组合起来获得一种既精确又易使用的传感器。

鲍尔·B.杜普依斯 (Honeywell 军用航空电子部)

MN15-2322;HVN 542-5965

选择一台精确测量系统(总误差预算小于 1%)用的压力传感器传统上说,并不是一件查一下目录就能迅速找到一台适应应用需要的传感器那样简单的事情。选择工作往往被许多因素搞得复杂化,其中技术规格往往靠不住,并且会在传感器和它的系统接口中隐藏有误差源。不仅有必要选择单个元件-传感器-而且还要定义由许多元件组成的整个测量系统(每个元件都有其自身的误差)。因此,压力测量系统的精度不能简单地根据传感器内含的精度来确定,而必须通过耗时的分析和测试予以确定。

此外,当用大气压测量飞机的高度时,常常需要将压力测量结果转换为其它单位以便显示。这种非线性转换通常会使硬件变得复杂化,并使它仅适用于一个单一功能。

本文中介绍的 SMART 压力传感器提供了一种精确测量压力的系统方法,这种传感器能使系统设计师从研究、定义和验证传感器性能的工作中解放出来。SMART 传感器是将三种技术融为一体的结果:压敏电阻传感元件,微型计算机和数字信号处理。它可为温度效应和非线性度提供补偿,而且还能在测量系统的传感器端

提供换算并转换为用户需要的单位。这种传感器以定义系统中性能的单精度数为特点。所见即所得;没有任何隐藏误差源。SMART 传感器的主要优点是:在环境范围内具有优越的性能,长期极佳的稳定性,接口不会感生测量误差,能将来自若干台传感器的数字数据多路传输到公用导线对上,并能同时输出多个参数,如压力和高度。

设计师的问题

传统上选择传感器一直是与建立压力测量系统有关的一个非常耗时的工作。有无数隐藏的误差源和未披露的性能指标。在许多影响因素中必须进行考虑的几项是:零点和量程随温度和时间漂移、可重复性、稳定性、校准精度以及动态压力和温度变化对系统精度的影响。

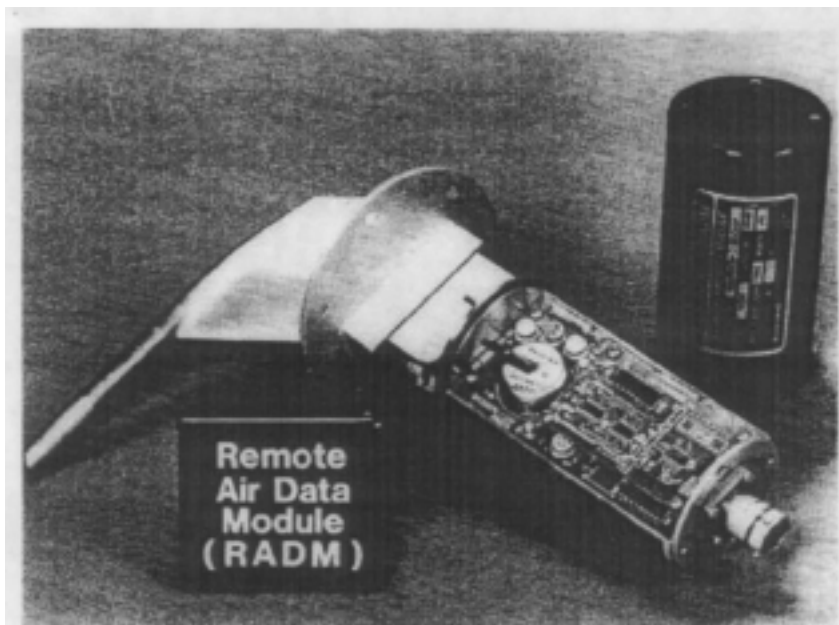
一旦选定传感器,下一项工作就是选择或设计模拟信号调节电子设备。系统的这部分设备需要完成几项功能。首先,必须放大传感器的低电平输出信号,并将它转换为一个可用格式以便消除接口接线上的噪声。其次,必须校正传感器上任何静电或热感应的零点和量程误差。最后信号调节电子设备往往必须校正压力非线性度。应当注意在通过时模拟元件用于对传感器

的缺陷进行补偿而接口电子设备本身又是附加的热误差源和长期误差源。

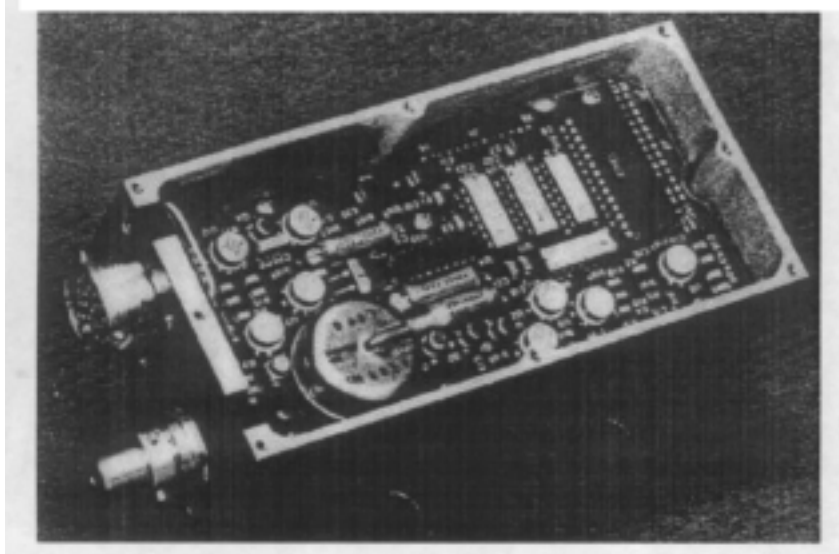
信号调节级的输出是一个模拟信号,或是电压或是电流,一般在 0 至 10 伏或 4 至 20 毫安之间。电压输出模式常被用在紧凑式系统中,在该系统中传感器的供电独立于输出信号。电流回路方式常用于传感器的定位与用户系统相隔一定距离的应用场合。采用这种模式时,电源和信号都是通过相同的导线对传送的,传感器将它的电源线电流调制为模拟输出信号。

压力测量系统设计师的最后一项工作就是为用户系统定义接口。在过去十年设计的大多数应用中,这个接口一直是将模拟数据传输格式转换为一种数字格式,供以计算机为基础的数据采集和控制系统,或数字式显示装置使用。

从这个观点来看,传统的传感器应用不是取决于单个元件而是取决于由许多独立元件组成的整个系统;该系统本身通常是大型的测量和控制系统的一部分。这种方法的缺点是:传感元件和终端系统用户之间的模拟误差源的累积。SMART 压力传感器



成套压力传感器系统被安装在一个皮托管上，皮托管延伸到流过一飞行中飞机的空气流中，传感器的用途有两种：一种是测量静压力或环境压力，另一种是监测与飞机速度有关的动压力。现在该模块正在波音公司的下一代新技术演示飞机上工作。



用于 A320 空中客车的空气数据模块与前一张插图中示出的模块相似，但未安装在皮托管上。每架空中客车安装了 8 个这样的模块，可为 Honeywell 空气数据惯性参照系统提供压力测量。

通过提供各种传感功能、信号调节功能、对热效应进行补偿和密封测量点处的用户装置克服了这

个缺点。然后传感器通过一个抗噪声数字的接口将数据发送给用户。

三个例子

SMART 压力传感器的开发一直受到霍尼韦尔公司内部数个机构的鼓励促进：前商业航空部、防御系统组、军用航空电子设备部、工业控制设备部、固态电子设备部、系统研究中心以及海底系统部。通过这种协作开发的两种 SMART 传感器显示在本页的插图中。

其中一个传感器是装在皮托管上的远程空气数据模块于 1985 年交付给波音公司作飞行试验用。目前，此传感器正在他们的下一代技术演示飞机上工作。一个未安装在皮托管上的等效传感器自 1986 年开始，它用于由霍尼韦尔公司空运系统部为 A320 空中客车制造的空气数据惯性参照系统。已经证实，其标准传送性能一般优于整个压力和温度环境内满刻度总误差带的 ± 0.01 。另一个 SMART 传感器是 1983-84 年为检测 MK-46 鱼雷的深度而研制的；这个应用利用了一个辅助模拟输出。

工作原理

在这些传感器中使用的固态传感器均基于(1-0-0)硅中的压敏电阻效应。

电桥输出信号的振幅是压力和温度的函数，如 77 页上插图所示，随这个“原”传感器输出而变的高温是不妥当的。最明显的随温度变化的元件，实际上是由于传感器膜片随温度升高而“软化”造成的。为了校正这种重复出现的随温度变化的误差，在电路芯片上提供了一个热敏电阻器。将这个电阻器测得的温度供模拟算法使用再对传感器内的随

温度变化的误差源进行补偿。

传感器设计基础

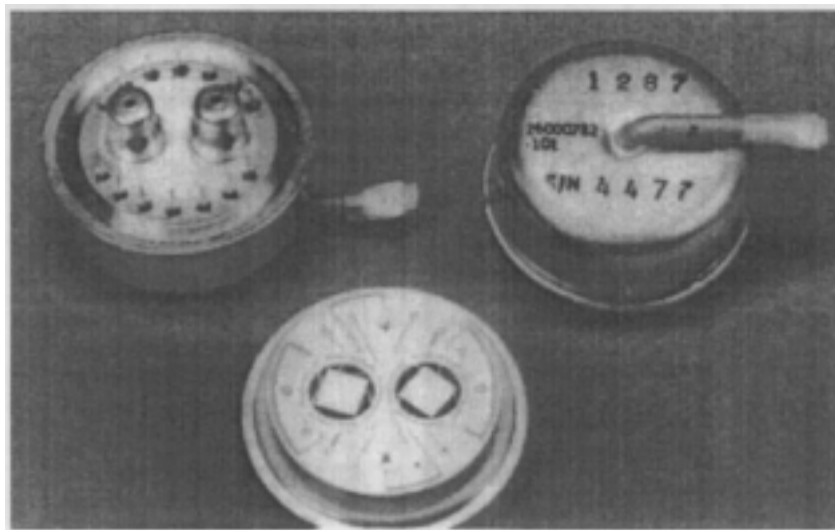
长期稳定性是我们对 SMART 传感器中所用传感器的主要设计目标。因此我们不能为了尝试补偿热效应和压力非线性度而在传感器芯片上堆满机械和电气器件，这一点非常重要。

传感器上的唯一绝对要求是可获得高度再生性的稳定结果。因此，传感器可以做得非常简单，并可以在数字模拟算法中进行校正。这种简单结构可提高可靠性、可重复性和稳定性，并可降低热滞后量和传感器的成本。其结果是无补偿、松容差但却稳定的传感器。

上面的插图中显示了这种传感器的一个示例。这种传感器用于霍尼韦尔公司的空气数据和发动机-压力-比产品中，供许多民用和军用场合使用，包括各种客机，如波音 727, 737 和 747，麦道 MD-80 系列和 DC-10，以及不久将投入使用的 A320 和 Fokker100 空中客车。

测量方式

为此，一般没有高性能纯差动压敏电阻传感器，尽管对使用硅胶或其它方法钝化芯片的有效侧以便获得纯差动测量结果做了各种尝试。我们的传感器通过提供“准差动”测量能力克服了差动传感器稳定性问题。



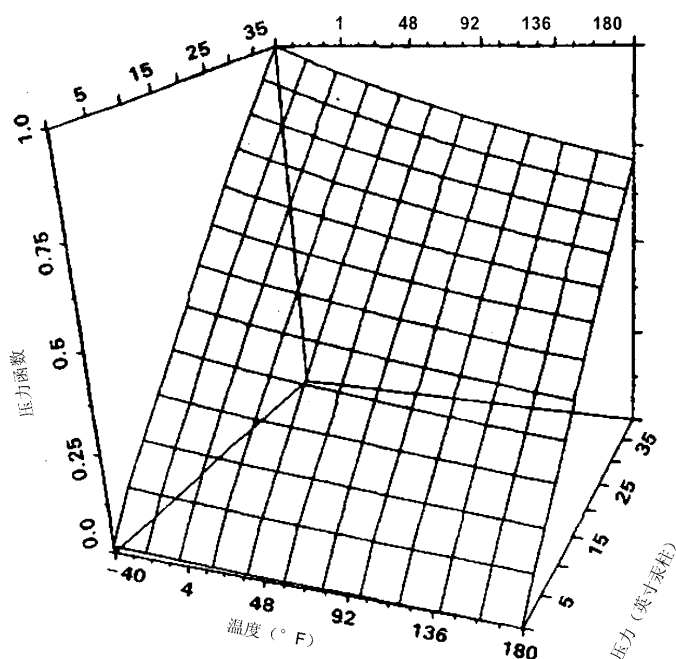
为了合成差动测量结果，用于测量空气数据的准差动传感器可以高精度测量两个绝对压力。将两个传感器安装在同一外壳中，使它们共享相同的参考真空，就可以消除潜在误差源，即就是两个独立参考真空室的剩余压力差。

该传感器是一种双通道绝压装置，原计划设计用于高性能一次空气数据应用(给飞行员、自动驾驶仪和飞机上的其它系统提供高度、空气速度、马赫数和其它有关资料)。参考文献 1 中对此进行了详细讨论。

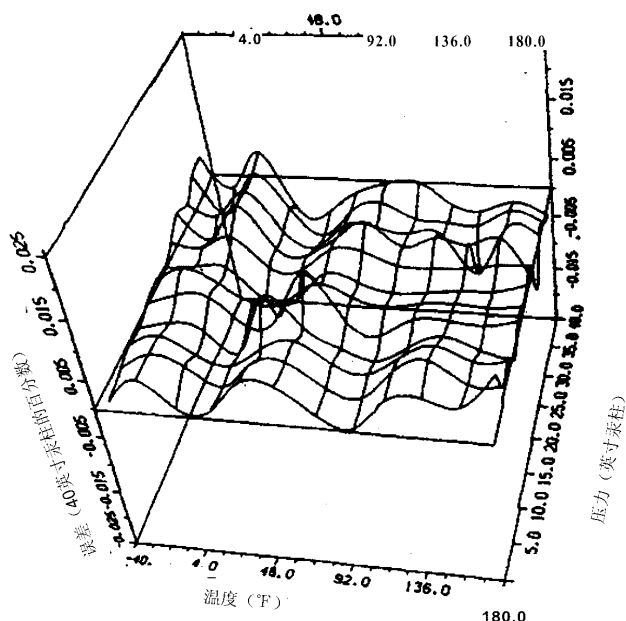
在空气数据应用中，需要精确了解两个压力。为了监测高度要知道环境绝对压力，一个对因飞机通过空气移动所产生的动态压力的差动测量可提供计算空气速度所需要的信息；两个压力可用于确定马赫数。准差动传感器可提供精确测量两个绝对压力的能力。因为两个传感元件都密封在相同的参考真空室中，所以它们之间没有参考真空差；从一个绝对压力测量结果中减去另一个测量结果可获得精确的差动测量结果。

将两个绝对压力相减以合成差动测量结果的概念，并不是新的概念。它一直是用独立的压力传感器实现的，每个传感器都有其自身的独立于参考真空的误差。采用固态电子设备部的微型压敏电阻传感器技术可将两个绝压传感器组成在相同的组件中，并共享相同的参考真空。这样任何参考真空误差就成为共模误差，从而从差动测量中消失。

单一的参考真空的优点可解释如下： P_1 和 P_2 是要测量的输入压力，而 V_1 和 V_2 是对应的参考真空室中的压力(真空绝不是完全真空)。



传感器无补偿的输出在很大程度上取决于温度和压力。图形的表面向右下倾的实情表示温度升高时传感器对压力变得不太敏感。在固定温度下传感器对压力的响应也呈轻微的非线性。



通过调用一个算法来模拟补偿“原”传感器数据中和随温度变化的误差及非线性度可大大提高传感器的精度。此插图中的垂直刻度放大了 2000 倍，以便与理想传感器的可见响应稍有些偏离。此图表明，测定压力和温度所有组合的传感器可精确到 $\pm 0.01\%$ 内。

通常，先合成两个压力的差压，然后采用下式计算：

$$(P_1 - V_1) - (P_2 - V_2) = (P_1 - P_2) + (V_2 - V_1)$$

与此相反，准差压测量仅用单一的共用参考真空 V ：

$$(P_1 - V) - (P_2 - V) = (P_1 - P_2)$$

因此，通过将一个共用参考真空用于两个绝对压力测量结果，就不会有参考真空误差源影响准差压测量。

高压压敏电阻压力传感器(用于 2000 psi 以上的场合)一般需要采用不同的方法以便使传感器保持较小的体积，并可承受环境施加的高应力水平。这种方法会使性能稍有降低，但能使具有成本效益的高压传感器长期可靠使用。

数字信号处理

SMART 传感器中使用的微型计算机允许简单的传感元件仅按松容差制作，以便进行高精度测量。通过被称为模拟的过程可以用一种算法来测量和系统地补偿每个传感器及其有关的模拟-数字转换器的重复误差源。微型计算机还能将输出数据格式化，执行传感器功能的连续自测，提供串行通信以及执行由用户定义的计算或极限函数。

通过模拟进行校准可使我们生产不用任何精密元件和无需进行模拟校准调试的传感器。

模拟算法能校正压力非线性度和固定的并随温度变化的误差源,提供优越的性能,可靠性和长期稳定性。

77 页上的插图对模拟前的标准化“原”传感器性能与模拟后的系统精度进行了比较。由于单独通过数字模拟进行补偿,因而所有的点都可精确到满刻度的 $\pm 0.01\%$ 内。这种性能水平是最终用户用 SMART 传感器系统能够实现的水平。因为模拟仅仅是一种算法功能,所以它还能将一种参数转换为另一种参数。例如,模拟算法能合并大气压和高度之间的非线性关系。

必要时还可以处理其他数字数据。例如,传感器的动态性能(对压力变化的响应)可通过数字滤波算法形成。或者,对于控制系统来说,微型计算机可计算和输出除基准比例函数外的微分和积分函数,实际上,输出操作甚至可以是这些项的加权组合。

数字通信与控制

在传感器内装入微型计算机可使我们增加许多其他能提高性能和更加方便的特性,在常规模拟传感器中是无法得到这些特性的。

传感器和使用系统之间的通信是体现数字技术显著优点的领域。

采用标准串行通信协议如 RS-423(默认)RS-422, RS-232C 或 ARINC 429(用于空气-数据模块)传感器可以很容易地配置并输出它的数据。采用这些格式中的某些格式可以在一对导线上多路传输来自若干传感器的信号。空气数据模块提供了一个双向 RS-423 通道和一个 ARINC 429 不定向输出,可以同时适应多种通信格式。双向通信可以使用户控制和监视(通过内部机内测试特性)传感器的工作。这种设施允许自动进行校准核验和调整,无需拆下传感器。还可以提供其他输出格式,甚至是模拟(如前面提到的那样)以便与现有系统相连接。

数字输入-输出链路的另一个重要优点是,对接口感应噪声的不敏感性。在模拟接口中,为减少混淆现实而进行的滤波会降低总体系统的动态性能。SMART 传感器使用的数字接口可以采用标准误差检测和校正技术,例如奇偶校验和数据重构。这样就可确保传感器和用户之间的高度完整性的数据链路。因此,在合成压力测量结果上叠加的外来噪声极小。

结论

或许归纳 SMART 传感器优点的最好方法是考虑首字母缩略词“SMART”的含意。传感器的优点如下:

- 使用简单: 数字接口能将系统设计师从耗时的研究和设计传感器工作中解放出来。

- 易于维护: 传感器的许多功能都是由固件控制的,可以通过数字数据链路来控制、测试和调节固件。
- 精确: 用户只要了解单一的精度规格。当传感器组合在系统中时,传感器规定的精度一定会完全实现。
- 可靠: 数字机械化的简单和稳定性可确保传感器的可靠性。
- 适应性强: 微型计算机能根据现场插入的函数编程以换算和限制输出数据。

鸣谢

我想对下列人员为本文中所述的 SMART 传感器的开发和基于该传感器的应用所做的突出贡献表示感谢: 都格·阿特金斯(DSG), 奥拉夫·贝克曼小组(DSG), 鲁斯·比尔斯基(ATSD), 吉姆·布鲁德里克(ATSD), 都格达斯高普塔(ATSD), 切瑞尔·迪马斯(ATSD), 里泽·法勒格-泽德荷(ATSD), 艾德·费恩(ICD), 鲍尔哈夫纳(USD), 鲁斯·约翰逊(SSSED), 卡尔·里切勒(ATSD), 马克·曼夫雷克(ATSD), 雷·穆伦(SSSED), 彼德·纳斯鲍姆(SSSED), 吉拉德·奥布瑞恩(ATSD), 杰夫·斯克斯(USD 和 S&RC), 斯宾塞·斯库尔德(PSC), 罗德·斯坦吉兰德(ATSD), 吉姆·斯达(SSSED), 汤姆·托伦顿(MAvD)和戴夫·沃姆斯塔德(SSSED)。

参考文献

1. 杜普依斯·鲍尔,“新型一次空气数据优质压力传感器”, 1985 年国家航空电子设备会议论文集。