

关键应用场合使用的火柴盒大小的“智能”型压力传感器 鲍尔·B·杜普依斯

霍尼韦尔军用航空电子设备部
明尼苏达 55416 号圣路易斯公园
(612)542-5965

摘要:

现代控制系统都在努力获得最高效率以使成本降到最低程度；减少污染和提高安全性。这一点适用于传感器的全部应用领域--从今日汽车中的电子燃料注入系统，到工厂自动化，再到高性能航空和航天应用。

为了满足最终应用的性能目标，系统设计师们一直在提出严格要求以精确地测量相关的控制变量。目前，他们常常需要比用常规测量系统结构测得的数量级更高的精度要求，这种性能往往是为更苛刻的环境而规定的。

采用新系列“智能”型数字传感器可以解决这些问题，并满足所讨论的关键应用场合的要求。这种传感器的主要特点有：稳定性好，免维护寿命长，精度高，可靠性高和易于控制。另外这种传感器还极为小巧，功率低，能在相同的双向串行数字总线上多路复用多台传感器。总线上的所有传感器均可配置为相互同步或异步工作。

这的确是事实！

自 1990 年 1 月以来，霍尼韦尔公司已提供了 2000 只 LG-1237 火柴盒大小的智能型压力传感器，供喷气发动机控制系统使用。这些传感器目前正在引进的 A340 型空中客车和指定的其他民用和军用飞机上工作。“智能”这个术语使这种以微控制器形式具有内智能性的传感器与更传统型传感器进行区分。这种微控制器能在传感器内提供智能性或“智能性”的交互或独立的决策能力。这使得传感器自身能动态地适应其工作环境。这种微控制器还能在传感器内执行测量、控制、通信、计算和自测任务。

这些传感器中有九种已用在第二代，全授权数字式发动机控制系统-FADEC-II 中(它控制了 A340 型飞机上的 31200 台 CFM565C 型推力发动机中的每一台)。这种发动机是由法国巴黎 CFM 国际公司制造的。

FADEC-II 也用在正在研制的 95000 磅 GE90 型推力发动机上。

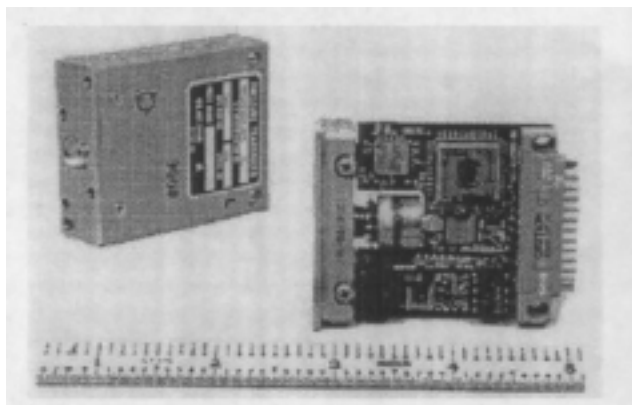


图 1：火柴盒大小的 LG-1237

FADEC-II 使用这些传感器来传感发动机机芯级内和机芯外的压力。这些 LG-1237 压力传感器可提供发动机闭环控制系统所需要的压力测量反馈。FADEC-II 的内部算法使用这些传感器提供的精确压力测量结果来控制发动机的输出功率和使效率达到最佳。这些传感器还能提供一种机理，用以探测因正常磨蚀、使用损伤如鸟、冰雹或吸入水、或其他如机舱结冰等影响安全的因素而导致的性能降低或是否需要维修。

为了获得这一应用目标，需要使用极稳定，精确和高分辨率的传感器。这需要使用三种量程的传感器。这些传感器在最严格的精度点上具有 20,130 和 650 psia(GE90 为 750 psia)和 0.02% f.s 的满刻度压力额定值。这一性能必须保持 25 年以上。当进行全面的系统级容许裕度差分析时，传统模拟传感器型的系统结构一般不能满足这一严格要求。

关键应用要求

这种传感器的复杂要求有：

- 尺寸：2"×2.25"×0.6"--大火柴盒的外形
- 可靠性：150K 小时预计最小为 MTBF/密尔-Hdbk-217E 类 AUF-严格！
- 使用寿命/长期稳定性：25 年设计寿命
- 精度：0.02% 2 σ (95% 置信度)
- 剧烈--严重的振动、冲击、热和介质环境
- 高压下工作--可达 750 psia
- 频率响应：20 Hz BW,<6 ms 等待时间
- 成本：商业项目上有竞争力
- 质量：H/W & S/W 认证，达到军用 FAA 标准--极严格！
- 接口特性：15 节点高速
- 串行数据总线--节省布线
- 特点：
- 内部测试
- 多节点同步“抽点”测量--无测量不齐偏移现象
- 压力“模拟”能力--用于系统仿真。

内部故事

为了满足这些需要的应用要求，我们研发组又额外聘用了几名“专家”着手进行工作。1 号专家在使用压敏电阻硅传感元件以及重复性误差源的算法校正方面具有丰富的经验。这一技术自 1970 年以来就一直应用在我们的数字空气数据计算机(DADC)中。这些计算机可为飞行员提供高度、空气速度和马赫数信息——通过仪表显示器和 DC-10, 747, 737, 727 和 MD80 飞机上的自动驾驶仪。但是，这些 DADC 的“巨大”、“面包箱”型外形对比 FADEC-II 应用所需要的“微”型火柴盒外形尺寸要大得多。

2 号专家在生产大容量硅压敏电阻压力传感器方面富有经验。这些传感器用于由霍尼韦尔公司的工业自动化和控制(IAC)部制造的 ST-3000 智能型工业发射机(传感器)中。这些传感器主要用在石化工业中。然而，这种传感器又与所需的“火柴盒”大小不相符；它装在小型“啤酒桶”中-就像过程控制工业中的定型包装一样。用于这种应用场合的传感器是由霍尼韦尔公司的固态电子设备设计中心生产的。

3 号专家对用于 A320 型空中客车的 PG-1052 ARINC 738 空气数据模块(ADM)十分在行。这模块是分布空气数据/惯性参照系统(ADIRS)的一部分，在 ADIRS 内，八个远程安装的 ADM 向装在主 ADIRS 底盘内的处理器发送精确的压力数据。然后这处理器将这压力数据归并为空气数据参数。在这种应用中，空气数据计算机作为一个独立整体已被除去。这些 ADM 是砖块大小的器件，尽管早期原型的大小与此相同，但形状像汽水罐！挑战仍在继续进行！

在 3.2 oz.(盎司)组件中的“大量”技术！

图 1 显示了这种传感器的极小尺寸。考虑到这传感器的大小，将在其中装配屈指可数的几个电子元件。为了减少风险，除定制的压敏电阻传感器外，其他传感器均使用了标准现有的元件。我们不是用硬件而是用软件来“包装”传感器的。比方说，为了满足军用和民航耐飞性鉴定要求须通过大量规定文件来评判“大量”的软件。

它会经常出故障吗？

这些传感器经过配置能使常用器件既可用于要求极高的军用高性能战斗机发动机中，又可用于环保要求不高，但又大量使用的商用飞机发动机中。

这种传感器的一个主要开发目标是，在 217E 军用手册的苛刻空运条件、荒无人迹的、战斗机类型分类中预计元件工作的可靠性可达约 150K 小时，同时保持全额定性能。这等于如按那种环境评估，元件连续工作可超过 15 年或使用寿命可超过 50 年。它说明应用环境可以是结合了冲击、振动和大范围热循环的苛刻环境。这种元件的可靠性水平-但不是长期稳定性-与常规模拟传感器器件的预测可靠性水平相似。

在空运、荒无人迹的、货物(AUC)飞机类别中，该类别更危险，并可用于大型客机，LG-1237 型传感器的可靠性等于预测的 95 年使用寿命。如按地下，固定(静止)设备(GF)类别评估，其预计可靠性等于可连续 125 年无故障工作。

开发原则

为了获得所需要的可靠性水平，考虑到该项应用技术的复杂，我们不得不制订一个重点开发原则。其关键点有：

1. 采用包括客户、系统、硬件、软件、制造，评估和质量在内的并行工程技术。
2. 尽可能减少元件数目，以降低功率和提高可靠性。
3. 采用与规定性能等效的最小功率的元件(大多数是 CMOS 元件)。
4. 采用密耳限定或客户批准的集成电路和分立元件。
5. 减少每密耳规格的总元件数。
6. 注意热处理以最大程度地降低元件内的功率损耗和温升。

结构方面考虑事项

开发结果是，传感器大大超过可靠性要求，并且功率损耗一般仅为 0.25 瓦。

作为过程的一部分，要定义一种能满足这严格长期性能要求的方法，有必要采用候选“假想的”传感器配置和进行系统级总体误差分析。首先将“传统”模拟传感器以及它所在系统的其余部分作为首次评估的基线。这种配置的方框图如图 2 所示。图 3 中示出了 LG-1237 传感器的优化“智能”传感器配置，供比较用。

影响这两种系统结构性能的关键因素如下：

1. 压力传感元件或“传感器”，用以可将气动输入转换成一个低电平电信号。
2. 前端信号处理，用以可将低电平传感器输出转换成温度和线性补偿高电平输出信号，再将其传送到数据采集接口。
3. 模拟数据传送用的通信工具，本例中是一组导线。
4. 数据采集和转换接口，用以可将模拟数据转换回到数字信号,供微型计算元件使用,让它执行控制算法。

这些方框中的每一个都有各自的特性，最终会限制可实现的终端系统性能。表 1 中列出了这些误差源中的一些更明确的误差源。

常规模拟数据采集

传感器

下文与图 2 中描述的常规模拟压力测量系统器件有关。“传感器”表示通常由最终用户购买的元件。它包括敏感元件和其中的信号处理功能。在传感器中，较易校正的敏感元件误差一般是通过一系列无源和有源模拟校正网络的激光微调完成校正的。这些功能是通过接通和断开敏感元件以尝试提供补偿功能(它是特定敏感元件误差特性的补充)的方式完成的。这些补偿网络的复杂程度随可补偿误差的大小，补偿温度范围和终端设备的精度要求而变化。这种补偿方案是在电路复杂性(影响成本与稳定性)，易于校准且不会在激光微调(影响效率)间产生交互作用以及工作压力和温度包络线性能之间的折衷平衡。

基于传感器采用了激光微调或类似的模拟补偿网络，最好的压敏电阻敏感元件一般在-55至+125°C(军用)的温度范围内具有约±0.25%的精度限制(在装入系统之前)。剩余的误差源都是不可补偿的误差源，外加上激光微调补偿后不可补偿的剩余误差源。这些源等于剩余热灵敏度和非线性度的。

装入系统

装入系统后，其他精度影响因素就会显示出来。非系统设计的接口和噪声是两个主要原因。

接口信号

一个显著影响系统误差而常被忽视的因素是采用了不能提供比率输出的模拟传感器器件。在这种比率配置中，压力输出信号和传感器内部基准电压均作为输出量提供的(或常作为外部基准输入)。由于具有作为输出的基准电压，就可以将传感器基准和数据采集系统的基准电压间失去的跟踪作为一个误差源予以消除。如不使用这种配置就可能不需要向系统容限能力添加0.1至2% f.s.的附加误差—这视内部基准电压的精度和稳定性而定。

比率输出将传感器的输出函数表示为它的信号电压÷基准电压的无量纲比率。然后，数据采集可以将传感器的基准电压处理为一个外部基准输入，以进行更精确的测量。这种三线测量技术已广泛用于精密模拟仪表的应用场合，但很少应用在现场压力传感器的场合。

接口布线

模拟信号传输线上感应的噪声一般可以通过控制系统模拟数据采集部分用的输入低通滤波器部分地滤除。滤波时必须通过有用的频率且不会产生明显衰减或相移；这会将安装滤波器的控制回路动态性能降低到会引起不稳定或迟缓响应的程度。伴随滤过的模拟输入信号通过任何传输线，不可避免地会在这个模拟器件的相同通带内感应产生噪声。

在这个器件中，每个传感器都需要一对独立的导线，以将其模拟数据回传至数据采集系统。这会使一个较大系统的布线材料费和劳动力成本十分昂贵。在航空应用中，添加的导线会显著增加重量并降低可靠性。

模拟-数字转换过程

数据采集系统的模拟/数字转换器精度是另一个误差源。模/拟转换器及其相关的输入多路转换器和低通滤波器都会动态地作自校准。这样就能有效地校正传输线接收端的热和长期漂移误差。大多数研究人员在将输入电压转换为等同的数字电压方面都做了可靠的工作。问题是，在现实世界中，那些含有模拟压力数据的模拟输入至少有一部分被传输线上的电感应噪声所破坏。这只有通过降低系统动态性能才能消除。

模拟传感器系统性能概要

在模拟传感器系统的执行过程中，如在传输线上不感应噪声，并采用了比率三线测量技术，则性能接近单独传感器的保证性能。如果这些准则不能同时满足，则可获得的传感器性能必须根据具体情况逐例加以确定。

精确地译解传感器数据表，了解可获得什么性能并将其与总系统容许量分析合为一体，会使配置控制系统的任务变得非常复杂。这会导致产生一个更昂贵或次最佳的控制系统，因为分配给系统一部分(如接口布线噪声)的容许配置量会不必要地加在系统的另一部分上(如传感器精度)以便满足所需要的系统级容许量预算。

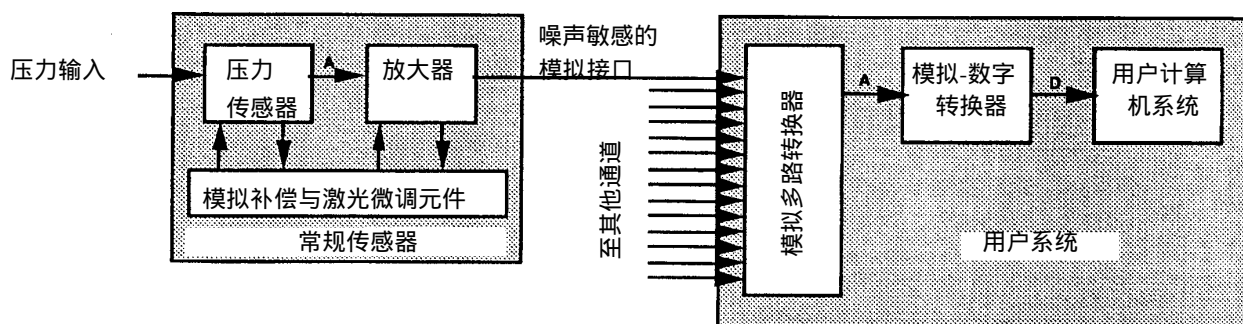


图 2: 常规模拟传感器系统器件

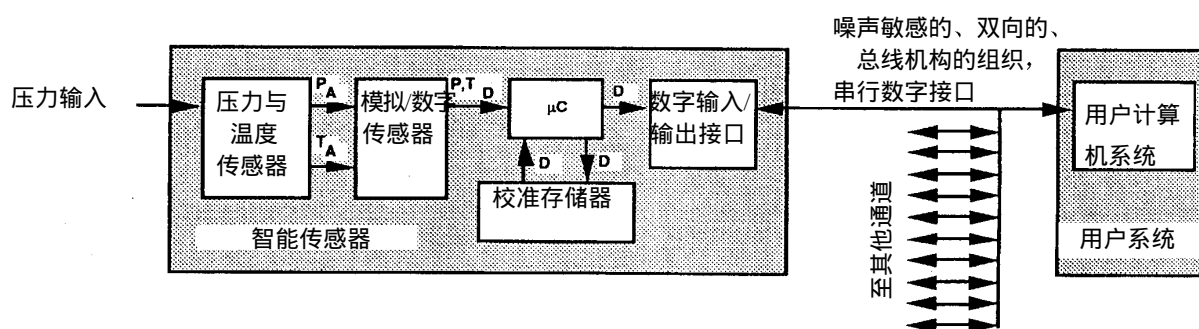


图 3: 智能型传感器系统器件

智能型传感器系统器件

为了提供高级系统性能，对 LG-1237 的结构进行了优化。它是以霍尼韦尔公司拥有的在精密传感器的算法校正方面的长期经验为基础的。为了导出 LG-1237 的结构，已通过并行设计对系统级误差源进行了评估，并予以消除或降至最小。这可确保传感器、内部电子硬件、内部软件、接口特性和用户系统的每项功能性能取得最大协同的功效。

通过这种系统设计方法将元件数目和不可补偿的误差源降至最少，已获得了一种能提供有保证的系统容差的器件。这是因为所有关键的误差源已在智能型传感器中合并在一起，并可对其进行有效地处理或消除。

下面介绍表 1 中列出的 LG-1237 主要类别的误差源是如何进行处理的。

传感器:

在这传感器中使用的是压敏电阻硅传感器。它输出一个电压，一般在满刻度时电压为几百毫伏。压敏电阻压力传感器的“原”输出会受到温度的显著影响，因此，对这些影响进行补偿是适当的。所有霍尼韦尔公司的精密压力传感器的一个主要特点是，经配置可以独立感测压力和温度--这个温度信息将在以后的补偿过程中使用。校正前，压力测量结果的热效应值约为满量程的 5%。这样做的目的不是使热补偿网络和激光微调的传感器复杂化，而是通过使它简单化而让使传感件随时保持再现性和稳定性。

表 1: 系统级测量误差源

测量误差源	模拟系统结构	智能型传感器结构(LG-1237)
传感器:		
可校正的		<0.007%，全包括在内
非线性度	部分校正，典型值为 0.1%	
热灵敏度		
零点漂移	部分校正，典型值为 0.1%	
量程漂移	部分校正，典型值为 0.25 至 0.5%	
线性变化	部分校正，典型值为 0.1%	
零压偏移(在 25°C时)	典型值为 0.05 至 0.1%	
满刻度量程(在 25°C时)	典型值为 0.1 至 0.2%	
不可校正的		
滞后量与可重复性	可变，典型值为 0.1%	≈0.013%，最差情况
长期漂移，25 年	可变，典型值为 0.05 至 2.5%	≈0.01%，最差情况
压力介质影响	与应用相关，0.01 至 1%	<0.005%，典型值
振动与加速影响	与应用相关，0.003 至 0.03%	<0.03%，典型值
信号调节(传感器中):		
可校正的		<0.005%，全包括在内
起始偏移与比例系数	典型值为 0.002 至 0.1%	
热灵敏度		
偏移	典型值为 0.002 至 0.1%	
比例系数	典型值为 0.05 至 0.2%	
线性度	典型值为 0.1%	
不可校正的		
校正后的剩余误差	典型值为 0.05 至 0.1%	典型值为<0.005%
长期元件漂移 25 年	典型值为 0.1 至 5%	典型值为<0.005%
接口电磁干扰磁化率	典型值为 0.01%	固有抗噪声性
数据采集与转换:		
可校正的或可拒收的		
数字接收误差	N/A	可拒收的
噪声	部分滤除	影响最小
基准电压失配	0.02 至 2%	无影响—不适用
系统模拟/数字转换器误差	0.01 至 0.4	无影响—不适用
不可校正的	剩余量 0.02 至 0.1%	多个奇偶校验失效
RSS'd-系统精度	±0.4 至 6%	±0.02%

信号调节:

信号调节, 传感器输出的模拟/数字转换和数据处理均与传感器本身紧密相连。从误差校正观点看, 实际上是将信号作为传感器的一个完整部分进行处理。这样可最大程度地降低数据传送线上的电感应噪声的影响。

这种模拟/数字转换技术已在光盘播放机中获得了广泛认可。这个模拟/数字转换器的输出由一台微控制器进行处理。无须对原数据或转换过的数据进行校正。

霍尼韦尔公司采用的消除可补偿误差的方法没有使用激光微调或其它模拟电调试, 而是采用了一种算法“模拟”技术。这样在采用激光微调时具有不会给传感器施加热应力的优点。因此, 这种算法技术可提供根本的长期稳定性, 因为不添加有关会改变数值或随时间推移而失效的模拟元件。

这种补偿技术极为灵活, 并易于优化, 因为未采用模拟硬件——它简直只需要钢笔的一次动作——是一种自动技术可数学地描述要采用的误差校正算法。这种技术已在其它霍尼韦尔产品上证实它具有比三个数量级大的补偿范围。其校正度远远超过通过模拟技术获得的校正度。因此, 可以对传感元件进行优化以获得长期稳定性——即使在具有较差热或非线性效应费用开支情况下。虽然传感元件不大和没有误差, 但传感器的 $\Delta - \Sigma$ A/D 转换器电子设备上的热效应还是通过这种模拟算法加以校正的。

由传感器中微控制器执行的其它算法对被测的压力数据的数字滤波进行了管理。这可以防止应用于控制系统剩余部分的数据被混淆。由微控制器执行的内部测试功能可提供连续和特殊通电检查以验证器件的完整性。

输出是以工程单位表示的精确数字数据。在置信度达 95% 时它提供的数字精度为 0.02%。

LG-1237 以双向串行数字形式输出这个数据。它包括十六个数据位, 四个源识别位、三个内部测试状态位和一个用于验证数据完整性的奇偶位。这个信

息是通过一个高速 1M 波特同步或 375K 波特异步多节点串行数字总线传送的。

接口:

这条总线在电学上是与 TTL & CMOS 兼容的, 用于短总线接口, 一般像安装在 FADEC-II 中一样, 是作为组件安装在另一件设备中的。类似 RS-485 微分输出一样的总线配置可任选用于具有外部总线(会受到电磁干扰)的应用场合; 这种配置采用了双芯绞合线总线。

对电源而言, LG-1237 一般使用 $+5 \pm 0.5V$ 电压, 电流 20 毫安, 和 $+14 \pm 5V$ 电压, 电流 10 毫安。

数据采集:

LG-1237 仅需要一个 UART, 计算机串行端口, 移位寄存器, 或 8051 系列微控制器, 就可将它与用户系统连接起来。在这个接口中未使用模拟信号。

通过一条总线就可以将多达 15 台这种传感器连成网。当总线控制者调用传感器按安装地址导出的传感器名称时, 总线上的每台传感器都会对命令发出响应。因为传感器的输出数据是以适当速率可重复读取的, 并且测量结果间的变化较小, 所以在大多数应用场合仅用一个奇偶位就足可校验数据传输的完整性。

异步接口通信

这个异步接口可提供下列功能:

- 1) 命令唯一指定的传感器进行压力测量并读取其压力测量结果。这是“读取压力”命令。
- 2) 命令整个网络进行时间同步“抽点”测量并读取其测量结果。这些是“抽点”和“读取抽点”命令。
- 3) 复位单个传感器或整个网络。“复位, 单个和全部”命令。

4) 存取每台传感器由内部测试功能生成的详细测试报告。这是“读取虚拟存储器”命令

异步操作方式由一至三个字的异步命令控制，它可能唯一被定向一个特定传感器或向整个网络广播。只有唯一定向命令才能将一个响应调到总线上。

同步接口通信

LG-1237 还提供了一种 1M 波特高速同步通信方式，可以代替异步方式选用。这种方式可提供不定向仅输出通信。很容易与接收端上的移位寄存器或 8051 相连接；无需像异步方式那样采用智能型总线控制器。采用这种方式时，传感器可被独立“选通”来存取数据或利用一个公用选通使其测量结果同步化。数据、时钟和忙碌信号均是输出。当使用公用选通时，每台传感器的数据被按序在一个时隙中输出到总线上，并分配到其唯一的安装地址。

同步方式输出仅包括压力，状态和奇偶信息，这与异步“读取压力”命令相似。

特点

这种传感器的一个特点是总线控制者能命令总线上的所有传感器独立于总线传输通信进行同步“抽点”测量。这种方式在时间一偏离的正常单通道命令/响应协议可能被拒绝采用时对评估多个压力点之间的关系特别有价值。

为了完成这个同步测量，总线控制者广播一条“抽点”命令，所有传感器根据这个命令执行任务。然后每个传感器在那一瞬间将当前输入的测量结果存储起来。应要求时这存储的测量数据可通过向每个需要此数据信息的传感器发送一个唯一“读取抽点”命令进行再调用而获得。

未来趋势

压力传感器用户和制造商均可通过遵循这方法而获益。显然，要获得压力传感器最佳性能需要采用基于多学科系统工程的总体结构，而不是采用一件一件积木式元件的方法。这样可以优化性能指标同时使成本降到最低。这种方法的确“智能”，因为它可提供：稳定性、免维护长寿命、精度、可靠性和易于处理-装入系统后的使用和执行过程都比较简单。

美国仪表学会 SP50 委员会正在制订一标准，其标题为“SP50 现场总线(草案)”标准。那种装置是 LG-1237 能力的功能延伸。它为未来的智能传感器和传感器指明了道路。

鸣谢：

下列人员对研制这种“智能”传感器起到了相当大的作用，在此表示致谢：尤吉尼奥·艾斯皮里杜-桑托，乔治·斯密斯，杰夫·西夫克，高迪·汉德伯格，杰克·苏克，迈克·格林伍德，沃尔特·鲍辛吉斯，温迪·唐纳德，凯涩琳·托马斯，鲁斯·约翰逊，杰克·汉格，戴夫·格里格，迪波拉·拜利，和许多其它人士。

参考文献：

1. 伯恩斯, D.&杜普依斯, P., “微型硅压力传感器”, 1991 年 4 月 16 日纽约, 电气和电子工程师协会(IEEE)1991 年电子国际会议论文集。
2. “新型一次空气数据优质压力传感器”IEEE 国内航空与电子会议论文集-NAECON, 1985 年 5 月 20-24 日, 275-283 页。
3. 美国仪表协会, 过程仪表术语, #ANSI/ISA S51.1-1979,1979。
4. 美国仪表协会, “SP50 现场总线标准草案”, #ISA/SP50-1992-236P, 1992。
5. 纳加费, 科哈利尔, “智能传感器”, 微型力学与微型设计杂志, 1991 年第 1 卷, 86-102 页。
6. 斯蒂凡尼德斯, E.J., “‘智能’压力传感器的简化, 升级控制系统”, 设计新闻, 1986 年 11 月 3 日, 86-89 页。