

压阻型地面气压传感器研制中的几个问题

杨 经 负

(南京气象学院)

摘 要

本文主要讨论气压传感器的长期稳定性和精度,找出了该器件不稳定的主要原因,导出了保证年稳定性的必要条件,提出了不牺牲灵敏度而能提高精度的分段处理方法。

一、气压传感器的特点和主要问题

气压传感器是一个真空密封器件,其结构如图1所示。带有扩散应变电阻的膜片正面密封于真空腔内,其背面处于大气中。在任何时刻它受到的压强恒等于它所在处的大气压,因而可用以测量气压。

整个气压范围为0—1070 mb。根据此器件的受压情况和为便于进行数据处理,取1000 mb为其满量程。

某一高度的气压,其年变化一般常小于150 mb,故具体台站的量程,200 mb就足够了。从海平面到海拔5000米高度的气压变化范围,约为1070—550 mb。按此将气压传感器分为1100—900mb, 900—700mb和700—500mb三个测量范围,就可满足所有平原站和高山站的需要。

地面气象站所用的水银气压表的精度为 ± 0.4 — 0.5 mb,无人气象站对测压的精度要求为 ± 1.0 mb,相对1000mb来说,精度分别为 $\pm 5 \times 10^{-4}$ 和 $\pm 1 \times 10^{-3}$ 。因前一项应用是主要的,故取 $\pm 5 \times 10^{-4}$ 为气压传感器的精度。

压力传感器在每次测量之前可以校正零点,除特殊情况外,长期稳定性不是主要问题。气压传感器系测大气压的绝对值,而且它总处于受压状态,所以一经校正进入运行,在检定期内,就不容许也不可能再调零点,它的长期稳定性要达到小于 $\pm 5 \times 10^{-4}$ /半年,才

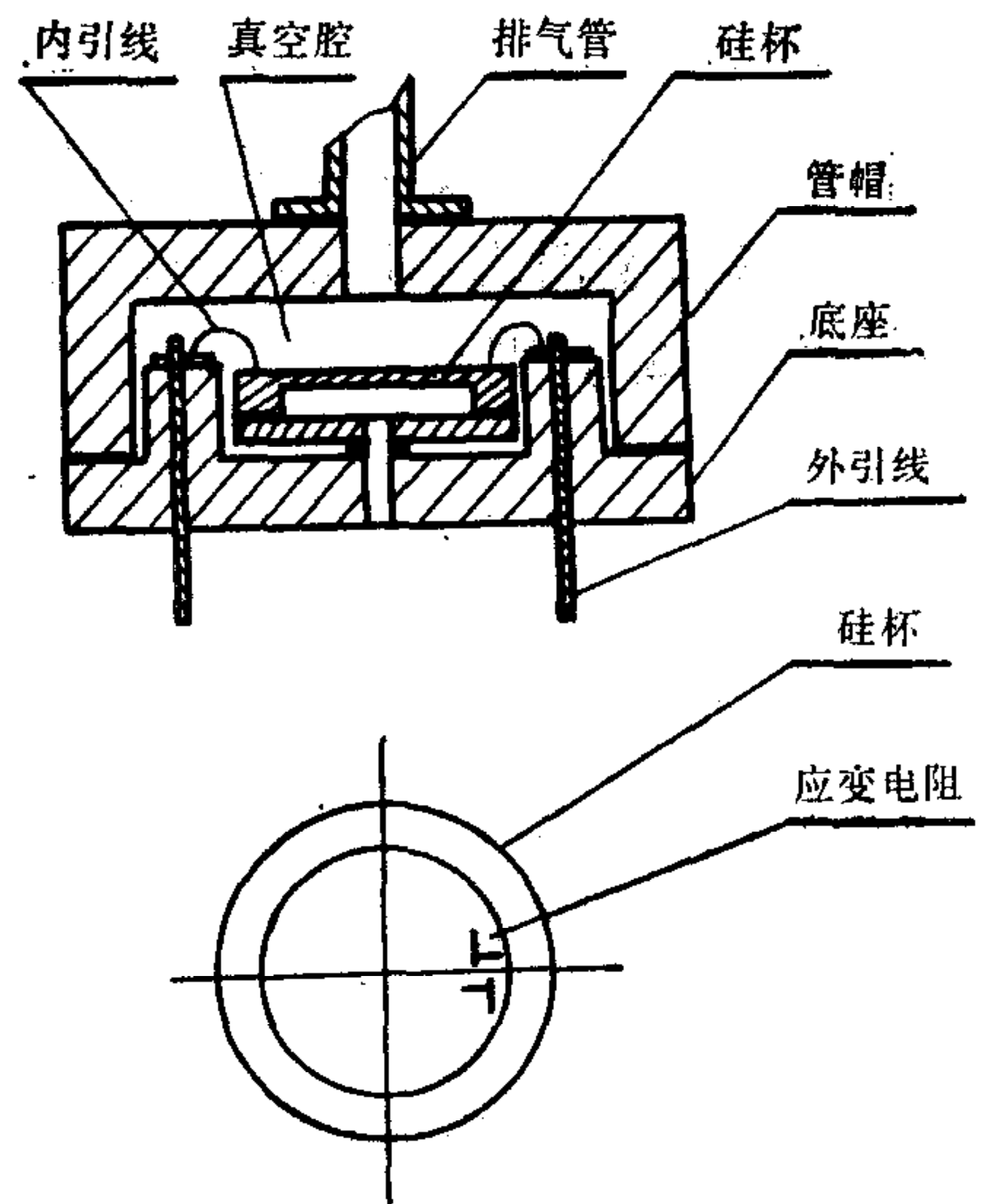


图 1

有使用价值。

另外,因地面气象站的工作温度范围为 0—40℃,因此要求它的总温漂要小。

综上所述,气压传感器应具有高精度、高稳定性和低温漂性能。众所周知,压阻传感器虽有一系列优点,但其温漂较大,稳定性较差。它的非线性误差虽然较小,但对高精度要求来说,却不容忽视。如何扬长避短,以满足气压测量的要求,就是这个器件研制中的主要问题。

二、长期稳定性问题

凡是压阻传感器,为提高其性能,必加补偿电路,气压传感器也不例外。因此,其长期稳定性与传感器本身、电路元件的性能有关。欲使传感器长期稳定,应满足下面三个条件:

- (1) 管芯质量良好,并予以钝化和保护,使其参数不随时间变化;
- (2) 选用性能稳定的电路元件,并予以老化和保护,使其性能不随时间变化;
- (3) 气密性良好,使其真空腔始终保持封管时的真空状态,至少在指定时间内因慢性漏气而引起腔内压强的变化小于指定值。

就目前的技术水平来说,制作高质量的管芯和提供稳定的电路元件等并不困难。而良好的气密性不仅可免除漏气时漂,而且对管芯可提供最有效的保护,以防止外界因素使管芯的参数改变。所以,气压传感器的气密性,既是它的工作基础,又是它的长期稳定性的保证。

实际上绝对气密是不存在的,只能要求器件的漏气率小于某指定值。

设气压传感器真空腔的容积为 V ,漏气率为 Q ,经时间 t 后,进入真空腔的空气使腔内压强上升 Δp ,则有

$$\begin{aligned}\Delta p &= \frac{Qt}{V}, \\ Q &= \frac{\Delta p \cdot V}{t}.\end{aligned}\quad (1)$$

因 $V \approx 2\text{cm}^3$, $t = 1$ 年 $\approx 3 \times 10^7$ 秒,允许腔内压强上升的数值 $\Delta p = 0.5\text{mb} \approx 0.4\text{mmHg}$,代入(1)式有:

$$Q \approx 3 \times 10^{-11} \text{ mmHg} \cdot \text{l/s}.\quad (2)$$

此式为保证年稳定性的必要条件。

应该指出,此式虽不是充分条件,但由上面的分析可以推断:器件管芯良好而又满足必要条件,必将具有高稳定性。

以我院试制的样管为例,对此论断予以验证。

样管的击穿电压 $BV = 12 \sim 120\text{V}$,漏电流 $I_l \leq 1\mu\text{A}$ 。样管经灵敏度为 $1 \times 10^{-7}\text{mmHg} \cdot \text{l/s}$ 的氦谱检漏仪检漏合格后,排气至 $5 \times 10^{-6}\text{mmHg}$ 进行封装。再经温度补偿,使其零点温度系数和灵敏度温度系数均小于 $2 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 后进行正式测试。测试时间,因长期稳定性而异,少则一月,多则一年以上。测试结果大致分为三种类型。第一类,经一年以上的测试,其零点无明显变化;第二类,经短期测试,其零点无明显变化,但经半月

以上的测试,其零点漂移就逐渐显现出来;第三类,只要几天就可见到零点漂移。后两类漂移具有单方向特点,其方向与空气进入真空腔导致零点漂移的方向一致。测试结果还表明,这种单向漂移与击穿电压无关。 $BV = 120V$ 的样管,有的表现为第三类;而 $BV = 20V$ 乃至 $12V$ 的样管,有的却为第一类。除此以外,无论那一类样管的灵敏度基本都是恒定的。

这种漂移是时间的单调函数,且与管芯性能无关,显然是由于慢性漏气造成的。因检漏精度不够高,虽检漏合格,却不一定满足(2)式。可以认为,第一类样管满足或基本满足(2)式,故其零点长期不变。后两类样管均不满足(2)式,故其零点随时间的推移作单向漂移,不同的漂移速率,乃是它们不同的漏气率的反映。

上面的测试对比,初步证实了长期稳定性和气密性的依从关系,而器件的灵敏度总是比较稳定的,因此可以说,在管芯质量良好的前提下,解决了气密性问题,长期稳定性问题也就解决或基本解决了。据此,笔者从工艺上提高了器件的气密性,少数样管的年稳定性已达 2×10^{-3} 左右。

事实上,这个器件不是一个单纯的半导体器件,而是半导体、力学和真空三项技术的结合,所以只有从三方面综合考虑,针对不同的问题,采取不同的措施,才有可能达到预期目标。

三、关于温度特性

由于制管工艺、结构设计、烧结封装和补偿技术的发展,压阻传感器的温度特性已大为改善。目前,无论是零点温度系数,还是灵敏度温度系数,国内已达 $5 \times 10^{-5}/^{\circ}C$ 左右,与国外不相上下。这里只介绍一下灵敏度漂移的变流源补偿原理^[1]。

当以具有温度系数 α_I 的电流 $I(T) = I_0(1 + \alpha_I \Delta T)$ 供给传感器,则其灵敏度的温度特性可表示为

$$\begin{aligned} s(T) &= s_0(1 + \alpha_R \Delta T)(1 + \alpha_s \Delta T)(1 + \alpha_I \Delta T) \\ &\approx s_0[1 + (\alpha_R + \alpha_s + \alpha_I) \Delta T]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中 α_R 为 P 型应变电阻的温度系数,恒为正; α_s 为灵敏度温度系数,恒为负。令

$$\Delta \alpha_s = \alpha_s + \alpha_R + \alpha_I = 0, \quad (4)$$

则 $s(T) = s_0$, 可得到完全补偿。(4)式为变流源补偿的完全补偿条件。

对于恒流源补偿,其完全补偿条件为:

$$\Delta \alpha'_s = \alpha_s + \alpha_R = 0. \quad (5)$$

众所周知,只有两个扩散浓度所对应的 α_s 和 α_R 可使(5)式成立。要在工艺上实现这一要求,显然是困难的。一般来说, $\Delta \alpha'_s \neq 0$, 并可能具有较大的数值,所以恒流源补偿并不能普遍保证具有良好的补偿效果。但可通过提供适当的 α_I 而使(4)式成立或近似成立,一般来说,使 $\Delta \alpha_s \leq 1 \times 10^{-4}/^{\circ}C$, 是不难达到的。所以,变流源补偿的适应性和补偿效果都优于恒流源补偿。

顺便指出,即使温度系数达到 $5 \times 10^{-5}/^{\circ}C$, 也不可能在 $0-40^{\circ}C$ 的范围内保证 5×10^{-4} 的精度。不过,再采取温度订正、恒温装置或微机校正等办法,问题将不难解决。

四、线性度问题

1. 问题的提出

压阻传感器的优点之一是它的重复性、迟滞和非线性误差较小，因此易于取得高精度。但气压传感器的精度为 5×10^{-4} ，这三项误差平均不能大于 3×10^{-4} ，要实现它是十分困难的。为解决这个问题，不应平均分配指标，而应根据压阻传感器的特点和气压测量的要求，将它们中间的一项或两项降到最低限度并忽略不计。

理论分析和实践表明，只要设计合理，工艺完善，重复性误差小于 5×10^{-4} 是可以达到的，满量程迟滞误差小于 $1-2 \times 10^{-4}$ 也是可能的。又因地面气压范围为满量程的一部分，由图 2 可见，其迟滞迴线在满量程迟滞迴线之内，所以其迟滞误差小于满量程的迟滞误差而可忽略不计。

在同样载荷下，这种器件的非线性误差既与它的感压膜片的半径厚度比 a/h 的大小有关，又与它的四个桥臂电阻的应变率是否一致有关。

感压膜片的应变与其载荷之间，基于小挠度理论，可当作线性关系处理。可以证明，在同样荷载下，当 a/h 值增减 \sqrt{n} 倍，灵敏度将增减 n 倍，而其非线性误差则将增减 n^4 倍。

即使应变与载荷之间是线性关系，输出与压力之间，一般也不是线性关系。通过线路分析，可以证明

$$u_0 = \frac{\Delta R}{R} \left(1 + A \frac{\Delta R}{R} \right) u_{桥} \tag{6}$$

其中 $\Delta R/R$ 为四个桥臂电阻的平均应变率； A 为四个桥臂电阻应变率的不一致因子。

一般来说， $A \approx 0$ ，故将产生非线性误差；而在 A 相同的条件下， a/h 值大者，应变率大，灵敏度高，但其非线性误差也大。

根据这两个因素，对于高精度器件，欲将其非线性误差降低到可忽略的程度，除在设计和工艺上给予充分注意以使它的四个桥臂电阻的应变率尽可能一致外，最有效的措施是降低它的 a/h 值。但灵敏度也是一项重要指标，不能顾此失彼。按一般设计并因工艺

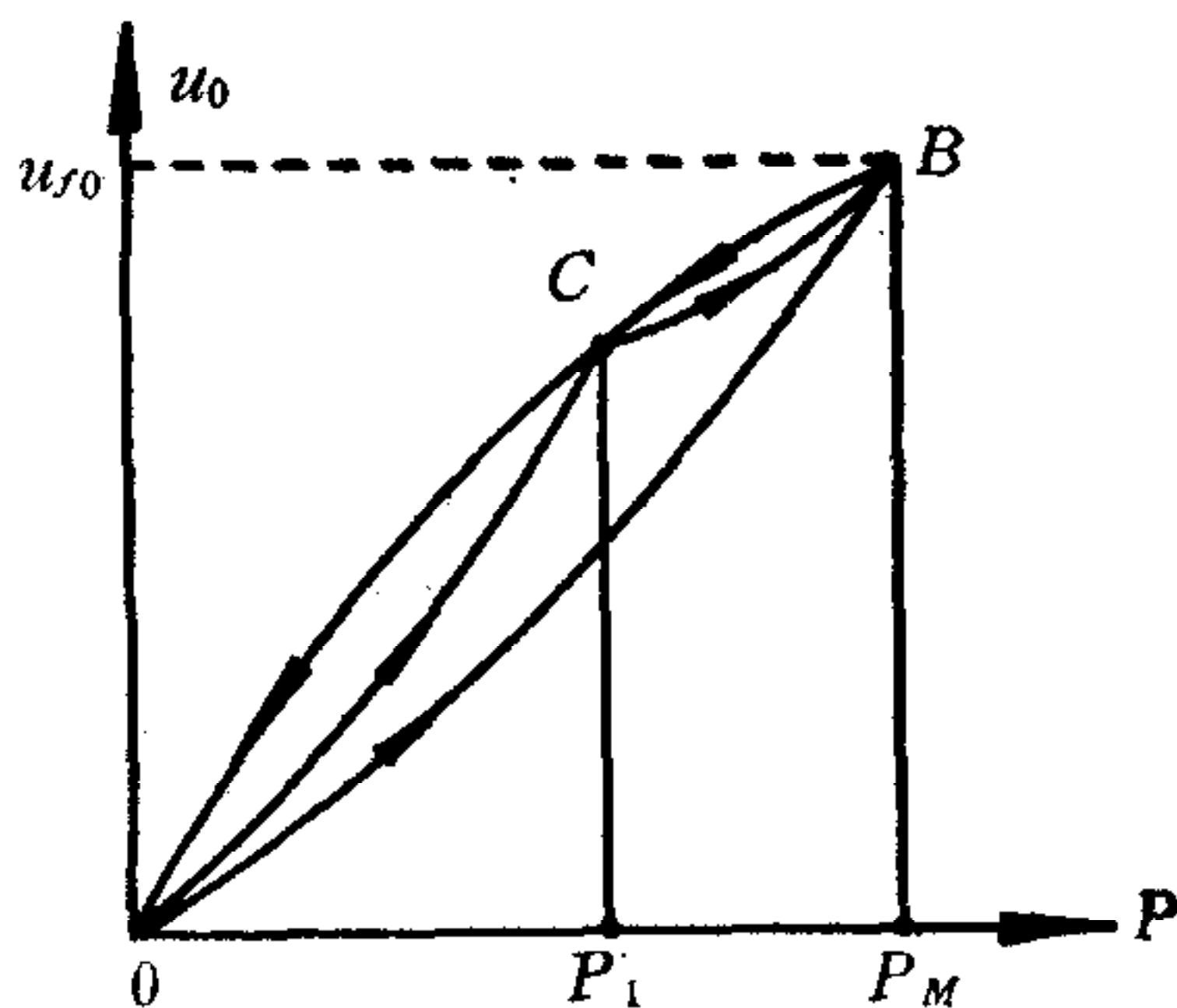


图 2

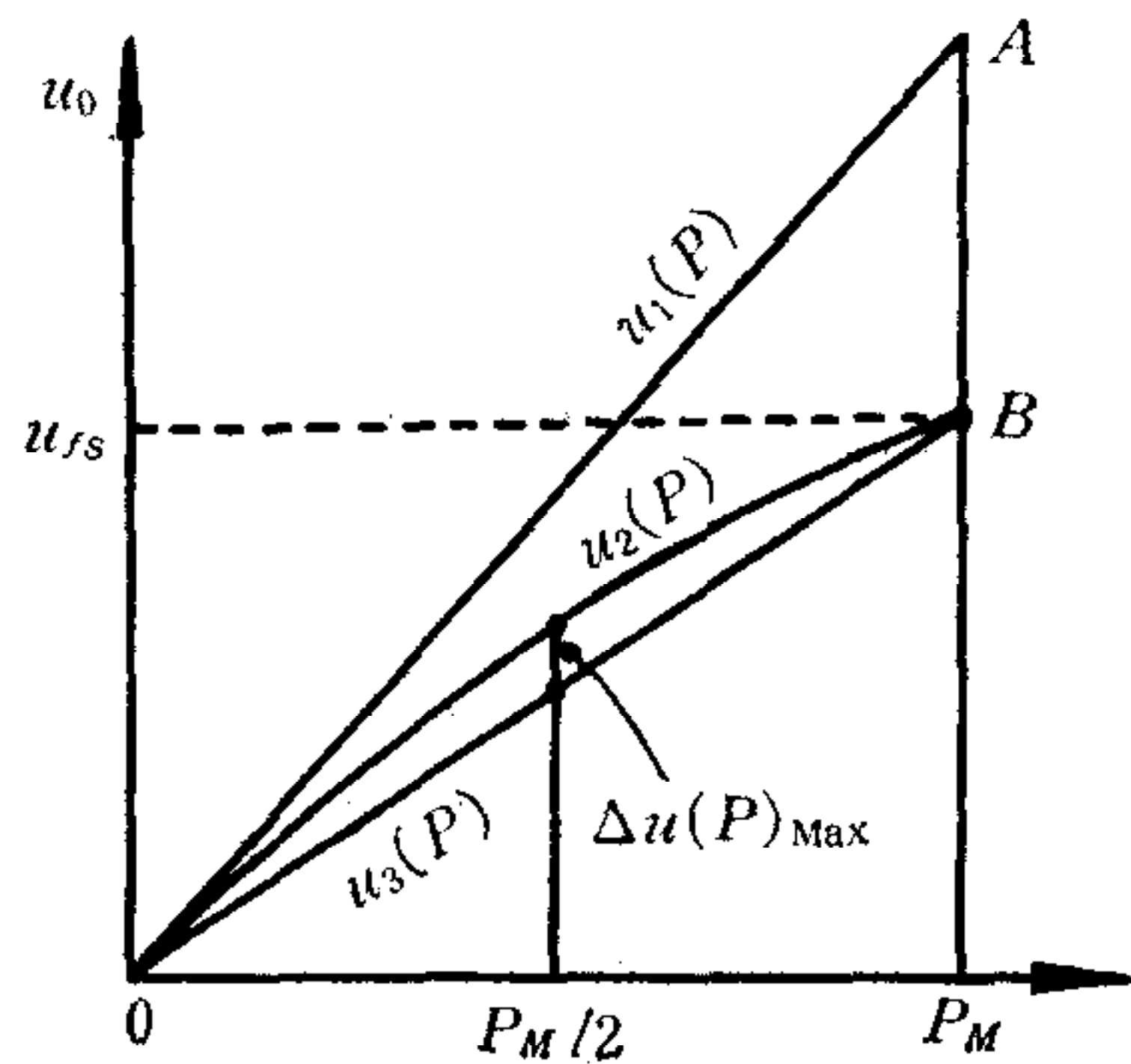


图 3

的分散性,压阻传感器的线性度多数在 $1 \sim 5 \times 10^{-3}$ 范围内。显然,这不能满足气压传感器的要求。为此,管芯上设计非线性补偿电阻^[2],曲线订正和微机处理等,都是解决问题的途径。本文根据地面气压测量的特点,从计量角度以分段处理方案来解决这个问题。

2. 分段处理方案

(1) 几个方程的建立

图 3 中, \widehat{OB} 为实测 u_0-p 曲线, OB 为其端点连线, OA 为一辅助直线,它切 \widehat{OB} 于原点 O , 交 Bp_M 于 A 点。

令 G 和 s 分别为 OA 和 OB 的斜率,并将 \widehat{OB} 以抛物线近似。则它们的方程分别为:

$$u_1(p) = Gp, \quad (7)$$

$$u_2(p) = Gp - kp^2, \quad (8)$$

$$u_3(p) = sp. \quad (9)$$

当 $p = p_M$ 时, $u_2 = u_3 = u_{fs}$, 由(8)式和(9)式有

$$G = s + kp. \quad (10)$$

将(10)式代入(7)式和(8)式可得

$$u_1(p) = (s + kp_M)p, \quad (11)$$

$$u_2(p) = (s + kp_M)p - kp^2, \quad (12)$$

$$\Delta u(p) = u_2(p) - u_3(p) = kp_M p - kp^2. \quad (13)$$

(2) 求输出曲线方程

令

$$\varepsilon_L(p) = \frac{\Delta u(p)}{u_{fs}} = \frac{kp_M p - kp^2}{u_{fs}}, \quad (14)$$

求导,并令 $\frac{d\varepsilon_L(p)}{dp} = p_M - 2p = 0$, 则在 $p = \frac{1}{2} p_M$ 处 $\varepsilon_L(p)$ 有最大值。按线性度定义,可求得

$$\varepsilon_L = \varepsilon(p)_{\max} = \frac{kp_M^2}{4u_{fs}}, \quad (15)$$

$$k = \frac{4\varepsilon_L u_{fs}}{p_M^2}. \quad (16)$$

将 $s = \frac{u_{fs}}{p_M}$ 代入(16)式,(12)式和(13)式,可得

$$k = \frac{4\varepsilon_L s}{p_M}, \quad (17)$$

$$u_2 = sp + 4\varepsilon_L s p \left(1 - \frac{p}{p_M}\right), \quad (18)$$

$$\Delta u(p) = 4\varepsilon_L s p \left(1 - \frac{p}{p_M}\right). \quad (19)$$

其中 ε_L 和 s 系实测值。按习惯,将(18)式改写为

$$u_0(p) = sp + 4\epsilon_{LS}p \left(1 - \frac{p}{p_M}\right). \quad (20)$$

(3) 分段量程线性度

在图 4 中, 设分段量程 p_1p_3 等于满量程的 $1/n$, 其中点为 p_2 , 并设 $op_2 = \frac{m}{n}p_M$, 则有

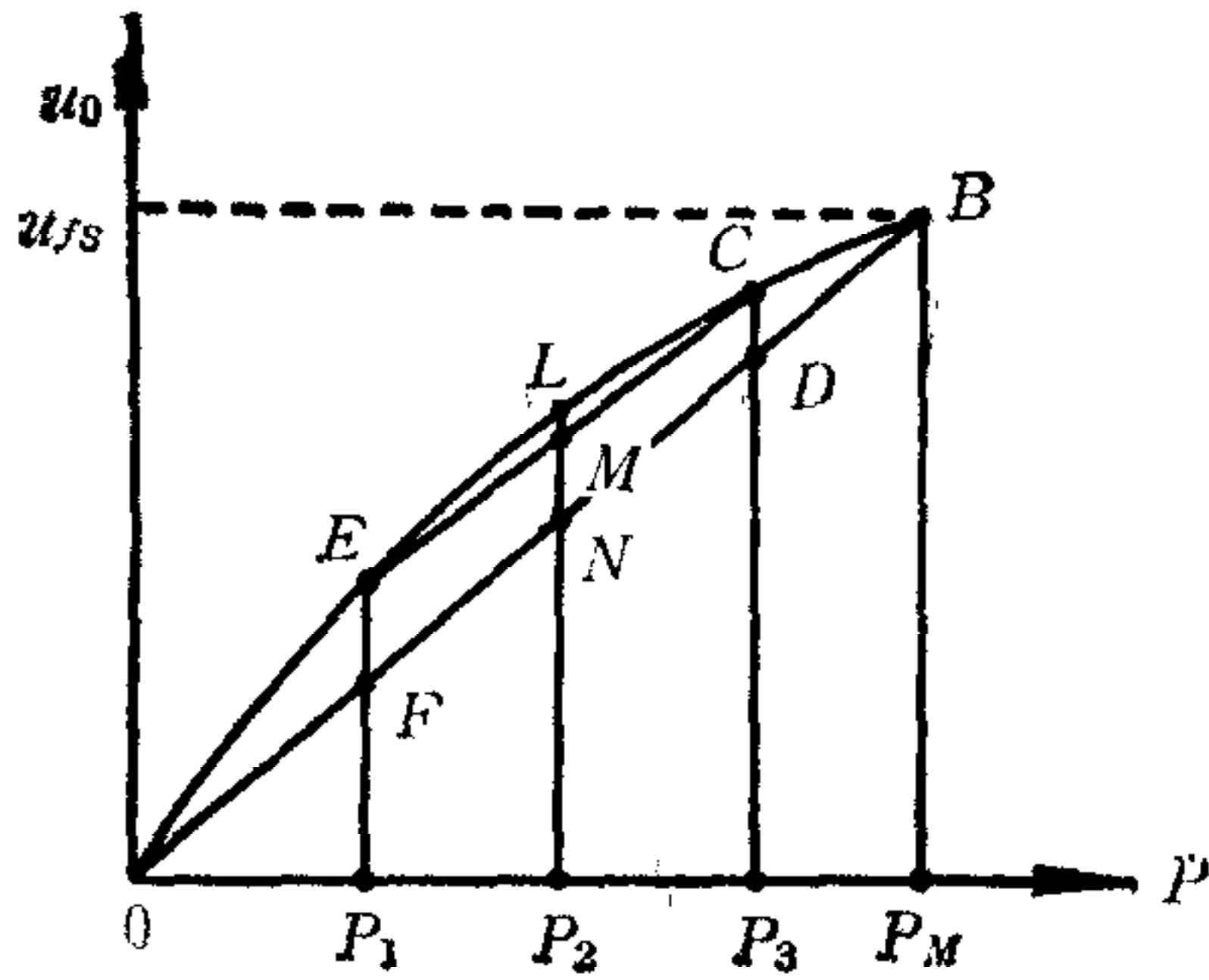


图 4

$$op_1 = \frac{2m-1}{n} p_M,$$

$$op_3 = \frac{2m+1}{n} p_M,$$

$$\begin{aligned} LN &= 4\epsilon_{LS}p_M \left(1 - \frac{p_2}{p_M}\right) \\ &= 4\epsilon_{LS}p_M \frac{mn - m^2}{n^2}, \end{aligned}$$

$$MN = \frac{1}{2} (CD + EF)$$

$$= \epsilon_{LS}p_M \frac{4mn - 4m^2 - 1}{n^2},$$

所以

$$LM = LN - MN = \frac{1}{n^2} \epsilon_{LS}p_M = \frac{1}{n^2} \epsilon_L u_{fs}. \quad (21)$$

分段量程的输出 u'_0 和平均灵敏度 s' 为

$$u'_0 = Cp_3 - Ep_1 = \frac{1}{n} sp_M + 4\epsilon_{LS}p_M \frac{n-2m}{n^2}, \quad (22)$$

$$s' = \frac{u'_0}{p_1p_3} = s + 4\epsilon_{LS} \left(1 - \frac{2m}{n}\right). \quad (23)$$

因气压传感器的满量程 $p_M \equiv 1000 \text{ mb}$, 因此分段量程所对应的满量程输出不是 u'_0 , 而是

$$u'_{fs} = s'p_M = u_{fs} \left[1 + 4\epsilon_L \left(1 - \frac{2m}{n}\right)\right]. \quad (24)$$

所以

$$\begin{aligned} \epsilon'_L &= \frac{LM}{u'_{fs}} = \frac{\epsilon_L}{n^2 \left[1 + 4\epsilon_L \left(1 - \frac{2m}{n}\right)\right]} \\ &\approx \frac{1}{n^2} \epsilon_L. \end{aligned} \quad (25)$$

当分段量程取 200 mb , $n = 5$, $\epsilon'_L = \frac{1}{25} \epsilon_L$, 且因这种器件的端点平移线性度约为它的端点线性度的二分之一, 因此, 只要其端点线性度 $\leq 5 \times 10^{-3}$, 就可使分段量程的非线性误差 $\leq 1 \times 10^{-4}$, 可忽略不计。由此可见, 采用分段处理, 既可保持较高的灵敏度, 又可取得高精度。

表 1 是一组实测数据。其分段量程线性度的实测值和计算值之差均不大于 5×10^{-5} , 故(25)式是可信的。附个别例外, 从附表中还可看到, 非线性误差随灵敏度的增加而急剧增长。因此, 适当控制 a/h 值是必要的, 否则, 灵敏度过高, 非线性误差过大。如 81-19 号样管, 虽经分段处理, 其非线性误差仍达 6×10^{-4} , 因而不能满足要求。

表 1

传感器编号		81-1	81-2	81-3	81-17	81-18	81-19
灵敏度 $\mu V / mb \cdot V$		17.6	16.9	8.8	12.5	13.5	21.6
端点平 移线性 度 1×10^{-4}	$\varepsilon_L 1000 mb$	53	64	10	32	21	161
	$\varepsilon_L 200 mb$ (实测)	1.7	3.0	0.6	1.4	1.4	6.0
	$\varepsilon_L 200 mb$ (计算)	2.1	2.6	0.4	1.3	0.9	6.4
	差值	-0.4	0.4	0.2	0.1	0.5	-0.4

参 考 文 献

- [1] 杨经负, 灵敏度温漂补偿分析与变流源补偿方案, 传感器技术, 1983 年第 1—2 期。
 [2] 饶夫基, 传感器的最新进展, 电子应用技术, 1983 年第 5 期。

SOME PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT OF ATMOSPHERIC TRANSDUCER

YANG JINGFU

(Nanjing Meteorology Institute)

ABSTRACT

In this paper, the long-term stability and accuracy of atmospheric transducer are discussed. The principal factor causing instability is found and the necessary condition ensuring annual stability derived. A method for treating the data in sections is suggested, which improves the accuracy without sacrificing the sensitivity.