

根据流体力学的原理可知,不可压缩流体沿圆管的恒定均匀流在作层流运动时,由于流动对称于管轴,管轴上的速度达到最大值,而沿管壁的速度为零,所以圆管层流流动沿有效断面的速度分布为一旋转抛物面。为了防止发射面和接收面上的流体速度为零,我们在探头结构的设计时,将发射面和接收面突出管壁,从而避免了在这两个面上聚集饼粉所引起的声程堵塞。

六、结 论

本仪器采用双通道超声波发射和接收方法,完成了超声波在混合油和标准溶剂中的传

播声时差与混合油浓度之间的转换。采用热敏电阻取样反馈的方法,进行了自动的温度补偿。实践证明:本仪器实现了液体浓度的在线检测。

参 考 文 献

- [1] 同济大学声学研究室,《超声工业测量技术》,上海人民出版社,1977,89
- [2] Papadakis E. P., *Physical Acoustics*, XI, 1975, 151.
- [3] 王寅观,实验技术与管理,3-2(1986),24.
- [4] Cheng David. K. 著,毛培法译,《线性系统分析》科学出版社,1978,67.

超声波水位检测中的温度差引起的误差

刘茂恺 周国顺

(哈尔滨工业大学)

1988年10月24日收到

较精确地检测大型水电站水库的水位,是经济调度所必不可少的。标志杆型自选校正段超声波水位计可以提供较好的检测精度。但当校正、测量段长度与该段温度差之积较大时,由温差引起的误差不容忽视。本文在考虑水蒸汽分压影响的声速表达式的基础上,分析了不同温度分布条件下的最大误差,指出,倾斜直线温度分布时具有接近最大值的误差。对最大误差进行拟合处理,提出了一个可用来计算由温度差引起的检测误差的简单、实用的公式,其计算误差在工程允许范围之内,这为综合评价此类超声波水位计的检测精度提供了有力的手段。

一、前 言

水库水位是水电站经济调度的重要参数。特别是大型水电站,水库库容大,每单位水位变化对应的发电量是很可观的,从而对水位检测精度提出了越来越高的要求。采用超声波的水位检测仪据称可以保证优于 $\pm 1.0\text{cm}$ 的检测精度。但是迄今为止,不少厂家没有提出充分的误差分析资料,因此,其所提供的精度指标有待验证。

应用声学

大测量范围(如20m及以上)的超声波水位检测大多采用具有较高精度的标志杆型自选校正段的声速校正方式。如上海浦江仪表厂研制的CSY系列超声波水位计,日本无线电股份有限公司的测量范围达100m的水位计^[1]都采用了这种方式。其原理示意图1。在传播超声波的波导管内每隔一定距离(一般为1m、2m或4m)安装一个能产生一定反射量的金属杆(其反射波较液面反射波小20dB,直径约为5mm)做为标志杆。超声波脉冲发出之后,经检测电路检出标志杆反射波个数 n 。设液面

反射波与其前一个标志杆(第 n 个)之间的超声波传播时间为 t (实际上是某固定频率的计数脉冲个数 N), 第 n 个到第 $n-1$ 个标志杆之间超声波传播时间为 t_0 (计数脉冲个数 N_0), 经运算电路计算出液面海拔水位 h

$$h = H_0 - h' = H_0 - \left(nL_0 + \frac{L_0}{t_0} t \right) = H_0 - \left(n + \frac{N}{N_0} \right) L_0 \quad (1)$$

式中 H_0 ——超声波发射、接收器的振动面处的海拔高度, h' ——超声波发射、接收器振动面到液面的距离, L_0 ——标志杆间距离。

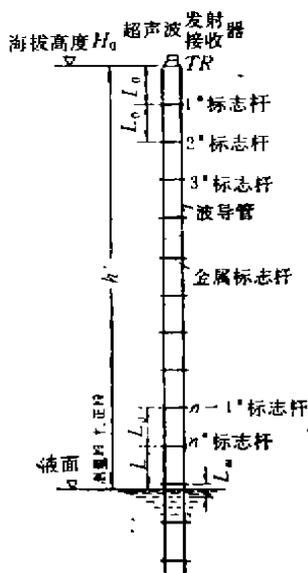


图 1 自选声速校正段的超声波水位计示意图

实际检测中, 为防止较强的液面反射波对靠液面过近的标志杆反射波的影响, 在电路上采取措施, 当液面上的标志杆距液面距离小于 L_m (一般为 L_0 的 $1/10-1/5$) 时自动将 n 号向上移一个标志杆(见图 1)。

式(1)表明, 所检测水位的大部分由液面上的标志杆个数及间距所决定, 利用超声波只是测了第 n 号标志杆到液面间的距离。这个距离系自动地选择第 $n-1$ 到第 n 个标志杆间的声速作为校正声速而计算出来的。显而易见, 检测精度主要靠标志杆间距 L_0 的安装精度及其对温度的稳定性来保证 (影响式(1)中的 L_0 及

N_0)。除此之外, 尽管声速校正段很靠近测量段, 当第 $n-1$ 号标志杆处与液面处空气存在温度差时也会引起误差。这在气候由冷变暖, 波导管或测井内温度上高下低, 无对流现象时是不可避免的。有关自选校正段超声波水位计的文献没有考虑与分析这一项误差, 因而难以准确评价其检测精度, 本文试图分析校正段、检测段间存在温度差时产生的最大可能误差, 为评价超声波水位检测的精度提供必要的依据。

二、校正、测量段温差引起的误差

1. 考虑温度、湿度、压强影响的声速表达式

空气中声速与温度、水蒸汽分压强、大气压强有关。 $T^{\circ}K$ 时干燥空气的声速 c 为^[2]

$$c = 331.45 \sqrt{T/273.15} \quad (2)$$

大气压强为 p 、水蒸汽分压强为 ϵ 的湿润空气声速 c_w 为^[2]

$$c_w = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\epsilon}{p} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_a} - 0.622 \right)}} \quad (3)$$

式中, γ_w, γ_a ——分别为水蒸汽、干燥空气的定容、定压比热比。常温下 $\gamma_a = 1.403$, $\gamma_w = 1.33$, 与式(2)一并代入式(3), 则

$$c_w = 20.0548 \sqrt{\frac{T}{1 - 0.326 \frac{\epsilon}{p}}} \quad (4)$$

文献[1]介绍了相类似的表达式:

$$c_w = 20.067 \sqrt{T \left(1 + 0.3192 \frac{\epsilon}{p} \right)} \quad (5)$$

水蒸汽分压强 ϵ 是相对湿度 $S(\%)$ 与饱和水蒸汽压 E 的函数

$$\epsilon = \frac{S}{100} E \quad (6)$$

饱和水蒸汽压 E 也是温度的函数。按照单元体积的两相平衡的 Clapeyron 方程式, 忽略远小于气相的液相摩尔体积, 则有^[3]

$$d(\ln E) = \frac{\Delta H_v}{RT^2} dT \quad (7)$$

式中, R ——气体常数; ΔH_v ——摩尔蒸发潜

热;对于 0°—180°C 的水蒸汽,

$$\Delta H_v = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 \quad (8)$$

式中, A_0, A_1, A_2 ——常数。将式(8)代入式(7),便可以求出饱和水蒸汽压 E 对温度 T 的表达式

$$\ln E = B_1 T^{-1} + B_2 + B_3 T + B_4 \ln T \quad (9)$$

即为水蒸汽饱和蒸汽压的 Dalton 定律^[4]。式中 $B_4 = 1.75, B_1 - B_3$ ——因物而异的常数。

表 1 给出了 0°C 到 40°C 范围内饱和水蒸汽
表 1 水蒸汽饱和蒸汽压

T' (°C)	E (mm Hg)	T' (°C)	E (mm Hg)	T' (°C)	E (mm Hg)
0	4.579	14	11.987	28	28.349
1	4.926	15	12.788	29	30.043
2	5.294	16	13.634	30	31.824
3	5.685	17	14.530	31	33.695
4	6.101	18	15.477	32	35.663
5	6.543	19	16.477	33	37.729
6	7.013	20	17.535	34	39.898
7	7.513	21	18.650	35	42.175
8	8.045	22	19.827	36	44.563
9	8.609	23	21.066	37	47.067
10	9.209	24	22.377	38	49.692
11	9.844	25	23.756	39	52.442
12	10.518	26	25.209	40	55.324
13	11.132	27	26.739		

汽压与温度的关系^{[5][2]}。用此表数据,利用对 $\ln E$ 的最小二乘原理可以求出系数 $B_1 - B_3$,最大误差小于 0.1%。也可以用对 $\ln E$ 的负整幂函数曲线,按最小二乘原理来拟合表 1 的数据,达 -2 次幂便可获得最大误差小于 0.06% 的拟合精度

$$\ln E = D_0 + D_1 T^{-1} + D_2 T^{-2} \quad (10)$$

式中, $D_0 = 18.5456, D_1 = -3873.6, D_2 = -212066$ 。

$$(11)$$

将分析结果代入式(4),便得到当温度为 T (°K),压强为 p (mmHg, 1mmHg = 133.322 Pa)、湿度为 S (%) 时的声速表达式

$$c_{T,P,S} = 20.0548$$

$$\sqrt{\frac{T}{1 - 0.326 \frac{S}{100P} \text{EXP}(D_0 + D_1 T^{-1} + D_2 T^{-2})}} \quad (12)$$

应用声学

也可以采用代入式(5)得到的结果

$$c_{T,P,S} = 20.067$$

$$\sqrt{T \left(1 + 0.3192 \frac{S}{100P} \text{EXP}(D_0 + D_1 T^{-1} + D_2 T^{-2}) \right)} \quad (13)$$

分析表明,声速受温度影响最大。

2. 检测误差表达式

当校正、测量段 ($L_0 + L$) 范围内温度 T 按某一规律变化时,段间声速 c 也是变化的(图 2)。

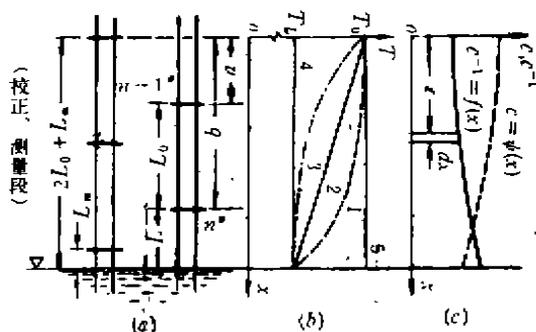


图 2 校正、测量段的温度分布与声速分布

为了有共同的比较基础,设校正、测量段最大距离 ($2L_0 + L_m$) 间的温度差为 $\Delta T = T_0 - T_L$ 。按照检测原理,校正段超声波实际传播时间 t_0 为

$$t_0 = \int_a^b c^{-1} dx \quad (14)$$

校正段平均声速(即校正声速) c_0

$$c_0 = \frac{L_0}{t_0} = L_0 / \int_a^b c^{-1} dx \quad (15)$$

测量段的检测值 L' 系测量段内超声波实际传播时间 t

$$t = \int_b^{L_0+L} c^{-1} dx \quad (16)$$

与校正声速 c_0 的乘积

$$L' = c_0 t = L_0 \left(\int_b^{L_0+L} c^{-1} dx / \int_a^b c^{-1} dx \right) \quad (17)$$

式中,积分限

$$\left. \begin{aligned} a &= (2L_0 + L_m) - (L_0 + L) = L_0 \\ &+ L_m - L \\ b &= a + L_0 = 2L_0 + L_m - L \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

用来评价检测精度的是绝对误差

$$\Delta L = L' - L = L_0$$

$$\cdot \left(\int_b^{L_0+L} c^{-1} dx / \int_a^b c^{-1} dx \right) - L \quad (19)$$

三、关于最大测量误差的分析

1. 校正、测量段的温度分布

校正、测量段的实际温度分布难以预测。但是,若校正段为凸曲线,测量段为凹曲线,两段的按声速平均温度差别较大(图3,曲线2),检测误差也较大。其极限情形(台阶式分布,曲线1)误差最大。

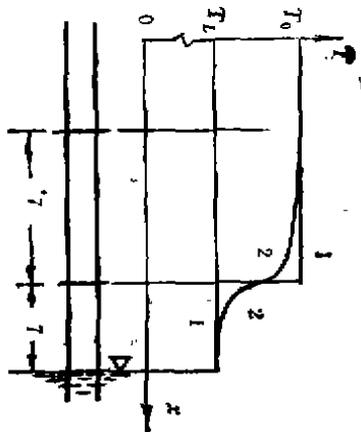


图3 极端温度分布

按照传热学的基本概念,在均匀介质中的温度分布不会出现如同图3那种带有拐点的情形,研究这种分布是没有实际意义的。单调的无拐点的温度分布曲线不外有三种可能:凸曲线、倾斜直线、凹曲线(图2, b)。在复杂的气候变化中,这几种分布形式都是可能出现的。

当 $T = T_0$ 或 $T = T_L$ (即校正、测量段的全范围内等温,图2, b 直线4、5)时,由式(19)所决定的误差等于零。显然,这中间必定有一种分布形式引起的检测误差最大。为找到这个分布形式,可以先用一种简单的函数来进行定性分析。

利用近轴双曲线

$$T = (\alpha x + \beta) / (x + \delta) \quad (20)$$

可以方便地表达凸、凹及直线温度分布。代入边界条件:

$$x = 0 \text{ (液面上 } 2L_0 + L_m \text{ 处) 温度为 } T_0,$$

$$x = 2L_0 + L_m \text{ (液面处) 温度为 } T_L,$$

则可以解出系数 α, β 值,从而

$$T = T_0 \frac{\left[1 - \left(1 + \frac{\delta}{L_0 + L} \right) \frac{\Delta T}{T_0} \right] x + \delta}{x + \delta} \quad (21)$$

式中, $\Delta T = T_0 - T_L$ 。

图4系按上式计算的不同 δ 值的 $T/T_0 = \varphi(\delta, x)$ 曲线。该图清晰地表明,参量 δ 表征曲线形状: $\delta = 0$ 及 $\delta = -(2L_0 + L_m)$ 分别代表 $T = T_L$ 、 $T = T_0$ 两条水平线; $\delta \in (0, +\infty)$ 代表凹曲线族, δ 愈大曲线的最大曲率

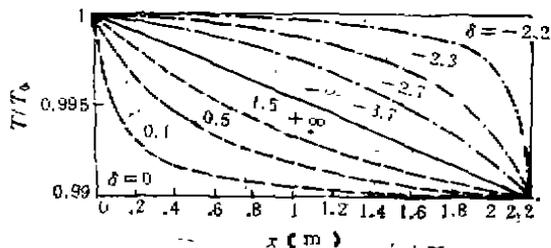


图4 $L_0 = 1\text{m}$, $L = 1.2\text{m}$, $\Delta T/T_0 = 0.01$ 时, $T/T_0 = \varphi(\delta, x)$ 曲线

愈小; $\delta \in (-2L_0 - L_m, -\infty)$ 代表凸曲线族, $|\delta|$ 愈大曲线的最大曲率也愈小; $|\delta| = \infty$ 代表倾斜直线

$$T = T_0 - \Delta T \cdot x.$$

分析表明,当 $\delta \in (-\infty, -2L_0 - L_m] \cup [0, +\infty)$ 时,式(19)所代表的曲线族覆盖了所有可能的温度分布形式,从而为研究不同温度分布形式下的检测误差提供了可能。

2. 最大检测误差

研究所有可能检测条件下由校正、测量段温度差造成的最大误差,即为整个超声波水位计检测误差的温差子项误差。

不同测量距离 L 的温差子项误差也不同。笔者采用 Simpson 数值积分法,编程序用计算机计算并比较了 $T_0 = 273.15^\circ - 313.15^\circ$ (间隔 5°) K, $\Delta T = 1^\circ - 10^\circ$ (间隔 1°) K,

$L_0 = 1\text{m}$, $p = 760\text{mmHg}$, $S = 100\%$ 条件下不同测量段长 L (间隔 0.2m) 的检测误差。结果表明,当测量段长最大 ($L = 2L_0 + L_m$) 时,检测误差最大(图 5 绘出了部分结果)。因此,研究其它参数对误差的影响时,应取 $L = L_{\text{max}} = 2L_0 + L_m$ 。

在 $L = L_{\text{max}}$ 的条件下,笔者编程计算并比较了不同 δ 值(即不同温度分布曲线)的检测误差。结果表明:在一个很接近于倾斜直线分布的某一 δ 值时,检测误差 ΔL 最大。若取三位

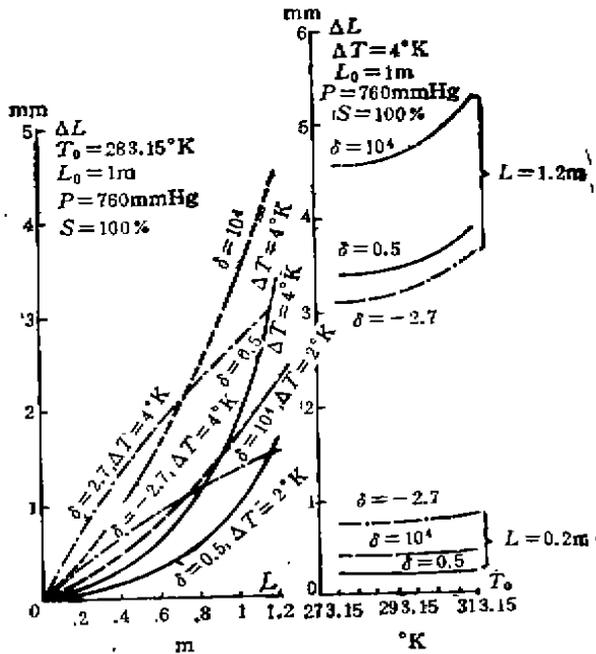


图 5 不同测量距离 L 的检测误差

有效数字,最大误差与倾斜直线温度分布时的误差几乎相等。因此,工程上可以认为倾斜直线温度分布条件下具有最大的测量误差。图 6 绘出了以上分析计算的部分结果。

以上的计算与分析结果说明:检测误差主要取决于温差 ΔT , 只有当 $T_0 \geq 293.15^\circ\text{K}$ 时,温度 T_0 才对检测误差有些影响。

由图 6 还可以直观地看出,检测误差对温差有较好的线性关系。利用直线

$$\Delta L = a + b \cdot \Delta T \quad (\text{mm}) \quad (22)$$

来拟合分析计算数据,有很好的相关性。对系数 a 、 b 的计算又一次证明倾斜直线温度分布时的检测误差很接近于最大误差。系数 a 、 b 与温度 T_0 的关系示于图 7。

值得注意的是,在通常采用的校正、测量段长的范围内 $L = L_{\text{max}} = 2L_0 + L_m$ 时的最大检测误差除以 $\Delta T \cdot L$ 后几乎为一只与 T_0 有关的常数。从而可以得到以 L_{max} 为基准的最大误差相对值表达式

$$\Delta L_* = a_* + b_* \cdot \Delta T \quad (23)$$

式中,

$$\Delta L_* = \frac{\Delta L}{L_{\text{max}}}; \quad a_* = \frac{a}{L_{\text{max}}};$$

$$b_* = \frac{b}{L_{\text{max}}}$$

不同温度 T_0 时的参量 a_* 、 b_* 示于表 2 及图 8。

表 2 直线 $\Delta L_* = a_* + b_* \cdot \Delta T$ 拟合参量

$\Delta T(\text{K})$		$T_0(\text{K})$							
		278.15	283.15	288.15	293.15	298.15	303.15	308.15	313.15
a_*	0-5	-0.002	-0.001	0.001	0.003	0.006	0.009	0.013	0.017
	0-10	-	-0.006	0.002	0.011	0.022	0.036	0.052	0.071
b_*	0-5	0.952	0.951	0.955	0.966	0.983	1.010	1.047	1.097
	0-10	-	0.953	0.955	0.962	0.976	0.998	1.030	1.074

运用表 2(或图 8)及式(23)可以方便地计算出不同温差,不同温度,不同 L_0 条件下的最大检测误差,避免了用式(19)所进行的繁杂计

应用声学

算。从而为超声波水位计检测精度评价提供了简便且实用的手段。

表 3 举例比较了用式(19)及式(23)两种方

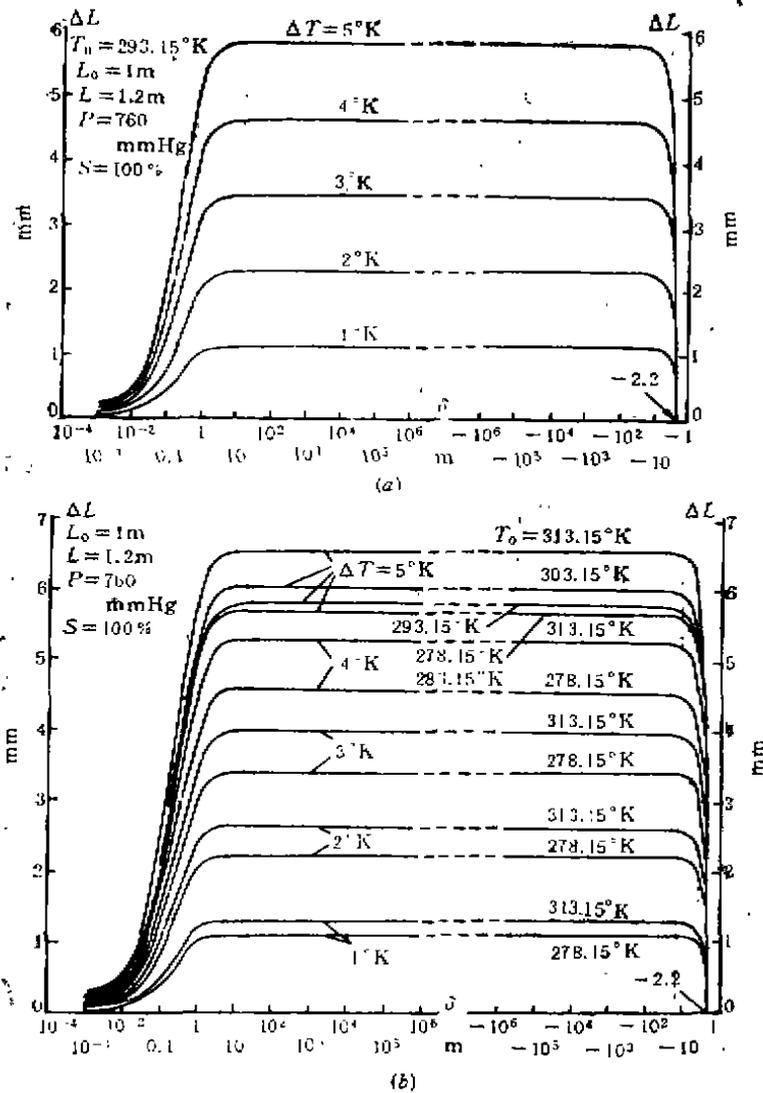


图 6 温度分布曲线形式对误差的影响

法的计算结果。进一步说明了式(23)用于分析超声波水位计的温度差引起的检测误差是完全适用的,其计算误差在工程允许范围之内。

以上分析是在压强 $P = 760 \text{ mm} \cdot \text{Hg}$, 相对湿度 $S = 100\%$ 的条件下进行的。因为在实际的大气压强变化范围内压强 P 对检测误差影响很小(见图 9)。而且水面上的较小距离内相对湿度较大(水面附近接近 100%)。另外,当校正、测量段内湿度稍有差异时,也必然是水面

处近于 100% , 其上方略低。这种湿度分布与温度分布的综合效果,是使其误差稍小于全段为 100% 湿度时的误差。因此以上分析结果给出了最大检测误差。

图 9 还说明,不考虑湿度参数的影响($S = 0$) 所得到的检测误差的分析结果是不能满足要求的。这进一步说明了运用综合声速表达式(12)或(13)来分析检测误差是必要的。

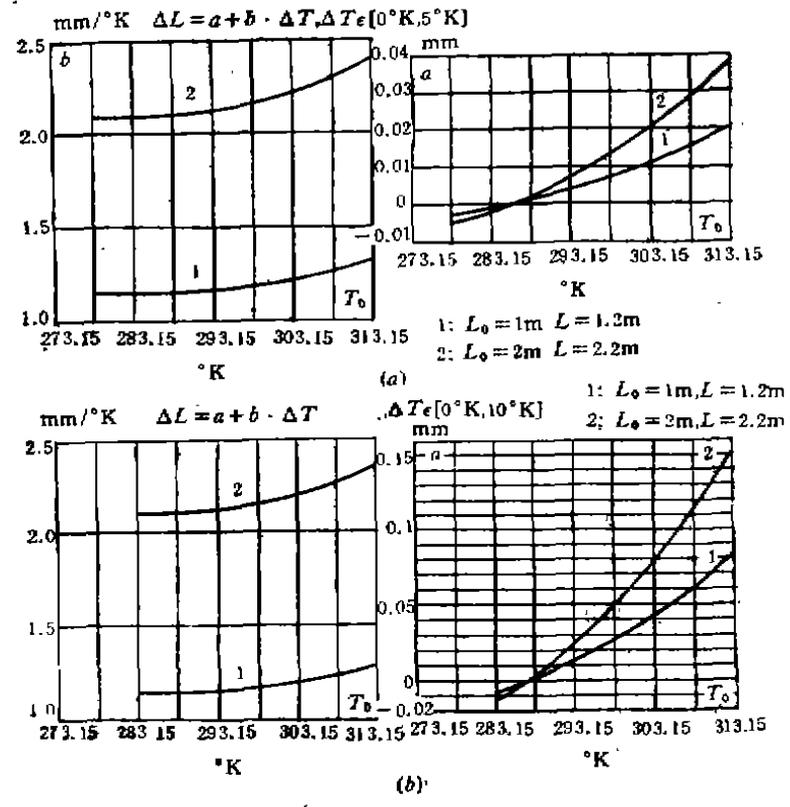


图 7 检测误差的直线拟合参数 a 与 b

表 3 两种计算方法的比较(单位: mm)

校正、测量段长	计算公式	T_0 K		313.15		
		ΔT K	5	10	5	10
$L_0 = 1\text{m}$	式(19) ΔL		5.713	11.455	6.586	12.902
$L_{max} = 1.2\text{m}$	式(23) $\Delta L_{*} \cdot L_{max}$		5.705	11.411	6.528	12.972
$L_0 = 2\text{m}$	式(19) ΔL		10.459	20.972	12.059	23.621
$L_{max} = 2.2\text{m}$	式(23) $\Delta L_{*} \cdot L_{max}$		10.459	20.920	11.968	23.782
$L_0 = 4\text{m}$	式(19) ΔL		19.960	40.023	23.012	45.075
$L_{max} = 4.2\text{m}$	式(23) $\Delta L_{*} \cdot L_{max}$		19.967	39.938	22.848	45.402

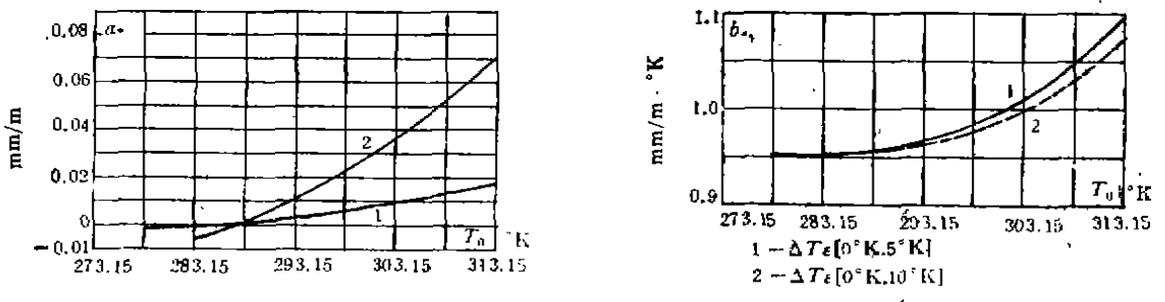


图 8 最大误差相对值的直线拟合参数

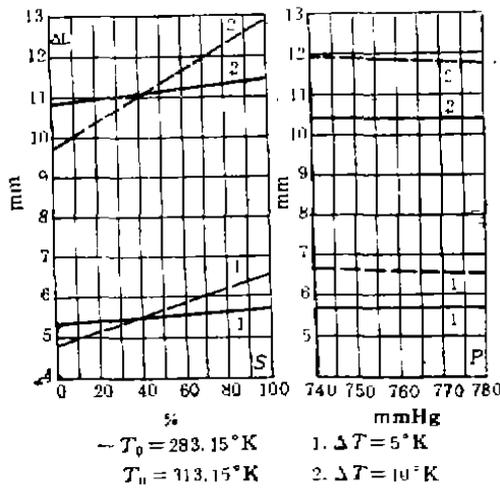


图 9 相对湿度及大气压强对误差的影响

四、结 论

1. 标志杆型自选校正段超声波水位计的校正、测量段内如有温度差,会造成检测误差。它主要取决于温度差及校正、测量段长。当二者之积较大时,对某些高精度检测来说,这个误差不容忽视。

2. 在进行检测误差分析时,应考虑水蒸汽饱和蒸汽压的影响。用 Clapeyron 方程式或 Dalton 定律拟合饱和蒸汽压表所提供的数据,可以得到饱和蒸汽压对温度关系曲线。但对

(上接第30页)

信号提出来,同时使用高斯曲线拟合法而估算出噪声级,进而确定 SNR。如果直方图中低声级端的峰不明显,同时又不能正确地选择切点的话,那么噪声级的估算就不准确。遇到这种情况时,应在单词之间或单词内留有较长时间的间歇,在句子首尾上有较长的停顿,这样直方图中在低声级端的峰就会明显,切点选择的准确度也就能大大地提高。性别对 SNR 的影响不明显,男性约比女性高 2dB;对于任意一个受试者来说,不同试验句的 SNR 变化范围是从 3—10dB;采用 Sennheiser 公司的 HMD 414-6 型传声器,可以提高 SNR 值。

六、备 注

0℃ 到 40℃ 的温度范围,利用饱和蒸汽压对数对温度的负整幂函数按最小二乘原理拟合,可以获得示于式(10)、(11)的优于 0.06% 拟合精度的结果,且较 Dalton 定律的表达形式简单。

3. 用考虑温度、湿度、压强的声速表达式分析三类(凸曲线、凹曲线、倾斜直线)可能的温度分布引起的检测误差,发现当为倾斜直线温度分布时的误差十分接近最大误差。在工程允许范围内,可以认为倾斜直线分布的检测误差最大。运用本文对计算结果的进一步处理所得到的结果(式(23)、表 3 或图 8)可以计算不同参数条件下的检测误差,避免了繁杂的计算,且保证了工程允许的计算精度。从而给评价标志杆型自选校正段超声波水位计的检测精度提供了简便且实用的手段。

参 考 文 献

- [1] 丹羽 登,《超音波計測》,昭晃堂,1983年,46;165.
- [2] 桑原五郎,《理科年表》第五十一册,丸善株式会社,1978,物 77.
- [3] 吉林工业大学、吉林工学院(合编),物理化学,机械工业出版社,1980,74.
- [4] 满久崇喜,木材の乾燥,森北出版株式会社,1976年改訂版,10
- [5] А. Зинovieва, Краткий Технический справочник часть первая, Государственное Издательство Технико-георетнической литературы, стр. 164.

本文是作者在美国国家标准局工作期间完成的。导师为 Dr. David S. Pallett (早期任美国国家标准局声学工程部负责人,目前为该局计算机科学与计算研究所的物理学家,是语言技术国际标准的主要发起人),对他的精心指导,作者表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Application of B&K Equipment to Acoustic Noise Measurements, 1973, B&K.
- [2] Arnold P. G., Peterson, Beranek Leo L., Handbook of Noise Measurement, Gegeral Radio Company, Canabrigde Maas., 1954.
- [3] Beranek Leo L., Acoustic Measurements, John Wiley & Sons. Inc., New York, 1949.