

微壓液體測高儀的研究和應用

李見賢 陳華材

(地理系)

摘 要

在進行野外調查工作中，常常由於沒有簡便而精確的測高儀器（一般空盒氣壓計，測高誤差較大），因此不能獲得準確的高度數據，大大影響了工作的進行和質量。為了解決這個問題，我們研究了И.И.門捷列夫（1874）所發明的差示氣壓計的原理以及前人根據這種原理所製成的測高儀器，改進了儀器的裝置，製成了一種簡便而精度較高的測高儀器。

儀器一次能測120米的高差，精度為±0.5米，個別情況出現±0.8米。

儀器的使用很簡便而計算快速，一般測量高差120米的地形，往返觀測兩次，只需20余分鐘，計算時間約數分鐘即可。

儀器具有輕巧的特點，其外殼體積為 $9.3 \times 7.4 \times 16$ cm，重量為1.25市斤。

儀器構造簡單，製造容易而造價低廉，每個約需人民幣10余元。

一 前 言

在野外調查工作中，常常由於沒有簡便而精確的測高儀器，或因測高儀器的精度不高（如一般的空盒氣壓計），往往不能得到準確的高度數字，因而大大影響了工作的進行和工作的質量，所以許多同志苦於尋找一種簡便而準確的測高儀器，以便解決野外的測高問題。

為了解決這個問題，我們研究了И.И.門捷列夫（1874）所發明的差示氣壓計的原理及前人根據這種原理所製的測高儀器。經過二年來的研究，進一步探討了門氏的原理，改進了儀器的裝置，製成一種簡便而精度較高的微壓液體測高儀。

這種儀器一次能測120米的高差，精度可達±0.5米。

* 1964年12月20日收到。

二 仪器的原理

Д.И.門捷列夫差示气压計的原理，按A.С.契巴塔廖夫所著《測量学》下卷第二分册 § 171所介紹^[1]：如图 1 所示，空瓶一端装开关，另一端装曲管。曲管内

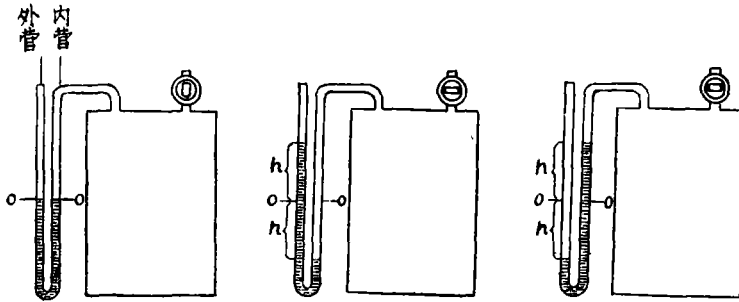


图 1 测高仪原理略图

盛液体。曲管之間装分划尺。当开关打开，空瓶內的气压与曲管外的气压相等，所以曲管两端液面是水平的。此时把开关关闭，空瓶內气压保持不变，如果曲管外气压亦不变时，則曲管两端液面仍保持水平。如果曲管外气压改变时，由于空瓶內压力与曲管外压力不等，則曲管两端液面就不水平了，压力大的一端下降，小的一端升高。利用地面高低两点气压不同的现象，在起点关闭开关，然后带仪器走到終点，曲管两端液面就出現不水平，根据曲管两端液面差，就可算出两点間的高差。

現对仪器的原理作如下探討：

設 P_1 为起点瓶內、外的气压（水銀柱 mm）

P_2 为終点瓶外的气压（水銀柱 mm）

P'_2 为終点瓶內的气压（水銀柱 mm）

V_1 为空瓶在起点时的体积（ cm^3 ）

r 为曲管口径的半径（cm）

ρ 为 $\frac{\text{水銀比重}}{\text{液体比重}}$

h 为两点間曲管一端的液面差

按波义耳——馬立欧特定律，得

$$P_1 V_1 = P'_2 (V_1 \pm h \pi r^2)$$

$$\text{故 } P'_2 = \frac{P_1 V_1}{V_1 \pm h \pi r^2} \quad (1)$$

$$\text{而 } P_2 = P'_2 \mp \frac{2h}{\rho} \text{ (換為水銀液柱)} \quad (2)$$

則由測點 1 到測點 2 的瓶外气压差

$$P_1 - P_2 = P_1 - \left(P'_2 \mp \frac{2h}{\rho} \right) \quad (3)$$

以(1)式的 P'_2 代入(3)式, 則

$$P_1 - P_2 = P_1 - \frac{P_1 V_1}{V_1 \pm h\pi r^2} \pm \frac{2h}{\rho}, \text{ 化簡得}$$

$$P_1 - P_2 = \left(\frac{\pm h\pi r^2}{V_1 \pm h\pi r^2} \right) P_1 \pm \frac{2h}{\rho} \quad (4) \textcircled{1}$$

我們要求液面差 $2h$ 之值能够獲得最大, 則儀器愈灵敏, 因此, 按公式(4), 必須使空瓶体积 V_1 要大, 曲管口径 r 要小, 液体比重 ρ 要輕才能獲得。

設 P_1 为 762.9mm, P_2 为 758.205mm, V_1 为 223.534cm³, ρ 为 16.1, r 为 0.50、0.25、0.15、0.10、0.05cm 时, 代入(4)式, 得到表 1。

表 1 曲管口径与液面差的关系

曲管口径的半径 r (cm)	高差为 53.58 米时, 曲管 两端液面差 $2h$ (mm)	液面差 1mm 等于 实际的高差 (m)	比水銀气压計精 度增加的倍数
0.50	24.08	2.225	5.128
0.25	49.14	1.090	10.466
0.15	63.30	0.846	13.483
0.10	69.59	0.770	14.821
0.05	74.00	0.724	15.761

从表 1 可以看出, 曲管口径的半径愈小, 其精度愈高。

儀器的精度, 在測量不同的高差时, 即随着液面差 h 的变化, 有微小的变化。設条件与上述相同, r 为 0.25cm, h 分别为 10mm、50mm 及 100mm 时, 代入公式(4), 計算結果, 儀器的精度比水銀气压計精度增加的倍数分别为 10.461、10.474 及 10.490, 前后仅相差不超过 2.8%, 10mm 与 50mm 精度的比較, 則仅相差 1.2%, 所以用它測量 100 米左右的高差时, 这数值可略去不計。

从公式(4)又可看出, 右項 P_1 是一个变数, 对儀器的精度有很大的影响。設条件与上述相同, 以各种 P_1 代入公式(4), 得到表 2。从表 2 可看出, P_1 为 600mm 时, 儀器比水銀气压計增加的精度为 11.3188 倍, P_1 为 700mm 时, 增加为 10.7850 倍, 即气压相差 100mm 时, 儀器精度相差为 4.83%。如气压相差为 10mm 时, 則儀器精

① (4)式右边第一項 h 单位为 cm, 第二項 h 单位为 mm。

度相差为0.46—0.50%。由此可看出,在不同的气压条件下,仪器精度有很大的变化,应很好考虑。这个问题在下面求仪器的分划值时,再详细讨论。

表 2 气压 P_1 的不同,使仪器精度引起的变化

水银气压 P_1 (mm)	比水银气压计精 度增加的倍数	水银气压差10mm, 仪器精度的差值	水银气压差10mm, 仪器精度相差的%	水银气压差100mm, 仪器精度相差的%
780	10.3929	0.0475	0.46	4.83
770	10.4404		0.46	
760	10.4883	0.0506	0.47	
710	10.7344			
700	10.7850	0.0511	0.47	
690	10.8361	0.0563	0.50	
600	11.3188			
590	11.3751	0.0569	0.50	
580	11.4320			

上面的讨论还没有考虑气温的条件,事实上气温的影响十分大。根据查理士定律,在一定体积下,温度升高 1°C ,气体压力增大约为 $\frac{1}{273}$ 。

设气压 P_1 为762.9mm,空瓶体积 V_1 为223.534 cm^3 ,前后两次观测时的温度 t_1 为 21.8°C 、 t_2 为 22.8°C , ρ 为16.1,玻璃线膨胀系数 β 为0.00002,代入公式(5),得到表3。

$$h = \frac{P_1 V_1 \frac{t_2 - t_1}{273 + t_1} - 3\beta(t_2 - t_1)V_1}{P_1 \pi r^2 + \frac{2V_1}{\rho}} \quad (5)$$

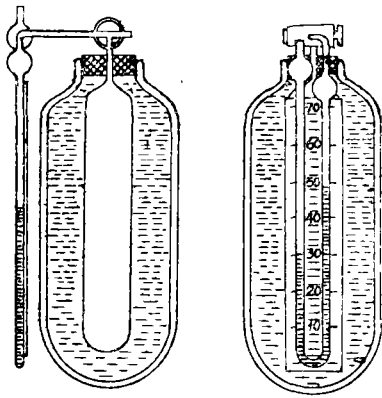
表 3 气温变化 1°C 对液面变化的影响

曲管口径的半径 r (cm)	液面差 $2h$ 的高度 (mm)	等于实际的高差 (m)
0.50	18.45	41.05
0.25	65.16	71.02
0.15	141.62	119.81
0.10	223.62	172.19
0.05	342.69	248.11

由表3可見，只要瓶內氣溫有極小的改變，對儀器液面升降的影響是十分顯著的。曲管口徑愈小，影響愈顯著。所以必須採取特別的方法來保持瓶內氣溫的穩定，而且還要應用特別的方法來改正溫度的影響(待後述)，才能使測高得到滿意的結果。

三 儀器的構造

如圖2、照片1，杜瓦瓶中盛滿清水^①，空瓶置于其中，用膠塞固定，曲管、空瓶與大氣用玻璃質的三通開關連接。杜瓦瓶外裝上保護套，然後把它放入有背帶的皮盒中(如照片2)。皮盒一面開一個附有活門的讀數窗，它的旁邊裝一支溫度計。另一面安一個連接開關的輕金屬旋扭，用它操縱開關。曲管後面裝一分劃尺，分劃值為1毫米。儀器皮盒的體積為 $9.3 \times 7.4 \times 16\text{cm}$ 。儀器重量為1.25市斤。



側面圖

正面圖

圖2 杜瓦瓶盛清水保溫構造圖

考慮到儀器是在野外使用的特點，所以必須輕巧。根據計算和試驗，空瓶的體積為 $10-20\text{cm}^3$ (高約8cm)，曲管口徑為1mm即能獲得滿意的效果，比水銀氣壓計精度增加的倍數為10倍左右(即液面差1mm等於實際的高差約為1.2米)，一次測高約為120米以內。我們認為曲管口徑1mm左右是極限，太小了便會影響液體的移動。如果增大空瓶體積，當然能增加

儀器的精度，但勢必增大了儀器的體積，這與野外需要輕巧儀器的原則是不符合的。

經過試驗，最理想的液體是鄰苯二甲酸二丁酯(比重在 20°C 時為1.041)。

開關的質量必須是十分精密的，絕不容許有絲毫漏氣。

曲管兩端的最上部各有一個小空球，其體積約等於曲管的全部體積，其作用是防止液體溢出管外或吸入瓶內。

曲管兩端的最上部各有一個小空球，其體積約等於曲管的全部體積，其作用是防止液體溢出管外或吸入瓶內。

四 儀器的用法

(一) 儀器分劃值

曲管液面差依靠毫米為單位的分劃尺決定。計算高差時，需要知道分劃尺的分

① 根據我們最近的初步實驗，不用杜瓦瓶，改用無真空的器皿盛清水，亦能達到較好的結果。這樣，可使儀器體積更小、更輕巧。如果在 0°C 以下地區測高，為防止凍結，應以鄰苯二甲酸二丁酯代替清水。

划值, 即 1mm 等于实际高差多少, 我们叫它为仪器分划值, 也叫做气压级或气压阶。仪器分划值决定于气压和气温, 因此每一个仪器都要做一个分划值表。

仪器分划值按公式 (6) ^[2] 求得,

$$n = \frac{8000(1+at)}{P} \times \frac{1}{\omega \cdot \rho} \quad (6) \textcircled{1}$$

式中 P 为两测点的平均大气压力。 a 为气体膨胀系数(约为 $\frac{1}{273}$)。 t 为两测点的平均气温。 $\omega \cdot \rho$ 为仪器比水银气压计精度增加的倍数, 即是两测点之间曲管两端液面差 ($2h$) 与大气水银气压差 ($P_1 - P_2$) 之比, 即

$$\omega \cdot \rho = \frac{2h}{P_1 - P_2} \quad (7)$$

可设 P 值每载相差为 10mm, t 值相差为 2°C , 代入 (6) 式第一项, 而这一项可在有关书中找到 ^[3]。 ω 值随仪器的空瓶体积, 曲管口径、液体比重及大气压力而异。因此, 如已知道这些条件后, 可代入 (4) 式 (式中 $2h$ 可假设为 100mm, 以适合于测高约为 120 米以内的地形。 P_1 为 725、735、……) 可求得 $P_1 - P_2$ 值, 将 $P_1 - P_2$ 值代入 (7) 式, 可求得各个不同气压条件下的 $\omega \cdot \rho$ 值, 以此值分别除水银气压级表中各个相应气压条件下的气压级数值 ^[3], 便求得仪器分划值表。

例如附表 1 (分划值表), 是按与上述相同的规格所计算的。设 h 为 50mm, P_1 分别为 725、735、745、755、765、775、785mm 代入 (4) 式, 分别求得它们各个的 $P_1 - P_2$ 值。再用各个 $P_1 - P_2$ 值分别代入 (7) 式, 求得各个 $\omega \cdot \rho$ 数值为 10.684、10.635、10.585、10.537、10.488、10.440、10.393。再用这些 $\omega \cdot \rho$ 值分别除相应的水银气压级 (如 760mm 的 $\omega \cdot \rho$ 值 10.488 除 760mm 的水银气压级 10.48、10.55、……, 12.10, 便得到适用于这个仪器的分划值 0.999、1.006……、1.154), 便得到这个分划值表 (附表 1)。

仪器的曲管口径及液体比重较易获得, 而空瓶体积则往往了解得不够确切, 因此可携仪器到实地观测, 先求得 V_1 。然后按上述方法计算分划值表。

测测 V_1 需同时携阿斯曼温度计一支, 精度高并经过校正的空盒气压计一个。选一个高差 50—100 米的小丘, 用三角高程测量测出其高差。然后在小丘的山脚和山顶用上述仪器进行几次观测, 获得液面差 $2h$ 的平均值 (其观测与计算方法和本节 (二) (三) 两点相同)。

兹举实例说明如下: 小丘高差 53.58 米, 测得山脚及山顶的平均气压为 762.9mm (水银柱), 平均气温为 22.7°C , $2h$ 为 49.14mm。查水银气压级表, 用内插法算出相应气压和气温条件下的水银气压级为 11.39 米, 因此山脚、山顶的气压差

① 根据参考文献 [2] 58 页的气压阶公式并结合本仪器的构造特点改写而成。

$(P_1 - P_2)$ 为 $\frac{53.58}{11.39} = 4.704\text{mm}$, 将此值及山脚的气压值等数代入(4)式, 即可求得 V_1 值。

(二) 观测方法

1. 准备工作。

如果测量高差50米以内的地形, 先将开关三通(即空瓶、曲管、大气相通), 使曲管两端液面水平(如果曲管两端液面原已接近水平, 可不必将开关三通), 经二、三分钟后, 把开关二通(即空瓶与曲管通, 与大气不通, 下同), 即可开始观测。如果测量高差大于50米的地形, 先将开关三通, 把仪器倾斜, 使曲管液体尽量流向空球(测正高差, 流向内球。测负高差, 流向外球), 然后关闭开关(即曲管、空瓶、大气互不相通。这一步骤很重要), 随即使仪器恢复垂直位置, 然后才把开关二通, 液体即从空球流下, 经二、三分钟后, 此时, 曲管两端液面不水平, 即可开始观测。观测开始后, 不能触动开关, 即需保持二通, 至观测一次完毕为止。

2. 观测步骤。

1) 在起点念内、外管液面读数(念数时, 仪器放在与眼同高处, 以半月形液面的最低点为准)。随即念时表读数(此动作应迅速)。

2) 念气压和气温读数。

3) 隔数分钟后, 再念1)项读数。

4) 携仪器至终点, 重复1)、2)、3)项步骤。

5) 如果要求较高, 应携仪器从终点返回起点, 进行第二次观测。如不在终点停留进行别的工作时, 可随即返回起点, 而往返时间大致相等, 进行第二次观测, 则不必进行第3)项读数, 进行第1)项时, 也无需念时表读数, 计算则十分简便(参看表4)。

表4 测高记录 1964年8月21日上午晴地点: 广州漱珠岗

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
地 点	气 温 (°C)	气 压 (mm)	液面读数 (mm)		两测点液面差 (mm)			两测点平 均液面差 (mm)	平均 气温 (°C)	平均 气压 (mm)	分划 值 (m)	高差 (m)
			外管	内管	外管	内管	合计					
起 点 脚	34	752	27.0	69.5	7.5	7.5	15.0					
终 点 顶	34	750	34.5	62.0				14.15	34	751	1.210	17.12
起 点 脚	34	752	27.7	68.5	6.8	6.5	13.3					

注: 本表分划值按附表2“分划值表”查得。

表 5 测高记录		1964年10月6日上午 晴 山顶有北风 地点: 广州瘦狗岭																				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
																						观测次数
起点(山脚)	1	8时 29.75	28	758	33.082.1																	
	2	35.75			33.581.7		+0.5	+0.4	6	+0.075												
终点(山顶)	1	47.20	28	748	83.081.7																	
	2	53.20			83.381.3		+0.3	+0.4	6	+0.058												
起点(山顶)	1	10时 1.5	31	746	96.917.2																	
	2	8.5			98.515.5		+1.6	+1.7	7	+0.236												
终点(山脚)	1	19.20	31.8	756	53.561.0																	
	2	23.20			54.959.8		+1.4	+1.2	4	+0.325												

注: 本表分划值按附表 2 “分划值表” 查得。

測量高差50米以內的地形，气压讀数要求不很高，只需近似气压讀数，所以具备精度 $\pm 3\text{mm}$ 空盒气压計即可。如无气压計，則可从当地气象站取得月平均气压，作为近似气压讀数（测点与气象站大致同高者）。或按公式(8)^[2]求得测点的近似气压。

$$P_2 = \frac{P_1[16000(1+at) - H]}{16000(1+at) + H} \quad (8) \textcircled{1}$$

式中 P_2 为测点的近似气压， P_1 为附近气象站的海平面气压， H 为测点近似高程（可从野外工作中所携带的大比例尺地图讀出）， a 为气体膨胀系数（0.004）， t 为测点与海平面的平均气温（海平面气温 = 测点气温 + $H \times 0.006^\circ\text{C}$ ）。

用上述方法求取气压讀数，測量高差100米左右地形，精度亦能达到 ± 1 米。

(三) 計算方法

以表5为例。第8、9栏是第6、7栏在同一测点1、2次讀数之差，如 $+0.5 = 33.5 - 33.0$ ， $+0.4 = 82.1 - 81.7$ （“+”号表示液体向外管移动，“-”号表示液体向内管移动）。第10栏是第3栏1、2次之差。第11栏是第10栏除第8、9栏平均值之商，如 $\frac{(+0.5) + (+0.4)}{2} \div 6 = +0.075$ 。第12栏是第11栏起点和終点的平均值，如 $[(+0.075) + (+0.058)] \div 2 = +0.067$ 。第13栏是第3栏起点第2次与終点第1次观测時間差，如 $47.20 - 35.75 = 11.45$ 。第14栏是第12栏与第13栏乘积的两倍（因用内外管同时观测，两管各变化同样数值，即瓶内气温变化及大气压力变化的改正数），其符号則相反，如 $(+0.067) \times 11.45 \times 2 = -1.53$ 。第15、16栏是第6、7栏起点第2次与終点第1次讀数之差（“+”表示液体向外管移动，“-”表示液体向内管移动），如 $49.5 = 83.0 - 33.5$ （第15、16栏之差，不应超过0.6，否則精度不易达到 ± 0.5 米）。第17栏是第15、16栏之和。第18栏是第17栏与第14栏之代数和，如 $99.5 + (-1.53) = 97.97$ 。第21栏查分划值表（附表2）获得。第22栏是第21栏与第18栏之乘积。

五 仪器的优缺点

本仪器与苏联的同类仪器比較，精簡及改进了仪器的装置，减少了仪器的体积和重量，簡化了仪器的使用方法，而仪器的精度仍然相同。

本仪器比空盒气压計的精度高得多，且构造簡單，制造容易，成本低廉，携带也还算方便，但体积及重量比一般小型的空盒气压計大，使用及保管也不及它方便。測高超过120米时，便需分次分段測量。

① 根据参考文献[2]第57頁的公式換代号及移項得出。

附表 2 分划值表

气 温	压 增 加 倍 数						气 温
	750	760	770	770	760	750	
	9.932	9.904	9.876	9.876	9.904	9.932	
- 6	1.053	1.042	1.032	1.117	1.128	1.140	+ 16
- 4	1.061	1.050	1.039	1.124	1.136	1.148	+ 18
- 2	1.069	1.058	1.047	1.132	1.144	1.156	+ 20
0	1.077	1.065	1.055	1.140	1.152	1.164	+ 22
+ 2	1.084	1.073	1.062	1.147	1.159	1.172	+ 24
+ 4	1.093	1.081	1.070	1.155	1.167	1.179	+ 26
+ 6	1.100	1.089	1.078	1.163	1.175	1.187	+ 28
+ 8	1.109	1.097	1.085	1.171	1.182	1.195	+ 30
+ 10	1.117	1.105	1.094	1.179	1.190	1.203	+ 32
+ 12	1.125	1.113	1.102	1.187	1.199	1.211	+ 34
+ 14	1.132	1.121	1.109	1.194	1.207	1.219	+ 36

参 考 文 献

- 〔1〕 A.C.契巴塔廖夫：测量学下卷第二分册 清华大学土木系 测量教研组译 一九五六年五月。
- 〔2〕 С.И.Костин：气象学与气候学原理 上册58页 杜淪聰等译 1935年中华书局。
- 〔3〕 С.В.奥勃鲁契夫主篇：野外调查手册（旅行家及地志学手册）上卷第三分册，306—315页，由С.Ф.科罗布科和С.费多罗夫计算的“各个高度的气压级表”科学出版社 1958年。
- 〔4〕 С.А.雅科甫列夫等著：第四纪沉积的研究与地质测量方法指南 下册 陆恩泽等译 中国工业出版社 1963年。
- 〔5〕 Ю.С.多伯罗霍托夫等著：地形测高仪工作指南 揭罕等译 测绘出版社 1957年。

致謝：此項研究曾得到方心东同志不少重要的帮助，仪器制造主要由我校物理系玻璃室負責，特此深表謝意。

О изучении и использовании жидковысотомера а микродавления

Ли Цзянь-сянь Чен Хуа-цэй

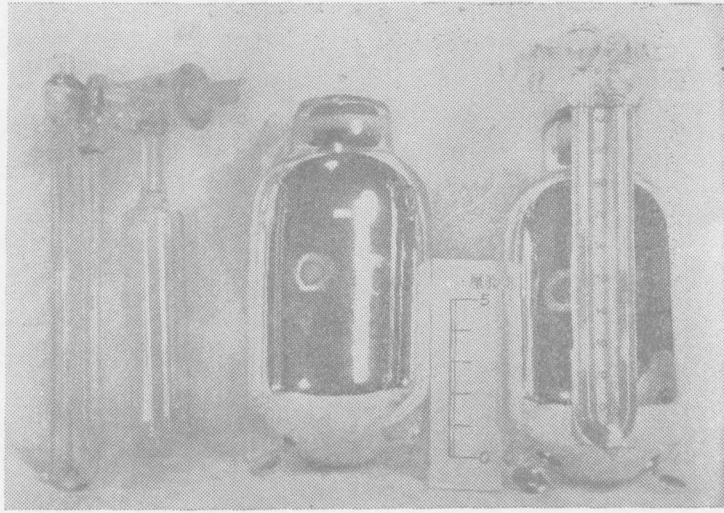
Резюме

При полевых исследованиях получись точные цифровые данные высот часто вообще невозможно из-за отсутствия удобного и точного высотомера (например, показательные превышения обыкновенного высотомера больше), это значительно влияет на ход и качество работы. Для разрешения данного вопроса, изучив принцип дифференциального барометра, предложенного Д.И. Менделеевым, и высотомер, созданный предыдущими, основанный на этом принципе, мы усовершенствовали его устройство и создали удобный и точный высотомер.

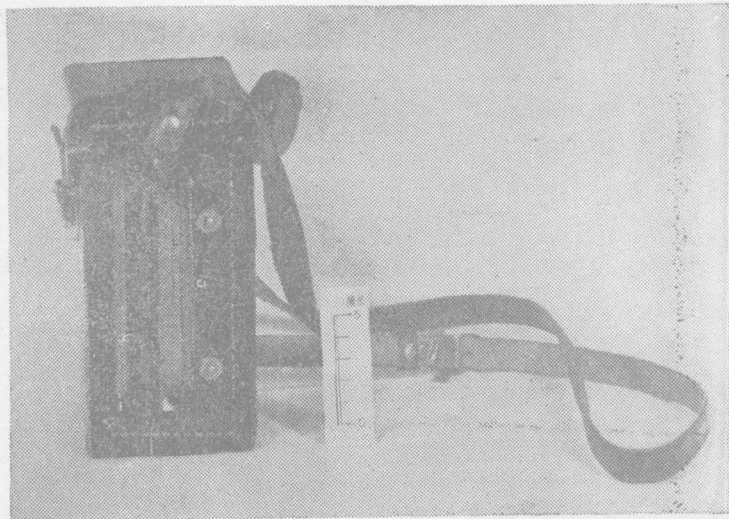
Высотомерам можно в один раз определять относительные превышения в пределах $\pm 120\text{М}$, с точностью в $\pm 0.5\text{М}$, отдельно в $\pm 0.8\text{М}$. Им пользуются для определения высоты очень удобно и быстро. Например, при измерении рельефа с относительной высотой 120М (обратно 2 раза) только нужно 20 минут и более, для пересчета - несколько мин.

Высотомер легкий и маленький, его размер $9.3 \times 7.4 \times 16\text{см}$, вес 625 г.

Устройство высотомера простое, его делают легко и экономно, цена одного не превышает 10 юан.



照片1 仪器部件及装置（左为空瓶、三通活塞及曲管，中间为杜瓦瓶，右方为空瓶装置于杜瓦瓶中后的情况）



照片2 微压液体测高仪（正面为读数窗及温度计，右上方为三通活塞的开关）

附表1 分划值表

表中：橫行两个气压級之間的数字是气压的气压級尾差；
縱行两个气压級之間的数字是气温的气压級尾差。

气温 气压 增 加倍 数	720		730		740		750		760		770		780	气压 增 加倍 数
	10.684		10.635		10.585		10.537		10.488		10.440		10.393	
- 2°	1.035 8	9	1.026 7	9	1.017 7	9	1.008 7	9	0.999 7	9	0.990 8	8	0.982 7	- 2°
0°	1.043 7	10	1.033 8	9	1.024 8	9	1.015 7	9	1.006 8	8	0.998 7	9	0.989 8	0°
+ 2°	1.050 8	9	1.041 7	9	1.032 7	10	1.022 8	8	1.014 7	9	1.005 7	8	0.997 7	+ 2°
+ 4°	1.058 8	10	1.048 8	9	1.039 8	9	1.030 7	9	1.021 8	9	1.012 8	8	1.004 7	+ 4°
+ 6°	1.066 8	10	1.056 7	9	1.047 7	10	1.037 8	8	1.029 6	9	1.020 7	9	1.011 8	+ 6°
+ 8°	1.074 7	11	1.063 8	9	1.054 8	9	1.045 7	10	1.035 8	8	1.027 7	8	1.019 7	+ 8°
+ 10°	1.081 8	10	1.071 8	9	1.062 7	10	1.052 8	9	1.043 8	9	1.034 8	8	1.026 7	+ 10°
+ 12°	1.089 7	10	1.079 7	10	1.069 8	9	1.060 7	9	1.051 7	9	1.042 7	9	1.033 7	+ 12°
+ 14°	1.096 8	10	1.086 8	9	1.077 8	10	1.067 7	9	1.058 7	9	1.049 8	9	1.040 8	+ 14°
+ 16°	1.104 8	10	1.094 7	9	1.085 6	11	1.074 8	9	1.065 8	8	1.057 6	9	1.048 7	+ 16°
+ 18°	1.112 7	11	1.101 8	10	1.091 8	9	1.082 7	9	1.073 7	10	1.063 8	8	1.055 7	+ 18°
+ 20°	1.119 8	10	1.109 7	10	1.099 7	10	1.089 8	9	1.080 8	9	1.071 8	9	1.062 7	+ 20°
+ 22°	1.127 7	9	1.116 8	10	1.106 8	9	1.097 8	9	1.088 7	9	1.079 6	10	1.069 8	+ 22°
+ 24°	1.134 8	10	1.124 8	10	1.114 7	9	1.105 6	10	1.095 7	10	1.085 8	8	1.077 6	+ 24°
+ 26°	1.142 7	10	1.132 8	9	1.121 8	10	1.111 8	9	1.102 8	9	1.093 8	10	1.083 8	+ 26°
+ 28°	1.149 9	9	1.140 7	11	1.129 8	10	1.119 8	9	1.110 7	9	1.101 6	10	1.091 7	+ 28°
+ 30°	1.158 7	11	1.147 8	10	1.137 7	10	1.127 7	10	1.117 7	10	1.107 8	9	1.098 8	+ 30°
+ 32°	1.165 8	10	1.155 7	11	1.144 8	10	1.134 8	10	1.124 8	9	1.115 8	9	1.106 7	+ 32°
+ 34°	1.173 7	11	1.162 8	10	1.152 7	10	1.142 7	10	1.132 7	9	1.123 6	10	1.113 7	+ 34°
+ 36°	1.180 8	10	1.170 7	11	1.159 8	10	1.149 7	10	1.139 7	10	1.129 8	9	1.120 8	+ 36°
+ 38°	1.188 7	11	1.177 8	10	1.167 7	11	1.156 8	10	1.146 8	9	1.137 7	9	1.128 6	+ 38°
+ 40°	1.195	10	1.185	11	1.174	10	1.164	10	1.154	10	1.144	10	1.134	+ 40°