第 27 卷　第 5 期　　地　震　学　报　　Vol. 27, No. 5
2005 年 9 月　(575～579)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Sep., 2005

文章编号： 0253-3782(2005)05-0575-05

研究简报

水平摆倾斜仪标定器的胀盒研究*

张志中　朱　虎　吴　健

（中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所）

关键词　胀盒标定器　汞　胀盒常数　无毒重液

中图分类号： P315.62　　**文献标识码：** A

水平摆用作地倾斜测量后，它的标定一直是人们关注的问题. 如果不能正确地给出它的格值常数，那么，观测的结果就没有实用意义. 从上世纪 20 年代以来，就有不少学者探索对它的标定问题，直到 1962 年 Verbaandert(1962)发表他研制的胀盒—水银杯标定器后，这问题才获满意的解决. 后又经改进，更为完善，使 V-M 石英水平摆倾斜仪在世界各地的观测都取得极大的成功(Melchior，1966，1978). 我们在 20 世纪 70 年代初试制成石英水平摆倾斜仪，同时也制成了胀盒标定器. 后又经多次改进，取得了满意的结果(朱虎，冯海英，1980). 石英水平摆倾斜仪能取得良好的观测结果，与这种水平摆的优良性能有关，也与正确的标定有关. 其中优良的胀盒起着重要作用. 胀盒是标定器的关键部件，它直接影响标定器的性能.

本文介绍了胀盒原理，对胀盒有关常数的测定及为解决环境污染用无毒重液代替汞等问题.

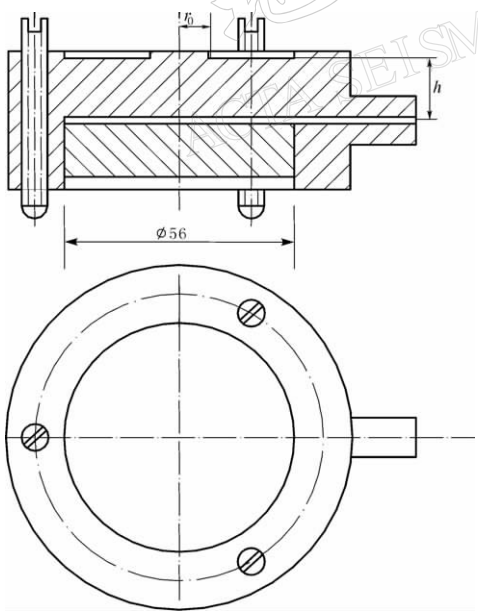

图 1　胀盒

1　水银胀盒原理及技术要求

水银胀盒像一只厚壁气压计(图 1)，用一根几米长的尼龙软管把胀盒腔体与水银杯连接起来，升高或降低水银杯，胀盒腔体内产生不同的压力，胀盒平膜产生弹性变形. 周边固支有中心硬块的平膜，在均布流体压力作用下的中心挠度(袁希光，1986)为

$$f=\frac{3(1-\mu^2)PR^4}{16Eh^3}\left(1-\frac{r_0^4}{R^4}+4\frac{r_0^2}{R^2}\ln\frac{r_0}{R}\right)$$

式中，f 为平膜的中心挠度，P 为均布压力，h 为膜片厚度，R 为膜片半径，r_0 为中心硬块半径，μ 为膜片材料的泊松比，E 为膜片材料的弹性膜量. 应指出，该公式只能用于水平放置的胀盒，这时膜片受的是均布压力. 标定伸缩仪的胀盒是垂直放置的，平膜上下的压力不同，不能用这个公式.

用作标定器的胀盒材料，要求弹性非常好，没有永久性变形；不能与传压介质水银发生化学变化；制

* 中国地震局地球物理研究所论著 05AC1025.
2004-06-20 收到初稿，2005-04-13 收到修改稿，2005-05-12 决定采用.

http://www.dizhenxb.org.cn

作的胀盒中不能用可塑性垫片密封.

2 水银胀盒材料和加工工艺

镍铬钛合金不锈钢弹性好，永久性变形小，弹性系数随温度的变化是所有金属合金中最小的，故又称为“恒弹性钢”. 它的防锈性能非常好，不受水银的腐蚀，我们用它制作胀盒，效果非常好. 紫铜是弹性差、在压力作用下产生塑性变形的金属，它的防锈性差，受水银腐蚀，因此泄漏水银，污染环境，所以紫铜材料不能用于水银胀盒.

为了使胀盒中留有空腔，采用两块合金不锈钢组成. 我们用保护气体焊或在真空中用电子束焊，把它烧焊成一体，然后进行时效处理，消除残余应力；再注高压气体检漏，合格后方能测定胀盒常数，交付使用. 用螺栓固结上下两块金属，中间用密封垫片制成的胀盒，垫片有塑性变形. 标定器所需胀盒的中心挠度只有零点几微米，而垫片的变形往往高达几十微米，这种胀盒不能给出正确的变形量.

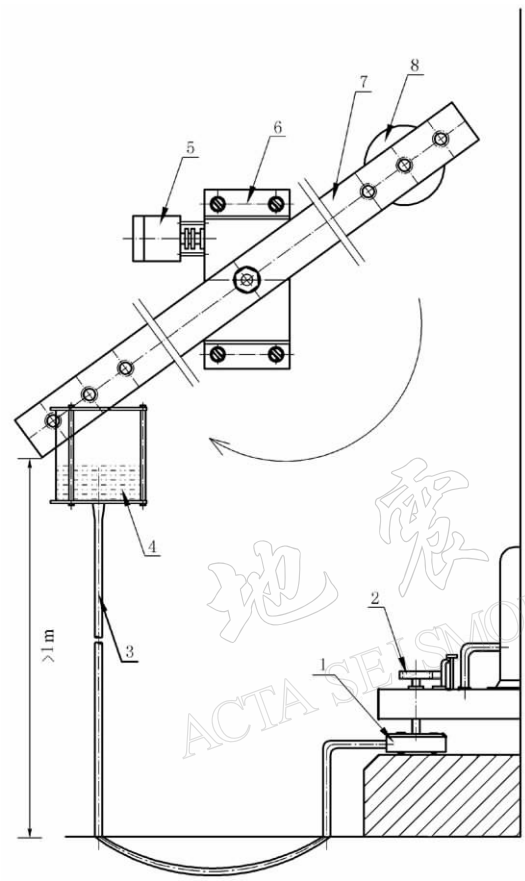

图 2 倾斜仪标定装置(胀盒—水银杯)

1. 胀盒；2. 旁移螺钉 V_2；3. 塑料管；4. 水银杯；5. 电动机；6. 变速箱；7. 转梁；8. 平衡锤

3 水银胀盒常数及有关性能的测定

1) 胀盒中心挠度 Δf 与水银杯高差 ΔH 之比即胀盒常数. $\alpha = \Delta f/\Delta H$. 胀盒中心挠度用接触式光干涉仪测定，干涉仪的光波长 $\lambda = 0.545$ μm 的单色光，干涉仪的格值为 0.1 μm/ 格，分辨到 0.1 格，即 0.01 μm. 测定装置如图 2 所示. 水平摆的 V_2 脚螺钉安放在胀盒中心硬块的凹槽内，胀盒上负有水平摆的部分重量(后面还将讨论胀盒的负重问题). 用接触式干涉测量 V_2 脚螺钉上端平面随 H 升降的位移，这平面要求加工为镜面光洁度. 安装时水银杯的最低位置要比胀盒高 1 m 以上，使胀盒腔体内有一定的预压力.

2) 胀盒常数的线性度. 线性度也称非线性. 这里指随着水银杯(H)的逐步升高(正向)或降低(反向)的垂直距离，与相应的胀盒中心挠度(f)是否呈线性关系. 只有两者是线性的，才能放心使用该胀盒. 其测定结果见表 1.

据表 1 数据，计算出各自的端点线性度：106 号胀盒的端点线性度为－0.606%～1.06%；152 号胀盒的端点线性度为－0.740%～1.11%.

我们测定过的数百只胀盒线性度都很好，所以胀盒常数的线性度是没有问题的.

3) 图中横梁是悬挂水银杯并通过横梁的旋转升降水银杯，产生 ΔH.

4) 胀盒常数的测定. H 从 0～200 cm～0 升降并反复测 Δf，一般在 18 次以上(表 2)，求平均值得到这只胀盒的胀盒常数 α 值.

5) 不同负载的胀盒常数. 如果水银杯的最低位置比胀盒高 1 m，胀盒空腔内压力就有 1.33×10^6 Pa. ϕ56 的膜片，其鼓出力可达 33 kg，在测定胀盒常数时，把水平摆架在胀盒上，水平摆自重 2.3 kg，胀盒上

http://www.dizhenxb.org.cn

负有水平摆的部分重量，这负载力很重要，如果没有负载力顶紧，所测的常数就有跳动，准确性差．我们还在仪器上逐次加上重块，最多加到 19 kg，不同负重对常数没有影响．

表 1　水银杯(H)的升降与相应胀盒中心挠度(f)的关系

106 号正向		106 号反向		152 号正向		152 号反向	
H/cm	f/格	H/cm	f/格	H/cm	f/格	H/cm	f/格
0	0	200	13.2	0	0	200	13.5
20	1.3	180	11.8	20	1.5	180	12.2
40	2.6	160	10.5	40	2.8	160	10.9
60	3.9	140	9.2	60	4.2	140	9.6
80	5.3	120	7.9	80	5.5	120	8.1
100	6.6	100	6.7	100	6.7	100	6.7
120	7.9	80	5.4	120	8.0	80	5.4
140	9.3	60	4.0	140	9.5	60	4.1
160	10.6	40	2.7	160	10.8	40	2.7
180	11.9	20	1.4	180	12.1	20	1.4
200	13.2	0	0	200	13.5	0	0

注：f/格的单位为 0.1 μm.

表 2　胀盒常数的多次测定

测量次序	58 号胀盒 $\alpha/10^{-6}$	470 号胀盒 $\alpha/10^{-6}$	32 号胀盒（负重的胀盒常数）	
			负重/kg	胀盒常数 $\alpha/10^{-6}$
1	0.655	0.950	0	0.669 3±0.013
2	0.655	0.950	2.30	0.667±0.004 0
3	0.655	0.945	3.15	0.665 6±0.002 9
4	0.655	0.945	4.10	0.664 3±0.003 1
5	0.645	0.945	4.80	0.668 1±0.004 2
6	0.645	0.945	5.70	0.665 6±0.003 1
7	0.650	0.940	9.70	0.666 3±0.003 5
8	0.650	0.945	11.5	0.667 1±0.003 0
9	0.650	0.945	19.0	0.665 8±0.002 9
10	0.650	0.945		
11	0.650	0.945		
12	0.650	0.945		
13	0.650	0.945		
14	0.650	0.945		
15	0.650	0.945		
16	0.650	0.945		
17	0.650	0.940		
18	0.650	0.945		
19	0.650	$\alpha=(0.945\pm0.002\,4)\times10^{-6}$		
20	0.650			
	$\alpha=(0.650\,5\pm0.002\,7)\times10^{-6}$			

6）使用多年后胀盒常数的复测．几只使用多年后的胀盒复测结果如下：

75 号胀盒　　1999 年 2 月 17 日测：$\alpha=(0.857\,2\pm0.004)\times10^{-6}$；

　　2000 年 5 月 10 日复测：$\alpha=(0.790\,3\pm0.003)\times10^{-6}$.

76 号胀盒　　1998 年 3 月 20 日测：$\alpha=(0.869\,0\pm0.004)\times10^{-6}$；

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA

1998 年 6 月 21 日复测：$\alpha=(0.845\ 0\pm0.004)\times10^{-6}$；

2000 年 3 月 23 日复测：$\alpha=(0.825\ 0\pm0.003)\times10^{-6}$.

86 号胀盒　2000 年 5 月 12 日测：$\alpha=(0.678\ 3\pm0.003)\times10^{-6}$；

2002 年 3 月 21 日复测：$\alpha=(0.652\ 5\pm0.004)\times10^{-6}$.

从以上结果看出，使用多年后胀盒常数会变化，其量虽大小不一，但总的趋势 α 值是在变小. 陕西乾陵台站也发现这种情况(李平等，1989). 根据胀盒中心挠度公式，使用多年后平膜的厚度 h，半径 R、r_0 没有改变，可能是胀盒材料的弹性模量 E、泊松比 μ 变了. 不管怎么说，α 的变化是存在的，故 α 值需要复测. 复测最好不中断倾斜仪的正常记录，所以把胀盒拿回实验室复测的办法不可取. 研制一套便携式胀盒常数测定设备很有必要，可到台站巡回检测. 位移可用激光干涉仪测量，能提高 α 值一位有效数字.

4 无汞胀盒

汞在室温下即能蒸发，温度越高蒸发越快. 汞进入人体后与蛋白质的源巯基相结合，使细胞酶的作用受到抑制，影响了细胞的正常新陈代谢，而引起中毒(上海第一医学院，1972). 多年来，我们对胀盒的材料、加工工艺等做了大量的研究工作，所制成的 500 多个的胀盒没有一只发生渗漏，但在安装过程中导管接头处包扎不严，有的地方导管被老鼠咬破等都曾造成汞泄漏. 水平摆倾斜仪是安装在山洞里的，仪器室外面还有几道密封门，以防止空气流通造成温度变化. 故一旦发生汞泄漏事故，汞蒸气便很难排除，易造成观测人员中毒. 因此，研制一种不用汞的胀盒标定装置是极为必要的(张志中，2002).

在公式(1)中，均布压力 $P=\rho H$. 其中，ρ 为传压介质的密度，H 为传压液体的高度. 故式(1)可写成

$$f=\frac{3(1-\mu^2)}{16}\frac{\rho HR^4}{Eh^3}\left[1-\frac{r_0^4}{R^4}+4\frac{r_0^2}{R^2}\ln\frac{r_0}{R}\right] \tag{2}$$

一般液体的密度都比较小，液体密度为 3，算是很大的了(岩石的密度约为 2.7)，但与密度为 13.6 的水银相比仍小 4.5 倍多. 从式(2)可知：适当改变胀盒的几何尺寸可以补偿传压介质密度 ρ 的不足. 如 ρ 为 3，加大平膜的半径 R 或减小平膜的厚度 h，仍可获得所需的中心挠度 f. 胀盒不宜做得太大，不能把平膜外径做得很大，减小平膜的厚度比较适宜. 经计算，我们设计了密度为 3 而常数约为 0.5×10^{-6} 的胀盒. 最初用密度为 3 的二碘甲烷，经测试能达到预期效果，但二碘甲烷也有毒，且是致癌物质，故不能正式使用，后来改用密度为 3 的无毒重液，我们共做了 4 只胀盒，测试结果如下：

W10 胀盒：$\alpha=0.625\times10^{-6}$；W11 胀盒：$\alpha=0.575\times10^{-6}$；W13 胀盒：$\alpha=0.625\times10^{-6}$；W14 胀盒：$\alpha=0.625\times10^{-6}$.

表 3　无汞胀盒线性度测定结果

W10 胀盒		W11 胀盒	
H/cm	f/格	H/cm	f/格
0	0	0	0
20	1.3	20	1.2
40	2.5	40	2.3
60	3.8	60	3.4
80	5.0	80	4.6
100	6.2	100	5.7
120	7.5	120	6.9
140	8.7	140	8.1
160	10.0	160	9.2
180	11.2	180	10.5
200	12.3	200	11.5

注：f/格的单位为 0.1 μm.

表 4　无汞胀盒重复测量一致性

测量次序	W10 胀盒 $\alpha/10^{-6}$	W11 胀盒 $\alpha/10^{-6}$
1	0.624	0.575
2	0.625	0.576
3	0.626	0.575
4	0.625	0.575
5	0.624	0.574
6	0.625	0.575
7	0.626	0.576
8	0.626	0.575
9	0.625	0.574
10	0.625	0.575
	$\alpha=(0.6251\pm0.0007)\times10^{-6}$	$\alpha=(0.5750\pm0.0006)\times10^{-6}$

http://www.dizhenxb.org.cn

无汞胀盒线性度测定的结果见表 3. 经计算 W10 胀盒的端点线性度为－0.4％～0.4％；W11 胀盒的端点线性度为－0.4％～1.3％.

无汞胀盒常数 α 值测定的结果见表 4.

从以上初步结果可以看出，无毒重液胀盒无论是线性度、重复测量的一致性都比较好，它完全可以代替水银胀盒，解决汞的污染问题. 使用这种标定器能安全、可靠、正确标定仪器常数，为用水平摆倾斜仪研究地面运动提供有效数据.

5　结语

倾斜仪格值常数的标定很重要. 如果不能正确给出仪器的格值，则观测结果就没有实用意义. 给出一个已知位移值作用在仪器上，测定在此情况下仪器输出信号，称为直接标定法(朱虎，1993). 给出的已知值必须非常准确，在水平摆式倾斜仪的标定中，只有胀盒能做到这点，但我们应注意：

1) 在选用胀盒材料，加工工艺常数测定等方面都做得很严格、合理，才能制成合格的胀盒标定器.

2) 使用多年的胀盒，胀盒常数会变化，需定期复测，才能保证标定出倾斜仪的格值是可以信赖的. 研制一台便携式胀盒常数测定装置，定期到台站巡回检测胀盒常数很有必要.

3) 胀盒标定器的传压介质汞有毒，即使胀盒本身不渗漏，台站因老鼠咬破尼龙软管、操作中不小心而泄漏水银的事故时有发生. 用无毒重液代替水银制成的无汞胀盒标定器，是解决汞污染环境的好办法.

参　考　文　献

李平，陈德福，冯留意. 1989. 关于倾斜仪格值常数标定的初步研究[A]. 见：地震监测与预报方法清理成果汇编，重力、地倾斜、地应力分册[C]. 北京：地震出版社，145～151

上海第一医学院主编. 1972. 除害与卫生职业病的防治[M]. 上海：上海人民出版社，157～158

袁希光. 1986. 传感器手册[M]. 北京：国防工业出版社，102～108

张志中，朱虎. 2002. 水平摆倾斜仪的无汞胀盒标定装置的研究[A]. 见：中国地球物理学会编. 中国地球物理学会年刊[C]. 北京：地震出版社，203

朱虎，冯海英. 1980. 水平摆式倾斜仪的格值常数测定[J]. 地震学报，**2**(3)：332～341

朱虎. 1993. 定点形变的标定问题[J]. 地震地磁观测与研究，**14**(1)：33～39

Melchior P. 1966. *The Earth Tides*[M]. Paliar：Pergamon Press，126～189

Melchior P. 1978. *The Tides of the Planet Earth*[M]. Paliar：Pergamon Press，215～256

Verbaandert J. 1962. L′etalonage des pandules Horigontaux[J]. *Bollettno Di Geofisica*，**4**(16)：419～446

RESEARCH ON BULGING PLATE SCALER FOR HORIZONTAL PENDULUM TILTMETER

Zhang Zhizhong　Zhu Hu　Wu Jian

(*Institute of Geophysic*，*China Earthquake Administration*，*Beijing* 100081，*China*)

Key words：bulging plate scaler；mercury；bulging plate constants；innocuous high-density liquid

http://www.dizhenxb.org.cn