

振动传感器的校准

1101

中国计量科学研究院第二力学实验室

1975.3

目 录

前 言	(1)
一、校准的内容与要求	(4)
二、校准用振动台	(13)
三、光干涉法	(24)
四、比较法	(35)
五、互易法	(43)
六、横向灵敏度的校准	(49)
七、传感器的线性校准	(60)
八、常用公式、图表等	(65)
九、主要参考文献	(79)

前 言

在毛主席无产阶级革命路线指引下,无产阶级文化大革命取得了伟大胜利,批林批孔运动正在普及、深入、持久地向前发展,最近全国人民学习毛主席关于理论问题的重要指示更加意气风发地进行社会主义革命和建设,推动着我国工农业生产、国防建设、科学研究事业的迅速发展,也对振动的计量、测试和控制提出了愈来愈多和愈来愈高的要求。许多单位遵照伟大领袖毛主席“独立自主,自力更生”的教导,对振动测量仪器、试验设备、校准方法等进行大量的研究工作,生产试制了大量的测振仪器和试验设备,计量部门也初步在振动、冲击方面建立了一批常用的基标准,使我国的振动计量和测试工作,从无到有,从小到大,为社会主义建设初步作出贡献。

目前在国民经济的各部门,无论是国防建设上,还是工农业生产当中,都大量应用各种测振仪器,监视所用设备在工作过程当中的各种振动参数,保证设备的正常运行,或者试验的准确成功。使用着各种振动、冲击试验设备,对产品进行各种必要的试验。因为所测对象的要求不同,所以测振仪器也是五花八门,各种各样。如果按其所测振动参数来分,可分为位移式、速度式、加速度式。如果按其结构原理来分,可分为压电式、压阻式、磁电式、应变式、电感式、电容式、光电式、伺服式等。如果按其测量方式来分,又可分为接触式、非接触式等。在这当中应用比较多的是压电式和磁电式。压电式的是利用压电晶体的压电效应,使其输出的电量(电荷或电压)与所感受的加速度成正比。磁电式的是利用线圈在恒定磁场里相对运动,切割磁力线,使产生与速度成正比的电信号。如果再经过微积分网络,还可测量振动的加速度或位移。因为各种振动试验的目的不同,所用振动台也不同,一般有机械式、电磁式、液压式几种。进行冲击试验的设备称为冲击台,可用来模拟实际过程的冲击过载情况。本资料以讨论压电式加速度计的校准为主。

为了保证产品的质量,在出厂前都必须按照规范对产品进行振动冲击试验,这也叫做例行试验,这就可以及早地发现和解决产品所存在的问题,以免在使用当中造成不良的结果。一般都是在振动台或冲击台上配合必须的测振仪器进行这项工作。根据不同的要求,振动试验也分为不同种类。如果按其实验目的来分,可分为振动稳定性试验、振动强度试验、耐振性试验等。振动稳定性试验的目的在于考察产品在规定的振动频段内有无机械共振发生,或在共振的条件下工作的可靠性。一般规定从低频到高频,再由高频到低频,反复变频振动,其频率变化规律有对数型和直线型两种。振动强度试验的目的在于考察产品的耐振极限强度,有的也叫做破坏性试验,一直振到试件不能正常工作为止,看其能承受多大的振动量。耐振性试验的目的在于考察产品在振动条件下工作时,机电参数发生了多少不可逆的变化,一般的规范里都规定了其许可的变化范围,给出了耐振试验时的振动参数和时间。如果按照试验特性分,又可分为正弦频率扫描试验、宽带无规振动试验、扫描无规振动试验。扫描无规振动试验也叫做扫描窄带无规振动试验。

随着社会主义建设事业的迅速发展,目前在工农业生产、国防建设、科学研究中,振动测量、试验、控制等已成为一个不可缺少的环节。下面就振动计量在国民经济各部门中的应用举例分叙如下:

在航空及宇宙飞行等工业中,随着飞行速度的提高,就要求各种飞行器的重量要尽可

能轻，结构强度要高，推力要大，因此振动测试就显得尤其重要。据报导，国外在宇宙飞行的事故中，有40%是由于振动所造成的。除了在飞行之前要进行各种振动测试之外，在飞行中也要随时监视其振动量的大小，有的测振仪器还必须在一定的温度下工作。现在发展的是采用大推力的振动台和多台并机方案进行整机试验，以便更好地模拟使用时的情况。美帝直到目前为止还对我国禁运大推力的振动试验设备，可见，在航空工业领域内振动试验是极其重要的。有的飞行器要承受大加速度值的冲击载荷，因此在地面上必须进行这方面的试验。就是一般的民航飞机，也要经常测量各部位振动量的大小，在振动量超过一定的允许值时，便不能起飞，以保证乘客和货物的安全。

对于各种舰船来说，主要的是低频振动和冲击试验，只有在地面上在实验室里用各种振动试验设备进行模拟试验，验证各种设备能够正常工作之后，才能正式投入使用，否则就会造成严重的后果。对于各种武器来说也必须按照其工作条件进行振动、冲击试验，以保证在正常使用时准确无误。

在一般工业、科学研究中需要进行振动测试的例子也是不胜枚举的。例如：需要用高灵敏度、非接触式的传感器及测量仪器才能测出精密机床主轴的微小偏摆量。大马力的内燃机车必须进行动平衡试验，同时测量其振动量的大小，以消除由于不平衡引起的振动。又如载重汽车原来是用在各种路面上行驶十万公里的办法来进行性能试验，现在用在振动台上进行模拟试验的办法，可大大地节省人力、物力和时间。对各种精密加工机械及测量仪器来说，必须采取隔振措施，这就需要对安装这种设备的车间进行振动测量，测出在各种情况下地面的振幅值和频率，针对当地的情况采取措施，以求使安装机器的隔振地基上能达到机器正常工作所许可的振动量，例如刻光栅机、复印制板机、单晶炉等设备都有这种要求。各种无线电电子仪器、电子计算机等由于振动的存在就会影响电子元件的正常工作，增加线路的故障率，使其在振动的环境下或在运输之后不能正常工作。因此必须在出厂前在振动台、冲击台上按照规范中规定的条件进行试验，如果在经过规定的例行试验之后，仪器仍能正常工作这才算合格，才能正式出厂。在电力工业中，发电机、汽轮机、锅炉等在工作时会伴随着产生一定的振动，因此必须用测振仪表随时监视其振动量的大小，在超负荷使用时，尤其要注意这个问题，使其振动量不超过规定的额定值才能保证安全生产。例如七三年日本就发生过三十万千瓦双水内冷发电机组因为振动过大而使机毁人亡的沉痛教训。遍布全国各地的地震台站的地震仪一直是在连续地工作着，以便记录地面振动量的大小，做好地震预报工作。地震仪还可用来测量由于核爆炸所引起的地面震动。各种抗震结构物的试验当中也是与振动测试分不开的。在建筑工程方面一般多要求低频振动测量，如高层建筑物上都装有地震仪，以便随时记录地震、台风等对它的影响。人防工事也必须进行抗振动、抗冲击能力的测量。地下铁道、桥梁、水坝等建筑物也必须经常测量振动对它的影响，以保证它们能坚固耐久，安全可靠。在机械加工工业中，目前大力发展的高速空气锻锤就是有效地利用机械冲击能量的一个极为明显的例子，使用这种锻锤既节省时间，又节省原材料，形状很复杂的另件都可以一次锻打成型。例如汽轮机的叶片过去用机床加工，既浪费时间和材料，又破坏了金属的维纤组织，使其机械强度下降，现在用空气锤直接锻打成型就保持了材料的纤维结构。因为这种锻锤在锻打时能量很大，因此在设计时就必须由模拟实验求得各部位冲击加速度的大小，使结构的强度设计做得既合理又可靠，这当中就提出了一系列的振动、冲击测量问题。在原子反应堆中也必须用测振仪器测出各部件在工作时振动加速度的大小，这就要求解决在高温、放射性幅射影响下的测振问题。又如在石油工业中，目前广泛采用爆炸探矿的办法，也就是用低频

测振仪器测出在炸药爆炸后应力波的传播情况，从而确定矿床的位置形状等，它要求同时测量很多点，这也就给振动测量提出了新问题。

上述的例子还可以举出很多，但仅就这几个片面我们就可以看出：各部门所制定的产品规范必须是符合实际情况的，在进行这些振动试验、振动测量时，所使用的试验测量仪器必须是准确的，只有这样才能圆满地完成任务达到预期的效果。因此在进行这些试验之前，必须先对所使用的仪器根据使用中的要求进行振动计量，确定其精度，只有这样才能做到心中有数，使各种测试工作准确可靠，才能对所测得的结果做出正确的判断。

为了保证振动试验的可靠性及振动测试的准确性，要求传感器的灵敏度要尽可能稳定；频率响应要平直，以适应所测振动的频率范围；横向灵敏度要尽可能小；线性度要大到足以适应所测振动的要求。对于在一定的温度、声场、磁场、瞬变温度、底座应变等条件下工作的传感器来说，还必须知道在这些条件下它们的工作情况。由于上述各参数总是在随时间发生变化，因此精确的校准工作就显得十分重要，在进行任何试验、测试之前必须首先做好这项工作。在对振动传感器进行校准时，只有根据使用时要求的精度和范围，选择合适的校准方法，才能符合多、快、好、省的原则。为了满足各单位校准振动传感器的需要，进一步交流振动计量技术，推动振动计量工作的开展，我室振动组的同志根据工作中的体会，编译了“振动传感器的校准”这份资料，以供从事这方面工作的同志们参考。

本资料首先对振动计量在国民经济中的作用进行了扼要的叙述，其后分别对校准用振动台、光干涉法、比较法、互易法、横向灵敏度的校准方法进行了探讨，力求反映当前国内外的技术水平。在最后收集了常用的公式和图表，以便同志们在工作中查用。

由于我们思想水平不高，工作做得不够，对国内外情况了解的不全面，又限于理论水平和缺乏实践经验，必然会存在不少缺点和错误之处，希望各有关单位的同志给以批评指正，以便我们进一步修改。

(本资料由郭营川、林劲、董显铨同志执笔编译)

中国计量科学研究院第二力学室 一九七五年三月

一、校准的内容与要求

使用冲击、振动传感器进行测量时,为保证一定的测量精度,尽可能免除不必要的误差,为此,就要确定传感器及其有关电子仪器的性能,就必须对传感器进行校准以及必要的环境实验及物理参数的测试。

这种校准工作,使传感器生产者能正确标明其产品的性能;是使用者正确选择测量用的传感器的依据。

目前测试中可能遇到的典型参数范围是:频率从零到10,000赫;加速度从0.001g到10,000g;速度是从0.003米/秒到15米/秒。当然,一次测试所遇到的只是一定范围大小的参数,而每种传感器所测参数范围也是有限的,传感方式是一定的,机械适用性也是有范围的,而对各种环境的敏感程度也不同,必须根据传感器校准结果选择合适的来使用。

(一) 校准的内容

目前国外在传感器的校准、环境实验及物理参数测试方面开展了许多项目的工作,主要的项目可分三大类,计有:

1. 工作特性: 这里包括

①灵敏度

②频率响应

③谐振频率

④幅值线性

⑤横向灵敏度

⑥温度响应

⑦电阻抗(电容量、绝缘电阻)

2. 环境特性

①密封试验

②极限加速度

③极限温度

④应变灵敏度

⑤特殊环境(磁灵敏度、瞬态温度效应、声灵敏度、电缆效应)

3. 物理参数

①尺寸

②重量

③动态质量

④极性

由于压电加速度计具有重量轻、尺寸小、可靠性高而且能自己产生电荷等优点,目前得到广泛应用。

对压电式加速度计来说,上述校准项目中的灵敏度、频率响应、电容量、绝缘电阻四项为基本的校准项目,其余的为辅助的校准项目。

传感器在出厂前,基本的校准与实验工作由制造者来作,以后定期进行重复校准,校准周期视传感器及使用情况而定,如标准加速度计以及在严格控制的实验室条件下使用的传感器,其校准周期为一年,对于使用较粗放的传感器,特别是经受到传感器所能承受的极限环境后,校准周期应为六个月到三个月。有的实验室每当在重要实验后都要重复基本的校准,这是因为传感器的任何故障都会影响实验结果的解释,如果传感器经受到的环境超过极限环境条件后,应立即进行基本的校准。

辅助的基本校准项目一般只对制造时所取的样品来做。此外,怀疑传感器是否失灵或其

遭受到超过规定的极限环境条件后,也要做辅助项目的校准,如果由基本的或辅助的校准看出传感器性能变化过大,传感器就不能用了,各种项目的允许变化量在下节分别叙述。

进行传感器工作性能校准时,有以下几点是共同要注意的:

①为获得较高的精度,校准时应将传感器及其配用的滤波器、前置放大器和连接电缆一起校准。当然,使用电荷放大器时,一般对带不带使用时的电缆不强求,而使用电压放大器时,就要求带使用时的电缆。

②校准时应当按照传感器制造者规定的安装条件进行安装,安装条件包括使用什么样的螺栓,安装面的平面度要求以及一定的安装力矩,对于高频及短脉冲的冲击校准尚需在传感器及安装面之间加一薄油层或薄胶层,以便有较大的接触刚度。

安装力矩不同,可使灵敏度改变1%甚至更多,接触刚度不同,使传感器谐振频率有较大的变化。

另外,要防止用油或其它脏物污染插座。

(二) 加速度计工作特性的校准

1. 灵敏度校准

确定灵敏度是传感器的一项基本校准工作,无此便无法使用加速度计,只有知道灵敏度才可由此计算被测加速度。另外,根据灵敏度确定前置放大器所用增益的范围。

目前国外一般在单频下(如100赫)标定灵敏度,而在加速度不大于10g的情况下进行,对我国市电是50赫的频率来说,显然在50赫及其高次谐波的频率下校准是不适宜的。

由于压电加速度计中压电陶瓷的老化现象等原因,一般传感器要定期进行灵敏度校准。国外目前标定灵敏度的最精确方法是互易法,其精度达 $\pm 0.5\%$ 。

2. 频率响应校准

频响校准一般来说有二个目的:其一是确定传感器所能使用的频率范围,正常的压电加速度计在低于其谐振频率五分之一的频段内,其灵敏度偏差一般在 $\pm 5\%$ 以内,而在低于其谐振频率三分之一的频段内,其灵敏度偏差一般在 $\pm 10\%$ 以内;其二是检查加速度计有无异常响应,正常加速度计的响应如图1-1(a)所示,而不正常的响应如图1-1(b), (c), (d), (e)所示。

(b)中7,300赫的小谐振峰,可能是加速度计外壳引起的;(d)中在8,000赫及9,400赫

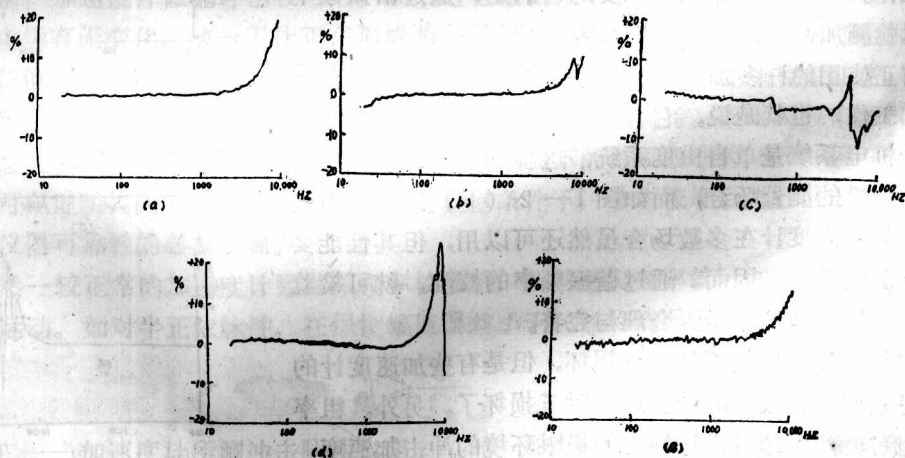


图 1-1

之间有一小谐振峰；小尺寸的加速度计会出现(c)中所表示的这种异常响应；安装螺栓损坏了的加速度计的响应会象(e)那样。特别是小谐振峰虽然对于冲击测量影响不大，但是对于高频测量就是重要的了，因其灵敏度上升了。小谐振峰一般是传感器内局部谐振引起的，如内部导线谐振、插头谐振、外壳谐振或电缆效应。通过日常的频响校准就可将这种响应异常的加速度计挑出来。

频响校准用正弦激振法进行，在规定的频率范围内至少要在七个频率上进行，每个频率的信噪比要大于10，对于重量大于56克，或者用于多轴测量的传感器（如三向加速度计），一般频响校准只进行到2,000赫，换句话说，2,000赫以上的频响校准只限对小于56克或单轴测量用的传感器进行。

频响校准除七个频率点外，尚需进行频率扫描，这就是为了检查传感器在工作频段内有无局部谐振，在扫描的频段内要求所用振动台的轴向正弦加速度失真小于5%，横向运动小于25%。

频响偏差计算有两种不同的方法，第一种方法是在响应平坦的频段上选一频率，以此频率的灵敏度为准，计算其余各点与此点的灵敏度相对偏差，以此做为频响偏差。

第二种方法经常用于标准传感器，即将响应平坦的频段上诸点的灵敏度取平均值，以平均灵敏度为准，计算各点的灵敏度相对偏差（以百分比表示），以此作为频响偏差。

若偏差超过10%，可能是传感器选择不当，或者是传感器性能变坏了，这就需重新做补充校准。

另外，对压电加速度计来说，因其阻尼通常小于临界阻尼的0.1，就无需进行相频（相位频率响应）校准，若传感器连同滤波器或阴极跟随器一起使用，相位随频率而改变，就需进行相频校准。

对非正弦测量来说，要使信号波形不失真，就要求相移正比于频率或为零度。

3. 谐振频率的校准

为了精确使用加速度计，不仅需要进行灵敏度及频响校准，而谐振频率也是主要的一项规定的校准项目，谐振频率校准是评价加速度计基本工作特性及其工作状况的一种最好方法，谐振频率的校准能确定加速度计是否象一单自由度系统那样工作。另一个或许是更重要的目的是，通过谐振频率校准可以检测加速度计内部损坏与否。

目前正使用的许多加速度计象图1-2(a)所示的理想加速度计那样工作，也就是说，它有一个谐振频率，这证明加速度计这一机电系统是单自由度系统，这种加速度计可用于精度和高可靠性的测量场合，而如图1-2(b)所示具有多个谐振峰的加速度计在多数场合虽然还可以用，但其性能要差，影响测量精度，因而，通过谐振频率的校准，就可检验加速度计的设计与工艺是否合理与完善。

压电加速度计虽然不易造成损坏，但是有些加速度计的设计使得它们承受较强的冲击运动时就损坏了。另外，粗率的处置也可能产生超过设计规定的极限环境的冲击加速度，而从造成加速度计的损坏。损坏情况有以下几种：压电元件

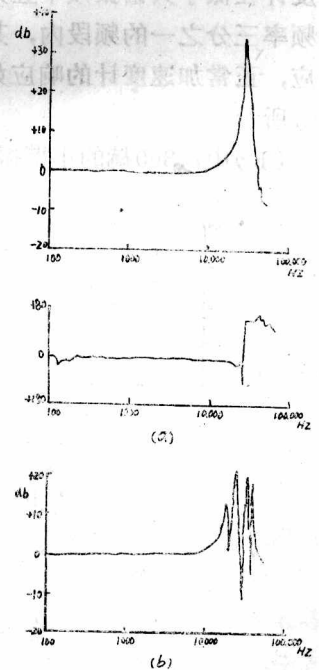


图 1-2

裂碎、压电元件与环氧树脂粘接处脱开、螺栓塑性变形、加速度计安装面受损、加速度计外壳变形等等。而压电元件碎裂后，加速度计的电容、灵敏度一般没有什么变化，而唯独谐振频率产生了明显的变化。因而，谐振频率校准是检验加速度计是否损坏的最精确方法。图1-3 (a) 与 (b) 是一加速度计承受强冲击运动前后的谐振频率校准曲线，从曲线可见，加速度计的谐振频率从32,000赫降至29,500赫，并在 9,000 赫处出现小谐振峰，谐振频率下降明确表示了内部业已损坏，在重要的实验中，恐怕就不能再用它了。

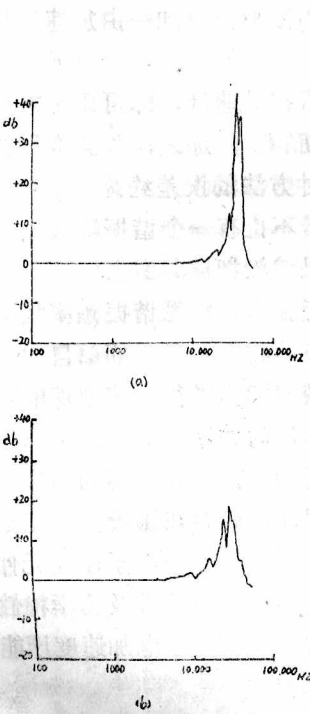


图 1-3

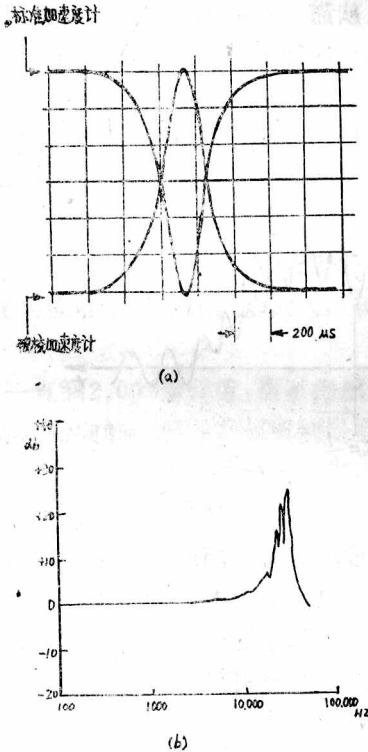


图 1-4

目前，加速度计做完冲击校准后，随后进行谐振频率的校准，以检验加速度计的工作特性在冲击后有无变化，这一工作正在形成为一种例行工作。多数加速度计并不会因冲击校准而失灵，但有时出现图 1—4 所示的情况。从图中可见，冲击校准结果完全正常，波形图上未出任何异常响应，且冲击灵敏度与正弦振动校准结果十分相符。而谐振频率的校准看出它有多峰，谐振频率为28,500赫，但其正常情况下的谐振频率为35,000赫，通过谐振频率校准可以证明其内部已损坏。所以，在实验室条件下，冲击校准后进行谐振频率校准是保证测量仪器可靠性的必要步骤。

当然一较正常的加速度计经谐振频率校准后，从其谐振频率就可知道可测多大脉冲宽度的冲击运动。如对半正弦脉冲，在保证幅值误差小于10%的情况下，目前一般推荐的公式是

$$T \geq \frac{5}{f_n}$$

式中，T —— 加速度计所测冲击脉冲宽度。f_n —— 加速度计的谐振频率。这样选择加速度计可保证对信号有足够的高频响应。

加速度计的谐振频率校准时,若其谐振频率不超过50,000赫时,就用高频振动台做正弦激振。一般说来,振动台弹性体的谐振频率要高于加速度计的谐振频率。而振动台运动部分的质量至少要比加速度计的质量元件重十倍。最大灵敏度的频率就是谐振频率。可用比较的方法来确定谐振频率。一个办法是与谐振频率高于50,000赫的标准加速度计进行比较;一个办法是与振动台的输入做比较。

若加速度计的谐振频率超过50,000赫,就应采用冲击激振法来进行谐振频率的校准。也就是说,将加速度计安装在钢砧上,冲击钢砧,使含有丰富谐波的冲击加速度激发起加速度计谐振。从而,在记忆示波器上可以看到外力所施的冲击波形上叠加一由加速度计谐振而引起的输出。这种图形称之为“振铃”。如图1-5所示。

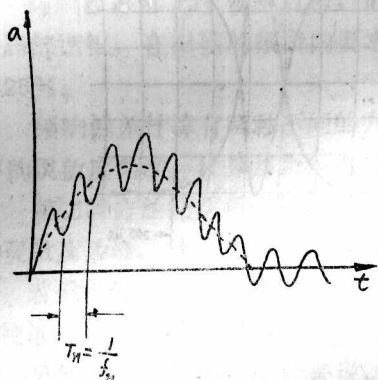


图 1-5

根据示波器扫描速度,即可确定被激发的加速度计的谐振周期 T_n ,那么,加速度计的谐振频率就是 $1/T_n$ 。这种方法的误差约为 $\pm 10\%$ 。

若加速度计不止有一个谐振峰或砧子被激发共振了,校准结果就没把握。

此外,从正弦激振法做谐振频率校准的过程中,将取的响应曲线与有阻尼的单自由度弹性系统的理论曲线比较,即可求得加速度计的阻尼。

4. 温度响应的校准

压电加速度计经常要在不同的温度下使用,如测量发动机的振动,就要在摄氏二、三百度,甚至更高的温度下进行。而压电加速度计的校准通常是在室温下进行的,由于压电元件随着温度不同,其压电系数、电容量以及弹性系数,也即其压电特性、介电特性及力学特性都要随之而变,那么,加速度计的工作特性(如灵敏度)也要变化,为了使压电加速度计能在不同温度下使用时获得一定精度,就必须对其进行温度响应的校准。

目前用比较法做温度响应的校准,也就是将标准加速度计与被校加速度计安装在一活动系统上,要使二者轴线重合。有两种具体做法,其一是让被校加速度计置于加温室内,而标准加速度计在加温室外,在整个校准过程中,标准加速度计灵敏度随环境温度的变化不能超过 $\pm 2\%$ 。另一方法是将标准加速度计与被校加速度计一起放在加温室内,这种方法要预先得知标准加速度计的温度响应,校准也只能在标准加速度计的已知的温度响应范围内进行。

温度响应校准时,要求振动台在校准的频率下其横向运动不得大于轴向运动的25%,所选用的振动台及所设计的固定加速度计的装置要保证在500赫以下校准时,标准加速度计与被校加速度计之间的相对运动小到可以忽略。

当加到最高校准温度时,稳定下来以后,要测量压电加速度计的内阻,此时若是其值太小,那就要影响测量系统的低频响应,那就应当在最高校准温度下进行低频响应的校准,在5赫—100赫之间选几个频率,以适当地描述频率响应。当然,加速度计与所配用的放大器应做为一个系统来校准。

对压电加速度计来说,因其阻尼小于临界阻尼的0.1,温度响应校准只需在一个加速度值下(但信噪比要大于10)及一个频率(低于500赫选一点)下进行,在加速度计所使用的温度范围内选几个温度点,只要能适当地描述其温度响应就行了。

温度响应偏差是指校准温度下加速度计的灵敏度与室温下灵敏度的相对偏差(用百分比

表示)。当然所选的室温下的灵敏度是从响应平坦的频段上取的,通常要求所选的加速度计在整个所用的温度范围内其温度响应偏差不要超过 $\pm 15\%$ 。

5. 横向灵敏度的校准

压电加速度计是一单自由度系统,它应当只对与灵敏轴方向一致或平行的运动敏感,而对其它自由度的运动不敏感,由于设计、工艺和材料的原因,它对其它五个自由度总有一定的响应,特别是它对垂直于灵敏轴平面内直线运动的响应,这就要用横向灵敏度来表征。横向灵敏度产生电输出量是加速度计的横向灵敏度比与轴向灵敏度及横向运动的积。过大的横向灵敏度就表明它对横向运动过于敏感,将它用于测量时,当运动在加速度计横向上有一较大分量时,加速度计输出中就包含着较大成分的横向分量,加速度计也就不是一个单自由度测量仪器,从而给测量带来较大误差。

横向灵敏度校准在低于500赫的单一频率下进行,如用产生正弦运动的振动台校准,台子在横向(垂直于灵敏轴)的运动至少要比轴向运动小100倍以上。若被校的加速度计的横向灵敏度小于1%,对振动台的运动要求就更严格,也就需要更熟练的技术来校准。

校准时,将加速度计绕其灵敏度轴逐点转动,每次转 45° 或更小的角度,旋转一周,即可找到最大灵敏度点。若横向灵敏度超过5%或者与早先的校准结果相比差别太大,就需对加速度计再做辅助校准。

对压电加速度计做横向灵敏度校准的经验表明,一直到2,000赫以前,看不出横向灵敏度与频率有关。而加速度计在2,000赫至10,000赫频段内的横向响应的资料目前还是有限的,几个实验表明,加速度计的高频横向响应(即从2,000赫到10,000赫)与低频(500赫以下)的横向灵敏度仍是同一数量级。一般说来,压电加速度计的轴向谐振频率高于36千赫,而其横向谐振基频高于10千赫,这就超出了加速度计的正常工作频段,因而,横向谐振一般不影响加速度计的正常工作。

6. 电阻抗

加速度计的电网络参数主要是电容量及绝缘电阻,这些参数与系统的测量性能有关,特别是与低频响应关系为大,也关系到电压灵敏度等。

若是所测加速度计的电参数与早先所测的值相差百分之好几(例如:电容量规定超过 $\pm 10\%$),这通常说明加速度计出了问题或损坏了,这就需在下次使用前做辅助校准。

在测量压电加速度计的电容量时,要在加速度计的工作频率下进行。要是电容量随频率变化,那么至少要在两个频率下测电容量,其中一个频率应当是灵敏度校准时所用的那个频率。若是电容量随频率变化不大,测量频率一般选为1,000赫,这也是压电材料电容率测试时规定的频率。

测量电容量应在室温下(70°F — 85°F ,相当于 21°C 到 32°C)进行,而且激励电压要低(应由制造者推荐),因为压电材料的电容量随温度及外加电场而变化。

加速度计的绝缘电阻可用兆欧表来测,所加电压不能超过100伏。

(三) 压电加速度计的环境特性的实验

加速度计的环境特性一般由制造者通过环境实验来测定,有时使用者也做这项工作。制造者所规定的加速度计所能承受的极限环境可能比它的正常工作范围要宽。环境实验有两个目的,要么是确定加速度计所能承受的极限环境,也就是传感器处于该环境下工作特性不发生永久(或“不可逆”)变化的界限。要么是传感器处在某种环境下工作时,确定它因环境所引起的输出,这当然看做是一种误差信号。

1. 密封实验

将水盛在透明的容器中,然后将水加热到比沸点低 $5-6^{\circ}\text{C}$ 的温度,将传感器的电缆及插头拿掉,然后浸入水中,使其在水面以下,若是从传感器冒出一串串气泡,这说明传感器不密封。

若是从插座处只冒出不多的气泡,这往往就是存于插孔内的少量空气,这并不是传感器内部漏的气。做完密封实验后,要将传感器晾干,但不能加热干燥,尔后再测绝缘电阻。

2. 极限加速度

加速度计所能承受的极限加速度,是指它的工作特性不发生较大变化情况下的最大加速度值。

为了验证加速度计制造者所提出的极限加速度值,通常在互相垂直的三个方向施以100次半正弦的冲击运动,冲击加速度要控制到不超出制造者所规定的极限值的 $\pm 10\%$ 。冲击脉冲的宽度最好是加速度计自然周期的三倍以上。脉冲宽度太窄会使加速度计的质量元件产生较大的运动,从而可能使加速度计损坏。冲击后,要做一些适当的辅助工作,为的是验证加速度计性能是否变坏。

也可用正弦激振法验证极限加速度值,这类似于线性校准。但是,在规定极限加速度值的频段内,往往难以获得足够大的正弦加速度值。

3. 极限温度

对压电加速度计来说,做极限温度实验时,是将其在最高及最低极限温度下最少放置四小时,此后仍需进行辅助项目的校准,以检验加速度计是否出了问题。

4. 应变灵敏度

由于加速度计底座承受弯曲,使得它产生一额外的输出,这需通过实验测定。将加速度计装在一悬臂梁上,安装处弯曲的曲率半径为25.4米,且其应变值为 250×10^{-6} 厘米/厘米。

钢制悬臂梁一端为刚性夹持。该梁宽7.5厘米、厚1.3厘米、臂长145厘米,这样一种梁的自然频率很接近5赫,加速度计装在离固定端3.8厘米处,应变片贴在紧靠加速度计处,用以测量应变。安装点处的运动大小可用显微镜或其它方法监视。

用多通道记录仪记录传感器及应变仪的输出。

在梁的自由端用手加力使其偏转,然后放开,令其自由振动。当应变仪的输出表示出该点的应变为 250×10^{-6} 厘米/厘米(等效于该点曲率半径为25.4米)时,从图示仪记录上取下这时传感器的输出。在安装处梁的实际运动与传感器所指示的运动之差就是由弯曲应变额外带来的输出。那么,应变灵敏度(在应变为 10^{-6} 厘米/厘米情况下的)就是用250倍的轴向灵敏度去除上述这一运动之差。

常常在不同的应变大小、在传感器的不同方向(让传感器绕其灵敏轴转动不同的角度)以及在不同的安装条件下测量应变灵敏度,在一些应用场合及安装条件下,有些传感器的最大应变灵敏度能带来相当大的误差。举例来说,由于校准用的激振器的应变能使某些压电加速度计产生百分之几的误差。

5. 特殊环境

一些特殊环境——如强电磁场、静电场、射频场、热辐射场、声场、电缆效应以及核辐射——都能对某些传感器产生有害的影响。虽然对于那些明显能产生不良影响环境已研究出一些专门的实验方法,但是目前对这类特殊环境似乎还拿不出普遍可以接受的技术方案,以下介绍几种特殊实验。

1) 磁灵敏度 将传感器安装由非铁磁材料(如铝)制成的十磅重的圆柱体上, 将其在60赫、400赫或其它所用的频率下置于已知强度的磁场中。转动传感器并记录传感器的最大电输出, 每高斯下的等值 g 值就是磁灵敏度。当然, 计算等效 g 值是根据工作特性校准所得的灵敏度。

必须从实验装置上消除因磁场而感应的机械振动和假的电噪声。

2) 瞬态温度效应 所有的压电传感器在受到瞬态温度影响时, 都产生热释电输出。热释电输出的大小取决于压电材料及传感器的设计。热释电输出的最主要的频率通常是远低于1赫。因而, 传感器的热释电输出的大部分信号由于放大器低频响应不够而被滤除。所以, 热释电输出取决于温度变化速度、放大器特性以及传感器特性。

做热释电实验时, 传感器要带着平常连用的放大器做, 将传感器装在一铝块上, 然后将它们快速地浸入热油槽或其它热液体槽内, 槽内温度要比室温约高 50°F (约 24°C)。铝块应比传感器约重10倍。从直流示波器上测量放大器的最大输出和从一开始上升到这最大输出所用的时间。如果在前两秒内输出又变了极性并达到反极性的峰值, 也要记下这反峰的大小和上升时间, 加速度计的热释电灵敏度就是用油槽温度与室温之差与轴向灵敏度之积去除放大器的最大输出, 通常表为(等效 g 值/ $^{\circ}\text{F}$), 要规定适用于测量热释电灵敏度的放大器的类型。

对一些特殊的应用来说, 所用的放大器其低频响应彼此相差很大, 所以在测热释电灵敏度时要带着实际应用时所用的放大器来测, 在某些场合, 瞬态温度的变化速度与上述实验条件下的远不相同, 就需模拟实际的温度环境来做实验。

3) 声灵敏度 许多压电加速度计在受到强声压场作用时, 其输出可以忽略不计, 要在混响室做这种实验, 用平面波管, 但是要注意消除因传感器安装面的振动所引起的输出, 也可在液体中做类似的实验。

4) 电缆效应 压电加速度计及其配用的电缆可能会因电缆效应给实验带来误差, 压电加速度计制造者通过实验以确保电缆性能均匀一致, 而且由冲击、振动引起的颤噪音要很小。使用其它方面来的电缆要小心, 电缆和插头作用于传感器一惯性力, 就会使传感器产生一误差信号或改变灵敏度。在进行工作特性校准时, 常常会发现电缆效应能带来很大的误差。

(四) 物理特性的测量

(1) 尺寸 包括高、宽及直径, 还有螺栓孔大小, 应画一外廓图, 在图上标明这些尺寸, 电缆及插座的大小与型号也应说明。

(2) 重量 是指传感器不包括安装螺栓及电缆在内的总重量。

(3) 动态质量 应说明包括安装件在内的整个传感器的动态质量。选用传感器应使其在所测频段上远小于被测体的动态质量。对于总重只有1克左右的微型加速度计, 电缆对动态质量可能影响很大。但是, 多数加速度计远在谐振频率以下使用, 其动态质量也就是静态下所测的总质量; 在加速度计设计使用的整个频段上, 动态质量不变。

为确定传感器在其安装点对被测体那点运动的影响, 必须知道动态质量的大小。若略去转动惯性, 安装传感器的结构的运动由下式推算:

$$A = \frac{A_0 M_s}{M_s + M_t}$$

式中, A ——安装传感器的结构的运动幅值; A_0 ——不带传感器时的运动幅值; M_s ——在安装传感器处, 在传感器灵敏轴方向上结构的点动态质量; M_t ——传感器在灵敏轴方向上的动态质量。

式中量是复量，也就是既有大小又有相位，传感器的动态质量，在使用频段上可通过实验来测定。

(4) 极性 传感器的极性用比较法确定。当加速度方向是从传感器安装面沿灵敏轴指向传感器顶端时，传感器应当有正的输出，这就是规定极性的方法。

附：美国 Endevco 2270 校准加速度计性能指标

灵敏度误差	$\pm 0.5\%$
灵敏度的稳定性 (在100赫时)	每年 $\pm 0.5\%$
附加质量对灵敏度的影响 (在100赫时)	每100克 $\pm 0.2\%$
频率响应及相对运动	
5—5000赫内，附加质量 (100克以内) 引起灵敏度的变化量	$-2\%^*$
5—10000赫内，附加质量 (50克以内) 引起灵敏度的变化量	$\pm 4\%$
灵敏度的线性	每1000g $\pm 0.1\%$
横向灵敏度	$\pm 3\%$
电荷灵敏度的温度响应	每 10°C $\pm 0.5\%$
应变灵敏度	每 μ 厘米/厘米为0.001g

* 由名义响应曲线计算所得最大修正误差为 $\pm 1.0\%$ 。

二、校准用振动台

为了得到高校准精度，必须要有正弦运动性能好的振动台，也即所谓的基准振动台或标准振动台，要求这种振动台的失真度要小，横向振动量要小，稳定性要好等。使被校准的传感器在振动台上承受正弦运动，同时测量其输出电讯号，而振动台的运动参数可用某种方法测出，这样就可以进行校准。由于当前振动测量中，大多采用压电加速度计，所以近年来校准压电加速度计的振动台得到了很快的发展。根据其频率范围基本上可分为低频、中频、高频三段。我国的振动计量基准也正在研制中，在国外已有一些国家建成了振动计量基准。下面就根据频段对在制作校准用振动台上所采用的新技术分别叙述如下：

(一) 中频振动台：

目前所采用的振动台一般有机械式的、电磁式的、液压式的、压电陶瓷式的等几种。根据其性能来看，电磁式的振动台比较适合作为中频段的校准用振动台。近几年来由于在这种振动台上应用了氧化铝陶瓷动圈或钹合金动圈就使得动圈的共振频率大大提高，减少了在其工作频段以内的失真度，由于使用了空气轴承就大大地减少了其横向运动量，由于使用了性能好的永磁回路就使得我们有可能获得高稳定性高强度的磁场，由于使用了无输出变压器或无输出电容的晶体管功率放大器线路就使得它有可能在低频使用，并具有低的失真度。这些新技术的采用使得中频校准用振动台的性能得到了很大的改善，在我国正在研制的中频基准振动台上也分别采用了这些新技术，以改善振动台的性能，再配以激光干涉测振仪测量振幅就为建立高校准精度的振动基准创造了条件。

国外从六十年代以来由于军火工业的畸形发展，就对振动计量的要求越来越高，对这种振动台也进行了一系列的研究。根据目前看到的资料来看，采用氧化铝陶瓷动圈的振动台的第一阶共振频率可达 25000 赫芝，在 5000 赫芝以下的频率范围内，可用来校准重 200 克以下的压电加速度计，下限频率可到 5 赫芝以下，其加速度值可达 $10g$ (g 为地球重力加速度值)，横向振动量小于 1.5%，失真度小于 1%。在 5000 至 20,000 赫芝的频段上，如果小心地避开横向振动的峰点的话也可以使用。用压电加速度计作为标准传感器，可以不受振动台磁场的影响。其具体性能见表 2—1。

表 2—1 空气轴承振动台的性能参数

动圈重量:	0.5公斤
额定推力:	6.8公斤
台面最大行程:	17.8毫米
主共振频率:	25000赫芝
驱动线圈阻抗:	3.3欧姆
台面漏磁场:	13高斯

整个振动台结构图如图 2—1 所示。其动圈是由烧结的三氧化二铝制成。这种材料具有弹性模量高、比重低、热膨胀系数小、绝缘性能好(可减小涡流)等一系列优点。几种材料物理常数的比较可见表 2—2。

陶瓷动圈为一端封闭的圆筒，具有均匀的横截面积，高的纵向、横向刚度。长度为 133

毫米，直径为47.676毫米，内径为38毫米。封闭端为台面，它垂直于动圈轴线，其厚度为19

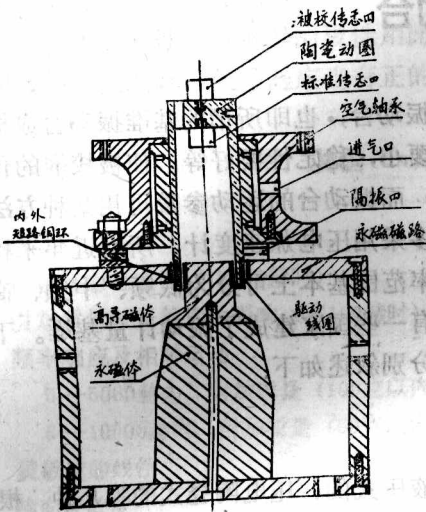


图 2-1：空气轴承振动台的结构图
(为了表示清楚，省略了动圈的支撑机构)

毫米，且具有带螺纹的中心孔以固定传感器用。标准传感器与被校传感器沿动圈轴线分别安装在它的两个面上，这两个面是严格平行的平面。装在动圈内的标准传感器可以用绝对法、互易法或比较法进行校准，然后在用比较法对被校传感器进行校准时，它可以作为标准传感器。动圈在径向用三根直径为6.4毫米的橡胶棒作弹性垂直支撑，调整它的张紧度，可调动圈的平衡位置。如果在动圈中通以直流电，则调整直流电流的大小，也可调其平衡位置。驱动线圈直接绕在陶瓷动圈的凹槽内，它距动圈底部为25毫米，层间涂以高强环氧树脂，用60°F的冷空气对动圈进行空气冷却。动圈直接装在空气轴承内，其上端大部分外壁即空气轴承的内轴承面。这样陶瓷动圈就同时起了老式振动台中驱动线圈骨架、轴、内轴承壁、加速度计安装台面的作用。

表 2-2

氧化铝陶瓷、钢、铝的某些物理常数

材 料	弹 性 模 量 (公斤/厘米 ²)	比 重 (克重/厘米 ³)	热 胀 系 数 (米/米·度)
三 氧 化 二 铝	3.8×10^6	3.7	7.8×10^{-6}
钢	2.1×10^6	7~8	18×10^{-6}
铝	0.7×10^6	2.5~2.8	24×10^{-6}

该振动台所用的空气轴承是静压式的。其直径为47.681毫米，长度为76.4毫米。材料为不锈钢。有两圈相距50.8毫米的孔，每圈有6个小孔，小孔直径为0.5毫米。动圈与轴承配合处表面光洁度为0.2微米，径向间隙为2.5微米。通到空气轴承的空气经过两次过滤，其压力为3.5公斤/厘米²。在台面上 X、Y、Z（轴向）三个互相垂直的方向安装三个压电加速度计，将其分别测得的加速度值进行比较，就可测出动圈的横向振动量。由于采用了空气轴承，在整个频段内可使横向振动量下降到1.5%以下。

在磁路中由于采用了永久磁铁，就可避免发热和交流耦合，提供稳定的磁场。磁场缝隙宽度为6.35毫米。磁场强度为8000高斯。空气轴承是通过三个橡皮减震器与磁铁连在一起的，这就避免了磁路部分的共振传到台面上去。

制作氧化铝陶瓷动圈时，首先要根据尺寸制成毛坯，进行烧结。由于结构的厚薄变化比较大，所以烧结时容易出现裂纹，应同时烧几个以便从中选择。在精加工时只能采用研磨的办法，用高精度的金钢石砂轮磨床进行磨削以达到尺寸要求。引线孔、螺纹孔等在烧结前就应当制好，但烧结后容易发生变形，所以采用氧化铝陶瓷动圈的主要关键在于加工困难。

为了对各种型式的压电加速度计作精确的频率响应和共振频率校准，就不但要求振动台的失真度小，横向振动量小，而且还要求振动台的共振频率要高，要远高于被校压电加速度计的共振频率，这样才能减小由于标准加速度计与被校加速度计之间存在的相对运动所造成的误差。这时上述的氧化铝动圈的共振频率就显得还不够高，需要寻求新的动圈材料。近年

来又采用了铍合金作为动圈材料，铍合金的弹性模量与氧化铝差不多，但比重只有氧化铝的一半。因为共振频率是和弹性模量与比重的比值的平方根成正比，所以由表 2—3 可见同样尺寸的动圈中，铍合金动圈的共振频率是镁合金动圈共振频率的 2.5 倍，而氧化铝陶瓷动圈的共振频率仅为镁合金动圈共振频率的 1.9 倍。在承受大应力时，镁合金的内阻尼比铍合金、氧化铝都大得多，但在动圈中一般不可能达到大应力值，所以应用镁合金作动圈并没有明显的优点。比较这三种材料的机械特性可知，铍合金的性能最好，但它的缺点是造价高，加工困难，加工时要防止中毒。

表 2—3 振动台动圈所用材料的机械特性

特 性	材 料		
	铍 合 金	氧 化 铝	镁 合 金
弹性模量 (E) 10 ⁶ 公斤/厘米 ²	2.96	3.52	0.458
比 重 (δ) 克重/厘米 ³	1.86	3.88	1.80
$\sqrt{\frac{\text{弹性模量}}{\text{比重}}} \sqrt{\frac{E}{\delta}} \cdot 10^3 \text{厘米}^{\frac{1}{2}}$	39.9	30.1	15.9
规一化的共振频率	2.5	1.9	1
由阻尼对数衰减	0.00005	0.00006	0.3*

*该数据是在材料所受机械应力大于 35 公斤/厘米² 时得到的。

在表 2—4 中给出了用这些材料做成的振动台的主要特性，可见铍合金动圈的共振频率最高。用共振频率比所测振动台的共振频率高的多的压电加速度计测量振动台的振动，改变振动频率，求出压电加速度计的输出电压与动圈电流的比值，当这比值达到最大值时，相位用从 0° 经过 90° 又达到 180°，则这个频率就是振动台的共振频率。

表 2—4 振动台特性一览表

特 性	指 标			
	A 台	B 台	C 台	D 台
动 圈 材 料	铍 合 金	铍 合 金	氧 化 铝	镁 合 金
动 圈 重 量 (公斤)	0.181	0.317	0.454	0.454
共振频率 (千赫)	55	35	30	10
最高频率时的相对运动	±2%	±4%	±5%	±10%
灵敏度及频率响应校准 (赫芝)	5~10,000	5~10,000	5~10,000	5~5,000
共振频率校准 (赫芝)	5~50,000	—	—	—
加 速 度 失 真 度	2%	2%	3%	5%

在高频时，装标准加速度计处与装被校加速度计处的运动幅度是不等的，这即所谓的相对运动，它的大小与负荷重量有关。选择一种这样的加速度计来测量相对运动：它的共振频率比所测振动台的共振频率要高，将它装到重量在 100 克以下的不同重量的底座上时，它的共振频率不会发生很大的变化。将这种加速度计与底座一起装到振动台上，测量它与标准传感器输出之比，就可测出振动台在不同负荷下的相对运动。图 2—2 给出了 A 振动台的相对运动。知道了这种曲线，在高频校准时就可以进行修正，以避免在高频时出现过大的校准误差。A 振动台在 10,000 赫以下其修正量小于 2%。由表 2—4 也可看出，镁合金动圈振动台相对运动过大，5000 赫以上就不能使用了。

振动台加速度失真的主要来源是振动台共振频率的谐波激振。与振动台配用的功率放大