

水声计量测试技术赴欧考察情况报告

袁文俊 薛跃泉 缪荣兴

(中船总公司七院七一五所)

一、概 况

水声计量测试技术赴欧考察小组从1989年4月21日-5月15日对丹麦的B&K公司进行了声学测量仪器、水听器和计量测试技术的考察,对丹麦的Reson公司、英国的DBE公司和英国国家物理实验室(NPL)进行水声计量测试技术和水听器的考察,对英国Dowty公司通讯分部进行了水声计量测试技术和声纳浮标的考察,对英国舒伦伯杰仪器公司的数字电压表和动态响应分析仪器及CEL公司(包括Datalab公司)的瞬态波形记录仪和声级测量仪进行了考察。另外,还访问了丹麦技术大学的工业声学实验室。通过参观、观看仪器演示、听取介绍、坐谈、询问和阅读资料等灵活多样的考察方式,基本达到了预定的考察目的,在水声计量测试技术、测试仪器、标准测量水听器和其它等方面都获得了许多有价值的信息,受到了启发,这必将十分有助于指导国防水声计量一级站的技术建设和水声计量测试工作的进一步提高。

参观访问中获悉欧洲国家都没有建立国家级的法定水声计量测试单位,许多水声单位的水声计量直接溯源到美国国家水声计量中心(NRL—USRD)。水声计量测试技术和条件最全面、最先进的可能在有关海军研究部门,我们这次尽了最大努力争取参观到的只是生产某些水声产品的生产厂。显然,它们的水声计量测试技术水平并不是最高、最全面的。但它们对水声计量测试工作是相当重视的,都把它作为产品研究开发的有机组成内容和必要条件。参观中看到的计量测试

系统几乎是全部计算机化的,并看到了由模拟自动记录到计算机控制的半数字自动测量再到计算机控制下的全数字自动测量的技术发展趋势。

通过对有关测试仪器公司的参观,看到了测试仪器的微处理机化、智能化和数字采集化,从而使有可能用计算机通过软件实现一器多用的发展趋势,提示了我们注意测量方法研究和测量系统组成应适应这种技术进步。

我们还了解了目前欧洲,特别英国的水听器计量传递的大概情况,考察中还了解了水声计量测试以外的许多其它方面的信息。

二、水声计量和测试技术

1. 计量和测试方法

在丹麦的B&K公司、Beson公司和英国的DBE公司、Dowty公司,中频段以上水听器的一级校准都采用通常的脉冲自由场互易法。B&K公司在采用这种方法时,仍象我们过去那样,把校准用三只水听器分别装在升降回转杆上同时置于水中,在同一水平面内排成等边三角形。为了确保校准方向不变,以减小由于水听器在水平面内指向性不均匀而引起的误差,在测量过程中需不断旋转换能器和水听器,使它们彼此对准在予先选定的方向。因此测量过程比较长,水听器产品多数应用比较法相对校准,有的单位应用标准水听器作参考,有的单位应用校准过的发射换能器作参考。在低频段,我们看到的校准方法有多种,各单位并不相同。例如,B&K

公司在40Hz~4KHz频率范围内曾利用空气消声室,以微音器作为标准,进行比较校准,在0.1Hz~4Hz次声频范围内,通过周期性地改变水听器深度进行绝对校准;英国的DBE公司和Dowty公司用脉冲法在下极限以下的适当频率范围内采用窄带噪声场法校准水听器。B&K公司、DBE公司和Dowty公司都使用空气耦合腔在某个或某些频率上校准已确定尺寸的水听器,耦合腔内的声级用标准的微音器预先校准。所以,这方法实际上是相对校准,最典型的是作为B&K产品的主要校准B&K水听器的4223型水听器校准器,在250Hz的频率上快速检查水听器的灵敏度。DBE公司还应用充水耦合腔和振动液柱法低频校准水听器。Dowty公司在5~2500Hz范围内应用了技术复杂而又比较先进的动生阻抗端行波管法测量水听器的灵敏度和方向性图,校准管比美国USRD的J系统和K系统都要短,适宜于比较法。英国NPL有完整的、高水平的0.5MHz~15MHz超声水听器一级、二级和工作装置的校准系统,采用了与水声频段完全不同的校准方法,用激光干涉法进行绝对校准,用非线性声场比较法进行二级校准。

2. 测量设施

我们考察的几个从事水声产品研究生产的单位都建有水池及其它一些专用测量设施。B&K公司有个 $4 \times 2.5 \times 2$ 米的非消声小水池,架有三个简易的手动回转装置,用于三边法互易校准,还有一个倒置的BK转台,用于测量指向性图。因该水池较小,又不消声,只能用脉冲测量技术,在3~4KHz频率上只有一个稳态波。根据IEC标准规定,应用脉冲法时至少需要二个稳态波。因此,正确测量的下限频率约为6~8KHz。丹麦Reson公司有一个 $3 \times 2 \times 1.5$ 米的小消声水池,用木头尖劈作消声器,在8KHz以上的频率上才能精确使用。英国的DBE公司有一个 $7 \times 7 \times 4$ 米的钢壳水池,脉冲自由场校准

的可用下限频率约为5KHz,(给我们表演时最低测量频率大于10KHz),在低频率上用窄带噪声法测量。英国的Dowty公司有一个直径10米,高8.5米的红木壁圆形水池(这种红木有一定的消声作用),脉冲自由场校准的下极限频率约为3KHz,频率再低用窄带噪声法。

我们还了解了一些高静水压下的校准装置。Dowty公司在常压水池中用高压透声容器进行高静水压下声性能测量,它还有一个Simes管,长约80公分,直径50公分,在两端各装有一个直径为36公分的相同的发射换能器,间隔为50公分,中间有一个步进马达驱动的小回转机构,可在0~70大气压,0~50℃范围内测量该公司浮标水听器的低频灵敏度和方向性。英国的DBE公司用耦合腔进行高压下校准,他们还把耦合腔放在烘箱内,解决温度变化条件下的校准问题。丹麦Reson公司用高静水压试验管进行水听器高压下性能相对变化的试验。

3. 测试技术和测量系统

(1) 丹麦B&K公司向我们展示了两个水听器校准系统。一个是4223空气耦合腔水听器校准器,用于在250Hz单频率上对BK水听器进行现场快速校准。另一个是水池中水听器比较校准系统,该系统全由B&K生产的声学仪器构成,利用新生产的1051程控扫描振荡器、4440脉冲门系统和发射响应已知的换能器进行水听器灵敏度响应曲线的模拟自动记录,其线路图如图1所示。1051输出信号幅度是频率的函数。当把它调节到与发射换能器电压发送响应随频率的变化关系正好相反时,记录得的被测水听器开路电压频响曲线即为其灵敏度频响曲线;无需再进行处理。

(2) 丹麦的Reson公司有一套比较先进的、由计算机控制的水声换能器和水听器数字自动测量系统,由两个测量通道组成,每个通道的原理图见图2。由定时器触发振荡器产生脉冲信号,通过功放激励发射换能器,

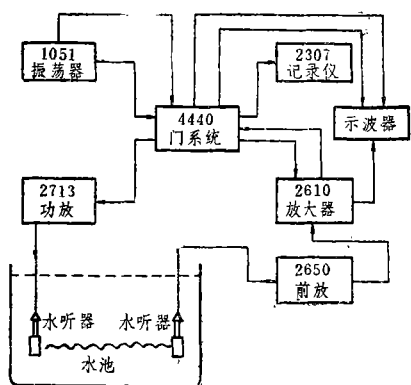


图 1

定时器也同时按时序触发多路A/D转换器,对发射电压和发射电流信号,或发射电压和水听器开路电压信号,或发射电流和水听器开路电压信号进行数字采样和模数转换,然后送至计算机,通过数字处理实现滤波和各种计算。计算机也可以控制步进马达运转。整个系统的可测量频率范围为1KHz~2MHz。通过软件和人机对话,选定水听器接收灵敏度测量(比较法和互易法校准)、换能器阻抗测量、发送响应测量和指向性图测量。A/D转换器的最高采样率为10M,分辨率为8bits,存储量8K。步进马达的步进间距为0.1度。电压比总的测量精度优于0.5dB。我们认为此系统是一个很适合于水声换能器的综合自动测量系统。由于应用了电压、电流信号的取样技术,显然也适用于大功率水声换能器的测量。

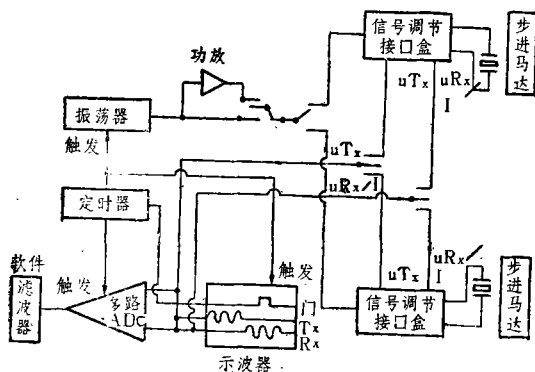


图 2

(3) 英国的DBE公司和Dowty公司都有一套工作原理和硬件组成基本相同的水声换能器半自动测量系统。Dowty公司的系统的组成如图3所示。该系统仍建立在目前许多单位(包括我国)常使用的脉冲选通门测量技术基础上。计算机只是通过直流数字电压表采集4440门系统输出的直流电压,不能得到任何相位信息。可测量水声换能器电压发送响应、接收灵敏度及指向性图。DBE公司把此系统和其它测量仪器组成固定的机架系统,计算机比较老。Dowty公司所使用的仪器和计算机都比较新。利用BK4440门系统,频率上限只能到200KHz,但DBE公司有自己研制的门系统,上限频率可到3MHz。

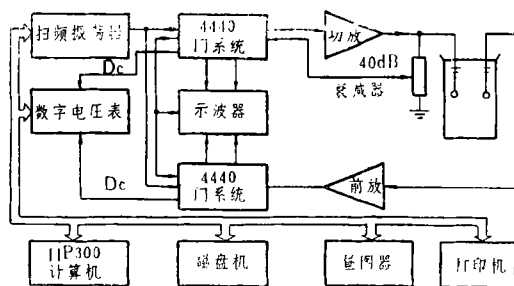


图 3

(4) Dowty公司有一个称之为Simes管的水听器自由场低频校准装置,用于校准该公司的声纳浮标水听器。此装置的组成原理如图4。Simes管是一密封的充水钢管,两端装有相同的低频发射换能器,中间段置有两对声压水听器和声压梯度水听器(即速度水听器),用于平面行波条件检测,被测水听器置于它们的中间。当需测指向性图时,可把它固定于步进马达驱动的回转装置上。用同频率信号同时激励两个发射换能器,并不断调节两个激励信号间的幅值和相位差,当通过两对声压水听器和声压梯度水听器检测得:

$$\left| \frac{P}{U} \right| = \rho C$$

$\dot{P}$ 与 $\dot{U}$ 间的相差为 0° (其中 $\dot{P}$ ——声压, $\dot{U}$ ——质点振速, ρC ——水的特性阻抗)时,表明中间已形成平面行波场。利用此行波场可进行水听器的比较校准和指向性图的测量。形成平面行波场和实施测量的整个过程都是在计算机控制下自动进行的。此装置可用的频率范围是5~2500Hz;静水压力控制范围为0~70大气压;温度可变范围为 $0^\circ\sim 50^\circ\text{C}$ 。

4. 我们的几点看法

(1) 从考察丹麦的B&K公司、Reson公司和英国的DBE公司、Dowty公司与NPL的情况来看,他们应用的与我们现用的和正在建立的计量测试方法差不多,没有发现其它更新的方法。在这些单位未见使用低频绝对校准水听器的补偿法,也即双辐射量值法,

这可能是由于这些单位不是专门从事计量工作的缘故。NPL的用于在0.5~15MHz范围内绝对校准超声水听器的方法,我们没有建立,不过由于我们的上限频率定为2MHz,可以不应用这种方法。

(2) 我们考察的这些单位所具备的测试系统从计算机化、自动化的程度而言,比我国目前的状态要好得多,但国防水声计量一级站的技术方案实现后,比他们的现状要强。考察的几个系统中,Reson公司的数字自动测量系统和Dowty公司的Simes管校准系统比较先进,具有目前国际先进水平,前者我们可考虑引进作为水声换能器综合测量系统,后者可作为我们建立低频行波管系统的技术借鉴。

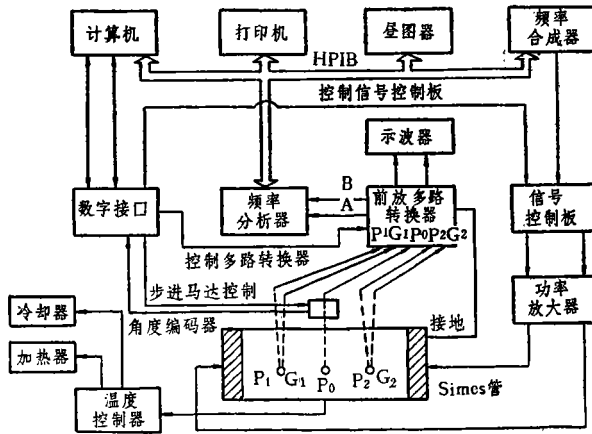


图 4

(3) 我们考察的公司都是以生产开发为主的,需计量测试的水听器和换能器品种比较单一,因此,没有看到从低频到高频,成套的计量测试系统。为了省钱,也不搞大的水池,这就使他们精确的自由场校准下限频率限制在很高的频率。英国的十个水声单位进行水听器比较校准时能校准到5KHz以下的很少,多数只能在10KHz以上才能较精确的校准,即使能在5KHz以下校准的单位,所用的方法并不是自由场下的一级校准方法,而是精度较低的噪声比较法。有些公司

在产品研究阶段曾利用花时花钱的特定方法或借用别的单位的条件进行全频段的实际校准。等产品成熟后,就利用小的水池在较高频率上校准,利用某种简单的特定方法(例如空气耦合腔)在一个低频率点上校准,然后根据水听器低频部份灵敏度响应平坦的理论,进行延伸。丹麦的B&K公司和Reson公司都采取这种办法。我们认为作为产品成熟单一的工厂可以这样,但作为专门从事计量测试工作的单位就不能这样,应建立全频段的校准装置和各种参数的测量条件。

(4) 我们考察的都是生产厂, NPL目前仍以超声校准和测量为主, 水声频段校准条件还未建立。在这些单位没有看到专门的高功率换能器测量系统、声基阵和导流罩方面的测量系统及水声材料系统。据介绍他们不能完成的校准和测量工作都借助于海军研究机构的条件进行的。由此可见, 从系统的完整性和精确性来看, 我们所看到的并不是这些国家的最高水平。

(5) 我们所考察的这些单位普遍对回转机构的步进马达化和水池介质的净化非常重视。我们看到的回转机构几乎全由步进马达驱动, 既精密小巧(步进间距为0.1度或0.01度), 又适合于计算机控制测量。有水池的单位都十分强调池水水质净化的重要性, 多数都设有池水净化装置。因为池水净化与否将会影响测量数据的稳定可靠。对于上述两项技术措施, 在我国还未普遍被重视。我们应该在力所能及的情况下改善回转机构, 建立池水净化设施。

三、关于水听器校准的溯源问题

在对B&K、Reson、DBE、Dowty和NPL的访问中, 都详细调查了关于水听器校准的溯源问题。得悉丹麦和英国, 甚至欧洲, 目前还都没有国家一级的法定的水声计量测试单位, 也没有形成一个传递比对系统。从职能来说, 英国的NPL是英国国家计量单位, 但在声学量方面过去都以超声、电声计量为主, 水声计量未开展。现在随着水声产品在国际上流通日益广泛, 许多公司, 包括海军研究部门很需要有一水声计量机构负责水声计量的传递和认可, 以确保量值的正确和统一, 要求NPL尽快开展此项工作。NPL为了首先摸清全英国水声计量的现状, 于1988年组织了一次全英国十一个水声单位参加的水听器校准比对活动。结果是令人吃惊的。各单位校准结果与整个平均值差异较大, 最大偏

差多数大于1dB(只有一个单位小于1dB), 有的大于3dB。而各单位给出的总的校准不确定度除个别之外, 都不超过1dB。这更进一步证明了加强水声计量传递管理的必要性。

我们所考察的这些单位目前还都自己校准水听器, 校准数据的溯源有下列几种情况:

(1) 自己通过互易法进行绝对校准(不需要标准水听器), 校准装置中有量值需求的仪器设备定期送到就近的校准公司进行法定计量。

(2) 用自己校准装置校准后的水听器送至美国海军研究所的水声基准部(NRL—USRD)进行复校, 由复校结果来确认自己校准装置的精度和可靠性。

(3) 在低频段用空气耦合腔校准水听器, 腔中声压值由校准微音器测定。而校准微音器的校准最后溯源到美国的NBS(国家标准局)。

(4) 先利用自己的装置进行校准, 然后参加全英国的比对校准, 并分别送至B&K公司和美国的NRL—USRD进行比对校准, 由这些来确定自己校准装置的准确度和可靠性。

四、水声计量测试用电子仪器情况

众所周知, 提高水声计量测试技术水平, 先进的测量方法固然重要, 但须靠仪器设备来实现。测量仪器有效地保障了方法的可靠实施和测量精度。因此, 我们把对水声计量测试用电子仪器的考察了解作为本次考察的重要内容, 先后考察了B&K公司的电声测量仪器、舒伦伯杰公司的数字电压表和传递函数分析仪器, 及CEL和DATA LAB公司的声学测量仪器和波形记录仪器, 还非常重视了解各考察单位正在使用的先进的电子测量仪

器。现把了解到的情况和我们的看法综述如下:

1. B&K公司是世界很有名气的声学振动测量仪器制造厂家,它的产品销售全世界。我国也非常广泛地使用。我们在参观了产品的生产线和试验实施后,总的感觉是加工精密、质量保证体系完整、措施得力,计量系统精确完善。在参观中没有看到很多新品种产品,但发现有两大变化趋势。一是越来越多的仪器具备有IEEE/IEC标准接口,以便适应于计算机取数和控制,组成自动数字测量系统;其二是数字式智能仪器代替过去模拟式自动仪器,使精度和功能大为提高,可控性大为增强。例如1051型正弦无规信号发生器,完全不同于一些老的扫频信号发生器,在数字控制下从0.2Hz到200KHz可连续扫频、间歇扫频或单次扫频,分辨率1MHz,仪器内部有一个存储器,可存储1024个幅度予置值。因此,可方便地输出具有所需幅度特性的扫频信号。利用此特性,可直接自动记录水声换能器的接收或发射响应曲线。该仪器还设有九个召唤频率,供反复测量和试验用。

2. 我们在英国DBE公司的水听器自动校准系统,Dowty公司的换能器自动校准系统,大都是利用小型计算机去控制系统的B&K声学测量仪器以达到自动化的目的。丹麦Reson公司的数字校准测试系统不仅显示了它的自动化,而且也体现了数字化。它所用的信号形式是合成的,测量系统在宽量程的前放之后用高速A/D变换器以数据采集的方式获得所需要的幅度和相位信息,小型计算机作功能的控制和测试后的运算,结果处理及控制外设。方向性测量状态时角度量也是由计算机通过接口驱动马达驱动器和马达来实现的。精度到0.1度,分辨率为0.01度。英国施伦伯杰仪器公司的1091频率响应数据管理系统也是一个数字化、自动化程度较高的测试系统,它的中心

控制器是用HP公司的310计算机,数据采集和频率分析是以1250为基础,若加上1250同步器后可使系统在脉冲状态下双通道工作,仪器中所采用的相关接收技术一方面可以排除干扰,另一方面可以分析非线性响应的谐波分量。即使在噪声存在的情况下,也可以得到精确测量和分析。

3. 参观了英国施伦伯杰仪器公司以后,明显地感觉到数字电压表的两个发展趋向,一是研制廉价的数字电压表,如7150数字万用表,重点放在廉价上,面向大众争取用户,但又不失其精度的特色,有5位半数字显示,能测高压,能测温度,可称得上价廉物美;二是研制供系统或精确测量用的高精度数字电压表,如7071/7081数字电压表,有8位半数字显示,仪器中带有微机。仪器本身有简单的运算能力。7061/7062高速巡查数字万用表,其特点是快速测量。在接到外部触发指令的三毫秒之内能完成4次测量,即能精确地捕捉到瞬态信息,另一特点是快速输出,能向IEEE 488总线以500读数/秒的速度输出数据。

数字电压表是施伦伯杰仪器公司的一个拳头产品,据说它用的脉冲调宽式模数转换器技术是该公司的专利,精度很高,号称是世界上最先进的精密型数字电压表。

4. 虽然B&K公司的精密声级计在声学测量中精度高、功能多。但与英国的Cel公司的393型精密声级计相比,特别是把393型声级计与238型微处理机或PL22型小FFT分析仪联用,情况就大不一样了。后者能实时地把信号展示在频域上或时域上,二通道输入能进行相关等等运算,并能与计算机系统联调使用,功能更多,体现了积木化和多功能,也便于携带,它代表着声学测量、分析发展方向。

5. 在新器件不断出现,计算机技术飞速发展的今天,微处理机在电子测量仪器中得到广泛的应用,使得电子测量仪器的研究

和生产几乎又面临着一个巨大的变革,新技术层出不穷,为下一代新型测量仪器开创了崭新的局面。在诸多的新技术中以频率合成技术、锁相技术、取样技术等等最为突出。在这一次的考察中,我们对具有锁相技术、频率合成技术方面的仪器接触不多,但在英国,我们参观了Lncase集团 deta lab 公司的瞬态波形记录仪。该仪器是用高频、高速采样技术来实现的。

这种取样技术是用所谓的取样门对高频高速信号进行采样变换,再将其以低频方式变换出来,从而避免了在测量仪器中大量使用高频元件和高频电路的困难。这种技术已在采样示波器、波形记录仪、网络分析仪等仪器中使用, data lab公司的瞬态波形记录仪就采用这种技术。该公司生产的PL 1080型程控波形记录仪双通道输入,每通道原理图见图5。每通道的采样速度为20 MHz,并带有 $4096 \times 8\text{bits}$ 的内存。二个通道是互相独立的,可以以相同的速度采集,也可以用不同的速度采集。

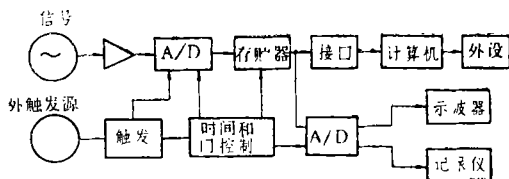


图 5

实际上它已属于标准件,即二通道就插二块插件板,各插一个通道板就多一个通道,多一个传感器,多一路信息。直到 n 通道。只要中心处理机能与之匹配,一般中心处理机,该公司选用扩了内存的HP 332计算机,并配有专用软件,也可以配PC机。另一种是dL 1200型四通道瞬态波形记录仪,每通道的采样频率为1MHz/秒。可以面板操作,也可程控。中心处理机也是用HP公司的扩展内存的

332计算机。

总之,水声测量用电子仪器正从非自动化或半自动化向全自动化发展,从单一功能向多功能发展,从大而重向小型化发展,从模拟指示向数字显示和输出发展,从完全人工操作向操作程序化发展。

五、关于水听器

我们考察了丹麦B&K公司、Reson公司和英国DBE公司生产的水听器。在B&K公司看到的仍只是8101、8103、8104和8105四种型号的水听器,没有新的品种。BK水听器使用比较广泛,不但在我国如此,许多欧洲国家也都普遍使用。因此,大家比较熟悉。对于丹麦Reson公司,我们过去并不很了解,实际上它生产的水听器品种和性能并不比BK水听器差,某些方面甚至比其更好。可用频率范围更宽,而且价值普遍比BK水听器低。DBE公司有OH 103, OH 107, OH 109三种定型的水听器,都是应用球状陶瓷灵敏元件,并带前置放大器,具有宽带、高灵敏度、低噪声特点。关于此三个公司的水听器性能详见表1。

另外,我们在英国NPL还考察了由NPL与GEC—Marconi合作研制的、现在由Marconi研究中心生产的膜片状PVDF水听器。这类水听器有一内径为100mm的圆环框架,灵敏元件尺寸很小,一般直径为0.5mm, 1mm或4mm,所用PVDF薄膜的厚度从0.006—0.050mm不等。它们具有频带宽、稳定性好的特点,可在0.5MHz—100MHz内作超声标准水听器和医疗超声检测用水听器。目前可提供共面屏蔽型、双层屏蔽型和差分输出型三种设计形式的单元膜片水听器。灵敏元件尺寸都为1mm直径的这三种型式水听器的典型性能见附表2。

附表1 三个公司生产的水听器性能

厂 家	丹 麦	B & K	公 司	丹 麦	Reson	公 司	英 国	DBE	公 司					
型 号	8101	8103	8104	8105	TC4014 (HYS-351)	HYS- 51	HYS- 101	HYS- 350	HYS- 120	HYS- 100	RS-1000	OH103	OH107	OH109
灵敏元件	压电陶瓷环	压电陶瓷管	压电陶瓷环	压电陶瓷球	陶 瓷 球	陶 瓷 管	陶 瓷 球	陶 瓷 球	陶 瓷 管	陶 瓷 球	陶 瓷 管	陶 瓷 管	陶 瓷 球	陶 瓷 球
频率范围	1Hz~ 120KHz +2dB -10dB	0.1Hz~ 180KHz +2dB -10dB	0.1Hz~ 120KHz +2dB -10dB	0.1Hz~ 160KHz +2dB -10dB	20Hz~ 500KHz	1Hz~ 50KHz	1Hz~ 125KHz	1Hz~ 380KHz	1Hz~ 150KHz	1Hz~ 125KHz	3Hz~ 1000KHz	1Hz~ 100KHz	1Hz~ 150KHz	10Hz~ 150KHz
灵敏度 (dB)	-184	-211	-205	-205	-187	-161	-182	-216	-211	-205	-199	-157	-163	-186
谐振频率(KHz)		~120	~65	~150	360		105	360	120	105		57	110	110
电容量 (pF)	(50Ω)	3850	7800	7200				4000	3000	10000				
前放增益 (dB)	0				+26	+23	+23				+20	+23	+30	+18.5
压力稳定性	-0.03 dB/ atm	-0.03 dB/ atm	-0.03 dB/ atm	-0.03 dB/ atm										
温度稳定性	-0.03 dB/ ℃	-0.03 dB/ ℃	-0.04 dB/ ℃	-0.03 dB/ ℃								±1dB/ -2℃~25℃	±1dB -2℃~25℃	±1dB -2℃~25℃
等效噪声压 参考1μPa/√Hz	小于70dB				小于50dB							小于42dB	小于61dB	小于73dB
过载声压级 参考1μPa	192dB											167 dB	173 dB	196dB
水平指向性	在100 KHz ±2dB	在100 KHz ±2dB	在100 KHz ±2dB	在100 KHz ±2dB	在360 KHz ±1dB							在100 KHz ±2dB	在50 KHz ±1dB 在100 KHz ±2dB	在50KHz ±1dB 在100 KHz ±2dB
垂直指向性	在15 KHz ±2dB	在100 KHz ±4dB	在50 KHz ±2dB	在100 KHz ±2dB 在270°内	在360 KHz ±1dB 在340°内							在100 KHz ±10 dB 在240°内	在25 KHz ±1 dB 在100 KHz ±2dB	在25 KHz ±1dB 在100 KHz ±2dB
最大工作深度	400m	400m	400m	1000m	1000m	1000m	1000m	1000m	500m	1000m		300m	300m	300m