

半球封闭圆柱体表面绕射声场研究

李宏伟^{1†} 陈克安¹ 姜建伟²

(1 西北工业大学航海学院 西安 710072)

(2 洛阳船舶材料研究所 洛阳 471039)

摘要 基于一致性几何绕射理论,对半球封闭圆柱体上半球表面的高频绕射声场进行了数值计算与分析,获得了单个点声源作用下,半球表面声场的声压分布图,其中包括一些干涉条纹,干涉条纹的区域及形状与点声源的位置和频率有关;在多个点声源作用下,发现在接近半球顶点的附近,多个声波经多途传播后在该区域的叠加声压由衰减转为增强的现象。

关键词 一致性几何绕射理论,绕射声场,半球封闭圆柱体

An analysis of the diffracted sound fields on the surface of a hemispherically terminated cylinder

LI Hong-Wei¹ CHEN Ke-An¹ JIANG Jian-Wei²

(1 College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039)

Abstract An approximate solution is presented for the diffracted sound fields on the surface of the hemisphere of a hemispherically terminated cylinder by the use of the uniform geometrical theory of diffraction. The distribution of the sound pressure with some interference stripes are obtained, which are induced by a point source on the cylindrical surface. The area and the shape of the interference strips depend on the locality and the frequency of the point source. Acted by multiple sources, it is discovered that in the neighborhood of the tip point of the hemisphere, after multi-path spread of the sound waves, the sound pressure is turned from decreasing to increasing.

Key words Uniform geometrical theory of diffraction, Diffracted sound fields, Hemispherically terminated cylinder

1 引言

随着计算机和信号处理技术的发展,声纳

性能有了很大的提高,同时水下声信息探测与反探测的对抗也越来越激烈。随着声隐身技术的发展,目前,自噪声问题对声纳性能的影响也

2006-07-10 收稿; 2007-10-28 定稿

作者简介:李宏伟(1978-),男,河南省洛阳市人,西北工业大学博士研究生,研究方向计算声学。

陈克安(1965-),男,西北工业大学教授,博士生导师。

姜建伟(1970-),男,洛阳船舶材料研究所高级工程师,学士。

† 通讯联系人 E-mail: hongweili@mail.nwpu.edu.cn

日益凸现出来，已经成为严重制约声纳性能提高的因素。水下航行器自噪声主要来源于机械噪声、螺旋桨噪声和流体动力噪声三部分，其位置都在声纳系统的后部，由于结构的遮挡，主要是通过绕射作用对声纳系统产生干扰。半球封闭圆柱体是水下航行器的一种典型结构，通过其表面绕射声场的研究，对于水下航行器声纳自噪声的预报和控制，具有重要的意义。

结构声散射问题具有很强的工程应用背景，一直是计算声学领域内的热点。目前，计算结构散射声场有许多方法，但能用于结构近场及表面声场计算的方法主要有：T-矩阵法^[1]、Sommerfeld-Watson 变换法^[2]、边界元法^[3]和一致性几何绕射理论^[4]等。T-矩阵法能适用于较宽的频率范围，但不能计算软边界条件和长宽比较大的结构；Sommerfeld-Watson 变换法使用起来较为复杂；边界元法由于计算规模等原因，只能在低频范围内应用；一致性几何绕射理论是一种高频近似方法，具有计算方法简单明确，物理概念清晰，计算结果精确，使用灵活的特点，能够较好满足工程应用的需要。本文基于一致性几何绕射理论，对半球封闭圆柱体上半球表面的高频绕射声场进行了研究：首先，研究了圆柱体表面上单个点声源作用下半球表面的声绕射问题，计算出了半球表面高频绕射声场的声压分布图，获得了半球表面的干涉条纹；其次，研究了关于圆柱体轴线均匀对称分布的多个点声源作用下半球表面的声绕射问题，发现在接近半球顶点附近，多个声波经多途传播后在该区域的叠加声压由衰减转为增强的现象。本文的方法和结论对于水下航行器声纳系统自噪声的预报和控制将起到积极的推动作用。

2 几何绕射理论

几何绕射理论是经典几何声学的扩展，通过引入一种新的射线（绕射射线），来描述散射现象。一致性几何绕射理论是几何绕射理论的

发展，克服了其在阴影边界区域的不连续性。根据文献 [4] 中的一致性几何绕射理论公式，刚性曲面上 Q' 点的振动微面积元 ds 在曲面上任意另外一点 Q 引起的声压可以表示为如下形式：

$$dp(Q|Q') = \frac{-jk\rho c u(s)}{2\pi} \left[1 - \frac{j}{kt} \left(1 - \frac{j}{kt} \right) \right] V(\xi) DG(kt) ds \quad (1)$$

其中： ρ 为介质密度， c 为介质中的声速， k 为波数， $u(s)$ 为微面积元的振速， t 为源点 Q' 沿表面射线到场点 Q 点的距离，如图 1 所示。

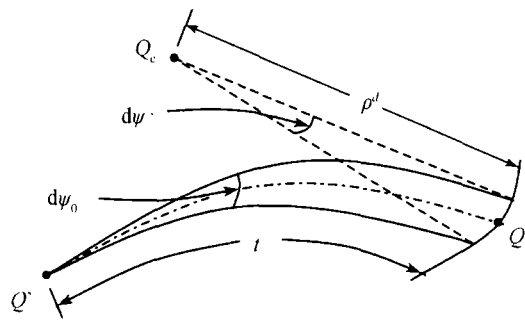


图 1 表面射线传播示意图

表面射线的轨迹由广义费马原理确定^[5]。广义费马原理指出： Q' 与 Q 两点间射线的实际轨迹就是对于微小的声程变化取极值的曲线，一般取极小值，但有时也可能取极大值。 $V(\xi)$ 为硬边界 Fock 函数，有

$$V(\xi) = \frac{\xi^{\frac{1}{2}} e^{j\frac{\pi}{4}}}{2\sqrt{\pi}} \int_{\infty e^{-j2\pi/3}}^{\infty} \frac{W_2(\tau)}{W_2(\tau)} e^{-j\xi\tau} d\tau \quad (2)$$

式中 $W_2(\tau)$ 为 Fock 型 Airy 函数，定义为

$$W_2(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\infty e^{-j2\pi/3}}^{\infty} e^{\tau Z - Z^3/3} dZ \quad (3)$$

$W_2'(\tau)$ 为其对 τ 的导数。 ξ 为 Fock 参数

$$\xi = \left(\frac{k}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \int_{Q'}^Q \frac{1}{[\rho_g(t)]^{\frac{2}{3}}} dt \quad (4)$$

$\rho_g(t)$ 为 $Q'(\tau)$ 点到 $Q(\tau)$ 点曲面短程线的曲率半径。 D 为表面射线的发散系数，

$$D = \sqrt{\frac{td\psi_0}{d\eta(Q)}} = \sqrt{\frac{td\psi_0}{\rho^d d\psi}} \quad (5)$$

如图 1 所示, $d\psi_0$ 为在源点 Q' 的两条邻近的表面射线的夹角, $d\psi$ 为相同的两条表面射线在场点 Q 的切线的夹角, ρ^d 为表面射线束横截面的主曲率半径。式 (1) 中 $G(kt)$ 为自由场 Green 函数

$$G(kt) = \frac{e^{-jkt}}{t} \quad (6)$$

刚性曲面的表面声场可以通过对表面振动处微面积元振动引起的声场叠加而求得。设 S 为曲面上的振动面, 则在 Q 点产生总的声压为

$$\bar{p}(Q|S) = \int_S dp(Q|Q') = \int_S \frac{-jk\rho c u(s)}{2\pi} \left[1 - \frac{j}{kt} \left(1 - \frac{j}{kt} \right) \right] V(\xi) DG(kt) ds \quad (7)$$

当曲面是二维曲面时 (如无限长圆柱体), 式 (7) 变为

$$\bar{p}(Q|S) = \int_S dp(Q|Q') = \int_S \frac{-k \exp[j(\pi/4)] \rho c u(s)}{\sqrt{2\pi k}} \left[1 - \frac{j}{kt} \left(1 - \frac{j}{kt} \right) \right] V(\xi) D'G'(kt) ds \quad (8)$$

其中 $D' = 1, G'(kt) = \exp(-jkt)/\sqrt{t}$ 。

一致几何绕射理论是基于高频的近似方法, 当物体几何尺寸或声程相对于声波波长较小时, 即 kt 趋向于零时, 一致几何绕射理论失效。另外, 一致几何绕射理论也不能计算焦散区的声场, 即当 Q 点位于表面射线焦散区时, (7) 和 (8) 式失效。实际应用中如需要计算焦散区声场时, 可采用其它方法 [6]。

图 2 为一致性几何绕射理论和解析解 [7] 计算的一些情况下声压幅值比较图: 图 2(a) 为球面上的一个点声源在球表面所产生绕射声场的声压分布图; 图 2(b) 为无限长圆柱体上的一个线声源在圆柱表面产生绕射声场的声压分布图; 其中 k 分别等于 50 和 100。从图中可以看出, 在不同曲面上和不同频率下, 一致性几何绕射理论和解析解的两条声压幅值曲线都合得很好, 这充分证明了本方法的正确性。

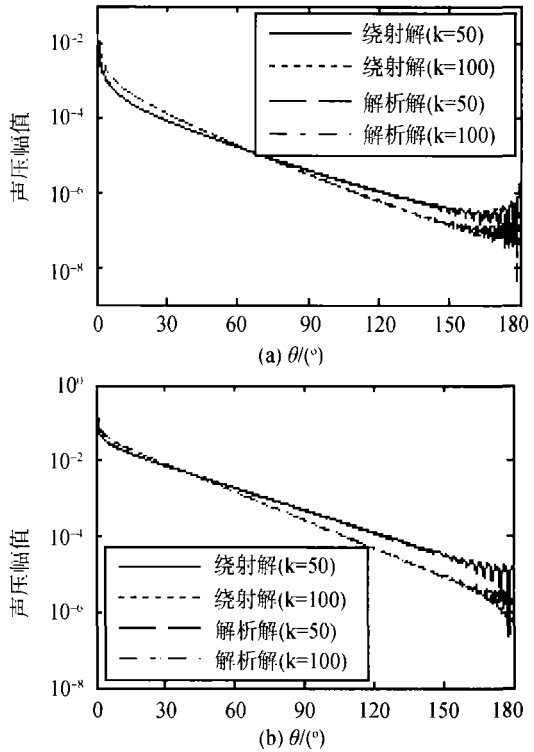


图 2 两种方法计算球面 (a) 和无限长圆柱表面 (b) 声压幅值分布图

3 半球封闭的圆柱体绕射声场

3.1 单个点声源的绕射声场

半球封闭的圆柱体如图 3 所示, 半球的半径为 $a = 1$, 圆柱体的长度为无限长, 源点 $S(\cos \phi_P, \sin \phi_P, Z_P)$ 在圆柱体表面, 场点

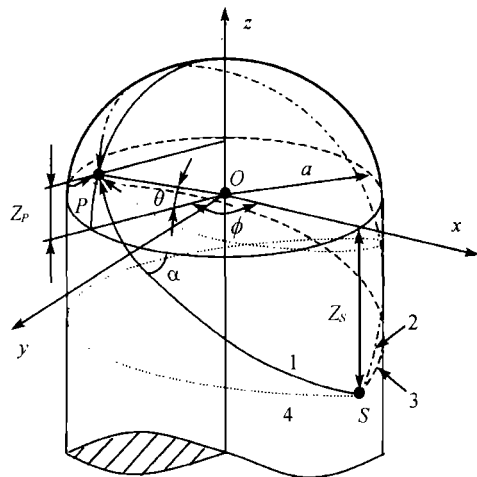


图 3 半球封闭的圆柱体示意图

$P(\cos\theta_S \cos\phi_S, \cos\theta_S \sin\phi_S, \sin\theta_S)$ 在半球表面。根据几何绕射理论，半球上任一场点 P 的声压，是由从源点 S 发出的声程取极值的表面绕射射线所决定的， S 点和 P 点在一定位置条件下会有高阶绕射射线，如射线 4 所示。由于曲面的绕射射线衰减较大，所以一般只考虑声程较短的一阶绕射射线，如射线 1、2、和 3。

图 4(a) 为在源点 $S(0, 1, -1)$ 上声源强度 $Q_0 = 1$ (以下计算中均取 $Q_0 = 1$) 的点声源，在场点 $P(0.97 \cos\phi, 0.97 \sin\phi, 0.25)$ 位置的声压分布图，其中方位角 $\phi = \phi_P - \phi_S = 0^\circ \sim 180^\circ$ ， k 为 50。从图中可以看到：当 ϕ 小于 40° 时，从源点 S 点到场点 P ，只有一条符合广义费马原理的绕射射线， ϕ 大于 40° 时，存在三条绕射射线；当 ϕ 较小时， P 点的声压以射线 1 为主，射线 2 和射线 3 的声压可以忽略不计；随着 ϕ 的增大，三条射线的声压逐渐接近，由于三条射线声程不同而引起的相位差，使总的声压开始产生振荡；由于三条射线的相位差较为复杂，引起总的声压产生不规则的振荡。

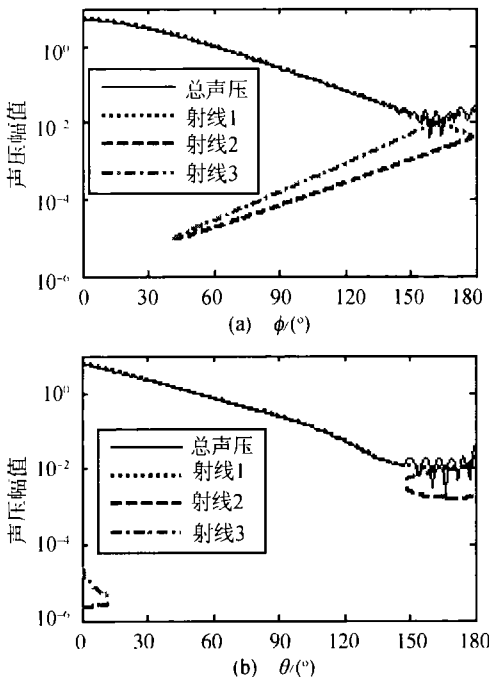


图 4 绕射射线随方位角 ϕ 和随俯仰角 θ 的声压分布图

图 4(b) 为相同点源在场点 $P(\cos\theta \cos 20^\circ, \cos\theta \sin 20^\circ, \sin\theta)$ 位置的声压分布图，其 $\phi\theta\phi\theta$ 中俯仰角 $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ ， k 为 50。从图中可以看到：当 θ 较小或较大时，即 P 点的位置较低时 (Z_P 较小)， P 点同时有三条绕射射线； θ 较小时，即 S 点与 P 点距离较近， P 点的声压以射线 1 为主，射线 2 和射线 3 可以忽略；随着 θ 增大，场点 P 的绕射射线变为一条，且总声压不断衰减； θ 接近时 180° 时， S 点与 P 点距离较远，三条射线的声压幅值接近，由于相位的差别而使总的声压产生不规则的振荡现象。

图 5(a), (b), (c) 分别为源点 S 坐标为 $(0, 1, -0.5)$, $(0, 1, -5)$, $(0, 1, -5)$ ， k 为 50, 50 和

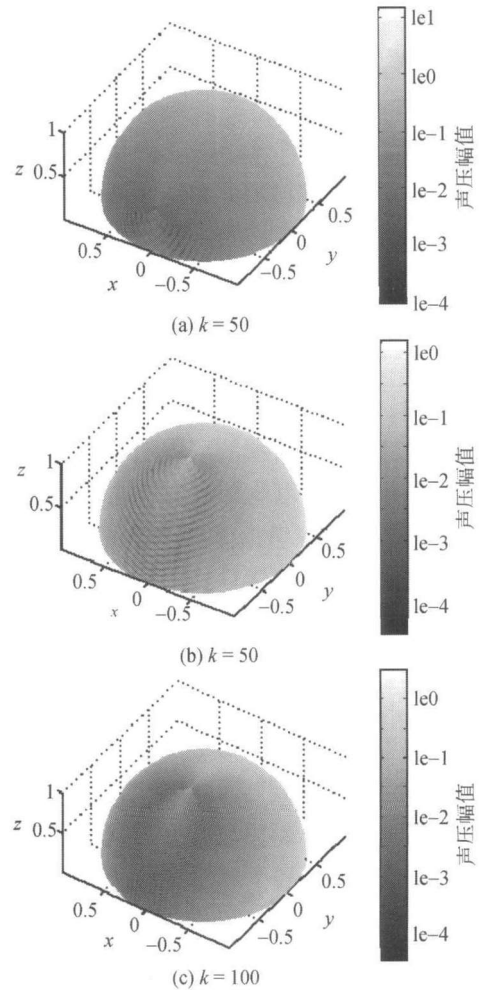


图 5 源点 S 坐标分别为 (a) $(0, 1, -0.5)$ ，(b) $(0, 1, -5)$ ，(c) $(0, 1, -5)$ 时，半球表面声压幅值分布图

100 时, 半球表面声压幅值的对数分布图, 从图中可以清楚地看到声波的干涉条纹。由图 4 可知, 当方位角 ϕ 和俯仰角 θ 较小时, 随着 ϕ 和 θ 的增加, 场点 P 的声压幅值衰减较为平稳, 所以在图 5 中的干涉区域以外, 半球表面的颜色过渡较为连续, 声压幅值平稳衰减; 当 ϕ 和 θ 较大时, 场点 P 的声压幅值出现振荡现象, 半球表面也开始出现声波的条纹干涉现象。图 (a) 中, 由于源点 S 距平面 xoy 距离较近, 三条射线能同时到达场点 P 的区域较小, 所以图中的声波干涉区域相对于图 (b) 和图 (c) 也较小。同时, 随着频率的升高, 图 (c) 中的干涉条纹也变得更加密集。

3.2 多个点声源的绕射声场

图 6 为圆柱体表面上关于 z 轴对称均匀分布的 60 个不相干点声源共同作用下的半球表面声压分布图, 其中 $Z_S = -1, k = 50$ 。点声源数目较多, 且对称均匀分布, 所以半球表面声压关于 z 轴对称分布, 随着俯仰角 θ 增大, 声压幅值逐渐衰减。图 7(a) 为 60 个点声源在圆柱体表面不同位置时 (Z_S 分别等于 $-0.1, -0.5, -1$ 和 -5), 半球表面俯仰角 θ 方向声压分布图, 其中 $k = 50$ 。从图中可以看出, 声源距 xoy 平面距离增大时, 绕射射线的声程随之增大, 声压的衰减也变大, 所以半球表面相同位置场点 P 的声压幅值随声源坐标 Z_S 的增大而减小; 随着 θ 增大, 半球表面声压逐渐衰减, 在 θ 接近 90° 时, 除了 $Z_S = -0.1$ 的曲线外, 其余三条曲线的幅值转为升高, 升高的幅度随 Z_S 坐标绝对值增大而升高。产生这种现象的原因是各个声场的叠加并互相干涉造成的。各个声源距半球顶点的声程相同, 因此顶点的声压是各个声场声压的叠加; 而顶点附近区域, 距离各个声源的声程不同, 各个声源在此区域产生的声场相位差别较大, 干涉严重, 因此声压幅值相对于顶点位置较小。图 7(b) 为 60 个点声源在 $Z_S = -1$ 处, k 分别等于 50, 100, 500 和 1000, 半球表面俯仰角 θ 方向声压分布图。从图中可以看出, 随着频率的升高, 绕射射线的衰减增

大, 半球表面声压幅值的衰减也加快; 另外, 在图中也可以看到不同频率下, 半球表面声压幅值曲线在接近 90° 时增大的现象。

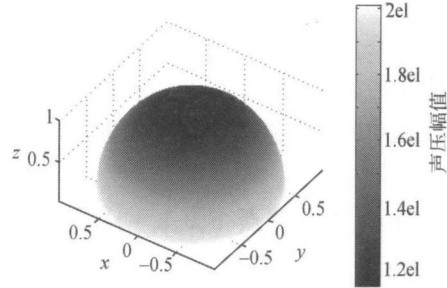


图 6 环状分布点声源的半球表面声压幅值分布图 ($Z_S = -1, k = 50$)

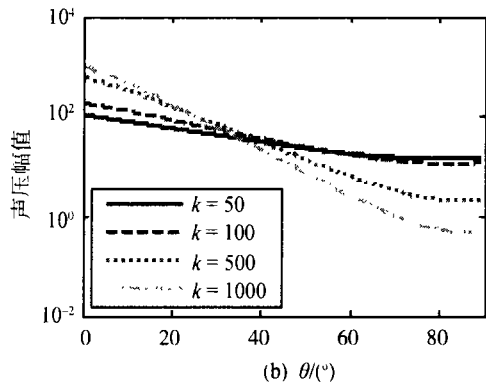
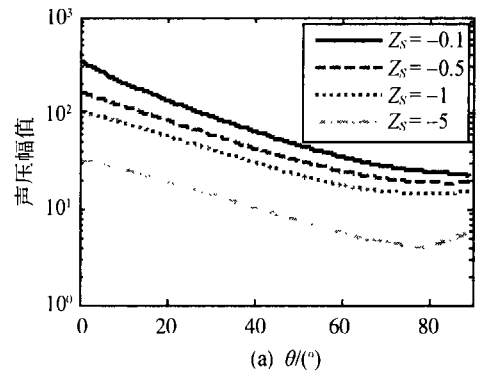


图 7 (a) 不同位置 ($k=50$) 和 (b) 不同频率 ($Z_S = -1$) 环状点声源的半球表面俯仰角 θ 方向声压分布图

4 结语

本文基于一致性几何绕射理论, 研究了半

封闭无限长圆柱体半球表面的绕射声场。在单个点声源作用下, 获得了半球表面声场的声压分布图和干涉条纹, 干涉条纹的区域及形状与点声源的位置和频率有关; 在多个点声源作用下, 发现在接近半球顶点的附近, 多个声波经多途传播后在该区域的叠加声压由衰减转为增强的现象。

本文的方法可用于类似结构水下航行器表面绕射声场研究, 为结构表面高频绕射声场研究提供了一种简单、灵活而准确的手段, 对于声纳自噪声的预报和控制具有积极的意义。由于实际结构形状的复杂多样, 本文的方法还需要进一步的发展和完善。基于一致性几何绕射理论, 研究具有棱角的非光滑结构表面高频绕射声场的计算方法, 将在工程上获得更广泛的

应用。

参 考 文 献

- [1] Gaunard G C, Werby W F. Appl. Mech. Rev., 1990; 43: 171-208.
- [2] Rumerman M L.J. Acoust. Soc. Am., 1992; 91: 2502-2509.
- [3] Schenck H A.J. Acoust. Soc. Am., 1968; 44: 41-58.
- [4] Pathak P H, Wang N. IEEE. Trans. on AP., 1981; 29: 911-922.
- [5] Keller J B. Geometrical theory of diffraction. J. Opt. Soc. Am., 1962; 52: 116-130.
- [6] Burnside W D, Peters L. Axial RCS of finite cones by the equivalent current concept with higher-order diffraction. Radio Sci, 1972, 7: 943-948.
- [7] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 哈尔滨: 国防工业出版社. 1981. 200-231.

2007 年全国功率超声学术会议在宁波召开

由中国声学学会功率超声分会主办、宁波新芝生物科技股份有限公司协办的“2007 年全国功率超声学术会议”于 2007 年 11 月 15 日~17 日在浙江省宁波市召开。这次会议经过了将近 1 年的筹备, 中科院声学所和陕西师范大学物理学院等单位做了大量的具体的工作。会议还得到了宁波市科学技术协会、中国电子学会浙江省分会宁波市电子学会的大力支持。

11 月 15 日上午会议开幕。参会的代表有 80 多人, 分别来自全国各地的高等院校、科研机构和功率超声设备制造应用企业。中国声学学会理事长田静和宁波市科协副主席钱爱民出席了开幕式, 对会议的召开表示祝贺, 并发表了热情洋溢的讲话。

此次会议共收到论文 16 篇, 论文内容基本上反映了当前功率超声技术的应用和研究现状。会议期间, 大家进行了充分的学术交流, 就功率超声领域的许多重要问题进行了热烈的讨论, 北京金星超声波设备技术有限公司、广州新栋力超声电子设备有限公司、成都九洲超声技术有效公司、北京邦联时代电子科技有

限公司、深圳东荣电子有限公司、然斯康波达机电设备(深圳)有限公司等企业的代表还分别介绍了功率超声技术的应用情况。功率超声分会主办的“中国功率超声网”的管理人员介绍了网站的运行情况。会议的消息和图片都及时地上传到“中国功率超声网”。

会议期间还召开了功率超声分会委员会议, 传达了声学学会的有关文件和今后工作的安排部署。各位委员就分会下一步的工作重点、学科发展的方向、2009 年学术年会的准备、对分会工作的建议以及学会网站的运行等问题进行了讨论和研究。

经过大家的共同努力, 此次会议取得了圆满成功。会议为产、学、研的交流与合作搭建了一个平台, 为科研人员以及工程技术人员、企业管理人员提供了交流和沟通的机会。会议必将对我国功率超声学科的发展起到推动的作用。

(中国声学学会功率超声分会)