

海澜、杨玉瑞、许建平同志的大力帮助、在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Lam F. K. and Szilard J., *Ultrasonics*, 14-3 (1976), 111-114.
- [2] Furgason E. S., et al., *Ultrasonics*, 13-1 (1975), 11-17.
- [3] Lee B. B. and Furgason E. S., *Ultrasonics*, 21-4(1983), 153-161.
- [4] Lam F. K. and Hui M. S., *Ultrasonics*, 20-3 (1982), 107-112.
- [5] Sung K. M., *Ultrasonics*, 22-2(1984), 61-68.
- [6] 应崇福,张海澜,李明轩,声学学报 9-1(1984),1-11.
- [7] Zhang H. L., Li M. X. and Ying C. F., *J. Acous. Soc. Am.*, 74-4(1983), 1105-1114.
- [8] Ying C. F., Li M. X. and Zhang H. L., *Ultrasonics*, 19-4(1981), 155-158.

## 超声脉冲回波谱分析全自动化 测量系统的研制\*

毛伟年 王新龙 张卫 陈兆华 叶式公 冯若

(南京大学声学研究所)

1989年9月18日收到

本文报道了一种全自动化超声脉冲回波谱分析测量系统。该系统具有对超声回波信号进行快速选择性采样、存贮、数字分析与处理及微机程序软件控制三维机械扫描等功能,可对生物组织样品的超声衰减系数谱、背向散射系数谱及回波谱自相关进行测量与分析。对一系列哺乳动物软组织样品所做的实验研究表明,该测量系统给出了令人满意的研究结果。

### 一、引 言

目前在医学临床上广泛应用的A型、B型超声诊断仪都是基于超声脉冲回波检测技术的。A型和B型超声诊断仪仅仅利用了超声脉冲回波的幅度参数来提取诊断信息。然而实际的回波信号不仅在幅度上包含有被测组织的某些信息,而且在其频谱分析中可能包含有更丰富的、更能表征组织结构特征的信息,因此通过对超声脉冲回波信号进行宽带频谱分析可以获得更多反映组织特征的信息,增加诊断信息量、扩大诊断范围、提高临床确诊率,为发展新型的定量超声诊断技术探索途径。

来自人体软组织的超声背向散射信号是B型超声诊断仪用于断层成像的主要信号,为进行生物组织超声背向散射谱的研究,我们研制、建立了一套超声脉冲回波谱分析全自动化测量

系统。该系统具有对超声回波信号进行快速采样、记录、数字分析与处理及程控机械扫描,以测量生物组织的超声衰减系数谱、背向散射系数谱及对回波频谱进行自相关分析等功能。利用该测量系统对动物软组织进行了一系列有关超声散射回波谱分析研究,取得了令人相当满意的结果。

### 二、测量系统的总体构成

整个测量系统包括硬件和软件两大部分。硬件主要由以下几部分组成:宽带脉冲激励单元,宽带超声脉冲发、收换能器,宽频带、高增益接收放大器及门电路,数字采样器及微型计算机控制和数据分析处理系统,微机控制的三维机械扫描系统及测量水槽等,如图1所示。

\* 国家自然科学基金资助的课题

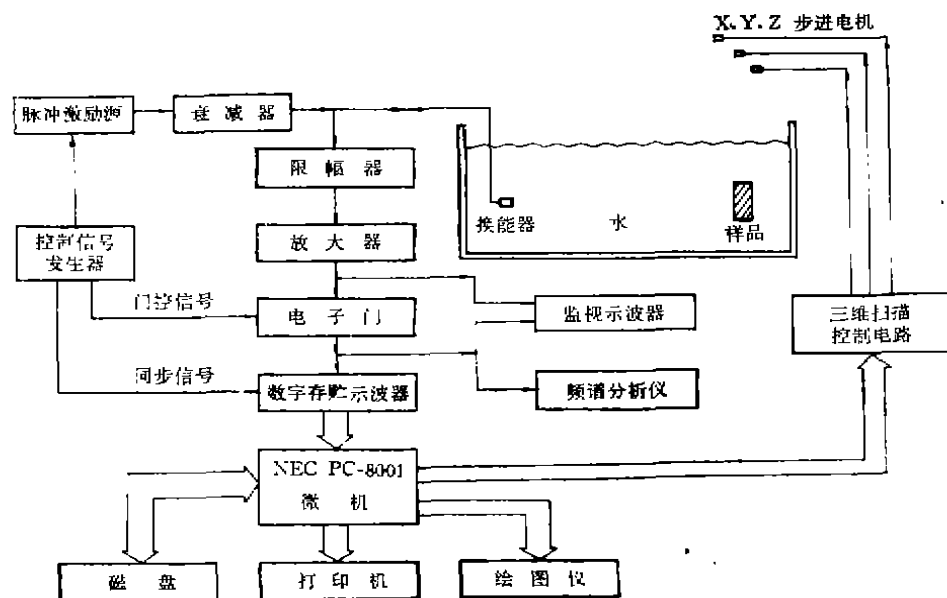


图1 测量系统硬件的总体构成框图

该系统在计算机软件程序控制下实现快速多功能自动测量。宽带超声换能器在 $\delta$ 脉冲激励下产生窄超声脉冲向水槽内发射，经目标物声阻抗突变的界面反射或散射的超声脉冲回波信号又为同一超声换能器所接收，经放大和门选，由高速采样器对门选回波信号采样并输入计算机内存，再由计算机进行快速频谱分析等处理。在计算机软件控制下，通过三维机械扫描装置移动超声换能器或测试样品，重复测量，从而实现了系统对样品进行自动化多点测量与分析处理。

该测量系统具有较宽的频率响应，能产生和接收宽频带超声脉冲信号；具有高增益、低噪声的接收电路，可用于检测比较微弱的散射回波信号；具有高速采样、数据传输和快速谱分析能力，并能自动进行快速的三维空间扫描测量。

### 三、系统主要硬件单元的性能指标

#### 1. $\delta$ 脉冲激励源

本测量系统所采用的 $\delta$ 脉冲激励源<sup>[1]</sup>产生的 $\delta$ 脉冲时宽小于50ns，带宽为15MHz，发射电压峰值可达330V，脉冲重复频率在0—5kHz

之间连续可调。

#### 2. 宽带超声换能器

本系统所使用的超声换能器为PZT压电陶瓷宽带换能器，由无锡721厂提供，其有效辐射面直径为12mm，中心频率为5.12MHz，3dB相对带宽大于50%，插入损耗为28dB。

#### 3. 接收电路

接收电路由限幅器、放大器及时延门电路所组成。

限幅器的作用是抑制不需要的大信号（主要是 $\delta$ 源的激励脉冲信号及测试样品的前界面反射信号），以保证其后边的主要用于放大小信号的高增益放大器工作在线性放大状态。

由于超声脉冲的散射回波信号较弱并具有宽带特性，则要求放大器应具有高增益、低噪声和宽频带的性能。本测试系统所用的自制放大器3dB带宽为1—10MHz，增益为60dB，输出动态范围为0—4V，输出噪声 $\leq 100\text{mV}$ ，输出阻抗为50 $\Omega$ 。

由门控信号控制的电子门选取的一段回波信号（对应于样品内部的某一散射体积），可供模拟信号谱分析与观察，当采用数字存储示波器进行高速数字采样时，模拟电路即不再需要

了。

#### 4. 数字信号采样器和微型计算机

本测量系统采用 Philips 公司生产的 PM 3315 型数字存储示波器作为高速信号采样器,对超声回波信号进行选择采样与存储。PM 3315 型示波器的最高采样频率可达 125 MHz,采样频率可调,量化位数为 8 位,最高灵敏度为 10mv/DIV。当选择  $5\mu s$  长度的时间信号采样时,采样频率取 50MHz,采样 256 个数据。整个采样过程通过 IEEE-488 通用接口母线由 NEC-PC-8001 微型计算机控制,并将数据输入计算机内存,由计算机存储和进行谱分析等计算。

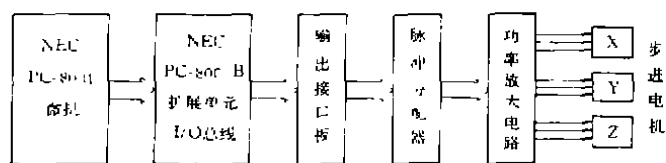


图 2 微机控制步进电机原理图

率放大电路组成,如图 2 所示。

步进电机是由脉冲电流驱动的,由微机输出的数字逻辑脉冲经过脉冲分配器及功率放大器后驱动步进电机转动,每输入一个脉冲,电机转动  $1.5^\circ$ ,X 与 Y 方向的丝杆螺距为 1.5mm,则相应的步进脉冲当量为  $\frac{1.5}{360} \times 1.5 = 0.00625$  mm/脉冲;沿 Z 方向驱动平台的丝杆螺距为 5 mm,则脉冲的驱动当量为  $\frac{1.5}{360} \times 5 = 0.0208$  mm/脉冲。整个三维机械扫描过程是由微机程序控制的,扫描方式可以有很多种,由设置的软件程序决定,如最简单的为直线扫描及等深平面扫描,即 C 型扫描等。

### 四、测量系统的程序软件

本测量系统在 NEC-PC-8001 微机程序控制下实现全自动化扫描测量。程序软件由主程序和功能子程序所组成,由 BASIC 语言和 Z-80 机器语言编写。目前已开发的程序包括对应用声学

#### 5. 三维机械扫描系统

在微机输出的数字逻辑脉冲控制下,通过步进电机控制器及三个步进电机驱动的机械传动装置实现检测超声对样品内空间作三维机械扫描。

三维机械传动装置:一个两边具有水平滑槽的长方形平台,可由一个步进电机和传动丝杆沿滑槽方向驱动,作 Z 方向深度扫描;在平台上装置有另二个步进电机与传动丝杆,可沿 X 方向及 Y 方向驱动,进行等深的 XY 平面扫描(即 C 型扫描)。三个步进电机由步进电机控制器驱动,该控制器包括微机输出接口电路、脉冲环形分配器(按三相单六拍方式分配)及九路功

超声回波信号快速选择采样、频谱分析、衰减系数估计、背向散射系数测量及回波频谱的自相关分析等功能。显然,通过对本系统程序软件的进一步开发与扩展,还可以进行其他的有关回波实验的分析研究。程序的主要结构框图如图 3 所示。

下面对几个主要功能子程序作些说明。

##### 1. 信号采样及数据传输子程序

为实现快速空间多次扫描测量,要求高速进行信号采样、数据传输及频谱分析等运算。回波信号采样由 PM3315 型数字存储示波器在微机程序控制下完成,并通过 IEEE-488 接口母线将采集的数据传输到微机内存。信号的采样速度取决于采样频率,PM3315 采样  $5\mu s$  长度的回波信号时,采样频率为 50MHz 左右,因此提高这部分工作的速度在于尽可能缩短数据传输时间。用机器语言编写控制程序可大大缩短传输时间,为此在本测量系统中控制 PM 3315 信号采样和数据传输的子程序由 Z-80 机器语言编写。该程序控制的采样并传输 256 个

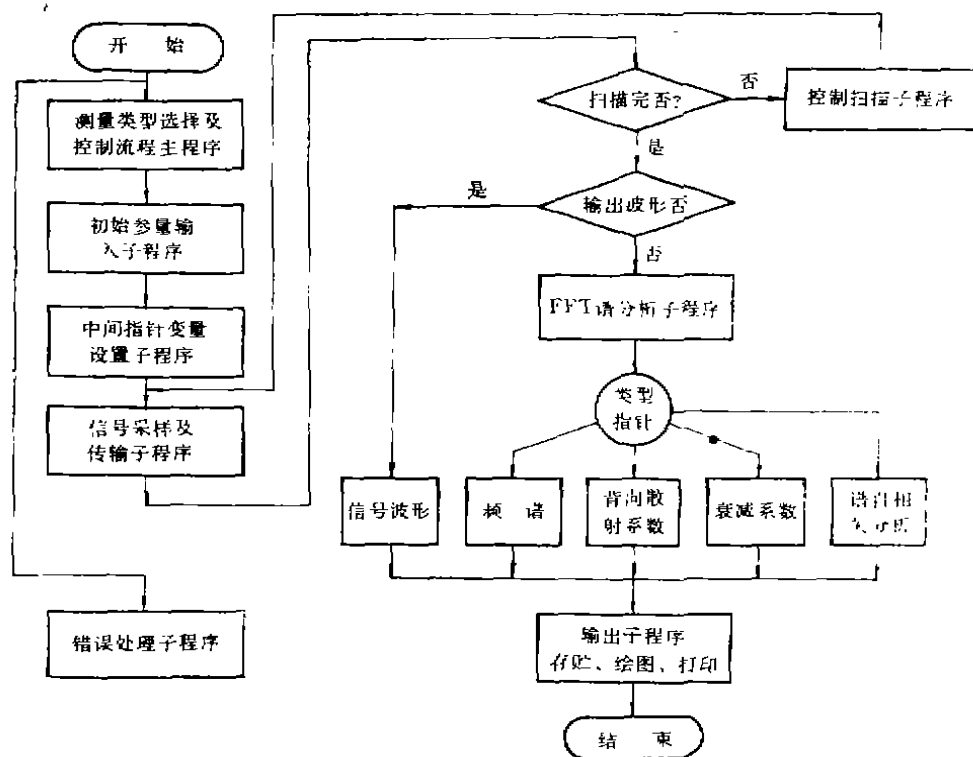


图3 测量系统的软件程序结构框图

数据用时不到2秒钟。

## 2. 快速傅里叶变换 (FFT) 及谱平均子程序

如果使用高级语言(如 BASIC 语言)编写 FFT 程序和空间散射谱累加及平均等程序,在 NEC-PC-8001 微机上运行是很慢的,需要相当长的时间,不适于生物样品测量。NEC-PC-8001 是以 Z-80 为 CPU 的 8 位微机,因此在本系统中用 Z-80 机器语言编制 FFT 和谱累加及平均子程序,大大提高了运行速度,缩短了测量时间。

## 3. 扫描控制子程序

三维机械扫描系统在不同的微机扫描方式程序控制下,可以作多种方式的扫描。在研究生物组织样品的散射性质时,主要是选取组织样品中某一等深截面作平面扫描。由于所测样品的形状一般取圆柱形,则其等深截面为圆面,扫描轨迹取为同心圆环形。扫描由圆的中心位置开始,再由内圆环逐步扩展到外圆

环,在整个扫描过程中确保声束不会超出样品边界。扫描步长可变,但步长应大于组织的相干长度。扫描是由  $x$  方向和  $y$  方向的两个步进电机与驱动丝杆完成的。为此编制了相应的控制机械扫描程序软件,在程序中对由于取整数脉冲而产生的位置坐标累积误差应予以修正,以保证定位准确。

## 4. 测试参量分析计算子程序

**背向散射系数子程序:** 对由取代法测得的背向散射传输函数进行超声衰减及衍射修正,以获得背向散射系数,再通过曲线拟合处理求出背向散射系数的频率依赖关系  $\sigma_{BS}(f)$ 。

**衰减系数子程序:** 由测量样品内不同深度处的背向散射传输函数进行衰减系数估计,获得衰减系数的频率依赖关系  $\alpha(f)$ 。

**回波谱自相关分析子程序:** 对回波频谱进行自相关分析并输出自相关谱,由谱峰的频率间隔来估计组织散射元的特征间隔。

每一散射回波信号波形和频谱都可直接通

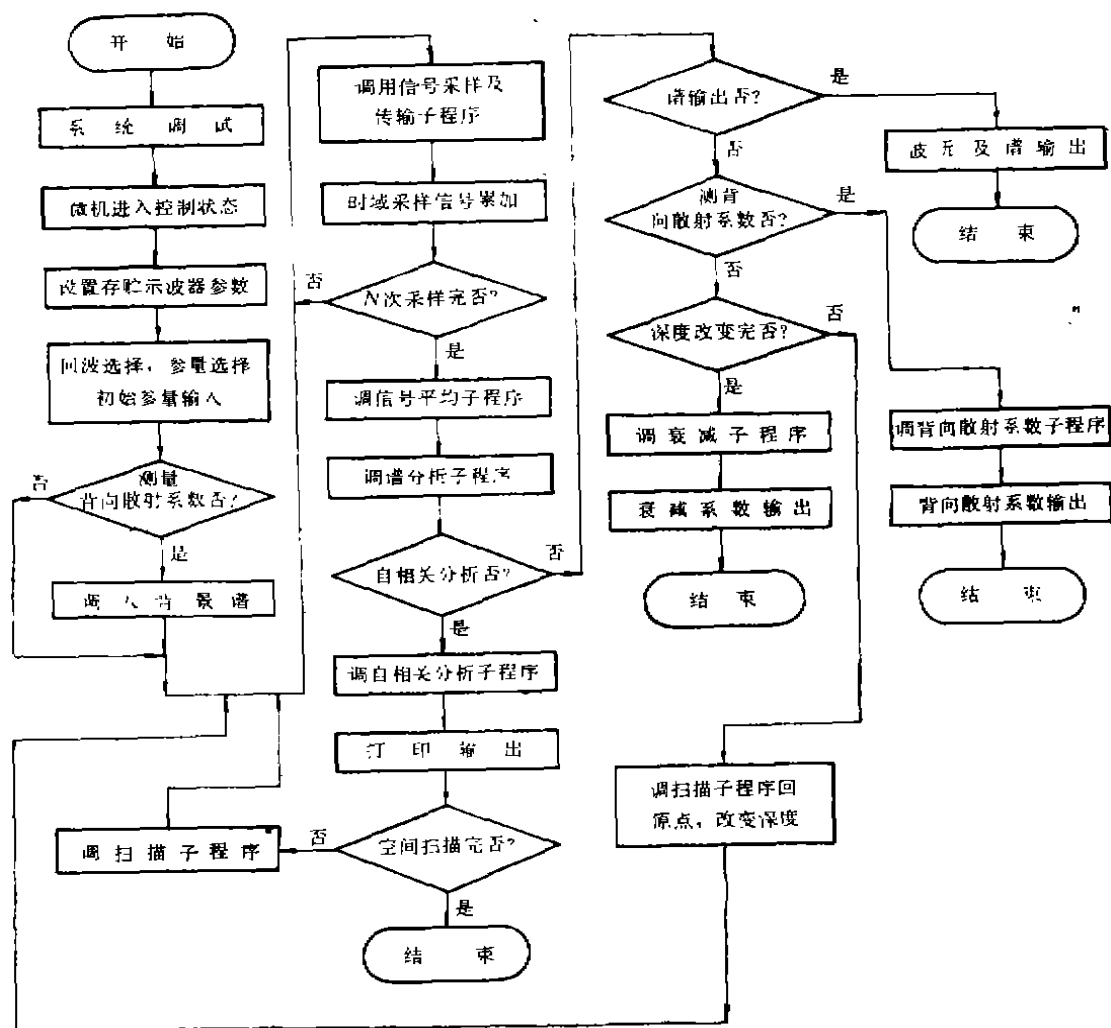


图4 系统自动测量的流程图

过输出子程序加以存贮或绘图记录输出。

## 五、测量系统的运行原理

如上述, 本测量系统可以自动测量组织样品的背向散射频谱、背向散射系数谱、衰减系数谱及背向散射谱的自相关函数谱等参量。其中背向散射频谱是指对散射回波进行 FFT 分析和对数化等处理后所获得的基本频谱特性, 它既决定于样品本身的散射特性, 同时也与测试系统及组织衰减等有关; 背向散射系数谱则是对背向散射谱进行系统频响修正、衰减修正及衍射修正后的频谱特性, 它只反映组织本身的

散射特性; 衰减系数谱则是在背向散射谱的基础上进行频域处理后得到的组织样品的超声衰减系数随频率的变化关系; 背向散射谱的自相关函数谱则反映了组织样品内散射元的空间结构特性。通过研究这些参数, 可从不同侧面用声学参量来研究揭示组织样品的结构和组份的变化, 从而构成了谱分析技术用于对组织进行超声定征的重要研究内容。整个测量过程包括换能器机械扫描、散射信号采样、数据传输、数据分析处理及结果输出等内容。测量开始前, 将系统调试到正常工作状态, 并选择合适的散射回波, 尔后启动微机进入控制运行状态, 确定所测参量, 输入相应的初始参数及予置参数(如

空间扫描方式等),则系统在软件控制下进入自动化测量过程,直至最后结果输出。整个测量过程可由图4所示的流程图说明之。

## 六、测量结果举例

应用本测量系统对一系列新鲜的离体哺乳动物软组织进行了系统的研究,所获结果可与近期文献上的有关报导相比较,令人满意。在此仅举对新鲜离体猪肝样品的测试结果说明之。

图5所示为对猪肝组织样品进行空间平面扫描44次后,测得的超声衰减系数谱。可见由背向散射谱估计的衰减谱有明显的起伏,但由此获得的拟合方程  $\alpha(f) = 1.203f^{0.883} \text{ dB/cm}$  ( $R = 0.672$ ) 则处于合理的数值范围<sup>[2]</sup>,上面式中  $\alpha(f)$  为超声衰减系数 (dB/cm),  $f$  为超声频率 (MHz),  $R$  为拟合相关系数。图5中的连线为相应的拟合曲线。

图6为对猪肝组织超声背向散射系数谱的测量结果。扫描次数为36次。由此而获得的拟合方程为  $\sigma_{BS}(f) = 9.598 \times 10^{-6} f^{1.891} / \text{cm} \cdot \text{Sr}$

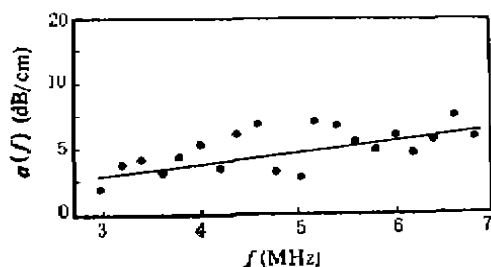


图5 猪肝超声衰减系数谱的测量结果

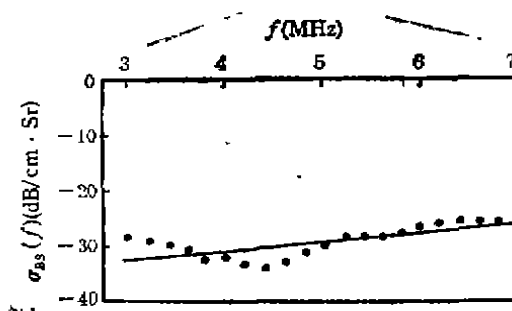


图6 猪肝超声背向散射系数谱的测量结果

与文献报导较为相符<sup>[3]</sup>。式中  $\sigma_{BS}(f)$  为背向散射系数 ( $1/\text{cm} \cdot \text{Sr}$ ),  $f$  为超声频率 (MHz)。图中连线为拟合曲线。

图7所示为猪肝组织的超声背向散射谱的自相关谱。可见,自相关谱具有明显的类似由相干产生的谱峰结构,该现象的存在正是组织内散射元半有序(亦即半随机)分布以及散射回波发生部分相干效应的反映。由此出发,从谱峰的频率间隔估计得出的组织散射元特征间隔亦与有关文献报导<sup>[4]</sup>相符。

对有关测量结果的详细分析报导将由另文逐一给出。此外,在本测量系统建立过程中已

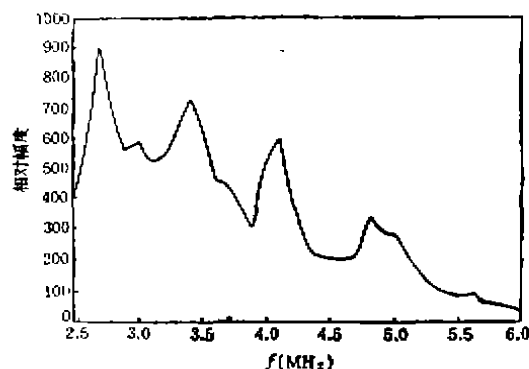


图7 猪肝超声回波频谱自相关谱的测量结果

有若干研究工作完成<sup>[5-7]</sup>。

## 七、结 语

研制与建立了一套全自动化超声脉冲回波谱分析测量系统。该系统包括硬件构成与程序软件两部分,具有微机程控三维机械扫描及对生物样品在3—7MHz频段内测量超声衰减系数、背向散射系数及回波谱自相关分析等功能。对一系列哺乳动物软组织样品的实验研究表明,该系统给出的测量结果可与有关的文献值相比较,令人满意。

进一步降低接收电路的噪声及改善微机性能是本职工作目前继续努力的目标。

对本系统功能软件的进一步开发与扩展,还会使它更广泛地适用于其他有关超声脉冲回波的实验研究。这将是本工作今后的努力目

标。

本测量系统不仅适用生物组织样品的谱分析,同样也适用于其他非均匀媒质的谱分析、研究与检测。

作者感谢王耀俊、管正元、邢舜琦、王淑华、冯纪成和宋受镒等同志在研制本测量系统过程中给予的支持与帮助。

## 参 考 文 献

[1] 陆钟楠,应用声学,6-3(1987)42—43.

- [2] Feng Ruo et al., *Chinese J. of Acoustics*, 5-1 (1986) 60—69.
- [3] D.Y. Fei and K. K. Shung, *J. Acoust. Soc. Am.* 78-3(1985) 871—876.
- [4] Linda L. et al., *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics* SU-31-4(1984) 418—428.
- [5] Feng Ruo et al., *WESTPAC-III Technical Papers* 1 (1988) 263—266.
- [6] 冯若等,中国生物医学工程学报, 8-4(1989)207—213.
- [7] Wang Xinlong and Feng Ruo, *Ultrasonics*, 27 (1989) 239—244.

# 首都钢铁公司鸿儒厅的声学改建

王 坤 陈金京 项端祈

白小茹

(北京市建筑设计研究院研究所)

(首都钢铁公司设计院)

1989年4月24日收到

首都钢铁公司鸿儒厅为一多用途大厅,主要用于宴会、会议和文艺演出,也可用来举行舞会及放映电影。大厅建成后,在开会、演出及放映电影时出现了语言清晰度差,音质不佳等问题,影响了大厅的使用。为此,声学工作者和建筑师密切配合、在不破坏大厅原有建筑环境的条件下,对大厅进行了声学改建,加装了吸声体、舞台反射板等声学构件。改建后的大厅语言清晰、音质良好,并使良好的听觉环境与良好的视觉环境达到了统一,受到了使用者的好评。

## 一、概 述

首都钢铁公司鸿儒厅为一多用途大厅,主要用于宴会、会议和文艺演出,也可用来举行舞会及放映电影。该大厅体积为 20,000m<sup>3</sup>,面积为 2300m<sup>2</sup>,其规模在国内宴会厅中属一流水平。由于用途的要求,该大厅呈长方形,中央大厅面积为 970m<sup>2</sup>,侧厅面积为 1400m<sup>2</sup>。在中央大厅和侧厅之间有十二根方形大理石柱子,侧厅上方是一圈二层迴廊。大厅前端有一个 0.36m 高的舞台,供开会、演出之用。大厅地面是大理石,两侧墙均为大玻璃窗,平时挂有丝绒窗帘。图 1 为该大厅的平剖面图。

由于该大厅在设计施工阶段工期较紧、所应用声学

以对建筑声环境的考虑有些欠缺、此外有些设计意图在施工中也未得到很好的贯彻,致使大厅使用后出现了音质问题。主要是开会、放电影时语言清晰度较差,声场分布不均匀,以及文艺演出时音色不佳。为此我们进行了大厅的音质改善工作。首先对大厅的混响时间和声场分布等声学指标进行了测定,其结果如表 1 所示。

表 1 大厅改建前实测声学数据\*

| 测量项目       | 频率(Hz) |     |     |      |      |      |
|------------|--------|-----|-----|------|------|------|
|            | 125    | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| 混响时间(s)    | 1.6    | 2.1 | 2.7 | 2.3  | 2.2  | 1.4  |
| 最大声压级差(dB) | 13.8   |     | 9.2 |      | 9.0  |      |

\* 测定时大厅内有 40 个沙发, 168 个软椅和数十个餐桌