

# 楼宇设备工程中结构声功率预测的平均特征值法

苏建新, 马顺良

(汕头大学物理系, 汕头 515063)

摘要: 机器透过安装点进入到支撑结构的总功率是反映结构噪声的重要物理量。导纳方法提供正确预测该值的途径,但这种方法涉及到太多的物理量,缺乏实用性。寻找简便的近似预测方法有着重要的意义。本文以特征值理论为基础,针对楼宇设备工程中源导纳远大于地板导纳的场合,给出简便的近似预测公式。以典型风机为例,将本文的方法与其他的较复杂近似预测方法比较。结果表明,本文所给出的简便方法与精确值的误差约为 4dB,比其它近似方法具有更好的预测准确度。

关键词: 功率预测; 平均特征值; 阻塞力

中图分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2006)-02-0124-05

## Method of mean eigenvalue in prediction of structure-borne sound emission in building equipment

SU Jian-xin, MA Shun-liang

(Department of Physics, Shantou University, Shantou 515063, China)

Abstract: Sound emission from mounting points transmitting into support structures is an important physical parameter in characterization of structure-borne sound. The mobility method provides a complete and mathematically rigorous way for predicting the sound emission value, but is inconvenient as it contains too many elements. From the eigenvalue theory, a simplified method is proposed for building equipment, in which mobilities of structure-borne sound sources are considerably greater than those of the supporting structure. With two typical fans as an example, sound power predicted using proposed method is compared with that predicted with other approximate methods. Results show that the proposed method gives  $\pm 4$ dB error with respect to the precise value, better than other approximate methods.

Key words: sound emission prediction; mean eigenvalue; block force

## 1 引 言

“声功率”成功地被用来描述空气声源。利用该物理量来比较声源、预测噪声污染程度以及确定噪声治理方法等问题。然而,和空气噪声源相比,结构噪声源问题的描述显得复杂得多。

机器在待安装点的自由速度矢量和导纳矩阵是对结构噪声源的完整准确的描述<sup>[1]</sup>,利用这些物理量可预测施加到安装点的力的分布,由此得到空间的噪声情况,从而达到预测的目的或制定减噪方法。但这种方法涉及太多的物理量,缺乏实用性。

一个比较被普遍接受的观点是机器透过安装点进入到支撑结构的总功率反映结构噪声的强度<sup>[2-4]</sup>。这样可把研究施加到安装点的力分布问题简化成为研究机器透过安装点进入到支撑结构的总功率。即要求生产厂家提供的信息能预测机器透过安装点进入到支撑结构的总功率即可。但是这依然要求生产

收稿日期: 2005-07-28; 修回日期: 2005-10-12

基金项目: 广东省自然科学基金博士科研启动基金资助(05300906)。

作者简介: 苏建新(1960-),男,浙江金华人,博士,主要从事结构噪声领域的研究工作。

厂家提供机器在待安装点的自由速度矢量和导纳矩阵的大量完整信息。然而在实际工程中并不要求完全精确的预测, 找一个在精确度牺牲不大, 而预测总功率明显简便的方法是很有意义的。

通常最普通的方法是把各安装点独立看待<sup>[5]</sup>, 即各点之间不考虑耦合。但这种方法仍保留过多元素, 且精确度牺牲也大。极子方法<sup>[6]</sup>无论在简便性方面和准确性上都没有带来明显的更好结果。事实上, 对于许多实际的情况, 特别是楼宇设备工程领域, 机器的导纳要比安装基础的导纳大得多<sup>[7]</sup>。在这种情况下, 本文在特征值理论的基础上给出一个简便的预测方法。

## 2 单位“平方总力”作用下的功率

考虑一个安装到地板上的机器, 它与地板有  $N$  个接触点。设机器第  $i$  个接触点施加到地板的力(谱)为  $\tilde{f}_i = \hat{f}_i \exp(j\varphi_i) = \sqrt{2} f_i \exp(j\varphi_i)$  ( $\varphi_i$  代表相位(谱),  $\hat{f}_i, f_i$  分别代表幅值(谱)和有效值(谱)), 若透过安装点进入到地板的总功率(谱)为  $P$ , 则我们有下列关系式<sup>[8]</sup>:

$$\lambda_{\min} \frac{P}{|f_i|_{\Sigma}^2} \lambda_{\max} \quad (1)$$

式中,  $|f_i|_{\Sigma}^2 = \sum |f_i|^2$  的简写形式, 称为平方总力(中间项代表在单位平方总力的作用下进入到地板的功率),  $\lambda_{\max}$  和  $\lambda_{\min}$  为支撑结构导纳矩阵实部  $\text{Re}(Y_R)$  的最大特征值和最小特征值。

如果  $\lambda_{\max}$  和  $\lambda_{\min}$  差别不是很大, 那么式(1)可近似写成:

$$P/|f_i|_{\Sigma}^2 = \lambda_{\text{mean}} \quad (2)$$

式中,  $\lambda_{\text{mean}} = \sum \lambda_i / N$  为平均特征值。它恰等于  $\text{Re}(Y_R)$  的对角元素的平均值。

在楼宇设备工程中, 机器的导纳往往要比地板的导纳通常大得多<sup>[7]</sup>, 这样施加到地板上的力可以用机器的阻塞力替代, 即  $|f_i|^2 = |f_{\text{bf}}|^2$  (阻塞力是机器放在一个导纳为零的基底上, 开动机器时施加到基底上的力, 它独立于安装环境)。这样机器透过安装点进入到支撑结构的总功率就可以用地板的平均特征值与源的阻塞平方总力的乘积。即有:

$$P = \lambda_{\text{mean}} |f_{\text{bf}}|_{\Sigma}^2 \quad (3)$$

但是实际上  $\lambda_{\max}$  和  $\lambda_{\min}$  差别是非常大的。从式

(1) 简化到式(2)意味着: 单位平方总力作用下, 进入到地板的功率的不确定范围用一个均值近似替代了。从理论上来说, 在单位平方总力的作用下, 进入到地板的功率, 可以小到  $\lambda_{\min}$ , 也可大到  $\lambda_{\max}$ 。然而取得  $\lambda_{\min}$  的机会和  $\lambda_{\max}$  的机会几乎是没的。因为与  $\lambda_{\min}$  和  $\lambda_{\max}$  对应的功率, 必须要求施加到地板上的各点力的大小和相位严格按照某一非常特殊要求分配。因此不难想象, 实际上式(1)的不确定范围要比  $\lambda_{\min}$  与  $\lambda_{\max}$  之间的范围要窄的多。也就是说, 用一个均值近似替代一个范围, 在准确性上付出的代价远比理论上小的多。作者通过下列分析, 进一步说明这种观点。

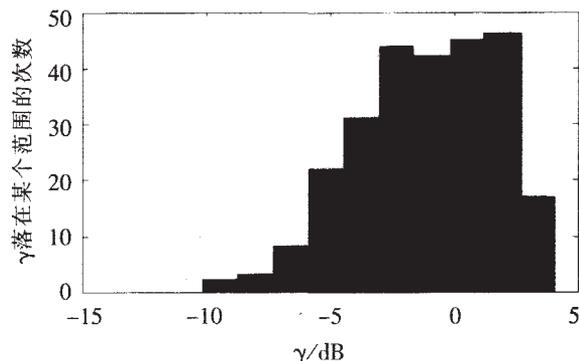
## 3 统计意义下的不确定范围

对于给定地板, 在单位总力作用下, 进入地板的功率与各点力的大小和相位分配有关, 而力的大小和相位分配又由机器安装点的导纳矩阵和自由速度决定。本文采用一种“构造”的方法研究单位总力作用下进入到地板的功率的分布情况。这种方法是先选定一个“地板”, 确定一个矩阵, 然后构造许多矩阵和列向量, 作为相应虚拟机器在安装点的导纳矩阵和自由速度。将这些虚拟机器分别一一地“安装”到上述选定的“地板”上, 计算相应的  $R = P/|f_i|_{\Sigma}^2$  的值。由于篇幅的限制这里暂忽略构造细节而只阐述一些原则: 文献[9, 10]的研究结果表明, 机器在安装点的矩阵元素的大小能很好的满足对数正态分布。在此基础上假设矩阵的元素相位在  $(0 \sim 2\pi)$  上满足均匀分配, 并把矩阵元素之间的上述特性推广到自由速度中去。另外, 按照物理上的要求, 机器在安装点的导纳矩阵的实部的特征值都要大于零。基于上述原则, 通过计算机构造出矩阵和列向量, 作为虚拟机器在安装点的导纳矩阵和自由速度。为方便起见, “地板”矩阵也用同样的方法来获得。

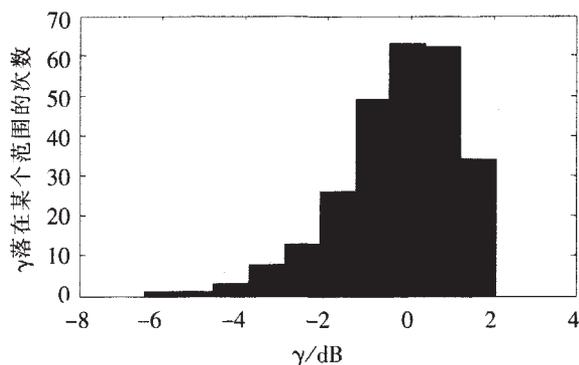
计算机按照上述要求可构造出许多个有四个安装点的虚拟机器(本文构造了 260 个虚拟机器, 作者认为这么多的虚拟机器足够了), 把它们放到某个给定的“地板”上, 计算对应的  $R$  值(共有 260 个  $R$  值), 以  $R_0 = \lambda_{\text{mean}} (\text{m}^2/\text{sN})$  为基准, 算得  $\gamma = 10 \lg R/R_0$  (dB) 的值, 并画出相应的统计分布图, 见图 1(最大  $\gamma$  值和最小  $\gamma$  值之间被分为 10 个区, 纵轴代表  $\gamma$  落在某个区的次数)。为了论述上的方便, 定义一个“地板”的状态值  $d$  (单位: dB):

$$d = 10 \lg (\lambda_{\max} |f_i|_{\Sigma}^2 / \lambda_{\min} |f_i|_{\Sigma}^2) = 10 \lg (\lambda_{\max} / \lambda_{\min})$$

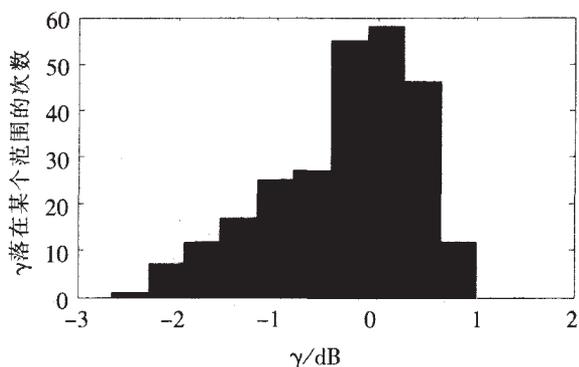
图 1(a) 对应“地板”状态值为 27.3dB。从图中看到尽管  $\lambda_{\max}$  与  $\lambda_{\min}$  之间的范围比较大, 但  $\gamma$  的范围相应要小的多, 如果除去  $\gamma$  顶部和低部的 5%,  $\gamma$  的范围大约只有 10dB。



(a) “地板”状态值  $d=27.3$  Condition number  $d=27.3$



(b) “地板”状态值  $d=10.8$  Condition number  $d=10.8$



(c) “地板”状态值  $d=5.2$  Condition number  $d=5.2$

图 1 单位平方总力作用下进入到“地板”的功率分布

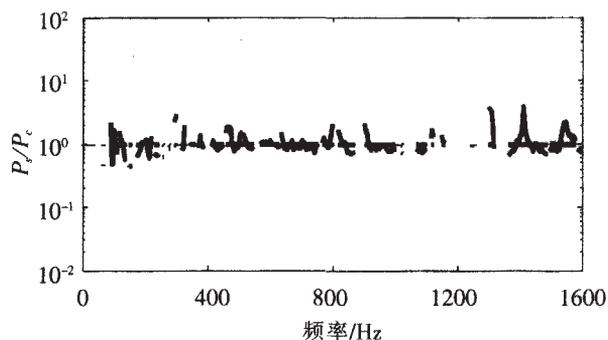
Fig.1 The power distribution into “floor” that was applied by unit total square force

图 1(b) 对应“地板”状态值为 10.8dB。虽然 的范围没有象前面的例子“收缩”那样多, 但这里的“尾巴”比较长。90%(除去顶部和低部的 5%) 的值都在一个宽度小于 6dB 的一个范围内。图 1(c) 对应“地板”状态值为 5.2dB, 这里  $\lambda_{\min}$  和  $\lambda_{\max}$  的差别没有特别大, 单位平方总力的作用下, 进入到地板的功率的不确定范围已不会太宽了。

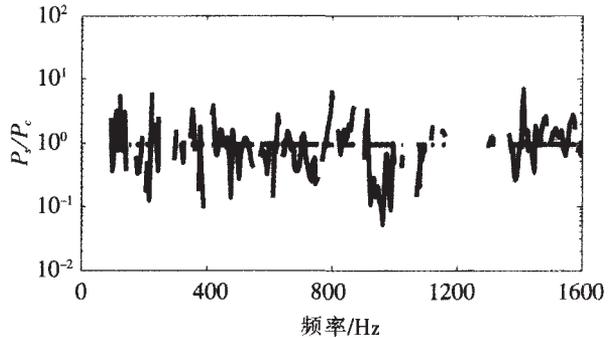
由以上的结果不难理解, 实际上在单位平方总力的作用下, 进入到地板的功率不确定范围要比理论上的不确定范围窄得多, 或者说“收缩”了很多。对于大的状态值“收缩”现象虽然更明显, 但由于这种情况下, 理论上的不确定范围很宽, 即使“收缩”过后还是很宽, 然而, 实际上地板的状态值大多为十几 dB<sup>[11]</sup>, 大状态值的机会不多, 因此用式(3)预测结构声功率会有较好的效果。

## 4 各种简化方式的比较

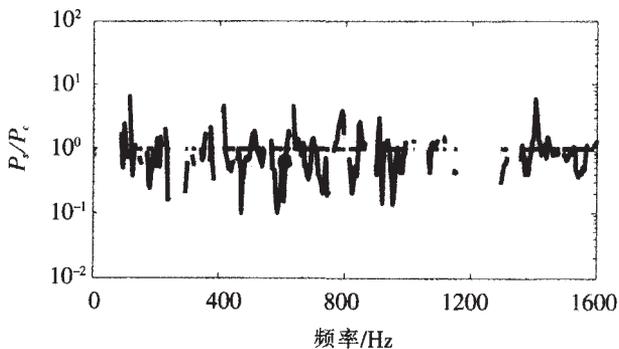
以两个典型风机(称为风机 1 和风机 2)安放到有限大“水泥板”和无限大“水泥板”为例, 比较各种



(a) 本文方法 Proposed method



(b) 无耦合方法 No coupling method



(c) 极子方法 Polar method

图 2 对风机 1 放到无限大水泥板的情况, 各种简化预测功率的比较  
Fig.2 The comparison of different simplified prediction of power emission for the case of combination of fan 1 with a infinite concrete floor

简化预测功率的方式。这两个风机在待安装点的自由速度和导纳矩阵是测量得到<sup>[11]</sup>。而支撑结构导纳矩阵是计算得到。水泥板的几何参数的选择能满足其点导纳大小的平均值比风机的该值至少小一个数量级。

图 2(风机 1 放到无限大水泥板)和图 3(风机 2 放到有限大水泥板)是各种简化预测功率  $P_s$  的比较,  $P_c$  为未经简化的准确值。结果表明, 尽管本文的方法简单, 但是预测的结果反而好。有的频段上风机最小特征值小于零, 这是由于实验误差过大带来的结果。在这些地方对应曲线没有画出。

## 五 结 语

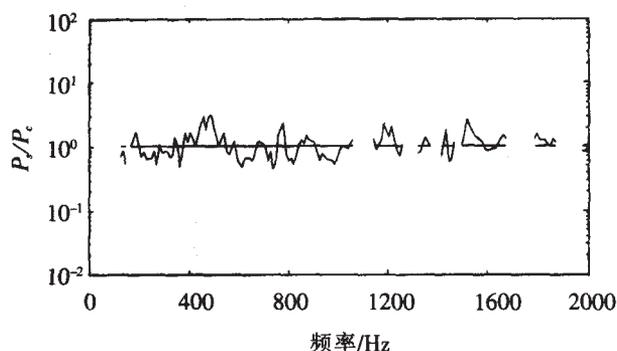
对于楼宇设备工程中源导纳远大于地板导纳的场合, 机器透过安装点传入到地板的功率, 可以用地板的实平均点导纳与源的阻塞平方总力的乘积作近似。对风机安装到水泥地板的情况, 上述近似预测方法和未简化的精确值比较约有 4dB 的差别, 与其他近似预测方法比较, 本文方法不但简便且更精确。

进入地板的功率一部分耗散成为热能, 另一部分向空气辐射声能。对于实际情况中地板只是大楼的一部分, 其等效阻尼因子比本文计算用的孤立水泥地板模型等效阻尼因子更大, 因此实际地板导纳矩阵实部的最大特征值与最小值之间的间距会更小<sup>[12]</sup>, 用本文方法会更有效。

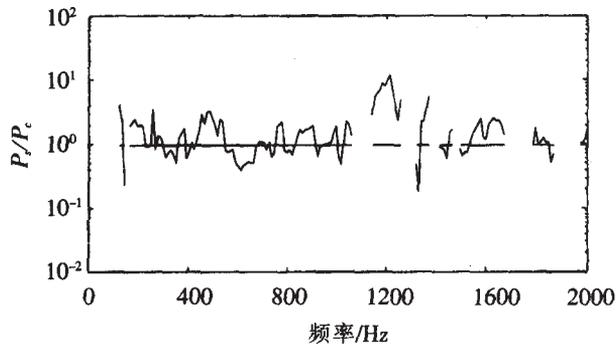
致谢: 本文工作得到教育部留学回国人员科研启动基金的资助, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

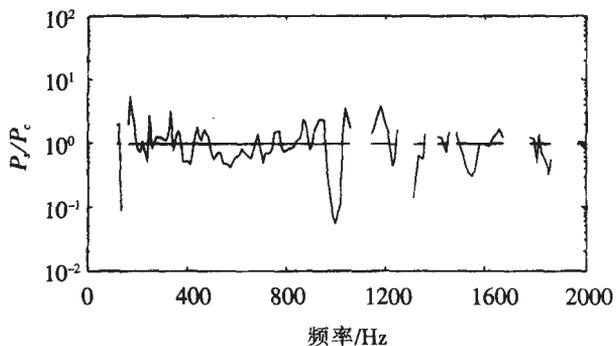
- [1] Verheij J W. Inverse and reciprocity methods for machinery noise source characterisation and sound path quantification, Part1: Sources[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 1997, 2(1): 11-20.
- [2] Wolde T ten, Gadefelt G R. Development of standard measurement methods for structure-borne sound emission[J]. Noise Control Engineering Journal, 1987, 28(1): 5-14.
- [3] Gibbs B M. Structure-borne sound sources in buildings[J]. Building Acoustics, 1994, 1(4): 313-329.
- [4] Mondot J M, Petersson B A T. Characterization of structure-borne sound sources: the source descriptor and the coupling function[J]. J Sound and Vib, 1987, 114: 507-518.
- [5] Ohlrich M. Terminal source power for predicting structure borne sound transmission from main gearbox to a helicopter fuselage[C]. Inter-noise 95, 1995, 555-558.
- [6] Pinnington R J, Fulford R A, Terry M. The use of polar mobilities for predicting the coupled response of machine Mounting systems[C]. Inter-Noise96, 1996, 1587-1592.
- [7] Yap S H, Jianxin Su, Gibbs B M. The Measurement of the structural dynamic characteristics of floors with installed machines[J]. Applied Acoustics, 1997, 52(2): 105-124.
- [8] SU Jianxin, MoorHouse A T, Gibbs B M. Towards a practical characterization for structure-borne sound sources based on mobility techniques[J]. J Sound and Vib, 1995, 185(4): 737-741.
- [9] Fulford RA, Gibbs BM. Structure-borne sound power and source characterisation in multi-point connected systems. Part 3: Force ratio estimates[J]. J Sound and Vib, 1999,



(a) 本文方法 Proposed method



(b) 无耦合方法 No coupling method



(c) 极子方法 Polar method

图 3 对风机 2 放到有限大水泥板的情况, 各种简化预测功率的比较

Fig.3 The comparison of different simplified prediction of power emission for the case of combination of fan 2 with a finite concrete floor

- 225(2): 239-282.
- [10] 苏建新, 张会占. 导纳矩阵元素统计分布特性的研究 [J]. 声学技术, 2005, 24(2): 121-124.  
SU Jianxin, ZHANG Huizhan. Study of statistical distribution for mobility matrix element [J]. Technical Acoustics, 2005, 24(2): 121-124.
- [11] Moorhouse A T, Gibbs B M. Simplified characterisation of multiple point excited structures using mobility matrix eigenvalues and eigenvector [J]. Acoustics, 1998, 84: 843-853.

## 人物介绍

### 《声学技术》副主编——章奎生教授级高工简介

章奎生声学设计研究所所长、教授级高工章奎生同志是上海市建设系统建声专业技术学科带头人、是一位具有43年丰富建筑声学设计及科研经验的专家。曾先后荣获两届上海市劳模、建设部劳模、全国“五一”劳动奖章及首批国务院政府特殊津贴, 现任中国建筑学会建筑物理分会名誉理事、中国环保产业协会全国噪声与振动控制委员会主任、全国声学标准化委员会建声分技委委员、上海市声学学会名誉理事兼建声、噪声专业委员会主任、中国演艺设备技术协会演出场馆专业委员会委员及《声学技术》副主编、《噪声与振动控制》编委等职。

多年来, 章奎生所长负责或参与了如上海大剧院、北京保利剧院、上海东方艺术中心、浙江省人民大会堂、博鳌亚洲论坛会议中心等一大批重要建声设计工程, 取得优良音质效果。

由他负责声学设计、咨询或顾问的主要工程有: 上海大剧院、北京保利剧院、上海广电大厦、上海艺海剧院、中央党校报告厅、上海国际会议中心、中南海和国务院电影厅、上海影城、宁波体育馆、福建游泳跳水馆等100多项工程。其中上海大剧院、上海广电大厦、上海影城等项目都获得了上海市优秀设计一等奖, 还有6项科研成果获得上海市科技进步奖; 他还发表了大量建声和噪声专业论文, 并出版了《章奎生建筑声学论文集》; 参与编写了《建筑声学设计手册》、《噪声与振动控制工程手册》、《工业企业噪声控制设计规范》、《实用供热空调设计手册》等许多手册、标准和规范。上海大剧院观众厅的声学模拟实验成果于1988年被香港国际经济评价中心评为世界华人重大科技成果, “圆筒式电动可调吸声体的设计和试验”被美国洛杉矶科学文化信息中心选评为1996年世界优秀科学技术论文, 最近“上海大剧院音质设计研究”论文被评为国际优秀科技论文。

《声学技术》编辑部

### 《声学技术》编委——汪源源教授简介

汪源源, 男, 1968年5月生于浙江温州。1994年6月获理学博士学位(导师: 王威琪院士), 1998年起任复旦大学教授, 2000年起任复旦大学特聘教授、博士生导师、电子工程系主任、生物医学工程中心主任, 2003年起兼任复旦大学超声医学与工程研究所常务副所长, 2004年起兼任生物医学工程博士后流动站负责人。

汪源源从事医学超声工程领域的科研与教学工作, 曾主持国家自然科学基金, 教育部, 科技部, 上海市教委、科委等十多项科研项目研究。受教育部优秀年轻教师基金及其跟踪计划、教育部骨干教师计划、上海市青年科技启明星计划及其跟踪计划和上海市曙光计划等的资助。

汪源源在国内外学术杂志发表论文200多篇。出版教材一本, 合作著作三部。两次被国际无线电科学联盟授予青年科学家奖(1999年, 2002年), 荣获教育部高等学校首届优秀骨干教师(2002年)、上海市高校优秀青年教师(1997年)、上海市新长征突击手(2001年)和上海市IT十大新锐(2004年)等称号。曾获上海市科技进步二等奖两次(1993年, 2000年)、三等奖两次(2001年, 2004年)、上海市优秀职务发明奖一等奖两次(1999年, 2000年)、二等奖两次(1999年, 2004年)。

汪源源还是IEEE高级会员、上海支会副主席, 中国声学学会医学超声工程分会委员, 中国仪器仪表学会青年工作委员会常委、副秘书长, 全国高校生物医学工程教学指导委员会委员, 上海市声学学会理事, 上海市学位委员会生物医学工程学科评议组委员, 上海理工大学医疗器械学院兼职教授, 云南大学兼职教授, 《上海生物医学工程》杂志编委会副主任, 《声学技术》、《航天医学与医学工程》、《应用科学学报》、《复旦学报》(自然科学版)和《中国医疗》等杂志编委。

《声学技术》编辑部