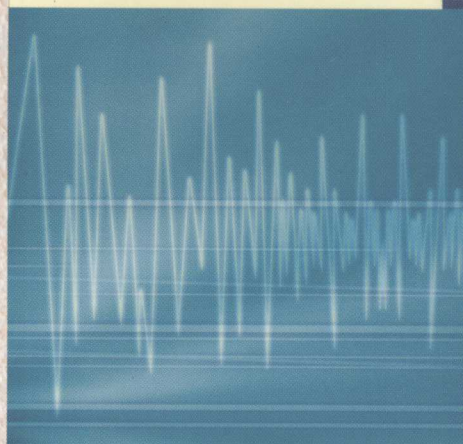


学者书屋系列

扫描声强 测量技术

周广林◎著



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

学者书屋系列

扫描声强测量技术

周广林 著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书共分6章,包括绪论、声强测量系统误差及不确定度评定、扫描路径与扫描参数、基于几何平均声压的声强计算的误差分析、扫描声强测量声功率技术的实验研究、总结和展望等。

本书适合从事声学理论与实验,机械振动与噪声研究的教师、研究生和专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

扫描声强测量技术/周广林著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007.10

ISBN 978 - 7 - 81133 - 058 - 8

I . 扫… II . 周… III . 声强测量 - 扫描 - 技术 IV . TB52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 158190 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 16.75
字 数 204 千字
版 次 2007 年 10 月第 1 版
印 次 2007 年 10 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

噪声污染是现代社会的四大公害之一,降低噪声主要有两个途径:一是降低声源的发声;二是控制噪声的传播,两者的前提必须是准确客观地评价机器设备的噪声。评价噪声的大小有声压级方法和声功率级方法,用声功率级方法来评价噪声的大小更具优越性,目前用声功率级的大小限制噪声的方法的应用越来越广泛。

无论是声压级方法还是声功率级方法,测量结果都是数量值。只能表示某一点噪声的强弱或从噪声源辐射出的声能量的多少,不能确切地反映噪声发出的位置、传播形式和传播方向,即没有声场的概念,有时分析鉴定噪声源很不方便,且不可靠。

在描述声场的基本参数中有一个能反映噪声传播形式和方向的参数——声强(Sound intensity)。声强本身是一个矢量,有大小、方向,是净能量的流动。声强可以描述声的能量场,即可以描述声能量发射、传播、反射或被界面吸收等各种状态。用声强法测定噪声源的声功率原理提出的较早,但因为长期以来声强的测量很困难,所以并未获得广泛的应用。理论上求声强要同时测量声压和声质点的振动速度,然后求积,但实际上准确地测量声质点的振动速度是很困难的。进入 20 世纪 80 年代,随着传声器设计的不断进步和信号处理技术的发展,人们逐渐地能够对声强进行可靠的测量,成功地研究出了各种测量仪器、设备,组成了各种声强测量系统。

利用声强测量技术测量机器噪声源声功率,按声强探头的移动方式可分为两类,即离散点法和扫描法,而且都颁布了相应的国际标准和国家标准。离散点法由于其数学关系清楚,实现简便,在世界各国都进行了广泛研究与应用,但是这种方法测量时间长,效率低,测量成本高。研

究结果表明,扫描声强测量法测量精度高于离散点测量法的测量精度,同时测量效率也更高,但是由于对测量结果不确定度与扫描参数的关系缺乏足够的理论和实践认识,导致了扫描声强测量法国际标准比离散点声强测量法国际标准晚颁布了几年。目前对声压扫描的研究成果较多,但在扫描声强测量上,还有许多问题需要进一步研究。

本书的主要内容有:详细地回顾了声强测量技术的发展历史及研究现状;介绍了波动方程、声能、声能流密度、声强及度量方法、声强测量原理、测量系统误差和评定等内容;分析了扫描声强法测量声功率的收敛性;针对基于算术平均声压计算的声强值存在高频止限这一问题,对几何平均声压的声强计算方法与算术平均声压的声强计算方法进行比较,找出这两种计算方法的适用范围,并从计算精度和计算量上进行比较;介绍了扫描声强法测量声功率的实验方法,并对这项技术进行了展望。

本书是作者对博士学位论文的进一步总结和充实,绝大部分内容是作者攻读博士期间的科研成果。在此特向导师陈心昭教授表示感谢。本书的撰写是根据作者对扫描声强法测量声功率的理解,由浅入深,逐步展开,也可以说是作者对扫描声强测量技术研究成果的汇编。

本书的出版得到了黑龙江省自然科学基金(ZTE2005-28),哈尔滨市科技局攻关项目(2003AA1CG054),黑龙江省骨干教师项目(1502G036)和黑龙江科技学院学术著作出版基金的资助。

由于本人的水平有限,书中难免存在疏漏、不足甚至错误之处,恳请读者批评指正。

本书的撰写得到了家人、领导,和同事的关心、帮助及热情支持,在此表示感谢。

周广林

2007年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 声强测量技术及其应用的研究进展	4
1.3 扫描声强法测量声功率时存在的问题	10
1.4 本书的主要内容	11
第 2 章 声强测量系统误差及不确定度评定	13
2.1 声场中的波动方程及其解	13
2.2 声能与声强	19
2.3 声强技术中的 P-U 法和 P-P 法	25
2.4 双传声器互谱声强测量原理及声强互谱关系式	28
2.5 双传声器声强测量系统误差分析及不确定度评定	33
2.6 双传声器声强测量系统误差修正方法	44
2.7 系统修正	50
第 3 章 扫描路径与扫描参数	53
3.1 扫描路径的收敛性	53
3.2 扫描声强法声源声功率测量通用数学模型	60
3.3 矩形测量面几种扫描路径声功率测量的误差分析	69
3.4 扫描速度对扫描声强法测量声功率精度的影响	78
3.5 扫描面几何特征对扫描声强法确定声源声功率误差的影响	86
3.6 方形扫描路径确定声源声功率误差特性分析	92
3.7 扫描声强法测量声功率时扫描参数的确定	103
3.8 声强传感器特性对扫描声强法确定声源声功率的影响	111
第 4 章 基于几何平均声压的声强计算的误差分析	120

目 录

4.1 问题的提出	120
4.2 点声源声强计算方法的误差分析	121
4.3 单极子、偶极子、四极子声源声强计算方法误差分析	127
4.4 球声源作振动时声强计算方法的误差分析	140
4.5 两同相小球源及声柱两种声强计算的误差分析	146
4.6 基于谱分析理论的几何平均声压与算术平均声压比较	151
4.7 复声压信号的获得和声压几何平均的实现	157
第5章 扫描声强测量声功率技术的实验研究	161
5.1 实验目的及实验内容	161
5.2 声强测量系统的对比实验	161
5.3 扫描路径及扫描参数对声功率测量影响的实验研究	176
5.4 声强仪的校准	184
第6章 总结和展望	189
附录A 声强法测定噪声源的声功率	194
附录B 声强法测定噪声源的声功率级	219
参考文献	246

第1章 绪论

1.1 问题的提出

噪声污染是现代社会的四大公害之一^[1],所以许多国家都以立法的方式来控制噪声污染。日本于1968年颁布了“噪声限制法”,1971年确立了“噪声环境标准”及特定工厂配套治理公害的法律^[2];美国1969年至1972年相继颁布了“国家环境保护法”、“噪声污染消除法”、“环境控制法”^[3];欧盟于1996年1月发表了题为“未来噪声政策”的绿皮书。中国也从1997年3月开始施行“环境噪声污染防治法”,该法规定,“国家鼓励和支持环境噪声污染防治的科学研究、技术开发,推广先进的防治技术”,同时规定了“国家对环境污染严重的落后设备实行淘汰制度”,制定颁布了多个噪声测量的国家标准^[4~15]。

降低机器设备噪声,主要有两个途径:一是降低声源的发声;二是控制噪声的传播,两者的前提必须是准确客观地评价机器设备的噪声。用声功率级来评价噪声的大小更具优越性^[16~18],目前越来越多的机械产品用声功率级的大小限制其噪声。

声功率就是指声源在单位时间内辐射出的总声能量。声功率级不能在声场的某一位置直接测得,只能通过间接的方法测量。目前国家标准规定测量声功率的方法有《声学 声压法测定噪声源声功率级——反射面上方近似自由场的工程法》(GB/T3767-1996)、《声学 声压法测定噪声源声功率级——反射面上方采用包络测量面的简易法》(GB/T3768-1996)、《声学 噪声源声功率级的测定——混响室精密法和工程法》

(GB/T6881 - 1986)、《声学 噪声源声功率级的测定——消声室和半消声室精密法》(GB/T6882 - 1986)、《声学 声压法测定噪声源声功率级——使用标准声源简易法》(GB/T16538 - 1996)、《声学 振速法测定噪声源声功率级——用于封闭机器的测量》(GB/T16539 - 1996)、《声学 声强法测定噪声源的声功率级——第一部分:离散点上的测量》(GB/T16404 - 1996)、《声学 声强法测定噪声源的声功率级——第二部分:扫描测量》(GB/T16404.2 - 1999)等^[174]。此外,也有不少机械产品相应的噪声声功率级测定方法标准,如《金属切削机床噪声声功率级测定方法》(GB4215 - 1984)、《齿轮装置噪声声功率级测定方法》(GB4216 - 1984)。这些方法适用于一个反射平面上方为自由场的声学测量环境下,在包络声源的假想测量平面上测量声压级,以计算声功率级。

无论是声压级方法还是声功率级方法,测量结果都是数量值。只能表示某一点噪声的强弱或从噪声源辐射出的声能量,不能确切地反映噪声发出的位置、传播形式和传播方向,即没有声场的概念,有时分析鉴定噪声源很不方便,且不可靠^[19]。

在描述声场的基本参数中有一个能反映噪声传播形式和方向的参数——声强(Sound intensity)。声强就是指在单位时间内,声波通过垂直于声波传播方向上单位面积的声能量。声强本身是一个矢量,有大小、方向,是净能量的流动。声强可以描述声的能量场,即可以描述声能量发射、传播、反射或被界面吸收等各种状态。用声强法测定噪声源的声功率原理提出的较早,但由于长期以来声强的测量很困难,并未获得广泛的应用。理论上求声强要同时测量声压和声质点的振动速度,然后求积,但实际上准确地测量声质点的振动速度是很困难的^[20,21]。

进入 20 世纪 80 年代,随着传声器设计的不断进步和信号处理技术的发展,人们逐渐地开始能够对声强进行可靠的测量,并成功地研究出了各种测量仪器、设备,组成了各种声强测量系统,因此声强测量法正越来越多地用于噪声源的识别^[22-30],利用测得的噪声辐射面的声强值,可

以作出声强的矢量图、等高线图和三维声强分布图^[26,30],形象地表示出被测噪声辐射面各部位的噪声辐射分布,从而可以直接识别出主要噪声辐射位置。

采用声强法测量噪声源的声功率的主要优点有:(1)声强法测量对测试环境的要求较低,被测声源周围的背景噪声对声强测量的影响很小,因此声强测量不需要特殊的声学实验室,测量时也不用将声源移入消声室或半消声室,就可以得到较高的测量精度,也就是说声强法测量噪声可以直接在工作现场进行;(2)声强测量能反映出噪声的能量及其流动情况,且由于声强具有方向性,所以测得的声强可以全面反映从声源发出的噪声能量传播状态,另外,在用声强法测量声功率时,对测量封闭面的形状没有严格要求;(3)声强法的测量结果直观,可视性强,由于声强法的后处理能力强,因此可以通过后处理软件绘制声强的矢量图、等高线图、三维图等,由图线可直接分析噪声源的位置;(4)声强法也可以对测量数据进行频谱分析,特别是声强法可以绘制出指定频率的声强矢量图等图线,也使频率分析变得直观、可视性强;(5)声强可以在近场和远场进行测量,排除声场不纯的影响。

当然,采用声强法测量噪声源声功率也有一些缺点:(1)采用双传声器法测量时测量频率受两个传声器间距的限制;(2)要给出声强矢量场,需要测出声强在三个坐标轴方向的分量,测量工作较为复杂费时,测量效率较低;(3)与其他的测量方法相比,测试设备较为昂贵;(4)双传声器法测量会产生原理误差等。

利用声强测量技术测量机器噪声源声功率,按声强探头的移动方式分类有两种:离散点法和扫描法,且都颁布了相应的国际标准和国家标准^[12,13,83~85]。离散点法由于数学关系清楚,实现简便,在世界各国进行了广泛研究与应用。但此法测量时间长,效率低,测量成本高。研究结果表明^[154],扫描声强测量法测量精度高于离散点测量法测量精度,同时测量效率也高。但由于对测量结果的不确定度与扫描参数的关系缺乏

足够的理论和实践方面的认识,导致了扫描声强测量法国际标准^[84,85]比离散点声强测量法国际标准^[83]晚颁布了几年。目前对声压扫描的研究成果较多,但在声强扫描测量上,还有许多问题需要进一步去研究。

1.2 声强测量技术及其应用的研究进展

声强可以通过测量声质点的振动速度和声压直接求出,也可以通过两个传声器测得的声压信号间接求出。

采用直接方法进行声强测量的设想最早见于 1932 年 Olson H 的专利^[80]设计出来的声强测量装置,这个装置由一个传声器和一个质点速度传感器组成。1941 年,Clapp 和 Firestone 研制出了各种不同形式的声强仪,由于稳定性和校准等问题没有解决,因此均未得到广泛应用。1943 年,Bolt 和 Petrauskas 发明了“声阻抗仪”,用两个传声器测量“声压和”及“声压差”来计算声强,原理同现在的双传声器法。1955 年,Baker 发明了压力麦克风,继而研制出了与之配套的声强测量仪器。1956 年,Schultz 用两只静电式麦克风构成的声强探头系统,采用了背靠背安装方式。

到了 1965 年,Cooley J W 和 Tukey J W 提出了 FFT 方法,推动了现代数字处理技术的发展。1977 年,美国的 Chung J Y^[81]和英国的 Fahy F J^[82]分别证明了互谱声强测量的关系式,以互功率谱为基础的双传声器声强测量法的出现就成为必然,它是现代计算机技术、随机过程谱分析理论与声学原理的有机结合。1978 年,Chung J Y 发表了用声强法测量柴油机声功率的论文;1979 年,Credit 首次成功地用双传声器技术直接测量复杂机器的声功率,同期许多学者开展了这方面的研究工作,因而声学测量技术迅速引起学术界的广泛重视。从 1980 年起,多次召开声强测量国际学术会议,国际标准化组织也于 1993 年开始,连续颁布了三个声强

测量的国际标准:ISO9614-1^[83],ISO9614-2^[84],ISO9614-3^[85]。与此相适应,美国也颁布了相应的国家标准 ANSI1.12,国际电工学会(IEC)成立了一个 IEC/SC/29C/WG20 工作组,研究、制定声强测量仪器规范,1984年,日本成立了噪声测量声强技术分会,定期地组织情报信息交换和学术交流^[31]。可见,声强测量法在声学及噪声控制工程等领域中的推广应用已经成为必然趋势。

1.2.1 声强测量法的理论研究

1983年,Gopal, Mathur P 用信号的相关函数推导了声强公式^[86];1982年以 Bucheger D J, Martin, Trethewey W, Jung-seok, Park 等^[88-91]为代表的研究者提出了基于多输入、单输出,多输入、两输出模型的选择声强法,用于区分多声源作用时各源对总声强的贡献;1968年,Mechel^[60], Odin^[61], Kurze^[62]研究了有功声强、无功声强、相位差与平方声压之间的关系,他们的研究成果为后人对声强的理解和测量技术的开发作出了巨大的贡献。

1990年,Weyna S^[98]采用空间声强矢量研究声强的辐射,发现复杂声场不仅在近场是有旋的,而且在远场也是有旋的。

1988年 Ginn K B 介绍了复声强,并定义了主动声强和被动声强,指出主动声强是由声压的相位梯度变化而产生的,被动声强是由声压的幅值梯度变化产生的^[99];1990年, Jacobsen F 对混响声场中的主动与被动声强进行了研究^[100];Jean-Claude Pascal 使用声强的矢量特性描述声场^[101];1984年, Jiri Tichy 建立了主动和被动声场、声场的势能与动能密度间的关系,推导了声强矢量场中的微分关系和散度数学表达式^[102];Thompson J K 在被动声场环境中用两个单极子声源对正反射和斜反射进行了分析,并讨论了声强测量误差^[103]。

1.2.2 声强测量法的应用研究

声强测量技术可以被广泛应用于声源鉴别问题^[72]。20世纪80年

代以来,已有大量工作涉及通过声能流分布图来决定噪声源的分布^[73~77]。在实际测量中,负向声强的出现一般被解释为测量面外的额外声源,或者测量面内的声吸收,抑或声强测量误差,但曾力军用理论计算和对扬声器实测的方法验证了声场分布中的负向声强问题,并对负向声强的传统解释增添了新的内容^[92];Harris R E 使用声强方法讨论了管道中的声强计算问题^[87]。

1990年,Hiroo Yano 等将声强测量方法和有限元法(FEM)相结合,验证了管道系统中局部扩腔的声衰减特性^[93]。

用声强法研究结构的振动和声辐射效率方面,Muzychenko Vadim V^[94]、任明章、胡章伟等进行了一些研究^[95~97]。1982年,日本的小白井等学者进行了声强测量实验^[32],在此之后出现了许多介绍声强法原理及应用方面的文章^[33~39]。从研究领域看,应用最多的是在汽车领域,早在1981年日本的畑等学者就将声强法用于汽车发动机噪声问题的研究上^[40]。押野康夫等用声强法从事了多年的汽车噪声研究,发表了许多论文^[34~36,41~45]。日本学者还在建筑^[52~54]、材料的吸声性能^[55,56]、隔声^[57,58]、噪声源研究^[59]等领域广泛使用了声强测量法。测量振动的表面声强已经有若干年的历史^[65,66],比较成功的要首推美国的 Crocker 等人提出的采用加速度传感器和传声器互功率谱表面声强测量法。

1992年,杜光升等用 Boit 理论对流体饱和和多孔介质中的声强进行了探索^[104]。文献^[69~71]采用互谱声强法进行声源定向。

1.2.3 基于声强测量法的声功率测量研究

Nicolas J 就声强法测量声功率的一些限制进行了模拟,对包络面类型、测点数、测点位置进行了讨论;1984年,Paterson A L T 建立了扫描声强法测量声功率的数学模型,假设扫描是缓慢的,并使用了简单的路径,进行了实验验证^[105];Gerhard Hüber 介绍了现场测量声功率的一些限制及误差^[107,108];1991年,Hao Yun 等研究了采样误差对声强法进行声功率

测量的影响,推导了单极子、偶极子、四极子在理想情况下的声功率^[106]; 1993年 Shirahatt U S, Croker M J 和 Baki K R 等比较了扫描法和离散点法进行声功率测量的精确度^[154,109]; Michael Bockhoff 分析了扫描法和离散点法的优缺点,用两个简单声源进行了数值模拟,给出了它们的误差及分析^[110];丹麦的 Jacobsen 研究后认为^[172],尽管没有人对扫描声强法作出理论上的证明,但只要扫描速度足够慢,应该能够得到可靠的声功率估计。Gade S, Jbjerg K H, Schack T 列出了三种扫描路径^[173],即方形、正弦形、锯齿形,但没有给出进一步的信息。Gade S 对扫描法测量声功率提出了快扫和慢扫两种方法,快扫时速度小于 2 m/s,慢扫时速度小于 0.2 m/s^[111]; Tandon N 讨论了声强测量参数的选取对声功率测量结果的影响,测量结果与下列因素有关,即测点距声源的距离、扫描路径的形状和扫描速度、测点的布置和测量线密度,结果表明,在距声源较远、测点较密、扫描速度较慢和扫描间距较小的情况下,有望获得较好的结果^[112]。2000年,甘长胜建立了扫描声强法测量声功率的数学模型,在假定扫描速度恒定的前提下,对矩形、圆片状、板球面三种测量面上的简单扫描路径进行了分析^[113],继而又在速度恒定的条件下,建立了方形、直线加半圆形、锯齿形三种扫描路径的误差函数的数学模型^[114]。为了规范扫描声强法的测量,国际标准化组织和中国相应制定了标准:ISO9614-2, ISO9614-3 和 GB/T16404.2-1999。标准中都规定:推荐手动扫描速度应在 0.1~0.5 m/s 范围之内,机械扫描速度则应在 0~1 m/s 范围之内,且在单个面上任何一次扫描的持续时间不应少于 20 s。如果被测声源的形状为展开的板或壳形振动面,则测量面源于声源表面的平均距离不应小于 200 mm;如果形状很小且密实,则平均距离可降为 100 mm,给出了扫描路径为直线加半圆形。

1.2.4 对声强测量误差的研究

1983年, Yousri Gerges Samir N 分析了活塞型声源声强测量时有限差

分误差^[115];1984年,Bjron,Forssen,Crocker J给出了有限差分误差的一般表达式及声压、声强在近场分布的主要差异^[116];1982年,Thompson J K以单极子、偶极子、四极子为例推导了有限差分误差的大小,建立了声强测量误差与波数、声强探头传声器之间的距离、探头离声源的距离之间的关系^{[117][118]};1986年,Watkinson P S研究了相位失配误差和随机误差的评定方法^[119];1985年,Schmidt H对时延系统误差进行谱分析估计时产生的误差作了分析^[120];郑勋分析了声强测量在半扩散声场中产生的误差,说明了声强测量技术在半扩散声场中应用的局限性^[121];陈端石^[63]采用改进传递函数法对测量系统误差进行修正;1991年,Jacobsen^[64]采用残余声强法对测量系统误差进行修正。

1.2.5 声强测量系统的研究

1984年,Ginn K B研制出了实时表面声强测量仪,给出了基于传声器与速度传感器的声强表达式^[122];Hiroo Yano研制了一台便携式声强测量仪用于现场测量声强值^[123];Bruel Per V介绍了B&K公司的声强测量系统^[124];Gunnar Rasmussm展望了声强测量仪器的进展情况^[125];文献[126]介绍了B&K声强测量仪器的发展。20世纪80~90年代,日本学者在声场解析和可视化方面作了许多工作^[46-51],日本的小野、オリン等株式会社开发出了声强测量仪产品。国内的合肥工业大学首先用HP3562A+HP900/320微型计算机组成声强测量系统,后来相继开发出基于微型计算机+外设扩展箱组成的声强测量系统、基于单片机便携式声强测量系统^[133]、基于笔记本电脑的声强测量系统,2004年又成功开发了基于扫描声强法的高性能智能式声强测量系统^[175]。上海交通大学、清华大学、浙江大学、西安交通大学、成都科技大学、南京航空航天大学、中国科学院声学研究所等在这方面都开展了很有意义的工作。

在声强探头的研制方面,1984年,Hodgson Thomas H设计了光纤型发射、一个接收器与一个电容传声器构成的声强探头^[127];Nordby S A等研

制出超声三维探头^[128]; Maeda T 等建立了三维声强识别系统^[129], 设计了传声器阵列控制系统, 用计算机对传声器阵列进行分列控制; Paul Kitech & Jiritichy 对声强探头对声场的阻碍作用作了研究^[131]; Glen Steyer 等就多探头测量时由于散射而导致的测量误差作了研究^[132]。1995 年, Sideo suzuki 等人开发出一套有四个传声器组成的三维声腔探头^[78, 79, 141]。2003 年, 合肥工业大学也成功开发了三维矢量声强探头, 并申报了国家专利(专利号为 ZL03222301.3)。

1.2.6 声强测量的新技术

智能声强测量系统: Cervera F 等设计了一套近场声强测量自动定位系统, 该系统可进行五个方向的定位, 并同时测量声强矢量的三个正交分量^[134]。

门声强技术: Gunnar Rasmussen 在分析旋转机械的噪声辐射时提出了门声强(Gating Intensity)、门分析、门谱阵、门声强谱阵等概念, 实现这些分析的关键是采用光电门脉冲, 确保门的精确开启时刻^[135]; Wei Wei, Robert Hickling 用门声强测量技术测量机器的门声功率^[136]。

BAHIM 技术: Jadin Mann 等比较了 BAHIM 与传统的双传声器声强法的测量结果, 以工业压缩机为例进行测量的结果表明, 双传声器声强法只能作一般的声源定位, 而 BAHIM 却给出了声源的精确定位^[67]。何元安在这方面也做了很有意义的工作^{[68][137]}。

结构声强测量技术: 结构声强测量技术可以分为两类, 即接触式和非接触式。非接触式结构声强测量技术只局限于实验室条件下的声强测量^[138], 实际应用中主要采用接触式结构声强测量技术。接触式结构声强测量技术可以分为弯曲波声强测量技术^[139]、准纵向波声强测量技术^[140]、扭转波声强测量技术^[138]、剪切波声强测量技术^[138]等。

1.3 扫描声强法测量声功率时存在的问题

利用声强测量技术测量噪声源的声功率有离散点法和扫描声强法。随着对声强测量技术研究的深入,离散点法固有的缺陷也逐渐显露出来,如测量精度低,测量时间长等。与离散点法相比,扫描声强法能节约大量的测量时间,且研究表明,在理想条件下扫描声强测量法(即使在声强探头移动速度不是常值的情况下)比离散点声强测量法的测量精度高^[154],但同时也表明,由于对测量精度与扫描参数的关系缺乏正确的理解,扫描测量法的精度在很大程度上取决于操作者的经验与习惯,对此丹麦的 Jacobsen 认为^[172],尽管没有人对此方法(扫描声强法)作出理论上的证明,但只要扫描速度足够慢,应该能够得到可靠的声功率估计。许多对比研究表明,扫描法比离散点法测量精度高,测量时间也短;而另一方面,由于对扫描参数与测量结果的不确定度之间的关系缺乏足够的认识,使得在扫描参数的选取上存在很大的随意性。扫描声强测量系统的误差与哪些因素有关,如何进行评定与修正,扫描声强测量时选取什么样的测量面更为合理,文献[113]给出了三种形状测量面(矩形面、圆片形面、半球面)。显然,最简单且易于实现的是矩形测量面,那么在该测量面上能否找到一些简单路径(文献[173]列出了三种扫描路径,即方形、正弦形、锯齿形,但没有给出进一步的信息),使沿该路径扫描的声功率估计值收敛于声功率真值;在矩形测量面上若存在几种简单的扫描路径(诸如方形、直线加半圆形、锯齿形)均收敛于真值,能否进一步说明在矩形测量面上是否还存在其他收敛于真值的扫描路径(诸如正弦曲线、余弦曲线形等),若存在,该路径收敛于真值的条件是什么。文献[114]考虑的扫描速度恒为 1,这一般与实际不符,那么扫描速度不为 1 时可否证明扫描也收敛于真值;ISO9614-2(或 GB/T16404.2-1999)推荐手动扫