维普资讯 http://www.cqvip.com

动测试并自动显示 B/A 值，并自动判断其测量的正确性，这不仅给测量带来了很大的方便，而且是用微机技术对已有的测量非线性参量方法的一种改进。

## 参 考 文 献


[1] Beyer, R. T., *J. Acoust. soc. Am.*, **32**, (1960), 719—721.

[2] Coppens, A. B., Beyer, R. T., Seiden, M. B., Donohue, J., Guepin, F., *J. Acoust. soc. Am.*, **38**, (1965), 797—804.

[3] Coppens, A. B., Beyer, R. T., Ballon, J., *J. Acoust. soc. Am.*, **41**, (1967), 1443.

[4] 朱哲民，龚秀芬，黄建红，声学学报，**13**-4(1988)，303—307.

[5] Beyer, R. T., «Nonlinear Acoustics», Naval Ship Systems Command, Dept. of the Navy, (1974), 91—114.

[6] 龚秀芬，冯若，朱正亚，声学学报，**11**-2(1986)，95—99.

[7] Apfel, R. E., *J. Acoust. soc. Am.*, **74**, (1983), 1866—1868.

[8] Gong, X. F., Feng, R., Zhu, C. Y., Shi, T., *J. Acoust. soc. Am.*, **76**, (1984), 949—950.


# 测定声源声功率级的新方法——正声强测量法


徐 滇 郑 郧

（第二汽车制造厂技术中心）


1989 年 10 月 4 日收到


本文通过对一般环境中声强场特性的研究分析，提出了一种测量噪声源声功率级的新方法——正声强测量法（PSIM）。与国际标准草案 ISO/DP 9614 《声学：噪声源声功率级的测定方法——声强法》中的方法相比，正声强法对声场环境要求较低，判别条件简单，省时，易推广。因此用正声强方法在现场测量机器辐射声功率很适合在工程测量中应用。文章给出了正声强测量方法的原理和初步测试结果。结果是令人满意的。


## 一、前 言

众所周知，声强测量技术的优点之一是在现场测量机器的声功率级。但遗憾的是，一般房间的声场特性并不满足测量的精度要求。因此，在国际标准 ISO/DP 9614《声学：噪声源声功率级的测定方法——声强法》草案中给出了许多必须在每个倍频程或 1/3 倍频程频带上进行测量的声场指标，来校核声场是否符合测量精度的要求。但是，这些工作是很复杂而又很费时的。

通过对声强场特性的分析，作者提出了一种测量声源声功率级的新方法，即仅用测得的正声强部分（$I^+$ 或 $L_{I^+}$）在现场测量和计算机器的辐射声功率级（$L_w$ dB）的正声强测量方法（*Positive-going Sound Intensity Method*，简称 PSIM）。该方法对声场环境要求较低，判别条件简单，测量简便，省时，便于推广[1]。所以，正声强方法测量机器的辐射声功率很适合在工程测量中应用。本文给出了正声强测量方法的原理和初步测试结果。更深入的问题有待于进一步的研究。

## 二、声强测量原理

设声场中某点的瞬时声压为 $p(t)$，质点振动速度矢量为 $u(t)$。则该点的瞬时声强定义

维普资讯 http://www.cqvip.com

为[2]:

$$\boldsymbol{I}(t) = p(t) \cdot \boldsymbol{u}(t) \tag{1}$$

在时域稳态声场中的时间平均声强为:

$$\boldsymbol{I} = \frac{1}{T}\int_0^T p(t) \cdot \boldsymbol{u}(t)dt. \tag{2}$$

由于声强是单位面积上通过的声功率，根据声强的定义，沿机器的任意封闭包络面对法向声强进行积分可得机器辐射总声功率 $W$，即:

$$\oint_s I_n \cdot ds = W. \tag{3}$$

式中: $I_n = \boldsymbol{I} \cdot \boldsymbol{n}$, $\boldsymbol{n}$ 为元面积 $ds$ 的法向单位矢量.

在测量表面上进行连续空间积分一般是不现实的. 在实际测量中是用有限块元面积叠加来代替连续积分,即:

$$\sum_{i=1}^{N} I_{ni} \cdot \Delta s = W \tag{4}$$

由此带来的采样误差是测量表面上法向声强空间分布的波动性函数. 它取决于声源指向性，选用的采样表面及采样点分布. 而且由于在近场或反射面及驻波的存在,声场呈现高度抗性. 所以在 ISO/DP 9614 标准中给出了许多声场判别指标以确定测量的精度.

由于声强是个矢量，当声场中某个频率的声源的入射声强 ($\boldsymbol{I}_i$) 方向与声强探头轴线方向成 $\theta$ 角时,测得的声强为:

$$\boldsymbol{I}_i = \boldsymbol{I}_i \cdot \cos\theta \tag{5}$$

现定义: 从声强探头前方入射的声强为正声强 $\boldsymbol{I}^+$; 从声强探头后方入射的声强为负声强 $\boldsymbol{I}^-$. 见图 1. 在一般声场中，由于存在多个声源以及墙面等物体的反射，使测点处有多方向的声波入射. 按 (5) 式计算合成后，对于某频率测点的结果可分为从探头前方入射的正声强 $\boldsymbol{I}_f^+$ 和从后方入射的负声强 $\boldsymbol{I}_f^-$. 此时测点在某频率下的总声强为:

$$\boldsymbol{I}_f = \boldsymbol{I}_f^+ - \boldsymbol{I}_f^- \tag{6}$$

将各频率的声强 $\boldsymbol{I}_f$ 按正负叠加起来，即可得到测点的正 ($\boldsymbol{I}^+$) 负 ($\boldsymbol{I}^-$) 声强值来. 由计算公式: $L_I = 10\lg\frac{I}{I_0}$ 即可得出测点的正声强级 $L_I^+$ 和负声强级 $L_I^-$.

## 三、一般房间的声场特性

我们希望在试验场地使用声强方法现场测量机器的辐射声功率级，因此就必须研究一般环境声场中的声强场特性，从而确定测量的精度.

声强测量仪器使用日本 RION 公司的由 SA-73 双通道 FFT 分析，RION SI-21 声强探头和 Hp 9836 微机组成的声强测量分析系统. 测量装置框图见图 2.

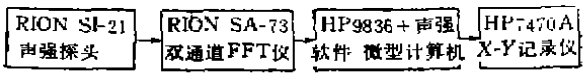


图 2 声强测量装置框图

将由丹麦 B & K 4205 声功率放大器驱动的 B & K HP 1001 声源放在一普通房间的中间. 声源轴线朝着墙面,离地 1.2m 高. 声源表面离墙面距离 $D$ 为 2m 和 3m. 测量沿声源轴线上声强随距离的变化. 测量示意图见图 3. 由上述的声强测量系统即可测得每个测点的正声强级 $L_I^+$ 和负声强 $L_I^-$ 以及测点的声强级 $L_I$, 其

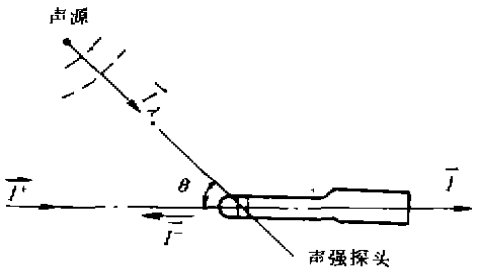


图 1 几种声强的关系

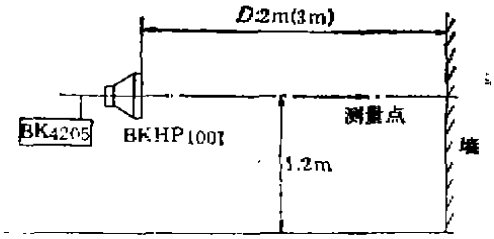


图 3 测量示意图

维普资讯 http://www.cqvip.com

中

$$L_I = 10\lg[10^{L_{I^+}/10} - 10^{L_{I^-}/10}] \qquad (7)$$

从声学理论可知[3]，在一般房间中从声源到墙壁的声压场可以分成三个部分．即：近场，自由场和扩散场．在近场和扩散场中声压变化无规律．而在自由场中，声压的变化符合反平方律，即两测点的声压级 $L_{p_1}$，$L_{p_2}$ 与测点到声源距离 $r$ 之间有如下关系：

$$L_{p_2} - L_{p_1} = 10\lg\frac{r_1^2}{r_2^2} \qquad (8)$$

即当距声源的距离增加一倍，声压级下降约 6 dB．

但是，声强场的分布如何？一般房间中声强场与声压场是否具有相同的分布？以前人们对此研究很少[2,5,6]．作者通过试验研究，观察到了一些有用的现象．

**1.** 当声源发出纯音时，声强级随测点到声源距离的变化如图 4．从图中可见，由于墙面的影响，在中间测点位置的声强矢量改变了方向，变成负声强（$L_{I^-}$）．越靠近墙面部分，负声强峰值出现得越多．而且，纯音的频率越高，所出现的负声强峰值也越多．所以，对于纯音，其声强随测距的变化均不符合反平方律．

**2.** 声源发出倍频程噪声时的声强测量结果见图 5．图中曲线 1 是理想的反平方律变化曲线；曲线 2 是测得的正声强级 $L_{I^+}$ 随测距的变化曲线；曲线 3 是声强级 $L_I$ 随测距的变化曲线；曲线 4 是负声强级 $L_{I^-}$ 随测距的变化曲线（下图中各曲线的含义均同此）．从图中可见，由声强形成的自由场可达到离墙 0.8m 处．而由正声强形成的自由场可以达到离墙面更近的距离．这两种声强的自由场也可以达到离声源很近的距离处．

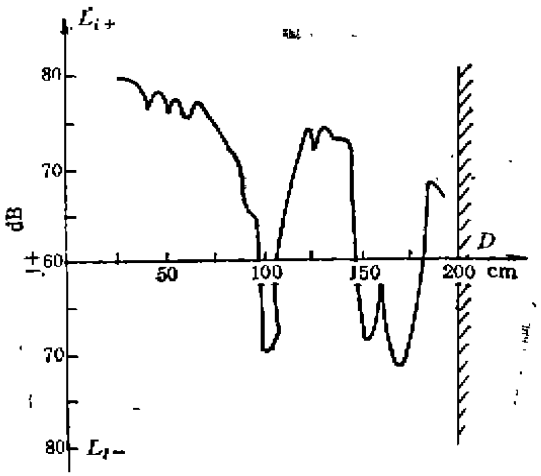


图 4　纯音时声强随测距的变化

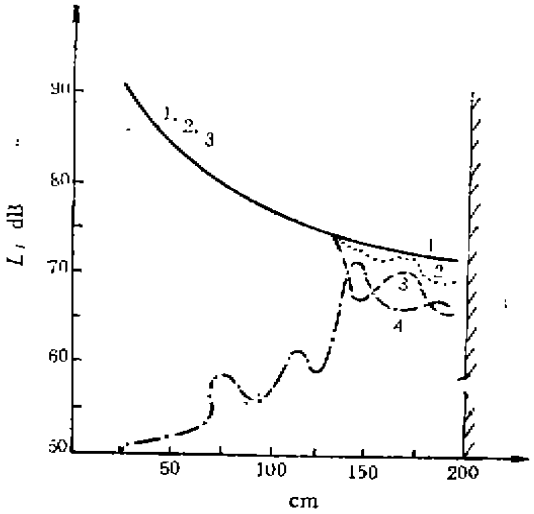


图 5　250Hz 倍频程时声强级的变化

**3.** 当声源发出 100 Hz—10 kHz 的宽带噪

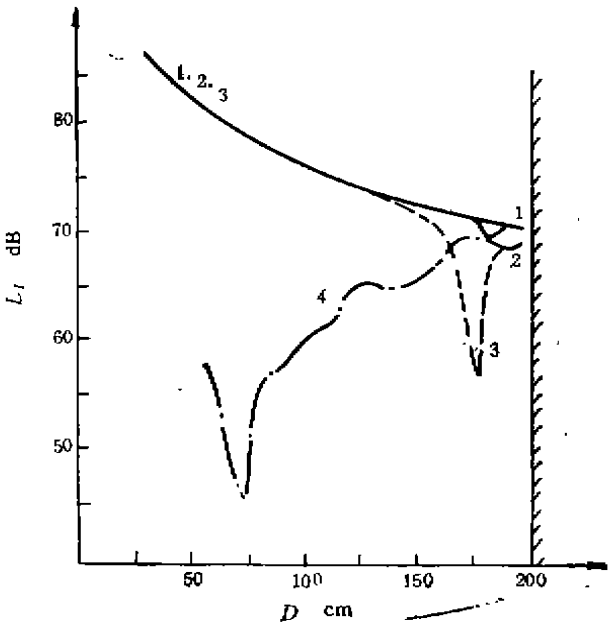


图 6　宽带噪声下的声强级

维普资讯 http://www.cqvip.com

声时的测量结果见图 6. 此时，由正声强级 $L_{I^+}$ 形成的自由场可以达到离墙面 0.25m 处. 而由声强级 $L_I$ 形成的自由场仍与发出倍频程噪声时的相同. 并且此时两种声强的自由场也可以达到离声源很近的位置处(<0.3m).

**4.** 在一般房间中声源离墙面 3m 时的各种声场分布见图 7. 图中曲线 1—4 意义同前；曲线 5 是理想声压场中声压级随测距变化的反平方律曲线；曲线 6 是实测声压级 $L_p$ 随测距的变化曲线. 从图中可以清楚地看到，声压场的自由场范围很小，其混响半径 $D_{fp}$ (表示自由场范围的参数)只有 0.75m. 总声强场的自由场很宽，其混响半径 $D_{fI}$ 为 2m. 而正声强形成的自由场就更宽，见图 7 中的曲线 2，此时 $D_{fI^+}=2.5$m. 该自由场边缘离墙面仅 0.5m. 这一发现对使用声强法现场测试具有重要意义.

由于正声强的自由场范围可以延伸到离墙面很近的地方. 此时用正声强 $I^+$ 比使用声强 $I$ 能更好地表示出声源的声能辐射状况. 因此这给我们一个重要的启示，即我们可以在现场并且在一个很宽的范围内仅用正声强来测量计算声源的辐射声功率.

**5.** 定性的理论解释：在理想的自由声场中，声波的辐射随测距的变化是服从反平方律的. 即在自由场中有 $L_{I^+}=L_I$；$L_{I^-}=0$. 此时没有任何反射波存在. 但在一般房间的情况就很不相同了. 由于在房间中存在墙壁等反射面会产生反射波. 这些反射的声波会叠加在声源的入射声波上，就会使得某些点的声矢量减少甚至是改变方向. 在纯音作声源测量时的中间测点就是如此. 这就意味着某个测点的声强大小是取决于入射波和反射波在该点的相位和幅值. 对于纯音作声源时的某个测点的声强值要么为正要么为负. 对于倍频程和宽带噪声信号来说，它们都是由无数个纯音成份组成的. 对于某个测点所测得的声强中，有些频率上的声强为正，有些频率上的声强为负. 因此，在以倍频程或以宽带噪声信号作声源的测量中，声强频谱中必存在正声强 ($I^+$) 和负声强 ($I^-$) 两部分. 将所有正声强 $I_f^+$ 叠加起来即可得到测点总的正声强 $I^+$ (或者是正声强级 $L_{I^+}$). 将负声强 $I_f^-$ 叠加起加可以得到测点的总负声强 $I^-$ (或者是负声强级 $L_{I^-}$). 将两者按能量叠加公式合成即可得到测点声强值 $I$ (或者是测点声强级 $L_I$). 由于测量时声强探头是对着被测声源的，在测量的声强谱中虽然存在着负声强，但对一般房间中的反射不太严重时，声强频谱中的总的正声强级 $L_{I^+}$ 远大于总负声强级 $L_{I^-}$，叠加后的总声强值 $L_I$ 也为正. 而且 $L_I$ 与 $L_{I^+}$ 的值相差也较小[2,6]. 这说明此时环境对总的声强结果影响较小. 因此，在一般房间中的较宽范围内，声强随测距的变化仍可近似地服从反平方律关系. 然而，当在很恶劣的声学环境中，例如在靠近墙面处的测量时，虽然探头仍对着声源，但由于测点处的反射成份增多，使负声强分量增加，因而使测量的声强值与声源实际情况有很大的差异. 此时的结果不再服从反平方律了. 如果我们只取声强谱中正声强部分 $I^+$ 进行计算，即我们使用正声强测量方法时，由于该方法在计算中去掉了负声强部分，因此它可以基本上消除反射波对测点的影响. 使测得的 $L_{I^+}$ 值比 $L_I$ 值要更加接近声源的真实辐射状况. 这也就使得实测中的 $L_{I^+}$ 比 $L_I$ 有更宽的自由场范围.

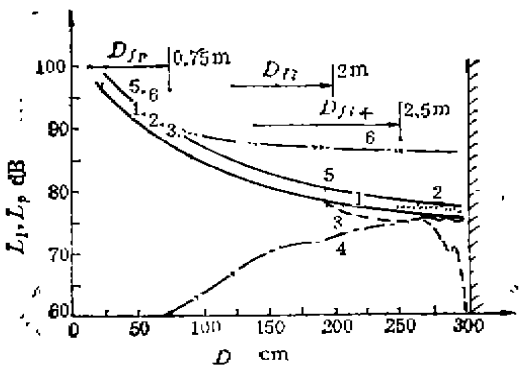


图 7 一般房间的声场分布

在一般房间中的声强谱随测点离墙面距离变化如图 8 所示. 图中如 0.25/1.75m 表示了：测点到声源的距离 (m)/测点到墙面的距离 (m). 从图可见，当测点越靠近墙面时，声强频谱中所出现的负声强成份也越多.

维普资讯 http://www.cqvip.com

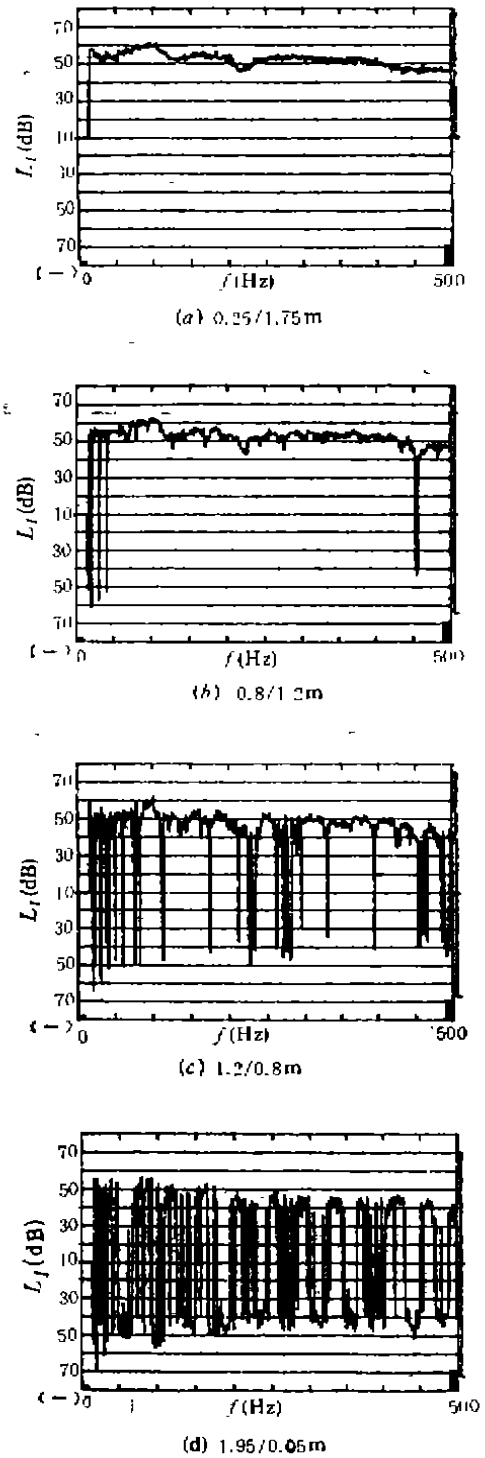


图 8　不同测点的声强频谱

在靠近声源的测点，如图 8*a* 中 0.25/1.75 m 点的声强谱中负声强级 $L_I$- 可以被忽略。也就是说在这里几乎是纯自由声场了。但是如果用高放大倍数的细化功能进行分析时，仍可以看出许多负声强线。

在靠近墙面的测点，如图 8*d* 中 1.95/0.05 m 点，声强谱中 $L_I$- 与 $L_I$+ 几乎相同。此时的声强级近似为零。这表明该处是纯扩散声场。

## 四、用正声强方法测量声功率级的试验

试验装置如图 9 所示，测量仪器同前。测量对象是 B&K 4205 标准声功率源，它的扬声器（B&KHP 1001）被放置在房间的中央。声功率级设置为 80 dB。分别对布置的 $S_1$，$S_2$ 两个测量表面进行测量。$S_1$ 测量面靠近声源，尺寸为：长 1.5m，宽 1.5m，高 1.3m。$S_2$ 测量面靠近墙壁(离墙面 0.5m)，尺寸为：长 4.6m，宽 4.6m，高 1.3m。当然此墙壁的反射性较强。测量点的布置是根据国际标准化组织推荐标准（草案）ISO/DP 9614 要求设置的。在 $S_1$ 测量面布置 10 个测点。在 $S_2$ 测量面布置 38 个测点。声功率级 $L_W$ 也是根据 DP 9614 要求计算的。同时还计算由正声强法（PSIM）测得的声功率级。表 1，表 2 给出了测量及计算结果。

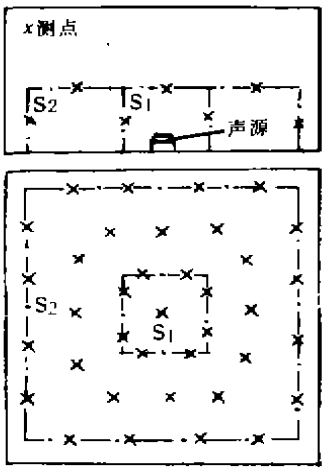


图 9　试验装置及测点布置

上表 2 中，$F_2$ 为总声压—声强指数，计算公式为

$$F_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I_n|} \tag{9}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 1　S1 表面测量计算结果

| fc Hz | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1k | 1.25k | 1.6k | 2k | 2.5k | 3.15k | 4k | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F2 dB | 4.5 | 3.6 | 4.1 | 4.8 | 4.3 | 3.3 | 3.1 | 3.8 | 3.9 | 2.9 | 3.6 | 3.3 | 3.4 |
| F3 dB | 4.6 | 3.6 | 4.1 | 4.8 | 4.3 | 3.3 | 3.1 | 3.8 | 3.9 | 2.9 | 3.6 | 3.3 | 3.4 |
| N-$C_2F_4^2$ | −1 | 7 | −4 | −6 | 7 | 9 | 10 | 4 | 4 | 5 | −4 | −3 | 6 |
| PPC | no | yes | no | no | yes | yes | yes | yes | yes | yes | no | no | yes |
| $L_W$ dB | 61 | 61 | 62 | 66 | 67 | 73 | 73 | 70 | 68 | 70 | 68 | 68 | 79.9 |
| $L_W$ dB | 使用正声强方法（PSIM） | | | | | | | | | | | | 79.9 |

表 2　S2　表面测量计算结果

| fc Hz | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1k | 1.25k | 1.6k | 2k | 2.5k | 3.15k | 4k | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F2 dB | 7.2 | 9.1 | 7.0 | 5.7 | 6.7 | 6.9 | 7.7 | 6.7 | 7.9 | 6.5 | 5.5 | 6.3 | 6.8 |
| F3 dB | 7.3 | 9.8 | 7.3 | 6.3 | 6.8 | 7.0 | 7.7 | 7.0 | 7.9 | 6.7 | 5.6 | 6.5 | 6.8 |
| N-$C_2F_4^2$ | 3 | 2 | 1 | 1 | −7 | 4 | −5 | −3 | −3 | −7 | −5 | −4 | −1 |
| PPC | no | no | no | no | no | no | no | no | no | no | no | no | no |
| $L_W$ dB | 不满足 ISO/DP 9614 的要求，无法计算 | | | | | | | | | | | | |
| $L_W$ dB | 使用正声强测量方法（PSIM） | | | | | | | | | | | | 80.3 |

其中：$\bar{L}_p$ 为由下式计算出的表面平均声压级

$$\bar{L}_p = 10\lg\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}10^{0.1L_{pi}}\right]\ \text{dB} \quad (10)$$

$\bar{L}_{|I_n|}$ 为由下式计算的测量表面上无符号的法向声强级：

$$\bar{L}_{|I_n|} = 10\lg\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|I_{ni}|/I_0\right]\ \text{dB} \quad (11)$$

$F_3$ 为总的外加噪声指标，可按下式计算：

$$F_3 = \bar{L}_p - 10\lg\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}I_{ni}/I_0\right]\ \text{dB} \quad (12)$$

$F_4$ 为声场不均匀性指标，由下式计算：

$$F_4 = \frac{1}{\bar{I}_n}\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}[I_{ni}-\bar{I}_n]^2} \quad (13)$$

式中，$\bar{I}_n$ 为测量表面的法向声强，由下式计算：

$$\bar{I}_n = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}I_{ni} \quad (14)$$

$I_{ni}$ 为测点 $i$ 上的法向声强；$I_0$ 为基准声强 $10^{-12}\text{W/m}^2$；$L_{pi}$ 为测点 $i$ 处的声压级；$N$ 为测点数目。表中 $C_2$ 为系数，其值的选取是 [3]；PPC 是以正声功率集中的判别准则；*no* 表示声场特性不满足 ISO/DP 9614 的要求，需要采取些改进措施。从表中可以看到，虽然 *S2* 测量面的声场特性不满足 ISO/DP 9614 标准的要求，以至于无法计算出声源的辐射声功率，但使用正声强法的测量计算结果仍有很好的精确度。此时正声强法的结果与标准值仅差 0.3 dB。

然后，我们将仿 B & K 4204 的标准声功率源 ASSR-2 放在房间中央原 B & K 4205 的放置处。该声源 $L_W = 94.4$ dB。而将 B & K4205 作为噪声干扰源放在 *S2* 测量面外的房间角落处，其声功率级设置为 94dB。以 *S2* 为测量面测量标准声功率源 ASSR-2 的辐射声功率级。这种恶劣的声场条件是完全不符合 ISO/DP 9614 标准的要求。由于在同一房间中的两声源声功率级相同，相距也不远。所以用声压测量方法更是无法测量出某个声源的辐射声功率。但是使用正声强测量方法（PSIM），此时测得 ASSR-2 声源的辐射声功率级为 95.0dB。该值与标准值仅差 0.6dB。由此可见，在如此恶劣的环境中以 *S2* 作测量表面时，正声强方法仍然能达到一定的精度。而这种环境在现场测量中有时也会遇到。所以在现场用正声强测量法测量机器辐射声功率有重要意义。

维普资讯 http://www.cqvip.com

但是有一点需要注意，即正声强法仅能用于辐射宽带噪声的机器和测取机器总的声功率级。在工程测量中，人们常用A计权声功率级来估计机器的噪声级。对大多数种类的机器来讲，所发出的噪声是宽带的，如汽车和发动机等。由以上比较可以知道，正声强测量法不但能达到很高的精度，完全符合工程测量的要求，而且测试十分方便。由于正声强的自由场范围很宽，如图6中 $L_I$+ 的自由场一直可以到达墙面附近。因此，使用正声强测量法时不需要测量声压值及房间 $K$ 值作声场修正。

另外，由于纯音并不服从反平方律变化规律。所以，如果任何单一频率上的声级与总噪声级相差不多时，正声强测量法不宜使用。

作者相信，正声强测量法可以被作为常规测量声功率级的方法。并且可以采用和传统的自由场内测量声功率级的声压法完全一样的方法，例如 ISO 3745《声学：噪声源的声功率级测定——消声室和半消声室的精密方法》就是仅在试验现场进行测量而不必进行声场特性检查及环境修正。和 ISO/DP 9614 中的方法相比，正声强方法可以大大地简化试验方法，节省试验及数据处理时间，所以容易推广。我们将在更深入的研究以后建议将正声强测量方法（PSIM）纳入国际标准 ISO/DP 9614，作为目前该标准草案的补充。

## 五、结　论

**1.** 在一般房间中，对于宽带噪声声源，其声强场能象声压场一样可划分成三个部分。它们是近场（靠近声源处），自由场和扩散场。声强级 $L_I$ 的自由场范围要比声压级 $L_p$ 的宽。而正声强级 $L_I$+ 的自由场范围比 $L_I$ 的还要宽。在自由场范围内测量声功率 $L_W$ 时，可以获得较精确的结果。用正声强法现场测量声源声功率时可基本消除环境噪声的影响，而不需要测量声压级和声场的特征系数等。所以正声强测量方法对于工程测量中使用是更方便，并将使它很容易地被各方广泛使用。

**2.** 正声强法仅适用于非纯音的宽带噪声声源的声场测量。因此，使用正声强法测量前应测量声源的频率特性。

**3.** 应进一步研究测量面位置和频率特性对正声强测量法的限制，以及该方法的误差分析和判定条件。

感谢杨正江等同志对本文试验的帮助。

## 参 考 文 献


[1] 徐滇，郑郧，inter-noise 88 proceedings，135—138.

[2] 陈端石，噪声与振动控制，4(1987)6—20

[3] 杜功焕等，声学基础，上海科学技术出版社，1981.

[4] 戴根华，曾力军，inter-noise 87 Proceedings，1407—1410.

[5] 徐滇，郑郧，inter-noise 89 Proceedings，1025—1028.


（上接第 4 页）


[29] 汪一奇，中华理疗杂志，10-4(1987)，126.

[30] 刘多任等，临床医学，9-5(1989)，205.

[31] 李中国等，中华理疗杂志，11-3(1988)，100.

[32] 万明奎等，中华理疗杂志，4-3(1988)，166.

[33] 金完成等，中国超声医学杂志，4-3(1988)，166.

[34] 张凤兰，中华理疗杂志，10-3(1987)，185.

[35] 成勤媛，中国超声医学杂志，2-3(1986)，196.

[36] 于丽黎，第四届全军理疗康复专业学术会议资料选编，1986，104 页.

[37] 张凤兰，中华理疗杂志，10-4(1987)，249.

[38] 杜宝森，疗养医学，1986，15.

[39] 侯　湘等，中华理疗杂志，12-1(1989)，17.