维普资讯 http://www.cqvip.com

# 选择声强法用于强背景噪声下声源识别

胡章伟　　尹坚平
（南京航空学院空气动力学系）

1990年2月9日收到

选择声强法是一种新的测试方法，它集中了传统声强法和偏相干方法的优点，可以在声源间存在相干和高背景噪声的情况下，进行声源辐射声强的识别．本文首先论述了选择声强法的理论，并在多输入、双输出的频域模型基础上，讨论了如何利用选择声强法将声强矢量分解为与各噪声源有关的分量，然后结合在强背景噪声下扬声器辐射声强的区分实验，给出了此方法在实际应用中可能遇到的一些问题以及相应的解决办法．

## 一、引　　言

在噪声控制过程中，若要有效地控制噪声源辐射的噪声，首先必须弄清引起噪声的来源；正确地判断和区分噪声的来源是声学设计有效性的保证．近年来，在噪声源识别中主要应用声强法[1]和偏相干法[2]，其中声强法已逐渐发展成为一种标准的测试方法，它较常规测试方法有许多优点，可以适用于许多特殊条件，如对大型、形状复杂、表面温度高的声源的识别．但对于各声源间距很小、声源间存在相干或者声源附近有强烈的背景噪声并且包络面中存在吸收的情况下，就无法利用传统的双传声器声强法精确地得到各声源对总声场的贡献．如柴油机的噪声源识别，由于各部件声源间是相关的，传统的声强方法将无法得到精确的各部件所辐射的声强．偏相干法虽有其独特的优点，如可用于识别多声源相干的工业现场噪声，即使在背景噪声较高的环境下也有较强的功能，但偏相干法只能给出各识别声源功率谱方面的信息，无法得到各声源声能量的传播方向．

考虑到传统声强法和偏相干法的不足，J. Baucheger 和 W. Trethewey[3] 提出了一种选择声强法，即利用双传声器加声源特征信号的方法来识别各声源的声强分量，它集中了声强法和偏相干法的优点，可以在声源间存在相干、高背景噪声情况下，进行声源辐射声强的识别．目前，国外已将此方法成功地用于风钻噪声源的识别[4]，可以说选择声强法是传统声强法的进一步发展．

选择声强法是将各声源模拟为一线性多输入、双输出系统．两个传声器的信号作为系统的输出，各声源的特征信号作为系统的输入，利用多输入、双输出频域模型，在最小二乘的意义下得到输入和输出间的频率响应函数，利用这些频率响应函数以及各信号相互间的谱函数，即可区分出各特定声源辐射的声强分量．

本文首先论述了选择声强法理论，建立多输入、双输出模型，然后将此方法用于强背景噪声下，扬声器辐射声强的识别，并讨论了特征信号的选择问题．

## 二、选择声强法原理[3]

声场中某点 $r$ 方向的有功声强 $I$ 可以通过沿该方向两个相邻传声器的互谱来得到[1]：

$$I_r = \frac{I_m[G^*_{P_1P_2}(f)]}{2\pi f \rho \Delta r} \tag{1}$$

这里 $G^*_{P_1P_2}(f)$ 为两传声器声压信号互谱的共轭，$I_m[\ ]$ 指取虚部，$f$ 为频率，$\rho$ 为大气密度，$\Delta r$ 为两传声器间距．

维普资讯 http://www.cqvip.com

当所研究的系统由多个辐射源组成时，每一个测量到的声强矢量为各声源所辐射的声强矢量的和，沿 $r$ 方向声强分量 $I_r$ 包含了所有声源包括背景噪声的贡献。因此仅有双传声器所提供的信号，将无法利用(1)式分离出各声源或背景噪声对总声强的贡献。为了获得各声源辐射的声强，考虑图 1 所示多输入、双输出系统模型，输入信号 $X_i$ 是每一声源特征信号的傅里叶变换，$P_1$ 和 $P_2$ 分别为两传声器声压信号的傅里叶变换，$H_{iP_1}$ 和 $H_{iP_2}$ 分别为 $X_i$ 和 $P_1$、$P_2$ 之间的频率响应函数，$N_1$ 和 $N_2$ 为背景噪声信号的傅里叶变换。声压信号和特征信号之间的关系可写为：

$$P_1(f) = \left[\sum_{i=1}^{m} H_{iP_1}(f)X_i(f)\right] + N_1(f) \tag{2}$$

$$P_2(f) = \left[\sum_{i=1}^{m} H_{iP_2}(f)X_i(f)\right] + N_2(f) \tag{3}$$

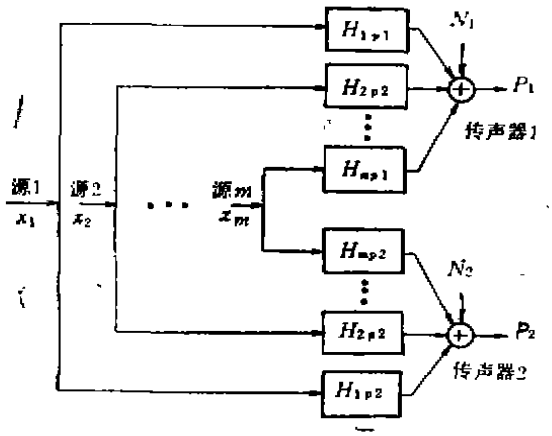



图 1　选择声强法多输入、双输出模型

声压的互谱 $G_{P_1P_2}$ 可由声压信号乘积的期望值来得到：

$$G_{P_1P_2} = \frac{2}{T} E[P_1^*(f)P_2(f)] \tag{4}$$

上式中 $T$ 为样本记录长度。将方程(2)(3)代入方程(4)并考虑到背景噪声与输入信号之间是不相关的，可以推得：

$$G_{P_1P_2}(f,T) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} \times [H_{iP_1}^*(f)H_{jP_2}(f)G_{ij}(f,T)] + G_{N_1N_2}(f,T) \tag{5}$$

这里 $G_{ij}(f,T)$ 为输入信号 $X_i$ 和 $X_j$ 间的互谱，$G_{N_1N_2}(f,T)$ 为背景噪声的互谱。

利用方程(5)可以重新将声强关系式(1)改写成下面的形式：

$$I_r(f) = I_m \times\left\{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} [H_{iP_1}(f)H_{jP_2}^*(f)G_{ij}^*(f,T)] + G_{N_1N_2}^*(f,T)/2\pi f\rho\Delta r\right\} \tag{6}$$

方程(6)是选择声强法的基本方程，由输入的声源特征信号的谱函数和频率响应函数来确定。此方程经过一些合理假设和计算，可以分离出任意一个声源对总声强的贡献。例如，要得到声源 $X_k$ 对总声强的贡献(表示成 $I_{r\leftarrow X_k}$)，只要令除 $i=j=k$ 以外的其它所有频率响应函数 $H_{iP_1}$ 和 $H_{iP_2}$ 等于零并减去背景噪声谱 $G_{N_1N_1}^*(f,T)$，由(6)式可以得到：

$$I_{r\leftarrow X_k} = I_m[H_{kP_1}(f)H_{kP_2}^*(f)G_{kk}^*(f,T)]/2\pi f\rho\Delta r \tag{7}$$

这样做，相当于将除 $X_k$ 以外的其它声源(包括背景噪声源)"屏蔽"起来。这与传统的"包裹"法的道理是一样的。不过，现在的方法的优点是只需要从数学上获得所需信息，不需要从物理上将除 $X_k$ 以外的其它声源用包裹法屏蔽起来。另外，比较方程(6)和(7)可以看出，方程(7)给出的是源 $X_k$ 独立的贡献。由于各声源间一般总是相关的，因此方程(6)中 $i \neq j$ 项则表示了源 $X_i$ 和 $X_j$ 相干的那部分贡献。利用方程(6)还可以得到几个相干源的共同贡献。

为了利用方程(6)计算选择声强，需要得到 $2m$ 个频率响应函数 $H_{iP_1}$ 和 $H_{iP_2}(i,j=1,2,3,\cdots\cdots m)$。在最小二乘意义下，可得到最优选择的频率响应函数，这些频率响应函数使得 $N_1$ 和 $N_2$ 与 $X_i$ 和 $P_1$、$P_2$ 不相关。各频率响应函数可通过解下面矩阵方程来得到：

$$\begin{bmatrix} G_{1P_1} & G_{1P_2} \\ G_{2P_1} & G_{2P_2} \\ \vdots & \vdots \\ G_{mP_1} & G_{mP_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1m} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ G_{m1} & G_{m2} & \cdots & G_{mm} \end{bmatrix}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\begin{bmatrix} H_{1P_1} & H_{1P_2} \\ H_{2P_1} & H_{2P_2} \\ \vdots & \vdots \\ H_{mP_1} & H_{mP_2} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 $G_{iP_1}$ 和 $G_{iP_2}$ 分别为第 $i$ 个声源的特征信号 $X_i$ 与声压信号 $P_1$ 和 $P_2$ 的互谱。

方程(8)中所有的自谱和互谱都可以直接测量获得，由此可以解出所要求的频率响应函数，代入方程(7)得到任意一个声源辐射的声强分量。

选择声强法的导出虽然直截了当，但在实际工程应用中有一些问题必须予以充分注意。例如，多个时间历程测量的时间不同步和仪器系统的相位差引起的测量误差，特别是声源特征信号的选取，也就是计算模型的有效性问题，更是选择声强法能否取得成功的关键。有关问题将结合强背景噪声下扬声器辐射声强的区分实验进行讨论。

## 三、选择声强法用于强背景噪声下扬声器辐射声强识别

为了研究选择声强法在实际应用中的有关问题，验证选择声强法的可行性，我们在南京航空学院空气动力学系消声室内作了强背景噪声下声源识别实验。实验中把一扬声器作为需要识别的声源，以 B&K 4204 参考声源作为背景噪声源，两者紧靠在一起，同时调节扬声器输入信号，使两者在测点传声器处产生的总声压相近，以保证背景噪声相对于要识别的声源有足够的强度，实验框图和相应的选择声强模型如图 2 和图 3 所示。

模型输入特征信号的选取是获得有意义结果的保证。特征信号必须能充分反映所研究系统的特征，要根据声源的性质和特点来选用测量传感器的个数以及安放位置。对于统计独立的声源，只要辐射面处的结构振动比较强，就可以用加速度计测得的表面振动信号作为特征信号。当使用多个输入特征信号时，任何一对输入信号之间的相干函数不应等于 1，否则两个输入间含有了重复的信号，这时其中一个输入就应从模型中去掉。根据以上考虑，我们在扬声器振膜上安置了一个超小型加速度计，把获取的振动信号作为输入特征信号 $X_1$。

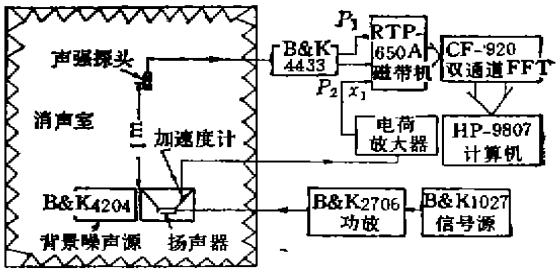



图 2 实验框图

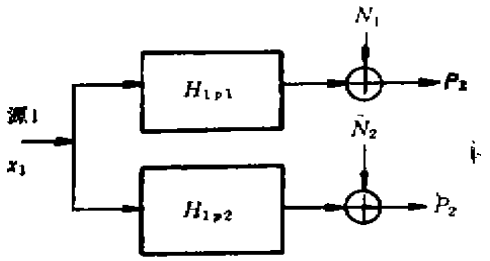



图 3 选择声强模型

输出双传声器声强探头置于两声源几何中心连线的中垂线上，距中点约 1.0m，测量步骤如下：

用磁带机同时记录有背景噪声时特征信号 $X_1$ 和两传声器输出信号 $P_1$ 和 $P_2$，然后回放给 CF-920 双通道 FFT 分析仪进行各种谱分析，各种所需谱分析结果调入到 HP-9807 计算机中进行选择声强计算，利用(7)式和(8)式即可识别出存在背景噪声时扬声器辐射的声强。关掉背景噪声源，利用传统声强方法测出扬声器辐射的声强，就可以和选择声强法得到的结果进行比较。

声强探头两传声器间距为 50 mm，B&K 4433 分析频带为 63Hz—2000Hz，CF-920 谱分辨率为 5Hz，谱平均次数为 256 次。

在进行选择声强计算之前，首先必须验证模型的有效性，对于单输入系统可以用输入信

维普资讯 http://www.cqvip.com

号 $X_1$ 和传声器声压信号 $P_1$（或 $P_2$）的常相干函数 $\gamma^2_{iP_l}$ 来评定[5]（对于多输入情况，有关式见附录）：

$$\gamma^2_{iP_l}=\frac{|H_{iP_l}(f)|^2G_{ii}(f,T)}{G_{P_lP_l}}\quad(l=1,2)\tag{9}$$

常相干函数值越大，说明模型输入的特征信号的选择越恰当，当 $\gamma^2_{iP_l}$ 接近 1 时，可以认为选择的模型是有效的；当 $\gamma^2_{iP_l}$ 接近零时，选择的模型不合适。图 4 给出了本文实验中加速度信号 $X_i$ 和 $P_l$ 的常相干函数曲线：从图中发现，在分析的大部分频率范围内，相干函数在 0.7 以上，甚至接近于 1，但在 1000Hz 附近，$\gamma^2_{iP_l}$ 值很小。但是，这并不能肯定特征信号选择不当，即没有表征声源的特征。事实上，如果这一频段范围内声源本身的输出较低，对总输出的贡献相对减小，也会造成相干函数值下降。这时必须提供一个补充检验，即检查模型输出相干功率与模型输出总功率之比，也即模型输出功率比：

$$\gamma_1=\int_0^\infty|H_{iP_l}|^2G_{ii}df\Big/\int_0^\infty G_{P_lP_l}df\quad(l=1,2)\tag{10}$$

本文算得在 63 Hz—2000 Hz 范围内 $\gamma_1$ 为 74.3%。文献[5]指出当 $\gamma_1>70\%$ 时，模型是

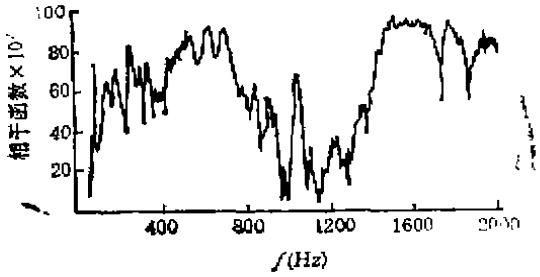
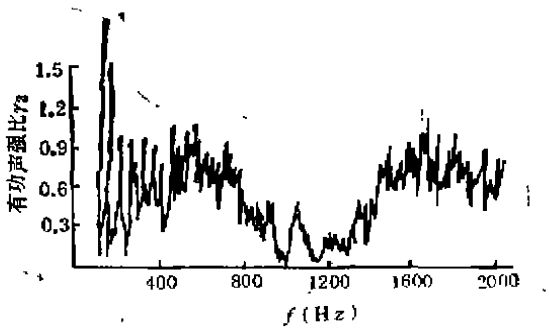



图 4　$X_i$ 与 $P_i$ 的常相干函数曲线




5　有功声强比

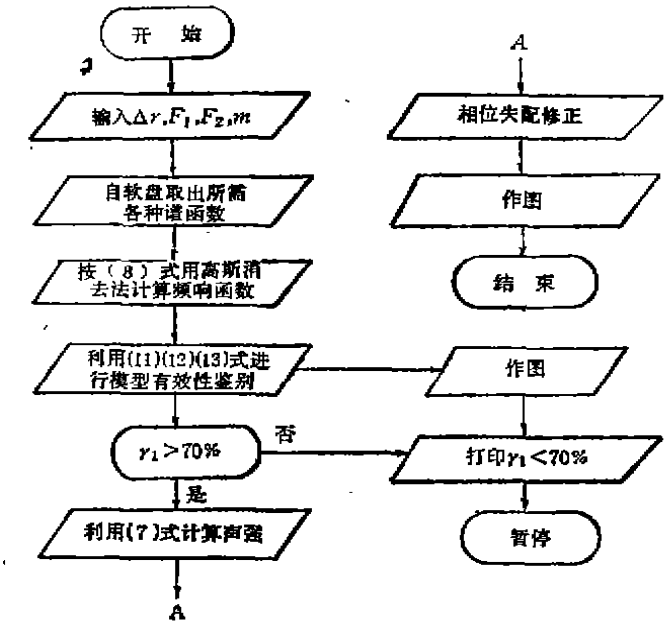



图 6　选择声强计算程序框图

$F_2$，$F_1$——测量频带上下限　$m$——输入特征信号数

维普资讯 http://www.cqvip.com

有效的。

除了以上的模型有效性鉴别方法以外，本文还采用了另一鉴别方法，即有功声强比 $\gamma_2$[4]，定义为模型输出有功声强与直接测量的有功声强比：

$$\gamma_2 = \frac{I_m[H_{1P_1}H^*_{1P_2}G^*_{11}]}{I_m[G^*_{P_1P_2}]} \qquad (11)$$

图 5 给出了本文实验中得到的有功声强比曲线。除了 1000Hz 附近以外，大多数频段 $\gamma_2$ 值都大于 0.7，一般认为 $\gamma_2$ 值在 1 附近时，模型是有效的。

从有功声强比，相干函数以及模型输出功率比可以知道，除某些频率以外，本文实验中采用加速度信号作为系统输入的特征信号是正确的，从而也就证明了在识别扬声器辐射声强时所选择的模型(图 3)是正确的。

合适的选择声强模型建立以后，还必须考虑两传声器测量系统之间相位失配误差，通常的修正方法为传递函数法和传声器交换法[4]；由于传声器交换法将附加很大的计算量，建议在使用选择声强法时，采用传递函数法进行相位失配修正。

图 6 示出了选择声强法计算程序框图，该程序能够根据频谱分析仪输出的各种谱数据，进行模型有效性判断，相位失配修正，由此对各声源辐射声强的大小和方向进行识别。

图 7 和图 8 分别给出了有背景噪声时，利用选择声强法得到的扬声器辐射声强和传统声强法测到的声强。图 9 给出了无背景噪声时，传统声强法测到的扬声器辐射声强。

比较图 7 和图 9 可以看出，虽然存在较强

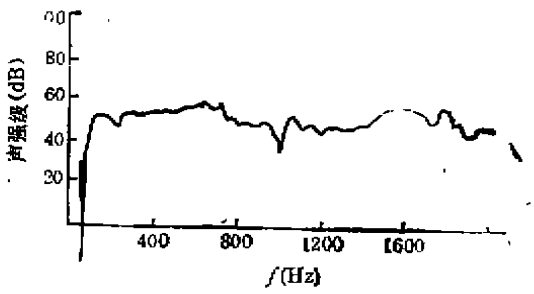



图 7 选择声强法得到的扬声器辐射声强(有背景噪声)

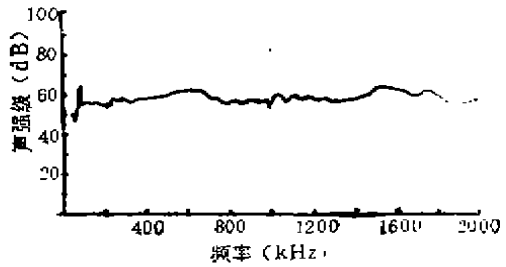



图 8 传统声强法测到的声强(有背景噪声)

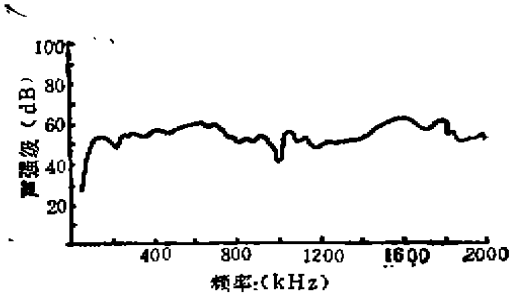



图 9 传统声强法测到的扬声器辐射声强(无背景噪声)

的背景噪声，只要选择了合理的模型，仍可以在强背景噪声下利用选择声强法得到精确的扬声器辐射声强(误差<2dB)。这是用传统声强法很难做到的。

## 四、结束语

利用选择声强法进行噪声源辐射声强的识别是一种新的测试方法，有很大的应用前景。

### 附 录

对于多输入(多个特征信号)系统，类似于单输入系统，可通过重相干函数 $\gamma^2_{P_l:X}$、模型输出功率比 $\gamma_1$ 和有功声强比 $\gamma_2$ 来检查模型的有效性，它们的表达式分别为：[4-5]

$$\gamma^2_{P_l:X} = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} H^*_{lP_l}H_{iP_l}G_{ij}}{G_{P_lP_l}} \qquad (l = 1,2)$$

$$\gamma_l = \frac{\int_0^\infty \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} H^*_{lP_l}H_{lP_l}G_{ij}df}{\int_0^\infty G_{P_lP_l}df} \qquad (l = 1,2)$$

$$\gamma_2 = \frac{I_m\left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} H_{iP_1}H^*_{jP_2}G^*_{ij}\right]}{I_m[G^*_{P_1P_2}]}$$

## 参 考 文 献


[1] 陈端石,"噪声与振动控制",4(1987),6—20.

[2] 徐世荣等,"噪声与振动控制",2(1988),45—51.

[3] Bucheger J., Trethewey W., *J. Sound. vibration*, **90**-1(1983), 93—101.

[4] Trethewey M. W., *Noise Control Eng. Journal*, **30**-1(1988), 22—29.

[5] Trethewey M. W., *J. Acous. Soc. Am.*, **75**-4 (1984), 1092—1104.


# 反射式超声频电功率计


鲍 善 惠

(陕西师范大学应用声学研究所)



1990 年 4 月 4 日收到



本文介绍了反射式超声频电功率计测量阻抗失配程度的原理及具体的电路，分析了这种功率计的误差来源和使用上的限制，并给出了有关的计算公式.


## 一、前 言

通用型的超声波发生器通常对所接负载的阻值有着比较严格的要求，只有当负载的阻值等于发生器的输出阻抗即最佳负载值时，发生器才能工作于设计状态，向负载提供额定的输出，并避免由于失配而造成的损坏. 当阻值为任意的负载与发生器相连时，必须使用匹配网络进行阻抗变换，使得负载与发生器匹配. 在调匹配的过程中，需要有一种设备能够随时指示负载与发生器之间的配接状况，以便确定调节的方向，判断是否达到了匹配状态. 反射式电功率计就是这样一种设备. 它一方面可以测量负载功率，另一方面可以指示发生器与负载间的配接状况. 根据这种指示，即可以准确而迅速地实现发生器与负载的阻抗匹配.

## 二、阻抗失配及其表示方法

为叙述方便，我们用"阻抗失配"一词来表示发生器与负载之间未匹配的状态. 阻抗失配的程度，则可用下式定义的失配系数 $\rho$ 来表示[1]:

$$\rho = \frac{Z_L - R_0}{Z_L + R_0}. \qquad (1)$$

式中 $Z_L = R_L + jX_L$ 为负载阻抗，$R_0$ 为发生器的输出阻抗值. 需要说明的是，本文所说的"输出阻抗"系指发生器所要求的外接阻抗值，它通常是一个纯阻，故用 $R_0$ 表示.

从(1)式可以看出，$\rho$ 是一个复数. 当 $Z_L$ 的虚部为零，实部等于 $R_0$ 时，$\rho$ 等于零，说明达到了匹配. 除此之外的任何 $Z_L$ 值都将给出不为零的 $\rho$，说明阻抗失配. $Z_L$ 和 $R_0$ 相差越大，$|\rho|$ 就越大，说明失配越严重. 在 $Z_L = 0$ 和 $Z_L = \infty$ 这两种极端情况下，$|\rho| = 1$，即达到最大值. 可见，$\rho$ 能够表示出阻抗失配的程度.

但是，直接测量 $\rho$ 是比较困难的. 因此，在反射式功率计中采用了一种间接的、在技术上更为可行的方法来测量失配程度，同时兼顾到负载功率的测量. 首先，需要引入两个量：正向功率 $P_F$ 和反射功率 $P_R$. 这两个量的实质将在后面讨论，这里先给出它们的定义式:

$$P_F = P_L + P_R, \qquad (2)$$

$$P_R = |\rho|^2 \cdot P_F. \qquad (3)$$