

NO. 003
1979.04

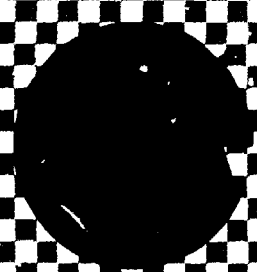
1979.04



空间热流与热电偶
SPACE HEATING WITH THERMOCOUPLE

SPACIAL HEATER

in China



原子能出版社

中国核信息中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00337
(TSHUNE-0011)

空间滤波及热电偶空间滤波器

SPACIAL FILTING AND THERMOCOUPLE

SPACIAL FILTER

(In Chinese)

韩 兵 佟允宪

(清华大学核能技术研究所, 北京)

中国核情报中心

原子能出版社

北京·1989.12

摘 要

研究和设计了一种热电偶空间滤波检测器,用于一体化布置的反应堆堆芯流量测量。着重论述空间滤波检测器的基本原理和热电偶空间滤波器空间频率特性的数学推导及分析。

关键词 空间滤波器 热电偶空间滤波器 空间频率特性

SPACIAL FILTERING AND THERMOCOUPLE SPACIAL FILTER

Han Bing Tong Yunxian

**(Institute of Nuclear Energy Technology, Tshinghua University,
Beijing)**

ABSTRACT

The design and study on thermocouple spacial filter have been conducted for the flow measurement of integrated reactor coolant. The fundamental principle of spacial filtering, mathematical descriptions and analyses of thermocouple spacial filter are given.

一、引 言

由于国际能源日益紧张,目前一些国家积极开展核低温供热反应堆的研究,清华大学核能研究所也开展了此项研究并正在建造5MW低温供热模式堆。出于反应堆设计中的安全及经济考虑,此堆采用低压自然循环系统和一体化布置。在正常工况下,该堆型与其他堆型相比流速较低,且高可靠性的常规流量测量装置难于布置在一体化的反应堆流道中。为了简便有效地测量堆内的流量,我们试图发展一种热电偶空间滤波检测器,对低流速热不平衡流体的流动予以测量。

空间滤波技术是本世纪70年代后发展起来的。随着计算机、超大规模集成电路的发展和各种廉价、高性能相关分析仪及频谱分析仪的出现,空间滤波技术逐渐被人们重视起来。近年来,日本、美国和西德等国,都开展了对空间滤波器的研究。当前国际上的研究集中于光学空间滤波器,用于固体速度检测。用于流体速度检测的实际研究工作见诸于文献的还很少。本文提出了用热电偶空间滤波器通过对流体热噪声的滤波来检测流体流速的简化理论模型。

二、空间滤波器的基本原理

对于时间频率的概念,我们是非常熟悉的。它表示单位时间内物理量周期性变化的次数。如果某物理量在空间上呈周期性空间分布,我们称该物理量具有一定的空间频率。能够选择一定空间频率段的器件,我们称之为空间滤波器。

图1是一个空间频率器的模式。

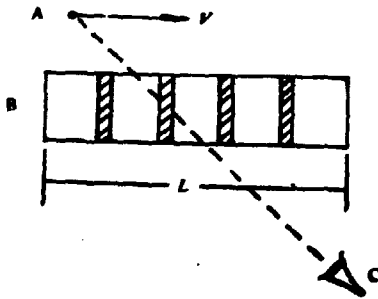


图1 光栏空间滤波

A为一光点,以速度 V 沿图示方向运动。B为具有 N 个等间距的通光栅栏。人眼在位置C隔着B观察A的移动,于是人眼就能感到光的闪动。A运动速度快,人眼感到的光的闪动就快,反之则慢。设栅的尺寸为 L ,栅的个数为 N ,令 $P=L/N$,其中 P 为空间变化的周期,因此有空间频率 $\lambda=1/P$ 。若改变 L 或 N ,就改变了 λ ,可见栅就是一个空间频率器。

人眼感到的闪动快慢取决于A的运动速度 V ,这时的闪动信号已是时间频率了。显而易见,空间频率 λ 与时间频率 f 间存在着下面的关系:

$$f = \lambda \cdot V \quad (1)$$

若空间频率已知，则通过测量 f ，我们就可以知道物体的运动速度。

下面描述一维空间滤波器的一般原理。

定义：设有一可用一定函数型式描述的空间信息源，将其乘以称为空间滤波器的空间权函数，并在空间权函数的非零区间对该乘积进行积分，这一信息的空间处理方法称为空间滤波。

一维空间滤波器如图2所示。滤波器的长为 L ，传递函数为 $h(x)$ ，被测物理量的分布为 $f(x, t)$ ，且以速度 V 沿 x 轴方向运动。设 x 方向空间频率为 λ ，检测器输出信号为 $g(t)$ ，则有：

$$g(t) = \int_0^L f(x, t) h(x) dx \quad (2)$$

设被测物在 t 时间内沿 x 轴方向运动了 ξ 距离。

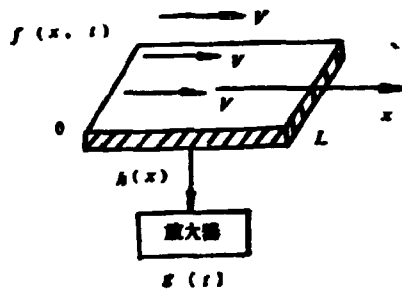


图2 一维简化空间滤波器模型

$$\xi = Vt \quad (3)$$

那么(2)式可改写成：

$$g(\xi) = \int_0^L f(x-\xi) h(x) dx \quad (4)$$

通常，被测量是随机噪声，因此要用随机过程参数的方法进行分析。

设 $h(x)$ 的谱为 $H(\lambda)$ ， $f(x-\xi)$ 的功率谱为 $F(\lambda)$ ， $g(\xi)$ 的功率谱为 $G(\lambda)$ 。

$$\text{有： } G(\lambda) = |H(\lambda)|^2 F(\lambda) \quad (5)$$

$$\text{其中： } H(\lambda) = \int_0^L h(x) e^{-j2\pi\lambda x} dx$$

考虑到随机信号的功率谱密度是其自相关函数的傅里叶变换。所以

$$G(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{g..}(x) e^{-j2\pi\lambda x} dx \quad (6)$$

这里：

$$R_{g..}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi) g(\xi+x) d\xi$$

$$\because \xi = Vt, \quad \xi+x = V(t+\tau)$$

τ 是物体由 ξ 运动到 $\xi+x$ 所需的时间。

$\therefore x = V\tau, dx = Vd\tau$ 代入(6)式：

$$G(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{g..}(\tau) e^{-j2\pi\lambda V\tau} Vd\tau = V \int_{-\infty}^{\infty} R_{g..}(\tau) e^{-j2\pi\lambda' \tau} d\tau \quad (7)$$

而 $\int_{-\infty}^{\infty} R_{11}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$ 恰好是时间频率的功率谱，用 $P(f)$ 表示。因此：

$$G(\lambda) = VP(f)$$

$$VP(f) = |H(\lambda)|^2 P(\lambda) \quad (8)$$

当被测物确定后 $P(\lambda)$ 为一定，且 $H(\lambda)$ 为已知，因此求出输出信号的时间功率谱就可以求出被测物体的运动速度。

三、热电偶空间滤波器及其传递函数的分析

热电偶空间滤波器可以设计成多种形式。所谓热电偶空间滤波器就是以一定间隔排列成梳状的一组热电偶。下面我们只分析其中两种，为简化理论分析，我们假设热电偶的热惯性为零。

1. 相加型空间滤波器的空间函数

相加型空间滤波器的理想化空间函数如图3所示。它代表以 P 为间距的 N 个热电偶相互串联控成的空间滤波器，其数学表达式为：

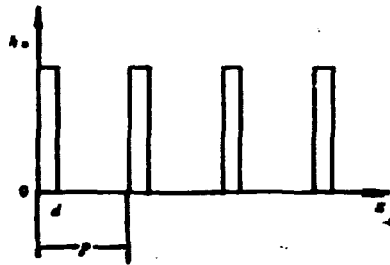


图3 相加型空间滤波器的空间函数

$$h_0(x) = \sum_{k=0}^{N-1} h'(x - kP) \quad (9)$$

其中：
$$h'(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq d \\ 0 & d < x < P \end{cases}$$

d 为热电偶直径。

对 $h_0(x)$ 作傅里叶变换得：

$$h_0(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} h_0(x) e^{-j2\pi\lambda x} dx \quad (10)$$

(9) 式代入 (10) 式：

$$\begin{aligned} H_0(\lambda) &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} h'(x - kP) e^{-j2\pi\lambda x} dx \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{2\pi\lambda} e^{-j2\pi\lambda kP} (e^{-j2\pi\lambda d} - 1) \end{aligned}$$

利用等比级数前 n 项和公式：
$$S_n = \frac{a_1(1 - q^n)}{1 - q}$$

有:

$$H_c(\lambda) = \frac{j}{2\pi\lambda} (e^{-j2\pi\lambda d} - 1) \left(\frac{1 - e^{-j2\pi\lambda NP}}{1 - e^{-j2\pi\lambda P}} \right) \quad (11)$$

那么:

$$\begin{aligned} |H_c(\lambda)|^2 &= \left| \frac{1}{2\pi\lambda} \right|^2 |e^{-j2\pi\lambda d} - 1|^2 \left| \frac{1 - e^{-j2\pi\lambda NP}}{1 - e^{-j2\pi\lambda P}} \right|^2 \\ &= \left[\frac{1}{\pi\lambda} \cdot \frac{\sin\pi\lambda d \sin\pi\lambda NP}{\sin\pi\lambda P} \right]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

当 $\lambda=0$ 时, $|H_c(\lambda)|^2 = (Nd)^2$

以 $\alpha=2\pi\lambda P$ 为横坐标, 图4示出了(12)式的 $|H_c(\lambda)|^2 \sim \alpha$ 曲线。

从图中我们可看到, $|H_c(\lambda)|^2$ 含有很强的直流分量。流体中温度噪声的方差一般很小, 需要经过很高增益的放大器放大后才能检测出来。大的直流分量会使放大器饱和, 使得热噪声信号无法检测。故这种空间滤波器不宜使用。

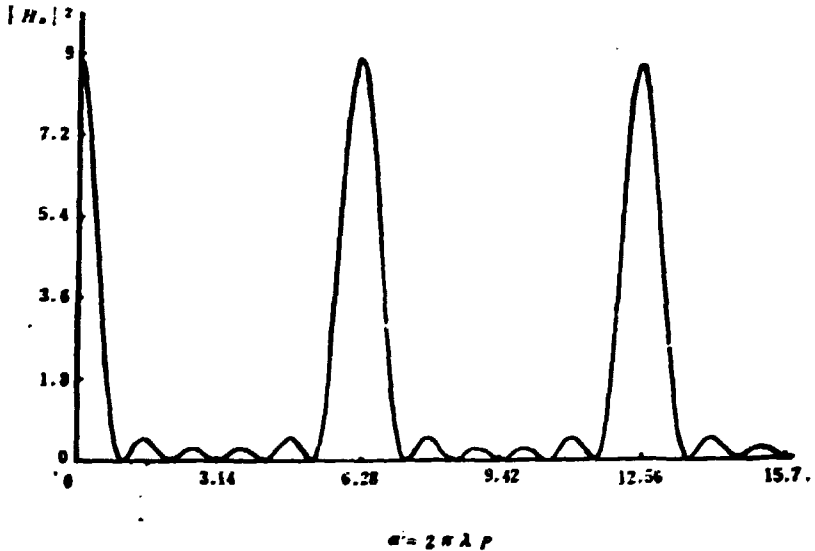


图4 相加型空间滤波器的空间频谱

2. 差动型空间滤波器的空间函数

差动型空间滤波器的空间函数如图5所示。它等效于以 P 为间距的 N 个热电偶, 令其相邻的热电偶反向串联构成的空间滤波器。

数学表达式为:

$$h_0(x) = \sum_{k=0}^{N-1} (-1)^k h'(x - kP) \quad (13)$$

其中:

$$h'(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq d \\ 0 & d < x < p \end{cases}$$

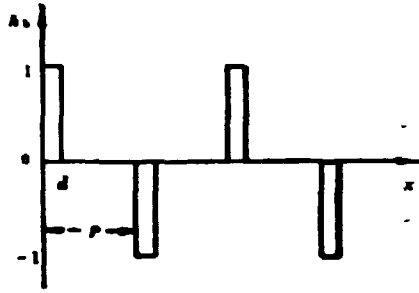


图5 差动型空间滤波器的空间函数

对 (13) 式作傅里叶变换, 得:

$$H_0(\lambda) = \frac{j}{2\pi\lambda} (e^{-j\pi\lambda d} - 1) \left(\frac{1 - (-1)^N e^{-j\pi\lambda NP}}{1 + e^{-j\pi\lambda P}} \right)$$

$$|H_0(\lambda)|^2 = \left(\frac{\sin\pi\lambda d}{\pi\lambda} \right)^2 \left| \frac{1 - (-1)^N e^{-j\pi\lambda NP}}{1 + e^{-j\pi\lambda P}} \right|^2 \quad (14)$$

现在让我们来考察下式:

$$\left| \frac{1 - (-1)^N e^{-j\pi\lambda NP}}{1 + e^{-j\pi\lambda P}} \right|^2 \quad (15)$$

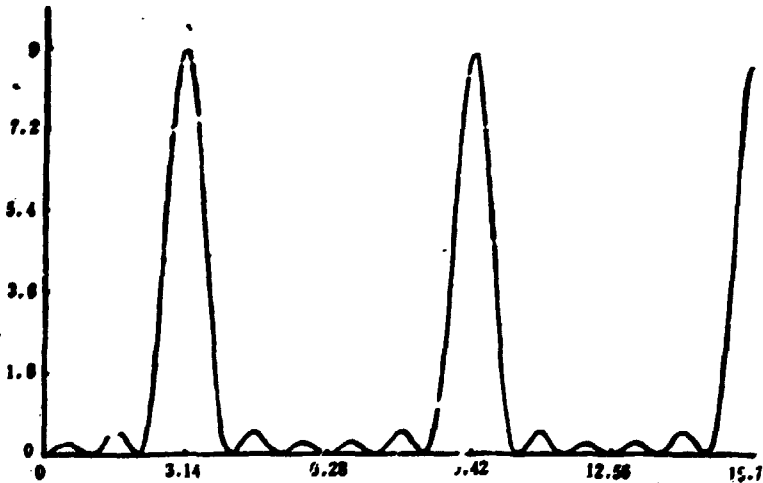
a) N 为偶数时:

$$(15) \text{ 式} = \left| \frac{1 - e^{-j\pi\lambda NP}}{1 + e^{-j\pi\lambda P}} \right|^2 = \frac{\sin^2 \pi\lambda NP}{\cos^2 \pi\lambda P}$$

把此结果代入 (14) 式, 得:

$$|H_0(\lambda)|^2 = \frac{1}{(\pi\lambda)^2} \frac{\sin^2 \pi\lambda d \sin^2 \pi\lambda NP}{\cos^2 \pi\lambda P} \quad (16)$$

$$\lambda=0, |H_0(\lambda)|^2=0$$



(a) N 为偶数 $a = 2\pi\lambda P$

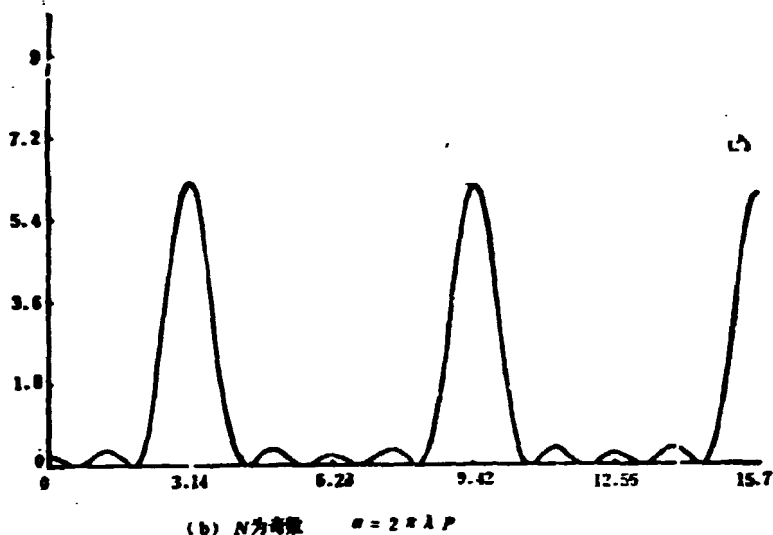


图6 差动型空间滤波器的空间频谱, 纵坐标为 $|H_0|^2$

b) N 为奇数时,

$$(15) \text{ 式} = \left| \frac{1 + e^{-j2\pi\lambda NP}}{1 + e^{-j\pi\lambda NP}} \right|^2 = \frac{\cos^2 \pi\lambda NP}{\cos^2 \pi\lambda P}$$

把此结果代入(14)式, 得:

$$|H_0(\lambda)|^2 = \frac{1}{(\pi\lambda)^2} \frac{\sin^2 \pi\lambda d \cos^2 \pi\lambda NP}{\cos^2 \pi\lambda P} \quad (17)$$

$$\lambda=0, |H_0(\lambda)|^2 = d^2$$

(16)式和(17)式的曲线分别示于图6(a)和图6(b)中。

比较图4和图6, 我们可以看到这两种空间滤波器的显著差别是两者在 α 轴上相差 180° 。这意味着在相同的流速 V 和间距 P 下, 前者主峰所对应的时间频率是后者的两倍。由(12)式和(17)式所描述的空间滤波器均带有直流成分, 而(16)式所描述的空间滤波器频谱不含直流成分, 是较理想的空间滤波器形式。

下面就(16)式做进一步的分析。

3. N 值的影响

在 P 、 d 不变的情况下, 图7示出了三种不同 N 值时, (16)式所对应的曲线。

图中第一主峰代表了流体的速度。主峰的大小, 形状直接影响到流速的测量精度。从曲线上可以看出, N 的大小在两个方面影响主峰。第一, 它影响了主峰的幅度, N 增大, 主峰的幅值增大。事实上, 主峰的幅度与 N^2 成正比。主峰高意味着流速所对应的信号被增强, 更易于测量。第二, N 影响着主峰的带宽。 N 增大, 主峰变窄, 即分辨率提高。人们正是利用这一空间处理方法增强信号并提高分辨率以减轻后续信号处理的负担。从这两个方面来说, 我们都希望 N 值要大。但当 P 一定时, N 不能无限增加, 因为它要受到相关性的限制。在进行上述分析时, 我们假定流体热噪声的空间分布是非时变的, 即是“凝固态”的, 这一假设仅具有相对正确性。当 N 值无限增加时, “凝固态”的假设就不再成立, 上述空间处理

也就不再起增强信噪比的作用。

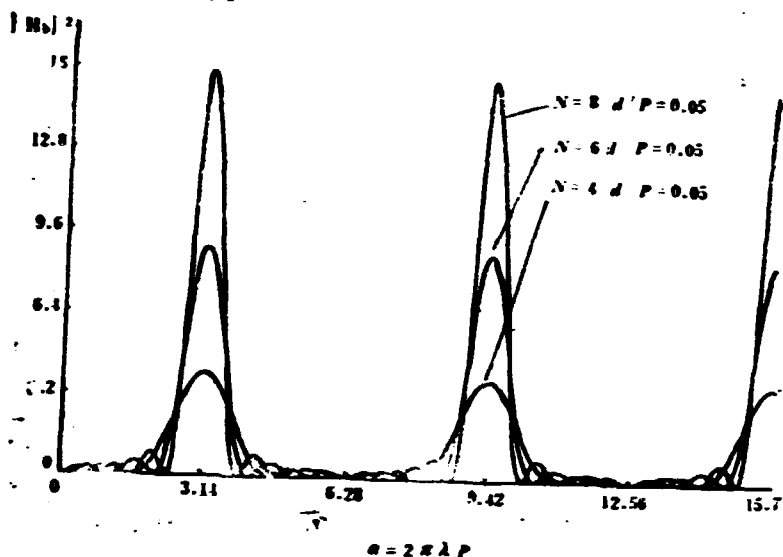


图7 不同N值的差动型空间滤波频谱

4. d和P值的影响

我们把(16)式重写于此,

$$|H_0(\lambda)|^2 = \frac{1}{(\pi\lambda)^2} \frac{\sin^2 \pi \lambda d \sin^2 \pi \lambda NP}{\cos^2 \pi \lambda P} \quad (N \text{ 为偶数})$$

当 $\alpha = 2\pi\lambda P \Rightarrow (2k+1)\pi$, ($k=0, 1, \dots$) 时

$$\sin \pi \lambda NP \Rightarrow 0, \cos \pi \lambda P \Rightarrow 0$$

对(16)式求极限, 我们可推出:

$$|H_0(\lambda)|^2 = (N/\pi\lambda)^2 \sin^2 \pi \lambda d \quad (18)$$

显然, 这就是滤波峰值的包络线方程。图8示出了该方程的典型曲线。滤波峰值是衰减的。

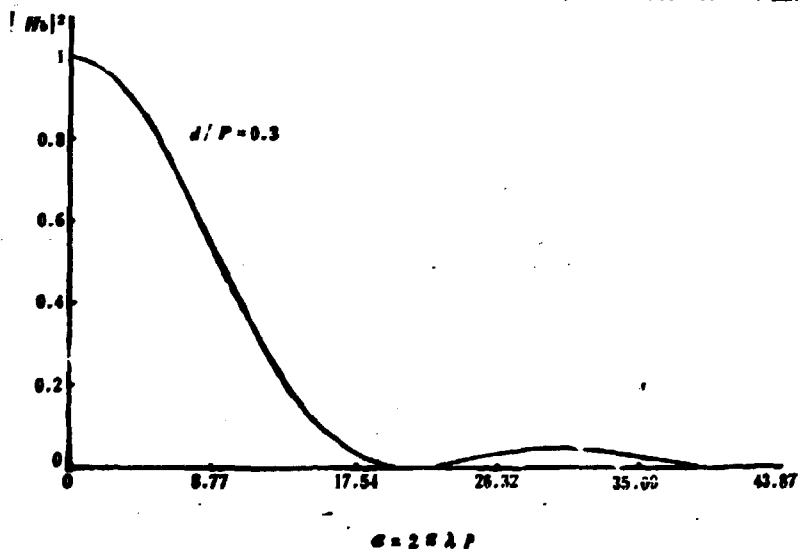


图8 滤波峰值的归一化包络线曲线

以 $\alpha=2\pi\lambda P$ 代入(18)式,有:

$$|H_s(\lambda)|^2 = \left(\frac{2PN}{\alpha}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d}{P}\right) \quad (19)$$

(19)式告诉我们谐波衰减程度取决于 $\frac{1}{\alpha^2}$ 与 $\sin^2\left(\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d}{P}\right)$ 的积。图9给出了不同 d/P 值的 $\frac{1}{\alpha^2} \sin^2\left(\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d}{P}\right) \sim \alpha$ 曲线。显而易见, P 一定时,适当增大 d 值(当然 d 不可能大于 P)。谐波峰值将很快衰减,从而使第一主峰突出。这意味着流速所对应的时间频率容易辨识,甚至可采用简单的计数辨识方法。但 d 增大势必导致热电偶时间常数增大,过大的时间常数将使热电偶失去对热噪声的检测作用。 d 减小故然可使热电偶时间常数减小,但随之而来的是高次谐波峰值几乎同主峰值一样大,给主峰辨识带来困难。

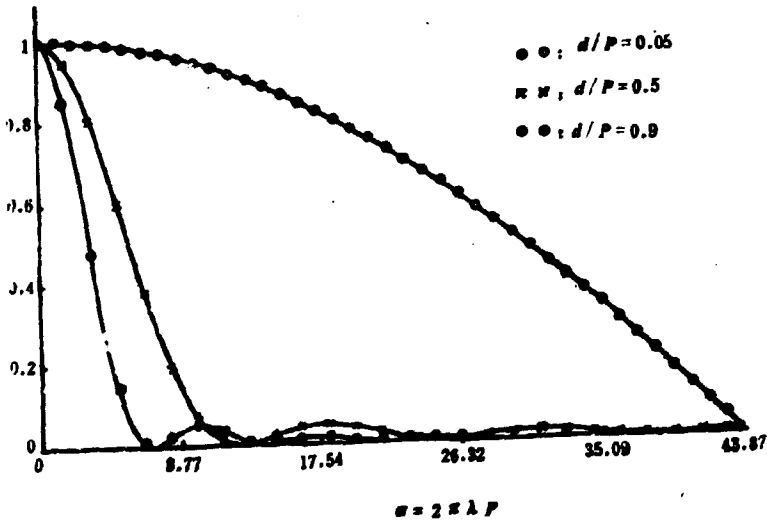


图9 不同 d/P 值的归一化包络线曲线,纵座标为 $\sin(ad/(2P))/a^2$

若 d 不变,减小 P 值,同样可加快高次谐波的衰减,但带来的问题是主峰的高度降低了。

还有一个不太引人注意的问题是,包络线的衰减会导致速度峰向低频方向偏移,衰减越快,偏移量越大。图10说明了这一点。

设速度峰频率测量值为 f ,偏移量为 $\delta\pi$,则有: $2\pi\lambda P = (1-\delta)\pi$,将 $\lambda=f/V$ 代入求得实际速度值为:

$$V = \frac{2fP}{1-\delta}$$

若按通常不考虑偏移的算法计算,那么流体速度 $V' = 2fP$,这样就会带来 $\left|\frac{V'-V}{V}\right| = \delta$ 的相对误差。

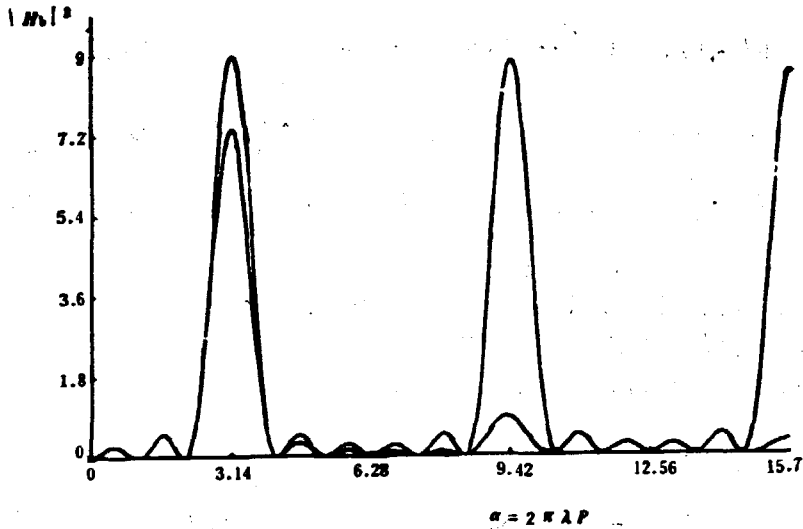


图10 不同 d/P 值的空间频谱
 高值峰—— $d/P=0.05$ $N=6$
 低值峰—— $d/P=0.5$ $N=6$

四、差动型热电偶空间滤波器的理想化时间频率特性

假设用一维差动型热电偶空间滤波器处理通道中非热平衡流体的温度噪声，空间滤波器与流体流动方向的夹角为零，并且空间滤波器具有有如(16)式给出的理想化空间频率功率谱密度函数。

为了简化分析，再假设流体中的温度噪声的空间分布是“凝固态”随机白噪声 $f(x)$ ，流体以流速 V 流动。则空间滤波器输出信号的时间频率功率谱密度函数为：

$$P(f) = \frac{1}{V} \cdot \left| H_s \left(\frac{f}{V} \right) \right|^2 F(\lambda) \quad (20)$$

其中 $F(\lambda)$ 为函数 $f(x)$ 的空间频率功率谱密度函数，在 $f(x)$ 为白噪声的条件下， $F(\lambda) = 1$ 。于是

$$P(f) = \frac{1}{V} \cdot \frac{1}{\left(\pi \left(\frac{f}{V}\right)\right)^2} \cdot \frac{\sin^2 \pi \left(\frac{f}{V}\right) d \sin^2 \pi \left(\frac{f}{V}\right) NP}{\cos^2 \pi \left(\frac{f}{V}\right) P} \quad (21)$$

图11的三维图形给出了(21)式描述的空间滤波器时间信号的功率谱密度函数与流体速度 V 的关系。随着 V 的增大，时间频率功率谱的主峰向高频方向移动，若将主峰的峰顶连线在 fV 平面上投影，则投影线方程为 $V = 2Pf$ 。图11直观、形象地描绘了空间滤波器用于速度测量的原理。

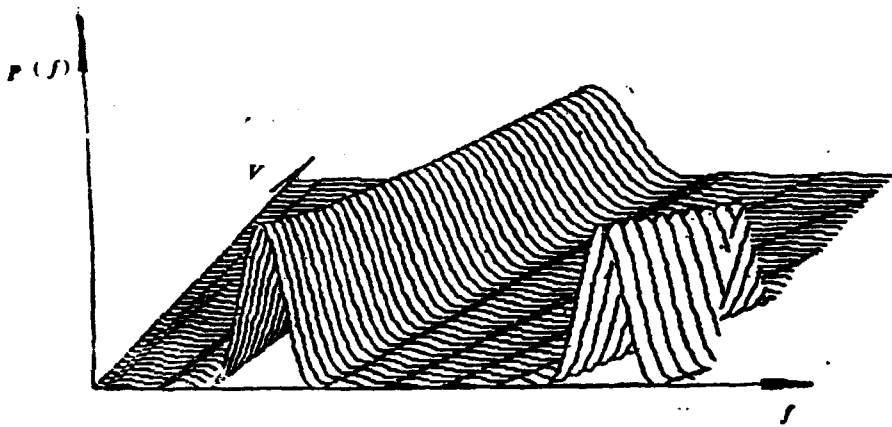


图11 空间滤波器时间频率功率谱密度函数与流速 V ，时间频率 f 的关系曲线

五、结 论

用热电偶空间滤波器测量热不平衡流体的流量，实质上是测量流体的流速。流量 Q 由公式 $Q=C\pi V(D/2)^2$ 求出。这里 D 为流道直径， C 为加权系数，它取决于热电偶在管道内的几何位置和流体在管内的速度分布。如前所述，(16)式所描述的空间滤波器具有较好的特性。在合理优化 N 、 P 、 d 参数和热电偶时间响应之后，能设计出主峰幅值较高、频带较窄且高次谐波衰减较快的热电偶空间滤波器。热电偶空间滤波器有希望成为测量低流速热不平衡流体流速或流量的新方法。进一步的研究方向是进行热电偶时间滞后对空间滤波性能影响的研究和信号处理方法的研究。此项研究实验正在清华大学核能技术研究所进行，并取得了初步进展。空间滤波器具有广泛用途，例如将热电偶换成电导探针用于汽液两相流系统，则可测量空泡的速度。这项实验也正在进行中。

参 考 文 献

- [1] G.D.拉商，「利用辐射强度关系测量两相流速度」，「Water Reactor Safety Research Systems Engineering」，1975.8
- [2] 「检测技术和自动化仪表论文集」，第一卷 1983，清华大学自动化系。

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



书号: 15175-00337

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre