

# 新型 RRS 换热器的随机响应分析

王学生 董其伍 刘敏珊 王定标 郭茶秀  
(郑州工业大学化工系)

**摘要** 利用随机振动理论讨论了由湍流脉动而引起的两种不同结构管壳式换热器管束的随机响应。计算结果表明,新型 RRS 换热器与普通挡板式换热器相比,具有优良的抗振性能。

**关键词** 换热器;随机响应;振动

**中图分类号** TQ15

## 0 引言

换热器广泛应用于化工、石油、动力、轻工等工业部门。流体在换热器壳程内的流动过程是个复杂的动态过程。对于大型管壳式换热器,由于横向流或平行流而引起的管束振动问题始终受到了各国研究者的重视<sup>[1],[2]</sup>。

流体在换热器壳程内的流动具有复杂的随机性质。流动的随机性意味着作用于换热管上的载荷也是随机的,且管束的振幅变量及其振动按正态分布<sup>[3]</sup>。而管束的振动主要是由液流压力的随机湍流脉动所激发的。因此,换热器的管振激励力是随机的、动态的随机力函数。若采用传统的计算方法来确定流体诱导振动将具有较大的误差。因此,应用随机振动理论作进一步的研究,将更接近于实际工况。对具有多支承、多跨距管束的列管换热器的随机响应分析,用传递矩阵法较其它方法更简单方便。

## 1 换热管力学模型分析

### 1.1 换热管力学模型建立

#### 1.1.1 换热器两种不同的壳程结构形式

对于折流板换热器,其换热管是靠壳程折流板支承,流体在壳程内流动是横向流动,如图 1 所示。而对于新型 RRS 换热器,其换热管是用折流栅支承,壳程流体的流动是平行冲刷管束,但同样也能引起换热管束的横向诱导振动<sup>[4]</sup>,如图 2 所示。

#### 1.1.2 力学模型建立

不论是折流板换热器还是新型 RRS 换热器,分析换热器中换热管的受力情况,可视换热管为一个多支承的,其上受随机湍流作用的等截面连续梁。其中两端固支(管板与管子连接处),中间简支(折流

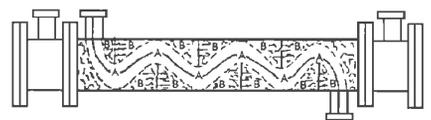


图 1 折流板换热器

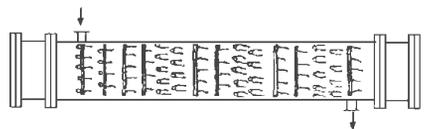


图 2 RRS 换热器

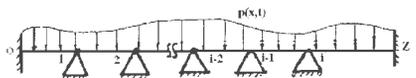


图 3 换热管受力模型

板或折流杆支承处) 其力学模型如图 3 所示。

### 1.2 随机湍流力的统计特性

图 3 所示作用在管壁上的分布湍流力  $P(x, t)$  是时间和管长的随机函数, 设  $P(x, t)$  是各态历经的稳态高斯过程。则湍流力的自相关函数为:

$$R_p(x_1, x_2, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 P(x_1, t) \cdot P(x_2, t + \tau) dt \quad (1)$$

经傅立叶变换得到湍流力的自功率谱密度为:

$$S_p(x_1, x_2, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_p(x_1, x_2, \tau) e^{-2i\pi f \tau} d\tau \quad (2)$$

## 2 换热管的随机动态分析

### 2.1 换热管随机响应分析的传递矩阵法

把图 3 所示的换热管力学模型, 采用无质量杆的简化模型进行讨论。经简化得到如图 4 所示的离散系统, 其中  $m_i$  是集中质量,  $I_i$  是集中转动惯量,  $L_i$  和  $EI_i$  分别是第  $i$  杆的长度和弯曲刚度。把分布的随机压力  $P(x, t)$  也集中成相应的一系列随机力  $P_i(t)$  及集中随机力矩  $R_i(t)$ 。

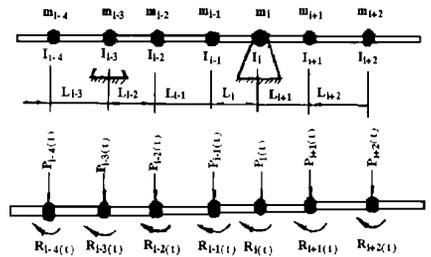


图 4 离散系统

随机响应的研究, 首先要求得同随机集中力及随机集中力矩相应的频率响应函数矩阵。为此建立离散模型的传递矩阵。其状态矢量如图 5 所示为:

$$\{Z\} = [\delta \ \theta \ M, \ Q]^T$$

$i$  点与  $i+1$  点状态矢量之间的关系表示为:

$$\{Z\}_{i+1} = [F]_{i+1} \{Z\}_i \quad (3)$$

而  $\{Z\}_i = [S]_i \{Z\}_i + \{L\}$  (4)

(3)、(4) 式中,  $[F]_{i+1}$  和  $[S]_i$  表示点传关系中的矩阵,  $\{L\}$  表示外部激励力,  $L$  和  $R$  表示梁任一点的左边和右边。对于一般的不计剪切变形的弹性杆有:

$$[F]_{i+1} = \begin{pmatrix} 1 & L & L^2/2EI & L^3/6EI \\ 0 & 1 & L/EI & L^3/2EI \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}_{i+1}$$

$$[S]_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -w^2 I & 1 & 0 \\ w^2 m & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}_i$$

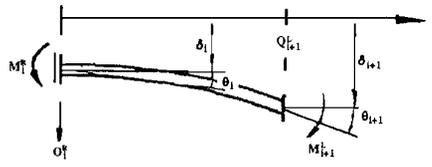


图 5 离散模型的状态矢量

令矩阵  $[T]$  带上上标和下标来表示梁上任意两点之间的一般传递矩阵。如:

$${}^R_k [T]_j^R = [S]_k [F]_k \cdots [F]_{j+2} [S]_{j+1} [F]_{j+1} \quad (5)$$

${}^R_k [T]_j^R$  表示第  $j$  点右传到第  $k$  点右的传递矩阵。

设一个激励矢量为： $\{L\} = [0 \ 0 \ -R \ P]^T \cdot e^{i\omega t}$   $R$  和  $P$  表示激励的幅值(以后用“-”表示矢量幅值)。则引起的换热管上  $j$  点的状态矢量为：

$$\begin{pmatrix} \delta \\ \theta \\ -m \\ Q \end{pmatrix}_j = {}^R_j [T]_o^R \begin{pmatrix} \delta \\ \theta \\ -m \\ Q \end{pmatrix}_o + {}^R_j [T]_r^R \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -R \\ P \end{pmatrix}_r \tag{6}$$

对式中的  $\{L\}$  可以根据梁两端的端点条件来确定。

①设换热管两端简支 则：

$$\delta_o = M_o = \delta_N = M_N = 0 \tag{7}$$

代入(6)式得：

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \theta \\ 0 \\ Q \end{pmatrix}_N^L = {}^L_N [T]_o^R \begin{pmatrix} 0 \\ \theta \\ 0 \\ Q \end{pmatrix}_o^R + {}^L_N [T]_r^R \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -R \\ P \end{pmatrix}_r \tag{8}$$

展开上式：

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}_N^L = {}^L_N \begin{pmatrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{32} & T_{34} \end{pmatrix}_o^R \begin{pmatrix} \theta \\ Q \end{pmatrix}_o^R + {}^L_N \begin{pmatrix} -T_{13} & T_{14} \\ -T_{33} & T_{34} \end{pmatrix}_r^R \begin{pmatrix} R \\ P \end{pmatrix}_r \tag{9}$$

其中  $T_{jk}$ 表示  $[T]$ 中的第  $j$  行第  $k$  列上的元素,由此解得：

$$\begin{pmatrix} \theta \\ Q \end{pmatrix}_o^R = - \left[ {}^L_N \begin{pmatrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{32} & T_{34} \end{pmatrix}_o^R \right]^{-1L} \begin{pmatrix} -T_{13} & T_{14} \\ -T_{33} & T_{34} \end{pmatrix}_r^R \begin{pmatrix} R \\ P \end{pmatrix}_r \tag{10}$$

把式(10)代入式(9)。若  $q < r$ , 则得：

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \delta \\ \theta \\ m \\ Q \end{pmatrix}_q^R &= {}^R_q [T]_o^R \begin{pmatrix} 0 \\ \theta \\ 0 \\ Q \end{pmatrix}_o^R = \begin{pmatrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{22} & T_{24} \\ T_{32} & T_{34} \\ T_{42} & T_{44} \end{pmatrix}_o^R \begin{pmatrix} \theta \\ Q \end{pmatrix}_o^R \\ &= - \begin{pmatrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{22} & T_{24} \\ T_{32} & T_{34} \\ T_{42} & T_{44} \end{pmatrix}_q^R \left[ {}^L_N \begin{pmatrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{32} & T_{34} \end{pmatrix}_o^R \right]^{-1L} \begin{pmatrix} -T_{13} & T_{14} \\ -T_{33} & T_{34} \end{pmatrix}_r^R \begin{pmatrix} R \\ P \end{pmatrix}_r \end{aligned} \tag{11}$$

这样就得到在  $r$  点上有两种激励作用时,在  $q$  点右边的四种响应的频率响应函数矩阵：

$$[H(\omega)]_{qr} = - \begin{pmatrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{22} & T_{24} \\ T_{32} & T_{34} \\ T_{42} & T_{44} \end{pmatrix}_q^R \left[ {}^L_N \begin{pmatrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{32} & T_{34} \end{pmatrix}_o^R \right]^{-1L} \begin{pmatrix} -T_{13} & T_{14} \\ -T_{33} & T_{34} \end{pmatrix}_r^R \tag{12}$$

$q$  点左边的响应函数矩阵为：

$$[H(\omega)]_{qr} = - \begin{matrix} L \\ \begin{matrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{22} & T_{24} \\ T_{32} & T_{34} \\ T_{42} & T_{44} \end{matrix} \\ q \end{matrix} \begin{matrix} R \\ \\ \\ o \end{matrix} \begin{matrix} \left( \begin{matrix} L \\ \begin{matrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{32} & T_{34} \end{matrix} \\ N \end{matrix} \right)^R \\ \\ \\ o \end{matrix}^{-1} \begin{matrix} L \\ \begin{matrix} -T_{13} & T_{14} \\ -T_{33} & T_{34} \end{matrix} \\ r \end{matrix} \begin{matrix} R \\ \\ \\ r \end{matrix} \quad (13)$$

对于  $q > r$  的情况, 需要加上激励的响应, 则频率响应函数矩阵为:

$$[H(\omega)]_{qr} = - \begin{matrix} (L)R \\ \begin{matrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{22} & T_{24} \\ T_{32} & T_{34} \\ T_{42} & T_{44} \end{matrix} \\ q \end{matrix} \begin{matrix} R \\ \\ \\ o \end{matrix} \begin{matrix} \left( \begin{matrix} L \\ \begin{matrix} T_{12} & T_{14} \\ T_{32} & T_{34} \end{matrix} \\ N \end{matrix} \right)^R \\ \\ \\ o \end{matrix}^{-1} \begin{matrix} L \\ \begin{matrix} -T_{13} & T_{14} \\ -T_{33} & T_{34} \end{matrix} \\ r \end{matrix} \begin{matrix} R \\ \\ \\ r \end{matrix} + \begin{matrix} R \\ \begin{matrix} -T_{13} & T_{14} \\ -T_{33} & T_{34} \end{matrix} \\ q \end{matrix} \begin{matrix} R \\ \\ \\ r \end{matrix} \quad (14)$$

假如计算的换热管在弱平稳随机激励下的弱平稳响应, 则  $q, r$  两点上的响应功率谱密度函数为:

$$[S_{zz}(\omega)]_{qr} = [H(\omega)]_{qi} [S_{FF}(\omega)]_{jk} [H^*(\omega)]_{rk} \quad (15)$$

式中  $[S_{zz}(\omega)]_{qr}$  表示换热管上  $q$  和  $r$  两点上的响应互谱密度函数矩阵,  $[S_{FF}(\omega)]_{jk}$  表示换热管上  $j$  和  $k$  两点上激励的功率谱密度函数矩阵。

②如果换热管两端固支, 则

$$\theta = \delta_i = \alpha = \delta_k = 0 \quad (16)$$

由式 (6) 得:

$$\begin{matrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -m \\ Q \end{pmatrix}_N \\ \\ \\ \end{matrix} = \begin{matrix} L \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -m \\ Q \end{pmatrix}_o \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} R \\ \\ \\ o \end{matrix} + \begin{matrix} L \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -R \\ P \end{pmatrix}_r \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} R \\ \\ \\ r \end{matrix} \quad (17)$$

③如果换热管一端固定一端简支, 则:

$$\text{设 } \theta = \delta_i = 0 \text{ (固定端)} \quad \delta_k = M_N = 0 \text{ (简支端)}$$

则由 (6) 式得:

$$\begin{matrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \theta \\ 0 \\ Q \end{pmatrix}_N \\ \\ \\ \end{matrix} = \begin{matrix} L \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -m \\ Q \end{pmatrix}_o \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} R \\ \\ \\ o \end{matrix} + \begin{matrix} L \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -R \\ P \end{pmatrix}_r \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{matrix} R \\ \\ \\ r \end{matrix} \quad (18)$$

利用边界条件展开式 (17)、式 (18), 得到换热管两端固定和换热管一端固定一端简支的频率响应函数矩阵  $[H(\omega)]_{qr}$  和响应互谱密度函数矩阵  $[S_{zz}(\omega)]_{qr}$ 。其  $q, r$  表示换热管上任意两点。推导方法与换热管两端简支的方法相同。

## 2.2 换热器管束随机位移响应计算

现对换热器输入一些窄带随机信号<sup>[5][6]</sup>, 分别考察折流板换热器和新型 RRS 换热器中换热管在各种不同条件下的随机响应。其中信号的窄带有效宽度为 5HZ, 采样时间间隔为 0.002 秒, 窄带放大倍数为 5 倍, 其中窄带中心频率因换热器结构及支承形式不同而不等。

如表 1 所示。

表 1 不同支承形式不同类型换热器的参数

参 数 换 热 器	两端支承形式	中心频率 (HZ)	跨数	每跨长(mm)	
折流板 换热器	固—固	50	2	$l_1 = l_2 = 800$	
	简—简	80			
	固—简	60			
新 型 RRS 换热器	固—固	235	2	$l_1 = l_2 = 800$	
	简—简	200			
	固—简	210			
	固—固	310			$l_1 = l_2 = 400$
	简—简	200			
	固—简	235			

在此窄带随机信号激励下, 换热管每跨中心点的随机位移响应历程分别在图 6~图 14 中表示。下列图中, 实线表示第一跨中心点位移, 虚线表示第二跨中心点位移。

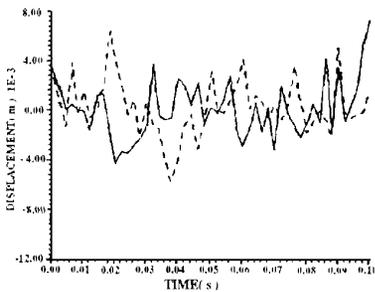


图 6 折流板换热器, 换热管长  $l=1600mm$   
两端固支

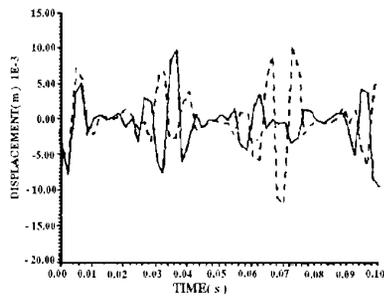


图 7 折流板换热器, 换热管长  $l=1600mm$   
两端简支

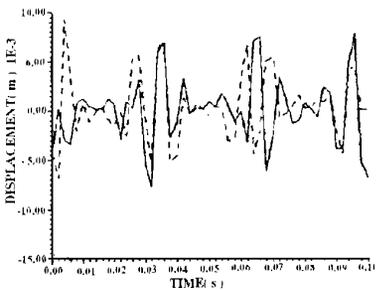


图 8 折流板换热器, 换热管长  $l=1600mm$   
一端固支一端简支

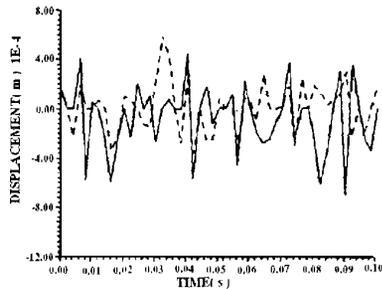


图 9 新型 RRS 换热器, 换热管长  $l=1600mm$   
两端固支

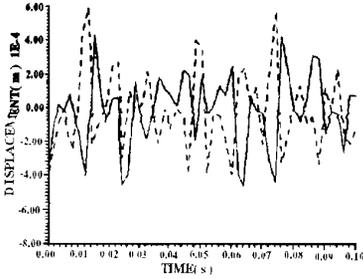


图 10 新型 RRS 换热器, 换热管长  $l=1600mm$  两端简支

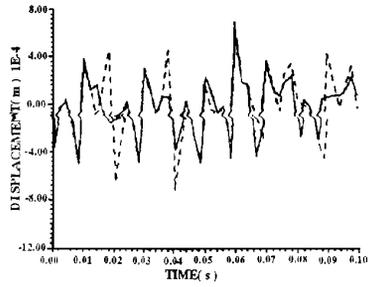


图 11 新型 RRS 换热器, 换热管长  $l=1600mm$  一端固支一端简支

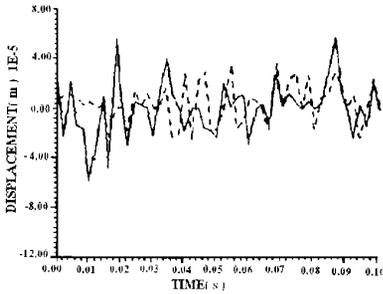


图 12 新型 RRS 换热器, 换热管长  $l=800mm$  两端固支

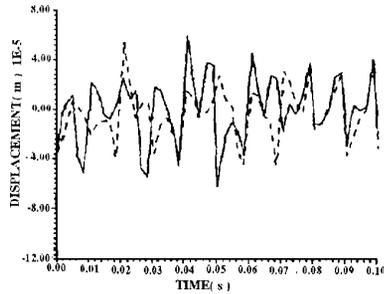


图 13 新型 RRS 换热器, 换热管长  $l=800mm$  两端简支

由图 6~图 8 与图 9 图 11 相较, 无论换热管其两端是固支 还是简支或是一端固支一端简支, 折流板换热器的位移响应值远大于新型 RRS 换热器的位移响应值。由图可见, 折流板换热器的最大位移响应值为新型 RRS 换热器的 10 倍左右 (支承形式相同时)。同一种换热器, 换热管两端支承情况对其位移响应历程有影响, 固支比简支好。

由图 12~图 14 与图 9~图 11 相比较可见: 换热管长度对其振动响应有影响, 缩短换热管长度可以明显提高换热器的抗振性能。

### 3 结论

①作用在管束上的随机湍流, 假定为平稳高斯过程, 且各态历经。它对管振的激发作用实际上在整个流速变化范围内都存在, 由此而产生的流体激振动力具有很宽的频谱, 但实际能激发管振的只是其频率接近于管固有振频的一部分。

②无论对折流板换热器还是新型 RRS 换热器, 缩短换热管管跨长度及紧固换热管均明显提高换热器的抗振性能。

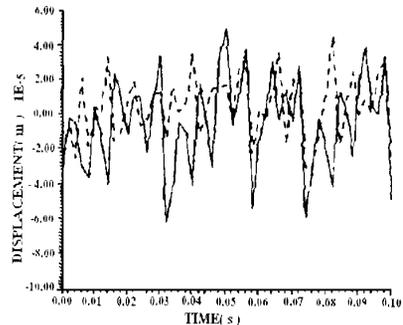


图 14 新型 RRS 换热器, 换热管长  $l=800mm$  一端固支一端简支

③新型 RRS 换热器与折流板换热器相比,具有十分优越的防振性能。

## 参 考 文 献

- 1 Maurice M·Sevik·流动激起的结构振动·力学译丛 No.5,1979
- 2 钱颂文,吴家声,曾文明编著·换热器流体诱导振动基础·华中工学院出版社·1988
- 3 Axisa F·J· Antunex et· Random Excitation of Heat Tube By Cross-Flow presented At The winter Annual meeting of the ASME Chiago· USA NOV 27-Dec 2,1988. ASME 1988 pp23~46
- 4 曹质彬·热交换器管束的振动与噪声(一)~(四)·石油化工设备·Vol.14, No.11~12. Vol.15. No1~2.1985
- 5 振动数字信号处理程序库·编委会编·振动数字信号处理程序库·科学出版社·1988
- 6 王学生·新型 RRS 换热器性能研究:[硕士论文]郑州:郑州工学院,1993

## The Analysis of Random Response on New Type RRS Heat Exchanger

Wang Xuesheng Dong Qiwu Liu Minshan Wang Dingbiao Guo Chaxiu  
(Zhengzhou University of Technology)

**Abstract** In this paper, by using random vibration theory, the radom dynamic re-  
sponse is analysed for baffle and new type RRS heat exchanger. Compared with the baf-  
fle heat exchanger, results of experimental and the theoretical analysis show that new type  
heat exchanger has superior anti-vibration performance.

**Keywords** heat exchanger; random response; vibration