

换热管固有频率计算方法

苏文献, 陈 功

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 采用有限元分析软件 ANSYS 计算某管壳式换热器的换热管的固有频率, 将其计算结果与采用相关标准 (GB 151-1999 和 TEMA) 和经验公式 (Macdaff-Felga 法) 计算得到的固有频率结果进行分析比较. 结果表明, 采用有限元法计算得到的固有频率与采用 GB 151-1999 标准以及 Macdaff-Felga 法的计算结果保持一致, 采用 TEMA 标准计算的固有频率结果小于采用其他几种方法计算的结果. 另外, 有限元法的计算结果显示, 折流板的一阶频率在管子的一阶频率和二阶频率之间.

关键词: 管壳式换热器; 固有频率; 经验公式; 有限元法

中图分类号: TQ 051 **文献标志码:** A

Method of Computing Natural Frequencies of Tube

SU Wenxian, CHEN Gong

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Finite element software ANSYS was used to calculate the natural frequency of tube in a shell and tube heat exchanger. The calculation result was compared with the analytical results by using the related standards (GB 151-1999 and TEMA) and empirical formula (Macdaff-Felga). The natural frequency of tube calculated by the finite element method is consistent with those calculated by GB 151-1999 and Macdaff-Felga, and the frequency calculated by TEMA is smaller compared with those calculated by other methods. The finite element computation also shows that the first mode of baffle lies between the first mode and the second mode of tube.

Key words: shell and tube heat exchanger; natural frequencies; empirical formula; finite element method

换热器在石油、化工、医药、纺织、食品及冶金等领域应用十分广泛, 在生产过程中换热器的性能对产品质量、能量利用效率以及整个生产系统运行的经济性和可靠性起着至关重要的作用. 目前, 虽然出现了很多新式换热器, 如板壳式换热器、板框式换热器及

双螺纹换热器等, 但是, 管壳式换热器由于结构简单、制造方便, 能在高温和高压下使用, 在工业应用中, 管壳式换热器仍占据换热器使用的 70% 左右^[1-2].

由于在工业生产中换热器振动破坏现象屡屡发生, 这引起了人们对流体诱发振动的关注. 1978 年,

收稿日期: 2014-05-16

第一作者: 苏文献(1967-)男, 副教授. 研究方向: 过程设备设计与有限元分析. E-mail: digestsu@163.com

在美国管式换热器制造商协会(TEMA)标准第 6 版中,首次将换热器管束振动列入标准,重点在于解决单相流体横向流诱发的振动,在之后的 TEMA 第 7 版,单独将流体诱导振动编入第 6 章.

在国内外科学研究工作的基础上,全国压力容器标准化技术委员会在组织编制钢制管壳式换热器标准 GB 151-1989 时,以参考件的形式将换热器管束振动列入附录.目前,在 GB 151-1999 附录 E 中列出的是经过修改和补充后的条目,它是根据国内管壳式换热器发展的需要并参照国际同类标准进行修改的.

由于流体诱发振动的复杂性,目前的技术水平难以对换热管束振动作详细解答,标准所提经验公式只是作为参考,并未对换热器设计作强制要求.本文分别按照 GB 151-1999 和 TEMA 所推荐的公式和有限元法对换热器管子的固有频率进行计算,比较其结果,并列出其他两种管壳式换热管的固有频率算法——Timoshenko 法和 Ganapathy 法.

1 管壳式换热器参数

某单程大型管壳式换热器采用固定管板式,有两块等间距弓形折流板,跨距为 1 910 mm.因跨距较大,故未在折流板缺口处布置换热管,折流板缺口率为 18%.换热器管子排列方式为等边三角形排列法,整台换热器共有 5 513 根管子,材料为 304L 不锈钢.换热器的结构尺寸如表 1 所示.

表 1 换热器结构尺寸

Tab.1 Structure size of heat exchanger mm

名称	尺寸	名称	尺寸
管箱筒体内径	2 900	换热管厚度	2
管箱筒体壁厚	15	换热管中心距	32
壳程筒体内径	2 900	管板厚度	135
壳程筒体壁厚	15	折流板间距	1 910
换热管长度	6 000	折流板厚度	24
换热管直径	25		

2 按照 GB 151-1999 计算换热管固有频率

GB 151-1999 附录 E 对管壳式换热器管束的固有频率提出了详细的计算方法,对等跨距直管、非等跨距直管、有轴向力作用时的直管及 U 形管的固有频率都提出了计算公式^[3].一般情况下,由于管板较厚,相对于管束振动,管板可以看作是刚性的,折

流板与管子之间有很小的间隙,在管束与折流板的接触处,管子可以扭转、扰动,因此,在计算时换热管的支撑条件为:管子与管板接触端为固支,管子与折流板接触处为简支.

本换热器折流板等间距排列,如图 1 所示,在折流板缺口处没有布管,因此,所有管子固有频率及振型相同,按照以下公式进行计算:

$$f_n = 35.3 \lambda_n \sqrt{\frac{E(d_o^4 - d_i^4)}{ml^4}} \quad (1)$$

$$m = m_i + m_o + m_t \quad (2)$$

$$m_i = \frac{\pi d_i^2 \rho_i}{4} \quad (3)$$

$$m_o = \frac{C_M \pi d_o^2 \rho_o}{4} \quad (4)$$

$$m_t = \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)\rho_t}{4} \quad (5)$$

式中: f_n 为管子固有频率; λ_n 为频率常数,下标 n 为振型的阶数,查表 2 可知, λ_n 一阶为 12.648,二阶为 18.469; E 为管子的弹性模量; d_i 为换热管内径; d_o 为换热管外径; S 为换热管中心距; l 为跨距; m 为单位换热管长的质量; m_i 为换热管内流体的质量; m_o 为被振动管排开的虚拟管外流体的质量; m_t 为空管质量; C_M 为附加质量系数, C_M 由 S/d_o 查图 2,得 $C_M = 1.57$; ρ_i 为管内流体的密度; ρ_o 为管外流体的密度.



图 1 换热管支撑简图

Fig.1 Sketch of the support style of heat exchanger

表 2 频率常数 λ_n

Tab.2 Frequency constant λ_n

频率阶数	跨 数				
	1	2	3	4	5
一阶	22.396	15.418	12.648	11.514	10.950
二阶	61.737	22.373	18.469	15.418	13.693

注:频率常数表摘自 GB 151-1999 附录 E 的表 E2.

根据换热器结构及工艺参数可知,管子弹性模量 $E = 1.97 \times 10^5$ MPa,换热管内径 $d_i = 21$ mm,换热管外径 $d_o = 25$ mm,换热管中心距 $S = 32$ mm,换热器管束跨距 $l = 1 910$ mm,操作工况下管内气体密度 $\rho_i = 0.112 2$ kg/m³,管外冷却水密度 $\rho_o = 994.877$ kg/m³.将以上已知条件带入式(1)~(5)

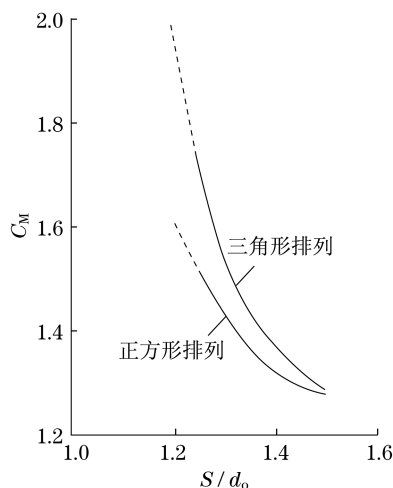


图2 附加质量系数

Fig.2 Coefficient of added mass

可求出换热管的前两阶固有频率

$$f_1 = 17.395 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 25.401 \text{ Hz}$$

3 按照 TEMA 标准计算换热管固有频率

TEMA 标准是由美国管式换热器制造商协会所属的技术委员会编制的关于列管式换热器设计、制造和检验的标准,是目前世界上使用最广泛的列管式换热器标准.1978 年颁布的 TEMA 标准第 6 版,首次将管束振动列入标准,在 RGP-RCB-4.56 这一节对管束振动进行了较为详细的介绍,对于计算等跨距换热管固有频率,标准推荐使用的公式与 Macduff-Feglar 得到的公式一致^[4].1988 年颁布的第 7 版,将流体诱导振动在第 6 章单独作了较为详细的介绍,在内容、范围和篇幅上,都较第 6 版有大的增加.最新 2007 年第 9 版的 TEMA 在振动这一章改动较少,在第 6 章 TEMA 使用范围中指出,由于振动问题的复杂性,TEMA 对于振动只作为工程参考,不能保证换热器不发生振动破坏,同时,其他计算振动的方法仍然可以使用^[5].早在 1981 年,董洁^[6-7]就对 TEMA 标准第 6 版进行了实例讨论.TEMA 对换热器固有频率求解作了简化,按照支撑情况不同,对于每段支撑管,分别计算其固有频率,然后选取最小值作为整个管子的基频,表达式为式(6),其中,参数单位为英制单位.

$$f_n = 10.838 \frac{AC}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad (6)$$

式中: A 为管子的轴向应力系数,忽略轴向力影响,取

$A=1$; C 为边界的条件系数,此处选择两端简支情况,取 $C=9.9$; E 为弹性模量,1 psi = 6 894.76 Pa; J 为截面的惯性矩,其值为 $\pi(d_o^4 - d_i^4)/64$,1 lb/ft = 0.001 48 kg/mm; m 为单位换热管长的质量,1 inch = 25.4 mm.

为了计算方便,在计算前将换热器直径、密度、跨度等已知条件的单位都换算为英制单位,统一代入式(6)进行求解,解得换热管基频

$$f_n = 13.609 \text{ Hz}$$

4 按照 Macduff-Feglar 法计算换热管固有频率

在计算振动时,Macduff-Feglar 的方法被广泛应用^[4],即 TEMA 第 6 版的 RGP-RCB-4.562 所推荐的公式,它的表达式为

$$f_n = \frac{154.8 C_n}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{mg}} \quad (7)$$

式中: f_n 为管子固有频率; C_n 为频率常数,下标 n 为振型的阶数,查表 3 可知, λ_n 一阶为 40.52,二阶为 59.56; J 为截面的惯性矩; g 为重力加速度,取 9.81 m/s².

其余参数意义及单位与式(1)相同.代入换热器数据,可以求出换热器前两阶频率

$$f_1 = 17.288 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 25.411 \text{ Hz}$$

表3 频率常数 C_n Tab.3 Frequency constant C_n

跨数	两端简支		两端固支		固支简支	
	一阶	二阶	一阶	二阶	一阶	二阶
1	31.73	126.94	72.36	198.34	49.59	160.66
2	31.73	49.59	49.59	72.36	37.02	63.99
3	31.73	40.52	40.52	59.56	34.32	49.59
4	31.73	37.02	37.02	49.59	33.02	42.70
5	31.73	34.99	34.99	44.19	33.02	39.10

5 按照其他公式计算换热管固有频率

目前计算换热管固有频率除了 GB 151-1999 和 TEMA 推荐的方法以外,还有 Timoshenko 法和 Ganapathy 法.

a. Timoshenko 法.

$$f_n = \frac{10^3 \lambda^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \quad (8)$$

式中, λ 为特性系数,1/m;

b. Ganapathy 法.

$$f_n = \frac{254CR}{l^2} \sqrt{\frac{E\rho_s}{E_s\rho}} \quad (9)$$

式中: C 为频率常数, 无量纲; R 为管子的回转半径, 其值为 $R = \sqrt{I/A_1}$; A_1 为管子的截面积; I 为惯性矩; E_s 为钢材的弹性模量; ρ_s 为钢材的密度.

6 有限元法计算换热管固有频率

有限元方法起始于 20 世纪 40 年代, 经过 70 多年的发展, 已经在航天、汽车、机械及化工等领域广泛应用. 它的基本概念是用较为简单的问题代替复杂问题, 然后进行求解, 其应用范围包含固体力学、流体力学、传热学、电磁学、声学及生物力学等. 由于采用有限元方法可以很方便地求解复杂结构振型, 该方法已经在机械、化工中得到了广泛的应用^[8-10].

6.1 单元选择

为了简化模型, 换热器管子采用 BEAM188 梁单元, 该单元几何结构如图 3 所示. K, J 为自由度. BEAM188 适合用于分析细长及中等厚度粗短梁结构. 该单元基于 Timoshenko 梁理论, 考虑结构受到的剪切变形影响. BEAM188 单元为 3D 二次梁单元, 在默认情况下, 每个节点有 6 个自由度, 包括 X, Y, Z 这 3 个方向平移和绕 X, Y, Z 这 3 个方向旋转. 当设置 ANSYS 中的参数 KEYOPT(1) = 1 时, 会增加第 7 个自由度的翘曲幅度自由度. 该单元适合在线性、大旋转或者非线性大应变情况下使用.

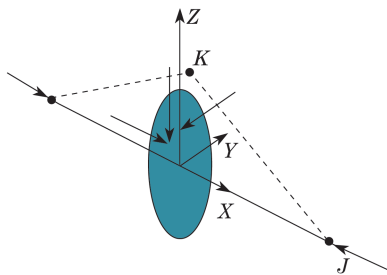


图 3 BEAM188 单元几何结构示意图

Fig.3 Structure sketch of BEAM188

6.2 模型介绍

建立仅含单根换热管模型, 该模型与前文标准及其他经验公式所采用的模型完全一致, 可以验证经验公式与有限元计算结果的一致性.

该换热器的换热管及管板、折流板的材料均为 304L 不锈钢, 管板、折流板密度采用材料实际密度进行计算, 由于本文不直接考虑流体的流动对换热

管振动的影响, 而参照 GB 151 - 1999 热交换器中运用等效密度法更加简单、间接地考虑外部流体对换热管振动的影响, 因此, 换热管的计算密度采用等效平均密度进行计算, 计算式如式(2)~(5)所示. 材料属性如表 4 所示.

表 4 材料属性表

Tab.4 Material attribute

参数	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	材料密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$
参数值	1.97×10^5	0.3	1.32×10^{-5}

6.3 换热管模态分析

6.3.1 单管模态分析

对于单根换热管模态分析, 这里选择简化模型, 模型及约束与文中经验公式所采用的模型完全一致, 换热管与管板处为固支, 折流板与换热管接触处为简支; 换热管与管板的连接处可以看作是固支. 换热管和折流板处有很小缝隙, 折流板主要起支撑作用, 此处换热管不会发生径向位移, 但是, 会转动及轴向移动, 故此处可以看成是简支, 约束 X, Y 这 2 个方向的自由度. 具体有限元模型如图 4 所示.

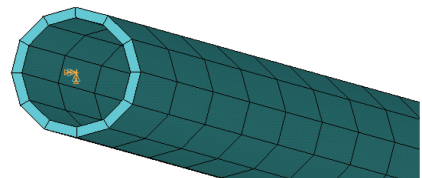


图 4 单根换热管有限元模型

Fig.4 Finite element model of single tube

在 ANSYS 通用后处理中提取前两阶频率, 结果如图 5 和图 6 所示. $X_{\max}, X_{\min}$ 分别为 X 方向的最大变形和最小变形.

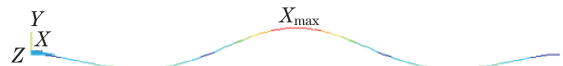


图 5 一阶振型 $f_1 = 17.419 \text{ Hz}$

Fig.5 First mode $f_1 = 17.419 \text{ Hz}$



图 6 二阶振型 $f_2 = 25.453 \text{ Hz}$

Fig.6 Second mode $f_2 = 25.453 \text{ Hz}$

6.3.2 单管含管板模态分析

如图 7 所示, 采用 SOLID186 单元建立管板和

换热管的模型,折流板和换热管之间耦合 X, Y 方向的自由度.采用模态分析技术,在 ANSYS 后处理模块中提取前两阶模态频率,前两阶振型如图 8—10 所示. X_w, Y_w, Z_w 分别为工作平面的坐标.从图 9 中可以发现,折流板的一阶固有频率介于换热管的前两阶固有频率之间.

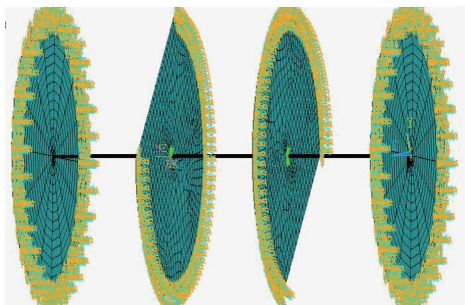


图 7 单管的有限元模型

Fig.7 Finite element model of single tube

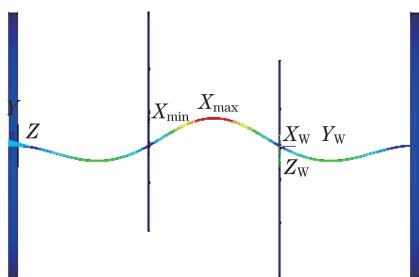


图 8 换热管的一阶振型 $f_1 = 17.369 \text{ Hz}$

Fig.8 First mode of tube $f_1 = 17.369 \text{ Hz}$

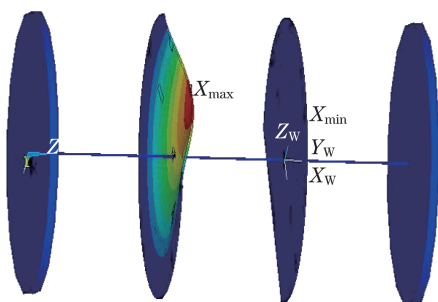


图 9 折流板的一阶振型 $f_1 = 21.748 \text{ Hz}$

Fig.9 First mode of baffle $f_1 = 21.748 \text{ Hz}$

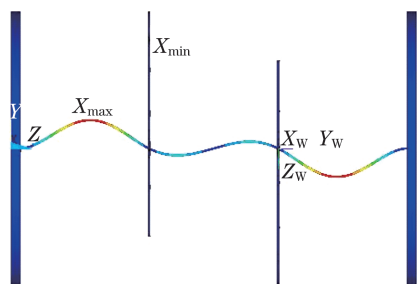


图 10 换热管的二阶振型 $f_2 = 25.320 \text{ Hz}$

Fig.10 Second mode of tube $f_2 = 25.320 \text{ Hz}$

7 结果分析

对采用有限元法、GB 151 - 1999、TEMA 及 Macdaff-Fegla 法计算得到的换热管固有频率进行比较,结果如图 11 所示.

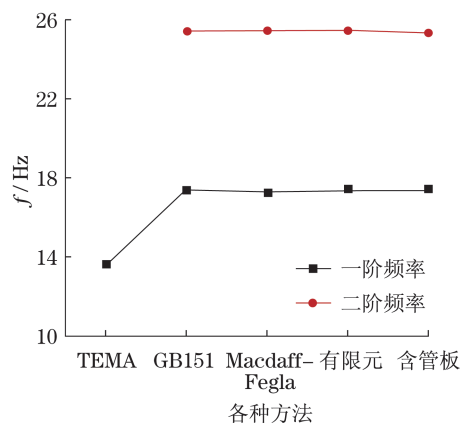


图 11 各种方法比较

Fig.11 Comparison of different methods

通过图 5—11 可以看出:

a. 有限元法计算的单管模型以及包含折流板的单管模型的换热管一阶频率、GB 151 - 1999 计算的换热管一阶频率、Macdaff-Feglar 所得的换热管一阶频率分别为 17.419, 17.369, 17.395, 17.288 Hz, 二阶频率分别为 25.453, 25.320, 25.401, 25.411 Hz, 4 种方法计算的结果非常接近.根据文献[11]第 3 章中试验所得,在管束中如果只有 1 根管子振动而其他各管固定,则此时测量得到的固有频率与 Macdaff-Feglar 计算的值相当符合,故在工程实践中计算单管的固有频率时可以采用有限元法简化计算.

b. 在计算包含折流板结构的换热管模型时,折流板的一阶频率在管子的一阶频率和二阶频率之间,故在工程实践中分析换热管的振动破坏时,应当考虑到折流板的横向振动会加速换热管的磨蚀和破坏.

c. TEMA 标准采用分段计算各段的频率,并且取最小值作为结构的固有频率,而 GB 151 - 1999 以及有限元法均考虑了多跨度对结构的影响,故通过 TEMA 计算得出的固有频率要小于 GB 151 - 1999 以及有限元法计算得到的固有频率.

参考文献:

[1] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

(下转第 545 页)

及储罐热防护提供理论参考。

参考文献:

- [1] 单彦广,俞昌铭.液化气在储存与运输过程中的事故分析及防治[J].劳动保护科学技术,1998,18(1):27-31.
- [2] 陈思凝,孙金华,王青松.液化石油气泄漏的危险性分析及其事故后果评价方法[J].中国工程科学,2005,7(9):61-64.
- [3] 淮秀兰,俞昌铭.盛有液化气的压力容器在高温环境下的热响应[J].油气储运,1993,12(4):18-22.
- [4] 单彦广,俞昌铭.喷射火焰环境下液化气容器的热响应[J].燃烧科学与技术,1999,5(4):375-379.
- [5] 邢志祥,赵晓芳,蒋军成.液化石油气储罐火灾模拟试验(二)——喷射火焰环境下[J].天然气工业,2006,26(1):132-133.
- [6] 朱常龙,蒋军成.LPG 饱和蒸汽压的估算及分析[J].石油与天然气化工,2010,39(3):186-188.
- [7] 赵博,毕明树.火灾环境下 LPG 储罐压力与温度响应的数值模拟[J].石油学报(石油加工),2012,28(3):512-516.
- [8] Bi M S, Ren J J, Zhao B, et al. Effect of fire engulfment on thermal response of LPG tanks[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192 (2): 874-879.
- [9] 弓燕舞,林文胜,顾安忠.分层对液化石油气储罐热响应的影响[J].工业加热,2002,31(5):14-16.
- [10] 弓燕舞,林文胜,顾安忠.液化石油气储罐分层增压过程研究[J].天然气工业,2004,24(1):86-88.
- [11] 俞昌铭,单彦广,肖金生,等.液化气储罐受热引爆机理分析[J].北京科技大学学报,2013,35(4):522-530.
- [12] 单彦广,俞昌铭.外焰加热条件下液化气储罐爆炸原因的定性分析[J].劳动保护科学技术,1998,18(6):40-42.
- [13] 单彦广,杨荣,李凌.火灾时 LPG 储罐内传热传质过程分析[J].工程热物理学报,2006,5(4):664-666.
- [14] 曾晨岗,单彦广.LPG 储罐泄漏喷射火灾过程模拟[J].上海理工大学学报,2015,37(5):473-478.
- [15] Robert T,Beckett H,Cooke G,et al. Jet fire impingement trial on a 85% full,unprotected,2 tonne propane tank [R]. Buxton;Safety Executive,1995.
- [16] Robert T,Beckett H,Cooke G,et al. Jet fire impingement trial on a 41% full,unprotected,2 tonne propane tank [R]. Buxton;Health and Safety Executive,1995.

(编辑:石 瑛)

(上接第 539 页)

- [2] 刘海刚.大型管壳式换热器管束动力特性分析及流体诱导振动研究[D].上海:上海理工大学,2012.
- [3] 全国压力容器标准化技术委员会. GB151 - 1999. 管壳式换热器[S].北京:中国标准出版社,2000.
- [4] 聂清德,连华英,侯增英.多跨管固有频率的计算[J].压力容器,1984(4):51-55.
- [5] 聂清德,谭蔚,吴皓.多跨 U 形管固有频率的计算[J].压力容器,2011(9):15-21.
- [6] 董洁.TEMA 管式换热器标准计算实例(一)(1978 年第 6 版)[J].化工设备与管道,1981(6):25-41.
- [7] 董洁.TEMA 管式换热器标准计算实例(二)[J].化工设备与管道,1982(1):42-64.
- [8] 苏文献,许伍.基于 ANSYS 压力容器不等厚过渡区的强度优化[J].上海理工大学学报,2014,36(1):81-85.
- [9] 苏文献,金玉龙,韩超.单塔风诱导振动破坏分析[J].上海理工大学学报,2013,35(4):391-396.
- [10] 杜宝江,丁鹏鹏,于亚君,等.基于有限元分析的机油泵卡死现象设计改进[J].上海理工大学学报,2015,37(3):269-273.
- [11] 程林.换热器内流体诱发振动[M].北京:科学技术出版社,1995.

(编辑:石 瑛)