

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905820

流致振动差压式测振装置的研究

马平昌¹, 李 红¹, 林 淡², 张 良², 王立闻³

(1. 北京强度环境研究所 北京 100076; 2. 天津航天瑞莱科技有限公司成都分部 成都 611731;
3. 东方电气股份有限公司中央研究院 成都 611731)

摘 要:为解决管束流致振动试验中,现有接触式振动测量方法的应用局限性,提出一种基于测量受激对象换热管两侧压差脉动频率原理的测振装置,即差压式测振装置。差压式测振装置解决了传统接触式传感器对换热管外部流场的干扰问题以及安装空间受限的问题。为了验证差压式测振装置的有效性,分别进行了单管和换热管束两类流致振动测试试验。试验结果表明,差压式测振装置能在复杂的流动环境中准确捕捉到换热管受到的各类激振形式的频率,而且单管流致振动试验结果表明差压式测振装置所测得的周期性涡激振动频率与理论值偏差在5%以内。因此,差压式测振装置的研制与应用对于流致振动试验的测试以及换热管振动的长期监测均有很重要的意义。

关键词: 流致振动; 振动测量; 差压原理; 激振频率

中图分类号: O353.1 TL35 TH825 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 130.20 490.99 460.40

Research on differential pressure vibration measurement device for flow induced vibration test

Ma Pingchang¹, Li Hong¹, Lin Dan², Zhang Liang², Wang Liwen³

(1. Beijing Institute of Structure and Environmental Engineering, Beijing 100076, China;
2. Chengdu Branch of Tianjin Aerospace Ruilai Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China;
3. Central Research Institute of Dongfang Electric Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: The contact vibration measurement method has application limitation in the flow induced vibration test of the tube bundle. To solve this problem, a new measurement device, named as the differential pressure vibration measurement device, is designed. Based on the principle of measuring the pressure differential fluctuation frequency on both sides of the heat exchange tube, the differential pressure type vibration measuring device can measure the excitation frequency of the external fluid force of the heat exchange tube. Differential pressure vibration measurement device solves the problem of interference of the traditional contact sensor to the external flow field of the heat exchange tube and the problem of limited installation space. To verify its effectiveness, the single tube flow induced vibration test and the heat exchange tube bundle flow induced vibration test are carried out respectively. Experimental results show that the designed device can accurately capture the frequency of all kinds of vibration forms of the heat exchange tube in the complex flow environment, including pump vibration, natural vibration, periodic vortex vibration and two-phase flow vibration characteristics. Experimental results of single tube flow induced vibration test show that the periodic vortex-induced vibration frequency measured by the designed device is within 5% of the theoretical value. Therefore, the development and application of the differential pressure vibration measuring device is of great significance for the measurement of the flow-induced vibration test and the long-term monitoring of the vibration of the heat exchange tube.

Keywords: flow induced vibration; vibration measurement; differential pressure principle; vibration frequency

0 引言

管壳式换热器因其结构简单、传热面大、耐高温、耐高压等特点,在石油化工、动力及核能等工业中得到普遍的应用。换热器中传热管长期处于管程冷却剂和壳程汽水混合物的环境中,同时作为冷却剂回路的压力边界,存在发生流致振动导致的振动和磨损失效的风险^[1-2]。国内外的学者采用理论分析、数值模拟以及试验研究等手段,针对不同换热器形式流致振动产生的机理进行了大量的研究。研究表明,引起换热管流致振动的机理主要有4种:旋涡脱落激振,湍流抖振,流体弹性不稳定性,声共振^[3-5]。尽管目前对于换热器管束流致振动的机理有了一定的共识,理论与数值方法也很大程度地用于指导换热器的设计中,但是为保障换热器具有高可靠性,试验验证依然是唯一的有效可靠的方法^[6-7],这是因为换热器实际工作过程中换热器内部流体的流动十分复杂,一方面存在气液两相的影响^[8-9],另一方面受到回路主泵产生的脉动压力影响^[10-13]。

在流致振动试验中,目前针对管束的振动测量方法主要分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量主要采用加速度传感器、电阻应变片、光纤传感器等^[14-17];非接触测量主要为激光多普勒方法^[18-21]。接触式测量容易受到安装空间的限制,而且传统接触式测量所采用的传感器会干扰换热管外部流场,形成额外的流体激振^[22]。布鲁塞尔自由大学 Depauw 等^[23]通过燃料组件振动测量试验对比研究了不同测量方法的优缺点,研究表明激光多普勒方法因为其非接触测量的特点,对试验件的影响较小,测量振动频率优势更大。然而激光多普勒方法对光路传播高度敏感,受介质的折射影响较大,且试验中需要透明观察窗^[18],所以激光多普勒方法的实际应用十分受限。

差压式测振装置基于测量受激对象换热管两侧压差脉动频率的原理,从而实现对换热管外部流体力激励频率的测量,而目前试验过程中流致振动的测量原理是对换热管的振动响应进行测试。考虑到传统的接触式测量的缺点,差压式测振装置的外形设计与换热管形成一体,从而解决了传统接触式传感器对换热管外部流场的干扰问题以及安装空间受限的问题。差压式测振装置的研制对于流致振动试验的测试以及换热管振动的长期监测均有很重要的意义。

1 差压式测振装置的结构及测量原理

差压式测振装置由测振传感器、差压传感器以及信号采集分析仪组成,其组成原理如图1所示。测振传感

器用于和换热管连接形成一体,感受换热管两侧所受的流体激励,测振传感器与差压传感器通过传压管连接,测振传感器将感受到的流体激励通过传压管传至差压传感器的差压感应膜,并将差压信号转化为电压信号,最终由信号采集分析仪对电压信号进行采集分析。测振传感器与换热管连接,处于蒸发器内部,而差压传感器与信号分析采集仪位于蒸发器外部,这种分离式的结构同样也拓展了差压式测振装置的使用温度范围,从而满足高温流致振动试验测试需求。

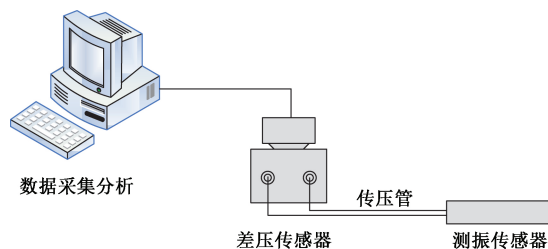


图1 差压式测振装置组成原理

Fig.1 Diagram of the differential pressure vibration measuring device

差压式测振装置中的核心部件为测振传感器,测振传感器三维结构如图2所示。测振传感器采用圆柱截面,外径与换热管外径一致,从而避免了传感器对换热管外部流场的干扰以及安装空间受限的问题。测振传感器的基本原理是通过测量与换热管形成一体的传感器两侧的压差脉动,从而实现对换热管外部流体力激励频率的测量。

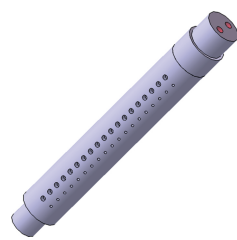


图2 测振传感器结构

Fig.2 Structural diagram of the vibration measuring sensor

测振传感器两端分别开设两列感应孔,并分别与两侧均匀腔相通,以达到多点差压平均测量的目的,从而提高测量精度。为了更好地捕捉流致振动过程中可能出现的周期性旋涡,测振传感器两侧均匀腔中间设有挡板,并且挡板上开有导流孔,如图3所示。导流孔可以实现传感器两侧旋涡交替脱落的负反馈吹吸流动控制,即当传感器一侧存在旋涡脱落现象时,当地压力变小,柱体内部流体由旋涡附着的一侧流向旋涡脱落的一侧,此时附着侧的旋涡达到稳定而脱落侧的旋涡形成则被增强。研究表明,吹吸流动控制具有控制稳定旋涡脱落的作用^[24],

而且这种被动式的吹吸流动控制几乎不会改变系统的涡激振动频率^[25]。测振传感器通过结构设计可以实现不同横流速度下漩涡沿传感器轴向的同步分离且分离点得到有效控制,从而解决了圆柱绕流旋涡分离点不稳定的特点对周期性旋涡测量和捕捉所造成的困难。

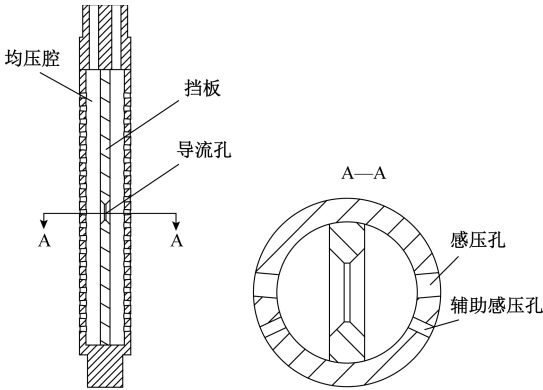


图 3 测振传感器剖面图
Fig.3 Vibration sensor section

测振传感器与换热管的连接形式如图 4 所示,测振传感器与换热管采用两端接头进行连接,一端采用螺纹连接,另一端采用紧定螺钉进行定位锁死,传压管由测振传感器引出,并经由换热管内部穿出。

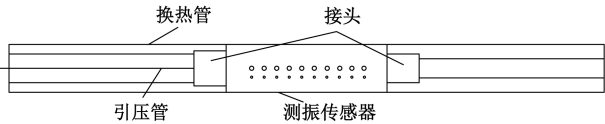


图 4 测振传感器连接
Fig.4 Schematic diagram of vibration sensor connection

2 单管流致振动测试试验

为验证差压式测振装置在流致振动试验中应用的可行性,进行单管流致振动测试试验。模拟换热管外径为 16 mm,测振传感器外径与模拟换热管外径一致,两者通过接头连接形成一体并安装于试验段,如图 5 所示。测振传感器处于试验段内水流环境,传压管经由模拟换热管内部穿出与差压传感器连接。

试验段采用圆管,常温水流经过整流稳压后进入试验段并对模拟换热管进行横向冲刷,试验过程中通过变频调节水泵转速进而实现不同流速冲刷下的流致振动试验,来流雷诺数 Re 的控制范围为 $5 \times 10^3 \sim 4.5 \times 10^4$ 。

图 6 所示为不同横流速度下,差压式测振装置所采集单管的流致振动时域信号。实际流动中换热管周围的流动状态十分复杂,所以为了更好地分析换热管所受的各类流动激励,需要对流致振动时域信号进行频谱分析

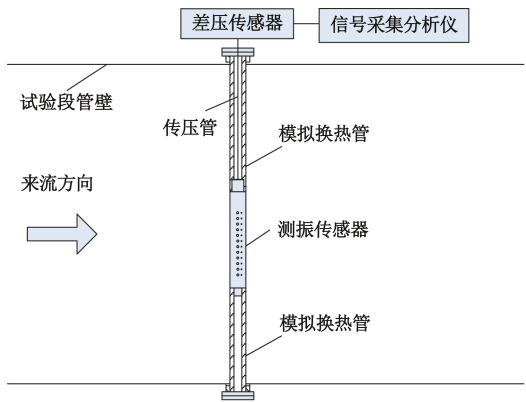


图 5 单管流致振动试验段原理
Fig.5 Schematic diagram of single pipe flow induced vibration test section

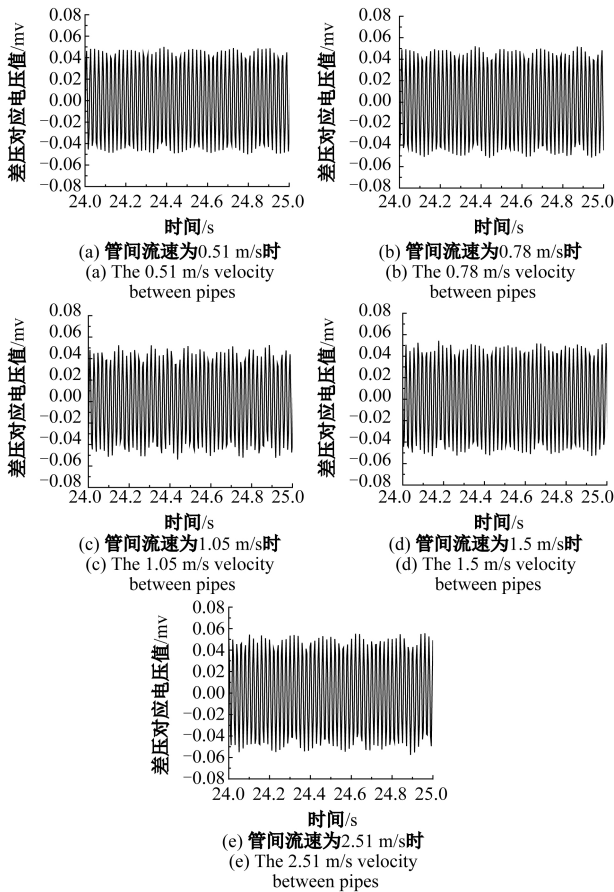


图 6 不同流速下测振装置采集的流致振动时域波形
Fig.6 Time domain oscillogram of flow induced vibration acquired by vibration measuring device at different velocity values

且使用功率谱进行表征更为有效,如图 7 所示。由图 7 可以观察得出,换热管受到的振动信号中存在窄带尖峰,即周期性旋涡激励,而且峰值频率随着流速的增大逐渐

向高频移动,这一现象符合单管横流理论和试验结果^[26]。随着流速的增加,换热管流致振动功率谱逐渐出现多峰现象,振动能量也逐渐向低频聚集,而高频部分依然满足涡街脱落规律^[27]。为了验证差压式测振装置的测试效果,使用斯特劳哈尔数 St 进行评价, St 数定义为: $St=fd/V$,其中 f 为旋涡脱落频率,单位为 Hz; d 为换热管外径,单位为 m; V 为换热管管间流速,单位为 m/s。

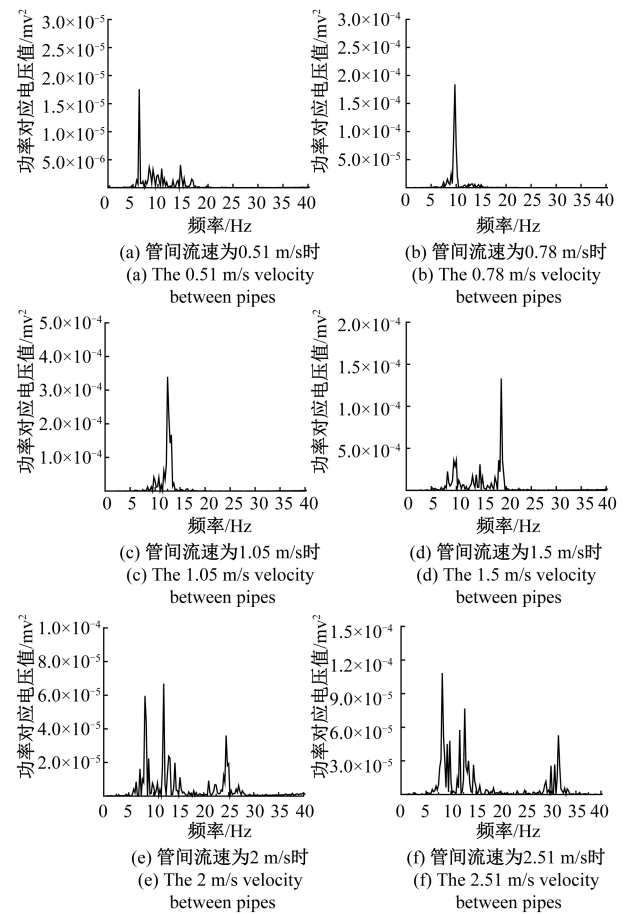


图 7 不同流速下测振装置采集的单管流致振动功率谱
Fig.7 Power spectrum of single pipe flow induced vibration acquired by vibration measuring device at different velocity values

Chen^[28]指出当 $300 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 时,横向流中的单根圆管存在周期性交替脱落的旋涡,且 St 数基本恒定,为 0.2。图 8 所示为不同雷诺数 Re 下, St 数试验值与理论值的对比, Re 数定义为: $Re=Vd/\nu$,其中 V 为管间流速,单位为 m/s; d 为换热管外径,单位为 m; ν 为水运动粘性系数,单位为 m^2/s 。由图 8 可得,试验值与理论值基本一致,且误差在 5% 以内。

由以上分析可知,差压式测振装置在单管流致振动试验中可以准确地捕捉和测量出单管在不同横流速度下的受激特性以及主要激振频率,并且差压式测振装置所测量的涡激振动频率与理论值偏差在 5% 以内。

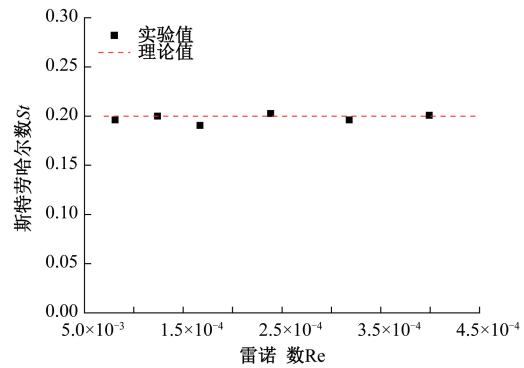


图 8 不同雷诺数 Re 下的 St 数试验值与理论值的对比
Fig.8 Comparison between experimental and theoretical values of St number at different Reynolds number

3 换热管束流致振动测试试验

为了进一步验证差压式测振装置在流致振动试验中应用的可行性,进行换热管束流致振动试验。试验采用蒸汽发生器模拟试验件,其外形和截面如图 9 所示。蒸汽发生器模拟试验件内换热管外径 d 为 16 mm,采用错列三角排布形式。蒸汽发生器壳程入口设计有均流环,从而实现入口流体从蒸汽发生器截面四周沿径向向内流动冲刷换热管,此时蒸汽发生器内换热管受流体横向冲刷最严重的地方位于来流入口第一排管束。测振传感器的安装位置处于受流体横向冲刷最严重的管束位置处,具体如图 10 所示,测振传感器与换热管的安装形式与图 4 所述一致,传压管经由换热管内部由管程出口穿出,并与外部差压传感器相连。

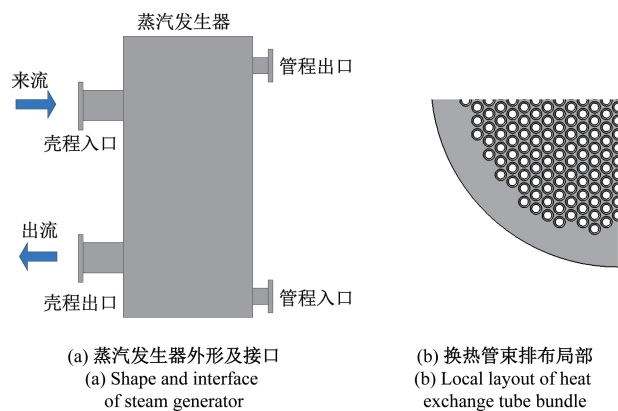


图 9 换热管束流致振动试验件
Fig.9 Diagram of flow induced vibration test piece of heat exchange tube bundle

试验过程中通过调节水路系统供水水泵的转速实现入口流量的改变,从而进行不同管间流速下换热管流致

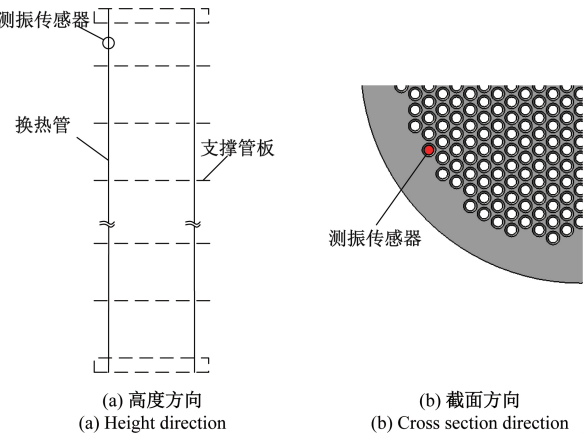


图 10 测振传感器安装位置

Fig.10 Installation position of the vibration sensor

振动试验。实际换热管束在蒸汽发生器内工作时所处的流动环境十分复杂,换热管不单受到流体冲刷引发的振动,还受到主泵产生的压力脉动以及气液两相诱导的振动。为了充分验证差压式测振装置能否在复杂流动环境中准确捕捉各类振动信号,试验过程中水路系统没有进行稳压整流,水路系统存在水泵导致的轴频、叶频以及相关的倍频^[29],且采用上进水下出水的方式实现壳程流动中存在气液两相流动。试验工况如表 1 所示。

表 1 换热管束流致振动试验工况

Table 1 Flow induced vibration test conditions of heat exchange tube bundle

流量 /(m ³ /h)	管间最大横 流速度 /(m/s)	泵 1 轴 频/Hz	泵 1 叶 频/Hz	泵 2 轴 频/Hz	泵 2 叶 频/Hz
800	0.44	7.5	30	7.5	30
1 600	0.88	12.5	50	12.5	50
2 421	1.34	18	72	19	76

试验结果如图 11 和 12 所示。图 11 所示为不同管间流速下差压测振装置所采集换热管流致振动的时域波形图,图 12 所示为不同管间流速下测振传感器采集的差压幅频谱,由于试验过程中存在工频干扰,所以直接采用差压幅值谱进行振动特性表征。由图 11 可以观察得到换热管周围的流体激励具有明显的周期性,且随着管间流速的增大,振幅逐渐增大。由图 12 可以观察得到试验过程中,差压式测振装置所采集到的流体激励有很丰富的频率,其中较为明显的是在低频段 10 Hz 左右的位置处,此时激励力的脉动表现为窄带内的随机波动和周期性波动的混合,这是典型的气液两相诱导振动现象^[8]。换热管在低频 10 Hz 处的激振频率不随管间流速变化而改变,这很有可能是由壳程流体的冲击和弹性管束本身的结构所引起的^[30]。将不同

管间流速下,测振装置所采集换热管流致振动的峰值频率及幅值进行汇总,如图 13 所示。

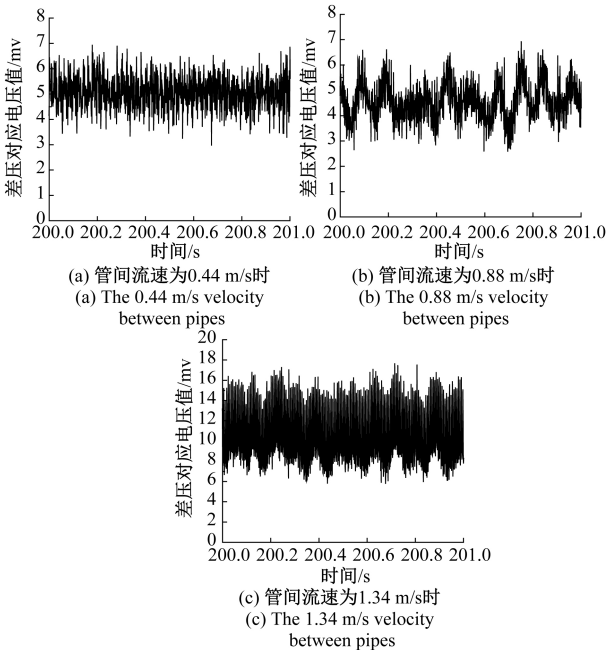


图 11 不同管间流速下测振装置的采集时域波形
Fig.11 Time domain waveform under different velocity between pipes of vibration measuring device acquired by vibration measuring device

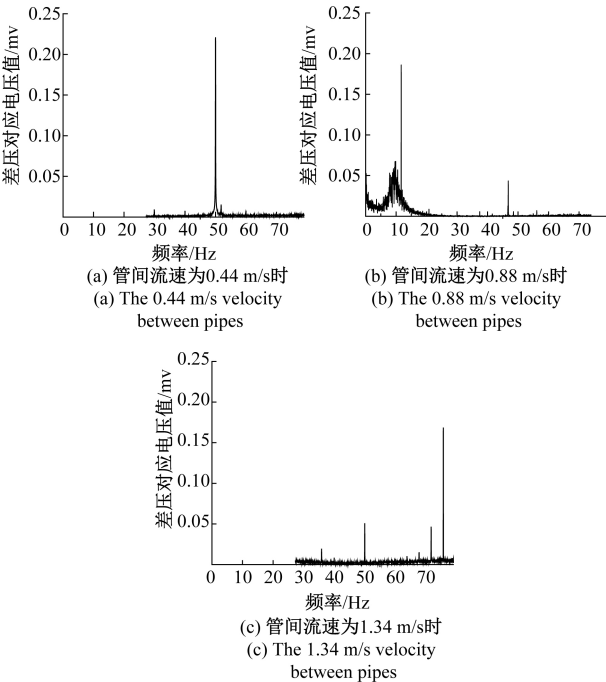


图 12 不同管间流速下测振装置采集的差压幅频谱
Fig.12 Amplitude frequency spectrum of differential pressure acquired by vibration measuring device under different velocity between pipes

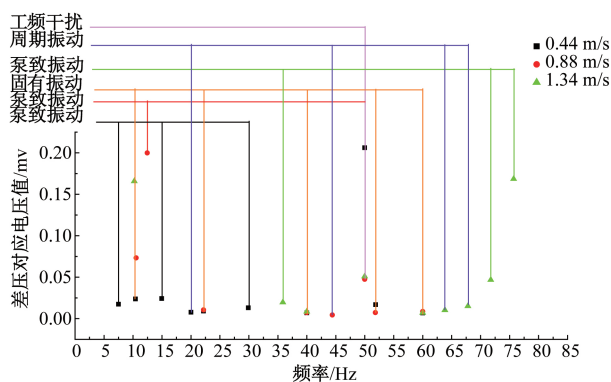


图13 测振装置采集的振动主频统计

Fig.13 Statistical diagram of main frequency of vibration acquired by vibration measuring device

由图13可以观察得到在不同的管间流速下,换热管受到泵致振动、固有振动以及周期性旋涡激励。换热管受到的泵致振动包含了轴频、叶频以及相关的倍频;换热管受到周期性旋涡激励主频随流速的增大而增大,且在 $V=1.34\text{ m/s}$ 的工况下出现双频激励。

通过换热管束流致振动试验测试结果可知,差压式测振装置能在复杂的流动环境中准确捕捉换热管受到的各类激励形式的频率,且差压式测振装置能准确地反映气液两相流激励频率特性。

4 结 论

差压式测振装置由测振传感器,差压传感器以及信号采集分析仪组成,它的测量是基于测量受激对象换热管两侧压差脉动频率的原理,从而实现对外部流体力激励频率的测量。测振传感器的结构具有两侧旋涡交替脱落的负反馈吹吸流动控制的功能,从而可以更好地捕捉流致振动过程中可能出现的周期性旋涡。此外测振传感器采用圆柱截面,外径与换热管外径一致,从而避免了传感器对换热管外部流场的干扰以及安装空间受限的问题。

为了更好地验证差压式测振装置在流致振动试验的有效性以及可行性,分别将其应用于单管流致振动试验和换热管束流致振动试验,其具体结论如下:

1) 差压式测振装置在单管流致振动试验中可以准确地捕捉和测量出单管在不同横流速度下的受激特性以及主要激励频率,并且差压式测振装置所测得的涡激振动频率与理论值偏差在5%以内;

2) 差压式测振装置能在复杂的流动环境中准确捕捉换热管受到的各类激励形式的频率,包括固有振动、泵致

振动以及周期性涡激振动,且差压式测振装置能准确地反映气液两相流激励频率特性。

参考文献

- [1] PAIDOUSSIS M P. A review of flow-induced vibrations in reactors and reactor components[J]. Nuclear Engineering and Design, 1983, 74(1): 31-60.
- [2] GOYDER H G D. Flow-induced vibration in heat exchangers [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2002, 80(3): 226-232.
- [3] PETTIGREW M J, TAYLOR C E, FISHER N J, et al. Flow-induced vibration: Recent findings and open questions[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 185(2-3): 249-276.
- [4] HASSAN M. Flow-induced Vibrations in Nuclear Steam Generators [M]//Steam Generators for Nuclear Power Plants, Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.
- [5] 吴昊, 毛成, 位召祥, 等. 折流杆式换热器流致振动分析[J]. 压力容器, 2018, 35(4): 42-49.
WU H, MAO CH, WEI ZH X, et al. Flow induced vibration analysis of baffle rod heat exchanger [J]. Pressure Vessel, 2018, 35(4): 42-49.
- [6] 蒋庆磊, 张坤, 周继云, 等. 蒸汽发生器传热管湍流激励功率谱密度计算[J]. 压力容器, 2014, 34(7): 16-21.
JIANG Q L, ZHANG K, ZHOU J Y, et al. Calculation of turbulent excitation power spectral density of heat transfer tube in steam generator [J]. Pressure Vessel, 2014, 34(7): 16-21.
- [7] 喻丹萍, 马建中, 席志德, 等. 反应堆堆内构件流致振动试验研究综述[J]. 核动力工程, 2016(S2): 50-54.
YU D P, MA J ZH, XI ZH D, et al. Summary of flow induced vibration test of reactor internals [J]. Nuclear Power Engineering, 2016(S2): 50-54.
- [8] 马晓旭, 田茂诚, 张冠敏, 等. 垂直U形管内气液两相流诱导振动模拟[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(10): 2221-2226.
MA X X, TIAN M CH, ZHANG G M, et al. Simulation of gas-liquid two-phase flow induced vibration in vertical U-tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(10): 2221-2226.
- [9] 刘宝庆, 陈小阁, 陈涛, 等. 两相横向流诱发换热器管束振动的研究进展[J]. 化工机械, 2016, 43(2): 131-136.

- LIU B Q, CHEN X G, CHEN T, et al. Research progress on vibration of heat exchanger tube bundle induced by two-phase transverse flow [J]. Chemical Machinery, 2016, 43 (2): 131-136.
- [10] 周科, 魏宗岚, 张丹, 等. 蒸汽发生器传热管泵致脉动分析[J]. 中国核电, 2017, 10(2): 200-204.
- ZHOU K, WEI Z L, ZHANG D, et al. Analysis of pulsation caused by heat transfer tube pump of steam generator[J]. CNNP, 2017, 10(2): 200-204.
- [11] BANYAY G A, IMBROGNO G M, MEYER G A. Generation of pump-induced pulsation loads for the AP1000 reactor internals [C]. Transactions of the 22nd Structural Mechanics in Reactor Technology Conference, San Francisco, 2013: 1-13.
- [12] 李景悦, 罗丽. 核主泵压水室非定常流动特性分析[J]. 水力发电, 2016, 42(6): 53-56.
- LI J Y, LUO L. Analysis of unsteady flow characteristics of pressurized water chamber of nuclear main pump[J]. Hydroelectric Power, 2016, 42(6): 53-56.
- [13] 陈向阳, 袁丹青, 杨敏官, 等. 300 mW 级核电站主泵压力脉动研究[J]. 核动力工程, 2010, 31(3): 78-82.
- CHEN X Y, YUAN D Q, YANG M G, et al. Study on pressure fluctuation of main pump of 300 mW Nuclear Power Station [J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(3): 78-82.
- [14] 许静, 柳琳琳, 喻丹萍, 等. CAP1400 堆内构件流致振动试验研究与分析 [J]. 核动力工程, 2016, 37(S2): 43-46.
- XU J, LIU L L, YU D P, et al. Flow induced vibration test research and analysis of CAP1400 reactor internals[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(S2): 43-46.
- [15] 夏欣, 喻丹萍, 罗英, 等. 华龙一号堆内构件流致振动现场实测测点布置论证[J]. 核动力工程, 2019, 40(S1): 55-58.
- XIA X, YU D P, LUO Y, et al. Layout demonstration of field measurement points of flow induced vibration of internal components of hualong-1 reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(S1): 55-58.
- [16] 沙洲, 杨洋, 刘颖华, 等. 小波信息熵在输水管道泄漏检测技术中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(7): 151-156.
- SHA ZH, YANG Y, LIU Y H, et al. Application of wavelet information entropy in leakage detection technology of water pipeline [J]. Journal of Electronic Measurement and Instruments, 2018, 32(7): 151-156.
- [17] 王大伟, 封皓, 杨洋, 等. 基于 Φ -OTDR 光纤传感技术的供水管道泄漏辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 830-837.
- WANG D W, FENG H, YANG Y, et al. Identification method of water supply pipeline leakage based on Φ -OTDR optical fiber sensing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 830-837.
- [18] 杨安良, 龚圣捷, 顾汉洋. 流致振动激光多普勒测振方法研究[J]. 测试技术学报, 2015, 29(2): 93-99.
- YANG AN L, GONG SH J, GU H Y. Study on laser Doppler vibration measurement method of flow induced vibration [J]. Journal of Measurement Technology, 2015, 29(2): 93-99.
- [19] 刘家正, 干富军, 龚圣捷, 等. 激光测振技术的可靠性试验研究[J]. 中国核电, 2013, 6(4): 296-300.
- LIU J ZH, GAN F J, GONG SH J, et al. Reliability test and research of laser vibration measurement technology[J]. China Nuclear Power, 2013, 6(4): 296-300.
- [20] 吴建霖, 蒋理兴, 李晨阳, 等. 基于单目红外的远距离多测点振动测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 255-263.
- WU J L, JIANG L X, LI CH Y, et al. Vibration measurement method of remote multi-measuring points based on monocular infrared [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 255-263.
- [21] 伍济钢, 王刚, 蒋勉, 等. 光流点匹配跟踪的薄壁件振动模态测试方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 850-858.
- WU J G, WANG G, JIANG M, et al. Vibration mode test method of thin-walled parts with optical flow point matching and tracking [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(6): 850-858.
- [22] 周国成. 管束流致振动与噪声特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- ZHOU G CH. Study on vibration and noise characteristics of tube bundle flow [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [23] DEPAUW B, VANLANDUIT S, VAN TICHELEN K, et al. Benchmarking of deformation and vibration measurement techniques for nuclear fuel pins [J].

Measurement, 2013, 46(9):3647-3653.

- [24] PANKANIN G L, ARTUR K, JERZY B. Investigations of Karman vortex street using flow visualization and image processing[J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2007, 138(2):366-375.

- [25] 汤爱平, 陶仕博. 吸气作用下圆柱涡激振动特性试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016(2):97-101.

TANG AI P, TAO SH B. Experimental study on vortex induced vibration of cylinder under suction[J]. Journal of Huazhong University of science and Technology (Natural Science Edition), 2016(2):97-101.

- [26] COUTANCEAU M, JEAN-RENÉ D. Circular cylinder wake configurations: A flow visualization survey [J]. Applied Mechanics Reviews, 1991, 44(6):255.

- [27] 及春宁, 花阳, 许栋, 等. 不同剪切率来流作用下柔性圆柱涡激振动数值模拟[J]. 力学学报, 2018, 50(1):21-31.

JI CH N, HUA Y, XU D, et al. Numerical simulation of vortex induced vibration of flexible cylinder under different shear rates[J]. Journal of Mechanics, 2018, 50(1):21-31.

- [28] CHEN S S. Flow-Induced Vibration of Circular Cylindrical Structures [M]. Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory, 1987.

- [29] 刘阳, 袁寿其, 袁建平. 离心泵的压力脉动研究进展[J]. 流体机械, 2008, 36(9):33-37.

LIU Y, YUAN SH Q, YUAN J P. Research progress of pressure fluctuation of centrifugal pump [J]. Fluid Machinery, 2008, 36(9):33-37.

- [30] 季家东. 弹性管束换热器壳程分布式脉动流诱导管束振动研究[D]. 济南:山东大学, 2016.

JI J D. Study on vibration of tube bundle induced by distributed pulsating flow in shell side of elastic tube bundle heat exchanger[D]. Jinan:Shandong University, 2016.

作者简介



Ma Pingchang received his B. Sc. and M. Sc. degree both from Beihang University in 2013 and 2016, respectively. He is currently an engineer at Beijing Institute of Structure and Environmental Engineering. His main research interests include environmental simulation and fluid measurement technology.



E-mail: lind@relialab.com

Lin Dan received his B. Sc. degree from Xi'an University of Science and Technology in 2010, and received his M. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2013. He is currently an engineer at Chengdu Branch of Tianjin Aerospace Ruilai Technology Co., Ltd., His main research interests include environment and reliability test technology.



E-mail: wanglw@dongfang.com

Wang Liwen received his B. Sc. and Ph. D. degree both from Harbin Institute of Technology in 2005 and 2011, respectively. He is currently the director level researcher at the Academia Sinica of Dongfang Electric Co., Ltd.. His main research interests include vibration monitoring and fault diagnosis, and flow-induced vibration test technology of nuclear power equipment.

马平昌, 分别在 2013 年和 2016 年于北京航空航天大学获得学士学位和硕士学位, 现为北京强度环境研究所工程师, 主要研究方向为环境模拟及流体测量技术。

E-mail: 1055221240@qq.com

林淡, 2010 年于西安科技大学获得学士学位, 2013 年于西北工业大学获得硕士学位, 现为天津航天瑞莱科技有限公司成都分部工程师, 主要研究方向为环境与可靠性试验技术研究。

王立闻, 分别在 2005 年和 2011 于哈尔滨工业大学获得学士学位和博士学位, 现为东方电气股份有限公司中央研究院主任研究员, 主要研究方向为振动监测与故障诊断、核电换热设备流致振动试验技术。