Coriolis 质量流量传感器内部耦合振动

郑德智 樊尚春

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 谐振式科里奥利质量流量计(CMF),依靠测量管路工作在谐振状态产生的科氏力效应实现流体流量的测量. 实际的谐振式科里奥利质量流量计工作过程中,普遍存在传感器的外部和内部耦合振动现象,直接影响流量计的稳定性和测量精度. 对传感器的外部耦合振动问题,通过增加测量管路直管段、增强传感器固定刚度等措施已得到较好解决;传感器内部耦合振动问题目前尚无完善的理论指导和技术解决方案. 结合 CMF 传感器的工作机理,利用激光测振仪对存在内部耦合振动问题和无内部耦合振动问题的 CMF 对比测试,进一步证实了传感器内部耦合振动对测量精度的影响,揭示了内部耦合振动对测量管振动的影响相当于在测量管的主振动上叠加了一个附加分量,导致测量管上的 2 个拾振点产生附加的振动相位差,并且对于一个特定的传感器,该附加分量的量值基本固定,而科氏力对测量管振动的作用随被测流量的增加而增强,故随着被测流量的增加,耦合振动的影响相对减小,引起的流量测量误差随之减小.

关 键 词: 谐振; 流量计; 耦合; 振动

中图分类号: TH 814^{+}.6

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)03-0301-05

Internal coupling vibration of Coriolis mass flowmeter

Zheng Dezhi Fan Shangchun

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Resonant Coriolis mass flowmeter (CMF) measures liquid mass flux via the Coriolis theory of the measurement tubes resonant vibration. Actually the external coupling and the internal coupling vibration are widely existent, the operating stability and the measurement precision are directly influenced. The external coupling vibration was resolved by increasing the straight pipelines or strengthening the sensor fixure, but the internal coupling vibration is absence of flawless theoretical guidance and solution. The internal coupling vibration phenomenon and the influence to measurement precision of the sensor were put forward on the basis of the Coriolis mass flowmeter operating mechanism, the comparison experiments of the CMFs with internal coupling vibration and without internal coupling vibration were made by using Polytec laser doppler vibrometer, it was revealed that the internal coupling vibration is tantamount to the additive weight on the main vibration, the additive phase difference was induced. For the special CMF, the additive weight is mostly steady, but the Coriolis force increases with the fluid flux, therefore the influence of internal vibration decreases with the increased fluid flux and the measurement error is decreased.

Key words: resonance; flowmeter; coupling; vibration

收稿日期: 2005-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60274039)

作者简介: 郑德智(1978-),男,辽宁锦州人,博士生,mickeyzheng@163.com.

科氏质量流量传感器内部耦合振动因素在其应用中对性能具有较大影响[1]. 作为一种通过测量管的振动敏感被测流体质量流量的仪表,内部耦合振动是 CMF(Coriolis Mass Flowmeter)传感器中普遍存在的现象. 实践表明,各种 CMF 传感器都存在着不同程度的内部耦合振动. 当内部耦合振动严重时,CMF 的性能有明显的降低,甚至不能正常工作,生产实践中已多次遇到这类问题. 但目前对科氏质量流量计传感器内部耦合振动影响机理研究尚不明晰,减弱或消除内部耦合振动影响的有效理论和实践方法较少,因此对内部耦合振动的研究具有深远的现实意义.

1 CMF 传感器内部耦合振动

CMF 传感器的敏感结构较为复杂. 图 1 所示为典型的双 U 型管 CMF 传感器的结构示意图,传感器由测量管 1 和 2、定距板、激振单元、拾振单元 1 和 2、分流器、基体(支承管)、上盖、箱体等组成. 其中,箱体是一面开口的矩形截面薄壁壳体,开口端与上盖通过螺钉连接. 传感器工作时,闭环自激电路驱动激振单元,对 2 个 U 型测量管施加简谐激振力,使测量管做相对振动. 由于闭环自激电路的作用,激振频率等于测量管的一阶弯曲振动固有频率 ω_{t1},测量管在 ω_{t1} 上谐振[2].

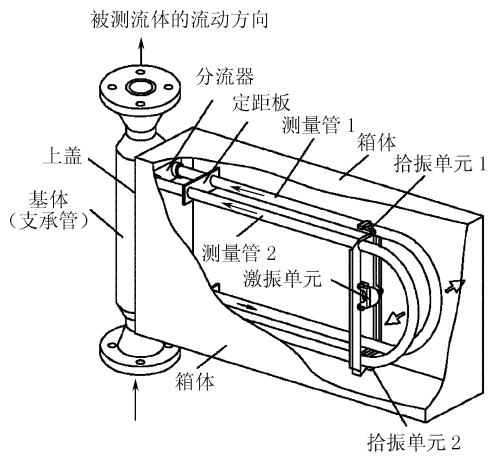


图 1 双 U 型管 CMF 传感器结构示意图

传感器的内部耦合振动是指无传感器以外的振动激励时,仅由于测量管正常的谐振而引起的其他零部件的振动. 耦合振动是由于固体结构之间及固体结构与非结构因素间的能量耦合而产生的振动[3]. 在 CMF 传感器中,可能存在着结构与结构、结构与电磁场、结构与声场 3 种耦合方式,但实践已证明后 2 种方式所起作用较小. 因此,结构耦合是 CMF 传感器内部耦合振动的主要方式,其根源是敏感结构自身的振动. 图 2 所示为 CMF 传感器的主要零部件连接方式,各主要部件之间以焊接和螺钉连接为主,传感器内各零部件之间存在着结构耦合,测量管的振动将通过结构耦合传递到其他零部件上,使其他零部件产生耦合振动. 同时,其他零部件的耦合振动也会影响测量管的振动,使测量管的振动特性发生变化,进而使 CMF 的性能发生变化[4].

实践已证明,传感器的内部耦合振动与传感器结构和生产工艺有关. 对图 1 所示的双 U 型管 CMF 传感器,内部耦合振动的主要特征是箱体壁面存在着较大的振动,而且随着 U 型管直径的增大,闭环驱动电路的驱动能量增加,箱体壁面的耦合振动现象趋于严重.

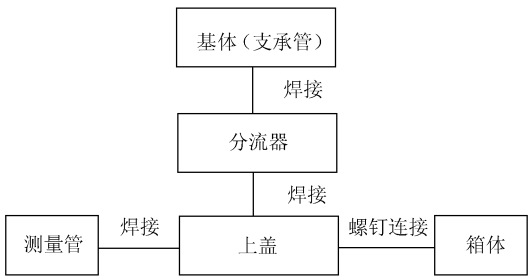


图 2 CMF 传感器主要零部件连接方式

2 内部耦合振动分析

假设除传感器内部耦合振动以外的其他条件不变. 当不考虑内部耦合振动的影响时,设被测流体的实际瞬时质量流量 Q_T 与 CMF 的测量值 Q_C 的关系为

$$Q_C = k_0 Q_T + a_0 + \varepsilon_{Q0} \tag{1}$$

式中,k_0,a_0 为 CMF 的标定系数;ε_{Q0} 为瞬时流量的随机误差. 对正常的 CMF,k_0 接近于 1,a_0 则接近于 0.

当传感器存在内部耦合振动时,设

$$Q_C = k_0 Q_T + a_0 + \varepsilon_{Q0} + \Delta Q_1 + \varepsilon_{Q1} \tag{2}$$

式中,ΔQ_1,ε_{Q1} 分别为由于传感器内部耦合振动而引起的 CMF 瞬时流量测量误差的确定性分量和随机分量[5],均与 Q_T、内部耦合振动和其他实验条件有关. 再考虑 Q_T 随时间变化的情况,将式(2)表示为

$$Q_C(t, V_b, \hat{C}) = k_0 Q_T(t, \hat{C}) + a_0 + \Delta Q_1(Q_T, V_b, \hat{C}) + \varepsilon_{Q0} + \varepsilon_{Q1} \tag{3}$$

式中,V_b,$\hat{C}$ 分别为传感器内部耦合振动和其他实验条件的集合. 将式(3)对时间积分,可得 CMF 的累积质量测量值 m_C. 若忽略 CMF 在累积过程中产生的误差,可将 m_C 表示为

$$m_C(t, Q_T, V_b, \hat{C}) = k_0 m_T(t, Q_T, \hat{C}) +$$

$$a_0 t + \Delta m_1 + \varepsilon_m \tag{4}$$

式中,实际累积质量 m_T 与累积时间 t,Q_T 和 $\hat{C}$ 有关:

$$m_T = \int_0^t Q_T(\tau, \hat{C})\,\mathrm{d}\tau \tag{5}$$

式中,Δm_1 为传感器内部耦合振动引起的累积质量测量误差的确定性分量:

$$\Delta m_1 = \int_0^t Q_1(Q_T, V_b, \hat{C})\,\mathrm{d}\tau \tag{6}$$

式中,ε_m 为累积质量测量误差的随机分量,包括内部耦合振动引起的和其他条件引起的随机误差 2 部分:

$$\varepsilon_m = \int_0^t (\varepsilon_{Q0} + \varepsilon_{Q1})\,\mathrm{d}\tau \tag{7}$$

理想情况下($k_0 = 1, a_0 = 1, \Delta m_1 = 0, \varepsilon_m = 0$),$m_C$ 与 m_T 之间是斜率等于 1 的直线关系. 实际情况下,k_0,a_0 和 ΔQ_1 使 m_C 与 m_T 之间不再是斜率等于 1 的直线关系,ε_{Q0}和 ε_{Q1}使 m_C 中产生随机误差.

由式(5)可知,当 Q_T 不随时间变化时,m_T 与 t 的关系可表示为

$$t = \frac{1}{Q_T(\hat{C})} m_T \tag{8}$$

由式(6)可知,当 Q_T,V_b 和 $\hat{C}$ 都不变时,ΔQ_1 为常值,Δm_1 与 t 的关系可表示为

$$\Delta m_1 = \Delta Q_1(Q_T, V_b, \hat{C})t = \frac{\Delta Q_1(Q_T, V_b, \hat{C})}{Q_T(\hat{C})} m_T \tag{9}$$

实际工作中,Q_T 随时间波动,但由于变化量较小,式(8)和式(9)仍近似成立.

因此,在 Q_T 的变化量较小、除传感器耦合振动以外的 $\hat{C}$ 不变的前提下,由式(4)、式(8)、式(9),可将有传感器耦合振动时 CMF 的 m_C-m_T 关系表示为

$$m_C \approx \left(k_0 + \frac{a_0}{Q_T(\hat{C})} + \frac{\Delta Q_1(Q_T, V_b, \hat{C})}{Q_T(\hat{C})}\right) m_T + \varepsilon_m \tag{10}$$

由式(4)和式(8)可将无传感器耦合振动时 CMF 的 m_C-m_T 关系表示为

$$m_C \approx \left(k_0 + \frac{a_0}{Q_T(\hat{C})}\right) m_T + \varepsilon_m \tag{11}$$

显然,传感器内部耦合振动引起的确定性瞬时流量测量误差 $\Delta Q_1(Q_T, V_b, \hat{C})$会引起 m_C-m_T 关系的直线斜率变化. 因此,分别以直线拟合有、无传感器耦合振动时的 m_C-m_T 关系,由拟合直线的斜率即可分析传感器内部耦合振动引起的 CMF 确定性瞬时流量测量误差 $\Delta Q_1(Q_1, V_b, \hat{C})$.

另外,由式(7)可知,ε_{Q1}将增大累积质量测量的随机误差,使 m_C 的离散程度增加. 因此,比较有、无传感器耦合振动情况下 m_C 的离散程度,可以分析 ε_{Q1}.

3　实验研究

3.1　实验装置

采用的实验装置如图 3 所示. 其中,泵的标称输出流量为 0.83 kg/s,经旁路调节阀调节后产生所需的实验流量 Q_T. 实验采用静态质量法[6],利用电子称得到一定时间内流过被测传感器的 m_T,利用计数器对传感器本身输出的代表瞬时质量流量的频率信号进行计数累加,得到 m_C,两者之差即得到传感器的误差. 同时利用实验室现有的 Polytec 激光多普勒测振仪测量箱体壁面的耦合振动,并进行频谱分析.

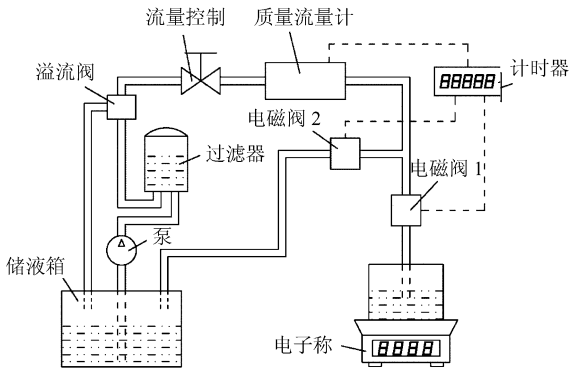


图 3　实验装置结构示意图

3.2　实验结果分析

3.2.1　传感器的内部耦合振动

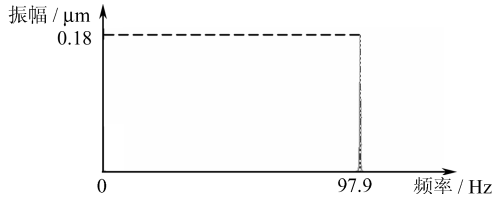
传感器工作时,除测量管正常的谐振外,其他零部件也存在着结构耦合引起的耦合振动. 实验中,用 Polytec 激光多普勒测振仪和相关软件对通径为 ϕ16 mm 和 ϕ25 mm 的多个双 U 型管传感器的内部耦合振动进行了测试和分析,结果如下:

1) 除箱体外,其他零部件的耦合振动都很小,难以用 Polytec 激光多普勒测振仪测量.

2) 箱体是耦合振动最大的零部件,是耦合振动的主要特征. 箱体壁面上各点具有不同的振幅,不同传感器的箱体壁面上振幅最大点所在位置不同,最大振幅也不相同.

3) 频谱分析表明,箱体壁面的耦合振动频率与测量管的谐振频率相同(见图 4),这在一定程度上说明,结构耦合是传感器内部耦合振动的主要原因.

4）随着传感器中 U 型测量管直径的增加，箱体壁面的耦合振动现象趋于严重.



注：测量管谐振频率 f_0 = 97.9 Hz；频谱分析范围 0 ~ 1 kHz

图 4 通径 ϕ16 mm 传感器的箱体壁面耦合振动频谱图

3.2.2 内部耦合振动对 CMF 测量精度的影响

鉴于箱体是传感器中耦合振动中最大的部件，箱体耦合振动对测量管振动特性的影响也应是各零部件中最大的，因此，本研究以箱体的耦合振动为主要内容，选择有明显箱体耦合振动的传感器，利用图 3 所示的装置，通过有箱体和无箱体时的对比实验，分析以箱体振动为主要特征的传感器内部耦合振动对 CMF 测量精度的影响.

实验过程中，保持 CMF 的安装条件、流体类型、温度和压力等实验条件不变，仅通过调节旁路调节阀门的开度，改变瞬时流量. 在各特定的瞬时流量条件下，选择不同的累积时间，分别用 CMF 和电子称测量累积质量，以电子称测得的累积质量 m_e 代替 m_T，对比分析有、无箱体情况下的实验数据，可得出如下结论.

1）内部耦合振动使 CMF 产生测量误差

以 $\Delta m = m_C - m_e$ 表示累积质量测量偏差，比较有、无箱体情况下的 Δm，可确定内部耦合振动是否对流量测量精度有影响. 表 1 为某通径 ϕ16 mm CMF的一组实验结果. 由实验结果可见，2 种情况下的 Δm 明显不同，这表明以箱体振动为主要特征的传感器内部耦合振动使 CMF 产生了流量测量误差，其原因是传感器的内部耦合振动改变了测量管的振动特性，而测量管的振动特性是 CMF 敏感质量流量的依据.

2）内部耦合振动引起的确定性测量误差

用折线拟合 $\Delta m = m_C - m_e$ 关系，得到多组以拟合折线斜率表示的实验结果. 表 2 为实验所得某通径 ϕ16 mm CMF 的 Δm 拟合折线平均斜率对照表. 由实验结果可见，有、无箱体情况下所拟合 Δm 折线的斜率明显不同，以箱体振动为主要特征的传感器内部耦合振动使 CMF 产生了确定性流量测量误差，而且该误差与被测流量有关，流量越大，耦合振动引起的确定性测量误差越小.

表 1 m_e 为 15 kg 时的测量偏差对照表

Q_C/(kg·s^{-1})	Δm 的平均值/kg		Δm 平均斜率变化量
	有箱体	无箱体	
0.15	−0.901 6	−0.880 4	0.021 2
0.45	−0.722 4	−0.673 6	0.048 8
0.75	−0.650 4	−0.612 8	0.037 6

表 2 Δm 拟合折线平均斜率对照表

Q_C/(kg·s^{-1})	Δm 拟合折线平均斜率		Δm 平均斜率变化量
	有箱体	无箱体	
0.15	0.882 8	0.895 6	0.013 1
0.45	0.909 4	0.918 5	0.009 1
0.75	0.915 1	0.916 9	0.001 8

3）内部耦合振动引起的随机性测量误差

在每个累积质量点进行 5 次实验，并计算累积质量测量偏差的标准差，得到多组以测量偏差的标准差 S_C 表示的实验结果. 由误差分析理论可知，S_C 反映了实验数据的重复性，即反映了随机误差对被测参数的影响. 表 3 所示为某通径 ϕ16 mm CMF 的测量重复性实验结果. 由实验结果可见，有、无箱体情况下的 S_C 明显不同，以箱体振动为主要特征的传感器内部耦合振动使 CMF 产生了随机性流量测量误差，而且该误差也与被测流量有关，流量越大，耦合振动引起的随机性测量误差越小.

表 3 m_e 测量重复性实验结果

Q_C/(kg·s^{-1})	S_C		S_C 的变化量
	有箱体	无箱体	
0.15	0.047 6	0.019 3	−0.028 3
0.45	0.014 2	0.009 6	−0.004 5
0.75	0.010 9	0.012 7	0.001 8

4 结 论

传感器内部耦合振动引起的确定性和随机性流量测量误差都随被测瞬时流量的增加而减少. 这一变化规律表明，内部耦合振动对测量管振动的影响可能与科氏力对测量管振动的作用相似，相当于在测量管的主振动上叠加了一个附加分量，将导致测量管上的 2 个拾振点产生附加的振动相位差. 对于一个特定的传感器，该附加分量的量值基本固定，而科氏力对测量管振动的作用则随被测流量的增加而增强. 因此，随着被测流量的增加，耦合振动的影响相对减小，所引起的流量测量误差也随之减小.

实验研究的结果初步揭示了 CMF 传感器的内部耦合振动现象及其对流量测量精度的影响规律，为更深入地研究耦合振动的机理和抑制对策，消除或减小耦合振动及其影响奠定基础.

参考文献（**References**）

[1] 樊尚春. 科氏质量流量计的若干干扰因素及其抑制[J]. 科

学技术与工程, 2004, 4(4):269 ~ 271
Fan Shangchun. Some disturbance factors and their reductions for Coriolis mass flowmeter[J]. Science Technology and Engineering, 2004, 4(4):269 ~ 271(in Chinese)

[2] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2004. 325 ~ 328
Fan Shangchun. Sensor technology and application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004. 325 ~ 328(in Chinese)

[3] 张立翔,黄文虎,Astijsseling. 输流管道流固耦合振动研究进展[J]. 水动力学研究与进展, 2000,15(3):366 ~ 379
Zhang Lixiang, Huang Wenhu, Astijsseling. Review of FSI analysis of fluid conveying pipes[J]. Journal of Hydrodynamics, 2000,15(3):366 ~ 379(in Chinese)

[4] Clark C, Cheesewright R. The influence upon Coriolis mass flow meters of external vibrations at selected frequencis[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2003, 14:33 ~ 42

[5] 黎　胜,赵德有,郭昌捷. 薄壁结构弯扭耦合振动计算研究[J]. 振动与冲击,2000,19(4):48 ~ 50
Li Sheng, Zhao Deyou, Guo Changjie. Calculating research of crankle coupling vibration on thin wall structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2000,19(4):48 ~ 50(in Chinese)

[6] 苏彦勋,李金海. 流量计量[M]. 北京:中国计量出版社, 1991. 170 ~ 171
Su Yanxun, Li Jinhai. Flux measurement[M]. Beijing: Chinese Measurement Press, 1991. 170 ~ 171(in Chinese)

[7] Kutin J, Bajsic I. Stability-boundary effect in Coriolis meters[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12: 65 ~ 73

中英空间科学与技术合作研讨会在北航召开

由中国国家航天局与英国国家航天局联合举办、我校与英国驻华大使馆共同承办的“中英空间科学与技术合作研讨会”3 月 14 日隆重开幕。此次研讨会是为落实 2005 年 1 月中英两国航天机构部长级会议的协议,在中英科技年合作框架内,进一步加强中英两国航天科学与技术的交流,推进中英航天机构在民用航天领域的合作而举行的。

研讨会的内容是就空间科学的前景和空间任务的通用技术,空间飞行器与系统技术,陆基和空基望远镜技术及载荷,空间载荷的通用技术,地面系统与运行的通用技术等议题进行研讨与交流,并探讨双方合作的具体领域和方式。研讨会英方参会报告的 17 位专家分别来自英国研究委员会中心实验室理事会、卢瑟福—阿普尔顿实验室、粒子物理学和天文学研究中心、英国国家航天局、萨瑞卫星技术有限公司、牛津大学、城市大学、南开普敦大学、Mullard 空间科学实验室等 15 个单位。中方参会报告的 22 位专家分别来自中国科学院、中国航天科技集团公司、中国航天科工集团公司、北京大学、清华大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学等 11 个单位。

摘自北航新闻网