

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108328

双管型科氏质量流量传感器非线性影响抑制研究^{*}

李中翔¹, 郑德智^{1,2}, 胡 纯³, 樊尚春^{1,4}
(1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191; 2. 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院 北京 100191; 3. 北京理工大学前沿交叉科学研究院 北京 100081; 4. 量子传感技术工信部重点实验室 北京 100191)

摘 要:双管型科氏质量流量传感器输出信号中存在以倍频信号为主的非线性现象,已从数值分析角度进行溯源,本文借助 ANSYS 有限元分析软件构建全参数化模型,通过仿真实验进一步验证数值模型的可靠性;并通过分析耦合系统中测量管质量、定距板厚度、激励力大小对非线性振动的影响,证明测量管刚度和约束刚度对非线性的抑制有重要影响;进而采用附加质量法改善耦合系统局部刚度来抑制非线性倍频现象,结果显示改善局部刚度可以有效抑制和消除非线性现象;并且开展非线性抑制实验,结果符合仿真分析,验证了理论研究的正确性。为进一步细化非线性抑制方案、开展非线性抑制实验提供了理论支撑和技术指导,并可结合具体测量环境和测量需求,针对性的抑制或消除非线性现象,作为下一步 CMF 优化设计依据。

关键词:科氏质量流量传感器;倍频信号;非线性抑制;附加质量

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Research on non-linear suppression of dual-tube Coriolis mass flowmeter

Li Zhongxiang¹, Zheng Dezhi^{1,2}, Hu Chun³, Fan Shangchun^{1,4}
(1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. Key Laboratory of Quantum Sensing Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: There is the nonlinear phenomenon in the output signal of double-tube Coriolis mass flowmeter, which is mainly the frequency doubling signal. The source has been traced from the perspective of numerical analysis. In this article, the full parametric model built by ANSYS finite element analysis software is used to further evaluate the reliability of the numerical model through simulation experiments. By analyzing the influence of the excitation force on the nonlinear vibration of the measuring tube mass and the thickness of the measuring tube spacing plate, it proves that the measuring tube stiffness and the constraint stiffness have important effects on suppressing the nonlinear vibration. Then, the additional mass method is used to improve the local stiffness of the coupling system to suppress the nonlinear frequency doubling phenomenon. Results show that the improved local stiffness can effectively suppress and eliminate the nonlinear phenomenon. The nonlinear suppression experiments are carried out, and the results accord with the simulation analysis, which verifies the correctness of the theoretical research. This part of work provides theoretical support and technical guidance for further refining nonlinear suppression scheme and carrying out nonlinear suppression experiments. Combined with the specific measurement environment and measurement requirements, the nonlinear phenomenon can be suppressed or eliminated, as the next step of CMF optimization design basis.

Keywords: Coriolis mass flowmeter; frequency doubling signal; nonlinear suppression; additional mass

0 引言

双管型科氏质量流量传感器 (Coriolis mass flowmeter, CMF) 是一种典型的谐振式传感器^[1], 通常被认为是线性系统, 但实际输出信号中存在非线性干扰成分。Cheesewright 等^[2]分析了在脉动流的情况下, 拾振单元输出信号存在 4 种不同频率的分量。Zheng 等^[3]证实了这种现象, 并且发现检测信号存在以倍频信号为特性的非线性信号, 不仅影响着谐振式传感器闭环自激系统的实现, 也严重影响其工作特性。随着研究的深入, 脉动流^[4]、附加质量、阻尼等非理想效应^[5-7]、测量管工艺^[8-9]、温度^[10]对检测信号中频率分量提纯已经逐渐清楚, 针对这类问题, 传统的解决方法均是从信号处理的角度进行考虑, 采用不同的信号处理方法抑制传感器输出信号中的非线性因素^[11-18]。

检测信号存在倍频非线性现象始终鲜有报道, 分析原因是倍频信号分量往往会隐藏在其他非线性信号中, 且幅值其他非线性相对较小。存在两种情况, 倍频信号的影响尤为突出: 管道流体质量和体积远小于管道质量和体积; 管道的流体为平推流; 前者存在于小流量、极小流量的测量, 这类传感器通常以零稳定性定义最大误差; 后者流体沿管道以均匀但时变的速度移动, 与管道完美耦合, 因此表现得像一根弦, 没有内部流体运动。在理论分析中, 这两种情况在测量管模型都可用“空管”表示^[19]。Kéita^[20]针对直管科氏质量流量传感器, 通过理论预测与实验分析, 验证可以测量气体流量。因此, 对 CMF 测量管倍频信号的溯源、抑制以倍频信号为特点的非线性现象对提高极端流体、特殊流体的测量精度、拓展应用尤为重要和迫切。

1 理论基础

图 1 为典型的双管型 CMF 的结构图^[21-22], 其敏感单元是一对完全对称的测量管。针对空管模型, 研究测量管振动特性。CMF 中两个对称敏感单元在激励单元作用下做反向同步振动, 可将其视为典型的反相同步运动。基于惠更斯同步理论, 基座横梁使两根测量管的振动发生了相互(耦合)作用^[23-24]。在研究过程中^[25], 将图 1 等效成如图 2 所示的抽象模型, 其中 z_1, z_2, z 分别代表梁在自身坐标系下振动的位移, 系统的位移, m_1, m_2, m 分别代表梁和基座的质量, F_1, F_2 为大小相等方向相反的激励力, k 和 c 为系统弹簧阻尼系数。

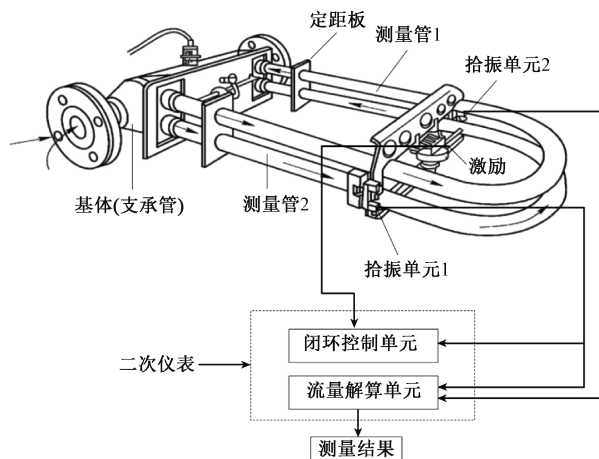


图 1 U 形管式科氏质量流量传感器结构

Fig. 1 U-tube CMF structure drawing

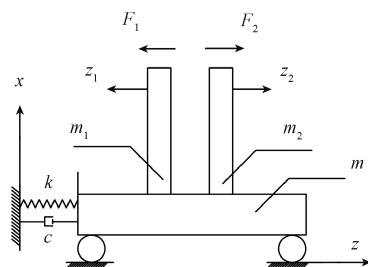


图 2 科氏质量流量传感器简化的双梁耦合振动模型^[25]

Fig. 2 Simplified two-beam coupled vibration model for CMF^[25]

建立双梁耦合振动的弹簧阻尼模型, 定义广义坐标为 (q_{11}, q_{21}, z) , i 梁的振动表达式如式(1)所示。

$$z_i \approx \sum_{j=1}^3 \phi_j(x) q_{ji}(t) \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

通过拉格朗日方程建立耦合振动的动力学微分方程, 其双梁耦合振动模型的动力学微分方程组如式(2), 数值分析, 证实了耦合振动的双梁确实存在倍频现象的非线性信号。

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{m_i}{l} \int_0^l \left[(-1)^i \phi_1(x) \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \phi_1^2(x) \frac{\partial^2 q_{ii}(t)}{\partial t^2} \right] dx + \\ & EJ q_{ii}(t) \int_0^l \left(\frac{\partial^2 \phi_1(x)}{\partial x^2} \right)^2 dx = Q_{z_i} \\ & (m + m_1 + m_2) \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{m_i}{l} \int_0^l (-1)^i \phi_1(x) \frac{\partial^2 q_{ii}(t)}{\partial t^2} dx + kz = -c \frac{\partial z}{\partial t} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

由于数值方法基于大量的假设, 过程中可能会掩盖或忽略一些非线性干扰因素, 无法全面的描述耦合系统的振动情况。有限元模型与实验结果的比较, 可限于检测频谱中的定性频率成分^[4], 作为数值分析和实验验证的过渡, 得到了普遍认可。Watt^[26]利用有限元仿真软件

对直管科氏质量流量传感器进行有限元建模与分析,求解得到最大应力值;樊尚春教授^[27-28]分别对空管状态和载有流体测量管进行有限元建模,研究其频率特性和振型变化规律。同样还有一些针对流体的有限元建模分析^[29-32]。

由于传感器结构设计的对称性,以往建模只单独分析某一段管道的振动而忽略测量管整体的耦合振动,无法保证约束环境与实际情况的一致,因此在仿真阶段无法得到上述非线性结论,更无法对设计 CMF 提出抑制或消除非线性倍频振动的解决方案。本文基于同步现象的耦合振动,借助 ANSYS 有限元分析软件,通过仿真实验进一步验证数值模型的可靠性,研究结构参数对非线性倍频的影响,探究 CMF 非线性抑制方法。第 2 节主要展示建模的过程和针对数值模型的仿真实验验证;第 3 节讨论耦合系统自身关键参数对非线性影响的仿真分析;第 4 节探究使用附加质量法来抑制非线性的仿真分析;第 5 节实验验证;第 6 节给出最终的结论。该部分工作可以指导下一步针对具体 CMF 开展非线性抑制实验,并且有利于在 CMF 的设计过程中,结合具体测量环境测量需求,针对性的抑制或消除非线性现象,提高测量精度,具有重要的意义。

2 建模与仿真

CMF 几何形状可以通过物理仪表直接测量获得,材料特性可以从 CMF 生产商获得。在测量管在相应的节点上添加各自传感器和驱动器组件的质量。施加激励力以保持恒定的振幅,力为周期力,其频率为 CMF 的激励频率。通过瞬态分析计算 CMF 拾振单元位移幅值的时间历程,并使用与实验数据相同的信号处理算法得到频谱图。具体过程与仿真如下。

2.1 建模过程

使用 ANSYS2020 构建仿真环境,构建全参数化模型。模型结构由基座、定距板、测量管、激励单元和拾振单元组成。

1) 定义单元类型:基座、定距板、测量管均为弹性元件,采用 SOLID185 单元进行建模;激励和拾振结构,作为激励点和拾振点,等效成集中质量点,采用 MASS21 单元进行建模。

2) 定义材料性质:基座、定距板、测量管为 316 L 不锈钢材料,基本材料属性弹性模量 $E=206\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$,密度 $\rho=7\,800\text{ kg/m}^3$;激励和拾振单元由磁钢和漆包线组成,按照单元类型定义实常数。

3) 定义结构尺寸:参照实际工作的 CMF 设计主要结构参数和意义如表 1 和图 3。

表 1 测量管几何参数							
Table 1 Measurement tube geometric parameters							
B	R1	R2	H1	H2	H3	H4	D(管壁厚)
260	60	54	240	180	23	48	1

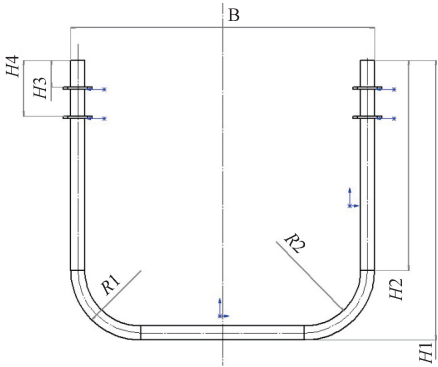


图 3 含有定距板的双 U 形管几何建模示意图
Fig. 3 Geometrical modeling of the double U-shaped tube with the spacer plate

4) 划分网格:网格划分的效果会直接影响结果的准确性和计算速度,为保证计算精度,将网格尺寸设置为 1 mm。

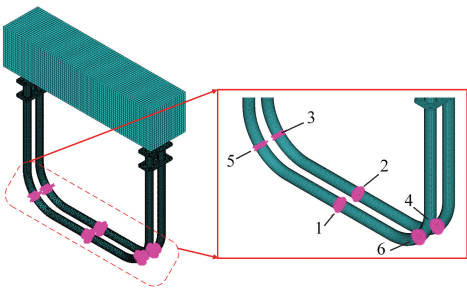
5) 边界条件和激励载荷:考虑测量管与基座的刚性连接,选用 CONTA174 和 TARGE170 单元定义实体接触面积;考虑实际 CMF 的装配情况,定义基座在长度方向上的侧面为弹簧阻尼约束,用单元 COMBIN14 进行建模;本研究中主要采用了模态分析和瞬态分析,通过模态分析可获得 CMF 激励模态对应的频率,瞬态分析中按照激励模态频率对 CMF 模型中的两个激励位置施加大小相等、方向相反的载荷,使其保持在激励模态。

6) 后处理:提取关切位置的时域振动数据,将振动信号以数据的形式导出,进行频谱分析。

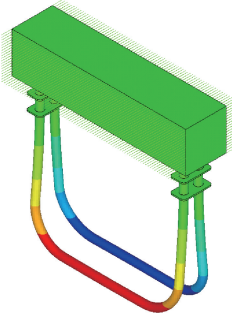
2.2 仿真实验及结果分析

最终得到 CMF 有限元模型如图 4(a) 所示,其中 1、2 为 CMF 激励单元,4~6 为 CMF 拾振单元。由于系统为弹簧阻尼约束,因此选用 QR 算法方法进行模态提取,得到测量管的前 6 阶振型和固有频率,仿真得到的固有频率值如表 2。

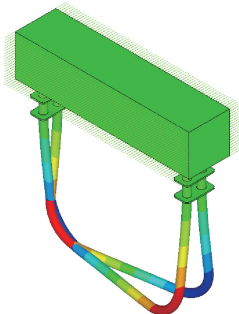
CMF 具有两种模态:激振模态和科氏力模态。激励线圈对测量管进行激振,使其以相应的谐振频率振动,其振动特点为反向同步振动,如图 4(b),称为一阶激励模态;当有流体经过振动的测量管时,产生科氏效应,测量管做扭转振动,如图 4(c),称为二阶科氏力模态。经研究发现激励模态对应仿真结果四阶模态,对比实际 CMF 的激励模态频率 133 Hz,与 ANSYS 有限元仿真结果基本吻合,验证了仿真结果的可行性,从而可以指导后续非线性抑制研究。



(a) 双U形测量管有限元模型
(a) FEM of double U-shaped measuring tube



(b) 双U形测量管激励模式
(b) Excitation mode of double U - shaped measuring tube



(c) 双U形测量管科氏力模式
(c) Coriolis force mode of double U-shaped measuring tube

图 4 双 U 形测量管有限元模型及模态
Fig.4 FEM of double U-shaped measuring tube and modal

表 2 测量管几何参数

Table 2 Measurement tube geometric parameters

	mm					
阶次	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	0	8.72×10^{-3}	2.08×10^{-2}	135.05	171.48	196.05

瞬态分析中,按照激振模式频率、根据实际工作加入载荷进行有限元计算。图 5 为经过载荷时长为 0.1 s 仿真计算后,绘制的 4 个拾振点随时间的振动曲线。

可以看出,同一根梁的两个测量点输出信号完全相同,不同梁的测量点呈现大小相等方向相反的振动。这与实际 CMF 的工作情况一致,再次验证了仿真模型的可靠性。选择任意一个测量点(这里选择 4 号拾振单元)

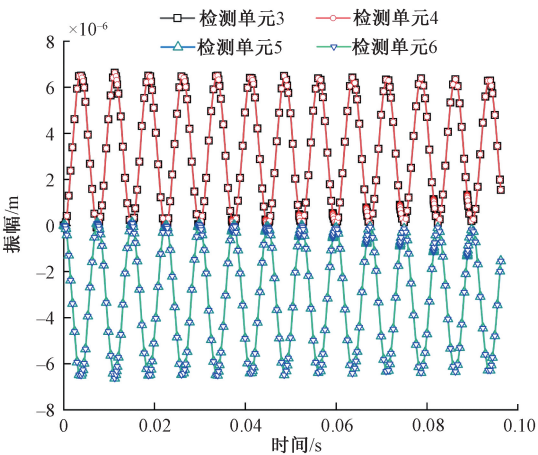


图 5 拾振单元输出的振动时域图
Fig.5 Time domain diagram of vibration output of the detection unit

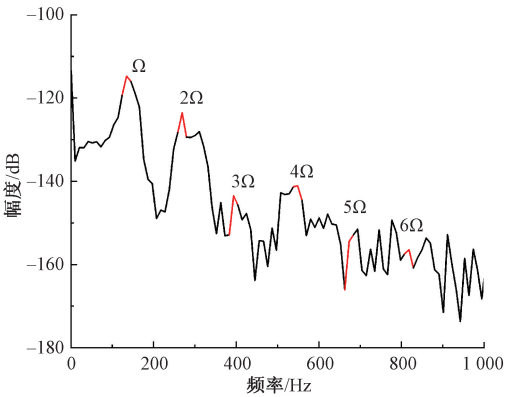


图 6 拾振单元 4 输出的振动频谱图
Fig.6 The vibration spectrum diagram of the output of detection unit 4

的信号,进行 FFT 计算,结果如图 6 所示。

显然测量管在激励频率处振动强度最大,此外可以明显发现在激励频率整数倍的频率处,有突出的振动强度,这符合前期基于同步效应开展理论推导^[25]的结果,仿真验证了倍频信号的存在,进一步说明非线性的影响的确与系统整体振动导致两个测量管之间产生的耦合有关,这种耦合效果的叠加使得最终的信号里存在倍频。除了倍频外,仿真结果与理论结果相比,出现大量随机振动,这是由于理论分析中模型简化以及没有考虑刚性连接和约束等对振动造成的干扰;与已有实验结果相比^[3],随机振动强度普遍大于实际 CMF 输出信号的强度,是因为实际 CMF 用信号处理的方法抑制了非线性,但二者共同存在倍频现象,说明目前倍频现象无法通过信号处理实现有效抑制。

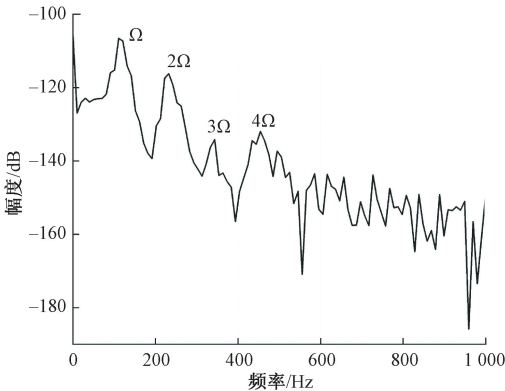
3 非线性影响仿真分析

仿真实验的结果有利地验证了耦合振动数值模型和仿真模型的可靠性,接下来需要研究耦合系统中影响这种非线性现象的关键参数,依照其工作特点,本文从测量管质量(不改变管内径)、定距板厚度、激励大小进行研讨,旨在总结规律,为抑制非线性提供新的思路,更好的对耦合系统进行研究和设计。

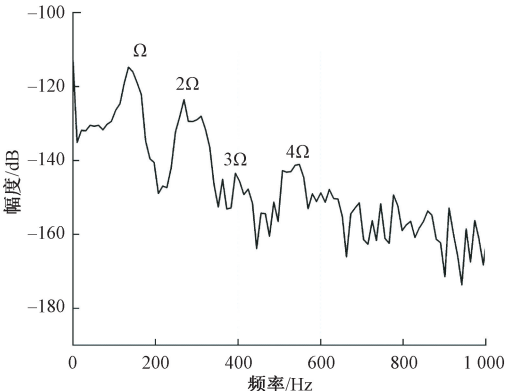
3.1 测量管质量对非线性的影响

从传感器的工作性能的角度出发,讨论测量管质量对非线性的影响,应当不改变通过测量管截面的流体参数,因此要求测量管的内径保持不变,通过改变测量管外径来改变测量管的质量。

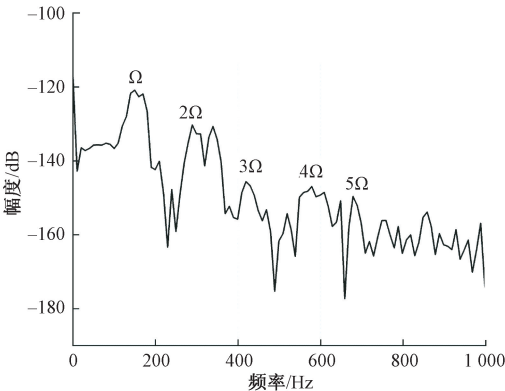
图 7 为改变耦合系统中测量管外径 (11、12、13、14 mm)对应的频谱图。可以观察到:1)随着管壁厚度的增加,CMF 的激励模态频率同步增加,这是因为虽然外径的增加使得系统质量增加,但也造成测量管壁厚增加(对应的壁厚分别为 0.5、1、1.5、2 mm),因此测量管的刚度增加,从而引起模态频率增大;2)随着壁厚的增加,随机振动逐渐变平稳、强度降低,对高频抑制效果明显,同



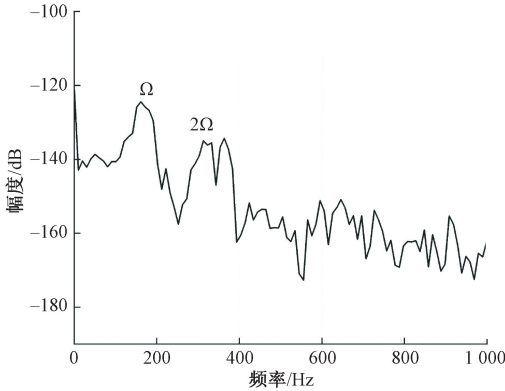
(a) 测量管外径: 11 mm
(a) The outside diameter of the tube: 11 mm



(b) 测量管外径: 12 mm
(b) The outside diameter of the tube: 12 mm



(c) 测量管外径: 13 mm
(c) The outside diameter of the tube: 13 mm



(d) 测量管外径: 14 mm
(d) The outside diameter of the tube: 14 mm

图 7 改变耦合系统中测量管外径频谱图

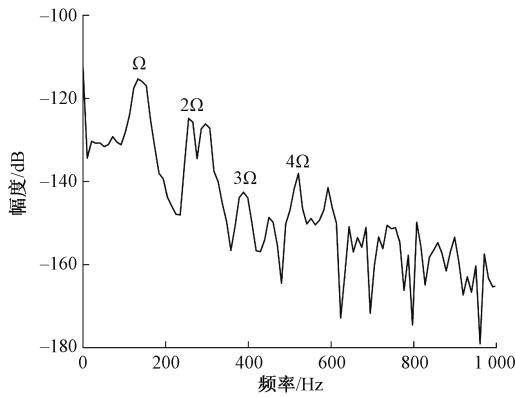
Fig. 7 Change coupling system of measurement tube diameter

时倍频信号分量大小在逐渐减小,说明改变质量,对于抑制非线性是有一定作用的;3)管厚的增加,会造成了测量管振动强度整体降低,信噪比并没有显著提升。

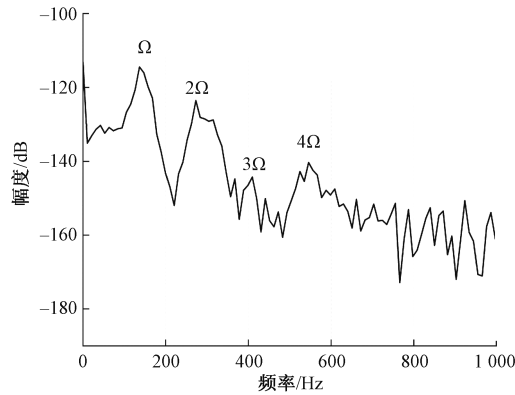
在不改变梁的长度和内径的情况下,随着壁厚的增加:首先对高倍频分量有明显的改善,高频率非线性得到抑制,进而逐渐影响低倍频。优化过程中会牺牲测量管振动强度,倍频信号依旧存在且对于信噪比的影响仍然是不可忽略的。

3.2 定距板厚度对非线性的影响

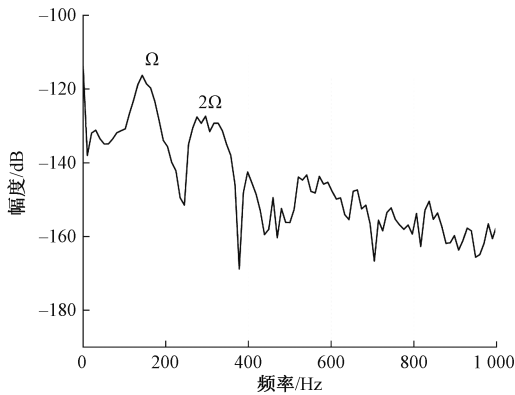
定距板是距离测量管振动端最近的结构件,它与测量管刚性连接,保证了两根测量管的间距固定且平行,某种意义讲,它起到了“基座”的耦合作用,根据惠更斯理论,测量管的振动最先由定距板进行传递、耦合,因此研究定距板的结构参数与非线性抑制是必要的,定距板的主要结构参数有上下定距板的间距、定距板距离基座的位置、定距板的厚度,这里单独讨论定距板厚度对非线性的影响。



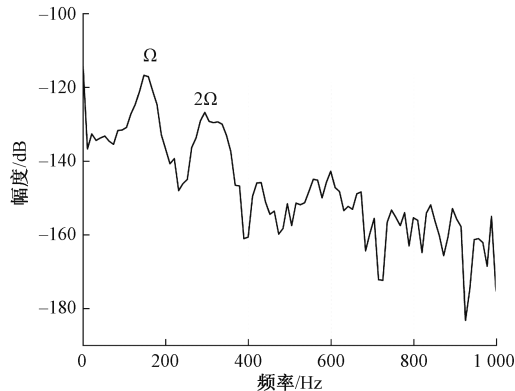
(a) 定距板厚度: 1 mm
(a) The spacer plate thickness: 1 mm



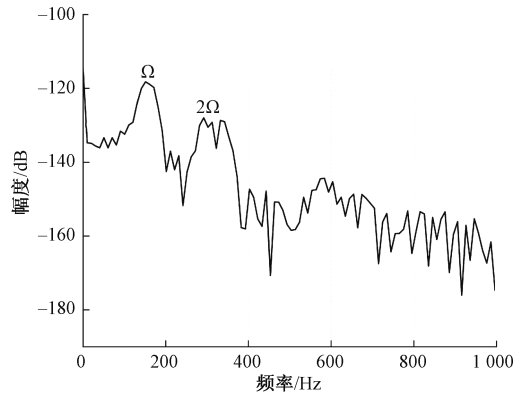
(b) 定距板厚度: 3 mm
(b) The spacer plate thickness: 3 mm



(c) 定距板厚度: 6 mm
(c) The spacer plate thickness: 6 mm



(d) 定距板厚度: 8 mm
(d) The spacer plate thickness: 8 mm



(e) 定距板厚度: 10 mm
(e) The spacer plate thickness: 10 mm

图 8 改变耦合系统中定距板厚度频谱图

Fig. 8 Change the spacer plate thickness in the coupling system spectrum

图 8 为改变定距板厚度(1、3、6、8、10 mm)对应的频谱图,定距板的质量远小于 CMF 系统的质量,一定范围内定距板厚度变化不足以引起整体质量的变化,因此对 CMF 的激励模态频率影响较小,但厚度的增加,导致刚性接触的面积增加,引起测量管的刚度变化,可以观察到 CMF 的激励模态频率会有一定幅度的增加,同时,刚度的变化并不会引起振动强度的明显减少。

厚度增加,对非线性有一定的抑制效果,当厚度小于 8 mm 时,高频率的非线性现象得到改善,高倍频振动强度逐渐被抑制,低频率的随机振动得到改善;当厚度大于 8 mm 时,高倍频虽得到抑制,但局部高频和低频的非线性振动显著增加,此时 CMF 整体振动不稳定。因此在设计过程中,需要考虑选取合适的定距板厚度,适当的增加约束刚度可有效降低非线性的影响。

3.3 激励力大小对非线性的影响

除了常规的结构参数会对非线性有一定的影响,激励力的大小也是不可忽略的因素,直观上它可能对非线性的改善不会有直接影响,但它是否能够抑制倍频的振动强度、提高信噪比,降低非线性倍频对测量精度的影响,尚未得知。

图 9 为改变激励力大小(0.1、0.5、1、3 N)观察对应的频谱图,可以看出随激励力的增大,信号的主频率和非线性振动都同步变化,频谱曲线向上平移,但随着激励力继续增大,平移增幅变得不明显,说明激励力的大小对提高振动强度效果有限,因此需要根据耦合系统的结构参数,选择适当的激励力即可得到较好的振动强度,侧面降低了对激励单元的要求。

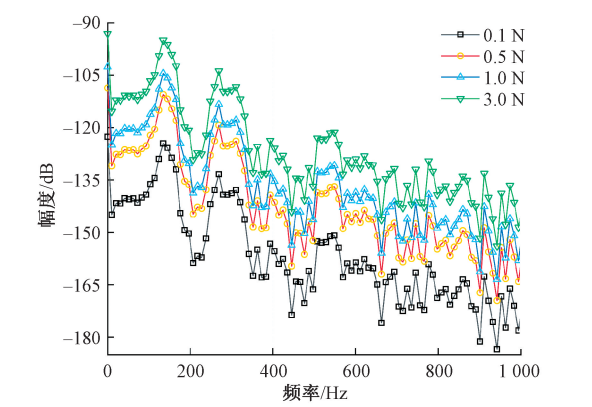


图 9 改变耦合系统中激励力大小频谱图

Fig. 9 Change coupling system of exciting force size spectrum

4 附加质量环抑制非线性仿真分析

第 3 节的仿真结果可以看到,通过改变壁厚来改变测量管的质量、改变定距板的厚度来改善测量管约束刚度、改变激励力来调整振动强度,都无法从根本上消除由耦合效应带来的非线性现象,即使部分频率段的非线性倍频得到抑制,也必然牺牲了 CMF 的测量范围、测量精度等性能,提高了对工艺、安装条件等的要求,增加成本,在使用上带来不便。同时分析得到,质量和刚度的变化对非线性现象都有较为显著的影响,因此考虑在测量管上增加附加质量段(环),既可以增加测量管的刚度又最小限度影响测量管的激励模式频率。

附加质量法常用于梁结构的无损检测,使用附加质量能够最小程度减小对 CMF 质量和尺寸等关键结构参数的影响。对于测量管,根据 CMF 工作特性,质量环可以分布在测量管与基座的垂直部分(垂直段)、测量管弯曲部分(弯曲段),如图 10 所示。结合 CMF 实际工作情况和结构设计,在仿真过程中,定义质量环与测量管使用相同的材料和结构,质量环与测量管属于刚性连接,同样

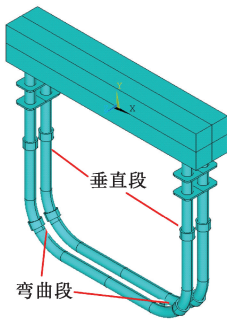


图 10 质量环在测量管的分布位置

Fig. 10 The ring distribution position in the measuring tube

选用 CONTA174 和 TARGE170 单元定义实体接触面积,不同位置的质量环厚度统一为 1 mm,长度/弧长统一为 10 mm,因此可以得到质量环的质量约为 6 g。通过调整质量环的位置和结构参数,得到抑制非线性倍频规律,判断出最佳的抑制位置。需要说明的是,除质量环的变化外,CMF 的结构参数保持不变,其结构参数与第 2 节保持一致。

4.1 垂直段对称放置质量环

垂直段质量环分布的位置是根据质量环靠近基座的端面(底面)距离定距板的距离决定,这是由于定距板对测量管的刚度约束远大于基座约束。根据 CMF 结构参数,参照距离定距板的位置,垂直段长度为 130 mm。这里选择质量环底面距离定距板为 0、25、50、85、100 mm。观察包含对称放置质量环的耦合系统振动情况时,由于系统依然是对称结构,根据第 2 节的结果,选择任意一个测量管拾振单元信号即可,这里统一使用 4 号拾振单元的输出信号源(下同),频谱图结果如图 11 所示,频率和幅值如表 3 所示。

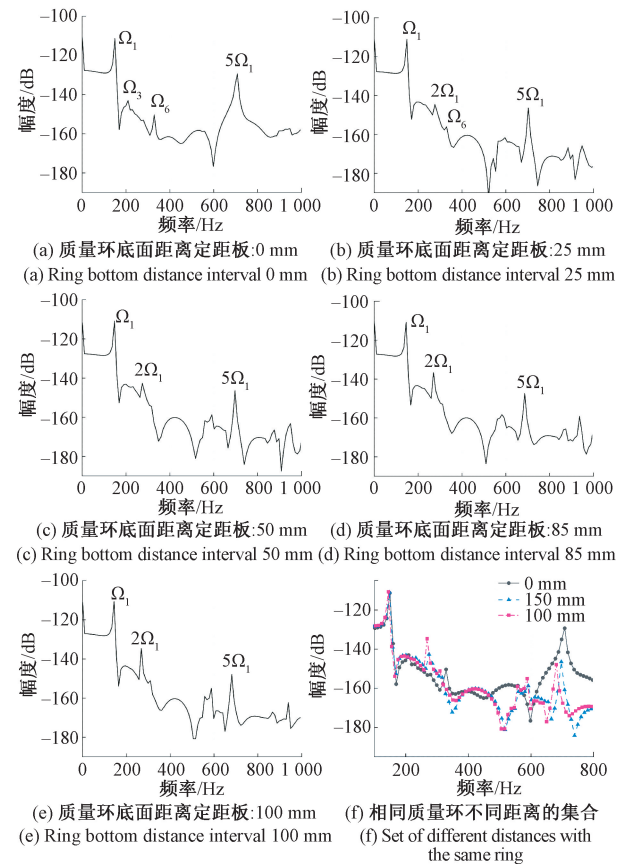


图 11 垂直段对称放置质量环的耦合系统振动频谱图

Fig. 11 Vertical section of the symmetry placing quality ring coupling system vibration spectrum

表 3 频率和幅值表
Table 3 Frequency and amplitude

质环位置/mm	倍频关系	f/Hz	a/dB
0	Ω_1	140.57	111.34
	$2\Omega_1$		
	$5\Omega_1$	707.97	129.32
25	Ω_1	138.92	111.03
	$2\Omega_1$	276.82	144.57
	$5\Omega_1$	702.70	146.38
50	Ω_1	137.78	110.94
	$2\Omega_1$	274.55	142.62
	$5\Omega_1$	696.93	146.46
80	Ω_1	135.68	110.76
	$2\Omega_1$	270.36	136.75
	$5\Omega_1$	686.31	147.48

从图 11 中明显看出,引入对称质量环会大幅度改善耦合系统的非线性振动,频谱图曲线光滑且第 3 节出现的大部分随机振动被消除,除 1、2、5 倍激励模态频率外的其他非线性振动抑制效果明显。结合表 3,可以得到:质量环位置的改变,对系统的激励模态频率和振动强度影响较小;随着质量环远离定距板,系统的三阶和六阶频率对应的峰逐渐消失。当质量环靠近定距板时(0、25 mm),对低频率范围内的非线性振动和非线性振动幅值的抑制效果越好;当质量环靠近垂直段的尾端(85、100 mm)时,对高频率有较好的非线性抑制;在垂直段的中段(50、85 mm)对各频率段非线性抑制的整体效果均衡。

4.2 弯曲段对称放置附加质量环

用同样的方法进行弯曲段质量环的仿真计算,质量环位置分布与质量环底面与测量管横截面(即水平面)的夹角有关,整个弯曲段跨度为 90°,分别选取夹角为 0°、30°、45°、60° 和 75° 进行仿真计算,频谱图结果如图 12,频率和幅值如表 4。

同样可以看出质量环对整个频率范围都有非常好的非线性抑制效果,并且对 CMF 的激励模态频率和振动强度影响较小。在 0°时,质量环的底部刚好位于垂直段的末端,因此振动情况与 4.1 节中质量环距离定距板 100 mm

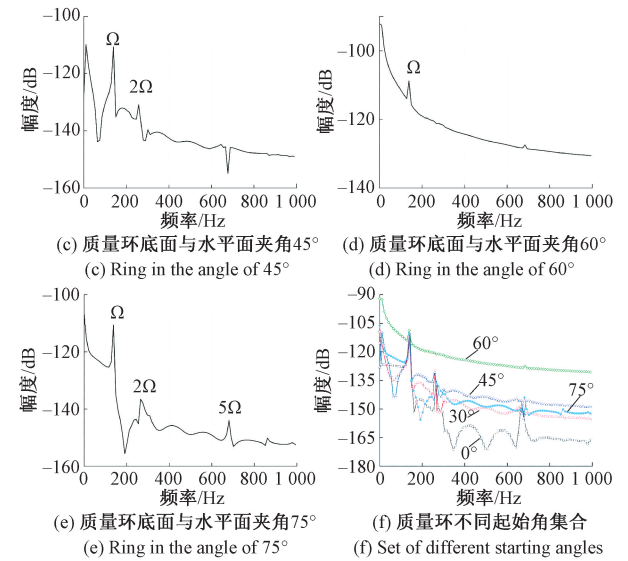
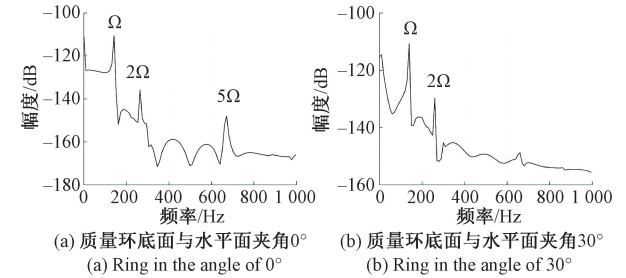


图 12 弯曲段对称放置质量环的耦合系统振动频谱图
Fig. 12 Spectrum of vibration of a coupling system with a mass ring symmetrically placed at a curved segment

表 4 频率和幅值表
Table 4 Frequency and amplitude

夹角/(°)	倍频关系	f/Hz	a/dB
0	Ω	132.75	110.67
	2Ω	264.53	135.87
	5Ω	671.49	147.99
30	Ω	130.55	110.68
	2Ω	260.14	129.75
	5Ω		
45	Ω	129.51	110.65
	2Ω	257.99	130.84
	5Ω		
60	Ω	128.69	108.78
	2Ω		
	5Ω		
75	Ω	128.15	110.61
	2Ω	265.93	136.57
	5Ω	680.77	143.97

的情况相近,但对高频率有更加明显的抑制效果,在大于 500 Hz 的频段除 5 倍频外,几乎没有非线性振动;30°、45°基本实现了非线性抑制,除能够观察到基频和 2 倍频外,随机噪声更小,频谱图变得光滑,不仅高频非线性振动和振动强度得到抑制,对于低频也有明显的抑制效果,说明弯角中心的局部刚度对非线性抑制有重要的影响;在 60°时,从频谱上看,实现了非线性消除,在整个频谱范围内只有激励模态频率,但此时测量管各频率下的振动强度高,尤其是低频区间,噪声振动强度普遍大于激励模

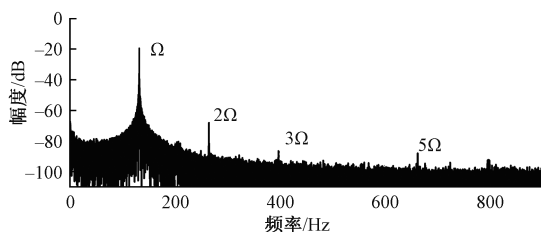
态强度,很容易造成反馈系统无法判定激励模态,系统稳定性差,容易产生更大的波动,造成测量误差。当角度继续增加时,可以看到高倍频振动强度突出,高频率范围内开始出现非线性随机振动,但低频率范围内非线性抑制效果好,信噪比高。

综上所述,弯曲段比垂直段具有更好的非线性抑制效果,说明改善弯管的局部刚度可以有效抑制和消除一些非线性现象。通过对垂直段和弯曲段的仿真计算,分析可知垂直段因测量管距离跨度大,具体可以分为低频/低倍频抑制和高频/高倍频抑制,但无法同时实现同时抑制;弯管段的质量环对低频和高频都有较好的抑制。

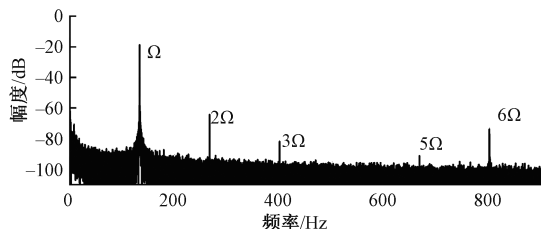
测量管除了垂直段和弯曲段,还有平行于基座的横梁段,但在横梁段安放质量环,等效于将类直管 CMF 两端固定在四根由直梁与弯管组成的悬臂梁,很显然会破坏横梁自身的稳定性,也抑制和阻断了振动的横向传递,造成横梁的振动形式复杂化。

5 实验验证

最后对仿真结论进行实验验证。待优化的 CMF 结构参数与第2节保持一致,附加质量材料与测量管材料保持一致,质量约为1 g,用3 M 双面胶对称粘贴在4个弯管段上,安放角度为60°。将 CMF 通过钢绳水平悬挂在横梁上,保持工作状态,通过自研数据采集卡^[21]输出 CMF 拾振单元的时域振动信号,通过 MATLAB 进行数据处理后,得到如图13(a)的振动频谱图,图13(b)为没有附加质量的振动频谱图。



(a) 弯曲段60°对称放置1 g附加质量值的实验振动频谱图
(a) Experimental vibration spectrum with 1 g additional mass at 60° of bending section



(b) 无附加质量的实验振动频谱图
(b) Spectrum of experimental vibration without additional mass

图13 耦合系统有无附加质量实验的振动频谱图

Fig. 13 Spectrum of vibration of a coupling system with and without the additional mass

由于选用商业 CMF,观测图13(b)大部分非线性振动信号已被消除,此时倍频信号尤为突出。对比图13(a)和(b)。对比看出,正如仿真分析得到情况在60°添加附加质量,高倍频有明显的抑制和消除,但低频区间的振动强度略有提升。实验结果初步验证了仿真实验结论。

6 结 论

本文通过有限元软件构建参数化模型,验证了测量管非线性倍频的存在,证明了数值模型的可靠性;分析了耦合系统中测量管质量、定距板厚度、激励大小对非线性现象的影响,发现耦合系统的非线性现象与系统的刚度有密切的关联。引入附加质量法,研究对称附加质量对耦合系统的非线性倍频的影响。仿真结果显示:优化刚度对非线性抑制有显著的效果,随机振动明显消除,并且倍频也得到一定的抑制。加强弯曲段局部刚度比垂直段具有更好的非线性抑制效果。搭建实验平台,对比特殊位置有无附加质量,结果初步验证仿真结论。

特别指出的是增加刚度会导致更高的频率,具有更快的动态响应时间,然而,增加刚度会降低 CMF 的灵敏度,因此需要考虑响应时间和灵敏度之间的平衡,根据测量需求进行具体角度、长度、厚度等的设计。下一步采用持续细化实验来进行分析和抑制非线性倍频,并推进 CMF 在研发阶段针对非线性随机振动和非线性倍频现象进行针对性设计。

参考文献

- [1] 樊尚春. 谐振式传感器[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
FAN SH CH. Resonant sensor [M]. Beijing: Beihang University Press, 2013.
- [2] CHEESEWRIGHT R, CLARK C, BISSET D. Understanding the experimental response of Coriolis massflow meters to flow pulsations [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1999, 10(4): 207-215.
- [3] ZHENG D, WANG S, FAN S. Nonlinear vibration characteristics of Coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 198-205.
- [4] BELHADJ A, CHEESEWRIGHT R, CLARK C. The simulation of Coriolis meter response to pulsating flow using a general purpose FE code [J]. Journal of Fluids and Structures, 2000, 14(5): 613-634.
- [5] KUTIN J, BAJSIĆ I. An analytical estimation of the Coriolis meter's characteristics based on modal superposition [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2002, 12(5-6): 345-351.
- [6] CLARKE D W. Non-linear control of the oscillation

- amplitude of a Coriolis mass-flow meter [J]. *European Journal of Control*, 1998, 4(3): 196-207.
- [7] CUNNINGHAM T J. Zero shifts due to non-proportional damping [C]. *Proceedings of the 15th international modal analysis conference (IMAC)*, 1997.
- [8] WANG T, BAKER R C. Manufacturing variation of the measuring tube in a Coriolis flowmeter [J]. *IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 2004, 151(3): 201-204.
- [9] MILLS C. Calibrating and operating Coriolis flow meters with respect to process effects [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 71: 101649.
- [10] COSTA F O, POPE J G, GILLIS K A. Modeling temperature effects on a Coriolis mass flowmeter [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 76: 101811.
- [11] 樊尚春, 张轩, 张庆荣, 等. 科氏质量流量计的非线性影响机理分析与抑制 [J]. *科学技术与工程*, 2005, 4(9): 569-571.
FAN SH CH, ZHANG X, ZHANG Q R, et al. The influence mechanism of nonlinear vibration and its reduction for Coriolis mass flowmeter [J]. *Science Technology and Engineering*, 2005, 4(9): 569-571.
- [12] TARANENKO P A, TELEGIN D V, ROMANOV V A. Analysis of forced bending vibrations of straight pipe with flowing fluid [C]. *International Conference on Industrial Engineering*. Springer, Cham, 2018: 703-711.
- [13] WANG L, LIU J, YAN Y, et al. Gas-liquid two-phase flow measurement using Coriolis flowmeters incorporating artificial neural network, support vector machine, and genetic programming algorithms [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 66(5): 852-868.
- [14] LI M, HENRY M. Complex bandpass filtering for Coriolis mass flow meter signal processing [C]. *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016: 4952-4957.
- [15] IBRYAEVA O, SALOV D. Matrix pencil method for coriolis mass flow meter signal processing in two-phase flow conditions [C]. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2017: 1-4.
- [16] 樊尚春, 李晓蕾. 利用调频信号实现低频振动传感器的快速校准 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 4(11): 1328-1332.
FAN SH CH, LI X L. Speedy calibration of low frequency vibration by using linear frequency modulation signal [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 4(11): 1328-1332.
- [17] CHEN P, TU Y, LI M, et al. A real-to-complex conversion phase difference estimation method for Coriolis mass flowmeter signal [C]. *2019 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)*. IEEE, 2019: 280-284.
- [18] 张建国, 徐科军, 方正余, 等. 数字信号处理技术在科氏质量流量计中的应用 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(9): 2087-2102.
ZHANG J G, XU K J, FANG ZH Y, et al. Applications of digital signal processing technology in Coriolis mass flowmeter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(9): 2087-2102.
- [19] WANG S, CLARK C, CHEESEWRIGHT R. Virtual Coriolis flow meter: A tool for simulation and design [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2006, 220(6): 817-835.
- [20] KÉITA N M. Behaviour of straight pipe Coriolis mass flowmeters in the metering of gas: Theoretical predictions with experiment verification [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1994, 5(4): 289-294.
- [21] ZHAO J, LI ZH X, ZHENG D Z, et al. Modal simulation and experiment analysis of coriolis mass flowmeter [C]. *7th International Symposium on Test Automation & Instrumentation (ISTA 2018)*, 2018: 727-731.
- [22] 郑德智, 樊尚春, 邢维巍. 科氏质量流量计相位差检测新方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2005, 4(5): 441-443, 477.
ZHENG D ZH, FAN SH CH, XIN W W. The novel method of phase difference detection in Coriolis mass flowmeter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 4(5): 441-443, 477.
- [23] NÉDA Z, RAVASZ E, BRECHET Y, et al. The sound of many hands clapping [J]. *Nature*, 2000, 403(6772): 849.
- [24] NÉDA Z, RAVASZ E, VICSEK T, et al. Physics of the rhythmic applause [J]. *Physical Review. E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 2000, 61(6): 6987.
- [25] LI Z X, HU C, ZHENG D Z, et al. Synchronization theory-based analysis of coupled vibrations of dual-tube Coriolis mass flowmeters [J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 6340.
- [26] WATT R. M. Modelling of Coriolis mass flowmeters using ANSYS [C]. *ANSYS User Conference*, Pittsburgh, 1991, 10: 67-78.
- [27] 樊尚春. 用于直接质量流量测量的 U 型管的频率特

性[J]. 测控技术, 1999, 18(3):27-29.

FAN SH CH. Frequency characteristics of U-type tube for measuring direct mass flow [J]. Measurement & Control Technology, 1999, 18(3):27-29.

- [28] 樊尚春. 圆弧型弹性弯管频率特性的有限元分析[J]. 仪器仪表学报, 2002, 4(S2):559-560.

FAN SH CH. Analysis of frequency characteristics for the circular arc tube using FEM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 4(S2):559-560.

- [29] 曹胜强, 张海涛, 涂亚庆, 等. 基于谐振频率的 U 形管科氏流量计测量管污垢在线检测方法[J]. 仪表技术与传感器, 2018(6):24-28.

CAO SH Q, ZHANG H T, TU Y Q, et al. On-line detection method based on resonant frequency for dirt in U-shaped tube Coriolis mass flowmeter [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(6):24-28.

- [30] 纪爱敏. 科氏质量流量计的有限元建模及灵敏度分析[J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(1):78-81.

JI AI M. Modeling and sensitivity analysis of Coriolis mass flowmeter with finite element method [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2006, 33(1):78-81.

- [31] 胡纯, 韩明哲, 郑德智, 等. 直管科氏质量流量传感器灵敏度分析软件设计[J/OL]. 测控技术: 1-8[2021-08-30]. <https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2021.02.209>.

HU CH, HAN M ZH, ZHENG D ZH, et al. Sensitivity analysis software for straight tube Coriolis mass flow sensor[J/OL]. Measurement & Control Technology: 1-8 [2021-08-30]. <https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2021.02.209>.

- [32] WILLIAMSON M P. Finite-element analysis [J]. Com-puter-Aided Engineering Journal, 1985, 2(2):66-69.

作者简介



李中翔, 2011 年于北京理工大学获得学士学位, 2014 年于北方工业大学获得硕士学位, 现为北京航空航天大学博士, 主要研究方向传感器敏感机理。

E-mail: lingflybit@163.com

Li Zhongxiang received his B. Sc. degree

from Beijing Institute of Technology in 2011, and received his M. Sc. degree from North China University of Technology in 2014. He is currently a Ph. D. candidate at Beihang University. His main research interests include sensor sensitivity mechanism.



郑德智(通信作者), 分别在 2000 年和 2006 年于北京航空航天大学获得学士学位和博士学位, 现为北京航空航天大学研究员、博士生导师, 主要研究方向为传感器敏感机理、脑机接口、信号检测和处理。

E-mail: zhengdezhi@buaa.edu.cn

Zheng Dezhi (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Beihang University in 2000 and 2006, respectively. He is currently a professor at Beihang University. His main research interests include sensor sensitivity mechanism, brain-computer interface, signal detection and processing.



胡纯, 2009 年于中国地质大学(武汉)获得学士学位, 2015 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京理工大学副研究员, 主要研究方向为先进传感与智能仪器。

E-mail: huchun198@163.com

Hu Chun received his B. Sc. degree from China University of Geosciences in 2009, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2015. He is currently an associate researcher at Beijing Institute of Technology. His main research interests include advanced sensing and intelligent instruments.



樊尚春, 1984、1986、1990 年分别于北京航空航天大学获得工学学士、硕士和博士学位, 现为北京航空航天大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为微结构传感器及系统、谐振式传感器、智能化测试技术。

E-mail: fsc@buaa.edu.cn

Fan Shangchun (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Beihang University in 1984, 1986 and 1990, respectively. He is currently a professor at Beihang University. His main research interests include resonator sensor, advanced sensing and intelligent instruments.