



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2022.11.27.01

文章编号: 1674-5086(2025)03-0170-09

中图分类号: TE832.2; TH814

文献标志码: A

## 基于流固耦合的科氏流量计数值及实验研究

奚占东<sup>1</sup>, 邓勇<sup>1</sup>, 熊明<sup>1</sup>, 赵怀刚<sup>1</sup>, 周兆明<sup>2\*</sup>

1. 国家管网集团西南管道有限责任公司, 四川 成都 610218; 2. 西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500

**摘要:** 针对管道科里奥利质量流量计(Coriolis Mass Flowmeter, CMF)计量超差问题, 开展了流固耦合状态下科里奥利流量计的振动特性研究。以西南管道典型CMF300科氏质量流量计为例, 采用ANSYS流固耦合有限元技术, 对科氏流量计进行了流固耦合模态振动分析和实验研究。结果表明: 1) 计算得到第二阶模态的固有频率为科氏质量流量计的激振频率, 第六阶模态的固有频率为科氏力频率; 2) 有限元模态分析的激振频率为80.043 Hz, 模态测试实验的激振频率为83.820 Hz; 3) 实验对CMF300的激励频率和驱动频率进行了测试, 其结果与有限元计算模型相吻合; 4) 建立的数值模型及模态测试方法可以获取每个场站不同科氏质量流量计实际固有频率。研究结果为消除外界干扰对流量计的计量误差提供了理论依据。

**关键词:** 科里奥利; 质量流量计; 模态分析; 数值计算; 实验研究

## Numerical and Experimental Study of Coriolis Flowmeter Based on Fluid-structure Interaction

XI Zhandong<sup>1</sup>, DENG Yong<sup>1</sup>, XIONG Ming<sup>1</sup>, ZHAO Huaigang<sup>1</sup>, ZHOU Zhaoming<sup>2\*</sup>

1. Southwest Pipeline Company, PipeChina, Chengdu, Sichuan 610218, China

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

**Abstract:** The vibration characteristics of the Coriolis mass flowmeter in the fluid-structure coupling state were studied in order to solve the metering error problem. Taking a typical CMF300 Coriolis mass flowmeter in a pipeline station as an example, the fluid-structure coupling modal vibration analysis and experimental study of Coriolis flowmeter are carried out by using ANSYS finite element method. The results are as follows: 1) the calculated natural frequency of the second order mode is the excited frequency of Coriolis mass flowmeter, and the natural frequency of the sixth order mode is the Coriolis force frequency; 2) the excitation frequency of finite element modal analysis is 80.043 Hz, and that of experimental test is 83.820 Hz; 3) the excitation frequency and driving frequency of CMF300 are tested, and the experimental results are in good agreement with the finite element model; 4) the numerical model and modal test method can obtain the actual natural frequencies of different Coriolis mass flowmeters at each station. The research conclusion provides a theoretical basis for eliminating the external interference to the metering error of the flowmeter.

**Keywords:** Coriolis; mass flowmeter; modal analysis; numerical calculation; experiment study

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20250520.0755.002.html>

奚占东, 邓勇, 熊明, 等. 基于流固耦合的科氏流量计数值及实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 170-178.

XI Zhandong, DENG Yong, XIONG Ming, et al. Numerical and Experimental Study of Coriolis Flowmeter Based on Fluid-structure Interaction[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2025, 47(3): 170-178.

\* 收稿日期: 2022-11-27 网络出版时间: 2025-05-20

通信作者: 周兆明, E-mail: zhouzhaom@126.com

## 引言

科里奥利质量流量计(简称科氏质量流量计)具有高精度、宽量程、低压损、长寿命等优点,被广泛地应用于石油、化工等领域。某管道在3年检定中发现,51台科氏质量流量计(共59台)存在计量超差问题,进而引起计量纠纷。质量流量计是谐振式仪表,外界振动频率会影响质量流量计的计量准确性。科氏质量流量计的驱动频率在出厂时已设定,但由于现场安装条件的差异,导致流量计的二阶驱动频率会发生变化,造成流量计计量结果产生误差。

目前,国内外对于科氏质量流量计的研究以结构和动态特性分析为主。仝猛等<sup>[1]</sup>采用数值方法对单值科氏质量流量计简化模型进行模态分析,结果表明模态分频受边界条件影响较大。Zhao等<sup>[2]</sup>通过简化有限元模型和相似结构模态测试实验,研究了小口径和小尺寸双U型科氏质量流量计的振动特性。Wang等<sup>[3]</sup>通过实验研究了科氏质量流量传感器的振动特性。Yaushev等<sup>[4]</sup>建立了 $\Omega$ 型科氏质量流量计有限元模型,同时进行了模态分析,通过流量计模态试验,验证了有限元计算结果。李栋等<sup>[5]</sup>利用ANSYS对单直管型科氏质量流量计进行有限元分析,研究了单直管型流量计两拾振器对称安装的必要性。张军等<sup>[6]</sup>采用声学和阻抗实验对模态分析结果进行了验证。结果表明,当扫频信号接近所加共振信号时,会出现明显的共振现象。马亚朋等<sup>[7]</sup>对小口径 $\Omega$ 型科氏质量流量计进行了模态和流固耦合振动分析,研究表明,当气泡含量为1%时测量相对稳定,当气泡含量大于5%时测量稳定性变差。王微微等<sup>[8]</sup>基于Hilbert-Huang变换对流量波动数据进行了经验模态分解,分析了固有模态函数的能量分布。Clark等<sup>[9]</sup>对多种型号的流量计进行了外部振动频率的影响实验,结果表明,外界振动频率等于驱动频率时误差与振动强度成正比。Cheesewright等<sup>[10]</sup>研究了外部振动频率对流量计测量结果的影响,结果表明,当外界机械振动的频率与驱动频率相差很大时,外界机械振动对科里奥利流量计的计量性能有一定的影响。Ridder等<sup>[11]</sup>对外部振动下的简化质量流量计测量误差影响进行了定量研究,并提出外部振动干扰特征,计算了该干扰下的均

方根(Root Mean Square, RMS)流量误差。

目前,国内外学者主要针对流量计的简化模型和小型相似模型开展了部分实验,针对实际安装工况下的固有频率测试以及对大口径双U型流量管的法兰等结构的分析较少。本文通过剖析真实全尺寸双U型科氏质量流量计,建立有限元数值模型,通过数值和实验研究了双U型科氏质量流量计的振动特性,研究结论可为科氏质量流量计的现场使用提供指导。

## 1 流固耦合模态分析方法

每阶模态参数可以通过理论计算或实验分析方法求取,每一阶模态都有其特定的固有频率、阻尼比和模态振型<sup>[12]</sup>。动态特性依赖于结构的质量、刚度和阻尼分布,并确定在承担工作载荷时的结构振动行为。线性结构系统的每一次变形均可以表示为结构模式的线性组合。本文开展科氏质量流量计的模态分析需要考虑流量计内的流体,开展流固耦合模态分析。由固有频率理论分析结果可知,科氏质量流量计的固有频率与其材料属性、质量等有关。因此,当流量计内有流体时,流量计的固有频率会随着流体质量的变化而变化<sup>[13]</sup>。进行流固耦合模态分析时,首先进行流体力学计算,计算出流体对流量计振动管内壁产生的压力,然后将流体产生的压力加载进行预应力下的模态分析。

流固耦合作为数值模拟计算方法中的重要组成部分,主要针对流体力学与固体力学的相互作用进行研究分析,同时流固耦合也属于固体和流体相结合的多物理场研究<sup>[14]</sup>。在进行科氏质量流量计流固耦合分析时,振动管与管内流体的相互作用主要由流体流动方程、固体控制方程及流固耦合方程决定,3个理论方程如下所示。

### 1.1 流体流动方程

待测流体在科氏质量流量计流道内流动时,其理论方程主要遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律等<sup>[15]</sup>。3种基本守恒定律的控制方程为:

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho_f$ —密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$t$ —时间, s;

$\mathbf{v}$ —流体速度矢量, m/s。

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho_f \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla(\rho_f \mathbf{v} \mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}_f) = \mathbf{f}_f \quad (2)$$

式中:

$\mathbf{f}_f$ —体积力矢量, m/s<sup>2</sup>;

$\boldsymbol{\tau}_f$ —剪切力张量, N/m<sup>2</sup>。

其中, 剪切力张量  $\boldsymbol{\tau}_f$  可表示为

$$\frac{\partial(\rho_f h_{\text{tot}})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho_f \mathbf{v} h_{\text{tot}}) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(\mathbf{v} t) + \nu \rho_f \mathbf{f}_f + S_E \quad (4)$$

式中:

$h_{\text{tot}}$ —流体总焓, kJ/kg;

$\lambda$ —流体导热系数, W/(m·K);

$T$ —温度, °C;

$S_E$ —能量源项, W/m<sup>3</sup>。

## 1.2 固体控制方程

由牛顿第二定律可知, 结构受力后会产生加速度, 由此推导出结构的守恒方程

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s \quad (5)$$

式中:

$\rho_s$ —固体密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\ddot{\mathbf{d}}_s$ —固体域当地加速度矢量, m/s<sup>2</sup>;

$\boldsymbol{\sigma}_s$ —柯西应力张量, N/m<sup>2</sup>;

$\mathbf{f}_s$ —固体中的体积力矢量, N/m<sup>3</sup>。

由于固体结构内部存在一定的能量传递, 当结构内部存在一定的温差时, 固体结构会发生机械变形, 热变形项如式(6)所示

$$\mathbf{f}_T = \alpha_T \nabla T \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{f}_T$ —热变形项;

$\alpha_T$ —热膨胀系数, 1/°C。

## 1.3 流固耦合方程

科氏质量流量计进行耦合分析时, 需要将科氏质量流量计流道内壁设置为流固耦合交界面。在流固耦合交界面会发生能量的相互作用, 因此, 固体结构与流体的应力、位移、热流量和温度等参数的能量守恒, 即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}_f \mathbf{n}_f = \boldsymbol{\tau}_s \mathbf{n}_s \\ d_f = d_s \\ q_f = q_s \\ T_f = T_s \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{n}_f$ —流体在流固交界面的单位外法向量, 无因次;

$$\boldsymbol{\tau}_f = (-p + \mu \Delta \mathbf{v}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{e} \quad (3)$$

式中:

$p$ —流体压力, N/m<sup>2</sup>;

$\mu$ —动力黏度, (N·s)/m<sup>2</sup>;

$\mathbf{I}$ —单位张量, 无因次;

$\mathbf{e}$ —速度应力张量,  $\mathbf{e} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)$ , N/m<sup>2</sup>。

3) 能量守恒方程

$\mathbf{n}_s$ —固体在流固交界面的单位外法向量, 无因次;

$\boldsymbol{\tau}_s$ —固体应力, Pa;

$d_f$ —流体位移, m;

$d_s$ —固体位移, m;

$q_f$ —流体热流量, W;

$q_s$ —固体热流量, W;

$T_f$ —流体温度, °C;

$T_s$ —固体温度, °C。

## 2 理论计算分析

### 2.1 双 U 型科氏质量流量计数值模型的建立

目前, 应用于高精度质量测量的大多为双 U 型科氏质量流量计, 因此, 以大口径双 U 型科氏质量流量计作为研究对象。本文对科氏质量流量计 CMF300 型号质量流量计实体结构进行切割, 内部结构如图 1a 所示。由于科氏质量流量计的内部包含测量管、检测线圈、驱动线圈和配重块等多个结构部件, 配重块和传感器均已达到振动平衡, 同时数值模拟分析的结构越复杂, 对计算机的性能要求越高。

因此, 文章主要针对流量计测量管、流量计两端法兰、外部支撑管及内部支撑板等主要结构, 流量计尺寸如图 1b 所示。测量管和支撑板的材质为 316 L 不锈钢, 其密度为 8 027 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量为 208 GPa, 泊松比为 0.3。

根据科氏质量流量计的结构特点, 用有限元软件 ANSYS 建立全尺寸三维数值模型, 流量计模型如图 2a 所示。为减小计算难度, 简化流量计模型, 进行网格划分, 通过网格敏感性测试, 计算结果误差小于 0.5%, 满足计算要求。网格划分结果见图 2b。

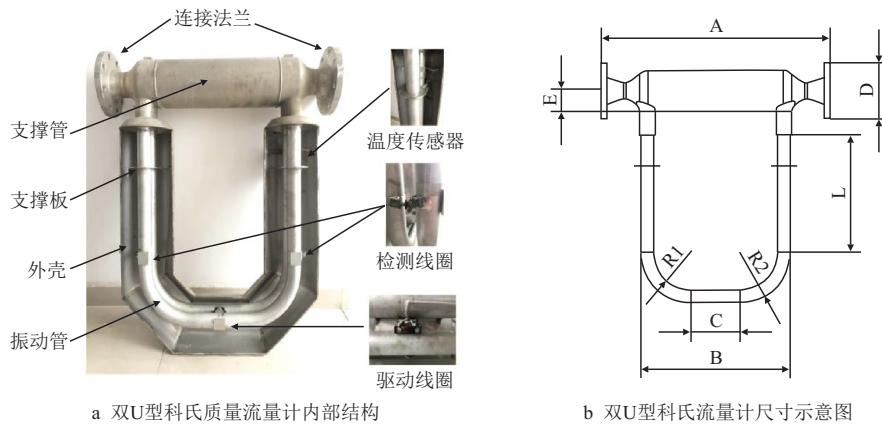


图 1 科氏质量流量计结构图  
Fig. 1 Structure diagram of Coriolis flowmeter

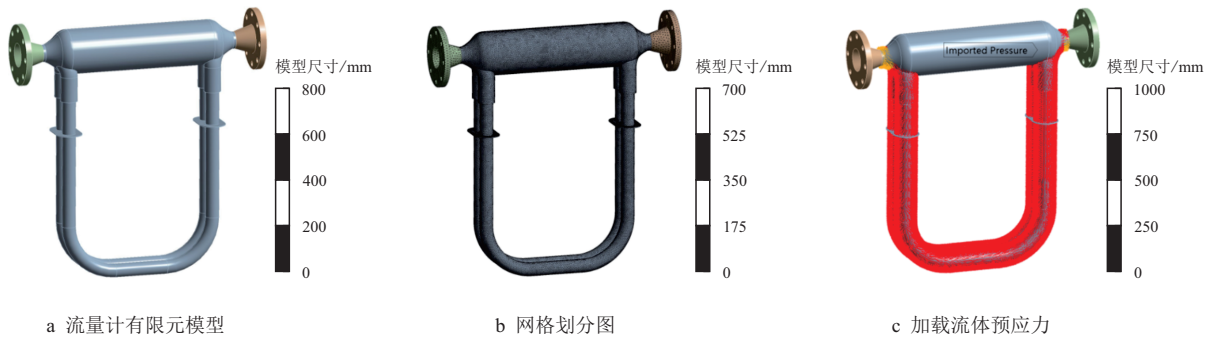


图 2 流量计数值模型  
Fig. 2 Flow meter simulation calculation model

2.2 模态分析

由固有频率理论分析结果可知, 科氏质量流量计的固有频率与其材料属性、质量等有关。因此, 当流量计内有流体时, 流量计的固有频率会随着流体质量的变化而变化。进行流固耦合模态分析时, 首先进行流体力学计算, 计算出流体对流量计测量管内壁产生的压力, 然后将流体产生的压力加载进行预应力下的模态分析。

计算流固耦合模态时, 需要考虑流体的影响, 将测量管内的介质设置为液态水, 密度为  $998.2 \text{ kg/m}^3$ 。实验工况设置为常压静止状态, 其中常压即是标准大气压 ( $101\ 325 \text{ Pa}$ )。

首先, 计算测量管内介质对测量管内壁产生的压力, 再将压力以预应力的形式加载到流量计测量管内壁, 预应力加载如图 2c 所示, 然后在流量计两端法兰面施加固定约束即可进行计算, 流固耦合模态分析的前六阶振型如图 3 所示, 每一阶模态对应的固有频率如表 1 所示。

观察流固耦合模态分析的各阶固有频率, 当

科氏质量流量计流道内充满流体时, 流量计的固有频率比无流体时有所减少, 该仿真结果与理论相符合。一般选择流量管的张开闭合形态频率作为激振频率, 这样振幅大, 有利于激振。也有利用高阶模态的高次谐波, 有利于避开工业现场强的低频干扰振动和噪声。

由表 1 可以看出, 各阶固有频率随阶数依次增大。特别的, 观察流固耦合模态分析结果的固有振型。在第二阶模态下, 科氏质量流量计双管的振型表现为张开闭合的振动。在第六阶模态下, 科氏质量流量计双管的振型表现为扭转振动。由此可知, 第二阶模态的固有频率为科氏质量流量计的激振频率, 第六阶模态的固有频率为科氏质量流量计的科氏力频率, 激振频率约为科氏力频率的 0.4 倍, 与该流量计生产厂家提供的参数一致。质量流量计工作以第二阶模态的固有频率为科氏质量流量计的激振频率。结合科氏质量流量计的实际应用工况, 流固耦合模态分析更贴近实际, 计算结果更符合实际情况。



图3 流固耦合模态分析前六阶模态振型图

Fig. 3 Vibration mode diagram of the first six modes of fluid structure coupling modal analysis

表1 流固耦合模态分析前六阶固有频率值  
Tab. 1 The first six natural frequencies of fluid structure coupling modal analysis

阶数	固有频率/Hz	阶数	固有频率/Hz
一阶	49.734	四阶	131.698
二阶	80.043	五阶	145.084
三阶	95.910	六阶	197.523

### 3 固有振动特性测试实验

CMF300 的激励频率小于 100 Hz, 为了验证数值模型的可靠性, 采用美国 LORD MicroStrain 振动测试设备对科氏质量流量计进行固有振动特性测试实验。一方面通过振动测试设备对科氏质量流量计进行模态测试<sup>[16]</sup>, 采用模态软件分析振动信号获得模态频率; 另一方面对科氏质量流量计的驱动频率进行测试, 从而双重验证模态分析数值模拟计算结果的可靠性。

#### 3.1 模态测试

模态测试结果的验证对于设计有限元模型具有重要意义<sup>[17]</sup>, 采用振动测试设备和检测设备配套软件。该系统由加速度传感器、无线传感器接口节点、数据采集网关和同步数据通信协议的全功能用户软件平台组成。节点和网关之间的双向无线通信可以在 2 km 之外收集和配置传感器数据, 振动测试设备的采样频率最高可支持 512 Hz, 可以

获得流量计测量管的前六阶振动响应信号。将科氏质量流量计放置在实验台上, 将测量管内充满介质, 介质为液体水。边界条件为弹性支撑, 在一个测量管上放置 6 个加速度传感器, 如图4所示。基于模态分析的基本原理<sup>[18]</sup>, 对测量管施加连续激励, 选择流量计激励线圈的位置作为激励位置, 同时采集振动响应信号。振动测试设备测量每个测试点的响应信号 3 次, 通过数据采集网关将采集的振动信号发送到 PC 端。

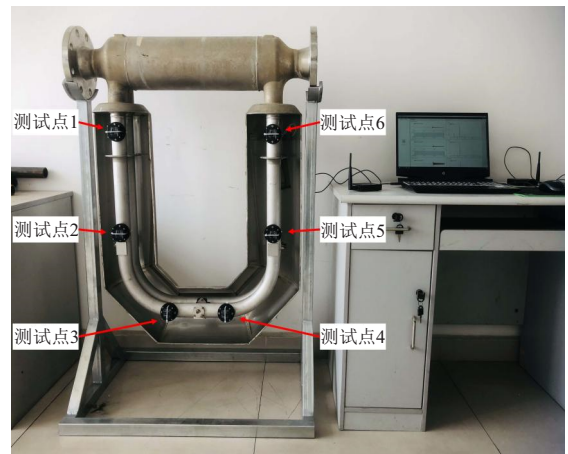


图4 模态测试实验台

Fig. 4 Modal test bench

将相应测试点的振动信号转换为相应的加速度振动信号, 为了获得固有频率振动下响应的模态形状, 采集了一系列连续加速度振动信号并导入 MATLAB 进行快速傅里叶变换。图5为6个测试点采样

信号傅里叶变换后的频率响应图<sup>[19]</sup>。观察各测试点的频率响应图可知, 振动加速度信号的频率基本在 84.000 Hz 附近。将采集到的加速度数据导入模态测试软件, 计算得到的固有二阶频率为 83.820 Hz, 这与上文中数值模拟分析得到的激励频率 80.043 Hz 非

常接近。由于数值模拟分析模型与流量计的实际结构在材料性能、阻尼特性、约束条件等方面存在客观差异, 同时为了便于计算, 数值模拟分析模型省略了测量管外壳、激励线圈、检测线圈的质量, 导致数值模拟分析和测量结果略有差异。

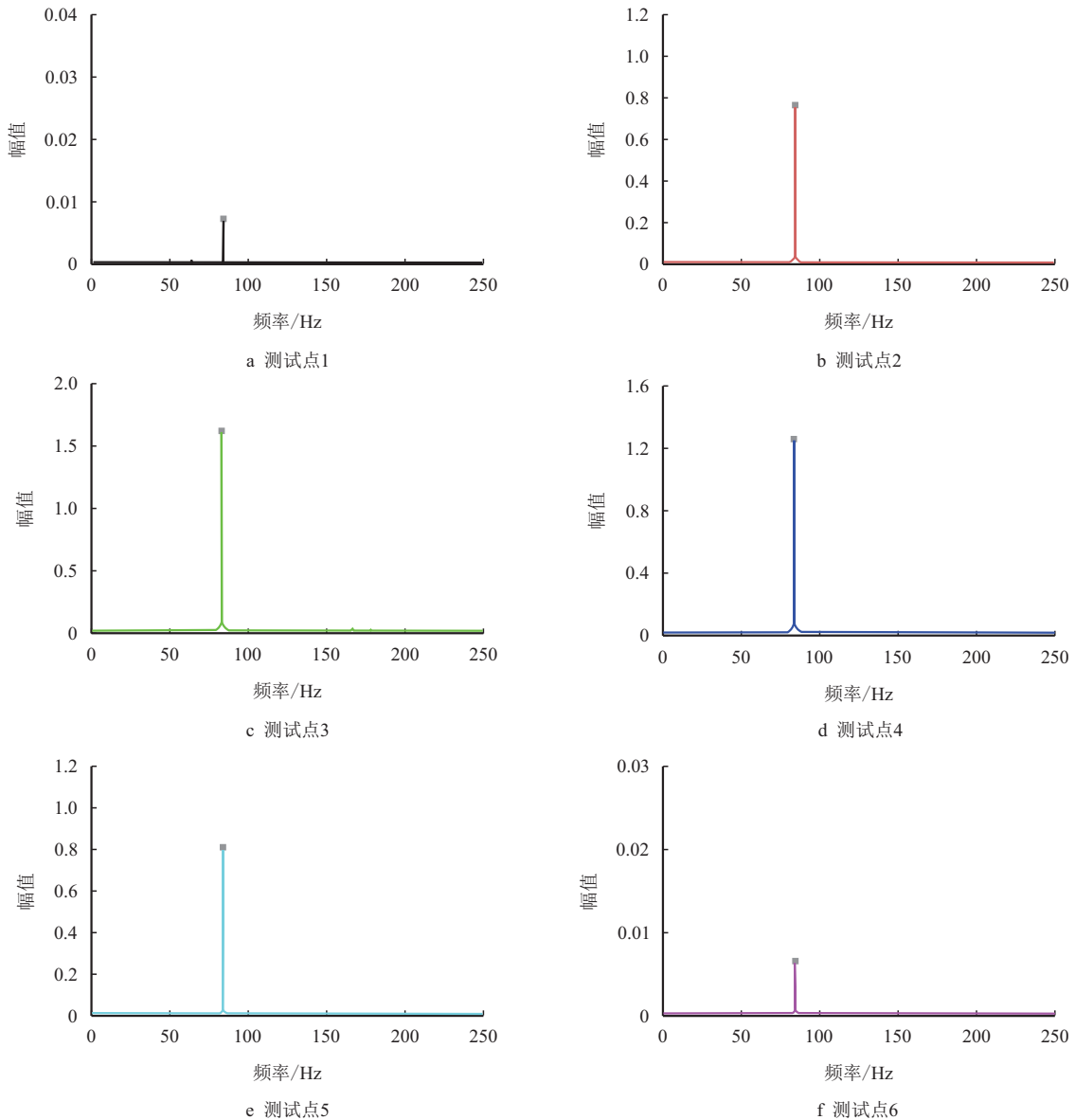


图 5 测试点的频率响应图  
Fig. 5 Frequency response diagram of test point

### 3.2 驱动频率测试

根据上文的分析结论可知, 科氏质量流量计二阶模态的固有振型是张开闭合的振动<sup>[20]</sup>, 为科氏质量流量计的激振频率。流量计的二次仪表为 RFT9739 现场安装型, 将流量计一次仪表和二次仪表的信号线相连接, 同时给变送器 220 V 供电后, 测量管上的驱动线圈开始工作。

实验平台如图 6 所示, 将加速度传感器分别固定在测量管和流量计过程法兰上<sup>[21]</sup>, 对测试点的振动信号进行采集, 两测试点的振动加速度信号如图 7 所示, 从图中可以观察到测试点 1 的振动加速度明显大于测试点 2。然后对振动信号进行傅里叶变换, 分析科氏质量流量计工作状态下的振动频率, 振动信号的频率响应如图 8 所示。

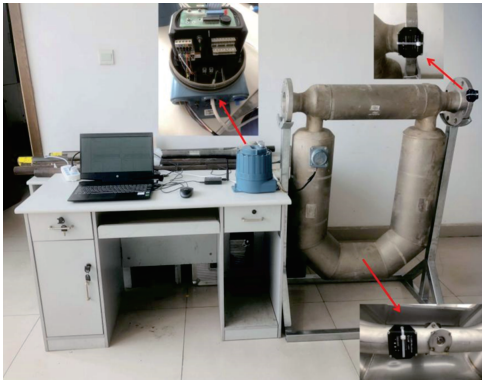
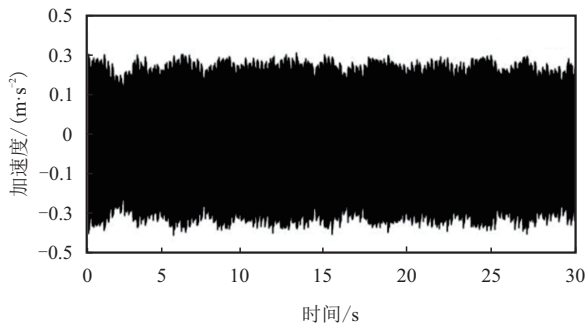
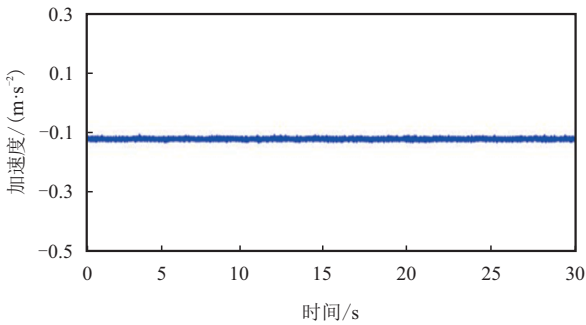


图 6 驱动频率测试实验台  
Fig. 6 Driving frequency test bench



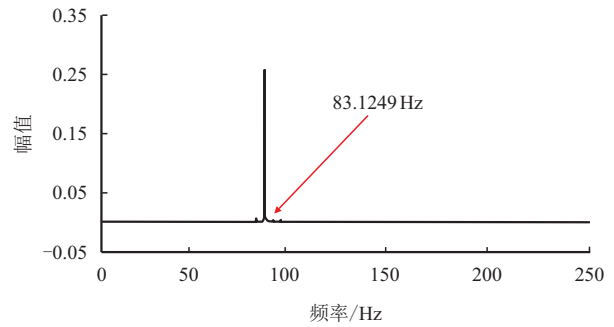
a 测试点1



b 测试点2

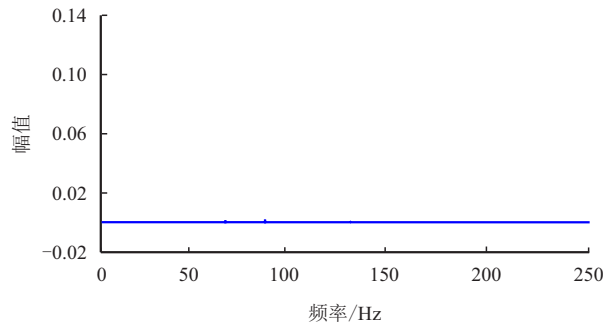
图 7 测试点的振动加速度曲线  
Fig. 7 Vibration acceleration curve of test point

从图 8 可以看出,测量管上检测的频率,即驱动频率为 83.000 Hz 左右,与数值模拟计算的二阶模态固有频率 80.043 Hz 非常接近,再次验证了数值模型及模态分析结果的可靠性<sup>[22]</sup>。同时,也可以观察到测试点 2 的频率响应幅值非常小且频率远小于激励频率。本文所建立的有限元模型根据测试的振动频率值,进行修正,通过修改质量管的材料参数获得与实验结果一致的有限元模型,根据这种模型及测试方法可以分析现场每台流量计的固有二阶频率,为判断干扰频率提供基础数据。



频率/Hz

a 测试点1



频率/Hz

b 测试点2

图 8 测试点的频率响应图

Fig. 8 Frequency response diagram of test point

## 4 结 论

1) 基于双向流固耦合模型,采用 ANSYS 软件得到第二阶模态的固有频率为科氏质量流量计的激振频率,第六阶模态的固有频率为科氏质量流量计的科氏力频率。

2) 采用振动测试设备和模态分析软件进行模态测试实验,有限元模态分析的激振频率为 80.043 Hz,模态测试实验的激振频率为 83.820 Hz。

3) 实验对 CMF300 的激励频率和驱动频率进行了测试,其结果与有限元计算模型相吻合。

4) 建立的数值模型及模态测试方法可以获取每个场站不同科氏质量流量计实际固有二阶频率,作为判断外界振动干扰频率值,可为消除振动干扰频率提供依据。

## 参考文献

[1] 全猛,任萍,陈明,等.科里奥利质量流量计动态特性的研究[J].自动化仪表,2003,24(11):6-10. doi:10.3969/j.issn.1000-0380.2003.11.003

- TONG Meng, REN Ping, CHEN Ming, et al. Study on dynamic characteristics of Coriolis mass flowmeter[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2003, 24(11): 6–10. doi: 10.3969/j.issn.1000-0380.2003.11.003
- [2] ZHAO Juan, LI Zhongxiang, ZHENG Dezhi, et al. Modal simulation and experiment analysis of Coriolis mass flowmeter[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 23: 9013–9016. doi: 10.1049/joe.2018.9169
- [3] WANG Shuai, ZHENG Dezhi, FAN Shangchun. Analysis on vibration characteristics of Coriolis mass flow sensor[C]. Beijing: 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, IEEE, 2009. doi: 10.1109/ICEMI.2009.5274441
- [4] YAUSHEV A A, TARANENKO P A, LOGINOVSKIY V A. Study of the oscillation modes of a Coriolis flowmeter using a parametric finite element model, verified by the results of modal testing[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 150: 336–340. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.027
- [5] 李栋, 宋方臻, 刘保双. 单直管型科里奥利质量流量计动力学分析[J]. *中国仪器仪表*, 2014(10): 52–56. doi: 10.3969/j.issn.1005-2852.2014.10.011
- LI Dong, SONG Fangzhen, LIU Baoshuang. Dynamics analysis of single straight tube Coriolis mass flowmeter[J]. *China Instrumentation*, 2014(10): 52–56. doi: 10.3969/j.issn.1005-2852.2014.10.011
- [6] 张军, 罗德昌, 丁鹏飞. 基于 EMI 技术的质量流量计 U 型管动态测试研究[J]. *机电工程*, 2021, 38(3): 293–299. doi: 10.3969/j.issn.1001-4551.2021.03.004
- ZHANG Jun, LUO Dechang, DING Pengfei. Dynamic testing of mass flowmeter U-tube based on EMI technology[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2021, 38(3): 293–299. doi: 10.3969/j.issn.1001-4551.2021.03.004
- [7] 马亚朋, 石础, 罗宇, 等. 科氏流量计气-液两相流的数值模拟[J]. *计量学报*, 2018, 39(5): 663–667. doi: 10.3969/j.issn.1000-1158.2018.05.12
- MA Yapeng, SHI Chu, LUO Yu, et al. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in Coriolis flowmeter[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(5): 663–667. doi: 10.3969/j.issn.1000-1158.2018.05.12
- [8] 王微微, 孔祥翠, 陈静静, 等. 基于 HHT 气液两相瞬时流量特征分析[J]. *测井技术*, 2015, 39(2): 137–141. doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2015.02.002
- WANG Weiwei, KONG Xiangcui, CHEN Jingjing, et al. Characteristics analysis of gas-liquid two-phase instantaneous flowrate based on HHT[J]. *Well Logging Technology*, 2015, 39(2): 137–141. doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2015.02.002
- [9] CLARK C, CHEESEWRIGHT R. The influence upon Coriolis mass flow meters of external vibrations at selected frequencies[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2003, 14(1–2): 33–42. doi: 10.1016/S0955-5986(02)00065-1
- [10] CHEESEWRIGHT R, BELHADJ A, CLARK C. Effect of mechanical vibrations on Coriolis mass flow meters[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 2003, 125(1): 103–113. doi: 10.1115/1.1539098
- [11] RIDDER L, HAKVOORT W B J, DIJK J V, et al. Quantification of the influence of external vibrations on the measurement error of a Coriolis mass-flow meter[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2014, 40: 39–49. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.005
- [12] 刘颖, 罗宇, 杉时夫, 等. 基于流固耦合计算的科里奥利质量流量计计算机辅助设计[J]. *船舶工程*, 2013, 35(S1): 140–143, 167. doi: 10.13788/j.cnki.cbgc.2013-s1.009
- LIU Ying, LUO Yu, SHAN Shifu, et al. Computer aided design of Coriolis mass flowmeter based on fluid solid coupling calculation[J]. *Ship Engineering*, 2013, 35(S1): 140–143, 167. doi: 10.13788/j.cnki.cbgc.2013.s1.009
- [13] LI Zhongxiang, HU Chun, ZHENG Dezhi, et al. Synchronization theory-based analysis of coupled vibrations of dual-tube Coriolis mass flowmeters[J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 6340. doi: 10.3390/s20216340
- [14] HUANG Tianxing, REN Jianxin, ZHANG Pei. Fluid-structure interaction analysis of Coriolis mass flowmeter[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2020, 34(14–16): 2040119. doi: 10.1142/S0217979220401190
- [15] YANG Hai, ZHANG Lizao, LI Li, et al. Error analysis and accuracy calibration method of U-tube Coriolis mass flowmeter under pulsating flow[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1–13. doi: 10.1109/TIM.2021.3126366
- [16] 张莹, 赵歌, 王太勇. 联合调参随机共振在流量计测试中的应用[J]. *资源节约与环保*, 2014(3): 13, 22.
- ZHANG Ying, ZHAO Ge, WANG Taiyong. Application of jointly tuned parametric stochastic resonance in flowmeter testing[J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2014(3): 13, 22.
- [17] KOLHE V A, EDLABADKAR R L. Performance evaluation of Coriolis mass flow meter in laminar flow regime[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 77: 101837. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101837
- [18] 吴舒琴, 厉劲风, 方凯, 等. 液氢科氏质量流量计

模态分析[J]. 低温与超导, 2022, 50(6): 91–96. doi: 10.16711/j.1001-7100.2022.06.014

WU Shuqin, LI Jinfeng, FANG Kai, et al. Modal analysis of liquid hydrogen Coriolis mass flowmeter[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2022, 50(6): 91–96. doi: 10.16711/j.1001-7100.2022.06.014

- [19] 徐媛, 代显智. 科氏质量流量计信号处理方法探究[J]. 数字通信世界, 2024(2): 17–19. doi: 10.3969/J.ISSN.1672-7274.2024.02.006

XU Yuan, DAI Xianzhi. Exploration of signal processing methods for Coriolis mass flowmeter[J]. Digital Communication World, 2024(2): 17–19. doi: 10.3969/J.ISSN-1672-7274.2024.02.006

- [20] 刘洁, 卢佳豪, 王文山, 等. 关于科氏质量流量计的动力学模型分析[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 116–120. doi: 10.13876/J.cnki.ydnse.220075

LIU Jie, LU Jiahao, WANG Wenshan, et al. Dynamic model analysis of Coriolis mass flowmeter[J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2023, 42(1): 116–120. doi: 10.13876/J.cnki.ydnse.220075

- [21] 赵宏伟. 法兰锻件自由锻工艺过程的控制要点[J]. 机械工程与自动化, 2018(5): 208, 210. doi: 10.3969/j.issn.1672-6413.2018.05.082

ZHAO Hongwei. Process control points for free forging of flange parts[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2018(5): 208, 210. doi: 10.3969/j.issn.1672-6413.2018.05.082

- [22] 王鹏, 梁晓瑜, 禹静, 等. 槽道式流量计节流件结构优化的数值模拟研究[J]. 中国计量大学学报, 2023, 34(4): 549–555, 598. doi: 10.3969/j.issn.2096-2835.2023.04.008

WANG Peng, LIANG Xiaoyu, YU Jing, et al. A numerical simulation study on the structure optimization of the throttling element of channel flowmeters[J]. Journal of China Jiliang University, 2023, 34(4): 549–555, 598. doi: 10.3969/j.issn.2096-2835.2023.04.008

## 作者简介



奚占东, 1973 年生, 男, 满族, 四川成都人, 高级工程师, 硕士, 主要从事油气储运方面的研究。E-mail: xizhandong@126.com



邓勇, 1976 年生, 男, 汉族, 四川乐至人, 高级经济师, 主要从事油气储运工作。E-mail: 363195022@qq.com



熊明, 1984 年生, 男, 汉族, 高级工程师, 硕士, 主要从事油气储运方面工作。E-mail: xiongm-ing2008@163.com



赵怀刚, 1968 年生, 男, 汉族, 贵州贵阳人, 高级经济师, 主要从事油气储运方面的研究。E-mail: tlmtyzjzx@163.com



周兆明, 1983 年生, 男, 汉族, 河南南阳人, 副教授, 博士, 主要从事油气设施健康安全监测及检测的研究。E-mail: zhouzhaom@126.com

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>