

文章编号 : 1009 - 38X(2000)03 - 0299 - 03

直管科里奥利质量流量计理论设计及灵敏度分析^{*}

汪克文¹, 朱超平², 周一届¹

(1. 无锡轻工大学机械工程系, 江苏无锡 214036 ; 2. 常州橡胶塑料机械总厂, 江苏常州 213000)

摘 要 :建立了给定条件下直管型科里奥利质量流量计的力学模型, 给出了灵敏度系数的计算方法, 用以指导传感系统的设计及后续电路的处理, 所得结果得到了具体计算的验证.

关键词 :质量流量计 科里奥利力 灵敏度

中图分类号 :TP302 **文献标识码 :**A

Design Theory and Sensitive Character Analysis of the Straight Tube Coriolis Mass Flowmeter

WANG Ke-wen¹, ZHU Chao-ping², ZHOU Yi-jie¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Wuxi University of Light Industry, Wuxi 214036 ; 2. Changzhou Rubber Plastic Machinery General Works, Changzhou 213000)

Abstract : This paper presents the mechanical model of the straight tube coriolis mass flowmeter , and the sensitive character of the mass flowmeter is analysed under the condition of omitting some factors , which provides the basis of design for sensor system and succeeding signal processing circuits , the results obtained have been verified by specific calculation.

Key words : mass flowmeter ; coriolis ; sensitivity

随着科技迅猛发展, 准确的流体介质的计量已广泛应用于货物交易、产品质量控制和内部结算等方面. 科氏力流量计(CMF)以其独特的优点, 成为发展最为迅速的流量测量仪表, 在工业控制过程中得到了广泛的应用, 它将成为 21 世纪最主要的流量测量手段之一. 其优点体现在以下几个方面:

- (1) 实现了真正高精度的直接流量测量;
 - (2) 对流速分布不敏感, 且被测介质广泛;
 - (3) 实现了多参数测量, 在测质量流量的同时可获得密度、体积流量参数;
 - (4) 无可动部件, 管内无障碍物, 便于清洗.
- 目前工业应用中的 CMF 振管有各种类型, 从

简化结构、缩小尺寸角度考虑, 直管、短管将是其发展方向, 但信号处理较别的形式困难.

作者在忽略一些次要因素的前提下, 经适当简化, 建立了直管 CMF 的力学模型, 并推导了灵敏度计算的有关公式, 计算结果得到了实例验证.

1 工作原理

CMF 是利用流体的科里奥利加速度所产生的力来实现流体测量的. 其一次仪表主要包括振动管、激振器和传感器. 如图 1 所示.

在一根两端固定的管子中间, 给予一激振力, 在一平面上产生谐振. 在没有流体的情况下, 对以

^{*} 收稿日期 : 1999 - 05 - 03 修订日期 : 2000 - 03 - 05.
作者简介 : 汪克文(1974 年 12 月生), 男, 安徽宁国人, 工学硕士.

中点为基准的对称点来说,它们是同向振荡.在有流体流过时,由于科氏力的作用,管子前半段振荡受阻尼,振荡角速度减少,而后半段振荡角速度增大.这样,两对称点就不再是同相振荡,而是有一相位差.这个相位差与要测定的质量流量成正比.

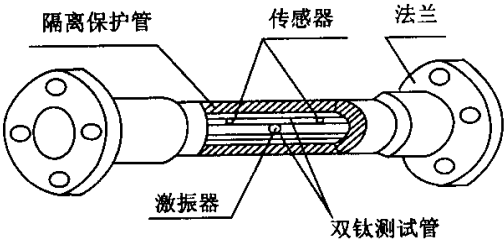


图 1 CMF 结构图
Fig.1 Structure of CMF

2 力学模型建立及灵敏度分析

如图 2 所示,振管 A 端、B 端与管道固接,简化为固定端.在中点 M 处受驱动力 F 作用,由于直管的实际振动形态较为复杂,故当振动频率低于其基频时,取其静挠度曲线为其变形曲线.两端固定连接

F 作用外,还受附加科氏力 F_K 作用.

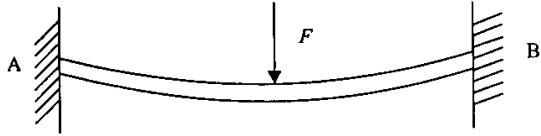


图 3 F 作用下直管变形曲线
Fig.3 Deformative curve of the straight tube under the force

设在 x 处有一流体质量微团 dm ,所受科氏力为:

$$dF_K = 2dm\omega_x v = 2dm \frac{dx}{dt} \cdot \omega_x = 2Q_M dx \cdot \omega_x \quad (4)$$

式中, $Q_M = \frac{dm}{dt}$ 为质量流量; $\omega_x = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\frac{dY}{dx})}{dt}$ 为 x 处的角速度.

当 $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$ 时,

$$\omega_x = (\frac{F_0 L}{8EI} \cdot x - \frac{F_0}{4EI} \cdot x^2) \omega \cos(\omega t + \phi).$$

$$\therefore q(x) = 2Q_M \omega \cos(\omega t + \phi) (\frac{F_0 L}{8EI} \cdot x - \frac{F_0}{4EI} \cdot x^2) \quad (5)$$

同理,可得 $\frac{L}{2} \leq x \leq L$ 时,

$$q'(x) = 2Q_M \omega \cos(\omega t + \phi) (\frac{F_0}{4EI} \cdot x^2 - \frac{3F_0 L}{8EI} \cdot x + \frac{F_0}{8EI} L^2) \quad (6)$$

设 $0 \leq x_0 \leq \frac{L}{2}$, 分别将 x_0 及 $L - x_0$ 代入(5)式和(6)式,可得

$$q(x_0) = -q'(L - x_0) \quad (7)$$

由于是对称结构,且载荷积度相反,在 $q(x)$ 作用下,对称点位移应大小相同,方向相反.如图 4 所示.设 x_0 及 $L - x_0$ 处位移分别为 Y_2, Y_2' , 则有:

$$Y_2(x) = -Y_2'(L - x) \quad (8)$$

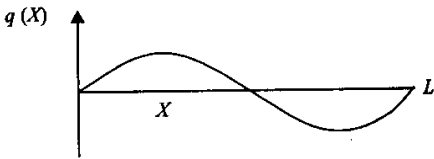


图 4 科氏力集度—位移关系图
Fig.4 The Connection about Coriolis and Displacement
由杆件弯曲变形理论,可知在载荷积度 $q(x)$ 作用下,振管弯曲位移

$$Y_2(x) = \frac{F_0}{24E^2 I^2} Q_M \omega (\frac{L}{20} \cdot x^5 - \frac{1}{30} \cdot x^6 - \frac{L^3}{60} \cdot x^3) \cos(\omega t + \phi) \quad (9)$$

当振管处于工作条件时,两对称点 x_0 及 $L -$

以上是管中无流体或流速 $v = 0$ 时的情形,当管中有流速 v 的流体流动时,管子除受到激振力

x_0 处位移分别为

$$Y(x_0) = Y_1(x_0) + Y_2(x_0),$$

$$Y(L - x_0) = Y_1'(L - x_0) + Y_2'(L - x_0) = Y_1(x_0) - Y_2(x_0).$$

将 $Y_1(x_0), Y_2(x_0)$ 代入, 并设

$$\left(\frac{F_0 L}{16EI} \cdot x^2 - \frac{F_0}{12EI} \cdot x^3\right) = A,$$

$\left(\frac{F_0}{24E^2 I^2} Q_M \omega \left(\frac{L}{20} \cdot x^5 - \frac{1}{30} \cdot x^6 - \frac{L^3}{60} \cdot x^3\right)\right) = B,$ 可得

$$Y(x_0) = A \sin(\omega t + \phi) + B \cos(\omega t + \phi) = \sqrt{A^2 + B^2} \sin(\omega t + \phi + \alpha) \tag{10}$$

$$Y(L - x_0) = A \sin(\omega t + \phi) - B \cos(\omega t + \phi) = \sqrt{A^2 + B^2} \sin(\omega t + \phi - \alpha) \tag{11}$$

式中, $\tan \alpha = \frac{B}{A} = \frac{2Q_M \omega}{EI} \left(\frac{\frac{L}{20} \cdot x^5 - \frac{1}{30} \cdot x^6 - \frac{L^3}{60} \cdot x^3}{3Lx^2 - 4x^3}\right),$

令括号中的分式为 $f(x)$, 得: $Q_M = \frac{EI}{2\omega f(x)} \cdot \tan \alpha.$
 $f(x)$ 的值仅与检测点的位置有关, 当检测点一定时, $\frac{EI}{2\omega f(x)}$ 为一常数, 设为 $C.$

$$\therefore Q_M = C \tan \frac{\omega \Delta t}{2}.$$

当 α 很小时, 可认为 $\tan \alpha = \tan \frac{\omega \Delta t}{2} = \frac{\omega \Delta t}{2}.$
此时, 灵敏度系数

$$K = \frac{|\Delta t|}{Q_M} = \frac{4}{EI} |f(x)| \tag{13}$$

对于检测点 $x_0, L - x_0$, 将 $f(x_0)$ 代入 (13), 得

$$K = \frac{4}{EI} |f(x)| = -\frac{3Lx_0^5 - 2x_0^6 - x_0^3 L^3}{60EI(3Lx_0^2 - 4x_0^3)} \tag{14}$$

参考文献

[1] SULTAN, HEMP J. Modelling of the coriolis mass flowmeter[J]. *Sound Vibration*, 1989, 132: 473~489
[2] 朱蕴璞. 科里奥利质量流量计灵敏度特性分析计算[J]. *南京理工大学学报*, 1997(6): 10.
[3] 郭会. 双直管科氏质量流量计传感器设计理论研究[J]. *仪表技术与传感器*, 1997(2): 7.

3 计算及检验

解剖 E+H 公司的直管科氏力流量计, 其有关参数为:

- 管长 $L = 0.24 \text{ m}$, 外径 $D = 12.7 \text{ mm}$,
- 管壁厚 $\Delta D = 1.32 \text{ mm}$;
- 扬氏模量 $E = 110 \text{ GPa}$;
- 振管材料密度 $\rho_s = 4.5 \text{ g/cm}^3$.

根据给定参数, 可知:

- 单位长度管子质量 $m_s = 1.124 \text{ g/cm}$;
- 转动惯量 $I = 453.48 \text{ mm}^4$;
- 若以水来标定, 取 $\rho_1 = 0.998 \text{ g/cm}^3$.

根据一维有阻尼受迫振动系统谐振频率计算公式, 可得:

$$\text{谐振频率 } f = 944.4 \text{ Hz}.$$

取检测点位置分别为 $x_0 = 5 \text{ cm}, 19 \text{ cm}$, 则代入灵敏度计算公式, 可得 $K = 15.77 \text{ }\mu\text{s}/(\text{kg/s})$.

由于本流量计范围为 $0 \sim 108 \text{ kg/min}$, 则产生的 Δt 范围为 $0 \sim 28.4 \text{ }\mu\text{s}$.

4 结 语

国内对于科氏力流量计的研究主要集中在 U 型管, 对直管研究较少, 国外的有关报道考虑因素较多, 计算烦琐, 而结果同本文的大致相同. 直管科氏力流量计灵敏度的推算属首次, 实际使用中, 此系数需标定, 该系数的计算为后续信号处理电路的设计奠定了基础.

(责任编辑 秦和平)