

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

刘颖¹, 罗宇¹, 杉时夫², 陆经纬³

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 东京计装株式会社, 日本东京; 3. 东京计装(上海)仪表有限公司, 上海 200233)

摘要: 科里奥利质量流量计(CMF)是一种海洋石油和天然气工业广泛应用的仪器。确立了一种运用有限元软件 ADINA 进行 CMF 流固耦合振动分析的数值模拟方法,并用直管 CMF 的实验数据和分析数据相比较,验证该方法的可行性和准确性。在此基础上,提出两种弯管型 CMF 模型,用文中确定的数值模拟方法对其进行结构尺寸以及检测点布置对灵敏度的影响分析。该数值模拟方法为新型 CMF 的计算机辅助设计指明了方向。

关键词: 科里奥利质量流量计; 计算机辅助设计; 有限元分析; 流固耦合

中图分类号: TH814 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6982 (2013) Z1-0140-04

Computer Aided Design of Coriolis Mass Flowmeter Based on Fluid-Structure Interaction Calculation

LIU Ying¹, LUO Yu¹, SUGI Tokio², LU Jing-wei³

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Tokyo Keiso Co., Ltd., Tokyo, Japan; 3. Tokyo Keiso Instrument Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Coriolis Mass Flowmeter (CMF) is a widely used instrument in the field of offshore oil and gas industry. This paper developed a numerical simulation method for finite element vibration analysis of fluid-structure interaction, which was proved correct by comparing the analytical data with the experimental data of the straight tube CMF. Then the curled shape CMF model proposed by this paper was taken for an example, some influential factors on measurement sensitivity, such as the dimension of the tube and allocation of the detectors were analyzed by the new numerical simulation method. Such research could point out the way for the computer-aided design of new CMF.

Key words: coriolis mass flowmeter; computer aided design; finite-element analysis; fluid-structure interaction

科里奥利质量流量计(CMF)是利用流体流过振动管道时产生的科里奥利效应对管道两端振动相位的影响来测量流体的质量流量。该流量计计量精确,不易受温度、密度、流体流态的影响。由于以上诸多优点,它被广泛应用于海洋石油和天然气工业等各个领域,具有良好的发展前景。

国内外许多学者运用解析法及数值分析法对 CMF 做过大量的研究。英国的 G. Sultan 和 J. Hemp^[1]运用振动梁理论建立了测量管的欧拉伯努利梁(Euler-Bernoulli beam)模型,推导了 U 型 CMF 的振

动微分方程,并给出方程的无量纲解形式,由此进行数值计算。研究结果表明流速在一定范围内,相位差与流速成线性关系,而当流速超过一定值后,该线性关系将不再成立。

南斯拉夫的工艺测量实验室 G. Bobovonk 和 N. Mole 等人^[2,3]对 CMF 流固耦合有限元分析做了详细的研究。他们应用 Star-CD 和 ABAQUS 软件分别模拟流场以及结构场来实现 CMF 的耦合振动分析,并将两种解析模型(欧拉梁——一维流体模型以及薄壁单元——势流体模型)与数值耦合模型作比较,讨论

收稿日期: 2013-01-06; 修回日期: 2013-03-04

作者简介: 刘颖(1986-),女,硕士研究生。主要研究方向为金属结构流固耦合振动分析。

了长径比 L/D 对固有频率及相位差的影响。

河海大学的纪爱敏^[4]运用拉格朗日方程导出了载流测量管单元的质量、刚度及科里奥利矩阵, 利用 ANSYS 软件提供的用户接口单元 Matrix27 将所定义单元输入到 ANSYS 中, 实现了 CMF 的有限元建模与求解。文中还以 U 型 CMF 为例, 对影响流量计灵敏度的因素进行了分析。

然而, 直接将流固耦合有限元分析应用于实际 CMF 的计算机辅助设计中的研究报道并不多见。本文确立了一种运用有限元方法进行科里奥利质量流量计流固耦合振动分析的数值模拟方法。为了验证该方法的正确性, 以参考文献[3]的直管型 CMF 为例, 用流固耦合振动有限元分析计算得到相位差与流速的关系, 并与实测结果相比较, 发现分析结果和实测结果有很好的 consistency。

在此基础上, 以文中提出的两种弯管型 CMF 模型为对象, 用文中确定的流固耦合计算方法进行全面的分析, 探讨结构尺寸以及检测点布置对灵敏度的影响。同时比较两种模型的灵敏度、检测点振幅等性能参数, 为确定优化的新型 CMF 结构提供理论支持。

1 科里奥利质量流量计测量原理概述

科里奥利质量流量计的测量管形式多种多样, 下面以单 U 型 CMF 为例来阐述其测量原理。

如图 1 所示, 电磁激振器驱动测量管做简谐振动, 相当于绕轴 AB 做往复旋转运动。流体由入口 B 流进, 出口 A 流出。由于流体受到科氏力 F_C 的作用, 并将反作用力作用于测量管上。如图 2 所示, 直管段科氏力分布是均匀的, 弯管段分布不均匀。科氏力分布具体分析详见文献[5]。入口段受到科氏力的阻碍, 测量管运动幅度减小, 相位滞后; 出口段受到科氏力的推进, 测量管运动幅度增大, 相位超前。

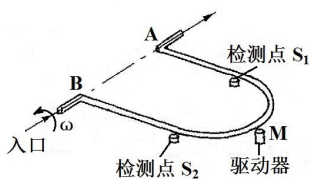


图 1 CMF 结构示意图

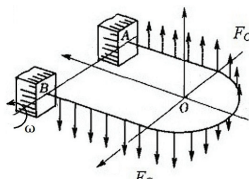


图 2 CMF 力学模型

由于激振点 M 两端对称位置处检测点 S_1 、 S_2 的相位差与质量流量成正比, 如公式 (1) 所示, 因此可通过检测相位差来达到计算流体质量流量的目的。

$$Q_m = K \cdot \Delta\varphi \quad (1)$$

式中, Q_m 为质量流量; $\Delta\varphi$ 为检测点 S_1 、 S_2 的相位差; K 为与管形状等参数相关的常数。

2 CMF 流固耦合振动有限元分析

以直管型 CMF 为例, 验证应用有限元法进行流

固耦合振动分析的准确性。直管型 CMF 模型取自文献[3], 内径 $d=20\text{mm}$, 管长 $L=400\text{mm}$, $L_S=200\text{mm}$, 壁厚 $t=0.5\text{mm}$ 。管子材料密度 $\rho=4510\text{kg/m}^3$, 泊松比 $\gamma=0.34$, 弹性模量 $E=102700\text{MPa}$ 。以水作为介质, 其密度为 $\rho_F=1000\text{kg/m}^3$, 粘度系数 $\mu=0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

2.1 有限元模型建立

建模前对模型做以下假定: 1) 由于测量管变形较小, 符合线弹性理论; 2) 忽略检测器以及驱动器的质量; 3) 由于流体粘性的存在, 所产生的黏性阻尼远大于测量管自身存在的材料阻尼, 故忽略材料阻尼的影响; 4) 不考虑温度影响, 假设流体是等温、不可压缩的牛顿流体。

由于壁厚与内径比值较小 ($t/d=0.025$), 故测量管可用 SHELL 单元进行模拟, 流体则采用 3D-FLUID 单元。如图 3 所示, 测量管两端刚性固定, 激振力 F 施加在测量管中部 M 点处, S_1 和 S_2 为检测点。

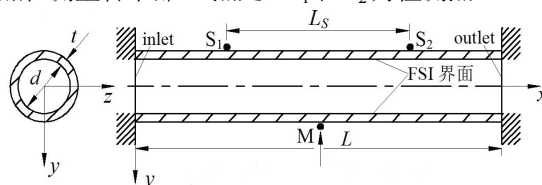


图 3 直管型 CMF 有限元模型

2.2 流固耦合模态分析

流固耦合振动分析可分为两步: 先进行流固耦合模态分析, 计算得到固有频率; 然后实施流固耦合振动分析, 激振频率为第一步计算得到的固有频率。

模态分析即为特征值分析, 就是求解与振动方程对应的无阻尼线性动态问题。多自由度线性系统的振动可以由各个模态振动 (模态振型) 叠加而成, 系统特征值则确定了各阶模态振型的固有频率与阻尼率。在各阶振型中, 只有一种振型是 CMF 在简谐激振力作用下的振型, 经过模态分析可得到该阶振型的无阻尼固有频率。

流固耦合模态分析时流体采用势流体单元 (无粘, 没有漩涡, 没有热传递, 流体边界有相对很小的位移或没有位移) 模拟。本文中计算所得直管型 CMF 的一阶固有频率为 401.651Hz 。

2.3 流固耦合振动分析

2.3.1 流固耦合分析原理

本文中的流固耦合问题为双向耦合, 即流体的作用力影响结构的变形, 同时结构的位移又影响流场的流态。求解方法采用弱耦合法, 即流体方程和结构方程按顺序相互迭代求解, 各自在每一步得到的结果提供给另一部分使用, 直到耦合系统的解达到收敛为止。

理论上流体和结构模型在流固耦合交界面处的节点应是重合的两节点, 从而使流体与结构间顺利的进行数据传递, 如图 4(a) 所示, 但对于复杂结构使流固

耦合面上节点完全对应并非易事。流体与结构可以使用完全不同的单元和网格，通常在流固耦合面上，两个模型的节点位置并不相同，如图 4(b)所示。流体节点的位移是通过结构节点的位移插值得到的，例如，流体节点 2 的位移是由结构节点 2 和 3 的位移插值得到的。同样的，流体作用在结构节点上的力是由结构节点周围流体边界上的单元的应力插值得到的，例如，结构节点 2 上的流体作用力是由流体节点 1 和 2 上的流体应力插值得到的，而结构节点 1 和 4 上的应力则分别等于流体节点 1 和 3 上的应力。

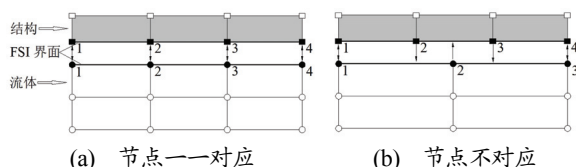


图 4 流固耦合网格示意图

2.3.2 直管型 CMF 流固耦合振动分析

CMF 流固耦合振动分析属于简谐力作用下阻尼系统的振动，阻尼系统的谐振载荷响应可分为两部分：瞬态振动响应和稳态振动响应。瞬态振动响应是由于阻尼的存在而使得结构自由振动响应部分逐步衰减直至最后消失，瞬态振动响应衰减的快慢主要取决于结

构的阻尼、质量和刚度。对于无阻尼系统，该项不会衰减掉，而是将无限地持续下去。稳态振动响应是与载荷直接相关并按载荷频率振动的响应分量，即只要有力的作用，系统就会有稳态响应。稳态振动响应是需要得到的响应值，根据稳态振动响应可以计算相位差。

直管型 CMF 模型的载荷及边界条件如图 3 所示，管内壁为流固耦合边界面（FSI 界面），入口流速分别取 0.1m/s、0.4m/s、2m/s 以及 5m/s。简谐激振力 F 施加在测量管中部 M 点处，其表达式为：

$$F(t) = F_0 \sin(2\pi ft + \phi) \quad (2)$$

式中， F_0 为激振力幅值；激振频率 f 为模态分析所得一阶固有频率； ϕ 为初始相位。

收敛速度与时间步长的大小有一定关系，步长太大不易收敛，步长太小计算时间太长。本文时间步长取 $\delta t = T/20 \sim T/25$ 。

检测点的振动曲线如图 5 所示，大约经过 0.02s 振动基本达到稳定状态，此时瞬态响应已衰减。取达到稳定状态的振动曲线进行分析，计算检测点 S_1 、 S_2 两点的相位差，并将相位差与文献[3]中的值进行对比，如图 6 所示。由图 6 可以看出，本文模拟计算所得相位差与文献中的计算结果有较好的一致性。

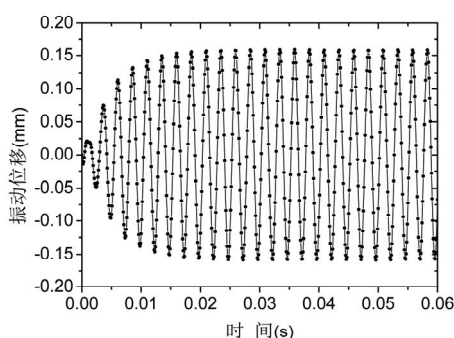


图 5 激振点 M 处的振动响应曲线

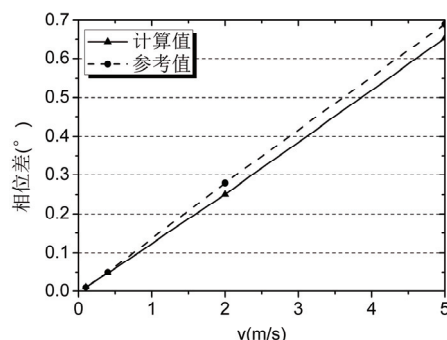


图 6 相位差对比

3 CMF 计算机辅助设计

本节以两种带有减震板的弯管型 CMF 为对象，探讨结构尺寸以及检测点布置对灵敏度的影响，同时比较两种模型的灵敏度、检测点振幅等性能参数。研究的有限元模型参见图 7，研究模型均为双管型且在

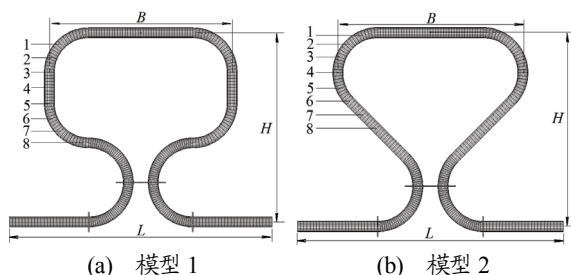


图 7 两种不同测量管形状的 CMF 有限元模型

靠近端部的位置增加减震板装置。双管型 CMF 较单管型能有效的降低外界振动干扰，从而提高测量精度。

3.1 有限元模型建立

两种 CMF 有限元模型主要几何参数如表 1 所示， D 为管子外径， t 为管壁壁厚，材料参数参见表 2。

表 1 测量管几何参数

模型	B/mm	L/mm	H/mm	D/mm	t/mm
1	176	253	182	9.7	1.5
2	176	253	182	9.7	1.5

表 2 材料参数

316 L			水	
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	E/GPa	γ	$\rho_F/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\nu/\text{Pa}\cdot\text{s}$
8027	208	0.3	1000	1.003×10^{-3}

3.2 模态分析对比

表3列出了两种模型的二阶固有频率值, 为了便于激振, 采用该阶频率值作为激振频率。由该表可以看出, 不同的测量管形状其同阶次的固有频率也大不相同, 因此可对测量管进行设计, 使其固有频率值避开工业现场的低频振动及噪声干扰。

表3 各模型二阶固有频率对比

模型	1	2
耦合频率/Hz	133.603	142.276

3.3 测量管形状及检测点位置对相位差的影响

两种模型测量管形状并不相同但 B 、 L 、 H 值均相同, 模型检测点布置如图7所示。激振力幅值 $F_0=2\text{N}$, 激振频率取各自模态分析得出的频率, 取流速 $V=5\text{m/s}$ 作为计算工况。灵敏度计算公式为:

$$K_q = \Delta t / Q_m \quad (3)$$

式中, Δt 为时间差; K_q 为灵敏度。

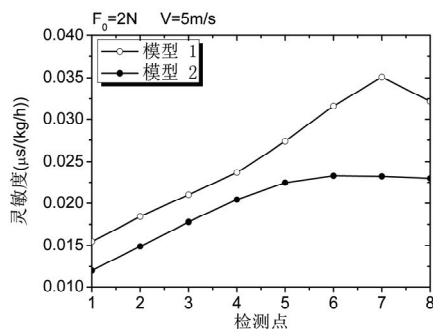


图8 两种模型不同检测点灵敏度对比图

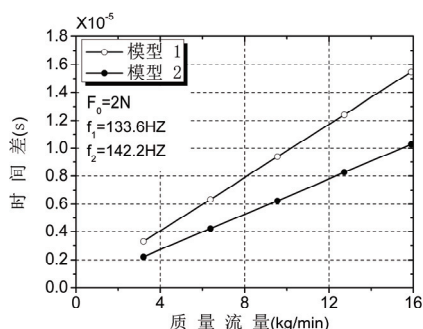


图10 时间差随质量流量关系对比

由图10、11可看出, 不同流速下模型1的时间差与相位差大于模型2。对比图8和图9, 两模型振动位移相差不大, 但模型1的灵敏度比模型2高。在本文假定的前提下, 即综合考虑灵敏度以及振动信号的检测问题, 可得出结论: 模型1的性能高于模型2, 可作为一种新型的CMF结构。

4 结束语

由图8可以看出, 模型1的灵敏度较模型2大, 这是由于模型1结构扭转惯性大, 因而灵敏度大。

对同一模型而言, 检测点位置不同灵敏度也大不相同。文献[4]中研究过U型CMF的灵敏度, 结果显示靠近固定端灵敏度增大。由图8可看出, 本文中的两模型灵敏度先增大后减小, 减小的原因是由于减震板将四根管子固定在一起, 靠近减震板处扭转角减小, 因而灵敏度降低。

图9显示了同一激振条件下不同检测点处振幅的对比。对于模型1而言, 虽然检测点7处灵敏度最大, 但由于其振幅较小, 不利于振动信号的检测。因此在选择检测点时则需综合考虑图8和图9, 使该点处灵敏度大并且振动信号易于检测。

图10、图11分别显示了两种模型灵敏度最大处时间差与相位差随质量流量的变化关系, 时间差以及相位差与质量流量是近似线性关系, 与公式(1)表达的关系是一致的。

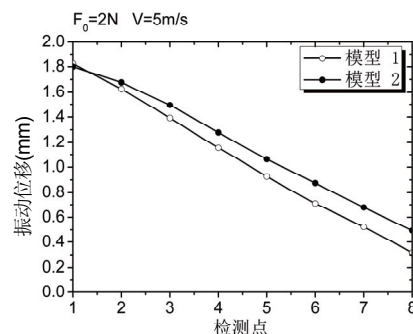


图9 两种模型不同检测点振动位移对比

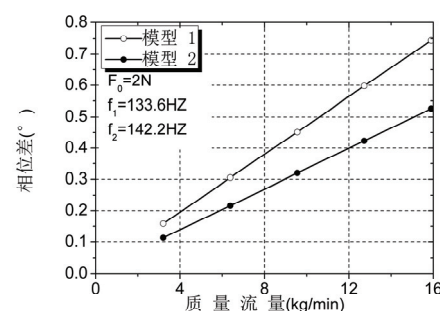


图11 相位差随质量流量关系对比

1) 本文研究了一种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的方法。

2) 以文献[3]中直管型CMF为例, 通过相位差与流速关系的实测结果和计算结果的比较, 验证了所开发的流固耦合有限元振动分析方法的准确性。

3) 对弯管型带有减震板的CMF模型进行了全面分析, 掌握了结构尺寸以及检测点布置对灵敏度的影响规律, 为计算机辅助设计CMF奠定了坚实的基础。

(下转第167页)

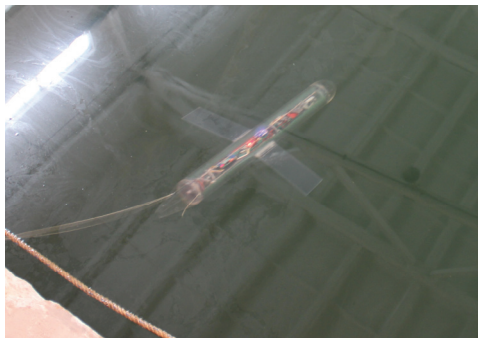


图6 原理样机试验

4 总结

本文主要设计并制造了一种小型水下滑翔机原理样机。在设计中, 将净浮力调节机构放置在滑翔机艏部, 在系统姿态变换过程中能够产生正向于系统改变的力矩。这样的设计有助于降低系统调节时间, 增加系统调节稳定性, 并通过水下滑翔机原理样机的仿真模拟得以验证。下一步, 我们将研究水下滑翔机外部型线的优化问题, 水下滑翔机的非线性控制问题及其在空间内稳定滑翔运动的控制问题。

参考文献:

- [1] H.Stommel. The Slocum mission[J]. *Oceanography*, 1989, 2(1): 22-25.
- [2] J.Sherman, Russ E. Davis, W. B. Owens, *et al.* The Autonomous Underwater Glider "Spray"[J]. *IEEE J.Oceanic Eng.*, 2001, 26(4): 437-446.
- [3] C.C.Eriksen, T. James Osse, Russell D. Light, *et al.* Seaglider: A long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research[J]. *IEEE J.Oceanic Eng.*, 2001, 26(4): 424-436.
- [4] T.B. Curtin, James G. Bellingham, Josko Catipovic, *et al.* Autonomous Oceanographic sampling Networks[J]. *Oceanography*, 1993, 6(3): 86-94.
- [5] Webb D C, Simonetti, P. J, Jones, C.P. SLOCUM: an underwater glider propelled by environmental energy[J]. *IEEE J.Oceanic Eng.*, 2001, 26(4): 447-452.
- [6] J.Graver, Jonathan Liu, Craig Woolsey, *et al.* Design and Analysis of an Underwater Vehicle for Controlled Gliding[C]//In Proceedings of the 1998 Conference on Information Sciences and Systems, Princeton, NJ, March 1998: 801-806.
- [7] K.Kawaguchi, Tamaki U, Yosibumi Tomod, *et al.* Development and sea trials of a shuttle type AUV "ALBAC"[C]// In Proc. 8th Int. Symposium on Unmanned Untethered Submersible Tech, Durham, NH, 1993: 7-13.
- [8] <http://www.sia.cas.cn/xwzx/kydt/>
- [9] Joshua Grady Graver. Underwater Gliders: Dynamics, Control And Design[D]. NJ: Princeton university, 2005
- [10] Bhatta P, Leonard N E. Stabilization and coordination of underwater gliders[C]//In: Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 2081-2086.
- [11] 杨海. 水下热滑翔机的温差能热机性能与运动控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [12] 葛晖, 徐德民, 周秦英. 基于变质心控制的低速水下航行器动力学建模[J]. *机械科学与技术* 2007, 26(3): 327-331
- [13] 陈宇航, 严卫生, 高剑, 等. 水下滑翔机纵倾运动的自适应积分反演控制[J]. *兵工学报*, 2011, 32(8): 981-985
- [14] D.webb. ALACE Glider-Test Tank Trials[R]. Falmouth, MA: Report of the Webb Research Corp, 1995.
- [15] Benjamin Abraham. Measurement methods and analysis: Forces on Underwater Glider[R]. United States Naval Academy Annapolis, Maryland, 2002.
- [16] N.E.Leonard and J.G.Graver. Model-based feedback control of autonomous underwater gliders[J] *IEEE J.Oceanic Eng.*, 2001, 26(4): 633-645.
- [17] 《航空气动力手册》编写组. 航空气动力手册(第二册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [18] H.Lamb. Hydrodynamics[M]. 6th. New York: Dover, 1932.

(上接第143页)

4) 在本文假定的前提下, 两模型中模型1更适合于作为一种新型的CMF的结构。

参考文献:

- [1] G. Sultan and J. Hemp. Modelling of Coriolis Mass Flowmeter[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1989, 32(3): 473-489.
- [2] G. Bobovonk, N. Mole, J. Kutin, B. Stock, I. Bajsic. Coupled finite-volume/finite-element modeling of the straight-tube Coriolis flow meter[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 20: 785-800.
- [3] N. Mole, G. Bobovonk, J. Kutin, B. Stock, I. Bajsic. An improved three-dimensional coupled fluid-structure model for Coriolis flowmeters[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2008, 24: 559-575.
- [4] 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.
- [5] 叶林, 朱德贵, 刘健荣. 科里奥利质量流量计传感系统的研究[J]. *华中理工大学学报*, 1991, 19: 29-32.