

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.02.013

复杂条件下多普勒流量计监测效果分析及 关键影响因素试验研究

丁睿, 郭帅

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:多普勒流量计在我国排水管道流量的测定中得到越来越多的应用,但是实际排水管道普遍存在阻塞、满水等情形,给多普勒流量计的现场使用造成困难。文章基于室内全尺寸排水管道试验平台对复杂条件下的多普勒流量计监测效能进行评估,通过安装一系列挡板模拟不同的管道阻塞程度,在入流量已知的条件下通过误差分析发现流速是影响多普勒流量计监测效果的主要因素,而低流量和严重管道阻塞会导致流速监测准确性下降;利用管道自由恒定出流的实测液位数据拟合多种液位-流量关系模型,基于信息准则对模型进行优良性评价。结果表明:二次多项式为该试验条件下的最佳模型;通过不同流量工况下的水力要素实测值分析管道阻塞时的液位-流量变化规律,为复杂工况下管内液位-流量模型的建立提供了参考。

关键词:排水管道;多普勒流量计;流量监测;液位监测;信息准则

中图分类号: TU992.0

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2023)02-0229-07

Experimental study on monitoring efficiency of Doppler flowmeter under complicated conditions and key influencing factors

DING Rui, GUO Shuai

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: At present, the Doppler flowmeter has been increasingly used in the measurement of the discharge of the drainage pipeline in China, but it is difficult to use the Doppler flowmeter in the field because of the obstruction and the filling of water in the drainage pipeline. Based on indoor full-size drainage pipeline test platform, the monitoring effectiveness of the Doppler flowmeter under the complicated conditions was evaluated. Different pipeline blocking degrees were simulated by installing a series of baffles. Under the condition of known inflow, error analysis shows that the velocity is the main factor influencing the monitoring efficiency of the Doppler flowmeter, and low flow and severe pipeline blocking will cause a decline in the accuracy of velocity monitoring. Using the measured liquid level data of free and constant flow, various liquid level-flow relation models were fitted. Based on the information criterion, the superiority evaluation of the models was carried out, and it is shown that the quadratic polynomial is the optimal model under this experimental condition. Based on the measured value of hydraulic elements under different flow conditions, the variation law of liquid level and flow during the pipeline blocking was analyzed, which provides reference for the establishment of the model of liquid level-flow in the pipeline under complicated flow conditions.

Key words: drainage pipeline; Doppler flowmeter; flow monitoring; liquid level monitoring; information criterion

收稿日期: 2021-03-31; **修回日期:** 2021-04-23

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1908085QE211)

作者简介: 丁睿(1996—),男,重庆市人,合肥工业大学硕士生;

郭帅(1984—),男,河南商丘人,博士,合肥工业大学副研究员,硕士生导师,通信作者, E-mail: guoshuai@hfut.edu.cn.

目前,随着“长江大保护”“黑臭水体治理”“污水厂提质增效”等一系列国家级战略工程项目的开展与实施,排水管道流量的在线测量技术已成为搭建各种模型评估系统、实现水环境目标的关键,因此,各级市政部门与项目参与方均投入了大量的资金进行管道在线流量计的购买、安装与应用,旨在获取准确而稳定的管道实时流量数据^[1-3]。针对不同管内水体特征开发的管道流量计量设备主要可分为堰槽式流量计、电磁流量计、时差式超声波流量计和多普勒超声波流量计。其中多普勒超声波流量计基于流体中不同流速运动微粒对超声波信号发生散射时的频移效应对断面平均流速进行解析,并搭载高精度液位压力传感器,通过面积-流速法对管道流量进行在线测量,具有便携灵敏、不影响管道正常运行的优点^[4],普遍适用于以非满流、大管径、两相介质为特点的排污管道流量监测,是目前最常用的排水管道流量计。然而,一方面许多地区的排水管道现状十分复杂,管道缺陷、管网外来水的入渗问题严重、管道淤积堵塞多发等造成了管内雨污水运行水位高、流速低、甚至满管溢流等现象的普遍存在,给多普勒流量计实时监测数据的准确性、可靠性提出了挑战;另一方面,由于多普勒流量计具有液位同步监测功能,有学者依据现场数据对管内或检查井内液位-流量关系进行拟合,以液位监测替代流量监测^[5-6],但提出的拟合模型尚缺乏合理性评价。

本文首先以室内全尺寸排水管道物理模型试验平台,通过模拟管道自由出流、堵塞、满水等多种水力工况,在管内实际入流量已知的前提下对比评价多普勒流量计的实际监测效能,并通过误差分析判断影响流量监测效果的主要因素,旨在为实际工程中多普勒流量计的合理使用提供指导;然后根据统计数据进行多种类型的管内液位-流量关系拟合,并基于信息准则构建目标函数对拟合模型优良性进行评价,为合理建立管道液位-流量模型提供参考。

1 材料和方法

1.1 管道运行试验平台

试验采用搭建于合肥工业大学水工模型试验大厅的全尺寸排水管道运行模拟试验平台,效果图如图 1 所示。试验平台包括水箱、进水管、提升泵、排水管道、检查井、电动阀门、电磁流量计等部分。平台占地总长为 40 m、宽为 4 m,其中试验循环水箱置于地面,总体积为 6 m³,通过 DN100

钢管和立式离心泵出水,并且配有电磁阀和电磁流量计用于控制出流量。模拟污水管道和检查井根据实际排水管道形式进行设计,模拟管道全长 37 m,为 DN300 HDPE 波纹管,管道坡度范围为 1.25‰~5.00‰,为了便于观察和放坡模拟管道全部架空安装,底部用钢制支架支撑,最低点距地面 1.05 m。全程设置 5 个检查井用以进行管内观察和设备安装,其中起始检查井为砖砌井,总高度为 1.80 m,底部连接进水钢管,顶部连接模拟排水管道,水流由井底上升过程中流速降低,以保证管道入流均匀平缓;其余 4 个检查井为塑料井,通过橡胶圈和模拟管道密封连接,底部利用砖砌支座固定。试验平台工作方式采用循环控制,水箱出水阀门打开后,水箱内水体先由水泵抽吸至起始检查井完成消能,然后溢流至模拟管道,依靠重力流完成流程后排入水箱再次循环。

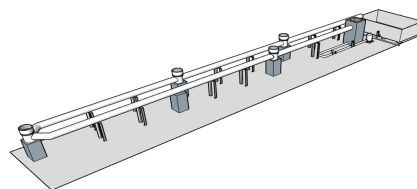


图 1 试验平台效果图

1.2 监测设备和试验水质

试验平台共安装使用了 2 种类型的管道流量计,对于装置进水部分,在入流钢管平直段安装电磁流量计对模拟污水流量进行计量控制,流量测量相对误差为 $\pm 1\%$,测量介质电导率要求大于 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$,经过人工流量校验,该电磁流量计计量准确。在试验模拟管道底部正中按照推荐方法安装多普勒流量计探头,通过电脑连接设置监测管道断面形状、管径和数据采样频率,本研究采样频率设置为 1 次/min,可同时收集管内流速、液位、流量和温度数据。该流量计在具有均匀速度场的水体中流速测量精度为 $\pm 2\%$,液位测量精度为 $\pm 1.75\%$ 。

试验所用模拟污水为自来水,经检测电导率范围为 140~200 $\mu\text{S}/\text{cm}$,满足电磁流量计测量需求;另外还通过向试验水箱添加高岭土以满足多普勒流量计对测量水体的浊度要求,试验期间模拟污水浊度范围为 4~20 NTU,处于实际排水管道污水的中低浊度范围^[7]。

1.3 数据处理

对于多普勒流量计监测效果的研究,每组流量工况下利用 10 个连续测量数据作为监测效果

评估样本。分别计算其平均绝对百分比误差 δ 和变异系数 C_V , δ 为同一入流量工况下多普勒流量计连续测量结果与和电磁流量计实际读数相对差值百分比的均值,代表流量计测量的准确性; C_V 为同一入流量工况下多普勒流量计连续测量结果的标准差和均值的百分比,可表示流量计在固定流量工况下的测量稳定性,其计算公式分别为:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q^* - Q_i}{Q^*} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$C_V = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}} \times 100\% \quad (2)$$

其中: Q^* 为对应工况下电磁流量计显示的实际入流量; Q_i 为某一流量工况下多普勒流量计第 i 个实测样本值; σ_Q 、 \bar{Q} 分别为某一流量工况下多普勒流量计连续测量值的标准偏差和算术平均值。

根据试验所得的管内液位-流量数据,利用多种函数对其变量关系进行拟合,并且采用最小残差平方和准则(也称最小二乘准则)和判定系数 R^2 ($0 \leq R^2 \leq 1$) 作为检验曲线拟合准确性的准则和参数,计算公式为:

$$V_{RSS} = \sum_{j=1}^n (Q_j - Q_j^*)^2 \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{V_{RSS}}{\sum_{j=1}^n (Q_j - \bar{Q})^2} \quad (4)$$

其中: Q_j 为第 j 个流量工况下多普勒流量计的实测流量; Q_j^* 为第 j 个流量工况下装置的实际入流量; \bar{Q} 为 n 个流量工况多普勒流量计实测流量的算术平均值; V_{RSS} 为拟合模型与实测样本值之间的残差平方和, V_{RSS} 值越小,相应的 R^2 越接近于 1,拟合优度越高^[8]。

另外,基于赤池信息准则(AIC)和贝叶斯信息准则(BIC)的目标函数对拟合模型进行信息量优选,2种准则的计算公式为:

$$V_{AIC} = -2 \ln L + 2k \quad (5)$$

$$V_{BIC} = -2 \ln L + k \ln n \quad (6)$$

其中: k 为模型拟合参数个数; n 为建立模型所用的样本数量; L 为模型的极大似然函数。

(5)式、(6)式中:第1项为似然函数项,代表模型数据拟合效果;第2项为模型参数数量相关的惩罚项,代表模型复杂程度。因为当模型参数个数 k 增加时,模型拟合效果加强,似然函数项减小,但 k 值过高将导致模型冗杂,所以以 V_{AIC} 、 V_{BIC} 值最低为目标进行模型筛选,能够使得液位-流量关系拟合结果兼具准确性和简洁性,避免过度拟合现象^[9]。

2 多普勒流量计监测效果分析

2.1 监测结果

在 1.67‰ 管道坡度条件下设置多普勒流量计固定监测点,通过在监测点下游安装不同高度的隔水挡板以及调节装置入流量来分别模拟管道自由恒定出流、管道阻塞和管道满水的情形,设备安装位置如图 2 所示。

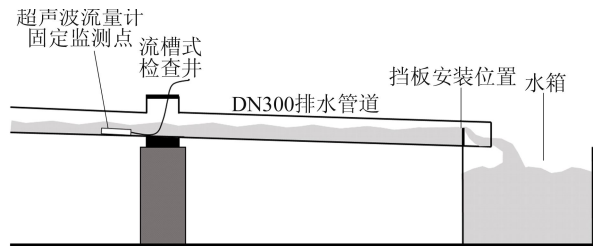
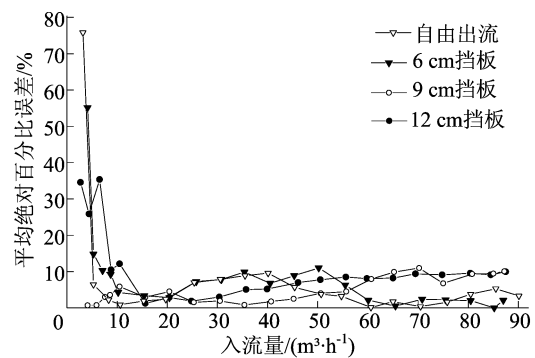
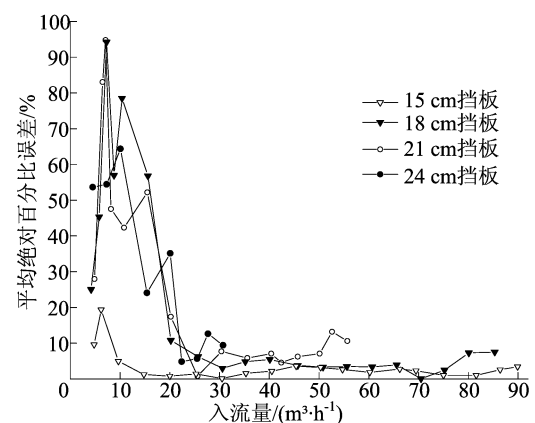


图2 流量计和挡板安装位置

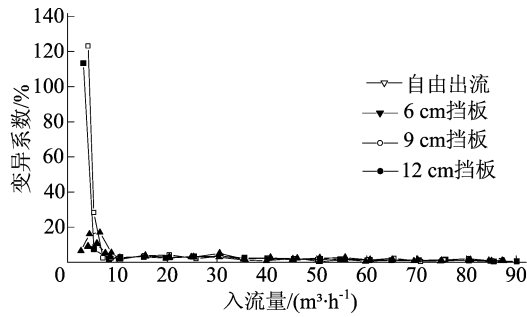
利用电磁流量计和电磁阀调节入流量,调节范围为 2~90 m³/h,每隔 5 m³/h 设置一个工况,为了调查低流量的监测效果,将 2~10 m³/h 的小流量试验工况加密为 5 个。当管道满水则试验终止,因此挡板高度较高时,试验工况数相应减少,计算每个工况下的流量平均绝对百分比误差和变异系数作为误差评价指标进行流量监测效果的分析比较,结果如图 3 所示。



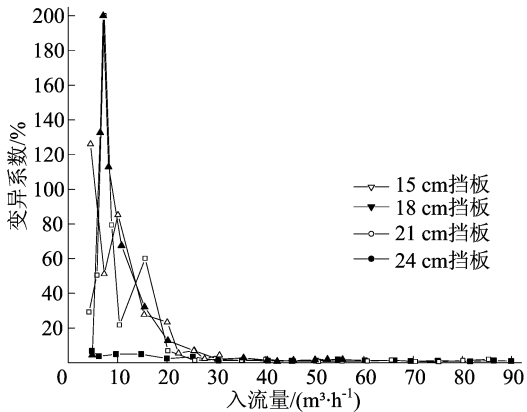
(a) 0~12 cm挡板平均绝对百分比误差



(b) 15~24 cm挡板平均绝对百分比误差



(c) 0~12 cm挡板变异系数



(d) 15~24 cm挡板变异系数

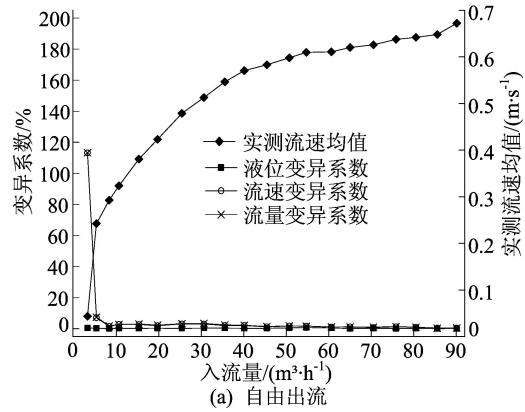
图 3 不同挡板高度下的流量监测平均绝对百分比误差和变异系数

由监测结果可知,多普勒流量计流量监测误差和变异系数大小受入流量和挡板高度的影响十分显著。当管内流量较小且挡板高度较高时,测量平均绝对百分比误差和变异系数普遍较高,其中当管内流量为 $7 \text{ m}^3/\text{h}$ 、挡板高度为 18、21 cm 时,平均绝对百分比误差和变异系数分别达到了最大值 94% 和 200%,而大流量和低挡板高度条件下的平均绝对百分比误差和变异系数分别降至 10% 和 5% 以内,其中平均绝对百分比误差存在一定波动,而各工况下的变异系数则基本稳定重合。从单一曲线的变化趋势上看,同一挡板高度下大流量工况的测量准确度和稳定性明显强于低流量工况,而由图 3a 与图 3b、图 3c 与图 3d 的对比可知,0~12 cm 挡板高度下的测量准确度和整体稳定性明显好于 15~24 cm 挡板高度下的结果。另外在管内流量增加过程中还存在使得测量误差和变异性逐步稳定的临界流量,其大小随挡板高度的增加而增加,例如图 3a、图 3c 所示的 0~12 cm 挡板高度条件下的临界流量分别为 15、 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,而图 3b、图 3d 所示的 15~24 cm 挡板高度下的临界流量分别为 25、 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

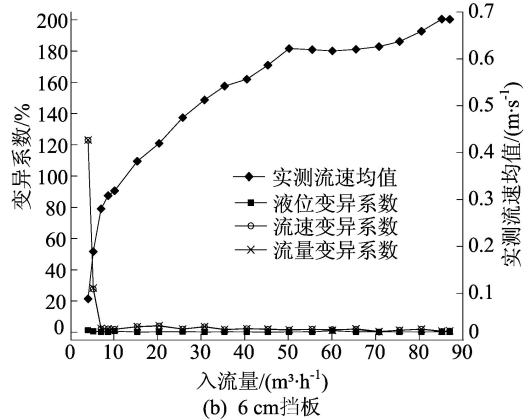
2.2 监测效果影响因素分析

根据多普勒流量计面积-流速法的监测原理,分别计算自由出流和 6、21、24 cm 挡板高度下不

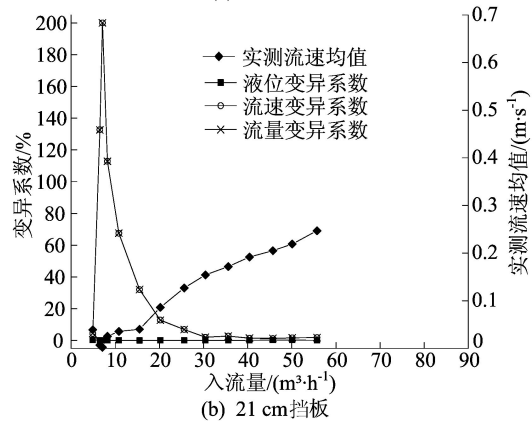
同入流量下实测液位、流速和流量的变异系数,研究管道阻塞和低流量状况下监测效果的主要影响因素,并且列出相应流量工况下的实测流速均值,如图 4 所示。



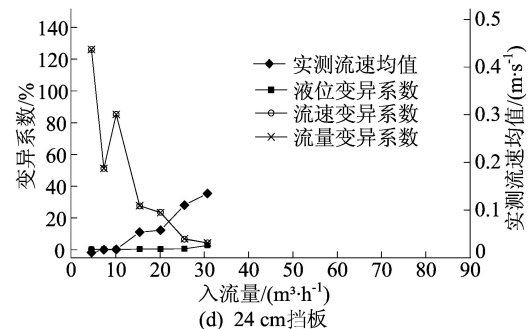
(a) 自由出流



(b) 6 cm 挡板



(c) 21 cm 挡板



(d) 24 cm 挡板

图 4 实测液位、流速和流量变异系数

结果表明不同入流量下的液位变异系数始终稳定在1%以内,而流速和流量变异系数变幅较大且计算结果基本重合,说明多普勒流量计液位监测结果十分稳定且对流量监测效果影响较小,而流速监测效果才是影响流量的主要因素。

由图4a、图4b可知,管内流量较低时,变异系数较高,对照实测流速可知这主要是由低流量导致的低流速状况造成的;由图4c、图4d可知,挡板高度较高时,同流量下管内实测流速降低,特别是在低流量工况下,流量流速变异系数增加显著,这表明管道流量过低和阻塞满水导致的低流速状况均不利于多普勒流量计较好地发挥监测效果。因此

为了尽量避免误差,应控制监测点水力状况在适宜条件内^[10]。

3 管道液位-流量模型建立评估

3.1 自由出流状态下的管内液位-流量关系

分别在1.25‰、1.67‰、5.00‰管道坡度下进行不同装置入流量下的自由出流试验,根据多普勒流量计监测所得的液位数据,分别利用曼宁公式、幂函数、指数函数和多项式函数进行非线性拟合,研究恒定流状态下管道液位-流量关系模型,并且计算其 R^2 和 V_{RSS} 值进行拟合效果比较,实测及数据拟合结果如图5所示,见表1所列。

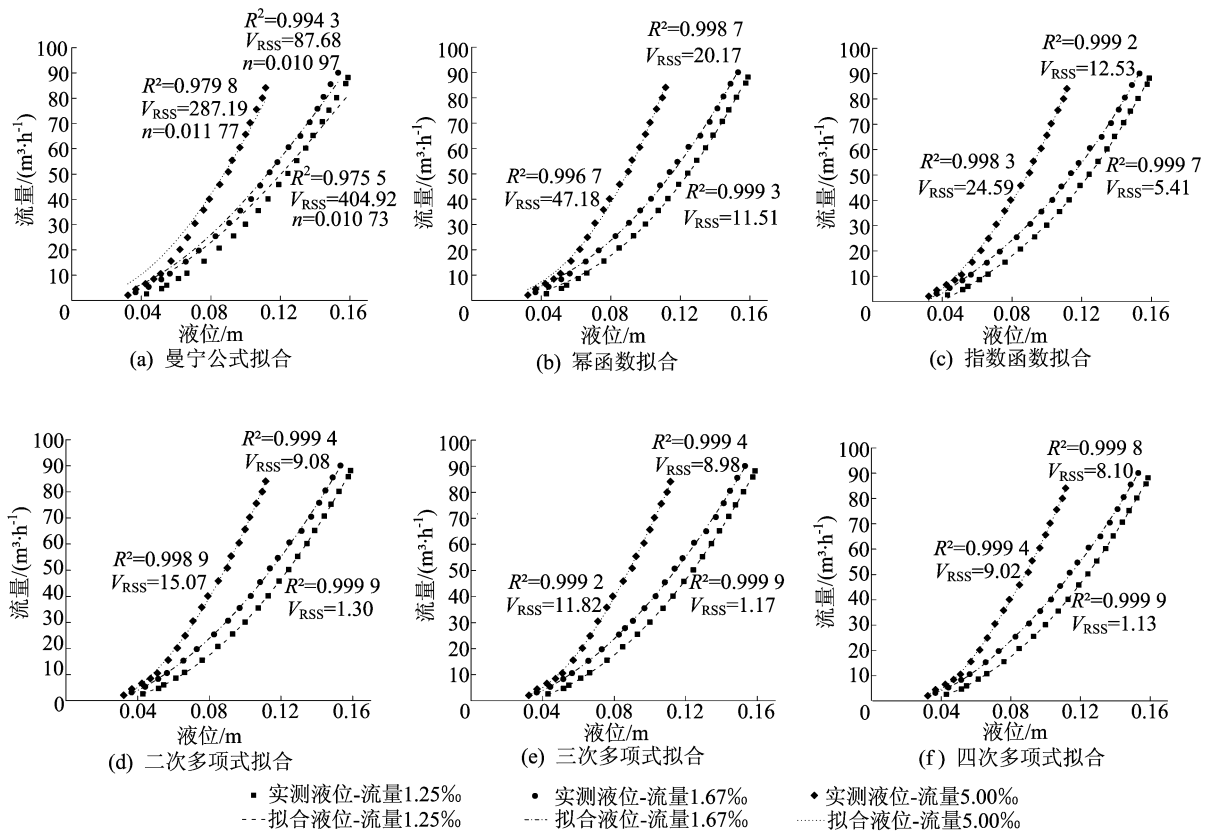


图5 不同管道坡度下的液位流量关系拟合结果

表1 利用4种函数进行3种坡度工况下的液位流量拟合函数表达式

拟合函数类型	1.25‰坡度工况拟合结果	1.67‰坡度工况拟合结果	5.00‰坡度工况拟合结果
曼宁公式	$Q = \frac{0.25(\theta - \sin \theta)^{5/3}}{n\theta^{2/3}}$	$Q = \frac{0.29(\theta - \sin \theta)^{5/3}}{n\theta^{2/3}}$	$Q = \frac{0.50(\theta - \sin \theta)^{5/3}}{n\theta^{2/3}}$
幂函数	$Q = 6\ 638.62h^{2.35}$	$Q = 4\ 329.34h^{2.06}$	$Q = 16\ 383.61h^{2.40}$
指数函数	$Q = -31.33 + 20.19e^{11.21h}$	$Q = -43.20 + 32.03e^{9.32h}$	$Q = -38.77 + 24.52e^{14.49h}$
二次多项式	$Q = 0.04 - 122.83h + 4\ 252.83h^2$	$Q = -4.69 + 72.10h + 3\ 557.24h^2$	$Q = -4.03 - 84.20h + 7\ 840.49h^2$
三次多项式	$Q = -1.98 - 52.62h + 3\ 518.36h^2 + 2\ 376.57h^3$	$Q = -3.27 + 17.76h + 4\ 173.14h^2 - 2\ 134.27h^3$	$Q = 7.19 - 628.30h + 15\ 891.02h^2 - 37\ 018.75h^3$
四次多项式	$Q = -5.27 + 102.44h + 960.02h^2 + 20\ 005.42h^3 - 43\ 216.41h^4$	$Q = 7.55 - 554.85h + 14\ 490.62h^2 - 78\ 933.13h^3 + 201\ 810.59h^4$	$Q = 39.98 - 2\ 782.13h + 65\ 557.36h^2 - 517\ 527.50h^3 + 1.66 \times 10^{-6}h^4$

注:Q为排水管道流量;h为排水管道液位;θ为排水管道中心到液面线两端的夹角,θ=2cos⁻¹(1-6.73h)。

由图 5a 可知,利用曼宁公式分别拟合 1.25‰、1.67‰、5.00‰管道坡度下各自的实测液位-流量数据,得到 R^2 分别为 0.975 5、0.994 3、0.979 8,表明拟合效果较好,并且其拟合得到的粗糙系数 n 分别为 0.010 73、0.010 97、0.011 77,与《室外排水设计规范》GB 50014—2006 中 PE 管粗糙系数取 0.009~0.011 的规定值相近^[11],表明实测液位-流量数据与基于曼宁公式的理论计算结果吻合。对以上结果进行综合对比可知,曼宁公式、幂函数、指数函数和多项式函数都能够在流量调节范围内对管内液位-流量关系进行较好拟合,由 R^2 和 V_{RSS} 值对以上 4 种回归方程的拟合效果从优到差依次排序为四次多项式拟合、三次多项式拟合、二次多项式拟合、指数拟合、幂函数拟合、曼宁公式拟合,因此多项式拟合所得模型的准确性最高。但是对比图 5d~图 5f 可知,随着多项式次数增加,虽然模型精度不断提高,但是其拟合参数数量 k 也随之增加,造成回归方程逐渐复杂,并且出现过拟合现象。因此分别计算其

V_{AIC} 和 V_{BIC} 值,并对具有最佳参数数量的模型进行筛选,结果见表 2 所列。

根据 V_{AIC} 和 V_{BIC} 值对以上液位-流量模型进行优良性排序从优到差依次为多项式拟合、指数拟合、幂函数拟合、曼宁公式拟合,与基于模型准确性的排序一致,但 3 种不同次数多项式的评价结果存在差异。其中在 1.25‰和 1.67‰管道坡度下表现为随多项式次数增加, V_{AIC} 和 V_{BIC} 值增加,模型优良性降低。结合相应模型准确性评价结果可知,虽然增加模型次数可优化 R^2 和 V_{RSS} 计算结果,但提升效果不明显,反而造成与模型复杂程度相关的惩罚项增加,因此在本试验流量范围内二次多项式才是兼具准确性和简洁性的最佳液位-流量模型。而在 5.00‰管道坡度下, V_{AIC} 和 V_{BIC} 值最低的为四次多项式,结合相应的 V_{RSS} 值分析可知,由于该管道坡度下的实测液位数据不稳定,因此二次拟合模型 V_{RSS} 值较大,只能通过提升多项式次数来降低 V_{RSS} ,从而使该试验的 V_{AIC} 和 V_{BIC} 值最低的为四次多项式。

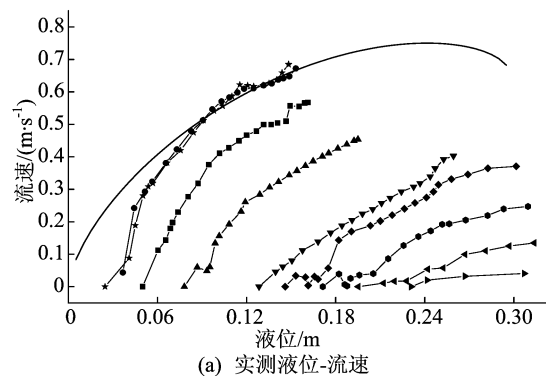
表 2 拟合模型的 V_{AIC} 、 V_{BIC} 比较

管道坡度/‰	样本数量 n	评价项	曼宁公式 ($k=1$)	幂函数 ($k=2$)	指数函数 ($k=3$)	二次多项式 ($k=3$)	三次多项式 ($k=4$)	四次多项式 ($k=5$)
1.25	21	V_{AIC}	66.81	-5.22	-17.96	-47.92	-46.68	-43.46
		V_{BIC}	68.23	-3.50	-16.28	-46.25	-45.46	-43.19
1.67	20	V_{AIC}	34.27	7.67	1.31	-47.92	-46.68	0.38
		V_{BIC}	35.55	9.16	2.63	-46.25	-45.46	-0.10
5.00	20	V_{AIC}	57.99	24.66	14.79	5.01	3.76	2.53
		V_{BIC}	59.28	26.15	16.11	6.33	4.45	2.04

3.2 模拟管道阻塞状态下的液位-流量关系

因为管内过流断面流速分布对充满度十分敏感^[12],所以通过在管道内部安装不同高度的挡板模拟不同的管道阻塞程度,得到不同挡板高度下的实测液位与流速、流量的关系如图 6 所示,因为管道固定监测点位于挡板安装位置上游(图 1 中管道坡度为 1.67‰),所以图 6b 各曲线起始液位低于挡板高度。由图 6a 可知,模拟管道阻塞程度越高,相同流量下过流断面面积增加,流速越低,并且随着液位增加,流速增长逐渐变缓,这与曼宁公式的计算结果变化趋势基本一致。由图 6b 可知,实测液位-流量曲线随模拟阻塞程度增加而变化,当挡板高度 < 15 cm 时,曲线斜率随液位增加而增加,结合图 6a 和圆形管道断面几何特征分析可知,这主要是由于在液位上升过程中水面扩宽,

过流面积增长空间较大,同时流速也随液位迅速增长造成的;当挡板高度 > 15 cm 时,曲线斜率逐渐随液位增加而降低,同样是由于此时液面宽度逐渐收缩,过流面积随液位的增长空间变小,且流速随液位的增长也逐渐变缓造成的。



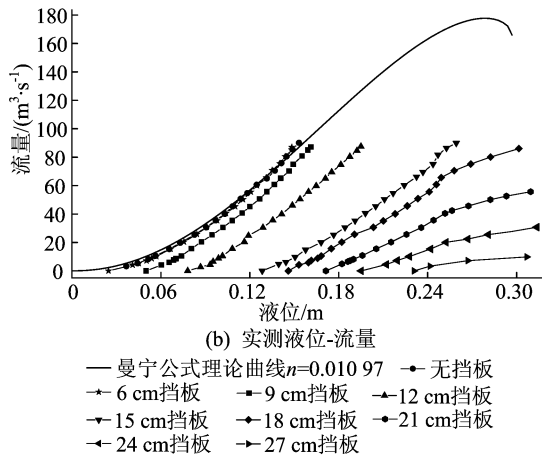


图6 不同管道模拟阻塞程度下的实测水力要素

另外图 6a、图 6b 都表明,挡板安装条件下,当液位接近管顶时,实测液位-流速和液位-流量曲线均单调递增,而非根据曼宁公式理论推导所呈现的非单调特征,这与文献[13]中关于圆管无压均匀流液位-流量关系的实测结果一致,具有相似性。

4 结 论

(1) 通过安装不同高度的挡板模拟了实际排水管道自由出流、阻塞和满水的情形,在已知入流量的前提下对多普勒流量计监测效果进行评估,结果表明:管内流量过低以及管道阻塞程度的加重将导致多普勒流量计监测准确性和稳定性下降,其中流速监测效果是影响流量监测效果的主要因素,因此适宜的管内流速及畅通的水力条件将有助于多普勒流量计发挥最佳性能。

(2) 利用 4 种函数拟合了 3 种坡度下的管道自由恒定出流的液位-流量关系,基于信息准则进行比较认为,在本试验条件下二次多项式是表达管内液位-流量关系的最佳模型。根据不同挡板安装高度下的实测液位、流速结果对管道阻塞条

件下的液位-流量关系变化原因进行了分析,表明管内液位-流量变化趋势取决于不同起始液位后的断面面积和流速变化过程;另外实测管道阻塞的条件下圆管重力流接近管顶时液位-流量关系具有单调性。

[参 考 文 献]

- [1] 何人杰,吴林安,董鲁燕,等.水管网在线流量监测技术在无锡市的应用[J].环境工程,2011,29(5):123-126.
- [2] GUO S, SHI X, LUO X, et al. River water intrusion as a source of inflow into the sanitary sewer system[J]. Water Science and Technology, 2020, 82(11): 2472-2481.
- [3] 许雨桐.重庆市某中心城区污水管道运行状况调查及对策研究[D].重庆:重庆大学,2019.
- [4] 涂晓立,杨道业,陈静.超声波多普勒流量计的设计[J].仪表技术与传感器,2016(3):41-43.
- [5] 刘旭辉,张金松,GOULVEN I.深圳市排水系统地下水渗流量初步研究[J].中国给水排水,2013,29(3):77-79.
- [6] 张明凯.基于污染物过程线模型的污水管网水量水质动态模拟研究[D].北京:清华大学,2017.
- [7] 张红,施永生,孙娜.生活污水浊度与化学需氧量的关系[J].工业水处理,2007,27(3):44-45.
- [8] 《数学模型》编写组.数学模型[M].广州:华南理工大学出版社,2001.
- [9] 刘璋温.赤池信息量准则 AIC 及其意义[J].数学的实践与认识,1980(3):65-73.
- [10] 王宏伟,孙永峰.多普勒便携式(在线式)流速/流量测定仪在管道流量测验中的应用[J].吉林水利,2012(9):50-52.
- [11] 上海市政工程设计研究总院.室外排水设计规范:GB 50014—2006[S].北京:中国计划出版社,2006:27-28.
- [12] 丁法龙,茅泽育.圆形断面管道非满流水力特性[J].水科学进展,2020,31(4):547-555.
- [13] 茅泽育,赵璇,罗昇.圆形断面管道非满流流速计算表达式[J].水科学进展,2007,18(2):170-174.

(责任编辑 张 镗)