

声学多普勒流速仪在水槽流速测量中的应用

严松, 吴浩, 孙大鹏, 唐蔚

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要:针对声学多普勒流速仪(ADV)运用于清澈水质的水流中精度较低的问题,采用了一种向清澈水流中掺混适量悬浮颗粒物的方法显著提高 ADV 的测量精度。通过对比掺混悬浮颗粒物与清澈水质中 ADV 的流速测量结果,发现掺混适量悬浮颗粒物后,流速测量数据明显更稳定,符合水槽流场的实际情况。给出了悬浮颗粒物的推荐含量为 106 g/m^3 。采用该方法,在水槽中沿垂向布置 10 个流速测点,通过调整水泵变频器频率来改变流速,测量了不同流速时的水槽断面垂向流速分布。发现流速沿垂向分布不均匀,呈线性剪切流分布。水槽出流口的布置方式和水槽壁面及底面摩擦是产生断面流速沿垂向分布不均匀性的原因。最后,通过最小二乘法拟合给出了水泵变频器的频率与断面平均流速的线性关系。

关键词:声学多普勒流速仪; 悬浮颗粒物; 流速; 垂向分布

中图分类号:TV 131.61

文献标志码:A

文章编号:1006-7167(2017)05-0009-05



Application of Acoustic Doppler Velocimetry in Flume Flow Experiment

YAN Song, WU Hao, SUN Dapeng, TANG Wei

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: Aiming at the problem of the low accuracy of Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) used in clear water flow, a method of mixing suspended particles into the clear water is presented to improve the accuracy of ADV. By comparing the measurement results of ADV in the water flow with mixed suspended particles and the clear water, it is observed that the flow velocity of the former situation is obviously more stable, the result meets with the actual stable uniform flow of the water flume. The suggested content of the suspended particles in this test is 106 g/m^3 . Ten velocity measuring points are arranged vertically in the water flume. The flow velocity is changed by adjusting the frequency of the converter of a pump. This method is used to measure the vertical distribution of the flow velocity of the water flume. It is observed that the flow velocity is not uniformed along the vertical direction, and is followed the linear shear flow distribution. The reasons for this uneven distribution are the arrangement of outflow port and the friction of the lateral and bottom walls of the water flume. Finally, the linearly relationship between the frequency of converter and mean vertical velocity is presented by the means of least square method.

Key words: acoustic Doppler velocimetry; suspended particles; flow velocity; vertical distribution

收稿日期:2016-08-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51409041);辽宁省博士科研启动基金项目(20141024)

作者简介:严松(1990-),男,湖北孝感人,硕士生,主要研究方向为柔性圆柱管涡激振动的试验研究。

Tel.:18340819403; E-mail:18340819403@163.com

通信作者:吴浩(1980-),男,辽宁大连人,博士,工程师,主要从事海洋工程水动力学研究。

Tel.:0411-84708520; E-mail:wuhao@dlut.edu.cn

0 引言

流速是水动力学试验中的一个基本参数,流速的大小及流速分布是确定其他试验条件和试验设计的重要因素。因此,测量和研究水流流速具有十分重要的意义。长期以来,许多学者对水流流速的分布开展了大量的研究工作,如严军等^[1-3]对水流流速进行了系统

的试验研究,建立了流速沿垂线的分布公式。

近年来,流速测量技术迅猛发展,国内外测量水流流速的仪器也越来越多,如毕托管、旋桨流速仪、超声多普勒流速仪 (Acoustic Doppler Velocimetry, ADV)、激光多普勒流速仪 (Laser Doppler Velocimetry, LDV)、粒子图像测速仪 (Particle Image Velocimetry, PIV) 等^[4-7]。其中 ADV 由于操作方便、对流场干扰小、数据稳定可靠、精度高和三维测量的优势,成为了主要的测量手段^[8-10],如华明等^[11-12]在实验室中运用 ADV 测量了瞬时流速的变化,叶小云等^[13-15]运用 ADV 测量水流的流速分布,研究了紊动强度沿垂线的分布。虽然 ADV 在水槽试验中应用较多,但也存在缺点,其探头发射的超声波特别依赖水中悬浮颗粒的反射作用,在清澈水质的水流中测量困难,误差很大^[10]。

本文采用一种向清澈水质的水流中掺混适量悬浮颗粒的办法,提高了 ADV 的测量精度。运用该方法准确测量了不同流速下试验水槽的垂向流速分布,分析探讨了水槽的结构对垂向流速分布的影响,并且通过最小二乘法拟合得到了断面平均流速和水泵变频器频率的线性关系。

1 试验装置

本试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的波流水槽中进行,水槽(长×宽×深)22.0 m×0.45 m×0.60 m,水槽底面和壁面均为光滑玻璃,试验装置如图 1 所示。试验用水为纯净自来水,水深为 0.55 m。采用变频器控制水泵造流,水泵转速通过调节变频器频率来控制,从而调节水流流速,变频器的变频范围为 0~50 Hz。

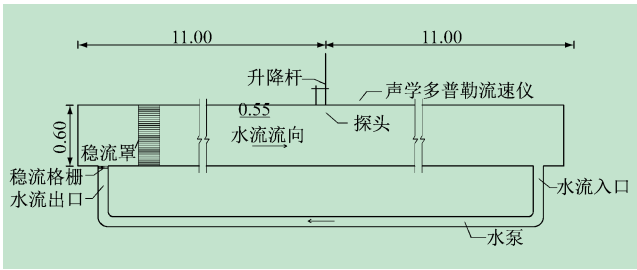


图 1 试验装置(m)

为了增大水流流速,在水槽的试验段安装导流箱,将过流断面的宽度缩窄至 0.25 m,试验中可获得的最高流速为 0.3 m/s,如图 2 所示。

为了降低湍流度,提高流场的稳定性,在水流出口处安装稳流格栅,并在水流出口与试验段之间安装了格栅型稳流器,如图 3 和图 4 所示。

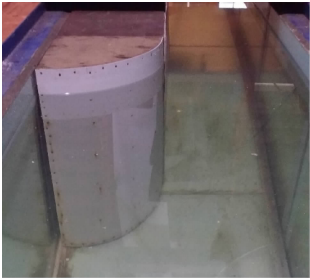


图 2 导流箱



图 3 稳流格栅

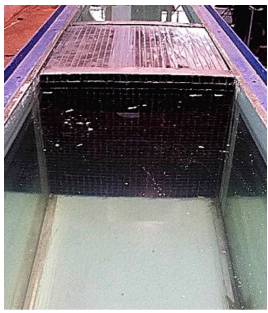


图 4 格栅型稳流器

2 测量仪器

本试验选用 Nortek 公司生产的“小威龙”声学多普勒流速仪测量流速,该流速仪的性能指标见表 1。

表 1 “小威龙”声学多普勒流速仪性能指标

流速测量	范围/(m·s ⁻¹)	±0.01, 0.1, 0.3, 1, 4
	精度/(mm·s ⁻¹)	测量值的 ±0.5% ±1
采样点	采样输出/Hz	1~200
	距探头距离/m	0.05
	直径/mm	6
	高/mm	3~15
回声强度	声学频率/MHz	10
	强度范围/dB	25

采用 ADV 测量流速时,自水面向下 5 cm 范围为测试盲区。本试验测量自水面以下 5 cm 至水底以上 5 cm 之间共 45 cm 范围内的流速。ADV 的探头固定在标有刻度的升降杆上,通过调节升降杆的高度来改变探头的入水深度,流速仪及升降杆如图 5 所示。

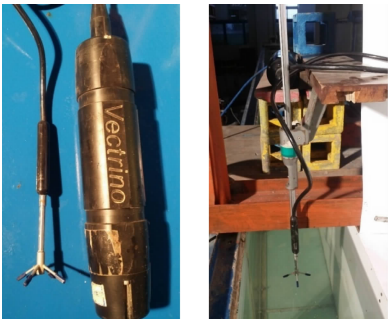


图 5 “小威龙”声学多普勒流速仪

ADV 测速技术以声学多普勒效应原理为基础,超声信号发射探头发出的超声信号,经由水流中的颗粒物发生散射,散射信号被接收探头所接收,最后由电子仪器来度量频率的变化,从而计算出采样体积中的三维水流速度,实现实时的三维流速分布测量。在利用 ADV 测量水流流速的过程中,需要水流中有适宜浓度的颗粒物对超声信号进行散射。当颗粒物的浓度较低时,接收信号的声强随粒子浓度的增加而增大;而当颗粒物浓度较大时,超声波信号沿程衰减起主导作用,接收信号的声强将随颗粒物浓度的增加而减小。因此,超声多普勒流速仪测量水流流速的精度与水流中悬浮颗粒物的浓度有直接的关系。

3 流速测量方法改进

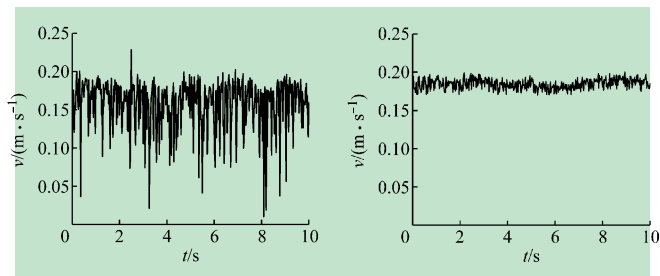
3.1 悬浮颗粒物

本试验采用自来水,水质清澈,水槽内壁干净,水流中的悬浮颗粒极少。采用 ADV 进行流速测量时发现,在不同流速下测量信号均不稳定,噪音干扰非常显著,调整各项设置参数并无改善。结合 ADV 测速原理分析发现,导致此次测量误差较大的原因是水流中缺少足够的悬浮颗粒物对超声波信号进行散射。因此,本试验采用向水流中掺混悬浮颗粒物的方法,解决超声波散射信号弱的问题,提高 ADV 的测量精度。

本试验选用的颗粒物为聚氯乙烯树脂粉,其外观为白色无定形粉末,不溶于水,粒径为 $60 \sim 250 \mu\text{m}$,表观密度为 $0.40 \sim 0.60 \text{ g/mL}$ 。聚氯乙烯树脂颗粒是多孔的,颗粒内部平均疏松度高于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ ^[16]。由于聚氯乙烯树脂颗粒内部空隙的存在,其真密度与水的密度接近。通过试验观察,聚氯乙烯树脂颗粒可长时间悬浮于水流中。掺混入水流中悬浮颗粒物的含量不仅影响流速测量精度,而且关系到试验材料成本。在试验中,通过逐渐增加颗粒物含量进行测试发现,当颗粒物含量大于 106 g/m^3 时,ADV 测量信号收到干扰较小,再继续增加颗粒物含量对测量精度改善不明显。因此,对于本试验采用的悬浮颗粒物,推荐含量为 106 g/m^3 。

3.2 试验验证

利用 ADV 分别测量了清澈水质水流和掺混聚氯乙烯树脂颗粒水流的流速,以验证上述方法可改善 ADV 的测量精度。试验中水泵转速恒定,在出水口和试验段上游安装格栅型稳流器,造流开始后等待 15 min ,以确保水槽中形成均匀稳定的流场。两种情况下流速随时间变化的过程线如图 6 所示。从图中可以发现,ADV 测量清澈水质水流的流速时测量信号很不稳定,波动幅度很大,噪音干扰显著,这与水槽中流场的实际情况不符。向水中掺混适量悬浮颗粒物以后,ADV 测量信号的稳定性得到明显改善,波动幅度很



(a) 清澈水质的水流

(b) 掺混悬浮颗粒物的水流

图 6 流速随时间变化过程线

小,噪音干扰被消除。

两种情况下流速的统计参数如表 2 所示。其中,极差是流速的最大值与最小值之差,反映了测量信号的最大波动范围;方差是用来衡量测量信号相对平均值的离散程度。极差和方差越小,说明测量信号的波动越小,数据越稳定。从表中可见,向清澈水质水流中掺混悬浮颗粒后,流速的极差和方差均大幅度减小,说明测量结果的波动明显减小,数据更稳定,与水槽均匀流的实际情况相吻合。因此,在水流中掺混颗粒物的方法能够减少 ADV 测量误差,提高测量精度。

表 2 流速统计参数对比

水质特点	极差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	方差/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2})$
清澈水质	0.219	10.2
掺混颗粒物	0.030	0.4

4 水槽流速分布

4.1 试验设置

在水槽试验段沿垂向均匀布置 10 个测点,1[#]测点距水面 0.05 m ,10[#]测点距水底 0.05 m ,每 2 个相邻测点之间的距离为 0.05 m ,如图 7 所示。在流速开始测量前,按照 106 g/m^3 的含量向清澈水质的水流中掺混聚氯乙烯粉末,使颗粒物均匀地悬浮在水流中。

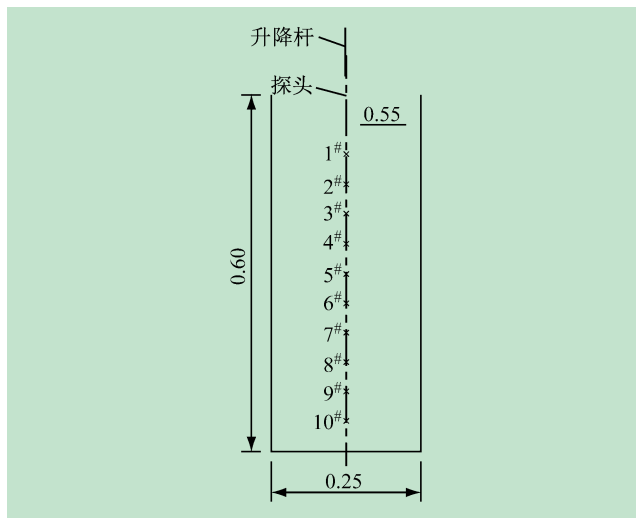


图 7 测点分布(m)

水泵转速通过调整变频器的频率来控制,从而调整水槽流速。变频器频率从 10 ~ 43 Hz,间隔为 3 Hz,共设置 12 组试验。试验过程中分别测量各个频率所对应的垂向流速分布,调整变频器频率后,等待 15 min 后开始下一组测量试验,以确保水槽中的流场均匀稳定。在测量某一频率下的垂向流速分布时,沿垂向滑动升降杆来调节探头的入水深度,从而对各个测点的流速进行测量。

4.2 试验结果

不同变频器频率对应的流速沿垂线的分布结果如图 8 所示。从图中可以看出,水槽沿垂向分布各测点的流速均随着水泵变频器频率的增加而增加。在同一变频器频率下,水槽沿垂向分布各测点的流速并不相同,而是呈现从水槽底部向顶部逐渐增大的趋势。对各个变频器频率下沿垂向分布 10 个测点的流速进行统计分析,得到与变频器频率相对应的平均流速和方差,如表 3 所示。方差用于衡量某一变频器频率下垂向各测点流速偏离平均流速的大小,方差越大,说明垂线上 10 个测点流速的差异越大,流速沿垂线分布越不均匀。

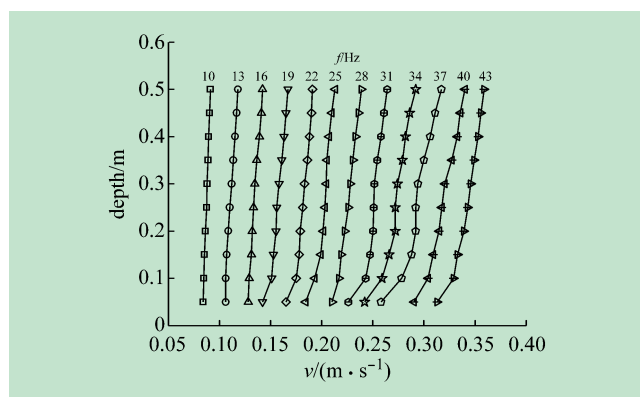


图 8 不同的变频器频率对应的流速沿垂线分布

表 3 不同变频器频率下的平均流速与方差

变频器频率/Hz	平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	方差/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)
10	0.087	0.04
13	0.111	0.16
16	0.135	0.25
19	0.157	0.49
22	0.182	0.64
25	0.202	0.64
28	0.226	0.81
31	0.251	1.21
34	0.272	1.96
37	0.294	2.89
40	0.319	2.56
43	0.342	1.96

从表中可以看出,随着变频器频率的增加,垂向上各个测点流速的方差明显增加,说明随着频率的增加,垂线上各点流速的差异更加显著。总体而言,垂向流速分布接近于线性关系,形成剪切流分布形态,而当平均流速较高时,靠近水槽底部的流速随高度呈现一定的非线性变化。

造成垂向流速分布不均匀的原因与水槽的造流方式和结构有关。在水槽出水口处,水流垂直于水槽底部向上流出,之后流向由竖直向上变成水平,导致在水槽出水口附近的流速呈现水槽顶部流速较大,底部流速较小的分布状态,并且水泵转速越大,水槽顶部流速与底部流速相差越大。此外,水槽顶部为流体的自由表面,而水槽底部为固壁边界,存在壁面流动摩阻影响,导致水槽底部流速小于顶部流速,而流体黏性作用使垂向流速分布趋向于剪切流。随着平均流速的增加,底摩阻的影响更加显著。

运用最小二乘法对断面平均流速与变频器频率进行了线性拟合,相关系数 $R^2 = 0.999\ 86$,拟合效果如图 9 所示。

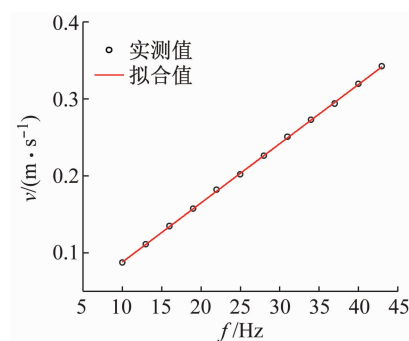


图 9 平均流速与变频器频率的线性关系

变频器频率 f 与流速 v 的关系式如下:

$$v = 0.007\ 7f + 0.011\ 3$$

可见,水槽平均流速与水泵变频器的频率之间具有很好的线性关系。在试验过程中,运用平均流速与变频器频率的拟合公式,通过调节变频器的频率可以精确地设定水槽的平均流速。

5 结 语

针对 ADV 测量清澈水质水流的流速时存在精度较低的问题,本文采用向清澈水质水流中掺混适量悬浮颗粒物的方法,显著地提高了 ADV 的测量精度。本试验中,悬浮颗粒物的推荐含量为 $106\ \text{g}/\text{m}^3$ 。采用该方法测量了不同流速时的水槽断面垂向流速分布,发现垂向流速分布不均匀,呈线性剪切流分布。导致断面流速沿垂向分布不均匀性的原因是受到水槽出口口的布置方式和水槽壁面及底面摩阻的影响。通过最小二乘法拟合,得到了水泵变频器的频率与断面平均流

速之间的良好线性关系。试验中,可运用该线性关系式来指导流速的精确调节。文中提高 ADV 测量精度的方法,在水槽试验中具有普遍的适用性,可供相同类型试验借鉴。

参考文献 (References):

- [1] 严军,王二平,孙东坡,等. 矩形断面明渠流速分布特性的试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005(5): 59-64.
- [2] 陈兴伟,林木生,程年生,等. 粗糙透水床面明渠水流的垂线流速分布[J]. 水科学进展, 2013(6): 849-854.
- [3] 王二平,金辉,张艳艳,等. 矩形明渠流速分布特征及其在流量量测中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2008(4): 25-28.
- [4] 鲁娟娟. 流速测量技术对比研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2011(12): 6-8.
- [5] 文华,朱玉琛,付广. 流速仪在国内外的研究现状[J]. 舰船防化, 2007(3): 43-45.
- [6] 吴嘉. 流速测量方法综述及仪器的最新进展[J]. 计测技术, 2005(6): 1-4.
- [7] 许联锋,陈刚,李建中,等. 粒子图像测速技术研究进展[J]. 力学进展, 2003(4): 533-540.
- [8] 黄毅. 声学多普勒测流仪原理及应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2013(4): 119-121.
- [9] 肖洋,唐洪武,毛野,等. 新型声学多普勒流速仪及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002(3): 15-18.
- [10] Snyder W H, Castro I P. Acoustic Doppler velocimeter evaluation in stratified towing tank[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(6): 595-603.
- [11] 华明,唐洪武,王惠民,等. ADV 技术测量圆射流流场紊动特性实验[J]. 水利水运科学研究, 2000(3): 18-21.
- [12] 陈纯,蒋昌波,程永舟,等. ADV 在波浪边界层流动特性研究中的应用[J]. 泥沙研究, 2008(5): 60-65.
- [13] 叶小云,陈立,王有生,等. 泥沙浓度与水流紊动的试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003(2): 10-14.
- [14] Wang X Y, Yang Q Y, Lu W Z, et al. Experimental study of near-wall turbulent characteristics in an open-channel with gravel bed using an acoustic Doppler velocimeter[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(1): 85-94.
- [15] 刘月琴,万艳春. 弯道水流紊动强度[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003(12): 89-93.
- [16] 斯凡格林 P R,李隆岐. PVC 树脂的粉末性质[J]. 聚氯乙烯, 1986(2): 60-65.

(上接第8页)

阀门不能及时地进行响应,不仅会造成工业生产过程落后于工业要求的目标,甚至也有安全隐患。

与此同时,控制系统输出量的稳定性在生产过程中也占有很大的比重,输出量越接近设定量,控制过程越精确,越有利于生产过程的顺利进行;若系统输出不够稳定、超调较大,则不利于生产过程的精确控制,会导致生产效率不高,无形之中增加了成本,降低了经济效益;若输出大幅不稳定则可能产生安全问题。

所以,快速性和稳定性都要兼顾,需要综合考虑。由以上分析得,模糊 Smith 控制方法的动态响应和稳态性能均有很好的效果,能满足快速性和稳定性的要求,是一种有效的控制手段。

4 结 语

本文将模糊控制与 Smith 预估器设计结合,构成模糊 Smith 控制方法,将该方法与模糊内模以及传统 PID 控制方法进行对比。仿真结果显示,模糊 Smith 控制方法具有更好的动静态性能。对于工业过程,该方法能兼顾快速性和稳态性能,对智能阀门定位器进行及时和精确的控制提供了一种好的思路。

参考文献 (References):

- [1] 周欢喜. 气动智能阀门定位器设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [2] 金献军. 智能电气阀门定位器自整定算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [3] 赵明南,杨金堂,夏中愈,等. 智能阀门定位器控制方法的研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(2): 141-144.
- [4] Zhang L, Fu W Y, Li Y H, et al. Design and simulation about a self-tuning fuzzy-PID controller [J]. Journal of CHONGQING University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2009, 21(2): 192-195.
- [5] Makara S T. PID fuzzy logic controller system for DC motor speed control[J]. Directory of Open Access Journals, 2004, 8(1): 25-27.
- [6] 宋新甫,梁波. 基于模糊自适应 PID 的风力发电系统变桨距控制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 50-58.
- [7] Gaicia C E, Morari M. A unifying review and some new results[J]. Ind Eng Chem Proc Dev, 1982, 21(2): 308-323.
- [8] Edgar C R, Postlethwaite B E. MIMO fuzzy internal model control[J]. Automatica, 2000, 36(6): 867-877.
- [9] 白建云,尹二新,李春晖. 基于 PID 的模糊内模控制在炉内脱硫系统控制中的应用[J]. 热力发电, 2015, 44(1): 58-63.
- [10] 刘启辉,文云,张云龙. 基于一阶时滞系统的 Smith 预估器控制研究[J]. 工业控制与应用, 2014, 33(9): 11-14.
- [11] 曾庆良,顾强,仇毅,等. 基于 Smith 模糊 PID 控制的温室监控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(6): 1964-1966.
- [12] 廖宜亮. 智能阀门定位器的设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [13] 廖正军. 调节阀智能阀门定位器控制系统的研制[D]. 成都: 四川大学, 2003.
- [14] 李飞. 智能阀门定位器控制系统的研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015.
- [15] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 303-306.
- [16] Chen J, He Z F, Qi X. A New control method for MIMO first order time delay non-square systems [J]. Journal of Process Control, 2011, 21(4): 538-546.