

DOI: 10.19364/j.1674-9405.2020.01.010

灌区计量率定物理试验研究方法探析及应用

郭磊^{1, 2, 3}, 梅林⁴, 邱静^{1, 2, 3}, 王丽雯^{1, 2, 3}

1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635;
2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635;
3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510635;
4. 水利部信息中心, 北京 100053)

摘要: 目前灌区渠道计量方式多采用水位-流量法, 部分渠道受制于渠道结构复杂多变及率定条件不理想等, 难以准确测定水位-流量关系。针对实践中大量灌区结构条件较好但率定条件不理想的渠道, 探索采用单一物理模型试验研究的方法, 实现对多渠道水位-流量关系的精确率定。构建包含矩形、梯形及复式断面的规则渠道单一物理模型, 采用动态比尺方式实现水位-流量关系模型到原体的还原; 通过现场可测的少量水位流量数据对物理模型进行率定, 然后由全工况物理模型试验, 确定多组外包的水位流量, 通过相关分析实现对水位-流量关系的插补外延。经实际验证, 由该方法及现场监测水位推算的流量与实际值平均相差不超过5%, 可为规则渠道的水位-流量关系率定提供借鉴和参考。

关键词: 灌区计量; 水位-流量关系; 相关分析; 物理模型试验; 动态比尺; 规则渠道

中图分类号: S27

文献标识码: A

文章编号: 1674-9405(2020)01-0050-06

0 引言

为支撑最严格水资源管理制度的具体落实, 实现对水资源的精细化管理, 水利部启动了国家水资源监控能力建设项目(以下简称一期项目), 以实现对取用水、水功能区、大江大河省界断面的信息化监测。一期项目工程已于2016年完成验收。为进一步提高水资源监控能力, 水利部启动了国家水资源监控能力建设项目(2016—2018年)(以下简称二期项目), 二期项目在一期项目的基础上, 扩大了建设覆盖范围, 增加了建设内容, 完善了相关标准, 提高了监测数据的可靠性、准确性及系统稳定性, 可为实施最严格水资源管理制度提供有力的技术支撑^[1-2]。

灌区计量监测建设是国控二期项目的重点, 对于广东省而言, 灌区计量监测建设工程量占比超过60%以上(按监测点数), 是水资源监控建设的重点。灌区水量计量一直是南方丰水区农灌水统计的

难题, 灌区用水结构、取用水方式及水源多样等均给准确计量带来困难。广东省二期项目, 灌区计量大部分采用水位-流量关系法进行监控建设, 即现场监测渠道水位, 然后依据水位-流量关系确定渠道流量。因此, 准确而稳定的水位-流量关系是灌区计量的关键。

项目实施过程中发现, 部分灌区渠道受制于渠道结构复杂多变及率定条件不理想等, 难以准确测定水位-流量关系, 进而影响灌区计量精度^[3]。因此, 为对灌区水量较为准确的计量, 提出采用单一物理模型试验研究的方法, 实现对灌区多渠道水位-流量关系的精确率定^[4-5]。

1 研究方法及技术路线

1.1 研究方法

首先对灌区渠道进行水位-流量率定, 对不满足

收稿日期: 2019-05-28

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2016-11)

作者简介: 郭磊(1980-), 男, 安徽金寨人, 博士, 教授级高工, 从事水资源、水力学及河流动力学研究工作。E-mail: gl_gdsky@126.com

率定条件的渠道，即水位流量数据工况覆盖不全、集中度较高的渠道，测定监测点处的渠道断面结构型式和坡降。对项目中的所有断面结构规则但不满足率定条件的渠道进行统计分析，并根据河工物理模型试验技术规程，按重力相似准则，在室内构建动态比尺物理模型；通过现场测定部分水位-流量关系对物理模型进行率定；开展多组次全工况的物理模型试验，测定大变幅全覆盖水位流量数据；通过动态比尺物理模型相似律，实现由物理模型试验数据到原体测量数据的还原，再由灌区渠道水位流量相关分析，确定水位-流量关系算式，完成水位-流量关系率定。

根据 GB/T 28714—2012《取水计量技术导则》^[6] 要求，对于采用渠道取水的，计量误差应控制在 5%~7% 以内，为提高物理模型试验精度，现场尽可能量测多组水位流量数据，为物理模型提供率定依据。同时，现场应尽可能收集各渠道的历史流量或最高水位等运行信息^[7-8]，为物理模型试验确定边界条件提供参考。另外，为了能够在统一的物理模型中进行多渠道试验，模型设计要能兼顾不同渠道断面结构型式、坡降流量的边界值。

1.2 技术路线

对采用水位-流量法进行水量测量的矩形、梯形和复式断面渠道，首先进行原体水位-流量关系测定，若受限灌区渠道放水条件，无法进行中高流量测试的，则根据该渠道的结构型式、尺寸等进行物理模型试验研究，采用原体有限组次数据对物理试验进行校验，通过多组次物理试验确定覆盖低中高流量组次的渠道水位和流量序列。水位-流量关系率定技术路线如图 1 所示。

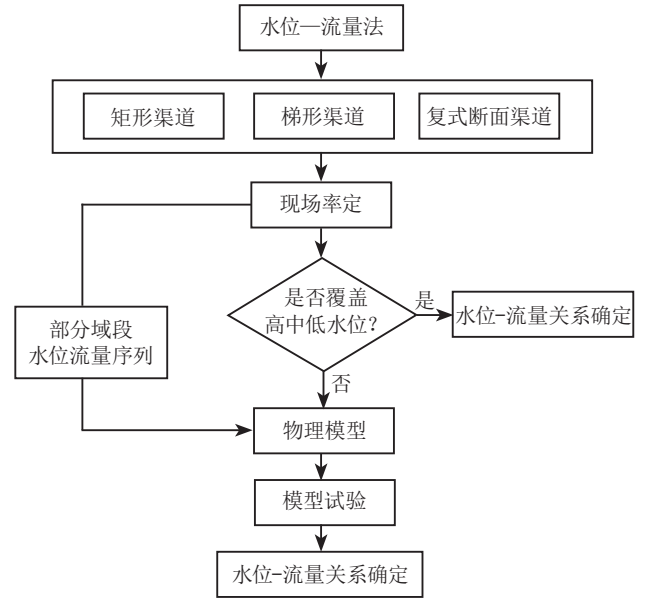
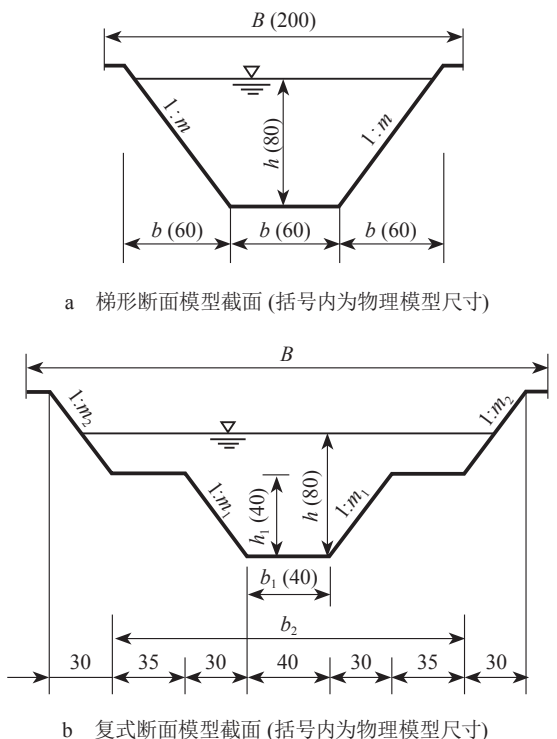


图 1 水位-流量关系率定技术路线

表 1 模型比尺

几何比尺	流速比尺	流量比尺	糙率比尺
$\lambda_1 = \lambda_i$	$\lambda_v = \lambda_i^{1/2}$	$\lambda_Q = \lambda_i^{3/2}$	$\lambda_n = \lambda_i^{1/6}$

示，模型平面布置如图 3 所示（图中箭头为水流方向）。在进水前池设置量水堰用于标定流量，大流量采用矩形堰测量，小流量采用三角堰测量。



a 梯形断面模型截面 (括号内为物理模型尺寸)

b 复式断面模型截面 (括号内为物理模型尺寸)

图 2 梯形及复式断面模型截面 (单位: cm)

2 模型设计及推算

物理模型主要对灌区渠道中常见的矩形、梯形和复式 3 种断面结构型式进行试验研究，测定分析水位-流量关系。考虑到测量点上下游渠道水流衔接过渡必须满足的条件，在模型测量点上下游布设 5 倍渠宽的顺直过流段。采用重力相似准则进行试验研究，模型比尺采用动态比尺 λ ，相关比尺如表 1 所示。

物理模型采用扭曲水槽形式布置，共设置 5 种不同模型尺寸渠道，其中矩形渠道宽分别为 0.4, 1.0 和 1.5 m，梯形及复式断面结构型式如图 2 所

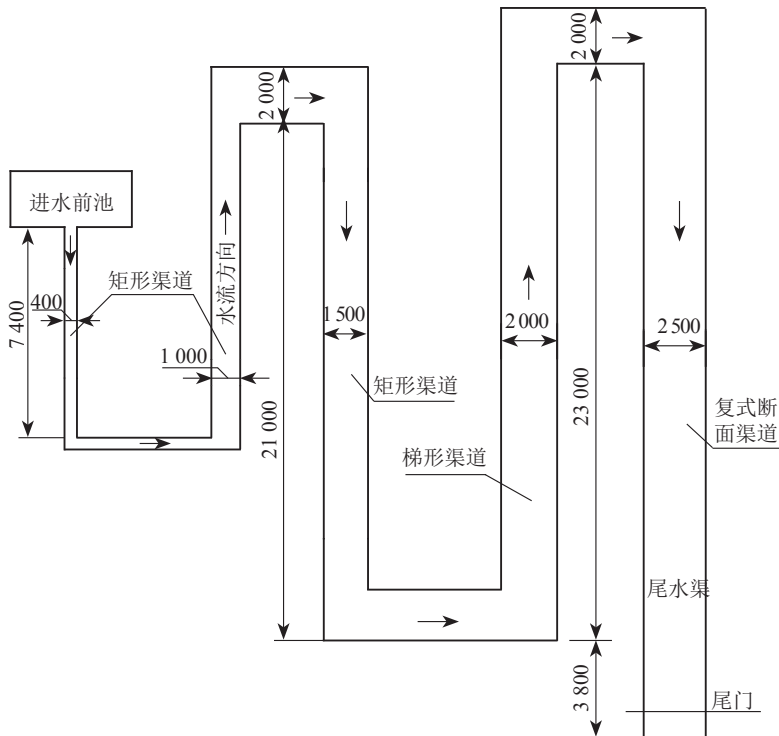


图3 模型平面布置示意图(单位: mm)

因试验采用单一的物理模型进行水位-流量关系测定, 物理模型糙率可调, 但模型几何尺寸固定, 对实际渠道断面水平和垂向几何比例关系与物理模型比例一致的矩形渠道, 可直接按表1中的比尺进行演算。对于实际渠道断面水平和垂向几何比例关系, 与物理模型不一致的梯形和复式断面渠道, 考虑到天然长直灌区渠道基本符合均匀流流态特征, 可采用曼宁公式修正因横纵比例不一致致使物理模型数据还原到原体数据产生的误差。对于糙率和坡度, 则主要通过多次反复调节物理模型表面粗糙程度, 并用实测部分数据对模型进行比对, 使得模型在糙率和坡度上与原体符合重力相似。

由曼宁公式计算出不同截面(含原体和模型还原2种结构)下的模型流量 Q_{m1} 和 Q_{m2} 的比例 r , 再由 r 校正模型推算的流量 Q_i , 确定最终的原体模型流量 Q 。

2.1 矩形渠道

对于矩形渠道, 实际渠道断面水平和垂向几何比例关系与物理模型比例一致, 因此, 可将渠道底宽原体和模型的比例定义为模型几何比尺。进行物理试验时, 各组流量和水位按此几何比尺对应换算, 通过试验数据还原后的相关分析可确定原体水位-流量关系。

2.2 梯形及复式断面渠道

对于梯形或复式断面渠道, 平面、垂向及坡度等存在比例不协调情况, 为减少因比例不协调导致的模型还原原体的误差, 首先按渠底比尺将模型截面还原到类原体渠道截面, 采用曼宁公式, 分别计算类原体渠道和原体截面同一水位下的流量比例, 按此比例对模型还原的流量进行校正, 再通过校正的流量和水位值进行相关分析, 确定水位-流量关系。

由曼宁公式, 渠道均匀流流量为

$$Q = \frac{AR^{2/3}}{n} \sqrt{J}, \quad (1)$$

式中: Q 为流量; A 为断面面积; R 为水力半径; n 为糙率; J 为坡降。

对于2种不同截面结构的渠道, 在糙率和坡降相同的情况下, 其渠道的流量比例 r 为

$$r = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A_1 \times R_1^{2/3}}{A_2 \times R_2^{2/3}} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{5/3} \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^{2/3}, \quad (2)$$

式中: A_1 和 A_2 分别为2种渠道的截面积; x_1 , x_2 分别为2种渠道的湿周; R_1 , R_2 分别为2种渠道的水力半径; Q_1 , Q_2 分别为2种渠道的流量。

对于梯形渠道, 湿周 x 算式如下:

$$x = b + 2h\sqrt{1+m^2}, \quad (3)$$

对于复式断面渠道, 湿周 x 算式如下:

$$x = b_2 - 2m_1h_1 + 2h_1\sqrt{1+m_1^2} + 2(h-h_1)\sqrt{1+m_1^2}, \quad (4)$$

式中: b 为渠道底宽; m 为坡度; h 为渠道水深。

由式(4)可见, 流量比例 r 不仅与截面的结构特征参数 b 和 m 相关, 还与相关的水深 h 有关, 因此, 在具体计算时, 每组试验流量、水位均需单独换算, 即针对不同试验水位 h_i , 计算确定不同的 r_i , 从而确定不同的原体流量 Q_i 。

3 试验及案例分析

3.1 物理试验数据分析

通过物理模型开展28组工况试验, 试验流量从0.005到0.150 m³/s, 确定不同截面渠道的水位, 试验结果具体如表2所示, 绘制的水位-流量关系曲线如图4所示。

表 2 试验成果数据

编号	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	不同结构断面试验水位/m				
		矩形(底 宽 0.4 m)	矩形(底 宽 1.0 m)	矩形(底 宽 1.5 m)	梯形(底 宽 0.6 m)	复式(底 宽 0.4 m)
1	0.005	0.119	0.059	0.046	0.079	0.270
2	0.008	0.166	0.080	0.061	0.105	0.286
3	0.011	0.211	0.098	0.074	0.127	0.299
4	0.014	0.253	0.114	0.086	0.146	0.312
5	0.018	0.308	0.135	0.101	0.170	0.326
6	0.022	0.362	0.154	0.115	0.192	0.34
7	0.026	0.415	0.172	0.128	0.211	0.352
8	0.031	0.480	0.193	0.143	0.234	0.367
9	0.033	0.506	0.202	0.149	0.243	0.373
10	0.039	0.583	0.226	0.165	0.268	0.389
11	0.043	0.633	0.242	0.176	0.283	0.399
12	0.049	0.709	0.265	0.192	0.305	0.413
13	0.056	0.798	0.291	0.209	0.329	0.429
14	0.060		0.305	0.219	0.342	0.438
15	0.065		0.323	0.231	0.358	0.448
16	0.073		0.351	0.250	0.382	0.465
17	0.076		0.361	0.256	0.391	0.471
18	0.085		0.392	0.276	0.415	0.488
19	0.083		0.385	0.272	0.410	0.484
20	0.097		0.432	0.302	0.447	0.510
21	0.098		0.435	0.304	0.449	0.511
22	0.111		0.477	0.331	0.481	0.534
23	0.108		0.467	0.325	0.474	0.529
24	0.116		0.493	0.341	0.492	0.542
25	0.132		0.543	0.373	0.528	0.567
26	0.134		0.550	0.377	0.532	0.571
27	0.146		0.587	0.400	0.557	0.589
28	0.150		0.599	0.408	0.565	0.595

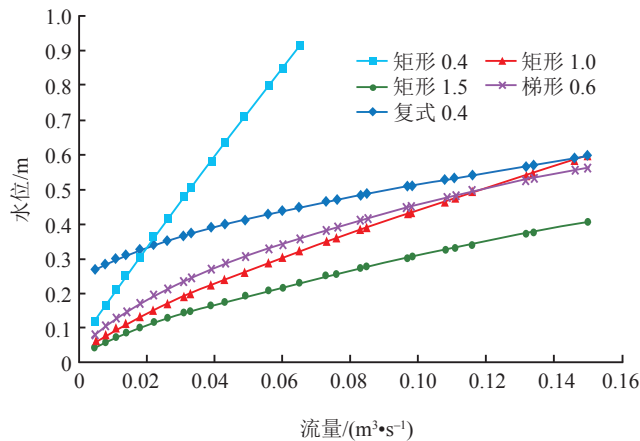


图 4 试验确定水位流量关系

由图 4 可见，试验确定的水位-流量关系良好，在大流量区间段，基本呈线性关系，在小流量区域段则呈指数项相关。

3.2 矩形渠道实例计算分析

某灌区渠道为矩形截面，宽为 0.8 m，材质为混凝土结构，测量点处渠道基本无淤积物，混凝土表面糙率约为 0.015。采用 0.4 m 宽矩形模型渠道试验数据进行原体的推算，按重力相似准则，模型平面比尺取 2，则流量比尺为 $2^{2.5} = 5.66$ ，糙率比尺为 1.12，模型糙率取抹光水泥砂浆即 0.013，则模型还原的糙率为 0.015，与原体基本一致，模型数据可用原体水位-流量关系分析。

将 0.4 m 宽矩形渠道试验数据按比尺还原到原体 0.8 m 宽矩形渠道，还原后的数据如表 3 所示。

表 3 试验成果数据 (矩形截面)

水位/m	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	水位/m	流量/(m ³ ·s ⁻¹)
0.119	0.005	0.238	0.028
0.166	0.008	0.332	0.045
0.211	0.011	0.422	0.062
0.253	0.014	0.506	0.079
0.308	0.018	0.616	0.102
0.362	0.022	0.724	0.125
0.415	0.026	0.830	0.147
0.480	0.031	0.960	0.175
0.506	0.033	1.012	0.187
0.583	0.039	1.166	0.221
0.633	0.043	1.266	0.243
0.709	0.049	1.418	0.277
0.798	0.056	1.596	0.317

现场采用流速-面积法进行监测，确定 16 组水位和流量序列，由于本渠道宽为 0.8 m，为提高测量精度，共布置 8 条测速垂向，流速采用 ADV（声学多普勒流速仪）测量，并采用浮子式水位计进行水位计量。将 20 组模型还原水位流量进行线性插值，可推算模型流量，与原型测量的水位流量比较结果如表 4 所示，水位-流量关系如图 5 所示。

由表 4 可知，各水位工况下原体 and 试验流量相对误差值大部分在 10.0% 以内，经过计算，相对误差的平均值为 -3.1%，相对误差绝对值平均值为 6.9%，就一个灌溉周期而言，基本满足《取水计量技术导则》计量误差要求。

表4 原体和试验流量比较(矩形截面)

原体水位/m	原体流量/(m ³ ·s ⁻¹)	试验流量/(m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%
0.33	0.039	0.043	10.3
0.35	0.044	0.048	9.1
0.37	0.049	0.052	6.1
0.39	0.054	0.056	3.7
0.41	0.059	0.060	1.7
0.43	0.064	0.064	0.0
0.45	0.069	0.068	-1.4
0.47	0.075	0.072	-4.0
0.49	0.080	0.076	-5.0
0.51	0.086	0.080	-7.0
0.53	0.091	0.084	-7.7
0.55	0.097	0.088	-9.3
0.57	0.103	0.092	-10.7
0.59	0.109	0.097	-11.0
0.61	0.114	0.101	-11.4
0.63	0.120	0.105	-12.5

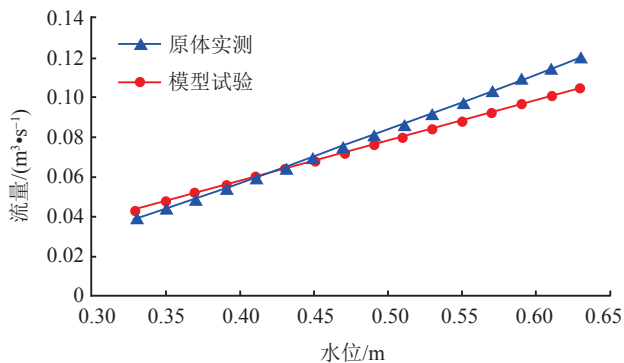


图5 模型试验和原体实测流量比较(矩形)

3.3 梯形渠道实例计算分析

某灌区渠道采用梯形渠道截面,底宽为2.5 m,高为1.0 m,边坡坡度为1:1.35,材质为混凝土结构,测量点处渠道基本无淤积物,混凝土表面糙率约为0.017。采用0.6 m底宽梯形模型渠道试验数据进行原体推算。模型比尺为4.17,则流量比尺为 $4.17^{2.5} = 35.5$,糙率比尺为1.27,模型糙率取抹光水泥砂浆即0.013,则模型还原的糙率为0.016,与原体基本接近,模型数据可用原体水位-流量关系分析。

考虑到模型边坡坡度为1:0.75,与原体坡度不一致,采用式(2)对模型还原流量进行修正。由表2试验数据按模型比尺4.17还原原体数据,并按式(2)对流量进行修正,结果如表5所示。

表5 模型还原流量计修正流量

试验水位/m	试验流量/(m ³ ·s ⁻¹)	还原水位/m	还原流量/(m ³ ·s ⁻¹)	校准系数	模型流量/(m ³ ·s ⁻¹)
0.079	0.005	0.329	0.18	0.987	0.175
0.105	0.008	0.438	0.28	0.987	0.280
0.127	0.011	0.530	0.39	0.987	0.386
0.146	0.014	0.609	0.50	0.988	0.491
0.170	0.018	0.709	0.64	0.990	0.633
0.192	0.022	0.801	0.78	0.992	0.775
0.211	0.026	0.880	0.92	0.993	0.917
0.234	0.031	0.976	1.10	0.995	1.096

通过物理模型还原的水位-流量关系,由实测的水位进行线性插值确定物理模型流量,与实测流量进行对比,比较结果如表6所示,水位-流量关系曲线如图6所示。

表6 原体和试验流量比较(梯形)

原体水位/m	原体流量/(m ³ ·s ⁻¹)	试验流量/(m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%
0.39	0.209	0.234	10.7
0.42	0.259	0.263	1.6
0.45	0.288	0.294	2.1
0.50	0.358	0.352	-1.8
0.71	0.688	0.634	-8.4

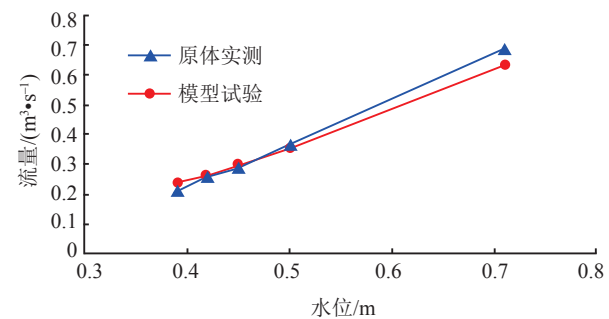


图6 原体和试验流量比较(梯形)

由表6可见,原体和试验流量平均相对误差为0.8%,平均绝对值相对误差为4.9%,基本满足《取水计量技术导则》计量误差要求。

4 结语

开展灌区渠道计量率定物理试验研究,解决原体率定条件不足下的渠道水位-流量关系率定,是必要和有实际意义的。相比原体观测和率定方法,物

理模型不受灌区现场率定条件限制，可开展全工况大变幅的水位流量试验。通过原体少量水位流量数据，可对物理模型进行精细化的率定，从而进一步提高模型的精度。

通过实例验证，采用物理试验确定的矩形和梯形渠道水位-流量关系与原体观测值吻合较好，平均相对误差均在 5% 以内，满足相关导则要求。用曼宁公式比法校准模型还原和实际的流量，可修正因糙率和比例不协调导致的计量偏差，可在满足精度要求的前提下大大节约现场率定的工作量，提高工作效率。

考虑到渠道现场条件多变，特别是计量点下游的水头损失与渠道糙率、形态及内部建筑物等均有一定关系，物理模型通过尾门和糙率调节模拟原体水力阻力，与原体存在一定差异，为确保物理模型试验方法的精度，建议用于水流和断面稳定，顺直段长度大于渠道最大流量时水面宽度 5 倍的渠道水位-流量关系的推算。

参考文献：

- [1] 吴永祥, 雷四华, 王高旭. 国家水资源监控能力建设项目标准的补充完善[J]. 水利信息化, 2018 (2): 53-60.
- [2] 付鹏, 任祖春, 黄旭, 等. 水资源监控能力建设对三条红线管理的支撑作用[J]. 东北水利水电, 2018, 36 (6): 26-28.
- [3] 任庆海, 马辉, 董自立. 农业灌区渠首计量设施调研与分析[J]. 水利信息化, 2015 (4): 39-43.
- [4] 汤海平, 郭磊, 刘中峰. 庵埠水厂取水计量率定物理试验研究[J]. 广东水利水电, 2018 (3): 48-51.
- [5] 郭磊, 邱颂曦, 杜涓. 某电厂加装取水计量装置及率定试验研究[J]. 广东水利水电, 2010 (10): 16-19.
- [6] 水利部水资源司. 取水计量技术导则: GB/T 28714—2012 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2012: 2-3.
- [7] 赖红根, 黄良夏. 驷马山引江灌区输水计量系统浅析[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26 (增刊 1): 136-137.
- [8] 关平. 浅谈景电灌区支渠水量自动计量系统[J]. 中国农村水利水电, 2004 (10): 26-27, 29.

Application and exploration of physical test research on water consumption measurement calibration in irrigation area

GUO Lei^{1,2,3}, MEI Lin⁴, QIU Jing^{1,2,3}, WANG Liwen^{1,2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources & Hydropower, Guangzhou 510635, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamics, Guangzhou 510635, China;

3. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510635, China;

4. Information Center, the Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: At present, water level-discharge method is mostly used in irrigation canal water consumption measurement. With different project constructions, it is found that some canals are constrained by complex and changeable canal structure and unsatisfactory calibration conditions, which make it difficult to accurately determine the relationship between water level and discharge, thus affect the measurement accuracy of irrigation areas. In view of the fact that a large number of irrigation canals have good structural conditions but unsatisfactory calibration conditions, the physical model test method is explored to achieve accurate calibration of the relationship between water level and discharge in regular canals. The physical models of regular canals such as rectangular, trapezoidal and compound sections are constructed, and the conversion of the physical model of water level-flow relationship to the original body is realized by changing the ratio. The physical model is calibrated by a small amount of water level-flow data which can be measured in the field, and then the physical model test under the whole working condition is carried out. Then it can obtain the interpolation and extension relationship of water level and discharge through correlation analysis. Relative mean deviation between the actual discharge and the calculated value from the method is not more than 5%. The method can provide reference for the calibration of water level-discharge relationship in regular canals.

Key words: irrigation area measurement; water level and discharge relationship; correlation analysis; physical model test; dynamic scale; regular canal