

非恒定流水力模型流量检测控制系统及其特性分析

虞邦义^{1,2},俞国青¹,马 浩²,武 锋²,蔡 华²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院,安徽 蚌埠 233000)

摘要 :介绍了由闭环数字化量水堰组成的、用于非恒定流水力模型量测的流量测控系统的组成、工作原理和控制方法,对该系统的动态性能指标和实际应用效果进行了详细分析和讨论,并与电磁流量计、电动执行阀组成的闭环测控系统进行了比较,结果表明,闭环数字化量水堰测控系统的检测精度较高。

关键词 :非恒定流,水力模型,流量测控,精密水位计

中图分类号 :TV13 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2003)01-0033-05

非恒定流水力模型,如防洪河工模型、溃坝模型、水电站及水泵站过渡过程水力模型等,入流过程是一个随时间连续变化的非恒定过程,流量测量与控制是水力模型上边界相似的基本条件和保证。通常的做法是将实际入流过程进行简化,用台阶式折线来近似代替入流的连续变化曲线,即用分段恒定流来近似模拟非恒定流,忽略了水流的惯性,这样不可避免地产生误差和振荡。

随着计算机技术、自动控制技术和水力量测技术的发展,这个问题逐步得以解决。第 1 种方法是选用电磁流量计和电动执行阀组成的闭环测控系统,进行入流测控。吴艳春等^[1]、蔡守允等^[2]、王庆新等^[3]采用的就是这种系统,其优点是既适合于清水模型,又适合于浑水模型;不足之处是费用高,且小流量调节精度较差。第 2 种方法是采用数字化量水堰。量水堰是传统的流量测量装置,根据不同的流量量程,采用不同的堰板,可获得较高的测量精度。量水堰量测精度一般可控制在 1.5% 左右。数字化量水堰测控系统又可分为两类。一类是闭环系统,即模型入流侧堰板固定,根据水位计所测堰上水头与目标堰上水头之差来调节量水堰弃水侧弃水流量,以保证入流侧堰上水头满足模型流量变化过程要求。陈先朴、吕列民、武锋等^[4~7]首先在淮河干流淮滨—正阳关段防洪模型中研制了此种测控系统,其调节装置是在弃水侧采用可逆电动机带溢流板上下运动以调节堰上水头。赵有皓、蔡辉等^[5]也研制了类似的测控系统,不同的是在弃水侧采用横拉格栅门来调节堰上水头。另一类是开环系统,即保持量水堰堰上水位不变,用步进电机直接调节入流堰板高度,从而改变堰上水头。堰板开启过程根据流量过程来事先设定,不存在反馈环。开环数字化量水堰实际应用较少^[8],尚未见其应用效果详细报道。从控制理论的角度分析,闭环电磁流量计—电动调节阀系统和闭环数字化量水堰系统应较开环系统完善,不会产生累积误差,成功应用的实例也较多^[1~7]。本文仅讨论闭环系统,着重研究其动态性能指标和实际应用效果,并与电磁流量计—电动调节阀闭环系统特性进行初步比较(后者的特性试验及分析另文讨论^①)。

1 系统的组成和工作原理

根据陈先朴、吕列民、武锋^[4~7]的研制方法,笔者在淮河干流正阳关至淮南(田家庵)段防洪模型、淮河临淮岗洪水控制工程枢纽水工模型中^②共研制了 5 套不同量程的闭环数字化量水堰测控系统,并配置了相应的闭环电磁流量计—电动机执行阀测控系统与之比较^[9,10]。下面以淮河干流正阳关至淮南(田家庵)段河工模型为例,讨论系统的组成及特性。

收稿日期 2001-11-22

基金项目 :国家自然科学基金资助项目(59979005)

作者简介 :虞邦义(1962—),男,安徽宿松人,博士研究生,教授级高级工程师,主要从事水力学及河流动力学研究。

① 马浩,虞邦义.电磁流量测控系统在非恒定流水力模型中的应用与特性分析.安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院,2001.

② 虞邦义,武锋,等.临淮岗洪水控制工程水工模型自动检测与控制系统.安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究院,2001.

模型平面比尺 $\alpha_L = 500$,垂直比尺 $\alpha_H = 80$, $\alpha_Q = 35\,770.88$, $\alpha_t = 55.902$.淮河干流鲁台子站(入流控制站)采用三角堰控制.换算成原型流量,计算公式为

$$H = \left(\frac{Q}{357\,770.88 \times 1.33} \right)^{\frac{1}{2.465}}$$

(1)

式中: Q ——原型流量 m^3/s ; H ——模型三角堰上水头 m .

由式(1)可见,通过把给定流量换算成水头,控制堰上水头,就可以实现流量的跟踪控制,其控制原理如图1所示.

图1所示的就是一个典型的位置闭环反馈控制系统,被调量是 Q ,输出控制是溢流闸门的位置,偏差量 e 是给定流量与输出流量的差值.

系统流量的测控精度取决于堰上水头测量所采用的水位计的精度.为此,笔者研制了一种新型水位计——AW远传振动针式精密水位计.该水位计主要由振动头、信号处理、放大驱动、交流伺服电机、光电编码器、单片机系统和RS485通讯接口等部分组成,结构框图如图2.其工作原理为:当仪器工作时,振动头以50 Hz的频率上下振动.当振动针与水面接触时,信号处理电路得到一高电平的信号;当振动针离开水面时,信号处理电路得到一低电平的信号.这样一来,当振动针正好在水面上下等幅振动时,信号处理电路得到一个占空比为50%的高、低电平变化的脉冲信号.当水位变化时,输入到信号处理电路中去的脉冲信号的占空比也将随之改变.如水位升高,则高电平时间长、低电平时间短(甚至可能没有低电平),此时单片机系统就控制电机使振动头向上运动,直至高、低电平的占空比再次达到50%时为止;当水位下降时动作相反.该仪器采用振动式测针,可避免杂质的吸附,抗干扰能力强,工作可靠性很高.

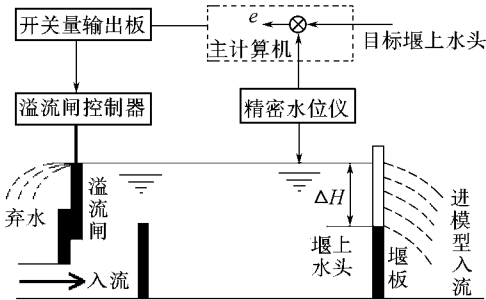


图1 系统控制原理示意图

Fig.1 System control principle

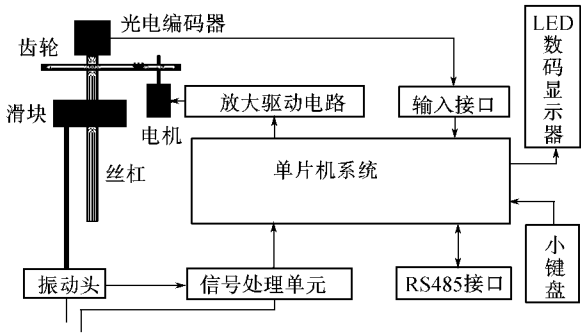


图2 AW远传振动针式精密水位计组成原理框图

Fig.2 Schematic diagram of AW precise water level gauge

2 控制原理和算法的实现

为改善控制系统的静态和动态品质,提高跟踪精度,采用了经典的PID控制算法^[4~7].

2.1 PID控制算法

PID是比例、积分、微分的英文缩写,典型的PID算式如下:

$$u_k = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

(2)

式中: $e(t)$ ——误差, $e(t) = r(t) - y(t)$; k_p ——比例系数; T_d ——微分常数; T_i ——积分常数.

将上式进行离散化,得到如下PID公式:

$$u_n = k_p \left(e_n + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^n e_k T + T_d \frac{e_n - e_{n-1}}{T} \right)$$

(3)

式中: u_n ——调节器输出; T ——采样时间; e_n ——第 n 次采样差值; k ——采样序列号.

根据系统的客观要求,采用增量式PID调节,把式(3)再进行变换:

$$\Delta u_n = u_n - u_{n-1} = k_p (e_n - e_{n-1}) + k_i e_n - k_d (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})$$

(4)

式中: k_i ——积分系数, $k_i = k_p (T/T_i)$; k_d ——微分系数, $k_d = k_p (T_d/T)$.

采用增量式PID调节有以下优点:(a)只输出控制增量,误动作时影响小;(b)手动/自动切换时冲击小;(c)算式中不需要累加,控制增量的确定仅与本次和前两次采样差值有关,容易获得较好的控制效果.

为了进一步改善系统性能,还进行了如下的改进:

a. 水位采集增加数字滤波. 由于水面干扰因素很多,为排除误动作,增加了数字滤波,采用平均值法:

$$SW_n = (SW_{n1} + SW_{n2} + SW_{n3})/3 \tag{5}$$

b. 对输出量增加死区和饱和限幅控制. 为消除频繁动作,又不影响控制精度,对流量偏差设置了死区,由于实际输出量是电机的动作时间,而采样周期又是一个恒定值(3 s),所以输出量幅度受采样周期限制,设置了饱和区. 即:

(a) 当 $|r(n) - y(n)| = |e(n)| < B$ 时,工作在死区,不计算输出.

(b) 当 $|r(n) - y(n)| = |e(n)| > B$ 时,计算输出,根据计算结果又分两种情况:第 1 种,当 $|T| \geq 2500 \text{ ms}$ 时 $T_0 = 2500 \text{ ms}$;第 2 种,当 $|T| < 2500 \text{ ms}$ 时 $T_0 = T$ (其中 T 为计算结果, T_0 为实际输出). 改进后的控制特性如图 3 ($T_0 = 2500 \text{ ms}$).

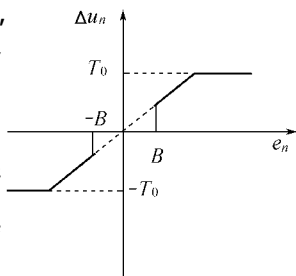


图 3 输出控制特性

Fig.3 Output control

2.2 系统 PID 控制参数的整定

用试验法,先对 P 进行整定,再稍微减小 P 值加入积分项,确定 I 值;如果达不到理想效果,出现过调或严重滞后,再加入微分项,进行超前调节. 本系统通过多次试验,整定结果为 $P = 8, I = 0.6, D = 0.2$.

3 系统性能指标的测试与分析

3.1 系统的阶跃响应

对系统加入 $u(t) = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 阶跃输入,特性曲线如图 4. 不同初始位置,阶跃响应特性曲线如图 5.

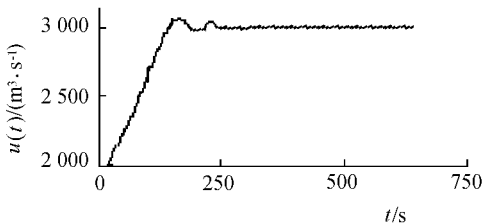


图 4 系统阶跃输入响应曲线

Fig.4 System response to step signal

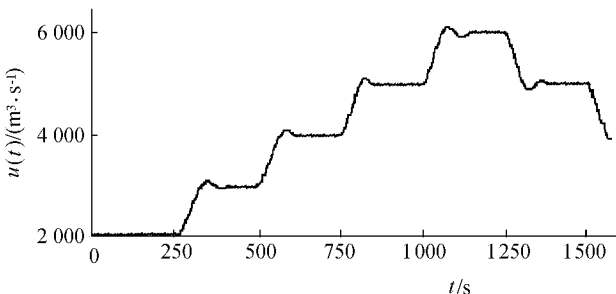


图 5 多步阶跃输入响应曲线

Fig.5 System response to multi-step signal

3.2 系统的数学模型

本系统包含几个复杂的环节,分析如下^[11~12]:

a. 量水堰水位变化可近似看为纯滞后一阶惯性环节,该环节传递函数为

$$\Phi(S) = A/(T_1S + 1) \tag{6}$$

b. PID 控制传递函数为

$$\Phi(S) = k_p(1 + \frac{1}{T_iS} + T_dS) \tag{7}$$

c. 流量与水位转换关系为

$$Q = 35770.88 \times 1.333H^{2.465} \tag{8}$$
$$\Phi(S) = A/S^{3.465} \quad (A \text{ 为常数})$$

拉氏变换为

以上忽略了电机的力矩特性,实际上电机启动力矩、溢流负载、数字滤波等因素对系统也有影响. 结合上述分析和实验结果曲线可见,本系统的数学模型可近似地看作二阶系统,其闭环传递函数为

$$\Phi(S) = \frac{K_V}{T_M S^2 + S + K_V} \tag{9}$$

又可写成

$$\Phi(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \tag{10}$$

式中: K_V ——开环增益, $K_V = k_d K_A K_m i_p$; ω_n ——无阻尼频率, $\omega_n = \sqrt{K_V/T_m}$; ξ ——阻尼比, $\xi = 1/(2\omega_n T_m)$;

σ ——衰减系数 $\sigma = \xi\omega_n$.

从阶跃响应特性曲线可分析出系统动态性能主要指标:

a. 峰值时间 t_p . 峰值时间是响应曲线达到超调量第一个峰值所需要的时间, 它表征系统反映的快速性. 从阶跃响应曲线可知:

$$t_p = 160 \text{ s} \quad (\alpha_t = 55.902)$$

b. 最大超调量(超出稳态值的最大偏移量). 最大超调量是反映系统平稳性的一项指标, 它是指超出稳态值的最大偏移量, 常用绝对值 M_p 和稳态值的百分比 σ 表示.

$$M_p = 50 \text{ m}^3/\text{s} \quad \sigma = 50/1000 = 0.05$$

c. 调整时间(响应曲线达到并不再超出该 2% 误差带的最小时间). 调整时间是表征系统过渡过程持续的时间, 也是反映系统快速性的指标.

$$t_s = 220 \text{ s}$$

d. 上升时间 t_r (从 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 上升到 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 所需时间). 上升时间是表征系统反应快速性的参数, 是指单位阶跃响应曲线从稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间.

由式 $\beta = \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\xi\omega_n} = \tan^{-1} 1.052 = 0.811$ 推导出

$$t_r = (\pi - \beta)/\omega_d = 118.8 \text{ s}$$

该结果与实测结果相符.

e. 延迟时间. 延迟时间也是表征系统反应快速性的参数, 是指单位阶跃响应曲线上升到稳态值 50% 所需的时间, 它更强调了系统在起始阶段的反应能力. 从图 4 可知:

$$t_d = 80 \text{ s}$$

f. 系统数学模型结构参数. 包括工作阻尼系数 ξ 、无阻尼自然频率 ω_n 和阻尼自然频率 ω_d , 据已知的 σ 和式 $\sigma = e^{-(\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2})}$ 得

$$\xi = 0.69 \quad \omega_d = \pi/t_p = 0.0196 \quad \omega_n = \omega_d/\sqrt{1-\xi^2} = 0.0270$$

3.3 实际测控效果分析^[10,13,14]

按《水工模型(常规)试验规程》, 恒定流时量水堰制作误差应控制在 $E_{r1} \leq \pm 1\%$.

闭环系统中加入了水位测量误差. AW 远传振动针式精密水位计分辨率为 $\pm 0.02 \text{ mm}$, 实际测控精度为 $\pm 0.1 \text{ mm}$, 可能最大误差为 0.2 mm . 对于矩形堰、三角堰, 设计最小水头 $H_{\min} \geq 30 \text{ mm}$, 按三角堰入流公式 $Q = 1.33H^{2.465}$ 进行计算, 则水位计带来的测控误差 $E_{r2} \leq \pm 0.5\%$. 考虑到系统反馈调节滞后作用, 还会产生调节与滞后误差 E_{r3} .

淮河干流鲁台子站 1991 年 6 月 12 日至 7 月 23 日共 40 天洪水过程, 按实测资料插值计算出流量记录 3890 组, 平均流量 $4879 \text{ m}^3/\text{s}$, 最小流量 $1519 \text{ m}^3/\text{s}$, 洪峰流量 $7480 \text{ m}^3/\text{s}$.

对上述 3890 组目标流量与模型实际跟踪控制流量进行方差分析^[10], 所得结果如下:

闭环数字化量水堰测控系统跟踪流量标准偏差 $\sigma_d = 21.9 \text{ m}^3/\text{s}$;

枯水流量时, 系统最大调节与滞后相对误差 $E_{r3m} = (21.9/1519) \times 100\% = 1.44\%$;

系统平均调节滞后相对误差 $E_{r3p} = (21.9/4879) \times 100\% = 0.45\%$;

洪峰流量时, 系统调节与滞后相对误差 $E_{r3f} = (21.9/7480) \times 100\% = 0.29\%$.

综上所述, 由于系统调节与滞后作用, 整个洪水过程的可能最大误差为 1.44% , 平均误差为 0.45% , 洪峰误差为 0.29% . 3 种因素累积产生的可能最大误差, 整个洪水过程均不超过 3% .

对比闭环电磁流量计-电动调节阀测控系统, 上述流量过程, 采用 E-mag 型电磁流量计 ($D = 200 \text{ mm}$), 平均跟踪标准偏差 $\sigma_E = 39.1 \text{ m}^3/\text{s}$, $E_{r3e} = 2.57\%$, 远大于数字化量水堰. 此外, 电动调节阀小开度时 ($e \leq 20\%$), 流量与输出信号间非线性关系明显, 影响小流量时测控精度, 跟踪曲线吻合程度远不及数字化量水堰. 若采用固定堰来率定电磁流量计流量与输出信号关系曲线, 则上述误差 E_{r1} 和 E_{r2} 在该系统中仍然存在, 其各项累积最大误差将达到 4.57% .

闭环数字化量水堰测控系统跟踪效果如图 6 所示.

4 结 束 语

- a. 以闭环数字化量水堰组成的流量测控系统在淮河干流上 3 个防洪模型中的应用表明,其检测精度高,性能稳定,能实现入流、出流的过程控制,避免了将天然流量过程人工阶梯化的误差,减少了振荡.
- b. 精密水位计是该系统的核心设备,笔者研制的 AW 远传振动针式精密水位计能满足该系统对堰上水头的测量要求.
- c. 系统性能指标测试表明,对流量过程变化较快的非恒定流水力模型,该系统仍满足跟踪控制要求.
- d. 对于恒定流水力模型,该系统能取代人工调节,使系统迅速达到给定流量,并在试验过程中自动补偿由于电力系统波动产生的流量偏差,实现水力量测的自动化.
- e. 与电磁流量计和电动执行阀组成的闭环测控系统相比,闭环数字化量水堰测控系统有价格和精度优势,适合于清水模型中使用.

参考文献:

[1] 吴艳春,惠钢桥.南水北调穿黄模型检测与控制自动化系统[J].长江科学院院报,1999,16(3):46—49.

[2] 蔡守允,雷学锋,魏延文.河工模型试验测量与控制系统[J].水利水运科学研究,1999(4):402—407.

[3] 王庆新,黄启明.水工模型试验自动化测控系统[J].水利水电技术,1998,29(8):43—45.

[4] CHEN Xian-pu, LU Lie-min, WU Feng. The system of model control and data acquisition in the Huaihe River Flood Control Mode[J]. Journal of Hydrodynamics(Ser. B), 1995, 7(4): 47—53.

[5] 陈先朴,吕列民,武锋,等.淮河防洪模型自动控制与检测系统[J].水动力学研究与进展(A 辑),1996,11(3):305—311.

[6] 吕列民,陈先朴.淮河防洪模型流量自动检测系统[J].治淮科技,1999(1):12—17.

[7] 陈先朴,武锋,吕列民,等.淮河防洪模型流量控制设备研制[J].治淮科技,1999(1):18—20.

[8] 吴建钢.数字量水堰.河海大学学报(自然科学版)[J].2000,28(2):85—87.

[9] 虞邦义,武锋.淮河干流正阳关至田家庵段大型河工模型自动检测与控制系统的研制[J].水利学报,2001(增刊):1—15.

[10] 虞邦义,葛国兴,梁斌,等.淮河干流正淮段大型防洪模型设计与试验验证[J].水利水电技术,2001,30(10):17—19.

[11] 陆进宏.自动控制理论实验教程[M].上海:上海交通大学出版社,1999.102—118.

[12] 唐光荣.微型计算机应用技术[M].北京:清华大学出版社,2000.57—83.

[13] 虞邦义,武锋,马浩.MCGS 组态软件及其在大型河工模型试验中的应用[J].泥沙研究,2001(6):46—49.

[14] 虞邦义,武锋,吕列民.河工模型量测与控制技术研究进展[J].水动力学研究与进展(A 辑),2001,16(1):84—91.

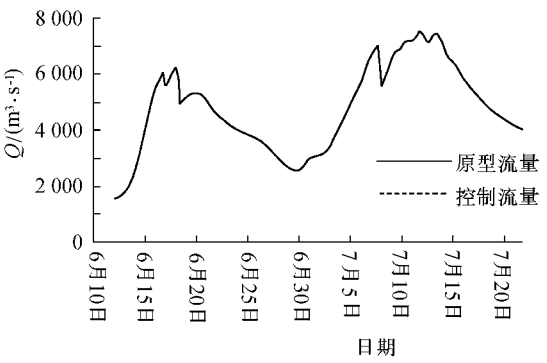


图 6 淮河干流正淮段防洪模型入流控制效果
Fig.6 Inflow control effects of flood model for the Huaihe River

Discharge measurement and control system for unsteady flow hydraulic model and its performance analysis

YU Bang-yi^{1, 2}, YU Guo-qing¹, MA Hao², WU Feng², CAI Hua²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China ;
2. Hydraulic Research Institute , Huaihe River Water Resources Commission , Ministry of Water Resources , Bengbu 233000 , China)

Abstract : An introduction is given to the composition , operation principle , and control method of a discharge measurement and control system , which consists of digitized close loop measuring weirs , and the dynamic characteristic indexes and applications of the system are analyzed in detail. As compared with other close loop measurement and control systems composed of electromagnetic flow meters and motor valves , the present system is of high precision .

Key words : unsteady flow ; hydraulic model ; flow rate measurement and control ; precise water level gauge