

何立新, 曹辰宇, 张峥, 等. 引黄济青明渠段输水控制系统的 MIL 测试系统设计与实现[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 1-9, 58. HE L X, CAO C Y, ZHANG Z, et al. Design and implementation of a model-in-the-loop test system for the Yellow River to Qingdao open channel water delivery control system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 1-9, 58. (in Chinese)

引黄济青明渠段输水控制系统的 MIL 测试系统设计 与实现

何立新^{1,2}, 曹辰宇^{1,2}, 张峥^{1,2}, 雷晓辉^{1,2}, 李翔^{1,2}

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要: 针对现有输水工程中闸泵站控制模型测试体系不完善的问题展开探索, 旨在进一步提升渠道输水控制模型在不同工况下的准确性和稳定性, 以确保输水工程现场的安全与高效运行。将引黄济青工程明渠段作为研究区, 将渠道输水控制系统中的控制模型作为测试对象, 并基于 LabVIEW(laboratory virtual instrument engineering workbench)开发系统组态, 以水动力模型作为环境仿真模型, 搭建模型在环(model-in-the-loop, MIL)测试系统, 实现了闭环测试, 验证所开发模型在环仿真系统和模型开发阶段对模型进行测试的可行性。本研究为渠道输水工程领域内的控制模型开发与测试工作提供关键的技术支撑, 为提升输水工程的运行效率及增强其安全性奠定了坚实的基础。

关键词: 渠道输水; 模型在环(MIL)测试; 水动力数值模拟; 控制系统; LabVIEW

中图分类号: TV698 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2025.0001

随着渠道输水控制系统自动化和智能化水平的提升, 这些系统将逐渐取代人工成为决策主体^[1], 这就对其可靠性和安全性提出了更高的要求。为确保这些控制系统能够在各种复杂的工况下稳定运行, 它们必须经过全面测试。V 型验证是一种软件开发和测试的方法^[2-3], 适用于控制系统的开发和验证过程。它将软件开发过程中的不同阶段与相应的测试阶段进行对应, 以确保控制系统的稳定性。其中的模型在环(model-in-the-loop, MIL)是基于模型的测试方法, 在测试环境集成控制模型与被控对象模型形成闭环仿真, 用于验证和测试控制系统模型^[4-5], 可有效降低开发成本和风险。

近年来, 智能汽车和航空航天等高科技行业迅速发展, 促使智能化和自动化成为主要趋势。这些行业对安全性要求严格, 因此 MIL 测试技术得到了广泛应用。国外在 MIL 测试方面研究较深入, 形成了完善的理论体系, 并制定了如 ISO 26262 等相关标准, 且多家公司开发了成熟的 MIL 测试

工具, 如德国 ETAS 公司的 ASCET。国内对 MIL 的研究起步较晚且未制定专门的 MIL 测试标准, 主要采用国际标准并集中应用在汽车行业。在汽车行业中 MIL 测试对于验证和优化自动变速箱、自动驾驶控制器等关键系统起到了至关重要的作用。王承强等^[6]构建 MIL 测试系统验证了自动变速器模型的可靠性; 姚逸程等^[7]通过 Simulink 协同仿真展示 MIL 在汽车传动系统模型验证中的价值, 能够提前发现问题并修正, 从而提高汽车传动系统的安全性及稳定性。

目前在水利行业的渠道输水工程中, 自动化控制模型鲜有应用, 且尚未形成完整的统一开发测试流程, 出现了模型专用、重复开发、不成体系等多种弊端。因此, 有必要形成一套完整的水力控制模型在环测试系统。将为 V 型验证中的软件在环(software-in-the-loop, SIL)测试、处理器在环(processor-in-the-loop, PIL)测试和硬件在环(hardware-in-the-loop, HIL)测试奠定基础, 对实现渠道输

收稿日期: 2024-06-18 修回日期: 2024-11-27 网络出版时间: 2024-12-04

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20241203.1914.002>

基金项目: 十四五国家重点研发计划项目(2023YFC3209400)

作者简介: 何立新(1966—), 男, 宁夏石嘴山人, 教授, 博士, 主要从事智慧水务与水安全方面研究。E-mail: helixin@hebeu.edu.cn

通信作者: 张峥(1981—), 男, 甘肃白银人, 副教授, 博士, 主要从事智慧水利方面研究。E-mail: zhangzheng@hebeu.edu.cn

水工程“无人值班、少人值守”的目标具有推动作用。

本文以 LabVIEW 作为开发环境,水动力数值模拟模型为环境仿真模型,渠道输水控制系统中的控制模型为测试对象,建立基于渠道输水控制系统的 MIL 测试系统,通过该系统,可在不同工况下模拟和验证控制模型的性能,从而降低开发成本,提高输水系统调控精度,确保工程安全可靠运行。本研究填补了渠道输水工程领域中对模型在环测试系统研究的空白,为渠道输水工程的自动化控制系统开发与应用提供了新思路。

1 渠道输水控制系统模型建立

1.1 研究区概况

以山东胶东调水工程引黄济青工程明渠段为研究区,起点为王樨泵站下游,终点为北胶新河倒虹闸上游,全长约 29 km,内部含 1 个分水口、2 座节制闸,按顺序依次为宋庄分水口、东黄埠节制闸(桩号:162+834)、入吴沟河节制闸(桩号:169+379)。

1.2 一维水动力数值模拟模型建立

水动力模拟是描述河流水动力过程规律的重要手段,可实现天然河道、调水工程、城市水网等复杂水系统的水情感知与时空变化规律模拟。渠道输水控制系统又以水动力数值模拟模型为控制对象,因此需要建立水动力数值模拟模型。在明渠调水工程中,调水长度总大于输水断面的宽度和深度,因此可将调水系统的水动力仿真近似概化为一维问题^[8]。一维水动力模型采用的基本控制方程为一维非恒定流的圣维南方程组,可用来描述渠道输水时从某一恒定流状态到非恒定流状态再回到恒定流状态下的水动力过程,表达式为

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

式(1)和(2)中: Z 为水位, m; Q 为流量, m^3/s ; B 为过水断面的表面宽度, m; t 为时间, s; x 为渠道沿程距离, m; q 为旁侧入流, m^3/s ; α 为动量校正系数; A 为过水断面面积, m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; S_f 为摩阻比降,由公式(3)计算:

$$S_f = \frac{n_c^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \quad (3)$$

式中: n_c 为输水渠道曼宁糙率系数; R 为水力半径, m。

之后通过 Preissmann 四点隐式差分格式对圣维南方程组进行数值离散^[9],并与概化后的闸门、分水口等内边界进行联立^[10],后利用“追赶法”进行求解差分方程^[11],建立含有调控建筑物的一维水动力数值模拟模型,并对模型参数进行率定,实现输配水过程中水情的时空连续模拟。

为验证一维水动力数值模拟模型是否满足日常调度需求及所率定参数的有效性,以胶东引黄济青调水工程进行验证,选取验证期为 2023 年 3 月 17 日 18 时—3 月 22 日 18 时。采用率定好的闸门过流系数与糙率系数对王樨泵站站后—北胶新河倒虹闸闸前进行一维水动力模型计算与验证,得到模拟区域内监测断面与非监测断面水情时空变化过程。

通过所建立的模型进行计算,部分断面的模拟结果见表 1 和图 1。本文在图 1 中的实际水位数据上添加了误差带,其宽度反映了模拟水位与实际水位之间的偏差程度。当模拟值与实测值之间的差异增大时,误差带相应变宽;反之,当二者差异减小时,误差带则变窄。可视化地展示了所建立一维水动力数值模拟模型的准确度,通过对比分析,发现模拟水位与实际水位的总体变化趋势基本一致。

表 1 东黄埠节制闸闸前断面部分模拟水位

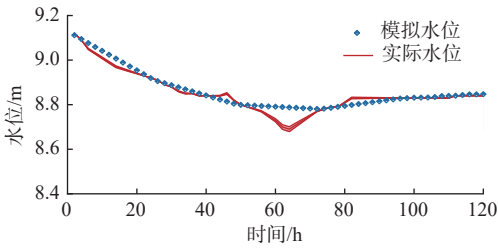
Tab. 1 Simulation water level at the upstream section of the Donghuangbu control gate

时刻/h	实测值/m	模拟值/m	误差率/%
1	10.191	9.886	2.99
2	10.168	9.877	2.86
3	10.148	9.868	2.76
4	10.131	9.859	2.68
5	10.116	9.850	2.63
6	10.101	9.841	2.57
7	10.087	9.832	2.53
8	10.076	9.823	2.51
9	10.066	9.814	2.50
10	10.060	9.805	2.53
11	10.051	9.796	2.54
12	10.048	9.787	2.60
13	10.040	9.778	2.61
14	10.036	9.769	2.66
15	10.030	9.759	2.70
16	10.024	9.750	2.73

表 1(续)

Tab. 1 (Continued)

时刻/h	实测值/m	模拟值/m	误差率/%
17	10.017	9.741	2.76
18	10.006	9.732	2.74
19	10.000	9.723	2.77
20	9.992	9.714	2.78
21	9.989	9.705	2.84
22	9.976	9.696	2.81
23	9.963	9.687	2.77
24	9.945	9.678	2.68
25	9.928	9.670	2.60
26	9.913	9.663	2.52
27	9.898	9.655	2.46
28	9.888	9.648	2.43
29	9.878	9.641	2.40
30	9.869	9.634	2.38



(d) 入吴沟河节制闸闸后水位

图 1 东黄埠节制闸和入吴沟河节制闸水位仿真

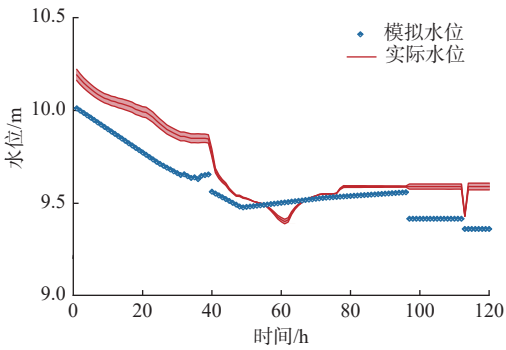
Fig. 1 Simulation of water levels at the Donghuangbu control gate and the Ruwugou River control gate

参考实测数据,模型误差控制在 4% 以内,虽个别时间点误差较大。考虑到糙率等参数的变动性和外部环境的影响,长期模拟可能累积误差。在合理选取参数条件下,该模型能满足胶东调水工程的需求,适合进行水力响应特性和闸门实时调控的研究。该模型的建立为模型在环测试系统提供了可靠的环境仿真模型,使控制模型能够在实际应用前完成全面而系统的闭环测试。尽管这种测试并非基于现场动态实时数据,但通过构建的水动力数值模拟模型,可以准确地模拟真实输水过程中水情的时空变化规律。这种方法不仅提高了模型在环测试结果的可靠性,也为后续的实际应用提供了科学依据。

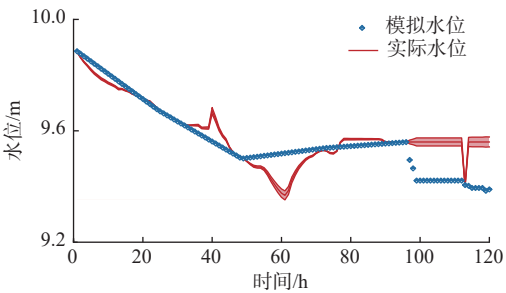
1.3 渠道输水控制算法设计

渠道输水控制系统以自动化控制算法为控制模型,因此需要完成渠道输水控制算法的设计^[12]。基于研究区域内闸门与控制渠池运行方式,建立 GA-PI 和 MPC 仿真控制器,并耦合一维水动力模型,通过模拟渠道输水系统进行控制器仿真研究与分析,完成输水系统控制算法的设计。研究框架见图 2。

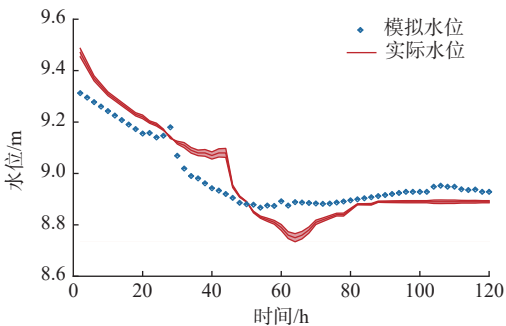
渠段 PI 控制可实现在闸前常水位运行方式下渠段下游闸门的闸前水位保持目标水位不变。设计 PID 仿真控制器的核心是 PID 控制算法的参数整定,合适的 PID 参数直接决定了研究区域中渠段的运行控制效果^[13]。现阶段,工业上的大部分 PID 控制器的参数设计是在被控对象的数学建模的基础上通过试算法来确定的,此法不稳定,且工作量较大,在渠道输水的运行过程中,很难根据现场的工况变化而灵活变动。试算参数的时不变性决定了其难以精确控制被控对象^[14]。因此,本研究设计基于遗传算法的 PI 仿真控制器^[15],采用遗传算法对设计的 PI 控制器进行参数优化,使 PI 控制器尽可能达到最优控制效果。基于 GA 的 PI 参数优化控制系统结构见图 3。



(a) 东黄埠节制闸闸前水位



(b) 东黄埠节制闸闸后水位



(c) 入吴沟河节制闸闸前水位

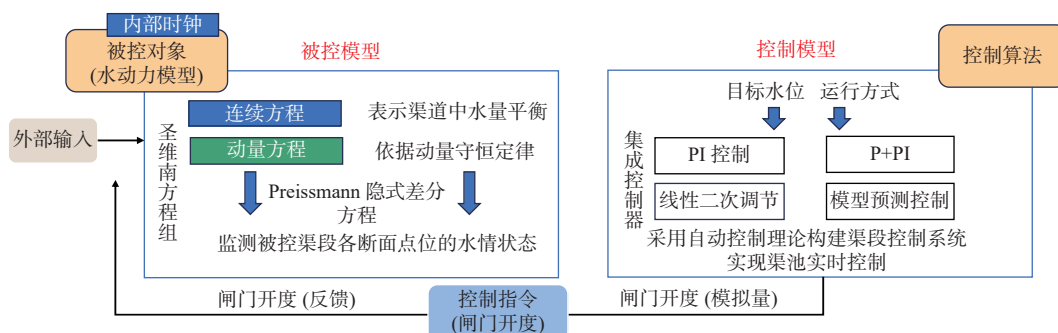


图 2 控制算法研究框架

Fig. 2 Control algorithm research framework

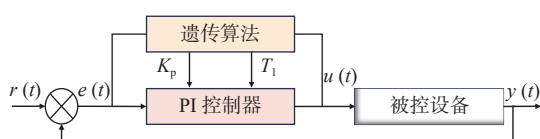


图 3 基于 GA 的 PI 参数优化控制系统结构

Fig. 3 Structural diagram of PI parameter optimization control system based on GA

渠道输水系统的动态过程不确定性大, 机理过程非线性强, 控制目标多维^[16], 导致明渠的状态难以直接用仿真模型进行长序列精确预测。基于仿真模型一次离线优化得到的优化调控策略可能无法在长时段内适用, 单一的 PID 控制难以保证系统性能保持最优, 控制效果有限。因此, 引入模型预测控制到输配水工程的实时控制系统中, 使模型失配、畸变、扰动等引起的不确定性及时得到弥补, 从而得到较好的动态控制性能^[17]。本文基于滚动预测^[18]思想, 设计了 MPC 控制器, 并将问题转化为求解二次规划问题。MPC 控制算法的结构见图 4。

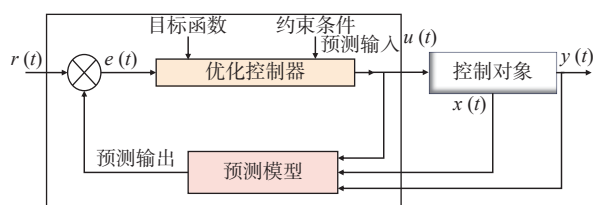


图 4 MPC 控制算法的结构

Fig. 4 Structure diagram of the MPC control algorithm

1.4 控制器仿真设计与实现

针对 GA-PI 控制器、MPC 控制器进行控制算法仿真验证。调控渠池以东黄埠节制闸(桩号: 168+834)为起点, 入吴沟河节制闸(桩号: 169+379)为终点, 全长 545 m, 底宽 12.31 m, 边坡系数为 2, 糙率为 0.03。采用闸前常水位控制运行方式。在水动力模型中, 采用仿真时间步长为 120 s, 根据现场闸门电机转速实际情况以及调度经验, 控制器控制间隔为 0.5 h/次。

GA-PI 控制器采用工况如下: 分水流量变化对运行水位影响。设置渠道上游初始流量为 12.31 m³/s, 人为制造不同程度的分水扰动, 以检验 GA-PI 仿真控制器效果。取水口分水流量设置为由 0 增加至 10 m³/s, 控制水位 9.7 m, 仿真步长 30 min, 仿真时间 24 h, 遗传算法迭代次数 Maxgen 为 50, 种群数量 N 为 30。

MPC 控制器采用工况如下: MPC 仿真控制器采用相同分水流量扰动工况, 以检验控制效果。预测时域 N_p 与控制时域 N_c 取相同值 25, 模型输入为状态变量水位与目标水位偏差, 输出控制变量 $U(k)$, 控制水位 9.7 m, 仿真步长 30 min, 仿真时间 24 h, 分水扰动下 GA-PI 与 MPC 仿真控制器控制效果见图 5。由图 5 可得, MPC 控制相较于 GA-PI 控制, 水位偏差最大变幅更小, 控制效果更好。这是由于 MPC 内部的预测模型可以预测时段内分水扰动对水位产生的变化, 可以提前进行控制动作, 在发生分水变化时, 相较于 GA-PI 控制可降低分水影响所带来的水位变幅。同时验证了所设计的 2 种控制算法的准确性及稳定性。

2 MIL 测试系统的设计与实现

本研究的核心是搭建 MIL 测试平台, 其主要优势在于可以利用 MATLAB/Simulink 仿真平台开发的模型替代实际硬件, 模拟硬件的响应, 从而有效降低测试成本和风险。同时, MIL 能够模拟系统的多种行为, 包括闸门控制、水力响应特性和环境条件, 使得研究人员可以在算法正式应用前进行全面测试, 避免潜在危险事故的发生, 缩短开发周期并节省成本。此外, MIL 测试支持在不同情况下暂停仿真, 研究人员能够在系统行为异常或出现意外结果时快速停止仿真, 深入分析问题根源, 准确识别并定位模型设计缺陷, 及时采取纠正措施。通过充

分设计的被控对象的环境仿真模型, MIL 还能够模拟难以在实际条件下实现的复杂工况,并快速切换不同工况,从而显著提高测试效率,确保控制算法在多变条件下的稳定性。将水动力数值模拟模型

与控制算法进行系统集成于一台虚拟仪器,并在 LabVIEW 环境中构建基于渠道输水控制系统的模型在环测试系统。

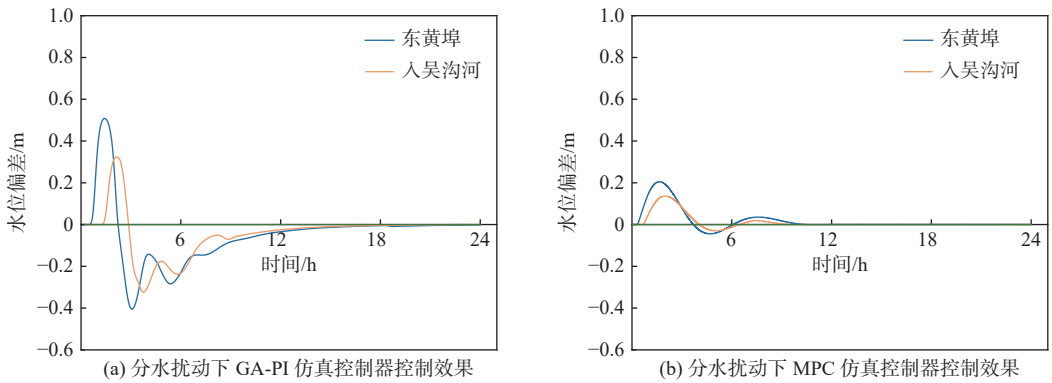


图 5 分水扰动下 GA-PI 与 MPC 仿真控制器控制效果
Fig. 5 Control effect of GA-PI and MPC simulation controllers under water splitting disturbance

2.1 基于 LabVIEW 的系统组态设计

LabVIEW 是专为测试、测量和控制应用而设计的系统工程软件^[19-20],其采用图形化编程的方式,具有针对大多数主流的测试仪器、数据采集设备的驱动程序,可以快速构建测试平台的功能模块,并通过数据线相互连接。同时,LabVIEW 具有丰富的函数库,使得测试平台的原型开发更高效,开发周期更短。本文采用 LabVIEW 软件,通过前面板平台界面设计和程序框图编程设计渠道闸门控制系

统的模型在环测试平台。平台主要有 2 个界面:主界面和测试界面。

主界面分为模型参数设置和模拟结果展示。参数设置涉及边界类型、模拟时段、渠道形状与断面个数、时间步长等。模拟结果展示部分是对水动力数值模拟模型计算部分结果的展示,通过设置模拟内边界和展示数据,可展示与设置目标相对应的模拟数据、历史监测数据以及误差值,并绘制出模拟值曲线图。主界面设计见图 6(a)。



图 6 主界面与测试界面设计
Fig. 6 Design diagram of main interface and testing interface

测试界面用于评估控制系统的算法执行性能,支持 GA-PI 和 MPC 算法,可扩展其他算法。监测界面实时显示控制效果,包括状态变量的变化值和控制变量的输出值。调试界面允许设置仿真参数和运行工况,模拟实际工程的不同阶段进行多轮测试,结果自动存库以核实模型准确性和稳定性。测

试界面设计见图 6(b)。

2.2 模型调用

为确保在 Simulink 等仿真平台上开发的渠道输水控制模型在不同工况下展现出其准确性与稳定性,利用库函数节点(dynamic link library, DLL)作为模型功能接口的动态载体,与 LabVIEW 软件联

动^[21],实现模型的即时调用和状态反馈。步骤如下:

实时仿真与水动力模型 DLL 可执行文件的交互。LabVIEW 可通过 DLL 实现与控制模型的动态链接。LabVIEW 通过 DLL 中存储的是预先定义好的函数与仿真模型进行实时交互。识别路径、函数名称以及相关的参数信息,传参和返回结果通过 DLL 的输入输出端口进行管理。

Simulink 模型的编译与集成:首先将 Simulink 模型中的关键控制单元分离,保持输入输出接口的连贯性,以确保外部信号的准确传递。随后,在 Simulink 环境中,使用特定的编译配置文件生成可以被 LabVIEW 调用的可执行文件,实现 Simulink 和 LabVIEW 两平台间的衔接,便于在 LabVIEW 平台上进行模型性能的测试和验证。

LabVIEW 与仿真模型的连接。在 LabVIEW 环境下,利用已编译的 Simulink 模型,构建一个实时仿真循环^[22]。通过一系列定制化的子 VI(virtual instruments),实现模型的加载(load model.vi)、模型状态的更新(take model time step.vi)以及模型的卸载(unload model.vi)。在每个仿真周期内,LabVIEW 与 Simulink 模型交换数据,并确保仿真的连续性。此方案的实施确保了模型的实用性和精确性,支持了各种复杂工况下控制策略的全面评估。

2.3 数据库与 LabVIEW 数据传输设计

在构建渠道输水控制系统的模型在环测试系统中,水动力模型变量输入与结果拟合均需要大量的水位、流量、闸门开度等历史监测数据,数据类型复杂,数据量庞大。为可靠、实时地对数据进行导入与管理,需将数据信息存入 MySQL 数据库中^[23]。这样,用户能够根据测试结果对控制系统进行调整和优化。在此背景下,数据库与 LabVIEW 的数据传输成为系统设计的重要组成部分。下面从设计思路诠释内容。

数据库集成。本研究中数据库的作用主要为两方面:一是作为数据仓库存储调水工程的历史监测数据和测试时产生的数据;二是作为数据交换平台传递控制参数及命令。考虑到实时性和高效性的需求,选择 MySQL 数据库是因为其开源、高性能且可跨平台。Navicat 作为图形界面工具,提供直观的数据库管理和维护功能,方便测试系统用户对数据库进行操作。

LabVIEW 数据通信方式。选择 LabVIEW 与 MySQL 之间进行通信是基于其能够提供直观的编

程环境和灵活的数据接口。LabVIEW 的数据库工具箱支持基于 ADO(activeX data objects)的数据库访问技术^[24],可通过 ODBC(open database connectivity)标准与 MySQL 数据库进行交互。该通信方式允许 LabVIEW 执行 SQL 语句,实现对数据库数据的查、添、改、删等操作,并通过图形界面直接展示给用户。

设计与实现。针对模型在环测试系统的设计,需要确保数据库结构能够反映出渠道输水工程的特点和测试需求。因此在数据库设计阶段,需根据渠道系统的动态特性和控制算法的需求确定数据表结构和关系模型,以支持高效的数据流通和处理。

在 LabVIEW 平台上,采用数据流驱动的编程范式对数据库进行操作。在具体实施过程中,配置 ADO 连接数据库,通过 SQL 执行子 VI 发送 SQL 命令至数据库进行数据读写。在此基础上,开发操作界面,直观地监控和操纵测试过程中的数据交互。

LabVIEW 与 MySQL 建立通信的具体步骤如下:首先,配置 MySQL ODBC 驱动,创建数据源;其次,连接 Navicat,设计数据库结构;最后,LabVIEW 调用 LabSQL 中 Fetch a Table.vi,实现 MySQL 数据修改、传输以及显示功能。

3 测试应用

进入主界面,根据实际工程情况与模拟需求,进行水动力模型参数选择与设置。选择东黄埠节制闸闸前水位进行模拟结果展示,开始计算后,部分数据及结果在界面显示(图 7),可见模拟误差在合理范围内,适合进行渠道输水控制系统的模型在环测试。

进入测试页面,选择相应控制算法;算法确定后,调控参数随之确定。进入调试界面,选择不同模型参数及不同扰动工况。以分水流量变化为例,渠池下游分水口分水 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在同一工况下,选择 GA-PI 算法与 MPC 算法,确定输入步长等参数后,开始调控。2 种算法控制效果和调控过程以动态曲线的形式显示在界面图表中,见图 8。

经测试,GA-PI 控制算法与模型预测控制算法针对同一种典型工况,采用 ASCE 推荐渠道自动化控制算法评价指标^[25]进行评价。评价结果见表 2。



图 7 平台水动力仿真

Fig. 7 Hydrodynamic simulation of platform

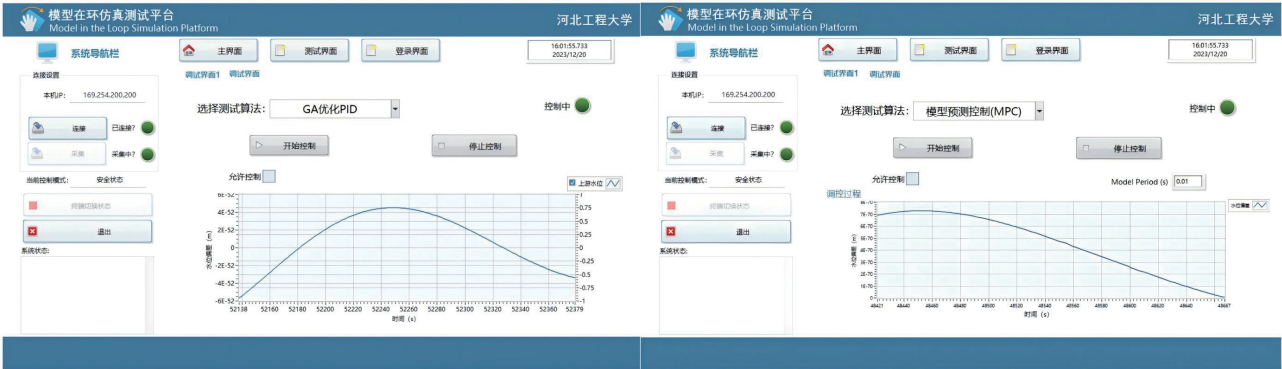


图 8 测试界面仿真

Fig. 8 Test interface simulation

表 2 2 种控制算法下的评价指标

Tab. 2 Evaluation metrics under two control algorithms

控制算法	稳定时间/h	最大绝对误差/%	平均相对偏差/%	静差/%
GA-PI	14.0	3.34	1.250	0
MPC	10.5	1.39	0.506	0

经测试及评价指标可得, GA-PI 控制算法与 MPC 控制算法在下游闸前常水位运行方式下, 面对渠中分水口的分水扰动, 最终均可实现静差为 0 m, 即 2 种算法均能够通过动态调整闸门开度, 将控制点水位稳定在目标值。具体而言, 当分水扰动引起水位偏差时, GA-PI 控制算法基于遗传算法优化的 PI 参数进行控制, PI 控制器根据当前的系统状态进行反馈调节, 通过调整闸门开度, 逐步消除水位偏差, 最终将水位稳定在目标值上; MPC 算法则通过滚动预测, 在每个控制周期内基于当前系统状态和预测的未来水位变化, 优化闸门开度调整量, 以提前应对可能出现的水位波动。MPC 算法的稳

定时间为 10.5 h, 比 GA-PI 算法的 14 h 缩短了 25%, 表明 MPC 与 GA-PI 相比, 因其具备预测能力, 能够在扰动后更快地调整闸门开度, 使水位更迅速地回到目标值, 且在此过程中 MPC 的最大绝对误差为 1.39%, 明显低于 GA-PI 的 3.34%, 这表明 MPC 控制算法在调整过程中更为精确, 水位的偏差较小。MPC 的平均相对偏差为 0.506%, 而 GA-PI 为 1.25%, 这意味着 MPC 能够更均匀地保持水位在目标值附近, 波动幅度较小。从控制效果来看, MPC 表现更为优越。因此, 本研究开发的模型在环仿真平台能够有效地在模型开发阶段对模型进行测试与验证, 充分展示了模型在模型环境中的性能及可行性。

这一测试体系为进一步优化和提升控制模型在实际工程中的应用奠定了基础。

4 结论

以现有输水工程中闸泵站控制模型测试体系不完善的问题为导向,通过搭建数据库与组态系统实现数据通信,并调用水动力模型与渠道控制模型,搭建模型在环仿真系统。以胶东调水引黄济青工程为例,对其控制模型进行测试。结果表明,所开发系统能在渠道输水控制模型运用到现场之前,对其进行有效测试,为提高控制模型的准确性、稳定性,降低开发成本,实现输配水精细化水力水量管理提供指导和参考。

参考文献:

- [1] 孔令仲,王浩,雷晓辉,等.基于线性预测控制算法的明渠实时控制研究[J].水利学报,2020,51(3):326-334. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190505.
- [2] 涂明煜.硬件在环测试技术在线控制动系统开发中的应用[J].上海汽车,2023(9):33-37. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4554.2023.09.06.
- [3] 李金华,马子焜,刘佳,等.船用柴油机电控系统硬件在环测试平台设计验证[J].柴油机,2023,45(2):10-15. DOI: 10.12374/j.issn.1001-4357.2023.02.003.
- [4] 孙贵斌,卓文得,李英,等.基于 MIL 的整车控制器模型开发及功能验证[J].电子机械工程,2019,35(6):57-60. DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2019.06.014.
- [5] 田士炜.智能车算法仿真测试平台搭建与事故场景下的算法测试研究[D].长沙:湖南大学,2020. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2019.003305.
- [6] 王承强,田颖,马云飞,等.基于 AMESim 和 Simulink 的自动变速箱模型在环试验研究[J].机械设计与制造,2024(5):1-5. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2024.05.008.
- [7] 姚逸程,周文华.基于 FMI 标准的传动系统模型在环虚拟车辆仿真研究[J].机电工程,2017,34(8):938-942. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.024.
- [8] 位文涛,靳燕国,张召,等.南水北调中线工程流量监测站点倒挂数据清洗模型及应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(6):1158-1167. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0114.
- [9] 王枫.基于 Preissman 四点隐式差分的洪水位计算方法[J].水科学与工程,2018(1):34-36. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2018.01.010.
- [10] 江春波,周琦,申言霞,等.山区流域洪涝预报水文与水动力耦合模型研究进展[J].水利学报,2021,52(10):1137-1150. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2021.0003.
- [11] 张晓波,闪丽洁,张瑶兰.追赶法在含闸分洪河道水动力计算中的改进研究[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21(1):10-22. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20220209.
- [12] 张雨萌,管光华.基于数值仿真的单目标多变量渠道控制参数寻优算法研究[J].灌溉排水学报,2020,39(12):78-86. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2019404.
- [13] 黄金龙,秦小元,沈博渊,等.基于神经网络和智能优化算法的水电机组自适应 PID 控制[J].中国农村水利水电,2022(9):195-200.
- [14] 刘宁,柴天佑.PID 控制器参数的优化整定方法[J].自动化学报,2023,49(11):2272-2285. DOI: 10.16383/j.aas.c220795.
- [15] 曾彬洋.一种基于遗传算法的 PID 参数优化方法[J].当代化工研究,2024(2):187-190. DOI: 10.20087/j.cnki.1672-8114.2024.02.060.
- [16] 孔令仲,雷晓辉,张召,等.多级串联明渠调水工程多目标水位预测控制模型研究[J].水利学报,2022,53(4):471-482. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210836.
- [17] 李汉元,张召,雷晓辉,等.明渠模型预测控制快速优化计算方法[J].排灌机械工程学报,2024,42(5):484-490. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.23.0021.
- [18] 曲逸,许芳,于树友,等.基于扩张状态观测器的车辆横摆稳定模型预测控制器设计(英文)[J].控制理论与应用,2020,37(5):941-949. DOI: 10.7641/CTA.2019.19018.
- [19] 裴吉,张猛,武春辉,等.基于 LabVIEW 的淮安一站水泵机组振动监测系统设计与开发[J].排灌机械工程学报,2023,41(3):217-223. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.21.0267.
- [20] 曾骥,曹铭,黄菊花,等.电池管理系统硬件在环测试系统研究[J].电源技术,2021,45(5):619-621. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087x.2021.05.016.
- [21] 陈振宇,秦琴,丁锋,等.基于硬件在环系统的故障注入自动测试平台设计与实现[J].信息与电脑(理论版),2022,34(6):115-118.
- [22] 于朝,王孙清,张杰,等.基于 LabVIEW 与 Matlab-Simulink 的深潜器舱口盖控制系统设计[J].自动化与仪表,2021,36(4):20-23. DOI: 10.19557/j.cnki.1001-9944.2021.04.005.
- [23] 张国喜,韩国福,冯德妍,等.基于 ADO 技术实现 LabVIEW 动态访问 MySQL 数据库[J].青海师范大学学报(自然科学版),2019,35(3):31-35. DOI: 10.16229/j.cnki.issn1001-7542.2019.03.006.
- [24] 熊群毓.大数据时代 MySQL 数据库的应用分析

[J]. 信息与电脑 (理论版), 2023, 35(14): 209-212.
 [25] 李泉华, 管光华. 基于改进雷达图综合指标的渠道

系统 PI 控制参数优化 [J]. 节水灌溉, 2022(10): 56-62. DOI: 10.12396/jsgg.2022124.

Design and implementation of a model-in-the-loop test system for the Yellow River to Qingdao open channel water delivery control system

HE Lixin^{1,2}, CAO Chenyu^{1,2}, ZHANG Zheng^{1,2}, LEI Xiaohui^{1,2}, LI Xiang^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Handan 056038, China)

Abstract: Addressing the uneven distribution of water resources and improving water ecological degradation, long-distance water transfer and cross-basin diversion through canal systems are effective approaches. The level of automation control of flow structures during water transfer directly impacts the efficiency of water distribution. With the rapid development of automation technology and continuous innovation in canal water transfer engineering techniques, canal water transfer control algorithms have been increasingly applied in practical water transfer projects. However, despite the expanding scope and depth of their application, a comprehensive and systematic development and test system for canal water transfer control algorithms has not yet been established, which affects the reliability of the algorithms to a certain degree. Various canal water transfer control algorithms that have not been fully developed and rigorously tested may not guarantee sufficient accuracy and stability when applied in the field under various working conditions.

A hydrodynamic numerical simulation model and a canal water transfer simulation controller were established based on the current status of the research area. A model-in-the-loop (MIL) test system was designed and developed for the canal water transfer control system. This MIL test system provides technical support for improving the accuracy of canal water transfer control algorithms, reducing development costs, and achieving fine management of water distribution.

Firstly, a one-dimensional hydrodynamic numerical simulation model was established. By discretizing the Saint-Venant equations using the Preissmann four-point implicit difference scheme, the unsteady flow conditions in the canal were described. Meanwhile, the internal boundaries such as sluice gates and water outlets were generalized into corresponding control equations using the mass conservation equation and flow-discharge relationships, coupled with the discretized Saint-Venant equations to establish a one-dimensional hydrodynamic numerical simulation model with regulatory structures. The model parameters were calibrated to achieve continuous spatial and temporal simulation of flow and water level during water distribution.

Secondly, an automated real-time control system for the canal was established. Based on the operation modes of the gates and control basins in the study area, PI (proportional-integral) and MPC (model predictive control) simulation controllers were developed using genetic algorithms. The established simulation controllers took the opening degree of the sluice gates as the system output, generating real-time control variables for the local end. The simulation controllers were deeply coupled with the hydrodynamic numerical model, forming a closed-loop control at the model level, considering different control conditions under various working conditions.

Lastly, the design and implementation of the MIL test system were completed. Taken the control algorithms in the canal automation control system as the test objects, the system configuration was developed based on LabVIEW, utilizing the hydrodynamic model as the environmental simulation model to achieve closed-loop test. The main contents included system configuration design, real-time invocation of the control model, and data storage, transmission, and communication with the MySQL database. Through testing in the MIL test system, the control algorithm established can effectively solve real-time canal control issues. The testing environment can be used to test the development of canal water transfer control algorithms, and the control algorithms can be replaced according

(下转第 58 页)