

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.18.008

# 一体化泵闸的发展及应用研究

陈静, 汉京超, 周娟娟, 曹晶

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 一体化泵闸是将闸门与水泵合二为一的一体化装置,与传统闸站相比,其在水力条件、占地面积、施工周期、工程投资、运行维护和智能化管理等方面有着明显的优势。一体化泵闸早期以闸门泵的形式出现,过去的十余年在河道防洪排涝、水环境提升及泵闸改造升级等类型项目中均有应用。结合一体化泵闸的应用,总结了一体化泵闸组成、适用范围和应用优势,分析了一体化泵闸应用中的发展瓶颈,并对未来发展进行了展望。未来,随着一体化泵闸行业标准体系的建立与完善以及泵闸性能的不断升级优化,一体化泵闸的应用场景和适用条件将不断拓展,在城市水务工程中发挥更大作用。

**关键词:** 泵闸一体化; 瓶颈分析; 行业标准; 安全性

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0049-06

## Development and Application Study of Integrated Pump Gate

CHEN Jing, HAN Jing-chao, ZHOU Juan-juan, CAO Jing

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The integrated pump gate is an integrated device combining the gate and the water pump. It has obvious advantages in hydraulic conditions, floor area, construction cycle, project investment, operation maintenance and intellectualization management compared with the traditional gate station. The integrated pump gate appeared in the form of a gate pump in the early stage, which has been applied in river flood control and drainage, water environment improvement, pump gate reconstruction and other projects in the past decade. Combined with the application practice of the integrated pump gate, the composition, application scope and advantages of integrated pump gate were summarized. The development bottleneck of the integrated pump gate application was analyzed, and prospects of future development were proposed. With the further development of the industry standardization construction and improvement, the performance of the integrated pump gate will be constantly upgraded and optimized. In addition, the application and applicable conditions of the integrated pump gate will continue to expand and play a greater role in urban water engineering.

**Key words:** pump gate integration; bottleneck analysis; industry standards; security

闸站作为水务工程中一种常见的建筑物,在防洪排涝、水环境提升、水资源配置等领域发挥了重要作用。随着人们对水工建筑物功能要求的不断提高,传统闸站在行洪效率、占地面积、施工周期、自动化等方面的短板日益凸显,这就促使业界开始

寻找一种性能更为优化的替代品,在此背景下一体化泵闸的研发应用就显得非常必要和迫切。区别于传统闸站,一体化泵闸采用闸泵一体的结构型式,不再区分闸室和泵室,不仅大大改善了行洪效率和近岸水流条件,而且节约了土地资源,提升了

构筑物对河道空间的利用效率,加之施工周期短、自动化水平高、可实现个性化定制等诸多优点,近年来备受关注。一体化泵闸自 2016 年进入国内市场,在河道引水调度、防洪排涝、水闸升级改造等类型工程实践中均有一定的应用。由于缺少相关行业标准的指导,一体化泵闸市场化发展脚步相对缓慢,但不可否认的是,一体化泵闸有着传统闸站无法比拟的优点,具有广阔的应用前景。

### 1 一体化泵闸概述

#### 1.1 一体化泵闸的定义及组成

一体化泵闸是将水泵安装在闸门上,使闸门和水泵合二为一的一体化装置。闸门既是挡水结构,又是水泵支承的基础<sup>[1]</sup>。

一体化泵闸由检修闸、拦污系统、闸门、闸泵、启闭系统、液位传感系统和智能控制系统组成(见图 1)。考虑不同河宽及流量的设计要求,闸门与水泵的配置型式有一闸一泵和一闸两泵两种。根据设计要求及不同工况,闸门泵的安装形式有卧式、立式和液压缸 3 种<sup>[2]</sup>。立式一体化泵闸是将水泵置

于 S 型流道的井筒内,井筒固定在平板闸门梁格上,特点在于检修方便,对下游水深要求较低,流道复杂。卧式一体化泵闸是将包含水泵的圆筒平卧安装在闸门面板上<sup>[3]</sup>。

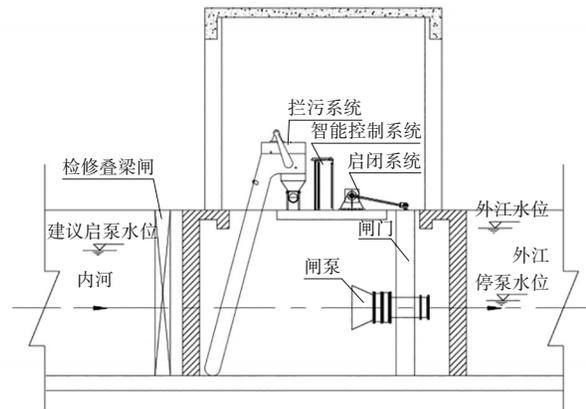


图 1 一体化泵闸示意

Fig.1 Schematic diagram of integrated pump gate

#### 1.2 一体化泵闸优势分析

一体化泵闸采用水闸和泵站一体化布置,与传统闸站的对比分析见表 1。

表 1 一体化泵闸与传统闸站对比

Tab.1 Comparison of integrated pump gate and traditional gate station

项 目	传统分离式闸站	一体化泵闸
水力条件	仅闸室段过水,泵室段占用大量过水断面,过闸自排能力受到较大限制 <sup>[3]</sup> ;泵室段上下游近岸区水体循环缓慢,易出现死水区	全断面过水,过流能力比传统闸站提升 1 倍以上 <sup>[4]</sup> ;断面流态优于分离式闸站
占地面积	闸泵分离,单独建设,占用土地面积大	闸泵一体,无需建设泵房,节省建筑占地面积
施工条件及周期	施工导流明渠、上下游挡水围堰长度较长;设备多,采购安装调试工作量大,施工周期长	相同条件下导流明渠长度短、基坑面积小 <sup>[3]</sup> ;设备少,泵闸部件提前预制,现场整体吊装,施工周期短
工程投资	征拆费用和设备费用高,建设投资大,运维成本高	节省大量征拆及设备费用,与传统闸站相比,建设投资可节约 40% <sup>[5]</sup> ,运维成本低
维护管理	设备多,运维管理复杂	设备集成度高,运维管理简便
智能化	自动化和智能化水平低	自动化和智能化水平高
个性化设计	实现代价更高	配置灵活,根据应用需求和场景不同,可实现个性化设计

#### 1.3 一体化泵闸的适用范围

基于一体化泵闸的特点和应用实践,一体化泵闸的应用场景<sup>[2-9]</sup>可归纳为以下几个方面:

##### ① 内河补水或换水

根据城市内河水质及维持景观水位的要求,采用一体化泵闸可实现水体的补水或换水。当城市内河水质较差或水位低于最低景观水位时,可通过一体化泵闸进行补水,此时泵闸关闭,水泵开启运行,实现外河对内河的补水,改善内河水动力条件,

提高水环境容量,维持景观水位。当城市内河水位持续抬高达到设定的开闸水位时,水泵关闭,泵闸开启,实现高水位内河一侧向低水位外河一侧的自排。

##### ② 防洪排涝的智能化运行

根据不同水位工况,实现一体化泵闸的强排与自排模式的智能化运行,以保障圩区的防洪排涝安全。汛期圩内水位低于外河水位而无法自排时,一体化泵闸的闸门关闭、水泵开启,实现圩区内河到

外河的强排;随着外河水位的消落,圩内水位高于外河水位时,水泵关闭,闸门自动开启,实现内河水的重力自排。

### ③ 河道闸站升级改造

依靠重力自排的传统水闸在防洪排涝中有一定的局限性,尤其是近年来随着极端天气的不断增多,水闸在排涝过程中的短板越来越明显,因此出现了大量水闸升级改造为闸站的需求。将水闸改造为传统闸站时需新增泵房及附属用地,而土地征拆是城市工程建设中的痛点和难点。与其他地区相比,城区闸站升级改造在政策处理、征拆费用、施工周期等方面的难度和成本大幅增加,总体而言改造难度较大。而一体化泵闸在土地、投资和施工周期等方面的优势,可解决闸站改造工程在城市建设实践中的这一痛点和难点。

### ④ 排口防倒灌与河道水质改善

城市河道作为城市雨水管网排口的受纳水体,与排口的相互影响主要表现在两方面:一方面汛期河道水位上升而淹没排口,导致管道内的雨水无法及时外排,严重时会发生河水倒灌,造成城市局部内涝;另一方面在遭遇径流污染浓度较高的中小雨工况或上游污水混入的突发状况时,排口处由于缺少隔离措施,污染浓度较高的初期雨水或混接水直接进入河道,造成河道水体污染。一体化泵闸可以实现雨季排口防倒灌、汛期雨水强排及早季闸断,以保证污水不流入河道。

## 2 一体化泵闸的发展历程

### 2.1 一体化泵闸的国外应用实践

国外对一体化泵闸的设计研究应用起步较早,荷兰是最早应用一体化泵闸的国家之一,在阿姆斯特丹解决莱茵河洪涝问题中一体化泵闸发挥了显著作用。日本早在20世纪90年代已经参与一体化泵闸的设计制造和应用,经过近30年的发展积累了丰富的经验。

2011年印尼首都雅加达的ANGKE河现状水闸改造时采用了一体化泵闸,闸门型式为一闸一泵,共设闸泵6台,单泵设计流量为 $2\text{ m}^3/\text{s}$ ,设计扬程为 $30\text{ kPa}$ 。2013年印尼巴厘岛KARTIKA广场的内河排涝整治工程也采用了一体化泵闸,闸门型式为一闸两泵,单泵设计流量为 $1.5\text{ m}^3/\text{s}$ ,设计扬程为 $33\text{ kPa}$ 。

### 2.2 一体化泵闸的国内应用实践

2008年国内成功生产了第一台闸门泵<sup>[6]</sup>,设计流量 $2.5\text{ m}^3/\text{s}$ ,设计扬程 $40\text{ kPa}$ ,水泵电机功率 $150\text{ kW}$ 。

2012年颖上县城市防洪工程采用了闸泵一体型式<sup>[7]</sup>,自排流量为 $11.71\text{ m}^3/\text{s}$ ,抽排流量为 $7.78\text{ m}^3/\text{s}$ ,设计扬程为 $22.4\text{ kPa}$ ,选用3台潜水闸门泵,总装机功率为 $465\text{ kW}$ ,闸泵一体水泵自耦安装的特点有效降低了工程量和投资,结构简单,安装管理方便,为平原地区低扬程排涝泵站工程提供了一定的借鉴。

2013年在广州西濠涌涌口泵站改造工程<sup>[4]</sup>中,由于缺少新建排涝泵站用地,按常规改造方案实施难度非常大,通过区域分析设计采用了一体化泵闸型式,在现有防潮闸上改造安装闸门泵及配套辅助设施,配套安装2台潜水贯流泵,强排能力为 $4\text{ m}^3/\text{s}$ ,有效降低了雨季时的西濠涌水位,有效缓解了区域内涝问题,且比传统城区排涝泵站节省 $60\sim 100$ 万元/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$ 出水的工程投资费用,节省 $500\sim 1\,000\text{ m}^2$ 的建设用地。

2018年在福州市城区水系综合治理过程中,首次引入一体化泵闸智能系统<sup>[2]</sup>,不仅解决了建设传统闸站面临的土地资源紧张情况下增强水动力条件的难题,同时改善了内河水量不均、水位不稳定而导致的景观效果不佳的问题。陆庄河是其中一条较严重的黑臭河道,且两岸场地狭窄不具备传统泵闸建设条件,因此采用一体化泵闸进行建设。设计补水规模为 $2.88\text{ m}^3/\text{s}$ ,共3个泵闸,一闸一泵,每台泵流量为 $0.96\text{ m}^3/\text{s}$ ,扬程 $20\text{ kPa}$ 。一体化泵闸智能系统在福州市水系综合治理项目中的顺利实施,为一体化泵闸系统在黑臭河道治理中的应用提供了宝贵经验。

2018年在广州市新塘镇新塘大围加固工程中<sup>[3]</sup>,一体化泵闸替代传统闸站在西涌水闸改建工程中实现了排内涝挡外潮的作用。闸口尺寸为 $4.5\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ ,水泵设计扬程为 $30\text{ kPa}$ ,设计流量为 $1.0\text{ m}^3/\text{s}$ 。

在浙江省某海水湖的水质提升工程<sup>[8]</sup>中,从经济性、实用性角度考虑,采用一体化泵闸方案对现状纳潮闸进行改造,实现了湖区补水及水位控制的目的。水闸净宽 $4\text{ m}$ ,选用1台立式潜水轴流泵,设计流量为 $4.5\text{ m}^3/\text{s}$ ,装机容量为 $340\text{ kW}$ 。

总结国内一体化泵闸的应用实践,一体化泵闸的水泵型式多为潜水轴流泵或贯流泵,每台泵设计流量为 $0.5\sim 5\text{ m}^3/\text{s}$ 、设计水头为 $20\sim 25\text{ kPa}$ 。实际应用中,可根据河道宽度设置一闸两泵或多泵联排<sup>[9]</sup>,配置灵活、抽排能力大且能力可调,平面布置紧凑,可不占用河道外土地或新增用地<sup>[2-5]</sup>。一体化泵闸设计及施工要点较多,设计过程中闸门平面布置型式、闸门宽高比、水泵设计扬程、水泵在闸门上的安装位置、配电室及控制系统的防涝防潮设计、各类预埋件的位置及尺寸、闸门的吊装和启闭设计、施工组织设计等都是重要内容。施工安装过程中设备预埋与土建施工在顺序上的衔接、预埋件位置及尺寸的精准度、泵组同心度和轴线度、设备连接和固定的牢固性和稳定性等<sup>[5]</sup>都会影响设备的安装效果。

### 3 一体化泵闸的应用瓶颈分析

近年来,水利部多次发文(水信息[2019]220号和水信息[2020]46号)提出加快推进智慧水利,示范引领智慧水利快速发展的要求。2021年4月8日国务院办公厅发布《关于加强城市内涝治理的实施意见》(国办发[2021]11号),提出加快推进城市内涝治理,提升城市防洪排涝能力的要求。在此双重背景下,大量水闸、泵站存在改造升级的需求,对于一体化泵闸来说既是机遇也是挑战。面对潜在的巨大需求,通过行业标准体系的规范化引导、典型工程的示范化引领以及产品自身的优化升级,打破市场化发展瓶颈以更好地满足市场需求,获得业界和市场的广泛认同,是一体化泵闸发展面临的现实问题。

通过总结国内一体化泵闸应用实践中存在的问题,分析一体化泵闸的发展瓶颈,主要有以下几个方面:

① 缺少行业标准的规范化引导。一体化泵闸设计及施工要点众多,但缺少行业标准的规范化引导,设计施工和质量检验无法规范化,工程质量得不到有效保障,也在一定程度上制约了一体化泵闸的发展。因此,在充分调研市场容量、成熟度、产品占有率等要素的前提下,应结合工程应用实践建立涵盖设计、施工、运维全过程的标准体系,为一体化泵闸的应用提供全过程技术指导,有利于保障一体化泵闸的工程质量、提高产品市场认可度,引领

一体化泵闸市场的规范健康发展。

② 一体化泵闸的结构安全性和可靠性有待进一步提升。国内外钢闸门事故调查显示,闸门低阶自振频率与水流高能脉动频率重合而引起的共振很可能导致闸门结构破坏<sup>[10]</sup>。一体化泵闸荷载组合和门体结构型式都更为复杂,泵闸的振动变化规律也更加复杂<sup>[11]</sup>。研究闸门型式、水泵布置方案、安装位置、闸门开度、电机频率等对自振特性的影响<sup>[12]</sup>,以及耦合不同水流条件下的振动特性,并在此基础上研究系统减振技术,进行泵闸的抗振优化设计,对于泵闸结构的安全性和可靠性来说尤为重要。

一体化泵闸水泵安装于闸门之上,闸门除自质量外还要承受水泵质量,闸门门体宽且质量大<sup>[1]</sup>,对泵闸的吊装和启闭都提出了更高要求。设计启闭系统时应充分考虑启闭力和平衡启闭<sup>[6]</sup>。泵闸在工厂完成组装后,应进行静平衡试验,确保闸门倾斜度不大于门高的 $1/1\ 000$ <sup>[13]</sup>。

③ 一体化泵闸应用场景和适用条件有待进一步拓展。目前一体化泵闸应用场合多为南方平原河网地区,应用条件多为中小流量、低扬程,尚无与大中型水闸工程相结合的实践案例<sup>[11]</sup>。未来随着水环境综合治理项目需求的发展,大流量、中高扬程的一体化泵闸的需求会愈加迫切。随着极端寒冷环境下泵闸疲劳破坏机理研究的突破<sup>[14]</sup>,选择适用于极端寒冷环境的钢闸门使一体化泵闸在北方地区推广成为可能。一体化泵闸在软土地基和耐盐耐蚀环境中的应用尝试,将使得一体化泵闸在沿海地区排涝、水环境提升、海水淡化工程中发挥更大作用。

④ 一体化泵闸科研成果的产业化转化有待加强。一体化泵闸技术的进一步发展离不开科研成果的支撑,以学校、研究机构为依托,大量关于泵闸水动力特性、系统安全、结构及闸门泵性能优化等研究也在同步开展。建立一体化泵闸的产学研合作与成果转化体系,将最新的科研成果与应用实践相结合,促进研究成果产业化,有利于一体化泵闸快速突破技术瓶颈,实现应用场景和适用条件的进一步拓展,加快泵闸性能的优化升级。例如,为消除水泵进水口及流道内可能出现的涡流、夹气及表面起泡等不良流态,利用CFD模拟技术进行渠道和水泵入口的流态分析,并进一步研究渠道和闸门

泵的设计优化方法;利用三维有限元数值模拟研究泵闸的振动机理,并在此基础上进行泵闸结构体型的抗振优化设计<sup>[12]</sup>等。

另外,相关行业在新材料、新技术方面的研究成果的突破,为一体化泵闸的优化升级提供了借鉴和技术支持。例如,借鉴建筑行业中的超强钢、汽车工业中的胶焊接技术、工程结构中的仿生技术等先进优势,将其应用于一体化泵闸的产品设计中<sup>[14]</sup>。

#### 4 前景展望与建议

① 一体化泵闸与传统闸站相比,在土地利用、施工周期、工程投资、运行维护及智能化管理等方面有着较为明显的优点。一体化泵闸在国内的研发应用已有十余年,在防洪排涝、水环境提升、泵闸改造升级等工程项目中发挥了重要作用。现状一体化泵闸主要应用于南方城市平原河网地区,水泵型式多为潜水轴流泵或贯流泵,应用条件多为低扬程。

② 目前一体化泵闸在国内的应用尚处于成长阶段,未来随着水环境综合治理项目需求的发展,对城市水系统综合功能要求的提升,一体化泵闸将在城市水务工程中发挥更大作用,应用前景十分广阔。

③ 一体化泵闸设计施工的要点众多,但由于缺少泵闸标准体系的规范化引导,工程质量得不到有效保障,也在一定程度上制约了一体化泵闸的发展。为保障一体化泵闸的工程质量,引领一体化泵闸市场的规范健康发展,建立涵盖设计、施工、运维全过程的标准体系势在必行。

④ 闸泵一体的特点使一体化泵闸对系统结构安全性和可靠性有更高要求,与传统闸站相比,一体化泵闸荷载组合和门体结构型式更为复杂,因此闸门振动变化规律也更为复杂。研究一体化泵闸的振动特性和减振技术,进行泵闸系统的抗振优化设计,对于提升泵闸结构安全和可靠性来说尤为重要。

⑤ 随着一体化泵闸技术的不断发展,泵闸的应用场景和适用条件将得到进一步发展。一体化泵闸群组智能控制系统与城市智慧水务平台的对接与交互,将使得一体化泵闸在城市防洪排涝、水环境提升中发挥更大的作用,实现城市水系统智能

化管理的进一步升级。

⑥ 建立一体化泵闸的产学研合作与成果转化体系,将最新科研成果与应用实践相结合,促进研究成果产业化,有利于一体化泵闸实现技术瓶颈突破,加快产品优化升级。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 陆惠萍. 泵闸一体型布置方式探讨 [J]. 城市建设理论, 2015(31):1396.  
LU Huiping. Discussion on integrated layout of pump gate [J]. Urban Construction Theory Research, 2015 (31):1396(in Chinese).
- [ 2 ] 宋建大. 一体化泵闸在福州内河水系治理中的应用 [J]. 福建建筑, 2018(7): 140-142.  
SONG Jianda. Application of pump gate in inland river water treatment in Fuzhou [J]. Fujian Architecture & Construction, 2018(7): 140-142 (in Chinese).
- [ 3 ] 谭颖科. 排水闸站的类型及对比分析 [J]. 陕西水利, 2021(7): 242-244.  
TAN Yingke. Types and comparative analysis of drainage gate stations [J]. Shaanxi Water Resources, 2021 (7): 242-244 (in Chinese).
- [ 4 ] 张建良. 广州市中心城区内涝治理经验及建议 [J]. 中国给水排水, 2016, 32 (5): 112-115.  
ZHANG Jianliang. Experience and suggestions on waterlogging control in central area of Guangzhou [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (5): 112-115 (in Chinese).
- [ 5 ] 周朋, 孟凡有, 张武. 一体型泵闸的研制与应用 [J]. 通用机械, 2014 (4): 85-86.  
ZHOU Peng, MENG Fanyou, ZHANG Wu. Development and application of integrated pump gate [J]. General Machinery, 2014 (4): 85-86 (in Chinese).
- [ 6 ] 王书丽. 潜水闸门泵的发展和成功应用 [J]. 水泵技术, 2009 (6): 56-57.  
WANG Shuli. Development and successful application of submersible gate pump [J]. Pump Technology, 2009 (6): 56-57 (in Chinese).
- [ 7 ] 周亚洲. 潜水闸门泵在颍上县城市防洪工程中的应用 [J]. 黑龙江水利科技, 2014 (12): 221-222.  
ZHOU Yazhou. Application of submersible gate pump in urban flood control project in Yingshang County [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2014 (12): 221-222 (in Chinese).

- [8] 徐旦,翁浩轩,詹敏杰,等. 一体化泵闸在水质提升中的应用[J]. 天津科技, 2021, 48(5): 50-53,57.  
XU Dan, WENG Haoxuan, ZHAN Minjie, *et al.* Application of integrated pump gate in water quality improvement [J]. Tianjin Science & Technology, 2021, 48(5): 50-53,57(in Chinese).
- [9] 张建良,陆宗雷. 排水泵站类型的选择及应用探讨[J]. 中国给水排水, 2016, 32(12): 38-40.  
ZHANG Jianliang LU Zonglei. Discussion on type selection and application of pumping station [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12): 38-40 (in Chinese).
- [10] 严根华. 水工闸门流激振动研究进展[J]. 水利水电工程学报, 2006(1): 66-73.  
YAN Genhua. Research development of flow-induced gate vibration [J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(1): 66-73 (in Chinese).
- [11] 沈远航,朱召泉. 考虑流固耦合的泵闸组合闸门结构自振特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(2): 13-17,23.  
SHEN Yuanhang, ZHU Zhaoquan. Research on natural vibration characteristics of pump-gate combination gate structure considering fluid-structure interaction [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(2): 13-17, 23 (in Chinese).
- [12] 侍贤瑞,严根华,董家,等. 立式一体化泵闸安全性研究及结构优化[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1): 176-181.  
SHI Xianrui, YAN Genhua, DONG Jia, *et al.* Safety and optimization of vertical pump gate [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 176-181 (in Chinese).
- [13] 张一平,吴萍. 闸门泵设计与应用[J]. 城市道桥与防洪, 2019(2): 186-187.  
ZHANG Yiping, WU Ping. Design and application of gate pump [J]. Urban Roads Bridge & Flood Control, 2019(2): 186-187 (in Chinese).
- [14] 王正中,张雪才,刘计良. 大型水工钢闸门的研究进展及发展趋势[J]. 水力发电学报, 2017, 36(10): 1-18.  
WANG Zhengzhong, ZHANG Xuecai, LIU Jiliang. Advances and developing trends in research of large hydraulic steel gates [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10): 1-18 (in Chinese).

作者简介:陈静(1985- ),女,河南南阳人,硕士,工程师,主要从事排水工程设计工作。

E-mail:kuailechenjing@163.com

收稿日期:2021-12-27

修回日期:2022-01-24

(编辑:丁彩娟)

全面推进水生态环境保护和修复  
打造水清岸绿、河畅湖美的美丽家园