

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221978

平面闸门全过程三维参数化设计及应用

哈 佳^{1,2}, 张雪才^{1,2}, 陈丽晔^{1,2}, 张富富^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;

2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

摘要: 针对目前闸门设计中存在设计质量不稳定、设计周期长、重复工作量大等问题, 基于全过程三维参数化设计理念, 依据设计规范和手册, 提出了一种闸门全过程三维参数化设计方法, 即在同一平台 Workbench 通过编写相应程序实现平面闸门结构的三维参数化几何建模、空间结构分析和工程出图。工程应用结果表明, 该方法可使闸门结构由平面设计过渡到空间设计, 设计过程更加直观形象, 提高了设计的质量和效率, 减少了设计过程中因设计变更产生的重复性工作。

关键词: 平面闸门; 全过程; 三维参数化; 三维结构分析; 数字设计

中图分类号: TV663.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0178-04

1 引言

通常闸门结构的计算大多采用平面体系法^[1], 但设计方式仍存在设计质量不稳定^[2]、设计周期较长、重复工作量大等问题。随着科技的进步, 闸门设计方式也发生着变化, 主要有两种方法: ①采用空间体系法对闸门整体结构进行分析^[3], 但在成果交付方面仍不能满足工程需要; ②采用建模软件建立闸门结构几何模型, 通过自带有限元程序或其他有限元软件进行分析^[4-7], 但这种方式也存在不足: ①闸门结构计算仍采用平面体系法, 三维成果交付不完善, 并非真正意义上的三维设计; ②采用三维建模软件与编程平台结合, 存在接口衔接问题; ③三维几何建模过程复杂, 还需单独建立定位网格轴线装配闸门整体结构; ④自带有限元分析模块中单元类型不完善、网格质量不高, 分析结果误差较大; ⑤三维几何模型导入有限元软件进行网格划分时, 往往出现结构模型失真的问题。为此, 本文鉴于 Workbench 具有强大的参数化建模、分析、出图等功能, 提出了采用 Workbench 对闸门进行全过程三维参数化设计的新方法, 以期对闸门结构布局、尺寸优化及数字

化设计奠定基础。

2 三维参数化设计架构

基于全过程三维参数化设计理念, 依据闸门设计规范^[1]和手册^[8], 采用 Workbench 设计平台编写闸门三维参数化几何建模程序, 并将几何模型进行三维结构分析和工程出图。三维参数化几何建模参数可分为位置参数和尺寸参数, 位置参数主要指确定顶梁、主梁、水平次梁、底梁、竖直次梁、边梁、吊耳和行走支承等结构位置的变量, 尺寸参数主要指确定闸门面板、顶梁、主梁、水平次梁、底梁、竖直次梁、边梁、吊耳和行走支承等结构具体尺寸的变量。三维结构分析时遵循相应的分析原则^[2]来确保分析结果的合理性和准确性, 工程出图遵照相关的制图标准。设计时先根据实际工程孔口尺寸、设计水头和运用条件, 依据设计规范^[1]和手册^[8]、并结合工程经验快速建立闸门三维几何模型、对三维几何模型进行网格划分、施加边界条件和分析计算, 若不满足规范要求, 则通过调整相应参数重复上述过程, 直至闸门三维参数化设计全过程中几何模型的真实性和有限元模型的正确性、边界条件的恰当性、分析结果

收稿日期: 2022-09-21, **修回日期:** 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179164); 河南省博士后科研启动项目(202102088); 黄河设计公司博士后研究开发项目(2020BSHZL06)

作者简介: 哈佳(1980-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利工程勘察设计, E-mail: 29119270@qq.com

通讯作者: 张雪才(1990-), 男, 博士、工程师, 研究方向为水利工程勘察设计, E-mail: xnzxc1990@163.com

的合理性和工程图纸的实用性等均满足设计要求。闸门全过程三维参数化设计架构见图 1。

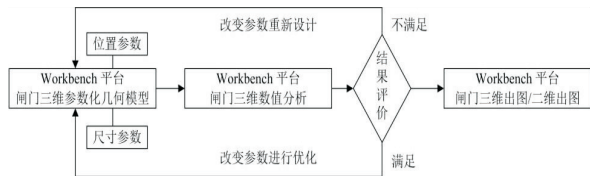


图 1 闸门全过程三维参数化设计架构

Fig. 1 Three dimensional parametric design framework for the whole process of gate structure

采用全过程三维参数化方法对闸门设计的要点:①要熟悉和明晰闸门结构的整体组成、门体布置、作用荷载和传力路径;②要掌握 Workbench 中参数化几何建模过程和有限元分析理论;③要全局把控参数化几何建模的关联性和传递性、参数化几何建模与参数化网格划分、施加约束、参数化施加荷载和结果分析间的内在联系;④从理论分析、试验和工程经验等方面对分析结果进行评价。

3 三维参数化几何建模

以平面滑动闸门为例说明参数化几何建模架构。首先根据工程资料确定孔口的宽度和高度;其次明确平面闸门的结构布置型式;再次依据闸门设计规范^[1]并通过工程类比或经验的方式初步确定不同结构的位置参数和尺寸参数;最后对几何模型进行完善,确保满足设计规范要求 and 实际工程需求。采用三维参数化方法建立平面闸门结构几何模型见图 2。

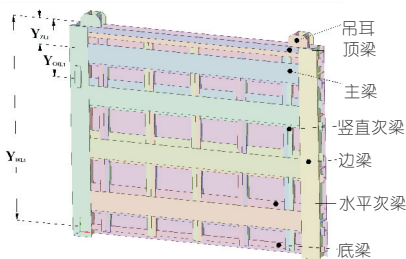


图 2 闸门结构几何模型

Fig. 2 Geometric model of gate

三维参数化几何建模的位置参数可初步确定闸门结构的整体布局,是尺寸参数的基础;尺寸参数用来确定各构件的具体尺寸,是位置参数的具体体现。尺寸参数主要包括闸门面板、主梁、水平次梁、竖直次梁、顶梁、底梁、边梁、行走支承和吊耳等结构尺寸。为更直观表现闸门结构的尺寸参数,分别给出面板(图 3)、主梁(图 4)、水平次梁(图 5)、竖直次梁(图 6)、边梁(图 7)、顶梁和底梁(图 8)、吊耳(图 9)、滑块(图 10)等主要构件的二

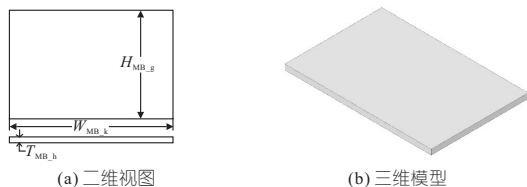


图 3 面板结构

Fig. 3 Panel structure of gate

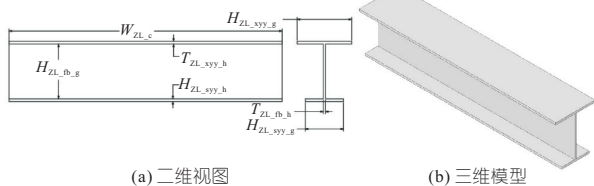


图 4 主梁结构

Fig. 4 Main beam structure

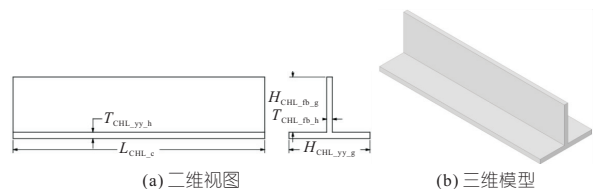


图 5 水平次梁结构

Fig. 5 Horizontal secondary beam structure

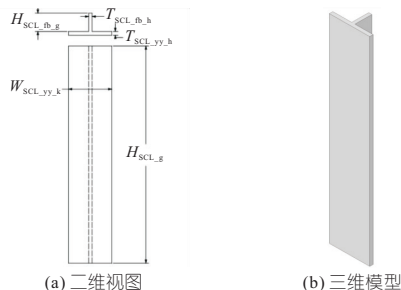


图 6 竖直次梁结构

Fig. 6 Vertical secondary beam structure

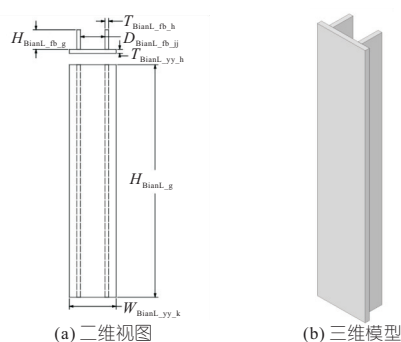


图 7 边梁结构

Fig. 7 Side beam structure

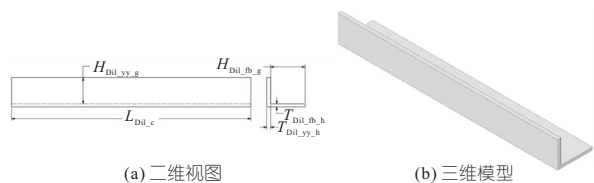


图 8 底梁结构

Fig. 8 Bottom beam structure

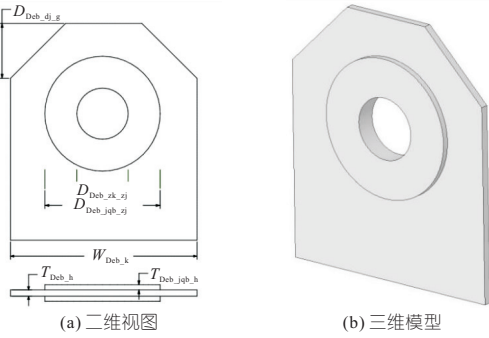


图 9 吊耳结构

Fig. 9 Lifting lug structure

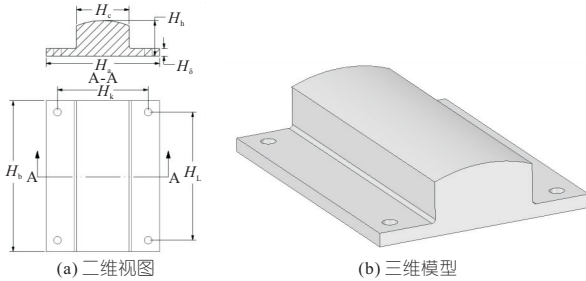


图 10 弧面滑块结构

Fig. 10 Structure of Globoidal slider

维图和三维图。位置参数和尺寸参数的逻辑关系见表 1。

4 三维结构分析

将三维参数化建立的几何模型直接导入

Workbench 结构分析模块,对闸门结构赋予材料属性、网格划分、施加约束和荷载、结果分析。闸门常用材料为钢结构,规范^[1]规定其弹性模量取 2.06×10^5 MPa,质量密度 7850 kg/m^3 ,泊松比 0.3。采用 Solid 186 结构实体单元对闸门结构进行模拟,尽管网格划分和分析计算工作量稍大,但分析精度较高^[3],Solid 186 为高阶三维 20 节点实体单元,每个节点有 3 个自由度,即沿节点坐标系 x, y, z 方向的平动位移。施加约束和荷载一般根据闸门实际情况进行施加,对表孔闸门,一般在闸门底缘处施加沿门叶向上的位移约束,在主滑块下表面施加沿水流方向的位移约束;对潜孔闸门,一般在闸门底缘施加沿门体向上的位移约束,在主滑块下表面和门楣处施加沿水流方向的位移约束,计算荷载均为门体自重和水荷载。结果分析一般提取闸门整体结构的等效力和沿水流方向的位移,据此判断结构的强度和刚度。闸门结构的有限元模型见图 11(a),分析结果见图 11(b)、(c)。

5 工程出图

将三维参数化建立的几何模型采用 Workbench 的前处理模块打开,直接导入二维工程图(图 12),同时还可根据实际需要定制工程图纸模

表 1 位置参数和尺寸参数的逻辑关系

Tab. 1 Logical relationship between position parameters and dimension parameters

序号	位置参数 (图 2)	尺寸参数(图 3~10)		说明
		独立参数	非独立参数	
1	面板结构	$W_{MB,k}$ (面板宽度)、 $H_{MB,g}$ (面板高度)、 $T_{MB,h}$ (面板厚度) 共计 3 个	0	
2	$Y_{ZL1}, Y_{ZL2} \dots$ (主梁位置)	$H_{ZL,xyy,g}$ (主梁下翼缘高度)、 $T_{ZL,xyy,h}$ (主梁下翼缘厚度); $H_{ZL,syy,g}$ (主梁上翼缘高度)、 $T_{ZL,syy,h}$ (主梁上翼缘厚度)、 $H_{ZL,fb,g}$ (主梁腹板高度)、 $T_{ZL,fb,h}$ (主梁腹板厚度) 共计 6 个	$W_{ZL,c}$ (主梁长度), 一般等于闸门宽度, 共计 1 个	
3	$Y_{CHL1}, Y_{CHL2} \dots$ (水平次梁位置)	$H_{CHL,yy,g}$ (水平次梁翼缘高度)、 $T_{CHL,yy,h}$ (水平次梁翼缘厚度)、 $H_{CHL,fb,g}$ (水平次梁腹板高度)、 $T_{CHL,fb,h}$ (水平次梁腹板厚度) 共计 4 个	$L_{CHL,c}$ (水平次梁长度), 一般等于闸门宽度, 共计 1 个	
4	Y_{DL} (底梁位置)	$H_{DL,yy,g}$ (底梁翼缘高度)、 $T_{DL,yy,h}$ (底梁翼缘厚度)、 $H_{DL,fb,g}$ (底梁腹板高度)、 $T_{DL,fb,h}$ (底梁腹板厚度) 共计 4 个	$L_{DL,c}$ (底梁长度), 一般等于闸门宽度, 共计 1 个	
5	$L_{SCL1}, L_{SCL2} \dots$ (竖直次梁位置)	$H_{SCL,fb,g}$ (竖直次梁腹板高度)、 $T_{SCL,fb,h}$ (竖直次梁腹板厚度)、 $W_{SCL,yy,k}$ (竖直次梁翼缘宽度)、 $T_{SCL,yy,h}$ (竖直次梁翼缘厚度)、 $H_{SCL,g}$ (竖直次梁高度) 共计 5 个	0	
6	$Y_{Hhk1}, Y_{Hjk2} \dots$ (弧形滑块位置)	H_b (弧形滑块长度)、 H_a (弧形滑块宽度)、 H_c (弧形滑块凸头宽度)、 H_h (弧形滑块凸头高度)、 H_0 (弧形滑块底板厚度)、 H_l (弧形滑块螺栓孔间距离) 共计 6 个	0	
7	$L_{BianL1}, L_{BianL2} \dots$ (边梁位置)	$H_{BianL,g}$ (边梁高度)、 $T_{BianL,yy,h}$ (边梁翼缘厚度)、 $W_{BianL,yy,k}$ (边梁翼缘宽度)、 $H_{BianL,fb,g}$ (边梁腹板高度)、 $T_{BianL,fb,h}$ (边梁腹板厚度)、 $D_{BianL,fb,jj}$ (边梁腹板间距) 共计 6 个	0	双腹式边梁的腹板间距离不宜太小, 不应小于 $300 \sim 400 \text{ mm}$ ^[8] 。
8	$L_{Deb1}, L_{Deb2} \dots$ (吊耳位置)	$D_{Deb,zk,zj}$ (吊耳轴直径)、 $D_{Deb,jqb,zj}$ (吊耳孔加强板直径) 共计 2 个	$W_{Deb,k}$ (吊耳板宽度)、 $D_{Deb,dj,g}$ (吊耳板角距)、 $T_{Deb,h}$ (吊耳板厚度)、 $T_{Deb,jqb,h}$ (吊耳孔加强板厚度) 共计 4 个	根据文献 ^[8] 知: $W_{Deb,k}$ 为 $D_{Deb,zk,zj}$ 的 2.4 到 2.6 倍, $T_{Deb,h}$ 为 $W_{Deb,k}$ 的 0.05 倍, $W_{Deb,dj,g}$ 为 $D_{Deb,zk,zj}$ 的 0.9 到 1.05 倍, $D_{Deb,jqb,h}$ 一般不小于 $T_{Deb,h}$ 的 0.6 倍。

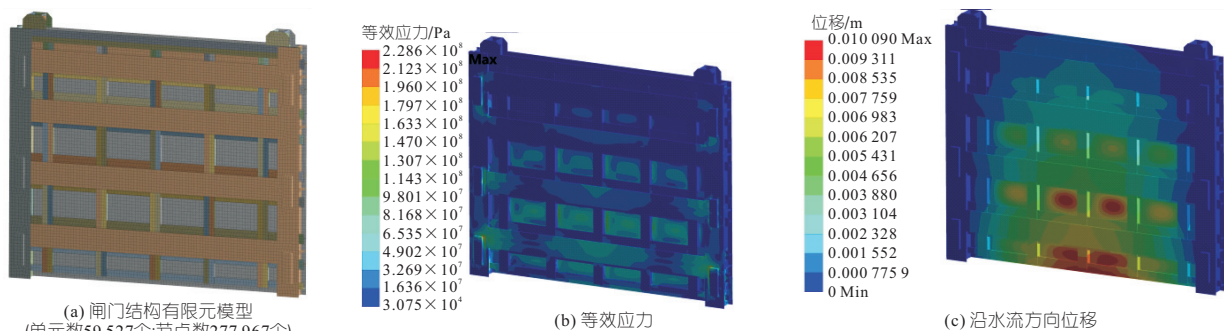


图 11 闸门结构的有限元模型及分析结果

Fig. 11 Finite element model and analysis results of gate structure

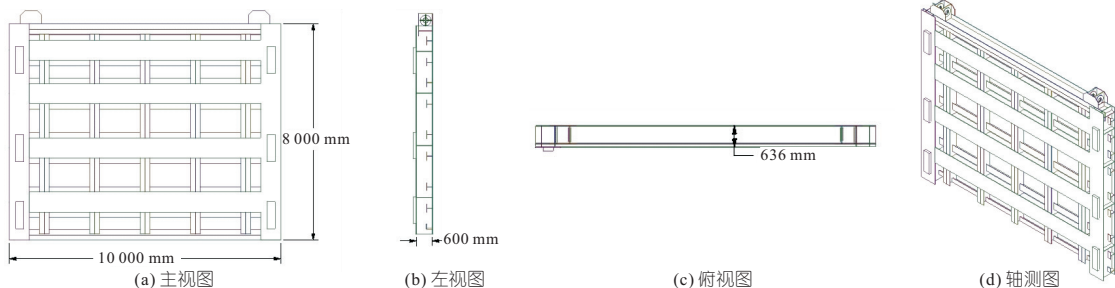


图 12 门叶总图(单位:mm)

Fig. 12 General drawing of gate

板和图框,直接进行三维交付。

6 工程应用

本文提出的平面闸门全过程三维参数化设计方法已在实际工程中进行了应用。在可研阶段可快速准确得到闸门的工程量,如某水利枢纽工程电站机组进口事故门宽×高一水头(8.0×2.9—15.8 m),直接将程序中的闸门宽度修改为 8.0 m、闸门高度修改为 2.9 m,设计水头修改为 15.8 m,然后直接进行结构分析,若分析结果满足现行闸门设计规范要求^[1]且整体结构受力合理,随即得到该事故闸门的三维几何结构模型,反之,微调闸门结构的位置参数和尺寸参数,直到满足规范要求^[1]时方可统计闸门重量,得到该进口事故闸门重量为 15.0 t;同时在闸门制造图阶段直接交付制造厂家三维工程图,目前该闸门已完成出厂验收。通过工程应用,发现闸门全过程三维参数化设计能满足工程不同阶段对闸门设计的需求,减轻了设计人员的工作量。

7 结论

- a. 提出了一种平面闸门全过程三维参数化设计方法,解决了其三维几何建模、三维结构分析和工程出图间相互独立的问题。
- b. 构建了闸门各组成结构的三维参数化模

型,可满足不同类型闸门快速设计的需求。

c. 本文在三维参数化几何建模中未考虑止水 and 连接结构的建模,未来研究中需进一步完善。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钢闸门设计规范:SL74-2019[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2020.
- [2] 张雪才,杨顺群,侯庆宏,等. 水工闸门面板结构空间有限元分析原则[J]. 水力发电, 2021, 47(10): 61-70.
- [3] 张雪才,陈丽晔,王正中. 水工弧形闸门结构的 APDL 建模方法[J]. 图学学报, 2021, 42(2): 271-278.
- [4] 任博,邓达人,谭守林,等. 水利水电工程中平面钢闸门三维参数化设计与研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 210-212.
- [5] 于尧. 三维设计在水工金属结构专业中的应用和展望[J]. 水利规划与设计, 2020, 26(2): 136-141.
- [6] 马洪山,徐志林,艾存峰. 基于 SolidWorks 和 ANSYS Workbench 的平面钢闸门三维有限元分析[J]. 水利建设与管理, 2017, 37(7): 18-22.
- [7] 徐国宾,周富满,高仕赵. 基于 VB 的平面钢闸门设计平台开发[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 7-9, 13.
- [8] 水电站机电设计手册编写组. 水电站机电设计手册金属结构(一)[M]. 北京:水利电力出版社, 1988.

1; 闸门关闭过程中, 工况 b-3 的幅值 3 个测点下差值最小为 9。可得在闸门底缘 b 中闸门上所受的脉动压力作用较均匀。

3.3.3 边际谱图分析

分析 12 个工况在 3 个测点下的脉动压力标准值信号的边际谱图所取的第一主频对应的 K_p 能量幅值, 将所有 IMF 分量瞬时频率按最小网格 0.5 Hz 划分, 将最小网格内所有分量瞬时频率进行累加即得边际谱图。如表 3 所示, 3 个测点下

表 3 测点 1、2、3 第一主频对应的 K_p 值

Tab. 3 The K_p value corresponding to the first main frequency of measuring point 1, 2 and 3

测点	启闭速度	闸门状态	底缘	底缘	底缘	底缘
			型式(a)	型式(b)	型式(c)	型式(d)
测点 1	开启 90 s		27.75	269.30	241.40	221.20
	持住 30 s		8.06	19.61	14.18	99.76
	关闭 90 s		99.77	170.50	91.48	128.40
测点 2	开启 90 s		264.40	34.22	302.30	89.89
	持住 30 s		12.92	9.18	16.23	34.14
	关闭 90 s		58.22	91.10	82.86	292.20
测点 3	开启 90 s		19.32	120.10	190.20	731.00
	持住 30 s		14.67	11.00	15.17	14.09
	关闭 90 s		88.46	126.70	46.31	26.51

K_p 值对应的第一主频均为低频信号, 在 0~1 Hz 之间, 而从 3 个测点的 K_p 值信息可知, 闸门底缘 d 的 K_p 值是 4 种闸门中最高的, 闸门底缘 b 的 K_p 值均相对较小; 就 3 个测点的 K_p 值差值来看闸门底缘 d 的差值最大, 闸门底缘 c 的差值均较小。

4 结论

a. 从 HHT 二维图中可得到闸门在底缘 b 下的脉动压力时间—频率—幅值分布平缓, 闸门底部 3 个测点的幅值相近, 闸门底部受脉动压力作用均匀。

b. 通过工况对比, 得到组合式底缘比平底底缘的脉动压力信号连续且突变值小。

参考文献:

[1] LI HONGQI, YANG ZHONGCHAO. Dynamic simulation of hydraulic characteristic of the Yinpan lock during valve opening [J]. Hydro-science and engineering, 2010(3): 101-106.
 [2] 付仙兰, 罗萍萍. 基于改进 Petri 网与希尔伯特黄变换融合的电网故障诊断[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 210-214.

Time-frequency Characteristics Analysis of Pulsating Pressure of Water Flow Through Gate Based on Hilbert-Huang Transform

ZHANG Rui¹, SHEN Chun-ying¹, MA Jiang-xia^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
 2. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

Abstract: The plane gate controls water storage and discharge by opening and closing, and is easily damaged by the pulsating pressure of the water flow during operation. In order to study the interaction process between the opening and closing motion of the gate and the flow through the gate, this paper firstly conducted a three-dimensional numerical simulation of the flow through the gate during the opening and closing process of the gate under different bottom edge forms. And then the Hilbert-Huang transform was used to analyze the flow through the gate, and the time-frequency-amplitude information of the signal. The information analysis and comparison found that the bottom edge of the combined gate with a forward tilt of 45° and a backward tilt of 30° is gently affected by the pulsating pressure at the bottom of the gate, and the change difference of the energy amplitude at the measuring point was the smallest, and the water flow state was relatively stable. This study can provide a reference for the analysis of the pulsating pressure of the water flow through the plane gate.

Key words: plane gate; gate bottom edge; pulsating pressure; Hilbert-Huang transform; time-frequency characteristic analysis

*(上接第 181 页)

Three Dimensional Parametric Design and Application of Plane Gate in Whole Process

HA Jia^{1,2}, ZHANG Xue-cai^{1,2}, CHEN Li-ye^{1,2}, ZHANG Fu-fu^{1,2}

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources(Preparation), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Aiming at the problems such as unstable design quality, long design cycle and large repetitive workload in the current gate design, based on the whole process three-dimensional parametric design concept, and according to the design specifications and manuals, a three-dimensional parametric design method for the whole process of gate is proposed, that is, the three-dimensional parametric geometric modeling, spatial structural analysis and engineering drawing of plane gate structure are realized on the same platform by writing corresponding programs. This method can make the gate structure transition from plane design to space design, make the design process more intuitive, improve the quality and efficiency of the design, reduce the repetitive workload caused by design changes in design process.

Key words: plane gate; whole process; three-dimensional parameterization; three-dimensional structure analysis; digital design