

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.16.012

# 基于Grasshopper与CFD的虹吸式屋面排水系统智能设计

张 慎, 孟凡凯, 王义凡, 尹鹏飞, 杨泽旺  
(中南建筑设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 综合考虑虹吸式屋面雨水排水系统在不同设计阶段的内容及特点,提出一种针对设计全过程的智能设计框架,并基于Grasshopper平台开发了相应智能设计工具。该工具运用参数化设计技术与计算流体力学(CFD)仿真模拟技术,以建筑屋面模型为基础,实现了径流分析、水力计算、方案生成、智能优化、仿真校核等功能,不仅极大程度提高了虹吸排水系统的设计效率,而且确保了方案的精确性与最优性,同时保障了方案在多种真实工况下的安全性与可靠性。详细阐述了工具内各模块的关键技术及实现方法,并通过工程实例验证了工具的可行性与高效性。

**关键词:** 虹吸式屋面排水系统; 智能设计; CFD; Grasshopper

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)16-0070-07

## Intelligent Design of Siphonic Roof Drainage System Based on Grasshopper and Computational Fluid Dynamics

ZHANG Shen, MENG Fan-kai, WANG Yi-fan, YIN Peng-fei, YANG Ze-wang  
(Central-South Architectural Design Institute Co. Ltd., Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Considering the content and characteristics of siphonic roof drainage system in different design stages, this paper proposed an intelligent design framework for the whole design process, and developed a corresponding intelligent design tool based on Grasshopper platform. Based on building roof model, the tool realized functions such as runoff analysis, hydraulic calculation, scheme generation, intelligent optimization and simulation check, which greatly improved the design efficiency of siphonic roof drainage system and ensured the accuracy and optimality of the scheme by using parametric design technology and computational fluid dynamics (CFD) simulation technology. In addition, it guaranteed the safety and reliability of the scheme under various real working conditions. The key technologies and implementation methods of each module in the tool were described in detail, and the feasibility and efficiency of the tool were verified by an engineering example.

**Key words:** siphonic roof drainage system; intelligent design; CFD; Grasshopper

目前虹吸式排水系统已被广泛应用于武汉天河机场、温州奥体中心等大面积屋面工程中<sup>[1-2]</sup>,现阶段其设计存在以下问题:①设计流程中的每一个环节都需要人工手动操作来实现,导致方案修改不

便,设计效率低下;②设计方案的优劣主要依赖于工程师经验,在有限的时间与精力下,难以通过反复修改计算这种方式找到最佳方案;③整个设计均假设系统处于满管流状态,但实际运行中并非如

此,因此仅靠经验和公式计算无法保证系统在多种工况下的可靠性。为此,提出一种智能设计框架,并基于 Grasshopper 参数化设计平台开发了相应工具,实现屋面排水系统的自动布置、智能优化以及仿真校核,极大程度提高设计效率与质量。

1 智能设计工具的架构

Grasshopper 是一款依托 Rhino 软件的参数化设计平台,设计师可通过可视化编程方式,利用现有运算器,实现建模、分析等功能的一体化设计过程,同时也能够使用 C#、Python 等计算机语言编写脚本来开发自定义运算器,以实现某些特定功能。

笔者在 Grasshopper 平台上开发了虹吸式排水系统智能设计工具,包含四大功能模块(见图 1):① 方案设计模块。能够基于现有建筑屋面造型开展径流分析工作,通过经验公式计算的方式对排水系统进行初步设计,然后结合计算结果与设备产品数据库,利用参数化建模技术快速生成排水系统方案与模型。② 智能优化模块。功能是利用遗传算法、粒子群算法、NSGA-2 算法等进化算法对排水系统方案进行智能优化,通过不断迭代计算找到符合目标要求且满足约束条件的最优解。③ 仿真校核模块。功能是将方案设计模块中生成的排水系统三维模型导入计算流体力学(CFD)软件中进行多工况模拟,完成方案的验证与校核。④ 后处理模块。实现计算结果的后处理,对水力计算、智能优化、CFD 仿真等过程的数据进行处理分析并可视化展示。



图 1 工具架构图

Fig.1 Tool architecture diagram

相比于传统设计,该智能设计工具优势如下:

① 生成式设计。利用数字算法完成排水系统方案的自组织,工程师只需将设计需求转化为多种类参数,以此把控整个设计过程,在保证数据连续性与流动性的同时,减少人工操作的频率。

② 智能优化。能在一定程度上弥补常规“基于经验的”设计过程所造成的设计结果偏差,自动按照设定的目标对方案进行精确优化,极大程度降低设计工作的重复性,并确保得到最佳设计结果。

③ 数值仿真。虹吸式排水系统的设计主要基于暴雨强度公式来确定屋面降雨量,且大多基于满管流状态假设,但是由于自然界降雨的不确定性,会导致实际降雨强度与设计降雨强度不符,进而降低系统运行效率甚至发生事故。因此在工具中增加了基于 CFD 的仿真校核功能,能够确保系统在多种实际工况下的安全性与可靠性。

2 智能设计工具的实现

基于上述架构,使用 C# 语言在 Grasshopper 平台上开发自定义运算器,以实现各模块的具体功能。

2.1 方案设计模块构建

① 搭建数据库。一个完整的数据库至少应当包含如表 1 所示的类型及参数,其中数值参数主要用于水力计算,三维模型则用于搭建精细化的方案模型。通过选择具体厂商型号即可调用对应参数,从而确保设计全过程数据的真实性与有效性。

表 1 数据库类型及参数

Tab.1 Database type and parameters

库类型	雨水斗库	管材库	管件库
数值信息	阻力系数 额定流量	计算内径 绝对粗糙当量	管件类别 阻力系数
模型信息	三维模型		

② 径流分析。包含两大功能:一是动态汇水模拟,目的是在方案前期快速对屋面进行雨水流动模拟,便于找到关键汇水位置,具体实现流程见图 2,由输出的径流分析点即可组成径流曲线;二是汇水区域划分,目的是将完整的建筑屋面按要求划为多个汇水区域,便于各区域配置独立的排水系统。

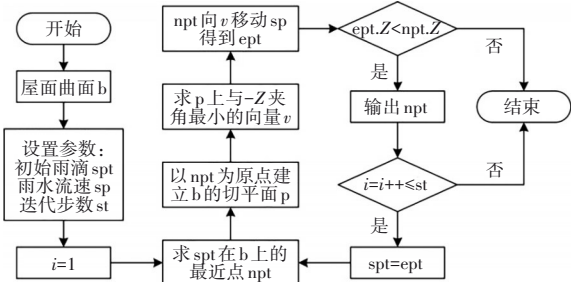


图 2 动态汇水模拟流程

Fig.2 Flow chart of dynamic catchment simulation

③ 水力计算。虹吸式排水系统设计关键之

一是进行精确的水力计算,从而保证系统安全可靠地正常工作。

为了避免繁琐且复杂的手工计算过程,本工具基于《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019)与《虹吸式屋面雨水排水系统技术规程》(CECS 183:2015)中给出的计算步骤及公式,开发了一整套水力计算运算器,实现设计降雨量、天沟设计、溢流设计、管道系统水力等方面的计算功能,以电算代替手算,大幅提高设计效率。

④ 方案生成。虹吸式排水系统由雨水斗、排水管以及连接件组成,几何关系清晰、构造逻辑明确,为参数化设计提供了有利条件。

图 3 所示的方案生成流程包含以下三个运算器:a. 系统方案布置运算器。主要实现排水系统的参数化建模,生成线框模型。针对规则方案,通常只有一根连通的主悬吊管与立管相接,悬吊管在平面上呈现直线型,梳理其构造逻辑后开发相应运算器,如图 4 所示,只需通过控制管道长度、管道方向等参数即可快速生成多种方案,而对于各管道连接关系较为复杂的方案,则可采用手动建模的方式,再分类型将其拾取进 Grasshopper 中进行调用。b. 管段数据处理运算器。对整个方案中的节点、管段进行编号,同时计算各管段内的流量与节点位高,将这些数据与线框模型进行绑定,便于系统水力计算使用。c. 三维模型生成运算器。以线框模型为骨架,将数据库中已选用设备的模型进行组装,得到完整且精细的排水系统三维模型,可用于后续数值仿真模拟。

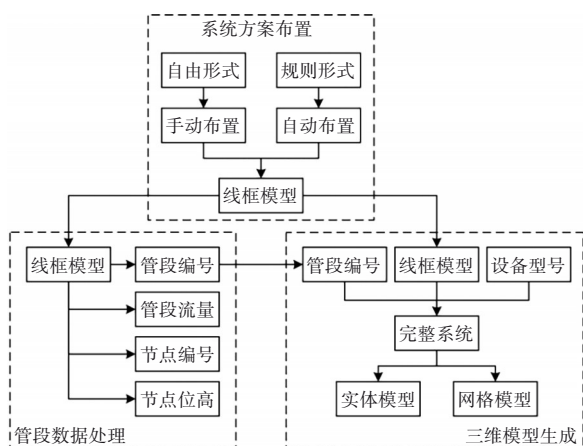


图 3 方案生成流程

Fig.3 Scheme generation flow chart

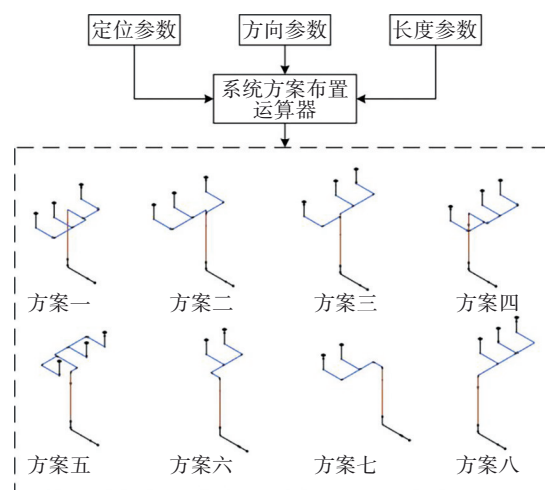


图 4 快速生成多方案

Fig.4 Fast generation of multiple schemes

## 2.2 智能优化模块构建

在传统设计方法中,需要反复进行方案调整与水力计算,而本模块通过如图 5 所示的方式来解决这类问题:设置管道管径、管道长度、系统布置形式等参数为优化变量,设置管道流速、系统余压、最大负压等参数为约束条件,以总造价最低为目标函数,利用 Grasshopper 平台提供的 Galapagos、Silvereye 等智能算法优化工具完成排水系统方案的自动寻优。

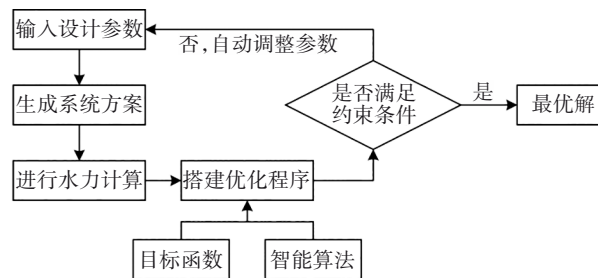


图 5 智能优化流程

Fig.5 Intelligent optimization flow chart

## 2.3 仿真校核模块构建

该模块主要功能是利用 CFD 对系统方案进行多工况模拟校核。为保证模拟结果的准确性,这一环节应当在专业的 CFD 软件上进行,例如:ANSYS Fluent、OpenFOAM、XFlow 等。

Grasshopper 与这类专业 CFD 软件进行数据交互主要有如图 6 所示两种方式:①利用通用格式的文件来传递数据。在 Grasshopper 中将系统网格模型以 .stl 格式导出,然后在 CFD 软件中读取该模型,进行参数设置和计算,并将计算结果以任意文本格



式(如.txt、.xls等)反馈给Grasshopper。该方式操作简单,适用性强,但不便于方案的反复修改。②利用二次开发接口来传递数据。在Grasshopper中调用CFD软件进行计算,利用OAPI提供的相关函数来写入模型、计算参数,或是读取计算结果。该方式更加方便快捷,但只适用于支持二次开发或开源的CFD软件。综上,可根据实际需求来决定具体的数据交互方式。

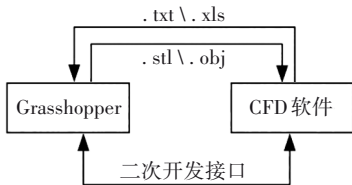


图6 数据传递方式

Fig.6 Data transfer mode

### 3 应用案例

利用笔者开发的工具对某国际机场航站楼东区建筑进行智能设计,流程见图7。

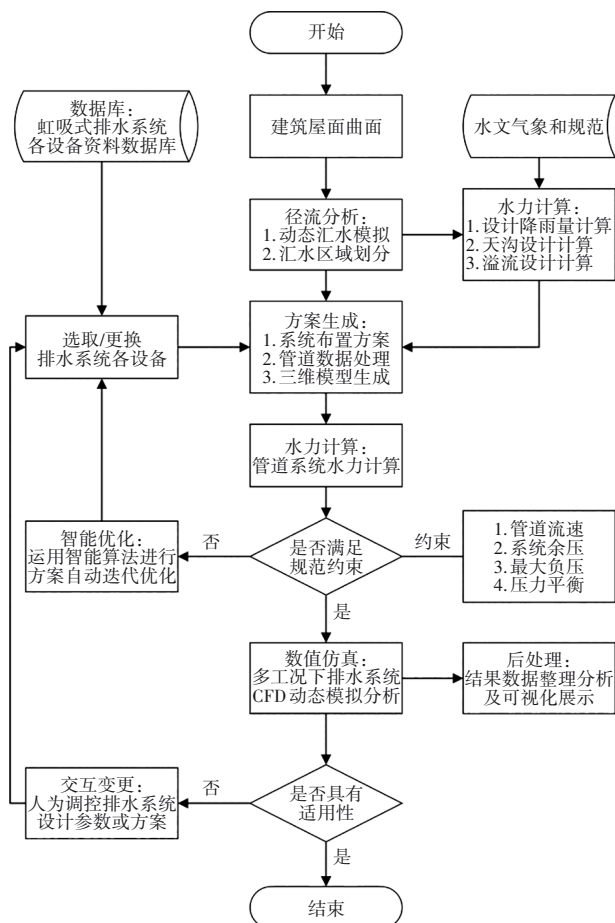


图7 智能设计流程

Fig.7 Intelligent design flow chart

该建筑东西长68 m,南北宽58 m,总高度约为8 m,建筑投影面积约2 376 m<sup>2</sup>,采用不锈钢天沟自防水金属屋面,整个屋面为空间造型较为独特的坡屋面,坡度在3%~5%之间变化。该建筑屋面按照暴雨重现期 $P=10$  a、5 min暴雨强度 $q=474$  L/(s·100 m<sup>2</sup>)、汇水系数 $k=1.5$ ,设计虹吸雨水系统;按照暴雨重现期50年和10年差值,5 min暴雨强度 $q=130$  L/(s·100 m<sup>2</sup>),设计溢流口。

#### 3.1 方案设计

将建筑屋面模型输入本工具径流分析运算器中,得到径流分析,结果见图8,并结合建筑给出的分水线,自动将该屋面划分为4个汇水区域,共设6套虹吸式排水系统,3套溢流系统,具体如图9所示。

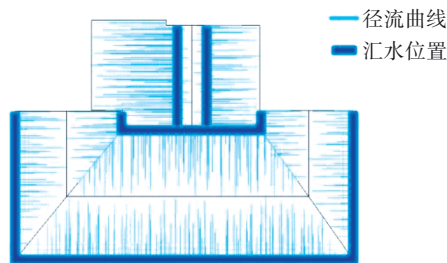


图8 径流分析

Fig.8 Runoff analysis

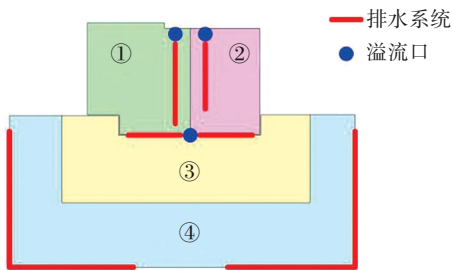


图9 汇水区域划分及系统布置

Fig.9 Division of catchment areas and system layout

以汇水区域3为例进行说明,该区域总汇水面积为660 m<sup>2</sup>,首先将暴雨重现期、汇水系数等参数输入各水力计算运算器,快速得到如下设计结果:天沟尺寸为600 mm×400 mm,溢流口尺寸为400 mm×200 mm,选用额定流量为12 L/s的DE 56虹吸雨水斗共4个,各雨水斗实际分配流量为11.75 L/s;然后利用方案生成运算器,通过输入各类型管道的长度参数,快速生成排水管道系统图(具体如图10所示),并进行编号、排序等操作;最后结合系统图与选用的管道、管件等设备型号,组成系统的三维模型。

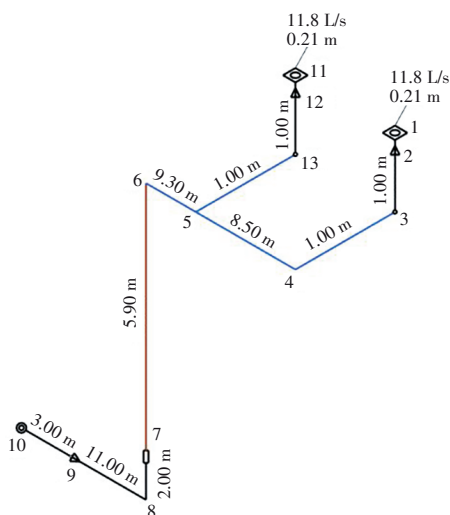


图 10 管道系统图

Fig.10 Piping system diagram

### 3.2 智能优化

基于智能优化模块,对上述方案进行虹吸排水系统优化,具体优化条件如下:

① 目标函数:管道系统总造价最低。管道直径越小其材料用量也越少,通常造价也会更低,在不考虑年折算费用的情况下,可以按照下式对管道造价进行粗略估算<sup>[3]</sup>:

$$W = \sum_{i=1}^n 671.429 D_i^{1.425} \times L_i \quad (1)$$

式中:  $W$  为管道总造价;  $D_i$  为第  $i$  管段的管道直径;  $L_i$  为第  $i$  管段的管道长度;  $n$  为设计管段数。

② 优化变量:各管段管道型号。按照除尾管外的管段数量,共设置 10 个变量,各变量均为离散型变量,变化范围基于数据库模块中管道库所包含的类型,在 DN32 ~ DN315 之间进行调整。

③ 约束条件:依据《建筑给水排水设计标准》与《虹吸式屋面雨水排水系统技术规程》中的要求,归纳管道流速、系统余压、最大负压、压力平衡四方

面约束(见表 2)。采用一种简化的罚函数法将约束与目标相结合,即当计算结果不满足约束条件时,目标值就会乘以一个较大的罚因子,使得这个解被优化算法所舍弃。这种方法具有极强的可实施性,且在一定条件下能加快计算的收敛。

表 2 约束条件

Tab.2 Constraint condition

约束种类	约束原因	约束范围
管道流速	防止杂质沉积 且避免形成水塞	连接管、悬吊管 $\geq 1$ m/s $2.2$ m/s $\leq$ 立管 $\leq 10$ m/s 排出管 $\leq 1.8$ m/s
系统余压	保证系统正常运行	系统余压大于 $1$ m
最大负压	防止发生气蚀现象	最大负压不低于 $-90$ kPa
压力平衡	雨水斗泄流量平衡	差值不超过 $10$ kPa

④ 优化算法:遗传算法。利用 Grasshopper 内嵌的 Galapagos 运算器<sup>[4]</sup>来实现。经过 100 步左右的迭代计算,优化问题逐渐收敛,管道总造价由 1 507 元降低至 1 074 元,减少约 28.7%,整个变化过程见图 11。优化前、后各管段水力计算结果对比见表 3,可见,优化后的最不利管段管径要远小于优化前的数值,且变化更为平缓,而在流速与压力等方面均符合《虹吸式屋面雨水排水系统技术规程》要求,该方案为满足约束条件且造价最低的排水系统方案。

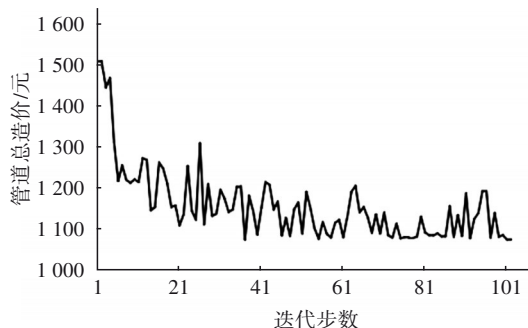


图 11 优化过程中管道造价变化

Fig.11 Changes of pipeline cost during optimization

表 3 优化前、后水力计算结果对比

Tab.3 Comparison of hydraulic calculation results before and after optimization

项 目		最不利管段									支路管段		
节点编号		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	11-12	12-13	13-5
管段管径 DN/mm	优化前	56	56	75	110	160	110	90	125	160	56	56	75
	优化后	56	63	75	90	110	90	90	90	160	56	56	75
管段流速 $V/(m \cdot s^{-1})$	优化前	5.98	5.98	3.14	1.45	1.37	2.90	4.34	2.24	1.37	5.98	5.98	3.14
	优化后	5.98	4.61	3.14	2.17	2.90	4.34	4.34	4.34	1.37	5.98	5.98	3.14
节点压力 $P/m$	优化前	-3.02	-3.16	-2.16	-1.96	-2.08	3.11	3.93	4.17	4.21	-2.84	-2.98	-2.13
	优化后	-3.02	-1.91	-1.65	-1.90	-2.82	1.50	2.86	0.63	1.37	-2.84	-2.98	-2.13

3.3 仿真校核

虹吸启动时间是衡量排水系统性能的重要指标,其定义为悬吊管与立管连接处形成能充满整个断面的水跃时的最小时间,也可简单定义为悬吊管末端水气比达到 40%~60% 所需要的时间<sup>[5]</sup>,根据《虹吸式屋面雨水排水系统技术规程》,虹吸式屋面雨水系统的虹吸启动时间不宜大于 60 s。

本案例数值仿真基于达索系统的 XFlow 软件<sup>[6]</sup>来完成。由于自然界降雨的不确定性,主要按照以下三种工况对优化后的系统性能进行考察:

工况 1:当实际降雨强度与设计降雨强度相近时,计算流量取值与设计流量相等;

工况 2:当实际降雨强度大于设计降雨强度时,计算流量取值为 1.3 倍的设计流量(近似于暴雨重现期为 50 a 时的设计流量);

工况 3:当实际降雨强度小于设计降雨强度时,计算流量取值为 0.4 倍的设计流量。

利用数值仿真模块分别对这三种工况进行模拟,并基于可视化模块对仿真结果进行数据处理,得到悬吊管末端截面处压力、流量、水气比随时间变化的曲线(见图 12),同时生成虹吸启动时刻天沟内的雨水流线速度云图(见图 13)。以工况 1 为例描述虹吸雨水系统的工作流程,定义雨水落入天沟为初始时刻,当系统运行到 35 s 左右时,雨水开始通过悬吊管进入立管,截面处流量与水气比逐步增大;运行至 44 s 左右时,悬吊管末端水气比近似达到 50%,开始启动虹吸作用,此时该截面处流量为 11.53 L/s;运行至 63 s 左右,各项数值变化均趋于平稳,此时悬吊管末端截面处流量为 21.58 L/s,水气比达到 100%,证明系统开始形成相对稳定的虹吸满管流状态。类似地,其余两种工况时,系统在运行过程中各状态的参数见表 4。

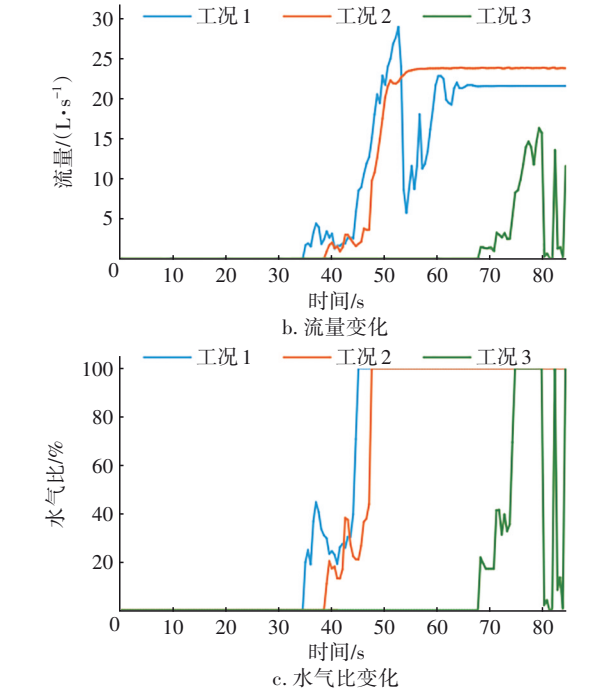
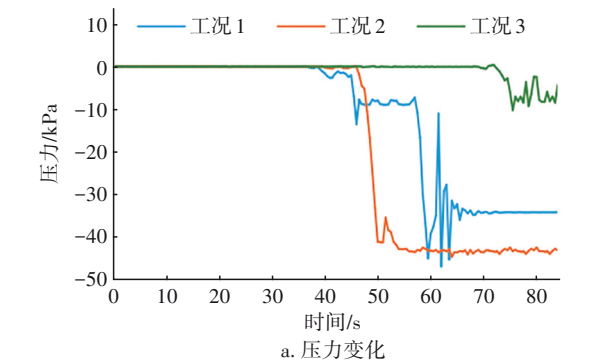


图 12 三种工况下悬吊管末端截面处压力、流量、水气比随时间变化曲线

Fig.12 Curves of pressure, flow rate and water-gas ratio at the end section of suspension pipe with time under three working conditions

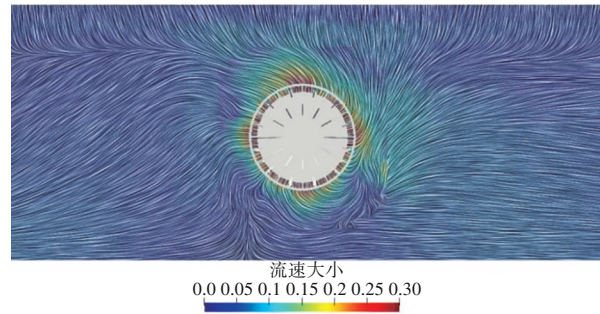


图 13 天沟局部雨水流线速度云图

Fig.13 Cloud map of local rainwater streamline velocity in the gutter

表 4 系统在各工况下的运行参数

Tab.4 Operating parameters under various working conditions

项目	开始运行状态		虹吸启动状态		稳定虹吸状态	
	时间/s	流量/(L·s <sup>-1</sup> )	时间/s	流量/(L·s <sup>-1</sup> )	时间/s	流量/(L·s <sup>-1</sup> )
工况 1	35	1.67	44	11.53	63	21.58
工况 2	39	0.90	47	12.12	54	23.89
工况 3	68	1.42				

由数值模拟结果可知:工况 1 的虹吸启动时间满足要求,且处于虹吸满管流时的最大排水量与设



计流量相近,证明该系统在此种情况下能够通过虹吸作用高效地将雨水排出;工况2在虹吸启动时间上也能满足要求,但最大排水量为23.89 L/s,与其设计流量28.2 L/s之间存在一定差距,说明在此种情况下系统无法完全将雨水排出,因此需要进行溢流系统的设置来防止事故发生;而工况3则会在系统内出现紊动强烈的气水两相流,短暂出现的虹吸作用会迅速排出雨水造成空气进入,从而破坏虹吸作用,导致无法形成稳定的虹吸满管流状态,但由于实际降雨量远小于设计降雨量,雨水仍然可以通过重力流方式排出。综上所述,优化后的排水系统在三种工况下均能够安全可靠地运行。

#### 4 结论

针对现阶段虹吸排水系统设计存在的几大问题,提出了一种相对完善的智能设计流程,结合参数化技术与CFD技术,以Grasshopper平台为基础开发了一套虹吸排水智能设计工具,并通过具体案例验证了该工具的实用性,主要得到如下结论:

① 开发的智能设计工具,以数字算法的形式实现了虹吸排水系统的生成式设计,通过调整参数即可完成径流分析、快速建模、自动计算、智能优化等一系列设计过程,可极大提高设计效率与精度。

② 利用遗传算法、粒子群算法等进化算法开发了排水系统方案智能优化模块,在保证系统满足规范要求的基础上,通过降低最不利管段的管径大小,实现工程造价的显著降低,从而得到满足相应条件的最优方案。

③ 通过CFD技术对虹吸排水系统进行数值仿真,模拟其不同降雨条件下的系统运行情况,预防屋面积水漏水等工程风险。

④ CFD仿真结果表明,传统水力计算方式设计得到的虹吸雨水排水系统的实际排水量与设计流量存在一定误差,后续还需展开更深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] 杜金娣, 吴永强, 涂正纯, 等. 武汉天河机场T3航站楼屋面虹吸雨水系统设计及思考[J]. 给水排水, 2018, 44(12): 65-72.
- DU Jindi, WU Yongqiang, TU Zhengchun, et al. Design and thinking of siphon rainwater system in T3 terminal building of Wuhan Tianhe Airport[J]. Water &

Wastewater Engineering, 2018, 44(12): 65-72 (in Chinese).

- [2] 廖宇凡, 洪瑛, 黄景会. 温州奥体中心体育场屋面雨水设计[J]. 给水排水, 2021, 47(5): 96-101.

LIAO Yufan, HONG Ying, HUANG Jinghui. Roof rainwater design of Wenzhou Olympic Sports Center Stadium[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5): 96-101 (in Chinese).

- [3] 王珂. 建筑屋面雨水排水系统研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.

WANG Ke. Study on Roof Rainwater Drainage System [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007 (in Chinese).

- [4] 张少飞. 基于Galapagos和Octopus的自然采光优化设计方法论证——以机构养老建筑居室侧向采光口为例[D]. 天津:天津大学, 2017.

ZHANG Shaofei. Demonstration of Natural Lighting Design Optimization Using Galapagos and Octopus—Taking the Daylighting Opening of Institutional Pension Building as an Example [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017 (in Chinese).

- [5] 罗岚兮, 归谈纯, 李学良, 等. 虹吸式屋面雨水排水系统单斗虹吸启动数值模拟研究[J]. 给水排水, 2019, 45(1): 86-92, 99.

LUO Lanxi, GUI Tanchun, LI Xueliang, et al. Investigation and numerical modelling of the priming of single-outlet siphonic roof drainage system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(1): 86-92, 99 (in Chinese).

- [6] 宋歌. 基于XFlow软件的离心式喷嘴雾化特性分析[D]. 厦门:厦门大学, 2017.

SONG Ge. Study of the Swirl Atomizer Performance Based on the XFlow [D]. Xiamen: Xiamen University, 2017 (in Chinese).

**作者简介:**张慎(1982—),男,河南汝南人,博士,正高级工程师,研究方向为BIM及建筑全生命周期管理PLM平台研发与应用、GIS平台开发与应用、参数化设计与优化、CFD仿真分析、自然灾害风险评估等各类高端数字技术开发及应用,发表学术论文50余篇,包括3篇SCI、4篇EI,取得实用新型专利5项、发明专利15项(实质审查)、软件著作权40项。

**E-mail:**zhangshen202@163.com

**收稿日期:**2022-06-27

**修回日期:**2022-07-20

(编辑:孔红春)