

长距离输水工程数字孪生模型数据融合及编码技术研究

潘志权¹, 闫飞^{2,3}, 贾东远¹, 刘晨^{2,3}, 周超², 陈晨咏⁴

(1. 广东粤港供水有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;
3. 滨水空间规划设计湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430010;
4. 粤海水资源工程研究中心(广东)有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 针对长距离输水工程在数字孪生工程数据底板建设过程中 GIS 与 BIM 等多源数据融合及编码体系不完善的问题, 通过分析长距离输水工程设施数字孪生模型建立方法和编码特点, 开展 BIM 模型和倾斜摄影三维实景模型建立与融合方法、水工设施 KKS 编码方法和基于 Dynamo 的快速编码技术的研究。研究结果及工程应用表明, 基于 Cesium 的 BIM 模型和倾斜摄影模型融合能够实现精细化三维场景模型构建和长距离输水工程数据信息共享。将 KKS 编码拓展到水工设施编码, 形成的数字化编码库, 有利于水工设施与机电设备编码的高效和统一管理。利用 Dynamo 自动编码技术, 可快速实现设施设备快速编码, 提升了长距离输水工程设施运维管理的数字化与智能化程度, 为后续数字孪生延伸应用奠定基础。

关键词: 长距离输水工程; 建筑信息模型(BIM); 数字孪生; KKS 编码; 地理信息系统(GIS)

中图分类号: TV672

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)02-0012-07

Research of Data Fusion and Coding Technology for Digital Twin Modeling in Long Distance Water Transmission Projects

PAN Zhiquan¹, YAN Fei^{2,3}, JIA Dongyuan¹, LIU Chen^{2,3}, ZHOU Chao², CHEN Chenyong⁴

(1. Guangdong Yue Gang Water Supply Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China;

2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010, China;

3. Hubei Provincial Engineering Research Center of Waterfront Space Planning and Design, Wuhan, Hubei 430010, China;

4. Yuehai Water Resources Engineering Research Center (Guangdong) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Aiming at the problem of imperfect data fusion and coding system of multiple sources such as GIS and BIM during the construction process of digital twin engineering data base plate for long-distance water transmission project, the research and application of the establishment and fusion method of BIM model and oblique photography three-dimensional reality model, the KKS coding method for hydraulic facilities and the Dynamo-based fast coding technology are carried out by analyzing the establishment method and coding characteristics of the digital twin model of the long-distance water transmission project facilities. The research results and project practice show that the fusion of BIM model and the oblique photography model based on Cesium can realize the construction of the refined 3D scene model and the sharing of data and information of long-distance water transmission project. The digital code library formed by expanding KKS coding to hydraulic facilities coding is conducive to the efficient and unified management of hydraulic facilities and electromechanical equipment coding. Using the Dynamo automatic coding technology, rapid coding of facilities and equipment can be quickly realized, which improves the digitalization and intelligence of the operation and maintenance management of long-distance water transmission project facilities, and lays the foundation for the subsequent extension of digital twin application.

Keywords: long-distance water transmission project; Building Information Modeling (BIM); digital twin; KKS coding; Geographic Information System (GIS)

收稿日期: 2023-11-23

修稿日期: 2023-12-29

基金项目: 国家重点研发计划项目“中小流域堤坝群数字孪生平台高效构建和‘四预’快速响应关键技术”(2022YFC3005504)

作者简介: 潘志权(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利工程技术管理等方面工作。E-mail: 349567664@qq.com

通讯作者: 闫飞(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水利信息化设计与研究工作。E-mail: 1211461997@qq.com

随着现代化工程管理和智慧水利技术的发展,目前借助信息化技术可以高效解决面临的一系列新问题。数字孪生技术就为水利工程智慧管控提出了新的思路。“数字孪生”(Digital Twin)是一项用数字化的方法构建一个和现实世界一模一样的数字世界的技术,是一种集成多物理、多尺度、多学科属性,具有实时同步、真实映射、高保真度特性,能够实现物理时空和虚拟世界交互与融合的技术手段^[1-3]。数字孪生技术为现实物理世界与虚拟信息空间的交互融合搭建了桥梁,借助数字孪生技术构建三维水利工程数字孪生系统,促成了多源异构数据的集成、交换和共享,能够实现三维空间下水利工程物理空间与信息空间的实时交互、迭代优化,在全局范围内增强水利工程的信息全面感知能力、数据服务能力、科学决策能力和应用支撑能力等^[4]。

在智慧水利建设的过程中,随着数字孪生技术的应用,形象直观的三维数据逐渐取代二维数据成为水利工程行业数据建设的首选,基于 GIS 及 BIM 技术的三维建模为数据更新提供了新的技术手段,两者的融合也有利于水利工程建设和统筹管理^[5]。建立完善的 BIM 分类标准、编码体系以及高效的编码管理系统,是实现智慧水利数字孪生场景的重要支撑^[6-7]。实景三维正成为水利工程从数字化向信息化和智慧化升级的主要建设内容之一^[8],建成三维框架模型和水工设施精细模型,是实现供水工程一体化精细管理的重要数据基础。

从目前来看,在智慧水利建设过程中仍然存在以下问题:GIS 三维数据与 BIM 数据融合问题;BIM 标准化体系不够健全,标准化建设不足;BIM 编码体系不够完善,编码管理自动化程度不高;不同三维模型之间数据标准建设不全,导致数据共享难等。因此,对水利工程数字化建模、融合及编码进行研究,将会对水利工程数字孪生领域的发展起到非常大的推动作用。

1 整体技术路线

水工设施主要包括水库、泵站、生物硝化站、发电站、输水构筑物等,工程设施类型多、专业覆盖面广,为构建输水工程数字化三维场景,提升输水工程智慧化管控水平,制定整体工作路线,如图 1 所示。其中,BIM 模型构建与编码通过对目标工程图纸收集整理和编码梳理,分析编码的分类标准,建立编码数据库,在此基础上完成 BIM 模型构建和快速编码技术研究,进而完成 BIM 模型构建和编码参数录

入。倾斜摄影模型构建主要通过资料分析、测区踏勘、像控点布设、数据采集与处理、模型优化等一系列步骤获得倾斜摄影模型。通过获得的 BIM 模型和倾斜摄影模型,研究数据融合方法,以实现输水工程的数字化三维场景构建。

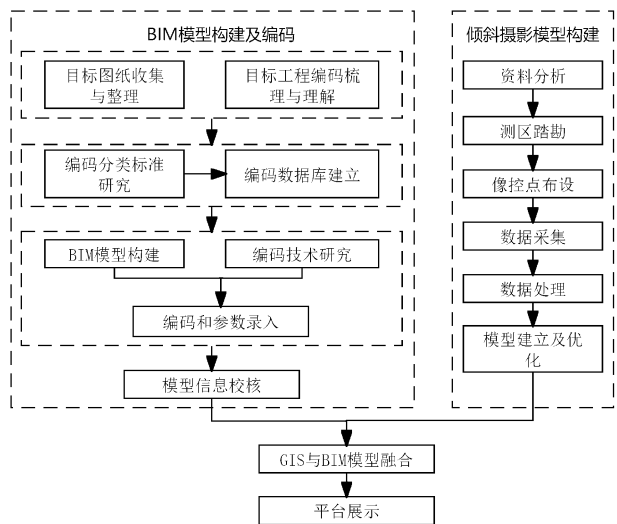


图 1 整体技术路线图

2 数字孪生模型建立及数据融合

在智慧水利建设的过程中,随着数字孪生技术的应用,形象直观的三维数据逐渐取代二维数据成为水利工程行业数据建设的首选,基于 GIS 及 BIM 技术的数字化模型为数据更新提供了新的技术手段。如何利用 BIM 技术实现数字孪生应用落地,需要从两个方面进行研究,一是要根据数字孪生应用需求建立完善的 BIM 分类标准和编码体系,二是要按照分类和编码要求搭建精细化模型,并将编码和相关信息参数录入模型,为数字孪生应用提供重要的数据支撑。

2.1 BIM 三维模型建立

利用 BIM 技术进行三维模型建立,可分为正向建模和逆向建模两种方式,其中正向建模方式是利用多种信息模型强化设计过程从而实现更高效设计的方法。正向建模的设计流程主要包括:设计任务书的解读、建模精度确定、项目拆分原则确定、BIM 建模工具规划、配套设计设备确定、建模时间节点及任务分配、协同方式确定、项目模板制定、中心文件及工作集创建和认领、设计深化及成果输出等。逆向建模方式也叫翻模,该方式主要用于既有建筑物的建模,该类建筑物是通过传统二维施工图方式指导施工建设。逆向建模的主要建模流程包括:图纸

梳理、建模精度确定、BIM 模型基点及空间坐标确定、建模工具规划、建模时间节点及任务分配、建模协同方式确定、项目模板制定、中心文件及工作集建立、成果输出等。

2.2 倾斜摄影三维模型建立

倾斜摄影三维建模是通过遥感技术实现现实三维场景模型构建的方法。目前倾斜摄影主要利用无人机搭载摄影测量镜头,通过先进的定位、融合和建模等技术,对真实地物纹理进行获取,生成真实三维场景。倾斜摄影三维建模的主要流程包括:资料分析、测区踏勘、像控点布设、数据采集、数据处理、模型建立及优化、模型输出等过程^[9]。

2.3 BIM 数据与倾斜摄影数据融合

在设计及应用过程中, GIS 数据主要用于人居环境的建模和分析, BIM 模型数据主要用于单个或多个建筑物的设计、建造和运维管理。从 20 世纪 90 年代开始, BIM 和 GIS 数据融合已经成为三维设计场景构建及应用面临的重要问题^[10], 目前最为常见的解决方案是将 BIM 数据导出成一定的通用格式文件, 比如 IFC 格式文件, 然后利用软件对 IFC 文件进行解译, 进而对 BIM 模型进行加载。Cesium 是一个基于 WebGL 的开源三维地图引擎^[11], 可以实现 BIM 和 GIS 数据的有效融合^[12, 13]。以利用 Cesium 为例加载 BIM 模型和倾斜摄影模型, 其主要操作流程为: 首先, 建立 BIM 模型和获取倾斜摄影三维实景模型; 其次, 通过倾斜摄影提取建筑物所在位置坐标及高程信息, 利用坐标信息对 BIM 模型进行坐标和高程调整, 实现坐标基准统一; 然后, 将 BIM 模型导出 Cesium 能够识别的 3Dtiles 文件; 接着, 利用 DPmodeler 等软件对倾斜摄影模型进行处理; 最后, 利用 Cesium 对 BIM 模型和倾斜摄影模型进行加载融合。

3 输水工程编码体系及方法

3.1 基于 KKS 编码的输水工程编码体系

3.1.1 KKS 编码概述

KKS 编码起源于德国, 是“电厂标识系统”(Identification System for Power Plants)的德文缩写^[14]。1970 年由德国技术委员会(VGB)以手册的形式开始编写, 目前最新的为 2000 年修订的第四版。KKS 电厂标识系统是根据任务、类型和位置来表示不同阶段、任何类型和位置来标识不同阶段、任何类型电厂的规划立项、设计、采购、施工、调试、运行和检修

的设备管理, 并符合国家和国际标准, 它还是一种适合计算机处理的编码体系。但 KKS 编码主要应用于电厂的机电设备编码, 对于水利工程水工设施编码的应用还较少^[15], 因此开展水工设施 KKS 编码研究, 实现水利工程水工建筑设施和机电设施的统一管理具有非常大的意义。机电设施编码结构如表 1 所示^[16]。

表 1 机电设施 KKS 编码结构

机电 KKS 编码约定							
分解层次 序号	第 0 级 (全厂码)	第 1 级 (系统码)	第 2 级 (设备码)			第 3 级 (部件码)	
编码字符	G	F1、F2、F3	FN	A1、A2	AN	A3	B1、B2
编码字符 类型	A 或 N	AAA	NN	AA	NNN	A	AA

说明: 表中 A 英文字母字符; N 数字字符; F1、A1、FN、B1 等均表示具有分类功能的代码元素; NN 表示由两个数字组成的字符串; AAA 表示由三个英文字母组成的字符串。

3.1.2 KKS 编码格式

根据 KKS 编码特点, 工程中的泵站和电站工程可以很好契合 KKS 的编码规则, 而长距离输水设施无法直接照搬机电设施的编码规则, 因此需要对水工设施的编码规则进行重新定义。

水工设施 KKS 编码结构与机电设备的编码方案不同, 主要分为三个层级, 第 0 级(系统)、第 1 级(单元)、第 2 级(构件), 由 15 为字符组成, 按照所属关系、构件分类、地点标识、位置信息进行编码。如表 2 所示。

表 2 水工设施 KKS 编码结构

编码约定							
分解层次 序号	第 0 级 (系统)	第 1 级(单元)			第 2 级(构件)		
编码字符 名称	系统 编码	前缀 码	单元 分类码	单元 编号	构件 分类码	构件 编号	构件 附加码
编码字符	A0	F0	F1、F2、F3	FN	A1、A2	AN	A3
编码字符 类型	A	NN	AAA	NN	AA	NNNN	A

说明: 表中 A 英文字母字符; N 数字字符; A0、F0、FN 等均表示具有分类功能的代码元素; NN 表示由两个数字组成的字符串; AAA 表示由三个英文字母组成的字符串。

(1) 第 0 级约定

第 0 级为系统编码, 主要考虑长距离输水工程线性的特点, 根据各维护、管理的区间划分将不同段的水工设施, 按照 A—Z(除 I 和 O)的字母顺序对其进行约定, 如此每个管理区间均有唯一一个系统代码进行表示。

表 3 水工设施 KKS 编码第 0 级结构

序号	建筑物系统	编码约定 (系统编码)	备注
一	泵站类		
1	泵站 1	A	
2	泵站 2	B	
	...	...	...
二	水库类		
1	水库周边建筑物	Y	不含分水工程
三	输水类		
1	泵站至泵站区间建筑物	T	不含分水工程
...	...	...	...
9	分水工程	F	分水工程

(2) 第 1 级约定

第 1 级为单元编码,主要根据主旁路识别、水工设施类型、设施单元编号进行编码约定,其中系统前缀码(F0)主要用于识别主旁路设施(主路指主线输水设施,旁路指分水、排水、弃水设施),采用两位数字进行约定,水工设施若为主路则约定为 00,若为旁路则按照主要供水方向从 01 开始对各旁路设施进行连续编号;单元分类码(F1、F2、F3)由三个字母组成,主要用于识别不同类型的水工设施;单元编码(FN)为输水单元编号,按输水建筑物结构类型或功能特性划分,采用两位阿拉伯数字沿水流方向连续编号。

表 4 水工设施 KKS 编码第 1 级结构

输水类建筑物 (单元)		编码约定		
		前缀码	单元分类码	单元编号码
主干 输水工程	主路水工结构			
	砌石结构 支护明渠		ULA	FN 为输水单元编号,按输水建筑物结构类型或功能特性划分,采用阿拉伯数字沿水流方向连续编号
	...	主路识别号: 约定为 00	...	
	渡槽		ULD	
	有压箱涵		ULF	
	...		...	
	排水泵房		UMB	约定为 00
	旁路水工结构			
	弃水渠	旁路编号:从 01 开始沿供水方向给各条旁路连续编号	根据结构类型见输水类主路水工	同输水类主路水工
	检修车道		ULZ	同输水类主路水工

(3) 第 3 级约定

第三级为构件编码,主要根据单元设施的构件分类码、构件编号、构件附加码进行编码约定,其中构件分类码(A1、A2)由两位字母组成,对不同单元设施中的不同构件根据材质、位置、属性进行区别标

识,如砌体设施、测量设施、防洪设施等;构件编号码(AN)属于单元构件定位码,采用设施的起始里程桩号的前六位阿拉伯数字为编号,如桩号 Q06 + 006—Q09 + 211 的单元划分后,构件 AN 编号为 06006;构件附加码(A3)用以识别并联的输水元件,如泵站有 8 条流道,约定顺水方向从左到右分别附加代码 A—H;若无并联(唯一)则约定为 Z。

表 5 水工设施 KKS 编码第 3 级结构

输水类建筑物 (构件)		编码约定		
		构件分类码	构件编号码	构件附加码
输水工程	顶部设施	WU		AN 采用设施的起始里程桩号为编号
	底部设施	WD		
	左侧设施	WL		
	右侧设施	WR		
	结构缝设施	WZ		
...	...	...		附加码:用以识别并联的输水元件,如泵站有 8 条流道,约定顺水方向从左到右分别附加代码 A—H;若无并联(唯一)则约定为 Z
附属设施	混凝土路面	XA		根据实际管理需要进行分段,AN 采用该段绿化块的起始里程桩号为编号
	沥青路面	XB		
	碎石路面	XC		
	...	...		

以邵岗头明槽和窑坑隧洞出口检修车道为例,水工设施 KKS 编码形式见表 6 所示。

表 6 水工设施 KKS 编码示例

序号	设施名称	水工设施 KKS 编码
1	邵岗头三孔明槽第 1 孔	T 00ULB04 WU01269A
2	邵岗头三孔明槽第 2 孔	T 00ULB04 WU01269B
3	邵岗头三孔明槽第 3 孔	T 00ULB04 WU01269C
4	窑坑隧洞出口检修车道混凝土路	J 10ULZ01 XA06707Z

“T”、“J”为系统码,分别代表“太园泵站至莲湖泵站区间建筑物”、“金湖泵站至上埔泵站区间建筑物”;“00”、“01”为前缀码,分别代表“主路识别”、“排序为 10 的旁路”;“ULB”、“ULZ”为单元分类码,分别表示水工设施单元属于“垫基明槽”、“其它结构单元”;“04”、“01”为单元编号码,分别表示此水工设施在本管理段内属于“第 4 个单元设施”、“第 1 个单元设施”;“WZ”、“XA”为构件分类码,分别表示“明槽的顶部设施”、“混凝土路面检修车道”;“01269”、“06707”为构件编码,分别表示本单元起始桩号为“01 + 269”、“06 + 707”;“A/B/C”、“Z”为构件附加码,分别表示“此输水设施属于三组并联”、“无并联关系”。

3.2 编码数据库建立

准备阶段的主要工作主要为基于工程现有水工

设施基础数据,结合 KKS 编码规则,建立水工设施编码数据库,便于后期数字孪生模型编码和单元构件信息查找。以某工程倒虹吸出水渠为例,编码数据库见表 7 所示。

表 7 编码数据库(部分)

序号	层次	设施描述	编码	始桩号	末端桩号	设施属性	单位	数量
1	1	新开河倒虹吸出水渠	A 00ULQ11	00 + 286.600	00 + 373.600	—	m	87
2	2	新开河倒虹吸出水渠第 1 段底板	A 00ULQ11 WD00286Z	00 + 286.600	00 + 296.600	混凝土建筑物	m	10
3	2	新开河倒虹吸出水渠第 1 段左侧墙	A 00ULQ11 WL00286Z	00 + 286.600	00 + 296.600	混凝土建筑物	m	10
4	2	新开河倒虹吸出水渠第 1 段右侧墙	A 00ULQ11 WR00286Z	00 + 286.600	00 + 296.600	混凝土建筑物	m	10
5	2	新开河倒虹吸出水渠第 1 段结构缝设施	A 00ULQ11 WZ00286Z	00 + 286.600	00 + 296.600	结构缝设施	m	10
6	2	新开河倒虹吸出水渠第 2 段底板	A 00ULQ11 WD00296Z	00 + 296.600	00 + 306.600	混凝土建筑物	m	10
7	2	新开河倒虹吸出水渠第 2 段左侧墙	A 00ULQ11 WL00296Z	00 + 296.600	00 + 306.600	混凝土建筑物	m	10
8	2	新开河倒虹吸出水渠第 2 段右侧墙	A 00ULQ11 WR00296Z	00 + 296.600	00 + 306.600	混凝土建筑物	m	10
9	2	新开河倒虹吸出水渠第 2 段结构缝设施	A 00ULQ11 WZ00296Z	00 + 296.600	00 + 306.600	结构缝设施	m	10
...	...	...	...	...	...	...	...	...

3.3 基于 Dynamo 的水工设施编码技术研究

Dynamo 是一种基于流的可视化编程软件,现作为 Revit 中的配套插件,用于实现可视化编程、快速建模、参数化设计、批量处理模型信息等功能。利用 Dynamo 进行水工设施编码技术研究,主要步骤为:① 准备工作,在 Revit 项目文件中添加相应的构件库,并建立 BIM 模型;② 创建共享参数,对建立的模

型进行参数设置,创建共享参数,并通过 Dynamo 设置“KKS 编码”共享参数;③ 录入构件名称,通过建立的构件名称库,利用 Dynamo 软件实现模型构件名称的自动加载;④ 自动编码,根据构件的名称,编写 Dynamo 代码实现构件编码自动输入和参数录入,如图 2 所示。

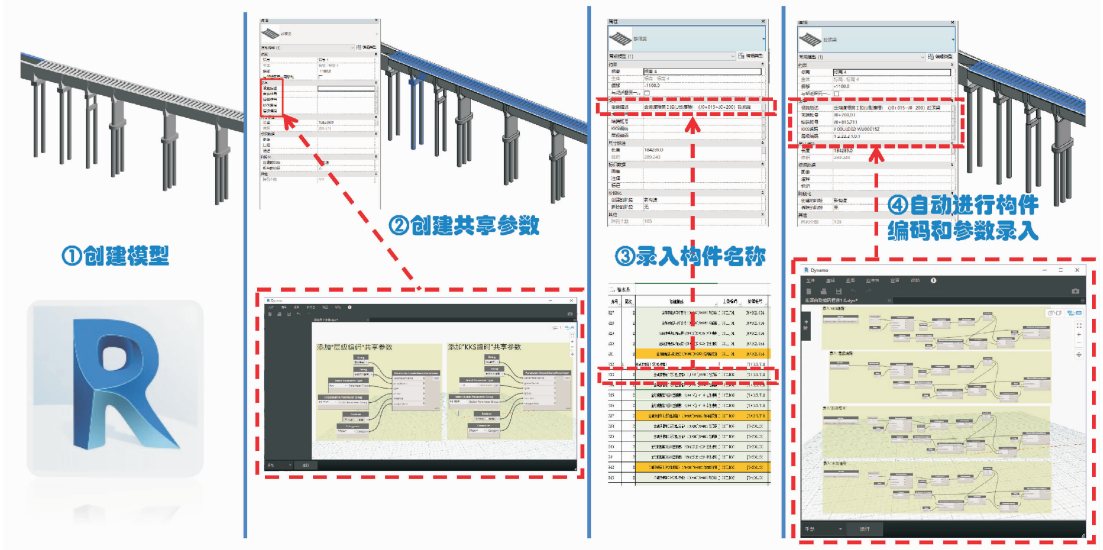


图 2 基于 Dynamo 的水工设施编码技术流程

4 长距离输水工程数字孪生模型建立及编码应用

4.1 工程简介

通过对某长距离输水工程的特点研究发现,整个工程全长约 68 km,沿线水工设施类型繁多,包括 6 座泵站、1 座生物硝化站、2 座电站、2 座水库、63.83 km 专用输水建筑物、1 套独立供电网络、45 个分水口、1 个调度中心及其它配套水利工程施工,根据 KKS 编码特点,工程中的泵站和电站工程可以很好契合 KKS 的编码规则。

4.2 水工设施数字孪生模型建立及融合结果展示

4.2.1 BIM 模型展示

选用欧特克 Autodesk Revit 软件为主要建模软件,各专业建模人员并行开展各专业建模工作。首先建立统一的标高轴网文件,各专业定制专用的项目样板。针对土建、机电、金结分别建立独立的 BIM 模型,通过链接方式对各专业模型进行整合,经过校核后最终完成模型成果,如图 3 所示。

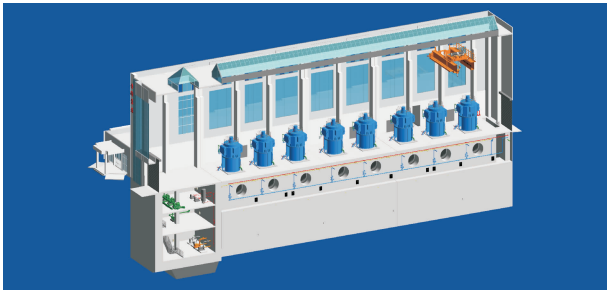


图 3 BIM 模型三维展示

4.2.2 倾斜摄影数据模型展示

根据倾斜摄影三维建模流程,基于飞马 D2000 旋翼无人机,搭载索尼 D-CAM3000 单镜头倾斜航摄影仪,通过规划航飞路线,从前视、左视、右视、后视共 4 个不同的方向对地面影像进行采集,获取高分辨率影像数据。基于倾斜摄影实景三维建模技术,在统一的空间参考坐标系下,采用影像融合和自动匹配技术,将倾斜影像自动匹配到相应空间的三维模型骨架上,从而快速构建实景三维模型数据。通过航空摄影测量技术手段,依照现行国家标准、测绘行业标准以及有关规定,充分利用现有航摄数据资料,利用 context capture 软件进行倾斜空三加密,形成三维模型数据成果,见图 4 所示。



图 4 倾斜摄影三维模型展示

4.2.3 BIM 与倾斜摄影数据融合结果展示

利用 Revit 建立三维模型和无人机倾斜摄影建立实景三维模型后,将 BIM 模型导出成 3Dtiles 格式文件,然后利用 Cesium 加载 BIM 模型和处理后的三维倾斜摄影模型,如图 5 所示。基于 BIM 模型与 GIS 三维数据融合技术,实现长距离输水工程数据信息共享,为工程智慧运行提供三维可视化技术保障。



图 5 BIM 与倾斜摄影三维模型融合展示

4.3 模型构件编码结果展示

利用可视化编程软件,根据《水工设施编码数据库》,自动将 KKS 编码及其他相关参数,统一导入至模型构件,转成 GIS 平台支持的数据格式,见图 6 所示。



图 6 三维模型编码结果展示

5 结 论

以长距离输水工程数字孪生数据底板建设为背景,开展了多源数据模型建立、融合和编码研究,主要研究结论和成果如下:

(1) 提出了基于 Cesium 的 GIS 三维倾斜摄影模型与 BIM 数据融合方法。通过无人机摄影测量和 Revit 软件分别获取某工程倾斜摄影三维模型和 BIM 模型,利用位置及高程信息统一坐标基准,实现了基于 Cesium 的 BIM 模型和倾斜摄影模型融合。

(2) 提出了长距离输水工程编码体系及编码方法。通过研究某供水工程设施特点,分析 KKS 编码规则,拓展水工设施 KKS 编码体系,建立了输水工程编码数据库,实现了基于 Dynamo 的水工设施快速编码方法。

(3) 通过建立的某供水工程设施管理系统,解决了 BIM 模型与 GIS 三维数据融合问题,提升了长距离输水工程设施运维管理的数字化与智能化程度,为类似的长距离输水工程数字孪生模型应用提供了一定的技术指引。

参考文献:

- [1] 钱 峰,周逸琛.数字孪生流域共建共享相关政策解读[J].中国水利,2022(20):14-17,13.
- [2] 孙瑞刚,陶少雄,管林杰,等.引江补汉工程建设管理数字孪生体系的构建研究[J].中国水利,2022(18):70-72.
- [3] 李 喆,叶 松,杨星玥,等.数字孪生驱动的南水北调中线水源工程水质平台设计与开发[J].长江科学院院报,2023,40(3):174-180.
- [4] 蔡 阳.以数字孪生流域建设为核心构建具有“四预”

功能智慧水利体系[J].中国水利,2022(20):2-6,60.

- [5] 蒋乐龙,张社荣,潘 飞.基于 BIM + GIS 的长距离引水工程建设管理系统设计与实现[J].工程管理学报,2018,32(2):51-55.
- [6] 李家华,张宏铨,万浩然,等.水运工程中 BIM 模型编码技术研究及应用[J].中国港湾建设,2021,41(10):38-43.
- [7] 陈 特,苏文哲,吴 含,等.基于分类和编码标准的 BIM 模型属性管理研究[J].人民长江,2023,54(6):236-241.
- [8] 朱 庆,张利国,丁雨淋,等.从实景三维建模到数字孪生建模[J].测绘学报,2022,51(6):1040-1049.
- [9] 刘安琪,冯 瑞.无人机倾斜摄影实景三维技术研究[J].测绘与空间地理信息,2022,45(S1):293-295.
- [10] 孙文良.融合 GIS 和 BIM 的流域环境保护三维数字化管理平台[J].长江科学院院报,2023,40(2):161-168.
- [11] 乐世华,张 煦,张尚弘,等.基于 Cesium 的 WebGIS 流域虚拟场景搭建[J].水利水电技术,2018,49(5):90-96.
- [12] 胡夏恺,陈俊涛,杨 聘,等.基于 Revit 二次开发的 BIM + WebGIS 融合应用研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):3930-3942.
- [13] 代进雄,蒋 奇,俞 锋,等.基于 BIM 的水利工程建设管理平台研究及应用[J].水利水电技术(中英文),2022,53(11):37-49.
- [14] 康 慧.KKS 编码工程应用探讨[J].电力建设,2005,26(7):53-55.
- [15] 卓鹏飞.基于 Omniclass 的唯一编码及水利工程 BIM 集成交付[J].人民长江,2020,51(3):199-204.
- [16] 杨灵敏,李佳佳,王 勇.基于 KKS 编码的发电集团资产统一标识方案[J].计算机工程与科学,2008,30(7):148-150,154.