

交通强国·高速公路智能建造工程示范系列

高速公路全要素智能建造 关键技术及其工程应用

(仁沐新高速卷)

周黎明 何刚 尹紫红 刘勇
廖知勇 陈非 朱明 王孝国 著
潘峰 王健 黄红亚

西南交通大学出版社

·成都·

图书在版编目 (C I P) 数据

高速公路全要素智能建造关键技术及其工程应用. 仁
沐新高速卷 / 周黎明等著. —成都: 西南交通大学出
版社, 2021.5

(交通强国·高速公路智能建造工程示范系列)

ISBN 978-7-5643-8033-5

高... 周... 智能技术 - 应用 - 高速
公路 - 道路建设 - 研究 U412.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 090582 号

交通强国·高速公路智能建造工程示范系列

Gaosu Gonglu Quanyaosu Zhineng Jianzao Guanjian Jishu Ji Qi Gongcheng Yingyong
(Ren-Mu-Xin Gaosu Juan)

高速公路全要素智能建造关键技术及其工程应用

(仁沐新高速卷)

周黎明 何刚 尹紫红 刘勇
廖知勇 陈非 朱明 王孝国 著
潘峰 王健 黄红亚

责任编辑 王同晓

封面设计 吴兵

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸 170 mm × 230 mm

印 张 19.5

字 数 307 千

版 次 2021 年 5 月第 1 版

印 次 2021 年 5 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-8033-5

定 价 118.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

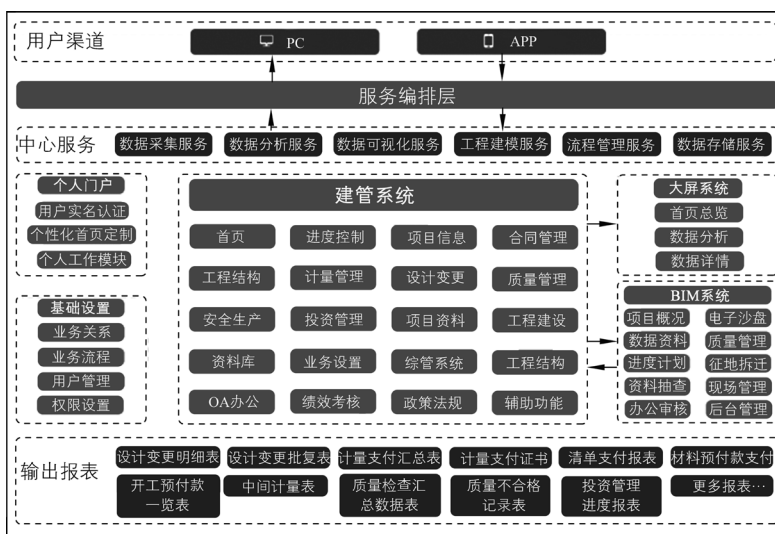
前言

PREFACE

建设管理平台是施工全过程标准化管理平台，依照“全方位、多维度、多层次”的总体建设思路，结合物联网、互联网、人工智能等技术，实现了数据收集、分析和可视化，将项目数据从设计、施工到竣工、养护的全面存储打通。建设管理平台为项目公司对施工现场的标准化管理提供了手段，确保了现场数据实时采集，以及施工过程可溯源，有效提升了施工现场流程标准化水平。

建设管理平台以提高工程建设质量、提高管理效率为目标，通过物联网系统、移动 APP（工序检查、施工日志、工地视频等功能）等技术实时采集现场资料，打破项目管理者现场监管的空间限制，实现从施工现场到企业的全角度有效管理，提升工作效率、降低工作成本，最终实现项目数据的全要素全周期管理。

建设管理平台旨在为项目管理者提供一个管理新思路，从管理行为着手，推动在建高速项目管理模式朝着“工作流程化、流程标准化、考核数据化、数据台账化、责任明确化”的“五化”目标前进，打造规范、透明、反腐清廉的阳光工程。



如今，数字技术作为交通行业重要的生产决策手段，已经成为新时期的核心竞争力。庞大的基础设施建设规模，形成了珍贵的公路数据“富矿”。然而，却一直没有形成一套与之相匹配的高速公路建管养一体化数据管理与决策分析系统，造成大量的信息孤岛和数据断点，阻碍了行业数字化进程。

为整合交通运输大数据、云计算、人工智能、物联网等技术，开始了对高速公路全要素智能建造管理平台的研发。该平台以数据云中心建设为核心，以公路建设智能管理、公路运维智能管理、公路资产智能管理与辅助科学决策为核心架构，呈现两大突出特点：

一是信息可视化。平台以 BIM + GIS 为信息载体，将工程实体建设运维全过程、全要素信息映射到 BIM 中，对照高速公路物理实体建设，同步生成“数字高速”。同时，对每一工程构件设置唯一编码标识，将建养全过程数据与之绑定，通过信息可视、流程透明、动作标准的管理平台，实现规划、设计、建造、养护、运维全过程、全要素多源数据时空集成、互联、共享。

二是监管精细化。贯彻质量终身制原则，将每个工程结构构件的设计、施工、质检、计量等过程中的全部信息进行实名登记，实现高速公路全寿命周期信息快速追溯；结合重点部位视频与智能监测设备，实现对项目建设质量、投资、安全、进度、环保等的实时动态管控。

该平台的诞生全方位突破了高速公路传统的建管模式，对高速公路资产的科学运维更有着非凡意义。它不仅可以为管理者合理分配养护资金、选择最佳养护方案提供科学依据，还能实现资产管理成本效益最大化和全寿命周期资产的优化增值。

著 者
2021 年 1 月

目录

CONTENTS

第 1 章	绪 论	001
1.1	道路交通基础设施建设数字化	002
1.2	BIM 相关技术概述	009
1.3	生命周期管理和信息交互	019
1.4	基于模型工程的数字孪生构建	024
1.5	关键技术及发展现状	033
1.6	存在的问题	048
1.7	研究意义及研究内容	050
第 2 章	仁沐新高速公路工程概况	052
2.1	项目背景	053
2.2	沿线自然地理特征	054
2.3	项目特点及控制性工程	063
2.4	高速公路项目建设管理难点	065
2.5	高速公路全要素智能建造的必要性	067
第 3 章	高速公路全要素智能建造管理平台架构研究	068
3.1	高速公路项目建设管理现状与需求	069
3.2	平台总体设计方案	070
3.3	平台系统框架	073
3.4	平台关键技术	075
3.5	平台组成与功能	106
3.6	组织体系	113
3.7	保障机制	121

第 4 章	多源异构数据融合技术研究	127
4.1	多源异构大数据融合国内外发展现状	128
4.2	基于模型集成的多源异构数据融合	133
4.3	基于 BIM + GIS 多元数据集成与融合方法研究	146
4.4	高速公路 BIM + GIS 多源数据集成与融合	154
4.5	基于 WBS 的高速公路施工建设项目管理应用	160
第 5 章	工程项目管理信息系统与 BIM 结合应用方案	168
5.1	工程项目管理信息系统概述	169
5.2	工程项目管理信息系统的应用价值	170
5.3	工程项目管理信息系统总体功能架构	172
5.4	工程项目管理信息系统功能设计	172
5.5	基于 BIM 的工程项目管理信息系统设计构想	215
第 6 章	高速公路全要素智能建造工程应用	222
6.1	项目管理模块	223
6.2	隧道管理模块	256
6.3	质量评定模块	260
6.4	竣工档案模块	264
6.5	BIM 模块	268
6.6	数字化竣工交付新模式	278
第 7 章	结 语	286
7.1	高速公路全要素智慧建造取得成效	287
7.2	创新点	288
7.3	建议与展望	290
参考文献		292
附：乐西高速公路施工建造过程图		299

高速公路全 要素智能建 造关键技术 及其工程应用

第 1 章

绪 论

1.1 道路交通基础设施建设数字化

1.1.1 道路基础设施数字化

截至 2019 年年末，全国公路总里程已达到 501.25 万千米，其中高速公路里程达 14.96 万千米，中国已成为名副其实的交通大国。当前，中国正处于由“交通大国”迈向“交通强国”的重要节点，交通运输业高质量发展刻不容缓。2019 年，交通运输部《数字交通发展规划纲要》指出：加快交通运输信息化向数字化、网络化、智能化发展，为交通强国建设提供支撑。该纲要进一步规划到 2025 年，交通运输基础设施和运载装备全要素、全周期向数字化升级迈出新步伐，数字化采集体系和网络化传输体系基本建成。2020 年，交通运输部印发的《推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见》进一步明确，到 2035 年交通运输领域新型基础设施建设须取得显著成效。先进信息技术将深度赋能交通基础设施，精准感知、精确分析、精细管理和精心服务能力全面提升，“新基建”将成为加快建设交通强国的有力支撑。由此可见，道路基础设施数字化是智能公路建设、无人驾驶、智能交通等多领域发展的重要条件。

从技术研发与工程应用视角对道路基础设施数字化进行定义：道路基础设施数字化 (Highway Infrastructure Digitalization) 通过汇集包括物联网技术 (IoT)、地理信息系统 (GIS)、建筑信息模型 (BIM)、信息物理系统 (CPS)、数字孪生 (Digital Twin)、大数据驱动 (Big Data-driven) 等在内的多种技术手段，对道路基础设施进行全生命周期、全要素的信息感知，在此基础上，通过数据存储、传输、可视化等多种方式对道路数字化新建或改造过程进行集成处理。从而对道路基础设施中的物理信息、性能信息、状态信息、行为信息进行全方位监控，以期更好地依托工程规划设计建模平台、项目建设协同管理平台、运维管养综合分析平台，为进一步实现道路基础设施的优化设计、智能建造、性能仿真与预测、科学管理与决策提供技术支持。在全球数字化经济迅猛发展的背景

下，道路基础设施数字化技术研发和工程应用正处于快速发展时期，机遇与挑战并存。道路基础设施行业须紧紧抓住数字化技术的发展，充分发挥数字技术对传统行业的引领、带动与改造作用，促进行业转型升级。这是推动经济高质量发展的现实路径。

当前，道路基础设施数字化发展有 2 种主要的实现途径：其一是推进开展既有公路交通基础设施数字化、智能化升级改造；其二是新建智慧化公路。无论哪一种都会对基础设施技术体系和开发应用提出新的要求与挑战。然而，数字化道路基础设施的发展建设当下仍停留在功能性、保障性、服务性的初级阶段，关键技术与相关应用有待于进一步研发与拓展。这其中：在数据感知方面，更强调数据的采集；在大数据处理方面，数据种类多、体量大、来源复杂，数据结构、格式也不统一，数据库管理应用有限，解决数据融合的技术手段相对落后，缺乏统一数据框架；在技术应用方面，包括数字道路信息感知技术、数据管理与分析技术、全生命周期工程应用等关键技术尚处于起步阶段，业务应用场景单一，此外相关技术标准与协同设计仍有待进一步研究，目前缺少系统性地集成应用。

1.1.2 国内外文献统计与分析

1. 数据来源、研究方法 with 工具

分别选取 2000—2020 年间 CNKI 数据库核心合集数据库和 Web of Science TM、IEEE、Science Direct 外文数据库中与道路基础设施技术研究相关的文献作为数据来源，中文以关键词（数字化和道路基础设施、交通基础设施、公路基础设施）为检索条件，英文以检索式.TS = [“ (Highway Infrastructure ” OR “ Transportation Infrastructure ” OR “ Infrastructure Digitalization ”) AND (“ BIM ” OR “ IoT ” OR “ GIS ” OR “ CPS ” OR “ data-driven ”) AND Document Type = (ARTICLE) not la = CHINESE] 为检索条件。为进一步提高检索结果与主题契合度，对文献进行筛选整理，删除与研究主题不符、无关键词、作者不全的文献，得到有效中文文献 229 篇，英文文献 23 695 篇。使用 VOSviewer 软件进行

共被引分析，分别从主要文献统计、期刊分布、高频关键词共现、主要研究国家等方面的共引知识图谱进行可视化与分析。

2. 文献年度分布分析

通过对近年来国内外各年发文量进行整理，绘制图 1-1。由图 1-1 可以看出：自 2000 年以来，国内外道路基础设施领域的中英文发文量总体上呈递增态势；2008 年，政府推出“四万亿计划”来刺激经济，重点集中在铁路、公路、桥梁等交通领域；2018 年，中央经济工作会议首次提出“新型基础设施建设”这一概念，10 年间基础设施建设领域得到蓬勃发展，学界的研究也进一步深入，2018 年中英文发文量是 2008 年发文量的近 5 倍，英文文献的发文量更是在 2018 年达到峰值。从增幅来看，2010 年、2012 年和 2018 年前后发文量增幅较大。总体来看，道路基础设施研究逐渐受到学界的关注。

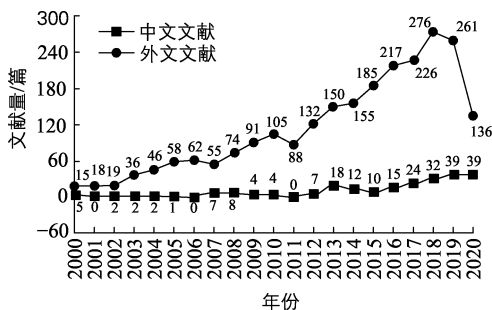


图 1-1 2000—2020 年国内外各年发文量统计

3. 期刊分布分析

为进一步明确道路基础设施研究相关文献的整体情况，识别主要来源期刊，对论文数据进行统计分析，梳理 2000—2020 年国内外道路基础设施领域发文量排名前 10 的期刊（表 1-1）。期刊研究领域涵盖交通工程、计算机科学、环境科学、地理学、公共管理、城市研究在内的多个学科。这不仅反映了道路基础设施领域研究内涵的丰富性，同时也映射出道路基础设施与其他学科之间存在着交叉研究现象，为后续开展相关研究提供了更多新视角。

表 1-1 2000—2020 年中英文道路基础设施领域期刊载文量排名

排名	外文期刊	中文期刊
1	Automation in Construction	《北京交通大学学报》
2	sustainability	《建筑技术》
3	IEEE Access	《交通运输系统工程与信息》
4	Bautechnik	《公路》
5	Transportation Research Record	《土木工程与管理学报》
6	Journal of Computing in Civil Engineering	《工程管理学报》
7	Sensors	《施工技术》
8	Engineering Construction and Architectural Management	《建筑经济》
9	ISPRS International Journal of Geo-information	《中国公路学报》
10	Journal of Cleaner Production	《科技管理研究》

4. 高频关键词共现分析

关键词是文献内容的高度凝练，直观上表明了文章的研究领域。道路基础设施领域高频关键词的出现，体现了道路基建相关细分领域持续受到关注，可以基于此进一步分析该研究领域国内外的热点趋势。使用 VOSviewer 软件对 2000—2020 年道路基础设施研究中 229 篇中文文献进行高频关键词共现分析，依据阈值参数经验将关键词设置为 5，共梳理 371 个关键词，关键词共现知识图谱如图 1-2 所示。图 1-2 显示了频次大于 5 的关键词：2014 年左右的研究出现智能交通、建筑信息模型、智慧城市、云计算等关键词，相较而言更偏重于概念化；2018 年前后逐渐向物联网、特高压、大数据中心等技术平台的研究领域拓展。此外被引频次前 10 位关键词的被引频次与中心性（用于表征重要性的指标）如表 1-2 所示：交通基础设施、交通强国、工业互联网、人工智能是近年来国内研究学界的热点。

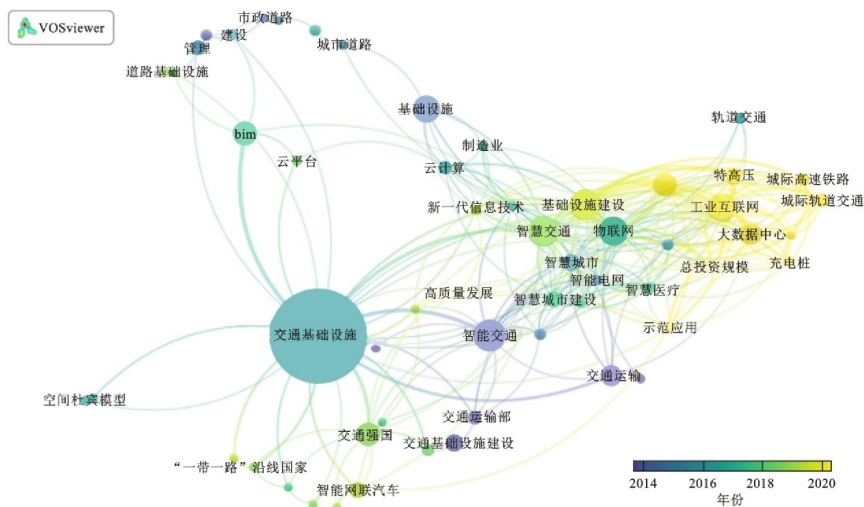


图 1-2 知网关键词共现知识图谱

表 1-2 被引频次前 10 位关键词的频次与中心性

序号	关键词	频次	中心性
1	交通基础设施	69	80
2	智能交通	16	29
3	工业互联网	14	78
4	物联网	14	53
5	人工智能	11	59
6	交通强国	11	21
7	BIM	10	13
8	大数据中心	10	63
9	特高压	7	41
10	智慧城市	7	21

进一步进行外文文献的高频关键词共现分析。由于外文文献较中文文献体量大,依据经验将外文关键词阈值参数设置为 10,进一步梳理了国外文献关键词共 176 组。此外由于 VOSviewer 软件一次最多导入 500 篇文章,故将 2000—2020 年道路基础设施研究中的 2 395 篇外文文献文

本信息分 5 次导入分析中，分析结果如图 1-3 所示，其中 Model(模型)、Framework(框架)、GIS(地理信息系统)、Performance(性能)、Simulation(模拟)、Cloud Computing(云计算)、Ontology(本体论)、Interoperability(互操作性)、Optimization(优化)是国际道路基础设施数字化研究的热词；相较而言，国外研究更强调科技与关键技术对道路基础设施领域研究的引领。总体来看，在交通基础设施规模和复杂性不断扩大的今天，道路基础设施数字化突出研究的目标(网联、智能、智慧)，强化研究的手段(计量经济学、物联网、BIM、GIS、云计算)，深入研究的问题(本体论、互操作性、优化)，是当今重要的研究课题。

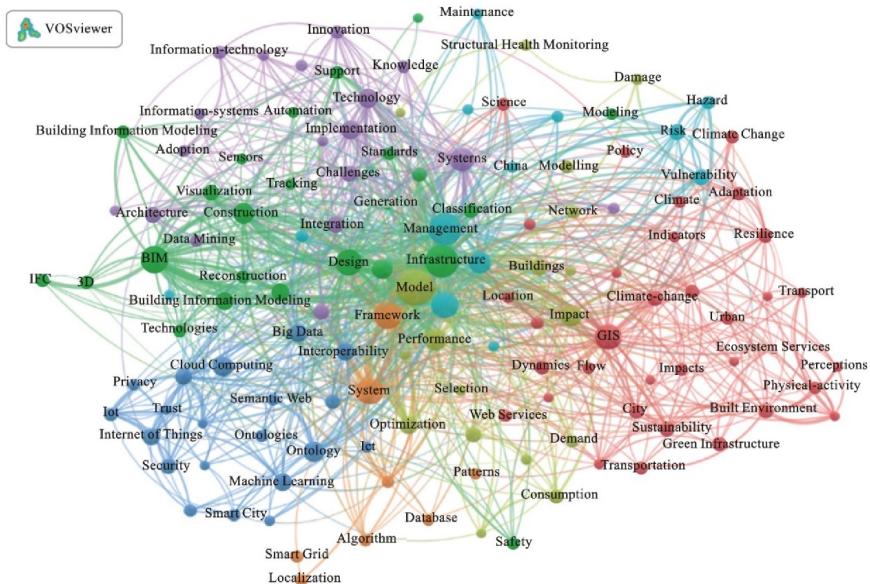


图 1-3 Web of Science 关键词共现知识图谱

1.1.3 道路基础设施基本特征

道路基础设施作为连接城市的复杂系统，是承载着城市发展演化的交通网络。随着数字化技术手段的迅速发展，使得道路的自我感知、自我愈合、自我适应以及自我供能成为可能。随着技术的演进发展，基础

设施经历了从低等级公路到高速公路，再到数字化、智能化公路的演化历程，未来将向着超性能与绿色公路的目标而奋进，如图 1-4 所示。基础设施的进一步完善也催发着车辆向高性能、新能源、无人驾驶等更高新领域发展，绿色可持续、数字化、智能化已经成为人、车、路协同发展的共同目标。

国际经济合作与发展组织在 2013 年召开的 OECD 国际峰会上指出，道路基础设施是各收入阶层群体发展进步的物质基础，助力人民的福祉和社会的发展。作为构成节点、区域、通道的大型网络化公共工程，道路基础设施对国家政治经济、社会科技、环境保护、国家安全具有重要意义。从功能上看，道路基础设施作为城市发展建设的重要一环，在城市集聚、扩散过程中起到了物质输送和人口流动的重要作用。Gomes 等指出道路基础设施具有投资规模大、建设周期长、风险复杂、利益相关者多、组织结构复杂等特点。此外，由于道路基础设施的复杂特征和其对行业发展的重要意义，学者们开始关注于道路基础设施的配置与经济发展的关系，以期通过优化基础设施系统，促使道路基础设施对经济、环境和社会发展产生积极的影响。

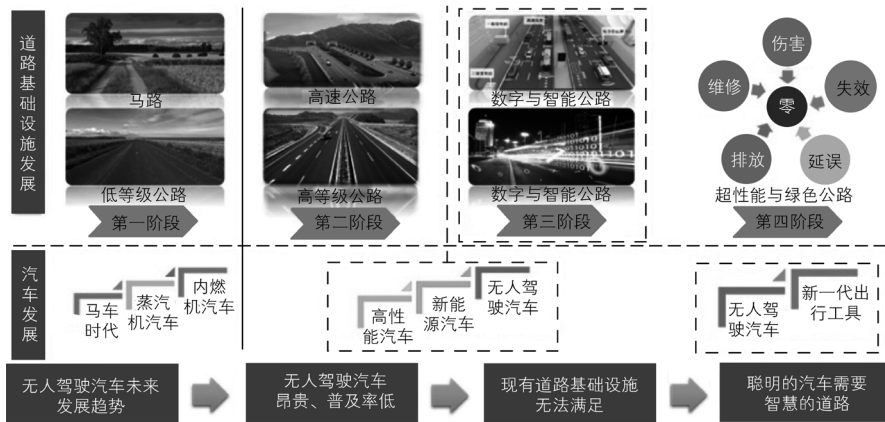


图 1-4 道路基础设施和车辆发展演化历程

道路交通基础设施建设一直以来都被认为是促进经济增长的重要因素。Nuno 等认为建设交通基础设施是影响运输成本的关键，其基于实证研究分析了双边贸易流量与运输成本之间的关系，印证了影响非洲经贸水平的一个重要因素是当地交通基础设施水平低下。Salling 等结合成本

效益理论，提出了用评估交通基础设施项目的决策支持模型，重点分析基础设施建设的经济必要性。Lakshmanan 等进一步指出，道路基础设施除了作为公共投资产生正外部性外，还能够通过知识溢出、技术溢出效应间接地拉动经济增长。然而，在道路基础设施建设过程中，不可避免地会产生环境污染和城市噪声，由此产生负外部性。随着城市中基础设施规模的持续扩大，不合理的交通基础设施规划也带来诸多不良影响，Flyvbjerg 和 Ri-etveld 先后分析得到对于经济欠发达地区，通过新建或改造交通基础设施不但无法对经济发展起到正面影响，甚至可能导致区域内劳动力、资本和其他生产要素向外流出，掣肘经济发展；Puga 进一步指出过剩的基础设施不仅无法保证缩小地区间的经济差距，反而可能会进一步加剧区域间的社会经济的不协调、不平衡状态，造成恶性循环。

随着人口的不断增长和城市交通系统的演化发展，城市开始对道路基础设施的建造、监测、维护逐渐有了更高的要求。交通运输的各个部门，都在着力开发和使用创新技术。在此背景下，Kupriy-anovsky 等指出交通行业需要通过将物理基础设施和数字基础设施相结合来开发智能基础设施，从而提供更多信息来改进管理决策。在物联网和大数据时代，以 BIM、GIS、IoT 等为代表的关键技术也逐渐成为智慧城市规划和管理的必需品，开始融入建筑、工程和施工行业，进行基础设施全生命周期管理。

1.2 BIM 相关技术概述

长期以来，工程建设领域都受到设计错误频发、信息割裂、项目管理效率低下等诸多问题的困扰，根据国际相关实践经验，BIM 技术的推广被认为是能够解决工程生产这些根源问题的重要手段，行业从业者借助 BIM 技术开展工程领域的数字化转型，在明确用户需求的第一时间同步构建信息模型，降低成本的同时缩短交付时间、提高生产质量和服务水平。英国在 2020 年度的国家 BIM 技术发展报告中指出，在英国本土 BIM 技术应用范围广泛，约有 73% 的被调查者使用 BIM 技术，他们普

普遍认为 BIM 技术具备改变行业的突出特点；报告进一步指出，信息协作效率的增强、生产力的提高、对风险的实时预警、盈利能力的提升是 BIM 用户一致认可的优点。

BIM 技术作为工程数字化建设的重要技术手段，通过精细、海量的模型数据完成对工程项目全过程的信息化、智能化管理。BIM 技术具有优化性强、模拟性好、协调性高、三维可视化效果好的特点，能够贯穿工程数字化全生命周期中；GIS 技术长期以来被用于收集、存储、管理、查询、综合分析、处理和显示宏观的地理环境，它能够基于三维可视化技术展现工程项目的外部环境和地理信息，是集成处理空间数据的重要介质，能够和 BIM 技术形成互补；IoT 技术是基础设施项目中智能管理、能效管理与运维管理的重要支撑，通过物联网技术将项目中的人员、机器、原料、方法、环境有机聚合起来，进行信息交换和通信，从而实现实时管理控制和传导执行。在人工智能技术的触发下，物联网技术能够具有多源智能特征，从而实现工程项目各环节的智能决策。

近年来，随着国内大交通建设、数字交通建设的全面推进，BIM 技术在道路基础设施领域的应用也迎来了发展的机遇期。大数据、物联网、云计算、人工智能的发展迭代，将使 BIM 技术在道路基础领域具有更大的应用价值。这其中 BIM 技术主要用以对基础设施内部信息的分析与管理，GIS 技术主要针对区域外部空间，通过分析空间地理信息辅助设计模型实体周围的地理环境场景，进一步提高 BIM 信息的完备性，再通过 IoT 技术将 BIM 和 GIS 数据汇集，完成信息交换和通信。

1.2.1 BIM 的由来与技术概念

20 世纪 70 年代，受全球石油危机的影响，美国整个建筑业都在考虑如何提高行业生产效益的问题。在此背景下，1975 年美国乔治亚理工大学的查克-伊斯特曼教授（Chuck Eastman）在其研究课题“Building Description System”（建筑物描述系统）中提出“a computer based description of a building”（基于计算机的建筑物描述方法），并以第一作者的身份撰写了世界上第一篇 BIM 论文“An Outline of the Building Description System”（建筑物描述系统的框架）。最初，查克-伊斯特曼将

BIM 定义为“建筑信息模型是一种涵盖建筑项目在其整个生命期内所有形貌特征、功能要求及组件性能信息的综合模型，该模型中应包括工程进度、建造过程及其控制信息”。他认为 BIM 是通过数字技术对建筑工程项目中的各个关键信息进行建模，从而实现建筑工程项目的数字化，进而解决建筑工程各个阶段所存在的信息不对等或是不完整的问题，实现工程项目的可视化、可控性和高效率，即 BIM 便于实现建筑工程的可视化和量化分析，提高工程建设效率。

按照我国国家标准《建筑信息模型统一标准》(GB/T 51212—2016)规范定义，建筑信息模型 (BIM) 即：在建设工程及设施全生命期内，对其物理和功能特性进行数字化表达，并依此设计、施工、运营的过程和结果的总称。

BIM 技术是一种多维 (三维空间、四维时间、五维成本、N 维更多应用) 模型信息集成技术，可以使建设项目的所有参与方 (包括政府主管部门、业主、设计、施工、监理、造价、运营管理、项目用户等) 在项目从概念产生到完全拆除的整个生命周期内都能够在模型中操作信息和在信息中操作模型，从根本上改变从业人员依靠符号文字形式图纸进行项目建设和运营管理的工作方式，实现在建设项目周期内提高工作效率和质量以及减少错误和风险的目标。

BIM 的含义总结为以下三点：

(1) BIM 是以三维数字技术为基础，集成了建筑工程项目各种相关信息的工程数据模型，是对工程项目设施实体与功能特性的数字化表达。

(2) BIM 是一个完善的信息模型，能够连接建筑项目生命期不同阶段的数据、过程和资源，是对工程对象的完全描述，提供可自动计算、查询，组合拆分的实时工程数模可被建设项目各参与方普遍使用。

(3) BIM 具有单一工程数据源，可解决分布式、异构工程数据之间的一致性和全局共享问题，支持建设项目生命期中动态的工程信息创建、管理和共享，是项目的实时共享数据平台。

1.2.2 公路工程 BIM 技术发展

从 2007 年起我国就在“十一五”国家科技支撑计划重点项目中启动

了“建筑业信息化关键技术研究与应用”课题。BIM 技术在我国从研究阶段开始至今已经发展了近 13 年，原建设部最早于 2007 年推出《关于发布“十一五”国家科技支撑计划重点项目“建筑业信息化关键技术研究与应用”课题申请指南的通知》，推动 BIM 技术在建筑工程软件方面的研究性工作。近年来，工业与民用建筑领域的 BIM 技术相关国家标准相继发布，推动了 BIM 技术在工程建设全生命期的应用，总体应用效率和效益都开始逐步显现。BIM 技术在交通基础设施行业的应用起步较晚，2016 年开始，交通运输部相继出台一系列的政策，大力推进 BIM 技术在公路和水运工程的推广应用。表 1-3 收集并整理了交通运输部近年来涉及 BIM 技术的相关政策文件，同时提取了政策文件中的 BIM 相关内容。

表 1-3 交通运输部 BIM 相关政策文件统计表

时间	政策名称	主要内容
2016 年 7 月	《交通运输节能环保“十三五”发展规划》	鼓励应用 BIM 等新技术，探索应用健康、安全和环境三位一体（HSE）管理体系，积极推广合同能源管理，稳步推进建设与运营期能耗在线监测管理
2016 年 7 月	《关于实施绿色公路建设的指导意见》	当前，应进一步探索将 BIM 技术应用于公路建设项目的规划、设计、施工和运营维护等全过程，拓展 BIM 技术在高精度项目空间场景、模拟设计选线和结构物选型、精细化管理、远程实时监控、工程施工组织设计、可视化分析控制工程进度，以及管理信息公开透明等方面的应用，加速推动公路建设全方位的技术创新与管理创新，实现工程无痕化、智能化建设
2017 年 1 月	《交通运输部办公厅关于印发推进智慧交通发展行动计划（2017—2020 年）的通知》	应深化 BIM 技术在公路、水运领域应用。鼓励 BIM 技术在企业生产运维等阶段中的应用。要加强在养护、运营、监测、应急、管理等方面的应用
2017 年 9 月	《交通运输部办公厅关于开展公路 BIM 技术应用示范工程建设的通知》	在公路工程行业内，率先开展第一批 5 项示范工程建设，在工程建设领域，大力推广 BIM 技术的研发和应用
2017 年 12 月	《关于推进公路水运工程 BIM 技术应用的指导意见》	到 2020 年，相关标准体系初步建立，示范项目取得明显成果，公路水运行业 BIM 技术应用深度、广度明显提升

续表

时间	政策名称	主要内容
2018年 1月	《公路水运品质工程评价标准（试行）》	项目实施了“智慧工地”，“在BIM技术、质量安全数据自动采集管理、结构风险可知可控、隐蔽工程检验等方面积极推进信息化技术，成效明显”的项目作为品质工程项目创新加分项
2018年 1月	《交通运输科技“十三五”发展规划》	BIM、水运主通道大坝通航、深远海应急救援打捞、基于车—路合作与协同的道路交通安全等方面重大关键技术开发与应用上取得一批拥有核心自主知识产权、实用性强的研发成果，新一代信息技术在交通运输领域得到广泛应用，互联网与交通运输发展深度融合
2018年 5月	《交通运输部办公厅关于加快推进绿色公路典型示范工程建设的通知》	在论证的基础上尽可能利用原有桥梁等沿线设施，厉行节约。积极应用废旧材料和建筑垃圾，推广节能技术和清洁能源，鼓励通过BIM技术应用逐步实现基础设施数字化，鼓励通过推进设计标准化实现结构工程工业化建造。倡导以人为本的设计理念，合理布设沿线服务设施，促进公路与旅游融合发展，提前统筹谋划绿色养护、绿色运营和未来的自动驾驶、车路协同要求
2018年 11月	《“平安百年品质工程”建设研究推进方案》	应推动先进智能建造设备和便捷监测技术研发应用。推进BIM与GIS在航道整治设计施工中的集成应用
2019年 7月	《数字交通发展规划纲要》	明确指出数字交通是数字经济发展的重点领域，在全行业内推动现代交通运输体系建设，以数据为关键要素和核心驱动，促进物理和虚拟空间的交通运输活动不断融合
2020年 8月	《关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见》	明确指出到2035年，基础设施建设运营能耗水平有效控制。泛在感知设施、先进传输网络、北斗时空服务在交通运输行业深度覆盖，行业数据中心和网络安全体系基本建立，智能列车、自动驾驶汽车、智能船舶等逐步应用。科技创新支撑能力显著提升，前瞻性技术应用水平居世界前列

根据上表内容，2017年12月交通运输部印发了《关于推进公路水运工程应用BIM技术的指导意见》，文件中多次强调支持并鼓励相关单位积极研究和应用BIM技术，将BIM技术基础平台研发作为企业发展的长期战略任务，推动BIM技术的广泛应用，并给予明确的政策支持。由此可见，公路工程的BIM应用势在必行，且随着应用的不断深入，将给公路工程行业带来革命性的变化。

2017年开始，交通基础设施行业的各大设计院积极响应政策号召，相继组建BIM中心或相关团队，开展BIM相关技术在公路工程中的研发应用工作，各省、自治区、直辖市的交通运输行业主管部门都在积极推进公路BIM应用示范工程的建设。中交第二公路勘察设计研究院BIM应用推广中心承担了交通运输部第一批公路BIM技术应用示范项目中的2项，分别为贵州都匀至安顺高速公路项目和京沪高速公路莱芜至临沂（鲁苏界）段改扩建工程。同时，中交第二公路勘察设计研究院BIM应用推广中心作为主要编写单位之一，承担了交通运输部行业标准《公路工程信息模型应用统一标准》《公路工程设计信息模型应用标准》及《公路工程施工信息模型应用标准》的制定工作。

根据中交第二公路勘察设计研究院近年来的工程实践经验总结，BIM技术在公路工程中的应用发展将经历3个阶段，即起步阶段、高速发展阶段和成熟阶段。要真正实现公路工程设计行业由目前基于图纸的二维设计向基于BIM模型的三维设计的转变绝非易事，需要一代科研人员，用10年甚至更长的时间进行相关基础平台的研发和技术储备，才能完成公路工程行业管理模式的转型升级。

（1）起步阶段。

本阶段公路行业内的大型设计单位均较重视本单位三维设计生产能力的建设，设计院内部相继成立BIM中心或组建BIM团队，负责相关BIM课题的研发与工程实践。但由于此阶段公路工程行业内的质量控制仍以传统设计规范为主，而且设计成果的交付形式以设计文件为主，只有部分示范工程要求提交数字化成果，实现公路BIM的数字化交付。综上所述，本阶段公路工程设计行业总体呈现二维设计与三维设计并存、二维设计为主的显著特点。公路BIM在设计阶段更多的是起辅助设计作用，设计单位充分利用BIM的可视化优势，在项目前期阶段促进工程各参与方理解设计方案，提高总体设计质量，减少施工图设计阶段出现大

的设计方案变更，有效控制设计周期。

本阶段公路工程 BIM 相关技术标准以及实施标准缺失或不完善，BIM 技术在公路工程中的应用属于初级阶段，公路工程信息模型的创建工具和建模平台尚不成熟，道路、桥梁及隧道工程建模效率不高，大型设计院都在积极探索自动化快速建模的解决方案，部分中小型设计院设计人员需要依靠主流建模平台手工完成建模等相关工作。

（2）高速发展阶段。

本阶段公路行业内各省级公路勘察设计院均具备了一定的三维设计生产力，有技术储备的大型设计单位开始在部分工程项目中探索实现正向设计，有更多的辅助工具帮助设计人员实现基于三维模型生成二维的设计图纸。各单位的 BIM 中心逐步由科研单位向管理单位转型，开始制定企业级标准，管控三维设计的工作流程和质量。公路 BIM 的数字化交付平台较为成熟，市场内会形成 2~3 家成熟的平台类产品，大型公路项目的建设单位在设计招标阶段，会明确要求设计单位实现实物工程和数字工程的双产品交付。公路 BIM 基本实现了从设计阶段向施工阶段交付，有效避免了施工阶段重新翻模的现象，减少了大量重复劳动和社会资源的浪费。

本阶段公路工程行业的信息模型相关技术标准体系已成熟，部分基础标准已正式发布，并有效指导工程实践。公路工程行业内设计成果的交付形式逐步过渡为以三维模型为主，二维设计图纸为辅。大多数的公路工程要求提交数字化成果。二维的设计图纸在设计阶段更多的是辅助说明的作用。大型设计单位充分利用三维协同设计平台，开展全专业的协同设计，搭建公共数据环境，协同工作方式逐渐由基于文件的协同开始向基于数据的协同转变。设计单位的三维设计能力逐步提升，部分单位形成核心竞争力，设计行业优胜劣汰的趋势更加明显，部分中小型设计企业逐渐被市场淘汰。

（3）成熟阶段。

通过十多年的信息技术发展和进步，公路工程信息化的水平得到了高速发展。公路行业内各大中型设计企业均具备正向设计能力，二维设计图纸在工程设计行业已消失殆尽。各单位的 BIM 中心已完成历史使命，逐渐退出历史舞台。设计院内部均已建设完备的基于三维正向设计的 QHSE（质量、健康、安全、环境）管理体系。公路 BIM 的数字化交

付平台成熟规范，中国数字化高速公路网已搭建完成并初具规模。大型公路工程项目在招投标阶段，对数字化工程建设均已提出明确的要求，设计单位在设计阶段要进行全生命期的规划，充分考虑运维阶段的信息需求，国内的大型公路设计单位，均已构建完备的企业级公路工程构件库，形成企业核心竞争力。具备三维正向协同设计能力的设计企业，将大幅度提升公路工程行业的整体设计质量和效率。

本阶段公路工程行业的数字化工程标准体系已成熟，三维正向设计已成为行业内的新常态。公路工程行业实现全生命期的数字化交付，设计图纸在公路工程建设中逐步退出历史舞台，基于电子签名的数字化设计成果具备了法律效力可以指导公路工程建设实践。由于设计效率的大幅提升，国内的大型公路设计企业逐渐向工程总承包和高端工程咨询集团转型，只有具备三维协同正向设计能力的企业，才能在激烈的市场竞争中生存下来。

1.2.3 BIM 与可视化及 GIS 技术

可视化是对英文 Visualization 的直译，如果改为基于建筑行业的术语，应该是“表现”。英文维基百科这样解释 Visualization：“Visualization is any technique for creating images ,diagrams ,or animations to communicate a message. Visualization through visual imagery has been an effective way to communicate both abstract and concrete ideas since the dawn of man.”大致意思：可视化是用于创建图像、图表或动画以传达信息的技术。自人类诞生以来，基于视觉图像的可视化一直是传达抽象和具体思想的有效途径。

如果用百分制表示可视化程度，CAD、BIM 和可视化三者的关系可以用图 1-5 表示。

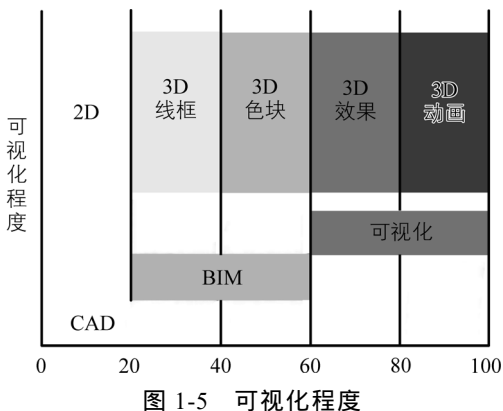


图 1-5 可视化程度

目前，建筑业可视化流程是“CAD+效果图”，CAD 图纸是项目信息的抽象表达，可视化程度低，而效果图是对 CAD 图纸中表达的部分信息做图形化表现。这个过程需要根据 CAD 图纸重新建立三维可视化模型（即所谓的翻模），不可避免的产生时间和成本的增加。更何况项目中，设计需要不断修改调整，这种工作模式下，要保持可视化模型与 CAD 始终一致，难度非常高。大多数情况下，通过业主审批同意后，效果图的使命就算完成了，不会继续更新模型。这就造成了最终完工效果与可视化效果不一致。

BIM 的使用将扭转这种情况：第一，BIM 本身的可视化程度比较高；第二，BIM 包含几何尺寸、材料等完整信息，不需要重新建立可视化模型，可视化的工作集中到提高可视化效果上，而且可视化模型与 BIM 设计模型保持一致；第三，由于 BIM 包含的信息比 CAD 更丰富，可以与计算分析软件集成，使可视化的表现范围得到拓展，例如四维进度模拟、日照分析等。

以管理地理空间数据为核心功能的 GIS 技术，其主要特征是完成对地形地貌以及相应建筑工程分布的描述，在工程规划设计选线、施工布置等方面发挥着重要的作用。但工程后续设计、施工、运营管理中的数据存储及分析，并不是 GIS 的强项。BIM 技术能够在世界坐标系中对建筑物自身框架和内部信息进行三维精细化管理，并且通过模型的统一化和信息的标准化，使得项目全生命周期的信息在单一的模型中被完整记录。但是 BIM 技术对于大范围地理空间数据处理分析的能力略显不足。

若将 BIM 工程数据信息作为城市地理信息系统的重要数据源，加上基于 GIS 系统的地理空间数据源与全球遥感定位等功能，以城市地形为依托，集成模型内、外的三维可视化表达，实现城市三维 GIS 的应用突破，则可满足用户对图形属性及地理信息的双向查询、叠加分析以及应用管理等。

1.2.4 BIM 相关技术应用现状

在美国，近 50%的道路基础设施项目深度使用 BIM 技术，极大地解决了传统基础设施建设的不足；在澳大利亚，将 BIM 技术应用于道路工

工程项目的成本、时间和质量控制方面，取得了不俗的成绩。近年来中国也将 BIM 技术深度应用于基础设施领域，通过将传统的 CAD 2D 图纸与 BIM 模型相结合，实现传统工程设计到现代数字化设计的升级，并在其中引入协同作业。高速公路建设方面，为保证项目的安全可靠运营，使用 Revit 软件在设计环节预先建立高速公路的 BIM，通过编码建立模型数据库以满足项目数字化的要求，以可视化的形式呈现给设计施工人员，包括勘察设计、预制、施工建设、运维管理等各个阶段的关键数据，在减少建设成本的同时，显著提高工程效率与质量。

基于工程领域的应用经验总结，BIM 等技术也被运用到道路基础设施的全生命周期数字化建设中。基于“BIM + GIS”技术，能够基于顶层设计，实现对整个道路工程项目的系统设计与协同施工，将“BIM + GIS”应用到工程项目的全过程管理中，是实现对项目全过程精细化、精益化管理的重点内容。当前，BIM 在道路基础设施研究中的工程应用、管理平台构建、相关技术、行业标准等方面均发挥着至关重要的作用。

由于工程项目通常建模复杂，包含更多的未知因素，需要多方的工程意见和高效的信息共享。实际上，基础设施组件库的可用性有限以及难以将几何形状参数随机分配给项目对象的特点，被认为是将 BIM 用于道路基础设施全生命周期中的主要障碍，这也是 BIM 技术在港口、机场、高架桥等场景中应用相对有限的原因。再加上主流建模平台的不成熟，大体量公路 BIM 轻量化交付，以及“BIM + GIS”技术融合等技术瓶颈的限制，公路工程行业整体水平仍将在较长时间内处于起步阶段。

当前基于 BIM 技术推进交通基础设施数字化，在主要道路项目的设计和建设领域应用广泛，包括项目规划阶段的空间分析。DeLaat 等研究了通过 BIM 与地理信息系统的集成来选择合适的项目地点。Azhar 在研究中指出 3D 激光扫描设备的先进性和经济性使从业人员能够准确扫描现有交通设施并将其整合到 BIM 中，在道路设计阶段，业主使用 BIM 技术遴选了最经济的设计方案，节省了大约 200 万美元的设计成本。在道路施工阶段，项目组成员使用 BIM 来监控项目进度，使用 4D（施工 3D 模型与时间）分阶段计划，用于贸易协调会议。此外 Rubenstone 将 BIM、云计算技术用于项目建设阶段，还介绍了 BIM 在移动设备中的各种应用。Ku 等从 BIM 中提取的数据信息能够应用于道路基础设施的施工建设和运维管理。Philips 等从项目利益相关者的角度出发，分析了

设计人员、业主、施工人员和设施管理人员如何借助 BIM 技术从各自的项目核心业务中获益。

当下的研究表明：

- (1) 尚缺乏一种能在各种软件之间共享信息的 BIM 标准交换格式；
- (2) 基于 BIM 技术的项目风险评估仍有较大不足，需要进一步研究提高施工建设、运维管理的效率和安全性；
- (3) 进一步解决 BIM 与其他先进技术的融合适配问题仍是较大的挑战；
- (4) 采用 BIM 技术，用以评估道路基础设施开发的环境影响是一个较少受到关注的研究领域，未来可以通过深化开发 BIM 功能，提供有关项目可持续性的全面内容，真正将装配建筑、智能建筑与绿色建筑应用于道路基础设施数字化建设中。

1.3 生命周期管理和信息交互

生命周期管理兴起于 20 世纪 90 年代的欧美等工业发达的国家，为工业产品信息管理提供了最新的管理模式。维基百科对建筑生命周期管理的解释是“Building lifecycle management or BLM is adaptation of product lifecycle management (PLM) -like techniques to the design , construction , and management of buildings.”大意是，建筑生命周期管理 (Building Lifecycle Management , BLM) 是将类似于产品生命周期管理 (Product Lifecycle Management , PLM) , 应用于建筑物的设计、建造和管理。

全生命周期管理是一种管理理念，而并非一个具体的工程技术。这一理念服务于项目总体目标的实现过程，实现手段是人力和信息技术在建设工程项目全寿命周期实现集中管理。BLM 理念的核心任务是解决工程信息的创建、管理以及共享，使项目的各个参与方获得更加优质的服务，从而实现节约综合成本、缩减实施阶段工期、提升项目整体质量等目标，最终实现项目全过程的增值。

1.3.1 生命周期管理与 BIM 的关系

虽然从理论上讲，BLM 并没有规定使用什么样的技术手段和方法，但设想未来 BLM 得以真正实现，能够产生经济效益，以下条件是不可少的：

(1) 需要支持项目所有参与方的快速准确决策，二维平面表达的信息不如三维立体的形象，也更容易产生歧义。任何修改部分信息，必须自动更新模型中的相关信息，非参数化建模不足以胜任。任何参与方对模型信息的添加、修改、读取，系统必须存储项目的几何、物理、工程等信息。这正是 BIM 要实现的。

(2) 对于众多参与方各自专业的不同需求，没有一个软件可以独立完成所有需求，必须有多个软件去分别完成规划、设计、分析、统计、校对、漫游展示等任务，因此软件之间的数据交互必不可少。

(3) 建筑工程的参与方来自不同企业，有不同的专业背景。如果没有一个统一的协同作业和管理平台，BLM 也难以实现。

工程建设项目的全生命周期管理是围绕着信息展开的。工程建设主要有两个过程：一是信息过程，二是物质过程。施工开始以前的项目策划、设计、招投标等工作是信息过程，工作内容就是信息的生产、处理、传递以及应用。施工和运营维护阶段主要是物质的生产和运营，但也是在信息的指导下完成的，这个过程中还不断有新的工程信息产生。可以说，建设工程全生命周期管理的核心是信息的管理。信息管理要求工程信息的完备性、关联性和一致性。但传统 CAD 存储的只是图形元素，不能表示工程属性，文件中的信息无法被计算机识别，也就无法进入下一个阶段。传统意义上的信息管理已经无法满足 BLM 理念的要求了。

信息在全生命周期每个建设过程中不是一成不变的，一个建设活动的输出成为下一个建设活动的输入，随着项目建设的进展，信息本身得到了“进化”。BIM 技术的应用使建设工程信息在“进化”过程中始终保持数字化形式，从而保证准确和前后一致的信息在项目参与各方得到共享。在一个建设项目的生命周期内，我们不仅不缺信息，甚至也不缺数字形式的信息，试问现在哪一家参与方不是在用计算机处理信息？我们真正缺少的是对信息的结构化组织管理（机器可以自动处理）和信息交互（不用重复输入）。由于技术、经济和法律的诸多原因，这些信息在被

不同的参与方以数字形式输入处理后，往往又被降级成纸质文件交付给下一个参与方，或者即使上下游双方愿意交付数字化成果，也因为不同软件之间信息不能互通而束手无策。

需要将生命周期管理的流程集成到 BIM 系统中，以促进施工利益相关者的无缝使用。这样可以实现“BIM 技术”的愿景，开发人员可以设计生命周期精确的可用产品，以促进行业向前发展以获得所需的利益。与 BIM 服务器基础结构集成，是生命周期管理必要条件，以便可以根据需要监管、修改和评估业务流程。可以这样说：BLM 理念的核心是信息集成管理。BIM 的出现为 BLM 提供了技术支持，BLM 丰富了 BIM 的应用前景。

1.3.2 基于 BIM 的全生命周期应用框架

基于 BIM 的全生命周期应用，是指把建设项目从规划、设计、招投标、施工到运维管理的整个过程作为服务对象，在各个阶段中不同程度的使用 BIM 技术，使得工程信息能够在生命周期全过程中的传递、共享以及集成式管理。

全生命周期 BIM 技术的作用是使建设项目所有参与方实现在模型中操作信息和在信息中操作模型的工作模式，从根本上改变了传统依靠文字、符号等形式表达蓝图的工程建设管理方式，对于整个行业的可持续、健康发展产生深远影响。

基于 BIM 技术的全生命周期应用框架的构建思路就是彻底改变传统模式中信息传递及共享的方式，发挥 BIM 技术特有的信息高度集成及协作共享优势，将建设项目各阶段及所有参与方有效地结合起来，从真正意义上实现建设项目全生命周期的可持续应用和管理。

基于 BIM 技术的全生命周期应用框架，由基础层——数据库，载体层——模型，应用层——功能构成，如图 1-6。基础层即为 BIM 数据库，主要实现各阶段各参与方之间数据存储、交换。载体层即是各阶段模型，按生命周期阶段分为设计模型、施工模型、运营模型。功能层是 BIM 在项目生命周期各阶段的具体应用。其中载体层是关键层，而设计模型又是施工模型、运营模型基础数据的来源，因此设计模型是整个应用框架的关键。

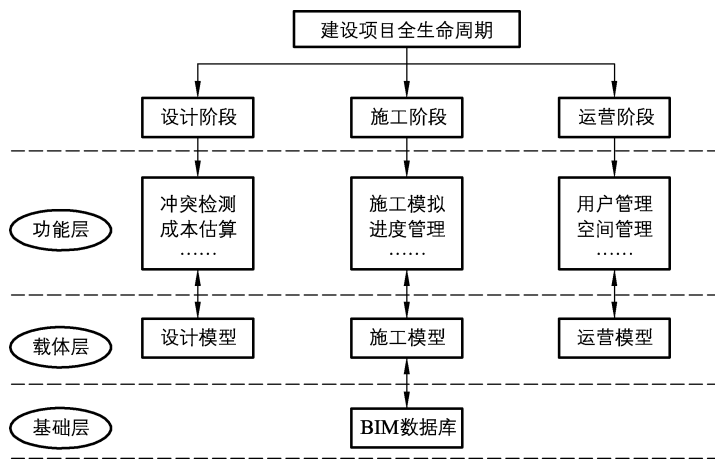


图 1-6 基于 BIM 技术的全生命周期应用框架

1.3.3 信息交互及 IFC 不足

所谓信息交互 (Interoperability, 也称为“信息互用”), 是指项目建设过程中项目参与方之间、不同应用系统之间对项目信息的交换和共享。交互是协调与合作的前提和基础, 对项目的进展产生重要的影响。

工程项目的信息交互效率一直是行业难题。建设工程项目的信息具有数据量大、类型复杂、来源广、存储分散等特点。工程项目中的每个参与方都可能成为信息的提供者, 大量的项目信息存储在信息提供者自己的信息系统中, 由于形式和格式的不同, 无法与其他参与方分享, 造成信息孤岛等问题。高效的信息互用是 BIM 的核心价值所在。

缺乏信息交互导致了各阶段交接和转换过程中大量信息流失, 各参与方需要安排人员检查丢失的信息, 因此给信息交流和管理带来了极大地负担, 最终导致成本增加和工期延误等问题。项目生命周期中的信息流失如图 1-7 所示。

实施 BIM 要用到很多软件, 不同软件商的数据格式不开放不兼容, 甚至同一软件商的不同软件信息也不能交互。这给信息交流造成很大的障碍, 与 BIM 数据共享的理念背道而驰。因此如何把不同软件的数据共享, 是 BIM 全生命周期应用急需解决的问题, 也是基础的问题。

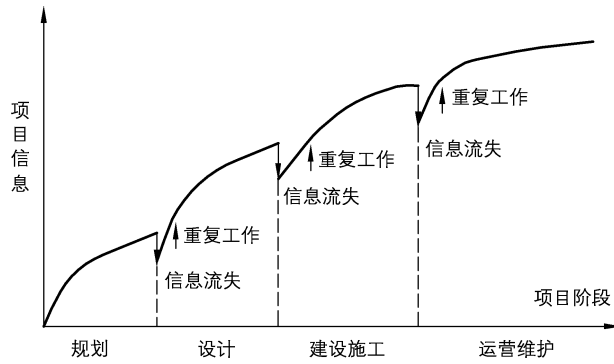
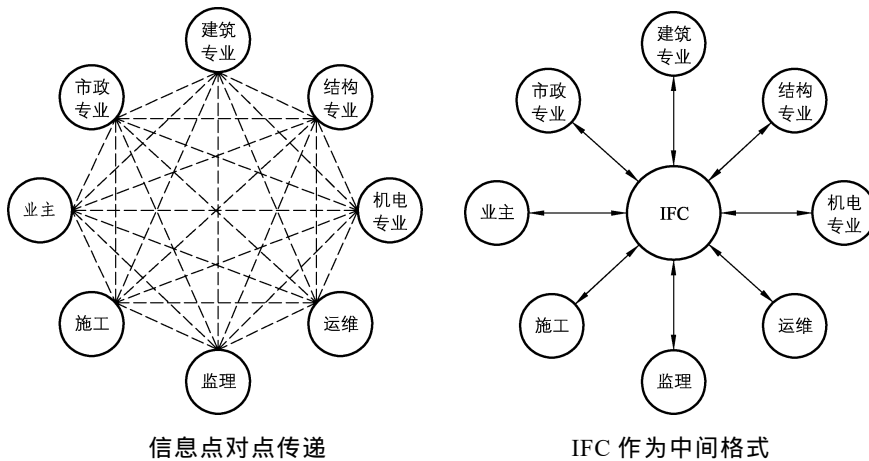


图 1-7 项目生命周期中的信息流失

IFC (Industry Foundation Classes) 标准是一个不受单一供应商控制的中性标准。各大建筑软件商均宣布旗下产品支持 IFC 格式文件。IFC 标准使每个软件系统只需要建立一个与中间数据格式 (IFC 格式文件) 的输入/输出接口, 而不用与其他的软件直接进行数据交换。协同工作的软件必须有一个共同的核心数据模型, 这样一来每个软件只要与 IFC 格式文件建立双向接口, 就能和其他软件交换信息, 这种方式也便于维护和升级。同时, 可以不用为了与其他软件实现信息交换而重新编写接口。IFC 优化信息传递流程如图 1-8。



信息点对点传递

IFC 作为中间格式

图 1-8 IFC 优化信息传递流程

Renaud Vanlande 等人使用 IFC 文件处理和共享数据,管理的建筑面积超过 600 万平方米。但他也坦言 IFC 自身的不足也十分明显。

(1) IFC 所选择的 EXPRESS 语言自身的不足。IFC 选择 EXPRESS 语言,是因为这种语言是一种面向对象的信息描述语言,具有无二义性和很强的建模能力。但它并不能描述构件间动态联系的机制,即“不完备的 O-O 性能”。比如,当调整 IFC 格式的建筑轴网时,轴网上的梁板柱等构件并不能随之变化。IFC 只能反映实体之间的静态联系。

(2) IFC 的全面性将使一些简单的交换变得复杂。IFC 的出发点就是建立一个完整的标准,这个标准可以适应于几乎所有能遇到的情况,所以哪怕很小一部分数据交换,也需要将一整套的 IFC 类加载进来。任何文件格式的文件大小与数据模型的组织方式密切相关,因而描述同一个项目数据,IFC 格式文件通常比单一软件格式的文件要大很多。

(3) 不同专业软件不支持 IFC 规范所涵盖的全部信息。这使得各个应用程序之间无损数据交换几乎不可能。

从信息管理的角度来看,各专业软件根据本专业的特性,对信息进行结构优化,将数据量减小到最低限度。而信息交换过程是更改专业软件的数据结构,重新构建 IFC 数据结构。如果同时保持数据的全面性和专业性,数据量必然存在极大冗余;如果想控制数据量,全面性和专业性必然难以兼顾。

1.4 基于模型工程的数字孪生构建

1.4.1 数字孪生的概念及模型质量指标

1. 数字孪生的概念

数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。数字孪生是一种

超越现实的概念，可以被视为一个或多个重要的、彼此依赖的装备系统的数字映射系统。

最早，数字孪生思想由密歇根大学的 Michael Grieves 命名为“信息镜像模型”(Information Mirroring Model)，而后演变为“数字孪生”的术语。数字孪生也被称为数字双胞胎和数字化映射。数字孪生是在 MBSE 基础上深入发展起来的，企业在实施基于模型的系统工程(MBSE)的过程中产生了大量的物理的、数学的模型，这些模型为数字孪生的发展奠定了基础。2012 年美国航空航天局(NASA)给出了数字孪生的概念描述：数字孪生是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据，集成多学科、多尺度的仿真过程，它作为虚拟空间中对实体产品的镜像，反映了相对应物理实体产品的全生命周期过程。为了便于数字孪生的理解，庄存波等提出了数字孪生体的概念，认为数字孪生是采用信息技术对物理实体的组成、特征、功能和性能进行数字化定义和建模的过程。数字孪生体是指在计算机虚拟空间存在的与物理实体完全等价的信息模型，可以基于数字孪生体对物理实体进行仿真分析和优化。数字孪生是技术、过程、方法，数字孪体是对象、模型和数据。

进入 21 世纪，美国和德国均提出了 Cyber-Physical System (CPS)，也就是“信息-物理系统”，作为先进制造业的核心支撑技术。CPS 的目标就是实现物理世界和信息世界的交互融合。通过大数据分析、人工智能等新一代信息技术在虚拟世界的仿真分析和预测，以最优的结果驱动物理世界的运行。数字孪生的本质就是在信息世界对物理世界的等价映射，因此数字孪生更好地诠释了 CPS，成为实现 CPS 的最佳技术。

2. 数字孪生模型质量指标

(1) 模型的逼真度和可信度。

数字孪生本质上是一种模型。统计学家乔治·伯克斯有一句名言：“所有模型都是错的，但有些是有用的。”因为任何一个模型都只能近似地描述客观对象的一部分特性，但是当我们难以直接对物理对象进行操作或分析时，模型似乎也是必不可少的。

只有在模型足够可信的情况下，我们才可以相信从模型所获取的知识，并用来指导对物理对象的改进和优化，或针对物理对象的决策。

在仿真领域，评价一个模型是否可信一般有 2 个指标：逼真度

(Fidelity) 和可信度 (Credibility , 也称置信度)。

逼真度反应对象客观特性,模型和真实对象“相像程度”。这个指标最早来源于对飞行模拟器 (simulator) 的评价,需要模拟器和被模拟对象尽可能像,才能提供足够的训练、评估价值。由于早期的模拟器是物理设备 (现代模拟器虽然数字化程度越来越高,但仍然在一些关键环节使用物理设备), 而将一个物理设备做得和另一个物理对象高度逼真,甚至完全相同,是有可能的,因此追求高逼真度是有意义的。NASA 习惯上使用高逼真度 (high fidelity) 来衡量其数字孪生的质量,也正是因为其数字孪生源于飞行模拟器的事实。由此我们有理由推测, NASA 的所谓数字孪生事实上是一种数字模型和物理模型相结合的混合模型系统。但若将数字孪生理解为纯数字模型,那么追求“高逼真度”将会带来一系列问题。一方面,用数字模型“一模一样”地复制一个物理对象,是不现实的;另一方面,盲目追求数字模型逼近物理现实,会带来不必要的复杂性,从而降低模型可靠性、可计算性、可维护性等其他重要性能。

可信度则是根据仿真的具体目的和需求,来考察一个模型的可信任程度的指标。体现用户对于模型的信任程度。实际上,对一种需求有效的模型可能并不适用于另一种需求,也就是说,针对不同的仿真需求,同一个模型可能显示出不同的可信度。

模型的可信度分为功能性可信与非功能性可信。功能性可信指的是相较于实际的物理系统,模型在特定功能上表现出的准确程度。非功能性可信指的是模型的质量指标,如可用性、可靠性、准确性、完整度、成熟度和建模过程管理。对于数字模型而言,可信度更符合解决问题的一般规律,具有更强的现实意义和实用价值。一方面,可以在保证模型能满足仿真需求的前提下,避免不必要的复杂性。另一方面,对于以模拟结构或外观为主要目的仿真需求,可信度和逼真度是一致的。

在目前通常把数字孪生理解为纯数字模型的情况下,对它的评价指标应该采用可信度,而非逼真度。

(2) 模型的成熟度。

模型成熟度是指随着使用时间和使用次数的增加,模型相对于实际对象的发展状态。模型成熟的过程是模型逐渐满足需求并逐渐趋于稳定的过程。模型成熟度的等级划分如表 1-4。

表 1-4 模型成熟度的等级划分

等级	级别名称	内涵
1	初级	建模过程非正规，缺少文档，模型未经校核和验证，未被规范管理，仿真失败较多。
2	已验证级	建模过程规范化程度低，模型文档不完整，只进行内部校核和验证，管理不规范，仿真失败较少。
3	可重用级	建模过程规范，文档齐全，模型经过专业校核、验证和确认，具有可接受的可信度，没有错误或问题导致故障或失灵。模型具有友好的接口，可以在不降低性能的情况下重新配置模型，模型采用模型库管理。
4	协作级	建模过程具有较高的标准化程度。模型经过专业机构的验证、论证和认可，具有较高的可信度。模型具有友好的接口，符合特定领域的互操作性标准。该模式对异构环境有一定的适应性。在模型的使用过程中，很少有琐碎的问题。该模型可以很容易地重新配置，以满足不同的要求，而不会降低其性能。具有工程级的模型库，对模型管理完善。
5	最优级	建模过程具有非常高的标准化程度。模型经过专业第三方机构的完全验证、验证和认可，具有较高的可信度和逼真度。模型的接口非常友好，能够适应不同的互操作标准。模型对异构环境具有较强的适应性。在使用模型的过程中，没有任何问题。模型可以很容易地重新配置和重建，以满足不同的要求，而不会降低其性能。模型采用商业级模型库和配套工具进行专业管理。

(3) 其他质量指标。

除了上述指标，一个理想的数字孪生模型还需要兼顾很多因素。数字孪生的生命周期包含分为三个重要阶段：构建、应用与重用，在每个阶段都需要采用相应的指标进行评价。

在模型构建阶段，除了可信度/逼真度外，模型复杂度、标准化程度和模型开发能力成熟度对模型的质量都有重要的影响。其中模型开发的能力成熟度是保障模型开发过程规范化从而保证模型质量的重要指标，类似于软件过程中的能力成熟度（CMMI），但由于模型的复杂性和多样性，模型开发的能力成熟度需要考虑更多的因素，目前国内外尚缺乏相应的研究。在模型应用阶段，主要考察模型的解耦能力、并行化能力和

容错能力等。在模型重用阶段，需要考察模型的可重构性、可配置性、可组合性、移植性等。另外，还有一些重要指标贯穿模型生命周期的不同阶段，除模型成熟度外，还包括全生命周期成本、模型对需求和环境的适应性等。

这些指标大都是独立于应用领域的共性指标，但针对不同的应用需求，各个指标的重要程度可能有所不同，需要根据实际情况进行考量。而对一些指标的评估方法特别是量化评估方法都还需要深入的研究。

1.4.2 模型工程关键技术

构建一个可信的、高质量的数字孪生模型是开展各类数字孪生应用的核心和基础。模型工程可为数字孪生的构建提供重要的方法和保障。

保证所构建的模型的高质量是一个系统工程，需要从事后的验证评估和建模过程的规范管理两方面入手，即通过实施模型工程，保证模型构建、使用、维护、演化、重用等全生命周期各个阶段可信及满足其他相关指标的要求。

模型工程是采用系统化、标准化、量化的方法，以最小的代价保证模型全生命周期可信和高质量的理论、方法、技术、标准及相关工具的总称。表 1-5 给出了模型工程的主要关键技术。

表 1-5 模型工程技术体系

模型构建	全生命周期管理	模型重用和共享	定量分析和评估	支撑技术
1. 领域无关的建模方法 2. 模型描述和建模语言 3. 模型相关标准 4. 模型组合	1. 模型全生命周期过程的建模 2. 模型需求的获取与管理 3. 面向建模过程的能力成熟度模型 4. 模型工程的过程管理	1. 模型库管理 2. 模型即服务 3. 基于云的模型重用和共享 4. 模型重构和配置 5. 模型成熟度	1. 模型可信性量化分析和评估 2. 风险分析 3. 成本分析 4. 复杂性分析	1. 模型验证、校核与确认(VV&A) 2. 数据/知识管理 3. 模型及全生命周期过程的可视化 4. 支撑环境/工具

