

第1部分

引 言

1.1 建筑业数字化的发展与瓶颈

1.1.1 建筑业稳固的国民经济支柱产业地位

建筑业作为关系国计民生的基础性产业,是国民经济的重要组成部分。新中国成立 76 年来,建筑业增加值稳步增长,建筑业支柱产业地位巩固,对国民经济的贡献较大。据国家统计局统计分析,自 2014 年以来,建筑业增加值占国内生产总值的比例始终保持在 6.70% 以上。从图 1.1 可以看出近十年来建筑业生产总值逐年递增,建筑业国民经济支柱产业的地位稳固。



图 1.1 2014—2023 年国内生产总值与建筑业生产总值对比情况(国家统计局)

1.1.2 建筑行业亟待进行数字化升级

建筑业转型升级是建筑行业在现代化进程中不可忽视的革命性趋势。随着全球数字化浪潮的加速,项目规模和复杂性的不断增加,从设计到施工,再到运营维护,涉及大量数据、跨专业协同和复杂的流程管理。传统的建筑项目流程和管理方式已经无法应对现代项目的需求,信息孤岛、沟通不畅等问题层出不穷,极大地影响了项目的效率和质量。

同时,在劳动力短缺和市场需求多样化的背景下,建筑业数字化的应用也显得更加迫切和必要。据麦肯锡国际研究院《想象建筑业数字化未来》报告截至 2022 年统计,在全球机构

行业数字化指数排行中,建筑业在资产数字化、业务流程及应用数字化、组织及劳动力数字化方面均处于较低水平,在所有行业中的数字化水平仅高于农业,居倒数第二位。德勤咨询2023年的“数字化成熟度”调查结果显示,建筑业数字化成熟度得分为4.50,在被调研的行业中得分最低。在我国,住房城乡建设部印发的《“十四五”建筑业发展规划》中将建筑数字化作为重点发展方向。其中,提到BIM 18次,数字化13次,进一步明确了建筑产业数字化转型的方向。住房城乡建设部等13个部门联合印发的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展指导意见》强调加快推动智能建造与建筑工业化协同发展,打造全产业链融合一体的智能建造与建筑数字化产业体系。

因此,建筑业有需要也有必要向数字化转型,这既是建筑业应对变革的内在要求,也是建筑业实现高质量发展的必经之路。未来,随着数字技术的进一步发展,建筑业将会迎来更为深刻的变革,实现从设计到建造再到运维的全方位数字化转型。

1.1.3 建筑业数字化的发展与演变

建筑业作为传统行业,努力寻求与数字技术的融合与创新发展,本书从数字技术的应用角度将建筑业数字化发展历程划分为如图1.2所示的4个阶段。



图1.2 建筑业数字化的发展历程

1. 阶段一：以 CAD 为代表的业务工具数字化

建筑业数字化第一阶段是形成以计算机辅助设计(computer aided design,CAD)为代表

表的业务工具数字化。20世纪90年代末,计算机技术普及与CAD功能的完善,使CAD在工程行业得到广泛应用。图纸变更、深化设计等都会涉及对图纸的反复修改,CAD相较于手工制图因其易于修改和存储的特点得到广泛应用,此外模板的可复用性极大提高了建筑设计效率。

2. 阶段二：以PMIS为代表的信息管理数字化

随着数字技术的进一步发展,管理信息系统在企业管理方面得到广泛应用。此阶段主要形成以项目管理信息系统(project management information system,PMIS)为代表的数字化信息管理。PMIS本质是对项目实施过程中所产生的数据进行及时有效的管理,为工程项目人员提供高质量信息服务,是集数据收集、加工和存储于一体的计算机系统。PMIS涵盖工程算量、进度管理、安全管理以及成本管理等工作内容,旨在利用数字技术提高信息的存储和访问效率,便于管理人员对项目信息的准确把控。

3. 阶段三：以BIM为代表的建筑产品数字化

在三维图形引擎技术的推动下,建筑信息模型(building information modeling,BIM)的发展使得建筑产品数字化成为可能。BIM的本质是一个以三维模型为载体的建筑产品数据库,贯穿项目建设的全生命周期。基于二维图纸的信息表达,在项目建设期间不同参与方的理解差异,经常会出现信息传递偏差,进而导致返工和设计变更等问题,降低项目实施效率。相较而言,BIM所见即所得的特点减少了建筑信息在传递过程中的偏差。在项目实施中,BIM能够使各参与方根据自身需求对模型进行修改、完善并作为成果交付,支撑建筑全生命周期信息的集成管理,从而实现设计、施工和运维的可视化和协同化管理。这种以模型为中心的项目管理模式,有利于提高各参与方间的沟通协作效率。

4. 阶段四：业务流程数字化

近年来,随着物联网(IoT)、无人机、5G、人工智能(AI)、区块链等技术的快速发展,建筑行业的数字化正从单一技术应用向多技术深度融合迈进,尤其是以BIM为核心的业务流程数字化。BIM作为建筑行业数字化的基础载体,逐步从传统的三维模型工具扩展为集数据整合、过程优化和智能决策于一体的核心平台。特别是BIM与AI的结合,不仅在数据处理、智能分析和自动化管理上提升了效率,还开启了建筑全生命周期的智能化管理。

1.1.4 建筑业数字化面临的问题与挑战

随着新一代信息技术的飞速发展,建筑业迎来了前所未有的变革机遇。云计算、大数据、物联网、人工智能和扩展现实等技术为建筑业赋能,推动了设计、施工和运维等各个环节的智能化与高效化。尽管技术快速发展,建筑业数字化转型仍面临体制机制滞后、生产关系失衡和技术水平不足等多重深层次挑战:企业间利益分配不均和上下游数字化能力差距加剧了协作难度,而技术集成性不足、动态数据利用率低以及研发投入不足进一步限制了技术的实际应用效果。这些问题共同制约了建筑数字化的深入推进和整体效能的发挥。

上述问题反映了建筑数字化发展的一些共性挑战,但更深层次的核心问题在于数据展现与应用的形式已经无法满足建筑数字化进一步发展的需求。随着BIM、AI、物联网等技

术的快速发展,行业对数据的实时性、互动性和沉浸感的需求日益迫切,而传统的屏幕端展现形式显得力不从心。数字化展现方式的问题在于现有技术大多局限于二维图纸或桌面端三维模型,这种静态、单向的展现形式难以满足复杂建筑场景中实时动态交互的需求。协作模式的问题则主要体现在数据共享和多方协作的低效性上。建筑项目涉及多方参与,包括设计、施工、监理、运维等,各方数字化能力参差不齐,缺乏统一的数据标准和协同机制,导致“信息孤岛”问题普遍存在。此外,利益分配的不平衡和反馈机制的滞后也进一步阻碍了协作效率,制约了数字化技术在全生命周期中的整合应用。具体体现在以下几个方面。

(1) 虚实割裂,项目建设各环节脱节。现有的建筑数字化技术大多停留在将模型显示在桌面端,导致现场施工与虚拟模型之间存在明显的割裂。施工人员在实际操作中难以将桌面端的三维模型与现场环境相结合,无法直观理解复杂的建筑构造。这种脱节不仅增加了错误操作和错误施工的风险,还延长了施工周期,增加了成本。

(2) 互动与反馈机制不足。现有的数字化技术缺乏与实际施工现场的互动与反馈。施工过程中,现场情况可能会不断变化,而桌面端的模型往往无法实时反映这些变化。缺乏实时互动和反馈机制,使得数字化工具在施工现场的应用效果大打折扣,施工人员无法及时获取和反馈现场的实际情况,影响了整体施工的协调性和响应速度。

(3) 缺乏沉浸感与直观体验。当前的数字化技术主要依赖于二维图纸和桌面端的三维模型,虽然提供了基本的视觉参考,但缺乏足够的场景代入感和沉浸感。施工人员在实际场地中难以通过传统屏幕端的模拟全面理解建筑构造和施工流程,导致他们在执行任务时缺乏对整体工程的深刻理解。这种缺乏沉浸感的体验,使得施工人员无法充分利用数字化工具进行高效施工。

建筑业数字化转型面临的问题,反映了当前技术、管理和协作模式上的一系列深层次障碍。尽管信息技术在建筑领域的应用潜力巨大,但仍存在虚实割裂、互动反馈机制不足、数据共享不畅以及技术集成难度大等诸多挑战。这些问题不仅影响了数字化工具的实际应用效果,还限制了建筑项目各环节的高效协同和优化。只有克服这些挑战,才能推动建筑业走向更高效、更智能、更可持续的发展道路。

1.2 建筑扩展现实的发展意义

1.2.1 扩展现实的发展概况

扩展现实(extended reality,XR)技术通过提供沉浸式体验,正在改变用户与数字内容的互动方式,为各行业带来创新的解决方案和商业模式。随着XR技术迅速应用到娱乐、教育、医疗和工业等多个关键行业,其产业链得到快速发展和完善。XR的核心技术如光学显示、传感技术和芯片的进步,为行业的快速发展提供了坚实基础。2022年10月,工业和信息化部等五部门联合发布《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划(2022—2026年)》,文件提出:到2026年,我国虚拟现实产业总体规模(含相关硬件、软件、应用等)超过3500亿元,虚拟现实终端销量超过2500万台;在工业生产、文化旅游、融合媒体、教育培训、体育健康、商贸创意、智慧城市等虚拟现实重点应用领域实现突破。预计未来全球XR设备市场规模持续增长,到2028年,全球XR市场规模或将达1427亿元(图1.3)。

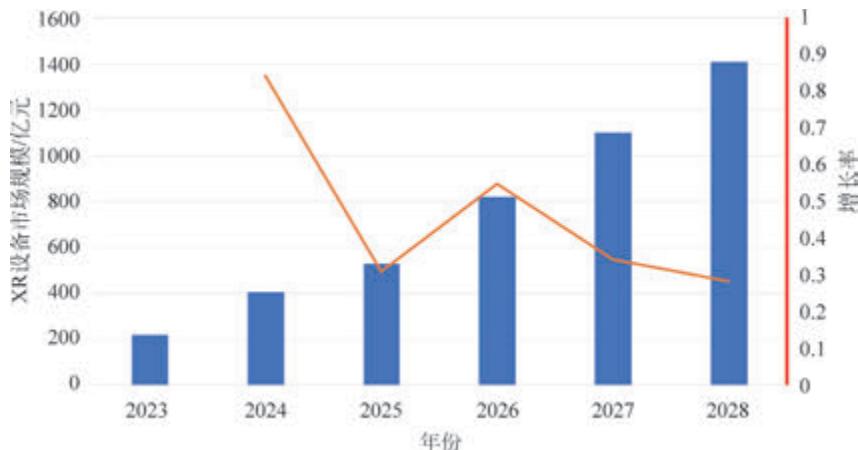


图 1.3 2023—2028 年全球 XR 设备市场规模预测及增长率(引自：共研产业咨询)

XR 技术的引入成为突破数据展现形式瓶颈的重要潜力,该技术通过将虚拟信息与现实场景无缝融合,可以解决传统展现方式的诸多限制,其优势体现在施工人员能够通过 XR 设备在实际场景中“看到”虚拟模型的原位映射,直观理解复杂数据。XR 可以将动态现场数据实时反映到虚拟模型中,实现模型与实际环境的同步更新。XR 技术不仅适用于设计阶段,还能够贯穿施工和运维环节,为建筑全生命周期管理提供支持。

通过沉浸式体验、实时互动和无缝集成,XR 技术能够有效弥补当前建筑数字化技术的不足,使数据更具操作性和理解性,为建筑业数字化发展注入新的动力。下一阶段,XR 技术不仅是一种解决方案,更可能发展为数字化转型的重要商业模式,引领建筑行业向更智能、高效的方向迈进。

1.2.2 建筑扩展现实的意义

回顾建筑业数字化发展进程,尽管技术持续更新与进步,行业内仍面临着诸如设计与施工环节脱节、信息传递效率低下、与现场实时交互机制的缺失等发展桎梏与挑战。这些问题不仅严重制约着建筑业的生产效率,也对项目的整体品质及用户体验带来了不利影响。然而,XR 技术凭借其沉浸性、交互性和实时性的独特优势,展现出解决问题的巨大潜力,为应对建筑业数字化转型中遇到的发展瓶颈提供了创新性的研究路径。本节将阐述 XR 技术如何与建筑业实现深度融合,突破传统技术和方法的局限性,探讨其在提升建筑空间舒适度、提供建筑全生命周期精确指导、与 BIM 信息融合创新、实现工程状态与仿真方案原位化,以及推动建筑工程教育转型升级等多方面的发展意义与价值体现。

1. 提升人体工程学视角下的建筑空间舒适度

现阶段,传统的二维图纸和三维模型难以直观、充分地展现设计的精髓与细节,施工人员对二维屏幕展示的施工模拟仍欠缺具象化理解和沉浸感体验。为应对上述挑战,建筑行业对建筑产品的需求已经从基本功能层面,跃升至个性化、智能化及深度人机交互体验的新高度。XR 技术以其独特的沉浸式特征,使用户仿佛置身于真实场景之中,能够直观地看到

建筑项目实际效果,更加深入地理解建筑构件的各个细节,为决策者提供直观、全面的数据支持,以提高沟通协作和施工管理的高效性与准确率。

此外,传统方法难以精确模拟和预测人在建筑空间中的行为路径与交互模式,在评估空间布局的合理性方面存在局限性,如通道宽度、区域划分等是否满足人体工程学要求。XR技术可以创建沉浸式的虚拟环境,让用户仿佛置身于真实的建筑空间中,通过模拟人的行走、转身、操作等动作,能够精确判断结构属性及空间布局等方面合理性,发现潜在的设计缺陷并及时做出调整。同时,XR技术的交互性特点使得用户可以在虚拟环境中进行各种操作,如手势识别、语音控制、实时记录等。通过虚拟样板间、环境模拟、实时巡检等全链条虚实融合交互体验,不仅促进了各阶段各参与者的紧密沟通与协作,而且显著提升了建筑空间布局与功能配置的科学性与人性化水平,有效提升了用户舒适度与满意度。

2. 提供建筑全生命周期精准指导

现有的工程建设与管理方法仍面临“图”“模”“实体”时空割裂的问题,导致施工人员对三维模型的理解和体验存在明显不足,并且缺乏与实际施工现场的直接、实时互动与反馈机制,这使得在复杂多变、动态调整的工程项目中实现精准指导变得尤为困难。而XR技术的引入使得虚拟触角大大延伸,突破二维图纸的平面束缚以及屏幕端三维模型的空间限制,将虚拟与现实世界深度融合,使得用户能够身临其境地获得与现场相同的直观感受和体验。这种沉浸式的交互方式,不仅显著提升了工作效率,缩短了从设计到施工的理解与转化周期,还极大地增强了决策过程的科学性与准确性。

同时,XR技术还打破了时间限制,在远程协同评审、远程实时监控与指导等方面发挥着重要作用,实现了信息的即时传递与共享,使得不同地点的参与者可实时参与项目的评审和决策过程。无论是身处异地的专家,还是项目现场的施工人员,都能通过XR技术实现无缝沟通,共同解决项目中的问题。这种跨时空的协同工作模式,不仅缩短了决策周期,还使得项目的建筑全生命周期中的各环节都能够得到更加精准和高效的指导,进一步提升项目管理的整体效能,从而推动建筑业向更加智能化、高效化的方向发展。

3. 与BIM信息融合创新

在建筑业数字化转型的新阶段,BIM已成为建筑行业不可或缺的一部分。BIM技术通过创建建筑物的数字模型,将建筑项目的几何及非几何数据系统性地整合在一起,形成了一个全面、精确的信息库,从而实现了建筑全生命周期的信息共享和高效管理。而XR技术能够与BIM时期的模型及内在各项数据实现无缝结合,将BIM中的复杂数据和信息转化为直观、沉浸式交互且高度可视化的形式,极大地丰富了用户的信息感知维度。XR技术的引入使得BIM不再局限于静态展示,而是成为一个动态的、可交互的决策支持平台,用户可以通过直观的视觉和交互体验,深入探索BIM中的各类数据,从而深化了数据的可理解性和可操作性。这不仅提高了数据的使用效率和准确性,还为设计优化和决策制定提供了更为丰富与直观的依据。同时,XR技术还支持数据驱动的实时分析,使得用户能够基于实时更新的BIM数据,进行动态的模拟、预测和评估,从而进一步优化设计方案,降低施工风险,提升项目的整体效益。

4. 实现工程状态与仿真方案原位化

在工程模拟与仿真过程中,尽管理论计算工具能够提供结构性能的详细数据,但这些数据往往难以与施工现场的实际情况精准匹配。同时,施工现场缺乏高效、实时的监测手段,传统的监测方法滞后且精度不足,难以及时发现问题区域,且现有监测系统通常无法将实时监测数据与理论计算数据相结合,造成施工过程中的沟通障碍和决策失误。此外,传统的施工模拟方法往往基于简化的假设,无法准确反映施工过程中的各种复杂情景,缺乏有效的工具来模拟和优化施工方案。从而导致施工资源浪费、效率低下及风险增加等现象。

在XR环境中,建筑项目的虚拟模型能够与有限元分析、热力分析、流体动力学分析等理论计算数据深度融合,在XR空间内直观地看到基于软件精准模拟的建筑结构响应,如应力分布、温度分布模式及流体流动特性等,极大地增强了理解和沟通的效率。通过对比理论预测与虚拟模型中的实时状态,可以迅速识别设计中的潜在问题区域,以便在项目早期进行优化调整。此外,XR技术通过集成传感器网络、物联网设备及远程监控系统等,能够实时捕获并分析施工现场的各类数据,同时,将理论计算结果与工程原位的实时监测数据实现无缝对接,形成一个闭环的反馈系统,极大地提升了施工决策的准确性和时效性。XR技术还允许在虚拟环境中进行工程原位场景的模拟和仿真,通过模拟各场景中不同方案的施工效果,从而选择最优解。这种基于实时数据的虚拟试验,不仅提高了施工效率,节约了变更成本,而且显著降低了施工风险,确保了项目的质量和安全性。

5. 推动建筑工程教育与培训范式转型升级

由于建筑本体具有三维空间性与复杂性,而一些建筑场景在施工过程中存在较高危险性及隐蔽性,而课堂空间的局限性、建筑场景无法直观展示,这些困难严重阻碍了理论教学的效率与质量的提升。XR技术的引入为理论教学带来了新的解决方案,该技术能够跨越传统建筑工程教育的时空边界,突破教学空间的物理限制,使学习者能够沉浸式地体验建筑场景,从而更深刻地理解建筑构件的构造逻辑与施工过程。此外,在火灾模拟、试件拉伸等高风险的破坏性试验中,XR技术通过直观、沉浸式互动的展示方式,相较于传统屏幕端的二维视觉呈现,增强了学生对知识的理解与感受,极大地提升了教学的效率与质量。同时,教育资源分配不均与试验成本高昂等问题也一直是制约实践教学发展的关键因素。XR技术的出现,为实践教学开辟了新的路径。它推动了虚拟实验室与远程实训平台的构建,通过低成本、低风险、高效率的模拟实践环境,有效缓解教育资源紧张的问题。这种模拟实践不仅促进了理论与实践的深度融合,还推动了教育公平与质量的双重提升,为建筑行业的可持续发展奠定了坚实的人才储备基础。

综上所述,XR技术在智能建造领域占据着至关重要的地位。在建筑信息化进程中,XR技术以一种革新性的解决方案应运而生,是对传统建筑信息化显示模式的替代,充当着工程建设项目的全新“显示端”,将建筑全生命周期内的各类数据、模型以沉浸式、交互式模式呈现,突破虚实割裂、互动反馈不足、沉浸感匮乏等诸多瓶颈,是虚拟建筑信息与现实建设场景之间的关键桥梁。同时,极大地促进了各参与方之间的沟通协作效率,推动建筑设计、施工、运维、教育等各个环节朝着智能化、高效化、人性化方向深刻变革,为建筑行业高质量发展和创新实践创造了不可估量的价值,是引领建筑行业迈向未来的关键核心技术,为行业带来了意义重大且影响深远的变革。

