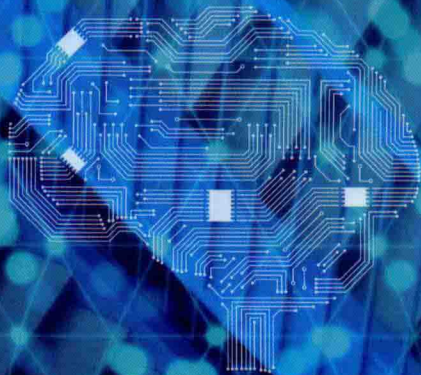


高等教育土木类专业系列教材

智慧建造概论

ZHIHUI JIANZAO GAILUN

主编：毛超 刘贵文 副主编：汪军 傅晏 洪竞科



重庆大学出版社

高等教育土木类专业系列教材

智慧建造概论

主编：毛 超 刘贵文
副主编：汪 军 傅 晏 洪竞科

重庆大学出版社

内容提要

智慧建造贯穿于建设项目规划、设计、生产、施工、运营全生命周期，新一代信息技术的迭代将实现建筑行业全要素、全过程、全参与方的智慧化协同升级和产业的整合。本书介绍了全球智慧建造发展的背景和机遇，系统性地对智慧建造相关概念和内涵提出了智慧建造的特征以及实现逻辑；介绍了前沿类信息的概念、技术特征和适用性，以及面向建筑工程场景，并给出了各种新一代信息技术的新内涵和新定义。本书从建筑全寿命周期视角，分章节从智慧设计、智慧生产、智慧施工、智慧运维等4个核心阶段，详细介绍了传统迈向智慧升级过程中，相关环节所需的核心支撑技术和智慧融合应用。

本书主要是面向高等院校智能建造类、土木建筑类、工程管理类专业学生，可作为相关课程的本科教材或参考书，也可作为从事智能建造、建筑工业化、建筑信息化等领域相关专业人士的研究或实践参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

智慧建造概论 / 毛超, 刘贵文主编. -- 重庆: 重庆大学出版社, 2021.7

高等教育土木类专业系列教材

ISBN 978-7-5689-2529-7

I. ①智… II. ①毛…②刘… III. ①智能化建筑—高等学校—教材 IV. ①TU18

中国版本图书馆CIP数据核字 (2021) 第103269号

智慧建造概论

主编: 毛超 刘贵文

副主编: 汪军 傅晏 洪竞科

策划编辑: 陈力 林青山

责任编辑: 陈力 版式设计: 林青山

责任校对: 谢芳 责任印制: 赵晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人: 饶帮华

社址: 重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编: 401331

电话: (023) 88617190 88617185 (中小学)

传真: (023) 88617186 88617166

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆新金雅迪艺术印刷有限公司印刷

*

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 12 字数: 293千

2021年7月第1版 2021年7月第1次印刷

印数: 1—2 000

ISBN 978-7-5689-2529-7 定价: 49.00元

本书如有印刷、装订等质量问题, 本社负责调换

版权所有, 请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书, 违者必究

前言

建筑业是我国国民经济的重要支柱产业。当前，我国正处于高速度发展向高质量发展的转折期，我国正从“工程大国”向“工程强国”迈进。在2019年新年贺词中，习近平总书记指出：“中国制造、中国创造、中国建造共同发力，继续改变着中国的面貌。”全面建成社会主义现代化强国是我国必然发展趋势，需要国家全面提高各方面的发展水平，建筑行业追求整体高质量、高效率发展也不例外。时代变革大潮裹挟着物联网、云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术呼啸而来，正加速推进各行业实体经济与技术交叉和融合，在此背景下，建筑业亟须改变落后的生产方式，通过科技创新实现产业变革，完成从数字化、网络化、智能化到智慧化的转型，走出一条工程建造高品质发展新路。

“智慧建造”抑或是“智能建造”将助推建筑行业迈向发展新时代。2020年6月，我国住房和城乡建设部等十三个部门联合印发《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》（以下简称《意见》），强调建筑业向工业化、数字化、智能化方向升级，加快建造方式转变，推动建筑业高质量发展，打造“中国建造”品牌。《意见》指出，要以大力发展建筑工业化为载体，以数字化、智能化升级为动力，加大智能建造在工程建设各环节的应用，推动建筑业由智能建造向智慧建造转变，形成涵盖科研、设计、生产加工、施工装配、运营等全产业链融合一体的智能建造产业体系。《意见》中多次提到了智能建造，即使在本书作者的相关研究中也用过“智能建造”这一概念，而本书却采用“智慧建造”命名。关于“智慧建造”与“智能建造”两个概念有何不同，哪个概念更适合本教材的内容，作者一直在推敲。其实，“智慧”应该是“智能”的下一个阶段，无论当前称为“智能建造”

抑或是“智慧建造”均不会有太大差别，然而作为一本概论类的教材，我们更想给读者呈现一个广义的内涵。“智能建造”表征一种新型生产方式，即在信息化、工业化高度融合的基础上，利用新技术对建造过程赋能，推动工程建造活动的生产要素、生产力和生产关系升级，促进建筑数据充分流动，整合决策、设计、生产、施工、运维整个产业链，而“智慧建造”是“智能建造”进阶阶段，用数据驱动工程建设活动各种技术或管理的自我学习和自我迭代，让工程建设活动都变得“类人化”，更大范围、更深层次实现机器换人，让机器具备感知、辨析、判断、决策、反馈、优化的能力，彻底进入体力替代和脑力替代的时代，以提升工程建设活动的效率和品质。

本书中覆盖了建筑业的策划、设计、生产、施工、运维全过程的智慧化升级，不仅是“机器换人”的智能化，还涉及“机器换脑”的智慧化。本书主要围绕项目全生命周期，分别阐述了智慧建造的发展背景和意义、国内外发展进程、智慧建造相关概念及特征，前沿信息技术在智慧建造中的融合应用，以及智慧设计、智慧生产、智慧施工和智慧运维的内容。

本书由重庆大学毛超教授、刘贵文教授任主编，汪军博士（澳大利亚迪肯大学）、傅晏副教授（重庆大学）、洪竞科研究员（重庆大学）任副主编，感谢各位作者对本书提供的宝贵思想和资源。重庆大学研究生彭窑胭、蒋成陶、黄竹、马欣瑶、邹春、刘文丽、程建兵、岳奥博、赵澍铭、刘泽邦、王卓琪等为本书案例整理和编写提供了支持和帮助。全书由毛超统稿审校。

本书的编写不仅集成了作者对智慧建造、建筑工业化长期的关注、研究和思考，还参考了国内外一些研究学者的思想观点，在此谨向各位作者表示感谢。同时，特别感谢广联达科技股份有限公司、远大住宅工业集团股份有限公司、中建海龙科技公司、林同棧(重庆)国际工程技术有限公司、北京地厚云图科技有限公司、广东博智林机器人有限公司、光辉城市(北京)数字孪生科技有限公司、上海点贸信息技术有限公司、重庆市住房和城乡建设委员会、金科地产集团股份有限公司、重庆市市政设计研究院等在本书收集资料过程中给予的大力帮助。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

毛 超

2021年3月

目 录

第 1 章 智慧建造概述	1
1.1 传统建筑业的困境	1
1.1.1 粗放式增长与高质量发展的矛盾	2
1.1.2 劳动力供需之间的矛盾突出	5
1.1.3 生产环境与“以人为本”的理念冲突	7
1.1.4 高消耗、高污染与绿色发展理念的冲突	8
1.2 全球智慧建造的兴起	9
1.2.1 美国	9
1.2.2 英国	10
1.2.3 德国	11
1.2.4 日本	11
1.2.5 中国	12
1.3 智慧建造的概念与内涵	14
1.3.1 智慧与智能的本质	14
1.3.2 智慧建造的概念	15

1.4	智慧建造的特征	16
1.4.1	技术特征	16
1.4.2	管理特征	17
1.5	智慧建造的实现途径	17
1.5.1	新兴信息技术的智慧化赋能	17
1.5.2	建筑工业化和建筑信息化的高度融合	18
1.5.3	智慧建造的演化阶段	20
1.6	智慧建造各生命周期概述	20
1.6.1	智慧决策概述	20
1.6.2	智能设计概述	21
1.6.3	智慧生产概述	22
1.6.4	智慧施工概述	22
1.6.5	智慧运维概述	23
	思考题	24
第2章 前沿信息技术在智慧建造中的融合应用		25
2.1	大数据与工程大数据	25
2.1.1	大数据	25
2.1.2	工程大数据及应用	28
2.2	物联网与工程物联网	30
2.2.1	物联网	30
2.2.2	工业物联网及其应用	33
2.2.3	工程物联网及其应用	34
2.3	机器人与工程机器人	36
2.3.1	机器人	36
2.3.2	工程机器人及其应用	40
2.4	增材制造与建筑3D打印	41

2.4.1	增材制造	41
2.4.2	3D 打印在其他领域的应用	43
2.4.3	建筑 3D 打印及其应用	45
2.5	人工智能与工程 AI	47
2.5.1	人工智能的概念	47
2.5.2	人工智能的应用	49
2.5.3	建筑工程 AI 及其应用	50
2.6	区块链与工程区块链	53
2.6.1	区块链	53
2.6.2	区块链在其他行业的应用	55
2.6.3	工程区块链及应用	56
2.7	虚拟技术与建筑信息模型	58
2.7.1	虚拟样机技术	58
2.7.2	虚拟现实技术	59
2.7.3	增强现实技术	63
2.7.4	建筑信息模型 (BIM) 与工程仿真技术	67
	思考题	69
第 3 章	智慧设计	70
3.1	概述	70
3.2	建筑设计工具的数字化	71
3.2.1	二维图样设计	71
3.2.2	计算机辅助设计	72
3.3	工程数字化设计方法	75
3.3.1	参数化设计	75
3.3.2	生成式设计	80
	思考题	83

第4章 智慧生产	84
4.1 概述	84
4.2 智慧工厂	85
4.2.1 智慧工厂的特征	85
4.2.2 智慧工厂的基本构架	86
4.2.3 智慧工厂的建设内容	86
4.3 智慧生产的CPS技术	89
4.3.1 CPS技术与起源	89
4.3.2 CPS的技术体系	90
4.3.3 CPS技术支持下的智慧化生产应用	94
4.4 智慧生产的MES技术	97
4.4.1 MES技术的定义	97
4.4.2 MES功能定位和功能模块	98
4.4.3 MES与其他系统的集成应用	100
4.4.4 MES技术支持下的智能化生产应用	104
4.5 建筑部品部件的工厂化生产	105
4.5.1 游牧式预制生产	106
4.5.2 固定模台生产线	106
4.5.3 自动化流水生产线	107
4.5.4 建筑部品部件工厂生产数字化的应用	108
思考题	109
第5章 智慧施工	110
5.1 概述	110
5.2 智慧施工的实现路径	111
5.2.1 智慧施工的技术时代	111
5.2.2 智慧施工的实现进程	111

5.3 施工装备的智能化	112
5.3.1 智能施工机械机具	113
5.3.2 工程建造机器人	117
5.4 施工技术的智慧化	125
5.4.1 施工虚拟仿真建造技术	126
5.4.2 施工过程的智能监测技术应用	127
5.4.3 施工装备和机械设备的智能化安全控制技术应用	129
5.5 施工工地的智慧化	131
5.5.1 智慧工地的劳务管理	132
5.5.2 智慧工地的物料管理	134
5.5.3 智慧工地的设备监测	136
5.5.4 智慧工地的进度管理	137
5.5.5 智慧工地的安全监测	139
5.5.6 智慧工地的质量监测	143
5.5.7 智慧工地的环境监测	144
思考题	147
第6章 智慧运维	148
6.1 概述	148
6.2 智慧运维的内容	149
6.2.1 运维管理的内容	149
6.2.2 运维管理的形式变迁	150
6.2.3 运维管理的基本工作	151
6.3 智慧运维的关键技术框架	154
6.3.1 智慧运维的数据感知层	154
6.3.2 智慧运维的数据传输	155
6.3.3 智慧运维的数据存储	155

6.3.4	智慧运维的核心算法	156
6.3.5	业务引擎及中间件	156
6.3.6	功能模块层	156
6.3.7	主要用户层	157
6.4	智慧设施运维的应用范畴	157
6.4.1	建筑设施运维智慧化	157
6.4.2	社区内设施运维智慧化	159
6.4.3	城市级设施运维智慧化	160
6.5	能源管理的智慧化	162
6.5.1	能源管理	162
6.5.2	智慧能源管理的功能	162
6.5.3	智慧能源管理系统的应用	165
6.6	应急管理的智慧化	165
6.6.1	应急管理	165
6.6.2	智慧应急管理的技术实现	165
6.6.3	应急管理的智慧化应用	166
6.7	空间运维的智慧化	168
6.7.1	空间管理	168
6.7.2	智慧化空间管理的技术实现	169
6.7.3	智慧空间运维的应用展望	171
	思考题	171
	参考文献	172

第 1 章

智慧建造概述

当前，以物联网、大数据、人工智能为典型代表的新一轮科技革命和产业变革的浪潮正在席卷全球，深刻地改变和影响诸多领域，这为各行业的转型升级、产品开发、服务创新带来了巨大的发展机遇，建筑业也身在其中。在此大背景下，建筑业作为占全球 GDP 的 6%、拥有超过 1.8 亿从业人员的支柱产业，势必将迎来一次颠覆性的产业变革，而工程建造方式、管理方式及其商业模式也必将朝着信息化、数字化和智能化方向发展。

1.1 传统建筑业的困境

习近平总书记在 2019 年新年贺词中首次提到了“中国建造”，并且随着“一带一路”倡议的不断深入实施，中国建造已开始走向世界。改革开放 40 多年来，高速的城镇化进程以及各类大型基础设施的建设，使得我国建筑业实现了跨越式发展，取得了巨大成就，实力明显增强。在美国《工程新闻记录》（*Engineering News-Record*, ENR）杂志公布的 2019 年度全球最大 250 家国际承包商中，74 家中国企业上榜，中国交建、中国电建和中国建筑进入前十名；在国际权威品牌研究机构“Brand Finance”最新发布的 2020 年工程建筑品牌报告中，11 家中国企业进入 TOP 50，中国建筑位列榜首；而在《财富》杂志公布的 2020 年世界 500 强企业名单中，中国建筑名列第 18 位，排在世界工程建筑类企业第一位，更是成为全球唯一营业收入超千亿美元的基建公司。在建筑业规模上，我国建筑资产规模及建筑业增加值分别于 2015 年和 2016 年先后超过美国，位列全球第一，根据国家统计局 2020 年 GDP 初步核算数据，我国建筑业增加值的绝对额为 72 996 亿元，约占全国总 GDP 的 7.18%，实现了稳定增长，支柱产业地位愈发稳固，且在多个领域处于世界前列。

在超高建筑领域，世界高层建筑与都市人居学会（Council on Tall Building and Urban Habitat, CTBUH）发布的年度报告显示，在2020年竣工的全球十大摩天楼中有一半来自中国，在目前全球排名前十的最高建筑中，中国占比超过1/2；在桥梁工程领域，世界桥梁界中流传着“21世纪看中国”说法，不仅数量最多，而且跨海大桥、高铁桥、斜拉桥、悬索桥等诸多世界之最均在中国；在高速铁路领域，截至2020年年底，我国高速铁路运营里程达3.79万千米，超过全球高铁总里程的2/3，稳居世界第一，高铁已成为展示中国经济发展水平的一张亮丽名片。其中诞生了许多代表中国建造的超级工程，如代表“量度”的三峡水利工程、代表“高度”的上海中心大厦、代表“深度”的洋山港深水码头、代表“难度”的青藏铁路和“华龙一号”核电工程等，北京大兴国际机场和港珠澳跨海大桥更是被英国《卫报》选为新的世界七大奇迹。特别值得一提的是，在我国抗击新冠肺炎疫情的关键时刻，中建三局仅用10天便建成了火神山和雷神山医院，向世界展示了中国建造的速度。

虽然我国已成为建造大国，但与世界建造强国相比还存在一定的差距，并且随着全球经济发展方式的转变，粗放式增长、劳动力密集、质量安全问题频发、资源消耗量大等一系列传统建造方式存在的局限性正逐步暴露，阻碍工程建造领域的高质量发展，已成为全球建筑业面临的共同困境，转变传统的工程建造方式已成为大势所趋。建筑行业的主要矛盾和转型需求表现在下述方面。

► 1.1.1 粗放式增长与高质量发展的矛盾

粗放式增长在建筑业中是一个全球性问题，尤其在中国。科技的进步和我国的基本国情等都决定了需要推动建筑业进行转型升级，走新型建筑工业道路，不能再走大量建设、消耗和排放的传统的粗放式发展道路。然而，我国建筑业现状与高质量增长的发展理念匹配度较低以及数字化、信息化和绿色化程度较低，主要体现在以下方面。

首先，建筑业的劳动生产效率较低。麦肯锡研究的报告显示，在过去的20年里，全球建筑业的总体劳动生产效率年增长率不到1%，显著落后于世界总体经济2.8%的年增长率，更落后于制造业3.6%的年增长率。从图1.1可以看出，全球建筑业生产率增长一直在下降，而农业、制造业等在持续上升。例如，德国和日本虽然作为全球工业效率的典范，但近年来在建筑劳动生产率方面几乎没有增长。世界经济论坛的一份报告显示，美国在过去的50年中，建筑劳动生产率也提高甚微，其复合平均增长率（Compound Average Growth Rate, CAGR）仅为-0.4%。而在中国，虽然近年来我国建筑业按总产值计算的劳动生产率在稳步提升，但整体仍处于全球较低水平，并且在数字化进程中，与国民经济其他行业相比，建筑业仍然是劳动生产率增长速度较低的行业之一（图1.2），主要是因为我国建筑业目前采用的建造方法仍以人工作业为主，没有满足高质量增长中减少人工、提高效率的原则。

其次，建筑业的数字化程度和盈利能力较低。2015年麦肯锡的一项分析发现，从资产、使用和劳动力等方面来看，建筑业是全球经济中数字化程度较低的行业之一，而我国建筑业的数字化程度更排在国内所有行业的最后（图1.3）。同时，在过去10年中，全球建筑业的平均市盈率为5.8倍，而标准普尔500指数为12.4倍，其盈利能力仅为5%左右。而我国建筑业近10年的产值利润率一直在3.5%左右徘徊，低于国际5%的平均水平，更远

全球生产率增长

平均每人实际增加值 (2010美元) (1991=100)

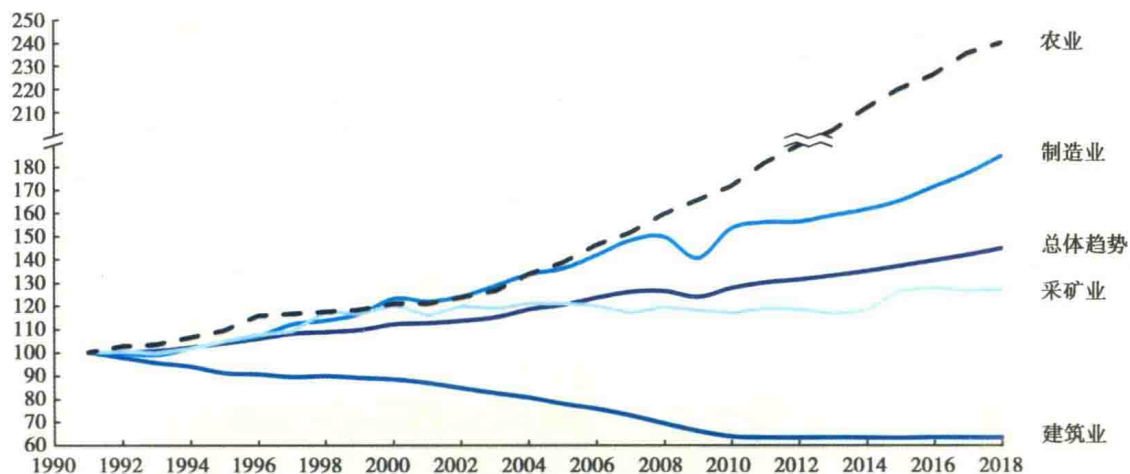


图 1.1 全球各行业生产率增长走势

(数据来源: 麦肯锡《建筑和建筑技术——蓄势待发?》)

劳动生产率增长趋势, 2011—2016年

复合年增长率, %

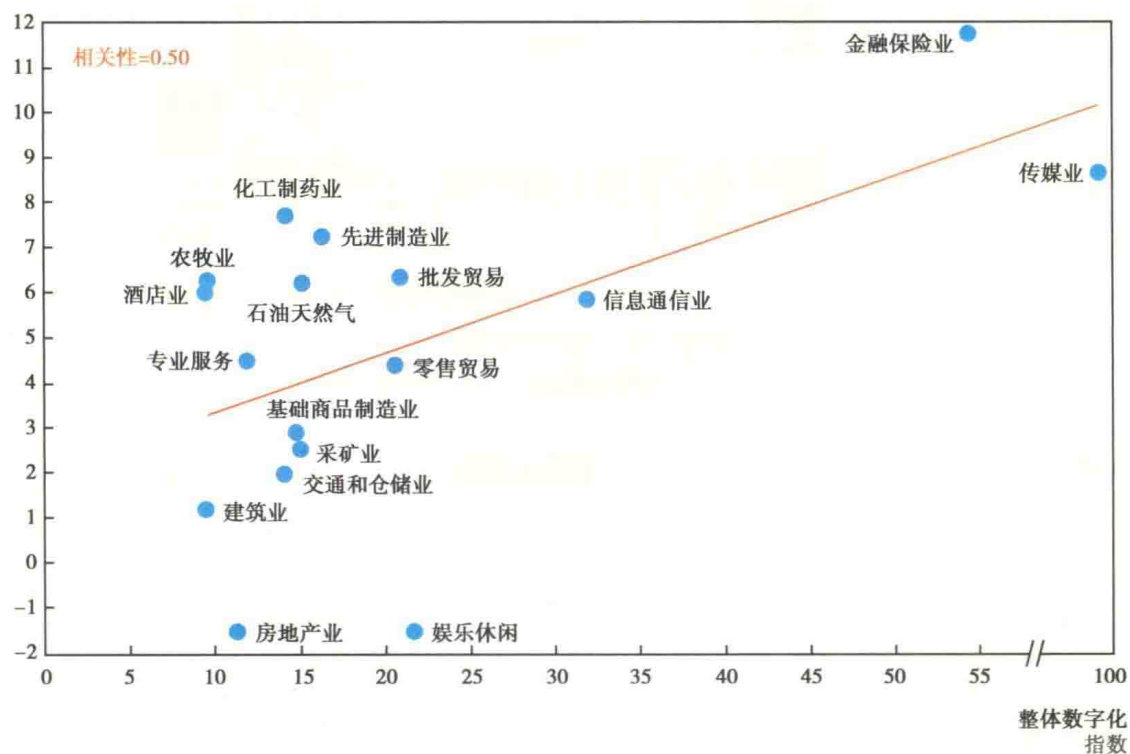






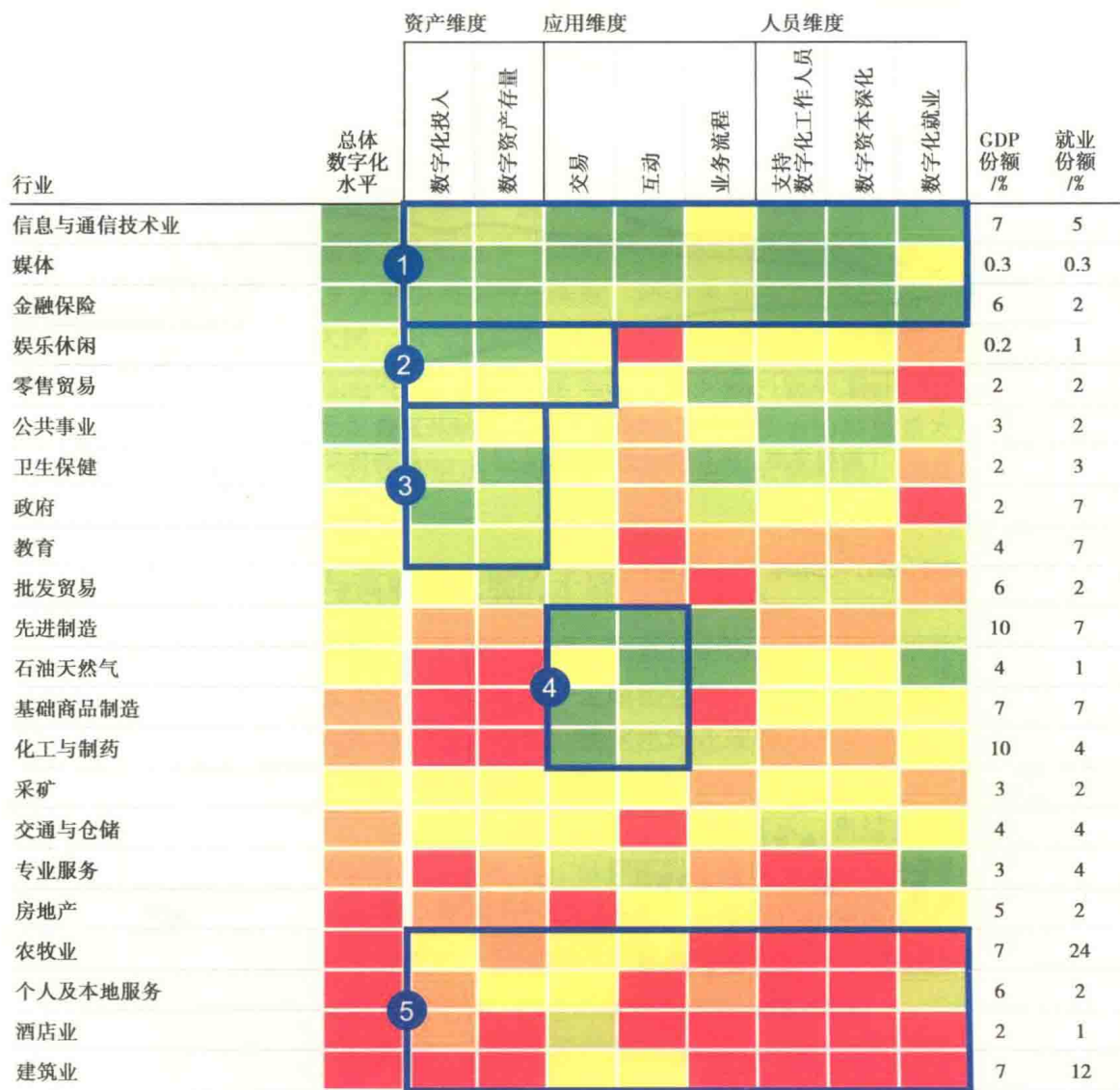
图 1.2 我国各行业劳动生产率与数字化程度的相关性

(数据来源: 麦肯锡《数字中国: 推动经济发展 提升全球竞争力》)

低于我国工业常年 6% 左右的产值利润率，且近年来持续下跌，属于产值利润率最低的第二产业。

麦肯锡全球研究院产业数字化指数：中国

数字化程度低     数字化程度高



- 分类
- ① 信息与通信技术、媒体和金融
 - ④ 资本密集型行业
 - ② 面向消费者的行业
 - ⑤ 本地化与分散化行业
 - ③ 政府相关部门

图 1.3 中国各行业数字化程度排名
(数据来源：麦肯锡《数字中国：推动经济发展提升全球竞争力》)

再次，我国建筑业的增长方式亟待转变。建筑业总产值是反映建筑业生产成果的综合指标，建筑业增加值则体现了所有建筑企业在建设过程中投入劳动所实现的价值。自2010年以来，虽然建筑业增加值占国内生产总值的比例始终保持在6.6%以上，但对比建筑业总产值增速和建筑业增加值增速（图1.4）可以发现，在2010—2019年的10年间，我国建筑业总产值增速除2015年外均大于建筑业增加值增速，这表明真正在建筑生产建造过程的投入所带来的价值增长较为缓慢。从长期来看，固定资产投资增速将进入下滑期，建筑业不能一如既往地依赖国家投资来带动企业的粗放式增长。因此，我国建筑业的增长方式必须有所改变。



图 1.4 2010—2019 年建筑业总产值和建筑业增加值及其增速
(数据来源: 国家统计局)

最后，我国建筑业产品和服务水平依旧不乐观。根据世界经济论坛2018年发布的《2018—2018年度全球竞争力指数报告》，我国基础设施工程质量明显低于美国。同时，随着网络媒体的发展，越来越多的房屋住宅质量问题被消费者在网上披露和曝光，这些问题主要集中在房屋漏水和渗水、外墙面脱落以及墙面开裂等质量通病，有的甚至出现了地基不均匀沉降、施工偷工减料等涉及房屋安全的问题。而造成这些质量问题的原因主要包括设计与施工脱节、机械化程度不高、管理不规范和不完善等。

► 1.1.2 劳动力供需之间的矛盾突出

一直以来，建筑业都是劳动力密集型行业，目前在全球拥有超过1.8亿的从业人员，并且随着近年来全球人口老龄化趋势加剧，使得劳动力短缺现象日益严重，正逐渐成为一个全球性的普遍现象。同时，现代工程项目越来越需要更多的经验和技术的实行，使得大部分建筑企业都面临着熟练劳动力和技术工人严重短缺的问题。

普华永道曾发布报告称，美国婴儿潮一代的工人已进入退休阶段，20世纪60年代中期至70年代末出生的一代也在逐渐淡出建筑市场，使得行业人才流失严重。美国建筑行业协会（Associated General Construction of America, AGCA）在2017年和2019年发布的报告

中指出, 70% 的施工单位难以招到熟练工人以及 78% 的建筑公司在小时工方面招工困难。根据世界经济论坛数据, 美国 2016 年约有 71 万家工程建造领域的公司, 其中只有 2% 的公司员工超过 100 人, 80% 的公司只有 10 名或更少的员工, 预计到 2030 年, 美国现有建筑业劳动力中约有 41% 将退休, 建筑业劳动力短缺届时将更为严重。

日本建筑业劳动力供给情况也不容乐观, 安永 2017 年发布的报告《全球建筑业发展趋势》表明, 日本在过去的 20 年中, 技术型建筑工人的数量下降为从业人员的 28%。未来几年, 日本建筑业将面临近 100 万人的劳动力缺口。为解决这一问题, 日本建筑行业协正在建立一个详细记录所有工人各类信息的数据库以帮助相关企业或机构雇用所需员工, 日本政府也在 2019 年放开包括建筑业在内的低端劳动力外劳签证条件限制, 并开始招募 20 000 名外籍工人。

而在中国, 建筑业拥有着超过 5 000 万人的庞大从业人员群, 吸纳了大量的农村劳动力, 农民工在建筑业一线作业人员中占到 95% 以上, 已成为支撑我国建筑业发展的主流力量。近年来, 虽然农民工总数量和所占比重持续不断上升, 但随着我国劳动力供需矛盾的日渐突出, 建筑业也面临着劳动力短缺的问题。有关数据表明, 虽然我国建筑业从业人员在全社会就业人员中占比为 7% 左右, 但其增长率已连续两年出现大幅下滑, 2019 年甚至出现了负增长 (图 1.5)。

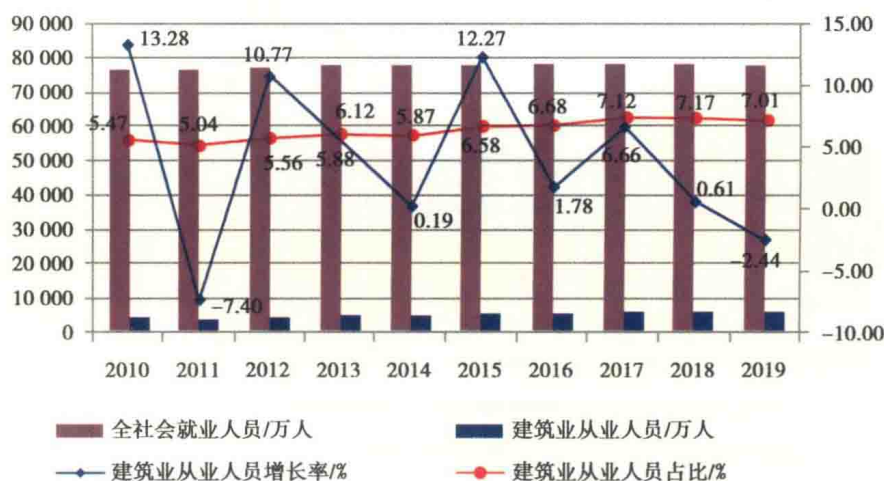


图 1.5 2010—2019 年全社会就业人员总数、建筑业从业人数增长情况
(数据来源: 中国建筑业协会《2019 年建筑业发展统计分析》)

根据国家统计局近年来发布的《农民工监测调查报告》, 2019 年建筑业一线作业人员平均年龄超过 45 岁, 老龄化趋势明显, 这将会大大加剧建筑业未来劳动力供给与需求的紧张程度。具体来说就是建筑业农民工年龄偏大会导致建筑企业的施工效率降低、建筑企业机械化和工业化的速度减缓、工人生活成本上升以及施工安全隐患加大等问题。同时, 建筑业对一些年龄结构较年轻、文化程度较高的农民工群体吸引力较低, 这一现象使得建筑业缺乏新鲜血液注入, 进而造成劳动力成本的大幅上升。此外, 建筑业的高速发展离不开高端技术人才, 而我国建筑业中高层次专业技术人才较为匮乏。2018 年, 建筑企业工程技术人员仅占行业从业人员的 12.7%。这都表明劳动力供给总量的减少、建筑业对新生代农