



感知矿山理论与应用

Internet of Things in Mining:
Principle and Applications

主编 葛世荣 副主编 丁恩杰



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

感知矿山理论与应用

主 编 葛世荣

副主编 丁恩杰

国家重点基础研究发展计划项目“深部危险煤层无人采掘装备关键基础研究”（编号：2014CB046300）

国家科技支撑计划项目“矿井信息采集关键技术研究 with 新型传感关键技术研究及相关产品研制”（编号：2012BAH12B01）

国家 863 计划项目“面向煤矿灾害救援机器人研究开发与应用”（编号：2012AA041504）

资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

随着物联网技术的发展,将物联网技术应用到煤矿,将带来煤矿领域的第四次技术革命。本书介绍矿山物联网领域的理论与应用,按照“源、流、岛”的体系去认知矿山生产及环境全过程;利用“三个感知”诠释矿山物联网的本质;从信息的获取、传输、处理和应用示范方面详细描述作者对矿山物联网理论与技术的认识。本书包括感知矿山技术体系、感知矿山的信息源、感知矿山的信息岛、感知矿山的信息流、感知矿山的传输网、感知矿山的智能化、矿山灾害感知、矿山人员环境感知、矿山装备感知、感知矿山云平台、井下灾变感知以及感知矿山工程实践 12 章内容。

本书反映了当前矿山物联网领域所取得的最新技术成果和发展前景,可供广大煤矿科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

感知矿山理论与应用/葛世荣主编. —北京:科学出版社,2017.3

ISBN 978-7-03-052166-8

I. ①感… II. ①葛… III. ①智能技术-应用-矿业工程-研究 IV. ①TD67

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 053629 号

责任编辑:胡 凯 李涪汁/责任校对:张凤琴

责任印制:张 倩/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:34

字数:780 000

定价:179.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《感知矿山理论与应用》编委会

主 编：葛世荣

副主编：丁恩杰

编 委：（按姓氏笔画排序）

马洪宇 巩思园 朱 华 刘 春

刘 鹏 刘 静 孙晓燕 孟 磊

赵 端 赵小虎 赵志凯 胡延军

胡青松 霍 羽

前 言

分析家预测物联网产品与服务在近几年会有指数型的增长，国内外政府与相关机构对物联网研发的资助力度也会不断加强。将物联网技术引入煤矿行业，将带动煤矿行业的第四次工业革命，只有建设矿山物联网才能满足当今能源革命对煤矿行业所提出的任务和使命。本书反映了作者对感知矿山的理念、理论及技术的探索和实践。

煤矿行业已经经历了三次技术革命，第一次革命是以采掘面装备综合机械化设备为标志的机械化革命，此次变革极大地提高了煤矿生产效率；第二次革命则是以井下设备的控制自动化为标志的自动化革命，此次革命使得高效矿井成为可能；第三次革命则是以建立井上、井下骨干通信网络并实现地面对井下设备进行远程控制为标志的信息化革命，此次变革进一步提高了煤矿安全生产效率，但更重要的是初步实现了煤矿井下少人化。随着物联网技术的发展，我们认为将物联网技术应用到煤矿，将带来煤矿领域的第四次技术革命。只有建设了物联网矿山，才能实现“无人化采煤”，推动智能化矿山发展。

煤矿行业生产系统是一个复杂开放的巨系统，如何打破传统学科的束缚，系统性认知矿山生产的全过程，是我国煤矿科技人员一直努力解决的问题；这也是造成目前我国矿山生产的理论及技术呈条块分割状态的真正原因，科技部万钢部长视察物联网研究中心时指出“感知矿山物联网是解决煤矿安全问题的很好举措”。为了更好地解决上述问题，加快矿山物联网技术的快速发展，我们要加强对一些核心关键技术的研究，如身份识别、信息安全、语义信息的获取与处理、CPS 技术等，物联网与云计算技术的聚合、大数据和未来网络等也应在研究之列。

本书按照“源、流、岛”的体系去认知矿山生产及环境全过程；利用“三个感知”诠释矿山物联网的本质；从信息的获取、传输、处理和应用示范方面详细描述作者对矿山物联网理论与技术的认识。利用这种体系去认识矿山生产系统，能体现各个子系统的相互关系和整个矿山生产的跨学科特点。需要说明的是，本书的体系并不是对原有各种安全生产监控系统的否定，而是试图说明如何从更高层次对各子系统的聚合，使现有系统能发挥更大的作用，以及矿山物联网还需要建设什么内容。

本书由中国矿业大学葛世荣教授担任主编、丁恩杰教授担任副主编，其中葛世荣编写了第 9 章，丁恩杰参与编写了第 2 章和第 10 章。其余章节分工如下：赵端编写了第 1 章，马洪宇编写了第 2 章（葛世荣编写第 2.5 节），胡青松编写了第 3 章，赵志凯编写了第 4 章，霍羽编写了第 5 章，孙晓燕编写了第 6 章，刘春编写了第 7 章，胡延军、孟磊编写了第 8 章，刘鹏编写了第 10 章，朱华、葛世荣编写了第 11 章，赵小虎编写了第 12 章。全书由丁恩杰教授统稿。

本书的阅读对象主要是煤矿科技工作者。由于矿山物联网是一个新兴事物，目前还未见相关的系统阐述。因此，作者通过本书表达自身观点的同时，还希望本书能起到抛砖引玉的作用，使更多的研究人员关注矿山物联网，加速推动矿山技术革命。

目 录

前言

1 感知矿山技术体系	1
1.1 感知矿山的基本概念	1
1.1.1 人的感知能力	1
1.1.2 感知矿山的内涵	2
1.1.3 感知矿山的意义	4
1.1.4 矿山感知技术发展	5
1.2 感知矿山物联网	7
1.2.1 物联网的概念	7
1.2.2 矿山物联网	8
1.3 感知矿山的关键技术	11
1.3.1 感知矿山系统架构	11
1.3.2 感知层关键技术	11
1.3.3 传输层关键技术	14
1.3.4 应用层关键技术	18
1.4 感知矿山的技术标准	19
1.4.1 标准建设的意义	19
1.4.2 矿山物联网标准内涵	19
1.4.3 M2M 接口标准	20
1.4.4 信息描述标准	23
参考文献	24
2 感知矿山的信息源	25
2.1 信息源	25
2.1.1 信息定义	25
2.1.2 信息获取	26
2.2 传感器	27
2.2.1 矿用传感器概述	27
2.2.2 物联网与传感器	29
2.2.3 传感器原理	30
2.2.4 传感器特性与选用	32
2.2.5 矿用传感器防爆	35
2.3 矿用气体传感器	36
2.3.1 气体传感器分类	37

2.3.2	瓦斯传感器	37
2.3.3	氧气传感器	44
2.3.4	一氧化碳传感器	47
2.4	微纳气体传感器	50
2.4.1	微纳甲烷传感器	50
2.4.2	微纳氧气传感器	52
2.4.3	其他微纳气体传感器	53
2.5	光纤传感技术	57
2.5.1	光纤传感原理	57
2.5.2	光纤温度传感器	57
2.5.3	光纤位移传感器	60
2.5.4	光纤压力传感器	63
2.5.5	应变感知	67
2.5.6	振动感知	71
2.5.7	流量感知	74
2.5.8	气体感知	75
2.5.9	电流感知	78
2.6	其他矿用传感器	81
2.6.1	风速传感器	81
2.6.2	其他传感器	84
2.7	矿用传感器的发展	86
	参考文献	89
3	感知矿山的信息岛	92
3.1	信息岛的内涵	92
3.2	信息岛构建和演变	94
3.2.1	信息孤岛的动态扩展	94
3.2.2	全矿井信息岛拓扑生长	98
3.3	信息岛内的数据处理	100
3.3.1	监测信息入岛	100
3.3.2	统一数据描述	103
3.3.3	岛内数据表示方法	106
3.3.4	岛内数据融合方法	107
3.4	信息岛的中转与接驳	110
3.4.1	机会通信模型	110
3.4.2	机会中继与接驳	113
	参考文献	117
4	感知矿山的信息流	120
4.1	感知矿山信息预处理	120

4.1.1 信息流分类	120
4.1.2 信息流预处理	121
4.1.3 信息流数据融合	122
4.2 感知矿山信息流编码	123
4.2.1 信息流编码目的	124
4.2.2 信息描述规范	124
4.2.3 信息流编码设计	125
4.3 感知矿山信息流传输	126
4.3.1 信息流传输方式	126
4.3.2 信息流传输平台	128
4.4 感知矿山信息流存储	129
4.4.1 信息库的特征	129
4.4.2 信息库的构建	130
4.4.3 信息库的应用	131
4.5 生产状态感知信息流	132
4.5.1 地质勘探感知信息流	132
4.5.2 采掘系统感知信息流	133
4.5.3 提升系统感知信息流	133
4.5.4 通风系统感知信息流	134
4.5.5 排水系统感知信息流	134
4.5.6 供电系统感知信息流	135
4.5.7 皮带系统感知信息流	135
4.6 灾害渐变感知信息流	135
4.6.1 瓦斯灾害感知信息流	135
4.6.2 煤火灾害感知信息流	136
4.6.3 粉尘灾害感知信息流	136
4.6.4 矿震灾害感知信息流	137
4.6.5 突水灾害感知信息流	137
4.7 指挥调度感知信息流	137
4.7.1 人员定位感知信息流	137
4.7.2 语音通信感知信息流	137
4.7.3 视频联动感知信息流	138
4.7.4 应急指挥感知信息流	138
4.7.5 生产调度感知信息流	138
4.8 矿区环境感知信息流	138
4.8.1 矿区灾害感知信息流	138
4.8.2 生态环境感知信息流	139
参考文献	139

5 感知矿山的传输网	141
5.1 感知矿山传输网发展现状	141
5.1.1 感知矿山传输网基本要求	141
5.1.2 感知矿山传输网技术现状	143
5.2 感知矿山传输网构建	149
5.2.1 感知矿山传输网组网	149
5.2.2 感知矿山传输网构架	151
5.2.3 基于认知无线电的传输网	152
5.3 感知矿山传输网优化	160
5.3.1 矿山环境对传输网的约束与限制	160
5.3.2 基于先进无线通信的传输网优化	161
5.3.3 网络多媒体数据传输的可靠性保障	162
5.3.4 网络多媒体数据传输的 QoS 提升	167
5.4 灾后应急传输网重建	171
5.4.1 灾后应急传输网重建策略	171
5.4.2 基于 QoS 的应急数据传输	173
5.4.3 应急泛在网络能耗最小化	174
参考文献	177
6 感知矿山的智能化	180
6.1 概述	180
6.2 感知矿山系统决策架构	181
6.2.1 矿山决策概述	181
6.2.2 决策支持系统	182
6.2.3 智能决策架构	183
6.3 感知矿山的认知方法	185
6.3.1 感知矿山认知建模的对象	185
6.3.2 感知矿山认知建模的方法	187
6.3.3 感知矿山认知决策的知识	197
6.3.4 感知矿山认知建模的模型	198
6.4 大数据感知矿山系统建模	205
6.4.1 矿山安全系统建模成果	205
6.4.2 大数据驱动的感知建模	206
6.5 融入知识的感知决策	209
参考文献	211
7 矿山灾害感知	213
7.1 瓦斯与煤火灾害感知	213
7.1.1 瓦斯与煤火感知方法	213
7.1.2 瓦斯涌出量感知	217

7.1.3	煤与瓦斯突出灾害感知	226
7.1.4	煤火灾害感知	239
7.2	矿山压力灾害感知	245
7.2.1	矿山压力灾害感知方法	245
7.2.2	冲击地压灾害感知的微震监测法	251
7.3	矿井突水灾害感知	272
7.3.1	矿井突水机理与感知方法	273
7.3.2	突水地质条件感知	276
7.3.3	突水地带特征感知	283
7.3.4	矿井突水的感知网络	290
7.3.5	矿井突水的综合感知	294
	参考文献	298
8	井下人员感知	302
8.1	井下人员感知模型	302
8.1.1	人员感知的层次框架	302
8.1.2	主动式人员环境感知	303
8.2	井下人员定位技术	304
8.2.1	井下定位技术发展	304
8.2.2	井下动点定位算法	306
8.2.3	动点定位误差分析	314
8.3	人员感知流构建技术	317
8.3.1	压缩感知技术	318
8.3.2	分布式协同编码技术	320
8.4	移动组网拓扑控制	324
8.4.1	邻居节点选择概率的优化模型	324
8.4.2	邻居节点选择概率的分布式实现	325
8.4.3	算法描述	326
8.4.4	算法仿真及分析	326
8.5	人员感知信息岛	328
8.5.1	特征提取技术	328
8.5.2	信息联动	328
8.5.3	井下人员管理 GIS 系统	331
8.5.4	系统功能	336
	参考文献	336
9	开采装备感知	340
9.1	地下采矿装备概述	340
9.1.1	巷道掘进装备	340
9.1.2	煤炭回采装备	340

9.1.3	液压支护装备	342
9.1.4	矿井运输装备	343
9.1.5	井下供电装备	345
9.1.6	通风排水装备	346
9.2	采矿装备状态感知	347
9.2.1	掘进机状态感知	347
9.2.2	采煤机状态感知	349
9.2.3	液压支架感知	351
9.2.4	转运装备感知	353
9.2.5	提升装备感知	353
9.2.6	带式输送机感知	359
9.2.7	电力装备感知	363
9.2.8	通风装备感知	365
9.2.9	排水装备感知	366
9.3	智能材料结构感知	368
9.3.1	智能材料	369
9.3.2	智能结构	372
9.3.3	智能结构应用	374
9.4	移动装备定位感知	383
9.4.1	井下移动装备定位技术	383
9.4.2	井下运输车辆导航技术	391
9.5	截割煤岩性状感知	398
9.5.1	基于煤岩物性的识别技术	400
9.5.2	基于切割载荷的识别技术	405
9.5.3	基于岩层扫描的识别技术	409
9.6	机械润滑状态感知	413
9.6.1	油液监测技术	414
9.6.2	润滑油在线监测技术	416
9.6.3	几种典型油液监测技术	419
9.6.4	润滑油在线净化与修复	426
	参考文献	431
10	感知矿山云平台	434
10.1	感知矿山云平台基础	434
10.1.1	云计算概念	434
10.1.2	云计算应用模式	435
10.1.3	云计算与大数据	436
10.1.4	感知矿山的云计算	437
10.2	感知矿山云平台技术	439

10.2.1	云系统管理软件	440
10.2.2	云存储软件	441
10.2.3	云门户软件	443
10.2.4	云应用软件群	446
10.3	感知矿山云平台服务	453
10.3.1	煤矿灾害预警云服务	453
10.3.2	煤矿风网优化云服务	462
10.3.3	设备健康监测云服务	463
10.4	感知矿山云平台前景	464
10.4.1	感知矿山云平台特色	464
10.4.2	感知矿山云平台需求	464
10.4.3	中国感知矿山云服务中心	465
	参考文献	466
11	井下灾变感知	468
11.1	井下灾变事故特征	468
11.1.1	瓦斯事故	468
11.1.2	顶板事故	471
11.1.3	矿井水灾	472
11.1.4	矿井火灾	473
11.1.5	井下灾变感知特点	474
11.2	灾变环境感知方法	474
11.2.1	基于视觉的感知方法	474
11.2.2	基于听觉的感知方法	476
11.2.3	基于嗅觉的感知方法	476
11.2.4	基于触觉的感知方法	478
11.3	灾变感知的运载工具	479
11.3.1	灾变感知的运载工具	479
11.3.2	运载工具的关键技术	483
11.4	灾变环境通信系统	489
11.5	灾变受困人员感知	494
	参考文献	496
12	感知矿山工程实践	498
12.1	概述	498
12.2	霍尔辛赫煤矿示范工程	498
12.2.1	霍尔辛赫煤矿示范工程规划	499
12.2.2	感知矿山信息集成交换平台	499
12.2.3	骨干网络建设	503
12.2.4	无线感知网络建设	504

12.2.5	井下人员感知系统	505
12.2.6	井下设备感知系统	507
12.2.7	感知矿山信息联动系统	513
12.2.8	井下移动目标定位系统	515
12.2.9	感知矿山物联网运行维护管理系统	519
12.3	夹河煤矿示范工程	522
12.3.1	夹河煤矿简介	522
12.3.2	夹河煤矿感知矿山建设内容	522
12.3.3	夹河煤矿感知矿山系统应用	523
12.4	感知矿山示范创新意义	526

1 感知矿山技术体系

进入 21 世纪以来,以信息技术为代表的技术革命迅猛发展,为实现矿山的全面感知提供了成熟的技术支撑。数年来,工业界一直处于一场重大而根本性的变革之中,这一变革在德国被称为“工业 4.0”,在中国称为“中国制造 2025”,而推广到矿山领域,我们称之为“感知矿山”,它将是“互联网+”这一概念应用在矿山行业的最佳模式。因此,本章将从“感”“知”的概念入手,逐步揭示感知矿山的内涵、技术体系等内容。

1.1 感知矿山的基本概念

1.1.1 人的感知能力

什么是“感”?有些东西是我们用眼睛看不到的,如黑暗中的物体,我们却可以凭借手和身体去感觉它们的存在;有些东西是我们无法用手和身体触摸到的,如远处的物体或者是风景,我们却可以用眼睛来感觉它们的存在;有些东西我们既无法用眼睛看到,也不能用手和身体去触摸,如歌声、音乐、话语等,我们却可以用耳朵来感觉它们的存在;还有一些东西,是我们的感官无法直接感觉的,如紫外线、红外线、细胞、粒子与电磁波等,但我们可以制造各种仪器,借助工具来感觉它们的存在。人类对自己器官所接收的信号做出认识,称之为“感”。对这些感觉信号在大脑中进行分类处理和存储,并对其进行分辨和识别,解释这是什么、有什么作用,就是人类的“知”。

人有五感,分别为视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉,所对应的感受部分分别是人体的眼、耳、鼻、口和皮肤。正所谓,眼观五彩,耳听五音,鼻闻五气,舌尝五味,体感五动。人们对于外部世界的认知,无论是放在面前桌子上的一盘菜,还是远处天边的一道彩虹,都是在这五官五感的综合作用下,才变得直观,变得具体,变得深刻^[1]。那什么是五感呢?

1) 视觉

视觉是通过视觉系统的外周感觉器官(眼)接受外界环境中一定波长范围内的电磁波刺激,经中枢有关部分进行编码加工和分析后获得的主观感觉。光作用于视觉器官,使其感受细胞兴奋,信息经视觉神经系统加工后产生视觉。

2) 听觉

声波作用于听觉器官,使其感受细胞处于兴奋并引起听神经的冲动以至于传入信息,经各级听觉中枢分析后引起的震生感。外界声波通过介质传到外耳道,再传到鼓膜,鼓膜振动,通过听小骨放大之后传到内耳,刺激耳蜗内的纤毛细胞(也称听觉感受器)而产生神经冲动。神经冲动沿着听神经传到大脑皮层的听觉中枢,形成听觉。听觉是仅次于视觉的重要感觉通道。

3) 味觉

味觉是指食物在人的口腔内对味觉器官化学感受系统的刺激并产生的一种感觉。

4) 嗅觉

它由两个感觉系统参与,即嗅神经系统和鼻三叉神经系统。嗅觉和味觉会互相作用。嗅觉是外激素通信实现的前提,它是一种远感,即说它是通过长距离感受化学刺激的感觉。相比之下,味觉是一种近感。

5) 触觉

触觉是接触、滑动、压觉等机械刺激的总称,是指分布于全身皮肤上的神经细胞接受来自外界的温度、湿度、疼痛、压力、振动等方面的感觉。多数动物的触觉器是遍布全身的,像人类的皮肤位于人的体表,依靠表皮的游离神经末梢能感受温度、痛觉、触觉等多种感觉。

随着社会的进步,人与人之间的交流范围越来越大,仅凭借身体本身,人们已经不能完成对周围事物的掌控。于是,人类不断创新发明,用工具来延伸自己的感官:比如脚力不及,人类便发明了轮子;听力不够远,人类便发明了电话。同样,媒介也是人类感觉能力的延伸:印刷媒介是视觉的延伸,广播是听觉的延伸,电视则是视听觉的综合延伸;按照这个逻辑,电脑作为媒介融合的产物,无疑就是人脑的延伸^[2]。随着感知手段的多样化、自动化、网络化,主流的技术创新一直以人的感官功能为诉求,人们持之不懈地研究人工智能、人机交互,以期实现感知的延伸。因此,“感知”在现今乃至未来的生产、生活中,不再仅仅是一般意义上的“感”和“知”,它还蕴含了智能、智慧的含义,如图 1.1 所示,给出了人的感知能力和人工智能感知替代的关系。

1.1.2 感知矿山的内涵

人类早在几千年前就对矿山有了一定的了解,并开始对矿石进行开采和利用,如中国夏商时期对青铜、春秋战国时期对铁矿石的开采和冶炼;在欧洲,希腊学者在公元前约 300 年就记载有煤的性质和产地,而古罗马更是在大约 2000 年前就开始用煤进行加热。在矿石的开采过程中,人类对矿山形成了初步的感知,掌握了掘进、支护、开采、运输等一系列的生产流程,并沿用至今^[3]。随着科技的发展和进步,现代化开采需要新的感知手段,去更全面地了解矿山,从而更好地指导人们进行生产,由此,感知矿山的概念就应运而生了。

为了保证矿山的安全开采,管理者希望能够了解矿山开采每一个环节、每一道工序、每一台设备的运行情况,能够全面感知矿山的地质、环境、采掘设备状态等信息,就像人们利用感觉器官可以全面感知我们的身体状态一样。但是,矿山开采是一个复杂的过程,涉及大量的电气和机械设备,还难以做到有效监测监控。因此,感知矿山的内涵,就是要利用现代的传感技术、通信技术和信息处理技术,实现矿山生产过程中资源环境、地质灾害、人员安全、设备健康的全面监测。

矿山开采系统主要包括:综掘设备、综采设备、胶带运输、提升系统、辅助运输、煤的洗选、装车等矿山采掘、生产、运输过程中所涉及的一系列生产系统。同时,矿山开采还要面对复杂的地质条件、矿山压力、瓦斯、一氧化碳、地下水及煤尘等,需要排

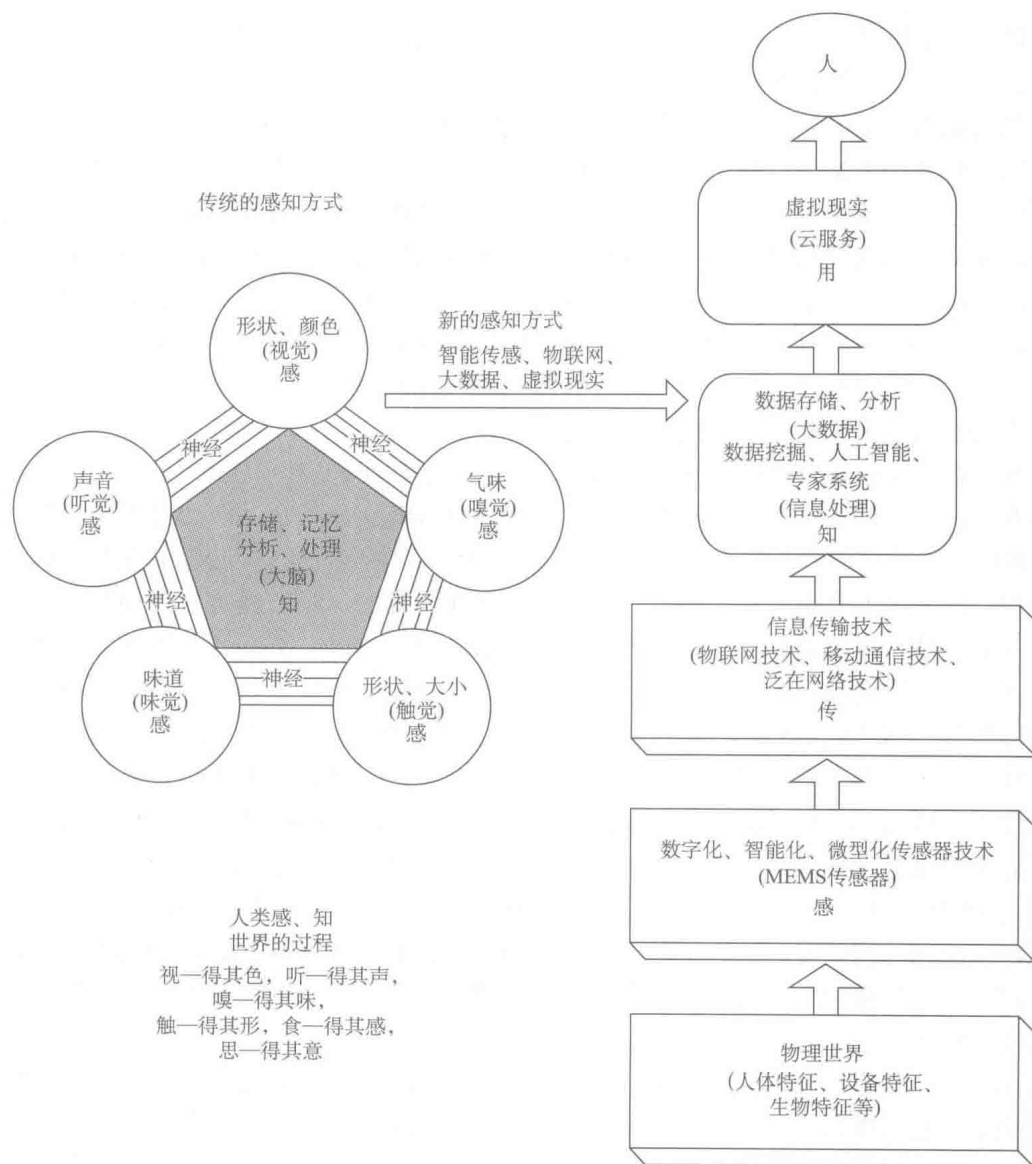


图 1.1 人工智能感知替代关系

水、通风、供电、压风等生产辅助系统。大量的开采系统、辅助系统独立运行，不成体系，造成了矿山生产监控难、调度难、安全事故多等问题。

钱学森等 3 位中国学者于 1990 年发表了题为“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”一文，提出了开放的复杂巨系统的概念，揭开了开放的复杂巨系统研究的序幕^[4]。钱学森在复杂性理论的研究中将系统分为简单系统和巨系统两大类，巨系统又分为简单巨系统和复杂巨系统，进而提出开放的复杂巨系统概念。他指出开放的复杂巨系统具有以下四个特征：第一，系统是开放的，也就是系统本身与系统外部环境有物质、能量和信息的交换；第二，系统包含很多子系统，成千上万甚至是上亿万，所以是巨系统；第三，系统的种类繁多，有几十、上百甚至几百种，所以是复杂的；第四，正

因为以上几个特征，整个系统之间的结构是多层次的，每个层次都表现出系统的复杂行为，甚至还有作为社会人的参与。

我们认为，矿井生产系统就是一个典型的开放的复杂巨系统^[5]。首先，矿井系统所包含的子系统种类繁多，数量庞大，如矿井地质、巷道开拓、巷道掘进、围岩支护、工作面回采、供电线路、电器设备、监测监控、瓦斯抽放、矿井通风、排水、井底车场、运输、提升、地面设施等子系统，这些子系统本身又包含许多子系统，层次很多，规模宏大，可以划分为成千上万个系统，所以称为“巨”系统；其次，影响安全生产的因子众多，各因子之间具有强烈的非线性相互作用，复杂是矿山安全生产系统的基本特征。最后，这些系统本身显然都与系统周围的环境有物质的交换、能量的交换和信息的交换，且有人的参与，由于有这些交换，所以是“开放的”。

开放的复杂巨系统的一个典型特点是人对其子系统不能完全认识、了解，子系统内部还有更深、更细的子系统无法完全认知，难以掌握其完全信息。例如对于矿井生产系统，我们无法确定矿井每一个地方的地质构造、瓦斯含量等。这些问题如何解决？钱学森院士在提出开放的复杂巨系统同时，还给出了现在能用的、唯一能有效处理开放的复杂巨系统的方法，这就是从定性到定量的综合集成方法^[5]，该方法强调人的重要性及人的聪明才智与实践经验的重要性，将科学理论、经验知识和专家判断力相结合，提出经验性假设（判断或猜想）；而这些经验性假设不能用严谨的科学方式加以证明，往往是定性的认识，但可以用经验性的数据和资料以及几十、几百、上千个参数的模型对其确定性进行检测，而这些模型也必须建立在经验和对系统的实际理解上，经过定量计算，反复对比，最后形成结论，这个结论就是从定性上升到定量的认识^[5]。由此可见，从定性到定量的综合集成方法，其实质是利用各种通信网络，将井下传感器的监测数据结合起来，形成物与物的交互；再把各种学科的科学理论和人的经验知识结合起来，分析这些监测数据，形成物与人的交互，利用专家群体的优势（各类有关专家）解决生产过程中出现的问题。

20 世纪 90 年代初，微计算机技术、互联网技术飞速发展，这就为矿山开采系统的信息采集和通信提供了技术上的保证。为了保证矿山开采这个复杂巨系统的稳定性，我国的科研工作者开始将这些新技术引入到矿山开采系统中，用于采集各类设备和环境参数，初步实现矿山开采的自动化，自动化采掘、支护、开采、运输，使得矿石的产量及开采的安全性得到了质的飞跃。但是，人类对矿山的感知不全面，生产过程中伴随的冲击地压、岩爆、矿震、岩土工程失稳、泥石流、煤与瓦斯突出、矿井火灾、突水等灾害仍是造成矿山生产事故的主要因素。因此，如何运用新兴的信息技术、网络技术，感知矿山开采过程中的人员信息、设备信息、灾害信息及环境信息，预知自然灾害及生产事故，保证井下工人的生命安全、设备的运行安全以及开采环境的安全，即为感知矿山的内涵。

1.1.3 感知矿山的意义

感知矿山的目的是利用物联网技术搭建泛在网络平台，以有线或无线方式接入以 MEMS 传感器为核心的智能传感器，辅以大数据存储与云计算技术，对矿山开采前的勘