



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

智能矿山概论

李国清 主编

胡乃联 主审



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

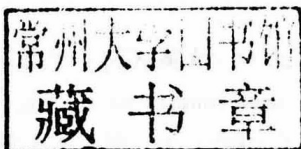


普通高等教育“十三五”规划教材

智能矿山概论

李国清 主编

胡乃联 主审



北京

冶金工业出版社

2019

内 容 提 要

本书针对现代信息技术、自动控制技术、大数据以及智能分析技术等在我国金属矿山生产、运营与管理中的深层次应用,以两化融合和智能制造 2025 为切入点,全面介绍了智能矿山的产生与发展、智能化的生产条件准备、智能采矿与无人采矿、无人化设备设施、智能选厂、智能化安全保障、生产系统的智能管理与优化、矿业大数据与商务智能等内容。

本书为采矿工程专业、智能采矿专业和矿物资源工程专业教材,也可供相关领域的研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能矿山概论/李国清主编. —北京:冶金工业出版社,
2019. 4

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-8119-3

I. ①智… II. ①李… III. ①智能技术—应用—矿山
建设—高等学校—教材 IV. ①TD2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 064106 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 张耀辉 宋 良 美术编辑 郑小利 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8119-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2019 年 4 月第 1 版,2019 年 4 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13.25 印张; 314 千字; 200 页

29.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

随着现代采矿技术、大型无轨设备、计算机技术、网络通信技术的进步及广泛应用，矿山面貌发生了显著变化，高新技术一直在引领和推动着矿业的发展。进入 21 世纪，大数据、物联网、云计算、人工智能、自动定位与导航技术、虚拟现实技术等高新技术逐步在矿山集成应用，使矿山的生产方式发生了根本性的变革，从传统的手工作业和机械化作业，逐步发展到了自动化、数字化和智能化阶段。

智能采矿是矿山技术变革、技术创新的一种必然。经过不断的研究与探索，矿业发达国家在智能采矿领域已经取得了丰硕成果，并广泛应用。近年来，我国对智能矿山技术的研究与应用也非常重视，在政策、资金等方面给予了大力支持。矿山的智能化应用体现在多个领域，包含地质、采矿、选矿、管理、决策等，智能化手段可以极大地提高矿山生产效率，保障矿山安全生产，减少生命和财产损失，从而实现我国矿业的安全、高效、经济、绿色与可持续发展。

本书由北京科技大学李国清主编，胡乃联主审；博士研究生马朝阳、侯杰、刘迪、黄树巍、王浩、郭对明，硕士研究生路亚雄、凌嘉鸿、蒋淑云等参加了本书的撰写工作，在编写过程中，作者参阅了国内外有关文献，在此谨向文献作者表示感谢。

本书立足于展现智能矿山技术的最新进展，由于现代信息、人工智能技术的发展日新月异，不断推动着智能矿山技术的发展与创新，加之作者水平所限，书中不妥之处，敬请读者指正。

李国清

2019 年 3 月 10 日

于北京科技大学

目 录

1 绪论	1
1.1 智能矿山的发展	2
1.1.1 自动化采矿沿革	3
1.1.2 数字矿山的出现	4
1.1.3 智能矿山技术进展	5
1.2 从数字矿山到智能矿山	8
1.2.1 数字矿山的建设内容	8
1.2.2 数字矿山涉及的关键技术	10
1.2.3 现代矿山面临的智能化需求	11
1.2.4 数字矿山的智能化提升途径	12
1.3 智能矿山的建设构想	13
1.3.1 智能矿山的建设定位	13
1.3.2 智能矿山的系统架构	14
1.3.3 智能矿山中的基础平台	15
1.4 智能矿山的应用体系	15
参考文献	17
2 智能化生产条件准备	19
2.1 矿业软件应用的全面规划	19
2.2 空间信息的智能化采集	23
2.2.1 卫星测量仪	23
2.2.2 雷达遥感测量仪	24
2.2.3 三维激光扫描仪	25
2.2.4 无人机航测技术应用	27
2.3 空间信息的智能化处理	28
2.3.1 地质资源信息的智能化处理过程	28
2.3.2 资源储量动态评估	32
2.4 露天矿开采境界优化	34
2.4.1 境界优化方法	34
2.4.2 基于矿业软件的境界优化过程	36
2.5 地下矿山开采设计	38
2.5.1 基于三维矿业软件的采矿设计	38

2.5.2 地下矿生产的可视化布局	40
参考文献	41
3 井下作业自动化	43
3.1 凿岩自动化	43
3.1.1 凿岩自动化发展概述	43
3.1.2 智能化中深孔凿岩装备与技术	45
3.1.3 应用案例	47
3.2 装药自动化	48
3.2.1 装药自动化发展概述	48
3.2.2 自动装药装备与关键技术	49
3.2.3 应用案例	50
3.3 出矿自动化	50
3.3.1 出矿自动化发展概述	50
3.3.2 井下精确定位与导航技术	52
3.3.3 智能铲运装备与技术	53
3.3.4 应用案例	56
3.4 支护自动化	57
3.4.1 智能喷浆台车	57
3.4.2 自动锚杆台车	58
3.4.3 应用案例	58
3.5 溜井智能化监测	59
3.5.1 溜井智能化监测技术	59
3.5.2 自动液压移动破碎装备与技术	60
3.5.3 应用案例	61
3.6 有轨运输自动化	61
3.6.1 有轨运输自动化系统构成	62
3.6.2 应用案例	63
3.7 提升自动化	65
3.7.1 提升自动化系统构成	65
3.7.2 应用案例	66
参考文献	68
4 露天开采作业自动化	71
4.1 智能化生产调度	71
4.1.1 露天矿生产调度的智能化需求	71
4.1.2 基于全球导航卫星定位的智能化生产调度	72
4.1.3 智能调度系统组成与功能	73
4.1.4 应用案例	76

4.2 卡车运行自动化	77
4.2.1 卡车自动运行简介	77
4.2.2 国内外卡车自主运行装备的研究与应用	79
4.3 胶带运输自动化	83
4.3.1 胶带运输自动化的发展	83
4.3.2 胶带运输自动化的系统构成	85
4.3.3 应用案例	87
参考文献	89
5 固定设备无人值守	91
5.1 通风系统	91
5.1.1 智能化需求与目标	91
5.1.2 系统构成	92
5.1.3 应用案例	93
5.2 井下排水系统	94
5.2.1 智能化需求与目标	94
5.2.2 系统构成	95
5.2.3 应用案例	96
5.3 供风系统	98
5.3.1 智能化需求与目标	98
5.3.2 系统功能	98
5.3.3 应用案例	99
5.4 变配电系统	100
5.4.1 智能化需求与目标	100
5.4.2 应用案例	102
5.5 充填系统	103
5.5.1 智能化需求与目标	103
5.5.2 系统构成	103
5.5.3 应用案例	106
参考文献	108
6 智能选厂	109
6.1 选矿智能化的需求与目标	109
6.2 智能选厂的体系架构	110
6.3 系统组成与功能	111
6.3.1 碎矿智能化	111
6.3.2 磨矿智能化	114
6.3.3 浮选智能化	116
6.3.4 尾矿输送智能化	117

6.4 应用案例	119
6.4.1 数据采集平台与选矿数据中心	119
6.4.2 智能操作选厂	120
6.4.3 虚拟选厂建设	121
6.4.4 协同云服务平台	123
参考文献	124
7 智能化安全生产保障	126
7.1 人-机-环-管相集成的智能化安全保障	126
7.2 通信联络系统	128
7.2.1 井下通信联络技术发展	128
7.2.2 井下通信联络系统构成	132
7.3 井下人员定位	134
7.3.1 人员定位技术发展	134
7.3.2 人员定位系统的构成	136
7.3.3 应用案例	137
7.4 智能化监测监控系统	138
7.4.1 作业环境在线监测与智能预警	138
7.4.2 微地震监测与智能预警	139
7.4.3 露天边坡稳定性监测与智能预警	142
7.4.4 尾矿库在线监测与智能预警	144
7.5 集成化安全生产管理	146
7.5.1 现场安全的 PDCA 闭环管理	146
7.5.2 安全隐患的排查与智能辨识	148
7.5.3 应用案例	149
7.6 安全保障新技术	151
7.6.1 虚拟现实与增强现实技术	151
7.6.2 交互式安全培训	153
7.6.3 多场景紧急救援预案	154
参考文献	155
8 生产系统智能管理与优化	157
8.1 资源储量动态管理	157
8.1.1 智能化资源储量动态管理体系	157
8.1.2 系统构成与功能	159
8.1.3 系统集成与数据融合	159
8.2 生产计划智能化管理	160
8.2.1 业务模型	160
8.2.2 系统构成与功能	162

8.2.3 基于三维矿业软件的计划编制	163
8.2.4 生产计划的智能化趋势	164
8.3 地下矿智能化生产调度	165
8.3.1 智能化生产接续与动态调度	165
8.3.2 系统构成与功能	166
8.3.3 井下无轨设备配置与调度	168
8.3.4 事件响应与短间隔控制	171
8.4 生产运营信息统计与核算	173
8.4.1 生产信息的维度划分	173
8.4.2 统计分析报表的标准化与智能化	174
8.4.3 主题化生产指标体系	174
8.4.4 生产运营数据统计与分析	176
8.5 数据仓库与决策支持	177
8.5.1 数据仓库与矿业数据仓库	177
8.5.2 决策支持与矿山智能决策	179
8.5.3 矿业商务智能	181
8.5.4 应用案例	185
参考文献	187
9 智能矿山技术展望	189
9.1 矿业大数据和云计算	189
9.1.1 大数据的产生和发展	189
9.1.2 云计算的产生和发展	191
9.1.3 大数据和云计算的关系	192
9.1.4 矿业大数据与云计算的应用	193
9.2 互联网+矿业	194
9.2.1 互联网+的理论概述	194
9.2.2 互联网+矿业的核心体系	195
9.2.3 互联网+矿业的关键技术	197
参考文献	198
附录 主要缩略名词中英文对照	199

本章学习要点：深部、绿色和智能开采已成为金属矿业的三大主题。我国的智能矿山建设起步较晚，明显落后于矿业发达国家，其技术研发要在数字矿山研究成果基础上进行，从智能生产、智能管理和智能决策三个层面展开。智能矿山的建设，应以物联网、人工智能、大数据和云平台为支撑，围绕智能化生产条件准备、开采作业自动化、固定设备无人值守、选矿智能化与智能选厂、智能化安全保障体系、生产系统智能管理与优化以及智能生产决策支持系统等应用体系展开。

矿业泛指从地球特别是地壳中提取具有经济价值的矿产资源的产业。从产业范畴看，矿业涉及冶金、有色、黄金、煤炭、油气、核原料、化工、建材等相关部门；从生产过程看，矿业包括矿产资源的地质勘查、设计建设、矿床开采、矿物加工等工艺环节。矿山是指有一定开采境界的采掘矿石的独立生产经营单位，可以是企业法人，也可以是企业所属生产单位/车间。矿山一般包括若干个坑口、矿井、露天采场、选矿厂及其他辅助生产单元。

无论是矿业还是矿山，其发展与扩大矿产资源的开发利用，对客观世界和经济社会的发展与进步都产生了巨大的、无可替代的促进作用。不同于其他产业，矿山企业具有以下特征：

(1) 资源特征：矿山是以自然资源开发利用为对象的生产企业。赋存于地壳浅层中的矿产资源，不仅其所赋存的地质环境非常复杂，而且其空间位置、形态、有用元素品位分布等极富变化。人们对资源的认识程度会随着开采的不断进行而逐步深入；随着市场价格和开采技术条件的变化，矿体的边界也会随之变化，并需及时进行变更和修正。

(2) 动态特征：由于工作场地多、工序复杂，矿山生产要素具有动态特征，即除了少部分人员设备工作位置固定以外，大多数人员和设备的位置在生产过程中不断变更。

(3) 工艺离散：与加工企业的工艺流程相比，矿山企业的生产工艺具有离散（即工艺不连续）和分散（即作业场所多）的特点，各工序之间的协调运行是确保矿山高效、安全生产的基础。

(4) 环境恶劣：矿山生存环境恶劣、作业空间狭小，与露天开采相比，地下矿山的电磁屏蔽性强、噪声大，正常通信难以实现，生产指挥困难。

(5) 信息复杂：不仅生产系统内部存在大量的多源、异质信息流动，而且系统内部与外部环境之间，如电力、设备供应、矿产品需求市场等，均存在着信息的交换和流动。

伴随着我国经济的飞速发展，矿业支撑着我国成为世界第二大经济体的可持续发展，成绩斐然。然而近年来国际经济提振乏力，国内经济增速放缓，企业内涵发展不足，伦敦金属交易所价格持续下跌等因素，给我国的金属矿业发展带来巨大冲击。此外，矿床开采带来的生态环境恶化，尚未得到根本好转，安全事故频发。更为突出的是我国正面临日益

复杂的深井开采问题。据统计,目前全球采深超过 1000 米的矿山有 126 座,其中中国有 15 座。南非的 Western deep level 金矿已开采到 4800 米,是目前全球开采最深的矿山,而我国深部开采才刚刚开始。据不完全统计,未来 10 年内,我国将有 1/3 以上金属矿山开采深度达到或超过 1000 米。深井开采将遇到高地应力集中诱发的岩爆、高温热害、竖井提升、通风、排水、支护、充填工艺环节等一系列的技术难题,矿业发展正是朝着克服这些困境的方向在迈进,深部、绿色和智能,已成为我国矿业发展的三大主题。信息化则成为衡量一个行业、一个企业的先进程度、文明程度的重要标志,矿业信息化的发展,必然驱使矿业走向智能采矿。

从 20 世纪开始,计算机、大型无轨设备、通信技术、网络技术、软件技术等研究成果进入矿业领域,使矿山生产方式发生了显著变化,现代高新技术便一直在引领和推动着矿业发展。大数据、互联网、遥感探测等新技术与矿业不断交叉融合,为矿业发展带来日益强劲的新动能。新时代背景下,智能化是彻底解决矿山安全隐患、提高效率、节约能耗、降低成本、提升企业竞争能力的关键,成为矿业发展的必由之路,也是提高矿企核心竞争力、实现可持续发展的必然选择,是矿业发展的方向。据不完全统计,正在开展地下矿山智能化遥控采矿试验和技术应用的有南非、澳大利亚、瑞典、芬兰、加拿大、智利等 10 多个国家。在我国,一批具有远见卓识的企业,已把信息化列为矿山的基础设施工程,取得突出成绩,初步建成了集多功能于一体的矿山综合信息平台。

随着微电子技术和卫星通信技术的飞速发展,采矿设备的自动化和智能化的进程明显加快,无人驾驶的程式化控制和集中控制的采矿设备正进入工业应用阶段,为无人采矿的变革提供了重要的技术条件。在矿床开采中,以开采环境数字化、采掘装备智能化、生产过程遥控化、信息传输网络化和经营管理信息化为基本内涵,以安全、高效、经济、环保为目标的集约化、规模化的采矿工程,构成了智能化采矿的核心内容。

智能采矿,以智力资源为依托,以知识和技术创新为动力,打造了矿业发展由工业经济向知识经济过渡的新型产业形态。实现智能采矿,就是一场矿业的技术革命。

1.1 智能矿山的发展

信息技术的突飞猛进、矿产资源的持续消耗以及开采条件的逐渐恶化,正在推动着矿业不断采用高新技术来改造传统工艺和发展新型工艺。智能矿山作为一种发展中的概念,对其具体内涵的界定尚无广泛共识,缺少普遍适用性和精确性。但可以认为,智能矿山作为学术研究与工程应用的结合,正在经历着一个伴随着自动化、数字化和智能化技术的发展和演化过程。截至目前,矿山生产模式大致经历了四个阶段:

一是原始阶段,主要通过手工和简单挖掘工具进行矿产采掘活动,无规划、低效率、资源浪费极大;

二是机械化阶段,大量采用机械设备完成自动化生产任务,机械化程度较高,但仍无规划,生产较粗放,资源浪费比较严重;

三是数字矿山阶段,采用自动化生产设备进行作业生产,采用信息化系统作为经营管理工具,实现数字化整合、数据共享,但仍面临系统集成、信息融合等诸多问题,并且核心目标仍着眼于扩大开采量,对绿色矿山、人文关怀、可持续发展等方面不够重视;

四是智能矿山阶段,以两化融合、智能制造为指引,通过信息技术的全面集成应用,使矿山具有人类般的思考、反应和行动能力,实现物物、物人、人人的信息集成与智能响应,主动感知、分析,并快速做出正确处理。

矿业在为经济社会可持续发展和人类生活水平不断改善而提供物质财富及生产资料的过程中,积极引入和发展高新技术,大力提升生产力水平,高效开发利用矿产资源,全面保障生产安全及职业健康,努力实现零环境影响,已经成为矿山企业在 21 世纪的奋斗目标。与科技发展相融合,矿业引入了一种全新理念,即构建一种新的无人采矿模式,实现资源与开采环境数字化、技术装备智能化、生产过程控制可视化、信息传输网络化、生产管理与决策科学化。在此目标的实现过程中,智能矿山已经成为矿业科技和矿山管理工作者的美好憧憬,人们希冀未来的采矿设备能够在井下安全场所或地面进行遥控,乃至全面采用无人驾驶的智能设备进行井下开采,使采矿无人化,逐步实现智能矿山。

1.1.1 自动化采矿沿革

作为矿山智能开采核心技术之一的自动化采矿技术,在国外的的发展已有 40 余年历史。瑞典卢基矿业公司(LKAB)的基律纳矿(Kiruna)早在 20 世纪 70 年代初期便开始实施地下矿轨道运输的自动控制技术。

自 20 世纪 80 年代中后期起,地下矿无轨设备自动化技术迅速发展。加拿大诺兰达(Noranda)技术中心基于蒙特利尔大学实验室的原型设计,为金属矿地下开采研制了多种自动设备,包括铲运机(Load Haul Dump, LHD)和卡车光导系统、LHD 遥控辅助装载系统、自动行走系统等。这些技术及系统最初于 20 世纪 90 年代中期,通过 SRAS 公司在 Noranda 的 Bell Allard 矿和 Brunswick 矿的矿石铲装过程中应用,前者由自动采矿技术实现的矿石产量一度达到 70%,后者曾一度达到 80%。2001 年, Noranda 公司在 Brunswick 矿采场运输卡车上试用了自动采矿系统 SIAM。Noranda 公司的自动采矿技术及系统可以在不同的采矿条件下独立运用,也可以用于中央集群多车遥控系统,适应了 Noranda 多个矿山开采、不同生产规模和复杂矿体条件的实际需要。

1994 年,澳大利亚联邦科学和工业研究组织(CSIRO)发起了采矿机器人研究项目,开展了用于矿山采掘及装运作业的复杂传感系统和高级遥控系统的研究。CSIRO 研发了用于索斗铲巡航操作的回转辅助(DSA)系统和用于索斗铲精确卸载的数字地表模型(DTM);开发了用于地下开采的 LHD 自动控制系统,技术成果已由卡特彼勒(Caterpillar)商业化,形成了 MINEGEM 系统,装备有该技术的 LHD 称为 Smart Loader。

1996 年,加拿大英柯国际镍公司(Inco)、芬兰汤姆洛克(Tamrock)和挪威太诺(Dyno)等企业合作发起采矿自动化计划(MAP),投资 2270 万美元,开发、示范和商业化自动采矿技术,目的是有效地开发深部或难采的矿产资源,减少交接班及进出矿井等无效工时,提高劳动生产率,降低作业成本,保障矿工安全。Inco 还进一步研发了高级通信系统、采矿设备定位与导航系统、机器人掘进与回采、先进工艺与监控等方面的自动采矿新技术,包括井下 LHD、凿岩车等机动设备的遥控技术,并在 Stobie 矿和 Creighton 矿应用,使其成为地下采矿自动化实践的先驱之一;与其他有关机构合作,于 2000 年开始了一个井下爆破自动装药项目(ELAP)的研究与开发工作,系统原型于 2002 年通过井下工业试验。

南非德比尔斯 (De Beers) 的芬斯金刚石矿 (Finsch), 在 2000 年露天开采转地下开采的工程设计中, 投资 2000 万美元采用了山特维克之汤姆洛克 (Sandvik Tamrock) 的自动采矿技术系统 (AutoMine), 包括自动卡车运输系统的设计、建设、设备购置和安装。该矿采用崩落法放矿、LDH 和卡车联合装运系统, 其中卡车系统由地面遥控, 通过无线射频系统 (MineLan) 与矿井主干通信网连接。卡车自动控制系统的采用, 使井下卡车运行速度和设备生产率得到提高; 地表操作员能够同时操作多台卡车, 使井下人员的数量显著减少, 极大地改善了矿山安全生产状况, 提高了劳动生产率。目前, Sandvik Tamrock 正在 Finsch 矿实施 LHD 自动系统。

在美国, 卡内基梅隆大学在美国宇航局 (NASA) 和乔伊 (Joy) 公司的资助下, 对地下煤矿连续采煤机的自动定位与导航技术进行了研究, 获得了可供商业化的研究成果。克劳多大学研究了井下矿石爆堆的体视成像模型, 以便控制 LHD 自动装载。

此外, 加拿大萨斯喀彻温省 (Saskatchewan) 的铀矿, 通过遥控作业使矿工免受辐射; 澳大利亚的艾萨山 (Mt. Isa) 矿和南非深部矿井, 通过遥控使矿工免受高温和潮湿空气侵害; 智利的国家铜业公司 (Codelco) 埃尔特尼恩特矿 (El Teniente) 通过遥控作业使矿工免受岩爆威胁。

截至目前, 矿业发达国家从凿岩、装药、爆破、支护、出矿到井下运输, 已全部实现了机械化配套作业, 各道工序无手工操作, 无繁重体力劳动。

我国矿山的自动化工作起步较晚, 但也取得了一定成果。在固定设备的运行自动化方面, 许多矿山已经具备了成功的经验, 减少了大批的操作人员, 如提升、运输、通风、排水、充填、供风、供电、供水、选矿等自动化系统。在移动设备的自动化方面, 成功经验相对较少。首钢矿业公司杏山铁矿、云南迪庆普朗铜矿、铜陵公司冬瓜山铜矿等一些矿山, 已经实现了井下电机车运行自动化; 山东黄金、中国黄金、梅山铁矿等矿山, 部分实现了铲运机、凿岩台车的视距遥控; 个别矿山正在试验自动运行铲运机出矿。

1.1.2 数字矿山的出现

随着信息及计算机技术, 特别是海量信息处理技术、可视化、遥感 (Remote Sensing, RS)、全球定位 (Global Positioning System, GPS)、地理信息 (Geographic Information System, GIS) 和虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 等技术的发展, 系统数字化及可视化, 成为科技工作者的研究热点领域, 乃至引起了政府的关注。

1998 年底, 前美国副总统戈尔在一次题为“数字地球: 展望 21 世纪我们这颗行星”的演讲中, 提出了“数字地球 (Digital Earth, DE)”的概念, 指出将各种与地球相关的信息集成起来, 可以实现对地球的数字化、可视化表达, 以及多尺度、多分辨率动态交互; 同时提出, 数字地球的技术与功能将随着时间而演变, 不会一蹴而就。例如, 计算科学与模拟、海量存储及处理、卫星成像、宽带网络、互通 (interoperability)、元数据 (metadata) 等数字地球技术以及虚拟外交、打击犯罪、保护多样性、预测气候变化、提升农业生产力等数字地球功能都在发展中。同年, 我国前国家主席江泽民在中国科学院和中国工程院院士大会期间, 也谈及了“数字地球”问题。

政府的关注引发了数字地球概念的拓展。中国政府于 1999 年提出了数字中国战略, 随即以一系列“金”字工程为代表的数字中国 (Digital China, DC) 项目建设有序铺开,

带动了一批行业或领域信息技术的创新发展和工作模式的改造提升,数字区域、数字国土、数字行业、数字工程等数字中国子集的建设与实施如火如荼。受数字地球与数字中国概念的启发,对于古老的采矿业而言,其机遇与挑战并存,采矿业的创新发展——数字矿山(Digital Mine, DM),成为必然趋势。

1999年11月,在北京召开的“首届国际数字地球会议”上,吴立新教授率先提出了数字矿山的概念,并围绕矿山空间信息分类、矿山空间数据组织、矿山GIS等问题进行了分析和讨论。所谓数字矿山,是“对真实矿山整体及其相关现象的统一认识与数字化再现,是一个硅质矿山”。数字矿山是矿山系统的一种数字化、计算机化表征系统,是智能矿山的一部分;它也包括实现矿山数字化的各种技术手段,如自动化采矿技术。

据此分析可知,数字矿山一方面是在统一的时间和空间坐标下,科学合理地将各类矿山信息进行分类,把矿山工程地质勘查数据、采矿工程数据、管理数据等海量异质的矿山信息资源转换为计算机能够识别、存储、传输和加工处理的格式,并进行全面、高效和有序的管理与整合,组建成一个功能齐全的矿山信息数据仓库。另一方面,充分利用现代空间分析、数字仿真、知识挖掘、虚拟现实、可视化、网络、多媒体和科学计算技术,对矿山系统进行各种方式的再现,包括平面图、剖面图、地质地形图、三维仿真图、设计方案、状态分析、控制策略等,以便在更快、更广、更深、更直观的信息基础上,为矿产资源评估、矿山规划、开拓设计、生产安全和决策管理进行模拟、仿真、评估和优化提供新的技术平台和强大工具,使矿山企业生产呈现安全、高效、低耗的局面,取得更好的经济社会效益。

数字矿山的基本特征如下:

(1) 有高效可靠的计算机网络平台,用于传输和管理矿山安全生产的多元异质海量数据和信息。

(2) 有完善的数据采集系统和手段,用于实时收集和获取矿山安全生产中一切有用的信息和数据,主要技术包括航测、遥感、卫星定位、钻探、物探、化探、电测、射频,以及常规的测量方法和各种监测监控技术等。

(3) 有功能齐全的数据库,用于全方位存储、管理地面地下的气象、交通、水文、地形、地物、地质、采掘工程、危险源、生产设施和生产进度等内容的静态和动态模型和数据,实现各种空间分析、网络分析、综合查询和专题统计。

(4) 有高性能的三维建模引擎和图形工作站,用于矿山模型的建立、展现和透明管理,通过强大的可视化分析功能实现对地层环境、矿山实体、采矿活动、采矿影响等进行直观、有效的3D可视化再现、模拟与分析。

(5) 有多功能的数据挖掘工具及核心应用软件,用于矿山勘察、规划、设计、计划、生产、安全、管理、经营和生产过程监控的优化及决策支持。

1.1.3 智能矿山技术进展

从1999年提出数字矿山概念,经过近20年的发展,很多矿业大国已认识到,在通过提高机械化、自动化水平来提高矿山的生产能力、效率和安全性的同时,必须利用信息技术改造传统矿山的生产和管理模式。数字矿山的内涵经不断丰富、演变和提升,形成了智能矿山概念,新一代互联网、云计算、智能传感、通信、遥感、卫星定位、地理信息系统

等各项技术的成熟与融合,实现数字化、智能化的管理与反馈机制,为智能矿山的发展提供了技术基础,矿山智能化已经成为一种必然趋势,成为全球矿业领域的技术热点和发展方向。

纵观全球矿业数字化与智能化建设成果,因技术水平发展阶段与资源禀赋条件的限制,国内外针对矿业的发展有着不同的战略设想,在建设目标、建设规划、功能体系等方面,分别形成不同的侧重点。

1.1.3.1 国外的智能矿山与无人采矿

发达国家在数字化、智能化矿山建设方面研究起步较早,其中,选矿技术发展十分迅速,已基本实现了自动化生产。而在矿物资源的开采方面,则着力推进了矿山生产的自动化进程,如遥控铲装、无人驾驶、自动导航等技术已完成实验并进入应用阶段。就信息技术在生产、管理和经营中应用的程度和发挥的作用而言,发达国家的矿山企业已在很大程度上实现了数字化、智能化生产。从20世纪80、90年代开始,矿业发达国家的矿山智能化建设就已经出现了许多成功的案例。如瑞典的基律纳铁矿基本实现了“自动化采矿”,依靠远程计算机集控系统,工人和管理人员可实现在远程执行现场操作,在井下作业面除了检修工人在检修外,几乎看不到其他工人;在澳大利亚,力拓开展的“未来矿山”计划,将知名的皮尔巴拉矿区的控制中心设在了1500km外的珀斯市,屏幕上显示着15座矿山、4个港口和24条铁路的运转情况,现场只有设备的运转声和寥寥可数的工作人员。智利的特尼恩特(El Teniente)铜矿、加拿大的国际镍公司(Inco)、南非的芬斯(Finsch)金刚石矿、澳大利亚的奥林匹克坝(Olympic Dam)铜铀矿、芬兰的奥托昆普(Otokumpu)公司、印度尼西亚的Grasberg深部矿带、美国的Bingham铜矿、蒙古的Oyu Tolgoi铜矿、巴布亚新几内亚的Wafi金铜矿、智利的Chuquicamata铜矿等矿山的智能化也非常成功,实现了工作面无人(或少人)的目的。

此外,为取得在矿山生产行业中的竞争优势,芬兰、加拿大、澳大利亚和瑞典等矿业强国也在同步开展矿山自动化和智能化的战略规划,先后制定了“智能矿山”或“无人化矿山”的发展规划。

芬兰于20世纪90年代初提出了智能矿山技术研究计划(IM),从1992年至1997年历时5年完成。项目的主要目标是通过实时生产控制、采矿设备自动化和高新技术的应用来提高硬岩露天矿和地下矿的生产效率和经济效益。该计划共分28个研究开发项目,预算1200万美元,通过对资源和生产的实时管理、设备自动化和生产维护自动化三个领域的研究,初步建立智能矿山技术体系。在此之后,芬兰继续提出了智能矿山实施研发技术计划(IMI),其目的是对智能矿山计划中研制完成的设备和系统在试验矿山进一步试验和完善。从1997年开始,历时3年,通过先进技术的实施、数据利用和对矿山人员的培训三大方面的研究,再结合计划的协调、先进开采工艺设计两大支撑计划研究,开发出了可用的机械装备与系统,并在奥托昆普公司(Otokumpu)公司凯米地下矿进行了应用试验,显著提高了矿山的劳动生产率,降低了矿山生产总成本,明显改善工人的工作条件。

加拿大国际镍公司研制了一种基于有线电视和无线电发射技术相结合的地下通信系统,并在斯托比矿(Stobie)投入试用。这种功能很强的宽带网络与矿山各中段的无线电单元相结合,可传输多频道的视频信号,操作每台设备。该矿除了固定设备已实现自动化

外, 铲运机、凿岩台车、井下汽车均已实现了无人驾驶, 工人在地面遥控这些设备。中央控制系统安装有数据库系统、模拟系统和规划设计软件, 直接向采矿设备发送工作指令。设备基本上是自主运行, 整个井下工作面基本上不需工作人员。

1993年, 加拿大完成论证并开始实施采矿自动化项目(MAP)五年计划, 该计划预算近2000万美元, 基于国际镍公司研发的地下高频宽带通信系统, 研发遥控操作、自主操作和自调整系统等核心技术。矿体圈定机器人装置通过通信系统与智能地质模型连接, 开拓过程则是根据矿体圈定结果建立的矿体模型, 自动化工程开拓模型向进行工作的遥控设备直接提供信息。同时, 遥控设备的信息也直接提供给矿山模型, 并作用到生产过程, 直接给机器人技术设备提供信息, 并最终发送信息返回到模型。实现所有上述功能的装置是采矿机器人控制器, 它既是一个连接监控传感器与局部遥控执行器的计算装置, 又是一个射频调制解调器, 为控制数据、监视数据、位置数据及图像提供信道。另一方面, 建立了矿山基本辅助系统, 如通风、泵送、地层控制、配电、矿山排水、压缩空气以及工艺用水等。在这些辅助系统中, 布设在现场的传感器将信息通过与通信系统相连接的信息控制装置发送到中心控制计算机。该计算机按照模型处理数据并发出信号到各个水平的远距遥控的执行机构进行调节。通过上述内容的研究开发, 使加拿大在采矿技术方面处于领先地位, 保持了采矿业的竞争能力, 并形成了新的支柱技术产业。此后, 加拿大还制定出一项拟在2050年实现的远景规划, 即将加拿大北部边远地区的一个矿山实现为无人矿井, 从萨德里通过卫星操纵矿山的所有设备, 实现机械自动破碎和自动切割采矿。

澳大利亚CSIRO开发了由控制装置、监测设备、网络灯标和矿工异频雷达收发机组成的矿工人身安全定位与监测系统, 具有无线通讯能力, 即使在发生瓦斯爆炸等井下灾害之后, 仍能报告井下矿工的位置和安全状况。此外, 还开发了一种名为Numbat的遥控无人驾驶急救车, 用于爆炸之后对伤员进行紧急抢救。

瑞典制定了“Grounteknik 2000”战略计划, 并开发大量具有良好的自动化或智能化功能的采矿设备和多种智能矿山的装备系统, 着力提高矿山智能化生产水平。

此外, 智能采矿技术的发展与设备制造厂家有密切关系。近十年来, 国际著名的几家采矿设备公司, 如Sandvik、Atlas Copco、Caterpillar等, 均在大力发展各自的自动化采矿装备及相关技术, 在解决自动定位与导航等方面发挥了重要作用。如瑞典的Sandvik公司, 不仅开发的大量采矿设备具有很好的自动化或智能化功能, 而且开发了多种智能矿山的技术与装备系统, 如AutoMine系统、OptiMine系统等。它们和一些知名的矿业公司合作, 正逐步由单一的设备供应商向技术解决方案供应商转变。

1.1.3.2 我国的智能矿山建设

我国对矿山智能化生产的实现, 则是以数字矿山建设为基础, 以信息化、自动化和智能化带动矿山生产行业的改造与发展, 开创安全、高效、绿色和可持续发展的新模式, 这也是中国矿山企业生存与发展的必由之路。

尽管我国矿山的智能化工作起步较晚, 但也取得了可喜的成果。目前, 国内部分大中型矿山企业数字化设计工具普及率、关键工艺流程数控化率已经得到一定程度的提高, 智能化水平也在不断提升。我国的新疆阿舍勒铜矿、内蒙古的乌努格吐山(乌山)铜钼矿、山东三山岛金矿、云南普朗铜矿等, 代表了国内目前智能矿山建设的较高水准。

中国黄金集团内蒙古矿业有限公司乌山铜钼矿以智能矿山建设为载体, 以采选、管理

数字化为目标,利用信息化、智能化与互联网技术,实现采选工艺数字化管控,形成立体化办公、信息共享、市场分析、成本管控的深度融合。在采矿数字化方面,建立了包括年度采剥施工计划、月度采剥施工计划、矿岩穿爆系统、生产管控平台、三维配矿平台、采矿MES系统和文件数据库等在内的采矿管控系统。选矿智能化从三个层面实现:一是运用大型先进设备,为实现自动化控制奠定基础;二是配备先进的仪表,为实现智能化控制提供保障;三是建立数据库,为实现智能化分析提供依据。管理智能化的实现主要通过建立涵盖生产经营全过程的、业务财务一体化的、信息流贯通的企业信息化管理系统,把管理理念固化在工作流程中,实现可靠的安全环保管理、高效生产过程管理、精准的财务管理和全过程的成本管理。

同样走智能矿山建设之路,实现企业高质量发展的,还有位于莱州湾畔的山东黄金集团三山岛金矿。三山岛金矿是海底开采的黄金矿山,也是目前国内机械化程度和整体装备水平最高的现代化金矿,其智能矿山建设总体规划以物联网平台为支撑,包含生产系统智能化、生产管理智能化和运营决策智能化三个层次。目前建设了信息综合服务平台、集成化安全管理系统、地质储量管理系统等信息化系统,实现了地质储量、采掘过程、现场安全、生产信息、决策分析等有效管理。

与此同时,为了实现我国从矿业大国到矿业强国的转变,政府和相关部门对智能矿山的研究也非常重视。“十二五”期间,科技部将“地下金属矿智能开采技术研究”列入了国家“863”计划,取得了一些研究成果。“十三五”期间,在“深地资源开采”专项下,设置了“地下金属矿规模化无人采矿关键技术研发与示范”项目,国家通过重点研发计划,继续在政策、资金等方面予以支持。此外,国家还先后立项开展了多项与智能化采矿相关的重点或专项科技攻关项目,如“数字化采矿关键技术与软件开发”“地下无人采矿设备高精度定位技术和智能化无人操纵铲运机的模型技术研究”“井下(无人工作面)采矿遥控关键技术与装备的开发”“千米深井地压与高温灾害监控技术与装备”等,为进一步全面开展智能矿山建设奠定了良好的基础。

总之,我国在智能矿山建设上整体处于前进上升的趋势,也有了领先发展的企业。可以说,我国矿山的智能化建设已经在稳步推进中。

1.2 从数字矿山到智能矿山

1.2.1 数字矿山的建设内容

基于数字矿山概念与特征可知,数字矿山建设是一个典型的多学科技术交叉的新领域,它涵盖了矿山企业生产经营的全过程。加之,矿山企业普遍具有生产对象(资源)的不确定性、生产过程的动态性和生产环境的恶劣性。因此,数字矿山建设是一项复杂、系统而艰巨的工作,既有人观念影响,也有技术因素的影响;既有资金的影响,也需法规的约束。借鉴国内外矿山的先进建设经验,基于矿山的自身特点和安全生产的特殊需求,可以从以下4个角度阐释数字矿山的建设目标:

(1) 使现代信息技术与传统矿山企业的现代工业化变革相融合;

(2) 实现矿山企业生产经营增长方式由劳动密集型向技术密集型的转变;