

工业生产中的知识自动化决策系统

Knowledge Automatic Decision Making System in Industrial Production

陈晓方/CHEN Xiaofang
吴仁超/WU Renchao
桂卫华/GUI Weihua

(中南大学, 湖南 长沙 410083)
(Central South University, Changsha
410083, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 05-0042-005

摘要: 认为知识自动化是未来经济发展的颠覆性技术,为解决工业生产决策问题提供了新途径。以一类铝电解生产企业的两级智能决策系统为例,对知识自动化决策系统的实现进行了说明,并对其体系结构、知识库构建、决策算法和分级决策系统的设计进行了简要说明。知识自动化决策有望为中国工业企业实现两化深度融合提供新的重要契机,可能产生深远的技术影响。

关键词: 知识型工作自动化; 决策支持系统; 知识库; 系统设计

Abstract: Knowledge automation is a disruptive technology in the future and can be a new solution for industrial production decisions problem. An example of a two-level intelligent decision system for aluminum reduction plants is introduced briefly with its structure design, knowledge base construction, decision algorithms and two-level decision system. Knowledge automation decision-making may provide new favorite opportunity for deep integration of informationization and industrialization and produce profound influence.

Keywords: knowledge work automation; decision-making support system; knowledge base; system design

1 知识自动化的提出

古典经济理论认为劳动力、土地和资本是经济发展的关键动因,而现代经济理论则更加看重人类知识的积累对于经济增长的促进作用。知识自动化的提出很大程度上源于知识型工作自动化的启示。2009—2010年,美国的帕罗奥多研究中心讨论了关于“知识型工作的未来”,并指出2020年知识型工作自动化将成为工业自动化革命后的又一次革命。美国麦肯锡全球研究院指出,知识型工作自动化是指用计算机来自动执行之前只有人可以完成的知识型工作,该机构于2013年在《颠覆性技术:先进技术将改变生活、商业和全球经济》报告中列举了十二大改变经济和未来的颠覆性技术,其中知识型工作自动化位列第2。2015年11月,麦肯锡全球研究院非正式发布了知识自动化技术对于职业、公司机构和未来工作的潜在影响的研究结果,图1所示是收入高低与可自

动化度的关联图,麦肯锡对将近800人的2000技能工作进行了“可自动化性”评定,发现将近45%的工作能够通过使用当前已有的科学技术被自动化,超过20%的CEO工作也是可以实现知识自动化的。通过对知识自动化在一些产业中转变业务流程的潜力进行分析,发现收益通常是成

本的3~10倍。

2016年1月,谷歌AlphaGo^[1]在围棋上取得的胜利被认为是人工智能发展的新里程碑。围棋博弈这类复杂分析、精确判断和创新决策的知识型工作在过去被认为只有围棋手这样的知识型工作者才能完成。AlphaGo的成功引起的巨大社会影

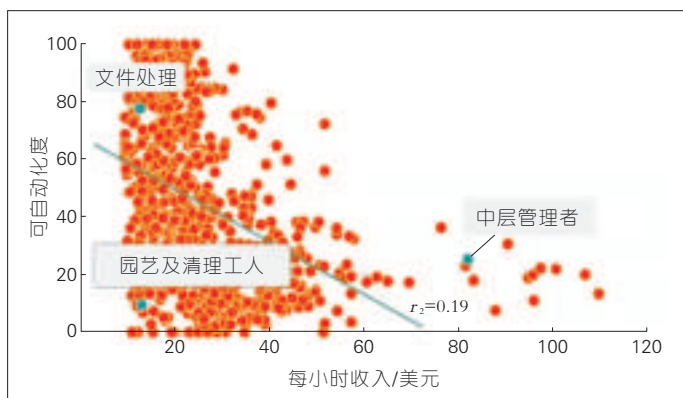


图1
麦肯锡:收入高低
与可自动化度的
关联

收稿时间: 2016-07-23

网络出版时间: 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目
(61533020)

响,事实上具有三重含义:知识自动化在技术愿景上的可能性;人们对于知识自动化的潜在渴望;知识自动本身具有颠覆性的科学和经济意义。

在现代工业企业生产过程中,通过生产分工和自动化技术,体力型工作基本上已经被自动化系统和机器替代,但目前复杂工业生产过程中涉及分析、判断、决策的工作大部分还是要依靠人来完成。将来,得益于计算技术、机器学习、自然的用户接口和自动化技术的蓬勃发展,越来越多的知识型工作也可以通过自动化技术由机器来完成,从而为知识型工作自动化提供了可能。

从自动化发展的历程来看,工业自动化经历了机械自动化、电气/仪表自动化、信息化几个时代,知识在工业生产中的地位日益凸显。知识自动化是工业自动化发展的新阶段,是知识经济时代特征和智能化趋势在工业自动化领域的映射,是复杂生产过程中工业化信息化深度融合的必然结果,有望为各行业带来革命性变化。

2 工业生产决策中的知识自动化

中国已经是一个工业大国,但工业发展目前在资源、能源、环境方面受到严重制约,面临着巨大的生产转型升级压力。如何依托智能化、信息化手段从将中国从工业大国发展成为智造强国是我们面临的重大战略课题。

2.1 知识型工作的地位

知识型工作在工业生产中起核心作用,现代大型工业生产中的决定性工作,例如:决策、计划、调度、管理和操作等都是知识型工作^[1]。处理这些工作时,知识型工作者需要统筹关联与工作对应的多领域、多层次知识,在各自的工作岗位上利用自己掌握的专业知识完成决策等知识型工作。例如,在运行优化层,许多工业、

企业操作参数的选择设定以及流程的优化控制都依赖工程师完成控制指令决策等知识型工作。在计划调度层,调度员需要统筹考虑人、机、物、能源等各种生产要素知识及其时间空间分布等相关知识,通过调度流程管理系统协调各层级部门之间的生产计划,完成能源资源配置、生产进度、仓储物流、工作排班、设备管理等知识型工作。在管理决策层,高级管理者的经营管理决策过程流程涉及企业内部的生产状况、外部市场环境以及相关法规政策标准等,而董事会通过相关流程审批这一系列经营管理决策。

2.2 知识与决策系统

目前,随着计算技术、机器学习、自然用户接口和自动化技术的蓬勃发展,越来越多知识可以封装到决策系统中,从而逐步形成一类蕴含知识的决策系统。许多国际知名的自动化系统供应商研发了蕴含有关知识的模型、软件和系统,有些已得到应用验证。但是由于国际已有的知识决策系统的核心技术和算法的保密,以及难以完全适用解决中国特殊的工业生产问题,因此亟需提出针对中国现代工业生产所特有问题的知识决策系统。美国 Honeywell 公司在 2002 年推出了世界第一套的过程知识系统 E-PKS,该系统是一个基于知识驱动应用的、规模可变的、业务与制造智能平台。2011 年 Honeywell 公司陆续为流程工业推出了多种基于知识驱动应用的工业自动化应用系统和服务,包括生产管理数据平台 Uniformance、生产执行系统 Business、FLEX,以及先进控制与优化系统 Profit、SuiteTM 等,涉及化工、天然气、生命科学等诸多领域。美国 AspenTech 公司推出的 AspenDMC 软件运用框架式知识建立了流程知识模型,主要用于化工过程。德国西门子公司开发的 SIMETALCIS VAIQ 计算机辅助质量控制系统包括生产系统、

知识库系统、知识发现系统,利用灵活的知识库组件为冶金专家及工艺流程工程师提供有关生产和产品质量预测专门知识,通过详细的过程和检验数据,促进冶金过程控制^[2]的发展。法国 ArcelormittalGent 公司使用了统计过程控制(SPC)技术,该技术的核心特点是发现潜在数据知识。在长期的运行过程中,SPC 技术通过定义与异常情况相关过程变量,将异常情况与过程变量联系起来,可以快速诊断异常情况的根本原因,同时也可以促进系统内部的知识生成,从而提高生产力。美国 Gensym 公司开发了实时专家系统平台 G2。作为智能故障诊断系统,G2 系统封装了专家知识组件对象,运用的知识关联的推理引擎能够实时响应大量的外部数据和事件,目前已广泛应用于石油化工、电力、航天、军事等领域。这类蕴含知识的决策系统已经产生了一定影响,但还缺乏系统的知识自动化决策方法与技术体系。

决策是管理者在一定的条件下,运用科学的方法对解决问题的方案进行研究和选择的全过程。决策支持系统的概念最初是由 Scott 等在 1971 年整合了管理行为的分类和决策类型的描述而提出的。决策支持系统在发展过程中可以分为两条路线:第一条是从 Sprague 提出的 2 库结构开始,逐渐发展到 5 个部件的 4 库结构组成,包括人机接口(对话系统)、数据库、模型库、知识库和方法库;另一条由 Bonczek 等人提出的 3 系统结构,包括语言系统、问题处理系统、知识系统。传统的决策支持系统(DSS)采用各种定量模型,对半结构化和非结构化决策问题提供支持,而群决策支持系统、分布式决策支持系统、智能决策支持系统已经成为热门的研究方向。3I 决策支持系统(3IDSS),即智能型、交互式、集成化决策支持系统,也吸引了学者的关注。在近些年发展中,DSS 不断与各种新技术融合,比如数据仓库、联

机分析处理、机器学习、数据挖掘、云计算、大数据等,促进决策支持系统在不同方向上的深入研究^[4-7]。不过决策系统在工业生产中的应用大多还只是针对工业、企业某些局部生产过程或者单一层级的决策问题来提供解决方案。

2.3 知识自动化决策

由于现代工业生产需要面对快速变化的市场需求、资源供应、环保排放等诸多因素的综合挑战,从而造成了工况变化更加复杂,再加上现代工业具有生产规模增加和产能集中的显著趋势,使得现代工业生产对知识型工作的要求也越来越严苛。目前云平台、移动计算、物联网、大数据的新技术的出现使得工业环境中数据种类和规模迅速增加,以往工业生产中的知识型工作者根据少量关键指标依赖经验进行决策分析,现在面对新环境下海量的信息以个人有限的知识已经感到力不从心。过去人工的知识决策方式严重依赖个别高水平知识型工作者,而个别高水平知识型工作者的决策制订具有主观性和不一致性。在决策反应灵敏性和知识积累成本上人工决策也存在缺陷。因此工业生产过程中的知识型工作正面临新的挑战,只依赖知识型工作者是无法实现工业跨越式发展的。未来必须逐步摆脱对知识型工作者的传统依赖,探索知识自动化以及知识自动化决策系统的解决之道。

知识自动化决策的实现当然离不开在人工智能领域已有的知识获取、表示、关联推理等大量研究积累。许多研究者在知识获取方面提出了一系列方法,例如粗糙集^[8]、决策树^[9-10]、神经网络^[11-12]、群智能算法^[13-14]等。在知识表示方面,谓词逻辑^[15-16]、产生式规则^[17]、语义网络^[18-19]等方法主要的研究热点。知识关联推理方法主要有关联规则^[20-21]、案例推理^[22-23]、语义推理、非精确推理等。这些方法对实现知识自动化决策有重要

参考价值,但目前还缺少面向工业决策问题的从数据、知识到自动化决策的整体设计和技术方案。

3 知识自动化决策系统

3.1 问题分析

在设计构建面向工业生产的知识自动化决策系统时,应当基于知识自动化方法解决3个问题:局部点的知识自动化决策问题;基于知识的决策业务流程优化问题;知识自动化决策环境和支撑技术问题。解决这3个问题,就能够保证利用知识高效完成局部决策的同时,尽可能地改善整体决策机制,可以使得工业生产的决策流程达到全局优化。知识自动化决策系统需要发现和解决生产、管理、调度流程中的关键决策点的决策问题,并从每个特定的决策流程以及其中涉及的知识型工作者出发,基于知识优化决策流程。各级决策调用的知识服务体系包括工业大数据支撑环境和知识表示、知识获取、知识关联/重组/推理等一系列知识自动化算法模型。

3.2 一类铝电解生产知识自动化决策系统的设计

以一类铝电解生产企业的集团和分厂两级智能决策系统设计为例,对知识自动化决策系统的实现进行说明,其体系结构示意如图2所示。该系统的硬件体系主要包括工业生产过程智能感知的工业物联网、企业级大数据中心、按需服务的集团级大数据云服务中心等,从而实现集团级/企业级生产计划业务的无缝集成和协同工作。系统中信息类型主要有物流信息、原始数据流、决策信息流和知识信息,其中蕴含了从原始数据集成为大数据,从大数据中获取知识,从知识实现决策的一系列关键环节。这些关键环节实现都离不开基于知识自动化决策支持环境。

铝电解生产两级智能决策系统

设计采用“挖掘提取、归一协同、模型计算、分级决策”的思想实现生产知识自动化决策,其内容主要包括以下几个方面。

(1)体系架构和环境设计。在工业大数据和云网络平台的支持下,基于资源管理实现内容动态封装,建立具有多维度和多粒度结构的决策知识库,并根据认知推理和动态演化机制实现推理计算,据此形成集团级生产规划决策能力和企业级生产计划决策能力,使之成为具备知识自动化和集成化能力的全覆盖式智能决策服务系统。为了使铝电解集团/企业具有全新的感知、分析和优化决策能力,依托工业物联网、企业级大数据中心、集团级大数据云服务中心等,在工业大数据环境下实现人与生产过程的高效协同,形成面向服务、透明和集成、按需使用的云制造决策支持平台。

(2)基于知识获取的知识库构建。按照铝电解的生产决策实际需要,在知识库中将包含结构化和非结构化特征的知识有效组织起来,实现知识的压缩和精炼化。通过研究多源/异构数据解码与转换、知识结构化、基于学习的数据性知识提取、经验性领域知识提取方法等获取知识的一致性表达。通过研究知识相似性度量、知识源可靠性和知识成熟度分析进行知识评价,并且标注其对于各种决策问题的知识关联度,建立知识关系智能化标注。

(3)知识决策模型与算法的设计。通过基于学习的知识关系特征提取和基于领域知识的特征提取等方法,对模型中知识结构进行演化、校正,以适应知识关系的动态变化。对铝电解生产分级决策系统来说,知识推理的结果需要针对不同推理计算对象进行识别和知识匹配。因此,知识推理核心就是构建以推理问题为导向的分层求解器。算法库中还包含知识库的实时更新算法和演化方法。

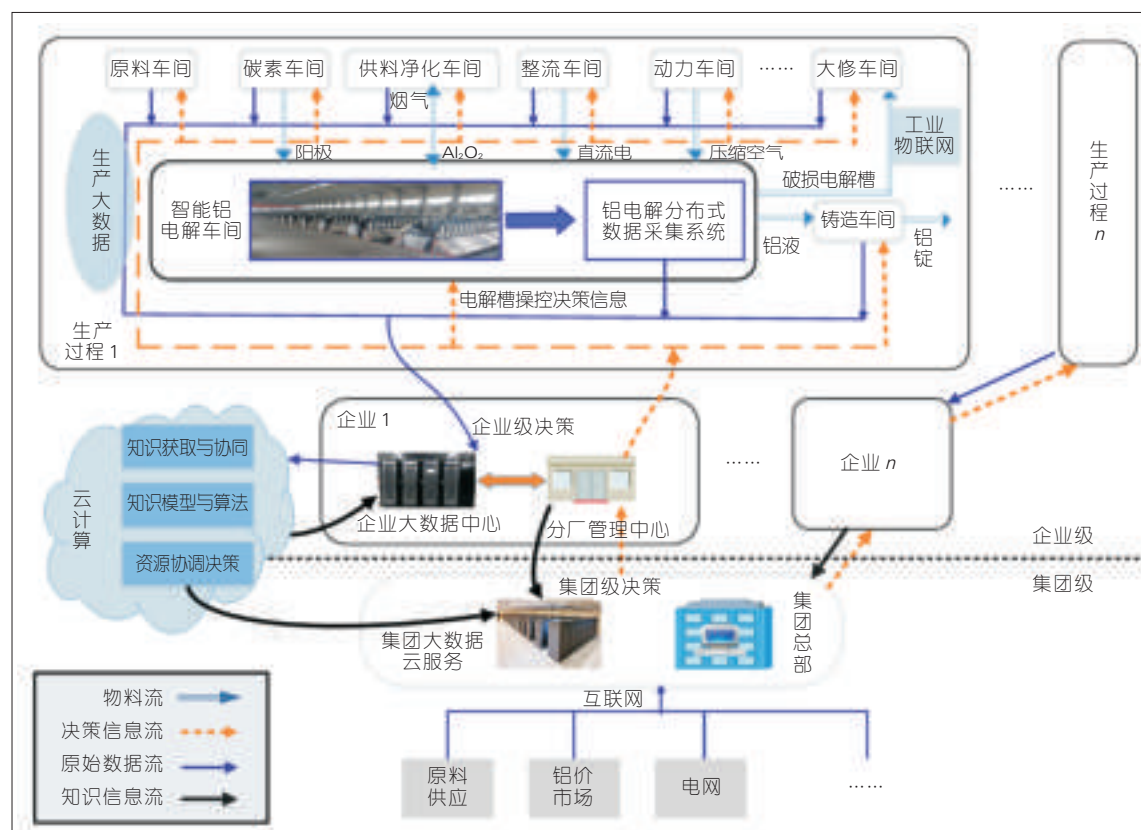


图2
铝电解生产两级
智能决策系统结构

(4) 依托知识推理机制和决策支持环境实现两级决策系统。这需要从集团级和企业级两个层面进行考虑。在集团级,实现基于知识自动化的集团级管理决策、经营决策、计划决策、技术决策和生产决策,确定生产计划;在企业级,需要根据下达的生产计划实现基于知识的全流程智能决策,以生产计划完成情况和生产指标为决策评价函数,优化配置人员与设备,优化调整生产系列总体技术方案,优化能源和原材料供应,实现快捷、高效与绿色生产。

4 结束语

随着智能感知、云计算、大数据、工业互联网等新兴技术的快速发展,工业生产管理数据爆炸式增长,数据量已超出了人工决策和传统决策支持系统处理的能力范围,对现有决策方式在时效性、准确性、前瞻性、共享性等方面提出了新的挑战。知识自动化是具有颠覆性的新技术,知识自

动化决策有望为中国工业、企业实现转型升级和两化深度融合提供新的技术途径,并可能产生深远的技术影响。相关系统的研发对于形成适应中国工业生产实际的智能工厂建设方案具有重要价值。知识自动化决策是多学科交叉的研究课题,涉及工业过程控制、计算机应用、大数据与云计算、人工智能、决策支持系统等多个热点领域知识,对多学科研究领域的拓宽、延伸和交汇将起到重要推动作用。

参考文献

- [1] SILVER D, HUANG A, MADDISON C J, et al. Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search [J]. Nature, 2016, 529(7587): 484-489
- [2] 钱锋. 以流程工业智能化助推“智造强国”. 联合时报[OL]. <http://shsxz.eastday.com/node2/node4810/node4851/node4852/u1ai95566.html>
- [3] AMARAL R R. A New SPC Tool in the Steelshop at ArcelorMittal Gent Designed to increase productivity [D]. Belgium: Ghent University, 2012
- [4] WEN W, CHEN Y H, CHEN I C. A

Knowledge-Based Decision Support System for Measuring Enterprise Performance [J]. Knowledge-Based Systems, 2008(21): 148-163

- [5] MUNOZ E, CAPON-GARCIA E, LAINEZ-AGUIRRE J M, et al. Using Mathematical Knowledge Management to Support Integrated Decision-Making in the Enterprise [J]. Computers and Chemical Engineering, 2014(66): 139-150. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2014.02.026
- [6] ALALWAN J A, THOMAS M A, WEISTROFFER H R. Decision Support Capabilities of Enterprise Content Management Systems: An Empirical Investigation [J]. Decision Support Systems, 2014(68): 39-48. DOI: 10.1016/j.dss.2014.09.002
- [7] CHIOU S W. A Bi-Level Decision Support System for Uncertain Network Design with Equilibrium Flow [J]. Decision Support Systems, 2015(69):50-58. DOI: 10.1016/j.dss.2014.12.004
- [8] SHI F Q, SUN S Q, XU J. Employing Rough Sets and Association Rule Mining in KANSEI Knowledge Extraction [J]. Information Sciences, 2012(196): 118-128. DOI: 10.1016/j.ins.2012.02.006
- [9] BARROS R C, JASKOWIAK P A, CERRI R. et al. A Framework for Bottom-Up Induction of Oblique Decision Trees [J]. Neurocomputing, 2014(135): 3-12. DOI: 10.1016/j.neucom.2013.01.067
- [10] MANTAS C J, ABELLAN J. Credal-C4.5: Decision Tree Based on Imprecise Probabilities to Classify Moisy Data [J].

- Expert Systems with Applications, 2014(41): 4625–4637
- [11] CHAN K Y, JIAN L. Identification of Significant Factors for Air Pollution Levels Using a Neural Network Based Knowledge Discovery System [J]. Neurocomputing, 2013(99): 564–569. DOI: 10.1016/j.neucom.2012.06.003
- [12] GUEERERO J I, LEON C, MONEDERO I, et al. Improving Knowledge-Based Systems with Statistical Techniques, Text Mining, and Neural Networks for Non-Technical Loss Detection [J]. Knowledge-Based Systems, 2014(71): 376–388. DOI: 10.1016/j.knsys.2014.08.014
- [13] GHANBARI A., KAZEMI S M R, MEHMANPAZIR F, et al. A Cooperative Ant Colony Optimization-Genetic Algorithm Approach for Construction of Energy Demand Forecasting Knowledge-Based Expert Systems [J]. Knowledge-Based Systems, 2013(39): 194–206. DOI: 10.1016/j.knsys.2012.10.017
- [14] CHEN C H, KHOO L P, CHONG Y T, et al. Knowledge Discovery Using Genetic Algorithm for Maritime Situational Awareness [J]. Expert Systems with Applications, 2014(41): 2742–2753. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.09.042
- [15] IKRAM A, QAMAR U. Developing an Expert System Based on Association Rules and Predicate Logic for Earthquake Prediction[J]. Knowledge-Based Systems, 2015(75): 87–103. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.09.042
- [16] ZHANG J F, ZHAO X J, ZHANG S L, et al. Interrelation Analysis of Celestial Spectra Data Using Constrained Frequent Pattern Trees [J]. Knowledge-Based Systems, 2013(41): 77–88. DOI: 10.1016/j.knsys.2012.12.013
- [17] PRAT N, WATTIAU I C, AKOKA J. Combining Objects with Rules to Represent Aggregation Knowledge in Data Warehouse and OLAP Systems [J]. Data & Knowledge Engineering, 2011(70): 732–752
- [18] LI J, QIN Q M, XIE C, et al. Integrated Use of Spatial and Semantic Relationships for Extracting Road Networks from Floating Car Data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012(19): 238–247
- [19] IJINOH O, TAEHOON K, SUN P, et al. Efficient Semantic Network Construction with Application to PubMed Search [J]. Knowledge-Based Systems, 2013(39): 185–193. DOI: 10.1016/j.knsys.2012.10.019
- [20] HAN M, CAO Z J. An Improved Case-Based Reasoning Method and Its Application in Endpoint Prediction of Basic Oxygen Furnace [J]. Neurocomputing, 2015(149): 1245–1252. DOI: 10.1016/j.neucom.2014.09.003
- [21] YAN A J, QIAN L M, ZHANG C X. Memory and Forgetting: An Improved Dynamic Maintenance Method for Case-Based Reasoning [J]. Information Sciences 2014(287): 50–60. DOI: 10.1016/j.ins.2014.07.040
- [22] MARLING C, MONTANI S, BICHINDARITZ I, et al. Synergistic Case-Based Reasoning in Medical Domains [J]. Expert Systems with Applications, 2014(41): 249–259. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.05.063
- [23] YAN A J, SHAO H S, GUO Z. Weight Optimization for Case-Based Reasoning Using Membrane Computing [J].

Information Sciences, 2014(287): 109–120. DOI: 10.1016/j.ins.2014.07.043

作者简介



陈晓方, 中南大学信息科学与工程学院副教授; 主要研究方向为复杂过程建模与优化、工业大数据分析; 获得省部级以上科技奖励2项; 发表论文50余篇。



吴仁超, 中南大学信息科学与工程学院博士研究生; 主要研究方向为知识自动化系统和智能调度决策算法。



桂卫华, 中国工程院院士, 中南大学信息科学与工程学院教授; 主要研究方向为复杂工业过程建模、控制与优化; 获得国家科技进步二等奖3项; 发表论文500余篇。

←上接第41页

- Equipment [R]. Silicon Valley: Trend Micro Incorporated, 2013
- [3] STOUFFER K, PILLITTERI V, LIGHTMAN S, et al. Guide to Industrial Control Systems Security: SP800–82 [S]. Gaithersburg: NIST, 2015
- [4] Industrial Security Incidents Database (ISID) [EB/OL]. <http://www.risidata.com/>
- [5] GENGE B, HALLER P, KISS I. Cyber-Security-Aware Network Design of Industrial Control Systems [J]. IEEE Systems Journal, 2016, 1932(8184): 1–12
- [6] 360天眼实验室. 2015年中国高级持续性威胁研究报告-解读版 [R/OL]. [2016-06-26]. <http://zt.360.cn/2015/reportlist.html?list=4>
- [7] Lukas. CONPOT ICS/SCADA HoneyPot [EB/OL]. <http://conpot.org/>
- [8] VASILOMANOLAKIS E, SRINIVASA S. Did You Really Hack a Nuclear Power Plant? An Industrial Control Mobile HoneyPot[C]//2015 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS). USA: IEEE, 2015: 729–730. DOI: 10.1109/CNS.2015.7346907
- [9] MACHII W, KATO I, KOIKE M, et al. Dynamic Zoning Based on Situational Activities for ICS security[C]//2015 10th Asian Control Conference (ASCC). USA: IEEE, 2015: 1–5. DOI: 10.1109/ASCC.2015.7244717
- [10] ICS-CERT. Cybersecurity for Electronic Devices[R]. Washington: DHS, 2013
- [11] CNPI. Configuring and Managing Remote Access for Industrial Control System[R]. Washington: DHS, 2010
- [12] 黄登泽. 基于TCP/IP协议的工业控制网络远程数据通信网关的研究与实现[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012
- [13] 罗耀锋. 检测技术与自动化装置[D]. 杭州: 浙江大学, 2013
- [14] 彭勇, 向憧, 张淼, 等. 工业控制系统场景指纹及异常检测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(1): 14–21
- [15] 高春梅. 基于工业控制网络流量的异常检测[D]. 北京: 北京工业大学, 2014
- [16] LEE J, BAGHERI Behrad, KAO H. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems[J]. Society of Manufacturing Engineers, 2015(3): 18–23
- [17] ICS-ISAC. Situational Awareness Reference Architecture (SARA)[EB/OL]. <http://ics-isac.org/blog/sara/>
- [18] SAUNDERS N, KHANNA B, COLLINS T. Real-Time Situational Awareness for Critical Infrastructure Protection[C]//2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). USA: IEEE, 2015: 151–156
- [19] Gartner. Gartner Identifies the Top 10 Technologies for Information Security in 2016[EB/OL]. <http://www.gartner.com/newsroom/id/3347717>
- [20] Detect Security Breaches Early by Analyzing Behavior [EB/OL]. <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/detect-security-breaches-early-by-analyzing-behavior/>

作者简介



陶耀东, 360企业安全集团沈阳研发中心主任、AI安全组成员; 主要研究方向为信息安全、工控安全; 曾荣获中国发明优秀奖、沈阳市科技进步一等奖、辽宁省科技进步二等奖; 先后主持和参与国家项目10余项; 发表论文20余篇, 已获得发明专利授权6项。



李强, 360企业安全集团CTO办公室研发总监; 主要研究方向为信息安全、嵌入式系统; 曾荣获沈阳市科技进步一等奖、辽宁省科技进步二等奖等; 主持和参与国家、省市级科研项目5项; 获得国家发明专利20余项。



李宁, 中国科学院大学沈阳计算技术研究所在读硕士研究生; 主要研究方向为工业互联网安全、工业大数据; 已发表论文2篇。