

国内外智能制造研究热点与发展趋势

王友发^{1,2}, 周献中¹

(1. 南京大学工程管理学院, 江苏 南京 210093; 2. 江苏大学管理学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 本文以中国期刊全文数据库和美国科学情报研究所 Web of Science 数据库为数据源, 选取 1992—2015 年收录的智能制造研究文献为样本, 利用文献计量学方法, 对国内外智能制造领域的研究现状、主题及热点进行了分析。在此基础上, 结合文献内容进一步对国内该领域的研究进行了述评和分析, 找出与国外存在的差距, 为中国学者今后在该领域的研究提供借鉴。

关键词: 智能制造; 产业创新; 内容分析法; 共词分析法

中图分类号: F406.2 **文献标识码:** A

DOI:10.13580/j.cnki.fstc.2016.04.025

A Review of Research on Domestic and International Intelligent Manufacturing

Wang Youfa^{1,2}, Zhou Xianzhong¹

(1. School of Management and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Taking a large number of literatures published in the journals of CNKI and ISI Web of Science database from 1992 to 2015 as data sources, this paper analyzes the state, topical subjects and hot topics about the intelligent manufacturing by bibliometrics methods. Based on the analysis of these literatures, the gap of manufacturing level between China and foreign countries is addressed. The paper facilitates Chinese scholars' research in intelligent manufacturing.

Key words: Intelligent manufacturing; Industry innovation; Content analysis method; Co-word analysis method

1 引言

近年来,在信息技术与工业领域,都发生了重大变革,如大数据、云计算、3D 打印、工业机器人等,其中智能制造作为信息化与工业化深度融合的产物,更是得到了各国政府的广泛关注和普遍重视,如美国先进制造业国家战略、法国“新工业法国计划”、德国“工业 4.0”^[1]等。与此

同时,中国经济发展进入新常态,制造业面临的资源和环境约束不断强化。在此背景下,“中国制造 2025”规划出台,坚持创新驱动、智能转型,加快从制造大国转向制造强国。

针对智能制造这一研究热点,国内外众多学者从不同角度展开了探讨,如美国国家科学基金(NSF)智能制造项目^[2]、欧盟第七框架计划中的

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于‘人即服务’理念的决策支持系统设计理论和方法研究”(71171107),江苏省高校研究生科研创新计划“面向智能制造的机器人社会体系机构研究”(CX1X13_055)。

收稿日期: 2015-07-07

作者简介: 王友发(1981-),男,江苏盐城人,南京大学博士研究生;研究方向:智能信息系统。

制造云项目^[3]、中国工程院智能制造重大咨询项目等。然而,智能制造研究涉及智能技术、制造技术、信息技术等多个学科,造成目前该领域的研究呈现出散乱的“碎片化”态势:在研究领域上,智能制造横跨了理工学科到人文社科之间的诸多细分研究领域;在研究载体上,既有综述性探讨^[4-5],也有量化研究^[6];在研究主题上,智能制造系统、智能制造服务、智能管理、智能终端产品等散乱分布,几乎难以整合到一个框架之中。目前,智能制造庞杂的研究现状既显示了该研究领域蓬勃的生命力,同时也表明该领域到了亟需进行梳理与总结的阶段。鉴于此,本研究采用文献计量学方法,对国内外智能制造文献进行系统梳理,廓清该领域的发展现状和趋势,识别出该领域的热点和前沿,并揭示出与国外研究存在的差距,为今后中国智能制造的进一步研究提供方向性指导。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

本研究以中国期刊全文数据库(CNKI)为国内文献数据源,CNKI在中文文献方面的影响力、内容覆盖度上具有明显的优势。国外文献以美国科学情报所(ISI)的Web of Science数据库为数据源,该数据库是国际科学界公认的权威数据库之一,以文献内容权威、数据完整规范、便于计算机整理分析而出名。

为尽可能全面了解智能制造领域的研究状况,本文采用主题检索方式,国内文献以“智能制造”为主题词,在CNKI核心期刊中进行检索,共得到574条记录。对检索结果进行筛选,剔除与主题相关度不大的文献、会议通知、征文信息等,最后得到176篇文献,作为国内文献样本数据。数据的时间范围是1992年(该领域在CNKI中收录的最早时间)至2015年4月。国外文献以“intelligent manufacturing”为主题词,在Web of Science核心合集中进行检索,为方便进行国内外的比较,国外文献时间跨度也设置为1992—2015年,以“article”为文献精简类型,并剔除相关度不大的文献,最后选取1565篇文献作为国外样本数据。

2.2 研究方法

本文运用文献计量分析、内容分析和关键词

共词分析等文献计量学方法^[7]。文献计量分析是采用数理统计的方法来定量分析、评价和预测学科的发展现状与趋势;内容分析法是通过系统的分析文献内容,揭示出蕴含在文献中本质性的事实;关键词共词分析法是通过高频词聚类发现当前学科领域的研究热点,通过低频词聚类来预测学科未来的可能研究方向。

3 国内外智能制造研究现状分析

为从整体上了解智能制造领域的发展概况,本文从文献数量分布、文献国家(地区)分布、研究力量分布三个方面,对国内外智能制造领域的研究情况分析如下。

3.1 国外智能制造研究现状

(1) 数量分布方面,图1显示了Web of Science核心合集数据库中检索到的智能制造各年份文献数量。总体上看,国外该研究领域论文年发表数量保持着稳定增长的趋势,特别是2008年金融危机后论文数量更是明显增长。这说明智能制造研究领域具有很大的活力,并且随着全球制造业的转型与发展,研究队伍也在不断壮大。可以预见,随着世界经济的发展,发达国家“再工业化战略”的实施和深入推进,今后国外智能制造研究领域的文献数量仍将保持快速增长。

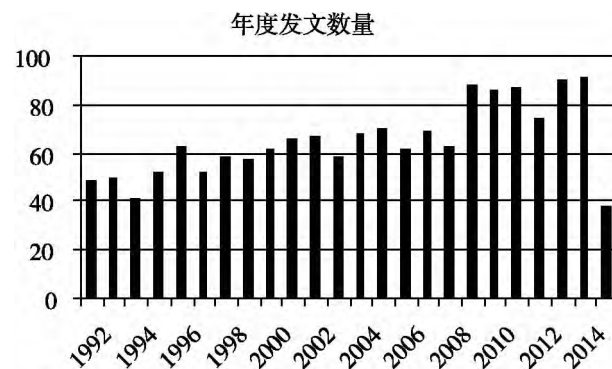


图1 Web of Science中收录的智能制造文献数量

(2) 国家和地区分布方面,在智能制造研究领域发文量居首位的国家是美国,发表论文412篇,占文献总量的26.3%,具有非常明显的学术优势。从地区分布来看,由于美国整体科研实力雄厚,加上该领域排名第七的加拿大,因此北美地区成为当前智能制造研究水平最高的区域;其次是英国、德国等欧洲地区,共发表论文346篇,占比为22.1%;再次是亚洲地区,以日、韩为代

表,在该领域的研究水平也较高,占比为17%。与国外发达国家相比,中国在该领域的研究仍处于较弱水平,文献的数量尤其是质量上存在较大的差距。

(3) 研究力量分布方面,分析结果显示,有18家研究机构的发文量在15篇以上,其中发文量最多的是美国卡内基梅隆大学,占全部18家机构发文总量的12.7%,特别是其计算机与机器人的研究,在智能制造领域有着非常重要的影响力。其次是英国曼彻斯特大学、新加坡南洋理工大学和美国普渡大学,各发文量占研究机构文献总量的比例分别为9%、8.5%、8%。以上数据表明,这4家研究机构在智能制造领域有着突出的学术优势和地位。

3.2 国内智能制造研究现状

(1) 数量分布方面,与国外相比,国内智能制造研究起步较晚,最早开始于1992年,由华中科技大学的杨叔子院士牵头开展研究,后随着中国制造业的发展,文献数量总体上呈快速增长趋势。近年来,在“中国制造”转型升级背景下,智能制造受到社会各界越来越多的重视,并成为当前制造领域的热点课题,该领域的文献数量进入迅猛增长阶段,但总量依然偏少,2014年也还不到30篇。这表明,中国智能制造研究尚处于快速发展初期,与国外相比还存在较大差距。

(2) 文献期刊方面,经整理发现,国内智能制造领域的176篇文献共分布在78种期刊中。早期的文献主要分布在《中国机械工程》、《计算机集成制造系统》等理工科期刊上,后随着社会经济和科技的发展,越来越多的学者从不同视角对智能制造展开研究,近期在《经济管理》、《中国科技论坛》等人文社科期刊上也不断有该领域的论文发表。以上结果一方面说明智能制造已得到来自不同领域学者的广泛关注,但另一方面也反映出智能制造的研究力量不够集中,文献成果分布较为零散。

(3) 研究机构方面,经统计发现,176篇文献共来自40家研究机构,其中发文数量大于5篇的有15家(如华中科技大学、浙江大学、西安交通大学、清华大学、南京航空航天大学等),共发表文献96篇,占总文献量的54.5%。由此可见,这些研究机构可看作智能制造研究的核心单位。进

一步分析,在这15家机构中有12家为高校,可见当前高校是国内智能制造研究的主力军,且各高校的机械、计算机、经济管理学院等为该领域的主阵地。

4 国内外智能制造研究热点分析

本文利用Bibexcel和CiteSpaceII软件,以文献中的关键词为分析对象,计算一组关键词在文献记录中共现的频次和中心度。如果关键词共现的频次越高、中心度越大,则说明其研究主题越接近,其所代表的问题往往也是该领域的前沿热点^[7]。

4.1 国外智能制造研究热点分析

国外部分,首先利用Bibexcel软件,以WoS数据库中下载的1565篇文献记录为分析对象,生成共现矩阵。然后将生成的共现矩阵导入CiteSpaceII软件进行关键词共现分析,生成频次大于30的高频次关键词表,结果见表1。

表1 国外智能制造研究高频次关键词

序号	关键词	频次	中心度
1	Intelligent Manufacturing	120	0.21
2	Computer Numerically Controlled	90	0.24
3	Artificial Intelligence	87	0.20
4	Wireless Sensor Networks	85	0.18
5	Multi-agent Systems	80	0.20
6	Model	50	0.15
7	Remote Monitoring	46	0.09
8	RFID	42	0.07
9	Service	40	0.12
10	Simulation	39	0.11
11	Internet of Things	37	0.16
12	Virtual Enterprise	32	0.18
13	Scheduling	32	0.07
14	Holonic systems	31	0.03
15	Performance	31	0.16

表1中的关键词频次和中心度较高的有: Intelligent Manufacturing (智能制造)、Computer Numerically Controlled (数控机床)、Artificial Intelligence (人工智能)、Wireless Sensor Networks (无

线传感器网络)、Multi-agent Systems (多主体系统)、Model (模型)、Internet of Things (物联网)、Simulation (仿真)、Service (服务)、Performance (绩效) 等关键词。下面结合表 1 内容,对国外节点文献做进一步分析,概括出国外智能制造研究热点如下:

(1) 智能设计方面。Gillenwater 等主要从信息科学的视角,研究了将计算机辅助制造/设计 (CAM/CAD)、网络化协同设计、模型知识库等各种智能化的设计手段和方法,应用到企业的产品研发设计中,以支持设计过程的智能化提升和优化运行^[8]。

(2) 智能生产方面。Prickett 等主要从制造科学的视角,研究了将分布式数控系统、柔性制造系统、无线传感器网络等智能装备、智能技术应用到生产过程中,支持企业生产过程的智能化^[5]。Ruiz 等将多主体系统 (Multi-agent Systems) 引入到生产过程的仿真模拟中,以适应智能制造生产环境的新要求,最后通过实例验证了该仿真方法的优势^[9]。

(3) 智能管理方面。Choy 和 Su 从管理科学的视角,研究了智能供应链管理、外部环境的智能感知、生产设备的性能预测及智能维护、智能企业管理 (人力资源、财务、采购及知识管理等),最终目的是达到企业管理的全方位智能化^[10-11]。

(4) 智能制造服务方面。Tso 和 Hu 从服务科学的视角,研究了智能制造服务,主要包括产品服务和生产性服务。其中产品服务主要针对产品的销售以及售后的安装、维护、回收、客户关系的服务;生产性服务主要包含与生产相关的技术服务、信息服务、金融保险服务及物流服务^[12-13]。

(5) 其他相关方面。Cagnin 等对不同文化背景下的国家或地区智能制造组织管理模式进行了研究,重点阐述了人在系统中的重要性,强调智能制造需要“以人为本”^[14]。

综上所述,目前国外智能制造研究已经较为成熟。研究内容上涵盖了智能制造研究领域的各方面,呈现出多视角、动态化的趋势,多学科交叉融合;研究方法上已从早期的概念阐述、理论论述等定性研究方法,逐步转向计算仿真、数据调查、案例研究等实验方法和定量分析方法;研

究背景上已开始注重不同人文社会环境对智能制造的影响,顺应了智能制造跨学科、跨文化的发展趋势,增强了研究的现实针对性。

4.2 国内智能制造研究热点分析

对国内文献的关键词进行整理,将一些相近的关键词进行合并,如“智能制造”与“智能化制造”合并为“智能制造”,同时剔除一些与主题不相关的高频词如“路径”、“趋势”等,最后利用 CiteSpace 软件,生成频次大于 5 的高频关键词表,见表 2。

表 2 国内智能制造研究高频次关键词

序号	关键词	频次	中心度
1	智能制造	57	0.53
2	智能制造系统	41	0.14
3	智能制造装备	37	0.20
4	智能制造技术	35	0.18
5	人工智能	33	0.13
6	数控系统	28	0.42
7	柔性自动化	20	0.35
8	先进制造	18	0.23
9	数字化制造	17	0.34
10	多 Agent 系统	16	0.23
11	计算机集成制造	13	0.21
12	自适应控制	10	0.12
13	产业结构	9	0.03
14	制造业转型	9	0.23
15	网络化	7	0.02
16	云计算	5	0.00
17	第三次工业革命	5	0.00
18	工业 4.0	5	0.00
19	敏捷制造	5	0.00
20	智慧制造	5	0.00

表 2 中,除“智能制造”频次和中心度均较高外,还有“智能制造系统”、“智能制造装备”、“智能制造技术”、“人工智能”、“数控系统”、“数字化制造”、“制造业转型”等。下面结合表 2 对节点文献做进一步分析,概括出中国智能制造研究热点如下。

(1) 智能制造理论研究。该部分的研究热点,主要是讨论智能制造的概念、内涵、模式、发展路径及影响因素等方面。由于制造技术、信息技术、网络技术等不断发展,关于智能制造的概念和内涵,也处在不断变化、充实和完善之中。杨叔子和丁洪从智能制造的研究背景和发展现状出发,指出智能制造研究领域主要包括智能制造技术(IMT)与智能制造系统(IMS),同时强调了智能制造从属于21世纪先进制造范畴,双I(Integration & Intelligence)是其重要特征^[4]。朱剑英从科学、技术和产业三者关系的角度对智能制造进行了研究,并指出在实现智能制造时要重视中小企业和传统产业的数字化智能化,另外相比于机器设备的智能化而言企业管理的智能化更为重要^[15]。熊有伦从产业交叉融合的角度对智能制造进行了阐述,指出智能制造是工业化和信息化深度融合的产物,并概括了智能制造的范围:智能制造技术、智能制造装备、智能制造系统和智能制造服务及衍生出的各类智能产品^[16]。虽然学界对智能制造理解的侧重点不同,但总体上可概括为两个层面,一是制造设备、产品的智能化,二是制造过程、管理的智能化,前者关注制造对象,后者关注制造主体,后者的研究正受到越来越多学者的重视。

针对智能制造的模式、发展路径以及影响因素,国内学者大都是在借鉴国外先进经验的基础上展开相应研究。例如,张爽生以全球信息化为背景,分析了企业生产制造所面临的新问题,提出需借鉴发达国家经验,对中国企业生产模式进行改造^[17]。易开刚和孙漪主要从要素环境、制度环境、产业环境等方面,探讨了民营制造企业智能化转型影响因素,并针对民营企业“低端锁定”问题,提出了相应突变路径^[18]。

(2) 智能制造与产业的相关研究。该部分主要研究智能制造与制造业转型升级的相互关系,以定性为主。例如,丁纯和李君扬从德国“工业4.0”的动因、内容、前景等方面入手,介绍了德国制造业智能化的特点和发展趋势,并给出了中国应对全球制造业变革的对策建议^[19];杜晓君和张序晶研究了国外发达国家制造业升级路径,总结了国外经验对中国制造业转型升级的启示和借鉴意义^[20];陈雪琴针对高端制造向发达国家回流,

低端制造向东南亚等国转移这一新形势,指出中国制造业亟需从要素驱动转型升级为效率驱动、创新驱动,并强调需积极开展智能制造试点示范,提升制造业的智能化,推动产业升级^[21]。以上结果说明,智能制造已成为发达国家产业转型升级的重点发展领域,中国也必须给予足够的重视,积极开展相关研究和实践。

(3) 智能制造与企业的相关研究。该部分主要探讨智能制造环境下的企业集成、企业智能化升级、企业管理智能化、企业运营绩效等问题。例如,胡春华等人在分析制造业发展趋势和企业面临问题的基础上,提出了智能制造环境下企业集成的总体目标和原则,以及企业集成的信息模型和实现技术^[22]。易开刚和孙漪等论证了智能制造可有效打破民营企业“低端锁定”路径依赖,并从外部政策支持及企业内部变革两方面,提出了民营企业实施智能制造策略的路径^[18]。蔡为民以轮胎制造企业为例,研究了智能制造与企业运营绩效的关系,并从生产效率、节能减排、服务质量等方面进行了统计,分析表明智能制造可助力制造企业提质增效^[6]。

(4) 智能制造其他方面的研究。该部分主要探讨了智能制造与管理创新、企业社会责任等其他方面的话题,研究内容较宽泛。例如,陈佳贵以国外管理学百年发展历程为背景,研究了中国管理学创新发展问题,并在文章中指出“大数据、智能制造、移动互联网为代表的新技术正在激发企业组织结构、制造模式等一系列管理范式的变革”^[23]。云制造是近年来由李伯虎院士等借用云计算的思想,提出的一种基于知识、面向服务的网络化智能制造新模式^[24]。更进一步,姚锡凡等在云制造、制造物联、企业2.0等基础上,提出了智慧制造,并探讨了从云制造到智慧制造的实现路径^[25]。

5 研究趋势与展望

(1) 理论研究方面。目前国内智能制造理论研究主要是对制造业智能化现象的笼统描述、转型路径的浅层分析和简单总结,未见理论上的深层次探讨,研究深度尚显不足。主要表现为:对智能制造内涵和外延的界定比较模糊、不够清晰;对制造业智能化转型升级的影响因素没有完整的分析;对智能制造发展路径和模式的

探讨更多集中在现象描述层面,缺乏微观机制和内部动力等视角的深入分析;对智能化转型中企业的组织架构、管理方式变革等方面只有少部分论述,未见系统的探讨。因此,在今后的工作中,不仅需要对智能制造的内涵、外延等进行详细阐述和研究,还要注意结合创新理论、运营管理理论、组织理论等对智能制造发展的路径、模式、规律等进行深入、系统的研究,为后续工作奠定扎实的理论基础。

(2) 实证研究方面。当前国内智能制造的研究大多数是对国外经验的借鉴性研究和一般性的归纳总结研究,且大多集中于理论探讨,缺乏实证数据的支持。另外,对相关现象的分析目前还基本停留在问题描述和对策建议层次上,但由于缺少实证数据、实践经验的支持,使得所提的对策建议较为宏观,现实针对性不强。因此,在今后的研究中,国内学者应根据各类制造业的产业特性,通过企业调研、实地访谈、问卷调查等方式深入了解智能制造的发展现状,并运用数理统计学和经济计量学方法对智能制造的模式、路径、影响因素等进行实证研究,为进一步剖析和解决智能制造领域相关问题提供更加科学的依据。因此,智能制造实证方面的研究是另一个值得关注

的课题。

(3) 交叉研究方面。智能制造研究领域涉及经济学、管理学、制造科学、信息科学等多个学科。制造业智能化是一个复杂、系统的转型过程,同时也是多学科相互交叉、深度融合的过程,但目前国内学者对智能制造交叉领域的相关问题,如智能化管理、智能化服务、智能化过程中人的因素等研究较少或仍是空白。因此,国内学者在后续研究中应注重多学科的交叉融合。例如,根据制造业智能化的特点,引入智能供应链的思想,研究制造业各环节的智能衔接和管理优化;智能制造强调“以人为本”的中心思想,因此可从员工的招聘、培训、职业发展等问题入手,探讨人力资源管理如何支持和服务于制造企业的智能化转型;另外,还可借鉴行为科学和市场营销理论,从微观层面研究消费者的心理倾向和选择偏好问题。值得一提的是,目前智能制造领域的消费者行为研究大部分基于西方文化语境,缺乏“中国情境”以及跨文化情境下的比较研究。这一点需引起中国学者的注意,对中国语境下的消费者行为展开研究,形成具有本土消费文化特色的研究结论或比较研究,从而为中国企业智能产品的创新研发提供指导。

参考文献:

- [1]黄顺魁. 制造业转型升级:德国“工业4.0”的启示[J]. 学习与实践 2015(01):44-51.
- [2]GUO Q,ZHANG M. An agent-oriented approach to resolve scheduling optimization in intelligent manufacturing[J]. Robotics and computer-integrated manufacturing 2010(26):39-45.
- [3]Manu cloud[EB/OL]. [2014-03-01]. <http://www.manucloud-project.eu/>.
- [4]杨叔子,丁洪. 智能制造技术与智能制造系统的发展与研究[J]. 中国机械工程 1992(02):18-21.
- [5]FRANKOWIAK M,GROSVENOR R,PRICKETT P. A review of the evolution of microcontroller-based machine and process monitoring[J]. International journal of machine tools and manufacture 2005 45(4):573-582.
- [6]蔡为民. 智能制造助力轮胎工业提质增效[J]. 橡胶科技 2014(05):58-59.
- [7]廖胜姣,肖仙桃. 基于文献计量的共词分析研究进展[J]. 情报科学 2008 26(6):855-859.
- [8]GILLENWATER E L,CONLON S,HWANG C. Distributed manufacturing support systems: the integration of distributed group support systems with manufacturing support systems[J]. Omega-international journal of management science 1995 23(6):653-665.
- [9]RUIZ N,GIRET A,BOTTI V et al. An intelligent simulation environment for manufacturing systems[J]. Computers & industrial engineering 2014 76:148-168.
- [10]CHOY K L,LEE W B,LAU H et al. Design of an intelligent supplier relationship management system for new product development[J]. International journal of computer integrated manufacturing 2004 17(8):692-715.
- [11]SU Y C,CHENG F T,HUNG M H et al. Intelligent prognostics system design and implementation[J]. IEEE transactions on semiconductor manufacturing 2006 19(2):195-207.
- [12]TSO S K,LAU H,HO J K L. Coordination and monitoring in an intelligent global manufacturing service system[J]. Computers in Industry 2000 43(1):83-95.
- [13]HU Y,ZHOU X,LI C. Internet-based intelligent service-oriented system architecture for collaborative product development[J]. In-

- ternational journal of computer integrated manufacturing 2010 23(2):113-125.
- [14] CAGNIN C, KÖNNÖLÄT. Global foresight: lessons from a scenario and roadmapping exercise on manufacturing systems [J]. Futures 2014 59: 27-38.
- [15] 朱剑英. 智能制造的意义、技术与实现 [J]. 机械制造与自动化 2013(03):1-6.
- [16] 熊有伦. 智能制造 [J]. 科技导报 2013 31(10):1.
- [17] 张爽生. 全球信息化与中国企业生产模式 [J]. 科技进步与对策 2000(01):103-104.
- [18] 易开刚, 孙漪. 民营制造企业“低端锁定”突破机理与路径——基于智能制造视角 [J]. 科技进步与对策 2014(06):73-78.
- [19] 丁纯, 李君扬. 德国“工业4.0”: 内容、动因与前景及其启示 [J]. 德国研究 2014(04):49-66.
- [20] 杜晓君, 张序晶. 发达国家制造业高技术化的国际经验 [J]. 中国科技论坛 2003(04):116-119.
- [21] 陈雪琴. 国际制造业转移新趋势下的中国产业价值链升级路径 [J]. 经济研究参考 2014(46):39-43.
- [22] 胡春华, 张智勇, 程涛, 等. 智能制造环境下的企业集成 [J]. 中国科学基金 2001(04):29-32.
- [23] 陈佳贵. 管理学百年与中国管理学创新发展 [J]. 经济管理 2013(03):195-199.
- [24] 李伯虎, 张霖, 王时龙. 云制造——面向服务的网络化制造新模式 [J]. 计算机集成制造系统 2010 16(01):1-7.
- [25] 姚锡凡, 练肇通, 杨屹, 等. 智慧制造——面向未来互联网的人机物协同制造新模式 [J]. 计算机集成制造系统 2014 20(6):1490-1498.

(责任编辑 沈蓉)

2016
中国科技论坛
Zhongguo Keji Luntan