**分布式多智能体系统的应用**

# 引言

分布式多智能体系统（MAS）是一项变革性技术，广泛应用于各个领域，以提高复杂环境中的效率、决策能力和适应性。通过使多个自主智能体能够协作和通信，MAS已应用于机器人、电信、医疗保健、金融、交通运输和环境监测等领域。这些系统的多功能性和可扩展性使其在应对复杂挑战、提高运营绩效和推动智慧城市创新方面尤为突出。

在机器人领域，MAS促进了重大进展，特别是在自动驾驶汽车和工业自动化方面。自动驾驶汽车利用MAS与其他车辆和基础设施进行实时通信，从而提高安全性和效率。在制造业中，协调的机械臂通过适应装配线上的意外问题，提高了生产率和可靠性。此外，MAS在搜救行动中也发挥了重要作用，可以部署无人机和地面机器人高效导航危险环境。

MAS的影响还延伸到电信领域，优化了智能电网管理和交通系统。通过自主智能体，MAS增强了数据集成、资源管理和多种技术的互操作性，从而使电信网络更加响应迅速和高效。在智能电网应用中，MAS改善了能源管理和可靠性，允许实时调整并促进电力资源的分散控制。

尽管潜力巨大，分布式多智能体系统的部署并非没有挑战。必须解决围绕可扩展性、鲁棒性和安全性的问题，以确保其在金融和医疗保健等敏感应用中的有效性。在金融领域，MAS增强了欺诈检测和市场分析，但也引发了关于风险管理和问责制的伦理考虑。随着该领域研究和开发的进展，跨学科方法的持续探索和先进技术的集成对于最大化MAS在各行业中的效益至关重要。

# 应用

## 计算机网络

由于新技术的出现以及联网设备的大量增加，计算机网络的复杂性显著提高。智能体技术被广泛应用于克服这困难。由于多智能体系统在网络中的应用范围广泛我们进一步将其分为四个子类别：

### 云计算

云计算能够实现对可配置系统资源(如CPU、GPU和内存)以及计算服务(如服务器、数据库、网络和软件)的普遍访问，这些资源通常通过互联网提供。云计算利用虚拟化作为底层技术为用户提供服务。通过虚拟化，一台物理机被多个客户共享为多个虚拟机(VM)，每个虚拟机都模拟一台独立的机器。与传统的每个用户都拥有自己专用资源的方式相比，云计算具有多项优势:

* 降低货币成本:云用户租用他们所需的各种资源，这些资源由云服务提供商进行管理。这样就无需再自行购买和维护资源，从而降低了货币成本。
* 可靠性:每个资源都有多个重复备份，这使得云计算能够抵御资源故障，从而提高了其可靠性。如果出现例如 CPU 的故障，其相关任务可以被转移到其他类似的资源上。阐述了云计算中涉及的几个关键概念:管理云资源、进行通信以及核算每个用户对资源和/或服务的使用情况[1]、[2]。

在[3]中，提出了一种基于智能体的框架，用于在云端执行“任务包(BoT)，即一系列独立的任务。一组智能体收集有关每个特定任务的可用资源和云提供商的信息。智能体将每个客户与合适的云提供商进行匹配。然后，客户和云提供商进行协商，就提供给客户的资源以及应支付给云提供商的价格达成协议。通过模拟以及从终端用户的角度考虑的成本，研究了任务的分配、释放和执行时间。仿真结果表明，该智能体系统在任务分配方面比亚马逊 EC2 云资源分配方法更成功。

在任务分配过程中，必须考虑每个资源的负载情况，因为负载过重会导致服务接收出现长时间延迟。[4]提出了一种基于智能体的负载均衡框架，以平衡虚拟机的负载。云提供商定义了一项策略来控制虚拟机的负载。所提出的方法得益于三个智能体，即:负载智能体、迁移智能体和通道智能体。负载智能体通过监测虚拟机的负载来确保其负载与所定义的策略相匹配。为了监测虚拟机的负载，负载智能体会请求通道智能体启动迁移智能体。迁移智能体是移动于网络和收集关于资源信息的移动智能体。这些信息会报告给通道智能体，该智能体负责控制传输策略和选择策略。然后，通道智能体将收到的信息转发给负载智能体。基于收到的信息，负载智能体通过将新任务分配给负载较低的虚拟机来平衡虚拟机之间的负载。

多智能体系统被应用于云环境中的资源监控[3]、安全[5]资源发现[6]以及自动服务管理[7]等方面。有关多智能体系统在云环境中的应用的全面综述可参见[8]。

### 社交网络

随着互联网用户的不断增加，社交网络的普及程度呈指数级增长社交网络由参与者(如用户、群组和服务)组成[9]。社交网络的复杂性源于其动态性，即大量参与者加入或退出网络，或与其他参与者建立新的联系，以及其广泛的用途和服务。多智能体系统可能是解决社交网络复杂性问题的潜在方案。

[10]**错误!未找到引用源。**提出了一种基于智能体的方法来预测社交网络(如推特)中的用户行为，例如点赞、发布内容和关注等。作者提议使用多个智能体，即参与者，它们分布在社交网络中，以收集用户行为的数据集。然后，这些智能体会对每个特定用户的数据进行主题和情感分类，这些分类结果随后用于构建用户档案。最后，将用户档案输入到预测系统中，该系统能够预测用户的未来行为，包括点赞、主题、回复、发布内容和分享等。

社交网络不一定非得基于网络形式。只要人类出于特定原因聚集在一起进行互动并分享信息，任何这样的场所都可以被视为一个社交网络。[11]将学校视为一个社交网络，并应用多智能体系统来帮助学校管理者了解向不同学校项目(如体育、学术和文化活动)分配资金与学校表现之间的关系。学生、教师和学校部门被视作智能体，它们共同构成了这个社交网络。例如，就是这所学校。每个学生与其他学生或教师之间的互动、过去几年的资金分配政策以及学生在当前和过去几年的表现都被组织成一个层级结构。然后，这个结构会被输入到一个学习功能中，该功能会评估资金分配政策与学生学业成绩之间的关系。

### 安全

自 2002 年以来，关于多智能体系统在网络中的安全应用的研究已展开[12]。多智能体系统是解决网络安全问题的有效方案，因为它们能够主动了解并从而检测出新的安全威胁。

在文献[13]中提出了一种基于自主智能体的入侵检测系统(IDS)。所提出的该入侵检测系统由五种智能体组成，分别是集合智能体、检测智能体、决策智能体、响应智能体和协作智能体。集合智能体从网络中收集简单网络管理协议SNMP)和路由表的内容，并将这些数据发送给检测智能体后者使用误用和异常检测引擎来检测异常的数据包或通信。检测引擎的结果被输入到决策智能体中，该智能体会判断网络中是否发生了恶意活动，如果存在，则决定采取何种适当措施来减轻其影响。然后，所决定的行动会传递给协作智能体，该智能体是一种移动智能体，它将决策传达给响应智能体。响应智能体在网络中执行相应的操作。

基于智能体的入侵检测系统是文献中多智能体系统在网络安全领域的主要应用。然而，多智能体系统也用于其他安全应用。[14]提出了一种基于智能体的安全方法，以保护用户免受劫持攻击。在该攻击中，攻击者在目标用户网络浏览器的闲置标签页上打开随机网站。两个智能体监控打开的标签页，并收集五元组元素，即文本、图像、URL、标题和网站图标，即网页标题图标然后，智能体将运行在打开标签页上的操作的指纹与现有攻击签名进行比较，以检测劫持攻击。使用 JADE模拟器进行了模拟(见第七节)。模拟结果表明，使用智能体，误报率和漏报率低于非智能体方法，攻击检测的准确率达到了 91%。

未来，MAS 有可能被用作解决诸如信任和密钥管理等复杂安全任务的解决方案。此外， MAS 可用于克服物联网(IoT)的安全挑战。[15]中提出了一项关于基于智能体的入侵检测系统的综合研究。

### 路由

路由指的是根据特定指标(例如源节点与目的地之间的跳数)为数据包从源节点向目的地寻找路径的过程。自1998年以来，使用智能体进行路由是多智能体系统研究中的首批应用之一[16]。此后，随着路由协议面临的新挑战不断出现，多智能体系统也不断发展。

[17]提出了一种针对车辆自组织网络(VANET)的去中心化智能体式路由协议，该协议由三组智能体组成。第一组智能体由车辆承载，用于监测车辆参数，例如速度、位置等。第二组智能体由路边基础设施承载，监测车辆之间的通信以及车辆与路边基础设施之间的通信。第三组智能体通过模拟车辆、路边基础设施及其通信来创建一个虚拟环境，形成一个图。智能体通过应用蚁群算法在图中寻找通往目的地的短路径，从而通过向不同车辆发送不同的路径来避免该区域的拥堵。实验结果表明，基于智能体的这种方法的行程时间比其他已研究的路由方法要短。

路由中的一个关键挑战在于所选路径的可靠性，即要确保该路径不会频繁出现故障。[18] 为无线传感器网络提出了一种可靠的路由协议。该方法得益于智能体在转发数据包和汇总传感器数据方面的作用。首先，汇聚节点(即无线传感器网络中的中央控制器)广播一个数据包，以查找节点的可用资源，用于执行特定任务，这些资源用于划分网络。然后，汇聚节点建立移动智能体，以收集和汇总多个区域内的传感器数据。通过跟踪每个移动智能体访问的传感器，汇聚节点根据每个区域中传感器到汇聚节点的距离，为每个传感器生成一个排序的传感器列表，作为通往每个传感器的可靠路径。仿真结果表明，与传统路由协议相比，基于智能体的路由协议的能耗更低，数据包丢失率也更低。

为了进一步提高可靠性，[19] 提出了一种可靠的多播路由协议，该协议由两组智能体组成。第一组是移动智能体，它们在网络中移动以收集节点的能量、带宽、移动性和内存状态。这些信息用于为每个节点计算可靠性因子(RF)。然后，该因子传递给第二组智能体，后者利用具有最高 RF的节点建立多播骨干网。仿真结果证明，基于智能体的方法比不使用智能体的方法具有更高的数据包传输率和可靠性。

## 机器人

关于机器人领域的智能代理的研究已经持续了近二十年，首篇相关文章于 1996 年发表，文中阐述了智能代理在机器人技术中的利弊 [20]。

[21] 认为，在机器人技术领域存在两个主要挑战:(1)机器人之间的协作与协调，以及(2)规划其移动轨迹。随后，作者提出了一种利用硬件和软件代理来克服上述挑战的方法硬件代理指的是构成机器人的物理硬件，而软件代理则是决策、路径规划、任务管理和通信代理。一个硬件代理利用其传感器(例如摄像头)来捕捉环境中的图像。然后，一个通信代理将这些图像发送给图像处理代理。后者对图像进行处理，以确定机器人的位置和环境中的障碍物。然后，这些信息被发送给决策制定代理，该代理会找到一条障碍物最少的路径以到达目的地。实施结果表明，所提出的方法能够检测到障碍物，并找到一条优化的路径(没有任何障碍物)以到达目的地。

机器人可能会被部署在非确定性的动态环境中，这增加了其决策过程的复杂性。为了研究这种复杂性，[22] 提出了一种基于代理的足球机器人。代理(即球员)被分组组成团队。团队中的代理通过与环境的互动来学习有关对手团队和可能行动的知识，然后它们会将所学策略与团队中的其他代理共享。强化学习与概率神经网络(PNN)结合使用，以提高代理所做最终决策的准确性。实施结果表明，与非代理团队相比，代理团队中的代理能够预测出正确的行动，从而提高了球的控制率(这是足球中的一项重要性能指标)

在[23]-[25]中讨论了智能体在机器人技术中的更多应用。

## 复杂系统建模

对复杂动态系统的建模成本高昂，并且会带来大量的处理开销这是因为需要强大的建模平台以及较高的复杂性。而代理所提供的灵活性、自主性和可扩展性使得基于代理的建模(ABM)成为一种低成本且资源消耗少的复杂系统建模解决方案。ABM 采用基于规则的方法来对环境进行建，这与使用方程的其他建模方法不同。ABM 的最重要优势包括[26]:i)能够整合多种建模方法，ii)在建模大规模自治系统时具有灵活性，ii)对预定义知识的灵活性，因为代理可以通过从环境中学习来获取知识，iv)可以并行执行从而加快建模过程，以及v)能够探索由于代理的主动性而产生的涌现行为。

[27]提出了一种代理模型来模拟供应链。供应链中的每个实体都单独进行建模，拥有自己的政策，并能够定义与其他实体的互动方式。所提出的方法包含两组代理，即:规划代理和物理代理。客户和供应商使用规划组中的六种代理来协商并就产品的价格达成协议。规划组中的代理如下:i)需求满足代理负责管理客户需求;ii)物料资源规划代理，与生产商沟通并采购产品;iii)需求预测代理，根据当前和历史需求情况预测客户需求;iv)主计划代理，汇总生产计划;v)生产计划代理，由主计划代理汇总的计划进行分解;vi)调度代理，对多个代理中的任务进行调度。物理组中的三个代理执行物理任务，即接收和存储原材料制造以及向客户交付产品。

[28] 中提出了一种 ABM(代理行为模型)，用于研究城市配送中心(UDC)的使用情况。在智能城市中，该配送中心通过优化和调度用于货物运输的路线，来集中管理产品配送，从而控制城市拥堵污染、配送时间和可靠性。

在该方法中，移动自动化系统由卡车、货物、客户、用户数据中心以及城市车辆组成。停车场中未获许可或超时停放的车辆会导致卡车的停车问题，从而造成货物配送的延误。用户数据中心的代理在设计配送路径时会考虑到这一挑战，以进一步缩短配送时间。与传统管理系统相比，该方法为店铺业主最大限度地降低了配送成本为配送公司最大限度地提高了配送利润。

基于[29]中所提出的观点，现有的电力行业建环境无法有效地对复杂的可扩展电力网络进行建模，例如拥有大量不同能源来源和用户的智能电网。代理模型是一种适用于智能电网的有效分布式建模方法，这使得代理模型成为该领域的一个有趣的研究方向[30]。参考[25]和[30]以获取关于代理模型的更详细讨论。

## 城市与环境建设

近年来，利用代理来管理城市和建筑物的研究受到了研究人员的极大关注。在城市中，货物的无序分配会增加成本、污染和拥堵。[31]提出了一种基于代理的方法来解决这一挑战，该方法使用了六个代理，分别是:RFIDG、零售商、供应商、运输商、网络和城市代理。RFIDG代理使用 RFID标签来管理资源供应客户向零售商或供应商代理发送购买商品的请求。收到请求后，零售商或供应商代理会搜索其数据库以找到所请求的商品。接下来货物会被发送给运输商代理，以便将其送达客户手中。网络代理确定减少城市拥堵的最优路径，以便运输商代理能够将货物送达客户。城市管理员代理会将交易的相关政策和规则(例如商业和货物运输)告知双方，例如供应商和客户。

城市面临的另一个重大挑战是控制和管理不断扩张的都市区的交通系统和交通状况。[32]提出了一种基于代理的方法来解决这一难题。该方法考虑了诸如票价和乘客满意度等参数，用于定义和分析交通模型。他们使用了两组代理:旅客和车辆。这些组中的代理共享关于拥堵和交通状况的信息，其他代理会利用这些信息来决定一条低拥堵的通往目的地的短路径。

MAS 还被用于管理建筑物。在[33]中提出了一种基于代理的建筑物供暖管理方法。代理的主动性和灵活性使它们成为管理由建筑物周围分布的异构供暖设备和传感器组成的供暖系统的有效解决方案。一个需求代理会检查建筑物内的温度，并将数据传递给燃气加热器、缓冲器和热泵代理。后者的代理会使用从需求代理接收到的数据以调节建筑物的温度。作者们在一套公寓中实施了所提出的方案，并将其与集中式方法进行了对比，作为基准测试。实施结果表明，采用代理方法相比集中式方法，每日的电力消耗显著降低。

关于该领域的进一步阅读内容可参见文献[33]和[34]。

## 智能电网

在相关文献中，智能电网中的“代理”被用于应对一系列挑战包括平衡发电量与用电量、在能源消费者与生产者之间就能源价格进行协商、在家庭储能设备中储存能源以及进行能源恢复。

[35] 提出了一个基于代理的服务模式。例如，为智能电网提供能源和恢复功能，以支持分布式能源存储。该系统使用两个代理，即:切换代理和分布式能源存储代理。切换代理平衡能源负载，并检测并隔离故障，即由于某些能源生产者或能源分配系统中的故障而导致的停电。能源存储代理根据电网是否连接到智能电网或是否处于隔离状态，为电网提供能源。所提出的方法通过有效的恢复来降低系统损耗，并实现动态孤岛化，以恢复正在断开连接(孤岛化)的电网部分。

智能电网的参与者要么是能源生产商，要么是能源消费者。

能源生产商旨在通过以更高的价格出售能源来增加利润。为了实现这一目标，[36] 提出了一种储能管理方法。每个能源生产商(代理)都拥有一个储能设备，并旨在通过分析包括客户和其他能源生产商在内的其他代理所生成的价格信号来增加自身利润。每个代理都会将储能使用情况记录在一个独特的存储方案中。该代理利用博弈论方法对存储方案进行分析，以预测未来的使用情况，从而决定是出售还是储存其产生的能源。

参考文献[37]以进一步了解智能电网中多智能体系统的应用情况。

# 未来方向

尽管分布式多智能体系统（MAS）取得了显著进展，但其在各行业中的集成和应用仍面临各种挑战。最突出的挑战之一是这些系统的可扩展性。随着业务的增长和任务复杂性的增加，保持高效性能变得至关重要。随着更多智能体加入系统，潜在交互的指数增长需要有效的资源分配，以防止瓶颈并确保平稳运行[25][10]。此外，可扩展性不仅需要在性能方面进行评估，还需要在不增加资源的情况下保持运营效率[25]。

另一个紧迫的问题是MAS的鲁棒性和弹性。虽然这些系统提供了诸如容错性等优势——即一个智能体的故障不会破坏整个系统的性能——但在动态环境中设计支持自组织和适应性的架构仍然是一个挑战[10-1][26]。确保智能体之间的安全通信也至关重要，特别是在金融系统和军事行动等敏感应用中，需要强大的加密和认证机制来保护信息交换的完整性和机密性[27][10]。

未来分布式MAS的研究方向应侧重于通过跨学科方法解决这些开放性问题。需要不仅促进技术采用，还能管理组织变革中以人为本的框架。正如van Der Aalst等学者所强调的，理解文化和组织障碍对于在抵制此类创新的行业中集成AI驱动的变革至关重要。

此外，将多智能体强化学习（MARL）与结构化人类工作流相结合，提供了另一个值得探索的方向。当前的研究往往忽视了这种集成，留下了一个必须弥合的空白，以实现多智能体系统（MAS）在现实世界应用中的全部潜力[9]。随着城市交通格局的演变，技术创新与公平、环保的城市生活之间的协同作用将变得越来越重要，这将使MAS成为塑造未来城市环境的关键参与者。

参考文献

1. J. Bajo, F. De la Prieta, J. M. Corchado, and S. Rodríguez, A low-level resource allocation in an agent-based cloud computing platform, Appl. Soft Comput., vol. 48, pp. 716728, Nov. 2016.
2. J. Fiosina and M. Fiosins, Density-based clustering in cloud-oriented collaborative multi-agent systems, inProc.Int.Conf.HybridArtif.Intell. Syst., 2013, pp. 639648.
3. J. O. Gutierrez-Garcia and K. M. Sim, Agent-based cloud bag-of-tasks execution, J. Syst. Softw., vol. 104, pp. 1731, Jun. 2015.
4. A. Singh, D. Juneja, and M. Malhotra, Autonomous agent based load balancing algorithm in cloud computing, Proc. Comput. Sci., vol. 45, pp. 832841, Jan. 2015.
5. K.Govinda and E. Sathiyamoorthy, Agent based security for cloud computing using obfuscation, Proc. Eng., vol. 38, pp. 125129, Jan. 2012.
6. R. Nikbazm and M. Ahmadi, Agent-based resource discovery in cloud computing using bloom lters, in Proc. 4th Int. eConf. Comput. Knowl. Eng. (ICCKE), Oct. 2014, pp. 352357.
7. F. Hou and X. Mao, Cross-clouds services autonomic management approach based on self-organizing multi-agent technology, Concurrency Comput., Pract. Exper., vol. 28, no. 11, pp. 32133237, 2016.
8. K.M.Sim, Agent-based cloud computing, IEEETrans.Serv. Comput., vol. 5, no. 4, pp. 564577, Oct. 2012.
9. Y. Jiang and J. C. Jiang, Understanding social networks from a multiagent perspective, IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol. 25, no. 10, pp. 27432759, Oct. 2014.
10. M. Gatti et al., Large-scale multi-agent-based modeling and simulation of microblogging-based online social network, in Proc. Int. Workshop Multi-Agent Syst. Agent-Based Simulation, 2013, pp. 1733.
11. L. Ma and Y. Zhang, Hierarchical social network analysis using multiagent systems: Aschoolsystemcase, inProc.IEEEInt.Conf.Syst.,Man Cybern. (SMC), Oct. 2014, pp. 14121419.
12. V. Gorodetski and I. Kotenko, The multi-agent systems for computer network security assurance: Framework sand case studies, inProc.IEEE Int. Conf. Artif. Intell. Syst. (ICAIS), Sep. 2002, pp. 297302.
13. L.Mechtri, F. D. Tolba, and S. Ghanemi, Masid: Multi-agent system for intrusion detection in MANET, in Proc. 9th Int. Conf. Inf. Technol., New Generat. (ITNG), Apr. 2012, pp. 6570.
14. S. Sarika and V. Paul, AgentTab: An agent based approach to detect tabnabbing attack, Proc. Comput. Sci., vol. 46, pp. 574581, Jan. 2015.
15. S.Shamshirband, N.B.Anuar, M.L.M.Kiah, and A.Patel, Anappraisal and design of a multi-agent system based cooperative wireless intrusion detection computational intelligence technique, Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 26, no. 9, pp. 21052127, 2013.
16. G. Di Caro and M. Dorigo, An adaptive multi-agent routing algorithm inspired by ants behavior, in Proc. 5th Annu. Austral. Conf. Parallel Real-Time Syst. (PART), 1998, pp. 261272.
17. R. Claes, T. Holvoet, and D. Weyns, A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems, IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 12, no. 2, pp. 364373, Feb. 2011.
18. M. Bendjima and M. Feham, Multi-agent system for a reliable routing in WSN, inProc. Sci. Inf. Conf. (SAI), Jul. 2015, pp. 14121419.
19. S. Manvi and M. Kakkasageri, Multicast routing in mobile ad hoc networks by using a multiagent system, Inf. Sci., vol. 178, no. 6, pp. 16111628, 2008.
20. G.Dudek,M.R.Jenkin,E.Milios,andD.Wilkes, Ataxonomyformulti agent robotics, Auto. Robot., vol. 3, no. 4, pp. 375397, 1996.
21. C.G.Cena,P. F. Cardenas, R. S. Pazmino, L. Puglisi, and R. A. Santonja, A cooperative multi-agent robotics system: Design and modelling, Expert Syst. Appl., vol. 40, no. 12, pp. 47374748, 2013.
22. Y. Duan, B. X.Cui, and X.H.Xu, Amulti-agentreinforcement learning approach to robot soccer, Artif. Intell. Rev., vol. 38, no. 3, pp. 193211, 2012.
23. J. Ota, Multi-agent robot systems as distributed autonomous systems, Adv. Eng. Informat., vol. 20, no. 1, pp. 5970, 2006.
24. P. Inigo-Blasco, F. Diaz-del-Rio, M. C. Romero-Ternero, D. Cagigas-Muñiz, and S. Vicente-Diaz, Robotics software frameworks for multi-agent robotic systems development, Robot. Auto. Syst., vol. 60, no. 6, pp. 803 821, 2012.
25. A. Soriano, E. J. Bernabeu, A. Valera, and M. Vallès, Multi-agent systems platform for mobile robots collision avoidance, in Proc. Int. Conf. Practical Appl. Agents Multi-Agent Syst., 2013, pp. 320323.
26. D. Helbing, Agent-based modeling, in Social self-Organization. Berlin, Germany: Springer, 2012, pp. 2570.
27. R.Domínguez, S.Cannella,andJ.M.Framinan, SCOPE:Amulti-agent system tool for supply chain network analysis, in Proc. IEEE Int. Conf. Comput. (EUROCON), Sep. 2015, pp. 15.
28. O. Wangapisit, E. Taniguchi, J. S. Teo, and A. G. Qureshi, Multi-agent systems modelling for evaluating joint delivery systems, Proc.-Social Behavioral Sci., vol. 125, pp. 472483, Mar. 2014.
29. S. D. J. McArthur et al., Multi-agent systems for power engineering applications Part I: Concepts, approaches, and technical challenges, IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 4, pp. 17431752, Nov. 2007.
30. P. Ringler, D. Keles, and W. Fichtner, Agent-based modelling and simulation of smartelectricity grids andmarkets Aliteraturereview, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 57, pp. 205215, 2016.
31. M. Khayyat and A. Awasthi, An intelligent multi-agent based model for collaborative logistics systems, Transp. Res. Procedia, vol. 12, pp. 325338, Jan. 2016.
32. K. Hager, J. Rauh, and W. Rid, Agent-based modeling of traf c behavior in growing metropolitan areas, Transp. Res. Procedia, vol. 10, pp. 306315, Jan. 2015.
33. O. van Pruissen, A. van der Togt, and E. Werkman, Energy ef ciency comparison of a centralized and a multi-agent market based heating system in a eld test, Energy Procedia, vol. 62, pp. 170179, Jan. 2014.
34. J. Cai, D. Kim, R. Jaramillo, J. E. Braun, and J. Hu, A general multi agent control approach for building energy system optimization, Energy Buildings, vol. 127, pp. 337351, Sep. 2016. C. P. Nguyen and A. J. Flueck, Agent based restoration with distributed
35. energy storage support in smart grids, IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 10291038, Jun. 2012.
36. P. Vytelingum, T. D. Voice, S. D. Ramchurn, A. Rogers, and N. R. Jennings, Agent-based micro-storage management for the smart grid, in Proc. 9th Int. Conf. Auto. Agents Multiagent Syst., 2010, pp. 3946.
37. G.H.Merabetetal., Applications of multi-agent systems in smart grids: Asurvey, in Proc. Int. Conf. Multimedia Comput. Syst. (ICMCS), 2014, pp. 10881094.