

物品万维网资源管理框架研究与应用

李养群^{1,2}, 张登银^{1,2}

(1. 南京邮电大学物联网学院, 江苏 南京 210003;
2. 南京邮电大学江苏省宽带无线通信与物联网重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 物品万维网 (WoT, Web of things) 将万物通过 Web 相连在一起, 实现物品 (things) 所提供的数据或服务资源的共享, 以充分实现它们的潜在价值。但这些资源分布于各地并且分属于不同组织, 基于中央基础设施的 WoT 资源管理机制已无法满足当前应用规模不断扩展、需求快速变化、数据种类不断增加的新形势。针对这些新问题与新需求, 提出了一种 WoT 资源管理框架 (WoTRMF, Web of things resource management framework)。首先, 在该框架的基础上对资源的分布式管理、资源高效发布与发现、资源的安全高效共享、资源统一管理平台等机制进行综述。接着, 针对分布式管理需求, 提出了一种基于地理位置的 P2P 技术以实现 WoT 应用的高可用性和高效资源管理; 针对高效发布/发现需求, 提出了基于概率主题的智能化管理 WoT 资源发布方法以实现资源的自动化分类及有序发布与存储; 针对资源安全访问需求, 提出了基于区块链的安全可信 WoT 资源共享机制。然后, 针对资源统一管理需求, 给出了该 WoT 资源管理框架的功能实现模型。最后, 通过 WoTRMF 在智慧城市安全管理中的应用分析了其开放性、灵活性、可扩展性及智能化等特点。

关键词: 物品万维网; 资源管理; 区块链; 概率主题; 管理平台; 智慧城市安全; 数字孪生

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00271

Research and application of Web of things resource management framework

LI Yangqun^{1,2}, ZHANG Dengyin^{1,2}

1. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2. Jiangsu Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Internet of Things,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: Web of things (WoT) connects all things together through the Web and realizes the sharing of resources, such as data or services provided by things, to fully implement their potential value. However, these resources are distributed in various places and belong to different organizations. The WoT resource management based on central infrastructure can no longer meet the new situation of continuous expansion of application scale, rapid changes in demand, and continuous increase of data types. In response to these new problems and new requirements, WoTRMF (Web of things resource management framework) was proposed. Firstly, based on this framework, the WoT resource management mechanism from the following aspects was reviewed, including distributed management of resources, efficient publish and discovery of resources, cost-effective, secure and efficient sharing of resources, and a unified resource management platform. Then, according to the requirement of distributed management, a P2P technology based on geographic location was proposed to realize distributed automatic management of WoT resources, so as to meet the high availability requirements of WoT applications and improve the efficiency of resource management.

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2022-05-11

通信作者: 李养群, yqli@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61972211)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61972211)

Aiming at the requirement of efficient resource publishing/discovery, an intelligent WoT resource publishing mechanism based on probabilistic topics was proposed to realize automatic classification and orderly publishing and storage of resources. Aiming at the security access requirements of resources, a secure and trusted WoT resource sharing mechanism based on blockchain was proposed. According to the requirement of unified resource management, the functional implementation model of WoTRMF was given. Finally, through the application case of WoTRMF framework in smart city security management, its characteristics of openness, flexibility, scalability and intelligence were analyzed.

Key words: Web of things, resource management, blockchain, probabilistic topic, management platform, smart city security, digital twin

0 引言

物联网技术体系复杂。它由多种智能化感知设备、异构传输协议组成并提供了多种智慧化应用^[1]。例如，感知层由各种功能的传感器和执行器组成，它们为应用提供真实世界中的各种环境数据^[2]；它支持多种网络协议实现数据传输；它广泛应用于各种行业，如农业、交通等领域。这种复杂性给物联网应用开发带来重大挑战，具体包括：异构性问题、互操作性问题、缺乏统一与开放的应用环境^[3-4]等。

为了应对这些挑战，物品万维网（WoT, Web of things）^[5]通过万维网技术将不同物品（things），例如 RFID 标签、传感器节点关联的物品集成在统一的 Web 平台。基于万维网技术体系，WoT 可实现对异构装置的远程 Web 操作，为物联网应用提供统一开放平台。基于物联网技术的 WoT 体系架构如图 1 所示^[2]。WoT 通过万维网将异构感知装置整合在开放、标准化平台上构建了开放物联网应用生态。具体包括：

1) 建立统一开放共享生态

WoT 技术改变了封闭与专有的传统物联网应用环境，使其成为可快速共享资源的开放式生态环境。该开放式环境可实现物联网装置提供的服务能力的快速高效共享，从而降低部署、开发成本。WoT 开放共享生态环境包括 WoT 资源所有者、WoT 平台提供者、WoT 业务运营者、WoT 用户及开发者

等角色。WoT 开放生态环境如图 2 所示。

2) 良好的可扩展性与易用性

万维网资源定位机制可用于感知装置的寻址。万维网资源描述机制可用于描述其所提供的服务。万维网的数据传输机制可实现物联网装置的数据传输。这使得 WoT 环境下异构装置与应用可通过标准化的机制实现快速集成，使得 WoT 应用可灵活扩展可适应不同的系统规模。同时，万维网技术具备丰富的开发资源、成熟的开发方法以及规模庞大的开发人员等完整的生态体系。这使得 WoT 技术可有效降低物联网应用开发难度，加快 WoT 应用创新发展。

3) 良好的分布式特性

万维网技术具备良好分布式特性。因此，基于万维网技术的 WoT，在 WoT 资源管理平台的使能下，可实现分布于各地的物联网资源及物联网应用的良好协同，简化分布式环境下 WoT 应用开发。

由于所具有的良好特性，WoT 近年来得到学术界的研究并在产业界得到不断应用。例如，实现数据开放与共享的定制化 WoT 资源管理框架^[6]、利用语义万维网技术从大规模数据中高效发现资源的机制^[7]、利用语义万维网实现 WoT 资源协作发现的机制^[8]、面向智慧农业的支持时延容忍机会网络机制的（disruption tolerant opportunistic networking）WoT 资源管理技术^[9-10]。随着 WoT 的广泛应用，专有的资源管理方法已无法适应大规模分布式环境下海量资源高效管理。

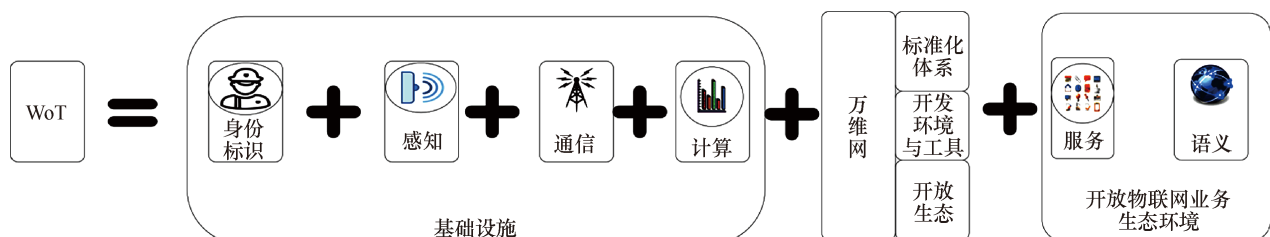


图 1 基于物联网技术的 WoT 体系架构

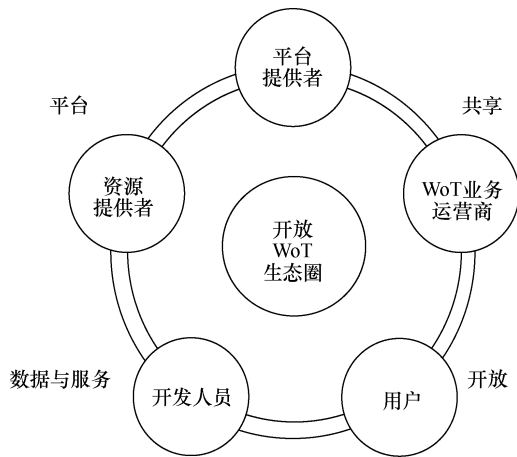


图2 WoT 开放生态环境

1 WoT 核心技术

WoT 核心技术如图 3 所示，它给出了 WoT 所使用的核心技术及可能的应用场景。将物理实体之间通过 Web 进行互联是实现 WoT 的第一步。这就是 WoT 使能层的主要功能。该功能一般通过物联网接入网关或者物品本身嵌入 Web 服务器实现^[11-14]。同时，利用万维网技术描述、定位物品资源以及传输感知数据。WoT 管理层从全局及应用视角对资源进行建模、储存、公开发布、发现、共享。WoT 应用层给出了 WoT 部分应用。例如，利用 WoT 的特性，解决数据流系统的可扩展性及异构感知数据融合问题^[15]。WoT 应用还可以利用 Web API 快速实现物理实体、Web 资源之间的业务聚合^[16-18]。通过自身功能的 Web API，物理实体也可以融合到高层业务流程中，通过提供实时周围环境信息，实现业务流程的动态适应性^[19-22]。从这些核心技术中，可以看出，WoT 通过统一的方法实现感知资源描述、数据的传输、资源的操作，为异构数据融合提供了良

好基础^[23-26]。

从图 3 中看出，WoT 资源管理是 WoT 应用成功的关键。物联网感知装置通过 WoT 使能层虚拟为 WoT 资源后，所有者如何安全、高效、快速地共享其资源？WoT 应用开发人员如何高效准确地发现和利用这些资源？分布式环境下，不同所有者所拥有的多种资源如何可信、安全、高效、灵活、可计费的方式共享？这些需求给 WoT 资源管理提出了挑战。文献[27]探讨了 WoT 的使能层、部分资源管理及 WoT 应用研究现状关键技术，本文在此基础上，重点深入探讨 WoT 资源管理层的新的研究现状、挑战，并尝试建立一种 WoT 资源管理框架以解决这些新挑战。

2 WoT 资源管理框架

WoT 利用万维网技术实现物理、虚拟物品之间的互连^[27]。物联网领域中，物品可分为物理对象世界（物理实体）与信息世界（虚拟实体）。这些物品可以被标识并通过网络实现互连^[29]。同时，它们具有为用户提供各种数据与服务的能力，该能力被称为资源。例如，物联网感知装置所采集的环境数据或控制器所提供的远程操作智能家居的服务，都可以被称为资源。而 WoT 资源是指可通过 Web 进行访问的物联网资源。WoT 技术将资源通过 Web 向用户共享，可以提高资源的重用性，降低 WoT 应用的部署成本。WoT 方便了用户共享所拥有的物品资源，同时，也为物品之间的互操作提供良好基础，从而便于 WoT 应用之间的交互协作。

根据 WoT 定义及体系架构，WoT 资源描述模型如图 4 所示，该模型通过 P2WoT（physical entity to Web of things）方法将物品映射为 WoT

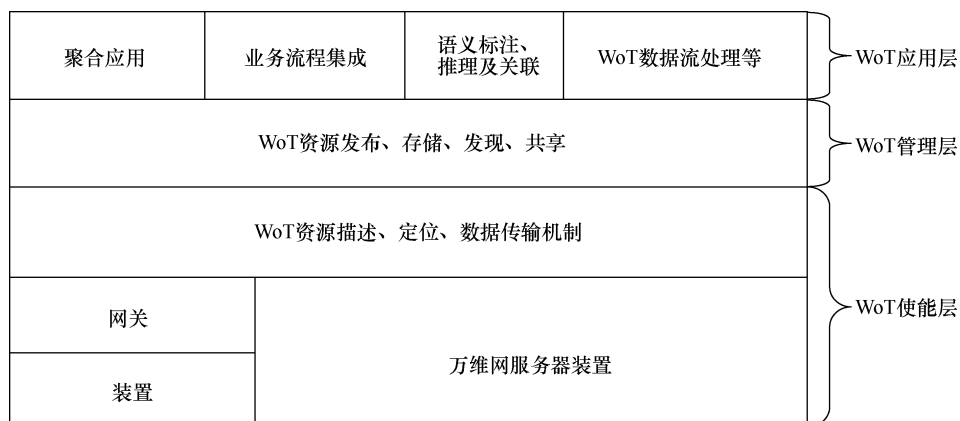


图3 WoT 核心技术

资源。WoT 资源要想被外部用户所共享使用，其应具有可寻性、可操作性、可发现性以及安全性等能力。可寻性是指用户通过某种机制定位该资源，例如，WoT 资源的链接地址 URL 等方法。可操作性是指读取该资源数据或者控制该资源行为的接口。用户通过资源描述信息判断其是否满足自身需求的过程称为资源的可发现性。安全性是指 WoT 资源对访问者提出的具体要求以确保资源得到安全使用。

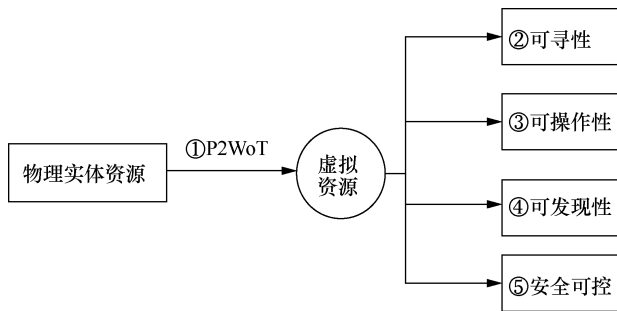


图 4 WoT 资源描述模型

本文用元组描述 WoT 资源模型： $WoTR \rightarrow (F, URI, DES, OPERS, T, G, \#)$ 。其中，WoTR 表示 WoT 资源， F 表示该资源对外提供的功能 API，URI 表示如何在网络中定位资源。DES 利用文本或语义方法描述了资源的详细信息，OPERS 为资源所提供的 RESTful 风格操作，例如 PUT/DELETE/UPDATE/GET 等。 G 为资源的地理位置， T 为资源的有效生存时间模型， $\#$ 表示对资源访问者的安全要求。

W3C 的 WoT 架构抽象描述^[28]给出了如何通过 Web 实现物品之间的互联与共享。该抽象描述

具体包括物品之间交互模型、基于 Web 链接 (Web link) 以及 Web 表单 (form) 超媒体机制、WoT 协议绑定以及 WoT 功能组成。ITU-T 也分别定义了 WoT 系统^[29]以及 WoT 服务框架 (service framework)^[30]。这两个框架描述了 WoT 应包括的能力，具体包括：支持通过 Web 接口实现资源注册以及发现的能力；支持通过服务组合创建 WoT 应用的能力；支持访问控制功能保护资源的能力；支持本地感知装置控制与管理的能力等。这些建议标准从 WoT 的系统视角描述了 WoT 的基本构成、构成元素之间的关系以及内部结构，未能基于高层次的面向 WoT 开发、管理、部署的视角描述资源管理的具体需求，同时，也未能明确 WoT 资源管理的具体实现机制。

从用户层次视角出发，WoT 资源管理主要包括了 WoT 资源的 Web 互联、发布、发现、安全共享等过程。这些过程是实现 WoT 资源共享的不同阶段，紧密相关。因此，需要一种统一的资源管理框架实现资源共享过程的协同管理。从 WoT 应用开发视角出发的一种 WoT 资源管理框架如图 5 所示，该框架描述了 WoT 资源管理框架所涉及的不同实体与功能，定义如下。

定义 1 物理实体 (PE, physical entity)：它表示具备感知物理环境信息能力的一种装置。

定义 2 虚拟资源 (VE, virtual entity)：在本框架中，它是物理实体的抽象描述，以便物理实体之间的互联。WoT 应用可通过虚拟资源操作所对应的物理实体。虚拟资源可以根据需要映射到多个物理实体，即多个物理实体的聚合。

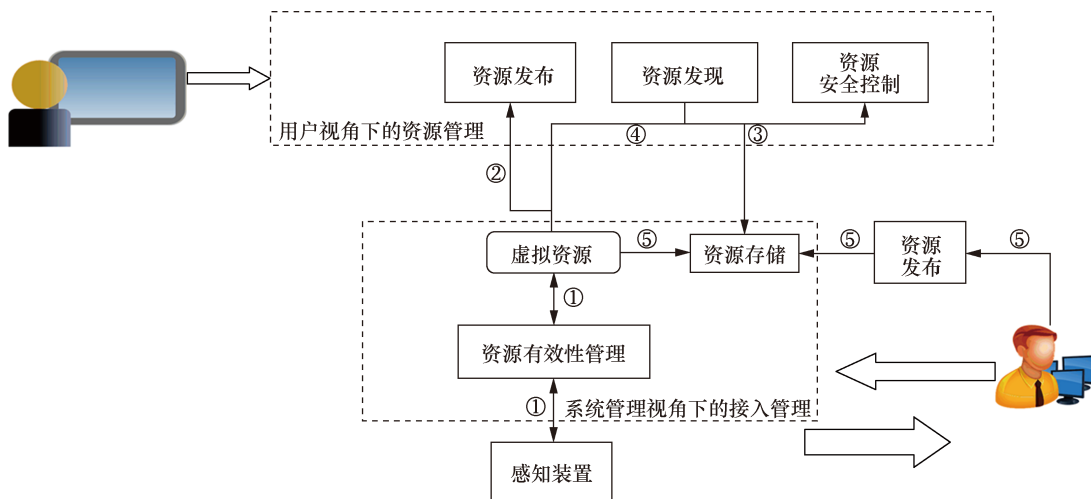


图 5 WoT 资源管理框架

定义 3 资源映射功能 $f: \Phi(\text{PE}) \rightarrow \text{VE}$ 。实现物理实体与虚拟资源之间的 WoT 映射。

该框架包含以下功能。

1) 物理实体映射为虚拟资源功能模块。该模块将物理实体映射到 Web 空间中与之相对应的 Web 虚拟资源, 以使其方便与其他感知计算资源整合。该功能就是 WoT 资源接入管理功能。同时, 该模块利用资源的有效性管理功能模块监控虚拟资源所对应的物理实体的状态是否可用, 能否提供服务。该模块是从系统管理视角实现物联网装置实体 Web 互联的重要一环。

2) 发布管理模块。该模块是指资源所有者根据 WoT 资源模型, 描述资源所具有的功能及操作接口等信息并对外发布, 实现该资源的共享。

3) 资源发现管理模块。该模块表示 WoT 应用结合实际需求, 从 Web 虚拟空间寻找满足其需求的共享 WoT 资源。

4) 安全访问控制模块。该模块实现对 WoT 资源的访问控制, 以保护 WoT 资源的高效安全共享。

5) 存储管理模块。该模块首先存储本地各种 WoT 资源。同时, 也存储其他共享资源的基本信息。

3 WoT 资源管理现状

WoT 资源共享可使得更多用户更为容易并且快捷地获取各种信息。智慧旅游应用中, 用户旅游之前, 需要提前熟悉景区的基本情况, 例如, 景区当前的拥挤度、舒适度、空气质量、温湿度等信息。这些信息通过景区自身部署的或者其他旅客所携带的移动感知装置获得。景区服务商可以共享该资源, 游客亦可共享其自身资源。同时, 这些资源可在任何地点任何时间被任何用户按照相应的规则访问。当游客离开该景区时, 其所共享的资源应自动失效。而景区共享的资源持续有效。

该智慧旅游应用场景说明, 快速高效地发布资源是及时共享资源以及获取资源的基本要求。同时, 资源失效的信息也应快速更新。为了提高效率, 提供者共享其所拥有的资源时, 系统应简化操作, 降低资源管理负担。为了使用共享资源, 用户查询 WoT 平台中是否具有满足其需求的资源。因此, 快速准确发现 WoT 资源是 WoT 资源共享成功的关键。实际部署中, 某区域可能存在多个相同功能的 WoT 资源。当使用某类功能资源

时, 若其失效, 系统应依据地理位置及其功能等信息, 快速准确寻找新的适合的同类资源以确保上层应用的持续可用性。尽管资源所有者期望共享 WoT 资源, 但也不愿意消耗过多时间用于 WoT 资源管理^[31]。这些需求都对 WoT 资源的管理提出了新的挑战。

3.1 WoT 资源分布式管理

真实环境下, 物联网资源分布各地, 并且属于不同所有者。协同管理的缺失使得资源发布、发现及共享效率较低。因此, 需要一种机制实现 WoT 资源的有效组织及高效、高准确率的匹配。Tanganelli 等^[32]基于边缘计算思想, 首先利用网关管理本地 WoT 资源, 然后在网关之间通过 P2P 技术分布式管理 WoT 资源。但是该机制未考虑资源的地理位置信息, 不能实现某地理位置内同类功能资源的快速定位, 也未实现资源的生命周期管理。WoT.City^[33]建立了基于 WoT 的物联网开发框架。该框架基于 P2P 网络实现, 但缺乏对资源的有效管理。EmbJXTAChord^[34]利用 P2P 协议 JXTA 和 Chord 实现 WoT 环境下不同协议的相互集成。本机制着重于如何将物联网装置通过 P2P 协议接入到 WoT 中, 未从资源使用者的视角实现 WoT 资源管理。S4TWoT 系统^[35]提出一种基于云的方法, 通过动态 DNS 的机制以实现部署于网络边缘 IoT 节点上的服务的发现与管理。该方法使得用户在任何时间与地点通过 Web 访问与控制 WoT 资源。该方法主要目标在于拓展了功能受限的 WoT 资源的访问范围。

边缘网络中存在大量多种可用 WoT 资源。这使得在边缘部署低时延、隐私保护和健壮的 WoT 应用程序成为可能。文献[36]针对快速高效发现边缘资源, 提出了一种分布式机制。该机制通过 P2P 方式连接附近边缘设备并对其进行分簇 (cluster) 管理, 以实现基于隐私偏好的边缘网络中异构资源自动发现。该机制通过分簇将附近边缘设备构建为边缘邻域 (edge neighborhood), 并通过自动选择与部署协调器 (coordinator) 实现边缘邻域资源的分布式发现与管理。在资源发现时, 充分考虑了时延、网络动态变化性以及自适应性。

数字孪生技术在物联网领域也正在得到新的应用。数字孪生 (DT, digital twin) 是现实世界物品 (things) 的虚拟化映射。DT 典型架构涉及 3 个组件^[37]: 物理对象、虚拟对象和它们之间的数据接

口。WoT 技术为物联网应用实现数字孪生提供了基础^[38]。在分布式环境下, WoT 需要实现一定规模的实体资源与虚拟资源之间的关联与映射。文献[39]提出了一种数字孪生万维网(digital twin Web)实现方案 TwinBase, 用于管理和分发元级(meta-level)数字孪生的原型平台。但是该平台仅仅将数字孪生描述文档存储在 Git 存储库中, 并通过静态 Web 服务器将它们分发给人类和机器用户。文献[40]介绍了基于 Web 的数字孪生热电厂的方法和技术。文献[41]提出了一个面向信息物理生产系统的数字孪生系统框架。该框架通过数字孪生建模、事件驱动的分布式协作机制和 Web 技术, 为该生产系统的快速系统配置和轻松运行提供指导。smAR²^[42]架构允许用户通过增强现实(AR, augmented reality)技术浏览周围环境并根据 WoT 资源的物品描述无缝地与物品相互交互。该技术通过高层次模型抽象描述物品, 运行时自动转换这些模型以反映与物品的实时交互行为并根据模型自动更新 AR 界面。它为 WoT 实现数字孪生提供了一种借鉴。文献[43]针对 WoT 数字孪生应用场景提出了一种 WoT 动态迁移策略以降低通信以及 CPU 等负载, 实现 WoT 处理能力从云端向边缘计算迁移, 提高响应时间。迁移过程被建模为多目标优化问题, 在综合考虑网络负载、CPU 负载、物品数量等因素的基础上, 提出了一种基于启发式算法的解决方法。该方法对 WoT 资源进行动态部署管理, 以此优化 WoT 应用响应时间, 但未能实现从应用开发人员的视角对 WoT 资源的统一管理。

文献[40-42]此类方法只是将 Web 作为一种交互工具用于一种生产应用场景的物理实体与虚拟实体之间的一种简单映射, 未能深入考虑数字孪生元素之间如何通过 Web 进行互联互通以及在虚拟实体之间建立与分布式环境下物理实体之间对应的关联关系。WoT 实体所产生的数据之间有什么关系? 如何将数据融合? 产生这些数据的 WoT 实体存在何种关联关系? 文献[44]为关联关系的元数据(metadata)自动化产生提供了一种数据驱动框架。该框架通过语义中的概念、属性、实体(entity)及主题(theme)自动描述这些数据之间的关系并实现跨域知识融合。这种方案为 WoT 资源的数字孪生实现提供了一种可行性, 但仅分析了在一定范围内的 WoT 数据的元信息的关联分析, 对于分布式环境下的关联关系分析尚待进一步研究。因此, 未

来在分布式环境下, WoT 在数字孪生中的应用是一个值得研究的方向。

3.2 WoT 资源发现

WoT 资源发布与发现(简称“发现”)是向用户提供服务的基础。海量物品中, 如何快速、准确、有效地发现 WoT 资源仍然需要深入研究。目前, WoT 资源发现机制包括^[45-47]: 基于文本索引的传统资源发现机制; 基于语义的资源发现机制; 基于内容的资源发现机制, 例如, 基于数据状态、实体上下文的资源发现等。

传统万维网资源发现是搜索引擎根据关键字查找并返回包含该关键字的 Web 页面 URL 实现的。该方法主要强调资源的查找, 无法对 WoT 资源进行有序化地分类与存储管理。K-CAR^[48]基于关键词搜索机制向 WoT 开发人员推荐满足其需求的 WoT API。它利用 API 被使用的历史构建加权 API 关联图(weighted APIs correlation graph)。该图中节点代表描述 Web API 功能的关键字, 而每条边及其权重值表示连接边的节点(即 Web API)之间的兼容性信息。作者采用了基于动态规划的方法来寻找最小的 Steiner 树以及相应的一组最优 API。该 API 既能满足用户的功能需求, 又具有最高的兼容性。该方法只需要利用关键词即可快速找到相应的 WoT 资源或 WoT API, 但该方法需要提前搜集 Web API 的使用历史, 这限制了其灵活性。文献[49]提出了一种基于位置感知的 WoT 资源发现机制。该机制构建了一种包括功能、地理位置及资源质量(QoR, quality of resources)的三维索引模式以实现资源匹配。QoR 综合考虑了资源的动态性、成本、可用性、使用率等因素。其所使用的地理位置采用层次结构描述之间的从属关系, 并可从相邻地理位置查找所需要的资源。

海量 WoT 资源中快速而又准确地找到满足用户需求的资源是 WoT 应用能否快速高效开发的重要因素。语义万维网技术被用以描述 WoT 资源并结合语义推理技术进行资源发现。它可以根据资源描述所蕴含的深层含义发现关键字等技术未能直接找出的资源, 更为实际的反映资源的真实功能。文献[50-51]采用 OWL-T 语义技术定义谁在何时、何地可以对该资源执行何种操作的方式丰富物品的描述, 以实现万物之间的协作。eWoT^[52]通过 WoT-Mappings 对物品描述(thing description)进行扩展, 然后使用 SPARQL 语义技术分布式访问 IoT

设备以对 IoT 设备的异构数据即时统一转换为资源描述框架格式 (RDF, resource description framework) 进行集中式存储, 然后利用该 RDF 进行资源发现。文献[53]通过区块链及智能合约技术实现分布式环境下语义 WoT 资源的注册、存储、发现以实现资源的匿名访问及提高可靠性, 但是未实现资源基于上下文的访问控制。针对 WoT 资源的动态变化性, 文献[54]采用分簇、索引及排序等方法实现基于语义标注的 WoT 资源过滤与选择, 同时, 还实现了增量式的 WoT 资源动态发现。通过逻辑推理是深入发现 WoT 资源的有效方法之一。文献[55]将 WoT 资源发现问题形式化为基于语义描述的溯因推理问题 (abductive reasoning problem), 然后利用溯因逻辑编程数学框架实现多项式时间复杂度的溯因算法。该方法通过推理实现 WoT 请求与资源之间的匹配查找, 缺少实际实现。文献[56]利用描述逻辑形式化语义信息, 并用概念覆盖 (concept covering) 方法选择最能满足请求的最小资源集实现 WoT 资源的协同发现。为了减少搜索规模, 提高发现效率, 文献[57]利用物品之间的协作能力、地理位置关系、所有权对象关系构建 WoT 资源的社会网络并进行分簇。该方法的前提条件是需要预判物品之间的多种关系。WoTSPD^[58]利用物品描述的属性、行为、事件 3 个维度的语义距离计算 WoT 资源之间的相似度实现 WoT 资源发现。

基于语义的资源发现机制难以在厂商之间建立统一的本体概念, 因而, 在资源发现过程中, 需要通过复杂计算过程判断不同词汇描述的资源的相似性。目前基于搜索引擎技术的 WoT 资源发现机制无法通过有效组织与管理降低 WoT 资源发现的复杂性。同时, 基于语义的 WoT 资源发现需要发布者对资源进行语义化描述, 而语义描述对普通用户是较为复杂的。这使得基于语义的 WoT 资源的存储与发现管理过程复杂, 缺乏灵活性, 不能适应快速、高效的资源共享要求。

WoT 资源发现的核心技术包括: 分布式网络中寻找数据源; 具备动态索引能力; 基于用户要求 (即质量、类型、位置等条件) 选择资源^[46]。除此以外, 资源管理机制还应考虑如何通过自动化、智能化分类机制实现资源的发现管理以提高系统的易用性。现有的 WoT 资源管理机制缺乏一定的智能性, 影响资源共享效率。例如, 前文的智慧旅游应用场景

中, 需要共享资源时, 旅游者难以快速提供资源语义信息。景区服务商共享资源时, 由于缺乏技术人员, 也难以提供语义信息。同时, 资源的准确分类以及在此基础上的有序组织管理, 在动态变化的情境下, 传统方式难以高效实现。若资源共享者采用万维网中的无序发布的方式共享资源, 则资源被准确发现的效果较差。

3.3 WoT 资源访问控制

WoT 提供了灵活、可扩展的与物理世界实时交互的方法, 但其泛在性和移动性也导致了诸如数据安全、隐私、安全认证以及基于策略的授权机制等新的安全和隐私问题。例如, 如何保护物品的数据安全、个人信息及位置等隐私信息, 如何对用户进行授权许可访问等^[59]。WoT 资源种类多、分布广、属于不同所有者, 同时, 感知装置在 CPU、内存和电池资源方面具有局限性、动态性。这些因素使得基于中央基础设施的传统安全机制已无法满足 WoT 资源安全管理方面的需求^[60]。

基于密码的传统访问控制机制灵活性差、可扩展性不足, OAuth2.0^[61]标准针对这些问题, 引入授权层实现用户与资源所有者角色相分离, 为应用提供灵活性。应用请求资源时, 它首先向所有者申请访问权限。获得相应授权, 该应用向认证服务器发送该授权信息。然后, 认证服务器向应用发放令牌使其访问共享资源。IoT-OAS^[62]框架通过集成 OAuth 授权服务 (OAS, OAuth-based authorization service) 实现 WoT 资源授权。IoT-OAS 体系结构灵活、高度可配置并且易于集成。它通过委派授权功能在非传感器上实现访问控制, 可细粒度定制访问控制策略。OAuth-IoT^[63]同样基于 OAuth 建立了一种 WoT 资源访问控制框架并建立实验床进行验证分析。文献[64]扩展了 OAuth 标准, 利用可全局访问的互操作令牌 (interoperable access token) 实现跨平台、可互操作的基于角色的访问控制。

上述这类机制依赖中心授权服务器实现用户身份认证, 为传统应用的安全访问控制提供一种较好的方案。但该机制同样深度依赖权威授权服务中心, 面临同样的灵活性、可扩展性差的问题。实际应用场景中, WoT 资源的分布性、多样性及所有者的不同, 资源共享者判断资源的用户真实身份的成本较大。因此, 此类机制也无法满足分布式、大规模环境下的 WoT 资源访问控制需求。

针对分布式环境下的 WoT 资源访问控制问题，学术界近来结合区块链与智能合约技术进行研究与实践。O.Novo^[65]提出基于区块链的面向 WoT 的分布式访问控制架构。该架构允许 WoT 资源通过管理代理 (management hub) 与区块链集成，以实现该 WoT 资源的安全访问控制。O.Novo 强调了基于区块链的访问控制机制的实现，没有明确访问控制模型，同时，也未实现 WoT 资源的细粒度访问控制。Zhang 等^[66]提出一种基于智能合约的 WoT 访问控制框架。该框架强调了对不当行为的惩罚机制，缺少对资源共享者的奖励，因此难以激发用户资源共享，无法构建良好的资源共享生态。同时，其访问控制基于访问者的行为进行，未能考虑资源提供者上下文信息。EdgeChain^[67]将区块链与边缘网络相结合，利用比特币以及信用机制约束 WoT 装置行为，实现 WoT 装置对边缘云计算资源合理安全有效使用。EdgeChain 中的边缘资源费用与当前可用资源数、服务优先级以及所请求的资源数有关，从而实现边缘资源的分配优化。FairAccess^[68]是一种基于目标、模型、架构以及机制的面向 WoT 的访问控制参考模型。FairAccess 使用 Token 表示资源访问权限，然后利用区块链的交易机制实现 Token 在所有者与请求者之间传递。该机制没有实现资源计费策略以及上下文环境动态变化下访问控制的实现。刘敖迪等^[69]提出了基于区块链的面向大数据共享的基于属性的访问控制机制。该机制用于企业内部大数据资源共享，强调了区块链与访问控制策略在资源安全共享方面的应用，但缺少计费策略，也未能涉及资源共享情况下的奖惩机制。IoTShare^[70]是一种基于区块链的物联网资源共享协议。该协议可实现物联网装置分布式管理、物联网资源的发现以及资源使用的计费操作。但 IoTShare 未能实现资源访问控制动态管理，未考虑奖惩机制。文献[71]设计了使用智能合约和区块链的方案提供安全的数据共享和访问环境。但缺乏基于上下文的动态访问控制机制。

WoT 资源安全访问控制机制对比见表 1，其中，“√”代表所对应的特点良好，“×”代表没有相应功能。表 1 方案中，RBAC4WoT^[59]通过集中式机制实现 WoT 应用的基于角色的访问控制，只能在较小规模的 WoT 应用下实现资源安全访问控制，如智能家居等。

表 1 WoT 资源安全访问控制机制对比

机制	分布式	灵活性	动态性	计费	细粒度	复杂性
ASAM4IoT ^[65]	√	√	×	×	√	一般
BAC_SC4IoT ^[66]	√	√	中等	×	×	一般
EdgeChain ^[67]	√	√	×	一般	√	较高
FairAccess ^[68]	√	√	×	×	√	较高
IoTShare ^[70]	√	√	×	×	×	较高
RBAC-SC ^[72]	√	×	×	×	×	较高
RBAC4WoT ^[59]	×	×	×	×	×	较高

3.4 WoT 资源管理平台

WoT 试验床 WoTT^[73]采用标准协议，建立了一个稳定、开放、灵活和安全的基础设施以简化 WoT 应用开发。该平台隐藏底层实现细节，通过自动化管理，减少人工干预，可管理多个协议和平台，支持良好的业务设计与测试环境。IoT-LAB^[74]平台用于测试链路层协议性能，如资源消耗、报文成功率等。SmartSantander^[75-76]提供了约 20 000 个节点的大规模测试床，用于智慧城市服务和环境数据采集。这些平台针对无线传感器网络开发，由科研机构早期开发，应用较少，也未能从资源共享的目标去探讨 WoT 资源管理机制。文献[77]在分析现有物联网中间件平台的基础上，从应用支撑、应用开发以及装置管理等方面进行了综合比较，最后给出了一种物联网中间件参考模型。文献[78]从资源发现和管理、数据管理、事件管理以及代码管理等维度对物联网中间件平台总结分析，并给出了物联网中间件应该支持的功能与非功能需求。

WoTStore^[79]是对 WoT 资源进行管理的框架。它允许动态发现环境中可用的资源。此外，还允许搜索和执行第三方 WoT 应用程序。它对资源统一管理思想与本文的目标相似。但该框架主要实现对本地 WoT 资源的管理及 WoT 应用的部署管理等功能，无法实现对大规模分布式环境下资源的管理，而且缺少资源可信安全共享机制。SmartGeoLayers^[80]为开发智慧城市应用程序提供了一种平台。该平台提供了上下文数据管理、异构数据集成、语义支持、数据分析和可视化以及数据安全和隐私支持等功能。该平台主要强调对异构数据的处理，未考虑数据及资源如何共享。通过对比文献[78]中所列 WoT 技术需求与现有 WoT 平台的技术特征，目前还有部分 WoT 技术需求仍未实现，具体包括：资源的生命周期管理、智能化管理、资

源计费及安全访问控制管理、WoT 应用开发中的资源发布、发现等需求。

4 WoTRMF 实现机制

本节首先给出了 WoTRMF 的实现功能模型，然后对模型的不同功能模块的实现机制分别进行描述。

4.1 WoTRMF 功能模型

在实际环境下，WoT 资源有效管理是 WoT 应用成功开发与部署的关键。WoTRMF 通过协同集成 WoT 资源管理核心技术，有效降低用户的资源管理成本，降低开发复杂度，方便 WoT 资源共享以及提高应用开发效率。

WoT 资源管理框架功能模型如图 6 所示，该模型描述了 WoT 资源管理框架的主要功能与模块。框架的功能分为资源管理功能、资源安全访问及计费功能、资源共享功能。资源管理功能模块一方面负责将物联网物理实体资源映射为 WoT 资源，另一方面，该功能模块还采用概率主题模型方法对 WoT 资源分类，并在此基础上结合 P2P 技术实现分布式资源生命周期管理。同时，该模块还提供资源的安全访问控制模型描述。资源安全访问及计费功能模块利用区块链技术在分布式环境下，实现基于上下文的大规模资源安全访问控制及资源计费。WoT 共享功能在上述两个模块的基础之上，向用户提供资源服务以及资源服务组合等功能。该框架建立了一种从资源提供者到资源管理平台再到资源使用者的

端到端应用框架，提高管理效率，保障资源共享安全，为大规模环境下 WoT 资源的共享提供保障。

4.2 基于地理位置的资源分布式管理机制

WoT 资源的特性要求采用分布式管理机制实现资源管理。该分布式机制可使得资源所有者快速、方便、自动化地共享其所拥有的资源。P2P 技术具有这样的特点。因此，本文将 WoT 资源分布式管理需求与 P2P 相结合实现 WoT 资源自动化管理。同时，在泛在环境下，WoT 资源共享过程应尽可能易用、方便与高效，用户无须担心资源组织与管理问题。同时，使用者也需要快速、准确地获取所需求的资源信息以及资源的状态变化。但当前基于 P2P 的 WoT 资源管理机制无法对资源有序组织与管理，使 WoT 资源共享面临万维网中的资源管理杂乱无序的现象，致使用户无法准确快速查找资源。

WoT 资源往往与其所在地理位置相关联。因此 WoT 资源管理时，若使得地理位置相邻的 WoT 资源存储于 P2P 网络相邻节点空间中，则可以更为方便快捷实现对某地理位置下的资源发现。因此，本文利用 P2P 技术实现一种基于地理位置的 WoT 资源分布式协同管理机制以降低管理复杂度，提高 WoT 应用开发效率。该机制同时实现了 WoT 资源生命周期自动化管理，即从资源接入、注册、存储、发现、有效安全访问以及资源的可用性管理等方面实现统一协同管理。该管理模块还可提供资源发现、资源动态监控、业务流程组合、资源调度等模块用于 WoT 应用开发。

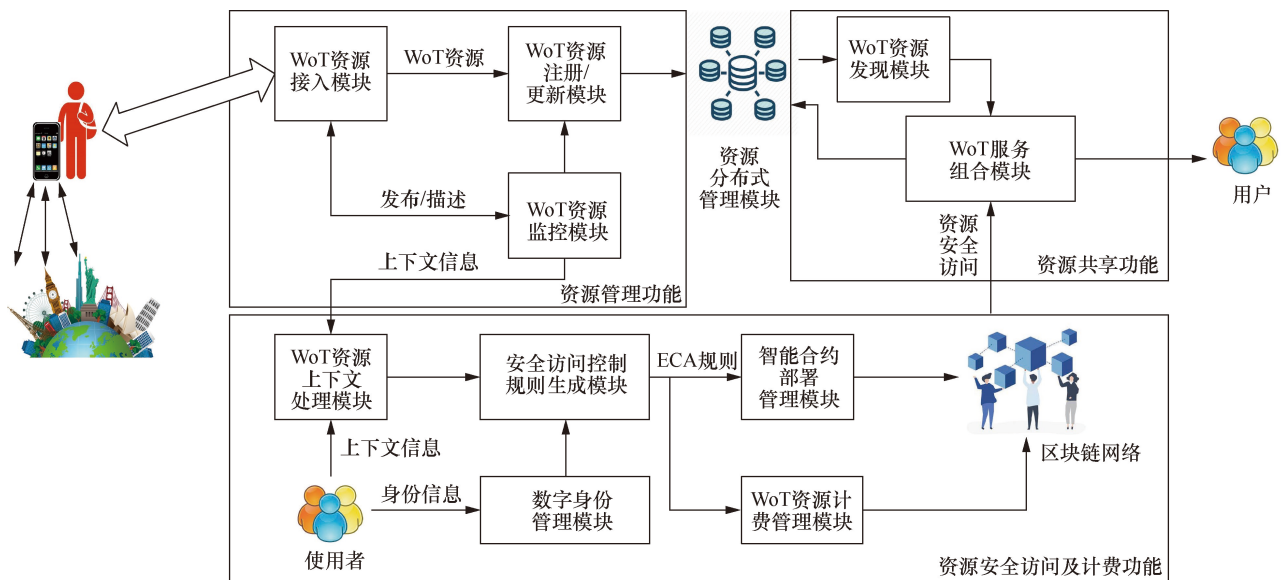


图 6 WoT 资源管理功能模型

4.3 基于概率主题的资源智能化管理机制

实际 WoT 资源发布过程中，若通过手工发布资源，一方面会导致效率低，另一方面，独立的资源发布者无法实现资源准确、统一的分类。针对该现状，本文提出了一种基于概率主题模型的 WoT 资源智能化管理机制。该机制利用概率主题模型技术，自动从资源的普通文本描述中提取隐含主题，然后在此基础上，通过机器学习资源按照所属类别分层和分类。最后，利用该层次化分类结果，构建资源 Hash ID，并据此将资源分布式发布于 WoT 网关构建的 P2P 网络中。该机制可实现 WoT 环境下，资源的智能化、自动化分类管理。与其他机制相比，本机制可在较少人工操作的情况下自动化实施。

WoT 资源智能化管理机制对比见表 2，主要从效率、准确性、自动化程度、分布式特性、规模以及方便性等进行对比，从而说明本机制特点。基于关键词的方法无法自动化实现资源的统一分类管理。资源发布往往由共享者无序直接公开于真实 Web 环境中。该方法只能依赖索引机制实现资源发现。而索引建立与更新需要消耗一定的时间，因此，它无法快速找到资源以及更新资源状态。同时，采用关键词匹配的该方法无法发现功能相同，但关键词不匹配的资源。基于语义通过消耗较多计算资源的推理方法进行资源匹配。该方法较为适合存在资源存储中心的场景，并且对用户要求较高。而基于概率主题的方法，可从普通文本描述中抽取隐含主题，然后利用计算主题之间的相似性以发现关键字不匹配，但功能却相同的资源。该方法与 P2P 分布式计算相结合，可充分利用概率主题优势，将资源在 P2P 网络中的分类存储，实现 WoT 资源的高效组织与管理。Chord4S^[81]利用分层的服务标识符机制将资源存储于 P2P 网络中。该服务标识符分两部分：第一部分为功能位，第二部分为服务提供者位。功能位又分为 5 个部分，每一部分都为前面一部分的子类。因此，根据该服务标识的特点，功能相同的服务或者同属于某一类别的资源标识符功能位

相同。根据 P2P 协议原理，这个特性使得同属某一类的资源将集中存储于一定范围内的 P2P 网络节点中。但是该方法需要通过手工方式建立统一的服务种类分层标准。而本文的机制可通过概率主题模型，利用机器学习算法实现资源所属类别自动识别，然后根据该识别结果将资源分类存储于 P2P 网络，实现 WoT 资源高效智能化管理。

与其他方案相比，本机制的特点如下。

1) 基于概率主题模型和机器学习方法实现自动化、智能化的资源分类管理。

2) 将地理位置与资源的主题信息相结合构建资源 Hash ID，并使用该 Hash ID 将资源发布到 P2P 网络以将相同主题或同一类别的资源存储于 P2P 网络空间中相邻节点。

3) 当某资源无法提供服务时，根据本机制的特点，可快速寻找相同功能的资源提供同类型服务，提高 WoT 应用的可用性。

4.4 区块链下基于上下文的资源安全可信管理机制

在开放复杂环境下，WoT 能否成功将依赖于数据安全与隐私保护等因素^[68]。因此，如何在安全、高效及保障隐私的情况下，实现 WoT 资源共享是能否充分发挥 WoT 资源价值的关键。

智慧旅游应用中，游客愿意分享景点相关信息，让其他用户了解景点状况。当共享该资源时，他无法掌握该资源使用者的身份、角色，也不可能与使用者预先建立信任关系。同时，共享者期望通过共享获得收益。因此，需要一种无须双方信息及权威信任中心的机制灵活实现共享者与使用者之间的可信安全交互。此外，游客共享资源的可用性随着感知装置的状态而不断改变。这就要求资源共享者可根据上下文信息动态调整资源的访问能力。因此，利用分布式访问控制（access control）技术，WoT 资源所有者可决定资源被哪个实体访问、如何访问、访问行为审计等功能以确保 WoT 资源的安全。同时，WoT 应用使用资源时应该付出相应的费用，而提供者获取一些收益。同时，系统还应应对恶

表 2

WoT 资源智能化管理机制对比

机制	效率	准确性	自动化程度	分布式特性	规模	方便性
基于关键词的方法	一般	一般	一般	—	大规模	良好
基于语义的方法	一般	良好	一般	—	一般	较难
文献[82]的方法	一般	良好	无	—	一般	一般
Chord4S ^[81]	良好	良好	无	有	大规模	一般
本文方法	良好	良好	良好	有	大规模	方便

意访问行为进行适当惩罚。这种奖惩机制能够优化 WoT 资源共享，提高效率。区块链具有高安全性、匿名性、分布式、支持交易等特点，可满足 WoT 资源共享的这些需求。因此，本文基于上下文信息，利用区块链实现分布式环境下 WoT 资源的可信安全共享。该机制的特点如下。

- 1) 通过智能合约分布式存储访问控制策略，以实现分布式环境下 WoT 资源安全访问控制。
- 2) 根据资源提供者及使用者的动态上下文信息动态调整访问控制策略，以提供灵活性与适应性。
- 3) 通过奖惩机制优化资源共享，以建立良好的资源共享生态环境。

5 WoTRMF 应用

WoT 变得越来越重要，这是因为通过 Web 标准，促进了城市系统和设备之间的连接，从而优化了居民与城市之间的互动，为智慧城市向认知城市的转变提供了基础^[83]。本节通过智慧城市的城市安全应用场

景，分析如何利用 WoT 资源管理框架实现智慧城市中 WoT 资源的分布式管理、高效智能管理以及可信安全共享管理以满足智慧城市应用开发需求。

图 2 所示的 WoT 开放业务生态环境中涉及多种角色，如 WoT 资源所有者、WoT 平台提供者、WoT 业务运营者、WoT 应用用户等。

智慧城市安全管理应用场景中，WoT 资源分属不同所有者。例如，工厂及建筑中的感知装置属不同企业，公共场所感知装置属于政府部门，行车记录仪、智慧家居等感知装置属于个人所有。不同的所有者均可通过 WoT 资源管理平台，低成本及快速地实现资源的统一高效管理，方便资源共享。这符合共享经济发展趋势。不同所有者共享资源时，WoT 平台提供者可以由具备一定计算能力的不同的人实现，只要该平台支持统一的资源发布、存储及可信安全共享机制即可。例如，城市中的电信运营商、物联网运营商均可提供该平台等。这些平台之间通过 P2P 分布式协议实现交互。智慧城市

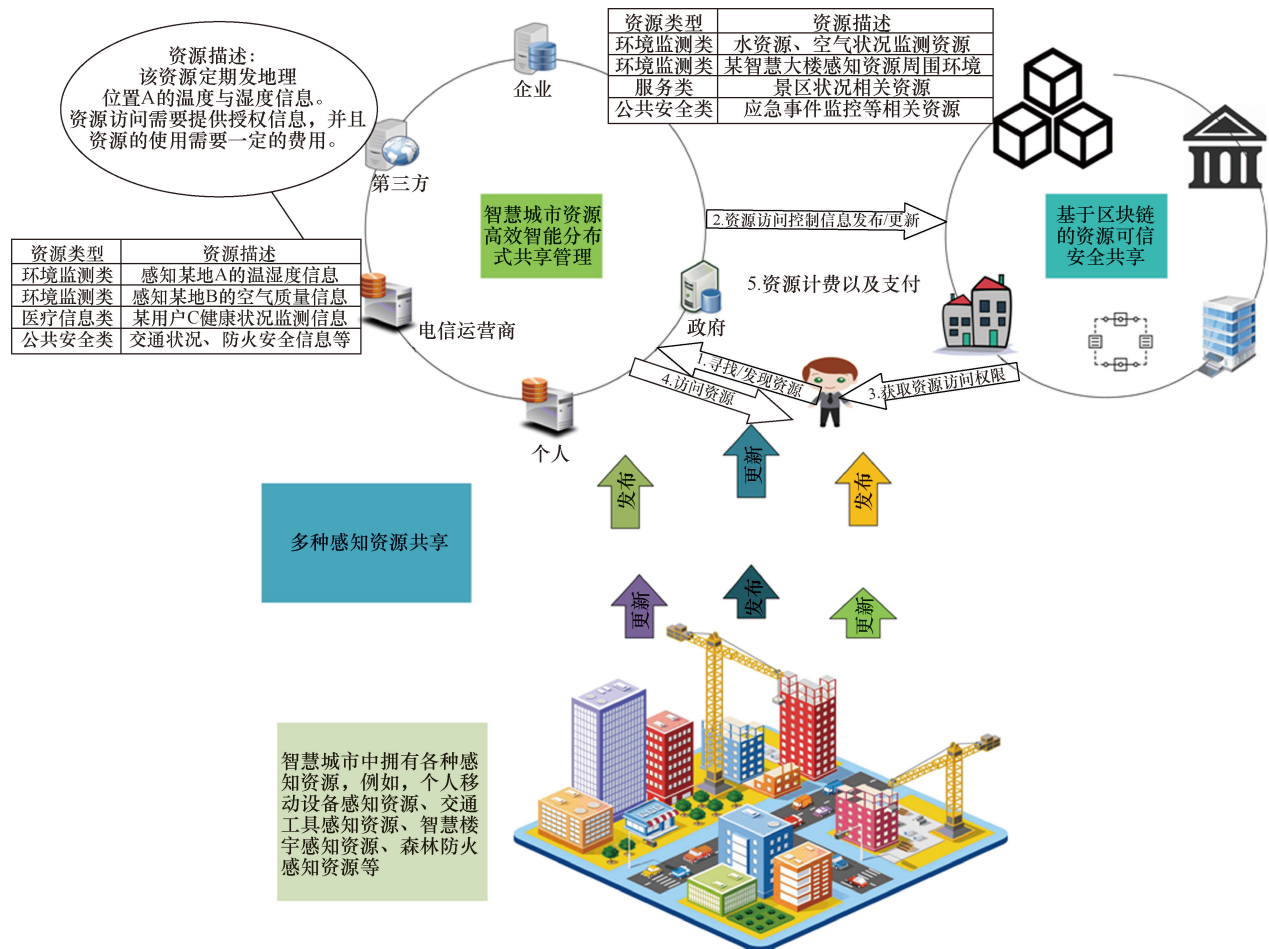


图7 智慧城市资源共享应用场景

资源共享应用场景如图 7 所示。其中, 部署于公共领域的感知资源可以利用政府部门提供的资源管理平台进行共享, 而个人用户的感知装置资源可通过电信运营商提供的资源管理平台共享。

WoT 资源共享者还可利用区块链技术实现资源安全可信共享并从中获得相应的收益。通过共享实现资源共享者以及资源使用者的共赢。图 7 中可以看出区块链存储了智慧城市中资源安全访问相关信息。该区块链网络可以由公共区块链平台构建, 也可以通过 WoT 资源管理网关节点运行区块链协议构建。该方法利用分布式机制实现了资源安全访问的良好可扩展性, 实现不同类型及不同所有者的智慧城市资源在更大范围内的使用, 充分发挥其作用。

WoT 业务运营商在资源管理平台之上, 通过使用 WoT 资源的共享能力, 在开放环境下, 开发多样性的 WoT 应用以满足 WoT 用户需求。例如, 政府部门可充分利用车联网中共享的感知资源, 动态实时获取交通状况信息并作出快速决策。个人可通过共享其智慧家庭中的温湿度信息使 WoT 用户获取附近环境状况信息。游客通过共享景区状况信息为 WoT 用户提供服务。

城市安全是智慧城市管理中的一个重要环节。例如, 交通安全、火灾的监控管理等。为了实施这些监控管理, 往往需要部署大量感知装置, 使得成本较高。同时在偏远地方, 这些装置的部署与维护成本很高。在 WoTRMF 的使能下, 自身拥有感知资源的个人、家庭或企业可以方便地向需要该服务的政府机构或企业共享这些资源。基于 WoTRMF 的激励与奖惩机制, 一方面通过共享资源, 资源的所有者可以获得相应的收益; 另一方面资源使用者降低了其成本, 可更快速地实现应用开发。

例如, 车辆在行驶过程中, 可感知周围环境及交通等众多信息。通过管理框架的自动服务注册模块将其资源信息及访问控制信息智能化发布于 WoTRMF 中。而使用者通过管理框架的自动服务发现模块快速准确地找到类似服务。同时, 在基于区块链的访问控制的基础上, 双方无须直接交互就可进行安全访问。WoTRMF 还能够根据双方上下文信息动态更新访问控制规则, 实现双方交互的灵活性以及系统的可扩展性。

通过该应用场景的分析, 可以看出 WoTRMF 具有开放性、可扩展性、灵活性、智能化等特点,

可构建良好的 WoT 业务生态。开放性使得任意用户可方便提供资源以获取一定的收益或安全使用资源以快速开发应用。由于采用分布式技术, 系统具有良好的可扩展性, 系统规模可以良好伸缩。系统自动根据上下文信息动态对资源进行访问控制, 具有灵活性。这些特点为 WoT 资源共享提供了基础。

6 结束语

WoT 技术充分利用万维网思想、技术与方法, 实现万物在应用层之上的互联, 实现各种异构装置之间的集成以及它们之间良好的互操作性, 为 WoT 应用开发提供统一开放平台, 提高 WoT 应用开发效率。利用 WoT 可将物联网资源进行整合, 但这些资源分布于各地、分属于不同组织, 现有基于全局可信中央基础设施的 WoT 资源管理技术已经无法满足 WoT 分布式应用规模不断扩展、需求快速变化、数据种类不断增加的新形势。这对快速灵活开发满足用户需求的服务带来了挑战。这些挑战包括: 如何将这些资源有效组织和管理起来; 如何有效发现资源; 如何有效地使用这些资源; 如何为应用提供健壮和可靠的服务; 在资源受限的 WoT 环境下, 如何在保证参与方隐私的情况下, 高效共享 WoT 资源。同时现有 WoT 平台主要针对异构网络的互操作性、网络结构与性能等方面进行测试, 缺乏在 WoT 环境下, 集成多种应用层协议、资源管理框架、不同 WoT 应用场景融合发展的应用平台, 无法满足 WoT 应用对分布式环境下, 智能化、安全可信的 WoT 资源管理的紧迫需求。

本文在对 WoT 面临的挑战分析研究的基础上, 结合 WoT 资源管理框架提出了相应的解决方法。首先采用基于地理位置的 P2P 技术实现 WoT 资源统一高效及自动化管理, 降低 WoT 资源接入及生命周期维护成本。在此基础上, 为了满足 WoT 应用快速、准确使用 WoT 资源, 利用概率主题智能化方法实现 WoT 资源发布与发现。同时, 利用区块链技术, 在开放、分布式环境下, 实现基于动态上下文的安全可信 WoT 资源共享机制以满足资源共享对安全的需要。最后, 给出了本文所提出的 WoT 资源管理框架 WoTRMF 的功能实现模型并利用智慧城市安全管理应用场景描述了该框架在实践中的一种应用案例。

未来工作将深化分析应用场景, 研究与实现系

统原型以进一步说明该 WoT 资源管理框架的可行性与应用价值。同时,在深度结合人工智能、区块链等相关技术的基础上,探讨其在数字孪生中的深层次应用。

参考文献:

- [1] Y.2060: Overview of the internet of things [R]. 2012.
- [2] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of Things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [3] 吴振宇. 基于 Web 的物联网应用体系架构和关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
WU Z Y. Research on web of things service environment architecture and key technologies[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [4] RAZZAQUE M A, MILOJEVIC-JEVRIC M, PALADE A, et al. Middleware for internet of things: a survey[J]. *IEEE internet of things Journal*, 2016, 3(1): 70-95.
- [5] STIRBU V. Towards a RESTful plug and play experience in the web of things[C]//*Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Semantic Computing*. Piscataway: IEEE Press, 2008: 512-517.
- [6] ZHAO S, YU L, CHENG B. A real-time web of things framework with customizable openness considering legacy devices[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2016, 16(10): 1596.
- [7] NADIM I, ELGHAYAM Y, SADIQ A. Semantic discovery architecture for dynamic environments of web of things[C]//*Proceedings of 2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [8] RUTA M, SCIOSCIA F, PINTO A, et al. CoAP-based collaborative sensor networks in the semantic web of things[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 10(7): 2545-2562.
- [9] TOUSEAU L, SOMMER N. Contribution of the web of things and of the opportunistic computing to the smart agriculture: a practical experiment[J]. *Future Internet*, 2019, 11(2): 33.
- [10] LE SOMMER N, TOUSEAU L, MAHÉO Y, et al. A disruption-tolerant RESTful support for the web of things[C]//*Proceedings of 2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 17-24.
- [11] OSTERMAIER B, KOVATSCH M, SANTINI S. Connecting things to the web using programmable low-power Wi-Fi modules[C]//*WoT '11: Proceedings of the Second International Workshop on Web of Things*. 2011: 1-6.
- [12] DUQUENNOY S, GRIMAUD G, VANDEWALLE J J. The web of things: interconnecting devices with high usability and performance[C]//*Proceedings of 2009 International Conference on Embedded Software and Systems*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 323-330.
- [13] MAYER S, GUINARD D, TRIFA V. Facilitating the integration and interaction of real-world services for the web of things[C]//*Proceedings of Urban Internet of Things-Towards Programmable Real-time Cities (UrbanIoT)*. 2010.
- [14] COLLINS J T, KNAPPER J, MCDERMOTT S J, et al. Simplifying the OpenFlexure microscope software with the web of things[J]. *Royal Society Open Science*, 2021, 8(11): 211158.
- [15] OLIVER S. WISSPR-a web-based infrastructure for sensor data streams sharing, processing and storage[D]. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2010.
- [16] MAYER S, GUINARD D, TRIFA V. Real-world service interaction with enterprise systems in dynamic manufacturing environments [EB]. 2020.
- [17] OSTERMAIER B, SCHLUP F, RÖMER K. WebPlug: a framework for the web of things[C]//*Proceedings of 2010 8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 690-695.
- [18] GUINARD D, MUELLER M, PASQUIER-ROCHA J. Giving RFID a REST: building a web-enabled EPCIS[C]//*Proceedings of 2010 Internet of Things (IoT)*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-8.
- [19] PINTUS A, CARBONI D, PIRAS A, et al. Connecting smart things through web services orchestrations[M]//*Current Trends in Web Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 431-441.
- [20] International conference on mobile ubiquitous computing, systems, services and technologies - TOC[C]//*Proceedings of International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM'07)*. Piscataway: IEEE Press, 2007: v-viii.
- [21] SPIESS P, KARNOUSKOS S, SOUZA L, et al. Reliable execution of business processes on dynamic networks of service-enabled devices[C]//*Proceedings of 2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 533-538.
- [22] DAVIDYUK O, MILARA I S, RIEKKI J. CADEAU: Supporting autonomic and user-controlled application composition in ubiquitous environments[M]. *Pervasive Computing and Communications Design and Deployment: Technologies, Trends and Applications*, IGI Global, 2011: 74-102.
- [23] MORARU A, MLADENIC D, VUCNIK M, et al. Exposing real world information for the web of things[C]//*IWeb '11: Proceedings of the 8th International Workshop on Information Integration on the Web: in conjunction with WWW 2011*. 2011: 1-6.
- [24] PFISTERER D, ROMER K, BIMSCHAS D, et al. SPITFIRE: toward a semantic web of things[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(11): 40-48.
- [25] NAMBI S N A U, SARKAR C, PRASAD R V, et al. A unified semantic knowledge base for IoT[C]//*Proceedings of 2014 IEEE World Forum on Internet of Things*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 575-580.
- [26] BOUSSARD M, CHRISTOPHE B, LE BERRE O, et al. Providing user support in web-of-things enabled smart spaces[C]//*WoT '11: Proceedings of the Second International Workshop on Web of Things*. 2011: 1-6.
- [27] 李养群, 沈苏彬, 许斌. 物品万维网技术综述[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(2): 32-42, 56.
LI Y Q, SHEN S B, XU B. Technology of web of things: a survey[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2014, 34(2): 32-42, 56.
- [28] Web of Things (WoT) Architecture W3C Candidate Recommendation [R]. 2019.

- [29] ITU-T Y.2063: Framework of the web of things [R].2012.
- [30] ITU-T Y.4414/H.623: Web of things service architecture [R]. 2012.
- [31] WOLF S, COOLEY R, BOROWCZAK M. S-CHIRP: securing communications in lightweight peer-to-peer networks in the IoT[J]. IEEE Potentials, 2019, 38(1): 14-19.
- [32] TANGANELLI G, VALLATI C, MINGOZZI E. Edge-centric distributed discovery and access in the Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(1): 425-438.
- [33] CHEN J. Devify: decentralized Internet of Things software framework for a peer-to-peer and interoperable IoT device[J]. ACM SIGBED Review, 2018, 15(2): 31-36.
- [34] BATTAGLIA F, LO BELLO L. A novel JXTA-based architecture for implementing heterogenous networks of things[J]. Computer Communications, 2018(116): 35-62.
- [35] BENOMAR Z, LONGO F, MERLINO G, et al. A cloud-based and dynamic DNS approach to enable the web of things[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, PP(99): 1-1.
- [36] MURTURI I, DUSTDAR S. A decentralized approach for resource discovery using metadata replication in edge networks[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2305, PP(99): 1.
- [37] DANG H V, TATIPAMULA M, NGUYEN H X. Cloud-based digital twinning for structural health monitoring using deep learning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 3820-3830.
- [38] FAHEEM M R, ANEES T, HUSSAIN M. The web of things: findability taxonomy and challenges[J]. IEEE Access, 2019(7): 185028-185041.
- [39] AUTIOSALO J, SIEGEL J, TAMMI K. Twinbase: open-source server software for the digital twin web[J]. IEEE Access, 2021(9): 140779-140798.
- [40] LEI Z C, ZHOU H, HU W S, et al. Toward a web-based digital twin thermal power plant[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3): 1716-1725.
- [41] LIU C, JIANG P Y, JIANG W L. Web-based digital twin modeling and remote control of cyber-physical production systems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020 (64): 101956.
- [42] BEZERRA J D H, DE SOUZA C T. smAR2t: a models at runtime architecture to interact with the web of things using augmented reality[C]//SBES 2019: Proceedings of the XXXIII Brazilian Symposium on Software Engineering. 2019: 124-129.
- [43] AGUZZI C, GIGLI L, SCIULLO L, et al. From cloud to edge: seamless software migration at the era of the web of things[J]. IEEE Access, 2020, 8: 228118-228135.
- [44] YU H, CAI H M, LIU Z Y, et al. An automated metadata generation method for data lake of industrial WoT applications[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 9871, PP(99): 1-14.
- [45] PERERA C, VASILAKOS A V. A knowledge-based resource discovery for Internet of Things[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 109: 122-136.
- [46] BARNAGHI P, SHETH A. On searching the Internet of Things: requirements and challenges[J]. IEEE Intelligent Systems, 2016, 31(6): 71-75.
- [47] ZHOU Y C, DE S, WANG W, et al. Search techniques for the web of things: a taxonomy and survey[J]. Sensors, 2016, 16(5): 600.
- [48] QI L Y, HE Q, CHEN F F, et al. Finding all You need: web APIs recommendation in web of things through keywords search[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2019, 6(5): 1063-1072.
- [49] KALLAB L, CHBEIR R, MARISSA M. Location-aware resource discovery and QoR-driven resource selection for hybrid web environments[J]. Sensors, 2021, 21(20): 6835.
- [50] MAAMAR Z, FACI N, ELNAFFAR S, et al. Semantic thingsourcing for the Internet of Things[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2021: e6684.
- [51] BOTONAKIS S, TZAVARAS A, PETRAKIS E G M. iSWoT: service oriented architecture in the cloud for the semantic web of things[C]//Advanced Information Networking and Applications, 2020: 1201-1214.
- [52] CIMMINO A, POVEDA-VILLALÓN M, GARCÍA-CASTRO R. eWoT: a semantic interoperability approach for heterogeneous IoT ecosystems based on the web of things[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(3): 822.
- [53] RUTA M, SCIOSCIA F, IEVA S, et al. A blockchain infrastructure for the semantic web of things[EB]. 2018.
- [54] NADIM I, ELGHAYAM Y, SADIQ A. Semantic discovery architecture for dynamic environments of web of things[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [55] VICTOR C, SEBASTIAN K, HARALD K. A framework for semantic discovery on the web of things[J]. Studies on the Semantic Web, 2018, 36: 147-162.
- [56] RUTA M, SCIOSCIA F, PINTO A, et al. CoAP-based collaborative sensor networks in the Semantic web of things[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(7): 2545-2562.
- [57] KHADIR K, GUERMOUCHE N, MONTEIL T, et al. Towards avatar-based discovery for IoT services using social networking and clustering mechanisms[C]//Proceedings of 2020 16th International Conference on Network and Service Management (CNSM). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [58] ROBLES M I, SILVERAJAN B, NARENDRA N C. Web of things semantic functionality distance[C]//Proceedings of 2019 26th International Conference on Telecommunications (ICT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 260-264.
- [59] EL HAJJI S, NITAJ A, CARLET C, et al. Securing the web of things with role-based access control[C]//Proceedings of 1st International Conference on Codes, Cryptology, and Information Security (C2SI), 2015: 14-26.
- [60] ZHANG Y, LI B, LIU B, et al. An attribute-based collaborative access control scheme using blockchain for IoT devices[J]. Electronics, 2020, 9(2): 285.
- [61] The OAuth 2.0 Authorization Framework [R]. 2012.
- [62] SCIANCALEPORE S, PIRO G, CALDAROLA D, et al. OAuth-IoT: an access control framework for the Internet of Things based on open standards[C]//Proceedings of 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 676-681.
- [63] CIRANI S, PICONE M, GONIZZI P, et al. IoT-OAS: an OAuth-based authorization service architecture for secure services in IoT scenarios[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 1224-1234.

- [64] OH S R, KIM Y G, CHO S. An interoperable access control framework for diverse IoT platforms based on OAuth and role[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(8): 1884.
- [65] NOVO O. Blockchain meets IoT: an architecture for scalable access management in IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(2): 1184-1195.
- [66] ZHANG Y Y, KASAHARA S, SHEN Y L, et al. Smart contract-based access control for the Internet of Things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 1594-1605.
- [67] PAN J L, WANG J Y, HESTER A, et al. EdgeChain: an edge-IoT framework and prototype based on blockchain and smart contracts[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(3): 4719-4732.
- [68] OUADDAH A, ABOU ELKALAM A, AIT OUAHMAN A. FairAccess: a new blockchain-based access control framework for the Internet of Things[J]. *Security and Communication Networks*, 2016, 9(18): 5943-5964.
- [69] 刘敖迪, 杜学绘, 王娜, 等. 基于区块链的大数据访问控制机制[J]. *软件学报*, 2019, 30(9): 2636-2654.
LIU A D, DU X H, WANG N, et al. Blockchain-based access control mechanism for big data[J]. *Journal of Software*, 2019, 30(9): 2636-2654.
- [70] HAMDAROU B, ALKALBANI M, RAYES A, et al. IoTShare: a blockchain-enabled IoT resource sharing on-demand protocol for smart city situation-awareness applications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 10548-10561.
- [71] CHIU W Y, MENG W Z, JENSEN C D. My data, my control: a secure data sharing and access scheme over blockchain[J]. *Journal of Information Security and Applications*, 2021, 63: 103020.
- [72] CRUZ J P, KAJI Y, YANAI N. RBAC-SC: role-based access control using smart contract[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 12240-12251.
- [73] BELLI L, CIRANI S, DAVOLI L, et al. Design and deployment of an IoT application-oriented testbed[J]. *Computer*, 2015, 48(9): 32-40.
- [74] Fit IOT-LAB[EB]. 2012.
- [75] SOTRES P, SANTANA J R, SÁNCHEZ L, et al. Practical lessons from the deployment and management of a smart city Internet-of-things infrastructure: the SmartSantander testbed case[J]. *IEEE Access*, 2017(5): 14309-14322.
- [76] SÁNCHEZ L, GUTIÉRREZ V, GALACH J A, et al. SmartSantander: experimentation and service provision in the smart city[C]//16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2013: 4-9.
- [77] DA CRUZ M A A, RODRIGUES J J P C, AL-MUHTADI J, et al. A reference model for internet of things middleware[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(2): 871-883.
- [78] 沈苏彬, 杨震. 物联网体系结构及其标准化[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(1): 1-18.
SHEN S B, YANG Z. Architecture of internet of things and its standardization[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2015, 35(1): 1-18.
- [79] SCIULLO L, GIGLI L, TROTTA A, et al. WoT Store: managing resources and applications on the web of things[J]. *Internet of Things*, 2020, 9: 100164.
- [80] D'ONOFRIO S, FRANZELLI S, PORTMANN E. Advancing Cognitive Cities with the web of things new advances in the internet of things[EB]. 2018.
- [81] HE Q, YAN J, YANG Y, et al. A decentralized service discovery approach on peer-to-peer networks[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2013, 6(1): 64-75.
- [82] 魏强, 金芝, 许焱. 基于概率主题模型的物联网服务发现[J]. *软件学报*, 2014, 25(8): 1640-1658.
WEI Q, JIN Z, XU Y. Service discovery for internet of things based on probabilistic topic model[J]. *Journal of Software*, 2014, 25(8): 1640-1658.
- [83] PEREIRA J, BATISTA T, CAVALCANTE E, et al. A platform for integrating heterogeneous data and developing smart city applications[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2022, 128: 552-566.

[作者简介]



李养群(1977-), 男, 博士, 南京邮电大学物联网学院讲师, 主要研究方向为物品万维网、区块链技术。



张登银(1964-), 博士, 南京邮电大学物联网学院教授, 主要研究方向为智能信号处理、信息网络、信息安全等。