



专题：物联网技术与应用

基于云雾融合的工业物联网能源管理架构

赖春媛¹, 闫文卿², 亓晋¹

(1. 南京邮电大学, 江苏 南京 210003;

2. 山东科技大学计算机科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 针对当前工业物联网中能源消耗持续增长、环境污染日趋严重等能源问题, 提出一种基于云雾融合的工业物联网能源管理架构。该架构利用云计算与雾计算分别在管理中心和边缘为能源管理提供丰富、实时的存储与计算资源, 从而提高能源管理效率。此外, 该架构还通过在云计算与雾计算之间建立渗透模型, 实现云雾融合, 使得云雾资源得到更加合理高效的利用。最后, 通过一个工业环境测试案例, 证明了该架构能有效降低能源消耗成本和减少污染物排放量, 对工业物联网中的能源起到高效、节能、绿色管理的作用。

关键词: 工业物联网; 云雾融合; 能源管理; 渗透模型

中图分类号: TP315

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017269

An energy management framework based on fog-cloud combining for industrial internet of things

LAI Chunyuan¹, YAN Wenqing², QI Jin¹

1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. College of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: Aiming at the IIoT's energy problems such as the continuous growth of energy consumption and the increasingly serious environmental pollution, an energy management framework based on fog-cloud combining for industrial internet of things (IIoT) was proposed. The framework utilized cloud computing and fog computing to provide rich and real-time storage and computing resources for the energy management at management center and edge respectively, thereby improving the efficiency of energy management. In addition, the framework built a penetration model between cloud computing and fog computing to achieve fog-cloud combining. An industrial environmental test case demonstrates that the framework can effectively reduce energy consumption and pollutant emissions.

Key words: industrial internet of things, fog-cloud combining, energy management, penetration model

收稿日期: 2017-08-20; 修回日期: 2017-09-22

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (No.BK20160910); 江苏省教育厅自然科学研究面上项目 (No.16KJB520034, No.17KJB520026)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No.BK20160910), Natural Science Fund for Colleges and Universities in Jiangsu Province (No.16KJB520034, No.17KJB520026)

1 引言

随着工业信息化的快速发展,各国纷纷提出了自己的工业技术发展策略,如美国的第三次工业革命、德国的工业4.0、中国的“互联网+”等。在这些策略的推动下,工业物联网(industrial IoT, IIoT)蓬勃发展。然而随着IIoT的不断发展,持续增长的能源消耗和严重的环境污染问题引起了各界人士的广泛关注。因此,IIoT迫切需求高效绿色的能源管理^[1],降低能源消耗、减轻环境污染。

目前,国内外关于IIoT能源管理的研究已取得不少成果,参考文献[2]在物联网环境中基于云计算技术,为智能环境(如智能家居、工厂、建筑)提供智能服务,通过建立服务分配模型,最终显著降低整体能源消耗;参考文献[3]通过节能的视角,设计了一个包含云计算中心的绿色工业物联网架构,在该架构中通过为传感器节点设计睡眠调度和唤醒协议,有效减少传感器节点的能源消耗;参考文献[4]基于工业物联网、云计算平台、大数据分析及反向优化控制,构建了能源管理平台,并研发出相应能源管理系统,最后通过实际运行结果表明该系统能够有效提高能源利用率;参考文献[5]基于工业厂房的能源需求和现场发电情况,为工业厂房设计了一种能量优化调度方案,从而最大限度地提高生产效率,减少能源消耗。

国内外关于IIoT能源管理的研究主要集中在将云计算^[6,7](cloud computing)技术融入能源管理中,解决传统能源管理资源受限、扩张难度大的问题。然而,云计算给IIoT能源管理带来便利的同时也带来了巨大挑战。随着IIoT不断成熟,必然会产生海量的能源数据信息^[8,9],若将数据全部移动到云中存储计算,必然会造成云中心和工业设备间的输入/输出瓶颈,使得整个IIoT传输速率大大降低,同时也带来严重的网络拥

塞。此外,数据全部存储在云中还存在较大的安全隐患。

为了解决上述问题,本文不再拘泥于云计算,进一步研究雾计算(fog computing)^[10-12]并将其也融入能源管理中,它能在工业设备上(或者在设备之间、网络上)进行数据的存储与计算。雾计算可以在网络边缘直接对能源数据信息进行有效处理,从而大大降低网络时延,提高能源管理效率。同时,雾计算只将复杂重要的能源数据信息转移到云中进行处理,有效缓解IIoT拥塞,且雾计算分布式的存储模式能有效保障数据的安全性。

因此,本文设计一种基于云雾融合的工业物联网能源管理架构。该架构一方面利用云计算提供无限资源,缓解雾计算资源有限问题;另一方面利用雾计算边缘信息处理能力缓解云计算引起的高时延、网络拥塞、低可靠性问题。该架构还通过在雾计算与云计算间构建渗透模型实现云雾融合,在最小化云雾资源消耗量的引导下,使得能源管理服务在云雾之间合理分配,实现云雾资源合理高效利用,从而实现IIoT能源高效管理^[13-15]。

2 工业物联网能源管理需求

针对IIoT规模庞大、精确性要求高、时延敏感等多方面特性,IIoT对能源管理提出了以下几点需求。

(1) 高速可靠网络传输能力

在IIoT中,许多工业控制系统对网络有着严格的时延和可靠性要求。例如,在无人机床控制系统中要求时延低于几十毫秒,并且还需要保证信息可靠传输,因为细微的数据变化,会引起整个生产线异常运作,造成巨大的经济损失。

(2) 海量数据存储计算能力

随着IIoT的快速发展,必然会产生海量的能源数据信息,为了实现更加精确可靠的能源管理,



需要对这些海量数据进行全方位的存储和计算。

(3) 智能分析决策能力

IIoT 能源管理的主要目标是实现 IIoT 中能源合理配置，实现能源绿色高效管理，而智能分析与决策能力将是实现这一目标的关键。

(4) 信息安全保障能力

在 IIoT 中用户为了获得最适当的能源管理服务，不得不与其他用户分享能源数据信息，但这些信息中可能包含了用户的隐私，因此 IIoT 中信息安全是必不可少的。

为了满足以上需求，本文提出基于云雾融合的工业物联网能源管理架构。在该架构中，工业雾计算充分利用工业设备本身闲置的存储计算资源，在网络边缘对收集到的能源数据信息进行有效处理，只将有特殊需求的数据传输到工业云中，这种计算方式无疑减少了传输时延和能耗，同时降低了隐私数据泄露的可能。并且采用这种分布式存储计算方式，满足海量数据存储和计算的需求，为精确能源管理提供了数据保障。并且在该架构中，采用云雾融合的能源管理方式，不仅能通过工业雾为工业设备提供实时高效的本地能源管理服务，而且还能通过工业云为工业设备提供更智能精准的全局能源管理服务，从而使得能源管理更具智能性。

3 基于云雾融合的工业物联网能源管理架构

基于云雾融合的工业物联网能源管理架构如图 1 所示，可分为 3 层，即：工业设备层、工业云雾计算层和能源管理层。

IIoT 环境中，工业设备不停地从事生产活动，消耗大量能源。该架构在工业设备周围部署大量数据采集设备，收集工业设备的实时能源数据信息，并通过网关等通信设备将信息传输到上层的工业云雾中。一些简单数据会在工业雾中被直接处理，而一些重要复杂数据会进一步上传到工业云中。工业云雾分析这些信息并将它们分门别类

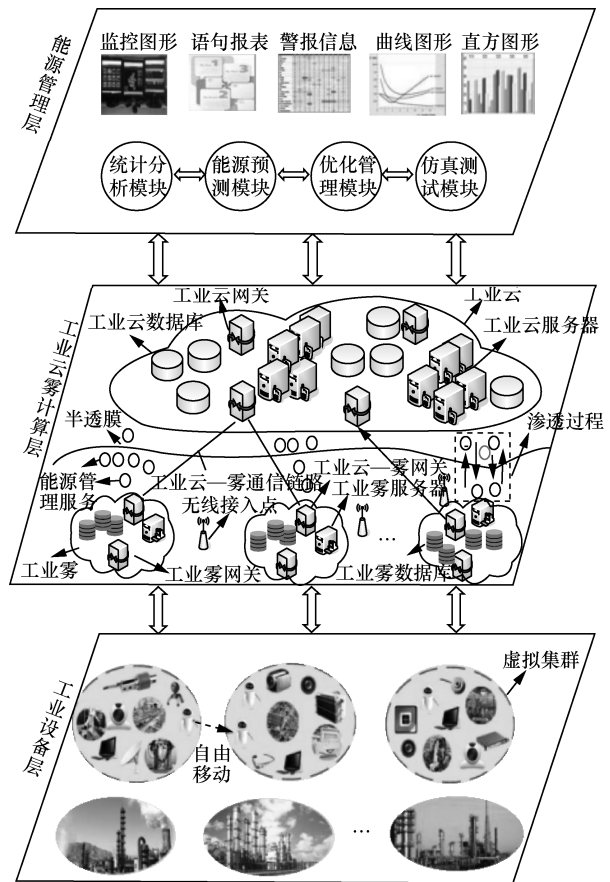


图 1 基于云雾融合的工业物联网能源管理架构

地存储在相应工业数据库中。同时，工业云雾还为能源管理应用提供丰富的计算资源，将不同能源管理模块下达的指令分解为能源管理服务，然后将这些服务分配到不同工业云雾中执行，控制工业设备，最后将执行结果再返回给相应能源管理模块。为了有效合理利用工业云雾资源，提高能源管理效率，在工业云雾间建立渗透模型，使得能源管理服务合理分配。最后，该架构通过多种可视化技术，将复杂的能源管理信息处理为直接明了的图像、表格、文字等，便于 IIoT 用户参与能源管理。

3.1 工业设备层

该层是架构中的底层，其中主要设备有：数据采集设备、通信设备和工业设备。数据采集设备解决了人类世界和工业世界的的数据变换问题，它们负责收集工业设备能源数据信息并通过通信

设备将数据向上层传输，以获得更多的潜在能源信息。工业设备是 IIoT 中进行工业生产的设备，是能源主要消耗者，是能源管理的主要控制对象，它们可以受本地控制，也可以受远程控制。

这些设备都可以被看作 IIoT 中的节点，节点根据功能、位置和作用域的不同可以被划分成不同的子网络，形成虚拟集群。每个虚拟集群又与上层中的工业雾有着——对应的映射关系。同时，节点（设备）可以根据环境、时间和自身状态的变化自由离开或加入任何虚拟集群中，并与上层相应工业雾断开或建立连接。工业雾能够根据自身资源对这些节点（设备）进行负载自适应调节。

3.2 工业云雾计算层

该层是架构的中间层，一方面存储分析底层能源数据信息，为能源管理提供数据保障；另一方面为上层能源管理提供相应能源管理服务，对底层工业设备进行控制，如配置工业设备、虚拟集群移入移出。

该层又分为工业云计算与工业雾计算，工业云作为集中式计算中心，为能源管理提供丰富的存储计算资源，对整个 IIoT 能源管理起到集中控制的作用；工业雾作为分布式计算点，为能源管理提供实时存储计算资源，缓解工业云引起的时延、拥塞和安全性问题。并且工业雾与工业云之间通过渗透模型，提高资源利用率。

3.2.1 工业云雾渗透模型

本文在工业云雾计算间引入渗透模型，如图 2 所示。上层能源管理模块下达的复杂指令被分解为多个能源管理服务，由工业云雾负责对这些服务进行处理。渗透的作用在于对这些服务进行动态调整与分配，实现工业云雾资源合理高效利用。该渗透过程可以类似地看作化学中的渗透，通过半透膜平衡膜两侧溶液浓度。然而，与化学渗透不同的是，在工业云雾间服务的渗透过程中允许对资源进行可调配置，根据配置的差异决定了服务在工业云雾间的迁移方向。

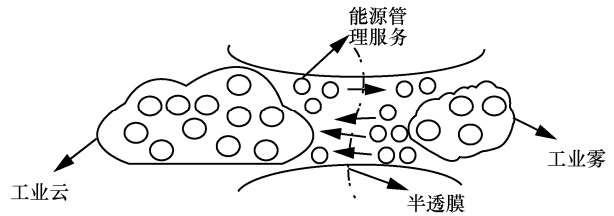


图 2 工业云雾渗透模型

渗透模型主要包含 3 个重要组成部分，即溶质、溶剂、半透膜。

(1) 溶质的选择

溶质是溶液中的静态部分，它们不能穿过半透膜。在所考虑的 IIoT 能源管理中，溶质的组成可以是：工业云雾服务器的数量、存储能力和计算能力等。

(2) 溶剂的选择

溶剂是可以自由穿过渗透膜的动态部分，所以将能源管理服务作为溶剂，根据半透膜两边工业云雾资源的差别，实现能源管理服务合理分配。

(3) 半透膜的选择

半透膜管理着整个渗透过程，它允许溶剂（能源管理服务）的移动，以平衡膜两端的浓度。半透膜必须是智能的，它考虑多方面因素，从而控制能源管理服务的流向。

上述渗透模型的数学表达式如下：

$$\begin{aligned} \min_{X_i, Y} & \left(\sum_{i=1}^N C_i^{\text{fog}} + C^{\text{cloud}} \right) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^N X_i + Y = L \\ \sum_{i=1}^N D_i^{\text{fog}} + D^{\text{cloud}} + \sum_{i=1}^N D^{\text{comm}} < \bar{D} \\ 0 \leq X_i \leq X_i^{\text{max}} \\ f^{\text{min}} \leq f \leq f^{\text{max}} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

这是一个带约束的优化问题，其中， i 表示第 i 个工业雾； N 表示工业雾的总个数； C_i^{fog} 和 C^{cloud} 分别表示第 i 个工业雾和工业云的存储计算资源消耗量，计算如下：

$$C_i^{\text{fog}} = a_i X_i^2 + b_i X_i + c_i \quad (2)$$



$$C^{\text{cloud}} = Y\eta(Af + B) \quad (3)$$

其中, X_i 表示第 i 个工业雾中所分配的能源管理服务的工作量; a_i 、 b_i 、 c_i 是与第 i 个工业雾相关的可调配参数, 由工业雾服务器的数量、存储能力和计算能力决定; Y 表示工业云中所分配的能源管理服务的工作量; η 是该工业云中的服务器个数; f 是服务器 CPU 频率; A 、 B 是与工业云相关的可调配参数, 由工业云服务器的存储能力和计算能力所决定。

在该数学模型中还包含了几条约束, 第一条是能源管理服务平衡约束, 即分布在工业云雾中能源管理服务个数之和等于总的能源管理服务个数 L ; 第二条是时延约束, 考虑到 IIoT 中严格的时延要求, 所以制定能源管理服务总时延小于规定时延 \bar{D} , 其中, D_i^{fog} 、 D^{cloud} 、 D^{comm} 分别为工业雾处理时延、工业云处理时延、工业云雾通信时延。第三、四条分别是工业雾与工业云自身约束, 工业雾所能承受的工作量不超过其上限工作量 X_i^{max} , 工业云服务器在其上下限 CPU 频率与 f^{min} 与 f^{max} 间工作。

3.2.2 工业云雾数据库

为了提高能源管理服务的执行效率, 在工业云雾中搭建工业数据库是十分必要的。在该架构中设计了以下几种数据库: 实时数据库、配置数据库、历史数据库和能源管理服务数据库。

(1) 实时数据库

IIoT 能源管理过程中存在着大量实时数据, 且这些实时数据对处理速度有着较高的要求, 所以建立一个存储空间的实时数据库是十分必要的。在该数据库中使用静态数组存储实时数据, 便于数据的查找与应用。由于数据库中的数据可能被多个能源管理服务同时访问, 所以同步必不可少。在该数据库中, 用于存储工厂信息的 Factory 类 (factory class) 最为重要, 其结构如图 3 所示, 可以将 IIoT 中每一个工厂对应成 Factory 类的每一个对象。

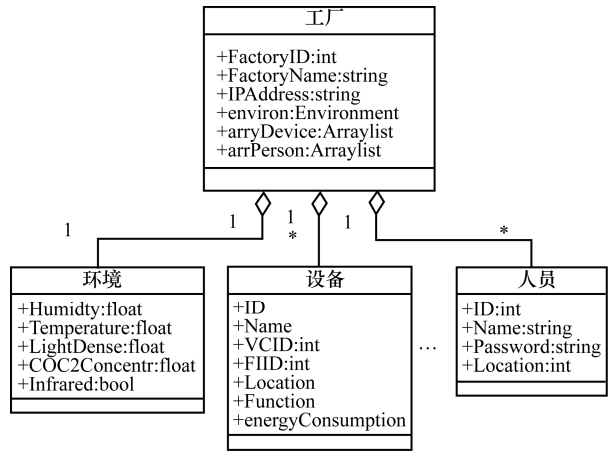


图 3 Factory 类数据结构

(2) 配置数据库

由于 IIoT 规模庞大, 所以该数据库的设计必须具有灵活性和可扩展性, 能简单便捷地查找工厂配置信息, 即每个工厂的设备数量、每个设备的类型和 ID 等。

(3) 历史数据库

该数据库用于定期存储实时数据, 因此该数据库应该根据实时数据库而创建。

(4) 能源管理服务数据库

该数据库用于存储执行能源管理服务过程中所产生的数据信息, 为能源管理服务的执行提供保障。

3.3 能源管理层

该层作为架构的顶层负责提供多样化的能源管理应用, 一方面向下层传达能源管理指令, 另一方面为 IIoT 用户提供良好的人机交互环境。该层主要有四大能源管理模块, 如图 4 所示, 即: 统计分析模块、能源预测模块、优化管理模块和仿真测试模块。

(1) 统计分析模块

该模块负责对无序、零散、不系统的原始能源数据信息按一定标准进行归类汇总, 从而使原始资料简单化、形象化、系统化。然后再通过统计运算, 反映原始能源数据信息的趋势、离散程度和相关强度。例如, 通过统计分析模块可以了解每个车间最高、最低单位时间耗能量及其出现时间。

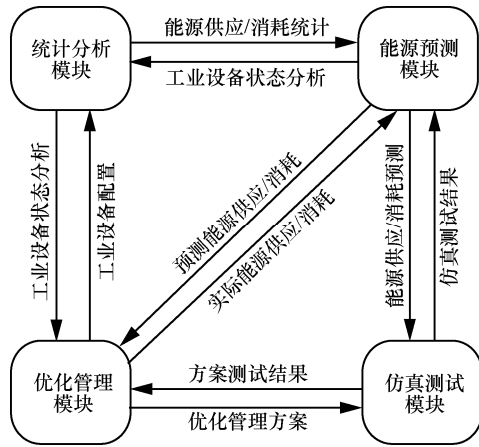


图4 能源管理模块

(2) 能源预测模块

该模块有两个主要方面，一方面是能源消耗量预测，另一方面是能源供应量预测。能源消耗量是指一定时期内 IIoT 各种耗能设备的耗能量，包括原煤和原油及其制品、天然气、电力等。能源生产量是指一定时期内 IIoT 各种能源的供应量，包括原煤、原油、天然气、水电、核能发电量、生物质能、太阳能等。

(3) 优化管理模块

其功能就是基于实时数据和历史数据，建立工业设备执行性能与能耗之间的关系模型，应用多目标优化控制算法，寻找最优能源管理方案，在保持工业设备优秀性能的同时降低能源消耗。

(4) 仿真测试模块

模拟真实环境，对改进后的能源管理方案进行有效仿真，测试改进后方案是否能达到预计效果。

最后，为了便于 IIoT 用户了解能源管理状况，参与到能源管理中，在该架构中采用多种可视化技术，直观地呈现出能源管理过程中各种数据信息，例如由曲线图、报表和警示图标等。

4 案例分析

通过搭建一个简单工业生产场景，进一步测试基于云雾融合的工业物联网能源管理架构的效益。图 5 是一个简单的工业生产场景示意，其中包含各种工业设备，如一个云数据中心，多个雾数据中心，工业无线网络，智能控制设备，智能生产、包装、运输设备等。

该场景中工业设备都是智能设备，集成了智能传感器实时收集的工业生产中的能源数据信息，并且这些设备还具有联网功能，能将这些信息共享出去。此外，这些智能工业设备具有一定计算能力，多个智能设备通过网络组合在一起，形成工业雾，工业雾可提供本地能源管理服务对这些设备进行本地控制。多个工业雾之间可以相

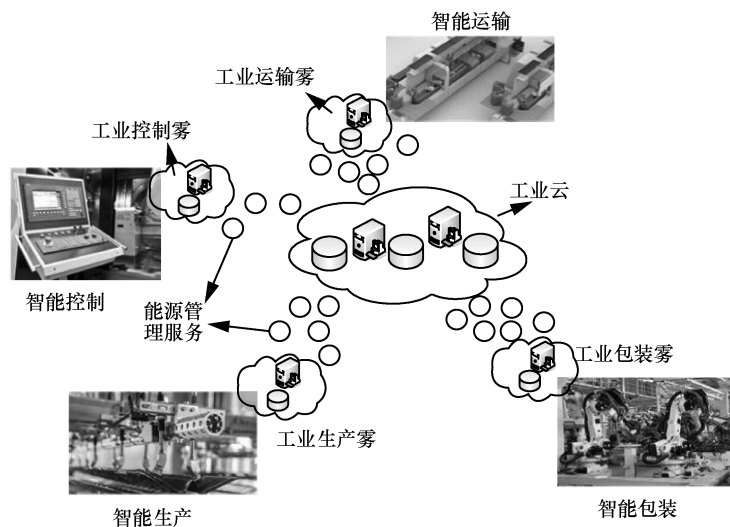


图5 工业生产场景示意



互通信，也可以与工业云通信。因此，工业云了解整个工业场景运作状态和能源消耗情况，并对整个场景进行全局能源管理，监督控制发生在工业雾中的局部能源管理。用户可以通过该工业场景中的智能计算机，参与到能源管理系统中，不仅可以直观地查看该场景能源消耗状况，还可以下达能源管理指令，完成特定的能源管理功能。

为了评估基于云雾的工业物联网能源管理架构的性能，本文在上述工业场景中比较传统能源管理架构与该架构的能源管理效果，如图6与图7所示，分别对工业设备每小时能源消耗成本和污染物排放量进行对比。

在图6中，基于云雾融合的能源管理架构下工业设备各时段能源消耗成本较少，且相对于传

统架构而言，各时段能源消耗成本波动较小，整个工业场景耗能稳定。此外，该架构下工业设备的总能源消耗成本约为13200元，远远小于传统架构下21538元的总成本。

在图7中，基于云雾融合的能源管理架构下大部分时段污染物排放量较少，且总排放量1208kg小于传统架构下的1759kg，更为绿色环保。综上所述，该架构更为高效、绿色，能源管理效果更好。

5 结束语

本文提出了一种基于云雾融合的工业物联网能源管理架构，解决了IIoT中能源消耗持续增长和环境污染日趋严重等能源管理问题。通过一个案例分析，证明该架构相较于传统能源管理架构而言，更

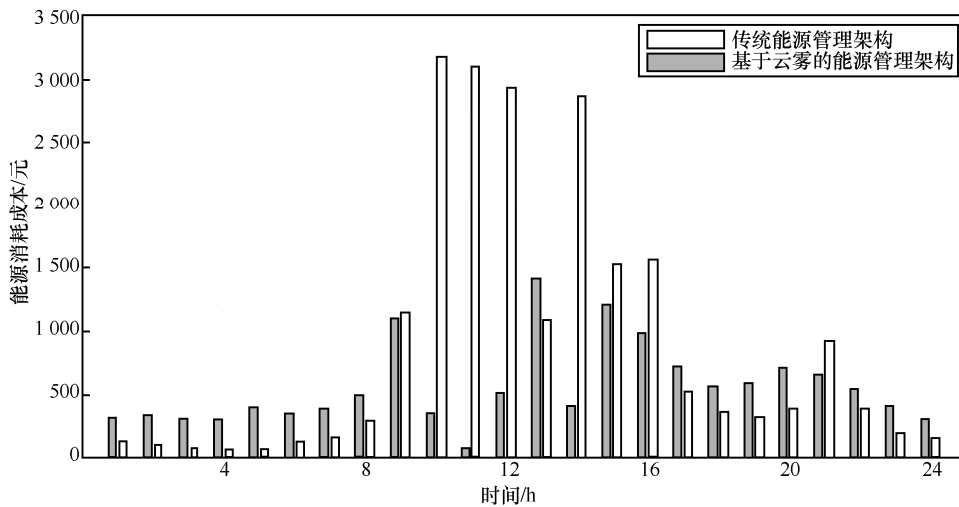


图6 各时间段工业设备能源消耗成本对比

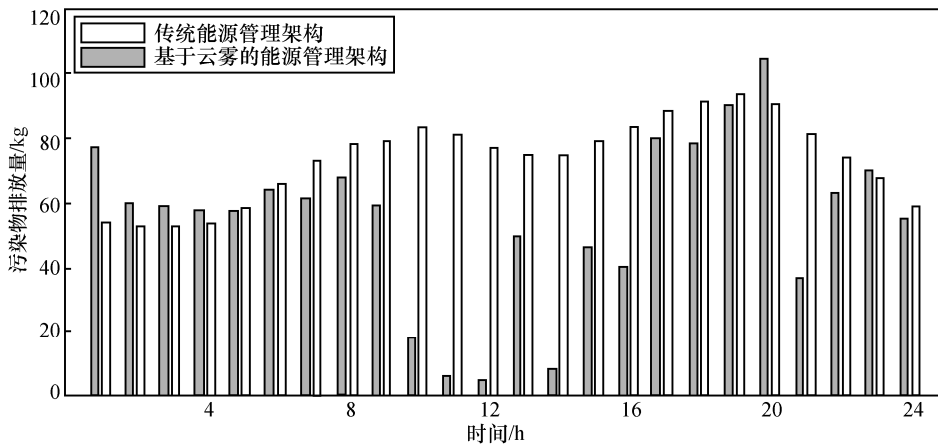


图7 各时间段工业设备污染物排放对比

能显著降低工业设备的能源消耗成本和污染物排放量,证明了该架构的高效性和绿色性。云计算技术与雾计算技术的融合是技术发展的趋势,而本文中的渗透模型,能有效融合云计算与雾计算,使得云雾资源得到更加合理高效的利用。同时,本架构的实施将有助于工业物联网中能源高效、绿色的利用,为解决工业物联网能源管理问题提供了一种新思路,可有效促进工业物联网的快速健康发展。

参考文献:

- [1] BIN S, GUIQING Z, SHAOLIN W, et al. The development of management system for building equipment internet of things[C]//2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks, May 27-29, 2011, Xi'an, China. New Jersey: IEEE Press, 2011: 423-427.
- [2] BARCELO M, CORREA A, LLORCA J, et al. IoT-cloud service optimization in next generation smart environments[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 4077-4090.
- [3] WANG K, WANG Y, SUN Y, et al. Green industrial internet of things architecture: an energy-efficient perspective[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(12): 48-54.
- [4] 刘勇, 闫鲁杰. 基于物联网、云计算和大数据的工业能源管理系统[J]. 供用电, 2014(12): 28-32.
LIU Y, YAN L J. Industrial energy management systems based on internet of things, cloud computing and large data[J]. Distribution & Utilization, 2014(12): 28-32.
- [5] CHOUBINEH M, MOHAGHEGHI S. Optimal energy management in an industrial plant using on-site generation and demand scheduling[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 1945-1952.
- [6] 房秉毅, 张云勇, 程莹, 等. 云计算国内外发展现状分析[J]. 电信科学, 2010, 26(S1): 1-6.
FANG B Y, ZHANG Y Y, CHENG Y, et al. Analysis of the development of cloud computing at home and abroad[J]. Telecommunications Science, 2010, 26(S1): 1-6.
- [7] 吴吉义, 平玲娣, 潘雪增, 等. 云计算: 从概念到平台[J]. 电信科学, 2009, 25(12): 23-30.
WU J Y, PING L D, PAN X Z, et al. Cloud computing: concept and platform[J]. Telecommunications Science, 2009, 25(12): 23-30.
- [8] SARKAR S, CHATTERJEE S, MISRA S. Assessment of the suitability of fog computing in the context of internet of things[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2015(99): 1.
- [9] LIU Q. Key technologies and applications of internet of things[J]. Computer Science, 2010: 197-200.
- [10] YI S, LI C, LI Q. A survey of fog computing: concepts, applications and issues[C]//The 2015 Workshop on Mobile Big Data, June 21, 2015, Hangzhou, China. New York: ACM Press, 2015: 37-42.
- [11] BONOMI F, MILITO R, ZHU J, et al. Fog computing and its role in the internet of things[C]//The First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing, August 17, 2012, Helsinki, Finland. New York: ACM Press, 2012: 13-16.
- [12] BONOMI F, MILITO R, NATARAJAN P, et al. Fog computing: a platform for internet of things and analytics[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2014.
- [13] DENG R, LU R, LAI C, et al. Optimal workload allocation in fog-cloud computing toward balanced delay and power consumption[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6): 1171-1181.
- [14] SHARMA V, YOU I, KUMAR R, et al. Computational offloading for efficient trust management in pervasive online social networks using osmotic computing[J]. IEEE Access, 2017(5): 5084-5103.
- [15] 程锦堃, 陈巍, 石远明, 等. 5G 室内密集立体覆盖的计算通信: 架构、方法与增益[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 41-53.
CHENG J K, CHEN W, SHI Y M, et al. Computational communication for three-dimensional dense coverage in 5G systems: architecture, approach and gain[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(6): 41-53.

[作者简介]



赖春媛(1992-),女,南京邮电大学硕士生,主要研究方向为能源互联网、智能优化算法和能源优化调度。



闫文卿(1995-),男,山东科技大学计算机科学与工程学院在读,主要研究方向为智能计算在能源互联网及工业互联网中的应用。



元晋(1983-),男,博士,南京邮电大学物联网学院网络工程系主任、副教授,主要研究方向为新一代网络与数据通信理论及技术、人工智能算法在工业互联网及能源互联网中的应用。