

一种基于云的软 PLC 系统架构研究

陈 海^{1,2}

(1.中电智能科技有限公司,北京 102209;2.华北计算机系统工程研究所,北京 100083)

摘要:在工业自动化领域,工厂的控制常由可编程逻辑控制器(PLC)执行。随着自动化应用越来越小型化、柔性化,在这些领域使用、设计并维护一个完整的、基于硬件的 PLC 是不经济的,基于云的软 PLC 可以成为控制即服务的解决方案。介绍了一种基于云的多实例、可扩展的软 PLC 系统架构,并基于该模式评估了系统的实时性和可扩展性。最后,对未来工业应用中基于云的控制现场场景提出了展望。

关键词:工业控制;云;软 PLC

中图分类号: TP23

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200451

中文引用格式: 陈海. 一种基于云的软 PLC 系统架构研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(4): 97–100, 111.

英文引用格式: Chen Hai. Research on a soft PLC system architecture based on industrial cloud[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(4): 97–100, 111.

Research on a soft PLC system architecture based on industrial cloud

Chen Hai^{1,2}

(1.Intelligence Technology of CEC Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2.National Computer System Engineering Research Institute of China, Beijing 100083, China)

Abstract: In the field of industrial automation, factory control is often performed by Pro-grammable Logic Controller(PLC). With the application of automation becoming more and more miniaturized and flexible, it is uneconomical to use, design and maintain a full hardware-based PLC in these fields. The software PLC based on industrial cloud can become a Control-as-a-Service solution. This paper introduces a multi-instance and scalable soft-PLC system architecture based on industrial cloud. Furthermore, the real-time and scalability of the architecture based on industrial cloud are evaluated. Finally, an outlook to the prospect of cloud-based control scene in future industrial applications is given.

Key words: industrial control; cloud; soft PLC

0 引言

近几年,云计算在越来越多的领域成为了核心技术^[1-2]。云计算具备一些很重要的特性,如按需部署、动态可扩展、灵活性高、可靠性高、性价比高等。这些特性引起了工业自动化领域的关注,以研究新型云应用在自动化中的适用性。随着工业 4.0 和工业互联网的出现,云将成为工业系统中主要的基础设施、服务和算法都将在云端分布式执行。软 PLC 是该系统下的一种应用,可以在云端采集传感器数据并对工厂进行控制。但是,连接到云系统的软 PLC 不能保证系统的硬实时性,因此基于云的软 PLC 不适合运行有硬实时性要求的关键控制程序。

然而,基于云的软 PLC 有以下优点:

(1)软 PLC 比硬件 PLC 更容易部署和改进,可以作为系统开发与调试期间的一种控制手段;

(2)软 PLC 的冗余成本远远低于硬件 PLC 系统,可以大大节约系统建设成本;

(3)基于云的软 PLC 价格低廉、易于扩展,可以迅速在一些新兴领域取得突破效果,如工业互联网、工业 4.0 及物联网等应用。

为了能够在这些场景下进行应用,需要对基于云的软 PLC 系统进行深入研究。本文提出了一种多实例可扩展的软 PLC 系统架构,分析了在云环境下部署和执行软 PLC 的可行性,并对实时性、可靠性等关键性指标进行了评估,阐述了基于云的控制系统可能的现实场景。

1 工业控制需求

工业控制的应用范围很广范,包括过程自动化、离散制造、发电配电、楼宇控制等领域。为了满足这些多方面应用不断增长的需求,自动化系统需要不断创新,从而采用其他领域已被验证的新技术。例如,基于 PC 的高性能控制器补充了传统的控制器在性能上的不足,并且可以在控制器中集成如 HMI、MES 等额外的应用程序。智能化现场设备的出现导致控制现场越来越分散,更有利于基于云的软 PLC 分布式部署。

通常情况下,实时控制是在固定周期内进行的。例如每50 ms进行一次数据采集、执行算法、控制输出,这种方法非常适合硬件PLC中通常存在的固定资源。然而部署在云端的软PLC系统的负载不太好预测,资源效率是软件提供最佳操作的关键,基于事件的控制方法显得更有意义。在这种方法中,算法的执行只在更改输入时触发,可以节省不必要的计算周期,然而这种方法从传统控制角度来看,会使得整个控制算法的执行不可预测。因此,在讨论基于云的软PLC控制应用场景时,应该按以下分类确定该架构何时可行。

(1)硬实时:自动化系统错过了控制截止时间,导致整个自动化系统失效。系统保证所有的控制截止时间是第一要务,例如锅炉的控制。

(2)强实时:系统可以容忍一些控制截止时间的延迟,但系统的服务等级会下降。如果错过了所有的控制截止时间,系统失效。例如零件分拣控制是允许一定比例的漏检的,但该比例需控制在一定范围内。

(3)软实时:系统错过控制截止时间仅仅会降低系统的服务质量,响应时间的平均值可接受即可,允许每次控制在一定范围内波动。例如视频会议控制系统是允许数据包延迟的。

由此可见,基于云的软PLC控制仅仅可以用于软实时控制或者强实时控制中的特定场合,如楼宇自动化、太阳能电池板控制、电动汽车充电站等。

2 当前研究进展

工业控制系统对实时性的要求从自动化金字塔的顶部到底部逐渐增强,如图1所示。最高层级的系统对实时性要求并不高,如ERP和MES系统,研究人员已经将云计算与生产制造系统进行了融合^[3-4]。在控制系统的监控层级(SCADA)移到云端也有了一定研究,国外率先提出了一种能够部署在云端基于Web的SCADA系统^[5-7]。

底层PLC系统对实时性的限制以及对可靠性和安全性的严格要求,限制了基于云的软PLC系统的研究和

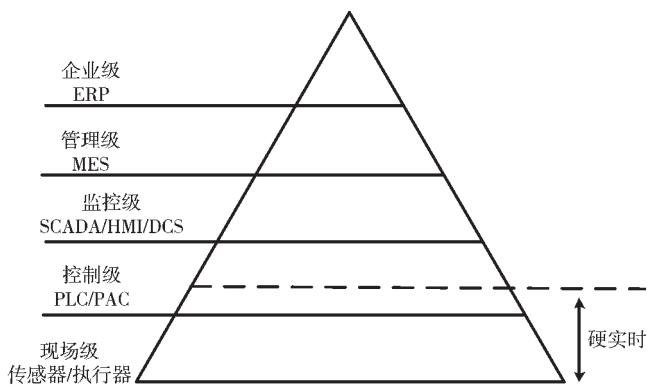


图1 自动化金字塔

应用。

3 基于云的软PLC系统架构

3.1 云计算软件体系架构

在软件架构中,高级的架构设计理论在解决特定的架构需求时扮演了十分重要的角色。本文的软件体系架构参考了专门为云计算系统创建的软件架构设计方法^[8],提高了系统的可伸缩性、可维护性、可定制性和可用性。如图2所示^[9],软件体系架构分为客户端、会话层、应用层、数据库层4个层级,4个层级依次串行交互。

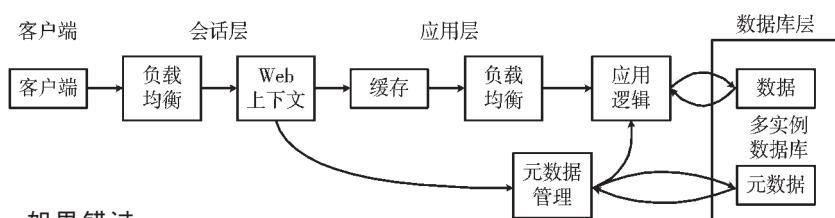


图2 云计算软件体系架构

3.2 OpenPLC

OpenPLC^[10]是一款开源的PLC运行时软件,能够在多个平台下进行安装应用。OpenPLC是根据IEC 61131-3标准创建的,支持结构化文本(ST)、指令列表(IL)和功能框图(FBD)等多种语言的编程解析及执行功能。OpenPLC能够与Arduino开源硬件配套使用。本文描述的基于云的软PLC架构中,外部输入信息通过网络通信输入给OpenPLC实例,OpenPLC实例将已编好的PLC程序解释执行并将结果输出,如图3所示。

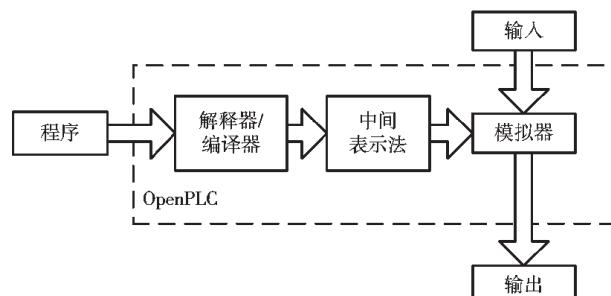


图3 OpenPLC实例的应用

3.3 基于云的软PLC系统架构

基于云的软PLC系统架构根据上文提到的软件体系架构进行搭建,融合了云计算的多种优秀特性,其中包括通过消息总线使用云级通信,并且使用了平台即服务(PaaS)的功能,保证系统的快速部署和组件的可扩展性。

3.3.1 云端通信

如图4所示,基于云的软PLC系统与受控工业现场的本地组件(例如传感器和执行器)通过基于OPC-UA的连接器进行通信。OPC-UA^[11]是最新的OPC标准,通过提供一个完整的、安全和可靠的跨平台的架构,以获取实时和历史数据和时间。OPC-UA为工业系统的互联

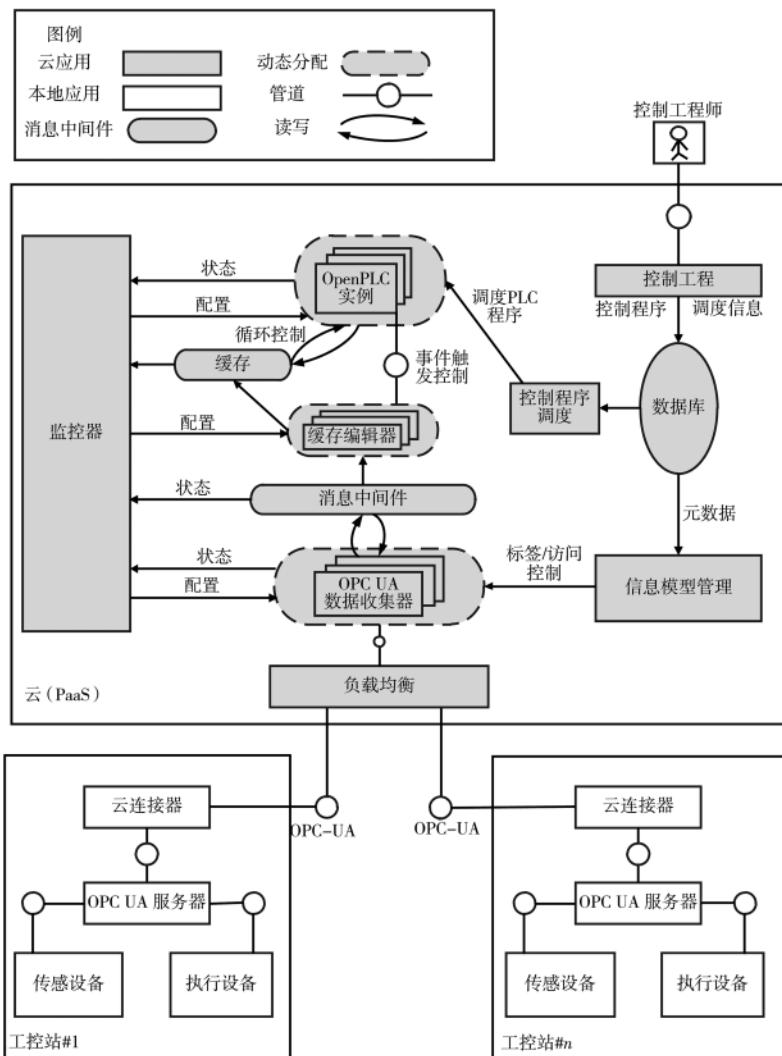


图 4 基于云的软 PLC 系统架构

互通提供了统一的访问方式、更好的认证互操作性、设计的可靠性，并提供标准的安全模型。OPC-UA 是客户–服务器协议，支持二进制 TCP 协议、HTTP(s) 协议和 XML Web 服务等功能，客户端启动连接后可订阅服务器数据。

3.3.2 基于云的软 PLC 系统组件

云系统的内部操作(如部署、监视、维护)和扩展系统的应用程序和服务等功能由 PaaS 平台实现。主流的 PaaS 平台提供了许多云模型^[12]。例如 CloudFoundry 提供了监视已部署的应用程序并可以弹性扩展的方法；提供了健康管理器，在系统出现故障时会自动重新启动故障组件；在充分利用 CloudFoundry 所提供的云级特性基础上设计如图 4 所示的应用程序架构，下面将分别介绍软 PLC 系统中的重要组件。

(1) 监控器

监控器组件作为弹性管理器负责监视系统的各种统计信息，例如面向消息的中间件中的队列长度或应用程序的 CPU 负载。基于这些统计数据，监控器可以利用

PaaS 的 API 动态生成数据收集器、缓存编写器和软 PLC 本身的新实例。

(2) 数据收集器

为了保证分布式云组件的负载均衡，负载均衡器接收所有数据并分发到适当的数据收集器实例。数据被 OPC-UA 数据采集器实例收取后，它就被转发到由面向消息的中间件(MOM)组成的中央通信组件(RabbitMQ)，数据收集器确保安全的处理来自客户端的数据，并将其映射到适当的交换队列。

(3) 缓存编写器

将控制算法的执行与软 PLC 的状态分离，即设计一片内存缓冲区域，该缓存由 MOM 中的缓存编写器进行填充。它确保现场传入数据和 PLC 结果的缓存值始终是最新的。因此，在软 PLC 出现故障时，新生成的实例可以根据缓存中存储的值轻松地继续控制计算。

(4) 控制工程

对于控制算法中的输入/输出变量或调度属性等映射关系，需要定义一个 UI 组件进行可视化配置^[13]。控制算法和调度信息存储在文档数据库中。

(5) 控制程序调度器

控制程序调度器负责将控制程序加载到软 PLC 实例中，并指定程序的循环执行或触发执行方式。软 PLC 实例间的通信通过 MOM 中的一个监听所有软 PLC 实例的特殊控制队列实现^[14]。

(6) 软 PLC 组件

执行控制算法的核心组件就是基于 OpenPLC 的软 PLC 组件。软 PLC 组件作为云架构中的应用组件，允许动态缩放和分配工作负载。在这种模式下一组激活的软 PLC 实例可以同时执行一系列控制程序。控制程序按周期运行，并根据给定的输入值计算输出值。为了使软 PLC 的输入输出与状态无关，这些值存储在缓存组件中。通过从数据库加载程序并且使用缓存中的内部状态值，可以在不同的软 PLC 中执行新的循环，这使得工作负载可以按需快速弹性地分配到负载较少的实例上^[15]。

4 实验仿真分析

由于实验条件有限，使用 VirtualBOX、OpenPLC、Node-RED^[13]、CloudFoundry 等软件工具单个实例的实时性进行实验仿真分析。硬件配置：i58250u，主频 1.8 GHz，内存 16 GB，硬盘 256SSD。

如图 5 所示，PLC 程序以固定的间隔 T_1 周期性地读取发生器的生成的 I/O 设备输入，并将反向值写入输出，

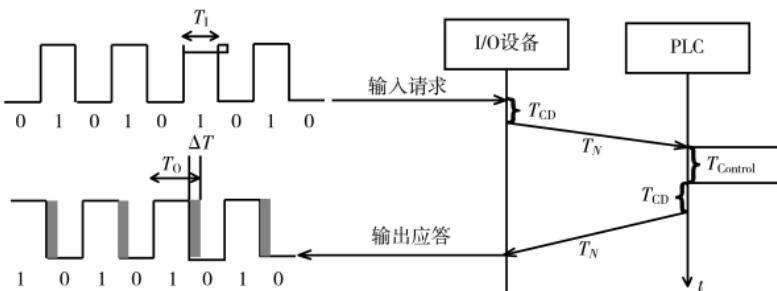


图 5 I/O 设备数据传输图

使用示波器测量并记录。输入信号间隔用 T_1 表示, 输出间隔用 T_0 表示。通常, 输出会受延迟影响, 记为 ΔT , 见方程式(1):

$$T_0 = T_1 + \Delta T \quad (1)$$

由于网络没有完全同步, 因此当帧开始在网络上传输时, 应考虑周期更新时间。该时间值在方程式(2)中显示为 T_{CD} 。在最坏的情况下, 如果一个帧在其上下游时间等待整个周期时间, 则该延迟将为 $2T_{CD}$ 。

$$T_{E2E} = 2T_{CD} + T_{Control} + 2T_N \quad (2)$$

用式(3)定义 N 个实验的 ΔT 的平均值, 作为评估基于云的软 PLC 系统性能指标。实验记录 $N=1\,000$ 次, 置信度为 90%。

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta T_j \quad (3)$$

如图 6 所示, 评估结果表明, 基于云的软 PLC 系统在输出端有一定延迟, 特别是对于较短的输入间隔, 系统的工作负载将大量增加, 从可编程逻辑控制器的 CPU 使用情况和网络流量来看, ΔT 值将更高, 这表明系统的性能较差。但是, 对于软实时应用来说, 性能降低是可以接受的, 因为对于这类应用来说, T_1 更高。

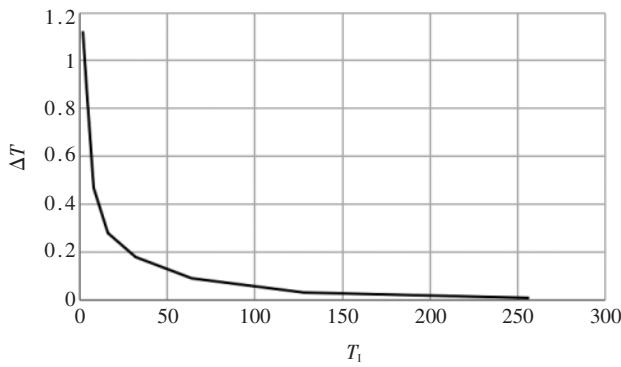


图 6 实时性折线图

5 结论

本文提出了一种基于云的多用户可扩展的软 PLC 系统架构, 并且根据最简单的单实例模式分析了系统的实时性, 从仿真实验分析结果得出结论, 在软实时控制系统中使用基于云的软 PLC 系统是可行的。但由于实验条件有限, 未能进一步测试多实例对系统实时性的影响、

系统的冗余恢复时间、内存数据库及消息中间件对系统的影响等质量指标。在接下来的工作中会搭建完善的系统原型, 并对系统中未测试的部分进行补充测试, 以明确该系统适合的应用场景。在未来, 将探索进一步的应用领域, 在工业 4.0 的过程中推进基于云的软 PLC 系统应用。

参考文献

- [1] BUGHIN J, CHUI M, MANYIKA J. Clouds, big data, and smart assets: Ten tech-enabled business trends to watch[J]. McKinsey Quarterly, 2010, 56(4): 75–86.
- [2] CHEN Y, DU Z, GARCIA-ACOSTA M. Robot as a service in cloud computing[C]. Fifth IEEE International Symposium on Service Oriented System Engineering. IEEE, 2010.
- [3] GILART-IGLESIAS V, MACIA-PEREZ F, MARCOS-JORQUERA D, et al. Industrial machines as a service: modelling industrial machinery processes[C]. 2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics. IEEE, 2007.
- [4] PEREZ F M, MARTINEZ J V B, JORQUERA D M, et al. Cloud agile manufacturing[J]. IOSR Journal of Engineering, 2012, 2(5): 1045.
- [5] YANG S H, CHEN X, ALTY J L. Design issues and implementation of internet-based process control systems[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(6): 709–720.
- [6] LANGMANN R, MAKAROV O, MEYER L, et al. The WOAS project: web-oriented automation system[C]. 2012 9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation(REV). IEEE, 2012.
- [7] KARNOUSKOS S, COLOMBO A W. Architecting the next generation of service-based SCADA/DCS system of systems[C]. Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011.
- [8] HEGAZY T, HEFEEDA M. Fault-tolerant industrial automation as a cloud service[C]. Proceedings of the 4th Annual Symposium on Cloud Computing, 2013.
- [9] KOZIOLEK H. The SPOSAD architectural style for multi-tenant software applications[C]. Proceedings of the 9th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA'11), Workshop on Architecting Cloud Computing Applications and Systems. IEEE, 2011.
- [10] OpenPLC[EB/OL].[2020-06-04].<https://www.plcopen.org>.
- [11] MAHNKE W, LEITNER S H, DAMM M. OPC unified architecture[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [12] FEHLING C, EWALD T, LEYMANN F, et al. Capturing cloud computing knowledge and experience in patterns[C]. IEEE International Conference on Cloud Computing. IEEE, 2012.
- [13] GOLDSCHMIDT T. Towards an infrastructure for domain-

(下转第 111 页)

4 结论

通过对已有的压缩感知观测矩阵算法进行优化,本文提出一种结合 QR 分解与自适应梯度下降的观测矩阵优化算法,获得了性能较优的观测矩阵。该矩阵具有较高的列独立性,并且与稀疏基之间具有较低的互相关性。实验结果表明了该算法的有效性,并在重建质量方面有较大的优势。后期的研究工作将着力于进一步降低算法的复杂度,提高重建信号的效率。

参考文献

- [1] 胡行华,史明洁.帐篷混沌序列稀疏测量矩阵构造[J].传感器与微系统,2017,36(7):50–54.
 - [2] CANDÈS E J.The restricted isometry property and its implications for compressed sensing[J].Comptes Rendus Mathématique,2008,346(9–10):589–592.
 - [3] DONOHO D L, ELAD M.Optimally sparse representation in general(nonorthogonal) dictionaries via L1 minimization[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2003,100(5):2197–2202.
 - [4] GRIBONVAL R, NIELSEN M.Sparse representations in unions of bases[J].IEEE Transactions on Information Theory,2004,49(12):3320–3325.
 - [5] ELAD M.Optimized projections for compressed sensing[J].IEEE Transactions on Signal Processing,2007,55(12):5695–5702.
 - [6] ABOLGHASEMI V, FERDOWSI S, SANEI S.A gradient-based alternating minimization approach for optimization of

(上接第 100 页)

specific languages in a multi-domain cloud platform[C]. European Conference on Modelling Foundations and Applications , 2014.

[14] SHUE D , FREEDMAN J M , SHAIKH A .Performance isolation and fairness for multi-tenant cloud storage[C]. Proceedings of the 10th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation, ser. OSDI'12.Berkeley

(上接第 106 页)

(收稿日期:2020-05-26)

作者简介：

顾能华(1978-),男,硕士研究生,中级实验师,主要研

the measurement matrix in compressive sensing[J].Signal Processing , 2012 , 92(4) : 999–1009.

- [7] 赵瑞珍,秦周,胡绍海.一种基于特征值分解的测量矩阵优化方法[J].信号处理,2012(5):49–54.
 - [8] DONOHO D L.Method and apparatus for compressed sensing: US 2010.Compressed sensing[J].IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289–1306.
 - [9] SZAREK S J.Condition numbers of random matrices[J].Journal of Complexity, 1991, 7(2): 131–149.
 - [10] DONOHO D L.Compressed sensing[J].IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289–1306.
 - [11] 李昕艺,刘三阳,谢维.基于共轭梯度法的感知矩阵优化方法[J].浙江大学学报(理学版),2019, 46(1): 18–24.
 - [12] 孙超.基于后验信息和单位范数紧框架的图像测量矩阵优化[D].重庆:重庆邮电大学, 2020.
 - [13] 沈子钰,汪立新.步长自适应的测量矩阵迭代优化方法[J].计算机工程与应用, 2019, 55(1): 272–276.
 - [14] 蒋伊琳,佟岐,张荣兵,等.自适应梯度下降观测矩阵优化算法[J].计算机应用研究, 2017, 34(7): 1950–1952.

(收稿日期: 2020-05-23)

作者简介：

周琦宾(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:压缩感知、SAR图像处理。

吴静(1963-),通信作者,女,副教授,主要研究方向:目标识别、感知技术和智能算法等,E-mail:1320958927@qq.com。

余波(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:图像检测。

CA , USA : USENIX Association , 2012.

- [15] HUBER N.Evaluating and modeling virtualization performance overhead for cloud environments[C].Closer–International Conference on Cloud Computing & Services Science.DBLP , 2011.

(收稿日期:2020-06-04)

作者简介：

陈海(1986-),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:工控软件、嵌入式系统、智能制造。

究方向：计算机科学、嵌入式系统、电器智能化。

侯银银(1987-),女,硕士研究生,中级工程师,主要研究方向·电力系统数据分析 无功补偿。

韩雪龙(1988-),男,硕士研究生,初级实验师,主要研究方向:串力电子与串力传动

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所