

“雨燕”敏捷智能计算系统及应用研究

方科¹, 宁琨², 潘灵¹

(1.敏捷智能计算四川省重点实验室, 四川 成都 610036; 2.东方电气风电有限公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 针对部分工业所处恶劣边缘环境往往缺乏充足的计算存储和网络资源, 但又具有典型的超实时毫秒级数据密集型应用场景需求, 从总体架构、软硬件组成、关键技术 3 个方面介绍了基于敏捷智能计算技术的“雨燕”系统。该系统已在风电设备中得到验证性应用, 提升了用户优化风机运维检测能力, 减少停机损失, 降低运维成本, 同时展望了依托敏捷智能集群计算技术实现从单体风机智能运维到大规模风场智能运营的智慧风电应用前景。

关键词: 边缘计算; 运维; 智能集群; 风电

中图分类号: TP393

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201331

中文引用格式: 方科, 宁琨, 潘灵. “雨燕”敏捷智能计算系统及应用研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(4): 9-16, 23.

英文引用格式: Fang Ke, Ning Kun, Pan Ling. Research and application on agile intelligent system named “SWIFT”[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(4): 9-16, 23.

Research and application on agile intelligent system named “SWIFT”

Fang Ke¹, Ning Kun², Pan Ling¹

(1.Sichuan Key Laboratory of Agile Intelligent Computing, Chengdu 610036, China;

2.Dongfang Electric Wind Power Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: In view of the lack of sufficient computing, storage and communication network resources for computing equipment at the edge of inclement industrial environments, and the requirement for ms-level data processing response, the agile intelligent system named “SWIFT” was introduced from the general architecture, hardware and software composition and key technology. This system has been verified in wind power equipment, which improves the user's ability to optimize wind turbine operation and maintenance detection, and reduces downtime loss and operation cost. At the same time, it also discussed that the agile intelligent cluster computing technology could be applied in not only intelligent operation and maintenance of single wind turbine, but also the intelligent operation of large-scale wind farm.

Key words: edge computing; operations and maintenance; intelligent clustering; wind power

0 引言

随着全球工业数字化浪潮的到来, 5G、AI、大数据等新技术不断涌现。智能计算正在兴起, 成为“新基建”当中与工业互联网、物联网等行业系统的重要结合点和改变数据信息服务模式的关键创新之一, 有望带来更多的颠覆性业务模式^[1]。

许多企业已经针对工业资产实现了数字化, 并通过建立集中的物联网平台来收集、处理和分析这些资产数据。但行业智能时代, 除了需要对海量数据分析以实现各种智能场景外, 更需要不断优化计算力, 使其能匹配行业数字化带来的数据爆炸式处理压力^[2-4]。鉴于部分工业所处恶劣边缘环境(例如海上石油勘探平台、风电)往往缺乏充足的计算存储和网络资源, 但又具有典型的超实时毫秒级数据密集型应用场景需求, 仅依靠边缘计算技术是无法适用于机器学习和深度学习模型的^[5-9]。若能进一步建立深度学习计算框架对应用场景提供实

时决策能力, 扩展数据边缘性低延迟计算能力, 提高非传统计算硬件的利用率, 比如数字信号处理器(DSP)、现场可编程门阵列(FPGA)、多核 CPU 等, 则可从这些工业应用中获取更多的价值。

1 敏捷智能计算概念

如图 1 所示, 敏捷智能计算是一种“边缘计算+实时处理+异构部署+智能服务”的计算模式, 在靠近物或数据源头的网络边缘侧, 融合网络、计算、存储、应用核心能力的分布式开放平台, 以弹性、轻量级、虚拟化、异构和硬件友好为特征, 在嵌入式异构处理平台上实现大规模并行计算和智能算法应用。因此, 敏捷智能计算是边缘计算与人工智能的结合, 让每个边缘计算的节点都具有计算和决策的能力。

云计算、边缘计算、敏捷智能计算的特点如表 1 所示。与云计算、边缘计算相比, 敏捷智能计算除了拥有更高的安全性、更低的功耗、更短的时延、更高的可靠性、

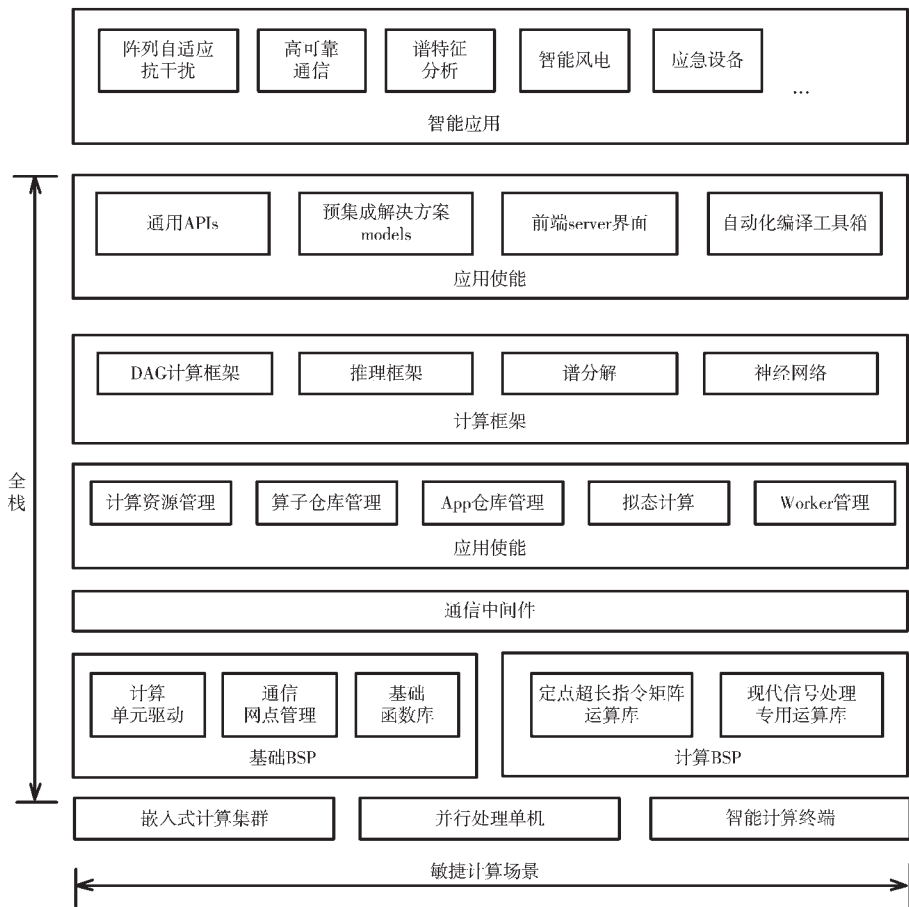


图 1 敏捷智能计算模式

表 1 三种计算模式的特点

计算模式	技术特点及优势应用场景
云计算	云计算擅长全局性、非实时、长周期的大数据处理与分析,能够在长周期维护、数据模型训练、业务决策支撑等领域发挥优势
边缘计算	边缘计算可以很好地弥补云计算在时延、安全、能耗等方面的不足,擅长局部性、实时、短周期数据的处理与分析,更适用于本地计算密集型业务
敏捷智能计算	基于嵌入式异构硬件资源,具有计算和决策的能力,支持算力的灵活部署和调度,满足边缘业务对多样性计算的需求,既适合需要计算平台执行复杂调度任务的计算密集型应用,又适合需要高效完成海量数据并发处理的数据密集型应用

更低的带宽需求以外,还可以更大限度地适配相对恶劣的工作条件与运行环境,利用时敏数据,将计算与用户、业务结合,具有丰富的行业应用场景,强化现场级控制力,让数据变得更有价值,应对异构型边缘生态系统所带来的挑战^[10-11]。因此,敏捷智能不是简单地把边缘计算搭建起来,把计算方式从云计算落实到贴地计算,而是基于兼备灵活性(边缘、异构)和知识性(智能)的框架,牢牢把握住了业务发展逻辑的核心——弱化硬件平台本身的价值,凸显深度定制化的行业赋能赋智能力,尤其是高机动平台、工业现场等恶劣环境,通过集成大量

嵌入式通用芯片和并行计算架构、智能计算引擎来提供充裕的敏捷智能计算能力,从而在军事智能、工业赋能领域实现较高的性能和效能^[12]。

2 “雨燕”敏捷智能计算系统

2.1 总体架构

针对高机动移动平台和恶劣运行环境下体积小、功耗低等需求,“雨燕”敏捷智能计算系统以嵌入式环境下可颗粒化计算资源(如多核 DSP、多核 CPU、多个 FPGA 分区等)作为基础计算单元,采用了与超算系统类似的工作方式。在用户任务需要运行时,通过千兆以太网接收用户界面(如浏览器网页)提交的任务请求,根据用户任务请求所需要的计算和通信资源,在计算平台资源池上完成计算平台任务部署和资源调度;在需要停止指定的任务时,通过用户页面上的取消按钮,就可以结束当前任务的执行,将该任务占用的计算资源回收,供后面的任务使用。

“雨燕”系统采用四层结构:颗粒化计算资源组成的物理平台层、容器虚拟化的计算资源虚拟化层、基于 RTFrame 的敏捷智能计算框架层和负责任务编排管理的应用层,并通过可视化 Web 前端提供异构资源池化服务和敏捷智能计算服务,如图 2 所示。

(1)物理平台层主要采用高性能多核 DSP 芯片,也支

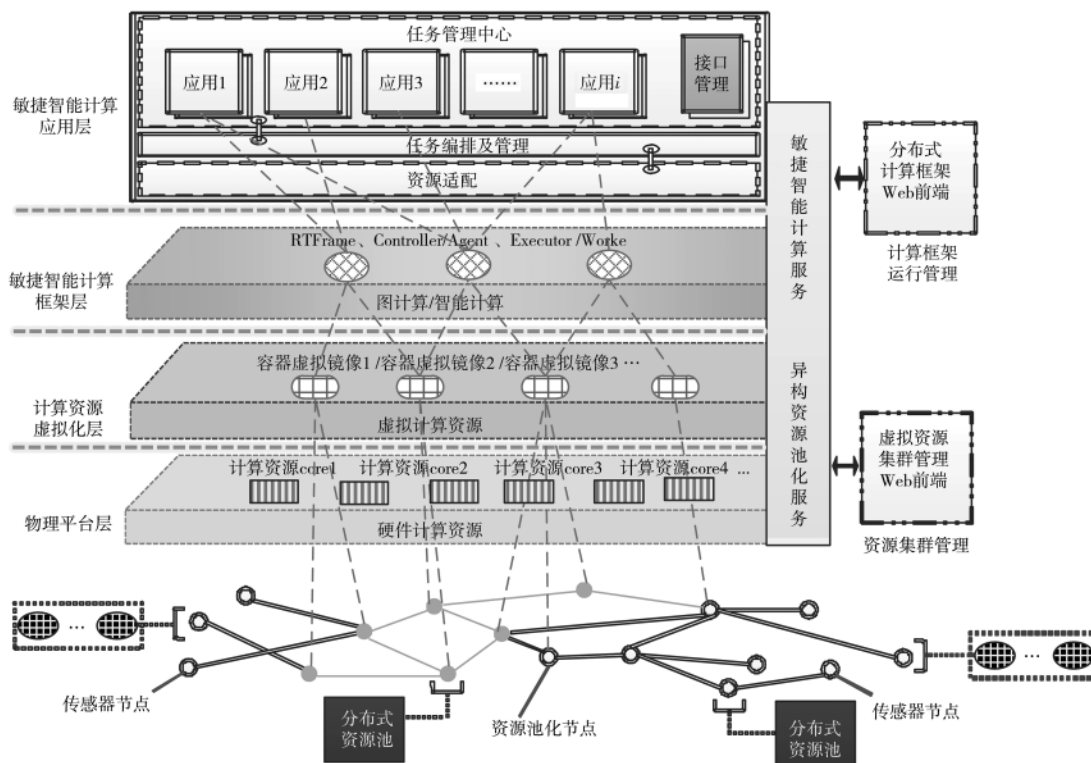


图2 “雨燕”系统总体架构

持FPGA、多核CPU等其他嵌入式硬件计算资源。物理形态一般由标准模块根据不同的算力规模任意堆叠,自主研制千核互联体系结构,具有灵活的扩展能力。

(2)计算资源虚拟化层主要针对轻量级嵌入式资源虚拟化的需求,基于容器虚拟化技术,完成对物理平台层各类异构计算资源的虚拟化,实现不同应用算法的容器虚拟化镜像和嵌入式异构资源的管理。

(3)敏捷智能计算框架层是在计算资源物理平台层和虚拟化层之上,面向不同应用算法所需的大规模并行计算需求,通过RTFrame等智能计算框架,构建实时计算图,形成对应应用所需计算资源的分布式协同计算服务能力。

(4)敏捷智能计算应用层主要通过可视化的计算任务编排和框架运行管理接口,实现应用所需的计算资源适配及资源调度。

2.2 软硬件组成

“雨燕”敏捷智能计算系统硬件平台由机箱、背板、系统控制模块、嵌入式计算模块、网络交换模块组成,如图3所示。系统控制模块通过千兆以太网接受Web浏览器控制,同时通过千兆以太网与网络交换模块、嵌入式计算模块进行指令、响应数据交互。单块嵌入式计算模块集成了颗粒化计算资源芯片(如多核DSP、多个FPGA分区、多核CPU),利用千兆以太网络和高速交换网络(如Rapid IO网络、高速万兆网等),实现实时计算总线网络与调度总线网络的分离。

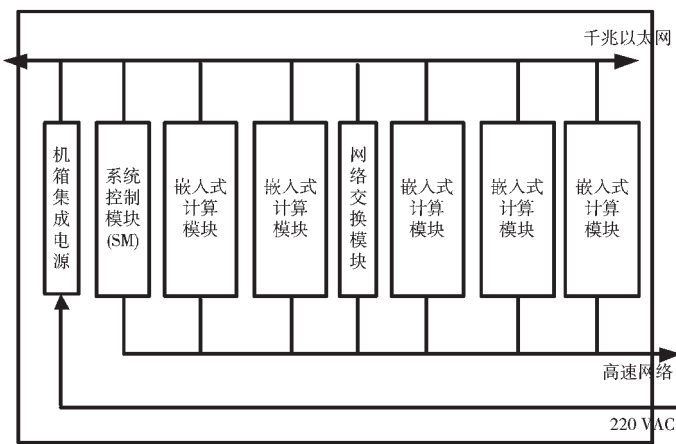


图3 “雨燕”敏捷智能计算系统硬件组成

“雨燕”敏捷智能计算系统软件组成根据功能和运行位置的不同包括四类:Master软件、节点代理类软件、实时执行器类软件和非实时执行器类软件。分别对应Master软件框架、节点代理软件框架、实时执行器软件框架和非实时执行器软件框架,如图4所示。

Master软件框架包括:Linux操作系统、TCP/IP通信软件 and Master软件,其中,Master软件又包含了RTFrame总任务驱动器、RTFrame系统总控制器和RTFrame节点中管理器;一个系统只能有一个Master。

节点代理软件框架包括:Linux操作系统和BSP驱动软件、TCP/IP和本地CMD通信软件 and Agent代理软件,其中,Agent代理软件又包含了RTFrame节点控制器

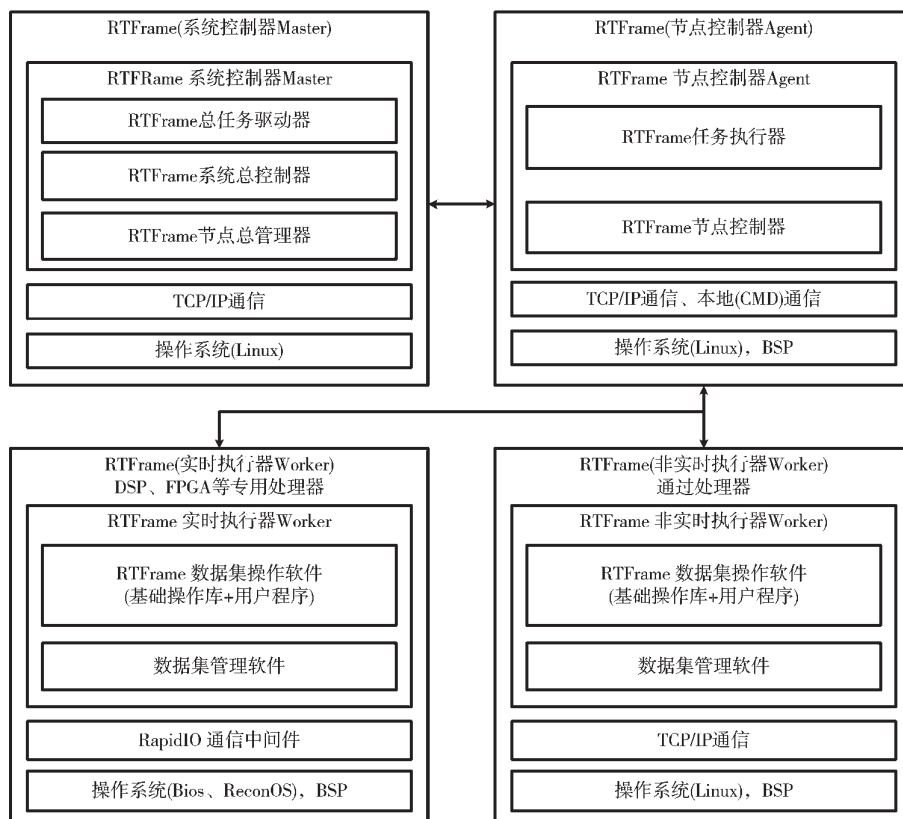


图4 “雨燕”敏捷智能计算系统软件组成

软件和 RTFrame 任务执行器,一个节点可以运行多个 RTFrame 任务执行器;通常一个系统有多个 Agent 节点。

实时执行器软件框架包括:嵌入式处理器操作系统和 BSP 驱动软件、RapidIO 通信中间件软件和 RTFrame 执行器软件,其中,RTFrame 执行器软件又包含了 RTFrame 数据集操作软件和数据集管理软件,而 RTFrame 数据集操作软件由基础操作库和用户程序组成。

非实时执行器软件框架包括:Linux 操作系统和 BSP 驱动软件、TCP/IP 通信软件和 RTFrame 执行器软件,其中,RTFrame 执行器软件又包含了 RTFrame 数据集操作软件和数据集管理软件,而 RTFrame 数据集操作软件由基础操作库和用户程序组成。

此外,图中实时和非实时主要是针对执行器之间的通信是否采用实时传输总线而进行区分的,嵌入式处理器之间通过 RapidIO 等总线高速互联则称为实时执行器类软件,如果系统总线为非实时的以太网总线,那么称为非实时执行器类软件,此时系统退化成为一种以太网环境下的通用云计算平台。

3 关键技术

3.1 RTFrame 实时计算管理框架

实时计算管理框架(RTFrame)是“雨燕”敏捷智能集群计算系统在教育中的应用管理中枢,主要包括通用调度域和实时计算域两个维度,通用调度域包含系统控制器(Master)、任务驱动器(Driver)、节点控制器(Agent)、执行器组管理

器(WorkerMgr)几个功能模块,实时计算域中是多个执行器,承担实质的实时计算任务,如图5所示。

任务驱动器是并行计算框架实时计算域任务部署、管理、执行过程监控的核心部件,每个任务对应一个任务驱动器,系统中可同时存在多个任务驱动器。每个任务驱动器在新任务下发后由系统控制器产生,负责任务部署和任务执行整个生命周期的管理,在任务结束后销毁。

节点控制器处在通用调度域中主节点和从节点之间承上启下的位置,与主节点的系统控制器和任务驱动器均有信息的交互,同时控制着执行器组管理器的运行。

系统控制器运行在系统控制节点,负责所有资源的管理和所有分布式应用的管理,包括四大功能模块:集群资源管理模块、任务监控模块、系统配置管理模块、前后端接口管理模块。

3.2 实时计算图表征与构建技术

实时计算图的表征和构建是“雨燕”敏捷智能集群计算系统在教育中的应用功能抽象实现,并行计算架构为适应大规模计算资源的自主高效配置与调度,采用实时计算图的方式对应用的计算任务进行表征与构建。实时计算图的运行过程就是计算图中多操作到硬件资源的部署过程,如图6所示。大规模计算图或者多计算图并行运行时,这些图的运行需要将计算图中的多操作并行部署到计算域中通用的计算资源中去。

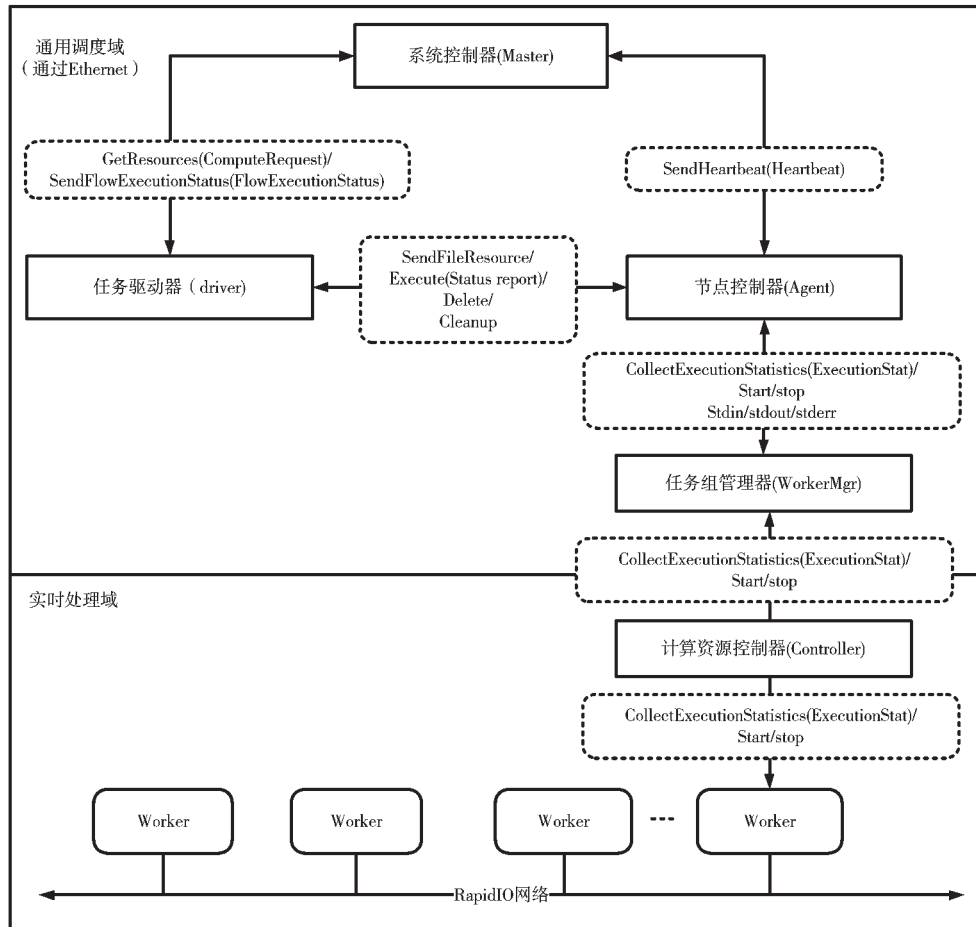


图 5 RTFrame 实时计算管理框架

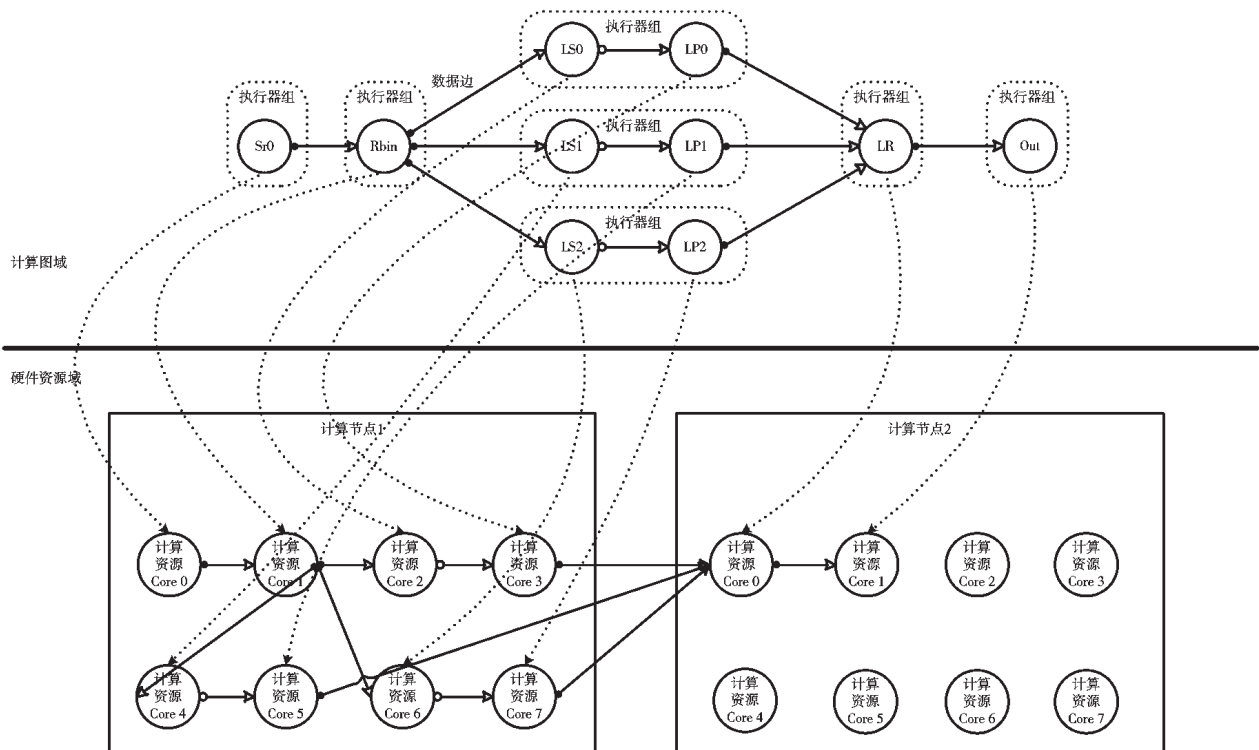


图 6 实时计算图表征与硬件资源映射

3.3 执行器 Worker 高性能通信技术

执行器 Worker 高性能通信是“雨燕”敏捷智能集群计算系统中的应用信息实时交互通道,执行器(Worker)可部署于不同计算节点的计算核上,也可部署于同一个计算节点的不同计算核上,因此必须要实现每个计算图中各执行器之间通信与位置的解耦,并满足执行器间通信的高效性和实时性。执行器之间基于本地共享内存与SRIO总线共享内存模型进行统一的内存映射通信技术,采用统一的虚端口进行信息交互,给每个执行器配置多个输入和输出数据虚通道。

为了简化虚通道配置流程,根据计算图的描述模式,采用后向节点配置前向节点的方式完成。虚通道配置流程见图7。可以看出,运行在执行器 n 上的通道配置管理程序根据相应的配置参数(ID号决定具体芯片,端口port决定具体虚通道)发送通道描述符信息给执行器1,执行器1收到通道描述符信息后根据对应信息完成相应发送通道配置,执行器 n 则完成本地接收通道的配置。发送通道和接收通道均配置完成后,即可建立起由执行器1发送到执行器 n 的块数据通道。

4 智慧风电领域的应用探讨

中国风电过去十年中飞速发展,装机规模和速度已经成为了世界第一,但是风电行业蓬勃发展的背后也面临巨大挑战。由于风场选址通常环境较为恶劣,导致设备运维管理的难度较大,如何通过边缘智能监控和预测性分析等先进技术手段实现风机甚至风场的智能运维,降低运维费用和提升发电效率是整个风电行业的重要发展方向之一^[13-15]。

如果将每台风机都视为边缘节点,通过有效利用风机上各类传感器产生的大量数据进行计算处理和特征

提取,有助于及早发现风电场设备运维管理中的异常情况,及时排除风电场安全隐患,从而大幅降低风机停机时间,增加发电时间,降低度电成本。但要将这些数据传输出去进行分析需要耗费高的带宽且难以满足实时性要求,智慧风电敏捷智能计算终端应运而生。

4.1 单体风机智能运维

智慧风电敏捷智能计算终端将“雨燕”敏捷智能计算技术与风电行业深度结合,在边缘端部署RTFrame实时计算管理框架对计算资源进行智能管理,以实时计算图表征与构建风机多通道传感器的有向无环数据流计算图,以高性能通信保障数据流的实时传输。实际应用中,将智慧风电敏捷智能计算终端随风机主控一起部署在每个风机上,通过先进的采集以及边缘计算策略,除了采集传统的传动链信息之外,还包括叶片、塔筒、螺栓、轴承以及电气系统等状态,根据采集到的信息基于不同的部件和特征机理,提供多元化的分析手段,实现对风机各设备的故障进行智能诊断,对设备状态进行智能评估,结合运维经验,实现运维决策自动化、智慧化,最大限度提升风机运行安全与发电效率。

4.1.1 单体风机智能终端

敏捷智能计算终端主要由三个单元构成,分别为多源传感器单元、传感器信号预处理单元、后端处理单元,如图8所示。多源传感器单元用于感知风机部件状态,包括双轴静态倾角传感器、声音传感器、振动加速度传感器、低频振动加速度传感器等;传感器信号预处理单元由信号调理和传感器信号采集两部分组成。信号调理用于为前端传感器提供电流,对传感器输出信号进行衰减、放大、滤波处理以满足后端ADC芯片输入要求。

智能处理单元进行多线程并行数据驱动的计算图

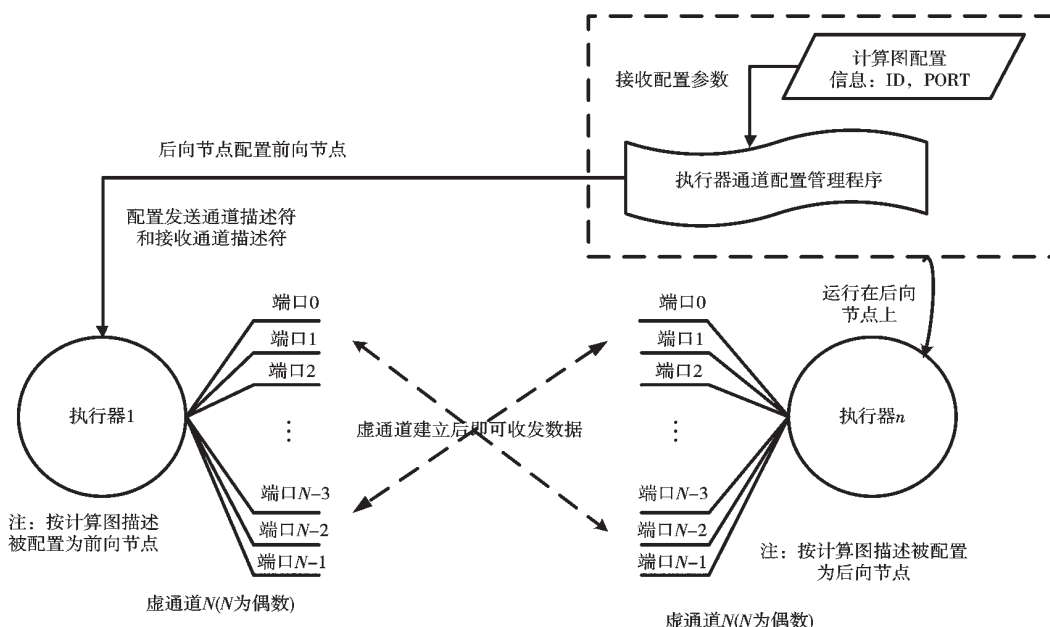


图7 虚通道配置流程图

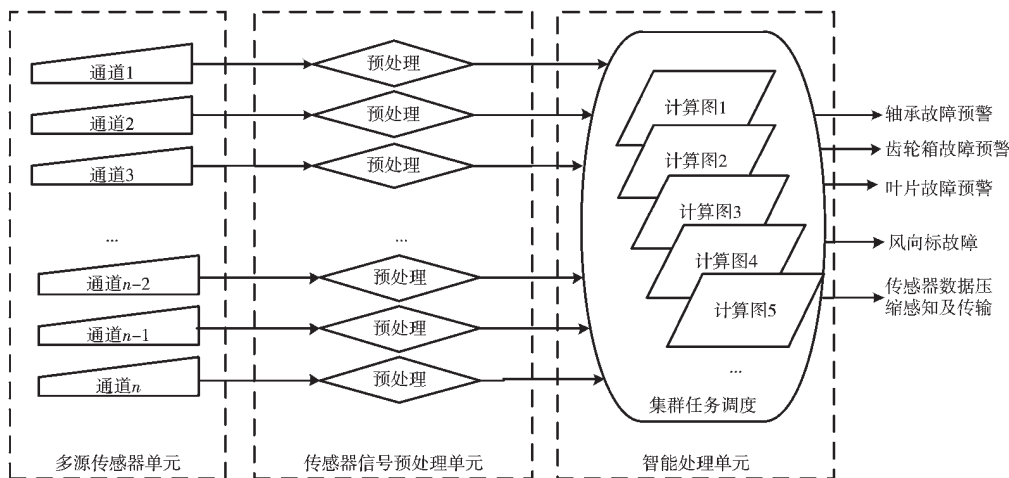


图 8 智慧风电敏捷智能计算终端构成图

处理,实现风电机组的多种类型多通路传感器数据(例如轴承端振动数据、齿轮箱振动数据、风向标标位数据、机组电压数据、机组电流数据等)智能处理,输出轴承故障状态、齿轮箱故障状态、叶片故障状态、风向标故障状态以及多源传感器的数据感知压缩传输等。针对不同具体风电机组的状态监测功能,实时构建的计算图如图9所示。当输入数据源为轴承振动数据时,根据计算图的流水有向无环图特征,数据流分别经历数据分发函数、神经网络算子推理、数据转发函数、结果输出函数操作,实现轴承状态分类,同时这些操作由RTFrame框架自动分配计算资源。

4.1.2 计算框架在轴承故障智能检测应用

“雨燕”敏捷智能集群计算系统的智能化主要体现在计算框架对神经网络计算框架、推理框架的支持,计算框架所包含的神经网络模型包将会以算子库的形式存在,并以应用库构建智能应用有向无环计算图,实现对具体场景的智能应用。下面以轴承故障智能检测进行举例分析,该功能应用构建的实时计算图如图9所示。

在风电智能终端轴承故障智能检测应用中,基于振动信号的故障诊断在保证轴承安全性能方面起着重要作用,而且轴承故障(滚珠故障、内圈故障、外圈故障等)具有随时间缓慢演变性,在进行故障诊断前,首先需要

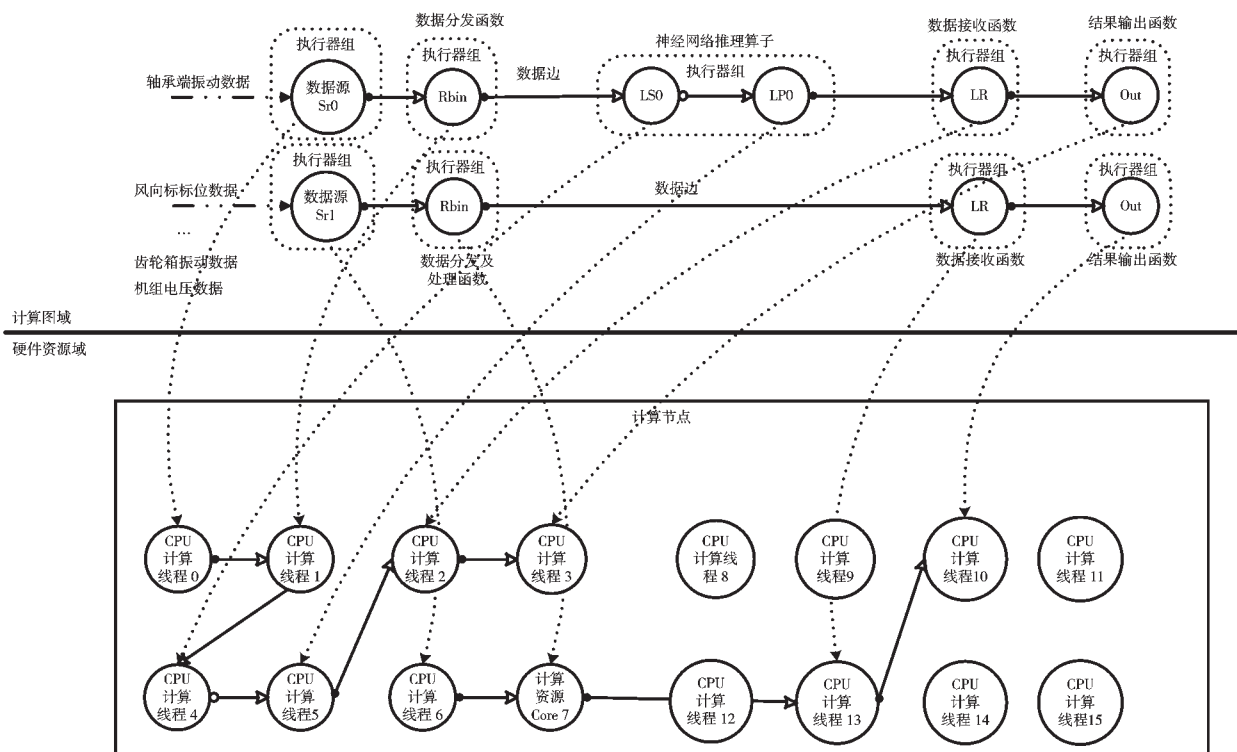


图 9 风电智能终端的功能应用实时计算图构建示例

进行信号特征提取。工程实现中建立了一维卷积神经网络(1DCNN),实现了轴承振动信号作为输入轴承故障状态作为输出的端到端轴承故障诊断方法,如图10所示。

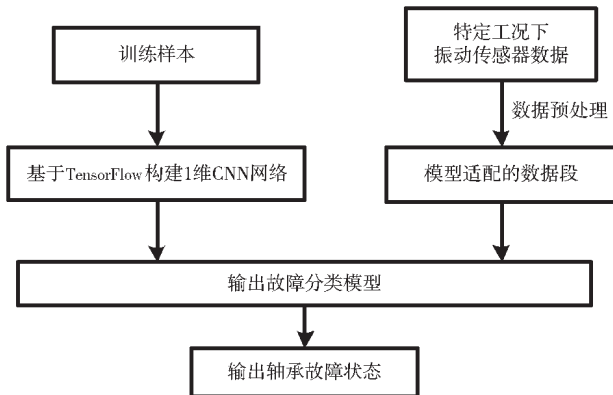


图10 轴承故障智能检测实现

由于特定工况下的故障数据难以采集,传统方法仅以发生故障出现了风电机组功能性丧失的情况下才进行检修和数据采集,对功能故障前的数据采集存储较少,因此难以直接使用工程中的故障数据。但是轴承故障具有渐变性,需要找到引起质变功能性故障前的故障状态进行提前预测维护,本文采用DC竞赛轴承故障检测训练赛的数据集^[16],数据集共1320条数据,每条数据6000个采样点,实际训练集为792条,测试集为528条。为了避免过拟合,分析了数据的周期性,以1000维度将单条数据分割为6份,将训练集扩大到4752条,大大减小了CNN过拟合的可能性。使用Keras搭建1DCNN网络模型并进行训练,代码如下:

```

model=sequential()
model.add(Conv1D(16,kernel_size=3,strides=1,activation=
'relu',input_shape=input_shape))
model.add(Conv1D(16,kernel_size=3,strides=1,activation=
'relu',))
model.add(Conv1D(16,kernel_size=3,strides=1,activation=
'relu',))
model.add(MaxPooling1D(pool_size=2))
model.add(Conv1D(32,kernel_size=3,strides=1,activation=
'relu',))
model.add(Conv1D(32,kernel_size=3,strides=1,activation=
'relu',))
model.add(Conv1D(32,kernel_size=3,strides=1,activation=
'relu',))
model.add(MaxPooling1D(pool_size=2))
model.add(Conv1D(64,kernel_size=3,strides=1,activation=
'relu',))
model.add(Conv1D(64,kernel_size=3,strides=1,activation=
'relu',))
model.add(Conv1D(64,kernel_size=3,strides=1,activation=
'relu',))

```

```
model.add(MaxPooling1D(pool_size=2))
```

.....

完成5000次训练后进行测试,使用测试集进行模型测试,模型达到99.8%的准确率。

4.2 大规模风场智能运营展望

智能风机是智慧风电中最基础的元素,当一个风场中所有的风机单体都配上敏捷智能计算终端之后,则可利用联邦管理技术将每个风机上智慧风电敏捷智能计算终端组网形成智慧风电敏捷智能计算集群,将多个智能计算终端获取的风机运维数据进行融合,大幅提升环网数据价值密度,利用“雨燕”系统强大的敏捷集群智能计算能力,感知风轮在流场中的气流形态,优化风电机组运行效率,对整个风场进行实时优化计算,提高整个风场发电效率。

5 结论

目前边缘计算已在“网-云-边-端”协同应用领域取得了令人瞩目的进步,而各类恶劣条件下超实时工业行业应用场景,直接驱动着人工智能在边缘计算平台上的应用。本文中的雨燕敏捷智能计算系统,融合了边缘计算、超异构计算平台、资源虚拟化集群管理、大规模并行计算框架、轻量级智能计算框架等关键技术,必将能在这类工业场景发挥行业赋能作用。本文只是对这种敏捷智能计算模式结合在风电行业已进行的赋能作用做了初步探索,随着相关研究及应用的深入开展,必将挖掘出智慧应急、智慧气象等更多的创新解决范式。

参考文献

- [1] 工信部信管[2020]197号文件.工业互联网创新发展行动计划(2021-2023年)[Z].2021.
- [2] ECC&N5A.边缘计算IT基础设施白皮书1.0[EB/OL].(2019-11-01)[2019-12-21].<http://www.econsortium.org/Lists/show/id/375.html>.
- [3] SDNLAB.2019大盘点:各家巨头公司的重大技术发布[EB/OL].(2019-12-24)[2020-01-20].<https://www.sdnlab.com/23805.html>.
- [4] 贾明权,钟瑜,潘灵,等.信号级协同计算平台架构及应用思考[J].电讯技术,2019,59(6):627-634.
- [5] SHENG S,VEERS P S.Wind turbine drivetrain condition monitoring-an overview[M].National Renewable Energy Laboratory,2011.
- [6] PULLEN A,SAWYER S.Global wind report[R].Annual market update 2014(2014).
- [7] CHEN Z,ZHANG L,WANG Z,et al.Research and application of data mining in fault diagnosis for big machines[C].International Conference on Mechatronics and Automation.IEEE,2007.
- [8] QI G,TSIAI W T,HONG Y,et al.Fault-diagnosis for reciprocating compressors using big data[C].2016 IEEE Second International Conference on Big Data Computing

(下转第23页)

- [25] RIVERA J, NASIRIFARD P, LEIMHOFER J, et al. Automatic generation of real power transmission grid models from crowdsourced data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5436–5448.
- [26] SHI Z, ZENG Y, SUN L. Operation and maintenance analysis for power communication networks based on big data[C]. 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2016.

(上接第 8 页)

- [2] ETSI. GS MEC 003. Mobile Edge Computing (MEC); framework and reference architecture[S]. 2016.
- [3] ETSI. GR MEC 004. Mobile Edge Computing (MEC); service scenarios[S]. 2015.
- [4] ETSI. GR MEC 010–2. Mobile Edge Computing (MEC); Part 2: Application lifecycle, rules and requirements management[S]. 2017.
- [5] ETSI. GR MEC 017. Mobile Edge Computing (MEC); Deployment of mobile edge computing in an NFV environment[S]. 2018.
- [6] 沈彬, 李海花, 高腾. 工业互联网技术洞察[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(6): 34–37.
- [7] 李庆, 刘金娣, 李栋. 面向边缘计算的工业互联网工厂内网络架构及关键技术探究[J]. 电信科学, 2019, 35(S2): 160–168.
- [8] 钮丹, 乐兰娟, 李欣, 等. 边缘计算在工业互联网平台建设中的应用探讨[C]. 中国造船工程学会会议论文集, 2019.
- [9] 穆域博, 柴瑶琳, 宋平, 等. 边缘计算发展现状及标准体系研究[J]. 信息通信技术, 2020, 14(4): 23–30.
- [10] 马吉军, 贾雪琴, 寿颜波, 等. 基于边缘计算的工业数据

(上接第 16 页)

- Service and Applications (BigDataService). IEEE, 2016.
- [9] SHAO Z, WANG L, ZHANG H. A fault line selection method for small current grounding system based on big data[C]. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2016.
- [10] KNORR E, GRUMAN G. What cloud computing really means[J]. InfoWorld, 2008(7): 20.
- [11] 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, 2017, 3(6): 1171–1181.
- [12] ZHAO Z M, LIU F, CAI Z P, et al. Edge computing: platforms, applications and challenges[J]. Computer Research and Development, 2018, 55(2): 327–337.
- [13] HAMEED Z, HONG Y S, CHO Y M, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related

(收稿日期: 2020–12–31)

作者简介:

李霁轩(1991–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 边缘计算、电力通信调度管理、人工智能无监督学习。

吴子辰(1988–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 边缘计算, 电力通信。

郭焘(1988–), 男, 工程师, 工程硕士, 主要研究方向: 电力通信。

采集[J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37(4): 91–93.

- [11] 路璐. 工业互联网中数据集成和边缘处理技术国际态势分析[J]. 高科技与产业化, 2020(2): 42–48.
- [12] 孙念, 傅为. 对 5G 工业互联网的边缘计算技术架构与应用探讨[J]. 数字通信世界, 2020(3): 211, 213.
- [13] 黄智国, 李宏杰, 钱岭, 等. 一种云边协同的工业应用云化方案[J]. 电信科学, 2019, 35(S2): 84–88.
- [14] 李辉, 李秀华, 熊庆宇, 等. 边缘计算助力工业互联网: 架构、应用与挑战[J]. 计算机科学, 2021, 48(1): 1–10.
- [15] 刘炜, 张为等. 基于边缘智能 2.0 的工业互联网平台架构及应用[J]. 光通信研究, 2020.
- [16] 乔爱锋. 边缘计算多业务融合架构及关键技术[J]. 通信与信息技术, 2020(6): 27–28, 33.

(收稿日期: 2020–11–03)

作者简介:

甘雨莹(1991–), 通信作者, 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: MEC 关键技术的研究, E-mail: ganyy@chinatelecom.cn.

孙慧(1986–), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 工业互联网的工业 PON、MEC 和 5G 典型行业应用。

梁真铭(1993–), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 接入网网络重构。

algorithms: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1): 1–39.

- [14] LIU W Y, TANG B P, HAN J G, et al. The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 466–472.
- [15] 任玉亭. 振动监测技术在风力发电机组的应用[J]. 内蒙古电力技术, 2010, 28(2): 8–12.
- [16] DC 轴承故障检测数据集[EB/OL]. http://www.js.dclab.run/v2/cmptDetail.html?id=248.

(收稿日期: 2021–01–25)

作者简介:

方科(1979–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 信号处理及敏捷智能计算。

宁琨(1985–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 智慧风电应用。

潘灵(1981–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 嵌入式平台软件、分布式计算框架。

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