

doi: 10.7690/bgzdh.2021.04.006

军用机场智慧场务保障系统架构

李子先, 陈荣俊

(空军勤务学院机场勤务保障系, 江苏 徐州 221000)

摘要: 为解决传统场务保障系统因缺乏广泛互联互通互操作而存在协调不充分的问题, 建立军用机场智慧场务保障系统架构。将云计算和信息物理系统(cyber-physical systems, CPS)概念引入场务保障系统, 对智慧场务保障系统架构进行研究, 分析智慧场务保障系统的基本内涵与系统架构建设需求, 诠释架构中各层次功能和特点。结果表明: 该架构具有强大的信息处理能力、按需弹性的服务模式、高效的协同控制等优势, 能提升场务保障系统的智慧化、信息化水平。

关键词: 云计算; 信息物理系统; 军用机场; 智慧场务保障系统; 架构

中图分类号: TP302.1 **文献标志码:** A

Architecture of Intelligent Field Security System for Military Airfields

Li Zixian, Chen Rongjun

(Department of Airfield Engineering, Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient coordination in the traditional field security system due to the lack of extensive interconnection and interoperation, the architecture of the intelligent field security system for military airports was established. This paper introduces the concepts of cloud computing and cyber-physical systems (CPS) into the field service security system, studies the architecture of the intelligent field service security system, analyzes the basic connotation of the intelligent field service security system and the construction requirements of the system architecture, and explains the functions and characteristics of each level in the architecture. The results show that this architecture has the advantages of powerful information processing capacity, flexible on-demand service mode, efficient collaborative control, and can improve the intelligence and information level of the field service guarantee system.

Keywords: cloud computing; cyber physical system; military airfield; intelligent field security system; architecture

0 引言

场务保障是为航空兵部队提供机场飞行场地及其附属设施设备, 以及相应服务的活动, 是保障飞机起降安全的核心工作^[1]。新型装备在军用机场的逐步列装, 对场务保障质量标准提出了更高要求, 道面、驱鸟、消防等场务保障工作面临的安全风险越来越高^[2]。

目前, 虽然与智慧场务保障系统建设相关的子系统如助航灯光系统^[3]、道面管理系统^[4]、场面监视与控制系统^[5]、机场围界安防系统^[6]和跑道外来异物(foreign object debris, FOD)监测系统^[7]等方面发展迅速, 但这些子系统的管理都相对个体被动化, 系统各个部分的运行缺乏有效的协同性, 要让众多的系统实现合力, 就涉及到系统架构问题。笔者从智慧场务保障系统的基本内涵出发, 围绕系统架构的建设需求, 根据云计算架构和信息物理系统(CPS)架构理论, 建立了军用机场智慧场务保障系统架构, 为系统的规划和建设提供参考借鉴。

1 架构理论概述

1.1 云计算架构

云计算按需弹性的服务模式、数据仓库规模的处理方式从根本上为智慧场务保障系统建设提供了一种新颖的支持, 云数据中心良好的灾难备份与应急响应的特性也可以有效增强系统的鲁棒性^[8]; 所以, 将云计算技术应用在智慧场务保障系统中, 具有可行性和必要性。美国国家标准技术研究院提出的云计算架构由 IaaS、PaaS 和 SaaS 组成^[9]。

1.2 CPS 架构

CPS 是通过集成计算、通信及控制技术将信息基元与物理元素融为一体, 并基于信息系统和物理系统之间的相互作用与反馈, 以实现系统的精确认知和有效控制^[10]。智慧场务保障系统具有 CPS 的普遍特点, 如实时动态、精确控制等。CPS 的出现促进了场务保障系统运行方式的转变, 为系统“智慧化”的建设提供了途径。目前, 大部分研究者认

收稿日期: 2020-12-02; 修回日期: 2021-01-14

作者简介: 李子先(1998—), 男, 山东人, 硕士, 从事机场保障自动化与信息化研究。E-mail: 974510758@qq.com。

可的 CPS 架构分层为底层的感知模块、中间层的通信网络以及上层的计算决策模块^[11]。

2 智慧场务保障系统的基本内涵

2.1 智慧场务保障系统的组成要素

从“智慧”的本质出发,分析高等智慧生物的特征和组成要素,以界定智慧场务保障系统的定义。感官、大脑、肌体、神经是高等智慧生物生长必不可少的组成要素。如表 1 所示,智慧场务保障系统要具备智慧能力,也需要组成要素做支撑,在智慧场务保障系统中分别定义为感知网络、数据中心、基础设施和通信网络。

表 1 智慧场务保障系统的组成要素

智慧生物体基本要素	系统组成要素	系统智能能力
感官	感知网络	主动感知
大脑	数据中心	自主辨析、自主决策
肌体	基础设施	自主行动
神经	通信网络	动态交互

2.2 智慧场务保障系统的概念

智慧场务保障系统:利用云计算、大数据等新一代信息技术,使军用机场飞行场地及其附属设施具备主动感知、自主辨析、自主决策、自主行动和动态交互智能能力,将军用机场保障中的道面保障、助航灯光保障、供电保障、消防保障、驱鸟保障等要素融为一个整体系统,场务保障人员可以依靠其实现可视化、智能化的运行与管理。

3 智慧场务保障系统架构建设需求

不同军用机场建设的智慧场务保障系统在业务应用上可能略有不同,但其架构有共性。智慧场务保障系统架构的建设需求主要分为 4 方面:

1) 建设泛在化的感知设备。

信息在获取和接入等方面需具有泛在化的特征,传感器装置应遍布整个场区,以实现机场道面、助航灯光、供电线路、车辆装备的状态监控,飞鸟、无人机、FOD、入侵人员等外来物的感知。

2) 建设多样化的承载网络。

构建无处不在的联接,是建设智慧场务保障系统的首要基础。依靠广覆盖、低延时、高可靠、大宽带的有线和无线的网络通信服务,在信息推送、状态预警、能力评估、事件决策等方面实时交互,保证场务人员可以及时掌握保障过程中的所有动态信息。

3) 建设云端高性能的数据中心。

传感器的部署、物联网的运用都将产生大量实时数据。对这些大数据的高效处理,关系到场务人员信息优势的获取。现有的数据处理方式已不能满足高效信息处理的需要,需构建高性能的数据中心,实现海量信息的集中存储和高效处理。另外,军用平板等设备因其便携灵活的特性,可以更好地适应场务保障过程中信息快速获取和分发的需要。

4) 建设综合性的业务应用系统。

智慧场务系统涉及到多个业务应用子系统,在传统的业务系统建设中,其运行模式可以简单归纳为稳定单一业务群,即为了保证各部门的运行,系统建设以各业务为主题形成相应的业务群,不同业务群间存在信息孤岛。解决该问题的根本方法是在系统构建之前做好顶层设计和整体规划,对各应用进行合理整合,构建综合性的业务应用系统。

4 智慧场务保障系统架构构建

在 CPS 中,数据的获取、传递与处理是系统运行的关键,云计算成为 CPS 的一个可选的部署选项,用于支持和匹配 CPS 中的计算^[12]。CPS 元素以互补的方式变成云计算中具有控制功能的资源。

军用机场智慧场务保障系统架构的设计思想是基于 CPS 的智能控制能力,将控制过程中通用的计算和存储信息(如视频监控、机场 GIS、各场务活动的大数据分析等)交给由各类高性能计算存储服务器组成的云端,而终端在需要获取数据时只需向云端发出通信请求并获取信息。考虑到终端的处理和存储能力有限,该设计能充分发挥云计算快速处理和海量存储的优势,在降低对设备硬件要求的同时,提高系统的运行效率。

将云计算架构与 CPS 架构进行集成并结合系统架构的建设需求。如图 1 所示,文中构建的系统架构由物理资源层、基础设施服务层、平台服务层、用户服务层和 CPS 层组成。

4.1 物理资源层

智慧场务保障系统通过通信网络将感知设施物联成网,实现场区态势的实时感测与监控,并利用各类基础设施实现采集信息和控制信息的实时、准确传递。

1) 感知设施。

智慧场务保障系统以物联网技术为依托,通过具有图像、位置和环境感知等功能的分布式传感器提供对机场基础设施、环境、设备、人员等方面的

识别、信息采集和监测。执行器接收上层网络传输的执行信息，对物理对象的状态和行为进行调整，以适应物理世界的动态变化^[13]。物联网网关实现感知网络与通信网络，以及不同类型感知网络之间的协议转换。

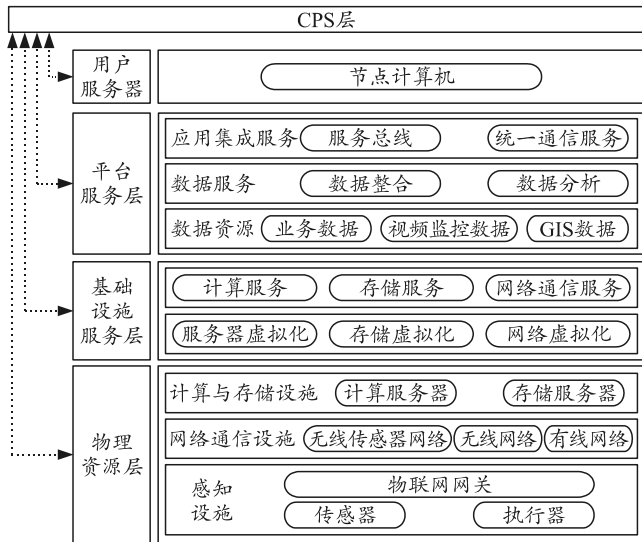


图 1 智慧场务保障系统架构

2) 网络通信设施。

网络通信设施是实现人与系统动态交互的基础，其具备传输语音、视频、图像等数据资源的功能，智慧场务保障系统的网络通信设施主要包括无线传感器网络、无线网络和有线网络。系统的组网拓扑图如图 2 所示。

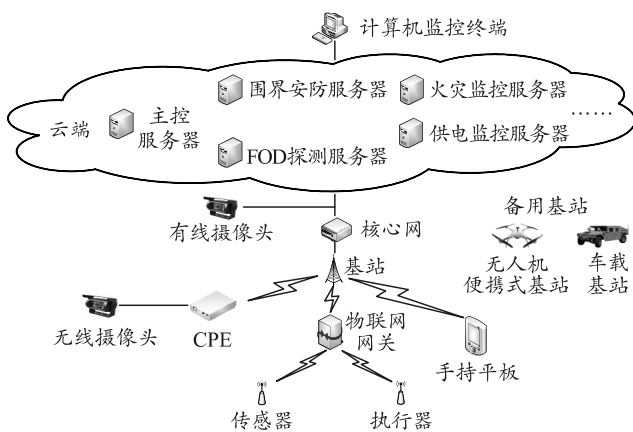


图 2 组网拓扑

3) 计算与存储设施。

计算与存储设施包括计算服务器和存储服务器，负责为监控终端提供视频监控、数据处理、指挥调度和共享信息等服务。高性能计算存储服务器采用标准化同构产品，按照高可用设计要求进行分布式部署，由主控服务器统一管理。主控服务器由设备运维人员进行服务管理，控制工作流的正常

运转。

4.2 基础设施服务层

基础设施服务层实现对服务器设备的虚拟化，通过使用高性能服务器模拟一系列虚拟机。每个虚拟机存放一类系统数据。计算机监控终端接入云端，访问并使用云端内的各类服务器，从而保证系统的高效运行。其中，云端的高性能服务器具备计算与存储资源，可为计算、存储和网络通信服务提供支持。当某一设备发生故障，可根据需要启动备份服务，保证系统正常运转。

1) 计算服务。

在智慧场务保障系统架构中，计算服务是系统的核心功能。如图 3 所示，计算任务由 1 台主控服务器和多台执行服务器完成。在系统设计中，执行服务器为云端的子服务器(围界安防器、火灾监控服务器等)。计算机监控终端以 Web Service 方式向主控服务器提出计算请求，主控服务器响应后建立连接，将计算任务分配给相应的子系统执行服务器。执行服务器在接到主控服务器指令后执行计算任务，将计算结果按主控服务器的要求通过网络传输至计算请求端。

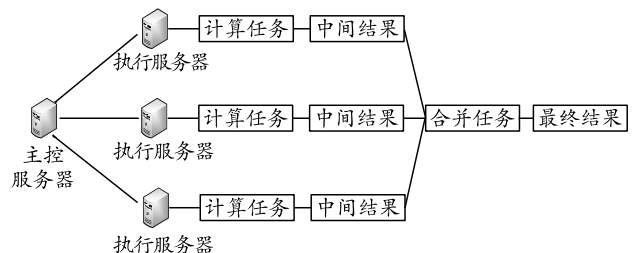


图 3 智慧场务保障系统计算服务

2) 存储服务。

如图 4 所示，在数据存储服务设计中，子系统的数(如灯光监测、仓库物资、配电网监测等数据)采用分布式文件系统(distributed file system, DFS)进行存储。DFS 采用 C/S 结构，由主控服务器、数据服务器和计算机监控终端组成。其中，主控服务器与提供计算服务的主控服务器合并，数据服务器与提供计算服务的执行服务器合并，共享硬件资源。

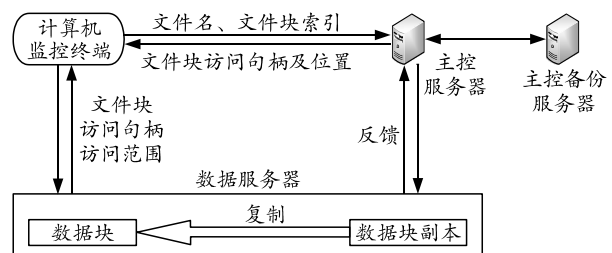


图 4 智慧场务保障系统存储服务

由于主控服务器是智慧场务保障系统计算与存储的核心，任何故障或不可靠将导致系统不可用；因此，在设计中将主控服务器的所有日志文件和映像文件存储为本地文件，另设 1 台主控备份服务器定期备份主控服务器数据文件。一旦主控服务器失效，主控备份服务器立即接替工作，建立与各执行服务器、数据服务器的连接^[14]。

4.3 平台服务层

平台服务层是一个可供用户进一步开发利用整合基础资源的平台。用户对上层中的应用程序进行部署和应用环境进行配置即可，使其可作为一种服务交付的平台。平台服务层提供的服务有数据资源、数据服务和应用集成服务。

1) 数据资源。

系统的数据来源于多处，并且面向多个不同的业务，根据用户服务层中的内容进行划分，主要有 3 类数据：① 业务数据，包括 FOD 探测、道面检查、灯光监测、仓库物资、配电网监测、气象、火灾监测、人员、保障任务、净空监测和车辆装备等数据；② 视频监控数据，指视频监控的图像数据；③ GIS 数据，指机场及周边的地理数据。

2) 数据服务。

在数据服务的建设中，借助数据仓库技术，面向不同的业务主题，整合所要的数据，建立一个集成、共享的历史数据及运行数据管理平台。基于 HADOOP 技术构建数据实时处理分析和分布式存储平台，通过数据存储、数据分析、数据挖掘和数据预测程序，整合数据资源，实时获取各类业务数据，形成数据资源池，为系统提供数据支撑^[15]。

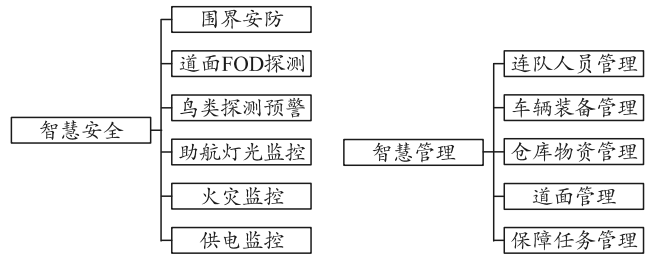
3) 应用集成服务。

应用集成服务提供了集成所需的服务总线和统一通信服务。服务总线为各子系统提供统一的信息交换通道和数据交换接口，完成大量的应用集成，提高业务运行效率；统一通信服务是计算机技术与传统通信技术融合成为一体的通信模式，作为中间媒介实现各通信系统的互联互通。通过多样化的终端和网络的配合，随时随地为场务人员提供融合语音、数据和视频的多媒体通信。

4.4 用户服务层

用户服务层为用户提供所需的应用程序，用户通过节点计算机终端设备对开发人员提供的各类应用进行访问。用户不需要对下层中的物理资源进行

管控，就可以直接使用开发人员提供的应用。如图 5 所示，根据智慧场务保障系统的基本内涵，将智慧场务保障系统的应用子系统分为智慧安全和智慧管理 2 方面。



(a) 智慧安全建设内容 (b) 智慧管理建设内容

图 5 用户服务层建设内容

1) 智慧安全。

在安全领域实现智慧化有关的子系统如图 5(a) 所示。在围栏上挂装摄像头，利用智能视频分析技术，实现围界入侵目标检测、识别及定位；在跑道一侧分区域安装前端智能探测系统设备实现 FOD 探测；对雷达、红外和视频等多源探测数据的融合处理，获取飞鸟目标的数量、种类、飞行方向和 3 维坐标等多维信息；根据故障预测等技术，完成各类灯的使用状况跟踪与维护管理；通过图像型火灾报警系统进行火灾监控，24 h 对停机坪、机库等重点要害部位进行监控。

2) 智慧管理。

智慧管理方面涉及到的子系统如图 5(b) 所示。依靠北斗定位技术，实现连队人员分布情况、进场保障车辆分布情况的实时展现；利用 RFID 技术实现物资信息的查询与巡检；基于 GIS 平台和大数据分析，实现对道面信息的录入和道面状况的预测；通过保障任务管理子系统，实现保障任务的及时传达与完成情况反馈。

4.5 CPS 层

CPS 层是系统架构的最顶层，该层可与其余各层进行跨层互联以提供特定的服务支持，以适应协同控制的要求，CPS 层在获取物理资源层中感知设施信息后，利用基础设施服务层和平台服务层处理实时数据，结合历史数据，获得不同工况下传感器的控制策略，并通过网络节点传输至各执行器进行场区设备的协同控制。

智慧场务保障系统的建设须考虑计算过程和物理过程之间的影响。解决方法是从系统组件构成的角度，构建组件接口模型，实现组件间的交互。另

外，在 CPS 模型中一般用事件描述 CPS 组件属性变量的变化。在动态数据库领域，人们最早引入事件—条件—行动建模方法，事件被定义为对条件进行判断的触发器，可以从时空混成特性和事件驱动性的角度建立智慧场务保障系统协同控制模型，实现组件间的互联互通。

1) 基于时空混成和事件驱动的系统协同控制。

在智慧场务保障系统中，同一属性可能会被多个组件观察，并可能产生一系列的事件。为保证事件的有效性，对同一属性相关的多个事件不能每次都得到响应，就需要事件的融合机制，将一段时间内关于同一属性的多个事件融合为一个事件；因此，笔者采用多元组表示事件。

基于事件的建模常用形式描述的方法^[16]，为保障智慧场务保障系统的有效交互，考虑事件与响应的关系，给出如下事件接口的形式描述。

定义 1 事件接口形式描述为六元组，即

$$E = \Phi \{C_{id}, S_{id}, J_{id}, V, T^0, L^0\} \quad (1)$$

式中： E 为事件接口； Φ 为事件类编码，属于全局预定义，用于后续事件的融合； C_{id} 为组件编码； S_{id} 为事件类型 Φ 的生成者编码； J_{id} 为被观察者编码； V 为事件的相关属性； T^0, L^0 均为事件发生的时空信息。

定义 2 协同器。连接组件接口，实现组件间的交互。已知组件 C_1, C_2, L, C_n ，协同器根据各组件的状态生成组件响应事件的方式，即

$$CO = CW \{\Phi_1, \Phi_2, L, \Phi_n\} \quad (2)$$

式中： $\Phi_1, \Phi_2, L, \Phi_n$ 分别对应组件 C_1, C_2, L, C_n 的事件类型接口； CW 为 $\Phi_1, \Phi_2, L, \Phi_n$ 间的协同关系。

从系统组件构成的角度看，在智慧场务保障系统架构中，物理资源层提供传感器组件和执行器组件，基础设施层和平台服务层提供计算单元组件，CPS 层提供协同器组件。文中建立的基于时空混成和事件驱动的系统协同控制模型如图 6 所示。

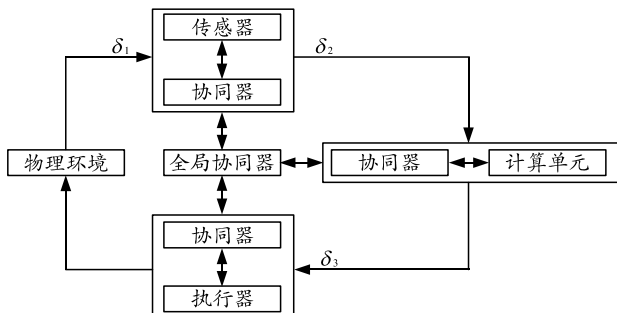


图 6 基于时空混成和事件驱动的系统协同控制模型

外部环境变化和执行器的指令均可激活传感器工作的事件接口 δ_1 ，传感器开始监测外部环境并输出 δ_2 ，激活计算单元实现数据的处理，计算单元输出控制指令 δ_3 ，激活执行器完成物理操作。协同器通过控制策略协调传感器、计算单元和执行器完成事件响应活动。通过该协同控制方法，组件间的交互由协同器完成，解决了不同组件间的异构性问题。

2) 基于时空混成和事件驱动的代数模型。

已知组件 C_1, C_2, L, C_n ，组件间通过事件接口 $\delta_1, \delta_2, L, \delta_n$ 实现协同控制， δ_i 为组件 C_i 的事件接口，根据系统协同控制模型定义 6 种事件接口逻辑关系，如表 2 所示。

表 2 事件接口逻辑关系

事件接口逻辑关系	执行语义
和	$\delta_1, \delta_2, L, \delta_n$ 的对应组件独立响应事件
且	$\delta_1, \delta_2, L, \delta_n$ 均激活后组件同步响应事件
或	$\delta_1, \delta_2, L, \delta_n$ 不受激活接口数量影响，被激活接口的组件均可同步响应事件
因果	若 δ_{i+1} 之前的 $\delta_1, \delta_2, L, \delta_n$ 被激活，则 $\delta_1, \delta_2, L, \delta_n$ 的对应组件顺序响应事件，其中 $i \in [1, n-1]$
有且只有	$\delta_1, \delta_2, L, \delta_n$ 均激活后可选择被激活接口的组件中的一个响应事件
互斥或	$\delta_1, \delta_2, L, \delta_n$ 不受激活接口数量影响，被激活接口的组件中只能有一个响应

Simon Bliudze 为解决离散数学问题提出了代数模型^[17]。在此基础上，笔者基于事件接口间的同步和互斥关系，为协同器建立了基于时空混成和事件驱动的代数模型。

定义 3 代数模型 $CA(E)$ 。 E 为组件的事件接口集， $0, 1 \notin E$ ，其中 0 表示系统处于异常停运状态，1 表示系统处于正常运行状态。定义一元操作符为“ $[\cdot]^*$ ”，其中 $[\cdot]^0$ 为汇聚型事件，指该事件与其他事件构成逻辑关系，不能被单独响应； $[\cdot]^1$ 为触发型事件，指该事件可独立响应。

定义代数模型的集合为

$$U_{CA} = \{[0]^*, [1]^*\} \cup \{[\delta]^* \mid \delta \in T\} \quad (3)$$

定义二元运算符：“+”为连接运算符、“ \cdot ”为同步运算符、“ Θ ”为互斥运算符，优先级由高到低为：“ $[\cdot]^*$ ” > “ \cdot ” > “ Θ ” > “+”。

因此，事件接口间的 6 种逻辑关系对应的执行语义如表 3 所示。

3) 实例分析。

以智慧安全中机场围界安防为例，模拟非法入侵机场围界事件，建立基于时空混合和事件驱动的系统协同控制模型，实现机场围界的安全防护。组

件包括位置传感器 S_a 、 S_b 、 S_c ，机场围界感应器 S_1 ，音频播放器 S_2 ，报警器 S_3 ，计算机监控终端 S_4 ，计算单元 S_5 。图 7 模拟了外来人员 M 入侵营区的过程。虚线表示外来人员 M 的入侵路线。

表 3 事件接口逻辑关系和执行语义对应表

事件接口逻辑关系	执行语义
和	$[\delta_1] \cdot [\delta_2] \cdot L \cdot [\delta_n]$
且	$[\delta_1] \cdot [\delta_2] \cdot L \cdot [\delta_n]$
或	$[\delta_1] \cdot [\delta_2] \cdot L \cdot [\delta_n]$
因果	$[\delta_1] \cdot [\delta_2] \cdot L \cdot [\delta_3] \cdot [\delta_{i+1}] \cdot L \cdot [\delta_n]$
有且只有	$[\delta_1] \ominus [\delta_2] \ominus L \ominus [\delta_n]$
互斥或	$[\delta_1] \ominus [\delta_2] \cdot L \ominus [\delta_n]$

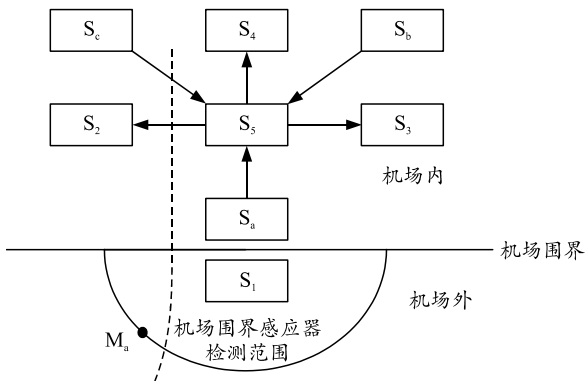


图 7 外来人员入侵营区的过程模拟

定义位置传感器实现初始化的事件接口为 E_{Init} 。只有当初始化接口被激活，才能触发 3 个位置传感器对 M 的 3 维空间坐标位置进行监测，避免了传感器时刻采集数据所造成的资源浪费。

定义位置传感器的输出事件接口为 E_{Out} 。 Φ_{Out} 触发位置传感器输出定位 M 的 3 维空间坐标数据至缓存区。计算单元的计算事件接口为 E_{5_Data} ， Φ_{5_Data} 触发计算单元对 M 的 3 维空间坐标数据进行处理，判断是否有入侵围界的行为。

定义音频播放器、报警器和计算机监控终端的输出事件接口为 E_2 、 E_3 和 E_4 。当事件产生者 S_5 发现机场围界入侵事件后，激活事件 Φ_2 、 Φ_3 和 Φ_4 ，触发执行器（音频播放器、报警器和计算机监控终端），并将 M 的入侵路线显示在计算机监控终端上。

协同器协调位置传感器、音频播放器、报警器计、计算机监控终端和计算单元，构成逻辑响应关系，即

$$[E_{a_Out} \cdot E_{b_Out} \cdot E_{c_Out}] \cdot [E_{5_Data}] \cdot [[E_2] \cdot [E_3] \cdot [E_4]] \quad (4)$$

当 3 个传感器同时成功采集数据时，计算单元才能进行数据的处理。当计算单元判定机场围界入

侵事件发生后，触发音频播放器和警报器事件，同时将 M 的空间位置在计算机监控终端上实时显示。

综上，笔者提出的智慧场务保障系统架构具有如表 4 所示的特点。

表 4 传统场务与智慧场务保障系统架构比较

项目	传统场务保障系统架构	智慧场务保障系统架构
功能	数据处理能力低,对物理资源的协同控制能力弱	具备强大的计算存储、协同控制能力
拓展性	规模固定,不易拓展	通过资源虚拟化,可拓展系统的计算存储资源;应用集成服务为多系统接入提供了条件
交互共享能力	各子系统相互独立,信息交互困难,存在信息孤岛现象	通过平台服务层实现子系统的集成,具有较好的资源共享与交互能力
资源利用率	硬件资源利用率低	利用虚拟化技术,1台服务器可成为多台虚拟机,不同子系统可共享服务器资源
运行维护	系统分散,运营维护成本较高	系统统一部署,方便管理维护,运营成本低

5 结论

1) 借鉴高等智慧生物的组成要素和智能能力，将智慧场务保障系统中的组成要素归纳为感知网络、数据中心、基础设施和通信网络；智能能力归纳为主动感知、自主辨析、自主决策、自主行动和动态交互；基于此得出智慧场务保障系统的概念。

2) 提出了一种由物理资源层、基础设施服务层、平台服务层、用户服务层和 CPS 层组成的智慧场务保障系统架构。该架构充分考虑系统的建设需求，具有高效的计算、存储和控制能力。

3) 在物理资源层中，传感器与执行器完成场区态势的实时监控，网络通信设施实现数据的传输；在基础设施服务层中，对服务器资源进行虚拟化，实现对资源的访问和利用，并提供计算存储等服务；在平台服务层中，提供给用户一个可开发利用的平台，通过数据整合和应用集成等服务，解决异构系统间的信息交互和协同工作的问题；用户服务层根据智慧场务保障系统的基本内涵，提供的应用服务包括智慧安全和智慧管理 2 方面；在 CPS 层中，为实现该层与其余各层的协同控制，提出了基于时空混成和事件驱动的系统协同控制方法，并通过实例分析，证明了该方法能够清晰地反映组件间的交互关系，屏蔽组件的异构性，实现物理进程与计算进程的融合。

参考文献：

[1] 华桦. 中国军事百科全书(后勤指挥分册)[M]. 北京:

- 解放军出版社, 2007: 136-137.
- [2] 陈荣俊. 机场保障概论[M]. 徐州: 空军勤务学院, 2019: 25-27.
- [3] 王丙元, 倪善庆, 李宝胜, 等. 机场助航灯光远程监控系统研究与实现[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(8): 1878-1881.
- [4] 张献民, 张润峰, 刘亚, 等. 基于三维 GIS 的机场飞行区运行数字化管理系统[J]. 南京: 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 761-771.
- [5] NASA. Advanced Surface Movement Guidance and Control System(A-SMGCS) Manual, First Edition, Doc 9830, AN/452[S]. Washington: International Civil Aviation Organization, 2004.
- [6] 邱冬莉, 魏旗. 机场飞行区智能周界安防系统设计探讨[J]. 智能建筑电气技术, 2016, 10(5): 18-22.
- [7] YONG W. An Anti-FOD Method Based on CA-CM-CFAR for MMW Radar in Complex Clutter Background[J]. Journal of Technology, 2020, 8(1): 79-86.
- [8] 郭保平, 程建, 刘争荣. 云计算在军事信息系统中的应用探析[J]. 飞航导弹, 2015, 45(4): 55-59.
- [9] NIST. NIST Cloud Computing Reference Architecture[S]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2011.
- [10] 孙棣华, 李永福, 刘卫宁, 等. 交通信息物理系统及其关键技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 144-155.
- [11] 何明, 梁文辉, 陈希亮, 等. CPS 系统体系结构顶层设计研究[J]. 计算机科学, 2013, 40(11): 18-22.
- [12] 李波. 基于云平台的大数据驱动的 CPS 的建模表示、分析与设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2017: 51-52.
- [13] 李仁发, 谢勇, 李蕊, 等. 信息-物理融合系统若干关键问题综述[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(6): 1149-1161.
- [14] 李京伟. 基于云计算的模拟飞行训练体系架构设计[J]. 兵工自动化, 2020, 39(4): 79-83.
- [15] 李涛. 大型枢纽机场智能数据中心系统设计与实践[J]. 民航学报, 2019, 3(6): 41-44.
- [16] TAN Y, VURAN M C, GODDARD S, et al. A concept lattice-based event model for cybe-physical system[C]//ICCP. 中国自动化学会过程控制专业委员会: 中国自动化学会过程控制专业委员会, 2010: 50-60.
- [17] SIMONB, JOSEPHS. The Algebra of Connectors Structuring Interaction in BIP[J]. IEEE Transactions on Computer, 2008, 57(10): 1-16.

(上接第 22 页)

4 结束语

近年来, 科技发展突飞猛进, 互联网+、大数据、物联网等新技术从实验室走向了实用阶段, 为提高装备保障效益提供了技术基础。建立基于大数据处理技术的装备维修保障辅助决策系统是未来装备维修发展的必然趋势。该系统的可靠运行, 能够实现日益剧增的大量装备维修保障信息的有效管理和精准分析, 从而为装备管理人员实现精确化保障提供强大的数据支撑。

参考文献:

- [1] 杨飞, 于洪敏, 吕耀平. 基于物联网的部队装备信息共享需求分析[J]. 兵工自动化, 2016, 35(7): 89-92.
- [2] 王富永. 武器装备维修质量评估系统构建相关研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(12): 121-122, 125.
- [3] 芮平亮, 傅军, 杨怡. 信息系统顶层设计技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 2-10.
- [4] NEGRIA E, FUMAGALLIA L, MACCHI M. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems[J]. Procedia Manufacturing, 2017(11): 939-948.
- [5] 代冬升, 谢峰, 孙江生, 等. 基于数据仓库的装备综合保障系统设计研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 163-167.
- [6] 周钢, 郭福亮. 军械装备综合保障的数据体系分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(2): 23-26.
- [7] 许双伟, 刘兵, 朱安石. 保障资源约束下的装备多阶段作战任务成功性仿真评估[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(6): 114-116, 148.
- [8] 廖锋, 成静静. 大数据环境下 Hadoop 分布式系统的研究与设计[J]. 广东通信技术, 2013, 33(10): 22-27.
- [9] 何福, 杜轶焜, 徐涛, 等. 以信息化思维驱动风洞装备保障智慧化变革[J]. 兵工自动化, 2017, 36(10): 17-20, 28.