



智能制造中关键技术与实现

Key Technology and Its Realization in Intelligent Manufacturing

中航工业北京航空制造工程研究所 邹方



邹方

自然科学研究员,北京航空制造工程研究所数字化制造与柔性装配技术研究室副主任。多年从事数控系统研制和应用工作,曾获部级科学技术进步一、二等奖;主持开发了我国首台具有自主知识产权的“柔性多点拉形模具”,并获得发明专利多项;目前承担了多项“飞机数字化与柔性装配技术”基础预研课题,并开展该领域的系统控制与集成技术的研究工作。

智能制造是一种高度网络连接、知识驱动的制造模式,它优化了企业全部业务和作业流程,可实现可持续生产力增长、能源可持续利用、高经济效益目标。智能制造结合信息技术、工程技术和人类智慧,从根本上改变产品研发、制造、运输和销售过程,通过零排放、零事故制造提高人身安全、保护环境。

在过去的10年里,数字计算和通信的发展从根本上改变了制造工厂的运营模式。智能制造通过工业自动化与信息技术(IT)的融合,将很快提升工厂的生产灵活性,并可节约能源、保护环境、降低成本、提高质量和人身安全,从而使工厂的生产效率和质量得到大幅度的优化提高。这种新兴的智能制造技术正在经历如下3个阶段。

(1) 第一阶段——车间、企业集成。

这是一种贯穿车间、跨越企业的全局制造业数据集成,将显著改善成本、安全和环境的影响,具有重大的意义。

在这一阶段,智能制造将工厂企业互连,更好地协调制造生产的各个阶段,推进车间生产效率的提高。典型的制造车间使用信息技术、传感器、智能电动机、电脑控制、生产管理软件等来管理每个特定阶段或生产过程的操作。然而,这仅仅解决了一个局部制造岛的效率,并非全企业。

智能制造将整合这些制造岛屿,使整个工厂共享数据。机器收集的数据和人类智慧相互融合,推进了车间级优化和企业范围管理目标,包括经济效益大幅增加、人身安全和环境可持续性的实现。这种“制造智能”的出现将开启智能制造的第二阶段。

(2) 第二阶段——从车间优化到制造智能。

这些数据配合先进计算机仿真和建模,将创建强大的“制造智能”,实现生产节拍的变化、柔性制造、最佳生产速度和更快的产品定制。

这一阶段应用高性能计算平台(云计算)连接各个工厂和企业,进行建模、仿真和数据集成,可以在整个工厂内建立更高水平的制造智能。为了节约能源、优化产品的制造交付,整条生产线和全车间将实时、灵活改变运行速度,当然现在是不可行的。企业可以开发先进的模型并模拟生产流程,改善当前和未来的业务流程。例如,制造商能使用纳米技术开发大量制造产品和设备的模型。纳米技术是极端小型化高度复杂设备、系统和材料的发展产物。人们普遍预言:一场行业技术和行业的革新,需要更小、更强、更轻材料和强大精密设备。

(3) 第三阶段——制造知识重整市场秩序。

随着制造智能技术的进步,将激励制造过程和产品创新,实现智能制造,颠覆主要市场秩序。

这一阶段将广泛应用信息技术来改变商业模式,消费者习惯的 100 多年的大规模生产工业供应链将完全颠覆。灵活可重构工厂和 IT 最优化供应链将改变生产过程,允许制造商按个人需求定制产品,如同生产药物特定剂量和配方一样,客户会“告诉”工厂生产什么样式的汽车,构建什么功能的个人电脑,如何定制一款完美的牛仔裤……这种极富戏剧性

的竞争力至关重要,越来越多的生产知识创新奠定了智能制造的第三阶段。这些改变不会停留在量变层面上,它们将彻底改变游戏规则,使产品和工艺市场发生颠覆性变化。

智能制造与装配的内涵

智能制造是一种高度网络连接、知识驱动的制造模式,它优化了企业全部业务和作业流程,可实现持续生产力增长、能源可持续利用、高经济效益目标。智能制造结合信息技术、工程技术和人类智慧,从根本上改变产品研发、制造、运输和销售过程,通过零排放、零事故制造提高人身安全、保护环境。

2007 年,美国国家标准和技术研究院(NIST)主办的装配技术研讨会第一次提出了智能装配的概念。它侧重于如何开发和集成智能工具,如传感器、无线网络、机器人、智能控制等,以便解决今天产品种类变化的强烈需求和后续生产制造的复杂性。智能装配是一个生产工艺、人、设备和信息集成的概念,它使用虚拟和现实的方法来实现生产效率、交货时间和制造敏捷性的显著改善。智能装配远远超出传统的自动化和机械化范围,它在工程和操作上挖掘人与机器有效协同作业潜力,集成了高技术、多学科团队,具有自我集成和自适应装配处理的能力。

智能装配系统为工厂开创了一种分析、建议和应对生产环境的新模式。其中,传感器起着关键的作用。传感器将监控每一个重要的操作参数,所有参数设置了控制限制,系统时刻评估装配状态,关注任何偏差的发生。

智能装配环境以类似于人体的免疫系统方式运行,以一种非常有效的方式来应对没有明显症状的异常反应。智能装配系统可以调整和适应生产环境的变化,如投入零部件的变化,最大的好处就是系统健壮性,

以确保系统质量和生产能力。智能装配基本单元虽然已经应用在一些生产制造系统之中,然而还需要进行更多的系统顶层研究,实现机器和子系统协同工作。在智能装配中,一是加强虚拟能力+实时能力,二是整合集成产品流程、工艺流程、信息流程等 3 大流程,这些决定了智能装配的成败。

波音公司目前正在基于智能装配理念来实施网络化制造和操作(NEMO)创新计划,它仿照了美国陆军未来战斗系统项目。该计划的目标是将战场上最先进的技术,如“态势感知”技术引入到飞机装配生产线中。智能工具和传感器是 NEMO 的第一层。目前,多项技术已经应用在波音 737 和波音 787 的装配流程中,如密封胶固化监控。另外,制孔和安装工具也已配备了传感器,可以监测用户身份验证、设置信息、校准状态和互动进/退功能。

此外,波音公司还将 NEMO 技术应用用于一些军事项目,如检查 F/A-18 战斗机的线包。波音公司的工程师们还设想了一个广泛的系统,在不久的将来实现数字化设计工具和无线生产现场系统之间运动信息的自动化。智能装配应用于这些过程,公司将专注于开发智能工具,它不需要操作者为一个特定的操作设定界限或扭矩。未来,波音飞机的装配工作指令将直接投射到机翼或机身上,传感器嵌入在紧固件连接的工具中,将指导装配工人作业。与此同时,投射到飞机上的激光图像会自动告诉工人零件的准确定位点或边界,数字电子测量和检验系统将监测传播装配过程各个方面的在线信息。例如,传感器将不断监控紧固连接工具、点胶设备、工装、夹具和其他生产设备的性能状态。在未来 10 年内,波音公司计划扩大 NEMO 范围,将客户/供应商与工程师和装配工厂连接起来。

智能制造中的关键技术

要实现一个生产系统的智能制造,必须在信息实时自动化识别处理、无线传感器网络、信息物理融合系统、网络安全等方面得到突破,这其中涉及到如下智能制造的关键技术。

1 射频识别技术

射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术又称为无线射频识别,是一种无线通信技术,可以通过无线电信号识别特定目标并读写相关数据,而无需识别系统与特定目标之间进行机械或光学接触。常用的无线射频有低频(125~134.2kHz)、高频(13.56MHz)和超高频3种,而RFID读写器分为移动和固定式两种。射频识别是一种自动识别技术,它将小型的无线设备贴在物件表面,并采用RFID阅读器进行自动的远距离读取,提供了一种精确、自动、快速的记录和收集目标的工具。

20世纪八九十年代,RFID技术实现了楼宇人员和车辆的进出控制、道路收费站的自动收费、动物跟踪,以及生产资料进库和出库的自动跟踪仓储等。目前,该技术还广泛应用于供应链管理、在制品制造、资产管理、安全访问控制、消费应用等方面(表1)。

随着射频识别技术的巨大进步,RFID成为了业务流程精益化的基本使能器,可以减少生产库存,提高生产效率和质量,从而提高制造企业的竞争力。早在2000年,空客公司就认识到这种技术优势,应用RFID技术与各大航空公司进行工具租赁业务。到2006年,空客有15个项目的赢利都得益于RFID技术。然而,要实现整个公司利益最大化,需要采用协调的方法来避免重复性劳动,达到协同效应最大化。因此,到2007年,空客决定在全公司范围内

使用零件序列化的自动识别技术(包括RFID),增加飞机全生命周期的可视化,这被称为价值链可视化(VCV)计划(图1),空客公司则称之为“空客业务雷达”。RFID技术成为简化业务流程、降低库存和提高经营活动效率与质量的强大武器,大大提高了企业竞争优势。

新一代RFID芯片除了天线端口外,还提供了一条I²C总线连接,因此可以直接连接到微控制器和ASIC上。这就意味着它为后续的用

户化功能定制开辟了新的道路,可以向最终用户提供多样化的服务,如采用蓝牙通信协议的RFID可以使用普通手机作为RFID阅读器。此外,这种I²C技术还可以连接上各种传感器,构成简单的无线传感器网络。

2 实时定位系统

在实际生产制造现场,需要对多种材料、零件、工具、设备等资产进行实时跟踪管理;在制造的某个阶段,材料、零件、工具等需要及时到位和撤离;生产过程中,需要监视在制品

表1 RFID射频识别应用领域及效果

应用领域	效果
供应链管理	通过自动化数据收集和数据传输,降低劳动力成本; 减少发货错误、库存迷失和重复数据读取; 减少盗窃和物品丢失; 利用远程进行产品维护、保修和调用警报
在制品制造	减少返修,保证制造精度; 提高生产效率,加快零部件的定位和正确检索; 降低生产成本,消除手动条形码读取; 实现自动化零件集成跟踪; 连续的零件库存通道减少了生产线中断
资产管理	提供快速公司资产识别; 确保传输点的安全跟踪; 减少盗窃和物品丢失
安全访问控制	确保个人、机密信息的安全,方便访问; 提供移动、动态更新的数据存储库; 减少盗窃、欺诈,减轻风险
消费应用	提高个人安全; 确保个人事务数据安全、方便访问; 增加用户获得商品和服务的便利; 降低欺诈和风险

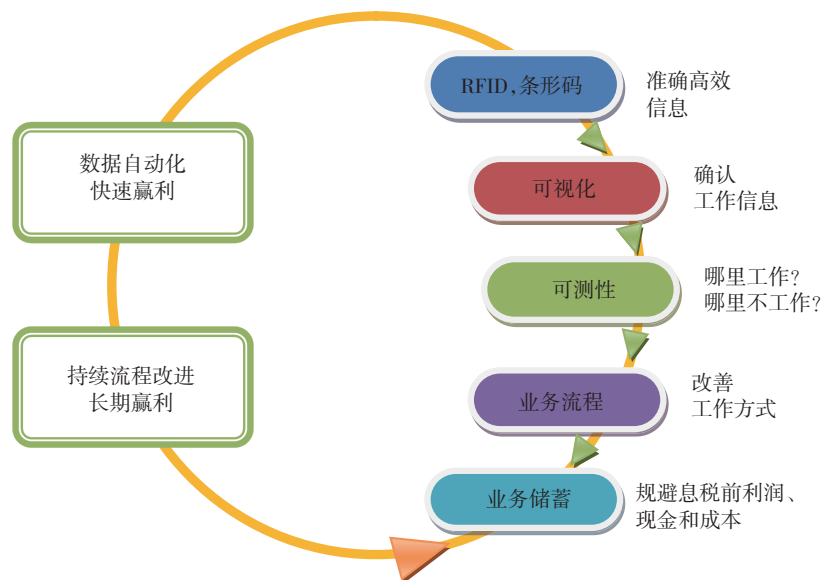


图1 空客公司价值链可视化计划

的位置行踪,以及材料、零件、工具的存放位置等。这样,在生产系统中需要建立一个实时定位网络系统,以完成生产全程中角色的实时位置跟踪。

实时定位系统(Real Time Location System, RTLS)由无线信号接收传感器和标签无线信号发射器等组成。一般地,被跟踪目标贴上有源 RFID 标签,在室内布置 3 个以上阅读器天线,使用有源 RFID 标签来发现目标位置;3 个阅读器天线接收到标签的广播信号,每个信号将接收时间传递到一个软件系统,使用三角测量来计算目标位置。

RTLS 通常建在一个建筑物内或室外识别和实时跟踪对象的位置。RTLS 通常不包括 GPS、手机跟踪或只使用被动 RFID 跟踪的系统。RTLS 的物理层技术通常是某种形式的射频(RF)通信,但一些系统使用了光学(通常是红外)或声(通常是超声波)技术代替了无线射频。标签和固定参考点可以布置发射器和接收器,或两者兼而有之。

目前,室内实时定位系统通常采用超声、红外、超宽带(UWB)、窄频带等技术,在带宽、精度、墙体穿透性、抗干扰能力等方面存在各自的特点,其技术性能见表 2。从表中可以看出超宽带的综合性能最优,所以在许多生产制造现场广泛采用了基于超宽带的实时定位系统。

3 无线传感器网络

今天的工厂布置了越来越多的

检测点,产生了大量的数据。这些数据容易被机器自动收集处理,但是人类可以不处理它们。因此,如果机器在某个生产区域可以彼此交流的话,那是相当有用的。通过创建网络化的检测环境,许多处理过程可以做得更加高效、灵活和低成本。非常小的、低成本的无线传感器分布在生产工厂里,允许对象注册它们的环境和无线通信;几种不同类型的传感器技术,如光电、压力、温度和红外传感器共同努力创建一个整体情况描述,感受目前环境发生变化的一切。

在未来的工厂里,产品和生产设施将成为活跃的系统组件,控制着自己的生产和物流,它们将构成一个信息物理融合系统——连接互联网的网络空间与现实物理世界。然而,不同于当前机电一体化系统,它们具有与环境交互的能力,可以规划和调整自己的行为来适应环境,并且学习新的行为模式和策略,从而进行自我优化,进而实现最小批量的快速产品转化和多品种的高效率生产。嵌入式传感器/致动器组件、机器/机器通信交流和主动语义产品记忆催生了在工业环境中节约资源的优化方法,这将促进未来工厂以一个合理的成本实现环境保护和复杂生产。

无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由许多在空间分布的自动装置组成的一种无线通信计算机网络,这些装置使用传感器监控不同位置的物理或环境状况(如温

度、声音、振动、压力、运动或污染物等)。无线传感网络的每个节点除配备 1 个或多个传感器之外,还装备了 1 个无线电收发器和 1 个很小的微控制器和 1 个能源(通常为电池)。单个传感器节点的尺寸可以大到像一架航天飞机,也可以小到如一粒尘埃。传感器节点的成本也是不一样的,从几百美元到几美分不等,这取决于传感器网络的规模及单个传感器节点所需的复杂度。传感器节点尺寸与复杂度的限制决定了能量、存储、计算速度与带宽的受限。无线传感网络主要包括 3 个方面:感应、通信、计算(硬件、软件、算法)。其中的关键技术主要有无线数据库技术,如用于无线传感器网络的查询和其他传感器通信的网络技术,特别是多次跳跃路由协议,如摩托罗拉使用在家庭控制系统中的 ZigBee 无线协议。

标准的 ZigBee™ 或 802.15.4 对于许多低功耗、低数据率无线通信服务而言,是一个不错的选择。然而,高数据率通信则要选择 802.11 WLAN 无线局域网。需要大活动范围和更长电池供电的应用场合,ZigBee 协议能轻松满足代码空间(32~70kB),并有一个适度的范围(10~100m)。对于工业和家庭网络来说,应优先选择 ZigBee,它的一大优点是“网”功能。网状网络允许从节点到节点来传递信息,如果任何节点失败,仍然可以通过选择其他节点将信息送达目的地。下面就常用的无线局域网、蓝牙、无线个域网 3 种无线网络性能进行了对比(表 3)。

在生产系统中,要合理利用无线网络,根据任务的实时性、数据吞吐量大小、数据传输速率、可靠性等特点实施不同的无线网络技术,如监督通信、分散过程控制、无线设备网络、故障信息报警、实时定位可分别采用 WLAN、RFID、ZigBee/Bluetooth、GPRS、UWB 等网络技术。

表2 几种室内实时定位技术性能比较

分类		频率	带宽	精度	墙体穿透性	贴标签	抗回波干扰	
超声(Ultrasonic)		非常高	非常高	非常高	不能	非常高	非常好	
红外(IR)		非常高	非常高	非常高	不能	非常高	非常好	
电磁	超宽带(UWB)	高	非常高	非常高	好	非常高	非常好	
		窄频带	中	低	差	优异	低	差
	常规	扩展	信号强度	中	中	差	非常好	中
		扩展	达到时间	中	中	中	非常好	中

表3 3种常用的无线网络详细性能对比

特征	IEEE 802.11b	Bluetooth	ZigBee
电源功耗	小时	天	年
复杂度	非常复杂	复杂	简单
可接入节点数	32	7	64000
等待时间 /s	3	10	0.03
范围 / m	100	10	10~100
扩展性	可以漫游	No	Yes
数据速率 /bps	11M	1M	250k
安全	身份验证服务 SetID (SSID)	64 bit, 128 bit	128 bit AES 和应用层用户定义

4 信息物理融合系统

信息物理融合系统(Cyber-Physical System, CPS)也称为“虚拟网络-实体物理”生产系统,它将彻底改变传统制造业逻辑。在这样的系统中,一个工件就能算出自己需要哪些服务。通过数字化逐步升级现有生产设施,这样生产系统可以实现全新的体系结构。这意味着这一概念不仅可在全新的工厂得以实现,而且能在现有工厂一步步升级的过程中得到升华。

在当前的工业制造环境中,已经可以看到将要改变的迹象,从僵化的中央工业控制转变到分布式智能控制。大量的传感器以令人难以置信的精度记录着它们的环境,并作为一个独立于中心生产控制系统的嵌入式处理器系统作出自己的决策。现在唯一缺少的是综合无线网络组件,它能实现永久的交换信息,在复杂事件、临界状态和情景感知中综合不同传感器评估识别,并基于这些感知处理并制定进一步的行动计划。

CPS是一个综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统,通过3C(Computation、Communication、Control)技术的有机融合与深度合作,实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务。CPS实现计算、通信与物理系统的一体化设计,可使系统更加可靠、高效、实时协同,

具有重要而广泛的应用前景。CPS系统把计算与通信深深地嵌入实物过程,使之与实物过程密切互动,从而给实物系统添加新的能力。

在美国,智能制造提得最多的核心技术称为“信息物理融合系统”,而在欧洲,德国提出了工业4.0的概念,并将物联网技术作为核心技术。它们的核心技术是同根同源的,都是基于互联网的大规模网络嵌入式系统(智能组件),其目标愿景也是坚持计算和“智能”不脱离实际生产环境,最终构建一个大规模分布式计算系统的系统。

5 网络安全技术

数字化推动了制造业的发展,在很大程度上得益于计算机网络技术

的发展,与此同时也给工厂的网络安全构成了威胁。以前习惯于纸质的熟练工人,现在越来越依赖于计算机网络、自动化机器和无处不在的传感器,而技术人员的工作就是把数字数据转换成物理部件和组件。制造过程的数字化技术资料支撑了产品设计、制造和服务的全过程,这些信息在整个供应链得到了共享,但必须得以保护。工厂花费大量的精力以保护信息系统和网络中的技术信息,并面临一种前所未有的严峻挑战。不仅需要从防范数据盗窃来保护技术资源,还必须防止网络入侵破坏生产系统的安全,以避免造成正常生产运行的瘫痪。

面对网络安全,生产系统采取了一系列IT安全保障技术和措施,如防火墙、入侵预防、病毒扫描器、访问控制、黑白名单、信息加密等。波音公司应用回程连接的安全边界技术来实施企业内部网络与外部IT网络的隔离(图2),取得了很好的效果。如何创建一个明确的责任分工及一个恰如其分的解决方案是摆在面前亟待解决的问题。

基于智能制造的网络化装配试验系统

运用智能制造的理念和关键技术

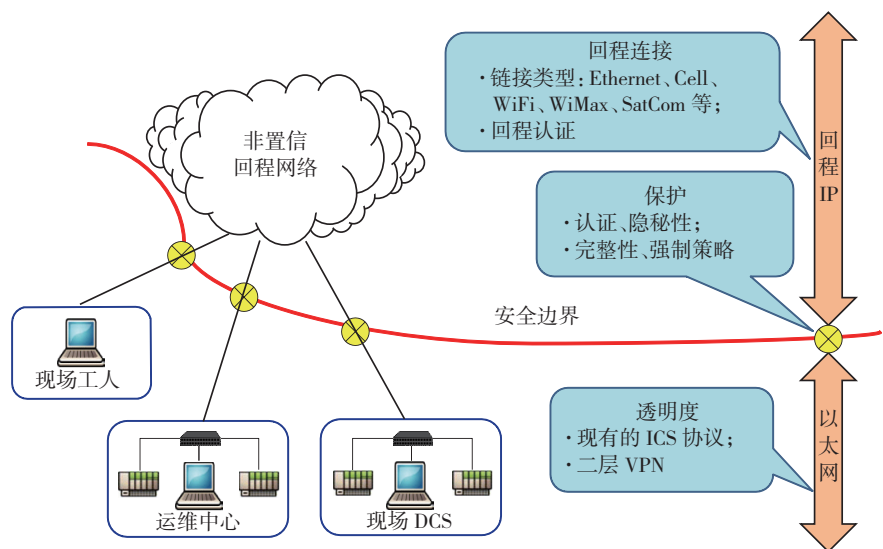


图2 网络安全隔离 (波音)

术来构建一个基于智能制造的网络化装配系统,对本文中所列的关键技术进行应用验证。该试验系统本着起点高、投资少、智能高等原则,按照整体规划、分步实施来创建。在充分利用十二五期间数字化柔性装配的科研成果,如可重构工装和部件对接系统、机器人钻铆系统、大尺寸数字化测量系统(三维激光跟踪仪、室内 iGPS)、智能 AGV 移动小车的基础上实施无线网络技术,需增加必要的智能部件,如 RFID 射频识别、实时定位系统、智能货架、无线传感网络等单元。在未来几年中,还将开发研制手持式智能工具,包括具有位移、压力、应变力感知的手持紧固件拉铆工具,带有 iGPS 法向检测、制孔力监视的智能制孔手持工具等,这都将陆续纳入该试验系统中。

网络化装配试验系统的基本单元包括可重构柔性工装、大部件对接系统、机器人钻铆系统、智能移动小车、实时定位系统、智能货架、数字化测量系统等。该试验系统的所有物件都要贴上 RFID 标签,实时定位系统将实时、高精度监视和跟踪系统的材料、工具、部件、设备、移动小车等物件的位置;在可重构工装系统中,将布置三维激光投影仪、室内 iGPS 以及手持智能工具,采用人工来高效、高质量完成翼面类部件的手工装配。该系统还增设了一个智能货架,安装了带 RFID 读取的码头门,对物资进行有效的自动化管理。

网络化装配试验系统的硬件包括 RFID 阅读器(码头门)、实时定位 UWB 接收器、信号阅读器(智能货架)、手持 RFID 阅读器、RFID 打印机、网络数据处理服务器和边缘服务器等,并把 4 个 UWB 接收器安装在车间的四周,用于跟踪系统物资。软件包由 Windows server 2003(网络/数据库主机)、MySQL(数据库)、系统运行仿真系统和电子产品代码信息管理服务器等组成。RFID 设备连

接在网络 DMZ(隔离区)上,通过这种方式,外部网络可以访问该试验系统的边缘服务器和其他设备。出于网络安全,DMZ 设置了一堵防火墙。该试验系统由集成控制系统来管控,实现了整个系统的数据采集和监控,并能对系统的运行状态和健康水平进行诊断和预测。该试验系统的网络布局如图 3 所示。

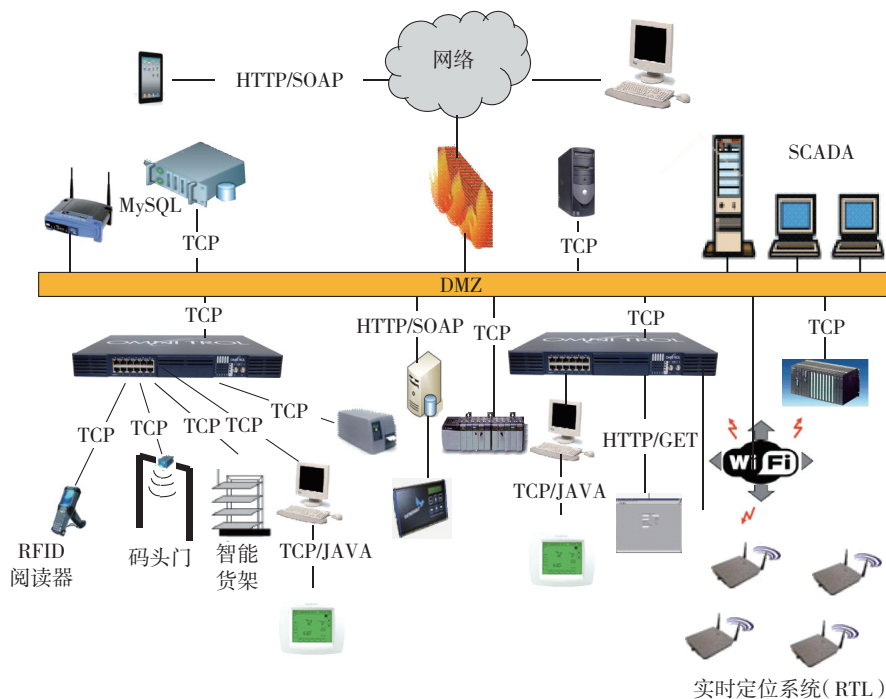


图3 试验系统的网络布局

结束语

最近几年,德国提出了工业 4.0,美国提出了智能制造,智能制造的关键技术得到了飞速发展。它们都对未来的制造工厂描绘了一幅美好的蓝图。美国智能制造强调了信息物理融合系统,而德国工业 4.0 则强调了物联网技术,将未来工厂看成为一个物联网的工厂。但无论如何,其中的关键技术都是一样的。

未来要在实时、可靠、高效、低成本基础上解决智能制造所需的传感器技术、网络技术、人工智能技术,将日常生活中已有的通信设施、互联网资源、个人的数字化设备终端连入未来工厂中得到充分的应用。

智能制造的巨大优势在于它是可以逐渐实现的。应用信息物理融合系统技术来逐步升级正在运行的工厂,可以根据需要集成传感器,安装微型服务器系统组件取代总线系统。这意味着可以从单台机器人入手,然后扩展到整个工厂。

但也应认识到,智能制造中的许多关键技术还不成熟,如无线网络存

在过分密集的无线规划、缺乏更多的频率资源、容易受到环境变化攻击、实时传输性能差等问题,要满足工业的实时、可靠、高效、安全等需求,还应在实时、高效等关键应用中发挥作用。另外,实时定位存在传感系统欠稳定、精度低,没有实时定位行业标准,无法处理敏感信息(隐私)等问题,因而要有一个可靠、高精度的室内实时定位系统 iGPS,必须关注敏感的隐私问题。

我国在智能制造领域与西方发达国家尚存在一定的差距,各科研院所及企业必须共同攻关,使智能制造中的关键技术达到工程应用水平,实现我国未来工厂智能制造的美好蓝图。

(责编 谷雨)