

文章编号:1005-0523(2019)04-0001-07

超低功耗无线传感器技术应用与智能状态监控

陈衍庆¹,余银犬²

(1. 电气和电子工程师协会电力电子与工业应用新加坡分会,新加坡 117576;

2. 华东交通大学精密加工与智能装备制造研究所,江西 南昌 330013)

摘要:智能制造物联网,即工业4.0、中国2025或无人工厂,都非常注重通过空中传送,智能、无缝地重新配置系统的生产能力。如今,无论单个机器还是整条工厂生产线、制造执行系统甚至资源规划系统中的连接都必须向通用化转变,从而真正能够实现每个子系统的利用效率最大化,也就是最优化的方案。数据是它们之间的通用语言。因分布式无线传感器因其能在CPS IoT和云数据平台之间实现无缝和可靠互连的数据平台,已广泛用于空间,人类,环境,自动化,军事,结构和建筑应用等领域的传感和监测。随着技术的进步,这种设备变得更小更便宜,使得它们更具吸引力。然而,操作可持续性仍然是这种电池供电设备的主要问题,需要定期更换新电池。

关键词:超低功耗无线传感器;自复能源系统设计;智能状态监控

中图分类号:TP212.9

文献标志码:A

当我们步入21世纪,随着人工智能在生活当中以及智能制造在工业上的广泛应用,传感器无论从种类上还是从数量上的需求都越来越多。由于新技术的应用和生产工艺改进促使传感器的尺寸越做越小,传感器的生产成本也大大降低。新型的分布式无线传感器(通常部署在用于传感和监测目的的网络中)由于其无需接线、超低功耗、安装和使用方便正变得越来越广泛^[1]。这种新型传感器的各个零部件和功能模块从设计阶段就受到了高度重视。从要采用的硬件数据路由路径,到传输和接收的数据完整性,从多任务和多处理中的硬件设备可靠性,到同步传输和恢复丢失数据包的软件策略都有系统的综合考虑。由于对功率可持续性和超低功率管理的需求,我们需要探索从系统级到组件级的整体优化方法,以实现能耗最小化和可用输入能量最大化,从而延长传感器的运行时间。传感器需求的功率降低是学术界关注的热点问题之一,一些可用的传统技术例如工作循环和数据驱动方法可有效降低传感器本身的能源消耗。从环境能源中获取能量是另外一种可持续有效利用能源来对传感器自身供电的有效途径。无论是作为单一光源,还是将其同电池作为混合来源连接在一起,或者利用室内采光/扫光作为唯一来源,这是另一个非常受关注的方法,作为获取替代能源的可行方法,为这些微型无线传感器供电^[2-3]。然而,实际的部署情况在很大程度上决定于当时遇到的条件限制、使用的方法和技术成熟度。在不同的环境下采用的方案是完全不同、千差万别的,建议可以采用最简单的即插即用,到具有自我维持、最高能量输出点的跟踪捕捉、低压启动和调压功能的复杂单片机编程解决方案。本文提出了一种不用任何外部电池或额外的单片机的可持续无线传感器方案,它仅仅增加了能量收集和存储两大子模块。本文讨论了如何从实际试验中遇到的局限性得出的几个关键设计考虑因素,以

收稿日期:2019-05-23

作者简介:陈衍庆(1978—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为物联网设备。Priuted Power Pte.ltd.首席执行官兼联合创始人。新加坡IEEE分会副主席,IES高级会员,SAE国际会员,SSTA专业会员,IEC特邀会员。In Teeh, Springer Taglor& Francis Group, John Wile & Sciyo等期刊审稿人。

通讯作者:余银犬(1969—),男,博士,博士生导师,研究方向为智能电机,精密加工与智能装备制造。新加坡ASME执行委员,国际电气工程师学会(IEEE)资深会员,新加坡工程师学会资深会员,亚方数据读写和储存大会(APMRC2010)组织者之一,美国电气工程师学会国际电磁期刊,美国电气工程师学会工业电子技术期刊,电气工程师学会电磁研究国际会等国际期刊指定审稿人,新加坡科技研究局购买大型设备的专业鉴定人。

及加入的系统组件,以使能量收集解决方案的性能评估能够达到要求,无线传感器无需外接电源且对本身电池充电能够持续运行5年以上。

1 智能应用场景

虚拟现实确实是一个发展非常迅速的新兴科学领域,它是研究和开发连接网络和物理世界的传统工程系统。智能设备在工业和日常消费生活中的集成被描述为物联网。物联网被设计为通过连续和动态地耦合分布式计算和物理组件与环境交互。如图1所示,从物联网示例中可以看到,物联网工程化系统是基于计算算法和物理组件的无缝集成而构建的。物联网的进步将使功能、适应性、可扩展性、弹性、安全性和可用性大大超过当今简单的嵌入式系统。物联网已经改变了人们与工程系统交互的方式——就像互联网改变了人们与信息交互的方式一样。

本文讨论的两个物联网重要应用领域是:①中国蓬勃发展的农业;②遍布全球的制造业。农业行业和其他任何行业一样,一直在寻求产量最大化、风险最小化和提高效率的方法。农业和科技公司正越来越多地联合起来,通过传感器、软件和数据分析来提高作物产量和控制害虫,使生产更加高效、成本更低,从而更加可持续。为了提高收割效率,农业工业一直在探索使用自动车辆。

约翰迪尔^[4]锐眼和博世^[5]等公司都已经开发了新的应用,如图2远程监控站,图3所示传感器提供了所有类型的农业作物生产的外部信息。新的环境传感器测量包括降雨、风速和方向、阳光、环境温度树叶湿度和土壤条件数据。农业专家可以访问通过万维网界面得到所有数据加以分析和采取相应措施帮助农民提高作物质量和产量,在病虫害或农作物其他灾害发生之前提供更好的决策,可以为农民或相关农产品公司减少多达数百万美元的损失^[6]。

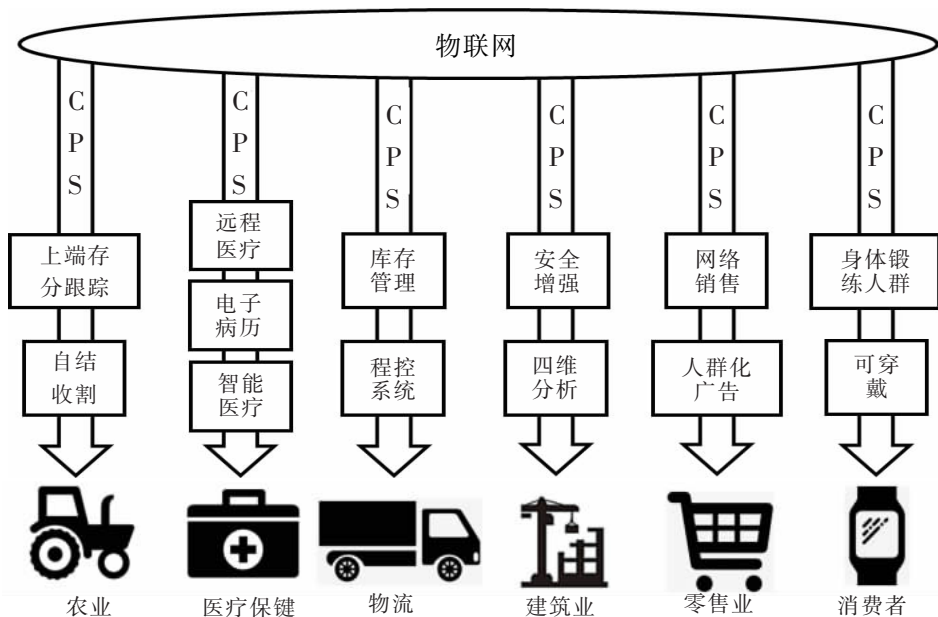


图1 物联网生态系统

Fig.1 The internet of things ecosystem

同样,在工业应用上,在整个生产或制造环境中放置无线传感器也允许使用互联网管理的装配线、连接的工厂和仓库。这种物联网实施的体系结构采用智能设备与日常物理对象的日益集成和互连方式,图4中给出的智能工厂应用,此应用中采用了与智能制造体系结构中5C系统的各个级别相关的应用程序和技术。

无线传感器物联网应用被称为工业4.0,或中国制造2025,或未来工厂,在制造业中,与现有机器人或自动化基础设施一起组合应用被称为“第四次工业革命”,几乎正在影响每个国家的每一个生产行业。

智能制造物联网,即工业4.0、中国制造2025或无人工厂,都非常注重通过空中传送,智能、无缝地重新配置系统的生产能力。如今,无论单个机器还是整条工厂生产线、制造执行系统甚至资源规划系统中的连接



图 2 约翰迪尔的现场连接系统

Fig.2 John Deere's field connection system



图 3 Semios 环境传感节点系统

Fig.3 Semios environmental sensor node system

都必须向通用化转变,以便如图 4 的数据多层传输,从而真正能够实现每个子系统的利用效率最大化,也就是最优化的方案。数据是它们之间的通用语言。图 5 显示在物联网和云数据平台之间实现无缝和可靠互连的数据平台。

故障检测与识别、隔离与再配置是一种控制方案,可确保发生故障时容错运行机器系统的持续安全或可接受操作,即故障检测与识别检测和隔离,容错控制器根据规定重新配置来应对隔离故障。所有容错系统开发的一个基本要求是全面了解常规系统的运行情况,以便将其行为与发生故障时的机器行为进行比较。图 6 给出了两种方案(冗余和非冗余)的重新配置和补偿策略流程图。

配置	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center; gap: 20px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">监督控制</div> <div style="font-size: 24px;">→</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">必要行动</div> </div>	柔性控制系统	采取预防行动
认知	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> </div>	专家决策系统	专家决策系统
网络	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> <p>机器组 自适应分析</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>点对点监视 时光机器快照</p> </div> </div>	车间物联网系统	自我智能化对比决策
会话	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> <p>机器</p> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>元器件</p> </div>	预测健康管理	自我认知决策
联通	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="text-align: center;"> <p>传感器</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>有效的传感器选择</p> </div> </div>	机器状态模拟	机器健康状态模拟

图 4 5C 构架的技术与应用

Fig.4 5C architecture technology and application

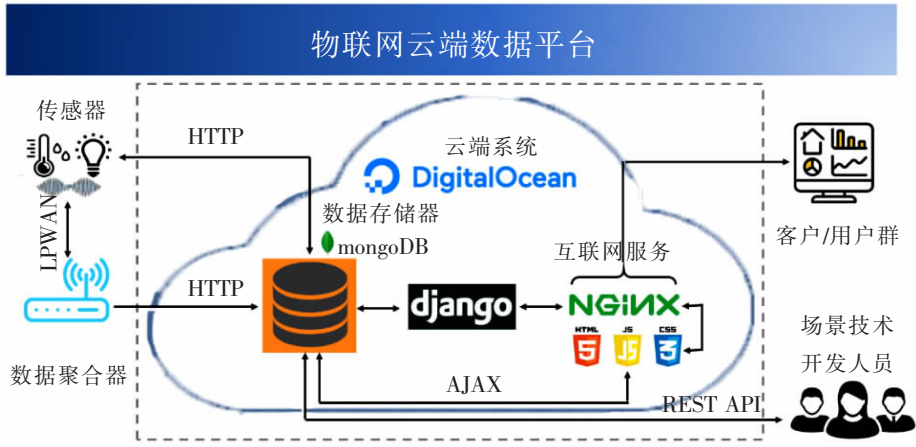


图5 基于状态维护容错机器运行系统的重构

Fig.5 Reconstruction of fault-tolerant machine running system based on state maintenance

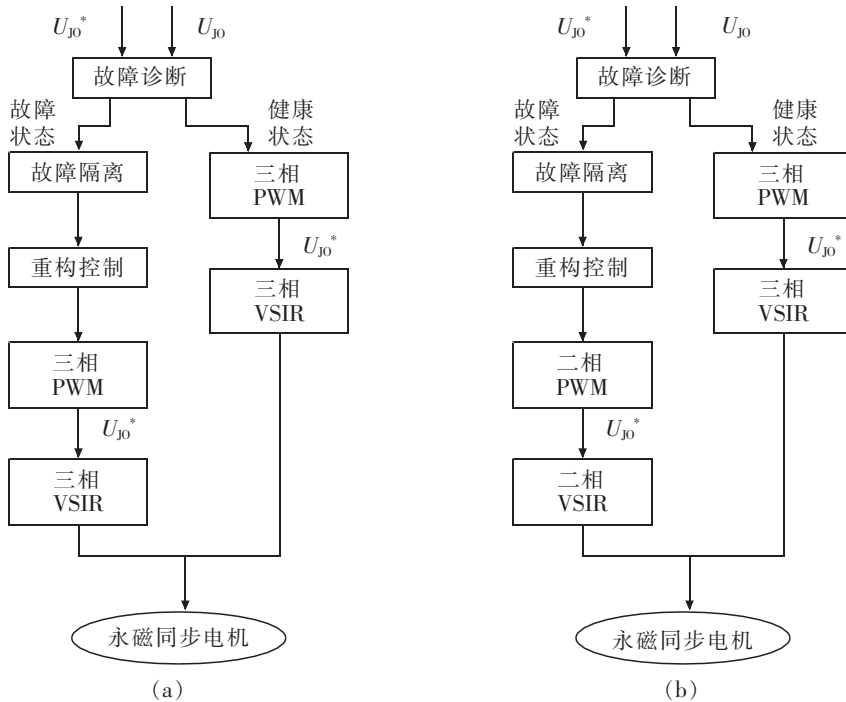


图6 印刷电源公司设计的能量收集装置同物联网数据平台的无缝连接系统

Fig.6 Seamless connection system for energy harvesting devices designed by printing power companies and IoT data platforms

2 故障诊断

检测和判断系统是不是有故障,如果没有故障,控制计算单元执行设备健康状态下的控制策略。如果发现设备有故障,控制计算单元执行控制策略按如下几个步骤运行:

- 1) 故障开关隔离:删除已发生故障的子电路相关的内部控制命令,对其进行隔离;
- 2) 重构与隔离腿相对应,隔离故障腿并连接健康腿(图6(a))或中点直流链路(图6(b));
- 3) 通过调整脉宽调制控制进行补救:计算故障后逆变器拓扑开关的新脉宽序列。

在图6(a)中的方框图中,由三相VSIR表示的功率反相器模块对应于反相器拓扑,其中故障支路被第4个冗余支路替换。在图6(b)中,故障后的反相器电路(二相VSIR)是由故障后的2条支路组成的。为了防止二次故障的发生,有必要在故障发生后尽快执行此程序。

3 能量自收集技术

数千个传感器节点被部署到 I4.0 或 FOF 工厂楼层。最大的挑战仍然是维护和更换这些大量无线传感器的电池,这是一项非常昂贵和耗时的的工作。采用自我集能技术的传感器技术,独立节点可以很容易地放置在难以到达的地方,充电电池系统可以持续数千个周期,极大地延长了节点的寿命。通常自带电源传感器提供了一个电池,表面上是方便和低成本的。然而,电池的能量供应有限,需要定期更换或充电。这在个别部署中可能很好,但在包含多个节点的无线网络中,这种配置维护起来非常麻烦,显然对客户不具有吸引力。此外,更换电池的需要意味着无线系统应该可以对其访问以了解电池的剩余电量,这几乎是不可能的,即使可能也会大大影响其性能。最后,还有环保方面的担忧,即将数百万个智能设备的电池投入市场,将在未来产生一个日益严重的环保问题。集能技术的应用可以克服简单地采用电池为传感器供电的百万个节点的挑战,作为替代电池的一种方法,它可以在无线系统的整个生命周期内提供所需的电力,并且可以自由嵌入或放置在最适合执行传感器功能的地方。

新一代、更强大的能量收集技术的积极性也来自于不断扩大的无线传感器和支持通信网络(也称为无线传感器网络)的安装^[1]。能得到有效应用的常见例子包括电动可穿戴智能手表、智能卡或访问设备、远程无线传感器节点(WSN)、射频识别(RFID)资产跟踪标签、实时定位系统(RTL)、机器状态监测、人体健康检测手表、用于远程患者监测的医疗仪器,家用自动化和消费电子产品等。当前的趋势是将各种能量收集技术融合到可穿戴电子设备中,减少更换电池或充电的需要,从而提高便利性^[7-9]。本文的以下内容将探讨上述各种可能性,并研究在延长、无人看管或永久运行的情况下延长微动力电子设备运行寿命的技术潜力。

图 7 所示是一个扩展了能量收集系统的基本设计。设计的能量收集系统包括:光伏板(收集环境光);MPPT 电路(最大功率点跟踪)^[10-11];超级电容器,存储任何多余的能量,并在无照明期间作为备用;以及传感器或终端设备。

3.1 太阳能板的能量收集方案设计

通过一个称为光伏效应的物理过程^[12],光伏电池将光转换成电能。光(以光子的形式)被吸收到光伏电池中,将它的能量转移到半导体器件上,使电子自由流动。这些产生的电子在材料内的不同带(例如,从价带到导带)之间转移,导致两个电极之间的电压积聚。在为室内传感器供电的各种能量收集技术中,室内太阳能的功率密度最高^[2]。

这个原型是采用现成的三洋非晶体的 AM-1454 PV 底板。底板的总尺寸是 39.6 mm×25 mm×3 mm。图中 400 Lux 表示,它能够提供峰值功率约 0.143 mW(图 8)。大体上,本系统能自我可持续工作而无需外接能源的系统,而要维持自我供电,通常吸收能源的输入必须大于或等于消耗能源输出。更进一步就是说,系统是尽可能吸收最多能源,消耗最少能源。为了获取最大输入功率,一部分开路电压 MPPT 电路。

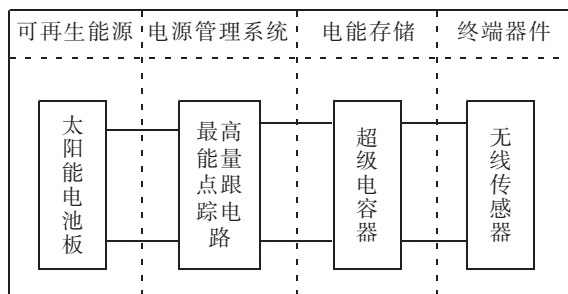


图 7 能源收集系统原理图

Fig.7 Schematic diagram of energy harvesting system

3.2 无线传感器

此设计的无线传感器使用的是美国德州仪器 EZ430-RF2500 数据采集卡。由于已对传感器结构进行了优化设计,以满足试验传感和监测要求,因此功耗曲线将大大低于初始工厂设置。图 9 显示了终端设备的传输电流分布。较小的感应尖峰之间的持续时间约为 40 ms,而较大的传输尖峰周期大约 2 s。

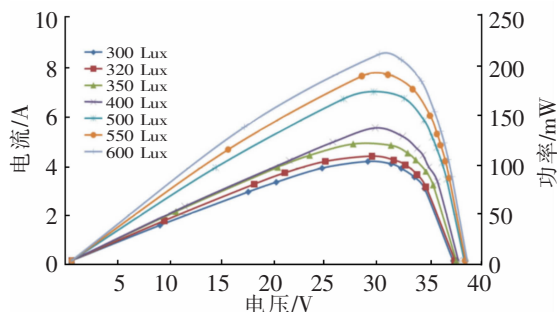


图 8 太阳能电池板不同 Lux 值得光电效应曲线

Fig.8 Photoelectric effect curve of solar panels with different Lux values

3.3 电能管理模块

能量管理模块包括基于分数倍频开路电压的 MPPT 电路。MPPT 是光伏电池板输出功率最大化的常用技术。各种 MPPT 技术分为“直接”或“间接”方法^[12]。分数倍频开路电压法是一种最简单、经济有效的方法。理论上,在不同的辐照和温度水平下,对应于最大功率的光伏阵列电压与阵列开路电压呈线性关系。最大功率点电压, $U_{\text{mpp}}=k_{\text{oc}} \cdot U_{\text{oc}}$, 其中 U_{oc} 是光伏的开路电压, k_{oc} 是电压系数^[13]。为了在 MPPT 上操作光伏板, 将实际光伏阵列电压 U_{pv} 与参考电压 U_{ref} 进行比较。控制 MPPT 电路处理错误信号并补偿 U_{pv} , 使其尽可能接近 U_{ref} 。通常, 面板与负载瞬时断开, 以对其开路电压进行采样。测量与 U_{mpp} 相对应的开路电压的分数倍频, 并将其保存在保持电路中, 以作为控制回路的 U_{ref} 。

3.4 超级电容模块

通常, 光伏电池板产生的任何未使用的能量都将储存在超级电容器中。这对于频繁进行充放电循环的能源收集方式来说是理想的储能选择。此外, 超级电容器还发挥着重要作用, 提供替代能源, 以维持零收获期间的运行, 并缓冲任何功耗高峰。在确定超级电容器的尺寸时, 应使用以下参考公式

$$t=C\Delta V/I=C(U_0-iR-U_1)/(I+I_L) \quad (1)$$

式中: t 为超级电容器充电时间, h; ΔV 为超级电容体积, cm^3 ; C 为超级电容器的电容, F; U_0 为输入电压, V; U_1 为切断电压, V; I 为充电电流, A; I_L 为超级电容器泄漏电流, A; R 为超级电容器内部电阻, Ω 。

通常电容容量越大, 电容器的持续时间越长。但是缺点是物理尺寸也越大。采用大电容的另一个优点是电路中电压水平更稳定, 波动更小, 这取代了电路中对电压调节器的需求, 让电路设计大大加以简化。所以, 如果我们想把电压降限制在 2.5~2.7 V, 超级电容器的容量必须在 40 F 左右才能持续一天以上。超级电容器的性能可以持续更长的时间, 考虑到在较低的电压下, 电流消耗趋于较低, 因此增加了超级电容器的持续时间。

3.5 能量采集样机的能量平衡计算

在了解了各种负载消耗后, 确定了整个系统所需的能量平衡输入, 如图 9 所示。对于净正能量系统, 收集能量时间段内收集的能量必须大于一天内消耗的总能量。单块光伏板可产生约 0.143 mW 的最大功率。并联布置的 5 块光伏板, 理论最大发电量为 0.715 mW, 应能满足当天的总能耗。

在测试电路过程中, 由于光伏板阻抗不匹配、电路未优化和损耗, 输入可能小于计算值, 负载消耗可能更大; 因此, 首先使用 5 个光伏电池板提供一些缓冲, 以实现系统能量的自给自足。无需外接电源或电池供电。

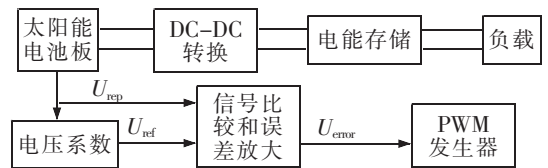


图 9 分倍频开路电压最大能量点跟踪电路原理图
Fig.9 Schematic diagram of maximum energy point tracking circuit with multi-frequency open circuit voltage

4 结论

本文介绍了一个自可持续的能量采集系统设计实例, 说明了在基于可重构状态的维修容错机器系统中部署这种能量采集无线传感器是可行的, 可以实现智能制造万物相连的物联网系统。

参考文献:

- [1] ANASTASI G, CONTI M, FRANCESCO M D, et al. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(3): 537-568.
- [2] JAVANMARD N. Indoor power harvesting using photovoltaic cells for low power applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4502-4509.

- [3] HANDE A, POLK T, WALKER W, et al. Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2007, 31(6): 420–432.
- [4] DEERE J. John Deere Adds Array of Environmental Sensors to Field Connect. [N/OL] https://www.deere.com/en_US/corporate/our_company/news_and_media/press_releases/2013/agriculture/2013mar1_field_connect.page
- [5] SHENOY J, PINGLE Y. IOT in agriculture[C]// International Conference on Computing for Sustainable Global Development. 2016.
- [6] TORII T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25(1–2): 133–153.
- [7] TOH W Y, TAN Y K, KOH W S, et al. Autonomous Wearable Sensor Nodes With Flexible Energy Harvesting[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(7): 2299–2306.
- [8] SONG J, TAN Y K. Energy consumption analysis of ZigBee-based energy harvesting wireless sensor networks[C]//2012 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS). IEEE, 2012: 468–472.
- [9] TAN Y K, PANDA S K. Energy Harvesting From Hybrid Indoor Ambient Light and Thermal Energy Sources for Enhanced Performance of Wireless Sensor Nodes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(9): 4424–4435.
- [10] SALAS V, E. Olías, Barrado A, et al. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, 90(11): 1555–1578.
- [11] AHMAD J. A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays [C]// International Conference on Software Technology & Engineering. IEEE, 2010.

Ultra-low Power Wireless Sensor Technology Application and Intelligent State Monitoring

Chen Yanqing¹, Yu Yinquan²

(1. IEEE Power Electronics and Industrial Applications, Singapore 117576, Singapore; 2. Institute of Precision Machining and Intelligent Equipment Manufacturing, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, China)

Abstract: The smart manufacturing CPS throughout the world, being it the I4.0, China 2025, or, FoF drive, is so much focusing on the ability to reconfigure the system smartly and seamlessly via OTA (over the air). The legacy connections equipped in machines, factory systems, manufacturing execution systems, to even the resource planning system have to be transformed towards a universal dimension in order to be really able to achieve ultimate benefits for each subsystem being designed for its purpose. Data is the common language among them. The data platform realizes seamless and robust interconnection between the CPS IoT and cloud data platform by use of wireless sensor and its network. Distributed wireless sensors have been widely used for sensing and monitoring in space, human, environment, automation, military, structure and building applications. With the advancement of technology, such devices have become even smaller and cheaper, making them even more attractive to use. However, the operational sustainability is a major concern for such batteries powered devices, requiring regular changing of fresh batteries.

Key words: ultra-low power wireless sensor; self-sustainable energy harvesting design; Intelligent state monitoring