

# 射频识别技术在土木工程中的应用研究

成 程<sup>1</sup>, 雷 雨<sup>2</sup>

(1. 陕西建工集团股份有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 伴随着射频识别技术(RFID)在各个行业中的广泛应用, 我国传统形式的建筑行业开始将射频识别技术运用在结构参数检测、施工过程管理及质量控制等方面。本文通过阐述射频识别技术的系统组成和工作原理, 为其在土木工程领域的推广应用奠定可靠的理论基础。文章重点分析射频识别技术对于混凝土温度/湿度、应变、腐蚀及裂缝等关键参数检测的研究现状。同时, 归纳总结了射频识别技术在建筑施工过程中人/材/机的管理应用, 以及对工程质量的控制, 旨在为实际工程中亟待解决的技术难题提供新思路, 为实现智慧城市的信息化和智能化提供参考意见。

**关键词:** 射频识别技术; RFID 标签; 结构健康监测; 施工过程管理; 施工质量控制

中图分类号: TU7; TP212.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)04-0611-06

## Application of radio frequency identification technology in civil engineering

CHENG Cheng<sup>1</sup>, LEI Yu<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. Shaanxi Coal Chemical Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

**Abstract:** With the extensive application of radio frequency identification(RFID)technology in various industries, the traditional construction industry in China has begun to apply RFID technology to structural parameter detection, construction process management and quality control. This paper elaborates the working principle and composition of RFID system to lay a reliable theoretical foundation for its popularization in civil engineering. It mainly analyzes the research status of RFID technology for the detection of key parameters of concrete, such as temperature/humidity, strain, corrosion and crack. Meanwhile, it summarizes the application of RFID in the management of human/material/machine in the construction process, as well as the control of construction quality, aiming to provide new ideas for the technical problems to be solved in the actual project, and provide reference for the realization of informatization and intelligence of smart city.

**Key words:** radio frequency identification technology; RFID tag; structural health monitoring; construction process management; project quality controlling

射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)利用射频信号空间的电磁或电感耦合来识别跟踪特定目标并读写相关数据, 实现非接触式自动识别<sup>[1]</sup>。与传统识别技术相比, 该技术基于抗干扰能力强、识别速度快、读取距离远、数据可更新可加密以及存储容量大等诸多优势, 赢得了国内外学者的高度认可。早期国内外学者致力于突破技术的瓶颈问题, 包括芯片设计<sup>[2]</sup>、标签封装、天线制造<sup>[3]</sup>、读写器设备生产和应用软件集成等环节。近年来, 得益于 RFID 技术理论基础的显著突破, 它已经得到更广范围和规模的应用尝试, 其相关产品也渗入人们生活和工作中, 主要

集中在物流仓储、交通、身份识别及设备管理等诸多领域<sup>[4]</sup>。

目前, RFID 技术在建筑业中的研究主要涉及基础理论和推广应用两方面。将 RFID 标签与传感器相结合集成射频识别系统, 被认为是最有潜力的室内位置传感技术。因此, RFID 在建筑业中拥有了很大的应用空间, 能够用以实时感知并收集建筑数据, 如温度、湿度、压力和振动等诸多关键信息。欧进萍院士研究团队已经成功应用无线传感网络技术检测建筑物及数座桥梁的日常健康状况。另外, RFID 技术可以应用于混凝土的加工处理以及对施工过程中人、材、机的安全管理等

实际工程中,同时,基于RFID技术建立施工进度监测系统,利用采集的进度数据确保施工的进度和质量。如今,新基建兴起为智慧城市的建设带来前所未有的发展机遇,以RFID为核心的物联网技术为创建新型智慧城市奠定了良好的物质基础。未来几年,以RFID技术为代表的新一代信息技术将使城市的基础设施得以智能化管理,包括智慧交通、智慧医疗、智慧家居及智慧建造等方方面面,实现传统建筑业的转型发展,创造更大的经济效益和社会效益。

## 1 射频识别技术的工作原理

射频识别系统主要由读写器和应答器(标签)组成(如图1所示),RFID标签包括电子芯片和接收天线。每个芯片都具有唯一的电子编码,将芯片附着在物体上用来存储并标识目标的相关信息。目前,标签依据能否通过自身携带的电池进行供电可分为无源和有源标签。其中,无源标签产品因结构简单、经济实用在智能建筑中获得了更为广泛的应用。接收天线是用于标签和读写器间传递射频信号,也为芯片读写数据及传输数据提供能量。

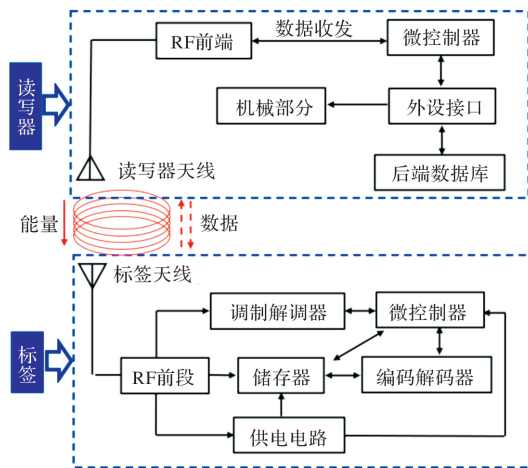


图1 RFID系统的组成

Fig. 1 Composition of RFID system

读写器利用射频信号以电感耦合或电磁反向散射耦合的两种方式实现与标签信息的无接触传递。电感耦合是基于变压器模型,通过空间高频交变磁场实现耦合,适合于中低频的近距离识别系统;而电磁反向散射耦合依据雷达原理,利用发射电磁波的目标反射回波读取目标信息,适合于高频的远距离识别系统<sup>[5]</sup>。

RFID技术是指将标签天线因周围环境变化而引起的天线参数改变,通过读写器接受并反馈,

从而实现远距离传感作用。因此,天线结构设计在传感器中是最重要的环节之一,它的类型和大小直接决定着读写器与标签的通信能力,从而影响整个系统性能。可以通过改善天线的主要参数(天线效率、增益系数和输入阻抗等)来实现天线的优异性能。其中,天线的输入阻抗 $Z_{in}$ 可以决定天线与后端传输或波导的匹配特性,其值由公式(1)决定。

$$Z_{in} = \frac{2P_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad (1)$$

$R_{in}$ 为输入电阻; $X_{in}$ 为输入电抗; $V_{in}$ 和 $I_{in}$ 为馈电端口处输入电压和电流; $P_{in}$ 为天线的输入复功率。阻抗匹配调节在天线设计中显得尤为重要,只有当输入阻抗与馈线达成良好的匹配时,天线才能获得最大辐射功率。天线的输入阻抗由电压驻波比(VSWR)和反射系数 $\Gamma$ 决定,它们可以反映天线的匹配能力,如公式(2)所示。驻波比的值处于1到无穷大之间,1代表天线完全匹配,而无穷大表示完全失配。

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2)$$

标签天线的设计应根据不同射频识别系统的工作原理和应用场景,实现必要的性能,如良好的方向性、鲁棒性、较长的读取距离、或标签芯片共轭匹配等。具备上述的设计要求有利于实现RFID标签传感器在土木工程背景下的推广应用。

## 2 射频识别技术在结构健康监测中的应用

### 2.1 混凝土温度/湿度监测

混凝土固化和成熟期间的温度/湿度值会对其强度、收缩、徐变等性能产生重要影响,特别是对于大体积混凝土浇筑。基于超高频RFID传感技术不仅可以迅速定位指标异常的混凝土,还大大降低系统成本。天津大学战金雷<sup>[6]</sup>设计了低功耗无源RFID温度标签芯片,并将温度偏差控制在 $0.4^{\circ}\text{C}$ 以内。另外,复旦大学和中国科学院利用模数转换技术实现了RFID温度/湿度传感功能,为无源RFID检测技术的发展奠定了良好的理论和物质基础。此后,诸多学者<sup>[7]</sup>开始研究RFID传感器在混凝土环境中的真实应用效果,并给标签加装保护装置,避免传感器在粗糙的施工环境中受到损伤。后期试验表明,该标签传感器可以达到与传统热电偶一样的精确度,如图2所示。

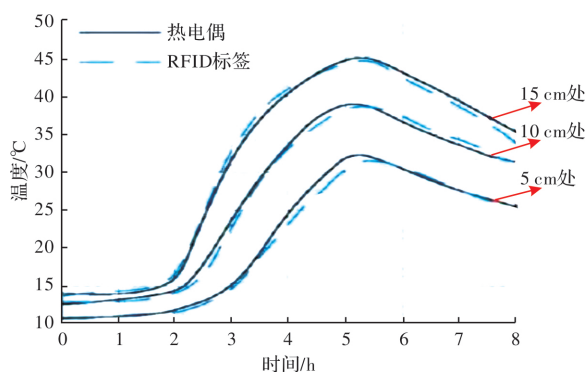
图2 RFID传感器与热电偶测温性能对比<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Comparison of temperature measurement performance between RFID sensor and thermocouple

学者霍灵瑜<sup>[8]</sup>将温度与湿度标签集成于一套RFID检测装置中,同时实现混凝土温度和湿度的自动检测及远程监控。由此可见,多功能RFID系统的集成是未来RFID传感技术的发展趋势。同时,从降低混凝土材料的介电常数、电导率和厚度等角度出发,减小电磁波穿透混凝土时产生的损耗,提高读写器与标签之间无线通信的可靠性,也是未来RFID系统的研究热点。

## 2.2 应变监测

传统的应变传感器如电阻应变片等具有设备引线过多、作业复杂且成本过高及需要持续供电等缺点。为了突破它们在实际工程中有源有线的局限性,无源无线的RFID应变传感器通过两种方式来实现非接触式应变检测,如图3所示。

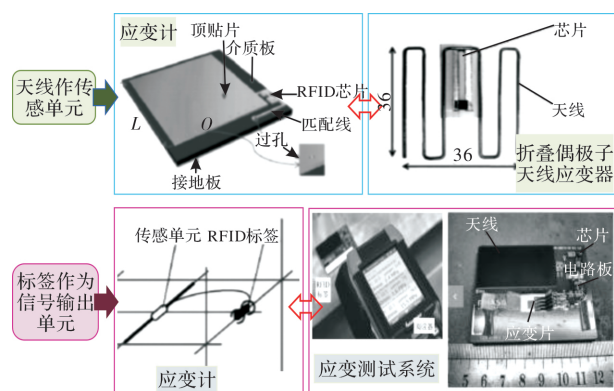


图3 RFID应变传感器的两种设计思路

Fig. 3 Two design ideas of RFID strain sensors

第一种是利用天线部分来感知应变,天线经历形变会使其电学性质产生变化,通过读写器收集电学性质的改变量,由此实现应变传感监测。这类传感器的设计主要采用天线的谐振频率作为应变测量指标,其主要原因是该电学参数非常稳定,并在小应变状态下与应变表现为线性关系。为了提高天线感知外界应变的能力,Yi<sup>[9]</sup>等人开发

了片状天线结构,可以实现高精度的定量应变监测。当研究目标表面开裂引起天线变形时,电磁谐波频率会产生相应漂移,以此来检测材料应变量。另外,Occhiuzzi<sup>[10]</sup>利用应变导致偶极子天线金属丝夹角变化的原理,设计了基于折叠偶极子天线的标签传感器,为利用天线感知外界应变的RFID传感技术提供了新方向。

第二种RFID应变传感器是将标签作为信号输出单元,并将传统应变计与标签集成传感系统。实际工程中,将有线传感器获得的应变值传递并储存在标签中,再读写目标的实时应变数据。据此原理,日本Taiheyo公司<sup>[11]</sup>开发了RFID应变计,将固定在待测钢筋上的有线应变计测得的应变值传递到RFID标签中,再读写到目标钢筋的实时应变数据,从而实现钢混结构中纵筋应变的有效监测。此外,美国Phase IV公司<sup>[12]</sup>利用惠世通电桥将应变片电阻值的改变量转换为电压信号传递至RFID标签中,形成了特高频RFID应变系统,并且成功监测到墙体与混凝土中的应变状况。

基于上述事例,可以说明RFID传感器技术由于超低成本、安全可靠、可大规模部署等优势,有望取代复杂昂贵的传感系统实现建筑结构的应变监测。

## 2.3 腐蚀和裂缝检测

目前,学者们正在尝试利用RFID技术解决结构裂缝和腐蚀程度检测等土木工程界关注的重大问题。为了突破传统腐蚀检测技术的局限性,纽卡斯尔大学<sup>[13]</sup>采用低频RFID传感器来表征钢材的海洋大气腐蚀,并利用选择性瞬态功能提取腐蚀特征,根据相应公式计算出腐蚀响应参数,以此实现RFID技术在钢材腐蚀检测领域的应用。后来, Lee<sup>[14]</sup>和 Hong Zhang<sup>[15]</sup>等人研发了基于高频标签的腐蚀检测系统,通过分析复阻抗的实部和虚部来平衡传感器的定位,实现了钢结构腐蚀行为的在线监测和表征。由此可见,RFID技术在结构腐蚀监测领域的应用研究虽然才刚开始,但是它具有的本征优势,为未来土木工程结构腐蚀监测技术的发展指明了方向。

针对结构裂缝监控这一亟待解决的技术难题,基于RFID原理的裂缝传感器成为实现结构裂纹发展全过程监测的最佳选择之一。最早由德克萨斯大学Huang H团队将RFID技术应用于金属结构的裂纹测量,设计了灵敏度可达亚毫米级的矩形贴片天线传感器<sup>[16]</sup>,并成功监测到双悬臂梁结构疲劳裂纹扩展的不同阶段<sup>[17]</sup>。可见,用于缺陷检

测和表征的低成本 RFID 传感器系统可以弥合无损检测技术和结构健康监测的差距。此后,宁波大学郑俊飞<sup>[18]</sup>等人提出了一种安全可靠、结构简单、价格低廉的新型无源 RFID 裂缝标签传感器,能够实现 7 m 以上的远距离报警。张军<sup>[19]</sup>基于 3D 天线和核主成分分析提出了一款用于裂缝检测的超高频无源 RFID 传感器系统,实现了结构的开放和封闭裂缝的评估。

目前 RFID 传感器在结构裂缝领域的应用研究离实际工程仍具有很大的差距,需要加强 RFID 技术与各类天线传感器的结合应用,探究 RFID 裂缝传感器在实际工程中的监测规律。更重要的是需要更多学者和科研团队在 RFID 传感器的裂纹测量理论研究和性能优化等方面不断尝试。

### 3 射频识别技术在施工管理中的应用

#### 3.1 建筑施工过程中人/材/机的管理

项目施工过程中工人、建筑材料、机械设备的管理水平直接影响建筑质量与工程造价,运用 RFID 技术实时监控人/材/机的具体位置和使用状况,可以保证建筑施工过程的安全性。将标签安装在工人日常必备的安全装置中,管理人员通过读写器准确了解工人位置,实现远程追踪,提高了对整体工程的监管效率。为此,肖剑锋<sup>[20]</sup>等人利用该方法在每个振捣施工人员安全帽上放置了 RFID 标签,根据在立柱或墙壁表面安置的读写器接收到的信号强弱来判断读写器与参考点间的距离,从而计算出振捣工人的移动节点位置,估测局部振捣程度,可以提前发现混凝土浇筑缺陷,有助于实现精细化施工和工程质量的实时把控。

另外,从建筑材料的规划设计、营造施工到运营维护,可以利用射频识别技术为施工方和生产商建立远程监督系统。该技术能够依托建筑现场安装的读写器读取材料内提前植入的 RFID 标签,全程跟踪每批材料,并且根据实际施工进度灵活调整构件的生产计划,尤其适用于现今非常热门的装配式建筑<sup>[21]</sup>。RFID 技术与 BIM 在装配式建筑全寿命周期管理中的结合应用更是建筑业的研究热点,众多学者<sup>[22]</sup>通过搭建构件生产质量管理流程模型,实现了构件生产过程中信息交流的精确性和构件追踪管理的高效性,同时为装配式建筑构件生产质量管理体系的建立提供参考。当发生建筑材料余量不足或偷换等异常问题时,传感器还可以及时报警,避免工期延误。

当然,RFID 技术不仅在装配式建筑的制造和

使用过程中具有非常明显的优势,同时也成为大型智能建筑和智慧城市的重要内容。在智能建筑的运营维护过程中,物业系统运用 RFID 技术能够对建筑物构件运行状况有更加直观的了解,防止发生突发安全事故。

针对施工机械的问题,需要在混乱无序的大型建筑施工现场运用 RFID 技术准确记录服役及闲置机械和车辆,可以帮助资源有效整合。同时可以根据标签信息,准确掌握机械的损坏和维护情况。对于特殊工种的大型机械(如塔吊等),可以实时监督它们的出入,借助安全监控和预警模型,避免碰撞、甚至更大型事故的发生。例如,学者 Chae S<sup>[23]</sup>利用此方法在施工机械设备和工人身上安置了特定标签,当机械设备误入非必要工作区域或者工人处于风险作业区,RFID 传感器能够及时报警,有效地预防安全事故。王志杰<sup>[24]</sup>成功将自主设计的 RFID 车辆监测系统应用于实际施工工地车辆管理中,实现了建筑工地车辆的高效化数字管理,极大提高了工作效率并产生了巨大的经济利益。

#### 3.2 建筑工程质量控制

RFID 技术在一些隐蔽性建筑工程质量控制中起到了非常显著的作用,可以取代传统耗时费力的检测方法。如在基础、梁、柱等关键构件中埋入 RFID 标签,通过读写器读取数据,实时监测它们的形变、位移等重要参数,有利于实时掌握建筑的运营情况,为保证构件安全提供数据参考。又如利用 RFID 技术实现混凝土和钢筋的质量检测监控,保证建筑物的最终质量和安全性。在混凝土内部和钢筋表面植入 RFID 标签,从施工现场到第三方检测单位全过程进行追踪和动态监管(如图 4 所示),以规范建筑材料质量监管过程中的公正性和真实性,有利于促进各个城市建筑质量追踪及动态监管系统的推广<sup>[25-26]</sup>。然而,现存的质量追踪系统仅仅覆盖了施工单位、监理单位及第三方检测机构,将来需要利用 RFID 技术与生产单位进行联动,从材料的生产开始进行质量追溯,实现包括生产、运输、仓储、交易到施工完成及运营阶段的整个供应链的全程记录,为存在纰漏的环节预警,为控制整个工程质量产生巨大的经济效益和社会效益。

### 4 结论

(1)未来将从优化系统结构和提升精确度两大方面展开 RFID 传感系统的基础研发,提高建筑科



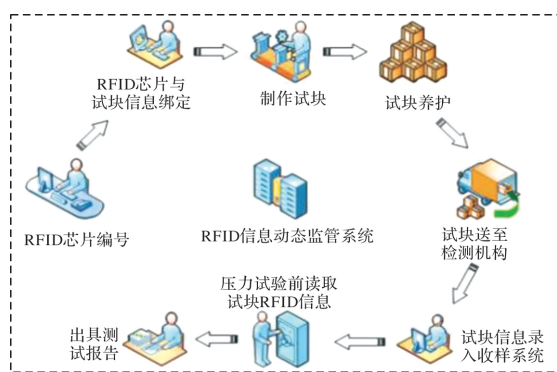
图4 RFID混凝土质量追踪系统<sup>[27]</sup>

Fig. 4 RFID concrete quality tracking system

研技术,为结构健康监测提供新思路,为建立更好的施工管理秩序提供新方向。

(2)针对土木工程行业中不同应用场景,对RFID传感器进行性能设计和结构开发,如无源应变计与裂缝计、智能骨料等。考虑目前建筑工程中尚未应用案例,需要进一步增强RFID技术的可用性和环境适应性。

(3)RFID技术已经初步应用于施工现场的安全监控、构件识别和追踪、智能建筑等,大大提高了施工质量。此后,需要推广RFID传感器在建筑物从生产、施工到运营的全过程应用,到达实时可视化、信息自动化、多方协同参与的高效监控。

## 参考文献 References

[1] LANDT J. The History of RFID[J]. IEEE Potentials, 2005, 24(4): 8-11.

[2] 佚名. 萨兰托大学开发最远射程完全无源RFID传感器[J]. 传感器世界, 2014, 20(10):45.

Anon. The University of Saranto develops the longest range completely passive RFID sensor[J]. Sensor World, 2014, 20(10): 45.

[3] KUO J S, WANG J J, HUANG C Y. Dual-frequency antenna for RFID tags with complementary characteristic[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2010, 49(6): 1396-1398.

[4] 姜伟. RFID技术在我国零售业物流中的应用[J]. 知识经济, 2014(13):111.

JIANG W. Application of RFID technology in China's retail logistics[J]. Knowledge Economy, 2014(13):111.

[5] 罗春彬, 易彬. RFID技术发展与应用综述[J]. 通信技术, 2009, 42(12): 112-114.

LUO C B, YI B. Overview of RFID technology and application[J]. Communications Technology, 2009, 42(12):112-114.

[6] 战金雷. 集成温度传感器的无源UHF RFID标签设计

与验证[J]. 传感技术学报, 2013, 26(12):1711-1714.

ZHAN J L. Design and verification of passive UHF RFID tag with integrated temperature sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(12): 1711-1714.

[7] 周双喜. 基于无源RFID的混凝土温度监测技术研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(3):65-73,82.

ZHOU S X. Research on concrete temperature-monitoring technique based on passive RFID[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3):65-73,82.

[8] 霍灵瑜. 一种带温敏装置的RFID标签, RFID系统及温度检测方法: 中国, CN 201210179509, [P], 2012-01-01.

HUO L Y. An RFID tag with temperature sensitive device, RFID system and temperature detection method: China, CN 201210179509, [P], 2012-01-01.

[9] YI X, CHO C, COOPER J, et al. Passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing electromagnetic simulation, and testing[J]. Smart Material and Structure, 2013, 22(8):1-37.

[10] OCCHIUZZI C, PAGGI C, MARROCCO G. Passive RFID strain-sensor based on meander-line antennas[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2011, 12(59): 4836-4840.

[11] JIANG K L, XIAO C, ZHANG Yi, et al. RFID strain sensing system for concrete structures[J]. Journal of Research of the Taiheiy Cement Corporation, 2010, 11(3):1-9.

[12] CHING L, LEKTOMILLER J M. RFID sensor tag and system for small output transducer, and related methods: US 20150083810 A1[P]. 2016-6-28

[13] ALI S, TIAN G Y, ZHANG J. Low frequency(LF) RFID sensors and selective transient feature extraction for corrosion characterization[J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2016, 241:34-43.

[14] LEE Y H, MARSIC I. Object motion detection based on passive UHF RFID tags using a hidden Markov model-based classifier. [J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2018, 21:65-74.

[15] 张宏, 吴瑞坤, 徐鲁雄. 基于高频无源RFID标签的钢腐蚀检测系统及检测方法: 中国, CN201711155531. 8[P]. 2017-11-20.

ZHANG Hong, WU Ruikun, XU Luxiong. Steel corrosion detection system and detection method based on high frequency passive RFID tag: China, CN201711155531. 8 [P]. 2017-11-20.

[16] DESHMUKH S, MOHAMMAD I, et al. Crack detection and monitoring using passive wireless sensor [C]//ASME Conference on Smart Materials, Adaptive

- Structures and Intelligent Systems. California, USA, 2009: 511-516.
- [17] MOHAMMAD I, GOWDA V, ZHAI H, et al. Detecting crack orientation using antenna sensors[J]. Measurement Science & Technology, 2012, 7981(8): 765-768.
- [18] 郑俊飞, 王健等. 一种基于无源 RFID 的裂缝传感器设计[J]. 传感技术学报, 2020, 33(6): 785-790.  
ZHENG Junfei, WANG Jian. A Novel Design of Crack Sensor Based on Passive RFID[J]. Journal of Transduction Technology, 2020, 33(6): 785-790.
- [19] ZHANG J, GUI Y T, ZHAO A B. Passive RFID sensor systems for crack detection & characterization[J]. NDT & E International, 2017, 86: 89-99.
- [20] 肖剑锋, 李东新. 混凝土施工中几种定位技术的分析比较[J]. 国外电子测量技术, 2018: 37(7): 138-142.  
XIAO Jianfeng, LI Dongxin. Analysis and comparison of several positioning technologies in concrete construction[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018: 37(7): 138-142.
- [21] 常春光, 吴飞飞. 基于 BIM 和 RFID 技术的装配式建筑施工过程管理[J]. 沈阳建筑大学学报, 2015, 17(2): 170-174.  
CHANG Chunguang, WU Feifei. Prefabricated construction process management based on BIM and RFID technology[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2015, 17(2): 170-174.
- [22] 曹新颖, 鲁晓书, 王钰. 基于 BIM-RFID 的装配式建筑构件生产质量管理[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(4): 102-106.  
CAO Xinying, LU Xiaoshu, WANG Yu. Quality Management of Component Production of Prefabricated Building Based on BIM-RFID Technology[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(4): 102-106.
- [23] CHAE S, YOSHIDA T. Application of RFID technology to prevention of collision accident with heavy equipment[J]. Automation in Construction, 2010, 19(3): 368-374.
- [24] 王志杰, 王铭泽, 王英博. 基于 RFID 的建筑工地车辆计数系统应用研究[J]. 科学时代, 2012(7): 93-94.  
WANG Zhijie, WANG Mingze, WANG Yingbo. Application Research of RFID based vehicle counting system in construction site[J]. Science Times, 2012(7): 93-94.
- [25] 李贞, 高帆. RFID 和智能机器人在混凝土全自动抗压强度检测系统中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(8): 77-79.  
LI Zhen, GAO Fan. Application of RFID and intelligent robot in automatic concrete compressive strength detection system[J]. China Concrete and Cement Products, 2017(8): 77-79.
- [26] 张敏, 唐贵和, 李文雄. 应用于无线传感网络的分布式损伤识别技术[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013(2): 199-208.  
ZHANG Min, TANG Guihe, Li Wenxiong. Distributed damage identification technology for wireless sensor networks[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2013(2): 199-208.

(编辑 桂智刚)