

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.003



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



融合图像和声纹特征识别的钢-混凝土结构 磁吸爬壁机器人设计

陈冬冬¹, 张建清², 张骁琳¹, 季阳¹, 付睿丽³

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037; 2. 长江地球物理探测(武汉)有限公司, 武汉 430010; 3. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要:针对钢-混凝土结构界面脱空自动化检测难题,设计了一种融合图像和声纹特征识别的爬壁机器人。首先介绍该爬壁机器人的底盘、磁吸装置、电源系统、驱动系统、图传和声纹等模块。其次,对硬件控制系统进行重点说明,通过受力分析和试验测试,确定了钕铁硼永磁体提供吸附力的方案。最后,详细阐述了图像和声纹特征识别软件部分的构成与功能,其中,图像采集部分采用基于香橙派平台的图像传输解决方案,声纹识别模块由前端、中端和后端3层架构构成:前端搭载叩击和录音设备,用于激发和采集声纹;开发了声纹识别微信小程序中端,实现声纹噪声去除和有效特征提取;后端通过腾讯云和微信小程序配合,识别声纹数据并将结果返回给微信小程序。设计的融合图像和声纹特征识别的磁吸爬壁机器人能实现图像和声纹的协同采集与分析,为钢-混凝土结构界面脱空自动化检测提供有效的解决方案。

关键词:爬壁机器人;磁吸附;图像传输;声纹识别;钢-混凝土结构

中图分类号: TU689; TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)05-0038-06

Design of a magnetic wall-climbing robot for steel-concrete structures by integrating image and acoustic feature recognition

CHEN Dongdong¹, ZHANG Jianqing², ZHANG Xiaolin¹, JI Yang¹, FU Ruili³

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China; 2. Changjiang Geophysical Exploration and Testing Co., Ltd., Wuhan 430010, P. R. China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

收稿日期: 2024-09-25

基金项目:国家自然科学基金(52408337、52201319);中国博士后科学基金(2023M741728);江苏省自然科学基金(BK20220980);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(24KJB580008);中国地球物理学会工程物探检测重点实验室开放研究基金(CJ2021GE08);南京市建设行业科技计划(Ks2389)

作者简介:陈冬冬(1992-),男,博士,副教授,主要从事压电智能传感研究,E-mail: chendongjt@163.com。

付睿丽(通信作者),女,博士,副教授,E-mail: ruilifu@hhu.edu.cn。

Received: 2024-09-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52408337, 52201319); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2023M741728); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20220980); Basic Science Research of Jiangsu Province Higher Education Institution (No. 24KJB580008); Open Research Fund of Key Laboratory of Engineering Geophysical Prospecting and Detection of Chinese Geophysical Society (No. CJ2021GE08); Nanjing Construction Industry Science and Technology Project (No. Ks2389)

Author brief: CHEN Dongdong (1992-), PhD, associate professor, main research interest: piezoelectric-based smart sensing, E-mail: chendongjt@163.com.

FU Ruili (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: ruilifu@hhu.edu.cn.

Abstract: To address the challenge of automated detection of void of the steel-concrete structures interfaces, this paper designs a magnetic wall-climbing robot incorporating image and acoustic feature recognition. First, we introduce the robot's chassis, magnetic suction device, power system, drive system, and mapping and sound modules. Next, we discuss the robot's hardware control system and determine the feasibility of using Neodymium-iron-boron permanent magnet for adsorption force through force analysis and experimental testing. Finally, the composition and functions of the image and acoustic feature recognition software part are detailed. Among them, the image capturing part adopts the image transmission solution based on the Orange Pie platform. The acoustic pattern recognition module consists of front-end, middle-end and back-end architecture: the front-end carries percussion and recording devices for excitation and collection of acoustic patterns; the middle-end of the acoustic pattern recognition WeChat mini program is developed to achieve acoustic pattern noise removal and effective feature extraction; the back-end, through the cooperation of Tencent Cloud and the WeChat mini program, recognizes acoustic pattern data and returns the results to the WeChat mini program. The magnetic wall-climbing robot incorporating image and acoustic feature recognition designed in this paper can achieve the collaborative acquisition and analysis of image and acoustic patterns, providing an effective solution for the automated inspection of steel-concrete and other structural interfaces for debonding.

Keywords: wall-climbing robot; magnetic adsorption; image transmission; acoustic recognition; steel-concrete structures

钢-混凝土结构能充分利用钢(抗拉)和混凝土(抗压)各自的材料特性,具有承载力高、刚度大、抗震性能好、截面尺寸小等优点^[1-2],目前广泛应用于高层房屋、大跨桥梁等结构。随着服役时间的增加,钢和混凝土的弹性模量、泊松比以及热膨胀系数等材料性质差异,导致二者变形不协调,可能产生脱粘甚至脱空,进而降低整体结构的服役性能,其中钢管混凝土结构最具代表性^[3]。该损伤属于隐蔽缺陷,目前主要依赖人工检测,效率低且精度差,亟需开发高效高精度的检测方法^[4]。

随着自动化技术的发展,检测机器人,如无人机、爬壁机器人等在土木工程领域得到广泛应用^[5-6]。其中,无人机一般基于图像识别技术,适用于表观损伤检测,如混凝土桥梁表观裂缝检测,钢桥表观锈蚀等,不适用于钢-混凝土脱空损伤检测。爬壁机器人又称壁面移动机器人,是一种结合吸附功能和移动能力的先进机器人^[7],广泛应用于墙体维修、油箱检查、船舶维护以及风电塔筒外壁运维检测等高空作业领域^[8-9]。爬壁机器人具备两项基本功能:壁面吸附功能和移动功能。笔者旨在通过开发爬壁机器人,为钢-混凝土结构脱空损伤检测提供一个自动化平台,促进相关技术的发展。

1 爬壁机器人整体设计

设计的爬壁机器人外观如图1所示,爬壁测试如图2所示。爬壁机器人整体采用扁平化设计,以降低风阻并提高抓地力。机器人整体长度约50 cm,宽度约20 cm,高度约10 cm。车身外壳采用聚乳酸

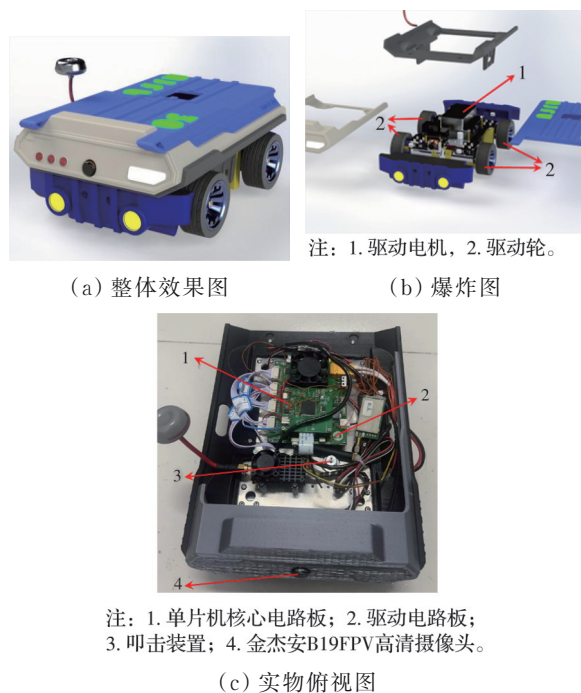


图1 爬壁机器人整体模型

Fig. 1 Overall model of the wall-climbing robot



图2 爬壁机器人爬壁测试

Fig. 2 Climbing wall test for wall-climbing robot

(PLA)热塑性塑料 3D 打印,减轻机器人重量的同时提供足够的强度和刚度,此外还具有防尘防水、保护内部电子元件的效果。

爬壁机器人主要由电源、底盘、驱动系统、磁吸装置、图传模块和声纹识别模块等部分组成,为确保其在墙面移动作业时的稳定性,底板采用 3 mm 厚的方形铝合金材料,通过激光定制化切割,为锂电池、控制系统等重要元件预留孔位。

驱动系统包括电源、驱动电机、车轮以及驱动主板。电源采用 4S 的航模电池,由 4 节 3.7 V 的锂电池串联组成,可为爬壁机器人提供 30 min 的续航时间。通过带闭环反馈的霍尔直流电机,直联 4 个驱动轮,机器人可以在金属壁表面上移动,直行最高速度为 1 m/s,速度误差在±0.05 m/s 以内。采用滑动转向(也称差速转向)方式控制爬壁机器人转动,即通过改变机器人左右轮的速度来实现滑动转向。相对于其他控制方式(如阿克曼式,铰接式、四轮转向),该方式具备转向稳定性强、灵敏度高、转向半径小和续航能力更强的优点^[10]。

在实际检测过程中,待检测的钢-混凝土结构一般尺寸较大,在设计爬壁机器人时,设置了电量低于 5% 时的电量不足提示。由于爬壁机器人采用的是永磁体吸附方式,其吸附力不受电池电量影响,在电池低电量甚至电量耗尽情况下仍然具有吸附功能,不会产生由于电池电量耗尽导致的坠落风险。

2 控制系统模块

2.1 硬件部分

硬件控制系统由 CPU、无线遥控器、录音设备、驱动装置、永磁体和锂电池等元件组成。这些元件共同构成了爬壁机器人的核心功能和操作系统,确保其能够在各种环境条件下可靠运行和执行任务。图 3 为机器人控制系统硬件关系图,表 1 为硬件设备主要参数。

控制系统以电池为动力源,采用 STM32F407 单片机作为控制系统核心,通过 I/O 口直接连接控制驱动器和电机。CPU 作为控制中枢,负责接收、处理和执行来自无线遥控器及其他传感器的指令。无线遥控器则为操作者提供便捷的远程操作接口,使操作者可以实时监控和调试爬壁机器人的工作状态。

叩击装置用来检测脱空缺陷的重要设备,通过叩击钢结构表面产生声音,为后续声纹识别提供原始数据。

录音设备是机器人的重要部件,用于记录环境

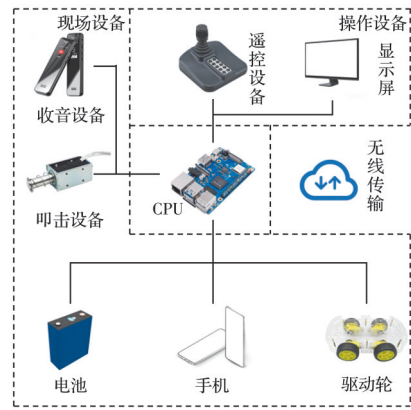


图 3 控制系统硬件关系

Fig. 3 Hardware relationship of control system

表 1 硬件设备主要参数

Table 1 Main parameters of hardware devices

名称	通信方式	供电电压/V
4S 航模电池	直连	14.8
驱动电机	串口	12.0
遥控器	无线	1.5
录音机	蓝牙	3.7
摄像头	模拟信号传输	5.0
声纹激励装置	直连	12.0

中的声音和叩击声,并将数据传输至后台进行分析和处理。机器人搭载的录音设备为爱国者 S5 无线麦克风,可以实现与手机设备的无线通信。

目前爬壁机器人的磁吸附通常是利用机载磁体对铁钴镍等金属类物质壁面的吸引力作为吸附力,将机器人固定在壁面^[11]。其中,机载磁体可以是永磁体或电磁体,通过接触式或非接触式吸附^[12-13]方式实现与金属平面吸附。尽管电磁体具有可控的磁性优势,但其缺点同样显著:结构相对复杂,提供相同大小的吸附力时,质量往往会显著高于永磁体;耗电量大,会显著降低爬壁机器人的续航时间;只有完全吸附在金属上的时候才有吸引力。因此,为了确保爬壁机器人在作业过程中具备足够的吸附力,同时减轻自身重量并降低布线需求,设计的爬壁机器人采用永磁体作为机载磁体^[14]。

为了保证永磁体可靠吸附,吸附力需要考虑两方面因素:能够保证机器人在垂直壁面克服自身重力,稳定吸附不下滑;能够保证在驱动装置的驱动下有效移动^[15]。

当机器人位于墙面竖直位置,静止状态下的受力情况如图 4 所示。为确保机器人稳定吸附,其静摩擦力应大于机器人所受重力,受力情况为

$$F_c = 2(F_{N1} + F_{N2}) \quad (1)$$

$$G = 2(F_1 + F_2) \quad (2)$$

式中: F_c 为机器人受到磁吸附力的反作用力; G 为

机器人所受重力; F_{N1} 、 F_{N2} 为前后排驱动轮的支持力; F_1 为前轮与墙面的静摩擦力; F_2 为后排驱动轮与墙面的摩擦力,且 $F_1 = \mu \cdot F_{N1}$, $F_2 = \mu \cdot F_{N2}$; μ 为墙面的动摩擦因数。

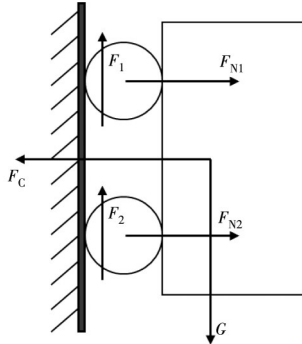


图4 机器人受力状态

Fig. 4 Force state diagram of the robot on the wall

由式(2)可得

$$G = 2\mu(F_{N1} + F_{N2}) \quad (3)$$

联立式(1)和式(3)可得

$$G = \mu F_c \quad (4)$$

考虑到驱动轮与壁面之间存在铁锈、灰尘等影响,动摩擦因数 μ 取0.5。于是,爬壁机器人在静止时能够安全吸附在壁面上,必须满足

$$F_c \geq 2G \quad (5)$$

通过对爬壁机器人在壁面静止状态下的受力分析可以发现,机器人在壁面安全吸附的最小磁吸附力须满足式(5)。根据爬壁机器人的预估数值, $G = 1.9 \text{ kN}$,则爬壁机器人的磁吸附力最小为 3.8 kN 。考虑到在实际工程应用中爬壁机器人在壁面作业时存在各种状况,要保证其能够安全稳定地吸附在壁面上,所设计的磁吸附力应当大于理论值2倍以上。基于上述分析,采用了4块 $28 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 钕铁硼材质的强磁体,理论上能够提供 6 kN 以上的磁力,确保吸附力能达到理论需求。在实际运用中,可以根据现场的实际情况,自行调整永磁体的数量以及永磁体与被吸附钢板之间的距离,以达到最佳吸附效果。

2.2 软件部分

爬壁机器人的软件部分包括:图传模块和声纹识别模块。

图传模块负责实时传输视频和图像数据到显示器操作端。通过前置高清摄像头对爬壁机器人前方画面进行实时追踪,为操作者提供清晰的实时视角,实现远程监控和导航机器人。

声纹识别模块能够捕捉和分析不同区域叩击声的声纹特征,将其传输到后端腾讯云平台 and 手机微信小程序进行数据分析和识别。

2.2.1 图传模块

爬壁机器人的图像传输模块采用COFDM图传技术^[16],以香橙派(Orange Pi)^[17]作为主要硬件平台,搭载Linux操作系统,通过CAN总线连接机器人,搭载于机器人主板上,配合前置金杰安B19FPV高清摄像头,通过模拟信号传输图像,提供稳定、高效的图像采集与传输解决方案,用于检测结构表面状态。在空旷无遮挡的环境下,最远通信距离为 3 km ,图传最远距离为 1 km ,传输的图像类型为模拟图像,遥控距离为 1.5 km 。该图传系统能在较远距离内进行控制和图像传输,适用于长大钢-混凝土结构界面检测的远程操作场景。设计的图传模块与机器人、摄像头、服务器数据交互及相应功能如图5所示。

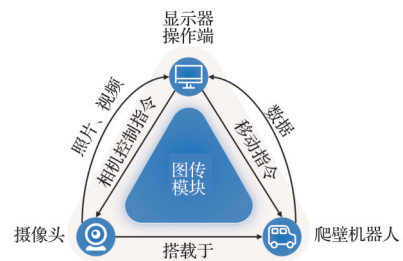


图5 图传模块交互结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the interaction structure of the image transmission module

2.2.2 声纹识别模块

爬壁机器人的声纹识别模块由前端、中端和后端3层架构构成:前端用于激发和采集声纹,爬壁机器人搭载的高性能录音设备可以通过蓝牙与手机连接,将采集好的声纹传递给声纹处理及识别模块。中端用于去除声纹噪声并提取有效特征,实时获取和分析叩击声的声学特性,进而帮助用户快速识别和定位目标物体或环境中的潜在问题或变化。后端通过微信小程序识别声纹数据并将结果返回。声纹传输及处理模块架构如图6所示。

前端模块涉及机器人、录音设备和手机等硬件设备,机器人搭载的声纹激励装置采用电磁激励形

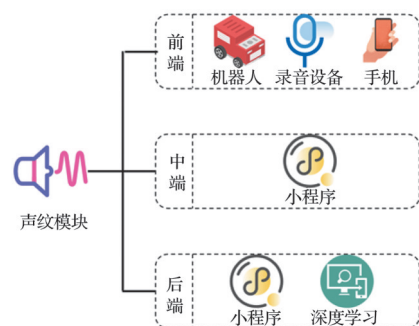


图6 声纹模块整体设计架构

Fig. 6 The architecture of the acoustic module

式,可根据现场检测需要,实现 1、2、5 Hz 三种频率的叩击动作,此外,进行初步试验时,可以以不同厚度的外包覆层为对象,测量并记录声纹响应,以便确定在特定厚度下最有效的敲击力范围。通过爱国者 S5 无线麦克风和数据传输软件相互配合,确保声纹数据准确、及时地被录制和传输。

中端模块部署在微信小程序上,主要负责接收和处理来自前端传输的声纹数据,声纹检测微信小程序首页如图 7 所示。该模块首先对接收到的数据进行预处理,以去除噪声和其他干扰因素,确保数据的质量。随后进行特征提取,提取出有效的声纹特征参数,并将这些特征数据存储在数据库中,以便后续分析和处理。借助云服务器的强大计算能力,中端模块能够高效地处理大量声纹数据。



图 7 声纹检测微信小程序首页

Fig. 7 Homepage of the acoustic detection WeChat mini program

后端通过云架构的声纹系统和微信小程序交互,分析并训练存储的声纹数据。该模块开发了基于一维原始时序波形的声纹深度学习模型,实现了基于声纹的脱空损伤识别。

通过前端、中端和后端 3 层架构设计,本系统可以实现高效、准确的脱空声纹检测与分析。

3 结论

设计了一款融合图像和声纹特征识别的磁吸爬壁机器人,由电源、底盘、驱动系统、磁吸装置、图传模块和声纹识别模块构成,可以实现图像和声纹

的协同采集与分析,为钢-混凝土结构界面脱空自动化检测提供有效的解决方案,主要结论如下:

1) 借助钕铁硼永磁体为爬壁机器人提供吸附力,基于力学分析,确定了钕铁硼永磁体合适的数量以及几何尺寸,并通过改变左右轮的速度来控制爬壁机器人前进、后退及转向等动作。

2) 基于香橙派平台,开发了钢-混凝土结构图像采集系统,可以实现结构表观缺陷的图像采集与识别。

3) 开发了由前端、中端和后端 3 层架构构成的声纹识别模块。其中,前端搭载叩击和录音设备,用于激发和采集声纹;中端基于声纹识别微信小程序,实现声纹噪声去除和有效特征提取;后端通过腾讯云和微信小程序配合,识别声纹数据并将结果返回给微信小程序。

由于机器人搭载的蓄电池储能能力有限,无法驱动设备进行长时间作业。提高爬壁机器人续航能力、数据处理速度、传感器精度是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 聂建国, 余志武. 钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用[J]. 土木工程学报, 1999, 32(2): 3-8.
NIE J G, YU Z W. Research and practice of composite steel-concrete beams in China [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(2): 3-8. (in Chinese)
- [2] 韩林海, 陶忠. 方钢管混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 17-25.
HAN L H, TAO Z. Study on behavior of concrete filled square steel tubes under axial load [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2): 17-25. (in Chinese)
- [3] 林春姣, 郑皆连, 秦荣. 钢管混凝土拱肋混凝土脱空研究综述[J]. 中外公路, 2004, 24(6): 54-58.
LIN C J, ZHENG J L, QIN R. Summary of research on void of concrete filled steel tube arch rib [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24(6): 54-58. (in Chinese)
- [4] 杨劲, 韩西, 杨科, 等. 钢管混凝土脱空无损检测技术研究综述[J]. 中外公路, 2012, 32(5): 189-191.
YANG J, HAN X, YANG K, et al. Review on nondestructive testing technology of concrete filled steel tube void [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(5): 189-191. (in Chinese)
- [5] FANG Y, WANG S, BI Q S, et al. Design and technical development of wall-climbing robots: A review [J]. Journal of Bionic Engineering, 2022, 19(4): 877-901.
- [6] LYU G Z, WANG P, LI G H, et al. A heavy-load wall-climbing robot for bridge concrete structures inspection [J]. Industrial Robot: the International Journal of Robot-

- ics Research and Application, 2024, 51(3): 465-478.
- [7] 黄龙, 张卫华, 陈今茂, 等. 爬壁机器人的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程与技术, 2021(3): 345-363.
HUANG L, ZHANG W H, CHEN J M, et al. A review and trend of wall-climbing robots [J]. Mechanical Engineering and Technology, 2021(3): 345-363. (in Chinese)
- [8] MUTHUGALA M A V J, SAMARAKOON S M B P, ELARA M R. Toward energy-efficient online complete coverage path planning of a ship hull maintenance robot based on Gladius bio-inspired neural network [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 187: 115940.
- [9] HUANG H C, LI D H, XUE Z, et al. Design and performance analysis of a tracked wall-climbing robot for ship inspection in shipbuilding [J]. Ocean Engineering, 2017, 131: 224-230.
- [10] 胡亚辉. 四轮独立驱动电动车差速转向性能研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
HU Y H. Research on differential steering performance of four-wheel independent drive electric vehicle [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019. (in Chinese)
- [11] ENJIKALAYIL-ABDULKADER R, VEERAJAGADHESWAR P, LIN N H, et al. Sparrow: A magnetic climbing robot for autonomous thickness measurement in ship hull maintenance [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(6): 469.
- [12] KIM H, KIM D, YANG H, et al. Development of a wall-climbing robot using a tracked wheel mechanism [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(8): 1490-1498.
- [13] 魏军英, 张聪, 王吉岱, 等. 输电铁塔攀爬机器人的结构分析与实验验证[J]. 机械传动, 2021, 45(1): 140-145.
WEI J Y, ZHANG C, WANG J D, et al. Structural analysis and experimental verification of climbing robot for transmission tower [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(1): 140-145. (in Chinese)
- [14] 李占鹏. 船舶除锈清洗爬壁机器人永磁式履带研究应用[J]. 广东造船, 2020, 39(2): 47-50.
LI Z P. Permanent magnet track of ship rust removal wall-climbing robot [J]. Guangdong Shipbuilding, 2020, 39(2): 47-50. (in Chinese)
- [15] 邹玉静, 马本啸, 庞峰, 等. 爬壁机器人结构优化设计与吸附力分析[J]. 现代制造工程, 2021(1): 28-34, 161.
ZOU Y J, MA B X, PANG F, et al. Structural optimum design and adsorption capacity research for oil-tank wall-climbing robot [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(1): 28-34, 161. (in Chinese)
- [16] 李永志. COFDM技术用于无线图像传输系统的优势[J]. 无线通信技术, 2007, 16(2): 60-62.
LI Y Z. The advantage of COFDM application in the wireless image transmission system [J]. Wireless Communication Technology, 2007, 16(2): 60-62. (in Chinese)
- [17] 王赛, 刘子龙. 基于4G网络的移动机器人远程控制研究[J]. 软件导刊, 2019, 18(11): 71-74.
WANG S, LIU Z L. Remote control of mobile robot based on 4G network [J]. Software Guide, 2019, 18(11): 71-74. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)