

doi: 10.12194/j.ntu.20190707001

引文格式: 张天奇, 王进, 李跃华. 基于窄带物联网的智能门禁锁的设计与实现[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2020, 19(2):50-55.

基于窄带物联网的智能门禁锁的设计与实现

张天奇, 王进*, 李跃华

(南通大学 信息科学技术学院, 江苏 南通 226019)

摘要:传统机械门锁钥匙易丢失、易被复制;密码型门禁锁密钥易泄露、易遗忘;基于 Wi-Fi 技术的门禁锁部署受限于网络覆盖范围。针对这些问题,设计一种基于窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)的智能门禁锁。该门禁锁利用指纹信息作为身份凭据, NB-IoT 技术作为通信方式。系统主要由外设、控制器、NB-IoT 模块、信息邮局等模块组成,可实现指纹采集、指纹匹配、指纹删除、图像采集与传输、拜访提醒、远程开门与报警等功能。经测试,所有功能均可正常运行。最后,将该门禁锁系统分别与基于 RFID 技术、Wi-Fi 技术、蓝牙技术的门禁锁进行对比,结果表明,基于 NB-IoT 技术和指纹识别技术的智能门禁锁识别迅速准确、难以被复制,具有更广的网络覆盖范围、更低的功耗和更安全可靠的身份凭据等优势。

关键词:窄带物联网通信;门禁系统;指纹识别

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2020)02-0050-06

Design and Implementation of Intelligent Entrance Guard Lock Based on NB-IoT

ZHANG Tianqi, WANG Jin*, LI Yuehua

(School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The key of conventional mechanical lock is easy to be lost and duplicated; the password entrance guard lock shares similar problems, like the high possibility of leaking and forgetting the password; the entrance guard lock based on Wi-Fi is limited by the scope of the network. In order to solve these problems, a smart access control lock based on the narrow-band internet of things (NB-IoT) is proposed, which uses fingerprint as the identity information, and NB-IoT technology as a communication method. The system is mainly composed of peripherals, controllers, NB-IoT modules, information post offices and other modules, which can realize the functions of fingerprint collecting, fingerprint matching, fingerprint deleting, image collecting and transmitting, visit reminding, remote door opening and alarming. The tests confirm all the effectiveness of all the functions. Finally, the access control system is compared with access control locks based on RFID technology, Wi-Fi technology, and Bluetooth technology, the findings show that the smart lock identification based on NB-IoT technology and fingerprint recognition technology is the fastest and the most accurate one, difficult to be duplicated. It enjoys the advantages of wider network coverage, less power consumption, and more secure identity information.

Key words: narrow band internet of things communication; entrance guard system; fingerprint identification

收稿日期: 2019-07-07

基金项目: 南通市科技计划项目(JC2018132)

第一作者简介: 张天奇(1996—), 男, 硕士研究生。

* 通信联系人: 王进(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为模式识别与机器学习。E-mail: wj@ntu.edu.cn

门禁系统是智能化安防产业中的重大子系统之一,在政府、企业、医院、部队等重要场所都得到了大量应用^[1]。根据门禁系统识别方式不同,目前的门禁系统主要有密码门禁系统、刷卡门禁系统和生物识别门禁系统^[2]。密码门禁系统以设定好的密码作为身份凭据,用户通过键盘键入密码获取门禁的授权。这种系统虽然操作简便、实现容易,然而密码需要长时间记忆,也容易遭到泄露^[3]。刷卡门禁系统包括接触式与非接触式两种。接触式门禁通过刷卡的方式获取门禁系统的授权,然而卡片容易磨损、消磁^[3],非接触式门禁系统的耐用性比接触式的优秀,读取速度更快,难以被复制^[4],广泛地应用于考勤系统、停车场等场所。生物识别门禁系统以人体生物特征作为身份权限评判标准,常见的生物识别方式有指纹识别、人脸识别、虹膜识别等^[5]。生物识别门禁系统安全性高,与密码门禁系统及刷卡门禁系统相比,生物特征很难被复制,用户无需携带额外的物件,但是成本较高^[6]。由于存储的生物特征会随着人们的年龄变化而改变,使得识别率降低,因此用户需要在一定阶段内于门禁锁前重新录入新的特征来维持识别率。

同时,门禁系统的通信方式也各不相同,有蓝牙通信^[7]、Wi-Fi 通信^[8]、GPRS 通信^[9]等。然而,蓝牙通信受限于通信距离^[10];Wi-Fi 通信受限于网络覆盖范围;GPRS 通信受限于功耗。综合上述主流门禁系统的问题,本文设计并实现了采用指纹识别的、基于窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)通信的智能门禁锁。人体生物特征中的指纹信息作为身份凭据之一,安全性高,难以被复制^[11];NB-IoT 具有低功耗、广覆盖等特点,可用于无人值守的场景,可以与锁管理人员进行长久通信,从而在安装、部署、运营成本较低的情况下,实现了设备的高效管理^[12-13]。

1 系统框架设计

本文研究的门禁锁系统的框架图如图 1 所示。门禁锁主要由外设、控制器和 NB-IoT 模块组成。外设由指纹模块、门铃、摄像头模块、电控锁模块组成;信息邮局由基站、云服务器以及数据库组成,信息邮局 MPO 中的基站是公用移动通信基站,主要

功能是提供无线覆盖,基站通过天线实现消息的收发;云服务器与数据库负责实现外设与用户端和门禁锁管理系统的信息交互,它是外设与用户端和门禁锁管理系统间的桥梁;用户端由智能手机组成;门禁锁管理系统包含系统权限授予、指纹远程采集和门锁开启日志的功能。其中,指纹采集、指纹匹配、指纹删除和报警功能由指纹模块实现;图像采集由摄像头模块实现^[14];门锁状态侦测功能由电控锁的状态侦测线来实现;指纹开门功能由指纹识别通过后,向电控锁通电实现;远程开门由控制器释放开门信号后,向电控锁通电实现;拜访提醒由门铃实现,控制器向服务器上传拜访提醒,通知用户有人拜访。门禁锁管理系统与信息邮局保持连接,主要负责系统内的权限授予、远程采集指纹信息并发送至门禁锁的指纹模块中、记录门锁开启日志。控制器和外设间通过指令进行交互。NB-IoT 模块负责上传控制器的数据至服务器,同时接收并传递服务器的数据至控制器。

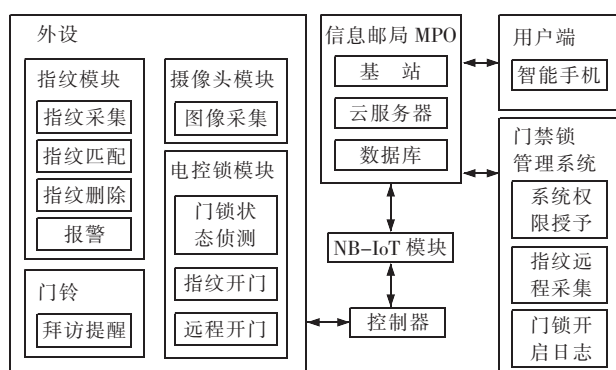


图 1 门禁系统的系统框架图

Fig. 1 System frame diagram of the entrance guard system

2 硬件选型与分析

2.1 控制器

系统采用低功耗、高性价比的含 32 位 ARM Cortex-M0+内核的 KL36 微控制器作为控制器。可使用 UART、定时器、SPI 等模块;Flash 和 SRAM 的容量足以存储所有的局部变量与功能函数;CPU 工作频率能够胜任本系统所有的功能。KL36 系列共有 11 个具体芯片型号,本系统选用 MKL36Z64VLH4。

2.2 NB-IoT 模块

系统采用苏州金蒲芦物联网技术有限公司研

发的 NB-IoT 模块。该模块内置 SIM 卡, SIM 卡中含有唯一的国际移动用户识别码(international mobile subscriber identification number, IMSI), 可用于区分不同的终端设备。该 SIM 卡产生的费用由芯片生产商或者中间件的供应商统一缴纳。

NB-IoT 模块负责将终端数据上传至云服务器, 同时也负责将云服务器当中的数据下发给控制器。在通信时, 该 NB-IoT 模块会将每个数据帧附上 IMSI 码标识自己由哪台终端上传, 这方便了云服务器对数据的接收, 也为云服务器实现对多个终端设备的管理创造了可能。

2.3 摄像头模块

系统采用 ATK-OV7725 摄像头模块(广州市星翼电子科技有限公司(正点原子))。该模块主要由 Omni Vision 公司生产的 OV7725 图像传感器、有源晶振以及型号为 AL422B 的 FIFO 缓存芯片组成。该模块的初始化采用了类 IIC 的串行成像控制总线(serial camera control bus, SCCB)协议控制, 门禁锁的控制器适用该协议。控制器可从缓存芯片随时读取缓存数据, 并通过 NB-IoT 模块将数据上传至服务器。这降低了对控制器工作频率的要求, 使得控制器能够顺利完成图像采集与传输的功能。

2.4 指纹识别模块

系统采用 ATK-AS608 指纹识别模块。该模块是由广州市星翼电子科技有限公司(正点原子)推出的高性能的光学指纹识别模块, 采用杭州晟元芯片技术有限公司研发的 AS608 指纹识别芯片, 内置 DSP 运算单元, 集成指纹识别算法, 能够快速采集指纹图像与生成特征^[5]。该模块成本适中, 具有出色的指纹识别算法和强大的运算能力。

2.5 电控锁模块

电控锁模块由 LY-8812 电控锁和一路光耦隔离继电器驱动模块组成。电控锁模块负责实现门禁系统的开门功能。当继电器收到控制器开锁信号后, 令公共接口与常开接口导通, 使处于上锁状态的电控锁通电, 立即开锁。同时, 该模块拥有状态侦测线, 将其与控制器相连可以判断门锁的开闭状态, 实现状态侦测功能。该电控锁需用 12 V 的电压驱动才能保证通电时间为 0.5~0.6 s, 控制器的高电平电压仅有 3.3 V 无法驱动电控锁, 故本文引入了

继电器模块来驱动电控锁。另外, 电控锁的上电无正负极之分, 继电器的吸合触发电平可自行定义, 降低了开发及运维难度。该电控锁与继电器可以很好地满足本系统的需求。

2.6 门铃

系统选用无源蜂鸣器与四脚按键组合成门铃。采用 NPN 型的三极管实现 5 V 电压驱动无源蜂鸣器。若按键被压下, 蜂鸣器会以控制器设置的频率振铃, 控制器将向服务器发送拜访提醒信号, 提醒用户有人拜访, 从而实现拜访提醒功能。该方案具有成本低廉、简单易行的优势, 能较好地满足本系统的需求。系统智能门禁锁如图 2 所示。

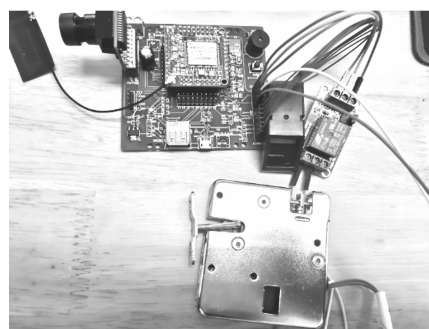


图 2 智能门禁锁样机图

Fig. 2 The prototype of intelligent entrance guard lock

3 主要功能工作原理

3.1 NB-IoT 通信

若要实现 NB-IoT 通信功能, 控制器首先需与云服务器建立连接。图 3 是 NB-IoT 模块与云服务器建立连接的流程图。NB-IoT 模块与云服务器建立连接需要完成模块初始化、连接基站与连接云服务器的操作。当 NB-IoT 模块与云服务器建立连接后,

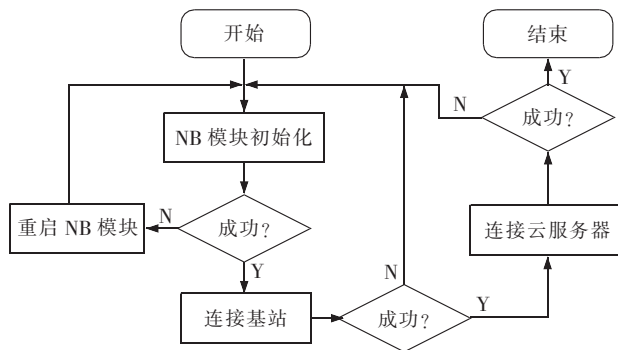


图 3 NB-IoT 模块连接服务器流程图

Fig. 3 Flow chart of NB-IoT module who connecting to the server

控制器与服务器即可相互通信。当控制器向云服务器发送数据时,控制器先将待发数据存入临时数组,当数据长度确定后,与服务器通过 AT 指令沟通,完成数据的上传,服务器亦通过已建好的 TCP 连接将数据下发至模块,由模块通过串口将数据传给控制器。同时,控制器会以同样的方式向服务器发送心跳帧,以保持 TCP 连接。

3.2 指纹识别相关功能

系统利用指纹模块实现指纹采集、指纹匹配与指纹删除功能。指纹采集分为指纹本地采集与指纹远程采集。指纹本地采集步骤如下:首先,为确保可靠性,指纹模块采集用户两次指纹图像,分别生成相应的指纹特征;接着,精确对比这两枚指纹特征,若两者能够匹配,便将指纹特征生成模板,存入指纹模块的 Flash 中;最后,向控制器返回采集成功信号,控制器向服务器发送采集成功信号,完成采集指纹功能。指纹远程采集功能是指在别处录入指纹,在获取远程采集指纹的权限并按之前所述步骤生成模板后,指纹模板被下发至门禁锁控制器,存储至指纹模块,完成指纹远程采集功能。

当手指按压于指纹模块上时,指纹区配功能运作。和指纹采集功能类似,首先进行指纹图像采集,生成特征;接着在指纹模块的指纹库中搜索;最终返回搜索结果。若搜索成功,模块将返回搜索成功信号,控制器向服务器发送指纹开门成功的信号,完成指纹匹配功能。

指纹模块根据控制器的删除指纹指令,对指纹库中的指纹作删除处理,并将处理结果返回控制器,控制器将结果上传服务器,完成指纹删除功能。

3.3 图像采集与传输功能

系统的图像采集与传输功能是为了满足用户获取门禁前图像的需要而设计。

图 4 是摄像头模块采集和传输图片的流程图。首先,摄像头模块进行初始化工作,对多个寄存器进行配置;接着,当控制器向摄像头模块释放获取图像的使能信号时,摄像头模块中的缓存芯片会存储一帧图像数据,待缓存芯片将这一帧图像数据缓存完毕,控制器向摄像头模块释放禁止缓存图片的信号;然后,控制器释放输出图像数据的使能信号,摄像头将输出图像数据,控制器读取这一帧图像数据;最

后,控制器将读取到的数据存入待发送的数组中,当存到一定数量时,控制器会将这些数据上传到服务器中,完成采集图片和传输图片的功能。

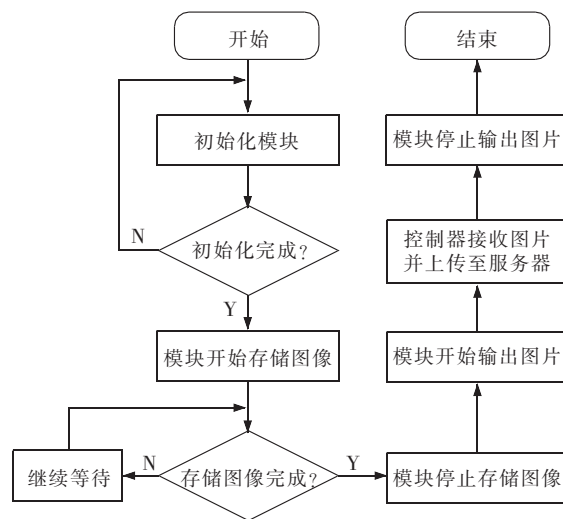


图 4 摄像头模块采集和传输图片流程图

Fig. 4 Flow chart of camera module collecting and transmitting pictures

3.4 外人来访相关功能

这些功能包括拜访提醒、检测门锁状态、远程开门与报警功能。

拜访提醒功能主要由门铃组成。外人按压门铃,门铃发出“叮咚”的响声,控制器向服务器发送拜访提醒数据,服务器向用户发出拜访提醒通知,以告知用户有人在门外。

门锁状态侦测功能主要由电控锁上的状态侦测线实现。该侦测线的导通与断开和电控锁当前的状态有关。电控锁上锁时,状态侦测线断开;电控锁被打开时,状态侦测线导通。

远程开门功能需要控制器收到服务器的远程开门指令才能实现。控制器得到远程开门指令后,向电控锁发送开锁信号,并将开锁信息上传至服务器。

报警功能由指纹匹配连续失败次数决定,达到 5 次时,控制器向服务器发送报警信号。

4 系统测试及对比

智能门禁锁设计完成后,需要对其进行功能测试。本部分主要对系统的所有功能进行测试,包括 NB-IoT 通信测试、指纹模块相关功能测试和外人拜访场景测试。此外,还将与基于 Wi-Fi 技术、RFID

技术、蓝牙技术的门禁锁方案作对比。

4.1 NB-IoT 通信测试

窄带物联网通信是本系统与服务器进行数据交互的主要方式,这里将测试 NB-IoT 连接服务器与发送心跳帧的功能,此处设定每分钟发送一次心跳帧。门禁锁通电后,控制器给 NB-IoT 通信模块供电,通信模块连接到信息邮局 MPO,基站给通信模

块分配一个临时的 IP 地址,以供控制器与信息邮局 MPO 进行数据交互,控制器与服务器建立 TCP 连接。如图 5 所示,正在监听 2222 端口的服务器与 IP 为 36.113.242.40、端口号为 25957 的 NB-IoT 模块建立了 TCP 连接,并接受了对方发来的数据。此后,控制器每分钟都向服务器发送心跳帧,保持通信链路持久连接。由此可见,NB-IoT 通信相关功能正常。



图 5 NB-IoT 模块连入服务器并发送心跳帧示意图

Fig. 5 Frame of NB-IoT module connecting to the server and sending heartbeat

本门禁锁使用 NB-IoT 通信,与 GPRS 通信相比拥有更广的网络覆盖范围和更低的功耗;基于 Wi-Fi 通信和蓝牙通信的方案分别受限于网络覆盖范围与通信距离,功耗亦高。相比之下,选用 NB-IoT 通信能够充分发挥低功耗、广覆盖的优势。

4.2 指纹模块相关功能测试

以用户录入指纹、使用指纹开门与删除指纹为使用场景进行功能测试。

首先用户采集指纹,服务器向控制器发送采集指纹信息,指纹采集功能开始运作,测试代码如图 6(a)所示,用户需要采集两次指纹并生成特征;接着,模块会精确对比两枚指纹的特征,比对合格后生成模板,存入指纹模块的 flash 中;最后,用户远程录入指纹,门禁锁管理系统处的指纹模块将采集到的模板传给门禁锁的控制器,存入门禁锁指纹模块的 flash 中。

采集完指纹,用户就可以使用指纹匹配功能。用户将已采集指纹信息的手指放在指纹模块上,指纹匹配通过,房门打开;用户将未采集信息的手指放在指纹模块上,指纹库内没有相应的指纹特征,指纹匹配失败,如图 6(b)所示。

用户发出删除指纹指令,如图 6(c)所示,服务器将该指令发送给控制器,指纹模块将指纹库中的指纹清空。此时使用之前录入信息的手指进行指纹

匹配,匹配失败,门禁锁没有被打开。

```

Please put your finger on the as608.
Please put your finger on the as608.
Good work.
Please put your finger on the as608 AGAIN.
Please put your finger on the as608 AGAIN.
Good work.
Compare with 2 fingerprints...
Comparing success!
Generating template...
Generating template success!
Depositing in the flash...
Depositing success!

```

(a)采集指纹

```

Search success!
Search failed!

```

(b)区配指纹代码

```

Empty success!
Search failed!

```

(c)删除指纹

图 6 指纹模块相关功能测试

Fig. 6 Related functions test of fingerprint module

4.3 外人拜访场景测试

此处模拟无人在门禁锁部署的房间时,给门外的人开门的场景,测试拜访提醒、图像采集与传输功能、检测门锁状态功能、远程开门功能和报警功能。

测试人员在门外按下门铃,用户收到拜访提醒,得知有人在门外;然后,用户使用图像采集功能,成功获取门前的图像,发现认识门前的人,如图 7(a)所示;用户使用远程开门功能打开房门,待门外的测试人员进入后,用户根据门锁状态侦测功能,可知房门已经关好。接下来,测试人员在门外尝试通过指纹匹配的方式进入房间,当指纹匹配连续失败 5 次时,

用户收到了门禁锁发出的报警信息,如图 7(b)所示。



图 7 外人拜访场景测试

Fig. 7 Test of outside visitor

4.4 方案对比

表 1 给出 RFID 技术与指纹识别技术的对比。基于 RFID 技术的门禁锁使用无线射频技术实现无钥匙出入,虽然工作功率较指纹识别模块低,但是该方案使用的射频卡容易损坏与丢失。本文使用的指纹模块拥有存储身份凭据的 Flash 缓存。迄今为止,最为成熟的、最为人们所关注的生物识别技术非指纹识别技术莫属^[1],本文的门禁锁使用指纹作为身份凭据,具有唯一性、普及性等特征,难以被复制,更安全,更方便。

表 1 RFID 技术与指纹识别技术比较

Tab. 1 Comparison of RFID and fingerprint recognition

识别方式	工作功率/mW	模块可存特征数
RFID	85.8	0
指纹识别	99.0	300

表 2 给出 Wi-Fi、蓝牙和 NB-IoT 通信方式的对比。基于 Wi-Fi 和基于蓝牙的门禁锁发射功率较基于 NB-IoT 模块的门禁锁低,然而,基于 NB-IoT 模块的门禁锁待机功率明显优于前两种,从长远角度看,NB-IoT 模块具有低功耗的特点;基于 Wi-Fi 和基于蓝牙的门禁锁运作受通信距离所限,而 NB-IoT 模块的最大通信范围远大于前两者。

表 2 3 种通信方式比较

Tab. 2 Comparison of three communication methods among Wi-Fi, bluetooth and NB-IoT

通信方式	发射功率/	待机功率/	最大通信范围/
	mW	mW	
Wi-Fi	100	0.830	300
蓝牙	100	18.675	100
NB-IoT	178	0.019	22 000

综上所述,基于 NB-IoT 模块和指纹识别技术的智能门禁锁具有低功耗、广覆盖的特点,更加地安全可靠。

5 结论

本文设计了基于 NB-IoT 技术和指纹识别技术的门禁锁,与基于 Wi-Fi 技术、RFID 技术、蓝牙技术的门禁锁相比,本文设计的门禁锁具有更广的网络覆盖范围、更低的功耗和更安全可靠的身份凭据。本文实验环境拥有良好的网络环境,无明显高频脉冲干扰,今后将更多地考虑复杂的外界环境影响因素,优化门禁锁的硬件设计,充分发挥 NB-IoT 低功耗、广覆盖的优势,使得人们在网络部署难度大的环境中,也能够轻易部署与使用该门禁锁。

参考文献:

- [1] 路遥. 安防门禁的最新技术和发展趋势[J]. 信息与电脑, 2016(2):27.
- [2] 赵华峰, 邹祥祥, 廖杰. 基于云计算的二维码门禁系统[J]. 中国公共安全(综合版), 2016(13):129-132.
- [3] 贾广政, 魏东, 王永顺. 智能门锁身份识别系统设计与开发[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(7):2094-2100.
- [4] 王兴, 侯礼宁, 白雪. 基于 RFID 技术的身份证识别门禁系统开发[J]. 高技术通讯, 2019, 29(6):539-545.
- [5] 许佩冉. 人脸识别技术在安保工作中的应用及发展趋势研究[J]. 智能建筑, 2017(12):35-37.
- [6] HUSSEIN N A, MANSOORI I A. Smart door system for home security using raspberry pi3[C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Computer and Applications (IC-CA), September 6-7, 2017, Doha. New York:IEEE Xplore, 2017:395-399.
- [7] 李韩军, 张宜军, 赵行明, 等. 基于蓝牙 4.0 技术的智慧门禁系统的研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(6):65-68.
- [8] 张浩, 边红军, 唐磊, 等. 基于 WIFI 可视化门禁系统的设计与实现[J]. 信息技术与信息化, 2018(4):62-66.
- [9] 王沁, 乔路, 王佳. 一种智能门禁管家系统的设计[J]. 电子设计工程, 2018, 26(22):103-107.
- [10] 唐志强. 基于蓝牙通讯的设备间网络 BDRP 路由算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017:1-5.
- [11] 刘宁. 自动指纹识别系统关键技术[M]. 长春:吉林大学出版社, 2015:1-2.

(下转第 63 页)

渐减弱,压力脉动强度在额定流量工况附近最小。

2)各转速下压力脉动均呈周期性波动,各流量工况下压力脉动的频域图主频均为叶轮转频,同时在 $5f_n$ 范围内也存在宽频压力脉动信号。

3)随着转速降低,泵内压力脉动强度显著减小,但其值并不完全符合相似换算定律。转速越高势流干涉作用越强,压力脉动周期性越强;低转速时尾迹干涉作用越明显,在低转速小流量工况时压力脉动变得更紊乱,周期性变差。

参考文献:

- [1] 施卫东,张悦,肖宇,等. 泵水力设计方法的研究现状[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2019, 18(4):1-7.
- [2] DRING R P, JOSLYN H D, HARDIN L W, et al. Turbine rotor-stator interaction[J]. Journal of Engineering for Power, 1982, 104(4):729-742.
- [3] PARRONDO-GAYO J L, GONZÁLEZ-PEÑEZ J, FERNÁNDEZ-FRANCOS J. The effect of the operating point on the pressure fluctuations at the blade passage frequency in the volute of a centrifugal pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3):784-790.
- [4] 何秀华. 水泵叶频压力脉动形成的机理探讨[J]. 机械科学与技术, 1996, 25(6):38-39.
- [5] 何秀华. 水泵压力脉动的类型研究[J]. 排灌机械, 1996, 14(4):47-49.
- [6] 黄先北,刘竹青. 无导叶离心泵蜗壳内低频压力脉动分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(10):170-176.
- [7] 袁寿其,张玉臻. 离心泵分流叶片偏置设计的试验研究[J]. 农业机械学报, 1995, 26(4):79-83.
- [8] 袁寿其,周建佳,袁建平,等. 带小叶片螺旋离心泵压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3):83-87.
- [9] 张伟捷. 带分流叶片高速离心泵的压力脉动与试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2012.
- [10] 张金凤,王文杰,方玉建,等. 分流叶片离心泵非定常流动及动力学特性分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(23):37-41.
- [11] 周汉涛,崔宝玲,方晨,等. 不同分流叶片起始直径对离心泵压力脉动的影响[J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(3):235-240.
- [12] 张宁,高波,李忠,等. 离心泵口环间隙对压力脉动特性影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(7):1520-1525.
- [13] 江伟,陈帝伊,王玉川,等. 半高导叶对离心泵径向力影响数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10):15-22.
- [14] 张德胜,王超超,董亚光,等. 高比转速斜流泵内部压力脉动特性的实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(9):27-34.
- [15] CHALGHOU I, KANFOUDI H, ELAOU S, et al. Numerical modeling of the flow inside a centrifugal pump: influence of impeller-volute interaction on velocity and pressure fields[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41(11):4463-4476.
- [16] 马鹏飞. 转速变化对离心泵性能影响的数值模拟研究及调速调节节能分析[D]. 兰州:兰州理工大学, 2011.
- [17] 谭林伟. 单叶片离心泵非定常流动特性及诱导径向力的数值模拟与实验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2018.
- [18] 姚志峰,王福军,肖若富,等. 离心泵压力脉动测试关键问题分析[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(3):219-223.
- [19] GÜLICH J F. Centrifugal pumps[M]. Berlin:Springer, 2008.
- [20] PEI J, YUAN S Q, BENRA F K, et al. Numerical prediction of unsteady pressure field within the whole flow passage of a radial single-blade pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(10):101103.

(责任编辑:张燕)

(上接第 55 页)

- [12] KOUZAYHA N, JABER M, DAWY Z. Measurement-based signaling management strategies for cellular IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(5):1434-1444.
- [13] 刘梦君,沙涛,李丹,等. 窄带物联网下的安全门锁密钥可靠更新方案[J]. 计算机科学, 2019, 46(4):137-143.

- [14] XUE Y L, CHEN B W. A research about acquisition and transmission of the water meter's image based on STM32[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1037:187-190.
- [15] 马馨雅. 基于 STM32 的指纹识别门禁系统[J]. 电子世界, 2018(24):157.

(责任编辑:仇慧)