

doi: 10.7690/bgzdh.2022.02.002

# 基于 MQTT 协议的自动化生产线数据可视化系统

陈霆希, 杨余旺

(南京理工大学计算机科学与工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为提升自动化生产线的生产效率和质量, 实现生产设备实时状态数据的可视化显示, 搭建某弹药装配机生产线数据系统。采用 STM32F103 作为下位机主控芯片, 承担采集数据和控制任务, 通过 RS485 将采集到的数据传输到工控机电脑上客户端, 下位机同时再将周期性的数据打包上传到采用 Java 和 PostgreSQL 数据库实现的消息队列遥测传输协议 (message queuing telemetry transport, MQTT) 服务器, 实现了数据可视化显示。使用结果表明: 该系统传输的数据准确性高、延迟低, 数据显示直观, 能对自动化生产线系统的可视化发展提供借鉴方案。

**关键词:** 工业物联网; 自动化生产线; MQTT 协议; 可视化技术

**中图分类号:** TJ410.5 **文献标志码:** A

## Data Visualization System of Automatic Production Line Based on MQTT Protocol

Chen Tingxi, Yang Yuwang

(School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to improve the production efficiency and quality of automatic production line and realize the visualization of real-time status data of production equipment, the production line data system of an ammunition assembly machine is built. STM32F103 is used as the main control chip of the lower computer, which undertakes the task of collecting data and controlling, and transmits the collected data to the client of the industrial computer through RS485. At the same time, the lower computer packs the periodic data and uploads it to the message queuing telemetry transport (MQTT) server implemented by Java and PostgreSQL database to realize the visual display of the data. The application results show that the data transmitted by the system has high accuracy and low delay, and the data display is intuitive, which can provide a reference scheme for the visualization development of automatic production line system.

**Keywords:** industrial IOT; automated production line; MQTT protocol; visualization technology

### 0 引言

随着工业物联网 (Industrial Internet of Things, IIOT) 技术快速发展, 低成本传感器能够采集现代工业设备大量的数据<sup>[1]</sup>, 使工业设备自动化、智能化生产和管理成为可能。同时, 通过不同方式让传感器接入互联网的需求也在大大增加。消息队列遥测传输协议 (MQTT) 是一个基于客户端-服务端的消息发布/订阅传输协议<sup>[2]</sup>, 提供了一对多消息分发机制, 并且 MQTT 协议特有的消息质量 (QoS) 能根据消息的不同重要程度确定不同的传输质量等级; 遗嘱标志 (will flag) 能够在客户端节点与服务器异常断开连接时及时通知用户<sup>[3]</sup>。

在自动化生产线的装配过程中, 为了确保产品的质量, 工厂对设备和控制系统的可靠性具有较高的要求, 通过对气缸位置、电机速度、工作状态等运行参数进行实时监测, 可对设备状态进行准确的判断, 提高生产效率和可靠性, 降低在人工装配过

程中不精确导致的残次品甚至危险情况的发生; 但是在数据量巨大的情况下, 传统的数据显示方式不直观的缺点给数据分析造成很大影响。通过运用数据可视化 (visualization) 技术, 以图形化方式表示信息, 突出数据的模式和趋势<sup>[4]</sup>, 能够帮助用户快速对设备状态做出判断。

### 1 系统架构

如图 1 所示, 整个自动化生产线可视化系统分为 4 部分: 1) 传感控制层, 主要是控制生产线的设备和物联网传感器, 传感器负责采集设备的数据, 通过采集到设备的数据控制生产线的生产工作, 并且将数据上传到网关; 2) 控制处理层, 主要组成部分是微控制单元 (microcontroller unit, MCU) 和控制终端上位机, MCU 负责执行控制终端的指令和整理、清洗传感器上采集到的数据, 并且将采集到的数据按照规定格式传输给物联网网关, 其中控制终端也会接收传感器数据, 并且实时地在本地控制终

收稿日期: 2021-10-30; 修回日期: 2021-11-28

基金项目: 国防基础科研计划项目 (JCKY201860\*\*001)

作者简介: 陈霆希 (1997—), 男, 广东人, 从事工业设备的故障诊断与故障预测研究。E-mail: 244168012@qq.com。

端上显示, 但是不存储任何数据, 数据存储功能全部由云服务器的数据实现; 3) 网络层, 物联网网关将传感器数据经过一定的转换后, 通过以太网上传到服务器, 服务器经过处理后将数据存储到数据库中; 4) 应用层, 可视化网页根据需要订阅 (subscribe) 服务器中数据内容, 负责将每个传感器的实时数据或历史数据在网页上可视化显示, 供用户监控生产线实时状态或分析生产线的历史运行状态和趋势。

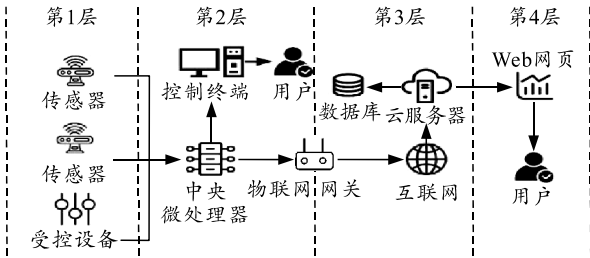


图 1 生产线可视化系统框架

## 2 系统流程设计

### 2.1 本地数据采集处理终端设计

系统本地数据采集处理流程如图 2 所示, 在装配机自动化生产线中, 共有 22 个磁传感器、12 个光电开关、1 个电流传感器、1 个电机速度传感器。其中, 磁传感器和光电开关都是数字量, 通过 I/O 直接与 MCU 通信, 电流和气压都属于模拟量, 在传感器内部经过 A/D 转换后通过串口发送一个 2 字节的数据给 MCU, MCU 将传感器采集到的数据使用固定格式分别发送给本地工控机和 RS485 转以太网网关, 用户可以通过本地控制终端控制装配机的生产和监控当前装配机的状态数据。数据包格式如图 3 所示。

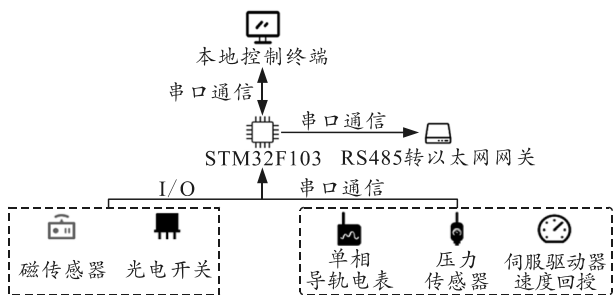


图 2 本地数据采集处理流程

位:0	8	16	24	31
数据包长度	数据包目的设备	磁传感器状态数据		
磁传感器状态数据		光电开关状态数据		
电流数据				
气压数据		伺服电机转速数据		
伺服电机转速数据		MCU当前输出状态		
CRC16校验码				

图 3 本数据包格式

数据包长度: 占 8 位, 表示该数据包的长度, 单位是字节, 目的设备收到经过 CRC 校验后首先需要检查数据包长度是否准确, 若不准确应该丢弃。

数据包目的: 占 8 位, 表明数据包目的端设备, 若为 0x11 则表示该数据包目的的设备是控制终端, 若第 2 字节为 0x22 则表示该数据包目的的设备是网关。

磁传感器状态数据: 占 24 位, 每一位表示一个磁感应传感器的状态, 若为 1 则表示磁感应传感器感应到气缸活塞的磁铁, 反之为 0。

光电开关状态数据: 占 16 位, 每一位表示一个光电开关的状态, 若为 1 则表示装配机的滑台处于当前光电开关所处位置, 反之为 0。

电流数据: 占 32 位, 表示当前电流强度, 单位安培 (A), 电流数据符合 IEEE-754 标准浮点数, 数据格式为 32 位 4 字节的单精度浮点数数据格式。

气压数据: 占 16 位, 表示当前系统的气压。

伺服电机转速数据: 占 32 位, 表示电机目前实际速度, 单位 0.1 rpm, 采用 BCD 码, 最低 4 位固定为小数位。

MCU 当前输出状态: 占 16 位, 该数据只有发送到控制终端的数据包才会包含, 每一位表示一个受控零部件的状态。

CRC16 校验码: 占 16 位, 对数据包进行多项式计算后, 将结果附在数据包的最后面, 接受设备也执行类似的算法, 确保传输的正确性和完整性。

网关接收到 MCU 发送来的数据包后, 首先使用循环冗余校验计算信息字段校验码, 和当前收到的实际校验码比对, 若相等, 则信息正确无误; 反之则丢弃当前数据包。CRC 校验通过后, 网关再检查数据包第 1 字节的长度数据与实际数据包长度是否一致, 如果一致则再检查该数据包目的终端是否是网关, 都通过之后, 将数据部分需要转换成浮点数或十进制数通过公式分别计算。其中: 磁传感器和光电开关数据计算如式(1);  $State_n$  为第  $n$  个传感器的状态; 电流数据计算如式(2);  $S$  表示电流数据二进制表示的最高位的数值;  $e$  代表 23-30 位的数值;  $M$  代表 0-22 位的数值; 气压数据计算如式(3);  $P_{max}$  表示气压传感器量程上限;  $P_{min}$  为量程下限。最后按顺序与数据对应的传感器的访问令牌 (access token) 一一对应。

$$State_n = State \text{ And } 2^n - 1; \quad (1)$$

$$I = (-1)^s \times 2^{e-127} \times 1.M; \quad (2)$$

$$P = (P_{max} - P_{min}) \div 2000 \times P + P_{min}. \quad (3)$$

## 2.2 网络传输层实现

网络传输采用的是 MQTT 协议。MQTT 协议运行在 TCP/IP 或其他网络协议，提供有序、无损、双向连接<sup>[5]</sup>。MQTT 协议具有轻量、简单、开放和易于实现等特点，应用非常广泛<sup>[6]</sup>。

实现 MQTT 协议需要客户端和服务端通信完成。本系统 MQTT 服务器基于 Netty 开发，Netty 是一个基于 NIO 利用 Java 的高级网络的能力，隐藏其背后的复杂性而提供一个易于使用的 API 的客户端/服务器框架<sup>[7]</sup>。

在通信过程中，MQTT 协议中有 3 种身份：发布者 (publish)、代理 (broker) (服务器)、订阅者 (subscribe)。其中，消息发布者和订阅者都是客户端，消息代理是服务器，消息发布者可以同时是订阅者。在本系统中，身份划分见表 1。MQTT 传输的消息分为主题 (topic) 和负载 (payload) 2 部分：1) topic，可以理解为消息的类型，subscribe 订阅后，就会收到该主题的消息内容 (payload)；2) payload，可以理解为消息的内容，是指订阅者具体要使用的内容<sup>[8]</sup>。

表 1 MQTT 角色划分

模块	角色	作用
以太网网关	发布者	将本地传感终端的数据打包转发到服务器
MQTT 服务器	服务器	接受系统上传的传感器数据
可视化网页	订阅者	接受数据，将数据显示在网页端

网络传输层实现如上表所示，在网关将采集到的数据转换成目标数据格式之后，将每个传感器的访问令牌作为 MQTT 报文的用户名 (user name)。访问令牌是在服务端创建新的传感器之后人工设定的一个小于 20 个字的字符串，服务端将它用于身份验证和授权，主题名 (topic name) 固定为 “v1/devices/me/telemetry”，用于识别有效载荷数据应该被发布到遥测信息通道，数据内容使用以 JSON 格式的 Key-Value 字符串，基本格式为 {“Key” “Value”}，Key 代表数据信息；根据不同的传感器，Value 可以是 bool, float, long 格式。例如，转速传感器上传的数据内容为：{“Speed” “700”}。

服务器从设备接收到消息后，为了确保每条消息都能正确被使用，笔者采用了消息队列中间件，在消息被解析后，将会推送到消息队列。这里消息队列使用了 Kafka。Kafka 是一个分布式的、可分离的、冗余的、持久的由 Scala 开发的基于 TCP 协议的消息发布订阅系统<sup>[9]</sup>，消息有序，通过控制能够

保证所有消息被使用且仅被使用一次。所有由单片机上传的数据都要经过消息队列的数据清洗，消息队列中间件的峰值消息处理能力约为 20 条/s，在系统设计的过程中，考虑到整个系统的数据量和单片机的传感器数据采集能力，将单片机的采样时间设定为电机和气缸工作时开始，直到电机和气缸完全停止 30 s 后停止，采样频率设定为 1 次/s，这样能够较好地适应服务端的消息处理能力，也能达到实际使用过程中实时性的要求。在可视化部件显示时为 1 s 更新一次，且默认展示有数据上传的时间段内的数据。

网页服务端是整个可视化系统的核心，主要功能有：

- 1) 负责存储有关活动设备会话和监视设备连接状态；
- 2) 使用系统的用户验证；
- 3) 负责在系统中创建设备后生成访问令牌；
- 4) 创建和管理传感器及自动化生产线间的实体关系；规则引擎负责处理传入的消息，对传感器的数据进行单位转换等处理，同时可以将传感器数据对应的状态创建逻辑关系。数据库采用 PostgreSQL 数据库。PostgreSQL 支持大部分的 SQL 标准并且提供了很多其他现代特性，如复杂查询、外键、触发器、视图、事务完整性、多版本并发控制等<sup>[10]</sup>，主要进行存储传感器数据 (包括属性、时序、传感器读数、事件等)、设备属性和关系、用户数据和关系等。最终可视化网页将各类数据、逻辑关系等通过各类可视化部件例如柱状图、条形图、饼状图等直观地将数据展示出来。

## 2.3 可视化系统实现

数据可视化技术的基本思想，是将数据库中每一个数据项作为单个图元素表示，大量的数据集构成数据图像，同时将数据的各个属性值以多维数据的形式表示，可以从不同的维度观察数据，从而对数据进行更深入的观察和分析<sup>[11]</sup>。

用户管理系统：在可视化系统中共有 3 种用户角色，分别是系统管理员、用户管理员、普通用户。系统管理员可以创建或删除用户管理员账号，修改数据异常警报发送邮件的地址、邮件协议、邮箱用户和邮件内容等，同时也可以设置用户登录的安全策略，例如设置登录尝试验证次数，若超过次数则锁定用户账号，需要系统管理员才能解锁，还可以设置密码规则，规定密码最短长度、必须包含的字

符种类等;用户管理员可以创建或者删除用户账号,创建、修改设备名称和属性以及直接删除设备,管理传感器的属性、访问令牌,管理可视化界面,将可视化界面分配给需要的用户;普通用户只能查看用户管理员分配给自己设备的数据和状态。在一般的自动化生产线中,有电气工程师和机械工程师 2 个用户:电气工程师一般关心与电气相关的内容,例如电机转速、电流等;机械工程师一般关心与机械相关的内容,例如气缸状态等。所以用户管理员可以根据用户需要数据的不同将传感器数据和可视化仪表板针对性的分配给系统用户。

设备管理系统:在设备管理系统中,为了方便管理和理解,系统共设置 2 种设备大类型。一种是资产;另一种是传感器。资产包括整个机器和里面重要的设备,例如气缸、电机等,这类设备一般本身不能上传数据;传感器负责接收实际传感器上传的数据,资产和传感器都需要与实际的设备一一对应。用户管理员可以手动添加设备,设定设备的名字和访问令牌,还可以设置资产与资产、资产与设备之间的逻辑包含关系,并且将该设备分配给特定的用户,以此方便管理和查看目标数据。例如,一个电机资产包含电机本体、转速传感器和电流传感器,当用户管理员将一个资产分配给某个用户时,该资产下所有包含的传感器都会被分配到该用户,未被分配到用户就不能查看该资产和传感器的数据。设备管理系统还允许用户查看设备所有的警报事件,当警报已经解除或处理完成,用户或用户管理员可以在警报界面将警报记录删除。

可视化组件展示系统:可视化网页界面由各种数据可视化小部件组成,有柱状图部件、折线图部件、状态时序图部件和警报提示部件 4 种,各类部件 UI 都是采用 node.js 语言编写。柱状图显示实时的传感器数据;折线图展示一段时间的传感器数据;状态时序图主要展示状态传感器例如磁传感器在一段时间内的变化;警报提示部件以表格的方式展示当前系统尚未处理的警报事件。除了警报提示部件需要规则引擎提供警报规则外,其他部件都需要至少一个传感器数据与其绑定。

图 4—7 是以某弹药装配机为例,显示装配机比较重要的传感器数据可视化显示的各个可视化部件。图 4 电流监测由 2 个部件组成,柱状图负责显示电机实时电流,折线图展示了一段时间内电流变化的情况;图 5 状态变化图则展示了一段时间内防爆窗开关的状态;图 6 是电机转速监测,类似于汽

车仪表盘,仪表盘负责显示当前电机转速,当转速达到 800~900 rpm 时,处于黄色转速区间,此时系统会发出“警告”警报,当转速超过 900 rpm 时,转速处于仪表盘红色区域,则会发出“危险”警报;图 7 是系统警报部件,在这个部件可以看到警报发生的时间、类型和严重程度,在本研究中,电流警报的阈值被设定为 3.5 A,超速警报的阈值被设定为 1 000 rpm,通过发送超出设定电流过大和转速过快阈值的模拟数据,成功触发了电机电流和电机转速超阈值警报。

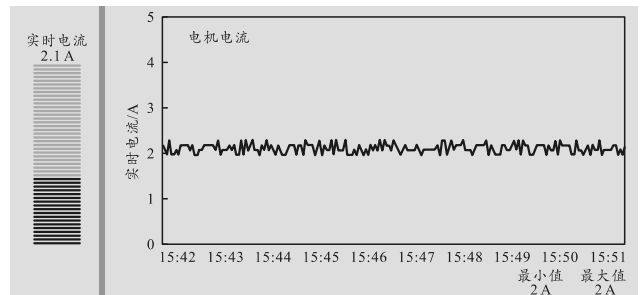


图 4 电机电流监测部件

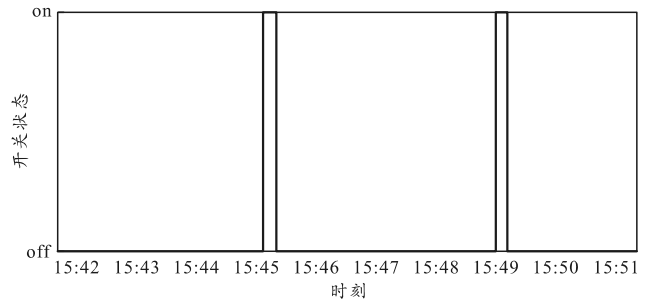


图 5 防爆窗开关状态监测部件



图 6 电机转速监测部件

警告		
创建时间	类型	严重程度
2021-03-28 21:59:07	电机转速过低	警告
2021-03-28 21:57:36	电机转速过快	警告
2021-03-28 21:57:35	电机转速过低	警告
2021-03-28 21:48:37	电流过高	危险
2021-03-28 21:41:23	电流过低	警告

图 7 系统警报部件

### 3 系统测试

为了测试装配机自动生产线数据可视化系统的可靠性和稳定性，在装配机自动生产线上装配了传感器进行实际的数据采集，然后对数据上传、阿里云平台和 Web 网页端等进行测试。

首先是资产和传感的创建和关联。如图 8 和 9 所示，装配机自动生产线各类传感器都能正确创建，并和资产进行关联，在传感器数量较多的情况下，用户可以通过查询对应的资产设备来快速获取目标传感器的信息。

名称	设备类型
电机-速度传感器	速度传感器
电机-电流传感器	电流传感器
工位5-下磁感应传感器	磁感应传感器
工位5-上磁感应传感器	磁感应传感器
工位5-后磁感应传感器	磁感应传感器
工位5-前磁感应传感器	磁感应传感器

图 8 部分传感器列表

到实体类型	到实体名称
设备	电机-震动传感器
设备	电机-电流传感器
设备	电机-速度传感器

图 9 电机和传感器之间的关联

然后对系统数据采集进行测试，收集到电机电流和转速的数据，结果如图 10 和 11 所示，在测试开始后约 1 h，人为将电机负载降低和转速调低，可看到采集到的数据能够正确反映实际情况，随后继续进行 23 h 电机低负载运行测试，在 1 s 上传一次数据的情况下，在 24 h 的测试中，系统能够正确地采集到电机的实时数据，并且保存到数据库中。如图 12 所示，用户可以选取任意时间段的数据在网页上可视化显示。

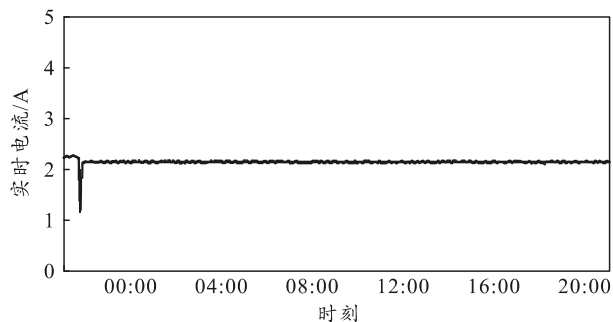


图 10 电流连续采集上传数据测试

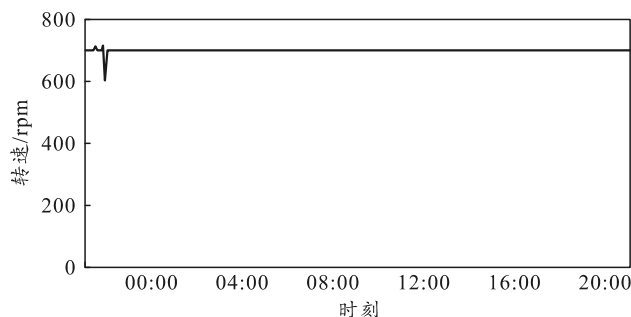


图 11 转速连续采集上传数据测试



图 12 数据展示时间段设置

最后对工件位置变化示意动画进行测试，图 13 和 14 所示为装配机现场环境示意图，托盘在装配人工间进行上料操作，此时所有工件都在装配人工间显示；上料完成后，托盘退回装配间，此时工件在装配间内显示。

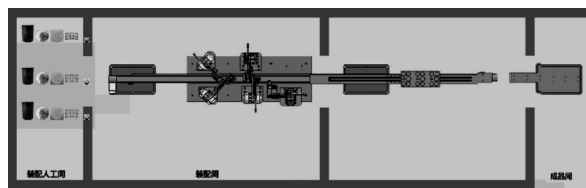


图 13 工件处于上料位置

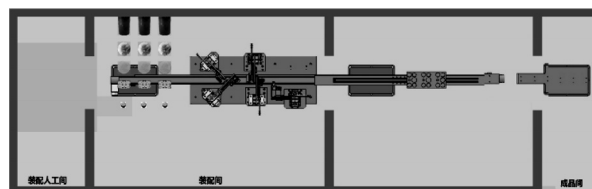


图 14 工件进入装配间

### 4 结束语

该研究基于 MQTT 协议的自动化生产线数据可视化系统，可实现对自动化生产线进行远程实时监测，保存采集的数据集。用户可以随时查看任意时间段的数据，并在网页上可视化显示，更直观地展示数据，很大程度上提升了自动化生产线的智能程度，大幅提升了自动化生产线的可靠性和安全性，降低了检修人员的维护难度。在装配机上对数据可视化系统进行的测试中，系统结合了当前流行的 MQTT 协议，使得装配机自动生产线物联网系统的网络连接具有响应快、传输稳定等优点，以及下位机的高性能处理数据能力和传感器高精度采集数据

等特点,使得装配机自动生产线可视化系统具有较高的实用性。

参考文献:

[1] KABUGO J C, JÄMSÄ-JOUNELA S L, SCHIEMANN R, et al. Industry 4.0 based process data analytics platform: A waste-to-energy plant case study[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2020, 115: 105508.

[2] HARIPRIYA A P, KULOTHUNGAN K. Secure-MQTT: an efficient fuzzy logic-based approach to detect DoS attack in MQTT protocol for internet of things[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 2019(1): 90.

[3] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.

[4] CECCARINI C, MIRRI S, SALOMONI P, et al. On exploiting Data Visualization and IoT for Increasing

Sustainability and Safety in a Smart Campus[J]. Mobile Networks and Applications, 2021: 1-10.

[5] 耿云飞. 融合通信消息引擎的设计与实现[D]. 沈阳: 中国科学院研究生院(沈阳计算技术研究所), 2016.

[6] 姚丹, 谢雪松, 杨建军, 等. 基于 MQTT 协议的物联网通信系统的研究与实现[J]. 信息通信, 2016(3): 33-35.

[7] 左贝. 传感器网络与云统一连接框架设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

[8] 梁志勋, 施运应, 覃有燎, 等. 基于 MQTT 协议的智慧农业大棚测控系统研究[J]. 北方园艺, 2020(23): 161-171.

[9] FU G, ZHANG Y F, YU G. A Fair Comparison of Message Queuing Systems[J]. IEEE Access, 2021(9): 421-432.

[10] 刘鑫. MySQL 和 PostgreSQL 的对比选择[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2011, 7(2): 171-173, 177.

[11] 赵中帼, 罗庆云. 基于网络的数据可视化研究与实现[J]. 大庆师范学院学报, 2010, 30(6): 5-7.

\*\*\*\*\*

(上接第 4 页)

将火力硬杀伤和干扰诱骗软对抗相结合, 防抗并重。在被掩护目标区域内使用空管对抗、武器打击、雷达干扰等软抗击手段, 迷惑、干扰敌方攻击武器, 使其偏离预定的任务目标, 降低其作战效能。同时, 对要地、人员、装备等采取严密的隐蔽和防护等措施, 最大限度地减少敌方攻击可能造成的损失, 保证稳定的要地防御和持续的战斗能力, 既要防敌方常规火力突击, 又要防敌方电子干扰、电磁杀伤和信息干扰等。

4 结束语

笔者基于要地防抗的美军发展情况及我军发展需求, 提出一种具备要地综合防抗能力的能够“看得清”“控得好”“防得住”“抗得赢”的车载要地区域综合一体化防抗系统。笔者详细描述了系统的组成、功能及特点, 并分析了基于该系统的典型要地防抗作战过程。该系统采用多功能、高集成、一体化设计, 各功能模块的技术基础良好、工程应用成熟, 可在短时间内形成装备能力与作战能力, 为我军提供空中与地面, 固定要地与作战转移的全方位、全过程综合防抗保障, 并为我国要地区域综合防御提供新的设计理念和技术途径。

参考文献:

[1] 杨雪榕, 程子龙, 肖龙龙. 导弹防御指挥控制与作

战管理系统研究[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 86-91.

[2] 刘敬蜀, 姜文志, 代进进. 动态火力接入下要地防空目标分配研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(6): 34-39.

[3] 毕开波, 隋先辉, 张翼飞. 海上编队区域防御面临的新威胁和对策(上)[J]. 中国航天, 2016(5): 60-63.

[4] 毕开波, 隋先辉, 张翼飞. 海上编队区域防御面临的新威胁和对策(下)[J]. 中国航天, 2016(6): 56-60.

[5] 陈志平. 地面防空指挥控制系统的设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2015.

[6] Joint Publication 3-27: Homeland Defense[S]. USA Joint Chiefs of Staff, 29 July 2013.

[7] Joint Publication 3-01: Countering Air and Missile Threats[S]. USA Joint Chiefs of Staff, 21 April 2017.

[8] Joint Publication 3-09.3: Joint Tactics, Techniques, and Procedures for Close Air Support (CAS)[S]. USA Joint Chiefs of Staff, 25 November 2014.

[9] 罗良彬, 商长安, 杨辉. 区域防空作战体系网络拓扑结构分析与建模[J]. 现代导航, 2016, 44(1): 10-15.

[10] 朱智. 网络化防空反导体系可组合建模框架研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.

[11] 隋江波, 孙学锋, 朱良明. 海军要地防空多武器系统协同作战[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(6): 78-81.

[12] 李光辉. 联合作战下数据链电子防御技术发展分析[J]. 现代导航, 2015(6): 540-543.

[13] 杨南, 吉磊. 无线网络安全监测及防御技术研究[J]. 信息安全与通信保密, 2016(3): 106-109.