

基于 ARIMA 模型的环境监测系统设计与实现

王 鹏, 徐圣法, 刘杰强, 李田甜, 王海江

(北京东方计量测试研究所, 北京 100086)

摘要: 运载火箭存储发射过程中, 推进剂的加注、转注、存储和发射, 都可能存在泄漏安全问题^[1]; 一旦发生泄漏事故, 推进剂的易燃、易爆、毒性和腐蚀性特点, 将引发不良的后果, 严重影响试验任务^[2-3]; 文章提出的环境监测系统, 采用 B/S 架构设计, 通过在关键位置布置的高精度传感器, 实时采集发射区周边环境信息, 运用大数据分析技术和 ARIMA 模型, 实现了对发射区推进剂泄漏状况、环境健康状况、空调设备运行状态和人员健康状况监测预警, 预判推进剂浓度变化趋势及扩散情况; 经实际应用, 该系统能有效降低试验任务的风险系数, 符合运载火箭存储环境在平时与应急两种状态下的监测与评估功能要求, 满足发射场工作环境智能化监测预警建设需求, 具有一定的推广价值。

关键词: 环境监测; 推进剂; ARIMA 模型; B/S 架构

Design and Implementation of Integrated Environmental Monitoring System Based on ARIMA Model

Wang Peng, Xu Shengfa, Liu Jieqing, Li Tiantian, Wang Haijiang

(Beijing Orient Institute of Measurement & Test, Beijing 100086, China)

Abstract: During the storage and launch process of the carrier rocket, filling, transfusion, storage and launch of the propellants may have the leak safety issues. In the event of a leak, flammable, explosive, toxic and corrosive characteristics of propellants, will be the bad consequences and the seriously affect for the test mission. The environmental monitoring system is proposed in this paper, it adopts B/S architecture design, the real-time environmental information around the launch area is collected by the high-precision sensors arranged in the key position, it applies the big data analysis techniques and ARIMA model, realizes the monitoring and early warning of the propellant leakage, the environmental health conditions, the operation state of the air-conditioning equipment and the health status of the personnel in the launch area, calculates the change trend and diffusion of the propellant concentration. After practical application, this system can effectively reduce the risk of the test task, conforms to the monitoring and evaluation function requirements in the normal and emergency states for the storage environment of the launch vehicle, meets the construction requirements of the intelligent monitoring and early warning for the working environment of the launch site, should be promoted.

Keywords: environmental monitoring; propellant; ARIMA model; B/S architecture

0 引言

随着试验任务的不断增加, 对发射区工作环境的安全性和可靠性提出了更高的智能化监控管理要求。如何更好的在信息化、智能化的技术条件下, 收集整理分析环境参数数据, 高效评估预测环境健康状态, 对突发事故快速响应报警, 提前预判安全事故, 把风险系数降到最低, 是当前智慧发射场建设需研究的课题。本文设计的环境监测系统, 通过在发射区关键位置布置的传感器收集环境参数信息, 采用虚拟实景、二维、三维、图形、图表、柱状图、饼状图、曲线等多种可视化手段, 在正常情况下, 实时展示发射场区环境综合监测信息; 在事故发生时, 快速锁定泄漏源位置, 预判推进剂泄漏扩散路径, 评估事故危险等级, 给出巡检人员最佳逃生路线的指导性意见, 为管理者指挥调度提供重要的数据参考依据。该系统显示功能多样

化, 操作简单, 维护便捷, 可实现跨平台访问与管理, 具备智能预判与提前预警等快速响应能力, 提高了发射场智能化监控管理水平, 有效提升人员工作效率。目前该系统已在某地投入使用, 应用效果显著。

1 系统功能要求

环境监测系统主要用于实时监测、评估、判断发射区环境的健康状态、推进剂泄漏情况、推进剂泄漏扩散状态、空调设备运行状态、人员健康状态等情况, 对突发安全事故快速响应, 迅速锁定事故源, 掌握相关处置策略, 对事态变化趋势跟踪和评估, 作为事故抢救的重要依据。其主要功能如下。

1.1 重要部位, 实时监测显示

利用关键部位布置的传感器、网络通讯、数据交互、大数据分析 with 处理等多种技术手段, 结合地理图像数据, 采用虚拟实景、二维、三维、图形、图表、柱状图、饼状图、曲线等多种可视化手段, 实时展示发射区域环境健康状态、空调设备运行状态, 跟踪推进剂泄漏数据的变化趋势, 并对环境安全程度做出评估。还可进行历史数据查询、

收稿日期:2020-03-26; 修回日期:2020-04-27。

作者简介:王 鹏(1988-),男,山西怀仁市人,工程师,硕士,主要从事航天器环境监测评估与人工智能领域方向的研究。

三维模型历史数据回放、历史数据变化趋势查询等操作。

1.2 突发事故，快速报警提醒

当推进剂泄漏事故发生时，可通过界面高亮闪烁和现场声光报警器，根据不同程度的报警等级，发出报警信号，实现双重报警，快速锁定泄漏源位置，及时判断评估泄漏事故状态，为巡检人员提供最佳逃生路线的指导性意见，快速给出事故处理的合理建议。还可进行报警历史查询、报警事件统计分析、重要数据预测报警、报警限值设定等操作。

1.3 环境状态，跟踪预测评估

当发生推进剂泄漏事故时，可通过泄漏源定位功能，快速锁定事故发生源头，为事故抢修节约宝贵时间；通过推进剂泄漏扩散评估功能，模拟推进剂泄漏后，在发射场外外部扩散情况，为场外工作区与生活区人员撤离提供指导意见；通过空调设备运行状态评估功能，判断重要区域空气风场流向及风力大小，为空调设备控制调整提供指导意见；通过重要数据变化趋势预测功能，提前预防安全事故发生，为试验任务安全执行提供有力保障。

1.4 人员健康，安全运维管理

通过巡检人员佩戴便携式个人剂量计设备，收集工作人员接触推进剂浓度累积量，记录统计巡检人员工作情况，运用加权比较法，分析评估人员健康状态，建立人员健康档案，为工作人员健康工作，提供指导意见。

1.5 系统设备，智能监控管理

可对系统中涉及到的传感器、数据采集器、个人剂量计、声光报警器等设备进行配置、修改、增删操作；建立设备信息库，定期提示需要维护的设备信息；对系统用户个人信息、系统界面操作菜单、用户操作日志记录、角色分配权限，进行集中运维管理，实现权限统一分配和系统辅助操作管理。

2 系统整体架构

环境监测系统主要是通过发射场重要区域和关键位置布置的各种高精度传感器，实时采集发射区周边偏二甲胍气体浓度、二氧化氮气体浓度、氧气浓度等 10 余种环境参数状态信息，通过数据采集器把环境参数模拟信号转换成数字信号，再传递到中转工控机上，通过组态软件把数据转换成特定协议格式，打包分类，传送至服务器主机上，通过数据处理软件和评估算法模块，对数据进行综合分析、计算、处理、评估，并通过数据显示软件，把处理后的数据展示给用户。该系统采用 B/S 架构设计^[4]，可以直接在浏览器中输入网址打开，通过特定账号和密码来远程登陆访问该系统，便于用户随时查看发射区域现场及周边以至整个场区的态势。在人员值班室分别放置两台声光报警器，当泄漏事故发生时，系统自动控制发出声光报警信号，提示工作人员事故排查。

环境监测系统通过对环境参数收集分析，运用 Calpuff 软件^[5-7]（非稳态拉格朗日烟团模型，可模拟三维流场随时间和空间发生变化时，污染物在大气环境中的扩散过程），

建立气体扩散模型，模拟推进剂泄漏后，在发射场外外部扩散情况，为场外工作区与生活区人员撤离提供指导意见；运用朴素贝叶斯方法，判断定位推进剂泄漏源位置，辅助值班人员及早发现险情，为事故抢修节约宝贵时间；基于 ARIMA 模型，预测评估推进剂泄漏变化趋势，提前做好防范工作，把安全事故风险系数降到最低；通过微压差数据分析对比，识别关键区域风场流向和风力强度，判断当前空调设备运行情况是否符合设计要求，为空调设备风量控制调节，提供指导意见，确保推进剂泄漏后，可沿风场方向排出场外，保障巡检人员人身安全；通过巡检人员携带的个人剂量计，收集人员摄入的推进剂浓度累积量数据，运用加权比较法，评估人员健康状态，建立人员健康档案，给出员工合理工作建议，保障身心健康。

系统结构组成图如图 1 所示。

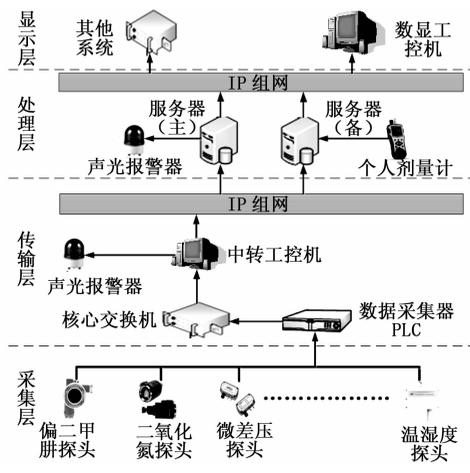


图 1 系统结构组成图

3 系统软件设计

该系统采用 B/S 架构设计，运行于银河麒麟操作系统上，可兼容 Microsoft Windows 系列操作系统，数据存储于 MySQL 数据库中，采用 SpringBoot 框架编写业务层服务，前台展示界面采用 Vue.js 技术开发，其逻辑架构如图 2 所示。系统软件由两部分组成：数据处理软件和数据显示软件。数据处理软件包含数据接收、数据库管理、数据分析、数据服务和评估算法；数据显示软件包含数据显示与查询模块、报警查询与预警模块、环境评估模块、人员健康档案、设备管理模块和系统管理模块。

数据处理软件主要负责对中转工控机上传的实时监测数据接收处理，与评估算法模块配合完成数据的综合分析、评估、对其运行结果进行存储和管理。数据显示软件可以通过访问服务器数据库表对处理和评估后的数据进行提取显示。数据显示软件为人机操作交互界面，通过向各个模块发送请求，被请求模块前往数据库表中调用相关数据，然后返回查询的数据结果，结合地理信息模型，运用多种可视化手段，为用户展示数据运行结果。数据处理软件和数据显示软件二者之间完全独立运行，通过 WebSocket 通

信协议进行数据交互。

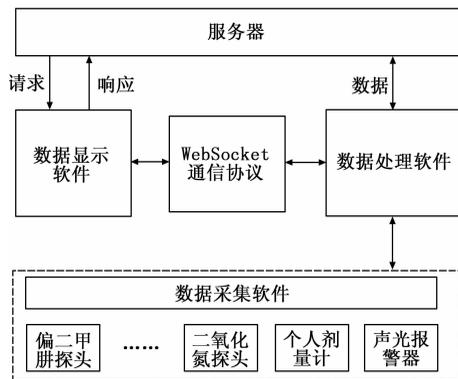


图 2 系统架构图

软件运行流程如图 3 所示。首先, 数据处理软件采用 UDP 通信协议方式获取数据采集器传输的各类环境参数信息数据, 并对数据进行解析。然后, 系统对解析后的数据通过与报警限值比较, 判断是否存在报警事件, 如果存在, 则在系统界面报警提示, 并把报警信息存储到报警记录数据库表中; 如果不存在, 则把解析后的数据存储在实时监测数据库表中。同时, 解析后的数据经算法评估模块的各功能模块运行计算, 得到预测评估结果数据, 并对结果数据与预警限值比较, 判断是否有预警事件发生, 如果有, 则在系统界面预警提示, 并把预警数据存储在预警记录数据库表中; 如果没有, 则把结果数据存储在预测数据库表中。同时, 解析后的数据经过处理分析后, 存储在相应的数据库表中。当用户需要查看不同类型的数据信息时, 数据显示软件触发数据调用程序, 从相应的数据库表中提取相关数据信息, 进行多维度展示。

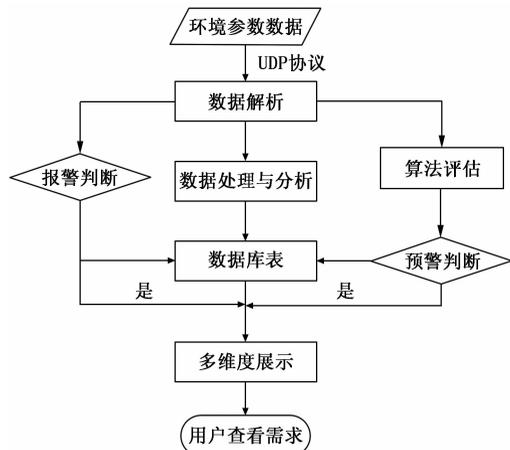


图 3 系统软件流程图

4 预测报警算法

推进剂浓度是环境参数中最重要的监测指标, 一旦发生泄漏事故, 如果处理不当, 将会引发严重后果。为了预防推进剂泄漏事故发生, 系统开发推进剂预测报警功能, 通过对推进剂历史数据和实时数据的综合分析, 运用 ARIMA

模型^[8-10], 对推进剂泄漏的时间序列数据分析与预测, 提前预警, 及早通知维护人员检查维修, 把安全事故风险系数降到最低。

预测报警算法模块工作流程如图 4 所示。首先, 数据处理软件对推进剂实时监测数据进行预测门限判别, 当推进剂浓度数据连续 5 个以上超过预测门限时, 系统触发算法模块, 对推进剂数据变化趋势预测, 并根据预测结果, 绘制出未来 24 小时内的数据变化趋势曲线, 同时, 系统还对预测值与报警阈值进行比较, 如果预测值超过报警阈值, 数据处理软件立即向数据显示软件发出报警信号, 通过系统界面报警提示和声光报警器发出声光报警信号等多种报警手段, 提醒工作人员有安全隐患存在, 需前往现场故障排查。系统自动将预警过程信息和预警判别结果存入到预警记录数据库表和趋势预测数据库表中, 便于用户后续查看。

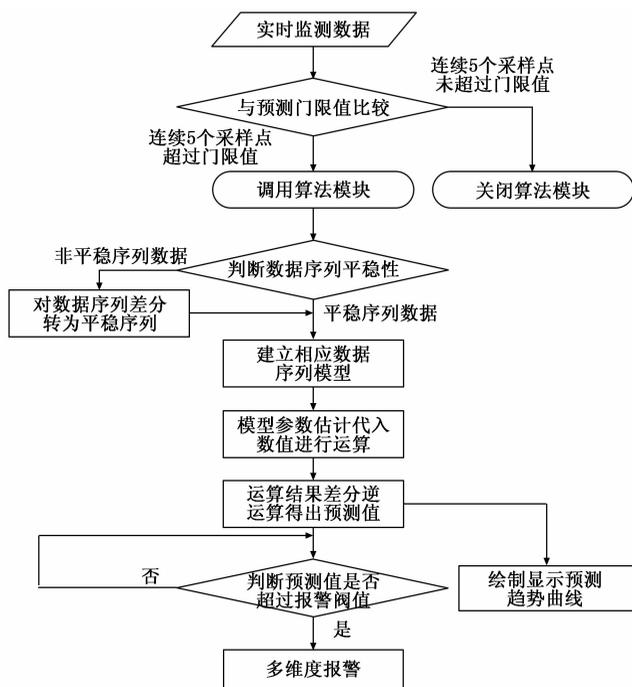


图 4 预测报警算法模块工作流程图

预测报警算法是基于 ARIMA 模型来实现的, 其中, φ 、 θ 两个权值的作用是将采集的推进剂浓度值 X_{t-i} 和误差项 u 进行加权, 获得未来时刻推进剂浓度的预测值 X_t , 权值需要通过 ARIMA 模型运算获取。

ARIMA 算法模型可以表示为:

$$X_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + u_t - \sum_{j=1}^q \theta_j u_{t-j} \quad (1)$$

式中, X_{t-i} 为系统在 $t-i$ 时刻所采集到的推进剂浓度值; X_t 为算法模块预测的 t 时刻推进剂浓度值; u_{t-j} 、 u_t 为 t 、 $t-j$ 时刻的误差项; φ_i 为对应 i 时刻采集的推进剂浓度的权值; θ_j 为 j 时刻误差项的权值; p 、 q 为通过 ARIMA 模型识别阶后生成的最佳参数。

算法模块运行步骤如下所示:

1) 识别推进剂浓度序列的平稳性。把采集到的推进剂浓度值看做一个序列, 令 B^k 为 k 时刻推进剂浓度的滞后算子, 即:

$$B^k X_t = X_{t-k} \quad (2)$$

把公式 (2) 代入到公式 (1) 得公式 (3):

$$X_t = \varphi_1 B X_t + \varphi_2 B^2 X_t + \dots + \varphi_p B^p X_t + u_t - \sum_{j=1}^q \theta_j u_{t-j} \quad (3)$$

令 $\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B + \varphi_2 B^2 + \dots + \varphi_p B^p$, 则序列的平稳条件是 $\varphi(B)$ 的根在单位圆外。

2) 对非平稳序列平稳化处理。如果推进剂浓度序列的根在单位圆内, 即为非平稳浓度序列, 则需要对序列数值进行差分运算。取序列中各相邻项之间的差值, 组成新的序列, 并判断新序列的平稳性。如果新序列依然为非平稳序列, 则继续差分运算, 直到差分后的序列变为平稳为止, 差分阶数记为 d 。

3) 根据序列模型识别规则, 建立对应序列模型。当推进剂浓度序列平稳处理后, 对模型识别定阶, 判断适合该序列的最佳模型, 识别出使模型最佳的 p 与 q 两个参数。

在建立模型的过程中, 首先需确定推进剂浓度序列的自协方差函数 r_k 、自相关函数 ρ_k 与偏自相关函数 φ_{kk} , 其数学公式如 (4) ~ (6) 所示。

$$r_k = \begin{cases} (1 + \sum_{i=1}^q \theta_i^2) \sigma^2, & k = 0 \\ (-\theta_k + \theta_1 \theta_{k+1} + \dots + \theta_{q-k} \theta_q) \sigma^2, & 1 \leq k \leq q \end{cases} \quad (4)$$

式中, σ^2 为白噪声序列的方差; k 为某一时刻。

$$\rho_k = \frac{r_k}{r_0} = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ \frac{-\theta_k + \theta_1 \theta_{k+1} + \dots + \theta_{q-k} \theta_q}{1 + \sum_{i=1}^q \theta_i^2}, & 1 \leq k \leq q \\ 0, & k > p \end{cases} \quad (5)$$

式中, ρ_k 表示推进剂浓度序列中, 相隔 k 时刻的采样值之间的相关程度。

$$\varphi_{kk} = \begin{cases} \varphi_k, & 1 \leq k \leq p \\ 0, & k > q \end{cases} \quad (6)$$

式中, φ_{kk} 表示对于推进剂浓度序列 X_t , 在已获取 $k-1$ 个推进剂浓度序列值的情况下, X_t 与 X_{t-k} 之间的条件相关关系。

随着 k 的增加, 如果推进剂浓度序列的自相关函数 ρ_k 与偏自相关函数 φ_{kk} 的函数值逐渐变为 0, 我们称其具有截尾性; 反之, 如果随着 k 的增加, 自相关函数值和偏自相关函数值不为 0, 则称其具有拖尾性。若浓度序列的偏自相关函数是截尾的, 而自相关函数是拖尾的, 则浓度序列选用 AR 模型运算; 若浓度序列的偏自相关函数是拖尾的, 而自相关函数是截尾的, 则浓度序列选用 MA 模型运算; 若浓度序列的偏自相关函数和自相关函数均是拖尾的, 则浓度序列选用 ARMA 模型运算。

模型的最佳参数 p 和 q 可以通过 AIC 准则来确定, AIC 定阶准则的公式如式 (7) 所示:

$$AIC(S) = \ln \hat{\sigma}^2 + \frac{2S}{N} \quad (7)$$

式中, S 是模型的未知参数的总数; $\hat{\sigma}^2$ 是白噪声序列方差 σ^2 的估计值; N 为采集的推进剂浓度值个数。

使 AIC (S) 的值最小的点 (\hat{p}, \hat{q}) 即为模型的最佳参数 p 和 q 的估计值。其中, 在 AR (p) 模型中的 $S = p$; 在 MA (q) 模型中 $S = q$; 在 ARMA (p, q) 模型中 $S = \frac{p+q}{2}$ 。

4) 系统建立好对应的模型后, 运用矩估计法估算推进剂浓度权值的估计值 $\hat{\varphi}$, 计算公式如 (8) 所示:

$$\begin{pmatrix} \hat{\varphi}_1 \\ \hat{\varphi}_2 \\ \dots \\ \hat{\varphi}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\gamma}_q & \dots & \gamma_{q-p+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\gamma}_{q-p+1} & \dots & \hat{\gamma}_q \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{\gamma}_1 \\ \hat{\gamma}_2 \\ \vdots \\ \hat{\gamma}_p \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, $\hat{\gamma}$ 为自协方差 γ 的估计值。

令 $Y_t = X_t - (\hat{\varphi}_1) X_{t-1} - \dots - \hat{\varphi}_p X_{t-p}$, 则 Y_t 的自协方差函数的矩估计, 计算公式为 (9) 所示:

$$\hat{\gamma}_k^{(Y)} = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^p \hat{\varphi}_i \hat{\varphi}_j \gamma_{k+j-i}, \quad \hat{\varphi}_0 = -1 \quad (9)$$

Y_t 可以近似为 MA (q) 序列, 用下面的算法可以计算误差项权值估计值 $\hat{\theta}$, 计算公式为 (10) 所示:

$$\begin{cases} (1 + \hat{\theta}_1^2 + \dots + \hat{\theta}_q^2) \hat{\sigma}^2 = \gamma_0 \\ (-\hat{\theta}_1^2 + \hat{\theta}_1 \hat{\theta}_{k+1} + \dots + \hat{\theta}_{q-k} \hat{\theta}_q) \hat{\sigma}^2 = \gamma_k, k = 1, \dots, q \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\hat{\sigma}^2 = \gamma_0 - \sum_{j=1}^p \hat{\varphi}_j \gamma_j$ 。

5) 把获得的最佳参数 p 和 q 、权值 φ 和 θ 、推进剂采集的浓度值 X_{t-i} 以及误差项 u 代入到识别得到的序列模型中, 经计算, 最终得到未来各时刻的推进剂浓度差分数据序列。在关闭算法模块之前, 系统将一直沿用识别得到的序列模型进行预测, 模型运算得到的各项参数值将保持不变。

6) 对计算得到的未来时刻推进剂浓度差分数据序列进行差分逆运算, 即为推进剂浓度未来时刻预测值, 系统自动把预测值存储到趋势预测数据库表中。

通过上述步骤, 可以得到推进剂浓度未来时刻预测值, 系统通过调用趋势预测数据库表中相关数据, 绘制成推进剂浓度变化趋势曲线, 展示给用户。

运用 MATLAB 仿真软件验证监测预警算法的准确性。系统连续选取 600 个真实的推进剂浓度值作为参考数据源, 监测预警算法模块按照上述步骤, 利用前 200 个推进剂浓度实际值, 计算得到后 400 个推进剂浓度预测序列值, 预测数值与实际数值对比, 如图 5 所示。对算法得到的推进剂预测值与实际值进行相对误差运算, 运算结果如图 6 所示, 由图可看出, 推进剂预测值与实际值相对误差小于 2.6%。

根据上述实验结果可知, 由预测报警算法模块计算得到的推进剂浓度预测序列数据曲线与推进剂实测曲线相比, 准确率最高达 97% 以上, 可以作为推进剂泄漏预测报警的

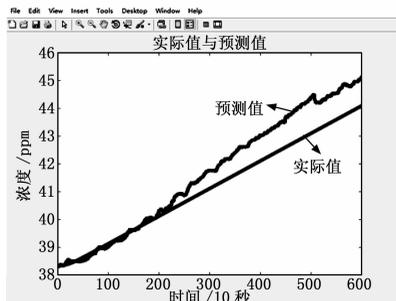


图 5 实际值与预测值仿真对比图

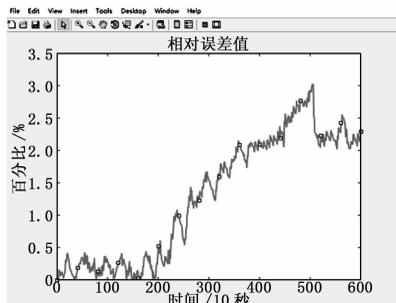


图 6 相对误差运算结果图

重要判断依据。

5 试验验证与分析

为了验证系统功能指标是否满足设计要求, 保证试验结论的真实性和有效性, 特委托第三方测评机构对系统功能测试。测试工具包括: USR-TCP232-Test 串口转网络调试助手、jmeter 压力测试工具、Post-man 接口测试工具、MATLAB 仿真工具、Visual Studio、MySQL 和 ProView。

系统功能测试连接关系如图 7 所示, 测试方法主要是通过数据源模拟软件模拟现场实时数据, 验证系统功能符合情况。

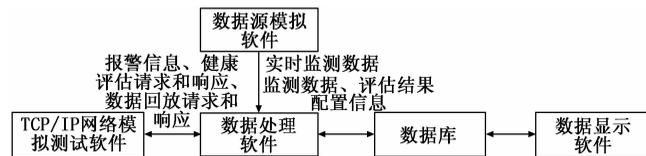


图 7 系统功能测试连接关系图

系统主要测试用例执行情况统计如表 1 所示, 系统全部测试用例执行情况统计如表 2 所示。系统所有测试用例都覆盖执行, 所有测试用例都全部通过, 无不合格测试项, 系统功能满足设计要求。

6 结束语

本文提出的环境监测系统, 结合了“大数据分析、物联网、虚拟实景、人工智能”等最前沿技术手段, 实现了对发射区环境安全、空调设备运行安全和人员健康安全的全面监控, 通过评估算法模块及 ARIMA 数学模型, 大大提高了发射场智能化监控管理水平, 为发射场建设提供安全、可靠、敏捷的一体化解决方案。

表 1 系统主要测试用例执行统计表

序号	功能测试内容	测试情况	序号	功能测试内容	测试情况
1	初始化功能测试用例	测试通过	10	空调设备运行状态评估功能测试用例	测试通过
2	实时采集功能测试用例	测试通过	11	泄漏事故趋势预测功能测试用例	测试通过
3	历史数据写入功能测试用例	测试通过	12	泄漏源位置评估功能测试用例	测试通过
4	回放功能测试用例	测试通过	13	数据显示与查询功能测试用例	测试通过
5	传感器参数配置功能测试用例	测试通过	14	报警查询与预警功能测试用例	测试通过
6	数据变化趋势预测功能测试用例	测试通过	15	环境评估功能测试用例	测试通过
7	人员健康功能测试用例	测试通过	16	人员健康评估功能测试用例	测试通过
8	报警及泄漏源评估功能测试用例	测试通过	17	设备管理功能测试用例	测试通过
9	二维、三维模型功能测试用例	测试通过	18	系统管理功能测试用例	测试通过

表 2 系统全部测试用例执行情况统计表

系统测试用例总数		220	
测试时间		2019 年 11 月—2019 年 12 月	
系统执行测试用例总数	220	通过测试用例总数	220
		未通过测试用例总数	0
部分执行测试用例总数	0	未通过测试用例总数	0
未执行测试用例总数	0		
测试结论	系统所有功能测试用例全部通过测试, 系统功能符合设计要求		

该系统在实际应用中发挥了重要作用, 可为其他领域的环境与设备健康监测管理提供一种技术手段, 具有一定的实用性和应用前景。

参考文献:

[1] 陈 联, 赵 澜, 孙冬花, 等. 航天器推进剂泄漏检测技术研究发展 [J]. 真空与低温, 2017, 23 (3): 125-130.

[2] 郝 龙, 徐 光, 赵 全, 等. 基于 ZigBee 技术的推进剂泄漏监测报警系统的设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2019, 42 (7): 139-143.

[3] 丛继信, 王 力, 张光友. 液体推进剂职业中毒风险评价及防护对策研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 9 (7): 40-45.

[4] 潘光添, 林建斌, 梁伟玲, 等. 基于 B/S 的医疗器械自主采购与评审系统设计与应用 [J]. 医疗卫生装备, 2019, 42 (7): 139-143.

[5] 杨朝旭, 段成龙, 张晶晶, 等. 基于 CALPUFF 大气扩散模型研究与应用进展 [J]. 广州化工, 2018, 46 (3): 20-22.