

引用格式:陈伟庆,陈良超,何兴,等.炼化装置腐蚀监控分析系统设计与应用[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(6):56-63.

CHEN WeiQing, CHEN LiangChao, HE Xing, et al. Design of a corrosion monitoring and analysis system for use in refinery units[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019, 46(6): 56-63.

炼化装置腐蚀监控分析系统设计与应用

陈伟庆¹ 陈良超^{1*} 何 兴² 胡海兰² 赵 琳² 赵彦龙²

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 兰州石化公司研究院 材料防腐研究所, 兰州 730000)

摘 要: 为了全面、实时掌握生产系统中的腐蚀状况,了解腐蚀因素,针对炼化装置的腐蚀现状,通过对炼化厂现有装置中的物料化学分析、设备的定点测厚及在线监测等数据进行综合管理和评定,设计并开发了一套具有腐蚀预警、剩余寿命趋势分析及报警管理等功能的一体化管控软件,实现了炼油厂装置的腐蚀状况监控和监测数据的集成和管理。

关键词: 腐蚀监控; 系统开发; 腐蚀预警; 趋势分析

中图分类号: TG172 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.06.009

引 言

随着进口原油量的剧增,高硫高酸原油的炼制在国内炼化厂的生产中占比不断攀升,因此劣质原油对炼化装置的腐蚀以及由此产生的对产品质量和企业经济效益的负面影响成为急需解决的问题。为有效识别和控制腐蚀问题,保障设备安全稳定运行,学者们开展了大量相关研究。陈凤琴^[1]通过对电阻探针的腐蚀监测技术的研究,指出了在线腐蚀监测系统应用的必要性。李杰等^[2]在普光气田中对天然气净化装置建立了腐蚀监测系统,采用电感探针间接监测装置腐蚀情况;段汝娇等^[3]针对特定管道开发了基于电指纹腐蚀监测(FSM)的管道腐蚀监测技术,实现了一定情况下的管道腐蚀监控;陈轩等^[4]建立了一套集部分设备、管线基础数据信息及各类数据处理功能于一体的腐蚀与防护系统,实现了对所检部分设备基本的腐蚀分析、评估预测及常规评价整合。

然而以上检测系统主要针对个别装置进行监测

或管理,缺乏对于整个炼化厂的全面监控能力^[5-7]。为此,本文针对厂区内所有炼化装置建立了综合性的腐蚀监控分析系统,设计了一套独立的运行架构,通过该系统配套的实施流程,能够实现化学分析、定点测厚、在线监测、数据审核和储存以及各类检测报告和分析数据的导出等功能。本文系统既可以对企业中具体装置的腐蚀关键数据进行采集、监控、管理和分析,又可以将整个工厂(分公司)所有装置的采集数据、分析报告等汇总形成完整的数据库,并能通过层层上传进入中石油总部数据库,便于各级监测和管理人员进行全面监控和管理。中石油某公司炼油厂的试运行结果表明,本文系统能够满足炼化企业不同层级的腐蚀状况动态管理需求。

1 腐蚀监控系统设计

1.1 运行架构

本文系统的网络架构主体层级分为 5 级,从下至上依次为人工级(操作人员)、装置级、车间级、公司级和企业级。各层级有不同分工。人工级主要负责化学分析数据取样和人工定点测厚;装置级主要负责收集所有来自人工级的数据以及在线监测所得实时数据,并通过相关接口传输至各车间总服务器;各车间汇总所有监测数据后统一传输至各分公司;分公司筛选总部所需数据,汇总并发送至企业总部。5 个层级的有机统一形成整套数据传输的运行架构,具体流程如图 1 所示。

收稿日期: 2019-03-05

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发(2016D-2301)

第一作者: 男,1993 年生,硕士生

* 通信联系人

E-mail: 15001257838@163.com

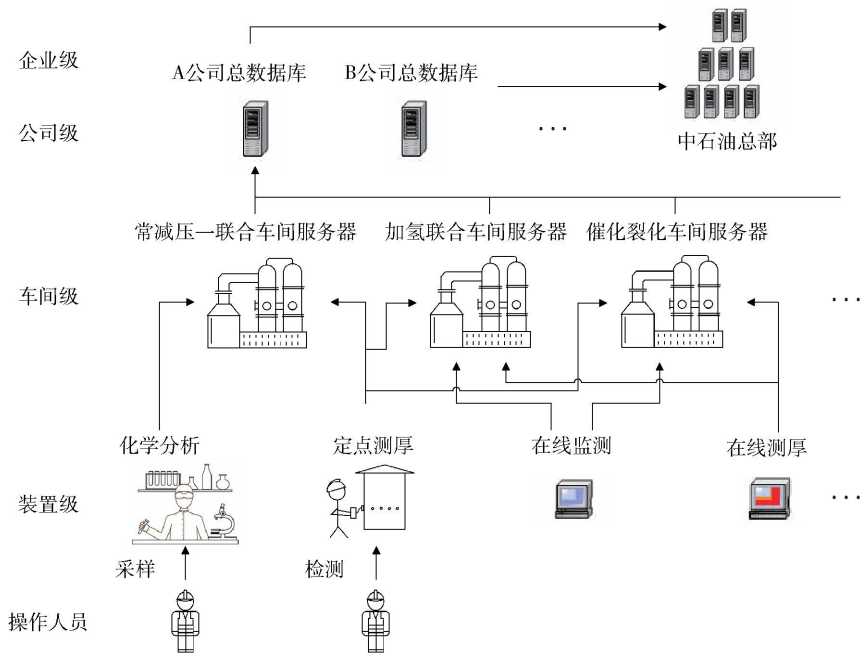


图 1 腐蚀监测系统平台数据运行架构

Fig. 1 Data operation architecture of the corrosion monitoring system platform

1.2 数据审核

为保证获取数据的可靠性和完整性,系统中设立了一套独立的审核流程,如图 2 所示。具体步骤如下:①由数据采集人员进行数据采集和相关检测并将数据上传至系统;②由审核人员对包括化学分析数据、定点测厚数据、在线监测数据等在内的上传数据进行层层审核,确认数据可靠无误后上传至各装置总数据库,再由系统预设的阈值进行甄别,录入内容为设备监测信息表中包含的全部项目(包括设备管线基础信息、腐蚀测点状态统计、腐蚀速率分析、腐蚀预警情况等),为排除仪器仪表、环境、人为等因素可能造成的误差,要求检测数据充分、检测点具体,以确保数据的实时性、真实性和有效性;③数据分析完成后由装置负责人上传至车间数据库;④车间负责人再次审核数据,审核通过后上传至厂级数据库;⑤最后由厂级负责人将整个公司的数据上传至中国石油总部。

1.3 主要功能模块

1.3.1 系统功能模块

系统主体由化学分析、定点测厚、在线监测三大核心模块组成,同时还兼有监测点管理、管道趋势分析、剩余寿命预测及腐蚀预警等辅助分析模块,具体功能层级如图 3 所示。

1.3.2 化学分析模块

本模块主要对设备中物料的化学成分分析数据

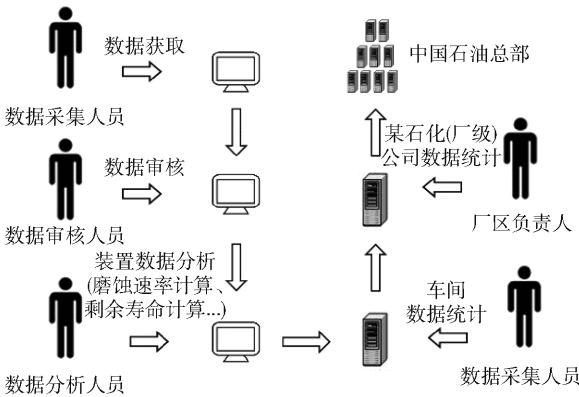


图 2 数据审核流程

Fig. 2 Data audit process

进行汇总和管理,具体流程如图 4 所示。系统根据所检设备物料中各成分含量判断该物料是否会对设备产生腐蚀,通过对设备中物料的 pH 值、 NH_4^- 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 S 、 Cl^- 等的含量(mg/L)以及检测样品的性质(肉眼可见的颜色以及浑浊程度)进行检测,形成完整的化学分析数据表,表内数据一经导入,系统会自动根据预先设定的阈值(Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 含量大于 3 mg/L 或 $7 < \text{pH} < 9.5$)进行判断,存在腐蚀可能的测量数据会作为警醒而被标记显示,以直观反映某日某设备的腐蚀情况。

本模块主要对设备中物料各成份含量、 pH 值进行直接监控,根据监控数据实时反映设备的腐蚀情况,当监测数据超过阈值时启动报警,辅助人工监

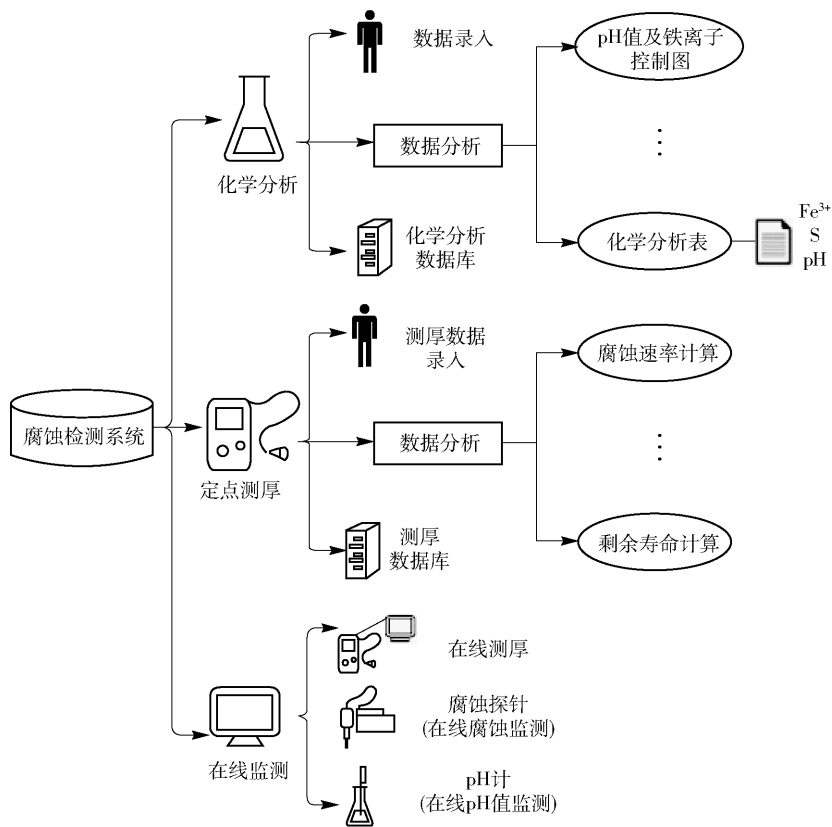


图3 系统功能模块

Fig. 3 Functional modules of the system

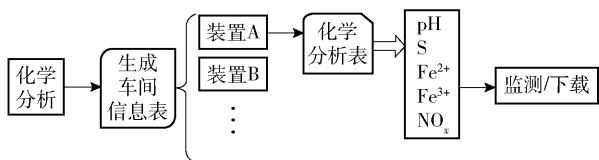


图4 化学分析模块运行流程

Fig. 4 Running process of the chemical analysis module

控。支持设备化学分析数据的批量上传、系统数据及预设化学分析表模板的下载;支持批量检测数据的直接导入,数据经人工或系统阈值审核通过后进入数据库;支持数据导出和保存所有上传数据,辅助进行大数据分析。

1.3.3 定点测厚模块

定点测厚模块主要以国内外炼化企业通用的超声测厚技术检测设备壁厚^[7-8],然后将测厚数据录入设备管线信息表,包括隶属装置、隶属管线、管线名称等,测厚部位的基本信息包括测厚部位ID、测厚频次、初始壁厚等。在管线信息表中能够查看到任一管线的信息,通过该管线的腐蚀速率计算页面可查看管线的理论腐蚀等级(用不同颜色表示),同时系统的腐蚀月报功能为监测各个管线提供了数据支持。腐蚀速率及剩余寿命计算公式如下。

短期腐蚀速率

$$V_s = \frac{d_p - d_a}{t_s} \quad (1)$$

式中: V_s 为短期腐蚀速率, mm/a; d_p 为某一位置的前一次测量厚度, mm; d_a 为同一位置的本次实测厚度, mm; t_s 为两次间隔时长, a。

长期腐蚀速率

$$V_l = \frac{d_i - d_a}{t_l} \quad (2)$$

式中: V_l 为长期腐蚀速率, mm/a; d_i 为原始壁厚, mm; t_l 为 d_i 与 d_a 之间的间隔时长, a。

平均腐蚀速率

$$V' = \frac{\Delta d}{t_l - t_s} \quad (3)$$

式中: V' 为平均腐蚀速率, mm/a; $\Delta d = d_i - d_a$ 为腐蚀减薄量, mm。

剩余寿命

$$t_R = \frac{d_a - d_r}{V'} \quad (4)$$

式中: t_R 为剩余寿命, a; d_r 为要求壁厚(或极限壁厚), mm。

极限壁厚由以下 3 种方法计算,然后系统取其
中最大者保留为有效值。

①按 $D_0/150$ 确定的管线极限壁厚(D_0 为管外

径,mm)。

②符合表 1 的规定最小壁厚(美国 ASME 标准
值)。

表 1 炼化厂常用类型管线的规定最小壁厚

Table 1 Minimum wall thickness specifications for common types of pipelines in refineries

材料	不同公称直径管子的最小壁厚/mm				
	≤DN 50	DN 51 ~ DN 100	DN 101 ~ DN 200	DN 201 ~ DN 450	≥DN 500
碳钢、低合金钢 STD(标准壁厚管)	3.9	6.1	8.2	9.6	9.6
高合金钢、奥氏体不锈钢 5S/10S/40S(不锈钢管道壁厚系列)	1.7/2.8/3.9	2.2/3.1/6.1	2.8/3.8/8.2	4.2/4.8/9.6	5.6/6.4/-

③由公式(5)确定的计算厚度

$$d_s = \frac{p_c D_0}{2([\sigma]'\phi + p_c Y)}$$

(5)

式中, d_s 为计算壁厚(或极限壁厚),mm; p_c 为设计
压力,MPa; $[\sigma]'$ 为设计温度下的材料许用应力; ϕ
为焊缝系数,查表可得; Y 为温度对公式(5)的修正
系数, $d_s < D_0/6$ 时,由查表可得,反之则根据断裂理
论、疲劳、热应力及材料特性等因素综合考虑确定。

图 5 为定点测厚模块的运行流程。

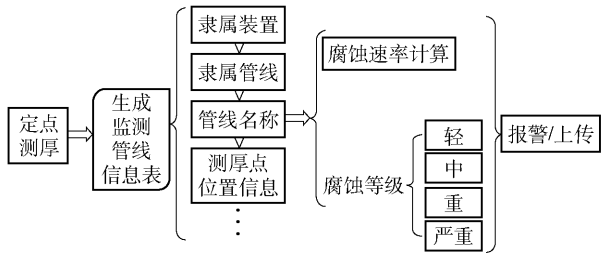


图 5 定点测厚模块运行流程

Fig. 5 Use flow of the fixed-point thickness measurement module

1.3.4 在线监测模块

本模块主要功能是利用电感探针直接进行在线
壁厚腐蚀速率测量,系统在每日的固定时刻进行数
据采集并取其平均值作为当日腐蚀速率,间隔 24 h
后进行下一次数据采集,每隔 1 个月自动计算一次
短期腐蚀速率,以便及时发现设备腐蚀问题。

在线测厚是在线监测模块的主要组成部分,其
功能与定点测厚类似,主要计算公式如下。

长期腐蚀速率

$$V_l = \frac{d_i - d_a}{T_a - T_u}$$

(6)

式中, T_a 为某次采集数据的时间点,a; T_u 为管段开
始投用的具体时间点,a。

短期腐蚀速率

$$V_s = \frac{d_{i'} - d_i}{\frac{1}{12}}$$

(7)

式中, $d_{i'}$ 为某位置的上月某日测量厚度,mm; d_i 为同
位置的本月同日测量厚度,mm。

2 系统实现及应用

腐蚀监测系统自投入应用以来的实践表明,系
统能满足设计要求和企业需求,通过将炼化厂现有
装置的化学分析、定点测厚、在线监测等数据进行综
合管理和评定,达到了实时监控全厂腐蚀状况的目
的。当前系统已部署于中石油腐蚀与防护中心,经
过半年时间的系统调试以及数据的集成和导入,已
实现 25 家分公司安装的 900 多个在线监测腐蚀速
率探针、89 个 pH 探针以及 320 个在线测厚监测点
的数据采集和监测任务;已收集兰州石化定点测厚
18 000 多个监测点数据和 100 多个部位的化学分析
检测数据;在系统应用过程中,保持了在线数据的稳
定采集,能同时支持大量用户的并发使用。结合试
运行过程中的具体案例,系统在实际应用中主要实
现了以下三方面功能。

2.1 监测点统计与管理

监测点统计与管理主要包括化学分析和在线监
测两种分级运行过程。图 6 为某石化 500 万 t/a 常
减压装置中物料的化学分析和设备在线监测分级运
行示意图,通过分级运行模式能够查看车间信息、装
置信息、物料情况以及具体监测点位置等信息。根
据功能需求的不同,化学分析功能分为公司级、车间
级、装置级以及化学分析级共 4 级;定点测厚和在线
监测均分为 5 级,其中第 4 级为管线级,第 5 级为探
针级。利用本功能实现了厂区对石化企业各个定点
监测点的统计和具体划分,不仅减轻了相关监测的
工作量,监测数据也一目了然。本系统将在中国石

油的各个石化分公司炼油厂推广应用,以满足中国石油总部同时对多个石化公司数据进行综合管理的需求,包括监测点总量、公司名称、相应公司接入的 IP 地址、各石化厂监测点的运行状况以及各装置监测情况的汇总统计。

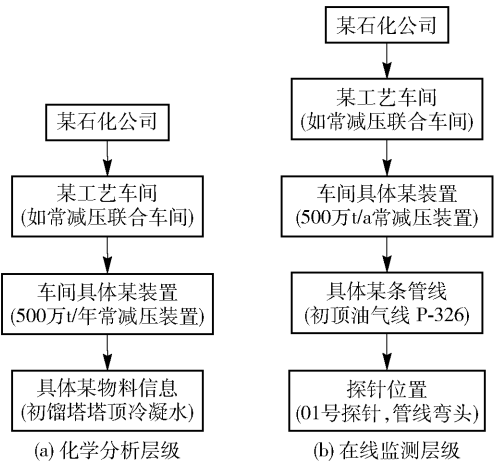


图6 化学分析层级和在线监测层级

Fig.6 Chemical analysis level and online monitoring level

2.2 趋势分析

趋势分析包括化学成分趋势图分析和定点测厚趋势图分析两部分。

化学成分趋势图分析将监测数据(图7)分析成图来直观反映腐蚀情况的各个关键成分(NH_4^- 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 S 、 Cl^- 等)含量的变化趋势及不同介质(如初顶塔塔顶冷凝水和常压塔塔顶冷凝水)pH值的变化趋势对比(图8),同时对不同车间不同装置的相关化学分析取样数据进行自动关联生成相关数据趋势图,便于监测设备内介质的各项化学物质含量,并对危险情况(关键成分超出阈值)进行及时

反馈。

定点测厚趋势图分析根据录入的数据自动筛选出每根管线不同部位不同测点的最小减薄点,筛选完成后自动关联生成最小减薄点与极限壁厚的对比柱状图,以便了解危险点的腐蚀减薄情况;同时系统生成管线内部测厚部位极限壁厚与壁厚减薄曲线图,便于总结所有测点壁厚变化情况。图9为某石化常减压车间500万t/a常减压装置初顶油气线(P-064)的各个关键部位分析图,通过分析对比发现弯头和三通部分最小壁厚已低于设计极限壁厚,需进行更换处理。图10为初顶油气线(P-064)综合分析趋势图,通过对某石化常减压车间500万t/a常减压装置初顶油气线(P-064)进行各个关键位置的综合分析对比,直观得出了腐蚀失效时间轴,再根据趋势图分析可知该管线应在使用2个月后进行重点监测。

2.3 报警管理

报警管理包括化学分析报警、定点测厚报警及在线监测报警3部分。化学分析报警模块反映自系统监测以来各装置所有存在问题的报警值,包括日期及 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 含量等相关化学分析参数值,存在腐蚀可能的数据需进行统一标记和预警提示。在线监测报警与定点测厚报警属于同类,因此仅选取定点测厚报警应用情况进行分析。定点测厚报警根据腐蚀情况分为4级,由不同颜色表示(具体见1.3.3),剩余寿命从1级到4级依次递减;3级以内的报警由系统自动提示,4级报警由系统在自动提示的同时将报警情况保留在工作日志中,但解除报警需要人工操作;报警等级主要由腐蚀速率和剩余



图7 某石化常减压车间500万t/a常减压装置初馏塔塔顶冷凝水化学监测数据

Fig.7 Monitoring data of the condensate at the top of the primary distillation column of the 5 million tons/year atmospheric and vacuum distillation unit in X petrochemical atmospheric and vacuum pressure workshop

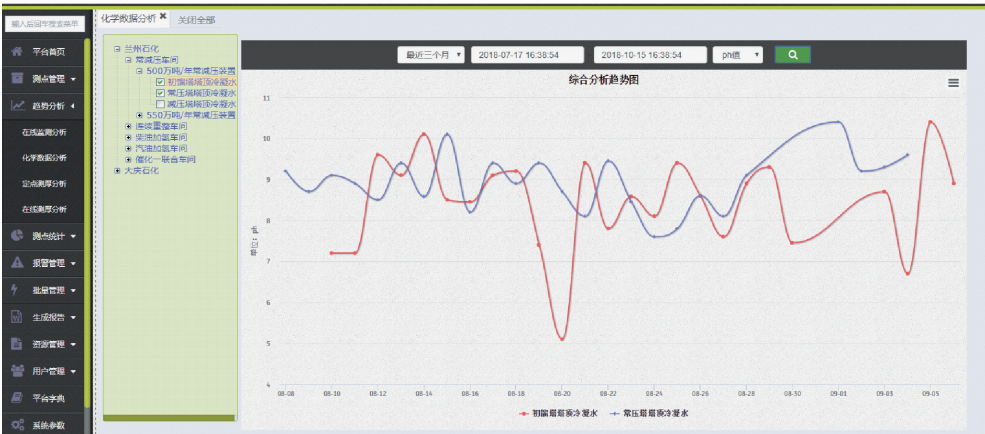


图 8 初馏塔塔顶冷凝水与常压塔塔顶冷凝水化学数据趋势分析

Fig. 8 Analysis of chemical data for the condensate at the top of the primary distillation column and the atmospheric tower

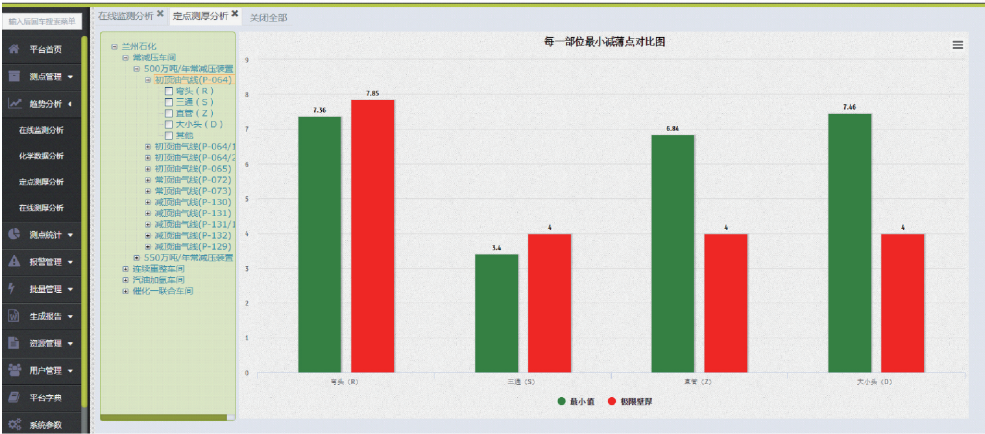


图 9 初顶油气线(P-064)最小减薄点与极限壁厚对比

Fig. 9 Comparison of the minimum thinning point and ultimate wall thickness for the initial top oil and gas line (P-064)

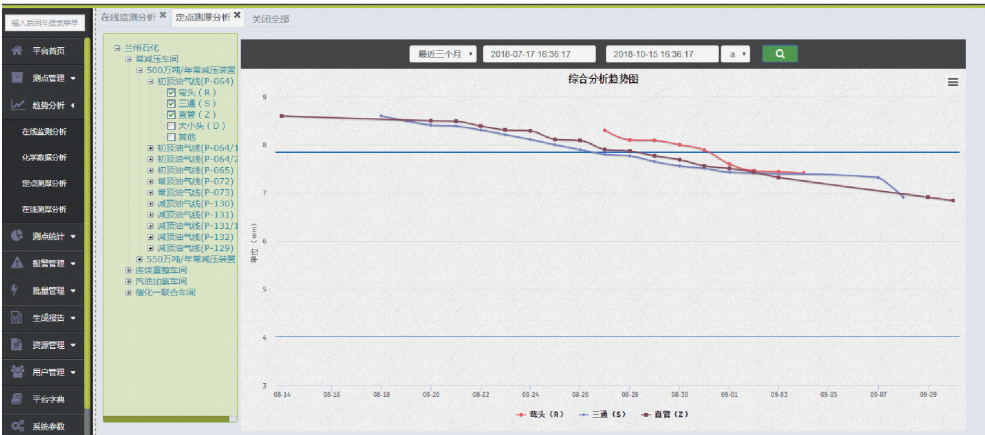


图 10 初顶油气线(P-064)综合趋势分析

Fig. 10 Comprehensive analysis of the initial top oil and gas line (P-064)

寿命决定,二者为并集关系,即只要一方达到阈值即可触发报警。

企业根据趋势分析进行报警值预设,各类实时

监测数据达到报警预设值时即触发相应报警,同时生成报警日志(图 11),以方便人员查阅,也为防腐措施的制定提供数据支持。同时,通过本系统面向

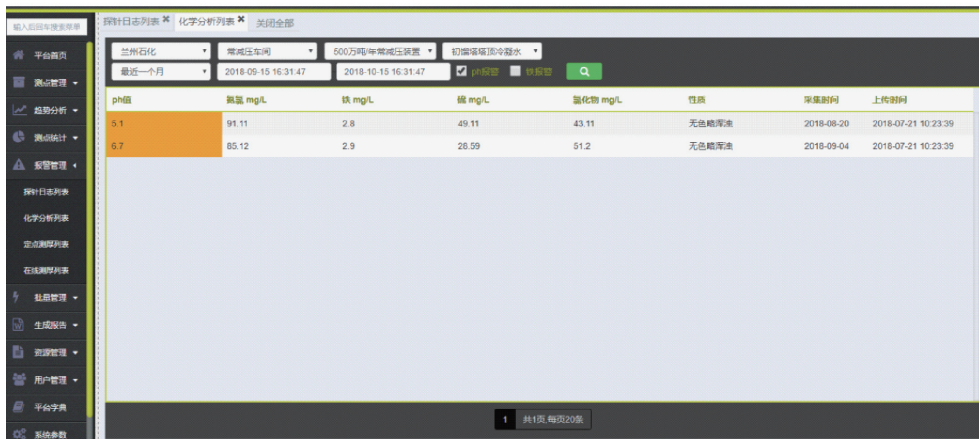


图 11 初馏塔塔顶冷凝水化学数据分析 pH 值报警日志

Fig. 11 Analysis of chemical data for the pH value alarm log for the condensate at the top of the primary distillation column

中石油各分公司进行全面数据采集和系统资源数据库的建立,能够为将来大数据分析奠定基础^[9-10]。

3 结论

(1) 本文腐蚀监测系统基本涵盖了炼化装置腐蚀监测所需要的所有功能,实现了集数据审核、数据储存、腐蚀预警、剩余寿命预测等多项功能于一体的综合化管理目标,已建立了较为完善的炼化装置腐蚀信息采集平台与数据库集成系统。

(2) 本系统目前已服役于中石油腐蚀与防护中心,实现了多个炼化厂装置的腐蚀监控分析,同时结合安装的在线监测腐蚀速率探针、pH 探针以及设置的在线测厚监测点,能够稳定地进行数据采集和监测;已收集兰州石化大量的定点测厚数据和化学分析检测数据,实现了同一系统的多用户操作。

参考文献:

- [1] 陈凤琴. 自然环境腐蚀监测领域电阻探针的设计与应用[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学(深圳), 2017.
CHEN F Q. Design and application of resistance probe in natural environment corrosion monitoring [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology (Shenzhen), 2017. (in Chinese)
- [2] 李杰, 李煌, 王利波, 等. 在线腐蚀监测在高含硫天然气净化厂的应用及优化[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2018, 35(1): 38-40.
LI J, LI H, WANG L B, et al. Application and optimization of on-line corrosion monitoring in natural gas purification plant with high sulfur content [J]. Corrosion and Protection in Petrochemical Industry, 2018, 35(1): 38-40. (in Chinese)

- [3] 段汝娇, 张勇, 何仁洋, 等. 油气管道内腐蚀外监测系统软件设计与实现[J]. 中国特种设备安全, 2017, 33(8): 35-40.

DUAN R J, ZHANG Y, HE R Y, et al. Design and implementation of software for internal and external corrosion monitoring system of oil and gas pipeline [J]. China Special Equipment Safety, 2017, 33(8): 35-40. (in Chinese)

- [4] 陈轩, 冯丹, 陈阵, 等. 腐蚀监测系统在炼油装置的建立及应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(4): 379-383.

CHEN X, FENG D, CHEN Z, et al. Establishment and application of corrosion monitoring system in refinery unit [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(4): 379-383. (in Chinese)

- [5] 洪政甫, 文学, 吴巍, 等. 油气管道的腐蚀监测、检测及安全评估[J]. 全面腐蚀控制, 2004(5): 34-36.

HONG Z P, WEN X, WU W, et al. Corrosion monitoring, detection and safety assessment of oil and gas pipelines [J]. Total Corrosion Control, 2004(5): 34-36. (in Chinese)

- [6] 刘杰, 付裕, 高海宾, 等. 一种新型管道腐蚀监测技术及应用[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(8): 19-22, 82.

LIU J, FU Y, GAO H B, et al. A new pipeline corrosion monitoring technology and its application [J]. Total Corrosion Control, 2016, 30(8): 19-22, 82. (in Chinese)

- [7] 李杰, 逯辰源, 李军强, 等. 在线腐蚀监测系统在高含硫天然气净化装置中的建设及应用[J]. 化学工程与装备, 2014(4): 87-89.

LI J, LU C Y, LI J Q, et al. Construction and application of on-line corrosion monitoring system in natural gas

- purification unit with high sulfur content [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2014(4): 87–89. (in Chinese)
- [8] LIU W C, SONG D Q, WEI Y, et al. Application of acoustic emission technology in fixed thickness measurement technology[C] // 2014 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing. Chengdu, 2014.
- [9] DU J Y, WANG L C. Research on corrosion monitoring system of grounding grid based on cloud platform[C] // The 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation. Hefei, 2017.
- [10] ZAFAR S, HUSSAIN R, HUSSAIN F, et al. Interplay between big spectrum data and mobile internet of things: current solutions and future challenges [J]. Computer Networks, 2019, 163: 106879.

Design of a corrosion monitoring and analysis system for use in refinery units

CHEN WeiQing¹ CHEN LiangChao^{1*} HE Xing² HU HaiLan² ZHAO Lin² ZHAO YanLong²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Department of Material Antisepsis, Research Institute of Lanzhou Petrochemical Company, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A corrosion monitoring data network has been designed and used to develop a corrosion monitoring and analysis system platform for refinery units, in order to monitor the corrosion status of the production system and follow the corrosion factors in real time. The monitoring system evaluates the data from chemical analysis of the materials in the existing equipment of the refinery, fixed-point thickness measurementss, and on-line monitoring of the equipment. An integrated management and control software platform with the functions of corrosion warning, residual life trend analysis and alarm management has been obtained. Real-time monitoring and unified management of corrosion status and uploaded data has been accomplished in a refinery in the Lanzhou Petrochemical Company of PetroChina.

Key words: corrosion monitoring; system development; corrosion early warning; trend analysis

(责任编辑:汪 琴)