

腐蚀监测系统在飞机上的应用

薛蒙¹, 张登², 张幸²

(1. 海军装备部装备采购中心, 北京 100071; 2. 中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448035)

摘要: 介绍了在飞机上应用的腐蚀监测系统的工作原理、监测功能和使用模式, 总结了国外腐蚀监测系统在飞机上的应用现状, 指出了腐蚀监测系统研发及应用的关键技术, 并提出了该腐蚀监测系统研发及应用的发展趋势。

关键词: 腐蚀监测系统; 飞机; 多电极耦合传感器

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.06.016

中图分类号: TG174.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)06-0095-05

Application of Corrosion Monitor Systems in Aircraft

XUE Meng¹, ZHANG Deng², ZHANG Xing²

(1. Equipment Procurement Center of the Naval Armaments Department, Beijing 100071, China;

2. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: The working theory, monitoring functions and using methods of corrosion monitor systems for aircraft applications were introduced, the aircraft applications of corrosion monitor systems in foreign countries were summarized, the key technologies for development and application of corrosion monitor systems were pointed out, and the development trends of the research and application of corrosion systems for aircraft applications were put forward.

KEY WORDS: corrosion monitor systems; aircraft; multi-electrode coupling sensor

在过去的十几年, 腐蚀监测技术随着飞机维护费用的增高和飞机安全可靠性的提高显得越来越重要^[1]。2002年美国政府的统计显示, 每年航空装备因腐蚀损失10亿美元^[2]。传统的飞机维护费时费力, 包括机体结构的拆卸、手工检查部件和重装机体结构。虽然一般检查的结果都是无损伤, 但是出于安全考虑, 频繁的检测还是必须的。腐蚀监测技术

的出现可以大大减少目前繁琐的检测程序, 使得日常检测仅仅只需要关注几个特定的易腐蚀部位。现有的无损检测技术具有局限性, 许多情况下, 只有在结构发生了严重腐蚀或裂纹的情况下, 无损检测设备才能识别, 而此时结构可能已经需要更换。另外, 腐蚀对飞机安全的影响也很大, 飞机结构的腐蚀主要是电化学腐蚀, 腐蚀的种类和形式多样, 有均匀腐蚀、

收稿日期: 2014-08-28; 修订日期: 2014-10-14

Received: 2014-08-28; Revised: 2014-10-14

作者简介: 薛蒙(1967—), 男, 山东人, 硕士, 高级工程师, 主要从事腐蚀监测技术、海军装备采购等方面的工作。

Biography: XUE Meng (1967—), Male, from Shandong, Master, Senior engineer, Research focus: corrosion monitoring technology, marine equipment procurement and other aspects of the work.

晶间腐蚀、剥蚀、点蚀、磨蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳等^[3],对飞机防护体系有直接破坏作用^[4],甚至直接影响飞机结构的强度及寿命^[5-8]。为此,需要腐蚀监测技术在飞机上提供在线的早期腐蚀监测。目前国外一般采用腐蚀监测系统来实现飞机结构腐蚀的在线监测,可以及时监测腐蚀的发生、扩展速率等,以便尽早地发现、诊断及处理腐蚀损伤,可最大限度地降低腐蚀损坏所引起的代价。国内在飞机腐蚀监测方面尚未应用,在石油、化工等行业已有了一些较成熟的应用^[9-12]。

1 飞机结构腐蚀监测系统的工作原理和监测功能

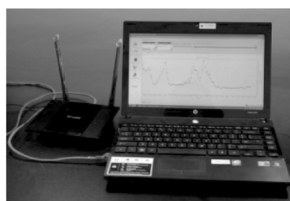
飞机上应用的腐蚀监测系统由探头系统、腐蚀自动监测仪、腐蚀监测数据处理系统组成,如图 1 所示。腐蚀监测系统的工作模式如图 2 所示,将腐蚀自动监测仪、探头系统安置在飞机结构密闭或不宜检查的区域,对环境要素、涂层老化率、基体腐蚀速率等进行测量及监测。腐蚀自动监测仪具有临时存储数据和无线传输功能,飞机在执行任务时关闭无线传输装置,等飞机执行完任务地面停放时,根据需要,可打开无线传输装置通过无线传输方式或通过端口下载方式获得腐蚀数据,传入腐蚀监控数据处理系统中对腐蚀数据进行处理与分析。飞机结构腐蚀监测系统可监测温度、湿度、pH 值、氯离子浓度、环境介质腐蚀性、涂层老化率和基体腐蚀速率等。



a 探头系统



b 腐蚀自动监测仪



c 腐蚀监测数据处理系统

图 1 腐蚀监测系统

Fig. 1 Corrosion monitor system



图 2 腐蚀监测系统工作模式原理

Fig. 2 The working pattern principle of the corrosion monitor system

在涂层老化率监测技术方面,主要基于电化学交流阻抗法(EIS)^[13],将涂层涂覆在监测探头表面,如图 3 所示。对防腐涂层体系施加不同频率的激励信号,可将带防腐涂层结构的电化学腐蚀电池通过电子元器件模拟出来,如图 4 所示。根据电化学原理,就可以测试出防腐涂层的电阻 R_p 等电化学特性,测量获得的电荷转移或极化的阻力与被监控表面的腐蚀速率成正比,以此表征防腐涂层的性能。在腐蚀速率监测方面,主要基于多电极耦合传感器方法^[14],不需要外加激励以及溶液环境,它将监测探头分解为多个耦合电极,各个耦合电极在使用环境下形成正极或负极,腐蚀电流在各电极中进行传递,通过零电阻将各电极中的电流进行测试,给出腐蚀电流,实现腐蚀速率的测试,如图 5 所示。

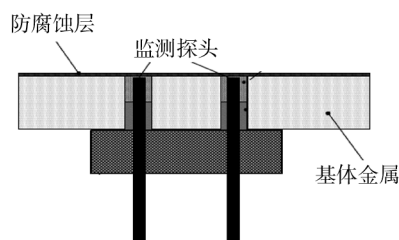


图 3 防腐涂层电化学腐蚀监测示意

Fig. 3 The sketch of electrochemical corrosion monitoring for anti-corrosion coating

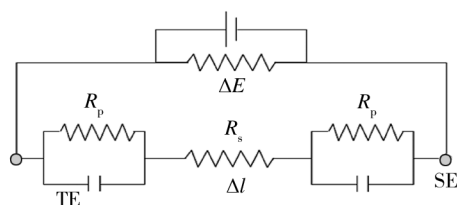


图 4 典型的 EIS 模拟电路

Fig. 4 Typical EIS analog circuit

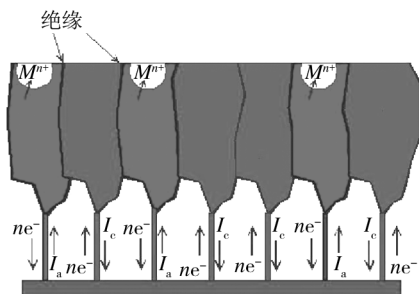


图 5 多电极耦合传感器原理示意

Fig 5 The schematic diagram of multi-electrode coupling sensor

2 国外发展应用状况

国外对飞机结构腐蚀监测技术非常重视,近 10 年来对新型腐蚀监测系统的研制投入力度较大,实现了较大的技术突破,研制的基于电化学的腐蚀监测系统实现了较大的技术突破,在军、民用飞机上已经实现了工程应用。研究的新型腐蚀监测系统的功能已经扩展至可监测包括温度、湿度、pH 值、氯离子浓度、环境介质腐蚀性、涂层阻抗和基体腐蚀速率等^[15]。

腐蚀监测技术在美国、澳大利亚、英国和加拿大等国已得到应用。美国 LUNA 公司开发了一种用于飞机的腐蚀监测系统,如图 6 所示。一般将探头系统和腐蚀自动监测仪在飞机上进行网络布置,主要布置在易腐蚀区域和关键结构件部位,从而对飞机结构腐蚀状态进行有效监测。美国 P-3 反潜巡逻机的腐蚀监测布置如图 7 所示,共选择了 7 个部位安装腐蚀监测探头系统和腐蚀自动监测仪,分别是平尾、中机身、机翼与机身连接处、发动机短舱、前机身、驾驶舱、机翼。

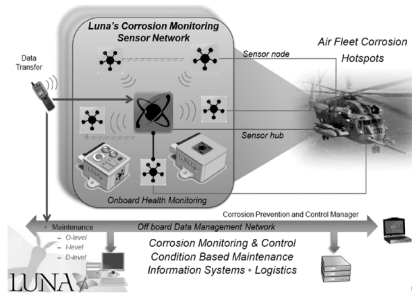


图 6 LUNA 开发的腐蚀监控系统

Fig.6 Corrosion monitor system developed by LUNA

美国巴特尔研究所试验中心研制的腐蚀监测系

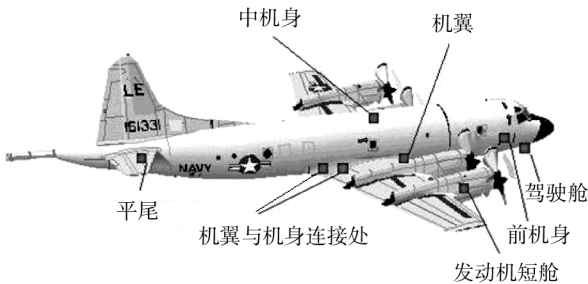


图 7 美国 P-3 飞机腐蚀监测系统安装部位

Fig.7 Corrosion monitor system installation sites of the US P-3 aircraft

统可以通过测量厚度来表征腐蚀程度,并将成果用于在 CP-140 飞机上。如图 8 所示,不同部位的传感器将数据传输至处理中心,进行数据处理后得到各部位的腐蚀速率。该研究所研制的一种用于军用直升机的腐蚀监测系统如图 9 所示,该腐蚀监测系统可以考察环境参数对腐蚀速率的影响,从而确定清洗频率、评价缓蚀剂和保护膜效果等。其成果已用于 UH-60,CH-47,OH-58 和 AH-64D 型号直升机上(如图 10 所示)。

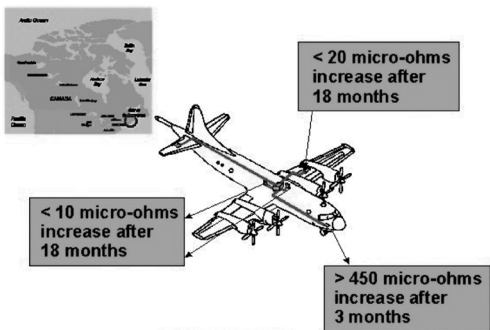


图 8 CP-140 各部位腐蚀速率

Fig.8 Corrosion rates at different sites of CP-140

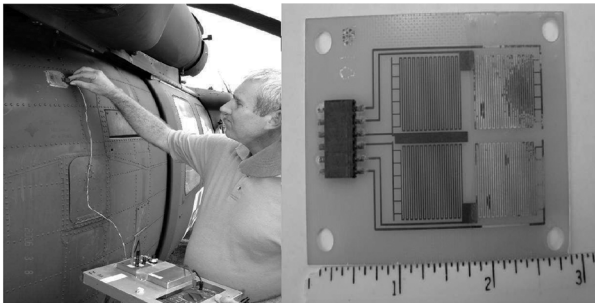


图 9 用于军用直升机的腐蚀监测系统

Fig.9 Corrosion monitor system used on military helicopter

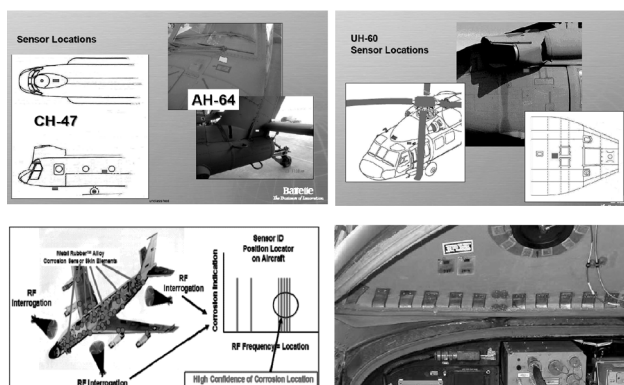


图 10 安置在直升机上的腐蚀监测系统

Fig. 10 Corrosion monitor system installed on helicopter

美国海洋警卫队在 HC-130, UH-60, HU-25 飞机上安装了几十个薄片式腐蚀监测探头, 以监控结构的腐蚀速率及评定使用维护措施的有效性。美国海军将腐蚀监测系统应用于 C-130, F-16, H-60 等飞机上, 采集了 3~5 年的腐蚀环境或腐蚀速率数据, 通过监测系统对清洗周期、缓蚀剂和防护体系的性能进行了在线评价。C-130 飞机在美国代顿海洋环境下服役时腐蚀监测系统的输出参数与飞机清洗周期的关系曲线如图 11 所示。F-16D 飞机上传感器输出参数与安置时间的关系曲线如图 12 所示。由两曲线图可知, 可根据腐蚀监测传感器的输出参数判断飞机腐蚀的严重程度, 以提供最佳维修时间。

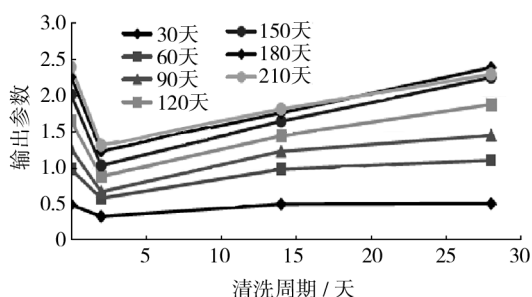


图 11 C-130 飞机上腐蚀监测传感器输出参数与清洗周期的关系曲线

Fig. 11 Relationship between the output parameters and wash intervals of the corrosion monitoring sensor on C-130 aircraft

目前国外使用腐蚀监测系统重点可以实现以下目的: 评定防护体系在服役环境下的适应性; 评定缓蚀剂/防腐剂的性能; 确定飞机结构的清洗周期; 实现环境要素的监测及环境严酷性的评定; 在线监测

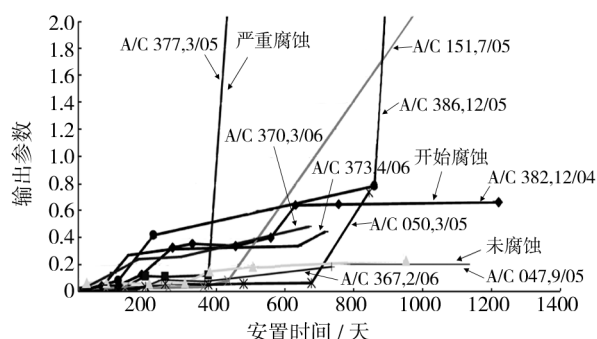


图 12 F-16D 飞机上腐蚀监测传感器输出参数与时间关系曲线

Fig. 12 Relationship between the output parameters and time of the corrosion monitoring sensor on F-16D aircraft

结构的腐蚀速率(尤其是不易检查区域); 为视情维修(CBM)提供参考, 据此确定最佳的维修时间及维修方案, 避免过早维修导致人力、物力的增加, 及维修滞后导致的结构性能下降, 甚至产生严重后果; 节省腐蚀维修成本 20% 以上。

3 飞机结构腐蚀监测系统的发展趋势

随着电化学监测技术的发展, 基于电化学原理的腐蚀监测系统在腐蚀监测中体现了其特有的优势。电化学腐蚀监测系统检测灵敏度高, 可实现防护体系、基体金属的早期腐蚀监控, 传感器体积小, 耐环境, 可进行无线监测, 国外已在多个型号的飞机上使用。

目前, 在航空、民用工业领域, 国内电化学腐蚀监测商品化仪器还很少, 针对飞机结构腐蚀损伤监测的电化学传感器尚未有所闻, 在国内仍属于空白状态。制约飞机结构腐蚀监测系统研发及应用的关键技术主要体现在以下 3 个方面。

1) 低导电性环境下高阻涂层的阻抗精密测量技术。飞机结构一般处于盐雾、湿热等低导电性潮湿空气环境下, 传统电化学腐蚀的测量技术测量精度低、抗干扰能力差, 不适于高阻涂层的阻抗衰变监测, 是飞机结构腐蚀监测系统研发的制约因素之一, 研究低导电性环境下高阻涂层的阻抗精密测量技术是今后的发展趋势。

2) 腐蚀特征量与监测系统信号的映射关系建立。基于电化学原理, 准确建立腐蚀特征量与腐蚀

监测系统输出信号的映射关系本身是一个难点,另外监测系统信号受外界环境如温度、湿度等的干扰。在腐蚀特征量与监测系统信号的映射关系建立过程中,需要修正环境所带来的影响,准确建立腐蚀特征量与监测系统信号的映射关系是提高腐蚀监测系统监测精度的发展趋势。

3) 涂层失效阈值分析技术。传统的涂层失效主要是通过外观(如剥落、粉化、起泡等)来定性评定,基于电化学原理的腐蚀监测系统可监测涂层老化率进行定量评定,涂层老化率与涂层含水率、涂层阻抗和涂层介电常数等表征量的关系及涂层老化率的表征形式是难点。建立涂层老化率分级标准时要与涂层外观一致,需要进行大量试验探索,研究涂层失效阈值分析技术也将成为今后的发展趋势。

4 结语

总之,研制新型低成本、高耐久性、小体积、高集成度、易于制造和使用的腐蚀监测系统;实现低电导率环境(盐雾、湿热、涂料介质等)下 pH 值、湿度、温度、氯离子浓度、基体腐蚀速率、涂层老化等的监测;通过腐蚀损伤监测评定材料、防护体系、缓蚀剂的耐腐蚀性能;逐步实现构件为单位的腐蚀损伤监测及控制体系;可靠布置机队的在线腐蚀监控网络;建立数据处理和信息反馈系统等,是当今国际上的发展趋势。

参考文献:

- [1] 吴荫顺. 金属腐蚀研究方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993.
- [2] WU Yin-shun. Method for the Research of Metal Corrosion [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1993.
- [3] FROMAN D A. "Annual Cost of Corrosion for Navy and Marine Corps Aviation Equipment" Logistics Management Institute(LMI)[R]. Report MEC70T3, 2008.
- [4] 中国特种飞行器研究所. 海军飞机结构腐蚀设计指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005.
- [5] China Special Vehicle Research Institute. Navy Aircraft Structure Corrosion Design Guide[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005.
- [6] 房振乾, 陈群志, 董兵, 等. 飞机结构表面涂层体系改进研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 102—107.
- [7] FANG Zhen-qian, CHEN Qun-zhi, DONG Bing, et al. Study on the Improvement of Aircraft Structure Surface Coating System[J]. Materiel Environmental Engineering, 2013, 10(5): 102—107.
- [8] 谭晓明, 金平, 蔡增杰, 等. 腐蚀损伤对典型铝合金结构疲劳寿命的影响研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 9—13.
- [9] TAN Xiao-ming, JIN Ping, CAI Zeng-jie, et al. Study on the Impact of the Typical Aluminum Alloy Structures Fatigue Life of Corrosion Damage[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 9—13.
- [10] 陈群志, 房振乾. 飞机结构日历寿命及腐蚀防护研究应关注的问题[J]. 环境装备工程, 2012, 9(6): 72—77.
- [11] CHEN Qun-zhi, FANG Zhen-qian. The Concern of the Calendar Life of Aircraft Structure and the Corrosion Protection Study[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 72—77.
- [12] 李旭东, 刘治国, 贾明明. 基于两参数 Weibull 模型的预腐蚀 2A12 铝合金材料裂纹萌生寿命评估[J]. 环境技术, 2013(5): 9—12.
- [13] LI Xu-dong, LIU Zhi-guo, JIA Ming-ming. Evaluation of Crack Initiation Life of Pre Corrosion of 2A12 Aluminum Alloy Based on Two Material Parameters Weibull Model [J]. Environmental Technology, 2013(5): 9—12.
- [14] 石舫, 李旭东, 李超, 等. LY12CZ 铝合金 EXCO 腐蚀损伤演化模型研究[J]. 环境技术, 2013(3): 7—10.
- [15] SHI Fang, LI Xu-dong, LI Chao, et al. Research on the Model of Damage Evolution of EXCO Corrosion of LY12CZ Aluminum Alloy[J]. Environmental Technology, 2013(3): 7—10.
- [16] 矿成承, 张黎明, 王晓猛. 在线腐蚀监测系统在常减压蒸馏装置的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2013, 31(2): 56—60.
- [17] KUANG Cheng-cheng, ZHANG Li-ming, WANG Xiao-meng. Application of Corrosion Monitoring System Online in Atmospheric and Vacuum Distillation Unit[J]. Corrosion and Protection in Petrochemical Industry, 2013, 31(2): 56—60.
- [18] 皮艳慧, 张哲, 何梦醒, 等. Microcor 腐蚀监测技术及其应用[J]. 管道技术与设备, 2013(5): 40—43.
- [19] PI Yan-hui, ZHANG Zhe, HE Meng-xing, et al. Microcor Corrosion Monitoring Technology and Its Application[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2013(5): 40—43.
- [20] 于金山, 郭军科, 卢立秋, 等. 钢筋混凝土电化学腐蚀监测技术应用与研究[J]. 东北电力技术, 2013(11): 34—38.

- mization Algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(8): 89—92.
- [9] 杨钟瑾. 核函数支持向量机[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(33): 1—6.
- YANG Zhong-jin. Kernel-based Support Vector Machines [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(33): 1—6.
- [10] 刘治国, 穆志韬, 金平. LY12CZ 腐蚀疲劳寿命的神经网络研究[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3): 24—27.
- LIU Zhi-guo, MU Zhi-tao, JIN Ping. Study of Corrosion Fatigue Life of LY12CZ Based on Artificial Neural Network [J]. Equipment Environment Engineering, 2008, 5(3): 24—27.
- [11] 刘成臣, 徐胜, 王浩伟, 等. 基于灰色模型和神经网络的铝合金腐蚀预测对比[J]. 装备环境工程, 2013, 3(10): 1—4.
- LIU Cheng-chen, XU Sheng, WANG Hao-wei, et al. Comparative Study of Prediction Models of Aluminum Alloys Based on Gray Model and Artificial Neural Network [J]. Equipment Environment Engineering, 2013, 3(10): 1—4.
- [12] 刘延利, 钟群鹏, 张铮. 基于人工神经网络的预腐蚀铝合金疲劳性能预测[J]. 航空学报, 2001, 3(2): 135—139.
- LIU Yan-li, ZHONG Qun-peng, ZHANG Zheng. Predictive Model Based on Artificial Neural Net for Fatigue Performances of Prior-corroded Aluminum Alloys [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 3(2): 135—139.
- [13] 王海涛, 韩恩厚, 柯伟. 腐蚀领域中人工神经网络的应用进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 5(3): 147—150.
- WANG Hai-tao, HAN En-hou, KE Wei. Application of Artificial Neural Network to the Field of Corrosion [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 5(3): 147—150.
- [14] 刘晓春, 黄爱军, 马芳, 等. 基于指数平滑技术的装备维修备件需求预测[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 109—112.
- LIU Xiao-chun, HUANG Ai-jun, MA Fang, et al. Requirement Forecast of Equipment Maintenance Parts Based on Exponential Smoothing Method [J]. Equipment Environment Engineering, 2012, 9(6): 109—112.
- [15] 俞国红, 杨德志, 丛佩丽. ARIMA 和 RBF 神经网络相融合的股票价格预测研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(18): 245—248.
- YU Guo-hong, YANG De-zhi, CONG Pei-li. Study of Stock Price Forecasting Based on Combination of ARIMA and RBF neural network [J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(18): 245—248.
- [16] 甘旭升, 端木京顺, 高建国, 等. 基于 ARIMA 模型的航空装备事故时序预测[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(3): 97—102.
- GAN Xu-sheng, DUAN-MU Jing-shun, GAO Jian-guo, et al. Time Series Prediction of Aviation Equipment Accident Based on ARIMA Model [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(3): 97—102.
- [17] 王燕. 应用时间序列分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2005.
- WANG Yan. Analysis of Time Series Application [M]. Beijing: China People University Press, 2005.

(上接第 99 页)

- YU Jin-shan, GUO Jun-ke, LU Li-qiu, et al. Reinforced Concrete Electrochemical Corrosion Monitoring Technology Research and Application [J]. Northeast Electric Power Technology, 2013(11): 34—38.
- [12] 陈晓东. 油气管道腐蚀在线实时监测系统[J]. 中国化工贸易, 2013, 5(12): 93—93.
- CHEN Xiao-dong. Real Time Monitoring System of On-line Corrosion of Oil and Gas Pipeline [J]. China Chemical Trade, 2013, 5(12): 93—93.
- [13] SRINIVASAN R. Miniature Wireless Full Spectrum EIS Corrosion Sensor [C]//2005 Tri-Service Corrosion Conference. Houston, TX: NACE, 2005.
- [14] YANG L T, SRIDHAR N. Coupled Multi-electrode Array Systems and Sensors for Real Time Corrosion Monitoring—A review [C]//Corrosion. Houston, TX: NACE International.
- [15] THOMAS J G. Corrosion Sensor Systems for Aircraft Applications [J]. NACE International, 2012, 51(3): 56—60.