变电站大气环境腐蚀参数自动检测仪研制及应用

台闯
（中国科学院金属研究所 材料环境腐蚀研究中心，沈阳 110016）

摘要：目的 通过自主研发的大气环境腐蚀参数自动检测仪，监测并积累变电站大气腐蚀数据，判断大气腐蚀性，为变电站选择腐蚀与防护手段，提供数据支持和依据。**方法** 依据变电站大气腐蚀研究的最新理论成果，参考最新国家标准，将影响变电站腐蚀因素的各参数整合，选择国内外最先进的传感器，根据实际工况要求，研制了一台基于变电站环境的大气腐蚀参数检测仪。**结果** 仪器的各项技术指标均达到设计要求，能够满足现场要求，可以根据变电站设备材质要求，定制腐蚀传感器。**结论** 通过在国家大气腐蚀网站（沈阳站）、浙江电力公司所属变电站的测试，研制的大气环境腐蚀参数自动检测仪能够实时采集影响腐蚀的各影响因子的参数值，满足未来腐蚀监测仪器、装备多参数、智能化的要求。

关键词：大气腐蚀；腐蚀分级；腐蚀传感器；变电站；检测仪
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2020.04.003
中图分类号：TG172.4 **文献标识码：**A
文章编号：1672-9242(2020)04-0014-06

Development and Application of Automatic Measurement Instrument for Atmospheric Corrosion Parameters in Substation

TAI Chuang
(Environmental Corrosion Center, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: This paper aims to monitor and accumulate the atmospheric corrosion data of substations with self-developed automatic detection instrument for atmospheric environmental corrosion parameters, to judge the atmospheric corrosion grade and provide the data support and basis for the selection corrosion prevention measures of substations. An atmospheric corrosion parameter detector based on the substation environment was developed according to the requirements of actual working conditions, which applied the most advanced sensors and integrated the parameters affecting the corrosion of substation by referring to the latest national standards and theoretical achievements on atmospheric corrosion of substation. All the technical indexes of the instrument met the design and field requirements. The corrosion sensor can be customized according to the material requirements of the substation equipment. Based on the tests conducted in the national atmospheric corrosion station (Shenyang) and the substation owned by Zhejiang Electric Power Co., Ltd., the automatic detection instrument for atmospheric environmental corrosion parameters developed in this project can collect the parameters of all corrosion related factors in real time and meet the requirements of multi-parameters and intelligence on corrosion monitors in the future.

收稿日期：2019-08-01；**修订日期：**2019-09-08
Received：2019-08-01；**Revised：**2019-09-08
作者简介：台闯（1976—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向腐蚀监检测技术研究及应用。
Biography：TAI Chuang (1976—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: research and application of corrosion monitoring technology.

KEY WORDS: atmospheric corrosion; corrosion grade; corrosion sensor; substation; detector

腐蚀是指材料受环境介质的作用而发生破坏与变质的现象。大多数情况下，金属腐蚀属于电化学腐蚀，腐蚀介质在金属表面形成各种微小的原电池，进而产生锈蚀。例如在潮湿的空气中，钢材表面吸附一层极薄的水膜，通过水膜和微电池，铁被氧化成铁锈。据统计，大气中使用的钢材约占生产总量的 60%，自然环境腐蚀的损失在总损失中所占的比例最大，其中材料大气环境腐蚀损失占总损失的 50% 以上[1-2]。

随着我国经济的快速发展，电力的需求与日俱增。电力输送网络承担着全国电力输送任务，安全可靠的电力供应非常重要，输电设备、线路、金具等重要部件的安全可靠运行至关重要。

通常，变电站起着变换电压和分配电能的作用。变电站金属构件较多，材质涉及铜材、碳钢、镀锌钢、不锈钢、铝材等。由于腐蚀，金属构件材料性能降低，影响设备可靠性。正常情况下，腐蚀程度与设备、装置的使用、服役年限有关。有些部件腐蚀的位置是固定的，如螺栓的接触部位[3]。

变电站大部分碳钢构件采用热镀锌防腐。抱箍、槽钢、螺栓这几类金属构件防腐镀锌层易出现质量问题。由于镀锌层厚度不够，镀层瑕疵，或在运输、安装过程中造成的局部镀锌层破坏，使原本包覆在铁外面起电化学保护作用的镀锌层过早失效，露出下面的铁基体而加速腐蚀[4]。因此，根据我国大气环境特征和典型材料的大气腐蚀规律，开发快速检测和评估电力设施大气腐蚀强度的方法及设备迫在眉睫。

浙江湖州市某变电站变电设备的大气腐蚀情况如图 1—图 4 所示。设备的材质主要是碳钢，可以看到由于大气腐蚀而裸露的红锈。腐蚀会造成电流有效传导面积减小或丧失，进而导致结构材料的强度下降，严重威胁输电线路安全运行，增加设备非正常停工概率。

图 1　JDCF-110 电压互感器腐蚀状况
Fig.1　Corrosion of JDCF-110 voltage transformer

图 2　LCWB-110 电流互感器腐蚀状况
Fig.2　Corrosion condition of LCWB-110 current transformer

图 3　手力操动机构-手柄腐蚀状况
Fig.3　Hand operating mechanism-handle corrosion

图 4　法兰盘腐蚀状况
Fig.4　Corrosion of flange

1　理论依据

大气腐蚀的环境影响因素很多，如温度、湿度、降雨量、沉降量及离海岸距离和污染状况等。可以通过两种方法对某一地区的大气腐蚀性进行评价分级：一是对大气腐蚀关键因素——润湿时间及二氧化硫和氯化物污染物水平的检测；二是检测标准金属试片的第 1 年或 10 年的平均腐蚀速率。

国家标准将大气的腐蚀性划分为 5 个等级，规定了通过检测润湿时间及二氧化硫和氯化物沉积量的检测值对大气腐蚀性的分级方法（GB/T 19292.1—

2003《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性分类》）和二氧化硫、氯化物沉积量的检测方法（GB/T 19292.3—2003《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 污染物的测量》）；规定了根据碳钢、锌、铜和铝 1 年的腐蚀速率评价腐蚀等级的方法（GB/T 19292.1—2003《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性分类》）和用标准试样检测腐蚀速率的方法（GB/T 19292.4—2003《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性 用于评估腐蚀性的标准试样的腐蚀速率的测定》）[5-9]。

随着工业的发展，大气中污染成分越来越复杂，像氨（NH_3）、氮氧化物（NO_x）和硫化氢（H_2S）等也会对金属腐蚀有一定影响，实际上金属的腐蚀是环境的诸多因素共同作用或协同作用的结果。因此，通过检测金属的腐蚀速率来划分大气腐蚀性等级更能客观地反应实际状况。文中的研究及应用背景基于浙江省电网所属变电站大气环境腐蚀参数[10]。

2 大气环境腐蚀分级原则

由于浙江省内除沿海工业区外，环境因素没有很大差别，腐蚀速率的差异不是很大，如果按 GB/T 19292.1—2003《金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性分类》的方法划分等级，很多地区会在同一等级下。因此，依据浙江电网提供的 2012 年度浙江省各区县 SO_2 和 Cl^- 检测数据，将国标等级可能覆盖最多的两个等级细分，并按浙江省的环境特点，划分了 6 个等级，见表 1。

表 1 与标准金属腐蚀速率对应的大气腐蚀性等级

Tab.1 Atmospheric corrosivity grade corresponding to standard metal corrosion rate

腐蚀性等级	金属的腐蚀速率 r_{corr}/(μm·a^{-1})		
	碳钢	锌	铜
C1	$r_{corr}\leqslant 10$	$r_{corr}\leqslant 0.3$	$r_{corr}\leqslant 0.2$
C2	$10<r_{corr}\leqslant 20$	$0.3<r_{corr}\leqslant 0.8$	$0.2<r_{corr}\leqslant 0.7$
C3	$20<r_{corr}\leqslant 29$	$0.8<r_{corr}\leqslant 1.1$	$0.7<r_{corr}\leqslant 1.0$
C4	$29<r_{corr}\leqslant 35$	$1.1<r_{corr}\leqslant 1.4$	$1.0<r_{corr}\leqslant 1.2$
C5	$35<r_{corr}\leqslant 100$	$1.4<r_{corr}\leqslant 4.2$	$1.2<r_{corr}\leqslant 2.8$
CX	$r_{corr}>100$	$r_{corr}>4.2$	$r_{corr}>2.8$

注：其中腐蚀速率由暴露 1 年后金属试样单位面积腐蚀质量损失数据计算得到

3 大气环境腐蚀参数自动检测仪功能设计

大气环境腐蚀参数自动检测仪的设计依据上述大气腐蚀分级原则[11]，并根据浙江当地工况条件，选择测量的参数及功能。大气腐蚀的影响因素很多，其中主要的有大气的相对湿度、温度、成分以及大气中的污染物等，在个别重工业污染区，SO_2 影响最严重。大气环境腐蚀参数自动检测仪综合考虑上述大气腐蚀性影响因素，对大气腐蚀主要影响因子（温度、相对湿度、二氧化硫浓度、ACM 电流等四个关键影响因素）进行现场实时快速检测。

通过对比大气腐蚀因子检测结果，进而对被测大气环境腐蚀等级进行快速评价。为输变电系统在材料的选择、腐蚀防护工作的开展、设备更新与维护方面提供重要的数据支持。

3.1 温、湿度检测传感器

大气温、湿度检测采用 Sensirion 公司的 SHT7x 系列产品。该传感器将测温模块、湿度测量模块集成在一块微型电路板上，采用 CMOSens®技术，直接输出温度和湿度数字信号，经后续计算，转换成可以显示的温湿度值。因此，该产品具有性能稳定、响应迅速、抗干扰能力强、性价比高等优点。温度精度为±0.3 ℃，相对湿度精度为±1.8%。

该传感器采用两线制的串行接口及内部的电压调整模块，使外围系统集成变得快速而简单。

3.2 二氧化硫浓度检测传感器

大气二氧化硫浓度检测采用国产 ME3-SO_2 型气体传感器。该传感器根据电化学原理，利用被测气体在传感器工作电极和对电极上发生相应的氧化还原反应，并释放电荷，通过外电路形成电流，电流大小与气体浓度成正比，从而实现对目标气体的定量测量。该传感器具有低功耗、高精度、高灵敏度、线性范围宽和抗干扰能力强的特点。广泛适合工业、环保中 SO_2 的检测。

3.3 腐蚀电偶电流检测（ACM）

大气腐蚀电流检测的测量原理是利用电化学的 ACM 技术，根据薄层电解质液膜下电化学电池的电流信号来反映大气环境腐蚀性强弱[12]。目前，此技术已成为一种比较成熟的评价大气腐蚀强弱的方法。

为模拟大气腐蚀，采用不同或者相同材质偶合，构成电偶接触型或外加电压的原电池。这种电偶腐蚀原电池中，两种不同腐蚀电位的材料，通过电介质这个媒介，直接或者经过其他导体间接形成电连接，使电流从一种材料经过电介质流向另一种材料。电位较低的材料由于和腐蚀电位较高的材料偶合而产生阳极极化，电位较高的材料由于和电位较低的材料偶合而发生阴极极化，结果溶解得到抑制，受到保护[13-15]。

ACM 技术就是通过测量曝露在大气中电偶腐蚀原电池的电流及电流积分来监测大气的腐蚀性。ACM 技术可以真实地再现薄液膜下金属大气腐蚀过程，可连续、动态监测金属腐蚀电流随时间、环境的变化[16]。

3.4　检测仪总体设计

大气环境腐蚀参数自动检测仪可以同时检测大气 SO_2 浓度、ACM 电流强度、环境温湿度等参数，如图 5 所示。检测仪集成的各类环境参数传感器输出的模拟信号经数据处理模块转换成数字信号后，传输给中央处理器进行数据处理。中央处理器处理将收集来的各数字信号进行内部程序运算后，最终结果显示在液晶屏（TFT）上。除上述直接数据外，还包括大气腐蚀性等级判断及显示。

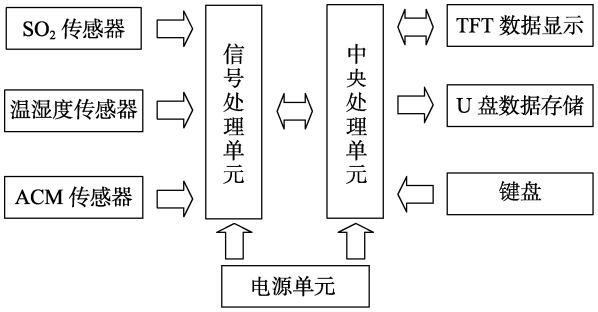

图 5　检测仪总体设计功能
Fig.5　Overall design function of detector

4　沈阳国家大气监测站测试

2013 年 7 月，大气环境腐蚀参数自动检测仪在沈阳监测站进行了稳定性、数据跟踪实时性测试。该次测试采用 ACM 测试传感器，从第一天下午 17:00 开始采集，到第二天上午 9:00 时结束，历经一夜，采样间隔为 1 次/min，测试总时间约为 16.66 h。

监测结果如图 6 所示。从监测结果来看，温度、相对湿度和 ACM 电流变化趋势与理论完全吻合。温度从日落开始缓慢降低，相对湿度也随之缓慢增大，ACM 电流随着温度的降低而降低；进入深夜，温度降到最低（28 ℃），相对湿度同样也达到最大值（48%），ACM 电流达到最小值；清晨太阳升起，温度回升，相对湿度下降，但 ACM 电流出现迅速上升趋势。整个监测过程中，ACM 电流在纳安数量级变化，腐蚀性较轻。从温度、相对湿度和 ACM 这三个监测指标的变化趋势完全吻合的情况来看，ACM 电流在一定的湿度范围内，受环境温度的影响更为敏感。从实验数据结果来看，通过监测 ACM 电流来评价环境腐蚀性是可行的。

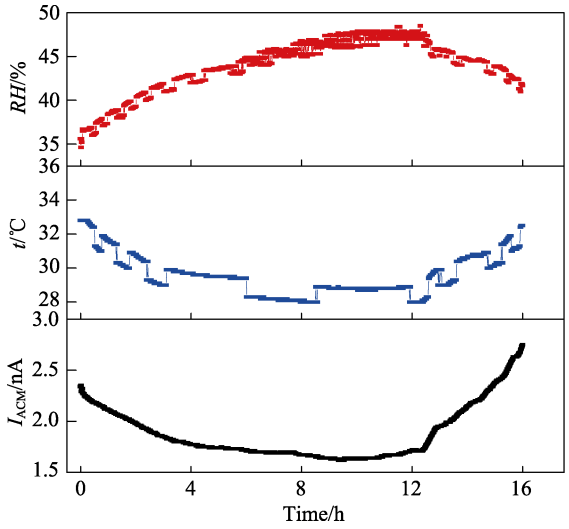

图 6　沈阳监测站大气腐蚀参数测试曲线
Fig.6　Test curve of atmospheric corrosion parameters in Shenyang monitoring station

5　浙江地区现场测试结果

5.1　湖州 110 kV 变电站

监测开始时间为 2014 年 01 月 07 日，小雨，采用大气环境腐蚀参数自动检测仪对浙江省湖州 110 kV 变电站环境（大气、土壤）进行连续监测。环境温度为 5 ℃，环境相对湿度为 60%~70%，ACM 电流采用 Cu/Zn 监测传感器，监测采样间隔为 2 s，共采集了 2677 组数据。湖州大气腐蚀电流测试曲线如图 7 所示。

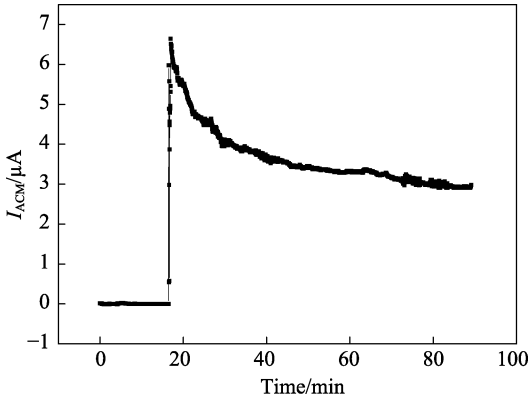

图 7　湖州某变电站大气腐蚀监测曲线
Fig.7　Atmospheric corrosion monitoring curve of a substation in Huzhou

测试初期，传感器表面干爽，电偶电流较小，为纳安级。在 16 min 后，传感器表面液膜形成，电偶电流迅速增大，最高达到约 7 μA。随着监测时间的增长，Cu/Zn 两电极自身的开路电位差逐渐减小，并有腐蚀产物生成，覆盖在电极表面，电偶电流从最高的 7 μA 缓慢减小，最终稳定于 3.5 μA。根据监测结果，可判断测试当天湖州 110 kV 变电站大气腐蚀较为严重。

5.2　浙江嘉兴某变电所

2014 年 01 月 15 日，采用腐蚀检测仪对浙江省嘉兴共建变电所环境进行测试，监测显示环境温度为 15 ℃，环境相对湿度为 50%~60%，电偶电流用 Cu/Zn 监测传感器，监测采样间隔为 10 s。大气腐蚀电流测

试曲线如图 8 所示。从电偶电流监测曲线看，在整个监测周期内（从中午到晚上），电偶电流整体呈逐渐增大趋势。监测初期（午间）的电偶电流为 1.5 nA 左右，进入晚间时，电偶电流增大到 20 nA 左右。整体来看，测试当天嘉兴区大气电偶电流不大，腐蚀性较轻。

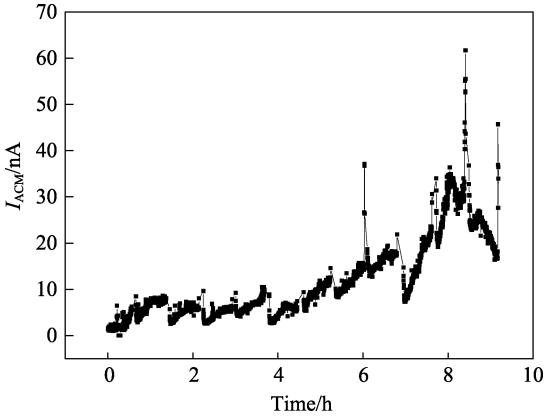

图 8　嘉兴某变电所大气腐蚀监测曲线
Fig.8　Atmospheric corrosion monitoring curve of a substation in Jiaxing

6　结语

依据大气腐蚀性分级原则研发的大气环境腐蚀参数自动检测仪可以实时采集各腐蚀传感器的信号，判断大气腐蚀性。国外同类产品只能通过指示灯显示对应的腐蚀性，不能获得过程数据值。

通过在工业现场实地测试的数据结果来看，上述研制的检测仪能够满足现场的实际需要，反映了变电站所在地测试日期的大气腐蚀环境。后续应加大数据测试积累的时间（如 1~2 年），这样才能真正反映出一年四季变电站所在地的大气腐蚀规律及特点。

智能化、自动化腐蚀监测仪器发展很快，出现了许多集成不同种类传感器、控制器的腐蚀监测系统。集成度高、自检测、网络化已成为 21 世纪腐蚀监测仪器发展的一个重要特点。相信随着电子技术、腐蚀科学的不断进步，将来会有更多的腐蚀监测智能仪器或系统出现，满足国民经济的需要。

参考文献：

[1]　柯伟. 中国腐蚀调查报告[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
KE Wei. China Corrosion Investigation Report[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.

[2]　曹楚南, 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
CAO Chu-nan. Natural Environment Corrosion of Materials in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[3]　王振尧, 于国才, 韩薇. 我国自然环境大气腐蚀性调查[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(8): 323.
WANG Zhen-yao, YU Guo-cai, HAN Wei. A Survey of the Atmospheric Corrosiveness of Natural Environments in China[J]. Corrosion & Protection, 2003, 24(8): 323-326.

[4]　陈军君, 李明, 王军, 等. 变电站金属构件的常见腐蚀形式及解决措施[J]. 内蒙古电力技术, 2013, 31(1): 7-11.
CHEN Jun-jun, LI Ming, WANG Jun, et al. Common Style of Metallic Components Corrosion in Substation and Its Solution[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2013, 31(1): 7-11.

[5]　GB/T 14165—2008, 金属和合金 大气腐蚀试验现场试验的一般要求[S].
GB/T 14165—2008, Corrosion of Metals and Alloys—Atmospheric Corrosion Testing—General Requirements for Field Tests[S].

[6]　GB/T 16545—1996, 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S].
GB/T 16545—1996, Corrosion of Metals and Alloys—Removal of Corrosion Products from Corrosion Test Specimens[S].

[7]　GB/T 19292. 1—2003, 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性分类[S].
GB/T 19292. 1—2003, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheric—Classification[S].

[8]　GB/T 19292. 3—2003, 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性污染物的测量[S].
GB/T 19292. 3—2003, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheric—Measurement of Pollution[S].

[9]　GB/T 19292. 4—2003, 金属和合金的腐蚀 大气腐蚀性用于评估腐蚀性的标准试样的腐蚀速率的测定[S].
GB/T 19292. 4—2003, Corrosion of Metals and Alloys—Corrosivity of Atmospheric—Determination of Corrosion Rate of Standard Specimens for the evaluation of Corrosivity[S].

[10]　林玉珍, 杨德钧. 腐蚀和腐蚀控制原理[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010: 146-148.
LIN Yu-zhen, YANG De-jun. Corrosion and Corrosion Control Principles[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010: 146-148.

[11]　王振尧, 于国才, 郑逸苹, 等. 锌的加速腐蚀与大气暴露腐蚀的相关性研究[J]. 环境技术, 2001, 19(4): 18-22.
WANG Zhen-yao, YU Guo-cai, ZHENG Yi-ping, et al. Investigation on Interrelation of Accelerated Corrosion Testing and Atmospheric Exposure of Zinc[J]. Environmental Technology, 2001, 19(4): 18-22.

[12]　曹献龙, 萧以德, 卢颖, 等. Cu/Fe 双电极原电池对环境敏感性的研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 20-26.
CAO Xian-long, XIAO Yi-de, LU Ying, et al. Research of Environmental Sensitivity of Cu/Fe Galvanic Cell[J].

Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(4): 20-26.

[13] 林翠, 王凤平, 李晓刚. 大气腐蚀研究方法进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(4): 249-256.
LIN Cui, WANG Feng-ping, LI Xiao-gang. The Progress of Research Methods on Atmospheric Corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2004, 24(4): 249-256.

[14] 王振尧. 金属材料大气腐蚀研究动态[J]. 全面腐蚀控制, 1995(4): 1-3.
WANG Zhen-yao. Research Trends of Atmospheric Corrosion of Metal Materials[J]. Total Corrosion Control, 1995(4): 1-3.

[15] 徐俊丽, 李牧铮. 大气腐蚀电化学监测的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1987, 7(1): 60-65.
XU Jun-li, Li Mu-zheng. Electrochemical Monitoring of Atmospheric Corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1987, 7(1): 60-65.

[16] 萧以德. 周学杰, 张三平. 低合金钢大气腐蚀的电化学研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(3): 200-204.
XIAO Yi-de, ZHOU Xue-jie, ZHANG San-ping. An Electrochemical Study for Atmospheric Corrosion of Low-alloy Steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1995, 7(3): 200-204.