

输电线路超短期覆冰厚度精准预测模型研究

莫思特, 刘天琪, 曾琦

(四川大学电气信息学院, 四川成都 610065)

摘要: 冬季架空输电线路覆冰是导致输电线路发生冰雪灾害的直接原因, 在线实时融冰是预防冰雪灾害的有效措施。对于冻雨致冰厚度的精准预测, 是实施最优融冰方案的前提。设计了模拟导线监测系统和现场微气象系统, 以模拟导线监测数据和微气象站技术, 结合冻雨覆冰理论计算空气中前期液态水含量。基于灰色系统理论, 应用GM(1, 1)模型, 预测空气中超短期液态水含量、风速、降雨量。在此基础上, 根据所预测液态水含量、风速、降雨量计算覆冰增长速度。综合多种实际监测数据, 建立覆冰数据仿真模型。

关键词: 实时融冰; 输电线路; 精准预测模型; 冻雨致冰; 灰色系统理论

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)06-0032-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.06.008

Research on Accurate Prediction Model for Icing Thickness of Transmission Lines in Ultra-short Period

Mo Site, Liu Tianqi, Zeng Qi

(College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The icing on transmission lines is the key issue to cause snow and ice disasters during the winter. The on-line real-time ice-melting technology is an effective measure to relieve the snow and ice disasters. The accurate prediction of icing thickness on transmission lines due to freezing rain is the precondition of deciding the optimal ice-melting scheme. The simulated wire monitoring system and the on-site micrometeorology system are designed to simulate the conductor monitoring data and microweather station, and calculate the water content in the air according to the icing theory due to freezing rain. Based on grey system theory, GM(1, 1) model is applied to predict the water content, wind speed and rainfall in the air. The icing growth rate is figured out based on the predicted liquid water content, wind speed and rainfall. The simulation model of icing data is established by combining various actual monitoring data.

Key words: real-time ice-melting; transmission line; accurate prediction model; ice due to freezing rain; grey system theory

0 引言

当气温处于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 如果下雨或空气中含有大量液态水滴, 液态水滴将可能与架空高压输电线路碰撞致冰, 附着在输电导线上形成输电线路覆冰。若输电线路覆冰不能及时去除, 将导致输电塔线承重超出设计载荷而损坏。历史上, 有许多输电线路冰雪灾害的典型实例, 北美、北欧、俄罗斯、英国、日本等国家和地区都有大量报道^[1-2]。中国近年来大面积冰暴灾害事故时有发生, 并导致电网发

生倒塔、断线、舞动、覆冰闪络等多种灾害^[3-4], 由此造成的损失难以估量。输电线路融冰技术研究吸引了大量业内研究者^[5-6], 断电离线融冰取得了丰硕成果, 但是由于需要断电操作, 故需谨慎决策, 难以真正消除冰雪天气导致的输电线路冰暴灾害。

在线实时融冰技术, 将可以有效防止输电线路覆冰灾害, 减少输电线路覆冰承载参数, 降低输电线路设计成本。文献[7]提出一种自融冰导线设计方法, 并设计了自融冰设备, 为实现输电线路实时在线融冰提供了新思路和新方法。

输电线路覆冰超短期精准预测技术是实施高效优化的在线实时融冰的前提和基础。业内学者采用

基金项目: 国家重点研发计划“500 kV 直流断路器在直流系统的应用特性与自分断技术”(2017YFB0902401)

相关系数与置信度、支持向量机(support vector machine SVM)、神经网络、模糊隶属度、重现期计算方法等技术,对长期、中期、短期输电线路融冰技术开展了广泛研究^[8-10],但尚未检索到对未来 10 min 左右的超短期输电线路覆冰状态的精准预测方法。造成输电线路冰灾受损的最主要因素是冻雨积冰,2008 年南方出现历史上罕见的冰暴灾害,造成输电线路的巨大损失,也是因为长期连续的冻雨所致^[11-13]。因此,研究超短期冻雨致冰精准预测方法,为在线实时融冰提供可靠数据,对于防止输电线路覆冰灾害具有重要意义。

1 精准预测基本原理

通过现场模拟导线数据采集系统,可以采集近期输电线路覆冰数据;应用冻雨覆冰计算方法,可以计算空气中的液态水含量;根据测量及计算数据,应用灰色系统的 GM(1,1) 模型,预测几分钟内液态水含量的发展趋势,并根据液态水含量计算覆冰增长趋势,为输电线路在线实时融冰提供依据。

1.1 冻雨积冰数学模型

业内有多种冻雨积冰数学模型,其中认可度最高的是 Jones 模型^[14],诸多学者都对 Jones 模型进行了实验验证^[15-16]。这里也基于 Jones 提出的冻雨积冰数学模型来进行研究,如式(1)所示。

$$R_{eq} = \frac{1}{\rho_i \pi} \sum_{j=1}^n \sqrt{\left(\frac{1}{60} P_j \rho_w\right)^2 + (0.06 V_j W_j)^2} \quad (1)$$

式中: R_{eq} 为导线覆冰等效厚度; n 为冻雨持续时间, min; P_j 是对应时刻的降雨强度, mm/h; W_j 为对应时刻液态水含量, g/m; ρ_i 为冰密度; ρ_w 为水密度; V_j 为风速。 ρ_i 和 ρ_w 为已知的, P_j 、 W_j 和 V_j 则需要在线测量。液态水含量 W_j 不便于直接量测,可通过拉力传感器测量积冰重量,利用式(1)来计算。

1.2 模拟导线数据采集系统

模拟导线数据采集系统包括微气象数据采集模块和在线模拟导线数据采集模块。考虑工程应用经济性和实际需求,微气象数据采集模块测量参数包括空气温度、空气湿度、降雨量、大气压、风速、风向,设计框图如图 1 所示。

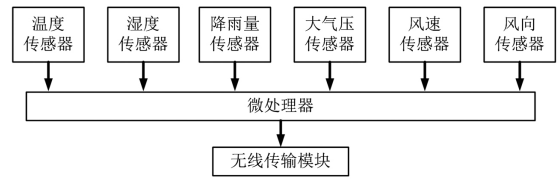


图 1 微气象数据采集模块结构

在线模拟导线数据采集模块如图 2 所示。图 2 中,模拟导线是输电导线上截取的一小段,在输电导线相同环境下,可以精确模拟输电导线的覆冰过程。模拟导线的整体重量为模拟导线重量和覆冰重量之和,通过拉力传感器采集连接杆的受力,将受力减去模拟导线和连接杆的重量,可以算出输电导线覆冰重量。

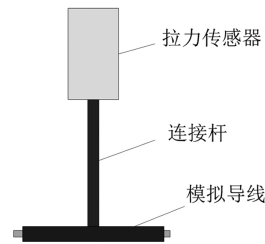


图 2 在线模拟数据采集模块

1.3 灰色预测理论

1981 年,邓聚龙教授首次提出了“灰色系统”这一概念。1982 年,邓聚龙教授发表的论文“The Control Problems of Grey Systems”和《灰色控制系统》标志着灰色系统理论的诞生。灰色系统理论通过从已知信息中产生、开发和挖掘有用信息,探索研究对象的客观规律^[17-22]。

灰色预测模型是灰色系统理论最重要的内容之一,在社会学领域、自然科学领域、工程领域等方面,灰色预测模型都有许多应用案例。用于数据预测的灰色预测模型主要有:GM(1,1) 模型、GM(2,1) 模型、GM(0,N) 模型、GM(1,N) 模型、M-GM(1,N) 模型、GM(1,1) 幂模型等等。其中,GM(1,1) 模型只需要一个参数且只计算一阶微分方程,因参数少、计算简单得到广泛应用。这里选择 GM(1,1) 模型进行预测。

灰色系统理论的基本思想是:客观系统是有整体功能的,无论其现象多么复杂,数据多么乱,必然蕴涵某种内在规律。可见,灰色系统理论是一种从数据中挖掘数据规律的理论体系。式(1)揭示了输电线路的覆冰规律,通过对式(1)未知参数的预测,可以预测未来输电线路覆冰增长规律。

通过前 30 min 的测量数据,应用灰色预测模型预测后十多分钟的覆冰增长状态,符合灰色系统理论的基本思想,因此用灰色预测模型预测未来十多分钟内的导线覆冰增长规律具有可行性。由于未来十多分钟的气候与前 30 min 内的气候有类似的客观规律,利用灰色预测模型进行超短期预测,不会有太大误差。

2 精准预测方法

通过微气象站数据采集模块和在线模拟数据采集模块,每 3 min 采集 1 组数据,总共采集 10 组数据,根据所采集的 10 组数据建立 GM(1,1) 模型。根据 GM(1,1) 模型预测未来 12 min 内的风速、降雨量、液态水含量,通过所预测的风速、降雨量、液态水含量预测未来 9 min 内的覆冰增长状态。具体方法如下。

2.1 输入数据

在式(1)中,需要预测的量有降雨强度 P_j 、液态水含量 W_j 和风速 V_j 。其中降雨强度和风速可以通过微气象站前 30 min 采集的数据预测,液态水含量可以通过图 2 的测量方法,应用式(1)计算。

每隔 3 min 采集一次降雨强度、风速、覆冰重量,按时间先后顺序,分别记为 $P = (p(1), p(2), p(3), \dots, p(10))$; $W = (w(1), w(2), w(3), \dots, w(10))$; $G = (g(1), g(2), g(3), \dots, g(10))$ 。对应的等效覆冰厚度分别为 $R = (r(1), r(2), r(3), \dots, r(10))$, 根据式(1), 有

$$r(i+1) = r(i) + \frac{3}{\rho_i \pi} \sqrt{\left(\frac{1}{60} P_{i+1} \rho_w\right)^2 + (0.06 V_{i+1} W_{i+1})^2} \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{3}{\rho_i \pi} \sqrt{\left(\frac{1}{60} P_{i+1} \rho_w\right)^2 + (0.06 V_{i+1} W_{i+1})^2}, \text{ 有}$$

$r(i+1) = r(i) + \Delta$ Δ 表示覆冰厚度增长。

设模拟导线长度为单位长度 1 m, 导线的半径为 R_d 则,

$$g(i+1) = \pi (R_d + r(i) + \Delta)^2 \rho_i + g_0 \quad (3)$$

$$g(i) = \pi (R_d + r(i))^2 \rho_i + g_0 \quad (4)$$

式(3)与式(4)中 g_0 为模拟导线重量减去与模拟导线等体积的冰的重量。式(3)减去式(4), 忽略 Δ^2 项, 得到:

$$g(i+1) - g(i) = \rho_i \pi (2(R_d + r(i)) \Delta) \quad (5)$$

根据式(5), 可以得到:

$$w(i+1) = \frac{1}{0.06v(i+1)} \sqrt{\left(\frac{g(i+1) - g(i)}{6(R_d + r(i))}\right)^2 - \left(\frac{\rho(i+1)\rho_w}{60}\right)^2} \quad (6)$$

根据式(4), 可以算出:

$$r(i) = \sqrt{\frac{g(i) - g_0}{\pi \rho_i}} - R_d \quad (7)$$

由此, 根据上述参数可以预测 3 min、6 min、9 min、12 min 的降雨强度、液态水含量和风速。

2.2 灰色系统预测方法

2.2.1 极比检查

$$\sigma(k) = \frac{x(k-1)}{x(k)} \quad (8)$$

根据式(8)构建极比序列: $\sigma = (\sigma(2), \sigma(3), \sigma(4), \dots, \sigma(n))$, 根据序列数目确定可容覆盖范围, 并判断极比序列数据范围。当极比序列都落在可容覆盖范围时, 可以进行 GM(1,1) 建模。

2.2.2 GM(1,1) 建模

GM(1,1) 建模计算过程如下:

1) 序列初始数据为第 2.1 节测量的降雨强度、风速或液态水含量。

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) = X \quad (9)$$

2) 根据式(10)计算累加序列 $X^{(1)}$ 。

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$$

3) 根据式(11)计算紧邻均值序列 $Z^{(1)}$ 。

$$z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)}{2} \quad (11)$$

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), z^{(1)}(4), \dots, z^{(1)}(n))$$

4) 根据式(12)至式(14)计算发展系数 a 和灰色作用系数 b 。

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & 1 \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Y_n = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (14)$$

2.2.3 预测

令 $x^{(1)}(0) = x^{(0)}(1)$, 根据式(15)、式(16)进行模型值计算。

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[x^{(1)}(0) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (15)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (16)$$

当 $k \leq 10$ 时, 计算值为模型值, 用于检验模型是否正确。当检验模型正确时, 取 $k > 10$, 就可对未来进行预测。

2.2.4 预测检验

根据对实际值的计算结果进行预测检验。预测检验采用残差检验方法:

$$\text{残差} = (\text{实际值} - \text{模型值}) / \text{实际值} \quad (17)$$

当所有残差绝对值小于 0.2 时, 可以判断预测结果正确。

2.3 覆冰计算方法

将第 2.1 节的数据序列用于第 2.2 节的预测方法, 可以预测未来 3 min、6 min、9 min 的降雨强度、液态水含量和风速, 然后根据式(1)计算覆冰厚度。

3 仿真验证

综合已发表论文中的测量数据, 建立风速、降雨量、液态水含量的仿真数据模型, 根据液态水含量计算覆冰状态仿真数据模型。总共仿真 42 min 的数据模型, 根据前 30 min 的数据预测后 12 min 的结果, 并将预测结果跟仿真模型的后 12 min 数据对比, 验证仿真模型的正确性。

3.1 仿真数据模型

文献 [14] 对输电线路覆冰做了长时间的现场实验, 取得了大量的数据。由于其数据没有针对超短期预测, 因此, 可以根据其数据结果来设计超短期仿真数据模型。

仿真数据模型通过 3 次多项式来模拟, 仿真模拟多项式为

$$S(i) = A \left(1 + \frac{Bk_i + Ck_i^2 + Dk_i^3}{B + D} \right) \quad (18)$$

式中: B, C, D 为最大值为 1 的随机函数的绝对值; $k_i = (i/10)$ $i = 1, 2, 3, \dots, 14$; A 按式(19)取值。

$$A = \text{Min} + |\text{rand}|(\text{Max} - \text{Min}) \quad (19)$$

式中: rand 为幅值为 1 的随机函数; Min、Max 的取值根据文献 [16] 实际测量数据来决定, 根据文献 [16] 中图 5.1、图 5.4、图 5.5 的测量结果, Max 和 Min 的取值如表 1 所示。

表 1 Max 和 Min 取值

参量	Max	Min
风速/(m·s ⁻¹)	9.00	3.00
液态水含量/(g·m ⁻³)	3.00	0.04
降雨强度/(mm·h ⁻¹)	15.00	0.50

3.2 仿真结果

仿真使用的导线型号为 LGJ-210/50, 导线直径为 20.38 mm, 导线密度为 2811 kg/m³, 冰的密度取值 0.6 × 10³ kg/m³。

仿真过程如下:

- 1) 根据式(18)设计模拟仿真数据;
- 2) 根据式(1)计算等效覆冰厚度;
- 3) 根据式(2)和式(4)计算拉力传感器的值;
- 4) 根据式(6)计算液态水含量;
- 5) 取前 10 个值作为 GM(1, 1) 模型的输入值, 根据式(14)计算 a, b ;
- 6) 根据式(16)计算前 10 个时刻的模型值, 并计算残差;
- 7) 计算第 11 至第 14 个时刻的预算值, 并计算偏差;
- 8) 根据式(2)和式(4)计算第 1 至第 14 个时刻的重量, 计算模型值的残差和预测值的偏差。

根据上面的仿真过程, 计算 20 次数据, 并列出重量残值平方和最小值与最大值结果, 残值平方和最小值如表 2 所示, 残值平方和最大值如表 3 所示。

从上述仿真结果可以看出, 超短期预测结果与实际值相吻合, 验证了所提方法的有效性。

4 结语

对即将工程应用的实时在线融冰技术, 探究了超短期精准预测方法, 以对实时在线融冰过程进行最优控制, 取得了如下结果:

- 1) 设计了模拟导线监控系统, 为精准预测提供实时数据;
- 2) 针对难以测量的液态水含量, 根据模拟导线监控系统测量参数, 推导液水含量计算公式;

表2 残值平方和最小值

次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
风速	0.02	0.01	0.05	0.02	0.03	0.01	0.04	0.05	0.05	0.03	0.02	0.06	0.01	0.03
降雨强度	0.04	0.03	0.02	0.01	0.05	0.02	0.01	0.04	0.02	0.05	0.05	0.03	0.06	0.01
液态水含量	0.04	0.01	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.04	0.02	0.05	0.03
重量	0.01	0.01	0.05	0.04	0.01	0.02	0.06	0.05	0.01	0.01	0.04	0.03	0.04	0.02

表3 残值平方和最大值

次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
风速	0.08	0.13	0.10	0.08	0.14	0.13	0.10	0.11	0.08	0.09	0.13	0.08	0.14	0.09
降雨强度	0.09	0.12	0.11	0.08	0.12	0.14	0.13	0.08	0.14	0.09	0.14	0.10	0.09	0.12
液态水含量	0.07	0.14	0.08	0.07	0.11	0.13	0.10	0.08	0.14	0.14	0.09	0.07	0.13	0.09
重量	0.14	0.06	0.11	0.12	0.10	0.14	0.12	0.11	0.11	0.09	0.10	0.09	0.13	0.13

3) 提出了风速、降雨量、液态水含量超短期预测方法,并以风速、降雨量、液态水含量预测值为基础提出了超短期覆冰趋势预测方法;

4) 提出了仿真数据模型,并根据仿真数据模型对所提出的超短期覆冰趋势预测方法进行了验证。

上面的研究仅仅基于仿真方法,尚缺乏实测数据,希望今后能开展实验室数据测试和现场数据测试,以检验预测的有效性。此外,由于实际导线中流经电流,更精确的分析需在模拟导线模型中考虑实际导线电流产生的热量。

参考文献

[1] M. Huneault, C. Langheit, R. S. Arnaud, et al. A Dynamic Programming Methodology to Develop De-icing Strategies during Ice Storms by Channeling Load Currents in Transmission Networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1604-1610.

[2] Liushunxin, Guo guangsong, Yan lichao, et al. Research on Conductor Icing of Overhead Transmission Lines [C]. 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks(CECNet), IEEE, 2011: 606-609.

[3] 赵彬,程永锋,王景朝,等. 阻尼间隔棒及双摆防舞器对特高压架空输电导线覆冰舞动特性的影响 [J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3837-3843.

[4] 毕茂强. 分裂导线电流转移循环融冰试验与方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

[5] 陈亮,李兴源,傅闯. 基于等风险度法的电网直流融冰计划决策 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2017, 47(2): 158-164.

[6] 陆佳政. 电网覆冰灾害及防冰技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

[7] 莫思特,刘天琪,李碧雄. 一种自融冰导体及其融冰设备: 中国, CN201610867150.1 [P]. 2016-09-30.

[8] Lu J Z, Zhang H X, Fang Z, et al. Research and Engineering Application of Power Grid Large-scale Ice-disaster Prevention and Treatment Technology [C]. CIGRE 2014.

[9] Xu X J, Lu J Z, Zhang H X, et al. Short-term Winter Icing Climate Prediction Based on the Polar Vortex Area and the Subtropical High [C]. Proceeding of the 15th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS 2013), Montreal, Canada, 2013.

[10] Bernstein B. C. Regional and Local Influences on Freezing Drizzle, Freezing Rain, and Ice Pellet Events [J]. Wea. Forecasting, 2000, 15(5): 485-508.

[11] 张庆云,宣守丽,彭京备. La Nina年冬季亚洲中高纬环流与我国南方降雪异常关系 [J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 385-394.

[12] Zhou W, Johnny C L C, Wen C, et al. Synoptic-scale Controls of Persistent Low Temperature and Icy Weather over Southern China in January 2008 [J]. Monthly Weather Review, 2009, 137(11): 3978-3991.

[13] 李崇银,扬辉,顾薇. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. 气候与环境研究, 2008, 13(2): 113-122.

[14] Jones K F. A Simple Model for Freezing Rain Ice Loads [J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1-2): 87-97.

[15] Degaetano A T, Belcher B N, Spier P L, et al. Short-term Ice Accretion Forecasts for Electric Utilities Using the Weather Research and Forecasting Model and A Modified Precipitation-type Algorithm [J]. Wea. Forecasting, 2008, 23(5): 838-853.

(下转第70页)

和 10 号 C 相的量测数据序列之间的平均欧氏距离均小于阈值,而电压互感器 11 的量测数据序列与上述电压互感器的量测数据序列的平均欧氏距离大于阈值,由此可以判定电压互感器 11,也就是叙二线 C 相的电压互感器发生故障。

综上所述,所提方法的分析结果与电压互感器的实际故障情况一致,从而表明了所提方法的正确性。

4 结 语

前面提出了一种基于多维量测数据序列的电压互感器故障识别方法,通过分析多个电压互感器的在线量测数据,能够准确实时地识别电压互感器故障,且适用于所有类型的电压互感器。该方法首先利用经验模态分解法对电压互感器量测数据进行去噪处理;然后,利用时间序列分层聚类法对电压互感器量测数据进行分析,识别电压互感器故障;最后,将所提方法应用于实际电压互感器量测数据,结果显示所提方法能够有效消除量测数据噪声,并准确识别出发生故障的电压互感器,从而验证了方法的合理性和有效性。

参考文献

[1] 张东霞,苗新,刘丽平,等.智能电网大数据技术发展研究[J].中国电机工程学报,2015,3(1):2-12.

[2] 陈文龙.浅析两起 110 kV 电容式电压互感器故障[J].高压电器,2005,31(1):80-80.

[3] 席风沛.电容式电压互感器故障分析处理[J].变压器,2010,47(6):71-72.

[4] 郑坚强,陶涛,万文博.浅析一例 110kV 电容式电压互感器二次电压失压故障[J].变压器,2012,49(7):73-76.

[5] 林浩,倪学锋,王岩,等.基于 EMS 数据的电容式电压互感器在线监测系统研究[J].电测与仪表,2015,52(4):1-7.

[6] 邱太洪,罗容波,李国伟,等.电容式电压互感器二次电压在线监测在故障检测分析中的应用[J].变压器,2015,52(9):70-73.

[7] 张福州,刘鹏,黄嘉鹏,等.电容式电压互感器误差在线监测系统的研制[J].电测与仪表,2016,53(s1):53-57.

[8] 李坤,邵明鑫,汪本进,等.±1100 kV 直流电压互感器在线监测系统研究[J].高压电器,2017,12(6):1-7.

[9] 郑祖光.经验模态分析与小波分析及其应用[M].北京:气象出版社,2010.

[10] 贾嵘,徐其惠,田录林,等.基于经验模态分解和固有模态函数重构的局部放电去噪方法[J].电工技术学报,2008,23(1):13-18.

[11] 钱勇,黄成军,陈陈,等.基于经验模态分解的局部放电去噪方法[J].电力系统自动化,2005,29(12):53-56.

[12] 杨位钦,顾岚.时间序列分析与动态数据建模(修订本)[M].北京:北京理工大学出版社,1988.

[13] 陈湘涛,李明亮,陈玉娟.基于时间序列相似性聚类的应用研究综述[J].计算机工程与设计,2010,31(3):577-581.

[14] 方开泰,潘恩沛.聚类分析[M].北京:地质出版社,1982.

[15] 吕黎.面向相似性的时间序列聚类方法研究[D].武汉:华中科技大学,2006.

[16] 周悦.电线积冰形成机理研究:观测和模拟[D].南京:南京信息工程大学,2012.

[17] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.

[18] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.

[19] 袁明友,肖先勇,杨洪耕,等.基于灰色理论的供电系统负荷中长期预测模型及其应用[J].四川大学学报(工程科学版),2002,34(4):33-35.

[20] 崔立志.灰色预测技术及其应用研究[D].南京:南

[4] 郑坚强,陶涛,万文博.浅析一例 110kV 电容式电压互感器二次电压失压故障[J].变压器,2012,49(7):73-76.

[5] 林浩,倪学锋,王岩,等.基于 EMS 数据的电容式电压互感器在线监测系统研究[J].电测与仪表,2015,52(4):1-7.

[6] 邱太洪,罗容波,李国伟,等.电容式电压互感器二次电压在线监测在故障检测分析中的应用[J].变压器,2015,52(9):70-73.

[7] 张福州,刘鹏,黄嘉鹏,等.电容式电压互感器误差在线监测系统的研制[J].电测与仪表,2016,53(s1):53-57.

[8] 李坤,邵明鑫,汪本进,等.±1100 kV 直流电压互感器在线监测系统研究[J].高压电器,2017,12(6):1-7.

[9] 郑祖光.经验模态分析与小波分析及其应用[M].北京:气象出版社,2010.

[10] 贾嵘,徐其惠,田录林,等.基于经验模态分解和固有模态函数重构的局部放电去噪方法[J].电工技术学报,2008,23(1):13-18.

[11] 钱勇,黄成军,陈陈,等.基于经验模态分解的局部放电去噪方法[J].电力系统自动化,2005,29(12):53-56.

[12] 杨位钦,顾岚.时间序列分析与动态数据建模(修订本)[M].北京:北京理工大学出版社,1988.

[13] 陈湘涛,李明亮,陈玉娟.基于时间序列相似性聚类的应用研究综述[J].计算机工程与设计,2010,31(3):577-581.

[14] 方开泰,潘恩沛.聚类分析[M].北京:地质出版社,1982.

[15] 吕黎.面向相似性的时间序列聚类方法研究[D].武汉:华中科技大学,2006.

作者简介:

龙 呈(1987),博士,主要从事变电站自动化技术研究。
(收稿日期:2018-07-25)

=====

(上接第 36 页)

[16] 周悦.电线积冰形成机理研究:观测和模拟[D].南京:南京信息工程大学,2012.

[17] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.

[18] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.

[19] 袁明友,肖先勇,杨洪耕,等.基于灰色理论的供电系统负荷中长期预测模型及其应用[J].四川大学学报(工程科学版),2002,34(4):33-35.

[20] 崔立志.灰色预测技术及其应用研究[D].南京:南

京航空航天大学,2010.

[21] 邓聚龙.灰预测与灰决策[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.

[22] 汪进峰.高压输电线路安全运行状态分析建模与仿真[D].武汉:武汉理工大学,2012.

作者简介:

莫思特(1969),副教授、博士,研究方向为电气工程;
曾 琦(1977),博士、讲师,研究方向为电力系统稳定和控制、高压直流输电。

(收稿日期:2018-08-19)