

基于正态模型的电气试验方法优化及参数估计研究^{*}

商豪¹, 卢威²

(1. 湖北工业大学, 武汉 430068; 2. 武汉大学, 武汉 430072)

摘要:为掌握正态分布电气特性数据的正确试验方法, 确定合理的参数估计值, 文章基于最小二乘参数估计方法, 针对多级法和升降法电气试验数据进行中值及标准偏差统计分析。研究结果表明, 多级法与升降法试验数据的中值估计值 50% 放电电压 U_{50} 有很好的-致性, 仅相差 3.7%; 而两种试验方法对应的标准偏差估计值相差较大, 达到 42.6%, 因此, 在实际电气试验工作中, 尤其对于获取大尺度绝缘的标偏试验, 应优先选择多级法, 而获取 50% 放点电压则两种方法均可以满足要求。

关键词:正态分布; 多级法; 升降法; 最小二乘法; 参数估计

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.011.010

中图分类号: TM855

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2019)11-0055-06

Research on electrical test method optimization and parameter estimation based on normal model

Shang Hao¹, Lu Wei²

(1. Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China. 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to correctly select the test method which conforms to the normal distribution model and determine the reasonable statistical value of parameters, based on the least squares parameter estimation method, this paper makes a statistical analysis of the median and standard deviation of the test data of multi-stage method and lifting method commonly used in electrical tests data. The research results show that the two test methods of multi-stage method and lifting method have good consistency with the corresponding median U_{50} estimation value, while the difference between two statistical standard deviations is large, reaching 42.6%. Therefore, in the actual electrical test work, especially for the parameter statistics of large-scale insulation test for obtaining standard deviation, the multi-stage method should be preferred, rather than lifting method. Both methods can meet the requirements of obtaining 50% discharge voltage.

Keywords: normal distribution, multi-stage method, lifting method, least squares method, parameter estimation

0 引言

在社会生活中, 大量客观事物的存在都符合正态分布规律, 如身高、体重、产品质量, 等等。为了很好的掌握实际事物的正态特征, 为生产、生活服务, 统计部门、制造企业或研究机构通常会采用统计方法, 估计其正态分布的关键参数, 计算得出其中值和统计偏差的估计值, 对于指导社会生产、政策制定等工作具有重要的实际意义。

文章针对电气绝缘试验的参数估计问题, 首先分别采用多级法和升降法就同一棒-板典型间隙, 开展了

放电特性试验, 获得了大量不同电压下的放电特性数据, 然后采用最小二乘法对于两类试验数据进行了参数估计, 并对比分析了多级法和升降法试验数据的统计特性, 提出了两种方法试验数据统计中值电压和统计标偏的差异性, 可为电气绝缘特性研究中试验方法的选择, 以及电力工程绝缘配合标准偏差的合理确定提供重要支持。

1 棒-板间隙电气绝缘试验

为了满足输电线路或变电站空气绝缘间隙的合理配置, 电力科研单位通常需要开展典型间隙的放电特性试验, 获取放电电压值, 如 50% 放电电压、统计偏差等。试验时采用冲击电压发生装置产生脉冲电压, 施

^{*} 基金项目: 湖北省教育厅科学研究项目(14G191)

加于空气间隙电极上,进行多次放电电压测试。由于在试验中,多次空气间隙放电之间会间隔一定时间,如 1 min ~2 min,放电之间可视为无相关性,因此,单次放电试验属于独立事件,其规律符合正态分布(或高斯分布)^[1-2]。基于试验事件正态分布参数估计的基本原理,试验过程所采用的方法主要有升降法和多级法两种,其试验结果统计分析后均可以得到 50% 放电电压值 U_{50} 和统计标偏 σ 的结果,但两种方法的结果在准确性方面存在一定差异性,下文将以典型试验数据为例,对比分析两种方法的统计结果的准确性和适用条件。

文章首先针对 5.0 m 棒-板长空气间隙,分别采用升降法和多级法进行了放电特性试验,获得了相应试验数据。如图 1、图 2 所示棒-板电极,棒电极为长 15 m、直径 60 mm 钢棒,端部结构是 60 mm 的半球;板电极为 20 m×20 m 接地钢板。

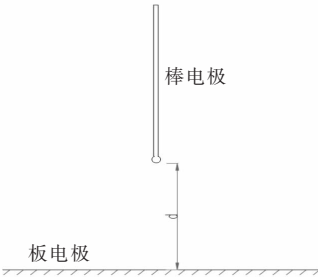


图 1 棒-板电极间隙试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rod-plane electrode air-gap test



图 2 棒-板电极间隙试验典型放电图

Fig. 2 Rod-plane air-gap typical flashover picture

如图 2 典型放电图所示,试验时上侧棒电极联接高压引线,施加标准操作冲击电压,下侧棒板处于地电位。试验结果根据环境温度、湿温和气压修正到标准大气条件。

1.1 棒-板间隙多级法放电试验结果

1.1.1 多级法试验方法

文章试验所采用的多级试验法,电压选择 5 个等

级,每级进行 13 次试验^[3-4]。

具体试验过程为:

- (1) 选择 m 个不同的电压等级 $U_i, i = 1, 2, \dots, m$, 文章 m 取 5;
- (2) 在每一级电压 U_i 下各加压 n_i 次, 文章 n_i 均取 13;
- (3) 记录每次试验的电压幅值和是否发生放电的结果;
- (4) 选择数理统计方法求取 50% 放电电压估计值和标准偏差估计值。

1.1.2 多级法试验结果

采用多级试验法,获得的棒-板间隙试验数据结果如表 1 所示。

表 1 空气间隙放电多级法试验数据

Tab. 1 Multi-stage method test data of air-gap flashover

序号	电压等级 i									
	1	2	3	4	5					
1	1 209	o	1 280	o	1 379	o	1 404	x	1 375	x
2	1 208	o	1 279	o	1 380	x	1 366	x	1 420	x
3	1 203	o	1 213	x	1 318	x	1 387	x	1 419	x
4	1 201	o	1 275	o	1 387	o	1 423	o	1 378	x
5	1 204	o	1 271	o	1 363	x	1 376	x	1 455	o
6	1 183	x	1 279	o	1 385	o	1 429	o	1 425	x
7	1 200	o	1 278	o	1 383	o	1 359	x	1 410	x
8	1 205	o	1 278	o	1 294	x	1 338	x	1 392	x
9	1 201	o	1 210	x	1 354	x	1 422	o	1 426	x
10	1 204	o	1 259	x	1 371	x	1 379	x	1 415	x
11	1 205	o	1 211	x	1 383	o	1 356	x	1 421	x
12	1 201	o	1 271	o	1 388	o	1 378	x	1 380	x
13	1 209	o	1 276	x	1 380	o	1 370	o	1 390	x

表注:“o”—耐受;“x”—放电

表 1 给出了 5 个电压等级各次试验中,包括耐受和放电的各次试验电压值及放电标示^[5-6]。表 2 在表 1 基础上进行了汇总统计,求取了每级施加电压的均值和各级电压的放电比率。

表 2 多级法试验数据统计结果

Tab. 2 Statistical results of multi-stage method testdata

第 i 级试验	1	2	3	4	5
试验次数	13	13	13	13	12
施加电压均值 U_i/kV	1 204	1 276	1 384	1 396	1 455
某级放电比率 f_i	0.077	0.385	0.462	0.692	0.923

图 3 为试验棒-板间隙在多级法每级施加电压下的放电比率。

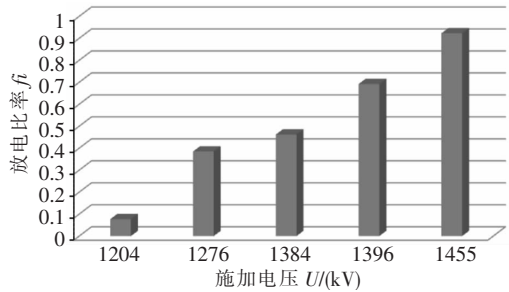


图 3 各级电压放电比率

Fig. 3 Flashover ratio at various stages of voltage

从表 2 及图 3 概率值统计结果来看,随着施加电压的逐渐提高,在每级 13 次试验中,放电概率从 7.7% 增大到 92.3%。基于表 2 数据,采用相应参数统计方法,可分析得出正态分布统计中值,即对应该试验的 50% 放电电压和统计标准偏差。

1.2 棒-板间隙升降法放电试验结果

1.2.1 升降法试验方法

在升降法试验中,电压等级 U_i 施加 n 组,每组 m 次基本不变的电压,每组加压的电压水平根据前一组试验结果来确定增加或减少一个小量 $\Delta U^{[3]}$ 。

通常采用两种试验程序:为找出相应于低放电概率的电压水平的耐受程序和为了找出相应于高放电概率的电压水平的放电程序。在耐受程序中,如果一组 m 次加压中没有破坏性放电发生,则电压水平增加一个级差 ΔU 否则减少一个级差 ΔU 。在放电程序中,如果一组 m 次加压中耐受住一次或一次以上,则增加一个级差,否则减少一个级差。

当 $m = 1$ 时,上述两种程序相同并相应于 50% 放电电压升降法试验。文章升降法试验 m 取 1,试验总次数为 30 次。

1.2.2 升降法试验结果

表 3 中数据是文章采用升降法试验获得的 5.0 m 棒-板间隙试验数据,在 30 次试验中耐受和放电各占 15 次。

表 3 空气间隙放电升降法试验数据

Fig. 3 Test data of air-gap flashover lifting method

序号	电压值 U_i/kV	结果 标示	序号	电压值 U_i/kV	结果 标示
1	1 256	o	16	1 292	x
2	1 294	x	17	1 230	x
3	1 237	x	18	1 190	o
4	1 186	o	19	1 250	o
5	1 259	o	20	1 311	x
6	1 332	o	21	1 245	x
7	1 338	x	22	1 187	o
8	1 313	x	23	1 253	o
9	1 236	x	24	1 288	x
10	1 186	o	25	1 273	o
11	1 257	o	26	1 331	o
12	1 333	o	27	1 367	x
13	1 344	x	28	1 335	o
14	1 309	x	29	1 381	x
15	1 264	o	30	1 306	x

表注:“o”—耐受;“x”—放电

图 4 为升降法试验数据统计图,从图 3 中曲线可见,在 30 次试验中,共出现 4 个电压等级,试验电压在 4 个等级内上下浮动。

采用同样方法将升降法试验数据按照电压等级分级统计后,可以得出升降法试验各级电压试验次数和放电概率结果如表 4 所示。

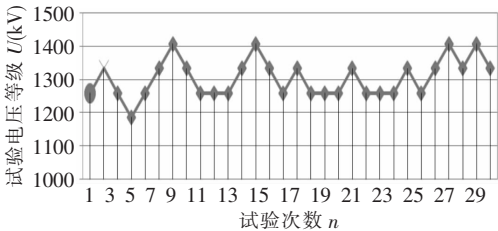


图 4 升降法试验数据统计曲线

Fig. 4 Statistical curve of lifting method test data

表 4 升降法试验数据统计结果

Tab. 4 Statistical results of lifting method test data

第 i 级试验	1	2	3	4
试验次数	1	14	11	4
施加电压均值 U_i/kV	1 187	1 259	1 333	1 406
放电概率 f_i	0	0.071	0.545	1

分析表 4 中数据可知,第 1 级和第 4 级放电概率分别为 0 和 100%,对于正态分布参数统计无实际价值。另外的第 2 级和第 3 级试验,其放电概率分别接近于 10% 和 50%,可作为参数估计的有效试验数据。

2 最小二乘法参数估计方法

2.1 标准偏差估计值 $\hat{\sigma}$ 的计算

最小二乘法计算多个电压等级试验电压标准偏差 σ 的估计值为:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^m U_i^2 - m\bar{U}^2}{\sum_{i=1}^m U_i t_i - m\bar{U}\bar{t}} \quad (1)$$

式中 m 为统计试验电压级数; U_i 为第 i 级电压均值;

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^m U_i}{m} \quad (2)$$

$$t_i = \frac{U_i - U_{50}}{\sigma} \quad (3)$$

式(3)中, U_{50} 和 σ 分别为 50% 放电电压及其标准偏差真实值,因此, t_i 符合标准正态分布规律。将试验中的各级电压放电比率 f_i 作为标准正态概率点,查询标准正态分布表可获得对应的 t_i 值。 $\bar{t}$ 为 t_i 的均值^[7,9]。

根据不同电压等级试验数据统计结果,利用式(1)可以计算得出标准偏差的样本估计值 $\hat{\sigma}$ 。

2.2 50% 放电电压估计值 $\hat{U}_{50}$ 的计算

50% 放电电压 U_{50} 的估计值 $\hat{U}_{50}$ 为:

$$\hat{U}_{50} = \bar{U} - \hat{\sigma}\bar{t} \quad (4)$$

依据试验中多个电压等级试验结果,结合标准正态分表,利用式(1)、式(4)可计算得出 50% 放电电压估计值 $\hat{U}_{50}$ 。

3 试验结果的参数估计及对比

3.1 多级法试验结果参数估计

首先将不同等级电压试验放电比率作为概率分布值,查标准正态分布表得出分位数 t_i 值^[10-13],如表 5 所示。

根据表 5 试验数据统计结果,可以依次计算得出 $\bar{t}$ 、 $\bar{U}$ 和 $\hat{\sigma}$ 。

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} = \frac{(-1.43 - 0.29 - 0.1 + 0.5 + 1.43)}{5} = 0.022 \quad (5)$$

表 5 多级法试验数据统计结果

Tab. 5 Statistical results of multi-stage method test data

电压等级 i	电压峰值 U_i/kV	击穿比率 f_i	t_i
1	1 204	0.07 7	-1.43
2	1 276	0.385	-0.29
3	1 384	0.462	-0.1
4	1 396	0.692	0.5
5	1 455	0.923	1.43

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^m U_i}{m} = \frac{1204 + 1276 + 1384 + 1396 + 1455}{5} = 1343 \text{ kV} \quad (6)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^m U_i^2 - m\bar{U}^2}{\sum_{i=1}^m U_i t_i - m\bar{U}\bar{t}} = 101.9 \text{ kV} \quad (7)$$

最小二乘法计算 50% 放电电压 U_{50} 的估计值 $\hat{U}_{50}$ 为:

$$\hat{U}_{50} = \bar{U} - \hat{\sigma}\bar{t} = 1343 - 101.9 \times 0.022 = 1340.8 \text{ kV} \quad (8)$$

3.2 升降法试验结果参数估计

将升降法试验数据中不同电压等级放电比率作为概率分布值,查标准正态分布表得出 t_i 值,如表 6 所示。由于升降法试验数据中第 1 级试验放电比率为 0,第 4 级放电比率为 100%,根据最小二乘法参数统计规律,这样的数据对于参数估计是无效概率点,不予统计,只统计第 2 和第 3 电压等级数据。

表 6 升降法试验数据统计结果

Tab. 6 Statistical results of lifting method test data

电压等级 i	电压峰值 U_i/kV	击穿比率 f_i	t_i
2	1 259	0.071	-1.47
3	1 333	0.545	0.11

根据表 6 数据和最小二乘法原理,可以逐步计算得出统计标偏 $\hat{\sigma}$ 和 $\hat{U}_{50}$ 。

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} = -0.68 \quad (9)$$

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^m U_i}{m} = 1296 \text{ kV} \quad (10)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^m U_i^2 - m\bar{U}^2}{\sum_{i=1}^m U_i t_i - m\bar{U}\bar{t}} = 58.5 \text{ kV} \quad (11)$$

最小二乘法计算 50% 放电电压 U_{50} 的估计值 $\hat{U}_{50}$ 为:

$$\hat{U}_{50} = \bar{U} - \hat{\sigma}t = 1335.8 \text{ kV} \quad (12)$$

3.3 两种试验方法参数估计的对比分析

将多级法和升降法试验数据经过最小二乘法参数估计分析后,得出其 50% 放电电压和统计标偏值对比情况,如表 7 所示。

表 7 两种试验方法参数估计结果的对比

Tab. 7 Comparison of parameter estimation between two test methods

试验方法	$\hat{U}_{50}$	$\hat{\sigma}$
(M) 多级法	1 340.8	101.9
(L) 升降法	1 335.8	58.5
参数估计对比差异 $(U_m - U_l)/U_l = 3.7\%$ $(\sigma_m - \sigma_l)/\sigma_l = 426\%$		

从表 7 两种试验方法获得的试验数据统计结果来看,多级法与升降法得出的 50% 放电电压值差别微小,仅为 3.7%。如考虑不同试验时间大气条件差异的影响,则文章所获得的 U_{50} 值的差别会更小,因此,两种方法估计的 U_{50} 值是基本一致的;而两种方法试验数据的统计标偏分析结果则差异显著,达到 42.6%。其主要原因为,按照升降法的设计思想,施加电压以几个级差 ΔU 的差别(通常 $\leq 5\Delta U$) 围绕试验时段的 U_{50} 值上下浮动。试验获得的概率值,除最低电压对应的概率 $P_{u-\min} = 0\%$ 、最高电压概率值 $P_{u-\max} = 100\%$ 外,通常只包括 1~3 个概率点,且主要分布在 50% 上下,未同时包括 < 15.6% 和 > 84.6% 的概率值,因此,根据正态分布原理不能较为准确的得出统计标偏,且偏差较显著,其统计结果不能用于实际工程设计。目前,多级法是国家标准中求取标准偏差估计值的通用试验方法,但部分工程设计人员未理解试验方法与统计结果的关系,错误的将升降法的统计标偏作为试验标偏用于绝缘配合,容易造成设计绝缘尺度偏小或过于保守的问题,应予以足够重视,及时纠正使用方法。文章研究明确的得出了两种试验方法的参数估计的一致性和差异,可以作为试验人员和设计人员日常工作的参考。

4 结束语

(1) 文章分别采用多级法和升降法两种方法研究了 5.0 m 棒-板空气间隙标准操作冲击绝缘放电特性,获得了该典型间隙在不同电压幅值下的放电概率分布;

(2) 研究表明多级法和升降法两种试验方法所获

得试验数据经统计分析后,其 50% 放电电压具有很好的一致性,仅相差 3.7%,表明这两种方法用于求取 50% 放电电压试验,均具有很好的准确性。

(3) 多级法是求取标准偏差估计值的通用试验方法,而升降法试验数据统计后得出的统计标偏与多级法统计标偏差异显著,相差达到 42.6%,因此,升降法虽然可以通过较少的试验次数和较短试验时间求取 50% 放电电压值,但通过该方法得出的统计标偏与实际值存在较大误差,不能用于绝缘配合等工程设计工作中,否则会造成较严重的设计缺陷。

参考文献

- [1] 黄超. 对数正态分布的参数估计[J]. 高等数学研究, 2015, 18(4): 4-20.
Huang chao. Parameter estimation of the lognormal distribution[J]. Studies in College Mathematics, 2015, 18(4): 4-20.
- [2] 郑明, 杨艺. 基于分组数据的对数正态分布的参数估计[J]. 系统工程理论方法应用, 2004, (6): 553-556.
Zheng Ming, Yang Yi. Estimating parameter in lognormal distribution from grouped data[J]. Systems Engineering-theory Methodology Applications, 2004, (6): 553-556.
- [3] GB/T 16927.1-2011, 高电压试验技术 第1部分: 一般定义及试验要求[S].
- [4] 雷鸣, 郭玥, 李俊, 等. 基于参数估计的工频交流信号过零时刻检测方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(3): 99-103.
Lei Ming, Guo Yue, Li Jun, et al. Method of zero-cross time detection of power-frequency AC signals based on parameter estimation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(3): 99-103.
- [5] 王彤, 曾彦珩, 李怡, 等. 基于统计法的变电站雷击故障率计算方法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(9): 17-23.
Wang Tong, Zeng Yanjun, Li Yi, et al. Calculation Method of Lightning Failure Rate of Substation Based on Statistical Method[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(9): 17-23.
- [6] 商豪, 王学宗. 正态模型参数统计方法在试验数据处理中的应用分析[J]. 电工技术, 2018, (5): 27-30, 78.
Shang Hao, Wang Xuezhong. Application Analysis of Normal Model Parameter Statistics Method in The Experimental Data Processing[J]. Electric Engineering, 2018, (5): 27-30, 78.
- [7] 穆小星, 段梅梅, 张健. 数字化电能表“溯源”探究与分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(23): 28-34.
Mu Xiaoxing, Duan Meimei, Zhang Jian. Probe and analysis of the traceability method for the digital electrical power meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(23): 28-34.
- [8] 张志国, 曹洋, 孙平. 对数正态分布参数的精确估计及其应用[J]. 辽宁科技大学学报, 2008, (Z1): 269-272.
Zhang Zhiguo, Cao Yang, Sun Ping. Precise estimation and application of log-normal distribution parameters[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2008, (Z1): 269-272.
- [9] 王慧武, 刘巍, 丛超. 基于非线性理论的电力谐波检测与估计[J]. 电测与仪表, 2016, 53(3): 68-74.

- Wang Huiwu, Liu Wei, Cong Chao. The detection and estimation of electric power harmonics based on nonlinear theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(3): 68-74.
- [10] 王昌长, 姜秀峰, 谈克雄. 多级法数据处理方法的探讨[J]. 高压电器, 1990, (3): 29-33.
- Wang Changchang, Jiang Xiufeng, Tan Kexiong. Discuss on the data processing of multi-stage method[J]. High Voltage Apparatus, 1990, (3): 29-33.
- [11] 彭小娟, 王磊, 贾正森, 等. 基于蒙特卡罗法的数字化电能表计量误差评估[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16): 100-105.
- Peng Xiaojuan, Wang Lei, Jia Zhengsen, et al. Measurement error evaluation of digital energy meter based on Monte Carlo method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16): 100-105.
- [12] 孙曙光, 杜太行, 耿宾, 等. 框架式断路器关键附件电气参数检测与试验技术研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(9): 36-40, 112-119.
- Sun Shuguang, Du Taihang, Geng Bin, et al. Research on the key accessory electrical parameter detection and test technology of frame type circuit breaker[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(9): 112-119.

- [13] 张千, 李新民. 两正态分布总体变异系数差的区间估计[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2014, 28(3): 42-45.

Zhang Qian, Li Xinmin. Confidence interval of the variation coefficients for two normal distributions[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 28(3): 42-45.

作者简介:



商豪(1982—), 女, 汉族, 湖北黄冈人, 讲师, 博士, 主要从事统计建模、随机过程及应用等方面的研究。

Email: greenshh@126.com

卢威(1992—), 男, 汉族, 湖北人, 硕士研究生, 主要从事高电压绝缘测试及工程电磁场仿真分析的研究工作。

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-05-05

(杜景飞 编发)

(上接第54页)



赵琦(1994—), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为应用数学及数据分析建模。

Email: zhaoq17@fudan.edu.cn



田英杰(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真。

Email: 13901712348@163.com

收稿日期: 2019-03-12; 修回日期: 2019-04-28

(田春雨 编发)



郭乃网(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为计算机及数据建模分析。

Email: 76629513@qq.com



苏运(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真及配用电大数据分析。

Email: oppenvi@163.com