第 52 卷 第 5 期：2339-2348 高电压技术 Vol.52, No.5: 2339-2348
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250903

基于场致发射电流特性的真空灭弧室触头表面微观状况的无损检测方法

耿　云[1]，姚晓飞[2]，丁健刚[3]，许闽桦[2]，耿英三[2]，刘志远[2]
（1. 西安理工大学电气工程学院，西安 710048；2. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049；3. 南方电网电力科学研究院，广州 510663）

摘　要：触头表面状态直接影响真空断路器的开断性能及其运行可靠性。由于真空灭弧室通常被密封于固体绝缘材料中，现有的触头状态评估方法大多依赖拆解操作，难以实现工程现场的无损测量。针对上述问题，该文提出一种基于直流电压下合闸过程的场致发射电流无损测量方法，可在无需拆卸真空灭弧室的前提下实现对触头表面微观状况的定量评估。首先系统分析了热-场致发射理论，建立了适用于不同测量场景下的数学模型，对比了交流静开距与直流动开距两种测量方法的适用性与测量精度。随后，结合 Fowler-Nordheim 和 Murphy-Good 两种理论，分别构建场致发射电流特征图谱，提出了相应的触头场致增强系数与有效发射面积提取方法。在容性投切实验中，将所提出的新型测量系统与综合实验平台进行集成，通过逐次加载高频涌流并监测场致发射特性，实现了对触头表面烧蚀过程的定量追踪。实验结果表明，该方法不仅简化了测量流程，显著提高了工程适用性，同时具备良好的数据一致性和理论可解释性，可为真空断路器在线状态评估与寿命预测提供有效支撑。

关键词：真空断路器；场致发射电流；触头状态评估；无损测量；Murphy-Good 理论；Fowler-Nordheim 理论

Non-destructive Testing Method for Contact Surface Microtopography in Vacuum Interrupters Based on Field Emission Current Characteristics

GENG Yun[1], YAO Xiaofei[2], DING Jiangang[3], XU Minju[2], GENG Yingsan[2], LIU Zhiyuan[2]
(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
3. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The contact surface condition directly affects the breaking performance and operational reliability of vacuum circuit breakers. Since vacuum interrupters are typically sealed within solid insulating materials, existing contact assessment methods mostly rely on disassembly procedures, making it difficult to achieve non-destructive measurement on-site in engineering. To address this issue, this paper proposes a non-destructive measurement method based on field emission current during the closing process under DC voltage, enabling quantitative evaluation of contact surface microtopography without disassembling the vacuum interrupter. First, this paper systematically analyzes thermionic-field emission theory, establishes mathematical models suitable for different measurement scenarios, and compares the applicability and measurement accuracy of two methods, namely, AC static contact gap and DC dynamic contact gap measurements. Subsequently, by integrating Fowler-Nordheim and Murphy-Good theories, characteristic field emission current profiles are constructed, and corresponding extraction methods for the field enhancement factor and effective emission area of contacts are proposed. In capacitive switching experiments, the proposed measurement system is integrated with a comprehensive test platform. By sequentially applying high-frequency inrush currents and monitoring field emission characteristics, quantitative tracking of contact surface erosion is achieved. The experimental results demonstrate that this method not only simplifies the measurement process and significantly improves engineering applicability, but also exhibits strong data consistency and theoretical interpretability. The method can provide effective support for online condition assessment and lifespan prediction of vacuum circuit breakers.

Key words: vacuum circuit breaker; field emission current; contact condition assessment; non-destructive measurement; Murphy-Good theory; Fowler-Nordheim theory

——————————

基金资助项目：国家自然科学基金重点项目(51937009)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51937009).

0 引言

真空灭弧室因结构紧凑、机械寿命长、维护简便和环境友好等优势[1]，在电力系统中得到广泛应用，尤其是在中压真空断路器中表现尤为突出。真空断路器凭借优异的载流与短路电流开断能力，已成为当前中压系统中最可靠的开关设备之一[2]。然而，真空断路器的开断性能和保护能力在很大程度上取决于触头的工况状态。若触头状态劣化而未及时检测和修复，可能导致系统和负载遭受严重损失。

典型真空断路器由真空灭弧室、操动机构和控制单元 3 部分组成。据统计，真空断路器故障主要发生在操动机构，而约 14%故障源于灭弧室本体[3]。相较于操动机构和控制单元，真空灭弧室的状态评估，尤其是触头状态的判断，面临较大挑战[4-6]。由于灭弧室通常密封在固体绝缘材料中，且长期承受高压和大电流作用，难以直接获取触头内部状态信息。因此，如何实现对触头状态的有效评估，已成为保障真空断路器安全可靠运行的关键问题。

在实际运行过程中，触头会因电弧作用产生烧蚀和熔焊，削弱断路器电流开断与绝缘能力，进而影响其整体性能[7]。特别是在容性负载合闸时，由于高幅值高频率涌流的冲击[8]，触头表面易发生剧烈烧蚀，严重时甚至引发触头熔焊现象，显著缩短设备寿命并降低运行可靠性[9-10]。因此，深入研究触头烧蚀机制，并建立有效的状态评估方法，对于提升真空断路器的运行稳定性和延长其服役寿命具有重要意义。

现有的触头状态评估方法可分为侵入式和非侵入式两类。侵入式方法通过拆解真空灭弧室并结合高分辨率成像技术或扫描电子显微镜(scanning electron microscope，SEM)等，直接观测触头表面的宏观和微观形貌[11]。然而，此类方法会对设备造成不可逆损伤，仅适用于实验室条件或可拆卸式灭弧室[12]。

非侵入式诊断方法更适合现场应用，主要包括接触电阻测量、焊接力检测及场致发射电流检测等方法。其中，接触电阻法因对轻微烧蚀不敏感而难以准确反映触头实际状态[13]；焊接力检测也存在一定局限性，无法有效评估非焊接状态的烧蚀[14]。相比之下，场致发射电流检测因其对触头微观状态变化敏感，已成为一种有效的无损诊断手段[15]。

场致发射电流由金属触头表面电子在强电场作用下，通过量子隧穿效应逃逸形成，直接反映触头微观拓扑、功函数及电场分布状态，因而能够有效评估触头表面状态。然而，传统场致发射电流测量方法需要拆解真空灭弧室，无法应用于密封式真空断路器，限制了其工程应用[16]。

为克服上述限制，本文提出了一种基于改进Fowler-Nordheim(F-N)理论的触头场致增强系数无损测量方法。通过低功率直流电压激励和同步采集场致发射电流、电压及触头位移信号，实现对触头微观特性的定量表征[17]。该方法具有测量灵敏度高、实时无损监测以及已验证的实验有效性等显著优势。相较文献[17]，本研究突破在于引入Murphy-Good(M-G)高精度模型，实现了真空灭弧室触头表面烧蚀过程的动态量化监测。

此外，M-G 场致发射理论通过进一步考虑量子效应，对 F-N 公式进行了修正，理论上可显著提高测量精度，但基于该理论的无损测量方法尚未建立[18]。这使得双断口真空断路器高频涌流下的触头场致增强系数变化规律研究仍属空白，成为制约触头预击穿分散性研究的技术瓶颈。

为此，本文提出一种基于直流合闸过程的触头状态在线检测新方法，通过监测合闸过程中触头间的场致发射电流实现真空灭弧室触头状态的实时评估。文章后续章节将详细阐述该方法的工作原理、实验验证以及新方法相较传统方法在测量精度与工程适用性方面的优势。

1 热-场致发射理论

场致发射理论主要研究在高电场、近零温度条件下的电子发射行为，发展历程较复杂。1928 年，Fowler 和 Nordheim 首次推导出场致发射电流密度的近似表达式，为该领域奠定了理论基础[19]。

$$j_{\mathrm{E}} = a\varphi^{-1}E^{2}\exp(-b\varphi^{3/2}/E) \tag{1}$$

式中：j_{E} 表示场致发射电流密度；E 为阴极表面附近电场强度；φ 为材料的功函数；a 和 b 分别为第一和第二 Fowler–Nordheim 常数。式(1)即著名的 Fowler–Nordheim 方程，已被广泛应用于多个研究领域。

尽管式(1)在定性上与实验结果相符，但在定量预测方面存在显著偏差。其主要误差来源包括：在推导过程中忽略了像电荷效应，以及假设施加电场下的势垒为理想的三角形[20]。此外，原始推导中还存在若干数学上的不严谨之处[21]。

后续研究对以上数学误差进行了修正。1953 年，Burgess、Kroemer 与 Houston(BKH)提出了更精确的场致发射电流表达式[22]。在此基础上，Murphy

和 Good 进一步引入了像电荷对势垒的影响。当同时考虑施加电场与像电荷效应时，位于 $z>0$ 区域的势垒形状如图 1(a)所示。此时势垒整体仍呈三角形，但顶端趋于圆滑，因此被称为“圆顶三角势垒”。此外，电场不仅会使势垒变窄，还会降低其最大高度，这种现象称为肖特基效应(Schottky effect)。图 1(b)展示了势垒降低程度与电场强度之间的关系。

结合 BKH 修正与圆顶三角势垒模型，Murphy 与 Good 于 1956 年推导出在 0 K 条件下适用的 Murphy-Good 方程[23]，其表达式如下：

$$j_{\mathrm{E}} = t_{\mathrm{E}}^{-2} a\varphi^{-1} E^2 \exp(-v_{\mathrm{E}} b\varphi^{3/2} / E) \tag{2}$$

式中：t_{E} 和 v_{E} 是与局部电场强度相关的函数。尽管 Murphy-Good 方程具有较高计算精度，但其数学形式较复杂，计算量较大。在随后的几十年中，许多研究致力于构建高精度的近似模型[24]，以提高计算效率并简化应用过程。该研究仍在持续推进，相关理论也在不断完善和发展。

热电子发射的理论计算已较为成熟，适用于高温、低电场强度条件下的电子发射过程。其发射电流密度可由 Richardson-Laue-Dushman(RLD)方程描述如下：

$$J_{\mathrm{T}} = \frac{4q\pi m_{\mathrm{e}} (k_{\mathrm{B}} T)^2}{h^3} \exp(-\frac{\varphi - \Delta\varphi}{k_{\mathrm{B}} T}) \tag{3}$$

式中：J_{T} 为热电子发射电流密度；q 为元电荷量；m_{e} 为电子质量；h 为普朗克常数；T 为发射体温度；k_{B} 为玻耳兹曼常数；$\Delta\varphi$ 为肖特基效应引起的功函数降低量。

在真空击穿现象中，通常同时存在高温与强电场，这使得热-场发射电流的精确计算变得更加复杂和具有挑战性。针对这种耦合机制，目前常用的热-场发射电流表达式如下：

$$j_{\mathrm{TF}} = \pi p / \sin(\pi p) \cdot t_{\mathrm{E}}^{-2} a\varphi^{-1} E^2 \exp(-v_{\mathrm{E}} b\varphi^{3/2} / E) \tag{4}$$

式中：j_{TF} 为热-场致发射电流密度；p 为一个与局部电场强度和温度相关的系数，其具体形式可表示为：

$$p = \frac{4\pi\sqrt{2m_{\mathrm{e}}\varphi} t_{\mathrm{E}} k_{\mathrm{B}} T}{hqE} \tag{5}$$

尽管该方法可用于计算热-场发射电流，但其精度仍较为有限。要实现对热-场发射电流的高精度计算，仍需进行大量复杂的数值计算。

2　交流电压下固定开距的场致发射电流测量方法

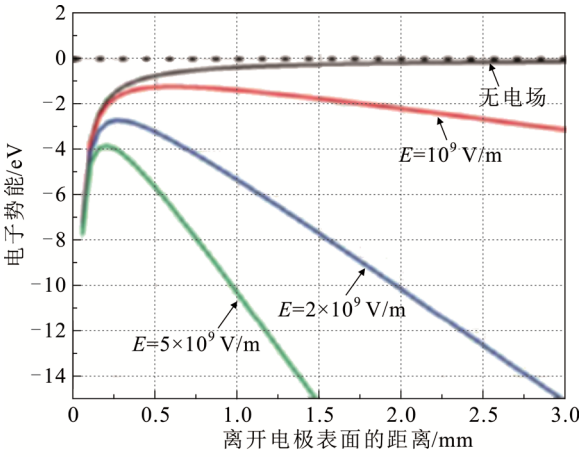
传统的交流定开距测量方法通过施加 50 Hz 交流电压，在固定开距(0.3~1 mm)下测量场致发射电流。图 2 所示系统中，取样电阻 R_{s} 与真空灭弧室串联，电流信号经示波器采集。图中，U_{AC} 为交流源电压；SW_1 为断路器；R、R_1、R_2 为电阻；U_1 为分压器电压；C_1、C_2 为电容；$\mathrm{VI}_{\mathrm{test}}$ 为被试真空断路器。为防止过电压损坏，R_{s} 并联瞬态电压抑制二极管(TVS)，其击穿电压为数十伏。触头间电压由高压分压器测量。其中，电压、场致发射电流和动触头行程曲线的测量精度分别为 0.1 kV、0.1 mA 和 0.1 mm。

通过 R_{s} 测量的电流(i)分为 3 部分：场致发射电流(i_{fe})、位移电流(i_{c})和通过绝缘瓷壳的泄漏电流(i_{leak})。关系式如下所示：

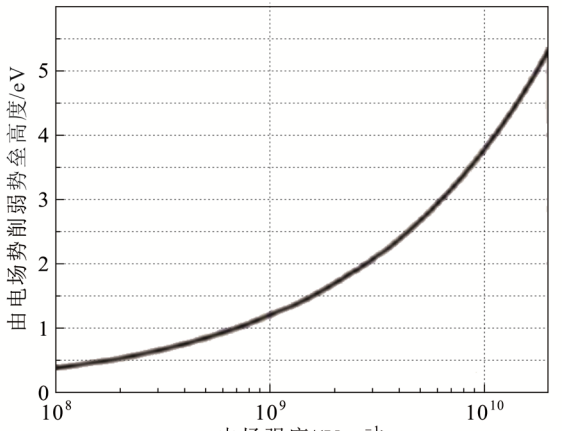
$$i = \frac{U_{\mathrm{e}}}{R_{\mathrm{s}}} = i_{\mathrm{fe}} + i_{\mathrm{c}} + i_{\mathrm{leak}} \tag{6}$$

式中：U_{e} 为 R_{s} 两端电压。

绝缘瓷壳的电阻介于 10^{12}~10^{15} Ω 之间，且施加



(a) 电场对势垒形状的影响



(b) 电场削弱的势垒高

图 1　电场对金属-电极界面势垒的削弱效应[20]

Fig.1　Electric field-induced weakening effect on the metal-electrode interface barrier[20]

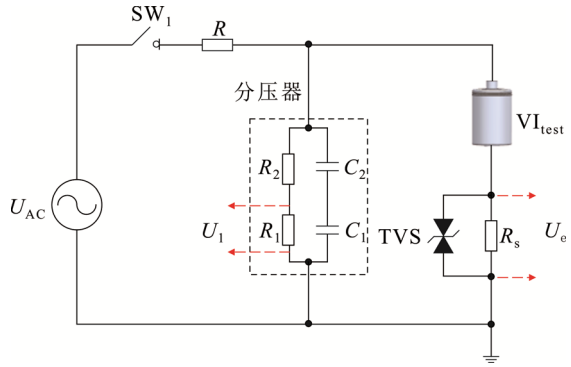


图 2 交流定开距触头表面微观状况测量系统

Fig.2 AC fixed-contact-gap measurement system for contact surface microtopography

电压峰值不超过 80 kV，因此泄漏电流始终小于 1 μA，可忽略不计。电流中的容性分量为位移电流 i_c 相位领先外加电压 90°，其大小取决于触头间真空间隙形成的电容，计算式如下：

$$i_c(t)=C\frac{\mathrm{d}V(t)}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

式中：C 为两触头间电容；$V(t)$为施加的交流电压；t 为时间。

未去除与已去除位移电流时的电压与电流波形分别如图 3 和图 4(a)所示。图 3 显示，位移电流在总电流中占主导地位，需通过补偿算法去除，以提取有效的场致发射电流。

3 交流定开距下的触头场致增强系数计算方法

3.1 基于 Fowler-Nordheim 场致发射理论

鉴于 M-G 模型计算复杂，本节对比 F-N 简化模型适用边界，3.2 节将验证 M-G 高精度优势。传统的交流定开距测量方法通过构建 F-N 图评估触头表面微观状态。尽管 F-N 理论最初基于单发射点模型，但引入场致增强因子 β 后，可扩展应用于大面积发射情况。局部电场 E 按以下公式计算：

$$E=\beta\cdot\frac{U}{d}=\beta_g\cdot\beta_m\cdot\frac{U}{d} \tag{8}$$

式中：U 为施加电压；d 为触头开距；β_m 为微观增强因子；β_g 为宏观增强因子。

其中，β_m 来源于触头表面的微观凸起，β_g 则反映触头间电场的非均匀分布。引入 β 后，施加电压 U 与局部电场 E 可用于 F-N 方程建模。F-N 方程(式(1))可重写为依赖于场致发射面积 A_e 和场致增强因子 β 的形式如下：

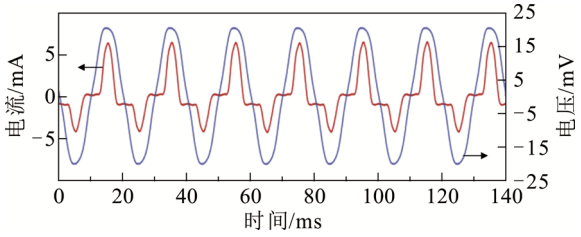


图 3 测得的场致发射电流和电压波形(未去除位移电流)交流定开距触头表面微观状况测量系统[17]

Fig.3 Measured field emission current and voltage waveforms (including displacement current component)[17]

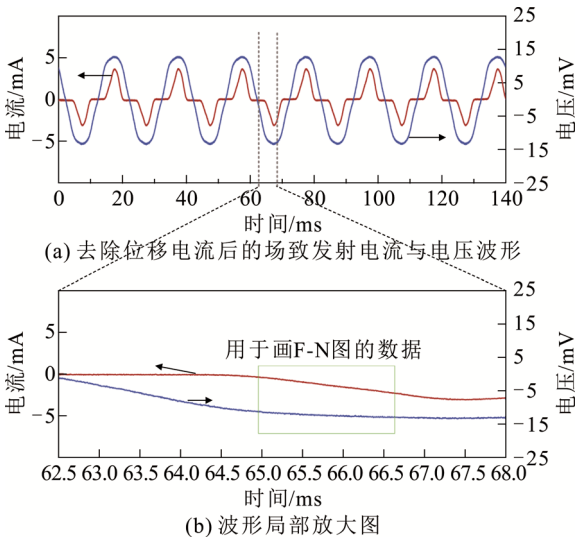


图 4 去除位移电流后的场致发射电流与电压波形及波形局部放大图[17]

Fig.4 Field emission current and voltage waveform after displacement current removal and zoomed-in view of the waveform[17]

$$\ln\frac{I_e}{U^2}=\frac{-6.83\times10^7 v(y)\varphi^{1.5}d}{\beta}\cdot\frac{1}{U}+\ln\left(\frac{1.54\times10^{-6}}{t^2(y)}\cdot\frac{A_e\beta^2}{\varphi d^2}\right) \tag{9}$$

式中：I_e 为场致发射电流；$t(y)$和 $v(y)$为缓慢变化的函数；d 为触头开距；A_e 为场致发射面积。

为简明表达，式(9)可重写为：

$$\ln\frac{I_e}{U^2}=a\cdot\frac{1}{U}+b \tag{10}$$

其中 a 和 b 是由(9)得到常数值：

$$a=\frac{-6.83\times10^7 v(y)\varphi^{1.5}d}{\beta} \tag{11}$$

$$b=\ln\left(\frac{1.54\times10^{-6}}{t^2(y)}\cdot\frac{A_e\beta^2}{\varphi d^2}\right) \tag{12}$$

根据式(10)—(12)，可绘制 F-N 图。系数 a 表示斜率，b 为纵轴截距。图 5 展示的典型 F-N 图呈线性分布，同时给出传统测量方法的流程。

根据系数 a 和 b，可以计算场致增强因子 β 和场致发射面积 A_e：

$$\beta=\frac{-6.83\times10^{7}v(y)\varphi^{1.5}d}{a} \tag{13}$$

$$A_e=\frac{t^2(y)\varphi d^2e^b}{1.54\times10^{-6}\beta^2} \tag{14}$$

3.2　基于 Murphy-Good 场致发射理论

F-N 计算方法在过去数十年中被广泛应用，但已有研究指出，式(9)在物理解释和数学结构上存在明显缺陷，基于 F-N 图求得的场致发射系数 β 和有效发射面积 A_e 的准确性长期受到质疑。为此，Forbes 于 2019 年基于常温下的 Murphy-Good 模型，提出了改进方法，并通过合理简化与变形，导出如式(15)所示的新表达式。

$$I_e=A_e(\theta\exp\eta\cdot U_{mR}^{-\kappa})\cdot U_m^{\kappa}\cdot\exp(-\eta U_{mR}/U_m) \tag{15}$$

式中：θ 和 η 为与材料逸出功相关的尺度因子；U_{mR} 表示当肖特基-诺德海姆势垒顶端电位等于费米能级时，发射点两端的真空间隙电压；U_m 为测得的间隙两端电压；κ 是 η 的函数。此外，各参数具体形式如下：

$$\theta=ac_S^{-4}\varphi^3 \tag{16}$$

$$\eta=bc_S^{2}\varphi^{-0.5} \tag{17}$$

$$U_{mR}=c_S^{-2}\varphi^2 d/\beta \tag{18}$$

$$\kappa=2-\eta/6 \tag{19}$$

式中：c_S 为肖特基常数。对式(15)进行变换可得：

$$\ln(I_e/U_m^{\kappa})=\ln(A_e\cdot\theta\exp\eta\cdot U_{mR}^{-\kappa})-\eta U_{mR}/U_m \tag{20}$$

在假设材料逸出功为定值的前提下，以 $1/U_m$ 为横坐标、$\ln(I_e/U_m^{\kappa})$ 为纵坐标，可将实验数据绘制成 1 条理论直线，该图被称为 Murphy-Good Plot(简称 MG-Plot)。结合式(16)—(20)，可根据直线斜率与截距推算出相应的发射系数 β 与有效发射面积 A_e。与传统 F-N 公式相比，该方法克服了其在数学表达上的不严谨以及对势垒形状的过度简化，理论上可实现更高精度的参数提取。相关测量流程见图 5。

4　直流电压下合闸过程中的场致发射电流测量方法

区别于交流定开距测量方法，直流动开距测量方法是在直流电压下，通过真空断路器合闸过程中

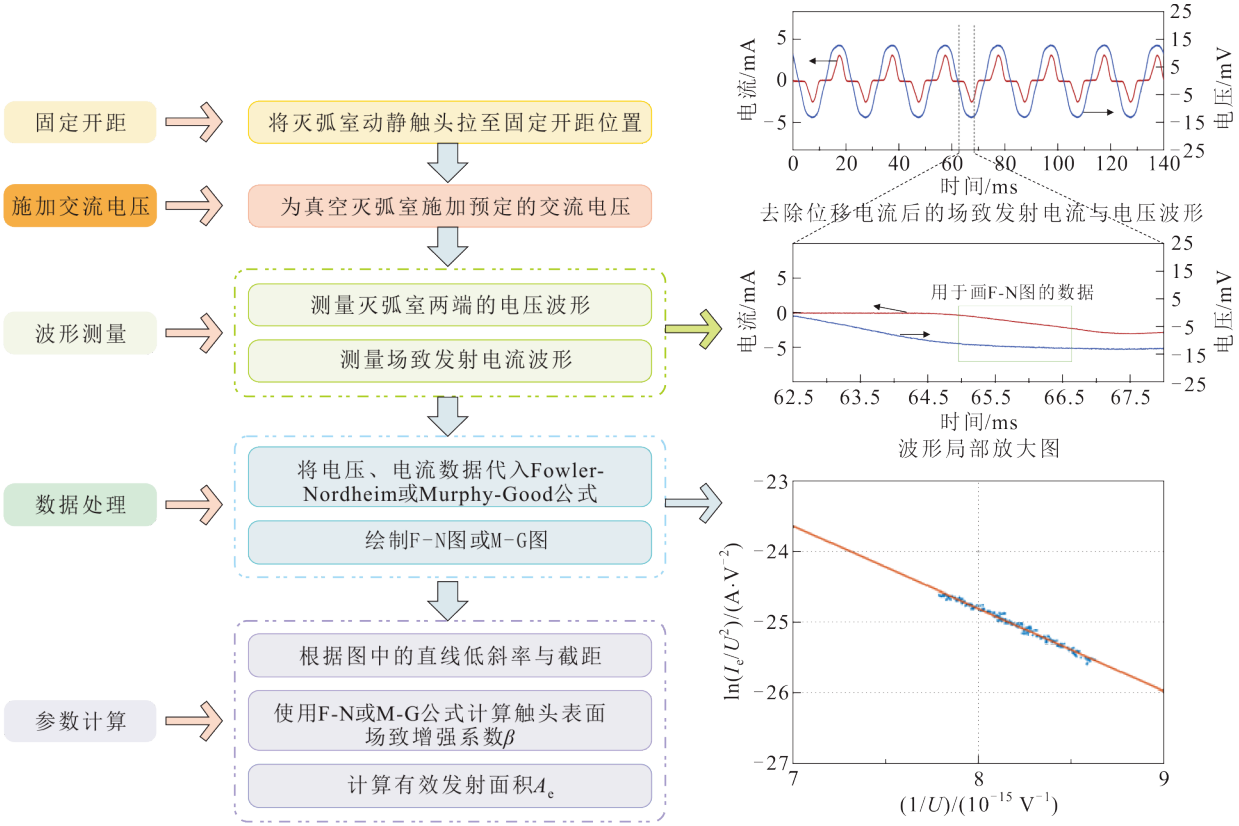


图 5　交流定开距测量方法的流程图

Fig.5　Flowchart of AC fixed-contact-gap measurement methodology

的场致发射电流来评估触头表面微观状况。测量系统如图 6 所示，主要由场致发射电流测量装置、低功率直流电压源、分压器、激光三角位移传感器和真空断路器组成。直流电压源输出电压高达数十千伏，电流仅为数毫安，对触头表面无显著影响。合闸过程中，场致发射电流通过并联 TVS 保护的取样电阻 R_s 测量；动触头位移由安装于断路器内的激光三角位移传感器实时记录。

由式(6)可知，测得电流包括 3 部分：场致发射电流 i_{fe}、位移电流 i_c 和泄漏电流 i_{leak}。其中，i_{leak} 通常小于 1 μA，可忽略不计。采用低功率直流电压源有效消除了杂散电容电流的影响，位移电流可忽略，无需补偿算法，如式(21)所示，具体计算验证过程见文献[17]。

$$i=\frac{U_e}{R_s}=i_{fe} \tag{21}$$

图 7 为场致发射电流与位移曲线典型波形。图 6(b)为动触头行程曲线，反映了触头间真空间隙的动态变化。直流合闸过程中，预击穿发生于触头机械接触前，导致电压瞬间降为零。在此之前，场致发射电流呈指数增长；预击穿发生时，电流瞬间跌至零，如图 6(a)所示。

5 直流动开距下的触头场致增强系数计算方法

5.1 基于 Fowler-Nordheim 场致发射理论

在合闸过程中，触头间隙持续减小，测量变量包括施加电压 U、场致发射电流 I_e 和开距 d。通过分析发射电流波形、电压波形及动触头位移曲线，可计算 β 和 A_e，如图 6 中虚线框所示。

式(10)中的 F-N 方程应修改为：

$$\ln\left(\frac{I_e\cdot d^2}{U^2}\right)=\frac{-6.83\times10^7 v(y)\varphi^{1.5}}{\beta}\cdot\frac{d}{U}+\ln\left(\frac{1.54\times10^{-6}}{t^2(y)}\cdot\frac{A_e\beta^2}{\varphi}\right) \tag{22}$$

式(22)可记为：

$$\ln\left(\frac{I_e\cdot d^2}{U^2}\right)=C_1\cdot\frac{d}{U}+C_2 \tag{23}$$

其中 C_1 和 C_2 是常数：

$$C_1=\frac{-6.83\times10^7 v(y)\varphi^{1.5}}{\beta} \tag{24}$$

$$C_2=\ln\left(\frac{1.54\times10^{-6}}{t^2(y)}\cdot\frac{A_e\beta^2}{\varphi}\right) \tag{25}$$

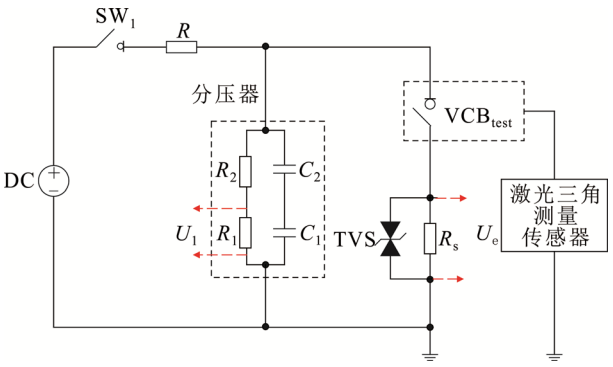


图 6 直流动开距触头表面微观状况测量系统

Fig.6 DC dynamic contact-gap measurement system for surface microtopography

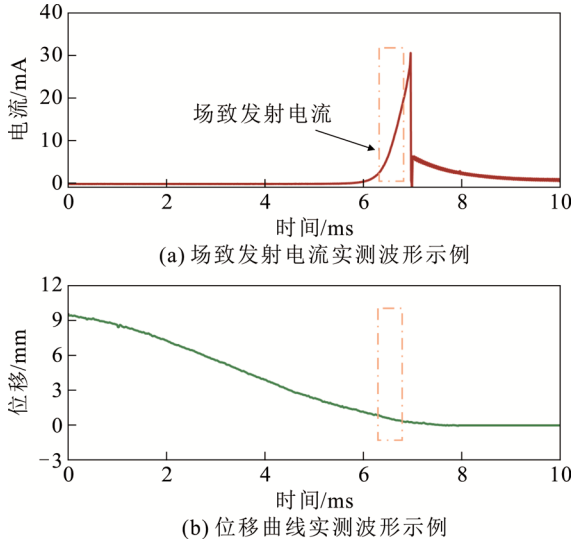


图 7 场致发射电流和位移曲线实测波形示例

Fig.7 Representative waveforms of field emission current and contact displacement profile

根据式(23)，F-N 图呈一条直线，其斜率和截距分别为系数 C_1 和 C_2。由此可进一步计算场致增强因子 β 和发射面积 A_e：

$$\beta=\frac{-6.83\times10^7 v(y)\varphi^{1.5}}{C_1} \tag{26}$$

$$A_e=\frac{e^{C_2}t^2(y)\varphi}{1.54\times10^{-6}\beta^2} \tag{27}$$

基于直流电压下合闸时场致发射电流测量方法的流程图如图 8 所示。

5.2 基于 Murphy-Good 场致发射理论

将式(18)代入式(15)，并对其两边取自然对数，可将该表达式重新整理为：

$$\ln\left(\frac{I_e d^{\kappa}}{U_m^{\kappa}}\right)=\ln(A_e\theta\exp(\eta)\lambda^{-\kappa})-\frac{\eta\lambda d}{U_m} \tag{28}$$

假设触头材料的逸出功为常数，可设横坐标为 d/U_m，纵坐标为 $\ln(I_e\cdot d^{\kappa}/U_m^{\kappa})$。将实验数据代入该坐标系，理论上应形成 1 条直线，即 Murphy-Good 图。根据式(17)—(20)，该线的斜率与截距可用于提取场增强因子 β 和有效发射面积 A_e 的数值。

式(28)可改写为：

$$\ln\left(\frac{I_e d^{\kappa}}{U m^{\kappa}}\right)=\frac{f_1\cdot d}{U_m}+f_2 \tag{29}$$

$$f_1=-\eta\lambda \tag{30}$$

$$f_2=\ln(A_e\theta\exp\eta\lambda^{-\kappa}) \tag{31}$$

$$\lambda=-\frac{f_1}{\eta} \tag{32}$$

$$A_e=\frac{e^{f_2}}{\theta\exp\eta\lambda^{-\kappa}} \tag{33}$$

式中：f_1、f_2 为常数。将式(19)代入式(32)可得：

$$\beta=-\frac{b\varphi^{1.5}}{f_1} \tag{34}$$

该方法改进的实质在于场致增强系数和有效发射面积的计算过程，克服了传统 Fowler-Nordheim 方程在数学形式上的局限性，避免了对势垒形状的过度简化，从而在理论上能够更准确地估算场致发射参数。综上所述，基于 Murphy-Good 理论改进后的直流合闸过程中触头表面状态测量方法的整体流程如图 8 所示。

6　讨论

6.1　交流静开距与直流动开距测量方法对比分析

传统的交流定开距测量方法已广泛应用于评估真空灭弧室触头的表面状态，尤其在容性负载投切场景中[26-28]。然而，该方法存在以下局限性：

1）测量需在固定开距下进行，而真空断路器结构密封，灭弧室封装于绝缘材料中，难以在不破坏结构的前提下调整触头间隙。即使通过结构改造暴露灭弧室，拆装过程亦复杂，易影响其机械性能。

2）交流电压激励下，测得电流中含有显著位移电流，需通过复杂的补偿算法去除，影响测量精度。

3）直流动开距测量方法具备以下优势：

(1)依托合闸过程中的触头动态变化，直接测量场致发射电流，无需拆卸断路器，显著提升测试效率。

(2)采用直流电压激励，位移电流可忽略，所测量即为真实场致发射电流，简化了数据处理流程，

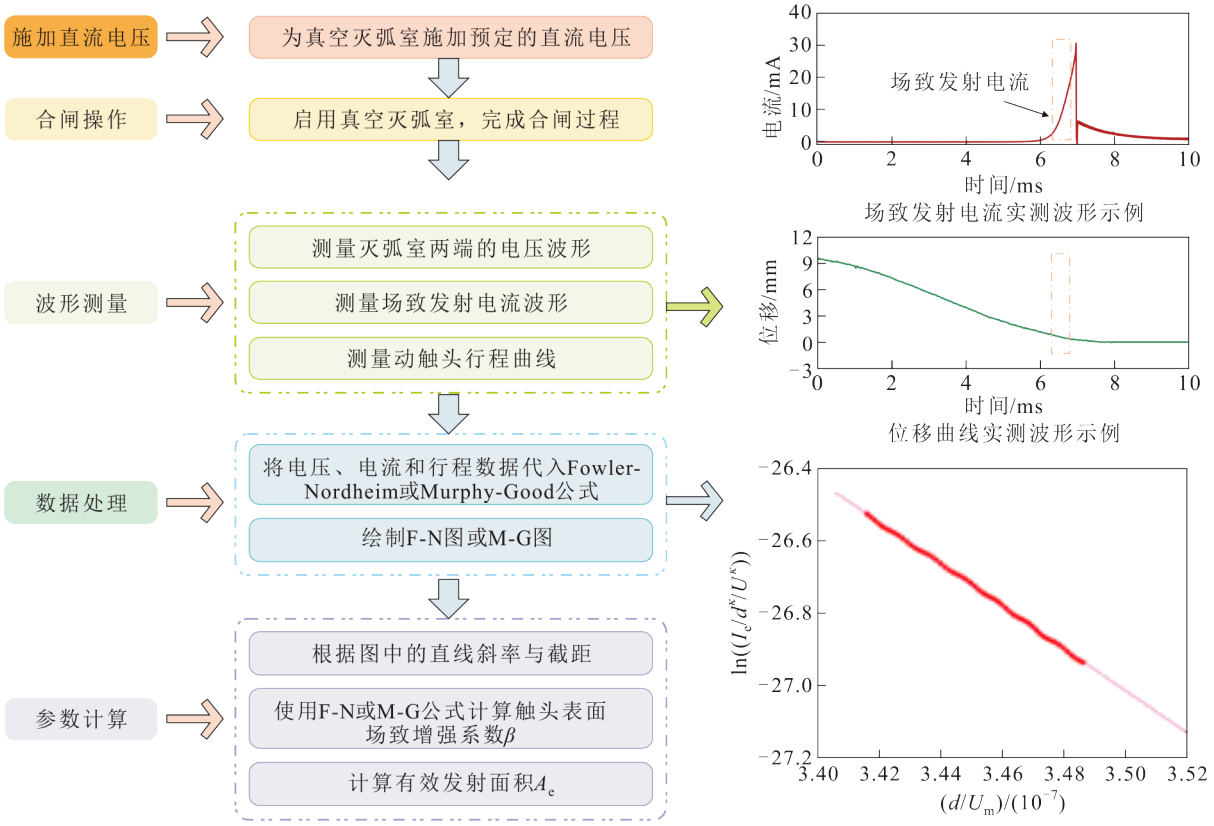


图 8　直流动开距测量方法的流程图

Fig.8　Flowchart of DC dynamic contact-gap measurement methodology

提高了测量准确性。

(3)如图 9 所示，实验系统通过 SW_{inrush}、SW_1、SW_{DC} 与 SW_2 控制，支持灵活切换，适用于现场条件下触头微观状态的评估。

综上，直流动开距测量方法在简便性、效率与实用性方面优势显著，可有效弥补传统交流定开距测量方法的不足。交流动开距与直流定开距测量方法的实验结果对比将在后续研究中开展。

6.2 基于 Fowler-Nordheim 和 Murphy-Good 场致发射理论的直流动开距测量结果对比分析

容性合闸过程中的高频涌流会烧蚀触头表面，降低其绝缘性能。触头烧蚀程度通常通过场致发射电流进行评估。已有研究对容性合闸或开断后的场致发射行为进行了表征，但通常仅记录实验前后触头的静态状态，缺乏过程中的动态测量[25]。

图 9 展示了容性合成实验回路与直流动开距测量系统的集成方案。被测真空断路器通过激光三角位移传感器实时监测触头运动。图左为容性合成实验回路，主要由电容组 C_1、电感 L_1、断路器(SW_{inrush}、SW_1)、电压分压器与罗氏线圈组成。实验前，C_1 预充电至设定电压 U_s；合上 SW_{inrush} 后，断路器接收合闸指令，若触头无法承受 U_s，则发生预击穿，激发 C_1 与 L_1 间的高频电流振荡。高频电流幅值由 U_s 决定，频率由 C_1 和 L_1 决定，波形通过变比为 1 000:1 的罗氏线圈测得，电压则通过分压比为 9 880:1 的电阻分压器(R_1=31.2 MΩ, R_2=3.158 kΩ)采集。

图 9 右侧为直流动开距测量回路，由直流电源 DC、电阻 R、采样电阻 R_s(与 TVS 并联)以及开关 SW_{DC} 与 SW_2 组成。测试流程中，容性合闸阶段闭合 SW_{inrush} 与 SW_1，断开 SW_{DC} 与 SW_2；而在发射电流测量阶段，则切换开关状态。相关参数详见表 1。被测样品为 1 台采用 $CuCr_{30}$ 材料杯状纵磁触头的双断口真空断路器。实验中高频电流幅值为 20 kA，频率为 4 250 Hz，共执行 50 次合闸操作，每 10 次合闸操作后进行一次场致发射电流测量。

以高压侧真空灭弧室中的触头为例，测得的场致发射电流与电压数据分别采用 Fowler-Nordheim 公式与 Murphy-Good 公式进行拟合。拟合得到的场致增强因子 β 汇总于表 2。与 F-N 方法相比，M-G 方法下的 β 略低，但整体差异较小。考虑两种模型的物理基础与适用条件，M-G 图法具有更高的理论可信度。总体来看，所测电流与电压在 F-N 图与

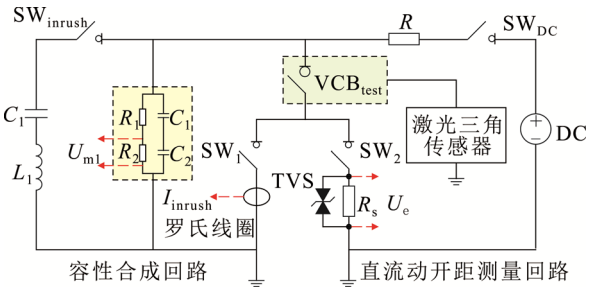


图 9 容性合成回路及直流动开距测量系统集成方案

Fig.9 Integrated solution for capacitive synthetic test circuit and DC dynamic contact-gap measurement system

表 1 容性合成实验中真空断路器参数及实验条件

Table 1 Parameters and experimental conditions of vacuum circuit breakers in the capacitive synthesis experiment

被测 VCB	双断口真空断路器
触头结构	杯状纵磁触头
触头材料	CuCr30
高频涌流	20 kA 峰值、4 250 Hz
真空灭弧室开距	10 mm
施加直流电压	30 kV
开断电流	0 A (无负载)
实验工况	C-O: 50 次
场致发射电流	每进行 10 次容性合闸操作测量一次

表 2 基于 F-N 与 M-G 公式计算的场致增强因子 β

Table 2 Field enhancement factor β calculated by the Fowler-Nordheim (F-N) and Murphy-Good (M-G) formulas

编号	容性实验次数	测量次数	预击穿开距/mm	F-N 场致增强系数 β_{FN}	M-G 场致增强系数 β_{MG}
1	0	1	1.44	212	209
2	20	1	1.90	1 656	1 572
3	20	2	1.76	1 325	1 269
4	30	1	2.06	1 200	1 155
5	30	2	1.90	958	926
6	40	1	2.07	1 236	1 201
7	40	2	1.92	1 338	1 287
8	50	1	1.58	1 090	1 044

M-G 图中均呈良好线性关系，进一步验证了测量结果的准确性与可靠性。未来研究将聚焦于深入分析开距动态范围、触头结构差异及实验电压优化策略对测量结果的影响，以进一步提升该无损检测方法在真空断路器产品性能评估中的适用性与精度。

7 结论

1）本文围绕真空断路器触头状态无损在线评估难题，设计并实现了 1 种基于直流动开距的场致发射电流测量方法。首次将 M-G 理论应用于真空灭

弧室触头表面微观状况的在线监测。与传统交流定开距测量方案相比，该方法在无需拆解真空灭弧室的前提下，成功实现了对触头表面微观状态的无损量化评估，显著提升了测量的工程可行性与数据可信度。

2）通过引入激光位移传感器与低功率直流激励，测量系统有效规避了交流激励下位移电流的干扰，实现了更纯净、更直接的场致发射电流获取过程。同时，结合 Fowler-Nordheim 与 Murphy-Good 两类模型，建立了 2 套独立的参数提取方法，对触头表面场致增强因子和有效发射面积进行了系统识别。特别是在容性合闸实验中，实验数据在 F-N 图与 M-G 图中均展现出良好的线性相关性，进一步验证了本方法的理论合理性与实验稳定性。

3）通过阶段性高频涌流操作与数据拟合分析，本文实现了对触头烧蚀演化过程的定量跟踪，为后续开展断路器状态评估、性能退化建模及寿命预测提供了新的技术路径。

参考文献　References

[1] 舒胜文，阮江军，黄道春，等. 双断口真空断路器开断特性的试验与仿真研究[J]. 高电压技术，2014，40(8)：2381-2388.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Experimental and simulation research on breaking property of double-break vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2381-2388.

[2] 葛国伟，张　众，程　显，等. 双断口真空断路器的动态介质恢复协同特性[J]. 高电压技术，2018，44(9)：2963-2969.
GE Guowei, ZHANG Zhong, CHENG Xian, et al. Dynamic dielectric recovery synergy characteristic of vacuum circuit breaker with double-break[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2963-2969.

[3] 程　显，杜　帅，葛国伟，等. 环保型罐式多断口真空断路器均压配置研究[J]. 电工技术学报，2021，36(15)：3154-3162.
CHENG Xian, DU Shuai, GE Guowei, et al. Study on voltage-sharing configuration of environment-friendly tank type multi-break vacuum circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3154-3162.

[4] 黄翀阳，刘晓明，刘芮彤，等. 双断口直流真空断路器延时开断仿真分析与实验[J]. 中国电机工程学报，2018，38(22)：6753-6759.
HUANG Chongyang, LIU Xiaoming, LIU Ruitong, et al. Simulation and experiment on delay breaking for double-break direct current vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6753-6759.

[5] 程　显，田小倩，葛国伟，等. 环保型罐式多断口真空断路器电场分析与优化[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3200-3207.
CHENG Xian, TIAN Xiaoqian, GE Guowei, et al. Electric field analysis and optimization of 126 kV environmental protection gas insulated tank circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3200-3207.

[6] JIA S L, SHI Z Q, WANG L J. Vacuum arc under axial magnetic fields: experimental and simulation research[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(40): 403001.

[7] 于　力，刘志远，王　东，等. 真空断路器触头熔焊性能的研究综述[J]. 高压电器，2008，44(1)：64-68.
YU Li, LIU Zhiyuan, WANG Dong, et al. Review of welding phenomena of vacuum circuit breaker contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 64-68.

[8] 张登奎，张立岩，李志兵，等. 基于经验小波变换的真空断路器关合预击穿燃弧时间分析[J]. 电工技术学报，2024，39(增刊 1)：106-116.
ZHANG Dengkui, ZHANG Liyan, LI Zhibing, et al. Analysis of pre-strike arcing time for vacuum circuit breaker closure based on empirical wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(Supplement 1): 106-116.

[9] GENG Y, YAN J, HUANG J C, et al. A novel controlled switching strategy of back-to-back capacitor banks considering the prestrike characteristics of vacuum circuit breakers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108223.

[10] GENG Y, YAO X F, ZHANG Z L, et al. Trend of contact surface condition in VCB investigated using DC dynamic gap measurement method during capacitive switching[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(4): 2475-2484.

[11] LIN R J, WANG L J, SHI W X, et al. Experimental investigation on triggered vacuum arc and erosion behavior under different contact materials[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(8): 3047-3056.

[12] JIANG F F, WU Y, WU Y F, et al. Experimental investigation on the erosion behavior in high-current vacuum arcs and resulting microparticles dynamics[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(39): 395201.

[13] DULLNI E, GENTSCH D, SHANG W K, et al. Resistance increase of vacuum interrupters due to high-current interruptions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 1-7.

[14] YU Y X, GENG Y, GENG Y S, et al. Inrush current prestrike arc behaviours of contact materials CuCr50/50 and CuW10/90[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(2): 266-274.

[15] YANG H, GENG Y S, LIU Z Y, et al. Capacitive switching of vacuum interrupters and inrush currents[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 159-170.

[16] LI S M. Characteristics of field-emission-induced breakdown with conical microprotrusion[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1322-1328.

[17] GENG Y, DONG J L, YAO X F, et al. A new measurement method of contact conditions in a vacuum circuit breaker with the field emission current during the closing operation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 6005111.

[18] ALLAHAM M M, FORBES R G, KNÁPEK A, et al. Interpretation of field emission current-voltage data: background theory and detailed simulation testing of a user-friendly webtool[J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103654.

[19] LI Y Z, DING J G, LIU Z Y, et al. Electron emission characteristics of cathode micro-protrusion and the comparison with the MG theory analysis[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2025, 58(8): 085201.

[20] DING J G, LIU X, YAO X F, et al. Lightening impulse breakdown of vacuum gaps in series-Part I: partial breakdown[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1365-1372.

[21] FORBES R G. 21st century planar field emission theory and its role in vacuum breakdown science[C]//2020 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Padova, Italy: IEEE, 2021: 3-10.

[22] FORBES R G. The Murphy-Good plot: a better method of analysing field emission data[J]. Royal Society Open Science, 2019, 6(12): 190912.

[23] FORBES R G. Field emission: applying the “magic emitter” validity test to a recent paper, and related research-literature integrity issues[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2023, 41(4): 042807.

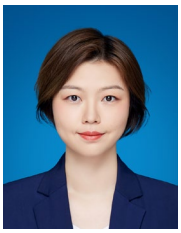
[24] DE ASSIS T A, DALL’AGNOL F F, FORBES R G. Field emitter electrostatics: a review with special emphasis on modern high-precision finite-element modelling[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2022, 34(49): 493001.

[25] GENG Y, YAO X F, DONG J L, et al. Prestrike characteristics of single-break vacuum circuit breakers with cup-type AMF contacts and spiral-type TMF contacts under inrush current conditions[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(9): 2660-2669.

[26] 钟建英，孙广雷，杨葆鑫，等. 高电压等级真空断路器研究现状及展望[J]. 高电压技术，2024，50(2)：451-466.
ZHONG Jianying, SUN Guanglei, YANG Baoxin, et al. Research status and prospect of high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 451-466.

[27] 吴益飞，吴 翊，庄伟斌，等. 直流快速开断技术研究进展和展望[J]. 高电压技术，2024，50(2)：467-477.
WU Yifei, WU Yi, ZHUANG Weibin, et al. Research progress and prospect of fast DC current interruption technology[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 467-477.

[28] 赵书涛，黄伟杰，刘会兰，等. 高压断路器触头烧蚀及电寿命评估研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(2)：489-502.
ZHAO Shutao, HUANG Weijie, LIU Huilan, et al. Review of research on contact ablation and electrical life assessment of high-voltage circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 489-502.



耿 云
1990—，女，博士，讲师
主要从事真空断路器无功投切方面的研究工作
E-mail: gengyun@xaut.edu.cn

GENG Yun
Ph.D.



姚晓飞(通信作者)
1985—，男，博士，副研究员，硕导
主要从事快速真空断路器方面的研究工作
E-mail: 12345678@126.com

YAO Xiaofei
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2025-06-18 在线出版日期 2025-12-15 编辑 卫李静