

# 基于多幅值脉冲电流的电气虚接故障诊断研究

赵思傲<sup>1</sup>, 王玉峰<sup>1\*</sup>, 邢晨阳<sup>2</sup>, 耿天宇<sup>2</sup>, 李立伟<sup>3</sup>

(1. 辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

3. 山东大学 计算机科学与技术学院, 山东 青岛 266237)

## Research on Loose Electrical Connection Fault Diagnosis with Multi-Amplitude Pulse Currents

Zhao Si'ao<sup>1</sup>, Wang Yufeng<sup>1\*</sup>, Bing Chenyang<sup>2</sup>, Geng Tianyu<sup>2</sup>, Li Liwei<sup>3</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, University of Science and

Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

3. School of Computer Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** [Objective] To ensure the reliability of electrical connections in cable circuits, this paper proposes a method for diagnosing loose electrical contact faults based on multi-amplitude pulse currents. [Methods] Firstly, the variation of contact resistance with key parameters such as temperature and contact area was analyzed through finite element simulation under both normal and loose contact states. Then, a self-developed electrical connection reliability testing device was used to apply pulse currents of different amplitudes, and the contact resistance and temperature were measured under normal and loose contact states, obtaining the variation curve of contact resistance with pulse current amplitude. Finally, a mathematical model of the relationship between contact resistance and current was established, and a derivative-based fault criterion for loose electrical contact was proposed by analyzing the first and second derivatives. [Results] The simulation and experimental results demonstrated that the proposed diagnostic method effectively identified loose electrical contact faults and improved the reliability of electrical connections. [Conclusion] The proposed derivative-based fault criterion provides a novel approach for diagnosing loose electrical contact faults, demonstrating practical application value.

**Key words:** multi-amplitude pulse current; loose electrical contact; fault diagnosis; contact resistance

**摘要:** [目的] 为了确保线缆回路电气连接可靠性, 提出一种基于多幅值脉冲电流的电气虚接故障诊断方法。 [方法] 首先, 通过有限元仿真分析电连接在正常和虚接状态下的接触电阻随温度和接触面积等关键参数的变化规律。然后, 使用研制的电连接可靠性检测装置施加不同幅值的脉冲电流, 测量电连接在正常和虚接状态下的接触电阻和温度, 得到电接触电阻随脉冲电流幅值的变化曲线。最后, 建立接触电阻与电流的数学模型, 结合一阶导数和二阶导数分析, 提出了一种基于导数的电气虚接故障判据。 [结果] 仿真和试验结果表明, 本文所提诊断方法能够有效诊断电气虚接故障, 并提高电气连接可靠性。 [结论] 本文所提基于导数的故障判据为电气虚接诊断提供了新思路, 具有实际应用价值。

**关键词:** 多幅值脉冲电流; 电气虚接; 故障诊断; 接触电阻

## 0 引言

电气回路通过电连接或端子排进行中转, 回路中包含多处电接触点, 任何一个接触点出现电气虚接故障或电连接器性能下降时, 都可能导致线路的过热故障, 还可能引起设备损坏或更严重的安全事故<sup>[1-2]</sup>。电连接器接触性能降低, 通常由接触区域的磨损、接插件材料的氧化以及压接不良造成的气隙等因素引起<sup>[3]</sup>。电连接器接触的可靠性通常通过接触电阻的大小来评估<sup>[4]</sup>。采用传统阈值法来判定回路导通故障<sup>[5]</sup>, 设定回路电阻阈值为 5 欧姆, 超过阈值则判定检测的线路存在故障。但该方

基金项目: 辽宁省教育厅项目(LJKFZ20220190)  
Liaoning Provincial Education Department Project  
(LJKFZ20220190)

会出现漏判,只适用于故障非常严重,甚至断路的情况。国内外学者已开展了大量研究工作,但仍难以准确识别电气虚接故障的特征<sup>[6-9]</sup>。

本文提出一种基于多幅值脉冲电流诊断电气虚接故障的方法。通过连续输出不同幅值的脉冲电流,测量回路电阻随温度变化的曲线。线缆金属导体材料的电阻温度系数为正值且较小。正常情况下,测量的回路电阻值随温度升高而小幅增加;虚接情况下,接触电阻会将一部分电能转化为热能,从而导致接触区域温度显著升高,氧化层烧蚀,接触电阻降低。因此,根据测量的回路电阻随脉冲电流幅值的变化,可以有效诊断电气虚接故障。

## 1 理论基础

接触电阻的影响因素主要包括触点材料的性质、表面状态及环境等<sup>[10]</sup>。通常将接触电阻的触点视为光滑表面,通过理论计算公式计算接触面的收缩电阻,如式(1)所示:

$$R_c = R_s + R_b \quad (1)$$

式中: $R_c$  为接触电阻; $R_s$  为收缩电阻; $R_b$  为膜电阻。

然而,考虑到表面具有微观粗糙特征,触点间实际的接触面积远小于宏观的接触面积,因此接触电阻的真实值往往会高于理论计算结果<sup>[11]</sup>。触点一般具有特定的形状和尺寸,并具有柔韧接触的特性,半球面触点与平面接触如图 1 所示。

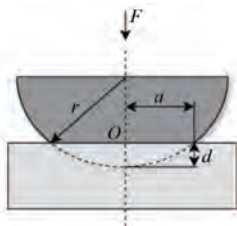


图 1 半球面与平面接触

Fig. 1 A hemisphere in contact with a plan

假设触点为理想光滑的表面,根据 Hertz 提出的接触电阻理论,曲率半径为  $r$  的半球面与平面发生弹性形变时,圆形接触点的接触半径  $a$  与接触压力  $F_{p-e}$  之间的关系为

$$a = \left( \frac{3F_{p-e}}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中: $E^*$  为等效弹性模量; $p$  为导电球形探针; $e$  为弹性导电基底电极。

由于接触电阻的存在,电流通过时会产生焦耳热,导致触点温度升高。过大的电阻可能引发接触材料形变和局部过热现象<sup>[12]</sup>。电阻温度系数的影响如式(3)所示:

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3)$$

式中: $R(T)$  为温度  $T$  下导体基材电阻; $R_0$  为材料在参考温度下的初始接触电阻; $T$  为当前环境或接触点的温度; $T_0$  为电阻  $R_0$  对应的温度; $\alpha$  为电阻温度系数。

接触电阻的变化与材料的电阻温度系数密切相关,尤其在大电流负载条件下,温度升高对接触电阻的影响更加显著。

## 2 仿真研究

### 2.1 建立仿真模型

电连接器由多个零件组成,包含插针、插孔、导电主体、紧固结构及壳体等模块。在进行有限元分析时,为了提高计算效率并满足精度要求,采取了适当的简化处理。在不影响热-电特性分析精度的前提下,对电连接器模型中的部分结构进行了合理简化,主要包括一段插针与一段插孔,两者在中部形成接触界面。采用 COMSOL Multiphysics 软件,建立仿真模型,如图 2 所示。

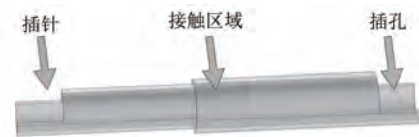


图 2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

在几何建模中,体积较小的弹簧、密封圈等零件被省略,同时去除了零部件间可能存在的几何干涉关系。对不影响导电路径和热传导特性的倒角、细小开孔以及尺寸较小的局部细节予以忽略处理<sup>[13]</sup>。模型中保留了插针与插孔两端的开口结构,用于模拟导线的实际通入条件。接插件材料为铜,材料参数如表 1 所示。由于镀层较薄,仅对表面摩擦产生影响,对接插件力学性能的影响较小。因此,在结构建模中忽略了镀层的存在<sup>[14]</sup>。

网格划分采用四面体网格法,针对不同区域特点进行了差异化调整。在接触区域,由于其对接触电阻和热效应的影响较大,采用较小的单元以更准确地捕捉接触面上的微观形变和应力分

布。对涉及热效应的区域进行了网格细化,避免因网格过粗而导致热效应计算不准确。

表 1 材料基本参数

Tab. 1 Basic material parameters

材料类型	杨氏模量/GPa	泊松比	传热系数/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	表面粗糙度/μm	微硬度/GPa
铜	110	0.32	7	2	3

在电场计算中,考虑了材料电阻率随温度变化的特性、集肤效应对接触电阻的影响;在热场中,主要考虑焦耳热源的作用,忽略磁场对涡流损耗的影响<sup>[15]</sup>;在力场计算中,同步考虑了热应力作用及外部载荷对分析结果的影响。电场与热场之间为双向耦合关系,电场通过电流影响热场中的焦耳热源,而热场则通过温度变化改变材料电阻率;热应力与力场之间也为双向耦合关系,热应力会对力场中材料的形变产生作用,而材料形变又会进一步影响接触压力的大小与分布,而接触压力反过来影响接触电阻;电场与力场之间则为单向耦合关系,电场的变化影响接触电阻。

由于电-热-力的耦合仿真核心目标在于求解电连接器温升和接触电阻,因此需要构建固体传热控制方程,其表达式为

$$\rho C_p \nabla T - k \nabla^2 T = Q_E \quad (4)$$

$$Q_E = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla v \quad (8)$$

式中: $t$ 为时间; $\rho$ 为温度 $T$ 时刻的密度; $C_p$ 为材料的比热容; $k$ 为温度 $T$ 时刻的导热率; $Q_E$ 为焦耳热源; $\mathbf{J}$ 为材料的电流密度; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\sigma$ 为材料的电导率; $v$ 为电势。

式(4)中的第一项为温度的变化,第二项为由温度梯度引起的热量传递。

在求解电场控制方程时,需要综合考虑线性电导率随温度变化的特性与集肤效应。电导率的温度依赖关系可表示为

$$\sigma(T) = \frac{1}{\rho_e [1 + \alpha(T - 293.15)]} \quad (9)$$

$$R_T = \frac{K}{S \times \sigma} \quad (10)$$

式中: $\rho_e$ 为材料在 20 °C 下的电阻率; $K$ 为集肤效

应系数; $S$ 为导体材料横截面积; $R_T$ 为温度 $T$ 下导体间的接触电阻。

在 Cooper-Mikic-Yovanavich 模型中,接触压力和表面粗糙度会对接触电阻产生影响。此外,接触面的温度分布情况也需要作为重要因素加以考虑。接触电阻会导致局部发热,从而影响接触区域的温度分布。将表面的粗糙度与赫兹接触理论相结合,分析微观接触面在外部压力作用下发生塑性变形的情况,考虑了接触应力的作用以及材料微硬度的影响。具体而言,实际接触面积与理论接触面积之间的关系为

$$\frac{A_{act}}{A_{nom}} = \frac{P_a}{H} \quad (11)$$

式中: $P_a$ 为接触应力; $H$ 为接触材料的硬度。

COMSOL 软件中,基于 Cooper-Mikic-Yovanavich 模型,得到的接触电阻的表达式为

$$h_c = 1.25 \sigma_{contact} \frac{m_{asp} \left( \frac{P_a}{H_c} \right)^{0.95}}{\sigma_{asp}} \quad (12)$$

$$\sigma_{contact} = \frac{2\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (13)$$

式中: $h_c$ 为接触电导率; $\sigma_{asp}$ 为粗糙表面平均高度; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 分别为左、右两接触材料的电导率; $m_{asp}$ 为粗糙表面平均斜率; $H_c$ 为表面微硬度。

## 2.2 正常状态下的仿真分析

计算 COMSOL 软件中的电流模块、固体传热以及电磁热多物理场耦合模块。边界条件设置为:将电流流出端定义为接地边界,即电势固定为 0;电流流入端设置为终端,在该端口向模型施加 5~50 A、步长为 5 A 的不同幅值的电流,并保证电流在端口截面上均匀分布,实现了与试验条件一致的激励。固体传热模块中:选用对流热通量描述该传热关系,设定传热系数为 7 W/(m<sup>2</sup>·K),选用自由四面体为具体的网格类型进行网格划分,采用物理场控制常规网格<sup>[16]</sup>,并在接触区域进行适度细化,最大单元不超过 0.017 74 m。

以施加 50 A 电流为例,分析连接器在稳态条件下的温升分布规律,如图 3 所示。由图 3 可知,最高温度出现在接触区域的中部,温度峰值为 300 K。随着距离接触面逐渐增大,热量沿插针和插孔方向扩散,电流在导体截面内分布较均匀,使连接器的温度场保持均匀稳定。

进一步对 5~50 A 不同电流下的仿真结果进

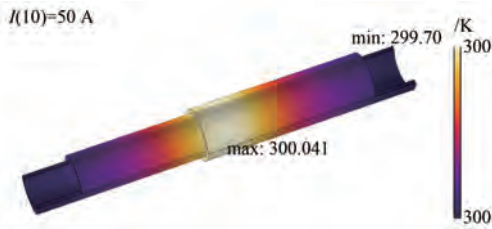


图 3 稳态时的温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution at steady state

行分析,绘制温升曲线如图 4 所示。由图 4 可知,接触区域最大温升为 300 K,并随电流幅值增加而上升。考虑到金属材料具有良好的导热能力,温度分布较为均匀,未出现突变点。需要指出,焦耳热功率与电流幅值的平方成正比,因而温度随电流增大而显著增大。

电连接器接触电阻的仿真过程需要考虑电阻效应,故需选取焦耳热物理场接口,涵盖电流、固

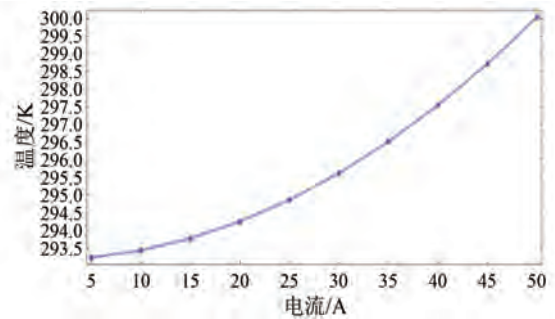


图 4 正常状态下电连接器电流-温度关系

Fig. 4 Current-temperature relationship of electrical connector under normal state

体热传导和固体力学的物理场模块。在此过程中,必须考虑电磁热效应,并进行稳态分析,以确保模型能够准确反映接触电阻对电流流动、热传导和力学行为的综合影响。定义插针、插孔材料为铜,材料热、电属性如表 2 所示。

表 2 材料热、电属性

Tab. 2 Thermal and electrical properties of materials

材料类型	电导率/ ( $S \cdot m^{-1}$ )	恒压热容/ ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	热膨胀 系数/ $K^{-1}$	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	导热系数/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	接触阻抗/ ( $\Omega \cdot m^2$ )
铜	5.998e7	385	17e-6	8 960	400	1e-5

在电流物理场设置中,接插件材料设置为固体。电接触部分采用 Cooper-Mikic-Yovanovich 收缩传导率模型,以考虑塑性形变;同时选择基于材料本身的电导率。

在固体力学物理场中,根据表 1 中给定的杨氏模量、泊松比和表面粗糙度等材料特性进行设置,对于接触对的计算,求解方法采用增强拉格朗日算法。在仿真过程中,根据 COMSOL 计算接触区域的面积为  $0.00142 m^2$ 。仿真结果表明,随着电流从 5 A 增加至 50 A,接触电阻呈上升趋势,如图 5 所示。尽管几何接触面积保持不变,但焦耳热效应引起局部温升与材料热膨胀共同作用,导致接触电阻发生了微小变化。在正常接触状态下,电阻的轻微上升对连接器的导电稳定性影响有限,仍处于可靠运行状态。

### 2.3 虚接状态下的仿真分析

仿真中通过接触边界加入表面阻抗,以模拟氧化膜、污染层或压接不良等引起的导电性能劣化。这些非理想因素会导致接触面上的电阻显著增加<sup>[17]</sup>,从而影响电连接器的电气性能与运行稳

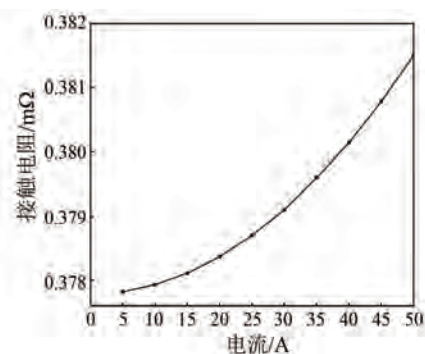


图 5 接触电阻-电流关系

Fig. 5 Contact resistance-current relationship

定性。

在理想接触状态下,表面阻抗接近于  $0^{[18]}$ ,接触电阻保持在毫欧级别;而在虚接状态下,电流受限于少量的导电斑点,初始接触电阻较高。随着电流增加,局部过热导致材料发生形变,增加了有效接触面积,同时部分氧化膜和污染层被击穿或退化,表现为接触电阻随电流非线性下降。这一特征与正常接触状态形成对比,因而可作为电气虚接故障诊断的重要判据。

虚接状态下,连接器温升随电流的变化规律如图6所示。由图6可知,在表面阻抗作用下,接触区域的温度达到419 K,显著高于正常接触状态水平。与正常接触状态相比,虚接条件下由于接触电阻的显著增大,局部焦耳热效应明显增强,使得接触区出现局部过热现象。该结果表明,表面阻抗在界面上等效引入了一层高电阻率薄膜<sup>[19]</sup>,限制了电流的均匀传输,导致电流密度在局部区域内集中,从而产生更多焦耳热并积聚在接触点。

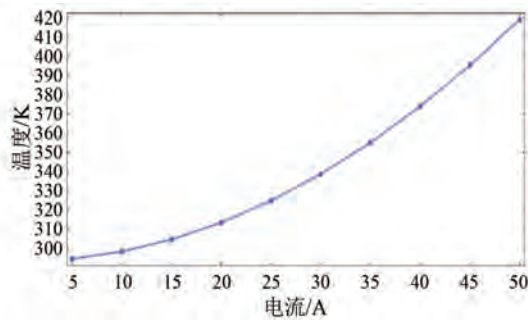


图6 虚接状态下电连接器电流-温度曲线关系

Fig. 6 Current-temperature curve relationship of electrical connector under loose contact state

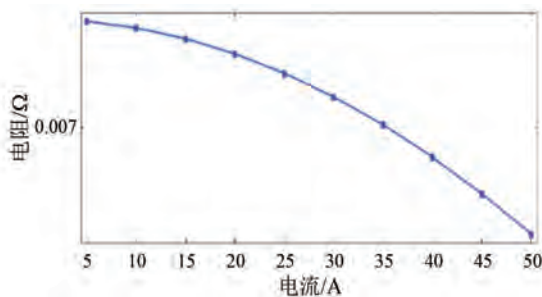


图7 接触电阻-电流曲线

Fig. 7 Contact resistance vs. Current curve

由图7可知,引入表面电阻后,接触电阻随电流 $I$ 的增大呈下降趋势,5~20 A降幅较缓,30~50 A降幅明显加快。这一规律表明,由于氧化膜、污染层或气隙的存在,虚接状态下接触电阻的初始值显著偏高,限制了电流的有效传导。随着电流增大,焦耳热效应促使界面局部温升,材料发生热软化和塑性形变,扩大了有效接触斑点面积;同时部分氧化层被击穿或退化,形成新的导电通道。二者叠加效应使得接触电阻逐步下降,且降幅超过了金属电阻率随温度上升的增加量,最终呈现整体下降的趋势。

### 3 试验研究

#### 3.1 电连接可靠性装置研制

本文研制的电连接可靠性检测装置能够输出步长为5 A的5~50 A的脉冲电流,通过测量接触电阻随温度的变化诊断电气虚接故障。电连接可靠性检测装置由主机和从机两部分组成,主机通过LoRa无线通信,其结构框图如图8所示。在测量线缆的回路电阻时,恒流源输出激励电流,采集线缆回路电压,根据欧姆定律可以计算出回路电阻<sup>[20]</sup>。

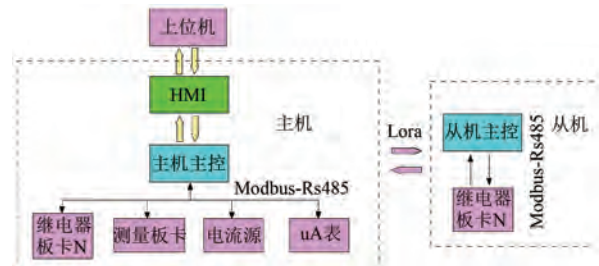


图8 电连接可靠性检测装置结构框图

Fig. 8 Structural block diagram of electrical connection reliability testing device

研制的电连接可靠性检测装置如图9所示,包括基于STM32为核心控制器的主控板卡、工控屏MCGS设计的人机交互界面、可调节输出电流的恒流电源、多通道矩阵继电器板卡和测量板卡。各个板卡模块通过485总线与主机主控测试板卡模块进行通信,主控板卡模块采集电流、电压数据并上传上位机。通过LoRa无线模块与从机通信协调工作,实现多电气回路接触电阻的多通道矩阵测量。



图9 电连接检测装置

Fig. 9 Electrical connection testing device

#### 3.2 模拟试验

试验以电缆通过OT端子连接为例,采用螺

电连接方式。通过调节螺栓的紧固程度来模拟电气虚接故障。在测试过程中,使用专用夹具将测试线缆进行固定,以确保电气连接的稳定性。

试验一:紧固螺栓将 OT 端子处于良好的接触状态,调节电连接可靠性检测装置,输出电流从

表 3 电接触良好时 OT 端子接触电阻和温度

Tab. 3 Contact resistance and temperature of OT terminal under good electrical contact state

	5 A	10 A	15 A	20 A	25 A	30 A	35 A	40 A	45 A	50 A
电阻值/mΩ	11	13	15	14.5	14.2	14.3	14.4	13.7	13.6	13.5
温度/℃	24	24	24.5	25.3	25	26.3	25.3	25.3	26.5	25.3

由表 3 可知,在螺栓紧固电接触良好的情况下,接触电阻值和温度均不随电流增大而显著变化。这表明 OT 端子接触界面稳定,导通性能良好,无虚接或氧化导致的异常发热。

试验二:减小螺栓扭力,模拟 OT 端子电气虚

表 4 电气虚接时 OT 端子的接触电阻和温度

Tab. 4 Contact resistance and temperature of OT terminal under loose electrical contact

	5 A	10 A	15 A	20 A	25 A	30 A	35 A	40 A	45 A	50 A
电阻值/mΩ	68.1	59	48.5	41.6	38.2	35	32.2	30.5	28	27
温度/℃	29.2	31	34	41.4	53	60.3	66	76.1	98.5	101.4

由表 4 可知,电气虚接状态下接触电阻的初始值较大,表明导电斑点较少或接触压力不足。随着电流增大电阻下降,可能是由于温度升高导致接触材料软化、膨胀或接触表面产生微小变化,而非性能提高。热成像仪显示电接触点处的温度随电流增大显著升高,虚接故障区域的温度显著高于正常工作区域,且局部升温较快。这表明接触电阻产生了大量热能,可能导致接触材料退化、氧化或损坏,进一步加剧虚接故障,验证了电连接器的虚接状态。

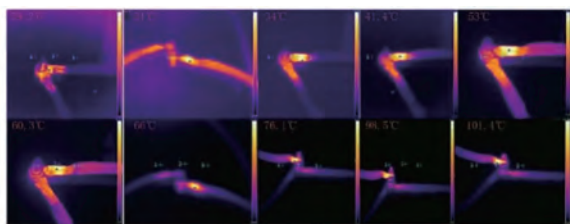


图 10 电气虚接状态下在不同幅值脉冲电流下的 OT 端子温度

Fig. 10 OT terminal temperature under loose electrical contact state with different pulse current amplitudes

5 A 开始,以 5 A 为步长开始逐步升高至 50 A。每档电流脉冲持续时间为 15 s,测试间隔为 15 s。在不同幅值脉冲电流条件下,电连接可靠性检测装置测量的接触电阻和热成像仪测量的端子温度如表 3 所示。

接状态。输出步长 5 A、5~50 A 的脉冲电流,电流脉冲持续时间为 15 s,测试间隔为 15 s,测量虚接状态下 OT 端子的接触电阻和温度,结果如表 4 所示,热成像如图 10 所示。

## 4 故障诊断方法

电气虚接故障源于接触不良、氧化、磨损或间隙等因素。在电气连接的诊断中,接触电阻的变化及其与电流的关系是判断虚接故障的重要依据。为了实现有效的虚接故障诊断,本文通过数学建模并结合一阶、二阶导数分析,提出了一种基于导数的电气虚接故障判据。

### 4.1 电流与接触电阻的关系建模

通过试验数据拟合,接触电阻  $R(I)$  与电流  $I$  之间的关系式为

$$R(I) = a_3 I^3 + a_2 I^2 + a_1 I + a_0 \quad (14)$$

式中: $R(I)$ 为接触电阻; $I$ 为电流; $a_3$ 、 $a_2$ 、 $a_1$ 、 $a_0$ 为拟合系数。

为了分析接触电阻的变化速率,对式(14)进行一阶求导,可得:

$$R'(I) = \frac{dR(I)}{dI} = 3a_3 I^2 + 2a_2 I + a_1 \quad (15)$$

式中: $R'(I)$ 为接触电阻的一阶导数,若其出现异常波动,则为接触不良或虚接故障。

为了进一步分析接触电阻变化的速率,对式(15)再次求导,可得:

$$R''(I) = \frac{dR'(I)}{d(I)} = 6a_3I + 2a_2 \quad (16)$$

式中: $R''(I)$ 为接触电阻的二阶导数,若其出现显著波动或突变,可判定为虚接故障。

#### 4.2 故障判据

若一阶导数和二阶导数的数值变化与正常接触状态下的变化趋势显著不同,则可判定为虚接故障。定义一个综合判据指标 $D$ ,如式(17)所示:

$$D = w_1 |R'| + w_2 |R''| \quad (17)$$

式中: $w_1, w_2$ 为权重系数。

通过数据设定一个合适的阈值 $D_{\text{thresh}}$ ,作为虚接故障的判定标准。当 $D$ 超过 $D_{\text{thresh}}$ 时,判断为存在虚接故障。

基于 Matlab 得到电流与接触电阻及其导数的关系图,如图 11 所示。图(a)~(c)中蓝色、红色分别代表正常接触、虚接状态。

由图 11 可知,虚接故障可通过接触电阻的一阶与二阶导数的变化有效识别。在接触正常状态下,接触电阻随电流的变化较为平缓,一阶、二阶导数变化均较小;在虚接故障发生时,一阶导数表现出剧烈波动,二阶导数也出现突变。

## 5 结语

本文提出了一种基于多幅值脉冲电流的电气虚接故障诊断方法。仿真和试验结果表明,电气虚接情况下接触电阻初始值明显偏高,且随电流作用呈下降趋势;同时,温升随电流急剧增加。该方法既能准确反映正常接触下的导电与发热特性,又能有效识别虚接状态下的异常行为,为电气连接器在大电流工况下的可靠性评估和虚接故障的预防提供了有价值的参考。

#### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

#### 作者贡献

赵思傲进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写,邴晨阳参与试验平台搭建、测试方案

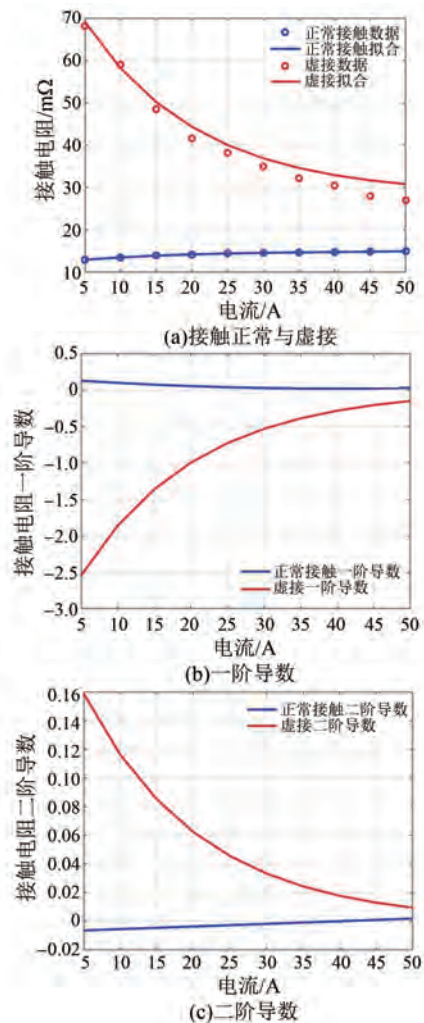


图 11 接触电阻与电流关系曲线图

Fig. 11 Contact resistance vs. Current curve

制定及试验数据采集,耿天宇参与试验验证、结果分析及工程应用讨论,李立伟参与故障诊断算法设计、数据处理方法研究及论文修改,王玉峰参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Zhao Si'ao was responsible for scheme design, experimental investigation, content summarization, and manuscript drafting. Bing Chenyang contributed to the establishment of the experimental platform, formulation of test protocols, and acquisition of test data. Geng Tianyu participated in experimental validation, result analysis, and discussions regarding engineering applications. Li Liwei engaged in the design of fault diagnosis algorithms, research on data processing methodologies, and manuscript revision.

Wang Yufeng was involved in the review and final editing of the paper. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

## 参考文献

- [ 1 ] 王东伟, 刘明星, 陈晓, 等. 电子连接器微动摩擦磨损问题研究综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(10): 210-223.  
Wang D W, Liu M X, Chen X, et al. Review on fretting friction and wear problems of electrical connectors [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(10): 210-223.
- [ 2 ] 侯鑫尧, 倪强, 李学明, 等. 列车牵引传动系统温度传感器实时故障诊断与容错估计[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 269-276.  
Hou X Y, Ni Q, Li X M, et al. Real-time fault diagnosis and fault-tolerant estimation of temperature sensor in train traction drive system [J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(2): 269-276.
- [ 3 ] 魏振伟, 刘昌奎. 电连接器组件典型失效模式特征及原因[J]. 失效分析与预防, 2022, 17(1): 63-72.  
Wei Z W, Liu C K. Characteristics and causes of typical failure modes of electrical connectors [J]. Failure Analysis and Prevention, 2022, 17(1): 63-72.
- [ 4 ] 张彤, 郁大照. 军用航空电连接器接触件力学性能仿真[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(5): 159-163+173.  
Zhang T, Yu D Z. Contact simulation of contacts for military avionics connectors [J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(5): 159-163+173.
- [ 5 ] 于华龙, 鲁挺, 姬世奇, 等. 高压 IGBT 串联均压控制电路阈值电压设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1357-1365.  
Yu H L, Lu T, Ji S Q, et al. Active clamping circuit threshold voltage design for series-connected HVIGBTs [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1357-1365.
- [ 6 ] 唐丹, 吴浩, 蔡源. 电力电缆早期故障诊断研究综述[J]. 电线电缆, 2023, 66(6): 1-5.  
Tang D, Wu H, Cai Y. Research review of cable early fault diagnosis [J]. Wire & Cable, 2023, 66(6): 1-5.
- [ 7 ] 许成彬, 潘骏, 陈文华, 等. 高温电连接器有限元热分析与接触件插拔试验[J]. 工程设计学报, 2015(3): 250-255.  
Xu C B, Pan J, Chen W H, et al. Finite element thermal analysis and plugging test of the high temperature electrical connector [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015(3): 250-255.
- [ 8 ] Song J, Hilmert D, Kiel F. Mechanisms of failure and state analysis of electrical connectors in automobiles [J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 173: 109427.
- [ 9 ] 许允之, 方永丽, 张晓. 基于最小二乘支持向量机和能量频谱分析的电机匝间短路故障诊断[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(2): 30-33.  
Xu Y Z, Fang Y L, Zhang X. The motor fault diagnosis of turn-to-turn short circuit based on LS-SVM and energy spectrum analysis [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2013, 40(2): 30-33.
- [ 10 ] Balakrishnan G K, Yaw C T, Koh S P, et al. A review of infrared thermography for condition-based monitoring in electrical energy: Applications and recommendations [J]. Energies, 2022, 15(16): 6000.
- [ 11 ] 许军, 李坤. 电接触的接触电阻研究[J]. 电工材料, 2011(1): 10-13.  
Xu J, Li K. The research on resistance of electrical contact [J]. Electrical Engineering Materials, 2011(1): 10-13.
- [ 12 ] 吴承创, 周宇, 张超, 等. 考虑触点粗糙表面特征的接触电阻仿真分析方法[J]. 电器与能效管理技术, 2025(3): 6-10.  
Wu C C, Zhou Y, Zhang C, et al. Simulation analysis method of contact resistance considering characteristics of rough contact surfaces [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(3): 6-10.
- [ 13 ] 王海涛, 杨博. 直流接触器触头电弧侵蚀特性[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 53-60.  
Wang H T, Yang B. Arc erosion characteristics of DC contactor contacts [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 53-60.
- [ 14 ] 王璐, 马飞, 艾衢, 等. 大电流连接器热电耦合温升仿真分析[J]. 机电元件, 2022, 42(5): 56-59.

- Wang L, Ma F, Ai H, et al. Simulation analysis of thermoelectric coupling temperature rise of high current connector [ J ]. *Electromechanical Components*, 2022, 42(5): 56-59.
- [ 15 ] 王世娇, 陈文华, 钱萍, 等. 航天电连接器的可靠性设计建模[ J ]. *机械工程学报*, 2017, 53(10): 180-186.
- Wang S J, Chen W H, Qian P, et al. Reliability design model of aerospace electrical connector [ J ]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(10): 180-186.
- [ 16 ] 张智超, 沈常宇, 朱周洪, 等. 漏磁结合涡流的非铁磁性金属材料探伤研究[ J ]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4): 150-159.
- Zhang Z C, Shen C Y, Zhu Z H, et al. Magnetic flux leakage combined with eddy current for non-ferromagnetic metal materials damage detection [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4): 150-159.
- [ 17 ] 薄凯, 周学, 翟国富, 等. 大电流条件下真空接触器温升特性的试验测量与仿真分析[ J ]. *电工技术学报*, 2019, 34(24): 5135-5143.
- Bo K, Zhou X, Zhai G F, et al. Experiments and simulation analysis of the temperature-rise characteristics of high current vacuum contactor [ J ]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(24): 5135-5143.
- [ 18 ] Dardé J, Staboulis S. Electrode modelling: The effect of contact impedance [ J ]. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 2016, 50(2): 415-431.
- [ 19 ] Costa F. Surface impedance measurement of resistive coatings at microwave frequencies [ J ]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62(2): 432-437.
- [ 20 ] 刘冰冰, 张永新, 李茂堂, 等. 高电流回路电阻智慧检测系统设计[ J ]. *机械研究与应用*, 2025, 38(6): 77-81+85.
- Liu B B, Zhang Y X, Li M T, et al. Design of intelligent detection system for loop resistance under high current [ J ]. *Mechanical Research & Application*, 2025, 38(6): 77-81+85.
- 
- 收稿日期:2025-12-23  
收到修改稿日期:2026-03-19  
作者简介:  
赵思傲(1994—),女,硕士研究生,研究方向为故障检测, siazhao@163.com;  
\*通信作者:王玉峰(1978—),男,博士,副教授,研究方向为嵌入式系统硬件设计和软件程序开发、电力电子设备制造及产品电磁兼容可靠性设计, wangyufeng@ustl.cn。