

# 低气压环境下弓网电弧对列车牵引传动系统的影响研究

邹丹丹<sup>1</sup>, 夏子鑫<sup>1</sup>, 张泽伦<sup>1</sup>, 魏文赋<sup>2\*</sup>

- 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西省 南昌市 330013;
- 西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 610031

## Influences of Pantograph-catenary Arc on Traction Drive System Under Low Air Pressure

ZOU Dandan<sup>1</sup>, XIA Zixin<sup>1</sup>, ZHANG Zelun<sup>1</sup>, WEI Wenfu<sup>2\*</sup>

- School of Electric and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi Province, China;
- School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** Pantograph-catenary arc is a common fault that can significantly disrupt the stable operation of traction drive system. In high-altitude environments with low air pressure, the electrical characteristics of pantograph-catenary arc differ from those in plains, potentially affecting the system in a different manner. This paper models the pantograph-catenary arc-traction drive system and examines the influence of arc on voltage and harmonic characteristics under different pressures. The results show that lower air pressure increases the impact; short offline periods lead to more severe voltage drops and waveform distortions, while longer offline periods result in larger overvoltages. DC-side voltage drops more slowly after arc quenching, with increased harmonic distortion as pressure decreases. This study provides a valuable reference for the design of electrified trains operating on high-altitude routes.

**KEY WORDS:** pantograph-catenary arc; traction drive system; low air pressure environment; voltage characteristic; harmonic characteristics

**摘要:** 弓网电弧是弓网系统常见的电气故障, 会严重影响列车牵引传动系统稳定运行。与平原地区相比, 高海拔低气压环境下弓网电弧电气特性会发生改变, 对列车牵引传动系统的影响也可能存在差异。该文考虑了高速列车在低气压环境运行时弓网电弧电气参数的改变, 建立弓网电弧-牵引传动系统联合模型, 研究了川藏线不同气压等级下弓网电弧对牵引传动系统电压特性和谐波分布的影响。结果表明, 气压越低, 弓网电弧对牵引传动系统的影响越大; 从电压看, 短时

间离线时, 车载变压器高压侧电压过零点处发生电压跌落、波形畸变, 气压越低, 电压跌落、波形畸变越严重。长时间离线时, 熄弧后车载变压器产生过电压, 气压越低, 过电压越大。直流侧电压在熄弧后快速降为零, 气压越低, 下降速度越慢, 并在离线恢复过程中产生过电压; 从谐波看, 同一阶段, 气压越低, 总谐波畸变率越大。该研究可为高原铁路电气化列车的设计提供一定参考。

**关键词:** 弓网电弧; 牵引传动系统; 低气压环境; 电压特性; 谐波特性

## 0 引言

川藏铁路作为我国“十四五”规划重点工程之一, 东起四川省成都市, 西至西藏自治区拉萨市, 途径雅安、理塘、江达、林芝等地, 具有地貌复杂、落差大、海拔高、气候条件极端等特点。作为连接四川与西藏的重要通道, 川藏铁路的建设对于带动中西部经济发展有着重要意义。弓网系统在电气化铁路运营中起着至关重要的作用, 是连接供电系统和电力机车的关键桥梁。弓网离线可能会产生弓网电弧<sup>[1]</sup>, 使列车受流时断时续, 产生瞬态温升并烧蚀受电弓滑板<sup>[2-3]</sup>, 产生辐射电磁噪声<sup>[4-5]</sup>, 影响牵引传动系统的安全稳定运行<sup>[6]</sup>。实验中已发现气压环境对弓网电弧运动特性、电气特性存在重要影响<sup>[7-9]</sup>, 因此, 与低海拔地区相比, 高海拔低气压环境下弓网电弧对列车牵引传动系统的影响也可能存在差异。

目前国内外针对弓网电弧黑盒模型及牵引传动系统的影响已经开展了部分研究, 文献[10]考虑

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52467016); 江西省自然科学基金项目(20232BAB204061, 20242BAB23043)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52467016); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20232BAB204061, 20242BAB23043)。

气流吹弧作用，建立适用于不同列车速度下的弓网电弧黑盒模型；文献[11]基于 Mayr 经典模型，提出针对串联故障电弧的新模型；文献[12]研究电弧现象，包括电弧暂态机理以及影响因素，进一步推导了 Habedank 电弧黑盒模型；文献[13]基于现场阻抗参数，建立“网-车-轨”牵引传动系统模型，研究了不同离线工况下弓网电弧对列车过电压特性的影响；文献[14]考虑弓网电弧演化过程，仿真分析了在低海拔地区发生弓网离线燃弧现象时，弓网电弧对列车牵引传动系统电气特性的影响；文献[15]基于 Mayr 方程建立电弧模型，结合列车牵引电机驱动电路，分析了电弧电流的谐波特性；文献[16]建立包含弓网电弧和列车牵引变流器的仿真模型，分析了弓网离线时车载变压器高压侧过电压和谐波特性，研究了弓网离线对牵引变流器直流侧电压的影响；文献[17]通过建立 Habedank 电弧模型，研究了弓网电弧对新型电力电子车载变压器的影响，并提出改进策略。以上关于弓网离线对牵引传动系统的影响研究都是基于低海拔环境，未考虑气压因素的影响，针对高海拔低气压环境下的相关研究仍存在空白。随着川藏铁路的建设，亟需开展高海拔低气压弓网电弧对列车牵引传动系统的影响研究，为川藏铁路建设及后续高寒高海拔地区铁路建设奠定理论基础。

针对上述问题，本文考虑在高海拔低气压环境下的列车运行条件，依托高速列车电气回路结构，基于经典 Schwarz 电弧模型，建立适用于高海拔低气压环境的弓网电弧-牵引传动系统联合模型，并系统研究不同气压等级下，弓网电弧对列车车载变压器及牵引变流器电压特性和谐波特性的影响<sup>[18-19]</sup>。

## 1 低气压电弧-牵引传动系统模型的建立

### 1.1 低气压弓网电弧模型

与低海拔地区相比，在高海拔低气压环境下，弓网电弧的电气特性会发生改变，对牵引传动系统的影响可能也会存在差异，但国内外相关研究没有考虑气压因素的影响，仅分析了在传统低海拔地区弓网离线对牵引传动系统的影响，存在一定局限性。

作为电弧经典模型之一，在传统 Mary 模型的基础上，Schwarz 模型将耗散功率  $P_{\text{loss}}$  和时间常数  $\tau_M$  设定为电弧电导的幂函数，因此，Schwarz 模型与实际中的电弧燃烧过程更为吻合，经典的 Schwarz 电弧模型<sup>[20]</sup>为

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau g^a} \left( \frac{ui}{P_1 g^b} - 1 \right) \quad (1)$$

高海拔环境中，弓网电弧电气特性发生改变，相应电弧耗散功率也发生变化。本文基于经典 Schwarz 模型，结合高海拔地区气压、行车速度、电弧温度及直径等相关因素，基于电弧对流散热，对 Schwarz 模型耗散功率  $P_{\text{loss}}$  进行修正，建立适合高海拔低气压地区的弓网电弧耗散功率表达式。

文献[21]提出随着气压减小，电弧直径会相应增加，二者之间的关系式为

$$d = 2 \left( \frac{P}{P_0} \right)^{-0.465} \sqrt{\frac{i}{1.45\pi}} \quad (2)$$

列车高速运行会产生较大气流，受电弓和接触网脱离时，列车与空气相遇，产生空气压缩现象<sup>[22]</sup>，因此，耗散功率以对流散热为主。燃弧过程中，空气会由起始温度升高至电弧平均温度<sup>[23]</sup>，所需热量经过单位换算<sup>[24]</sup>为

$$P_{\text{loss}} = 11.39vd \ln \frac{T_h + T_1}{2T_0} \quad (3)$$

结合上述公式，本文基于经典 Schwarz 模型建立了同气压因素相关的高海拔弓网电弧模型：

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau g^a} \left[ \frac{ui}{11.39vd \ln(T_h + T_1)/(2T_0)} - 1 \right] \quad (4)$$

式中： $v$  为列车运行速度，根据川藏铁路设计时速设置为 160 km/h； $g(0)$  为电弧电导，选取电弧初始电导值为  $10^4 \text{ s}^{[18]}$ ； $\tau$  为电弧时间常数常系数，设置为  $10^{-3} \text{ s}^{[18]}$ ； $P_1$  为电弧耗散功率常系数，常通过实验拟合求得； $a$  为电弧时间常数的电导指数，取值为  $0.177^{[18]}$ ； $u$ 、 $i$  分别为电弧电压、电流的瞬时值； $d$  为电弧直径，cm，随海拔变化； $l$  为电弧长度，设置电弧起始长度为  $0.5 \text{ cm}^{[4]}$ ； $T_0$  为流体介质未与电弧接触时的温度，取值为  $300 \text{ K}^{[25]}$ ； $T_h$  为电弧燃烧时弧柱的最高温度，随海拔变化<sup>[26]</sup>； $T_1$  为电弧燃烧时弧柱最低温度，取值为  $4000 \text{ K}^{[26]}$ ； $H$  为海拔高度，m； $P_0$  为标准大气压，取值为  $101.3 \text{ kPa}$ ； $P$  为某海拔高度的大气压，kPa。

查阅川藏铁路资料和国家气象科学数据中心观测数据，川藏铁路途径川西进藏，川西康定平均海拔为 2500~3000 m，选取平均海拔 2700 m，对应气压  $P=70.6 \text{ kPa}$ 。西藏部分线路海拔为 4000~5000 m，选取平均海拔 4500 m，对应气压  $P=50.5 \text{ kPa}$ ，并与标准大气压  $P_0=101.3 \text{ kPa}$  进行对比研究。

## 1.2 牵引传动系统模型

高速列车牵引传动系统是一个高度集成的电力电子系统,由车载变压器、整流器、直流支撑电容、逆变器及牵引电机组成,主要基于“交-直-交”的电力变换方式,将接触网提供的电能转换为驱动列车前进的机械能,系统基本框架如图 1 所示。列车行驶过程中,受电弓与接触网通过滑动接触获得电压 25 kV、频率 50 Hz 的交流电。在供电过程中,车载变压器先对电压进行降压处理,输出电压 1.5 kV、频率 50 Hz 的交流电,整流器与支撑电容配合,将交流电转化为稳定的直流电,通过逆变器将直流电逆变成电压和频率均可调节的三相交流电,以适应牵引电机的需求。牵引电机通过联轴节、齿轮箱驱动车轮转动,确保列车稳定、高效前进<sup>[27-28]</sup>。

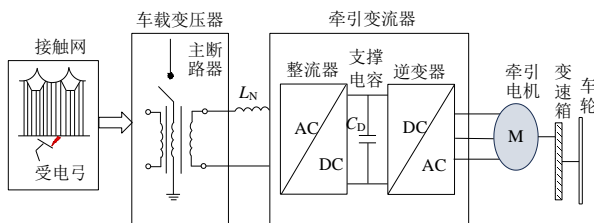


图 1 列车牵引传动系统原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of traction drive system

根据牵引传动系统原理框图,本文以 CRH2 型动车组为参考,结合其牵引、制动特性和牵引变压器、整流器、逆变器等关键组件的技术参数特点,建立牵引传动系统仿真模型。CRH2 型列车组采用 ATM9 型变压器,其额定参数如表 1 所示<sup>[29]</sup>,整流器采用单相三电平 PWM 脉冲整流器,逆变器采用三电平逆变器,整流器、支撑电容、逆变器整体构成牵引变流器,变流器输入侧漏感为 4.3 mH<sup>[14]</sup>,其余参数参考文献[29]。

表 1 牵引变压器额定参数

Table 1 Rated parameters of traction transformer

绕组	容量/kVA	电压/V	电阻/ $\Omega$	电感/H
一次侧	3 060	25 000	4.322	0.459
二次侧	2 570	1 500	0.794	0.084

基于建立的电弧模型和牵引传动系统模型,得到弓网电弧-牵引传动系统联合模型,如图 2 所示。仿真得到弓网电弧电压波形如图 3 所示。由图 3 可知,弓网正常接触时,弓网之间电压为 0 kV。弓网离线燃弧时,电弧电压呈现马鞍形,出现明显的尖峰电压。电弧熄弧时,弓网之间出现过电压,其值达到 80 kV,随后逐渐衰减并稳定在电源电压,整体趋势与文献[14]仿真、实验结果一致,验证了模

型的可靠性和有效性。从气压来看,气压越低,燃弧尖峰电压越高,熄弧时产生的过电压也越大。

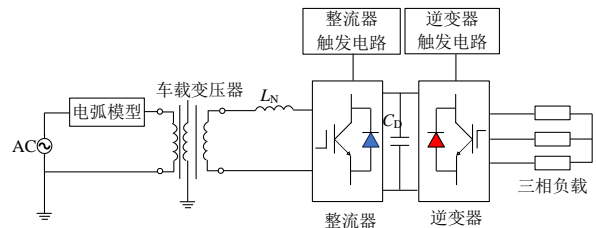


图 2 弓网电弧-牵引传动系统联合模型

Fig. 2 pantograph-catenary arc-traction drive system Co-Simulation model

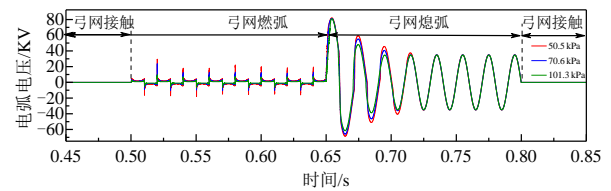


图 3 弓网电弧电压波形图

Fig. 3 Waveform of voltage of pantograph-catenary arc

## 2 弓网电弧-牵引传动系统模型仿真分析

### 2.1 仿真工况确定

在列车运行过程中,弓网离线通常会伴随着电弧产生,电弧作为临时电能传输通道向列车供给电能。当弓网离线时间过长或列车电流过零点时,可能会因能量不足而造成熄弧,引发列车牵引传动系统电气暂态过程<sup>[30]</sup>,对列车运行的稳定性、安全性构成潜在威胁。为更好地分析不同离线情况下弓网电弧对牵引传动系统的影响,本文针对列车运行发生弓网离线时可能遇到的两种情况展开分析。

1) 弓网离线时间相对较短,离线过程中电弧稳定持续燃烧,为列车提供必要的电能支撑,能量供应相对充足,本文设置弓网离线时间为 100 ms。

2) 弓网离线时间相对较长,随着离线时间增加电弧能量消耗加快,后期电弧能量不足以维持继续燃烧以致熄弧。本文设置弓网离线时间为 400 ms。

基于上述设定,本文对低气压弓网电弧对牵引传动系统的影响开展变压器高压侧电压、谐波及直流侧电压 3 个方面的研究。

### 2.2 高海拔弓网电弧过电压的影响

根据 2.1 节中弓网离线时可能发生的 2 种典型工况,分别设置弓网短时间离线  $t=100$  ms、弓网长时间离线  $t=400$  ms。假设在列车电机已经启动并稳定运行时发生弓网离线,设置弓网离线时间为  $t=0.5$  s,弓网恢复接触时间分别为  $t=0.6$ 、 $0.9$  s。设

置 101.3、70.6、50.5 kPa 3 种气压等级，通过仿真分析 3 种气压等级下弓网电弧对车载变压器高压侧电压及整流器直流侧电压的影响。

图 4 为弓网离线时间  $t=100\text{ms}$  时，不同气压等级下车载变压器高压侧电压波形。弓网稳定接触时，车载变压器高压侧电压值稳定在 35 kV，与列车正常运行参数相符合<sup>[14]</sup>。弓网离线产生电弧后，车载变压器高压侧的电压并未出现显著波动或下降，仍然保持在 35 kV 左右，并且随着时间的推移，这一电压值几乎不变，但在电压过零点处，电弧无法获得足够的能量维持燃烧，产生不稳定现象，导致车载变压器高压侧电压出现明显跌落，波形产生畸变。

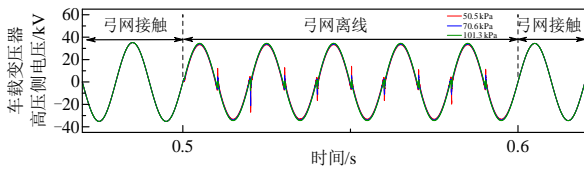


图 4 短时间离线车载变压器高压侧电压  
Fig. 4 Waveform of primary side voltage of vehicle transformer when offline for a short time

图 5 为弓网离线燃弧过程车载变压器高压侧电压波形放大图。可以看出，气压对车载变压器高压侧电压有着重要影响。气压越低，车载变压器高压侧电压波形在电压过零点处跌落畸变越严重，气压等级为 101.3 kPa(标准大气压)时，跌落电压为 5.75 kV；气压等级为 70.6 kPa 时，跌落电压为 10.96 kV；气压等级为 50.5 kPa 时，跌落电压为 16.44 kV。当气压从 101.3 kPa 下降到 50.5 kPa 时，跌落电压上升 185.91%，可能会对列车运行稳定性造成一定影响。

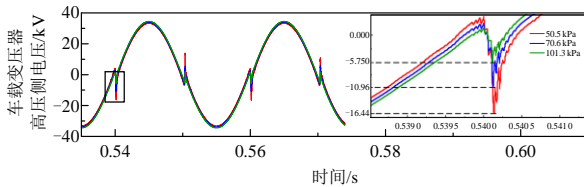


图 5 短时间离线燃弧阶段放大图  
Fig. 5 Enlarged view of the short-time offline arcing stage

图 6 为弓网离线时间为 400 ms 时，3 种不同气压等级下车载变压器高压侧电压波形变化情况。其整体波形变化趋势与文献[6]接近，验证了模型有效性。在弓网未发生离线时，波形与短时离线情况相同，电压稳定在 35 kV 左右。弓网离线燃弧后，在电压过零点同样发生电压跌落、畸变现象，畸变程度与短时间离线情况相同。当电弧

熄灭时，电弧续流通道被切断，电流突然中断，导致车载变压器绕组中产生反向冲击电流，从而产生反向电动势，引发反冲过电压，使车载变压器高压侧产生瞬时电压尖峰，引发过电压。随后，由于系统内部元件的相互作用，电压波形呈现出 6 个周期的方波递减波形，进入震荡状态，随着能量耗散，震荡幅度逐渐减小。

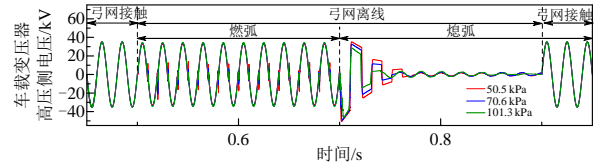


图 6 长时间离线 3 种海拔车载变压器高压侧电压  
Fig. 6 Waveform of primary side voltage of vehicle transformer when offline for a long time

图 7 为熄弧过程车载变压器高压侧电压波形放大图。可以看出，随着气压的降低，熄弧过程中的电压变化幅度显著增大，气压越低，熄弧时产生的过电压越高。这表明低气压环境下，电弧的熄灭过程更为剧烈、电压波动更为严重。当气压等级为 101.3 kPa 时，车载变压器高压侧过电压值为 46.41 kV；气压等级下降到 70.6 kPa 时，过电压值为 49.37 kV；当气压等级再次下降为 50.5 kPa 时，过电压值为 50.88 kV。气压从 101.3 kPa 下降到 50.5 kPa 时，过电压值上升 9.63%，可能会对牵引变流器产生冲击，威胁到列车的安全运行。

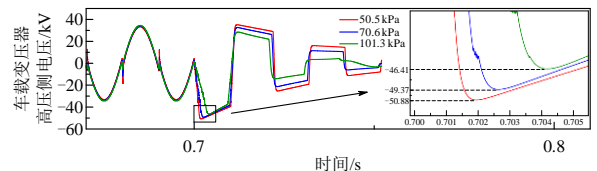


图 7 长时间离线燃弧阶段放大图  
Fig. 7 Enlarged view of the prolonged off-line arcing stage

图 8、9 分别为短时间、长时间离线情况下整流器直流侧电压变化波形。在弓网短时间离线且电弧持续燃烧的情况下，输出电压能够保持在约 3 kV 的水平，几乎不发生变化。这表明在电弧稳定存在时，能够有效地维持电路中的电压稳定，使直流侧电压不受弓网离线状态的影响。由图 9 可知，在弓网长时间离线时，离线熄弧产生之前，波形与短时间离线情况相同，电压稳定在 3 kV 左右。当长时间离线使电弧最终熄灭时，绕组线圈中能量在短时间内释放，整流器输出电压快速降为 0。弓网恢复接触后，由于存储在系统中的剩余能量以及重新接触时产生的电磁感应共同作用，产生相应过电压，其值在 7.46 kV 左右，之后逐步稳定在 3 kV。值得注

意的是，不同气压等级下的过电压值基本相同，这表明过电压的产生主要受电路特性和重新接触条件的影响，与气压的关系不大。但在直流侧电压快速下降和恢复过程中，气压起到调节作用。气压越低，直流侧电压下降和恢复的速度越慢，存在明显的滞后现象。这可能是因为低气压环境下，电弧的熄灭和重燃过程更为复杂，从而影响了电路中的能量转换和电压恢复过程。

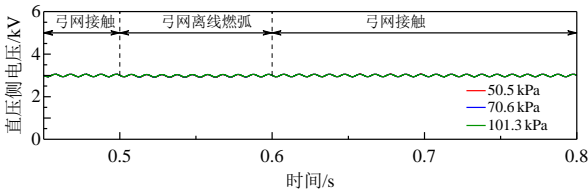


图8 短时间离线直流侧电压

Fig. 8 Waveform of the output voltage from rectifier when offline for a short time

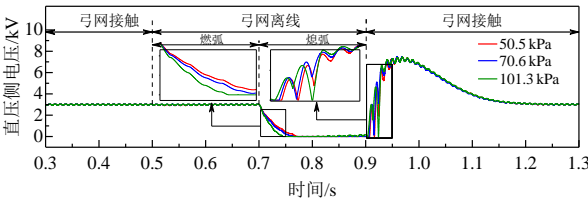


图9 长时间离线直流侧电压

Fig. 9 Waveform of the output voltage from rectifier when offline for a long time

2.3 低气压弓网电弧谐波的影响

在设置电弧-牵引传动系统模型参数不变的前提下，对弓网离线时间  $t=400\text{ ms}$ 、气压等级分别为 101.3、70.6、50.5 kPa 工况下，车载变压器高压侧电压谐波分布情况进行分析。

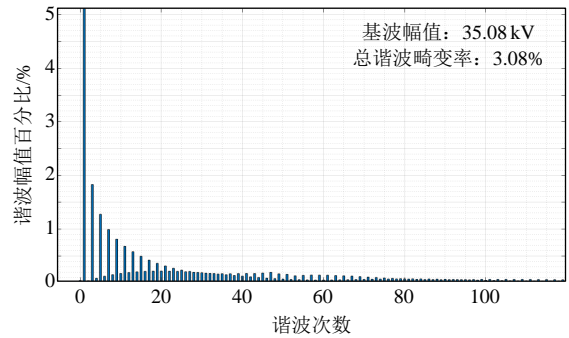
为直观对比 3 种气压等级下弓网状态变化过程中车载变压器高压侧电压谐波分布情况，本文将整个过程划分为 3 个关键阶段。

- 1) 初始燃弧阶段( $t=0.50\sim 0.52\text{ s}$ ): 此阶段弓网开始分离，弓网电弧初步形成；
- 2) 稳定燃弧阶段( $t=0.60\sim 0.62\text{ s}$ ): 电弧稳定燃烧，弓网处于持续离线阶段；
- 3) 电弧熄灭阶段( $t=0.70\sim 0.72\text{ s}$ ): 由于能量逐渐消耗，电弧处于熄灭阶段。

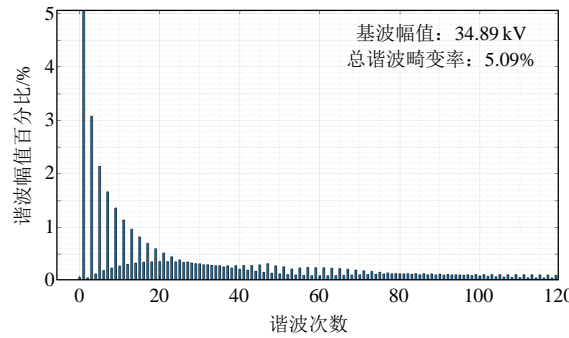
针对每个阶段进行快速 Fourier 变换分析，分析车载变压器高压侧电压谐波特性。横轴为谐波次数，纵轴为谐波幅值百分比，是各次谐波幅值与基波幅值的百分比。

图 10 为不同气压等级下初始燃弧阶段车载变压器高压侧电压谐波分布。可知，3 种气压环境下

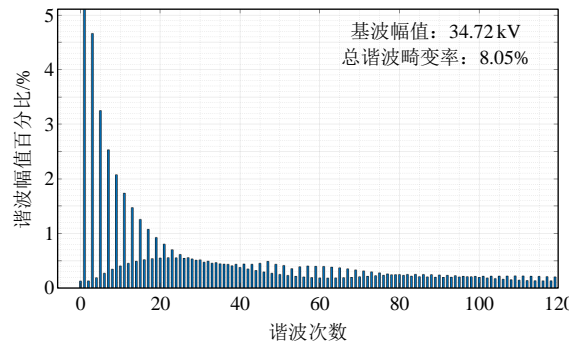
的谐波分布趋势大致相同，在 40 次谐波内，奇次谐波的幅值百分比随着谐波次数的增大而逐渐降低。偶次谐波的幅值百分比则呈现先增大再降低的趋势，整体而言，偶次谐波的幅值相对较小，对电压波形的影响不如奇次谐波显著。



(a) 气压为101.3 kPa, 电弧熄灭阶段( $t=0.50\sim 0.52\text{ s}$ )



(b) 气压为70.6 kPa, 电弧熄灭阶段( $t=0.50\sim 0.52\text{ s}$ )



(c) 气压为50.5 kPa, 电弧熄灭阶段( $t=0.50\sim 0.52\text{ s}$ )

图10 初始燃弧阶段车载变压器高压侧电压谐波

Fig. 10 Harmonic of primary side voltage of vehicle Transformer during initial arcing stage

随着气压降低，基波幅值略微下降，同次谐波的幅值，特别是低次谐波的幅值显著增加。这表明在低气压环境下，电弧的燃烧更加不稳定，产生了更多的谐波分量。总谐波畸变率也随气压的降低而显著上升，气压等级从 101.3 kPa 下降到 50.5 kPa 时，总谐波畸变率从 3.08% 上升到 8.05%，这表明在低气压环境下，电压波形的谐波畸变更加明显。

图 11 为不同气压等级下稳定燃弧阶段车载变压器高压侧电压谐波分布。可知，主要能量集中在

低频段，低频谐波幅值显著高于高频谐波。奇次谐波幅值显著高于偶次谐波，主要表现为低次奇次谐波(如 1、3、5、7 次等)。在 80 次谐波内随着谐波次数的增大，奇次谐波幅值百分比呈现先下降再上升的趋势，偶次谐波幅值百分比呈现先上升再下降的趋势。

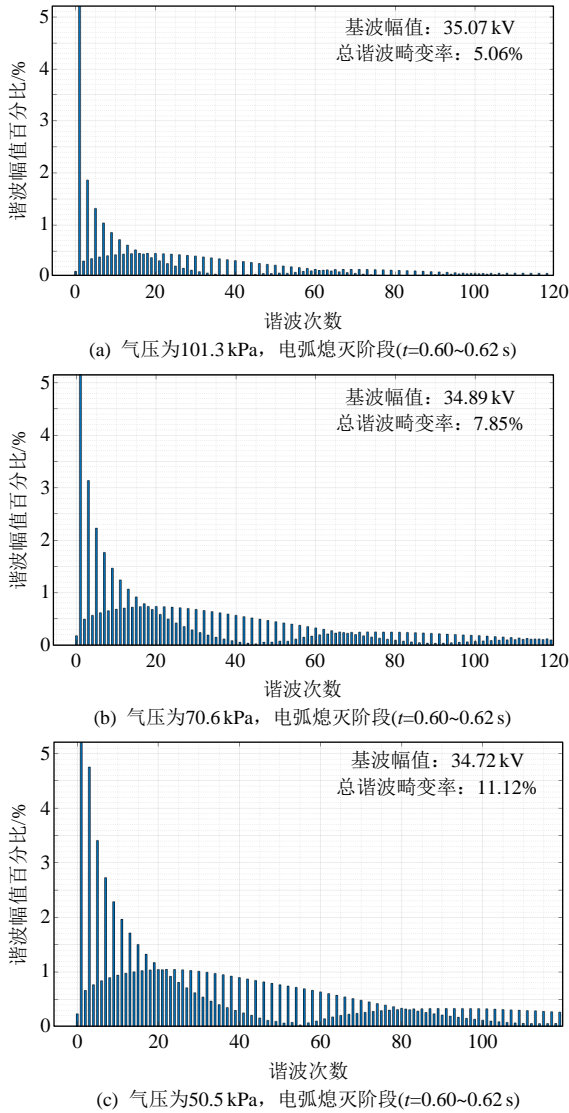


图 11 稳定燃弧阶段车载变压器高压侧电压谐波  
Fig. 11 Harmonic of primary side voltage of vehicle Transformer during stable arcing stage

随着气压降低，基波幅值略微减小，不同气压下同次谐波幅值尤其是低次谐波幅值同样显著增加。总谐波畸变率随着气压降低而增加，电压等级从标准大气压 101.3 kPa 下降到 50.5 kPa 时，总谐波畸变率由 5.06% 上升到 11.12%，说明在低气压环境下，谐波的影响更为显著，谐波成分更加复杂。

图 12 为不同气压等级下电弧熄灭阶段车载变压器高压侧电压谐波分布。可知，主要能量集中在 20 次内的低频谐波，60 次后的谐波接近于 0，这意

味着电弧熄灭阶段存在较大的直流分量，功率损耗较大。奇次谐波显著高于偶次谐波，且奇次、偶次谐波整体呈现下降趋势。

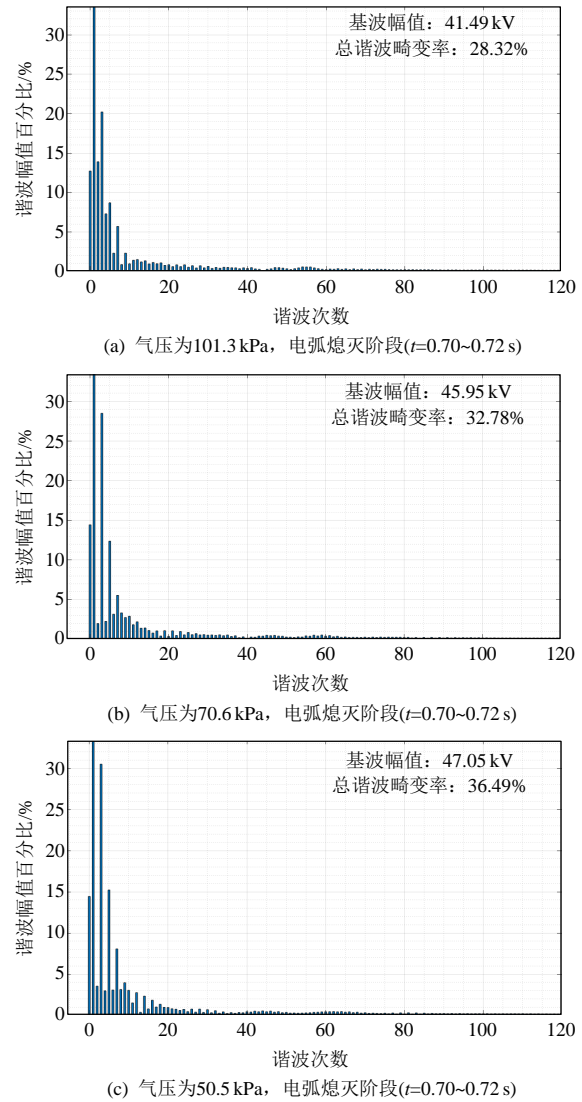


图 12 电弧熄灭阶段车载变压器高压侧电压谐波  
Fig. 12 Harmonic of primary side voltage of vehicle Transformer during arc quenching stage

与前面 2 个阶段不同的是，在电弧熄灭阶段，随着气压降低，基波幅值显著上升，这是由于气压越低，电弧温度越低、电弧半径越大，电弧更容易在熄弧后发生重燃，导致系统的瞬态电压波动和畸变加剧，从而影响了电压基波与谐波畸变率。气压等级从标准大气压 101.3 kPa 下降到 50.5 kPa 时，总谐波畸变率由 28.32% 上升到 36.49%，这表明随着气压降低，列车系统中的谐波失真愈加严重，可能会对系统的可靠性产生重大影响。

图 13 给出不同气压等级下，不同燃弧阶段牵引传动系统变压器高压侧电压总谐波畸变率的变化趋势。可知，在弓网接触时，总谐波畸变率接近

0, 电压较为稳定。在弓网燃弧阶段, 随着燃弧时间的延长, 总谐波畸变率呈现缓慢增大的趋势, 气压越低, 相应总谐波畸变率越大。在弓网熄弧环节, 总谐波畸变率迅速增大, 当气压等级从标准大气压 101.3 kPa 下降到 50.5 kPa 时, 总谐波畸变率由 28.32% 上升到 36.49%, 说明气压的下降使输入电压波形发生畸变, 电能质量恶化, 可能威胁到列车在高海拔低气压环境下运行的安全性和稳定性。

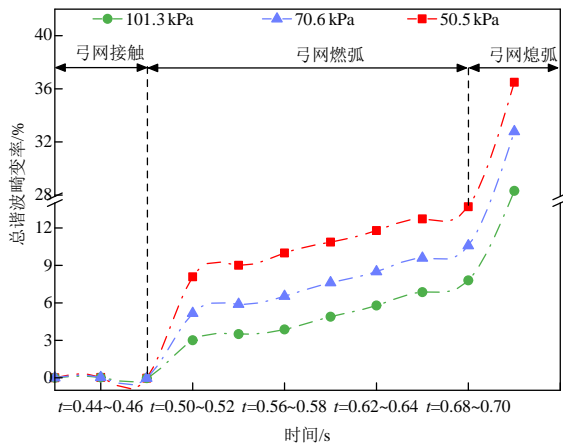


图 13 车载变压器高压侧电压谐波变化趋势

Fig. 13 Trends of Harmonic of primary side voltage of vehicle Transformer

### 3 结论

本文建立了基于 Schwarz 模型的高海拔低气压弓网电弧模型, 搭建了低气压弓网电弧-牵引传动系统联合模型, 首次系统性地开展了高海拔低气压环境下弓网电弧对车载变压器高压侧电压、谐波分布及直流侧电压的影响研究, 并与相关实验、仿真结果进行对比, 验证了模型的有效性与可靠性。得到主要结论如下:

1) 当弓网离线时间较短时, 弓网电弧会持续燃烧, 使车载变压器高压侧在电压过零点产生电压跌落和波形畸变现象。随着气压降低, 电压跌落程度逐渐加剧, 当气压从标准大气压 101.3 kPa 下降至 50.5 kPa 时, 跌落电压上升 185.91%, 从而引发列车传动系统的短暂电压波动。

2) 当弓网离线时间较长时, 电弧持续燃烧后逐渐熄灭。牵引变流器直流侧电压迅速下降, 并在离线恢复时产生 7.46 kV 的过电压, 随着气压降低, 直流侧电压下降和恢复速度减缓; 车载变压器高压侧产生过电压, 其值随着气压降低而增加, 当气压由标准大气压 101.3 kPa 降至 50.5 kPa 时, 过电压上升 9.63%, 最大值达到 50.88 kV。这可能使高海拔

低气压环境下列车运行的安全风险增加, 存在安全隐患。

3) 不同气压下, 弓网电弧对车载变压器高压侧电压谐波分布特性产生不同影响。初始燃弧和稳定燃弧阶段中, 总谐波畸变率随着气压降低而缓慢增大; 在电弧熄灭阶段, 随着气压降低, 基波幅值明显上升, 总谐波畸变率显著增大。在气压为 50.5 kPa 时, 总谐波畸变率达 36.49%, 并存在大量直流分量。这表明在高海拔、低气压环境下, 电压波形的谐波畸变更加显著, 可能对电力系统的稳定性和设备运行产生更大影响。

本文通过建立低气压弓网电弧-牵引传动系统模型, 对低气压环境下弓网电弧对列车牵引传动系统的影响进行了研究。但本文模型中没有考虑到我国高海拔地区含氧量及温湿差等因素的影响, 在后续研究中将考虑进一步细化已经建立的高海拔低气压弓网电弧模型, 考虑更多相关因素影响, 并进一步探索新型电力电子技术对高海拔弓网电弧抑制的应用。此外, 进一步讨论引入高海拔电弧随机性的影响, 同样是重要且有意义的研究工作。

### 参考文献

- [1] 吴广宁, 周悦, 雷栋, 等. 弓网电接触研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3495-3506.  
WU Guangning, ZHOU Yue, LEI Dong, et al. Research advances in electric contact between pantograph and catenary[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3495-3506(in Chinese).
- [2] 郭凤仪, 刘帅, 王智勇. 弓网系统滑动电接触瞬态温度场仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(3): 29-34.  
GUO Fengyi, LIU Shuai, WANG Zhiyong. Research on transient temperature field of electrical sliding contact in pantograph and catenary system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(3): 29-34(in Chinese).
- [3] 伍玉鑫, 杨泽锋, 高国强, 等. 电弧作用下电接触材料的热烧蚀过程[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2276-2283.  
WU Yuxin, YANG Zefeng, GAO Guoqiang, et al. Thermal ablation process of electrical contact materials under arc effect[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2276-2283(in Chinese).
- [4] 李虹, 张冲默, 王作兴, 等. 高速列车供电系统电磁干扰形成机理与抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 3137-3153.  
LI Hong, ZHANG Chongmo, WANG Zuoxing, et al. Review of EMI mechanism and suppression methods in power supply system of high-speed train [J]. Proceedings

- of the CSEE, 2023, 43(8): 3137-3153(in Chinese).
- [5] 郭凤仪, 王喜利, 王智勇, 等. 弓网电弧辐射电场噪声实验研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 220-225. GUO Fengyi, WANG Xili, WANG Zhiyong, et al. Research on radiated electric field noise of pantograph arc[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 220-225(in Chinese).
- [6] 肖嵩, 曹野, 吴广宁, 等. 高铁过电压对车载牵引供电系统的影响机理及抑制方法: 系统性综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4682-4701. XIAO Song, CAO Ye, WU Guangning, et al. Influence mechanism and suppression methodologies of the overvoltage of high-speed railway on the vehicle-mounted traction power supply system: systematic review [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4682-4701(in Chinese).
- [7] 周昱涵, 杨泽锋, 鲁超, 等. 弓网系统离线电弧在低气压环境下运动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5412-5420. ZHOU Yuhan, YANG Zefeng, LU Chao, et al. Research on motion characteristics of offline arc in pantograph catenary system under low air pressure environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5412-5420(in Chinese).
- [8] 蒋兴良, 胡松林, 杨国林, 等. 高原地区隧道净空绝缘间隙修正[J]. 高电压技术, 2024, 50(8): 3589-3597. JIANG Xingliang, HU Songlin, YANG Guolin, et al. Correction of tunnel clearance insulation gap at high altitudes[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3589-3597(in Chinese).
- [9] 刘勇, 李超, 辛岳芑, 等. 覆冰绝缘子直流电弧运动特性及燃弧时间的影响因素[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 4222-4231. LIU Yong, LI Chao, XIN Yuepeng, et al. DC-arc motion characteristics and influencing factors of arcing-time on ice-covered outdoor insulators[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4222-4231(in Chinese).
- [10] 陈旭坤, 曹保江, 刘耀银, 等. 高速气流场下列车弓网电弧动态模型[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3593-3600. CHEN Xukun, CAO Baojiang, LIU Yaoyin, et al. Dynamic model of pantograph-catenary arc of train in high speed airflow field[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3593-3600(in Chinese).
- [11] 郭凤仪, 王鑫, 刘艳丽. 基于 Mayr 模型改进的适用于串联故障电弧的新模型[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(2): 67-71. GUO Fengyi, WANGXin, LIU Yanli. New improved model for series arc fault based on Mayr model[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(2): 67-71(in Chinese).
- [12] WANG Ying, LIU Zhigang, MU Xiuqing, et al. An extended habedank's equation-based EMTP model of pantograph arcing considering pantograph-catenary interactions and train speeds[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1186-1194.
- [13] 肖嵩, 段君璋, 朱涛, 等. 高速铁路弓网离线过电压对车体电位的影响[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(5): 180-190. XIAO Song, DUAN Junzhang, ZHU Tao, et al. Impact of pantograph-catenary off-line overvoltage on car body potential in high-speed railway[J]. China Railway Science, 2023, 44(5): 180-190(in Chinese).
- [14] 魏文赋, 张婷婷, 高国强, 等. 弓网电弧对牵引传动系统电气特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1589-1597. WEI Wenfu, ZHANG Tingting, GAO Guoqiang, et al. Influences of pantograph-catenary arc on electrical characteristics of a traction drive system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1589-1597(in Chinese).
- [15] LIU Y J, CHANG G W, HUANG H M. Mayr's equation-based model for pantograph arc of high-speed railway traction system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 2025-2027.
- [16] 黄祥, 高国强, 吴广宁. 弓网离线对牵引传动系统的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 102-107, 116. HUANG Xiang, GAO Guoqiang, WU Guangning. Influence of pantograph-catenary disconnection on traction system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 102-107, 116(in Chinese).
- [17] 胡德旺, 周春晓, 毛承雄, 等. 弓网离线电弧对 PETT 的影响及其抑制措施[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(4): 119-125. HU Dewang, ZHOU Chunxiao, MAO Chengxiong, et al. Disconnection-arc influence of pantograph-catenary on PETT and suppression measure[J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(4): 119-125(in Chinese).
- [18] 王卓非, 章程, 张耀, 等. 工频交流电压下变压器油中电弧放电初期压力波特性[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(09): 3320-3332. WANG Zhuofei, ZHANG Cheng, ZHANG Yao, et al. Characteristics of Shock Waves During the Initial Arc Discharge in Transformer Oil Under Power Frequency AC Voltage[J]. Proceedings of CSEE, 2025, 45(09): 3320-3332(in Chinese).
- [19] 张逸, 林楠, 刘必杰, 等. 基于多源数据的配变低压侧谐波估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11): 4305-4318. ZHANG Yi, LIN Nan, LIU Bijie, et al. Harmonic Estimation Method for Low Voltage Side of Distribution Transformer Based on Multi-source Data [J]. Proceedings

- of CSEE, 2025, 45(11): 4305-4318(in Chinese).
- [20] PARIZAD A, BAGHAEI H R, TAVAKOLI A, et al. Optimization of arc models parameter using genetic algorithm[C]//International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, (EPECS). Sharjah, United Arab Emirates: IEEE, 2009: 1-7.
- [21] RIZKF A M, REZAZADA A Q. Modeling of altitude effects on AC flashover of polluted high voltage insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 810-822.
- [22] 宋冬冬, 程林, 林志法, 等. 电弧热等离子体建模、仿真及应用综述[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 932-943. SONG Dongdong, CHENG Lin, LIN Zhifa, et al. Review of arc thermal plasma modeling, simulation and application[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 932-943(in Chinese).
- [23] 乔凯, 刘文正, 张坚, 等. 基于改进 Mayr 模型的弓网离线电弧仿真分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(5): 138-142. QIAO Kai, LIU Wenzheng, ZHANG Jian, et al. Simulation analysis of pantograph-catenary arc based on improved Mayr model[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(5): 138-142(in Chinese).
- [24] 李爽, 金鑫, 毕海涛, 等. 可变电弧模型下特高压气体绝缘变电站快速暂态过电压的数值计算[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1306-1312. LI Shuang, JIN Xin, BI Haitao, et al. Numerical calculation on very fast transient overvoltage of UHV gas insulated substation by variable gap arc model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1306-1312(in Chinese).
- [25] 马云双, 高国强, 朱光亚. 高速列车弓网电弧温度场特性仿真研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3597-3603. MA Yunshuang, GAO Guoqiang, ZHU Guangya. Numerical simulation and analysis of temperature distribution of pantograph-catenary arc characteristics of high-speed train[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3597-3603(in Chinese).
- [26] XU Zhilei, GAO Guoqiang, WEI Wenfu, et al. Characteristics of pantograph-catenary arc under low air pressure and strong airflow[J]. High Voltage, 2022, 7(2): 369-381.
- [27] 冯江华, 王坚, 李江红. 高速列车牵引传动系统综合仿真平台的分析与设计[J]. 铁道学报, 2012, 34(2): 21-26. FENG Jianghua, WANG Jian, LI Jianghong. Integrated simulation platform of high-speed train traction drive system[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(2): 21-26(in Chinese).
- [28] 崔恒斌, 冯晓云, 林轩, 等. 牵引网与交直列车耦合系统谐波谐振特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2736-2745. CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, LIN Xuan, et al. Simulation study of the harmonic resonance characteristics of the coupling system with a traction network and AC-DC-AC trains[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2736-2745(in Chinese).
- [29] 张曙光. CRH2 型动车组[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 136-138. ZHANG Shuguang. China railways CRH2[M]. Beijing: China Railway Press, 2008: 136-138(in Chinese).
- [30] WEI Wenfu, WU Jie, GAO Guoqiang, et al. Study on pantograph arcing in a laboratory simulation system by high-speed photography[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(10): 2438-2445.



邹丹丹

在线出版日期: 2025-02-14。

收稿日期: 2024-10-08。

作者简介:

邹丹丹(1985), 男, 博士, 副教授, 研究方向为放电等离子体、高速铁路弓网电弧相关研究, ddzou@ecjtu.edu.cn;

夏子鑫(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为高速铁路弓网电弧, xiazx99@163.com。

\*通信作者: 魏文赋(1987), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高速铁路弓网电弧与电接触等, wfwei@home.swjtu.edu.cn。

(编辑 张蕾)