

文章编号: 1005-0523(2026)01-0064-07



## 直供方式下高速铁路牵引回流系统金具熔烧故障研究

伦利, 何洪, 漆星, 曾加成, 程宏波

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西南昌 330013)

**摘要:** 回流系统是牵引供电系统的重要组成部分, 直供方式下该系统由多个回路组成, 结构复杂, 回流不畅可能导致支撑金具出现熔烧, 严重威胁铁路行车安全。文章旨在分析直供方式下牵引回流系统故障导致支撑金具熔烧的机理, 明确其关键影响因素, 并为牵引回流系统的故障诊断和排查提供理论依据。首先, 对牵引回流系统中电流分布特性进行了深入分析, 建立了基于CDEGS的牵引供电回流系统仿真模型; 然后, 分别模拟了正常工况、接触网支柱未接地和回流线未接地等典型故障工况下的电流与电位分布特性; 进一步对比分析了不同土壤电阻率和接地电阻对系统电流分布的影响规律, 总结了引起支撑金具熔烧的原因。仿真结果表明, 在正常工况下, 回流线和贯通地线的最大回流比例分别为37.00%和19.00%; 当回流线未接地时, 回流线和贯通地线回流占比分别为47.34%和10.10%, 此时部分电流通过支柱流入贯通地线, 支柱最大通过电流可达74.73 A, 回流线和支柱间存在最大40 V的电压差。当回流线未接地时, 回流线、支柱和贯通地线存在电压差, 同时有较大电流流过支柱上的支撑金具, 两者共同作用导致支撑金具发热熔烧。在实际运行中需加强对回流线未接地情况的排查, 以避免此类故障的发生。

**关键词:** 牵引回流; 支撑金具; CDEGS; 回流系统故障

**中图分类号:** U225

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 伦利, 何洪, 漆星, 等. 直供方式下高速铁路牵引回流系统金具熔烧故障研究[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(1): 64-70.

## Research on the Melting and Burning Failure of Metal Fittings in High-Speed Railway Traction Return System Under Direct Supply Mode

Lun Li, He Hong, Qi Xing, Zeng Jiacheng, Cheng Hongbo

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The return system is an important component of the traction power supply system. Under the direct power supply mode, the traction return system consists of multiple circuits with a complex structure. If the return is not smooth, it may cause the supporting fittings to melt and burn, seriously threatening the safety of railway operation. This study aims to analyze the mechanism of support fittings melting and burning caused by traction return system faults under direct power supply mode, clarify its key influencing factors, and provide theoretical basis for fault diagnosis and troubleshooting of traction return system. Firstly, an in-depth analysis was conducted on the current distribution characteristics in the traction return system, and a simulation model of the traction power supply return system based on CDEGS was established; Then, the current and potential distribution characteristics were simulated under typical fault conditions such as normal working conditions, ungrounded contact

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 江西省主要学科学术和技术带头人培养项目(20232BCJ22004); 江西省自然科学基金项目(2021ACB204004)

wire pillars, and ungrounded return lines; Further comparative analysis was conducted on the influence of different soil resistivity and grounding resistance on the distribution of system current, and the reasons for the melting and burning of pillar fittings were summarized. The simulation results show that under normal operating conditions, the maximum return ratios of the return line and the through ground line are 37.00% and 19.00% respectively; When the return wire is not grounded, the proportion of return wire and through ground wire return is 47.34% and 10.10% respectively. At this time, some current flows into the through ground wire through the pillar, and the maximum current passing through the pillar can reach 74.73 A. There is a maximum voltage difference of 40 V between the return wire and the pillar. When the return wire is not grounded, there is a voltage difference between the return wire, pillar, and through ground wire, and a large current flows through the supporting fittings on the pillar. The combined effect of the two causes the supporting fittings to heat up and melt. In actual operation, it is necessary to strengthen the investigation of ungrounded return lines to avoid the occurrence of such faults.

**Key words:** traction return current; supporting metal; CDEGS; return system malfunction

**Citation format:** LUN L, HE H, QI X, et al. Research on the melting and burning failure of metal fittings in high-speed railway traction return system under direct supply mode[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(1): 64-70.

铁路牵引供电回流系统由钢轨、回流线、贯通地线及其附属结构组成。随着高速铁路不断发展,牵引回流不断增大,回流系统的故障日渐频繁,给牵引供电系统安全带来巨大隐患。由于回流线通常直接通过非绝缘方式架设在H型钢柱上并接地,在某些情况下会导致非绝缘支撑金具熔烧。此类故障时有发生,如牵引回流烧断保护线(protective wire, PW)<sup>[1]</sup>、汉宜铁路因回流不畅导致架空地线烧断<sup>[2]</sup>、京广高铁某支柱PW烧断<sup>[3]</sup>等,危害铁路供电系统的正常运行。

牵引供电回流系统近来受到学界重视,在回流系统仿真分析及故障诊断等方面已有较多相关研究。仿真分析主要有通过牵引网网络模型的数学分析<sup>[4-6]</sup>和基于软件的仿真分析<sup>[7-8]</sup>。学者针对铁路引入综合接地系统情况,利用多导体传输线理论对牵引网网络模型进行分析,探究了牵引回流系统各路回流情况<sup>[9]</sup>;基于机器学习理论提出无绝缘轨道电路健康状态综合评价方法,为实现“状态修”提供依据<sup>[10-11]</sup>;针对牵引回流支路短路和断路故障,在总结故障的情况下提出了故障识别和定位的方法<sup>[12-14]</sup>。综合查阅各类相关研究,针对回流系统中回流线支撑金具熔烧故障理论研究和分析相对较少。

支撑金具熔烧现象较为普遍,主要发生在回流线非绝缘架设处,具有隐蔽性和持续性的特点。与

其他类型回流故障有所不同,支撑金具熔烧易导致回流线脱落,从而影响行车安全,但目前对支撑金具熔烧的研究较少,对故障产生原因也没有系统认识。本文考虑钢柱在回流系统中的影响,建立了牵引回流系统模型,研究不同故障下支撑金具通过电流情况,分析不同因素对故障情况的影响,总结引起支撑金具熔烧故障的原因,为现场问题排查和整改提供指导。

## 1 牵引回流系统仿真建模

我国电气化铁路目前主要采用自耦变压器(auto-transformer, AT)供电方式和直供加回流供电方式两种,其中AT供电方式设有专用的负馈线回流,负馈线与支柱间采用绝缘安装,其回流结构简单、工作条件较好,回流故障较少。而直供加回流供电方式下,回流路径较多,包含回流线、钢轨和地等多个通路,且回流线多采用非绝缘安装架设在支柱上,支柱和地之间存在连接,导致直供加回流方式下回流情况较为复杂,容易出现故障;因此,本文主要针对直供加回流方式下回流系统的情况进行分析。

### 1.1 牵引回流系统结构

直供加回流供电方式下,牵引电流从机车流向钢轨,随后在钢轨上朝两端流去,当流至金属回路全并联点处时将会分流,一部分流向回流线和贯通

地线,一部分继续在钢轨上传输,最终在牵引变电所附近通过线缆或扁钢引回所内牵引变压器接地点。图1为直供加回流方式下牵引回流系统结构。

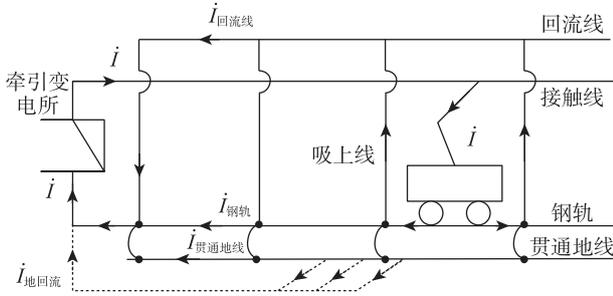


图1 直供加回流方式下牵引回流系统结构  
Fig. 1 Structure of traction return system under the mode of direct supply and return

直供加回流方式下,回流系统中每隔3 km左右设置完全横连接,利用扼流变压器连接回流线和贯通地线两个金属回路。

根据系统结构,可计算回路电压与电流的分布

$$\begin{cases} d\dot{U}(x) = z_{eq} \dot{I}(x) dx - z_{0eq} \dot{I} dx \\ d\dot{I}(x) = D\dot{U}(x) dx \end{cases} \quad (1)$$

由上式解得,  $\dot{U}(x)$  和  $\dot{I}(x)$  为

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} \\ \dot{I}(x) = k_c \dot{I} + \frac{1}{Z_0} (Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\dot{U}(x)$  为距变电所  $x$  处的电位;  $\dot{I}(x)$  为距变电所  $x$  处的回路电流;  $z_{eq}$  为接触线等效自阻抗,  $z_{0eq}$  为接触线和回流等效回路之间的互阻抗;  $D$  为回流等效回路的对地导纳;  $k_c$  为感应系数,  $k_c = z_{0eq}/z_{eq}$ ;  $Z_0$  为回流等效回路特性阻抗,  $Z_0 = \sqrt{z_{eq}/D}$ ;  $\gamma$  为回流等效回路传播常数,  $\gamma = \sqrt{z_{eq}D}$ ;  $A, B$  为待定系数。

可根据边界条件确定待定系数  $A$  和  $B$ , 在变电所处  $x=0$ , 边界条件为

$$\begin{cases} \dot{I}(0) = k_c \dot{I} + \frac{1}{Z_0} (A - B) \\ \dot{U}(0) = A + B \\ \dot{U}(0) = [\dot{I}(0) - \dot{I}] (Z_0/Z_E) \end{cases} \quad (3)$$

在机车取流处,  $x=l$ , 边界条件为

$$\begin{cases} \dot{I}(l) = k_c \dot{I} + \frac{1}{Z_0} (Ae^{\gamma l} - Be^{-\gamma l}) \\ \dot{U}(l) = Ae^{\gamma l} + Be^{-\gamma l} \\ \dot{U}(l) = [\dot{I} - \dot{I}_T(l)] Z_0 \end{cases} \quad (4)$$

可解得  $A, B$  为

$$\begin{cases} A = \frac{1}{2} (1 - k_c) Z_0 e^{-\gamma l} \dot{I} \\ B = \frac{-(1 - k_c) Z_0 (2Z_E + Z_0 e^{-\gamma l})}{2(Z_0 + 2Z_E)} \dot{I} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Z_E$  为变电所接地网的接地电阻。

可以得到等效回路电压  $\dot{U}_T(x)$  和电流  $\dot{I}_T(x)$  的一般表达式

$$\begin{cases} \dot{U}_T(x) = \frac{1}{2} (1 - k_c) Z_0 \dot{I} \left[ e^{-\gamma(l-x)} - \frac{(2Z_E + Z_0 e^{-\gamma l}) e^{-\gamma x}}{Z_0 + 2Z_E} \right] \\ \dot{I}_T(x) = k_c \dot{I} + \frac{1}{2} (1 - k_c) \dot{I} \left[ e^{-\gamma(l-x)} + \frac{(2Z_E + Z_0 e^{-\gamma l}) e^{-\gamma x}}{Z_0 + 2Z_E} \right] \end{cases} \quad (6)$$

## 1.2 牵引回流系统建模及其验证

基于CDEGS仿真平台建立直供方式牵引供电回流系统模型,线路选择单行线,采用直供加回流供电方式,并设有综合贯通地线。

供电区间设为18 km,回流线、钢轨与贯通地线每3 km进行一次横向全并联,牵引网采用JTMH-120承力索、CTMH-150接触线,回流线型号LB-GLJ-185、贯通地线型号TJ-95,钢轨型号UIC-60,各导体的空间分布如图2所示,导体的参数见表1。图2以线路中心为  $X$  轴的0点,水平地面为  $Y$  轴的0点,  $(X, Y)$  为所指点的坐标。

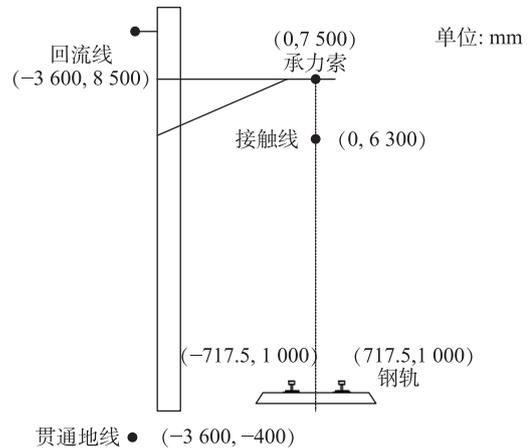


图2 直供方式牵引网各类导体空间分布情况  
Fig. 2 Spatial distribution of various conductors in direct supply traction network

将承力索与接触线等效为一根导体,根据牵引网导体参数与空间分布,可以得到直供方式下的牵引网阻抗矩阵如表2所示。表2中,实部(没有  $j$  的数)为电阻值,虚部( $j$ 后面的数)为电抗值。

设土壤电阻率为  $1000 \Omega \cdot m$ , 电流激励为  $500 A$ ,

表1 直供方式牵引网导体参数

Tab.1 Traction network conductor parameters in direct supply mode

传输线类型	型号	等效半径/mm	有效电阻/(Ω/km)
承力索	JTMH-120	5.30	0.242 0
接触线	CTMH-150	5.56	0.185 2
钢轨	UIC-60	12.79	0.135 0
回流线	LBGLJ-185	9.03	0.154 4
贯通地线	TJ-95	4.74	0.200 0
H型钢柱	Q235	127.80	1 340

表2 直供方式牵引网阻抗参数矩阵

Tab.2 Impedance parameter matrix of direct supply traction network

传输线类型	接触线	钢轨	回流线	贯通地线
接触线	0.106 3+j0.33	j0.183 9	j0.194 9	j0.175 1
钢轨	j0.183 9	0.067 5+j0.31	j0.174 5	j0.195 4
回流线	j0.194 9	j0.174 5	0.154 4+j0.34	j0.172 7
贯通地线	j0.175 1	j0.195 4	j0.172 7	0.2+j0.376 8

对模型进行仿真验证。仿真结果显示,牵引电流返回牵引变电所时,地网回收的电流和机车离牵引变电所的距离成正比,而钢轨、回流线以及贯通地线的回流则成反比。其中钢轨最大回流比例为43.00%,回流线最大回流比例为37.00%,贯通地线最大回流比例为19.00%,地网最大回流比例为16.00%。回流比例符合要求,与实际情况吻合,反映搭建的模型正确<sup>[15]</sup>。

## 2 回流系统不同类型故障仿真

### 2.1 不同类型故障仿真分析

由于回流系统组成较为复杂,尤其是特性相差较大的大地参与回流,导致回流系统的故障分析较为困难。在所搭模型的基础上,对回流系统可能的故障形式进行仿真,对不同类型故障的特征进行总结,为系统实际故障的诊断提供依据。

牵引回流在横向全连接处进行分流,分别流入回流线和贯通地线,在此期间可能出现扼流变压器未接地、H型钢柱基础未接地等情况,导致回流不畅。对正常情况、H型钢柱未接地以及回流线未接地3种情况进行仿真,得到不同情况下各部分的特征如表3所示。其中L1表示靠近牵引变电所侧离机车最近的引上线位置,L2表示远离牵引变电所侧

表3 不同状态下回流系统的特征参数

Tab.3 Operation characteristics of return system in different states

运行状态	位置	回流线电流/A	贯通地线电流/A	支柱最大电流/A
正常	L1	114.10	52.60	0
	L2	63.70	28.90	0
支柱未接地	L1	114.10	52.60	0
	L2	63.70	28.90	0
回流线未接地	L1	171.90	25.20	74.73
	L2	55.80	25.30	53.93

离机车最近的引上线位置。

从表3可以看出,正常情况下,在L1处回流线和贯通地线的电流分别为114.10 A和52.60 A,在L2处分别为63.70 A和28.90 A。观测区间的回流线和贯通地线占总回流的比例分别为35.56%和16.30%。在回流系统正常时,支柱中无电流流过。

由于支柱不是预设的回流通道,故当支柱未接地时对回流系统无影响,回流数据未发生改变,与正常情况相同。

在回流线未接地时,由于电流在流向贯通地线时受阻,电流会集中在回流线和钢轨上,从而故障点的靠近变电所侧的回流线电流增大至171.90 A,贯通地线电流减小到25.20 A。由于回路的改变,在故障点的远离变电所侧的回流线和贯通地线都略有减小,分别为55.80 A和25.30 A。观察区间回流线和贯通地线回流占总回流的比例分别为45.54%和10.10%。由于电流无法通过回流线流向贯通地线,支柱将承担回路功能,导致电流通过支柱,在故障区间吸上线的两侧支柱通过电流可达74.73 A和53.93 A。此时牵引回流通路发生改变,其回流路径如图3所示。

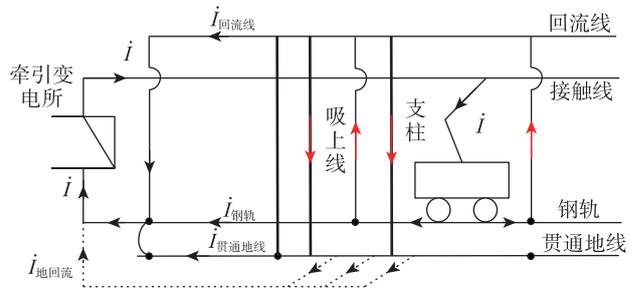


图3 回流线接地异常时回流路径示意图

Fig. 3 Diagram of the backflow path when the backflow cable is grounded abnormally

## 2.2 支撑金具熔烧故障的原理分析

### 2.2.1 支撑金具热量计算分析

铁路回流系统中沿线支撑金具载流能力大多为 10.00~50.00 A<sup>[14]</sup>,在回流线接地异常故障中,支柱通过的电流大于此标准。

根据仿真结果,当回流线未接地时,支撑金具处的最大电流  $I=74.73$  A。高速铁路常用 6061 铝合金作为回流线支撑金具,其电阻率  $\rho=2.82 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ,比热容  $C$  为  $900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,熔点约为  $582 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[16]</sup>。设支撑金具的长度  $L=0.1 \text{ m}$ ,截面积  $A=1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ,质量  $m=0.5 \text{ kg}$ ,则支撑金具的电阻  $R$  为

$$R = \rho \frac{L}{A} = 1.88 \times 10^{-3} \Omega$$

根据焦耳定律,产生的热量  $Q$  为

$$Q = I^2 R t = 642\ 538 \text{ J}$$

除去日常检修等天窗点,取牵引变电所对牵引网供电时间为 6:00—23:00,共 17 h,  $t=61\ 200 \text{ s}$ 。则温度上升  $\Delta T$  为

$$\Delta T = \frac{Q}{mC} \approx 1\ 154.85 \text{ }^\circ\text{C}$$

取初始环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,则支撑金具的最终温度为

$$T = 25 + 1\ 154.85 = 1\ 179.85 \text{ }^\circ\text{C}$$

此温度超过该合金材料的熔点 ( $582 \text{ }^\circ\text{C}$ ),将导致金具出现明显的熔烧和结构损坏。

因此,发生回流线接地断线时,当有机车通过该区间,牵引回流将通过回流线支撑金具经支柱流回贯通地线。由于电流超过支撑金具的载流能力,电流发热效应将引起金具温度不断升高,最终出现金具熔烧现象。

### 2.2.2 回流系统的电势分析

发生此类故障时,回流大多集中到回流线上,贯通地线无电流通过,两者之间会产生一个较大的电势差。在故障点附近位置回流线和贯通地线的电势分布如图 4 所示。

从图 4 可以看到,在线路区间支柱处,回流线电势为  $160 \text{ V}$ ,支柱电势为  $120 \text{ V}$ ,贯通地线电势为  $78 \text{ V}$ ,三者之间存在较大电势差,而三者又是非绝缘连接的,在系统未达到稳定时,电流从高电势流向低电势,直至稳定。

因此,当线路中出现回流线未接地时,回流线、支柱与贯通地线之间将存在较大电势差,这个电势差将克服回流线与支撑金具接触电阻的影响,使得电流经金具和支柱流向贯通地线。当流经电流超

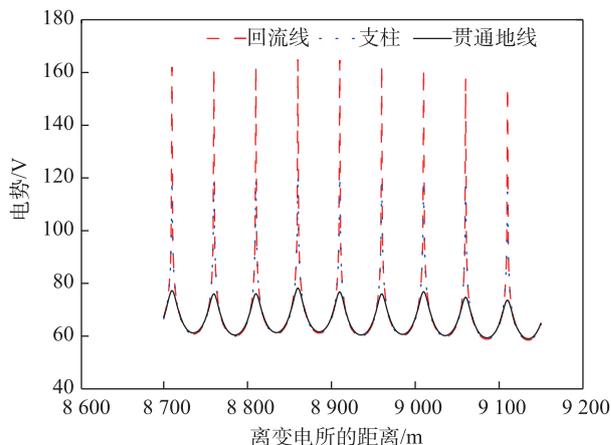


图 4 回流线未接地时电势分布图

Fig. 4 Potential distribution diagram when the return line is not grounded

过支撑金具的载流能力时,在长时间电流作用下,将导致金具持续发热,最后熔烧金具,导致回流线脱落。

## 3 不同因素对故障特性的影响

回流线未接地会导致回流线支撑金具处有电流流过,从而引起发热,下面分析不同因素变化对故障的影响。

### 3.1 土壤电阻率的影响

由于牵引供电区间长达 15 km 以上,途经不同的地质条件,不同位置处土壤电阻率会有不同,而不同的土壤电阻率会引起不同的土壤电位。

设土壤整体电阻率为  $2\ 000 \Omega \cdot \text{m}$ ,在 8.5~9.5 km 处分别选取土壤电阻率为 20, 100, 500,  $1\ 000 \Omega \cdot \text{m}$  进行仿真。用 L1、L2 流经支柱上最大电流情况作为对比,其结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在土壤电阻率不同时,流经支柱的电流大小不同,土壤电阻率越小时,流经支柱的电流越大;但土壤电阻率变化对支柱电流的影响较小。

### 3.2 接地电阻的影响

根据设计标准,贯通地线接入处的接地电阻不应大于  $1 \Omega$ ,但实际中贯通地线可能出现高于标准的情况。设置 8 910, 8 960, 9 010 m 处 3 个支柱接地电阻正常,在区间内其余支柱接地电阻正常。1, 5,  $10 \Omega$  支柱流经最大电流结果如图 6。

从图 6 可以看出,支柱通过的电流随着接地电

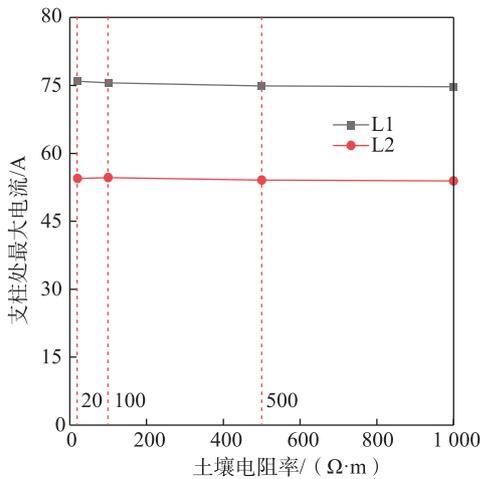


图5 不同土壤电阻率下支柱通过最大电流

Fig. 5 Different soil resistivity under the pillar through the maximum current

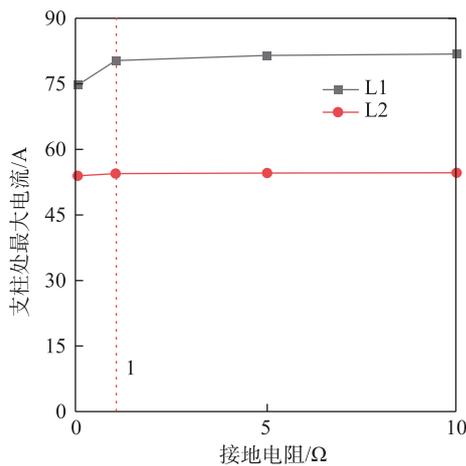


图6 不同接地电阻下支柱通过最大电流

Fig. 6 The maximum current passing through the pillar under different ground resistances

阻增大而增大,接地电阻越小时,流经支柱的电流越小。

#### 4 结论

针对直供加回流供电方式下回流系统支撑金具熔烧现象进行了分析,利用CDEGS软件搭建了牵引回流系统模型,通过不同典型故障的对比,得到结论。

1) 正常情况下,牵引变电所处回流比例随着机车位置的变化而不断改变,钢轨最大回流比例为43.00%,回流线最大回流比例为37.00%,贯通地线最大回流比例为19.00%,地网最大回流比例为

16.00%。

2) 回流线接地时,回流线、支柱以及贯通地线间存在40 V以上的电势差,电压将在回流线和支柱之间建立起电气回路。

3) 回流线接地异常时,流经支柱支撑金具中的电流可超过50.00 A,在电压和电流的共同作用下,会引起支撑金具的熔烧损坏。

4) 土壤电阻率、接地电阻都会对流经支柱的电流产生影响,但土壤电阻率的影响较小,保持支柱的低接地电阻可以减小流经支柱的电流,从而降低回流不畅对支撑金具的影响。

#### 参考文献:

- [1] 徐华沙. 牵引回流通道不畅案例及解决方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(7): 13-19.  
XU H S. Research on cases and solutions of traction return channel impediment[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(7): 13-19.
- [2] 周福林, 陈明辉, 熊进飞, 等. 牵引网短路故障下的车体电位及车体回流分布特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1542-1552.  
ZHOU F L, CHEN M H, XIONG J F, et al. Train body potential and body return current distribution characteristics under short circuit fault of traction network[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1542-1552.
- [3] 李腾, 李立峰, 马春莲, 等. 重载铁路牵引回流对过分相感应装置的影响研究[J]. 电气化铁道, 2022, 33(4): 84-91.  
LI T, LI L F, MA C L, et al. Study on influences to sensors of phase separation caused by traction return current of heavy haul railway[J]. Electric Railway, 2022, 33(4): 84-91.
- [4] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 52-58.  
WU M L. Uniform chain circuit model for traction networks of electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52-58.
- [5] 魏巍, 刘炜, 叶小雯. 高速铁路牵引回流系统建模分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 31-38.  
WEI W, LIU W, YE X W. Modeling analysis of high speed railway traction return current system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(1): 31-38.
- [6] 王壮壮. 基于多导体传输线理论的电气化铁路牵引回流分布研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.  
WANG Z Z. Research on the distribution of traction back-flow in electrified railways based on the theory of multi-

- conductor transmission lines[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [7] 黄文, 杨雪淞, 杨佳, 等. AT供电方式下土壤电阻率对牵引变电所地网电位影响研究[J]. 电气化铁道, 2022, 33(3): 31-33, 42.  
HUANG W, YANG X S, YANG J, et al. Research on influence on earthing network potential of traction substation caused by soil resistivity under AT power supply mode[J]. Electric Railway, 2022, 33(3): 31-33, 42.
- [8] 熊秋龙. 高速铁路变电所回流异常的分析[J]. 铁道建筑技术, 2021(9): 84-87, 106.  
XIONG Q L. Analysis of abnormal return current in power supply substation of high-speed railway[J]. Railway Construction Technology, 2021(9): 84-87, 106.
- [9] 魏巍. 含综合地线的牵引供电系统建模与仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
WEI W. Modeling and simulation of traction power supply system with integrated grounding wire. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [10] 董寅超, 赵林海. 基于机器学习的无绝缘轨道电路健康状况综合评价方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(12): 92-102.  
DONG Y C, ZHAO L H. A comprehensive assessment method for health status of jointless track circuit based on machine learning[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(12): 92-102.
- [11] 程宏波, 何洪, 李云泉, 等. 电动汽车群体互动策略的随机演化博弈分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(3): 74-81.  
CHENG H B, HE H, LI Y X, et al. Stochastic evolutionary game analysis of group strategies for electric vehicles in vehicle network interaction[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(3): 74-81.
- [12] 张志昆. 牵引供电回流系统故障诊断方法研究与应用[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.  
ZHANG Z K. Research and application of fault diagnosis methods for traction power supply reflux system[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.
- [13] 刘仕兵, 周诗涵, 但业光. 基于改进YOLOv5算法的接触网绝缘子定位方法[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(1): 105-112.  
LIU S B, ZHOU S H, DAN Y G. Catenary insulator positioning method based on improved YOLOv5 algorithm [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(1): 105-112.
- [14] 李天石, 李明祥, 霍斌. 高速铁路变电所牵引电流回流指标研究[J]. 中国铁路, 2017(2): 21-25.  
LI T S, LI M X, HUO B. A research on reflux indicator of traction current of HSR traction substation[J]. China Railway, 2017(2): 21-25.
- [15] 仇建桐, 邓沛然, 邵威, 等. 6061铝合金热拉深成形研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(9): 124-131.  
QIU J T, DENG P R, SHAO W, et al. Study on hot deep drawing of 6061 aluminum alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(9): 124-131.
- [16] 边凯. 高速铁路牵引供电接触网雷电防护研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
BIAN K. Research on lightning protection of traction power supply overhead contact line in high-speed railway[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.



通信作者: 伦利(1979—), 女, 高级实验师, 硕士生导师, 研究方向为智能电网大数据分析 & 智能控制。E-mail: llun@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 姜红贵)