

文章编号:1671-251X(2015)06-0053-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.06.013

赵猛,吝伶俐,耿蒲龙,等.基于分布参数的煤矿井下直流杂散电流研究[J].工矿自动化,2015,41(6):53-57.

基于分布参数的煤矿井下直流杂散电流研究

赵猛¹, 吝伶俐¹, 耿蒲龙¹, 李永学²

(1.太原理工大学 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室,山西 太原 030024;

2.晋煤集团 寺河矿,山西 晋城 048000)

摘要:直流杂散电流是引起井下瓦斯爆炸的重要原因之一,对煤矿安全生产具有很大威胁。针对这一问题,从杂散电流的产生机理着手,建立了井下直流杂散电流的分布参数模型;在该模型的基础上,仿真分析了各个参数对杂散电流的影响,得出了如下结论:随着机车电流的增加、供电区间的延长及轨道电阻的增大,杂散电流也会线性增加,可通过减小机车电流、缩短供电区间长度及减小轨道电阻来减小杂散电流;轨道与大地间过渡电阻低于安全值时会造成杂散电流急剧增大,保证轨道与地之间的绝缘是限制杂散电流的一种有效措施。

关键词:煤矿;杂散电流;分布参数;分布规律

中图分类号:TD641

文献标志码:A

网络出版时间:2015-05-29 13:59

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150529.1359.013.html>

Research of DC stray current in underground coal mine based on distributed parameters

ZHAO Meng¹, LIN Lingyan¹, GENG Pulong¹, LI Yongxue²

(1. Shanxi Key Laboratory of Mine Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan

University of Technology, Taiyuan 030024 China;

2. Shihe Coal Mine, Jincheng Coal Mining Group, Jincheng 048000, China)

Abstract: DC stray current is one of the major cause of gas explosion in underground coal mine, and has serious threat to the safety production of coal mine. In order to solve this problem, a distributed parameters mathematical model of DC stray current was established on the basis of generation mechanism of stray current. The effects of related parameters on the extent of stray current were analyzed based on the distributed parameters mathematical model, and conclusions were obtained: with the increase of current of locomotive, power supply range and track resistance, the stray current increases linearly, stray current can be reduced by reducing locomotive current, shortening the power interval length and reducing track resistance; When transition resistance between the rail and the earth is below a certain value, the stray current will increase sharply, an effective measure to limit stray current is to ensure insulation between the rail and earth.

Key words: coal mine; stray current; distributed parameters; distribution regularity

0 引言

直流架线式电机车是矿井中直流杂散电流的主要来源,较大的杂散电流不仅会导致雷管发生早爆,

还会引起瓦斯爆炸,腐蚀电缆外皮和风、水管路^[1],甚至导致井下检漏装置发生误动作,严重影响井下安全生产^[2]。据统计,在我国煤矿机电事故中,杂散电流引发的火灾和瓦斯爆炸事故占 25%~35%。

收稿日期:2014-11-26;修回日期:2015-03-19;责任编辑:张强。

基金项目:山西省基础研究自然科学基金项目(2014011024-3);晋煤集团科技攻关项目(JMJS-JS-2012050)。

作者简介:赵猛(1987-),男,山西河津市人,硕士研究生,研究方向为电气工程,E-mail:turtrock@163.com。

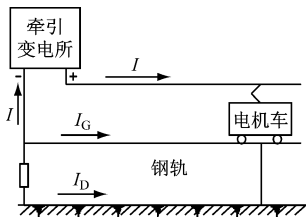
国内外对杂散电流的研究至今已有百年历史,大部分集中于地铁轨道、市政管道等处的杂散电流研究,关于煤矿井下杂散电流没有系统的理论研究。以往的相关研究模型主要为集中参数模型,从宏观上对杂散电流进行计算,具有简洁高效的特点,与空间位置无关,在对空间位置分布没有要求的条件下具有其优势。而实际中不仅仅需要考虑总的杂散电流的大小,同时需要考虑的是杂散电流在各个位置的分布,这时集中参数模型就不再适用,应用分布参数模型则可以很好地解决这个问题。本文以井下实际环境条件为背景,通过直流杂散电流的产生机理,建立更加接近实际情况的杂散电流分布参数模型,通过仿真计算,对比在参数变化情况下杂散电流的变化,确定了影响井下直流杂散电流的参数,为煤矿井下杂散电流的防治提供理论支撑。

1 杂散电流的产生机理以及数学模型的建立

在井下架线电机车运输系统中,考虑到经济因素,钢轨不仅被用来作为运行用轨道,而且被作为负载回路^[3],因为这样就不需要额外再安装回路^[4]。然而钢轨由于自身连接以及环境因素的影响,与大地不可能完全绝缘,并且随着时间推移,钢轨由于潮湿氧化等因素使轨道与大地绝缘性能降低;由于回流轨道存在电气阻抗,牵引电流在回流轨道中产生压降的同时,回流线对周围土壤介质、地下管道以及线路均会产生一定的漏泄电流,漏泄电流沿埋设管线等介质重新回到铁轨,形成直流杂散电流^[5-6]。

实际杂散电流由于受水分、空气等环境因素影响,其分布极其复杂。为了更简化地处理问题,在建立模型前做以下几点假设:轨道电阻均匀分布;轨道与大地过渡电阻均匀分布;大地电导特性均匀。

假设有一台电机车,已知电机车的位置以及电机车负载电流,建立直流电机车的供电系统简图,如图 1 所示。



I—电机车负载电流; I_G —流过轨道的电流;
 I_D —流经大地的电流

图 1 直流电机车供电系统简图

的过渡电导都是由许多无穷小的集总元件组成^[7-8],所得等值电路如图 2 所示。

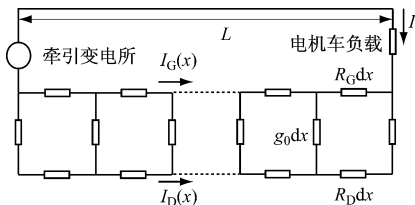
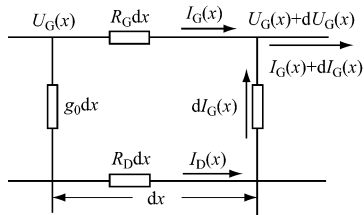


图 2 直流电机车供电系统等值电路

设变电所到电机车的供电区间长度为 L ,从变电所距机车 x 处取一微元 dx ,其微元等效电路如图 3 所示。



$U_G(x)$ —任意位置轨道对地的电位; R_G —单位长度轨道的纵向电阻; R_D —单位长度大地纵向电阻; g_0 —轨道对地的过渡电导; $I_G(x)$ —任意位置流过轨道的电流; $I_D(x)$ —任意位置的大地电流

图 3 微元等效电路

由图 2 可得

$$I = -(I_D(x) + I_G(x)) \quad (1)$$

对图 3 中的回路应用基尔霍夫电压定律可得

$$U_G(x) - I_G(x)R_G dx - (U_G(x) + dU_G(x)) + I_D(x)R_D dx = 0 \quad (2)$$

整理得

$$dU_G(x) = I_D(x)R_D dx - I_G(x)R_G dx \quad (3)$$

将式(1)代入式(3)得

$$\frac{dU_G(x)}{dx} = -I_G(x)(R_D + R_G) - IR_D \quad (4)$$

根据基尔霍夫电流定律,有

$$I_G(x) - g_0(U_G(x) + dU_G(x))dx = I_G(x) + dI_G(x) \quad (5)$$

整理得

$$\frac{dI_G(x)}{dx} = -g_0(U_G(x) + dU_G(x)) \quad (6)$$

由式(6)得

$$\frac{d^2 I_G(x)}{dx^2} = -\frac{d(U_G(x) + dU_G(x))}{dx} g_0 \quad (7)$$

略去无穷小量得

$$-\frac{dU_G(x)}{dx} g_0 = IR_D g_0 + I_G g_0 (R_D + R_G) \quad (8)$$

式(8)为一个二阶线性微分方程,它的解为

$$I_G(x) = C_1 \exp(\lambda x) + C_2 \exp(-\lambda x) - m \quad (9)$$

假设轨道电阻、大地电阻以及轨道与大地之间

式中: $m=\frac{IR_D}{R_D+R_G}$; $\lambda=\sqrt{g_0(R_D+R_G)}$; C_1, C_2 为待定系数。

考虑边界条件 $I_G(0)=-I, I_G(L)=-I$, 代入式(9)可解得

$$\begin{cases} C_1=\frac{m-I+(I-m)\exp(-\lambda l)}{\exp(\lambda l)-\exp(-\lambda l)} \\ C_2=-\frac{m-I+(I-m)\exp(\lambda l)}{\exp(\lambda l)-\exp(-\lambda l)} \end{cases} \quad (10)$$

将上述计算结果代入式(9)得

$$I_G(x)=\frac{m-I+(I-m)\exp(-\lambda l)}{\exp(\lambda l)-\exp(-\lambda l)}\exp(\lambda x)-\frac{m-I+(I-m)\exp(\lambda l)}{\exp(\lambda l)-\exp(-\lambda l)}\exp(-\lambda x)-m \quad (11)$$

将式(11)代入式(6)得轨道电压为

$$U_G(x)=-\frac{1}{g_0}\left[\frac{m-I+(I-m)\exp(-\lambda l)}{(\exp(\lambda l)-\exp(-\lambda l))g_0}\lambda\times\exp(\lambda x)+\frac{m-I+(I-m)\exp(\lambda l)}{(\exp(\lambda l)-\exp(-\lambda l))g_0}\lambda\times\exp(-\lambda x)\right] \quad (12)$$

流入大地的杂散电流为 $I_z(x)=-I_b(x)$, 即

$$I_z(x)=\frac{m-I+(I-m)\exp(-\lambda l)}{\exp(\lambda l)-\exp(-\lambda l)}\exp(\lambda x)-\frac{m-I+(I-m)\exp(\lambda l)}{\exp(\lambda l)-\exp(-\lambda l)}\exp(-\lambda x)-m+I \quad (13)$$

2 杂散电流影响因素仿真分析

在建立杂散电流分布参数数学模型的基础上, 对轨道电流、轨道电位以及杂散电流分布进行仿真并研究各个参数对它们的影响。仿真时各参数的取值范围^[9]见表1。

表1 各个参数的取值范围

参数	取值范围
供电区间长度 L/km	1.5~5
大地纵向电阻 $R_D/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	0.000 1~1
轨道电阻 $R_G/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	0~0.1
轨道与大地过渡电阻 $R/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	0~100
机车电流 I/A	100~300

2.1 机车电流对杂散电流的影响

设 $g_0=0.07\text{ S/km}$, $R_s=0.02\text{ }\Omega/\text{km}$, $L=2.5\text{ km}$, $R_D=0.001\text{ }\Omega/\text{km}$, 通过改变机车负载来观察沿线轨道电位以及杂散电流的分布规律。

图4、图5分别对应在2.5 km范围内相同轨道

位置处轨道电压和杂散电流随机车电流变化的分布规律。

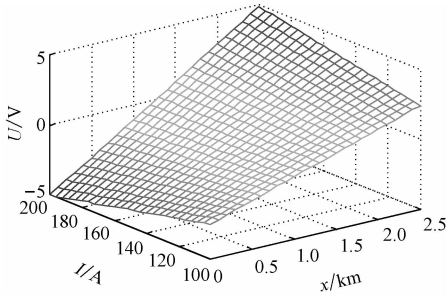


图4 不同负载下轨道电位的分布

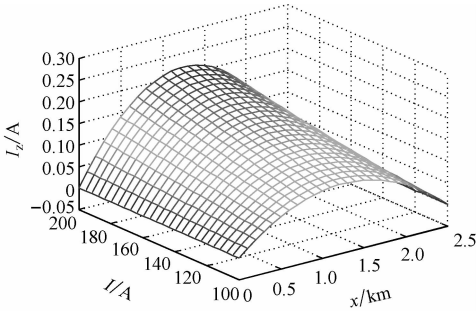


图5 不同负载下杂散电流的分布

从图4和图5可以看出, 在相同环境条件下, 在轨道的任意位置处, 随着机车负载电流的增大, 轨道电位成比例地线性增加, 同样, 杂散电流也随负载电流的增加成比例地线性增加。由此可以得出, 机车负载电流是影响杂散电流的重要因素。机车负载电流对杂散电流的影响较大, 通过调节机车的负载电流来控制杂散电流是一种有效的手段。

减小机车电流不会改变杂散电流回流点的位置, 但是从上述分析结果可以看出, 机车的负荷电流越大, 则轨道电位以及相应的杂散电流就越大。机车的负载电流与牵引系统电压、负重量、变电所供电距离等很多因素相关, 通常情况下减小机车的负载电流是较困难的。采用较高的系统电压是一种减小负荷电流的有效方法, 根据功率的关系($P=UI$)可以知道, 在功率不变的情况下, 提高直流牵引电压, 则电流会按电压升高比例相应下降。

2.2 供电区间长度对杂散电流的影响

取 $g_0=0.07\text{ S/km}$, $R_D=0.001\text{ }\Omega/\text{km}$, $I=100\text{ A}$, $R_G=0.02\text{ }\Omega/\text{km}$, 通过改变机车与变电所的供电区间长度来观察沿线轨道压降、杂散电流的分布规律。

图6、图7分别对应在相同轨道位置处轨道电压和杂散电流随机车与变电所供电区间长度变化的分布规律。

从图6可以看出, 随着 L 的增大, 轨道电位线

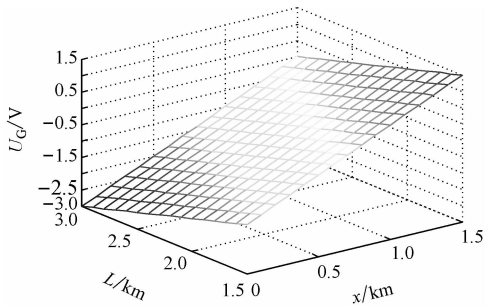


图 6 不同供电区间长度下轨道电位的分布

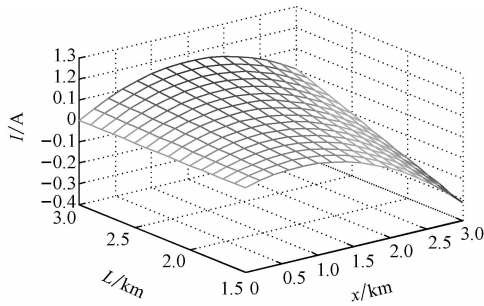


图 7 不同供电区间长度下杂散电流的分布

性增加;从图 7 可以看出,在轨道的中间位置处,杂散电流达到最大值,在 $L=1.5\text{ km}$ 与 $L=3\text{ km}$ 时,最大杂散电流相差 0.05 A ,达到最大杂散电流的 33% (0.15 A),变化幅度比较大;同时,随着 L 的增加,任意位置点杂散电流也相应地线性增加,特别是在轨道的中间位置处容易引起过大电流,给井下工作带来极大风险。所以,机车与变电所的供电区间长度也是影响杂散电流的重要因素之一。

过大的供电区间长度会使杂散电流的返回路径变长,这样接触电压就会增大,从而杂散电流也就越大。所以,缩短供电区间长度是减小杂散电流的一种有效方法。

2.3 大地纵向电阻对杂散电流的影响

取 $R_G = 0.02\ \Omega/\text{km}$, $g_0 = 0.07\text{ S/km}$, $I = 100\text{ A}$, $L = 2\text{ km}$,通过改变 R_D 来观察沿线轨道压降、杂散电流的分布。

图 8 和图 9 分别对应应在相同轨道位置处轨道电压和杂散电流随 R_D 变化的分布规律。

从图 8、图 9 可以看出,在相同的轨道位置处,随着大地纵向电阻增大,轨道电位、杂散电流的变化几乎为平行直线,基本没有量上的变化。由此可见,杂散电流分布几乎不受大地纵向电阻的影响。

2.4 轨道电阻对杂散电流的影响

取 $R_D = 0.001\ \Omega/\text{km}$, $I = 100\text{ A}$, $g_0 = 0.07\text{ S/km}$, $L = 2\text{ km}$,通过改变 R_G 来观察沿线轨道压降、杂散电流的分布。

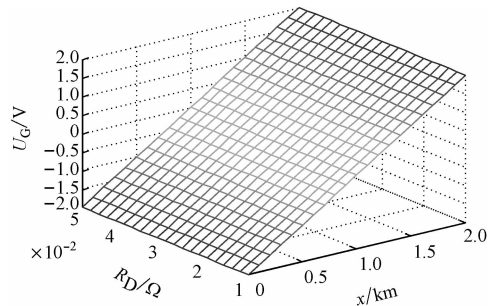


图 8 R_D 变化时轨道电位的分布

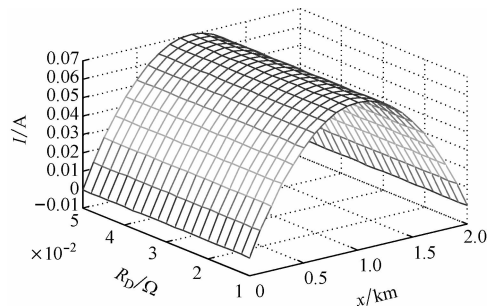


图 9 R_D 变化时杂散电流的分布

图 10 和图 11 分别对应应在相同轨道位置处轨道电压和杂散电流随 R_G 变化的分布规律。

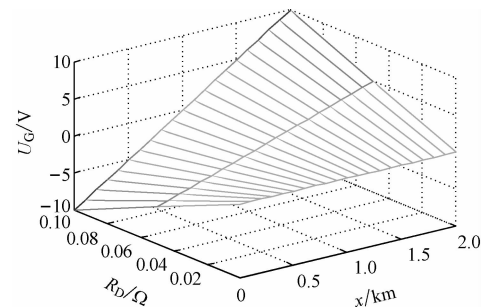


图 10 R_G 变化时轨道电位的分布

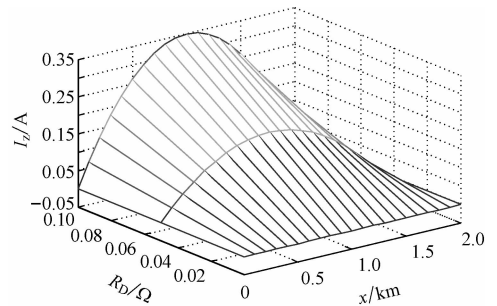


图 11 R_G 变化时杂散电流的分布

从图 10 和图 11 可以看出,随着轨道电阻的增大,轨道电压、杂散电流也都相应地线性增加。从数值上来看,在 1 km 处,在 $R_G = 0\ \Omega/\text{km}$ 时杂散电流为 0 A ,在 $R_G = 0.1\ \Omega/\text{km}$ 时杂散电流为 0.35 A ,最大相差 0.35 A ,变化幅度比较大,可以说杂散电流的增量主要是由 R_G 的变化引起的,可见轨道电阻

对杂散电流的分布有很大影响,是影响杂散电流的重要因素之一。

上述分析表明,随着轨道电阻增大,接触电压以及相应杂散电流提升比较显著。因此,非常有必要采取措施来减小轨道的电阻。目前常用的方法是使用横截面较大的钢轨,保证焊接工道尽可能无缝连接,这样就可以有效减小轨道的电阻。

2.5 轨道与大地过渡电阻对杂散电流的影响

取 $L=2\text{ km}$, $R_G=0.02\text{ }\Omega/\text{km}$, $I=100\text{ A}$, $R_D=0.001\text{ }\Omega/\text{km}$,通过改变 R 来观察沿线轨道压降、杂散电流的分布,其中 $R=1/g_0$ 。

图12和图13分别对应在相同轨道位置处轨道电压和杂散电流随 R 变化的分布规律。

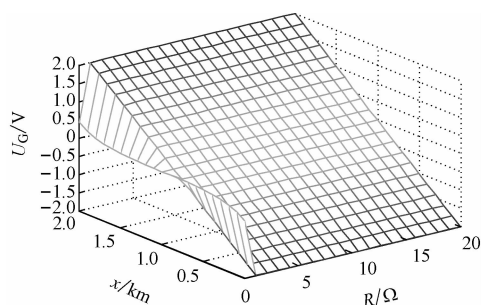


图12 R 变化时轨道电位的分布

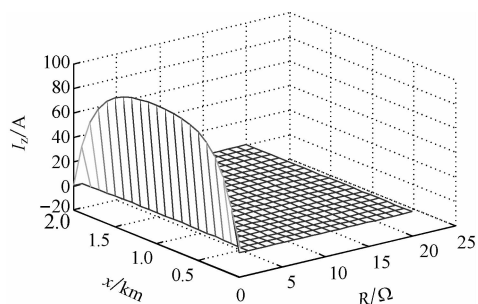


图13 R 变化时杂散电流的分布

从图12和图13可以看出,当 R 从 $0\text{ }\Omega/\text{km}$ 增加到 $1\text{ }\Omega/\text{km}$ 过程中,轨道电位从 1.25 V 增加到 2 V ,轨道电压的变化幅度明显大于其他区段;在轨道中心位置处,最大杂散电流急速减小,几乎达 40 A 。当 R 从 $1\text{ }\Omega/\text{km}$ 开始增加时,轨道电位以及杂散电流的变化趋于平缓,变化非常小。从上述分析还可以看出,虽然增大轨道与大地间的过渡电阻并不会降低轨道的电位,但是对杂散电流的影响显著。所以,维持轨道与大地过渡电阻在安全范围内是十分必要的,在安全范围内,过渡电阻对杂散电流

的影响十分微小,增大轨道与大地间绝缘电阻是消除杂散电流的必要措施。增大轨道与大地间过渡电阻的措施包括:安装轨道绝缘;将轨道隔离分区,各个区域单独引回流线;给轨道铺设道渣并添加防腐剂,保证道床不受潮湿环境以及地下水的侵蚀。

3 结语

从分析杂散电流的产生机理出发,在假定各个电阻均匀分布的条件下,采用分布参数建立了煤矿井下直流杂散电流的数学模型,该模型可以从理论上计算出轨道电位和杂散电流的分布值;得出了影响杂散电流分布的几个主要因素:机车负荷电流、供电区间长度、轨道电阻以及过渡电阻;对比在参数变化情况下杂散电流的分布规律,确定了影响井下直流杂散电流的参数,通过改变影响杂散电流的几个参数来达到减小杂散电流的目的;并提出了具体可行的杂散电流防治措施。

参考文献:

- [1] 陈红花,张祥宏.井下杂散电流的测试与防治[J].煤矿安全,1998(12):14-17.
- [2] 周保鲁,王和志.杂散电流的危害及防治[J].煤炭技术,2004(9):28-29.
- [3] 王平.煤矿井下杂散电流的危害与防治[J].煤矿机械,2006,27(5):889-890.
- [4] 蔡兴国.杂散电流的产生危害及消除[J].煤炭技术,2008(5):50-51.
- [5] YU J G. The effects of earthing strategies on rail potential and stray currents in DC transit railways [C]//IEEE Proceedings of International Conference on Developments in Mass Transit Systems, London, 1998:303-309.
- [6] MACHCZYNSKI W. Simulation model for drainage protection of earth return circuits laid in stray current area[J]. Electrical Engineering,2002,84(3):165-172.
- [7] 王猛.直流牵引供电系统钢轨电位与杂散电流分析[J].城市轨道交通研究,2005(3):24-26.
- [8] 李国欣,王崇林,范建国,等.矿井直流杂散电流分布规律的仿真研究[J].工矿自动化,2006,32(3):8-11.
- [9] 王崇林,马草原,王智,等.地铁直流牵引供电系统杂散电流分析[J].城市轨道交通研究,2007(3):51-53.