

文章编号: 0253-9993(2005)01-0129-04

# 煤矿井下杂散电流分布规律的研究

张 英 梅

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

**摘 要:** 对杂散电流的分布规律及其机理进行了研究, 通过数学模型的建立, 在负载集中参数和分布参数 2 种情况下, 描述了轨道电位和杂散电流的变化过程; 根据数学模型的计算, 理论上可确定轨道电位、杂散电流及各个参数的大小、正负及极值点位置。

**关键词:** 杂散电流; 分布规律; 电力机车牵引

**中图分类号:** TD641 **文献标识码:** A

## Research on distribution rule of the stray current in the pits

ZHANG Ying-mei

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Presented a new mathematical model by analyzing the distribution and mechanism of the stray current. Considering both concentration parameters and distribution parameters of load, described the changing process of track potential and stray current in theory. According to the calculation of the model, we can know the track potential, stray current and other parameters' value and position of extreme point.

**Key words:** stray current; distribution rule; electric locomotive traction

在煤矿井下, 直流电机车牵引网络中的杂散电流是引发雷管先期爆炸及瓦斯爆炸的原因之一, 也是引起地下金属管道和电缆被腐蚀的主要原因。杂散电流可使雷管发生先期引爆。由于杂散电流的存在, 地面有一定的电位差, 若雷管的两个管脚同时接触到地面时, 就会有电流流过, 当其电流大于雷管的起爆电流时, 就会使雷管引爆。杂散电流可引起瓦斯爆炸。由于杂散电流的存在, 金属碰撞管路和轨道时, 会产生电火花, 当杂散电流值超过其引爆安培数量级时, 瓦斯就会爆炸。杂散电流可腐蚀地下金属管道及电缆。金属管道及电缆均是杂散电流的良好通路, 再加上潮湿, 常引起电化学反应; 杂散电流引起的金属腐蚀非常严重, 其直接经济损失是巨大的。杂散电流是一个分布的电流场和电势场, 由于轨道环境条件和参数的影响, 更使它成为一个比较复杂的问题。本文对杂散电流的分布及其机理进行了研究, 通过数学模型的建立, 从理论上给出了杂散电流的分布规律, 为防治和减小杂散电流的危害提供准确、科学的依据。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 杂散电流的分布

直流电机车牵引网络中的漏电电流叫杂散电流。在架线电机车的牵引网络中, 轨道作为回电体, 由于

收稿日期: 2004-06-07

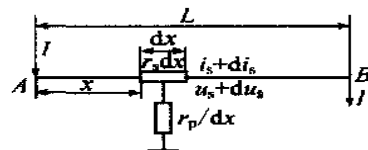
基金项目: 山西省留学回国人员基金资助项目 (2003-26)

作者简介: 张英梅 (1956-), 女, 河北邯郸人, 副教授. E-mail: irvingtc@163.com

轨道与大地是不绝缘的, 电机车从架空线上得到的电流, 完全可能有一部分不通过轨道直接由大地回到牵引变电站而产生杂散电流; 杂散电流的大小是与轨道环境参数、机车负荷、变电站的区间长度有关的量, 且是一个比较复杂的空间电流场的问题. 为便于分析, 笔者假设空间问题为平面问题, 并假设场的问题为分布参数的电路问题<sup>[1]</sup>.

## 1.2 集中负载参数下轨道电位和电流的数学模型<sup>[2]</sup>

以变电站两端距离  $AB$  为一个区间长度, 一列电机车为集中负载位于  $A$  点, 回电点为  $B$  点, 作为集中参数电路, 线路电流没有衰减, 处处相等. 轨道电路必须作为分布参数考虑, 由轨道电阻和轨道对大地的过渡电阻组成的等效电路如图 1 所示. 设从  $A$  点沿轨道任意一点  $x$  处, 轨道电位和流过轨道的电流可用微分方程描述为



$$du_s = -i_s r_s dx, \quad di_s = -\frac{u_s}{r_p} dx, \quad (1)$$

式中,  $r_s$  为轨道的电阻,  $\Omega/\text{km}$ ;  $r_p$  为轨道对地的过渡电阻,  $\Omega/\text{km}$ ;  $u_s$  为轨道的电位, V;  $i_s$  为流过轨道的电流, A.

图 1 集中参数下的轨道等效电路  
Fig. 1 Track equivalent circuit under concentration parameters

整理式 (1), 并消去变量  $u_s$  得

$$\frac{d^2 i_s}{dx^2} - i_s r_s \frac{1}{r_p} = 0, \quad (2)$$

或

$$\frac{d^2 u_s}{dx^2} - k^2 u_s = 0, \quad (3)$$

其中  $k = \sqrt{\frac{r_s}{r_p}}$ . 微分方程 (3) 的解为

$$i_s = Ae^{kx} + Be^{-kx}. \quad (4)$$

由图 1 可以看出, 集中参数时负载电流没有衰减. 所以, 边界条件为:

当  $x=0$ ,  $i_s = I$  时

$$I = A + B; \quad (5)$$

当  $x=L$ ,  $i_s = I$  时

$$I = Ae^{kL} + Be^{-kL}, \quad (6)$$

式中,  $I$  为电机车的负载电流, A;  $L$  为供电区间长度, km.

联立式 (5), (6) 得积分常数为

$$A = \frac{I}{2\text{sh}kL} (1 + \text{sh}kL - \text{ch}kL), \quad B = \frac{I}{2\text{sh}kL} (\text{sh}kL + \text{ch}kL - 1). \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (4) 得流过轨道的电流为

$$i_s = \frac{I}{\text{sh}kL} [\text{sh}kx + \text{sh}k(L-x)]. \quad (8)$$

流入大地的电流即杂散电流应为负载电流与轨道电流之差, 即  $i_z = I - i_s$ , 其中  $i_z$  为杂散电流, 即

$$i_z = I - \frac{I}{\text{sh}kL} [\text{sh}kx + \text{sh}k(L-x)]. \quad (9)$$

将式 (8) 代入式 (1), 得轨道电位  $u_s$  的表达式为

$$u_s = \frac{kI}{r_p \text{sh}kL} [\text{sh}k(L-x) - \text{ch}kx]. \quad (10)$$

式 (9), (10) 分别为集中负载参数下求轨道电位和杂散电流的理论公式. 当  $u_s = 0$  时, 流入大地的杂散电流从大地返回轨道, 并且, 此时杂散电流最大. 故令  $x = x_a$ ,  $u_s = 0$ , 且有杂散电流最大值, 则

$$u_s = \frac{kI}{r_p \operatorname{sh} kL} [\operatorname{ch} k(L - x_a) - \operatorname{ch} kx_a] = 0.$$

解得  $x_a = L/2$ , 代入式 (9) 求杂散电流最大值  $I_{zm} = I - I/\operatorname{ch}(kL/2)$ . 所以, 在变电站工作区间  $L$  内, 当  $x_a > x > 0$  时, 轨道对地的电位为正, 杂散电流从轨道流入大地; 相反, 当  $x_a < x < L$  时, 轨道对地的电位为负, 杂散电流从大地返回轨道; 在  $x = x_a$  处, 杂散电流最大, 同时, 此点正是地下金属管道发生电化学反应的被腐蚀点.

### 1.3 分布负载参数下轨道电位和电流的数学模型

当供电区间内有多列机车时, 应作为分布负载参数考虑, 线路总电流由  $I$  逐渐衰减. 假设线路电流均匀分布, 沿轨道任一点  $x$  处分布负载电流应为  $i_0 x$ , 经推导, 关于  $x$  处的微分方程及其解不变<sup>[3]</sup>, 同式 (2), (4), 但分布负载参数下的边界条件不同, 所以积分常数也不相同. 由式 (2), (4) 求积分常数.

当  $x=0$ ,  $i_s=0$  时

$$0 = A + B; \quad (11)$$

当  $x=L$ ,  $i_s=i_0L$  时

$$i_0L = Ae^{kL} + Be^{-kL}, \quad (12)$$

式中,  $i_0$  为负载分布电流, A/km.

联立式 (11), (12), 求积分常数为

$$A = \frac{i_0L}{e^{kL} - e^{-kL}}, B = -\frac{i_0L}{e^{kL} - e^{-kL}}. \quad (13)$$

将积分常数式 (13) 代入式 (4), 得分布负载参数下流过轨道的电流为

$$i_s = i_0L \frac{\operatorname{sh} kx}{\operatorname{sh} kL}.$$

而分布负载参数下从某点  $x$  处流入大地的杂散电流  $i_z = i_0x - i_s$ , 即

$$i_z = i_0 \left[ x - L \frac{\operatorname{sh} kx}{\operatorname{sh} kL} \right]. \quad (14)$$

同理可求得分布负载参数下轨道电位  $u_s$  的表达式为

$$u_s = i_0 r_p \left[ 1 - kL \frac{\operatorname{ch} kx}{\operatorname{sh} kL} \right]. \quad (15)$$

式 (14), (15) 为分布负载参数下, 求轨道电位和杂散电流的理论公式. 同样, 令  $u_s=0$  时, 杂散电流有最大值  $I_{zm}$ , 求  $x_a$  得

$$x_a = \frac{1}{k} \ln \left[ \frac{\operatorname{sh} kL}{kL} + \sqrt{\left( \frac{\operatorname{sh} kL}{kL} \right)^2 - 1} \right]. \quad (16)$$

显然, 轨道电位为负的区间长度, 即杂散电流从大地返回轨道的位置  $x_a$  改变了. 再将式 (16) 代入式 (14), 求流入大地杂散电流的最大值为

$$I_{zm} = \frac{i_0}{k} \ln \left[ \frac{\operatorname{sh} kL}{kL} + \sqrt{\left( \frac{\operatorname{sh} kL}{kL} \right)^2 - 1} \right] - \frac{i_0L}{\operatorname{sh} kL} \sqrt{\left( \frac{\operatorname{sh} kL}{kL} \right)^2 - 1}.$$

图2描述了  $u_s$ ,  $i_z$ ,  $i_s$  在分布负载参数  $i_0$  下的曲线变化过程. 由图2可知, 在变电站工作区间  $L$  内, 轨道电位为正的区间长度  $x_a > 0.5L$ , 说明杂散电流的极值点发生位移; 地下金属管道被腐蚀点也发生位移. 同时可以看出,  $u_s$ ,  $i_z$ ,  $i_s$  各曲线均是与轨道参数  $r_s$ ,  $r_p$ , 供电区间长度  $L$  及负载分布电流  $i_0$  有关的量.

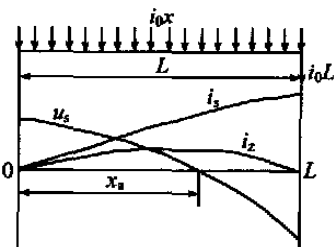


图2 分布参数下的负载分布电流及各参数的变化

Fig. 2 Load distribution current and variety curves of various parameters under distribution parameters

## 2 实 例

根据求  $u_s$ ,  $i_{zm}$  的公式, 可从理论上计算轨道电位和杂散电流的极值, 这种计算结果适用于任何场合下直流牵引网络中轨道电位和杂散电流的计算. 在煤矿井下, 以运输大巷中的电机车为例, 各个工作参数<sup>[2]</sup>条件及计算结果:  $L = 1.2$  km,  $r_p = 50$   $\Omega$ /km,  $r_s = 0.2$   $\Omega$ /km,  $i_0 = 80$  A/km,  $x_a = 0.693$  km,  $I_{zm} = 0.195$  A,  $u_{smax} = 13.8$  V,  $u_{smin} = -29.2$  V.

由此可以看出, 根据数学模型的计算, 理论上可确定各个参数的大小、正负及极值点位置, 从理论角度给防治及检测杂散电流提供了科学依据.

## 3 结 语

防治杂散电流, 一方面从影响杂散电流的几个参数着手, 为降低杂散电流下功夫. 传统的最直接的防治方法均有其实用价值<sup>[4]</sup>, 如增加轨道间的电气连接可减小轨道电阻  $r_s$ ; 提高轨道与大地之间的绝缘性能可增大其轨道与大地之间的接触电阻  $r_p$  等; 另一方面开发现代控制技术对杂散电流实行智能化检测, 以理论计算为依据, 以国家标准 (GB8031 - 87) 设定雷管爆炸的极限参数, 以煤炭行业标准 (MT670 - 1997) 《煤矿井下牵引网络杂散电流防治技术规范》设定安全值, 如采区内各巷道中的轨道对总接地网间的杂散电流, 采区内上、下山的轨道与运输大巷连接处的第 2 道绝缘夹板相连接的轨道对总接地网间的杂散电流均不能大于 60 mA 等. 智能化仪器对于测量数据应具有分析计算能力及将超限信号发送并报警的能力.

### 参考文献:

- [1] 邱关源. 电路 (下册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989. 102 ~ 130.
- [2] 张英梅. 煤矿井下直流牵引网络中杂散电流分布 [J]. 太原理工大学学报, 1998, 29 (3): 237 ~ 239.
- [3] Wladyslaw dziuba. Siec powrotna i prady bladzace [M]. Warszawa: Wydawnictwo Ksiazkowe Instytutu Elektrotechniki, 1995. 49 ~ 71.
- [4] 王志宏. 杂散电流及其防治 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986. 21 ~ 30.

## 2005 年《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》(《煤炭学报》英文版) 征订启事

《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》是中国煤炭学会主办的刊物, 是向国内外公开发行的英文版煤炭科学技术方面的综合性学术刊物. 主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文, 以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结, 也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯.

《煤炭学报》英文版《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》是向世界传播我国煤炭科技的重要媒体, 对加强中外科学技术交流, 宣传我国煤炭科学成就, 提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用. 及时报道我国煤炭科技新理论、新技术、新经验也是《煤炭学报》英文版的主要任务. 《煤炭学报》英文版和中文版具有不同的刊登内容和各自的特点.

《煤炭学报》英文版是半年刊, 每年 6 月和 12 月出版. 每期 112 页, 每册国内订价 20 元, 全年共收费 40 元. 订阅者可直接和本编辑部联系, 订单函索即寄, 编辑部随时办理订阅手续.

本刊地址: 北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部

邮政编码: 100013 联系电话: (010) 84262930 E-mail: mtxbhj@126.com, mtxb@vip.163.com