

研
究
开
发

负载特性对弓网电弧能量的影响

王 波, 吴广宁, 王万岗, 高国强, 崔 易

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)



作者简介: 王 波 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电气化铁道相关的研究工作。

摘 要: 随着列车运行速度的提高, 弓网离线现象愈来愈严重, 弓网电弧频繁发生, 弓网电弧烧蚀受电弓滑板和接触网导线, 其烧蚀程度与弓网电弧能量的大小密切相关。利用弓网电弧模拟试验系统研究不同负载功率因数、牵引电流时弓网电弧的电压电流, 分析弓网电弧的平均燃弧时间与牵引电流和负载功率因数的关系、弓网电弧能量与负载功率因数的关系。研究表明: 电弧的平均燃弧时间随着牵引电流的增大呈指数增长, 且感性负载的燃弧时间较阻性负载的长; 随着负载功率因数的增大, 弓网电弧的能量逐渐减小。

关键词: 功率因数; 弓网电弧; 电弧能量; 燃弧时间

中图分类号: U225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)06-0017-04

Pantograph Arc's Energy Characters Under Various Load

WANG Bo, WU Guang-ning, WANG Wan-gang, GAO Guo-qiang, CUI Yi

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031 China)

Abstract: Due to the increasing speed of the locomotive, the pantograph-catenary disconnection was getting worse, and the pantograph arc occurred frequently. The pantograph arc etched the pantograph slider and contact wire, and the etching level was influenced by arcing energy. In this paper, the arc voltage and current of different traction current and power factor was measured by pantograph-catenary arcing test system. The relationship between average arcing duration and traction current, power factor of load was analyzed, as well as the arc energy affected by power factor of load was studied. The results showed that the average arcing duration becomes longer in index with traction current increasing; the arcing duration with inductive load is longer than with resistive load; the arc energy decreases with the rising of load power factor.

Key words: power factor; pantograph arcing; arc energy; arcing duration

高速铁路是当今世界铁路发展的必然趋势, 提升列车运行速度是世界各国不断追求的目标^[1]。然而, 随着列车运行速度的提高, 接触网导线的不平顺、接触网的振动、受电弓弓头的振动、轨道的不平顺等多种因素造成的弓网(受电弓-接触网)离线现象愈来愈严重, 弓网离线将会产生弓网电弧。弓网电弧会烧蚀接触网导线和受电弓滑板^[2-5], 其烧蚀程度与弓网电弧能量的大小密切相关, 因此, 有必要对弓网电弧能量及其影响因素进行研究。

目前有关电弧能量的论述主要集中在开关电器领域: N. B. Jemma等在电接触研究中探讨了负载因素对电弧能量的影响, 指出不同负载导致电弧能量发生显著变化, 如电感负载时电弧能量是电阻负载时的100倍左右^[6-8]; 丁秉钧的研究小组在测量断路器电弧侵蚀速率中使用电弧的电荷量来表征电弧的能量特征, 指出了电荷对电弧能量大小的影响^[9]; 何俊佳等人探讨了电压和电流参数对直流电弧的影响, 认为电流对电弧能量的影响是线性的^[10]。然而, 与开关电器相比, 牵引供电系统具有如下特点, 首先, 电力机车在加速或者减速时相当于一个冲击性负荷, 使得接触网网压波动较大; 其次, 弓网电极的运动形式不仅包括沿着列车运行方向的纵向运动, 还包括垂直于钢轨方向的横

收稿日期: 2011-05-12

基金项目: 教育部新世纪优秀人才基金项目(NCET-07-0718); 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2009AA110303); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB711105)

向运动,电极的运动形式会极大地影响着电弧的特性;此外,电力机车工作于复杂的环境中,不像开关电器设备,电力机车上没有专门的灭弧设备。这些都是开关电弧研究中不曾遇到的问题。因此,无法直接将开关电弧的研究成果直接应用于弓网电弧,必须根据其特性开展针对性的研究。

1 弓网电弧的产生机理

弓网电弧是指受电弓与接触导线在相对高速滑动中分离而产生的气体放电现象。动车组通过受电弓与接触网导线相对滑动接触获取所需要的电流,属于典型的滑动电接触过程。然而,机车运行过程中,由于接触网的波动、受电弓弓头的振动、接触网覆冰以及接触网硬点等因素的影响,造成弓网离线现象。弓网离线瞬间,由于强电场的作用,弓网电极间的气隙被击穿,发生气体放电,形成电弧。电弧的弧根沿着机车的运动方向在接触网导线上运动(图1所示),随着弓网离线距离的增大,电弧被拉长,电弧电阻增大,弧柱温升急剧升高,此时的电子发射方式由场电子发射为主转变为热电子发射和光电子发射为主,随着机车继续前行,电弧进一步被拉长,直到电弧吸收的能量不足以维持电弧继续燃烧,电弧熄灭。

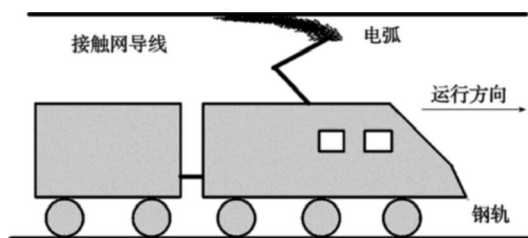


图1 弓网离线电弧弧根的运动轨迹

2 弓网电弧模拟试验系统

2.1 弓网电弧发生装置

图2为弓网电弧模拟试验系统的原理图,图中,W

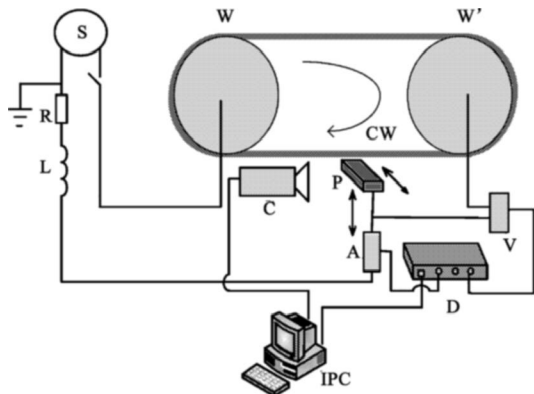


图2 弓网电弧模拟试验系统

S——单相电源;R、L——大功率电阻、电感;W——主动轮;W'——从动轮;CW——接触网导线;V——电压传感器;A——电流传感器;P——受电弓滑板;C——红外摄像机、高速摄像机;IPC——工控机

是主动轮,接触网导线镶嵌在其外圆周,主动轮中心轴的一端通过绝缘装置连接到变频调速电机的转轴,变频电机驱动主动轮转动;W'为从动轮,模拟接触网导线嵌入在主动轮和从动轮的外圆周,由主动轮和传送带带动其转动。两圆盘的轴心距离可以调节,以改变接触网导线的张力。受电弓滑板固定在由伺服系统控制的升降系统上,该升降系统可以做垂直于地面的垂向运动和垂直于钢轨的横向运动,以模拟受电弓升降弓、弓头的振动和受电弓的“Z”字形运动;弓网的振动速度和离线距离可以通过PLC控制器调节。

2.2 数据采集装置

图3为弓网电弧数据采集装置。本装置采用同步时钟信号进行触发,实现弓网电弧电压、电流的同步采集。其中:电弧电压采用宽频带阻容桥式差分电路。宽频带阻容桥式差分电路中, $R_1/R_2=C_2/C_1$ 且 $R_1=R_3, R_2=R_4, C_1=C_3, C_2=C_4$ 。通过对宽频带桥式分压器中并入电容,可有效地提高分压器的带宽,适用于宽频带的电弧信号采集。电弧电流信号通过2.5 mΩ精密电阻进行取样采集。分压器输出的电压信号和精密电阻取样得到的电流信号经隔离放大器送入数据采集卡中,下位机将采集的数据送入上位机,从而实现电弧电压、电流信号的采集。电弧形态,接触网导线温度采集分别采用高速摄像机和红外成像仪测得,所有采集系统通过同步时钟控制。通过上位机处理软件处理,获得燃弧时间、能量、电弧电阻等信息。

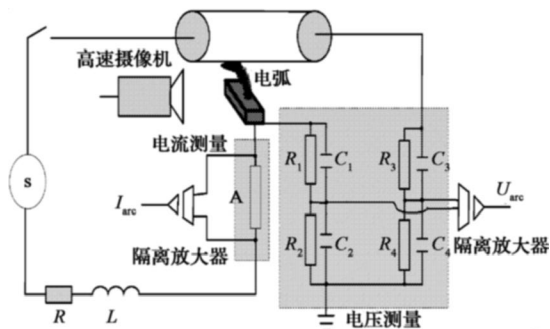


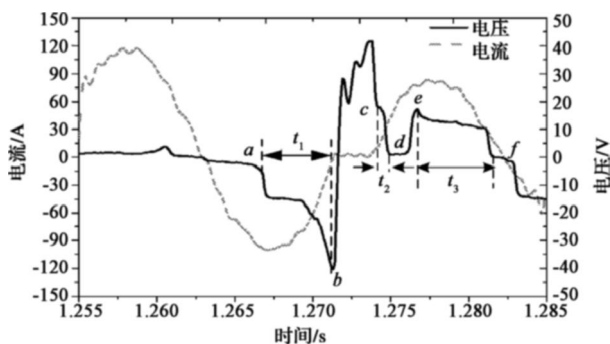
图3 弓网电弧数据采集装置

3 试验结果及分析

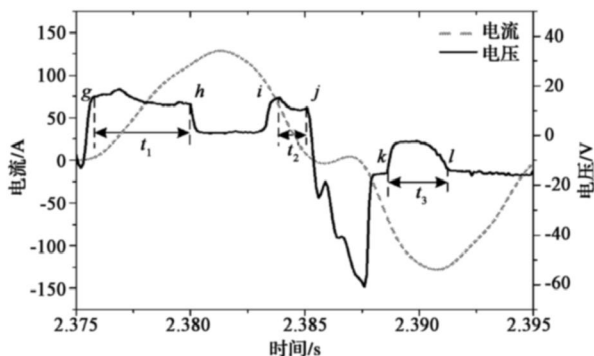
弓网电弧耗散的能量由电源和回路电感中储存的能量两部分提供。影响弓网电弧能量大小的因素包括负载性质、牵引电流的大小以及燃弧时间的长短等。本文利用研制的弓网电弧模拟试验系统测试了不同牵引电流、负载功率因数下的弓网电弧电气参量,并分析了一定时期内弓网电弧的平均燃弧时间,研究了弓网电弧的能量大小,着重分析了负载特性与弓网电弧能量特性的关系。

3.1 负载对电弧电气参量的影响

图4(a)为牵引电流100 A、感性负载时弓网电弧电压和电流的波形。



(a) 感性负载



(b) 阻性负载

图4 弓网电弧电压波形图

从图4(a)中可以看出,受电弓和接触网导线在a点离线,由于弓网之间存在着较强的电场,使得弓网之间的空气被击穿,从而形成弓网电弧。电弧燃烧初期,电弧释放出的能量较小,电弧主要以金属桥的形式存在,弓网之间充满了大量的金属蒸汽,弓网之间的温度急剧上升,同时随着离线距离的增大,弓网之间的金属蒸汽发生“爆炸”使金属桥被拉断,电弧电阻增大,电弧电压也相应地增加,该过程一直持续到b点;此时电弧电流过零点,电弧熄灭,电源电压直接加载到弓网之间,当弓网之间的场强达到气体击穿场强时,电弧在c点重燃;一直到d点,弓网接触,电弧熄灭,电压基本为零;e点时,由于受电弓弓头振动等原因,弓网再次离线产生电弧。

图4(b)为牵引电流100 A、阻性负载时的电弧电压和电流波形。从图中可以看出,其燃弧过程和感性负载的类似,在一个周期内电弧也燃烧了3次。然而,由于负载中电感存在的原因,其电弧电压电流的波形与阻性负载的相比有着明显的差别:电流过零后到电弧重燃时,阻性负载的电压较高,说明阻性负载的电弧电流过零点时间较感性负载的长[图4(a)感性负载的约为2.4 ms,图4(b)阻性负载约为1.87 ms],即电流过零后感性负载的弓网之间的电弧更容易重燃。其主要原因是电感中储存的能量和电源电压同时加在弓网之间,使得弓网之间的气体更容易被击穿。此外,从图4中可以看出,感性负载的总的燃弧时间较阻性负载的长[图4(a)约为10.56 ms,图4(b)约为8.5 ms]。

3.2 燃弧时间分析

燃弧时间是表征电弧特性的主要参数之一。在开关电器领域中,大量试验证明,电器触点材料的电侵蚀量与触点通断时触点间产生的电弧能量成比例关系,而燃弧时间的长短对电弧能量的大小、触头的侵蚀特性有重要影响,是反映电弧能量及触头表面的烧蚀情况的重要参数^[12]。因此,研究弓网电弧的燃弧时间对于分析弓网电弧能量的大小具有很重要的意义。

燃弧时间 t 由金属相燃弧时间 t_m 和气体相燃弧时间 t_g 组成。其中,金属相燃弧时间定义为电弧开始燃烧过渡到气体相电弧的时间,金属相电弧的燃弧时间主要在小电流短电弧下起主要作用。当牵引电流增加,电弧变长时,气相电弧逐渐占主导地位^[12]。当电流较小时,燃弧时间主要是金属相燃弧时间;当电流较大时,电弧燃弧时间主要是气相电弧的燃弧时间。

图5是阻性负载和感性负载时牵引电流与燃弧时间的关系曲线。从图中可见,无论是阻性负载还是感性负载,燃弧时间都随着牵引电流的增加而增加。这是由于随着电流的增大,注入电弧的能量也变大,因此电弧释放能量就需要更长的时间。此外,从图5中还可以发现,在牵引电流相同的情况下,感性负载时的燃弧时间较阻性负载的长。因为感性电路中,电压超前电流,电源电压过零时,回路中的电感将会释放储存在其上的能量以维持电弧继续燃烧,直到电感释放的能量不足以维持电弧燃烧所需的能量时电弧熄灭。

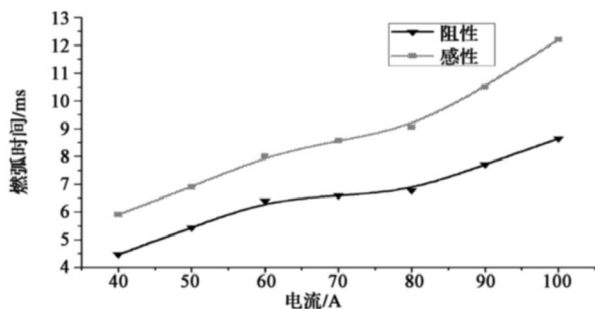


图5 牵引电流与燃弧时间的关系

3.3 弓网电弧能量

通过前面测得的弓网电弧的电流和电压以及燃弧时间即可利用式(1)计算得弓网电弧的能量 W_c :

$$W_c = \sum_{i=1}^N e = \sum_{i=1}^N (UI \Delta t) = \sum_{i=1}^N T \cdot \bar{P} \quad (1)$$

式中: e 为单次离线电弧的电弧能量,J; U 为单次燃弧时的电弧电压; I 为单次离线的电弧电流; Δt 为每次的燃弧时间; T 为总的燃弧时间; $\bar{P}$ 为平均电弧功率。

图6为不同功率因数下弓网电弧能量与牵引电流的关系。从图6中可以看出,弓网电弧的能量随着牵引电流的增大呈指数增大;牵引电流一定的情况下,弓网电弧能量随着机车功率因数的增大而减小。

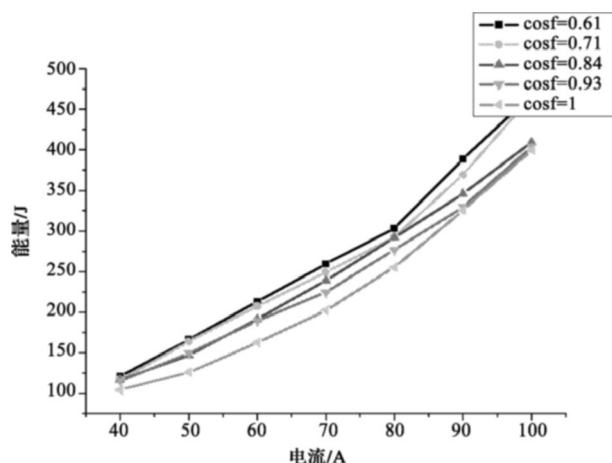


图6 弓网电弧能量与机车功率因数的关系

在牵引供电回路中,受电弓和接触导线分离产生电弧时,电弧消耗的能量主要来自两部分:一部分是以磁场形式储存在回路中(机车负载电感、牵引网电感)的能量,另一部分是电源提供的能量。阻性负载时,电弧能量主要由电源和牵引网中电感储存的能量提供,即

$$W_c = W_s + W_L \quad (2)$$

式中: W_c 为电弧消耗的总能量; W_s 为电源提供的能量; W_L 为回路中电感提供的能量。

在感性负载中,电弧能量由电源、接触网中的电感提供的能量和机车负载中的电感共同提供,即

$$W_c = W_s + W_L + W_V \quad (3)$$

从式(2)和式(3)可以看出,在电流相同的情况下,机车的功率因数越高,电弧消耗的能量越少,与本文试验得出的结论一致。

4 结语

利用弓网电弧模拟试验系统测试了不同负载功率因数、牵引电流时弓网电弧的电压电流,分析了弓网电弧的平均燃弧时间与牵引电流及负载功率因数的关系、弓网电弧能量与负载功率因数的关系。研究表明:随着牵引电流的增大,电弧的平均燃弧时间变长,弓网电弧能量增大;弓网电弧能量随着牵引电流的增大呈指数增长;牵引电流一定的情况下,弓网电弧的能

量随着机车功率因数的增大而减小。因此,在实际运行中,可以通过提高机车功率因数的方法来降低弓网电弧能量。

参考文献:

- [1] 金学松,温泽峰,张卫华. 世界铁路发展状况及其关键力学问题(特邀报告)[A]//第13届全国结构工程学术会议论文集(第1册)北京:清华大学出版社,2004:96-100.
- [2] Deng Ming-li, Ye Qiang, Wei xin, et al. The status of arch arc in the high-speed electrified railway[A]//Power and Energy Engineering Conference, Chengdu:IEEE, 2010:1-3.
- [3] 高宗宝,吴广宁,吕玮,等. 高速电气化铁路中的弓网电弧现象研究综述[J] 高压电器,2009(45):104-108.
- [4] Galdi V. Arcing in AC railways: a mathematical approach [A]//Proceedings of the 6th International Conference on Computer Aided Design. Lisbon, Portugal:IEEE Computer Society, 1998:891-904.
- [5] Surajit Midya, Dierk Bormann, Thorsten Schütte, et al. Pantograph Arcing in Electrified Railways—Mechanism and Influence of Various Parameters—Part II: With AC Traction Power Supply [J] IEEE Transaction on Power Delivery, 2009, 24(4): 1940-1950.
- [6] Morin L, Jemaa N B, Pinard J, et al. Contacts Materials Performance under Break Arc in Automotive Applications[J] IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2000, 23(2): 367-375.
- [7] Morin L, Jemaa N B, Jeannot D. Make Arc Erosion and Welding in the Automotive Area[J] IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2000, 23(2): 240-246.
- [8] Jemaa N B, Nedelec L, Benhenda S. Break Arc Duration and Contact Erosion in Automotive Application[J] IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology—Part A, 1996, 19(1): 82-86.
- [9] 郭聪慧,段文新,杨志懋,等. CuCr 触头材料电弧腐蚀速率的测定[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(2): 295-298.
- [10] 周玮,臧春艳,何俊佳. 电气参数和机械参数对继电器直流电弧的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 151-155.
- [11] Sone H, Takagi T. Role of the Metallic Phase Arc Discharge on Arc Erosion in Ag Contacts[J] IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1990, 13(1): 13-19.
- [12] Carvoux E, Ben Jemaa N. Electrical arc study in the range of 14-112V DC for automotive power contacts[J] IEICE Trans. Electronics, 2006, 89-C(8): 28-32.

《机车电传动》编辑部声明

为顺应网络环境下期刊出版的新要求,推进期刊网络出版传播,凡被本刊录用的论文,在著作权法的框架内,该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在全世界范围内转让给《机车电传动》编辑部及本编辑部授权的相关数据库。凡被本刊录用的论文将同时通过因特网、手机等进行网络出版或提供信息服务,本刊一次性支付作者著作权使用报酬(即稿费,包含印刷版、光盘版和网络版等各种版本的稿酬)。

《机车电传动》编辑部