

基于弓网电弧动态模型的高速列车弓网电弧产生机理

于东明¹ 孙洪亮²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司总体研发部, 130062, 长春;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司检修研发部, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘 要 分析了高速列车弓网电弧产生的机理, 结合受电弓和接触网间的离线时间、材料缺陷、电腐蚀等问题, 解析了弓网电弧与高速列车安全的关联机制。依据电弧理论的动态模型算法, 推导了 Cassie 模型和 Mayr 模型的理论公式, 并论述了这两种模型的适用条件和应用范围。提出了高速列车弓网电弧方面目前仍存在的问题及未来电弧研究的展望。

关键词 高速列车; 弓网电弧; 电弧产生机理; Cassie 模型; Mayr 模型

中图分类号 U225.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.04.013

Mechanism of Arcing in High Speed Train Based on Pantograph Arc Dynamic Model

YU Dongming, SUN Hongliang

Abstract Through analyzing the mechanism of high-speed train pantograph arc, and combined with the offline time between pantograph and catenary, material defects and electrical corrosion, the correlation mechanism between pantograph arc and high-speed train safety is resolved. Based on the dynamic model algorithm of arc theory, the theoretical formulas of Cassie model and Mayr model are deduced, the applicable conditions and scope of the two models are discussed. This paper puts forward the problems that still exist in the arc of high-speed trains and the prospect of future arc research.

Key words high-speed train; pantograph arc; arc generation mechanism; Cassie model; Mayr model

First-author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

弓网关系作为高速铁路的 3 大基础关系之一, 时刻影响着列车的运行安全。随着列车速度等级的提升, 弓网关系的稳定性就显重要。高速行驶的动车组会加大受电弓和接触网的离线率, 使得弓网电弧发生的概率增大, 严重影响牵引传动系统的正常工作, 成为动车组提速的瓶颈。

2007 年, 法国 TGV 高速列车在进行弓网试验中发现, 在列车速度达到 574.8 km/h 时, 弓网电弧发生的频次大增, 弓网接触成为非正常的拉弧受流状态。试验结束后观测到受电弓电腐蚀严重, 产生高温烧蚀, 基本报废。因此, 如何降低弓网电弧发生概率是目前国际上轨道交通领域的研究热点。

本文介绍列车实际运行时电弧的产生机理与影响因素, 推导电弧模型基本公式, 给出两种经典电弧模型的应用条件和范围。

1 电弧模型的研究进展

弓网系统是一个多因素交叉系统, 即使在相同电路、相同条件、相同环境的试验或仿真, 结果也可能大不相同, 即弓网系统具有很大的不确定性, 因此也是国际上的研究热点和难题。目前, 国内外研究弓网电弧的学者不在少数, 电弧研究团队的数量众多, 电弧理论模型的研究水平也在不断提高。

目前, 电弧模型的研究主要分为两大类: 一类是分析电弧内部物理状态的模型, 即对受电弓和接触网之间物质的物理状态为基础的模型; 另一类是研究电弧外部物理状态为基础的模型^[1-2]。1939 年, Cassie 首次提出黑盒电弧模型, 电弧研究开始步入正轨, 从定性研究转至定量研究。Mayr 在黑盒模型的基础上进行了改进, 修订限定条件, 被后人命名为 Mayr 模型^[3]。电弧模型的发展经历了从简单到复杂、从一维到三维的转变。在不同的限定条件下, 铁路专家研究并提出了多种类型的数学模型, 但都无法撼动 Cassie 黑盒模型和 Mayr 模型的地位。

受电弓作为铁路列车接收电能的一种设备, 工作时承受极高的电压和电流, 因此, 良好的弓网接触状态是列车正常运行的基础。事实上, 高速运行的列车其弓网始终处于滑动接触状态, 当列车经过分相点或接触网有异物时, 受电弓和接触网就会

有垂直振幅。当弓网间接触压力不均,导致受电弓接触网出现短暂分离时,分离的瞬间会产生较大的电压差。由于中间的空气是导电介质,强大的电压差会造成空气击穿,形成电弧放电现象,进而影响受电弓的物理性状和电气设备的稳定性。因此,铁路专家以及研究人员不断地探究弓网电弧发生的机理,提出了避免其发生的措施。

为解决受电弓和接触网间的压力问题,引入接触不均匀系数 μ ,用来评判动态条件下弓网接触的压力状态,表达式如下:

$$\mu = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}}$$

式中:

P_{\max} ——相互接触的最大压力值;

P_{\min} ——相互接触的最小压力值。

根据正线运营数据可知,车辆经停时 μ 小于10%,车辆高速运行时 μ 不大于25%。

2 电弧模型的形成机理和影响因素

根据电弧理论,将受电弓、接触网及他们之间的气体(等离子气体)看作为一个封闭体系,暂不考虑其他外部影响。在这个体系中,电弧的形成主要由电弧阳极、电弧阴极及电弧柱这3部分组成,其中电弧柱位于电弧阴阳极之间,为弧状结构,如图1所示。

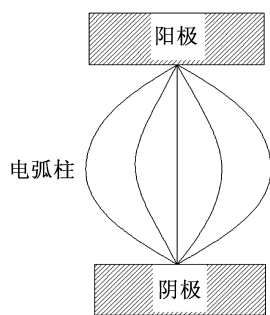


图1 高速列车弓网电弧结构示意图

离线的受电弓和接触网形成高强度电场,使得电弧阳极向电弧阴极发射电子,造成高速运动的正、负离子和电弧柱中的空气粒子相互碰撞与结合;随之热电子发射和光电子发射逐渐上升至主导地位,造成温度上升;温度的持续升高又加剧了粒子间相互碰撞,直到形成空气击穿点,产生用肉眼可观测的燃弧现象。由此可知,弓网电弧在视觉上是由弓网离线造成的电弧放电现象,但微观上是由

电子运动和温度升高引起的空气击穿所致^[4]。产生电弧的机理主要有以下几个方面。

1) 滑板材质缺陷。同等材质、同批号产品的滑板,即使在相同条件下,电弧形态也不同,这是因为滑板制造工艺把控不严,杂质粒子混入材料,而杂质能级各不相同,导致视觉上弓网电弧形态的差异。同时,滑板也存在不同程度的点和面的材质缺陷,这些结构缺陷会间接影响电子从阴极向阳极发射的进程,进而影响电弧的物理形态。

2) 电腐蚀和热腐蚀。一般情况下,列车会长时间地高速运行,使得弓网长时间接触和相对滑行,并因接触网高电压在弓网接触的位置产生热量。这种电能和热能会带来受电弓滑板的电腐蚀和热腐蚀。腐蚀产生的缺陷使得电弧发生的概率持续升高。同时,间歇性发生的电弧会导致材料熔化和气化,这也会加快滑板腐蚀进度^[4-5]。

3) 高离线率。列车在高速运行时其弓网会存在一定的离线率。离线时间0~10 ms为小离线,10~100 ms为中离线,100 ms以上为大离线。大离线会造成电弧柱内气体电离的时间增加,可导致严重的弓网电弧。

4) 升降弓不稳定。列车网络被用作控制车辆设备,在设计之初会充分考虑其冗余量。但是,网络传输不稳定一直存在,升弓和降弓的指令不会第一时间传达至升弓气路,升降弓的过程会受到影响,从而导致弓网电弧概率增大。

此外,滑板异物、接触线安装过程、电压浮动等因素都可能导致燃弧出现。综上所述,弓网电弧发生的原因综合涵盖了物理、化学、材料等方面,因此,为了探究电弧产生机理,本文分析电弧产生的条件及弓网接触机制,同时介绍两种经典的电弧模型。

3 电弧传统模型及其优化后动态分析

国外学者对列车电弧模型的研究已经历了半个多世纪,提出了多种模拟仿真算法模型,而国内学者的相关研究起步较晚,目前紧随其后。随着高速铁路弓网电弧现象的不断发生,其研究的内容也在不断深化。

最初的电弧模型分析中,研究人员从弓网电弧的能量平衡入手,切入电弧柱的可变电阻。根据电阻模型,推导出以下电弧电阻与能量耗散间的关系式:

$$\frac{i}{e} = \frac{1}{r} = g = f(q) = f\left[\int (P_{\text{in}} - P_{\text{loss}}) dt\right]$$

式中:

i ——电弧柱内的电流;

e ——电压瞬时值;

r ——电阻值;

q ——存储能量值;

g ——电弧电导瞬时值;

$P_{\text{in}}、P_{\text{loss}}$ ——单位长度的输入能量和能量耗散值。

静态电弧模型在单位时间内输入的能量和耗散的能量是相等的,但动态下存在差值。为了得到动态电弧模型表达式,可根据电弧电阻和能量耗散关系式推导得到以下单位时间的能量差值:

$$\frac{dq}{dt} = P_{\text{in}} - P_{\text{loss}} = ei - P_{\text{loss}}$$

等式两边进行变换,可以得到:

$$\left(\frac{dq}{dg}\right)\left(\frac{dg}{dq}\right) = \frac{1}{P_{\text{loss}}^{-1}}\left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{loss}}} - 1\right) = \frac{1}{P_{\text{loss}}^{-1}}\left(\frac{ge^2}{P_{\text{loss}}} - 1\right)$$

$$\frac{1}{g}\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{g} \frac{1}{P_{\text{loss}}^{-1}} \frac{dq}{dg} \left(\frac{ge^2}{P_{\text{loss}}} - 1\right)$$

设 $\tau = \frac{g}{P_{\text{loss}}}\left(\frac{dq}{dg}\right)$,则可进一步简化为:

$$\frac{1}{g}\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{\tau}\left(\frac{ge^2}{P_{\text{loss}}} - 1\right)$$

上式为动态电弧模型的基本表达式。目前电弧研究基本上是在此经典表达式上发展而来的,如 Cassie 模型和 Mayr 模型即是以上经典表达式的衍生。下面推导该两种模型的数学表达式。

3.1 Cassie 电弧黑盒模型

Cassie 黑盒数值分析模型中,假设电弧柱边缘和空气有明显的分界,且电弧柱的直径随电流密度的变化而变化,所以内部电流密度与电弧柱的横截面积有关,且电弧柱内的温度均匀分布,同时耗散功率是一个定值^[6]。当发生电弧现象时,能量外散,单位时间内的功率为常数。根据能量守恒定律,单位空间的储存能量也为常数,因此得出以下等式:

$$\frac{dq}{dg} = \frac{d(q_0 \pi r^2)}{d(g_0 \pi r^2)} = \frac{q_0}{g_0}$$

$$P_{\text{loss}} = (\pi r^2) P_0$$

$$E_0 = \sqrt{P_0/g_0}$$

式中:

$q_0、p_0$ ——单位长度电弧存储的能量和耗散的功率;

g_0 ——单位长度电弧的电导率;

U_0 ——单位长度电弧的电压值。

将上式代入到经典电弧函数式中得到:

$$\frac{1}{g}\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{\tau_0}\left(\frac{e^2}{U_0^2} - 1\right)$$

式中:

$\tau_0 = q_0/p_0$ ——时间常数,为定值,代表单位时间存储的能量和耗散能量的比值。

3.2 Mayr 电弧模型

Mayr 模型中,假设电弧是由直径为定值的等离子气体组成,单位时间内电弧柱耗散的能量是恒定值,即 P_{loss} 恒定,且因弓网离线距离较小,故燃弧能量散耗为常数^[7]。根据以上假设,需要引进沙哈方程,通过推导出单位长度电导和单位体积存储能量间的关系。沙哈方程为:

$$g = ke^{\frac{q}{E_0}}$$

式中:

k ——换算系数;

E_0 ——电阻改变 2.73 倍时电弧所需要的能量值,对于某个固定电弧,该值为定值。

通过推导和理论分析,可以得到以下电弧时间常数 τ_m :

$$\frac{dq}{dg} = \left(\frac{dg}{dq}\right)^{-1} = \frac{q_0}{g}$$

$$\tau_m = \frac{g}{P_{\text{loss}}}\left(\frac{dq}{dg}\right) = \frac{g}{P_{\text{loss}}}\frac{q_0}{g} = \frac{q_0}{P_{\text{loss}}}$$

等式两边同时微分,得出弓网电弧的微分方程式为:

$$\frac{1}{g}\left(\frac{dg}{dt}\right) = \frac{1}{\tau_m}\left(\frac{ei}{P_{\text{loss}}} - 1\right)$$

基于 Cassie 和 Mayr 模型,可深入探究燃弧半径和电场强度的关系、电弧柱内部温度分布等,然后通过一系列仿真和试验进行验证。

4 弓网电弧存在的问题

弓网电弧从发生到结束,整个过程可以分为燃弧和熄弧,由此对电弧的动态理论和熄弧理论进行分析,可得出不同的弓网电弧模型。目前,对弓网

电弧模型进行修正是研究的热点。

传统模型有如下特点,限定条件过于苛刻,应用范围窄。Cassie模型适用于电流零点前的大电流燃弧区域,而Mayr模型适用于零点附近的小电流燃弧区域,两种电弧模型的局限性迫使学者进一步改进模型。例如:Habedank模型将Cassie和Mayr模型串联,并加入高次谐波,以弥补基础理论的局限性;Schavemaker模型将电弧时间常数设为常数,修正功率函数;MHD模型加入了磁流体动力学,充分考虑电弧柱中等离子气体的微观特性。

电弧的实验验证国外起步较早,而我国研究起步较晚,但随着我国铁路行业的快速发展,国家对相关研究的重视程度不断提高。目前,已建立了国家电弧实验室,电弧的数学模型和工程实验实验已经有了丰硕的成果。

5 结论与展望

随着我国高速列车的快速发展,作为三大列车关系之一的弓网关系的重要性越来越受到重视。动态电弧模型是研究弓网电弧的主要方式,其中Cassie黑盒电弧模型假定耗散功率为定值,Mayr电弧模型假定电弧直径为定值,Schavemaker模型限定电弧时间常数为定值,等等。这些模型是对其他模型进行修正,然后通过仿真计算和实验验证所提电弧模型的正确性。近年来,国内弓网电弧的研究逐渐增多,考虑的因素也增加,维度从最开始的一维变成三维,部分学者开始着手探究弓网电弧的频率特性和光谱特性,试图用不同的方法探寻电弧的产生机理。目前,我国弓网电弧研究方向颇多,主要分为以下几个方面:

1) 弓网关系不是一个独立的研究方向,需要和列车其他供电部分联系起来,如与牵引传动系统的联系。电弧在产生、灭弧、重燃过程中对列车的供电系统有冲击,电压浮动较高,单独研究弓网关系就不是合适的分析方法,需综合考虑能量传输效率、电弧发生概率等指标。

2) 电弧模型一直被认为是探究电弧发生机理的最好研究方向,但是各个模型有各自的限定条件和应用范围。要探寻更为精准的数学模型,就需要针对实际列车运营状况建立合适的电弧模型来分析电弧耦合触发机制,分段考虑每个阶段的电弧机理,建立不同阶段的电弧模型。

3) 电弧的测量方式也是一个研究方向。如实际检测监测中,离线时间、火花次数等指标有各自的检测手段,但是弓网电弧的光谱特性的检测仪器精度不够,导致每一次的检测结果都会不同,这也是弓网关系难以准确模拟的主要原因之一。

因此,数学模型和实验相结合的方式更能深入了解电弧产生的内部机理,可为高速铁路的进一步提速提供技术支撑。

参考文献

- [1] 陈旭坤. 高速列车弓网电弧动态模型研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [2] GAO G Q. A pantograph arcing model for electrified railways with different speeds[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 232(6): 095440971774775.
- [3] 张婷婷. 高速列车弓网电弧的特性及其对牵引传动系统的影响[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [4] ZHU G Y, GAO G Q, WU G N, et al. Numerical analysis of pantograph-catenary arcing of high-speed train [C]// The Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Changsha: [s. n.], 2015.
- [5] 许思思. 弓网系统电弧机理试验与研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [6] WU T X, BRENNAN M J. Basic analytical study of pantograph-catenary system dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 1998, 30(6): 443.
- [7] KUBOTA Y, HAYASAKA T, MIYAUCHI T, et al. Effect of arc discharge on the wear profile of Cu impregnated carbon based pantograph contact strip [C]// The 27th International Conference on Electrical Contacts. Dresden: [s. n.], 2014.

(收稿日期:2019-08-22)

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址:tougao.umat1998.com