

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.04.031

弓网电弧温度场研究综述

杨 帅¹, 王晓红², 曹保江¹, 古 圳¹,
高国强¹, 韩伟锋¹, 刘贤洵¹, 朱光亚¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111)

摘要: 从弓网电弧的电弧模型、电弧能量、电弧的辐射特性等角度, 笔者综述了国内外弓网电弧和弓网电弧温度场的研究进展。介绍了电弧模型及其特性的研究现状, 论述了弓网电弧能量对弓网系统的影响及其辐射特性, 最后指出了弓网电弧温度场研究面临的诸多问题, 如电弧处于多场耦合的复杂环境、建立新的电弧模型、流体计算难等。

关键词: 弓网电弧; 温度场; 电弧模型; 电弧能量

Research Review of Arc Temperature Field Between Pantograph and Catenary

YANG Shuai¹, WANG Xiaohong², CAO Baojiang¹, GU Zhen¹, GAO Guoqiang¹,
HAN Weifeng¹, LIU Xianrui¹, ZHU Guangya¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. CSR Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Shandong Qingdao 266111, China)

Abstract: This paper reviews the recent progress in researches on arc and arc temperature field between pantograph and catenary with respect to the arc model, arc energy, characteristics of arc radiation, and so on. The current researches on arc model and its characteristics are introduced briefly. The impact of arc energy between pantograph and catenary on the pantograph-catenary system and the arc radiation characteristics are discussed. In addition, it is pointed out that the research on arc temperature field between pantograph and catenary is still facing many problems, such as complex environment of multi-field coupling where arc exists, establishment of new arc model, and difficult calculation of fluid.

Key words: pantograph-catenary arc; temperature field; arc model; arc energy

0 引言

在电气化铁路中, 受电弓与接触网导线滑动接触是牵引供电系统与车载电气传动系统相联系的关键环节, 弓网系统良好的服役性能是保障高速列车可靠、安全运行的基本条件^[1]。

弓网电弧是由于受电弓滑板与接触网导线在带电情况下的非正常分离而产生的一种气体放电现象。电力机车在高速运行时, 由于接触导线的不平顺、受电弓弓头的振动等因素的影响^[2], 受电弓滑板与接触导线分离(弓网离线)的现象时有发生。弓网离线时, 大多数情况下, 滑板与接触线之间的电压和开

断的电流均大于弓网系统的生弧电压和生弧电流^[3], 滑板与接触线的间隙通常会产生一团温度极高、发出强光和能够导电的电弧。

电弧发生时产生巨大能量, 接触网导线与受电弓滑板材料在电弧能量的反复热作用下, 材料表面发生熔融、蒸发、喷溅等金属侵蚀现象, 对接触网导线和受电弓滑板造成不同程度的破坏。电弧对接触材料的侵蚀造成接触表面的凹凸不平, 加剧了接触表面的载流磨损, 影响了弓网受流质量, 甚至可能导致接触网断裂, 造成机车运行事故^[4]。随着高速铁路的发展, 列车运行速度的不断提高, 弓网电弧的危害也越来越严重。为了更好了解和揭示弓网电弧对滑板和接触导线的侵蚀、烧损机理, 有必要研究弓网电

收稿日期: 2014-10-19; 修回日期: 2014-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1234202)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U1234202).

弧温度场的分布及其在接触网导线和受电弓滑板材料内部的传播,对探明弓网材料的磨损机理、改进弓网材料性质具有重要意义。而弓网电弧模型、电弧能量以及辐射特性等是影响弓网电弧温度场分布的主要因素。

1 电弧温度场国内外研究现状

对于弓网电弧的研究,国内外主要研究了弓网离线产生电弧、电弧对受流质量的影响、电弧与过电压的相互作用等^[5-8]。电弧温度场的研究成果主要集中在开关电弧领域,而至今关于弓网电弧温度场的研究还很少。如文[9-11]中采用净发射系数法(NEC)分析了开关电弧中心区域的温度分布,而 NEC 对温度较低的电弧边缘区域并不能得到好的结果;文[12]中指出 P_1 模型更适合于考虑等离子体边缘区域与器壁对辐射的影响。

作为动车组受流过程中的一种特殊能量传输载体,弓网离线时,8 MW 以上的功率通过弓网电弧来传递,以维持动车组能量供给的连续性,弓网电弧不能立即熄灭,也不能剧烈燃烧,必须将其抑制在一定的范围内,与开关领域立即灭弧不同。其差异性主要体现在:①弓网电弧的两电极处于高速切向滑动和法向频繁振动状态;②弓网电弧完全暴露于高速走形风形成强气流场中;③为了保证受流质量,弓网电弧不可能随意断弧。

相对弓网电弧的特点,开关电弧处于封闭的容器内,电弧与外界处于一种绝热的状态,而由于弓网电弧的特性,弓网电弧温度场与开关电弧不同,弓网电弧处于一个开阔的领域,并且弓网电弧弧根处于运动中,弓网电弧与外界一直存在能量的交换。因此随着动车组运营速度的提升,电弧本体的弧根、弧柱动态特性将有很大变化,电弧温度场以及其能量对弓网系统的损伤及其机理亟需进一步深入研究。

2 电弧模型

19 世纪初,皮德罗夫和但维发现了电弧;1902 年埃依尔顿提出了直流电弧伏安特性的经验公式,试图用数学来说明电弧的基本特性,随后电弧理论开始逐渐发展起来;1939 年克西(Cassie)提出电弧中能量平衡理论及电弧通道的数学模型^[13],麦也尔(Mayr)也提出了考虑传导和辐射散热的数学模型^[14],这两个数学模型都是以能量守恒方程为基础。电弧黑盒模型的基本思想就是不深究电弧内部复杂的物理过程,只着眼于电弧的外特性,将其行为视为一个若干时间变量(电压 u 、电流 i 、电导 g)及时变电弧参

数表示的电路元件并将其与所在网络联解来推断电弧的燃灭趋向。黑盒电弧模型中常用的有 Mayr 模型、Cassie 模型、Habedank 模型和 Schwarz 模型等, Schwarz 模型是对 Mayr 模型的进一步修正,使其与实际更相符合。

目前,弓网方面的电弧模型几乎都是黑盒模型,利用黑盒模型对弓网电弧的研究多是分析电弧的电压、电流和负载变化时弓网电弧能量特性,以及弓网离线产生的电弧对供电质量产生的过电压、谐波等影响。同时在开关电弧中,由于起弧和熄弧时间非常短暂,因此黑盒电弧模型在开关电弧温度场的研究中也得到了很好的运用。而对于弓网电弧温度场的研究,弓网电弧起弧和熄弧这两个过程相对缓慢,弓网电弧弧根随着滑板的移动而不断的变化,弓网振动导致弓网电弧间隙也在不断的变化。相对于开关电弧,对于弓网电弧温度场的研究,电弧模型需进一步完善。

随着电弧磁流体动力学数学模型的不断完善,计算机科学、数值传热学等相关学科的发展,涌现出了很多优秀的计算流体力学(CFD)软件,使得数值仿真成为一种研究电弧的有效手段,也为分析电弧这一高温、瞬变问题提供了条件。对电弧温度场的仿真模型研究也主要集中在开关电弧领域,20 世纪 70 年代建立了开关电弧的一维模型^[15-19],假设电弧温度均匀或沿径向按一定规律变化,通过数值计算,得到各状态变量在轴向上随时间变化的情况。20 世纪 80 年代电弧模型由一维模型发展到二维模型,但是这些二维模型对断路器的灭弧室结构都做了简化,对散热方式只是考虑了对流和辐射的影响。20 世纪 90 年代电弧模型开始考虑电磁力、湍流等影响因素,建立了电弧的磁流体动力学模型(MHD)。KARETTA F^[20]建立简化的低压开关电弧室,忽略弧柱区的空间电荷,将电弧弧柱区等效为高温气体,利用简化的辐射模型、第二类电势边界条件,计算了电弧室内的温度场分布特性;SWIERCZYNSKI B^[6]利用 MHD 模型分析了外加磁场对空气—尼龙混合电弧行为特性的影响,计算了混合电弧的温度场分布;吴翊、王伟宗等采用磁流体理论建立了低压开关空气电弧的三维电弧动态仿真模型,计算了空气电弧在灭弧室内的运动情况及其温度分布;SCHADE E^[21]提出在真空电弧中等离子体的流速在超音速情况下,等离子体中的电子和离子具有不同的温度,从而提出了电弧的双温度模型;王立军在 Schade 模型的基础上,考虑了离子动能项对真空电弧特性的影响,仿真计算了等离子体的离子温度和电子温度分布特性。

电弧模型涉及温度场、气流场、等离子体、电磁

场等多个学科领域,问题本身极其复杂。高速电气化铁路弓网电弧还具有自身的特殊性:电弧可能受到高速动车运动引起的空气流动的影响、接触网和受电弓机械振动的影响和复杂大气环境的影响等,因此电弧模型的建立还需要考虑更多的因素。

3 弓网电弧能量及其辐射特性

弓网电弧会烧蚀接触网导线和受电弓滑板,其烧蚀程度与弓网电弧能量的大小密切相关,另外电弧能量的大小对研究弓网电弧对受电弓滑板和导线磨损的影响也有至关重要的作用。文[22]中通过实验分析了不同弓网电弧能量下 C/C 复合材料滑板的磨损状况,随着电弧能量增加,材料磨损机制也发生变化,在较低的电弧能量下,材料磨损机制主要表现为磨粒磨损,在高电弧能量下,电弧的瞬间高温使得沉积碳和碳纤维被蒸发气化,形成空洞,材料磨损机制主要表现为电气磨损;文[23]中指出电弧的产生使碳材料表面的温度瞬时上升,电接触表面的巨大温度梯度产生的热应力,使接触材料基体形成了裂纹,在电弧高温的作用下,浸金属碳滑板材料表面发生气化,引起滑板的磨损;文[24]中在研究浸金属碳滑板和铜接触线的载流摩擦中,把电弧划分为初始状态和稳定状态两个阶段,这两个阶段接触线与碳滑板的磨损率与电弧能量都满足线性关系;文[25]中试验研究发现载流条件下电流产生的电弧热是其磨损量增加的主要因素;文[26]中研究发现,电弧放电产生的热量与磨损率成正比。

根据 Koji Kato 理论可知离线电弧放电的电弧能量主要由两个因素决定:离线电弧的放电时间和放电功率^[27]。JEMMA N B 等在电接触研究中探讨了感应、阻性和灯负载对电弧能量的影响,并发现在电感负载时电弧能量远远大于灯负载时的电弧能量。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。文[28]中探讨了电压、电流以及触头的分断速度对直流电弧能量的关系,认为电压等级的提高将极大程度上提高电弧的燃弧时间和电弧能量,电弧能量随电流上升而增加。

电弧能量影响弓网电弧温度场的分布,在电弧高温作用下,导致滑板和接触线严重的磨损,而弓网电弧能量除了与放电时间和放电功率有关外,还与弓网电弧处于高速气流场有关。

电弧等离子体中存在着热场、气流场和电磁场的复杂过程,见图 1,各个场之间通过一些相关的参数相互耦合。热场和气流场的基本参数为温度、压强

和速度,温度和压强的变化会导致电弧气体中粘性系数、电导率、辐射吸收系数等物性参数改变。电弧的热场和电场主要通过焦耳热和电导率进行相互耦合,电导率的变化使得电弧中的电场和电流分布发生变化,从而也引起磁场的改变。电流密度会产生单位体积的焦耳热,它是电弧气体的发热源,其作为源项直接参与了电弧能量方程的计算。磁场引起的洛伦兹力会对电弧气体气流场产生作用,并作为体积力直接参与了动量方程的计算,由此实现了磁场和气流场的耦合。热场的计算需要考虑传导、对流和辐射的作用,其中,辐射热是电弧热场方程中的重要源项之一,其大小与温度、辐射吸收系数有关^[29]。

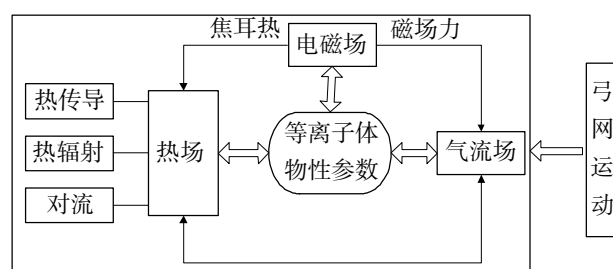


图 1 电弧等离子体中的物理过程

Fig. 1 The physical process of arc plasma

热辐射是包括弓网电弧在内的热等离子体中的一个重要现象和研究内容。热辐射是指在高温电弧下,被扰动的原子、电子的振动和受激会发出光,其中波长在 $0.4\sim 40.0\ \mu\text{m}$ 范围内的光谱投射到物体上后能被吸收,变为热能的过程。热辐射是通过电磁波的方式传播能量的,它不需要物体之间的直接接触。热辐射具体表现为:①电弧温度较高区域,辐射是最主要的能量耗散方式;②辐射热传递是等离子体内部的一种有效能量交换方式;③等离子体辐射出的能量可以加热周围的气体或者侵蚀外部材料。文[30]中指出电弧温度高于 $13\ 000\ \text{K}$,辐射成为最重要的能量耗散方式;文[31]中指出气流场中温度和压力的变化会导致能量单元电导率和辐射参数的改变,电导率的变化使得电弧单元电流分布产生变化,最终导致电弧能量的改变,电弧能量同时反作用于气流场,影响气流场的温度和压力;文[32]中研究了电弧等离子体中的辐射现象。电弧中心的高温向外辐射能量,边缘处的低温区对一部分能量存在自吸现象。

4 结论

综上所述,为了不断探究弓网电弧这一复杂的物理现象,提高弓网受流质量。国内外学者对弓网电弧模型及其特性进行了长期、持续地研究,主要包括弓网电弧基本物理特性、建模与仿真、试验测试,

不断地丰富着弓网电弧理论,并推动着高速电气化铁路安全运行技术的发展。但是,在弓网电弧温度场研究方面仍存在一些问题,需要研究者进一步的工作。主要体现在以下几个方面:

1)弓网系统具有自身的特性以及其所处的复杂环境,与开关电弧有显著的区别,主要区别在于弓网电弧处于高速的气流场中,一直与外界有能量的交换,因此弓网电弧温度场的研究与开关电弧温度场的研究不同,需要考虑更多的因素;

2)研究弓网电弧温度场的模型需要在已有的电弧模型基础上不断完善,可在黑盒模型的基础上,考虑弓网间隙、气流对流状态等因素;

3)电弧能量涉及到热场、气流场和电磁场的复杂过程,对于弓网电弧温度场研究与开关电弧温度场研究,影响电弧能量的主要因素不同,在弓网电弧中更主要考虑气流场的影响;

4)建立电弧模型,运用 ANSYS 对弓网电弧温度场的仿真分析可以得到弓网电弧内部的参数变化和基本过程,并由此分析出电弧内部参数的变化规律。

参考文献:

- [1] 吴积钦. 受电弓和接触网系统[M]. 成都:西南交通大学出版社,2010.
- [2] 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(3):104-108.
GAO Zongbao, WU Guangning, LYU Wei, et al. Research review of arc phenomenon between pantograph and catenary in high-speed electrified railway[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3):104-108.
- [3] 吴积钦,钱清泉. 弓网系统电弧侵蚀接触线时的热分析[J]. 铁道学报,2008,30(3):31-34.
WU Jiqin, QIAN Qingquan. Thermal analysis of arc erosion of contact wire of the pantograph & catenary system[J]. Journal of The China Railway Society, 2008, 30(3):31-34.
- [4] 郭艳玲,王洪涛,孙树朴. 牵引电网过电压产生机理及测试研究[J]. 电工技术杂志,2002(9):25-27.
GUO Yanling, WANG Hongti, SUN Shupu. Research on the reasons and tests of overvoltage arising interaction power supply system[J]. Electrical Engineering, 2002(9):25-27.
- [5] BURM A T K, GOEDHEER J W, SCHRAM C D. Plasma expansion in the preshock region[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(5):2162-2168.
- [6] SWIERCZYNSKI B, GONZALEA J J, TEULET P, et al. Advance in low voltage circuit breaker modeling[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2004, 37(4):595-609.
- [7] BERNARDI D, COLOMBO V, GHEDINI E, et al. Three dimensional time-dependent modeling of magnetically deflected transferred arc [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2): 428-429.
- [8] LIU X M, CAO Y D, WANG E Z. Numerical analyses on the interaction of arc and flow field for SF₆ circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1047-1050.
- [9] ZHU P, LOWKE J J, MORROW R. A unified theory of free burning arc, cathode sheaths and cathodes[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 1992, 25(8):1221-1230.
- [10] LOWKE J J, KOVITYA P, SCHMIDT H P. Theory of free burning arc columns including the influence of the cathode[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 1992, 25(11):1600-1606.
- [11] ZHANG J F, FANG M T C. Theoretical investigation of a 2 kA DC nitrogen arc in a supersonic nozzle[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 1987(20):366-379.
- [12] DERON C, RIVIERE P, PERRIN M Y, et al. Modeling radiative properties of LTE air atmospheric plasmas[C]//15th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Toulouse:IEEE, 2004:145-148.
- [13] CASSIA A M. Theorie nouvelle des arc de rupture et de l'aridite des circuit [C]// CIGRE.[S.l.]:IEEE, 1939:102.
- [14] MAYR O. Theorie des statibchen and des dynailischen lichtbogens[J]. Arehivf, Elektntechnik, 1943(12):588.
- [15] COWLEY M D. Integral method of arc analysis[J]. Application of Physics, 1974(7):2218-2222.
- [16] SWANSON B W, ROICLT R M. Boundary layer analysis of an SF₆ circuit breaker arc[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, 5(3):1086.
- [17] HERMANN W, RAGALLER K. Theoretical description of the current interruption in HV gas blast breakers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1546-1555.
- [18] LOWKE J J, LOCKI H C. A simple model for high current arc stabilized by forced convection[J]. Application of Physics, 1975(46):3325-3329.
- [19] CASYE M T, FANG D B. A current zero arc model based on forced convection[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1979, 7(4):217-229.
- [20] KARETTA F. Simulation of the gas dynamic and electromagnetic processes in low voltage switching arcs[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 1998, 21(1): 96-103.
- [21] SCHADE E. Numerical simulation of high-current vacuum arcs with an external axial magnetic field[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 890-901.
- [22] 张婧琳,孙乐民,胡道春,等. 电弧能量对 C/C 复合材料的载流摩擦磨损行为的影响[J]. 润滑与密封, 2009, 34(12):27-29.
ZHANG Jinglin, SUN Lemin, HU Daochun, et al. Influence of arc energy on the friction and wear behaviors of C/C composites[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(12):27-29.

- [23] 刘敬超,王 旭.铜基粉末冶金载流摩擦磨损微观型貌分析[J]. 润滑与密封, 2009,34(7):14-17.
LIU Jingchao,WANG Xu.Analysis on electrical sliding wear morphology of cu-base powder metallurgy [J]. Lubrication Engineering, 2009,34(7):14-17.
- [24] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk[J]. Tribology International,1999,32(7):367-378.
- [25] 马行驰,何国求,何大海. 铜石墨合金材料在载流条件下的摩擦磨损行为研究 [J]. 摩擦学学报,2008,28(2):167-172.
MA Xingchi, HE Guoqi, HE Dahai, et al.Friction and wear behavior of copper-graphite material under electrical current[J]. Tribology,2008,28(2):167-172.
- [26] BOUCHOUCHA A, ZAIDI H, KADIRI E K,et al.Influence of electric fields in the tribological behaviour of electro- dynamical copper/steel contacts[J]. Wear,1997 (203/204):434-441.
- [27] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trol-ley under electric current[J]. Wear,1998 (216):172-178.
- [28] 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.
ZHOU Wei, ZANG Chunyan, HE Junjia.Influence of electric and mechanism parameters on DC arc in relays[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(19):151-155.
- [29] 王伟宗. 空气开关电弧仿真技术及其应用的研究[J]. 低压电器,2010(5):7-10.
WANG Weizong.Research of simulation technique of electric arc in air switch and its applications[J]. Low Voltage Electrical,2010(5):7-10.
- [30] AUBRECHT V. LOWKE J J. Calculations of radiation transfer in SF₆ plasmas as using the method of partial characteristics [J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 1994,27(10):2066-2073.
- [31] 曹云东,纪腾飞,刘晓明.高压 SF₆ 断路器三维动态电弧仿真[J]. 中国电机工程学报,2010,30(32):342-346.
CAO Yundong,JI Tengfei,LIU Xiaoming.Three dimensional dynamic arc simulation for high-voltage SF₆ circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(32):342-346.
- [32] 杨 茜,荣命哲.低压断路器中空气电弧运动的仿真及实验研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(15):89-94.
YANG Qian,RONG Mingzhe. Simulation and experimental research on air arc motion in low-voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(15):89-94.

杨 帅(1988—),男,硕士研究生,主要从事弓网电弧与电接触理论方面研究。

(编辑 袁 妮)

(上接第 172 页)

- [40] 张晓星,谌 阳,唐俊忠,等.检测 GIS 局部放电的小型准 TEM 喇叭天线[J]. 高电压技术,2011,37(8):1975-1981.
ZHANG Xiaoxing,SHEN Yang,TAN G Junzhong,et al. Minitype quasi-TEM horn antenna for partial discharge detection in GIS [J]. High Voltage Engineering,2011,37 (8):1975-1981.
- [41] 陈 隽,李劲彬,夏 天,等.绝缘子对 GIS 中电磁波传播特性影响的仿真研究[J]. 陕西电力,2014,42(11):6-8.
CHEN Juan,LI Jinbin,XIA Tian,et al. Simulation study on influence of insulator on propagation characteristics of electromagnetic wave in GIS [J]. Shaanxi Electric Power, 2014,42(11):6-8.
- [42] 张晓星,唐 炬,彭文雄,等.GIS 局部放电检测的微带贴片天线研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(12):1596-1599.
ZHANG Xiaoxing,TANG Ju,PENG Wenxiong,et al. Study on the outer UHF microstrip patch antenna for partial discharge detection in GIS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2006,27(12):1596-1599.
- [43] 苑津莎,尚海昆,王 瑜,等.基于相关系数矩阵和概率神经网络的局部放电模式识别[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(13):110-115.
YUAN Jinsha,SHANG Haikun,WANG Yu,et al. Pattern recognition for partial discharge based on correlation coefficient matrix and probabilistic neural networks [J]. Power System Protection and Control,2013,41(13):110-115
- [44] 罗 翔,蔡金锭,张孔林.基于向量分析法的三相交联电缆局部放电检测与分析识别技术[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(16):91-96.
LUO Xiang,CAI Jinding,ZHANG Konglin.Partial discharge detection and identification for three-phase cross-bonded cable based on vector analysis method [J]. Power System Protection and Control,2013,41(16):91-96

汲胜昌(1976—),男,教授,博士生导师。研究方向为高电压技术。

(编辑 袁 妮)