面向多电飞机的直流串联电弧磁 流体模型研究



徐卓砾¹,路昕洋¹,崔德智¹,尚雅慧²,江军¹,张潮海¹ 1.南京航空航天大学,江苏南京 211106 2.航空工业陕西航空电气有限责任公司,陕西西安 710065

摘 要:面向多电飞机的直流串联电弧磁流体模型研究对于提升电弧故障的预测与控制能力、保障飞行安全,以及推动电气 化航空技术发展具有重要意义。针对多电飞机下直流串联电弧发展特性与物理机理尚不明晰的问题,本文基于磁流体动力 学(MHD)理论,通过连续拉弧的方式模拟了多电飞机运行中因电缆破损产生的直流串联电弧,并构建出电弧动态模型;通 过计算电、磁、热、流多个物理场的参量分布与变化趋势,分析了弧长变化对电弧物理特性的影响;通过对比分析电弧电压电 流试验及仿真结果,验证了电弧磁流体模型的准确性。仿真结果证实了电场强度、磁通密度、电弧温度以及电导率与电弧间 距有着密切的相关性。试验结果表明,在270V电源输出的情况下,该模型的电压、电流均方根(RMS)误差分别为0.837V、 0.137A;在540V电源输出的情况下,该模型的电压、电流均方根误差分别为0.442V、0.253A,优于传统数学拟合模型。研究 成果可为多电飞机下直流串联电弧故障诊断工作奠定理论基础。

关键词:多电飞机;直流串联电弧;磁流体动力学模型;多物理场计算;模型验证

中图分类号:V267

文献标识码:A

随着航空技术的快速发展,多电飞机(MEA)已成为未 来航空运输领域的重要趋势。相比传统飞机,多电飞机通 过广泛应用电气系统来替代液压和气动系统,从而提高了 能效、减轻了重量^[1]。然而,电气系统的广泛应用也带来了 新的技术挑战,特别是直流电弧故障的问题^[2]。直流串联 电弧不仅可能引发设备损坏,甚至危及飞行安全,因此,对 其机理的深入研究至关重要^[3]。磁流体动力学模型可以为 研究电弧的行为提供有效的工具,通过结合多电飞机的实 际工况,建立精确的直流串联电弧模型,有助于更好地预测 和控制电弧故障,为提升航空电气系统的可靠性与安全性 提供理论支撑。这项研究不仅对保障飞行安全至关重要, 还将推动电气化航空技术的进一步发展。

发生直流串联电弧故障时,故障电流的振幅不会发生 明显变化,传统过流保护装置难以检测此类故障^[4]。因此, 电弧模型成为人们研究电弧特性的有效手段,这有助于丰

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.04.005

富电弧的检测方法。从1902年至今,许多研究人员提出了 几种不同的直流电弧模型,但早期的作品在不同的试验环 境下只有有限的测试结果。Ayrton^[5]最早提出了用于稳态 电弧电学特性建模的已知方程,但仅适用于空气中相隔几 毫米的碳电极之间产生的电弧。Steinmetz^[6]在碳和磁铁矿 电弧试验的基础上推导出半经验V-I方程。Nottingham^[7] 得出了电弧产生类似反向特征的结论。近年来,基于磁流 体动力学的建模方法逐渐引起学者们的关注。Hsu等^[8]关 注了高强度、自由燃烧的氩弧,强调电气、磁力、流体动力学 和热效应的复杂相互作用将导致电弧建模面临挑战。 Chemartin等^[9]利用电阻磁流体力学模型模拟出持续电流条 件下的周期性弧柱,且与试验结果有良好的一致性。 Lebouvier等^[10]研究了空气中的低电流高压非传输直流等 离子体炬的磁流体动力学理论模型。Rau等^[11]对直流电弧 三维瞬态模型进行了模拟,但并未模拟电弧拉弧的过程。

收稿日期: 2024-09-08; 退修日期: 2024-12-16; 录用日期: 2025-02-13

- 基金项目:国家自然科学基金(52277152);航空科学基金(20230040052001);江苏省大型科研仪器开放共享自主研究课题(TC2024A006);南 京航空航天大学 2024 年度"实验技术研究与开发"项目(SYJS202402Z);南京航空航天大学研究生教育教学改革研究项目 (2024YJXGG14)
- 引用格式: Xu Zhuoli,Lu Xinyang,Cui Dezhi,et al.Research on DC series arc MHD model for multi-electric aircraft[J].Aeronautical Science & Technology,2025,36(4):37-47. 徐卓砾,路昕洋,崔德智,等. 面向多电飞机的直流串联电弧磁流体模型研究[J]. 航空科学技术, 2025,36(4):37-47.

然而,现有直流串联电弧模型对于拉弧过程中电弧动 态物理特性的关注较少,相关物理机理尚不明晰,同时对于 多电飞机下270V直流串联电弧模型的研究较为欠缺。因 此,本文基于磁流体动力学(MHD)建立了电弧动态模型, 模拟计算直流电弧产生与发展中各物理场变化,清晰地揭 示了直流电弧动态演变的内在物理机理。最后,搭建了直 流串联电弧测试平台,从电弧伏安特性角度验证了仿真模 型设置与计算结果的合理性与准确性。本文研究为复杂工 况下直流串联电弧故障的检测与诊断工作奠定理论基础。

1 仿真原理

电弧等离子体是一种复杂的物理现象,其特性受电场、 磁场以及流场之间相互作用的影响显著^[12-13]。该相互作用 导致了流场方程、磁场方程和电场方程之间的强耦合关系。 因此,电弧仿真必须综合流体动力学和电磁学的影响。

在研究电弧磁流体动力学模型时,需要以下基本假设^[14-16]:(1)忽略电弧的点火过程,即在确定电弧的初始温度条件下模拟电弧拉弧过程;(2)研究对象是宏观中性的牛顿流体,并且其流动性质是弱压缩的;(3)在能量方程中忽略了黏性耗散和等压膨胀;(4)忽略了由位移电流和电弧电流产生的磁场,电弧的运动取决于永磁体产生的磁场。

1.1 电场控制方程

电场是电弧产生的必要前提,由于电场、磁场和流场之间存在着紧密的耦合作用,电场结果会对磁场和流场产生 重要影响。电场控制方程是用以描述和求解电弧等离子体 仿真中的电流密度与电场分布。在直流情况下,流入和流 出任意封闭节点的电流满足电流守恒方程

$$\nabla \cdot J = 0 \tag{1}$$

式中,J为电流密度,其计算公式为

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_{\rm e} \tag{2}$$

式中, σ 为电导率;E为电场强度; σ E为传导电流密度,是欧姆 定律的本构方程形式;D为电位移矢量;t为时间; $\partial D/\partial t$ 为位 移电流密度; J_e 为外部注入的电流密度。由此得知,电场、感 应电流与外部注入电流共同构成用于计算的电流密度。

此外,电场强度与电势的关系满足式(3)

 $E = -\nabla \varphi$

式中,E为电场强度; φ为空间电势。

1.2 磁场控制方程

磁场控制方程可推导出磁感应强度。将磁感应强度与 电流密度结合起来,能够计算出洛伦兹力。洛伦兹力在维 持电弧温度燃烧方面发挥着关键作用,是解决动量方程的 基础。

安培环路定理表述了沿着闭合路径(通常是环路)的电 流总和等于路径内的磁场总和的总变化率乘以介质的电导 率,如式(4)所示

$$\nabla \times H = J \tag{4}$$

式中,H为磁场强度。

此外,磁感应强度与磁矢势之间的关系满足式(5)

$$B = \nabla \times A \tag{5}$$

式中,B为磁感应强度;A为磁矢势。由于规范场满足一定 的约束条件,各个分量之间并不是完全独立的。为了消除 这些非独立的量,需要引入一个额外的条件,这个条件称为 规范条件或规范固定。本文采用规范固定为A场,形成磁 场的电流密度为

$$E_{\rm m} = -\frac{\partial A}{\partial t} \tag{7}$$

式中,E_m为感应电场。

1.3 热场控制方程

(3)

热(温度)场的控制方程对于描述电弧等离子体的热力 学行为至关重要。物体的温度场变化直接关联到能量的传 递和转换,而这种能量主要来源于外部电源。电源注入的 能量主要表现为电弧和电极温度的变化,满足能量守恒 方程

$$\rho c_{p} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_{1} \cdot \nabla T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q + Q_{p} + Q_{vd}$$
(8)

式中, ρ 为空气密度; c_p 为比定压热容;T为温度; v_1 为流体速 度;k为热导系数。Q为内部热源; Q_p 为对流热源; Q_{vd} 为传 导热源。 $\rho c_p \partial T / \partial t$ 为内能项,表示由内能引起的热量; $\rho c_p v$ · ∇T 为对流项,表示由气体流动引起的能量传递; $\nabla \cdot (k \nabla T)$ 为传导项,遵循热力学定律,表示高温物体向低温物体传导 的热量。等式右侧表示为与之相对应的热源,依次为内部 热源 Q_v 对流热源 Q_p 和传导热源 Q_{vd} 。其中,内部热源Q为

$$Q = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{5k_{\rm B}T}{2e} \right) (\nabla T \cdot J) + E \cdot J + Q_{\rm rad} \tag{9}$$

式中,k_B为玻尔兹曼常数;e为电子电荷;Q_{rad}为总体积辐射 系数。等式右侧第一项表示等离子体的焓变热,第二项表 示焦耳热,第三项表示辐射热。

1.4 流体控制方程

根据磁流体动力学理论,等离子体在宏观尺度上可以 视为一种具有电导率的流体。因此,可以利用 Navier-Stokes 方程的层流理论描述电弧放电时空气的流动,满足 流体动量守恒

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v\right) = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu\left(\nabla v + \left(\nabla v\right)^{\mathsf{T}}\right)\right] + F + \rho g$$
(10)

式中,p为气体压力;I为三阶单位矩阵;µ为动力黏度;F为 体积力,g为重力加速度。等式左侧第一项表示外部受力, 第二项表示惯性力;等式右侧第一项表示气压和黏性力,第 二项F表示体积力。F来源于洛伦兹力,计算公式为

$$F = J \times B \tag{11}$$

第三项表示受重力影响的液体流动,满足流体质量 守恒

$$\rho \nabla \cdot v_1 = 0 \tag{12}$$

1.5 状态控制方程

在对电弧等离子体的模拟中,状态方程是不可或缺的 组成部分。基于MHD理论,它将电弧放电过程等效为一种 特殊类型的气体流动,用以描述电弧等离子体宏观热力学 状态,包括压力、温度和密度等物理量之间的关系。放电气 体的状态满足状态方程

$$\rho = \rho(T, p) \tag{13}$$

式中, *ρ*为空气密度; *T*为电弧等离子体温度; *p*为气体压力。可见, 气体密度会随着温度和压力的变化而发生改变。

2 模型建立与设置

2.1 几何模型与参数

为模拟真实多电飞机电气系统中的故障电弧,根据美国UL1699标准,设置铜金属电极与碳电极,分别用以模拟 真实电气系统中的线缆和接线端子。通过分离铜电极(作 固定电极与阳极)与碳电极(作移动电极与阴极)的拉弧方 式产生电弧。基于此,建立二维平面电弧模型,如图1所 示。矩形空气域长为100mm,宽为60mm。铜电极长为 49.5mm,半径为4mm,锥高为6mm。碳电极长为49.5mm, 半径为2.5mm。初始电极间距为1mm。在拉弧过程中,由 于电极间距的增加,几何模型区域纵向长度增加,而横向长 度及电极长度保持不变。

各区域材料属性参数取自 COMSOL Multiphysics 材料 库。其中,铜电极和碳电极具体材料参数见表1。

空气域参数设置对于电弧各物理量的求解至关重要。



表1 电极材料属性



属性	铜电极	碳电极
相对磁导率	1	1
电导率/(S/m)	5.998e7	3e3
比定压热容/(J/(kg•K))	385	710
相对介电常数	1	1
密度/(kg/m ³)	8960	1950
导热系数/(W/(m•K))	400	15•(300/T)

COMSOL Multiphysics的材料库中平衡放电类中包含了空 气的相关数据,其中温度与电导率的关系可参考图2中的 橙色曲线。可见,温度范围为0~25000K。其中黄色虚线部 分为外插值所得的结果。

而利用气体放电等离子体数据库(GPLAS)的空气参数可导入和替换COMSOL Multiphysics原材料库的空气参数,其温度与电导率的关系如图2中蓝色曲线所示。可见,温度范围更大,为0~100000K。由于该数据来源于试验,仿



图2 等离子体数据库与平衡放电模块中空气电导率与 温度关系图

Fig.2 Plasma database and the relationship between air conductivity and temperature in a balanced discharge module

真结果更有说服力,同时弥补了平衡放电模块中25000K温度之后缺失的电导率数据。

2.2 仿真设置

在拉弧过程中,电极间距改变会引起电弧弧长与形态的变化,进而导致电弧随机性的不同。为保证不发生因电极间距过大而使电弧熄灭的情况,本文设置电极间距为0.4~51.2mm,梯度变化为一倍。此外,仿真时间会显著影响模型结果的收敛速度与收敛性。为避免不收敛的情况发生,本文选择步长为0.1ms,总仿真时长为100ms。

3 仿真结果与分析

电弧模型与外部电路耦合,即与270V飞机直流电压源和 100Ω电阻串联。通过计算电弧电势与电场、磁场、温度与电导 率等物理量分布,分析电弧产生与发展过程中的物理变化。

3.1 电场分布

不同电极间距下电弧电势与电场分布情况如图3和图

4所示。电弧电势在纵向(沿弧长方向)和横向(垂直于弧 长方向)上分布不均匀,且沿纵向逐渐减小。电弧电场在 纵向和横向上分布也不均匀。在接近两个电极的区域,电 场强度表现为正值,而在电弧的中间区域,电场强度则为 负值。此外,电弧中间区域的电场强度相较于电极附近区 域显著减弱。

图5表示电极间距与平均电场强度、最大电场强度的 关系。随着电极间距的增加,平均电场强度和最大电场强 度均先减小后增加,呈现出对勾函数的趋势。当拉弧位移 较小时,平均电场强度较小,而最大电场强度相对较大。随 着电极间距的增加,最大电场强度逐渐减小。

3.2 磁场分布

从图6中可见,在电极与电弧接触的区域,磁通密度最 大;磁通密度较强的区域位于电弧的边缘;电弧的中间区域 磁通密度最小;而整个电弧区域以外的磁通密度沿电弧的 纵向方向逐渐减小。



Fig.3 Potential distribution diagram

v方向距离/mm

y方向距离/mm



图 4 电初分和图 Fig.4 Electric field distribution





图7表示电极间距与平均磁通密度以及最大磁通密度 的关系。随着电极间距的增加,平均磁通密度和最大磁通 密度均先增大后减小。电极间距较小时,平均磁通密度和 最大磁通密度处于较大位置。

3.3 温度与电导率分布

温度的变化会影响空气电导率,因此将其一起进行讨 论。温度和空气电导率分布情况如图8和图9所示。电弧 温度和电导率的分布规律基本一致。在电极间距较低时, 电弧温度分布较为集中。随着电极间距的增大,电弧温度 开始向周围扩散。当间距达到一定长度时,电弧受到洛伦 兹力的作用而开始向某一方向偏移。

10

图 10 和图 11 展示了电极间距对平均温度、平均电导 率、最大温度以及最大电导率的影响。随着间距的增加,平 均温度和平均电导率呈线性增加趋势,而最大温度和最大 电导率则表现为先下降后增加,最终再次下降。这一现象 也说明电弧的电导率与温度是基本呈线性相关的状态。

3.4 流场分布

流场分布能够反映电弧的运动趋势与运动轨迹,利于 进一步分析电弧特征。流场分布情况如图12所示。随着 间距的增加,电弧弧长与速度均在增加。间距较小时,电弧 速度分布较为集中。随着间距的增加,电弧开始向周围扩 散。由于洛伦兹力的作用,电弧开始向某一方向发生偏移。 随着间距进一步增加,偏移量变化逐渐显著。

4 试验设置与验证

为了验证电弧磁流体动力学模型建立及计算的合理性 与准确性,本节搭建了直流串联电弧试验平台,利用电弧电 压与电流特性变化验证仿真与试验结果的吻合。











4.1 试验设置

直流串联电弧试验平台如图13所示。铜金属电极与 碳电极被分别安装在装置的固定端和移动端。步进电机参 数可程控调节,配合4mm导程滚珠丝杆可实现步进精度 0.01mm、电极间距0~100mm的灵活控制。 图 13 中对直流电源与负载、电极间距与移动速度的设 置均与仿真相同。利用电压、电流传感器检测电弧伏安特 性,其参数见表2。

4.2 试验验证

电弧伏安特性是电弧变化最直观的反映,在利用其验 证仿真计算准确性的同时,也避免了试验中对上述物理量 测量的困难。为更好地验证电弧模型,本文设计了两组不 同电压下的电弧试验,工况分别为270V、100Ω和540V、 100Ω,同时每组工况分别试验10次取平均值。电弧伏安特 性的仿真与试验结果如图14和图15所示。

可见,磁流体模型比较吻合地模拟出试验电弧在产生 和发展过程中电弧电压及电流的波形变化。为了定量地验 证仿真与试验中电弧电压与电流波形一致性,利用均方根 (RMS)衡量数据集合中数值大小。RMS能够很好地消去 数据中杂波带来的影响,计算公式为

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$
(14)



Fig.8 Temperature distribution

RMS计算结果见表3和表4。其中,Aytron、Steinmetz 与Nottingham模型均为传统直流串联电弧数学拟合模型, 其特点均为通过试验数据推导的经验模型,与参数有着密 切的关系。

可见,Aytron模型的仿真结果较差,而Steinmetz模型和 Nottingham模型的仿真结果相差不大。然而,上述三种模 型均为经验模型,其参数选择具有一定的局限性,而磁流体 模型从物理机理层面出发,不受限于参数的选择,其结果仅 取决于物理场的设置与材料属性,能够更准确地反映电弧 发生过程及物理特性。

5 结论

为了揭示连续拉弧过程中电弧的动态物理特性,本文 基于MHD理论建立了直流串联电弧动态模型,研究了弧距 对电弧多物理量分布的影响。为了验证模型计算的准确 性,搭建了电弧试验平台。通过研究,得出以下结论:

(1) 电弧磁流体模型中的电场强度、磁通密度、温度以

及电导率等均与弧距存在密切的相关性。随着弧距的增加,电场强度先减小后增大;而磁通密度与电场强度相反, 表现为先增大后减小;温度则与电导率的变化相一致,表现 为平均值随弧距呈线性增加,而最大值先增大后减小。上 述中的弧距拐点为10mm。

(2) 基于伏安特性曲线,试验结果验证了模型计算的 准确性,其中 RMS 误差显著低于传统数学拟合模型,在 270V 电源输出的情况下电压误差为0.837V,电流误差为 0.137A,在540V 电源输出的情况下电压误差为0.442V,电 流误差为0.253A,体现了电弧磁流体模型的特有优势。对 电弧磁流体模型的研究不仅有助于理解电弧故障的机理, 还可为电弧故障的检测和保护提供科学依据。

参考文献

[1] 张卓然, 许彦武, 姚一鸣, 等. 多电飞机电力系统及其关键技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 969-984.
 Zhang Zhuoran, Xu Yanwu, Yao Yiming, et al, Electric power











system and key technologies of more electric aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 969-984.(in Chinese)

[2] Jing Tao, Huang Deshun, Mi Zhe, et al. An intelligent recognition method of a short-gap arc in aviation cables based



Fig.11 Relationship between average and maximum conductivity and arc spacing

on feature weight enhancement[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(4): 3825-3836.

 [3] Chang Xiaoxue, Zhang Xu, Tao Yanbo, et al. Feature analyses and identification methods of low-voltage series arc fault [C].
 2022 IEEE International Conference on High Voltage



图 12 流场分布图 Fig.12 Flow field distribution



图 13 电弧发生装置图 Fig.13 Diagram of arc generator

表2 传感器多维主要检测参数

Table 2 Multi-dimensional sensor main detection parameters

设备	型号	带宽	探测范围
电压探头	SI-9010	700MHz	0~1000V
电流探头	TCP303	15MHz	0~150A(AC/DC)

Engineering and Applications (ICHVE), 2022: 1-4.

[4] 唐圣学,王彦丰,乔乃珍.光伏发电系统直流串联故障电弧检测方法研究[J].太阳能学报,2023,44(11):31-39.

Tang Shengxue, Wang Yanfeng, Qiao Naizhen. Research on





DC series fault arc detection method of photovoltaic power generation system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44 (11): 31-39.(in Chinese)

[5] Ayrton H M. The electric arc[M]. Cambridge: Cambridge



Fig.15 Results of current comparison between experimental and simulation results



Table 3 Comparison table between arc experiment and simulation results at 270V voltage

类型	电压/V	误差	电流/A	误差
试验结果	39.075	0	2.368	0
Aytron模型	58.510	-19.435	2.115	0.253
Steinmetz模型	50.040	-10.965	2.100	0.268
Nottingham模型	29.660	9.415	2.103	0.265
磁流体模型	39.912	0.837	2.231	0.137

表4 540V电压下电弧试验与仿真结果对比

Table 4 Comparison table between arc experiment and simulation results at 540V voltage

类型	电压/V	误差	电流/A	误差
试验结果	52.060	0	2.368	0
Aytron模型	60.120	8.062	2.100	0.268
Steinmetz模型	54.303	2.246	2.103	0.265
Nottingham模型	54.303	2.245	5.200	0.312
磁流体模型	51.620	0.442	2.115	0.253

University Press, 2023.

- Steinmetz C P. Transformation of electric power into light[J].
 Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1906, 25(11): 755-779.
- [7] Nottingham W B. A new equation for the static characteristic

of the normal electric arc[J]. Journal of the American Institute of Electrical Engineers, 1923, 42(1): 12-19.

- [8] Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Study of the free-burning highintensity argon arc[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(3): 1293-1301.
- [9] Chemartin L, Lalande P, Montreuil E, et al. Three dimensional simulation of a DC free burning arc. Application to lightning physics[J]. Atmospheric Research, 2009, 91(2-4): 371-380.
- [10] Lebouvier A, Delalondre C, Fresnet F, et al. Three-dimensional unsteady MHD modeling of a low-current high-voltage nontransferred DC plasma torch operating with air[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(9): 1889-1899.
- [11] Rau S H, Zhang Zhenyuan, Lee W J. 3D magnetohydrodynamic modeling of DC arc in power system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4549-4555.
- [12] 王晓刚.等离子物理基础[M].北京:北京法学出版社,2014.
 Wang Xiaogang. Fundamentals of plasma physics [M]. Beijing: Beijing Law Press, 2014.(in Chinese)
- [13] 蒋原, 武建文, 张茜, 等. 中频真空电器电弧放电过程的多物 理场耦合仿真[J]. 真空电子技术, 2023(5): 35-42.
 Jiang Yuan, Wu Jianwen, Zhang Qian, et al. Multi-physics field coupling simulation of arc discharge in intermediate frequency vacuum switching devices[J]. Vacuum Electronics, 2023(5):35-42.(in Chinese)
- [14] Rau S H, Lee W J. DC arc model based on 3-D DC arc simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 5255-5261.
- [15] Jia Bowen, Wu Jianwen, Li Shu, et al. Magneto-hydrodynamic simulation study of direct current multi-contact circuit breaker for equalizing breaking arc[J]. Plasma Science and Technology, 2023, 25(2): 025506.
- [16] 李兴文, 陈德桂. 空气开关电弧的磁流体动力学建模及特性 仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21):31-37.
 Li Xingwen, Chen Degui. Magnetohydrodynamics modeling and characteristics simulation of air switching arc[J].
 Proceeding of the CSEE, 2007, 27(21):31-37.(in Chinese)

Research on DC Series Arc MHD Model For Multi-Electric Aircraft

Xu Zhuoli¹, Lu Xinyang¹, Cui Dezhi¹, Shang Yahui², Jiang Jun¹, Zhang Chaohai¹ *1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, *Nanjing 211106*, *China*

2. AVIC Shaanxi Aviation Electric Co., Ltd., Xi' an 710065, China

Abstract: The study of DC series arc MHD model for multi-electric aircraft is of great significance for improving the ability of arc fault prediction and control, ensuring flight safety and promoting the development of electrified aviation technology. Aiming at the problem that the development characteristics and physical mechanism of DC series arc in multi-electric aircraft are still unclear. Based on the magnetohydrodynamics theory (MHD), this paper simulates the DC series arc caused by cable damage in multi-electric aircraft through continuous arc pulling, and constructs the dynamic arc model. By calculating the parameter distribution and change trend of electricity, magnetism, heat and flow physical fields, the influence of arc length change on arc physical characteristics is analyzed. By comparing and analyzing the experimental and simulation results of arc voltage and current, the accuracy of arc magnetic fluid model is verified. The simulation results show that the electric field intensity, magnetic flux density, arc temperature and conductivity are closely related to arc spacing. The experimental results show that the voltage and current root-mean-square (RMS) errors of the model are 0.837V and 0.137A for 270V power output, and 0.442V and 0.253A for 540V power output, which are better than the traditional mathematical fitting model. The research results can lay a theoretical foundation for the fault diagnosis of DC series arc under multi-electric aircraft.

Key Words: multi-electric aircraft; DC series arc; magnetohydrodynamic model; multi-physical field calculation; model verification

Received: 2024-09-08; Revised: 2024-12-16; Accepted: 2025-02-13

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52277152); Aeronautical Science Foundation of China (20230040052001); Jiangsu Province Large-Scale Scientific Research Instrumentation Open-Sharing Independent Research Topics (TC2024A006); Nanjing University of Aeronautics and Astronautics 2024 "Experimental Technology Research and Development" Project (SYJS202402Z); Graduate Education and Teaching Reform Research Project of NUAA(2024YJXGG14)