

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局



(10) 国际公布号

WO 2020/114080 A1

(43) 国际公布日
2020年6月11日 (11.06.2020)

- (51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/110579
- (22) 国际申请日: 2019年10月11日 (11.10.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811488125.8 2018年12月6日 (06.12.2018) CN
- (71) 申请人: 西安交通大学 (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国陕西省西安市咸宁西路28号, Shaanxi 710049 (CN)。
- (72) 发明人: 孙晋茹 (SUN, Jinru); 中国陕西省西安市咸宁西路28号, Shaanxi 710049 (CN)。 姚学玲

(YAO, Xuelling); 中国陕西省西安市咸宁西路28号, Shaanxi 710049 (CN)。 陈景亮 (CHEN, Jingliang); 中国陕西省西安市咸宁西路28号, Shaanxi 710049 (CN)。 许雯珺 (XU, Wenjun); 中国陕西省西安市咸宁西路28号, Shaanxi 710049 (CN)。

(74) 代理人: 西安众和至成知识产权代理事务所 (普通合伙) (XI'AN ZHONGHE ZHICHENG INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY (GENERAL PARTNERSHIP)); 中国陕西省西安市未央区未央路112号, Shaanxi 710016 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,

(54) Title: METHOD FOR ASSESSING LIGHTNING DAMAGE OF CARBON FIBER COMPOSITE MATERIAL CONSIDERING NONLINEAR IMPEDANCE CHARACTERISTICS

(54) 发明名称: 考虑非线性阻抗特征的碳纤维复合材料雷电损伤评估方法

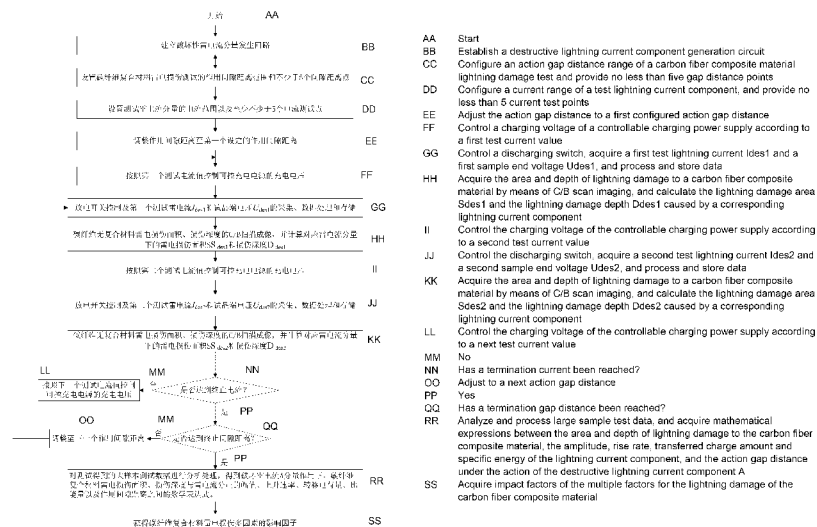


图4

(57) Abstract: Disclosed is a method for assessing lightning damage of a carbon fiber composite material considering nonlinear impedance characteristics. In the method, a variety of factors affecting lightning damage of a carbon fiber composite material caused by a single lightning current component are studied to acquire patterns between the area and depth of lightning damage to the carbon fiber composite material, the peak value, rise rate, transferred charge amount, and specific energy of the lightning current component, and

JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

the nonlinear impedance characteristics of the carbon fiber composite material. On this basis, the method establishes a multi-factor assessment model for the lightning damage caused by the single lightning current component, so as to acquire the area and depth of the lightning damage to the carbon fiber composite material, impact factors of the multiple factors, and mathematical expressions therebetween. The method examines the mechanism of lightning damage to carbon fiber composite materials, thereby providing a theoretical basis for research on the formulation and processing of carbon fiber composite laminates.

(57) 摘要: 本发明公开一种考虑非线性阻抗特征的碳纤维复合材料雷电损伤评估方法, 研究单一雷电流分量作用下, 碳纤维复合材料雷电损伤的各种影响因素, 获得碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度与雷电流分量的峰值、上升速率、转移电荷量、比能量以及碳纤维复合材料的非线性阻抗特性之间的规律, 在此基础上, 建立单一雷电流分量作用下雷电损伤的多因素评估模型, 获得碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度与多因素的影响因子及其之间的数学表达式, 探究碳纤维复合材料的雷电损伤机理, 为碳纤维复合材料层合板配方、工艺的研究提供理论依据。

考虑非线性阻抗特征的碳纤维复合材料雷电损伤评估方法

技术领域

本发明属于碳纤维复合材料雷电损伤的评估方法，特别涉及一种考虑非线性阻抗特征的碳纤维复合材料雷电损伤评估方法。

背景技术

碳纤维复合材料既具有低密度、高强度、高模量、耐高温、耐化学腐蚀等特性，又具有纺织纤维的柔软可加工性，广泛应用于航空航天、军事及民用工业等各个领域。随着飞机设计的改进和碳纤维复合材料技术的进步，碳纤维增强型聚合物复合材料 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) 在大型民用飞机、军用飞机、无人机及隐形飞机上的用量不断增长，从 1960 年麦道公司 DC-9 机型上 CFRP 的用量不足 1%，到 2011 年末波音 B787 的主翼、尾翼、机体、地板等结构的 50% 用的是 CFRP 材料，空客 A350XWA 上 CFRP 材料所占的比例达到 53%。

相比较飞机中传统使用的铝、钢和钛合金材料，CFRP 的电传导性能差。一般来讲，CFRP 层合板经向方向的电阻率为 $10^{-5} \Omega \cdot m$ 量级、横向平面方向的电阻率为 $10^{-1} \Omega \cdot m$ 量级、深度/厚度方向的电阻率更大。这就使得 CFRP 层合板在雷击情况下无法像金属材料那样具有短时间使积累的电荷迅速转移或扩散的能力，这部分积聚的能量以焦耳热的形式使得 CFRP 温度急剧升高，从而导致 CFRP 的纤维断裂、树脂热解、深度分层等严重损伤。

欧盟和美军标规定了航空器雷电直接的试验要求和雷电流分量，其中雷电分量包括分量 A（首次雷电回击分量）或 Ah（首次雷电回击的过渡分量）、B（中

间电流分量)、C/C* (持续电流分量) 和 D (后续回击分量) 电流波, 其中雷电流分量 A、Ah 和 D 波均为峰值高 (分别为 200kA、150kA、100kA)、上升速率快的雷电流分量; 雷电流分量 B 可以是平均电流 2kA、上升时间短、持续时间为几个毫秒的双指数波, 也可以是上升较为缓慢的方波电流; 雷电流分量 C 为上升时间缓慢、持续时间几百毫秒的电流波。

自 CFRP 问世以来, 诸多学者就将研究热点集中在其机械特性的研究方面, 得出了机械冲击参量与 CFRP 的抗拉伸强度、抗压缩强度及损伤区域和损伤深度之间的关系规律。目前而言, 关于碳纤维复合材料雷电损伤的研究获得了越来越广泛的关注, 许多研究者在实验手段缺乏的情况下, 通过建立单一雷电流分量作用下碳纤维复合材料雷电损伤的热电耦合模型, 通过仿真计算初步获得了碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度的影响规律。

但是, 碳纤维复合材料雷电损伤与雷电流分量的峰值、上升速率、电荷转移量、比能量以及碳纤维复合材料的阻抗特性的定量关系并未获得, 碳纤维复合材料雷电损伤的评估方法严重滞后, 大大阻碍碳纤维复合材料配方、工艺的研究和性能的提升, 因而制约了其在航空航天领域的应用。

发明内容

本发明的目的在于提供一种考虑非线性阻抗特征的碳纤维复合材料雷电损伤评估方法, 获得碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度与多种因素之间的规律, 为碳纤维复合材料层合板配方、工艺的研究提供理论依据。

为实现上述目的本发明采用如下方案:

考虑非线性阻抗特征的碳纤维复合材料雷电损伤评估方法, 将雷电流幅值、上升速率、电荷转移量、比能量以及作用间隙距离作为单一雷电流分量作用下

碳纤维复合材料雷电损伤的影响因素，并且考虑碳纤维复合材料的非线性特性，将碳纤维复合材料的非线性阻抗引入到雷电损伤评估模型中，用规定雷电流分量作用下的非线性阻抗对比能量进行调控，最终获得雷电流分量的各种影响因素与碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度的实验数据，在此基础上，建立碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度的多因素评估模型，获得碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度的多因素的影响因子，为碳纤维复合材料层合板配方、工艺的研究提供理论依据。

进一步，具体包括如下步骤：

1) 固定碳纤维复合材料雷电损伤测试的作用间隙距离，间隙距离在 1-10mm 之内选定，选定 3-5 个作用间隙距离点；

2) 设置破坏性雷电流分量作用的电流范围，在 100kA 或 200kA 范围内至少设置 5 个测试点；

3) 控制雷电流单一分量发生电路输出初始电流值 I_{des1} ，对被试碳纤维复合材料进行雷电损伤试验，测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{des1}) 及试品两端的电压 (U_{des1})，并采用 C/B 扫描成像得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积 S_{des11} 和损伤深度 D_{des11} ；

4) 控制雷电流单一分量发生电路输出第二个测试值 I_{des2} ，对被试碳纤维复合材料进行雷电损伤试验，测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{des2}) 及试品两端的电压 (U_{des2})，并采用 C/B 扫描成像得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积 S_{des12} 和损伤深度 D_{des12} ；

5) 判断破坏性雷电流测试值是否达到终止电流值？如果电流值未达到终止电流值，则控制雷电流单一分量发生电路输出下一个测试值，……，直至测试

电流达到终止电流值，测量和存储流经被试品的雷电流（ I_{des1n} ）及试品两端的电压（ U_{des1n} ），并采用 C/B 扫描成像得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积 S_{des1n} 和损伤深度 D_{des1n} ；

6) 调整被试碳纤维复合材料雷电流分量雷电损伤的作用间隙距离至第二个作用间隙距离 d_2 ；

7) 重复上述步骤 2) 至 5)，获得（ S_{des21}, D_{des21} ）、（ S_{des22}, D_{des22} ）、……、（ S_{des2n}, D_{des2n} ）直至（ S_{desm1}, D_{desm1} ）、（ S_{desm2}, D_{desm2} ）、……、（ S_{desmn}, D_{desmn} ）；

8) 对获得的碳纤维复合材料破坏性雷电损伤面积和雷电损伤深度（ S_{des11}, D_{des11} ）、（ S_{des12}, D_{des12} ）、……、（ S_{des1n}, D_{des1n} ）直至（ S_{desm1}, D_{desm1} ）、（ S_{desm2}, D_{desm2} ）、……、（ S_{desmn}, D_{desmn} ）大样本测试数据进行分析处理，建立碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度与雷电流单一分量的幅值、上升速率、电荷转移量、比能量等参数之间的雷电损伤评估模型，并求解碳纤维雷电损伤多因素的影响因子。

进一步，考虑雷电流分量作用下，碳纤维材料的非线性阻抗特性，将碳纤维复合材料的非线性阻抗引入到雷电损伤评估模型中，用规定雷电流分量作用下的非线性阻抗对比能量进行调控，则碳纤维复合材料的雷电损伤面积和损伤深度与雷电流单一分量参数的关系如公式（1）、（2）所示：

$$S_{des} = k_{1s} \times \frac{di}{dt} + k_{2s} \int i dt + k_{3s} \times Z_R \times \int i^2 dt \quad (1)$$

$$D_{des} = k_{1d} \times \frac{di}{dt} + k_{2d} \times \int i dt + k_{3d} \times Z_R \times \int i^2 dt \quad (2)$$

公式（1）、（2）中， k_{1s} 、 k_{2s} 、 k_{3s} 分别为雷电流分量的上升速率、电荷转移量、比能量对碳纤维复合材料雷电损伤面积的影响因子； k_{1d} 、 k_{2d} 、 k_{3d} 分别为

雷电流分量的上升速率、电荷转移量、比能量对碳纤维复合材料雷电损伤深度的影响因子； Z_R 为与雷电流分量的峰值相对应的动态阻抗。

本发明的考虑非线性阻抗特征的碳纤维复合材料雷电损伤评估方法，研究单一雷电流分量作用下，碳纤维复合材料雷电损伤的各种影响因素，获得碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度与雷电流分量的峰值、上升速率、转移电荷量、比能量以及碳纤维复合材料的非线性阻抗特性之间的规律，在此基础上，将碳纤维复合材料的非线性阻抗引入到雷电损伤评估模型中，用规定雷电流分量作用下的非线性阻抗对比能量进行调控，建立单一雷电流分量作用下雷电损伤的多因素评估模型，获得碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度与多因素的影响因子及其之间的数学表达式，探究碳纤维复合材料的雷电损伤机理，为碳纤维复合材料层合板配方、工艺的研究提供理论依据。

附图说明

图 1 是本发明雷电流分量测试回路

图 2 是本发明雷电流分量作用下碳纤维复合材料动态阻抗特性的测试流程图

图 3 是本发明被试品碳纤维复合材料的装夹示意图

图 4 是本发明破坏性雷电流分量作用下碳纤维复合材料的雷电损伤评估的测试流程。

图中：1 为可控直流充电电源；2 为储能电容单元；3 为放电开关；4 为波形调整电阻；11 为上电极棒；12 为上电极端头；13 为上绝缘端盖；14 为铜块；15 为弹簧；16 为第一螺栓；17 为第一螺母；18 为垫片；19 为绝缘支撑；110 为被试品绝缘底座；111 为第二螺栓；112 为被试品；113 为固定绝缘套；114

为第二螺母。

具体实施方式

下面结合附图及实施例对本发明的原理和计算方法作进一步详细说明。

参见图 1、本发明中雷电流分量测试回路包括可控直流充电电源 1 由调压器 T1、变压器 T2、整流二极管 D、充电电阻 R_2 组成；开关 S 与电阻 R_3 组成储能电容安全泄放回路；储能电容单元 2（电容量 C）、放电开关 3、波形调整电感 5（电感量 L）、波形调整电阻 4（电阻值 R）、组成雷电流 A 分量放电回路。

下面以雷电流 A 分量为例，来说明非线性雷电流 A 分量回路参数的调整方法，其他雷电流分量回路可以参照此过程进行回路参数的选择。

雷电流 A 分量的满足以下表达式为：

$$i(t)=I_0(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}), \text{ 其中: } \alpha=11354s^{-1}, \beta=647265s^{-1}$$

由此计算得到雷电流 A 分量的上升时间 T_1 和半峰值时间 T_2 分别为：

$$T_1=3.56\mu s \quad T_2=69\mu s$$

非线性雷电流 A 分量回路采用 RLC 电路产生，其回路参数选择按照如下步骤：

依据下面的公式（1）：

$$\begin{aligned} i_m^* &= i_m / \frac{U_0}{\sqrt{LC}} \\ T_1^* &= T_1 / \sqrt{LC} \\ \xi &= R / 2\sqrt{L/C} \end{aligned} \quad (1)$$

公式（1）中，C 为储能电容单元 2 电容量，L 为波形调整电感 4 电感量，R 为波形调整电阻 5 电阻值； U_0 为储能电容两端的充电电压， T_1 为雷电流分量的波前时间， i_m 为回路输出电流的峰值， ξ 为图 2 电路的阻尼系数； T_1^* 为波前时间

的归一化系数， i_m^* 为归一化的峰值系数。

公式（1）所说的 3 个方程中含有 4 个未知数，因此，方程（1）有无穷多组解。在假定储能电容容量的条件下，可以按照表 1 选择参数：

表 1：雷电流 A 分量回路参数的选择

序号	电容 C	电阻 R	电感 L
1	100	0.9	1.4
2	50	1.8	2.8
3	25	3.6	4.2
.....			

参见图 2，参照发明专利 ZL 2015104538855 的测量方法，获得碳纤维复合材料雷电流 A 分量作用下的准动态伏安特性曲线。对得到的碳纤维复合材料非破坏雷击作用下的伏安特性曲线进行数值拟合，获得雷电流 A 分量作用下碳纤维复合材料动态阻抗与雷电流波形参数之间的数学表达式。

碳纤维复合材料动态阻抗特性的测试流程为：

1) 按照表 1 所示的电路参数建立非破坏性雷电流分量发生回路，其电流幅值可以从几十 A、几百 A 至几千 A。

2) 预先设置碳纤维复合材料非破坏性动态阻抗特性的初始电流值 I_{nodes1} 、终止电流值 I_{nodesm} 以及测试电流数据点数 m 。

3) 控制雷电流分量发生电路输出初始电流值，测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{nodes1}) 及试品两端的电压 (U_{nodes1})。

4) 控制雷电流 A 分量发生电路输出第二个测试值，并测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{nodes2}) 及试品两端的电压 (U_{nodes2})。

5) 判断雷电流值是否达到终止电流值？如果电流值未达到终止电流值，则控制雷电流 A 分量发生电路输出下一个测试值，.....，直至测试电流达到终止

电流值, 测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{nodesm}) 及试品两端的电压 (U_{nodesm})。

6) 对获得的碳纤维复合材料非破坏性试验的电流和电压数据 (I_{nodes1} , U_{nodes1})、(I_{nodes2} , U_{nodes2})、(I_{nodesm} , U_{nodesm}), 进行分析处理, 得到碳纤维复合材料动态阻抗与雷电流波形参数之间的数学表达式。

参见图 3, 被试品碳纤维复合材料的装夹示意图。图中, 上电极棒 11 与雷电流 A 分量发生回路的高压输出端相连, 上电极端头 12、上绝缘端盖 13、铜块 14、弹簧 15 将被试品夹紧; 第二螺栓 111 用于将被试品绝缘底座 110 与绝缘支撑 19 固定在一起; 固定绝缘套 113 将上电极棒 11 与上绝缘盖板 13 固定在一起; 第二螺母 114 用于雷电流分量发生回路与被试品之间的电气连接。

参见图 4, 破坏性雷电流分量作用下碳纤维复合材料的雷电损伤的测试流程如下:

1) 固定碳纤维复合材料雷电损伤测试的作用间隙距离, 可以在 1-10mm 之内选定, 作用间隙距离至少选定 3-5 个作用间隙距离点, 比如 2mm (d_1)、4mm (d_2)、.....、10mm (d_m)。

2) 设置破坏性雷电流分量作用的电流范围, 在 100kA 或 200kA 范围内, 至少设置 5 个测试点, 可以是 20kA (I_{des11})、40 kA (I_{des12})、.....、100 kA (I_{des1n}) 或 20 kA (I_{des11})、50 kA (I_{des12})、.....、200 kA (I_{des1n})。

3) 控制雷电流单一分量发生电路输出初始电流值 I_{des1} , 对被试碳纤维复合材料进行雷电损伤试验, 测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{des1}) 及试品两端的电压 (U_{des1}), 并采用 C/B 扫描成像得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积 S_{des11} 和损伤深度 D_{des11} 。

4) 控制雷电流 A 分量发生电路输出第二个测试值 I_{des2} , 对被试碳纤维复合

材料进行雷电损伤试验，测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{des2}) 及试品两端的电压 (U_{des2})，并采用 C/B 扫描成像得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积 S_{des12} 和损伤深度 D_{des12} 。

5) 判断破坏性雷电流测试值是否达到终止电流值？如果电流值未达到终止电流值，则控制雷电流 A 分量发生电路输出下一个测试值，……，直至测试电流达到终止电流值，测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{des1n}) 及试品两端的电压 (U_{des1n})，并采用 C/B 扫描成像得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积 S_{des1n} 和损伤深度 D_{des1n} 。

6) 调整被试碳纤维复合材料雷电流 A 分量雷电损伤的作用间隙距离至第二个作用间隙距离 d_2 。

7) 重复上述步骤 2) 至 5)，就可以获得 (S_{des21}, D_{des21})、(S_{des22}, D_{des22})、……、(S_{des2n}, D_{des2n}) 直至 (S_{desm1}, D_{desm1})、(S_{desm2}, D_{desm2})、……、(S_{desmn}, D_{desmn})。

8) 对获得的碳纤维复合材料破坏性雷电损伤面积和雷电损伤深度 (S_{des11}, D_{des11})、(S_{des12}, D_{des12})、……、(S_{des1n}, D_{des1n}) 直至 (S_{desm1}, D_{desm1})、(S_{desm2}, D_{desm2})、……、(S_{desmn}, D_{desmn}) 大样本测试数据进行分析处理，建立碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度与雷电流 A 分量的幅值、上升速率、电荷转移量、比能量等参数之间的雷电损伤评估模型，并求解碳纤维雷电损伤多因素的影响因子。

(1) 碳纤维复合材料雷电损伤面积、深度与雷电流参数的关系

在作用间隙距离一定的情况下，碳纤维复合材料雷电损伤的影响因素包括：雷电流分量的峰值、上升速率、电荷转移量和比能量，但电流峰值与电荷转移量、比能量直接相关，如果再考虑雷电流分量作用下，碳纤维材料的非线性阻

抗特性，用规定雷电流分量作用下的非线性阻抗对比能量进行调控，则碳纤维复合材料的雷电损伤面积和损伤深度与雷电流 A 分量参数的关系如公式（1）、（2）所示：

$$S_{\text{des}} = k_{1s} \times \frac{di}{dt} + k_{2s} \int i dt + k_{3s} \times Z_R \times \int i^2 dt \quad (1)$$

$$D_{\text{des}} = k_{1d} \times \frac{di}{dt} + k_{2d} \times \int i dt + k_{3d} \times Z_R \times \int i^2 dt \quad (2)$$

公式（1）、（2）中， k_{1s} 、 k_{2s} 、 k_{3s} 分别为雷电流分量的上升速率、电荷转移量、比能量对碳纤维复合材料雷电损伤面积的影响因子； k_{1d} 、 k_{2d} 、 k_{3d} 分别为雷电流分量的上升速率、电荷转移量、比能量对碳纤维复合材料雷电损伤深度的影响因子； Z_R 为与雷电流分量的峰值相对应的动态阻抗。

（2）碳纤维复合材料雷电损伤面积、深度多因素的影响因子

从上述公式（1）和（2）可知，两个方程有 6 个未知数，因此，至少需要 4 个点的雷电损伤面积、损伤深度的测试数据；如果要验证碳纤维复合材料雷电损伤多因素影响因子的稳定性，测试数据点还应该继续增加，比如测试点不少于 5 个。

（3）如果要考虑作用间隙距离对碳纤维复合材料雷电损伤的影响作用，在上述公式（1）和（2）的基础上，还要加上作用间隙的影响因素，即上述公式（1）和（2）中两个方程有 7 个未知数，通过增加测试点的数量，用同样的计算方法，即可以计算出作用间隙距离的影响因子。

最后应该说明的是：以上实施例仅用于说明本发明的技术方案而非对其限制，尽管参照上述实施例对本发明进行了详细说明，所属领域的普通技术人员应当理解：依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换，而未脱

离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换，其均应涵盖在本权利要求范围当中。

1. 考虑非线性阻抗特征的碳纤维复合材料雷电损伤评估方法，其特征在于：将雷电流幅值、上升速率、电荷转移量、比能量以及作用间隙距离作为单一雷电流分量作用下碳纤维复合材料雷电损伤的影响因素，并且考虑碳纤维复合材料的非线性特性，用规定雷电流幅值下碳纤维复合材料的阻抗对比能量进行调控，最终获得雷电流分量的各种影响因素与碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度的实验数据，在此基础上，建立碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度的多因素评估模型，获得碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度的多因素的影响因子，为碳纤维复合材料层合板配方、工艺的研究提供理论依据。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于具体包括如下步骤：

1) 固定碳纤维复合材料雷电损伤测试的作用间隙距离，间隙距离在 1-10mm 之内选定，选定 3-5 个作用间隙距离点；

2) 设置破坏性雷电流分量作用的电流范围，在 100kA 或 200kA 范围内至少设置 5 个测试点；

3) 控制雷电流单一分量发生电路输出初始电流值 I_{des1} ，对被试碳纤维复合材料进行雷电损伤试验，测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{des1}) 及试品两端的电压 (U_{des1})，并采用 C/B 扫描成像得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积 S_{des11} 和损伤深度 D_{des11} ；

4) 控制雷电流单一分量发生电路输出第二个测试值 I_{des2} ，对被试碳纤维复合材料进行雷电损伤试验，测量和存储流经被试品的雷电流 (I_{des2}) 及试品两端的电压 (U_{des2})，并采用 C/B 扫描成像得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积 S_{des12} 和损伤深度 D_{des12} ；

5) 判断破坏性雷电流测试值是否达到终止电流值？如果电流值未达到终止

电流值，则控制雷电流单一分量发生电路输出下一个测试值，……，直至测试电流达到终止电流值，测量和存储流经被试品的雷电流（ I_{des1n} ）及试品两端的电压（ U_{des1n} ），并采用 C/B 扫描成像得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积 S_{des1n} 和损伤深度 D_{des1n} ；

6) 调整被试碳纤维复合材料雷电流分量雷电损伤的作用间隙距离至第二个作用间隙距离 d_2 ；

7) 重复上述步骤 2) 至 5)，获得（ S_{des21} ， D_{des21} ）、（ S_{des22} ， D_{des22} ）、……、（ S_{des2n} ， D_{des2n} ）直至（ S_{desm1} ， D_{desm1} ）、（ S_{desm2} ， D_{desm2} ）、……、（ S_{desmn} ， D_{desmn} ）；

8) 对获得的碳纤维复合材料破坏性雷电损伤面积和雷电损伤深度（ S_{des11} ， D_{des11} ）、（ S_{des12} ， D_{des12} ）、……、（ S_{des1n} ， D_{des1n} ）直至（ S_{desm1} ， D_{desm1} ）、（ S_{desm2} ， D_{desm2} ）、……、（ S_{desmn} ， D_{desmn} ）大样本测试数据进行分析处理，建立碳纤维复合材料雷电损伤面积、损伤深度与雷电流单一分量的幅值、上升速率、电荷转移量、比能量等参数之间的雷电损伤评估模型，并求解碳纤维雷电损伤多因素的影响因子。

3. 根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于：

考虑雷电流分量作用下碳纤维材料的非线性阻抗特性，将碳纤维复合材料的非线性阻抗引入到雷电损伤评估模型中，用规定雷电流分量作用下的非线性阻抗对比能量进行调控，得到碳纤维复合材料的雷电损伤面积和损伤深度与雷电流单一分量参数的关系如下面公式（1）、（2）所示：

$$S_{des} = k_{1s} \times \frac{di}{dt} + k_{2s} \int i dt + k_{3s} \times Z_R \times \int i^2 dt \quad (1)$$

$$D_{des} = k_{1d} \times \frac{di}{dt} + k_{2d} \times \int i dt + k_{3d} \times Z_R \times \int i^2 dt \quad (2)$$

公式（1）、（2）中， k_{1s} 、 k_{2s} 、 k_{3s} 分别为雷电流分量的上升速率、电荷转移量、比能量对碳纤维复合材料雷电损伤面积的影响因子； k_{1d} 、 k_{2d} 、 k_{3d} 分别为雷电流分量的上升速率、电荷转移量、比能量对碳纤维复合材料雷电损伤深度的影响因子； Z_R 为与雷电流分量的峰值相对应的动态阻抗。

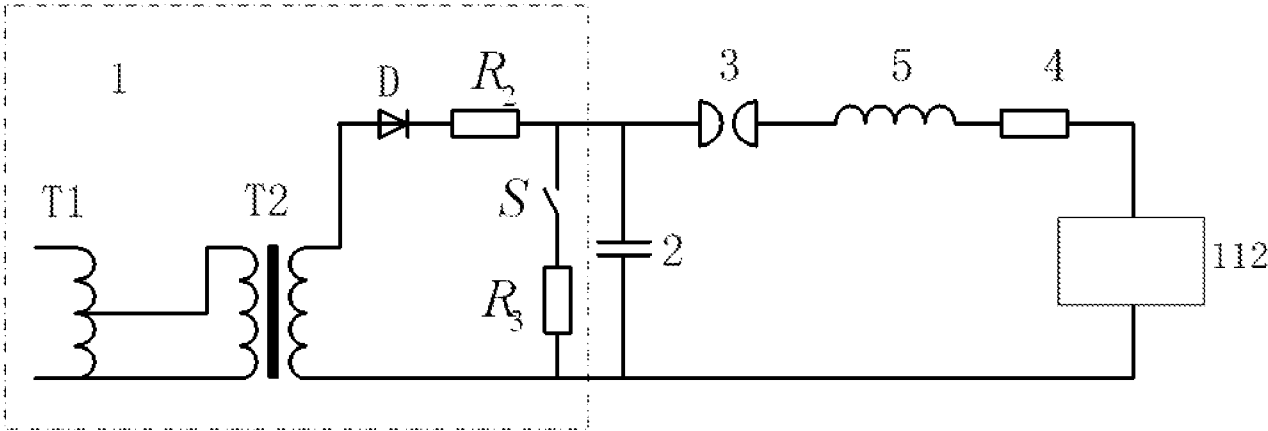


图 1

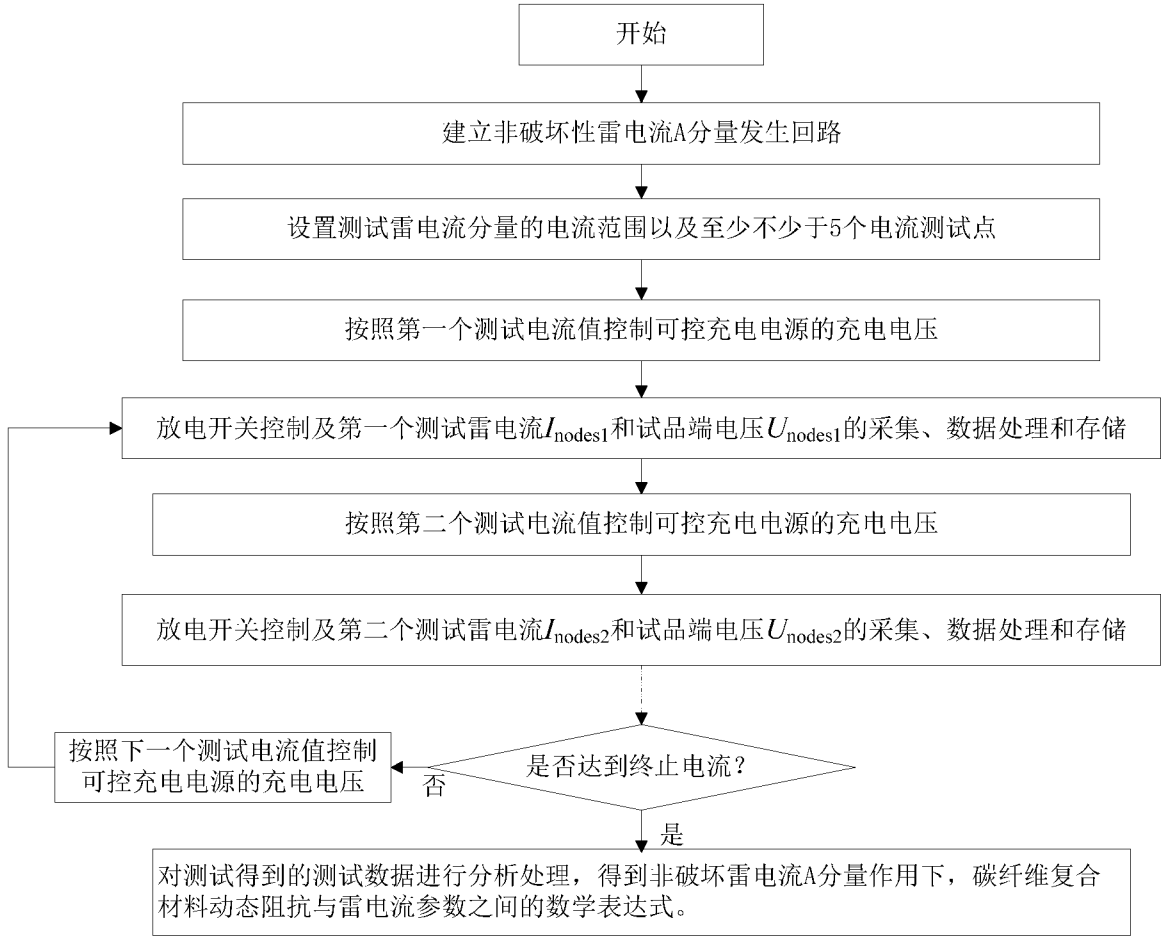


图 2

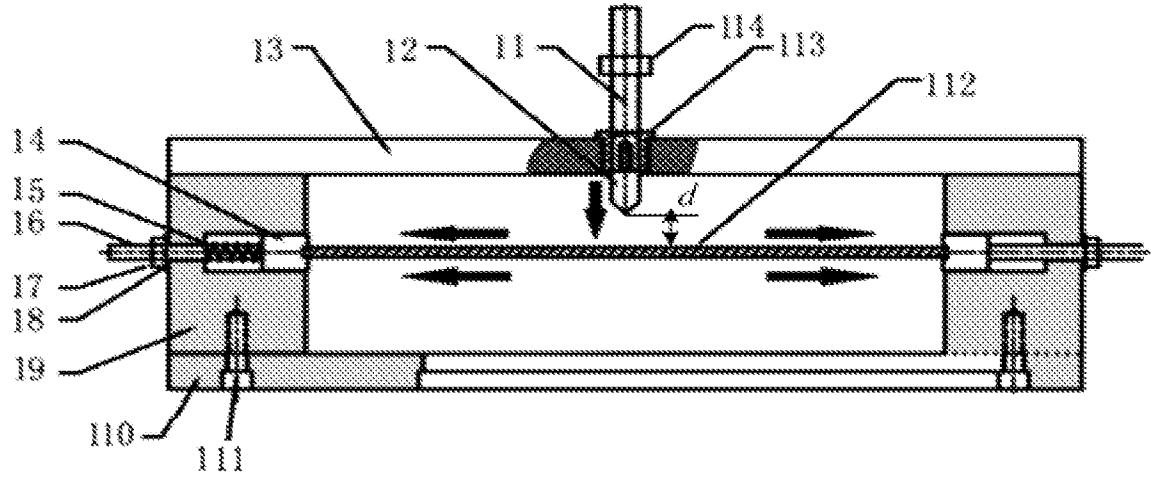


图 3

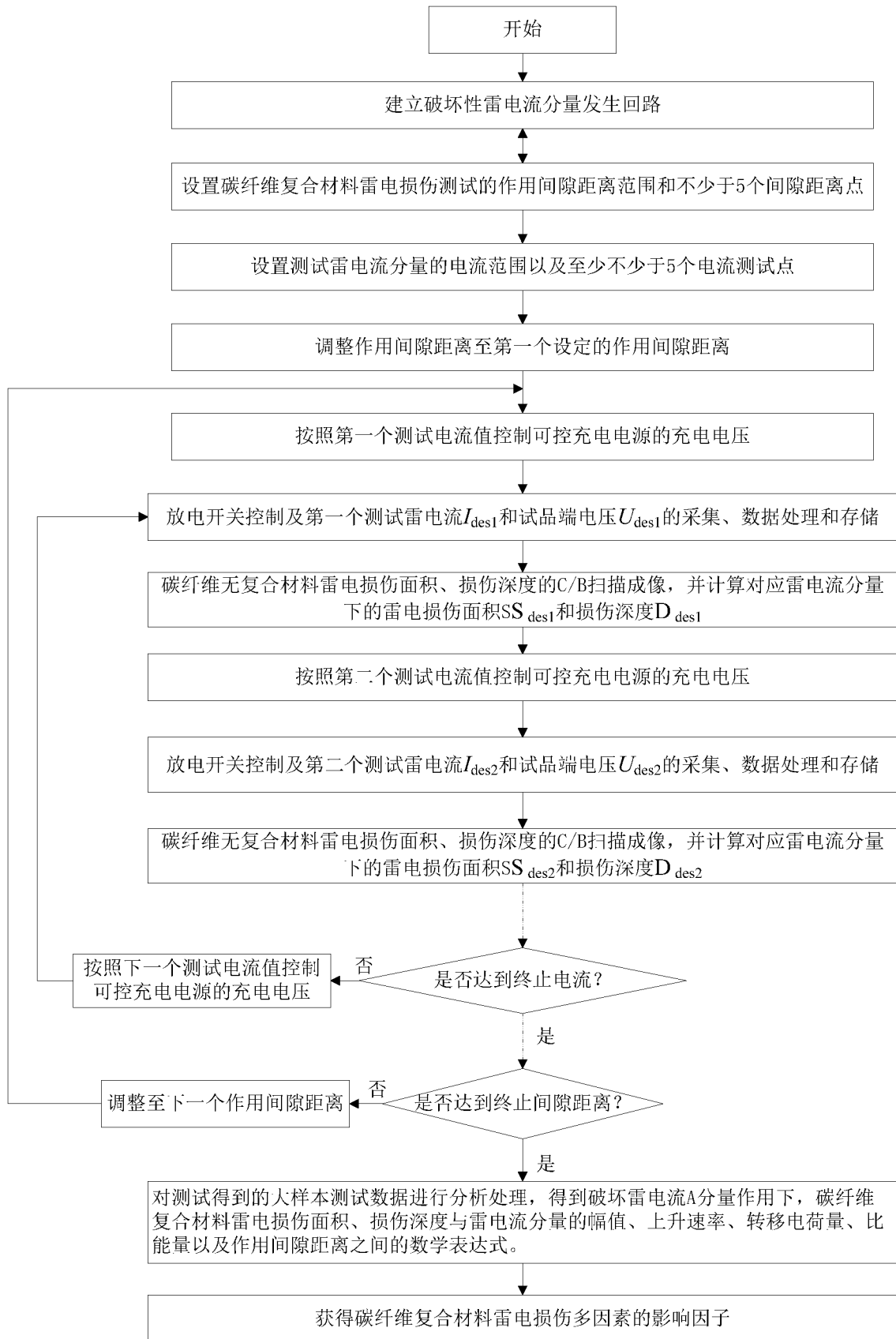


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/110579

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; VEN; USTXT; EPTXT; WOTXT; CNKI: 碳纤维复合材料, 雷电, 雷击, 非线性, 动态, 电阻, 阻抗, 模型, 损伤深度, 损伤面积, carbon fiber reinforced plastic, CFRP, carbon fiber composite, CFC, lightning, lightning strike, non-linear, dynamic, resistance, model, damage depth, damage area

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109598069 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 09 April 2019 (2019-04-09) entire document	1-3
A	姚学玲等 (YAO, Xueling et al.). "碳纤维复合材料在雷电流作用下的损伤仿真与试验 (Damage Simulation and Experiment of Carbon Fiber Composites Subjected to Lightning Current)" <i>高电压技术 (High Voltage Engineering)</i> , Vol. 43, No. 5, 31 May 2017 (2017-05-31), ISSN: 1003-6520, sections 1-3	1-3
A	司晓亮等 (SI, Xiaoliang et al.). "碳纤维复合材料雷电损伤预测 (Lightning Damage Prediction of Carbon Fiber Composite Materials)" <i>高电压技术 (High Voltage Engineering)</i> , Vol. 43, No. 5, 31 May 2017 (2017-05-31), ISSN: 1003-6520, sections 1-5	1-3
A	CN 103048381 A (SHANDONG UNIVERSITY) 17 April 2013 (2013-04-17) entire document	1-3
A	US 2016347918 A1 (THE BOEING COMPANY) 01 December 2016 (2016-12-01) entire document	1-3



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

04 December 2019

Date of mailing of the international search report

08 January 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/110579

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109598069	A	09 April 2019	None			
CN	103048381	A	17 April 2013	CN	103048381	B	24 June 2015
US	2016347918	A1	01 December 2016	BR	102016007335	A2	31 January 2017
				EP	3106291	A2	21 December 2016
				EP	3106291	A3	08 March 2017
				EP	3106291	B1	31 July 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/110579

A. 主题的分类 G06F 17/50 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNABS; CNTXT; VEN; USTXT; EPTXT; WOTXT; CNKI: 碳纤维复合材料, 雷电, 雷击, 非线性, 动态, 电阻, 阻抗, 模型, 损伤深度, 损伤面积, carbon fiber reinforced plastic, CFRP, carbon fiber composite, CFC, lightning, lightning strike, non-linear, dynamic, resistance, model, damage depth, damage area																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 109598069 A (西安交通大学) 2019年 4月 9日 (2019 - 04 - 09) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>姚学玲等. “碳纤维复合材料在雷电流作用下的损伤仿真与试验” 《高电压技术》, 第43卷, 第5期, 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31), ISSN: 1003-6520, 第1-3节</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>司晓亮等. “碳纤维复合材料雷电损伤预测” 《高电压技术》, 第43卷, 第5期, 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31), ISSN: 1003-6520, 第1-5节</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103048381 A (山东大学) 2013年 4月 17日 (2013 - 04 - 17) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2016347918 A1 (THE BOEING COMPANY) 2016年 12月 1日 (2016 - 12 - 01) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 109598069 A (西安交通大学) 2019年 4月 9日 (2019 - 04 - 09) 全文	1-3	A	姚学玲等. “碳纤维复合材料在雷电流作用下的损伤仿真与试验” 《高电压技术》, 第43卷, 第5期, 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31), ISSN: 1003-6520, 第1-3节	1-3	A	司晓亮等. “碳纤维复合材料雷电损伤预测” 《高电压技术》, 第43卷, 第5期, 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31), ISSN: 1003-6520, 第1-5节	1-3	A	CN 103048381 A (山东大学) 2013年 4月 17日 (2013 - 04 - 17) 全文	1-3	A	US 2016347918 A1 (THE BOEING COMPANY) 2016年 12月 1日 (2016 - 12 - 01) 全文	1-3
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
PX	CN 109598069 A (西安交通大学) 2019年 4月 9日 (2019 - 04 - 09) 全文	1-3																		
A	姚学玲等. “碳纤维复合材料在雷电流作用下的损伤仿真与试验” 《高电压技术》, 第43卷, 第5期, 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31), ISSN: 1003-6520, 第1-3节	1-3																		
A	司晓亮等. “碳纤维复合材料雷电损伤预测” 《高电压技术》, 第43卷, 第5期, 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31), ISSN: 1003-6520, 第1-5节	1-3																		
A	CN 103048381 A (山东大学) 2013年 4月 17日 (2013 - 04 - 17) 全文	1-3																		
A	US 2016347918 A1 (THE BOEING COMPANY) 2016年 12月 1日 (2016 - 12 - 01) 全文	1-3																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期 2019年 12月 4日		国际检索报告邮寄日期 2020年 1月 8日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		授权官员 马婷婷 电话号码 86-(20)-28958507																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/110579

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109598069	A	2019年 4月 9日	无	
CN	103048381	A	2013年 4月 17日	CN	103048381 B 2015年 6月 24日
US	2016347918	A1	2016年 12月 1日	BR	102016007335 A2 2017年 1月 31日
				EP	3106291 A2 2016年 12月 21日
				EP	3106291 A3 2017年 3月 8日
				EP	3106291 B1 2019年 7月 31日