

(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

(43) 国际公布日
2020 年 6 月 11 日 (11.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/114079 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/110571
- (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:
201811489482.6 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 号咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。 田向渝 (TIAN, XiangYu); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号咸宁西路 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,

(54) Title: METHOD FOR CALCULATING DAMAGE OF CARBON FIBER COMPOSITE MATERIAL UNDER ACTION OF SINGLE FAST-RISING LIGHTNING CURRENT COMPONENT

(54) 发明名称: 单一快上升雷电流分量作用下碳纤维复合材料损伤计算方法

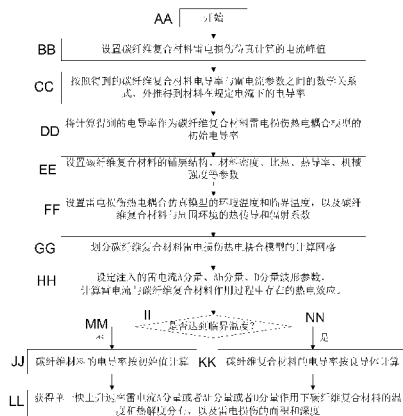


图 4

- AA Start
- BB Set a current peak value of the lightning damage simulation calculation of a carbon fiber composite material
- CC According to an obtained mathematical relationship between the conductivity of the carbon fiber composite material and a lightning current parameter, perform extrapolation to obtain the conductivity of the material under a specified current
- DD Take the calculated conductivity as an initial conductivity of a lightning damage thermoelectric coupling model of the carbon fiber composite material
- EE Set parameters, such as an overlay structure, a material density, a specific heat, a thermal conductivity and a mechanical strength, of the carbon fiber composite material
- FF Set an ambient temperature and a critical temperature of the lightning damage thermoelectric coupling model, and thermal conduction and radiation coefficients of the carbon fiber composite material and a surrounding environment
- GG Divide a calculation grid of the lightning damage thermoelectric coupling model of the carbon fiber composite material
- HH Set A component, Ah component and D component waveform parameters of an injected lightning current, and calculate a thermoelectric effect existing in the action process of the lightning current and the carbon fiber composite material
- II Is the critical temperature reached?
- JJ Calculate the conductivity of the carbon fiber composite material according to an initial value
- KK Calculate the conductivity of the carbon fiber composite material according to a good conductor
- LL Obtain the temperature and pyrolyzation degree distribution of the carbon fiber composite material under the action of an A component or an Ah component or a D component of a lightning current with a single fast-rising rate, and the area and depth of lightning damage
- MM No
- NN Yes

(57) Abstract: Disclosed is a method for calculating the damage of a carbon fiber composite material under the action of a single fast-rising lightning current component. A dynamic impedance curve of a carbon fiber composite material obtained under the action of a non-destructive lightning current is used to perform extrapolation to obtain the anisotropic conductivity of the carbon fiber composite material under specified single lightning current component parameters under a pre-designed lightning damage simulation condition,

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, 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))。

and the anisotropic conductivity is taken as an initial condition of the material conductivity in a thermoelectric coupling model of the carbon fiber composite material, so that a real lightning effect of the carbon fiber composite material can be better simulated, the lightning stroke damage of the carbon fiber composite material can be obtained more accurately, wherein the lightning stroke damage comprises a correlation between the area and depth of lightning damage and the lightning current component parameters, a lightning damage mechanism of the carbon fiber composite material is explored, and a theoretical foundation is laid for the formula and process research of the carbon fiber composite material and the performance improvement and engineering application thereof.

(57) 摘要: 本发明公开一种单一快上升雷电流分量作用下碳纤维复合材料损伤计算方法, 利用非破坏雷电流作用下得到的碳纤维复合材料的动态阻抗曲线, 外推得到预先设计的雷电损伤仿真条件下碳纤维复合材料在规定单一雷电流分量参数下的各向异性电导率, 作为碳纤维复合材料热电耦合模型中材料电导率的初始条件, 更好地模拟碳纤维复合材料的真实雷电效应, 更为准确地得到碳纤维复合材料的雷击损伤, 包括雷电损伤面积和损伤深度与雷电流分量参数之间的相关关系, 探究碳纤维复合材料与的雷电损伤机理, 为碳纤维复合材料配方、工艺的研究及其性能提升和工程应用奠定理论基础。

单一快上升雷电流分量作用下碳纤维复合材料损伤计算方法

技术领域

本发明属于碳纤维复合材料雷电损伤的仿真计算方法，具体涉及一种单一快上升雷电流分量作用下碳纤维复合材料损伤计算方法。

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 A 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, 此仿真模型一般是以温度的临界值或者阻抗随热解度变化的规律而建立的, 且热电耦合模型的初始条件均是静态 (直流) 小电流情况下碳纤维复合材料的电导率, 完全忽略了雷电流作用下碳纤维复合材料电导率与静态直流小电流的显著差异, 以及碳纤维复合材料雷电流作用下的非线性特征, 使得仿真计算的结果与实际雷击下的雷电损伤存在较大差异。发明专利 ZL 2015104538855 公开了“碳纤维复合材料非破坏性雷电流作用下阻抗特性测量方法及测量装置”, 相关文献的研究结果也表明: 碳纤维复合材料由于其结构、工艺特性, 在雷电流作用下其电导率呈现明显的非线性特性。

发明内容

本发明的目的在于提供一种单一快上升雷电流分量作用下碳纤维复合材料损伤计算方法, 准确地得到碳纤维复合材料的雷击损伤与雷电流分量参数之间

的关系，为碳纤维复合材料配方、工艺的研究及应用提供理论依据。

为实现上述目的本发明采用如下方案：

单一快上升雷电流分量作用下碳纤维复合材料损伤计算方法，包括如下步骤：

(1)、建立快上升速率的雷电流分量试验平台，测试获得碳纤维复合材料雷电流作用下的准动态伏安特性曲线；

(2)、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，获得碳纤维复合材料阻抗或电导率与波形参数之间的数学表达式；

(3)、按照预先设计的碳纤维复合材料雷电损伤仿真条件，将碳纤维复合材料的电导率按照步骤(2)获得的数学表达式进行外推，计算碳纤维复合材料在规定雷电流峰值的单一雷电流 A 分量、Ah 分量或 D 分量作用下的各向异性电导率，雷电流峰值的外推到 100kA 至 200kA，作为碳纤维复合材料快上升速率雷电流热电耦合模型中材料电导率的初始条件；

(4)、设置拟建模仿真的碳纤维复合材料层合板的铺层结构，材料的密度、比热、热导率及机械强度参数；

(5)、设置碳纤维复合材料雷电损伤的仿真模型边界条件，包括环境温度、临界温度，雷击作用过程中碳纤维复合材料与周围环境的热传导及辐射系数；

(6)、划分碳纤维复合材料热电耦合模型的仿真计算网格，设定注入的单一快上升雷电流分量参数，计算雷电流与碳纤维复合材料作用过程中存在的热电效应；

(7)、当碳纤维复合材料的温度升高到临界值之后，碳纤维复合材料内部树脂出现热解，随着材料热解度的增加，碳纤维复合材料的导电特性、导热特

性及机械性能均会发生巨大变化，其导电特性由原来的绝缘或高阻状态转变为良导体；

(8)、根据仿真计算得到的碳纤维复合材料在单一雷电流分量作用下的温度及热解度分布，对其雷电损伤面积和损伤深度进行分析。

进一步，雷电流分量试验平台包括雷电流分量发生电路，雷电流分量发生电路高压端与被测碳纤维试样上表面电气连接，雷电流分量发生电路低压端与被测碳纤维试样的下表面电气连接并接地；

还包括获取被测碳纤维试样上表面电压的脉冲电压取样单元和获取被测碳纤维试样下表面电流的雷电流取样单元，脉冲电压取样单元和雷电流取样单元与计算机测控分析单元相连。

进一步，所述雷电流分量发生电路由 RLC 电路或 CROWBAR 电路构成。

进一步，雷电流分量试验平台包括可控直流充电电源及并联在可控直流充电电源上的储能电容单元，可控直流充电电源和储能电容单元连接的高压端依次串联放电开关、波形调整电阻和波形调整电感，波形调整电感与被测碳纤维试样上表面电气连接，储能电容单元低压端与被测碳纤维试样的下表面电气连接并接地，通过控制储能电容单元、波形调整电阻和波形调整电感的参数获得快上升速率的雷电流分量。

进一步，雷电流分量试验平台电流峰值范围为几十 A 到几千 A。

本发明具有以下有益效果：

本发明单一雷电流作用下碳纤维复合材料雷电损伤的仿真计算方法，加入了碳纤维复合材料动态阻抗的边界条件，即利用非破坏雷电流作用下得到的碳纤维复合材料的动态阻抗曲线，外推得到预先设计的雷电损伤仿真条件下碳纤

维复合材料在规定单一雷电流分量参数下的各向异性电导率，作为碳纤维复合材料热电耦合模型中材料电导率的初始条件，更好地模拟碳纤维复合材料的真实雷电效应，更为准确地得到碳纤维复合材料的雷击损伤，包括雷电损伤面积和损伤深度与雷电流分量参数之间的相关关系，探究碳纤维复合材料与的雷电损伤机理，为碳纤维复合材料配方、工艺的研究及其性能提升和工程应用奠定理论基础。

附图说明

图 1 是本发明雷电流分量试验平台原理框图；

图 2a 是 RLC 电路原理图；图 2b 是 CROWBAR 原理图；

图 3 是本发明快上升速率非破坏雷电流分量作用下碳纤维复合材料动态电导率的测试流程图；

图 4 是本发明碳纤维复合材料在单一快上升速率雷电流分量作用下雷电损伤的仿真计算流程图。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步详细描述，但不作为对本发明的限定。

参见图 1，本发明的雷电流分量试验平台包括可控直流充电电源 1、储能电容单元 2、放电开关 3、波形调整电阻 4、波形调整电感 5，被测碳纤维试样 6、雷电流取样单元 7、脉冲电压取样单元 8 和计算机测控分析单元 9。

储能电容单元 2 并联在可控直流充电电源 1 上，可控直流充电电源 1 和储能电容单元 2 连接的高压端依次串联放电开关 3、波形调整电阻 4 和波形调整电感 5，可控直流充电电源 1、储能电容单元 2、放电开关 3、波形调整电阻 4 和

波形调整电感 5 构成雷电流分量发生电路，雷电流分量发生电路高压端与被测碳纤维试样 6 上表面电气连接，雷电流分量发生电路低压端与被测碳纤维试样 6 的下表面电气连接并接地，通过控制储能电容单元 2、波形调整电阻 4 和波形调整电感 5 的参数获得快上升速率的雷电流分量；

还包括获取被测碳纤维试样 6 上表面电压的脉冲电压取样单元 8 和获取被测碳纤维试样 6 下表面电流的雷电流取样单元 7，脉冲电压取样单元 8 和雷电流取样单元 7 与计算机测控分析单元 9 相连。

通过控制储能电容单元 2、波形调整电阻 4 和波形调整电感 5 的参数，可以获得快上升速率的雷电流 A 分量和 D 分量。以雷电流 A 分量为例，来说明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：

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

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：

$$T_1=3.56\mu\text{s} \quad T_2=69\mu\text{s}$$

参见图 2，雷电流 A 分量可以采用图 2a 所示的 RLC 电路或图 2b 所示的 CROWBAR 电路产生。

如果选用图 2a 所示的 RLC 电路产生快上升速率雷电流 A 分量波形，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, L 为波形调整电阻 4, R 为波形调整电感 5; 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 2a 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
.....			

图 2a 中, 可控直流充电电源由调压器 Tr、变压器 Tt、整流二极管 D、充电电阻 R_1 组成; 开关 S 与电阻 R_2 组成储能电容安全泄放回路。

本发明的陡上升速率雷电流分量也可以用图 2b 所示电路产生。图 2b 中的雷电流分量发生回路中, 包含储能电容 21, 主放电开关 31, CROWBAR 开关 32, 波形形成电感 51。

参见图 3, 按照表 1 参数和图 1 电路建立试验平台, 将被测碳纤维试样 6 串接在图 1 回路中, 被测碳纤维试样 6 的上表面与雷电流分量发生电路的高压端电气连接, 被测碳纤维试样 6 的下表面与雷电流分量发生电路的低压端电气连接。按照发明专利 ZL 2015104538855 的测量方法, 获得碳纤维复合材料雷电流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/Ah 分量或 D 分量作用下碳纤维复合材料阻抗或电导率与波形参数之间的数学表达式。

参见图 4，本发明的碳纤维复合材料雷电损伤的仿真计算方法如下：

1) 按照预先设计的碳纤维复合材料雷电损伤仿真条件，计算碳纤维复合材料在规定参数（电流峰值）的单一雷电流 A 分量（或 Ah 分量或 D 分量）作用下的各向异性电导率，作为碳纤维复合材料热电耦合模型中材料电导率的初始条件。

2) 根据实际情况设置碳纤维复合材料层合板的铺层结构，材料的密度、比热、热导率及机械强度等参数；

3) 设置碳纤维复合材料雷电损伤的仿真模型边界条件，包括环境温度，雷击作用过程中碳纤维复合材料与周围环境的热传导及辐射系数等。

4) 划分碳纤维复合材料热电耦合模型的仿真计算网格，设定注入的雷电流分量参数，仿真计算雷电流与碳纤维复合材料作用过程中存在的热电效应。

5) 当碳纤维复合材料的温度升高到临界值之后，碳纤维复合材料内部树脂出现热解。随着材料热解度的增加，碳纤维复合材料的导电特性、导热特性及机械性能均会发生巨大变化，其导电特性由原来的绝缘或高阻状态转变为良导体。

根据仿真计算得到的碳纤维复合材料在单一雷电流 A 分量（或 Ah 分量或 D 分量）作用下的温度及热解度分布，对其雷电损伤面积和损伤深度进行分析。

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. 单一快上升雷电流分量作用下碳纤维复合材料损伤计算方法，其特征在于包括如下步骤：

(1)、建立快上升速率的雷电流分量试验平台，测试获得碳纤维复合材料雷电流作用下的准动态伏安特性曲线；

(2)、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，获得碳纤维复合材料阻抗或电导率与波形参数之间的数学表达式；

(3)、按照预先设计的碳纤维复合材料雷电损伤仿真条件，将碳纤维复合材料的电导率按照步骤(2)获得的数学表达式进行外推，计算碳纤维复合材料在规定雷电流峰值的单一雷电流 A 分量、Ah 分量或 D 分量作用下的各向异性电导率，雷电流峰值外推到 100kA 至 200kA，作为碳纤维复合材料快上升速率雷电流热电耦合模型中材料电导率的初始条件；

(4)、设置拟建模仿真的碳纤维复合材料层合板的铺层结构，材料的密度、比热、热导率及机械强度参数；

(5)、设置碳纤维复合材料雷电损伤的仿真模型边界条件，包括环境温度、临界温度，雷击作用过程中碳纤维复合材料与周围环境的热传导及辐射系数；

(6)、划分碳纤维复合材料热电耦合模型的仿真计算网格，设定注入的单一快上升雷电流分量参数，计算雷电流与碳纤维复合材料作用过程中存在的热电效应；

(7)、当碳纤维复合材料的温度升高到临界值之后，碳纤维复合材料内部树脂出现热解，随着材料热解度的增加，碳纤维复合材料的导电特性、导热特性及机械性能均会发生巨大变化，其导电特性由原来的绝缘或高阻状态转变为良导体；

(8)、根据仿真计算得到的碳纤维复合材料在单一雷电流分量作用下的温度及热解度分布，对其雷电损伤面积和损伤深度进行分析。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：雷电流分量试验平台包括雷电流分量发生电路，雷电流分量发生电路高压端与被测碳纤维试样（6）上表面电气连接，雷电流分量发生电路低压端与被测碳纤维试样（6）的下表面电气连接并接地；

还包括获取被测碳纤维试样（6）上表面电压的脉冲电压取样单元（8）和获取被测碳纤维试样（6）下表面电流的雷电流取样单元（7），脉冲电压取样单元（8）和雷电流取样单元（7）与计算机测控分析单元（9）相连。

3. 根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于：所述雷电流分量发生电路由 RLC 电路或 CROWBAR 电路构成。

4. 根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于：雷电流分量试验平台包括可控直流充电电源（1）及并联在可控直流充电电源（1）上的储能电容单元（2），可控直流充电电源（1）和储能电容单元（2）连接的高压端依次串联放电开关（3）、波形调整电阻（4）和波形调整电感（5），波形调整电感（5）与被测碳纤维试样（6）上表面电气连接，储能电容单元（2）低压端与被测碳纤维试样（6）的下表面电气连接并接地，通过控制储能电容单元（2）、波形调整电阻（4）和波形调整电感（5）的参数获得快上升速率的雷电流分量。

5. 根据权利要求 1-4 任一项所述的方法，其特征在于：雷电流分量试验平台电流峰值范围为几十 A 到几千 A。

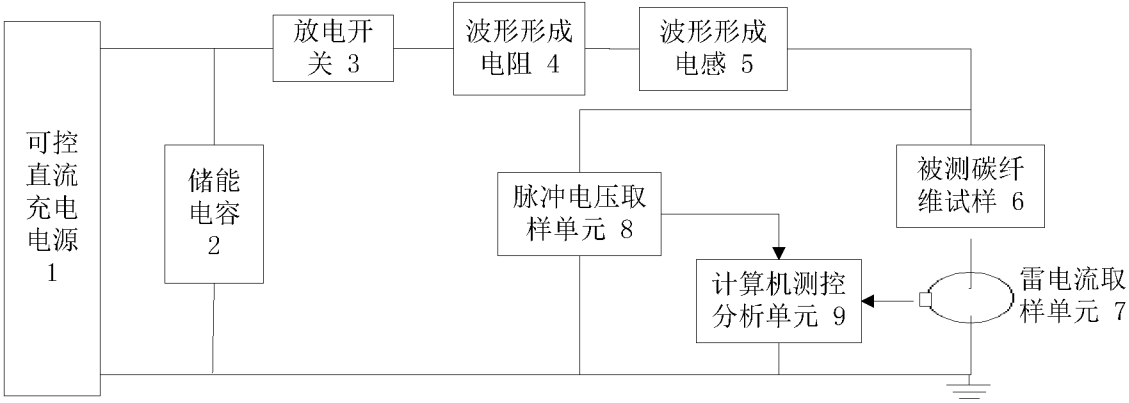


图 1

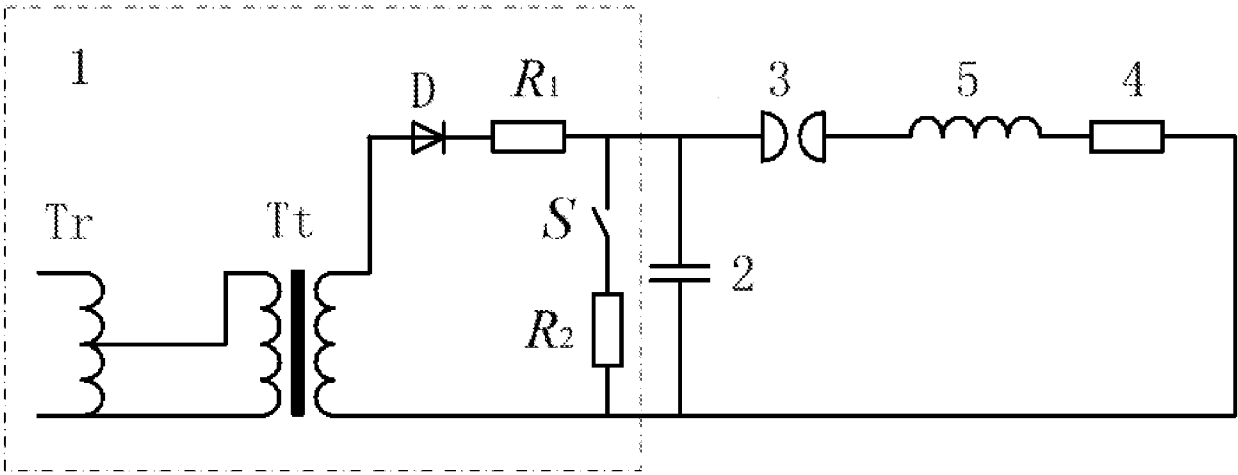


图 2a

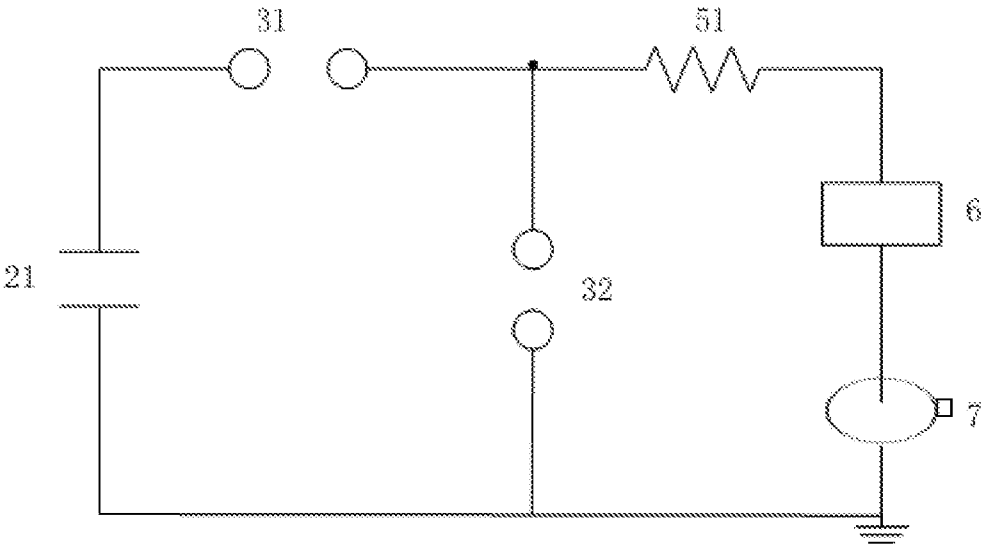


图 2 b

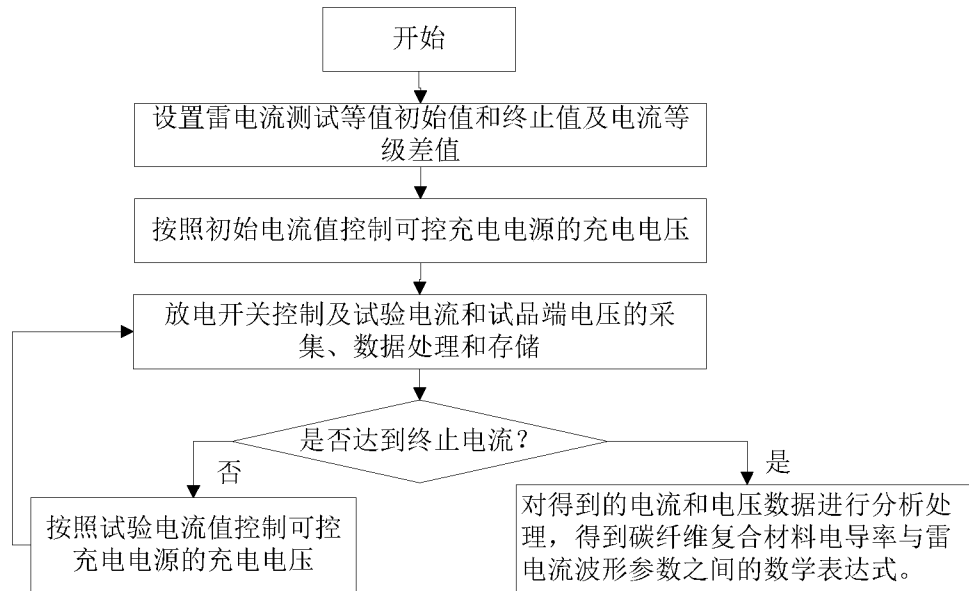


图 3

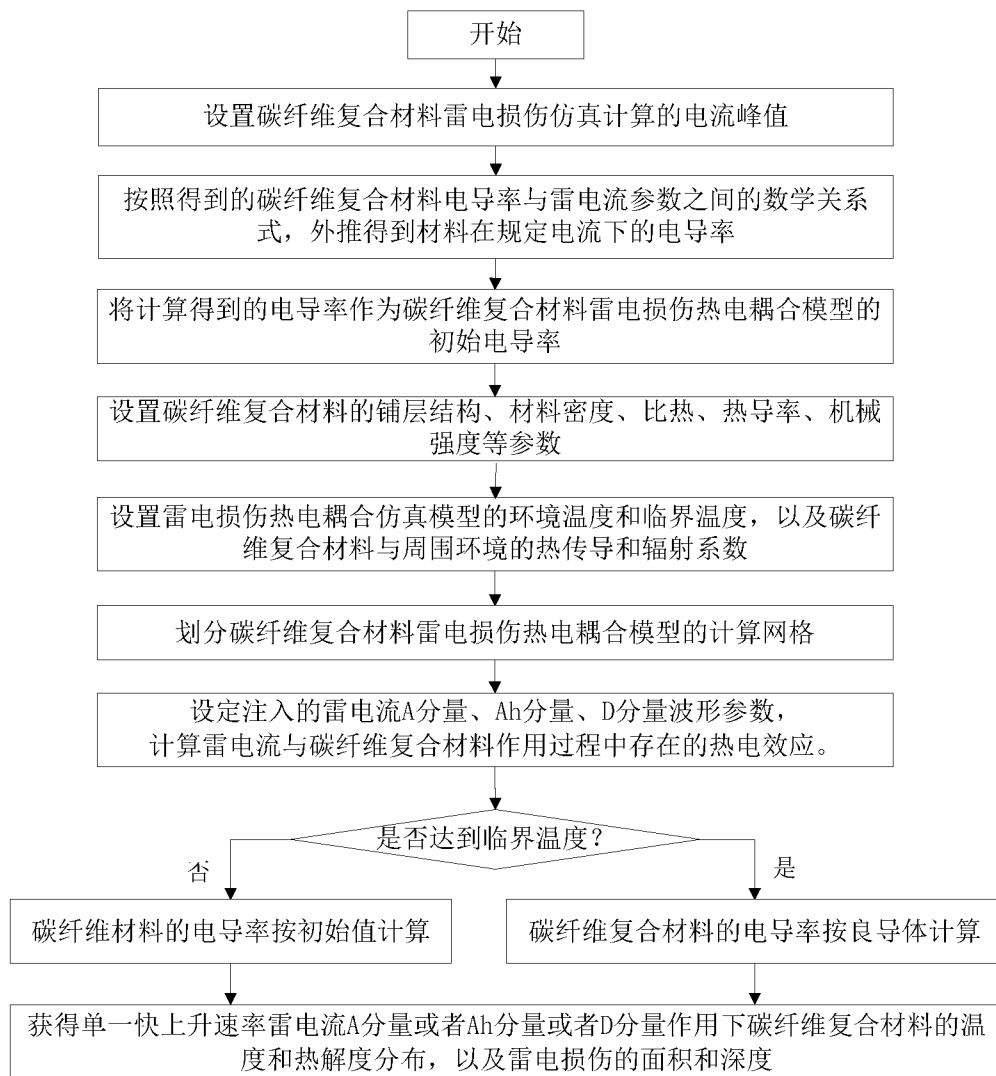


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/110571

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; G01R

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)

CPEA; CNMED; PLABS; AUABS; DWPI; TWABS; FRABS; TWMED; HKABS; CNABS; SGABS; LEXIS; MOABS; ILABS; SIPOABS: thunder, damage, emulat+, coupling, carbon fiber, simulation, G06F+, CFRP, lightning, 耦合, 碳纤维, 损伤+损耗+损坏, 仿真, 雷击+雷电+雷

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109783849 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 21 May 2019 (2019-05-21) claims 1-5	1-5
PX	CN 109783848 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 21 May 2019 (2019-05-21) description, paragraphs [0029]-[0049], and figures 1-4	1-5
PX	CN 109738489 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 10 May 2019 (2019-05-10) description, paragraphs [0033]-[0061], and figures 1-5	1-5
A	CN 105158572 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY et al.) 16 December 2015 (2015-12-16) entire description	1-5
A	CN 106503377 A (SHANGHAI SHENTIAN INDUSTRY CO., LTD. et al.) 15 March 2017 (2017-03-15) entire description	1-5



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

31 December 2019

Date of mailing of the international search report

14 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/CN2019/110571

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109783849	A	21 May 2019	None			
CN	109783848	A	21 May 2019	None			
CN	109738489	A	10 May 2019	None			
CN	105158572	A	16 December 2015	CN	105158572	B	27 February 2018
CN	106503377	A	15 March 2017	CN	106503377	B	19 July 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/110571

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; G01R 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)) CPEA; CNMED; PLABS; AUABS; DWPI; TWABS; FRABS; TWMED; HKABS; CNABS; SGABS; LEXIS; MOABS; ILABS; SIPOABS: thunder, damage, emulat+, coupling, carbon fiber, simulation, G06F+, CFRP, lightning, 耦合, 碳纤维, 损伤+损坏+损坏, 仿真, 雷击+雷电+雷																				
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 109783849 A (西安交通大学) 2019年 5月 21日 (2019 - 05 - 21) 权利要求1-5</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 109783848 A (西安交通大学) 2019年 5月 21日 (2019 - 05 - 21) 说明书第【0029】段至第【0049】段, 图1-4</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 109738489 A (西安交通大学) 2019年 5月 10日 (2019 - 05 - 10) 说明书第【0033】段至第【0061】段, 图1-5</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 105158572 A (西安交通大学等) 2015年 12月 16日 (2015 - 12 - 16) 说明书全文</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106503377 A (上海神添实业有限公司等) 2017年 3月 15日 (2017 - 03 - 15) 说明书全文</td> <td>1-5</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 109783849 A (西安交通大学) 2019年 5月 21日 (2019 - 05 - 21) 权利要求1-5	1-5	PX	CN 109783848 A (西安交通大学) 2019年 5月 21日 (2019 - 05 - 21) 说明书第【0029】段至第【0049】段, 图1-4	1-5	PX	CN 109738489 A (西安交通大学) 2019年 5月 10日 (2019 - 05 - 10) 说明书第【0033】段至第【0061】段, 图1-5	1-5	A	CN 105158572 A (西安交通大学等) 2015年 12月 16日 (2015 - 12 - 16) 说明书全文	1-5	A	CN 106503377 A (上海神添实业有限公司等) 2017年 3月 15日 (2017 - 03 - 15) 说明书全文	1-5
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
PX	CN 109783849 A (西安交通大学) 2019年 5月 21日 (2019 - 05 - 21) 权利要求1-5	1-5																		
PX	CN 109783848 A (西安交通大学) 2019年 5月 21日 (2019 - 05 - 21) 说明书第【0029】段至第【0049】段, 图1-4	1-5																		
PX	CN 109738489 A (西安交通大学) 2019年 5月 10日 (2019 - 05 - 10) 说明书第【0033】段至第【0061】段, 图1-5	1-5																		
A	CN 105158572 A (西安交通大学等) 2015年 12月 16日 (2015 - 12 - 16) 说明书全文	1-5																		
A	CN 106503377 A (上海神添实业有限公司等) 2017年 3月 15日 (2017 - 03 - 15) 说明书全文	1-5																		
☐ 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 31日		国际检索报告邮寄日期 2020年 1月 14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		受权官员 黄渊 电话号码 86-010-62411769																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/110571

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	109783849	A	2019年 5月 21日	无	
CN	109783848	A	2019年 5月 21日	无	
CN	109738489	A	2019年 5月 10日	无	
CN	105158572	A	2015年 12月 16日	CN 105158572	B 2018年 2月 27日
CN	106503377	A	2017年 3月 15日	CN 106503377	B 2019年 7月 19日