

基于 FDTD 的雷电脉冲对飞机介质舱体内干扰作用的研究

代 健 苏东林 赵小莹

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘 要: 该文提出一种利用时域有限差分计算雷电脉冲对飞机碳纤维介质舱体内的干扰作用的分析方法。将雷电通道等效为垂直于无限大导体地面的线天线,利用天线场区划分的概念将雷电电磁场划分为近区场和远区场。在远场情况下,通过在舱体侧设置平面波源来分析雷电脉冲对舱内的干扰;在近场情况下,通过在舱体一侧设置延伸至完全匹配层(PML),并与 PML 外金属边界相接的线电流来模拟一段雷电通道,有效避免了传统设置线电流时的静电积累效应,并分析近距离雷电对舱体的干扰。计算结果与解析结果吻合较好。分析解决了雷电脉冲的近场和远场情况下飞机碳纤维舱体内的电场分布及变化情况,为飞机介质舱体的电磁加固提供依据。

关键词: 雷电脉冲; 时域有限差分; 飞机舱体; 线电流; 平面波

中图分类号: TM154.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)09-2093-06

A Research of Lightning Pulse Interference with the Medium Cabin in Airplane Based on FDTD

Dai Jian Su Dong-lin Zhao Xiao-ying

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A method of analyzing the lightning pulse interference into the carbon fiber cabin in airplane is developed based on FDTD. The lightning channel is equivalent to be a linear antenna which is vertical on the conductor ground. Therefore the conception of antenna field partition is used to compartmentalize the lightning field. A plane-wave source can be set up beside cabin with FDTD to analyze far-field effect of lightning field. In near field region a segment of filamentary current which is extended into the Perfectly Matched Layer (PML) reaching the Perfectly Electric Conductor (PEC) boundary outside the PML is set up beside cabin to simulate a part of lightning channel using FDTD. This method avoids the charge effect at the two end-points of the linear current. The FDTD results are accurate compared with analytic results. And then the electric field in the cabin of airplane is calculated in near and far field region using this method, providing the warranty for electromagnetic compatibility design of the carbon fiber cabin.

Key words: Lightning pulse; Finite-Difference Time-Domain (FDTD); Cabin of airplane; Filamentary current; Plane-wave

1 引言

随着飞机逐渐向轻型化发展,飞机的部分外壳采用碳纤维等复合材料。但碳纤维材料的电磁屏蔽效能不如金属,这使机体内的精密电子设备更容易受到外部电磁环境的影响,所以飞机飞行过程中的电磁环境安全性分析已经成为重要的研究课题。而雷电作为一种常见的自然现象,在放电过程中会产生上升时间极快,持续时间极短的初始大电流脉冲。因此雷电在放电过程中会产生很强的瞬态电磁场,这种峰值极高的电磁场和电流脉冲会对处于飞行中的飞机电子设备造成极大危害。目前关于雷电的直

接效应和间接效应的一些研究分析有雷电的空间电磁辐射特性研究^[1,2],雷电对输电线的影^[3,4],雷电的回击电流对建筑物的影响^[5,6],利用数值算法研究雷电电磁场的传播^[1,7,8]。

由于雷击脉冲辐射场的宽谱特性,所以可以利用时域有限差分(FDTD)算法对雷电磁场进行分析研究。利用 FDTD 计算雷击电磁场从而研究该场对飞机设备的影响可分成近感应场和远辐射场。本文分析远场辐射时将雷击产生的瞬态电磁场在远场情况下等效为平面波,在 FDTD 中通过设置平面波源来分析雷电辐射场对飞机的影响及碳纤维飞机舱体内电场的变化情况;分析近感应场通常在空间中设置下端接无限大导体地面的直线电流源来近似模拟

雷电流通道。但本文要研究的问题是飞机某一部分的介质舱体受到雷电磁场的干扰作用，模拟的空间尺度较小。因此可以采用一定长度的线电流段来近似模拟近距离的雷电通道。但由于雷电脉冲的低频直流分量很强，如果单纯在飞机附近设置一线电流段来模拟雷电通道的近场干扰，而不构成闭合回路，这会在 FDTD 线电流网格两端处聚集静电荷^[9]，从而辐射出静电场。因此，本文采用将线电流延长到完全匹配层(PML)吸收边界内，并与 PML 最外层金属边界相接，从而构成一回路，消除了充电效应。仿真和理论计算分析表明，该方法可以有效地模拟雷电通道的近距离的柱状感应场，进而分析近距离雷电放电对飞机的干扰作用及碳纤维介质舱体内的电场分布及随时间的变化情况。

2 标准雷电流脉冲形式及辐射场

目前，雷电流脉冲的波形主要采用双指数脉冲 $I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ ，其中 α, β 是两个时间因子。在严酷雷击的情况下， I_0 可以达到 200 kA 以上，本文设置 $I_0 = 218 \text{ kA}$ ， $\alpha = 11354 \text{ s}^{-1}$ ， $\beta = 647265 \text{ s}^{-1[10]}$ 。如图 1 此雷电流产生的辐射场可以等效成一垂直于无限大导体地面的线天线^[6]，计算该线电流产生的电磁场可以等效为首尾相接的小电流元延垂直方向的积分产生的电磁场。

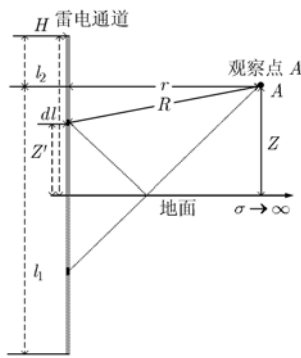


图 1 雷电通道垂直于地面情况下的高空电磁场

小电流元产生的电磁场的计算公式为

$$dE_z = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \int_{R/c}^t i(z', \tau - R/c) d\tau + \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^4} i(z', t - R/c) - \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} \quad (1)$$

$$dH_\phi = \frac{dz'}{4\pi} \left[\frac{r}{R^3} i(z', t - R/c) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} \right] \quad (2)$$

如图1，在高空处某点的电磁场计算公式可以将式(1)，式(2)中的电流元沿雷电通道进行积分。此雷电通道在高空产生的电磁场不仅与雷电流的强度有关，还与雷电通道的长度及观察点的位置有关，分析起来较为复杂。但将天线场区划分的概念用于雷电磁场的分析，可将分析难度简化。

3 雷电的场区划分

雷电对飞机设备的影响主要是雷电流产生的瞬态强电磁场的干扰。对于雷电磁场的干扰影响可以分为远辐射场干扰和近感应场干扰。将雷电流通道等效为线天线后，其场区的划分可依据天线的场区划分规则，如表 1。

表 1 雷电辐射场区划分^[11]

| 区域 | 离天线的水平距离 r |
|------|--|
| 感应近场 | $0 \sim 0.62\sqrt{H^3/\lambda}$ |
| 辐射近场 | $0.62\sqrt{H^3/\lambda} \sim 2H^2/\lambda$ |
| 远场 | $2H^2/\lambda \sim \infty$ |

表中 H 表示天线的最大尺度，即雷电通道的长度，在远场区，射线都是平行的，即以平面波的形式向外辐射。在辐射近场区，其中的辐射场起主导作用，而且角向场分布依赖于离天线的距离。在感应近场区，当 $H \gg \lambda$ 时，该区延伸到 $0.62\sqrt{H^3/\lambda}$ ；当 $H \ll \lambda$ 时，该距离为 $\lambda/2\pi$ 。从式(1)，式(2)中可以看出，雷电的近场感应电场和磁场， $i(t)$ 产生的分量起主导作用；在辐射近场区， $i(t)$ ， $\partial i(t)/\partial t$ 产生的电场磁场分量都需考虑；远场辐射可以认为只包含 $\partial i(t)/\partial t$ 产生的分量。

3.1 雷电远场干扰

当雷电通道距离观察点的水平距离 $r \geq 2H^2/\lambda$ 时，飞机处于雷电的远场区。根据式(1)，式(2)可以看出，当距离雷电通道较远时，电场垂直分量 E_z ，磁场 H_ϕ 分量在远场情况下可以只考虑最后一项，即远场情况。在远场情况下， $r \approx R$ ，所以将式(1)，式(2)沿雷电通道方向积分并简化为

$$E_z^{\text{far}}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\eta_0}{4\pi cr} \int_0^{2H} \frac{\partial i(z, t - R/c)}{\partial t} dz' \quad (3)$$

$$H_\phi^{\text{far}}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi cr} \int_0^{2H} \frac{\partial i(z, t - R/c)}{\partial t} dz \quad (4)$$

当 $H \ll r$ 时，可省略延时 $t - R/c$ ，即可近似将平面波简化为

$$E_z^{\text{far}}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\eta_0}{2\pi cr} \frac{H}{\partial t} \frac{\partial i(t)}{\partial t} \quad (5)$$

$$H_\phi^{\text{far}}(\mathbf{r}, t) = \frac{H}{2\pi cr} \frac{\partial i(t)}{\partial t} \quad (6)$$

3.2 雷电近场干扰

分析近场干扰时,可以在需要分析的设备或舱体附近设置一段线电流来模拟雷电脉冲电流通道,此时模拟雷电距离飞机很近的情况下的强电磁干扰。通过式(1),式(2)可以看出,近场中感应场主要贡献集中在 $i(t)$ 分量上。根据式(1),式(2),一段长度为 $2L$ 的雷电通道,在 (r, l_1) 观察点下产生的电磁场可以用如下公式近似计算。

$$E_z(r, t) \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{l_1} \frac{2l^2 - r^2}{c(l^2 + r^2)^2} \cdot I_0 \left(e^{-\alpha(t-\sqrt{l^2+r^2}/c)} - e^{-\beta(t-\sqrt{l^2+r^2}/c)} \right) dl + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{2L-l_1} \frac{2l^2 - r^2}{c(l^2 + r^2)^2} \cdot I_0 \left(e^{-\alpha(t-\sqrt{l^2+r^2}/c)} - e^{-\beta(t-\sqrt{l^2+r^2}/c)} \right) dl \quad (7)$$

$$H_\phi(r, t) \approx \frac{1}{4\pi} \int_0^{l_1} \frac{r}{(l^2 + r^2)^{3/2}} \cdot I_0 \left(e^{-\alpha(t-\sqrt{l^2+r^2}/c)} - e^{-\beta(t-\sqrt{l^2+r^2}/c)} \right) dl + \frac{1}{4\pi} \int_0^{2L-l_1} \frac{r}{(l^2 + r^2)^{3/2}} \cdot I_0 \left(e^{-\alpha(t-\sqrt{l^2+r^2}/c)} - e^{-\beta(t-\sqrt{l^2+r^2}/c)} \right) dl \quad (8)$$

4 基于 FDTD 的雷电脉冲激励源设置

4.1 远场情况下的平面波激励源设置

雷电辐射的远场情况可以通过在 FDTD 中设置平面波激励源来分析远场辐射对飞机部分设备的影响。随时间的步进,雷电产生的强电磁场以平面波的形式逐步作用到飞机的碳纤维舱体及内部空间。 $\partial i(t)/\partial t$ 表示雷电流的变化率。当 $H=5$ km, $r=100$ km 时,根据表 1 场区的划分可知,此时飞机处于雷电远场区。FDTD 激励源的设置方法如下:在平面波激励源 $j = j_s$ 处,利用式(10)进行迭代;其它网格处,利用标准的 FDTD 公式进行迭代。

$$E_z^{\text{far}} = -\frac{\eta_0 H}{2\pi cr} \frac{\partial i(t)}{\partial t} = -\frac{377.6}{2\pi} \times \frac{5000}{3 \times 10^8 \times 10^5} \times \frac{\partial i(t)}{\partial t} = -1 \times 10^{-8} \times \frac{\partial i(t)}{\partial t} \quad (9)$$

$$E_z(i, j_s, k) = -1 \times 10^{-8} \left(I_0(-\alpha) e^{-\alpha t} - I_0(-\beta) e^{-\beta t} \right) \quad (10)$$

由式(9)看出,可通过改变 H, r 的取值来改变传播到飞机处的电磁波的幅值的大小,这样可以灵活

计算任意远场情况下的雷电脉冲平面波作用于飞机的各个结构和舱体。

4.2 近场情况下的线电流激励源设置

在分析雷电的近场辐射对飞机的影响时,原则上可以在 FDTD 中通过设置一段线电流来模拟一段雷电流通道,该线电流激励源施加在电场分量上,并符合安培环路定律,如式(11)-式(13)。在 FDTD 中设置线电流来模拟雷电流通道的方法是在电通量 D 某一方向施加一线电流密度 J , 这里由于雷电流以平行于 Z 轴的方式设置在 FDTD 网格中,所以将 J_z 施加在 D_z 上,而其它位置采用标准的 FDTD 公式进行迭代。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (11)$$

$$J_z(i_s, j_s) = \frac{I^{n+1/2}}{\Delta x \Delta y} \quad (12)$$

$$E_z^{n+1}(i_s, j_s) = E_z^n(i_s, j_s) + \frac{\Delta t}{\epsilon} [\nabla \times \mathbf{H}(i_s, j_s)]_z^{n+1/2} - \frac{\Delta t I^{n+1/2}}{\epsilon \Delta x \Delta y} \quad (13)$$

线电流由 n 个网格连接而成,在每个网格的 E_z 分量上施加 J_z 的电流激励,组成一长度为 $n \times dl$, 横截面为 $\Delta x \times \Delta y$ 的线电流。但由于本文设置的双指数脉冲具有很强的低频和直流分量成分,所以单纯采用上述方法在设置一段线电流时会在网格两端产生直流充电效应,在网格的两端聚集静电荷,从而辐射出静电场^[9],如式(14),式(15)。

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (14)$$

$$-\int_{-\infty}^t \left(\oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \right) dt' = \int_{-\infty}^t I(t') dt' = Q = \epsilon_0 \Delta^2 \sum_6 E_{\text{face}} \quad (15)$$

在雷击脉冲消逝后,静电荷产生的静电场仍旧存在,这显然与实际情况不符。另外由于本文所要研究的问题是飞机的部分结构受雷击的影响,所以研究的空间较小,累积的静电荷产生的静电场不会因为距离的增加有明显的衰减。

对此,本文采用将线电流延长到 PML 吸收边界内,并且与 PML 最外层金属边界相接,从而构成一回路,避免了静电荷的积累效应,有效地降低了静电场的影响,从而使计算空间的电磁场主要为雷电双指数脉冲产生的电磁干扰(EMI)。如图 2,雷电流与内层 PML 交于 B, C 两点,与最外层金属壁交于 A, D 两点。在 A, D 聚集的静电荷会迅速释放掉。

在自由空间设置线电流源采用式(13),延伸到 PML 内的线电流源采用式(16),式(17)的迭代公式,

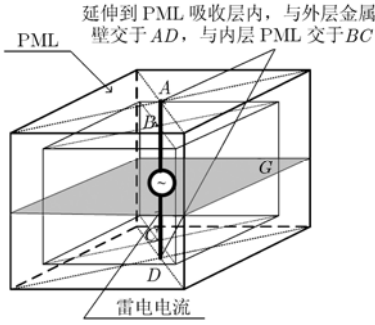


图2 近场雷电流源设置方法

无源处采用标准的UPML迭代公式。

$$D_z^{n+1}(i_s, j_s, k + 1/2) = CA(m) D_z^n(i_s, j_s, k + 1/2) - CB(m) \frac{I^{n+1/2}}{\Delta x \Delta y} + CB(m) \cdot \left\{ \left[H_y^{n+1/2}(i_s + 1/2, j_s, k + 1/2) - H_y^{n+1/2}(i_s - 1/2, j_s, k + 1/2) \right] / \Delta x - \left[H_x^{n+1/2}(i_s, j_s + 1/2, k + 1/2) - H_x^{n+1/2}(i_s, j_s - 1/2, k + 1/2) \right] / \Delta y \right\} \quad (16)$$

$$E_x^{n+1}(i + 1/2, j, k) = C1(m) E_x^n(i + 1/2, j, k) + C2(m) D_x^{n+1}(i + 1/2, j, k) - C3(m) D_x^n(i + 1/2, j, k) \quad (17)$$

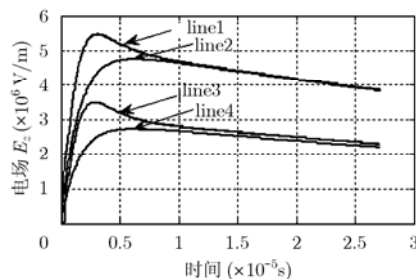
$$CA(m) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sigma_x(m)}{2\epsilon_0}, \quad CB(m) = \frac{1}{\Delta t + \frac{\sigma_x(m)}{2\epsilon_0}} \quad (18)$$

$$C1(m) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sigma_z(m)}{2\epsilon_0}, \quad C2(m) = \frac{1}{\Delta t + \frac{\sigma_x(m)}{2\epsilon_0}} \frac{\epsilon_1 + \epsilon_1 \sigma_z(m)}{2\epsilon_0}$$

$$C3(m) = \frac{1}{\Delta t + \frac{\sigma_x(m)}{2\epsilon_0}} \frac{\epsilon_1 + \epsilon_1 \sigma_z(m)}{2\epsilon_0} \quad (19)$$

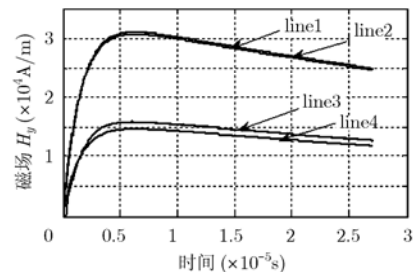


图3 雷电流产生的柱状电磁场，数值取为 $20 \lg E$



line1: FDTD 解 $E_z(r=1m)$
line2: 解析解 $E_z(r=1m)$
line3: FDTD 解 $E_z(r=2m)$
line4: 解析解 $E_z(r=2m)$

图4 FDTD 计算的雷电 Z 轴方向电场与解析解比较



line1: FDTD 解 $H_y(r=1m)$
line2: 解析解 $H_y(r=1m)$
line3: FDTD 解 $H_y(r=2m)$
line4: 解析解 $H_y(r=2m)$

图5 FDTD 计算的雷电水平方向磁场与解析解比较

式(18)，式(19)中 σ 为 PML 层的渐变电导率^[12]。利用本文的方法在 FDTD 中设置一段雷电通道可以有效地模拟雷电近场，在较小的范围内模拟雷电脉冲的电磁干扰，从而研究该雷电 EMI 对飞机碳纤维介质舱体的作用，及舱体内的电场变化和分布。如图 2 在 $150 \times 145 \times 75$ ，空间步长 $\Delta = 0.05 \text{ m}$ 的计算空间，利用 FDTD 计算一段线电流产生的电磁场如图 3 所示。图 3 显示出线电流产生的空间柱状电场分布。另外计算 $r = 1 \text{ m}$ ， $r = 2 \text{ m}$ 处的 Z 轴方向电场和水平磁场，解析解采用式(7)，式(8)，FDTD 的计算结果为图 2 中 G 面距离雷电通道的水平距离为 $r = 1 \text{ m}$ ， 2 m 处的 Z 方向电场和水平磁场。FDTD 计算结果与解析结果的比较见图 4，图 5。

从图 4，图 5 中可以看出，采用本文的线电流设置方法在 FDTD 中计算的近距离雷电场可以很好的模拟高空中一段雷电的近场情况。从而可以分析该雷电脉冲对飞机介质舱体的作用，及近雷电通道情况下的介质舱体内的电场环境，从而分析该舱体内的电磁安全性。图 4 中的电场在初始时间，由于电荷先积累后释放，最初的积累速度大于释放的速度，所以初始情况下电场值上升很快并且要超过解析公式计算的值，这是 FDTD 数值仿真的正常情况，在工程应用中，该误差是可以接受的。

5 雷电环境下飞机碳纤维介质舱体内的电场变化

5.1 雷电远场辐射下的舱体内电场变化情况

飞机的碳纤维介质舱体结构如图 6 所示，中部纵梁 G，上部盖板 F，前后档板 D，E 为金属材料。假设在飞机右侧距离较远处产生雷电，则平面波由右侧面向左侧传播并作用于飞机碳纤维舱体，使舱体内的电场发生变化。在左右舱内分别设置观察点 C，B。在空间网格为 $150 \times 145 \times 175$ ，空间步长 $\Delta = 0.05 \text{ m}$ 的 FDTD 计算区域，设置如图 6 所示的

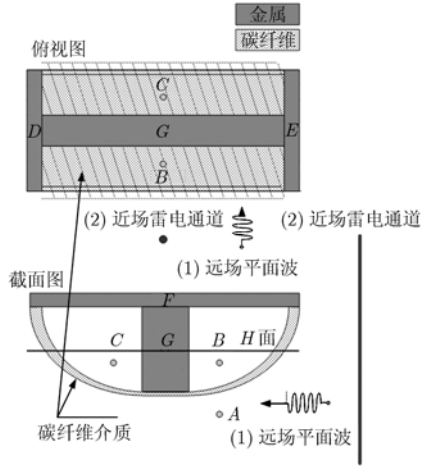


图6 碳纤维舱体结构示意图:远场情况下只有(1)平面波;近场情况下只有(2)雷电通道

舱体结构,舱体位于计算区域的中部。利用式(9),式(10)设置平面波激励源,计算结果如图7-图10。碳纤维的电参数为 $\sigma = 2, \epsilon = 4.6$ 。

舱体内部 B, C 点的振荡衰减电场主要是由于舱体 G, D, E 处的金属档板的反射造成的, B 点的电场要强于 C 点是由于 G 金属梁的遮挡屏蔽作用。图11显示的为 H 面切片在 $t = 3 \times 10^{-6}$ s 时刻的电场分布。此外,远场情况下的雷电脉冲辐射对飞机碳纤维舱体内的干扰作用的强弱主要取决于雷电通道距离飞机的水平距离 r 和雷电通道的长度 H 。由式

(5), 式(6)可以看出,在 FDTD 中设置平面波源时,电场的幅度与雷电通道的长度成正比,与水平距离 r 成反比。

5.2 雷电近场干扰下的舱体内电场变化情况分析

近场情况下,利用本文的方法设置线电流源模拟雷电通道。雷电通道和碳纤维舱体的位置和结构如图6所示。计算结果如图11-图12。

由图11,图12可以看出,在近距离雷电干扰情况下,碳纤维舱体内的电场峰值甚至达到了 7×10^4 V/m,因此单纯的碳纤维介质舱体的屏蔽效能很有限。另外,这种峰值极高的震荡电场对舱体内部电子设备危害很严重。可以采用在舱体外表面喷涂厚度为 0.5 mm 的铝来增加舱体的屏蔽效能。

6 结论

本文研究了雷电近场和远场情况下高空雷电脉冲产生的瞬态电磁场。在远场情况下,此时将雷电脉冲等效为平面电磁波,在 FDTD 中设置平面波源,分析雷电远场情况下碳纤维舱体内的电场变化。在雷电近场情况下,通过在 FDTD 中设置线电流以模拟一定长度的雷电流通道的近感应场。为了避免线电流首尾两端的充电效应,将线电流延伸到 PML 层内并与 PML 层外的金属边界相接,从而有效地解决了静电积累效应带来的问题。利用本文的方法可以在较小的空间范围内分析雷电近感应场和远辐射

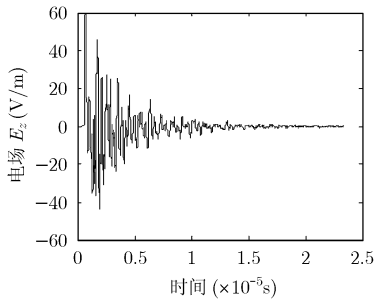


图7 舱体内部 B 点的电场 E_z

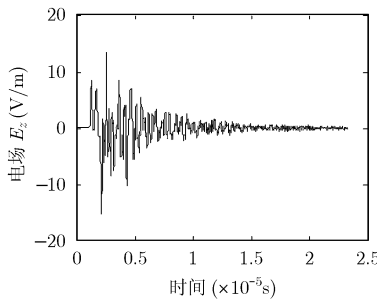


图8 舱体内部 C 点电场 E_z

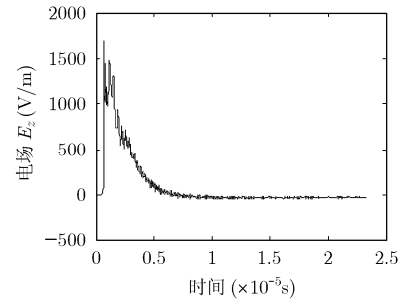


图9 舱体外部 A 点电场

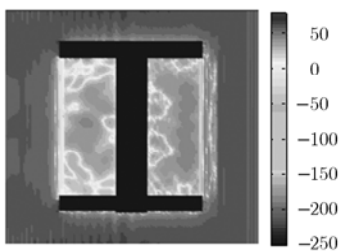


图10 舱内的图8中 H 面电场分布,数值取为 $20 \lg E$

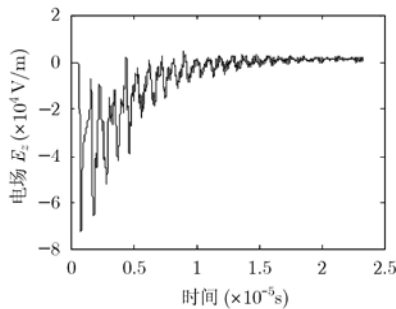


图11 舱体内 B 点的电场 E_z

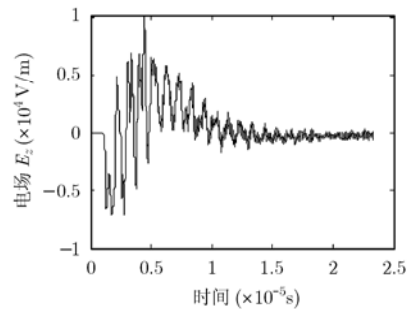


图12 舱体内 C 点的电场 E_z

场区域的雷电脉冲对飞机结构及设备的影响及舱体内的电场分布,为飞机的电磁加固提供依据。

参考文献

- [1] Li Qian, Zhao Zhi-bin, and Cui Xiang. Calculation and research of electromagnetic fields in space around lightning path with finite difference time domain method[C]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Qingdao, Oct. 2007: 424-427.
- [2] Hu Wen-yi and Cummer S A. An FDTD model for low and high altitude lightning-generated EM fields[J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 2006, 54(5): 1513-1522.
- [3] Noda T and Numerical A. Simulation of transient electromagnetic fields for obtaining the step response of a transmission tower using the FDTD method[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(2): 1262-1263.
- [4] 任合明, 周璧华. 地闪电磁脉冲对近地电缆外导体的耦合研究[J]. *电波科学学报*. 2006, 21(5): 750-755.
- Ren He-ming and Zhou Bi-hua. Study on coupling of LEMP to cables very close to ground. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(5): 750-755.
- [5] Baba Y and Rakov V A. Electric fields at the top of tall building associated with nearby lightning return strokes[C]. 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Munich, Germany, Sep. 2007: 179-182.
- [6] Rachidi F and Janischewskyj W. Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, 43(3): 356-367.
- [7] B'renger J P. Long range propagation of lightning pulses using the FDTD method[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, 47(4): 1008-1012.
- [8] Sabrina M and Innovative S. Absorbing boundary conditions for the efficient FDTD analysis of lightning-interaction problems[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, 43(3): 368-381.
- [9] Wagner C L and Schneider J B. Divergent fields, charge, and capacitance in FDTD simulations[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1998, 46(12): 2131-2136.
- [10] Department of Defense Interface Standard. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. MIL-STD-464A. Washington. 19 Dec. 2002.
- [11] Stutzman W L, Gary A 著. 朱守正, 安同一译. 天线理论与设计(第2版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 26-28.
- [12] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法(第二版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 100-104.
- 代 健: 男, 1984年生, 硕士生, 研究方向为计算电磁学、电磁兼容.
- 苏东林: 女, 1960年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁兼容、计算电磁学、抗干扰理论与应用、射频微波电路与系统、新型飞行器机载共形/共用/小型化天线等.
- 赵小莹: 女, 1978年生, 讲师, 博士, 研究方向为电磁兼容、天线设计.