基于结构表面云图的三维总剂量效应评估方法研究

高著秀，王玉林，孙　健，张耀磊

（中国运载火箭技术研究院，北京 100076）

摘　要：提出了一种可将屏蔽效果与辐射剂量在飞行器结构表面进行云图显示的评估方法，总结了评估方法的基本原理、分析流程及分析特征。针对简单的和相对复杂的两种飞行器结构模型进行了分析，并将分析结果与一维分析模式进行了对比。该方法贴近工程应用的实际，能够快速评估复杂结构模型的飞行器的总剂量效应，其显示效果更为直观，应用更为有效。

关键词：辐射剂量；屏蔽效果；结构表面

中图分类号：O571.33　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-4080（2018）05-0037-05

A New Method for Evaluating Three-dimensional Total Dose Effects Based on Structure Surface Cloud Picture

GAO Zhuxiu，WANG Yulin，SUN Jian，ZHANG Yaolei

（China Academy of Launch Vehicle Technology，Beijing 100076，China）

Abstract：A new method of evaluating shielding effects and radiation dose based on structure surface cloud picture is proposed in this paper. The basic principle，analysis process and character of this method are introduced. A simple aircraft structure model and a more complicated structure model are analyzed，with results compared with one-dimensional pattern. This method can be used for fast evaluating total dose effects of complicate structure aircraft，and the display effect of this method is direct.

Key words：Radiation dose；Shielding effects；Structure surface

0　引言

总剂量效应是大量辐射粒子进入半导体器件材料内部，与材料的原子核外电子发生电离作用而产生额外的电荷，这些电荷在器件内的氧化层堆积，或者在 Si/SiO_2 交界面诱发界面态，导致器件性能逐步退化乃至失效的现象。总剂量效应影响的大小与材料吸收的剂量值的多少有关，属累积效应[1-7]。空间辐射环境中对总剂量效应有贡献的主要是地球辐射带的电子和质子，其次是太阳宇宙线质子。银河宇宙线与辐射带和太阳质子相比，其通量很低，产生的剂量很小，可以忽略。

对飞行器的吸收剂量评价，目前主要有两种方法。一种是一维辐射剂量评估方法，分析过程中只考虑飞行器舱体及单机壳体，依据实心球模型得到飞行器在轨时的剂量深度曲线，进而评估各单机内部吸收的辐射剂量，作为辐射防护设计的依据，这种情况往往忽略了飞行器内部不同组件之间的相互屏蔽效果，高估了各单机内部吸收的辐射总剂量，相应的屏蔽设计属于过设计。另一种是三维辐射剂量评估方法，分析过程中依据具体的飞行器结构布局，考虑各部分结构互相之间的屏蔽，可以获取飞行器内部任意位置不同方向的屏蔽厚度，结合空间环境能谱分析结果得到

收稿日期：2018-01-15；**修订日期：**2018-04-04

作者简介：高著秀（1977-），女，博士，主要研究方向为空间环境效应。E-mail：gzx018@163.com

更为准确的辐射剂量。根据分析结果，调整飞行器布局及局部屏蔽方案，利用大质量设备对辐射效应敏感的器件提供质量屏蔽，优化屏蔽效果的同时降低选用抗辐射性能更优的器件的代价。

欧空局基于 Monte Carlo 软件 Geant4 开发了三维屏蔽与辐射剂量评估工具 SSAT，在国内外得到了广泛应用，但是需要应用 GDML（The Geometry Description Markup Language）语言来定义复杂几何结构，以便于 SSAT 软件识别与分析。飞行器各部分的结构和材料非常复杂，用户需要开展大量建模工作，分析效率低且分析结果的准确性未知。欧洲宇航防务集团的 Austrium 公司在其 SYSTEMA 航天器空间环境及效应数值模拟分析系统中开发了 Dosrad 模块，但是建模过程复杂，且辐射环境模型不够全面。国内哈尔滨工业大学、中科院国家空间科学中心及航天五院等相关研究单位开发了三维辐射剂量分析软件[1-3]，可以给出分析位置在各个方向的屏蔽厚度和辐射剂量，在显示方法上各有特色，包括基于包围分析目标的球面显示及射线显示等。本文在借鉴国内已开发软件的经验基础上，提出了一种可在目标表面进行屏蔽厚度和吸收剂量的全向分布显示的总剂量效应评估方法，并针对具体结构模型开展分析，分析结果与一维总剂量效应分析模式相比较，并给出分析精度与效率说明。

1 辐射剂量三维评估原理及流程

1.1 辐射剂量三维分析原理

1.1.1 粒子穿越径迹计算方法

虚拟粒子穿越某一几何体时的粒子径迹有两种方式，一种是 NORM 方法，即沿法向传输；另一种是 SLANT 方法，即沿直线传输，如图 1 所示。法向传输考虑的是射线在垂直屏蔽材料表面方向的传输距离，而直线传输则可以与任何材料表面倾斜相交，对于复杂的屏蔽结构而言，法向传输会高估实际的屏蔽厚度。本文的三维屏蔽与辐射剂量评估采用了直线近似传输原理，即对飞行器内部特定方向的屏蔽厚度计算采用沿该方向直线上的物质厚度作为屏蔽厚度。这种简化是合理的，因为首先粒子的初级成分是直线运行的，对辐射效应的贡献最大；其次，高能粒子在运动中产生的次级成分在粒子的入射方向上的分布最密集。Cai 等[1]在三维屏蔽估算方法采用的都是直线近似法，即对飞行器内部特定方向的屏蔽厚度计算采用沿该方向直线上的物质厚度作为屏蔽厚度[8-10]。

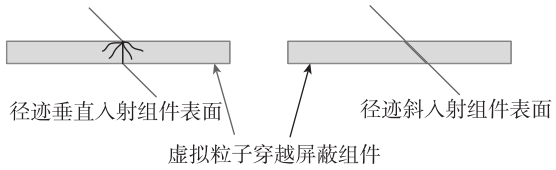

图 1 粒子穿越径迹计算方法

Fig. 1 Method of particles traversing

1.1.2 扇形角分析方法

一般认为空间高能带电粒子各向同性，应用扇形角等效分析方法计算三维复杂结构飞行器表面或舱内某点的吸收剂量，首先需要对空间能谱进行转换，即将空间各向同性粒子能谱转化为某一方向入射的粒子能谱。为了完成能谱的转化，需要将整个 4π 空间上的粒子通量转化为某一特定方向上的粒子通量。图 2 为空间环境下粒子入射立体角计算示意图。θ 是极角，在空间范围内，其角度范围为 0～π；ω 为方位角，在空间范围内为 0～2π。依据空间粒子入射的极角 θ 和方位角 ω，计算得到空间环境下单位能量和单位球面角范围内入射粒子的通量。

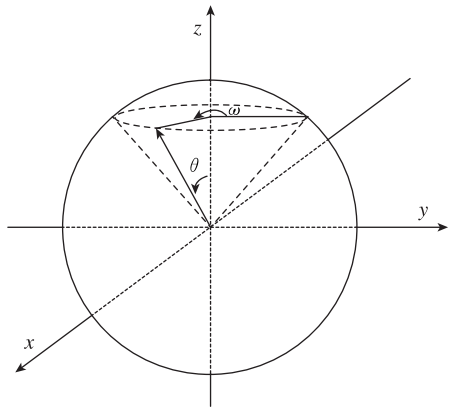

图 2 空间各向同性粒子入射立体角计算示意图

Fig. 2 Incident solid angle calculation diagram of spatial isotropic particle

1.1.3 基于 Creo 模型的飞行器屏蔽与辐射剂量三维评估方法

计算飞行器内某一位置的吸收剂量，可由两种计算方法实现。一种为扇形角等效分析法，适合于工程上计算复杂结构的吸收剂量；另一种为 Monte Carlo 方法，计算精度较高，但计算速度较

慢。在实际计算过程中，按照扇形角等效分析方法建立剖分模式，确定粒子在某一向上立体角内的入射概率并进行吸收剂量的计算。这种方法能够大大提高计算效率和计算精度。

计算复杂结构的总剂量的关键是建立卫星的三维屏蔽模型，模型需要定义飞行器的几何结构和材料属性。目前飞行器的模型设计主要采用 Pro/E、AutoCAD、UG 等计算机辅助设计软件。基于 Creo 模型的飞行器三维屏蔽与辐射剂量评估方法，采用有限元基本原理并结合 Creo 软件的基本功能来实现飞行器三维屏蔽与辐射剂量的分析计算，可兼容 Pro/E 模型，克服了 SSAT 工具几何建模方面的不足，使得总剂量效应的分析评估更加快速、准确、可靠，符合我国航天工程特有的现状和需求。

1.2　辐射剂量三维分析流程

与一维分析模式相比，三维辐射剂量分析模式兼顾舱内各单机遮挡关系及整体布局，在飞行器结构模型的处理上更为精确。图 3 给出了简单的一维总剂量分析与三维总剂量分析的流程对比。基本包含 3 个步骤：首先，结合任务轨道参数分析辐射环境能谱，对航天器总体提供的结构模型进行预处理，包括模型实体化处理和简化处理等，去除管路等小质量结构件；其次，采用有限元原理对围绕指定分析位置的 4π 立体空间进行空间网格划分，可采用等角度或等立体角划分，也可采用计算网格所占立体角比例的方法；最后，利用一定的方法计算三维屏蔽厚度分布，并结合剂量深度曲线得出分析位置处在三维屏蔽下的辐射总剂量。

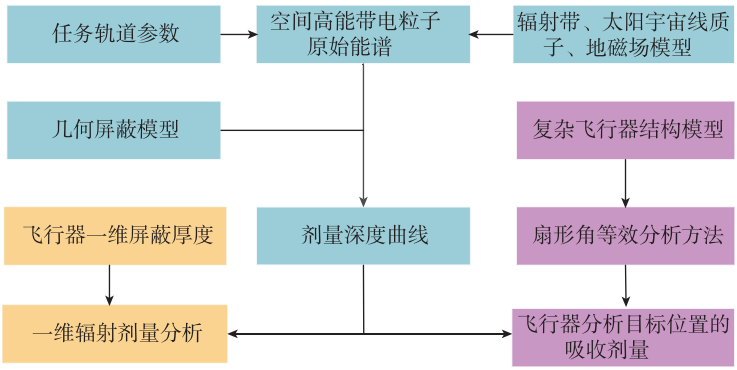

图 3　一维与三维辐射剂量分析流程

Fig. 3　Radiation dose evaluating process

1.3　基于结构表面云图的辐射剂量分析流程

基于结构表面云图显示的辐射剂量三维评估方法具体分析流程如下：

第一步：模型预处理。

针对实际飞行器 Creo 模型进行预处理，去除所有片体模型及可以忽略屏蔽效果的紧固件、插针、管路等小件，以提高解算速度。

第二步：模型离散化。

根据模型复杂情况，选择一定的分析精度，对模型进行离散化处理，为后续计算提供基础。

第三步：发射射线。

指定结构模型树中要分析的单机为目标单机，从选定的单机内部向 2π 立体角内均匀发射射线；射线密度选取可根据模型复杂程度及计算允许时间进行设定。

第四步：计算屏蔽厚度。

针对某射线，计算穿过该射线的所有实体的等效铝厚度，并进行累加，得到该射线方向的等效铝防护厚度，对所有射线方向的厚度加权累加得到单机总的屏蔽厚度，对应每条射线所计算的厚度对照厚度色条进行颜色赋值，并在对应面片上进行颜色显示。

第五步：计算辐射剂量。

对照剂量深度曲线进行插值，得到该方向吸收的辐射剂量，对所有射线方向的吸收剂量累加得到单机总的吸收剂量。对应每条射线所计算的剂量，对剂量照色条进行颜色赋值，并在对应面片上进行颜色显示。

2　分析实例

为检验该评估方法的有效性，下面以某飞行器结构模型为例，分析其三维屏蔽效果与辐射剂

量，并与一维分析模式进行对比。另外以复杂模型为例，检验该评估方法的分析效率。

2.1 简单模型分析实例

假设某飞行器飞行轨道为圆轨道，轨道高度为 1000km，倾角为 60°，飞行任务周期为 1 年，辐射剂量主要来源于地球辐射带电子、地球辐射带质子及太阳宇宙线质子。选取模型为太阳活动高年情况。

飞行器内某单机结构如图 4 所示，舱体为圆柱形，舱体材料为铝，厚度为 3mm，单机材料为铝，厚度为 2mm。

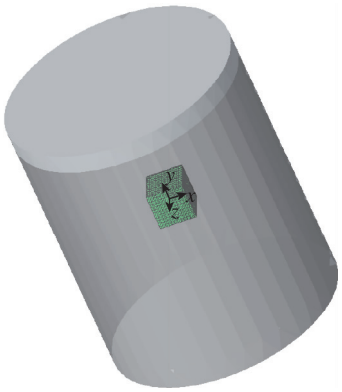

图 4 飞行器结构模型

Fig. 4 Aircraft structural model

图 5 为飞行轨道辐射剂量—深度分布曲线。按照辐射剂量的一维分析模式，该单机等效铝防护厚度为 5mm，任务期间累计吸收的辐射剂量为 2063rad。

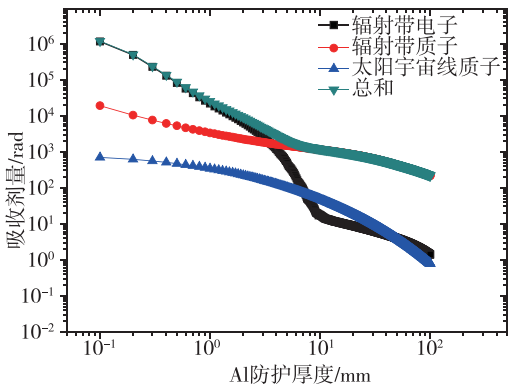

图 5 辐射剂量—深度分布曲线图

Fig. 5 Radiation dose—depth distribution curve

按照 1.3 节的分析步骤，首先选定目标单机作为分析对象，进行离散化处理后选择射线数量，然后分析该单机屏蔽厚度，图 6 为分析得到的单机屏蔽厚度分布云图。可以看到，单机 8 个顶角的防护厚度略高于平面部分防护厚度，符合物理实际。

在获取上述屏蔽厚度后，导入任务剂量深度曲线，分析单机内部吸收的辐射剂量，图 7 为分析后获取的辐射剂量分布云图。由于该模型中等效铝防护厚度基本处于 5mm～7mm 范围，各个方向辐射剂量都在 1000rad～5000rad 内。

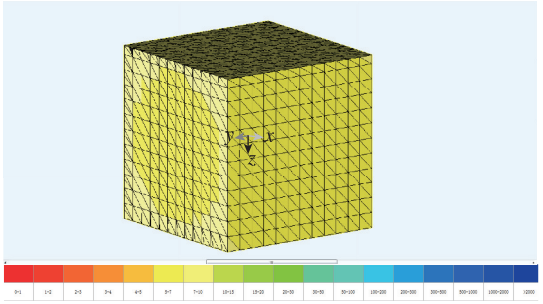

图 6 屏蔽厚度分布云图

Fig. 6 Shield thickness distribution cloud picture

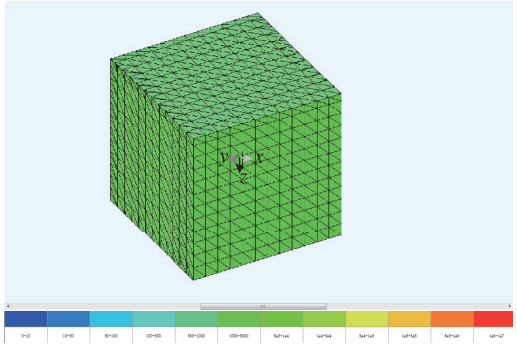

图 7 辐射剂量分布云图

Fig. 7 Radiation dose distribution cloud picture

将各方向获取的辐射剂量进行加权累计后，计算得到整个单机吸收的辐射剂量为 1590rad，而一维分析模式中分析结果为 2063rad，比较一维分析模式与本文的三维分析模式下的计算结果可知，一维分析模式明显低估了防护效果。

2.2 复杂模型分析实例

为检验该评估方法对于复杂模型的分析效率，下面构建了一个结构相对复杂、单机数量相对较多的飞行器模型，该模型舱体外安装有太阳电池阵及雷达，舱体单机结构包括立方体结构、球壳结构及圆柱形结构等，舱内单机总数为 39 个，结构模型如图 8 所示。该飞行器舱体为圆柱形，舱体等效铝防护厚度为 1mm，分析目标单机件壳体厚度约为 1mm。

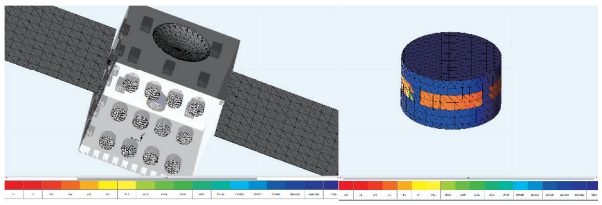

图 8　飞行器结构模型及目标单机厚度分布图

Fig. 8　More complex aircraft structure model diagram and shield thickness distribution

选取与简单模型分析相同的辐射环境参数，按照一维评估模式，单机内部吸收的辐射剂量为 8852rad。在三维评估模式下，分析得到该单机吸收的辐射剂量为 1393rad。可见，三维评估模式计算的辐射剂量远低于一维评估模式，如果采取相同抗辐射性能指标的电子器件，理论上单机壳体厚度可减小约 0.85mm，单机包络为 Φ100mm×40mm，质量减小约 0.07kg。对于含有 39 个单机的飞行器，粗略估计整个飞行器可降低质量约 3kg。对于一次飞行任务，可以增加约 3kg 的其他有效载荷质量。本次分析中，单机包络、厚度及质量规模较小，在实际工程中，采用三维剂量分析后，飞行器可减小的质量将更大。

本次分析中，利用硬件配置为 2.4GHz 处理器、12G 内存的计算机对该模型进行屏蔽厚度分析，模型解析用时 5min，防护厚度分析用时约 50min，辐射剂量用时约 1min，分析耗时可以满足工程研制需求。

3　评估特征及优势

国内外已经开发的三维辐射剂量分析工具各具特色，本文中提出的评估方法的特征及优势体现在以下方面：

1）本文提出的三维辐射剂量评估方法结合工程应用实际，在飞行器结构设计中常用的工具软件 Creo 基础功能之上进行二次开发，能够直接导入复杂的结构设计模型，无需开展复杂的建模工作，同时也避免了建模带来的误差。分析结果直接反馈给结构设计专业，提高了专业迭代效率。

2）该平台创新性地实现了在飞行器结构表面的防护厚度云图显示，其对应关系更直接，能够直观地显示屏蔽厚度分布情况，并且根据防护薄弱方向的指示，分析该方向上的质量分布，通过增加局部屏蔽屏或者调整布局的方式，优化质量屏蔽效果，使电子设备敏感器件处于辐射剂量相对较低的位置，降低选用辐射性能更优的电子器件的工程代价。

3）基于结构表面的三维辐射剂量评估方法不仅能够显示屏蔽厚度的分布，还能够在所分析目标结构的表面显示吸收剂量在 4π 立体角内的全向分布，将分布情况以云图的方式显示在结构表面，而不是仅仅得到所分析位置的辐射剂量总和，为空间环境专业设计人员对布局进行调整和优化提供更直接的参考依据。

4）通过改变分析精度参数，包括调整对结构的离散化程度，调整从分析位置出发的射线总数，能够根据飞行器结构模型复杂程度控制分析精度，通过权衡分析耗费时间与分析准确度要求，选取合适的分析精度值。

4　结论

本文介绍了基于结构表面的三维屏蔽效果及辐射剂量评估方法，分析过程贴近工程应用实际，分析过程简便，能够快速获取飞行器内部某一位置的辐射剂量，能够以云图方式显示屏蔽厚度与剂量的分布，并指示出防护薄弱方向，分析结果直接应用于结构设计的优化。可为空间环境专业人员设计及仿真分析工作提供分析理论和模型上的参考。

参考文献

[1] Cai M H, Han J W. Method for evaluating shielding thicknesses and radiation dose inside spacecraft based on ProE [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33 (6): 830-835.

[2] Zhang Z L, Li Z F, Tang X C, et al. Development of three-dimensional total dose analysis software based on Pro/E and its application in micro-satellites [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31 (6): 620-624.

[3] He B P, Ding L L, Yao Z B, et al. Three-dimensional simulation of total dose effects on ultra-deep submicron devices [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60 (5): 056105.

[4] Wang S H, Lu Q, Wang W H, et al. The improvement on total ionizina dose (TID) effects of the ultra-deep submicron MOSFET featurina delta doping profiles [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59 (3): 1970-1976.

（下转第 49 页）

region of energy finite element analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333 (9): 2601-2616.

[21] MSC. Software. MSC. Software EFEA 2012 User's Guide [EB/OL]. https://simcompanion.msc-software.com/infocenter/idex?page=content&id=DOC10009&cat=MSC_NATRAN_DOCUMENTATION_2012&actp=LIST, 2011.

[22] MSC. Software. MSC. Software EFEA 2012 Tutorial [EB/OL]. https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=DOC10007&cat=MSC_NASTRAN_DOCUMENTATION_2012&actp=LIST, 2011.

[23] 曾耀祥，潘忠文，李东. 基于统计能量分析法的火箭仪器舱声振环境预示 [J]. 导弹与航天运载技术，2013 (4): 27-32.

引用格式：王怀志，于开平，曾耀祥，等. 能量有限元方法的双星整流罩中频声振环境预示[J]. 宇航总体技术，2018，2 (5): 42-49.

Citation: Wang H Z, Yu K P, Zeng Y X, et al. Prediction for vibration environment of the double stars fairing structure based on energy finite element [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2 (5): 42-49.

(上接第 41 页)

[5] Li X J, Liu C M, Sun Z L, et al. Effect of ionizing radiation on dual 8-bit analog-to-digital converters (AD9058) with various dose rates and bias conditions [J]. Chinese Physics B, 2013, 22 (9): 098501.

[6] Ning B X, Hu Z Y, Zhang Z X, et al. Effects of total ionizing dose on narrow-channel SOI NMOSFETs [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62 (7): 076104.

[7] Liu Z L, Hu Z Y, Zhang Z X, et al. Total ionizing dose effect of 0.18μm nMOSFETs [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60 (11): 116103.

[8] Atwell W. Anatomical models for space radiation applications: an overview [C]. The Committee on Space Research, Washington, USA, 1992.

[9] Wilson J W, Miller J, Konradi A, et al. Shielding strategies for human space exploration [J]. NASA Conference Publication, 1997, 31 (1): 27-34.

[10] Xue B S, Han J W, Ye Z H. A shielding distribution analysis model for a spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22 (1): 46-49.

引用格式：高著秀，王玉林，孙健，等. 基于结构表面云图的三维总剂量效应评估方法研究[J]. 宇航总体技术，2018，2 (5): 37-41.

Citation: Gao Z X, Wang Y L, Sun J, et al. A new method for evaluating three-dimensional total dose effects based on structure surface cloud picture [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2 (5): 37-41.