

M/OD 失效风险评估系统开发及标准校验

刘有英¹, 王海福², 黄 海¹

1. 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191
2. 北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 论述了空间碎片失效风险评估在航天器设计中的重要性, 给出了自主开发的空间碎片风险评估系统 (MODRAS) 总体框架及图形用户界面。MODRAS 分为空间碎片风险评估和微流星体风险评估两大模块, 每个模块又包括 M/OD 环境模型、航天器建模、碰撞概率分析、失效概率分析以及航天器防护结构设计等功能模块。除了环境模型模块外, 其他各功能模块均为共享模块, 即可同时应用于空间碎片风险评估与微流星体风险评估。针对机构间空间碎片协调委员会 (IADC) 指定的单位立方体、单位球体及简单航天器 3 种标准工况, 将 MODRAS 分析结果与美国航空航天局的 BUMPER 系统、欧洲空间局的 ESABASE 系统、德国 MDPANTO 系统以及航天五院 MODAOST 系统等国内外同类软件分析结果进行比较。结果表明, 在微流星体环境下, MODRAS 与 BUMPER 程序失效数分析结果相差在 4% 以内; 而在空间碎片环境下, 失效数分析结果最大相差 8%, 校验了 MODRAS 的分析精度。此外, 还给出了 3 种标准工况遭遇 M/OD 的表面失效数分布。

关键词 空间碎片; 失效风险评估; 航天器; 校验

中图分类号 V414

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)06-0088-05

M/OD Failure Risk Assessment System and Its Calibration

LIU Youying¹, WANG Haifu², HUANG Hai¹

1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China
2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology; Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The importance of M/OD failure risk assessment for spacecrafts design is analyzed. A graphical user interface technology based M/OD Risk Assessment System (MODRAS) is developed. It's frame chart of M/OD failure risk assessment system is presented, including two modules of orbital debris risk assessment and meteoroid risk assessment. Each module consists of functional modules for M/OD environment, the spacecraft geometry modeling, impact probability analysis, failure probability computing module, spacecraft shield design, etc. These functional modules are shared except the environment module. That is to say, they can be used in both orbital debris and meteoroid environment risk assessment. The system is calibrated by three standard cases of IADC specified. The results show that the computing precision of MODRAS is very good with precisions of similar software in different countries, such as BUMPER, ESABASE, MDPANTO and MODAOST. The discrepancy of failure number of MODRAS and BUMPER is less than 4% in the meteoroid environment. And the maximum discrepancy is 8% in the orbital debris environment. Therefore, the analytic precision of MODRAS is calibrated. The distribution of failure particles in the surface of cube, sphere and simple space station are given.

Keywords orbital debris; failure risk assessment; spacecraft; calibration

0 引言

随着人类航天发射活动的日益频繁和空间碎片环境的不断恶化, 在轨航天器不可避免会遭遇空间碎片碰撞, 碰撞

事件是否会对航天器运行造成影响, 是否需要采取一定的防护措施? 防护措施会增加航天器的额外负重, 从而减少航天器有效载荷, 因此航天器失效风险评估是航天器设计的关键

收稿日期: 2009-11-06

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目 (20080231)

作者简介: 刘有英, 博士后, 研究方向为空间碎片防护技术, 电子信箱: lyliu@163.com

环节^[1-4]。国外在空间碎片失效风险评估方面做了大量研究,已发布的碰撞风险评估软件主要有美国航空航天局的 BUMPER 系统、欧洲空间局的 ESABASE 系统、德国 MDPANTO 系统等。国内仅中国航天五院的 MODAOST。笔者在 Matlab 平台下自主开发了 M/OD 风险评估软件系统 (Meteoroid & Orbital Debris Risk Assessment System, MODRAS),采用机构间空间碎片协调委员会(IADC)指定的 3 种标准工况对 MODRAS 进行了校验,计算精度与国内外同类软件相当,且 MODRAS 具有良好的用户程序界面,集成了 ORDEM2000、TrueGrid 等服务软件,能在 Windows 98/2000/XP/Vista 等多个系统下运行^[5-6]。MODRAS 可计算出不同防护结构下的航天器失效风险,根据计算结果选择最佳防护结构,从而减少不必要的额外负重。

1 系统总体框架

MODRAS 是基于空间碎片环境模型 ORDEM2000 及微流星体环境模型 NASA SSP-30425 的空间碎片风险评估系统,该系统由框架平台、应用程序模块和服务软件 3 部分组成,框架结构如图 1 所示。通过 Matlab 图形用户界面技术及

TrueGrid 有限元分析软件对航天器表面的网格划分,成功地 为 MODRAS 提供了主框架平台及前处理系统。

在功能上,MODRAS 分为空间碎片风险评估和微流星体风险评估两大模块,系统主界面如图 2 所示。每个模块又包括流星体和空间碎片 (Meteoroid & Orbital Debris, M/OD) 环境模型、航天器建模、碰撞概率分析、失效概率分析以及航天器防护结构设计等功能模块。在这些功能模块中,除了环境模型模块外,其他各功能模块均为共享模块,即可同时应用于空间碎片风险评估与微流星体风险评估。另外,为便于程序操作和使用,各功能模块被集成在同一界面内,相互之间按一定的逻辑顺序执行。

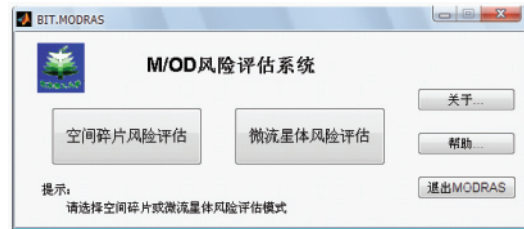


图 2 MODRAS 程序主界面

Fig. 2 Main interface of MODRAS

2 校验标准工况

针对 IADC 指定的 3 种标准工况进行 MODRAS 性能校验。通过将 MODRAS 分析结果与美国航空航天局的 BUMPER 系统、欧洲空间局的 ESABASE 系统、德国 MDPANTO 系统以及航天五院 MODAOST 等国内外同类软件分析结果进行比较,校验 MODRAS 的分析精度。校验任务参数如下:轨道高度为 400km,轨道倾角为 51.6°,发射时间为 2002 年,在轨 1 年。

IADC 指定的 3 种标准校验工况包括边长为 1m 的立方体、横截面积为 1m² 的球体和简单空间站,其中简单空间站的立方体边长和圆柱段直径均为 1m,x 方向的圆柱长为 3m,-y 和 -z 圆柱段的长为 1m,+z 圆柱段的长为 2m^[7]。3 种标准工况的有限元模型如图 3 所示,其中立方体表面划分为 600 个四边形单元,球体表面划分为 5400 个四边形单元,简单航天器划分为 296 个四边形单元。

3 校验结果

对单层墙及双层防护结构 (Whipple 防护结构) 航天器进行失效数校验,相关材料几何参数列于表 1,3 种情况的失效判据包括:① 成坑深度 $p \geq 1\text{mm}$ 粒子数;② 单层:穿透 1mm 厚单层墙 M/OD 数;③ 双层:穿透双层板 M/OD 数。立方体、球体和简单航天器的失效数校验结果分别列于表 2~表 4,单层结构航天器失效数分布如图 4~图 6 所示。

从表 2~表 4 可以看出,在微流星体环境下,MODRAS 与 BUMPER 程序失效数分析结果相差在 4% 以内;而在空间碎片环境下,失效数分析结果最大相差 8%,而 ESABASE 及

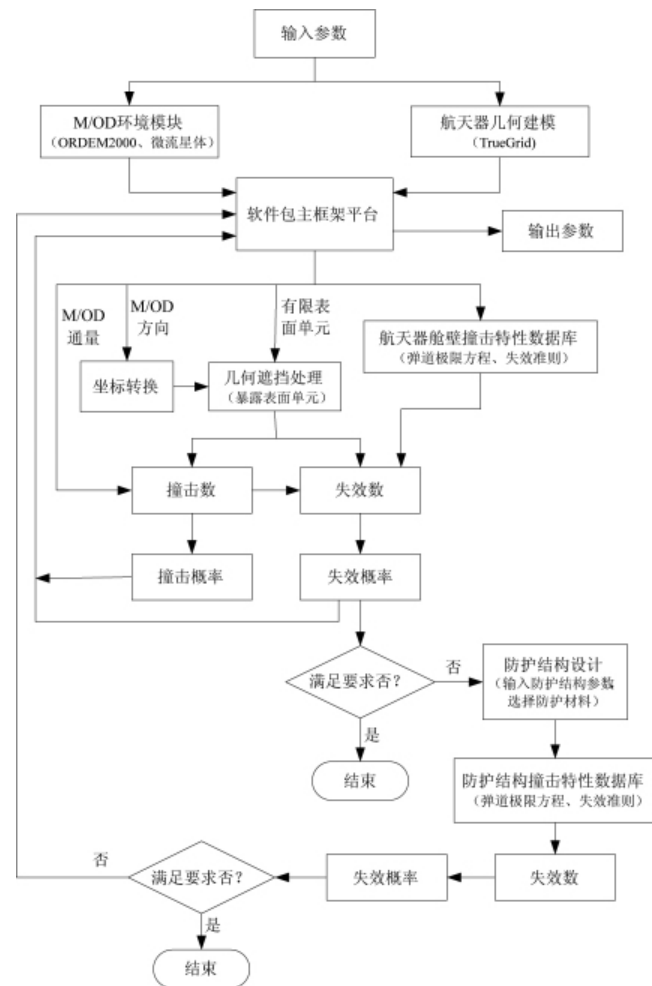


图 1 M/OD 失效风险评估系统总体框架

Fig. 1 Framework of MODRAS

表 4 简单空间站表面 M/OD 失效数校验结果
Table4 Failure numbers of simple space station case

环境模型		评估软件				
		BUMPER	ESABASE	MDPANTO	MODAOST	MODRASS
ORDEM2000	$p \geq 1\text{mm}$	1.227	—	—	1.116	1.323
	单层	6.150	—	—	5.583	6.261
	双层	8.934×10^{-5}	—	—	9.376×10^{-5}	8.488×10^{-5}
Meteoroid	$p \geq 1\text{mm}$	4.187×10^{-1}	3.400×10^{-1}	3.732×10^{-1}	3.729×10^{-1}	4.207×10^{-1}
	单层	2.819	2.470	2.564	2.536	2.845
	双层	1.297×10^{-4}	4.900×10^{-5}	4.657×10^{-5}	1.440×10^{-4}	1.332×10^{-4}

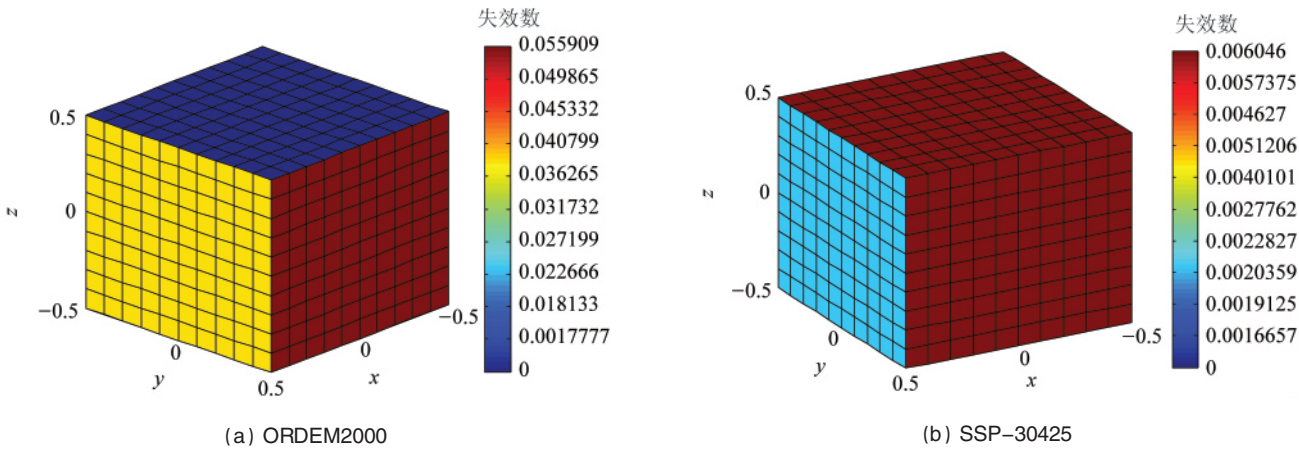


图 4 立方体表面失效数分布
Fig. 4 Failure numbers distribution of cube case

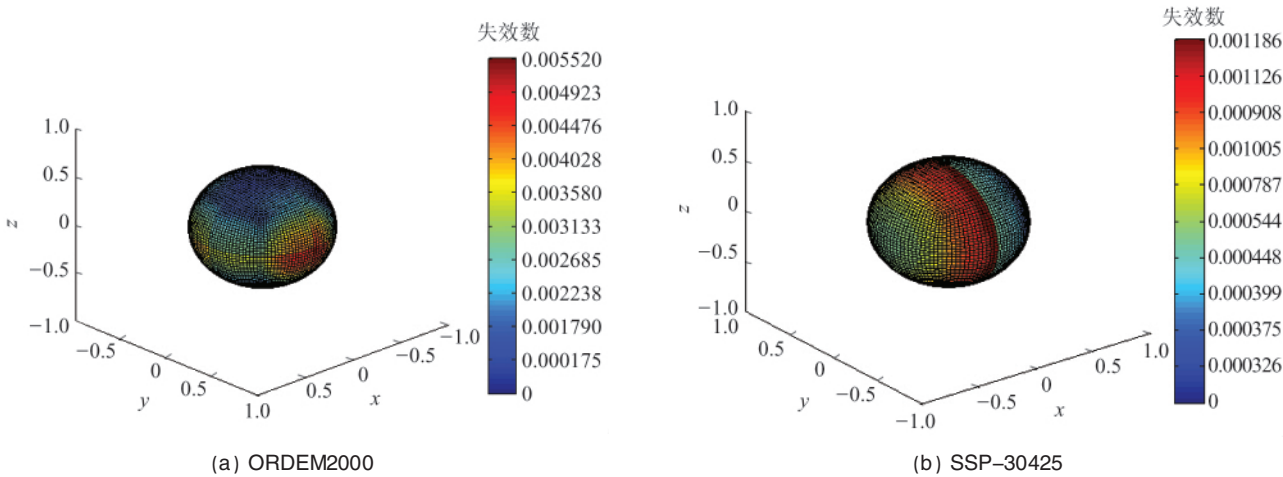


图 5 球体表面失效数分布
Fig. 5 Failure numbers distribution of sphere case

MODAOST 未提供 ORDEM2000 环境下的分析结果，表明 MODRAS 失效分析精度是可接受的。另外,从图 4-图 6 可以看出，航天器的正面和侧面遭遇 M/OD 撞击的失效风险明显高于其他表面,主要因为空间碎片具有方向性,作用于航天

器正面和侧面的通量更大;航天器遭遇微流星体碰撞的失效数呈带状分布,主要因为微流星体没有方向性,只需考虑地球屏蔽和引力会聚等效应的影响,致使航天器面向和背向地球的表面,遭遇微流星体的失效数明显低于其他表面。

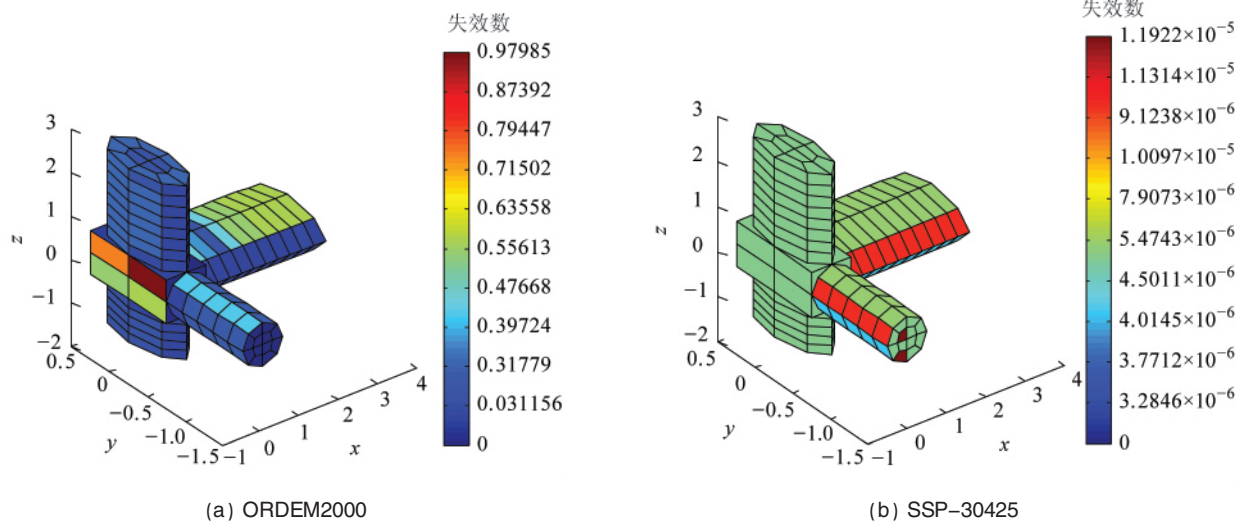


图 6 简单空间站表面失效数分布

Fig. 6 Failure numbers distribution of simple space station case

4 结论

科学评估航天器遭遇 M/OD 撞击的失效概率是确定航天器防护设计的重要依据。随着 M/OD 环境的日益恶化,通过对 M/OD 失效风险仿真评估研究,决定航天器是否需要防护结构设计及采用何种防护结构,确保航天器在轨安全运行,其意义更显突出和重要。为此,笔者在 Matlab 平台上自主开发了 M/OD 风险评估软件系统 MODRAS。

1) 给出了空间碎片失效风险评估系统总体框架。

2) 针对 IADC 指定的 3 种标准工况,MODRAS 的分析结果与美国航空航天局的 BUMPER 系统、欧洲空间局的 ESABASE 系统、德国 MDPANTO 系统以及中国航天五院 MODAOST 等国内外同类软件分析结果具有相同的精度。

3) 给出了单位立方体、单位球体及简单空间站遭遇 M/OD 撞击时的表面失效数分布。

参考文献 (References)

[1] Meshcheryakov S. The orbital debris impact risk analysis methods, the COLLO system [C]. Third European Conference on Space Debris.

Darmstadt, Germany, 2000.

[2] Liu Y, Wang H. Corrugation stuffed shield for spacecraft and its performance [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2006, 15(4): 397-400.

[3] Olsen G D, Nolen A M. Advanced shield design for space station FREEDOM[J]. *Int J Impact Eng*, 1993, 14: 541-549.

[4] 刘有英,王海福,黄海. 空间碎片防护结构效能评价仿真系统和应用 [J]. 科技导报, 2009, 27(18): 33-37.

Liu Youying, Wang Haifu, Huang Hai. *Science & Technology Review*, 2009, 27(18):33-37.

[5] 刘有英. 空间碎片碰撞风险评估建模与仿真技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学宇航学院, 2007.

Liu Youying. Modeling and simulation of orbital debris risk assessment [D]. Beijing: School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, 2007.

[6] Wang H, Yu Q, Liu Y. Meteoroid and orbital debris risk assessment and shielding system [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2009, 18 (1): 6-10.

[7] IADC WG3 members. Protection manual [M]. Inter Agency Debris Committee, 2004.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·

“第二届全国边坡工程学术研讨会”征文

在中国超大规模的工程建设中,遇到大量的天然边坡和人工边坡,有些边坡在规模和高度方面甚至是世界罕见的。由于问题本身的复杂性,边坡及滑坡一直是当今国内外岩土领域的热点和难点课题。为此,中国建筑学会将于 2010 年 4 月 9-13 日在成都市举办“第二届全国边坡工程学术研讨会”。

会议征文范围如下:边坡工程勘察技术;工程物探技术滑坡研究中的应用;边坡(滑坡)稳定性评估方法、分析计算模型;边坡(滑坡)监测与预警技术;边坡防护及边坡加固技术;边坡生态防护技术的最新进展;GIS 在滑坡工程中的应用等;城市边坡管理系统及土地利用控制;边坡工程实例。

会议网站:<http://www.geot.com.cn>

联系电话:010-84041273;传真:010-84025805;电子信箱:blili@geot.com.cn,qxu@geot.com.cn。

