

环境试验与观测

# AP9/AE9/SPM 辐射环境模型研究

田天<sup>1,2</sup>, 常峥<sup>3</sup>, 马杰<sup>2</sup>, 白钧水<sup>2</sup>, 王舸<sup>2</sup>, 李杨<sup>2</sup>

(1.国防科技大学 气象海洋学院, 长沙 410073; 2.北京市 5111 信箱, 北京 100094;  
3.中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

**摘要:** 对辐射环境模型 AP9/AE9/SPM 进行了系统研究, 重点分析了 AP9/AE9/SPM 辐射环境模型的发展历程、建模数据、模型能力、模型使用方法、模型特点和局限性以及发展趋势。总结了 AP9/AE9/SPM 辐射环境模型“螺旋式上升”研发途径中所发布的 11 个版本的特点、数据覆盖时间范围和能量范围。指出 AP9/AE9/SPM 辐射环境模型在研发过程中是通过不断地将最新的观测数据和理论知识进行整合, 达到扩展模型能量覆盖范围、增加空间粒子分布的目的。最新的 AP9/AE9/SPM 辐射环境模型具备了命令行和图形用户接口应用程序 2 种灵活便捷的使用方式, 能覆盖完整的辐射带空间, 基本实现了电子和质子能量范围的全覆盖。但目前最新版本的 AP9/AE9/SPM 仍然存在一些局限, 这些局限会随着辐射带探测数据的积累和人类对辐射带机理的进一步认知而逐渐得到改善。该研究可帮助用户快速了解并正确使用 AP9/AE9/SPM 辐射环境模型, 为我国自主辐射环境模型研发提供重要参考。

**关键词:** AP9/AE9/SPM 辐射环境模型; 发展历程; 模型能力; 模型使用; 模型特点; 模型局限性; 发展趋势  
**中图分类号:** P353.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9242(2022)05-0149-08

**DOI:** 10.7643/ issn.1672-9242.2022.05.019

## AP9/AE9/SPM Radiation Environment Model

TIAN Tian<sup>1,2</sup>, CHANG Zheng<sup>3</sup>, MA Jie<sup>2</sup>, BAI Jun-shui<sup>2</sup>, WANG Ge<sup>2</sup>, LI Yang<sup>2</sup>

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Mail-box 5111, Beijing 100094, China; 3. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**ABSTRACT:** The AP9/AE9/SPM radiation environment model is systematically studied. The development history, modeling data, model capability, application methods, model characteristics, model limitations and development trend of AP9/AE9/SPM radiation environment model are mainly introduced. The characteristics, data coverage time range and energy range of the 11 released versions in the AP9/AE9/SPM radiation environment model “spiral” development pathway are summarized. During the development process, it is pointed out that the AP9/AE9/SPM radiation environment model is constantly integrated with the latest data and theoretical knowledge to achieve the purpose of extending the model energy coverage and increasing the spatial particle distribution. The newly released AP9/AE9/SPM radiation environment model can be used in both command-line applications and graphical user interface applications, covering the complete radiation belt, basically covering the energy range of

收稿日期: 2021-04-23; 修订日期: 2021-05-28

Received: 2021-04-23; Revised: 2021-05-28

作者简介: 田天 (1982—), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为空间环境预报。

**Biography:** TIAN Tian (1982-), Female, Doctor, Engineer, Research focus: space environment forecast.

通讯作者: 常峥 (1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空间环境效应。

**Corresponding author:** CHANG Zheng (1979-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: space environmental effects.

引文格式: 田天, 常峥, 马杰, 等. AP9/AE9/SPM 辐射环境模型研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 149-156.

TIAN Tian, CHANG Zheng, MA Jie, et al. AP9/AE9/SPM Radiation Environment Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 149-156.

electrons and protons. However, the latest version of AP9/AE9/SPM still has some limitations, which will be gradually improved with the accumulation of radiation belt detection data and the further cognition of the mechanism of radiation belts. The research in this paper can help users quickly understand and correctly use the AP9/AE9/SPM model, and provide an important reference for the research and development of the independent radiation belt model in China.

**KEY WORDS:** AP9/AE9/SPM radiation environment model; development process; model capability; method of application; model characteristics; model limitations; Development trend.

空间辐射环境是引起航天器材料和器件性能退化甚至失效的主要环境因素,近地轨道带电粒子辐射主要来源于地球辐射带、太阳宇宙线和银河宇宙线。地球辐射带是指地球磁层中被地磁场捕获的高能带电粒子区域<sup>[1]</sup>。常用的地球辐射环境模型包括美国NASA研发的AP/AE系列模型、CRRESPRO质子模型、NOAAPRO质子模型、CRRESELE电子模型、POLE电子模型等<sup>[2-5]</sup>。其中,AP/AE系列模型中的AP8/AE8更是被世界各国普遍采用<sup>[6-7]</sup>,但由于AP8/AE8模型建模数据距今已经超过40年,并且AP8/AE8本质上属于静态模型,不能提供辐射带对各种空间环境突发性扰动事件响应,在使用过程中逐渐暴露出一系列问题<sup>[8-10]</sup>。为了更好地满足卫星设计需求,2006年,美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)与麻省理工学院林肯实验室、航空航天公司、大气和环境研究公司、洛斯阿拉莫斯国家实验室和波士顿学院科学研究所合作,开发了新一代辐射环境模型。这个新模型的质子和电子版本被分

别命名为AP9和AE9,等离子体模型被命名为SPM(Standard Plasma Model)。AP9/AE9/SPM是一套用于空间系统设计、任务规划和其他气候规范应用的近地空间辐射环境模型。该模型为Windows用户提供可执行版本,而开发人员或UNIX用户,可以受限地从AFRL请求源代码。发布的软件包括模型软件、用户指南、验证报告和其他常规文档。完整的技术文档由<https://www.vdl.af.mil/programs/AE9AP9/>网站提供。截至到2017年12月1日,AP9/AE9/SPM共发布了11个版本,最新版本为V1.50.001<sup>[11]</sup>。

## 1 发展历程和模型能力

自2006年开始研发,AP9/AE9/SPM历经了15年的发展历程,伴随探测数据的不断丰富和基础物理模式的更新,截至到2017年,AP9/AE9/SPM推出了一系列版本<sup>[11]</sup>。AP9/AE9/SPM已经发布的11个版本的情况见表1<sup>[12]</sup>。由表1可以看出,AP9/AE9/SPM

表1 AP9/AE9/SPM已经发布的11个版本及其特点  
Tab.1 Released versions and characteristics of AP9/AE9/SPM

版本号	发布时间	增加特性	增加数据
V1.00.002	2012-09-05	第一个正式版本	8个质子数据集 17个电子数据集 6个等离子体数据集
V1.03.001	2012-09-26	改进图形用户界面 描述历元 错误修正	N/A
V1.04.001	2013-03-20	集成等离子体积分工具错误修正	N/A
V1.04.002	2013-06-20	集成等离子体积分工具	N/A
V1.05.001	2013-09-06	修正SHIELDOSE-2	N/A
V1.20.002	2015-02-04	更多的输入/输出选项 增加IGRF2015 错误修正	TacSat-4/CEASE质子数据 THEMIS/ESA等离子体数据 AP9能量范围拓展到2 GeV 修正部分电子数据的交叉定标
V1.20.003	2015-04-20	增加已知重要功能的文档错误修正	N/A
V1.20.004	2015-10-14	修正等离子体积分工具的错误	N/A
V1.30.001	2016-02-09	修正AP9/AE9的蒙特卡洛计算功能	N/A
V1.35.001	2017-01-23	增加对并行计算的支持	N/A
V1.50.001	2017-12-01	改进API 新的输出工具	Allen Probes/RPS+REPT质子数据 Allen Probes/MagEIS电子数据 Azur质子数据 TWINS2/HiLET质子数据

每次发布的新版本与前一个版本相比都会有显著的改进,例如增加了新数据或者采用了新算法。这种“螺旋式上升”的研发途径,会使 AP9/AE9/SPM 功能性能逐渐完善,以满足用户的最终需求<sup>[13]</sup>。

AP9/AE9/SPM 在研发过程中不断吸收新的探测数据<sup>[14]</sup>。AP9/AE9/SPM 的第一个正式版本 V1.00 使用了 31 组数据,而到 2017 年 12 月,发布的 V1.50 使用了 45 个长持续时间、高质量的数据集。这些数据集跨

越了多个太阳活动周期,可以更好地反应各种空间环境状态的统计特征。AP9/AE9/SPM 的未来版本还将吸收 NASA 的范艾伦探针 (Van Allen Probes satellites) 卫星和演示与科学实验 (Demonstration and Science Experiments, DSX) 任务卫星的数据。AP9/AE9/SPM 使用数据的基本情况见表 2<sup>[15-17]</sup>, AP9/AE9/SPM V1.5 版本的能量和空间覆盖范围见表 3<sup>[18-19]</sup>。可以看出,最新的 AP9/AE9/SPM 模型能覆盖完整的辐射带空间,

表 2 AP9/AE9/SPM 使用的卫星、卫星轨道、数据覆盖的时间范围和能量范围  
Tab.2 Satellite, satellite orbit, time range and energy range of data used for AP9/AE9/SPM

粒子	卫星/探测器	轨道 (近地点×远地点, 倾角)	时间范围	能量范围	引入版本
质子	CRRES/PROTEL	350 km×33 000 km, 18°	1990—1991	2.0~80 MeV	V1.00
	S3-3/Telescope	236 km×8 048 km, 97.5°	1976—1979	0.1~ 2.0 MeV	V1.00
	HEO-F1/Dosimeter	500 km×39 000 km, 63°	1994—2011	10~400 MeV	V1.00
	HEO-F3/Dosimeter	500 km×39 000 km, 63°	1997—2011	10~400 MeV	V1.00
	ICO/Dosimeter	1 000 circular, 45°	2001—2009	10~400 MeV	V1.00
	TSX5/CEASE	410 km×1 710 km, 69°	2001—2006	10~400 MeV	V1.00
	POLAR/IPS	5 100 km×51 000 km, 86°	1996—2008	0.1~1.0 MeV	V1.00
	POLAR/HISTp	5 100 km×51 000 km, 86°	1996—2008	6.0~15.0 MeV	V1.00
	TacSat-4/CEASE	700 km×12 050 km, 63°	2011—2013	1~80 MeV	V1.20
	Van Allen Probe A/RPS/REPT	800 km×30 600 km, 10°	2012—2016	20~2000 MeV	V1.50
	Van Allen Probe B/RPS/REPT	800 km×30 600 km, 10°	2012—2016	20~2000 MeV	V1.50
	Azure/EI-88	380 km×2 140 km, 103°	1969—1970	1.5~104 MeV	V1.50
	TWINS 2/HiLET	1 000 km×39 500 km, 63°	2008—2016	5~30 MeV	V1.50
	电子	CRRES/MEA/HEEF	350 km×33 000 km, 18°	1990—1991	0.1~7.0 MeV
SCATHA/SC3		28 000 km×43 000 km, 7.8°	1979—1991	0.25~4.5 MeV	V1.00
HEO-F1/Dos/Tel		500 km×39 000 km, 63°	1994—2011	1.5~10.0 MeV	V1.00
HEO-F3/Dos/Tel		500 km×39 000 km, 63°	1997—2011	0.5~5.0 MeV	V1.00
ICO/Dosimeter		1 000 circular, 45°	2001—2009	1.0~7.0 MeV	V1.00
TSX5/CEASE		410×1 710 km, 69°	2001—2006	0.07~3.0 MeV	V1.00
SAMPEX/PET		550×675 km, 82°	1992—2004	2.0~3.5 MeV	V1.00
POLAR/HISTe		5 100 km×51 000 km, 86°	1996—2008	1.0~6.0 MeV	V1.00
GPS/BDDII ns18		20 200 km circular, 55°	1990—1994	0.25~1.0 MeV	V1.00
GPS/BDDII ns24		20 200 km circular, 55°	1991—2000	0.25~1.0 MeV	V1.00
GPS/BDDII ns28		20 200 km circular, 55°	1992—1996	0.25~1.0 MeV	V1.00
GPS/BDDII ns33		20 200 km circular, 55°	1996—2004	0.25~1.0 MeV	V1.00
LANL-GEO/SOPA 1989-046		36 000 km circular, 0°	1989—2008	0.05~1.5 MeV	V1.00
LANL-GEO/SOPA 1990-095		36 000 km circular, 0°	1990—2005	0.05~1.5 MeV	V1.00
LANL-GEO/SOPA LANL-97A		36 000 km circular, 0°	1997—2008	0.05~1.5 MeV	V1.00
LANL-GEO/SOPA LANL-02A		36 000 km circular, 0°	2002—2008	0.05~1.5 MeV	V1.00
Van Allen Probe A/MagEIS		800 km×30 600 km circular, 10°	2012—2016	0.04~0.9 MeV	V1.50
Van Allen Probe B/MagEIS		800 km×30 600 km circular, 10°	2012—2016	0.04~0.9 MeV	V1.50
等离子体		POLAR/CAMMICE/MICS	5 100 km×51 000 km, 86°	1997—1999	1.2~1.64 keV
	POLAR/HYDRA	5 100 km×51 000 km, 86°	1997—1999	1.0~40.0 keV	V1.00
	LANL-GEO/MPA 1990-095	36 000 km circular, 0°	1990—2005	1.0~63.0 keV	V1.00
	LANL-GEO/MPA 1991-080	36 000 km circular, 0°	1991—2004	1.0~63.0 keV	V1.00
	LANL-GEO/MPA 1994-084	36 000 km circular, 0°	1994—2008	1.0~63.0 keV	V1.00
	LANL-GEO/MPA LANL-97A	36 000 km circular, 0°	1997—2008	1.0~63.0 keV	V1.00
	THEMIS A/ESA	440 km×92 000 km, 16°	2007—2013	1~60 keV	V1.20
	THEMIS B/ESA	440 km×92 000 km, 16°	2007—2010	1~60 keV	V1.20
	THEMIS C/ESA	440 km×92 000 km, 16°	2007—2010	1~60 keV	V1.20
	THEMIS D/ESA	440 km×92 000 km, 16°	2007—2013	1~60 keV	V1.20
	THEMIS E/ESA	440 km×92 000 km, 16°	2007—2013	1~60 keV	V1.20

表3 AP9/AE9/SPM 的能量和空间覆盖范围  
Tab.3 Species and spatial/energy ranges covered by the AE9/AP9/SPM models

模型	粒子种类	能量范围	空间范围
AE9	e	40 keV~10 MeV	$0.98R_e < L^* < 12.4R_e$
AP9	H <sup>+</sup>	100 keV-2 GeV (V1.20)	$0.98R_e < L^* < 12.4R_e$
SPM	e, H <sup>+</sup> , He <sup>+</sup> , O <sup>+</sup>	1~40 keV (e); 1.15~164 keV (H <sup>+</sup> , He <sup>+</sup> , O <sup>+</sup> )	$2R_e < L_m < 10R_e$

注:  $R_e$  为地球半径;  $L_m$  是传统的 McIlwain L 值<sup>[20]</sup>;  $L^*$  是 Roederer L 值<sup>[21]</sup>。

在能量覆盖范围上, 也基本实现了电子和质子能量范围的全覆盖, 模型能力得到很大提升。

## 2 模型使用方法

AP9/AE9/SPM 模型提供 2 种灵活的使用方式, 分别是命令行 CmdLineAE9AP9 和图形用户接口 (Graphical User Interface, GUI) 应用程序 AE9AP9Gui。命令行应用程序 CmdLineAE9AP9 从用户构建的输入文件中加载模型参数和轨道位置规范, 并根据要求生成一组相应的输出文件, 其中包含星历、通量、剂量等计算结果。GUI 应用程序 AE9AP9Gui 为 CmdLineAE9AP9 应用程序提供了一个图形前端, 用户可以方便地进行轨道路径和各种模型参数的设置, 根据设置生成输入文件后, 自动执行 CmdLineAE9AP9 应用程序, 模型结果以二维图像的形式进行显示<sup>[11]</sup>。

## 2.1 模型输入

### 2.1.1 命令行应用程序输入

CmdLineAE9AP9 输入文件设置可以在逻辑上分为以下 5 个类别<sup>[11]</sup>。

- 1) 基本模型输入: 模型核心参数, 模型运行必须要设置的基本参数。表 4 概要介绍了 CmdLineAE9AP9 模型的基本输入。
- 2) 高级模型输入: 用于输入/输出格式和投掷角的可选设置。
- 3) 累积和汇总输入: 用于复杂输出结果的可选设置。
- 4) 剂量计算输入: 用于驱动 SHIELDOSE-2 模型计算的可选设置。
- 5) 轨道推算算法输入: 用于生成轨道星历的可选设置。

表4 AP9/AE9/SPM 命令行应用程序的基本模型输入  
Tab.4 Basic model input for AP9/AE9/SPM command line applications

参数关键字名	取值	是否必须	默认值	描述
ModelType	AE9、AP9、Plasma 传统模型 (AE8、AP8、CRRESELE、CRRESPRO、CAMMICE)	必须	无	要运行的模型类型(需要在 ModelDB 参数中指定相应的数据库文件)
ModelDB	<path>/AE9V15_runtime_tables.mat <path>/AP9V15_runtime_tables.mat <path>/SPMEV12_runtime_tables.mat <path>/SPMHV12_runtime_tables.mat <path>/SPMHEV10_runtime_tables.mat <path>/SPMOV10_runtime_tables.mat	必须	无	用于驱动模型的数据库文件, 对应于所选的模型类型
MagFieldDB	<path>/igrfDB.h5	必须	无	磁场模型的数据库文件
KPhiNNetDB	<path>/fastPhi_net.mat	必须	无	K/Phi 坐标神经网络的数据库文件
KHminNNetDB	<path>/fast_hmin_net.mat	必须	无	K/Hmin 坐标神经网络的数据库文件
OutFile	valid path and file name prefix	必须	无	生成模型输出文件时将使用的路径和文件名“前缀”; 这些文件的命名基于该前缀, 并且输入文件中还指定了各种模型数据输出和聚合参数
OrbitFile	valid path and file name of ephemeris file	必须	无	包含时间和位置信息的星历文件
FluxType	1PtDiff 2PtDiff Integral	必须	无	要计算的通量类型
Energies	AE9: 0.04~10.0 MeV AP9: 0.1~2 000.0 MeV [Plasma models valid for $2 \leq L_m \leq 10$ ] Plasma/electrons: 0.001~0.040 MeV Plasma/ions: 0.001 15~0.164 3 MeV	必须	无	以逗号分隔的能级列表, 以 MeV 为单位, 在每个时间步上计算通量值

续表 4 AP9/AE9/SPM 命令行应用程序的基本模型输入  
Tab.4 Basic model input for AP9/AE9/SPM command line applications

参数关键字名	取值	是否必须	默认值	描述
Energies2	AE9: 0.04~10.0 MeV AP9: 0.1~2 000.0 MeV [Plasma models valid for $2 \leq L_m \leq 10$ ] Plasma/electrons: 0.001~0.040 MeV Plasma/ions: 0.001 15~0.164 3 MeV	按需	无	仅在“FluxType”=“2PtDiff”时使用。 用于定义能量范围的终点,“Energies” 参数能量范围的起点
FluxOut	Mean Percentile,## Perturbed,### MonteCarlo,###	必须	无	生成/输出的通量数据
FluenceOut FlueOut	True False	按需	False	生成/输出的流量数据
DoseRateOut DoseOut	True False	按需	False	生成/输出的剂量率数据
DoseAccumOut CDoseOut	True False	按需	False	生成/输出的累积剂量数据

AP9/AE9/SPM 除了需要输入模型类型、航天器星历、驱动模型的数据库文件、粒子能量等基本模型输入参数以外,还可根据需要选择或者设置相关的高级模型输入参数、累积和汇总输入参数、剂量计算输入参数和轨道推算算法参数。比如, AP9/AE9/SPM 集成了 AP8/AE8、CRRESPRO/ELE 和 SHIELDOSE-2 程序,如果需要使用以上模型或程序时,输入中还应包括 AP8/AE8 模式、CRRESPRO/ELE 模式和 SHIELDOSE-2 程序所需的各项参数。具体参数的使用可查阅 AE9/AP9/SPM 辐射环境模型使用手册<sup>[11]</sup>。

### 2.1.2 图形用户接口应用程序输入

AE9AP9Gui 应用程序为使用 CmdLineAE9AP9 应用程序执行模型运行提供了一个简单的图形用户界面<sup>[11]</sup>。用户在界面中作出选择和设置,即可生成并执行具有相应参数设置的模型运行输入文件,模型计算结果以二维图像进行展示。

GUI 控件被分为 3 个标签页,分别标记为“卫星”、“模型”和“绘图”,遵循典型的模型运行会话进程:轨道路径在“卫星”标签页上定义;辐射环境模型在“模型”标签页选择、配置和执行;模型运行结果使用“绘图”标签页显示。

1) 卫星标签页。通过卫星标签页设置轨道规格类型,选择轨道推算算法,设定轨道参数以及时间等必要信息,这些信息用于定义特定时间段和时间步长沿卫星轨道路径计算辐射环境模型值的时间和轨道位置。

2) 模型标签页。通过模型标签页设置模型的运行路径、运行名称、模型名称、电子/质子能量,等效 AI 屏蔽层厚度、通量/流量类型等需要用户指定的参数,用于计算在已定义的星历表位置上的模型结果。

3) 绘图标签页。绘图标签页是对模型计算结果进行二维图像显示。

### 2.1.3 模型输出

AP9/AE9/SPM 的模型输出包括:对应输入时空位置的粒子通量、累积辐射总剂量和辐射剂量增长率的仿真结果。由于 AP9/AE9/SPM 集成了 SHIELDOSE-2 程序,因此可以使用输出的粒子通量,结合输入中的有关参数,包括等效 AI 屏蔽厚度、目标探测器类型、充电介质的几何形状、考虑的核反应类型等信息,计算出输入时间段内的累积辐射总剂量和辐射剂量增长率。

## 3 模型特点

AP9/AE9/SPM 模型不断地将最新的观测数据和理论知识进行整合,卫星设计人员可以使用该模型为穿越地球辐射带的发射任务制定辐射规范。该模型涵盖了从 keV 到 GeV 能量的捕获粒子和等离子体。它提供了均值和瞬态环境,并采用置信度水平进行评估。与以往的辐射环境模型相比, AP9/AE9/SPM 有许多重要改进<sup>[14,22-24]</sup>,包括以下内容:

1) 扩展能量覆盖范围。以往的模型能量范围一般仅覆盖高能质子和/或高能电子, AP9/AE9/SPM 能量覆盖范围扩展到了等离子体。

2) 增加了空间粒子分布和计算结果不确定度的描述<sup>[25]</sup>。以往的模型以单一数值的方式表示辐射带状态, AP9/AE9/SPM 用统计学方式描述空间粒子分布和计算结果的不确定度。

3) 增加了辐射带粒子随时间演化的描述。以往的模型不能表示辐射带的时间演化,或仅能单独给出几个离散的状态。 AP9/AE9/SPM 基于统计方式给出了辐射带粒子随时间的演化,在时间演化中考虑了多种粒子辐射效应对应的特征时间尺度。

4) 更加灵活便捷的使用方式。以往的模型一般以应用程序接口 (Application Programming Interface, API) 形式提供给用户,要求用户具备一定的编程能

力,使用起来有一定难度。AP9/AE9/SPM 以应用程序或图形界面的形式提供给用户<sup>[11]</sup>,程序运行在命令行或图形模式下,包含输入和输出界面,用户体验较好。同时,AP9/AE9/SPM 也保留了 API 模式<sup>[26]</sup>,用于应用程序的扩展和满足某些用户的二次开发需求。程序除了包含有 AP9/AE9/SPM 的功能以外,还集成了剂量计算程序 SHIELDSE-2<sup>[27]</sup>、辐射环境模型 AP8/AE8、CRRESPRO、CRRESELE 和等离子体模型 CAMMICE/MICS<sup>[28]</sup>。

## 4 模型局限性

目前,AP9/AE9/SPM 最新版本 V1.50 仍然存在一些局限性,这些局限主要是由以下 2 方面原因引起。其一是某些特定能量、空间和时间范围的实测数据较少甚至缺失;另外,AP9/AE9/SPM 集成了特定的外部模型,而这些外部模型又具有各自的局限性。AP9/AE9/SPM 的局限性主要包括<sup>[29]</sup>:

1) 不能描述太阳活动周变化,特别是 LEO 轨道质子变化。

2) LEO 区域 <20 MeV 质子通量的不确定性过大,这是由卫星实测数据的有效性较低以及数据覆盖稀疏造成的。

3) LEO 区域粒子通量沿高度的变化梯度存在较大的不确定性。

4) 内辐射带所有能量电子的误差棒不准确。范艾伦探针的探测结果表明,内辐射带内不存在 >1.5 MeV 的电子。这与过去的探测结果相矛盾,目前尚不清楚内辐射带的这一状态是临时性的还是常态。

5) 目前 AP9 估算的内辐射带质子通量水平过高,希望通过改进范艾伦探针数据的处理,在未来版本中解决这一问题。

6) 在特定的区域和状态下,AP9 沿同一路径估算的通量会出现不连贯的现象。这是由于模型中低高度和较高高度 2 个区域的通量是分开计算的,模型对这 2 部分结果的衔接处理不足。这一现象预计随着建模数据的积累会逐步得到解决。

7) SPM 的误差棒比实际的不确定度要低,特别是 O<sup>+</sup>和电子。O<sup>+</sup>和 He<sup>+</sup>模型仅由 1 个数据集构建,不能通过测量不同数据集之间的不一致性确定不确定度。

8) SPM 不包含磁地方时变化,未来版本将会解决这一问题。

9) 模型不能对非捕获粒子(如太阳质子)进行计算,未来版本将会解决这一问题。

10) 采用国际地磁参考场模型(International Geomagnetic Reference Field, IGRF)描述主地磁场,受 IGRF 自身系数表的限制,2020 年 1 月 1 日以后的地磁场变化将不能被描述,后续的模式研发可能会使

模型具备跨越该日期的能力。

11) IGRF 每 5 年更新 1 次系数,如果分别使用新、旧系数进行计算,计算结果之间的均方根误差大约为 1%。如果将这 1% 的误差引入到模型对通量的计算中,可能会带来 5%~15% 的均方根误差。当模型的新、旧版本使用的 IGRF 系数不同时,对同一场景的计算结果会有较大差距。

12) 即使在使用多线程处理的情况下,辐射剂量的计算速度依然较慢,未来版本将通过采用新计算内核和调整并行任务的调度算法来改善计算性能。

13) 目前 32 位 Windows 平台还不支持命令行模式和 API 模型下的多线程运行,这是因为 Intel 当前版本的消息传递接口(Message Passing Interface, MPI)库对该平台的支持不好。

## 5 发展趋势

AE9/AP9/SPM 辐射环境模型仍在不断发展,它可用于指导航天器系统设计,用于评估航天器运行过程中可能遭受的平均和最坏空间辐射环境情况。模型每 1~2 年更新 1 次,包括新数据、新算法和新理论的使用。目前 V1.5 版本的最明显改进在于添加了新的数据源,极大地提高了模型的空间覆盖范围。在 V1.5 版本发布后,开发小组将继续向 AE9/AP9/SPM 模型添加新功能。具体来说,V1.6 版本将增加新的范艾伦探针卫星数据;V2.0 版将过渡到模块化体系结构,加入新的质子模型;V2.5 版除了添加新的模型,还会使用 DSX 和 Arase 卫星探测的新数据<sup>[30-31]</sup>。

随着 AE9/AP9/SPM 模型不断发展,国际合作越来越密切,AE9/AP9/SPM 从 V1.5 版本开始向国际近地辐射环境(International Radiation Environment Near Earth, IRENE)命名法过渡。在过渡期间,AE9/AP9/SPM 和 IRENE 命名法将一起使用,在此之后,模型将简单地称为 IRENE<sup>[30-31]</sup>。

## 6 结语

新一代辐射环境模型 AP9/AE9/SPM 是一套用于空间系统设计、任务规划和其他气候规范应用的近地空间辐射环境模型,可用于指导航天器系统设计,评估航天器运行过程中可能遭受的平均和最坏空间辐射环境情况。与以往模型相比,AP9/AE9/SPM 不断将最新的观测数据和理论知识进行整合,扩展了模型能量覆盖范围,增加了空间粒子分布和计算结果不确定度的描述,使得模型使用更加灵活便捷,提供了命令行应用程序和图形用户接口应用程序 2 种使用方式。新的 AP9/AE9/SPM 辐射环境模型能覆盖完整的辐射带空间,基本实现了电子和质子能量范围的全覆盖。但目前最新版本的 AP9/AE9/SPM 仍然存在一些

局限, 比如不能描述太阳活动周变化, LEO 上 <20 MeV 质子通量的不确定性过大等。部分局限是由于某些特定能量、空间和时间范围的辐射带实测数据较少甚至缺失造成的, 另外一些局限是由集成到 AP9/AE9/SPM 的外部模型自身固有缺陷造成的。

随着辐射带探测数据的积累和人类对辐射带机理的进一步认知, AP9/AE9/SPM 模型不断发展会为航天器设计提供更精确的辐射带和等离子体环境描述。本文对 AP9/AE9/SPM 辐射环境模型的发展历程、建模数据、模型能力、模型使用方法、模型特点、局限性以及发展趋势进行了系统描述, 可帮助用户正确使用 AP9/AE9/SPM 辐射环境模型, 为我国自主辐射环境模型研发提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.  
SHEN Zi-cai. Space Radiation Environment Engineering [M]. Beijing: China Astronautical Press, 2013.
- [2] SAWYER D M, VETTE J I. AP8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum[R]. NASA STI/recon Technical Report N, NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1976.
- [3] HUSTON S L. Space Environments and Effects: Trapped Proton Model[R]. NASA STI/Recon Technical Report N2, 2002.
- [4] MEFFERT J D, GUSSENHOVEN M S. CRRESPRO Documentation[R]. Hanscom AFB, MA: Phillips Lab, 1994
- [5] BRAUTIGAM D H, BELL J T. CRRESELE Documentation[R]. Hanscom AFB, MA: Phillips Lab, 1995.
- [6] GINET G P, O'BRIEN T P. AE-9/AP-9 Trapped Radiation and Plasma Models Requirements Specification[R]. Air Force Research Laboratory & The Aerospace Corporation, 2009.
- [7] JORDAN C E. NASA Radiation Belt Models AP-8 and AE-8[R]. Radex Inc Bedford MA, GL-TR-89-0267, 1989.
- [8] DALY E J, LEMAIRE J, HEYNDERICKX D, et al. Problems with Models of the Radiation Belts[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2):403-415.
- [9] O'BRIEN T P. A Framework for Next-Generation Radiation Belt Models[J]. Space Weather, 2005, 3(7): 1-11.
- [10] BRAUTIGAM D H, RAY K P, GINET G P, et al. Specification of the Radiation Belt Slot Region: Comparison of the NASA AE8 Model with TSX5/CEASE Data[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(6): 3375-3380.
- [11] JOHNSTON W R, O'BRIEN T Paul, GINET G, et al. AE9/AP9/SPM Radiation Environment Model: User's Guide, Version 1.50.001[R]. Lexington, MA: Atmospheric and Environmental Research Inc, 2017.
- [12] Anonymous. AE9/AP9/SPM: Versions[EB/OL]. [2021-04-23]. <https://www.vdl.afrl.af.mil/programs/ae9ap9/versions-public.php>
- [13] 常峥. 地球辐射带建模框架和我国自主辐射带建模研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.  
Chang Zheng. Research of Earth Radiation Belts Model's Framework and Development of MORE[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [14] GINET G P, O'BRIEN T P, HUSTON S L, et al. AE9, AP9 and SPM: New Models for Specifying the Trapped Energetic Particle and Space Plasma Environment[J]. Space Science Reviews, 2013, 179(1/2/3/4): 579-615.
- [15] O'BRIEN, PAUL, JOHNSTON, WILLIAM Robert, et al. The AE9/AP9/SPM Next Generation Radiation Specification Models-Progress Report[C]//41st COSPAR Scientific Assembly. Turkey: [s. n.], 2016.
- [16] HUSTON S, GINET G, O'BRIEN T P, et al. AE/AP-9 Radiation Specification Model: An Update[C]//Proceedings of the GOMACTech-08 Conference. 2009: 17-18.
- [17] Anonymous. AE9/AP9/SPM: Data sets[EB/OL]. [2021-04-23]. <https://www.vdl.afrl.af.mil/programs/ae9ap9/datasets.php>.
- [18] JOHNSTON W R, O'BRIEN T P, GINET G P, et al. AE9/AP9/SPM: New Models for Radiation Belt and Space Plasma Specification [C]//Sensors and Systems for Space Applications VII. [s.l.]: SPIE, 2014.
- [19] Anonymous. AE9/AP9/SPM: Energy and Spatial Coverage[EB/OL]. [2021-04-23]. <https://www.vdl.afrl.af.mil/programs/ae9ap9/energy.php>
- [20] MCILWAIN C E. Coordinates for Mapping the Distribution of Magnetically Trapped Particles[J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(11): 3681-3691.
- [21] LI W, HUDSON M K. Earth's van Allen Radiation Belts: From Discovery to the van Allen Probes Era[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124(11): 8319-8351.
- [22] O'BRIEN T P, JOHNSTON W R, HUSTON S L, et al. Changes in AE9/AP9-IRENE Version 1.5[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(1): 462-466.
- [23] JOHNSTON W R, O'BRIEN T P, HUSTON S L, et al. Recent Updates to the AE9/AP9/SPM Radiation Belt and Space Plasma Specification Model[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015, 62(6): 2760-2766.
- [24] O'BRIEN T P, KWAN B P. Incorporating Radiation Effects into AE9/AP9[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(1): 457-461.
- [25] KWAN B P, O'BRIEN T P. Using Static Percentiles of AE9/AP9 to Approximate Dynamic Monte Carlo Runs for Radiation Analysis of Spiral Transfer Orbits[J]. IEEE

- Transactions on Nuclear Science, 2015, 62(3): 1357-1361.
- [26] WHELAN P. AE9/AP9/SPM Model Application Programming Interface, Version 1.00.000[R]. Lexington, MA: Atmospheric and Environmental Research Inc, 2014.
- [27] SELTZER S M. Updated Calculations for Routine Space-Shielding Radiation Dose Estimates: SHIELDOSE-2[R]. NIST Publication, 1994.
- [28] ROEDER J L, CHEN M W, FENNELL J F, et al. Empirical Models of the Low-Energy Plasma in the Inner Magnetosphere[J]. Space Weather, 2005, 3(12): S12B06.
- [29] Wm. Robert Johnston, T. Paul O'Brien, Gregory Ginot, et al. IRENE: AE9/AP9/SPM Radiation Environment Model Known Issues and Limitations, Version 1.50.001[R]. Lexington, MA: Atmospheric and Environmental Research Inc, 2017.
- [30] JOHNSTON W, O'Brien P, HUSTON S, et al. AE9/AP9-IRENE Version 1.5: Updated Space Radiation Climatology Model[C]//42nd COSPAR Scientific Assembly. [s. l.]: PRBEM, 2018.
- [31] JOHNSTON W, O'Brien P, HUSTON S, et al. Planned upgrades to the AE9/AP9-IRENE Space Radiation Climatology Model[C]//42nd COSPAR Scientific Assembly. [s. l.]: PRBEM, 2018.

责任编辑：刘世忠