

文章编号: 1671-0576(2021)02-0055-06

电大尺寸目标与复杂场景融合的 SAR 成像仿真

刘 琢^{1,2}, 王 峰^{1,2}, 李永晨³, 王海鹏^{1,2}

(1. 复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433; 2. 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433; 3. 上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘 要: 针对电大尺寸目标与复杂场景融合的合成孔径雷达(SAR)成像问题, 通过对目标的精细建模及复杂场景的布设, 分别采用双向解析射线追踪算法和映射投影算法计算电大尺寸目标和复杂场景的电磁散射, 获得电大尺寸目标与复杂场景融合的 SAR 成像结果。在实现目标高精度 SAR 成像仿真的同时, 兼顾了大范围场景 SAR 成像仿真的效率, 为目标与复杂场景融合 SAR 成像仿真提供了一种有效途径。

关键词: 合成孔径雷达成像; 复杂场景; 电大尺寸目标; 融合成像

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2021.02.012

SAR Imaging Simulation for Fusion of Electrically Large Targets and Complex Scenes

LIU Zhuo^{1,2}, WANG Feng^{1,2}, LI Yong-chen³, WANG Hai-peng^{1,2}

(1. School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Shanghai 200433, China;
3. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the problem of the synthetic aperture radar(SAR) imaging of the fusion of electrically large targets and complex scenes, the fine modeling of target and the layout of complex scenes are carried out. The electromagnetic scattering of electrically large targets and complex scenes are calculated by the bidirectional analytical ray tracing(BART) algorithm and the mapping and projection algorithm(MPA) respectively, then the SAR imaging results could be obtained. While realizing the high-precision SAR imaging simulation of targets, it also considers the efficiency of large-scale scenes SAR imaging simulation, which provides an effective way for the SAR imaging simulation of fusion of targets and complex scenes.

Key words: SAR imaging; complex scene; electrically large target; fusion imaging

收稿日期: 2020-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(61901122,61991421); 高分重大专项航空观测系统(30-H30C01-9004-19/21); 上海航天科技创新基金(SAST2019-073)

作者简介: 刘 琢(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事 SAR 成像仿真技术研究。

0 引言

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 具有全天时、全天候工作的优点^[1], 已被广泛应用于对地观测、军事侦察等领域。通过目标与场景三维建模, 采用电磁散射计算实现 SAR 成像仿真, 对 SAR 成像系统的研制至关重要, 是近年来的研究热点。

对于电大尺寸目标而言, 高频近似方法, 如物理光学 (geometrical optics, PO) 法^[2-3]、几何光学 (physical optics, GO) 法^[4-5]、物理绕射理论 (physical theory of diffraction, PTD)^[6]、弹跳射线 (shooting bouncing rays, SBR) 法^[7] 等, 能够实现快速电磁散射计算, 已在工程实践中被广泛采用。但在对复杂的电大尺寸目标建模时, 由于模型复杂、面元数量多, 上述方法存在计算时间长、资源占用量大的问题。如何在保证算法精度的前提下, 进一步提高计算效率显得尤为重要。采用双向解析射线追踪 (bidirectional analytical ray tracing, BART) 算法^[8] 对目标的精细三维模型进行面元分割, 基于每一个面元, 双向追踪入射和散射的电磁波多次传导的过程, 能够实现电大尺寸复杂目标电磁散射的高效计算, 极大地提高了计算效率。

由于复杂的自然场景模型相较于单个目标来说, 尺寸更大, 剖分面元更多, 电磁散射数值计算方法无法承受如此庞大的计算量。映射投影算法 (mapping and projection algorithm, MPA)^[9-10] 根据入射平面内地物散射成像的映射投影原理, 对复杂场景进行多次映射和投影, 并记录多次散射得到的映射与投影值, 从而实现复杂场景的电磁散射计算。

在复杂自然场景 SAR 成像方面, 近年来已有不少研究成果^[11-12]。而在实际应用中, 电大尺寸目标往往与复杂场景密不可分, 因此非常有必要开展电大尺寸目标和复杂场景融合的 SAR 成像仿真方法研究。本文通过构建电大尺寸目标与复杂场景融合的精细三维模型, 提出一种电大尺寸目标与自然场景的融合成像方法, 既能对电大尺寸目标进行高精度成像, 同时也能兼顾对大范围场景成像的高效计算。

1 电大尺寸目标电磁散射计算与 SAR 成像仿真

1.1 BART 算法原理

BART 算法结合物理与几何光学原理, 对构成目标的面元从入射方向与散射的逆方向上进行几何光学的射线束追踪。记录射线束在面元或边缘上的照射范围, 以及每个面元或边缘上的任一对正反射线, 构造由正反追踪路径上的 GO 反射和该面元或边缘的 PO 散射组成的多次散射项, 并计算其散射场的贡献。

在射线的发射端与接收端分别对目标物体的面元进行几何光学射线追踪。在发射端发射射线, 入射到面元发生 GO 反射, 继续追踪; 在接收端沿着散射逆方向进行追踪。若在某一面元存在正反追踪射线, 且照射区域相同, 则双向射线构造出一条完整路径, 可以对该面元计算物理光学散射, 如图 1 所示^[8]。

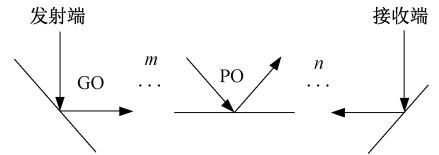


图 1 双向射线追踪示意图

在发射端与接收端同时对目标进行射线追踪, 在各自照射的面元上发生 GO 反射, 分别计入 m 次与 n 次面元反射, 即 m 与 n 阶。而在某一存在正反射线的面元上计入一次 PO 散射贡献, 设 PO 散射矩阵为 \mathbf{P} 。根据镜像法, 前向射线与后向射线可等效为一条直线, 即进行了 m 次与 n 次 GO 反射, 以及一次 PO 散射, 故其最大阶数为 $m + n + 1$ 。

在发射端, 前向路径 GO 反射的所有贡献可以表示为

$$\mathbf{G}^+ = \prod_{f=1}^m \mathbf{G}_f \exp(\mathbf{j}\mathbf{k}_f \mathbf{r}_f) \quad (1)$$

式中: \mathbf{G}^+ 为前向 GO 矩阵; \mathbf{G}_f 为前向路径第 f 次面元反射的 GO 矩阵; \mathbf{k}_f 为前向波数矢量; \mathbf{r}_f 为前向相对位置矢量。而在接收端, 后向路径 GO 反射的所有贡献可以表示为

$$\mathbf{G}^- = \prod_{b=1}^n \mathbf{G}_b \exp(\mathbf{j}\mathbf{k}_b \mathbf{r}_b) \quad (2)$$

式中: G^- 为后向 GO 矩阵; G_b 为后向路径第 b 次面元反射的 GO 矩阵; k_b 为后向波数矢量; r_b 为后向相对位置矢量。则总散射矩阵 S 可表示为

$$S = G^+ G^- P \quad (3)$$

1.2 BART 算法精度验证

为了验证 BART 算法的计算精度,以四棱台模型为例,分别采用 BART 算法和 FEKO 电磁场仿真软件中的 PO 算法进行仿真计算,并对计算结果进行对比。

仿真坐标系如图 2 所示。设电磁波入射俯仰角 $0^\circ \sim 90^\circ$,方位角 0° ,入射信号频率 30 GHz。

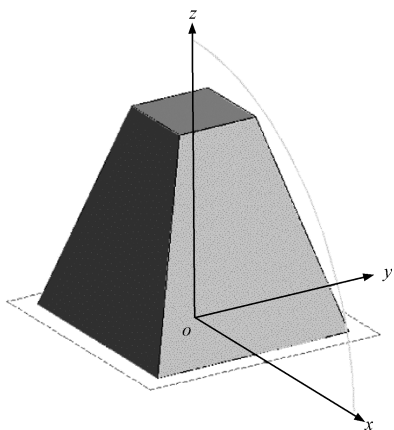


图 2 四棱台模型

HH 极化下,采用 FEKO 软件与 BART 算法计算得到的雷达散射截面(radar cross section, RCS)曲线,如图 3 所示。可知,BART 算法计算结果与 FEKO 软件计算结果吻合,证明 BART 算法的计算精度与 FEKO 软件采用的 PO 算法计算精度相当。

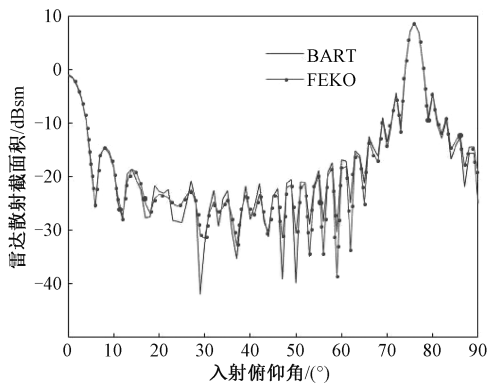


图 3 四棱台模型 RCS 仿真结果对比

1.3 电大尺寸目标 SAR 成像仿真

以空客 A320 客机为例,采用 BART 算法计算其电磁散射数据,实现 SAR 成像仿真。空客 A320 模型由 10 077 个面元组成,面元细节如图 4 所示。

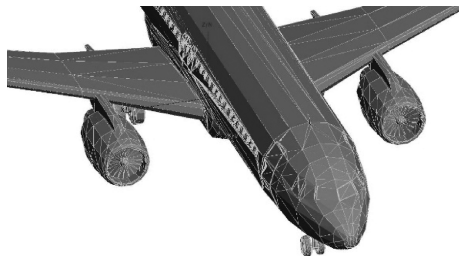


图 4 空客 A320 模型面元细节图

由于面元模型复杂,FEKO 软件已无法进行有效的计算。采用 BART 算法来计算该电大尺寸复杂目标。仿真参数为:平面波入射,入射方位角 $0^\circ \sim 1^\circ$,入射俯仰角 50° ,雷达工作频段(9.5~9.8) GHz,雷达工作带宽 300 MHz。空客 A320 的 RCS 仿真计算角度如图 5 所示。

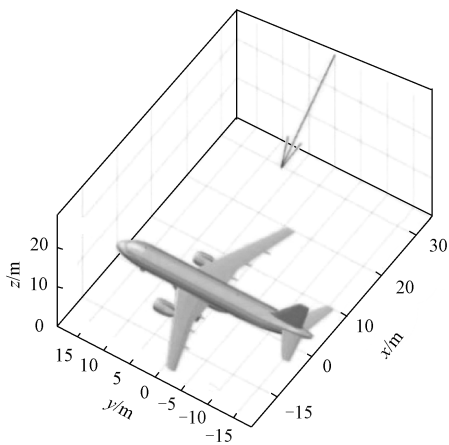


图 5 空客 A320 的 RCS 仿真计算角度示意图

图 6 为空客 A320 模型的 RCS 曲线。可知,在入射俯仰角 $0^\circ \sim 1^\circ$ 范围内,由于飞机尾部隆起部分存在边缘绕射与镜面反射,所以 RCS 振荡较为频繁。

采用 BART 算法进行计算,将得到的结果通过 VH 异向极化的方式成像,结果如图 7 所示。将 SAR 成像结果与空客 A320 模型对比,发现机翼及机身散射回波明显。

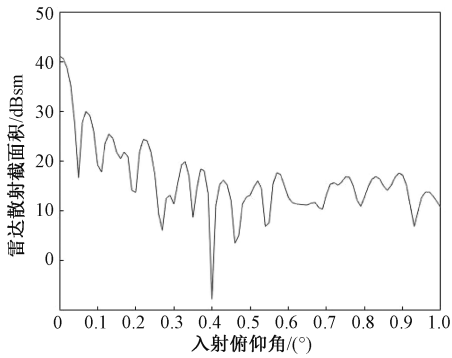


图 6 空客 A320 模型的 RCS 仿真曲线

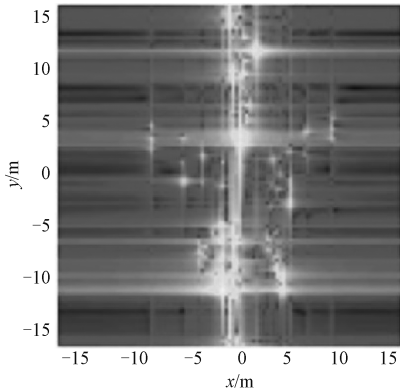


图 7 空客 A320 的 VH 极化成像结果

2 映射投影算法与复杂环境建模

2.1 MPA 算法原理

MPA 算法将目标场景划分为多个网格进行处理。图 8 为映射投影原理示意图^[9-10]。根据地面物体的高低,得到投影面 E 上的散射量,再将投影面的地物散射量映射至映射面 s 上。将其中同一网格部分的散射量累加,即可得到该部分的总散射系数。

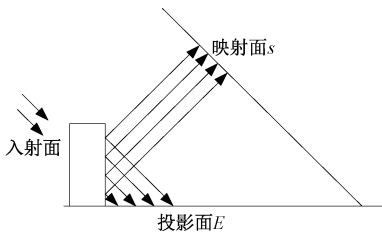


图 8 映射投影原理

在入射面,建立极坐标系 (r, θ) , 其中, r 为斜距, θ 为入射角。设在成像空间中,即投影面 (x, r, θ) , 一个微分单元的长宽高分别为 dx 、 dy 、 $r d\theta$, 具体表示为投影面的单位横纵坐标微分。

当入射波 i 到达并穿过单个散射元时,单位面积后向散射强度为可表示为

$$I_S(x, r, \theta) = E^+(x, r, \theta) P(x, r, \theta) \times E^-(x, r, \theta) I_i dr \quad (4)$$

其中

$$E^+(x, r, \theta) = \exp\left(-\int_{r_0}^r dr' k_e^+(x, r', \theta)\right) \quad (5)$$

$$E^-(x, r, \theta) = \exp\left(-\int_{r_0}^r dr' k_e^-(x, r', \theta)\right) \quad (6)$$

式中: $E^+(x, r, \theta)$ 和 $E^-(x, r, \theta)$ 分别为前向与后向的总衰减系数; $P(x, r, \theta)$ 为相函数,表征散射元散射特性; I_i 为单位散射强度; $[r_0, r]$ 为散射元斜距积分范围; $k_e^+(x, r', \theta)$ 和 $k_e^-(x, r', \theta)$ 分别为前向与后向光系数。

对 $I_S(x, r, \theta)$ 沿等斜距线积分,得到等斜距线上所有散射元能量总和 $S(x, r)$ 。可根据场景像素的大小对其进行积分,得到该像素的总能量大小,表达式为

$$\begin{aligned} S(x, r) &= \int_{\theta_0}^{\theta_1} I_S(x, r, \theta) r dx d\theta \\ &= \int_{\theta_0}^{\theta_1} E^+(x, r, \theta) P(x, r, \theta) \times \\ &\quad E^-(x, r, \theta) I_i(x, r, \theta) r dx dr d\theta \quad (7) \end{aligned}$$

式中: $[\theta_0, \theta_1]$ 为被积分像素对应的入射角范围。

为了提高效率,每次散射得到的单元投影区域若为 0,即判断该地形不存在任何有价值数据(如山丘,树木或是遮挡物),则跳过该区域。

2.2 复杂环境场景的建模

数字高程模型(digital elevation model, DEM)是通过高程数据对地形环境的数字化模拟。将典型的地形数据,如河流、平原、山丘的高程数据,进行数字化模拟,建立复杂环境场景的三维模型,如图 9 所示。

3 目标与场景融合 SAR 成像仿真

3.1 目标与场景的混合模型

对于存在电大尺寸目标的复杂环境场景而言,由于同时存在两类不同的目标(即电大尺寸目标与环境),需要对这两类目标进行尺度坐标校正。将 DEM 与电大尺寸目标模型做融合并在环境中设置常见的地理参照物,如河流、平原、山丘

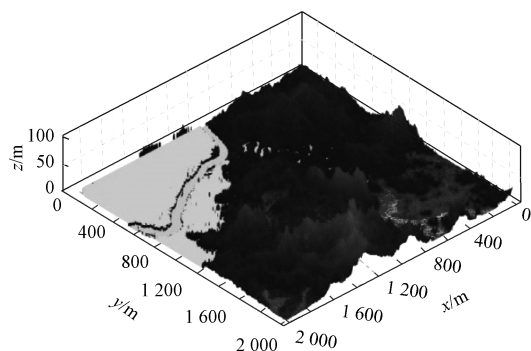


图 9 复杂环境三维模型

等,即可构建出一个带有电大尺寸目标的复杂环境拟真场景模型。

将 A320 模型置于复杂场景之中,构成目标与场景的复合模型,如图 10 所示。其中 A320 飞机位于场景左下角。

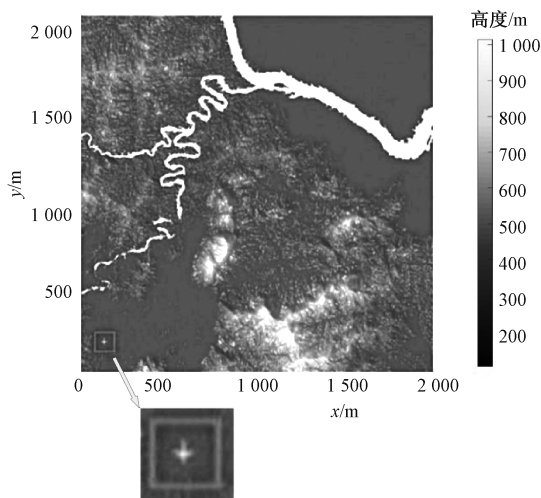


图 10 电大尺寸目标与复杂场景混合模型

3.2 融合成像流程

电大尺寸目标与复杂场景融合成像的流程如图 11 所示。

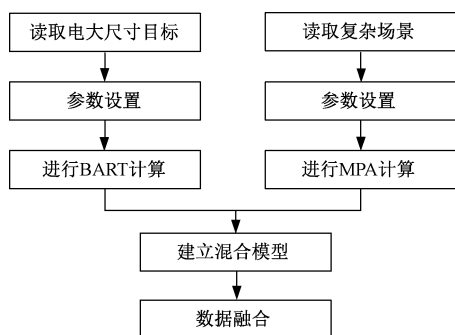


图 11 目标与复杂环境融合成像的流程

首先,读取电大尺寸目标与复杂场景模型数据,分别设置相同的参数;其次,利用 BART 算法计算电大尺寸目标的电磁散射,利用 MPA 算法计算复杂场景的电磁散射;再次,构建目标与场景的混合模型;最后,将电大尺寸目标计算得到的极化数据进行极化合成,并与复杂场景计算得到的数据进行数据融合生成 SAR 图像。

3.3 实验结果与讨论

目标与复杂环境融合 SAR 成像结果如图 12 所示。

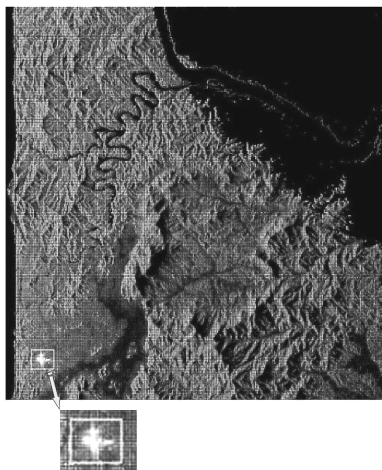


图 12 目标与复杂环境融合 SAR 成像仿真结果

对于复杂场景,SAR 成像结果能够反映地形纹理,如河流、山丘等。对于电大尺寸目标,成像形状与原始模型基本一致,主要散射点,如机身、机翼,也与模型特征基本吻合。仿真结果初步验证了融合成像算法的性能。

4 结论

本文提出一种电大尺寸目标与复杂场景融合的 SAR 成像仿真方法。构建目标与场景复合模型,电大尺寸目标的电磁散射采用 BART 算法计算,复杂场景的电磁散射则采用 MPA 算法计算,最终获取目标和场景融合的 SAR 图像。仿真结果表明,本文的方法能够兼顾电磁散射计算的精准度和效率,从而实现电大尺寸目标与场景的融合 SAR 成像。

参考文献

- [1] MOREIRA A, PRATS-IRAOLA P, YOUNIS M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6-43.
- [2] DE ADANA F S, DIEGO I G, BLANCO O G, et al. Method based on physical optics for the computation of the radar cross section including diffraction and double effects of metallic and absorbing bodies modeled with parametric surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(12): 3295-3303.
- [3] WEINMANN F. Ray tracing with PO/PTD for RCS modeling of large complex objects[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(6): 1797-1806.
- [4] KOUYOUMJIAN R G, PETERS JR L, THOMAS D T. A modified geometrical optics method for scattering by dielectric bodies[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1963, 11(6): 690-703.
- [5] KOUYOUMJIAN R G. Asymptotic high-frequency methods[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 53(8): 864-876.
- [6] UFIMTSEV P Y. Fundamentals of the physical theory of diffraction[M]. 2nd ed. Hoboken, NJ:

John Wiley & Sons Inc., 2014: 192-208.

- [7] LING H, CHOU R C, LEE S W. Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(2): 194-205.
- [8] XU F, JIN Y Q. Bidirectional analytic ray tracing for fast computation of composite scattering from electric-large target over a randomly rough surface [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(5): 1495-1505.
- [9] XU F, JIN Y Q. Imaging simulation of polarimetric SAR for a comprehensive terrain scene using the mapping and projection algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(11): 3219-3234.
- [10] XU F, JIN Y Q. Imaging simulation of bistatic synthetic aperture radar and its polarimetric analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(8): 2233-2248.
- [11] 徐丰, 金亚秋. 复杂自然场景双站 SAR 成像模拟 [J]. 电波科学学报, 2008, 23(6): 1022-1031, 1044.
- [12] LIU C Y, JIAO Y C. SAR echo-wave signal simulation system based on MATLAB[C]// IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012, 5: 1-4.

(上接第 54 页)

幅度。高超声速飞行器滑翔初始高度越高,滑翔高度和速度的跳跃幅度越大;滑翔的初始速度越大,射程越长,滑翔速度衰减越慢。通过滑翔初始速度和高度对飞行器飞行三维轨迹影响的仿真分析,提高了对高超声速滑翔飞行器滑翔段运动特性的认识,为弹道预报、轨迹规划与制导系统设计等任务提供了指导。

参考文献

- [1] 谢愈, 刘鲁华, 汤国建, 等. 多约束条件下高超声速滑翔飞行器轨迹优化[J]. 宇航学报, 2011, 32(12): 2499-2504.
- [2] CHEN X Q, HOU Z X, LIU J X, et al. Phugoid dynamic characteristic of hypersonic gliding vehicle [J]. Science China (Information Sciences), 2011, 54(3): 542-550.
- [3] 李广华, 张洪波, 汤国建. 高超声速滑翔飞行器典

型弹道特性分析[J]. 宇航学报, 2015, 36(4): 397-403.

- [4] ELNAGAR G, KAZEMI M A. Pseudospectral Chebyshev optimal control of constrained nonlinear dynamical systems[J]. Computational Optimization and Applications, 1998, 11(2): 195-217.
- [5] 张毅, 肖龙旭, 王顺宏. 弹道导弹弹道学[M]. 2版. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005: 9-30.
- [6] PHILLIPS T H. A common aero vehicle (CAV) model, description, and employment guide[R]. USA: Corporation, 2003.
- [7] 雍恩米, 唐国金, 陈磊. 高超声速无动力远程滑翔飞行器多约束条件下的轨迹快速生成[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 46-52.
- [8] RICHIE G. The common aero vehicle: space delivery system of the future[C]// AIAA Space Technology Conference and Exposition, Albuquerque, USA. Reston, USA: AIAA Press, 1999: 1999-4435.