

# 运动特征对飞机动态 RCS 分布特性的影响分析

王大朋, 张晨新, 庄亚强

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 为了研究不同航路捷径和高度对飞机动态 RCS 的影响,并能找到描述其分布特性的通用起伏模型,对飞机动态 RCS 进行了统计分析。首先采用准静态法仿真计算了飞机在不同航路捷径和不同高度时的动态 RCS,分析了运动特征对飞机动态 RCS 的影响;其次用 3 种经典起伏模型对动态 RCS 拟合建模,并通过 Kolmogorov-Smirnov 检验比较了统计建模结果的差异,得出对数正态分布在描述动态 RCS 起伏特性方面具有通用性的结论。研究成果对于非合作目标的预警探测有重要意义,为雷达总体性能的提升提供理论依据。

**关键词** 航路捷径;高度;动态 RCS;统计特性;拟合优度检验

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.005

**中图分类号** TN955 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0019-05

## An Analysis of the Impact of Movement Feature on Aircraft Dynamic RCS Statistical Characteristics

WANG Dapeng, ZHANG Chenxin, ZHUANG Yaqiang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different course short-cut and height on the dynamic RCS of aircraft and find out the universal model which can describe the dynamic RCS, the dynamic RCS of aircraft is statistically analyzed in this paper. By using a quasi-static analysis method, the dynamic RCS of aircraft is simulated at the different course short-cut and height, and the influence is analyzed respectively. Three statistical fluctuation models are used to match the RCS statistic data and the difference between different course short-cut and height, and the difference of the modeling results are compared and inspected by Kolmogorov-Smirnov test. The goodness-of-fit test results show Log-normal distribution is a universal distribution to describe the dynamic RCS beyond the limitation of course short and height. The results of this paper are of significance to the early warning and detection of non-cooperative target and provide a theoretic support to the advance of radar's function.

**Key words:** course short; height; dynamic RCS; statistical characteristic; goodness-of-fit test

雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)是 度量目标对照射电磁波散射能力的物理量,与雷达

收稿日期:2014-11-18

作者简介:王大朋(1990—),男,山东兖州人,硕士生,主要从事雷标目标动态特性及其应用研究.E-mail:wdpsheshou@126.com

**引用格式:**王大朋,张晨新,庄亚强.运动特征对飞机动态 RCS 分布特性的影响分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):19-23.  
WANG Dapeng, ZHANG Chenxin, ZHUANG Yaqiang. An Analysis of the Impact of Movement Feature on Aircraft Dynamic RCS Statistical Characteristics[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 19-23.

发射电磁波的频率、极化方式和雷达的视线角变化有关<sup>[1]</sup>。雷达目标分为合作目标和非合作目标。在军事斗争中,非合作目标总是处于运动状态,因此研究动态 RCS 对于非合作目标的预警探测具有重大意义。

近年来,对于雷达目标动态 RCS 的研究逐渐成为国内外学术界的热点。雷达目标的动态 RCS 可以通过外场测量和仿真计算 2 种途径获得,非合作目标的动态 RCS 数据难以通过外场测量获取,电磁仿真计算成为了获取其动态 RCS 的有效途径。文献[2]提出利用准静态法解算出预设航迹下雷达目标的动态 RCS;文献[3]考虑了目标在运动过程中的随机抖动因素,使得仿真结果更加接近真实情况;文献[4]从空气动力学原理出发,比较了动静态 RCS 对雷达检测性能评估影响的差异;文献[5~7]分别采用威布尔分布、卡方分布和对数正态分布对不同视向的 RCS 实测数据进行了统计分析;文献[8~9]提出采用起伏统计模型来描述动态 RCS 起伏特性,起伏特性将影响雷达的检测性能。

现有涉及航路捷径和高度对 RCS 统计分布的影响的文献非常少,本文主要针对这 2 个方面开展研究。

### 1 动态 RCS 的仿真计算

本文运用准静态法作为研究方法,首先用 CADFEKO 软件对典型隐身飞机仿真建模,然后计算了飞机的全空域静态 RCS 数据库,再根据预设航迹解算出目标在机动过程中雷达视线角的变化,最后利用雷达视线角信息,在静态 RCS 数据库中提取对应的 RCS 值,得到特定航迹下的动态 RCS 序列。

#### 1.1 静态 RCS 数据库构建

本文采用 FEKO 软件仿真了飞机在 VHF 频段水平极化的 RCS 值,方位角  $\varphi$  取 $[0^\circ, 360^\circ]$ ,俯仰角  $\theta$  取 $[0^\circ, 180^\circ]$ ,扫描角度间隔取  $1^\circ$ ,全空域 RCS 色标图见图 1。

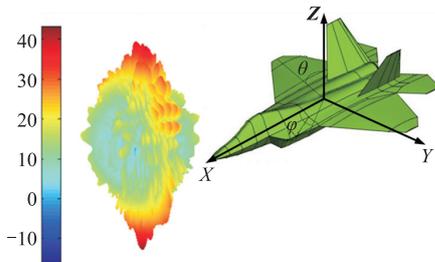


图1 机体坐标系及全空域静态 RCS 色标图  
Fig.1 Body axis system and all-space static RCS chromaticity scale diagram

### 1.2 航迹设定

为研究在不同航路捷径和高度飞机的动态散射特性,本文选用飞机进行侧站定常平飞机动。侧站平飞是研究飞机全向 RCS 的常用航迹,实际飞行中常用于飞机巡航。侧站平飞是最简单的航迹,速度保持不变,航迹偏转角恒定,航迹倾角恒为零,且速度滚转角为零。飞机在雷达坐标系  $Ox_gYgZg$  中的空气动力学方程为:

$$\begin{cases} \frac{dx_g}{dt} = V \\ P \cos\alpha = X \\ P \sin\alpha + Z = mg \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P$  为发动机推力; $X$  为空气阻力; $Z$  为升力; $m$  为飞机质量; $\alpha$  为迎角。

通过对式(1)的计算得到  $\alpha \approx 4.8^\circ$ ,飞机在飞行过程中保持姿态不变。雷达位置为坐标原点,飞机速度为  $V=1.4 Ma$ ,根据控制变量的原则,选取巡航高度  $H=10 \text{ km}$  时航路捷径为 10、50、100 km 见图 2(a),航路捷径为  $CS=10 \text{ km}$  时高度为 1、6、11 km,见图 2(b)。针对以上值分别进行仿真模拟,运用准静态法分别求出对应航迹下飞机的动态 RCS。

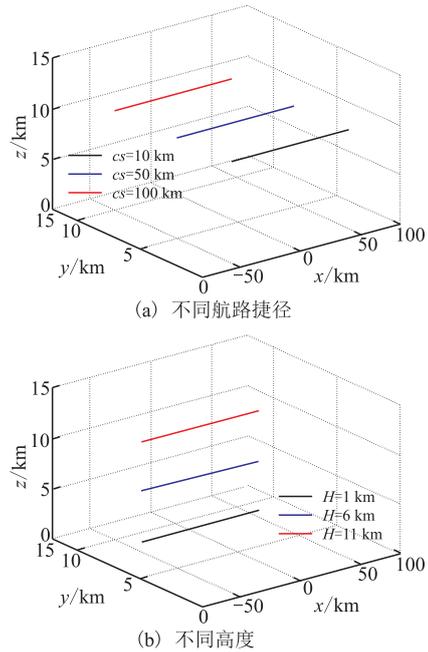


图2 预设航迹  
Fig.2 Track predestining

### 1.3 雷达视线角的解算

由图 2 中的航迹易得飞机在雷达坐标系中的直角坐标  $(x_r(t), y_r(t), z_r(t))$ ,经过坐标变换后<sup>[10]</sup>,可以得到雷达在机体坐标系中的坐标  $(x_t(t), y_t(t), z_t(t))$ ,因此可以解算出雷达视线角见式(2)、(3)。

$$\varphi(t) = 360 - \arctan \frac{y_i(t)}{x_i(t)} \quad (2)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{z_i(t)}{\sqrt{x_i^2(t) + y_i^2(t)}} \quad (3)$$

关于雷达坐标系与机体坐标系坐标变换,文献[10]已进行详尽论证,本文不再赘述。

飞机在运动过程中存在随机抖动,会导致飞机 RCS 值的剧烈变化。因此在解算雷达视线角时需要叠加上随机抖动的影响。本文选用的随机抖动模型<sup>[3]</sup>见式(3):

$$\varphi_{t+1} = \varphi_t \rho + \sqrt{1 - \rho} \text{rand}(t + 1) \sigma_\varphi \quad (3)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t \rho + \sqrt{1 - \rho} \text{rand}(t + 1) \sigma_\theta$$

式中: $\varphi_{t+1}, \theta_{t+1}$  分别为  $t + 1$  时刻方位角和俯仰角的扰动量,  $\text{rand}(t + 1)$  为在  $[-1, 1]$  上的正态分布,抖动模型的参数设置: $\rho = \exp(-\Delta t / T), \Delta t = 1 \text{ s}, T = 2 \text{ s}, \sigma_\varphi = 0.1^\circ, \sigma_\theta = 1^\circ$ 。

根据预设航迹,并叠加抖动模型,得到雷达视线的方位角和俯仰角见图 3、图 4。图 3 表示当  $CS = 10, 50, 100 \text{ km}$  时的方位角和俯仰角,图 4 表示当  $H = 1, 5, 11 \text{ km}$  时的方位角和俯仰角,其中当航路捷径不变,高度变化时,方位角相同。

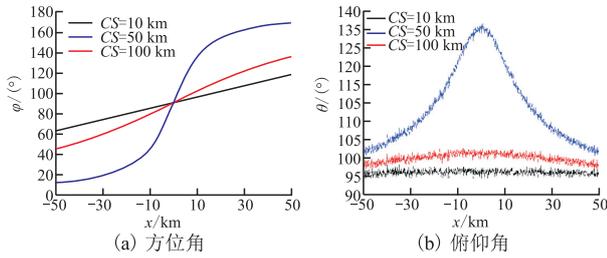


图 3 不同航路捷径的雷达视线角

Fig.3 Aspect angles at different course short

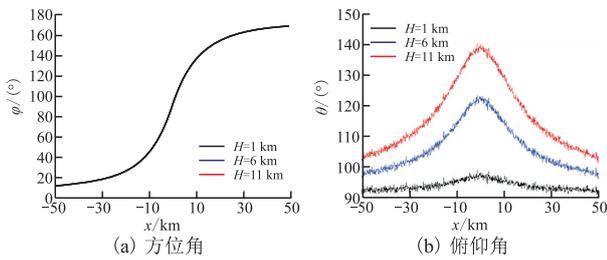


图 4 不同高度的雷达视线角

Fig.4 Aspect angles at different height

### 1.4 动态 RCS 的解算

根据全空域静态 RCS 数据库和雷达视线角信息,利用线性插值法提取时变姿态角对应的 RCS 值,得到飞机侧站平飞的动态 RCS 序列。

由图 5 和图 6 可以看到,高度不变时,RCS 值随航路捷径的减小变化越来越剧烈,而航路捷径不变时,RCS 值受高度的变化影响较小。原因在于,对于简单目标,RCS 的起伏模型已经归一化了雷达

距离因子,其不受雷达距离影响。但对于飞机目标,机头和尾部的 RCS 较小而侧面较大,当航路捷径增大时,侧面会较多地暴露在雷达的探测范围之内,姿态角变化快,因而会引起 RCS 的剧烈变化。而当高度变化时这种效应就没有那么明显,从另一方面验证了 RCS 不受雷达距离影响的结论。

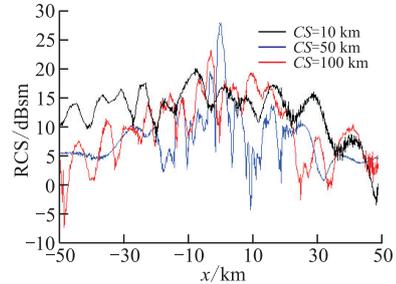


图 5 不同航路捷径的动态 RCS 序列

Fig.5 Dynamic RCS series at different course short

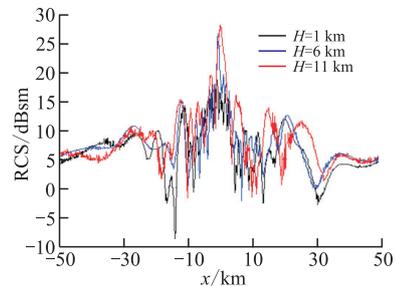


图 6 不同高度的动态 RCS 序列

Fig.6 Dynamic RCS series at different height

## 2 动态 RCS 的统计分析

RCS 起伏是随机的、不规律的,因此把动态 RCS 看作一个随机变量,通过研究动态 RCS 的统计特性,对提升雷达探测性能具有重大意义<sup>[1]</sup>。

### 2.1 3 种经典的起伏统计模型

1) 威布尔分布

威布尔分布<sup>[5]</sup>的概率密度函数表示为:

$$p(\sigma) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)^k}, \sigma > 0, k > 0, \lambda > 0 \quad (4)$$

式中: $\sigma$  为 RCS 值; $\lambda$  为尺度参数,决定峰值点的位置; $k$  为形状参数,影响概率密度曲线的整体形状。

2) 卡方分布

卡方分布的概率密度函数<sup>[6]</sup>表示为:

$$p(\sigma) = \frac{k}{\Gamma(k)\sigma} \left(\frac{k}{\sigma}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{k}{\sigma}\right), \sigma > 0 \quad (5)$$

式中: $\sigma$  为 RCS 值; $\bar{\sigma}$  为 RCS 的均值; $k$  称为双自由度数值,其值可以不为正整数,且越小表示 RCS 起伏越剧烈。经典的 Swerling I-V 模型就是当  $k$  分别取  $1, 2, N, 2N$  和  $\infty$  时的特例。

3) 对数正态分布

对数正态分布<sup>[7]</sup>的概率密度函数表示为:

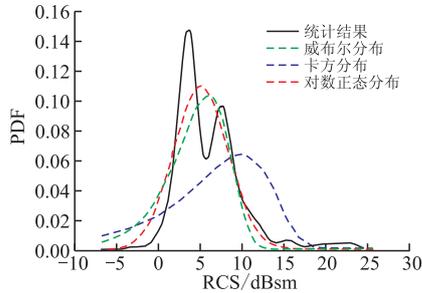
$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln\sigma - \ln\mu)^2}{2s^2}\right), \sigma > 0 \quad (6)$$

式中:  $\sigma$  为 RCS 值;  $\mu$  和  $s$  分别表示均值和标准差。

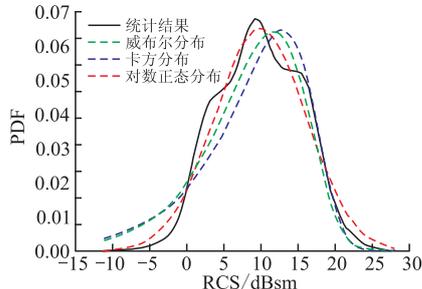
2.2 动态 RCS 的统计建模结果

本文分别采用上述 3 种分布,基于最小二乘原则,对得到的动态 RCS 数据进行拟合,拟合结果见图 7。

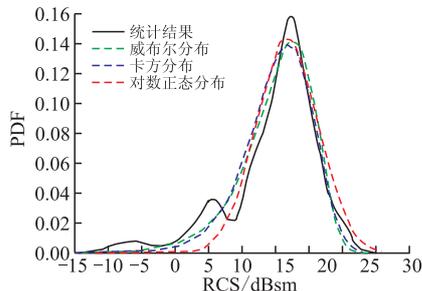
由图 7 可以看出,在同一高度、不同航路捷径时,隐身飞机的动态 RCS 呈现双峰特征,当航路捷径较小时左峰高于右峰,随着航路捷径增大,双峰的高度也跟着变化,航路捷径较大时右峰高于左峰;在同一航路捷径、不同高度时,隐身飞机的动态 RCS 也呈现双峰特征,低空时双峰高度相同,随着高度的增大,右峰高度逐渐减小。



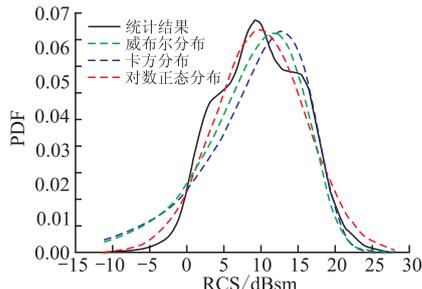
(a)  $H=10$  km,  $CS=10$  km



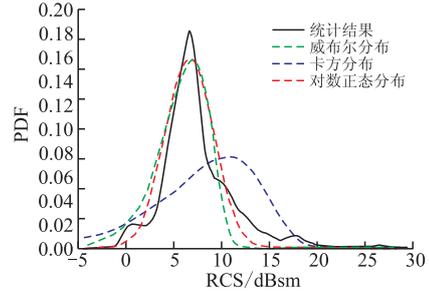
(b)  $H=10$  km,  $CS=50$  km



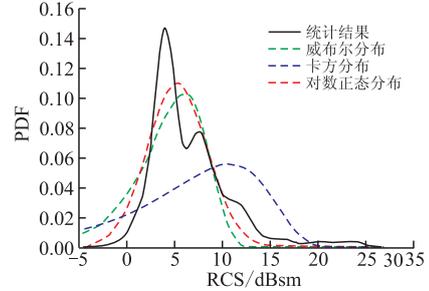
(c)  $H=10$  km,  $CS=100$  km



(d)  $CS=10$  km,  $H=1$  km



(e)  $CS=10$  km,  $H=6$  km



(f)  $CS=10$  km,  $H=11$  km

图 7 概率密度函数的拟合结果

Fig.7 Fitting results of PDF curve

2.3 拟合优度检验

本文采用 Kolmogorov-Smirnov (记为 K-S) 检验对不同模型的拟合效果进行比较分析<sup>[11]218-220</sup>。K-S 检验公式见式(7):

$$KS = \max(|F_1(x) - F_2(x)|) \quad (7)$$

式中:  $F_1(x)$  为统计结果的累积概率函数;  $F_2(x)$  为拟合模型的累积概率函数。KS 值越小表示模型与统计结果拟合得越好。检验结果见表 1。

表 1 K-S 检验结果

Tab.1 The result of K-S testing

	威布尔	卡方	对数正态
$CS=10$ km	0.147 7	0.250 5	0.084 1
$CS=50$ km	0.074 5	0.072 3	0.024 5
$CS=100$ km	0.058 9	0.074 0	0.016 5
$H=1$ km	0.092 3	0.104 2	0.040 5
$H=6$ km	0.172 5	0.257 9	0.106 3
$H=11$ km	0.155 8	0.261 6	0.097 7

通过观察分析拟合图像以及对 K-S 检验结果的分析,我们看到对于不同航路捷径和高度,对数正态分布的 KS 值均最小,即拟合效果最好,说明对数正态分布对动态 RCS 的拟合不受航路捷径和高度的限制,具有通用性。另一方面,通过纵向比较仿真结果可以看到,航路捷径较大和低空时的拟合效果较好。

3 结语

本文使用准静态法,并叠加了飞行过程中随机抖动的影响,仿真得到了预设航迹动态 RCS,得到

航路捷径越小动态 RCS 变化越剧烈而高度对动态 RCS 影响不大的结论。然后用 3 种经典起伏模型拟合,对仿真结果进行统计分析,并进行拟合优度检验,得到在不同航路捷径和高度下,对数正态分布均可以获得最佳拟合效果,具有通用性,且在大航路和低空时的拟合效果最佳。研究成果对于动态 RCS 的测量分析和隐身飞机的预警探测有重要意义,为雷达总体性能的提升提供理论依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
HUANG Peikang, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Radar Target Characteristic[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.(in Chinese)
- [2] 张居凤,冯德军,王雪松,等. 雷达目标动态 RCS 仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 834-837.  
ZHANG Jufeng, FENG Dejun, WANG Xuesong, et al. Simulation of Dynamic RCS Data of Radar Targets [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(4): 834-837.(in Chinese)
- [3] 苏东林,曾国奇,刘焱,等. 运动目标 RCS 特性分析[J].北京航空航天大学学报, 2006, 32(12): 1413-1417.  
SU Donglin, ZENG Guoqi, LIU Yan, et al. RCS Study of Moving Radar Targets[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(12): 1413-1417.(in Chinese)
- [4] 戴崇,徐振海,肖顺平. 雷达目标动静态 RCS 特性差异分析[J]. 信号处理, 2013, 29(9): 1256-1263.  
DAI Chong, XU Zhenhai, XIAO Shunping. Analysis for Differences Between Dynamic and Static RCS Characteristics of Radar Target[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(9): 1256-1263.(in Chinese)
- [5] Shi W Q, Shi X W, Xu L. Radar Cross Section(RCS) Statistical Characterization using Weibull Distribution [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2013, 55(6): 1355-1358.
- [6] 曾勇虎,王国玉,陈永光. 动态雷达目标 RCS 的统计分析[J]. 电波科学学报, 2007, 22(4): 610-613.  
ZENG Yonghu, WANG Guoyu, CHEN Yongguang. Statistical Analysis for RCS of Dynamic Radar Targets[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(4): 610-613.(in Chinese)
- [7] 史伟强,徐乐,史小卫,等. 基于完备对数正态分布模型的隐形飞行器动态 RCS 统计特性研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(9): 2121-2125.  
SHI Weiqiang, XU Le, SHI Xiaowei, et al. Dynamic RCS Statistic Characterization of Stealth Aircraft Using Complete Lognormal Distribution[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(9): 2121-2125.(in Chinese)
- [8] 杨英科,李宏,李文臣,等. 目标起伏特性对雷达检飞试验的影响及应用[J]. 现代雷达, 2013, 35(2): 22-25, 30.  
YANG Yingke, LI Hong, LI Wenchen, et al. Influence and Application of Target Movement Characteristic on Radar Flight Test [J]. Modern Radar, 2013, 35(2): 22-25, 30.(in Chinese)
- [9] DeMaio A, Farina A, Foglia G. Target Fluctuation Models and Their Application to Radar Performance Prediction[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2004, 151(5): 261-269.
- [10] 周超,张小宽,吴国成. 基于坐标转换目标动态 RCS 时间序列研究[J]. 火力与指挥控制, 2013, 39(3): 56-59.  
ZHOU Chao, ZHANG Xiaokuan, WU Guocheng. Analysis on RCS Time Series of Dynamic Target Based on Coordinate Transformation[J]. Fire Control and Command Control, 2013, 39(3): 56-59.(in Chinese)
- [11] 周品. MATLAB 概率与数理统计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.  
ZHOU Pin. MATLAB Probability and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.(in Chinese)

(编辑:徐楠楠)