

合成孔径雷达回波模拟方法研究

刘宇, 顾振杰, 韩红斌

(91336部队, 秦皇岛 066326)

[摘要] 合成孔径雷达回波模拟技术在 SAR 系统的研制、SAR 图像处理等方面具有十分重要的作用。目前对于 SAR 回波模拟技术的研究还不够深入。针对该问题开展 SAR 回波模拟方法研究,通过对合成孔径雷达基本原理的分析及回波信号数学模型的推导,提出了一种较为通用的合成孔径雷达回波模拟方法,根据该方法采用 Matlab 进行了不同类型 SAR 回波模拟仿真试验。试验结果表明:该方法适用于单点目标、多点目标、面目标、分布目标及真实场景等多种类型的 SAR 回波信号仿真,对 SAR 系统设计及性能分析具有重要的参考意义。

关键词: SAR; 回波模拟; 目标模型

Research on the Method of Echo Simulation of Synthetic Aperture Radar

LIU Yu, GU Zhenjie, HAN Hongbin

(Unit 91336 of PLA, Qinhuangdao 066326, China)

[ABSTRACT] Synthetic aperture radar echo simulation technology in the development of synthetic aperture radar system and in the subsequent processing of SAR images plays an important role. For synthetic aperture radar echo simulation technology research is not deep enough. SAR echo simulation study for the problem and through the analysis of the basic principle of synthetic aperture radar echo signal mathematical modeling of deduction, a more general synthetic aperture radar echo simulation is proposed, according to the method of using matlab to simulate different types of SAR echo simulation test. The test results show that the method is suitable for the single point target, more goals, objectives, distribution and the real scene, and other types of SAR echo signal simulation, for SAR system design and performance analysis has important reference significance.

Keywords: SAR; Echo simulation; Target model

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.115

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)自 20 世纪 50 年代基本概念提出之日起,即以其能全天时全天候对目标进行二维高分辨成像从而弥补光学成像的不足等特点,受到世界发达国家的高度重视。数十年来,一方面,由于有应用需求的强力牵引,对 SAR 技术的研究一直长盛不衰;另一方面,得益于大规模集成电路技术和数字信号处理技术的飞速发展, SAR 技术也日臻成熟,其在军事上的应用,已从传统的机载或星载 SAR 的战场情报侦察拓展到了弹载 SAR 的导弹中段或末段制导^[1-4]。

合成孔径雷达回波模拟技术在合成孔径雷达系统的研制及 SAR 图像的后续处理中具有重要作用。SAR 回波模拟技术可用于验证 SAR 系统参数的合理性,缩短系统研发周期,降低开发成本和研制风险; SAR 回波模拟技术可用于 SAR 系统成像算法验证,其点目标回波仿真可用来检验 SAR 成像算法成像质量,而分布式

场景目标模拟可用于分块处理算法检验; SAR 回波模拟技术可为 SAR 图像的自动目标识别提供数据来源。因此,对于合成孔径雷达模拟相关理论、技术和算法的研究具有十分重要的理论及现实意义^[5-8]。

本文主要针对不同类型的合成孔径雷达回波模拟方法进行研究,通过对合成孔径雷达基本原理的分析及回波信号数学模型的推导,提出了一种较为通用的合成孔径雷达回波模拟方法。根据该方法采用 Matlab 进行了不同类型 SAR 回波模拟仿真试验。试验结果表明:该方法适用于单点目标、多点目标、面目标、分布目标及真实场景等多种类型的目标回波信号仿真,对 SAR 系统设计及性能分析具有重要的参考意义。

1 SAR 回波信号数学模型

SAR 回波模拟是基于“stop and go”原理实现的。

根据该理论,设定电磁波的传播处于快时间域(脉内时间) t ,机械运动处于慢时间域(脉间时间) t_a ,载机运动过程中,合成孔径雷达以一定脉冲重复频率发射雷达脉冲并接收回波信号。图1为SAR几何关系示意图。

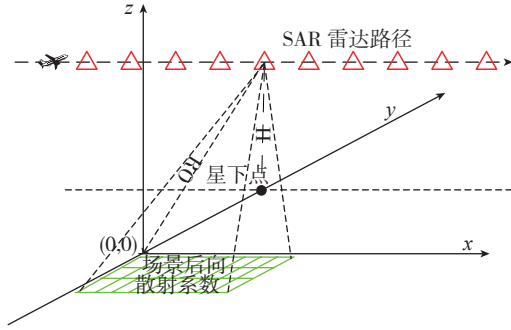


图1 SAR几何关系
Fig.1 SAR geometric relations

设雷达发射脉冲串为:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p(t - nT_{prt}) \quad (1)$$

式中, T_{prt} 为脉冲重复周期。

每个发射的脉冲为:

$$p(t) = a(t)\cos[2\pi f_c t + \phi(t)] \quad ,$$

其中, $a(t)$ 是定义在区间 $(-T_p/2, T_p/2)$ 上的矩形窗函数, 即

$$a(t) = \begin{cases} 1 & -T_p/2 \leq t \leq T_p/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$\phi(t)$ 为脉冲内的相位调制,通常采用线性调频,即:

$$\phi(t) = \pi k_f t^2 \quad ,$$

式中, T_p 为脉冲宽度, f_c 为雷达发射的中心频率, k_f 为距离向的调频率。则雷达对于时刻 (t, t_a) , 接收到斜距 $R(t_a)$ 处目标反射的回波信号为:

$$S_r(t, t_a) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot w \cdot p \left[t - nT_{prt} - \frac{2R(t_a)}{c} \right] \quad (3)$$

式中, c 为光速, σ 为目标的复散射系数, w 为接收信号的幅度因子。

回波信号通过下变频、中频放大、单边带滤波及正交相干解调后输出的复信号可以表示为:

$$S_r(t, t_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot w \cdot a \left[t - nT_{prt} - \frac{2R(t_s)}{c} \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi R(t_s)}{\lambda} + j\phi \left[t - nT_{prt} - \frac{2R(t_s)}{c} \right] \right\} \quad (4)$$

式中, λ 为雷达发射电磁波的波长,式(4)即为SAR单个点目标回波信号的数学模型。真实地面场景的分布目标是由多个单点目标构成,理想条件下将多个单点目标的回波信号进行叠加,即得真实场景的回波信号,其回波信号表示为:

$$S_r(t, t_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_k \sigma_k \cdot w \cdot a \left[t - nT_{prt} - \frac{2R(t_s)}{c} \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi R(t_s)}{\lambda} + j\phi \left[t - nT_{prt} - \frac{2R(t_s)}{c} \right] \right\} \quad (5)$$

2 SAR回波模拟方法

由于SAR在平台的不断运动过程中,以一定的时间间隔发射线性调频信号,每次发射的信号被地面反射得到的雷达回波数据被天线接收并记录在计算机存储介质中的某一行上。下一个脉冲的回波数据被记录在下一行中,这样就得到了一个二维回波数据矩阵。因此,SAR的回波仿真过程可以看作是地面上的各散射点对雷达发射信号的调制过程。由于各散射点所调制的雷达发射信号相同,因此可以将仿真过程分解成两步,首先计算每一个脉冲时刻,雷达接收机各通道对雷达仿真范围内所有散射点的总的冲击响应,然后再将该冲击响应函数卷积上发射的基带调制信号即获得每个脉冲时刻,SAR目标基带回波。

本文给出了SAR回波模拟全流程:

(1) 在回波仿真初始化时,对雷达发射的基带信号进行数字采样,采样之后将标准发射信号送入计算机;

(2) 计算机根据仿真精度需求,对送入计算机的数字化发射波形进行插值,从而得到需要的高采样率的基带信号;

(3) 下面是每个脉冲(PR)的操作:逐点计算地面散射点的冲激响应,并将其叠加到对应的距离门中,从而获得地面散射点的整体冲激响应;对高采样率的冲激响应与高采样的发射信号进行卷积操作,得到高采样的回波信号;对高采样的回波信号进行抽取处理,恢复成模拟器当初送入计算机的采样率的回波信号,并对其进行按PR进行输出/保存;

(4) 回波计算全部结束后,按照顺序得到全部回波数据。图2为SAR回波仿真的完整流程。

3 仿真计算

根据SAR回波模拟全流程,本文采用Matlab分别对单点目标、多点目标及真实场景SAR回波进行了仿真。

3.1 点目标回波模拟

本文在进行点目标SAR回波仿真,其仿真的主要参数如表1所示。

图3为点目标原始回波仿真结果,图中上半部分为第一个脉冲原始回波的实部,下半部分为前5个连续脉冲原始回波实部。

为检验该原始回波正确性,本文采用RD(距离多普勒)法对回波信号进行处理分析,图4为距离压缩后

的结果图,图中上半部为第一个脉冲距离压缩后信号,下半部分为前5个连续脉冲距离压缩后的结果。

图5为方位压缩和距离徙动校准后的结果图,从中可以看出产生的目标场景仅包含一个点目标,并且其

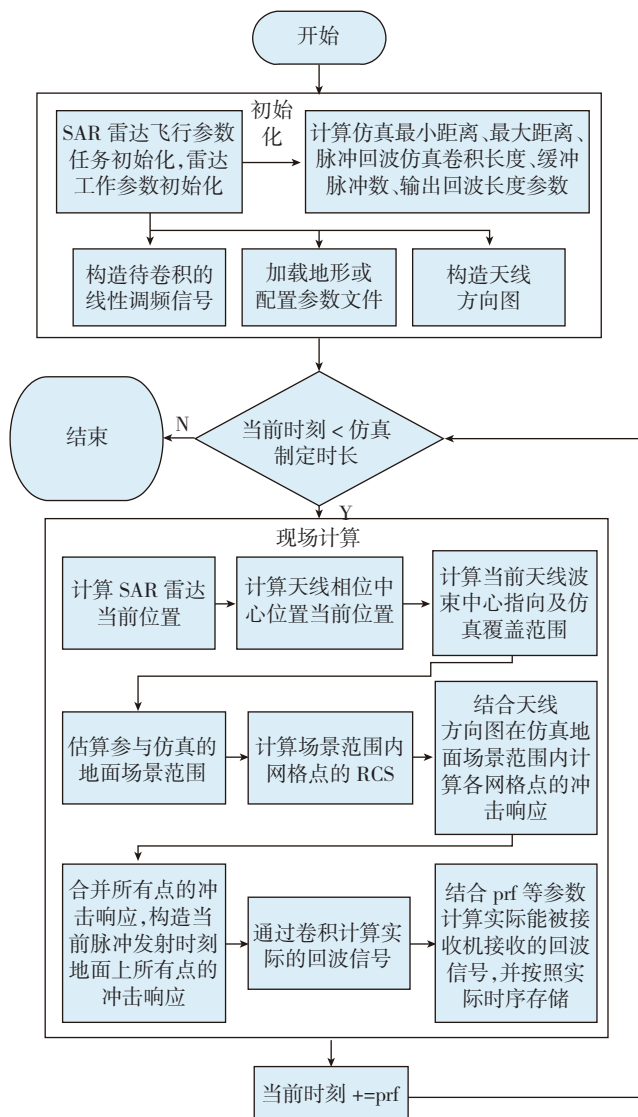


图2 SAR回波仿真流程

Fig.2 Simulation process of SAR echo

表1 点目标仿真参数表

载频	脉宽	信号带宽	距离采样率
8.3GHz	2 μ s	500MHz	600MHz
倾斜角	波束宽度	波长	脉冲重频率
0°	1°	0.0361m	500Hz
距离分辨率	孔径长度	孔径时间	方位分辨率
0.3m	349m	2.9s	0.3m
最小距离	高度	目标位置	SAR 运动速度
20000m	10000m	(0,0)	120 m/s

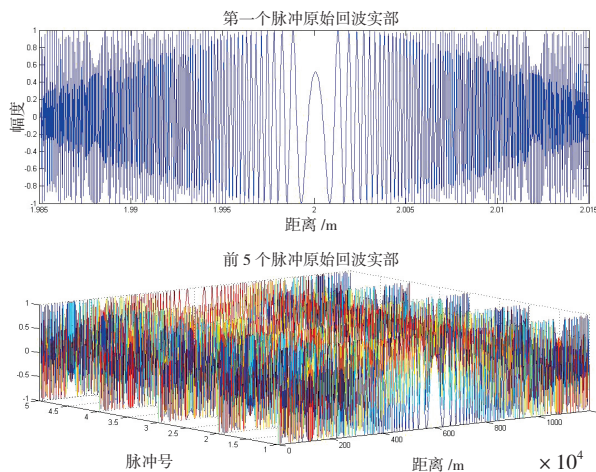


图3 点目标原始回波

Fig.3 Original echo of point target

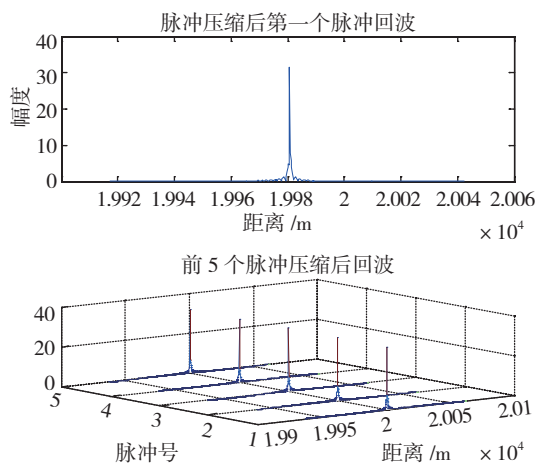


图4 点目标距离压缩图

Fig.4 Range compression of point target

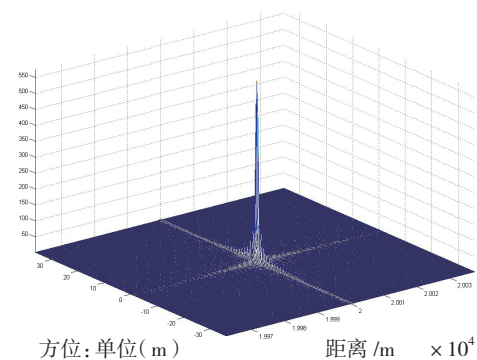


图5 点目标距离方位压缩图

Fig.5 Range and azimuth compression of point target

坐标位置同仿真初始设定保持一致,说明本文提出的仿真方法适用于点目标的 SAR 原始回波模拟。

3.2 多点目标回波模拟

假定在场景中包含两个目标,两目标相距为 3m,其坐标分别为(0,0)、(-3,0),其他仿真参数同表1保持一致。多点目标原始回波如图6所示,图中上半部分为

第一个脉冲原始回波的实部,下半部分为前5个连续脉冲原始回波实部。

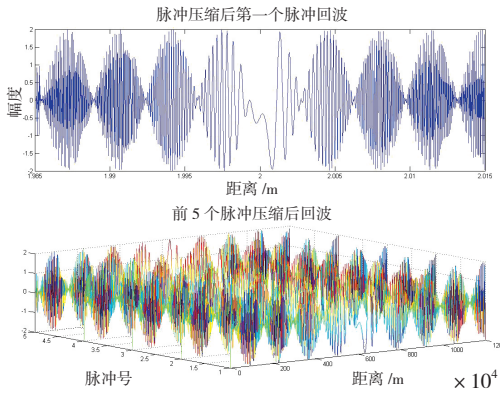


图6 多点目标原始回波
Fig.6 Original echo of multi point target

图7为多点目标距离压缩后的结果图,图中上半部为第一个脉冲距离压缩后信号,下半部分为前5个连续脉冲距离压缩后的结果。图8为多点目标方位压缩和距离徙动校准后的结果图。仿真结果表明该目标场景包含两个相距3m的点目标,证明本文提出的仿真

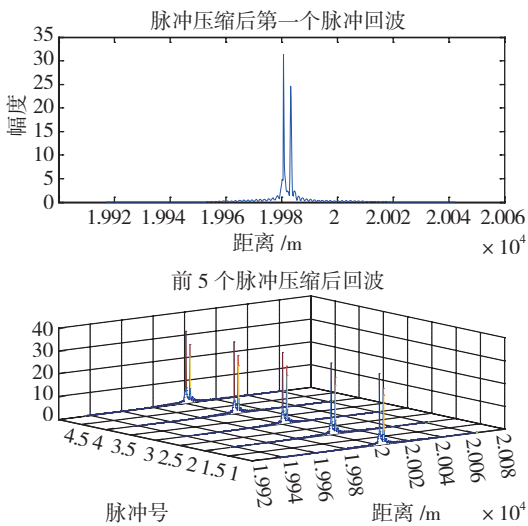


图7 多点目标距离压缩图
Fig.7 Range compression of multi point target

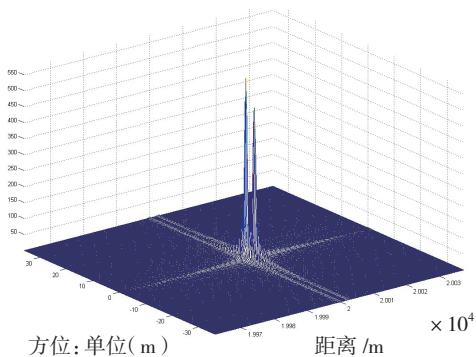


图8 多点目标距离方位压缩图
Fig.8 Range and azimuth compression of multi point target

方法满足多点目标的 SAR 原始回波模拟。

3.3 真实场景回波模拟

为了减少计算时间,本文在进行真实场景回波模拟时,选取了大小为 160×100 小地图数据,通过反演计算出该场景的后向散射系数,其他仿真参数同表1保持一致。真实场景原始回波如图9所示,图中上半部分为第一个脉冲原始回波的实部,下半部分为前5个连续脉冲原始回波实部。

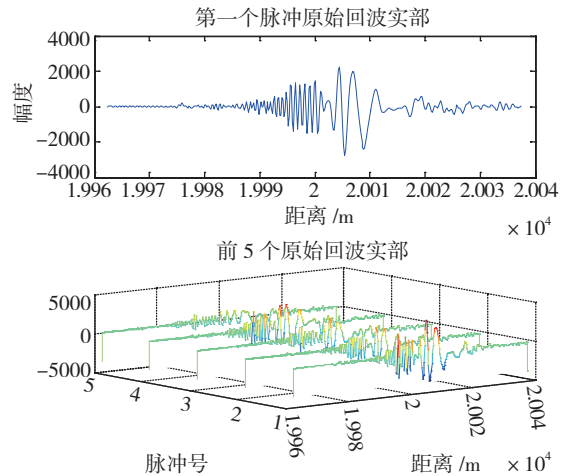


图9 真实场景原始回波
Fig.9 Original echo of real scenes

图10为真实场景距离压缩后的结果图,图中上半部为第一个脉冲距离压缩后信号,下半部分为前5个连续脉冲距离压缩后的结果。图11为真实场景方位压缩和距离徙动校准后的结果图。图12为真实场景 SAR 成像效果图。仿真结果证明该方法同样适应于真实场景的回波模拟。

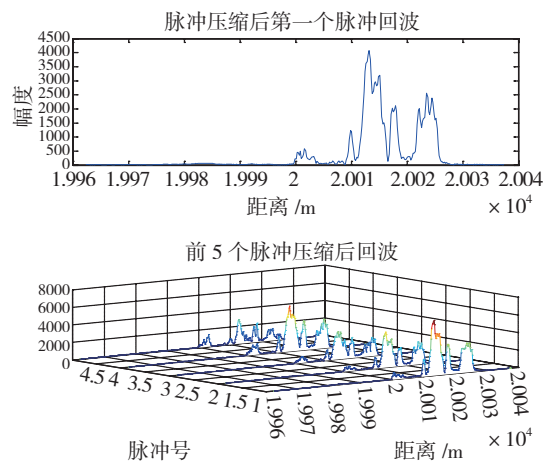


图10 真实场景距离压缩图
Fig.10 Distance compression of real scene

4 结论

本文主要对合成孔径雷达基本原理进行分析,并对

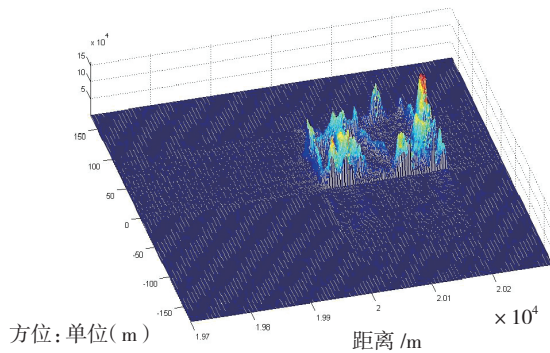


图11 真实场景距离方位压缩图

Fig.11 Distance and azimuth compression of real scene

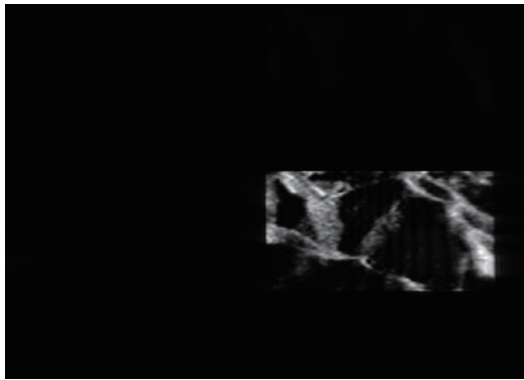


图12 真实场景SAR成像图

Fig.12 SAR imaging of real scene

SAR 回波信号数学模型的推导,在此基础上提出了一种适用于不同类型的合成孔径雷达回波模拟方法。仿真试验表明该方法具有一定的通用性,完全能够满足单点目标、多点目标、面目标、分布目标及真实场景等多种类型的 SAR 回波信号仿真需求,因而本文的研究对于 SAR 系统设计及性能分析具有重要的参考意义。

本文所提出的 SAR 回波模拟方法还无法实现大场景的 SAR 回波实时仿真,下一步本文将该问题进行研究,利用 GPU 并行计算实现大场景 SAR 回波快速模拟。

参考文献

- [1] GIORGIO Fanceschetti, MAUIZIO Migliaccio, DANIELE Riccio, et al. SARAS:A synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sense,1992,30(1):110-123.
- [2] GIEURLL C, RUPPEL M. An end-to-end synthetic aperture radar simulator[C]. EUSAR'96,Konigswinter,Gemrnay,1996:569-572.
- [3] FRANCESCHETTI G, IODICE A, RICCIO D, et al. An electromagnetic model for SAR raw signal simulation of urban areas[C]. Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas IEEE/ISPRS Joint Workshop, 2001:10-14.
- [4] KRUPP V H, WAITE W P, MAC Donald. Incidence angle consideration for Spacecraft imaging radar[J]. IEEE Trans.Geoscience and Remote Sensing,1982,20(3):384-389.
- [5] 李凌杰,王建国,黄顺吉.基于真实反射场景 SAR 原始信

号模拟[J].电子科技大学学报,1996,25(6):566-568.

LI Lingjie, WANG Jianguo, HUANG Shunji. SAR original signal simulation based on real reflection scene[J]. Journal of Electronic Science and Technology University,1996,25(6):566-568.

[6] 段秋萍,董戈,祁海明.基于真实场景的 SAR 回波模拟方法研究[J].遥测遥控,2007,28(7):36-41.

DUAN Qiuping, DONG Ge, QI Haiming. Simulation method of SAR echo based on real scene[J]. Remote Control, 2007, 28(7):36-41.

[7] 于明成,许稼,彭应宁,等. SAR 原始信号快速仿真[J].系统仿真学报,2006,18(2):122-125.

YU Mingcheng, XU Jia, PENG Yingning, et al. Fast simulation of SAR raw signal[J]. Journal of System Simulation,2006,18(2):122-125.

[8] 孙寒冰,曲长文,侯海平.合成孔径雷达原始信号的模拟方法[J].光电技术应用,2009,24(2):71-84.

SUN Hanbing, QU Changwen, HOU Haiping. Simulation method for the raw signal of synthetic aperture radar[J]. Optoelectronic Technology Application,2009,24(2):71-84.

(责编 宁宁)

(上接第 114 页)

[5] 吴欣.高速铣削工艺参数优化的试验研究[D].南京:南京理工大学,2004.

WU Xin. Experimental study on the optimization of process parameters for high speed milling[D].Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.

[6] WINFOUGH William R. Issues of dynamics in high-speed milling of aluminum aircraft structures[D].Gainesville:University of Florida, 1995.

[7] EYNIAN M, ALTINTAS Y. Analytical chatter stability of Milling with rotating cutter dynamics at process damping speeds[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2010, 132:1-14.

[8] DSC Eng. PAWE Twardowski. HSM machining stability during hardened steels milling progress[C]. Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering System Design and Analysis, ESDA,2008:289-294.

[9] 刘东,陈五一,刘强,等.7075 铝合金高速加工铣削力的试验研究[J].航空制造技术,2007(6):83-85.

LIU Dong, CHEN Wuyi, LIU Qiang, et al. Experimental study on milling force during high speed milling of Al alloy 7075[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(6):83-85.

[10] 汪振华,袁军堂,胡小秋,等.防锈铝合金 LF21 的高速铣削试验[J].中国机械工程,2009,20(14):1660-1664.

WANG Zhenhua, YUAN Juntang, HU Xiaoqiu, et al. Experimental study on milling forces in high-speed end milling of LF21 aluminum alloy[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(14):1660-1664.

[11] RAO Balkrishna, SHIN Yung C. Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001(41):1763-1781.

[12] KISHAWY H A, DUMITRESCU M, NG E G, et al. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005(45):219-227.

(责编 宁宁)