

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.07.017

## 民机近地告警系统的阈值非关键参数特性

赵鑫, 江驹, 王新华, 甄子洋, 焦鑫  
(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 针对民机近地告警系统中报警曲线阈值的非关键参数特性问题, 建立民用飞机飞行运动学模型。利用飞机的运动学特性将飞机作为质点, 根据离散的马尔科夫链计算地形高度分布建立二维地形模型, 在这 2 个模型的基础上, 利用模拟试验统计法, 分析飞行员操作延时、地形陡峭程度、飞机法向过载以及飞机航迹倾斜角在内的 4 个参数对报警曲线阈值的影响, 并在 Matlab 环境下对基于模拟试验统计法的告警系统进行仿真。仿真结果分析表明: 在不改变告警曲线阈值走向的情况下, 这 4 个参数会对告警曲线的斜率和范围存在一定影响。

**关键词:** 近地告警系统; 飞机模型; 地形模型; 报警阈值

**中图分类号:** TP206 **文献标志码:** A

## Non-Critical Characteristic Parameters in Threshold of Airliner's Ground Proximity Warning System

Zhao Xin, Jiang Ju, Wang Xinhua, Zhen Ziyang, Jiao Xin  
(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** This paper concentrates on discussing the influences of the non-critical characteristic parameters on alarm curve threshold in the ground proximity warning system for airliner. The civil aircraft flight kinematics model is established based on its kinematic characteristics. Besides, according to the calculation of markov chain of discrete topographic height distribution, the two-dimensional terrain model is established. In addition, using simulation test statistics, this paper analyses the influence of pilot operation delay, terrain steep degree, plane normal overload and aircraft flight path angle, four parameters on alarm curve threshold based on the model. Finally, simulation of this warning system is performed in Matlab. The result shows the four parameters has effects on the slope and ranges of the alarm curve by not changing the alarm curve threshold.

**Keywords:** ground proximity warning system; flight model; terrain model; alarm threshold

### 0 引言

可控飞行撞地 (controlled flight into terrain, CFIT) 是指飞机在飞行过程中处于完全适航的状态下发生飞机坠毁或严重损坏和人员伤亡的事故, 但这种事故并非由于飞机本身的故障或发动机失效等原因, 而是由于机组在毫无觉察危险的情况下, 操纵飞机撞山、撞地或飞入水中而造成的。自商用喷气飞机投入运营以来, 到 2006 年, 全世界范围内已经有 9 000 多人因为可控飞行撞地丧生<sup>[1]</sup>。由于事故一再发生, 1974 年美国联邦航空局 (FAA) 规定在大型客机上必须安装近地告警系统 (ground proximity warning system, GPWS), 以防止飞行可控撞地。1976 年, 美国联邦飞行总局同意授权将近地告警系统应用于商用飞机<sup>[2]</sup>。

近地告警系统主要用于防止可控飞行撞地, 当飞行状态超出报警阈值时, 告警计算机通过声光报警装置发出告警信号, 提醒飞行员目前处于危险状

态, 直到飞行员采取措施并脱离不安全区域时, 声光告警信号才终止。国外对近地告警系统的研究较为深入, 已经形成比较完善的理论体系和成熟的产品。例如美国麻省理工航空航天部的 James K.Kuchar 和 Lee C.Yang 共同提出了基于性能指标求取阈值的方法<sup>[3]</sup>。以美国霍尼韦尔公司增强型的近地告警系统 (EGPWS) 为代表的众多类型的告警系统也已在民机上广泛应用。目前国内对近地告警系统的研究主要分为 3 个方面: 近地告警系统曲线阈值的研究<sup>[4-5]</sup>、近地告警系统软件实现方面的研究<sup>[6]</sup>和近地告警系统硬件方面的研究<sup>[7-8]</sup>。

近地告警系统研究的核心问题是各种报警模式中告警阈值的确定, 以及飞机本身、环境参数对告警阈值的影响。确定影响阈值的因素有哪些对于阈值理论的研究和近地告警系统的工程实现都是十分有意义的。飞机在近进和着陆的过程中会产生大量的数据, 近地告警系统的设计需要考虑飞机本身

收稿日期: 2011-04-06; 修回日期: 2011-04-28

基金项目: 2010 研究生创新基地 (实验室) 开放基金资助项目“舰载机着舰环境与安全决策技术研究”; 2009 江苏高校优秀科技创新团队“飞行器智能导航、控制与健康研究”

作者简介: 赵鑫 (1987—), 女, 山东人, 硕士研究生, 从事飞行管理系统研究。

以及外界的参数, 精确把握各个参数对阈值的影响方式和程度对近地告警系统应用于不同飞机时调整阈值曲线具有十分积极的作用。目前关于非关键因素对阈值的影响的文章较少。因此, 笔者利用模拟试验统计法, 以模式 1(过大的下降率)为例, 在 Matlab 环境下, 仿真分析了包括飞行员操作延时、地形陡峭程度、飞机法向过载以及飞机航迹倾斜角在内的 4 个参数对报警曲线阈值的影响。

## 1 民机运动模型及地形模型描述

### 1.1 民机飞行运动模型

近地告警系统主要根据飞机的运动轨迹给出告警信息, 在此只考虑民机的运动学特性建立民机飞行运动学模型, 将民机运动假设为质点运动。

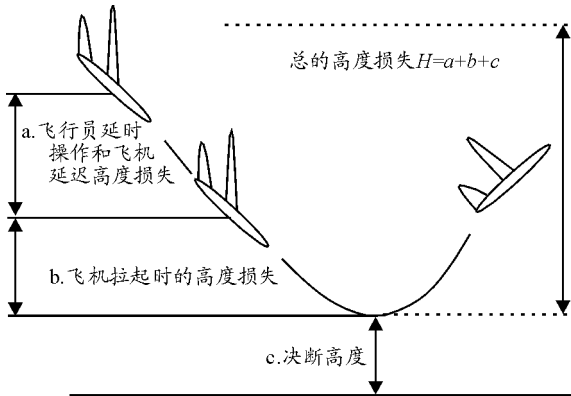


图 1 高度损失图

飞机由下降到拉起过程中的高度损失分为 3 个区域, 如图 1。

- 1) 飞行员延时操作和飞机机动延迟带来的损失;
- 2) 飞机拉起的高度损失;
- 3) 决断高度。

当飞机由报警开始到最终飞机拉起的过程中, 高度的损失就是以上 3 个区域高度损失之和, 其中轨迹的最低点要有一定的离地高度, 以确保飞机不会撞地, 即决断高度。总的高度损失为:

$$H = a + b + c \quad (1)$$

图 2 表示飞机拉起时的受力分析。图 2 中, 推力  $F_N = f(V, h, N)$  由推力曲线获取; 升力  $L = \rho V^2 S_w C_L / 2$ , 升力系数  $C_L = (2nG) / (\rho V^2 S_w)$ ; 法向过载  $n = L / G$ ; 阻力  $D = \rho V^2 S_w C_D / 2$ , 阻力系数  $C_D = f(C_L, M)$  由飞机升阻极曲线获取; 空气密度  $\rho = f(h)$  按高度查标准大气表; 航迹倾斜角  $\mu$ ; 重力  $G = mg$ 。

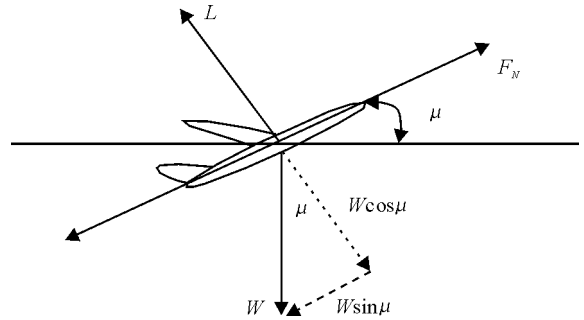


图 2 飞机拉起受力图

在此不考虑风速的影响, 记飞机速度为  $V$ 。某一瞬间飞机受力如图 2, 作用在飞机上的力有重力  $G$ 、空气阻力  $D$ 、飞机升力  $L$  和发动机推力  $F_N$ 。将上述作用于飞机的力投影到飞机的速度方向和垂直于速度的方向, 可得出飞机运动的动力学方程<sup>[9]</sup>为:

$$\begin{cases} \frac{G}{g} \frac{dV}{dt} = F_N - D - G \sin \mu \\ \frac{G}{g} V \frac{d\mu}{dt} = L - \frac{G}{g} \cos \mu \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $(G/g)V(d\mu/dt)$  为向心加速度。将式 (2) 进行化简得

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = g \sin \mu + \frac{1}{m} (F_N - D) \\ \frac{d\mu}{dt} = \frac{g}{V} (\cos \mu - n) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $n = L / G$  表示飞机的法向过载。

飞机下降高度为:

$$\Delta H = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} V \sin \mu dt \quad (4)$$

### 1.2 二维地形模型

经过实际地形的统计发现, 二维地形高度的分布符合高斯-马尔科夫特性<sup>[10]</sup>, 在此利用离散的马尔科夫链来计算地形高度分布。马尔科夫过程具有如下特性: 在已知目前状态(现在)的条件下, 它未来的演变(将来)不依赖于它以往的演变(过去), 这符合地形的特点。

这里仅考虑离散的马尔科夫过程。假设一个序列  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n$ , 其中  $n$  表示现在时刻。根据马尔科夫的性质, 下一个值  $y_{n+1}$  的值只取决于离它最近的一个值  $y_n$ 。这样, 建立现在时刻的信号时就无需知道前面所有函数的值, 离散时间的马尔科夫过程可以总结为如下等式<sup>[10]</sup>:

$$y_{n+1} = e^{-\beta} y_n + \xi_n \quad (5)$$

式中  $\xi_n$  是一个 0 均值的正态分布随机变量，方差为  $\sigma^2(1-e^{-2\beta})$ 。

由于平坦地形和山区地形的差别较大，为了更精确的建立它们的统计模型，将地形分为 5 个种类<sup>[10]</sup>：平坦地形、中等平坦地形、中等地形、中等陡峭地形和陡峭地形。各种地形特点和地形模型参数如表 1。

表 1 地形分类表

地形种类	高度标准差/m	$\sigma/m$	$\beta$
平坦	<84	79	$2.2 \times 10^{-3}$
中等平坦	84 ~ 167	269	$6.4 \times 10^{-4}$
中等	167 ~ 250	342	$1.3 \times 10^{-3}$
中等陡峭	250 ~ 333	415	$2.0 \times 10^{-3}$
陡峭	>333	1 007	$6.1 \times 10^{-4}$

### 2 试验统计算法设计

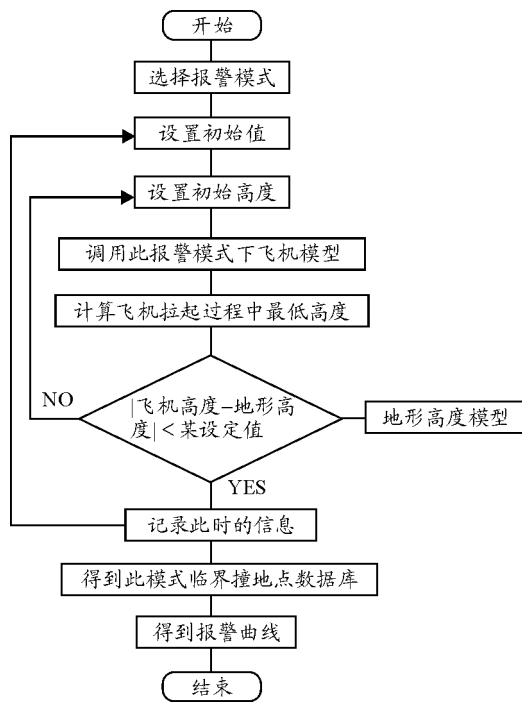


图 3 算法流程图

笔者采用模拟试验统计法来进行报警曲线的计算，这种方法是一种准确、简单的告警曲线阈值计算方法。考虑到飞机的临近撞地点是指飞机拉起过程中的最低点正好与地面相撞，所以在此利用飞机飞行中的最低点与地形进行比较来得出临界撞地点。利用飞机质点运动模型得到飞机飞行中实时高度，并计算最低高度值，利用地形模型计算地形高度分布，将飞机飞行中最低高度与地形高度相比较，若两者的差值的绝对值大于某设定值，则重新设置初始高度直至两者的差的绝对值小于所设定值时，记录此时的状态，然后重新设置初始值。重复进行以上过程，将撞地的临界点的信息记录到状态空间

中，用曲线拟合所得的临界点就可以得到飞机的近地告警曲线。笔者采用统计方法得到报警曲线，试验统计法算法的实现流程如图 3。

首先，根据飞机上的参数(例如起落架、襟翼的位置等)选择报警模式。然后，在此模式下飞机模型中设置初始参数(例如飞机速度，飞行员操作延时等)，并设定飞机初始高度，将飞机拉起过程中最低点的高度值与地形模型高度比较判断是否临界撞地。此时分为 2 种情况：1) 如果未撞地，则重新设置飞机初始高度继续循环计算飞机是否满足临界撞地的条件，直至飞机满足临界撞地。2) 如果飞机临界撞地，则在预先开辟的状态空间中记录此撞地点的信息(如高度，高度变化等)。并且重新选择初始状态开始下一轮循环，直到在状态空间中得到足够多的撞地点信息(如  $n=2000$ )，循环结束。这样就具有了足够多的临界撞地点，将这些点进行曲线拟合即可得到预期的报警曲线。

### 3 阈值非关键参数仿真分析

笔者利用上述试验统计法以及所建立的飞机运动学模型和二维地形模型在 Matlab 环境下进行仿真，通过仿真结果来分析非关键参数对报警阈值的影响。考虑到民航机对一些参数的限制，假设：飞机允许法向过载  $n \leq 2$ ，飞机操作延迟时间  $t \leq 8s$ ，飞机初始高度  $9.144m(30英尺) \leq h \leq 762m(2500英尺)$ 。笔者考虑的非关键参数包括飞行员操作延时时间、地形陡峭程度、飞机法向过载以及飞机航迹倾斜角 4 个因素。以模式 1(过大的下降率)为例来进行仿真，研究非关键参数对报警阈值的影响。模式 1 是在一定高度上，飞机的下降率超过了允许的极限值时给出声光报警，此方式与襟翼和起落架的位置无关，可工作在飞行中的任何阶段，其报警阈值由飞机离地高度和飞机下降率共同决定。

基于式 (3) 可以得到飞机拉起模型 Matlab 仿真结构框图如图 4。

图 5~图 8 为基于试验法得到的阈值曲线的 Matlab 仿真图。其中图 5 是飞行员操作延时时的阈值曲线，图 6 是改变地形时得到的阈值曲线，图 7 是改变法向过载时得到的阈值曲线，图 8 是不同的航迹倾斜角所得的阈值曲线。

图 5 仿真结果显示飞行员操作延时对模式 1 的报警曲线的斜率没有影响，但会改变报警范围，延迟时间越长报警范围越大。其中，相同的下降率在飞行员操作延时时间越长所需的报警高度越高，这是符合实际情况的，飞行员操作延时时间越长，飞

机下降高度越多, 所以相同下降率下所需的报警高度越高。

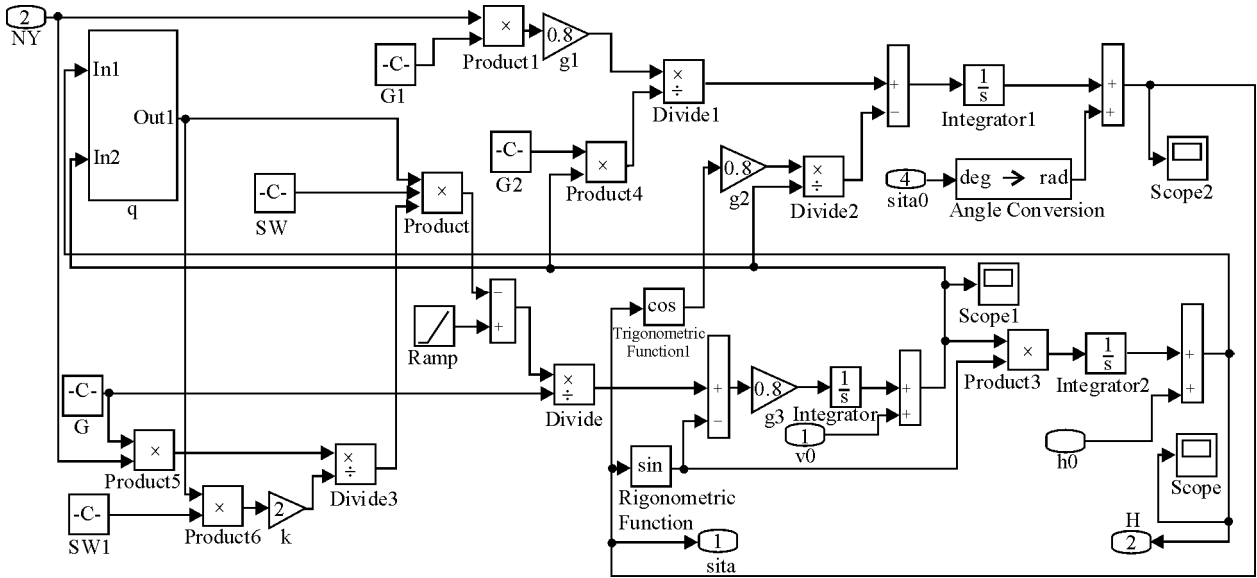


图 4 飞机运动学模型 simulink 仿真图

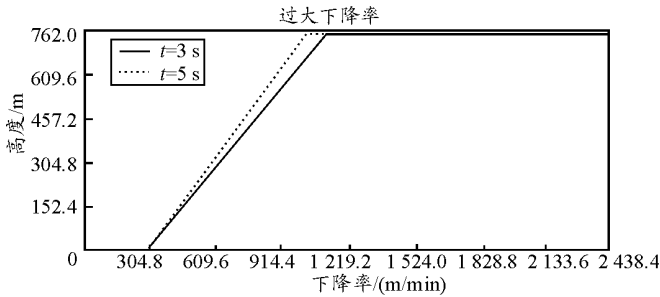


图 5 不同飞行员延时下的报警曲线

从图 6 中可以看出, 地形会改变模式 1 的报警曲线的范围, 地形越陡峭报警范围越大。模式 1 的工作高度区间是  $9.144 \text{ m}$  (30 英尺)  $\leq h \leq 746.76 \text{ m}$  (2450 英尺), 离地相对比较近, 由表 1 也可得出地形越陡峭, 高度标准偏差越大, 因此在相同的下降率下, 地形越陡峭飞机相对下降高度越高, 所需的报警高度也越高。

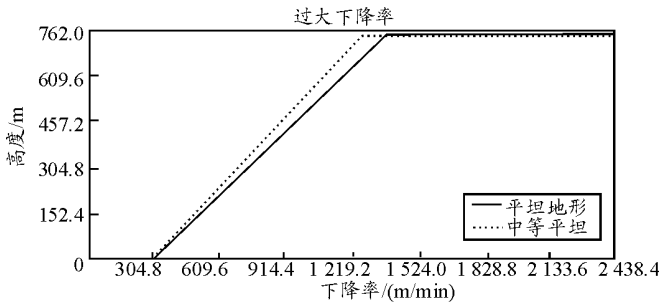


图 6 不同地形下的报警曲线

图 7 表明, 法向过载可以改变模式 1 的报警曲线的斜率, 对报警范围也有影响, 其中法向过载越大报警范围越小, 这也是符合常理, 飞机法向过载变大, 飞机的机动性增强了, 在较大空速的情况下

飞机有足够的机动性拉起, 从而逃离危险。

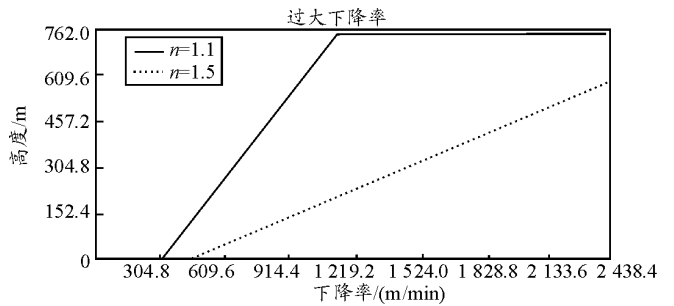


图 7 不同法向过载下的报警曲线

从图 8 中可以看出, 飞机航迹倾斜角对模式 1 的报警曲线的斜率和范围都有影响, 飞机航迹倾斜角的绝对值越大报警斜率越大, 报警范围越大。此处选用了航迹倾斜角为  $-10^\circ$  和  $-15^\circ$ , 在非正常降落时飞机航迹倾斜角是可以达到  $-15^\circ$  的。飞机下降率与飞机速度以及飞机航迹倾斜角有关, 相同的下降率在不同的航迹倾斜角时飞机具有不同的速度, 当航迹倾斜角越大时飞机速度越小, 相同的法向过载的情况下, 飞机的航迹倾斜角越大, 拉起时所需的时间越长。

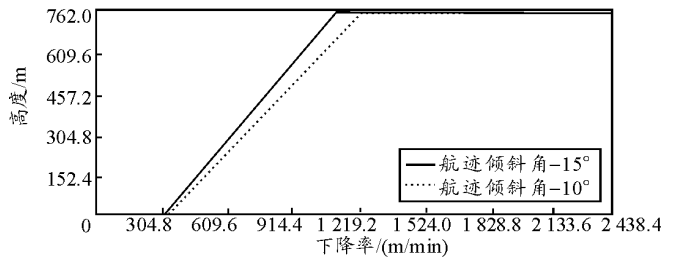


图 8 不同航迹倾斜角下的报警曲线

### 4 结论

近地告警系统的关键技术是报警曲线阈值的计算。对非关键参数的分析会对阈值曲线的调整提供足够的理论依据，也对内外报警曲线的确定具有一定指导意义。笔者采用模拟试验统计法，以模式一为例在 Matlab 环境下进行仿真，讨论了包括飞行员反应时间、地形陡峭程度、飞机法向过载以及飞机航迹倾斜角在内的 4 个非关键参数对报警阈值的影响。根据仿真结果可知，非关键参数不会改变报警阈值的走向，但会影响报警斜率或是报警范围，文中所得结果是符合常理的。

### 参考文献：

[1] 过志宏. 可控飞行撞地与应对[J]. 技术与管理论坛, 2006, 4: 62-67.  
 [2] Timothy R. Fitzgerald, Michael TB runner. Use of High-Fidelity Simulation in The Development of An F/A-18 Active Ground Collision Avoidance System[J]. AIAA, 1995, 33(6): 68-78.

(上接第 47 页)

初始相位差、开槽深度、加坡度方式和坡度角以及加窗技术等对 Ka 波段同轴布喇格反射器频率响应的性能都有影响。在现实中应根据实际需要来选择合适的参数,如果需要获得较窄的带宽(例如用于布喇格反射器),可采取选择内外导体壁波纹初始相位差为  $\pi$ 、较浅开槽深度、正圆锥形坡度和加窗技术;如果需要获得较大的带宽(例如用于布喇格滤波器),则可采取内外导体壁波纹初始相位差为  $\pi$ 、较深开槽深度、倒圆锥形坡度和加窗技术。

### 参考文献：

[1] Yariv A and Nakamura M. Periodic Structures for Integrated Optics[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1997, 13(4): 233-253.  
 [2] Kogelnik H, Shank C V. Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Laser[J]. J. Appl. Phys, 1972, 43(5): 2327-2335.  
 [3] Chong C K. Bragg reflectors[J]. IEEE Trans on Plasma Sci., 1992, 20(3): 393-402.  
 [4] McCowan R B, Fliflet A W, Gold S H, et al.. Design of a waveguide resonator with rippled wall reflectors for a 100 GHz CARM oscillator experiment[J]. Int. J. Electronics, 1988, 65(5): 463-475.  
 [5] Barroso J J, Leite Neto J P. Design of coaxial Bragg reflectors[J]. IEEE Trans on Plasma Sci., 2006, 34(3):

[3] Lee C. Yang, James K. Kuchar. Performance Metric Alerting: A New Design Approach for Complex Alerting Problems[J]. IEEE transactions on systems, Man and Cybernetics, 2002, 32(1): 123-134.  
 [4] 邱海俊, 江驹, 龚华军, 等. 基于性能指标的近地告警系统的阈值研究[J]. 中国航空学会 GNC 分会, 2009, 1: 86-90.  
 [5] 郑晟, 江驹. 近地告警系统报警曲线阈值研究方法[J]. 计算机仿真, 2011, 2: 67-71.  
 [6] 张朋, 赵怀军, 陈明. 基于 LabWindows/ CVI 的近地告警测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2007: 8-10.  
 [7] 陈冬梅. 机载增强型近地告警系统的设计[C]. 北京, 中国航空学会 2007 年学术年会, 2007: 1-5.  
 [8] 周托, 李庚, 范蟠果. 近地告警计算机自动测试系统设计[J]. 计算机技术与应用, 2006, 26(1): 62-64.  
 [9] 黄太平. 飞机性能工程[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 10-60.  
 [10] James K. Kuchar. Markov Model of Terrain for the Evaluation of Ground Proximity Warning System Thresholds[J]. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2001, 24(3): 428-435.  
 [6] Lai Y X, Zhang S C, Zhang H B. A Coaxial Bragg Reflector for Cyclotron Autoresonance Maser Oscillators [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(5): 328-330.  
 [7] Lai Y X, Zhang S C. Multiwave interaction formulation of a coaxial Bragg structure and its experimental verification [J]. Phys. Plasmas, 2007, 14(11): 113301.  
 [8] Y. X. Lai and S.C.Zhang. Multi-mode Coupling in a Coaxial Bragg Reflector[OL]. <http://www.paper.edu.cn>. A200706-1942, 2007.  
 [9] Lai Y X, Zhang S C. Separation of band-gap overlap in a coaxial Bragg structure operating in higher-order mode at Terahertz frequency[J]. Phys. Plasmas, 2008, 15(3): 033301.  
 [10] Chen X H, Zhang S C, Lai Y X. Suppression of residual side-lobes in a coaxial Bragg reflector[J]. Int. J. Infrared Millimeter Waves, 2008, 29(6): 552-557.  
 [11] CST Microwave Studio Version 4, CST Computer Simulation Technology[M]. July 2002.  
 [12] 丁学用, 张世昌, 谢永超. 具有坡度的同轴布喇格结构的频率响应[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 2051-2054.  
 [13] X. Y. Ding and S.C. Zhang. Effect of ripple shape and taper on frequency response of reflectivity and transmission in a coaxial Bragg structure[J]. J. Appl. Phys, 2009, 42(8): 085104.  
 [14] X. Y. Ding, H.Liu and Z.S.Lv. Effect of ripple taper on coupling modes in a coaxial Bragg structure[J]. Int. J. Infrared Millimeter Waves, 2010, 31(10): 1156-1163.