

文章编号:1674-8190(2019)04-480-07

# 一种基于箔条云团散射的远距支援干扰方法

邱时代,姚登凯,赵顾颢

(空军工程大学 空管领航学院,西安 710051)

**摘要:** 航空兵在执行对地突防任务的过程中,电子干扰是掩护突防编队、提高突防飞机生存概率的重要手段。提出一种利用箔条云团散射远距干扰信号对地空导弹制导雷达进行干扰的复合干扰方法。该方法使用干扰机照射突防航线上布撒的箔条云团,通过箔条云团的散射,从地空导弹制导雷达的主瓣注入干扰能量;在此基础上,建立实施正面突防时的箔条弹多次抛洒模型,该模型可以有效的计算出突防编队抛洒箔条弹的间隔距离,从而确定抛洒箔条弹的时机,并通过实例分析验证。结果表明:该方法具有更好的干扰效果;箔条弹多次抛洒模型可靠,可以确保对敌地空导弹阵地的持续干扰。

**关键词:** 复合干扰;突防;箔条云团;主瓣;抛洒时机

中图分类号: V243.2; TN972 文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.04.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A Remote Support Jamming Method Based on Chaff Cloud Scattering

Qiu Shidai, Yao Dengkai, Zhao Guhao

(Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Electronic jamming is an important means to protect penetration formation and improve the survival probability of penetration aircraft in the process of air force penetration. A compound jamming method for surface-to-air missile guidance radar using chaff cloud scattering long-range jamming signal is proposed. This method is to use jammers to irradiate chaff clouds scattered on penetration routes, and injects jamming energy from the main lobe of surface-to-air missile guidance radar through the scattering of chaff clouds. On this basis, a multi-time spraying model of chaff bombs in front penetration is established, which can effectively calculate the interval distance of the spraying of chaff bombs in penetration formation. The interval distance is used to determine the time of spraying chaff bombs, which is verified by an example. The results show that this method is of better jamming effect, and the chaff bomb multiple throwing model is reliable, which can ensure the continuous jamming to the enemy surface-to-air missile position.

**Key words:** compound interference; penetration; chaff cloud; main lobe; throwing time

## 0 引言

航空兵部队在执行对地突防任务的过程中,通

常需要使用远距支援干扰机等电子干扰设备对敌地空导弹制导雷达实施干扰,这样可以在一定程度上降低突防编队被发现和击落的风险,有效保证任

收稿日期:2018-09-21; 修回日期:2019-01-05

基金项目:国家自然科学基金(61601497)

通信作者:赵顾颢, zhaoguhao@163.com

引用格式:邱时代,姚登凯,赵顾颢. 一种基于箔条云团散射的远距支援干扰方法[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4): 480-486.

Qiu Shidai, Yao Dengkai, Zhao Guhao. A remote support jamming method based on chaff cloud scattering[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 480-486. (in Chinese)

务成功和飞行人员安全。

对于箔条干扰问题已有相关人员对其进行了不同程度的研究。国外对箔条干扰的研究从第二次世界大战就已经开始,包括对箔条云的建模分析<sup>[1]</sup>、RCS 精准计算<sup>[2]</sup>、时变 RCS 密度<sup>[3]</sup>等方面,并在多次对外战争中得到了应用,取得了较好的实战效果。国内,郑贺等<sup>[4]</sup>、李敬<sup>[5]</sup>深入分析箔条云的极化和能量特性、箔条的干扰原理以及应用发展;胡华强等<sup>[6]</sup>给出机载箔条弹在不同情况下最佳使用时机的计算方法;蔡万勇等<sup>[7]</sup>建立了大气环境下的箔条运动模型;李洋等<sup>[8]</sup>针对箔条干扰对新体制雷达的干扰能力和效果不断下降的问题,提出了新的复合干扰方法;周嘉汇等<sup>[9]</sup>研究了箔条作为无源干扰的重要方式对雷达探测的影响。上述研究对于旁瓣注入干扰能量的方法效果不佳,以及箔条干扰对具备动目标显示技术的雷达干扰效果不理想的相关问题进行深入研究。

针对上述问题,本文提出一种利用箔条云团散射远距支援干扰信号的复合干扰方法,该方法使用干扰机照射突防航线上布撒的箔条云团,通过箔条云团的散射,将干扰能量从地空导弹制导雷达的主瓣注入,达成优于旁瓣注入方法的干扰效果,之后建立实施正面突防时的箔条弹多次抛洒模型,为验证该模型有效性,结合实例进行仿真验证。

## 1 箔条云团散射远距干扰信号实施方法

将干扰机的强干扰能力和箔条云团的强散射能力结合起来,可以将干扰机的干扰能量从雷达天线主瓣注入接收机,从而取得较好的干扰效果,同时避免低速度箔条产生的雷达回波被具有动目标显示技术的雷达滤除,从而大幅扩大应用范围。干扰机掩护突防编队的过程中,突防编队到达敌防空火力圈边界时,在制导雷达、我突防编队连线上布撒箔条云团,敌地空导弹制导雷达探测突防编队时,雷达天线主瓣必定会对准突防编队尾部的箔条云团,此时远距支援干扰飞机照射箔条云团,强干扰能量通过箔条云团的散射从雷达天线主瓣进入雷达。干扰示意图如图 1 所示。

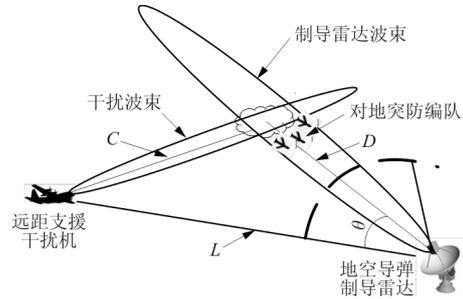


图 1 干扰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of chaff cloud scattering distant jam signal

根据雷达原理<sup>[8]</sup>,雷达接收机接收到的突防编队的散射回波的功率为

$$P_r = \frac{P_t G_z \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

箔条云团散射干扰机强干扰能量注入雷达天线主瓣的干扰信号功率为

$$P_{rg} = \frac{P_g G_g \sigma_b A_r}{(4\pi)^2 D^2 C^2} = \frac{P_g G_g G_z \lambda^2 \sigma_b}{(4\pi)^3 D^2 C^2} \quad (2)$$

式中: $P_t$  为雷达发射功率; $G_z$  为雷达天线主瓣增益; $G_g$  为干扰天线主瓣增益; $\lambda$  为雷达工作波长; $A_r$  为当前状态下的雷达天线有效面积; $\sigma$  为突防编队的等效散射面积; $R$  为雷达最大探测距离; $\sigma_b$  为箔条云团等效散射面积; $D$  为形成的箔条云团距雷达的距离; $C$  为干扰机距箔条云团的距离。

假设雷达接收机在信干比大于 10 时才能成功检测目标信号,雷达天线主瓣增益等于干扰天线主瓣增益,即  $G_z = G_g$ ,除了干扰能量之外没有其他的噪声来源,此时信干比可以表示为

$$\frac{P_r}{P_{rg}} = \frac{10D^2 C^2 P_t \sigma}{R^4 P_g \sigma_b} \geq 10 \quad (3)$$

则雷达最大探测距离为

$$R = \sqrt[4]{\frac{D^2 C^2 P_t \sigma}{P_g \sigma_b}} \quad (4)$$

面向敌地空导弹制导雷达突防的过程中,干扰机所在空域、地空导弹制导雷达位置相对固定,干扰机与敌地空导弹制导雷达位置距离为  $L$ ,干扰机与地空导弹制导雷达连线和突防航线之间的干扰角为  $\theta$ ,则雷达的最大探测距离为

$$R \leq \sqrt[4]{\frac{D^2 P_t \sigma}{P_g \sigma_b} (D^2 + L^2 - 2DL \cos\theta)} \quad (5)$$

假设干扰机的干扰功率  $P_g = 100 \text{ kW}$ ,雷达发

射功率  $P_t = 100 \text{ kW}$ , 一次抛洒  $n$  颗箔条弹形成的箔条云团等效散射面积  $\sigma_b = 40n \text{ m}^2$ , 突防编队等效散射面积  $\sigma = 10 \text{ m}^2$ ,  $L = 220 \text{ km}$ , 当干扰角  $\theta = 45^\circ$  时, 干扰机对地空导弹制导雷达进行正面突防, 则雷达的最大探测距离与箔条云团距雷达的距离、箔条云团等效散射面积之间的关系如图 2 所示。

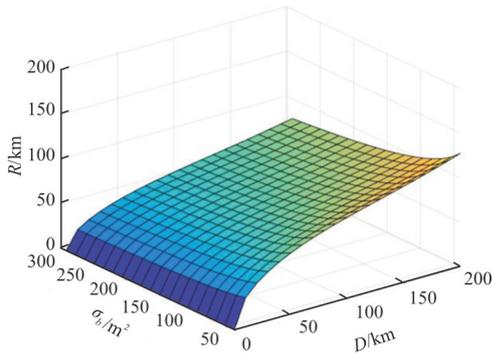


图 2 雷达的最大探测距离与箔条云团到雷达的距离、箔条云团等效散射面积的关系

Fig. 2 The relation of  $R$  versus  $D$  and  $\sigma_b$

若一远距干扰飞机从距离雷达天线  $L$  处, 直接对雷达旁瓣注入干扰,  $G_p$  为雷达天线旁瓣增益, 此时雷达天线有效面积变为  $A_f$ , 其余变量定义不变, 则进入雷达接收机的干扰功率为

$$P_z = \frac{P_g G_g A_f}{4\pi L^2} = \frac{P_g G_g G_p \lambda^2}{(4\pi)^2 L^2} \quad (6)$$

信干比为

$$\frac{P_r}{P_z} = \frac{P_t G_z^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \bigg/ \frac{P_g G_g G_p \lambda^2}{(4\pi)^2 L^2} = \frac{L^2 P_t G_z \sigma}{4\pi R^4 P_g G_p} \geq 10 \quad (7)$$

此时雷达的最大探测距离为

$$R \leq \sqrt[4]{\frac{L^2 P_t G_z \sigma}{40\pi P_g G_p}} \quad (8)$$

假设带旁瓣对消技术的雷达平均旁瓣电平为  $G_p/G_z = -40 \text{ dB}$ , 远距支援干扰飞机距雷达  $L = 220 \text{ km}$ , 雷达发射功率  $P_t = 100 \text{ kW}$ , 其中突防编队的散射面积  $\sigma = 10 \text{ m}^2$ , 利用旁瓣对消技术可以提供约  $10 \text{ dB}$  的对消比, 从而进一步降低旁瓣电平, 则雷达的最大探测距离与干扰功率之间的关系如图 3 所示。

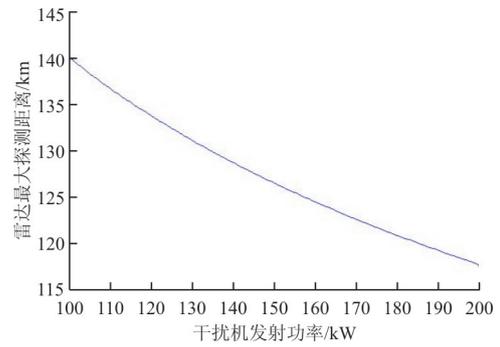


图 3 平均旁瓣电平下干扰功率与雷达最大探测距离的关系  
Fig. 3 Relationship between interference power and radar maximum detection distance under average side lobe level

从图 2~图 3 可以看出: 利用箔条云团转发远距干扰信号实施干扰的方式能够将雷达对突防编队的探测距离大幅降低, 干扰效果更好。

箔条云团转发远距支援干扰信号的干扰效果受箔条云团到雷达距离  $D$  和箔条云团等效散射面积  $\sigma_b$  的影响, 箔条云团距雷达越近, 等效散射面积越大, 干扰效果越好。相比之下, 缩短箔条云团距雷达的距离收效更好。

一次性抛洒箔条弹的数量  $n$  分别取 1、3、5、7 枚时, 即  $\sigma_b$  为 40、120、200、280  $\text{m}^2$ , 雷达的最大探测距离  $R$  与箔条云团距雷达的距离  $D$  在四种箔条云团散射面积下的关系如图 4 所示。

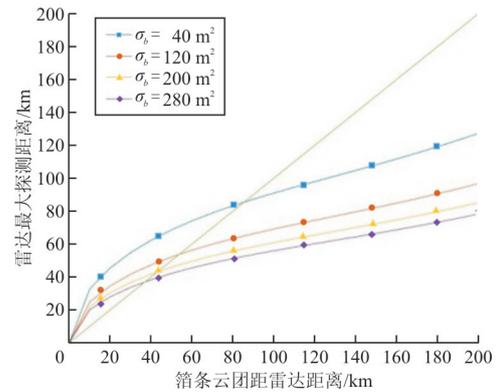


图 4 四种散射面积下的雷达最大探测距离与箔条云团到雷达距离的关系

Fig. 4 The relation between  $R$  and  $D$  in four  $\sigma_b$

从图 4 可以看出: 受到压制的最大雷达探测距离并不总是小于箔条云团距雷达的距离, 即当箔条云团距离雷达近到一定程度后, 雷达最大探测距离将大于或等于箔条云团距离雷达的距离, 此时干扰是无效的。从整个突防过程来看, 箔条云团等效散

射面积越大越晚进入压制无效的状态,因此在实际对地突防过程中必须根据实际情况选择合适的箔条弹抛洒位置和数量。

## 2 基于复合干扰方法的箔条弹多次抛洒模型

实施正面突防时,突防编队飞行至敌地空导弹制导雷达探测距离边界时,突防编队抛洒若干箔条弹,后方远距支援干扰机开始照射箔条弹爆炸后产生的箔条云团,对敌地空导弹制导雷达进行干扰,压制敌地空导弹制导雷达最大探测距离,使其无法探测到突防编队。当我突防编队再次飞至敌地空导弹制导雷达被干扰压制后的最大探测距离边缘时,再次抛洒若干箔条弹缩短敌地空导弹制导雷达最大探测距离,重复上述过程直至将敌地空导弹制导雷达最大探测距离压制至要求的距离。抛洒过程如图 5 所示。

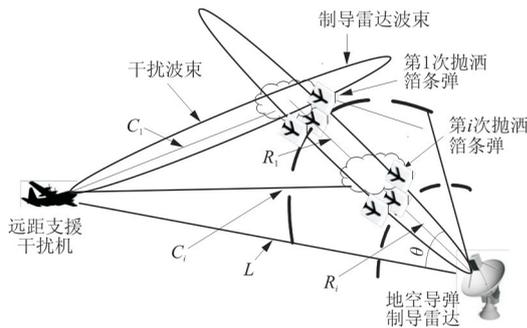


图 5 箔条弹抛洒示意图

Fig. 5 Chaff cartridge throwing timing diagram

每一次抛洒箔条弹后,敌地空导弹制导雷达最大探测距离为

$$R_{i+1} \leq \sqrt[4]{\frac{R_i^2 C_i^2 P_t \sigma}{P_g \sigma_b}} \quad (9)$$

式中: $R_{i+1}$  ( $i=1 \sim n$ )为第  $i$  次抛洒箔条弹后某型地空导弹制导雷达的最大探测距离; $C_i$  ( $i=1 \sim n$ )为第  $i-1$  次抛洒箔条弹后干扰机距离箔条云团的距离。

要求将敌地空导弹制导雷达最大探测距离压制到距离  $K$ 。

每一次抛洒箔条弹后,敌地空导弹制导雷达最大探测距离为

$$R_{i+1} \leq \sqrt[4]{\frac{R_i^2 P_t \sigma}{P_g \sigma_b} (R_i^2 + L^2 - 2R_i L \cos\theta)} \quad (10)$$

第 1 次抛洒箔条弹的时机应是突防编队首次飞至敌地空导弹制导雷达的未被干扰压制的探测距离边缘,即

$$X = R_1 \quad (11)$$

式中: $X$  为突防编队距离敌地空导弹制导雷达的距离。

则突防编队向前飞行  $S_i$  抛洒第  $i+1$  次箔条弹,即

$$S_i = R_i - R_{i+1} \quad (12)$$

具体步骤如下:

**step 1** 初始化  $K, \theta, P_g, P_t, \sigma, L, R_1, j, n_j$ ;

**step 2** 第 1 次抛洒  $n_1$  枚箔条弹的时机  $X = R_1$ , 计算  $R_2$ , 计算并输出  $\text{sum}_1 = n_1$ , 判断  $R_2$  是否小于等于  $K$ , 成立时进入 **step 5**;

**step 3** 第 2 次抛洒  $n_2$  枚箔条弹的时机  $S_1 = R_1 - R_2$ , 计算  $R_3$ , 判断  $R_3$  是否小于等于  $K$ , 计算并输出  $\text{sum}_2 = n_1 + n_2$ , 成立时进入 **step 5**;

**step 4** 第  $j$  次抛洒  $n_j$  枚箔条弹的时机  $S_i = R_i - R_{i+1}$  ( $i=1 \sim n$ ), 计算  $R_{i+2}$ , 判断  $R_{i+2}$  是否小于等于  $K$ , 成立时计算并输出  $\text{sum}_j = n_1 + n_2 + \dots + n_j$ , 成立时进入 **step 5**;

**step 5** 输出最小  $\text{sum}_j$  值及其对应的  $n_1 \sim n_j$ , 结束。

## 3 实例仿真分析

为了验证该方法的有效性,对某型战机面向敌地空导弹制导雷达所在目标区突防过程进行模拟,忽略地形、天气条件的影响且假设干扰机与制导雷达位于同一水平面。假设敌某型地空导弹制导雷达的探测距离  $R_1 = 200 \text{ km}$ , 发射功率  $P_t = 100 \text{ kW}$ , 某型战机突防编队等效散射面积  $\sigma = 10 \text{ m}^2$ , 每一枚箔条弹的等效散射面积  $\sigma_b = 40 \text{ m}^2$ , 干扰机布置我方一侧距离敌地空导弹制导雷达  $L = 220 \text{ km}$  处, 干扰角  $\theta = 45^\circ$ , 干扰机干扰功率  $P_g = 100 \text{ kW}$ 。假设空地武器最大发射距离为  $60 \text{ km}$ , 要求抛洒箔条弹次数在三次以内将敌地空导弹制导雷达最大探测距离压制在  $60 \text{ km}$  以内, 且由于受到重量等因素的制约, 飞机能携带的干扰资源有限, 所以优先选择使用箔条弹数量最少、压制效果最好的方法。模拟实际情况时有三种方式。

若在整个突防过程中, 突防编队只抛洒一次箔

条弹,即可在敌地空导弹制导雷达初始探测距离边缘一次性最少抛洒 21 枚箔条弹,将雷达探测距离压缩至 59.42 km,如表 1 所示。

表 1 抛洒一次箔条弹

Table 1 One time chaff cartridge throwing

参数类型	位置 1
抛洒位置距雷达距离/km	200
抛洒箔条弹数量/枚	21
箔条云团等效散射面积/m <sup>2</sup>	800
压缩后的雷达探测距离/km	59.42

若在整个突防过程中,突防编队抛洒两次箔条弹,满足要求的抛洒方法有两种,如表 2 所示,可以看出:两种干扰结果相差不大,采用第一种抛洒方法,使用 8 枚箔条弹将雷达最大探测距离压制到 59.65 km,如表 3 所示。

表 2 抛洒两次箔条弹

Table 2 Two times chaff cartridge throwing

抛洒方法	位置 1 抛洒数量/枚	位置 2 抛洒数量/枚	雷达探测范围/km	使用箔条弹总数/枚
第一种	2	6	59.65	8
第二种	3	5	59.95	8

表 3 两次抛洒方法中第一种箔条弹抛洒方式

Table 3 The first method of chaff cartridge throwing

参数类型	位置 1	位置 2
抛洒位置距雷达距离/km	200	106.96
抛洒箔条弹数量/枚	2	6
箔条云团等效散射面积/m <sup>2</sup>	80	240
雷达最大探测距离/km	106.96	59.65

若在整个突防过程中,突防编队抛洒三次箔条弹,满足要求的抛洒方法有五种,如表 4 所示。

表 4 抛洒三次箔条弹

Table 4 Three times chaff cartridge throwing

抛洒方法	位置 1 抛洒量/枚	位置 2 抛洒量/枚	位置 3 抛洒量/枚	雷达探测范围/km	使用箔条弹总数/枚
第一种	1	1	6	58.10	8
第二种	1	2	5	56.80	8
第三种	1	3	4	57.70	8
第四种	2	2	4	58.40	8
第五种	2	1	5	59.90	8

从表 4 可以看出:最少使用箔条弹总数均为 8 枚,其中第二种方法能够压制的雷达探测距离最

小,故采用第二种抛洒方法。使用 8 枚箔条弹将雷达最大探测距离压制到 56.80 km,如表 5 所示。

表 5 三次抛洒方法中第二种箔条弹抛洒方式

Table 5 The second method of chaff cartridge throwing

参数类型	位置 1	位置 2	位置 3
抛洒位置距雷达距离/km	200	127.20	84.33
抛洒箔条弹数量/枚	1	2	5
箔条云团等效散射面积/m <sup>2</sup>	40	80	200
雷达最大探测距离/km	127.20	84.33	56.80

由上述结果可知,突防过程中抛洒一次、两次、三次箔条弹,均能将雷达最大探测距离有效压制在 60 km 以内,但抛洒三次箔条弹方法中第二种抛洒方式使用箔条弹数量最少且干扰效果最好,可选择为最终干扰实施方案(实际干扰过程中抛洒两次箔条弹方法虽干扰效果相比较差,但达到要求的同时可以减少飞行员操作,也可选为最终实施方案),干扰过程如图 6 所示。

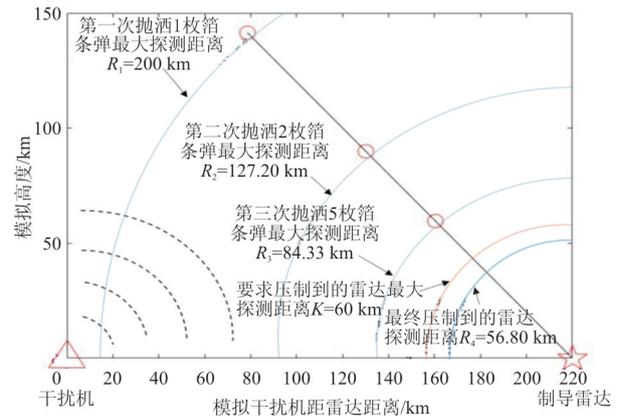


图 6 干扰过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of jam process

从图 6 可以看出:第一次抛洒箔条弹的时机是在突击航线与敌地空导弹制导雷达最大探测距离边缘交汇处,即突防航线上距离敌地空导弹制导雷达 200 km 时,此时第一次抛洒 1 枚箔条弹,雷达的有效探测距离由于强干扰能量从主瓣的注入变为 127.20 km;突击编队继续向前飞行 72.8 km 时到达雷达最大探测距离边缘,此时第二次抛洒 2 枚箔条弹,雷达的最大探测距离变为 84.33 km;突击编队继续向前飞行 42.87 km 时至最大探测距离边缘第三次抛洒 5 枚箔条弹,此时雷达的有效探测距离变为 56.80 km,小于要求的雷达最大探测距离 60 km,不再继续抛洒箔条弹,突防编队可以

开始实施对地突防任务。

实际作战中,要根据作战需求和突防编队实际能够装载箔条弹数量的多少,按照以上算法计算每次抛洒箔条弹的数量和位置,以取得符合实际和预期的干扰效果。

## 5 结 论

(1) 本文提出的箔条云团转发远距干扰信号实施方法,通过箔条云团的散射将干扰能量从雷达主瓣注入,对比干扰机远距旁瓣干扰方法可以取得更好的干扰效果。

(2) 本文建立的实施正面突防时的箔条弹抛洒模型可以在突防过程中对敌地空导弹制导雷达最大探测距离持续有效地进行压制,为执行突防任务的飞机编队提供有效保护。

### 参考文献

- [1] Pandey A K. Modeling and simulation of chaff cloud with random orientation and distribution[C]. Microwave and RF Conference, 2013.
- [2] Dong Wook Seo, Hyunjae Nam, OhJoon Kwon. Dynamic RCS estimation of chaff clouds[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(3): 2114-2127.
- [3] Marcus Sherman W. Dynamics and radar cross section density of chaff clouds[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(1): 93-102.
- [4] 郑贺,王兴华,张曦,等.极化散射矩阵的不同分布箔条云双站雷达截面分析[J].火力与指挥控制,2012,37(12): 16-18.  
Zheng He, Wang Xinghua, Zhang Xi, et al. Analysis of radar cross sections of chaff clouds with different distribution of polarization scattering matrices[J]. Fire Control and Command Control, 2012, 37(12): 16-18. (in Chinese)
- [5] 李敬.箔条弹干扰原理与形成机理[J].舰船电子对抗,2003,26(3): 15-19.  
Li Jing. Chaff jamming principle and formation mechanism[J]. Ship Electronic Countermeasures, 2003, 26(3): 15-19. (in Chinese)
- [6] 胡华强,徐忠伟.机载箔条弹最佳使用时机仿真研究[J].航天控制,2008,26(4): 61-64.  
Hu Huaqiang, Xu Zhongwei. Simulation of the optimum operating time of airborne chaff bomb[J]. Space Control, 2008, 26(4): 61-64. (in Chinese)
- [7] 蔡万勇,李侠,万山虎,等.大气环境下箔条运动轨迹及箔条幕扩散模型[J].系统工程与电子技术,2009,31(3): 565-569.  
Cai Wanyong, Li Xia, Wan Shanhu, et al. Chaff trajectory and chaff curtain diffusion model in atmospheric environment[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2009, 31(3): 565-569. (in Chinese)
- [8] 李洋,吴华,王红卫,等.一种高效的有源照射箔条云复合干扰方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(4): 39-43.  
Li Yang, Wu Hua, Wang Hongwei, et al. An efficient method of active radiation chaff cloud combined interference[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(4): 39-43. (in Chinese)
- [9] 周嘉汇,高曼,戴娟.箔条干扰对雷达探测的影响[J].科技资讯,2012(9): 30-31.  
Zhou Jiahui, Gao Man, Dai Juan. The effect of chaff jamming on radar detection[J]. Science and Technology Information, 2012(9): 30-31. (in Chinese)
- [10] 丁鹭飞,耿富录,陈建春,等.雷达原理[M].北京:电子工业出版社,2009: 219-222.  
Ding Lufei, Geng Fulu, Chen Jianchun, et al. Radar principle[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 219-222. (in Chinese)
- [11] 窦心连,韩伟.舰载箔条对抗相参体制末制导雷达技术研究[J].水雷战与舰艇防护,2012,20(1): 30-32.  
Dou Xinlian, Han Wei. Research on shipborne chaff countermeasure coherent system terminal guidance radar technology[J]. Mine Warfare and Ship Protection, 2012, 20(1): 30-32. (in Chinese)
- [12] 车俐,蒋留兵.雷达旁瓣对消性能分析与实现[J].火力与指挥控制,2009,34(增刊): 172-174.  
Che Li, Jiang Liubing. Performance analysis and implementation of radar side lobe cancellation[J]. Fire Control and Command Control, 2009, 34(S1): 172-174. (in Chinese)
- [13] 李圭源,张厚,徐海洋.副瓣对消技术在抑制雷达间电磁干扰中的应用[J].电讯技术,2010,50(8): 121-124.  
Li Guiyuan, Zhang Hou, Xu Haiyang. Application of Side lobe cancellation technology in suppressing inter radar electromagnetic interference[J]. Telecommunication Technology, 2010, 50(8): 121-124. (in Chinese)
- [14] 陈静.雷达箔条干扰原理[M].北京:国防工业出版社,2007: 103-110.  
Chen Jing. Principle of radar chaff jamming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 103-110. (in Chinese)
- [15] 李明图,孙荣奖.基于照射箔条云的复合干扰原理分析[J].航天电子对抗,2008,24(5): 24-25.  
Li Mingtu, Sun Rongjiang. Analysis based on the principle of compound interference of illuminating chaff clouds[J]. Space Electronic Countermeasure, 2008, 24(5): 24-25. (in Chinese)
- [16] 万路军,姚佩阳,李项军,等.航空兵对地突防概率模型[J].火力与指挥控制,2011,36(7): 53-56.  
Wan Lujun, Yao Peiyang, Li Xiangjun, et al. Probability model of air force ground penetration[J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36(7): 53-56. (in Chinese)

- [17] 苏福, 王小念, 皮军明, 等. 干扰走廊对地面警戒雷达干扰效果仿真分析[J]. 火控雷达技术, 2007, 36(3): 57-60.  
Su Fu, Wang Xiaonian, Pi Junming, et al. Simulation and analysis of jamming effect of jamming corridor on ground surveillance radar [J]. Fire Control Radar Technology, 2007, 36(3): 57-60. (in Chinese)
- [18] 王洪讯, 卢楠, 李项军, 等. 有源无源复合干扰机理与效能分析[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(6): 43-46.  
Wang Hongxun, Lu Nan, Li Xiangjun, et al. Analysis of mechanism and effectiveness of active and passive compound interference[J]. Fire Control and Command Control, 2012, 37(6): 43-46. (in Chinese)
- [19] 王洪讯, 王星, 王红卫. 地空复合箔条走廊干扰机理和效能分析[J]. 现代防御技术, 2012, 40(5): 145-149.  
Wang Hongxun, Wang Xing, Wang Hongwei. Interference

mechanism and effectiveness analysis of ground air composite chaff corridor[J]. Modern Defense Technology, 2012, 40(5): 145-149. (in Chinese)

#### 作者简介:

邱时代(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:空域与流量管理。

姚登凯(1965—),男,硕士,教授。主要研究方向:空域与流量管理。

赵顾颢(1986—),男,博士,讲师。主要研究方向:空域与流量管理。

(编辑:马文静)

#### (上接第 455 页)

Zhang Xinxiang. Research of ellipsoidal micropore for fatigue crack initiation[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013. (in Chinese)

- [48] Sigl K M, Hardin R A, Stephens R I, et al. Fatigue of 8630 cast steel in the presence of porosity[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2013, 17(3): 130-146.
- [49] Murakami Y. Material defects as the basis of fatigue design [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 41(1): 2-10.
- [50] Gao Y X, Yi J Z, Lee P D, et al. The effect of porosity on the fatigue life of cast aluminum-silicon alloys[J]. Fracture of Engineering Materials and Structures, 2004, 27(7): 559-570.

#### 作者简介:

姜文(1992—),男,博士研究生。主要研究方向:含孔洞镍基单晶疲劳寿命评估。

姚卫星(1957—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构疲劳、断裂、优化设计。

王英玉(1977—),女,博士,副教授。主要研究方向:多轴疲劳寿命预测。

(编辑:丛艳娟)

#### (上接第 461 页)

Liu Chengcheng, Li Jie, Li Xin, et al. Improved design and analysis on aerodynamics for a propeller-driven long-endurance UAV[J]. Flight Dynamics, 2012, 30(3): 209-212. (in Chinese)

- [8] Smith A M O. High lift aerodynamics[J]. Journal of Aircraft, 1975, 12(6): 501-530.
- [9] Wentz W H, Ostowari C. Additional flow field studies of the GA(W)-1 airfoil with 30-percent flower flap including slot-GAP variations and cove shape modifications[R]. NASA CR-3687, 1983.
- [10] 董斌斌. 二维襟翼缝道外形的气动优化设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.  
Dong Binbin. Design and optimization of two-element airfoil [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [11] Catalano P, Amato M. An evaluation of RANS turbulence modeling for aerodynamic applications[J]. Aerospace Sci-

ence and Technology, 2003, 7(7): 493-509.

- [12] Rumsey C L, Ying S X. Prediction of high lift: review of present CFD capability[J]. Progress in Aerospace Science, 2002, 38(2): 145-180.

#### 作者简介:

李建华(1977—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:无人机总体和气动布局设计。

李锋(1961—),男,博士,研究员。主要研究方向:空气动力学,无人机总体设计。

李茂强(1984—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:无人机总体设计。

包晓翔(1990—),男,硕士,工程师。主要研究方向:无人机气动和隐身设计。

(编辑:马文静)