

# 高超声速目标类型的灰色关联识别模型

管维乐, 刘健, 申卯兴

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

**摘要** 为了解决高超声速目标类型识别问题这一反导作战的重要环节,在分析高超声速目标速度、高度和航迹特性的基础上,利用灰色关联理论,选取合适的特征指标,建立了高超声速目标类型识别模型,并对所建立的模型进行了实例验证,证实了模型的有效性,为高超声速目标类型识别提供一条有效的途径。

**关键词** 灰色关联;高超声速;类型识别

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.009

**中图分类号** TP11 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0038-04

## A Grey Incidence Recognition Model for Types of Hypersonic Target

GUAN Wei-le, LIU Jian, SHEN Mao-xing

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

**Abstract:** Hypersonic target type recognition is an important link in the actual anti-missile combat. On the basis of analyzing the speed characteristic, highly characteristics, and track features of hypersonic target performance, the grey incidence theory is adopted to determine the comparative sequence, process the characteristic data in normalization, select appropriate characteristic indexes, and calculate the incidence coefficient and grey incidence degree. By doing so, a model of hypersonic target type recognition is constructed. The simulation results show that the model is effective, and this provides an effective way for identifying the hypersonic target types.

**Key words:** grey incidence; hypersonic speed; type identification

高超声速武器因具有速度快、威力大、隐身性能好、临近空间飞行等特点<sup>[1]</sup>受到青睐。有关各国都积极进行高超声速武器的研制,并取得了一定的成果。可以预见,在未来的空中进攻作战中,高超声速武器将发挥重要作用。

高超声速武器一般是指飞行速度大于 $5Ma$ ,高度在 $20\sim 100\text{ km}$ 的临近空间飞行的导弹、作战飞机、飞行器等武器<sup>[2-3]</sup>。在空天防御作战中,首先

要解决的是“看得见,认得清”的问题,如何识别高超声速目标类型即“认得清”,为作战指挥决策提供可靠地依据。与常规空气动力目标相比,高超声速武器几何尺寸小,RCS(Radar Cross Section,RCS)更小,速度更快,摄动和微动等特征信息难以快速提取,并且难以在较短时间内完成目标信息的综合分析<sup>[4]</sup>,严重制约了对高超声速武器的目标识别。

雷达测量是获取目标信息的主要来源,可以对

收稿日期:2013-11-22

作者简介:管维乐(1985—),男,湖北孝感人,硕士生,主要从事防空反导作战决策分析研究.E-mail:258344914@qq.com

**引用格式:**管维乐,刘健,申卯兴.高超声速目标类型的灰色关联识别模型[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(5):38-41. GUAN Weile, LIU Jian, SHEN Maoxing. A grey incidence recognition model for types of hypersonic target [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 38-41.

防空指控体系中雷达测量的数据进行分析,与典型目标类型参数进行比较,得到空中目标的类型。本文基于雷达探测高超声速目标获得的信息,利用灰色关联理论<sup>[5]</sup>,对高超声速目标类型的识别问题作了初步探讨。

## 1 确定目标类型及特征指标

### 1.1 高超声速武器特点分析

高超声速武器具有与常规空气动力目标不同的特点,为了建立高超声速目标类型识别模型,需要对高超声速目标特性进行系统性的分析,选取合适的特征指标。

#### 1.1.1 速度特性

与常规空气动力目标相比,高超声速目标速度更快,一般飞行速度在 $5 Ma$ 以上,高超声速武器之所以速度能在 $5 Ma$ 以上,主要是采用了超燃冲压发动机<sup>[6]</sup>。超燃冲压发动机采用吸气式,它以极高的速度将空气吸入并压缩,使其达到上千度的高温,再与混合燃料燃烧,产生巨大推力,为高超声速武器提供强大动力<sup>[7]</sup>。超燃冲压发动机能够使高超声速武器以超过 $5 Ma$ 的速度飞行,相比于现在的动力系统,其速度提升实现了质的飞跃。

#### 1.1.2 高度特性

高超声速武器多选择在临近空间进行,一方面是因为地球大气层的大气压力、大气密度随高度增加而迅速衰减,在距地球表面 $15\text{ km}$ 高度处,大气压力与大气密度分别约为地面的 $12.3\%$ 和 $16.2\%$ ;在 $30\text{ km}$ 高度处,分别约为地面的 $1.2\%$ 和 $1.6\%$ ;在 $60\text{ km}$ 高度处,分别仅为地面的 $0.031\%$ 和 $0.028\%$ ,已接近真空状态。 $30\sim 60\text{ km}$ 的高空“走廊”是高超音速飞行器长时间远距离飞行的理想空间,在这个“走廊”进行滑翔机动飞行可有效降低气动加热、减少燃料消耗<sup>[4]</sup>;另一方面,从目前地面防空武器系统来看,拦截高度大都在 $30\text{ km}$ 以下和 $40\text{ km}$ 以上, $30\sim 40\text{ km}$ 之间的高度是地面防空武器系统拦截的空白区域<sup>[8]</sup>,高超声速武器在这一空间飞行,正是出于这样的考虑。

#### 1.1.3 航迹特性

在不影响对高超声速目标识别的前提下,可将高超声速目标的运动轨迹简化为助推段、巡航段和攻击段3个阶段<sup>[9]</sup>。在巡航段,高超声速飞行器的飞行方式与常规空气动力目标也有很大的区别,常规空气动力目标的航迹类型可以分为平直、俯冲或

爬升,而高超声速飞行器采用高频跳跃方式飞行<sup>[10]</sup>,没有固定的轨迹,既可以入轨飞行,也可以在大气层内飞行,这就增加了雷达对其探测、跟踪难度。根据文献<sup>[11~14]</sup>,高超声速巡航弹和钻地弹在攻击段没有机动动作,而高超声速轰炸机和无人攻击机在执行完攻击任务后会以跳跃的方式逃离大气层。

### 1.2 高超声速武器类型

高超声速技术进入了以飞行器为应用背景的先期技术开发阶段。根据文献<sup>[3]</sup>,未来的高超声速目标主要可能类型是直接用于攻击的高超声速导弹,用于运载攻击武器的高超声速飞行器,以及用于作战用途的高超声速飞机。依据现阶段各国实验的情况,本文暂且把目标类型初步定为高超声速巡航导弹、高超声速轰炸机、高超声速无人侦察机和高超声速钻地弹4大类,分别记为 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 。在高超声速武器系统成熟以后,可根据具体的武器型号做进一步的研究。

### 1.3 特征指标的选取

目标特征指标信息来自于雷达测量信息,目标类型识别的主要特征指标包括:目标高度、飞行速度、航路捷径、电磁干扰、航迹类型等,因为高超声速目标速度快,RCS小,隐身性能好,这里从中选取发现距离、飞行速度、飞行高度、航迹类型4个信息,作为对目标进行类型识别的主要特征指标。根据前面的分析,为方便研究,目标进入攻击段以后,将航迹类型分为平直、俯冲或爬升这2种类型,分别用1和2来表示。

## 2 建立目标灰色关联模型

用4种类型目标的4个特征指标(发现距离、飞行速度、飞行高度、航迹类型)建立比较数列:

$$X_i = \{X_i(n) \mid n=1,2,3,4\}, i=1,2,3,4 \quad (1)$$

式中: $n=1,2,3,4$ 分别对应目标的4个特征指标; $X_i(i=1,2,3,4)$ 分别为4种典型目标的类型。

### 2.1 确定比较数列

假设目标在雷达的探测范围以内,且能够对目标进行稳定跟踪。由于目前高超声速武器的各项指标均在设计、验证当中,难以获得真实的目标数据。为此,本文结合文献<sup>[11~15]</sup>目标数据,设定高超声速目标在临近空间范围的飞行特征信息分别为: $X_1 = \{200,7,40,2\}$ ,  $X_2 = \{250,4,45,1\}$ ,  $X_3 = \{220,9.5,33.5,2\}$ ,  $X_4 = \{240,5,50,1\}$ 。(速度单

位:Ma,距离、高度单位:km)。

### 2.2 特征数据归一化处理

由于不同特征指标的量纲不同,因而不具有可比性,所以在进行灰色关联度计算之前,需要对特征指标进行归一化处理。特征指标间的数据不存在运算关系,这里采用区间值法<sup>[6]</sup>。对目标特征信息的处理公式为:

$$X_i D_3 = (x_i(1)d_3, x_i(2)d_3, \dots, x_i(n)d_3) \quad (2)$$

式中,区间值化算子 $D_3$ 的定义为:

$$x_i(k)d_3 = \frac{x_i(k) - \min_k x_i(k)}{\max_k x_i(k) - \min_k x_i(k)}, k=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\gamma(x_s(n), x_i(n)) = \frac{\min_i \min_n |x_s(n) - x_i(n)| + \rho \max_i \max_n |x_s(n) - x_i(n)|}{|x_s(n) - x_i(n)| + \rho \max_i \max_n |x_s(n) - x_i(n)|} \quad (4)$$

式中 $\rho$ 为分辨系数,分辨系数的选取对关联系数有着直接的影响, $\rho$ 在0.05附近,灰色关联系数具有更好的表现性,其取值区间达到0.95<sup>[15]</sup>,结合文献[4]中分析的高超声速武器的特性,为使对高超声速目标类型识别时的灰色关联系数取值区间符合0.95原则,本文取 $\rho=0.05$ 。

由于 $X_s = \{X_s(n) | n=1, 2, 3, 4\}$ 为待识别目标的特征信息,我们将它与已知典型目标的特征信息参数 $X_i = \{X_i(n) | n=1, 2, 3, 4\}$ , ( $i=1, 2, 3, 4$ )进行关联系数计算,得出待识别目标与已知典型目标之间的关联系数。关联系数的表示形式为:

$$\gamma_{si}(n) = \gamma(X_s(n), X_i(n)) \quad (5)$$

式中, $i=1, 2, 3, 4$ ,为4类典型目标, $n=1, 2, 3, 4$ 为目标的4个特性。

根据文献[6],确定灰色关联度计算公式为:

$$\gamma_{si}(X_s, X_i) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \gamma(x_s(n), x_i(n)) \quad (6)$$

下面假设雷达探测到6批目标,具体特征指标见表1:

表1 目标的特征指标数据

Tab. 1 Characteristic indexes data of target

目标 编号	特征指标			
	发现 距离/km	飞行 速度/Ma	飞行 高度/km	航迹 特性
1	210	7	42	2
2	230	5	46	1
3	245	5	48	1
4	200	7	43	2
5	225	9	35	2
6	240	4	43	1

采用上面建立的模型( $\rho=0.05$ ),联立式(1)~式(6),计算得到的灰色关联度见表2。

依此,对基准比较数列归一化处理为: $X_1 D_3 = (1, 0.0253, 0.1919, 0)$ ,  $X_2 D_3 = (1, 0.0120, 0.1767, 0)$ ,  $X_3 D_3 = (1, 0.0344, 0.1445, 0)$ ,  $X_4 D_3 = (1, 0.0167, 0.2050, 0)$ 。

### 2.3 选取灰色关联系数及确定灰色关联度

将要进行识别的 $s(s \in \mathbb{N})$ 组目标特征信息组成的数列设为参考数列,记为 $X_s = \{X_s(n) | n=1, 2, 3, 4\}$ ,则由文献[6], $X_i(n)$ 与 $X_s(n)$ 的关联系数表示见式(4):

表2 灰色关联度计算值

Tab. 2 Calculat on of grey incidence degree

目标 编号	类型			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	0.8809	0.5748	0.5588	0.6012
2	0.6530	0.6101	0.5452	0.7536
3	0.7468	0.6219	0.5414	0.7595
4	0.7928	0.5712	0.5765	0.7182
5	0.5778	0.5433	0.7025	0.5419
6	0.5494	0.8429	0.5286	0.5806

通过对表2得到的数据进行分析,可知1~6号目标的最大的关联度依次为 $\gamma_{11}, \gamma_{24}, \gamma_{34}, \gamma_{41}, \gamma_{53}, \gamma_{62}$ 。因此,目标1和4是高超声速巡航导弹,目标2和3为高超声速钻地弹,目标5为高超声速无人攻击机,目标6为高超声速轰炸机。

将所得到的结果与现行的人工特征分析进行比较,得到的结果一致,说明了这种方法的有效性和简洁性。

## 3 结语

本文通过分析高超声速武器的性能,提取其特征指标,利用灰色关联理论,建立了识别高超声速武器类型的模型,并用示例进行了验证,得到的结果较为满意。该方法是基于雷达探测到目标而提取的数据,具有简单、易行的优点。本文提出的模型,是探索应用灰色理论解决高超声速目标类型识别问题,随着高超声速武器的日益成熟,还有很大的改进空间,对高超声速武器的识别问题研究还有待进一步的深入。

## 参考文献(References):

- [1] 王艳奎.临近空间飞行器应用前景及发展分析[J].国防科技, 2009, 30(2): 20-24.  
WANG Yankui. An analysis on application prospects and development of near-space vehicles[J]. National defense science and technology, 2009, 30(2): 20-24. (in Chinese)
- [2] Kim, Jijoong, Faruqi. Design of optimal flight controller for generic linearised missile model in hypersonic regime[C]//Defense science and technology organisation edinburgh weapons systems DIV, Canberra Australia: [s.n.], 2010: 32-64.
- [3] Liu Haiyong, Qiang Hongfu. Numerical simulation of the aerodynamics and aerothermal heating for a hypersonic vehicle[C]//2011 International symposium on manufacturing systems engineering. Beijing: [s.n.], 2012: 147-153.
- [4] 肖存英. 临近空间大气动力学特性研究[D].北京:中国科学院研究生院, 2009.  
XIAO Cunying. Near space atmospheric dynamics research[D]. Beijing: Graduate school of Chinese academy of sciences, 2009. (in Chinese)
- [5] 刘思峰, 郭天榜. 灰色系统理论及其应用[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2004.  
LIU Sifeng, GUO Tianbang. Grey system theory and application[M]. 3rd ed. Beijing: Science press, 2004. (in Chinese)
- [6] 党爱国, 郭彦朋, 王坤. 国外高超声速武器发展综述[J]. 飞航导弹, 2013, 2: 12-19.  
DANG Aiguo, GUO Yanpeng, WANG Kun. Hypersonic weapon development abroad were reviewed[J]. Maneuverable missile, 2013, 2: 12-19. (in Chinese)
- [7] 何煦虹, 陈英硕. 高超声速发动机[J]. 飞航导弹, 2013, 12: 33-36.  
HE Xuhong, CHEN Yingshuo. Hypersonic engine [J]. Maneuverable missile, 2013, 12: 33-36. (in Chinese)
- [8] 杨建军. 地空导弹武器系统概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
YANG Jianjun. Surface to air missile weapon system introduction[M]. Beijing: National defence industry press, 2006. (in Chinese)
- [9] 关欣, 赵静, 何友. 临近空间高超声速飞行器跟踪技术[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(8): 4-6.  
GUAN Xin, ZHAO Jing, HE You. Track technology of hypersonic aircraft in near space[J]. Journal of Sichuan ordnance, 2011, 32(8): 4-6. (in Chinese)
- [10] 张晓岚, 张云, 王海涛, 等. 临近空间高超声速目标及其防御[J]. 上海航天, 2013, 30(1): 48-52.  
ZHANG Xiaolan, ZHANG Yun, WANG Haitao, et al. Strategy analysis anti-near space hypersonic objective[J]. AerpSPACE shanghai, 2013, 30(1): 48-52. (in Chinese)
- [11] 刘美霞. 跳跃的死神——美国“猎鹰”空天轰炸机计划情报[J]. 国际展望, 2007, 4(558): 46-51.  
LIU Meixia. Leap is a god of death - the falcon air bomber program information [J]. World outlook, 2007, 4(558): 46-51. (in Chinese)
- [12] Stanfield S, Kimmel R L, Adamczak. Hifire-1 flight data analysis: boundary layer transition experiment during reentry[D]. New York: AIAA Paper 2012-1087, 2012.
- [13] Joseph M H, James S M, Richard C M. The X-51 Asramjet Engine Flight Demonstration Program [D]. New York: American: American institute of aeronautics and astronautics, 2008.
- [14] Davis M C, White J T. X-43 flight-test-determined aerodynamic force and moment characteristics at mach 7.0[J]. Journal of spacecraft and rockets, 2008, 45(3): 472-484.
- [15] 申卯兴, 薛西风, 张小水. 灰色关联分析中分辨系数的选取[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2003, 4(1): 68-70.  
SHEN Maoxing, XUE Xifeng, ZHANG Xiaoshui. Determination of discrimination coefficient in grey incidence analysis[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2003, 4(1): 68-70. (in Chinese)

(编辑:田新华)