

基于DS的电子战多信息PCA融合方案

郑德生^{1,2}, 李晓瑜^{2*}, 蔡竞业²

(1. 西南石油大学计算机科学学院 成都 610500; 2. 电子科技大学信息与软件工程学院 成都 610054)

【摘要】 该文提出一种新型主成份分析(PCA)电子战信息一体化融合方案。该方案基于信息融合DS理论, 采用PCA分析法对数据进行收集和降维处理; 再对特征层数据建立基本信任分配函数, 实现基于特征的数据融合; 最后对电子战系统信息进行智能诊断和挖掘等, 有效实现电子战系统中故障检测和分离。进一步, 通过大数据挖掘对设备状态进行评估, 及时发送给控制系统, 实现作战过程中对作战战略的合理指导、预警管控, 从而对多系统协同工作提供有力保障。

关键词 大数据; DS理论; 多信息融合; 多系统信息分析; 主成份分析

中图分类号 TP391; TP392 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.03.016

Multi-Information PCA Fusion Scheme of Electronic Warfare Based on DS

ZHENG De-sheng^{1,2}, LI Xiao-yu^{2*}, and CAI Jing-ye²

(1. School of Computer Science, Southwest Petroleum University Chengdu 610500;

2. School of Information and Software Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, a new type of principal component analysis (PCA) for electronic warfare information integration fusion scheme is presented. Based on DS theory of information fusion, the PCA method is used to collect data and reduce dimensions, and the basic trust distribution function is established for feature layer data to realize further based data fusion. The electronic warfare system information is intelligently diagnosed and mined to effectively achieve the fault detection and separation of electronic warfare system. Furthermore, the device status is evaluated and timely sent the control system through the big data mining, thus implementing the reasonable guidance and early warning and control for operational strategy in warfare procedure.

Key words big data; DS Theory; multiple information fusion; multi-system information analysis; principal component analysis

1 背景介绍

随着现代战略装备和信息化电子战^[1-3]的需求, 越来越多的武装设备及其关键组成模块, 都具有智能信息采集和数据传输能力, 如战斗机载火控雷达^[3]、机载无线数据链^[4]、电子战系统^[5-7]、航空控制中心等, 从而实现对设备的综合管控、故障管理与检测、数据监测与挖掘、战略指导等。航空发动机^[8-9]是机载设备中最关键核心部件, 一直是航空领域研究的重点问题之一。它是众多传感器的集合, 如红外传感、振动传感、加速传感、温湿度传感等, 都可以提供大量数据。除了这些关键设备, 航空装备往往还有武器检测系统^[10]、探测感知设备检测系统^[11]等,

这些装备中都由自检传感器提供自身的健康、安全、管理数据。对于军用战机而言, 如何将这些海量的数据和信息汇集、融合、挖掘, 对整个网络传输能力、有效信息融合能力以及数据挖掘结果的即时性, 提出了很高的要求。因此, 需要对这个“大数据”系统进行有效的信息融合, 并且通过通信信道传输给控制中心, 使得控制平台可以及时根据战机所具有的作战能力, 做出有效的作战任务部署及调整, 如图1示例。

信息融合^[12-13]即数据融合, 又称多传感器信息融合^[14], 在该信息处理过程中, 将对从单个和多个信息源获取的信息及数据进行关联、相关和综合, 以获得精确定位和身份预估, 最终实现对态势和威

收稿日期: 2018-05-17; 修回日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61502082); 国家博士后面上资助一等(2016M590880)

作者简介: 郑德生(1983-), 男, 副研究员, 主要从事大数据方面的研究。

通信作者: 李晓瑜, E-mail: xiaoyu33521@163.com

胁及其重要程度的及时全面的评估。随着大数据技术^[15-18]迅猛发展,该过程对其汇集、评估和额外信息源需求评价持续精炼,处理过程不断自我迭代优

化。信息融合的3个层次主要为:数据层融合、特征层融合及决策层融合。每层级融合结果的不同,会对最后诊断与决策得出的结果有着不同的影响。

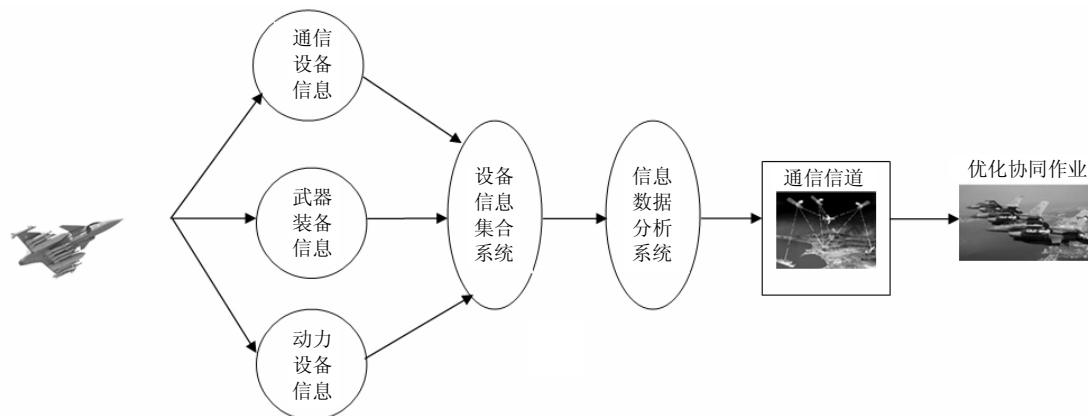


图1 数据融合与电子一体化系统框图

DS理论^[19-21],又称“Dempster-Shafer证据理论”,作为一种不确定推理方法,其证据理论最大的特点为:满足比贝叶斯概率论更弱的条件,以及具备直接表达“不确定”和“不知道”的能力。在信息融合^[22]、情报解析^[23]、目标识别^[24]、军略指挥^[25]和多属性决策分析等领域,如多个传感器的信息、多个控制中枢的信息、多位专家的意见等来自多源的不确定信息,都需要进行综合考虑,以达成问题的求解。其中,证据理论的组合规则在该类别的求解过程中发挥了重要的作用。随着科研工作者的不断推进,DS理论的最新发展及应用主要集中于:基于规则的证据推理模型和其规则库的离线与在线更新决策模型^[26],基于支持向量机的DS理论研究集^[27],DS理论与粗糙集^[28]和模糊集理论^[29]的结合,DS理论与神经网络^[30]和深度学习的融合,以及基于数据的Markovian与Dirichlet混合方法对DS理论质函数的赋值问题研究^[31]等。

由于电子战设备具有众多传感设备,需要对多种不同的数据进行融合、诊断,可以同时多个传感设备信息进行决策。DS理论作为目前被广泛研究的多传感器故障诊断决策层融合方法,却始终在该方法的应用方面存在一个重要缺陷,即当面临较多的传感器数据时,会出现证据混乱或证据冲突的情况。出现该错误的原因主要是在检测过程中数据信息量大,数据测量受干扰大,无法准确获取信息。本文主要通过设计决策级的解决方案,对数据特征进行有效的诊断和评估。提出一种基于主成份分析(PCA)的新型DS方法。首先,采集多种数据的特征值,比如振动特征值、电磁特征值、红外特征值等,

将其融合到一个数组当中;然后,通过PCA方法得到主要特征,特征数据利用DS理论方式进行诊断、降维等,进而实现数据融合和准确的电子战信息系统中设备的健康监测等目标。

2 数据融合理论

2.1 信息融合框架模型

多传感器信息融合,由于传感器之间的数据冗余性增强了系统信息的可靠性,同时,多传感器之间互补数据和信息扩展了整个电子战系统的性能。如图2所示,这里有多传感器,传感器之间存在若干非全组合的重叠关系,表现在数据上就是A、B、C、D等重叠区域的冗余数据,同时非重叠部分的数据又构成数据互补。

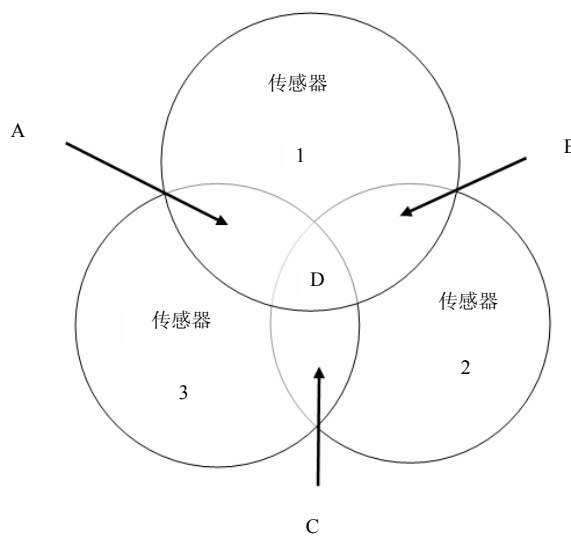


图2 多传感器信息融合数据冗余与互补示意图

1991年最早提出的数据融合处理模型如图3所

示, 当时主要是面向军事领域的应用, 自此一直被沿用于数据融合领域。信息融合的3个主要层次数据层融合、特征层融合及决策层融合, 就是基于该原型, 通过进一步改进与丰富所得。后期, “信息源”与“数据库管理系统”两个模块逐渐体现在数据层的融合上; 而“源预处理”体现在特征层融合; “目标评估”、“态势评估”、“威胁评估”和“总过程评估”则是决策层的融合。

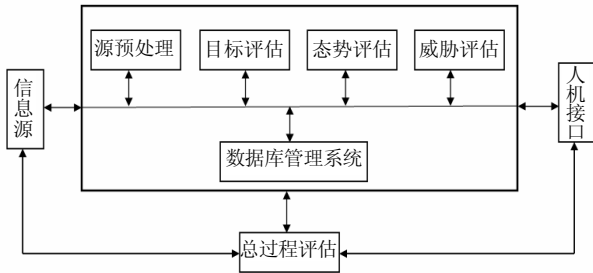


图3 数据融合处理框架原型

信息融合系统的融合层次, 不仅限于3个层次的融合结构, 根据不同的数据抽象, 还可划分为像素层融合、特征层融合和决策层融合。决策层融合作为3层次融合的最终结果, 直接指向具体的决策目标, 其融合结果直接影响决策水平的高低。然而, 决策层融合中要获得各自的判定结果, 第一步要对原传感器信息进行预处理, 所以预处理的代价更高。

2.2 DS理论简介

在DS证据理论中, 识别框架表示对某一问题的所有可能性答案, 是由互不相容的基本命题(假定)组成的完备集合, 而其中只存在一个正确的答案。命题是该框架的子集部分, 基本可信数(BPA, 也称m函数), m(A)反映对A的信度大小, 是分配给各命题的信任程度。具体基本定义如下:

定义 1 基本概率分配(BPA)

设U为已识别框架, 则函数m: 2^U → [0,1] 满足下列条件:

- 1) m(Φ)=0;
- 2) ∑_{A⊂U} m(A)=1 时, 称 m(A)=0为A的基本赋值,

m(A)=0表示对A的信任程度, 也称为mass函数。

定义 2 信任函数(belief function)

Bel: 2^U → [0,1]

$$Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B) = 1 (\forall A \subset U)$$

表示A的全部子集的基本概率分配函数之和。

定义 3 似然函数(plausibility function)

$$pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) =$$

$$\sum_{B \subset U} m(B) - \sum_{B \subset A} m(B) = \sum_{B \cap A \neq \phi} m(B)$$

似然函数是所有与A相交的子集的基本概率分配之和, 表示不否认A的信任度。

定义 4 信任区间

[Bel(A), pl(A)]表示命题A的信任区间, Bel(A)表示信任函数为下限, pl(A)表示似然函数为上限。

3 基于PCA的数据融合方案

3.1 PCA数据收集与降维处理

主成份分析法(PCA), 旨在利用降维的思想, 把多指标转化为少数几个综合指标(即主成份), 其中每个主成份所含信息互不相同, 都可以反映原始变量的大部分信息。该方法在引进多方面变量的同时将复杂因素归结为几个主成份, 进而简单化问题处理过程。基于该方法, 对多传感器数据进行融合, 提取它们的共同特征, 从而得到一个比较准确的采样信号, 将该信号带入下述算法中, 可以有效地减少因为恶劣环境或干扰引起的误差。

首先, PCA通过线性变换达到数据降维的目的:

$$Y = \omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \dots + \omega_p X_p = \Omega^T X \quad (1)$$

式中, X为多元变量, X_i为随机变量; Y是变换后所得的随机变量; Ω是线性变换矩阵, 有:

$$\max \text{Var}(\Omega^T X) = \max \Omega^T \text{Var}(X) \Omega, \Omega : \|\Omega\| = 1 \quad (2)$$

式中, Var(*)表示计算方差。实际中, 线性变换矩阵根据特征值由大到小的顺序排列, 由矩阵X的特征向量所组成, 及特征向量为γ₁, γ₂, ..., γ_p, 对应的特征值满足λ₁, λ₂, ..., λ_p。因此, γ₁^TX为第一主成份, γ₂^TX为第二主成份, 由此类推。值得注意的是, 该方法在很大程度上受影响于被处理数据的物理单位, 所以同单位物理量是最好的选择。在诸多电子战系统装备中, 大部分检测信号类型同一且均值为零的特性, 刚好满足PCA方法的要求。

假设X_i是系统检测到的信号, i表示为第i次检测到的信号。因此多源随机变量为:

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_p] \quad (3)$$

将以上检测到的测量信号集合X带入到PCA算法中, 就可以得到一个p维向量集合为:

$$\text{Score} = [\text{IMF}_1, \text{IMF}_2, \dots, \text{IMF}_p] \quad (4)$$

式中, IMF_i为第i模态分量, 即第i个主成份的数据。由于在实际检测中, 数据X都是几乎差不多的同种类型的信号, 便使得第一模态分量中的贡献值高达99%。因此, IMF_i用来代替检测到的数组集合X是完全可行的。

在本文方法中,首先确定有不同种类的数据来源集合,如振动信号、磁光信号、热辐射信号和转速信号等,并且将它们组合成一个数组信号,如 $Sensors=[V_1, V_2, V_3, \dots, V_n]$, 其中 V_i 表示第 i 种传感器所得到的特征信号。为保证信号处理的一致性,首先对 V_i 信号的采样数据位数要统一;其次,由于PCA方法对单位的敏感性,需要对数据进行归一化处理。通过以上方法处理后,可以实现多数据特征的融合,进一步通过DS方法判定,从而达到综合判定的效果。

3.2 信任函数分配

根据定义1,给定一个识别框架 Θ , 或称为假设空间。在识别框架 Θ 上的基本概率分配(BPA)是一个 $2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ mass函数, 简称为 m , 且满足如下关系:

$$\begin{cases} m(\Phi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, 焦元(focal elements)是使得 $m(A) > 0$ 的 A 。在识别框架 Θ 上, 基于BPA及定义2, 对于识别框架 Θ 中的某一个假设 A , 按照基本的概率分配BPA分别计算出关于该假设的信任函数 $Bel(A)$ 及似然函数 $pl(A)$, 组成信任区间 $[Bel(A), pl(A)]$, 以表示对某个假设的确认程度。由此, 对于 $\forall A \subseteq \Theta$, 识别框架 Θ 上的有限个mass函数 m_1, m_2, \dots, m_n 的Dempster合成规则为:

$$(m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n)(A) = \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) \quad (6)$$

式中,

$$K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) = 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) \quad (7)$$

通过以上数据处理技术和方案,对多数据进行融合优化处理,可以更加准确地判断设备故障和健康状态。PCA数据融合方案如图4所示,主要步骤如下:

- 1) 不同种类数据采集及特征提取;
- 2) 对不同传感器获得不同种类的特征数据进行等采样率采集处理,使数据点数相同;
- 3) 对不同种类的数据进行归一化处理,使PCA对其更有普遍意义;
- 4) PCA处理,得到主成份向量及降维后的数据特征;
- 5) 数据对象两两进行DS判据处理,得到信息故障和健康检测,同时该数据会迭代校准数据。

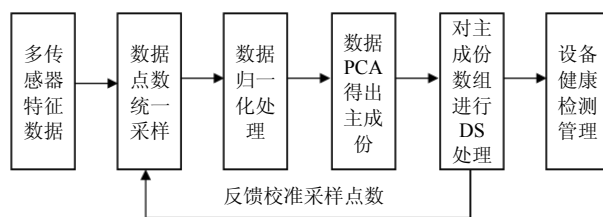


图4 PCA数据融合方案框图

4 电子战信息一体化系统的建立

通过以上方法和技术的设计,可以实现设备电子一体化的监控与管理,如图5所示,该系统各个模块之间的协同如下:

1) 数据源监测模块

该模块首先对恶劣环境下设备故障点进行分类,建立可能出现的故障数据库。

2) 人为诊断辨识专家库

同时,对于难建立库数据的故障,需要人为辅助支持,该方式采用专家单独数据库,便于实时更新。

3) 数据信息结构化处理模块

在结构化和半结构化数据中,需要采用大数据处理框架。

4) PCA大数据优化系统

对大量的多种多源数据进行分类存储和采用大数据分布式存储、计算方法,实现对数据的有效处理。

5) DS电子设备检测系统

电子一体化设备检测系统不包括系统本身的检测管理。

6) 辨识结论与通信模块

在电子信息辨识结论报告与通信模块中,得出有效的健康结论,支持任务合理分配。同时需要建立复杂大电子信息网络,诊断数据不仅需要传回给控制系统,同时需要与可识别的编队、海、陆、空等战备控制系统共享数据信息,可为战略部署提供重要的技术支持。

该框架的提出,可以通过对电子战武器系统和硬件装备的实时数据检测和大数据分析,得到基于PCA分析的多数据融合结果,并对该数据结果进行DS真假判断,对军事装备目前可战性的评估有一个具有科学意义的支持。同时,该框架的另一个突出部分是可以实现数据共享能力。该共享功能可以实现每个设备之间,相互了解队友在战争中有效处理突发战事情况的能力,从而可以更有效地实现协同工作。在最优化战略战术的情况下,对当前情况作

出综合判断, 在减少自身伤亡和损失的情况下取得战事的胜利。

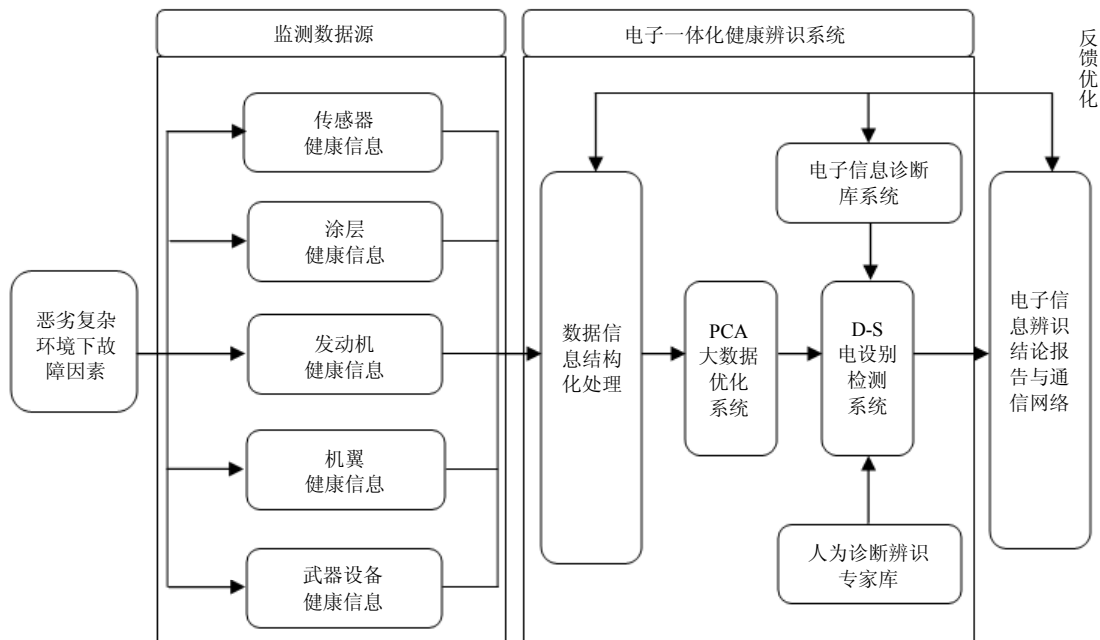


图5 恶劣复杂环境下电子战设备一体化检测系统

该方案通过信息网络、数据驱动和信息融合技术, 建立电子战争一体化信息系统, 完成数据的有效高速传输, 不仅可以使共享数据有效地发挥重要战略作用, 实现科学战争; 同时, 通过数据库的有效建立, 可以对共享数据和每次的战略部署进行分析和数据存储。实现未来无人作战过程中的有效战略部署大数据库的建立, 这将在未来智能战争中发挥重要作用。

5 结束语

随着电子信息技术高速发展与大数据时代的来临, 信息系统和武器控制系统的交互协作, 是提升电子战系统整体能力的主要手段。物联网技术迅猛发展, 使机载武器装备可以独立通信和自我检测, 随之, 装备信息系统也越来越复杂。在复杂恶劣环境下进行任务作业时, 信息、数据、设备发生错误对单机和编队都是致命的。本文讨论了电子战系统中设备健康检测与一体化作战系统的数据融合解决方案, 其中主要部分为电子战一体化识别系统, 需要通过PCA的算法, 建立数据层的信任分配函数并实现数据降维, 确实有效地对系统数据进行数据融合。本文提供了一种基于DS理论的全新PCA数据融合方案, 通过对不同传感设备得到的信息的有机组合, 采用主成份分析方法得到其特征信息, 再根据信任函数进一步进行数据融合, 综合识别多种设备

工作情况, 实现对电子战中各种设备的有效监控和战略部署。同时提出了电子战信息一体化构成系统, 通过通信系统和辨识结论共享, 实现各个战略单位战略协调作业, 为电子信息化作战提供有效的技术支持。

参 考 文 献

- [1] AN Hong, DENG Yang-jian, LYU Lian-yuan. Research on sliding mode control for anti-lock braking system based state observability and wheel optimal slip estimation[J]. Computer Simulation, 2002, 19(1): 66-68.
- [2] LIN Zhi-yuan, LIU Gang. The integration of radar-electronic warfare-communication[J]. Aerospace Shanghai, 2004, 21(6): 55-58.
- [3] WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, FENG De-jun. Modeling and simulation of modern radar and electronic warfare systems[M]. [S.l.]: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [4] DING Wen-rui, HUANG Wen-qian. The survey of the development of anti-jamming technology for UAV data link[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(10): 6-10.
- [5] GAO Xiao-bin, HAO Chong-yang. Fuzzy evaluation method of the electronic warfare system effectiveness[J]. Fire Control & Command Control, 2005, 30(1): 69-72.
- [6] KEMKEMIAN S, NOUVEL-FIANI M, CHAMOULARD E. Radar and electronic warfare cooperation: how to improve the system efficiency[J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 2011, 26(8):32-38.
- [7] JIANG Yan, LIU Yi, QI Yuan-xiang. Key techniques of integrated electronic warfare system[J]. Electronic Test,

- 2017(9): 85-86.
- [8] LIANG Cai-yun, XIE Ye-ping, LI Yong-fan, et al. Application of integrated aircraft/engine technology in aeroengine designing[J]. *Aeroengine*, 2015, 41(3): 1-5.
- [9] PAN Yang, LI Qiu-hong, GU Shu-wen, et al. Aeroengine thrust command model based on optimized intelligent networks[J]. *Aeroengine*, 2016, 42(2): 51-56.
- [10] ZHANG Liao-ning, QU Yang, ZHANG Zheng, et al. Ability to implement the mandate assessment of armored equipment weapons system based on technical detection[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2016, 35(7): 74-76.
- [11] WANG Dong. The research of data fusion perception rule mining in uavs cooperative network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [12] WANG Run-sheng. Information fusion[M]. [S.l.]: Science Press, 2007.
- [13] JIANG Wen, ZHANG An, DENG Yong. A novel information fusion method based on our evidence conflict representation[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(1): 27-32.
- [14] JIAN Xiao-gang, JIA Hong-sheng, SHI Lai-de. Advances on multi-sensor information fusion technologies[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2009, 7(2): 227-232.
- [15] CHENG Xue-qi, JIN Xiao-long, Wang Yuan-zhuo, et al. Survey on big data system and analytic technology[J]. *Journal of Software*, 2014(9): 1889-1908.
- [16] VIE L L, SCHEIER L M, LESTER P B, et al. The U.S. army person-event data environment: a military-civilian big data enterprise[J]. *Big Data*, 2015, 3(2): 67-79.
- [17] KULSHRESTHA S. Big data in military information & intelligence[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2016 (2): 107-108.
- [18] WANG Sheng-li. Analysis on development of C4ISAR systems in the era of big data[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(5): 1-5.
- [19] WU Rong-chun. Key technology research of information fusion in military information system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [20] MANDLER E, SCHUERMANN J. Combining the classification results of independent classifiers based on the Dempster-Shafer theory of evidence[J]. *Machine Intelligence & Pattern Recognition* 1988, 7: 381-393.
- [21] SENTZ K, FERSON S. Combination of evidence in Dempster-Shafer Theory[J]. *Contemporary Pacific*, 2002, 11(2): 416-426.
- [22] LELANDAIS B, GARDIN I, MOUCHARD L, et al. Dealing with uncertainty and imprecision in image segmentation using belief function theory[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2014, 55(1): 376-387.
- [23] HONG Zhao-yi, GAO Xun-zhang, LI Xiang. Research on temporal-spatial information fusion model based on DS theory[J]. *Signal Processing*, 2011, 27(1): 14-19.
- [24] SHU Jian, LIANG Chang-yong. Dynamic trust model based on DS evidence theory under cloud computing environment[J]. *Computer Science*, 2016, 43(8): 105-109.
- [25] LI Ling-bo, YANG Zhao-min, FENG Ya-jun, et al. Target handoff of tracking-and-guiding radar to KEI using DS method[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2013(6): 427-429.
- [26] DU Yang, DONG Bin-hong, ZHAO Yan, et al. Performance analysis of message-driven direct sequence/frequency hopping spread spectrum communication system[J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(5): 514-520.
- [27] CHENG Si-yi, SUO Zhong-ying, ZHANG Jin. The method of rule fusion based on evidence theory and its application[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2010, 11(4): 47-51.
- [28] ZHOU Hao, LI Shao-hong. Combination of support vector machine and evidence theory in information fusion[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(9): 1566-1570.
- [29] LIN Guo-ping. Connections between covering generalization rough set and Dempster-Shafer theory of evidence[J]. *Journal of Zhangzhou Normal University (Natural Science)*, 2010, 23(2): 1-4.
- [30] LU Xue-yan, Zhao Zheng. Fault diagnosis of mill based on fuzzy clustering analysis and D-S evidence theory[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2011, 27(7): 41-44.
- [31] XIAO Ting-ting, ZHANG Bing. Multi-sensor target recognition technology based on neural network and D-S evidence theory[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2010, 33(2): 90-93.