

基于FP增长算法的红外抗干扰评估指标简约方法

吴鑫¹, 伍友利¹, 高翔², 牛得清¹, 徐洋³

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 复杂航空系统仿真重点实验室, 北京, 100076;

3. 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所, 四川绵阳, 621000)

摘要 针对红外抗干扰评估指标体系存在的冗余现象和缺乏合理性的特点,从红外导引头的固有属性、抗干扰性能指标以及导弹战技性能指标3个角度构建红外抗干扰综合评估指标,通过红外抗干扰实验仿真平台,设置相应干扰量,获取海量数据并对其进行预处理;再利用数据挖掘中的FP增长关联规则算法,对数据进行挖掘分析,得出干扰量与指标之间的关联规则;然后通过这些关联规则的强弱对指标进行简约,去除了冗余项仅保留了核心指标;最后采用BP神经网络对简约后的指标进行了有效性检验,结果验证方法下获取的抗干扰指标更为简洁、高效。

关键词 红外抗干扰评估指标体系;指标简约;数据挖掘;FP增长算法;关联规则

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.01.016

中图分类号 O213.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)01-0099-06

Research on Simplified Method of Infrared Anti-Interference Evaluation Index Based on FP-Growth Algorithm

WU Xin¹, WU Youli¹, GAO Xiang², NIU Deqing¹, XU Yang³

(1. Aeronautic Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Key Laboratory of Complex Aeronautical System Simulation, Beijing 100076, China; 3. Ultra High Speed Aerodynamic Research Institute, China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract With the continuous development of infrared interference means, it's more and more important to establish a set of scientific, reasonable and concise infrared anti-interference evaluation index system. Aimed at the problems that redundant phenomenon is in existence in infrared anti-interference evaluation index system and there is lacking in rationality, firstly, the evaluation index system of infrared anti-jamming is constructed from the inherent performance index, anti-jamming performance index and missile tactical performance index, and then through the infrared anti-interference experiment simulation platform, set up corresponding disturbance variable is set up, huge amounts of data preprocessing are obtained. Next, the FP-Growth algorithm in data mining is used to mine and analyze the anti-interference experimental simulation data, and the association rules between disturbance variable and indexes are obtained. Finally, the index system is simplified through the strength of these association rules. As a result, the re-

收稿日期: 2020-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(61973253)

作者简介: 吴鑫(1996—),男,福建南平人,硕士生,研究方向:红外抗干扰评估。E-mail:1097190663@qq.com

引用格式: 吴鑫, 伍友利, 高翔, 等. 基于FP增长算法的红外抗干扰评估指标简约方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(1): 99-104. WU Xin, WU Youli, GAO Xiang, et al. Research on the Simplified Method of Infrared Anti-Interference Evaluation Index Based on FP-Growth Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(1): 99-104.

dundant items are removed for the index contracted and the core indexes are in existence.

Key words infrared anti-interference evaluation index system; index contracted; data mining; FP-Growth algorithm; the association rules

随着新型红外技术在制导武器上取得的重大进展,红外制导技术由单一制导向复合制导发展,导弹的追敌抗干扰能力不断提高^[1]。与此同时,针对精确制导武器的光电干扰与雷达干扰手段也在不断加强,因此提高红外导引头的抗干扰能力刻不容缓。但在提高抗干扰能力技术之前,首要任务是构建一套准确的红外抗干扰评估指标。文献[2]通过在干扰环境下对环境复杂度进行量化建模,预测了导弹命中率误差的置信区间;文献[3]提出一种基于方差分析和贝叶斯数据融合的评估数据分析方法,建立了一套针对红外制导导弹抗干扰能力的评估理论方法体系;文献[4]从导弹的各个部件系统出发,来分析各系统对抗干扰能力的影响,构建抗干扰能力指标体系;文献[5]通过粗糙理论建立指标体系,之后去除冗余项保留核心指标。然而,上述方法均未考虑干扰量与既定指标之间的关系,造成评估指标的冗杂或者缺少相关必要的指标,不利于从设计层面提高导弹的抗干扰能力。

本文利用数据挖掘中的 FP 增长关联规则算法,寻求干扰量与所构建的评估指标之间的相关关系,重新构建了评估指标体系。

1 构建评估指标

1.1 红外导引头固有属性

红外成像导引头功能是利用探测目标的红外辐射特性,形成电信号传递给导弹制导控制系统,主要任务是对目标进行高精度的探测和跟踪。红外成像导引头主要由光学成像系统和随动系统组成,因此这 2 个分系统基本性能参数的好坏会直接影响红外导引头的抗干扰性能^[5-6]。

1) 光学成像系统^[7-8]:接收目标或景物的红外辐射能并转换为包含跟踪信息的电信号输出给随动系统。它的主要性能参数包括光通透率、焦距、扫描帧数、探测率、图像处理周期。

2) 随动系统^[7]:根据光学系统给出的弹目视线与光轴间的误差信号,驱动导引头光轴向误差减小的方向运动,使其对准目标,实现目标实时跟踪。主要性能参数包括最大跟踪角速度、框架角精度和静态跟踪误差。

1.2 红外导引头抗干扰性能指标选取

红外成像导引头的抗干扰性能受自身性能、环

境影响很大,通过分析红外导引头的抗干扰原理以及打击过程中环境干扰对其性能的影响可以得出,红外导引头的抗干扰性能主要体现在干扰情况下其识别能力和稳定跟踪能力两方面。

1.2.1 抗干扰识别能力

抗干扰识别性能指标包括检测概率、虚警概率、单帧识别时间、有效识别距离以及识别算法的成功率。

当目标释放干扰源时,最关心的是目标能否被检测到,之后形成稳定电信号对目标进行持续跟踪,故利用干扰环境下检测到的目标次数 N_1 与检测总次数 N 的比值,即 $P_t = N_1 / N$ ^[5]。

虚警概率是指在干扰环境下,红外导引头在识别过程中将非目标识别为目标次数 N_2 与检测总次数 N 之间的比值,即 $P_x = N_2 / N$ ^[5]。

单帧识别时间是指红外导引系统的图像处理器从每一帧图像中提取出目标信息所需要的时间,也就是对目标识别的反应时间,红外导引头的单帧识别时间越短,留给制导系统的时间就越多,导弹的抗干扰性能就会越高。

有效识别距离是指在干扰环境下红外导引头的真实作用距离^[6]。该指标与所处的干扰环境关系很大,信噪比、大气传输效率以及目标与背景的相对温差对其都有较大的影响。

识别算法的成功率主要受干扰弹参数的影响,包括干扰弹发射速度、发射个数、发射距离、发射间隔^[6]。

1.2.2 稳定跟踪能力

稳定跟踪是指在目标实施的干扰环境中,导引系统所采取的跟踪方式可以持续有效地跟踪目标。目标释放干扰后稳定跟踪的方式有预测跟踪与质心跟踪。预测跟踪是导弹光轴预测目标下一位置,提前向该位置进行姿态调整的跟踪方法;质心跟踪是导弹光轴紧跟着目标与释放干扰的能量中心。当目标释放干扰后,做大机动动作进行规避,此时预测跟踪的跟踪误差较大。而质心跟踪受干扰弹的投放参数影响较大。

对此,本文采用目标视线方位角误差和目标视线俯仰角误差来体现红外导引系统的稳定跟踪性能,这 2 个角度指的是系统光轴与目标线在水平方向与俯仰方向上的误差角。

1.3 导弹战技性能指标选取

1) 弹目距离:弹目距离是指导弹与目标之间的距离。弹目距离的大小会影响导引系统探测整个视

场的时间。

2)来袭方向:由于目标机的红外辐射特征有典型的方位特性,导弹的来袭方向不同,红外导引头对目标的识别效果也会不同。

3)进入角:以飞机速度相反的方向为正方向,导弹的进入角度越小,打击难度就会相对变大。这是由于飞机蒙皮对发动机尾焰进行了遮蔽,诱饵弹诱

骗导弹的成功率将会提高。

4)杀伤能力:随着红外导引头的不断更新换代,图形识别能力越来越强,导弹的杀伤能力也得到了大幅度的提升,导弹的杀伤能力对干扰性能的影响也越来越明显。

综上,建立红外抗干扰评估指标体系见图 1。

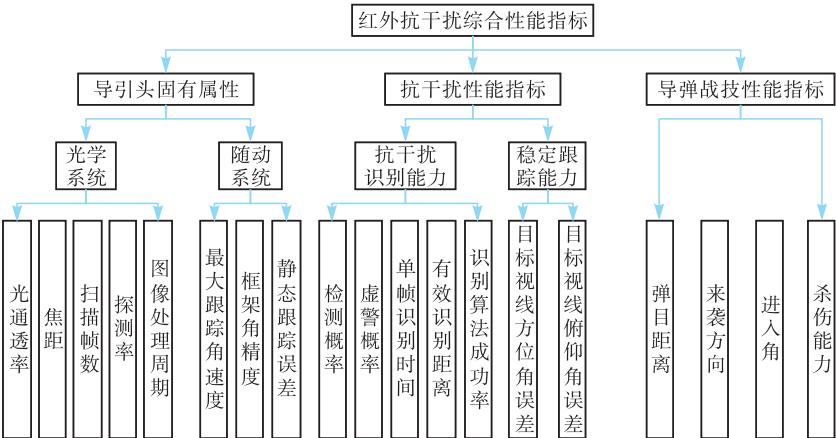


图 1 红外抗干扰评估指标体系

2 数据获取

2.1 红外抗干扰实验仿真平台

为了获得海量数据,本文基于 MATLAB2018 与 Visual Stadio2010,联合开发了红外抗干扰实验仿真平台,仿真流程如图 2 所示。

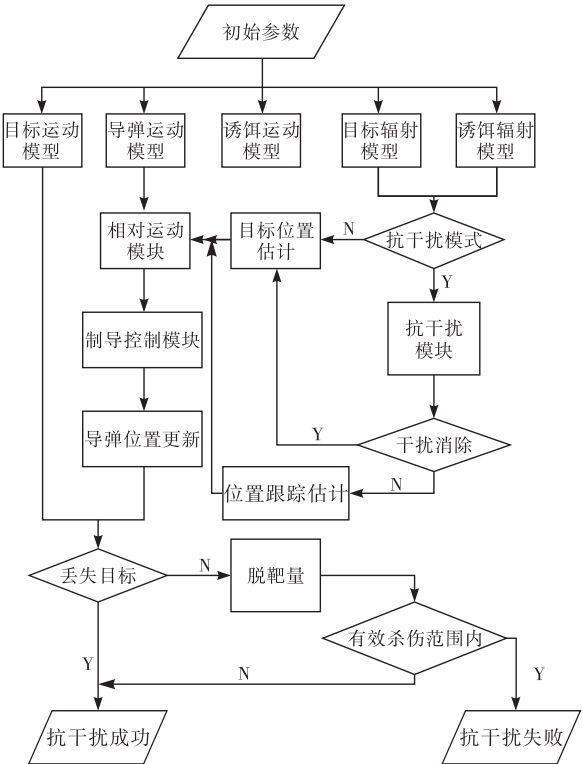


图 2 红外抗干扰仿真流程图

2.2 干扰量的设定

由文献[10]可知,目标投放红外诱饵弹的方式策略会对导弹红外导引头的稳定识别跟踪会产生巨大影响。对此,本文选择诱饵弹的投掷参数作为获取数据的干扰量,包括:诱饵弹总数、每组投掷个数、每组时间间隔、诱饵投掷时机、诱饵投掷速度、诱饵投掷角度。根据红外抗干扰实验仿真平台中诱饵弹参数的设定范围,本文制定了表 1 的仿真方案,以获取覆盖面较广的数据,同时设定导弹战术参数的范围。

表 1 诱饵弹参数范围设定

诱饵弹参数	含义	最小值	最大值	变化步长
N_s /个	投掷总数	4	16	2
N_f /个	每组投掷个数	2	4	2
T_i /s	每组时间间隔	0.1	0.9	0.4
T_l /s	投掷时机	0.5	3	0.5
V_f /(m/s)	投掷速度	20	35	5
θ_f /($^{\circ}$)	水平投掷角度	0	180	30
D_r /m	弹目距离	1 000	3 500	500
θ_m /($^{\circ}$)	进入角	10	170	30

2.3 数据收集及其预处理

在仿真前,需要对导弹模型、目标模型以及干扰弹模型的初始参数进行设置,见表 2。

对改变导弹战术参数获取到的数据进行预处理,将进入角与弹目距离进行编号,并将数据集通过脱靶量进行分类。战术参数预处理结果见表 3。

表 2 导弹、载机、干扰弹模型参数设定			
导弹模型	红外导引头	持续时间 T_1	0.05 s
		最大视线角	90°
		角坐标分辨率	0.036°
		瞬时视场角	3°
		离轴角	0°
	制导系统	比例导引比率 N	3
		持续时间 T_2	0.1 s
		过载限制	主动段:50 g 被动段:35 g
	载机模型	高度	5 km
		最大红外辐射强度	2 000 W/sr
		速度	250 m/s
干扰弹模型		最大红外辐射强度	5 000 W/sr
		峰值强度时间	1 s
		持续时间	5 s

表 3 战术参数数据预处理		
$\theta_m/(^\circ)$	D_r/m	R/m
10→39	1 000→45	<10→30
40→40	1 500→46	10~30→31
70→41	2 000→47	>30→32
100→42	2 500→48	
130→43	3 000→49	
160→44	3 500→50	

利用脱靶量 R 、命中前一刻偏航角 φ 、命中前一刻水平方向过载 n_z 以及命中前一刻水平方向视线角速度 dqz 4 个参量,对获取的海量数据进行清洗,把脱靶量数据分为 3 组,第 1 组 $R<10\text{ m}$,第 2 组 $10\leq R\leq 30\text{ m}$,其余数据为第 3 组;偏航角数据分为 2 组,第 1 组 $\varphi<2^\circ$,第 2 组 $\varphi>2^\circ$;水平方向过载数据分为 2 组,第 1 组 $2<n_z<40$,第 2 组 $n_z<2$;水平方向视线角速度也相应设组,第 1 组 $>1(^\circ)/\text{s}$,第 2 组 $<1(^\circ)/\text{s}$ 。干扰量数据预处理如表 4 所示。

表 4 干扰量数据预处理									
N_f	T_i/s	$V_f/(\text{m}/\text{s})$	T_l/s	N_s	$\theta_f/(^\circ)$	R/m	$\varphi/(^\circ)$	n_z	$dqz/((^\circ)/\text{s})$
2→1	0.1→3	20→6	0.5→10	4→16	0→23	<10→30	<2→33	2~40→35	<1→37
4→2	0.5→4 0.9→5	25→7	1.0→11	6→17	30→24	10~30→31	>2→34	<2→36	>1→38
		30→8	1.5→12	8→18	60→25	>30→32			
		35→9	2.0→13	10→19	90→26				
			2.5→14	12→20	120→27				
			3.0→15	14→21	150→28				
				16→22	180→29				

3 关联规则挖掘

3.1 FP 增长算法

关于数据挖掘中关联规则的定义如下:令 $I=\{i_1,i_2,\cdots,i_d\}$ 是所有项的集合,而 $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_N\}$ 是所有事务的集合,每个事务 t_i 包含的项集都是 I 的子集,在关联分析中,包含 0 个或多个项的集合被称为项集,如果一个项集中包含 k 个项,则称它为 k -项集。关联规则就是形如 $X\rightarrow Y$ 的表达形式,其中 $X,Y\subseteq I$ 且 $X\cap Y=\varnothing$,关联规则发现就是要找出支持度、置信度都大于等于支持度阈值与置信度阈值的所有规则。

FP 增长算法(FP-growth algorithm)是一种在数据中寻找关联规则的算法,主要步骤为:①通过数据构造出数据结构体,即 FP 树;②通过构造的 FP 树发现满足最小支持度阈值的所有频繁项集;③从发现的频繁项集中提取高置信度的关联规则。

关联规则的强度可以用支持度(s)和置信度(c)

度量。支持度用于确定给定数据集的频繁程度,而置信度确定 Y 在包含 X 的事务中出现的频繁程度。这两种度量的表示形式如下:

$$s(X\rightarrow Y)=\frac{\sigma(X\cup Y)}{N}$$
(1)

$$c(X\rightarrow Y)=\frac{\sigma(X\cup Y)}{\sigma(X)}$$
(2)

式中: $\sigma(\cdot)$ 表示项集的支持度计数。

若关联规则的支持度与置信度都大于最小支持度阈值与最小置信度阈值,则称这样的规则为强关联规则。但是仅用支持度-置信度框架来衡量关联规则的好坏存在许多局限性,支持度的缺陷在于许多潜在意义的模式由于包含支持度小的项而被删去;置信度的缺陷在于该度量忽略了规则后件中项集的支持度。为了解决这一问题,本文引入提升度(lift)来度量。

$$lift(X\rightarrow Y)=\frac{c(X\rightarrow Y)}{s(Y)}$$
(3)

3.2 导引头性能指标关联规则挖掘

通过 FP 增长算法,共获得 16 条与导引头抗干

扰性能指标相关的关联规则,见表 5。

表 5 导引头性能指标关联规则

序号	规则	支持度	置信度	提升度
1	37→30	0.663 8	0.983 8	1.251 6
2	35,37→30	0.648 5	0.983 4	1.251 2
3	33,35→30	0.574 2	0.981 3	1.248 5
4	33→30	0.596 1	0.978 5	1.244 9
5	2,15→35	0.486 9	0.969 6	1.044 8
6	15→35	0.567 7	0.963 0	1.037 7
7	30,33→37	0.532 8	0.893 8	1.324 8
8	35,33→37	0.521 8	0.891 8	1.321 8
9	2,15→30	0.438 9	0.873 9	1.111 8
10	30,37→33	0.532 8	0.842 6	1.317 6
11	15,35→30	0.476 0	0.838 5	1.066 7
12	35→30	0.757 6	0.816 5	1.038 7
13	35,37→31	0.521 8	0.791 4	1.299 1
14	35,30→33	0.574 2	0.757 9	1.244 2
15	35→37	0.659 4	0.710 6	1.053 2
16	35→33	0.585 2	0.630 6	1.035 2

本文挑选了其中 3 条可以较好地说明指标之间冗余关系的规则进行解释,其余不再赘述。

1)规则 37→30 的支持度是 66.38%,置信度是 98.38%表示击中目标前一刻,水平方向视线角速度小于 $1(^{\circ})/\text{s}$,脱靶量小于 10 m 的概率达到 98.38%。该实验结果说明击中目标前一刻水平方向视线角速度与脱靶量有较强的相关关系,与目标视线方位角误差的修正能力有关,因此目标视线方位角误差作为指标项保留,而目标视线俯仰角误差作为冗余项去除。

2)规则 35,37→30 表示击中目标前一刻,水平方向过载大于 2、水平方向视线角速度小于 $1(^{\circ})/\text{s}$,脱靶量小于 10 m 的概率达到 98.34%;而规则 35,37→31 表示击中目标前一刻,水平方向过载大于 2、水平方向视线角速度小于 $1(^{\circ})/\text{s}$,脱靶量大于 10 m 小于 30 m 的概率达到 79.14%。比较两组实验结果说明红外导引头识别跟踪算法能否识别成功会造成脱靶量的不同,一定程度上决定了导弹能否命中目标。

3)规则 15,35→30 表示击中目标前一刻水平方向过载大于 2、诱饵投掷时机为 3 s,脱靶量小于 10 m 的概率达到 83.85%。由于诱饵弹投掷时机较长,红外导引头的有效识别时间充足,增加了给导弹进行姿态调整的时间,最终降低了脱靶量。

通过对关联规则的分析,抗干扰识别性能指标与稳定跟踪能力指标简约为检测概率、单帧识别时间、识别算法成功率与目标视线方位角误差。

3.3 导弹战技性能指标关联规则挖掘

通过关联规则算法,本文最终获得了 6 条与导

弹战技性能指标相关的关联规则,如表 6 所示。

表 6 导弹战技性能指标关联规则

序号	规则	支持度	置信度	提升度
1	46→30	0.160 2	0.961 1	1.462 0
2	41→30	0.149 7	0.894 4	1.360 6
3	48→30	0.139 8	0.838 9	1.276 1
4	40→30	0.132 4	0.794 4	1.208 5
5	43→31	0.121 3	0.727 8	1.107 0
6	39→31	0.110 2	0.661 1	1.005 6

通过规则 2、4、5、6 不难看出,导弹进入角对脱靶量的影响很大。规则 2,导弹的进入角为 70° ,为侧向攻击,目标释放干扰对目标的遮蔽程度较差,导引头可以很好地区别目标与干扰的红外特性,所以脱靶量下降;而规则 6,导弹的进入角为 10° ,为迎头攻击,由于目标尾焰被目标蒙皮遮挡严重,此时导弹被诱骗后需要较长时间重新定位,目标容易脱离导引头视场,造成脱靶量上升。

规则 1、3 体现了弹目距离对脱靶量的影响。规则 1,由于导弹离目标已经很近,导弹进入盲飞区,目标所释放的干扰已经无法影响导引头视场,导致脱靶量下降;规则 3,由于弹目距离变大,导弹未进入盲飞区,此时目标释放的干扰对导引头的诱骗能力较强,导引头容易丢失目标,造成脱靶量上升。

4 指标体系的简约

4.1 简约结果

由于红外导引头的固有属性不随外界的干扰环境变化,故不对固有属性指标进行简约。通过导引头抗干扰性能指标关联规则,最后保留检测概率、单帧识别时间、识别算法成功率以及目标视线方位角误差作为导引头抗干扰性能指标;通过导弹战技性能指标关联规则,最后选择进入角与弹目距数作为导弹战技性能指标,简约后的红外抗干扰综合性能指标体系见图 3。

4.2 有效性检验

本次实验中,所设置的不同干扰量可以视为条件属性,最后的脱靶量结果视为决策属性,它们之间的映射关系可以利用人工神经网络这种较强的非线性映射关系来体现,故本文采用 BP 神经网络来对简约后所得评估结果进行有效性检验^[15]。利用红外抗干扰实验仿真平台,通过设置不同的干扰条件共产生 500 组测试评估数据,分别对简约前后的 2 个神经网络进行训练,训练误差曲线见图 4~5。

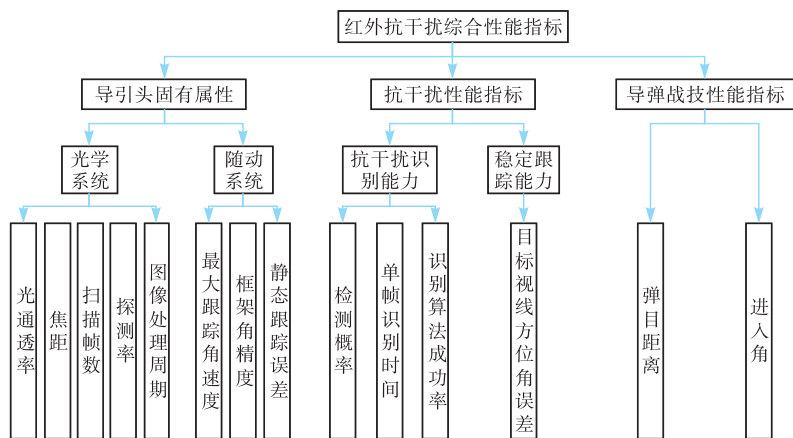


图3 简约后的红外抗干扰指标体系

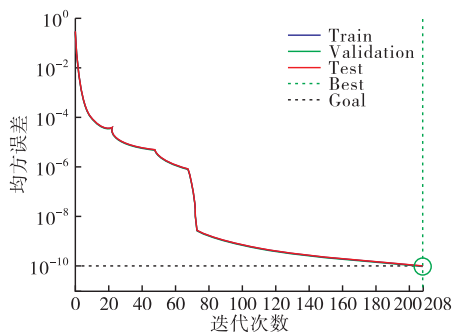


图4 约简前训练效果图

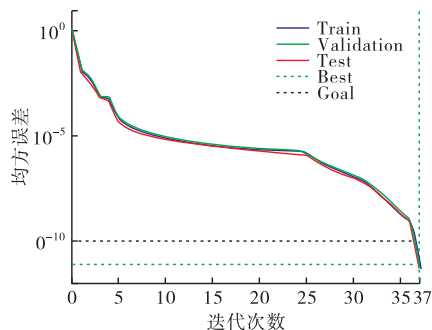


图5 约简后训练效果图

由图可知,约简后的神经网络的迭代次数由200次下降到40次,计算量的下降使得评估效率得到了提高。图4中,在模型迭代计算70次左右,模型的误差拟合速率越来越慢,这是由于指标体系中存在冗余项,模型获取干扰量特征值之间的差异较为困难,造成拟合速率的下降,而图5恰好相反。

由此可见,指标体系简约前系统中存在冗余项,评估效果差且计算繁琐,运用本文所提方法进行简约后,指标集更为简洁、高效。

5 结语

随着红外干扰手段的不断发展,建立一套科学、合理、简洁的红外抗干扰评估指标体系越来越重要。本文通过数据挖掘的手段探索了干扰量与红外抗干扰指标之间的关系,为红外抗干扰性能指标体系的建立提供了一条新的思路。但是本文所考虑的干扰

因素还不够全面,今后将融入干扰环境场景构建的因素,建立更加全面、具体的红外抗干扰指标体系。

参考文献

- [1] 淦元柳,蒋冲,刘玉杰,等.国外机载红外诱饵技术的发展[J].光电技术应用,2013,28(6):13-18.
- [2] 牛得清,伍友利,徐洋,等.点源红外诱饵干扰下环境复杂度量化建模[J].红外与激光工程,2020,49(2):211-219.
- [3] 张凯,张邵宇,杨东升.红外制导导弹抗干扰能力仿真鉴定评估技术[J].上海航天,2019,36(4):83-89.
- [4] 唐善军,王枫,陈晓东.红外导弹抗干扰能力指标体系和评估研究[J].上海航天,2017,34(4):144-149.
- [5] 周永恒,崔少辉,方丹.红外成像导引头抗干扰评估指标体系构建[J].现代防御技术,2019,47(3):175-180.
- [6] 韩培骏.红外导引系统抗干扰性能评估准则与方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- [7] 张仪广,杨军,朱学平.非制冷红外成像导引头[M].西安:西北工业大学出版社,2009.
- [8] 陈玻若.红外系统[M].北京:兵器工业出版社,1995.
- [9] 李慎波,李韬锐,董中翔,等.导弹战术参数对面源红外诱饵干扰效能影响[J].红外与激光工程,2018,47(7):1-10.
- [10] XU Y, FANG YW, WU YL, et al. Association Rule Mining for the Infrared Countermeasure by the PF-Growth Algorithm[C]//Proceedings of the 37th China Control Conference, 2018:8043-8048.
- [11] 杜垒,王俊京.基于FP增长算法的数据挖掘技术[J].技术与市场,2011,18(3):69-70.
- [12] 张文杰.基于贝叶斯神经网络的红外空空导弹抗干扰性能评估[D].长沙:国防科学技术大学,2015.
- [13] MICHAEL S, TAN P N, KUMAR V. Introduction to Data Mining[M]. 范明,范宏建,译.2版.北京:人民邮电出版社,2010:201-240.
- [14] 王泉,董维浩,刘新爱,等.新型红外空空导弹抗干扰能力评估分析[J].航天电子对抗,2019,3:16-19.
- [15] 高隽.人工神经网络原理及仿真实例[M].北京:机械工业出版社,2007.

(编辑:徐敏)