

基于频谱的机场周边宽带电磁干扰源识别*

周涛¹,朱峰²,林川²,唐晋生¹

(1.西南交通大学 物理科学与技术学院,四川 成都 611756;2.西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756)

摘要: 为了识别机场周边电磁干扰源,对多种干扰进行频谱数据采集,基于干扰源物理特性,进行人工特征提取,选取包络峰值、频谱能量、变异系数组合成识别特征集。使用熵值法衡量特征集的离散度,突出类内特征值集中、类间差异大的特征值点,赋权得到一个双加权的特征模板。将每个特征模板映射为高维空间的一个点,计算模板点与测试点的欧式距离,使用均值方差法进行阈值划分,用模板匹配的方法进行模式识别。实验结果说明此方法性能稳定,且快速高效,对机场周边的宽带电磁干扰源识别率高,具有较高的实用价值。

关键词: 电磁干扰;人工特征提取;模板匹配;干扰源识别

中图分类号: TP274+.2;V243.1

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191418

中文引用格式: 周涛,朱峰,林川,等. 基于频谱的机场周边宽带电磁干扰源识别[J]. 电子技术应用, 2020, 46(6): 86-92, 100.

英文引用格式: Zhou Tao, Zhu Feng, Lin Chuan, et al. Identification of wideband EMI sources around airport based on spectrum[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(6): 86-92, 100.

Identification of wideband EMI sources around airport based on spectrum

Zhou Tao¹, Zhu Feng², Lin Chuan², Tang Jinsheng²

(1.School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2.School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to identify the electromagnetic interference sources around the airport, the spectrum data of various interference sources around airports are collected. The characteristics of interference sources are summarized and artificial features are carried out. The peak value, spectrum energy and coefficient of variation are selected as identification features. Entropy method is used to measure the discreteness of feature set, and the feature points with similar feature values within class and big differences between classes are highlighted. Finally, a double weighted feature template is obtained by weighting. Each feature template is mapped to a point in the high-dimensional space, the Euclidean distance between the template point and the test point is calculated, the threshold is divided by the mean variance method, and the pattern recognition is carried out by the template matching method. The experimental results show that this method is stable, fast and efficient, and has a high recognition rate of wide-band EMI sources, which has practical value for interference sources identification around the airport.

Key words: EMI; artificial feature extraction; template matching; interference source identification

0 引言

近些年来,各种电子电气化设备和信息技术设施的快速发展,民航通信导航设备的电磁环境日趋复杂^[1-2],电磁干扰问题越发频繁。通导设备的电磁干扰从频带特征上可分为两类。第一,窄带干扰。例如“黑广播”或各类交互调等引发的干扰等,由于频谱峰值明显,目标方向明确,较容易识别,干扰源排查总体上有章可循,利用现有的无线电监测体系,凭借现有频谱备案数据,结合排查人员的相关经验,都能实现干扰类型判断和快速定位^[3]。第二,宽带干扰。如电气化列车弓网电弧、高压线电晕、街灯广告牌、机场监控设备老化、信号干扰器等所

产生的辐射发射,多为新型干扰源。由于此类干扰源特征不易把握,且干扰数据难以系统地采集,目前还未有切实有效的干扰源识别方案。一旦发生干扰,对于大范围复杂电磁环境的排查研究,通常需要处理海量数据,提取干扰发生的时间和频点等报表信息、监听信号的内容等方法,获取有价值的信息,再利用手持式仪器进行现场排查干扰,逐步缩小干扰范围^[4-5],排查干扰源耗时较长。若能快速判断干扰源类型,就能极大地缩小排查范围,从而快速地解决电磁干扰问题,保障机场通导设备的安全服役。

干扰源排查通常采集的是频谱数据,但是目前基于频谱进行目标识别的实用性研究较浅,且无针对性,无法对机场的电磁干扰源进行识别。为准确把握干扰源特

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0809500)

信号处理

Signal Processing

征,设计一种快速识别干扰源的方案,首先对典型的机场宽带电磁干扰源进行了频谱数据采集,对不易把握特征的电磁干扰信号进行频谱分析,基于电磁波频谱本身具有的物理特征,进行人工特征选择,规避在机器学习中,所提取的特征“黑箱”难以解释的弊端,方便实时调试。采用熵值法,在类内类间赋予双重权值,使特征具有区分度,最后使用模板匹配的方法进行模式识别^[6-7]。实验结果说明此方法对干扰源的识别率高,对机场的电磁干扰排查具有实用价值。

1 频谱数据采集

以往的信号采集中,常用时域波形来表示一个信号。本测试采用频域数据采集的主要原因:(1)机场通导设备的频率跨度较宽,从几兆到几千兆赫兹不等,如果对时域信号直接进行采集,精度不高,数据量大,且采样率常常难以达到;即使对信号下变频采集,也只能接收较窄带宽的信号。(2)频谱仪是窄带接收机,示波器等时域信号采集设备为宽带接收机,频谱仪灵敏度远高于示波器,对于一些宽带电磁干扰源即使使用时域数据进行傅里叶变换得到的频谱也是失真的。(3)在EMC标准,如IEC、CISPR、GB、GJB等中关于干扰发射的限制都在频域中规定,干扰发生通常也都为同频率的干扰,使用频率特征更容易判定干扰源。因此,使用频谱仪对机场多种干扰源电磁辐射频谱进行扫频测试,采集了频谱基础数据。

1.1 测试对象选取

本次实验参考GB-6364对航空无线电导航台的干扰源分类结合实际发生的干扰源类型^[8-9],选定宽带电磁干扰源类型为2种民用灯泡、6种机场照明灯泡、10个机场跑道灯泡、GPS干扰器、手机信号干扰器、列车电分相电弧放电、高压线电晕放电。干扰源对空间辐射电磁能量,使用天线将空间电磁波强信号转变为电压信号,接入频谱仪进行数据采集。

部分测试场景和样品图如图1所示。

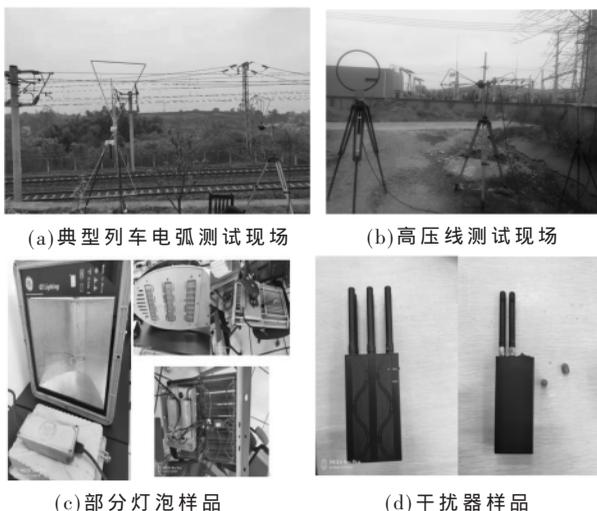


图1 部分测试场景和样品图

1.2 测试参数设置

实际测试时,采用频谱仪扫频测试,分辨率带宽(RBW)为120 kHz(CISPR16-1规定),测试采用峰值检波方式。具体测试仪器型号及技术指标见表1。

表1 测试设备及技术指标

设备名称	型号	技术指标
信号分析仪	Keysight N9010B EXA	10 Hz~44 GHz
频谱分析仪	Agilent N9340B	9 kHz~3 GHz
双锥天线	R&S HK116	30 MHz~300 MHz
对数周期天线	DS3200	30 MHz~2 GHz

不同的干扰源在不同的频段频谱特征差异大,如果直接设置扫宽包含整个频段,会造成扫描时间过长,且无法突出干扰源的窄频段细节特征,因此需将宽频段与窄频段测试相结合。最终选择测试频段及次数设置如表2所示。

表2 测试频段及次数

频率段/MHz	分辨率带宽/kHz	测量次数	极化方式
108~350	120	40	垂直/水平
960~2 000	120	40	垂直
108~148	120	40	垂直/水平
310~350	120	40	水平
1 010~1 050	120	40	垂直
1 070~1 110	120	40	垂直

1.3 干扰源特征分析

测试数据为频谱的峰值保持(上)和实时刷新(下)数据,为对应频点的电压幅值。

列车弓网离线电弧电磁辐射剧烈。随着频率的升高而降低,信号具有随机性,在过分相^[10-11]点测试的典型干扰频谱如图2所示。

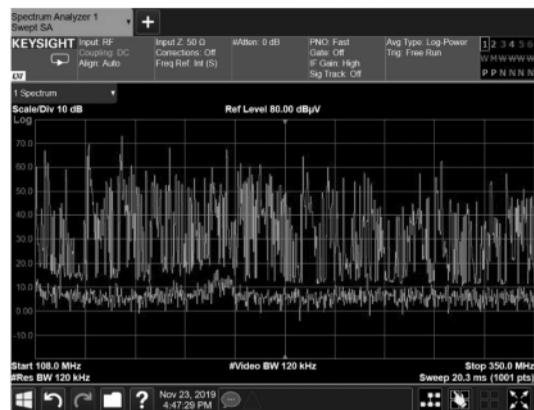


图2 过分相弓网电弧辐射频谱

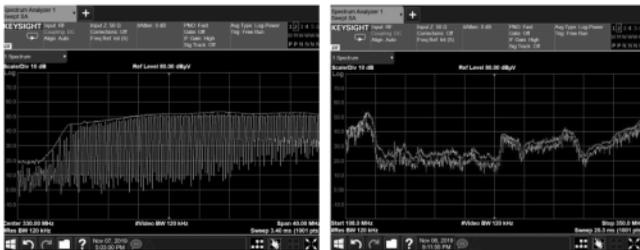
通过对大量老化的民用和机场灯进行测试,有个别灯具对外有电磁辐射。频谱特征主要分为两类,一类测试值整体电平抬升,且随频率降低,一类密集型的单频点电磁辐射,如图3所示。

信号干扰器电磁辐射信号强。干扰器,不仅会在其



图3 灯泡电磁辐射频谱

工作频段产生规整的强电磁辐射,周边频段也可能会有较强的电磁辐射信号,如图4所示。



(a)GPS 信号干扰器 (b)手机信号干扰器

图4 干扰器电磁辐射频谱

电晕电磁辐射低,且随着频率的升高而降低,在测试频段电磁辐射未见干扰,如图5所示,为背景噪声信号。

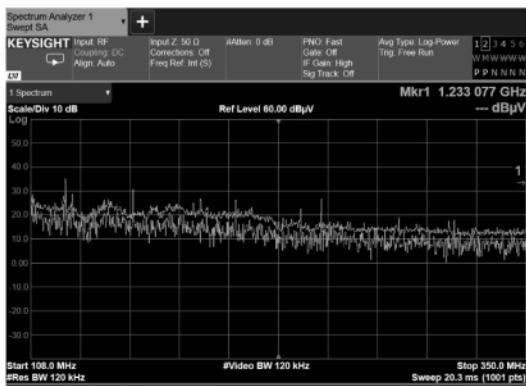


图5 高压线电磁辐射频谱

根据采集的频谱数据,对本次测试所用的宽带干扰源进行特征归纳,如表3所示。

选择可能对机场造成干扰的宽带电磁干扰源为:列车电弧放电、GPS 信号干扰器、手机信号干扰器、2 种民用路灯、3 种机场照明灯和 2 个种机场跑道灯。

2 电磁辐射信号原始特征集的构建

构建原始特征集,主要提取类内差距小,类间差距大的鉴别性的信息。分析物理特性,在分段划分的基础

表3 干扰源特征分析

干扰源	频带类别	发生时间	干扰程度	稳定性
列车电弧	宽带	瞬时	强	随机
民用灯	宽带	持续	弱/强	稳定
机场灯	宽带	持续	无/弱/强	稳定/随机
信号干扰器	宽带	持续	强	稳定
高压线电晕	宽带	持续	弱/无	随机

上,选用人工特征为频域包络的峰值特征 $A_1=[a_1, a_2, \dots, a_m]$ 、各个频率段上的能量分布特征 $A_2=[a_{m'+1}, a_{m'+2}, \dots, a_m]$ 、反应离散程度的变异系数特征 $A_3=[a_{m''+1}, a_{m''+2}, \dots, a_m]$ 。线性排列构建特征集 $A=[A_1 A_2 A_3]$ 。

2.1 包络峰值特征

由于频谱数据本身的波动性,直接提取峰值不稳定,先对频谱数据进行包络提取,再提取包络峰值特征。相对于单点的峰值特征,它的电磁辐射频谱包络峰值基本稳定不变。图6为一种对外有辐射的灯泡其20次的电磁辐射频谱包络提取图。峰值中心点在120 MHz 和 175 MHz 附近,幅值约为 32 dBμV 和 24 dBμV。对整个频段分段,特征提取为依据频率段排列峰值特征。

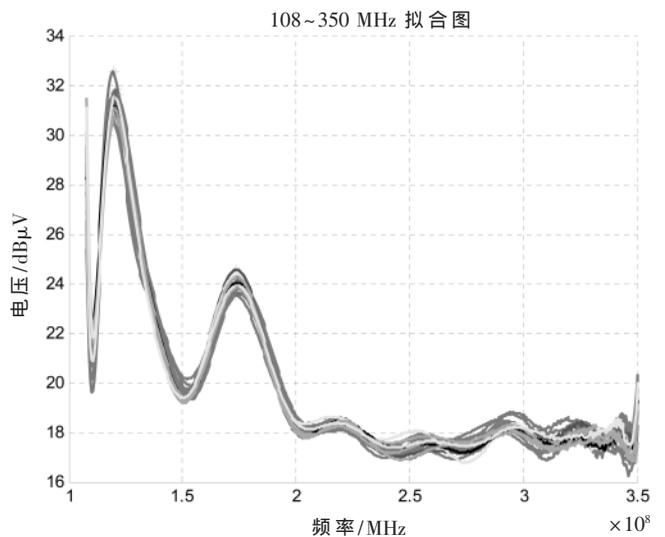


图6 包络峰值提取图

相同噪声干扰源的峰值点可能有微小频偏,使用频率分段提取,适用性更强,峰值点关注出现的频率段及相对峰值即可。

2.2 能量分布特征

频谱仪采集数据通常有两种方式。一种采集一段时间的时域信号,进行FFT变换;另一种为超外差频谱分析仪,是将本地产生的振荡波与输入信号混频,将输入信号频率变换为待测试的频率,然后输入检波器,不同检波方式对应不同的检波器充电时间,直接进行功率采集,数据显示为电压,其平方和功率成正比。在Parseval定理中,对于非周期信号的能量,可以在时域求得,也能从频域计算。

信号处理

Signal Processing

信号的总能量为:

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} [f(t)]^2 dt \quad (1)$$

可以推导得:

$$\begin{aligned} W &= \int_{-\infty}^{\infty} [f(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(j\omega)|^2 d\omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |F(j\omega)|^2 d\omega \end{aligned} \quad (2)$$

因此采集频谱数值和空间电磁波的物理能量是对应关系的,且反映了该特征的通用性。频谱描述信号能量随频率 ω 分布的特征。先对原始数据进行包络提取,再对频段能量进行分段提取,如图7所示,分别为GPS干扰器(左)和一种灯泡(右)的108~350 MHz频段的能量分段提取示意图。

提取的特征为依据频率段排列的能量积分。

2.3 变异系数特征

频谱数据虽具有一定的随机性,但是对于一个确定的信号,总体的离散程度却是趋于稳定的。为了准确度量一组数据的离散程度,使用变异系数进行衡量。变异系数是概率分布离散程度的一个归一化量度,定义为标准差和平均值的比值。

$$cv = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

提取的特征为依据频率段排列的归一化变异系数特征。

3 模板建立与识别研究

将提取的特征进行整合,组成高维数据集^[16]。基于特征点在同一类干扰源内和不同类干扰源之间的离散程度,赋予双重权值。

3.1 类内加权与初始模板建立

同类干扰源,各个特征值稳定性不一。对于稳定的特征点,应给予相应的高权值。运用熵值法,衡量特征点的离散程度,判断稳定性。

初始特征集 $A=[A_1 \ A_2 \ A_3]$,为一个 $1 \times m$ 的向量,对 n 个样本进行测试组成矩阵 T 。则 a_{ij} 表示一个干扰源第 i 个样本的第 j 个特征值, $i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,m$ 。

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

首先进行归一化处理,可有效减小测试距离,天线增益等影响,具体算法如下:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij}, \dots, a_{ij})}{\max(a_{ij}, \dots, a_{ij}) - \min(a_{ij}, \dots, a_{ij})} \quad (5)$$

计算第 j 个特征下第 i 个样本占该特征的比重。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{(x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{im})} \quad (6)$$

式中 $i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$ 。

计算第 j 个特征的熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (7)$$

则此次测试干扰源样本第 j 个特征值的类内权值为:

$$q_j = -\frac{e_j}{\sum_{j=1}^m e_j} \quad (8)$$

类内权值模板为:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_m] \quad (9)$$

初始样本模板为:

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_m] \quad (10)$$

式中 $y_j = \frac{1}{n} q_j \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 。

同理对第 k 种干扰源进行模板提取操作得:

$$\begin{cases} \mathbf{q}_k = [q_{k1}, q_{k2}, \dots, q_{km}] \\ \mathbf{y}_k = [y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{km}] \end{cases} \quad (11)$$

则初始样本模板为:

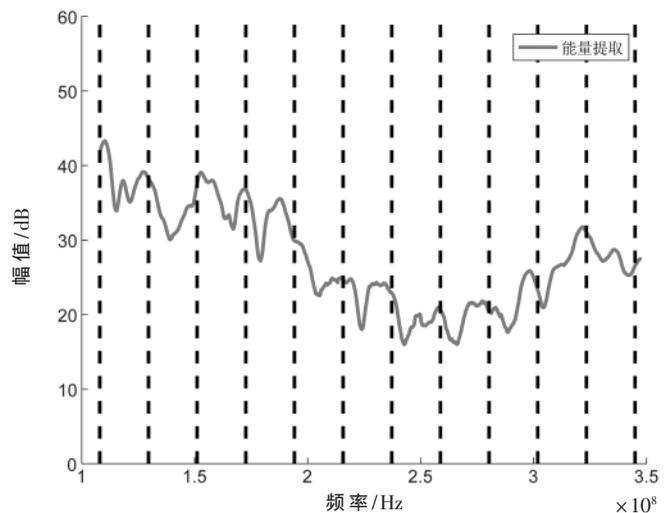
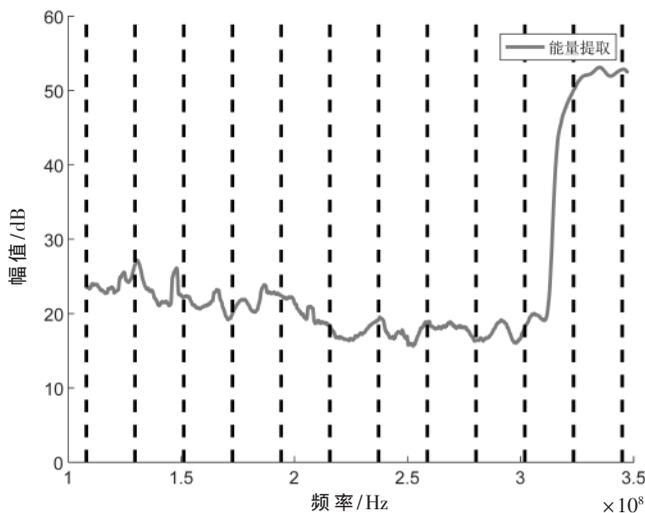


图7 能量提取特征图

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{n'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n'1} & y_{n'2} & \dots & y_{n'm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 $k=1, 2, \dots, n', y_{kj}$ 表示第 k 种干扰源的第 j 个特征值, n' 为干扰源种类, m 为特征数目。

3.2 类间加权与模板中心矩阵建立

每个特征对干扰源识别的贡献是不等的,需要赋予不同的权值。

在得到初始样本模板的基础上,进行类间权值判定。选择差异大的特征值作为识别点。

基于初始模板 Y ,计算每个特征对应的类间熵值。首先计算第 j 个特征下第 k 种样本占该特征的比重。

$$p'_{kj} = \frac{y_{kj}}{(y_{1j} + y_{2j} + \dots + y_{n'j})} \quad (13)$$

式中 $k=1, \dots, n'; j=1, \dots, m$ 。

则 e'_j 表示干扰源的第 j 个特征对应的熵值:

$$e'_j = -\frac{1}{\ln n'} \sum_{k=1}^{n'} p'_{kj} \ln(p'_{kj}) \quad (14)$$

计算信息熵的冗余度:

$$d_j = 1 - e'_j \quad (15)$$

计算类间权值:

$$q'_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (16)$$

类间权值模板为:

$$q' = [q'_1, q'_2, \dots, q'_m] \quad (17)$$

最终的复合权值为:

$$w_k = [q_{k1}q'_1, q_{k2}q'_2, \dots, q_{km}q'_m] \quad (18)$$

权值矩阵为:

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_{n'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11}q'_1 & q_{12}q'_2 & \dots & q_{1m}q'_m \\ q_{21}q'_1 & q_{22}q'_2 & \dots & q_{2m}q'_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{n'1}q'_1 & q_{n'2}q'_2 & \dots & q_{n'm}q'_m \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中 $k=1, 2, \dots, n', n'$ 为干扰源类别, q_{ij} 表示第 i 种干扰源的第 j 个特征的权值,归一化操作不影响权值的相对比例大小,为方便比较将权值归一化:

$$W_{kj} = \frac{q_{kj}q'_j}{\max(q_{kj}q'_j)} \quad (20)$$

模板矩阵 S 为训练数据的均值中心和复合权值的乘积。

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_{n'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11}W_{11} & X_{12}W_{12} & \dots & X_{1m}W_{1m} \\ X_{21}W_{21} & X_{22}W_{22} & \dots & X_{2m}W_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n'1}W_{n'1} & X_{n'2}W_{n'2} & \dots & X_{n'm}W_{n'm} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中 $X_{kj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}, k=1, 2, \dots, n', n$ 为同类干扰源训练样本数, n' 为干扰源类别数。

3.3 模板适用性分析

权值给定时只在同特征点上进行考量,未进行数据的多特征点横向对比,特征之间的相关性会忽略。但是由于最终用于识别时,各个特征指标之间相互独立,不需要在指标间横向比较,因此选用只需要对单个指标的稳定性衡量的熵值赋权法适用,且针对性强。

3.4 阈值确定

模板中心矩阵每一行对应高维空间的一个点。在特征点对应的高维空间中,模板中心点与一定距离围成的区域,反映该区域的例数占总例数的百分比。直接采用均值和均方差,来限定阈值。确定模板上下限:

$$S'_k = [Z_{k1}W_{k1}, Z_{k2}W_{k2}, \dots, Z_{km}W_{km}] \quad (22)$$

式中 $Z_{kj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} \pm N\sigma_k), \sigma_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - X_{kj})^2, k=1, 2, \dots, n', n$ 为同类干扰源训练样本数, n' 为干扰源类别数, N 为方差修正值。

使用欧氏距离衡量第 k 种干扰源模板的对应的阈值 D_k ,用向量 $(S'_k - S_k)$ 的 2 范数表示:

$$D_k = \left\| (S'_k - S_k) \right\|_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{kj}W_{kj} - X_{kj}W_{kj})^2} \quad (23)$$

若测试频谱与模板中心值的距离小于阈值所表示的高维空间区域半径,则判定为对应的干扰源。

模板的提取流程如图 8 所示。

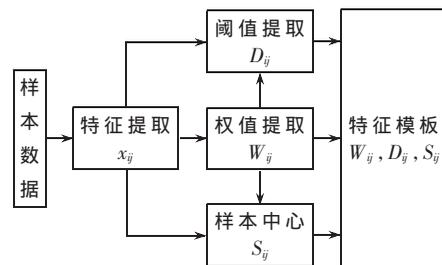


图 8 模板提取流程图

3.5 干扰源识别

输入一个待测信号,提取特征集合 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$; 和权值矩阵的每一行分别进行加权运算得到:

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_{n'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 W_{11} & \alpha_2 W_{12} & \dots & \alpha_m W_{1m} \\ \alpha_1 W_{21} & \alpha_2 W_{22} & \dots & \alpha_m W_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_1 W_{n'1} & \alpha_2 W_{n'2} & \dots & \alpha_m W_{n'm} \end{bmatrix} \quad (24)$$

使用欧式距离分别计算这个点和模板矩阵每一行的距离。

$$\text{dist}(\beta_k, S_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\alpha_j W_{kj} - X_{kj} W_{kj})^2} \quad (25)$$

信号处理

Signal Processing

如果测试信号和一种特征模板的距离小于阈值,则判定为该种干扰源。整个识别流程如图9所示。

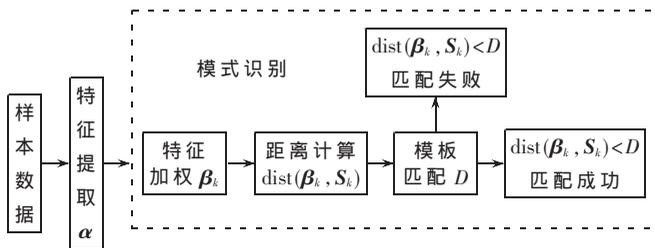


图9 干扰源识别流程图

混淆矩阵	预测值								
	类1	类2	类3	类4	类5	类6	类7	类8	类9
类1	20	0	0	0	0	0	0	0	0
类2	0	20	0	0	0	0	0	0	0
类3	0	0	20	0	0	0	0	0	0
类4	0	0	0	18	0	0	0	0	2
类5	0	0	0	0	19	0	0	0	1
类6	0	0	0	0	0	20	0	0	0
类7	0	0	0	0	0	0	20	0	0
类8	0	0	0	0	0	0	0	20	0
类9	0	0	0	0	0	0	0	0	20

图11 混淆矩阵图

4 实验结果与分析

使用模板匹配的方法进行模式识别,快速稳定高效。输入数据进行匹配识别,干扰源的准确识别与判定,与对应模板的阈值的选择紧密相关,过大造成误识别,过小会发生不识别。为方便观察,综合数据离散程度,模板 S 和某个待测试信号 α 的模板对比示意图如图10所示。模板1~9分别对应两种民用灯(1,2)、两种机场照明灯(3,4)、两个机场跑道灯(5,6)、GPS信号干扰器(7)、手机信号干扰器(8)、列车电分相的弓网电弧(9)。

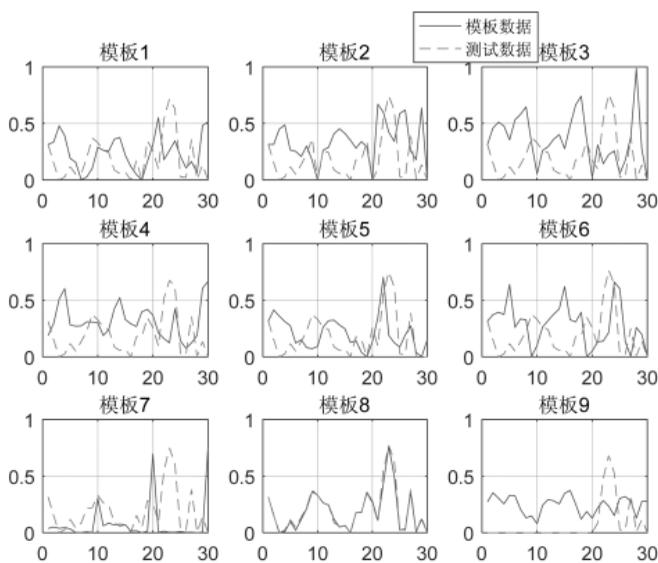


图10 模板示意图

使用混淆矩阵^[17]衡量识别方法的精度,如图11所示。(类1,类1)表示类1准确识别,(类4,类9)表示类4被误识别为类9。对待测试数据进行分类识别,每种干扰源测试数据20组,结果如图11所示,对大多数干扰源(1,2,3,6,7,8,9)都获得了100%的识别效果,个别干扰源(4,5)也有90%以上的准确率,性能良好。

进一步分析准确率不足100%的原因,由于干扰源9每次数据波动大,峰值、能量特征不够稳定,因此对应的模板阈值很宽,与其他干扰源的模板空间产生重合,造成误识别。需要优化处理,如手动赋权值,对峰值特征和能量特征给予相应惩罚,或选用更适用于此情况的特征。

5 结论

本文从原始数据采集,到机场周边电磁干扰的识别,提出了完整的识别方案。选择具有物理意义的人工特征,进行基于模板匹配的模式识别,快速稳定且识别率高,对机场干扰源排查针对性强。对一些近年来可能产生新干扰的情形,例如电气化铁路进机场、高压输电线的电压等级提高、工科医设备电磁发射等所造成的电磁干扰,具有普遍适用性。但由于机场电磁干扰源测试具有特殊性,对个别干扰源识别率不足100%,要提高其识别率,需在分析其特性的情况下,根据特征的适用程度给以相应的奖励或惩罚,或者选用更适用的特征,并在使用中不断地丰富和更新干扰源样本库。

参考文献

- [1] BERRY J M. Aviation Safety 2004: the year in review[C]. Joint Meeting of the FSF 57th Annual, the IAFS, IFA 34th International Conference, and IATA, 2004.
- [2] 殷明哲,刘晔,马纯清.长春机场潜在几种新型干扰源的特点分析和应对措施[J].科技创新与应用,2016(18):52.
- [3] 姜胜宇,张晓阳,罗贞富,等.四川成都:捣毁干扰民航通信的高山“黑广播”[J].中国无线电,2018(10):28.
- [4] 陈涛.民航通信电磁干扰排查中的几点经验[J].空中交通管理,2004(4):31-32.
- [5] 李光生.航空通信导航频率日常干扰分析[J].电子测试,2019(2):134-135,59.
- [6] 姚宇晨,彭虎.基于深度学习的通信信号自动调制识别技术[J].电子技术应用,2019,45(2):12-15.
- [7] 张璘,杨丰琦.基于深度学习的图像分类搜索系统[J].电子技术应用,2019,45(12):51-55.
- [8] 杨露,吴楷.高压交流架空输电线路对航空无线电中波导航台站有源干扰的评估[J].中国无线电,2011(7):42-44,65.
- [9] 杨晓嘉,朱峰,邱日强,等.弓网电弧辐射特性及对机场下滑信标的影响[J].航空学报,2018,39(1):253-260.
- [10] LI X, ZHU F, LU H, et al. Longitudinal propagation characteristic of pantograph arcing electromagnetic emission with high-speed train passing the articulated neutral section[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 61(2): 319-326.

- [11] LU H, ZHU F, LIU Q, et al. Suppression of cable over-voltage in a high-speed electric multiple units system[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 61(2): 361-371.
- [12] RODRIGO M A, CASTRO H L C, MUNOZ F A. New clustering techniques based on current peak value, charge and energy calculations for separation of partial discharge sources[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 340-348.
- [13] LIU K, YI S, WANG G, et al. Passive target classification based on mode energy difference characteristic of the wavenumber spectrum[C]. 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2017.
- [14] ZHAO C, LI C, CAI W, et al. Research on AP clustering of weighted load index for demand response potential analysis[C]. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2019.
- [15] 王宏, 赵菊敏, 李灯熬. 基于多特征融合的 J 波分类模型[J]. 电子技术应用, 2018, 44(11): 111-115.
- [16] MITICHE I, MORISON G, NESBITT A, et al. Classification of EMI discharge sources using time-frequency features and multi-class support vector machine[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 163(PARTA): 261-269.

(下转第 100 页)



(上接第 85 页)

征的缺陷。实验结果证实: 3 种误差均有显著减小, 说明利用灰色预测原理具备发现事物历史变化规律性的特性来改进 BP 神经网络预测模型的性能, 提高了 PM_{2.5} 浓度预测精度, 并且得到的预测值曲线与实测值曲线拟合度更好。

本文采用按小时数据替代日均值数据, 提高了数据精度, 同时扩大了测试数据范围, 提高了神经网络模型泛化能力。由于传统采用日均值的数据量较少, 如果取得更多的数据进行分析, 则有可能会跨越季节, 而根据本文的分析季节对于 PM_{2.5} 浓度值的变化影响较大。因此选择按小时数据, 将数据范围控制在同一个季节环境背景下, 预测结果更好。

参考文献

- [1] 毛亚青, 胡展鹏, 俞啸, 等. 基于车载 GPS 终端的城市环境健康监测平台设计[J]. 电子技术应用, 2016, 42(5): 74-76, 79.
- [2] OPREA M, MIHALACHE S F, POPESCU M. Applying artificial neural networks to short-term PM_{2.5} forecasting modeling[C]. 12th IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations(AIAI). Thessaloniki, Greece, 2016: 204-211.
- [3] 林承勇. 人工神经网络在预测 PM_{2.5} 浓度中的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [4] FENG X, LI Q, ZHU Y J, et al. Artificial neural networks forecasting of PM_{2.5} pollution using air mass trajectory based geographic model and wavelet transformation[J]. Atmospheric Environment, 2015, 107: 118-128.
- [5] GAO Y, WANG Z Y, LU Q C, et al. Prediction of vertical PM_{2.5} concentrations alongside an elevated expressway by using the neural network Hybrid model and generalized additive model[J]. Frontiers of Earth Science, 2017, 11(2): 347-360.
- [6] 张怡文, 敖希琴, 时培俊, 等. 基于 Pearson 相关指标的 BP 神经网络 PM_{2.5} 预测模型[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2017, 30(2): 83-87.
- [7] 李凤英, 白伟. 基于逐步回归分析的 T-S 模糊神经网络预测 PM_{2.5} 浓度研究[J]. 宁夏师范学院学报, 2016, 37(6): 5-13.
- [8] 马天成, 刘大铭, 李雪洁, 等. 基于改进型 PSO 的模糊神经网络 PM_{2.5} 浓度预测[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(9): 3258-3262.
- [9] 荆涛, 李霖, 于文柱, 等. t 分布受控遗传算法优化 BP 神经网络的 PM_{2.5} 质量浓度预测[J]. 中国环境监测, 2015(4): 105-110.
- [10] 裴雨潇, 刘奇洪, 丛小飞. 基于小波和过程神经网络的 PM_{2.5} 预测模型[J]. 环境科技, 2016, 148(2): 47-50.
- [11] 彭森, 连晓峰, 王昭洋, 等. 基于灰色预测和多目标决策的雾霾治理研究[C]. 全国仿真技术学术会议, 2015: 324-328.
- [12] 崔立志. 灰色预测技术及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [13] 谢乃明, 刘思峰. 离散 GM(1, 1) 模型与灰色预测模型建模机理[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(1): 93-99.
- [14] 王岩, 黄张裕, 张玉爽, 等. 基于震荡序列的灰色预测模型在边坡沉降监测中的应用[J]. 测绘工程, 2017, 26(3): 69-71, 76.

(收稿日期: 2019-10-20)

作者简介:

黄鹰(1962-), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向: 物联网与数据分析等。

史爱武(1972-), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 大数据、云计算。

陈占龙(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 地理空间信息。

嵌入式技术 Embedded Technology

最后,保存好该页面后就可以开始按照需要增加文字、图表、图片等信息了。

```
PDF_set_text_pos(p,50,570); /* 该位置以左下角为原点的二维坐标平面 */
PDF_setfont(p,font_ch,12);
PDF_continue_text(p,"序号,顶点,测试子项,测试结果,故障原因");
for(i=0;i<42;i++) /* 循环输出文字 */
{……}
PDF_end_page_ext(p,"");/* 每页结束需要调用该函数 */
/* 第 2 页 */
PDF_begin_page_ext(p,a4_height,a4_width,"");
PDF_save(p);
PDF_set_text_pos(p,50,570);
PDF_setfont(p,font_ch,12);
for(i=42;i<86;i++) /* 循环输出文字 */
{……}
PDF_continue_text (p," 测试人:_____ 复核:_____ 主管:_____");
PDF_continue_text (p," 日期:_____ 日期:_____ 日期:_____");
PDF_restore(p);
PDF_end_page_ext(p,"");
PDF_end_document (p,"");/* 文档结束需要调用该函数 */
}
PDF_CATCH(p)
{
printf("PDFlib exception occurred in document:\n");
printf("[%d] %s: %s\n",
PDF_get_errnum (p),PDF_get_apiname (p),PDF_get_errmsg (p));
PDF_delete(p);
}
PDF_delete(p);
```

在 PDFlib 库中,API 函数除了在上述事例中出现的常规处理、字体修改、文本控制等函数外,还包含相当数量的文本格式化输出、表格格式化输出、颜色设置、图形载入、块填充、人机交互、多媒体应用及文档信息处理等

函数。限于篇幅,不一一详述,一般所有在 PC 上可用的功能在嵌入式系统上都可实现。

4 结论

经过在实验室多次测试验证及在某工厂对动力车出厂前测试,在符合 PDFlib 库编程规则的要求下,PDFlib 库文件 API 函数确实可以满足应用到自动化测试时生成 PDF 版文件报告的功能需求。由于 PDFlib 库内容丰富、功能强大,本设计只是从文字处理方面进行了初步测试,PDFlib 库在其他嵌入式环境及图片、表格、多媒体应用等方面待后来者探索、开发、研究、应用。

参考文献

- [1] 周贤来.嵌入式系统的分类及特点[J].中国信息化,2013(8):79.
- [2] 解建伟,赖前程,曹成军,等.VxWorks 自定义动态系统调用的应用[J].计算机应用与软件,2017,34(2):242-245,266.
- [3] 朱玲玉.PDF 文档解析与内容脱敏技术研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [4] 余佳铭.基于 VxWorks 的 MUPDF 库文件移植及接口封装[D].武汉:华中科技大学,2014.
- [5] 孙本阳,王轶骏,薛质.一种改进的恶意 PDF 文档静态检测方案[J].计算机应用与软件,2016,33(3):308-309.
- [6] PDFlib GmbH.PDFlib products for mobile and embedded systems[S].Franziska-Bilek-Weg 9,80339 Munchen, Germany,2016:2-3.
- [7] 周浩尚,张立斌,高照玲.基于 MVB 和 TRDP 的列车主控双网冗余设计与实现[J].机车电传动,2018(5):74-76.
- [8] 周浩尚,高照玲.VxWorks 下 TRDP 协议栈移植[J].电子技术应用,2018,44(10):56-57.
- [9] PDFlib GmbH.A library for generating PDF on the fly PDFlib 9.2.0[S].Franziska-Bilek-Weg 9,80339 Munchen, Germany,2018:2-19.

(收稿日期:2019-12-10)

作者简介:

高照玲(1982-),女,硕士,讲师,主要研究方向:嵌入式技术应用。

王伟(1982-),女,硕士,副教授,主要研究方向:嵌入式技术应用。

周浩尚(1984-),男,硕士,工程师,主要研究方向:嵌入式系统平台研发与应用。

(上接第 92 页)

- [17] Deng Xinyang, Liu Qi, Deng Yong, et al. An improved method to construct basic probability assignment based on the confusion matrix for classification problem[J]. Information Sciences, 2016: 340-341.

(收稿日期:2019-12-26)

作者简介:

周涛(1993-),男,硕士,主要研究方向:射频电路、天线设计、电磁干扰、数据处理。

朱峰(1963-),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:牵引供电系统以及电力电子装置电磁兼容设计、电磁干扰排查以及电磁兼容测试系统集成等。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所