

引用格式:沈家煌,黄建冲,朱永成.一种折叠聚类的威胁雷达信号识别方法[J].电光与控制,2018,25(7):101-105. SHEN J H, HUANG J C, ZHU Y C. A method for identifying threat radar signals based on folding clustering[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(7):101-105.

## 一种折叠聚类的威胁雷达信号识别方法

沈家煌, 黄建冲, 朱永成  
(电子工程学院,合肥 230037)

**摘要:**威胁雷达信号的分选识别是雷达对抗侦察系统的重要任务,是影响对抗成败的因素之一。针对雷达数量大幅增加、信号调制样式多样、信号密度越来越高的复杂电磁环境,提出了一种 TOA 折叠聚类的威胁雷达信号识别方法。该方法首先对截获的脉冲流进行 TOA 折叠分选,然后用 DBSCAN 聚类算法提取数据,最后进行威胁雷达信号模板匹配识别。仿真结果表明,该方法在复杂环境下能够分选出目标雷达信号,对复杂体制的雷达信号适应能力强。

**关键词:**雷达信号识别; TOA 折叠法; DBSCAN 聚类; 模板匹配法

中图分类号: V271.4; TN95 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.07.021

## A Method for Identifying Threat Radar Signals Based on Folding Clustering

SHEN Jia-huang, HUANG Jian-chong, ZHU Yong-cheng  
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The identification of the threat radar signal is an important task of the radar reconnaissance system, and is one of the factors that affect the success or failure of the countermeasure. Considering the complex electromagnetic environment with the increasing number of radars, the diversity of signal modulation modes and the increasing signal density, we proposed a new method for threat radar signal recognition based on TOA folding clustering. The method firstly performs TOA folding and sorting of the intercepted pulse stream, then extracts the data with DBSCAN clustering algorithm, and finally performs the template matching recognition of the threat radar signal. The simulation results show that the method can sort out the target radar signal in complex environment, and can adapt to the complex modulation of radar signal.

**Key words:** radar signal recognition; TOA folding; DBSCAN clustering; template matching

### 0 引言

目前,各个国家对电子战的重视加快了电子战发展的进程,导致电子对抗辐射源的数目急剧增加,使得空间内的雷达信号异常密集,密度大幅提高。同时,随着雷达技术的发展,现代雷达体制越来越多样,例如重频参差、重频抖动、频率捷变、频率分集、脉内调制等新型体制雷达正不断取代传统的常规脉冲雷达,使得雷达信号所处的电磁环境越来越复杂。

威胁雷达信号的分选识别是电子侦察系统的重要任务,其分选识别结果为电子对抗和电子反对抗提供情报与实时支援,甚至决定电子战的成败<sup>[1]</sup>。对于雷

达信号分选识别而言,脉冲重复间隔(PRI)是一个非常重要的特征参数,但随着雷达信号所处的电磁环境复杂化以及雷达信号体制的多样化,用传统的雷达信号识别方法对PRI进行分析难以获得令人满意的结果。本文利用雷达信号的PRI的特性,提出了一种到达时间(TOA)折叠和DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise)聚类相结合的威胁雷达信号分选方法,并采用模板匹配法进行威胁雷达信号识别。

### 1 TOA 折叠法

雷达侦察接收机输出到信号处理系统的是密集交叠的脉冲流,信号分选过程就是从这种信号脉冲流中分离出各种雷达信号脉冲列的过程,其利用同一部雷达信号参数的相关性和不同雷达信号参数的差异性来实现。常用的雷达信号分选方法有扩展关联法、差直方图法、累积差直方图法(CDIF)、顺序差直方图法(SDIF)和PRI

收稿日期:2017-07-13 修回日期:2017-08-16

作者简介:沈家煌(1992—),男,福建连城人,硕士生,研究方向为雷达信号处理。

变换法等。

TOA 折叠分选是根据雷达信号的 PRI 信息,通过时域折叠变换的方法,将全脉冲在平面上用图形显示出来,从而分选信号<sup>[2]</sup>。设截获脉冲流共有  $N$  个信号脉冲,第  $i$  个脉冲的到达时间为  $t_i$ , TOA 折叠平面图形的宽度为  $T_0$ ,每个信号脉冲在 TOA 折叠平面图形上都用一个点来表示,则平面内的第  $i$  个信号脉冲的坐标为  $(x_i, y_i)$ ,即

$$\begin{cases} x_i = \Delta x \cdot \text{mod}(t_i/T_0) \\ y_i = \Delta y \cdot (\text{int}(t_i/T_0) + 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta x$  为单位时间所对应的  $x$  方向上的像素点;  $\Delta y$  为单位时间所对应的  $y$  方向上的像素点;  $\text{mod}(\cdot)$  为取余数操作;  $\text{int}(\cdot)$  为取整操作。从式中可知,  $x_i, y_i$  分别只与  $t_i$  除以  $T_0$  后的余数和商有关。

本文 TOA 折叠法的信号分选的依据<sup>[3]</sup>: 由于不同雷达信号的重复周期长度和 PRI 调制形式存在差异,所以在对截获脉冲流处理时,可通过改变折叠平面的宽度值  $T_0$ ,将不同 PRI 长度和不同 PRI 形式的雷达信号的特征曲线显示出来。

### 1.1 常规雷达信号的折叠分选

对常规雷达信号,其第  $i$  个信号脉冲的到达时间为

$$t_i = t_0 + (i-1) \cdot P_{\text{PRI}} + \varepsilon \quad i=1,2,\dots,N \quad (2)$$

式中:  $t_0$  为第一个脉冲信号的到达时间,  $t_0 < P_{\text{PRI}}$ ;  $\varepsilon$  为误差。

当平面折叠宽度值  $T_0 = P_{\text{PRI}}$  时,有

$$\begin{cases} x_i = \Delta x \cdot t_0 \\ y_i = \Delta y \cdot i \end{cases} \quad (3)$$

因此,第  $i$  个信号脉冲点将出现在第  $i$  行  $\Delta x \cdot t_0$  处,故该信号每个周期内的脉冲点在平面中会形成一条斜率很大的曲线。如果  $T_0$  的取值小于信号脉冲重复周期,则在平面图中形成一条斜率为负的曲线。反之,如果  $T_0$  的取值大于信号脉冲重复周期,则在平面图中形成一条斜率为正的曲线。

### 1.2 PRI 复杂调制的雷达信号折叠分选

由于各 PRI 复杂调制信号的样式和重复周期不同,当  $T_0$  为某种 PRI 调制信号的重复周期时,该种信号的特征曲线变得明显;当  $T_0$  变成另一个宽度时,该种 PRI 调制信号特征曲线变得模糊(或混乱),而另一种 PRI 调制信号的特征曲线有可能变得清晰<sup>[3]</sup>。总之,在对  $T_0$  进行调整时可以显示出不同 PRI 信号的特征曲线。所以对于 PRI 复杂调制的雷达信号而言,由于它们在大周期上仍是重复周期信号, TOA 折叠分选同样能够显示出信号的特征曲线。

PRI 参差变化的雷达信号的 TOA 折叠算法结果如图 1 所示。

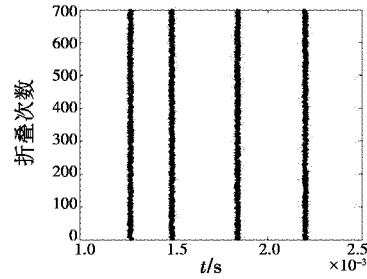


图 1 PRI 参差变化的信号折叠结果

Fig. 1 The folding results of staggered radar signal

从图 1 可知,脉冲序列的到达时间点在平面上形成 4 条斜率很大的曲线,根据图中特征曲线的位置可求出相邻脉冲之间的子间隔。

## 2 DBSCAN 聚类

DBSCAN 是一个极具代表性的基于密度的聚类算法,它根据一个密度值来控制簇的增长,不需要事先知道数据聚成几类,对于数据形状不敏感,可对任意形状的数据集进行聚类。该算法将具有足够高密度的区域划分为簇,并可在带有“噪声”的空间数据库中发现任意形状的聚类,它把簇定义为密度相连的点的最大集合<sup>[4]</sup>。

以下是 DBSCAN 算法的一些定义<sup>[5]</sup>。

**定义 1** 空间中任意一点  $P$  的  $E_{\text{Eps}}$  邻域:以该点  $P$  为圆心,以  $E_{\text{Eps}}$  为半径的球形区域。

**定义 2** 空间中任意一点  $P$  的密度:点  $P$  的  $E_{\text{Eps}}$  邻域内包含的点的数目。

**定义 3** 直接密度可达:给定  $E_{\text{Eps}}$  和  $M_{\text{Minpts}}$ ,若点  $Q$  在点  $P$  的  $E_{\text{Eps}}$  邻域内,且点  $P$  的密度大于  $M_{\text{Minpts}}$ ,则点  $Q$  从点  $P$  直接密度可达。

**定义 4** 核心点与边界点:给定  $E_{\text{Eps}}$ ,其密度不低于  $M_{\text{Minpts}}$  的点,称为核心点;不是核心点,但是从核心点密度可达的点,称为边界点。

**定义 5** 簇和噪声:基于密度可达性的最大密度相连对象的集合称为簇,数据集  $D$  中不属于任何簇的点称为噪声点。

在 DBSCAN 算法聚类过程中,如果点  $P$  在点  $Q$  的  $E_{\text{Eps}}$  邻域中,并且  $P$  的密度大于等于  $M_{\text{Minpts}}$ ,则进行聚类,否则就不进行聚类。DBSCAN 算法聚类的过程也就是该类簇不断扩大的过程,也就是将所有符合条件的样本加入该簇。当聚类的条件满足时,则继续进行聚类,直到形成一个完整的更大的簇为止。

DBSCAN 算法执行步骤<sup>[6]</sup>具体描述如下。

输入:数据集  $D$ ,半径参数,密度阈值  $M_{\text{Minpts}}$ 。

输出:聚类结果及噪声数据。

步骤 1) 从数据集  $D$  中随机抽取一个未被处理的对象  $P$ ,且在它的近邻满足密度阈值要求称为核对象;

步骤2) 遍历整个数据集,找到所有从对象  $P$  的密度可达对象,形成一个新的簇;

步骤3) 通过密度相连产生最终簇结果;

步骤4) 重复执行步骤2)和步骤3),直到数据集中所有对象都经过聚类处理。

通过以上描述,可以发现基于密度的聚类就是一组“密度相连”的对象,以实现最大化的“密度可达”。不包含在任何聚类中的对象就是噪声数据。

在本文的威胁雷达信号识别系统中的第一步仅对截获脉冲流进行了 TOA 折叠分选,未滤除无关的雷达信号脉冲和环境噪声,所获得的信号特征信息还不能够准确识别出雷达信号。在后续的处理中采用 DBSCAN 聚类算法对折叠结果进行处理,获得目标雷达信号特征曲线上的点数据,进一步获得目标雷达信号的特征信息,为进行威胁雷达信号的匹配识别提供依据。

### 3 威胁雷达信号识别

模板匹配法是模式识别中一种基本的统计识别方法,它以距离测度作为样本相似性度量的主要依据<sup>[7]</sup>,通过待识别雷达信号的特征参数与样本库中已知信号的特征参数进行匹配识别。本文为快速、准确地判断 TOA 折叠聚类后的信号是否为目标威胁雷达信号,采用信号的 PRI 子周期作为特征参数对目标威胁雷达信号进行模板匹配法识别处理,以目标威胁雷达信号的 PRI 子周期或重复间隔的不同排序作为模板,以分选后脉冲信号的 PRI 子周期或重复间隔作为待识别信号的特征参数。威胁雷达信号识别的步骤如下。

1) 求信号各 PRI 子周期值。

接收雷达脉冲信号以目标威胁雷达的重复间隔  $T_0$  为折叠宽度,经过前部分 TOA 折叠分选后得到的特征曲线能够显示出雷达信号的特征。为进一步判断折叠分选后的该信号是否为威胁雷达信号,要求给出该信号的各个 PRI 子周期的值。

为准确获取 TOA 折叠聚类后信号的 PRI 子周期,以每个特征曲线所有点的横轴坐标的均值作为曲线在横轴的位置值  $\bar{X}_l$ ,即。

$$\bar{X}_l = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{lk} \quad l = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$P_{PRI_0}(j) = \bar{X}_{l+1} - \bar{X}_l \quad j = 1, \dots, n-1 \quad (5)$$

2) 求待识别信号与目标威胁雷达信号的距离  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{n-1}\}$ 。

常用的模板匹配距离计算方法有 Minkowsky 距离、Manhattan 距离、City Block 距离及修正的 City Block 距离、Euclidean 距离和 Camberra 距离等。根据文献[8]的研究分析可知,对参数测量精度高的场合,用 Euclidean

距离进行匹配,识别效果会较好。因此,本文应该用 Euclidean 距离进行度量目标雷达信号与威胁雷达信号之间的相似度, Euclidean 距离计算的是匹配雷达信号两者之间整体的距离即两者的相似程度,一般以距离最小的作为匹配结果,其距离算式为

$$d_i(P_{PRI_0}, P_{PRI_i}) = \|P_{PRI_0} - P_{PRI_i}\| = \left[ \sum_{j=1}^{n-1} (P_{PRI_0}(j) - P_{PRI_i}(j))^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $P_{PRI_0}$  为脉冲流信号的子周期;  $P_{PRI_i}$  为目标威胁雷达信号的 PRI 周期,  $i = 1, 2, \dots, C_n^{m-1}$ 。

3) 判定识别结果。

从步骤2)求得的距离中寻找最小距离作为匹配结果。

### 4 仿真分析

为验证本文提出的威胁雷达信号识别法,进行了仿真实验和分析。识别处理首先将截获脉冲流以目标威胁雷达信号的脉冲重复间隔为平面折叠宽度进行 TOA 折叠分选处理,然后用 DBSCAN 聚类算法对脉冲流信号进行聚类分选,最后求出分选后脉冲流信号子周期或重复间隔进行模板匹配识别。整个目标威胁雷达信号识别流程见图2。



图2 信号识别流程框图

Fig.2 Block diagram of signal identification process

仿真实验中截获信号脉冲流包含6部雷达信号,分别为1部PRI固定雷达信号, PRI 值为  $150 \mu s$ ; 1部PRI抖动雷达信号(抖动量  $\delta = 10\%$ ), 其中心值  $P_{PRI_0} = 240 \mu s$ ; 1部三参差雷达信号, 子周期分别为  $P_{PRI_1} = 160 \mu s, P_{PRI_2} = 220 \mu s, P_{PRI_3} = 360 \mu s$ ; 1部滑变信号, PRI 滑变范围为  $100 \sim 310 \mu s$ ; 1部正弦调制信号, PRI 调制均值  $P_{PRI_0} = 200 \mu s$ ; 1部PRI脉组捷变雷达信号, 其中  $P_{PRI} \in \{30 \mu s, 60 \mu s, 95 \mu s\}$ , 详细信息见表1。

表1 雷达信号参数表

Table 1 Radar signal parameters

信号号	PRI 调制方式	PRI 中心值/ $\mu s$	脉宽类型	PW/ $\mu s$	载频类型	RF/MHz
1	固定	150	固定	0.4	捷变	3160 ~ 4660
2	抖动	240	固定	0.6	组变	2030, 3752
3	三参差	160, 220, 360	固定	0.71	固定	3610
4	滑变	100 ~ 310	捷变	0.8 ~ 0.9	固定	3301
5	正弦	200	固定	0.5	分集	3564, 4505
6	脉组	30, 60, 95	固定	0.1	固定	4303

#### 4.1 TOA 折叠分选仿真

本次仿真实验中分别以信号3和信号4为威胁雷达信号进行仿真实验,图3为对截获脉冲流进行 TOA 折

叠分选的平面图。

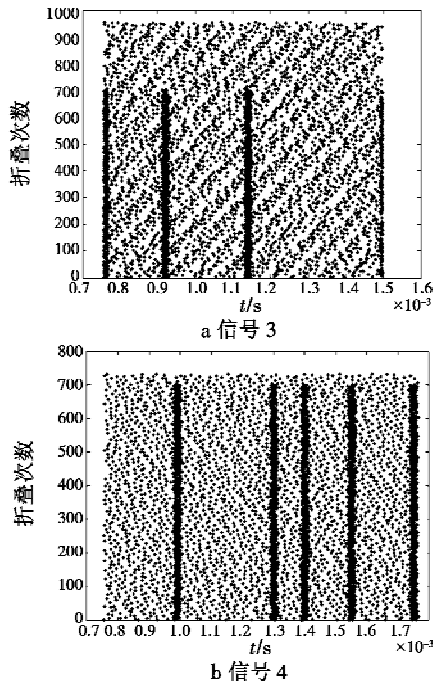


图3 折叠分选结果图

Fig.3 The results of folding

从图3的仿真结果可看出,经过 TOA 折叠法处理后,与折叠平面周期宽度接近或相等的重复周期雷达信号脉冲点会形成斜率很大的曲线,而重复周期与折叠平面宽度不相同的雷达信号的脉冲点则是散乱分布的。同时,从仿真实验可知,TOA 折叠分选不论对体制简单还是复杂的雷达信号都能有效分选,表明 TOA 折叠法具有较强的适应能力。

#### 4.2 DBSCAN 聚类仿真

将4.1节中 TOA 折叠分选结果采用 DBSCAN 聚类算法进行聚类,删除无关雷达脉冲点和噪声点后的聚类结果如图4所示。根据文献[5]中论述和经验可知,本文 DBSCAN 聚类仿真中  $E_{Dps} = 0.5$ ,  $M_{Minpts} = 4$ , 聚类后信号3的各特征曲线上的点数为696,880,895,457;聚类后信号4各个特征曲线上的点数为841,837,818,809,829。

图4为对经 TOA 折叠分选的数据进行 DBSCAN 聚类后获得目标雷达信号的特征曲线。对比图3和图4可知,DBSCAN 聚类算法能够有效地将目标雷达信号的脉冲从混合脉冲流中分选出来。虽然聚类的结果仍存在少量的噪声,但噪声数量相对信号脉冲数而言较小,对数据分析影响较小。利用聚类结果分别对目标雷达信号各特征曲线上的点在横坐标上求均值,再利用均值求得估计的目标雷达信号的 PRI 子周期,为威胁雷达信号匹配识别提供可靠的数据。

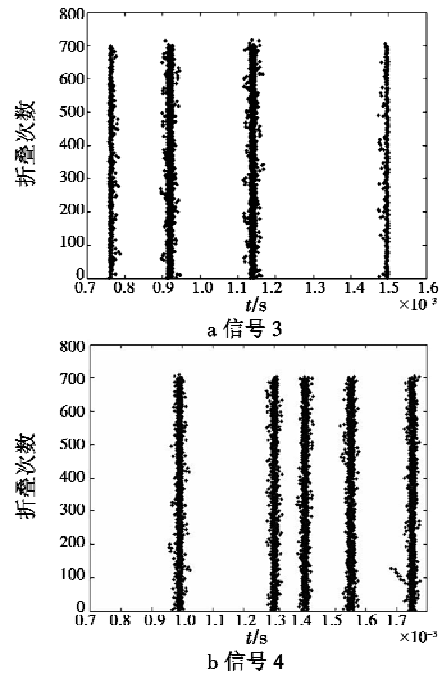


图4 聚类结果图

Fig.4 Clustering results

#### 4.3 威胁雷达信号匹配识别

根据 DBSCAN 聚类后求得目标雷达信号的 PRI 子周期,利用模板匹配法将其与样本库中威胁雷达信号的 PRI 子周期进行匹配,本文利用 Euclidean 距离来度量目标雷达信号与威胁雷达信号之间的相似度,威胁雷达信号匹配识别结果见表2~表3。表中,目标雷达 PRI 子周期是从匹配识别成功的实验中随机抽取的,匹配识别度为经过500次 Monte Carlo 实验的结果。表2为信号特征参数误差为1%时的仿真结果,表3为特征参数误差为10%时的仿真结果。

表2 雷达信号匹配结果(1%)

Table 2 Radar signal matching results(1%)

信号	子周期/ $\mu\text{s}$	匹配识别度/%
目标雷达	159.271,219.329,359.838	100
威胁雷达	160,220,360	
目标雷达	310.525,99.426,150.342,199.848,249.858	100
威胁雷达	310,100,150,200,250	

表3 雷达信号匹配结果(10%)

Table 3 Radar signal matching results(10%)

信号	子周期/ $\mu\text{s}$	匹配识别度/%
目标雷达	157.594,218.420,357.684	67.667
威胁雷达	160,220,360	
目标雷达	306.947,96.041,152.202,214.299,245.494	60.400
威胁雷达	310,100,150,200,250	

从表2和表3可知,由于雷达信号调制设置、信号环境干扰及聚类结果中存在部分噪声,仿真实验中得到的 PRI 子周期存在误差。同时,随着雷达信号特征参数

误差的增大,识别系统估计的 PRI 子周期误差也增大,从而导致匹配识别的 Euclidean 距离增大,威胁雷达信号的识别度降低。

## 5 结束语

针对雷达数量大幅增加、信号调制样式多样、信号密度越来越高的复杂电磁环境,本文提出了一种 TOA 折叠聚类的威胁雷达信号识别方法。与传统的信号分选方法相比,本文的 TOA 折叠分选具有简单、快速、对复杂环境和复杂信号体制适应能力强的特点。本文采用 DBSCAN 聚类来提取目标雷达信号的数据,能够有效地删除大量无关的脉冲和噪声,为模板匹配识别提供可靠数据;但 DBSCAN 聚类对输入参数过于敏感,所以下一步工作要对此进行改进。通过理论描述和仿真分析验证了本文提出的威胁雷达信号识别方法的可行性,对威胁雷达信号识别研究有一定的参考价值。

### 参考文献

[1] 雍元红. 雷达信号分选算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.

- 技大学, 2008.
- [2] QUAN G R, SUN Y S, CHEN B. Folding deinterleaving algorithm for multiple mixed pulse trains with pulse repetition intervals [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, 2006:13-16.
- [3] 赵闯, 赵拥军, 李冬海. TOA 折叠平面特征点无监督聚类[J]. 现代雷达, 2010, 32(1):39-41.
- [4] STAELIN D H. Fast folding algorithm for detection of periodic pulse trains[J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(4):724-725.
- [5] 冯振华. 基于 DBSCAN 聚类算法的研究与应用[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [6] 白雪. 一种基于网格的密度聚类算法研究及应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [7] PERKINS J, COAT I. Pulse train deinterleaving via the Hough transform[C]//Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1994: 197-200.
- [8] 王琨鹏, 颜春林, 杨辉. 基于模板匹配的雷达辐射源信号识别研究[J]. 舰船电子对抗, 2014, 10(5):31-41.

(上接第 95 页)

经过 65 s 左右误差值趋近于 0, 通过计算, 实际误差值的变化范围在  $-0.01 \sim 0.01$  °C 之间。

由以上实验可以看出, 模糊参数自整定 PID 控制调节时间短、超调量小、稳态精度高。通过在  $\pm 12$  °C 差分温度范围开展进一步测试来看, 温控精度、响应时间及短时的温度稳定性等指标均满足设计要求。

## 5 结论

针对红外探测器及红外热像仪整机的测试需求, 研制了一种红外面源黑体, 分别设计了热辐射器结构和温度控制电路系统。由于检测需要, 面源黑体对温度控制精度、抗干扰性能及响应时间等指标要求较高, 通过采用 24 位 AD 采集电路保证了系统输入信号的高精度, 采用模糊 PID 控制器及算法提高温控系统的静态性能和动态性能, 通过参数自整定, 实现了超调量小、稳态精度高、响应速度快等目标。测试结果表明, 各项指标达到了设计要求。该红外面源黑体性能稳定可靠, 与进口设备相比, 体积小、重量轻, 可用于红外热像系统 NETD, MRTD 等多项关键指标的测试, 并已经应用于某光电检测设备。

### 参考文献

- [1] 曹海源, 孙斌, 韦尚方等. 便携式红外系统检测仪[J]. 电光与控制, 2015, 22(5):80-81.
- [2] 刘博雅. 面源黑体辐射特性分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.
- [3] 王亚辉, 王强, 张伯川, 等. 红外窗口材料的热辐射特性测量方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7):1269-1274.
- [4] 林辉, 常继彬. 基于 PID 控制的温度大滞后系统算法研究[J]. 甘肃科学学报, 2011, 23(1):118-121.
- [5] 孙丽飞, 田小建, 艾宝丽. 大功率半导体激光器的精密模糊 PID 温控系统[J]. 量子电子学报, 2005, 22(3): 382-386.
- [6] 杨建斌, 张文瑞, 柏树, 等. 面源红外定标黑体控温热分析[J]. 真空与低温, 2011, 7(1):23-25.
- [7] 石明江, 张禾, 何道清. 基于 LabVIEW 的高精度铂电阻测温系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(4): 924-925.
- [8] 胡鹏程, 时玮泽, 梅健挺. 高精度铂电阻测温系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4):988-995.
- [9] 刘彬, 谭建平, 黄长征. 一种改进 PID 控制算法的研究与应用[J]. 微计算机信息, 2007, 23(16):15-17.