

基于热释电感知的分布式粒子群 优化目标跟踪

王泽兵^{1,2}, 崔宝珍¹, 秦丽², 杨卫²

¹中北大学先进制造技术山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

²中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 通过热释电红外感知设备采集目标方向角序列,利用粒子群优化算法实现了非测距方案下的目标跟踪。当阵列布局较大时,采集方向角序列的长度增大,算法搜索空间的维数增大,跟踪精度降低。通过分割序列,采用分布式粒子群优化算法,综合多节点协同决策,实现了大规模阵列的红外目标实时跟踪定位,且能满足目标跟踪精度的要求。结果表明,该方法有效扩展了基本粒子群算法在热释电感知中的应用。

关键词 测量; 热释电红外感知; 目标跟踪; 分布式粒子群; 目标实时跟踪

中图分类号 TP221 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100402

Distributed Particle Swarm Optimization Target Tracking Based on Pyroelectric Sensing

Wang Zebing^{1,2}, Cui Baozhen¹, Qin Li², Yang Wei²

¹Key Laboratory of Shanxi Province on Advanced Manufacturing Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract The direction angle sequence of the target is collected by the pyroelectric infrared sensing equipment, and the target tracking scheme without distance measuring is realized with the help of particle swarm optimization (PSO) algorithm. When the array layout is large, the collected length of direction angle sequence increases, the dimension of algorithm search space increases, and the tracking precision decreases. Through splitting sequence, the distributed particle swarm optimization algorithm (DPSO) integrated multi-node cooperative decision is used to realize the real-time target tracking in the large array of infrared detecting system. And the tracking accuracy meets the requirements. The experimental results show that the proposed method can effectively extend the application of the basic PSO algorithm in pyroelectric sensing.

Key words measurement; pyroelectric infrared sensing; target tracking; distributed particle swarm; real-time target tracking

OCIS codes 040.1240; 040.1880; 040.3060; 230.0040

1 引言

热释电红外传感器(PIR)对环境中红外辐射的变化感知灵敏,具有成本低、无源定位、非接触性检测方式、隐蔽性强、技术性能稳定等特点,广泛应用于运动目标的监测。

PIR分为静态和动态2种感知方式。静态感知一般采用较密集传感器布置方式,通过划分感知空间

收稿日期: 2017-03-21; **收到修改稿日期:** 2017-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(60871041)、国家863计划(011AA040404)

作者简介: 王泽兵(1972—),男,博士,讲师,主要从事传感器网络目标定位及群体智能方面的研究。

E-mail: wangzebing@nuc.edu.cn

并进行相应的编码来实现目标位置的判定^[1-8]。这种方法的节点设计比较复杂,感知范围小,Guan等^[1]将节点安装于室内屋顶,最大感知半径为3.6 m,Yun等^[3-4]设计的静态PIR的最大感知半径也为3.6 m,Yang等^[2]设计的静态PIR的最大感知半径为13 m。文献[9-10]为动态感知的研究提供了新思路,即用红外透镜替换菲涅耳透镜,通过旋转扫描周围环境,不仅减少了传感器的数量,简化了节点设计结构,而且极大地延伸了传感器的探测范围^[11-14]。

在PIR动态感知中,比较容易获取目标的方位角信息,但较难获取距离信息。孙乔等^[11]尝试通过测向、测距定位目标,但由于测距受外界因素的影响较大,定位精度不高。文献[12-14]根据目标的方位角信息,并结合目标的运动特征,成功地实现了目标的定位。孙乔等^[12]通过求解定位方程并辅以直线拟合得到了目标的轨迹,但精度较低;Wang等^[13]引入感知线等概念,通过几何分析得到了求解目标轨迹的充分条件;王泽兵等^[14]通过引入群智能算法实现了较高精度的定位和分时纯方位角信息获取条件下的目标跟踪过程。然而,当系统应用于更大范围的目标监测时,随着布局节点数量增多,以及监测数据量增大,问题求解空间的维数增大,这将会产生较大的跟踪误差;同时算法运行时间延长,也会引起跟踪滞后。基于此,本文首先引入跟踪周期的概念,约束单周期内方向角序列的长度,控制求解空间的维数;然后提出了一种分布式粒子群定位算法,在每个跟踪周期内所有感知目标的节点同时执行跟踪计算,协同决策跟踪结果,保证了跟踪精度和运行时间。本文所提算法对文献[14]进行了扩充,增强了系统的稳定性和可扩展性。

2 基于极径序列的粒子群目标跟踪模型及其应用局限

文献[14]利用热释电感知特性较精确地测得了红外目标在运动过程中随时间变化的方位角序列(即分时纯方位角数据,ABO_data),将跟踪定位问题转化为极径序列的确定,并通过构造粒子群搜索空间,实现了较精确的目标定位。在跟踪模型中,方位角序列的长度为粒子群搜索空间的维数,当数据长度较大时,将导致解的搜索空间维数变大,搜索时间变长,搜索精度降低。

如图1所示,在文献[14]的基础上扩大了节点的布局范围,无缝全覆盖布局16个感知节点,单节点感知半径为10 m,节点 S_1 的坐标为(0,0);目标路径起点 S_{start} 的坐标为(-15,-10),行走速度 $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,方向角函数 $f=\pi/4+\sin(t/10)/15$,其中 t 为时间。经过多次实验得到了处理后的数据,如表1所示,数据长度为30。采用基本粒子群定位算法迭代300次后,得到了运动目标的跟踪定位结果和目标跟踪误差曲线,如图2和图3所示。可见,目标跟踪定位精度较文献[14]有所降低,算法执行时间为10.654883 s,产生的定位滞后较大,这将对系统后期的处理结果产生极大影响。例如,在攻击目标过程中,攻击时间为0 s,数据长度会有10.65 m的误差,这将导致攻击失败。若通过减少迭代次数来缩短定位时间,那么目标的跟踪定位精度将会更低。

为消除较大值守范围内目标定位精度与定位时间受数据长度的影响,并改善基本粒子群定位算法的稳定性,本研究对采样数据长度进行限制,采用改进的分布式粒子群定位算法,充分利用多节点资源,协同决策,实现了任意范围值守区域的快速、高精度目标定位跟踪。

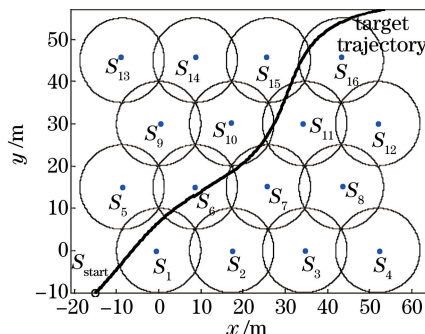


图1 实验布局图

Fig. 1 Experimental layout

表 1 目标跟踪探测数据
Table 1 Detecting data of target tracking

| Detecting number | Detecting angle /($^{\circ}$) | Time /s | Node position | | Detecting number | Detecting angle /($^{\circ}$) | Time /s | Node position | |
|------------------|---------------------------------|---------|---------------|------|------------------|---------------------------------|---------|---------------|------|
| | | | x /m | y /m | | | | x /m | y /m |
| 1 | 3.70 | 3.2 | 0.00 | 0 | 16 | 2.76 | 42.8 | 25.98 | 15 |
| 2 | 4.68 | 8.8 | -8.66 | 15 | 17 | 0.56 | 50.8 | 8.66 | 15 |
| 3 | 4.68 | 9.2 | -8.66 | 15 | 18 | 3.63 | 51.2 | 34.64 | 30 |
| 4 | 1.92 | 20.0 | 0.00 | 0 | 19 | 1.71 | 53.2 | 25.98 | 15 |
| 5 | 3.91 | 22.4 | 8.66 | 15 | 20 | 1.64 | 54.4 | 25.98 | 15 |
| 6 | 5.55 | 22.8 | -8.66 | 15 | 21 | 3.42 | 55.6 | 34.64 | 30 |
| 7 | 2.69 | 24.4 | 17.32 | 0 | 22 | 2.76 | 60.8 | 34.64 | 30 |
| 8 | 1.33 | 25.6 | 0.00 | 0 | 23 | 1.40 | 62.0 | 25.98 | 15 |
| 9 | 5.97 | 28.8 | -8.66 | 15 | 24 | 5.48 | 67.6 | 25.98 | 45 |
| 10 | 1.12 | 29.6 | 0.00 | 0 | 25 | 0.63 | 68.4 | 17.32 | 30 |
| 11 | 4.12 | 30.4 | 8.66 | 15 | 26 | 3.42 | 70.4 | 43.30 | 45 |
| 12 | 2.20 | 32.4 | 17.32 | 0 | 27 | 3.35 | 70.8 | 43.30 | 45 |
| 13 | 5.20 | 33.2 | 0.00 | 30 | 28 | 1.71 | 71.2 | 34.64 | 30 |
| 14 | 3.14 | 36.0 | 25.98 | 15 | 29 | 1.64 | 72.4 | 34.64 | 30 |
| 15 | 1.85 | 37.6 | 17.32 | 0 | 30 | 0.91 | 95.2 | 43.30 | 45 |

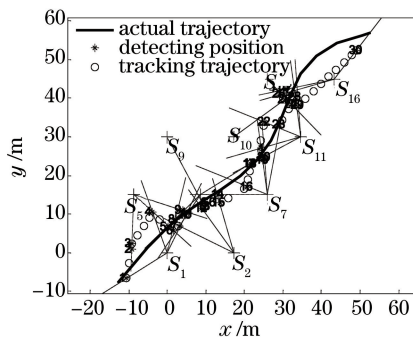


图 2 目标作曲线运动的跟踪结果

Fig. 2 Tracking results of target moving in curve

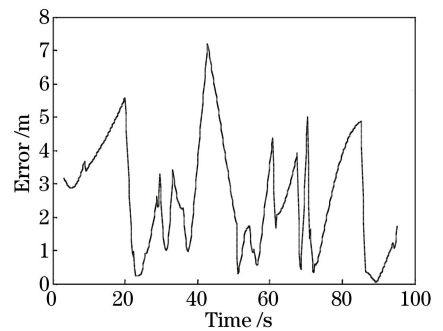


图 3 目标跟踪误差曲线

Fig. 3 Curve of target tracking error

3 分布式粒子群优化跟踪模型

3.1 模型参数

3.1.1 分时纯方位角数据长度

文献[14]的跟踪系统由大量节点组成,能够全方位监测环境,并能完成目标方位角信息的采集,但未考虑数据长度对系统的影响。通过基本粒子群算法局限性研究发现,过长的数据采集耗时较多,目标定位滞后,在极端情况下会导致信息尚未处理,目标已逃离群体感知覆盖区,因此不利于实时跟踪。另外,信息量的长度就是分布式粒子群优化(DPSO)搜索空间的维数,维数越高,搜索范围越大,定位精度越易降低;而若数据过短,则运动目标的信息量太少,基本粒子群跟踪精度较低。因此,适当的数据长度成为了围捕任务的关键因素。为方便研究,数据长度表示为 $L_{ABO} = \text{size}(ABO_data)$ 。

3.1.2 跟踪周期

如图 4 所示,目标跟踪是一个系统分时纯方位角数据采集、目标定位计算的周期性重复执行过程,定义重复执行一次所需时间为一个跟踪周期。跟踪周期 T 是一个影响跟踪效率的重要因素,可表示为 $T = kT_0$, $k \in \mathbf{N}^*$, T_0 为节点采样周期。若 T 太大,系统数据采集及跟踪计算时间较长,实时性较差;若 T 太小,则不能获取足够的目标信息,跟踪精度较低。图中的 t_1, t_2 是两个时间变量, V_s 为数据长度的设定值。

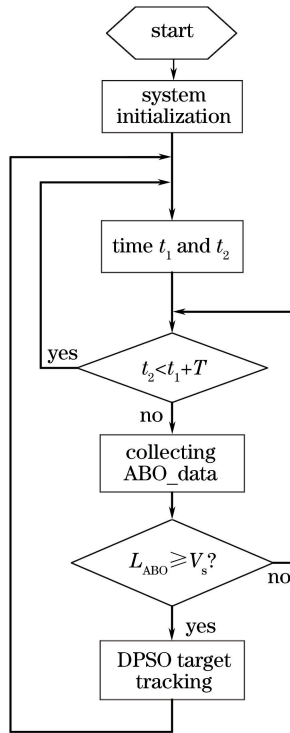


图4 目标跟踪流程

Fig. 4 Flow diagram of target tracking

3.2 跟踪模型

基于热释电感知与极径序列表示的粒子群目标跟踪模型与文献[14]的模型相同,在此称其为基本粒子群定位模型。假设整个跟踪系统的节点集 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_N\}$, 共 N 个节点, 某跟踪单周期 $[t, t + T]$ 内发现目标的节点集为 $S' = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{im}\} \subset S$, $(1 \leq n \leq N)$, 当发现目标次数达到分时纯方位角数据长度 L_{ABO} 时, 系统的方位角数据序列为

$$S_O = \{(\theta_1, t_1, S_{k_1}), (\theta_2, t_2, S_{k_2}), \dots, (\theta_n, t_{L_{ABO}}, S_{k_{L_{ABO}}})\},$$

$$S_{k_j} \in S', j = 1, 2, \dots, L_{ABO}, \quad (1)$$

式中 θ 为运动目标分时纯方位角数据; t 为对应方位角数据的时刻; k_j 为序列中第 k 组数据, 由第 j 个节点获取。

假设所有发现目标的节点能够正常通信, 实现数据共享, 并且能独立运行基本粒子群定位算法, 得到 L_{ABO} 维搜索空间的最优解, 然后通过比较每个节点的优化结果, 取其中的最优结果, 实现双重优化, 即 $p(t) = \operatorname{argmin}\{f_i[p_j(t)] \mid i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, L_{ABO}\}$, 其中 f_i 为第 i 个节点的适应度函数, $p_j(t)$ 为粒子群算法中第 j 个个体的历史最优位置, $p(t)$ 为分布式粒子群算法对应的最优位置。最优解记为 $x_{i_1} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{L_{ABO}})$, 其中 $\rho_j (j = 1, 2, \dots, L_{ABO})$ 为极径^[11]。

对于多周期的连续跟踪过程, 在时间间隔 $[t, t + kT] (k = 1, 2, 3, \dots)$ 内, 协同决策最优解为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_k\}$, 其中 $x_m (m = 1, 2, 3, \dots, k)$ 就是这 k 个周期中的一次单周期跟踪结果。

4 跟踪实验及系统参数确定

4.1 跟踪实验及数据统计

跟踪实验的硬件装置与文献[14]相同。布局及实验设计如图1所示。跟踪周期 $T = iT_0, i = 2, 4, 6, \dots, 16, L_{ABO} = 3, 4, 5, \dots, 10$ 。表2给出了不同周期设定值及不同数据长度条件下的目标跟踪误差, 空白区域表示没有跟踪结果, 跟踪点数为对应周期下针对不同分时纯方位角数据长度 L_{ABO} 的系统跟踪点数的平均值。此外, 系统计算时间随着数据长度的增加而增加。

表 2 实验数据统计结果

Table 2 Statistics results of experimental data

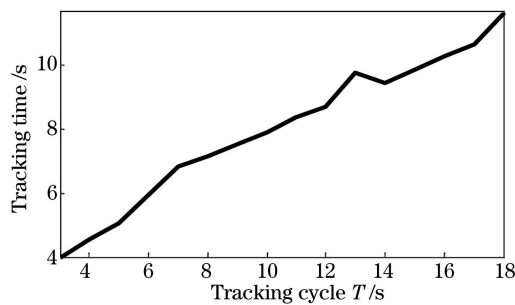
| Tracking cycle | L_{ABO} | | | | | | | | Error mean | Tracking point number |
|----------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------------|-----------------------|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| $2T_0$ | 0.58 | 0.70 | 0.61 | 0.57 | | | | | 0.61 | 22.50 |
| $4T_0$ | 1.49 | 1.29 | 1.49 | 1.46 | 0.40 | | | | 1.23 | 54.75 |
| $6T_0$ | 1.87 | 2.56 | 3.24 | 2.41 | 0.67 | 1.82 | | | 2.09 | 58.25 |
| $8T_0$ | 2.85 | 1.92 | 0.66 | 1.21 | 0.87 | 0.67 | 2.69 | | 1.55 | 57.75 |
| $10T_0$ | 2.76 | 2.06 | 1.84 | 2.68 | 1.29 | 1.86 | 0.88 | 0.91 | 1.78 | 57.88 |
| $12T_0$ | 2.28 | 2.85 | 2.01 | 2.78 | 1.59 | 2.56 | 2.11 | 1.68 | 2.23 | 57.25 |
| $14T_0$ | 3.71 | 2.71 | 2.78 | 2.25 | 1.55 | 1.17 | 1.27 | 1.59 | 2.13 | 57.38 |
| $16T_0$ | 3.37 | 2.62 | 3.22 | 2.71 | 1.13 | 0.88 | 1.91 | 1.96 | 2.23 | 56.38 |
| Error mean | 2.36 | 2.09 | 1.98 | 2.01 | 1.07 | 1.49 | 1.77 | 1.54 | | |
| Time /s | 4.76 | 5.61 | 6.02 | 6.39 | 6.76 | 7.19 | 7.62 | 8.07 | | |

4.2 分时纯方位角数据长度 L_{ABO} 的确定

将上述实验数据进行统计分析后可知:

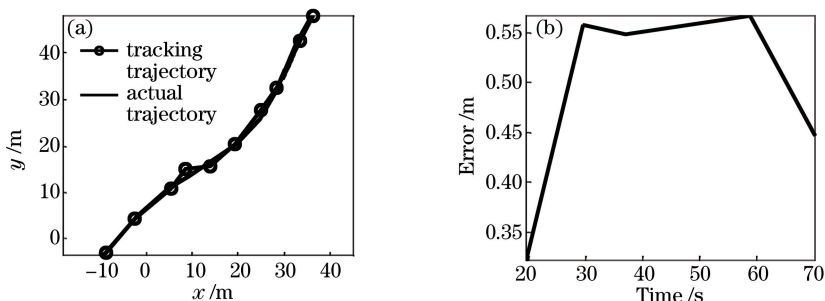
1) 分时纯方位角数据长度 L_{ABO} 是影响系统跟踪效率的重要因素。过长的数据会导致 DPSO 算法解的空间维数变大, 解的搜索难度加大, 导致定位误差变大, 计算时间延长; 而过短的数据则会造成目标信息量太少, 定位精度会受到影响。表 2 的统计结果也证实了这一点。

2) 跟踪周期 T 的大小决定了系统的实时性, T 较小时, 实时性较高, 但若 T 过小, 将会导致采集数据时间受限, 进而导致系统所得 L_{ABO} 值小于设定值, 不能准确定位目标。若 T 较大, 决策定位时间变长, 而当 T 过大时, 将会产生滞后, 导致实际目标位置与计算目标位置的偏差较大。图 5 给出了 T 对跟踪计算时间的影响。

图 5 跟踪周期 T 对跟踪时间的影响Fig. 5 Influence of tracking cycle T on tracking time

由 1) 和 2) 可知, 在保证定位精度的前提下, 应尽量选择较小的跟踪周期 T , 即先选择合适的数据长度 L_{ABO} , 再确定相应的跟踪周期 T 。

图 6 是分时纯方位角数据长度 $L_{ABO} = 7$, 跟踪周期 $T = 4T_0$ 时的一次跟踪结果。可见, 跟踪误差在米级范围内。

图 6 $T = 4T_0$ 和 $L_{ABO} = 7$ 时的 (a) 目标轨迹及 (b) 跟踪误差Fig. 6 (a) Target trace and (b) tracking error under the conditions of $T = 4T_0$ and $L_{ABO} = 7$

4.3 系统扩展实验

进一步扩大系统规模,取监测节点 $N=36$ 和 $N=49$,布局方式及其他参数同 4.1 节,跟踪结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,该方案的适应性较强,跟踪误差在米级范围内,比文献[1-8]的跟踪精度高,相比文献[14]有效扩充了应用规模,保证了系统的跟踪精度。

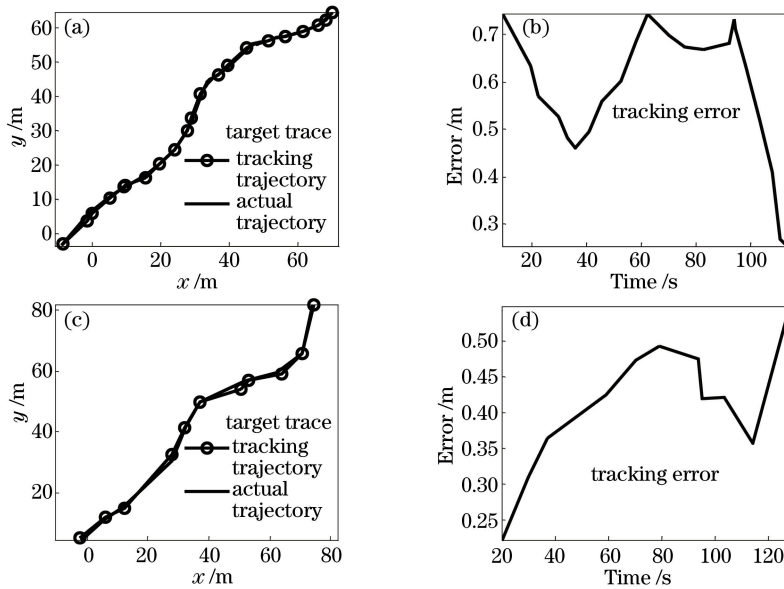


图 7 扩大布局范围后的目标轨迹和跟踪误差。(a)(b) $N=36$; (c)(d) $N=49$

Fig. 7 Target trace and tracking error after expanding the layout. (a)(b) $N=36$; (c)(d) $N=49$

5 结 论

提出了基于 DPSO 算法的热释电跟踪方案,该方案保证了粒子群算法在热释电跟踪中的进一步应用,实现了任意范围布局系统跟踪误差的相对稳定,为基于分时纯方位角的跟踪方法提供了参考,亦为随机跟踪定位方案的实现提供了依据。该方案目前仅适用于地势相对平坦区域的目标跟踪过程,对三维空间目标的跟踪过程有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Guan Q J, Yin X G, Guo X M, *et al.* A novel infrared motion sensing system for compressive classification of physical activity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(8): 2251-2259.
- [2] Yang B, Luo J, Liu Q. A novel low-cost and small-size human tracking system with pyroelectric infrared sensor mesh network[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 63: 147-156.
- [3] Yun J, Song M H. Detecting direction of movement using pyroelectric infrared sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(5): 1482-1489.
- [4] Yun J, Lee S S. Human movement detection and identification using pyroelectric infrared sensors[J]. *Sensors*, 2014, 14(5): 8057-8081.
- [5] Hao Q, Brady D J, Guenther B D, *et al.* Human tracking with wireless distributed pyroelectric sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(6): 1683-1696.
- [6] Huang Xin. Design and implementation of pyroelectric infrared wireless sensor network human positioning system[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2009.
黄鑫. 热释电红外无线传感器网络人体定位系统设计与实现[D]. 广州: 中山大学, 2009.
- [7] Shen Baihua, Luo Xiaomu, Wang Guoli. An approach for motion detecting and localization using pyroelectric infrared sensor[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, 21(9): 1350-1354.
申柏华, 罗晓木, 王国利. 运动检测与定位的热释电红外传感新方法[J]. *光电子 • 激光*, 2010, 21(9): 1350-1354.

- [8] Xiao Jia, Yang Bo. Target localization based on pyroelectric infrared sensing technology[J]. *Infrared*, 2011, 32(12): 17-22.
肖佳, 杨波. 基于热释电红外传感技术的目标定位研究[J]. *红外*, 2011, 32(12): 17-22.
- [9] Xu Wei, Yang Wei. Research on detection method of infrared sensor array [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(9): 16-18.
徐薇, 杨卫. 一种红外传感器阵列探测方法的研究[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(9): 16-18.
- [10] Zhang Ye, Yang Wei, Yue Yuan, *et al.* Influencing factors research of detection range on pyroelectric infrared sensor [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(6): 448-451.
张晔, 杨卫, 岳元, 等. 基于热释电红外传感器探测距离影响因素的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(6): 448-451.
- [11] Sun Qiao, Yang Wei, Yu Haiyang, *et al.* New target location method based on dynamic pyroelectric infrared sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2288-2292.
孙乔, 杨卫, 于海洋, 等. 动态下红外热释电传感器的目标定位方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2288-2292.
- [12] Sun Qiao, Yang Wei, Zhang Wendong, *et al.* Research on target tracking based on dynamic pyroelectric infrared sensor network[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(12): 2399-2403.
孙乔, 杨卫, 张文栋, 等. 动态热释电传感器网络目标跟踪技术研究[J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(12): 2399-2403.
- [13] Wang Z B, Yang W, Qin L. Target localisation based on dynamic pyroelectric infrared sensor[J]. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 2014, 7(3): 289-296.
- [14] Wang Zebing, Yang Wei, Qin Li. Target tracking based on particle swarm optimization using dynamic pyroelectric infrared sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1004001.
王泽兵, 杨卫, 秦丽. 基于粒子群算法的动态热释电目标跟踪[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1004001.