

人体热释电信息形成原理的研究

熊 迹¹, 严俊伟², 陈军桥³

(1. 文华学院信息科学与技术学部, 湖北武汉 430074; 2. 武汉理工大学信息工程学院, 湖北武汉 430070;
3. 东风神龙汽车有限公司, 湖北武汉 430034)

摘 要: 为了建立热释电传感器感应机理与人体特性相融合的数学模型, 以理解热释电传感器对人体热辐射感应特性与人体特征的关系, 本文研究了热释电传感器的工作原理, 以及人体在热释电感应区域运动时传感器对移动人体辐射源的感应规律. 推导出了人体特征与热释电感应机理之间的映射关系, 该映射关系揭示了传感器的感应数据与人体辐射源特征以及传感器特性之间内在的逻辑联系. 实验数据证明, 人体辐射源温度越高, 单位面积辐射能量越大, 感应出的电压波幅越大; 速度越快, 辐射角度变化率越大, 电压波幅越小; 人体体型越大, 辐射面积越大, 电压波幅越大. 同时这些结论也验证了该数学模型的正确性和有效性.

关键词: 热释电红外 (PIR) 传感器; 感应原理; 感应模型; 人体热释电特性

中图分类号: TP211 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)09-2299-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.037

Research for the Principle of Human Pyroelectric Information Forming

XIONG Ji¹, YAN Jun-wei², CHEN Jun-qiao³

(1. Department of Information Science and Technology, Wenhua College, Wuhan, Hubei 430074, China;
2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
3. Dong Feng Peugeot Citroen Automobile Company LTD, Wuhan, Hubei 430034, China)

Abstract: In order to establish the mathematical integration model of the pyroelectric infrared (PIR) sensor mechanism and the characteristics of human body thermal radiation and understand the relationship on PIR sensor between the human body thermal radiation and induction and the human characteristics, this paper studied the working principle of the PIR sensor and the laws of mobile body induction in the PIR sensing regions. The mapping relationship between human characteristics and mechanism of PIR sensing is deduced, which reveals the intrinsic logical connection between induction data and the human radiation source and PIR sensors characteristics. The experimental data show that the higher the human body radiation temperature is, the greater the radiation energy per unit area and the detected voltage amplitude will be; the faster the velocity is, the smaller the detected voltage amplitude will be; the bigger the human body is, the larger the detected voltage amplitude and the radiation area will be. At the same time, the experimental results also verify the correctness and validity of the proposed mathematical model.

Key words: PIR (pyroelectric infrared radial) sensor; principle of pyroelectric sensing; sensing model; pyroelectric characteristics of human body

1 引言

热释电红外 (PIR) 传感器能检测波长在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的红外线, 利用它的这一特性, 可实现在常温下对运动的人体进行检测. 现阶段, 研究者对热释电感应的信号特征进行研究, 发现不同的人体具有不同特征的热释

电信号, 依据这些特征, 对人体的跟踪与识别成为了现在研究的热点^[1-6].

国外, ZappiP 等人利用多个热释电传感器组成的矩阵来获取人体的多个特征信息, 例如人体移动方向, 速度以及经过感应区域人体的数目^[7]. 由于基于红外的被动测距方法主要集中在对红外图像的计算和处

理,算法复杂,对采集设备的要求高.利用热释电传感器测量距离成为了一个新的研究方向^[8-10],同时 ZappiP 等人设计了一个低功耗,低成本的热释电数据采集系统,可收集不同距离的人体热辐射信息,并利用不同距离的人体热辐射波形特征,以及不同分类算法对移动人体到热释电传感器的不同距离进行了识别,该方法利用识别的方式对人体所在的位置进行测距,结合波形的其他特征,可对人体进行粗粒度的跟踪^[11].文献[12]采用多个分布式布局的 PIR 探测器实现了对运动人体的追踪.文献[13]采用单只 PIR 传感器获取运动人体的热红外信息,同时利用主成分分析算法(Principal Component Analysis, PCA)结合(Support Vector Machines, SVM)算法对人体热释电感知信号中所包含的特征信息进行了聚类,证明了该方法用于人体热释电感知信号特征提取的可行性,在文献[14]中, FANG J S 等人设计了一个基于热释电传感器的低功耗人体识别系统,他们通过选用不同的 MASK 证明了人体的识别能力与热释电传感器所在空间位置, MASK 孔数以及到人体的垂向距离有关,以上的研究成果都是对热释电传感器的感应结果进行应用,但对热释电传感器的人体热红外感应机理还没有深入的研究,该机理与人体热红外特征存在着一定的联系,本文通过研究这一联系,解释了人体热释电感应波形形成的机理.

本文设计并研制了一套人体目标探测系统,当单个人体经过该系统的感应区域时,感应的波形为单周期高斯脉冲波,同时对热释电传感器感应的人体高斯脉冲波的形成机理进行了研究,并将人体在热释电感应区域运动时,人体感应面积变化规律进行了探讨,揭示了感应波形形成机理与人体感应面积的变化规律的映射关系,利用热释电效应的形成原理与该映射关系,推导出形成人体辐射热释电效应的数学模型,该模型由人体自身特征,运动特征以及热释电传感器的多种参数组成,使我们更容易理解感应波形的形成机理,便于对不同波形特征的提取与处理.

本文贡献:

(1) 揭露了人体热释电信号的形成机理与人体感应面积的变化规律的映射关系,认知了人体热红外感应波形的形成规律.

(2) 建立了人体辐射热释电效应的数学模型,该模型反映了人体特征,运动特征以及热释电传感器对感应数据的映射机理.

(3) 有利于热释电传感器在对人体目标进行探测的过程中,实现数据物理结构的优化.

2 热释电效应的形成原理

热释电器件在无辐射作用的情况下,与环境温度

处于平衡状态,其温度为 T_0 . 当辐射功率为 Φ_e 的热辐射入到器件表面时,设吸收系数为 α ,则器件吸收的热辐射功率为 $\alpha\Phi_e$. 其中一部分使器件的温度升高,另一部分补偿器件与环境的热交换所损失的能量.

根据能量守恒原理,热释电传感器吸收的辐射功率应等于器件内能的增量与热交换能量之和^[15]. 即:

$$\alpha\Phi_e = C_\theta \frac{d(\Delta T)}{dt} + G\Delta T + A\sigma(T_d^4 - T_a^4) \quad (1)$$

若选取开始辐射时为初始时间,此时器件与环境处于热平衡状态,即 $t = 0, \Delta T = 0$. 得到热传导的方程:

$$\Delta T(t) = \frac{\alpha\Phi_e\tau_T e^{j\omega t}}{C_\theta(1 + j\omega\tau_T)}$$

为正弦变化的函数^[16,17].

3 运动模型与感应映射关系分析

通过对 PIR 传感器感应原理的研究,发现 PIR 传感器采集的辐射功率以及交变的辐射能与人体单位体积辐射有关,交变单位体积的辐射能表示人体目标进入热释电感应区引起 PIR 传感器吸收辐射通量时的变化量,人体单位体积辐射表示人体目标进入热释电感应区域时,人体辐射的通量与感应体积大小的比值(本文为了计算方便将人体感应体积简化为纵向面积,所以本文后面的陈述为感应面积).

3.1 人体目标面积小于感应区域模型

如图 1 所示,当人体目标 H_1 从 t_1 时刻移动到 t_2 时刻时,移动距离为 d ,不同时刻所对应的角度分别为 θ_1, θ_2 ,且 $\theta_1 < \theta_2, \theta_2 - \theta_1 = \Delta t \cdot \beta_1, R$ 代表人体半径, θ 代表圆心角的度数.

$$\Psi = \frac{\Delta S_1}{\Delta t} = \frac{1}{2} R^2 \beta_1 \frac{\pi}{180} [1 - \cos\left(\frac{\pi}{180} \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right)\right)] \quad (2)$$

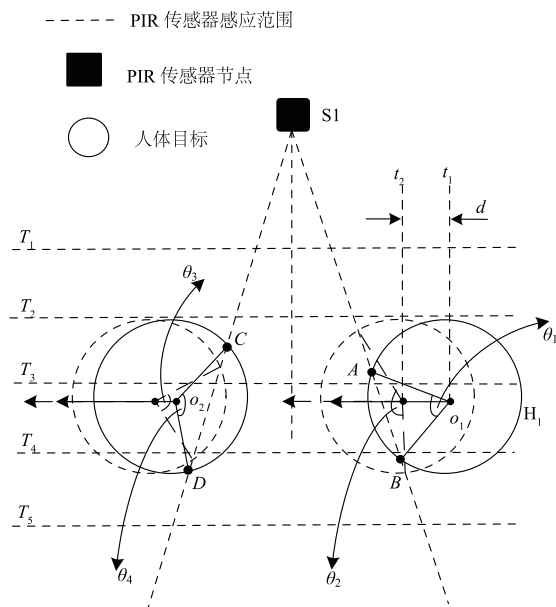


图1 人体目标进入热释电感应区模型

式(2)代表移进时人体感应面积的变化率分析如下:

阶段 1: $\Delta t \rightarrow \varepsilon, \theta_1 + \theta_2 \in [0 \ 180), (\theta_1 + \theta_2)/2 \in [0 \ 90)$, Ψ 随着角度的增大, 正方向加速递增.

阶段 2: $\Delta t \rightarrow \varepsilon, \theta_1 + \theta_2 \in [180 \ 360), (\theta_1 + \theta_2)/2 \in [90 \ 180)$, Ψ 随着角度的增大, 正方向减速递增.

阶段 3: $\Delta t \rightarrow \varepsilon, \theta_1 + \theta_2 \in [360 \ 540), (\theta_1 + \theta_2)/2 \in [180 \ 270)$, Ψ 随着角度的增大, 负方向加速递减.

阶段 4: $\Delta t \rightarrow \varepsilon, \theta_1 + \theta_2 \in [540 \ 720), (\theta_1 + \theta_2)/2 \in [270 \ 360)$, Ψ 随着角度的增大, 负方向减速递减.

在阶段 1 由于人体感应面积的变化率在加速持续增加, 所以 PIR 传感器感应出的电荷也在增加, 同时电压在加速持续上升. 在阶段 2 人体感应面积的变化率在减速增加, 导致热释电感应电荷也在减速增加, 电压减速增大并达到最大, 阶段 3, 当人体感应面积的变化率达到极限并向负方向加速递减时, PIR 传感器的感应电荷将不会有所增加, 电压达到临界状态并开始减小处于下降阶段, 阶段 4, 人体的大部分面积已经进入了热释电的感应区域, 人体感应面积也在减速递减, 其电压值将回归到零点. 当人体从热释电传感器感应区域移出时 $\theta_3 > \theta_4, \theta_3 - \theta_4 = \Delta t \cdot \beta_2$ 时, 可得:

$$\Psi = \frac{\Delta s_2}{\Delta t} = -\frac{1}{2} R^2 \beta_2 \frac{\pi}{180} \left[1 - \cos \frac{\pi}{180} \left(\frac{\theta_3 + \theta_4}{2} \right) \right] \quad (3)$$

式(3)代表移出时人体感应面积的变化率分析如下:

阶段 1: $\Delta t \rightarrow \varepsilon, \theta_3 + \theta_4 \in (540 \ 720], (\theta_3 + \theta_4)/2 \in (270 \ 360]$, 由于人体目标出感应区, 所以角度反向减少, Ψ 随着角度的减小, 负方向加速递增;

阶段 2: $\Delta t \rightarrow \varepsilon, \theta_3 + \theta_4 \in (360 \ 540], (\theta_3 + \theta_4)/2 \in (180 \ 270]$, Ψ 随着角度的减小负方向减速递增;

阶段 3: $\Delta t \rightarrow \varepsilon, \theta_3 + \theta_4 \in (180 \ 360], (\theta_3 + \theta_4)/2 \in (90 \ 180]$, Ψ 随着角度的减小, 正方向加速递增;

阶段 4: $\Delta t \rightarrow \varepsilon, \theta_3 + \theta_4 \in (0 \ 180], (\theta_3 + \theta_4)/2 \in (0 \ 90]$, Ψ 随着角度的减小, 正方向减速递增.

在阶段 1 由于人体感应面积的变化率在向负方向加速递增, 所以热释电传感器感应出的电荷为负向递增, 同时电压在加速负向持续上升. 在阶段 2 人体感应面积的变化率在负向减速递增, 导致热释电感应电荷也在负向减速增加, 电压负向减速增大并达到负向最大, 阶段 3, 当人体感应面积的变化率达到负向极限并向正向加速递增时, 热释电传感器的感应电荷将不会有所增加, 电压达到临界状态并开始减小处于下降阶段, 阶段 4, 人体的大部分面积已经超出了热释电的感应区域, 人体感应面积也在正方向减速递增, 其电压值将回归到零点.

3.2 人体面积大于感应区域面积模型

当人体目标移动到如图 1 所示的状态时, 其数学模型推导如下所示, 设整个人体目标的感应面积为:

$$\Delta_{\text{total}} = S_{\text{human}} - (\Delta_1 + \Delta_2), \{\theta_1, \theta_2\} \in [0 \ 90] \quad (4)$$

$$\Delta_1 = \frac{1}{2} R^2 \left(\frac{\theta_1 \pi}{180} - \sin \left(\frac{\pi}{180} \theta_1 \right) \right) \quad (5)$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{2} R^2 \left(\frac{\theta_2 \pi}{180} - \sin \left(\frac{\pi}{180} \theta_2 \right) \right)$$

$$S_{\text{human}} = \pi R^2$$

可得:

$$\Delta_{\text{total}} = \pi R^2 - \frac{1}{2} R^2 \Pi$$

$$\Pi = \frac{\pi}{180} (\theta_1 + \theta_2) - \left(2 \sin \frac{\pi}{180} \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \cos \frac{\pi}{180} \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \right) \quad (6)$$

设 $\theta_1 + \theta_2 = \beta$, 且 $\theta_1 - \theta_2 = \alpha$, 可得:

$$\frac{\partial \Delta_{\text{total}}}{\partial \alpha} = -\frac{R^2}{2} \left[\left(\sin \left(\frac{\pi}{180} \cdot \frac{\beta}{2} \right) \sin \left(\frac{\pi}{180} \cdot \frac{\alpha}{2} \right) \right) \right] \quad (7)$$

由于 $\alpha \rightarrow \varepsilon, \varepsilon \rightarrow 0$, 所以 $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) = 0$, 可得 $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\partial \Delta_{\text{total}}}{\partial \alpha} = 0$, 所以面积变化率趋近与 0.

由于 PIR 传感器感应面积小于人体面积, 所以在人体进入感应区域时, 大部分时间停留在人体感应面积变化趋近于 0 的状态, 所以能感应到人体面积变化状态的时间比较少.

4 人体热释电感应数学模型的建立

假设人体热辐射源与 PIR 传感器感应的辐射变化量满足如下转换关系:

$$\lambda \cdot \Delta S = \Phi_0 e^{j\omega t} \quad (8)$$

由于 $I_s = A_b P \omega \Delta T$, 且 $\Delta U = I_s \cdot R_i$, 可推导出热释电传感器感应电压的数学模型为:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{\Delta t} R_i = \frac{\omega P A_b \alpha \tau_T}{C_\theta (1 + j\omega \tau_T)} \lambda \left(\frac{\Delta S}{\Delta t} \right) R_i \quad (9)$$

λ 为单位面积辐射量, R_i 为等效电阻, A_b 为光敏面的面积, α 为吸收系数, τ_T 为热时间常数, P 为热释电系数, ω 为热释电工作电压, C_θ 为热容.

该人体单位面积辐射与人的温度有关系, 温度越高系数 λ 值越大. 该公式体现了热释电感应值与热释电传感器自身的参数以及人体状态有关.

由于人体感应面积与感应区域边界所形成的多个角度关系较复杂, 并在实际测量的过程中比较难实现, 所以将多个角度关系转换为 PIR Sensor 节点到人体的距离关系以及角度关系, 可以简化人体在感应区域移动过程中的数学模型, 如图 2 所示.

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= \frac{\Delta Q}{\Delta t} R_i = \frac{P A_b \alpha \tau_T}{C_\theta (1 + j\omega \tau_T)} \lambda \frac{\Delta S}{\Delta t} R_i \\ \eta &= \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{1}{2} \beta_1 \frac{\pi}{180} \times \Omega \\ \Omega &= [2R^2 - AC^2 + \frac{AC^2}{2} [\cos(2\angle NCA) - 1 + \cos^2(\angle NCA - \phi)]] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

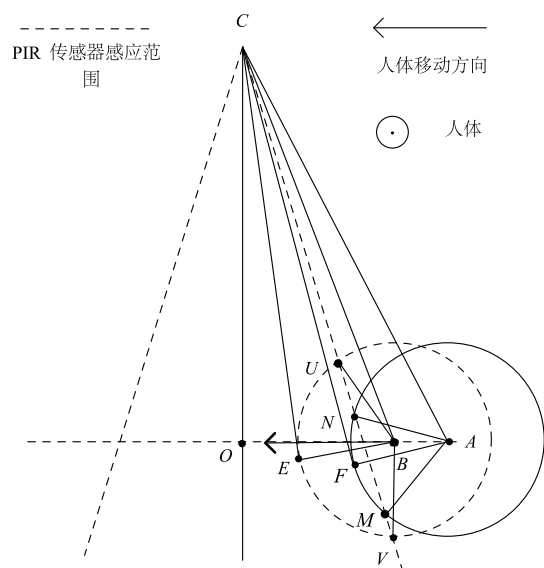


图2 感应面积与节点组成的角度关系示意图

式(10)将传感器的属性信息与人体在感应区域的几何关系进行了关联. 宏观信息, 微观信息相互融合后映射到感应电压的数学模型(感应电压代表了热释电传感器对热红外信号的感应能力)如式(11)所示:

$$\Delta U = \frac{PA_b \omega \alpha \tau_T R_i}{C_\theta (1 + j\omega \tau_T)} \lambda \frac{1}{2} \beta_1 \frac{\pi}{180} \times \Omega$$

$$\Omega = \left[2R^2 - AC^2 + \frac{AC^2}{2} [\cos(2\angle NCA) - 1 + \cos^2(\angle NCA - \phi)] \right] \quad (11)$$

从上述的数学模型可以分析得出, 该模型由两部分组成共同决定着感应电压, 即: 宏观特征和微观特征. 从宏观特征可以分析出, 人体热辐射在热释电感应区域如果存在角度变化, 即 $\angle NCA - \angle UCB = \phi$ 或 $\theta_2 - \theta_1 = \Delta t \cdot \beta_1$, 则热释电传感器将会映射为电压的变化. 角度变化越快, 则感应的电压增量越小, 因为角度变化越快, 停留在感应区的时间就越少, 热辐射摄入量相应变少, 所以电压增量减小, 同时还与人体面积 $R^2 \pi$ 有关, 人体面积越大感应的电压增量就越大. 同时 λ 越大, 电压值增量越大, 还与人体到热释电节点的距离 AC 有关, AC 越大, 感应电压值增量越小. 从热释电传感器的微观信息可以得出: 感应的电压与传感器内部的参数 $R_i, A_b, \alpha, \tau_T, P, \omega$ 以及 C_θ 都有关.

5 实验与分析

如图3所示2个PIR传感器模块分别固定在离地面 $H = 80\text{cm}, 160\text{cm}$ 的高处固定架上, 待测者在距离传感器节点正前方, 即: $L = 1.2\text{m}, 2.4\text{m}, 3.6\text{m}, 4.8\text{m}, 6.0\text{m}, 7.2\text{m}$ 的固定线路上行走, 作为样本数据.

本文通过设计实验场景来验证所提数学模型的结

论, 如图3所示, 以 $O(0,0)$ 为原点, 探测节点坐标为 $(0, 5\text{m})$, 7个20~25周岁的人体在指定的路径运动, 即表1所示:

表1 人体运动路径

起始点	终点
$A_0(1.2\text{m}, 0)$	$A_1(1.2\text{m}, 15\text{m})$
$B_0(2.4\text{m}, 0)$	$B_1(2.4\text{m}, 15\text{m})$
$C_0(3.6\text{m}, 0)$	$C_1(3.6\text{m}, 15\text{m})$
$D_0(4.8\text{m}, 0)$	$D_1(4.8\text{m}, 15\text{m})$
$E_0(6.0\text{m}, 0)$	$E_1(6.0\text{m}, 15\text{m})$
$F_0(7.2\text{m}, 0)$	$F_1(7.2\text{m}, 15\text{m})$

每条路径行走20次, 每个PIR传感器模块将会获取840个样本. 在进行特征提取之前, 先对信号数据进行预处理, 预处理主要包括波形截取和消噪两部分.

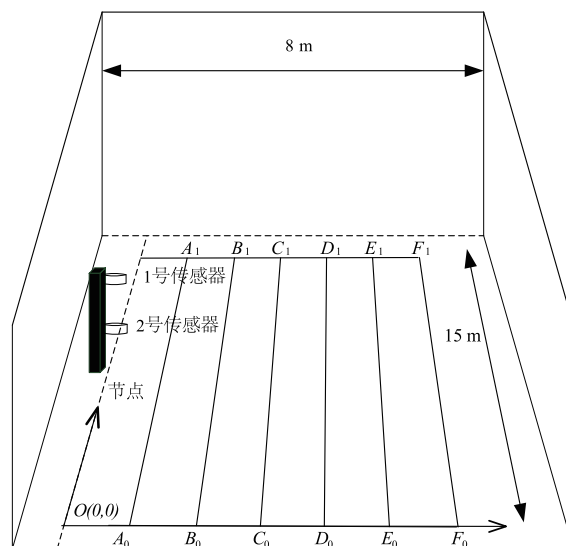


图3 系统组成与实验场景

根据不同的实验需求我们设计了3种实验方案, 从每种实验方案中抽取800个实验样本求均值. 同时, 本文分别从人体温度, 人体速度, 人体体积三个宏观参数来对上述推导的数学模型正确性和有效性进行验证.

(1) 人体热释电信息与温度的关系

人体目标在三段路径即 $A_0 \rightarrow A_1, B_0 \rightarrow B_1, C_0 \rightarrow C_1$ 上移动, 数据采集系统将对人体热红外信息进行采集, 然后对采集的人体热释电感应数据进行分析, 并从三个波形特征即: 单周期波峰与波谷的时间差, 波峰与波谷的电压差以及单周期电压差与时间差之比, 来验证数学模型的正确性与有效性. 表2为实验得出的数据规律与理论推导规律对比表. 从该表可看出, 实际数据显示的规律和理论推导规律的一致性. 即: 温度越高电压幅度越大, 热释电传感器感应的交变辐射越大, 电压峰值

回归零点所需要的时间越多,同时离传感器越远,波幅也会越小(正常温度为 36℃,较高温度为 60℃)。

表 2 实验数据规律与理论推导规律对比表——人体温度

	实验总结规律	数学模型推导规律
电压差 (ΔU)	温度越高, ΔU 越大	温度越高, λ 越大, ΔU 越大
	距离越远, ΔU 越小	距离 AC 越大, ΔU 越小

(2) 人体热释电信息与速度的关系

人体目标在路径 $B_0 \rightarrow B_1, C_0 \rightarrow C_1, D_0 \rightarrow D_1, E_0 \rightarrow E_1, F_0 \rightarrow F_1$ 上移动,得到多种样本数据,不同路径所采集的数据都满足表 3 所总结的规律. 即:速度越快相对于节点的角速度就越快,热释电感应的人体辐射能量就越少,波幅也越小,同时离传感器越远,波幅也会变小(慢速为 0.5m/s,中速为 1m/s,快速为 1.5m/s)。

表 3 实验数据规律与理论推导规律对比表——速度

	实验总结规律	数学模型推导规律
电压差 (ΔU)	速度越快, ΔU 越小	移动越快, ϕ 越大,得 ΔU 越小
	距离越远, ΔU 越小	距离 AC 越大, ΔU 越小

(3) 人体热释电信息与人体体型的关系

人体目标在路径 $B_0 \rightarrow B_1, C_0 \rightarrow C_1, D_0 \rightarrow D_1, E_0 \rightarrow E_1, F_0 \rightarrow F_1$ 上移动得到多种样本数据,不同路径所采集的数据都满足表 4 所总结的规律. 即:体型较大的人体目标比体型较小的人体目标在不同的距离上的电压差(波幅)都要大,同时离传感器越远,波幅也会越小,表 4 为实验得出的规律与理论规律的对比表,该表显示了实验得出的规律与本文提出的数学模型所推导的结论是一致的(较小体积的身体横截面积半径为 0.15m,较大体积的身体横截面积半径为 0.2m)。

表 4 实验数据规律与理论推导规律对比表——人体体积

	实验总结规律	数学模型推导规律
电压差 (ΔU)	体积越大, ΔU 越大	人体面积 $R^2\pi$ 越大, ΔU 越大
	距离越远, ΔU 越小	距离 AC 越大, ΔU 越小

6 结论

本文充分的分析了热释电传感器的工作原理,理解了传感器电信号的形成机理,从人体运动模型与热释电感应映射机理的关系入手展开了深入的研究,获得了相应的关系模型,以该模型为基础,将热释电传感器的感应原理与人体在热释电感应场中的感应特性相融合,并映射出具有微观和宏观特征的数学模型,热释电传感器对人体热红外的感应机理代表微观特性,人体在感应场区的运动特征和人体自身特征代表宏观特征,该数学模型能正确而有效的解释热释电传感器所感应的人体热红外波形的成形机理. 同时,本文从温度,速度,人体体型,这三个方面的实验数据证明了该数学

模型中的三个宏观参数与人体热释电形成规律存在一定的映射关系. 其规律为:人体温度越高,热释电传感器感应效果越强,人体运动速度越快,热释电传感器感应效果越强,人体体型面积越大,热释电传感器感应效果越强。

该规律为下一步对人体所在位置空间的识别与精确定位打下理论基础,并可以借助该理论,应用到对人体活动状态的识别和分析,同时也为多人目标精确跟踪提供有力的理论支撑。

参考文献

- [1] Xiong J, Li F M, Liu J. Fusion of different height pyroelectric infrared sensors for person identification[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(2): 436 - 446.
- [2] Xiong J, Li F M, et al. Human tracking system based on PIR sensor network and video[A]. Proceedings of the 7th China Conference on Wireless Sensor Networks[C]. Qingdao: CWSN, 2014. 13 - 25.
- [3] Lou X, Guan Q, TAN H, et al. Simultaneous indoor tracking and activity recognition using pyroelectric infrared sensors[J]. Sensors, 2017, 17(8), 1738 - 1756.
- [4] 李方敏, 姜娜, 等. 融合热释电红外传感器与视频监控器的多目标跟踪方案[J]. 电子学报, 2014, 42(4): 673 - 681.
Li F M, Jiang N, et al. Multi-object tracking scheme with pyroelectric infrared sensor and video camera coordination[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(4): 673 - 681. (in Chinese)
- [5] 熊迹, 李方敏. 基于人体热释电特征多策略融合识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1054 - 1066.
Xiong J, Li F M. Mult-strategy fusion recognition method based on the human pyroelectric feature[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1054 - 1066. (in Chinese)
- [6] Qi H, Brady D J, Guenther B D, et al. Human tracking with wireless distributed pyroelectric sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(6): 1683 - 1695.
- [7] Zappi P, Farella E, Benini L. Enhancing the spatial resolution of presence detection in a PIR based wireless surveillance network[A]. Proceeding of. IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance[C]. Bologna: IEEE, 2007. 295 - 300.
- [8] Lu Y, Ling Y S, Wu H P, et al. Study on passive distance measurement of ground objects by infrared radiation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 23(1): 77 - 80.
- [9] Huang S K, Xia T, Zhang T X. Pass ranging method based on infrared images[J]. Journal of Infrared and Millimeter

- Waves, 2007, 36(1): 109 – 13.
- [10] Qian Z T, et al. Passive ranging method for first systems [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2001, 20(4): 311 – 314.
- [11] Piceo Z, Elisabetta F, Luca B. Tracking motion direction and distance with pyroelectric sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(9): 1486 – 1494.
- [12] Cheng W, Dong Y. Detection of human body motion features using pyroelectric infrared sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(5): 1021 – 1023.
- [13] Wan B K, Feng L, Ming D, et al. Extraction and recognition of human body motion features base on pyroelectric infrared information [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2012, 10(3): 250 – 257.
- [14] Fang J S, Qi H, Brady D J, et al. Path-dependent human identification using a pyroelectric infrared sensor and Fresnel lens arrays [J]. Optics Express, 2006, 14(2): 609 – 624.
- [15] Chuan S, Ping M X. The detection mechanism of LiTaO₃ type II pyroelectric detectors [J]. Infrared Physics & Technology, 1999, 40(2): 61 – 70.
- [16] 刘卫国, 张良莹, 姚熹. 多层热释电探测器的动态热释电响应 [J]. 电子学报, 1995, 23(6): 71 – 75.
Liu W G, Zhang L Y, Yao X. Dynamic pyroelectric response of multilayer pyroelectric detectors [J]. Acta Electronica Sinica, 1995, 23(6): 71 – 75. (in Chinese)
- [17] Kang S J, Samoilov V B, Yoon Y S. Low-frequency response of pyroelectric sensors [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(5): 1255 – 126.

作者简介



严俊伟 男, 1986 年 5 月出生, 湖北省京山人. 2012 年获得武汉理工大学硕士学位, 2017 年获得武汉理工大学博士学位, 期间主要研究方向包括传感技术及应用, 信号处理, 人工智能等.

E-mail: junweiyan@whut.edu.cn



熊迹 男, 1982 年 7 月出生, 湖北省武汉市人. 分别于 2006 年, 2011 年和 2016 年在武汉理工大学获得工学学士学位, 工学硕士学位和工学博士学位. 现在主要从事信号处理, 人工智能等相关方面研究工作.