中 国 科 学

1991 年 4 月　　A 辑　　第 4 期

机器人用热觉传感器的理论与实验研究*

高国伟　王自成

(北京信息工程学院,北京 100101)

摘　要

本文研究了一种用于材料识别的机器人用热觉传感器. 文中描述了该传感器的模型、结构和实验;分析、讨论了热觉传感器敏感头诸结构因素对热觉传感器性能的影响; 提出了热觉特征量的新概念, 揭示了热觉特征量与热觉传感器响应特性的关系, 并指出了从热觉传感器的响应特性计算物体的热觉特征量的方法. 采用研制出的热觉传感器对 7 种材料(铜、钢、铝、聚四氟乙烯、橡胶、敷铜板、纸)的 130 次验证实验的分辨概率为 100%.

关键词: 机器人,热觉传感器,材料识别

人靠眼睛观察表面光滑的红色金属块、木块以及橡胶块是不能区分它们的. 然而在手接触它们之后,就很清楚它们是不同的,这就是它们的热性质不同[1]. 因此, 人们利用被接触物体的表面温度来获取有用信息,并把这种方法作为区分不同材料的一项新技术[2-4]. 人手触摸金属要比触摸木块和橡胶感觉凉爽,这个感觉与材料的绝对温度无关. 如果它们在同一房间,它们显然处于同一温度. 因此, 这个感觉是比较金属和木块以及橡胶的导热性质. 手指是热的,血流提供了一个恒热源. 当接触的是良导热体,例如金属,则热量迅速流出手指,减少手指的温度,因而触摸金属感觉凉爽. 这个现象可由热力学第二定律解释,当两个材料放置在一起时,热将从高温向低温物体流动,直到它们的温度平衡. 热系统中的热流对应于电系统中的电流,温差对应于电位差,压差产生电流, 温差产生热流. 我们提出的热觉传感器就是基于这一原理,以人手指的感觉机理为模型,通过测量材料从传感器吸热的比率来区分材料的.

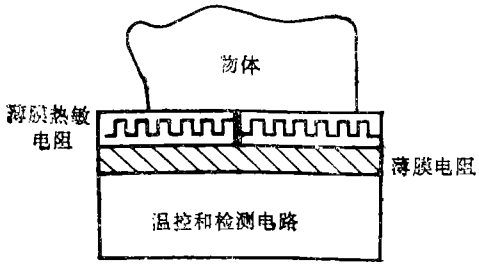

图 1　热觉传感器的结构示意图

图 1 是提出的新型热觉传感器的原理结构示意图[5]. 敏感头由两个薄层构成. 内层为薄膜加热源, 使传感器表面保持在一个高于环境温度的特定温度. 外层为薄膜热敏电阻, 用来记录传感器和被测材料界面的温度.

本文 1989 年 12 月 5 日收到, 1990 年 6 月 11 日收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目.

一、热觉传感器模型

为了分析热觉传感器的响应特性，我们建立了一个简单的传感器模型[6]，如图 2 所示。热觉传感器模型化为一薄片，被敏感材料作为无限长的棒。

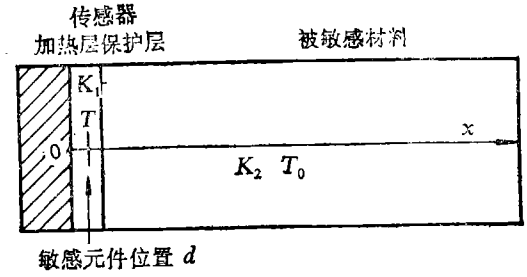

图 2　热觉传感器模型

采用一维热传导方程，设 u, v 分别为传感器保护层内和物体内的温度分布，则

$$\frac{\partial u}{\partial t} - a_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} - a_2^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0, \tag{2}$$

式中 a_1^2, a_2^2 分别是传感器保护层和物体的导温系数。热源加热器提供边界条件：

$$u(0, t) = T, \tag{3}$$

式中 T 为某一高于室温的温度。当 $x \to \infty$ 时，物体温度保持与室温 T_0 相等。因此

$$\lim_{x \to \infty} v(x, t) = T_0, \tag{4}$$

在 $x = L$ 处，满足边界条件

$$u(L, t) = v(L, t), \tag{5}$$

$$K_1 \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}\bigg|_{x=L} = K_2 \frac{\partial v(x, t)}{\partial x}\bigg|_{x=L}, \tag{6}$$

式中 K_1, K_2 分别是传感器保护层和物体的导热系数。在时间 t 为零时，传感器保护层的温度为 T，而物体的温度为 T_0，即

$$u(x, 0) = T, \tag{7}$$

$$v(x, 0) = T_0. \tag{8}$$

在 (1)—(6) 式中对时间 t 求 Laplace 变换，并利用 (7), (8) 式，有

$$PU - a_1^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - T = 0, \tag{9}$$

$$PV - a_2^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - T_0 = 0, \tag{10}$$

$$U(0, P) = \frac{T}{P}, \tag{11}$$

$$V(\infty, P) = \frac{T_0}{P}, \tag{12}$$

$$U(L, P) = V(L, P), \tag{13}$$

$$K_1 \frac{\partial U(x,P)}{\partial x}\bigg|_{x=L} = K_2 \frac{\partial V(x,P)}{\partial x}\bigg|_{x=L}, \tag{14}$$

式中 U, V 分别是 u, v 的 Laplace 变换。联立求解以上各式，得

$$U(x, P) = \frac{T}{P} - \frac{(T - T_0)}{P} D_1 \operatorname{sh}\left(\frac{\sqrt{P}}{a_1 x}\right) M(L, P), \tag{15}$$

式中

$$D_1 = \frac{a_1K_2}{a_1K_2 + a_2K_1}, \tag{16}$$

$$M(L, P) = \sum_{n=0}^{\infty} D_2^n e^{-\frac{(2n+1)L}{a_1}\sqrt{P}}, \tag{17}$$

式中

$$D_2 = \frac{a_1K_2 - a_2K_1}{a_1K_2 + a_2K_1}. \tag{18}$$

对(15)式求 Laplace 逆变换,有

$$u(x, t) = T - \frac{1}{2}(T - T_0)D_1M(L, x, t) \tag{19}$$

式中

$$M(L, x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} D_2^n[\mathrm{erfc}(x_n) - \mathrm{erfc}(y_n)], \tag{20}$$

式中

$$x_n = \frac{(2n+1)L - x}{2a_1\sqrt{t}}, \tag{21}$$

$$y_n = \frac{(2n+1)L + x}{2a_1\sqrt{t}}, \tag{22}$$

$$\mathrm{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-\phi^2}d\phi. \tag{23}$$

把热敏电阻元件的位置坐标 d 代入(19)式即得到感温元件所检测到的温度变化. 从(19)—(23)式可以看出,感温元件检测到的温度先下降后上升. 在传感器接触物体初期,传感器保护层内的热量迅速向物体内传递,感温元件所检测到的温度呈下降趋势;当传感器接触物体较长时间后,恒热源加热器逐渐补偿了传感器保护层内的热量损失,感温元件所检测到的温度又呈

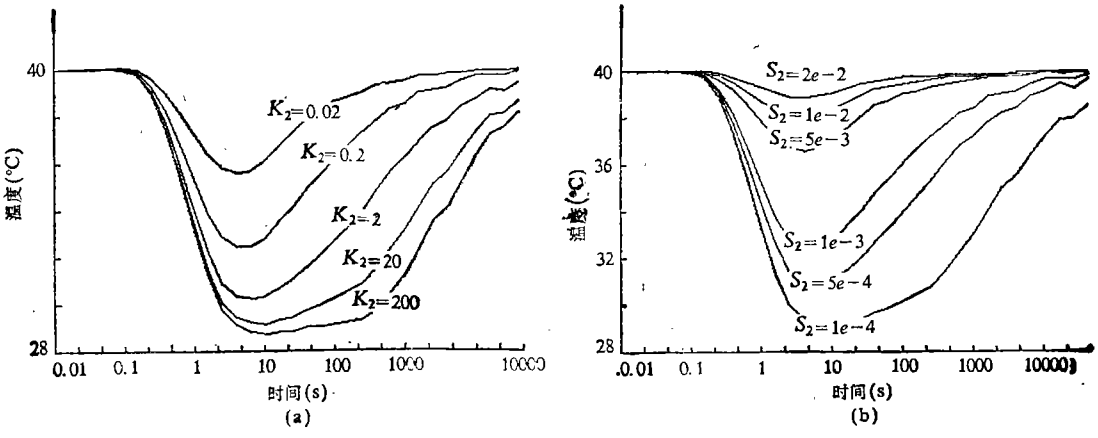

图 3 (a) 物体导热系数对热觉传感器响应特性的影响, (b) 物体热觉特征量对热觉传感器响应特性的影响

(T = 40℃, T_0 = 20℃)

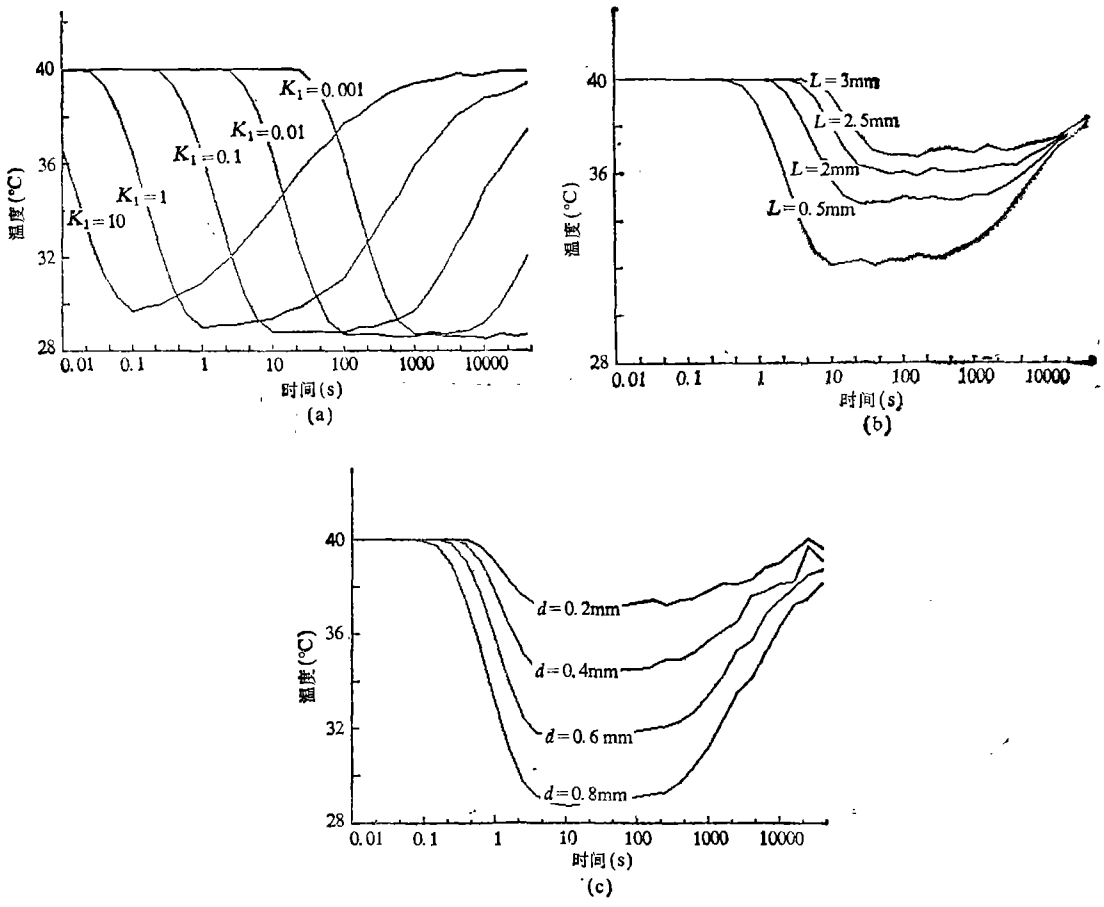

图 4　(a) 敏感头保护层导热系数对传感器响应特性的影响，(b) 保护层厚度对热觉传感器响应特性的影响，(c) 感温元件位置对热觉传感器响应特性的影响

($T=40℃$, $T_0=20℃$)

上升趋势。

图 3 示出了物体的导热系数和热觉特征量 S_2 (下节定义 1) 对传感器响应特性的影响；图 4 示出了传感器保护层导热系数、厚度和感温元件位置对传感器响应特性的影响。从图 3 可以看出，物体的导热系数越大(或热觉特征量越小)，热觉传感器的温度下降越大。不同材料的导热系数(或热觉特征量)不一样，因而热觉传感器的温度下降也不一样，这就是热觉传感器工作的基础。从图 4 可以看出，传感器保护层导热系数越大，厚度越薄，或感温元件越接近传感器表面，热觉传感器的温度下降越大，响应越快。

二、热觉特征量

热觉传感器接触不同的物体，响应特性不同。现在要解决的问题是：已经获得了热觉传感器对某一未知物体的响应，如何推知这个物体的材料属性？

1. 热觉特征量的定义

从 (19), (20), (16), (18) 式可以看出，物体的材料性质的影响主要包含在两个常数 D_1,

D_2 中,如果令

$$S_1 = \frac{a_1}{K_1}, \tag{24}$$

$$S_2 = \frac{a_2}{K_2}, \tag{25}$$

则

$$D_1 = \frac{S_1}{S_1 + S_2}, \tag{26}$$

$$D_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}. \tag{27}$$

由此可见,作为不同材料的表征而影响热觉传感器响应的量是 S_2.

定义 1. 我们称 $S_2 = \frac{a_2}{K_2}$ 为物体的热觉特征量,单位是 $m^2 \cdot ℃/(W \cdot s^{1/2})$.

从以上的讨论可知,热觉特征量是不同材料影响热觉传感器响应特性的表征量. 因此,只要我们从热觉传感器的响应特性计算出热觉特征量来,就可以区别不同的材料.

2. 极值温度法计算热觉特征量 S_2

根据 Gauss 误差函数 erfc 的特性和传感器的实际参数,我们采用近似方法计算物体的热觉特征量 S_2, 取 (19) 式中的级数的第一项,即

$$T(t) = T - \frac{1}{2}(T - T_0)D_1F(L, d, t), \tag{28}$$

式中

$$F(L, d, t) = \mathrm{erfc}\left[\frac{(L-d)}{2a_1\sqrt{t}}\right] - \mathrm{erfc}\left[\frac{(L+d)}{2a_1\sqrt{t}}\right]. \tag{29}$$

极值温度法选择感温元件上的温度下降到极值温度 T_m 的时候对热觉传感器的响应输出进行采样计算获得 T_m. 由 (28) 式有

$$T_m = T - \frac{1}{2}(T - T_0)D_1F(L, d, t_s), \tag{30}$$

把 (26) 式代入 (30) 式可求得

$$S_2 = S_1\left[\frac{T - T_0}{2(T - T_m)}F(L, d, t_s) - 1\right], \tag{31}$$

式中 t_s 可以利用 (28) 式的极值条件求得

$$t_s = \frac{Ld}{a_1 \ln[(L+d)/(L-d)]}. \tag{32}$$

由 (32) 式可以看出, t_s 与接触物体的性质无关. 这实际上就是这种计算法下的热觉传感器的响应时间,因此,只要在传感器接触物体后 t_s 时刻获取极值温度 T_m, 利用 (31) 式就可以计算物体的热觉特征量.

3. 分辨率和分辨因素

如果感温元件所能检测的最小温度间隔 δT 是有限的,那么热觉传感器所能区分的最小热觉特征量间隔 δS_2 也是有限的,

$$\delta S_2 = S_1\left[\frac{T_0 - T_m}{2(T - T_m)^2} F(L, d, t_s)\delta T\right]. \tag{33}$$

定义 2. 我们称由 (33) 式定义的 δS_2 为热觉传感器在极值温度计算法下的分辨率.

定义 3. 我们称 $F(L, d, t_s)$ 为热觉传感器在极值温度计算法下的分辨因素. 其物理意义是：分辨因素越大，热觉传感器能区分开的材料越多.

三、实 验 结 果

1. 实验装置和材料制备

实验台是由一台旧货物秤改装的，如图 5 所示. 我们拆除了秤的货物托盘，在托盘的位置安装了一块横板 a，热觉传感器敏感头 c 安装在横板 a 上，被检测的材料均制成厚约 0.5—1cm 的薄板 d，用螺钉拧在顶板 b 上. 当秤坠 e 上没有秤砣时，横板 a 下沉，热觉传感器敏感头与被检测材料不接触；当秤坠 e 上放置适当的秤砣时，横板 a 上升，热觉传感器敏感头与被检测材料接触，同时启动数据采集装置就可以记录下热觉传感器的响应特性.

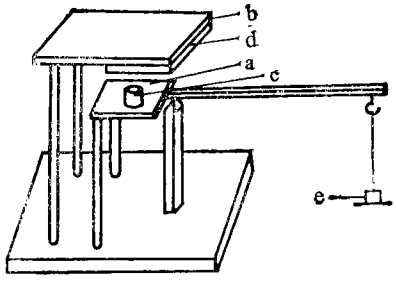

图 5　简易实验台

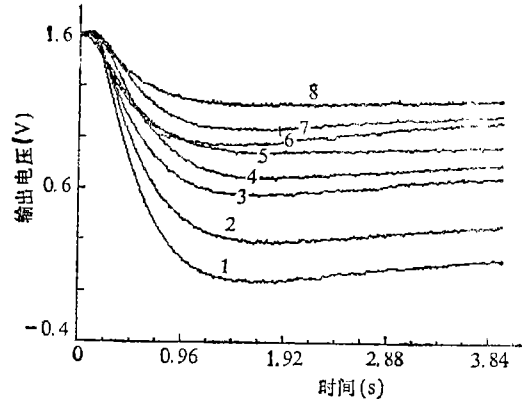

图 6　热觉传感器响应特性实测曲线

(1——铜，2——钢，3——铝，4——敷铜板(正)，5——橡胶，6——聚四氟乙烯，7——敷铜板(反)，8——纸)

2. 响应特性

我们利用本文所提出的热觉传感器实测了对铜、钢、铝、敷铜板等 7 种材料(包括 8 种情况)的响应特性，如图 6 所示.

从图 6 可以看出，对良导热体(金属)，热觉传感器信号变化快，幅度也大；而对非良导热体(非金属)，热觉信号的变化较慢，幅度也小. 这证实了本文第一节中的理论.

3. 重复性

热觉传感器是利用其响应特性计算来获知被检测物体材料的. 因此，热觉传感器对同一种材料的多次响应是否具有较好的重复性显得很重要. 我们做了如下实验：重复地把铜块和敷铜板反面与传感器接触，得到图 7 所示的响应曲线. 从图中可以看出，该传感器的重复性是令人满意的.

4. 材料识别

(1) 材料识别的困难和解决方法　　在理论上，只要获得了热觉传感器对某种材料的温

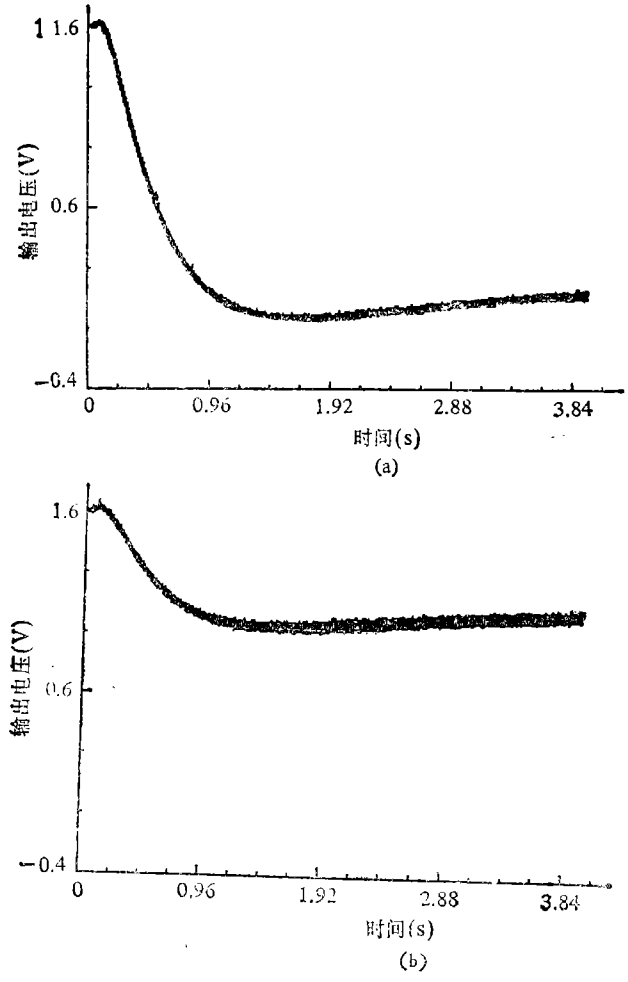

图 7 热觉传感器的重复性

(a) 物体: 铜,次数: 10; (b) 物体: 敷铜板(反),次数: 15

度响应特性,我们就可以用极值温度法计算该材料的热觉特征量,并由此推知材料是什么. 这首先得知道热觉传感器的结构因素,但是,由于目前还没有解决直接测量热觉传感器的结构因素 L, d 的问题,因此要通过计算物体的热觉特征量 S_2 来识别物体材料还有一定的困难. 面对这个困难,我们采用回避计算物体热觉特征量 S_2 的方法,而采用 S_2 的函数,输出电压变化极值 ΔV_m 来识别材料. 因为输出电压的变化与感温元件上的温度变化成正比. 根据实际传感器电路参数推得检测电路输出端电压变化与感温元件上的温度变化满足如下关系

$$\Delta V_{out} = K\Delta T/(R_T + b), \tag{34}$$

式中 K, b 为标定常数, R_T 为感温元件室温下的阻值. 利用 (28) 式可推得输出电压变化极值:

$$\Delta V_m = -\frac{1}{2}K(T - T_0)D_1F(L, d, t_s)/(R_T + b). \tag{35}$$

由上式可以看出, ΔV_m 是物体的热觉特征量 S_2 的函数. 上式是利用 ΔV_m 来识别材料的依

据。

(2) 重复性与分辨率　前面已经讨论了感温元件本身的限制对分辨率的影响。这里我们将考虑检测过程中的随机因素对分辨率的影响。热觉传感器的重复性越好，表明热觉信号的随机性越小，分辨率越高。表 1 列出了热觉传感器对材料的响应特性和相应物理量的均方根误差。显然，如果热觉传感器对一种材料的响应特性的数据已经在对另一种材料响应特性数据的误差范围内，则热觉传感器显然不能区分这两种材料。所以，我们有：

定义 4. 如果热觉传感器靠物理量H识别材料，δ 是H的均方根误差，则称

$$\lambda = \delta \tag{36}$$

为热觉传感器的分辨率。

这种分辨率是实验实测的分辨率，包括了前面讨论的感温元件性能的限制对分辨率的影响。

表 1　热觉传感器对 7 种材料的响应

材　料	室温 (℃)	验证次数	极值电压变化平均值 (V)	极值电压变化误差 (V)	极值电压变化相对误差 (%)	响应时间 t_s (s)	响应时间误差 (s)	响应时间相对误差 (%)
铜	21.0	15	1.62	0.03	1.8	1.13	0.02	1.8
钢	22.0	20	1.37	0.02	2.2	0.97	0.06	6.2
铝	22.0	15	1.07	0.02	1.9	1.03	0.04	3.9
敷铜板(正)	22.0	15	0.97	0.02	2.1	1.02	0.02	2.0
橡胶	21.5	15	0.80	0.02	2.5	0.82	0.03	3.7
聚四氟乙烯	22.0	20	0.72	0.02	2.7	0.74	0.16	21.6
敷铜板(反)	22.0	15	0.64	0.02	3.1	0.82	0.04	4.9
纸	21.0	15	0.44	0.02	4.5	0.58	0.15	25.8

定义 5. 在实际工作中，如果不能采用物体的热觉特征量 S_2 来识别材料，而采用 S_2 的函数

$$H = H(S_2) \tag{37}$$

来识别材料，则称 $H(S_2)$ 为物体的热觉特征量函数。

定义 6. 设 δ 是热觉特征量函数H的标准差，$\bar{H}$ 是H的平均值，λ 由 (36) 式所定义，则利用下面定义的实数集 R 上的区间

$$P(i) = \{H, \bar{H} - \lambda \leqslant H \leqslant \bar{H} + \lambda\}, \tag{38}$$

为相应的物体的热觉特征量函数带。每一种材料对应于一个热觉特征量函数带。i 为不同材料的标记。对于表 1 所示的数据，热觉特征量函数 ΔV_m 由 (35) 式所定义，铜、钢等材料的热觉特征量函数带为：

铜:　$P(1) = [1.59,\ 1.65]$,　(39)

钢:　$P(2) = [1.34,\ 1.40]$,　(40)

铝:　$P(3) = [1.05,\ 1.09]$,　(41)

敷铜板(正):　$P(4) = [0.95,\ 0.99]$,　(42)

橡胶:　$P(5) = [0.78,\ 0.82]$,　(43)

聚四氟乙烯:　$P(6) = [0.70,\ 0.74]$,　(44)

敷铜板(反): $P(7)=[0.62,\ 0.66]$, (45)

纸: $P(8)=[0.42,\ 0.46]$. (46)

定义 7. 设 $P(i)$, $P(j)$ 是两种材料的热觉特征量函数带,如果 $P(i)$, $P(j)$ 的交集满足

$$P(i)\cap P(j)=\phi,\quad \phi\text{ 为空集} \tag{47}$$

则称这两种材料是可分辨的,否则称这两种材料是不可分辨的.

定义 8. 设机器人所要操作的材料有 n 种,且 $P(1)$, $P(2)$,$\cdots$,$P(n)$ 分别为这 n 种材料的热觉特征量函数带. 并定义函数:

$$\sigma_{ij}=\begin{cases}0, & \text{如果 } P(i)\cap P(j)\neq\phi,\\ 1, & \text{如果 } P(i)\cap P(j)=\phi,\end{cases} \tag{48}$$

则称

$$P=\frac{1}{2M}\sum_{ij}\sigma_{ij}\times 100\% \tag{49}$$

为这 n 种材料中的被分辨材料的分辨概率. 式中M为从 n 中取出 2 的组合数,即

$$M=C_n^2. \tag{50}$$

考查 (39)—(46) 式,在输出电压变化极值法下,铜、钢等 7 种材料(包括 8 种情况)的分辨概率 P 为 100%.

从定义 4 到定义 8,我们给出了用计算机处理材料识别问题的数学基础.

四、结 论

1. 本文对热觉传感器的机理做了较详细的研究,分析了热觉传感器敏感头保护层的导热系数、厚度及感温元件的位置等结构因素对热觉传感器的影响. 理论结果表明: 热觉传感器敏感头保护层导热系数越大,热觉传感器响应越快;热觉传感器保护层厚度越薄,热觉传感器的响应越快;感温元件越接近热觉传感器表面,热觉传感器响应越快.

2. 提出了热觉特征量的新概念,揭示了热觉特征量与热觉传感器响应特性的关系,并指出了从热觉传感器的响应特性计算物体的热觉特征量的方法.

3. 采用研制出的热觉传感器,实测了对 7 种材料(包括 8 种情况)的响应特性,并初步讨论了用热觉传感器识别材料的具体方案和总体设想. 实验结果表明,利用热觉传感器识别材料是可行的. 对于输出电压变化极值法,热觉传感器对铜、钢、铝、敷铜板等 7 种材料 (包括 8 种情况)的分辨概率为 100%.

参 考 文 献

[1] Harmon, L. D., *Int. J. Robotics Res.*, 1(1982), 2: 3—32.
[2] Hillis, W. D., *ibid.*, 1(1982), 2: 33—44.
[3] Siegel, D. M., *Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, San Fransico, 1286—1291.
[4] Russel, R. A., *Int. J. Robotics Res.* 4(1985), 3: 35—39.
[5] Gao Guowei & Wang Zicheng, *Proc. SENSORS/CAPTEURS 89 Conference*, Paris, Franch, 160—164.
[6] Gao Guowei, Wang Zicheng & Gao Rui, *Int. J. Sensors and Actuators*, 1990, 23: 886—889.