・武器包装检测・

有限元热分析中空气夹层传热处理方法及其验证

罗群生,史光梅,李明海

(中国工程物理研究院总体工程研究所,绵阳 621900)

摘要:以传热学理论为基础,考虑夹层空气的热传导、对流和辐射,确定夹层空气传热的处理原则。对于较 薄空气夹层,在考虑导热和辐射传热的基础上,作等效导热处理;对于较厚和厚空气夹层,则在考虑边界对 流、辐射传热的基础上,引入中间节点,处理夹层空气与两壁间的传热。在结构有限元热分析中,用此方法 处理空气夹层,温度值计算分析结果与实验实测温度值比较,相符较好。 关键词:有限元;热分析;空气夹层;中间节点;等效导热;结果比较 中图分类号: TB487; TB482 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2011)23-0117-05

Air Interlayer Heat Exchange Treatment Method Using Finite Element Analysis and Its Validation

LUO Qun-sheng, SHI Guang-mei, LI Ming-hai

(Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The treatment principle of air interlayer heat exchange was determined based on heat transfer theory and considering heat conduction, heat convection, and heat radiation. For the thinner air interlayer, equivalent conduction was applied based on heat conduction and heat radiation; for thicker air interlayer, middle nodes was introduced based on allowing a convection surface load and heat radiation. This method can be used to treat heat exchange between air interlayer. The temperature result of simulation was accord with the measured value by experiment.

Key words: finite element; thermal analysis; air interlayer; middle node; equivalent conduction; result comparison

当结构内含有空气夹层时,尽管空气夹层可能较 薄,但空气的导热系数小,所产生的热阻较大,使得夹 层温度梯度相应较大,可能使结构产生较大的热应 力。因此,空气夹层对结构温度场和热应力分析的影 响往往不可忽视。

有限元法广泛用于不规则形状结构的温度场和 热应力分析。对于一般固体单元,不能同时考虑和处 理空气夹层导热、对流和辐射传热,因此,需要以传热 学理论为基础,针对不同的具体情况,对空气夹层传 热作适当处理,以确定单元的传热参数。

笔者以含有内热源及较薄和厚空气夹层的多层 组合结构温度场为研究对象,以传热学理论为基础,

确定有限元温度场分析中较薄、较厚和厚空气夹层的 处理方法,并将计算分析结果温度与实验实测温度进 行比较。

空气夹层传热模型 1

1.1 较薄空气夹层

对于结构中间较薄的空气夹层,空气的运动受到 壁面的限制,空气的加热和冷却在夹层内同时进行, 因此夹层的壁面必然有高温和低温之分,设温度分别 为 T_b 和 T_c,见图 1。设图中未注明温度的另外 2 个 壁是绝热的。在此情况下,夹层内空气的流动主要取

收稿日期: 2011-07-08

作者简介:罗群生(1955-),男,四川剑阁人,中国工程物理研究院总体工程研究所研究员,主要研究方向为装备环境试验与热分 析等。





决于以夹层厚度为特征的 Gr 数:

 $G_{\rm r} = \frac{g\beta(T_{\rm h} - T_{\rm c})\delta^3}{n^2}$ (1)

式中: G_r 为格拉晓夫(Grashof)数;g为重力加速 度 (m/s^2) ; β 为空气的体膨胀系数(1/T); T_h 空气夹 层高温壁温度(K);T。为空气夹层低温壁温度(K);δ 为空气夹层厚度(m); v为空气的运动粘度 (m^2/s) 。

对于竖直空气夹层 Gr≤2 860 和对于水平夹层 (底面为热面) $G_r \leq 2430$ 时,夹层内空气流动尚难展 开,夹层中空气的热量传递纯粹靠空气导热[1]。实际 上,对于空气夹层,在室温附近,只要空气夹层较薄() 尺寸与热边界层厚度相当),无论是竖直夹层还是水 平夹层,夹层中空气的热量传递都可以按纯粹导热处 理。

对于较薄的空气夹层,夹层中的热量传递除了空 气导热以外,还有两壁之间的辐射传热。这样,通过 较薄空气夹层传递的热流密度 q 为传导热流密度 q。 和辐射热流密度 q_r 之和,即:

$$q = q_{\rm c} + q_{\rm r} \tag{2}$$

$$q_{\rm c} = \frac{\Lambda_{\rm e}}{\lambda} (T_{\rm h} - T_{\rm c}) \tag{3}$$

$$q_{\rm r} = \varepsilon_{\rm s} \sigma_0 (T_{\rm h}^4 - T_{\rm c}^4) \tag{4}$$

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_s} - 1} \tag{5}$$

式(2)-(5)中:q为通过空气夹层两壁间传递的 总热流密度(W/m²); q。为通过空气导热传递的热流 密度 $(W/m^2); q_r$ 为通过辐射传热传递的热流密度 (W/m²);λ。为空气的导热系数(W/(m・K));δ为空 气夹层厚度(m); T_k 为空气夹层高温壁温度(K); T_k 为空气夹层低温壁温度(K); ϵ_s 为系统黑度; ϵ_1 , ϵ_2 分

别为空气夹层高温壁面、低温壁面黑度;σ。为斯蒂芬-玻尔茲曼(Stefan-Boltzmann)常数, $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8}$ $W/(m^2 \cdot K^4)_o$

从式(2)-(5),可得到:

$$q = \frac{\lambda_{c}}{\delta} (T_{h} - T_{c}) + \epsilon_{s} \sigma_{0} (T_{h}^{4} - T_{c}^{4}) = \frac{\lambda_{c} + \lambda_{r}}{\delta} (T_{h} - T_{c})$$
(6)

$$\exists \Pi : q = \frac{\lambda_c}{\delta} (T_h - T_c)$$
 (7)

$$\lambda_{\rm e} = \lambda_{\rm c} + \lambda_{\rm r} \tag{8}$$

$$\lambda_{\rm r} = \varepsilon_{\rm s} \delta \sigma_0 (T_{\rm h}^2 + T_{\rm c}^2) (T_{\rm h} + T_{\rm c}) \tag{9}$$

$$\lambda_{\rm r} = 4\varepsilon_{\rm s} \delta\sigma_0 (T_{\rm m}^2 + \Delta T^2) T_{\rm m}$$
(10)

式(6)-(10)中: λ ,为空气夹层的等效导热系数 $(W/(m \cdot K)); \lambda_r$ 为空气夹层的等效辐射导热系数 $(W/(m \cdot K)); T_m = (T_h + T_c)/2$,为空气夹层两壁的 平均温度(K): $\Delta T = (T_{\rm h} - T_{\rm c})/2({\rm K})$ 。

考虑到通常 $T_{\rm m} \gg \Delta T$,略去 ΔT^2 ,可得:

$$\lambda_{\rm e} = \lambda_{\rm c} + 4\varepsilon_{\rm s}\delta\sigma_0 T_{\rm m} \tag{11}$$

在有限元热分析时,以T__作为空气夹层的定性 温度,根据式(11),用插值法确定空气夹层的等效导 热系数,就能比较方便地处理较薄空气夹层的传热问 题,从而求出壁面温度。

1.2 较厚空气夹层

对于结构中间较厚空气夹层,当竖直空气夹层 G_r ≥2860 和当水平夹层(底面为热面) G_r ≥2 430 时, 夹层开始形成自然对流,并且随着 G, 数的增加,对流 的展开越来越剧烈,当G,达到一定数值时会出现从 层流向湍流的过渡和转变,因此,对较厚空气夹层进 行热分析时,需要考虑空气在夹层内的自然对流传热 和夹层两壁之间的辐射传热。

对空气在夹层内的自然对流传热,可用以下计算 关联式[1-2]。

竖直夹层(设夹层厚度为δ,δ/H≤0.33):

 $N_u = 0.197 (G_r P_r)^{1/4} \left(\frac{\delta}{H}\right)^{1/9}$, (8.6×10³ $\leq G_r \leq$ 2.9×10^5) (12)

$$N_{u} = 0.073 (G_{r} P_{r})^{1/3} \left(\frac{\delta}{H}\right)^{1/9}, (2.9 \times 10^{5} \leqslant G_{r} \leqslant 6 \times 10^{7})$$
(13)

 1.6×10^7)

水平夹层(底面向上散热)[3]:

 $N_u = 0.059(G_r P_r)^{0.4}$, $2.4 \times 10^3 \leq G_r \leq 1.0 \times 10^4$ (14)

118

 $N_u = 0.212 (G_r P_r)^{1/4}$, $1.0 \times 10^4 \leq G_r \leq 4.6 \times 10^5$ (15)

 $N_u = 0.061 (G_r P_r)^{1/3}$, $G_r \ge 4.6 \times 10^5$ (16)

式(12)-(16)中: $N_u = \alpha \delta/\lambda$ 为努塞尔(Nusselt) 数, λ 为夹层空气的导热系数(W/(m·K)); α 为夹层 空气与壁面间的对流传热系数(W/(m²·K)); δ 为空 气夹层厚度(m);H 为竖直夹层高度(m); $P_r = v/a$ 为 空气的普朗特(Prandlt)数;a 为空气的热扩散率(m²/ s);定性温度取($T_h + T_c$)/2,(K); G_r 数中的线性尺寸 取夹层的厚度 δ (m)。

对于具体的工程问题,结构空气夹层的厚度和高度是已知条件。在室温附近,空气的物性参数可近似认为是常数。这样,根据上面各式,可以确定夹层空气的对流传热系数 α 只是 ΔT 的函数,即:

$$=C(\Delta T)^{m} \tag{17}$$

式(17)中的C和m由式(12)-(16)确定。

工程上用有限元法分析结构所含较厚空气夹层 的自然对流传热和辐射传热时,为了便于用对流、辐 射边界单元处理夹层空气传热问题,引入中间节点, 认为中间节点代表一个中间壁,中间壁的温度 T_m 就 是夹层两壁的平均温度,即 T_m=(T_h+T_c)/2。把夹 层空气对流传热分解为高温壁与温度为 T_m 的中间 壁之间及温度为 T_m 的中间壁与低温壁之间的对流 传热和辐射传热。

在夹层内,空气对流传热的热流密度不变,即:

$$q_{\rm h,c} = q_{\rm h,T_m} = q_{T_m,c}$$
 (18)

$$\alpha(\Delta T) = \alpha_{h,T_{\rm m}}(\Delta T_1) = \alpha_{T_{\rm m},c}(\Delta T_2)$$
(19)

$$\alpha_{\mathrm{h},\mathrm{T}_{\mathrm{m}}} = \frac{\alpha(\Delta T)}{\Delta T_{\mathrm{1}}} \tag{20}$$

$$\alpha_{\mathrm{T}_{\mathrm{m}},\mathrm{c}} = \frac{\alpha(\Delta T)}{\Delta T_2} \tag{21}$$

式(18)-(21)中: $q_{h,c}$ 为夹层空气对流传热的热 流密度(W/m²); q_{h,T_m} 为高温壁与温度为 T_m 的空气 之间对流传热的热流密度(W/m²); $q_{T_m,c}$ 为温度为 T_m 的空气与低温壁之间对流传热的热流密度(W/m²);a为夹层空气对流传热系数(W/(m² · K)); a_{h,T_m} 为高温壁与温度为 T_m 的空气之间的对流传热 系数(W/(m² · K)); $a_{T_m,c}$ 为温度为 T_m 的空气与低 温壁之间的对流传热系数(W/(m² · K)); $\Delta T_1 = T_h$ $-T_m, \Delta T_2 = T_m - T_c$ 。

从上述定义可知, $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T/2$ 。综上所述,并利用式(17)可得:

$$\alpha_{\mathrm{h},\mathrm{T}_{\mathrm{m}}} = 2^{m+1} C (\Delta T_1)^m \tag{22}$$

 $\alpha_{\mathrm{T}_{\mathrm{m}},\mathrm{c}} = 2^{m+1} C (\Delta T_2)^m \tag{23}$

在进行含有较厚空气夹层结构的有限元热分析时,引入中间节点,建立对流边界、辐射单元,据(22)、(23)式,用插值法确定 $a_{h,T_m} \sim \Delta T_1$ 和 $a_{T_m,c} \sim \Delta T_2$ 之间的函数关系,就可以比较方便地处理较厚空气夹层的对流传热问题,从而求解出两壁温度。

对于较厚空气夹层两壁之间的辐射传热,认为两壁面积相等,中间节点代表一个中间壁,其温度为 *T*_m,中间壁为黑体,高温壁与中间壁之间的辐射传热 热流密度等于中间壁与低温壁之间的辐射传热热流 密度,即高温壁通过辐射传热传给中间壁的热流全部 由中间壁传給了低温壁,中间壁与两壁之间的辐射角 系数为1,高温壁和低温壁的黑度由实际壁面状况确 定,壁面温度为待求温度。

1.3 厚空气夹层

当结构内空气夹层足够厚(如竖直夹层厚度与高度之比大于 0.33)时,稳态或准稳态情况下,两壁间空气温度在很薄的热边界层以外实际上可以认为是常数,两壁与夹层空气的对流传热属于大空间自然对流传热。

常压下大空间空气的自然对流传热准则方程式 为^[4]:

$$N_u = C(G_r P_r)^m \tag{24}$$

式中:m为指数,取决于流动状态;C为系数,与 加热表面的形状与位置有关。

以热边界层平均温度为定性温度,对各种表面定型尺寸的取法及系数 C 见表 1。

表 1 空气自然对流时式(25)中的常数值

Tab.1 Constant value of formula (25) under natural convection

几何形状	应用范围	С	A	m	L
竖直平板	$10^4 < G_{\rm r} P_{\rm r} < 10^9$	0.59	1.42	1/4	高度
与竖圆柱	$10^9 < G_r P_r < 10^{12}$	0.10	1.31	1/3	1
水平圆柱	$10^3 < G_r P_r < 10^9$	0.53	1.32	1/4	直径
	$10^9 < G_{\rm r} P_{\rm r} < 10^{12}$	0.13	1.24	1/3	1
水平平板热面	$10^5 < G_{\rm r} P_{\rm r} < 2 \times 10^7$	0.54	1.32	1/4	边长
朝上或冷面朝下	$2 \times 10^7 < G_{\rm r} P_{\rm r} < 3 \times 10^{10}$	0.14	1.52	1/3	1
水平平板冷面	$2 \times 10^5 \swarrow C R \checkmark 2 \times 10^{10}$	0.97	0 50	1/4	油匕
朝上或热面朝下	$3 \wedge 10 \langle \mathbf{O}_{\mathbf{r}} \mathbf{P}_{\mathbf{r}} \langle 2 \wedge 10 \rangle$	0.27	0.39	1/4	四大

为了便于计算,可将式(24)中的物性参数归并到 一起,得出对流传热系数α的简化表达式为;

$$\alpha = A \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^m$$

式中:A 和 m 为取决于壁面几何形状和流动条件的常数;ΔT 为空气温度与壁面温度之差;L 为定型 尺寸(m),也是壁面几何形状和流动的函数。

为了方便使用,将式(25)中的数值^[5]列于表1。

在处理球形和方形固体表面的自然对流时,金 (King)^[6]建议应用水平圆柱的表达式,建议包括应了 由下式确定的修正的定型尺寸 *L*:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_{\text{KW}}} + \frac{1}{L_{\text{KW}}} \tag{26}$$

式中: $L_{x_{\Psi}}$ 为结构水平尺寸(m); L_{Se} 为结构竖直 尺寸(m)。显然,对于圆球,L就变成了D/2。

在进行含有厚空气夹层结构的有限元热分析时, 与处理较厚空气夹层类似,引入中间节点,并设节点 温度为大空间空气温度 T_i ,且认为 T_i 即为对流源的 温度,建立对流边界单元,并根据结构的几何形状和 流动条件(G_rP_r 的取值范围),按表 1 确定所分析结 构的定型尺寸和式(25)中的常数,用插值法确定温度 为 T_i 的夹层空气与壁面间的对流传热系数与 ΔT 之 间的函数关系,从而求出壁面温度和空气温度 T_i 。

对于厚空气夹层两壁之间的辐射传热,可以认为 中间节点温度 T_m 即为辐射源温度,辐射源与两壁之 间进行辐射传热,其辐射角系数为 1,壁面黑度由实 际壁面状况确定,壁面温度为待求温度。

2 实例分析与实验验证

用上述处理结构空气夹层的方法,计算分析了多 例含空气夹层结构的温度场,计算分析结果与实验结 果相符较好^[6]。

试验装置为含内热源多层结构,结构中部为多层 圆柱体,其长度为160 mm;结构两端为多层球冠。结 构总长310 mm,内层为厚2 mm 的钢壳,钢壳内表面 均布电加热绳模拟内部热源,钢壳外面为厚25.2 mm 保温材料,保温材料外面有3.5 mm 厚的合金钢外 壳,合金钢圆柱外壳直径260.2 mm。保温材料内壁 与钢壳之间和保温材料外壁与合金钢壳内壁之间有 0.35 mm 的空气夹层。圆柱壳内部空间用耐热纤维 填满,以消除空气对流传热。试验装置通过支架水平 置于试验箱中部。试验箱为内腔尺寸0.9 m×0.9 m ×1 m(宽×高×深)及相应外形尺寸1.1 m×1.1 m× 1.2 m 的长方体。试验箱内壁为5 mm 厚的不锈钢板, 外壁为2 mm 厚镀锌钢板,中间为93 mm 厚的聚氨酯 泡沫保温层。试验箱置于温度为 20 ℃的厂房内。

由于试验装置支架与试验装置之间接触面积很小,且用隔热垫隔热,忽略支架对传热的影响。电加 热绳出线孔仅 ∳4 mm,忽略其对传热的影响。认为 从初始时刻开始,电加热绳发出的热量通过试验装置 和试验箱各层向恒温 20 ℃的厂房空气传递,最终达 到温度稳定。装置各种材料的导热系数和模拟内部 热源电加热功率已知(具体数据略)。

对于试验装置保温材料内、外的空气夹层,其厚 度仅为 0.35 mm,经估算,其 G_{ro}≪2 430,因此,仅需 考虑热传导和辐射传热。事先用热像仪测出两壁面 的黑度,应用式(11),得出空气夹层的等效导热系数 与温度的关系,见表 2。

表 2 保温材料内、外空气夹层等效导热系数与温度的关系 Relation between temperature and equivalent thermal conductivity of insulation material with air interlayer inside and outside

$T/^{\circ}\mathbb{C}$	0	10	20	30	40	50
$\lambda_{ m e}/$	0 024	70 025	10 026	20 027	10 020	10 020 0
$(\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{\hat{C}}^{-1})$	0.024	10.025	40.020	50.027	10.028	10.020 0

分析试验装置与试验箱内空气传热,以圆柱直径 0.2602m为定型尺寸,将试验装置视为水平圆柱,经 估算,在室温附近,其 $G_{rt}P_r$ 值约为 $10^7 \sim 10^8$ 量级,符 合水平横圆柱在大空间的自然对流条件。利用式 (25)和表1中水平圆柱的常数A=1.32,b=1/4,计 算出试验装置外表面与试验箱内空气之间的平均对 流系数 α 与其温差 ΔT 的关系,见表 3。

表 3 试验装置外表面与试验箱内空气之间的平均自然对流系数 Tab.3 Average natural convection coefficient between testing facility outside surface and internal air of the chamber

$\Delta T/$ °C	0.000 1	1	3	10	20	50
$(\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{C}^{-1})$	0.184 8	1.848	2.432	3.286	3.908	4.914

用热像仪测得试验装置外表面辐射系数(黑度) 为 0.6,取形状系数为 1。

试验箱空气与试验箱内壁之间通过对流、辐射传 热。分析试验箱内空气与内壁之间的对流传热时,视 其为方形固体表面自然对流传热。取 $L_{xxx} = 1$ m, $L_{ga} = 0.9$ m,利用式(26)确定其定型尺寸 L =0.473 6 m。经估算,在室温附近,其 G_rP_r 值约为10⁷ 量级,符合自然对流条件。利用式(25)和表1中水平 圆柱的常数 A = 1.32, b = 1/4,计算出试验内壁与试 验箱内空气之间的平均对流系数 α 与其温差 Δt 的关

系,见表4。

表 4 试验箱内壁面与箱内空气之间的平均自然对流系数

Tab.4 Average natural convection coefficient between

internalface and internal air of the chamber

$\Delta T/^{\circ} \mathbb{C}$	0.000 1	1	3	10	20	50
α/	0 180 2	1 802	2 400	2 264	4 001	5 021
$(W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1})$	0.103 2	1.032	2.430	3.304	4.001	0.001

事先用热像仪测得试验箱内壁面辐射系数(黑度)为 0.8,取形状系数为 1。

用同样的方法,取试验箱外壁水平尺寸 1.2 m, 竖直尺寸 1.1 m,确定试验箱外壁对流传热的定型尺 寸为 L=0.573 9 m,计算出试验箱外壁与试验箱外 厂房空气之间的平均对流系数 α 与其温差 ΔT 的关 系,见表 5。

表 5 试验箱外壁面与箱外空气之间的平均自然对流系数

Tab.5 Average natural convection coefficient between

outside surface and outside air of the chamber

$\Delta T/^{\circ} \mathbb{C}$	0.000 1	1	3	10	20	50
α/	0.18041	. 804	2.374	3.208	3.815	4.797
$(\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{C}^{-1})$						

事先用热像仪测得试验箱外壁面辐射系数(黑度)为 0.9,取形状系数为 1。

考虑试验装置和试验箱的对称性,建立试验装置 和试验箱的 1/2 模型,生成各层的内部热传导单元; 引入中间节点,建立试验箱内空气与试验装置外壁以 及试验箱内空气与试验箱内壁之间的对流、辐射边界 单元;建立试验箱外壁与厂房空气之间的对流、辐射 单元。利用已知的各层材料的导热系数、模拟内热源 热生成率和上述等效导热系数、对流系数、辐射系数、 形状系数,用 ANSYS 程序计算出厂房温度 20 ℃条 件下试验装置和试验箱各层的温度分布,计算结果与 试验实测数据见表 6。

表 6 试验装置和试验箱各层稳态温度主要数据 Tab.6 Steady state temperature data

of testing facility and the chamber

	サロ神仏	计算温度 实测温度			
序亏	广商静位	/°C	/℃		
1	试验箱外厂房环境空气	20.0	20.1		
2	试验箱内空气	23.1	22.9		
3	试验装置合金钢壳圆柱段赤道外表面	27.9	27.8		
4	试验装置钢壳圆柱段赤道外表面	31.7	31.8		

从表 6 可知,各层计算温度与实测温度相符较 好。

3 结论和建议

经过对有限元热分析中结构空气夹层传热处理 方法研究和实例验证,可以得出如下结论。

 1) 对于结构中薄空气夹层(竖直空气夹层 G_n≪ 2 860,水平夹层(底面为热面)G_n≪2 430),进行结构 有限元热分析时,可以作等效导热处理,其等效导热 系数按式(11)用插值法确定。

2) 对于结构中较厚空气夹层(竖直空气夹层 G_n) ≥2 860, ∂/H≤0.33; 水平夹层(底面为热面)G_n≥ 2 430),进行结构有限元热分析时,可以在考虑夹层 对流、辐射传热的基础上,引入中间温度节点,代表一 个虚拟的表面为黑体的中间壁,建立夹层空气与两壁 的对流、辐射边界单元,按式(22)-(23),用插值法确 定中间壁代表的夹层空气与两壁定之间的对流传热 系数与温差的关系,结合已知壁面辐射黑度和边界、 初始条件,求解两壁温度。

3) 对于常压下结构中厚空气夹层,进行结构有限元热分析时,可按大空间空气自然对流传热处理, 在考虑夹层对流、辐射传热的基础上,引入代表夹层空气温度的中间温度节点,建立夹层空气与两壁的对流、辐射边界单元,根据结构壁面几何形状和流动条件,确定式(25)中的定型尺寸和常数,并用插值法确定夹层空气与两壁之间的对流传热系数与温差的关系,结合已知壁面辐射黑度和边界、初始条件,求解出两壁温度。

根据多年热分析工作体会,建议如下。

1) 对于厚空气夹层,当空气温度与壁面温度差 值较小,且分析精度要求较高时,不宜直接采用表 1 中的常数 A,而应根据预估的定性温度,从式(24)计 算出常数 A。必要时,可根据初步分析结果,修正定 性温度,从而重新确定 A 值。

2) 根据前面各个公式确定的对流传热系数是壁面的平均值,计算分析所得到的温度对于整个壁面平均来说是正确的,往往能够满足工程要求,但具体到壁面的每个点上,可能与实际值有所差异。如果要求比较准确计算分析出壁面上各个点温度,则应根据传热学理论,精确确定局部传热系数。

4 结论

伪装评估技术是随着探测目标的传感器技术发展而发展的。面向目标伪装反机载/星载 SAR 侦察性能评估的需求,笔者提出了基于 GB-SAR 的地面目标伪装性能评估方法,分析了 GB-SAR 采用的几种平台形式,并给出了一种典型 GB-SAR 系统的组成;着重分析了基于目标特性的伪装评估方法,指出了该方法是一种具有普适性的适用于多种伪装设备的评估方法。

参考文献:

- [1] 李应岐,宋建社.SAR 成像技术与军事伪装对策研究 [J].电子对抗技术,1999,14(6):5-9.
- [2] 康青,姜双斌.合成孔径雷达成像及工程伪装发展趋势

[J]. 后勤工程学院学报,2008,24(4):87-91.

- [3] 郭宝华,马宏亮,陈兴刚.军品隐身防护包装材料应用研 究[J].包装工程,2005,26(6):41-46.
- [4] http://web.archive.org/web/20070707093007/http://
 www.afit.edu/cmsr/.
- [5] ZHOU Z S, BOERNER V, SATO M. Development of a Ground-Based Polarimetric Broadband SAR System for Non-invasive Ground-truth Validation in Vegetation Monitoring, IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9):1803-1810.
- [6] 黄培康,殷红成,许小剑.雷达目标特性[M].北京:电子 工业出版社,2008.
- [7] CHRISTIAN I, MARC A J, UWE A, et al. Characterization of Target Camouflage Structures by Means of Different Microwave Imaging Procedures [J]. Proc of SPIE Radar Sensor Technology XIII, 2009, 7308, 19-1: 13.

(上接第116页)

美军已将一半以上的军事物流工作承包给了各地方 物流企业。为了应对未来的信息化战争,亟需建立军 民融合、协调发展的军事物流体系。具体做法是,依 托军队自身技术力量,搞好物流系统顶层设计、建设 规划以及指挥控制系统等涉密程度较高的项目建设 工作;将军地通用物资、通用技术交由地方物流企业 进行保障;建立顺畅高效的军地沟通协调机制,充分 利用好地方物流资源。平时,准确掌握地方的物流资 源,协调军地物流系统的运营;战时,实施快速物流动 员,加快平战转换速度,用军民一体的"大物流"保障 作战需要;借鉴跨国大型企业的先进物流理念,引进 先进物流信息技术,采用先进物流成果,合作开发, "借梯上楼",努力推动现代物流建设实现跨越式发 展。打破军地界限,将军事物流建设与地方物流建设 紧密结合,加快军地物资产品资源、生产能力资源、物流配送资源的融合,推行军地联储、联运、联供,不断扩大供应商直达配送范围,形成相互衔接、整体联动、优势互补的军事物流体系。

参考文献:

- [1] 尤培翔.构建一体化军事物流系统[J].南开物流网.
- [2] 周林和.积极推进我军现代军事物流体系建设[N].解放 军报,2009-03-19.
- [3] 杨建勇.现代战争:信息化军事物流大变革[N]. 解放军 报,2005-11-02.
- [4] 构建高效的军事物流体系.中国交通技术网.
- [5] 军事物流插上"信息化"翅膀.现代物流报.

(上接第121页)

参考文献:

- [1] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].第4版.北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 张正荣. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 1982.
- [3] INCROPERA F P. De Wite D P Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M]. 5thed John Wiley & Sons, 2002.
- [4] 陶文铨. 传热学基础[M]. 北京:电力工业出版社, 1981.
- [5] 威尔蒂JR.工程传热学[M].任泽霈,罗蒂庵,译.北京: 人民教育出版社,1982.
- [6] 李明海,翟贵立,宋耀祖,等.抗事故包装箱热防护结构 的设计及其性能分析[J].包装工程,2000,21(2):5-8.