变比热斜冲波解析解*

崔　济　亚

（北京航空航天大学动力系，北京，100083）

摘　要：首次推导了变比热斜冲波的基本公式及其衍生形式，分别就求解转角、波角、最大尖劈角、最小马赫数等典型问题，拟就解法及双精度计算机程序，一一作出例题，进入了变比热斜冲波园地。可以预见到的深入研究问题不少，尚待进一步探索。

主题词：气动热化学，计算流体动力学，斜激波，数值解

分类号：V433.11

ANALYTICAL SOLUTION OF VARYING SPECIFIC HEAT OBLIQUE SHOCK WAVES

Cui Jiya

(Department of Power, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing, 100083)

Abstract: This paper first derives a set of basic formulae of varying specific heat oblique shock waves. For various fundamental problems of solving turn angle, shock angle, maximum wedge angle and minimum Mach number of shock attachment, analytical methods are proposed with illustrative examples. Thus the analytical solution of varying specific heat oblique shocks has been commenced without much difficulty, nevertheless, further deepening problems remain to be tackled.

Keywords: Aerothermochemistry, Computation fluid danamics, Oblique blast, Numerical solution

1　前　言

作者在推导出变比热气动函数之后，用于正冲波解析解[1]，随后又作出不牵动总温的改进

* 本文1993年12月18日收到，系国家自然科学基金资助项目

解析解[2,3]，很自然地希望向斜冲波推广延伸。本文即是超音流流过尖劈时斜冲波参数的基本解析解，包括公式推导、计算方法、算例及讨论。

可以想象，斜冲波参数包括波角、转角或尖劈角、最大尖劈角及最小马赫数等，比正冲波要复杂的多。但有了变比热气动函数之后，这些问题都已初步解决。

2 公式推导

在本文推导中，要用到反映变比热的下列参数：

总温到静温平均比热 $\bar{c}_p$ 的比热比 k：

$$\frac{k}{k-1}R = \bar{c}_p$$

总温到临界温度平均比热 $\bar{c}_{pv}$的比热比 k_v：

$$\frac{k_v}{k_v-1}R = \bar{c}_{pv}$$

临界、静温时比热 c_{pk}的比热比 k_k、k_T：

$$\frac{k_k}{k_k-1}R = c_{pk}, \quad \frac{k_T}{k_T-1}R = c_{pT}$$

k 组合数 ε_v、ε、ε_T

$$\varepsilon_v = 1 + \frac{k_v-1}{2}\frac{k_k}{k_v},$$

$$\varepsilon = \frac{k-1}{2}\frac{k_k}{k}, \quad \varepsilon_T = \frac{k-1}{2}\frac{k_T}{k}$$

斜冲波前后的气流速度及方向角，如图 1 表示，图中 α 为波角，δ 为转角。

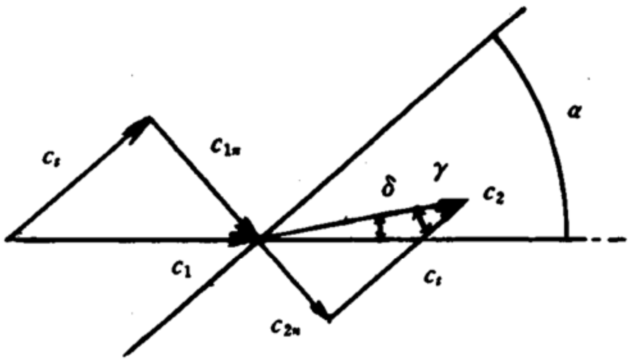

图 1 斜冲波前后速度

2.1 基本公式

此式由基本方程出发，全面概括了波角 α 与转角 δ 间的关系，但更便于已知 α 时求 δ。

由连续方程及动量方程

$$\rho_1 c_{1n} = \rho_2 c_{2n} \tag{i}$$

$$p_2 - p_1 = \rho_1 c_{1n}(c_{1n} - c_{2n}) \tag{ii}$$

可有

$$\frac{p_1}{\rho_1} + c_{1n}^2 = \frac{c_{1n}}{c_{2n}}\left(\frac{p_2}{\rho_2} + c_{2n}^2\right) \tag{a}$$

由能量方程及状态方程可有

$$\frac{c_1^2}{2} = i^* - i_1 = \frac{k_1}{k_1 - 1}R(T^* - T_1) \tag{iii}$$

及
$$\frac{p_1}{\rho_1} = RT^* - \frac{k_1 - 1}{k_1}\left(\frac{c_{1n}^2}{2} + \frac{c_t^2}{2}\right)$$

同理
$$\frac{p_2}{\rho_2} = RT^* - \frac{k_2 - 1}{k_2}\left(\frac{c_{2n}^2}{2} + \frac{c_t^2}{2}\right) \tag{b}$$

将（b）式代入（a）得：

$$RT^* + \frac{k_1+1}{k_1}\frac{c_{1n}^2}{2} - \frac{k_1-1}{k_1}\frac{c_t^2}{2} = \frac{c_{1n}}{c_{2n}}\left(RT^* + \frac{k_2+1}{k_2}\frac{c_{2n}^2}{2} - \frac{k_2-1}{k_2}\frac{c_t^2}{2}\right)$$

运用变比热函数关系 $RT^* = RT_k\varepsilon_v = a_k^2\varepsilon_v/k_k$，上式化成

$$c_{2n}a_k^2\varepsilon_v/k_k + \frac{k_1+1}{k_1}\frac{c_{1n}^2}{2}c_{2n} - \frac{k_1-1}{k_1}\frac{c_t^2}{2}c_{2n} = c_{1n}a_k^2\varepsilon_v/k_k + \frac{k_2+1}{k_2}\frac{c_{2n}^2}{2}c_{1n} - \frac{k_2-1}{k_2}\frac{c_t^2}{2}c_{1n}$$

经过通除 a_k^3 并整理得：

$$\frac{k_2+1}{2k_2}\lambda_{1n}\lambda_{2n}^2 - \left(\frac{k_1+1}{2k_1}\lambda_{1n}^2 - \frac{k_1-1}{2k_1}\lambda_t^2 + \frac{\varepsilon_v}{k_k}\right)\lambda_{2n} + \left(\frac{\varepsilon_v}{k_k}\lambda_{1n} - \frac{k_2-1}{2k_2}\lambda_{1n}\lambda_t^2\right) = 0 \tag{1}$$

此二次方程的合用解是

$$\lambda_{2n} = \frac{\left(\frac{k_1+1}{2k_1}\lambda_{1n}^2 - \frac{k_1-1}{2k_1}\lambda_t^2 + \frac{\varepsilon_v}{k_k}\right)}{\frac{k_2+1}{k_2}\lambda_{1n}} - \frac{\sqrt{\left(\frac{k_1+1}{2k_1}\lambda_{1n}^2 - \frac{k_1-1}{2k_1}\lambda_t^2 + \frac{\varepsilon_v}{k_k}\right)^2 - 2\,\frac{k_2+1}{2k_2}\lambda_{1n}^2\left(\frac{\varepsilon_v}{k_k} - \frac{k_2-1}{2k_2}\lambda_t^2\right)}}{\frac{k_2+1}{k_2}\lambda_{1n}} \tag{1$'$}$$

有了这个基本公式，$\lambda_2 = \sqrt{\lambda_{2n}^2 + \lambda_t^2}$ 及 $\gamma = \mathrm{tg}^{-1}\frac{\lambda_{2n}}{\lambda_t}$ 可求，气流转角 $\delta=\alpha-\gamma$ 也就求得，但有一个条件，即 $T_2 = (1 - \frac{k_2-1}{2}\frac{k_k}{k_2}\lambda_2^2/\varepsilon_v)T^* = (1 - \varepsilon_2\lambda_2^2/\varepsilon_v)T^*$ 与总温 T^* 求出的比热比 k_2，必须迭代到与前次所设值符合。

这个基本公式，在定比热即 $k=k_1=k_2$ 时，经过仔细演化，就回归到常见的定比热式

$$\lambda_{2n} = \frac{1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda_t^2}{\lambda_{1n}}$$

这也从另一侧面，证明变比热（1）式无误。

2.2 衍生公式

在上述基本公式中，波角 α 与转角 δ 之间的关系，比较隐含，特别是当已知转角或尖劈角

δ 而求波角 α 时，很不明朗，为此还须加以引伸。

将下列速度系数分量

$$\lambda_t = \lambda_1\cos\alpha \qquad \lambda_{1n} = \lambda_1\sin\alpha \qquad \lambda_{2n} = \lambda_1\cos\alpha\,\mathrm{tg}(\alpha - \delta)$$

代入（1）式并通除以 λ_1^3 得出：

$$\frac{k_2+1}{2k_2}\sin\alpha[\cos\alpha\ \mathrm{tg}(\alpha-\delta)]^2 - \Big(\frac{k_1+1}{2k_1}\sin^2\alpha - \frac{k_1-1}{2k_1}\cos^2\alpha$$

$$+ \frac{\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2}\Big)[\cos\alpha\ \mathrm{tg}(\alpha-\delta)] + \frac{\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2}\sin\alpha - \frac{k_2-1}{2k_2}\sin\alpha\cos^2\alpha = 0 \qquad (2)$$

给定转角 δ，这个式子已经可仿（1）式解法求出斜冲波的强弱两解 α_s、α_w，但因 α 还夹在未知量的两因子 cos 与 tg 之中，还不够明朗，仍待简化。

经过尝试，在较繁杂的运算后，毕竟得到较大的化简：

令 $A=\mathrm{tg}\delta$，引入

$$\mathrm{tg}(\alpha-\delta) = \frac{\mathrm{tg}\alpha - \mathrm{tg}\delta}{1+\mathrm{tg}\alpha\mathrm{tg}\delta} = \frac{\sin\alpha - A\cos\alpha}{\cos\alpha + A\sin\alpha}$$

后，（2）式成为：

$$\frac{k_2+1}{2k_2}\sin\alpha\cos^2\alpha(\sin^2\alpha - 2A\sin\alpha\cos\alpha + A^2\cos^2\alpha) - \Big(\frac{k_1+1}{2k_1}\sin^2\alpha\cos\alpha$$

$$- \frac{k_1-1}{2k_1}\cos^3\alpha + \frac{\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2}\cos\alpha\Big)(\sin\alpha\cos\alpha - A^2\sin\alpha\cos\alpha + A\sin^2\alpha - A\cos^2\alpha)$$

$$+ \Big(\frac{\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2}\sin\alpha - \frac{k_2-1}{2k_2}\sin\alpha\cos^2\alpha)(\cos^2\alpha + 2A\sin\alpha\cos\alpha + A^2\sin^2\alpha) = 0$$

上式各项通乘以 2 后，分解展开。为清晰起见，在相消各项下方划同样符号线表示：

$$(\sin^3\alpha\cos^2\alpha - 2A\sin^2\alpha\cos^3\alpha + A^2\sin\alpha\cos^4\alpha) + \frac{1}{k^2}(\sin^3\alpha\cos^2\alpha - 2A\sin^2\alpha\cos^3\alpha$$

$$+ A^2\sin\alpha\cos^4\alpha) + (-\sin^3\alpha\cos^2\alpha + A^2\sin^3\alpha\cos^2\alpha - A\sin^4\alpha\cos\alpha + A\sin^2\alpha\cos^3\alpha)$$

$$+ \frac{1}{k_1}(-\sin^3\alpha\cos^2\alpha + A^2\sin^3\alpha\cos^2\alpha - A\sin^4\alpha\cos\alpha + A\sin^2\alpha\cos^3\alpha) + (\sin\alpha\cos^4\alpha$$

$$- A^2\sin\alpha\cos^4\alpha + A\sin^2\alpha\cos^3\alpha - A\cos^5\alpha) + \frac{1}{k_1}(-\sin\alpha\cos^4\alpha + A^2\sin\alpha\cos^4\alpha$$

$$- A\sin^2\alpha\cos^3\alpha + A\cos^5\alpha) + (-\sin\alpha\cos^4\alpha - 2A\sin^2\alpha\cos^3\alpha - A^2\sin^3\alpha\cos^2\alpha)$$

$$+ \frac{1}{k^2}(\sin\alpha\cos^4\alpha + 2A\sin^2\alpha\cos^3\alpha + A^2\sin^3\alpha\cos^2\alpha) + \frac{2\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2}(-\sin\alpha\cos^2\alpha$$

$$+ A^2\sin\alpha\cos^2\alpha - A\sin^2\alpha\cos\alpha + A\cos^3\alpha + \sin\alpha\cos^2\alpha$$
$$+ 2A\sin^2\alpha\cos\alpha + A^2\sin^3\alpha) = 0$$

整理后还可简化：

$$\frac{2\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2}[A^2\sin\alpha + A\cos\alpha] - A[\underbrace{\underbrace{\sin^4\alpha\cos\alpha + \sin^2\alpha\cos^3\alpha}_{\sin^2\alpha\cos\alpha} + \underbrace{\sin^2\alpha\cos^3\alpha + \cos^5\alpha}_{\cos^3\alpha}}_{\cos\alpha}]$$

$$+ \frac{1}{k_1}[\underbrace{A^2\sin^3\alpha\cos^2\alpha + A^2\sin\alpha\cos^4\alpha}_{A^2\sin\alpha\cos^2\alpha} - \underbrace{\underbrace{A\sin^4\alpha\cos\alpha + A\cos^5\alpha}_{-A\cos\alpha(\sin^4\alpha - \cos^4\alpha)}}_{-A\cos\alpha(\sin^2\alpha - \cos^2\alpha)}] - \underbrace{\sin^3\alpha\cos^2\alpha - \sin\alpha\cos^4\alpha}_{-\sin\alpha\cos^2\alpha}]$$

$$+ \frac{1}{k_2}[\underbrace{A^2\sin\alpha\cos^4\alpha + A^2\sin^3\alpha\cos^2\alpha}_{A^2\sin\alpha\cos^2\alpha} + \underbrace{\sin^3\alpha\cos^2\alpha + \sin\alpha\cos^4\alpha}_{\sin\alpha\cos^2\alpha}] = 0$$

可以写成

$$A\left[\frac{2\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2}(A\sin\alpha + \cos\alpha) - \cos\alpha\right] + \frac{1}{k_1}[\sin\alpha\cos^2\alpha(A^2 - 1)$$
$$- A\cos\alpha(2\sin^2\alpha - 1)] + \frac{1}{k_2}\sin\alpha\cos^2\alpha(A^2 + 1) = 0 \tag{3}$$

这个式子也是可以迭代求强弱解 α_s、α_s 的，而且比（2）式稍有化简，起码已将由 A 代表的 δ 角与波角 α 分开了。可是，这式仍可进一步简化，使其表示为 $\sin^2\alpha$ 的方程：

将（3）式按此意图归并成

$$\underbrace{\sin\alpha\cos^2\alpha}_{\| \atop \sin\alpha(1-\sin^2\alpha)}\left(\underbrace{\frac{A^2-1}{k_1} + \frac{A^2+1}{k_2}}_{B}\right) + \frac{2A^2\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2}\sin\alpha = A\left[\frac{2\sin^2\alpha}{k_1} + \underbrace{(1 - \frac{1}{k_1} - \frac{2\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2})}_{D}\right]\cos\alpha$$

或写成

$$\underbrace{\left(B + \frac{2A^2\varepsilon_v}{k_k\lambda_1^2}\right)}_{C}\sin\alpha - B\sin^3\alpha = A\left(\frac{2\sin^2\alpha}{k_1} + D\right)\sqrt{1-\sin^2\alpha}$$

等号两边乘方后成：

$$C^2\sin^2\alpha - 2BC\sin^4\alpha + B^2\sin^6\alpha = A^2\left(\frac{4}{k_1^2}\sin^4\alpha + \frac{4D}{k_1}\sin^2\alpha + D^2\right)(1 - \sin^2\alpha)$$

$$= -\frac{4A^2}{k_1^2}\sin^6\alpha - \left(\frac{4A^2}{k_1}D - \frac{4A^2}{k_1^2}\right)\sin^4\alpha - \left(A^2D^2 - \frac{4A^2D}{k_1}\right)\sin^2\alpha + A^2D^2$$

移项后得

$$\underbrace{(B^2+\frac{4A^2}{k_1^2})}_{V_3}\sin^6\alpha-[\underbrace{2BC-\frac{4A^2}{k_1}(D-\frac{1}{k_1})}_{V_2}]\sin^4\alpha$$

$$+[\underbrace{C^2+A^2D(D-\frac{4}{k_1})}_{V_1}]\sin^2\alpha-\underbrace{A^2D^2}_{V_0}=0$$

令 $x=\sin^2\alpha$，则有

$$x^3-F_2x^2+F_1x-F_0=0 \tag{4}$$

式中：$F_2=V_2/V_3$，$F_1=V_1/V_3$，$F_0=V_0/V_3$。至此在计算机上由已知转角或尖劈角 δ 求斜冲波角 α_s、α_w 已不是什么难事。当然，算出波后参数的温度 T_2 与总温 T^* 求出的 k_2，必须返回迭代到与前次 k_2 值符合为止。

由于解变比热斜冲波时，多由定比热解先导，因此（4）式多余的一个由两边乘方带来的 α 解，不会引起任何扰乱。

3 计算方法简介及算例

在几种变比热斜冲波命题中，除了求最小马赫数有些分别外，按给定静温及马赫数求定起始速度系数 λ_1，可称为起始段，已有冲波后静温 T_2、速度系数 λ_2 及方向角后，求冲波后参数及性能，可称为结尾段，都是相仿的。因此本文按一种基本命题叙述，而在其余命题只介绍其中间段的特点。

解各命题方法另一共同点是，都以定比热解为先导，主要因为不仅要与变比热对比其误差量级，而且要利用波后静温 T_2 求变比热解中比热比 k_2 的初值，有时也可用其波角 α 值作为变比热解的初值或参数。

3.1 给定起始马赫数 M_1 及波角 α，求解转角 δ

本文均按常见的给定起始静温 T_1（并取为 290K），以下各命题均同此。

（1）求总温

$$T^*=T_1(1+\frac{k_1-1}{2}\frac{k_{T_1}}{k_1}M_1^2)=T_1(1+\varepsilon_{T_1}M_1^2)$$

式中 k_{T_1} 为静温 T_1 时的比热比，k_1 须返回迭代。

（2）求临界温度 T_k、比热比 k_k、k_v，也须返回迭代；然后求 ε_v、ε_1 及 $\lambda_1^2=(1-\frac{T_1}{T^*})\frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_1}$。

（3）按 α 角求分量 λ_{1n}、λ_t.

（4）按定比热解的 T_2 预求 k_2，由（1）式求 λ_{2n}，从而求 λ_2、T_2、k_2，并返回迭代。

（5）由 λ_{2n}、λ_t 求 γ 角，求转角 $\delta=\alpha-\gamma$.

(6) 求 T_2 的 k_{T_2}，结合 k_2 求 M_2.

(7) 按 (ii) 式可求出压比

$$\frac{p_2}{p_1}=1+\frac{\rho_1 c_{1n}^2}{p_1}(1-\frac{c_{2n}}{c_{1n}})=1+k_{T_1}M_{1n}^2(1-\frac{\lambda_{2n}}{\lambda_{1n}})$$

(8) 仿正冲波求总压系数及熵增

$$\sigma=\frac{p_2^*}{p_1^*}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)\frac{\pi_{T_1}^*}{\pi_{T_2}^*}$$

$$\Delta S=-R\ln\sigma$$

由上容易看出，仅 (3) (4) (5) 属中间段。

例题：按 $M_1=3.0$、$\alpha=45°$变比热计算结果如下 (括号中为定比热 $k=1.4$ 结果的误差，下文同)：

$\delta=25.7353°$ (-0.4657%)　　$T_2=516.92\text{K}$ (0.34%)

$M_2=1.693$ (-0.658%)　　$p_2/p_1=5.100$ (-0.329%)

$\sigma=0.663$ (-1.543%)　　$\Delta S=117.82$ (3.79%) J/kg·K

3.2 给定起始马赫数 M_1 及转角 (尖劈角) δ，求解波角 α

这一命题的特点，是有强弱冲波两个解，即 α_s、α_w，但都以定比热解为先导。其解法的起始段及结尾段相仿，中间段为：

(3) 按定比热解 T_2 求 k_2 初值，由 (4) 式解求 α，并可以定比热解的 α 值起始。

(4) 按 α 求 λ_t 及 γ ($=\alpha-\delta$)，由 λ_t、γ 求 λ_2。

(5) 按 λ_2、k_2 求 T_2 而得 k_2 新值，返回 (3) 迭代至符合为止。

例题：按 $M_1=3.0$，$\delta=25.7353°$变比热计算结果如下：

$\alpha_w=44.9999°$ (0.3796%)　　$\alpha_s=79.2953°$ (-0.5802%)

$T_2=516.92\text{K}$ (0.64%)　　$T_2=746.56\text{K}$ (1.49%)

$M_2=1.693$ (-1.073%)　　$M_2=0.594$ (0.843%)

$p_2/p_1=5.100$ (0.285%)　　$p_2/p_1=10.055$ (-1.147%)

$\sigma=0.663$ (-2.005%)　　$\sigma=0.338$ (-6.542%)

$\Delta S=117.82$ (4.93%) J/kg·K　　$\Delta S=311.27$ (6.24%)

3.3 给定起始马赫数 M_1，求解冲波接体的最大尖劈角 δ_{max}

在先导的定比热解中，先按熟知的公式求出最大尖劈角时的

$$\sin^2\alpha_m=\frac{1}{kM_1^2}\left[\frac{k+1}{4}M_1^2-1+\sqrt{(k+1)(1+\frac{k-1}{2}M_1^2+\frac{k+1}{16}M_1^4)}\right]$$

$$\mathrm{tg}\delta_{\max}=\frac{M_1^2\sin^2\alpha_m-1}{[M_1^2(\frac{k+1}{2}-\sin\alpha_m)+1]\mathrm{tg}\alpha_m}$$

然后取一稍低的弱波角 α_w，按定比热化的 (1)′式求出稍小的尖劈角 δ，再按定比热化的 (4) 式求出强波角 α_s，提供变比热迭代 α_w、α_s 的初值，连同 $\delta_{\max}$角的参数结果供对比。

变比热求解的中间段是：

(3) 以上述初值 α_w 按 (1)′式求尖劈角 δ，以及 T_{2w}、k_{2w}，并完成返回迭代。

(4) 以上述初值 α_s 按 (4) 式由 δ 求 α_s、以及其 T_{2s}、k_{2s}，并完成返回迭代。

(5) 在 α_w、α_s 及 k_{2w}、k_{2s}间加松弛因子，进行下一轮 (3) (4) 步，直至 $\sin^2\alpha_s-\sin^2\alpha_w\leq 1\times10^{-7}$为止，以求定 $\delta_{\max}$。

例题：按 $M_1=3.0$ 计算的最大尖劈角（或转角）结果如下：

$\delta_{\max}=34.5459°(-1.3678\%)$　　$\alpha_m=65.0908°(0.2305\%)$

$T_2=677.72\mathrm{K}(1.36\%)$　　$M_2=0.971(-1.793\%)$

$p_2/p_1=8.528(-0.428\%)$　　$\sigma=0.412(-5.321\%)$

$\Delta S=254.37(6.17\%)$　J/kg·K

3.4 给定尖劈角 δ，求解冲波接体的最小马赫数 $M_{\min}$

这个命题，看来似乎分别较大，因为起始马赫数没给而待求。但实际解时，也先设定一个较大的 M_1，逐步减小来求解，差别就不大了。

在先导的定比热解中，仍用第 3 命题中的两式，逐步调整 M_1，使其 α_m 算出的 $\delta_{\max}$值符合给定的 δ，从而得出 $M_{1\min}$。

在变比热解中，由于连 M_1 也是逐步减小的，其起始段与中间段就须结合起来，随着逐步进行。

(0) 先设一较大的 M_1。

(1、2、3、4)′取较定比热 α_m 为低的 α 初值，利用定比热由 (4) 式求弱波角 α_w 初值、以及 T_2；

(1、2、3、4、5) 按第 2 命题求出变比热的 α_w。

重复以上两节步序、但以较定比热 α_m 为高的 α 初值，求出变比热强波角 α_s。

根据 α_s、α_w 差值，减小 (0) 所设 M_1，重复以上过程，理论上应到 α_s 与 α_w 相等为止，但经过多次摸索，只达到 $\sin^2\alpha_s-\sin^2\alpha_w\lessapprox 1\times10^{-4}$。

(6、7、8) 完成结尾段，计算 $M_{1\min}$波后参数及性能。

例题：按尖劈角 34.5459°计算出的最小马赫数结果如下：

$M_{\min}=2.9988$　(0.039%)　　$\alpha_m=65.6128°$　(−0.4637%)

$T_2=680.77\mathrm{K}$　(3.98%)　　$M_2=0.955$　(0.058%)

$p_2/p_1=8.594$　(3.773%)　　$\sigma=0.409$　(−10.314%)

$\Delta S=256.92$　(12.16%)　J/kg·K

4 小　结

总的看来，变比热斜冲波解析解，还不是很复杂的，这主要是得力于变比热拟合公式和变比热气动函数。

这是首次的变比热斜冲波解析解，可说是入了门，待探索的问题还不少。例如，最大尖劈角、最小马赫数的利用强弱波角差的迭代解，还待改进为更直接的解；根据改进正冲波解的经验，不牵动总温的斜冲波解，也应有可能；圆锥尖劈的斜冲波解，还待开发；冲波极线图将如何变更；等等，深入研究之路还长。

参　考　文　献

〔1〕　崔济亚．变比热时气动函数式的简化及正冲波解析解．工程热物理学报，1990，11（2）

〔2〕　崔济亚．改进的变比热正冲波解析解．推进技术，1992（6）

〔3〕　崔济亚．Derivation of Varying Specific Heat Gasdynamic Functions，Normal Shock Analytical Solution and Its Improvements．Journal of Thermal Science，1992，1（4）

简　讯

航天第三信息网讨论航天与导弹动力装置的现状与任务

中国航天工业总公司第三信息网第 15 届技术信息交流会于 10 月 26 日至 29 日在西安举行。26 个单位的 42 名代表就“航天与导弹动力装置的现状与任务”进行了交流与讨论。议题涉及面广，内容丰富，有一定深度，起到了互相交流、互相学习、互相启发的作用，对完善今后推进系统的研制设想有一定参考价值。会议由副网长单位、总公司第 11 研究所主办，副网长、11 所科技委主任朱宁昌主持了会议。

（本刊通讯员）