平衡状态下空气的几种热力学函数的近似计算

中国科学院计算技术研究所　陈炳木

在平衡状态下，空气的热力学函数可利用热力学方法直接进行计算，也可查现成的空气热力学函数表．当在电子计算机上求解气体动力学问题时，若是用热力学方法直接进行热力学量的计算，计算工作量大，需占用大量的机器时间；由于计算机存储容量的限制，要在机器上使用热力学函数表也有许多困难．所以给出空气热力学函数的简单逼近表达式是有必要的．文[3]中曾以压力 p，温度 T 为独立状态参数，给出了焓 $h(p,T)$ 及函数 $K(p,T)\equiv\frac{\rho T}{p}$ 的逼近公式．但该公式要多次用到指数函数的计算，解题时间还是较费；同时在基本方程中要出现参量 T，这对于没有直接用到温度 T 的问题来说也是不方便的．

本文给出了以压力 p，密度 ρ 为自变量的平衡空气的音速 $a(p,\rho)$，焓 $h(p,\rho)$ 及温度 $T(p,\rho)$ 的近似计算公式．这些公式是以平衡空气热力学函数表[1]为基础，用函数逼近的方法得到的．计算的结果与函数表[1]上的数值相比较，最大相对误差为 1—2%．用本文所给的近似公式进行计算时，除了要进行一次对数运算外，其余仅是二阶多项式的运算，与文[3]的逼近公式相比较，运算量显然是减少很多．用本文的逼近公式求解平衡空气的绕流问题，计算时间仅比完全气体的绕流计算多 10% 左右．所以可以说这些表达式具有精度高且计算量小的优点．

文[2]曾指出，若采用

$$\left.\begin{aligned}\sigma &= \log p\\ q &= (1+0.1667|\sigma|)^{-\mathrm{sign}\sigma}(Q-0.45)\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

为自变量，其中 $Q=\frac{p}{\rho}\times 10^{-4}$，$p$ 的单位为[大气压]，ρ 的单位为[克/厘米^3]，则当 q 固定时，函数

$$\bar{f}_a(\sigma,q)\equiv\frac{a^2}{Q\Sigma_1},\quad \bar{f}_h(\sigma,q)\equiv\frac{1}{1-\frac{Q\Sigma_2}{h}},$$

$$\bar{f}_T(\sigma,q)\equiv\frac{RT}{Q}\times 10^{-4}$$

等可用 σ 的二次多项式来逼近（参看图 1—3）．所以这些函数可以对 σ 用二次多项式而对 q 用分段二次多项式来逼近．另外，在一些特殊情况下，这些函数可近似地表示成 Q 的二次多项式或 σ，Q 的双二次多项式，所以对这些热力学函数，我们用如下的表达式来逼近：

（i）当 $Q_0\leqslant Q<Q_1$ 时[1]，取表达式

$$\begin{aligned}f(p,\rho)&\approx f^*(\sigma,Q)\\&=\beta_{07}Q^2+\beta_{08}Q+\beta_{09}\end{aligned}\quad(2)$$

（ii）当 $Q_1\leqslant Q<Q_2=0.45$ 时，取表达式

$$\begin{aligned}f(p,\rho)&\approx f^{**}(\sigma,Q)\\&=(\beta_{11}Q^2+\beta_{12}Q+\beta_{13})\sigma^2\\&\quad+(\beta_{14}Q^2+\beta_{15}Q+\beta_{16})\sigma\\&\quad+\beta_{17}Q^2+\beta_{18}Q+\beta_{19}\end{aligned}\quad(3)$$

（iii）当 $Q\geqslant 0.45$ 时，在 q 方向上分 $n+1$ 个区间，在每一个区间 $q_j\leqslant q<q_{j+1}$ $(j=0,1,\cdots,n;\ q_0=0)$ 上，取表达式

1）当 $Q<Q_0$ 时（也就是相应于 $T<200°K$ 时），某些情形下仍可用式(2)作近似计算．

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$f(p,\rho)\approx f_i(\sigma,q)$$
$$=(\alpha_{i1}q^2+\alpha_{i2}q+\alpha_{i3})\sigma^2+(\alpha_{i4}q^2+\alpha_{i5}q+\alpha_{i6})\sigma+\alpha_{i7}q^2+\alpha_{i8}q+\alpha_{i9} \quad (4)$$

这里，$f(p,\rho)$ 为我们要逼近的任一函数；$Q_0=0.05666$，$Q_1=0.3399$；n 及 q_i 的值由函数的具体情况来确定．表达式确定后，便可由函数表[1]的值，用最小二乘法把系数 β_{ji}，α_{ji} 的值算出来．

下面就平衡空气的音速 $a(p,\rho)$，焓

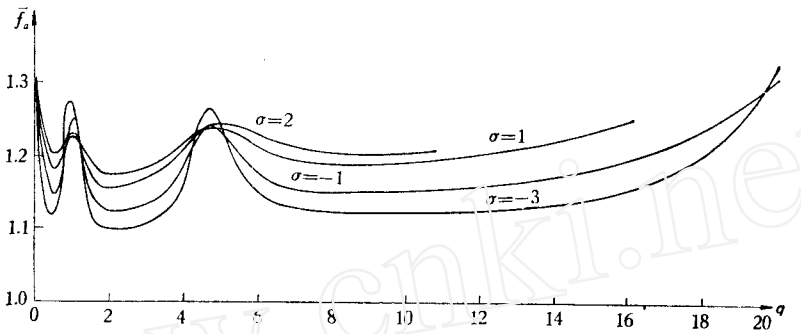

图1　函数 $\bar{f}_a(\sigma,q)$ 随 q 的变化

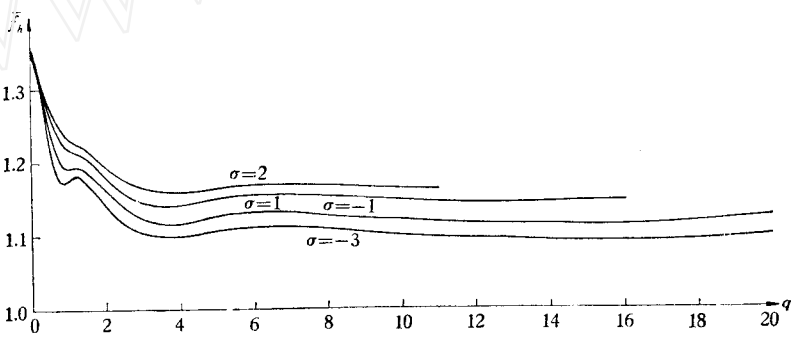

图2　函数 $\bar{f}_h(\sigma,q)$ 随 q 的变化

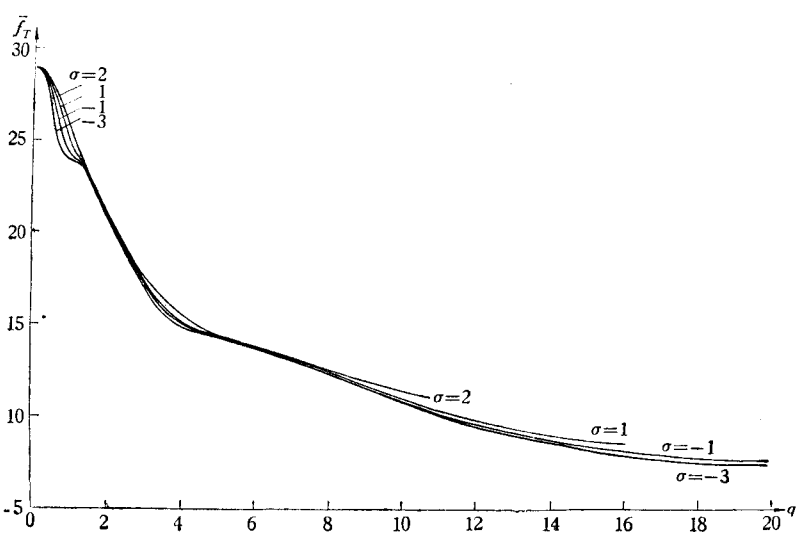

图3　函数 $\bar{f}_T(\sigma,q)$ 随 q 的变化

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　$t_a(p,\rho)$ 的逼近系数

i	Q_i		β_{i1}		β_{i2}		β_{i3}		β_{i4}		β_{i5}		β_{i6}		β_{i7}		β_{i8}		β_{i9}	
0	0.56657224	−1	0		0		0		0		0		0		−0.34240645	0	−0.14405247	0	0.14102685	1
1	0.33990483	0	−0.28610491	0	0.21073710	0	−0.38575344	−1	−0.95497886	−1	0.70341147	−1	−0.12875919	−1	0.19756667	1	−0.17077187	1	0.16739470	1
2	0.450	0																		

j	q_j		α_{j1}		α_{j2}		α_{j3}		α_{j4}		α_{j5}		α_{j6}		α_{j7}		α_{j8}		α_{j9}	
0	0		0.15584849	0	−0.41147597	−1	−0.16798927	−2	0.29460989	0	−0.14914867	−1	−0.56072507	−3	−0.89587516	0	−0.94411167	−1	0.13055461	1
1	0.2400	0	−0.56803366	−1	0.56195762	−1	−0.12793552	−1	−0.20263832	0	0.16829590	0	−0.15889813	−1	0.95605105	0	−0.96289779	0	0.14073047	1
2	0.4500	0	0.28472436	−1	−0.23008340	−1	0.55799442	−2	−0.20535258	−1	0.11392743	−1	0.17840740	−1	0.35763465	0	−0.41500949	0	0.12819343	1
3	0.6500	0	−0.11406494	0	0.18292781	0	−0.68056510	−1	−0.20418603	0	0.25079920	0	−0.60181008	−1	0.71883659	0	−0.92526251	0	0.14609910	1
4	0.9000	0	0.71152276	−1	−0.16521297	0	0.95244244	−1	0.41920179	0	−0.85169130	0	0.42711630	0	−0.12778888	1	0.27205046	1	−0.20285187	0
5	0.1100	1	0.16828039	−1	−0.41876785	−1	0.25306768	−1	−0.68953720	−1	0.22097100	0	−0.16214405	0	−0.17119642	−1	−0.15503588	0	0.14347120	1
6	0.1500	1	−0.10163628	−2	0.45859643	−2	−0.42374526	−2	−0.21767695	−2	0.10093328	−1	0.39243181	−2	0.52255218	−1	−0.23269637	0	0.13951093	1
7	0.2500	1	−0.44927450	−3	0.24534700	−2	−0.24505186	−2	−0.20691671	−2	0.12390179	−1	−0.24903270	−2	0.16645041	−1	−0.76986621	−1	0.12283985	1
8	0.3500	1	0.41173255	−2	−0.30600221	−1	0.57296549	−1	−0.16479645	−1	0.11385249	0	−0.18108004	0	0.12678688	−1	−0.39082864	−1	0.11443232	1
9	0.4500	1	−0.29829234	−2	0.27246393	−1	−0.59233174	−1	0.34988500	−1	−0.32954082	0	0.77195988	0	−0.92942799	−1	0.89757542	0	−0.93180399	0
10	0.5200	1	0.41237892	−2	−0.48354488	−1	0.14172590	0	−0.13817766	−1	0.16788719	0	−0.49494432	0	0.20524333	−2	−0.62419027	−1	0.14914960	1
11	0.6000	1	0.11580352	−3	−0.21598149	−2	0.88453460	−2	−0.20612466	−2	0.27397648	−1	−0.75241767	−1	0.93980779	−2	−0.13989485	0	0.16919078	1
12	0.7000	1	0.76721297	−4	−0.12283571	−2	0.42401707	−2	0.30454001	−3	−0.48642245	−2	0.34667798	−1	0.12501414	−2	−0.22775316	−1	0.12713199	1
13	0.1200	2	0.10718431	−4	0.21796329	−4	−0.12572584	−2	−0.88750729	−4	0.40088899	−2	−0.15175708	−1	0.13203358	−2	−0.27467745	−1	0.13175211	1
14	0.1700	2	−0.29186444	−3	0.11846451	−1	−0.11482995	0	−0.25520100	−2	0.90995726	−1	−0.78206993	0	0.91170584	−3	−0.86009882	−2	0.11148803	1
15	0.2200	2	0.10337060	−2	−0.50806272	−1	0.62195385	0	0.70777254	−2	−0.34001800	0	0.40394401	1	−0.97907085	−2	0.44288794	0	−0.36379077	1
16	0.2500	2	0.55375302	−3	−0.28198066	−1	0.35671935	0	0.19951484	−2	−0.86522374	−1	0.87865998	0	−0.53414658	−2	−0.31135066	0	0.57604484	1
17	0.2700	2	−0.83369153	−4	0.52580239	−2	−0.82133017	−1	−0.20310540	−2	0.12301144	0	−0.18436514	1	0.26223076	−2	−0.16642565	0	0.38297395	1
18	0.3050	2	−0.53143951	−3	0.33235825	−1	−0.51863851	0	−0.28866930	−2	0.18037855	0	−0.27973902	1	−0.32253297	−2	0.19498406	0	−0.17534920	1
19	0.3540	2																		

说明：i，j 为顺序编号；数值用规格化形式表示，即用 $x \pm n$ 表示数 $A = x \cdot 10^{\pm n}$，其中 $|x| < 1$，例如 $\alpha_{12} = 0.56195762 \times 10^{-1}$。$p$ 的单位是[大气压]，ρ 的单位是[克/厘米^3]。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 $f_k(p,\rho)$ 的逼近系数

i	Q_i	β_{i1}	β_{i2}	β_{i3}	β_{i4}	β_{i5}	β_{i6}	β_{i7}	β_{i7}	β_{i9}
0	0.56657224 −1	0	0	0	0	0	0	−0.38701791 0	0.37223599 −1	0.14005476 1
1	0.33990483 0	−0.26882402 −1	0.19800847 −1	−0.36245373 −2	−0.13914086 −1	0.10248737 −1	−0.18760274 −2	0.17506582 0	−0.27942963 0	0.14432391 1
2	0.4500 0									

j	q_j	α_{j1}	α_{j2}	α_{j3}	α_{j4}	α_{j5}	α_{j6}	α_{j7}	α_{j8}	α_{j9}
0	0.0000 0	−0.36267775 −1	−0.41306761 −2	−0.15784262 −3	0.43045628 −1	−0.19661940 −1	−0.81697900 −4	0.11518052 0	−0.13282684 0	0.13529466 1
1	0.1000 0	0.22291754 −1	−0.19788361 −1	0.82233057 −3	0.19589834 0	−0.55744489 −1	0.19980299 −2	−0.29090810 0	−0.32880712 −1	0.13470128 1
2	0.2000 0	0.70809125 −1	−0.41666533 −1	0.32572701 −2	0.13440650 0	−0.33206930 −1	−0.49808355 −4	−0.51508158 0	0.61278692 −1	0.13371479 1
3	0.3000 0	0.35082114 −1	−0.18675773 −1	−0.42452678 −3	−0.36946390 −1	0.76479621 −1	−0.37534013 −1	−0.17244677 0	−0.15211018 0	0.13703274 1
4	0.4000 0	−0.49032691 −2	0.14502839 −1	−0.72983104 −2	−0.85613776 −1	0.11653269 0	−0.25760461 −1	0.25605463 0	−0.50209969 0	0.14417630 1
5	0.5000 0	−0.85059207 −2	0.17286123 −1	−0.77892896 −2	−0.65232996 −1	0.92454840 −1	−0.18824729 −1	0.35234688 0	−0.60019416 0	0.14667372 1
6	0.6000 0	−0.67969194 −2	0.15398689 −1	−0.72720695 −2	−0.63050360 −1	0.90367205 −1	−0.18357897 −1	0.28116526 0	−0.51649075 0	0.14421405 1
7	0.7000 0	−0.11900312 −1	0.21884081 −1	−0.93111813 −2	−0.33985235 −1	0.48613225 −1	−0.33720220 −2	0.24011624 0	−0.44850086 0	0.14146616 1
8	0.9000 0	0.28930221 −2	−0.68179508 −2	0.45380463 −2	0.35456223 −1	−0.83986757 −1	0.59720381 −1	0.62299591 −1	−0.12617525 0	0.12686000 1
9	0.1100 1	0.11663117 −2	−0.36068436 −2	0.30951480 −2	0.18096130 −1	−0.48885645 −1	0.42114876 −1	−0.76101106 −1	0.17664198 0	0.11029659 1
10	0.1500 1	0.48800021 −3	−0.12166055 −2	0.10359918 −2	−0.15656251 −2	0.10548136 −1	−0.27968526 −2	0.11970922 −2	−0.62234635 −1	0.12873599 1
11	0.2000 1	−0.27006982 −3	0.16184308 −2	−0.16018007 −2	−0.24161106 −2	0.13156365 −1	−0.46113672 −2	0.21972622 −1	−0.13978911 0	0.13593667 1
12	0.2500 1	−0.15485075 −3	0.10193826 −2	−0.82429937 −3	−0.95334904 −3	0.59924080 −2	0.41562642 −2	0.13561071 −1	−0.97205613 −1	0.13054802 1
13	0.3000 1	−0.17011521 −3	0.11347514 −2	−0.10330258 −2	−0.68488368 −3	0.45828114 −2	0.59688657 −2	0.10737670 −1	−0.80504440 −1	0.12807873 1
14	0.3500 1	−0.31579403 −4	0.15792136 −3	0.68881581 −3	−0.66968560 −3	0.44298683 −2	0.63179903 −2	0.83468442 −2	−0.64175148 −1	0.12529224 1
15	0.4000 1	−0.41633355 −4	0.20635420 −3	0.65594771 −3	−0.43273568 −3	0.23719274 −2	0.10758555 −1	0.56815348 −2	−0.42524168 −1	0.12089634 1
16	0.4500 1	0.81112793 −4	−0.95997505 −3	0.34188198 −2	0.71925708 −3	−0.81742506 −2	0.34888503 −1	−0.58098679 −3	0.13907672 −1	0.10818362 1
17	0.5200 1	0.94883446 −4	−0.10604033 −2	0.35686885 −2	0.93259029 −3	−0.10608426 −1	0.41777685 −1	−0.32845298 −2	0.40281177 −1	0.10177978 1
18	0.6000 1	−0.11085020 −4	0.18074367 −3	−0.63328787 −4	0.16440461 −3	−0.15149329 −2	0.14871411 −1	−0.15935155 −2	0.19572809 −1	0.10811714 1
19	0.7000 1	0.27564421 −5	0.36948800 −4	0.26500363 −3	−0.35778365 −4	0.12687510 −2	0.51945891 −2	0.22425863 −3	−0.67999070 −2	0.11767095 1
20	0.1200 2	0.10258155 −5	0.20300884 −4	0.71398886 −3	−0.44130302 −5	0.48646174 −3	0.10065452 −1	0.25478964 −3	−0.70469112 −2	0.11752771 1
21	0.1700 2	−0.17908744 −4	0.71195302 −3	−0.55720098 −2	−0.74224236 −4	0.29616621 −2	−0.11837516 −1	0.19179286 −3	−0.47825691 −2	0.11549894 1
22	0.2200 2	−0.10331104 −4	0.38222436 −3	−0.19855566 −2	−0.63162060 −4	0.25796372 −2	−0.87870614 −2	−0.14682626 −3	0.10032782 −1	0.99294332 0
23	0.2500 2	−0.16896145 −4	0.78587387 −3	−0.79736442 −2	−0.93382310 −4	0.43608711 −2	−0.34430252 −1	−0.43942706 −3	0.24820295 −1	0.80613134 0
24	0.2700 2	0.36756261 −5	−0.28459855 −3	0.59322900 −2	0.32971019 −4	−0.22801673 −2	0.52766208 −1	−0.33046281 −3	0.18957827 −1	0.88498262 0
25	0.3050 2	0.37304146 −4	−0.22812220 −2	0.35546376 −1	0.22317982 −3	−0.13621015 −1	0.22172033 −0	0.42951341 −3	−0.27505305 −1	0.15951403 1
26	0.3540 2									

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 $t_T(p,\rho)$ 的逼近系数

i	Q_i		β_{i1}		β_{i2}		β_{i3}		β_{i4}		β_{i5}		β_{i6}		β_{i7}		β_{i8}		β_{i9}	
0	0.56657224	−1	0		0		0		0		0		0		0.15344031	0	−0.49257688	−1	0.28977223	2
1	0.33990483	0	−0.19912751	0	0.14667191	0	−0.26848235	−1	−0.17353173	−1	0.12781875	−1	−0.23397173	−2	0.23424115	1	−0.18699574	1	0.29343184	2
2	0.4500	0																		
j	q_j		α_{j1}		α_{j2}		α_{j3}		α_{j4}		α_{j5}		α_{j6}		α_{j7}		α_{j8}		α_{j9}	
0	0.0000	0	−0.46055239	0	−0.18027963	−1	−0.11691964	−2	0.10856880	1	−0.10457205	0	−0.10189083	−3	−0.17021984	1	0.38117527	0	0.28976042	2
1	0.2400	0	0.84824209	0	−0.61917547	0	0.67719642	−1	0.17818967	1	−0.11582485	0	−0.37502844	−1	−0.14263670	2	0.60366961	1	0.28342257	2
2	0.4500	0	0.32058880	0	−0.13551977	0	−0.43075629	−1	−0.20693394	1	0.32568222	1	−0.77531870	0	−0.34978085	1	−0.40135109	1	0.30684764	2
3	0.6500	0	−0.45765888	0	0.88114672	0	−0.37509920	0	−0.23034733	1	0.34455862	1	−0.79909371	0	0.81413195	1	−0.18977613	2	0.35493898	2
4	0.9000	0	−0.53631547	0	0.11047782	1	−0.51265573	0	−0.15058188	1	0.25839782	1	−0.66974667	0	0.48816926	1	−0.12827858	2	0.32599417	2
5	0.1100	1	0.16105761	−1	−0.88183342	−1	0.13117231	0	0.58076089	0	−0.18746521	1	0.17099852	1	−0.15711238	1	0.14439714	1	0.24708312	2
6	0.1500	1	0.14356809	−1	−0.56368462	−1	0.87385134	−1	0.50475570	−1	−0.15452672	0	0.32293914	0	−0.20925991	−1	−0.41414462	1	0.29598494	2
7	0.2500	1	−0.64293320	−2	0.39102923	−1	−0.21379944	−1	−0.41965840	−1	0.26735691	0	−0.15401111	0	0.86959541	0	−0.82284878	1	0.34250339	2
8	0.3500	1	−0.33165159	−2	0.18777003	−1	0.11628782	−1	−0.69783328	−1	0.45531592	0	−0.47110342	0	0.75392493	0	−0.73912780	1	0.32737068	2
9	0.4500	1	0.10676245	−2	−0.23015215	−1	0.11091491	0	0.45887327	−1	−0.57003844	0	0.18006605	1	0.15897995	0	−0.20748211	1	0.20860648	2
10	0.5200	1	−0.45915235	−1	0.53065998	0	−0.14977796	1	0.93771695	−1	−0.10999221	1	0.32612623	1	0.12230733	0	−0.20189889	1	0.21561948	2
11	0.6000	1	0.32805422	−2	−0.37934082	−1	0.14273682	0	0.22722054	−1	−0.26136554	0	0.78770956	0	−0.70222915	−1	0.18654699	0	0.15259821	2
12	0.7000	1	−0.15897889	−2	0.28834428	−1	−0.85996522	−1	−0.68499253	−2	0.15363867	0	−0.66829261	0	0.33123633	−1	−0.12895000	1	0.20528169	2
13	0.1200	2	0.40998557	−3	−0.14494374	−1	0.14598158	0	−0.95408967	−3	0.25932405	−1	0.15182176	−1	0.25181135	−1	−0.10735437	1	0.19080414	2
14	0.1700	2	0.12375792	−4	−0.14106993	−2	0.38468331	−1	−0.13336439	−2	0.34521439	−1	−0.21140242	−1	0.16840815	−1	−0.78538455	0	0.16592060	2
15	0.2200	2	0.95095878	−2	−0.44989387	0	0.53084475	1	0.24625072	−1	−0.11788317	1	0.14108611	2	0.13177953	−1	−0.66716794	0	0.15764120	2
16	0.2500	2	−0.32872338	−4	0.35163722	−4	0.24259215	−1	0.40832321	−3	−0.35750944	−1	0.66705930	0	−0.52429928	−2	0.22180261	0	0.50529473	1
17	0.2700	2	0.23241326	−3	−0.14109747	−1	0.21277859	0	0.26208780	−2	−0.15567892	0	0.22921623	1	−0.33923635	−2	0.11747617	0	0.65206527	1
18	0.3050	2	−0.33876497	−3	0.19328992	−1	−0.27576440	0	−0.19515221	−2	0.11582492	0	−0.17352296	1	−0.37894661	−2	0.13181150	0	0.64528297	1
19	0.3540	2																0		

$h(p, \rho)$ 及温度 $T(p, \rho)$，谈一下一些具体的细节.

1. 音速的计算　完全气体的音速 a 具有表达式 $a^2 = \gamma \frac{p}{\rho}$，其中 γ 为一常数. 仿照完全气体，我们把平衡气体的音速 a 表示成 $a^2 = f_a(p, \rho)\Sigma_1 Q$，并且不对 a^2 而是对

$$f_a(p, \rho) \equiv \frac{a^2}{Q \cdot \Sigma_1} \tag{5}$$

用前面给出的表达式来逼近. 这里音速 a 的单位为[米/秒]；Σ_1 为一常数，它等于 0.101325×10^7，它是因这里的 a，p，ρ 采用不同的单位制而引入的. $f_a(p, \rho)$ 的逼近系数已在表 1 中给出.

所以音速 a 的计算过程是这样：给定压力 p（大气压）和密度 ρ（克/厘米^3）后，按式(1)算出 σ，Q 及 q（当 $Q > 0.45$ 时）之值，然后根据 Q 或 q 之值用相应的公式(2)，(3)或(4)及表 1 中相应的系数，就可算出 $f_a(p, \rho)$ 之值，最后按公式

$$a = \sqrt{f_a \Sigma_1 \cdot Q} \quad [\text{米/秒}] \tag{6}$$

便可算得音速.

通过检验可知，这样算出的音速值与函数表 [1] 中的值相比，误差小于 1%（设 $10^{-5} \leqslant p \leqslant 10^3$，$2000°\text{K} \leqslant T \leqslant 20000°\text{K}$）.

2. 焓的计算　完全气体的焓的表达式为

$$h = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho}$$

其中 γ 为一常数. 仿照完全气体，我们把平衡气体的焓表示成

$$h = \frac{f_h}{f_h - 1} \Sigma_2 Q \tag{7}$$

并且不对 h 而是对

$$f_h(p, \rho) \equiv \frac{1}{1 - \frac{Q\Sigma_2}{h}} \tag{8}$$

用前面给出的表达式来逼近. 这里焓 h 的单位为[卡/克]；Σ_2 是因这里的 h，p，ρ 采用不同的单位制而引入的常数，它等于 0.2420106×10^3. $f_h(p, \rho)$ 的逼近系数已在表 2 中给出.

所以焓 h 的计算过程是这样：给定压力 p（大气压）和密度 ρ（克/厘米^3）后，利用表 2 的系数可算出 $f_h(p, \rho)$ 之值，再由式(7)式求得焓值. 这样算出的焓值与函数表 [1] 相比，误差小于 1.5%.

3. 温度的计算　平衡空气的状态方程为 $\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{\mu}$，其中 μ 为气体的平均分子量，单位是[克/克分子]；T 的单位为 [°K]；气体常数 $R = 82.0819$ 大气压·厘米^3/克分子·度. 因此要计算平衡空气的温度，只要给出平均分子量

$$f_T(p, \rho) \equiv \frac{RT}{Q} \times 10^{-4} \tag{9}$$

的逼近表达式便可. $f_T(p, \rho)$ 的逼近系数已在表 3 中给出.

因此温度 T 的计算过程是这样：给定压力 p（大气压）和密度 ρ（克/厘米^3）后，利用表 3 的系数可算出 $f_T(p, \rho)$ 之值，再由

$$T = \frac{f_T Q \cdot 10^4}{R} \ [°\text{K}] \tag{10}$$

便可求得温度. 这样求出的温度值与函数表 [1] 相比，误差小于 2%.

参 考 文 献

[1] Предводителев, А. С. и др., Таблицы термодинамических финкций воздуха:
а) М., Изд-во АН СССР, 1957 (6000°К ≤ Т ≤ 12000°К, 0.001атм. ≤ р ≤ 1000атм.);
б) М., Изд-во АН СССР, 1959 (12000°К ≤ Т ≤ 20000°К0.001атм. ≤ р ≤ 100атм.);
в) М., Вц АН СССР, 1962 (200°К ≤ Т ≤ 6000°К, 0.00001атм. ≤ р ≤ 100атм.).

[2] Дьяконов, Ю. Н., Пространственное обтекание затупленных тел с учетом равновесных физико-химических реакций, *ДАН СССР*, **157**, 4 (1964), 822—825.

[3] Наумова, И. Н., Аппроксимация термодинамических функций воздуха, *ЖВМ и МФ*, **1**, 2 (1961), 295—300.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net