



# 北京林业大学

## 标准大气参数计算软件

---

### 使用说明书



2019 年 2 月 28 日

## 标准大气参数计算软件使用说明书

本说明文档主要介绍了标准大气参数计算软件的基本情况、主要功能和计算原理，并通过计算实例演示了软件的使用流程和方法，以期帮助用户快速学习和使用本软件以及相关功能。

### 1. 软件概述

#### (1) 软件名称

标准大气参数计算软件 V1.0

#### (2) 开发环境

编程语言：C、C++

软件环境：Visual Studio 2017、Qt Creator 4.8.1 (Enterprise)、Qt 5.12.1 (MSVC 2017 64-bit)

硬件环境：操作系统：Windows 10 专业版；处理器：i5-7300HQ；内存：DDR4 8G×2；硬盘：SSD 256G×2。

#### (3) 运行环境

本软件的服务器端应用程序所需最低配置：CPU：1 GHz，内存：2 G，硬盘 200 MB；客户端应用程序所需最低配置：CPU：500 MHz，内存 512 MB，硬盘 100 MB。

### 2. 软件功能

#### (1) 主要功能

标准大气参数计算（附 Matlab 代码）

#### (2) 软件用途

本软件可根据给定高度、附加水蒸气分压，求解标准大气参数。采用了现行的最新国际标准大气<sup>[1-3]</sup>（ISO-2533-1975 Add 2、Add 1）进行计算，并且参考<sup>[4-6]</sup>美国标准大气（U.S. Standard Atmosphere 1976）、国际标准大气（ISA）、美国宇航局马歇尔航天飞行中心地球全球参考大气模型（NASA EGRA2010）和国家参考大气（GB 1920-80）进行公式梳理和校正，保证了其计算精度及准确性，方

便了流体力学、数值模拟的基础数据计算，可以实现不同高度附加水汽压的标准参考大气参数计算，让流体力学理论验证、数值模拟计算时更加贴近实际空气状况。它可作为计算流体力学数值模拟、压力测高表校准、航空器性能计算、飞机和火箭设计、弹道查算表和气象图表制作的依据。

### 3. 计算原理

标准大气（standard atmosphere），又称“参考大气（reference atmosphere）”。能够表示垂直方向上气温、气压、湿度等大气参数平均分布的一种模式大气。

在模型中，假定大气是静止的、空气为干洁的理想气体，在给定温度-高度廓线及海平面上的温度、压力和密度初始值后，通过对大气静力方程及气体状态方程进行积分，获得温度、气压和密度等数据。另外，在标准大气模型中还对各高度上大气的成分、标高、重力加速度、空气质点数密度、质点平均速度、平均碰撞频率、平均自由程、平均分子量、音速、粘滞系数、热传导率等有所规定。它可作为计算流体力学数值模拟、压力测高表校准、航空器性能计算、飞机和火箭设计、弹道查算表和气象图表制作的依据。

#### （1）主要常数的符号及数值

计算中用到的主要常数符号及数值在表一、表二中给出：

表一 标准大气参数计算中的主要符号

符号	释义
$g_n$	标准重力加速度
$M$	海平面上的空气摩尔质量
$N_A$	阿伏伽德罗常数
$p_n$	海平面气压
$R^*$	通用气体常数
$R$	空气气体常数
$r$	地球半径
$S\& \beta_s$	萨瑟兰在动态粘度方程中的经验值
$T_0$	平均海平面的冰点温度
$T_n$	平均海平面的标准热力冰点温度

$t_0$	平均海平面冰点温度摄氏
$t_n$	平均海平面的冰点温度
$k$	绝热指数
$\rho_n$	标准空气密度
$\sigma$	空气分子的有效碰撞直径
$a_n$	标准声速
$\mu_n$	标准运动粘度
$H$	重力位势高度
$Z$	几何高度
$Li$	动态温度梯度

表二 标准大气计算中采用的主要常数

符号	数值	单位
$g_n$	9.80665	m/s <sup>2</sup>
$M$	28.964420	kg/kmol
$N_A$	602.257*10 <sup>24</sup>	k/mol
$p_n$	101325.0	[Pa] or [N/m <sup>2</sup> ]
$R^*$	8314.32	J·K <sup>-1</sup> ·kmol <sup>-1</sup>
$R$	287.05287	J·K <sup>-1</sup> ·kmol <sup>-1</sup>
$r$	6356766	m
$S$	110.4	K
$T_0$	273.15	K
$T_n$	288.15	K
$t_0$	0.00	°C
$t_n$	15.00	°C
$\beta_s$	1.458*10 <sup>-6</sup>	kg·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1/2</sup>
$k$	1.4	无量纲
$\rho_n$	1.225	kg·m <sup>-3</sup>
$\sigma$	0.365*10 <sup>-9</sup>	m

## (2) 计算步骤

### a. 基本方程的建立

由于大气层相对地球是静止的，所以它受到地心引力的作用，空气静力平衡条件与静压  $p$ 、密度  $\rho$ 、重力加速度  $g$ 、高度  $h$  有关：

$$-dp = \rho g dh$$

通过理想气体定律建立温度和密度之间的关系：

$$p = \frac{\rho R^* T}{M}$$

在国际标准中： $\frac{R^*}{M} = \text{常数} = R$ ，故：

$$p = \rho RT$$

利用牛顿引力定律，通过计算离心加速度，可以精确地求得标准大气下的重力加速度：

$$g = g_n \left( \frac{r}{r + Z} \right)^2$$

首先引入重力位势高度  $H$ ，用它代替几何高度（海拔高度） $Z$ ，这样可以把重力场随高度变化造成的影响考虑进去。重力位势高度的计算公式如下：

$$H = \frac{Z}{1 + \frac{Z}{r}}$$

为了计算标准大气参数，现在主要采用插值法和公式计算法，本计算软件采用了公式计算的方法计算标准大气参数。

大气温度  $T$  随重力位势高度  $H$  的变化呈现线性变化，在 -2~86 km 范围内的大气满足完全气体的条件，可以通过流体静力学平衡方程和理想气体方程进行积分，得出该范围内的标准大气参数计算方程。利用流体静力学平衡方程和理想气体方程加上适当的修正因子，可以计算出 86~1000 km 范围内标准大气参数计算公式。

### b. 温度和垂直温度梯度：

在压力为 101325.0 Pa,  $T_0=273.15$  K 时，热力学温度的计算公式如下：

$$T = T_0 + t$$

根据温度变化把 -2~86 km 的大气层分为 9 层（如表三所示）。在计

算标准大气时，每一层的温度随重力势高度的变化函数为：

$$T = T_i + L_i (H - H_i)$$

其中， $L_i$  是每一层之内的温度变化率： $L_i = \frac{dT}{dH}$

为方便计算，我们引入一个中间参数 A 进一步简化计算公式：

$$\begin{cases} A = \frac{T_i + L_i (H - H_i)}{T_i} & (L \neq 0) \\ A = \frac{g_n(H_i - H)}{RT_i} & (L = 0) \end{cases}$$

故而，温度变化规律可用以下公式表示：

$$\begin{cases} T = T_i * A & (L \neq 0) \\ T = T_i & (L = 0) \end{cases}$$

表四 各层温度的起始温度、压力以及温度梯度

层	$Z_i$	$T_i$	$p_i$	$L_i$
$Z_1$	-2	301.154	127783	-6.50
$Z_2$	0	288.150	101325	-6.50
$Z_3$	11.1019	216.650	22632	+0.0
$Z_4$	20.062	216.650	5474.87	+1.0
$Z_5$	32.162	228.650	868.014	+2.8
$Z_6$	47.351	270.650	110.906	+0.0
$Z_7$	51.413	270.650	66.938	-2.8
$Z_8$	71.802	214.650	3.9564	-2.0
$Z_9$	86	186.870	$3.7338 \times 10^{-1}$	+2.0
$Z_{10}$	91	186.870	$1.8359 \times 10^{-1}$	0.0
	110	240.00	$7.1042 \times 10^{-3}$	

$Z_{11}$	120	86.65	$2.5382 \times 10^{-3}$	
$Z_{12}$	500	999.24	$3.0236 \times 10^{-7}$	12.0
$Z_{13}$	1000	1000.00	$7.5138 \times 10^{-9}$	

### c. 压力:

假设压力在各层之内也是随温度变化线性改变的, 由静压公式和理想气体定律可得:

$$\begin{cases} \ln p = \ln p_i - \frac{g_n}{RL_i} \ln A \text{ 或 } p = p_i \cdot A^{-\frac{g_n}{RL_i}} & (L \neq 0) \\ \ln p = \ln p_i + A \text{ 或 } p = p_i \exp A & (L = 0) \end{cases}$$

### d. 其他参数的计算:

通过理想气体定律可以计算空气密度 (air density):

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

比重  $\gamma$  (单位体积的空气重量):

$$\gamma = \rho g$$

压力标高 (pressure scale height):

$$H_p = \frac{R^*}{M} \cdot \frac{T}{g} = \frac{RT}{g}$$

空气粒子数量 (air number density):

$$n = \frac{N_A p}{R^* T}$$

平均空气粒子速度 (mean air particle speed):

$$\bar{z} = \left( \frac{8}{\pi} RT \right)^{\frac{1}{2}} = 1.595769 \sqrt{RT}$$

空气粒子平均自由程 (mean free path of air particle):

$$I = \frac{R^*}{\sqrt{2} \pi N_A \sigma^2} \cdot \frac{T}{p} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi n \sigma^2}$$

大气粒子碰撞频率 (air-particle collision frequency):

$$\omega = 4 \sigma^2 N_A \left( \frac{\pi}{R^* M} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{p}{T^{\frac{1}{2}}} = 0.944407 \times 10^{-18} n \sqrt{RT}$$

声速 (speed of sound) :

$$a = (\kappa RT)^{\frac{1}{2}} = 20.046796\sqrt{T}$$

其中,  $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$

热导率 (单位:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , thermal conductivity)

$$\lambda = \frac{2.648151 \times 10^{-3} \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + [245.4 \times 10^{-4} (T^{-1/2})]}$$

动力粘度 (dynamic viscosity) :

动力粘度运用 Sutherland 公式进行计算, 该公式在极高、极低以及 90 km 以上的大气无效。

$$\mu = \frac{\beta_s T^{\frac{3}{2}}}{T + S}$$

运动粘度 (kinematic viscosity) :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

水蒸气分压 (vapour pressure of water) :

水蒸气分压可以通过饱和相对湿度  $U$  和水汽压  $E_w$  计算。

$$E = U \times E_w$$

附加水蒸气分压之后, 总压  $p_t = p + E$ 。

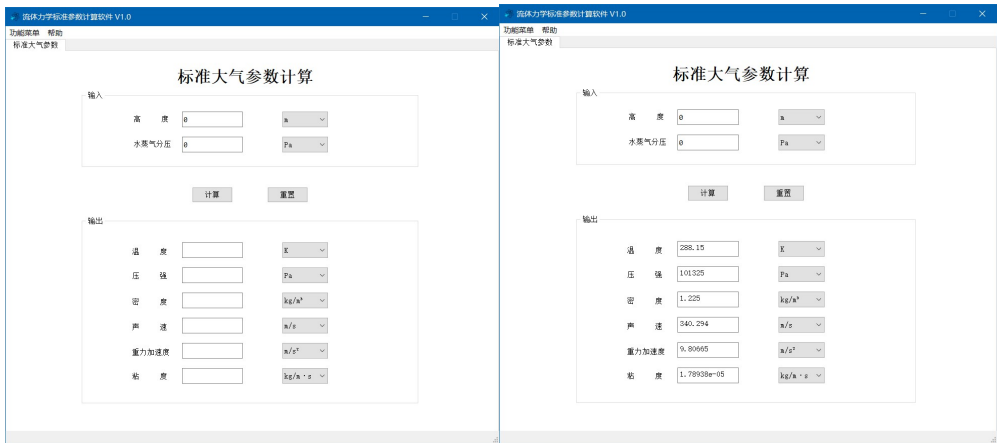
以上公式写入程序之后, 用计算机算出结果并与原表数据进行了核对, 算出参数的计算值与原表数据的相对误差。结果表明, 在本程序计算公式中各项误差均控制在万分之五范围之内。根据上述结果, 可以认为这组标准大气参数的计算公式是足够精确的, 完全可以代替标准参考大气表用于分析计算。

## 4. 应用实例

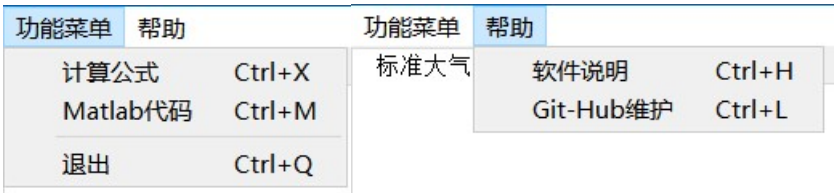
软件提供所有计算公式及 Matlab 代码, 计算过程清晰、界面交互性良好, 能够根据输入的高度, 迅速计算出对应高度的标准大气参数。

打开软件在输入功能区输入高度, 默认水蒸气分压为 0, 点击计算即可求得当前高度下的标准大气参数。软件预览图如图所示:





图一 软件预览图



图三 功能菜单及帮助菜单

为方便使用，本软件还设置了两个菜单栏，并且为其添加了快捷键快捷键如图 所示。功能菜单下拉之后可以选择查看计算公式的 equation.pdf，选择 Matlab 代码查看 equation.m，点击退出可以退出软件，选择软件说明可以查看本软件说明书 help.pdf

参考文献

[1] International Organization for Standardization. ISO 2533:1975 Standard Atmosphere [S]. Switzerland: ISO, 1975.

[2] International Organization for Standardization. ISO 2533:1975/Add 1:1985 Hypsometrical tables [S]. Switzerland: ISO, 1985.

[3] International Organization for Standardization. ISO 2533:1975/Add 2:1997 Extension to - 5000 m and standard atmosphere as a function of altitude in feet [S]. Switzerland: ISO, 1997.

[4] NOAA. U.S. Standard Atmosphere, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. October 1976.

[5] 中国气象局. GB/T 1920-1980 标准大气(30 公里以下部分)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1980.

[6]Leslie, F.W., Justus, C.G.. The NASA Marshall Space Flight Center Earth Global Reference Atmospheric Model—2010 Version. NASA/TM—2011—216467, Marshall Space Flight Center, AL, June 2011.

[7]Pasquale M. Sforza, Manned Spacecraft Design Principles Chapter 2 - Earth’s Atmosphere, Butterworth-Heinemann,2016, 13-46.

附录一

-2km~86km 标准大气参数表（国际单位）

$H^*$ $10^3$	$\rho/\rho_0$	$p/p_0$	$T/T_0$	温度	压力	密度	声速	动力 粘度 $*10^{-6}$	运动 粘度
$m$				$K$	$N/m^2$	$kg/m^3$	$m/s$	$kg/m\ s$	$M^2/s$
-2	1.206 7E+00	1.261 1E+00	1.045 1E+00	3.012 0E+02	1.278 0E+05	1.478 0E+00	3.479 0E+02	1.851 0E+01	1.250 0E-05
0	1.000 0E+00	1.000 0E+00	1.000 0E+00	2.881 0E+02	1.013 0E+05	1.225 0E+00	3.403 0E+02	1.789 0E+01	1.460 0E-05
2	8.216 8E-01	7.846 2E-01	9.549 0E-01	2.752 0E+02	7.950 0E+04	1.007 0E+00	3.325 0E+02	1.726 0E+01	1.710 0E-05
4	6.688 5E-01	6.085 4E-01	9.098 0E-01	2.622 0E+02	6.166 0E+04	8.193 0E-01	3.246 0E+02	1.661 0E+01	2.030 0E-05
6	5.388 7E-01	4.660 0E-01	8.648 0E-01	2.492 0E+02	4.722 0E+04	6.601 0E-01	3.165 0E+02	1.595 0E+01	2.420 0E-05
8	4.292 1E-01	3.518 5E-01	8.198 0E-01	2.362 0E+02	3.565 0E+04	5.258 0E-01	3.081 0E+02	1.527 0E+01	2.900 0E-05
10	3.375 6E-01	2.615 3E-01	7.748 0E-01	2.233 0E+02	2.650 0E+04	4.135 0E-01	2.995 0E+02	1.458 0E+01	3.530 0E-05
12	2.546 4E-01	1.914 6E-01	7.519 0E-01	2.166 0E+02	1.940 0E+04	3.119 0E-01	2.951 0E+02	1.422 0E+01	4.560 0E-05
14	1.860 0E-01	1.398 5E-01	7.519 0E-01	2.166 0E+02	1.417 0E+04	2.279 0E-01	2.951 0E+02	1.422 0E+01	6.240 0E-05
16	1.358 9E-01	1.021 7E-01	7.519 0E-01	2.166 0E+02	1.035 0E+04	1.665 0E-01	2.951 0E+02	1.422 0E+01	8.540 0E-05
18	9.930 2E-02	7.466 2E-02	7.519 0E-01	2.166 0E+02	7.565 0E+03	1.216 0E-01	2.951 0E+02	1.422 0E+01	1.170 0E-04
20	7.257 8E-02	5.456 9E-02	7.519 0E-01	2.166 0E+02	5.529 0E+03	8.891 0E-02	2.951 0E+02	1.422 0E+01	1.600 0E-04
22	5.266 0E-02	3.994 5E-02	7.585 0E-01	2.186 0E+02	4.047 0E+03	6.451 0E-02	2.964 0E+02	1.432 0E+01	2.220 0E-04
24	3.831 6E-02	2.932 8E-02	7.654 0E-01	2.206 0E+02	2.972 0E+03	4.694 0E-02	2.977 0E+02	1.443 0E+01	3.070 0E-04
26	2.796 4E-02	2.159 7E-02	7.723 0E-01	2.225 0E+02	2.188 0E+03	3.426 0E-02	2.991 0E+02	1.454 0E+01	4.240 0E-04
28	2.047 0E-02	1.595 0E-02	7.792 0E-01	2.245 0E+02	1.616 0E+03	2.508 0E-02	3.004 0E+02	1.465 0E+01	5.840 0E-04
30	1.502 8E-02	1.181 3E-02	7.861 0E-01	2.265 0E+02	1.197 0E+03	1.841 0E-02	3.017 0E+02	1.475 0E+01	8.010 0E-04
32	1.106 5E-02	8.774 0E-03	7.930 0E-01	2.285 0E+02	8.890 0E+02	1.355 0E-02	3.030 0E+02	1.486 0E+01	1.100 0E-03

34	8.070 9E-03	6.547 0E-03	8.112 0E-01	2.337 0E+02	6.634 0E+02	9.887 0E-03	3.065 0E+02	1.514 0E+01	1.530 0E-03
36	5.924 5E-03	4.919 8E-03	8.304 0E-01	2.393 0E+02	4.985 0E+02	7.257 0E-03	3.101 0E+02	1.543 0E+01	2.130 0E-03
38	4.380 6E-03	3.721 8E-03	8.496 0E-01	2.448 0E+02	3.771 0E+02	5.366 0E-03	3.137 0E+02	1.572 0E+01	2.930 0E-03
40	3.261 5E-03	2.833 7E-03	8.688 0E-01	2.504 0E+02	2.871 0E+02	3.995 0E-03	3.172 0E+02	1.601 0E+01	4.010 0E-03
42	2.444 5E-03	2.170 8E-03	8.880 0E-01	2.559 0E+02	2.200 0E+02	2.995 0E-03	3.207 0E+02	1.629 0E+01	5.440 0E-03
44	1.843 8E-03	1.672 7E-03	9.072 0E-01	2.614 0E+02	1.695 0E+02	2.259 0E-03	3.241 0E+02	1.657 0E+01	7.340 0E-03
46	1.399 2E-03	1.296 1E-03	9.263 0E-01	2.669 0E+02	1.313 0E+02	1.714 0E-03	3.275 0E+02	1.685 0E+01	9.830 0E-03
48	1.074 8E-03	1.009 5E-03	9.393 0E-01	2.706 0E+02	1.023 0E+02	1.317 0E-03	3.298 0E+02	1.704 0E+01	1.290 0E-02
50	8.381 9E-04	7.872 8E-04	9.393 0E-01	2.706 0E+02	7.977 0E+01	1.027 0E-03	3.298 0E+02	1.704 0E+01	1.660 0E-02
52	6.575 9E-04	6.139 5E-04	9.336 0E-01	2.690 0E+02	6.221 0E+01	8.055 0E-04	3.288 0E+02	1.696 0E+01	2.100 0E-02
54	5.215 8E-04	4.770 0E-04	9.145 0E-01	2.635 0E+02	4.833 0E+01	6.389 0E-04	3.254 0E+02	1.668 0E+01	2.610 0E-02
56	4.117 5E-04	3.686 9E-04	8.954 0E-01	2.580 0E+02	3.736 0E+01	5.044 0E-04	3.220 0E+02	1.640 0E+01	3.250 0E-02
58	3.234 4E-04	2.834 4E-04	8.763 0E-01	2.525 0E+02	2.872 0E+01	3.962 0E-04	3.186 0E+02	1.612 0E+01	4.070 0E-02
60	2.527 6E-04	2.166 8E-04	8.573 0E-01	2.470 0E+02	2.196 0E+01	3.096 0E-04	3.151 0E+02	1.584 0E+01	5.110 0E-02
62	1.964 7E-04	1.646 8E-04	8.382 0E-01	2.415 0E+02	1.669 0E+01	2.407 0E-04	3.115 0E+02	1.555 0E+01	6.460 0E-02
64	1.518 5E-04	1.243 9E-04	8.191 0E-01	2.360 0E+02	1.260 0E+01	1.860 0E-04	3.080 0E+02	1.526 0E+01	8.200 0E-02
66	1.166 8E-04	9.335 4E-05	8.001 0E-01	2.305 0E+02	9.459 0E+00	1.429 0E-04	3.044 0E+02	1.497 0E+01	1.050 0E-01
68	8.910 1E-05	6.959 3E-05	7.811 0E-01	2.251 0E+02	7.051 0E+00	1.091 0E-04	3.007 0E+02	1.467 0E+01	1.340 0E-01
70	6.760 1E-05	5.151 5E-05	7.620 0E-01	2.196 0E+02	5.220 0E+00	8.281 0E-05	2.971 0E+02	1.438 0E+01	1.740 0E-01
72	5.090 5E-05	3.785 2E-05	7.436 0E-01	2.143 0E+02	3.835 0E+00	6.236 0E-05	2.934 0E+02	1.408 0E+01	2.260 0E-01
74	3.785 6E-05	2.763 5E-05	7.300 0E-01	2.103 0E+02	2.800 0E+00	4.637 0E-05	2.907 0E+02	1.387 0E+01	2.990 0E-01
76	2.800 1E-05	2.006 1E-05	7.164 0E-01	2.064 0E+02	2.033 0E+00	3.430 0E-05	2.880 0E+02	1.365 0E+01	3.980 0E-01

78	2.059 7E-05	1.447 7E-05	7.029 0E-01	2.025 0E+02	1.467 0E+00	2.523 0E-05	2.853 0E+02	1.343 0E+01	5.320 0E-01
80	1.506 3E-05	1.038 4E-05	6.893 0E-01	1.986 0E+02	1.052 0E+00	1.845 0E-05	2.825 0E+02	1.321 0E+01	7.160 0E-01
82	1.095 0E-05	7.400 2E-06	6.758 0E-01	1.947 0E+02	7.498 0E-01	1.341 0E-05	2.797 0E+02	1.298 0E+01	9.680 0E-01
84	7.910 6E-06	5.239 1E-06	6.623 0E-01	1.908 0E+02	5.308 0E-01	9.690 0E-06	2.769 0E+02	1.276 0E+01	1.320 0E+00
86	5.677 7E-06	3.683 5E-06	6.488 0E-01	1.869 0E+02	3.732 0E-01	6.955 0E-06	2.741 0E+02	1.253 0E+01	1.800 0E+00