第1卷 第1期 空间科学学报 Vol. 1, No. 1
1981 年 7 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCES July, 1981

美国标准大气 1976 的几点分析

孙 超
(中国科学院空间物理研究所)

摘 要

本文分析了美国标准大气 1976 的大气参数表及制定的物理假设,其主要结果是:

1. 可用绝对温度来定义整个温度剖面 $T(Z)$, 而不用"分子量温度" T_M.
2. 温度剖面的椭圆段在 110 公里处引进了一个量级为 10^{-7} J/m³ · s 的过大散热源.
3. 看来大气参数表中唯一的"系统"错误是导热系数.
4. 详细讨论了联结均匀大气层和高层非均匀大气计算的各种可能途径.
5. 建议在高层大气模式中引进 CO_2 分量并降低计算界面到 80 公里.

最近我们复算了美国标准大气 USSA1976[1],并对其制定的物理假设做了分析. 本文着重分析 86 公里以下均匀层的计算和 86 公里中,高层大气界面值的选取.

1. 温度剖面 $T(Z)$

[1] 采用的温度剖面 $T(Z)$ 在 91 公里以下和 120 公里以上是一般常用的折线和指数形式; 在 110—120 公里间用了一段温度梯度较大的直线 12 K/km; 在 91—110 公里间采用了过去一般模式未曾用过的椭圆段. 其半横轴和半纵轴分别是:

$$A = 76.3232 \text{ K},$$
$$a = 19.9429 \text{ km}.$$

这样做的理由大概是为了能使剖面更清晰地分别适应温度和温度梯度的变化 (选择不同的 A 和 a 值). 的确, 椭圆段可使温度梯度在有限高度 a 内增至任意大的值, 但这种剖面也有一个缺点,即其温度梯度变化率较大,这个变化率可写成

$$\frac{d^2T}{dZ^2} = Aa[a^2 - (Z - 91)^2]^{-3/2},$$

它在 110 公里的值是 6.8 K/km². 若设该处的导热系数 $K \approx 3 \times 10^{-2}$ J/m · s · K,则 110 公里的散热源

$$L = \frac{d}{dZ}\left(K\frac{dT}{dZ}\right) \doteq K\frac{d^2T}{dZ^2} \doteq 2 \times 10^{-7} \text{ J/m}^3 \cdot \text{s}.$$

这个值是偏大了. 特别是在 110 公里以上,温度剖面为直线,这相当散热源突然消失. 这和大气的实际状况不符. 在低层可以假设温度剖面是折线, 因为那里气体密度大, 即使

本文 1980 年 12 月 13 日收到.

$\frac{dT}{dZ}$ 有间断(相当有吸热源和散热源),也不会产生很大的温度改变. 在高层则不然,热量偏离平衡很快会使静态温度剖面改观. 因此在选择温度剖面时,最好不但 $\frac{dT}{dZ}$ 而且 $\frac{d^2T}{dZ^2}$ 也连续,同时 $\frac{d^2T}{dZ^2}$ 也不能过大. 从这点要求来看国际参考大气 CIRA 1972[2] 中所采用的 $T(Z)$ 多项式还是有道理的.

关于[1]提出的温度剖面,还有一个问题值得研究. 在 86 公里以下剖面是以"分子量温度" T_M 对位势高度H的折线形式给出的

$$T_M(H) = T_{M,b} + L_{M,b} \cdot (H - H_b).$$

其中 $L_{M,b}$ 是各折线段的梯度,附标 b 代表各给定参考高度. T_M 不是一个很有意义的物理量. 在早期高空大气温度和成份探测很少,因而温度和分子量都不清楚时,提出 T_M 这个参数,

$$T_M = T \cdot \frac{M_0}{M}.$$

其中 M_0 是均匀大气的分子量. 把不清楚的T和M归并成一个参数 T_M; 再由假设 $T_M(H)$ 呈简单折线形式,直接积分出由地面到高空的压与;再由此标出密度. 这的确是一个简明的办法. USSA 1962 等模式大气都是这样做的. 这些模式大气的观测基础主要是密度和压力,在其大气参数表中比较有意义的也是这两项. 至于绝对温度T虽然也列了表,但它又和假定的分子量M剖面有关,因而只有一般的参考价值. 由此,我们看到提出 T_M 的目的是解决当时高层大气模式计算的困难. 现在高层大气模式,包括[1]本身,都是直接以 $T(Z)$ 为基础. 而一些低、中层均匀大气模式一直都是直接用 T. 看来在[1]中继续用 T_M 的唯一理由是既保持 86 公里以下计算简单,又使分子量 $M(Z)$ 值在 80—86 公里间可略加调整,以保证M值在 86 公里界面连续. 但如果我们采用更合理的界面连接条件,便没有必要再用 T_M 了(见本文后面分析).

2. 86 公里以下均匀层的计算

在[1]所给的常数表和大气参数表中有个别明显的错误,这些就不细说了. 我们复算了 86 公里以下的大气参数表,发现导热系数 K_t 有点"系统"错误. 由[1]中 K_t 的公式*

$$K_t = \frac{2.64638 \times 10^{-3} \cdot T^{3/2}}{T + 245.4 \times 10^{-(12/T)}},$$

算出 K_t 在海平面的值为 2.53259×10^{-2} J/m · s · K. 这和表 10 所给的值 2.5326×10^{-3} J/m · s · K 是一致的(量级 10^{-3} 印错了,应改成 10^{-2}). 但大气参数表 III 所给的值却是 2.5362×10^{-5} J/m · s · K, 这个值不但量级不对,而且前面的系数值也偏大了 1.0014 倍. 虽然这可能是个偶然错误,但结果却造成整个表 III 中 K_t 值偏大 1.0014 倍. 我们还可以从另一角度来分析这个问题. 因为 USSA 1976 和 USSA 1962 在 51 公里以下是一致的,所以两表中的K值应该一样. 但由 USSA 1962 的K值 6.0530×10^{-6} kcal/m · s · K 乘

* 在[1]中 K_t 和K是通用的.

[1] 所给的换算因子 4.18580×10^{3} J/kcal，算得 K 值为 2.53366×10^{-2} J/m·s·K. 这个值和 [1] 所给的两个值都不一样.因此看来美国标准大气的导热系数的确有些问题.改正 [1]中 K_t 值的简单办法有二：或者将表 III 中 K 值缩小 1.0014 倍；或者保持 K 值不变，而把 K_t 公式中的系数 2.64638 增大一点，改成 2.65014，并将海平面的参考值定为 2.5362×10^{-2} J/m·s·K. 无论用那种办法，表 III 中的 K 的相对值 K/K_0 可保持原值不变.

3. 大气参数界面值的选取问题

[1]将 86 公里作为均匀层和非均匀层的界面，在 1，2，4 节，1.3.2 节和附录 A 中分别讨论了分子量 M，总数密度 n 和各气体成份分数密度 n_i 的过渡问题. 界面值的问题在 [1]，[2]以及其他一些模式大气中都讲得不太清楚，因此我们想仔细分析一下.

设 F_i，M，n，T，P，ρ 为 86 公里以下均匀层模式在界面所算得的气体分容量、分子量、总数密度等参数；相应地设 F_i'，M'，n'，T'，P'，ρ' 为由 86 公里向上算时所应选的起算值. 在这些参数中 F_i 和各成份含量有关，另一些是大气结构的“整体”热力学量. 如果在过界面时，各成份含量连续，即 $F_i'=F_i$. 那么所有其他结构参数也连续. 但是[1]像其他模式那样在界面引进定量的氧原子，而略去 CO_2 和其他一些少量成份. 这样做是可以的，因为高层大气模式一般只需考虑 N_2，O_2，O，Ar，He，H 六种气体. 但由此使得 F_i 不连续. 现在的问题是如何使 F_i 和其他参数在过界面时尽可能少变化.

现在来分析 M'，n'，T'，P'，ρ' 的选值，这五个值要满足二种形式的气体方程：

$$P'=n'kT',\quad P'=\rho'\frac{R^*}{M'}T'.$$

为了便于比较，我们写出相应的 M 等的方程：

$$P=nkT,\quad P=\rho\frac{R^*}{M}T,$$

在 M' 等五个值中，有三个可以任意选，另两个由上述方程决定. 当 $M'=M$ 时，在 n'，T'，P'，ρ' 中任选两个等于其 n，T，P，ρ 中的相应值，另两个也自动等于其相应值，这时气体的热力学参数在界面全部连续. 当 $M\neq M$ 时，因为

$$M'=\frac{\rho'R^*}{n'k},$$

所以 ρ' 和 n' 中只能选一个等于其相应值，这时有以下三种选法：

① $n'=n$，$T'=T$，由此得 $P'=P$，$\dfrac{\rho'}{\rho}=\dfrac{M'}{M}$.

② $\rho'=\rho$，$T'=T$，由此得 $\dfrac{n'}{n}=\dfrac{P'}{P}=\dfrac{M'}{M}$.

③ $\rho'=\rho$，$P'=P$，由此得 $\dfrac{n}{n'}=\dfrac{T'}{T}=\dfrac{M'}{M}$.

从气体在界面应处于平衡这一物理条件出发，第①种选法 ($T'=T$，$P'=P$) 较合适. 由于在实际应用中密度重要，第②，③种选法 ($\rho'=\rho$) 也可以.不管那种选法，只要 M' 和 M 相差小，都可以采用一种简单的界面衔接办法. 即下面的模式只算到 85500 米，并列表；而从 86 公里用新的值起算. 由于间断值相差很小，实际上在大气结构表中是看不出这种

间断的.

4. USSA 1976 中，F_i' 和其他界面值的选法

[1]在 86 公里引进 $8.6\times10^{16}/m^3$ 的氧原子，其分容量为 0.000594472，略去的 CO_2 等气体的分容量为 0.000336. 由于引进的数大，因此其他成份的分子容量要适当减少. [1]采用的办法是 N_2, O_2, Ar 等的 F_i' 等比例地减少，即 $F_i'=\varepsilon F_i$，其中 $\varepsilon=0.99974445$. 由于减少了比较重的 CO_2 含量，又增加了轻的氧原子含量，结果造成 M' 值由 28.9644 减少到 28.9522. 而 M' 值的减少又造成其他结构参数界面值的变化.

在[1]中没有清楚说明其他界面值如何选. 但从数值上来看，[1]采用了上节所说的第③种选法，即 ρ 和 P 连续，M, n, T 在界面有间断. 为了解决这个间断，[1]把 80—86 公里作为过渡区. 并提出当需要细致考虑大气参数值时应将原来算得的 M, n, T 值修改. 办法是：$M(Z)$ 值逐渐由 28.9644→28.9522 (见[1]中 1,2,4 节)，n 值改成 nM_0/M (见[1]中 1,3,2 节)；对于温度值则认为原来算得的 T 是"分子量温度" T_M，真正的温度 $T=T_M\cdot M/M_0$. [1]所用的这种界面值衔接办法不但繁，而且还要依赖本来可以不用的"分子量温度" T_M. 当然让 $M(Z)$ 逐渐变化的办法在一些别的问题中可能有用，它表示原子氧成份逐渐增加，但现在 M' 和 M 相差很小，可用上节说的简单界面衔接办法. 事实上[1]在大气参数的列表中已"不自觉"地用了这种简单衔接办法. 可能是由于对界面值问题不清或出于要描述逐渐过渡而提出上述这种较繁的，同时又依赖 T_M 的办法.

5. 一些建议

从以上分析我们看到，若要使大气结构的"整体"参数在界面连续，最好的办法是使 $M'=M$. 而要使 $M'=M$，关键在于增加分子量较重的 Ar 或 O_2 的含量，而增加 Ar 最有效. 事实上只要增加 0.001 的 Ar，即可使 $M'=M$. 下面给一个算例：

若选 $F_{N_2}'=0.78$, $F_{O_2}'=0.208838$, $F_O'=0.000594$

$F_{Ar}'=0.01056$, $F_{He}'=0.00000524$ (保持原值 F_{He}). F_H' 的值很小，如[1]一样暂略去. 则

$$\sum F_i'=0.99999,$$

$$M'=\sum F_i'M_i=28.9644=M.$$

因为有几种气体，也可用别的办法使 $M'=M$；如不变 F_{Ar}，而使 F_{O_2} 增加 0.003，F_{N_2} 减少 0.003，还可使 F_{Ar} 和 F_{O_2} 都略为增加等，

从大气的温度结构来看，[1]把计算界面定在 86 公里的中层顶是有道理的. 但是高层大气的主要特征是气体的解离和电离，作为均匀大气层和高层大气的计算界面选在 86 公里以下，如 80 公里，可能更恰当，因为这时需要引进的氧原子含量 F_O' 较小.

另外，我们觉得在高层大气模式的气体组成中还应该增加 CO_2 一项. 从物理上看 CO_2 本来是低、中层均匀大气的组成部分，并有 0.000314 的含量，同时 CO_2 还是中层顶、热层底的红外散热物质，因此在界面突然略去不妥，让它在 80—120 公里的过渡层中自然衰减较合适. 从计算上看保留 CO_2，如果 F_O' 又很小，则只要对 Ar 等微加调整即可使 $M'=M$.

参　考　文　献

[1] NOAA, et al., U. S. Standard Atmosphere, 1976, U. S. Government Printing office, 1976.
[2] COSPAR, COSPAR International Reference Atmosphere 1972, Akademie-Verlag, 1972.

AN ANALYSIS OF THE U. S. STANDARD ATMOSPHERE, 1976

Sun Chao

(Institute of Space Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this note an analysis of USSA 1976 has been made about its physical assumptions and atmospheric tables.

The main results are:

1. Temperature profile T(Z) may be defined with absolute temperature in full height range without using molecular-scale temperature T_M.

2. The elliptical segment of T(Z) will give a sudden heat sink of the order of 10^{-7} J/m^3. s at 110 km which is too large.

3. It seems the only systematic mistake in atmospheric tables is the coefficient of thermal conductivity.

4. A detailed discussion is given about the possible choices to connect the computations of the homosphere and the upper heterosphere.

5. We suggert to introduce CO_2 as a component in the upper atmosphere model and lower the computing interface down to 80 km.