

密度温度 T_ρ ——一个新的大气热力学变量^①

彭治班¹ 周小刚² 赵秀英¹

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081)

(2 中国气象局培训中心, 北京 100081)

在近年出版的湿大气对流专著和论文中^[1,2,3], 引入了一个新的大气热力学变量——密度温度 T_ρ 。现根据有关文献及我们的理解, 对其介绍如下。

1 虚温 T_v

考虑到密度温度 T_ρ 可称为广义虚温, 故我们先重温一下虚温的概念。众所周知, 在气压 p 和温度 T 相同的情况下, 空气密度 ρ 随水汽含量而变化: 湿空气比干空气轻; 水汽含量越多, 湿空气密度越小。习惯上, 将密度与水汽含量的相关性放到一个修正的温度——虚温 T_v 中去考虑, 使得^[1]:

$$R_d T_v \equiv R' T,$$

$$\text{或 } T_v \equiv T \frac{1 + r/\epsilon}{1 + r} \simeq T(1 + 0.608r)$$

(1)

其中, R' 是有效气体常数, ϵ 为干空气气体常数 R_d 与水汽气体常数 R_v 之比, r 为混合比。余为惯用符号。

由式(1)看出: 虚温 T_v (K) 可视作在同一压力下, 干空气密度等于湿空气密度时空气应有的绝对温度。

2 密度温度 T_ρ

当空气中充满云滴、冰晶和(或)降水物质时, 在较好的近似下, 可以认为这些微粒是以它们的末速降落的, 亦即认为云和降水物

质是悬浮物^[1]。这样, 在很多场合, 空气和凝结水的混合物可看成是一个多相系统^[4,5]。另外, 大气湿对流中空气运动的尺度比凝结水粒子之间的典型距离大很多, 因此, 应考虑凝结水对多相系统密度的贡献。可以把这个系统的比容写为^[1,2]:

$$\alpha = \frac{V_a + V_l + V_i}{M_d + M_v + M_l + M_i} \quad (2)$$

式中, V_a, V_l, V_i 分别是湿空气、液态水和冰的体积, M_d, M_v, M_l, M_i 分别是干空气、水汽、液态水和冰的质量。将上式分子、分母同除 M_d , 并认为湿空气与干空气体积相等, 可得:

$$\alpha = \alpha_d \left[\frac{1 + r_l(\alpha_l/\alpha_d) + r_i(\alpha_i/\alpha_d)}{1 + r_T} \right] \quad (3)$$

这里 $\alpha_d, \alpha_l, \alpha_i$ 分别是干空气、液态水和冰的比容, $r_T = r + r_l + r_i$ 是水物质的总的混合比。由于液态水和冰的比容比空气比容要小 3 个数量级, 并且由于 r_l, r_i 的典型量级是 10^{-3} , 式(3)中分子的后两项可以忽略, 故有:

$$\alpha \simeq \alpha_d \left(\frac{1}{1 + r_T} \right), \alpha_d \simeq (1 + r_T) \alpha \quad (4)$$

利用水汽混合比的定义及理想气体定律, 可给出:

$$r = \frac{\rho_v}{\rho_d} = \frac{e/R_d T}{p_d/R_d T} = \frac{R_d}{R_v} \frac{e}{p_d} = \epsilon \left(\frac{e}{p_d} \right) \quad (5)$$

(下转封三)

① “冰雹落区预报逐级指导技术研究”与“内蒙防雹减灾新技术和冰雹预报研究”共同资助

(上接第 57 页)

利用式(5)及理想气体定律,将式(4)变换如下:

$$\begin{aligned}\alpha &\simeq \frac{R_d T}{p_d} \left(\frac{1}{1+r_T} \right) \\ &= \left(\frac{R_d T}{p} \right) \left(\frac{p_d + e}{p_d} \right) \left(\frac{1}{1+r_T} \right) \\ &= R_d \frac{1}{p} T \left(\frac{1+r/\epsilon}{1+r_T} \right) \quad (6)\end{aligned}$$

类似于引入虚温 T_v 的过程,由式(6)可引入密度温度 T_ρ 的定义式:

$$T_\rho \equiv T \frac{1+r/\epsilon}{1+r_T} \quad (7)$$

3 虚温 T_v 与密度温度 T_ρ 的比较

与虚温 T_v 的物理意义类似,密度温度 $T_\rho(K)$ 可看作在同一压力下,干空气密度等于含干空气、水汽、液固态水的多相空气的密度时,空气应有的温度。考虑到理想气体定律后,该多相系统的比容 $\alpha = R_d T_\rho / p$ 。

当无水凝物与冻结物时,亦即 $r_T = r$ 时,对比式(1)、式(7)可见:在这种情况下, $T_\rho = T_v$ 。

这就是说,虚温 T_v 是密度温度 T_ρ 的特例。

虚温 T_v 总是大于、等于未订正的空气温度。密度温度 T_ρ 则不然,根据凝结水和水汽的相对量, T_ρ 可大于也可小于未订正的空气温度。这不难从式(7)看出,也不难从物理上进行解释。

参考文献

- 1 Emanuel, K. A. Atmospheric Convection, 1994, Oxford Univ. Press, New York; 107~144.
- 2 Smith, R. K. (ed). The Physics and Parameterization of Moist Atmospheric Convection, 1997, Kluwer Academic Publishers; 29~58.
- 3 Song-You Hong, Hann-Ming Henry Juang, and Qingyun Zhao, 1998, Implementation of Prognostic Cloud Scheme for a Regional Spectral Model. Mon. Wea. Rev. 126, 2621~2623.
- 4 王竹溪. 热力学简程. 北京:人民教育出版社, 1978, 第5章.
- 5 Iribarne, J. V. and W. L. Godson, Atmospheric Thermodynamics. London, England 1981, 81; 53~85.