

埃玛图微机制作及对流有效位能的计算^①

李耀东 刘健文 刘玉玲 张方友

吴宝俊

(空军航空气象研究所,北京 100085)

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

该文阐述了微机制作简化埃玛图的思路和方法,介绍了与对流密切相关的大气能量参数 CIN 、 $CAPE$ 的计算方法,分析了两个实例,并对文中设计的大气能量计算方案的应用前景进行了讨论。

关键词: 埃玛图 大气能量 CIN $CAPE$

引 言

研究大气的对流问题时,埃玛图(温度对数气压图)是最常用的热力学图表之一。由于埃玛图坐标满足特定的数学物理关系,故在埃玛图上面积表示能量,等面积表示等能量。这样,它不仅能直观反映大气在整个对流层的垂直热力结构,还包含了大气垂直稳定度以及与对流运动有关的大气能量的许多信息^[1]。

手工绘制探空图不仅繁琐,而且由于引入了人为因素,或多或少都有误差存在。这种误差在制作大气层结曲线时不大,但在制作状态曲线时就会增大。而在用气块法计算对流有效能量时,这种误差会表现得非常明显,特别是层结曲线和状态曲线靠近时。用微机制作探空图,并在机器上实现与对流相关的大气能量的计算,不仅方便灵活,而且能避免上述误差的出现。

1 埃玛图制作

埃玛图的横坐标为温度,纵坐标为对数气压,因此,当用微机制作该图且图面大小确定后,温度表现为与屏幕上横向像素点固定不变的比例对应关系,气压表现为与屏幕纵向像素点广义不变的比例对应关系。上述关

系确立后,气压和温度与屏幕图上的图象点有着简单的对应关系。

1.1 层结曲线制作

有了物理坐标和图象坐标的对应关系,便很容易制作出层结曲线。

1.1.1 温度层结曲线

具体做法:按照底图的制作方法 with 比例,把一组表示温度与气压的探空点 (T_k, P_k) 映射到屏幕坐标 (X_k, Y_k) 上,再把这组屏幕坐标点依次相连,就得到这组温度探空曲线。值得注意的是:在 200hPa 以上物理坐标和屏幕坐标的映射关系与 200hPa 以下稍有不同,即 $(T, 200hPa)$ 在屏幕上有两个图象点,在 200hPa 以上的探空要按照另外一种关系与屏幕对应,这与手工点绘相一致。

1.1.2 露点层结曲线

制作方法与层结曲线完全相同。

1.2 状态曲线制作

与层结曲线相比,状态曲线的制作较为复杂。当选取的起始点不同时,状态曲线也往往不同。为简单计,本文把起始点选在大气的最低层。

状态曲线一般包含两部分,即干绝热部分和湿绝热部分。干绝热部分是指从起始点

^① “冰雹落区预报逐级指导技术研究”课题研究论文

开始,按干绝热过程即在埃玛图上的等位温线上上升到抬升凝结高度(t_c, p_c)。抬升凝结高度气压 p_c 及抬升凝结温度 t_c 按照下式^[2]求得:

$$t_c = t_0 - \frac{t_0 - t_{d0}}{0.976 - 8.33 + 10^{-4} \times \frac{(237 + t_{d0})^2}{237 + t_{d0}}} \times 0.976 \quad (1)$$

$$p_c = p_0 \left(\frac{273 + t_c}{273 + t_0} \right)^{\frac{C_{p,d}}{R_d}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, t_0, t_{d0}, p_0 分别表示起始点的温度、露点和气压,其余为惯用符号。

1.2.1 干绝热线制作

首先计算抬升起点(t_0, p_0)对应的位温值,然后,在(t_0, p_0)和(t_c, p_c)之间,气压每上升10hPa,根据位温不变的原则,计算相应的温度值,并计算对应的屏幕坐标,依次相连。

在实际大气中,温度露点差一般不大,干绝热线也不很长,况且干绝热线的曲率很小,接近直线,故在制作干绝热线时,可近似地把起点(t_0, p_0)与抬升凝结高度(t_c, p_c)所对应的屏幕坐标点直接相连作为实际大气的干绝热过程线。

1.2.2 湿绝热线制作

气块在抬升凝结高度以上的过程为饱和和大气过程,即湿绝热过程。湿绝热过程又可分为可逆饱和和绝热过程和假绝热过程。本文仅指后一种,即湿绝热过程遵循假相当位温不变的原则。假绝热过程线在埃玛图上的曲率变化较大,制作也较为复杂。

对于饱和状态(t, p),假相当位温的表达式^[2]为:

$$\theta_{se} = T \left(\frac{1000}{P - E_w} \right)^{\frac{R_d}{C_{p,d}}} \exp \left(\frac{L_w W_w}{C_{p,d} T} \right) \quad (t > 0^\circ\text{C}) \quad (3)$$

$$\theta_{se} = T \left(\frac{1000}{P - E_i} \right)^{\frac{R_d}{C_{p,d}}} \exp \left(\frac{L_i W_i}{C_{p,d} T} \right) \quad (t < 0^\circ\text{C}) \quad (4)$$

式(3)、(4)中, T 为绝对温度, E_w, L_w, E_i, L_i 为液态和固态水物质的饱和水汽(冰汽)压

和汽化潜热(这些参数皆为温度的函数, W_w, W_i 分别为空气温度大于和小于 0°C 时的水汽(冰汽)的混合比,与温度和气压有关。由此不难看出,对应于固定的 θ_{se} (相当于假绝热过程), T 和 P 互为隐函数,不能直接求出,故在绘制湿绝热线时必须用其它的方法。下面介绍解决这一问题的两种常用方法。

① 迭代法:计算出抬升凝结高度(t_c, p_c)处对应的假相当位温 θ_{sec} , 令气压减少10hPa,用一温度估计值 t_m , 即用($t_m, p_c - 10$)所对应的假相当位温值 θ_{sem} 与 θ_{sec} 比较,修改 t_m , 使 θ_{sem} 与 θ_{sec} 接近,当 $|\theta_{sem} - \theta_{sec}| < 0.0001$ 时,迭代终止。此时的温度 t_m 即为假相当位温 θ_{sec} 线在气压高度 $p_c - 10\text{hPa}$ 处的温度值。按此方法,令气压依次递减10hPa,可求得所对应的温度及其所对应的屏幕坐标。根据定义,把它们依次相连,就可得到经过点(t_c, p_c)的假相当位温线。

② 二分法^[2]:在埃玛图上,对应于某一点(t_i, p_i),有一确定的假相当位温 θ_{se} , 气压减少10hPa,即对应于($t_i, p_i - 10$),也有一确定的假相当位温值 θ_{se1} 与之对应。同样,对应于点($t_i - 0.1, p_i - 10$),有另一 θ_{se2} 与之对应(图1)。按照二分法概念,在 $p_i - 10$ 处,对于确定的 θ_{se} ,其温度值 t_{i+1} 应为:

$$t_{i+1} = t_i - \frac{\theta_{se1} - \theta_{se}}{\theta_{se1} - \theta_{se2}} \times 0.1 \quad (5)$$

按照这种方法,可求出气压依次递减10hPa时 θ_{se} 所对应的温度。与迭代法类似,也可刻出实际的湿绝热过程线。

用以上两种方法制作出的湿绝热线都有较高的精度,可任选一种。第二种方法计算量相对小些,本文所采用的是该方法。

2 对流抑制能量与对流有效位能计算方法

利用埃玛图计算与对流相关的大气能量的基础是气块法理论,在计算方案中都要用到对气压高度积分。故计算的关键在于转化为求在各气压高度时抬升气块及其环境的状

态。

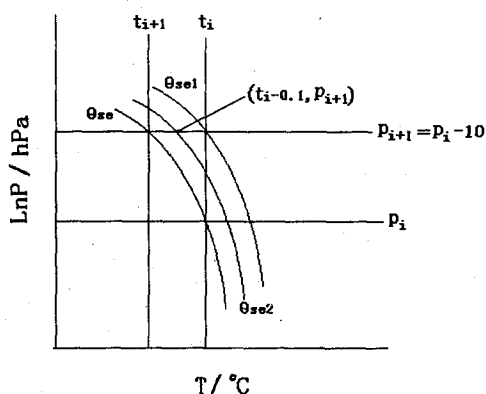


图1 二分法示意图

在某一确定的气压高度,决定大气热力状态的最基本要素为温度 T 、水汽含量 Q_v 和水物质含量 q 。以下标 e 代表环境大气状态, a 代表气块的状态,按各物理量呈对数气压分布的常用假定,不难求得每隔10hPa的大气层结状态 (T_e, Q_{ve}, q_e);按照气块法理论并利用大气状态曲线制作过程,不难求得每隔10hPa气块的状态 (T_a, Q_{va}, q_a)。有了这些与能量关系密切的大气状态值后,即可进行与大气对流相关的能量参数的计算方法讨论。限于篇幅,本文暂只讨论其中的两个,余者将另文讨论。

2.1 对流抑制能量 CIN ^[3] (Convective Inhibition)

CIN 为埃玛图上大气层结曲线和状态曲线在大气底到自由对流高度之间围成面积所表示的能量,其具体表达式^[3]为:

$$CIN = g \int_{z_{fc}}^{z_f} \frac{1}{T_e} (T_a - T_e) dz \quad (6)$$

式中, T_a 为气块温度, T_e 为对应于气块上升高度处大气层结曲线上的温度(下称层结温度)。 Z_{fc} 表示起始高度, Z_f 表示气块的自由对流高度。 T_e 为起始高度到自由对流高度之

间的平均温度(K)。

实际计算时,首先必须确定自由对流高度。具体做法是自起始高度开始向上,每隔10hPa,比较大气的层结温度和气块温度,当气块温度开始大于层结温度时,按对数线性插值法计算气块与环境温度相等时的高度,即自由对流高度。气块被抬升到自由对流高度后,不需要其它动力,由于气块温度比环境温度高而可自由地向上运动。

为了方便,一般在计算时把对高度积分转化为对气压积分,并离散化进行求和。

CIN 的物理意义:处于大气底部的气团,若要能自由地参与对流,至少要从其它途径获得的能量下限。在过去,一般把 CIN 作为对流不稳定能量的一部分来考虑,这种考虑并不能反映 CIN 内在的物理意义。实际上,处于底层的大气能否产生对流,取决于它是否能从其它途径获得 CIN 所表示的能量,这是对流发生的先决条件,并不是对已发生对流有其它任何限制。事实上,对于强对流发生的情况往往是 CIN 有一较为合适的值^[3]。太大,抑制对流程度大,对流不容易发生;太小,能量不容易在低层积聚,对流调整极易发生,从而使对流不能发展到较强的程度。

2.2 对流有效位能 $CAPE$ ^[4] (Convective Available Potential Energy)

$CAPE$ 表示在自由对流高度之上,气块可从正浮力作功而获得的能量。因为这部分能量对大气对流有着积极的作用,并可转化成大气动能,故称其为对流有效位能,具体表达式^[4]为:

$$CAPE = g \int_{z_f}^{z_e} \frac{1}{T_{ve}} (T_{va} - T_{ve}) dz \quad (7)$$

式中, T_{ve} 表示虚温, Z_f 表示自由对流高度, Z_e 为平衡高度。

平衡高度的求法与自由对流高度相类似。在平衡高度处,环境对气块的浮力加速度为0,在此高度之上,对流将因为环境的负浮

力作用而受到削弱。

在计算 CAPE 时,若忽略虚温的影响,其即为通常计算的对应于埃玛图上正面积的能量。对于实际大气,气块与环境的温度差和虚温差较为接近,为方便起见,也可忽略虚温的影响而直接代之以温度。这样,把上式转化到气压坐标系并按气压等间隔离散(与状态曲线制作过程气压间隔相等),CAPE 的计算式变为:

$$CAPE = -R_d \sum_{i=1}^N (T_{ai} - T_{ei}) \ln(p_{i+1}/p_i) \quad (8)$$

式中,求和上、下限分别为自由对流高度与平衡高度(在求和起始和结束时,气压差一般不是10的整数倍,需另作处理)。

事实上,CAPE 比传统意义上的对流不稳定能量更能恰当地表示出对流发展的强度,它作为对流发展的重要标志已经直接或间接投入业务使用^[5,6]。按照理想假定,气团若在自由对流高度的垂直速度为零,在自由对流高度之上,由于环境的正浮力而产生一定的加速度,则其到达平衡高度时,最大上升速度为:

$$W = \sqrt{2 \times CAPE} \quad (9)$$

3 计算示例

示例一:1996年6月29日08时北京站

图2为根据1996年6月29日08时(北京时、下同)北京站实际探空制作的埃玛图,图面右上角显示的为 CIN、CAPE 等参量的计算结果。与本个例对应的实际天气情况是,当天午后北京的密云、平谷两县发生了大范围的致灾冰雹(引自北京市气象局1996年夏季北京冰雹灾情报告)。

对于该个例,气块自地面($t = 21.6^{\circ}\text{C}$, $t_d = 19.9^{\circ}\text{C}$, $p = 993.0\text{hPa}$)抬升。计算得到抬升凝结高度为968.4hPa, CIN 为65.6J·kg⁻¹,自由对流高度为743.6hPa,平衡高度为245.9hPa,CAPE 为1200.1J·kg⁻¹;若考

虑虚温,CAPE 为1300.5J·kg⁻¹。气块上升到500hPa 时与环境的温差为4.1℃,在上升过程中,与环境的最大正温差为6.1℃(320hPa)。

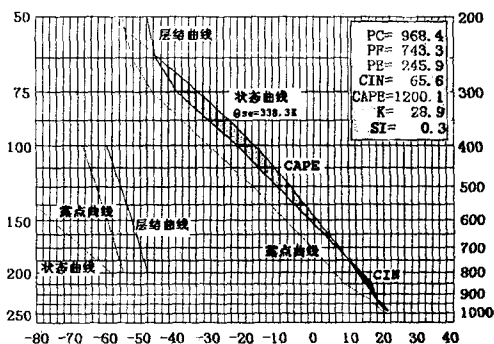


图2 1996年6月29日08时北京站探空及能量埃玛图 (图面右上角中 PF、PE、K、SI 分别为自由对流高度和平衡高度处气压、K 指数与沙氏指数)

示例二:1996年6月10日08时北京站

图3为根据1996年6月10日08时北京站实际探空制作的埃玛图。与本个例对应的实际天气情况是,当天午后,北京地区出现大范围轻雹。

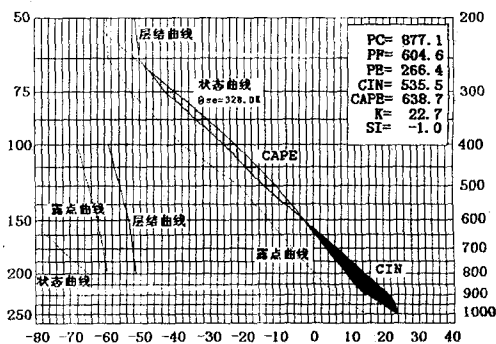


图3 1996年6月10日08时北京站探空及能量埃玛图 (其它说明同图2)

对于该个例,气块自地面($t = 24.0^{\circ}\text{C}$, $t_d = 19.0^{\circ}\text{C}$, $p = 1002.0\text{hPa}$)抬升。计算得到

抬升凝结高度为877.1hPa,抬升凝结温度为12.9℃,自由对流高度为604.6hPa, CIN 为535.5J·kg⁻¹,平衡高度为266.4hPa, $CAPE$ 为638.7J·kg⁻¹;若考虑虚温, $CAPE$ 为680.2J·kg⁻¹。

本个例采用的为08时探空。假如到午后,地面气温增4℃,露点增0.5℃,其它层温湿不变,那么计算所得的抬升凝结高度为833.7hPa,自由对流高度为663.5hPa,平衡高度为240.3hPa, CIN 为238.9J·kg⁻¹,不考虑虚温影响, $CAPE$ 值为1418.3J·kg⁻¹;若考虑虚温影响, $CAPE$ 为1495.6J·kg⁻¹。

4 讨论

4.1 用微机制作简化埃玛图,并籍此计算对流有关大气能量参数,与手工点绘及计算相比,不仅客观方便,而且防止了由人为因素引入的误差,使得能量计算较为准确;不考虑虚温, $CAPE$ 严格等于埃玛图正面积所表示的能量,考虑虚温影响, $CAPE$ 值增加。

4.2 埃玛图的制作难点在于等 θ_e 线的制作。而在设计制作该线时,可以得到抬升气块在各个气压高度层的温度值,它为用气块法计算大气能量提供最基本的热力状态参数。基于这种方法,可以准确计算如沙瓦特指数、气块与环境最大正、负温差等,也可根据需要设计计算自任意高度抬升的 $CAPE$ 。

4.3 本文在绘制探空图时,把大气的最低层作为抬升的起点。有了微机制作探空图的思路,可以用能量方法推算对流云顶高度(对流上限)^[5],也可根据实测云顶高度,按照本文设计的能量计算方法,逆推大气的抬升起点。

4.4 气块法是一种理想情况。有了本文状态曲线制作及 $CAPE$ 的计算思路,可根据实际大气探测情况,开展对诸如气块中的液态水拖曳(修正的对流有效位能 $MCAPE$)及下沉对流(下沉对流有效位能 $DCAPE$)等问题的进一步研究。关于 $MCAPE$ 和 $DCAPE$ 的计算方法等,我们将另文讨论。

参考文献

- 1 Emanuel K A. Atmospheric Convection. Oxford University Press, 1994.
- 2 郑良杰. 中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟. 北京:气象出版社, 1989:89~101.
- 3 Frank P. Colby, J. Convective Inhibition as a Predictor of Convection during AVE-SESAME, Mon. Wea. Rev., 1984, 112:2239~2552.
- 4 吴宝俊. 对流天气分析预报中引入的几个新参数. 航空气象科技, 1988, (2).
- 5 Desautels, G. and Verret, R., Canadian meteorological Centre Summer Severe Weather Package, 18th Conference on Severe Local Storms, AMS., 1996:689~692.
- 6 Huntrieser, H., et al. A New Thunderstorm Index for Switzerland, 18th Conference of Severe Local Storms, 1996:255~259.

Drawing Emagram with Microcomputer and Calculating Convective Available Potential Energy

Li Yaodong Liu Jianwen Liu Yuling Zhang Fangyao

(Air Force Aviation Meteorological Institute, Beijing, 100085)

Wu Baojun

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing, 100081)

Abstract

The method of drawing Emagram pattern with microcomputer was introduced. Two parameters of energy connecting to atmospheric convection were given, which including CIN , $CAPE$. Two real cases were analysed, and the scheme of calculation for convective energy was discussed.

Key Words: Emagram atmospheric energy CIN $CAPE$