

# 现代天气工程学

王继志 杨元琴 著



气象出版社

# 现代天气工程学

王继志 杨元琴 著

15AF 91

97-10

14V22  
柳应奎

气象出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

现代天气工程学/王继志, 杨元琴著. —北京: 气象出版社, 2000. 8

ISBN 7-5029-2900-2

I. 现… II. ①王… ②杨… III. 天气预报-研究  
IV. P45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 16669 号

**现代天气工程学**

王继志 杨元琴 著

责任编辑: 黄丽荣 成秋影 终审: 周诗健

封面设计: 尹春喜 责任技编: 刘祥玉 责任校对: 姜桂珍

气象出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 46 号 邮编: 100081)

\* \* \*

北京市白河印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 30.5 字数: 780 千字

2000 年 8 月第一版 2000 年 8 月第一次印刷

印数: 1~2500

ISBN 7-5029-2900-2/P · 1013

定价: 52.00 元

## 内 容 简 介

本书是作者近 10 年来在天气分析预报技术迅速发展过程中,在中央气象台从事业务现代化实践与研究成果的总结;也是近十年来作者根据在国内外从事有关天气预报工程技术的交流与讲课的讲稿基础上形成的。完成这本著作先后花费了两年多时间,其中在有关发展技术的章节上反复修改更新,力求能写进最新的技术。

本书包括绪论和十七章。绪论中以世纪之交的技术发展为契机,阐述了天气工程学的发展前景,回顾了近代天气工程学从 Petterssen 到我国陶诗言先生在国内外天气工程学发展中的作用。第一章介绍了天气工程学的基本概念和内容,介绍了现代天气工程中 AAA 工程当前的发展趋势及我国 AAA 工程中以 AFDOS 系统为缩影的发展。第二章介绍现代气象资料收集与分发系统。第三章到第五章介绍了人机交互系统的概念、发展和技术,提出了物理人机交互新概念与技术方法及其在天气工程学发展中的重要意义。第六章至第八章给出了资料库、图形图像库及程序库的基本技术。第九章至第十一章给出了现代天气工程学中图形学的理论和算法,给出了二维和三维作图的技术、方法及气象应用。

AFDOS 系统是由作者设计、研制并在国内外推广应用,并得到 WMO 推荐和注册的天气工程系统中唯一冲出亚洲走向世界的完整的自动化业务系统。在本书十二章中全面介绍了该系统的原理、方法和新技术。第十三章至十七章用五章篇幅介绍了 AFDOS 系统作为现代天气预报业务平台的一些新技术——多媒体技术、三维诊断技术以及智能综合决策技术在天气预报平台中的设计与应用。

全书附有大量原程序,图文并茂,既重视天气理论分析、业务算法实施,又强调天气工程学中作为技术核心,分析预测理论、动力气象学、数值预报学以及计算机通讯与图形图像学在交叉学科中的发展与技术增长。每章附有思考题和参考文献供读者参考。

## 序 言

近二十多年来,天气分析和预报业务有了快速的进展。在 70 年代出现了自动地面观测系统(ASOS)、美国天气局的气象现场业务与服务自动化系统(AFOS)以及现代化天气交互处理系统(AWIPS)。在 90 年代又出现了人工智能天气预报业务系统(AIFOS)。这三种系统(称 AAA 系统)的出现标志着现代天气分析预报已走上工程化的道路。王继志、杨元琴两人近十年来一直在中央气象台从事天气预报工程化技术的研究。他们设计和研制了天气分析预报业务化系统(AFDOS)为我国 AAA 工程建设填补了空白。这套系统得到世界气象组织(WMO)的推荐和注册,并已向第三世界国家气象部门推广。作者曾多次在这些国家进行讲学,介绍这个系统的功能。

作者最近将他们十年来从事天气预报业务工程化的经验进行系统总结,写出了“现代天气工程学”一书。全书包括绪论和十七章,全面介绍了现代天气工程学的内容以及今后发展的趋势,书中对他们开发的(AFDOS)系统作了详细的介绍(包括原理、方法和一些新技术)。书中附有大量原程序以及实际例子,每一章还附有思考题。

我相信本书的出版,将得到广大读者的欢迎和喜爱。

陶诗言

1999 年 1 月 28 日

## 绪 论

纵观人类科技发展历史,往往在世纪转折时期,许多新的科学在交叉学术领域中孕育发展。公元前 500 年古埃及尼罗河测地学研究发展很快,到公元 1 世纪,多年来尼罗河畔测量学研究证明,地球可能是圆球体,并推测是绕着太阳转动的。于是在公元 5~15 年,古天文学作为新学科从此诞生。这中间经历了大约 500 年!

天气学发展也是如此。测地学发展对天气学研究与发展影响甚大。但海洋学的发展对天气研究的需要就显得更为突出。15 世纪当人们开始从大陆驶向广阔的海洋时,天气图学才在测地学与海洋学交叉学科之间得到发展。众所周知,15 世纪郑和七次下西洋,而直到 17 世纪各类气象观测方才出现。这里航海安全的需要是重要原因。人们有理由认为,如果在大陆上旅行对天气依赖尚不迫切,若没有海图,不了解海上风浪和季风等变化,实现扬帆出海将会困难重重。天气图最早于 1842 年由美国 Loomis Elias 出版。它是具有等温线、等压线、风向风速的海区天气图<sup>[1]</sup>。1874 年丹麦的霍夫迈尔(H. C. Hoffmeyer)绘制了第一张北半球天气图。1881 年,西北太平洋上最早的台风路径图绘出,而西北太平洋最早的有等值线的天气图出现在 1897 年。我国最早的天气图出现在 20 世纪初的 1907 年,由徐家汇观象台绘出<sup>[2]</sup>。由此可见,从航海天气探测到天气绘图,由海洋返回大陆,发展成为较完整的学科又花费了约 5 个世纪,并在 19 世纪到 20 世纪之交初步形成了天气(图)学新学科。

如所周知,到了本世纪,天气学的发展速度之快大大超过了前几个世纪。

早在 20 世纪 50 年代初,当时在任的挪威气象局长 Sverre Petterssen 撰写了《天气分析与预报》的第一版<sup>[3]</sup>。在该书中,作者阐述了天气分析预报技术在当时能够建立的比较完整的理论体系与方法技术。该作者给出了有关天气学、动力气象学、物理气象学等几大分支的论述(Introduction to Meteorology)。8 年后,S. Petterssen 再版他的专著时指出,15 年来,气象科学发展的最伟大的贡献,是天气学与动力气象学之间差别的缩小<sup>[4]</sup>。

与此同时,陶诗言先生的名著《高空分析与天气预告》(1951)<sup>[5]</sup>问世。这是我国第一本把天气分析和预报技术从理论阐述到实践法则密切结合的专著。北京大学谢义炳先生的《天气学基础》<sup>[6]</sup>、杨大昇先生的《动力气象学》<sup>[7]</sup>以及国外 Palmen 和 Newton 的《大气环流系统》<sup>[8]</sup>等书出版以来的研究与发展,形成了动力气象学与天气预报学结合的天气学科发展的新阶段。

计算机技术发展之快,特别是计算机图形技术以其清晰的图形、逼真的图像、科学模拟仿真以及对自然景观动态显示和准确的数理表达等特点,使其在各行各业中应用推广之迅速是人们始料不及的。<sup>[9~13]</sup>这也正是本世纪内的事情。世界上第一台电子计算机出现至今仅仅 50 余年的历史。当时第一台电子计算机就是用于数值积分的,名字为 Electronic Numerical Integrator and Computer,英文缩写为 ENIAC。这台计算机于 1946 年 2 月 15 日正式揭幕运行。该机共使用了 1.8 万只电子管、7 万只电阻、1 万只电容,耗电 140 千瓦,占地 170 平方米,重 30 多吨,每秒钟运行 5000 次。仅仅 50 年后的今天,置于家庭室内不足一平米占地的微机 586,功能要强于 ENIAC 数千倍。可见,技术进步给人类带来的价值是多么不可估量。因此,计算机与计算机图形图像学与天气图学之交叉领域已经或即将形成的新的学科在技术高速发展的今天不再需要漫长岁月,即将到来的世纪之交已经给出了新学科发生发展的机遇。

11.4/104

这个新的学科发展就是本书所要介绍的‘现代天气工程学’。下面让我们进一步加以讨论。

人们清楚地认识到,最近 50 年中发展速度快,对气象科学技术进步影响最大的有三项技术:一是卫星遥感探测与通信技术;二是数值天气预报新技术;三是计算机图形图像技术<sup>[9]</sup>。

30 年前的今天,人类第一次登上月球,实现了美丽神话——‘嫦娥奔月’的旅行。支持这一伟大壮举,并能使这一壮观情景立刻呈现于地球上亿万人眼前,除人们知道的火箭工程技术外,计算机图形图像工程师们也做出了真正卓有成效的贡献。

今天,不论人们是否已经意识到,计算机图形、图像学及其技术通过深入到千家万户的计算机荧光屏幕,通过正在架设的信息高速公路及把全球的家家户户联网的 Internet 技术,已经向人们展现了即将改变人类生活的巨大力量。

数值天气预报技术发展之快也许易于为人们所察觉。计算机问世后不足 5 年,气象学家 Charney 首先用它作出了世界上第一张可以拿得出手的、合乎常理的 500 百帕形势数值预报图。这时计算机几年内从 5 千次/秒的运算速度已提高到 5 万次/秒。当时只能用正压过滤模式作一层 500 百帕预报,范围不超过半球,网格距 381 公里。15 年以后的 1965 年,计算机用于数值预报的速度提高到百万次/秒。到本世纪 90 年代,我国国家气象中心用于数值天气预报的计算机已升至十亿次/秒(见图)。各国气象局的数值天气预报模式能力发生了巨大的变化。可见,本世纪的后 50 年,计算机技术的发展对天气预报的影响是多么巨大。

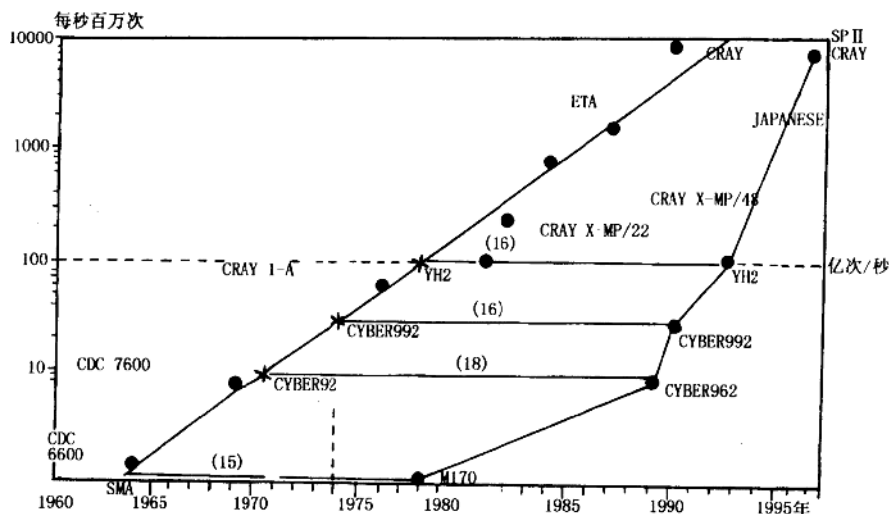


图 世界发达国家和我国气象业务的计算机速度的提高

然而,如果把计算机运算能力的提高仅仅看作是超级算盘,低估其在多学科综合发展的生长点上产生新学科和形成新领域的作用,就难于预测下一个世纪天气工程学的发展。

天气是一种十分复杂的大气物理现象。从古至今,人们往往把世上最复杂、最难于理解和预测之事归结为天。‘天气’不过是人类世代代对最疑难的事物认识理解的代名词。今天‘天气’一词作为一门科学,其含意当然不同,但究其渊源,对理解天气科学发展是有意义的。

古代,人们把复杂瞬变的万物之发生发展与运作归结为‘天’。天是什么?就是对大自然中一切事物的综合与统管。英文中 Synoptic 一词最早出自于《圣经》中对其前三章的综述

(Gospels<sup>[14]</sup>, 1755)。其原意为对上帝建造的世界的构造和运作原理给出概要与综合。Synoptic 词意后来演变为概要与综合,但词的内涵仍包含着对变幻莫测的现象的综合。从 Synoptic 的第二词意释为‘天气学’,即古代的‘天’学,不难看出,古今中外将天气学(Synoptics)理解为对复杂多变的自然现象(大气变化尤其如此)的综合理解是恰当的。通过研究与掌握大气信息的瞬息万变,从中寻求、综合和探索其物理规律与联系。而电子计算机从它出现的那一天就取名为数值集成(综合)与计算器(Electronic Numerical Integrator and Computer),可见计算机提供给人们的不仅仅是计算速度,更重要的是它的综合集成(integrated)能力。因此,在计算机技术飞速发展的今天,在如上所述的与其密切相联系的卫星遥感、计算机通信、计算机图形图像学(含多媒体技术)、计算机人工智能技术、数值天气预报技术多学科综合发展的交叉合成中,21 世纪将是一个现代天气工程学日新月异、高速发展的时期,我们目前就应当有预感,并有所准备来迎接这一发展。

现代天气工程应包括气象资料收集、资料处理、分析预报制作及产品分发三大工程。其中,诸多新的系统需要研究建立,但对下一世纪天气技术发展影响较大的有三大系统:第一是自动化观测系统;第二是现代天气分析预报综合平台系统;第三是人工智能天气预报系统。这三类系统的综合发展将构成现代天气工程学的主体。在欧洲、美国等发达国家对此三类系统的技术发展投入了极大的力量。其中第一项优先发展的是自动地面观测系统(ASOS, Automatic Surface Observation System);第二项是先后在美国天气局发展的气象现场业务与服务自动化系统(AFOS, Automation of Field Operations and Services)<sup>[15]</sup>和现代天气交互处理系统(AW-IPS, Advanced Weather Interactive Processing System),第三项是发展人工智能天气预报业务系统(AIFOS, Artificial Intelligence Forecasting Operational System)。这三项重要系统都以‘A’字母开始,简称为 AAA 系统工程,是现代天气工程未来发展的代表<sup>[16]</sup>。我国在发展 AAA 系统上已有了很好的起步。众所周知的 AFDOS 系统即是中国自行研制的天气分析预报业务化系统(Analyzing Forecasting Data-processing Operational System)<sup>[17]</sup>的缩写,AFDOS 系统作为天气系统工程在中国的发展得到世界气象组织(WMO)的肯定<sup>[18]</sup>,经 WMO 推荐,成为发展 AAA 系统的第三世界样板项目(Pilot Project),先后在亚洲、非洲等地的一些国家中推广应用,并取得了良好的效果。中国 AFDOS 系统在未来国际现代天气系统工程(AAA)发展中占有了一席之地是令人欣慰的。

近年来,作为中国国家级天气系统工程建设的的重要基地——国家气象中心的业务现代化建设取得显著进展。根据 1996 年《中国气象年鉴》和《国家气象中心年鉴》记载,截至 1996 年国家气象中心完成了 CRAY 巨型机配套设备工程。1999 年引进 4000 亿次计算能力的超级并行计算机“神威”为我国气象中心巨型机、大型机组更新和数值预报系统的建设,提供了新的条件。

CRAY 巨型机配套工程还包括 C92 巨型机扩容、计算机网络升级,以及数值预报及其产品分发系统的调整<sup>[19]</sup>。

与上述硬件工程配套的在软件工程上也取得很大进展。‘八五’重点科技攻关项目“台风、暴雨灾害性天气监测、预报技术研究”(85-906)是近年来‘天气系统工程’建设中软件工程建设的重要代表。在国家‘八五’重点科技攻关项目中,国家气象中心与中科院大气物理所联合承担了 20 余个重点专题的研究。《台风暴雨预警系统》的研究成果使天气工程学理论与天气工程建设相结合的进程迈出了新的一步。‘八五’攻关研究成果的业务化为我国‘AAA’工程之一的 AFDOS 系统平台的进一步完善提供了理论和技术。‘八五’重要研究课题并转化为业务的



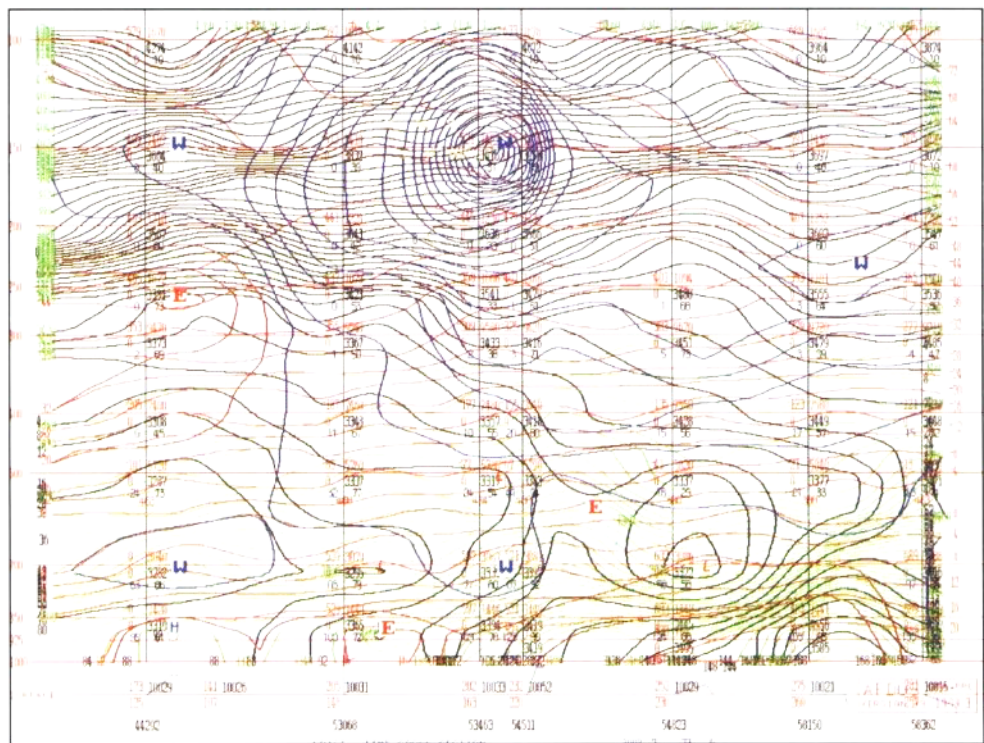
成果之一‘AFDOS’系统新版本在国家气象中心投入业务化运行<sup>[20]</sup>,标志着我国天气工程学从理论研究到业务实践已进入了一个良好的发展阶段。21 世纪已经并正在向人们招手。我们向 21 世纪提交什么?在众多学科交叉技术发展中,‘天气工程学’无疑将面临发展和挑战。

### 思 考 题

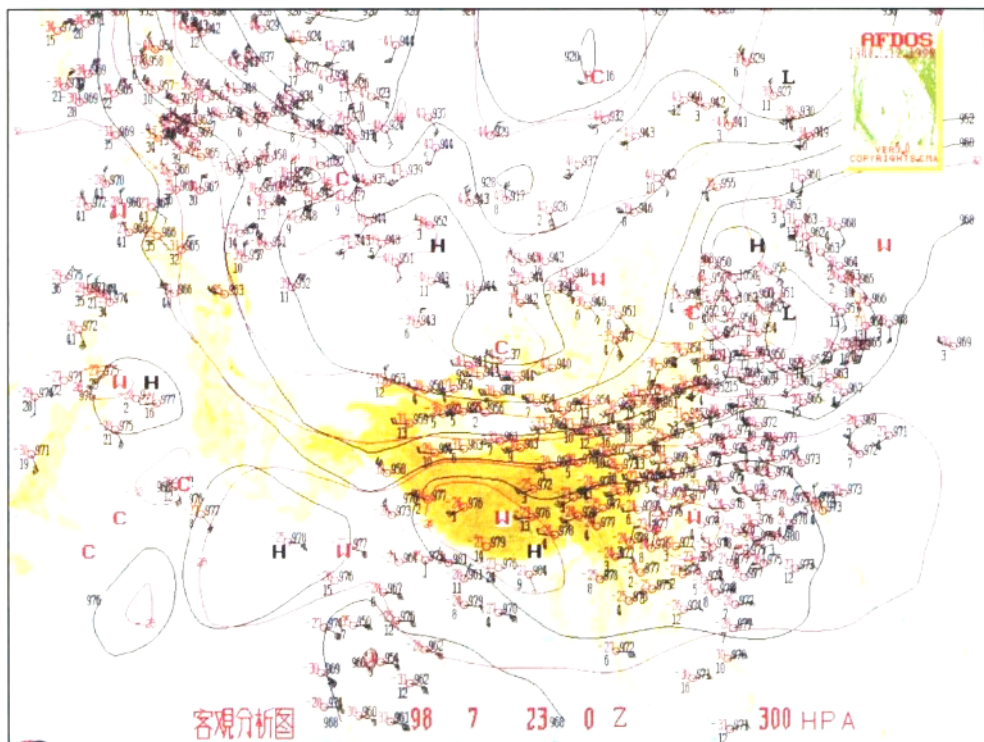
1. 简述天气学发展历史,评述天气工程学的产生时代与技术背景。
2. 现代天气工程学包含哪几项支柱工程? 21 世纪气象科学发展中的 AAA 系统工程是什么? 我国在 AAA 系统工程研究中有何发展?

### 参 考 文 献

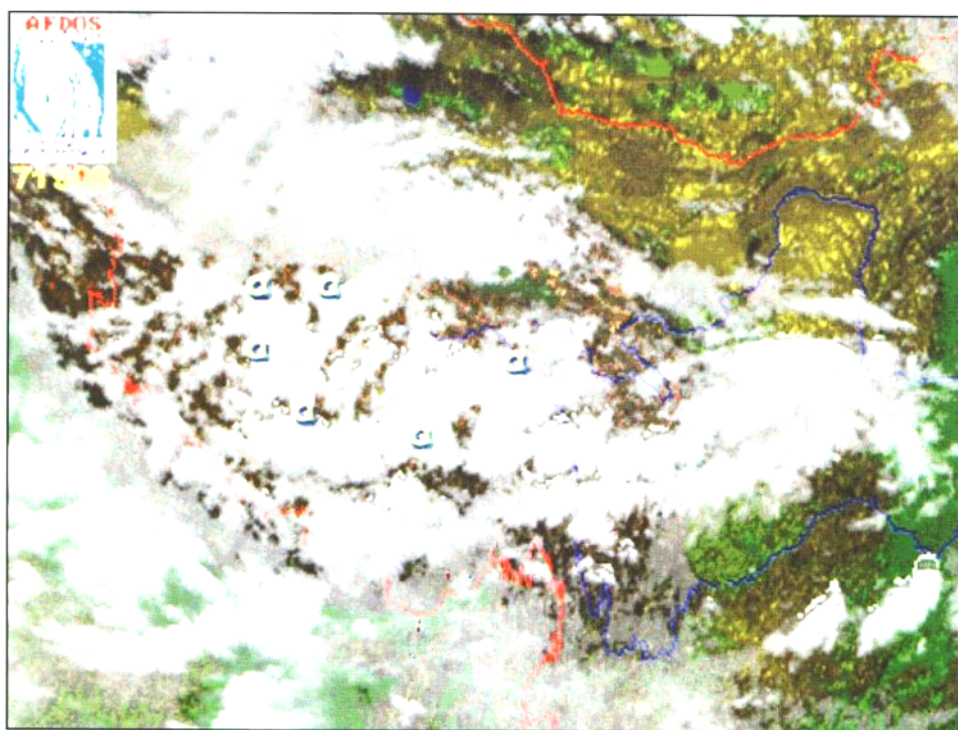
- [1] Calder. N., The weather book. London Michael Joseph. 1980
- [2] 洪世年等, 中国气象史. 农业出版社, 1983
- [3] Petterssen. S., Introduction to meteorology. 1948
- [4] Petterssen. S., Weather Analysis and Forecasting. 1956
- [5] 陶诗言, 高空分析与天气预告, 1951
- [6] 谢义炳等, 天气学基础. 高等教育出版社, 1959
- [7] 杨大昇等, 动力气象学. 科学出版社, 1981
- [8] E. 帕尔门, C. W. 牛顿, 大气环流系统. 程纯枢等译. 科学出版社, 1978
- [9] 王继志, 气象图形显示原理与方法. 科学出版社, 1991
- [10] 王昂生等, 台风、暴雨预报警报系统, 灾害评估及防灾对策研究进展. 气象出版社, 1996
- [11] 王继志、王昂生, 台风、暴雨警报服务系统的设计与研究. 气象出版社, 1996
- [12] 王昂生、梁碧俊等, 暴雨警报服务系统研究进展. 气象出版社, 1996
- [13] 李泽椿, 如何发挥中心气象业务总体效益的探讨. 国家气象中心科技年报, 1996
- [14] Gospels, 新旧约全书. 中国基督教协会出版社, 1994
- [15] Snellman, L. W. Impact of AFOS on Operational Forecasting. Bulletin of AMS, vol 58, P. 1035~1044, 1997
- [16] MacDonald. A. E., Mitigation; Monitoring, Forecasting and Disseminating, NOAA Forecast Systems Laboratory 1998
- [17] Wang Jizhi, Yang Yuanqin, An Analyzing Forecasting and Data-processing Operational System, Seventh International Conference on Interactive information for Met. Jan 14~18, New Orleans, USA, 1991
- [18] Lincoln. J. and Schiessl. D., Mission Report, WMO Inter-OFFICE MEMO, 1992
- [19] 国家气象中心年鉴编委会, 《国家气象中心年鉴》1996
- [20] 85-906-10 课题组, 台风、暴雨预报警报系统. 气象出版社, 1996
- [21] 中国气象年鉴编辑委员会, 《中国气象年鉴》1996



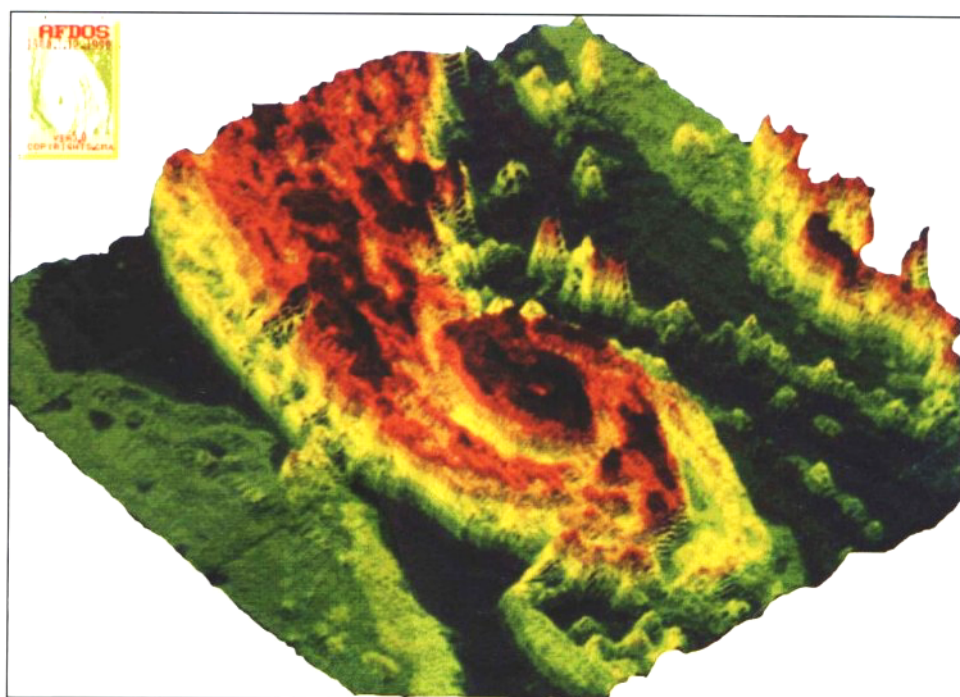
AFDOS 系统上任意走向选取自动分析的高空垂直剖面图



AFDOS 系统加入 '98 高原科学实验(TIPEX)特殊观测资料的 Bogus 客观分析



在AFDOS系统上分析显示高原上空积云对流的活跃与发展(图中a表示发展中的积云团,原始卫星云图由卫星气象中心提供。)



AFDOS系统平台上的三维台风结构显示

# 目 录

|                      |      |
|----------------------|------|
| 序 言                  |      |
| 绪 论                  |      |
| 第一章 现代天气工程学引论        | (1)  |
| 1.1 资料库              | (1)  |
| 1.2 程序库              | (1)  |
| 1.3 图形图像库            | (2)  |
| 1.4 预报员              | (2)  |
| 1.5 系统工程设计的要点        | (4)  |
| 第二章 现代气象资料收集与分发系统    | (10) |
| 2.1 引论               | (10) |
| 2.2 资料收集系统           | (11) |
| 1 系统的结构与组织           | (11) |
| 2 资料收集平台(DCP)        | (12) |
| 3 资料收集平台数据结构的一般设计    | (14) |
| 4 DCP 高空结点站功能        | (16) |
| 5 卫星与地面站的作用          | (16) |
| 6 资料收集平台新技术的未来发展     | (16) |
| 2.3 卫星通讯与资料分发        | (16) |
| 2.4 气象资料分发系统(MDD)    | (18) |
| 1 MDD 的组织            | (19) |
| 2 MDD 的传输规程          | (19) |
| 2.5 MDD 的结点站和接收站     | (22) |
| 第三章 人机交互系统概念         | (25) |
| 3.1 交互的定义            | (25) |
| 3.2 气象信息人机交互系统       | (25) |
| 3.3 人机交互的发展水平与类别     | (25) |
| 1 初级人机交互             | (25) |
| 2 输入输出的交互            | (25) |
| 3 条件与转移式交互           | (26) |
| 4 菜单方式的人机交互          | (27) |
| 3.4 窗口技术             | (27) |
| 第四章 AMIGAS 系统        | (30) |
| 4.1 鼠标的功能及其意义        | (30) |
| 4.2 窗口菜单和会话框         | (30) |
| 4.3 AMIGAS 交互系统绘制高空图 | (31) |

|     |                                  |      |
|-----|----------------------------------|------|
| 1   | 定义一个高空图底图                        | (32) |
| 2   | 如何选择高空填图编辑器进行填绘                  | (34) |
| 3   | 定义高空分析图                          | (38) |
| 4.4 | 窗口的程序设计原理与方法                     | (41) |
| 1   | 窗口设计的 C 语言基本函数                   | (41) |
| 2   | 程序设计的实例                          | (42) |
| 第五章 | 物理人机交互                           | (46) |
| 5.1 | 物理交互的概念                          | (46) |
| 5.2 | 联想窗口技术(YLW-Windows)              | (47) |
| 1   | Windows 技术                       | (47) |
| 2   | YLW-Windows 技术                   | (48) |
| 5.3 | AFDOS 系统平台的 Bogus 人机交互方法         | (50) |
| 1   | 基本概念                             | (50) |
| 2   | 鼠标定位与天气底图坐标转换                    | (51) |
| 3   | 物理 Bogus 方案的平台作业                 | (53) |
| 5.4 | 预报联想思维的程序模拟                      | (54) |
| 1   | 预报的思维过程与联想                       | (54) |
| 2   | 联想树求解                            | (55) |
| 3   | 8 码难题求解法                         | (57) |
| 4   | 控制策略                             | (58) |
| 5.5 | 物理人机交互指令传输方法                     | (64) |
| 1   | 矢量空间法的传输设计                       | (64) |
| 2   | 交互按钮的程序设计                        | (64) |
| 第六章 | 气象应用程序库设计                        | (75) |
| 6.1 | 程序设计基本原理                         | (75) |
| 6.2 | 辐散风场程序设计样例                       | (75) |
| 1   | 所计算的物理问题的意义                      | (75) |
| 2   | 采用的基本方程                          | (75) |
| 3   | 李卜曼张弛系数的数值试验与精确度讨论               | (77) |
| 4   | 程序功能与设计                          | (77) |
| 6.3 | 订正法计算铅直运动的程序                     | (78) |
| 1   | 基本原理                             | (78) |
| 2   | 小结                               | (80) |
| 6.4 | 若干气象应用源程序设计范例                    | (80) |
| 1   | 计算第二类条件不稳定参数 CISK 的简单方法程序(WCISK) | (80) |
| 2   | 计算饱和水汽压的程序(WDSV)                 | (81) |
| 3   | 计算湿空气微团绝热上升凝结高度程序(WHPLCL)        | (82) |
| 4   | 计算位温程序(WHPOTT)                   | (84) |
| 5   | 计算比湿或饱和比湿(WHQFRT)                | (86) |
| 6   | 计算比湿程序(WHRHQS)                   | (86) |



|    |                                                   |       |
|----|---------------------------------------------------|-------|
| 7  | 计算假相当位温的温度和比湿程序(WHTABL) .....                     | (87)  |
| 8  | 计算湿空气微团在绝热升降时任意高度上的温度和比湿程序(WHTCQC) .....          | (88)  |
| 9  | 计算假相当位温程序(WHTHTE) .....                           | (89)  |
| 10 | 郭晓岚参数化方案(WMC) .....                               | (90)  |
| 11 | 计算相对湿度程序(WMFRMH) .....                            | (91)  |
| 12 | 用 T、Q 计算露点温度的程序(WMFRMQ) .....                     | (92)  |
| 13 | 用 T、RH 计算露点温度的程序(WMFRMR) .....                    | (93)  |
| 14 | 计算湿对流调整程序(WMLINE) .....                           | (94)  |
| 15 | 计算湿对流调整程序(WMJTOP) .....                           | (94)  |
| 16 | 用总体经验输送公式计算海上动量、水汽、感热表面通量(WBFLUX) .....           | (97)  |
| 17 | 计算边界层内有关量(一)(WBFXZ0) .....                        | (98)  |
| 18 | 计算边界层内有关量(二)(WBUTFR) .....                        | (99)  |
| 19 | 用运动学方法计算垂直运动(一)(WMCALP, WMVELO) .....             | (100) |
| 20 | 水平散度和垂直速度计算程序(WMVELO) .....                       | (100) |
| 21 | 用运动学方法计算垂直运动(二)(WMDIVE, WMVMOT) .....             | (102) |
| 22 | 直接用测站的观测资料计算大范围散度、涡度及垂直速度(三角形法)<br>程序(WMCH) ..... | (102) |
| 23 | 球坐标系统中已知运动的初始位置与移向移速求终点位置(WMDB2L) .....           | (105) |
| 24 | 计算球坐标系中的势函数、辐散风、散度程序(WMDIVS) .....                | (106) |
| 25 | 球坐标系统中已知运动的初始与终点求运动方向速度的程序(WML2DB) ...<br>.....   | (108) |
| 26 | 计算平均环流输送及垂直积分程序(WMMETR) .....                     | (109) |
| 27 | 计算干对流调整程序(WMNADJ) .....                           | (110) |
| 28 | 用 T、RH 计算比湿程序(WMRMRH) .....                       | (112) |
| 29 | 计算相对湿度程序(WMRMTD) .....                            | (113) |
| 30 | 用 T、Td 计算比湿程序(WMRMTM) .....                       | (114) |
| 31 | 计算正方形网格点上的流函数无辐散风和涡度(WMROTR) .....                | (115) |
| 32 | 计算球坐标系中的流函数、无辐散风、涡度程序(WMROTS) .....               | (116) |
| 33 | 五点平滑程序(WMSMT) .....                               | (118) |
| 34 | 九点平滑程序(WMSMT9) .....                              | (119) |
| 35 | 计算定常涡旋输送及垂直积分程序(WMSTTR) .....                     | (120) |
| 36 | 计算一些热力学诊断量的程序(WMTHER) .....                       | (122) |
| 37 | 时间过滤程序(WMTIMF) .....                              | (124) |
| 38 | 计算瞬变涡旋输送程序(WMTRTR) .....                          | (126) |
| 39 | 根据水平散度计算垂直速度程序(WMVMOT) .....                      | (128) |
| 40 | 订正法计算垂直速度程序(WMWA2) .....                          | (129) |
| 41 | 升降法计算垂直速度程序(WMWA3) .....                          | (131) |
| 42 | 计算涡度和散度(WMWOSA) .....                             | (133) |
| 43 | 气象场的谐波分析程序(WSFSEP) .....                          | (134) |
| 44 | 计算凝结函数的程序(WTEO) .....                             | (136) |

|     |                                           |       |
|-----|-------------------------------------------|-------|
| 45  | 计算科氏参数和地图放大因子(WTMF) .....                 | (137) |
| 46  | UV 风分量合成为全风速的子程序(WVTMO) .....             | (138) |
| 47  | 计算垂直积分程序(WXINTE) .....                    | (139) |
| 48  | 计算平均场程序(WXMEAN) .....                     | (140) |
| 49  | 求高斯纬圈参数的程序(WAGAU) .....                   | (142) |
| 50  | 格点到谱的快速富里叶变换程序(WDFGS) .....               | (144) |
| 51  | 谱到格点的快速富里叶变换程序(WDFSG) .....               | (145) |
| 52  | 正方形网格线性内插程序(WMINTP) .....                 | (147) |
| 53  | P 或 $\sigma$ 坐标系中的高度场互相插值程序(WMITPO) ..... | (148) |
| 54  | 球坐标系雅可比算子程序(WMJACO) .....                 | (149) |
| 55  | 求抬升凝结高度程序(WML) .....                      | (151) |
| 56  | 气象场拉格朗日插值(WMLAGR) .....                   | (151) |
| 57  | 球坐标系拉普拉斯算子程序(MWLAPL) .....                | (154) |
| 58  | 由正方形网格向经纬度网格转换的插值程序(WOINPL) .....         | (155) |
| 59  | 求按球面函数展开的复系数程序(WSCSP) .....               | (156) |
| 第七章 | 气象图形基础 .....                              | (254) |
| 7.1 | 传统天气图的基本类型 .....                          | (254) |
| 1   | 地面天气图 .....                               | (254) |
| 2   | 等压面天气图 .....                              | (254) |
| 3   | 等熵面图 .....                                | (256) |
| 4   | 剖面图 .....                                 | (256) |
| 5   | 绝热图 .....                                 | (257) |
| 6   | 距平图 .....                                 | (258) |
| 7.2 | 气象图形基本概念 .....                            | (259) |
| 7.3 | 气象作图初值处理方法 .....                          | (259) |
| 7.4 | 气象图形资料的插值与变换 .....                        | (261) |
| 7.5 | 常用天气图及其在屏幕直角坐标上的变换 .....                  | (267) |
| 1   | 麦卡托柱面投影 .....                             | (267) |
| 2   | 极射赤面投影 .....                              | (267) |
| 3   | 兰勃特正形圆锥投影 .....                           | (268) |
| 第八章 | 气象常用基本图形 .....                            | (270) |
| 8.1 | 直线 .....                                  | (270) |
| 8.2 | 风羽的绘制 .....                               | (271) |
| 1   | 风速的图形表达 .....                             | (271) |
| 2   | 绘风羽的一个通用子程序 .....                         | (274) |
| 8.3 | 曲线的绘制 .....                               | (275) |
| 1   | 绘圆 .....                                  | (275) |
| 2   | 绘圆的渐开线 .....                              | (277) |
| 3   | 绘对数螺旋线 .....                              | (279) |
| 4   | 绘椭圆 .....                                 | (280) |

|      |                        |       |
|------|------------------------|-------|
| 8.4  | 等值线绘制基本原理 .....        | (282) |
| 8.5  | 网格点资料的内插 .....         | (282) |
| 8.6  | 跟踪法绘制等值线 .....         | (286) |
| 8.7  | 三次 B 样条法绘制天气图等值线 ..... | (291) |
| 1    | 离散点资料网格化 .....         | (292) |
| 2    | 等值线分析、绘制 .....         | (292) |
| 第九章  | 图形变换 .....             | (296) |
| 9.1  | 二维坐标变换 .....           | (296) |
| 1    | 平移 .....               | (296) |
| 2    | 比例放缩(Scaling) .....    | (296) |
| 3    | 旋转 .....               | (297) |
| 9.2  | 矩阵表示与同性坐标 .....        | (298) |
| 9.3  | 合成变换 .....             | (299) |
| 1    | 变换方法 .....             | (300) |
| 2    | 比例放缩的合成变换 .....        | (300) |
| 3    | 旋转变换的合成矩阵 .....        | (300) |
| 4    | 相对固定点的放缩 .....         | (300) |
| 5    | 绕支点的旋转 .....           | (301) |
| 6    | 任选方向的放缩 .....          | (301) |
| 7    | 矩阵连乘与通用变换方程 .....      | (301) |
| 9.4  | 反射与切变 .....            | (302) |
| 1    | 反射 .....               | (302) |
| 2    | 切变 .....               | (303) |
| 第十章  | 三维坐标变换 .....           | (305) |
| 10.1 | 平移 .....               | (305) |
| 10.2 | 比例放缩 .....             | (305) |
| 10.3 | 旋转 .....               | (306) |
| 10.4 | 对任意旋转轴的三维旋转 .....      | (308) |
| 10.5 | 反射与切变 .....            | (308) |
| 1    | 反射 .....               | (308) |
| 2    | 切变 .....               | (309) |
| 第十一章 | 三维取景 .....             | (311) |
| 11.1 | 投影 .....               | (311) |
| 1    | 平行投影 .....             | (312) |
| 2    | 透视投影 .....             | (314) |
| 11.2 | 取景变换 .....             | (315) |
| 1    | 定义取景平面 .....           | (315) |
| 2    | 景深 .....               | (317) |
| 第十二章 | AFDOS 系统 .....         | (320) |
| 12.1 | AFDOS 系统定义 .....       | (320) |



|      |                                      |       |
|------|--------------------------------------|-------|
| 12.2 | AFDOS 的标准版及模拟技术 .....                | (320) |
| 1    | AFDOS 标准版 .....                      | (320) |
| 2    | AFDOS 对传统天气分析预报的模拟技术 .....           | (322) |
| 12.3 | AFDOS 的高级版及发展技术 .....                | (333) |
| 1    | AFDOS 系统的标准彩色天气底图上等值线的嵌套客观分析技术 ..... | (334) |
| 2    | AFDOS 系统中图形的图像化处理技术 .....            | (334) |
| 3    | 工程化概念与 MOD 技术 .....                  | (339) |
| 4    | AFDOS 的综合多媒体平台技术 .....               | (343) |
| 5    | AFDOS 的现代 MOD 技术 .....               | (345) |
| 12.4 | AFDOS 系统的版本化设计 .....                 | (348) |
| 1    | 热带气旋预报方法的编程技术 .....                  | (348) |
| 2    | 编程技术设计与版本更新 .....                    | (352) |
| 3    | 程序设计与语言 .....                        | (364) |
| 12.5 | AFDOS 系统的业务平台 .....                  | (365) |
| 1    | AFDOS 业务平台概况 .....                   | (365) |
| 2    | 功能 .....                             | (368) |
| 第十三章 | AFDOS 系统多媒体平台设计 .....                | (373) |
| 13.1 | 多媒体概念和定义 .....                       | (373) |
| 13.2 | 超文本与超媒体概念 .....                      | (374) |
| 1    | 超文本(Hypertext) .....                 | (374) |
| 2    | 超媒体(Hypermedia) .....                | (376) |
| 13.3 | 多媒体平台硬件 .....                        | (377) |
| 13.4 | 多媒体平台软件原理 .....                      | (378) |
| 1    | 多媒体信息压缩技术 .....                      | (378) |
| 2    | 音频、视频同步原理 .....                      | (379) |
| 3    | 数字化天气图形与视频音频动态叠加技术 .....             | (380) |
| 4    | 计算机视觉 .....                          | (380) |
| 5    | 系统多媒体版功能概述 .....                     | (381) |
| 第十四章 | 应用 AFDOS 超媒体平台对'98 中国暴雨洪水的分析研究 ..... | (383) |
| 14.1 | 应用超媒体技术对'98 中国洪水的观测研究 .....          | (383) |
| 14.2 | 高原高层暖反气旋及其对中尺度云系的驱动 .....            | (384) |
| 14.3 | 形成稳定的大尺度背景的几种机理 .....                | (384) |
| 1    | 1997~1998 年异常 SST 分布 .....           | (385) |
| 2    | EP 通量辐合及西风带的减弱 .....                 | (385) |
| 3    | 青藏高原上的异常地面温度分布 .....                 | (387) |
| 4    | 季风暖湿气流与水汽输送 .....                    | (387) |
| 14.4 | 高原上空尺度积云对流活动的分析研究 .....              | (389) |
| 1    | 高原上空尺度积云对流的发展阶段的分析 .....             | (389) |
| 2    | 高原中尺度波动东传现象的分析 .....                 | (392) |
| 3    | 高原中尺度对流系统对大尺度系统的反馈作用 .....           | (393) |