

XINBIAN DONGLI QIXIANGXUE

新编动力气象学

李国平 编著

气象出版社

China Meteorological Press

新编动力气象学

李国平 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书全面、系统而简要地讲述了动力气象学中的基本概念和基本原理,介绍了处理大气动力学问题常用的数学方法,并用一定篇幅讨论了现代动力气象学理论中一些重要的问题,反映了动力气象学的一些新进展。全书共分十四章,论述了动力气象学的基本内容,包括大气流体力学基础、大气运动的基本性质、大气运动方程组、大气边界层理论、大气能量学、准地转动力学、大气波动、波动的不稳定理论、热带大气动力学等。

全书着重物理原理的阐述,数学处理过程较完整,并注重理论和实际的相互联系。本书内容全面,安排合理,逐步深入;物理概念清晰,数学推导严谨,理论联系实际;叙述准确清楚,深入浅出、简明易懂、便于自学。本书可作为高等院校大气科学专业及相关专业的本科教材以及气象高等学历教育教材,或可作为大气科学专业专科及在职培训的教学参考书,也可供气象、海洋、航空、环境等部门的科研人员和业务人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

新编动力气象学/李国平编著. —北京:

气象出版社, 2006. 12

ISBN 7-5029-4236-X

I. 新… II. 李… III. 理论气象学 IV. P43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 143558 号

出版者: 气象出版社

网 址: <http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxchs@263.net

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮 编: 100081

电 话: 总编室: 010-68407112

发行部: 010-62175925

责任编辑: 李太宇 袁信轩

终 审: 黄润恒

封面设计: 张建永

版式设计: 都 平

责任校对: 程铁柱

印刷者: 北京昌平环球印刷厂

发行者: 气象出版社

开 本: 787×960 1/16 印 张: 18 字 数: 370 千字

版 次: 2006 年 12 月第一版 2006 年 12 月第一次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 30.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

序

在大气科学学科中,动力气象学(现多称大气动力学)是一门应用物理学和流体力学定律及数学方法,研究大气运动动力和热力过程及其相互关系的重要分支学科。传统意义上的动力气象学涉及内容很广,包括大气热力学、大气动力学、大气环流、大气湍流、数值天气预报和大气数值模拟等,随着学科的发展和不断细化,现在动力气象学的内容则主要限于大气动力学。动力气象学的发展对更深刻地认识大气运动的机理、掌握天气和气候的变化规律具有十分重要的作用,它是大气科学的理论基础。

大学大气科学专业中,动力气象学是该专业一门重要的专业基础课,属核心必修课、专业主干课。该课程系统地讲述地球旋转大气运动的基本规律,介绍研究大气运动的基本方法和重要结论,为数值天气预报等后继课程提供必要的理论基础。通过学习该课程,使学生理解旋转大气运动特别是大尺度大气运动的基本特征,能够运用动力学的基本观点和方法分析大气问题,掌握大气动力学研究的主要结论,对动力气象学的最新进展和发展趋势有所了解。

根据面向 21 世纪专业技术人才培养的基本要求,我们在教学过程中既坚持全国指导性教学大纲,又特别注重培养和发展具有自己特色的教学模式,以此作为提高教学水平和教学质量、培养有特点学生的重要手段。围绕这一教学理念,根据中国气象事业发展战略和业务技术体制改革的要求以及大气科学专业学生的培养目标,我们广泛收集了国内外同类课程的教学资料和教改信息,认真进行研究和论证,重点改革课程体系,对大气科学专业动力学类专业基础课进行了结构性整合。在教学手段方面,1984 年以来我们就自编有动力气象习题集及习题解答;1994 年自主开发研制出“动力气象试题库微机管理系统”(DOS 版);2001 年又以二次开发方式制作出“动力气象试题库管理及试卷生成系统”(Windows 版),现已实现题库管理微机化,试题生成智能化,试卷、答案打印规范化,成绩录入、公布网络化;2002 年制作完成电子教案,开始使用多媒体投影方式进行教学,并在成都信息工程学院教务处教师主页栏目上发布教学用个人主页,免费、开放式提供教学大

纲、授课计划、电子教案、电子课件、专业软件、习题集、课程推荐参考书目和参考文献目录、考研资料等教学资源,并开展了 E-mail 答疑,还拟开展网络上传、批改作业。《动力气象学》课程被评为学院优质课程,2003 年被评为四川省首批省级精品课程。

作为大气科学的基础理论课,“动力气象学”教学内容丰富、信息量大,体系结构严谨、逻辑性强、数理知识要求高。因此,本书的内容涵盖动力气象学的全部内容,任课教师可根据教学目标和学生特点灵活选择、合理组合。第一章至第七章,作为动力气象学的基础性内容也可安排在《大气流体力学》或《地球流体力学》中讲授,这部分教学总学时(包括习题课、实验课)以 50~60 学时为宜。而第四章也可在《大气物理学》课中讲授;第八章可在《天气学原理》课和《天气诊断分析》课中讲授。第九章至第十四章则是《动力气象学》课的核心内容,这部分教学总学时以 70~80 学时为宜。教学内容组织的方式有:课堂讲授(板书或多媒体投影教学)、课堂提问、讨论;课后作业、课后答疑(包括 E-mail 答疑);实验课(理论内容的计算机计算或图形演示)、习题课(典型例题讲解、作业讲评)。

面向 21 世纪的高等教育需要包括教学手段在内的改革,动力气象学作为一门理论性较强的专业基础课,也需要重视并利用实验的方式来改进教学手段、提高教学效果。本课程传统的实践性教学环节主要为课堂布置一定数量的思考题和习题,这些问题多提炼自大气探测和天气分析实际问题,通过课堂典型例题讲解启发、学生课后完成作业(包括以程序设计或应用数学工具软件)、习题课讲评等环节,使学生加深对基本概念的理解,练习用动力学观点和数学知识分析和处理大气问题的基本方法,较直观地掌握大气动力学的基本原理和主要研究结论,鼓励本科生在二、三年级就参与课外科技活动或教师的科研课题,写科技小论文。除此之外,根据章节内容的需要,除了传统的理论推导、公式计算练习外,设计适当形式和数量的动力气象实验,通过计算机模拟实验或模型实验等方式让学生完成,应是动力气象学教学方式改革值得探索的一个方向。另外,对一些著名(动力)气象学家的介绍,也是本书的特色之一,有利于学生了解学科发展的历史,培养他们科学创新的精神。

在大气科学专业的专业课学习中,动力气象学以其物理概念众多、数学推导复杂常使不少大气科学学子“望而生畏”,对学好这门课缺乏信心,产生

畏难情绪。虽然 1980—1991 年国内编写、翻译出版了多本动力气象学教科书,但目前再版的很少;近 5 年仅有两种动力气象学教科书问世,难以满足当前国内气象高等教育多规格、多样化的需求。因此,编写一本体系完整但简洁明了、强调物理概念、尽量简化数学推导、理论联系实际通用型动力气象学教程很有必要。

本书是作者从事大气科学本科、专科以及培训班《流体力学》、《动力气象学》教学 20 多年的总结与提炼,简明、通用是编写本教程的指导思想。在此特别感谢有关专家的审读以及提出的宝贵意见。本院万军等教授在教学方面的指导和培养,段廷扬教授、胡毅教授、李萍副教授对本书编写的支持,大气科学系本科生徐进明、林麟在本书文字、公式录入以及图形绘制方面的辛勤工作,我的研究生刘晓冉对本书的细致校订和提出修改建议,我教过和正在教的学生们对我的鼓励和期待,中国气象局科技发展司和气象出版社刘燕辉社长、第一编辑室李太宇主任等同志对本书出版给予的关心,作者在此一并表示衷心的感谢。

作者

2006 年初秋于成都锦江河畔

目 录

序

第一章 流体力学基础	(1)
§ 1.1 研究流体的宏观模型	(1)
§ 1.2 流体速度与加速度, Lagrange 法和 Euler 法	(2)
§ 1.3 迹线和流线	(6)
§ 1.4 涡度、散度、环流和形变率	(8)
§ 1.5 速度势函数和流函数	(12)
思考题一	(13)
习题一	(14)
第二章 流体运动方程组	(17)
§ 2.1 连续方程	(17)
§ 2.2 作用于流体上的力	(18)
§ 2.3 流体运动方程及其简化形式	(19)
§ 2.4 能量方程	(21)
§ 2.5 纳维-斯托克斯方程的简单解	(24)
思考题二	(29)
习题二	(29)
第三章 大气运动坐标系与方程组	(31)
§ 3.1 作用于大气上的力, 惯性坐标系运动方程	(31)
§ 3.2 视示力, 旋转坐标系运动方程	(32)
§ 3.3 连续方程和热力学方程	(34)
§ 3.4 球坐标系大气方程组简介	(35)
§ 3.5 局地直角坐标系的大气方程组	(39)
§ 3.6 坐标变换, 气压坐标系的大气方程组	(43)
§ 3.7 有关科里奥利参数 f 的三个近似	(48)
思考题三	(49)
习题三	(50)

第四章 自由大气中的平衡运动	(52)
§ 4.1 自然坐标系	(52)
§ 4.2 地转风	(53)
§ 4.3 梯度风	(54)
§ 4.4 旋衡风	(56)
§ 4.5 惯性风与惯性振荡	(57)
§ 4.6 热成风	(59)
思考题四	(61)
习题四	(61)
第五章 尺度分析与方程组的简化	(64)
§ 5.1 尺度,大气运动的分类	(64)
§ 5.2 大气方程组的尺度分析	(67)
§ 5.3 大气方程组的简化	(68)
§ 5.4 常见的特征无量纲参数	(72)
思考题五	(75)
习题五	(75)
第六章 量纲分析与 π 定理	(79)
§ 6.1 相似概念与相似判据	(79)
§ 6.2 量纲分析, π 定理	(81)
§ 6.3 π 定理的应用	(83)
思考题六	(87)
习题六	(87)
第七章 环流定理与涡度方程	(89)
§ 7.1 环流定理	(89)
§ 7.2 涡度方程	(95)
§ 7.3 位势涡度,位涡守恒原理	(103)
§ 7.4 散度方程	(107)
思考题七	(108)
习题七	(109)

第八章 准地转动力学基础	(113)
§ 8.1 准地转运动的分类	(113)
§ 8.2 准地转方程组	(116)
§ 8.3 准地转位势涡度方程	(118)
§ 8.4 准地转位势倾向方程	(118)
§ 8.5 准地转 ω 方程	(120)
§ 8.6 Q 矢量形式的 ω 方程	(121)
思考题八.....	(122)
习题八.....	(122)
第九章 大气边界层	(124)
§ 9.1 大气边界层及其特征	(124)
§ 9.2 湍流应力与平均运动方程组	(125)
§ 9.3 边界层中风随高度的变化规律	(127)
§ 9.4 埃克曼抽吸, 二级环流和旋转减弱.....	(134)
§ 9.5 埃克曼数和理查逊数	(138)
思考题九.....	(141)
习题九.....	(141)
第十章 大气能量学	(143)
§ 10.1 大气能量的主要形式.....	(143)
§ 10.2 铅直气柱中各种能量的比较.....	(146)
§ 10.3 能量方程与能量守恒定律.....	(148)
§ 10.4 大气中的能量转换事实.....	(153)
§ 10.5 大尺度大气运动的能量循环过程.....	(156)
思考题十.....	(158)
习题十.....	(159)
第十一章 大气波动	(161)
§ 11.1 波动的基本概念.....	(161)
§ 11.2 群波与群速度.....	(164)
§ 11.3 微扰法与方程组的线性化.....	(166)
§ 11.4 大气声波.....	(170)

§ 11.5	重力波	(173)
§ 11.6	惯性波	(181)
§ 11.7	惯性—重力波	(183)
§ 11.8	大气长波	(185)
§ 11.9	水平辐散条件下的长波,长波的频散效应	(189)
§ 11.10	浅水模式中的混合波	(193)
	思考题十一	(195)
	习题十一	(196)
第十二章	地转适应过程	(201)
§ 12.1	地转偏差与地转适应过程	(201)
§ 12.2	天气变化过程的阶段性	(203)
§ 12.3	地转适应的机制	(207)
§ 12.4	地转适应的尺度理论	(208)
	思考题十二	(210)
	习题十二	(211)
第十三章	波动的不稳定理论	(213)
§ 13.1	波动稳定度的概念	(213)
§ 13.2	惯性不稳定	(215)
§ 13.3	正压不稳定	(217)
§ 13.4	斜压不稳定	(221)
§ 13.5	开尔文-赫姆霍兹稳定度	(225)
	思考题十三	(228)
	习题十三	(229)
第十四章	热带大气动力学基础	(232)
§ 14.1	热带大气运动的主要特征	(232)
§ 14.2	热带大气运动的尺度分析	(234)
§ 14.3	热带大气波动	(234)
§ 14.4	热带扰动发生、发展的机制	(239)
§ 14.5	热带气旋结构的动力学分析	(240)
	思考题十四	(244)
	习题十四	(245)

附录 1	主要参考文献	(247)
附录 2	常用物理参数	(249)
附录 3	常用单位及换算表	(250)
附录 4	常用的矢量运算公式	(251)
附录 5	重要名词解释	(252)
附录 6	大气科学及动力气象学简史	(265)
附录 7	动力气象学大事记	(272)

第一章 流体力学基础

地球大气属于流体,如果说流体力学研究的是流体运动的一般规律,那么作为流体力学一个分支的地球物理流体力学研究的是地球物理流体运动的具体规律,而动力气象学(现多称大气动力学)则是研究自转地球上的大气运动的特殊规律。因此,无论是学科发展的渊源,还是学科研究的方法,流体力学、地球物理流体力学和动力气象学的关系都非常密切。为了更好地学习动力气象学,有必要在本章简要介绍或复习流体力学研究的基本观点、基本方法以及所用的基本物理量。

- 流体(Fluid):具有流动性,形状易变的物体(不同于固体、刚体),是液体和气体的统称。其典型实例是水和空气。
- 流体力学(Fluid Mechanics):研究流体运动规律以及流体和固体间相互作用的科学,不同于研究刚体的“理论力学”。
- 地球物理流体动力学(Geophysical Fluid Dynamics):以与地球相联系的大气、海洋等为主要研究对象的流体力学,国内习惯简称为地球流体力学。
- 大气流体力学(Fluid Mechanics of the Atmosphere):以地球大气为主要研究对象的流体力学。

§ 1.1 研究流体的宏观模型

质点力学中把实际物体抽象概括称为“质点”(有质量但无体积),流体力学也把实际流体抽象概括为“流点”或“连续介质”。

1.1.1 连续介质假设

把离散分子构成的实际流体,看作是由无数流体质点没有空隙、连续分布而构成的,称为“流点”,即流体质点是大量流体分子的集合,气象上称为空气微团或气块。

流体质点是连续分布的,其上的物理量(如温度、密度、速度等)也是连续分布的,从而构成各种可用连续函数表示的物理量场,可运用高等数学中矢量分析与场论的知识加以研究。

1.1.2 流点的尺度

既要充分小,以使它在流动中可当作“点”,又要足够大,能保持大量分子具有确定的统计平均效应。其密度表示为:

$$\rho = \lim_{\delta\tau \rightarrow \tau_0} \frac{\delta m}{\delta\tau} = \rho(x, y, z, t) \quad (1.1)$$

其中 δm 为流点的质量, τ_0 为流点的体积。

1.1.3 流点概念的适用性

连续介质假设对大多数流体适用,但对个别情况不适用,如高层($z > 50$ km,即平流层中层以上)的稀薄大气,因为此时流点必须取得很大,则失去了点的意义。

§ 1.2 流体速度与加速度, Lagrange 法和 Euler 法

1.2.1 矢径

$$\mathbf{r} = xi + yj + zk \quad (1.2)$$

其中 (x, y, z) 为直角坐标系中的位置坐标。

1.2.2 流速

$$\mathbf{V} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \quad (1.3)$$

1.2.3 加速度

$$\mathbf{a} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} \quad (1.4)$$

1.2.4 拉格朗日 (Lagrange) 变量

当 $t = t_0$ 时,位于 $(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0)$ 的流点的位置可表示为:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(x_0, y_0, z_0, t) \quad (1.5)$$

即

$$\begin{cases} x = x(x_0, y_0, z_0, t) \\ y = y(x_0, y_0, z_0, t) \\ z = z(x_0, y_0, z_0, t) \end{cases} \quad (1.6)$$

则其流速为:

$$\mathbf{V} = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{r}(x_0, y_0, z_0, t) \quad (1.7)$$

拉格朗日变量(观点):简称拉氏变量。着眼于个别流点,跟踪考察确定的个别流点在不同时刻的速度和位置。即以某一流点为对象,研究其空间位置及物理量随时间变

化的规律,进而推广到整个流体中的所有流点。实例:漂流瓶、示踪剂。

判断流场用拉氏变量表示的特征:流场一般用位置坐标(函数)表示,变量为 x_0, y_0, z_0, t 。

1.2.5 欧拉(Euler)变量

固定在某一空间 (x, y, z) 点上考察其各个时刻的流速,表示为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(x, y, z, t) \quad (1.8)$$

或

$$\begin{cases} u = u(x, y, z, t) \\ v = v(x, y, z, t) \\ w = w(x, y, z, t) \end{cases} \quad (1.9)$$

即以流体空间某一固定体积元(空间中的固定点)为对象,研究不同时刻流体通过该固定点时的运动状态及物理量的变化规律。实例:气象站、水文站。

判断流场用欧拉变量表示的特征:流场一般用流速分量(函数)表示,变量为 x, y, z, t 。

欧拉观点的本质:流体运动归结为物理量场的特征及变化,通过物理定律,转换为一组偏微分方程来描述。

1.2.6 描述流体运动的两种观点的关系

拉氏观点的优点:描述流体运动直观、明了(跟踪流点),如研究高层大气中的物质输送问题。缺点:解决问题时,应用数学工具不方便。

欧拉观点的优点:把流体运动当作(流)场随时间的变化,便于应用矢量分析、场论和数理方程等数学工具,应用更为广泛,如流体力学、动力气象学研究中涉及的绝大多数问题。缺点:研究整个流场需要建立很多观测点。

两种变量仅是考察的角度不同,即着眼于流点还是空间(场)点,其描述同一流场的结论本质应该是一致的,则两者的表示结果可以相互转换。如欧拉变量转换为拉氏变量的步骤:(1)对 t 积分。(2)利用初始条件定出积分常数。即

$$\begin{cases} u = u(x, y, z, t) \\ v = v(x, y, z, t) \\ w = w(x, y, z, t) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} u = u[x(t), y(t), z(t), t] \\ v = v[x(t), y(t), z(t), t] \\ w = w[x(t), y(t), z(t), t] \end{cases} \quad (\text{空间点} \rightarrow \text{流点}) \quad (1.10)$$

因为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u \\ \frac{dy}{dt} = v \\ \frac{dz}{dt} = w \end{cases} \quad (1.11)$$

(1.11)式代入(1.10)式后对 t 积分后可解得:

$$\begin{cases} x = x(c_1, c_2, c_3, t) \\ y = y(c_1, c_2, c_3, t) \\ z = z(c_1, c_2, c_3, t) \end{cases} \quad (1.12)$$

利用初始条件: $t=t_0$ 时, $(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0)$, 可求出 (c_1, c_2, c_3) , 即可用 (x_0, y_0, z_0) 表示这些积分常数。则最后可得:

$$\begin{cases} x = x(x_0, y_0, z_0, t) \\ y = y(x_0, y_0, z_0, t) \\ z = z(x_0, y_0, z_0, t) \end{cases} \quad (1.13)$$

这样就由欧拉变量转换成了拉氏变量。

课堂思考题: 拉氏变量如何转换为欧拉变量?

例 1: 已知流场用欧拉变量表示为 $u = -\omega y, v = \omega x, w = 0$, (ω 为常数), 此处 x, y, z 为同一流点在不同时刻的空间坐标(见图 1.1), 试将欧拉变量转换为拉氏变量。

解: 因为

$$u = \frac{dx}{dt} = -\omega y, v = \frac{dy}{dt} = \omega x, w = \frac{dz}{dt} = 0$$

消元后解一元二阶常微方程得:

$$x = A \cos(\omega t + \epsilon), y = A \sin(\omega t + \epsilon)$$

其中 A, ϵ 为常数。设 $t=0$ 时, $x=x_0, y=y_0$ 为初始时该点的位置, 则有:

$$x_0 = A \cos \epsilon, y_0 = A \sin \epsilon$$

可得: $A = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \epsilon = \text{tg}^{-1} \frac{y_0}{x_0}$

则流场用拉氏变量表示为:

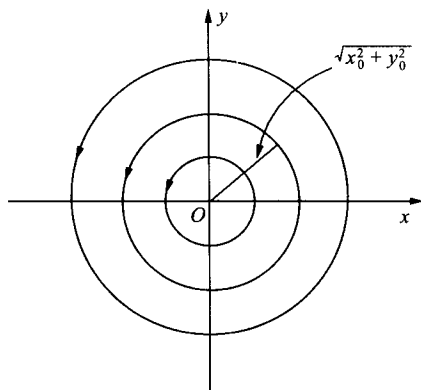


图 1.1 迹线族与流线族

$$x = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \cos\left(\omega t + \operatorname{tg}^{-1} \frac{y_0}{x_0}\right), \quad y = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \sin\left(\omega t + \operatorname{tg}^{-1} \frac{y_0}{x_0}\right), \quad z = z_0$$

1.2.7 两种观点下的加速度表示

$$\mathbf{a} = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{V}(x_0, y_0, z_0, t) \left(= \frac{d\mathbf{V}}{dt} \right) \quad (\text{拉氏观点}) \quad (1.14)$$

$$\mathbf{a} = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{V}(x, y, z, t) \quad (\text{欧拉观点}) \quad (1.15)$$

两者实质上是一致的,只是表示方法不同。若取(1.15)式中 (x, y, z) 为 t 时刻流点到达该空间点的位置坐标,即把空间点的加速度变为该点随 t 变化的加速度时

$\left(\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \frac{d}{dt}\right)$,有:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \quad (1.16)$$

引入 Nabla(或称 Hamilton)算子:

$$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (1.17)$$

则(1.16)式可改写为:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \right) \mathbf{V} \quad (1.18)$$

此为应用 Euler 变量求流场加速度的计算公式。推广到更一般的物理量(无论矢量、标量)有:

$$\frac{d(\quad)}{dt} = \frac{\partial(\quad)}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla)(\quad) \quad (1.19)$$

该式的物理意义是:个别变化=局地变化+牵连变化(其中牵连变化=平流变化+对流变化)。

1.2.8 定常流场

对于 Euler 变量表示的流场,若 $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = 0 \rightarrow \mathbf{V} = \mathbf{V}(x, y, z)$,即流动与时间 t 无关,则称该流场为定常流场或稳定流场。

§ 1.3 迹线和流线

为了更直观、形象地刻画流动,我们引入迹线和流线的概念(见图 1.2)。

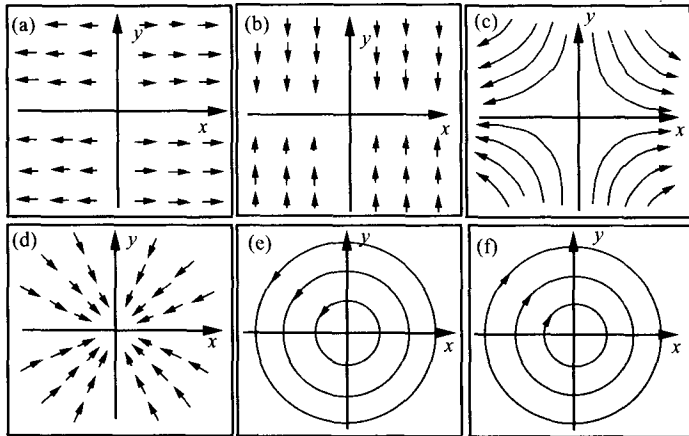


图 1.2 各种典型流场形式

1.3.1 迹线

流点在各时刻所运行路径的轨迹,反映拉氏观点下流动的几何图像,例如染色剂、漂流瓶。

在 dt 时段内流点在迹线上的位移为:

$$dx = udt, \quad dy = vdt, \quad dz = wdt \quad (1.20)$$

即

$$\begin{aligned} \frac{dx}{u[x(t), y(t), z(t), t]} &= \frac{dy}{v[x(t), y(t), z(t), t]} \\ &= \frac{dz}{w[x(t), y(t), z(t), t]} \\ &= dt \end{aligned} \quad (1.21)$$

此为迹线方程,其中 t 是单个、独立的变量。

1.3.2 流线

某时刻该曲线上的任一切线方向,正好和该时刻该处的流速方向相吻合,则此曲线称为流线(见图 1.3)。它是流场的瞬间“快照”。例如卫星云图,天气图。