



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 8

大气动力学

(第二版)

上册

刘式适 刘式达 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 8

大气动力学

(第二版)

上册

刘式适 刘式达 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

大气动力学/刘式适,刘式达编著. —2 版. —北京大学出版社,2011.7
(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-16158-6

I. 大… II. ①刘… ②刘… III. 大气动力学 IV. P433

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 222796 号

书 名: 大气动力学(第二版)(上、下)

著作责任者: 刘式适 刘式达 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-16158-6/P·0074

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021 出版部 62754962

电子邮箱: zpup@pup.pku.edu.cn

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 42 印张 780 千字

1991 年 10 月第 1 版

2011 年 7 月第 2 版 2011 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 99.00 元(上、下册)

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

《中外物理学精品书系》

编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了《中外物理学精品书系》,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,《中外物理学精品书系》力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

《中外物理学精品书系》另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,《中外物理学精品书系》还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套《中外物理学精品书系》的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

内 容 简 介

本书包含大气动力学的主要内容,是作者多年从事该课程教学的结晶。全书共分十三章,分上、下两册。上册包括前七章,后六章为下册。第一章到第五章主要介绍大气动力学的基本方程和最基本的运动规律;第六章应用摄动法建立了描写大气尺度运动的准地转运动方程组;第七章和第八章较全面地介绍大气波动及其传播理论;第九章介绍非线性波动理论;第十章介绍大气能量学;第十一章介绍稳定度理论;第十二章介绍地转适应理论;第十三章介绍最近发展较快的低纬大气动力学。

本书阐述由浅入深、严谨系统;编排精细新颖,应用新的方法叙述大气动力学中的一些概念,如准地转、有效位能等;并介绍大气动力学的最新发展,如非线性波、波的传播理论等。为了便于教学,每章末并附有复习思考题和习题。考虑近十多年的研究进展,本书第二版中第九章、第十章、第十二章和第十三章增加了一些相对成熟的内容。

本书可供天气动力学、大气物理学、海洋动力学等专业作为教材或教学参考书,也可供广大从事海洋、气象等方面的科技人员阅读参考。

第二版前言

《大气动力学》第一版已经面世 18 年了,通过教学和自学中广大读者反映,这本教科书较为系统,叙述严谨而便于学习,内容丰富而便于查找.不少读者认为从这本书的学习中获得了广泛的大气动力学知识,提高了这方面的理论水平,而且认为“大气动力学”不难学也有兴趣.

尽管该书曾获 1995 年国家教委高等学校优秀教材一等奖,但由于近二十多年来大气动力学学科的进展,加之在教学中的体会,特别是学者学习的体会,反馈给作者,是极具价值,应当采纳的宝贵意见,因此,有必要对第一版书中的叙述作适当修改,同时改正第一版书中的一些错误.在北京大学出版社的大力支持下,本书第二版得以问世.

随着我国经济的蓬勃发展和科技教育事业的飞跃进步,我们相信,这本书第二版必将满足广大读者的需要.

在第二版诞生之际,作者再一次深深感谢北京大学许多老师的深切关心和热情支持,也对北京大学出版社和顾卫宇编辑的大力协助和支持表示由衷的谢意.

有关章节的内容与国家海洋局第一海洋研究所海气相互作用课题组作了有益的讨论,在此也向他们表示深切的感谢.

刘式适 刘式达
于北京大学物理学院
2008 年 8 月

第一版前言

多年的学习和工作使我们体会到：总结近 10 多年国内外的科研成果编写出《大气动力学》一书，贡献给广大气象工作者不仅是我们的愿望，也是广大地球流体力学工作者所希望的。

本书是在 1982 年 10 月所编“动力气象学”讲义(上、下册)的基础上修订而成的。在修订过程中既考虑了教学，又考虑了学科的发展；既注意了系统性，又注意便于自学，使初学者能循序渐进地学习它既不感到多大困难又发生兴趣。当然，编写本书的主要目的还是在于使大学生通过学习掌握大气动力学的基础理论，且学会应用近代数学、物理的方法去解决大气动力学的基本问题，并从中了解本学科需要进一步探索和发展之处，从而在今后的学习和工作中去攻克它，为祖国的气象事业和四个现代化服务。

全书共分十三章，第一章到第五章主要介绍大气动力学的基本方程和最基本的运动规律；第六章应用摄动法建立了描写大气大尺度运动的准地转运动方程组；第七章和第八章较全面地介绍大气波动及其传播理论；第七章介绍近十多年发展的非线性波动理论；第十章介绍大气能量学；第十一章介绍稳定度理论；第十二章介绍地转适应理论；第十三章介绍近几年发展较快的低纬大气动力学。

本书内容除参考国内外有关的重要著作外，还包含了近些年我们和国内外一些学者的重要科研成果。本书的编写出版还要感谢一贯对本书的出版给以极大关心的谢义炳教授，杨大升教授主编的“动力气象学”也给本书以极大的启发，陶祖钰副教授阅读了本书的全部书稿，并提出了许多宝贵的意见。北大出版社邱淑清同志对本书的出版作了极大的努力，我们在此深表感谢。还要说明的是，本书的出版得到了中国科学院大气物理所曾庆存教授的热情支持和大气所开放实验室的大力资助，在此深表谢意。

限于编者的水平，本书一定有不少缺点和错误，希望读者指正。

目 录

上 册

第一章 大气运动的基本方程	(1)
§ 1.1 地球与大气的基本特征	(1)
§ 1.2 绝对运动与相对运动	(2)
§ 1.3 运动方程	(3)
§ 1.4 连续性方程	(8)
§ 1.5 状态方程	(9)
§ 1.6 热力学方程	(10)
§ 1.7 水汽方程	(13)
§ 1.8 基本方程组	(13)
§ 1.9 球坐标系中的大气运动方程组	(13)
§ 1.10 局地直角坐标系中的大气运动方程组及 β 平面近似	(19)
§ 1.11 大气运动的湍流性, 平均化的大气运动基本方程组	(23)
§ 1.12 湍流半经验理论, 封闭方程组	(29)
§ 1.13 初条件与边条件	(33)
§ 1.14 气压倾向方程	(38)
§ 1.15 柱坐标系中的大气运动方程组	(39)
复习思考题	(40)
习题	(41)
第二章 大气运动的变形方程	(45)
§ 2.1 角动量和角动量方程	(45)
§ 2.2 能量与能量方程	(49)
§ 2.3 正压大气与斜压大气	(58)
§ 2.4 环流与环流定理	(62)
§ 2.5 散度与涡度、流场分析	(67)
§ 2.6 涡度方程、位涡度方程	(76)

§ 2.7 散度方程与平衡方程	(84)
复习思考题	(86)
习题	(87)
第三章 大气中的平衡运动	(92)
§ 3.1 大气水平运动的方程组	(92)
§ 3.2 力的垂直分布和大气的动力分层	(93)
§ 3.3 自然坐标系	(95)
§ 3.4 自由大气中的平衡运动	(99)
§ 3.5 惯性振动和惯性稳定度	(109)
§ 3.6 近地面层大气中的平衡运动	(112)
§ 3.7 上部边界层大气中的平衡运动	(116)
§ 3.8 Ekman 抽吸与旋转衰减	(122)
§ 3.9 地转偏差	(125)
复习思考题	(127)
习题	(129)
第四章 层结大气与静力平衡	(135)
§ 4.1 层结大气和层结稳定度	(135)
§ 4.2 Richardson 数	(143)
§ 4.3 近地面层大气湍流的 Monin-Obukhov 理论	(147)
§ 4.4 有效势能(available potential energy)	(150)
§ 4.5 以静止大气为背景的大气运动基本方程组	(154)
§ 4.6 静力近似、非弹性近似和 Boussinesq 近似	(160)
§ 4.7 正压模式(旋转浅水模式, rotating shallow water model)	(162)
§ 4.8 准 Lagrange 坐标系	(167)
§ 4.9 其他层结参数	(182)
复习思考题	(186)
习题	(187)
第五章 尺度分析	(194)
§ 5.1 大气运动的分类和尺度概念	(194)
§ 5.2 尺度分析(scale analysis)	(195)
§ 5.3 无量纲参数	(201)
§ 5.4 方程的无量纲化及某些近似的充分条件	(209)
复习思考题	(212)

习题	(213)
第六章 准地转动力学	(215)
§ 6.1 小参数方法(摄动法)	(215)
§ 6.2 准地转模式与准地转位涡度守恒定律	(226)
§ 6.3 准地转模式的能量守恒定律	(229)
§ 6.4 准地转的位势倾向方程和 ω 方程	(233)
§ 6.5 准无辐散模式	(235)
§ 6.6 半地转模式	(237)
复习思考题	(238)
习题	(238)
第七章 线性波动	(244)
§ 7.1 波的基本概念	(244)
§ 7.2 小振幅波和小扰动方法(small perturbation method)	(249)
§ 7.3 正交模方法(normal modes method)	(256)
§ 7.4 大气中的基本波动	(257)
§ 7.5 正压模式中的大气波动	(268)
§ 7.6 Kelvin 波	(271)
§ 7.7 一般大气系统中的波动	(274)
§ 7.8 准地转模式中的大气波动	(282)
§ 7.9 包含基本气流的 Rossby 波	(284)
§ 7.10 Rossby 波的频散,上下游效应	(288)
§ 7.11 超长波的尺度分析与频率分析	(292)
§ 7.12 Haurwitz 波	(297)
§ 7.13 永恒性波解(permanent wave solution)	(299)
§ 7.14 地形 Rossby 波	(301)
§ 7.15 定常 Rossby 波的形成	(304)
复习思考题	(305)
习题	(306)

下 册

第八章 波的传播理论	(315)
§ 8.1 缓变波列(slowly varying wave train)	(315)

§ 8.2	波能密度及其守恒原理	(318)
§ 8.3	波作用量及其守恒原理	(322)
§ 8.4	波的多尺度方法	(326)
§ 8.5	Rossby 波的传播图像	(329)
§ 8.6	Rossby 波的经向和垂直传播	(333)
§ 8.7	Rossby 波的动量和热量输送	(335)
§ 8.8	Rossby 波的演变, 波与基本气流的相互作用	(338)
§ 8.9	E-P 通量(Eliassen-Palm flux)	(345)
§ 8.10	东西风带和经圈环流的维持	(348)
§ 8.11	Rossby 波的共振相互作用	(351)
	复习思考题	(357)
	习题	(358)
第九章	非线性波动	(362)
§ 9.1	波动方程的特征线, Riemann 不变量	(362)
§ 9.2	浅水波的 KdV(Korteweg de Vries) 方程和 Boussinesq 方程	(369)
§ 9.3	非线性的作用: 波的变形	(373)
§ 9.4	耗散的作用, Burgers 方程的求解, 冲击波(shock waves)	(377)
§ 9.5	频散的作用, KdV 方程的求解, 椭圆余弦波(cnoidal waves) 与孤立波(solitary waves)	(380)
§ 9.6	正弦-Gordon 方程的周期解、扭结波(kink waves)与反扭结波 (anti-kink waves)	(390)
§ 9.7	试探函数法(trial function method), 双曲函数展开法(hyperbolic function expansion method)	(395)
§ 9.8	Jacobi 椭圆函数展开法(Jacobi elliptic function expansion method)	(401)
§ 9.9	非线性 Schrödinger 方程的包络周期波(envelope periodic waves) 与包络孤立波(envelope solitary waves)	(407)
§ 9.10	非线性波的波参数	(409)
§ 9.11	奇异摄动法(singular perturbation method)	(412)
§ 9.12	约化摄动法(reductive perturbation method)	(414)
§ 9.13	幂级数展开法(power series expansion method)	(424)
§ 9.14	Bäcklund 变换	(428)
§ 9.15	散射反演法(inverse scattering method)	(436)
§ 9.16	非线性方程的守恒律	(448)

§ 9.17 准地转位涡度方程的偶极子(modon)解	(450)
复习思考题	(454)
习题	(454)
第十章 大气中的能量平衡	(462)
§ 10.1 基本气流能量与扰动能量	(462)
§ 10.2 能量平衡方程	(464)
§ 10.3 基本气流动能与扰动动能的平衡方程	(466)
§ 10.4 基本气流有效势能与扰动有效势能的平衡方程	(467)
§ 10.5 能量间的相互转换	(469)
§ 10.6 大气能量循环	(473)
§ 10.7 能量转换与 Richardson 数	(474)
§ 10.8 湍流的串级(cascade)与能谱(energy spectrum)	(475)
复习思考题	(476)
习题	(477)
第十一章 流动的稳定性的稳定性	(478)
§ 11.1 稳定性的基本概念	(478)
§ 11.2 重力波的稳定性	(481)
§ 11.3 惯性-重力波的稳定性	(492)
§ 11.4 Rossby 波的稳定性	(511)
§ 11.5 临界层问题	(529)
§ 11.6 非线性稳定性	(531)
§ 11.7 常微分方程的稳定性理论	(540)
§ 11.8 气候系统的平衡态(equilibrium states)	(558)
§ 11.9 大气流场的拓扑(topology)结构	(561)
复习思考题	(568)
习题	(568)
第十二章 地转适应理论	(575)
§ 12.1 适应过程和演变过程的基本概念	(575)
§ 12.2 适应过程和演变过程的可分性	(576)
§ 12.3 适应过程的物理分析	(580)
§ 12.4 正压地转适应过程	(583)
§ 12.5 斜压地转适应过程	(590)
§ 12.6 天气形势变化的分解、演变过程和适应过程的联结	(595)

复习思考题	(600)
习题	(600)
第十三章 低纬大气动力学	(604)
§ 13.1 低纬大气运动的主要特征	(604)
§ 13.2 低纬大尺度运动的尺度分析	(605)
§ 13.3 低纬大气风场与气压场的关系	(609)
§ 13.4 低纬大气的惯性振动	(610)
§ 13.5 低纬大气 Kelvin 波	(612)
§ 13.6 低纬大气的一般线性波动	(615)
§ 13.7 积云对流加热参数化	(624)
§ 13.8 台风中惯性-重力内波的不稳定	(628)
§ 13.9 第二类条件不稳定(CISK)和台风的发展	(630)
§ 13.10 台风的结构	(636)
§ 13.11 非绝热波动(diabatic waves)	(639)
复习思考题	(644)
习题	(645)

第一章 大气运动的基本方程

本章的主要内容有：

简述地球的特征及其对大气运动的影响；

分析大气中的力场，并建立大气运动的基本方程，这些方程主要有：运动方程（Newton 第二定律）、连续性方程（质量守恒定律）、状态方程（气体状态定律）、热力学方程（热力学第一定律）和水汽方程（水汽质量守恒定律）；

指出大气运动的湍流性，并根据湍流半经验理论将上述方程平均化；

建立描写大气运动的封闭方程组，并给出常用的初始条件和边界条件。

§ 1.1 地球与大气的特征

一、地球的基本特征

地球一方面绕太阳公转（一年 365.25 天绕太阳一周），另一方面又绕自己的轴（称为地轴）自西向东旋转。对太阳而言，自转一周的时间平均为 24 小时（称为太阳日）；对恒星而言，自转一周的时间平均为 23 小时 56 分 4 秒（称为恒星日）。

地球自转角速度为一矢量，记为 Ω ，见图 1.1。其方向为地轴方向，即垂直于旋转平面，并与旋转平面构成右手螺旋系统； Ω 的大小按恒星日计算为

$$\Omega = \frac{2\pi}{1 \text{ 恒星日}} = \frac{2\pi}{86164 \text{ s}} \approx 7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}.$$

地球自转对大气运动有重大的影响，而地球公转主要决定一年四季的变化，但对大气运动影响极小。

地球可视为一椭球体，赤道半径 $a_e \approx 6.378 \times 10^6 \text{ m}$ ，极地半径 $a_p \approx 6.357 \times 10^6 \text{ m}$ ，两半径之差约 21 km。又地球上最高的山脉高度不超过 10 km，所以，地球一般可作为球体来处理。设与椭球体同体积的球体半径为 a （称为地球的平均半径），则

$$a \approx 6.371 \times 10^6 \text{ m};$$

地球的质量经推算为

$$M \approx 5.976 \times 10^{24} \text{ kg}.$$

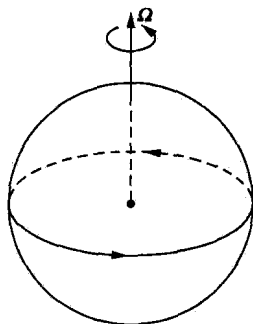


图 1.1 地球自转角速度

二、大气的基本特征

大气环绕地球并与地球一道旋转,地球大气总质量约为

$$M_a \approx 5.136 \times 10^{18} \text{ kg.}$$

标准大气压为一大气压,其数值为

$$P_0 = 1013.25 \text{ hPa} \approx 1000 \text{ hPa,}$$

它即是常说的海平面气压,标准大气密度数值为

$$\rho_0 \approx 1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3},$$

它即是常说的海平面附近的大气密度. 大气密度和压强都随高度的增加而减小. 大约 95% 的大气质量集中在离地面 20 km 高度以下, 这层大气相对于地球半径是很薄的, 但其中有千变万化的天气. 这层大气连续地充满该层的整个空间, 可视为连续介质, 因而其中一切物理量都可视为时间和空间的连续函数. 即大气的任一微小部分(空气微团)可以作为“点”来处理, 称为空气质点.

§ 1.2 绝对运动与相对运动

对于地球而言, 固定在地球上的观测者与地球一道旋转, 他所观测到的大气运动是相对于旋转地球的相对运动, 而对于在恒星上的观测者而言, 它所观测到的大气运动是绝对运动.

设原点位于地球中心, 坐标轴方向相对于恒星(如太阳)是固定的坐标系为惯性坐标系; 而原点也在地球中心, 但坐标轴固定在地球上的坐标系为旋转坐标系.

对于矢量 $\mathbf{A}$, 设它在惯性坐标系和在旋转坐标系中随时间的变化率分别为 $\frac{d_a \mathbf{A}}{dt}$ 和 $\frac{d \mathbf{A}}{dt}$, 因而, 依力学基本原理, $\frac{d_a \mathbf{A}}{dt}$ 应是 $\frac{d \mathbf{A}}{dt}$ 与因旋转坐标系以角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 旋转而引起的 $\mathbf{A}$ 的变化 $\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{A}$ 之和, 即

$$\frac{d_a \mathbf{A}}{dt} = \frac{d \mathbf{A}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{A}. \quad (1.1)$$

对于空气微团的位置矢量(矢径) $\mathbf{r}$, 上式化为

$$\mathbf{V}_a = \mathbf{V} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}. \quad (1.2)$$

它表示空气微团的绝对速度 $\mathbf{V}_a \equiv \frac{d_a \mathbf{r}}{dt}$ 等于它的相对速度 $\mathbf{V} \equiv \frac{d \mathbf{r}}{dt}$ 与因地球自转而引起的牵连速度 $\mathbf{V}_c \equiv \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$ 之和.

取旋转坐标系原点在球心 O , 空气微团所在空间一点为 P , 则 $\mathbf{r} = \overrightarrow{OP}$; 取地轴到 P 点且垂直于地轴的矢径为 $\mathbf{R}$ ($\mathbf{R}$ 的大小 R 称为通过 P 点的纬圈半径), 如图