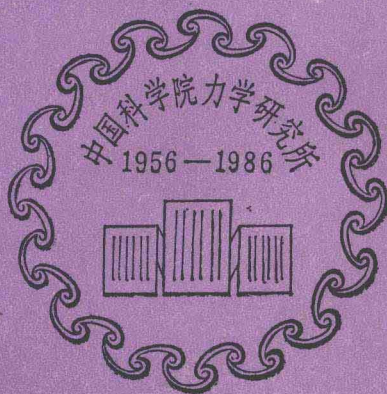


力学未来 15 年

国际学术讨论会论文集

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM
ON MECHANICS IN THE NEXT 15 YEARS

第 2 卷 Vol.2



中国科学院力学研究所建所 30 周年纪念

1986 年 6 月 8—10 日 北京

Thirtieth Anniversary of the Institute of Mechanics, Academia Sinica

June 8—10, 1986 Beijing

前 言

中国科学院力学研究所于1956年建立，第一任所长钱学森，副所长钱伟长、郭永怀。为了总结回顾30年来的工作，展望未来的发展前景，1986年6月8日至10日进行了以学术交流为中心内容的庆祝活动。参加庆祝大会的有力学所全体人员和国内外300多位来宾，其中包括6个国家和地区的19位著名力学专家，国内高等院校和科研单位的知名学者，以及有关单位的领导。庆祝大会后举行了“力学未来15年国际学术讨论会”。11位国内外专家作了大会学术报告。分组会学术报告有流体组15个，固体组12个，其他组13个。报告大多内容丰富，学术水平高，实际意义大。特别是论述力学未来发展的许多见解十分精辟。为了广泛进行交流，特将讨论会的报告分两卷出版。第1卷包括大会报告、综述论文和外宾报告共20篇，由科学出版社出版。第2卷包括分组会的其他报告共30篇，由中国科学院力学研究所出版。文集中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

中国科学院力学研究所

目 录

前言	(iv)
陆地表面物理过程的研究	孙菽芬 (1)
西北工业大学的自适应壁风洞试验研究	贺家驹 (6)
矩形截面直管中的振荡流动	林同骥 浦 群 (12)
含灰气流驻点加热增量机理研究	俞鸿儒 (18)
粘性流计算进展	卞荫贵 (23)
粘塑性流体在旋转圆盘上的流动	范 椿 (32)
流动对孤立波分裂的影响	周显初 (38)
双原子分子晶体振动弛豫过程的分子动力学	陈致英 丁家强 蔡锡年 (43)
激波风洞中分离流、缝隙流和底部流传热实验研究	唐贵明 李静美 王世芬 (49)
在脉冲型高超声速风洞中气动力测量和实验研究	杨耀栋 马家骥 (56)
关于开放型流动中转捩研究的展望	林贞彬 (63)
超声速机翼的二次滚转阻尼	顾为凯 (70)
大气中高压空穴水射流气蚀强度的试验研究	石守祥 刘建国 (74)
节能射流泵在工业中的应用	郑之初 (79)
拉格朗日湍流和哈密顿混沌	朱照宣 (85)
抗辐照材料的动态响应研究	赵士达 白以龙 沈乐天 尚嘉兰 (88)
裂纹顶端弹塑性场的高阶渐近解	王自强 李尧臣 (94)
干摩擦控制振动	田千里 张强星 (100)
焊接钢接头海水腐蚀疲劳试验研究	薛以年 徐纪林 李 禾 李延莘 邓蓉英 (104)
韧性损伤中的空洞剪切带及本构方程	李国琛 (111)
含裂纹板壳的研究	柳春图 李英治 (116)
水平静载荷下桩-土相互作用的分析	钱寿易 盛莞晶 (123)
高频等离子体理论和实验及其在制造高档钛白中的应用	陈允明 范支鹏 黎齐修 (131)
利用调频激光实现键选择性化学反应的可能性	解伯民 丁家强 (136)
平板爆炸焊接合理参数的快速确定	邵丙璜 李国豪 周之洪 张登霞 陈维波 (148)
爆破拆除技术研究和应用	庞维泰 周家汉 金星男 金宝堂 (155)
燃烧空气动力学在高性能稳燃装置中的应用	吴承康 (160)
设备与管道保温的最优化设计方法	方铎荣 陆显洁 吕钧锋 (167)
用于地层应力-应变观测的高灵敏度体积式应变仪	王德荣 苏恺之 (172)
水中瞬态压力测量技术与应用	严忠礼 张金城 郭淳义 戴菊英 黄立舜 (178)
附: 第 1 卷目录	(184)

CONTENTS

Study of land surface process.....	Sun Shu-fen (1)
Experimental research on adaptive wall wind tunnel at NPU.....	He Jia-ju (6)
Oscillatory flow through a rectangular tube.....	Lin Tong-ji, Pu Qun (12)
Study of heating augmentation mechanisms in dusty flow	Yu Hong-ru (18)
On computational viscous flow problems	Bian Yin-gui (23)
Flow of a viscoplastic fluid on a rotating disk	Fan Chun (32)
Effect of current on the fission of a solitary wave.....	Zhou Xian-chu (38)
Molecular dynamical study of the vibrational relaxation process in a diatomic molecular solid.....	Chen Zhi-ying, Ding Jia-qiang, D.H.Tsai (43)
The experimental investigations of aerodynamic heating in turbulent separated region, gap and base in shock tunnel	Tang Gui-ming, Li Jing-mei, Wang Shi-fen (49)
Measurements and study of aerodynamic forces in impulse type hypersonic wind tunnel.....	Yang Yao-dong, Ma Jia-huan (56)
Transitions in open flows, Prospect	Lin Zhen-bin (63)
The second-order damping in roll of rolling wings at supersonic speed	Gu Wei-kai (70)
An experimental study of the erosion intensity caused by a high pressure cavitating water jet in air	Shi Shou-xiang, Liu Jian-guo (74)
The applications of injector for energy saving in industry ...	Zheng Zhi-chu (79)
Hamiltonian chaos and Lagrangian turbulence	Zhu Zhao-xuan (85)
Study of dynamic response of radiation-resistant materials	Zhao Shi-da, Bai Yi-long, Shen Le-tian, Shang Jia-lan (88)
High order asymptotic field of elastic-plastic crack problems	Wang Zi-qiang (Tzu-Chiang Wang), Li Yao-chen (94)
Vibration control by dry-friction	Tian Qian-li, Zhang Qiang-xing (C.S.Chang) (100)
Experimental study on seawater corrosion fatigue of welded steel joints	Xue Yi-nian, Xu Ji-lin, Li He, Li Yan-ping, Deng Rong-ying (104)
Void, shear band of ductile damage and constitutive equations	Li Guo-chen (111)

- Study on cracked plates and shells.....Liu Chun-tu, Li Ying-zhi (116)
- Analysis of the pile-soil interaction under lateral static loads
..... Qian Shou-yi(Shou-I Tsien), Sheng Yuan-jing (123)
- High frequency plasma—Theory, experiment and application
..... Chen Yun-ming, Fan Zhi-peng, Li Qi-xiu (131)
- One possible way to promote the bond-selective chemical reactions by
frequency-modulated lasers..... Xie Bo-min, Ding Jia-qiang (136)
- Fast determination of weldable parameters of plates explosive welding
..... Shao Bing-huang(P.H.Shao),
Li Guo-hao, Zhou Zhi-hong, Zhang Deng-xia, Chen Wei-bo (148)
- Study and application of explosive demolition technique
...Pang Wei-tai, Zhou Jia-han, Jin Xing-nan, Jin Bao-tang (155)
- Application of combustion aerodynamics in high performance flame
stabilizing devicesWu Cheng-kang, et al (160)
- Optimal design method for thermal insulation of equipments and pipes
.....Fang Duo-rong, Lu Xian-jie, Lü Jun-feng (167)
- A high sensitivity volume strainmeter for crustal stress-strain measurements
.....Wang De-rong, Su Kai-zhi (172)
- Technology for the measurement of underwater explosion pressure and
its application.....Yan Zhong-li, Zhang Jin-cheng,
Guo Chun-yi, Dai Ju-ying, Huang Li-shun (178)

陆地表面物理过程的研究

孙 菽 芬

(中国科学院力学研究所)

提要 本文概述了陆地表面活动过程研究的几个有关方面,它们体现了流体力学研究与气候学、地学及农学的交叉。文中提出了两个有重要意义的研究方面:对大气环流研究重要而有用的大范围陆面水文过程的研究;非饱和土壤中水、热输运运动的研究。

关键词 地表活动过程;地面水文模式;植被生物圈与大气相互作用;非饱和土壤;水和热的输运

I. 陆地表面活动过程研究的重要性

陆地表面占全球面积的30%,形成不同覆盖面,大概 $1/4$ 是沙漠, $1/4$ 是森林, $1/4$ 是草原, $1/8$ 是农田和城市,其余为冻土、沼泽、湖泊及江河。这种复杂的地貌形成复杂地表活动过程,受到了包括数学、流体力学在内的多学科的科学工作者的重视。气象及流体力学工作者重视它,是因为地表与大气之间进行水汽及热量等交换,既对气候也对陆地生态的发展和变化产生深刻影响;而生态学家、农学家和森林学家,则是要研究生物的生存与这种变化和发展生态的相互关系;至于水文、水利学家的关心,是因为陆地表面上发生水循环过程与洪涝干旱及地上地下水资源有关。我们这里所提的陆地表面活动过程的研究,主要针对在各种天气及环境条件下,地表面上下发生的质量流及能量流的运动形式和规律进行探讨。这种研究,对于预测环境的变迁,研究生态平衡是十分重要的。

未来的气候向变暖发展,据预测,到2030年世界平均气温将上升 $1.5-4.5^{\circ}\text{C}$,我国将增温 $2-4^{\circ}\text{C}$ 。其结果将造成全球的降水量重新分配,中纬度陆地降水量将减少;而干旱将更频繁出现。同时还将带来冰川融化及海水上涨造成海平面增高 $0.2-1.4$ 米。这种变化,对我国干旱中纬度区域及发达的东南沿海经济区的影响将是十分重要的。此外我国还有许多特殊的问题。如:我国的人均水资源比较缺乏,为世界平均的 $1/5$,同时水资源的时、空分布又极不均匀,因此旱涝经常出现。在世界日趋严重的荒漠化过程中,我国的沙漠面积也在逐渐增长。我国还有2000多万公顷的盐碱荒地,以及人类活动造成的各种环境污染等。所有这些问题,都对陆地表面活动过程研究提出许多重要的课题,这些课题的研究,对于改造环境,指导国土整治等,均具有十分重要的意义。

II. 大尺度范围内陆地表面活动过程和用于气候研究的陆地水文模式 (GHM)

为了对全球变化的主导因素气候变化提高预测水平,必须对陆面-大气,陆地-水,水-大

气界面之间的水、热交换和化学循环及各自内部发生的物理过程进行研究。1977年在世界气象组织要求下，成立了应大气环流模式(GCM)之需的地表活动过程研究小组，并于1981年召开会议^[1]。许多科学家均明确指出，陆地表面各种覆盖如裸土、冰雪、植被等产生的活动十分复杂。由此而产生与大气之间不同能量和质量的交换，对气候研究结果(降水量、风场及气温)起着明显的影响，并指出，当今模拟气候变化的大气环流模式已发展到相当高的水平，而对地面活动及相应模式的研究却十分不相称。强调应加强这一研究，并在此基础上发展一个比较真实反映地面过程本质的地面水文模式的必要性。

早期比较有代表性的地面水文模式是桶式模型^[2,3]。在这个模式中，陆地被假设为有一定深浅的容器，其中水含量增减取决于雨量的补充及蒸发的损失。只有当水充满该容器时，地表才产生径流。至于土壤随空间变化和植被存在的效应则被忽略了。此模型看来有点简单化。但尽管如此，至今仍被沿用。1978年Deardorff^[4]设计了预告地面温度及水分变化的模式，包括单层植被层的效应。同年，Lin^[5]发展了分层陆地水文模式，考虑不同土质、不同种类植被效应。1983年，Mintz等人^[6]为了更细致研究植被生物圈与大气相互作用的关系，又设计了一个可与大气环流模式耦合的植被分层模式。

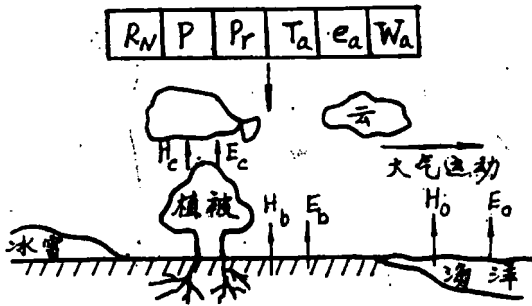


图1 陆-气之间水和热量的转换

我国已经开展了地-气相互作用多方面的物理研究。如对青藏高原影响，西北干旱地区地-气相互作用等研究。但对于陆地水文环流数学模式研究还不够深入，基本上仍沿用桶式模型概念。我们的工作是在改善和发展了Lin的模式，现介绍如下。

图1给出了陆地表面及其与大气之间相互作用的物理过程。在大气条件的驱动下，

陆地表面分别从裸土、植被等向大气输运水汽及热量。为了定量模拟这种质量、动量和能量交换，在GHM中，陆地表面被分配成很多大小为4度纬度乘5度经度的网格，并用五种土质、十余种植被来描述各网格土质及植被性质随空间和时间的变化。在每一网格中，土壤层分为两层，表面薄层置放在较厚的底层之上。描述水分运动的二层与描述热运动的二层并不一致，前者取决于极区的根部密度分布，后者则分为反映土壤温度日变化的表面层与反映逐年变化的深层。为了研究植被对传热传质的影响，植被被简化为一整体层置于土壤下垫面之上^[7]。

图2及图3给出在GHM模型中反映这样一个过程的示意图。描述土壤分层内水分及温度变化的方程为^[7]

$$d_1 \frac{d\theta_1}{dt} = \left(I_b - \frac{E_b}{\rho_w} \right) \sigma_b + (I_c - U_1) \sigma_c - q_{12} - R_{s1} \quad (1)$$

$$d_2 \frac{d\theta_2}{dt} = q_{12} - q_{23} - U_2 \sigma_c - R_{s2} \quad (2)$$

$$\alpha \frac{dT_{sb}}{dt} = \frac{2G_b}{C d_1} - \frac{2\pi}{\tau} (T_{sb} - \bar{T}) \quad (3)$$

$$\alpha \frac{dT_{sc}}{dt} = \frac{2G_c}{C\bar{d}_1} - \frac{2\pi}{\tau}(T_{sc} - \bar{T}) \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{\sigma_c G_c + \sigma_b G_b}{C\sqrt{365\pi}\bar{d}_1} \quad (5)$$

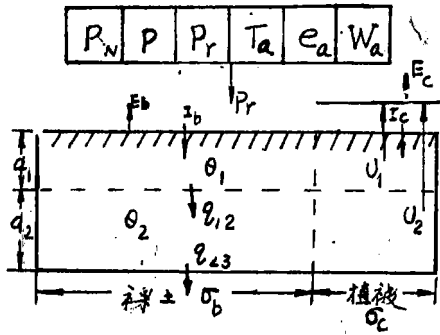


图2 水分运动

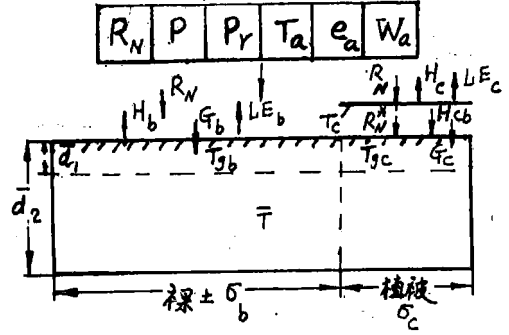


图3 热量交换

描述植被层平均温度 T_c 变化的方程为^[7]

$$h_c C_c \frac{dT_c}{dt} = x_M \quad (6)$$

这是一个高度非线性动力系统，只有数值模拟才能求解。为了求解，除了必要的初始条件外，还要求给定的上下边界条件。上边界条件由地表面与大气之间交换所决定。这是一个十分复杂的问题。这种交换既与大气湍流的特性也与土壤和植物生理性质有关，至今没有完整答案。只有多学科联合，才有希望解决。目前所采取的办法很多，这儿利用空气动力学方法并结合参数化手段去求解各时刻向大气输运的水汽及热通量。

为了验证这个模式设计的可信度，我们曾对三个典型不同地表覆盖面（裸土、冬小麦和针叶林）的实测数据进行7天的模拟，结果发现模拟与实测结果吻合得较好。¹⁾

由于陆地水文模式是一个参数化模式，所以其中各种参数并不都能精确地测定及决定。为了弄清这些参数大小对地面模式模拟结果的影响，曾在同一天气条件下对模型的若干参数进行了敏感性试验（如反照率，植被阻力，网格中植被密度等）。结果表明，植被密度的变化、反照率取值的不同以及植被阻力的改变，对模式模拟结果亦即地表活动过程的影响较大，尤其是植被密度变化的影响最为显著。这说明裸土与植被在与大气交换过程中所起作用十分不同，证明了建立一个比较真实反映地面活动的地面水文模式是十分必要的。

地表活动过程是一个十分复杂的过程，除了植被的效应，还有沙漠化、冰川覆盖等效应。这是一门亟待进一步深化研究的独立学科，也是我们流体力学工作者可以为之奋斗的研究领域。

Ⅲ. 非饱和土壤中水、热及溶质运动的研究

这是另一个尺度范围内研究水热循环发生在土壤内部并同土壤表面与大气交换有关的课题。当谈到水资源时，总是首先要知道雨水有多少补充至地下水，有多少变成地表径流，有

1) 参看：孙蓓芬，力学进展，14, 1 (1984)；1-10,

多少贮存在土壤中, 这就是所谓的四水(雨水、地下水、地表径流、土壤水)转换问题。图4给出了流域内四水转换的机制。决定这四水运动的方程组是高度非线性偏微分方程组^[8]。

在这样一个系统中, 非饱和土壤中水的流动起了承上启下的关键作用, 因为它与雨后的地下水补充及地表集流的产生有关, 与平时潜水(地下水)蒸发速率有关。对于旱农地区节水灌溉及盐碱地综合治理, 也都要求对这种流动进行研究。

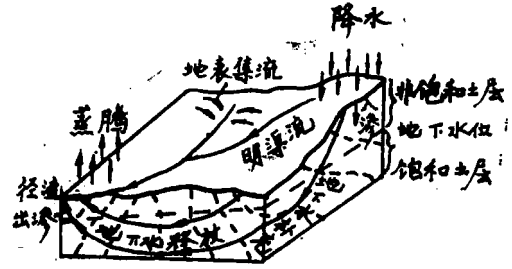


图4 四水循环

国外近一二十年来, 这种流动研究由于计算机的发展, 由于各种领域内科学工作者, 如土壤物理学者、数学及力学工作者相结合, 进展十分迅速。《地球物理和空间物理评论》杂志^[9-11]从1975年开始到1983年, 每四年都发表一篇关于这领域内的综述性文章, 在土壤科学杂志中有专栏介绍。近年来研究集中在以下三个方面: ①土壤内基本流动机理研究(包括单相及多相流动, 水热耦合流动, 水及溶质流动等的研究)以及有关的解析解, 但更多的是数值求解方法的探讨; ②由于测定土壤特性很困难, 土壤种类又杂, 所以对土壤性质及相应的输运系数测定和定量关系的建立至今一直很重视; ③由于土壤空间变异性, 如何由实验室的结果推广到实地, 如何由点到面, 近几年来十分引人注目, 因为这个问题的解决, 对于理论研究真正应用于实际是非常关键的。

我国这方面的工作还刚刚开始, 基本上处于起步或薄弱状态。虽然也有些结果, 但总的还落后于国际水平。如果数学、力学、土壤物理等学科的工作者结合在一起, 一定会迅速地将这门学科推向前进。

鉴于三峡工程及其他方面的需要, 我们曾对土壤内的水、热运动作过一定工作^[12]。土壤内的水、热运动基本上分两种模型: 一种是水、热运动互不相关的简化模型; 另一种是二者互相耦合的模型。为系统起见, 现介绍一维耦合模型。图5给出了相应的流动图案和方程组, 其中 C , D_θ , D_T , K , L_T , L 及 $D_{\theta v}$ 是土壤中

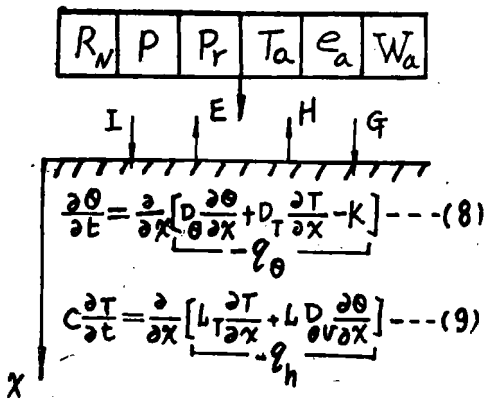


图5 土壤内水和热的运动

体积含水量 θ 及温度 T 的函数, 上边界条件为

$$\left. \begin{aligned} q_0 &= (-E/\rho_w) \text{ 或 } (+I) \\ q_h &= G \\ G &= R_n - LE - H \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

方程(8), (9)也是高度非线性的, 加之交界面上蒸发量 E (或入渗量 I)及热通量 H 是由天气条件及土壤表面条件所决定, 所以也只有通过数值计算进行求解。我们对有关实测数据进行

了一个星期的模拟。结果发现, 计算的土壤水分和温度的剖面以及表面蒸发量, 与实测结果较好地吻合。在这工作中, 我们引进了土壤表面有蒸发阻力存在的概念。它的大小随土壤表面层变干而增大, 这一点与法国的Perrier^[13]提出的看法一致。

有了土壤层水分运动的结果, 对于溶质(如盐分)一维运动可简化为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C) = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\theta D_s \frac{\partial C}{\partial x} - vC \right] \quad (10)$$

其中 C 为溶质浓度, D_s 为弥散系数, v 为水流通量。这是一个对流-扩散方程。当对流项作用大于弥散项时, 有时会出现数值解的振动及数值弥散等困难。这也是目前计算数学工作者所关心和力图去解决的问题。

方程 (2) — (10) 仅适用于各向同性的均质土壤。对于象我国黄淮海盐碱地区的非均质土壤, 因变量 θ (水分体积含量) 应该用水势 ϕ 来代替, 问题就困难得多了。加上实际问题是研究季节性气候条件下的蒸发及入渗情况下的水盐运动, 困难就更多。这方面的工作尚待深入。如果我们能够结合我国实际, 通过大量的数值模拟, 找出各种天气条件下、各种排灌淋洗条件下的水盐运动规律, 指示盐碱土的形成机制, 那么这种研究的学术意义及实际意义将是很大的。

参 考 文 献

- 1 World Meteorological Organization, Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Model, Papers Presented at JSC Study Conference, Greenbelt, USA (1981)
- 2 Manabe S., *Monthly Weather Review*, **97** (1969) : 739—774
- 3 —, *ibid*, **99** (1971) : 335—370
- 4 Deardorff J. W., J. G. R. **83C4** (1978) : 1889—1903
- 5 Lin J. D., et al, Modeling the future roles of satellite data, *Satellite Hydrology*, ed. by M. Deutsch, et al, Water Resources Associate (1979) : 124—138
- 6 Mintz Y., et al, NASA TM **84973** (1973)
- 7 Sun Shu Fen (孙菽芬), A sensitivity study of the ground hydrologic model using data generated by an atmospheric general circulation model, Ph. D. Dissertation, the University of Connecticut (1985)
- 8 Danish Hydraulic Institute, SHE, A short description (1982)
- 9 Melz F. J., et al, *Rev. Geophys. and Space Phys.*, **17**, 6 (1979) : 1221—1289
- 10 Smith R. E., *ibid*, **21**, 3 (1983) : 755—760
- 11 Amermun C. R., et al, *ibid*, **13**, 3 (1975) : 451—505
- 12 林家鼎, 孙菽芬, 水利学报, **7** (1983) : 1—8

STUDY OF LAND SURFACE PROCESS

Sun Shu-fen

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract This paper describes briefly several research respects relative to land surface processes. They reflect research interaction between fluid mechanics and climatology, geography and agronomy. In the paper, two important research aspects are presented, land surface hydrological process in large scale which is important to the study of the atmospheric general circulation, and water and heat transport in unsaturated soil.

Keywords land surface processes, land surface hydrology model, interaction between vegetation biosphere and atmosphere, unsaturated soil, water and heat movement

西北工业大学的自适应壁风洞试验研究

贺 家 驹*

(西北工业大学)

摘要 目前,各技术先进国家均在致力研究试验能消除风洞洞壁干扰效应的自适应风洞(自修正风洞),认为这是未来风洞的发展方向。我校于1982年建立课题组,根据现有条件在国内初次开展此项研究。本文简要地报告了我们4年来的研究工作,包括综述各国研究进展、原理分析论证、试验设备设计建造、数值模拟计算、加快迭代试验速度的方法和初步研究结果。并介绍今后5年研究计划及提出未来15年在国内开展自适应壁风洞研究与建设的建议。

关键词 自适应壁风洞;洞壁干扰;迭代试验

I. 前 言

自有风洞以来,很多气动力研究人员不断致力于修正或减小常规风洞试验中严重影响模型试验数据准确性的洞壁干扰效应。直到1973年Sears和Ferri等提出了一种“自适应壁风洞”新概念,其原理为若能主动迭代调节洞壁状态,使风洞内绕模型的流动与该模型在无约束时的流动一样,就可以得到无干扰试验数据。此概念符合流体力学基本原理,是很有前途的,因此,近10年来各国纷纷开展了各种方案的研究工作。归纳起来可分两大类:①通气壁自修正风洞;②柔性自流线壁风洞。文献[1]介绍了100多篇自适应壁风洞研究文章,新书[2]亦即将出版。1986年3月美国NASA Langley研究中心试验技术分部负责人R.A. Kilgore商同各国同行,编印了“Adaptive Wall”Newsletter No.1,加强了世界范围的自适应壁风洞研究的技术信息交流,并将陆续报道包括中国的研究进展和编制现有的自适应风洞一览表。

80年代初,两类型式的自适应壁风洞在 $M=0.90$ 以下时,均取得了二元模型试验的无干扰数据,已可进入应用阶段。最近文献[3]报告,英国南安普敦大学跨声速二元柔壁自流线型风洞(TSWT)试验近声速 $M=0.90-0.94$, $\alpha=4^\circ$ 的NACA 0012—64翼型已取得了一些进展,并正在探索 $M=0.94-0.97$ 时的流动状态及试验技术。Goodyer^[4,5]及Ganzer^[6]均表示有可能通过激波处柔壁局部偏转,被正确地自适应至激波下游的气流方向,并用以补偿激波后的边界层增厚,以及由于至洞壁的头波的减弱并与边界层相互干扰等,使试验 M 数

* 中国西北工业大学空气动力学研究室副教授,中国科学院力学研究所研制高雷诺数跨声速管风洞技术顾问,科工委重点气动研究课题“洞壁干扰研究”联合攻关组副组长

经过声速至低超声速范围。

为了减少迭代试验次数,提高风洞效率,节约能源,对加速收敛途径进行了研究,发展了一步法技术,已可应用于自适应程序中。

在二元研究取得成果的基础上,一些机构利用二元自适应壁风洞进行“拟”(psuedo)三元模型试验:当模型堵塞比较小时,如果二元洞壁形状是按照三元试验段半展宽度的中间位置处的流线成形,洞壁自适应也是可能的。

国外1982年起开始报道了三元自适应壁风洞的设计试验,分别建造了几种型式的三元自适应壁风洞。1985年西德DFVLR-Göttingen的E.Wedemeyer^[7]和笔者^[8]同时分别综述分析了世界范围的三元自适应壁风洞研究工作,前者介绍了在自适应壁风洞中计算机的作用,后者则介绍了初拟的三元柔壁自流线型风洞的设计方案。

II. 西北工业大学4年来的自适应壁风洞研究工作

我们首先综述分析了各国二元自适应壁风洞的进展^[9,10],论证其工作原理^[11]。之后,根据可能条件改建了一座低速二元柔壁自流线型试验段风洞^[12],设计加工了一副用于现有小跨声速风洞上的分格驻室孔壁,提供了试验研究条件。并对设计的低速二元柔壁自流线型风洞的整个工作过程进行数值模拟计算,以验证其可行性^[13]。经过初步试验,编写了对称模型的试验研究报告^[14,15],以及加快迭代收敛速度方法的研究报告^[16]。现正式准备结合国产民用飞机改型试验非对称翼型自适应技术,对跨声速通气壁分格驻室方案亦进行了一些探索。

III. 自适应壁风洞的分析论证,两种方案的工作原理,柔壁自流线型风洞的数值模拟

根据自适应壁风洞概念,需设计可调节的洞壁结构,通过调节进行迭代试验以获得模型的无干扰试验数据。因此,要给出迭代试验中洞壁干扰已否消除的判断和依据存在的洞壁干扰决定洞壁调节量的计算方法,并证明迭代过程具有收敛性,才能付诸实现。

通气壁自修的风洞的工作原理,是改变分段驻室内的压力分布或控制通气壁局部的横流特性,使洞壁附近控制面上的流动模拟无约束流动。

柔性自流线壁风洞的工作原理,则是调节洞壁几何形状,使其经边界层位移厚度修正后的有效洞壁形状内侧的真实流动与根据此有效洞壁形状、来流参数、在远场无扰动条件下按势流理论(低跨声速时用无扰动方程)计算出来的该有效洞壁形状外侧的假想流动相匹配时,就可以认为洞壁已经流线化,达到无干扰状态了。

我们结合低速二元柔壁自流线型风洞的设计进行了数值模拟计算,采用奇点法分别模拟风洞内、外场的流动,各自计算内、外场沿有效洞壁型线上的流动参数分布,按照试验准确度要求,判断洞壁干扰已否消除。如仍有洞壁干扰效应,可采用一涡面来模拟洞壁效应,依涡面、模型及自由流在洞壁上诱导的法向速度之和为零的条件,求出洞壁调节量,重新调整试验后加以判断,直至无洞壁干扰效应为止。模拟计算结果证明,自适应壁风洞原理正确。有关文献^[17-20]指出,通过一定假设条件下数值论证和解析证明,从理论上分析,认为自适应壁风洞的迭代过程具有收敛性质,并经各国同行和我们自己的试验验证了自适应壁风洞的可行性。

IV. NPU 低速二元柔壁自流线型风洞(LSWT)设计

为尽快在国内开展自适应壁风洞的试验研究,1984年春将一座原有的三元八角形模型风

洞改建成一座低速二元柔壁自流线型试验段风洞, 见图 1。

试验段主要设计参数如下: 口径 $256 \times 150 \text{ mm}^2$, 模型弦长 $C = 150 \sim 200 \text{ mm}$ 。试验段长度 1300 mm , 与模型弦长比 $L/C < 5$, 因此可使长度截断误差 $\Delta C_1/C_1 < 1\%$ 。

考虑到边界层位移厚度修正及尾流影响, 使风洞进、出口高度比为 $H_{\text{ex}}/H_{\text{en}} \approx 1.2$ 。

最大的调节螺杆位移量 $h = 25 \text{ mm}$, 其位移精度 $\Delta h < 0.01 \text{ mm}$, 在模型区附近 2 倍正常模型弦长范围内的调节螺杆间距为 $C/4$, 以得到精确的洞壁形状, 在此区域的上下游, 逐渐增加其间距, 每个柔壁上各有 19 个调节螺杆。

各相应调节螺杆及距入口 $15, 40 \text{ mm}$ 处共有 21 个沿轴向分布的测压孔。并在模型区布置了一些展向位置测压孔, 以观察流动的三元性。

柔壁采用 1 mm 厚的锡磷青铜板, 效果良好。

V. 低速二元柔壁自流线型风洞初步试验研究结果

1. 空风洞的流场性能 按四壁湍流边界层位移总厚度扩开调节上、下柔壁位置吹风,

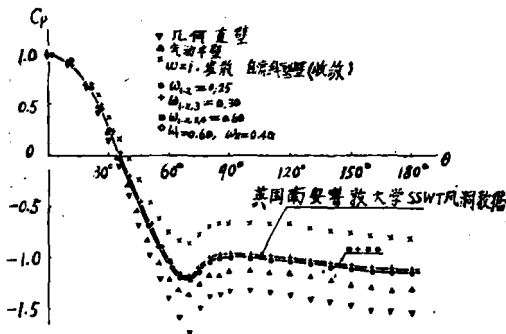


图 2 $\varepsilon = 13.7\%$ 圆柱体模型在各种壁面形状下的压力分布

得到了无轴向压力梯度的试验段流场 ($\Delta p < 1 \text{ mm}$ 水柱)。模型区附近几个截面上的速度型分布均匀, 二元性良好, 符合二元模型试验流场品质要求。

2. $\varepsilon = 13.7\%$ 圆柱体模型试验 图 2 示出了在几何平壁、气动平壁及自流线壁收敛后的圆柱体表面压力分布。可以看出, 松弛因子 ω 若取在 $0.25 \sim 0.60$ 之间, 经过 2—4 次迭代试验均能收敛得到无干扰试验结果。

图 2 中同时绘出了国外无干扰压力曲线, 以

资比较。

3. $C = 200 \text{ mm}$ NACA 0012 翼型试验 此时的风洞高度与翼型弦长比 H/C 仅为 1.28 , 通常二元风洞的 $H/C > 3 \sim 4$ 。图 3 表示了自流线壁收敛的翼型表面压力分布与无干扰曲线的比较。

图 4 表示 NACA 0012 翼型的在自流线壁收敛后的 $C_p - \alpha$ 曲线与无干扰参考曲线的比较。

由图 2—4 可知, 采用柔壁自流线型试验段通过自适应技术, 可以得到无干扰结果, 并能在小风洞内试验较大的模型, 易于满足几何相似准则及获得较高的试验雷诺数, 符合我国实际。

VI. 迭代试验运行程序与加速收敛技术的研究

图 5 为柔壁自流线型风洞迭代试验运行框图。

由图 5 可见, 求解 Δy_i 时, 需引入合适的松弛因子 ω ($0 < \omega < 1$), 才会较快收敛。为此研究了加快收敛速度的方法。由图 2 发现, 若改变松弛因子, 可以加快收敛速度。若定义

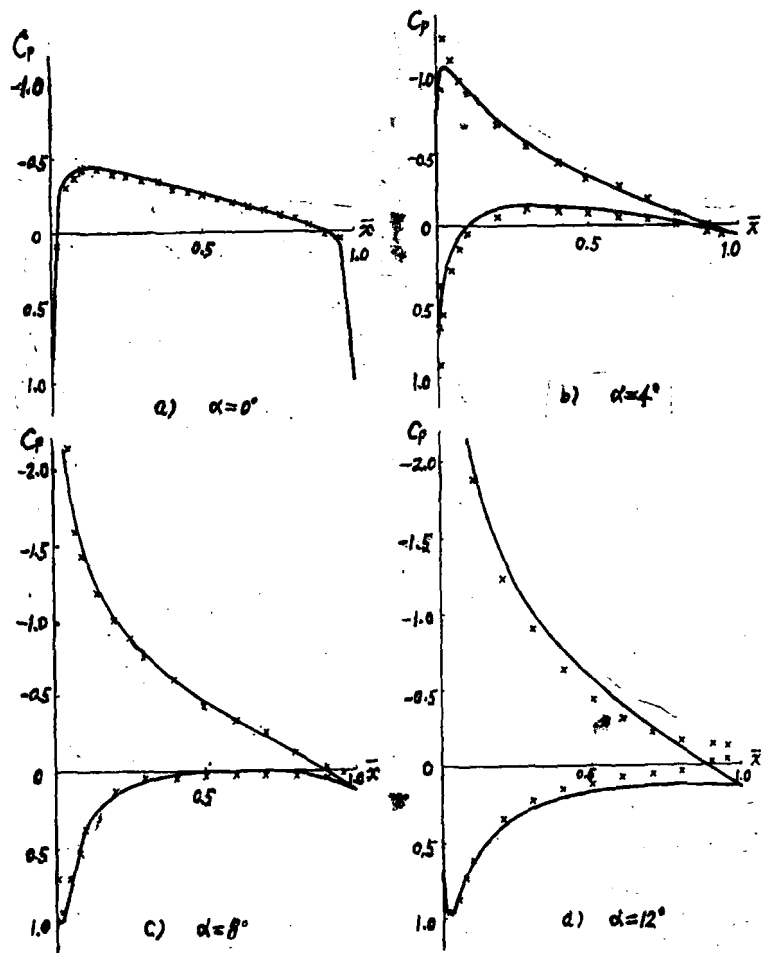


图3 $C=200\text{mm}$ NACA 0012 翼型在自流线壁收敛后的压力分布
 — 莱利压力风洞 $Re_c=3\times 10^6$, $M=0.3$, 固定转轴 $\times$ NPU自流线型风洞 $Re_c=0.44\times 10^6$

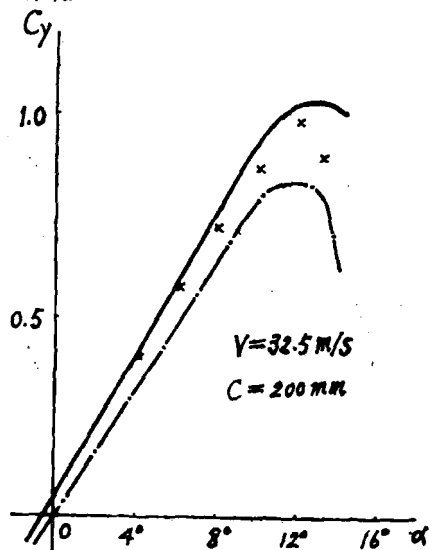


图4 $C=200\text{mm}$ NACA 0012 翼型在自流线壁收敛后的 $C_y-\alpha$ 曲线
 — 光滑表面 } 莱利研究中心LTT低湍流度风洞
 - - - 标准粗糙带 } $Re_c=0.7\times 10^6$
 $\times$ NPU 2维 LSWT 风洞 $Re_c=0.44\times 10^6$

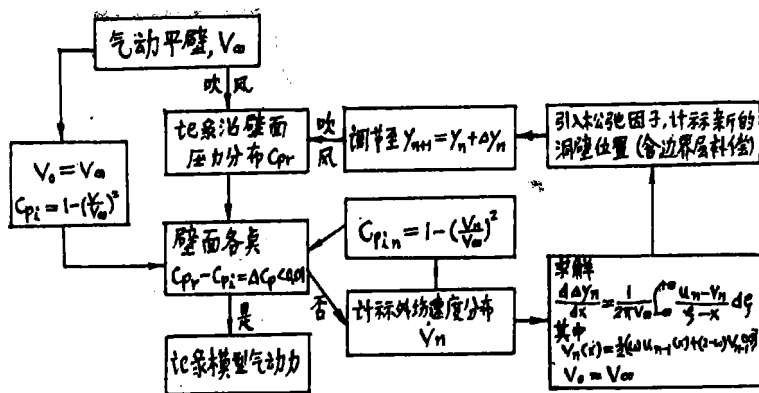


图5 二元柔壁自流线型风洞模型迭代试验运行程序框图

迭代前后的 ΔC_p 的算术平均值 $\overline{\Delta C_p}$ 的相对改变量为迭代超调 (或调节不足) 量 σ , 令 $\sigma_n = \overline{\Delta C_p}_n / (\overline{\Delta C_p}_n - \overline{\Delta C_p}_{n-1})$, 则下一次迭代试验应改变的松弛因子 ω_{n+1} 的值由下式决定:

$$\omega_{n+1} = (1 - k\sigma_n)\omega_n, \quad k \text{ 为待定系数, 经实验及分析定为 } 1$$

另外, 若上一次迭代后, 误差分布呈现为局部趋向收敛, 局部超调或调节过缓, 很不均匀的状态时, 可采用沿 x 方向量值变化的函数松弛因子来加速收敛, 此时图 5 中的求解公式可改为

$$V_\infty \frac{d\Delta y_n(x)}{dx} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\omega(\xi)[U_n(\xi) - V_n(\xi)]}{\xi - x} d\xi$$

其中

$$V_n(x) = \frac{1}{2} \{ \omega(x)U_{n-1}(x) + [2 - \omega(x)]V_{n-1}(x) \}, \quad V_0(x) = U_0$$

以上两方法均经试验验证表明确可加速收敛。

Ⅶ. 跨声速通气壁分格驻室孔壁及用轴向管在控制面测量法向速度分量的探索

设计了一副组合式分格驻室孔壁, 组件分 50, 100, 150mm 三种长度, 模型区采用小长度组件, 在均匀抽气下试验了轴向管在控制面测量法向速度分量的能力。初步表明试验段流场性能指标合格, 在装置三元模型引起扰动后, 轴向管有所反应, 但轴向管本身系统误差与模型引起的扰动分量属同一数量级, 尚需进一步探索改进。

Ⅷ. 目前的三元研究计划及对未来15年的建议

现正在准备计算三元柔壁试验段的设计参数, 计划明年完成设计投入加工, 后年完成风洞改装, 争取于1990年前初步得到三元自适应壁风洞研究成果, 为我国2000年气动力规划中建设自适应壁生产性风洞提供应用前景论证。希望能在国家重点气动力联合攻关项目中的壁洞干扰研究课题内在90年代中与支架干扰 (含磁悬浮天平技术) 和高雷诺数气动力试验设备 (含低温风洞, 路德维希管风洞等) 共同列为国家级气动力试验研究设备任务, 尽快达到先进国家水平。

Ⅸ. 结 束 语

此工作是由西北工业大学自修正风洞课题组全体同志共同努力完成的, 并得到林同骥研究员、戴昌晖教授、凌云沛教授、罗时钧教授、钱福星研究员及中国科学院力学研究所的同行们的支持与鼓励, 谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 Tuttle M. H. and Plentovich E. B., NASA TM 84526 (1982) : 33pp
- 2 NASA TM 87639 (Should be published in the near future)
- 3 Lewis M. C., NASA CR 3919 (1985) : 54pp
- 4 Goodyer M. J. and Wolf S. W. D., *AIAA J.*, 20, 2 (1982) : 227—234
- 5 —, DFVLR IB 222-84 A37, Paper No. 1 (1984) : 5pp
- 6 Ganzer U., ICAS 84-2.1.1 (1984) : 52—65
- 7 Wedemeyer E., Von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series 1985-06 (1985) : 37pp
- 8 贺家驹, 三元自修正风洞设计研究, 西北工业大学科技资料 (1985) : 17页
- 9 —, 国际航空, 1 (总263期) (1985) : 16—19
- 10 何心源, 同上, 9 (总247期) (1983) : 17—19
- 11 左培初, 自修正风洞分析论证, 西北工业大学科技资料 (1983) : 28页
- 12 贺家驹, 气动力学杂志, 3 (1984) : 49—55
- 13 左培初, 低速二元柔壁自修正风洞的数值模拟, 西北工业大学科技资料 (1985) : 9页
- 14 贺家驹, 左培初, 李华星, 航空学报, 7, 3 (1986) (即将出版)
- 15 He Jiaju and Zuo Peichu, The research of 2-D flexible wall self-streamlining wind tunnel (To 3ACFM) (1986) : 4pp
- 16 李华星, 加快自修正风洞实验迭代过程收敛速度的方法研究, 西北工业大学科技资料 (1985) : 19页
- 17 Erickson J. C. and Homicz C. F., AIAA 81-0160 (1981) : 15pp
- 18 Lo C. F. and Kraft E. M., *AIAA J.*, 16, 1 (1978) : 67—72
- 19 Sears W. R., *ZAMP*, 28, 6 (1977) : 915—927
- 20 Bernstein S. and Joppa R. G., NASA CR 2654 (1976) : 58pp

EXPERIMENTAL RESEARCH ON ADAPTIVE WALL WIND TUNNEL AT NPU

He Jia-ju

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract At present, the advanced technical countries all make efforts on adaptive wall (or self-correcting) wind tunnel which may eliminate wind tunnel wall interference and therefore, is considered as the direction of wind tunnel technology in the future. A research group has been formed in Northwestern Polytechnical University (NPU) and has embarked on study and foremost first in China. The paper reports simply on the research works in the last four years, which include summarization of the research advance in the world, analysis and demonstration of the principle, design and build of the experimental facility, numerical simulating computation, the methods of accelerating convergence of iteration and the results of preliminary test. In the end, the plan of the next five years is described and a suggestion is presented on adaptive wall wind tunnel research and construction in the future fifteen years in China.

Keywords *adaptive wall wind tunnel, wall interference of wind tunnel, iterative testing*

矩形截面直管中的振荡流动

林同骥 浦 群

(中国科学院力学研究所)

提要 通过解析求解 Navier-Stokes 方程, 本文给出了矩形截面直管中的层流振荡流动解。该解适用于不同的截面高宽比 γ 和不同的振荡流动雷诺数 λ^2 。对典的 γ 和型 λ , 给出了振荡流动速度的振幅比和相位差的等值线分布以及振荡流速随时间的变化。可以看出流动的速度分布如何从低频高粘性类型向高频低粘性的边界层流型逐渐变化; 也可以看出管道边壁和两壁相交的角部对振荡流动的影响。这是一般边界层理论没能给出的。当振荡频率 ω 为零时, 本文结果简化为通过矩形截面定常管道流动的 Stokes 解。

关键词 振荡流; 矩形管道流; 粘性流体流动

I. 引言

U 型水槽是一种产生简谐振荡流动的基本设备, 已被应用于海洋工程研究^[1,4]。为便于进行边界层实验以及流动显示, U 型水槽试验段截面通常采用矩形, 为此提出矩形截面振荡管流研究, 探讨不同截面高宽比、不同振荡频率以及不同流体粘性时振荡管流的侧壁及角流效应等问题。这些问题本身也是非定常内流研究中感兴趣的一些基本问题。尽管矩形截面定常管流问题早已解决^[8] (Stokes 1843), 圆管振荡流动也有了相当进展^[5,6,9,1,3], 但矩形截面振荡管流的研究相对很少^[2]。本文试图通过精确求解矩形截面振荡管流下的 N-S 方程对上面提到的一些问题进行研究。

II. 基本方程和解

考虑由活塞简谐周期运动引起的矩形截面直管中不可压缩粘性流体的运动。选取直角坐标系 (x, y, z) , 令 z 轴与直管中心轴线重合, x 轴和 y 轴分别与管道侧壁和上下壁面垂直。设管的长、宽、高分别为 $2l$, $2a$ 和 $2b$ 。令 p, ρ 和 ν 分别表示流体的压力、密度和运动粘性系数, t 和 ω 分别为时间和振荡频率, k 为参考加速度。为讨论方便, 引进下列无量纲量和参考速度 w_0 和 w_c :

$$\left. \begin{aligned} \xi = x/a, \quad \eta = y/a, \quad \gamma = b/a, \quad \tau = \omega t, \quad \lambda = a(\omega/\nu)^{1/2} \\ \sigma_n = (\pi/2)(n-1), \quad \delta_n = \sigma_n + i\lambda^2, \quad w_0 = k/\omega, \quad w_c = \lambda^2 w_0 = a^2 k/\nu \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

考虑 $l \gg a$ 和 b 的情况并忽略彻体力, 则沿管轴 z 方向的流速 w 和压力梯度 $\partial p/\partial z$ 均将与 z 无关并将有简谐变化形式, 即可令