

中国力学学会 第二届全国流体力学学术会议 论文集

《第二届全国流体力学学术会议论文集》编辑委员会编辑

科学出版社

1983

中国力学学会
第二届全国流体力学学术会议
论文集

《第二届全国流体力学学术会议论文集》编辑委员会编辑

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年7月第一版 开本:787×1092 1/16

1983年7月第一次印刷 印张:21 3/4

印数:0001—3,810 字数:496,000

统一书号:13031·2167

本社书号:2970·13—2

定价:3.35元

出版说明

为了更广泛地交流科研经验并作为我国力学学科发展的记录，现将第二届全国流体力学学术会议¹⁾上宣读与交流过的论文择优选编出版。

本选集分为两部分。第一部分搜集全文论文 50 篇。第二部分为论文摘要，其中一些已经或将要在全国性学术刊物上发表。大会报告未收入本集。

在出版之前，全文论文又进行过复审。绝大多数作者作了改写和补充。在此谨向大力支持本选集出版的作者、审稿者和科学出版社表示衷心的感谢。

参加论文编选工作的有周光炯、孙天凤、卞荫贵、许协庆、吴承康、曾庆存、郭尚平、陈钟祥、徐复、严子纲、浦群等同志。

《第二届全国流体力学学术会议论文集》编辑委员会 启

一九八〇年二月

1) 第一届全国流体力学学术会议于 1963 年 10 月在上海召开，原称全国第一次流体力学学术讨论会。——编者

前 言

第二届全国流体力学学术会议于一九七九年十一月九日至十六日在江苏省无锡市召开。这是自一九六三年十月第一届全国流体力学学术会议以来,我国流体力学工作者的又一次盛会。这次会议的目的是检阅十六年来,特别是粉碎“四人帮”以来,我国在流体力学科研方面所取得的成绩,交流这方面的学术观点和经验,讨论今后的工作方向和重点,加强各方面的协作,使我国的流体力学事业得到进一步的发展。出席这次会议的代表共218人。在会上宣读和交流的流体力学学术论文共216篇。会议分为大会报告,分组交流和专题讨论三种方式进行。

大会报告系对各分支领域或重大专题的国内外研究现状、发展趋势和主要研究课题进行综合评述,其中包括我国科学工作者的科研成果。这对流体力学各分支学科之间的互相渗透与交流、促进流体力学各个新兴方向的发展具有很重要的意义。周培源教授在大会上作了“均匀各向同性涡旋结构的统计理论”的报告。代表们还听了中国力学代表团访美情况的汇报。其他大会报告共十一篇,它们的题目和作者是:

一、泥沙运动力学的发展与前瞻	钱 宁
二、边界层研究现状	卞荫贵
三、湍流研究近半世纪的一些发展	蔡树棠等
四、水动力学若干问题研究近况	程贯一
五、非线性水波理论发展现状	孙明光
六、无粘跨声速流场分析	林同骥
七、风沙运动实验研究综述报告	凌裕泉
八、大气动力学中的一些问题	曾庆存
九、渗流力学研究现状和展望	郭尚平
十、化工中的若干流体力学问题	陈甘棠
十一、非牛顿流体力学问题	陈文芳

分组交流系对各分支领域或重大专题内的研究成果进行细致地交流和深入地讨论。会议共分七个分组。它们是:

- 一、空气动力组
- 二、水动力组
- 三、湍流与边界层组
- 四、宇宙气体与磁流体组
- 五、地球流体组
- 六、渗流组
- 七、多相、非牛顿流体与物理-化学流体组。

专题讨论系对流体力学科研中的共同性问题进行交流和讨论。会议分为计算与实验流体两专题组进行。

会议期间代表们还对全国力学发展规划、加强流体力学基础与薄弱分支领域的研究、提高科研质量、培养流体力学专业人才、加速流体力学实验室的建设与现代化、加强学术交流与协作等方面的问题进行了认真而热烈地讨论,并提出了许多积极的建议。

总的说来,这是一次成功的会议。与第一届全国流体力学会议相比,不仅参加会议的代表和论文的数量有了成倍的增长,论文质量有了大幅度提高,而且在一些流体力学的新兴分支领域中也取得了初步成果,有的甚至已具有我国自己的特点。但在基础实验研究与解决重大生产实际问题方面仍然相当薄弱,需要大力加强和迅速发展,以便为祖国的四个现代化建设做出更大的贡献。

中国力学学会流体力学专业委员会

一九八〇年二月

目 录

第一部分 (全文)

非定常超音速侧滑机翼的气动力系数及动导数的数值计算	张国富	1
高超音速平板前缘干扰数值解	付德薰	7
非定常差分方法中边界计算的多重特征格式	侯天相、周荣春、孟德俊	13
扰流片气动力计算方法	张有余	16
气动激光器列阵喷管设计	邬传保、俞 刚	23
在大气边界层气流中双曲线型冷却塔风压分布的实验研究		27
.....	北京大学力学系建筑空气动力学组	27
在高超音速时突起物干扰紊流分离流实验研究	高瑞峰	34
超音速风洞自由飞模型测俯仰阻尼导数的实验研究	许可法、罗 军、何龙德	40
25—37 毫米口径的二级轻气炮的设计与调试		47
.....	力学研究所十一室二组 (魏叔如执笔)	47
超声波多管压力计	刘可器、钮珍南等	55
轴对称头体空化起始试验	潘森森、杨占明、徐伯垠	58
迴转体零攻角超空泡绕流	吴品奇、孙伯起	63
空泡聚合自模解的微扰	范中波、徐华生	67
温差出流的局部掺混	陈惠泉、陈燕茹	73
渠道二层温差异重流的数值解	章本照	79
流体有限元的伽辽金法解坝面流场	翁情达、郑邦民	83
有螺旋槽球形轴承特性的有限元分析	傅瑞峰、苏铭德	88
挤压咀出口部分流动的数值计算	刘学宗、淮立琴	96
对于 Von Neumann 人为粘性新形式的讨论	陈大年	99
不可压缩位势流动中的有限元法	沈钧涛	102
平面平行层流稳定性问题的若干问题	周 恒、李 骧	107
均匀各向同性湍流涡旋结构的统计理论的一级近似数值解	魏中磊、李文绚	113
超音速湍流分离与局部融化烧蚀的理论和实验研究	谢象春	121
球锥体粘性激波层方程数值解	卞荫贵、呼和敖德、胡振华、沈大才、邬惠欣	127
湍流中散射粒子的跟随性	舒 玮	135
二元圆柱尾迹内湍流微结构的测量	魏中磊、钮珍南	141
小雷诺数下网格湍流前期衰变的微结构测量	魏中磊、钮珍南	149
聚合物降阻理论和试验研究	王锡良、夏长生	153
关于星系激波的分析解	胡文瑞	159
相对论流体力学中的几个问题	是长春	165
直管道磁流体力学流动的一致有效渐近解	陈允明	173

面积激波的稳定性	徐 复、马云丽	177
电磁激波管中激波的稳定作用	徐 复	184
电流分布对破裂不稳定性影响	马腾才	187
关于沿岸上升流的惯性模式	贾 复	193
不定常剪切流绕二维山的流动及对排放烟云轨迹影响的实验研究		
.....	任阵海、姜振远、彭贤安、叶文虎、丁润田、庞冠军、温玉璞	199
爬线形成的二维非线性过程	李麦村	204
并列系统二相渗流的近似计算方法	刘慈群、郑启心、马金良	213
油田注水开发过程中剩余油分布计算方法研究	孙长明、李保树	220
厚油层内油水运动规律研究	沈平平、胡芝云、林长生	226
裂缝油藏中水锥的数值模拟	李光和	232
渗流冲刷的概率分析	曹敦履、付礼英	237
论气泡、液滴和固体球在充满粘性流体的圆管中的运动	陈景尧	239
幂指数律非牛顿流体在直圆管中层流运动的稳定性	卓克聪	248
方型管道中聚合物减阻的充分发展的湍流速度分布	中国科学院力学研究所流体组	254
PW-30 稀溶液的管内减阻研究	赵学端、钟声玉、沈承龙、徐桂中等	258
悬沙理论中长期有争论的三个问题	蔡树棠	262
从紊流脉动相似性结构推论悬浮泥沙的垂线分布	朱鹏程	268
同位素 ^{137m} 铯示踪沙沉速测定法及泥沙颗粒在浑水中沉速特性的研究		
.....	李锡祺、樊新顺	274
单面辐射受热条件下亚临界压力蒸发管内膜态沸腾的研究		
.....	徐仁德(执笔)、钱进芳、张尧林、朱才广	278

第二部分 (摘 要)

绕飞机的定常跨音速势流的有限差分计算	罗时钧、郑郁文、钱 鸿、王蝶茜	282
任意非正交曲线网格中粘性可压缩流动的方程和数值分析	蒋锦良	282
圆柱间 Couette 流动的直接统计模拟	沈 青、赵国英	283
某些类型的可压缩气体的方程的准确解	袁镒吾	283
旋成体在高超音速小扰动理论下的解析解	靳式根	283
绕经钝体身部的高超音速流动	吴江航	284
辐射非平衡流研究及对气流激光的应用	高 智	285
消除火箭发动机不对称流动引起的推力偏心的一种近似方法	詹德来	285
压缩机排气管内脉动气流的计算	何卓烈、魏能姣、金忠正	286
激波管风洞的高反射压力运行	李清泉等	286
平面叶栅气动设计的最优化理论(一)、(二)	刘高联	287
圆柱形突起诱导的激波湍流边界层干扰区传热实验研究	俞鸿儒、李仲发等	287
有序熔楔和转捩	林同骥、陈仲英、王汝湧、浦 群、周正瑾、阎明山	288
旋动射流的流场特性和应用问题探讨	康振黄	288
射流附壁点距离和张角的关系	林同骥、浦 群	288

冲击波绕二维山体的数值计算·····	陈志林、李文绚、张永良	289
管内层流瞬态分析·····	王秀清	289
一端有容器的粘性流体管道流动的压力传播问题·····	程梯吾	289
溃坝水力学·····	谢任之	290
洪水演进的数学模型方法·····	谢任之	291
连通管内理想液柱振动微分方程两种推导的比较·····	刘先志	291
关于连通管内理想液体非线性振动的奇异点·····	刘先志	291
动力渠道中涌波的实验研究·····	谢佩珍、陈水倬	292
用双函数列逼近单连通区的保角变换和它在船型近似表示中的应用·····	陈启强、郭啸文	292
深潜回转体伴流分数的近似计算与尺度影响·····	岑长裔	293
波型分析的试验研究·····	都绍裘、吴鉴明、马良荣、许晋寿、葛纬桢、张家骥、王振云	293
波浪中船舶横向运动计算程序·····	于家鹏、魏本章、华善生、达荣庭	294
水中平板的水弹性振动·····	孙明光	294
平底矩形明槽中完整水跃的长度·····	张长高	295
库式消能工的水力学·····	李忠义	295
用有限单元法计算过溢流坝水流·····	刘曼聆、丁道扬	296
用有限单元法计算溢流坝坝头急变边界压力·····	丁道扬、刘曼聆	296
计算有自由水面水力学问题的有限单元法·····	许协庆	297
毕文管流量测量装置试验研究·····	刘培根	297
振弦式测压计的原理与应用·····	孙厚钧、张祖闻、全清刚	298
突泄坝址过程线简化分析·····	林秉南、龚振运、王连祥	298
水电站水锤计算研究·····	肖天铎	299
有螺旋槽球形轴承特性的小扰动分析·····	苏铭德、傅瑞峰	299
明渠沿程变质量非恒定流水动力学模型及其数值解·····	黄宽渊、吕明华	300
湍流运动论中的 Hilbert-Enskog-Chapman 展开 (I)·····	陈天权	300
均匀各向异性湍流后期衰变的涡性结构 (I)——单一涡旋结构·····	蔡树棠、麻柏坤	301
均匀各向异性湍流后期衰变的涡性结构 (II)——涡旋涡球混合结构与 J. C. Bennet 和 S. Corrsin 实验·····	蔡树棠、麻柏坤	301
涡量脉动相似结构和圆形涡旋流速分布·····	蔡树棠、麻柏坤	302
关于非均匀湍流中的耗散和耗散率方程·····	叶敬棠	302
湍流射流自模性的应用·····	姜正行	302
平板湍流边界层中的速度分布和能量方程·····	许维德	303
回转体湍流边界层和粘性阻力计算·····	沈泓萃、许鸿生	304
猝发与湍流边界层速度分布·····	俎铁林	304
剪切湍流猝发现象的理论模型的探讨·····	杨西霓	304
高焓流中的层流边界层分析·····	陆志云	305
热平板层流减阻·····	何友声、陈月林	305
用激光多普勒流速计测量圆管湍流及流量·····	舒 玮、王仕康	306

环形通道中旋流对内壁边界层发展的影响实验·····	张保栋	306
湍流数值计算的最近发展·····	晏名文	307
简化 Navier-Stokes 方程组及其数学性质·····	王汝权、刘学宗、焦履琼、高 智	307
星系螺旋结构三维密度波的流体动力学理论·····	徐建军	308
盘状星系的三维基态·····	徐建军	308
星际气体激波与恒星线性密度波的总合自洽解·····	唐泽眉	309
湍动对流与变星脉动稳定性·····	熊大闰	309
关于一种积分变换·····	陈振诚	310
星系的棒旋结构·····	陈振诚、翁士达、许 霖	311
河外射电双源中相对论流体激波的计算分析·····	孔祥言、徐燕候、钟钊新	312
磁场中高超音速气流绕对称钝头体的流动·····	吴望一	312
小扰动在电流体中的传播 (II)——双流理论·····	陈玉璞	313
大洋风生-热盐环流模型·····	冯士筭	313
三维海流的精确解——有限元方法·····	袁耀初、何魁荣	314
大气边界层中湍流扩散的理论探讨·····	叶文虎、卢崇飞、张霭琛	315
含变涡动系数的超浅海风暴潮模型·····	冯士筭、施 平	316
非均匀基流上扰动的演变·····	曾庆存、卢佩生	317
大气中的对流活动·····	周晓平、张可苏	317
不规则 Stokes 波·····	袁业立	318
黄海冷水团环流 (I) 中心部分的温度结构及环流特征·····	袁业立	319
旋转正压大气中的椭圆余弦 (Cnoidal) 波·····	巢纪平、黄瑞新	320
发展方程差分格式的构造和应用·····	季仲贞、曾庆存	320
双重孔隙介质中二相驱替理论·····	陈钟祥、刘慈群	321
非均质亲油砂岩油层层内油水运动规律的数值模拟研究·····	韩大匡、桓冠仁、谢兴礼	321
孔隙地层水平裂缝系统的弹性渗流问题·····	郭尚平	322
三重介质中的渗流问题·····	刘慈群	323
注水过程中裂缝影响的数值模拟方法·····	马志远、田书芬	323
双重孔隙岩层底水驱油运动的相似律·····	杜 珣	324
伽玛分布及其应用·····	黄延章	324
群井自三层结构含水层取水(水源地成圆形和长方形布置)时地下水非稳定流的计算 ·····	张蔚榛	325
单相均质液体低速渗流机理及流动规律·····	阎庆来	325
关于油水两相分散系统的渗流·····	阎庆来	326
中性润湿性地层中油水运动特点·····	阎庆来、何秋轩、王文悌	327
等梯度生理流动分析·····	朱月锐、江可宗	327
直毛细管中有限液柱的粘性小雷诺数流动·····	吴望一、钱民全、温功碧	328
非牛顿体高含沙水流治理黄河的理论基础·····	方宗岱	328
挟带悬移质紊流结构的探讨·····	朱鹏程	329
大雷诺数平稳湍流对其中悬浮颗粒的带动程度判据·····	李荫亭、关德相	329

非均匀固体颗粒两相流的阻力计算公式·····	周士昌	330
水平管道两相流的相似问题·····	周士昌	330
风沙运动的动态摄影实验 ·····	凌裕泉、吴 正	331
沙粒运动及其数理简析·····	刘贤万	332
感光材料涂液薄膜沿斜面流动的稳定性·····	王振东	332
固体发动机两相流动计算问题的讨论·····	罗俊扬	333
盐湖晶间卤水中自然转化效应的均衡计算·····	许广森	334
鳍片内螺纹蒸发管传热特性的研究·····	徐仁德等	334
关于流体动力学试验中流量测量精度的问题·····	赵学端	335

第 一 部 分

非定常超音速侧滑机翼的气动力系数及 动导数的数值计算

张 国 富

(南京航空学院)

主要符号表

v	无穷远来流速度	角线长, 即特征线坐标中菱形网格边长
M	无穷远流马赫数	
B	$= \sqrt{M^2 - 1}$	C_p 压强系数
c	机翼顺来流方向最大长度, 图 1	$P = \frac{\pi}{4} BC_p \cdot e^{-i\nu_0 t}$
b	机翼垂直来流方向的半展长, 图 1	$m_x = \frac{M_x}{qSL}$
S	机翼面积	$m_y = \frac{M_y}{qSL}$
A	$= \frac{4b^2}{S}$	$m_{x'} = \frac{M_{x'}}{qSL}$
ν_0	谐和振动角频率(角速度)	$m_{y'} = \frac{M_{y'}}{qSb_{x_0}}$
L	机翼展长	λ, μ 特征线坐标, 图 1
b_{x_0}	机翼平均气动弦长	$\bar{\lambda}, \bar{\mu}$ 无因次特征线坐标(整数), $\frac{\lambda}{d} + 1$, $\frac{\mu}{d} + 1$, 图 1
x_1, y_1, z_1	卡氏坐标	右上角标: j 沉浮谐振 F 绕 y' 轴俯仰谐振 g 绕 x' 轴滚转谐振
x, y, z	无因次卡氏坐标, 分别等于 $\frac{x_1}{c}, \frac{y_1}{b}, \frac{z_1}{b}$	
$\omega_{x'}$	$= \frac{\nu_0 L}{2\nu}$, 绕机翼 x' 轴折算频率, 图 2	
$\omega_{y'}$	$= \frac{\nu_0 b_{x_0}}{2\nu}$, 绕机翼 y' 轴折算频率, 图 2	
d	$= \frac{2Bb}{n-1}$, 菱形网格顺来流方向对	

一、侧滑机翼的特征线网格法

图 1 所示为一具有侧滑角的机翼, 用矩形 $ABCD$ 将此机翼围住, $AD(BC)$ 边平行于来流方向, 设将 AB 边划分成 $2n-2$ 等分, n 取奇数, 共有 $2n-1$ 个截面. 在矩形 $ABCD$ 外接特征线菱形 $IGHK$, 作特征线网, 让每根特征线通过 AB 边上号码为奇数的截面, 为了使 $AD(BC)$ 边包含整数个菱形网格, 取

$$N_c = E\left(\frac{c}{d}\right) + 1 \quad (1)$$

符号 E 表示算法语言中所用的整除.

设机翼作如下形式的谐振运动

$$z = \frac{c}{b} h(x, y) e^{i\nu_0 t} \quad (2)$$

设基本运动振型

$$h^{(r,s)} = x^{r-1} y^{s-1} \quad (3)$$

力振型

$$g^{(r',s')} = x^{r'-1} y^{s'-1} \quad (4)$$

广义力定义

$$Q^{(r,s)(r',s')} = \frac{2}{\Delta S} \iint_S C_p \cdot e^{-i\nu_0 t} \cdot g^{(r',s')} dx_1 dy_1 \quad (5)$$

上式沿翼面积分可化为求矩形 $ABCD$ 内所有网格上载荷的有限和,文献[1]用分布非定常超音速点源的特征线网格法给出广义力的数值计算公式

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \text{Re}(Q^{(r,s)(r',s')}) \\ \text{Im}(Q^{(r,s)(r',s')}) \end{pmatrix} \\ &= \frac{4}{\pi} \frac{1}{(n-1)^2} \sum_{l=2}^{L_1} \sum_{m=m_F}^{m_{\perp}} g_{l,m}^{(r',s')} \\ & \cdot \begin{pmatrix} \text{Re}(P_{l,m}) \\ \text{Im}(P_{l,m}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

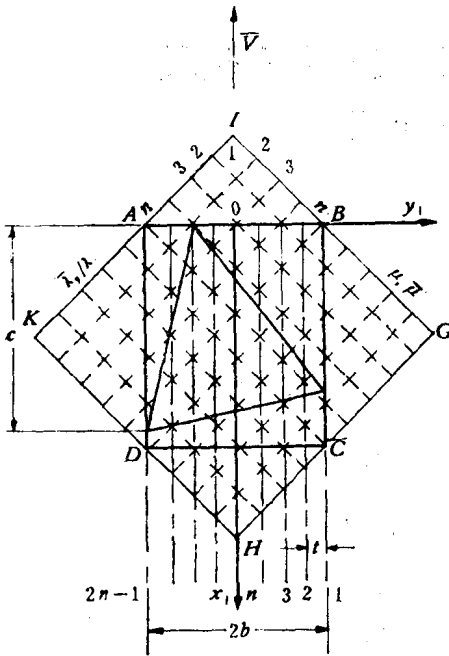


图 1

二、非定常侧滑机翼的振型,气动力系数及动导数计算

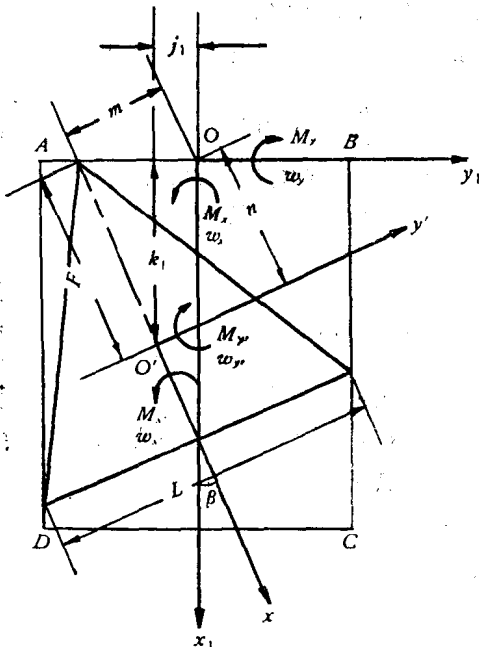


图 2

图 2 所示为一具有正侧滑角 β 的机翼,用矩形 $ABCD$ 将其围住,取 AB 中点 O 为坐标 $x_1 y_1 z_1$ 的原点, ox_1 轴与来流方向一致,再取机翼纵轴为 x' 轴,距顶点 F (在顶点以后为正,以前为负)为原点 O' ,作 $O'y'$, $O'z'$ 轴。

我们先算出作用在机翼上的升力 F_z 以及对 oy_1 和 ox_1 轴的力矩 M_y 和 M_x ,然后再算出对 $O'y'$ 和 $O'x'$ 轴的力矩, $M_{y'}$ 和 $M_{x'}$ 。

由式(4)(5)可以看出,在计算升力系数时 $r' = s' = 1$; 计算对 oy_1 轴力矩系数 $r' = 2, s' = 1$; 计算对 ox_1 轴力矩系数 $r' = 1, s' = 2$ 。

2.1 沉浮谐振

机翼作沉浮谐振时,运动振型 $h^i = 1$,对应的 $r = s = 1$ 。可求出以下气动力系数

$$C_z^i = -\frac{2}{S} \iint_S C_p \cdot e^{-i\omega_0 t} \cdot dx_1 dy_1 = -\Lambda Q^{(1,1)(1,1)} \quad (7)$$

$$m_y^i = -\frac{2c}{SL} \iint_S C_p \cdot e^{-i\omega_0 t} \cdot x dx_1 dy_1 = \frac{-c}{L} \Lambda Q^{(1,1)(2,1)} \quad (8)$$

$$m_x^i = \frac{-2b}{SL} \iint_S C_p \cdot e^{-i\omega_0 t} \cdot y dx_1 dy_1 = \frac{-b}{L} \Lambda Q^{(1,1)(1,2)} \quad (9)$$

2.2 绕 $o'y'$ 轴俯仰谐振

设机翼绕 $o'y'$ 轴作如下形式的俯仰谐振

$$z' = x' e^{i\omega_0 t} \quad (10)$$

在 $x_1 y_1$ 坐标系中运动振型可用基本振型表示成

$$h^F = \frac{b}{c} \sin \beta h^{(1,2)} + \cos \beta h^{(2,1)} - \left(\frac{j_1}{c} \sin \beta + \frac{k_1}{c} \cos \beta \right) h^{(1,1)} \quad (11)$$

式中 j_1 和 k_1 为原点 o' 在 $x_1 y_1$ 坐标系中的位置。

可求得气动力系数:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Lambda} \begin{pmatrix} C_z^F \\ \frac{L}{c} m_y^F \\ \frac{L}{b} m_x^F \end{pmatrix} &= \frac{-b \sin \beta}{c} \begin{pmatrix} Q^{(1,2)(1,1)} \\ Q^{(1,2)(2,1)} \\ Q^{(1,2)(1,2)} \end{pmatrix} - \cos \beta \begin{pmatrix} Q^{(2,1)(1,1)} \\ Q^{(2,1)(2,1)} \\ Q^{(2,1)(1,2)} \end{pmatrix} \\ &+ \left(\frac{k_1}{c} \cos \beta + \frac{j_1}{c} \sin \beta \right) \begin{pmatrix} Q^{(1,1)(1,1)} \\ Q^{(1,1)(2,1)} \\ Q^{(1,1)(1,2)} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 绕 $o'x'$ 轴滚转谐振

设机翼绕 $o'x'$ 轴作如下形式的滚转谐振

$$z' = y' e^{i\omega_0 t} \quad (13)$$

在 $x_1 y_1$ 坐标系中运动振型可用基本振型表示成

$$h^g = \frac{b \cos \beta}{c} h^{(1,2)} - \sin \beta h^{(2,1)} + \left(\frac{k_1}{c} \sin \beta - \frac{j_1}{c} \cos \beta \right) h^{(1,1)} \quad (14)$$

可求得气动力系数

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Lambda} \begin{pmatrix} C_z^g \\ \frac{L}{c} m_y^g \\ \frac{L}{b} m_x^g \end{pmatrix} &= \frac{-b \cos \beta}{c} \begin{pmatrix} Q^{(1,2)(1,1)} \\ Q^{(1,2)(2,1)} \\ Q^{(1,2)(1,2)} \end{pmatrix} + \sin \beta \begin{pmatrix} Q^{(2,1)(1,1)} \\ Q^{(2,1)(2,1)} \\ Q^{(2,1)(1,2)} \end{pmatrix} \\ &- \left(\frac{k_1}{c} \sin \beta - \frac{j_1}{c} \cos \beta \right) \begin{pmatrix} Q^{(1,1)(1,1)} \\ Q^{(1,1)(2,1)} \\ Q^{(1,1)(1,2)} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

2.4 对 $o'x'$, $o'y'$ 轴的力矩系数

由以上求出的对 ox_1 和 oy_1 轴的力矩系数, 现在通过力矩转换关系(图 2)可求出对 $o'x'$ 和 $o'y'$ 轴的力矩系数, 并分解成实部和虚部

$$\begin{pmatrix} \text{Re}(m_{y'}^i) \\ \text{Im}(m_{y'}^i) \end{pmatrix} = \frac{L}{b_{y_1}} \left\{ \cos \beta \begin{pmatrix} \text{Re}(m_y^i) \\ \text{Im}(m_y^i) \end{pmatrix} + \sin \beta \begin{pmatrix} \text{Re}(m_x^i) \\ \text{Im}(m_x^i) \end{pmatrix} + \frac{n}{L} \begin{pmatrix} \text{Re}(C_z^i) \\ \text{Im}(C_z^i) \end{pmatrix} \right\} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} \text{Re}(m_{x'}^i) \\ \text{Im}(m_{x'}^i) \end{pmatrix} = \cos \beta \begin{pmatrix} \text{Re}(m_x^i) \\ \text{Im}(m_x^i) \end{pmatrix} - \sin \beta \begin{pmatrix} \text{Re}(m_y^i) \\ \text{Im}(m_y^i) \end{pmatrix} + \frac{m}{L} \begin{pmatrix} \text{Re}(C_z^i) \\ \text{Im}(C_z^i) \end{pmatrix} \quad (17)$$

以上二式中右上角标 i 分别取 j, F, g . 式中各力矩的正负号按图 2 所示. m 和 n 按坐标系 $o'x'y'$ 读取.

2.5 动导数(阻尼导数和交叉导数)计算

(1) 机翼绕 $o'y'$ 轴作等速俯仰旋转时, 运动型式可取为

$$z' = \text{Im}(x' e^{i\nu_0 t})_{t \rightarrow 0} \quad (18)$$

因此由式(16)(17)求得的 $\text{Im}(m_{y'}^F)$ 和 $\text{Im}(m_{x'}^F)$ 即为侧滑机翼作俯仰旋转时对 $o'y'$ 和 $o'x'$ 轴的力矩系数. 则俯仰旋转时的阻尼导数和交叉导数:

$$\frac{\partial m_{y'}}{\partial \omega_{y'}} = \frac{\partial [\text{Im}(m_{y'}^F)]}{\partial \omega_{y'}}; \quad (19)$$

$$\frac{\partial m_{x'}}{\partial \omega_{y'}} = \frac{\partial [\text{Im}(m_{x'}^F)]}{\partial \omega_{y'}} \quad (20)$$

(2) 机翼绕 $o'x'$ 轴作等速滚转时, 运动型式可取为

$$z' = \text{Im}(y' e^{i\nu_0 t})_{t \rightarrow 0} \quad (21)$$

因此由式(16)(17)求得的 $\text{Im}(m_{x'}^g)$ 和 $\text{Im}(m_{y'}^g)$ 即为侧滑机翼滚转时对 $o'x'$ 和 $o'y'$ 轴的力矩系数. 则滚转时的阻尼导数和交叉导数

$$\frac{\partial m_{x'}}{\partial \omega_{x'}} = \frac{\partial [\text{Im}(m_{x'}^g)]}{\partial \omega_{x'}} \quad (22)$$

$$\frac{\partial m_{y'}}{\partial \omega_{x'}} = \frac{\partial [\text{Im}(m_{y'}^g)]}{\partial \omega_{x'}} \quad (23)$$

式(19)(20)(22)(23)可用通常的数值微分法(例如三点数值微分)算出.

三、算 例

表 1 为侧滑角从 0° 到 6° 的三角翼作沉浮、俯仰、滚转谐振时的气动力系数及动导数的计算结果. 这里折算频率用

$$\omega_r = \frac{\nu_0 c}{2V} \quad (24)$$

表 1 展弦比等于 2 的三角翼, $M=2.5$, $\omega_r=1$, $F=\frac{2}{3}$ 根弦长

侧滑角	沉浮谐振			俯仰谐振			滚转谐振			
	C_z^I	m_y^I	m_x^I	C_z^E	m_y^E	m_x^E	C_z^R	m_y^R	m_x^R	
0°	-0.2908	0.0007	0	-1.4977	0.0263	0	0	0	-0.0102	实部
2°	-0.3077	-0.0038	0.0079	-1.5711	-0.0059	0.0001	0.0519	-0.0019	-0.0113	
4°	-0.2663	-0.0095	-0.0054	-1.5778	-0.0116	-0.0100	0.1007	-0.0024	-0.0091	
6°	-0.2536	0.0014	-0.0097	-1.5649	-0.0161	-0.0011	0.1536	-0.0025	-0.0076	

0°	-3.0174	0.0973	0	0.1565	-0.2501	0	0	0	-0.1181	虚部
2°	-3.2092	0.0415	0.0017	0.1168	-0.2837	-0.0015	-0.0050	0.0048	-0.1328	
4°	-3.2341	0.0251	-0.0299	0.0769	-0.2838	-0.0031	-0.0340	-0.0040	-0.1329	
6°	-3.2590	0.0252	-0.0170	0.0682	-0.2776	-0.0034	-0.0235	-0.0009	-0.1299	

	$\frac{\partial m_y'}{\partial \omega_{y'}}$	$\frac{\partial m_x'}{\partial \omega_{y'}}$	$\frac{\partial m_y'}{\partial \omega_{x'}}$	$\frac{\partial m_x'}{\partial \omega_{x'}}$
0°	-0.4033	0	0	-0.1097
2°	-0.4590	0.0044	0.0071	-0.1242
4°	-0.4554	-0.0172	0.0003	-0.1257
6°	-0.4394	-0.0266	0.0044	-0.1241

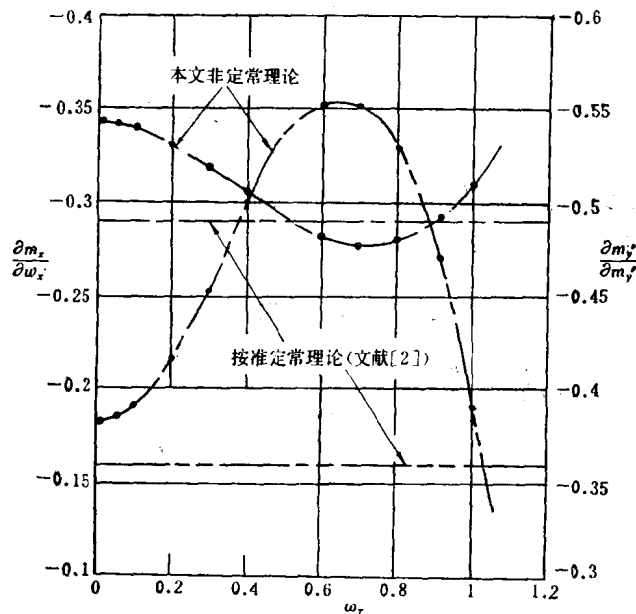


图 3

式中 c 取 $\beta = 0^\circ$ 时的值。

图 3 表示上述三角翼无侧滑时按本文方法和按准定常理论计算动导数结果的比较, 可以看出, 两种计算结果在本例计算范围内虽然在量级上相当, 但在精度上却显示出明显的偏差。重要的是按本文方法算出的动导数是折算频率有关, 而准定常理论却反映不

出这个特点。

文献[3]给出三角翼滚转阻尼导数在不同 BA (A 为展弦比) 时按准定常理论计算结果与实验结果比较(图 4), 比较指出在音速前缘 ($BA = 4$) 附近二者有较大偏差。图 4 同时附上本文计算曲线, 可以看出本文结果与实验结果符合得很好, 由于实验是将机翼装在旋成体上进行的, 故本文结果比实验结果稍上些是合理的。计算 M 数为 1.92, 折算频率与实验条件一致。

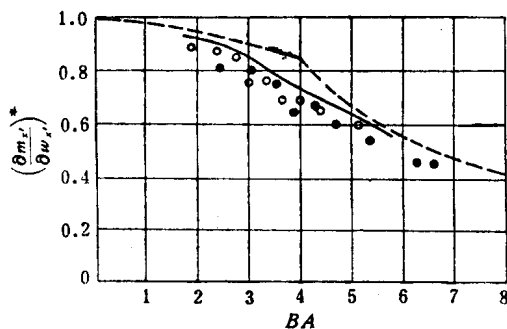


图 4

—— 本文方法
 --- 准定常理论
 实验 M
 1.62
 1.92

四、结 束 语

从上节的算例中可以看出按准定常理论计算动导数在精度上是比较粗糙的, 另外准定常理论只能计算一些无侧滑的平面形状简单的机翼, 因此本文提供的非定常数值解是有着较好的前景。作为本文方法基础的特征线网格法, 通常在翼面上可划分数千个网格, 这将使计算结果达到较高的精度, 本文作者在文献[4]中将特征线网格法推广到计算机翼升致阻力上, 通过阻力计算的考验证实了上述看法。

参 考 文 献

- [1] 空气动力学中的数值算法, 译文选(一), 十二、十三章, 第三机械工业部第六二八研究所, 1975.
- [2] 飞行器部件空气动力学, 上册, 北京科学教育编辑室, 1962.
- [3] Nielsen, J. N., Missile Aerodynamics, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC. 1960.
- [4] 张国富, 用网格法计算任意平面形状超、亚音速机翼阻力, 南京航空学院学报, 1 (1979).

高超音速平板前缘干扰数值解

付 德 薰

(北京空气动力研究所)

一、差分格式

为了简便起见,我们讨论以下简单模型方程,即 Burgers 方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - a \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.1)$$

其中, ν, a 为常数. 我们需要的是满足一定边界条件的方程 (1.1) 的定常解. 文献[5]中的差分格式对于方程 (1.1) 有以下形式:

$$u_m^{n+1} = u_m^n + \Delta t \left[\nu \frac{u_{m+1}^n - 2u_m^n + 2\beta(u_m^n - u_m^{n+1}) + u_{m-1}^{n+1}}{\Delta x^2} - a \frac{u_{m+1}^n - u_{m-1}^{n+1}}{2\Delta x} \right] \quad (1.2)$$

此差分方程以二阶精度逼近以下微分方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + K \left(a \frac{\partial u}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (1.3)$$

其中

$$K = \frac{1}{1 - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{\nu(1-2\beta)}{\Delta x} + \frac{a}{2} \right)} \quad (1.4)$$

可以看出式 (1.3) 的定常方程与式 (1.1) 的定常方程重合. 另外, 当 $K < 0$ 时, 问题的提法不适定. 故使能得到 t 相当大时的定常渐近解的必要条件是 $K > 0$, 即

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{\nu(1-2\beta)}{\Delta x} + \frac{a}{2} \right) \leq 1 \quad (1.5)$$

下面我们来讨论稳定条件. 在 $K > 0$ 的条件下, 当 $a > 0$ 时, 则 $Ka > 0$, 在此条件下从稳定性分析可知, 差分方程 (1.2) 的影响域总是包含微分方程 (1.3) 的影响域. 也就是说, 当 $a > 0$ 时, 差分格式 (1.2) 在 $K > 0$ 的条件下总是稳定的. 当 $a < 0$ 时, 则 $-aK > 0$, 为了使差分方程 (1.2) 的影响域包含微分方程的影响域 (见插图 1), 则要求

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{-aK} \quad \text{即} \quad \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\frac{\nu(1-2\beta)}{\Delta x} - \frac{a}{2} \right] \leq 1 \quad (1.6)$$

综合 (1.5) 和 (1.6) 式, 得差分方程 (1.3) 的稳定条件:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\frac{\nu(1-2\beta)}{\Delta x} + \frac{|a|}{2} \right] \leq 1 \quad (1.7)$$

当 $\beta = \frac{1}{2}$ 时, 以上稳定条件可写为