

气体物理研究论文集

庆贺崔尔杰院士七十华诞

李 锋 主编



航天空气动力技术研究院

· 北 京 ·

气体物理研究论文集

庆贺崔尔杰院士七十华诞

李 锋 主编

航天空气动力技术研究院

• 北 京 •

译 者 的 话

近年来,断裂力学的发展极为迅速。它在安全设计、合理选材、改进工艺等方面的应用,与日俱增,受到有关部门普遍重视。

我们为了开展这方面的学习研究工作,遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导,特将应变分析杂志上刊登的《断裂力学导论》(*Journal of Strain Analysis*, 1975, vol 10, No 4)的专辑论文11篇全部译出,以供有关同志参考。

本专辑所收各篇论文,对应力强度因子法、金属断裂韧性、屈服断裂力学、疲劳裂纹扩展以及裂纹增长的环境效应等问题,作了系统地阐述(所引用的文献资料有361篇)。

本译文集曾得到院科研处、情报室的领导同志的鼓励与支持,杨若华、钟嫦娥、林拜松、李桔南、陈志军等同志多方协助,使它能够顺利地和读者们见面,对此,我们深表谢意。

由于我们水平有限,加之时间仓促,译文中难免有误和欠妥之处,恳请读者批评指正。

译 者 1978年1月

于中南矿冶学院断裂力学资料组

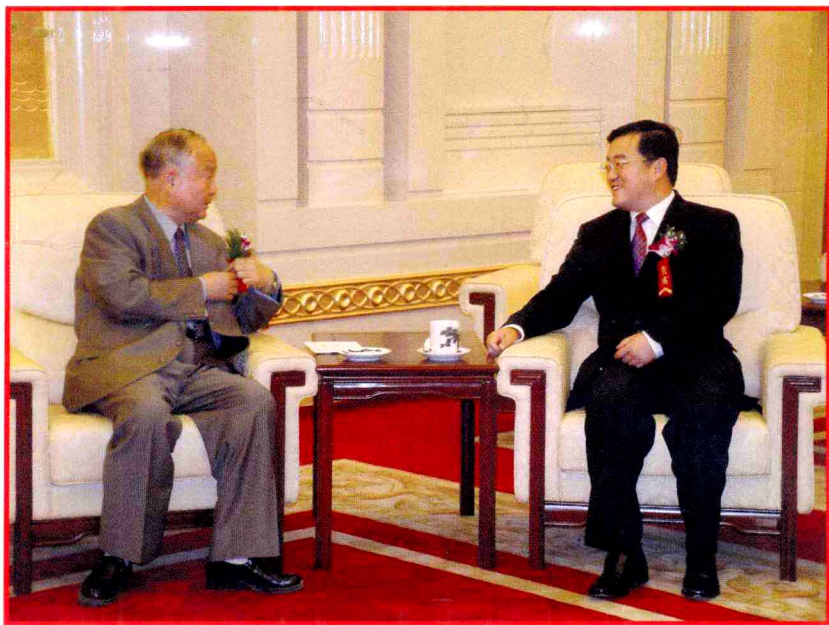
内 容

通用符号

1. 前 言
2. 断裂中采用能量平衡法的开端
3. 断裂中应力强度因子法的开端
4. 金属的断裂韧性
5. 屈服断裂力学
6. 应力强度因子的估算
7. 断裂韧性测试的实验方法
8. 断裂力学在结构钢脆断中的应用
9. 疲劳裂纹增长试验数据的分析和应用
10. 裂纹扩展中介质的作用
11. 断裂力学：目的和方法总结



崔尔杰院士



崔尔杰院士与中国航天科技集团公司张庆伟总经理在一起



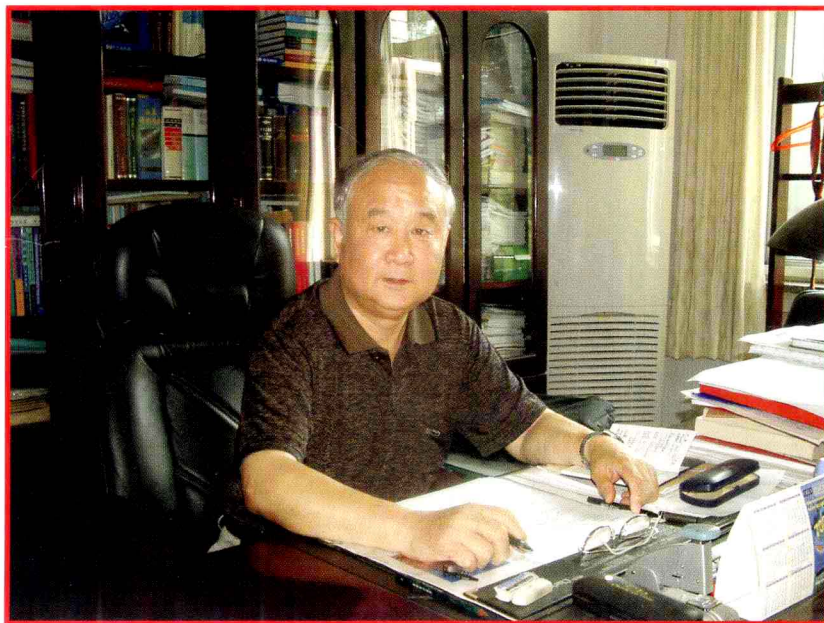
崔尔杰院士在基金评审会上发言



崔尔杰院士与中国科学院院士们



崔尔杰院士与他的学生刘子强博士和熊红亮博士



霍尔杰院士在办公室



霍尔杰院士在太湖

《气体物理研究论文集》

编辑委员会

主 编 李 锋

编 委	俞鸿儒	童秉刚	邓学莹	傅德薰	朱自强
	毛国良	李廷林	马汉东	沈 清	纪楚群
	马延文	高 智	姜宗林	王发民	何国威
	马晖扬	罗纪生	符 松	吴子牛	何 枫
	陆夕云	叶友达	袁湘江	黎作武	王晋军
	高正红	叶正寅	袁 礼	林建忠	任玉新
	黄育群	周伟江	程军波	贺小艳	王 强

责任编辑 江 娟

序

气体是自然界中物质存在及转变的主要形式之一。气体物理研究所揭示的是气体运动、演化及影响的科学规律。就实际应用而言，社会经济建设和国防工业发展的许多领域均涉及从低速到高速流动各种各样的复杂气体物理现象及问题。长期以来，为了推动我国气体物理理论与应用研究的不断进步，几代科学家付出了辛勤的努力，展现了卓越的智慧，享誉国内外的气体动力学家、中国科学院院士崔尔杰先生便是这样一位突出代表。

崔院士是航空气动力技术研究院高级顾问。他善于将基础理论与实际应用紧密而有机地结合在一起，所取得的科学成就包括多个方面。他在我国率先开展了飞行器非定常气动力问题的系统研究，提出了利用非定常激励进行流动分离及旋涡的主动控制获得高升力的方法，并在理论上揭示了其内在机制。他针对航天飞行器的流固耦合问题，建立了计及控制系统与气体动力干扰的气动弹性分析新方法并成功地用于有翼飞行器的设计，发展了涡致振动的非线性振子模型，探索了抑制涡致振动的多种途径。他开拓了国内的风工程和工业空气动力学应用研究，在结构风致振动、风力机气动弹性等问题上取得了创造性成果，还在体育流体力学领域发挥了推动作用。他主持了多个飞行地面模拟设备及实验测试系统的建设，突破了复杂结构流动相似性模拟、动态气动力特性测量等关键技术。他负责了全垫升气垫船的研制，组织开发了七种系列型号投放不同航线进行实际运营。他倡导了“地面效应空气-流体力学”的框架设想，确定了研究目标，充实了研究内容，并作为地效飞行器的总设计师，仅用三年多时间就完成了总体设计和成功试飞。

崔院士多年来一直在航空气动力技术研究院工作，细心指导了许多硕士和博士研究生，为国家的航天事业培养了一批出色的科研骨干，显示出教育家

的风范。在年轻人的心目中，他是一位学识渊博、治学严谨、循循善诱的良师，更是一位气度儒雅、平易近人、可亲可敬的长者。同他在一起，时常能被他的敏达睿智和风趣幽默所感染，枯燥的科学研究也在潜移默化中变得充满了活力和乐趣。

在繁忙的工作之余，崔院士承担了许多社会职务。他是中国科学院数学物理学部常务委员、中国力学学会理事长、中国科学技术大学等重点高校兼职教授、《中国科学》等核心学术刊物编委，还领导着国家自然科学基金重大研究计划等多个科研攻关项目。

今年是崔院士七十华诞，他素来淡泊名利，唯科学研究为己任。我们编印这本《气体物理研究论文集》，一方面为国内相关科研机构及研究人员搭建一个学术交流平台，另一方面谨以此向崔院士表示庆贺和敬意，衷心祝愿崔院士健康长寿、青松不老。

本论文集由航空气动力技术研究院面向全国同行约稿后，经有关专家评审，选定了 36 篇编印而成，涵盖气体物理的现象分析、理论探索、数理建模、计算方法、实验技术、工程应用等。它得到了来自下列单位科研人员的大力支持：清华大学、中国科学技术大学、北京航空航天大学、浙江大学、天津大学、西北工业大学、中国科学院力学研究所、中国科学院研究生院、中国科学院数学与系统科学研究院、中国空气动力研究与发展中心、北京应用物理与计算数学研究所，在此表示诚挚的谢意。



航空气动力技术研究院院长

二〇〇五年十一月

目 录

(按第一作者姓氏笔划排序)

高精度差分格式的构造与分析	马延文 傅德薰 (1)
前体非对称涡流动及其扰动主动控制	邓学莹 (8)
高空多喷流互相干扰流场分析	王发民 张 杰 (19)
基于非结构网格的低速流动算法研究	王振亚 张来平 叶友达 (26)
高速飞行器气动弹性分析的高效算法	叶正寅 张伟伟 (32)
高升阻比飞行器气动特性数值模拟研究	叶友达 卢 笙 王发民 张涵信 (39)
一种新的速度分解及其在跨音速冲击射流中的应用	甘才俊 何 枫 王金勇 杨京龙 许宏庆 (46)
超超声速局部小凸起物热环境特征研究	艾邦成 姜贵庆 孙 震 (53)
可用于 MAVs 的一种新拍动方式高升力机制研究	白 鹏 崔尔杰 李 锋 (66)
飞机设计中空气动力学 / 电磁学的综合设计	朱自强 王晓璐 陈泽民 吴宗成 (77)
超声速燃烧的湍流流场数值模拟	许 丁 王 春 马晖扬 (86)
弹性切尖三角翼的升力特性及其迟滞现象的实验研究	刘 洋 王晋军 (95)
短钝气动外形动稳定性时域分析	刘子强 傅光明 李 潜 崔尔杰 赵 磊 (103)
超声速自由剪切层的声辐射涡模态	沈 清 王 强 庄逢甘 (109)
分层湍流和旋转湍流的大涡模拟研究	陆夕云 庄礼贤 (119)
临近空间高超音速飞行过程激波干扰现象及低速临近空间飞行器推进技术	吴子牛 田中伟 (127)
化学反应流计算中的统计模型	何国威 王银春 张 健 (142)
低雷诺数下昆虫拍翼的非定常流动物理	余永亮 童秉纲 (156)
结构 / 直角切割网格下时域有限体积法在计算电磁中的应用研究	陈 刚 高正红 (168)
超音速风洞扩压器内的激波串现象	陈吉明 任玉新 (176)
矩形弯曲微通道流场物质扩散特性的研究	张 凯 林建忠 (183)
动边界飞行器非定常流场动网格数值模拟技术	张玉东 纪楚群 (190)
细长三角翼摇滚周期运动特性分析	杨云军 崔尔杰 周伟江 (198)
超音速小攻角尖锥边界层中扰动的演化	罗纪生 董 明 曹 伟 周 恒 (211)

球面气相爆轰波汇聚过程的气动物理问题	姜宗林	(220)
干扰剪切流理论和边界层理论的关系、它们的意义和用途	高 智	(231)
高速气体化学反应流的计算方法研究	袁 礼 汤 涛	雷旭波 (251)
钝体端头边界层 Bypass 转捩机理研究	袁湘江 沈 清	张涵信 涂国华 (261)
高超音速边界层转捩的模式研究	符 松	王 亮 (274)
超声速湍流边界层中的气动声源	傅德薰 李新亮	马延文 (282)
多物质混合流动的一种激波捕捉法	程军波 于 明	唐维军 (288)
电弧风洞内聚丙烯烧蚀对尾迹电子特性的影响研究	程晓丽 董永晖	李廷林 (298)
可压缩混合层中的涡结构	熊红亮 何 枫 甘才俊 杨京龙 刘 展 王金勇	崔尔杰 (307)
高超声速化学反应非平衡的气动热数值模拟研究	黎作武	(313)
高 Mach 数壁剪切湍流转捩结构及扰动特征分析	潘宏禄 马汉东	王 强 (322)
激波、爆炸波、爆轰波在气体中传播	俞鸿儒	(336)

高精度差分格式的构造与分析

马延文 傅德薰

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

摘 要 完成了一类 3~6 阶紧致格式的 Fourier 分析, 建立了格式的色散特性、耗散特性、群速度特性对波动参数的依赖关系, 指出这类格式产生数值振荡的原因是数值解群速度不均一。实现了对一个 6 阶慢型对称紧致格式的群速度控制函数重构, 使之在激波前为慢型, 在激波后为混合型。以多个算例表明, 新格式达到了高阶 WENO 格式的计算效果, 却具有编程简单、计算量小的优势。

关键词 紧致格式; 群速度; 耗散; 色散

众所周知, 为了正确数值模拟像湍流这类非定常多尺度复杂流动, 需要采用高阶精度的逼近方法。与同阶精度的传统性格式相比较, 紧致型格式有着网格基点少和分辨率更高的优点^[1-3]。通常高阶精度格式过激波产生非物理振荡。WENO 格式为捕捉激波较好的高精度计算方法。为了能正确模拟超、高超声速湍流, 取七阶精度的 WENO 格式才能有合适的差分耗散。然而, 采用高阶 WENO 格式求解三维可压 N-S 方程计算量太大。

本文构造了高精度紧致型格式的群速度控制方法。和通常高阶精度格式一样, 紧致格式解在激波附近有振荡现象产生。为了克服间断附近数值解中的振荡现象, 发展了很多有效的激波捕捉技术^[4-8]。经分析可知, 数值振荡的产生是由于数值解的群速度不均一所致。为了改进对激波的捕捉质量, 需对格式进行重构。我们在文献[7]中发展了具有四阶精度的紧致型格式群速度控制方法。本文中给出一个具有六阶精度的紧致型格式群速度控制的方法。在文中的第1节介绍格式的构造方法, 第2节介绍对格式的重构方法, 最后给出算例, 比较了高阶 WENO 格式与本文所构造的格式, 表明了格式的有效性。

1 格式的构造

考虑如下之模型方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} = 0, \quad f = cu, \quad c = \text{const.} > 0 \quad (1)$$

空间导数以如下紧致差分逼近^[1]

$$\alpha F_{j+1} + \beta F_j + \gamma F_{j-1} = a(f_{j+2} - f_{j+1}) + b(f_{j+1} - f_j) + c(f_j - f_{j-1}) + d(f_{j-1} - f_{j-2}) \quad (2)$$

这里 $a, b, c, d, \alpha, \beta$ 为待定系数, 且

$$F = \Delta x \partial f / \partial x$$

将方程(2)在 j 点进行 Taylor 展开, 并使对应的系数相等, 则可得方程

$$\begin{aligned}
\alpha + \beta + \gamma &= 1 \\
a + b + c + d &= 1 \\
3(a - d) + b - c &= 2(\alpha - \gamma) \\
7(a + d) + b + c &= 3(\alpha + \gamma) \\
(2^4 - 1)(a - d) + b - c &= 4(\alpha - \gamma) \\
(2^5 - 1)(a + d) + b + c &= 5(\alpha + \gamma) \\
(2^6 - 1)(a - d) + b - c &= 6(\alpha - \gamma)
\end{aligned} \tag{3}$$

求解方程(3)可得各系数, 对具有六阶精度的紧致型差分逼近式有

$$a = \frac{1}{60}, \quad b = \frac{7}{15}, \quad c = -\frac{7}{15}, \quad d = -\frac{1}{60}, \quad \alpha = \frac{1}{5}, \quad \beta = \frac{3}{5}, \quad \gamma = \frac{1}{5}$$

具有六阶精度的紧致型差分逼近式是慢型格式, 用其求解激波问题, 在数值解中将有数值振荡产生。如果我们只取(3)式中的前四个方程, 则精度可能降低, 但可得依赖于三个自由参数的具有三阶精度的差分逼近式。可利用这三个自由参数来控制格式的精度和数值解中的振荡现象, 使格式的解在光滑区仍具有六阶精度, 且有较好的激波捕捉能力。现只取方程组(3)中的前四个方程, 选取 $\delta\alpha$, δa , σ_α 为自由参数, 并定义

$$\begin{aligned}
\alpha &= \sigma_\alpha - \delta\alpha, & \gamma &= \sigma_\alpha + \delta\alpha, & \beta &= 1 - 2\sigma_\alpha \\
a &= -\frac{1}{12} + \frac{1}{2}\sigma_\alpha - \delta a, & d &= -\frac{1}{12} + \frac{1}{2}\sigma_\alpha + \delta a \\
b &= \frac{7}{12} - \frac{1}{2}\sigma_\alpha - 2\delta\alpha + 3\delta a, & c &= \frac{7}{12} - \frac{1}{2}\sigma_\alpha + 2\delta\alpha - 3\delta a
\end{aligned}$$

不难看出, 对任意选取的自由参数 $\delta\alpha$, δa , σ_α , 所得差分逼近式的逼近精度不低于三阶。将所得系数代入差分逼近式的可得

$$\begin{aligned}
&[\sigma_\epsilon F_{j+1} + (1 - 2\sigma_\epsilon)F_j + \sigma_\alpha F_{j-1}] + (-\delta\alpha F_{j+1} + \delta\alpha F_{j-1}) = \\
&\{(-\frac{1}{12} + \frac{1}{2}\sigma_\alpha)(f_{j+2} - f_{j+1}) + (\frac{7}{12} - \frac{1}{2}\sigma_\alpha)(f_{j+1} - f_j) \\
&+ (\frac{7}{12} - \frac{1}{2}\sigma_\alpha)(f_j - f_{j-1}) + (-\frac{1}{12} + \frac{1}{2}\sigma_\alpha)(f_{j-1} - f_{j-2})\} \\
&+ \{-\delta a(f_{j+2} - f_{j+1}) + (-2\delta\alpha + 3\delta a)(f_{j+1} - f_j) \\
&+ (2\delta\alpha - 3\delta a)(f_j - f_{j-1}) + \delta a(f_{j-1} - f_{j-2})\}
\end{aligned}$$

当取 $\delta a = 0$, $\sigma_\alpha = 1/6$ 时, 可得我们的依赖于单参数 $\delta\alpha$ 具有三阶逼近精度紧致型差分逼近式^[1]。如果取 $\delta a = 0$, $\sigma_\alpha = 1/6$, $\delta\alpha = 1/6$, 则可得作者提出的具有三阶精度的迎风型紧致差分逼近式^[1]。当取 $\delta\alpha = 0$, $\delta a = 0$, $\sigma_\alpha = 1/6$ 时, 可得众所周知的具有四阶精度的对称型紧致差分逼近式。当取 $\delta\alpha = 1/5$, $\delta a = 1/30$, $\sigma_\alpha = 1/5$ 时, 所得即为作者提出的具有五阶精度的迎风紧致逼近式^[2]。当取 $\delta\alpha = 0$, $\delta a = 0$, $\sigma_\alpha = 1/5$ 时, 所得即为具有六阶精度的对称型紧致差分逼近式^[3]。表1是几个常用格式, 逼近式No.7具有六阶精度, No.4具有三阶精度, 其右端网格基点为两点。我们将用这两个格式的组合来改进格式对激波的分辨率。

表1 三自由参数常用格式

No.	accuracy	σ_α	$\delta\alpha$	δa	notes
1	3rd	free	free	free	3-parameter
2	3rd	1/6	free	0	our 3-parameter
3	3rd	1/6	1/6	0	our upw. compct
4	3rd	1/6	1/4	0	rhs small stencil
5	4th	1/6	0	0	symm. compct
6	5th	1/5	1/5	1/30	our upw. compct
7	6th	1/5	0	0	symm. compct

我们取 $\sigma_\alpha = 1/5 - 1/30 \sigma$, $\delta\alpha = \sigma/4$, $\delta a = 0$, 则当 $\sigma = 0$ 时得逼近式No.7, 当 $\sigma = 1$ 时得逼近式No.4. 此时我们有依赖于单参数 σ 的逼近式

$$\begin{aligned}
 (\sigma_\alpha - \delta\alpha)F_{j+1} + (1 - 2\sigma_\alpha)F_j + (\sigma_\alpha + \delta\alpha)F_{j-1} = \\
 \left(-\frac{1}{12} + \frac{1}{2}\sigma_\alpha\right)(f_{j+2} - f_{j+1}) + \left(\frac{7}{12} - \frac{1}{2}\sigma_\alpha - 2\delta\alpha\right)(f_{j+1} - f_j) \\
 + \left(\frac{7}{12} - \frac{1}{2}\sigma_\alpha + 2\delta\alpha\right)(f_j - f_{j-1}) + \left(-\frac{1}{12} + \frac{1}{2}\sigma_\alpha\right)(f_{j-1} - f_{j-2})
 \end{aligned} \quad (4)$$

以上情况是针对方程(1)在 $c > 0$ 时的情况。对 $c < 0$ 情况可做类似的讨论。

2 格式的重构

文献[2]指出, 为了改进激波附近数值解的分辨率, 需对格式进行重构, 使得格式在激波前为慢型 (SLW), 在激波后为快型 (FST) /混合型 (MXD)。

现在我们来进行Fourier分析, 以讨论格式的色散特性、群速度特性和耗散特性对参数 σ 的依赖关系。取

$$f_j = \exp(ikx_j), \quad F_j = Ke \exp(ikx_j)$$

将其代入方程(4)可得

$$(A + Bi)(Kr + Ki) = C + D$$

式中

$$Kr = \frac{AC + BD}{A^2 + B^2}, \quad Ki = \frac{AD - CB}{A^2 + B^2}$$

$$A = 1 - 2\sigma_\alpha[1 - \cos(\alpha)], \quad B = -2\delta\alpha \sin(\alpha), \quad C = 4\delta\alpha[1 - \cos(\alpha)]$$

$$D = 2\left(\frac{2}{3} - \sigma_\alpha\right) \sin(\alpha) + \left(-\frac{1}{6} + \sigma_\alpha\right) \sin(2\alpha)$$

修正波数 $Ke = Kr + iKi$ 中, Kr 与格式的耗散特性有关, Ki 与格式的色散特性有关, 其斜率 $dKi/d\alpha$ 为数值群速度。在图1中给出了 Ki 和 Kr 随 σ 的变化曲线。由图1(a)知, 在 $\sigma = 0$ 时的六阶精度逼近式为SLW型, 在 $\sigma = 1$ 时的四阶精度逼近式为MXD型。在超高波段 (近 $\alpha = \pi$ 波段) 群速度总是慢型, 无法控制。由图1(b)知, 对MXD型逼近式在无法控制的近 $\alpha = \pi$ 波段有着强的耗散特性, 有利于抑制因无法控制的波导致的数值振荡。

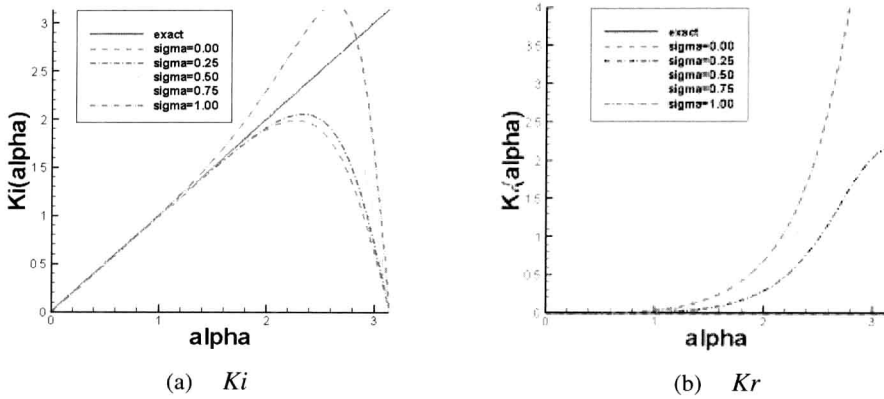


图1 不同参数 σ 下的 Ki 和 Kr 随 α 的变化曲线

引入控制参数后的差分逼近式为

$$\begin{aligned}
 F_j + \delta_x^- [\sigma_{\alpha j+1/2} (F_{j+1} - F_j)] + \delta_x^- [\delta \alpha_{j+1/2} (F_{j+1} + F_j)] = \\
 \delta_x^- \left[\left(-\frac{1}{12} + \frac{1}{2} \sigma_{\alpha j+1/2} \right) f_{j+2} + \left(\frac{7}{12} - \frac{1}{2} \sigma_{\alpha j+1/2} - 2\delta \alpha_{j+1/2} \right) f_{j+1} \right. \\
 \left. + \left(\frac{7}{12} - \frac{1}{2} \sigma_{\alpha j+1/2} + 2\delta \alpha_{j+1/2} \right) f_j + \left(-\frac{1}{12} + \frac{1}{2} \sigma_{\alpha j+1/2} \right) f_{j-1} \right]
 \end{aligned} \quad (5)$$

在本计算中控制参数 $\sigma_{j+1/2}$ 定义为

$$\sigma_{j+1/2} = C_{j+1/2} \frac{1 + SS(g_{j+1/2})}{2}$$

其中

$$C_{j+1/2} = \left\{ \frac{\sigma_0 |\bar{g}_{j+1} - \bar{g}_j|}{\max_j (|\bar{g}_{j+1} - \bar{g}_j|, \sigma_1)} \right\}^3, \quad \sigma_0 > 0$$

$$SS(g_{j+1/2}) = \frac{SS(g_{j+1}) + SS(g_j)}{2}, \quad SS(g_j) = \text{sign}(\delta_x^0 g_j \cdot \delta_x^2 g_j)$$

这里, $\sigma_1 = 0.5$, 而 g 和 $\bar{g}$ 代表变量 ρ , p 。 $SS(g)$ 函数的引入是为了控制群速度, $C_{j+1/2}$ 的引入是为了控制精度, σ_1 的引入是为了使格式在数值解中无间断时仍保持高的精度。容易验证, 所构造的格式(5)在光滑区具有六阶精度, 在激波附近形式精度仍为六阶, 且波前为混合型, 波后为慢型。但因在激波附近 $C_j \rightarrow 1$, 故一般来讲格式为三阶精度的。

对方程(1)中 $c < 0$ 情况可做类似的讨论。

3 数值试验

3.1 线性波的传播

在方程(1)中取 $c=1$, 计算区域为 $[0, 2\pi]$, 计算中取101个网格点。初始条件为

$$u(x, 0) = \sin(kx), \quad k = 30$$

图2是 $t = 0.1$ 时刻的计算结果, 该组计算是为了考查波的传播速度和耗散特性。图中还给