



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113390826 B

(45) 授权公告日 2022. 11. 01

(21) 申请号 202110589596.3

审查员 董瑞

(22) 申请日 2021.05.28

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113390826 A

(43) 申请公布日 2021.09.14

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 林鑫 李仁杰 李飞 余西龙

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理

事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 胡剑辉

(51) Int. Cl.

G01N 21/39 (2006.01)

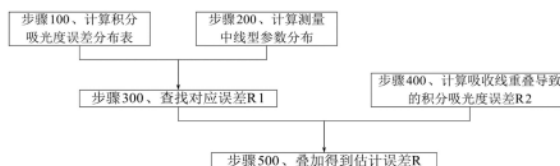
权利要求书1页 说明书4页 附图5页

## (54) 发明名称

一种用于视线非均匀吸收光谱测量的积分吸光度测量误差估计方法

## (57) 摘要

本发明属于光学流场诊断领域,针对视线非均匀吸收光谱测量中的关键中间变量积分吸光度,提供了一种积分吸光度测量误差估计方法,对视线非均匀流场下TDLAS方法测量结果的质量评估提供了输入参数。该方法包括如下步骤:第一步,基于测量所用吸收线型与线型参数范围计算非均匀性误差分布表;第二步,计算所用吸收线在非均匀流场的线型参数分布;第三步,根据测量流场线型参数分布查找非均匀性误差R1;第四步,计算非均匀流场下由吸收线重叠导致的积分吸光度误差R2;第五步,将误差R1与R2叠加得到积分吸光度估计误差R。可用于对视线非均匀激光吸收光谱技术测量结果进行误差分析与质量评估。



1. 一种用于视线非均匀吸收光谱测量的积分吸光度测量误差估计方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100、计算由流场非均匀性导致的积分吸光度测量误差分布表;

综合测量对象物理参数与所用吸收线光谱参数,计算准均匀流场区个数为 $n$ 时, $n \geq 2$ ,线型参数的变化范围;根据线型参数变化范围得到各区阻尼因子变化范围、各区缩放因子比值变化范围、各区积分吸收率比值变化范围;根据以上参数范围,使用光谱线型函数,模拟视线非均匀流场吸收信号;对视线非均匀流场吸收信号进行线型拟合,以积分吸光度拟合值减去积分吸光度真值,得到误差绝对值后比上积分吸光度真值,得到以三种参数变化为轴的积分吸光度测量误差分布表;

步骤200、计算所用吸收线在非均匀流场的线型参数分布;

将待测非均匀流场简化为 $n$ 个准均匀流场的线性组合;基于所用吸收线的光谱参数计算每个准均匀流场区下的线型参数;基于每个准均匀流场区下的线型参数得到线型参数分布,包括:各区阻尼因子、各区缩放因子比值和各区积分吸收率比值;

步骤300、使用线型参数分布在误差分布表中查找对应误差 $R_1$ ;

步骤400、计算由吸收线重叠导致的积分吸光度测量误差 $R_2$ ;

计算所用吸收线在各个准均匀流场区下由吸收线重叠导致的积分吸光度误差 $RE_i$ ;将 $RE_i$ 以各个准均匀流场区积分吸光度为权进行加权平均,得到非均匀流场下吸收线重叠导致的积分吸光度误差 $R_2$ ;

步骤500、将误差 $R_1$ 与误差 $R_2$ 叠加得到积分吸光度估计误差 $R$ 。

## 一种用于视线非均匀吸收光谱测量的积分吸光度测量误差估计方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于光学流场诊断领域,可用于对视线非均匀激光吸收光谱技术测量结果进行误差分析与质量评估。

### 背景技术

[0002] 作为一种进行视线平均测量的非接触式光学测量方法,可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术具有时空分辨率较高,可以对温度、组分浓度等参数进行准确定量等特点。随着测量仪器和数据处理方法的发展,改进的TDLAS技术已被广泛应用于锅炉、激波管、旋流燃烧器、发动机燃烧器等视线非均匀流场中。在大部分视线非均匀流场中,TDLAS技术使用直接吸收方法,通过积分吸光度这一关键中间变量,反演得到目标测量结果。

[0003] 非均匀流场中直接吸收方法的测量流程如图2所示,由激光器发出的激光经过非均匀流场吸收后被探测器转换为电信号,再通过吸收信号的基线处理与线型拟合,得到积分吸光度。积分吸光度最后经过迭代算法得到相应的测量结果。可见积分吸光度是测量流程中的关键中间量。由于光谱线型函数在数学上不具备可加性。因此,在视线非均匀流场测量中,流场非均匀性会与吸收线特征耦合,导致吸收线信号扭曲,干扰线型拟合,导致积分吸光度误差,最终影响测量结果。

[0004] 视线非均匀流场下积分吸光度误差受流场非均匀性、吸收线特征(包括吸收线参数和吸收线重叠)、测量噪声和线型拟合函数耦合影响。目前的研究更多针对特定流场分析流场非均匀性对测量结果的影响。受限于流场非均匀性的复杂性与目标吸收线特征的特异性,还没有对视线非均匀流场下积分吸光度误差的普遍量化结果,也没有视线非均匀流场下积分吸收率误差的通用计算方法。因而难以对视线非均匀流场吸收光谱测量结果的质量进行评估。

[0005] 为说明TDLAS技术在视线非均匀流场中的适用性,为对视线非均匀流场下TDLAS方法测量结果质量评估提供输入参数,有必要对非均匀流场下由信号扭曲导致的积分吸光度误差进行分析评估。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是为了突破特定视线非均匀流场与特定目标吸收线的限制,对由流场非均匀性导致的积分吸光度误差进行普遍量化,建立一种通用的积分吸光度误差估计方法。以说明TDLAS技术在视线非均匀流场中的适用性,为测量结果的评估提供输入参数。

[0007] 为实现上述目标,本发明通过对视线非均匀流场下积分吸光度误差的普遍量化,实现误差估计,具体步骤如下:

[0008] 步骤100、计算由流场非均匀性导致的积分吸光度测量误差分布表,实现对视线非均匀流场下积分吸光度误差的普遍量化;

- [0009] 步骤200、计算所用吸收线在非均匀流场的线型参数分布；
- [0010] 步骤300、使用线型参数分布在误差分布表中查找对应误差R1；
- [0011] 步骤400、计算由吸收线重叠导致的积分吸光度测量误差R2；
- [0012] 步骤500、将误差R1与R2叠加得到积分吸光度估计误差R。
- [0013] 在本发明中优选的是，在步骤100中，积分吸光度测量误差分布表的具体计算步骤为：
- [0014] 步骤101、综合测量对象物理参数与所用吸收线光谱参数，计算准均匀流场区个数为n时 ( $n > 2$ )，线型参数的变化范围；
- [0015] 步骤102、根据线型参数变化范围得到各区阻尼因子变化范围、各区缩放因子比值变化范围、各区积分吸收率比值变化范围；
- [0016] 步骤103、根据以上参数范围，使用光谱线型，模拟视线非均匀流场吸收信号。
- [0017] 步骤104、对视线非均匀流场吸收信号进行线型拟合，以积分吸光度拟合值减去积分吸光度真值，得到误差绝对值后比上积分吸光度真值，得到以三种参数变化为轴的积分吸光度测量误差分布表。
- [0018] 在本发明中优选的是，在步骤200中，非均匀流场的线型参数分布的具体计算步骤为：
- [0019] 步骤201、将待测非均匀流场简化为n个准均匀流场的线性组合；
- [0020] 步骤202、基于所用吸收线的光谱参数计算每个准均匀流场区下的线型参数；
- [0021] 步骤203、基于每个准均匀流场区下的线型参数得到线型参数分布，包括：各区阻尼因子、各区缩放因子比值和各区积分吸收率比值。
- [0022] 在本发明中优选的是，在步骤400中，由吸收线重叠导致的积分吸光度测量误差的具体计算步骤为：
- [0023] 步骤401、计算所用吸收线在各个准均匀流场区下由吸收线重叠导致的积分吸光度误差 $RE_i$ ；
- [0024] 步骤402、将 $RE_i$ 以各个准均匀流场区积分吸光度为权进行加权平均，得到非均匀流场下吸收线重叠导致的积分吸光度误差R2。
- [0025] 本发明的有益效果为：
- [0026] 该方法包括由流场非均匀性导致的积分吸光度误差分布表计算、非均匀流场下由吸收线重叠导致的积分吸光度误差计算、视线非均匀流场下积分吸光度误差估计。通过计算积分吸光度误差分布表，实现了对视线非均匀流场下积分吸光度误差的普遍量化，可以判断说明TDLAS技术在视线非均匀流场中的适用性。结合TDLAS技术特性与测量环境特征，该方法首次给出了测量中由流场非均匀性导致的积分吸光度估计误差，为测量结果评估提供了有效依据。

#### 附图说明

- [0027] 图1为本发明所述方法的实现流程图；
- [0028] 图2为TDLAS技术直接吸收方法在视线非均匀流场中应用流程示意图；
- [0029] 图3为非均匀流场吸收信号模拟与拟合图；
- [0030] 图4a为利用本发明所述方法计算的 $n=2$ 时，典型线型参数范围下积分吸光度误差

分布图(积分吸收率比值固定为1)；

[0031] 图4b为利用本发明所述方法计算的 $n=2$ 时,典型线型参数范围下积分吸光度误差分布图(归一化系数比值固定为1)；

[0032] 图5为执行视线非均匀流场积分吸光度误差估计方法的实施例的工况示意图；

[0033] 图6为实施例工况下特定吸收线积分吸光度估计误差结果图。

### 具体实施方式

[0034] 为便于理解,现结合附图和实施例对本发明做进一步详细描述。然而,本领域技术人员容易理解,实施例所描述的内容仅用于说明本发明,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0035] 实施例1:

[0036] 如图一所示,本发明用于在视线非均匀流场吸收光谱测量中对由非均匀性导致的积分吸光度测量误差进行估计,包括如下具体实施步骤:

[0037] 步骤100、计算由流场非均匀性导致的积分吸光度测量误差分布表。

[0038] 1)从Hitran数据库中获取常用水吸收线 $7185.597\text{cm}^{-1}$ 的光谱常数,基于一般典型测量流场物理参数(具有边界层的非均匀流场,准均匀流场区 $n=2$ 、环境静压 $1\text{atm}$ 、温度 $200\text{K}-4000\text{K}$ 、水分压 $0\text{atm}-0.4\text{atm}$ )估计计算线型参数(归一化系数 $x'$ 、阻尼因子 $y$ 、积分吸光度 $A$ )范围。线型参数计算公式如下。

$$[0039] \quad x' = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\alpha_D} \quad , \quad y = \sqrt{\ln 2} \frac{\alpha_L}{\alpha_D} \quad , \quad A = PX_{H_2O} S(T) L$$

[0040] 式中 $PX_{H_2O}$ 为水气分压、 $S(T)$ 为吸收线线强,与温度相关、 $L$ 为吸收长度、 $\alpha_D$ 和 $\alpha_L$ 分别为由多普勒加宽和碰撞加宽导致的半高半宽,其计算公式如下。

$$[0041] \quad \alpha_D = v_0 \sqrt{\frac{2k_B T \ln 2}{Mc^2}} \quad , \quad \alpha_L = \gamma_{self} PX_j \left(\frac{T_0}{T}\right)^{n_{self}} + \sum_f \gamma_f PX_f \left(\frac{T_0}{T}\right)^{n_f}$$

[0042] 式中 $k_B$ 为玻尔兹曼常数、 $M$ 为吸收物质分子量、 $c$ 为光速、 $T$ 为环境温度、 $PX_j$ 与 $PX_f$ 分别为吸收组分与非吸收组分的分压。 $\gamma_{self}$ 与 $\gamma_f$ 分别为吸收线自展宽系数与外展宽系数, $n_{self}$ 与 $n_f$ 分别为吸收线吸收组分与非吸收组分的温度依赖因子,都为吸收线光谱参数,可在数据库中查询。

[0043] 2)根据线型参数范围得到阻尼因子范围 $y=0.1\sim 10$ 、两个准均匀流场区缩放因子比值范围 $x'_1/x'_2=0.25\sim 4$ 、两个准均匀流场区积分吸光度比值范围 $A_1/A_2=0.1\sim 0.9$ 。

[0044] 3)使用两个Voigt线型函数线性叠加模拟视线非均匀吸收信号,信号模拟函数如下。

$$[0045] \quad a = \sum_{i=1}^{i=n} A_i \frac{1}{\sqrt{\pi}} x'_i K(x'_i v', y_i) \quad (n=2)$$

[0046] 式中 $\frac{1}{\sqrt{\pi}} x'_i K(x'_i v', y_i)$ 为Voigt线型函数, $v'$ 为相对波数。

[0047] 4)如图3所示,使用单个Voigt线型函数对视线非均匀吸收信号进行拟合,得到积

分吸光度拟合值,图中底部分别为对连续吸收光谱与孤立吸收光谱的拟合结果,顶部为拟合残差。将拟合值与真值之差的绝对值比上真值得到相对误差,部分相对误差分布结果如图4所示,图4a为积分吸收率比值固定为1,改变归一化系数比值与阻尼因子得到的误差分布结果,图4b为归一化系数比值固定为1,改变积分吸收率比值与阻尼因子得到的误差分布结果。

[0048] 步骤200、计算所用吸收线在非均匀流场的线型参数分布。

[0049] 如图五所示, $n$ 为进气道横向, $m$ 为进气道纵向,在具有斜激波的进气道中使用TDLAS技术,激波前速度为马赫数 $Ma=2.5$ ,水蒸气浓度 $X=0.1$ ,测量吸收光路总长为 $L$ 。所用激光包含水吸收线 $7185.597\text{cm}^{-1}$ ,在进气道斜激波流场中从 $n_1$ 移动至 $n_2$ 穿过斜激波进行吸收测量。

[0050] 1) 将待测进气道斜激波流场简化为两个准均匀流场区①和②的组合,其中①为低温区,吸收光路长为 $c$ ,②为高温区,吸收光路长为 $\delta$ ,其中 $\delta=L-c$ 。

[0051] 2) 使用水吸收线 $7185.597\text{cm}^{-1}$ 的光谱常数与两个准均匀流场区的物理参数计算线型参数。

[0052] 3) 基于两个准均匀流场区下的线型参数得到线型参数分布,包括:各区阻尼因子、各区缩放因子比值和各区积分吸收率比值。

[0053] 步骤300、使用线型参数分布在误差分布表中查找对应误差 $R1$ 。

[0054] 步骤400、计算由吸收线重叠导致的积分吸光度测量误差 $R2$ 。

[0055] 1) 从Hitran数据库中获取常用水吸收线 $7185.597\text{cm}^{-1}$ 左右 $1\text{cm}^{-1}$ 波数范围内所有水吸收线的光谱常数,分别在两个准均匀流场区的物理参数条件下通过逐行计算重建连续光谱吸收信号。再对连续光谱吸收信号进行Voigt线型拟合,得到拟合积分吸光度。将拟合积分吸光度与真值积分吸光度之差的绝对值比上真值,分别得到两个准均匀流场下由吸收线重叠导致的积分吸光度误差 $RE_i$ 。

[0056] 2) 将 $RE_i$ 以两个准均匀流场区积分吸光度为权进行加权平均,得到非均匀流场下吸收线重叠导致的积分吸光度误差 $R2$ 。

[0057] 步骤500、将误差 $R1$ 与 $R2$ 叠加得到积分吸光度估计误差 $R$ 。

[0058] 图6给出了实施例工况下特定吸收线积分吸光度估计误差随高温区吸收长度占总吸收长度比值变化的结果图。

[0059] 以上所述并非是对本发明的限制,应当指出:对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明实质范围的前提下,还可以做出若干变化、改型、添加或替换,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

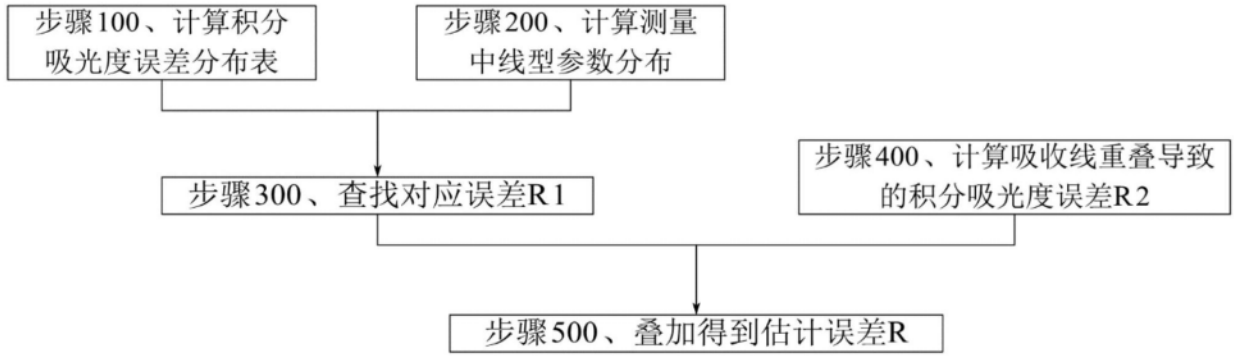


图1

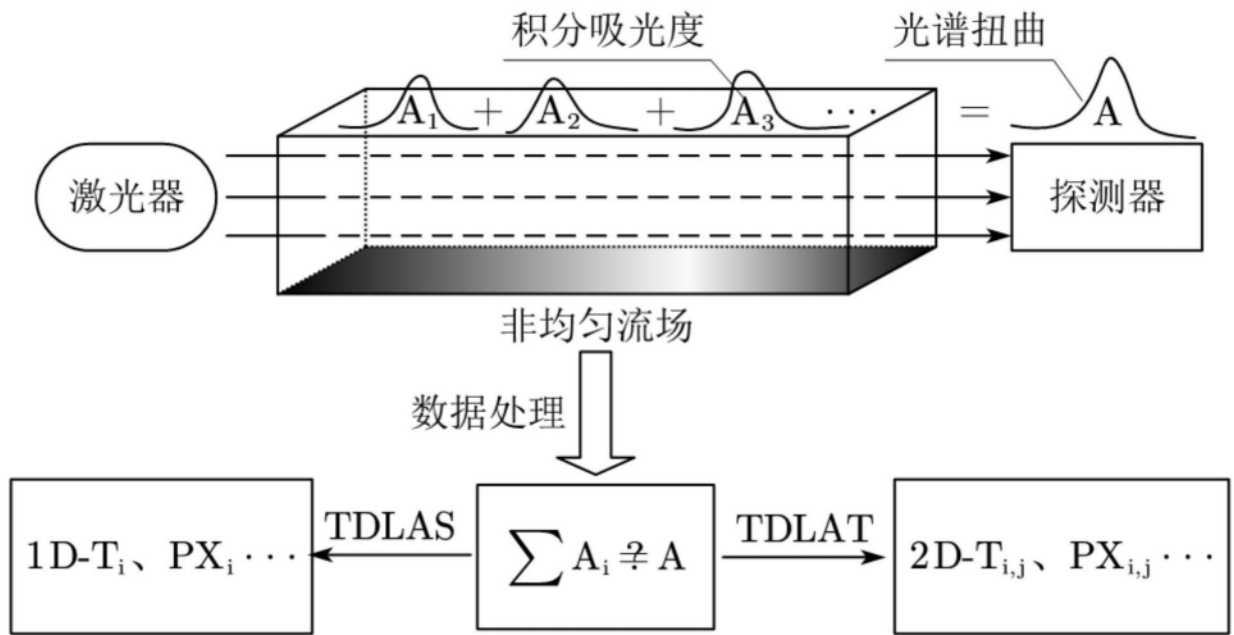


图2

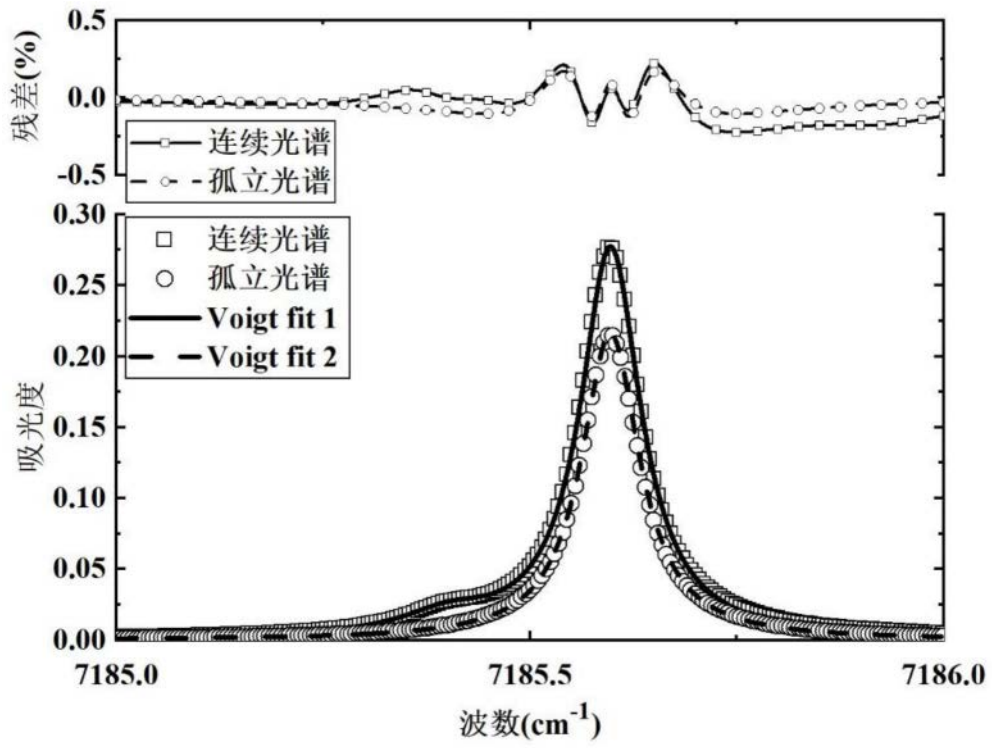


图3



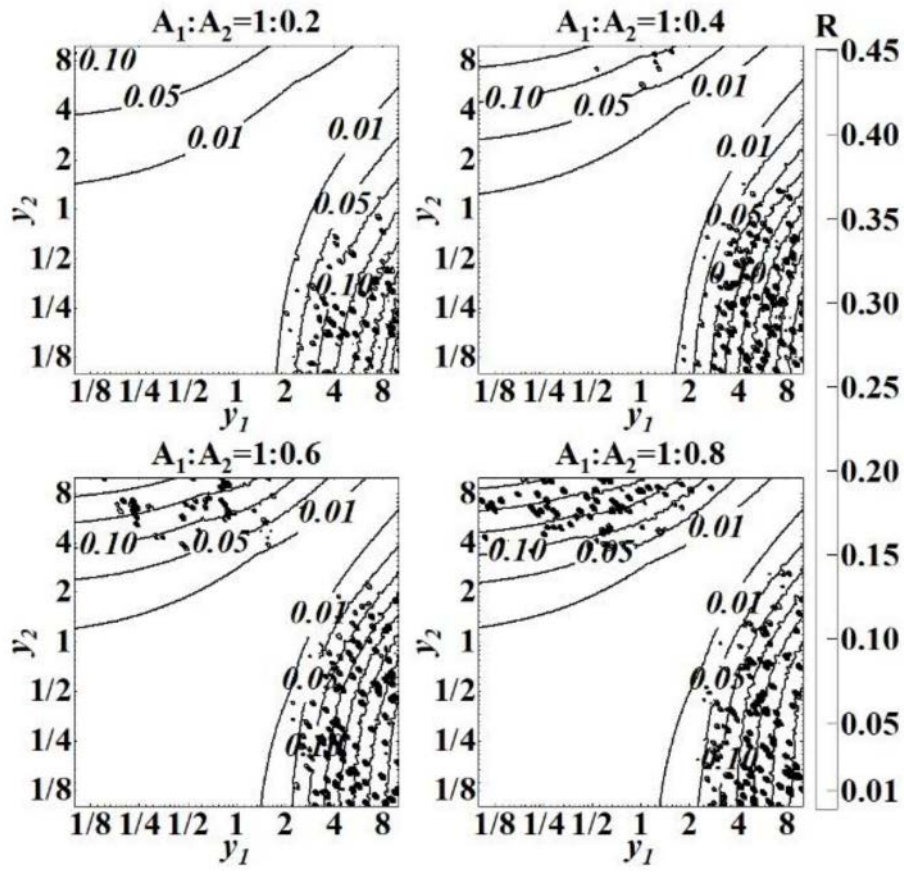


图4a

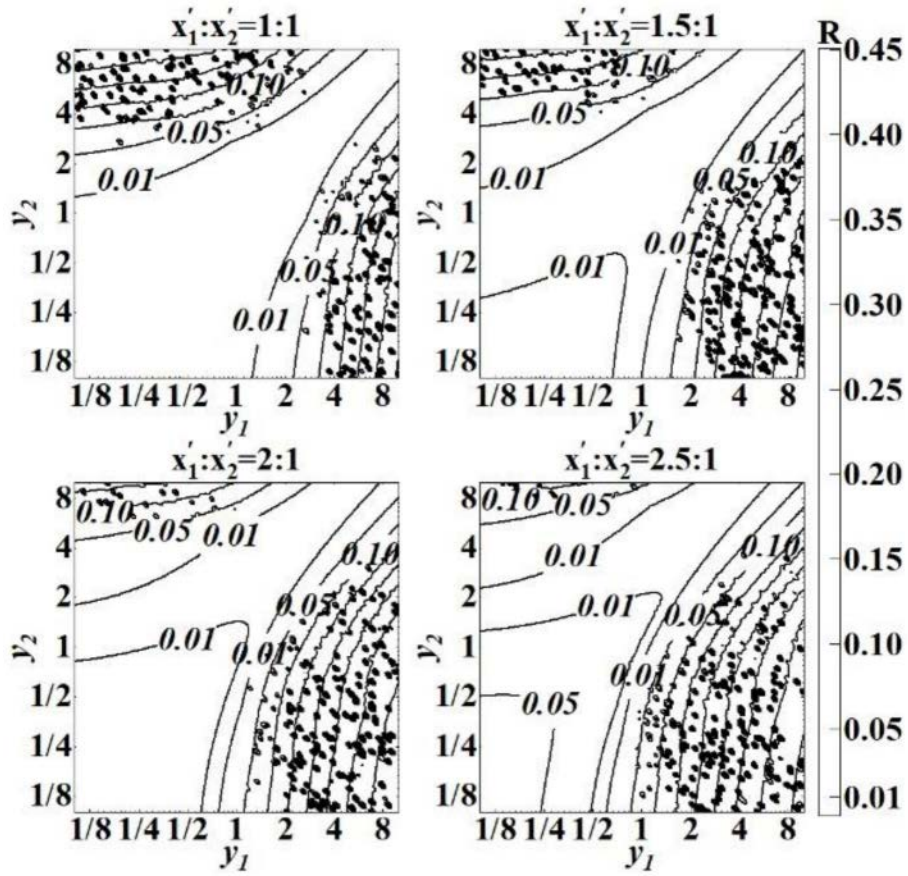


图4b

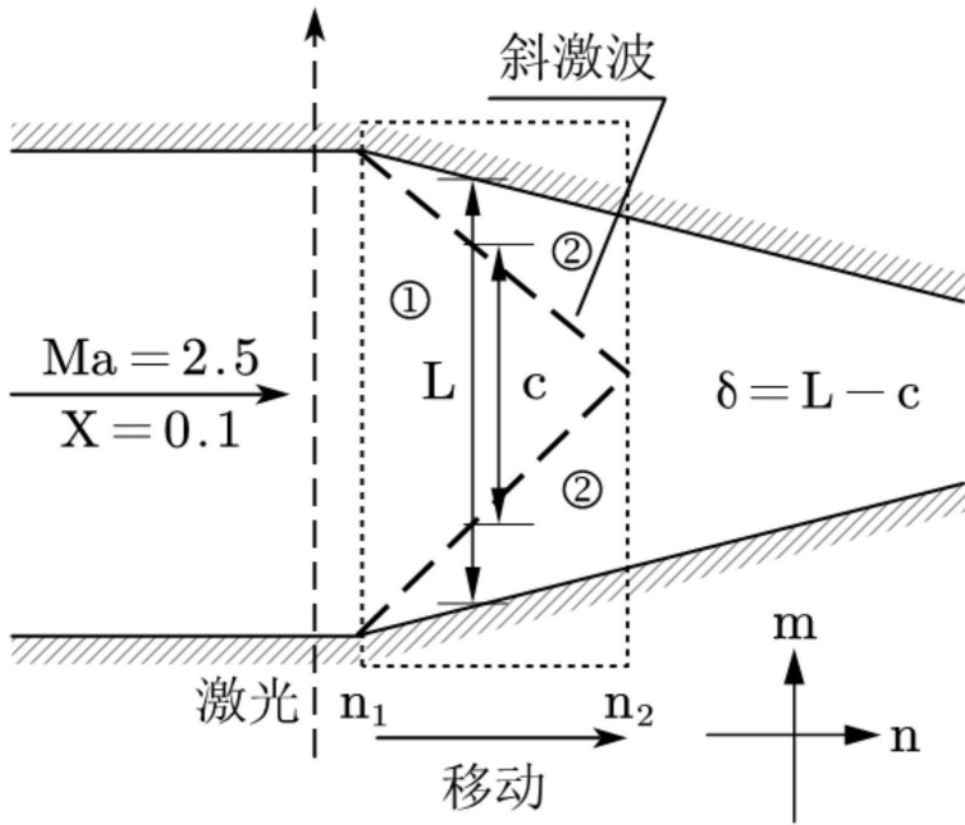


图5

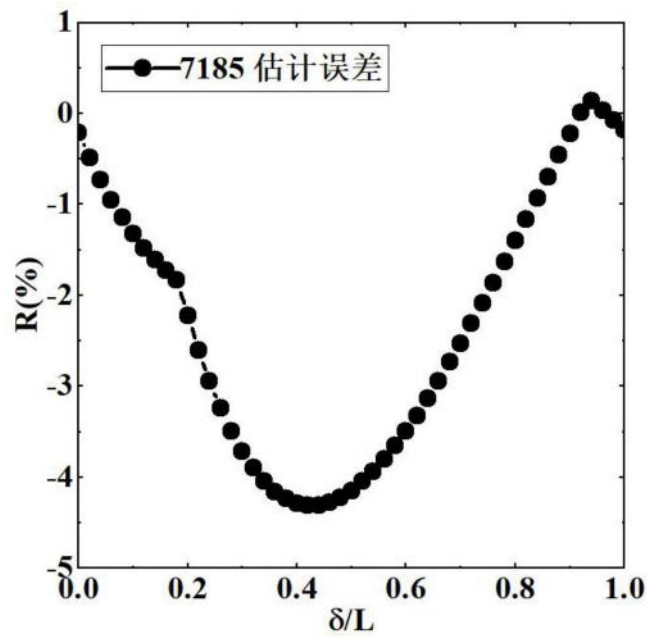


图6