

# 旋流管道声传播

## Swirl Duct Noise

-matlab Code

[Jiaqi Wang@situ.edu.cn](mailto:Jiaqi.Wang@situ.edu.cn)

仅作学习交流，切勿抄袭

### 1.1 编写目的

压气机转子和静子之间的旋流可能达到与轴向流动速度同一量级。传统的叶轮机噪声预测仅仅考虑平均流的影响，其声-涡-熵是完全独立的。而实际的旋流管道，其压力、速度和熵值之间存在耦合关系。针对该问题，我们进行了相对细致的研究，集成 MATLAB 代码为完整的单极子和偶极子传播仿真软件。目前为 1.0 版本，主要考虑了实际叶轮机管道的一些参数，包括：环形管道、平均流轴流速度、平均流周向速度（自由涡旋流+刚体旋流）、非硬壁边界条件和非均熵条件的影响。

### 1.2 基本术语解释

r_pole 声源径向点位（默认在 0-1 之间）；
x_pole 声源轴向点位（仿真轴向范围，可自由选取）；
Ratio 内径；
Boundary 边界条件的选取 {1,2,3,4}： {'Hard Wall';'Lined Outer Wall';'Lined Inner Wall';'Lined Outer&Inner Wall'}；
Mx 轴向速度（可自由选取，默认 0.3，跨音条件>1 未验证）；
c0 平均流速度；
Entropy 平均流熵值；
k 轴向波数；
M_theta 周向速度（旋流参数 $M_{\theta} = Tr./r + \Omega * r$ ）；

$\rho_0$  平均流密度;

$w$  发声频率;

$z_t, z_h$  软壁面边界条件;

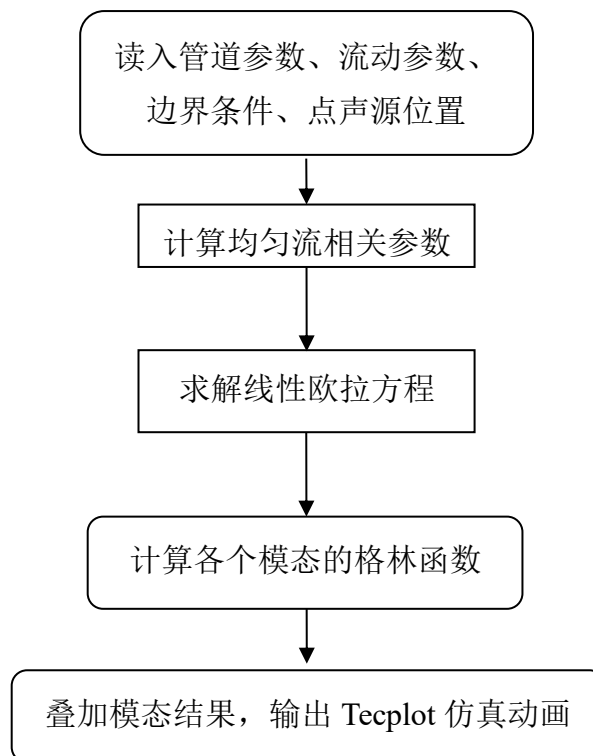
### 1.3 主要功能

软件功能主要包含两大块:

1. 从包含能量方程的扰动量形式线性欧拉方程出发, 推导波数域下包含 Ingard-Myers 边界条件的特征方程, 并利用配置法求解得到轴向波数。
2. 类比 Lighthill 声类比方程, 重新整理欧拉方程为六阶线性算子作用下的压力扰动的形式, 推导旋流条件下的单极子和偶极子格林函数。

### 1.4 处理流程

其主要计算过程的处理流程如下所示:



## 2 接口设计

### 2.1 外部接口

用户界面：无特殊要求，显示器，须在 MATLAB 平台下运行，流场结果输出为 `tecplot` 可读文件。

### 2.2 内部接口

本软件为一个主函数，其他为子函数(用于求解特定参数下的欧拉方程和格林函数)，另外还包含一个 `Chebfun` 数值包。`Chebfun` 是用于计算的开源软件包，其功能的精度约为 15 位。大多数 `Chebfun` 命令都是熟悉的 MATLAB 命令的重载-例如 `sum(f)` 计算一个积分，`roots(f)` 查找零，而 `u = L \ f` 解一个微分方程。

## 3 运行设计

### 3.1 运行模块的组合

各个子程序之间采用内部链接，调用时通过输入参数进行识别。

### 3.2 运行控制

本软件各种组合的运行控制方式，方法和具体步骤是相同的，即通过一个输入控制文件来实现，该文件包括管道参数、流动参数等。

### 3.3 运行时间

依据具体求解的问题大小而定。

## 4 程序设计

程序文件：SwirlDuctNoise.m

用户给出输入文件后，直接运行程序文件。

## 5 程序说明

### 5.1 SwirlDuctNoise.m:

输入输出模块，管道气动声学推导线性欧拉方程，求解特征值，代入旋流条件下的单极子和偶极子格林函数，并输出为 tecplot 可读文件。

### 5.2 Cheb.m:

```
[D,r] = cheb(N,a,b);
```

计算差分算子矩阵 D 和 Chebyshev 格子分布。

### 5.3 entropyPara.m

```
[c02,rou0,P0,s0]=entropyPara(r,N,Ratio,Omag,Tr,Entropy,beta)
```

计算均熵或非均熵条件下的均匀流分布参数。

根据实际情况，其包含如下 4 种选择（见代码）

```
case {0} %均熵  
case {1} %by Guan  
case {2} %by James  
case {3} %for James 将 gama->1 from Guan 参考熵为  $0=\ln(1)$   
case {4} %for Guan2 same as Tam --3.87 rou0=1
```

### 5.4 eigfun\_AB.m

```
[V,lam]=eigfun_AB(r,D,N,w,m(nk),Ratio,Mx,M_theta,rou0,P0,c02,Boundary,z_t,z_h);
```

在均熵或者非均熵情况下，密度脉动力可以线性表达为压力脉动量的形式。因此，可以在求解线性欧拉方程的时简化为 5 个脉动未知量（压力，三个方向速度，熵），并通过傅里叶变换，得到波数域的表达式。

整理上述方程错误!未找到引用源。-错误!未找到引用源。，并将 k 提取到右侧，得到矩阵表达形式：

$$AX=\lambda X$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{U_x \hat{\Omega}}{c_0^2 \zeta} i & \left[ -\frac{U_x}{c_0^2 \zeta} \frac{dU_x}{dr} + \frac{1}{r\zeta} + \frac{U_\theta^2}{\zeta r c_0^2} \right] + \frac{1}{\zeta} \frac{d}{dr} & \frac{n}{r\zeta} i & -i \frac{\hat{\Omega}}{c_0^2 \rho_0 \zeta} & 0 \\ 0 & -i \frac{\hat{\Omega}}{U_x} & -\frac{2U_\theta}{rU_x} & \frac{1}{\rho_0 U_x} \frac{d}{dr} - \frac{U_\theta^2}{\rho_0 U_x r c_0^2} & \frac{U_\theta^2}{r c_p U_x} \\ 0 & \frac{1}{U_x} \left[ \frac{U_\theta}{r} + \frac{dU_\theta}{dr} \right] & -\frac{\hat{\Omega}}{U_x} i & \frac{in}{r \rho_0 U_x} & 0 \\ -\frac{\rho_0 \hat{\Omega}}{\zeta} & \frac{\rho_0}{\zeta} \left[ \frac{dU_x}{dr} - \left( \frac{U_\theta^2}{c_0^2} + 1 \right) \frac{U_x}{r} \right] - \frac{\rho_0 U_x}{\zeta} \frac{d}{dr} & -\frac{n \rho_0 U_x}{r\zeta} & i \frac{U_x \hat{\Omega}}{c_0^2 \zeta} & 0 \\ 0 & \frac{1}{U_x} \frac{ds_0}{dr} & 0 & 0 & -i \hat{\Omega} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ P \\ S \end{bmatrix}, \quad \lambda = -ki$$

最终，通过 Matlab 自带的 eig()函数求解特征值和特征函数。

### 5.5 GMM\_Cluster.m 和 eig\_choose.m

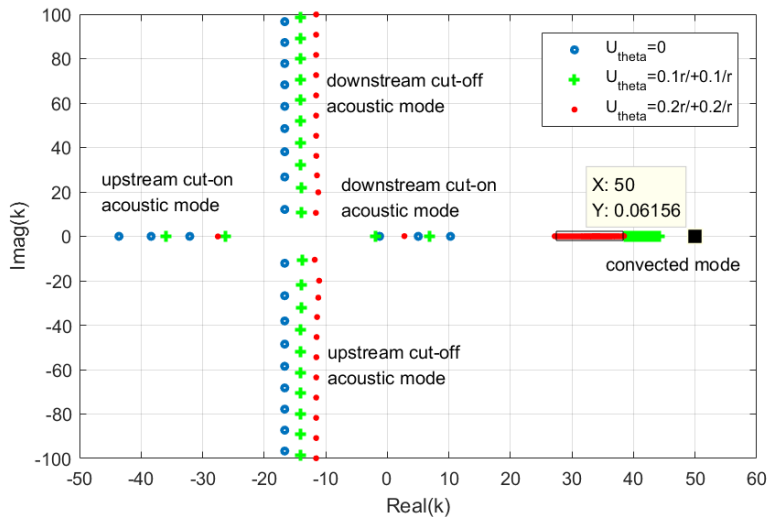
```
[cutOffLine]=GMM_Cluster(lam,crLayer)
```

```
[mode1]=eig_choose(V,N,lam,w,Mx,Tr,Omag,-2,40,-2,35,crLayer,cutOffLine,1); %选特征
```

```
[mode2]=eig_choose(V,N,lam,w,Mx,Tr,Omag,-2,40,-2,35,crLayer,cutOffLine,2); %选特征
```

如下图所示，根据特征值的实部和虚部来辨别声源在管道中的传播特性,并按照上游可传播模态、下游可传播模态、上游截止模态、下游截止模态、对流模态进行分类。

其中，上下游截止模态所在的截止线可以通过 GMM\_Cluster 进行聚类识别。



## 5.6 greenfun\_dipoleNoise.m

```
[G_nm1,Tgm11,Tgm12,Tgm13]=greenfun_dipoleNoise(r,Boundary,m(nk),Ratio,w,Tr,Omag,
Mx,c02,rou0,lam(mode1),z_t,z_h,r_pole,x_pole1,0,45,90);
```

```
[G_nm2,Tgm21,Tgm22,Tgm23]=greenfun_dipoleNoise(r,Boundary,m(nk),Ratio,w,Tr,Omag,
Mx,c02,rou0,lam(mode2),z_t,z_h,r_pole,x_pole2,0,45,90);
```

计算 green 函数

### 输入：

r : 管道半径; Boundary : 边界条件; m(nk) : 周向模态; Ratio : 管径比; w : 频率; Tr : 周向速度系数 1; Omag : 周向速度系数 2; Mx : 轴向速度; c02 : 声速; rou0 : 均匀流密度; lam(mode1) : 特征值; z\_t : 软壁面边界条件 1; z\_h : 软壁面边界条件 2; r\_pole : 点声源位置-r 方向; x\_pole1: 点声源位置-x 方向 ; 0 : 偶极子声源的指向性 1; 45: 偶极子声源的指向性 2; 90: 偶极子声源的指向性 3;

### 输出：

G\_nm1 : 单极子声源; Tgm11 : 偶极子声源-0 度; Tgm12 : 偶极子声源-45 度; Tgm13 : 偶极子声源-90 度;

## 5.7 cheb\_cumKxCell.m

```
[GNk1,TGm11,TGm12,TGm13]=cheb_cumKxCell(G_nm1,Tgm11,Tgm12,Tgm13,Ratio,length
h(x_pole1),length(mode1));
```

```
[GNk2,TGm21,TGm22,TGm23]=cheb_cumKxCell(G_nm2,Tgm21,Tgm22,Tgm23,Ratio,leng
th(x_pole2),length(mode2));
```

累加所有波数结果，输出 cell 格式结果。

## 5.8 greenfun\_span2volume.m

```
[Gw1{1,nk},Tm11{1,nk},Tm12{1,nk},Tm13{1,nk},Gwn1{nk},TGmn11{nk},TGmn12{nk},T
Gmn13{nk}]=greenfun_span2volume(r,GNk1,TGm11,TGm12,TGm13,m,nk,x_pole1);
```

```
[Gw2{1,nk},Tm21{1,nk},Tm22{1,nk},Tm23{1,nk},Gwn2{nk},TGmn21{nk},TGmn22{nk},
TGmn23{nk}]=greenfun_span2volume(r,GNk2,TGm21,TGm22,TGm23,m,nk,x_pole2);
```

累加所有模态结果，输出 cell 格式结果。

## 5.9 pltPlot\_greenswirl

pltPlot\_greenswirl(w,r,m,GGw,TTm1,TTm2,TTm3,rou0\_3D,P0\_3D,s0\_3D,Mx\_3D,M\_theta\_3D,Tr,Omag,save\_directory,Boundary,Type,x\_pole)

生成网格矩阵，导入数据并赋值，存储文件，并输出 plt 格式文件，在当前路径文件夹内。

## 6 计算结果（动画）

生成给定周向模态下的仿真结果（此案例给定周向模态  $m=5$ ），并可以通过 Contour 设置进行不同参数的结果转换,包括单极子、多极子（0, 45, 90 度），均匀流等其他参数的可视化。

