



上海交通大学
Shanghai Jiao Tong University



空调管路中冷媒流动噪音的机理研究

詹飞龙

上海交通大学

2021年4月



目 录

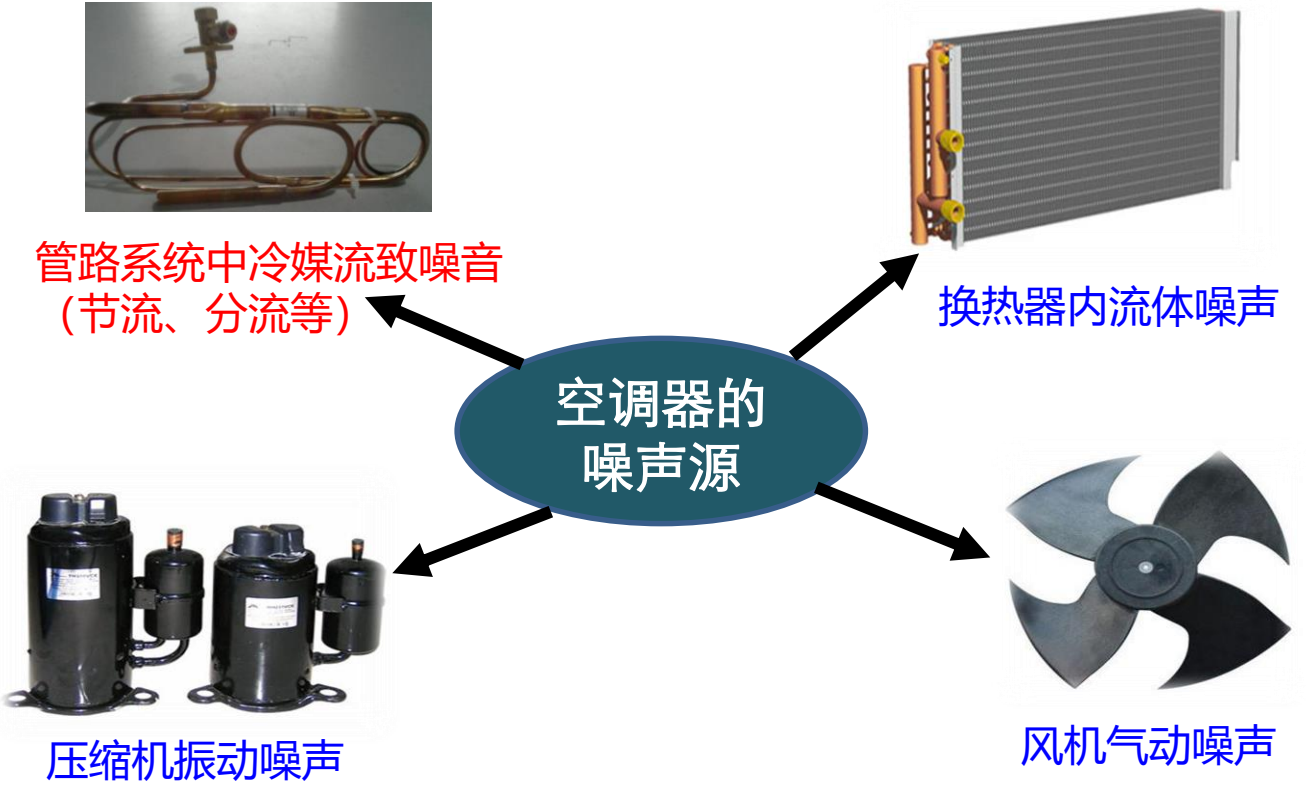
-  1. 研究背景
-  2. 管路内冷媒流型变化的实验研究
-  3. 管路内冷媒流型变化的模拟研究
-  4. 冷媒节流过程的噪音问题分析
-  5. 小结

1.1 空调器中的噪音问题严重影响舒适性

- **空调器存在多种类的噪音问题**：对于家用空调器产品的设计，除了要有好的性能和安全指标外，还需要降低空调器的噪音；家用空调器运行时产生的噪音源包括压缩机、风机、换热器、管路系统等。
- **管路系统中的冷媒流致噪音成为影响空调舒适性的重要因素**：空调管路系统中的阀类部件较多、管路布置复杂，在某些特定工况下，冷媒流动参数变化剧烈，会出现严重影响舒适性的流致噪音。

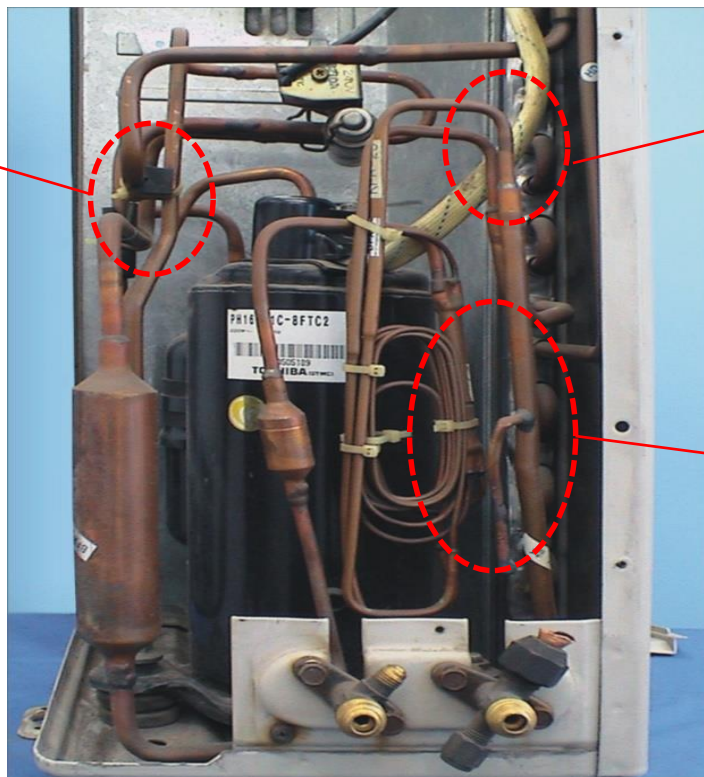
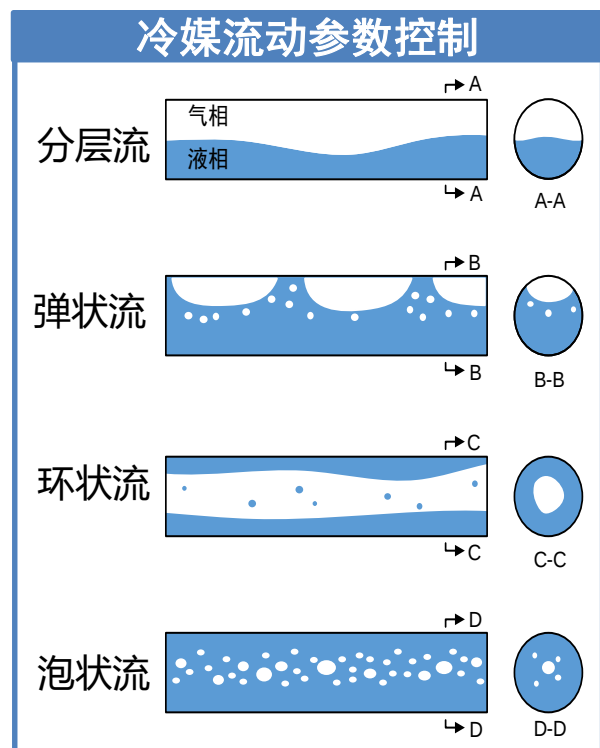
GB/T 7725-2004 中规定的分体式空调器的额定噪声值（声压级）

额定制冷量/kW	室内噪声/dB(A)	室外噪声/dB(A)
<2.5	≤40	≤52
2.5~4.5	≤45	≤55
>4.5~7.1	≤52	≤60
>7.1~14	≤55	≤65



1.2 抑制冷媒流致噪音成为空调产品开发中需要重点关注的技术点

- **冷媒流型影响流致噪音**：掌握不同工况下冷媒在管路中的流型特征，获得流型与噪音的关系。
- **复杂流动参数变化影响流致噪音**：掌握节流过程中冷媒相变空化的机制，获得冷媒相变与噪音的关系。
- **流致噪音的降噪思路**：从单体阀类部件结构优化、整个管路系统结构优化、以及冷媒流动参数控制三个层面上综合考虑降噪改进方法。



阀类部件结构优化

- 节流阀结构优化
- 分配器结构优化
-
-
-

管路系统优化布置

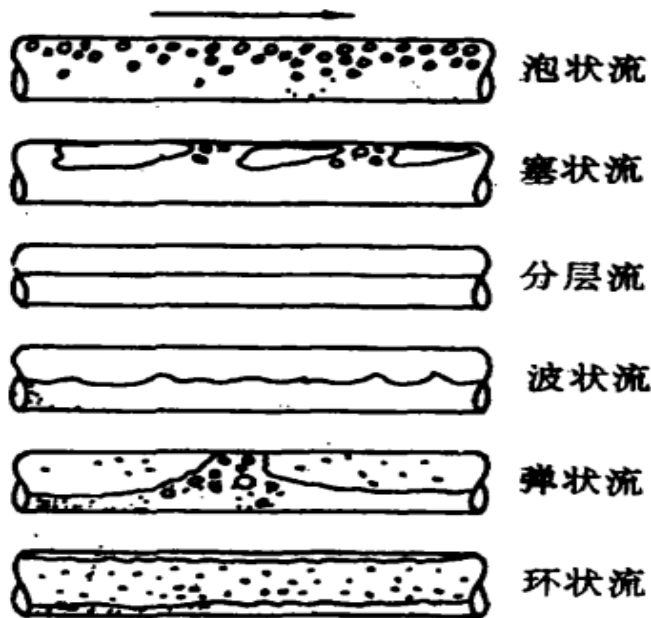
- 节流机构布置方式
- 管径组合方式
- 管路布置方式
-
-
-

2.1 流型研究的目的

➤ 获得水平管内流型变化规律及其对噪音的影响

水平管内常见的两相流型

- 基本流型：泡状流、塞状流、弹状流、分层流、波状流和环状流



水平管内流型转化条件

- 波状分层流和间歇流或弥散环状流转化条件

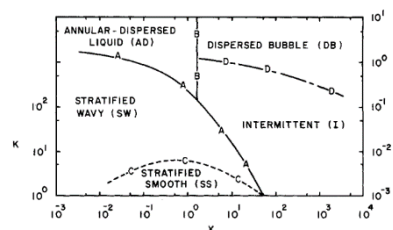
$$F^2 \left[\frac{1}{C_2^2} \frac{\bar{U}_G d \bar{A}_L / d \bar{h}_L}{\bar{A}_G} \right] \geq 1$$

- 分层流与波状分层流转化条件

$$K \geq \frac{2}{\sqrt{\bar{U}_L s \bar{U}_G}}$$

- 间歇流与弥散泡状流转化条件

$$T^2 \geq \frac{8 \bar{A}_G}{s_i \bar{U}_L^2 (\bar{U}_L \bar{D}_L)^{-n}}$$



F、K、T为表示
流型转化边界的
无量纲数

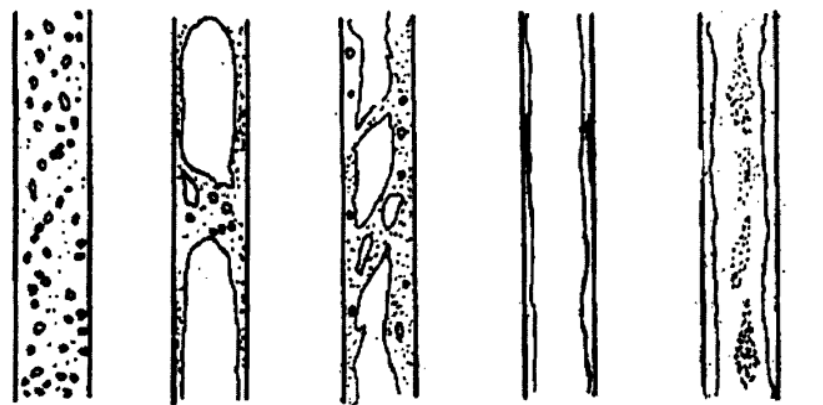
现有文献中的水平管内流型转化条件通常以流型图形式来表征。

2.1 流型研究的目的

➤ 获得**竖直管**内流型变化规律及其对噪音的影响

竖直管内常见的两相流型

- 基本流型：泡状流、弹状流和环状流，无分层流
- 过渡流型：弥散泡状流、搅混流（乳沫状流）、细束环状流等



1. 泡状流 2. 弹状流 3. 乳沫状流 4. 环状流 5. 细束环状流

竖直管内流型转化条件

- 泡状流与弥散泡状流转化条件

$$U_{LS} + U_{GS} = 4.0 \left\{ \frac{D^{0.429} \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.089}}{v_L^{0.072}} \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right]^{0.446} \right\}$$

- 泡状流与弹状流转化条件

$$U_{LS} = 3.0 U_{GS} - 1.15 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G) \sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4}$$

- 环状流与搅混流转化条件

$$U_G = \left(\frac{4K}{3C_d} \right)^{1/4} \frac{[\sigma g(\rho_L - \rho_G)]^{1/4}}{\rho_G^{1/2}}$$

- 弹状流与搅混流转化条件

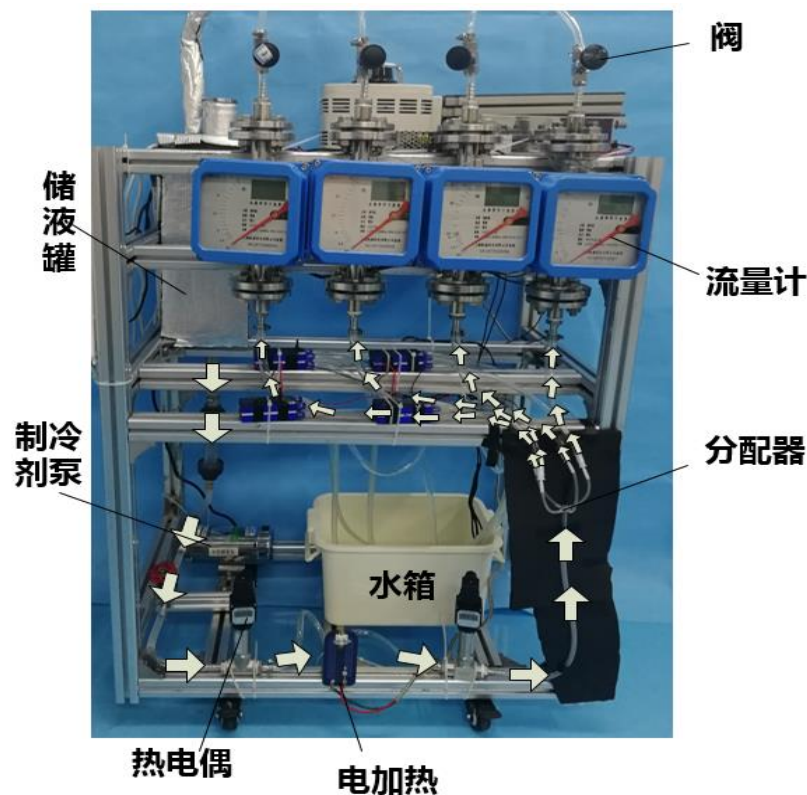
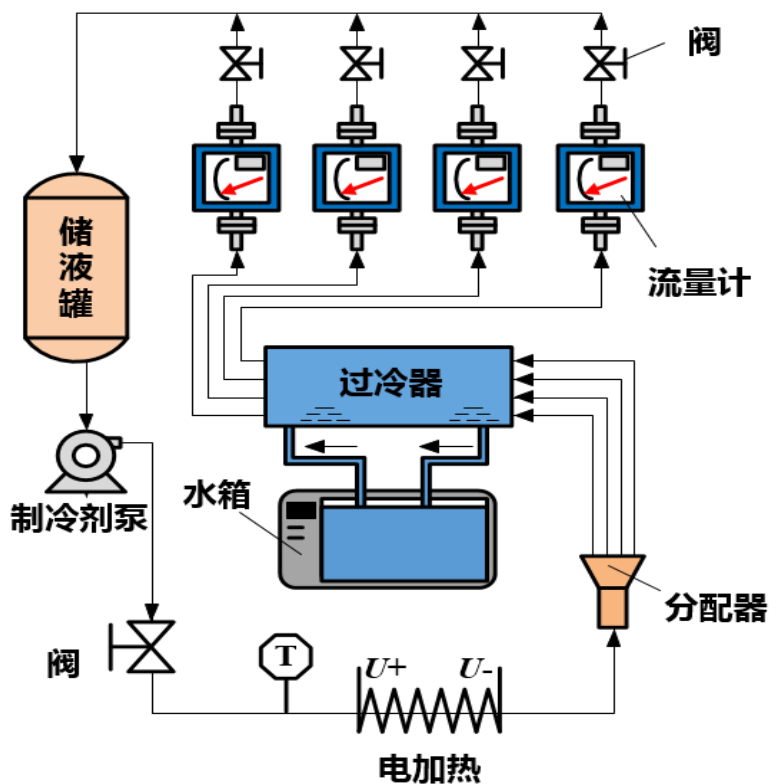
$$l_E = \frac{l_s U_G}{0.35 \beta \sqrt{gD}} \sum_{n=2}^{\infty} (e^{\beta/2n} - 1)$$

现有文献中的竖直管内流型转化条件通常以**折算速度**形式来表征。

2.2 冷媒流型可视化实验方法

➤ 流型可视化实验台

- **试验台：**主要包括储液罐、水泵、球阀、电加热模块、温度传感器T1和T2、调压器、半导体制冷模块、4个流量计以及实验样件。
- **循环工质：**采用常压制冷剂 R141b。



2.2 冷媒流型可视化实验方法

➤ 实验条件

▣ 实验工况

实验采用制冷剂为R141b。

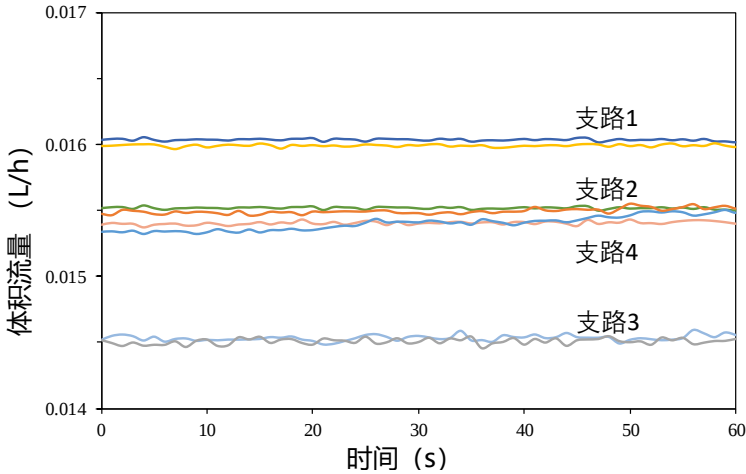
安装角 / 方式	流量 / (g/s)
0° / 水平	14、18、22
45° / 倾斜	14、18、22
90° / 竖直	14、18、22

▣ 测试参数

测试参数包括流量，温度和加热电压。

仪器名称	测量范围	测量精度
温度传感器	0-50 °C	0.1%
体积流量计	0-40 L/h	2.5%
调压器	0-250 V	0.8%

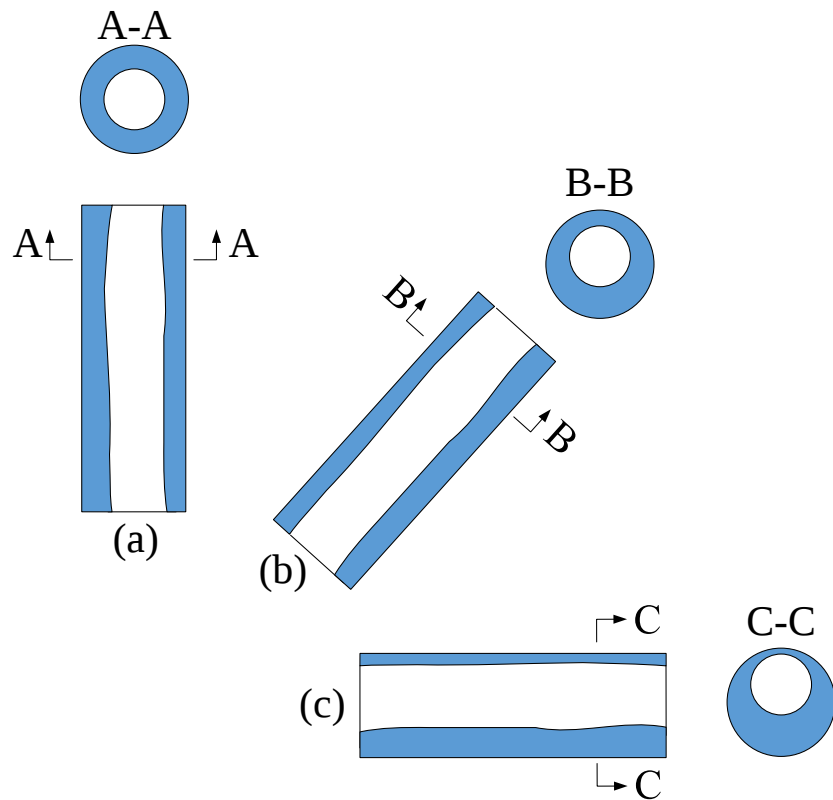
▣ 流量参数测量的稳定性



2.2 冷媒流型可视化实验方法

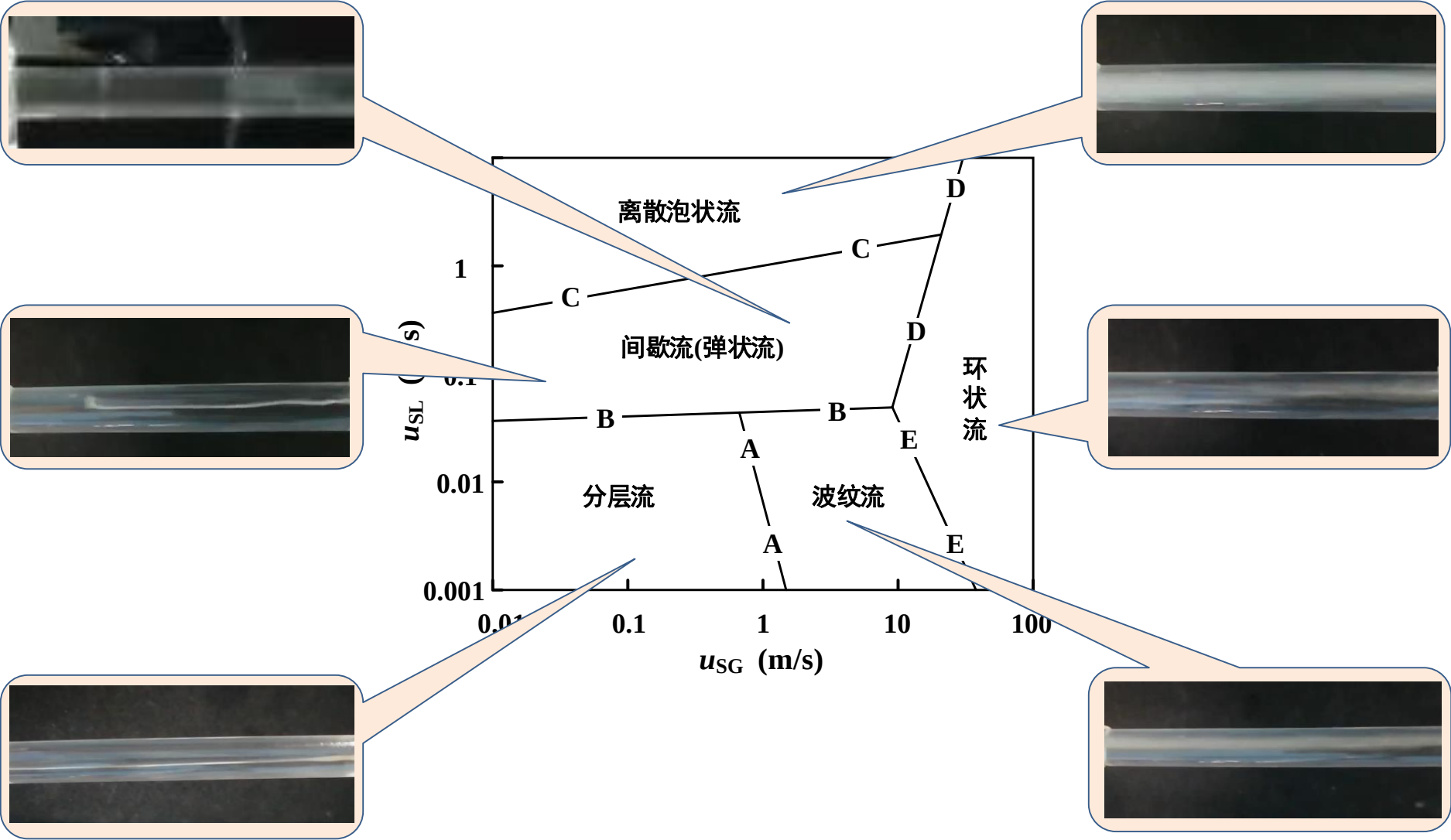
➤ 实验样件

- 试验样件：长度 $L > 15$ 倍的管内径 D 的圆管
 $D = 4.8\text{mm}$, $L = 100\text{mm}$



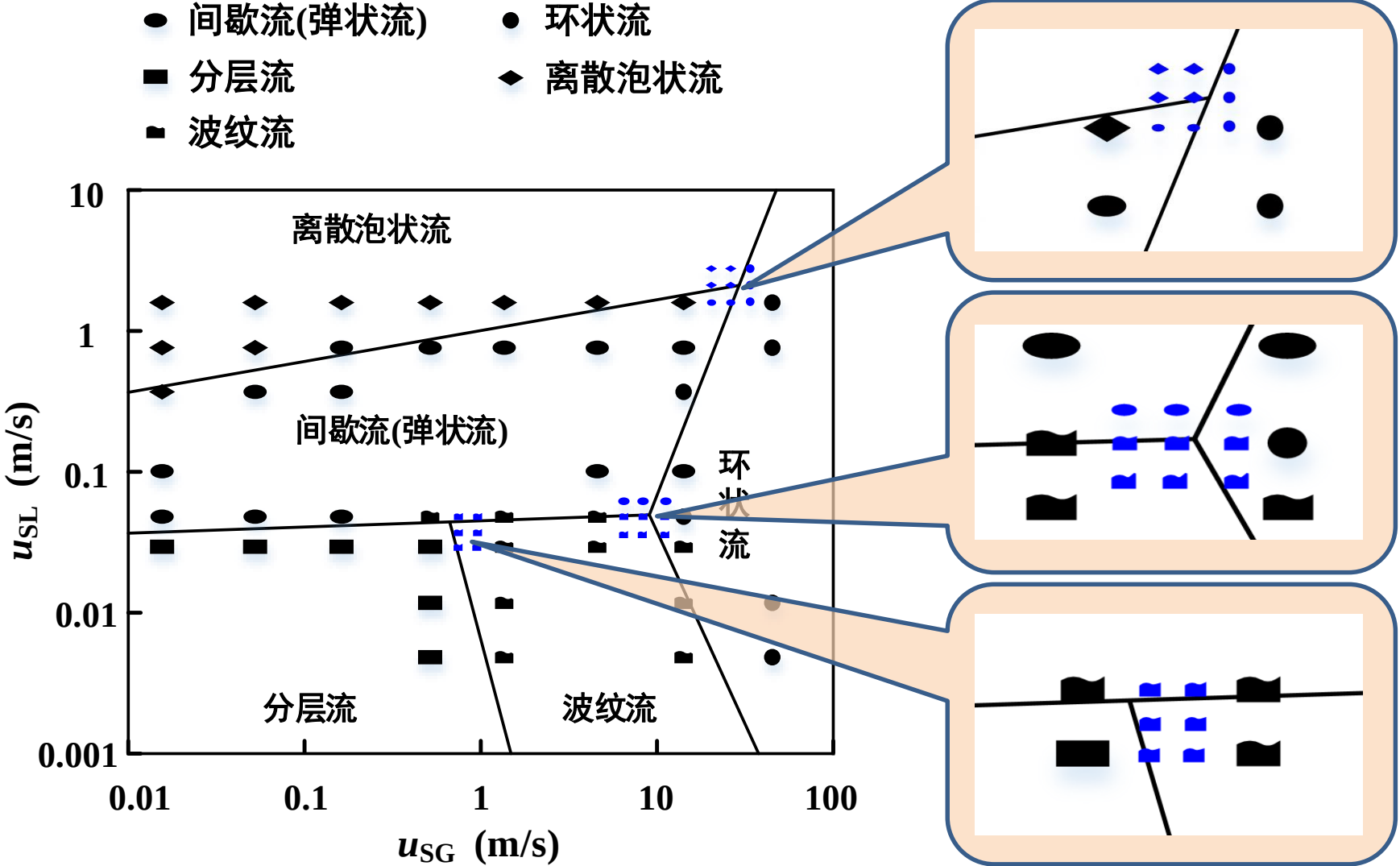
2.3 水平管内R141b流型可视化研究

➤ 流型可视化实验结果



2.3 水平管内R141b流型可视化研究

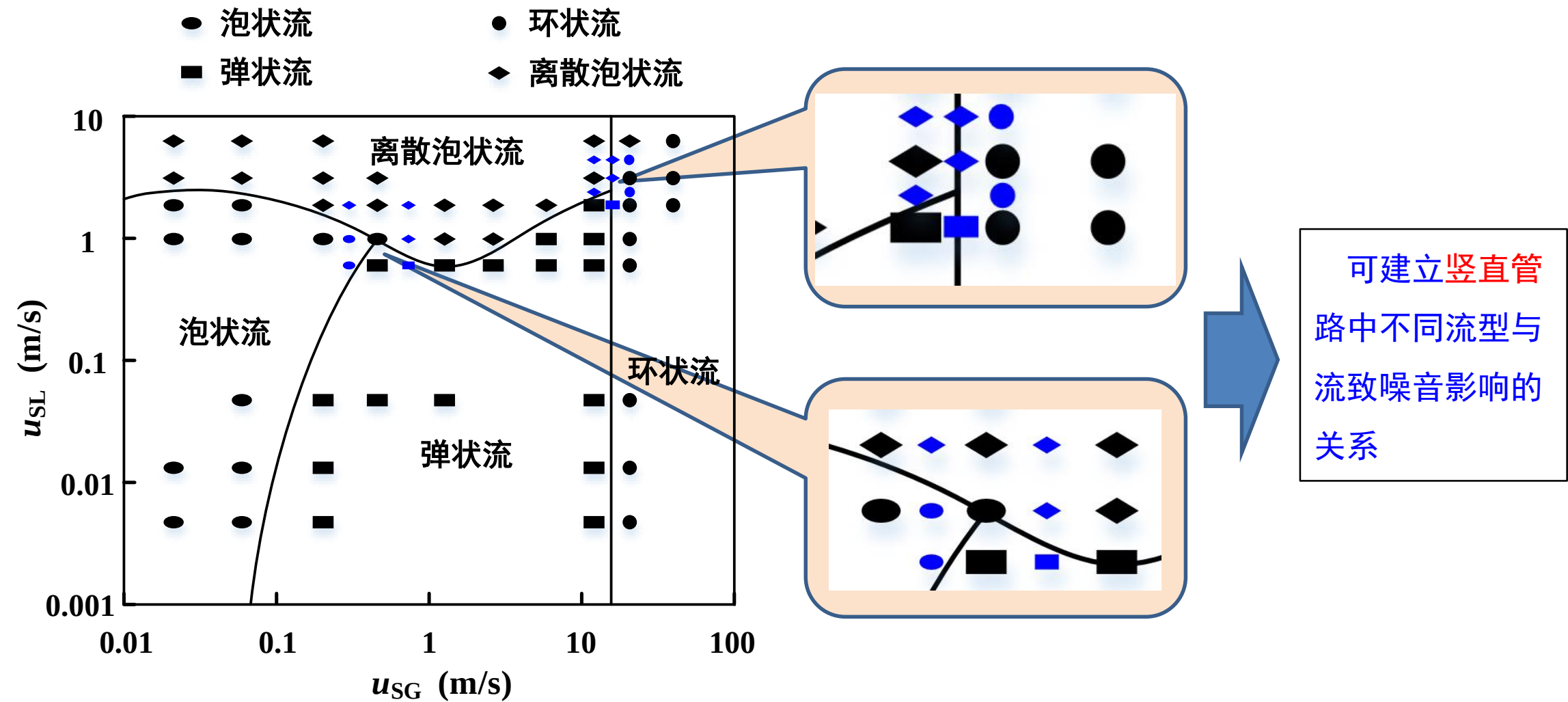
➤ 水平流型图



可建立水平管
路中不同流型与
流致噪音影响的
关系

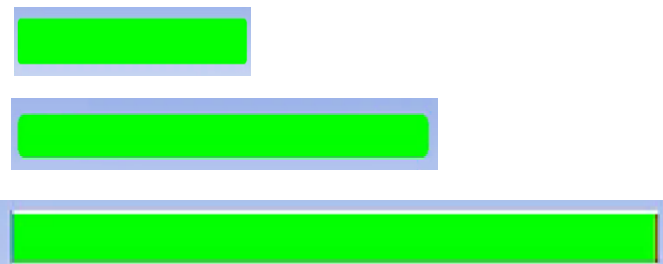
2.4 竖直管内R141b流型可视化研究

➤ 竖直流型图



3.1 流型模拟方法

计算模型

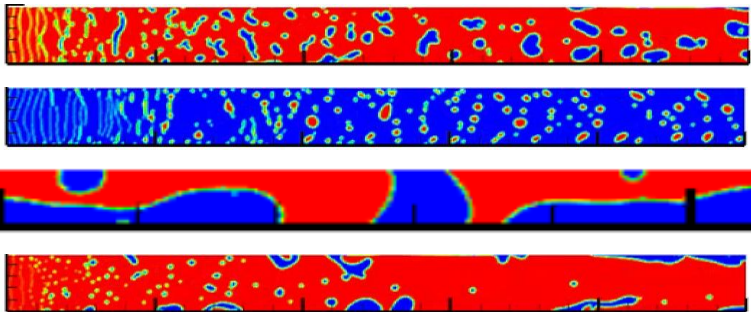


- 长直圆管
- $D=4.8\text{mm}$, $L=50\text{mm}/100\text{mm}/150\text{mm}$
- 最小网格尺寸为0.1，边界层区域绘有边界层网格

模拟设置

- 冷媒选取R141b和R32;
- 入口取为速度入口, 根据要求输入气液两相总流速和空泡系数;
- 管径保持4.8mm;
- 入口压力选取为冷媒的工作压力;
- 采用VOF模型
- 湍流模型选取 $k-\epsilon$ 模型;
- 长直圆管水平安装

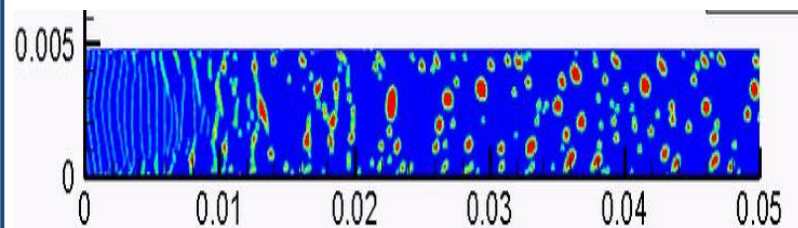
对应的模拟流型



- 弹状流
- 泡状流
- 层状流
- 环状流

3.2 R141b流型模拟结果

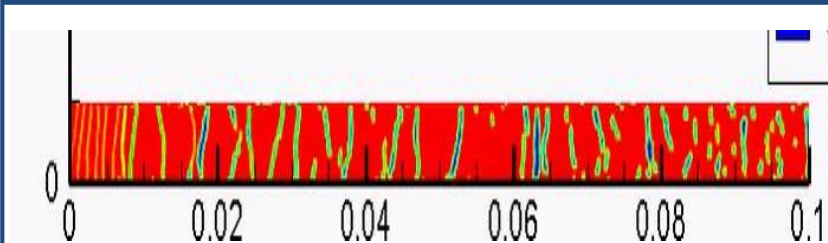
泡状流型



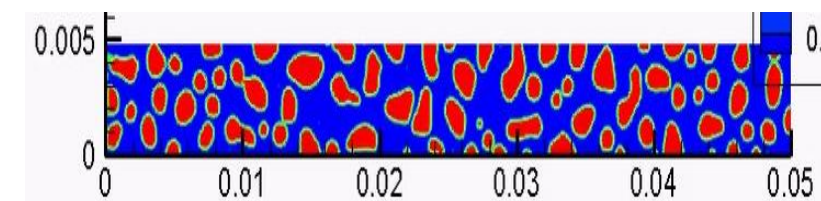
环状流型



弹状流型



层状流型



➤ 红色为气相，蓝色为液相

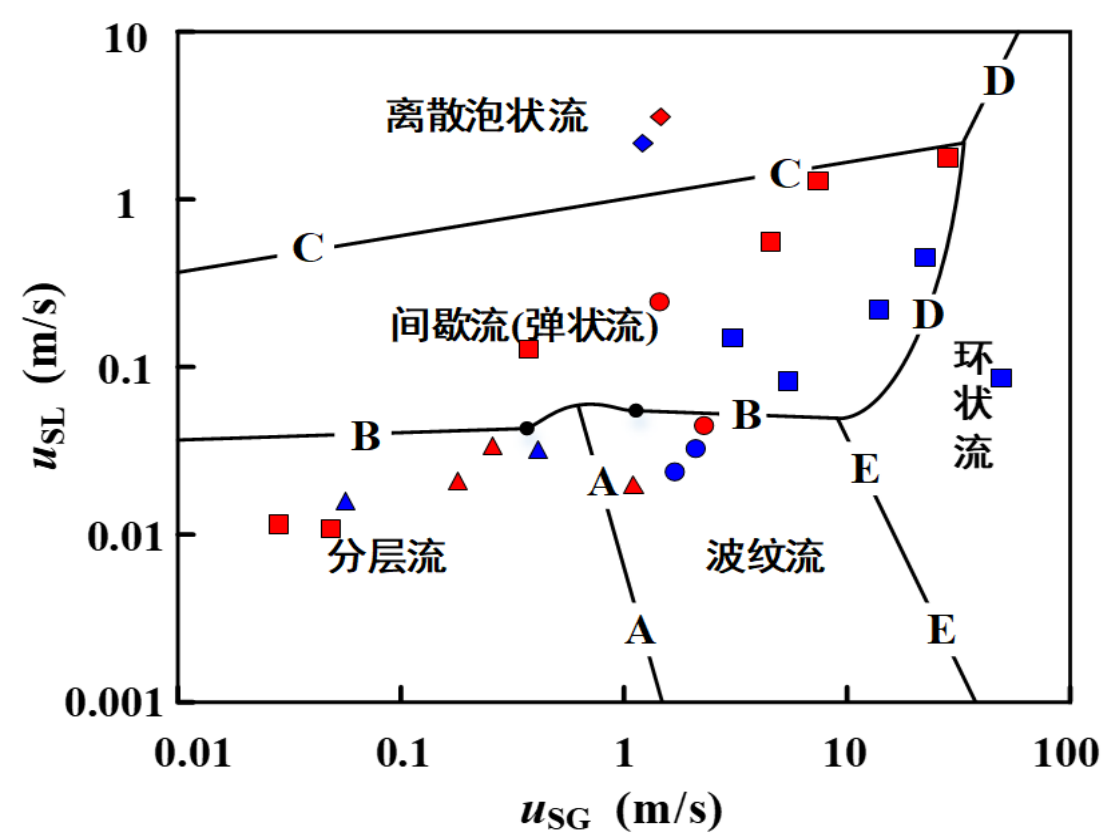
3.2 R141b流型模拟结果

工况点	总质量流量/(g/s)	干度	气相折算速度 (m/s)	液相折算速度 (m/s)	实验测得流型	模拟测得流型
1	45	0.002	1.5564363	1.9955153	泡状流	泡状流
2	2.6	0.1	4.4963714	0.1039747	弹状流	弹状流
3	0.6	0.2	2.0752483	0.0213282	波纹流	环状流
4	0.26	0.01	0.0449637	0.0114372	层状流	层状流

工况点	总质量流量/(g/s)	干度	气相折算速度 (m/s)	液相折算速度 (m/s)	实验测得流型	模拟测得流型
5	18	0.15	46.693088	0.6798349	环状流	弹状流
6	10	0.15	25.940604	0.377686	弹状流	弹状流
7	5	0.15	12.970302	0.188843	弹状流	弹状流
8	1	0.15	2.5940604	0.0377686	波纹流	环状流

R141b在各入口工况点下的流型模拟结果与实验结果基本吻合

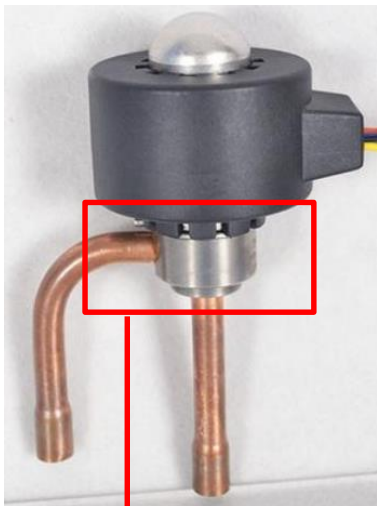
3.3 R32流型与R141b流型对比



基于R141b流型实验和仿真结果，并通过分析R32与R141b的差异性，可得到大致准确的R32流型图，并建立不同R32流型与流致噪音影响的关系

- | R141b | R32 |
|-------|-------|
| ▲ 层状流 | ▲ 层状流 |
| ■ 弹状流 | ■ 弹状流 |
| ● 环状流 | ● 环状流 |
| ◆ 泡状流 | ◆ 泡状流 |

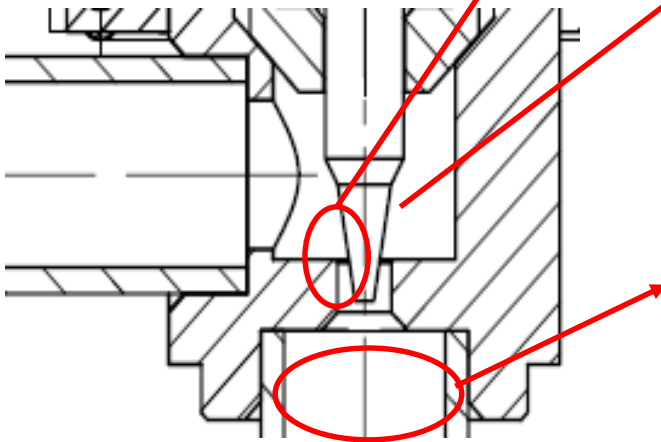
4.1 电子膨胀阀流动噪音问题



噪音问题1：冷媒节流过程中空化相变剧烈，空泡群振荡可能辐射噪声；

噪音问题2：高速冷媒冲击阀针引起自激振荡，可能引起噪声；

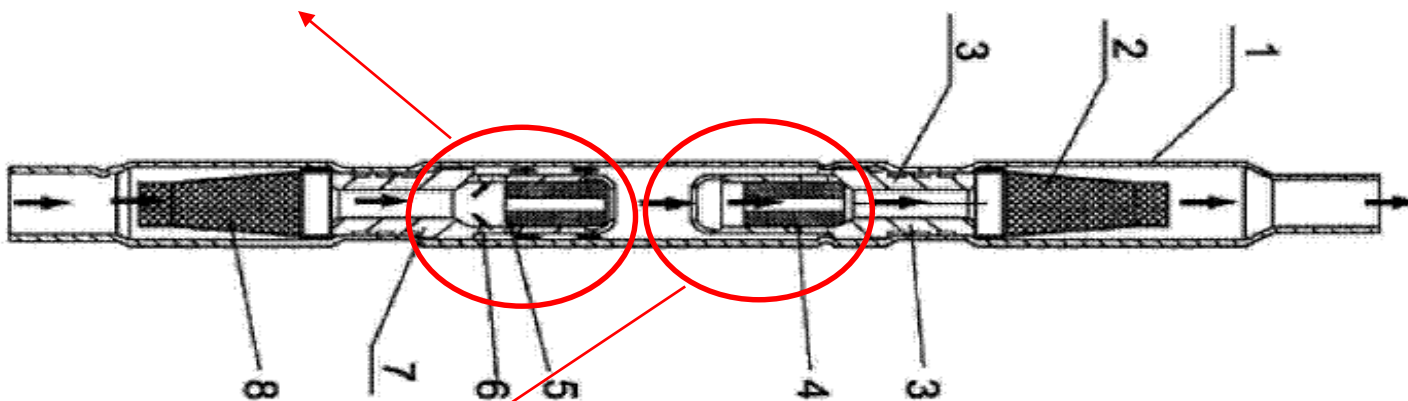
噪音问题3：流道突缩突扩引起复杂涡流变化，易产生湍流噪音。



4.2 双向流通单向节流阀的流动噪音问题

- **空调器中采用的另一种形式节流阀**：单向节流过程中，阀芯运动至一侧端面，冷媒只能从阀芯的细小通道流动；反向流通过程中，阀芯运动至另一侧端面，冷媒能够从阀芯外侧的通流孔流出。
- **噪音问题**：1) 节流过程的冷媒流动噪音；2) 阀芯运动的金属撞击噪音。

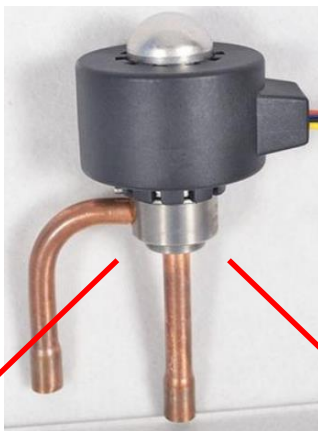
问题1：节流孔直径小，节流孔前后空间突扩，导致压降变化剧烈



问题2：阀芯与阀座撞击时会产生撞击噪音，且阀芯轴向窜动和径向转动时会产生金属摩擦噪音。

5.1 抑制冷媒流致噪音的难点是掌握流致噪音的发声机理

节流过程的流致噪音机理研究



- 需明确冷媒相变引起的空化噪音机理
 - 需明确冷媒冲击阀针引起的自持振荡发声机理
- ↓
- 如何降低空化程度 ➤ 如何避免流体共振

分流过程的流致噪音机理研究

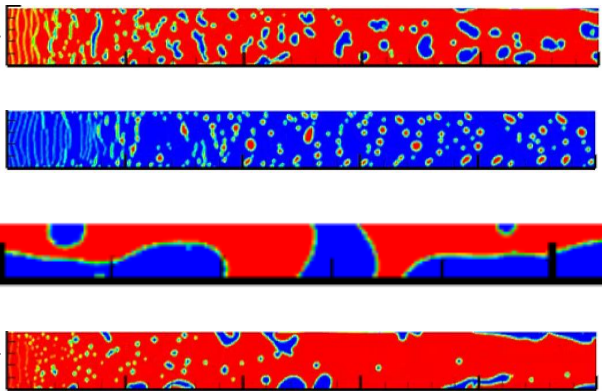


- 需明确流型对分流噪音的影响规律
 - 需明确降噪与分流均匀性的相互关系
- ↓
- 如何重整流型 ➤ 如何在保证分流均匀性的前提下降噪

5.2 交大具备冷媒流致噪音机理及实验研究的相关基础

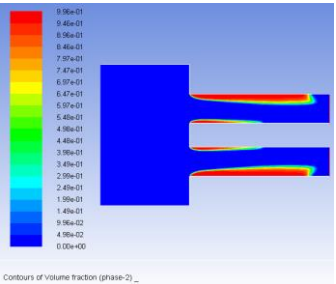
理论研究

流型研究

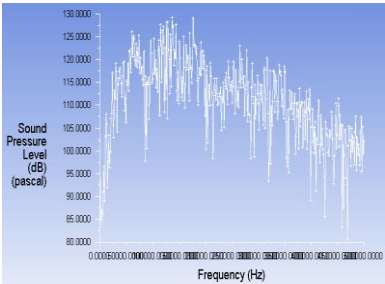


弹状流
泡状流
层状流
环状流

噪音仿真

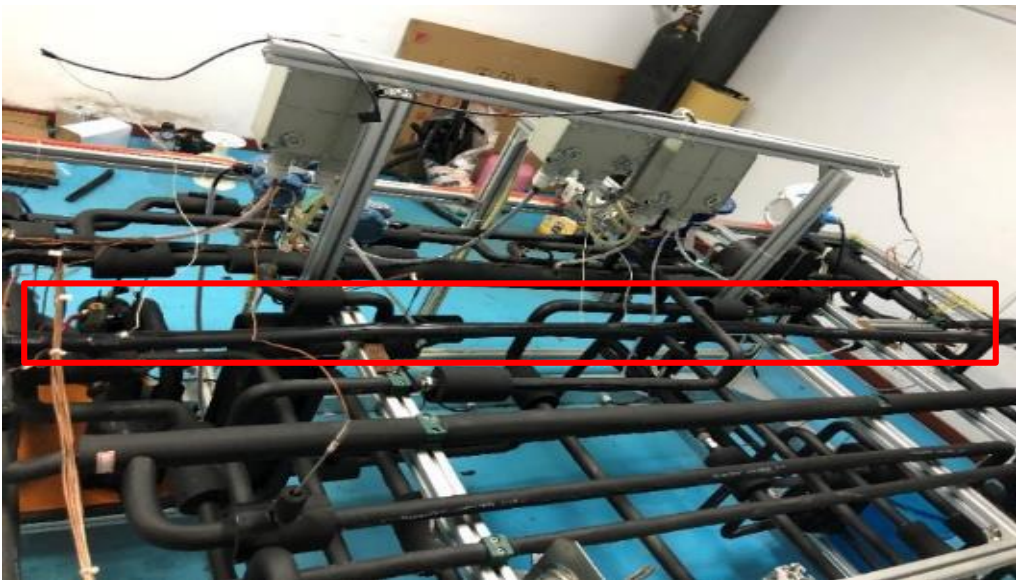


空化传质仿真



噪音频谱仿真

实验研究



- 已有R32/R410A冷媒实验台，通过适当改造可复现流致噪音，获得冷媒流动参数、流型与噪音的关系

基于已开发的噪音仿真方法和拟搭建的冷媒流动噪音测试台，可揭示流致噪音机理并开发降噪优化方案

谢谢!



Shanghai JiaoTong University