课程编号 180045000169

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **得分** | **教师签名** | **批改日期** |
|  |  |  |

**深 圳 大 学 实 验 报 告**

**课程名称：­ 大学物理实验（二）**

**实验名称： 基于COMSOL卡门涡街的研究**

**学 院： 计算机与软件学院**

**指导教师： 王光辉**

**报告人： 郭昌华 组号： 19**

**学号 2022190025 实验地点**

**实验时间： 年 月 日**

**提交时间： 年 月 日**

|  |
| --- |
| 1. 实验目的 2. 用Comsol软件模拟卡门涡街（圆柱绕流） 3. 学习Comsol模拟仿真软件 4. 了解卡门涡街的基础知识 5. 模拟流体经过圆柱后的卡门涡街尾迹 6. 绘制不同时刻的升力系数和曳力系数 7. 分析卡门涡街频率和圆柱体受力 |
| 1. 实验原理  * 卡门涡街: 在某些条件下，本来均匀而稳定的流动绕过物体时，会在物体的两侧周期性地脱落转向相反的旋涡，这些旋涡在物体的后部形成有规则的交错排列状态。第一个系统地解释这个现象的人是著名的空气动力学家冯·卡门（Von Karman），并且因为旋涡有规则地交错排列在尾迹两侧，就像街道两边的路灯一样，所以取名为卡门涡街。   物体后部是否会出现卡门涡街主要取决于流动的雷诺数，只有当雷诺数处于特定范围时，才会出现规则的卡门涡街。这个雷诺数很低，为40~150。我们日常看到的流动雷诺数都远大于这个数值，但仍然能看到摆动的尾迹，通常也称为卡门涡街。但这种高雷诺数的情况属于湍流的卡门涡街，已经不是冯·卡门早期研究的那种流动了。  http://image109.360doc.com/DownloadImg/2021/12/1209/235755310_6_20211212093923396  在流体动力学中，卡门涡街 (或 冯·卡门涡街)是一种重复的旋涡模式，由一个被称作旋涡脱落的过程引起，该过程是钝体周围的流体流动产生非定常分离的原因之一。悬挂在空中的电话或电力线会发出「嗡鸣」，汽车天线在特定风速下会振动，卫星图片上岛群后面出现的尾迹（如图 1 所示）……这些现象都是由卡门涡街造成的。    图 2 卫星拍摄的群岛后出现的卡门涡街  卡门涡街有多种数学建模方式，比如求解应用 k-epsilon, SST, k-omega, 雷诺应力和大涡模拟 (LES) 湍流模型的完整 Navier-Stokes 方程，或数值求解 Ginzburg-Landau 方程等动力学方程。   * Comsol:一个集成了有限元法、求解器和建模工具的仿真软件，可以仿真多物理场耦合，为处理各类工程或物理提供了统一的操作界面和工作流程。   COMSOL的模块包括：  1、基本模块（包括3个组件）   1. 模型开发器：用于创建、求解仿真模型，分析结果 2. App 开发器：用于制作特定功能的App 3. 模型管理器：用于管理仿真模型和辅助数据   2、附加模块  电磁学、结构力学、声学、流体流动、传热和化工模块。  本实验研究“流过圆柱体后的卡门涡街”，因为不考虑垂直方向的流动，可以选“流体流动”模块的二维层流，求解器可选通用求解器。   * 模拟原理: 本实验研究流体流经圆柱体后的卡门涡街现象，不考虑沿圆柱体方向的流动，因此可在圆柱体的横切面内进行仿真。建模时选择二维层流，让圆柱位于一个长方形内的左端（长方形为边界，边界条件需已知），流体从左端流入，右端流出（如下图所示）。     图 3卡门涡街建模思路   * 采用的参数值为：流速𝒖=𝟏𝒎/𝒔，流体流过区域的宽度𝑾=𝟐.𝟐𝒎，高度𝑯=𝟎.𝟒𝟏𝒎，圆柱半径𝑹=𝟎.𝟎𝟓𝒎，圆柱中心与左侧和下边界的距离均为𝟎.𝟐𝒎。流体密度𝝆=𝟏𝒌𝒈/𝒎^𝟑，动力粘度𝝁=𝟏𝟎^(−𝟑) 𝑷𝒂∙𝒔。（注：设置中使圆柱体略偏离中心，以触发涡流。） * 纳维-斯托克斯方程、质量守恒方程：实验中圆柱是固体，流体假设是不可压缩的。需要考虑的耦合为流体-固体耦合，求解的方程是：   外力  上述方程比较复杂，但COMSOL自带的通用求解器可以直接求解。  由于我们更关注流经圆柱体附近的气流，故在入口处设置流体的初速度沿高度方向呈抛物线分布，如右图所示。实验中还使用一个阶跃函数逐渐提升流入速度。    图 4 抛物线速度分布  流体的速度随时间在变化，所以求解时选择“瞬态”。圆柱体在流体中的受力可投影为水平方向的曳力（𝑭\_𝑫）和竖直方向的升力（𝑭\_𝑳），如图所示。    图 5 受力示意图  升力和曳力也随时间变化。因此，相对求解升力和曳力本身，无量纲的升力系数和曳力系数：  ，  其中是设置的平均速度，是流体密度， 是圆柱在流速方向的投影面积（圆柱厚度与直径的乘积）。   * 雷诺数: 运动物体上的惯性力与黏性力之比卡门涡街形成条件.雷诺数是用来表征流体流动情况的无量纲数。利用雷诺数可区分流体的流动是层流或湍流，也可用来确定物体在流体中流动所受到的阻力。   其中v、ρ、μ分别为流体的流速、密度、黏性系数，L为特征长度。例如流体流过圆形管道，则L为管道的当量直径。   * 卡门涡街形成条件：   涡振原理：(伯努利方程)  在流体中安置阻流体，在雷诺数在某一范围内。会出现不稳定的边界层分离，阻流体下游的两侧搓出两道非对称交错排列的旋涡.  尾涡脱落的一侧速度增大，压强就减小，尾涡交替脱落，导致圆柱背流面压力交替减小，形成涡振   * 有限元方法: 空间和时间相关问题的物理定律我们通常使用通常用偏微分方程（PDE）描述。 对大多数实际问题，这些偏微分方程没有解析解。不过，通常可以把实际模型离散化，用数值的方法进行求解。有限元法（FEM）是工程和数学建模中常用的数值求解偏微分方程的方法，被广泛应用于结构力学、流体力学、热传导和电磁学等领域。有限元法最早是在20世纪40年代被德裔美国数学家 Richard Courant 首次提出，它的基本思想是把一个大系统细分为更小、 更简单的部分， 称为有限元。在每个有限元上都可以得到一个简单方程。这样，就把原来的偏微分方程变成一个更大的方程组，这个方程组可以模拟整个问题。最后，FEM通过变分法最小化误差函数得到方程的解。 |
| 1. 实验仪器：   Comsol软件 |
| 四、实验内容：   1. 模型向导   1.1 打开COMSOL软件，在新建窗口中单击模型向导；  1.2 在模型向导窗口中，单击二维；  1.3 在选择物理场树中双击流体流动>单向流>层流；  1.4 单击添加，然后单击下方的研究；  1.5 在选择研究中选择一般研究>瞬态；  1.6 单击底部的完成   1. 参数定义   2.1 在左侧模型开发器窗口的全局定义节点下，单击参数1；  2.2 在参数的设置窗口中，定位到参数栏；  2.3 在表中输入以下设置：     1. 几何建模   3.1 在上方的几何工具栏中单击矩形；  3.2 在矩形的设置窗口中，定位到大小和性质栏；  3.3 在宽度文本框输入W，在高度文本框输入H；  3.4 单击构建选定对象；  3.5 在上方的几何工具栏中单击圆；  3.6 在圆的设置窗口中，定位到大小和性质栏；  3.7 在位置栏的x文本框输入0.2，在y文本框输入0.2；  3.8 定位到大小和形状栏，在半径文本框中输入R；  3.9 单击构建选定对象。  3.10 在上方的几何工具栏中单击布尔操作和分割，然后选择差集；  3.11 在差集的要添加的对象框里添加r1（点击右侧矩形即可添加）；  3.12 在差集的要减去的对象下方激活选择（点击激活选择按钮即可）  3.13 在差集的要减去的对象框里添加c1（点击右侧的圆即可添加）；  3.14 在几何工具栏中单击全部构建； 此时在右侧的图形界面形成了我们需要的流体流动区域，建模完成。     1. 材料设置   4.1 在模型开发器窗口的组件(comp1)节点下，右键单击材料并选择空材料；  4.2 在材料的设置窗口中，定位到材料属性明细栏；  4.3 在表中输入一下设置：     1. 层流设置   5.1 在模型开发器窗口的组件1(comp1)节点下，右键单击层流(spf) 并选择入口；  5.2 在入口的设置窗口中，边界选择栏里选择边界1（单击右侧图 形窗口里矩形的左边界即可）；  5.3 在入口的设置窗口中，定位到速度栏，在𝑼𝟎文本框中输入 6\*U\_mean\*y\*(H-y)/H^2\*step1(t[1/s])，这相当于对入射气流定 义一个抛物线分布，并用前面的step函数提升速度；  5.4 再次右键单击层流选择出口；  5.5 在出口的设置窗口中，边界选择栏里选择边界4（单击右侧图 形窗口里矩形的右边界即可）；   1. 划分网格   6.1 在模型开发器窗口的组件1(comp1)节点下，单击网格1；  6.2 在网格的设置窗口中，定位到物理场控制网格栏；  6.3 从单元大小列表中选择较细化；  6.4 单击全部构建；     1. 研究求解   7.1 在模型开发器窗口的研究节点下，单击步骤1: 瞬态；  7.2 在瞬态的设置窗口中，定位到研究设置栏；  7.3 在输出时间文本框中输入range(0,0.2,3.4) range(3.5,0.02,7)； 前3.4秒内时间步长为0.2秒，第3.5秒至第7秒的步长0.02秒；  7.4 在上面的研究工具栏中单击显示默认求解器；  7.5 在模型开发器窗口中展开解1(sol1)节点，然后单击瞬态求解 器1；  7.6 在瞬态求解器的设置窗口中，展开时间步进栏；  7.7 从求解器采用的步长列表中选择中级；  7.8 在研究工具栏中单击计算。计算时间在5分钟左右。 |
| 五、数据记录：  组号： 19 ；姓名 郭昌华  1.通过comsol导出的速度动画和压力动画如下：    速度分布图    压力分布图  2.同时，将comsol中计算得到的升力系数与曳力系数导入到origin中,以下仅展示部分数据:    Origin部分数据展示 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1. **数据处理**   1.首先根据升力系数峰值估算振动频率和升力大小：  根据导入到origin中的升力系数随时间变化的数据,绘制出升力系数随时间变化的点线图, 选取升力系数6个峰值或谷值（选3.5s之后的点）,如下图所示:  升力系数随时间变化图  由图可知，升力系数的大小在前0.5s几乎为0，0.5s到3.5s升力系数大幅不断变大然后减小，同时升力系数的峰值和谷值的绝对值都在变大，而且峰值和谷值的绝对值近似相等，3.5s到5.0s时，升力系数的峰值和谷值的绝对值缓慢增大，直到5.0s时都取到最大约0.89，此后5.0s到7.0s升力系数在峰值和谷值的绝对值的最大值之间波动。  选取点如下表所示:   |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | t(s) | 4.565 | 4.735 | 4.91 | 5.08 | 5.25 | 5.425 | | CL | 0.88904 | 0.91909 | 0.89746 | 0.92632 | 0.90257 | 0.92725 |   每两个相邻峰（或谷）之间的时间差近似为一个周期，根据选取的六个峰值坐标,用逐差法计算振动周期:  振动频率为:  假设圆柱厚度为1m，根据升力系数定义，计算升力的峰值:  其中,,仿真模拟时我们设置了,由假设,圆柱在流速方向的投影面积  以CL=0.88904时为例,计算升力峰值:  依次计算其余升力峰值,得到的结果如下表:   |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | t(s) | 4.565 | 4.735 | 4.91 | 5.08 | 5.25 | 5.425 | | CL | 0.88904 | 0.91909 | 0.89746 | 0.92632 | 0.90257 | 0.92725 | | FL | 44.452 | 45.9545 | 44.873 | 46.316 | 45.1285 | 46.3625 |   升力峰值结果计算表  从而升力峰值：  得出圆柱体在竖直方向受卡门涡街影响的升力峰值约为，振动频率约为。  2. 根据曳力系数的稳定值估算曳力大小：  作出曳力系数随时间变化图如下:  曳力系数随时间变化图  由图可知，曳力系数在0.5s前就从0急剧变大至约3.1，随后在0.5s到3.5s缓慢且小幅减小再增大至约3.16，在3.51s到7.0s时，曳力系数仅有微小波动。  计算3.51s到7.0s的平均曳力系数3.16388,则曳力大小: |
| **七、结果陈述：**  1.实验中，成功使用Comsol 软件对卡门涡街进行了仿真实验，学习了如何使用COMSOL软件还通过绘制升力系数和曳力系数随时间变化图和分析圆柱体在竖直和水平方向上受到的升力和曳力，以及观察卡门涡街形成时周围的压力和速度分布图，深入了解了卡门涡街的形成机制和特性。  2.通过观察速度和压力分布图，可以看到涡街中心的速度较高，压力较低，而涡街周围的速度较低，压力较高。这种速度和压力的分布特性对于涡街的形成和维持起到了重要作用。  3．本次模拟实验中，圆柱体在竖直方向受卡门涡街影响的升力峰值约为45.514mN，振动频率约为5.848Hz。圆柱体在水平方向受卡门涡街影响的曳力经过一段时间后稳定在约158.194mN. |
| **八、实验总结与思考题**  思考题:   1. 为什么升力系数随时间振荡？这在实际中带来哪些影响？ 请举例说明。   答: 升力系数随时间振荡的原因是流体在绕过物体时形成的涡街结构的不稳定性。涡街周期性地在上下游形成并消失，导致周围流场中的升力系数发生周期性变化，从而引起时间上的振荡。  这种时间振荡对实际应用产生了重要影响。在飞行器设计中，了解升力系数的时间振荡特性对于飞行性能和稳定性至关重要。当飞行器经历涡街的影响时，升力系数的时间振荡会导致飞行器的姿态和稳定性发生变化。因此，工程师在设计过程中需要考虑并优化飞行器的结构和控制系统，以确保飞行器在涡街的影响下具有良好的飞行性能。  此外，在桥梁和建筑结构的设计中，了解升力系数的时间振荡特性对于结构的稳定性和安全性也至关重要。当风通过桥梁或建筑物时，会形成涡街结构，导致升力系数的时间振荡。这可能会对结构产生振动和应力集中，进而影响结构的稳定性和耐久性。因此，在设计过程中需要考虑并采取相应的措施，以减小升力系数的时间振荡对结构的影响  。  2、简述卡门涡街流量计的工作原理  答: 卡门涡街现象可用于测量流体的流量。卡门涡街流量计由管道和放置在管道内的卡门涡街传感器组成。卡门涡街传感器通常由金属片制成，形状类似于细长的矩形板。传感器被固定在管道内，垂直于流体流动方向。当流体通过流量计的管道时，流体与特殊设计的卡门体相互作用，形成卡门涡街结构。通过测量卡门涡街的频率与流体速度以及障碍物的正面宽度之间的关系，可以间接计算出流体的流量。具体而言，卡门涡街的频率与流体流速成正比，与障碍物的迎面宽度成反比。这种原理使得卡门涡街流量计成为一种常用的流量测量工具，广泛应用于工业和实验室环境中。通过监测卡门涡街的频率变化，可以实时监测和控制流体的流量，以满足不同应用领域的需求。即:  其中：St为斯特劳哈尔数（可通过实验确定的无量纲数） V为流体速度d为障碍物迎面的宽度  卡门涡街流量计工作时，通过传感器测定障碍物的振动频率，加上已知的斯特劳哈尔数和障碍物迎面面积就可以求出流体流速，进而通过即可求出流体流量(其中： Q为流体流量 S为管道截面积 V为流体流速) 。    卡门涡街流量计结构图 |
| 指导教师批阅意见： |
| 成绩评定：     |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | **预习**  （20分） | **操作及记录**  （40分） | 数据处理与结果陈述30分 | 思考题  10分 | **报告整体**  **印 象** | **总分** | |  |  |  |  |  |  | |

原始数据记录表：

实验名称: 基于COMSOL卡门涡街的研究 组号 19 姓名 郭昌华

相关参数: