

# 基于混合现实的 CFD 物理场可视化研究

齐博源, 苏 想, 冯昊龙, 李 楠

(北京工商大学, 北京 100048)

**摘要:** 计算流体力学的高保真可视化, 是虚拟设计仿真设计领域的关键技术。传统的二维和三维可视化方法在呈现复杂物理现象时存在视角和交互方面的局限, 难以满足日益复杂的仿真需求。为此, 本研究提出了一种在混合现实环境下的 CFD 结果文件可视化方法, 通过数据提取、切片、匹配及合并, 实现对标量与矢量场的高效可视化。同时设计人机交互方案, 搭建混合现实可视化场景, 发布 UWP 应用, 使其可在各种设备上广泛应用, 从而在智能制造环境中实现跨设备的技术应用。

**关键词:** CFD; 混合现实; 物理场可视化; 人机交互; 数据后处理

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## 1 引言

在当前的工程与科学研究领域中, 计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是流体的数值模拟方法的核心。通过在计算机上模拟流体流动, CFD 技术为工程设计、系统优化及物理现象的分析提供了极其宝贵的视角。尽管传统的二维和三维可视化技术为展示 CFD 仿真结果奠定了基础<sup>[1]</sup>, 但这些方法在表达数据的直观性、多维性, 以及在实际环境中的应用方面受限于屏幕沉浸感并不强烈。并且由于深度信息的缺乏, 桌面平台在观察此类数据时, 需要用户进行多次的视角变换才能得到有效的观察结果<sup>[2]</sup>。且常规的鼠标和键盘交互方式不符合人机工程学, 缺乏自然性, 从而影响用户体验。

混合现实的概念最早由美国华盛顿大学的研究人员在 1994 年提出, 随着时间的推移, 这一概念逐渐从理论走向实践。初期的 MR 应用主要集中在科学研究和军事训练领域, 但随着智能手机和平板电脑等移动设备的普

及, 以及图形处理能力的增强, MR 技术开始迅速扩展到商业和工业领域当中。混合现实技术结合了虚拟现实和现实世界, 是一种可以将虚拟物体与真实环境中元素进行交互和融合的沉浸式技术<sup>[3]</sup>。它能够对真实存在的环境空间进行空间扫描, 将虚拟环境融合到扫描出的真实空间中, 混合现实技术的交互方式允许用户在真实环境中沉浸式地与三维模型互动, 非常适合智能制造场景中的复杂数据和操作需求<sup>[4-5]</sup>。在智能制造领域, MR 技术被用来优化设计、培训、生产、检测和维修等多个环节。目前已有研究搭建了渔业装置实验室, 实现了装配实验及操作培训, 用于学生课堂的教学和现代渔业装备的研究与开发学习。同时将实验从传统的实验室解放出来, 拓展至各大研究所, 进行开放性研究。但该实验室是在一个纯虚拟环境搭建的, 并没有充分与现实环境相结合, 缺乏真实感, 并在导入模型时因精度问题导致网格过于陈杂, 增加了混合现实设备的计算负荷<sup>[6]</sup>。还有研究将有

限元分析应用于MR场景中，通过自制文件转换器，打通各平台局限性，实现变形效果的可视化。该研究模拟并预测产品在实际工况下的性能，确保了智能制造场景中产品设计的可靠性并降低了成本与开发周期，但自制文件流程过于繁琐，工作量大且要进行多次格式转换<sup>[7]</sup>。本文通过研究混合现实环境下CFD的可视化技术，探索适用于智能制造的新型可视化路径<sup>[8-9]</sup>，以面对CFD仿真结果文件与混合现实平台格式不兼容的挑战<sup>[10-11]</sup>。

本文从CFD结果文件着手，通过数据后处理，针对混合现实平台要求进行多次文件格式转换，设计了一种适用于标量场与矢量场可视化的数据处理方法。Microsoft公司推出的HoloLens是一款典型的基于混合现实技术的设备，该设备拥有定制的全息处理单元，利用它的渲染能力，基于MR开发平台进行人机交互的方案设计。最终实现了基于混合现实场景的CFD结果的可视化效果。这不仅为CFD结果的可视化提供了新的参考思路，也为智能制造领

域中的复杂数据处理和展示提供了创新解决方案。

## 2 CFD结果可视化数据处理流程

为了实现混合现实环境下CFD结果可视化，首先需要基于MR开发平台实现混合现实场景中的布局，基于混合现实工具实现手势，语音交互，空间映射等交互功能。还需要准备的是可视化模型，本文在构建好模型文件后，对模型进行流体动力学的仿真，生成流场结果文件。接着对该文件进行特征提取与数据后处理，针对MR开发平台要求，设计搭建一条数据文件的数据形态变化路径，加快文件转换效率，并确保文件与平台的兼容性。最终导入模型后，在MR开发平台中编写着色器，进行仿真数据与模型数据的融合，模型的顶点颜色会展示在场景中，实现颜色映射。最后再将UWP应用发布到HoloLens上，观察到清晰的CFD结果可视化效果。整体过程实现框架如图1所示。

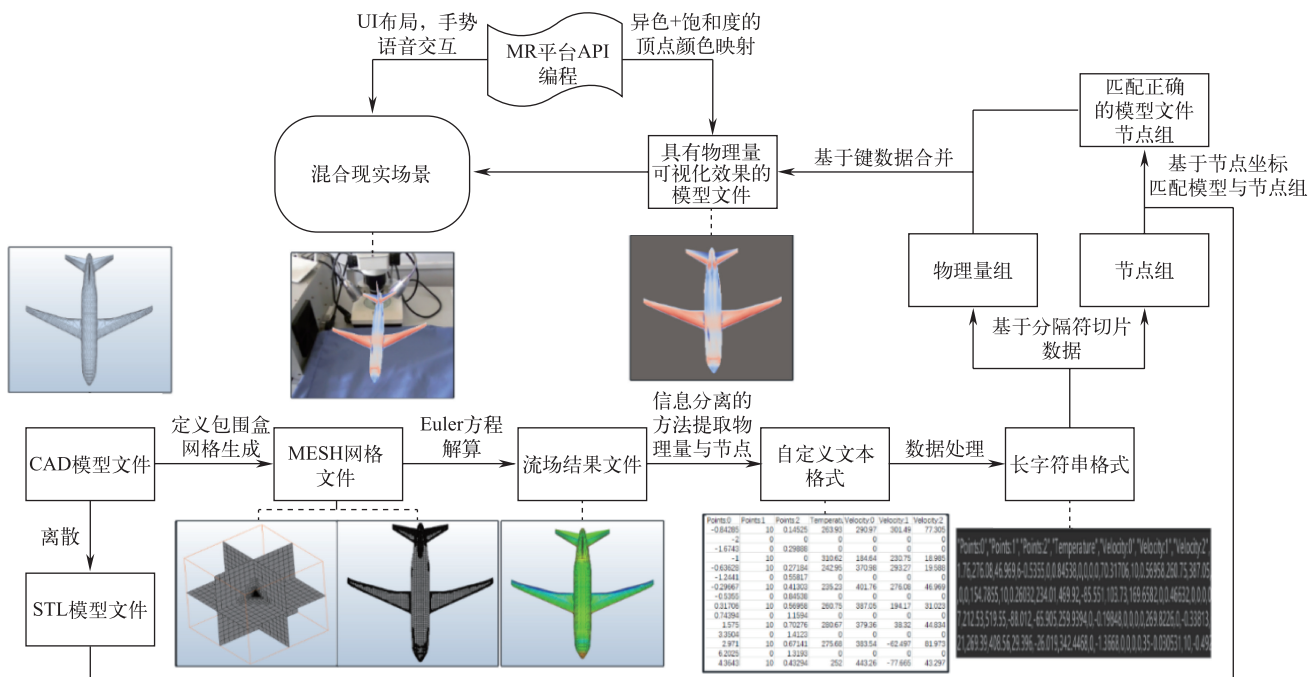


图1 CFD结果可视化数据变化过程实现框架

### 2.1 数据提取与数据切片

在CFD仿真完成后，需要对所需要的物理量进行特征提取。本研究借助混合现实环境所需要的开发平台可以编写和处理文本数据的特性，通过自定义文本格式进行数据提取。提取过程使用CFD软件内置的后处理工具来访问并筛选模拟数据。本阶段主要关注于筛选出对研

究至关重要的物理量，如速度场、压力分布及温度场等，筛选后的数据包括网格点的坐标值及相应的物理属性，将数据以表格化显示，这些数据集随后被保存在自定义的文本中。文本中每行对应于表格中的一行，也就是一个数据的记录。表现为网格点信息、X坐标、Y坐标、Z坐标、温度值和压力的集合，见表1。

表 1 CFD 结果提取

| 网格点信息       | X 坐标    | Y 坐标     | Z 坐标       | 温度值 /℃ | 压力 /N   |
|-------------|---------|----------|------------|--------|---------|
| Points0     | -112.69 | -117.01  | -115.72    | 288.15 | 101 330 |
| Points1     | 121.34  | -117.01  | -115.72    | 288.15 | 101 320 |
| Points1000  | 48.206  | -102.38  | 89.059     | 289.37 | 101 300 |
| Points5000  | 8.895 3 | 0.924 69 | -0.076 892 | 262.94 | 74 069  |
| Points10000 | 3.638 6 | 2.753 1  | 0.151 66   | 280.95 | 92 664  |
| .....       | .....   | .....    | .....      | .....  | .....   |

处理结果文件时，为了从中提取网格坐标值及其相应的物理量，设计采用了一种基于分隔符的分割策略。整个文本数据被加载成一个字符串数组，每个数组元素包含原始数据文件的一行文本。利用分隔符对策略进行了细化，执行初步分割操作将单个长字符串依据换行符 \n 为分割标志分割为数个较小的子字符串，每个子字符串代表了一个网格点的完整记录。

在数据处理的第二阶段中，进一步对每行数据进行细分，将其划分为两个独立的数组：一个用于存储网格点的坐标值，另一个用于存储相应的物理量。具体操作为，利用逗号（或其他预定的分隔符）作为分割标志，从每一行中提取网格点的坐标（XYZ）和相应的物理参数。每组提取出的坐标值随后被封装成一个 Vector3 类型的变量，以便于在后续处理中进行三维空间的计算和操作。

2.2 数据匹配与合并

在构建三维物体的过程中，确立顶点间的连接顺序是至关重要的。此过程通常涉及顶点索引的定义，以便

于正确地赋予给 Mesh 组件构建三角面片，从而实现物体的几何构建。针对混合现实设备性能限制，为了简化模型的构建过程，避免直接在 MR 平台中重构 Mesh 的复杂性。设计采用一种基于节点坐标的数据匹配方法，预先将已知模型导入至 MR 平台，并提取该模型的顶点坐标，将其存储于一个初始为空的数组中。通过遍历已预分割的坐标点组和物理量组数据，引入了基于差值的判定机制，确认坐标之间的差异是否处于可接受的精度范围内。

当坐标点满足规定的精度要求时，相应坐标点的物理量数据会通过顶点 ID 赋值到预导入的模型顶点上，从而完成数据的匹配与合并。该方法有效地避免了在 MR 开发平台中重新构建 Mesh 的需求，显著降低了操作的复杂性，并提升了数据处理的效率。此外，该方法通过精确的数据融合，确保了模型的几何和物理属性的一致性，为后续的可视化和分析提供了坚实的基础。整体流程如图 2 所示。

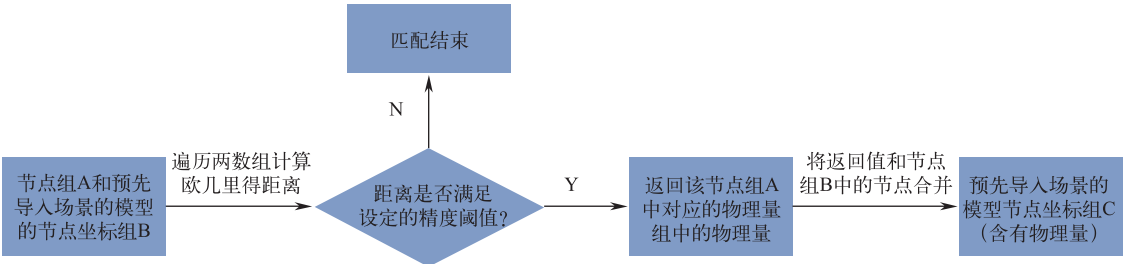


图 2 数据匹配与合并流程图

3 可视化实验

本研究涉及的实验环境见表 2。

3.1 数据可视化

对于标量场，设计按照模型上网格点的物理值进行

颜色编码，以便观察到整个物理场的情况，如图 4 所示，编码方式采用异色 + 饱和度的编码方式。以压力  $F$  为例，如图 3 所示，将压力的大小分为多个区间，每个区间对应 1 种颜色，在每个区间中根据压力的大小改变颜色的饱和度。

表 2 实验环境

| 实验环境 | 1                   | 2                         | 3                           | 4     |
|------|---------------------|---------------------------|-----------------------------|-------|
| 软件   | CFD 仿真              | CFD 数据后处理                 | 可视化渲染                       | MR 开发 |
| 模型   | 机翼 (单元数 80, 数据点 42) | 飞机 (单元数 8 132, 数据点 4 070) | 圆柱 (单元数 80 949, 数据点 14 343) |       |
| 硬件   | AR<br>Hololens2     |                           |                             |       |



图 3 压力颜色映射编码示意图

对于反应大小程度的颜色饱和度  $S$ ，首先计算物理量中的最大压力 ( $F_{MAX}$ ) 和最小压力 ( $F_{MIN}$ )，通过计算当前点压力 ( $F$ ) 在整个压力区间的位置从而确定渲染时所采用的颜色饱和度  $S$ 。在这种方法下，以压力为例，压力越大则颜色越深，呈红色。压力越小则颜色越浅，呈蓝色，公式表示为

$$S = \frac{F - F_{MIN}}{F_{MAX} - F_{MIN}} \quad (1)$$

对于矢量场，设计将后处理软件绘制的流线进行视觉场景的导出，通过建模工具将流线变成管状，并转换成网格实体，使流线最终以模型的形式导入 MR 平台，实现矢量场的可视化效果。

### 3.2 搭建混合现实可视化场景

本研究搭建的可视化场景是利用混合现实开发工具进行设计的，通过预制体的设计实现了凝视，手势点击，

语音等操作。当发生响应时，场景会检测到事件，进行处理来实现对应的反应。整个菜单分为切片、切块、整体和退出四个功能，与 PC 端的按钮点击事件原理是一致的，通过手势进行触碰选择不同的可视化方式。并可以通过手势对模型进行旋转、拖动，实现全方面的展示与学习。

将通过后处理的数据与模型导入至场景，模型此时会为白色，根据本文前面所述，通过编写脚本，当发生手势点击事件时，就可以展示其不同物理场的可视化效果，以绕流圆柱为例，整个场景如图 4 所示。

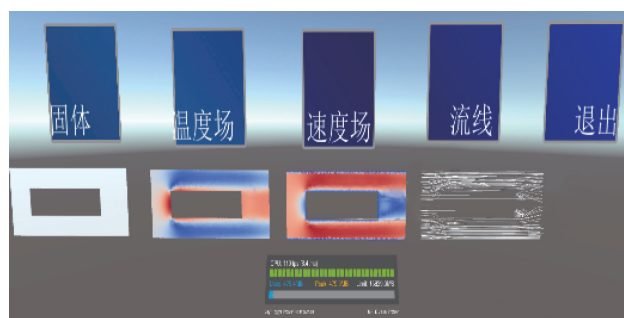


图 4 可视化功能展示示意图

### 3.3 可视化验证测试

混合现实环境下可视化以飞机与机翼为例进行测试，正确佩戴 HoloLens 通过手势点击操作 UI 界面，相对应的虚拟模型便会加载和显示。

以温度场可视化为例，对模型的物理量进行颜色的映射，显示出温度场在不同角度的可视化效果。通过场景切换，可以实现流线在各个部位的可视化效果，如图 5 所示。

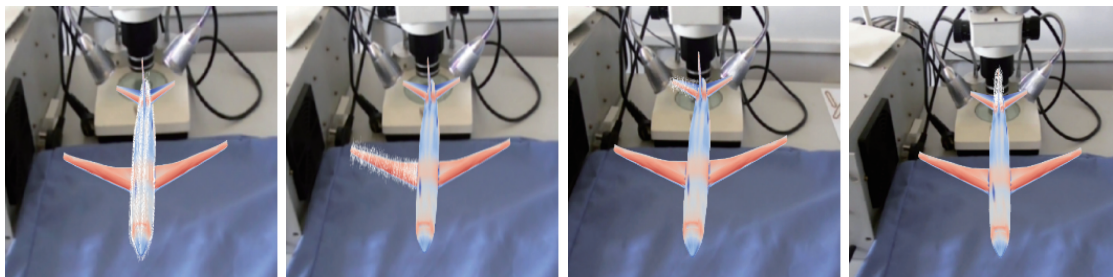


图 5 飞机可视化示意图

为验证混合现实环境下可视化场景的测试效果与交互方式的可用性，本文进行了主观量表实验。共召集了

15 名同学，平均年龄 24.3 岁，其中男性 10 名，女性 5 名，并在进行测试前事先进行了简单的 CFD 可视化理论知识

和混合现实设备手势操作训练。具体测试内容为同学佩戴设备依次体验场景所有功能，并与电脑端同样模型的可视化效果进行对比，最后对满意程度进行投票。整体测试结果见表3，测试结果表明，混合现实环境下的可视化效果相对于电脑端更具沉浸感与交互性，认可程度更高。对于流畅性来说因为混合现实设备自身算力问题，加载场景与响应按键的时间较长，但当模型加载完成后，场景运行较流畅。然而有同学反应在长时间使用 HoloLens 后，感觉眼部有些眩晕和疲劳。这主要是由于 HoloLens 的设计问题，重量过度集中在眼部上方所导致的。

表3 测试结果

| 满意程度 | 混合设备 | PC 端 |
|------|------|------|
| 沉浸感  | 15   | 0    |
| 交互性  | 15   | 0    |
| 流畅度  | 6    | 9    |
| 舒适性  | 5    | 10   |

## 4 结束语

本文使用 MR 开发平台对 CFD 仿真结果进行了可视化处理，并进行了混合现实场景的搭建。重点在于按照 MR 平台要求和头戴混合现实设备计算能力不足的问题，将仿真计算放在了 PC 端，设计了一套数据文件的形态转换方案，对 CFD 仿真结果进行了一系列的数据后处理，依次进行了数据的提取，切片，匹配和合并。从庞大的流场结果文件中提取出网格点的相应信息，以自定义的文本格式进行储存。通过 MR 平台进行编程实现数据的切片，并将处理后的数据与导入 MR 平台的模型进行数据匹配，再通过判定条件进行数据的合并从而在混合现实场景下得到具有物理量的模型。该方案实现了 CFD 结果文件从仿真软件到 MR 开发平台的转换，并通过顶点着色器对数据进行颜色编码，设定饱和度，达到理想的可视化效果。本文通过一组飞机和机翼模型的流场仿真数据搭建场景验证了该方案，实现了混合现实环境下的不同可视化效果。同时进行了满意度测试，本文搭建的混合现实场景沉浸感强，克服了传统计算机屏幕视角的局限性。该场景交互性高，能够满足用户的基本手势和语音交互需求，适用于虚拟教学的演示，实现了在混合现实环境下展示

CFD 物理场可视化结果。克服了仿真结果文件与混合现实平台格式不兼容的问题，为混合现实环境下 CFD 结果可视化提供了新的实现思路。

## 参考文献

- [1] 李信凯, 王帅, 封卫兵. 基于 VTK 的 CFD 可视化研究 [J]. 计算机技术与发展, 2015, 25 (10): 29-33.
- [2] 吴杰, 黄春生, 范绪箕. 基于 OpenGL 的 CFD 设计平台中的流场可视化技术及其实现 [J]. 工程图学学报, 2004 (2): 65-72.
- [3] 周忠, 周颐, 肖江剑. 虚拟现实增强技术综述 [J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45 (2): 157-180.
- [4] 黄进, 韩冬奇, 陈毅能, 等. 混合现实中的人机交互综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28 (6): 869-880.
- [5] 苑鑫, 王海坤, 赵旷世, 等. 基于增强现实技术的燃气轮机装配指导系统研究与实现 [J]. 热能动力工程, 2022, 37 (S1): 48-53.
- [6] 陈李萍, 朱全, 陈华. 混合现实技术在现代鱿鱼钓机中的应用 [J]. 机械工程师, 2024 (7): 5-8, 14.
- [7] 徐劲力, 周铮. 基于 HoloLens 的有限元分析变形结果可视化研究 [J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (1): 109-117.
- [8] KHAN D, ULLAH S, RABBI I. Factors affecting the design and tracking of ARToolKit markers[J]. Computer Standards & Interfaces, 2015, 41 (5): 56-66.
- [9] SOLMAZ S, GERVEN T V. Integration of interactive CFD simulations with AR and VR for educational use in CRE[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2020 (48): 2011-2016.
- [10] 周铮. 混合现实环境下的汽车关键零部件 FEA 结果可视化研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [11] YAN J Y, KENSEK K, KONIS K, et al. CFD visualization in a virtual reality environment using building information modeling tools[J]. Buildings, 2020, 10 (12): 229.

收稿日期: 2024-06-25