

气动数据可视化系统的设计与实现

钟佳伶, 黎茂锋, 黄俊, 刘志勤, 陈立伟

(西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 针对气动数据高维、量大、来源广泛的特点以及使用单机工具进行数据分析功能单一的问题, 在已有飞行器气动数据的基础上, 设计并实现了基于 MVVM 模式的气动数据可视化分析系统; 该系统基于气动试验、仿真、处理与分析的领域类数据语义化, 通过 MVVM 框架的动态模板建立了灵活、快速的气动数据分组及聚合机制, 并同时适配气动力、热、压的可视化分析需求, 动态生成通用的交互与可视化 UI 组件, 通过对系统进行不同参数的选取及条件值设置来进行气动数据的分析、处理与结果的可视化, 从而提高研究人员的工作效率; 实际应用表明, 该系统界面友好, 性能稳定, 能简单快捷地通过动态生成的数据筛选条件进行分析可视化的操作, 满足研究人员的需求。

关键词: 气动数据; MVVM 模式; 动态交互机制; web 可视化

Design and Implementation of Pneumatic Data Visualization System

Zhong Jialing, Li Maofeng, Huang Jun, Liu Zhiqin, Chen Liwei

(School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010, China)

Abstract: Aiming at the problems of high-dimensional, large-volume, wide-sourced aerodynamic data, and the single function of data analysis using a stand-alone tool, based on the existing aerodynamic data of the aircraft, a pneumatic data visualization analysis system based on the MVVM model was designed and implemented. The system is based on the semantics of domain data for aerodynamic testing, simulation, processing, and analysis. A flexible and fast aerodynamic data grouping and aggregation mechanism is established through the dynamic template of the MVVM framework, and it is also suitable for visual analysis of aerodynamics, heat, and pressure. Requirements, dynamically generate universal interaction and visualization UI components, and perform pneumatic parameter analysis, processing, and visualization of results by selecting different parameters and setting condition values for the system, thereby improving the work efficiency of researchers. The practical application shows that the system has a friendly interface and stable performance, and can be used to analyze and visualize the data filtering conditions dynamically and quickly, which meets the needs of researchers.

Keywords: aerodynamic data; MVVM pattern; dynamic interaction mechanism; web visualization

0 引言

飞行器的气动数据主要来源于计算流体力学 (CFD, computational fluid dynamics)、风洞试验及飞行试验^[1], 如何快速有效地表达试验过程中获得的数据以便为研究人员提供分析和决策支持, 是目前研究的难题之一。气动数据包含马赫数 Ma 、攻角 α 、侧滑角 β 等重要的属性信息, 同时具有数据量大、维度高、来源广泛等特点, 将多类型的气动数据集中在同一个平台上进行分析非常困难。可视化技术可以直观地呈现气动数据的变化趋势, 并提供丰富的交互方式, 以此利于研究人员揭示数据中包含的空气动力

学特性。

气动数据主要应用于飞机空气动力学仿真中, 以此根据飞机的空气动力特征数据来建立飞机的空气动力模型, 随着技术的进步及对飞机性能的高需求, 气动数据的维度越来越大, 结构也越来越复杂^[2]。传统的表格查询法已经很难满足试验任务的需求, 取而代之的是庞大复杂的数据表或者曲线形式等。Ananda 等人^[3]在低雷诺数的条件下, 将平板机翼上的升力系数 C_L , 阻力系数 C_D 和俯仰力矩系数 C_m 进行分析比较, 并利用 Matlab 工具分别可视化了在不同长宽比的有限机翼模型上的升力、阻力及法向力的变化趋势。Shields 和 Mohseni 等人^[4]在限定的雷诺数范围、锥

收稿日期: 2020-06-16; 修回日期: 2020-07-08。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61672438); 四川省教育厅研究项目 (18TD0021); 四川省军民融合研究院开发基金资助项目 (2017SCII0219、2017SCII0220); 西南科技大学研究生创新基金项目 (20ycx0030)。

作者简介: 钟佳伶 (1995-), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事计算机应用技术方向的研究。

刘志勤 (1962-), 女, 四川绵阳人, 硕士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事高性能计算、数值模拟方向的研究。

陈立伟 (1974-), 男, 重庆永川人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事信息处理、模式识别方向的研究。

通讯作者: 黎茂锋 (1977-), 男, 四川达县人, 硕士, 讲师, 主要从事气动数据库技术方向的研究。

引用格式: 钟佳伶, 黎茂锋, 黄俊, 等. 气动数据可视化系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(2): 155-160.

度比、纵横比的条件下进行风洞试验，通过脚本的编写将试验过程中获取的数据进行可视化，并根据可视化的结果图分析给出了升力系数 C_L ，阻力系数 C_D 和俯仰力矩系数 C_m 随攻角和雷诺数变化的情况。

由此可知在此之前的气动数据分析仅仅对于某一特定类型数据进行分析，所获取的异源气动数据无法集中在统一的平台上，并且分析结果的生成依赖于独立的分析工具，如 Matlab，不能很好地对多个类型的气动数据进行动态的可视化分析，使得分析结果的共享性不强，为此需要将不同类型的气动数据规范化在同一个数据库中，通过建立动态通用的用户界面 (UI, user interface) 组件对规范化后的数据进行实时的筛选分析操作，对于大数据量的实时绘制渲染 ECharts 具有非常好的交互性，气动数据具有数据量大、来源广泛等特点，因此利用 ECharts 可以较好的实现多类型气动数据的动态可视化，使得科研人员对气动数据除了数值本身之外更加直观的理解。

针对上述问题，基于 Echarts 实现了浏览器端气动数据分析图表的动态实时渲染与绘制，基于构建的动态 UI 组件实现了气动数据的实时筛选，对互联网环境下进行多类型气动数据的动态可视化进行了探索和时间，为涉及气动数据分析的工作人员提供了便利的分析平台。

1 需求分析与 MVVM 模式实现

1.1 气动数据特点与 UI 需求

气动数据主要的特点是量大，其重要来源是通过风洞试验获取，随着空气动力学研究的进步，在试验过程中产生的数据以及需要考虑的参数也随之增多^[5]，主要包括气动力、热、压三大类型，并且不同的数据类型与之对应的数据也有很大的差异。因此需要对数据进行筛选，如若使用人工筛选的方式不仅耗费大量时间，同时在效率上也得不到保障。由此可知针对数据筛选有必要建立动态通用的 UI 组件，即根据数据类型及相关参数的设定动态筛选出需要分析的气动数据。

1.2 MVVM 模式的动态机制

MVVM (model - view - viewmodel) 模式，是 WPF (windows presentation foundation) 和 Silverlight 架构师 John Gossman 与 2005 年提出的^[6]，是 MVP (model - view - presenter) 模式与 WPF 结合的应用方式时发展演变的一种新型模式框架。MVVM 框架模式结构^[7]如图 1 所示。

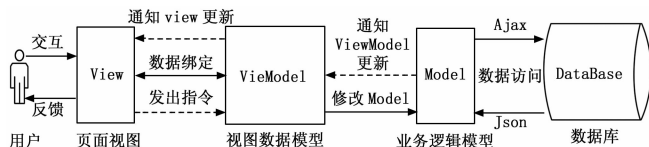


图 1 MVVM 模式框架结构图

MVVM 主要由页面视图 (View)、视图数据模型 (ViewModel)、业务逻辑模型 (Model) 三部分组成。用户

在 View 的页面视图中触发事件，在建立双向数据绑定的基础上通过向视图数据模型 ViewModel 发出指令与业务逻辑模型 Model 实现通信，双向数据绑定机制实现了页面视图模型 View 与视图数据模型 ViewModel 之间数据自动同步更新。在 MVVM 框架模式中一个视图数据模型 ViewModel 可以同时绑定在多个页面视图 View 上，以此来提高系统代码的复用性。

1.3 可视化中间件与 MVVM 框架的结合

ECharts 是一个使用 JavaScript 实现的开源可视化库，可以流畅的运行在 PC 和移动设备上，底层依赖矢量图形库，通过丰富组件和高度个性化的可视化解决方案，实现用户和数据之间的交互操作，提供直观，交互丰富的数据可视化图表^[8-9]。本文使用 ECharts 作为可视化的中间组件，利用 ECharts 丰富的人机交互可视化图表，实现单条数据或者多条数据的动态显示，结合 MVVM 框架的动态模板来实现对高维、量大的气动数据进行可视化分析的操作，由此提高气动数据分析处理的效率。

2 气动数据可视化分析

2.1 气动数据分析总体架构

整个气动数据可视化分析系统依托已有的气动数据管理系统，能够快速筛选出气动数据管理系统中需要进行可视化分析的研究对象及数据集。利用 MVVM 框架中的动态模板将接收到的 JavaScript Object Notation (JSON) 数据格式流通过 UI 组件动态筛选需要分析的数据类型，然后将筛选后的数据进行分析结果可视化的操作。系统主要包含表现层、控制访问层、业务逻辑层、数据访问层及数据库源 5 大层次结构，其总体架构如图 2 所示。

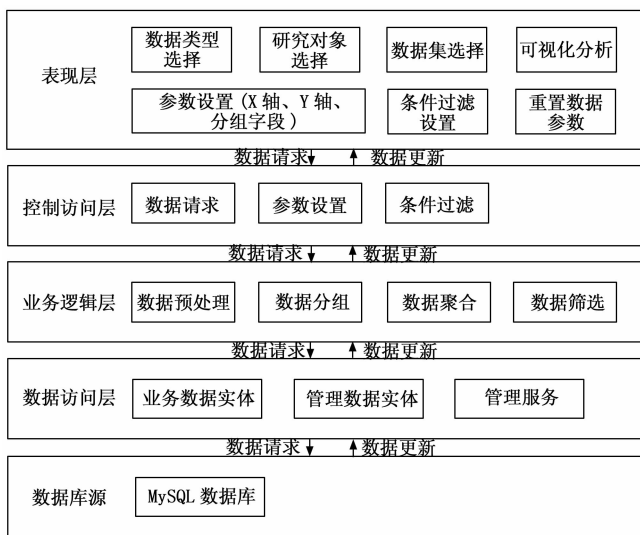


图 2 系统总体架构

2.2 气动领域常用的数据分析字段

由于气动数据类型主要包括气动压、热、力三大类型，但是每种类型下所包含的数据参数种类繁多。在本系统中

使用到的相关数据分析参数类型^[10]如下所示。

1) 气动压数据分析字段如式 (1) 所示:

$$\text{气动压: } \{Ma, C_p, P_\infty, q, P_{t2}, \gamma\} \quad (1)$$

式中, C_p 为压力系数, P_∞ 为来流静压, q 为来流动压, P_{t2} 为皮托压力, γ 为比热比, Ma 为来流马赫数。

2) 气动热数据分析字段如式 (2) 所示:

$$\text{气动热} \{q, \alpha, \rho, c, k, RC, \Delta E, E_0\} \quad (2)$$

式中, q 为热流密度, α 为薄膜电阻温度计温度系数, ρ 为热流传感器底部材料的密度, c 为热流传感器底部材料的比热容, k 为热流传感器底部材料的热传导系数, RC 为热流放大器热电模拟网络时间常数, ΔE 为薄膜电阻温度计两端电位差的平均值, E_0 薄膜电阻温度计两端初始电压。

3) 气动力数据分析字段如式 (3) 所示:

$$\{A, C_A, N, C_N, M, C_m, C_L, C_D, q_\infty, S, L_r, \alpha, L/D\} \quad (3)$$

式中, A 为轴向力, C_A 为轴向力系数, N 为法向力, C_N 为法向力系数, M 为对顶点的俯仰力矩, C_m 为对顶点的俯仰力矩系数, C_L 为升力系数, C_D 为阻力系数, q_∞ 为自由来流动压, S 为参考面积, L_r 为参考长度, α 为攻角, L/D 为升阻比。

2.3 可视化分析

在气动数据的可视化分析过程中, 作为因变量 (y 轴) 的分析字段有且仅有一个能使其发生变化的自变量 (x 轴) 分析字段。系统定义了可视化分析的 4 个模块: 气动数据类型选择、参数设置、条件过滤设置以及是否执行分析操作, 具体的分析过程如图 3 所示。

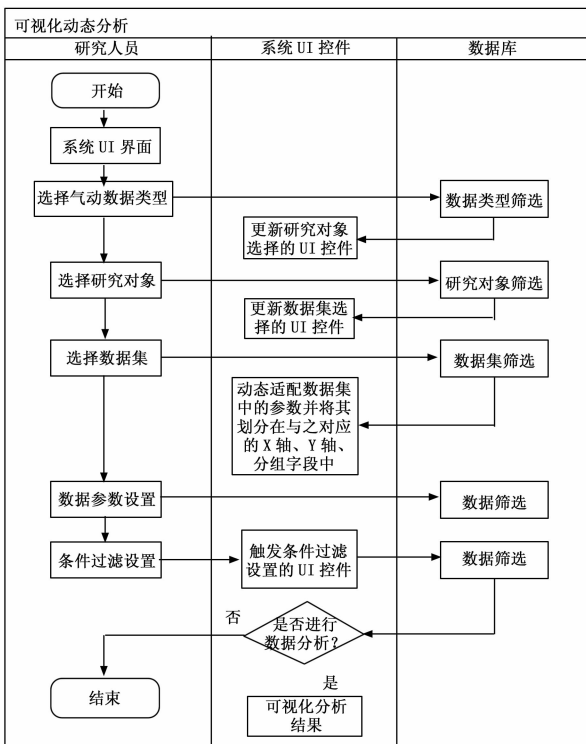


图 3 可视化动态分析泳道图

1) 气动数据集选择: 首先, 需要将异构的气动数据语义化在同一个数据库中, 在用户进行数据分析之前需要对系统中收集到的数据类型进行筛选, 包括气动压、气动热、气动力三大类。其次, 选择需要进行数据分析的研究对象, 包括模型、原型两类。最后, 选择进行分析的数据集。

2) 参数设置: 由于气动数据的数据量很庞大, 进行参数设置是为了过滤掉分析过程中不需要的数据, 系统形成了界面维度选择、过滤等控件对比较数据字段进行筛选, 这样有利于提高对气动数据的分析和处理效率。参数条件的设置随着数据类型的不同而发生变化。

3) 条件过滤设置: 经过参数设置完成部分数据的筛选后仍会存在很多与分析无关的数据, 因此设置条件过滤参数, 基于 MVVM 模式的动态框架实现页面最小化刷新, 将与之相关的数据从数据库中读取出来, 实现了对气动数据的二次筛选, 以此得到更符合需求、更准确的数据集来进行数据可视化分析的操作。

4) 数据可视化分析结果载入: Echarts 配合视觉映射组件 visualMap 提供的丰富的视觉效果, 将不同类型的数数据映射到不同的视觉呈现面^[9]。用户完成数据集选择及参数设置后, 可以通过“数据分析”按钮进行气动数据可视化分析的操作, 反之, 用户也可以通过“重置数据”按钮重新设定数据分析的相关参数。

根据图 3 中的分析泳道图及分析步骤, 生成气动数据分析动态筛选 UI 组件, 得到可视化分析整体 UI 布局界面如图 4 所示。

2.4 可视化组件动态适配

为了更加快速地进行不同类型气动数据的筛选, 使得实时更新出满足分析需求的数据, 系统根据分析维度、数据类型等条件对可视化的 UI 组件进行动态适配, 在人机交互展示界面中, 使用气动学专业术语与数据集的英文命名一一匹配, 也便于研究人员能更加迅速的定位所需参数。系统采用 MVVM 框架动态模板来实现页面视图 View 中最小化的刷新, 使节点随着与之相关变量的改变而更新, 由于在气动数据绑定时, 填充的数据量较大, 对文档对象模型 (DOM, document object model) 的操作频繁, 在保证系统性能的情况下, 还需要考虑到数据筛选的效率。快速、准确、完整地实现气动数据分析相关参数的事件绑定, 如可视化分析中 x 轴需要对马赫数 Ma 、攻角 α 、侧滑角 β 、测力点 $point$ 等参数进行 DOM 事件的绑定, 预先的参数绑定操作不仅能够缩短数据的动态筛选时间, 还能过滤掉不需要的数据来提高分析及处理效率, 以此来实现数据的局部更新只需要更新相关 DOM 就能将 DOM 节点和对应的数据进行映射处理, 核心代码如下所示:

```
function Directive(name, el, vm, expression) {
    this.name = name; // 定义指令的名称
    this.els = els; // 定义指令对应的 DOM 元素, 对应数据集中的参数
```

气动数据多维分析可视化平台

选择数据集

(一) 气动数据类型选择

气动力 气动热 气动压

(二) 研究对象选择

全选 LV模型 RV原型

(三) 数据集选择

<input type="checkbox"/>	name	type	dataResource
<input type="checkbox"/>	XX飞机气动力特性	气动力	高超声速风洞
<input checked="" type="checkbox"/>	XX飞机气动力特性	气动力	高超声速风洞
<input checked="" type="checkbox"/>	XX飞机模型气动力特性	气动力	炮风洞
<input type="checkbox"/>	XX飞机模型气动力特性	气动力	激波风洞
<input type="checkbox"/>	XX飞机模型气动力特性	气动力	暂冲式风洞

参数设置

*X轴: *Y轴:
 *分组字段:

条件过滤设置

马赫数: 滚转角: 侧滑角:
 油气比: 动压: FAS:
 雷诺数: 偏航角1: 偏航角2:
 偏航角3: 偏航角4:

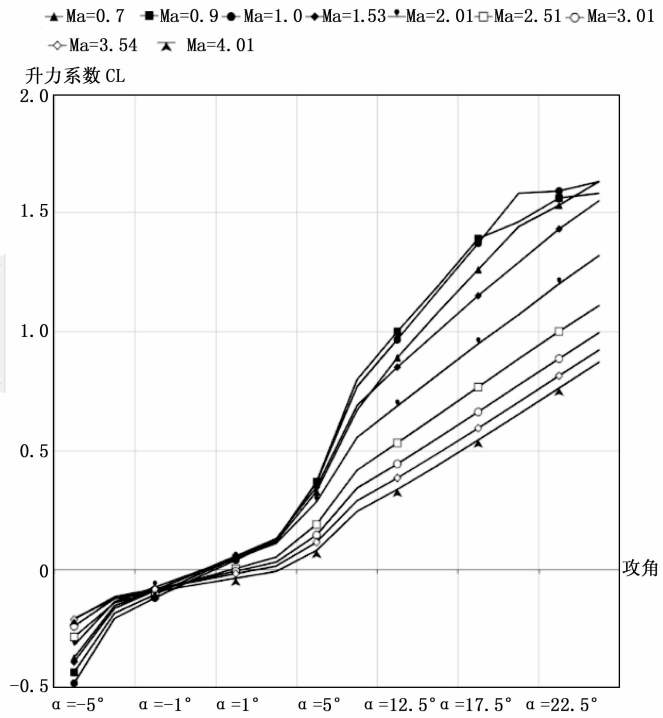


图 4 可视化分析整体 UI 布局界面

```
this.vm = vm; // 定义指令所属的实例
this.expression = expression; // 定义指令的表达式
this.attr = 'nodeValue'; // 代表对应树节点的值
this.dir_bind(); // 调用数据动态绑定函数,使数据集与相关参数进行绑定
```

```
}
//指令绑定函数
Directive.prototype.dir_bind = function () {
if(! this.expression) return;
//根据指令表达式实行实例化过程,并且在执行该指令对应的update 函数
this.dir_instantiate = new Instantiate(
this.vm,
this.expression,
this.dir_update, // 回调函数,进行 DOM 的更新操作
);
this.update();
};
// 指令更新函数,当数据发生改变时,执行该方法来更新树节点的值
```

```
Directive.prototype.dir_update = function () {
this.update();
console.log('update'+{ this.expression});
};
```

```
Directive.prototype.dir_update = function () {
this.update();
console.log('update'+{ this.expression});
};
```

本系统同时适配气动力、热、压的可视化分析,根据需求形成动态通用的交互与可视化呈现的 UI 组件,通过对

UI 组件的设定进行数据提取,以此建立气动数据多维可视化分析系统,通过不同参数的选取及条件值设置来辅助研究人员对气动数据的分析和处理。

利用 UI 组件对数据进行提取主要包括 3 个步骤: 1) 在选中了数据类型后,系统已经根据气动数据类型进行了初步筛选,将与之无关的数据采取过滤操作; 2) 选择数据集是对是进行二次筛选,即将需要分析的数据集保留; 3) 参数设置与条件过滤设置均是根据筛选出的数据集信息动态展示数据集中含有的相关参数,与之无关的参数则被隐藏,以此减少研究人员人工筛选的工作量。系统未进行数据动态筛选操作的参数设置如图 5 所示。

1) 气动力数据通过数据的动态筛选机制后自动适配出与之对应的 UI 界面如图 6 所示。

2) 气动热数据通过数据的动态筛选机制后自动适配出与之对应的 UI 界面如图 7 所示。

3) 气动压数据通过数据的动态筛选机制后自动适配出与之对应的 UI 界面如图 8 所示。

3 案例分析结果可视化

3.1 实验环境

所有实验均在普通 PC 上进行,硬件环境:处理器为 Intel (R) Core (TM) i5-3230M@2.6 GHz,内存为 8 G。软件环境: Windows 10 专业版, IntelliJ IDEA 2019。

3.2 分析结果

本文选取的实验数据来自于李素循书中^[10]及 UIUC 数

参数设置

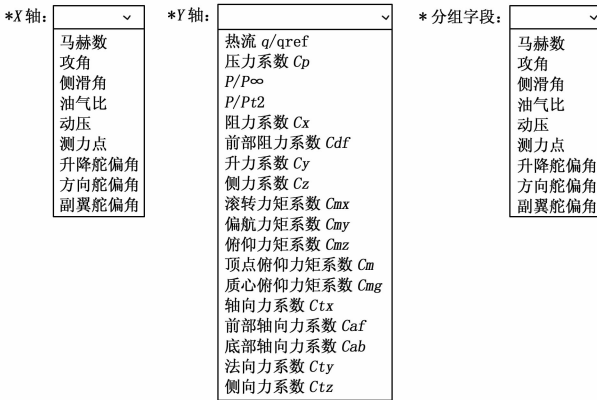


图 5 数据分析动态 UI 组件参数设置 (部分内容)

参数设置

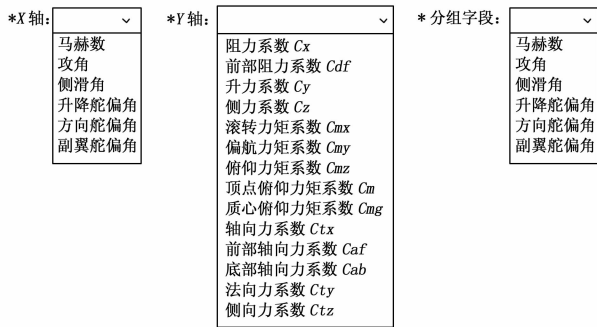


图 6 气动力数据动态筛选参数设置 (部分内容)

参数设置

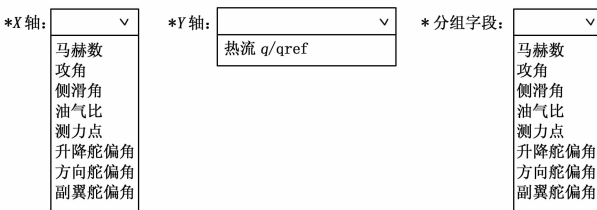


图 7 气动热数据动态筛选参数设置 (部分内容)

参数设置

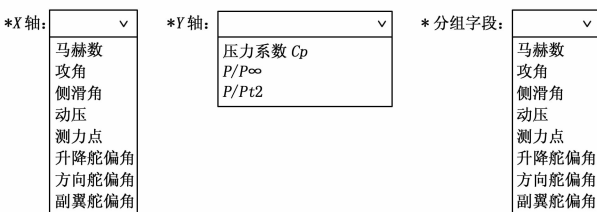


图 8 气动压数据动态筛选参数设置 (部分内容)

刻画的数据轨迹更加丰富, 能更加容易的得到可视化分析结果。具体数据集分布情况如表 1 所示。

表 1 实验数据集

类型	数量/条
气动压	839
气动热	856
气动力	140

1) 对于气动力数据的可视化分析: 动态选定在不同马赫数的情况下升力系数 C_L 随着攻角的变化趋势 (X 轴设定为攻角, Y 轴设定为升力系数 C_L 取值), 分析结果如图 9 所示。

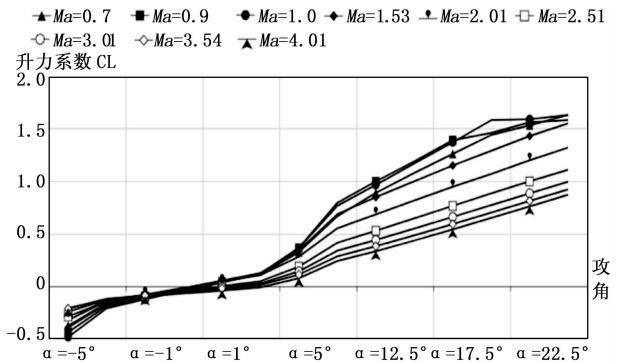


图 9 气动力数据分析结果

图 9 展示了一定的攻角范围内, 即 $\alpha \in [-5^\circ, 25^\circ]$, 在侧滑角与滚转角的实验条件下, 不同升力系数随着攻角的变化。在攻角小于 0° 时, 所有马赫数下的升力系数都为负数。在攻角为 0° 时, 所有马赫数下的升力系数都接近于 0。当攻角大于 10° 时, 随着马赫数的增大, 升力 C_L 系数的斜率趋于恒定。由图可知气动力中的升力系数 C_L 在相同攻角条件下具有良好的—致性。升力系数 C_L 在此数据集中当攻角 $\alpha = 25^\circ$, 马赫数 $Ma = 1.1$ 时取得最大值, 即 $C_{L_{max}} = 1.73$ 。

2) 对于气动热数据的可视化分析: 动态设置参数筛选气动热数据, 分析其在不同攻角的情况下热流 q/q_{ref} 随着测力点的变化趋势 (X 轴设定为测力点, Y 轴设定为热流 q/q_{ref} 取值), 分析结果如图 10 所示。

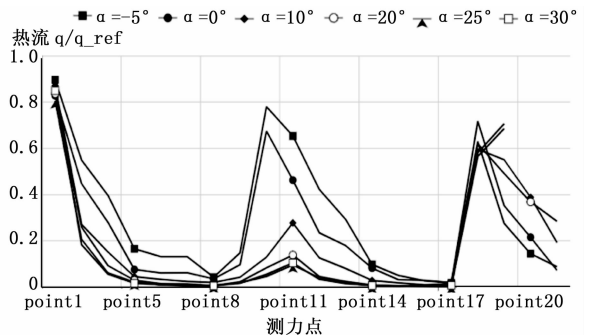


图 10 气动热数据分析结果

数据库^[1]关于气动数据分析的数据集。这些数据集提供了气动力、热、压的样本数据, 共计 1 835 条。这些数据集涉及到 3 种类型的气动数据, 使得进行气动数据可视化分析时

图 10 展示了一定的测力点范围内, 即 $point_e [1, 20]$, 在马赫数 $Ma=8.04$, 雷诺数 $Re=1.13 \times 10^7$ 的流场条件下, 不同热流随着测力点的变化。由图可知气动热流分布规律在相同攻角条件下具有良好的一致性。 q/q_{ref} 在此数据集中当攻角 $\alpha=-5^\circ$, 测力点为 $point1$ 时取得最大值, 即 $q/q_{ref_{max}}=0.896$ 。

3) 对于气动压数据的可视化分析: 动态设置参数筛选气动压数据, 分析其在不同攻角的情况下压力系数 C_p 随着测力点的变化趋势 (X 轴设定为测力点, Y 轴设定为压力系数 C_p 取值), 分析结果如图 11 所示。

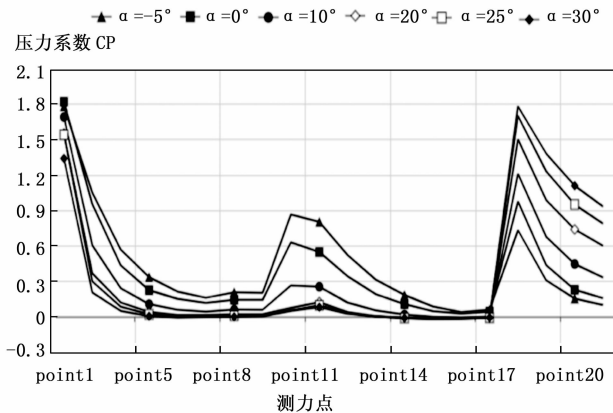


图 11 气动压数据分析结果

图 11 展示了一定的测力点范围内, 即 $point_e [1, 20]$, 在马赫数 $Ma=7.79$, 雷诺数 $Re=1.04 \times 10^7$ 的情况下, 不同压力系数 C_p 随着测力点的变化。有图可知气动压分布规律在气流与模型的夹角 α 相同的条件下具有良好的一致性。压力系数 C_p 在此数据集中当 $\alpha=0^\circ$, 测力点为 $point1$ 时取得最大值, 即 $C_{p_{max}}=1.82$ 。

通过本系统生成的可视化结果, 可以根据研究人员的需求查看单条数据或对比多条数据的变化趋势, 系统通过动态 UI 组件筛选数据的机制对多类型的气动数据进行实时的可视化分析和处理, 对于空气动力学的研究有一定的应用价值, 可以为相关的研究人员提供分析和决策支持, 对飞行器空气动力模型的建立具有重要的指导意义。

4 结束语

本文针对传统气动数据分析方法存在的问题, 利用 MVVM 模式的动态模板和 ECharts 可视化库在浏览器端构建了动态的可视化 UI 组件, 通过气动数据类型选择、数据集选择、参数设置和过滤条件设置实现了多类型气动数据的实时筛选及可视化, 最后在此基础上构建了集气动力、热、压三大气动数据类型为一体的气动数据可视化分析平台。验证结果表明, 提出的可视化方法可以在浏览器端模拟气动数据的变化过程, 并利用 ECharts 技术良好的兼容性

在多种浏览器上取得良好的可视化效果和用户体验, 提出的方法在跨平台、免插件、界面友好等方面较传统的气动数据可视化工具具有明显的优势。研究人员仅需要设置可视化所需的参数条件就可在浏览器端实现多类型气动数据的可视化绘制, 具有灵活、低耗、快速的优点。结合 ECharts 丰富的人机交互功能, 可以直观的反映单条数据或多条数据的演变趋势, 提出的可视化方法具有通用性, 可以广泛的应用到各类型气动数据的实时更新和筛选中, 实现互联网环境下气动数据的实时分析, 以此满足气动研究人员的需求。

在后续的研究中, 还可将动态的可视化 UI 组件用于多类型气动数据的多维度分析中。气动数据的分析在飞机空气动力学仿真及建模上的应用有着重要的意义, 值得进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 叶友达. 高超声速空气动力学研究进展与趋势 [J]. 科学通报, 2015, 60 (12): 1095-1103.
- [2] 胡孟权, 张登成. 高等大气飞行力学 [M]. 航空工业出版社, 2007.
- [3] Ananda G K, Sukumar P P, Selig M S. Measured aerodynamic characteristics of wings at low Reynolds numbers [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 42: 392-406.
- [4] Shields M, Mohseni K. Effects of Sideslip on the Aerodynamics of Low-Aspect-Ratio Low-Reynolds-Number Wings [J]. AIAA Journal, 2012, 50 (1): 85-99.
- [5] Pamadi B N, Brauckmann G J, Ruth M J, et al. Aerodynamic Characteristics, Database Development, and Flight Simulation of the X-34 Vehicle [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2001, 38 (3): 334-344.
- [6] Microsoft. Introduction to Model/View/ViewModel pattern for building WPF apps [ER/OL]. <https://docs.microsoft.com/zh-cn/archive/blogs/johngossman/introduction-to-modelviewviewmodel-pattern-for-building-wpf-apps>, 2005-10-8.
- [7] 彭显雯. 基于 MVVM 模式的响应式轻量级前端组件设计与实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [8] 沈汉威, 张小龙, 陈为, 等. 可视化及可视分析专题前言 [J]. 软件学报, 2016, 27 (5): 1059-1060.
- [9] 王子毅, 张春海. 基于 ECharts 的数据可视化分析组件设计实现 [J]. 微型机与应用, 2016, 35 (14): 46-48, 51.
- [10] 李素循. 典型外形高超声速流动特性 [M]. 国防工业出版社, 2007.
- [11] UIUC Applied Aerodynamics Group. UIUC Airfoil Coordinates Database [DB/OL]. <https://m-selig.ae.illinois.edu/index.html>, 2020-01-06.