

# 项目说明文档

## 喷注聚类问题的量子计算优化

参赛队伍 apmcmlz2500206fj

2025 年 12 月

## 目录

<b>1 项目概述</b>	<b>2</b>
<b>2 数据文件</b>	<b>2</b>
2.1 输入数据 . . . . .	2
2.2 配置文件 . . . . .	2
2.3 结果文件 . . . . .	2
<b>3 Python 脚本</b>	<b>3</b>
3.1 数据生成 . . . . .	3
3.2 QUBO 模型构建 . . . . .	3
3.3 基准求解器 . . . . .	3
3.4 开悟 SDK 求解器 . . . . .	4
3.5 分析和可视化 . . . . .	4
<b>4 输出目录</b>	<b>5</b>
4.1 结果和图表 . . . . .	5
<b>5 外部依赖</b>	<b>5</b>
5.1 开悟 SDK . . . . .	5
<b>6 工作流程摘要</b>	<b>6</b>
6.1 数据生成 . . . . .	6
6.2 基准求解 . . . . .	6
6.3 量子硬件求解 . . . . .	6
6.4 分析和可视化 . . . . .	6
<b>7 文件统计</b>	<b>6</b>
<b>8 关键技术</b>	<b>7</b>

# 1 项目概述

本项目将量子计算技术应用于高能物理中的喷注聚类问题。我们将问题建模为 QUBO（二次无约束二元优化）模型，并使用经典算法和开悟 SDK 量子求解器进行求解。解决方案在真实量子硬件（玻色量子 CPQC-550）上进行了验证。

## 2 数据文件

### 2.1 输入数据

- `events_data.npz`

**用途：**包含 50 个模拟粒子碰撞事件的压缩 NumPy 二进制文件。

**内容：**粒子属性 ( $p_T$ 、 $\eta$ 、 $\phi$ ) 和预计算的  $\Delta R$  距离矩阵。

- `events_csv/events_table.csv`

**用途：**CSV 格式的粒子事件数据 (682 行, 50 个事件)。

**字段：**`event_id` (事件编号)、`particle_id` (粒子编号)、`pT` (横向动量)、`eta` (赝快度)、`phi` (方位角)。

- `events_csv/generation_params.csv`

**用途：**数据生成参数，用于确保可重现性。

**内容：**随机种子 (2025)、粒子数范围 (12-15)、 $p_T$  范围、 $\eta$  范围。

### 2.2 配置文件

- `real_event0_lam200_mu30.json`

`real_event0_lam200_mu100_tmax100.json`

`real_event0_lam300_mu60_tmax100.json`

`real_event0_lam300_mu60_tmax100_oh1.json`

`real_event1_lam300_mu60_tmax100_oh1.json`

`real_event2_lam300_mu60_tmax10_oh1.json`

**用途：**QUBO 模型参数和量子求解器结果的 JSON 配置文件。

**参数：** $\lambda$  (约束惩罚系数)、 $\mu$  (平衡系数)、解向量。

### 2.3 结果文件

- `results_baseline_sa.csv`

**用途：**经典模拟退火求解器在所有 50 个事件上的结果。

**指标：**最优能量、平均能量、能量标准差、求解时间、可行性。

- `results_baseline_random.csv`

**用途：**随机搜索基准方法在所有 50 个事件上的结果。

- `results_kaiwu_sa.csv`

**用途：**开悟 SDK 模拟退火求解器在所有 50 个事件上的结果。

- `results_baseline.csv`  
**用途:** K-means 聚类基准方法的结果。
- `kaiwu_runs/*.pkl`  
**用途:** 包含开悟求解器详细输出的 Python pickle 对象。  
**内容:** 完整求解历史、能量轨迹、求解器参数。

## 3 Python 脚本

### 3.1 数据生成

- `generate_data.py`  
**用途:** 生成用于测试的合成粒子碰撞事件。  
**输出:** `events_data.npz` 和 `events_csv/` 目录。  
**主要函数:**
  - `generate_toy_events()`: 创建随机粒子事件
  - `deltaR_matrix()`: 计算  $\Delta R$  距离矩阵
  - `save_events_npz()`: 保存为 NumPy 格式
  - `save_events_csv()`: 保存为 CSV 格式

### 3.2 QUBO 模型构建

- `qubo_model.py`  
**用途:** 基础 QUBO 模型构建（已弃用，请使用 `real_qubo_model.py`）。  
**函数:** `build_qubo_matrix_k2()`: 为  $K=2$  聚类构建 QUBO 矩阵。
- `real_qubo_model.py`  
**用途:** 生产环境的 QUBO 模型，包含约束处理和平衡项。  
**主要函数:**
  - `build_qubo_matrix_k2()`: 构建带约束的 QUBO 矩阵
  - 参数:  $\lambda$  (约束)、 $\mu$  (平衡)、 $w$  (距离权重)

### 3.3 基准求解器

- `baseline_random.py`  
**用途:** 随机搜索基准求解器。  
**方法:** 随机采样可行解 (50,000 个样本)。  
**输出:** `results_baseline_random.csv`。
- `baseline_sa.py`  
**用途:** 经典模拟退火求解器。  
**方法:** 自定义 SA 实现，带自适应温度调度。

**参数:** 10,000 步，每个事件运行 10 次。

**输出:** results\_baseline\_sa.csv。

- baseline\_kmeans.py

**用途:** K-means 聚类基准（非 QUBO 方法）。

**方法:** 在  $(\eta, \phi)$  空间中聚类粒子。

**输出:** results\_baseline.csv。

### 3.4 开悟 SDK 求解器

- baseline\_kaiwu\_sa.py

**用途:** 开悟 SDK 模拟退火求解器（模拟模式）。

**方法:** 使用开悟的量子启发式 SA 求解器。

**参数:** 10,000 次扫描，每个事件读取 10 次。

**输出:** results\_kaiwu\_sa.csv。

- kaiwu\_config.py

**用途:** 开悟 SDK 身份验证配置模块。

**内容:** API 凭据、平台端点。

- run\_real\_event0\_cpqc550.py

run\_real\_event1\_cpqc550.py

run\_real\_event2\_cpqc550.py

**用途:** 向真实量子硬件（CPQC-550）提交任务的脚本。

**方法:** 连接到玻色量子云平台。

**输出:** 包含量子求解器结果的 JSON 文件。

### 3.5 分析和可视化

- analyze\_results.py

**用途:** 对所有事件的求解器性能进行统计分析。

**生成:** 汇总统计、性能比较。

- compare\_solvers.py

**用途:** 不同求解器的多维比较。

**指标:** 能量质量、求解时间、可行性、稳定性。

- plot\_energy\_vs\_time\_sa\_vs\_kaiwu.py

**用途:** 生成 SA 和开悟求解器的能量-时间对比图。

**输出:** energy\_vs\_time\_sa\_vs\_kaiwu.png/pdf。

- plot\_jet\_efficiency\_hist.py

**用途:** 绘制喷注聚类效率直方图。

- `make_paper_plots.py`

**用途：**生成所有出版质量图形的主脚本。

**输出：**文中图表/目录中的所有图表（PNG 和 PDF 格式）。

## 4 输出目录

### 4.1 结果和图表

- 文中图表/

**用途：**包含所有出版图表和表格的目录。

**内容：**

- 能量比较图（直方图、箱线图、散点图）
- 求解时间直方图
- 帕累托前沿（能量 vs 时间）
- 方法说明图
- 结果比较表（CSV 格式）

- `kaiwu_runs/`

**用途：**存储开悟求解器输出文件的目录（.pkl 格式）。

**命名：** WuYueCup\_real\_event{idx}\_N{N}\_lam{lam}\_mu{mu}\_...\_results.pkl。

- 真机使用截图/

**用途：**玻色量子云平台的截图。

**内容：**

- 任务列表.png: 任务列表截图
- 用量总览.png: 用量总览截图

## 5 外部依赖

### 5.1 开悟 SDK

- `kaiwu-1.3.0-cp310-none-any.whl`

**用途：**适用于 Python 3.10 的开悟 SDK wheel 包。

**安装：** `pip install kaiwu-1.3.0-cp310-none-any.whl`。

- `kaiwu-pytorch-plugin/`

**用途：**开悟 PyTorch 插件源代码和示例。

**内容：**文档、示例 notebook、测试脚本。

## 6 工作流程摘要

### 6.1 数据生成

1. 运行 `generate_data.py` → 创建 `events_data.npz` 和 `events_csv/`

### 6.2 基准求解

1. 运行 `baseline_random.py` → `results_baseline_random.csv`
2. 运行 `baseline_sa.py` → `results_baseline_sa.csv`
3. 运行 `baseline_kmeans.py` → `results_baseline.csv`
4. 运行 `baseline_kaiwu_sa.py` → `results_kaiwu_sa.csv`

### 6.3 量子硬件求解

1. 配置 `kaiwu_config.py` 中的凭据
2. 运行 `run_real_event0_cpqc550.py` → JSON 输出
3. 运行 `run_real_event1_cpqc550.py` → JSON 输出
4. 运行 `run_real_event2_cpqc550.py` → JSON 输出

### 6.4 分析和可视化

1. 运行 `analyze_results.py` → 统计摘要
2. 运行 `compare_solvers.py` → 比较指标
3. 运行 `make_paper_plots.py` → 文中图表/中的所有图形

## 7 文件统计

类别	数量
Python 脚本 (.py)	13
数据文件 (NPZ, CSV)	3
配置文件 (JSON)	6
结果文件 (CSV)	4
求解器输出 (PKL)	5
图表 (PNG, PDF)	31
表格 (CSV)	3

表 1: 项目文件统计

## 8 关键技术

- 编程语言： Python 3.10+
- 核心库： NumPy、Pandas、Matplotlib
- 优化方法： QUBO、模拟退火、K-means
- 量子平台：玻色量子 CPQC-550（550 量子比特）
- SDK：开悟 SDK v1.3.0