

二、建模与求解

问题一的建模与求解

1. 数据预处理

针对问题一的建模目标——分析光伏电站在理想天气下的理论发电能力，并量化实际观测功率的偏离情况，我们在数据选择与处理上主要分为两个阶段：

(1) 站点数据的选择与筛查

本研究选取了中国河北省衡水市的某典型地面光伏电站（编号：station01）作为样本站点，数据来源于“光伏电站运行与气象观测联合数据集（PVOD）”，该数据集由清华大学和中国气象局联合发布，覆盖全国多个大中型光伏电站，提供分钟级光伏出力与同时刻的多源气象数据。具体站点信息如下：

站点编号：station01

经纬度：北纬 38.18306° ，东经 117.45722°

组件类型：多晶硅组件，单位面积额定输出 270W

组件面积：74,000m²

装机容量 20MW

测量频率：每 15min 一次，时间范围为 2018/07/01 至 2019/06/13

(2) 数据预处理：时间字段清洗

原始时间格式为 'yyyy/mm/dd HH:MM:SS'，读取后首先去除双空格与冗余字符，并将其拆分为年月日时分秒六个字段，最终统一转换为 datetime 类型，便于时间索引与绘图分析。同时，在转换为本地时间后，新增月字段 month，用于后续的季节分类。

2. 模型建立

本研究围绕光伏电站在理想晴空条件下的发电能力评估展开建模，目标是基于站点经纬度、时刻信息和基础辐照物理关系，构建一个物理一致、可计算的理论功率模型，并通过与实际功率数据的对比，提取全天空指数、容量因子与偏差指标，为后续的功率预测与优化打下基淮。

整个模型的构建遵循“从物理辐照建模出发，到理论功率计算，最后提取统计指标”的三阶段流程，具体如下。

(1) 理论辐照建模

为了估算理想天气条件下的光伏理论发电量，我们首先需计算每个时刻的太阳高度角 $h(t)$ ，从而推导“晴空辐照” $G_{cs}(t)$ ，即无云条件下的太阳入射辐照。

设观测时间为 t ，其对应的年积日为 N ，太阳的赤纬角 δ 表示太阳相对于地球赤道平面的角度，计算公式为：

$$\delta = \frac{23.45 \cdot \pi}{180} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (284 + N)\right)$$

太阳时角 H 表示太阳相对于正午时刻的位置，其单位为弧度：

$$H = \frac{15 \cdot \pi}{180} \cdot (\text{hour}_f - 12)$$

其中 hour_f 为当日时刻的十进制表示（小时加上分钟/60）。

站点纬度记作 ϕ ，单位为弧度，则太阳高度角的正弦值为：

$$\sin(h) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(H)$$

夜间的 $\sin(h)$ 值会小于 0，此时置为 0：

$$\sin(h)_t = \max(0, \sin(h)_t)$$

由此得到晴空辐照强度（单位 W/m^2 ）：

$$G_{\text{cs}}(t) = G_{\text{STC}} \cdot \sin(h)_t$$

其中 $G_{\text{STC}} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ 为标准测试条件下的太阳辐照强度。

理论功率 $P_{\text{cs}}(t)$ 的估算公式如下：

$$P_{\text{cs}}(t) = \eta_{\text{STC}} \cdot \frac{G_{\text{cs}}(t) \cdot A}{G_{\text{STC}}}$$

其中 η_{STC} 为光伏组件的标准效率， A 为光伏电站组件的总面积。

（2）长短期数值计算

为分析光伏系统在典型日中的发电特性，采用每 15 分钟分辨率的理论功率 $P_{\text{cs}}(t)$ 构造全天的日内轮廓。具体做法为：首先从全年数据中筛选出典型日期（如春分、夏至、秋分、冬至），然后提取该日从 $t = 0$ 到 $t = 23:45$ 的理论功率序列，并绘制出日内发电功率随时间的变化曲线，以观察峰值时刻、日出日落等对理论发电能力的影响。

为探讨季节性对光伏发电的系统性影响，将全年理论功率按月份 $m \in \{1, \dots, 12\}$ 归类为四个季节：

$$\text{Spring} = \{3, 4, 5\}, \quad \text{Summer} = \{6, 7, 8\}, \quad \text{Autumn} = \{9, 10, 11\}, \quad \text{Winter} = \{12, 1, 2\}$$

对每一季节内的所有工作日，按日内时刻（如 08:00、08:15 等）对 $P_{\text{cs}}(t)$ 进行分组，并计算中位数：

$$\tilde{P}_{\text{cs}}^{(s)}(t) = \text{median} \{ P_{\text{cs}}(t) \mid t \in \text{Season } s \}$$

绘制四季对应的日内中位功率曲线，用以比较不同季节日照时长和强度的差

异。

(3) 全天空指数与偏差分析

全天空指数 $K_t(t)$ 用于衡量实际发电功率相对于晴天理论功率的完成度，定义如下：

$$K_t(t) = \frac{P_{act}(t)}{P_{cs}(t)}$$

其中 $P_{act}(t)$ 为实际测得的发电功率， $P_{cs}(t)$ 为对应时刻的理论功率。对于 $P_{cs}(t)=0$ 的夜间时刻，将 $K_t(t)$ 赋值为 NaN，以避免除零错误。

为量化实际发电与理论功率之间的偏差，定义每一时刻的偏差为：

$$\Delta(t) = P_{act}(t) - P_{cs}(t)$$

并进一步计算每日平均偏差：

$$\bar{\Delta}_d = \frac{1}{N_d} \sum_{t \in \text{Day } d} \Delta(t)$$

其中 N_d 表示该日有效观测点数。

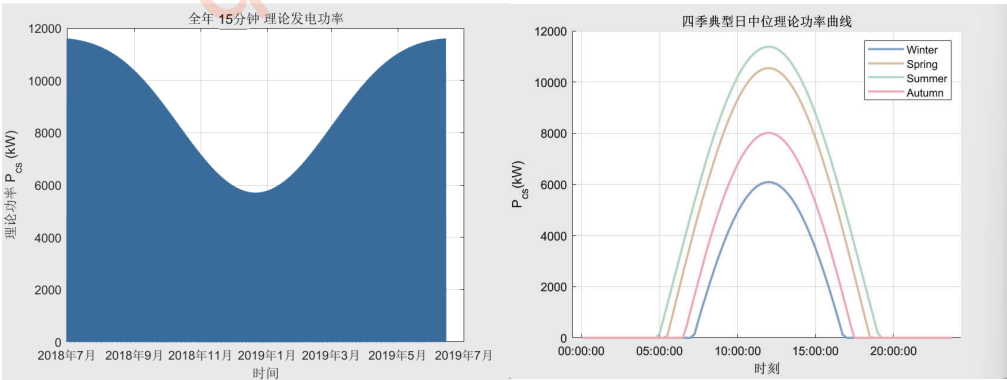
此外，定义性能比用于衡量系统整体运行效率：

$$PR = \frac{\sum_t P_{act}(t)}{\sum_t P_{cs}(t)}$$

该比值应低于 1，若 $PR > 1$ 通常表示理论功率低估或数据异常，需重新校准模型参数或检查原始数据质量。

3. 模型求解与分析

(1) 长周期（季节）理论光伏变化

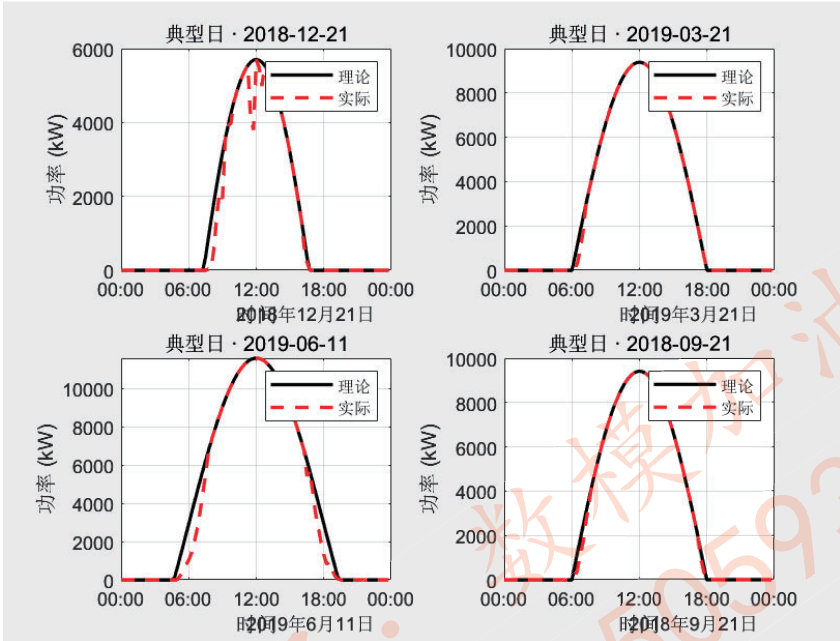


从全年理论发电功率曲线来看，光伏系统在一年中呈现出明显的季节性变化，整体趋势类似正弦波：夏季发电量最高，冬季最低。其主要原因在于夏季日照时长更长、太阳高度角更大，能够带来更强的入射辐射，从而显著提升理论发电功

率；而冬季则由于太阳高度角较低、有效光照时间缩短，导致发电能力下降。

在日内尺度上，四季典型日的理论功率曲线均呈钟形分布，上午逐渐升高，中午达到峰值后逐渐下降。不同季节之间峰值功率和发电持续时间存在显著差异：夏季中午峰值高达约 12000 kW，且持续时间长；冬季峰值不足夏季一半，且有效发电时段明显缩短。春秋两季则位于其间，秋季略低于春季。该特征反映了光伏发电强烈依赖太阳辐照条件，具备典型的天文驱动周期性。

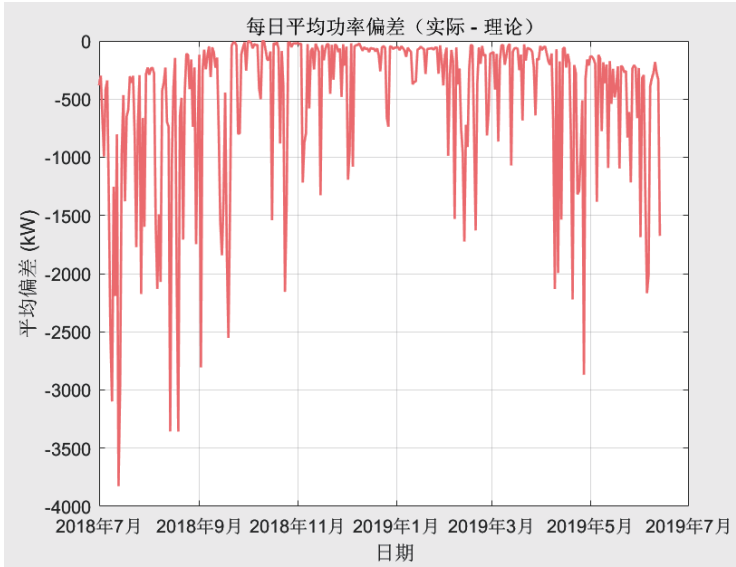
(2) 短周期（日内）理论光伏变化



从四季典型日的日内功率变化图可以看出，理论光伏发电功率均呈现出对称的钟形曲线，峰值出现在正午附近，体现出太阳辐照强度随时间变化的典型日循环特征。夏季（6月11日）和春秋两季（3月21日与9月21日）的理论发电曲线较为饱满，对应日照时长较长、太阳高度角较大，冬季（12月21日）则发电时段明显缩短，峰值功率也显著降低。

实际功率与理论功率整体趋势基本一致，但存在局部差异。尤其在部分典型日午后时段，可观察到实际功率低于理论值，出现“压低”的现象，反映出云层遮挡或组件温升效应对发电能力的影响。此外，部分时段存在实际功率突然下降或偏离的情况，可能由短时天气波动、设备出力限制或测量误差所致。整体而言，理论曲线提供了太阳资源驱动下的最大潜力估计，而实际曲线则呈现了光照条件、运行状态与环境因素共同作用下的真实响应。

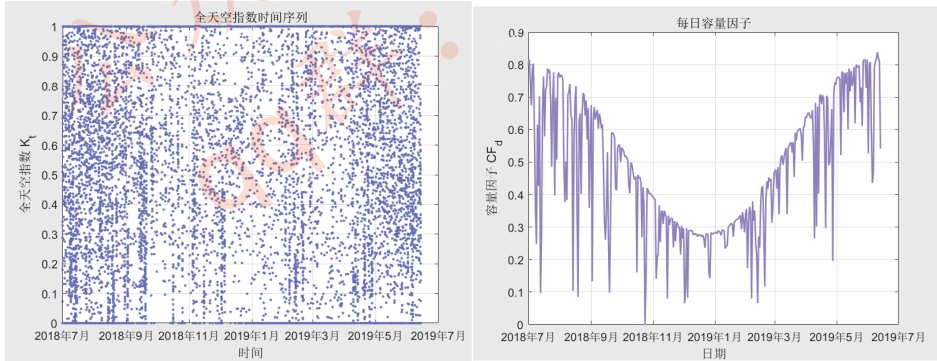
(3) 偏差分析



从图中可以看出，全年光伏发电的实际功率普遍低于理论功率，平均日偏差值大多为负，表明理想状态下的发电能力在实际运行中未被完全实现。偏差值主要集中在-500kW 到-1500kW 之间，个别日期甚至低于-3000kW，说明在部分天气条件较差或故障频发的日子里，系统输出显著受限。

全年中偏差波动较大的时期多出现在7月至10月及次年4月至6月，这些时间段可能对应降雨频发、云层遮挡或设备运维影响频繁的季节。相比之下，冬季虽理论发电能力较弱，但偏差曲线相对平稳，反映出天气变化对实际发电影响程度有限，或者说预期本身已足够保守。

(4) 全天空指数和容量因子分析



首先，从全天空指数 K_t 的散点图来看，该指数主要集中在 0 到 1 的区间，大多数点分布在 $K_t = 0.2 \sim 0.8$ 范围内，说明在绝大多数时段内，实际辐照强度均低于理论值，这与实际光伏运行中由于云层遮挡、大气污染、系统损耗等引起的发电量损失是一致的。同时，图中存在部分较低（接近 0）和较高（接近 1） K_t 值的离散点，反映出系统在部分时刻可能处于完全遮蔽或理想辐照条件下运行。

其次，从容量因子 CF_d 的变化趋势看，呈现出明显的年周期性变化特征。夏季期间容量因子整体较高，稳定在 0.6~0.8 区间，而在冬季则明显下降，最低可接近 0.2，这一趋势与日照时长和太阳高度角的季节性变化密切相关。

最后，全年性能比 $PR = 0.8291$ ，表明全年实际输出电量相当于理论可达电量的 82.91%，该值已接近国内良好光伏系统的运行水平，说明该电站在考虑遮挡、温度损耗及系统效率衰减后整体运行较为合理。同时结合偏差分析图，可以推测低 PR 段落往往与 K_t 波动剧烈与 CF_d 下跌的时期高度重合，进一步验证了光伏性能受环境影响的实际规律。

具体代码如下：

```
clc; clear;

%% 1. 站点参数 (station01)
eta_STC = 270 / 1.6635e3; % 组件效率 ≈0.1623
A_total = 74000; % 组件总面积 m²
G_STC = 1000; % STC 辐照 W/m²
P_rated = 20000; % 装机容量 kW
lat = 38.18306; % 纬度 (station01)

%% 2. 读取 CSV (确保时间列为字符串)
T = readtable('station01.csv', 'TextType', 'string');

%% 3. 时间列处理 (字符串切片 → datetime)
rawStr = string(T.date_time);
rawStr = replace(rawStr, ' ', ' ');
parts = split(rawStr, ' ');

dateTxt = parts(:,1); timeTxt = parts(:,2);
dateP = split(dateTxt, '-'); timeP = split(timeTxt, ':');

my_year = str2double(dateP(:,1));
my_month = str2double(dateP(:,2));
my_day = str2double(dateP(:,3));
my_hour = str2double(timeP(:,1));
my_minute = str2double(timeP(:,2));
my_second = str2double(timeP(:,3));

T.date_time = datetime(my_year, my_month, my_day, my_hour, my_minute, my_second)
+ hours(8);
```

```
T.month      = my_month;
T.power      = T.power * 1000; % MW → kW

%% 4. 理论发电功率 P_cs — 使用太阳高度角估计
my_doy       = day(T.date_time, 'dayofyear');
my_hourf     = hour(T.date_time) + minute(T.date_time)/60;

delta = deg2rad(23.45) .* sin(deg2rad(360 * (284 + my_doy) ./ 365));
H      = deg2rad(15 .* (my_hourf - 12));
phi     = deg2rad(lat);
sin_h   = sin(phi).*sin(delta) + cos(phi).*cos(delta).*cos(H);
sin_h(sin_h < 0) = 0;

G_cs = G_STC .* sin_h;
T.P_cs = eta_STC .* G_cs .* A_total ./ G_STC;

%% 4.1 实际功率截断
T.power_clipped = min(T.power, T.P_cs);

%% 5. 全年理论功率曲线
figure;
plot(T.date_time, T.P_cs, 'Color', [0.2 0.4 0.6], 'Linewidth', 1.3);
xlabel('时间'); ylabel('理论功率 P_{cs} (kW)');
title('全年 15 分钟 理论发电功率'); grid on;

%% 6. 季节分类 + 中位曲线
T.season = strings(height(T), 1);
T.season(ismember(T.month, [12, 1, 2])) = "Winter";
T.season(ismember(T.month, [3, 4, 5])) = "Spring";
T.season(ismember(T.month, [6, 7, 8])) = "Summer";
T.season(ismember(T.month, [9, 10, 11])) = "Autumn";

T.t_hhmm = string(datestr(T.date_time, 'HH:MM'));
seasonLUT = ["Winter", "Spring", "Summer", "Autumn"];
colors = [0.55 0.65 0.78;
          0.86 0.78 0.65;
          0.74 0.86 0.78;
          0.92 0.70 0.74];

figure; hold on;
for i = 1:4
    s = seasonLUT(i);
    idx = T.season == s;
    [grp, tags] = findgroups(T.t_hhmm(idx));
```

```
pMed = splitapply(@median, T.P_cs(idx), grp);
tags = string(tags);
tAxis = duration(tags, 'InputFormat', 'hh:mm');
plot(tAxis, pMed, 'DisplayName', s, 'Color', colors(i,:), 'LineWidth',
1.8);
end
xlabel('时刻'); ylabel('P_{cs}(kW)');
title('四季典型日中位理论功率曲线'); legend show; grid on;

%% 7. 每季典型日理论功率 vs 实际功率
typical = ["2018-12-21", "2019-03-21", "2019-06-11", "2018-09-21"];
figure;
for k = 1:4
    subplot(2,2,k);
    mask = string(datestr(T.date_time, 'yyyy-mm-dd')) == typical(k);
    plot(T.date_time(mask), T.P_cs(mask), 'k', 'LineWidth', 1.6, 'DisplayName', '
理论');
    hold on;
    plot(T.date_time(mask), T.power_clipped(mask), 'r--
', 'LineWidth', 1.6, 'DisplayName', '实际');
    xlabel('时间'); ylabel('功率 (kW)');
    title("典型日 · "+typical(k)); legend show; grid on;
end

%% 8. 全天空指数 K_t
T.Kt = T.power_clipped ./ T.P_cs;
T.Kt(T.P_cs == 0) = NaN;

figure;
plot(T.date_time, T.Kt, '.', 'Color', [0.4 0.4 0.7]);
xlabel('时间'); ylabel('全天空指数 K_t');
title('全天空指数时间序列'); grid on;

%% 9. 容量因子 CF_d 与 偏差分析
T.date_only = dateshift(T.date_time, 'start', 'day');
[gd, days] = findgroups(T.date_only);

CF_d = splitapply(@(x) sum(x)/(P_rated*24), T.power_clipped, gd);
biasMean = splitapply(@mean, T.power_clipped - T.P_cs, gd);

figure;
plot(days, CF_d, 'Color', [0.6 0.5 0.8], 'LineWidth', 1.3);
xlabel('日期'); ylabel('容量因子 CF_d');
title('每日容量因子'); grid on;
```



```
figure;
plot(days, biasMean, 'Color', [0.9 0.4 0.4], 'LineWidth', 1.3);
xlabel('日期'); ylabel('平均偏差 (kW)');
title('每日平均功率偏差 (实际 - 理论)'); grid on;

%% 10. 年度性能比 PR
PR = sum(T.power_clipped,'omitnan') / sum(T.P_cs,'omitnan');
fprintf('全年性能比 PR = %.4f\n', PR);

%% 11. 年度实际 vs 理论 功率对比图
figure;
plot(T.date_time, T.P_cs, 'k-', 'LineWidth', 1.3, 'DisplayName','理论');
hold on;
plot(T.date_time, T.power_clipped, 'Color', [0.8 0.3 0.3], 'LineWidth',
1.3, 'DisplayName','实际 (截断)');
xlabel('时间'); ylabel('功率 (kW)');
title('全年 实际 vs 理论 发电功率'); legend show; grid on;
```

Company Profile

睿森科研简介



关于我们

睿森科研 深耕论文辅导领域5年
为广大学子提供专业化、个性化的论文咨询服务

坚持初心，砥砺前行

我们始终秉持“授人以鱼不如授人以渔”的初心，为广大师生提供专业化、高水平的论文教育产品以及咨询服务。自19年以来，年均辅导学员人数达数千人，并呈现迅速上升趋势。



国内学术能力提升领导品牌，师资雄厚

提供会议论文辅导与发表、科研论文辅导与发表、硕博核心/S刊辅导、本硕博毕业论文辅导、以及各类大学生竞赛辅导等项目。我们的师资团队由2000余位专业论文咨询师组成。其中海内外高校博士及大学教授1000多人。



业务内容

科研论文、本硕博毕业论文辅导
各类大学生竞赛辅导

科研论文，毕业论文辅导

我们提供SCI、SSCI、CSSCI、EI 源刊、中文核心、学报等科研论文辅导；本硕博毕业论文、课题辅导。已成功助力数千名学员拿到相应辅导的录用通知，因此保研、申博成果的学员不计其数。



大学生竞赛辅导

各类数学建模竞赛、数学竞赛、英语竞赛、互联网+、挑战杯、力学竞赛、创青春等大学生竞赛辅导，已成功助力数百名学员荣获国奖！



rui sen ke yan & shu mo jia you zhan
安徽省合肥市高速中央广场A座

了解更多内容，请扫码咨询科研助理



资深师资团队

丰富教学经验

助你轻松拿奖

大学生创新创业大赛

精品辅导

互联网+ | 挑战杯 | 创青春 | 三创赛等

我们的优势

- 强大的师资力量
- 多对一全程服务
- 辅导前试听机制
- 无限次在线答疑
- 定制化课程内容
- 学员奖学金激励

课程内容

01 项目诊断

根据不同的项目，结合各方面背景，提供项目改进意见和项目方向规划。

02 参赛规划

依据学校、专业以及项目特点，制定参赛路线。

03 商业计划书修改

提供针对性的书写指导，并在完成后逐页提供修改意见。

04 PPT指导与修改

提供针对性的制作指导，并在完成后提供逐页提供修改意见。

05 答辩指导与训练

对答辩进行训练，并提供针对性的指导意见。

06 全程无限次答疑

比赛中遇见的各个问题，在辅导期间全程免费答疑。

辅导成绩

互联网+省银以上10余项

创青春省二以上10余项

三创赛国奖3项

扫码右侧二维码咨询报名>>>



数模加油站

新学期 科研论文新规划

试听机制 合同保障 全科覆盖 实力师资

雏鹰计划

- 全过程辅导（到论文定稿）：
高质量中文/英文期刊、EI/CPCI会议
- 辅导加发表一体化（到论文发表）：
一对一：高质量中文/英文期刊、EI/CPCI会议
双人团（两篇文章）：EI会议
- 时间周期：定稿2-4个月，录用1个月内，见刊2-6个月，检索1-3个月

卓研计划

- 全过程辅导（到论文定稿）：
SCI、EI源刊、中文核心、学报
- 辅导加发表一体化（到论文发表）：
一对一：SCI、EI源刊
二人小班（共同完成一篇论文）：SCI、EI源刊
三人小班（共同完成一篇论文）：SCI、EI源刊
- 时间周期：定稿3-6个月，录用2-8个月，见刊0.5-2个月，检索0.5-2个月

详情请扫描二维码咨询学术顾问



大学生学科类竞赛 保奖班

数学/英语/物理等

火热招生中

我们的优势

- 强大的师资力量
- 多对一全程服务
- 辅导前试听机制
- 无限次在线答疑
- 定制化课程内容
- 学员奖学金激励

课程大纲

- 基础知识讲解培训
依据相关竞赛大纲，逐点讲解
- 竞赛考点难点分析
针对竞赛难点，重点突破
- 真题选讲点评
结合历年真题，精选例题详解
- 全真模拟练习
竞赛全真模拟，赛后详细解析

大学生计算机类 竞赛保奖班

ACM/蓝桥杯等

国奖导师带你冲！！



我们的优势

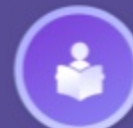
- 强大的师资力量
- 多对一全程服务
- 辅导前试听机制
- 无限次在线答疑
- 定制化课程内容
- 学员奖学金激励

课程设置



定制学习方案

根据学员基础，定制个性化培训方案



算法及编程基础培训

根据方案，开展基础培训



刷题特训

导师精选题目，特训练习



全真模拟练习

竞赛限时全真模拟，体验竞赛氛围

课程亮点



大牛授课
干货十足



全程伴学
无限答疑



绝密押题
赛前助力

扫码立即报名>>>>>>>



数模加油站

电工杯



转学术论文发表



服务内容



- 可转为EI会议/CPCI会议/高质量中英文期刊
- 免费提供论文方向评估及指导服务

含金量



- 发表一篇EI / CPCI会议堪比省一含金量
- 发表一篇高质量中/英文期刊堪比省奖含金量

我们承诺



- 收费透明，包含版面费，无任何二次收费
- 定金制，成功录用再补齐尾款，不录用全额退款

扫码添加学术顾问了解详情

