

风电场运行状况分析及优化

摘要

随着风力发展行业的快速发展，全球风电机组的装机规模也在持续增加。从 1986 年并网风电开始起步，经过二十余年的努力，我国的风电事业取得了不菲的成绩。

问题一 风能资源如何与风速和风功率密度有关，风功率密度蕴含风速、风速分布和空气密度的影响，根据题目给定风速及功率数据，对数据进行预处理，分别计算出日平均风速和日平均功率，进而算出月平均风速与月平均功率，以及年平均风速与年平均功率。

根据风功率密度公式 $D_{wp} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho \cdot v_i^3 (w/m^2)$ ，可求得 $D_{wp} = 1438.7 (w/m^2)$ ，该

地区风能资源很丰富，根据风能利用率公式： $C_p = \frac{2m_t \omega}{\rho S v^3}$ ，求出风电场的风能利用率是

51.9%，依据柱形图，可得出该风电场的风能利用率良好。

问题二 根据提供的风机型号，从风能资源与风机匹配角度判断哪类风机更为适合，用 AHP 模糊分析法建立模型进行研究。我们以容量系数、风能密度、风能利用率、风功率密度为指标层；以机型 I、机型 II、机型 III、机型 IV、机型 V 为对象层，列出矩阵，再运用 MATLAB 软件对列出的矩阵进行一致性检验，得出对象层对目标层的组合权向量。由模糊综合评判法的最大隶属原则可以知道，权重值越大对应的待选方案越优秀，根据 MATLAB 软件所求各目标层的权重值进行比较，现有机型的权重值较新机型的权重值大，故，现有机型比新机型更为适合。

问题三 因为风机每年需要维护两次，每次 2 天为一个班次，可以以半年为风机维护周期，一个周期内总的需要班次（值班、维护）为 $180/2 + 124 = 214$ ，以第 k 组维修

第 i 班次是否上班为决策变量，以 $M_{in} Z = \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{214} x_{ki} p_i$ （风电场所最少风能资源损失）为

目标函数，以所给该风电场每班次至少需要的班组数及风机维修排班要求为约束条件，建立 0-1 整数规划模型，利用 LINGO 软件求解得结果。

关键词：风电场 层次分析法 0-1 规划 风功率密度 风能利用率

一 问题重述

1.1 背景

由于全球能源紧缺与环境危机的影响，人类迫切需要一种可再生能源，风能具有资源丰富、环保等特点，因此成为 21 世纪比较有前景的新能源。

风能是一种最具活力的可再生能源，风力发电是风能最主要的应用形式。本题举例我国某风电场，该风电场已先后进行了一、二期建设，现有风机 124 台，总装机容量约 20 万千瓦。

1.2 需解决的问题

根据背景材料和收集的数据，建立数学模型回答以下问题

1、附件 1 给出了该风电场一年内每隔 15 分钟的各风机安装处的平均风速和风电场日实际输出功率。利用这些数据对该风电场的风能资源及其利用情况进行评估。

2、附件 2 给出了该风电场所在处的风速信息，其中 4#、16#、24#风机属于一期工程，33#、49#、57#风机属于二期工程，风机生产企业还提供了部分新型号风机，它们的主要参数见附件 3 和附件 4。试从风能资源与风机匹配角度判断新型号风机是否比现有风机更为适合。

3、为安全生产需要，风机每年需进行两次停机维护，两次维护之间的连续工作时间不超过 270 天，每次维护需一组维修人员连续工作 2 天。同时风电场每天需有一组维修人员值班以应对突发情况。风电场现有 4 组维修人员可从事值班或维护工作，每组维修人员连续工作时间（值班或维护）不超过 6 天。请制定维修人员的排班方案与风机维护计划，使各组维修人员的工作任务相对均衡，且风电场具有较好的经济效益，试给出你的方法和结果。

二 问题分析

这是一个关于风力发电厂风能资源数据采集处理及维护方案分析的问题

问题一要求我们依照附件所给的该风电场一年内每隔 15 分钟的各风机安装处的平均风速和风电场日实际输出功率，利用这些数据对该风电场的风能资源及其利用情况进行评估，进而采集、整理相关数据，给予正确的解答。

问题二要求我们根据该风电场所在处的风速信息，以及风机生产企业提供的部分新型号风机，参考它们的参数，根据附录所给的资料，从风能资源与风机匹配角度判断新

型号风机是否比现有风机更为适合。问题意在让我们要根据现有的数据进行合理地数据分析建立一个模型。

问题三要求我们解决因为安全生产需要，风机每年需进行两次停机维护，每次维护需一组维修人员连续工作 2 天。同时风电场每天需有一组维修人员值班以应对突发情况。对风电场现有 4 组维修人员进行从事值班或维护工作制定维修人员的排班方案与风机维护计划，使各组维修人员的工作任务相对均衡，且风电场具有较好的经济效益，为此我们需要利用 Lingo 软件，为此制定一个合理地排班计划。

三 问题的假设

- 1、假设附件所给的数据是真实可靠的；
- 2、假设风电场的空气分布均匀；
- 3、假设风电场工作人员都能正常上班；
- 4、假设所给风轮机风轮扫掠面积一点；
- 5、假设在计算过程中所产生的微小误差在不影响结果的前提下忽略不计；
- 6、假设第一次维护和第二次维护所维护的 124 台风机的维护顺序是相同的

四 符号说明

D_{wp} ：风功率密度 (w/m^2)

ρ ：空气密度 (kg/m^3)

n ：在设定时段内的记录数

A_i ：第 i 个因素

a_{ij} ： a_i 和 a_j 对上层目标的影响比

λ ：正反矩阵的最大特征值

CI ：矩阵的一致性指标

RI ：矩阵的平均随机一致指标

C_p ：风能利用率

S ：风轮扫掠面积

五 模型的建立与求解

4.1 问题一的解答

4.1.1 问题一的分析

要求我们依照附件所给的该风电场一年内每隔 15 分钟的各风机安装处的平均风速和风电场日实际输出功率，利用这些数据对该风电场的风能资源及其利用情况进行评估，我们分别求出了每一日的平均风速与平均功率，并求出每一个月的平均风速与平均功率，从而算出一年的平均风速与平均功率，并分别列出了表格，并带入公式，

1 名词的定义

本标准采用下列定义。

1.1 风功率密度

与风向垂直的单位面积中风所具有的功率。

1.2 切入风速

可以发出可以利用的电能的的风速，在并网来说，可以理解为可以并网发电的风速。

1.3 切出风速

指风力发电机组并网发电的最大风速，超过此风速后机组将切出电网。

1.4 额定风速

风电机组达到额定功率输出时，轮毂高度的设计风速。

1.5 额定功率

额定功率是风力发电机在额定风速以上“稳定”输出的功率。

1.6 日变化

以日为基数发生的变化，风速变化采用一个月所测每一日不同时间的数据，求出其平均值。

1.7 年变化

以年为基数发生的变化，风速年变化从 1 月到 12 月的月平均

4.1.2 数据预处理

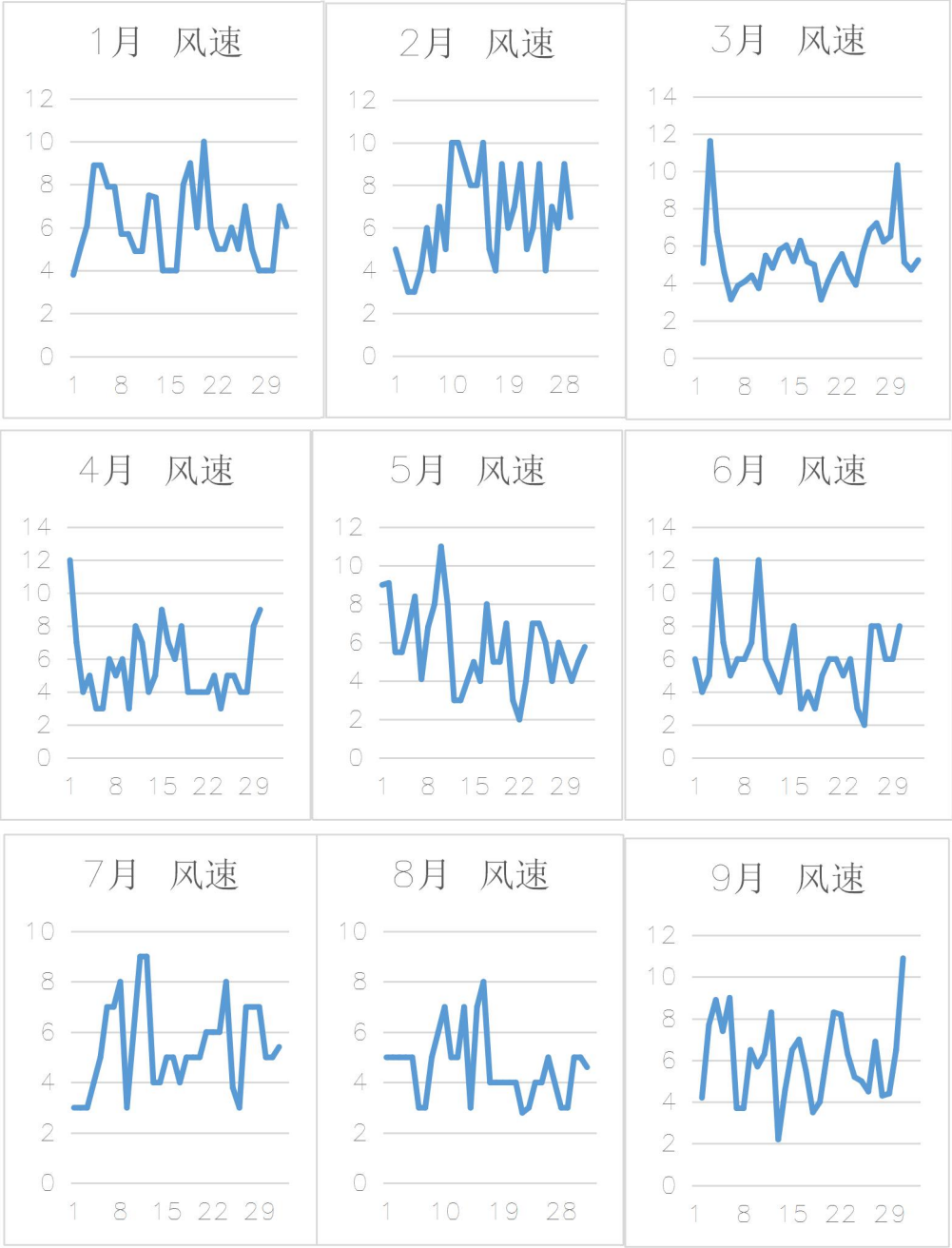
依据附件 1 所给的该风电场一年内每隔 15 分钟的各风机安装处的平均风速和风电场日实际输出功率数据，我们对其分别求出了日平均风速和日平均功率，进而算出月平均风速与月平均功率，以及年平均风速与年平均功率。

4.1.3 风能资源评估模型的建立

4. 1. 3. 1 编制风况图表

将处理好的各种风况参数绘制成图形，主要分为月风况和年风况两大类。

(1) 月风况与月功率



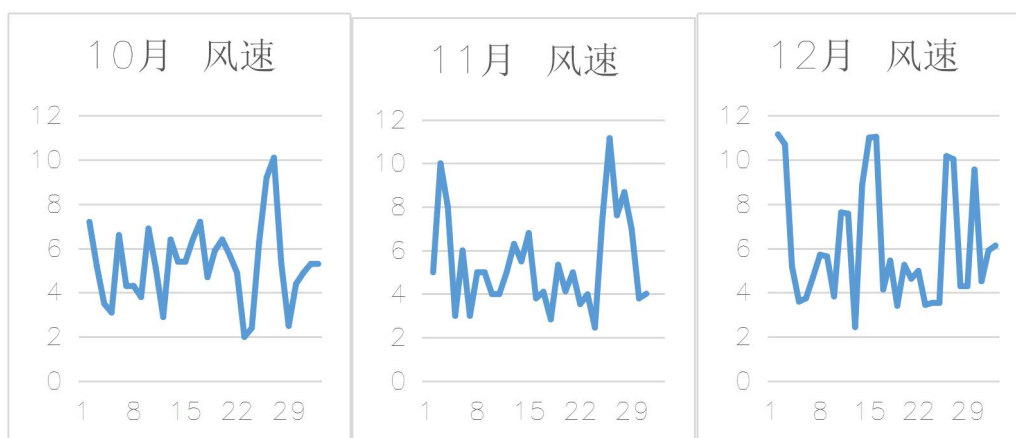
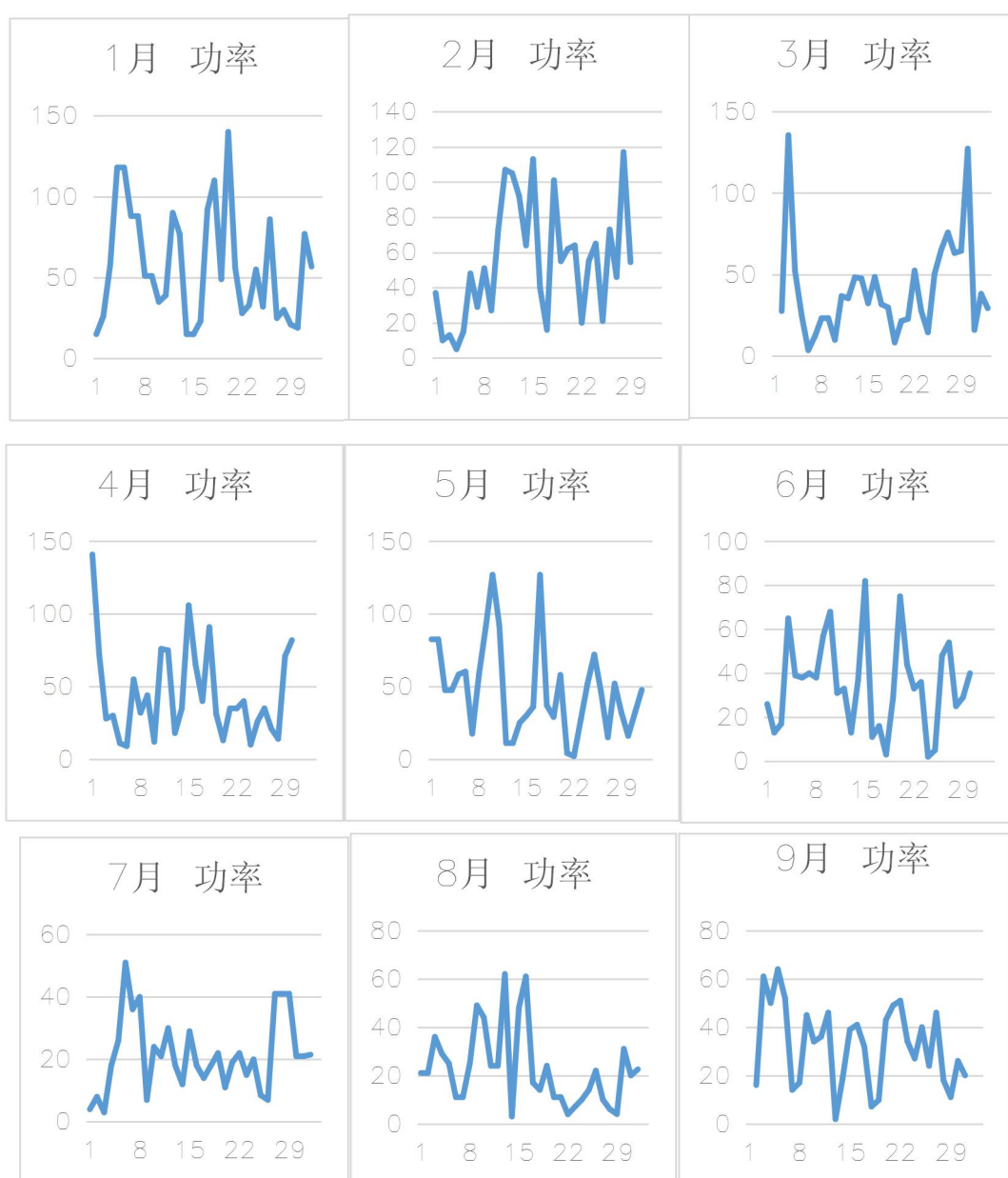


图1 各月的风速日变化图



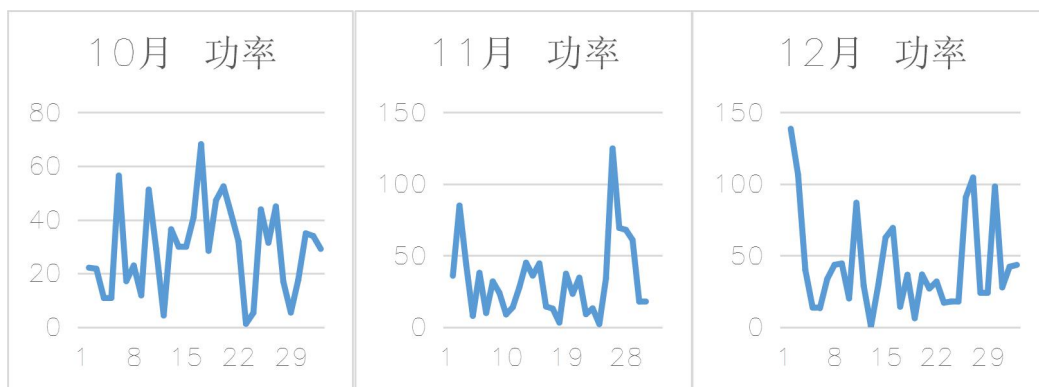


图 2 各月的功率日变化图

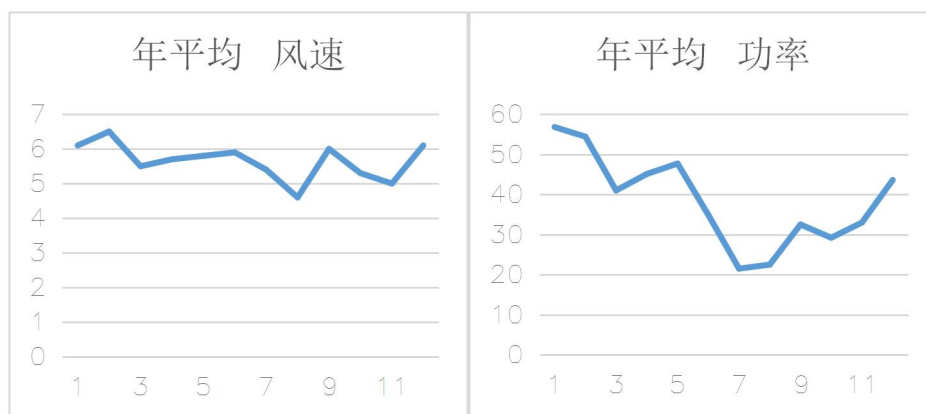


图 3 风速和风功率的年变化曲线图

4. 1. 4 风能资源评估模型的求解

根据所查资料，风能资源如何与风速和风功率密度有关，风功率密度蕴含风速、风速分布和空气密度的影响，是风场风能资源的综合指标，风功率密度等级见下表 1。

表 1 风功率密度等级

| 各稳定风速下的风功率密度（空气密度=1.225kg/m ³ ） | | |
|--|--------------------------|-------|
| 风速（m/s） | 风功率密度（W/m ² ） | 风资源评价 |
| 0 | 0 | 贫乏 |
| 5 | 80 | 贫乏 |
| ~5.5 | ~100 | 贫乏 |
| 5.5~8.7 | 100~400 | 丰富 |
| 10 | 610 | 丰富 |
| 10.5~ | 700~ | 很丰富 |
| 15 | 2070 | 很丰富 |
| 20 | 4900 | 很丰富 |
| 25 | 9560 | 很丰富 |
| 30 | 16550 | 很丰富 |

根据风功率密度公式

$$D_{wp} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho \cdot v_i^3 (w/m^2) \quad (1)$$

D_{wp} ——风功率密度(w/m^2)

ρ ——空气密度 (kg/m^3) ;

n ——在设定时段内的记录数;

v_i^3 ——第*i*记录的风速 (m/s) 值得立方;

依据 (1) 式, 代入所记录的数据可求得 $D_{wp}=1438.7 (w/m^2)$,

根据附件 1 提供的数据, 我们计算出一年中每个月的平均风速, 得到结果如下表所示:

表 2 一年中每个月的平均风速

| 月份 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 月平均风速 (m/s) | 6.1 | 6.5 | 5.5 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 5.4 | 4.6 | 6.0 | 5.3 | 5.0 | 6.1 |

根据表格及所算, 计算出年平均风速 $V=5.65(m/s)$; 计算出年平均风速 $v=119.9(m/s)$ 。查表可知, 该地区的风速在 5.5~8.7 范围内, 同时对应风功率密度也包括在 700~2070 范围内, 故该地区风能资源很丰富。

4.1.5 风能资源利用情况评估模型的建立与求解

根据风能利用率公式: $C_p = \frac{2\overline{m_t \omega}}{\rho S v^3}$, 得出该风电场的风能利用率是 51.9%,

下图是该风电场的月风能利用率, 与理想的月风能利用率的比较柱形图:

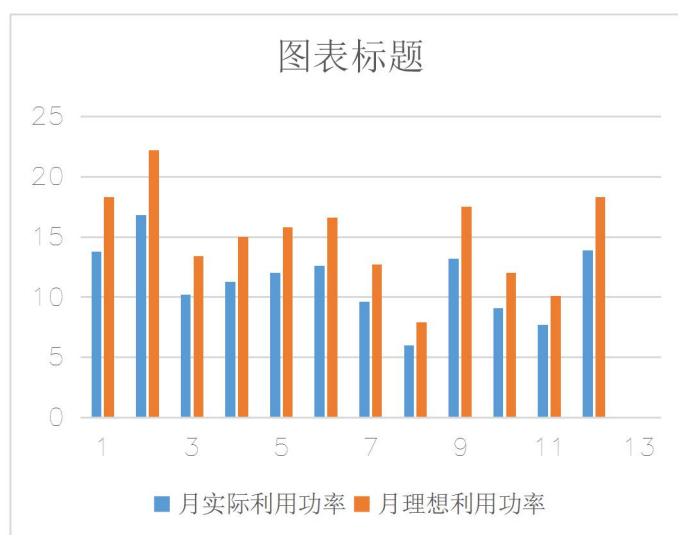


图 4 该风电场的月风能利用率

依据柱形图，可得出，该风电场的风能利用率良好。

4.2 问题二的解答

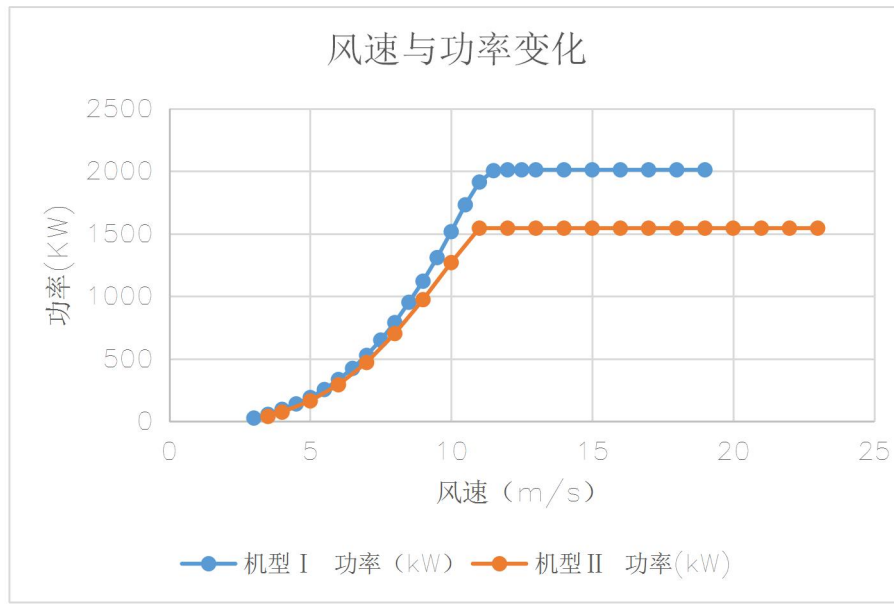
4.2.1 问题二的分析

问题二要求我们根据该风电场所在处的风速信息，以及风机生产企业提供的部分新型号风机，参考它们的参数，根据附录所给的资料，从风能资源与风机匹配角度判断新型号风机是否比现有风机更为适合。问题意在让我们要根据现有的数据进行合理地数据分析建立一个模型。依据建模知识，本题我们采用 AHP 层词分析法建立模型进行研究。我们以容量系数、风能密度、风能利用率、风功率密度为指标层；以机型 I、机型 II、机型 III、机型 IV、机型 V 为对象层，列出矩阵，再运用 MATLAB 软件对列出的矩阵进行一致性检验，得出对象层对目标层的组合权向量。

4.2.1 问题二模型的建立

根据附件 3 给出的机型 I 与机型 II 两种型号风机的风速-功率实测数据，绘制出如表 3：

表 3 机型 I 与机型 II 两种型号风机的风速-功率实测数据



步骤 1: 分析系统中各因素之间的关系, 建立系统的递阶层次结构 (大致为目标层、准则层、方案层)。

步骤 2: 构造两成对较的判断矩阵 $A = (a_{ij})$, 气质相邻的两个层次中高层的为目标, 低层次的因素, 则 a_{ij} 表示因素 a_i 与因素 a_j 对选择目标的重要性之比, a_{ij} 满足 $a_{ij} > 0$, $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, $a_{ii} = 1$, $(i = 1, 2, \dots, n)$ 。

步骤 3: 求出各层次的判断矩阵 A_i 的最大特征值 λ_i 及其对的特征向量 W_i , 将 W_i 归一化, 得到诸多因素对于目标的相对重要性排序数值 (即为各因素对其上一层目标的权重向量值); 利用 $CI = \frac{\lambda_i - n}{n - 1}$, 求判断矩阵 A_i 的一致性指标, 再利用 $CR = \frac{CI}{RI}$ 求判断矩阵 A_i 的一致性比率, $CR < 0.1$ 时, 我们认为判断矩阵具有满意的一致性, 否则要调整判断矩阵。 RI 取值如下表 4, 其中 n 表示矩阵 A_i 的行 (列) 数。

表 4 平均随机一致性指标 RI

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0.58 | 0.95 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 |

步骤 4: 从高层到低层计算同一层所有因素对于最高层相对重要性的排序权值方法为: 若上一层次 A 包含 m 个因素 A_1, A_2, \dots, A_m , 其层次总排序的权值 w (A_1, A_2, \dots, A_m 对应的判

断矩阵的最大特征值 λ 对应的归一化特征向量 w) 的分量 a_1, a_2, \dots, a_m , 下一层 B 包含 n 个因素 B_1, B_2, \dots, B_n , 它们对于因素 A_i 的层次单排序权值为 $b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{nj}$, (当 B_k 与 A_i 无联系时, 取 $b_{kj} = 0$), 则 B 层总排序的权值计算如表 5。最后应用公式 $CR = \frac{\sum_{j=1}^m a_j CI_j}{\sum_{j=1}^m a_j RI_j}$,

计算总排序的一致比率, 当 $CR < 0.1$ 时, 满足一致, 结果可信,

表 5 层次排序的权重计算

| 层次 A 层次 B | A_1 | A_2 | \dots | A_m | B 层次总排序 数值 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|---------------------------|
| | a_1 | a_2 | \dots | a_m | |
| B_1 | b_{11} | b_{12} | \dots | b_{1m} | $\sum_{j=1}^m a_j b_{1j}$ |
| B_2 | b_{21} | b_{22} | \dots | b_{2m} | $\sum_{j=1}^m a_j b_{2j}$ |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| B_n | b_{n1} | b_{n2} | \dots | b_{nm} | $\sum_{j=1}^m a_j b_{nj}$ |

4.2.2 问题二模型的求解

附件 2 给出了该风电场几个典型风机所在处的风速信息, 风机生产企业还提供了部分新型号风机, 让我们从风能资源与风机匹配角度判断新型号风机是否比现有风机更为适合, 为此, 我们采用层次分析法。现有五个风机可供选择, 分别是机型 I、机型 II、机型 III、机型 IV、机型 V, 有四个准则: 容量系数、风能密度、风能利用率、风功率密度; 首先, 我们采用 1-9 标度方法, 具体说明见下表 6, 当被比较的元素其属性处于不同的数量级时, 一般需要将较高数量级的元素进一步分解, 这可保证被比较元素在所考虑的属性上有同一个数量级或者比较接近, 从而适用于 1-9 标度。

表 6 9 级记分法

| 标度 | 含义 |
|----|---------------------|
| 1 | 表示两个因素相比, 具有相同重要性 |
| 3 | 表示两个因素相比, 前者比后者稍重要 |
| 5 | 表示两个因素相比, 前者比后者明显重要 |
| 7 | 表示两个因素相比, 前者比后者强烈重要 |

| | |
|------------|--|
| 9 | 表示两个因素相比，前者比后者极端重要 |
| 2, 4, 6, 8 | 表示上述相邻判断的中间值 |
| 倒数 | 若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij} ，那么因素 j 与因素 i 的重要性之比为 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ |

各机型的各项指标如下：

表 7 各机型指标

| | 机型 I | 机型 II | 机型 III | 机型 IV | 机型 V |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 容量系数 | 0.019 | 0.025 | 0.025 | 0.025 | 0.025 |
| 风能密度 | 61276 | 60132 | 63282 | 62212 | 64223 |
| 风能利用率 | 0.59 | 0.42 | 0.34 | 0.52 | 0.39 |
| 风功率密度 | 400 | 314 | 232 | 342 | 354 |

两两比较，我们得出以下指标间对比值：

表 8 指标间对比值

| | 容量系数 | 风能密度 | 风能利用率 | 风功率密度 |
|-------|------|------|-------|-------|
| 容量系数 | 1 | 6 | 7 | 2 |
| 风能密度 | 1/6 | 1 | 5 | 1/3 |
| 风能利用率 | 1/7 | 1/5 | 1 | 1/5 |
| 风功率密度 | 1/2 | 3 | 5 | 1 |

据表，我们列出对比矩阵：

$$\begin{bmatrix} 1 & 6 & 7 & 2 \\ 1/6 & 1 & 5 & 1/3 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1/5 \\ 1/2 & 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

运用 MATLAB 软件，得出结果指标层对目标层

的权向量，(0.38 0.28 0.15 0.08 0.11)

下面进行单因素评价矩阵：

$$\text{容量系数矩阵} \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 7 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1/2 & 5 & 2 \\ 1/2 & 2 & 1 & 4 & 2 \\ 1/7 & 1/5 & 1/4 & 1 & 1/3 \\ 1/5 & 1/2 & 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \text{风能密度矩阵} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 7 & 5 & 5 \\ 1/2 & 1 & 4 & 3 & 3 \\ 1/7 & 1/4 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1/5 & 1/3 & 2 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/3 & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{风能利用率矩阵:} \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 4 & 3 & 3 \\ 2 & 1 & 7 & 5 & 5 \\ 1/4 & 1/7 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1/3 & 1/5 & 2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/5 & 3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\text{风功率密度矩阵:} \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 4 & 1 & 1/3 \\ 3 & 1 & 6 & 3 & 1 \\ 1/4 & 1/6 & 1 & 1/5 & 1/7 \\ 1 & 1/3 & 5 & 1 & 1/2 \\ 3 & 1 & 7 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

运用 MATLAB，对各个矩阵进行一致性检验，通过一致性检验并归一化处理，得到标准化特征向量（权向量）：

$$w_1 = (0.4443 \quad 0.1715 \quad 0.2332 \quad 0.0464 \quad 0.1046)$$

$$w_2 = (0.4758 \quad 0.2636 \quad 0.0538 \quad 0.0981 \quad 0.1087)$$

$$w_3 = (0.1323 \quad 0.3485 \quad 0.0411 \quad 0.1151 \quad 0.3269)$$

$$w_4 = (0.2618 \quad 0.4721 \quad 0.0537 \quad 0.1160 \quad 0.0964)$$

对象层对目标层的组合权向量

$$(0.5327 \quad 0.1338 \quad 0.0495 \quad 0.2840) \bullet \begin{bmatrix} 0.4443 & 0.1715 & 0.2332 & 0.0464 & 0.1046 \\ 0.4758 & 0.2636 & 0.0538 & 0.0981 & 0.1087 \\ 0.1323 & 0.3485 & 0.0411 & 0.1151 & 0.3269 \\ 0.2618 & 0.4721 & 0.0537 & 0.1160 & 0.0964 \end{bmatrix} \\ = (0.38 \quad 0.28 \quad 0.15 \quad 0.08 \quad 0.11)$$

容量系数的大小决定于风力发电机的参数和性能以及风能资源情况，由模糊综合评

判法的最大隶属原则可以知道，权重值越大对应的待选方案越优秀。根据 MATLAB 软件所求得的目标层的权重值可以得出，从风能资源与风机匹配角度来看，现有风机比新型风机更加适合。

注释：求详解过程详见附录。

4.3 问题三的解答

4.3.1 问题三的分析

要求我们解决因为安全生产需要，风机每年需进行两次停机维护，每次维护需一组维修人员连续工作 2 天。同时风电场每天需有一组维修人员值班以应对突发情况。对风电场现有 4 组维修人员进行从事值班或维护工作制定维修人员的排班方案与风机维护计划，使各组维修人员的工作任务相对均衡，且风电场具有较好的经济效益。针对问题，我们融合运筹学思想，结合 0-1 整数规划方法，使用 Lingo 软件，对维修人员进行排班。

4.3.2 问题三模型的建立

经过对题目的分析，因为风机每年需要维护两次，每次 2 天为一个班次，可以以半年为风机维护周期，一个周期内总的需要班次（值班、维护）为 $180/2+124=214$ ，以第 k 组维修第 i 班次是否上班为决策变量，以所给该风电场每班次至少需要的班组数及风机维修排班要求为约束条件，建立以下约束式：

由题目所给条件限制可知，每次维护需一组维修人员连续工作 2 天，同时每天至少有一组维修人员值班，每组维修人员连续工作时间（值班或维护）不超过 6 天才能满足要求。我们认为最合适的排班方式是以一段连续的时间为一个循环节，4 组人员轮流按照循环的轮班方式完成维修和值班任务。

假设 x_{ki} 表示第 k 组被安排上第 i 次班，为方便本文模型的建立及求解，本文假设 x_{ki} 为 0-1 变量，既有：

$$x_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{表示第 } k \text{ 组上第 } i \text{ 次班} \\ 0 & \text{表示第 } k \text{ 组不上第 } i \text{ 次班} \end{cases}$$

由题目可知四组维修人员一共要上 214 个班次，则有：

$$\sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^n x_{ki} \geq 214 \quad (1)$$

又同时风电场每天需有一组维修人员值班，则有：

$$\sum_{k=1}^4 x_{ki} \geq 1 \quad (2)$$

最后 每组维修人员连续工作时间（值班或维护）不超过 6 天，则有：

$$\sum_{k=1}^4 x_{ki} \leq 3 \quad (3)$$

联立（1）（2）（3）式得到如下 0-1 整数规划模型

目标函数：
$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{214} x_{ki} p_i \quad (p_i \text{ 第 } i \text{ 个维护周期的平均功率; } i=1,2,\dots,214)$$

约束条件：

$$s.t. \begin{cases} \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{214} x_{ki} \geq 214, & k=1, 2,3,4, i=1,2,\dots,214 \\ \sum_{k=1}^4 x_{ki} \geq 1, & i=1,2,\dots,214 \\ \sum_{k=1}^4 x_{ki} \leq 3, & k=1, 2,3,4, i=1,2,\dots,214 \\ x_{ki} = 0,1 & (x_{ki} \text{ 取整数}) \end{cases}$$

以该风电场所需的最短维修时间和最少风能资源损失为目标函数，将所得结果求和便得到如下模型：

方案特点：

- （1）按照循环顺序（每 180 天一个循环节）进行排班的；
- （2）维修情况层次分明：
 - a. 每两天为一个班次，维修人员进行维修或者值班；
 - b. 每个班次保证至少有一组人维修，一组维修人员进行值班，；
 - c. 剩下的班次保证有一组维修人员值班，其他组的维修人员休息
- （3）各组维修人员的工作任务相对较均衡，排班容易，经济效益很好；
- （4）完成两次停机维护所用时间为 $t=180$ 天，所需班次=214 个；

最后运用 Lingo 程序编程（程序见附录）求解可知，将所得的 Z 取整数，即可得到结果。

| 天数 | 风机编号 | 维护组 | 值班组 | 天数 | 风机编号 | 维护组 | 值班组 |
|----|------|-----|-----|-----|-------------|-----|-----|
| 1 | 1 2 | BC | A | 114 | 113 114 115 | BCD | C |
| 2 | | | | 115 | | | |
| 3 | 3 4 | ACD | B | 116 | 116 117 118 | ACD | D |

| | | | | | | | |
|----|-------|-----|---|-----|------------------|------|--------|
| 4 | | | | 117 | 119 120 | | |
| 5 | 5 | AB | C | 118 | | AB | A |
| 6 | | | | 119 | | | |
| 7 | 无 | 无 | D | 120 | 无 121 122 123 | 无 | B |
| 8 | 6 | BCD | A | 121 | 97 98 | BCD | C |
| 9 | | | | 122 | | | |
| 10 | 7 8 | ACD | B | 123 | 124 | A | D |
| 11 | | | | 124 | | | |
| 12 | 9 | AB | C | 125 | 100 101 102 | ACD | A |
| 13 | | | | 126 | | | |
| 14 | 无 | 无 | D | 127 | 103 104 | AB | B |
| 15 | 10 | BCD | A | 128 | 无 | 无 | C |
| 16 | | | | 129 | | | |
| 17 | 11 12 | ACD | B | 130 | 105 106 107 | BCD | D |
| 18 | | | | 131 | | | |
| 19 | 13 | AB | C | 132 | 108 | ACD | A |
| 20 | | | | 133 | | | |
| 21 | 无 | 无 | D | 134 | | | B |
| 22 | 14 | BCD | A | 135 | 99 | AB | C |
| 23 | | | | 136 | | | |
| 24 | 15 | ACD | B | 137 | 无 | 无 | A B |
| 25 | | | | 138 | | | |
| 26 | 16 | AB | C | 139 | 111 112 | | |
| 27 | | | | 140 | | | |
| 28 | 无 | 无 | D | 141 | 无 | 无 | C |
| 29 | 17 | BCD | A | 142 | 97 | BCD | A |
| 30 | | | | 143 | | | |
| 31 | 18 19 | ACD | B | 144 | 98 99 | DACD | A |
| 32 | | | | 145 | | | |
| 33 | 20 | AB | C | 146 | 100 | AB | B |
| 34 | | | | 147 | | | |
| 35 | 无 | 无 | D | 148 | 无 | 无 | C |
| 36 | 20 | BCD | A | 149 | 101 102 | BCD | D |
| 37 | | | | 150 | | | |
| 38 | 21 | ACD | B | 151 | 103 | ACD | B |
| 39 | | | | 152 | | | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-----|---|-----|---------|-----|---|
| 40 | 22 23 | AB | C | 153 | 104 105 | AB | C |
| 41 | | | | 154 | | | |
| 42 | 无 | 无 | D | 155 | 无 | 无 | D |
| 43 | 24 25 | BCD | A | 156 | 106 | BCD | A |
| 44 | | | | 157 | | | |
| 45 | 26 44 | ACD | B | 158 | 107 | ACD | B |
| 46 | | | | 159 | | | |
| 47 | 45 46 | AB | C | 160 | 108 109 | AB | C |
| 48 | | | | 161 | | | |
| 49 | 无 | 无 | D | 162 | 无 | 无 | D |
| 50 | 47 48 | BCD | A | 163 | 110 | BCD | A |
| 51 | | | | 164 | | | |
| 52 | 49 | ACD | B | 165 | 111 112 | A | B |
| 53 | | | | 166 | | | |
| 54 | 50 | AB | C | 167 | 113 114 | | |
| 55 | | | | 168 | | | |
| 56 | 无 | 无 | D | 169 | 115 | | |
| 57 | 51 52 | BCD | A | 170 | 116 | | |
| 58 | | | | 171 | | | |
| 59 | 53 54 | ACD | B | 172 | 117 | | |
| 60 | | | | 173 | 118 119 | | |
| 61 | 55 56 | AB | C | 174 | | | |
| 62 | | | | 175 | 120 | | |
| 63 | 无 | 无 | D | 176 | 121 | | |
| 64 | 57 | BCD | A | 177 | | | |
| 65 | | | | 178 | 122 123 | | |
| 66 | 58 59 | ACD | B | 179 | 124 | | |
| 67 | | | | 180 | | | |
| 68 | 60 | AB | C | | | | |
| 69 | | | | | | | |
| 70 | 无 | 无 | D | | | | |
| 71 | 61 62 | BCD | A | | | | |
| 72 | | | | | | | |
| 73 | 63 | ACD | B | | | | |
| 74 | | | | | | | |
| 75 | 64 | AB | C | | | | |
| 76 | | | | | | | |
| 77 | 无 | 无 | D | | | | |
| 78 | 65 | BCD | A | | | | |

| | | | |
|-----|-------|---------|-----|
| 79 | | | |
| 80 | 66 67 | ACD | B |
| 81 | | | |
| 82 | 68 69 | AB | C |
| 83 | | | |
| 84 | 无 | BCD | D |
| 85 | 70 | BCD | A |
| 86 | | | |
| 87 | 71 72 | DACD | B |
| 88 | | | |
| 89 | 73 | AB | C |
| 90 | | | |
| 91 | 74 75 | 无 | D |
| 92 | 76 | BCD | A |
| 93 | | | |
| 94 | 无 | ACD | B |
| 95 | 77 78 | AB | C |
| 96 | | | |
| 97 | 78 | AB | |
| 98 | 79 80 | 无 | D |
| 99 | | | |
| 100 | 81 | BCD | A |
| 101 | 82 83 | A | B |
| 102 | | | |
| 103 | 84 85 | | |
| 104 | 86 | ACD | C |
| 105 | | | |
| 106 | 87 88 | AB 无 | D |
| 107 | 89 | | |
| 108 | | | A |
| 109 | 无 | BCD | B |
| 110 | 90 91 | | |
| 111 | | | ACD |
| 112 | 92 93 | AB | C |
| 113 | 94 | CD | |
| | 95 96 | AB | D |

六 模型的评价与推广

6.1 模型的评价

1、优点：

(1) 采用 Excel 软件，对处理大量的数据具有速度快、效率高、准确度高的优点。

(2) 层次分析法集系统性、实用性、间接性于一体，把定性和定量方法结合起来运用 MATLAB 计算简便，所得结果简单明确，容易被决策者了解和掌握。

(3) 利用 0-1 线性规划的思想来求解维修人员调度问题，其方法简便、快捷、直观、可操作性强；整数规划模型将约束条件统一化，运用 Lingo 软件即可求解所建的模型，费时少。

(4) 此模型在正确、清楚地分析了题意的情况下，加之坚实的数学基础，对风电场运行状况进行了合理地分析及有效的优化，适用于现实，具有很好的通用性。

2、缺点：

(1) 由于数据选取的局限性及人的主观因素对整个过程的影响，该法中的判断、比较以及结果的计算过程使得整个模型比较粗糙，不适用于精确度高的问题。

(2) 整数规划模型的建立并未考虑到维修人员因特殊原因而请假缺席的情况以及忽略了对国家法定节假日的考虑。

6.2 模型的推广

层次分析法在处理复杂地决策问题上有很好的实用性和有效性，应用遍及经济计划和管理、能源政策和分配、行为科学、军事指挥、运输、农业、教育、人才、医疗、环境等等领域。

0-1 整数规划模型，能够为现实管理调度中的某些常见的排班问题提供参考，如列车服务人员调度问题、机乘服务人员的排班问题及保安室值班排班问题等等。

七 参考文献

- [1] 吕鹏远，邓志勇. 风电场建设中的风力发电机组选型[J]. 水利水电技术, 2009, 40 (9): 57-59
- [2] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M], 北京: 科学出版社. 2005. 2
- [3] 周 慧勤, 马进, 符金伟. 基于 AHP 模糊综合评判法的风力发电机选型研究[J], 华东电力, 2012, 40 (9): 1494-1498
- [4] 张希良. 风能开发利用[M]. 北京: 化学出版社, 2005: 5-6.

[5] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (11):

1-5

八 附录

附录一:

```
clc;
```

```
clear;
```

```
A=[1 3 2 7 5;
```

```
1/3 1 1/2 5 2;
```

```
1/2 2 1 4 2;
```

```
1/7 1/5 1/4 1 1/3;
```

```
1/5 1/2 1/2 3 1]
```

```
[m,n]=size(A);
```

```
RI=[0 0 0.58 0.90 1.12 1.24 1.32 1.41 1.45 1.49 1.51];
```

```
R=rank(A);
```

```
[V,D]=eig(A)
```

```
tz=max(D);
```

```
B=max(tz)
```

```
[row,col]=find(D==B);
```

```
C=V(:,col);
```

```
CI=(B-n)/(n-1);
```

```
CR=CI/RI (1,n);
```

```
if CR<0.10
```

```
    disp('CI=');disp(CI);
```

```
    disp('cr=');disp(CR);
```

```
    disp('对比矩阵 A 通过一致性检验, 各向量权重向量 Q 为: ');
```

```
    Q=zeros(n,1);
```

```
    for i=1:n
```

```
        Q(i,1)=C(i,1)/sum(C(:,1));
```

```

    end
    Q
else
    disp(' 对比矩阵 A 未通过一致性检验，需对对比矩阵 A 重新构造');
End

```

```

A =

    1.0000    3.0000    2.0000    7.0000    5.0000
    0.3333    1.0000    0.5000    5.0000    2.0000
    0.5000    2.0000    1.0000    4.0000    2.0000
    0.1429    0.2000    0.2500    1.0000    0.3333
    0.2000    0.5000    0.5000    3.0000    1.0000

```

```

V =

```

```

Columns 1 through 4

```

```

    0.8190          0.6933          0.6933          -0.8563
    0.3161        -0.1891 + 0.3959i    -0.1891 - 0.3959i    0.0055 + 0.2022i
    0.4299          0.5267 + 0.0284i    0.5267 - 0.0284i    0.4206 - 0.0824i
    0.0855        -0.0451 - 0.1201i    -0.0451 + 0.1201i    0.0051 + 0.0472i
    0.1928        -0.1784 + 0.0190i    -0.1784 - 0.0190i    -0.0046 - 0.1995i

```

```

Column 5

```

```

-0.8563
0.0055 - 0.2022i
0.4206 + 0.0824i

```

$$0.0051 - 0.0472i$$

$$-0.0046 + 0.1995i$$

D =

Columns 1 through 4

| | | | |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 5.1156 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | $-0.0413 + 0.7196i$ | 0 | 0 |
| 0 | 0 | $-0.0413 - 0.7196i$ | 0 |
| 0 | 0 | 0 | $-0.0165 + 0.2629i$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 |

Column 5

| |
|---------------------|
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| $-0.0165 - 0.2629i$ |

B =

$$5.1156$$

CI=

$$0.0289$$

cr=

0.0258

对比矩阵 A 通过一致性检验，各向量权重向量 Q 为：

Q =

0.4443

0.1715

0.2332

0.0464

0.1046

clc;

clear;

A=[1 2 7 5 5;

1/2 1 4 3 3;

1/7 1/4 1 1/2 1/3;

1/5 1/3 2 1 1;

1/5 1/3 3 1 1]

[m,n]=size(A);

RI=[0 0 0.58 0.90 1.12 1.24 1.32 1.41 1.45 1.49 1.51];

R=rank(A);

[V,D]=eig(A)

tz=max(D);

B=max(tz)

[row,col]=find(D==B);

C=V(:,col);

CI=(B-n)/(n-1);

```

CR=CI/RI (1,n);
if CR<0.10
    disp('CI=');disp(CI);
    disp('cr=');disp(CR);
    disp('对比矩阵 A 通过一致性检验，各向量权重向量 Q 为: ');
    Q=zeros(n,1);
    for i=1:n
        Q(i,1)=C(i,1)/sum(C(:,1));
    end
    Q
else
    disp('对比矩阵 A 未通过一致性检验，需对对比矩阵 A 重新构造');
end
A =

```

```

1.0000    2.0000    7.0000    5.0000    5.0000
0.5000    1.0000    4.0000    3.0000    3.0000
0.1429    0.2500    1.0000    0.5000    0.3333
0.2000    0.3333    2.0000    1.0000    1.0000
0.2000    0.3333    3.0000    1.0000    1.0000

```

V =

```

-0.8409         0.7773         0.7773        -0.8575        -0.8575
-0.4658         0.4419 + 0.2711i    0.4419 - 0.2711i    0.3672 - 0.2415i    0.3672 + 0.2415i
-0.0951        -0.0200 - 0.1557i    -0.0200 + 0.1557i    0.0190 - 0.0064i    0.0190 + 0.0064i
-0.1733        -0.0261 + 0.0783i    -0.0261 - 0.0783i    0.0737 + 0.2146i    0.0737 - 0.2146i
-0.1920        -0.2829 + 0.1247i    -0.2829 - 0.1247i    -0.0748 - 0.1185i    -0.0748 + 0.1185i

```

D =

| | | | | |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 5.0721 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | $-0.0307 + 0.6008i$ | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | $-0.0307 - 0.6008i$ | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | $-0.0053 + 0.0548i$ | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | $-0.0053 - 0.0548i$ |

B =

5.0721

CI=

0.0180

cr=

0.0161

对比矩阵 A 通过一致性检验，各向量权重向量 Q 为：

Q =

0.4758

0.2636

0.0538

0.0981

0.1087

```

>>

clc;

clear;

A=[1 1/3 4 1 1/3;
3 1 6 3 1;
1/4 1/6 1 1/5 1/7
1 1/3 5 1 1/2
3 1 7 2 1]

[m,n]=size(A);

RI=[0 0 0.58 0.90 1.12 1.24 1.32 1.41 1.45 1.49 1.51];

R=rank(A);

[V,D]=eig(A)

tz=max(D);

B=max(tz)

[row,col]=find(D==B);

C=V(:,col);

CI=(B-n)/(n-1);

CR=CI/RI (1,n);

if CR<0.10

    disp('CI=');disp(CI);

    disp('cr=');disp(CR);

    disp('对比矩阵 A 通过一致性检验, 各向量权重向量 Q 为: ');

    Q=zeros(n,1);

    for i=1:n

        Q(i,1)=C(i,1)/sum(C(:,1));

    end

    Q

else

    disp('对比矩阵 A 未通过一致性检验, 需对对比矩阵 A 重新构造');

```

End

A =

| | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.0000 | 0.3333 | 4.0000 | 1.0000 | 0.3333 |
| 3.0000 | 1.0000 | 6.0000 | 3.0000 | 1.0000 |
| 0.2500 | 0.1667 | 1.0000 | 0.2000 | 0.1429 |
| 1.0000 | 0.3333 | 5.0000 | 1.0000 | 0.5000 |
| 3.0000 | 1.0000 | 7.0000 | 2.0000 | 1.0000 |

V =

| | | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|
| 0.2545 | -0.0208 + 0.2080i | -0.0208 - 0.2080i | -0.0483 + 0.2566i | -0.0483 |
| - 0.2566i | | | | |
| 0.6703 | 0.8320 | 0.8320 | -0.4382 - 0.1956i | |
| -0.4382 + 0.1956i | | | | |
| 0.0791 | -0.0588 - 0.0985i | -0.0588 + 0.0985i | -0.0325 + 0.0101i | -0.0325 |
| - 0.0101i | | | | |
| 0.2907 | -0.2401 + 0.2464i | -0.2401 - 0.2464i | 0.0053 - 0.2414i | 0.0053 |
| + 0.2414i | | | | |
| 0.6287 | 0.2668 - 0.2477i | 0.2668 + 0.2477i | 0.8013 | |
| 0.8013 | | | | |

D =

| | | | |
|--------|-------------------|---|---|
| 5.0864 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | | | |
| 0 | -0.0447 + 0.6299i | 0 | 0 |
| 0 | | | |

```

0          0          -0.0447 - 0.6299i          0
0
0          0          0          0.0014 + 0.2027i
0
0          0          0          0
0.0014 - 0.2027i

```

B =

```

5.0864

```

CI=

```

0.0216

```

cr=

```

0.0193

```

对比矩阵 A 通过一致性检验，各向量权重向量 Q 为：

Q =

```

0.1323

```

```

0.3485

```

```

0.0411

```

```

0.1511

```

```

0.3269

```

```

clc;

```

```

clear;

```

```

A=[1 1/2 4 3 3;
2 1 7 5 5;
1/4 1/7 1 1/2 1/3;
1/3 1/5 2 1 2;
1/3 1/5 3 1/2 1]

[m,n]=size(A);
RI=[0 0 0.58 0.90 1.12 1.24 1.32 1.41 1.45 1.49 1.51];
R=rank(A);
[V,D]=eig(A)
tz=max(D);
B=max(tz)
[row,col]=find(D==B);
C=V(:,col);
CI=(B-n)/(n-1);
CR=CI/RI (1,n);
if CR<0.10
    disp(' CI=' );disp(CI);
    disp(' cr=' );disp(CR);
    disp(' 对比矩阵 A 通过一致性检验，各向量权重向量 Q 为: ');
    Q=zeros(n,1);
    for i=1:n
        Q(i,1)=C(i,1)/sum(C(:,1));
    end
    Q
else
    disp(' 对比矩阵 A 未通过一致性检验，需对对比矩阵 A 重新构造');
end

A =

```

| | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1.0000 | 0.5000 | 4.0000 | 3.0000 | 3.0000 |
| 2.0000 | 1.0000 | 7.0000 | 5.0000 | 5.0000 |
| 0.2500 | 0.1429 | 1.0000 | 0.5000 | 0.3333 |
| 0.3333 | 0.2000 | 2.0000 | 1.0000 | 2.0000 |
| 0.3333 | 0.2000 | 3.0000 | 0.5000 | 1.0000 |

V =

| | | | | |
|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0.4650 | 0.4240 + 0.1896i | 0.4240 - 0.1896i | 0.6942 | 0.6942 |
| 0.8384 | 0.7230 | 0.7230 | -0.4546 - 0.5107i | -0.4546 + 0.5107i |
| 0.0953 | 0.0555 - 0.1364i | 0.0555 + 0.1364i | -0.0373 + 0.0336i | -0.0373 - 0.0336i |
| 0.2060 | -0.0790 + 0.3510i | -0.0790 - 0.3510i | -0.1831 + 0.0956i | -0.1831 - 0.0956i |
| 0.1713 | -0.3144 - 0.1075i | -0.3144 + 0.1075i | 0.0616 - 0.0397i | 0.0616 + 0.0397i |

D =

| | | | | |
|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 5.1552 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | -0.0101 + 0.8877i | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | -0.0101 - 0.8877i | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | -0.0675 + 0.0673i | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | -0.0675 - 0.0673i |

B =

5.1552

CI=

0.0388

cr=

0.0346

对比矩阵 A 通过一致性检验，各向量权重向量 Q 为：

Q =

0.2618

0.4721

0.0537

0.1160

0.0964

clc;

clear;

A=[1 6 7 2;

1/6 1 5 1/3;

1/7 1/5 1 1/5;

1/2 3 5 1]

[m,n]=size(A);

RI=[0 0 0.58 0.90 1.12 1.24 1.32 1.41 1.45 1.49 1.51];

R=rank(A);

[V,D]=eig(A)

tz=max(D);

B=max(tz)

[row,col]=find(D==B);

```

C=V(:, col);
CI=(B-n)/(n-1);
CR=CI/RI (1, n);
if CR<0.10
    disp('CI=');disp(CI);
    disp('cr=');disp(CR);
    disp('对比矩阵 A 通过一致性检验，各向量权重向量 Q 为: ');
    Q=zeros(n, 1);
    for i=1:n
        Q(i, 1)=C(i, 1)/sum(C(:, 1));
    end
    Q
else
    disp('对比矩阵 A 未通过一致性检验，需对对比矩阵 A 重新构造');
end

```

A =

| | | | |
|--------|--------|--------|--------|
| 1.0000 | 6.0000 | 7.0000 | 2.0000 |
| 0.1667 | 1.0000 | 5.0000 | 0.3333 |
| 0.1429 | 0.2000 | 1.0000 | 0.2000 |
| 0.5000 | 3.0000 | 5.0000 | 1.0000 |

V =

| | | | |
|--------|-------------------|-------------------|---------|
| 0.8588 | 0.8898 | 0.8898 | -0.7701 |
| 0.2156 | -0.2118 + 0.2269i | -0.2118 - 0.2269i | -0.0825 |
| 0.0798 | -0.0466 - 0.0972i | -0.0466 + 0.0972i | 0.0000 |
| 0.4578 | 0.3040 + 0.0888i | 0.3040 - 0.0888i | 0.6326 |

D =

| | | | |
|--------|---------------------|---------------------|---------|
| 4.2232 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | $-0.1116 + 0.9645i$ | 0 | 0 |
| 0 | 0 | $-0.1116 - 0.9645i$ | 0 |
| 0 | 0 | 0 | -0.0000 |

B =

4.2232

CI=

0.0744

cr=

0.0827

对比矩阵 A 通过一致性检验，各向量权重向量 Q 为：

Q =

0.5327

0.1338

0.0495

0.2840

>>

| K | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------|--------|--------|---------|--------|
| \mathbf{w}_k | 0.4443 | 0.4758 | 0.1323 | 0.2618 |
| | 0.1715 | 0.2636 | 0.3485 | 0.4721 |
| | 0.2332 | 0.0538 | 0.0411 | 0.0537 |
| | 0.0464 | 0.0981 | 0.1511 | 0.1160 |
| | 0.1046 | 0.1087 | 0.3269 | 0.0964 |
| \mathbf{CI}_k | 0.0289 | 0.0180 | -0.0320 | 0.0388 |