

# 风电场运行状况分析及优化

## 摘要

风电场风机的评估选型以及维修人员的合理排班规划对风电场的经济效益具有重要影响。本文通过对某地风能数据的分析、计算，利用威布尔分布等数学方法评估风能资源以及对风电机组进行选型，并且利用 0-1 整数规划制定维修人员工作排班表。

针对问题一，本文对附件一的数据进行处理后，利用平均风速、有效小时占比、风功率密度对当地风能资源进行评估，其中在分析有效小时占比时对数据进行了合理性检验中的范围检验，之后利用风面-利用系数对风能资源利用情况进行评估，并且计算出假设风轮扫面半径为 55m 时各月与全年风能利用系数。最终得出结论：该地风能资源情况较好且该风电场风能资源利用情况较好。

针对问题二，本文对附件二、附件三、附件四的数据、参数进行分析处理后，仅利用现有机型中六种风机所在处的风速情况进行威布尔分布参数估计，结合各机型自身切入风速  $v_i$ 、额定风速  $v_r$ 、切出风速  $v_c$ 、额定功率  $P_r$  计算出容量系数  $C_f$ ，并凭此参数评估原有风机与新机型风机对各处风能资源的匹配程度，得出结论：新机型风机中的机型三与各处风能资源最为匹配，即此机型比现有机型为适合，并且机型四与机型五不如现有机型合适。

针对问题三，需要我们合理安排维修人员的排班方案与风机维护计划，于是，我们以发电损失为目标，以安全生产、工作要求以及保证各维修队均衡工作为约束，将风机是否被维护、维修队是否工作设为 0-1 整型变量，建立 0-1 整数规划模型，利用 Matlab 得到发电量损失为  $6.24 \times 10^{12} J$ ；以及各维修队工作时长为：231 天的结果。

综上所述，本文依据各题给出的数据以及条件较全面且严谨地完成了风能资源及其利用情况的评估以及进行了风机选型，最后制定出合理的维修人员的排班方案与风机维护计划。经过分析验证，本文的模型具有合理性和一定的现实意义。

**关键字：** 风能资源   风机   容量系数   整数规划

## 一、问题重述

### 1.1 问题背景

风能是最具活力的可再生能源之一，而风力发电是风能的应用形式中最重要的一种。它不会像依靠燃烧化石燃料的发电厂那样污染空气，风电机也不会产生导致酸雨、烟雾或温室气体的大气排放。

### 1.2 问题的提出

已知中国的某个风电场分一、二期先后进行了两次建设，现有 124 台风机，总装机容量约为 20 万千瓦。为了安全起见，风力发电机组需要每年关闭两次进行维护，两次维护之间的连续工作时间不超过 270 天，每次需要一组维护人员连续工作两天，同时，风电场需要每天都有一组维护人员值班，以应对突发状况。通过建立数学模型，解决下列问题：

- (1) 尝试利用该风电场一年内风电场每日实际输出功率和每 15 分钟各风机安装处的平均风速对该风电场的风能资源及其利用情况进行评估。
- (2) 利用该风电场几个典型风机以及新型号风机所在位置的风速信息，从风能资源利用情况与风机匹配角度判断新型风机是否比原有风机更加适合。
- (3) 该风电场有 4 组维护人员可用于值班或维护工作，每组维护人员连续工作时间不超过 6 天。请制定维护人员的调度计划和风机维护计划，使每组维护人员的工作任务比较均衡，同时风电场具有良好的经济效益。

## 二、模型的假设

- 假设该风电场不会受到自然灾害等意外因素造成的风机损坏；
- 假设该风电场各处环境相同即不会有其他因素影响风电机；
- 假设该地空气密度为一个大气压条件下常温 (20°) 时的空气密度  $1.205\text{kg}/\text{m}^3$ ；
- 假设风轮扫面半径为 55m；
- 假设各维修队在工作时段正常工作。

### 三、符号说明

表 1 符号表

符号	定义	单位
$D_i$	风功率密度	$M/W^2$
$\bar{D}$	平均风功率密度	$M/W^2$
$\rho$	空气密度	$kg/m^3$
$v$	风速	$m/s$
$C_p$	风能利用系数	
$S$	风轮的扫面面积	$m^2$
$P$	风电机输出功率	$W$
$P_r$	风电机额定功率	$W$
$P_d$	日平均功率	$W$
$P_a$	年平均输出功率	$W$
$C_S$	风-面利用系数	
$C_f$	容量系数	
$v_i$	风电机切入风速	$m/s$
$v_r$	风电机额定风速	$m/s$
$v_c$	风电机输出风速	$m/s$
$k$	形状参数	
$c$	比例参数	
$W$	风电机发电损失	$J$

### 四、问题分析

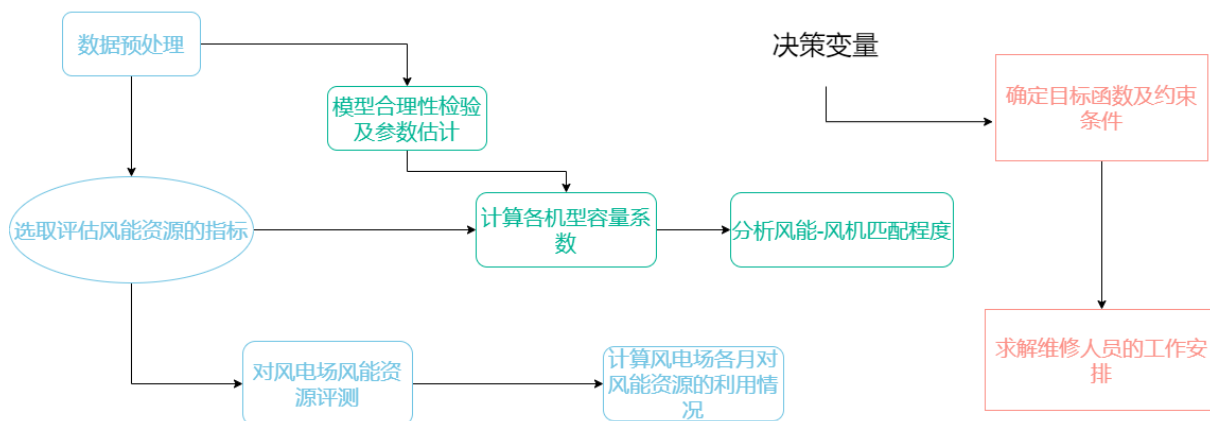


图 1 流程图

## 五、模型的建立与求解

### 5.1 问题一: 风能资源及其利用情况评估模型

风能资源及其利用情况的评估对风电场的运行与发展有着深远影响,不仅有助于已建成的风电场明晰自身情况并寻求改进方向以提高经济收益,同时对新风电场的选址与建设提供了指导性建议。

#### 5.1.1 模型建立

对风能资源详细的评估能了解当地风能资源情况,有利于未来风电场的设计选择。

本文从以下几个方面评估风能资源:

**平均风速:** 能清晰表示所在地风能资源状况的参数。

为了更好的显示风能资源状况优劣,根据附件一给出的 2015 年此风电场风速数据,本文提取出此风电场每月整点时刻平均风速计算平均值得到月平均风速日变化值,除此之外,计算出 2015 年此风电场全年整点时刻平均风速得到年平均风速日变化值,同时,计算出全年 12 个月各自的平均风速得到平均风速年变化值。最后,由于年平均风速越大意味着该地风能资源状况较好,且此参数最能显示风能资源的优劣<sup>[4]</sup>,所以我们求出 2015 年内该风电场风速平均值即年平均风速值。

**有效小时占比:** 又称风能可利用时间占比,代表测量时间内风速位于有效风速区间的累计小时数在所有小时数中的比例。有效小时占比是评价某一地区风能资源情况的重要参数,有效小时占比越大意味着风能资源越好。

我们间隔 1m/s 取风速区间,统计 2015 年此风电场各区间风速出现次数,得到全年风速频数分布值,同时,根据我国风能区域等级划分标准,有效风速范围为 3m/s——25m/s,于是我们观察全年风速频数分布,考虑风速位于 3m/s——25m/s 中的小时数比例评估风能资源。同时也可根据数据进行合理性检验中的范围检验(要求每小时平均风速

小于等于 40m/s)<sup>[3]</sup>

**风功率密度：**气流在单位时间内垂直通过单位面积的风能。

风功率密度是衡量某一地区风能资源的综合指标，评价风能开发潜力的重要参数，同时也可以在一定程度上反映风能利用率。

风功率密度计算公式为 (1)、平均风功率密度  $\bar{D}$  计算公式为 (2)：

$$D_i = \frac{1}{2} \rho v_i^3 \quad (1)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (2)$$

$n$  – 设定时段内的记录数

$\rho$  – 空气密度，单位为:kg/m<sup>3</sup>

$v^3$  – 第 i 次记录的平均风速的三次幂

对于空气密度  $\rho$ ，由模型的假设，设风电场空气密度为 1.205kg/m<sup>3</sup>。

结合公式 (1)、(2)，利用年平均风速日变化值可直接求得该地区 2015 年的**年风功率密度日变化值**。另外，计算另一重要指标年 (或) 月平均风功率密度时，我们考虑到不可用年 (或月) 平均风速计算年 (或月) 平均风功率密度<sup>[3]</sup>，于是我们提取出每小时平均风速来计算每小时平均风功率密度，得到 2015 年该地区每月逐小时风功率密度的平均值即**月平均风功率密度值**，同时计算出了 2015 年该地区全年逐小时风功率密度的平均值即**年平均风功率密度值**。

同时，本文通过以下参数评估风能资源利用状况：

**风-面利用系数：**风电机从风能中捕获的能量多少可以用风能利用系数  $C_p$  来表示<sup>[4]</sup>， $C_p$  的具体表达式如下：

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v^3 S} \quad (3)$$

$P$  – 风电机实际输出功率, 单位为 W

$S$  – 风轮的扫风面积，单位为 m<sup>2</sup>

由于不知道风轮的扫风面积，于是我们假设出风-面利用系数  $C_s$ ，具体表达式如下：

$$C_s = \frac{2P}{\rho v^3} \quad (4)$$

我们通过月平均风速、附件一中的风电机实际输出功率情况计算出的月平均实际输出功率，可以计算出 2015 年 12 个月风-面利用系数，我们在比较各月风能资源利用情况时，由于扫风面积不影响比较结果，不妨假设风轮扫面的半径为 55m，计算出各月风能利用系数，同时，为了对 2015 年全年风能资源利用情况进行一个大概评估，计算出全年风能利用系数。最后通过贝兹定律<sup>[2]</sup> 评估风能资源利用状况。

### 5.1.2 模型求解

通过 Matlab 计算出月风速日变化值并且通过 Python 绘图，将 12 个月按季度分成四张图，如图 2：

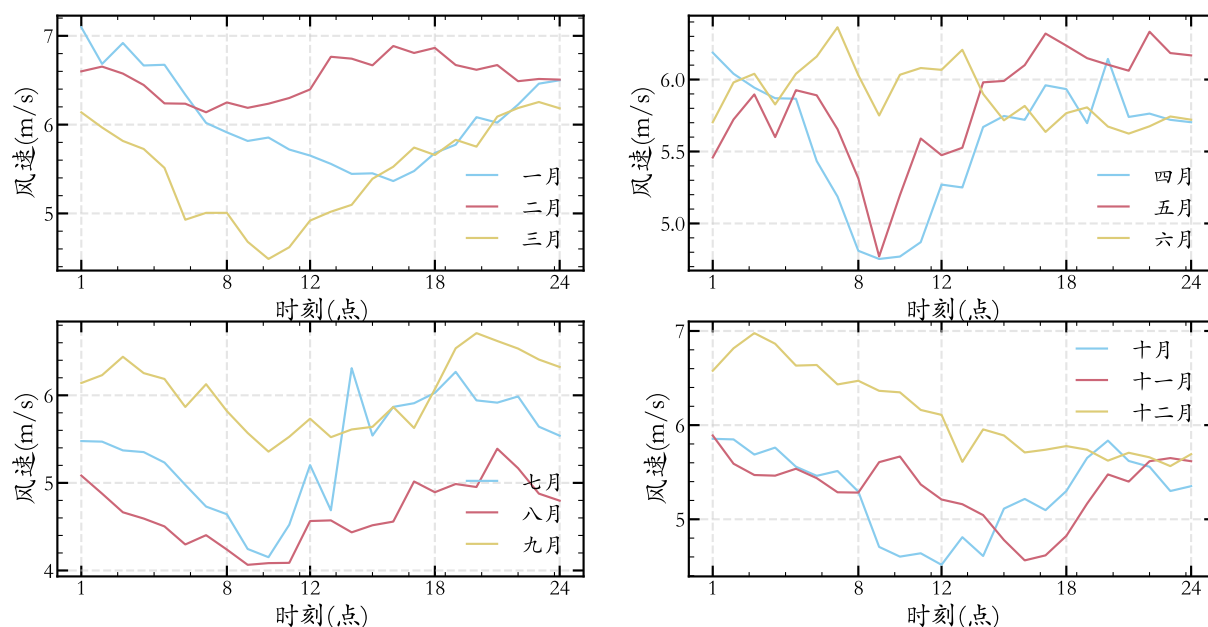


图 2 月风速日变化图

通过 Matlab 计算出年风速日变化值和年风功率日变化值，通过 Python 绘图，将两值绘制在同一张图上，如图 3：

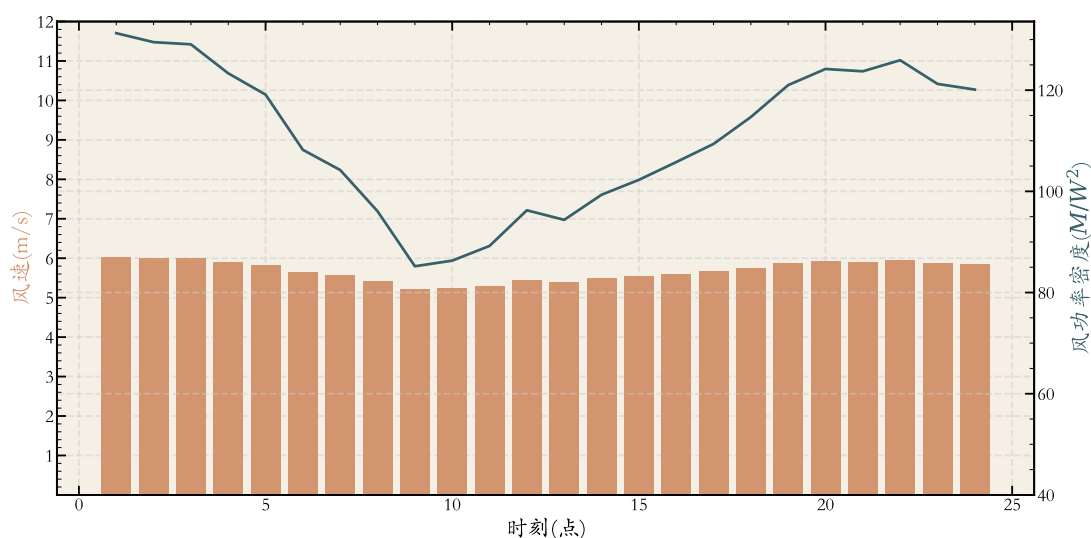


图 3 年风速 (风功率密度) 日变化图

由图 2 和图 3 可以看出，从月和年的角度观察，风速每日九至十点时平均风速及平均风功率密度较低。

通过 Matlab 计算出风速、风功率密度年变化值并通过 Python 将其绘制在同一张图上，如图 4:

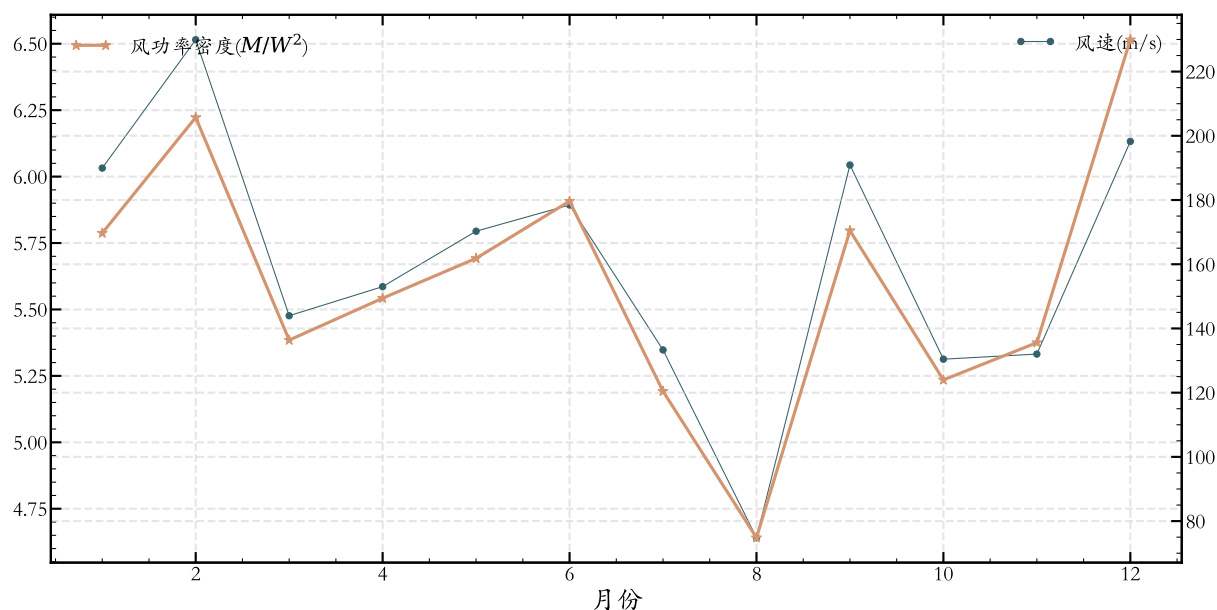


图 4 风速、风功率密度年变化图

通过 Matlab 计算出全年风速频数分布并通过 Python 绘制出分布直方图，并在图中划分出有效风速范围并指出该地区全年有效小时数所占比例为 84%，说明风能资源状况较好，同时所有平均风速皆小于 40m/s，通过合理性检验。如图 5:

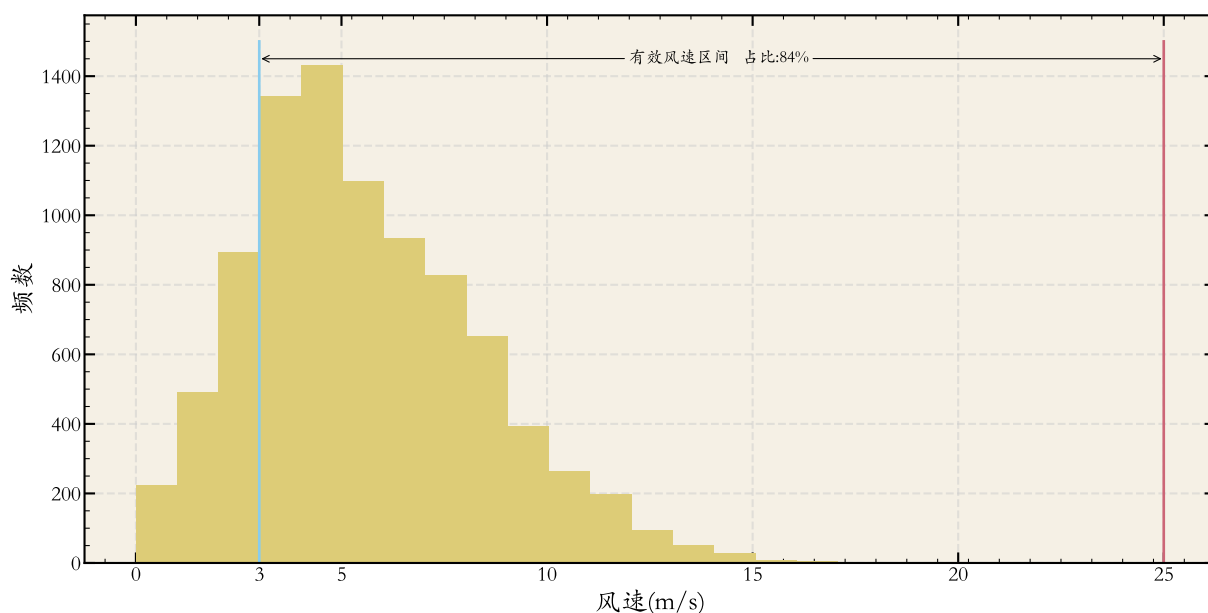


图 5 全年风速频数分布直方图

通过 Matlab 计算出年平均风速为 5.6756m/s、年平均风功率密度 157.7927W/m<sup>2</sup>，通过与表 2<sup>[4]</sup> 比对:

表 2 10m 高度风功率密度等级

风功率密度等级	风功率密度 ( $W/M^2$ )	年平均风速参考值	应用电网发电
1	<100	4.4	较差
2	100-150	5.1	一般
3	150-200	5.6	较好
4	200-250	6.0	好
5	250-300	6.4	很好
6	300-400	7.0	很好
7	400-1000	9.4	很好

由表 2，对比 10m 高度风功率密度等级，由计算出的年平均风速和年平均风功率密度可得该地风能资源状况较好。

通过 Matlab 计算出当风轮扫面半径为 55m 时各月风能利用系数，通过 Python 绘图，如图 5：

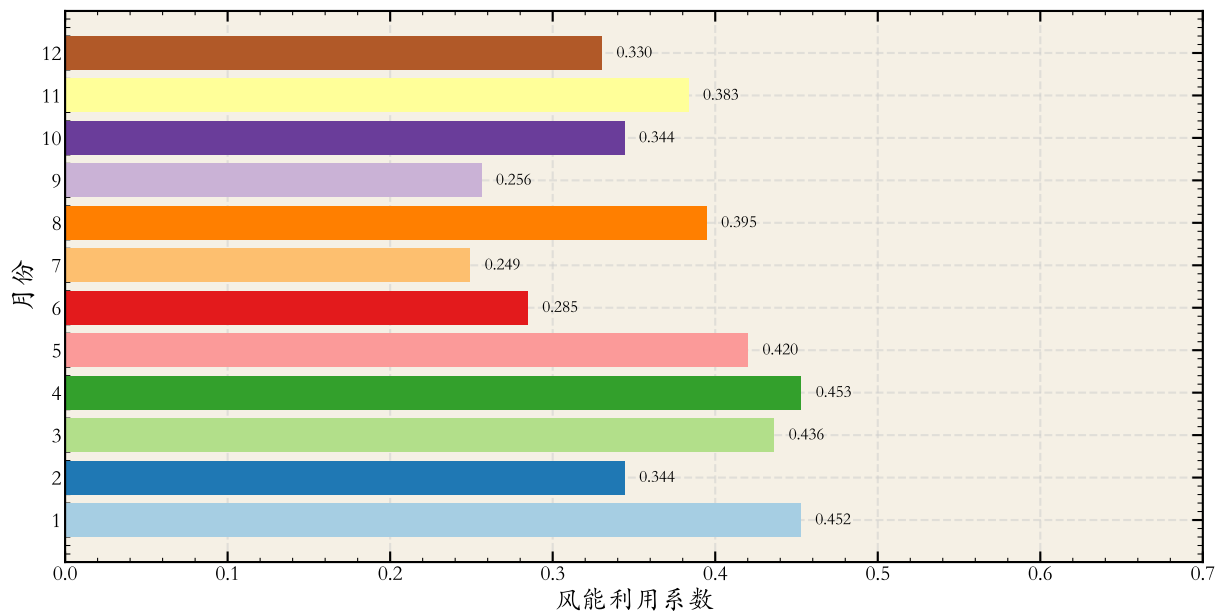


图 6 各月风能利用系数

通过 Matlab 计算出当风轮面积为 55m 时年风能利用系数为 0.369，低于贝兹极限 0.596，是合理的且说明该风电场风能利用情况较好。



## 5.2 问题二: 风能-风机匹配评估模型

风力机组的评价,除了与风电机组本身的型号及其参数(切入风速、切出风速、额定风速、额定功率等)有关,也取决于风力机组与所在地风能资源的匹配程度,本文利用容量系数最优方法判断新机型是否比现有机型更适合。

### 5.2.1 模型建立

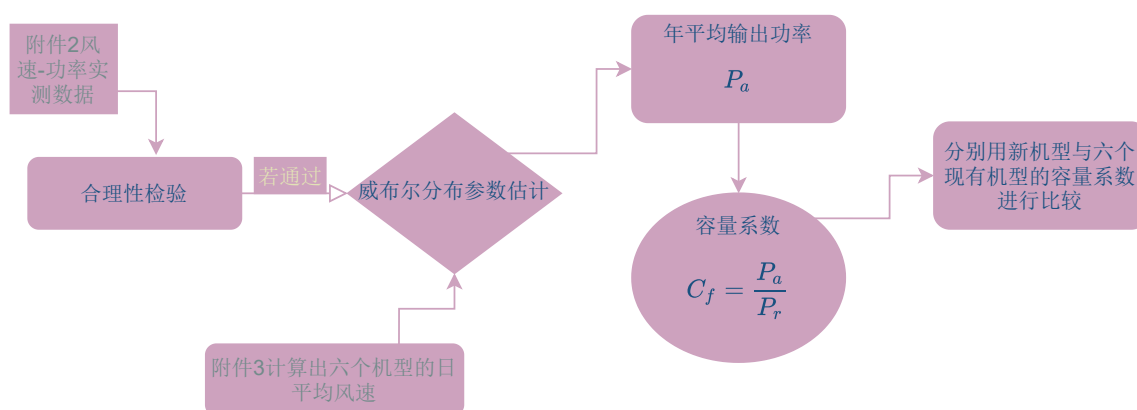


图 7 模型二流程图

根据附件二、附件三、附件四,所能利用的数据仅有原有机型所在地的风速信息、原有机型和新机型的型号及部分参数。我们想要更加严谨的评估风能资源与风机匹配程度即避免假设参数,查阅资料后发现容量系数这一参数能够符合我们的要求,此参数式风电场建设中风电机组选型的重要参数。容量系数仅涉及某地风能情况,根据风速与输出功率的函数以及风机本身参数即可计算,我们假设新机型接受各地原有机型处的风能资源,逐次比较容量系数即可完成评估

**Step1 合理性检验:** 风力机的输出功率可以由风速来表示,并且有风力机的功率输出特性曲线,表达式如下<sup>[4]</sup>:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_i \\ \eta(v)P_r & v_i \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_c \\ 0 & v > v_c \end{cases} \quad (5)$$

$v_i$  – 风电机切入风速

$v_r$  – 风电机额定风速

$v_c$  – 风电机切出风速

$P_r$  – 风力发电机额定输出功率

$\eta(v)$  – 切入风速和额定风速之间，风电机输出功率随风速变化的函数关系

上述  $\eta(v)$  输出特性理论上可以表示成三次函数<sup>[5]</sup>，于是我们利用附件三两种型号风机的风速-功率实测数据，拟合三次函数  $\eta(v) = a + bx^3$ 。

**Step2 威布尔函数参数估计：** 为了求出容量系数，我们利用附件二，首先对原有风电机组中的六个机型利用最小二乘法分别进行威布尔参数估计 (每个机型所处位置不同，风能资源不同)：

- 分别计算出六个机型风电机的日平均风速，得到各自日平均风速涵盖范围，取 1m/s 为步长划分成  $n$  个风速段：  $(0 \sim v_i), i = 1, \dots, n$ 。
- 统计六个机型风电机每个风速段日平均风速出现的频率  $p_i, i = 1, \dots, n$ 。
- 做如下变换：

$$\begin{aligned} x_i &= \ln v_i \\ y_i &= \ln[-\ln(1 - p_i)] \\ \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ k &= \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ c &= \exp \left[ - \left( \frac{\bar{y}}{k} - \bar{x} \right) \right] \end{aligned}$$

得到威布尔分布重要参数  $k$ 、 $c$ 。

Step3 计算年平均输出功率：得到双参数威布尔分布函数<sup>[1]</sup>如下：

$$P_w(v) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

由风力机功率输出特性表达式及威布尔分布函数 (6) 可计算出风电机年平均输出功率：

$$P_a = \frac{P_r}{(v_r - v_i)^3} \int_{v_i}^{v_r} (v - v_i)^3 P_w(v) dv + P_r \int_{v_r}^{v_c} P_w(v) dv \quad (7)$$

Step4 计算容量系数：于是容量系数  $C_f$  的具体表达式<sup>[4]</sup>为：

$$\begin{aligned} C_f &= \frac{P_a}{P_r} \\ &= \frac{1}{(v_r - v_i)^3} \int_{v_i}^{v_r} (v - v_i)^3 P_w(v) dv + \int_{v_r}^{v_c} P_w(v) dv \end{aligned} \quad (8)$$

### 5.2.2 模型求解

利用 Matlab，绘制出合理性检验的拟合函数图，如图 7：

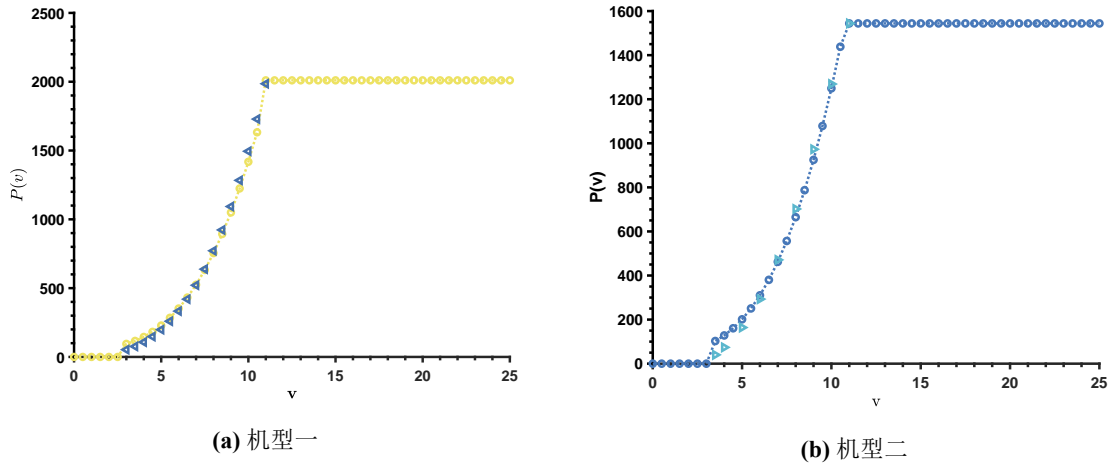


图 8 风速-输出功率拟合图

拟合优度分别为：0.9984、0.9915，说明曲线符合风力机功率输出特性即当地风力情况及两原有机型情况正常，通过合理性检验。

按照模型求解中的流程，编写 Matlab 程序可求解出六个原有机型与新机型的容量系数，由于六个原有机型又分别属于两种机型，于是我们利用 Python 绘制出机型一、机型二分别与新机型的容量系数对比玫瑰图，如图 8 所示。

由图可知，与所有原有机型对比后，机型三与各地风能资源匹配程度最好，所以我们认为机型三比原有机型更为合适，而机型四与机型五相较原有机型而言，与当地风能资源匹配程度较差，即机型三、机型四并不合适。

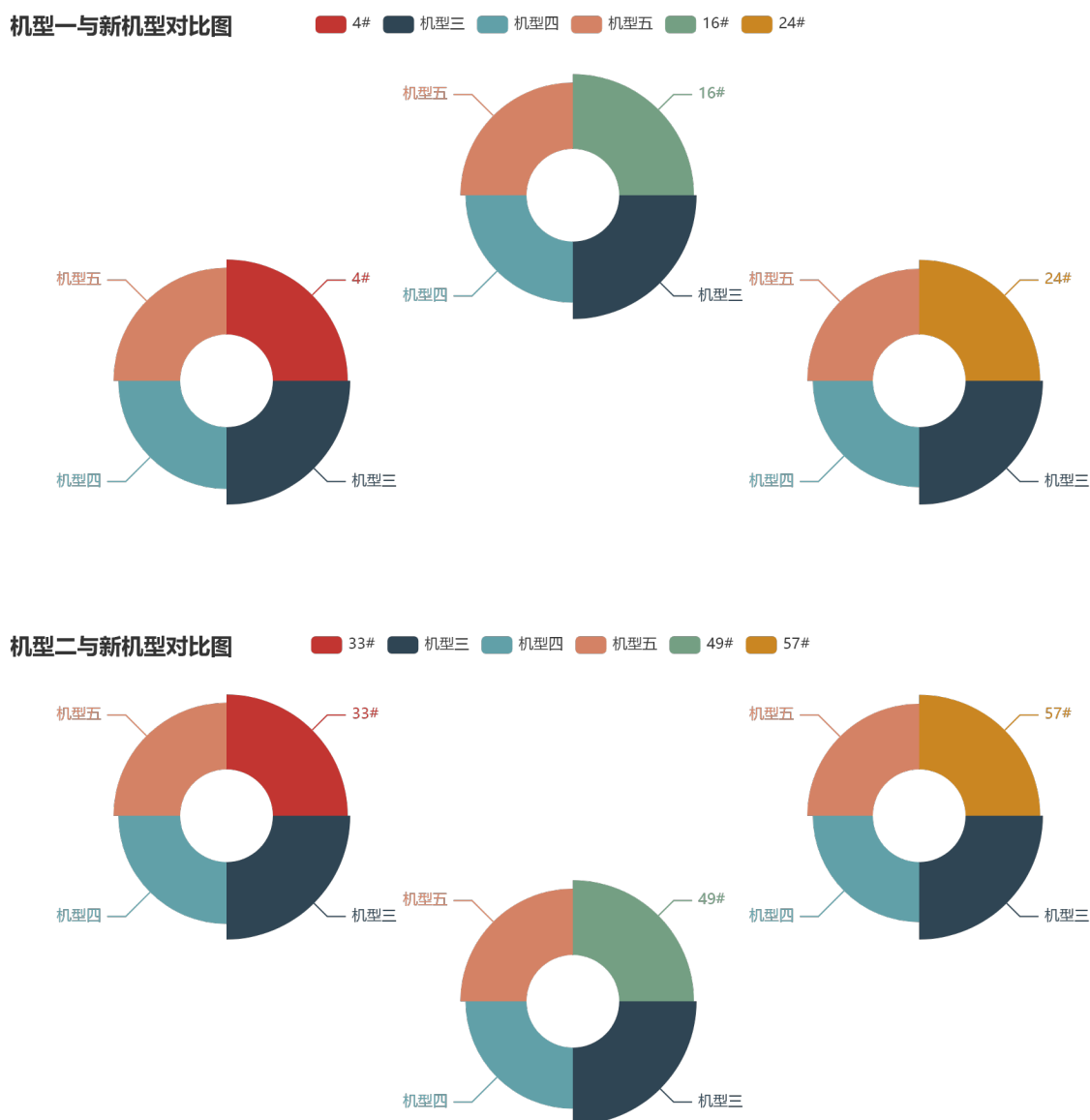


图 9 容量系数比较图

### 5.3 问题三: 风电场排班规划模型

对于此风电场 124 台风电机以及 4 组维修人员，根据题意，为了使各组维修人员的工作任务相对平衡，且风电场具有良好的经济效益，124 台风电机的停机维护计划方案和 4 组维修人员的值班 (维护) 安排可以使用 0-1 整数规划求解。

### 5.3.1 模型建立

设变量

$$x_{it} = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 台风机在第 } t \text{ 天维修} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 台风机在第 } t \text{ 天不维修} \end{cases}$$

$$y_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{第 } j \text{ 支维修队在第 } t \text{ 天维修} \\ 0 & \text{第 } j \text{ 支维修队在第 } t \text{ 天不维修} \end{cases}$$

$$z_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{第 } j \text{ 支维修队在第 } t \text{ 天值班} \\ 0 & \text{第 } j \text{ 支维修队在第 } t \text{ 天不值班} \end{cases}$$

其中  $i = 1, \dots, 124$  表示 124 台风机,  $j = 1, 2, 3, 4$  表示维修队,  $k = 1, \dots, 365$  表示一年天数。

求解出问题一中的每日平均功率记为  $P_d$ , 由于维修时风机停机, 即这段时间内输出功率为 0, 这导致了发电损失。可以由下式表示由于停机维修导致的发电损失, 为了使风电场具有良好的经济效益, 应使其尽可能小, 即将其设定为目标函数。

$$\min W = \sum_{i=1}^{124} \sum_{t=1}^{365} P_j x_{it} \quad (9)$$

下面给出约束条件:

为安全需求, 每台风机一年需要维修两次, 且每次维修两天, 所以有:

$$\sum_{t=1}^{365} x_{it} = 4 \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, 124$$

风机在两次维修之间连续工作的时间不超过 270 天, 即从任意某天开始, 在之后的 271 天内 (且不跨年) 至少有一天在维修, 所以有:

$$\sum_{t=d}^{d+270} x_{it} \geq 1 \quad (11)$$

$$d = 1, \dots, 95$$

$$i = 1, \dots, 124$$

任意一天进行维修工作的组数等于该天维修的风机数量, 所以有:

$$\sum_{i=1}^{124} x_{it} = \sum_{j=1}^4 y_{jt} \quad (12)$$

$$t = 1, \dots, 365$$

若某一组当天进行维修工作，则值班的任务不能由该组完成，所以有：

$$y_{jt} + z_{jt} \leq 1 \quad (13)$$

$$j = 1, 2, 3, 4$$

$$t = 1, \dots, 365$$

由于四组维修人员每天需要一组值班，故一天内至多三组进行维修工作，所以有：

$$\sum_{j=1}^4 y_{jt} \leq 3 \quad (14)$$

$$t = 1, \dots, 365$$

每组维修人员连续工作时间 (值班或维护) 不超过 6 天，所以有：

$$\sum_{t=f}^{f+6} (y_{jt} + z_{jt}) \leq 6 \quad (15)$$

$$f = 1, \dots, 359$$

$$j = 1, 2, 3, 4$$

每天需要且仅需要一组值班人员，所以有

$$\sum_{j=1}^4 z_{jt} = 1 \quad (16)$$

$$t = 1, \dots, 365$$

每次维护需一组维修人员连续工作 2 天，可以通过任意一天的前后连续三天的关系进行约束，有：

$$\sum_{t=k-1}^{k+1} x_{it} \geq 2x_{ik} \quad (17)$$

$$i = 1, \dots, 124$$

$$k = 2, \dots, 364$$

为使组与组之间的工作量均衡，即每组工作时长相等，所以有：

$$\sum_{t=1}^{365} (y_{jt} + z_{jt}) = \sum_{t=1}^{365} (y_{j+1,t} + z_{j+1,t}) \quad (18)$$

$$j = 1, 2, 3, 4$$

综上，由目标函数 (9) 以及约束条件 (10)-(18) 可构建 0-1 整数规划数学模型。

### 5.3.2 模型求解

利用 Matlab 计算可以求出发电量损失为  $6.24 \times 10^{12} J$ ，且维修队全年工作天数为 231 天。同时我们发现若使式 (18) 的约束为每组工作时长之间差额不超过 5 天，则维修队全年工作天数分别为：217、214、221、220 天，同时发电损失为  $6.88 \times 10^{12} J$ 。

## 六、模型的检验

本文在问题二计算容量系数时，假设空气密度为  $1.205 kg/m$ ，风轮的扫风半径为  $55m$ ，我们利用 Matlab 对两参数进行了灵敏度分析，结果如下：

当空气密度变化 10% 时，年容量系数变化 5% 左右，当扫风半径改变 10% 时，年容量系数变化 10% 左右，可以见得，容量系数对空气密度以及风轮扫风面积不敏感，即模型的稳定性较高。

## 七、模型的评价及推广

### 7.1 模型评价

#### 7.1.1 优点：

1. 在处理数据时进行了数据的合理性检验，提高了数据的可靠性和科学性。
2. 灵活运用 matlab 对数据进行处理运算，Python 进行数据的可视化。
3. 遵循科学严谨的原则对风能资源，风机匹配等问题进行求解。

#### 7.1.2 缺点：

1. 对数据的处理存在舍入误差，模型的精确度有一定降低。
2. 对于问题三所确定的排班方案，编程计算时时间较长

### 7.2 模型的推广

本文在评价风电场资源的利用所采用的方法，可以通过改变拟合的分布推广到对其他能源，如水资源、光能资源等的评价，解决诸多领域的问题。

运用了整数规划的方法，具有普适性，且对于实际风电场排班方案给出了一定程度上的建议。

## 参考文献

- [1] 威布尔分布. 维基百科, 自由的百科全书, 2020.

- [2] 風能. 维基百科, 自由的百科全书, 2021.
- [3] GB/T18710 2002. 风电场风能资源评估方法 [s], 2002.
- [4] 方笑. 风能资源评估和机组选型在风电场选址中的应用. 硕士, 湖南大学, 2011.
- [5] 王积建;. 风电场运行状况分析及优化. 数学建模及其应用, 5, 2016.



## 附录 A matlab 源代码

```
clc,clear all;
for j=1:12
    filename=['./2015',num2str(j,'%02d'),'.xls'];
    [Type Sheet Format]=xlsinfo(filename);
    for i=1:length(Sheet)
        data=xlsread(filename,i,'B4:K27');
        power=data(:,1:3:10);%提取每天每时刻的发电功率
        power=power(:);%将二维数组转化成一维数组
        power=rmmissing(power);%去除每个表中返回空值的数据
        day_data(i)=mean(power);
        if
            length(Sheet)<31
                for k=length(Sheet)+1:31
                    day_data(k)=0;
                end
            end
        end
        day_power(:,j)=day_data;
        month_power(j)=sum(day_power(:,j))/sum(sum(day_power(:,j)~=0));
        year_power=sum(sum(day_power))/sum(sum(day_power(:, :)~=0));
    end
    disp('day_power=')
    disp(day_power)
    disp('month_power=')
    disp(month_power)
    year_power
```

```
clc,clear,prob=optimproblem;
P=xlsread('./day_power.xls');
P=P(:);P(P==0)=[];%P= repmat(P,1,124);P=roundn(P,0);
x=optimvar('x',124,365,'Type','integer','LowerBound',0,'UpperBound',1);
y=optimvar('y',4,365,'Type','integer','LowerBound',0,'UpperBound',1);
z=optimvar('z',4,365,'Type','integer','LowerBound',0,'UpperBound',1);
for j=1:365
    for i=1:124
        prob.Objective=sum(sum(x(:,j))*P(j));
    end
end
prob.Constraints.con1=sum(x,2)==4;
prob.Constraints.con2=sum(y,1)<=3;
prob.Constraints.con3=sum(z,1)==1;
con4=[];
for i=1:3
    con4=[con4;sum(y(i,:))+sum(z(i,:))==sum(y(i+1,:))+sum(z(i+1,:))];
end
```

```

prob.Constraints.con4=con4;
con5=[];
for k=1:4
    for j=1:365
        con5=[con5;y(k,j)+z(k,j)<=1];
    end
end
prob.Constraints.con5=con5;
prob.Constraints.con6=sum(x,1)-sum(y,1)==0;
con7=[];
for i=1:124
    for t=1:95
        con7=[con7;sum(x(i,t:t+270))>=1];
    end
end
prob.Constraints.con7=con7;
con8=[];
for i=1:124
    for m=2:364
        con8=[con8;x(i,m-1)-x(i,m)+x(i,m+1)>=0];
    end
end
con9=[];
for i=1:4
    for n=1:359
        con9=[con9;sum(y(i,n:n+6))+sum(z(i,n:n+6))<=6];
    end
end
prob.Constraints.con8=con8;
prob.Constraints.con9=con9;
options.MaxTime = 5e4;
[sol,fval,flag]=solve(prob)

```

## 附录 B python 源代码

```

#encoding=gb2312
from matplotlib import colors
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
df = pd.read_excel('table3.xls',header=None)
df=df.values
print(df)
x=np.arange(1,13)
plt.style.use('science')

```

```

fig, ax1 = plt.subplots()
ax2 = ax1.twinx()
ax1.plot(x,df[0],color='#36606A',marker='o',label=r'风速(m/s)',)
ax1.legend()
ax2.plot(x,df[1],linewidth=3,color='#D39570',marker='*',markersize=10,label=r'风功率密度($M/W^2$)')
ax2.legend()
ax1.set_xlabel('月份')
plt.show()

```

```

#encoding=gb2312
from pyecharts import options as opts
from pyecharts.charts import Pie
from pyecharts.faker import Faker
import pandas as pd
df=pd.read_excel('table6.xlsx')
df=df.values
v1 = ['4#','机型三','机型四','机型五']
v2 = ['16#','机型三','机型四','机型五']
v3 = ['24#','机型三','机型四','机型五']

c = (
    Pie()
    .add(
        "",
        [list(z) for z in zip(v1, df[0,:])],
        radius=["15%", "40%"],
        center=["180", "300"],
        rosetype="area",
    )
    .add(
        "",
        [list(z) for z in zip(v2, df[1,:])],
        radius=["15%", "40%"],
        center=["460", "150"],
        rosetype="area",
    )
    .add(
        "",
        [list(z) for z in zip(v3, df[2,:])],
        radius=["15%", "40%"],
        center=["740", "300"],
        rosetype="area",
    )
    .set_global_opts(title_opts=opts.TitleOpts(title="机型一与新机型对比图"))
    .render("pie_rosetype.html")
)

```