

风电场运行状况分析及优化

摘要

本文通过构建风能资源评估系统、建立发电机选型层次结构模型和合理优化排班方案来对风电场运行状况分析及优化。

针对问题一：在对数据进行有效处理基础上，我们通过构建风能资源评估系统来评价其运行状况，利用 Origin75、Excel 软件计算出 5 个资源参数值，其中年有效平均风速 5.96m/s ，年平均有效风功率密度 183.66W/m^2 ，有效利用率

85.60%，并以两套评价标准为依据，得出该风电场的风能资源较丰富，有可利用价值的结论。

针对问题二：首先我们对机型 I、II 的 6 台风机的相关数据进行分析处理，初步建立了风力发电机选型层次结构模型，这里单项指标包括可利用率、风电场容量系数、年平均风速等，利用 SASS、MATLAB 和 R 多种软件得到了单项指标的相关数据，从而运用层次分析法构建相应的指标及权重体系，最后算出最终得分，得出以下结论：机型 I 明显比机型 II 有优势，6 台机型的总分排名依次是：4#>16#>24#>57#>49#>33#。

其次根据新型号风机相关数据，预估其他数据，以上述指标体系为准，重新计算总分并排名，从而得到新型机型（31.262 分）比机型 II（27.089 分）更适合，但不如机型 I（35.434 分）综合评价高。

针对问题三：我们利用已知条件，通过列举特例观察其中的规律性，综合考虑得出初始条件，建立线性规划模型，设置目标函数 $\min Z = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6$ ， x_i 为一个循环内维护所需要的班组，其中

$i = 1, 2, \dots, 6$ 。并通过 lingo 软件计算出结果，最终得出一个循环内的排班方案：

$x_1 = 2, x_2 = 2, x_3 = 2, x_4 = 3, x_5 = 2, x_6 = 3$ 。

关键词：风能资源、层次分析法、风速、权重体系、R 软件

一、问题重述

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。我国某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。请建立数学模型，解决以下问题：

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。试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 给出了该风电场几个典型风机所在处的风速信息，其中 4#、16#、24#风机属于一期工程，33#、49#、57#风机属于二期工程，它们的主要参数见附件 3。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 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

本文以风电场的实测数据为基础，在讨论了风速的日变化规律、年平均风功率密度、风速和风功率的波动特性及其关系、平均功率及风速频率等后，对风电场的运行状况、风机的选型问题、维修人员的排班问题进行研究，并给出了具体的数学模型和解决方案。

针对问题一，我们首先根据《风电场风能资源评估方法》对数据进行有效处理，通过构建风能资源评估系统来评价其运行状况，利用相关软件计算出具体的资源参数值，并通过综合评价原则，以两套评价标准为准对该风电场的风能资源进行综合评估。

针对问题二，首先我们根据机型 I、II 6 台机型的相关数据，通过构建风力发电机选型层次结构模型进行比较，这里单项指标包括可利用率、风电场容量系数、年平均风速等，利用 SASS、MATLAB 和 R 多种软件可以得到单项指标的相关数据，再运用层次分析法构建指标及权重体系，最后算出最终得分并排名，从而得出结论。其次根据新型号风机相关数据，预估其他数据，以上述指标体系为准，重新计算总分并排名，再对相关数据进行评价。

针对问题三，我们针对已知条件，通过列举的特例观察其中的规律性，综合考虑得出初始条件，设置目标函数建立线性规划模型，假设运行结果不理想，我们可以重新考虑初始条件并修正，最终得出具体的排班方案。

三、模型假设与约定

3.1假设

- 1.在风电场一期、二期建设中严格遵守国家相关法律法规，无任何破坏环境等违法行为；
- 2.不考虑风电场未建设之前的情况对现在造成的影响；
- 3.理想状态下，忽略因为停机维修导致的经济效益下降的影响；
- 4.数据处理的方法能够反应风电场的实际运行情况。

3.2约定

- 1.本文认为风速在3~25m/s为有效风速；
- 2.在处理数据中，根据实际情况给出合理的数值；
- 3.在描述风能资源及其利用情况时，依照文献资料，摘选了平均风速、有效平均风速和有效风功率密度等指标描述其情况；
- 4.论文中一些直接给出的定义或者结论来自于参考文献并引用；
- 5.论文中所出示的图均来自专业软件；

四、符号说明及名词定义

符号	含义		符号	含义
\bar{v}	平均速度		v_1	切入风速
n	风速序列数		v_2	切出风速
D_{wp}	有效风功能密度		$P(v)$	输出功率与风速关系特性
u	可利用率		$f_w(v)$	风速概率密度函数
F	容量系数		\bar{v}_i	年平均有效风速
P_a	年平均输出功率			
P_r	额定输出功率			

五、模型建立与求解

5.1 问题一模型建立与求解

5.1.1 模型的分析

题中要求我们根据附件中提供的每隔15分钟的平均风速和实际输出功率来对该风电场的风能资源及其利用情况进行评估。具体求解思路如下：

1、根据《风电场风能资源评估方法》（GB/T 18710.2002）对附件1中的数据进行预处理，剔除无效数据。

2、建立风能资源评估系统，该系统中纳入5个评价指标：平均风速和有效平均风速、有效风功能密度、风速-功率拟合曲线、可利用率、风速频率分布。

5.1.2 模型一的建立

1、数据预处理

根据《风电场风能资源评估方法》（GB/T 18710.2002）风电场测风有效数据完整率应 $\geq 90\%$ ，有效数据完整率计算公式：

$$\text{有效数据完整率} = \frac{(\text{应测数目} - \text{缺测数目} - \text{无效数据数目})}{\text{应测数目}} \times 100\%$$

其中，应测数目表示测量期间的所有数据；缺测数目表示空缺未记录的数据；无效数据表示确认为不符合要求的数据。

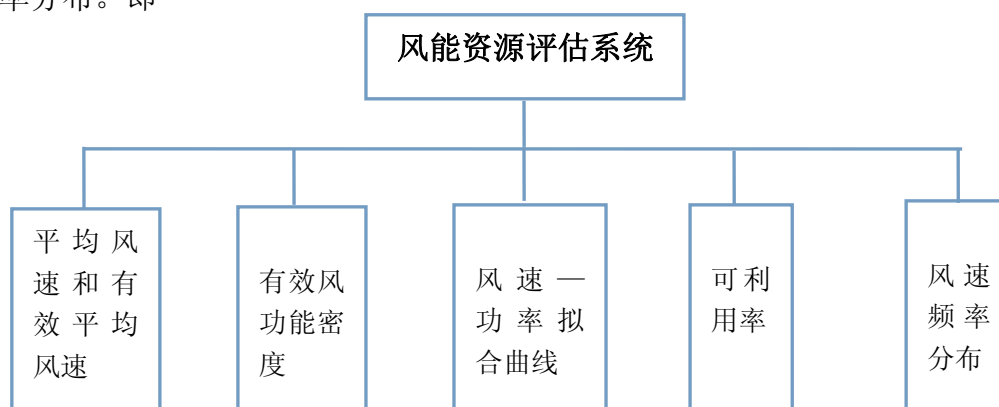
表 1.1 .主要参数合理范围参考值

主要参数	合理范围
平均风速	$0 < 15 \text{ 分钟风速平均值} < 40\text{m/s}$
1 小时平均风速变化	$< 6\text{m/s}$

注：经过数据预处理之后，有效数据的完整率为 99%。

2、建立风能评估系统

我们认为对风能资源及其利用情况进行评估时，主要考虑以下五个因素：平均风速和有效平均风速、有效风功能密度、风速-功率拟合曲线、可利用率、风速频率分布。即



5.1.3 模型一的求解

1、风能资源参数计算

1) 平均风速和有效平均风速

平均风速是指在特定时间内瞬时风速的平均值。其公式为^[1]：

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

其中 \bar{v} ——特定时间内的平均速度；

v_i ——特定时间段内风速观测序列中第 i 记录的风速值；

n ——特定时间段内的风速序列数。

表 1.2 月平均风速统计表

月/年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均 风速	6.03	6.52	5.47	5.65	5.79	5.90	5.35	4.64	6.04	5.31	5.33	6.11

由上表中月平均风速很容易计算出年平均风速为 5.68m/s。其中第一季度为 6.01m/s，第二季度 5.7m/s，第三季度 5.34m/s，第四季度 5.71m/s。全年在 8 月、10 月和 11 月风速偏小，在 1~7 月风速偏大，最大风速出现在 2 月。

有效平均风速是指在特定时间内有效瞬时风速的平均值。

表 1.3 月有效平均风速统计表

月/年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
有效平 均风速	6.51	6.96	5.88	5.64	6.41	6.51	5.66	5.09	6.41	4.32	5.50	6.66

由上表中月有效平均风速很容易计算出年平均有效风速为 5.96m/s。其中第一季度为 6.19m/s，第二季度 5.78m/s，第三季度 5.34m/s，第四季度 6.04m/s。

2) 有效风功率密度

2.1 风功率密度

风功率密度又叫风能密度，是指空气流在单位时间内垂直通过单位截面积的风能。某一地区的风功率密度越高，说明该地区风能资源越好，风能利用率也越高。风功率密度在风能资源评估中是很重要的参数，常用的有平均风功率密度和有效风功率密度，它们的计算方法有两种。本文中用实测的有效风速数据来计算：

有效风功率密度计算公式：

$$D_{wp} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (\rho) (v_i^3)$$

式中 D_{wp} ——特定时间段内的平均风功率密度 W/m^2 ；

ρ ——空气密度， kg/m^3 。

表 1.4 月有效风功率密度

月份	1	2	3	4	5	6
平均风 功率密 度值	191.84	240.42	154.86	179.22	199.51	205.59
月份	7	8	9	10	11	12

平 均 风						
功 率 密	135.63	95.31	200.39	146.50	162.17	255.23
度 值						

由上表中月平均风功率密度很容易计算出年平均风功率密度为 $183.66W/m^2$ 。

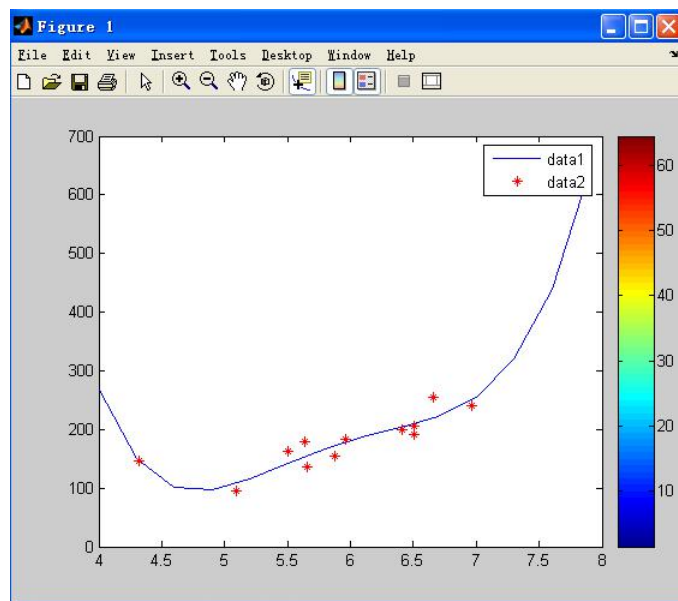
2.2 风速-风功率拟合曲线

由 EXCEL 分别计算出有效平均风速与平均风功率密度值，具体数值如下表所示：

表 1.5 月平均风速-风功率数值表

月/年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
有效平 均风速	6.51	6.96	5.88	5.64	6.41	6.51	5.66	5.09	6.41	4.32	5.50	6.66
平均风	191.	240.	154.	179.	199.	205.	135.	95.3	200.	146.	162.	255.
功率密	84	42	86	22	51	59	63	1	39	50	17	23
度 值												

得到风电场的平均风速与有效风功率密度拟合曲线如下：



3) 风速—功率拟合曲线

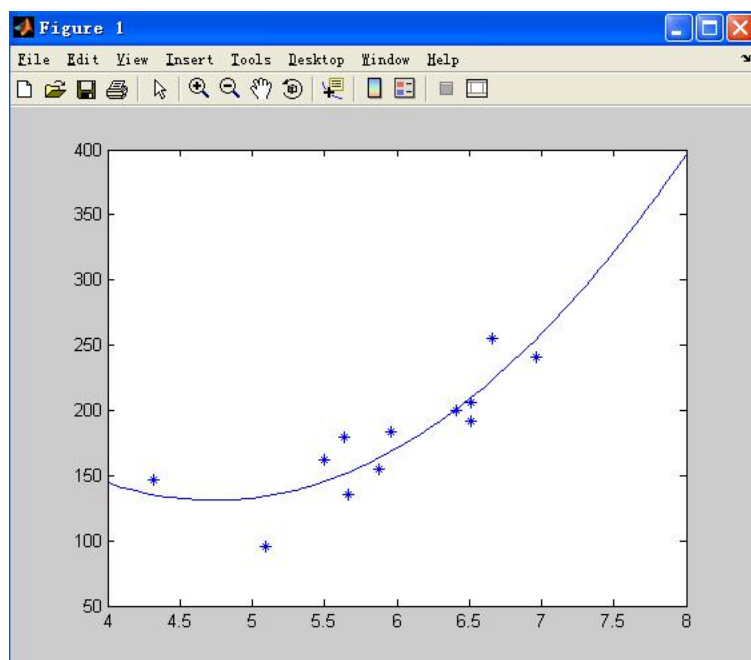
通过附件 1 中功率数据我们计算出月平均功率，并与有效平均风速作比较，并计算出年平均功率为 $30.5W$ ，同时利用 MATLAB 软件进行最小二乘法进行拟合，具体结果如下：

表 1.6 月平均风速-功率数值表

月份	1	2	3	4	5	6
有效平均 风速	6.51	6.96	5.88	5.64	6.41	6.51

平均功率	56.8	54.5	41.0	45.2	46.8	33.2
月份	7	8	9	10	11	12
有效平均 风速	5.66	5.09	6.41	4.32	5.50	6.66
平均功率	21.8	22.6	32.3	29.5	33.3	43.6

风电场平均风速和风功能密度拟合曲线：



4) 风能可利用率

风能有效小时数是风速在有效风速区间内的累计小时数。一般我们常见的有效风速区间的有：3-25m/s, 4-25m/s 和 5-25m/s, 其中 3-25m/s 有效风速区间是最常用的。文中根据风能有效数据计算得出有效利用小时，利用和总体时间的比值定义可利用率 u ：

$$u = \frac{t}{N} = \frac{\sum N_i}{N}$$

其中 $t = 7499$ 小时， $N = 8760$ 小时，从而得出 $u = 85.60\%$ 。

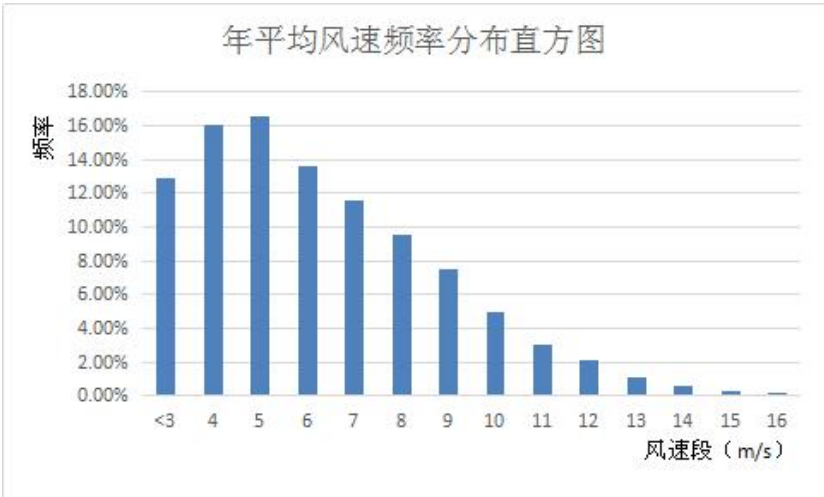
5) 风速频率分布

利用 Origin75 软件计算出年平均风速频率统计表，并绘制出相应的频率图：

表 1.7 平均风速频率统计表

风速段 (m/s)	<3	4	5	6	7	8	9
频数	4371	5459	5644	4636	3926	3254	2551

频率	12.85%	16.05%	16.59%	13.63%	11.54%	9.57%	7.50%
风速段 (m/s)	10	11	12	13	14	15	16
频数	1706	1036	733	361	188	114	32
频率	5.02%	3.05%	2.16%	1.06%	0.55%	0.34%	0.09%



这里我们可以看到主要风速集中在3m/s~8m/s之间，年平均风速频率位80.23%。

2、风能资源评估参考依据

根据《风电场风能资源评估方法》（GB/T 18710-2002）标准，风功能密度等级表和风区分类表展示如下：

表 1.8 风功能密度登记表

风功率 密度等级	10m 高度		30m 高度		50m 高度		应用于并 网风力发 电
	风功率密 度 W/m ²	年平均风 速参考值 m/s	风功率密 度 W/m ²	年平均风 速参考值 m/s	风功率密 度 W/m ²	年平均风 速参考值 m/s	
1	<100	4.4	<160	5.1	<200	5.6	
2	100~150	5.1	160~240	5.9	200~300	6.4	
3	150~200	5.6	240~320	6.5	300~400	7.0	较好
4	200~250	6.0	320~400	7.0	400~500	7.5	好
5	250~300	6.4	400~480	7.4	500~600	8.0	很好
6	300~400	7.0	480~640	8.2	600~800	8.8	很好
7	400~1000	9.4	640~1600	11.0	800~2000	11.9	很好

表 1.9 风区的分类

条 件 风 区	年平均风速 (m/s)	年最大风速 (m/s 10m)	最大阵风 (m/s 3s)	50 年最大风 速 (m/s 10m)	50 年最大风 速 (m/s 3s)
------------------	----------------	--------------------	------------------	------------------------	-----------------------

一类风区	10.00	37.50	52.50	50.00	70.00
二类风区	8.50	31.90	44.60	42.50	59.50
三类风区	7.50	28.10	39.40	37.50	52.50
四类风区	6.00	22.50	31.50	30.00	42.50

3、风能资源及其利用情况评估结果：

从以上风资源评估系统中的参数来看，这里年平均风速达到 5.68m/s，年有效平均风速为 5.96m/s，年平均风功率密度达到了 $183.66 W/m^2$ ，有效利用率为 85.60%，且风速-风功率、风速-功率拟合效果较好，结合以上参考依据，由此得出结论：该风电场的风能资源较丰富，有可利用价值，十分有利于开发，建立风电场是非常适合的。

5.2 问题二模型建立与求解

5.2.1 模型分析

题中让我们尝试从风能资源与风机匹配角度来判断新型号风机是否比现有风机更为适合。本题通过层次分析法的原理，以风力发电机选型指标为依据，构建层次结构模型，通过建立成对比较判断矩阵，进而计算各个评价指标的权重，并验证其一致性，得出 6 种机型与风能资源匹配总分。在比较新型号风机是否比现有风机更为适合时，同理我们算出最后得分，通过综合得分比较它们的优劣性。

5.2.2 模型二的建立——建立风力发电机选型层次结构模型

根据多层次结构特点，首先建立目标层、准则层和方案层三层结构。其中目标层为风力发电机选型，准则层分别记为运行可靠稳定性 U_1 ，风能资源适应性 U_2 ，功率-风速曲线函数 U_3 三个阶段，方案层总共包含 7 项单项指标，依次记为 $U_{11}, U_{12}, U_{21}, U_{22}, \dots$ 等，具体如下表所示。

表 2.1 风力发电机选型层次结构模型

目标层 一级指标	准则层 一级指标	方案层三级指标
风力 发电机 选型	运行可靠稳定性 U_1	U_{11} : 可利用率 U_{12} : 风电场容量系数
	风能资源适应性 U_2	U_{21} : 年平均风速 U_{22} : 年均风速-额定风速相对误差
	功率-风速曲线函数 U_3	U_{31} : 额定功率 U_{32} : 额定风速 U_{33} : 功率-风速相关系数

5.2.3 各单项指标的求解:

1) 由可利用率

$$u = \frac{t}{N} = \frac{\sum N_i}{N}$$

计算各台机型的可利用率结果如下:

表 2.1 利用率

机型	4#	16#	24#	33#	49#	57#
可利用率	93.8%	90.8%	88.7%	88.4%	89.1%	89.1%

2) 容量系数计算及结果分析

这里我们定义容量系数^[2]

$$R = \frac{P_a}{P_r}$$

其中 P_a 为风力机年平均输出功率, P_r 为风力机额定功率。

$$P_a = \int_{v_1}^{v_2} P(v) f_w(v) dv$$

这里 v_1 ——切入速度, v_2 ——切出速度;

$f_w(v)$ ——风速概率密度函数, $p(v)$ ——输出功率与风速关系特性。

一般情况下, 描述风速分布的线性模型很多, 包括对数正态分布, 瑞利分布, 威布尔分布等, 最常见的是双参数的威布尔分布。具体概率密度函数如下:

$$f_w(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)$$

其中 k ——威布尔分布的形状参数; c ——威布尔分布的尺度参数, 这里两个参数分别用平均风速 u 和标准偏差 σ 来估算:

$$u = \bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{v}_i,$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{v}_i - u)^2}$$

这里 \bar{v}_i ——各型号机型的年平均有效风速, n ——为有效风速序列数。

计算出

$$u = 6.9, \sigma = 0.24$$

则威布尔分布的两个参数值进行如下估计：

$$k = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^{-1.086} = \left(\frac{0.24}{6.9} \right)^{-1.086} = 38.3779 \approx 38,$$

$$c = \frac{u}{\Gamma(1+1/k)} = \frac{6.9}{\Gamma(1+1/38.3779)} = \frac{6.9}{0.9856} \approx 7$$

此时

$$f_w(v) = \frac{38}{7} * \left(\frac{v}{7} \right)^{37} * \exp\left(-\left(\frac{v}{7}\right)^{38}\right)$$

所以

$$\begin{aligned} P_{a1} &= \int_3^{11} 17.69 * \exp(0.442 * v) * \left(\frac{38}{7}\right) \left(\frac{v}{7}\right)^{37} \exp\left(-\left(\frac{v}{7}\right)^{38}\right) dv \\ &\quad + \int_{11}^{12} 2000 * \left(\frac{38}{7}\right) * \left(\frac{v}{7}\right)^{37} \exp\left(-\left(\frac{v}{7}\right)^{38}\right) dv \\ P_{a1} &= \int_{3.5}^{11} 12.794 * \exp(0.471 * v) * \left(\frac{38}{7}\right) \left(\frac{v}{7}\right)^{37} \exp\left(-\left(\frac{v}{7}\right)^{38}\right) dv \\ &\quad + \int_{11}^{11.5} 1500 * \left(\frac{38}{7}\right) * \left(\frac{v}{7}\right)^{37} \exp\left(-\left(\frac{v}{7}\right)^{38}\right) dv \end{aligned}$$

其中我们利用了 SASS 软件计算出输出功率与风速关系特性 $p(v)$ ：

$$\text{机型 I: } y = 17.69e^{0.442x}, 3 \leq x \leq 12; \text{ 机型 II: } y = 12.794e^{0.471x}, 3.5 \leq x \leq 11$$

最后我们得出 $F_1 = 0.015, F_2 = 0.020$ 。

3) 年平均风速

如同问题一我们根据平均风速的定义计算附件 2 的有效平均风速（计算前已对数据进行有效检验），最终我们得到 6 种机型的月平均风速和年平均风速。

表 2.2 6 台机型的年平均风速

机型	4#	16#	24#	33#	49#	57#
平均风速	7.0	6.9	6.6	6.5	7.0	7.2

4) 年均风速-额定风速相对误差：

定义：

$$\text{风速相对误差} = \frac{|\text{年均风速} - \text{额定风速}|}{\text{年均风速}} \times 100\%$$

表 2.3 年均风速-额定风速相对误差

机型	4#	16#	24#	33#	49#	57#
平均风速	7.0	6.9	6.6	6.5	7.0	7.2
额定风速	11	11	11	11.5	11.5	11.5
相对误差	57.14%	59.42%	66.67%	76.92%	64.29%	59.72%

另外我们利用 R 软件求出了附件 3 两种机型的功率-风速相关系数，这样我们就能得到风力发电机选型层次结构模型的各单项指标。下面通过层次分析法来计算各指标的权重和合成权重。

5.2.4 模型的求解过程：

1) 构造判断矩阵

判断矩阵是权重排序的基础，针对以上问题构造主因素层对目标层的判断矩阵，次因素层对主因素层的判断矩阵如下：

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 2 \\ 3 & 1 & 5 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{4} \\ 4 & 1 \end{pmatrix}, \quad B_2 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} \\ 3 & 1 \end{pmatrix}, \quad B_3 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 2 & 1 & \frac{1}{3} \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

2) 确定权重向量和一致性检验

* 确定相对权重向量

通过和法求各判断矩阵的权重和最大特征根。这里的计算过程我们可以通过 MATLAB 编程实现，求得一级指标对目标层的排序权重向量为

$w(A) = (0.2299, 0.6479, 0.1222)^T$ ，最大特征值为 $\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i} = 3.0037$ 。同理可

得，其他各矩阵的单排序权重向量和最大特征根，结果如下：

$$w(B_1) = (0.2000, 0.8000)^T, \lambda_{\max}(B_1) = 2;$$

$$w(B_2) = (0.2500, 0.7500)^T, \lambda_{\max}(B_2) = 2;$$

$$w(B_3) = (0.1373, 0.2395, 0.6232)^T, \lambda_{\max}(B_3) = 3.0183;$$

**** 一致性检验**

由于认识上的差异性，我们所构造的判断矩阵可能不具有—致性，所以我们要对其偏差进行—致性检验^[3]。

设 A 是 n 阶判断矩阵， λ_{\max} 为 A 的最大特征根，则 A 的—致性指标为

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)}$$

，为了确定 A 的不—致性程度的容许范围，又引入了随机—致性指

标 RI。RI 通常是由实际经验给出的，对于不同的 n, RI 的值如表 2.4 所示。

表 2.4 随机—致性指标 RI 的数值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

表中 n=1, 2 时，RI=0，这里判断矩阵一定是一—致阵，所以满足条件，不需要进行—致性检验。

当 $n \geq 3$ 时，利用公式 $CR = \frac{CI}{RI}$ 计算—致性比例 CR，当 $CR < 0.1$ 时，认为判断矩阵通过—致性检验，所得的权重向量是可以接受的；当 $CR > 0.1$ 时，应该要调整判断矩阵，重新计算检验，使之具有满意的一—致性。

根据上述的计算思路，下面对以上判断矩阵进行—致性检验，检验结果如下：

$$CR(A) = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)RI} = \frac{0.0037}{2 * 0.58} = 0.00319 < 0.1, \text{ 通过—致性检验;}$$

$$CR(B_3) = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)RI} = \frac{0.0183}{2 * 0.58} = 0.0158 < 0.1, \text{ 通过—致性检验;}$$

5.2.5 综合评价：

在以上工作的基础上，我们认为所构建的判断矩阵是可以接受的，由此计算出的权重向量可以作为我们体系中的参考权重。这样我们就构建了完整的风力发电机选型层次结构指标体系及权重体系，在进行评价时，我们可以以此为依据，算出每台风力发电机的最后得分。具体的指标体系及权重体系如下表所示。

表 2.5 风力发电机选型指标及权重体系

目标层一级 指标	准则层一级 指标	权重 A	方案层三级指标	权重	合成权重
	运行可靠稳 定性	0.2299	U ₁₁ : 可利用率	0.2000	0.0460
			U ₁₂ : 风电场容量系数	0.8000	0.1839

风力发电机 选型	与风能资源 适应性	0.6479	U_{21} :年平均风速	0.2500	0.1620
			U_{22} :年均风速-额定风速相关系数	0.7500	0.4860
	曲线功率- 风速曲线函 数	0.1222	U_{31} :额定功率	0.1373	0.0168
			U_{32} :额定风速	0.2395	0.0292
			U_{33} :功率-风速相关系数	0.6232	0.0762

在此基础上，我们针对该风电场 6 台机型单项指标原始数据进行计算，最终求出最后得分，具体结果如下：

表 2.6 6 台机型最后得分

机型	可利用率	风电场容量系数	年平均风速	年均风速-额定风速相对误差	额定功率	额定风速	功率-风速相关系数	总分
4#	93.8%	0.015	7.0	57.14%	2000	11	0.8454	35.443
16#	90.8%	0.015	6.9	59.42%	2000	11	0.8454	35.437
24#	88.7%	0.015	6.6	66.67%	2000	11	0.8454	35.422
33#	88.4%	0.020	6.5	76.92%	1500	11.5	0.8508	27.072
49#	89.1%	0.020	7.0	64.29%	1500	11.5	0.8508	27.092
57#	89.1%	0.020	7.2	59.72%	1500	11.5	0.8508	27.102

结论：在已建立的风力机选型指标体系的基础上，通过引入层次分析法的理论，综合考虑了风力机的 3 个一级指标和 7 个单项指标，由上表可以看出，机型一明显比机型二有优势，且 6 种机型的总分排名依次是：4#>16#>24#>57#>49#>33#。

新型号风机主要给出的参数是额定风速和额定功率，我们通过上面的模型进行比较，其中缺失数据用机型一和机型二的数据平均值代替，然后根据指标体系进行总分排名，我们得到新型机型比机型 II 更适合，但不如机型 I 综合评价高，具体结果如下表 2.7。

表 2.7 五种型号最后得分

机型	可利用率	风电场容量系数	年平均风速	年均风速-额定风速相对误差	额定功率	额定风速	功率-风速相关系数	总分
机型 I	91.1%	0.015	6.8	61.08%	2000	11	0.8454	35.434
机型 II	88.9%	0.020	6.9	66.98%	1500	11.5	0.8508	27.089
机型 III	90%	0.018	6.9	64.03%	1500	10.5	0.8497	31.262

机型Ⅳ	90%	0.018	6.9	64.03%	1500	11	0.8497	31.262
机型Ⅴ	90%	0.018	6.9	64.03%	1500	11.5	0.8497	31.262

5.3 问题三模型建立与求解:

根据题意我们通过几个特殊情况的排班，将6天作为一个循环。这里考虑有124台风机，一台一年需维修2次，一次2天，最多需维修248天，同时两次维护之间的连续工作时间不超过270天，综合上述情况，得到初始条件，从而建立线性规划。

这里维修人员的确定过程，首先要对目标单位的维护、值班任务需求进行分析，制定维护计划，进而确定目标单位年维护量和维护所需要的时间。通过维修任务需求分析，结合维修人员工作时间和目标单位年度，可利用工作日、维护所需工时等参数，从而确定人员最优配置方案。

下面我们先举例说明（表3.1、表3.2、表3.3），并通过观察写出初始的线性规划。

表 3.1

值班	维护
A	B+C+D
A	B+C+D
B	A+D
C	A+D
D	B+C
A	B+C
C	A+B+D
C	A+B+D
B	A+D
C	A+D
...	...

表 3.2

值班	维护
A	B+C+D
A	B+C+D
A	B+C+D
A	B+C+D
B	C+D
B	C+D
A	0
A	B+C+D
A	B+C+D
A	B+C+D
A	B+C+D

B	C+D
B	C+D
A	0
...	...

表 3.3

值班	维护..
A	B
A	B
A	C
A	C
A	C
A	C
B	C
B	C
B	D
...	...

我们设 x_i 为一个循环内维护所需要的班组，其中 $i=1,2,\dots,6$.

$$\min Z = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 4 \leq x_1 + x_2 \leq 6 \\ 4 \leq x_2 + x_3 \leq 5 \\ 2 \leq x_3 + x_4 \leq 4 \\ 2 \leq x_4 + x_5 \leq 4 \\ 2 \leq x_5 + x_6 \leq 4 \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \geq 0 \end{cases}$$

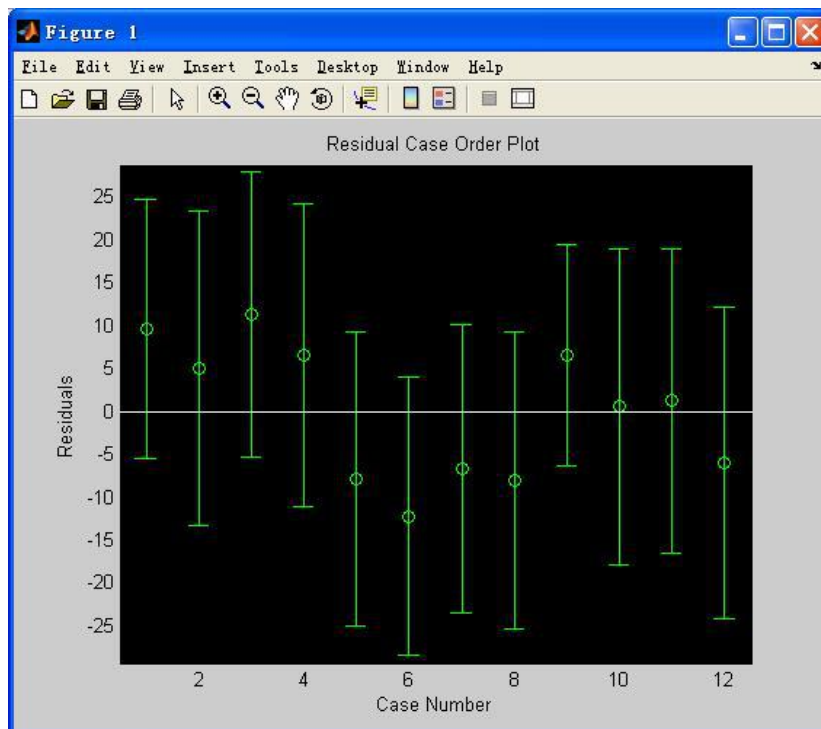
这里我们得出最优解 $x_1 = 2, x_2 = 2, x_3 = 2, x_4 = 0, x_5 = 2, x_6 = 0$ ，这里根据已知条件我们进行修正得到 $x_1 = 2, x_2 = 2, x_3 = 2, x_4 = 3, x_5 = 2, x_6 = 3$ 符合要求，这里能保证连续工作时间不超过 6 天，且排班能循环进行。一个循环内具体排班如下图所示：

值班	维护..
A	B+C+D
A	B+C+D
B	A+D
C	A+D
A	B+C
D	B+C
...	...

六、模型检验

为了验证问题二中通过拟合所得的函数模型的可行性，在此我们利用残差图对其拟合度进行分析（程序可见附录中程序），得到如下图形：

图 6.1 残差分析图



由残差图我们可以看出上述问题二中所得目标函数具有可行性。

七、模型评价与推广

8.1 模型评价：

优点：1) 我们在处理数据之前首先对数据进行了有效处理，所以后面所算出的风速、风功率等等都是有效的，拟合效果较好；

2) 在问题二中我们选择层析分析法构建层次结构模型，在综合评价时直接通过排名来说明孰优孰劣，评价合理直观，且指标体系的权重我们通过四种不同的软件得到结果，虽计算过程复杂，但科学合理，且体系构建也符合我们对风电场运行状况的初步分析结果；

3) 风能资源的评估系统我们采用数据已知的指标，通过5个参数的相互比较，并根据国家规定的标准类比分析，评估结果并有综合性和时效性。

缺点：附件中参数跟构建的模型需要的参数不匹配，需要我们查阅资料分析，但是有时误差较大，且在计算容量系数时积分过程繁琐，需改进；问题三中线性规划模型简单，可尝试建立多目标规划，改进约束条件。

8.2 模型推广：

在问题三中我们可以尝试建立如下优化模型：

$$T = \sum_{t=1}^k T_t$$

$$\sum_{t=1}^k \left[\sum_{j=1}^m (f(i,t)C_{ij}D_{ij}^t)T_t \right] > E_{pi,i=1,2,\dots,n}$$

$$\sum_{i=1}^n D_{ij}^t = 1 \text{ 或 } 0, \quad t \in (T_1, T_2, \dots, T_k)$$

$$f(i,t)=1 \text{ 或 } 0, \quad i=1,2,\dots,n, \quad t \in (T_1, T_2, \dots, T_k)$$

其中： T_i ——预定维护次序，端点为各项目的起点或者终点，总段数为 h ，模型优化的目标是寻找最优排班方案，使总维护时间最短。定额维护工作量，即用常数 E_{pi} 表示； D_{ij} 表示维修人员 i 在 T_i 时间段是否正在从事 j 维护工作； $f(i,t)$ 表示 i 项目在 T_i 时间段是否正在被维护。

八、参考文献

参考文献：

- [1]吴婷婷. 风电场风能资源评估中重要参数的计算与应用[D]. 内蒙古大学工业大学硕士学位论文, 2015(06).
- [2] 谢建民, 邱毓昌, 张治源. 200kW 国产风力发电机容量系数计算及参数改进[J]. 电工技术杂志, 2001(06).
- [3]杨珍, 牟占军. 基于层次分析法的高校教师教学质量评价研究[J]. 内蒙古工业大学学报, 2010, 19(1):111-122.
- [4]华荣芹. 基于风资源评估的风力机选型的研究[D]. 新疆大学硕士学位论文. 2014(05).
- [5]王海明, 韩肖清. 风电场稳态建模及应用研究[D]. 太原理工大学硕士学位论文. 2015(05).
- [6]高春香. 风能资源评估的参数计算和统计分析方法研究[J] 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2011 年第 S1 期上工程科技 II 辑.
- [7]韩朝帅, 王坤, 潘恩超, 刘瑞起. 基于任务需求的装备维修人员配置优化[J]. 兵工自动化, 2016(08).

九、附录

一、各类附表

附件 2 中的有效平均风速：

4#:

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
平 均	7.3	8.0	6.6	7.1	7.0	7.4	6.8	5.9	7.4	7.2	6.5	7.2	7.0
风速													

16# :

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
平均	7.1	8.0	6.5	7.1	6.9	7.8	6.8	5.6	6.9	6.8	6.3	7.3	6.9
风速													

24#:

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
平 均	6.6	7.6	6.3	6.8	6.4	7.2	6.6	5.6	7.1	6.5	5.9	6.9	6.6
风速													

33#:

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
平均	7.3	7.2	6.2	6.6	6.3	6.9	6.2	5.2	6.8	6.1	6.2	7.1	6.5
风速													

49#:

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
平 均	7.5	7.9	6.5	7.2	6.8	7.4	6.4	5.8	7.2	6.7	6.8	7.8	7.0
风速													

57#:

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年
平 均	7.4	8.4	6.5	7.4	7.3	7.9	6.6	5.7	7.3	6.8	6.7	8.2	7.2
风速													

二、模型执行程序汇总：

1. 问题一风电场的平均风速与有效风功率密度拟合

```
x=[6.51 6.96 5.88 5.64 6.41 6.51 5.66 5.09 6.41 4.32 5.50 6.66 5.96]
y=[191.84 240.42 154.86 179.22 199.51 205.59 135.63 95.31 200.39
    146.50 162.17 255.23 183.66];
P=polyfit(x,y,4);
xi=4:.3:8;
yi=polyval(P,xi);
plot(xi,yi,x,y,'r*');%拟合附件 1 的平均有效风速和有效风功率密度
```

2. 问题一风电场的平均风速与功率拟合

```
x=[6.51 6.96 5.88 5.64 6.41 6.51 5.66 5.09 6.41 4.32 5.50 6.66 5.96]
y=[56.8 54.5 41.0 45.2 46.8 33.2 21.8 22.6 32.3 29.5 33.3 43.6 30.5]
P=polyfit(x,y,4);
xi=4:.3:9;
yi=polyval(P,xi);
plot(xi,yi,x,y,'r*');%拟合附件 1 的平均有效风速和功率
```

3. 附件 3 风速-功率拟合

```
data a1;
set a;
y1=log(y);
x1=log(x);
run;
proc reg;
model y1=x1; /*拟合幂函数曲线*/
model y1=x; /*拟合指数函数曲线*/
model y=x1; /*拟合对数函数曲线*/
run;
模型一检验结果：
```

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F	
Model	1	29.61545	29.61545	2128.55	<.0001	
Error	17	0.23653	0.01391			
Corrected Total	18	29.85198				
Root MSE		0.11796	R-Square	0.9921		
Dependent Mean		6.18522	Adj R-Sq	0.9916		
Coeff Var		1.90705				
Parameter Estimates						
Variable	Label	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	Intercept	1	0.24752	0.13151	1.88	0.0771
fs1		1	3.06338	0.06640	46.14	<.0001
Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F	
Model	1	27.79168	27.79168	229.32	<.0001	
Error	17	2.06030	0.12119			
Corrected Total	18	29.85198				
Root MSE		0.34813	R-Square	0.9310		
Dependent Mean		6.18522	Adj R-Sq	0.9269		
Coeff Var		5.62840				
Parameter Estimates						
Variable	Label	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	Intercept	1	2.87306	0.23285	12.34	<.0001
fs	fs	1	0.44162	0.02916	15.14	<.0001

模型二检验结果:

模型三检验结果:

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F	
Model	1	7722462	7722462	96.79	<.0001	
Error	17	1356288	79782			
Corrected Total	18	9078749				
	Root MSE	282.45641	R-Square	0.8506		
	Dependent Mean	844.54053	Adj R-Sq	0.8418		
	Coeff Var	33.44498				
Parameter Estimates						
Variable	Label	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
Intercept	Intercept	1	-2187.51563	314.92335	-6.95	<.0001
fs1		1	1564.29730	158.99843	9.84	<.0001

4. 问题二风速-功率相关系数:

机型一:

程序:

```
ore<-data.frame(
x=c(3.0,3.5,4.0,4.5,5.0,5.5,6.0,6.5,7.0,7.5,8.0,8.5,9.0,9.5,10.0,10.5,
11.0,11.5,12.0,12.5,13.0,14.0,15.0,16.0,17.0,18.0,19.0,20,21,22,23,24,25),
y=c(27,56.41,96.76,140.10,191.13,254.97,335.13,423.64,527.61,650.08,
789.66,951.86,1120.18,1308.91,1516.25,1730.77,1912.29,2003.52,2010,
2010,2010,2010,2010,2010,2010,2010,2010,2010,2010,2010,2010,2010)
)
ore.m<-mean(ore);ore.s<-cov(ore);ore.r<-cor(ore)
attach(ore)
cor.test(x,y)
```

运行结果:

Pearson's product-moment correlation

data: x and y

t = 8.8116, df = 31, p-value = 6.006e-10

alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0

95 percent confidence interval:

0.7073672 0.9213023

sample estimates:

cor

0.8453795

机型二：程序

```
ore<-data.frame(
x=c(3.5,4.0,5.0,6.0,7.0,8.0,9.0,10.0,11.0,12.0,13.0,14.0,15.0,16.0,17.0,18.0,19.0,20.0,21.0,22.0,23.0),
y=c(40,74,164,293,471,702,973,1269,1544,1544,1544,1544,1544,1544,1544,1544,1544,1544,1544,1544,1544))
)
ore.m<-mean(ore);ore.s<-cov(ore);ore.r<-cor(ore)
attach(ore)
cor.test(x,y)
运行结果：
```

Pearson's product-moment correlation

data: x and y

t = 7.0583, df = 19, p-value = 1.022e-06

alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0

95 percent confidence interval:

0.6624644 0.9379988

sample estimates:

cor

0.8508325

5. 问题三的运行程序：

Global optimal solution found.		
Objective value:		8.000000
Infeasibilities:		0.000000
Total solver iterations:		3
Variable	Value	Reduced Cost
X1	2.000000	0.000000
X2	2.000000	0.000000
X3	2.000000	0.000000
X4	0.000000	0.000000
X5	2.000000	0.000000
X6	0.000000	0.000000
Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	8.000000	-1.000000
2	2.000000	0.000000
3	0.000000	1.000000
4	1.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000
6	2.000000	0.000000
7	0.000000	1.000000
8	2.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000
10	2.000000	0.000000

6. 模型检验中的残差分析图

运行程序：

```
x=[6.96 5.88 5.64 6.41 6.51 5.66 5.09 6.41 4.32 5.50 6.66 5.96]';
```

```
Y=[54.5 41.0 45.2 46.8 33.2 21.8 22.6 32.3 29.5 33.3 43.6 30.5]';
```

```
X=[ones(12,1) x];
```

```
[b,bint,r,rint,stats]=regress(Y,X)
```

```
rcoplot(r,rint)
```

运行结果：

```
r =
```

```
    9.6511  
    5.1126  
   11.3040  
    6.5148  
   -7.9150  
  -12.2619  
   -6.7322  
   -7.9852  
    6.5570  
    0.5657  
    1.2404  
   -6.0512
```

```
rint =
```

```
   -5.5172   24.8193  
  -13.2163   23.4414  
   -5.2825   27.8905  
  -11.1377   24.1673  
  -25.0491    9.2192  
  -28.4895    3.9657  
  -23.5291   10.0647  
  -25.3014    9.3310  
   -6.2941   19.4082  
  -17.8536   18.9850  
  -16.4960   18.9768  
  -24.2208   12.1183
```

```
stats =
```

```
    0.3747    5.9923    0.0344   69.3063
```