

风电场运行状况分析及优化模型

摘 要

在利用 MATLAB 对数据进行处理和分析的基础上，完成了风电场风速分布和风机发电性能的讨论，通过图像分析、曲线拟合与预测等方式建立并求解拟合和优化模型，很好的解决了题目中的三个问题。

针对问题一，读取、整理并预处理初始数据，通过数据图像可视化进行分析，评估了风电场的风能资源，经过转化输出功率数据计算出风机的风能转化率。

针对问题二，首先，观察到 I 和 II 机型功率输出归一化曲线重合，通过拟合得到了不依赖于风机切入风速、额定风速和额定功率等基本参数的风机功率输出规律。再通过验证，根据这种规律和风机基本参数，就可以重构出风机功率输出曲线。然后，用这种方法得到各新型风机的功率输出曲线，再对各处风速采样数据进行计算，得到每个风机在各处的风能利用率。通过对比分析，可以得到新型号风机相对于现有风机的优劣情况的评价。

针对问题三，首先，根据题目的限定条件和要求建立多目标优化模型。然后，充分利用计算机的运算能力，通过合并前后两天的方法适当简化模型进行改进。最后，通过 Lingo 求解得出并分析了最优风机维护方案和维修组值班安排。

所建模型具有良好的实用性和可借鉴性，适于推广至资源评估、数据预测及合理优化配置等多个方面。

关键词：风电场 资源评估 归一化 曲线拟合 优化配置

1. 问题的重述

1.1 基本信息

风力发电作为风能最主要的应用形式, 大力开发有利于缓解我国能源紧张问题. 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.

1.2 相关数据

2015 年度全年时间间隔为 15 分钟的平均风速和风电场日实际输出功率采样数据; 风电场六部典型风机所处地点在 2015 年全年的风速数据, 数据采样时间间隔为 2 小时; 现有两种风机的基本参数表报表及随风速变化的输出功率数据; 企业提供的新型号风机基本参数.

1.3 要解决的具体问题

问题一: 利用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对该风电场的风能资源及其利用情况进行评估.

问题二: 根据几个典型风机所在处的风速信息, 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.

问题三: 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. 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.

2. 模型的假设

- 假设风力发电场区域内空气是均匀分布的, 且空气密度不受外界因素的影响;
- 假设维修人员每个人的工作效率, 健康情况等都是一样的, 每个人员都能正常工作;
- 假设风机转子半径大小为 40 (单位: 米 m);
- 各机型功率除受切入风速、切出风速、额定风速和额定功率以外不受其它参数

的影响

3. 符号说明

符号	含义
ρ	空气密度
R	风机扇面的半径
v	风速大小
P	功率
E	风能
W	风机做功值
C	风能资源利用率
v_o	风机的切出风速
v_i	风机的切入风速
P_n	风机的额定功率
v_n	风机的额定风速

4. 模型的建立与求解

4.1 数据的处理与初步分析

(1) 数据的处理

原题中给出了大量的风速和风电场实际输出功率的采样数据，分别存储在数量庞大的 Excel 文件及其各个表单中。观察到文件命名的规律性，可以方便地通过程序读取到计算机内存中来，以备计算所需，具体过程参见附录 1。同时还注意数据的完整性和单位，原题附件 1 中的功率单位为兆瓦 (MW)，从中累计读取平均风速和实际功率 35040 个数据，附件 2 中读取六处风机确切风速数据各 4380 个，相关统计情况如图 1-图 3。

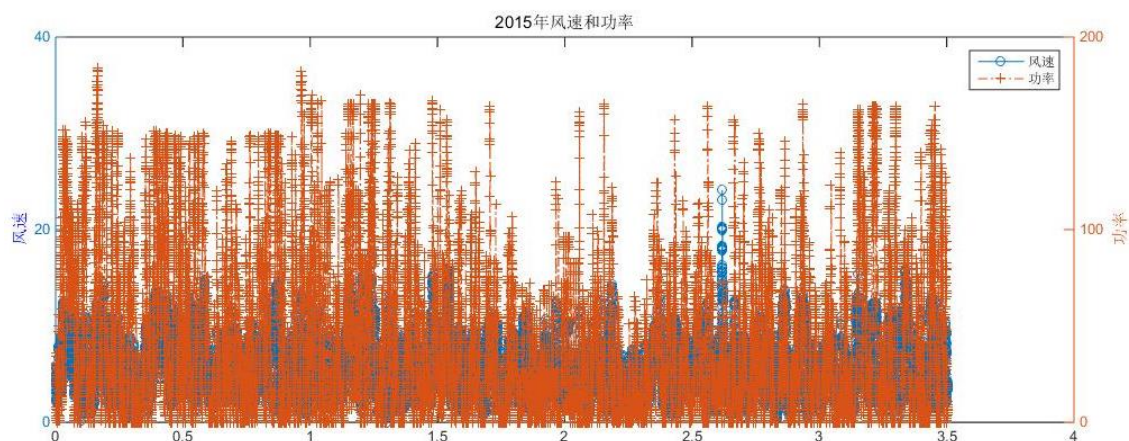


图 1 平均风速与实际功率输出数据

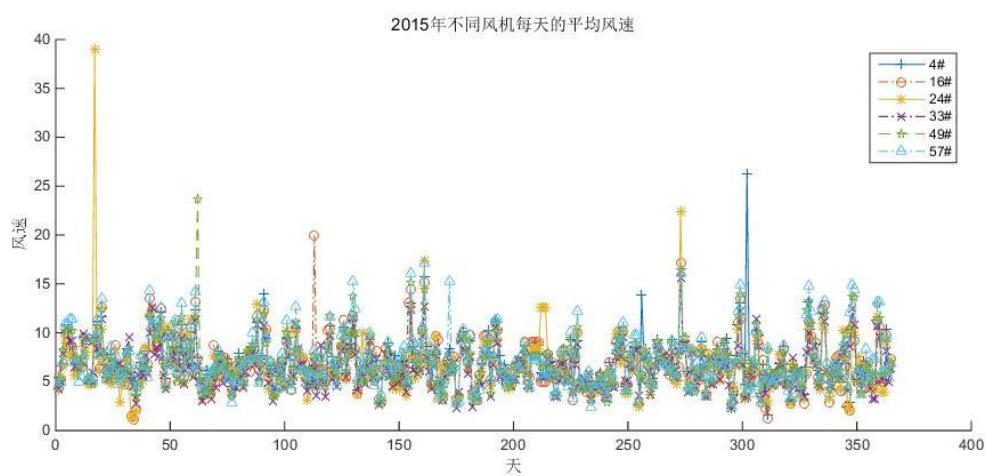


图 2 2015 年不同风机每天的平均速度

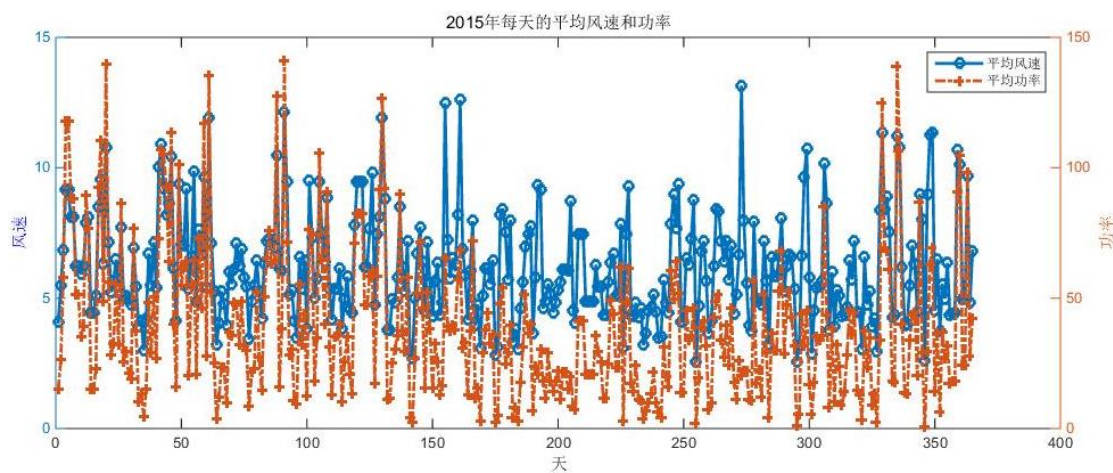


图 3 2015 年每天的平均风速和功率

由图 3 知，基本上风速大的时候，风电场的实际输出功率较高。同时，此风电场的

风速随日期和季节更替的变化并不明显，实际上风电场选址也应该考虑的风力资源的稳定情况，获得持续的功率输出。

通常，Weibull^[4]分布能很好地描述风速分布。风速分布 $f(v)$ 采用双参数 Weibull 分布，即

$$f(v) = \frac{d}{n} \left(\frac{v}{n} \right)^{d-1} e^{-\left(\frac{v}{n} \right)^d} \quad (1)$$

其中， d 和 n 分别为形状参数和尺度因子^[4]。

将全部平均风速按 0.5 间隔统计获得频率直方图及其 Weibull 分布拟合如下， d 和 n 分别为 2.1745 和 6.1702。

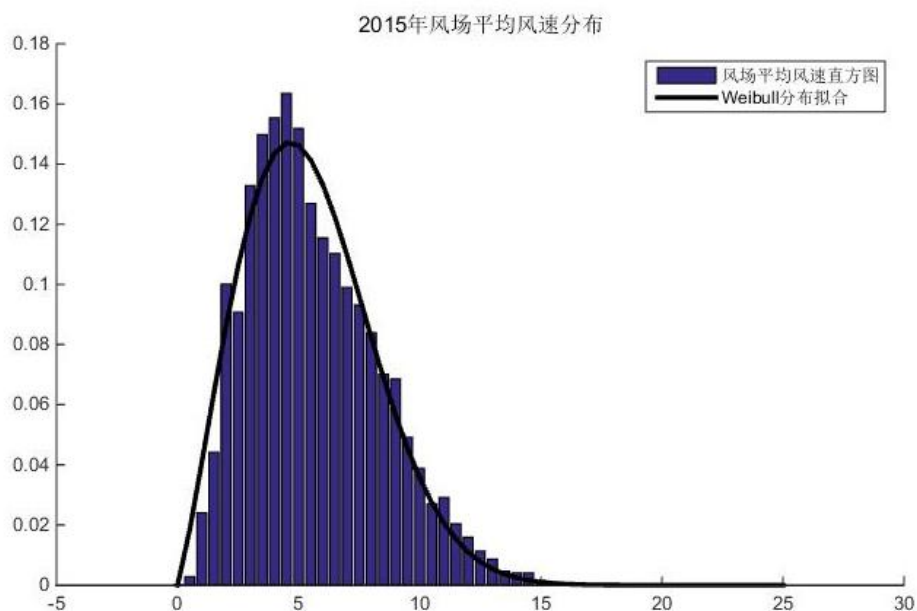


图 4 2015 风场平均风速分布与 Weibull 拟合

类似，可以获得 2015 年不同风机处风速的分布：

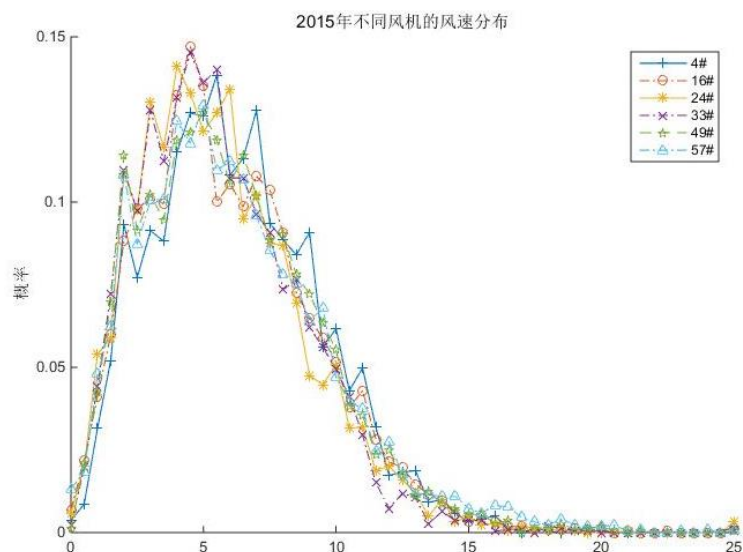


图 5 2015 年不同风机处的风速分布

分别进行 Weibull 分布拟合，得到 d 和 n 取值如表 1 所示。

表 1 2015 年不同风机处风速 Weibull 分布拟合

风机	d	n
4#	2.111684	7.138927
16#	1.962029	6.811088
24#	1.956054	6.34643
33#	1.978805	6.338952
49#	1.907676	6.852713
57#	1.874241	6.873915

各组数据的频率及拟合概率可以在误差允许的前提下，快速地提高采样数据的相关计算。数据分析和统计的具体过程见附录 2。

(2) 风力资源及其利用率

风机是通过转化“风”，即空气的水平流动产生的动能来推转子发电的。因此，对于风机发电，风力资源大小即某时间内流过风机的空气动能的大小。如图 6 所示，若风速为 v ，风机扇面半径为 R ，则时间 dt 内通过风机扇面的空气质量为 $\pi R^2 \rho v dt$ ，其中 ρ 为空气密度，可利用的风能 $dE = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho v^3 dt$ 。

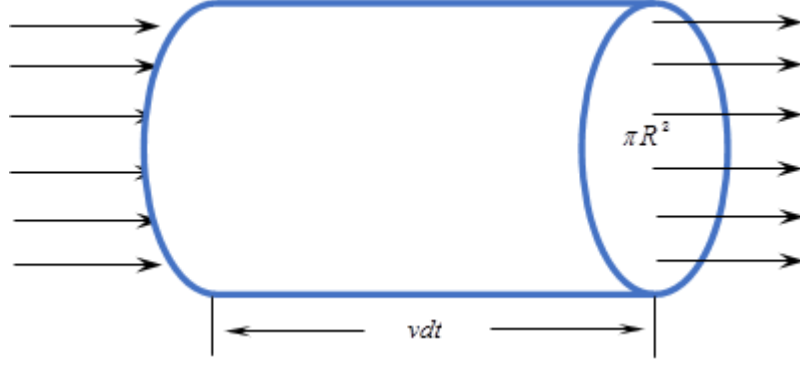


图 6 风力资源大小的描述

由此，某时间段 $[t_1, t_2]$ 内的风能大小为：

$$E = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \pi R^2 \rho v^3 dt = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 \Delta t \quad (1)$$

其中， v_i 为风速的离散采样， $i=1, 2, \dots, n$ ； Δt 为采样时间间隔。由（1）知，风力资源与风速的立方成正比。计算在某时间段内的平均风速应使用立方均值，前文图 2-3 既是如此。

记风机发电的实际功率输出为 P ，时间 dt 内的做功为 $dW = P(t)dt$ ，某时间段 $[t_1, t_2]$ 内的对外做功大小为：

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt = \sum_{i=1}^n P_i \Delta t \quad (2)$$

其中， P_i 为实际功率的离散采样， $i = 1, 2, \dots, n$ ； Δt 为采样时间间隔。

由（1）-（2），可以将风力资源的其利用率表示为

$$C = \frac{W}{E} = \frac{2 \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt}{\int_{t_1}^{t_2} \pi R^2 \rho v^3 dt} = \frac{2 \sum_{i=1}^n P_i \Delta t}{\pi R^2 \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 \Delta t} \quad (3)$$

4.2 风能利用率的计算和问题一的解答

利用（1）-（3）式和 4.1（1）中获得的采样数据，风机扇叶半径取 $R = 40$ （单位：米 m ），由附件 3 空气密度取 $\rho = 0.9762 \text{ kg/m}^3$ ，可以计算 2015 全年风力资源为 $E_{sum} = 3.105224057597369 \times 10^{15}$ （单位：焦耳 J ），2015 全年风机实际利用的风力资源

为 $W_{sum}=1.207221111 \times 10^{15}$ (单位: J), 利用率 $C=38.8771\%$, 基本符合目前风场发电的实际情况, 具体计算过程见附录 3.

针对 4#、16#、24#和 33#、49#、57#各风机具体情况, 虽然通过附件 2 读取的数据只能知道所处的风速信息, 但可以通过对应型号的风速-功率曲线获得不同风速的实际功率输出. 因为风速较低时受风轮机的设计限制, 而风速较高时又受到发电机的设计限制, 大部分风力机在一定风速范围内的输出功率变化规律是不变的. 风速-功率曲线用数学公式表示就是^[5]:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq v < v_i \\ f_p(v) & , v_i \leq v < v_n \\ P_n & , v_n \leq v \leq v_o \\ 0 & , v_o < v \end{cases} \quad (4)$$

其中 v_i 为风机启动风速, 即切入风速, 小于切入风速风机没有开启, 输出功率为 0; v_n 为额定风速, 风机发电能力到达既定额度, 受到发电机的设计限制风速继续超出输出功率保持在额定功率 P_n 不变; $f_p(v)$ 为风速在 v_i 和 v_n 之间时, 输出功率与风速的关系, 反映风机达到额定功率前的输出特性; 当风速继续变大, 超出切出风速 v_o 时, 风轮停机, 输出功率为 0. I 和 II 型风机的功率曲线如图 7 所示.

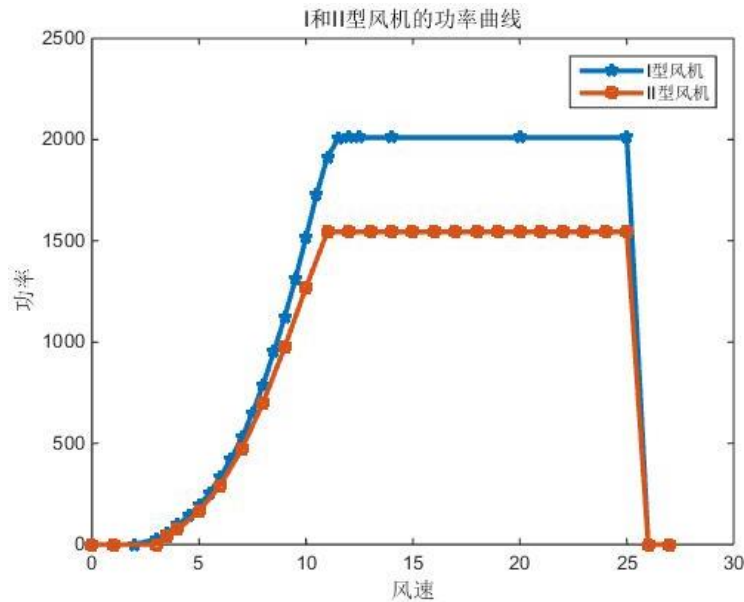


图 7 I 和 II 型风机的功率曲线

利用 4.1 (1) 从附件 2 中获得的风速数据, 对风速和功率曲线进行插值, 可以获

得各风机与风速数据对应的功率输出，由（1）-（3）式可以计算各风机的做功情况；同时，对各风机处的风速计算风能资源量，得到如下结果，具体过程见附录 3.

表 2 2015 年不同风机输出做功、风能资源和利用率

风机	风能	做功	利用率
4#	39786670258655.70	18324898862400.10	46.06%
16#	36175506522664.60	17036944736443.30	47.10%
24#	44450003723448.10	14812795564704.00	33.32%
33#	27142284743494.10	12229457976000.00	45.06%
49#	37878012804303.30	14308411544640.00	37.77%
57#	41206694102862.30	14747931360000.00	35.79%

4.3 风机达到额定功率前的输出特性

为对比新旧型号风机的风能利用情况，需要计算新型风机的功率输出曲线才能完成新型风机在不同风速数据情况下实际功率输出. 根据（4）式，在风机的切入风速、额定风速、额定功率、切出风速等基本参数已知的情况下，问题转化为 $f_p(v)$ ，即风机达到额定功率前的输出特性的刻画. 为此，将 I 和 II 型风机已知的 $f_p(v)$ 进行归一化，以获得不同风机 $f_p(v)$ 变化的共同特性.

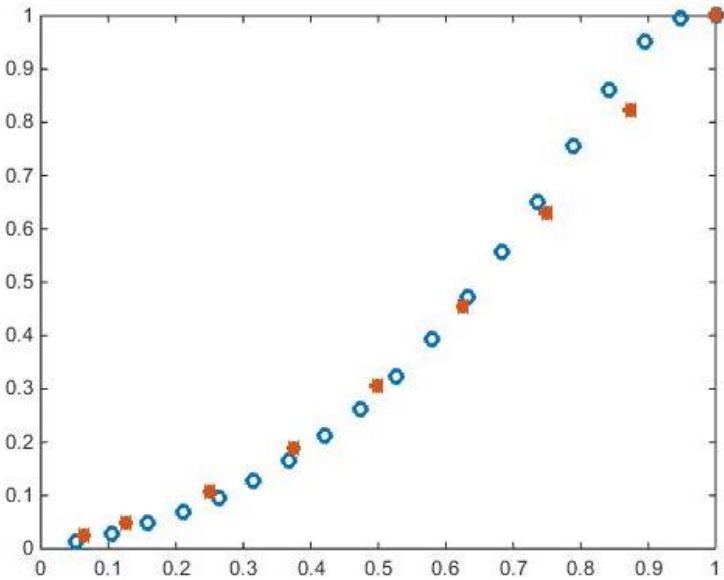


图 8 I 和 II 型风机 $f_p(v)$ 的归一化

可以看出，不同风机的 $f_p(v)$ 在归一化后有着共同的变化规律. 用经验函数

$$h_p(x) = a \cdot x^b \quad (5)$$

进行曲线拟合可得到：

$$a=1.064371539974373, \quad b=1.747599315639992$$

剩余方差为 0.028022815517043，拟合效果如图 9，称（5）为归一化函数。

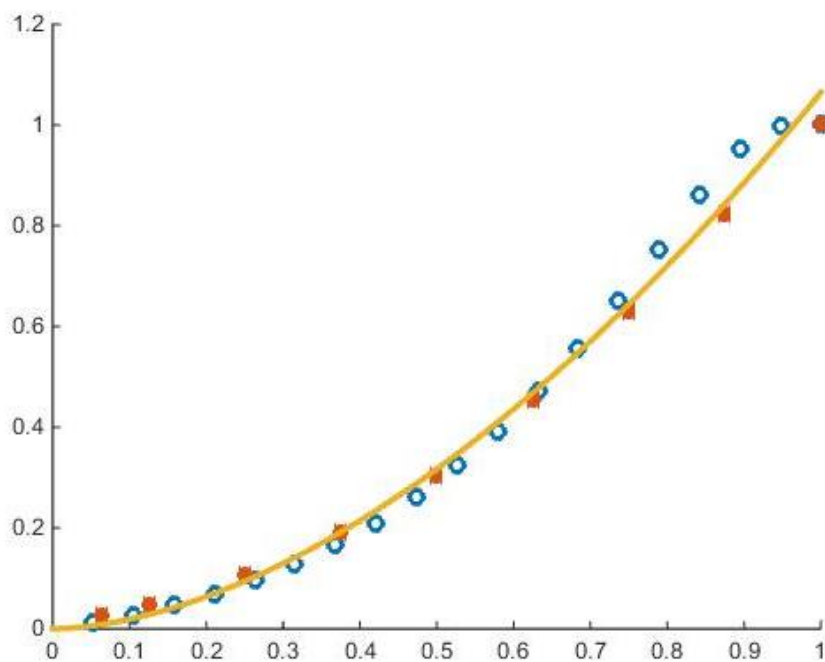


图 9 归一函数 $h_p(x)$ 的拟合效果

使用归一化函数和切入风速、额定风速、额定功率风速可以将 $f_p(v)$ 还原：

$$\begin{aligned} \frac{P_n - f_p(v)}{P_n} &= h_p(x) = h_p\left(\frac{v - v_i}{v_n - v_i}\right) = a \cdot \left(\frac{v - v_i}{v_n - v_i}\right)^b \\ \Leftrightarrow f_p(v) &= P_n - P_n \cdot a \cdot \left(\frac{v - v_i}{v_n - v_i}\right)^b \end{aligned} \quad (6)$$

利用（6）式将 I 和 II 型风机的 $f_p(v)$ 还原如图 10，效果良好。

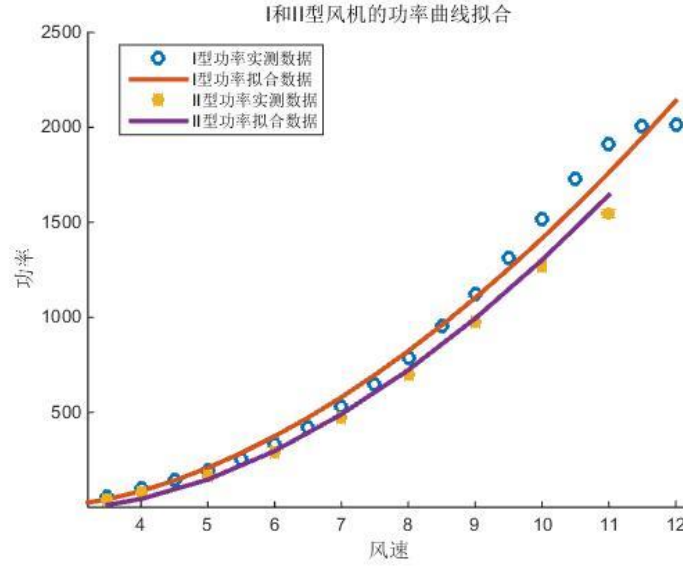


图 10 $h_p(x)$ 还原 $f_p(v)$ 效果

综上，可以认为归一化函数 $h_p(x) = a \cdot x^b$ 是不同型号风机一种本质的共同的属性，并且可以通过（6）式和风机的切入风速、额定风速、额定功率、切出风速基本参数完整地还原出风机的功率曲线函数 $P(v)$

$$P(v) = \begin{cases} 0 & , 0 \leq v < v_i \\ P_n - P_n \cdot a \cdot \left(\frac{v - v_i}{v_n - v_i} \right)^b & , v_i \leq v < v_n \\ P_n & , v_n \leq v \leq v_o \\ 0 & , v_o < v \end{cases} \quad (7)$$

即，新型号的风机功率曲线可以由（7）式给出，如下图 11。上述计算过程见附录 4。

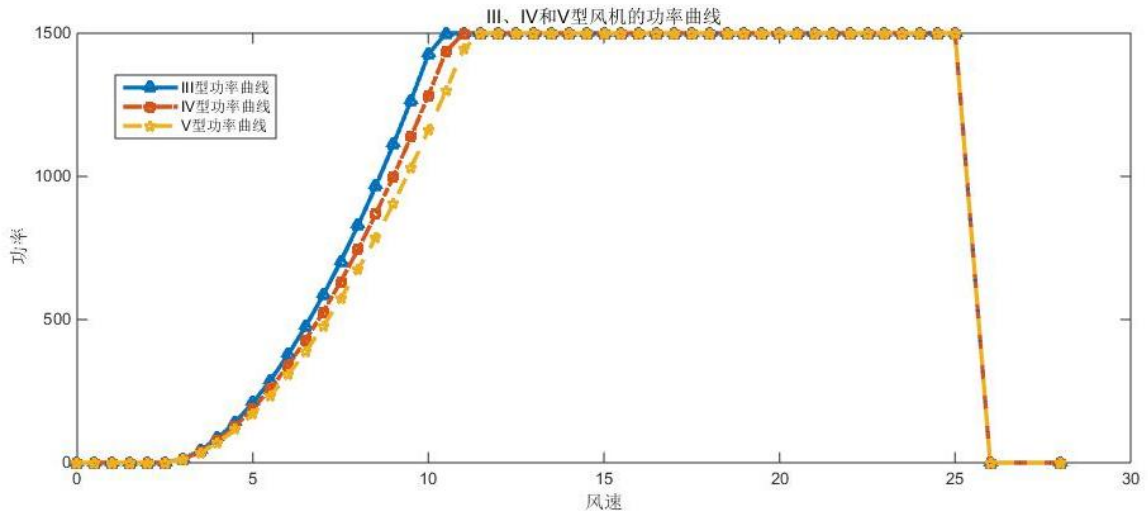


图 11 新型号风机的功率曲线

4.4 新型号风机的风能利用率和问题二的解答

根据（7）式，通过类似 4.2 中的分析，针对三种不同的新机型计算 4#、16#、24# 和 33#、49#、57# 各风机处风速采样数据对应的功率输出，进而给出全年的做功总量，得到数据如表 3。

表 3 新机型在各处的全年做功

风机处	Ⅲ型	Ⅳ型	V 型
4#	17109403059845.70	15880120510798.00	14733250375281.10
16#	15826020602489.70	14710419217355.80	13674036639140.60
24#	13954092387231.90	12917553606966.80	11966216782771.60
33#	13874621179894.70	12779839570324.00	11772541875710.50
49#	15964281795675.40	14818714305321.60	13763118068219.00
57#	16298528832834.20	15207025916564.30	14194993442249.70

与风资源总量比较得到利用率并跟原有机型利用率比较，得到如下表 4

表 4 各机型资源利用率比较

风机	4#	16#	24#	33#	49#	57#
Ⅲ型	43.00%	43.75%	31.39%	51.12%	42.15%	39.55%
Ⅳ型	39.91%	40.66%	29.06%	47.08%	39.12%	36.90%
V 型	37.03%	37.80%	26.92%	43.37%	36.34%	34.45%
I 型/II 型	46.06%	47.10%	33.32%	45.06%	37.77%	35.79%

通过对比可以发现，将Ⅲ型、Ⅳ型放置在 33#、49#、57# 风机处，都可以比原有机型获得更好的发电效率；其他机型或放置方式都不能得到比现有机型更好的发电效果。特别地，V 型风机在各地都落后于现有机型，发电效率最低。通过对比参数可以发现，相较其他机型，V 型风机具有更高的切入（启动）风速，相同的额定功率却需要更高的额定风速，能源利用效率明显低下。这也可以通过图 11 得到相同的结论，V 型风机功率曲线最低，相同风速下实际功率输出最小。

另一方面，可以根据风场全年的平均风速，使用功率曲线估算各型号风机全年的做功总量。得到结果如表 5。

表 5 各机型年平均做功总量及资源利用率

型号	做功总量	风能利用率
I 型	1749726224863240.00	56.35%
II 型	1474037256024000.00	47.47%
Ⅲ型	1677057350886750.00	54.01%
Ⅳ型	1543746827681740.00	49.71%
V 型	1422644623762910.00	45.81%

这样，从总体上看，各型号风机在本风电场发电效率可大体排名如下：

$$C(I) > C(III) > C(IV) > C(II) > C(V)$$

上述分析与计算过程可见附录 5。

4.4 风机维护与维修人员安排的优化模型

(1) 模型的分析与建立

124 台风机的停机维护计划方案和 4 组维修人员的值班安排可以使用 0-1 变量表示。记变量

$$X_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{表示第 } i \text{ 号风机在第 } k \text{ 天不维修} \\ 1, & \text{表示第 } i \text{ 号风机第 } k \text{ 天维修} \end{cases}$$

$$T_{jk} = \begin{cases} 0, & \text{表示第 } j \text{ 组维修队在第 } k \text{ 天不值班} \\ 1, & \text{表示第 } j \text{ 组维修队在第 } k \text{ 天值班} \end{cases}$$

其中， $i=1,2,\dots,124$ 代表不同编号的风机， $j=1,2,3,4$ 表示不同的维修组， $k=1,2,\dots,365$ 表示一年中的各天。

在 4.1 (1) 绘制图 3 过程中，已经计算了每天的平均功率，现记为 P_k ，可以使用 P_k 和 X_{ik} 表示由于停机维修导致的发电损失

$$L = \sum_{k=1}^{365} \sum_{i=1}^{124} X_{ik} \cdot \frac{P_k}{124} \quad (8)$$

每个维修组组一年中值班的总数可以表示为

$$B_j = \sum_{k=1}^{365} T_{jk}, \quad j=1,2,3,4 \quad (9)$$

由于维修组间没有直接的区分，不妨设 $B_j \leq B_{j+1}$ ， $j=1,2,3$ ，那么各组间工作任务的不均衡可以表示为

$$N = B_4 - B_1 \quad (10)$$

(8)、(10) 式可以用来描述模型的目标函数。

为了安全的生产的需求，风机每年需要进行两次停机维护，每次维修两天，即

$$\sum_{k=1}^{365} X_{ik} = 4 \quad (11)$$

对每个 $i=1,2,\dots,124$ ，每次连续两天维修的要求可以通过 X_{ik} 在前后连续三天的和来

约束表示，即如果 $X_{ik}=1$ ，则 $\sum_{t=k-1}^{k+1} X_{it} \geq 2$ ， $k=2,\dots,364$ ，可以验证其等价于

$$\sum_{t=k-1}^{k+1} X_{it} \geq 2X_{ik}, \quad i=1,2,\dots,124, \quad k=2,\dots,364 \quad (12)$$

两次维护的时间不超过 270 天可以表示为 $1-X_{ik}$ 任意连续 271 天的和不超过 270，
即

$$\sum_{t=k-270}^k (1-X_{it}) \leq 270, \quad k=271,\dots,365, \quad i=1,2,\dots,124 \quad (13)$$

同理，每队维修人员连续工作时间不超过 6 天可以表示为

$$\sum_{t=k-6}^k T_{jt} \leq 6, \quad k=7,\dots,365, \quad j=1,2,\dots,4 \quad (14)$$

此外还要求电场每天都需要有一组维修人员值班对应突发情况

$$\sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq 1, \quad k=1,2,3,\dots,365 \quad (15)$$

和有充分多的在值维修组应对多部风机停机维修

$$\sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq \sum_{i=1}^{124} X_{ik}, \quad k=1,2,3,\dots,365 \quad (16)$$

由 (8) - (16) 可以建立多目标优化模型如下：

$$\begin{aligned}
& \min \quad N = B_4 - B_1 \\
& \min \quad L = \sum_{k=1}^{365} \sum_{i=1}^{124} X_{ik} \cdot \frac{P_k}{124} \\
& S.T. \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^{365} X_{ik} = 4, \quad i = 1, 2, \dots, 124 \\ \sum_{t=k-1}^{k+1} X_{it} \geq 2X_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, 124, \quad k = 2, \dots, 364 \\ \sum_{t=k-270}^k (1 - X_{it}) \leq 270, \quad i = 1, 2, \dots, 124, \quad k = 271, \dots, 365 \\ \sum_{t=k-6}^k T_{jt} \leq 6, \quad j = 1, 2, \dots, 4, \quad k = 7, \dots, 365 \\ \sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq 1, \quad k = 1, 2, \dots, 365 \\ \sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq \sum_{i=1}^{124} X_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, 365 \end{cases} \quad (17)
\end{aligned}$$

(2) 模型的求解与问题三的解答

多目标规划的解法一般基本方法有主要目标法、评价函数法、理想点法、线性加权法和法、平方和权法等多种方法。这里最简单的处理方式是控制目标函数 $N = B_4 - B_1$ 的取值，比如 $N = B_4 - B_1 \leq 2$ ，然后在可行解中搜索 $L = \sum_{k=1}^{365} \sum_{i=1}^{124} X_{ik} \cdot \frac{P_k}{124}$ 的最优值。然而，实际的问题是模型 (17) 的实现远远超出了传统 PC 的能力范畴。在 Lingo 中显示，其变量个数达到了 47085 个，限制条件达 83076 个，具体见附录 6。

这里，首先将模型 (17) 做限制性简化，对 $k = 1, 2, 3, \dots, 365$ 各天前后按顺序俩俩合并。具体来说就是将 365 天按前后顺次分成 183 份（第 365 天单独考虑），重新计算前后两天的平均功率，仍记为 P_k ， $k = 1, 2, 3, \dots, 183$ 。在目标函数没有变化的同时，约束条件 (11) - (16) 的得到了极大的化简，比如 (12) 式可以省略，(13) 式求和以及循环的次数减小一半。同时注意，这是在一定限制并适当简化的模型，比如任意方案中维修组至少连续工作两天，实践表明这种简化取得了比较好的效果。综上，模型 (17) 可以简化为

$$\begin{aligned}
& \min \quad N = B_4 - B_1 \\
& \min \quad L = \sum_{k=1}^{183} \sum_{i=1}^{124} X_{ik} \cdot \frac{P_k}{124} \\
& S.T. \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^{183} X_{ik} = 2, \quad i = 1, 2, \dots, 124 \\ \sum_{t=k-135}^k (1 - X_{it}) \leq 135, \quad i = 1, 2, \dots, 124, \quad k = 136, \dots, 183 \\ \sum_{t=k-3}^k T_{jt} \leq 3, \quad j = 1, 2, \dots, 4, \quad k = 4, \dots, 183 \\ \sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq 1, \quad k = 1, 2, \dots, 183 \\ \sum_{j=1}^4 T_{jk} \geq \sum_{i=1}^{124} X_{ik}, \quad k = 1, 2, \dots, 183 \end{cases} \quad (18)
\end{aligned}$$

模型 (18) 可以直接在 Lingo 中求解, 具体见附录 7. 计算显示, 在 4 组维修人员工作任务完全相同的情况下 (224 天), 各风机停机维护造成的发电量损失可以控制在 5.7076×10^{12} (J), 具体风机停机维护方案见表 6, 维修组值班安排见表 7;

表 6 停机维护日期

#	维修				#	维修				#	维修				#	维修			
1	185	186	319	320	32	211	212	237	238	63	185	186	361	362	94	33	34	183	184
2	81	82	205	206	33	33	34	175	176	64	133	134	193	194	95	63	64	313	314
3	35	36	243	244	34	223	224	241	242	65	249	250	351	352	96	77	78	183	184
4	35	36	275	276	35	153	154	309	310	66	197	198	231	232	97	189	190	197	198
5	33	34	273	274	36	271	272	325	326	67	243	244	309	310	98	241	242	279	280
6	117	118	333	334	37	133	134	355	356	68	235	236	333	334	99	167	168	195	196
7	189	190	339	340	38	67	68	339	340	69	189	190	355	356	100	189	190	351	352
8	81	82	141	142	39	181	182	361	362	70	175	176	345	346	101	191	192	295	296
9	117	118	339	340	40	233	234	279	280	71	249	250	351	352	102	1	2	219	220
10	259	260	295	296	41	29	30	295	296	72	191	192	275	276	103	15	16	181	182
11	77	78	313	314	42	95	96	271	272	73	191	192	205	206	104	153	154	327	328
12	255	256	325	326	43	153	154	241	242	74	63	64	195	196	105	81	82	283	284
13	65	66	327	328	44	65	66	313	314	75	259	260	275	276	106	211	212	345	346
14	205	206	319	320	45	201	202	283	284	76	255	256	327	328	107	229	230	327	328
15	259	260	345	346	46	233	234	333	334	77	67	68	309	310	108	163	164	169	170
16	63	64	325	326	47	67	68	203	204	78	15	16	223	224	109	203	204	233	234
17	15	16	109	110	48	109	110	203	204	79	163	164	301	302	110	77	78	333	334
18	109	110	319	320	49	141	142	273	274	80	95	96	163	164	111	197	198	361	362
19	219	220	355	356	50	29	30	301	302	81	229	230	321	322	112	199	200	301	302
20	141	142	211	212	51	207	208	275	276	82	239	240	357	358	113	169	170	211	212
21	63	64	175	176	52	249	250	345	346	83	1	2	117	118	114	255	256	301	302

#	维修				#	维修				#	维修				#	维修			
22	217	218	241	242	53	169	170	205	206	84	183	184	357	358	115	195	196	235	236
23	33	34	201	202	54	35	36	255	256	85	109	110	235	236	116	81	82	181	182
24	35	36	279	280	55	213	214	319	320	86	1	2	133	134	117	217	218	361	362
25	29	30	167	168	56	65	66	239	240	87	77	78	339	340	118	167	168	249	250
26	197	198	279	280	57	233	234	357	358	88	223	224	283	284	119	239	240	357	358
27	67	68	283	284	58	1	2	273	274	89	95	96	271	272	120	203	204	219	220
28	271	272	325	326	59	201	202	213	214	90	213	214	309	310	121	153	154	217	218
29	217	218	229	230	60	183	184	321	322	91	259	260	295	296	122	15	16	169	170
30	195	196	351	352	61	219	220	313	314	92	133	134	175	176	123	185	186	229	230
31	167	168	181	182	62	117	118	239	240	93	95	96	141	142	124	243	244	321	322

表 7 维修组值班日期

1 组	2 组	3 组	4 组	1 组	2 组	3 组	4 组	1 组	2 组	3 组	4 组	1 组	2 组	3 组	4 组
1	1	1	1	2	2	2	2	191	193	191	195	192	194	192	196
3	5	7	7	4	6	8	8	195	195	195	197	196	196	196	198
7	11	11	11	8	12	12	12	197	197	197	199	198	198	198	200
9	15	13	15	10	16	14	16	201	201	201	203	202	202	202	204
15	17	15	19	16	18	16	20	203	203	203	205	204	204	204	206
19	23	19	23	20	24	20	24	205	205	205	207	206	206	206	208
21	25	23	27	22	26	24	28	209	211	209	211	210	212	210	212
25	29	31	29	26	30	32	30	211	213	211	213	212	214	212	214
27	33	33	33	28	34	34	34	215	217	213	217	216	218	214	218
29	35	35	35	30	36	36	36	217	219	217	219	218	220	218	220
33	43	39	37	34	44	40	38	219	223	219	221	220	224	220	222
35	47	43	41	36	48	44	42	223	229	223	225	224	230	224	226
41	49	47	45	42	50	48	46	227	231	225	227	228	232	226	228
43	55	49	49	44	56	50	50	229	233	229	229	230	234	230	230
47	57	55	55	48	58	56	56	233	237	233	233	234	238	234	234
51	61	57	57	52	62	58	58	235	239	235	235	236	240	236	236
53	63	59	59	54	64	60	60	239	241	239	239	240	242	240	240
59	67	63	63	60	68	64	64	241	245	241	241	242	246	242	242
63	69	65	65	64	70	66	66	243	247	243	243	244	248	244	244
65	71	67	67	66	72	68	68	249	249	247	249	250	250	248	250
67	75	73	71	68	76	74	72	251	255	249	251	252	256	250	252
73	77	77	77	74	78	78	78	255	259	253	255	256	260	254	256
77	81	79	79	78	82	80	80	257	261	255	259	258	262	256	260
79	83	81	81	80	84	82	82	259	267	259	261	260	268	260	262
81	91	87	87	82	92	88	88	265	271	263	265	266	272	264	266
85	93	91	91	86	94	92	92	269	273	267	271	270	274	268	272
87	95	95	95	88	96	96	96	271	275	271	273	272	276	272	274

1组	2组	3组	4组	1组	2组	3组	4组	1组	2组	3组	4组	1组	2组	3组	4组
89	101	97	97	90	102	98	98	275	279	273	275	276	280	274	276
95	105	101	103	96	106	102	104	277	283	275	279	278	284	276	280
97	109	105	107	98	110	106	108	279	285	279	281	280	286	280	282
99	111	109	109	100	112	110	110	283	289	283	283	284	290	284	284
103	113	111	113	104	114	112	114	287	293	285	287	288	294	286	288
107	117	113	115	108	118	114	116	291	295	289	291	292	296	290	292
109	119	117	117	110	120	118	118	295	297	293	295	296	298	294	296
111	121	121	121	112	122	122	122	301	301	295	299	302	302	296	300
117	127	125	125	118	128	126	126	303	309	301	301	304	310	302	302
123	131	129	129	124	132	130	130	307	311	303	305	308	312	304	306
129	133	133	133	130	134	134	134	309	313	307	307	310	314	308	308
133	135	137	139	134	136	138	140	313	317	309	309	314	318	310	310
137	139	139	141	138	140	140	142	315	319	313	313	316	320	314	314
139	141	141	143	140	142	142	144	319	321	315	315	320	322	316	316
141	147	145	147	142	148	146	148	321	325	319	319	322	326	320	320
147	153	149	151	148	154	150	152	325	327	323	321	326	328	324	322
151	155	153	153	152	156	154	154	327	329	325	325	328	330	326	326
153	159	157	159	154	160	158	160	331	333	327	327	332	334	328	328
161	161	161	161	162	162	162	162	333	335	333	331	334	336	334	332
163	163	163	165	164	164	164	166	337	339	335	333	338	340	336	334
167	167	167	167	168	168	168	168	339	341	339	339	340	342	340	340
169	169	169	169	170	170	170	170	341	345	341	343	342	346	342	344
171	173	171	175	172	174	172	176	345	349	345	345	346	350	346	346
175	175	175	177	176	176	176	178	347	351	349	349	348	352	350	350
179	177	177	181	180	178	178	182	351	353	351	351	352	354	352	352
181	181	181	183	182	182	182	184	355	357	355	355	356	358	356	356
183	183	183	185	184	184	184	186	357	359	357	357	358	360	358	358
187	185	185	189	188	186	186	190	361	361	361	361	362	362	362	362
189	189	189	191	190	190	190	192	363	365	363	363	364	366	364	364

如果 4 组维修人员工作任务可以允许一定的差异（比如 4 天），则停机维护造成的发电量损失不增加的情况下，工作任务量就会有一定的减少，分别是 208、208、212、212 天；如将减少值班工作量作为目标函数考虑，可以将发电量损失可以控制在 5.7418×10^{12} (J) 以下的前提下，每组工作量减小为 176 天，停机维护方案和值班安排示意图见图 11 和图 12，计算过程参见附录 7。

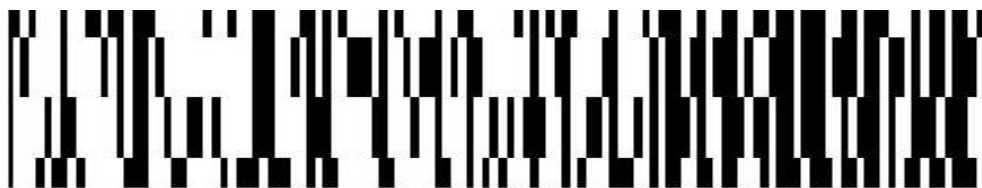


图 11 维修组值班安排示意图

注：第 j 行第 k 列像素为黑表示第 j 组人员在第 k 天值班

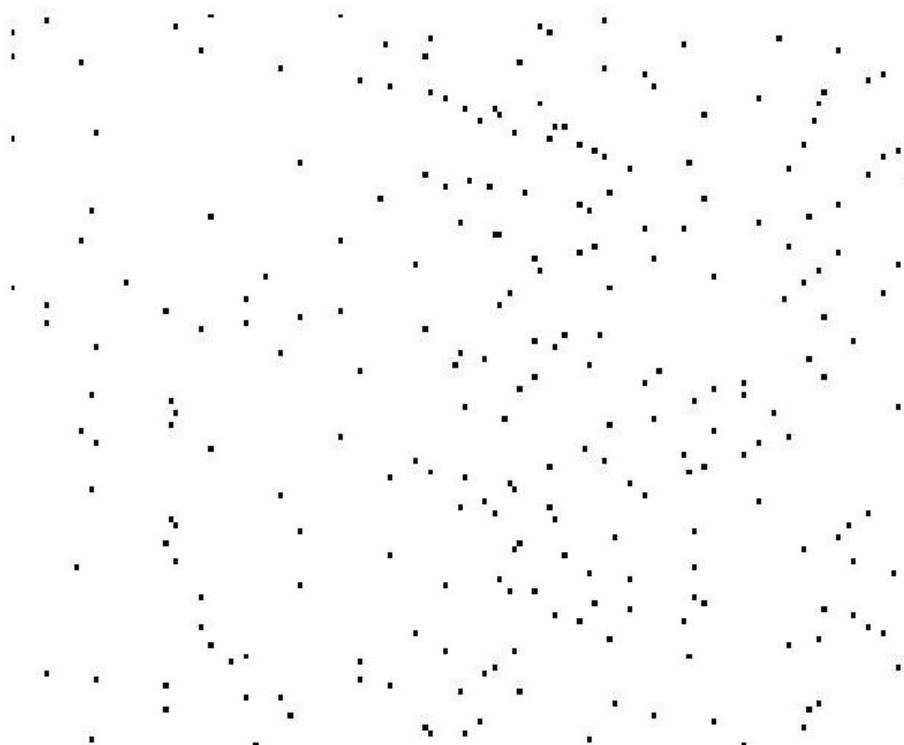


图 12 停机维护方案示意图

注：第 i 行第 k 列像素为黑表示第 i 号风机在第 k 天停机维护

5. 模型的评价与推广

5.1 模型的评价

通过 MATLAB 对数据进行了整合，使数据图像化，更加直观，提高了数据的可读性。问题一利用了整合的数据进行评估风力资源，保证了评估的严谨性。问题二中的模型通过归一化方法得到功率与风速的函数关系，函数关系曲线与实际数据相基本吻合，极大的降低了误差。问题三中的建立了多目标规划模型，通过 Lingo 软件进行计算，保证了模型的科学性与准确性。

5.2 模型的推广

本文模型适用领域广泛. 模型中通过对大数据的整合与分析, 可以运用于医疗器材的评估、空气质量的检验和工厂选址等; 问题二中模型对产品的预测可以运用于导弹的实验和新产品的开发等; 问题三中模型对多目标规划可以运用到资源的优化配置等方面, 具有提高资源利用率、节省人力成本及提高经济效益等优点, 实践性强.

参考文献

- [1] 王志新. MATLAB 程序设计及其数学建模应用[M]. 科学出版社, 2013.
- [2] 数学辞海编辑委员会. 数学辞海(第5卷)(精)[M]. 中国科技出版社, 2002.
- [3] 谢金星. 优化建模与 LINDO/LINGO 软件[M]. 清华大学出版社, 2005.
- [4] 郭琦, 路小娟, 李晓青. 基于风速模型参数的风电机组最大输出功率分析优化 电器技术[J]. 石化电力. 2016 年第 35 卷第 5 期: 46-49.
- [5] 牟聿强, 王秀丽. 风电场风速分布及风速功率曲线分析 中国高等学校电力系统及自动化专业年学术会. 2007

附录

附录 1 数据的读取

%附件1-2数据读取

```
strxls1={'201501.xls' '201502.xls' '201503.xls' '201504.xls' '201505.xls'....  
        '201506.xls' '201507.xls' '201508.xls' '201509.xls' '201510.xls'.....  
        '201511.xls' '201512.xls'};  
strxls2={'01.xls' '02.xls' '03.xls' '04.xls' '05.xls' '06.xls' '07.xls'...  
        '08.xls' '09.xls' '10.xls' '11.xls' '12.xls'};  
daynum=[31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31 ];  
Vfeng=[];  
Pgonglv=[];  
Vfeng0457=[];  
for k=1:12  
    st1=strcat('\fujian1\',strxls1(k));  
    st2=strcat('\fujian2\',strxls2(k));  
    for j=1:daynum(k)  
        v0=xlsread(st1{1}, j, 'A4:L27');  
        gl0=v0(:, [2 5 8 11]);  
        Pgonglv=[Pgonglv;gl0(:)];  
        fs0=v0(:, [3 6 9 12]);  
        Vfeng=[Vfeng;fs0(:)];  
        v0=xlsread(st2{1},j, 'C4:N9');  
        Vfeng0457=[Vfeng0457;v0'];  
    end  
end  
  
function y=weibull(dn,x)  
d=dn(1);  
n=dn(2);  
y=d/n*(x/n).^(d-1).*exp(-(x/n).^d);  
  
function p=fp1(abcd,v)  
a=abcd(1);  
b=abcd(2);  
%c=abcd(3);  
%f=abcd(4);  
p=a*v.^(b);
```

附录2 数据处理与分析

```
%chuli.m
%数据整理
load fujian12data
nData1=length(Vfeng);
nData2=length(Vfeng0457(:,1));
nDay1=nData1/365;
nDay2=nData2/365;
VfengDay=zeros(365,1);
PgonglvDay=VfengDay;
VfengDay0457=zeros(365,6);
for k=1:365
    VfengDay(k)=(sum(Vfeng((nDay1*(k-1)+1):(nDay1*k)).^3)/nDay1)^(1/3);
    PgonglvDay(k)=sum(Pgonglv((nDay1*(k-1)+1):(nDay1*k)))/nDay1;

VfengDay0457(k,:)=(sum(Vfeng0457((nDay2*(k-1)+1):(nDay2*k),:).^3)/nDay2)^(1/3);
end
[AX,h1,h2]=plotyy(1:365,VfengDay,1:365,PgonglvDay,'plot');
set(h1,'linestyle','-','marker','o','linewidth',2);
set(h2,'linestyle','-','marker','+','linewidth',2);
legend([h1,h2],{'平均风速','平均功率'});
HH1=get(AX(1),'Ylabel');
set(HH1,'String','风速');
set(HH1,'color','b');
HH2=get(AX(2),'Ylabel');
set(HH2,'String','功率');
title('2015年每天的平均风速和功率')
xlabel('天')
figure
hold on
plot(VfengDay0457(:,1),'-+');
plot(VfengDay0457(:,2),'-o');
plot(VfengDay0457(:,3),'-*');
plot(VfengDay0457(:,4),'-x');
plot(VfengDay0457(:,5),'-p');
plot(VfengDay0457(:,6),'-^');
title('2015年不同风机每天的平均风速')
xlabel('天')
ylabel('风速')
legend('4#','16#','24#','33#','49#','57#')
hold off
figure
```

```

[AX,h1,h2]=plotyy(1:nData1,Vfeng,1:nData1,Pgonglv,'plot');
set(h1,'linestyle','-','marker','o');
set(h2,'linestyle','-','marker','+');
legend([h1,h2],{'风速','功率'});
HH1=get(AX(1),'Ylabel');
set(HH1,'String','风速');
set(HH1,'color','b');
HH2=get(AX(2),'Ylabel');
set(HH2,'String','功率');
title('2015年风速和功率')
xlabel('天')
dv=0.5;
v=0:dv:25;
VfengH0457=zeros(length(v),6);
VfengH=hist(Vfeng,v)';
for k=1:6
    VfengH0457(:,k)=hist(Vfeng0457(:,k),v)';
end
figure
%options = optimoptions('lsqcurvefit','TolFun', 0.0000001, 'MaxIter', 100000);
[aw, Resnorm] = lsqcurvefit(@weibull,[2 3],v,VfengH'/nData1/dv,[0 0],[6 10])
hold on
bar(v,VfengH/sum(VfengH)/dv)
plot(v,weibull(aw,v),'k','linewidth',2.5)
title('2015年风场平均风速分布')
legend('风场平均风速直方图','Weibull分布拟合')
figure
hold on
plot(v,VfengH0457(:,1)/sum(VfengH0457(:,1))/dv,'-+');
plot(v,VfengH0457(:,2)/sum(VfengH0457(:,2))/dv,'-o');
plot(v,VfengH0457(:,3)/sum(VfengH0457(:,3))/dv,'-*');
plot(v,VfengH0457(:,4)/sum(VfengH0457(:,4))/dv,'-.x');
plot(v,VfengH0457(:,5)/sum(VfengH0457(:,5))/dv,'--p');
plot(v,VfengH0457(:,6)/sum(VfengH0457(:,6))/dv,'-.^');
title('2015年不同风机的风速分布')
xlabel('天')
ylabel('概率')
legend('4#','16#','24#','33#','49#','57#')
hold off
aw0457=zeros(6,2);
for k=1:6
    [aw, Resnorm] = lsqcurvefit(@weibull,[2 3],v,...
        VfengH0457(:,k)/sum(VfengH0457(:,k))/dv,[0 0],[6 10]);
    aw0457(k,:)=aw;

```

```

end
disp('六台风机处年风速分布的Weibull拟合参数')
aw0457

```

附录 3 利用率计算

```

%问题1, 风能利用率
%实际输出功率(单位MW)做功, 时间单位为小时h, 换算为J
dt=0.25;
WPsum=sum(Pgonglv)*dt*3.6*10^9;
%风能资源总量, 单位J
rho=0.9762;
R=40;
Efengsum=sum(Vfeng.^3)*pi/2*rho*R^2*124*dt*3600;
lylv=WPsum/Efengsum
Pgonglv0457=Vfeng0457;
Efengsum0457=sum(Vfeng0457.^3)*pi/2*rho*R^2*dt*3600;
Vfeng04570=Vfeng0457;
p=find(Vfeng0457>=25);
%切出风速为25
Vfeng04570(p)=0;
for k=1:3
    %I型风机
    Pgonglv0457(:,k)=interp1(FengjiGonglv(:,1),FengjiGonglv(:,2),...
        Vfeng04570(:,k),'linear');
    %II型风机
    Pgonglv0457(:,k+3)=interp1(FengjiGonglv(:,3),FengjiGonglv(:,4),...
        Vfeng04570(:,k+3),'linear');
end
WPsum0457=sum(Pgonglv0457)*dt*3.6*10^6;
lylv0457=WPsum0457./Efengsum0457

```

附录 4 风机输出特性和新机型的功率曲线

```

%问题2
dt=2;
%6个风机的功率输出和风能利用率
FengjiGonglv=[0 0 0 0
1 0 1 0
2 0 3 0
3 27 3.5 40

```



```

3.5 56.41 4 74
4 96.76 5 164
4.5 140.1 6 293
5 191.13 7 471
5.5 254.97 8 702
6 335.13 9 973
6.5 423.64 10 1269
7 527.61 11 1544
7.5 650.08 12 1544
8 789.66 13 1544
8.5 951.86 14 1544
9 1120.18 15 1544
9.5 1308.91 16 1544
10 1516.25 17 1544
10.5 1730.77 18 1544
11 1912.29 19 1544
11.5 2003.52 20 1544
12 2010 21 1544
12.5 2010 22 1544
14 2010 23 1544
20 2010 24 1544
25 2010 25 1544
26 0 26 0
27 0 27 0
200 0 200 0];

```

%画出2种类型风机的功率风速曲线

```

figure
plot(FengjiGonglv(1:end-1,1),FengjiGonglv(1:end-1,2),'-p',FengjiGonglv(1:end-1,3),
....
FengjiGonglv(1:end-1,4),'-s','LineWidth',2.5)
title('I和II型风机的功率曲线')
xlabel('风速')
ylabel('功率')
legend('I型风机','II型风机');
global vi;
global vn;
global pn;
ulv1=(0.2:0.1:0.9);
Resnorm=zeros(8,8);
v12cha=zeros(8,8);
options = optimoptions('lsqcurvefit','TolFun', 0.0000001, 'MaxIter', 100000);

x10=FengjiGonglv(4:22,1);y10=FengjiGonglv(4:22,2);
x20=FengjiGonglv(4:12,3);y20=FengjiGonglv(4:12,4);

```

```

%归一化
vi=3;
x1=(x10-vi+0.5)/(max(x10)-vi+0.5);y1=y10/max(y10);
vi=3.5;
x2=(x20-vi+0.5)/(max(x20)-vi+0.5);y2=y20/max(y20);
figure
plot(x1,y1,'o',x2,y2,'*','LineWidth',2.5)

[a, Resnorm] = lsqcurvefit(@fp1,[5 1],[x1;x2],...
    [y1;y2],[1 0.5],[100 10],options)
figure
hold on
plot(x1,y1,'o',x2,y2,'*','LineWidth',2.5)
plot(0:0.02:1,fp1(a,0:0.02:1),'LineWidth',2.5)
hold off

figure
hold on
vi=3; vn=11; pn=2000;
plot(x10,y10,'o',x10,max(y10)*fp1(a,x1),'LineWidth',2.5)
vi=3.5; vn=11.5; pn=1500;
plot(x20,y20,'*',x20,max(y20)*fp1(a,x2),'LineWidth',2.5)
xlabel('风速')
ylabel('功率')
legend('I型功率实测数据','I型功率拟合数据','II型功率实测数据','II型功率拟合数据')
title('I和II型风机的功率曲线拟合')
hold off
vv=[0:0.5:25 26 28 200]';
nxin=length(vv);
fpxin=zeros(nxin,3);
vi=3;
vo=25;
pn=1500;
vn0=[10.5 11 11.5];
for k=1:3
    vn=vn0(k);
    p=find((vv >= vn) & (vv<=vo));
    fpxin(p,k)=1500;
    p=find((vv > vi-0.5) & (vv<vn));
    fpxin(p,k)=pn*fp1(a,(vv(p)-vi+0.5)/(vn-vi+0.5));
end
figure
plot(vv(1:end-1),fpxin(1:end-1,1),'^-',vv(1:end-1),fpxin(1:end-1,2),'s-.',...
    vv(1:end-1),fpxin(1:end-1,3),'p--','LineWidth',2.5)

```

```

xlabel('风速')
ylabel('功率')
legend('III型功率曲线','IV型功率曲线','V型功率曲线')
title('III、IV和V型风机的功率曲线')
fpxin=[vv fpxin];

```

%拟合函数，归一函数

```

function p=fp1(abcd,v)
a=abcd(1);
b=abcd(2);
%c=abcd(3);
%f=abcd(4);
p=a*v.^(b);

```

附录 5 新型号风机的风能利用率

%三种新型风机在不同位置的风能利用效率

```

WPsumXin=zeros(3,6);
lylvXin=zeros(3,6);
dt=2;
for k=1:3
    for h=1:6
        PgonglvXin=interp1(fpxin(:,1),fpxin(:,k+1),Vfeng04570(:,h),'linear');
        WPsumXin(k,h)=sum(PgonglvXin)*dt*3.6*10^6;
        lylvXin(k,h)=WPsumXin(k,h)/Efengsum0457(h);
    end
end
WPsumXin
lylvXin=[lylvXin;lylv0457]
%计算六种风机在2015年中风场平均风速下的功率输出情况
%I型风机
Pgonglv15=zeros(nData1,5);
Pgonglv15(:,1)=interp1(FengjiGonglv(:,1),FengjiGonglv(:,2),...
    Vfeng,'linear');
%II型风机
Pgonglv15(:,2)=interp1(FengjiGonglv(:,3),FengjiGonglv(:,4),...
    Vfeng,'linear');
%III-V型风机
for k=3:5
    Pgonglv15(:,k)=interp1(fpxin(:,1),fpxin(:,k-1),...
        Vfeng,'linear');
end
dt=0.25;
WPsum15=sum(Pgonglv15)*dt*3.6*10^6*124;

```

lylv15=Wpsum15/Efengsum

附录 6 维护维修的优化模型

model:

sets:

day/1..365/:Wp;

fengji/1..124/;

weixiu/1..4/;

link1(fengji,day):xtj;

link2(weixiu,day):xwx;

endsets

data:

```
Wp=1307.7 2271.6 5009.4 10185.3 10181.7 7627.5 7627.5 4424.4 4431.6
3051.9
3366.9 7740.9 6649.2 1305 1309.5 1965.6 7975.8 9535.5 4212 12067.2

4862.7 2430.9 2808.9 4787.1 2776.5 7463.7 2197.044 2554.2 1824.3 1648.8
6629.4 3213 898.2 1137.6 392.4 1314 4183.2 2520.9 4376.7 2327.4
6303.6

9242.1 9079.2 7977.6 5526.9 9792.9 3467.7 1391.4 8738.1 4725 5362.2
5519.7 1754.1 4769.1 5584.5 1792.8 6283.8 3977.1 10119.6 2384.1
11708.1 4500 2158.2 309.6 1046.7 2006.1 2014.2 855.9 3178.8 3062.7
4169.7
4114.8 2795.4 4194.9 2743.2 2578.5 720 1855.8 1970.1 4532.4
2378.7 1256.4 4364.1 5637.6 6548.4 5460.3 5574.6 10995.3 1383.3
3300.3 12196.8 6178.5 2439.9 2633.4 935.1 805.5 4784.4 2766.6 3787.2
1070.1 6587.1 6448.5 1583.1 3020.4 9132.3 5610.6 3474.9 7858.8
2695.5 1102.5 3058.2 3060.9 3466.8 891.9 2226.6 3047.4 1792.8 1167.3
6124.5 7124.4 7125.3 7124.4 4100.4 4099.5 5033.7 5219.1 1503
5055.3 7903.8 10939.5 7950.6 981.9 983.7 2154.6 2608.2 3074.4 7772.4
3218.4 2538 5006.7 369.9 192.6 2311.2 4489.2 6180.3 3979.8 1333.8
4531.5 3315.6 1356.3 2804.4 2214 1130.4 1431 5649.3 3394.8 3240
3420 3281.4 4920.3 5911.2 2648.7 2836.8 1114.2 3222 6210.9 991.8
1359.9 253.8 2520 3274.2 3832.2 2829.6 3118.5 204.3 440.1 4140.9
4680.9

2149.2 2526.3 3433.5 357.3 703.8 238.5 1520.1 2689.2 4435.2 3146.4
3469.5 587.7 2074.5 1782 2607.3 1549.8 1008 2523.6 1582.2 1224 1584

1905.3 977.4 1886.4 1888.2 1300.5 1724.4 733.5 604.8 3558.6 3563.1
3565.8 1805.4 1802.7 1806.3 1802.7 3070.8 2539.8 2201.4 982.8 990
2144.7 4251.6 3816 2034 2040.3 5343.3 261.9 4189.5 5307.3 1490.4
1216.8
2100.6 963 933.3 333 569.7 867.6 1170 1869.3 855 558 351 2690.1
```

```

1707.3
1364.4 5228.55    4290.3 5539.5 4473.9 1202.4 1205.1 3906.9 2921.4
    3097.8 4003.11    166.5 1677.159 3354.3 3576.6 2728.8 617.4 848.7
    3684.6
    4230.9 4433.4 2909.7 2358    3413.7 2101.5 4001.4 1539    948.6 2255.4
    1751.4 1915.2 1891.8 945.9 929.7 4890.6 1486.8 1958.4 1026.9
4430.7 2518.2 376.2 3154.86    2592 2593.8 4563    5892.3 2465.1 4086.9
4539.6 3671.1 2725.2 111.6 462.6 3796.848 2722.5 3907.8 1470.6 473.4
    1529.1 3024    2929.5 3086.1 7362.9 3760.2 717.3 3323.7 871.2 2788.2
    2045.7 761.4 1213.2 2422.8 3893.4 3120.3 3852.9 1251.9 1125.9
    285.3 3233.7 2022.3 2989.8 791.1 1140.84    195.3 2939.4 10790.1
    5996.7
    5877    5268.6 1553.4 1540.8 11981.7    9209.7 3449.7 1187.1 1152
2916    3769.2 3849.3 1741.5 7512.3 2511    44.1    2551.5 5415.3 5994
    1242.9
    3167.1 548.1 3182.4 2340    2757.6 1482.3 1556.1 1559.7 7838.1
9038.7 2079.9 2086.2 8495.1 2410.2 3653.1;
enddata

```

! 风机分两次连续两天停机维修;

```

@for(fengji(I):
    @sum(day(K):xtj(I,K))=4;!维修2次;
    !维修间隔不大于270天;
    @for(day(K)| K#GT# 270:
        @sum(day(H)| (H#GE#(K-270)) #AND# (H#LE#K): 1-xtj(I,H))<270;
    );
    @for(day(K)| (K#GE#2) #AND# (K#LE#364):
        xtj(I,K-1)+xtj(I,K)+xtj(I,K+1)>xtj(I,K)*2;
        xtj(I,K-1)+xtj(I,K)+xtj(I,K+1)<2.5;
    );
);
!维修队连续值班不超过6天;
@for(weixiu(J):
    @for(day(K)| K#GE#7:

        xwx(J,K-6)+xwx(J,K-5)+xwx(J,K-4)+xwx(J,K-3)+xwx(J,K-2)+xwx(J,K-1)+xwx(J
,K)<6;
    );
);
!维修队值班条件: 1. 至少1队值班, 2. 及时维修停机的风机;
@for(day(K):
    @sum(weixiu(J):xwx(J,K))>1;
    @sum(weixiu(J):xwx(J,K))>@sum(fengji(I):xtj(I,K));
);

```

```

@for(link1(I,K):
    @bin(xtj(I,K));
);
@for(link2(J,K):
    @bin(xwx(J,K));
);

```

附录 7 维护维修模型的简化求解

%问题4, 2015年每天的平均风速: VfengDay, 计算每天的发电量

```

dt=0.25;
WPday=PgonglvDay*nDay1*dt*3.6*10^9;
WPsum
sum(WPday)
%%以上数据供lingo使用

```

```

model:
sets:
day/1..183/:Wp,tzs;
fengji/1..124/;
weixiu/1..4/:zb;
link1(fengji,day):xtj;
link2(weixiu,day):xwx;
endsets
data:
Wp=178.965 759.735    890.46 602.595    374.175    555.39 397.71 163.755
    875.565    813.96 364.68
    379.8  512.01 237.5622    173.655    492.12 101.79 85.32    335.205
    335.205    777.285    852.84
765.99 242.955    673.155    544.095    326.16 368.865    513.045    625.185
    810.405    123.39
152.64 143.505    312.075    414.225    349.515    266.085    128.79 325.125
    181.755    500.085
600.435    828.495    234.18 918.765    253.665    87.03 377.55 242.865
    651.78 230.175    737.145
    566.685    189.9 305.955    217.935    263.7 148.005    662.445
    712.485    409.995    512.64 327.915
    942.165    446.625    156.915    284.13 549.54 377.235    28.125 340.02
    508.005    293.265
    233.595    250.92 128.07 452.205    333 410.085    427.995    197.55
    471.645    117.585    138.69
    355.32 297.405    32.22 441.09 233.775    189.54 47.115 210.465

```

```

379.08 202.86 192.825
207.855    176.58 140.31 174.465    143.19 159.435    122.895    208.17
356.445    180.405
180.45 280.53 159.21 156.735    403.38 203.715    280.26 474.84 135.36
153.18
63.315 71.865 151.965    70.65 152.055    153.585    475.9425    500.67
120.375    341.415
355.0455  92.18295  346.545    167.31 226.665    433.215    263.385
275.76 277.02 160.2  183.33
141.885    291.015    172.26 272.88 144.72 287.343    357.84 417.87
431.325    319.815
28.71  325.9674  268.92 100.125    297.675    522.45 223.875    209.745
241.695    98.73  315.81
348.66 118.89 175.95 250.605    96.597 156.735    839.34 557.28 154.71
1059.57
231.84 203.4  380.925    462.69 127.755    398.34 361.845    185.76
276.12 211.995
155.79 843.84 208.305    545.265    365.31;

```

```

@ole('检修和值班安
排.xls','A1:GA124','A126:GA129','A131:GA131','A133:D133')=xtj,xwx,tzs,zb;
enddata
min=@sum(day(K):Wp(K)*(tzs(K)))/124+zb(4);
zb(4)-zb(1)<=2;
@for(weixiu(J)| J#GE# 2:
    zb(J)>=zb(J-1);
);
!风机分两次连续两天停机维修;
@for(fengji(I):
    @sum(day(K):xtj(I,K))=2;!维修2次;
    !维修间隔不大于270天;
    !@max(day(K):K*(1-xtj(I,K)))-@min(day(K):K*(1-xtj(I,K)))<135;
    @for(day(K)| K#GT# 135:
        @sum(day(H)| (H#GE#(K-135))#AND#(H#LE#K): 1-xtj(I,H))<135;
    );
);
!维修队连续值班不超过6天;
@for(weixiu(J):
    zb(J)=@sum(day(K):xwx(J,K));
    @for(day(K)| K#GE#4:
        xwx(J,K-3)+xwx(J,K-2)+xwx(J,K-1)+xwx(J,K)<3;
    );
);
!维修队值班条件: 1. 至少1队值班, 2. 及时维修停机的风机;
@for(day(K):

```

```

    @sum(weixiu(J):xwx(J,K))>1;
    @sum(weixiu(J):xwx(J,K))>@sum(fengji(I):xtj(I,K));
    tzs(k)=@sum(fengji(I):xtj(I,K));
);
!@for(fengji(I)|I#GE#2:
    !排序加速;
    ! @sum(day(K):K*(1-xtj(I-1,K)))<@sum(day(K):K*(1-xtj(I,K)));
!);
@for(link1(I,K):
    @bin(xtj(I,K));
);
@for(link2(J,K):
    @bin(xwx(J,K));
);

```

```

%导入lingo求解数据
xtj=xlsread('检修和值班安排.xls', 1, 'A1:GA124');
xwx=xlsread('检修和值班安排.xls', 1, 'A126:GA129');
figure
image((1-xtj)*255)
colormap('gray')
axis([1 183 1 124])
axis off
figure
image([(1-xtj)*255;(1-xwx)*255])
colormap('gray')
%axis([1 124 1 4])
axis off
figure
image([(1-xwx)*255])
colormap('gray')
axis([1 124 1 4])
axis off

```