

## A 题 风电功率预测问题

### 摘要

随着全球气候问题以及能源危机的出现,人类对可再生能源的依赖越显突出。风能作为一种可再生洁净能源的代表,有着广泛的发展前景。但如何准确预测风电机组输出功率的大小,却是一个非常棘手的问题。本文针对风电功率预测提出的三个问题,建立了相应的模型,并从实际情况进行分析,对预测功率精度进行了提高。

**模型1:**对题目进行分析可知,对5月31日输出功率进行的预测属于近期预测,首先选用灰色预测和最小二乘法对所需数据进行预测,然后选用时间序列分析法对5月31日每个时点功率进行预测。

建立灰色预测  $GM(1,1)$  模型:通过编程计算出其预测值,对预测值进行观察可以得到,随着时间的增加预测值逐渐趋向于平稳,与真实输出功率进行对比,其预测功率与真实功率存在较大误差,所以对此方法进行排除;

建立最小二乘法预测模型:对题目给定数据进行分析,得到电机输出功率呈现一定的波动。由此联想到波动曲线方程,通过 *Matlab* 编程拟合出方程,并对所求数据进行预测,对预测结果进行观察,得到预测值随着时间的增加逐渐增加,显然与实际不符,对此方法进行排除;

建立时间序列分析方法模型:通过分析可以得到,在每天同一个时点风电机组输出功率在很小范围内波动,所以对历史数据进行平均作为预测功率的修正参数,与预测数据上个时点的功率平均,得到的数值作为预测功率。然后,计算预测功率准确率和合格率,计算结果均满足《暂行办法》要求,所以推荐利用时间序列方法进行预测。最后,利用此方法对全部预测功率进行预测,预测结果以表格的形式在本文中全部给出。

**模型2:**针对问题2,利用问题1得到的预测数据与题目给出的数据,通过 *Matlab* 编程求出各个机组预测值与实际值在5月31日0时0分至5月31日23时45分在各个时点的差值,并且对预测数据进行残差分析,绘制出差值图和残差图。通过分析得到以下结论:差值图基本在同一时间段出现较大误差;  $P_A, P_B$  误差较小,  $P_4, P_{58}$  误差较大,由此得出风电机组的汇聚会加大预测结果误差。其具体误差出现在10—20和80—90这两个时间段。由此在这两个时间段要通过调整电网频率或改进机组使其在这两个时间段的输出功率保持基本一致。

**模型3** 针对问题3,在问题1的基础上,提高预测的精度。综合分析影响预测的因素后,对问题一中时间序列法进行调整,对预测的数据赋予权重并进行加权平均,所得数据再与上一个时点功率平均,作为真实预测值。作出真实与预测功率图像,观察得到预测功率与实际功率误差相对变小。

最后,对历史功率和邻近功率进行灵敏度分析,得到邻近时点功率对预测的准确率有极强的相关性,为了最大程度地提高预测的精度,不仅要从实际功率历史数据进行分析,还得从气压、风速、风向、气候等方面进行分析,如此考虑到多种因素后预测得到的预测功率一定会大幅度提高,但由于受到各方面的影响,预测精度不可能无限提高。

**关键词:**  $GM(1,1)$  模型 最小二乘法 时间序列分析法 加权移动平均法

## 1 问题重述

### 1.1 问题背景

随着人类的进步,现今电、水、石油已成为人们生活中不可或缺的一部分,但对于地球而言这些能源都是有限的,属于不可再生能源,为了下一辈人的生存,人类现在不得不考虑使用二次能源,风能也就被提上章程。

风能是一种可再生、清洁的能源。目前风力发电主要利用的是近地风能,近地风具有波动性、间歇性、低能量密度等特点,因而风电功率也是波动的。若某地的电工机组发电功率较大而电力调度部门所分配给其输电功率较小,势必会对发电机组和输电线路造成影响。所以,电力调度部门必须明确发电机组的发电功率,据此来安排调度计划。

如果可以根据历史输出功率对风电功率进行预测,电力调度部门将能够根据风电功率变化预先安排调度计划,保证电网的功率平衡和运行安全。

### 1.2 基本条件

1 每台机组的额定输出功率为  $850\text{kw}$ ;

2 2006 年 5 月 10 日至 2006 年 6 月 6 日时间段内该风电场中指定的四台风电机组 ( $A, B, C, D$ ) 输出功率数据;

3 全场 58 台机组总输出功率数据。

### 1.3 提出问题

1 采用至少三种方法对给定数据进行风电功率实时预测及进行误差分析,观察其是否满足附件 1 中关于预测精度的要求,并推荐最佳方法。要求如下:

1) 预测量:

a.  $P_A, P_B, P_C, P_D$       b.  $P_4$       c.  $P_{58}$

2) 预测时间范围:

a. 5 月 31 日 0 时 0 分至 5 月 31 日 23 时 45 分;

b. 5 月 31 日 0 时 0 分至 6 月 6 日 23 时 45 分。

2 在我国主要采用集中开发的方式开发风电,但众多风电机组的汇聚对发电功率有很大影响,根据问题 1 的预测结果试分析风电机组的汇聚对于预测结果误差的影响;

3 在问题 1 的基础上,构建有更高预测精度的实时预测方法(方法类型不限),并用预测结果说明其有效性,并分析论证阻碍风电功率实时预测精度进一步改善的主要因素。风电功率预测精度能否无限提高。

## 2 问题假设与符号说明

### 2.1 问题假设

1 各个风电机组在某个时点的输出功率与历史输出功率和前一个时点的输出功率有很大的相关性;

2 历史输出功率的平均值设定为预测输出功率的修正参数;

3 每台风电机组之间的波动有一定的相关性。

### 2.2 符号说明

$N$ : 日考核总时段数;

$C_{ap}$ : 风电场开机容量;

$P_{pk}$ :  $k$  时段预测平均功率;

$P_{mk}$ :  $k$  时段实际平均功率;

$P_A$ :  $A$  电机组风电功率输出数据;

$P_B$ :  $B$  电机组风电功率输出数据;

$P_C$ :  $C$  电机组风电功率输出数据;

$P_D$ :  $D$  电机组风电功率输出数据;

$P_{58}$ : 58 台电机组风电功率输出数据;

$P_4$ :  $A, B, C, D$  四台电机组风电功率输出总和;

$P_{A,i,q}$ :  $A$  电机组在  $i$  时点输出功率通过权重处理后的数据;

$P_{A,z,q}$ :  $A$  电机组在每个时点输出功率通过权重处理后的总和;

$P_{x,t}$ : 第  $x$  台电机组用时间序列分析方法所得到的预测功率( $x = A, B, C, D$ );

$P_A^i$ : 第一台风电机组输出功率  $P_A$  在第  $i$  个时点的预测功率值 ( $i = 1, 2, 3 \cdots n$ );

$P_A^i$ : 第一台风电机组输出功率  $P_A$  在第  $i$  个时点的真实电功率值 ( $i = 1, 2, 3 \cdots n$ );

$\overline{P_A^i}$ : 第一台风电机组输出功率  $P_A$  在第  $i$  个时点历史功率值的平均值 ( $i = 1, 2, 3 \cdots n$ );

$\overline{P_A^i}$ : 第一台风电机组输出功率  $P_A$  在第  $i$  个时点历史功率平均值与上一个时点功率的平均值。

### 3 问题分析

#### 3.1 问题 1 的分析

已知四台风电机组的输出功率数据, 要对风电功率进行实时预测和误差分析。由题意知实时预测是滚动地预测每个时点未来 4 小时即 16 个时点的风电功率数值, 每 15 分钟为一个时点。分析这些数据的特点, 联系理论结合实际我们采用灰色预测法、拟合和时间序列分析三种方法对所需数据进行预测。如下:

##### 方法一: 灰色预测法

通过该电厂的  $A$  机电组输出功率进行分析, 可知实际输出功率各个时点之间存在一定的关系, 因此结合灰色预测预测邻近点的数据时有准确性, 所以, 首先选用灰色预测的方法, 对“5 月 31 日 0 时 0 分至 5 月 31 日 23 时 45 分”这个时间段内  $A$  机电组的输出功率进行预测, 并利用真实功率值与预测功率值计算出预测的准确率和合格率, 观察是否可以预测, 如果误差 准确率较高并且合格, 则可以利用这种方法对其余数据进行预测, 反之进行方法的排除。

##### 方法二: 最小二乘法拟合

对数据进行分析, 可知每天同一时点风电机组的输出功率有一定的波动, 故此, 联想到 3 次多项式的波动曲线, 可以利用最小二乘法对每天同一时刻电机组的输出功率分别进行拟合, 以此来预测 5 月 31 日至 6 月 6 日每个时刻的输出功率。

##### 方法三: 时间序列分析方法

通过对表中数据进行分析, 可知在每天的同一个时点风电机组输出功率在很小的范围内摆动, 并且很多数据都逐渐趋向于一点, 由此, 可以利用时间序列分析方法, 以每天相同时间点机组的输出功率为历史数据, 对历史数据进行平均作为预测功率的修正数值。

从实际情况进行分析, 可知所预测点输出功率必定与前一个时点输出功率有很大相关性, 考虑利用时间序列方法中的持续法的优化方法。即用时间序列方法利用前一个时点输出功率来预测该时点的输出功率, 然后, 利用修正系数对预测功率进行修正, 最后修正后的数值作为真实预测值。

为了更好的观察预测输出功率与真实输出功率之间的误差，作出输出功率与真实功率的图像，对图像进行分析。若误差较小则可以对预测值进一步进行检验，由附件国家能源局发布的《风电场功率预测预报管理暂行办法的通知》中对准确率和合格率的规定，计算出用持续方法的优化模型预测得到输出功率的准确率和合格率，观察其是否符合《通知》的要求，如果符合则利用此方法对其余数据进行预测，反之则进行参数化更正。

### 3.2 问题 2 的分析

我国主要采用集中开发的方式开发风电，各风电机组功率汇聚通过风电场或风电场群（多个风电场汇聚而成）接入电网。众多风电机组的汇聚会改变风电功率波动的属性，从而可能影响预测的误差。因此根据问题 1 的预测结果计算出 A、B、C、D 四台风机的相对误差和 58 台风电机的总功率的相对误差，利用 Matlab 作出误差图和残差图直观的观察它们的关系，综合分析分析它们之间的规律，并根据它们之间的规律做出合理的预测。

### 3.3 问题 3 的分析

对题目分析，要求在问题 1 基础上提高风电功率实时预测精度，从实际情况和题目两方面进行分析。

首先，从实际情况进行分析，风电功率的大小受风速的大小、天气状况、发电地形、风向以及当地的气候等多方面的因素影响，为了更好的预测可以把影响因素对功率输出大小的程度参数化，但由于题目中没有给定关于这方面的数据及内容，不能对这些数据参数化处理。

然后，从题目出发，问题 1 中时间序列法对历史数据已利用修正数据对预测数据进行修正，但修正后的数据也有一定的误差，考虑用权重的方法进行处理。

再次，确定利用权重预测的相关内容。现实生活中，预测时点的输出功率一定受到历史输出功率的影响，但离预测时点越远对预测时点输出功率的影响就会越小，而问题 1 时间序列法中没有进行考虑，所以，在此利用权重对此进行合理化处理，离预测功率越远的点权重越小，离预测值越近的点权重越大，利用通过加权处理后的模型对所需数据进行预测并进行检验说明其有效性。

最后，对预测功率进行分析，论证阻碍风电功率实时预测精度进一步改善的主要因素，并考虑风电功率预测精度是否能无限提高。

## 4 模型的建立与求解

### 4.1 模型 1 的建立与求解

#### 4.1.1 GM(1,1) 模型的建立与求解

针对问题一，通过对题目进行分析可知，需要求出每台机组输出功率的预测值，其中一项预测范围为一天，为短期数据预测。结合灰色预测的特点，对预测短期数据较准，对长期数据预测值会产生较大误差。所以，利用灰色预测的方法对 A 机电组 5 月 31 日前 10 个时点的数据进行预测。

由题目可知 5 月 10 日到 6 月 6 日各个时点每台机组的实际输出功率，为了更好的预测出 5 月 31 日前 10 个时点的输出功率，本论文选用 5 月 30 日所有的数据进行灰色分析，具体以建立 GM(1,1) 模型来进行预测。具体步骤为：

1 设时间序列  $X^{(0)}$  有  $n$  个观察值， $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$ ，通过累加生成新序列  $X^{(1)} = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\}$ ，

则 GM(1,1) 模型相应的微分方程为：

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = \mu$$



其中： $\alpha$  称为发展灰数； $\mu$  称为内生控制灰数。

2 设  $\hat{\alpha}$  为待估参数向量， $\hat{\alpha} = \begin{pmatrix} a \\ \mu \end{pmatrix}$ ，可利用最小二乘法求解

解得： $\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$

求解微分方程，即可得预测模型：

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left[ X^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-ak} + \frac{\mu}{a}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n$$

由于选用的数据众多，从多方面考虑选用 *Matlab* 编程（见附录 A）来进行计算，通过灰色预测程序预测功率数据值见表 1。

表 1 灰色预测功率与真实输出功率

时点	1	2	3	4	5
灰色预测功率	305.5399	308.1317	308.193	308.1944	308.1944
真实输出功率	249.0938	355.3125	362.8125	323.8125	338.625
时点	6	7	8	9	10
灰色预测功率	308.1944	308.1944	308.1944	308.1944	308.1944
真实输出功率	411.9375	364.6875	405.375	496.2188	375.6563

由表可知当运用灰色预测对所需数据进行预测时，随着时点的增加预测数据全部趋向于 308.1944，从实际情况分析，风电机组的输出功率不可能随时间的增加而保持不变，从另一方面进行考虑，对于 10 个以内的功率，灰色预测所得到的数据与真实数据相差 33% 左右，所以对此种方法进行剔除。

#### 4.1.2 最小二乘法模型的建立与求解

通过对问题一的分析，采用最小二乘法对 5 月 31 日到 6 月 6 日每个时点的输出功率进行拟合，由于数据众多，可以利用 *Matlab* 编程进行计算（附录 C），得到每日各个时点（见表 7）输出功率。

表 7 5 月 31 日到 6 月 6 日每个时点的输出功率预测值

时点\日期	5 月 31 日	6 月 1 日	6 月 2 日	6 月 3 日	6 月 4 日	6 月 5 日	6 月 6 日
1	476.02995	569.80284	683.9589	820.197	820.197	980.2159	1165.714
2	614.85071	787.79146	998.4045	1249.887	1545.436	1888.249	2281.522
3	680.33949	877.55946	1118.405	1406.653	1746.08	2140.46	2593.572

由表可以看出，输出功率随时间的增长其数值也逐渐增加，显然与实际现象不符，用实际值与其对比发现存在较大的误差，所以此种方法排除。

#### 4.1.3 时间序列模型的建立与求解

首先，对第 A 机电组输出功率进行数据分析，利用 *Matlab* 作出输出功率  $P_A$  在每天的变化曲线（图 1）；

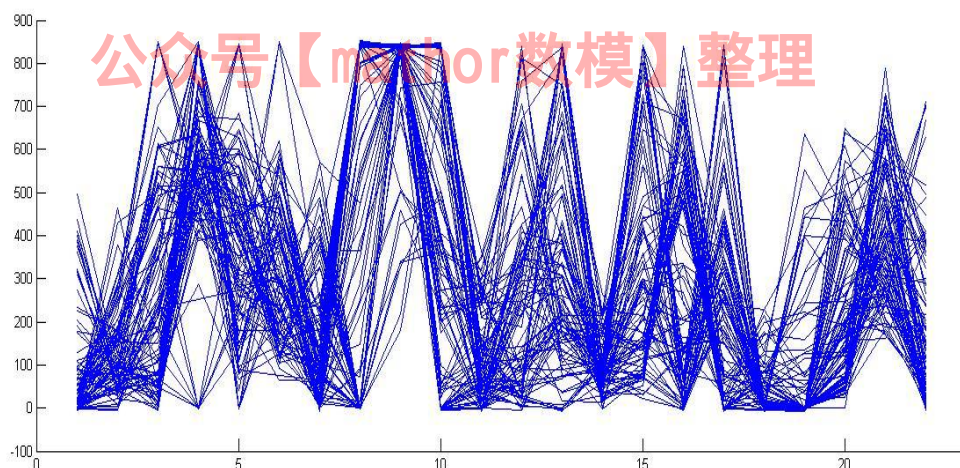


图 1 输出功率  $P_A$  在每天每个时点的变化曲线

对图像进行分析，图像中的波动有一定的规律性，即输出功率在每天的固定时点的输出功率与历史输出功率有很大相关性。在此不妨求出历史输出功率的平均值，以此为预测的参数。从实际情况进行分析，某时点的输出功率定会受到前一个时点输出功率的影响，必须对其进行考虑，所以，利用预测参数与前一个时点输出功率的平均值作为预测值。

为了提高预测的准确度，需对假设的预测参数进行检验，利用 *Matlab* 画出预测参数在每天的变化曲线（见图 2）。

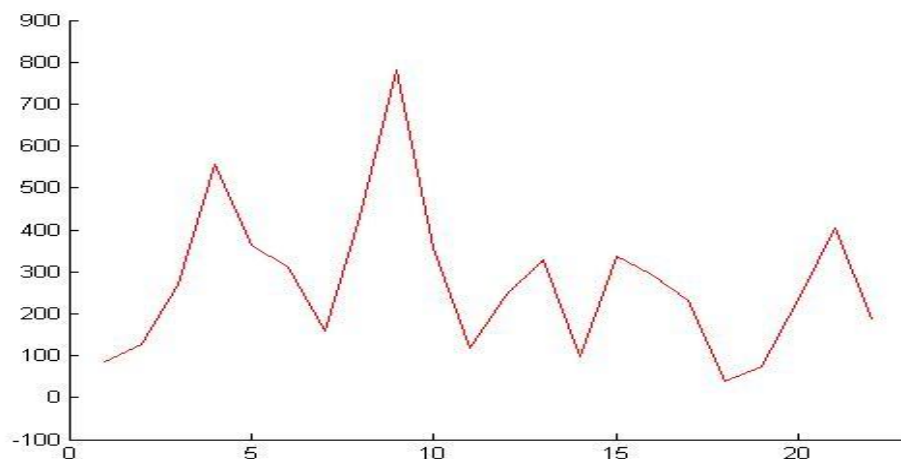


图 2 预测参数在每天的变化曲线

对图像 1 和图像 2 进行分析可知，预测参数与真实输出功率之间的图像有很大的相似性，完全可以作为预测功率的参数进行预测。

时间序列分析方法预测功率的具体步骤为：

1 利用时间序列分析方法对数据进行预测。

通过编程得到预测得到的  $P_{A,t} = 195.1875$

2 计算预测修正系数，即每天各个固定时点累加和的平均值。

$$\overline{P_A^1} = \frac{P_A^1 + P_A^2 + \cdots + P_A^n}{n}$$
$$\Rightarrow \overline{P_A^1} = \frac{411.375+8690.625+\cdots+480.75}{21}$$
$$\Rightarrow \overline{P_A^1} = 303.9074$$

2 用预测数据与修正系数的均值作为真实预测值。

$$P_A^1 = \frac{\overline{P_A^1} + P_{A,t}}{2}$$
$$\Rightarrow P_A^1 = \frac{303.9074+195.1875}{2}$$
$$\Rightarrow P_A^1 = 249.5524$$

3 由于题目要求进行实时预测，即一次预测出后四个小时的输出功率，据此利用 *Matlab* 编程（附录 *B*）求出所有的数据在 5 月 31 日的预测功率。

1）利用附件 2 中风功率数据  $P_A$ ，选定 5 月 10 日 0 时 0 分至 5 月 30 日 23 时 45 分的数据作为历史数据，根据编程得到 A 风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据（见表 1）。

表 2 A 风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据

时点	1	2	3	4	5	6	7	8
预测值	255.48	322.01	329.69	303.55	326.01	371.07	336.52	343.43
真实值	249.0938	355.3125	362.8125	323.8125	338.625	411.9375	364.6875	405.375
时点	9	10	11	12	13	14	15	16
预测值	402.06	345.17	342.79	349.41	185.27	120.22	102.19	136.08
真实值	496.2188	375.6563	380.8125	410.625	106.9688	12	-3.5625	10.78125
时点	17	18	19	20	21	22	23	24
预测值	115.98	127.99	122.46	140.64	141.3	135.39	122.09	116.37
真实值	-1.875	-2.25	-3.5625	5.25	27.375	13.3125	1.40625	17.15625
时点	25	26	27	28	29	30	31	32
预测值	128.98	109.92	127.1	125.4	132.68	117.91	108.51	119.87
真实值	49.78125	45.9375	60	62.34375	68.8125	34.59375	14.625	25.03125
时点	33	34	35	36	37	38	39	40
预测值	156.38	150.2	160.17	145.15	165.39	168.3	183.41	173.77
真实值	30.1875	21	19.875	1.96875	56.53125	55.21875	95.53125	74.15625
时点	41	42	43	44	45	46	47	48
预测值	154.27	198.38	326.31	261.09	175	229.53	381.29	249.75
真实值	54.46875	74.71875	388.875	264.6563	116.625	150.2813	448.0313	148.875
时点	49	50	51	52	53	54	55	56
预测值	217.52	265.2	351.83	238.61	300.59	262.06	248.58	226
真实值	155.25	236.4375	383.9063	189.75	283.6875	238.4063	188.625	196.5
时点	57	58	59	60	61	62	63	64
预测值	201.44	147.17	199.69	178.79	134.72	247.47	201.32	307.98
真实值	133.875	92.25	118.3125	79.21875	41.90625	241.9688	165.5625	376.7813

时点	65	66	67	68	69	70	71	72
预测值	290.26	281.13	393.72	507.44	492.84	466.15	505.75	443
真实值	290.7188	301.125	487.9688	696.9375	711.4688	626.8125	703.7813	519.0938
时点	73	74	75	76	77	78	79	80
预测值	355.63	506.66	355.81	275.49	268.99	174.82	252.96	257.95
真实值	385.5938	667.5	410.25	218.5313	204.75	54.5625	204.5625	183.4688
时点	81	82	83	84	85	86	87	88
预测值	185.47	142.68	148.06	170.68	211.16	209.44	215.76	208.21
真实值	92.8125	11.4375	-4.125	-1.6875	11.625	-2.0625	25.03125	49.40625
时点	89	90	91	92	93	94	95	96
预测值	225.96	231.77	234.51	238.72	248.66	227.43	235.38	225.08
真实值	43.6875	76.6875	139.3125	109.5	156.75	144.6563	180.75	153.0938

对预测功率和实际功率进行图像的对比，利用 *Matlab* 得到图像（见图 3）。

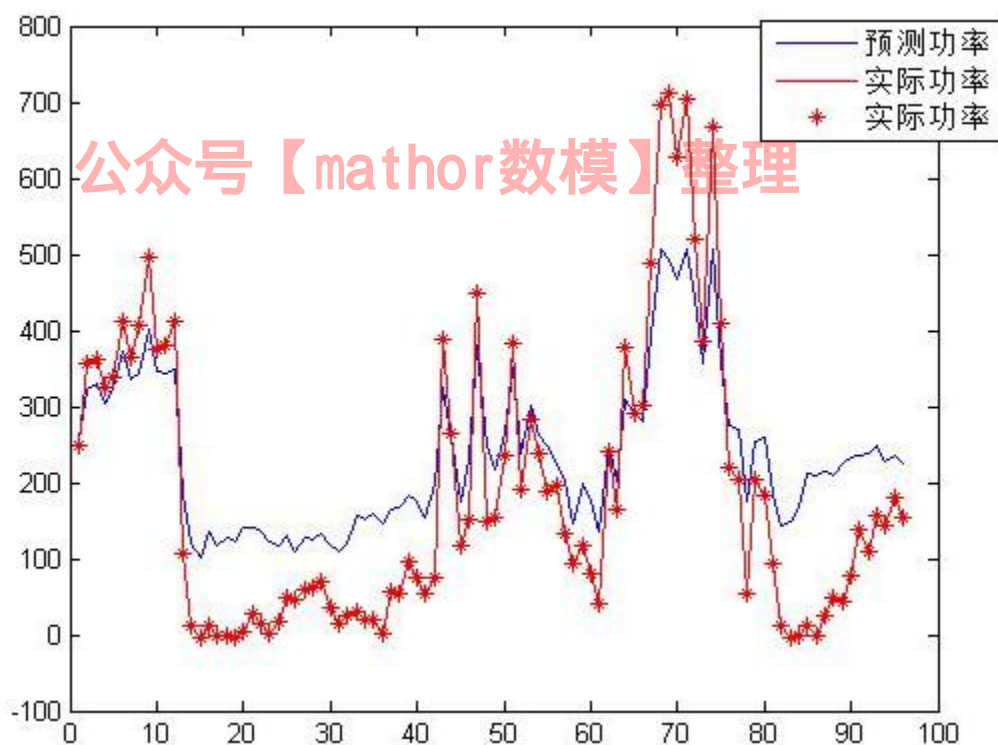


图 3 真实功率与预测功率图像对比

对图像分析，可知真实功率与预测功率极其吻合，可以利用此方法进行预测，但为了预测更具有说服力，对其数据进行检验，检验预测结果是否满足附件 1 中关于预测精度的相关要求，通过 *Matlab* 编程计算出准确率和合格率。

准确率：

$$r_1 = \left[ 1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left( \frac{P_{MK} - P_{PK}}{Cap} \right)^2} \right] \times 100\%$$

$$\Rightarrow r_1 = 81.4075\%$$



合格率:

$$r_2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n B_k \times 100\%$$

$$\Rightarrow r_2 = 80.2426\%$$

上述准确率和合格率均满足《通知》的规定,所以可以用于预测所有的数据。

2) 利用附件 2 中风功率数据  $P_B$ , 选定 5 月 10 日 0 时 0 分至 5 月 30 日 23 时 45 分的数据作为历史数据,根据编程得到 B 风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据(见表 2)。

表 2 B 风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据

时点	1	2	3	4	5	6	7	8
预测值	255.18	305.78	360.56	265.19	284.38	337.05	205.9	402.11
真实值	224.5313	353.8125	420.9375	268.875	287.3438	366.4688	127.7813	512.5313
时点	9	10	11	12	13	14	15	16
预测值	490.04	499.16	494.53	460.48	295.17	224.92	133.63	134.66
真实值	671.3438	667.6875	654.2813	614.3438	305.9063	181.5	21.375	6.375
时点	17	18	19	20	21	22	23	24
预测值	102.92	119.11	120.26	130.71	134.55	133.49	129.48	124.88
真实值	-3.1875	-1.5	16.78125	19.5	13.3125	22.3125	15.1875	19.5
时点	25	26	27	28	29	30	31	32
预测值	125.17	119.53	127.03	135.61	113.39	130.53	119.66	128.05
真实值	65.15625	47.25	62.53125	76.125	42.375	63.46875	38.0625	57.84375
时点	33	34	35	36	37	38	39	40
预测值	134.12	154.85	166.96	192.41	179.98	171.52	165.97	208.27
真实值	12.5625	45.1875	40.03125	108.5625	65.34375	67.5	32.71875	121.0313
时点	41	42	43	44	45	46	47	48
预测值	226.87	281.94	177.6	320.8	288.38	232.33	405.08	385.97
真实值	151.7813	261.1875	65.53125	355.6875	316.125	153.4688	428.9063	452.4375
时点	49	50	51	52	53	54	55	56
预测值	224.31	183.04	207.15	250.08	198.93	245.47	193.15	194.43
真实值	99.75	78.46875	138.1875	196.125	136.7813	251.625	159.6563	129.6563
时点	57	58	59	60	61	62	63	64
预测值	229.33	240.48	305.35	301.64	237.93	303.52	215.14	410.88
真实值	214.4063	214.9688	335.9063	288.2813	210.4688	379.3125	241.5	564.1875
时点	65	66	67	68	69	70	71	72
预测值	243.69	313.24	375.46	504.77	560.79	380.14	451.82	530.79
真实值	229.3125	384.0938	452.4375	669.8438	808.2188	494.7188	597.5625	736.2188
时点	73	74	75	76	77	78	79	80
预测值	354.92	381.7	397.88	321.74	203.85	192.01	228.54	252.37
真实值	406.4063	458.0625	468.1875	309.8438	101.625	86.90625	166.9688	188.0625
时点	81	82	83	84	85	86	87	88
预测值	227	172.77	142.96	170.33	205.12	208.6	216.9	192.72
真实值	167.7188	78.9375	12.75	31.40625	25.40625	19.3125	12.9375	16.59375
时点	89	90	91	92	93	94	95	96

预测值	210.59	265.77	257.95	240.74	246.86	225.48	208.83	194.33
真实值	15.46875	139.3125	156.5625	122.625	129.8438	151.4063	154.0313	150

3) 利用附件 2 中风功率数据  $P_c$ ，选定 5 月 10 日 0 时 0 分至 5 月 30 日 23 时 45 分的数据作为历史数据，根据编程得到 C 风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据(见表 3)。

表 3 C 风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据

时点	1	2	3	4	5	6	7	8
预测值	271.26	238.99	124.92	140.32	253.9	215.39	463.54	211.9
时点	9	10	11	12	13	14	15	16
预测值	332.87	223.77	125.86	236.63	244.4	265.25	301.49	215.15
时点	17	18	19	20	21	22	23	24
预测值	370.46	117.55	163.35	192.6	145.02	371.27	458.77	201.08
时点	25	26	27	28	29	30	31	32
预测值	314.79	126.6	139.69	207.53	237.62	279.61	280.22	200.89
时点	33	34	35	36	37	38	39	40
预测值	430.49	113.97	137.76	219.47	138.56	250.96	224.38	208.57
时点	41	42	43	44	45	46	47	48
预测值	338.16	107.78	139.97	297.75	244.97	340.54	216.71	237.57
时点	49	50	51	52	53	54	55	56
预测值	231.89	124.91	118.51	241.78	199	389.44	248.9	224.01
时点	57	58	59	60	61	62	63	64
预测值	365.25	128.77	126.25	403.42	186.24	381.95	275.78	243.1
时点	65	66	67	68	69	70	71	72
预测值	334.6	129.6	148.9	307.27	149.09	515.57	244.17	243.02
时点	73	74	75	76	77	78	79	80
预测值	483.59	123.28	151.49	307.93	310.29	570.73	192.62	225.5
时点	81	82	83	84	85	86	87	88
预测值	502.37	138.46	126.95	295.34	389.02	476.96	136.04	232.57
时点	89	90	91	92	93	94	95	96
预测值	428.6	135.66	169.29	236.28	216.15	425.3	180.11	219.11

4) 利用附件 2 中风功率数据  $P_d$ ，选定 5 月 10 日 0 时 0 分至 5 月 30 日 23 时 45 分的数据作为历史数据，根据编程得到 D 风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据(见表 4)。

表 4 D 风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据

时点	1	2	3	4	5	6	7	8
预测值	218.36	190.15	120.06	158.9	238.81	285.53	429.73	216.23
时点	9	10	11	12	13	14	15	16
预测值	254.2	167.61	111.99	134.84	192.74	210.32	232.7	200.35
时点	17	18	19	20	21	22	23	24
预测值	304.71	129.24	120.04	192.55	229.68	160.94	338.05	220.47
时点	25	26	27	28	29	30	31	32

预测值	270.94	110.94	124.58	211.31	201.39	274.05	291.43	183.29
时点	33	34	35	36	37	38	39	40
预测值	303.37	114.19	124.15	132.74	179.4	230.12	208.53	212.04
时点	41	42	43	44	45	46	47	48
预测值	302.74	128.55	122.04	311.88	207.07	321.13	190.39	247.97
时点	49	50	51	52	53	54	55	56
预测值	236.45	120.76	110.79	237.87	272.61	338.24	225.97	242.45
时点	57	58	59	60	61	62	63	64
预测值	423.38	138.59	124.83	345.18	262.33	484	257.25	218.82
时点	65	66	67	68	69	70	71	72
预测值	296.58	146.23	162.48	254.77	278.96	495.97	233.11	228.2
时点	73	74	75	76	77	78	79	80
预测值	344.03	140.52	164.05	325.83	151.3	515.46	173.69	192.32
时点	81	82	83	84	85	86	87	88
预测值	422.18	128.06	141.35	223.83	262.8	509.45	150.7	184.07
时点	89	90	91	92	93	94	95	96
预测值	326.88	125.04	143.69	210.58	298.48	343.37	183.48	174.59

整理

公众号【mathor数据】整理

公众号

5) 利用附件 2 中风功率数据  $P_{58}$ ，选定 5 月 10 日 0 时 0 分至 5 月 30 日 23 时 45 分的数据作为历史数据，根据编程得到 58 台风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据（见表 5）。

表 5 58 台风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据

时点	1	2	3	4	5	6	7	8
预测值	13247	11359	5975.5	8417.2	12376	12093	19286	10414
时点	9	10	11	12	13	14	15	16
预测值	15570	8896.5	5879.7	8777	11021	12041	18282	10299
时点	17	18	19	20	21	22	23	24
预测值	16602	6086.9	6471.4	9195.1	12124	10492	18115	10848
时点	25	26	27	28	29	30	31	32
预测值	15303	5996.8	6565.6	9205.6	12164	13479	14314	10218
时点	33	34	35	36	37	38	39	40
预测值	16616	5510.2	6172.7	9989	10793	15805	11643	10977
时点	41	42	43	44	45	46	47	48
预测值	17009	5918.1	6259.5	12664	12365	16053	9579.6	12370
时点	49	50	51	52	53	54	55	56
预测值	13441	5811.4	5900	13053	10961	17212	11965	12253
时点	57	58	59	60	61	62	63	64
预测值	20405	6516.7	6541.8	14097	12266	20632	13183	12134
时点	65	66	67	68	69	70	71	72
预测值	20839	6746.9	7347.7	13815	11210	23559	10520	11754
时点	73	74	75	76	77	78	79	80
预测值	22692	6512.4	7432.7	13889	10420	23517	8202.8	10791

时点	81	82	83	84	85	86	87	88
预测值	21134	6091.8	7673	15278	14073	24566	7168.9	10666
时点	89	90	91	92	93	94	95	96
预测值	18035	5931.3	8003.7	13277	12612	22636	8708.8	9690.3

6) 由题意知,  $P_4$  为四台风电机组输出功率总和, 对预测得到四台风电机组预测数据进行相加可以得到四台风电机组输出功率总和预测功率 (见表 6)。

表 6 四台风电机组在 5 月 31 日输出功率预测数据

时点	1	2	3	4	5	6	7	8
预测值	1000.3	909.58	499.13	644.59	934.54	873.56	1603.8	844.4
时点	9	10	11	12	13	14	15	16
预测值	1214.9	736.52	467.31	711.29	885.38	1026.6	1422.5	833.54
时点	17	18	19	20	21	22	23	24
预测值	1365.4	482.61	537.52	734.54	933.68	948.67	1550.5	854.21
时点	25	26	27	28	29	30	31	32
预测值	1154.5	508.28	525.29	800.88	927.69	1272.5	1168.9	785.1
时点	33	34	35	36	37	38	39	40
预测值	1344.3	447.06	507.98	733.35	817.47	1015	905.75	857.16
时点	41	42	43	44	45	46	47	48
预测值	1349	483.43	510.45	1089.9	959.56	1256	773.94	983.07
时点	49	50	51	52	53	54	55	56
预测值	1010.8	488.38	457.47	983.56	913.35	1496.9	956.37	958.93
时点	57	58	59	60	61	62	63	64
预测值	1534.2	538.71	499	1330.5	869	1878.2	1043.3	941.37
时点	65	66	67	68	69	70	71	72
预测值	1523.3	551.68	601.87	1025.4	858.83	2065.2	889.75	966.75
时点	73	74	75	76	77	78	79	80
预测值	1672	532.69	620.59	1095.6	849.25	1932.5	681.76	870.74
时点	81	82	83	84	85	86	87	88
预测值	1761.9	518.1	595.43	1305.5	1156.8	1944	577.76	860.84
时点	89	90	91	92	93	94	95	96
预测值	1565.4	501.95	650.54	1082.6	995.06	1742.5	704.6	813.11

4 根据附件中给定的输出功率, 选定历史数据利用时间序列分析方法对 5 月 31 日至 6 月 6 日每个时点的输出功率进行预测。

4.1.4 推荐方法

上述, 利用了三种方法对所需数据进行了预测, 从预测结果发现, 如果运用灰色预测和最小二乘法拟合, 所预测的数据与真实数据有较大的偏差, 进行排除。

运用时间序列的持续法的改进模型所得到的预测数据与真实输出功率偏差较小, 并且准确率和合格率都保持在 80% 以上, 故推荐用时间序列中持续法的改进方法进行预测。

4.2 模型 2 的建立与求解

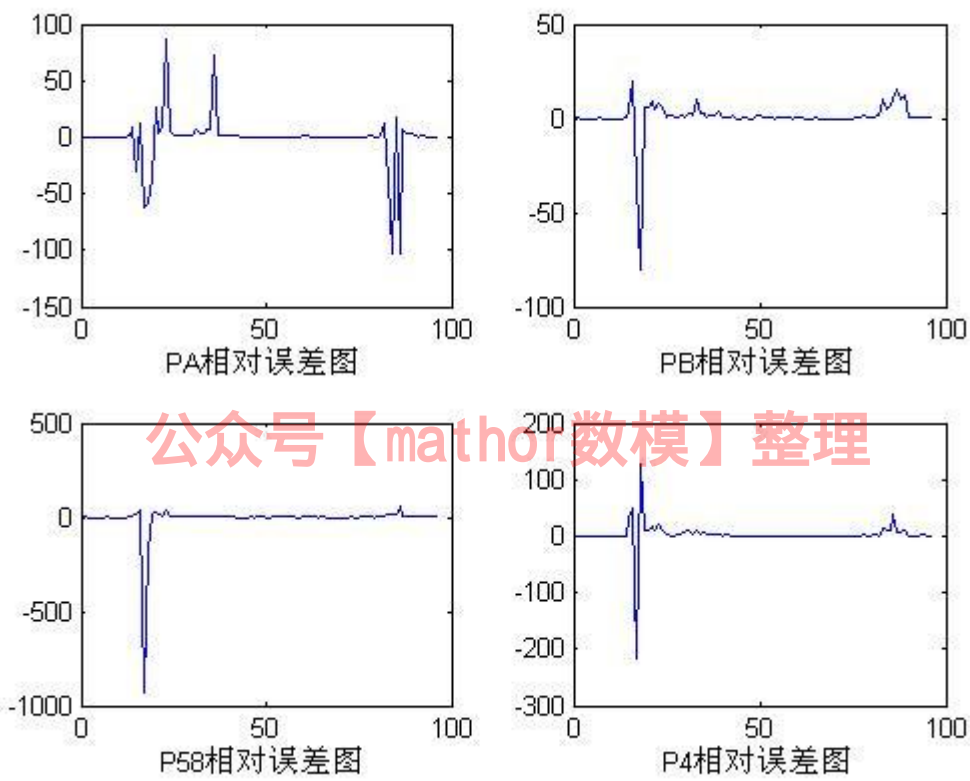
针对问题 2, 要知道发电机组的汇聚对风电功率的预测带来的影响。利用问题 1 的预测结果, 分别算出各台电风机的相对误差与总发电机组的相对误差。计算公式如下:



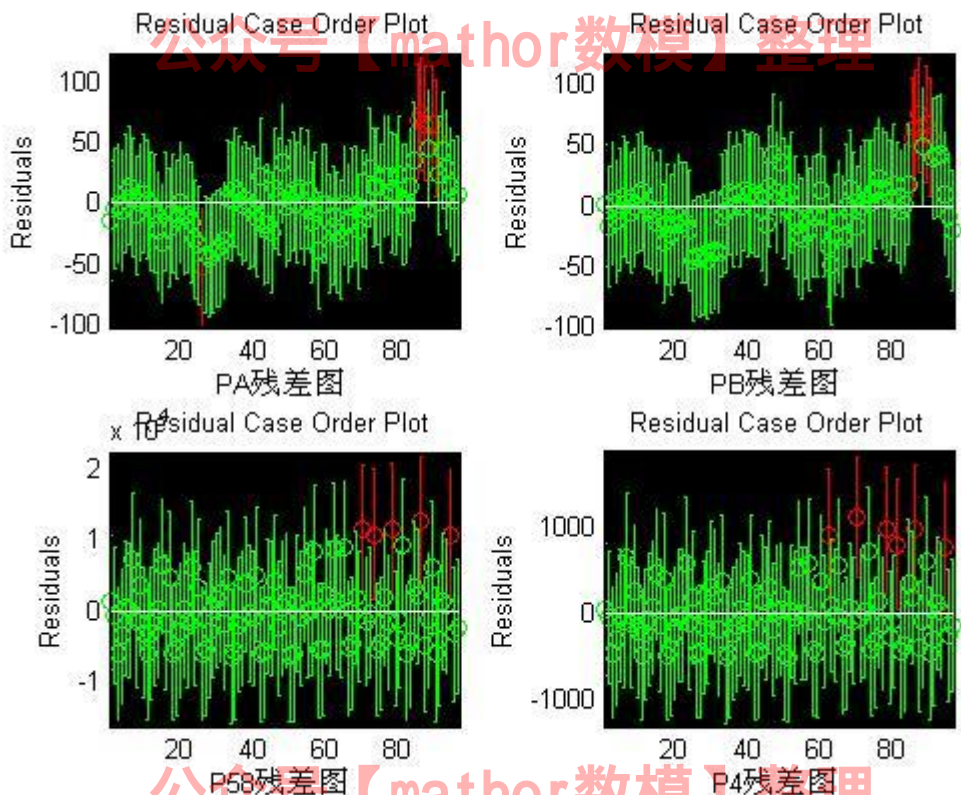
我们用预测的值减去实际值除以实际值得到各台电风机的相对误差，整个预测过程用 *Matlab* 软件编程求解，求解过程见附录 *D*。

由求解的数据可得，单个台机预测的误差相对于电台机组的误差较小。从整体上看，除某些时间段的数据误差偏大，各台电风机的相对误差保持在 20% 以内。

根据求解的数据分别做出 *A*、*B* 台风电机和总电机及 58 台电机的相对误差图如下：



用 *Matlab* 编程 (附录 *E*) 分别做出 *A*、*B* 风电机和总电机及 58 台电机的残差图如下：



由上残差图可知，单电台机的误差与组合机的误差差不多在相同的时间范围都出现较大的误差。由  $P_4$  的残差和  $P_5$  的残差相比可知，由  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  组合的风电机比 58 台机组合的误差范围大。由此可知风电机的组合加大了预测的误差。

综上所述，由于地形气候的异常会造成在某些时刻预测的数值误差很大，其原因可能有以下：

- 1 计算过程有一定的误差；
- 2 当风电机组合在一起时，由于单台风电机的发电功率不一致造成影响；
- 3 实际测量的数据有一定对误差。

4.3 模型 3 的建立与求解

题目要求提高风电功率实时预测精度，对输出功率进行分析知其受到风速、风向、地形、气候等多方面影响，通过对影响因素的参数化处理可以提高预测精度，但题目中没有给定具体的数据及情况，从另一方面分析，模型 1 时间序列方法中对历史数据进行平均处理，处理后的数据为修正参数，再次从实际情况考虑历史数据，可知离预测数据越远的时点对预测点的影响越小，离预测数据越近的对预测功率的影响越大。

对历史数据进行加权处理，每个历史数据配以不同的权数（见表 8），采用实时预测，对加权后的数据进行移动用来预测下个时点的输出功率，最后与预测上一个数据进行平均。

表 8 历史输出功率日期与所对应输出功率的权重

日期	5 月 5 日	5 月 6 日	5 月 7 日	.....	5 月 28 日	5 月 29 日	5 月 30 日
权重	2	4	6	.....	46	48	50

具体步骤为：

1 对历史数据进行权重处理。

$$P_{A,1,q} = P_A \times \frac{2}{\sum_{i=2}^{50} Q}$$

2 对权重处理后的数据进行累加。

$$P_{A,z,q} = \sum_{i=1}^{22} P_{A,i,q}$$

3 计算权重处理后输出功率总和与上一个时点输出功率的均值，用计算的得到的值作为预测值。

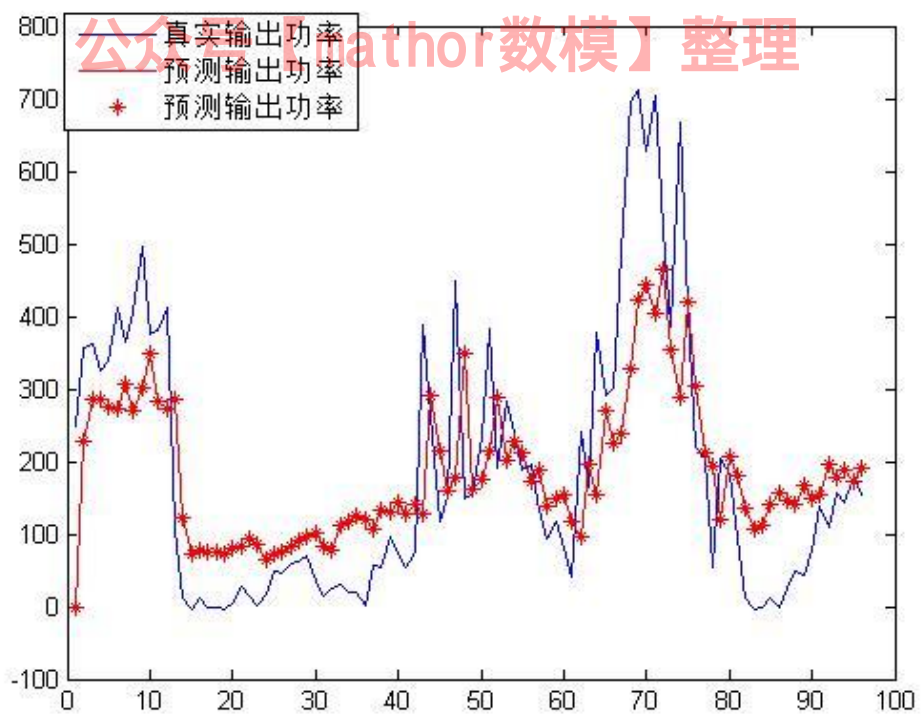
$$P_A^i = \frac{P_{A,z,q} + P_A^{i-1}}{2}$$

4 用预测得到的值对下一个时点进行预测，直到数据全部预测。通过 *Matlab* 编程（见附录 *F*）对所需数据进行预测，结果见表 9。

表 9 通过加权平均预测 5 月 31 日的输出功率

时点	预测功率							
1-8	232.54	285.69	71.112	107.78	163	117.72	353.78	140.77
9-16	226.39	123.56	75.49	133.63	174.17	97.275	287.11	156.54
17-24	286.61	73.467	83.976	130.87	215.05	196.93	419.93	147.12
25-32	285.46	76.896	91.823	144.23	288.44	153.03	302.86	141.25
33-40	276.2	73.877	95.884	128.17	200.32	269.75	211.55	168.29
41-48	271.89	75.568	100.23	140.58	227.25	225.43	192.66	149.82
49-56	306.55	71.677	83.576	128.08	212.74	238.23	119.67	154.32
57-64	269	80.136	77.419	291.19	172.47	328.44	206.81	196.61
65-72	301.71	82.522	112.6	215.19	188.9	423.42	181.01	177.72
73-80	347.99	94.391	118.06	158	137.95	442.7	136.24	188.36
81-88	282.48	84.908	124.38	178.58	148.62	402.72	105.79	172.11
89-96	272.89	64.14	120.95	348.4	155.01	463.57	112.13	192.05

为了与真实预测数据进行对比，利用 *Matlab* 画出真实输出功率与预测输出功率之间的图像（见图 4）。



整理

图 4 通过加权移动平均法预测出的输出功率与真实功率对比图

公众号

通过图像可以发现，利用加权移动平均法预测出的功率与真实功率基本相同，所以完全可以用加权平均法对风电功率进行预测。

在求解上述问题中，可以发现阻碍风电功率实时预测精度的主要因素是与预测时点相邻最近点的输出功率和历史输出功率，但是如果采用实时预测方法每 16 个时点作为一组数据进行预测，误差会有波动，个别时点的数据会出现较大误差。

如果要提高风电功率预测精度必须对邻近的数据点有很好的预测能力，由于风电功率的输出量主要受风速的影响，通过对未来风速的预测，如果预测风速的准确率提高势必输出功率会提高，即如果风速的预测精度无限提高，则风电功率的精度会无限提高。

从实际情况进行考虑，风速的预测精度不可能无限制提高，即风电功率的精度也不会无限提高，风电功率精度会随着风速预测精度的提高而提高。

## 5 灵敏度分析

由实际情况可知，风电机组的输出功率不仅与历史输出功率有很大关系，与当地的地形、天气状况、气候和设备安排有很大联系。

为了观察模型准确度，现对模型历史数据进行灵敏度分析，模型三中历史数据的加权处理值与预测上一个数据进行平均，得到的值作为真实预测值。现以加权处理值的 80%与预测功率上一个时点的 20%相加所得值作为真实预测值。

通过 *Matlab* 编程进行预测，作出真实输出功率与预测功率的图像（图 5）。



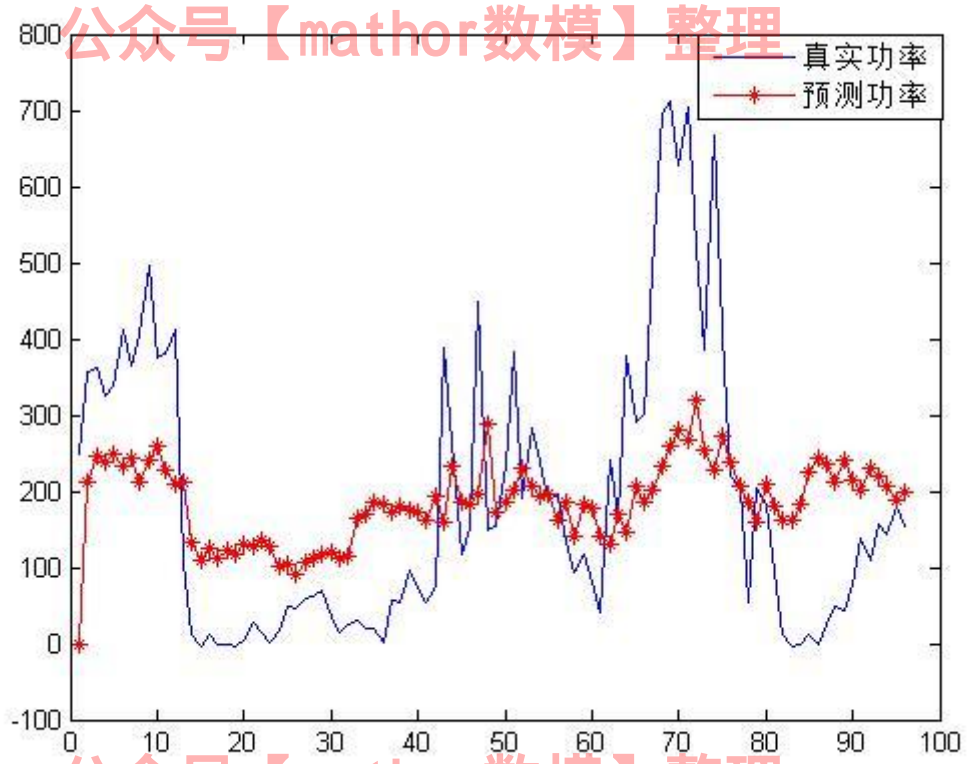


图 5 灵敏度分析所得真实功率与预测功率

对图 5 和图 4 进行对比可知，通过增加加权处理数值在预测中所占的比例，真实输出功率与预测输出功率误差会增大，据此得到对输出功率进行预测时，准确度与其相邻的上一个预测值精度有很大关系，即上一个时点预测功率精度直接关系到这一时点精度。

## 6 模型评价与推广

### 6.1 模型评价

#### 1 优点：

- 1) 本文针对每个问题分别建立了对应的模型进行求解，运用多种方法进行预测并对预测功率进行准确度检验，最后选用预测精度较高的方法进行预测，提高了论文的准确率；
- 2) 模型求解中计算部分运用专业软件 *Matlab* 进行求解，计算结果准确可信度高；
- 3) 由于预测数据众多，所以模型中运用了较多的表格和图形，有效提高了论文的可读性，使论文明了简练；
- 4) 模型从多方面进行了分析，更好的提高了模型的实际运用价值。

#### 2 缺点：

- 1) 模型综合考虑了各种因素，但复杂因素较多，不能对其进行全面的考虑，造成与实际有一定的不符之处；
- 2) 模型运用程序对所需要的功率进行预测，但输入数据烦琐复杂。

## 6.2 模型推广

随着地球能源的逐渐减少,二次能源风能的利用率大幅度提高,模型可以用于全国甚至全球范围内的功率预测,以此提高电力部门的调度效率,保证电网的功率平衡和安全运行。

## 7 参考文献

- [1] 吴振奎 王全文主编《运筹学》中国人民大学出版社 2005.
- [2] 姜启源 谢金星 叶俊编《数学模型》高等教育出版社 2003. 8
- [3] 吴建国主编《数学建模案例精编》中国水利水电出版社 2005. 5
- [4] 孙祥 徐流美 吴清编著《MATLAB7.0 基础教程》清华大学出版社 2005. 8

## 8 附录

附录 A:

%调用格式为  $x = [1 \ 2 \ 3 \ \dots \ n]$ ;  $gm1(x)$ ; 测试数据

%二次拟合预测GM(1,1)模型

```
function gmcal=gm2(x)
```

```
sizexd2 = size(x,2);
```

%求数组长度

```
k=0;
```

```
for y1=x
```

```
    k=k+1;
```

```
    if k>1
```

```
        x1(k)=x1(k-1)+x(k);
```

%累加生成

```
        z1(k-1)=-0.5*(x1(k)+x1(k-1));
```

%z1维数减1, 用于计算B

```
        yn1(k-1)=x(k);
```

```
    else
```

```
        x1(k)=x(k);
```

```
    end
```

```
end
```

%x1, z1, k, yn1

```
sizez1=size(z1,2);
```

%size(yn1);

```
z2 = z1';
```

```
z3 = ones(1,sizez1)';
```

```
YN = yn1'; %转置
```

%YN

```
B=[z2 z3];
```

```
au0=inv(B'*B)*B'*YN;
```

```
au = au0';
```

%B, au0, au

```
afor = au(1);
```

```
ufor = au(2);
```

```
ua = au(2)./au(1);
```

%afor, ufor, ua?

%输出预测的? a u 和 u/a的值

```
constant1 = x(1)-ua;
```

```
afor1 = -afor;
```

```
x1t1 = 'x1(t+1)';
```

```
estr = 'exp';
```

```
tstr = 't';
```

```
leftbra = '(';
```

```
rightbra = ')';
```

%constant1, afor1, x1t1, estr, tstr, leftbra, rightbra

```

strcat(x1t1, '=', num2str(constant1), estr, leftbra, num2str(afor1), tstr, rightbra, '+', leftbra, num2str(ua), rightbra)
%输出时间响应方程

```

```

%二次拟合

```

```

k2 = 0;
for y2 = x1
    k2 = k2 + 1;
    if k2 > k
    else
        ze1(k2) = exp(-(k2-1)*afor);
    end
end

```

```

%ze1

```

```

sizeze1 = size(ze1, 2);
z4 = ones(1, sizeze1)';
G=[ze1' z4];
X1 = x1';
au20=inv(G'*G)*G'*X1;
au2 = au20';

```

```

%z4, X1, G, au20

```

```

Aval = au2(1);

```

```

Bval = au2(2);

```

```

%Aval, Bval

```

```

%输出预测的? A, B的值

```

```

strcat(x1t1, '=', num2str(Aval), estr, leftbra, num2str(afor1), tstr, rightbra, '+', leftbra, num2str(Bval), rightbra)

```

```

%输出时间响应方程

```

```

nfinal = sized2-1 + 1;

```

```

%预测的步骤数 1

```

```

for k3=1:nfinal
    x3fcast(k3) = constant1*exp(afor1*k3)+ua;
end

```

```

%x3fcast

```

```

%一次拟合累加值

```

```

for k31=nfinal:-1:0
    if k31>1
        x31fcast(k31+1) = x3fcast(k31)-x3fcast(k31-1);
    else
        if k31>0
            x31fcast(k31+1) = x3fcast(k31)-x(1);
        else
            x31fcast(k31+1) = x(1);
        end
    end
end

```



```

end
x3lfcast%一次拟合预测值
for k4=1:nfinal
    x4fcast(k4) = Aval*exp(afor1*k4)+Bval;
end %x4fcast
for k4l=nfinal:-1:0
    if k4l>1
        x4lfcast(k4l+1) = x4fcast(k4l)-x4fcast(k4l-1);
    else
        if k4l>0
            x4lfcast(k4l+1) = x4fcast(k4l)-x(1);
        else
            x4lfcast(k4l+1) = x(1);
        end
    end
end
x4lfcast %二次拟合预测值

```

#### 附录B

```

function yuce1()
a=[数据];%注意：调用时把历史数据输入到a矩阵中
e1=[];
for i=1:96
    a1=a(:,i);
    b1=sum(a1);
    c1=21;
    d1=b1/c1;
    if i==1
        j=96;
    else j=i-1;
    end
    h1=a(22,:);
    if i-1==0
        e1(i)=(d1+a(21,j))/2;
    else e1(i)=(d1+h1(i))/2;
    end
end
e1
f1=1:96;
plot(f1,e1)
hold on
plot(f1,a(22,:), 'r')

```

#### 附录C

```

function nihe1()
a=[ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21];

```

b=[数据]; %此处输入预测的历史数据

c=polyfit(a, b, 3);

e=[];

syms x

d=c(1)\*x^3+c(2)\*x^2+c(3)\*x+c(4);

for i=22:28

e(i-21)=subs(d, x, i);

end

vpa(e, 8)

附录 D

%该程序用来绘制相对误差图

subplot(2, 2, 1)

plot(y, (A1-A)./A) % A1 由风电机 A 在 5 月 31 日各时点预测值组成的行矩阵, A 由风电机 A 在 5 月 31 日各时点真实值组成的行矩阵

subplot(2, 2, 2)

plot(y, (B1-B)./B) % B1 由风电机 A 在 5 月 31 日各时点预测值组成的行矩阵, B 由风电机 B 在 5 月 31 日各时点真实值组成的行矩阵

subplot(2, 2, 3)

plot(y, (P581-P58)./P58) % P581 由 58 台风电机在 5 月 31 日各时点预测值组成的行矩阵, P58 由 58 台风电机在 5 月 31 日各时点真实值组成的行矩阵

subplot(2, 2, 4)

plot(y, (P41-P4)./P4) % P41 由风电机 A、B、C、D 在 5 月 31 日各时点预测值总和组成的行矩阵, P4 由风电机 A、B、C、D 在 5 月 31 日各时点真实值总和组成的行矩阵

附录 E

%该程序用来绘制残差图

subplot(2, 2, 1)

>> x=A';

v=A1';

x=[ones(96, 1), x];

[b, bint, r, rint, stats]=regress(v, x); %

rcoplot(r, rint)

>> subplot(2, 2, 2)

>> x=B';

v=B1';

x=[ones(96, 1), x];

[b, bint, r, rint, stats]=regress(v, x);

rcoplot(r, rint)

>> subplot(2, 2, 3)

x=P58';

v=P581';

x=[ones(96, 1), x];

[b, bint, r, rint, stats]=regress(v, x);

rcoplot(r, rint)

>> subplot(2, 2, 4)

```

x=P4' ;
v=P41' ;
x=[ones(96,1),x];
[b,bint,r,rint,stats]=regress(v,x);
rcoplot(r,rint)

```

附录  $F$

```

function yuceaa
a=[数据];%此处输入数据;
aa=2:2:50;
for j=1:96
    sum=0;
    for i=1:21
        b=a(i,j)*aa(i)/650;
        sum=sum+b;
    end
    if j==1
        c=a(21,96);
    else c=a(22,j-1);
        p(j)=(sum+c)/2;
    end
end
p

```

公众号【mathor数模】整理

公众号

公众号【mathor数模】整理

公众号