

2016 CUMCM D

风电场运行状况分析及优化 评述

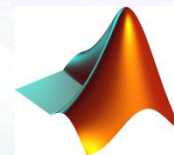
谈之奕

(浙江大学数学科学学院)

tanzy@zju.edu.cn

赛题特点

- 问题表述
 - 题意清楚、目标明确
 - 简化专业背景
- 综合能力
 - 三个小题、数据整理
 - 统计、运筹
 - 数学软件
- 专科要求
 - 两种途径



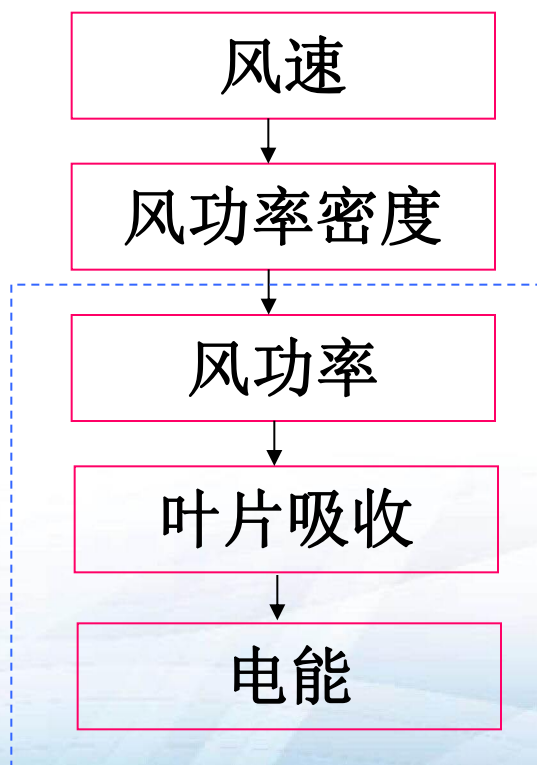
风能资源

- 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

- 35040条数据
- 个别数据格式错误

风电场日实际发电曲线统计表											
2015年1月1日						功率单位: MW。风速单位: m/s					
时间	功率	风速	时间	功率	风速	时间	功率	风速	时间	功率	风速
0:15	34	4.1	6:15	25	4.7	12:15	0	2.3	18:15	13	3.9
0:30	24	4.9	6:30	25	5.7	12:30	0	2.3	18:30	18	3.5
0:45	36	4.7	6:45	24	4.7	12:45	1	2.5	18:45	24	4.1
1:00	29	5.6	7:00	23	5.4	13:00	1	2.5	19:00	22	4.6
1:15	21	5.1	7:15	27	5.6	13:15	2	2.5	19:15	20	4.5
1:30	19	3.9	7:30	29	5.4	13:30	2	2.4	19:30	12	4.0
1:45	25	4.2	7:45	30	4.9	13:45	0	2.2	19:45	9	4.2

风力发电



v

$$\frac{1}{2} \rho v^3$$

$$\frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v) \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho v^3 A$$

$$\frac{1}{2} \rho v^3 A \cdot C_p \quad C_p \leq \frac{16}{27} \quad \text{Betz极限}$$

额定功率



Albert Betz
(1885-1968)
德国物理学家

评估指标

• 风能资源指标

- 平均风速
- 平均风功率密度
- 有效小时数
- 风频分布
- 风向
- 风切变
- 湍流强度

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad D_{wp} = \frac{\rho}{2n} \sum_{i=1}^n v_i^3$$

$$D_{wp} = \frac{\rho}{2} \bar{v}^3 \quad \times$$

$$D_{wp} < \frac{\rho}{2} \bar{v}^3 \quad \times$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3 \geq \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \right)^3$$

ICS 27.180
F 11



中华人民共和国国家标准

GB/T 18710-2002

风电场风能资源评估方法

Methodology of wind energy resource
assessment for wind farm

2002-04-26 发布

2002-10-01 实施

中华人民共和国
国家质量监督检验检疫总局 发布

利用情况

输出功率
额定功率
风功率

风资源
正常维护
弃风限电?

央广网
www.cnr.cn

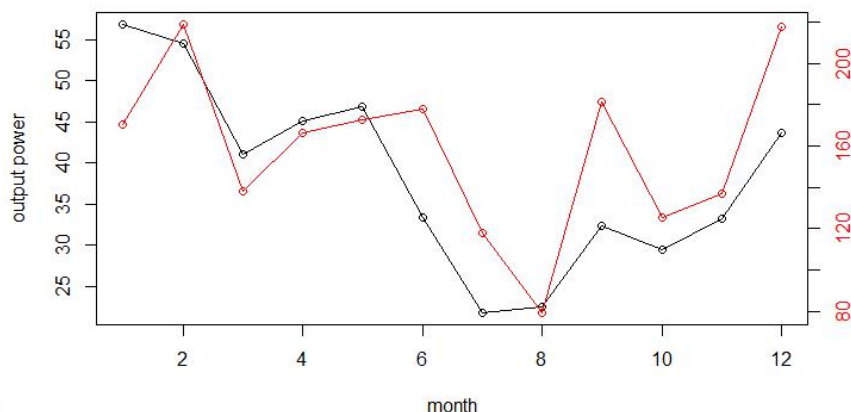
央广网财经 > 天下财经

撕裂的风电：弃风限电恶化 百亿元风电在流失

2015-12-08 08:16:00 来源：央广网

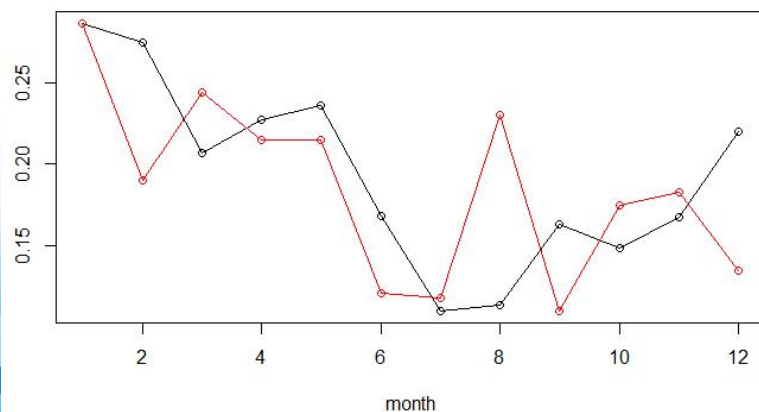
20	4:15	15	3.1	10:15	0	3.2
21	4:30	4	3.8	10:30	0	3.4
22	4:45	1	2.5	10:45	0	3.1
23	5:00	0	1.9	11:00	0	4.1
24	5:15	0	2.3	11:15	0	4.5
25	5:30	1	2.3	11:30	0	4.7
26	5:45	2	2.5	11:45	0	4.5
27	6:00	7	3.1	12:00	1	4.4

输出功率



风功率密度

输出
vs
额定



输出
vs
风功率

Weibull分布

• Weibull分布

• 密度函数

k : 形状参数

λ : 尺度参数

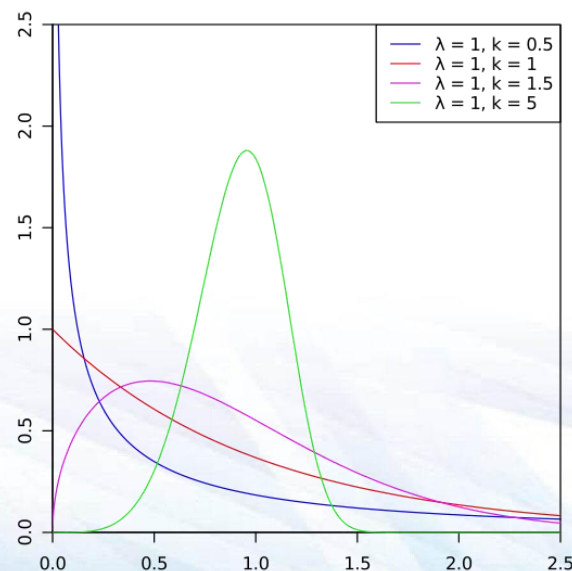
$$f(x; k, \lambda) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda} \right)^k} & x > 0, \\ 0 & x \leq 0, \end{cases}$$

• 数字特征

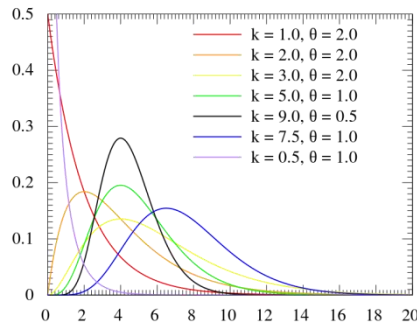
• 均值 $\lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$

• 方差 $\lambda^2 \left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right)^2 \right)$

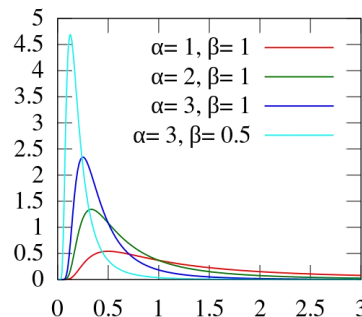
$$\mathbf{E}(D_{wp}) = \frac{1}{2} \rho \mathbf{E}(v^3)$$



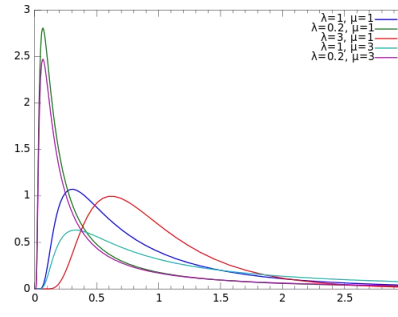
风速分布



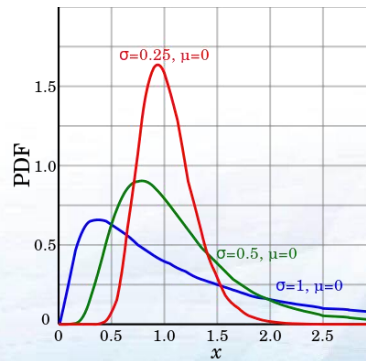
Gamma分布



逆Gamma分布

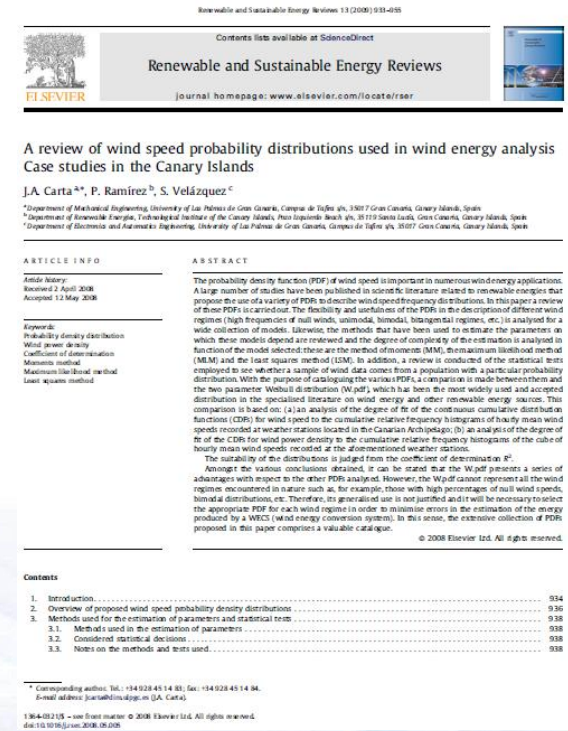
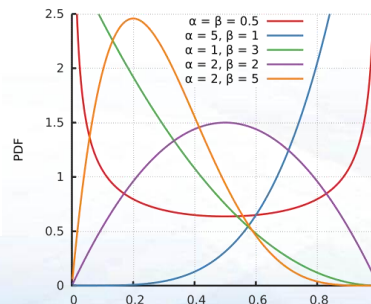


逆Gaussian分布



对数
正态
分布

Beta
分布



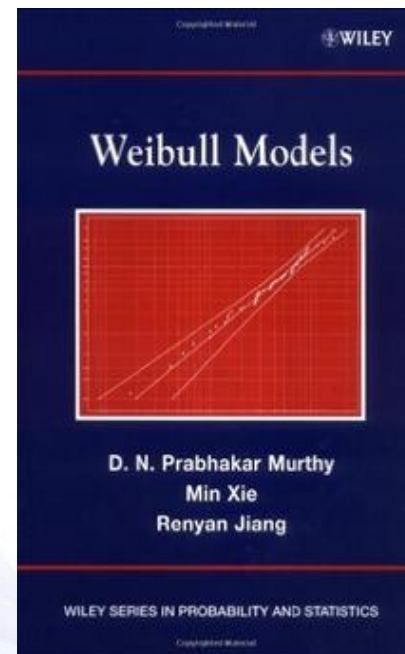
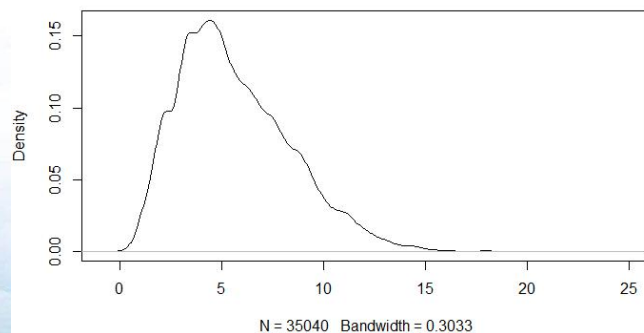
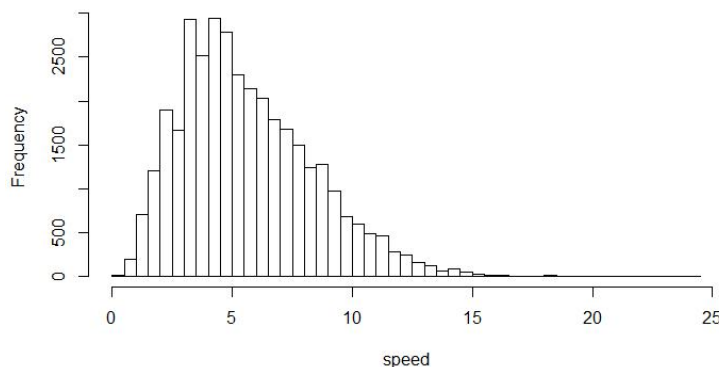
Carta JA, Ramirez P, Velazquez S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13: 933-955.

Weibull分布

- 参数估计
 - 矩估计
 - 极大似然估计
- 分布拟合检验
 - Kolmogorov-Smirnov

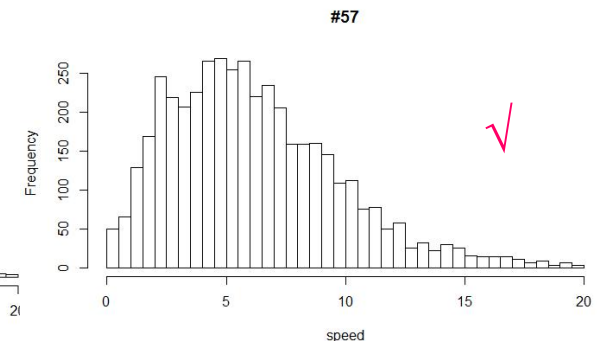
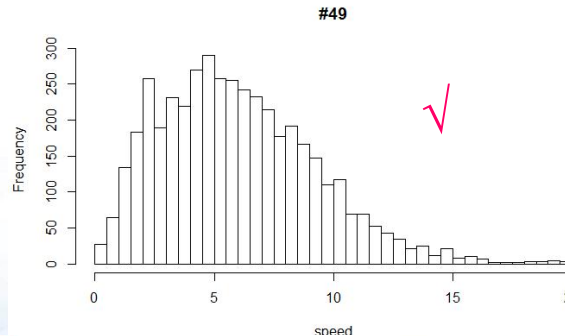
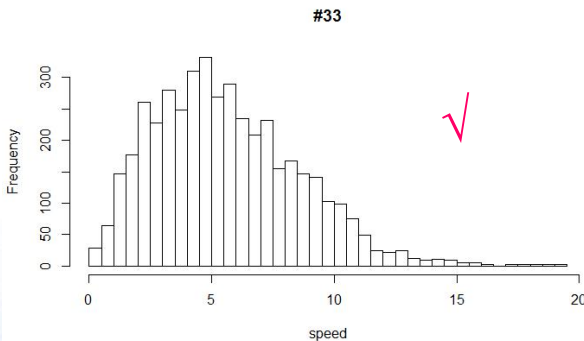
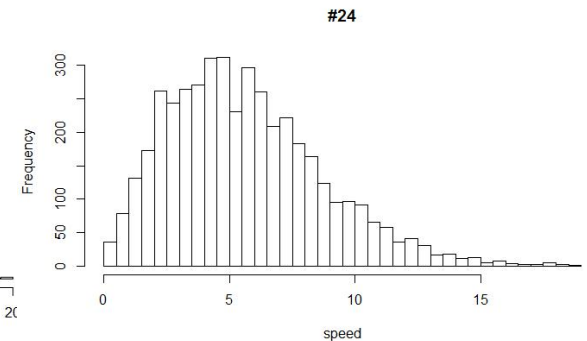
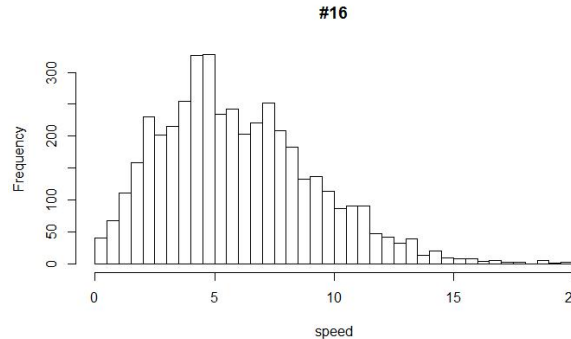
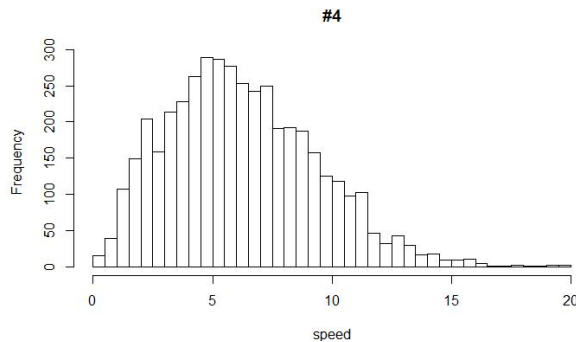
必要性？

如何做？



Murthy DNP, Xie M, Jiang R. *Weibull Models*. Wiley, 2004.

Weibull分布



Unfortunately, no results (not even approximations) have been known for sums of Weibull random variables. It is expected that this review could help to motivate some work for this case.

Nadarajah S. A review of results on sums of random variables. *Acta Applicandae Mathematicae*, 2008, 103: 131-140

风机选择

- 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
- 现风机生产企业还提供了部分新型号风机，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
 - 6处地点风速存在差异

风电场典型风机报表

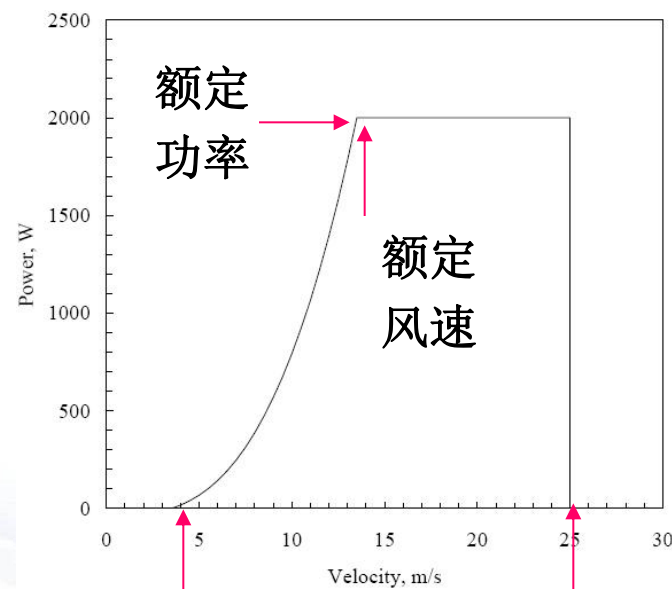
日期：2015年01月01日

时间		2:00	4:00	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	24:00
4#	风速 (m/s)	7.1	4.7	6.9	7.9	4.2	1.2	2.3	2.5	4.0	4.2	6.0	5.2
16#	风速 (m/s)	5.4	5.7	6.7	4.5	2.0	0.4	1.3	2.7	4.4	3.5	4.5	4.0
24#	风速 (m/s)	4.5	4.7	5.0	5.1	2.1	1.7	3.0	3.7	4.7	4.0	4.1	4.3
33#	风速 (m/s)	1.4	1.7	2.4	3.6	5.3	2.7	2.2	3.5	6.0	5.3	5.3	5.2
49#	风速 (m/s)	6.3	6.1	5.9	5.4	5.5	1.6	2.0	2.1	5.6	4.9	5.0	5.3
57#	风速 (m/s)	5.6	4.7	5.7	5.0	3.4	2.1	1.7	2.1	3.5	4.9	4.8	5.2

功率曲线

- **功率曲线 (power curve)**：反映风机功率随风速变化规律的曲线
 - 切入风速 (cut-in speed)
 - 切出风速 (cut-out speed)
 - 额定风速 (rated speed)
 - 额定功率 (rated power)

$$P(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ p(v) & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v > v_{co} \end{cases}$$



实际功率曲线

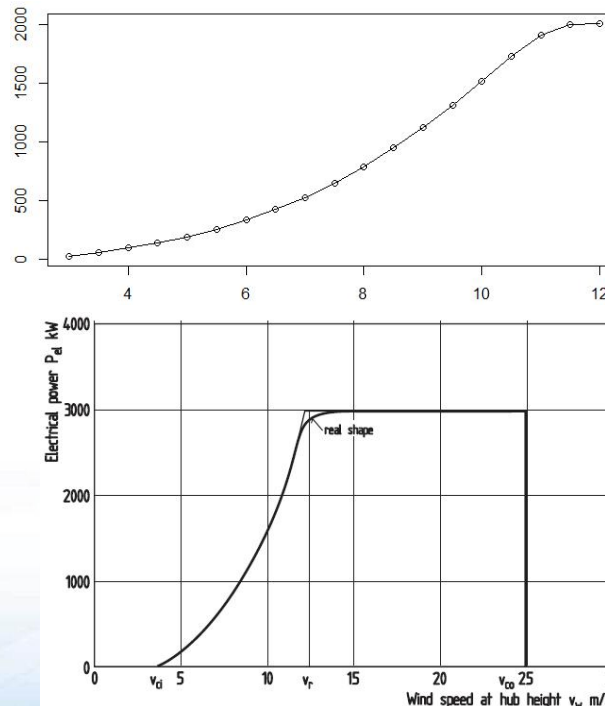
$$p(v) = C_1 + C_2 v + C_3 v^2$$

$$p(v) = P_r \frac{(v - v_{ci})^\beta}{(v_r - v_{ci})^\beta}$$

$$p(v) = P_r \frac{v^\beta - v_{ci}^\beta}{v_r^\beta - v_{ci}^\beta}$$

$$p(v) = P_r \frac{v^3}{v_r^3}$$

Due to the wind turbulence and characteristics of the blade pitch control, the power curve shows a more or less marked “rounding” as it nears the rated power



Review of power curve modelling for wind turbines

C. Carrillo*, A.F. Obando Montaño, J. Cidrás, E. Díaz-Dorado

Department of Electrical Engineering, IIS, University of Vigo, 36310 Vigo, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 14 February 2012
Received in revised form
9 January 2013
Accepted 14 January 2013
Available online 2 February 2013

Keywords:
Wind energy
Variable speed wind turbine generator
Power curve
Curve fitting

ABSTRACT

Currently variable speed wind turbine generators (VSWTs) are the type of wind turbines most widely installed. The wind energy studies, they are usually modelled by means the approximation of the manufacturer power curve using a generic equation. In literature, several expressions to do this approximation can be found. Nevertheless, there is not much information about which is the most appropriate to represent the energy produced by a VSWT. For this reason, in this paper, it is carried out a review of the equations commonly used to represent the power curves of VSWTs: polynomial power curve, exponential power curve, cubic power curve and approximate cubic power curve. They have been compared to manufacturer power curves by using the coefficients of determination, as fitness indicators, and by using the estimation of energy production. Data gathered from nearly 200 commercial VSWTs, ranging from 225 to 7500 kW, has been used for this analysis. Results of the analysis presented in the paper show that exponential and cubic approximations give the highest R^2 value and the lower error in energy estimation. With the approximate cubic power curve quite high values of R^2 and low errors in energy estimation are observed, which makes this kind of approximation very interesting due to its simplicity. Finally, the polynomial power curve shows the worst results mainly due to its sensitivity to the data given by the manufacturer.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Contents

1. Introduction	572
2. Energy evaluation and power curve	573
3. Power curve characterisation	574
3.1. Polynomial power curve	574
3.2. Exponential power curve	574
3.3. Cubic power curve	574
3.4. Approximate cubic power curve	574
4. Wind turbine characterisation	575
5. Power curve modelling	575
5.1. Power curve fitting	575
5.2. Coefficients of fit	575
5.2.1. Coefficient of determination R^2	575
5.2.2. Energy production	575
6. Results	577
7. Conclusions	577
Acknowledgement	580
Appendix A. The effect of rated wind speed value in polynomial approximation	580
Appendix B. Wind turbine database	580
References	580

Abbreviations: VSWT, wind turbine generator; VSWT, variable speed wind turbine;
* Corresponding author. Tel.: +34 986 81 51 02.
E-mail address: carrillo@univigo.es (C. Carrillo).
URL: <http://www.univigo.es/~carri>.
URL: cidras@univigo.es (A.F. Obando Montaño), jcidras@univigo.es (J. Cidrás),
ediaz@univigo.es (E. Díaz-Dorado).

1366-8452/\$ – see front matter © 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.012>

1. Introduction

The power curve of a WTC is obtained by the manufacturers from field measurements of wind speed and power, apart from environmental values (temperature, pressure and relative

Carrillo C, Montaño AFO, Cidrás J, Diaz-Dorado E. Review of power curve modelling for wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 21: 572–581.

风机选择

- 评价标准
 - 容量系数 $\frac{E(P)}{P_r}$
 - 输出功率 $E(P)$
- 影响因素
 - 风速分布
 - 功率曲线
- 更多信息
 - 理论功率曲线
 - 经济影响

风机型号	I	II	III	IV	V
切入风速	3	3.5	3	3	3
额定风速	11	11.5	10.5	11	11.5
切出风速	25	25	25	25	25
额定功率	2000	1500	1500	1500	1500

风频

定量为主

合理假设

维护安排

- 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
- 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
- 制定一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

问题分析

- 任务：风机维护时间安排方案、维护人员排班方案
- 对象

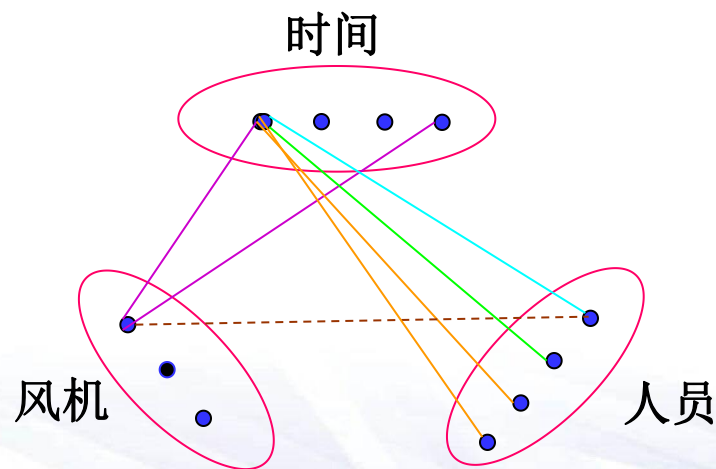
- 风机：两次维护
- 人员工作模式：维护、值班、休息
- 时间

- 限制

- 同一风机两次维护时间间隔限制
- 每天均需有人员值班
- 值班人员连续工作时间限制

- 目标

- 经济性：因维护而停机所造成的损失最小
- 均衡性：维护人员的工作量尽可能相等（维护、值班分别尽可能相等）



难点

- 三组对象的指派问题
 - 指派 v.s. 三维指派
- 双目标的处理
 - 将均衡性转化为约束条件
- 非本质难点
 - 两种工作模式
 - 一台风机维护持续两天

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\
 & s.t. \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n \\
 & \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n \\
 & \quad x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1, \quad i, j = 1, \dots, n
 \end{aligned}$$

总工作量 $124 \times 2 \times 2 + 365 = 861$

总工作时间 $365 \times \frac{6}{7} \times 4 \approx 1248$

整数规划

• 决策变量

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{维护人员 } k \text{ 在 } j \text{ 日开始对风机 } i \text{ 进行第一次维护,} \\ 0 & \text{其他,} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{维护人员 } k \text{ 在 } j \text{ 日开始对风机 } i \text{ 进行第二次维护,} \\ 0 & \text{其他,} \end{cases}$$

$$z_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{维护人员 } k \text{ 在 } j \text{ 日在风电场值班,} \\ 0 & \text{其他,} \end{cases}$$

• 目标函数

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^l (a_{ij} + a_{i,j+1}) x_{ijk} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^l (a_{ij} + a_{i,j+1}) y_{ijk}$$

风机 i 在 j 日的发电量



整数规划

• 约束条件（部分）

- 风电场每天有一组维护人员值班

$$\sum_{k=1}^l z_{jk} = 1, j = 1, \dots, n$$

- 每组维护人员值班天数尽可能相等

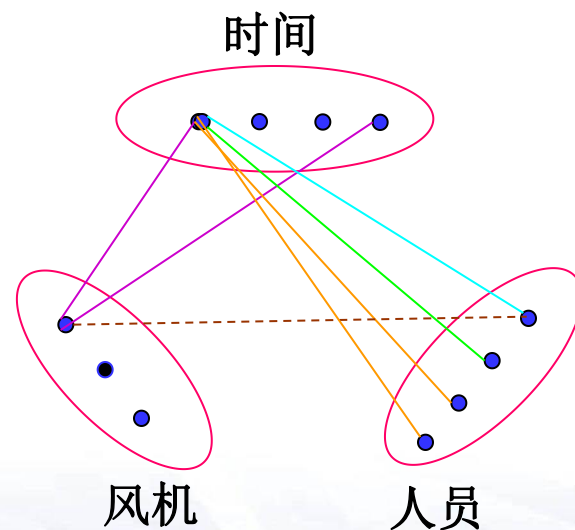
$$\left| \sum_{j=1}^n z_{jk} - \frac{n}{l} \right| \leq \varepsilon_1, k = 1, \dots, l$$

• 缺点

- 变量数过多，求解困难

- $m = 80$ 时，200000个变量，3000个约束

参数



维护人员和风机之间
不存在特异性限制

整数规划 II

- 决策变量

$$x'_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{风机 } i \text{ 在 } j \text{ 日开始第一次维护,} \\ 0 & \text{其他,} \end{cases} \quad u_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{维护人员 } k \text{ 在 } j \text{ 日开始维修某台风机} \\ 0 & \text{其他,} \end{cases}$$
$$y'_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{风机 } i \text{ 在 } j \text{ 日开始第二次维护,} \\ 0 & \text{其他,} \end{cases} \quad z_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{维护人员 } k \text{ 在 } j \text{ 日在风电场值班,} \\ 0 & \text{其他,} \end{cases}$$

- 决策变量之间的联系

$$\sum_{i=1}^m x'_{ij} + \sum_{i=1}^m y'_{ij} = \sum_{k=1}^l u_{kj}, j = 1, \dots, n$$

典型错误

- 未完全了解问题的要求和约束，盲目套用经典指派问题模型
 - 定义了两组决策变量，但未建立两者之间的联系
 - 未区分值班和维护两种工作状态
 - 用决策变量取值0,1,2分别表示休息、维护、值班
- 未恰当处理双目标优化问题
 - 将衡量经济性和均衡性的指标简单相加
 - 均衡性指标定义为各组工作量与平均工作量差的平方和
 - 完全未考虑经济性

典型问题

- 将附加条件的式子写入规划

$$\begin{cases} x_{ij} = 1 \\ x_{ij'} = 1 \\ 95 < j' - j < 270 \end{cases}$$

$$x_j = 1 \Leftrightarrow j = \sum_{i=1}^n i \cdot x_i$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i = 1, x_i = 0, 1 \right)$$

- 形式问题

- 规划前未给出决策变量的定义
- 规划后未解释约束条件的含义
- 同一求和指标在不同约束中表示不同的含义
- 同一对象用不同求和指标指代

周期性安排

- 集中维护、周期安排、任务均等

	1	2	3	4	5	6	7
A	●	●	●	●	X	X	▲
B	▲	▲	●	●	●	●	X
C	●	●	▲	▲	●	●	X
D	●	●	●	●	▲	▲	X

可行性与最优性

- 风速无法准确预测，但存在某种季节性趋势
- 将风机维护集中在两个风速较小或需求较少，间隔符合要求的时段进行
- 若要求集中维护持续时间尽可能短，上述方案具有较好的性质
 - 利用整数规划可求出给定机器台数时所需要持续的最短时间
 - 可估计任意机器台数时所需要持续时间的下界，并与方案需要持续的时间比较

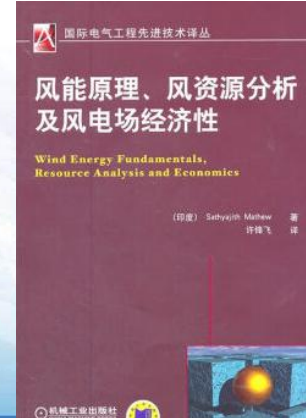
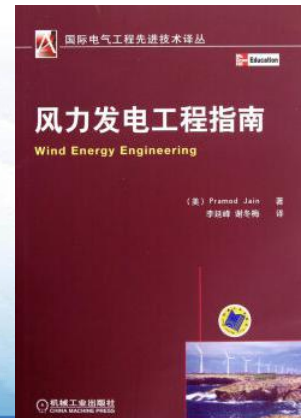
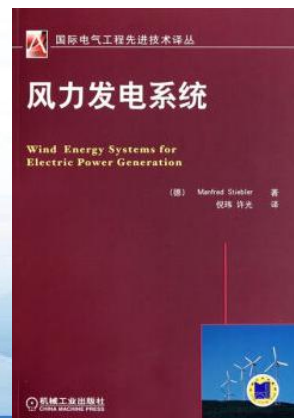
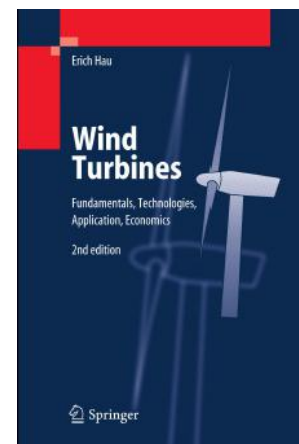
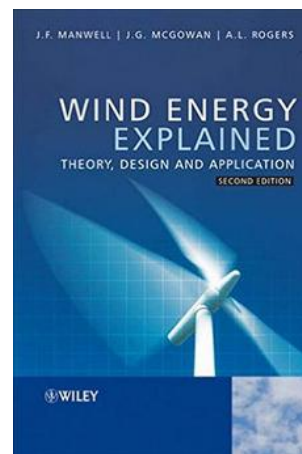
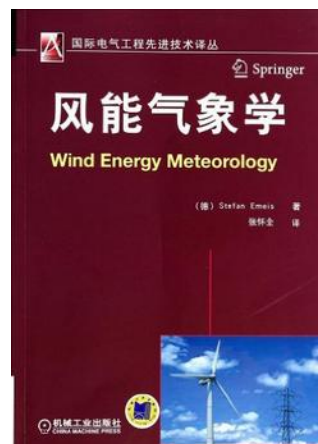
$$m = 17$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A	●	●	●	●	X	X	▲	●	●	●	●	X	X	▲	●	●
B	▲	▲	●	●	●	●	X	▲	▲	●	●	●	●	X	▲	▲
C	●	●	▲	▲	●	●	X	●	●	▲	▲	●	●	X	X	X
D	●	●	●	●	▲	▲	X	●	●	●	●	▲	▲	X	X	X

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	●	●	●	●	▲	X	●	●	●	●	X	▲	▲	▲
B	X	▲	●	●	●	●	▲	X	▲	▲	●	●	●	●
C	●	●	▲	▲	●	●	X	●	●	●	●	●	●	X
D	▲	●	●	●	●	▲	X	▲	●	●	▲	X	●	●

进一步问题

- 风速和风功率密度的短期、中期和长期预测
- 风电质量和稳定性
- 与风电相关的气象、机电、环境、经济领域的数学建模问题



谢 谢