

统计外推法在风力发电机载荷分析中的应用

王清波 赵伟 曾庆忠

摘要 本文基于东方电气2.5MW电励磁风力发电机组的仿真数据,用三参数威布尔分布对叶根弯矩和叶尖挠度的短期概率分布函数进行了拟合,外推了20年和50年一遇风力发电机叶根弯矩和叶尖挠度的极值。

关键词 外推法 极限载荷 三参数威布尔分布 概率分布函数

1 引言

风力发电机组的极限载荷通常是用机组运行期间发生的最大载荷乘以相应的安全系数得到,由于许多载荷计算只是在有限持续时间内仿真求得,这相对于风机20年的使用寿命是很短暂的时间,运行中实际的极限载荷很可能大于仿真中的极限载荷,因此,这种方法已经不能满足风电机组的设计要求,按照IEC61400-1:2005第三版的要求,为了确定适当的极限载荷,需要运用概率的方法来对仿真结果进行统计外推,从而得到载荷的极限值。

2 统计外推法

统计外推法是根据一组观测值,计算观测范围以外同一对象近似值的方法^[1],其基本思路是把时间序列作为随机变量序列的一个样本,应用概率统计的方法,作出在统计意义上客观的预测。对于一个给定的风况,按平稳随机过程的处理方法模拟短期的载荷响应。再进一步假设,最大载荷值出现在非常离散的时间点上,从而在统计学上是相互独立的。在观测时间 T 内最大载荷 F_{ext} 大于给定载荷的概率可以由下式表示:

$$\text{Pr ob}(F_{ext} \geq F|V, T) = 1 - (F_{max}(F|V))^{E(n|V, T)} \quad (1)$$

式中 $F_{max}(F|V)$ ——局部最大载荷的短期概率分布函数

$E(n|V, T)$ ——观测时间内局部最大期望数

V ——平均风速

T ——观测时间

上述统计量由平均风速 V 和观测时间 T 来确定,考虑所有运行风况,长期的超越概率为整个运行风速内的积分,即:

$$\begin{aligned} \text{Pr ob}(F_{ext} \geq F|V, T) &= P_e(F, T) \\ &= \int_{V_{in}}^{V_{out}} \text{Pr ob}(F_{ext} \geq F|V, T) p(V) dV \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $p(V)$ 为轮毂高度处风速的概率密度函数,

函数 $\text{Pr ob}(F_{ext} \geq F|V, T)$ 由响应仿真确定,极值可以通过下列方法得到:

(1)选择提取极值的原则是保证这些极值是相互独立的。

(2)极值的数量必须足以确定其分布类型,并提供可靠的尾部分布估计。

(3)湍流造成的最大载荷时的风速必须包含在仿真中。

可接受的超越概率是特征载荷相关的重现周期 T_r 与时间间隔 T 之比的倒数, F_g 为特征载荷,概率表达式如下:

$$P_e(F_g, T) = T / T_r \quad (3)$$

载荷外推分析过程如图1,轮毂高度处10min各平均风速下载荷仿真数量分布如图2。假设10min平均风速的长期分布可以用二参数威布尔分布来表示^[2],各平均风速为风速区间(bin)的中间风速,其bin宽取2,如平均风速为4m/s时,风速区间为3m/s ~ 5m/s。

来稿时间 2012—04

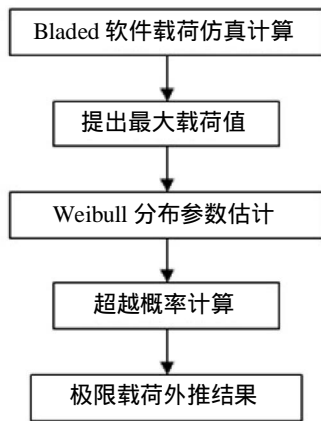


图1 极限载荷统计外推流程图

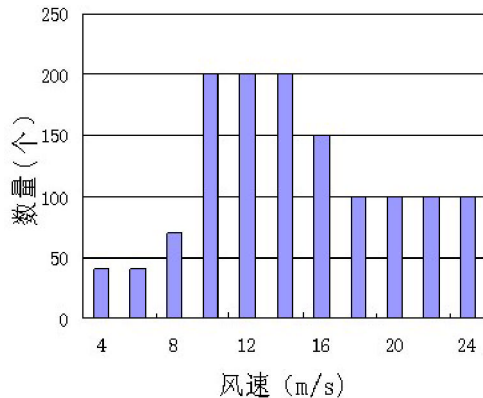


图2 轮毂高度处 10min 各平均风速下载荷仿真数量分布

3 叶根弯矩以及叶尖挠度外推

IEC61400-1:2005 第三版要求对 DLC1.1 载荷工况极限载荷进行统计外推。本节基于东方电机有限公司自主设计的 2.5MW 电励磁风力发电机的仿真数据,对叶根面内弯矩 M_x 、面外弯矩 M_y 以及叶尖挠度进行了统计外推,其叶片坐标系参看图 3。假设最大载荷概率分布符合威布尔三参数分布^[3] :

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-u}{s}\right)^k\right) \quad (4)$$

式中 u ——位置参数

s ——为尺度参数

k ——形状参数

威布尔分布参数估计方法很多,国内外一直在进行研究,目前有很多参数估计方法,但大多只能用于形状参数和尺度参数的估计。在众多的估计方法中,能用于威布尔分布三参数估计的却很

少,本文使用相关系数优化法,在 excel 中实现了威布尔三个参数的估计。表 1 给出了叶根弯矩和叶尖挠度最大值概率分布函数所服从的威布尔分布的三个参数。

DLC1.1 的仿真周期为 10 分钟,由式(3)可知,对于 20 年一遇极值的超越概率为:

$$P_e(F_k, T) = 10 / (20 \times 365.25 \times 24 \times 60) = 1.9 \times 10^{-5} \quad (5)$$

对于 50 年一遇极值的超越概率为 3.8×10^{-7} ,表 2 给出了 20 年一遇和 50 年一遇的极值外推结果,按照规范要求,表中的极值都乘了相应的安全因子,其中叶根弯矩 M_x 、 M_y 的安全因子为 1.25,叶尖挠度的安全因子为 1.375。图 4、图 5 和图 6 分别叶根弯矩 M_x 、 M_y 和叶尖挠度的超越概率拟合曲线。

为了检验外推结果的合理性,对 DLC1.3 工况(极限湍流模型)进行了仿真,纵向标准偏差由式(6)确定:

$$\sigma_1 = c \cdot I_{ref} \cdot \left(0.072 \cdot \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3\right) \cdot \left(\frac{V_{hub}}{c} - 4\right) + 10\right) \quad (6)$$

如果叶根弯矩和叶尖挠度的仿真结果小于外推结果,出于风力发电机的安全性考虑,可以改变式(6)中的值,从而改变载荷工况的湍流度,直到 DLC1.3 工况的仿真结果大于外推结果。表 3 和表 4 给出了 $c = 2.3$ 时 DLC1.3 工况的仿真结果。表 5 给出了外推结果与 DLC1.3 工况极值比较,结果令人满意,能够保证风力发电机组的安全运行。

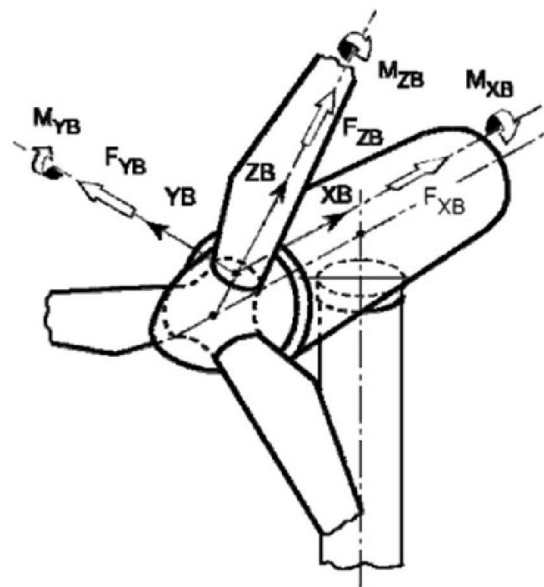


图3 Bladed 软件叶片坐标系

表 1 拟合的 Weibull 参数

外推变量	u	s	k
叶根 M_x	1150	2575	2.6
叶根 M_y	1660	3500	4.4
叶尖挠度	6.8	7	8.5

表 2 叶根弯矩和叶尖挠度外推结果(施加了安全因子)

外推变量	外推 20 年一遇的极值	外推 50 年一遇的极值
叶根 M_x (kNm)	4384.75	4587.4
叶根 M_y (kNm)	9373.75	9646
叶尖挠度 (m)	11.58	11.96

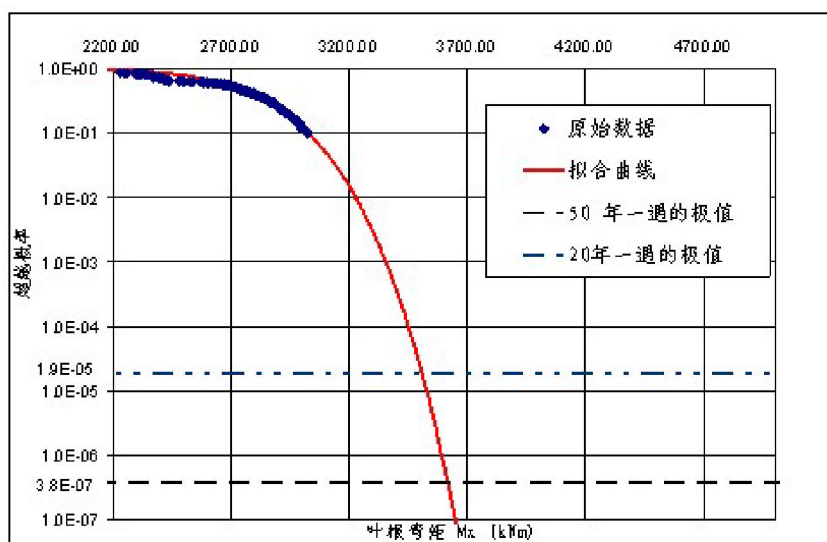


图 4 叶根弯矩 M_x 拟合曲线

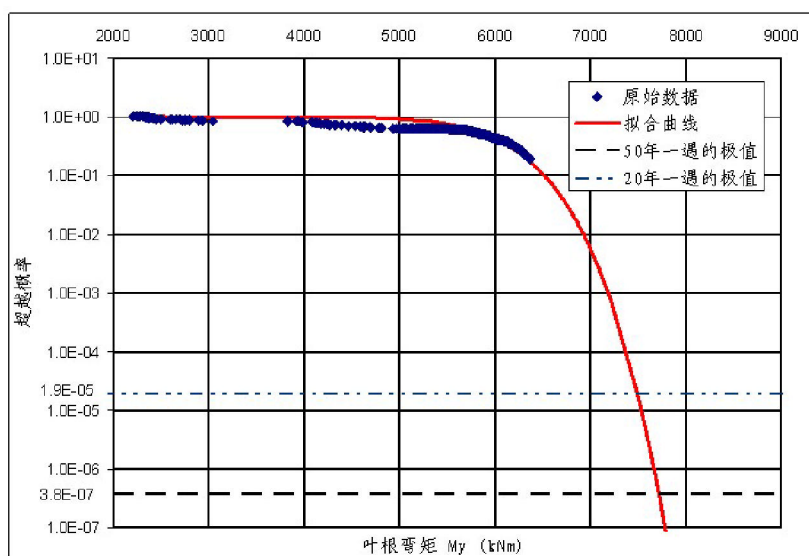


图 5 叶根弯矩 M_y 拟合曲线

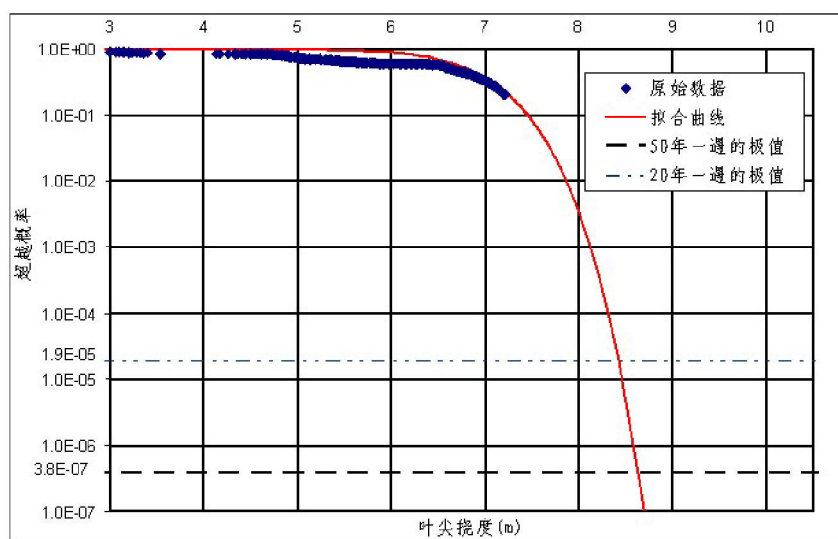


图 6 叶尖挠度外推拟合曲线

表 3 LC1.3 工况叶根弯矩极限值(施加了安全因子)

叶根弯矩	极值	载荷工况	叶根弯矩 M_x (kNm)	叶根弯矩 M_y (kNm)	安全因子
M_x	max.	dlc1.3k-6	4106.6	1075.7	1.35
	min.	dlc1.3k-2	- 4874.2	1124.0	1.35
M_y	max.	dlc1.3f-2	2172.1	9666.0	1.35
	min.	dlc1.3k-3	154.7	-3556.6	1.35

表 4 DLC1.3 工况 x 方向叶尖变形(挠度)极值(施加了安全因子)

叶尖变形	极值	载荷工况	叶尖 x 方向变形(m)	安全因子
x 方向变形	max	dlc1.3e-4	12.4	1.49
	min	dlc1.3k-6	- 5.32	1.49

表 5 外推结果与 DLC1.3 工况的极限值比较

外推变量	外推 20 年一遇的极值	外推 50 年一遇的极值	DLC1.3 极限值($c=2.3$)
叶根 M_x (kNm)	4384.75	4587.4	4874.2
叶根 M_y (kNm)	9373.75	9646	9666.0
叶尖挠度 (m)	11.58	11.96	12.4

3 结 语

本文按照 IEC61400-1:2005 第三版的要求 基于 2.5MW 电励磁风力发电机组 DLC1.1 工况的仿真数据 ,对风力发电机组极值进行了统计外推 ,求得了 20 年一遇和 50 年一遇叶根弯矩和叶尖挠度

的外推结果 ,对 DLC1.3 工况的极限值和外推结果进行了比较 ,证实了外推结果的合理性 ,从而也保证了风力发电机组的安全运行。

载荷统计外推法在一定程度上能保证风力发电机组的安全运行 ,但也存在着不足 ,还需要不断改正和完善 :

(1) 风力发电机极限载荷的短期概率分布函数已经找到了服从的分布函数,而极限载荷的长期概率分布函数却不得而知,因此可以对极限载荷的长期概率分布函数进行研究。

(2) 分布函数直接影响外推结果,因此对分布函数参数的求解变得很重要,怎么高效、简洁、正确的计算分布函数的各参数,也是值得深入研究的课题。

(3) 外推结果与实测数据的比较。

参考文献

- 1 邓建中.外推法及其应用[M].上海:上海科学技术出版社,1984
- 2 武鑫等译.风能技术[M].北京:科学出版社,2007
- 3 严晓东等.三参数威布尔分布参数估计方法比较[J].宁波大学学报,2005,18(3):301-305

(上接第32页)

<p>ducers. Smart Materials and Structures, 2004,13:393-403</p> <p>13 Naidu ASK, Soh CK. Identifying damage location with admittance signatures of smart piezo-transducers. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004,15: 627-42</p> <p>14 Tseng KK, Wang LS. Impedance-based method for non-destructive damage identification. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004,15(8):627-642</p>	<p>15 Bhalla S, Soh CK. Structural health monitoring by piezo-impedance transducer. Journal of Aerospace Engineering, 2004,17(4):154-165</p> <p>16 Yan W, Lim CW, Cai JB, Chen WQ. An electromechanical impedance approach for quantitative damage detection in Timoshenko beams with piezoelectric patches. Smart Materials and Structures, 2007,16:86-93</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

· 信息 ·

中国最大太阳能电站获批

2012 年 8 月 28 日,国家能源局批准保利协鑫能源控股有限公司宣布在山西大同地区建设一个总量为 310MW 地面光伏电站和总量为 30MW 屋顶光伏电站项目。此项目预计在建成之后将会成为中国最大太阳能电站,也是世界最大的单一太阳能电站之一。

山西大同地处华北电力京、津、唐负荷中心附近,光伏电站建成后,有着电力输送成本低、盐碱地等未利用土地资源丰富、发展清洁能源软环境佳等方面优势。有消息称国家或将光伏“十二五”计划再扩大一倍,到 2015 年或将达到 40GW。此前对于光伏“十二五”规划最初是 10GW,后来扩大为 21GW。山西大同光伏电站项目最终得到批复,也在一定程度上说明在接下来几个月或将继续有光伏电站项目被批准。