

GH Bladed 理论手册

1. 绪论

目的

GH Bladed 是一个关于风力发电机性能和负载计算的集成软件包。应用于以下方面：

- 风力发电机初步设计
 - 详细设计及部件规范
 - 风力发电机的验证
- 本软件有着尖端的用户绘图界面，允许用户直接完成下列任务：
- 所有风机参数，风速输入和载荷的规范。
 - 稳态特性的快速计算，包括：
 - ◇ 空气动力学数据
 - ◇ 性能系数
 - ◇ 功率曲线
 - ◇ 稳定运行载荷
 - ◇ 稳定停机载荷
 - 完成以下动态仿真：
 - ◇ 正常运行
 - ◇ 启动
 - ◇ 正常与紧急停车
 - ◇ 空转
 - ◇ 停车
 - ◇ 动态功率曲线
 - 所得结果的后期处理：
 - ◇ 基本统计
 - ◇ 周期分量分析
 - ◇ 概率密度，峰值和平面交叉分析
 - ◇ 谱分析
 - ◇ 交叉谱，一致性和传递功能分析
 - ◇ 雨流周期计算和疲劳分析
 - ◇ 变量的集合
 - ◇ 产生的年功率
 - ◇ 最终载荷（恶劣状况的可鉴别性）
 - ◇ 严重闪变
 - 陈述：结果可以以图解形式描述或整理成文字报告。

理论背景

GH 计算风机性能和载荷的方法已经研发了好多年。这种主要的研发目标已经取得了用于风机设计和验证的可靠工具。

本软件中的模型和理论方法已经通过许多不同型号和配置的风机的监控数据被加以验证，包括：

- WEG MS-1, UK, 1991
- Howden HWP300andHWP330,USA,1993
- WCN 25m HAT,Netherland,1993

- Newinco 500Kw, Netherland,1993
- Nordex 26m,Denmark,1993
- Nibe A, Denmark,1993
- Holec WPS30,Netherlands,1993
- Riva Calzoni M30,Italy,1993
- Nordtank 300KW, Denmark,1994
- WindMaster 750kw, Netherlands,1994
- Tjaereborg 2MW, Denmark,1994
- Zond Z-40,USA,1994
- Nordtank 500KW,UK,1995
- Vestas V27,Greece,1995
- Danwin 200kw,Sweden,1995
- Carter 300kw,UK,1995
- NedWind 50,1MW, Netherlands,1996
- DESA,300KW,Spain 1997
- NTK 600,UK,1998
- West Medit,Italy,1998
- Nordex 1.3MW,Germany,1999
- The Wind Turbine Company 350kw,USA,2000
- Windtec 1.3MW,Austria,2000
- WEG MS-4400KW,UK,2000
- EHN 1.3MW,Spain,2001
- Vestas 2MW,UK,2001
- Lagerwey 750 Netherlangds,2001
- Vergnet 200,France 2001

这些文献描述了 GH Bladed 软件中不同模型和具体的数字方法的理论背景。
支持

GH Bladed 软件提供一年的维护和支持协议，本协议可持续更新。这项支持包括使用电话的热线帮助服务， 传真或电子邮件：

电话： +44 (0) 1179729900

传真： +44 (0) 1179729901

E-mail: bladed@bristol.garradhassan.co.uk

1.4 文件

除了本理论手册， 还有 GH Bladed 用户手册用以介绍编码的使用。

1.5 感谢

发展于 JOULE II 项目下的 GH Bladed 得到了欧洲协会的代理的帮助， 其项目编号为 JOU2-CT92-0198。

2. 空气动力学

由本公司提供的风轮空气动力学的建模是以对组合叶素确定一个好的处理和动力理论为基础的。动力理论的两个主要的扩展是用来选择编码以处理空气动力学的不稳定性。这两个扩展中的第一个允许尾迹的动力学的使用，第二个通过使用一个失速滞后模型给出动力学失速的陈述。

下面给出由 Bladed 提供的风轮的空气动力学的运用的不同方面的理论背景。

2.1 组合叶素和动量理论

由 Bladed 提供的空气动力学模型的核心是组合叶素和动量理论。风轮空气动力学的运用的特点描述如下。

2.1.1 起动圆盘模型

为了帮助理解组合叶素和动量理论，开始时将风轮看作是一个起动圆盘是非常有用的。尽管这一模型非常简单，它还是为风轮的空气动力学提供了颇有价值的视野。

风力发电机是通过在穿过风轮横扫面的静压产生一个级变来从风中吸取能量的。当气流到达风轮时它逐渐降速，导致静压得降低，通过风轮圆盘的静压的减少导致了后面的气流形成了一个次级气压。当气流为下风向时，气压就会爬回到导致风速进一步降低的气流值。因此风的动能就会减少，而这些动能是可以由发电机转化为有用能的。

在以上描述的起动圆盘模型的过程中，在风轮圆盘的风速 U_d 与上风向的风速 U_0 有下面的联系：

$$U_d = (1 - a)U_0$$

在风轮圆盘处减小的风速明显的由 a 的大小决定， a 是轴向流动感应因数或 流入因数。通过应用 Bernoulli 等式并假定流动是均衡的和不可压缩的，由风轮所产生的功率 P 可由下式给出：

$$P = 2\rho AU_0^3 a(1 - a)^2$$

此处 ρ 是空气密度， A 是风轮圆盘的面积。

作用在风轮圆盘上的推力 T 可近似有下式给出：

$$T = 2\rho AU_0^2 a(1 - a)$$

无量纲的功率和推力因数， C_p 和 C_T 分别表示如下：

$$C_p = P / \left(\frac{1}{2} \rho AU_0^3 \right) = 4a(1 - a)^2$$

$$C_T = T / \left(\frac{1}{2} \rho AU_0^2 \right) = 4a(1 - a)$$

功率因数 C_p 的最大值是 $16/27$ ，此时 a 等于 $1/3$ ，这是由 Betz 限制得到的。

推力因数 C_T 的最大值是 1 ，此时 a 是 $1/2$ 。

2.1.2 尾流旋转

上面所用的起动圆盘的概念允许从风中吸取能量的估计而不考虑由风轮所吸收的转化成风轮的转矩 Q 和角速度 Ω 的那部分能量。风轮转矩必须产生一个与对应风速角度动量变化率相等，并因此降低气流切线方向的速率。根据切线方向气流感应因数 a' 可以明确确定切线方向的速率的变化。风轮圆盘上风向的切线速率是 0 ，在半径为 r 的风轮的圆盘上的切线速率是 $\Omega r a'$ ，远离下风向的切线速率是 $2\Omega r a'$ 。因为切线速率反作用于转矩上，所以它与叶片的运动是相对的。

风轮所产生的转矩与角度变化成比例可以表示如下：

$$Q = \pi \rho R^4 (1 - a) a' U_0 \Omega$$

2.1.3 叶素理论

组合叶素和动量理论是上述起动圆盘理论的拓展。风轮叶片被分成许多的叶素，前面描述的理论并不是将风轮圆盘作为一个整体来应用，而是应用在每一个叶素所扫略过的一系列圆环上。并且假定每一个圆环都是作为一个独立的起动圆盘以相同的方式起作用。在每一个径向位置上轴向和角度动量的变化率与每一个叶片元素所产生的推力和转矩相等。

半径为 r 处长度为 dr 的叶素所产生的推力 dT 为：

$$dT = \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) c dr$$

其中 W 是叶素的视在风速向量的模， ϕ 是入射角，指定了相对于叶片旋转平面的视在风速矢量的方向， c 是叶素的弦， C_L 和 C_D 分别是升力系数和阻力系数。

机翼的升力和阻力系数由下式确定：

$$C_L = L / (\frac{1}{2} \rho V^2 S)$$

$$C_D = D / (\frac{1}{2} \rho V^2 S)$$

其中 L 和 D 是升力和阻力， S 是机翼的俯视图面积， V 是相对于机翼的风速。

半径为 r 处长度为 dr 的叶素所产生的转矩 dQ 为：

$$dQ = \frac{1}{2} \rho W^2 r (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) c dr$$

为了解决适合特殊叶素径向位置的轴向与切线气流感应因数，叶素所产生的推力和转矩与通过叶素扫略的圆环的轴向和角度动量的变化率相等。应用轴向和角度动量的表达类似于上面 2.1.1 和 2.1.2 部分的起动圆盘，环形感应系数表述如下：

$$a = g_1 / (1 + g_1)$$

$$a' = g_2 / (1 - g_2)$$

其中

$$g_1 = \frac{Bc}{2\pi r} \frac{(C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)}{4F \sin^2 \phi} H$$

$$g_2 = \frac{Bc}{2\pi r} \frac{(C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)}{4F \sin \phi \cos \phi}$$

此处 B 是叶片的数量， F 是考虑到叶尖和轮毂损耗的因数，参考 2.1.4 部分。参数 H 定义如下：

当 $a \leq 0.3539$ 时， $H = 1.0$

$$\text{当 } a > 0.3539 \text{ 时， } H = \frac{4a(1-a)}{(0.6 + 0.61a + 0.79a^2)}$$

当轴向感应系数 a 大于 0.5 时，风轮过载并运行在“湍流尾流状态”。在此条件下 2.1.1 部分所展现的执行圆盘理论不再有效，推力系数的表达式：

$$C_T = 4a(1-a)$$

必须由经验表达式取代：

$$C_T = 0.6 + 0.61a + 0.79a^2$$

Bladed 叶素理论的实现是基于经验模型的 a 值大于 0.3539 而不是 0.5 的变换。这一策略导致了两种气流状态模型之间的平滑转换。

a 与 a' 所展现的等式只能给出迭代格式。其过程包括给出 a 和 a' 的初始估计值，计算作为 a 和 a' 函数的参数 g_1 和 g_2 ，然后用上面的等式来修正 a 和 a' 的值。一直持续这个过程直到 a 和 a' 达到要求的值。在 Bladed 中假设下面的情况下才会得到解：

$$a_k - a_{k-1} \leq tol$$

$$a'_k - a'_{k-1} \leq tol$$

其中 tol 是用户所允许的空气动力公差值。

2.1.4 叶尖与轮毂损耗模型

风机风轮的尾流在每一个风轮叶片之后形成一个漩涡。因此在风轮盘面上固定点的感应速率不是时间常数，而是在每一个叶片的通道之间波动，旋转片的桨距越大，叶片的数量越多，感应速率的变化量就越大。整体效果就是减少纯动量变化并因此减少纯发电功率。如果感应系数 a 定义为叶片通过风轮盘面的一个给定点时的瞬时值，在那一点的平均感应系数将是 aF_t ，此处 F_t 是一个低于整体的系数。

通过与在航空机翼的叶尖上相同的方式，尾流漩涡将叶片叶尖上的流通降低到 0。因此，在叶尖上系数 F_t 是 0。按照航空机翼的类推，这一降低是由来自叶尖痕迹的漩涡造成的， F_t 作为叶尖降低系数。

Prandtl[2.2]采用一种方法来处理这种螺旋桨理论。结果，远离尾流，螺旋涡流平面可以由实心盘面代替，调整相同的桨距为以尾流速度移到下风向的连续旋转片之间的正常的间距。

尾流之外的流速是自由气流值因此要比盘面上的快。在盘面的边缘，最快的自由气流其波形弯曲介于两者之间，故造成了盘面之间的平均轴向速率要比盘面本身的速率高，因此要模拟动量改变的降低。

系数 F_t 可以表示如下：

$$F_t = \frac{2}{\pi} \arccos \left[\exp \left(-\frac{\pi s}{d} \right) \right]$$

此处 s 是来自风轮叶片的叶尖处半径的距离 d 是两个连续螺旋片的距离。

同在叶尖处相似在叶片的根部也发生了类似的降低，气流一定降到 0，因此涡流被拖到尾部，可计算出独立的轮毂降低系数 F_h ，在叶片任何部位的有效高度降低系数为：

$$F = F_t F_h$$

结合的叶尖和轮毂降低系数被用在上面 2.1.3 部分提到的叶素理论的等式中。

2.2 尾流模型

2.2.1 平衡尾流

对于风机性能的时域动态模拟的叶素理论的应用是假设尾流瞬时起作用于叶片载荷的变化。这种处理被认为是一种平衡尾流模型，涉及在每一个风轮叶片的每一个元素和动态模拟的每一个时间步长的轴向和切线的感应系数的重新计算。基于这种处理沿每一个叶片的诱导速度可以以瞬时解的形式求得其在特殊气流条件和每一个叶片的每一个元素所承受的载荷下的解。

很明显，在叶素理论的说明中特殊的叶素轴向与切线方向感应速率随时间而变化且在由叶素扫略的环面里并非常数。

叶素理论的平衡尾流处理是此处所描述的三个处理中最要求计算的。

2.2.2 静态尾流

在静态尾流模型中，对于统一风场在平均轮毂高度处的模拟风条件下的风速其轴向与切线方向的诱导速度是通过使用叶素理论来计算的。根据平均，统一的气流条件计算的诱导速率被假定是固定的或者在时间上是静态的。沿叶片方向从一个叶素到另一个叶素的诱导速率是不同的但在由叶素扫略的环面里却是常数。因此，每一个叶片经历着相同的相同的诱导气流的径向分布。

注意到此处的静态对象是轴向和切线方向的诱导速率 aU_0 和 $a'r\Omega$ 而不是感应系数 a 和 a' 是非常重要的。

2.2.3 动态尾流

诚如以上所描述的，平衡尾流模型假设尾流和诱导速率流场在叶片载荷中同时发生变化。另一方面，静态尾流模型假设诱导流场在瞬时风条件和叶片载荷中其变化是完全独立的。实际上这些处理严格来说没有一种是正确的。叶片载荷的变化改变了风轮尾流拖拉而成的漩涡，这些改变的整体效果花费了有限的时间来改变诱导流场。与此方法相关的动态一般是被作为“动态注入”。

动态注入的研究始于 40 年前的直升机空气动力学的文章。简单来说，这一理论提供了一种描述风轮载荷所经历的诱导流场的动态相关性。Bladed 所用的动态注入模型是以在直升机领域已经得以真实确认的 Pitt 和 Peters 的论文为基础的，参考举例 Gaonker 等 [2.4]。

Pitt 和 Peters 模型的最初发展是对于一个启动盘，假设此启动盘涉及穿过盘面的入流的分布。在 Bladed 里，既然这个模型避免了任何关于穿过盘面的入流的分布的假设，因此它被用在叶素和启动轮等级中。

由半径 R_1 和 R_2 所确定的叶素需要以风速 U_0 ，基本推力， dT 来均匀轴向气流，表达式如下：

$$dT = 2U_0 am + U_0 m_A \dot{a}$$

其中 m 是流过环面的质量， m_A 是环面作用的外观质量， a 是轴向感应系数。

流过换面叶素的质量由下式给出：

$$m = \rho U_0 (1 - a) dA$$

其中 dA 环面的横截面积。

对于半径为 R 的圆盘，它所作用的外观质量基本上是通过势论，Tuckerman [2.5] 给出的：

$$m_A = \frac{8}{3} \rho R^3$$

因此与环面相关的推力系数表达如下：

$$C_T = 4a(1-a) + \frac{16}{3\pi U_0} \frac{(R_2^3 - R_1^3)}{(R_2^2 - R_1^2)} \dot{a}$$

因此微分等式可以用来代替叶素理论和动量理论等式计算轴向入流。等式在每一个步长上积分已给出叶片上叶素的入流值所确定的时间。切线方向的入流用常用的方式就能得到，因此它依赖于轴向值所确定的时间。已经证明等式将一个时间滞后引入由径向位置所确定的入流的计算中。

可能对于每一个在这种方式下计算的叶素来说时间滞后值将低估动态入流的某些效果，比如单独处理一个叶素而不考虑尾流的三维性或者叶尖涡流的可能的支配效果。然而这种处理是与叶素理论相一致的，它提供了一个简单、计算便宜并可靠的风轮尾流和诱导速度流域的模拟动态的方法。

2.3 静态失速

关于旋转风力发电机叶片的空气动力学失速的一般理解的陈述及一定的延伸依然比较少。考虑到相对于工业来说失速的重要性这便成为一种非常特别的情形。

由于三维的入射流场，风轮叶片的舱内部分的失速延迟已经通过模型和实体的测量得以全面验证。许多半经验模型已经发展成校正二维机翼数据来计算失速延迟。尽管这种模型被用在失速调节风轮的设计分析上，但是现在，应用于大部分的机翼部分和风轮结构的综合有效性比较薄弱。因此，Bladed 并没有具体的机翼数据修正模型来处理失速延迟，但是用户能够应用任何他认为较先前输入编码合适的机翼数据的修正。

2.4 动态失速

失速及其结果对于大多数动力学设施的设计和运行是非常重要的。大多数传统航空力学的应用都是通过很好的控制在所用机翼的静态失速角之下来避免失速的。然而，直升机与失速调节的风轮机运行的状态，此状态为至少他们的风轮叶片有一部分是在失速状态。确实失速调节风力发电机依靠机翼的失速行为来限制风轮在高速时的最大功率输出。

一定的不稳定性总是伴随着高度冲击时机翼上面的湍流。经历不稳定状态的提升表面的失速比静态失速更复杂。

在倾角快速增长的振荡机翼上，失速的起始时间可以延迟到倾角大大超过静态失速角。然而，当动态失速发生时，通常要比静态失速更加严重。空气动力与力矩相对于冲击的瞬态角呈现出很大的滞后，尤其是当振荡为接近于静态失速角的平均角。对于直接，唯一的流场调整的准稳定状态，倾角的每一次变化都呈现出非常重要的差异。

许多预测机翼部分动态失速的方法已经得以发展，主要用于直升机行业。

采用的包括机翼的不稳定性在内的方法取自 Beddoes。发展 Beddoes 模型用于直升机风轮性能计算，并且对于用于直升机风轮的机翼部分的动态风道测试已经阐述了很多年。已经被 Harris 和 Galbraith 等公司成功用于垂直轴风力发电机的行为预测。

Bladed 中所用的模型是 Beddoes 模型的发展，已经被几种风力发电机的失速调节的测量得以验证。此模型可利用以下在[2.8]中描述的模型元素来计算非稳定升力系数。

- 附加气流的模拟的阶跃响应功能
- 单独叶片后缘和涡流升力的模拟的时间滞后基尔霍夫公式

已经发现单独机翼前缘的模型应用在水平轴风力发电机上并不合适，水平轴风力发电机的机翼特性由逐次叶片后缘失速支配。

在单独叶片后缘的发展的时间延迟是一个 Bladed 执行模型的用户定义参数。时间滞后

包括对于变化冲击角的压力分布和界面层的响应的延迟。时间延迟的大小直接与升力系数的滞后等级有关。

应用伴随升力系数的计算所确定的有效的不稳定冲击角的半稳定输入数据来计算阻力矩和俯仰力矩。

3 结构动力学

工业发展早期，风力发电机的设计采用的是受结构动力学影响的半静态空气动力学计算，这种影响或者被彻底忽略或者通过估计动态放大因数的使用而诱导出。从1970年以后科研人员开始考虑动态分析的更可靠的方法，因此得到两个基本方法：有限元表示和模态分析。

标准的惯例应用，处理结构动力学问题的商业有限元分析编码在风机中还存在一定的问題。这是因为结构的一部分的总的运动，风轮，至于另一部份则为塔架。标准有限元软件包只用于考虑对于一个平均的不可取代的位置发生运动的结构，鉴于此对已经发展起来的风机的有限元模型进行了特别构造来处理这个问题。

作为设计计算基础最普遍的应用的风机动态模拟形式是包括一个模态表示。这种方法借鉴于直升机行业，其最大优势就是它提供了一个相对少自由度的风机的动力学的可靠表示。用于表示特殊风机的动力学的模态自由度的数量及类型取自设备本身的外形及结构。

现在，在很大程度上因为拓展的计算机程序要求结合有限元模型的应用，在设计分析风机动力学模拟的文章中艺术情形是基于自由模特模型的有限度数的使用。Bladed 中风机结构动力学的表示是以一个模态模型为基础的。

3.1 模态分析

因为相对于塔架支撑结构的风机的叶片的旋转，描述其动力学的运动方程含有周期系数。周期性意味着作为一个完整的结构实体一台运行的风机的模态特性的计算不可能使用商业有限元编码提供的标准特征分析。

解决此问题的一种方法是用弗洛盖分析来确定周期系统的模态特性。然而，由这种计算所获得的模式非常复杂且不能直接用于强制响应分析。

取而代之的方法是以“元件模式和成”为基础的。此处风机旋转与非旋转部件的模态特性独立计算。在强制响应分析中元件模式由风机运动等式的适当的公式表达连接起来。这一方法已经被 Bladed 所采用。

3.1.1 风轮模式

风机风轮的锥形与螺旋形的叶片的振动是一个很复杂的现象。表示这一振动的经典方法是依靠正交，结构的非耦合“标准”振荡模。每一个模式都是根据以下参数定义的：

- 模型频率， ω_i
- 模型的阻尼系数， ξ_i
- 模态振型， $\phi_i(r)$

其中写在下方的 i 表示第 i 个模态的特性。

模态频率和风轮的模态振型是根据以下信息计算出来的：

沿叶片的质量分布。

质量分布根据任何离散的、集中的块的数量和位置作为每一个径向位置上的局部质量密度定义的。

沿叶片的弯曲硬度。

弯曲硬度是在每一个径向位置的局部？副翼方式和边缘方式？的方向上被定义的。

沿叶片的扭转角分布。

模态振型是在平面上和平面外的方向上计算的，因此在每一个径向位置的 flapwise and edgewise 硬度都是通过局部扭转角解决的。

叶片桨距及设定桨距角。

模态振型是在平面上和平面外的方向上计算的，因此在每一个径向位置的 flapwise and edgewise 硬度都是通过叶片桨距及设定桨距角解决的。Bladed 用户可以选择一系列用于执行模型分析的不同桨距角。在以后的动力学仿真中，适合瞬时叶片桨距角的模型频率由模型分析结果的线性插值得到。

双叶片风轮轮毂摇摆合页的存在及其他方式。

对于双叶片风轮轮毂可能是刚性的或者摇摆的。摇摆合页的存在将引入一个包括摇摆合页的风轮的平面外旋转的不对陈风轮模型。

单叶片风轮明合页的存在及其他方式。

对于单叶片风轮轮毂可能是刚性的或者有一个明合页。明合页的存在将引入一个包括摇摆合页的风轮的平面外旋转的不对陈风轮模型。

单叶片风轮明合页的抗衡质量和惯性力矩。

如果轮毂可以旋转。

轮毂的旋转会影响风轮模型的频率和模态振型。随着轴的制动及风轮锁定在适当的位置，平面内模型将包括对称和不对陈悬臂式两种模型。伴随着风轮自由旋转，悬臂式不对陈模型被包含风轮轴旋转的不对陈模型所代替。

风轮的旋转速度。

平面内与平面外模型的频率和模态振型随风轮的旋转速度而定。由于作用在偏离风轮叶片的离心载荷，这种依赖可以通过传统的弯曲刚度的发展得以解释。Bladed 用户可以选择一系列用于执行模型分析的不同旋转速度。在以后的动力学仿真中，适合瞬时旋转速度的模型频率由模型分析结果的线性插值得到。

风轮模型的频率和模态振型是计算自风轮结构的有限元表示的特征值和特征向量。风轮的有限元模型是以二维流束元的应用为基础来描述风轮叶片的质量与硬度特性。

风轮模型分析的输出是定义在风轮平面内和平面外方向的模型频率和模态振型。模型的阻尼系数是由用户定义的输入值可以用来表示结构阻尼。

3.1.2 塔架模型

塔架的弯曲动力学的表示是以纵向与并行方向的运动的模型自由度为基础的。相对于风轮，塔架模型是根据他们的模型频率，模型阻尼和模态振型来定义的。

塔架的模型频率和模态振型是以下列信息为基础进行计算的：

沿塔架的质量分布

质量分布根据任何离散的、集中的块的数量和位置作为塔架位置高度的局部质量密度定义的。

沿塔架弯曲硬度

假设塔架是轴对称的，因此其弯曲硬度不受弯曲方向约束。

塔架基础的质量，惯性和硬度特性。

在塔架弯曲模型中的基础质量和硬度特性的影响可以计算，模型考虑了相当于移动及转动硬度的基础质量和惯性运动。

机舱及风轮的质量和惯性

为了塔架模型的计算，机舱和风轮分别作为位于重力的机舱中心和风轮轮毂的集中块和

惯量来进行模拟。对于单叶片和双叶片的风轮，风轮惯量在塔架模型特性上的影响由风轮方位角确定，因此用户可以自行定义。带有风轮方位角的塔架模型频率的变化通常都很小，因此对于模型分析的单个风轮方位角位置的假设是一个可靠的近似值。当然，用户可以通过对一系列不同的风轮方位角进行模型分析来确定塔架模型频率的方位角变化的拓展。

塔架模型的频率和模态振型是计算自塔架结构的有限元表示的特征值和特征向量。塔架的有限元模型是以二维流束元的应用为基础来描述塔架的质量与硬度特性。

塔架模型分析的输出是定义在纵向与平行方向的模型频率和模态振型。模型的阻尼系数是由用户定义的输入值可以用来表示结构阻尼。

3.2 运动方程

因为旋转与非旋转元件的模型自由度的耦合的复杂性，包括风机运动方程的求导的代数处理是一个复杂的问题。在 Bladed 的动态模型中，已经通过一个计算机代数软件包执行了求导并将其用于能量原理和拉格朗日等式中。

3.2.1 自由度

Bladed 中包括结构动态模型的运动方程的自由度展示如下：

- 风轮平面外包括摇摆，最多 6 种模式
- 风轮平面内，最多 6 种模式
- 机舱偏航
- 塔架纵向，最多 3 种模式
- 塔架并行，最多 3 种模式

另外，此手册的第 4 部分的描述提供了动力传动动力学的经典展示。

3.2.2 运动方程的公式表示

假定没有其他自由度的耦合，单个自由度的运动方程表示如下：

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q = F_i / M_i$$

其中 q_i 是时间变量模型位移，

$$M_i = \int_{rotor} m(r)\phi_i^2(r)dr \text{ 是模型质量，}$$

$$F_i = \int_{rotor} f(r)\phi_i^2(r)dr \text{ 是模型的动力。}$$

其中 $f(r)$ 是整个风轮或者塔架组成的分布力。

当然，Bladed 中自由度模型的耦合和运动方程的公式表示展现如下：

$$[M]\ddot{q} + [C]\dot{q} + [K]q = F$$

其中 $[M]$ ， $[C]$ 和 $[K]$ 分别是模型质量、阻尼和硬度矩阵， q 是模型位移向量， F 是模型动力向量。系统矩阵是自由度的耦合并包含周期系数主要是因为风轮和塔架的动力学的时间变量的相互作用。

因为它们复杂性，本手册没有展示动态方程。然而却提供了下面关键的内容：

- 尽管运动方程是以结构动力学的线形模型处理为基础，模型并没有包含起初联想的陀螺力矩的非线性条件。
- 风轮的自由摇摆度是由第一个平面外模型和包括机械阻尼、硬度和用户指定的预加载荷约束所表示的运动方程提供的。

- 机舱偏航自由度的运动方程是以风机的惯量为基础的，此惯量是关于有用户指定的偏航阻尼和硬度提供的机械限制的偏航轴的。
- 鉴于风轮叶片的每一个叶素的总的结构速度矢量和风速矢量之间的相互作用，在运动方程中考虑了空气弹性变形。风轮叶片的每一个叶素的总的结构速度矢量是由每一个结构自由度的适当的速率和组成。此外，也考虑到结构速率反馈回风轮叶片空气动力学，风轮摇摆的结构位移和机舱偏航。

3.2.3 运动方程的解答

运动方程运用变步长，四阶龙格-库塔积分通过微分方程的时间-行程积分求解。

3.3 结构载荷的计算

作用在风轮，动力传动系和塔架上的结构载荷可由用于空气动力载荷和惯性载荷的适当的总数计算而得。惯性载荷可由每一处的质量特性和总的加速度矢量综合计算而得。总的加速度矢量包括模态矢量，离心矢量，科里奥利矢量和重力矢量几种。

4 动力传动空气动力学

动力传动空气动力学定义驱动链，驱动链装备和发电机的空气动力学的旋转自由度。驱动链由低速轴，齿轮箱和高速轴组成。也可以模拟直接驱动发电机。

4.1 驱动链模型

4.1.1 锁定速度模型

适用的最简单的驱动链模型是锁定速度模型，它允许动力传动无自由度。因此假设风轮以绝对恒速旋转，假设发电机瞬时反作用转矩与空气动力转矩向平衡。很明显这一模型并不适合启动和停车时的仿真，但是在驱动链和发电机被完全表现出来之前，对于载荷与性能的快速，初始计算非常有用。

4.1.2 刚性轴模型

刚性轴模型是通过选择无轴扭转扰行的动态驱动链模型得到的。它允许风轮和发电机的单个旋转自由度。可被用于所有的计算，如果驱动链的扭转硬度非常高则可推荐此种模型。发电机和风轮的加速度可以通过风轮和发电机的组合惯量划分的转矩的不平衡来计算，估计出齿轮箱比率。直接驱动发电机可以通过设定齿轮箱比率为 1 来简单模拟。转矩不平衡实质上是在考虑齿轮箱比率的情况下空气动力学转矩和发电机反作用转矩及应用的任何制动转矩之间的差额。然而，需要修正此值以计算由于任何边沿叶片振动模式造成的叶片偏离的惯性效应。使用刚性轴模型，必须提供发电机模型，因此得到发电机反作用转矩。

停车仿真期间，或者在停车仿真中一旦制动使得风轮静止，实际制动转矩与空气动力转矩平衡（如果制动是在高速轴上则可估计出齿轮箱比率）且不再继续旋转。然而，如果空气动力转矩增大以至超过最大值或者应用制动转矩，制动开始滑动且旋转重新开始。

刚性驱动链模型可以用在柔性驱动链装备的组合中，此处运动方程更复杂—参 4.3 部分。

4.1.3 柔性轴模型

单轴或双轴柔性轴模型可以通过选择扭转扰性的动态驱动链模型得到。它允许涡轮的风轮和发电机的风轮的旋转的自由度分离。低速与高速轴的扭转扰性可以单独设定。与刚性轴模型类似，也必须提供发电机模型因此发电机反作用转矩也是指定的。

涡轮的风轮由于空气动力转矩（用于调节 4.1.2 部分所讲的边沿模型的作用）和低速轴转矩之间的转矩不平衡而加速。发电机风轮由于高速轴转矩和发电机反作用转矩之间的不平衡而加速。轴转矩可以通过轴扭转与任何依靠刹车位置的应用制动转矩一起计算得到，刹车位置可以被指定在高速轴或低速轴的末端。

在停车仿真期间，或者在停车仿真期间一旦制动圆盘停止，根据刹车位置运动方程发生

变化。如果制动临近风轮或发电机其元件将不再旋转，但其他元件将继续运动且相对于轴的扭矩扰性振动。如果制动临近齿轮箱且双轴是柔性的，则两个风轮和发电机将振动。然而，如果制动圆盘的转矩增长至超过最大值或所应用的制动转矩，则制动又开始滑动。

柔性驱动链模型可以用在有柔性驱动链装备的组合中，此处运动方程更加复杂—参考 4.3 部分。

必须指出当柔性轴模型在载荷预测中提供更大的准确性时，对于高频率的驱动链振荡模型中的一种还是有一定潜力的，这有赖于发电机的惯性和轴硬度。这种高频率模型的出现可能导致较慢的仿真。

4.2 发电机模型

如果刚性轴或者柔性轴驱动链模型指定则必须提供发电机特性。可以采用以下三种发电机模型：

- 直接连接感应电机模型（恒速涡轮机）
- 变速发电机模型（变速涡轮机）
- 变量滑动发电机模型（提供上述变速的限制范围）

4.2.1 恒速感应发电机

模型展示了一个直接连接到电网上的感应电机。其特性是由滑差斜率 h 和瞬时短路时间常数 τ 确定的。气隙或发电机反作用力矩 Q 是由以下微分等式定义的：

$$\dot{Q} = \frac{1}{\tau} [h(\omega - \omega_0) - Q]$$

其中 ω 是实际发电机速度， ω_0 是发电机同步速度或空载速度。

滑差斜率由下式计算得到：

$$h = \frac{P_r}{\varepsilon \omega_r (\omega_r - \omega_0)}$$

其中 ω_r 是发电机在额定功率输出 P_r 时的速度，由 $\omega_r = \omega_0 (1 + S/100)$ 确定，此处 S 额定滑动百分数， ε 是发电机的满载效率。

4.2.2 恒速感应发电机：电气模型

Bladed 也采用了一个更加完整的直接连接感应电机模型。这个模型要求提供发电机的等值电路参数（在工作温度，而不是‘冷’值），以及极对数，电压和电网的频率。也可能模拟功率因数修正电容器和辅助载荷例如发电机辅助装置。等值电路结构见图 4.1。

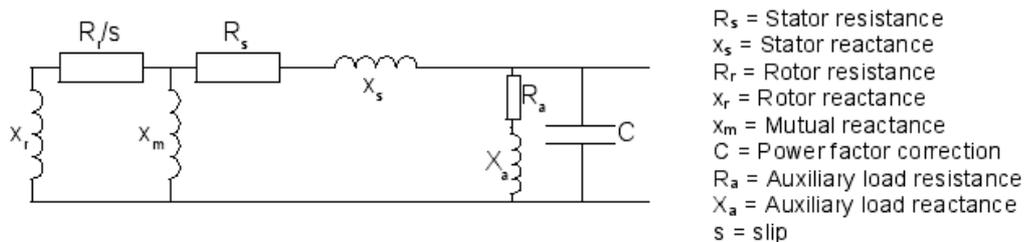


图 4.1 感应电机的等值电路

应该给出星形连接的发电机的等值电路参数。如果发电机是角形连接，则电阻和电抗应当除以 3 以转换成等价的星形连接结构。

电压应当是均方根值线电压形式。将峰值电压转换成均方根值形式要除以 $\sqrt{2}$ 。将相电压转换成线电压要乘以 $\sqrt{3}$ 。

既然在发电机及其辅助设施中此模型必须包含电气损耗，尽管可以指定机械损耗-参见 4.4 部分，但是还是不可能指定任何额外的电气损耗。

图 4.1 所阐述的系统的电气动态的四种不同的模型如下：

- 恒稳态
- 一阶
- 二阶
- 四阶

恒稳态模型简单计算了图 4.1 中瞬时恒稳态电流和电压。一阶模型将一个一阶滞后引入了滑差 (s) 和等效转子电阻 (R_r / s) 之间的联系中，所采用的瞬时短路时间常数由下式给出：

$$\tau = \frac{X_s X_r - x_m^2}{X_s X_r \omega_s}$$

其中 $X_s = x_s + x_m$ ， $X_r = x_r + x_m$ ， ω_s 是电网角频率。

二阶模型将发电机作为一个电压源 ε 落后一个暂态电抗 $X' = X_s - x_m^2 / X_r$ ，忽略了暂态定子流量：

$$i_s (r_s + jX') = v_s - \varepsilon$$

其中 i_s 和 v_s 分别是定子电流和出口电压。转子磁链 ψ_r 的动态方程可写为：

$$\frac{1}{\omega_s (1+s)} \dot{\psi}_r = -r_r i_r + js \psi_r$$

其中 s 是组合滑差速度 (发电为正)， i_r 转子电流，根据感应电压 ε 应用

$$\psi_r = -j \frac{x_m}{X_r} \varepsilon$$

上式可重写为：

$$T_0 \dot{\varepsilon} = - \left(\frac{r_s + jX_s}{r_s + jX'} - js \omega_s T_0 \right) \varepsilon + j \frac{X_s - X'}{r_s + jX'} v_s$$

其中 $T_0 = \frac{X_r}{\omega_s r_r}$

四阶模型是发电机在 d-q 轴的表示，用 Park 变换将发电机的三相绕组等效成正交的两相绕组。应用复数记法来表示电流和电压的直轴与交轴的合成作为单个复数的实部和虚部，

可以得到：

$$\frac{x_s x_r - x_m^2}{\omega_s} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_r r_s + j x_m^2 (1+s) & -x_m r_r + j x_m x_r (1+s) \\ -x_m r_s - j x_m x_s (1+s) & x_s r_r - j x_s x_r (1+s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_r \\ -x_m \end{bmatrix} v_s$$

其中所有的电压和电流都是复数。

当仿真速度要比精确度更重要，可以用到其中的一个低阶模型。4 阶模型用在较高的精确度要求的情况下，尽管在许多情况下低阶模型给出了相似的结果。然而，低阶模型并不能给出启动瞬时的精确表示。

4.2.3 变速发电机

这一模型应当被用在带有频率转换器的变速发电机依据电网频率解耦发电机转速。包括发电机和频率转换器的变速驱动可以整体仿真。现代变速驱动可以接受一个转矩命令并在很短的时间内响应它给出发电机空隙处所需转矩，无关于发电机转速（只要它是在设定范围内）。一阶滞后模型提供下面的响应：

$$Q_g = \frac{Q_d}{(1 + \tau_e s)}$$

其中 Q_d 是命令转矩， Q_g 是气隙转矩， τ_e 是一阶滞后模型的时间常数。注意，一个小的时间常数的应用可以导致一个较低的仿真。如果时间常数非常小，设定其为 0 则可加速仿真，而对精确度没有影响。

变速发电机要求一个控制器来发出适当的转矩命令，以使发电机的转速得以适当的调整。Bladed 所采用的控制模型的详细情况见第 5 章。

最小和最大发电机转矩必须设定。如果设定一个负的最小转矩则空转就会发生。

假设流入电网的有功功率和无功功率以与转矩相同的时间常数控制，电流与电压之间的相角，功率因数便可设定，频率转换控制器则用来维持恒功率因数。

提供驱动链阻尼反馈的选项。这表示附加功能可以用在频率转换控制器上，只要从测量的发电机转速上加一个条件驱动到引入的转矩命令上即可。这个条件是作为作用在测量速度上的转移函数而定义的。转移函数是拉普拉斯运算的一个比率多项式。因此气隙转矩 Q_g 的等式为

$$Q_g = \frac{Q_d}{(1 + \tau_e s)} + \frac{Num(s)}{Den(s)} \omega_g$$

其中 Num(s) 和 Den(s) 是多项式。转移函数通常是一些调谐带通滤波器设计来为驱动链扭力振动提供阻尼的，在变速运行情况下可能阻尼比较小，有时会造成严重的齿轮箱载荷。

4.2.4 变滑差率发电机

变滑差率发电机实质上是转子回路串联电抗的感应电机。低于额定功率时，它与恒速感应电机相同，因此其参数要求与 4.2.1 部分相同。

超过额定值，变滑差率发电机使用一个快速转换控制器来调节转子电流和气隙转矩，因此虽然有速度限制范围，发电机的实际行为类似于变速系统。与变速系统相同的参数必须提供，相角除外因为功率因数控制在此种情况下不被采用。

可以采用变滑差发电机的完美的电气模型。4.2.2 部分模拟发电机，转子电流控制器被

模拟作为连续时间 PI 控制器调节定义的限制范围之间的转子阻抗（综合限制降低），相应实际值与要求转子电流之间的差值。转矩与转子电流之间的稳态联系在仿真的开始就可以计算，因此转矩命令可以被转换成转子电流命令。见图 4.2 的图解。

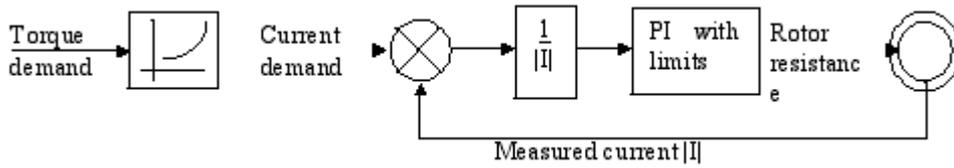


图 4.2 变滑差发电机—转子电流控制器

4.3 驱动链装备

如果需要，扭转扰性可以指定在齿轮箱装置上或者塔架顶部的托盘与台板之间。这一选项只有在确定刚性或柔性驱动链之后才被允许，且它加了一个额外的旋转自由度。

在每一种情况下，假设考虑到转轴，伴随着旋转轴都可以确定装置的扭转刚度和阻尼。关于低速轴的运动部分的惯性力矩必须指定。在柔性齿轮箱装备里，这是齿轮箱的惯性力矩。在柔性托盘装备里，它是齿轮箱、发电机定子、运动托盘和其他部分的惯性力矩。

如果装置的每一种形式都被指定，发动机轴的旋转方向将影响一些内部驱动链载荷。如果低速轴和高速轴旋转方向相反，则在驱动链模型中指定一个负的齿轮箱比率值。低速轴与高速轴之间的偏移量的影响可以忽略。

任何轴制动都被假设严格设置在托盘上。因此制动盘的任何运动都会停止转动这有赖于驱动链装备的类型及低速或高速轴上的制动的位置。例如，如果有一个软的托盘装置，即时轴是刚性的在制动盘停止后依然会有风轮的振荡。

类似于柔性轴驱动链模型的情况，应当指出当柔性装置的仿真效果在载荷预测中提供较精确值时，对于所造成的驱动链振荡模型的一种或两种有可能产生相当高的频率，这有赖于不同的惯性力矩和轴与装置的硬度。高频率模型可导致较低的仿真。

4.4 能量损耗

动力传动能量损耗是作为发动机（包括变速发电机情况下的频率转换器）机械损耗和电气损耗的组合来仿真的。

在齿轮箱和/或轴承上的机械损耗是作为转矩损耗或功率损耗来仿真的，它可以计算，也可以线性插入查询表格。这是一个相对于转速、齿轮箱转矩和轴功率的查询表格，或者是一个相对于转速和轴转矩或轴功率的二维查询表格。如果在第转速或者 0 转速执行计算机机械损耗依据功率仿真并不适合，例如，开始、停止、空转和停车计算时。在这些情况下，根据转矩可以更好的表达出损耗。

电气损耗可以由两种方法中的一种指定：

线性方法：这要求一个空载损耗 L_N 和效率 ε ，电功率输出 P_ε 与发电机轴输入功率 P_s 有关，

方程式如下：

$$P_\varepsilon = \varepsilon(P_s - L_N)$$

查询表格：功率损耗 $L(P_s)$ 是作为发电机轴输入功率函数 P_s 通过一个查询表定义的。电功率

输出 P_ε 由下式给出：

$$P_\varepsilon = P_s - L(P_s)$$

线性插值用在查询表格的点之间。

注意如果应用一个完美的发电机的电气模型，这种形式的额外的电气损耗不能指定，因为发电机模型已经包括所有的电气损耗。

4.5 电力网络

用到所提供的感应电机的详细的电气模型或者变速发电机模型，因此可以计算电力电流和电压，无功功率及有功功率，发电机接入的电网的特性也可以得到。因为允许电压振荡，所以电网不同点的闪烁可以计算，在直接连接感应电机的情况下，网络的存在可能影响发电机的动态相应特别是在弱电网中。

网络仿真是作为一个有定义阻抗的普通耦合点的连接及连接到初始母线的同样带有定义阻抗的深入连接。增进发电机可以被连接在普通耦合点。这些额外的发电机每一个都是假设与被仿真的发电机是相同的，包括普通耦合点的连接阻抗。然而对他们的仿真及仿真中的电流和相角常量作为静态要超过其动态。初始条件的计算要假设所有的发电机处于完全相同的状态，‘其他’的发电机也要始终维持相同的状态。由于所有处于普通耦合点的发电机则在计算发电机的用于仿真的性能时要考虑稳态电压增长。

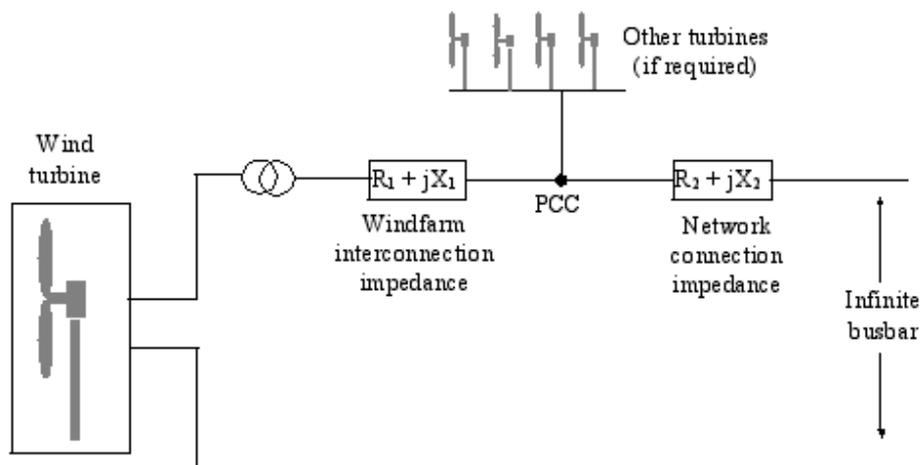


图 4.2 网络模型

5 闭环控制

5.1 引言

对于变速发电机，闭环控制可以被用于发电机的正常运行中以控制叶片桨距角和转速。以下提供了四种不同的控制方式：

1. 恒速失速调节。发电机直接连接到恒频率电网上，在正常功率生产期间没有主动的空气动力控制。
2. 恒速变桨距调节。发电机直接连接到恒频率电网上，变桨距控制在高风速时用于调节功率。
3. 变速失速调节。频率转换器耦合发电机与电网，允许通过控制发电机的反作用力矩来改变转速。在高风速时，速度控制装置用来降低风轮的转速直到空气动力失速限制功率到要求的水平。
4. 变速变桨距调节。频率转换器耦合发电机与电网，允许通过控制发电机的反作用力矩来

改变转速。在高风速时，转矩被保持在额定水平，变桨距控制用于调节转速及功率。

对于恒速失速调节的发电机来说当没有控制作用时便没有参数需要定义。在控制作用的其他情况中将确定发电机的稳态运行点及其动态相应。对于稳态运行计算它只需要指定那些定义发电机运行曲线的参数即可。对于动态计算增强参数用于定义闭环控制的动态特性。所要求的参数在以下部分会更进一步定义。

注意所有的闭环控制数据都是相对于高速轴定义的。

5.2 恒速变桨距调节控制器

这种控制器适用于在高风速时使用叶片变桨控制调节功率的直接联网发电机。它适合全档或者半档变桨控制，以及像副翼这种空气动力控制的其他形式。在后一种情况中，桨距角可以被拿去引证副翼的展开角。

从最适宜的位置，叶片可以在任意方向上变桨以降低空气动力转矩。如果选择顺桨桨距方式，叶片变桨距部分在风速（及功率）提高时转动以降低其冲击角。如果选择失速变桨方式，当风速提高时它向相反的方向转动以使叶片失速。在顺桨情况下，最小桨距角定义变桨距设定在额定值之下，而在失速情况下最大桨距角被用在额定值之下，变桨距降低到额定值之上的最小值（通常是一个负的桨距角）。

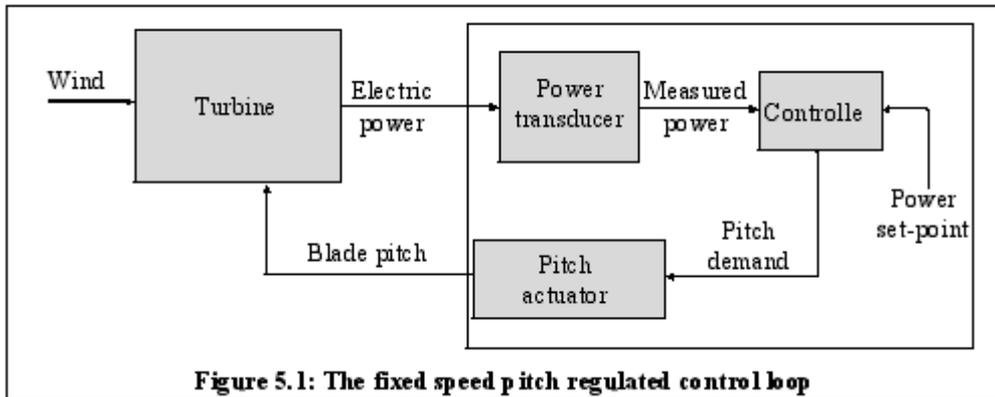


Figure 5.1: The fixed speed pitch regulated control loop

图 5.1 显示了用于仿真的恒速变桨距调节控制环的基本元素。

5.2.1 稳态参数

为了定义稳态运行曲线，必须定义功率置位点和最大最小桨距角设置，及上面所描述的变桨距的方向。为了获得任何给定稳态风速的职位点功率 可以计算修正桨距角。

5.2.2 动态参数

为了计算控制环的动态行为，必须指定功率传感器和变桨执行元件的动态响应，以及控制器用来计算响应测量功率信号的变桨命令采用的实际运算法则。5.5 部分描述了可用的传感器和执行元件模型，而 5.6 部分描述了控制器所采用的 PI 运算法则。

5.3 变速失速调节控制器

控制器模型适合于变速发电机，这种发电机使用一个频率转换器从电网的恒频中解耦发电机转速，超过额定风速时不使用变桨控制来限制功率。相反，在高风速时控制发动机反作用力矩以降低转速直至失速。控制环展示见图 5.2。

5.3.1 稳态参数

稳态运行曲线可以由象图 5.3 那样的转矩-速度曲线图来描述。稳态允许的速度范围是 S1 到 S2。低风速时通过跟随相应的运行在最大功率因数的常数叶尖速比载荷线可以捕获最大风能。载荷线是转矩-速度平面内的二次曲线，见图 5.3 里的线 BG。可以指定一个查询表格。如果有最大允许运行速度 S1 出现，则不再跟随低风速下的曲线，风机沿图中的 AB 曲线

以恒速运行。类似于在高风速时，一旦达到最大运行速度 S4，通过沿 GH 曲线以恒速运行离开最有载荷线再次成为必须。

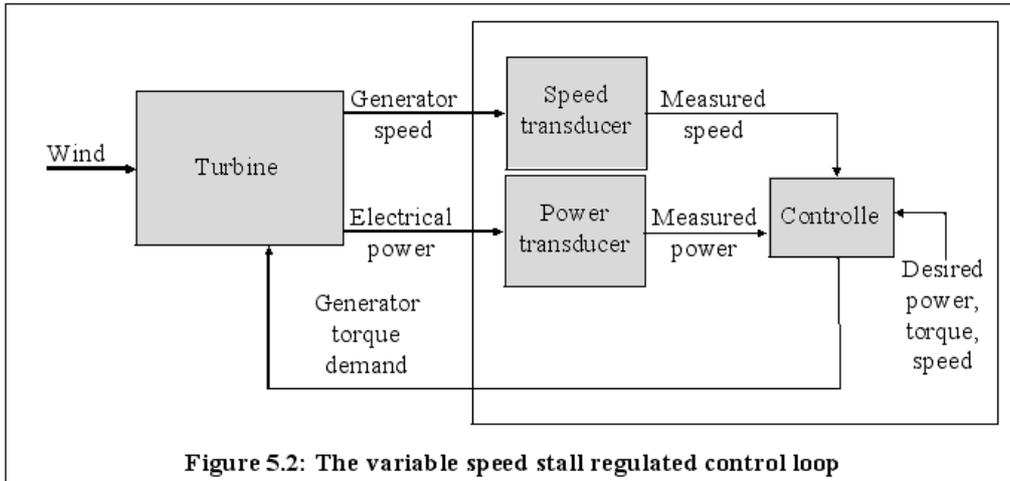


Figure 5.2: The variable speed stall regulated control loop

一旦最大功率达到 H 点，必须沿恒功率曲线 HI 降低风轮转速至失速。如果运行高旋转速度，当然对于 GH 曲线崩溃是可能的以至于使恒功率曲线和恒叶尖速比曲线相交于 J 点。

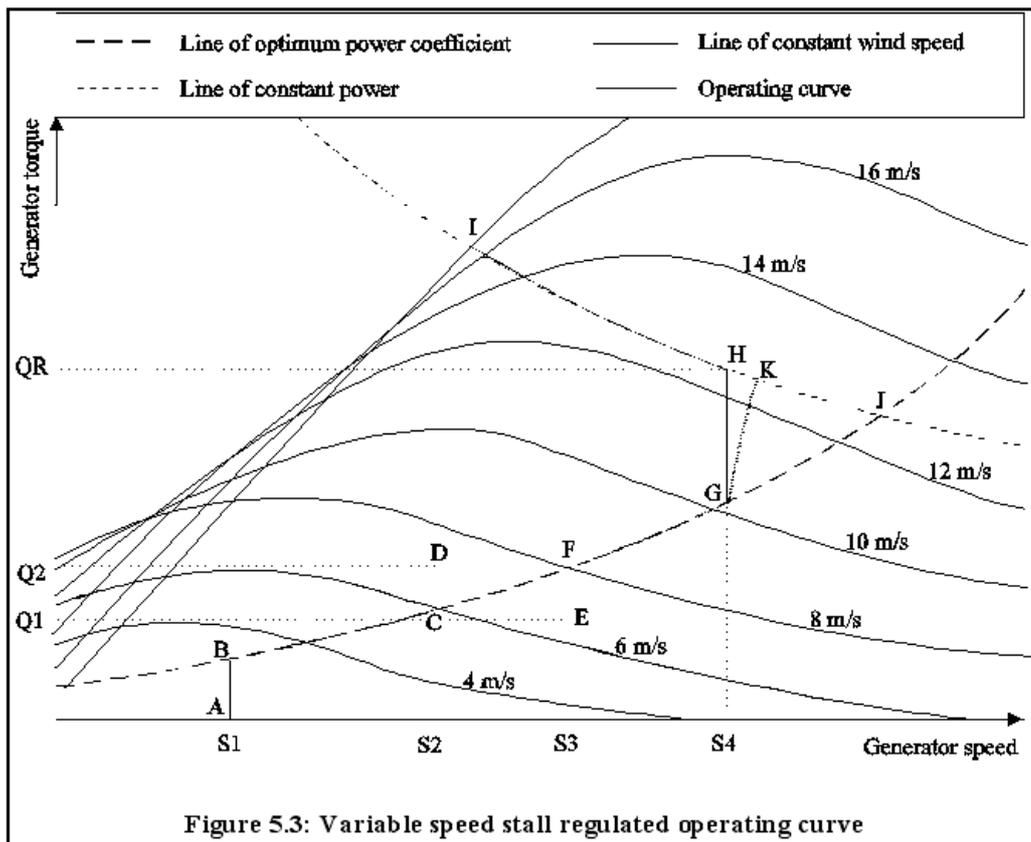


Figure 5.3: Variable speed stall regulated operating curve

稳态运行曲线需要指定的参数如下：

- 最小速度，S1
- 在恒叶尖速比模型中的最大速度，S4
- 最大稳态运行速度。通常是 S4，但是在发电机特性为以下情况时会变高，即当风速增大时，以上额定运行点从 H 移动到 I 点，然后又降回到 H 点，然后在非常高的风速上继续

(朝 J 点方向)。然而这并不是我们希望的情形，因为在非常高的风速时如果旋转速度超过 S4，则没有理由不增长到 S4 且运行低风速时相同高的风轮转速。

- 相应于曲线 HI，以上额定功率置位点。这是根据轴功率定义的。当然如果电气损耗也进行仿真的话电气功率将会降低。
- 参数 K_λ 用来定义曲线 BQ 的恒叶尖速比。由下式给出：

$$K_\lambda = \pi \rho R^5 C_p(\lambda) / 2 \lambda^3 G^3$$

其中 ρ ：是空气密度

R：是风轮半径

λ ：是所要得到的叶尖速比

$C_p(\lambda)$ ：是叶尖速比 λ 的功率因数

G：齿轮箱比率

当发动机转矩命令设定成 $K_\lambda \omega^2$ 时其中 ω 是测得的发电机转速，这确保在稳态时风机将维持叶尖速比 λ 及相应的功率因数 $C_p(\lambda)$ 。注意动力传动损耗随着旋转速度而变化，在此情况下最优风轮转速不会导致最大空气动力功率因数。

参数 K_λ 可选，查询表可以被指定给出发电机转矩作为速度函数。

5.3.2 动态参数

要计算控制环的动态行为，必须指定功率与速度传感器的动态相应，以及控制器用来计算响应测量功率和速度信号的发电机转矩命令采用的实际运算法则。5.5 部分描述了可用的传感器和执行元件模型。

发电机转矩控制可以应用两个闭环控制环，如图 5.4 中显示的。内控制环用发电机速度误差函数计算发电机转矩命令，而外控制环则用功率误差函数计算发电机速度命令。两个控制环都采用 PI 控制器，如 5.6 部分所描述的。

低于额定值时，速度置位点在 S1 到 S4 之间转换。低风速时在 S1，转矩命令输出受最优叶尖速比曲线 BG 所给出的最大值的限制。这使得运行点追踪轨迹 ABG。在较高风速时，职位点变化到 S4，转矩命令输出受最优叶尖速比曲线所给出的最小值限制，使得运行点追踪轨迹 BGH。一旦转矩达到 QR，外控制环就会使速度置位点沿 HI 降低，内控制环则追踪变化的速度命令。

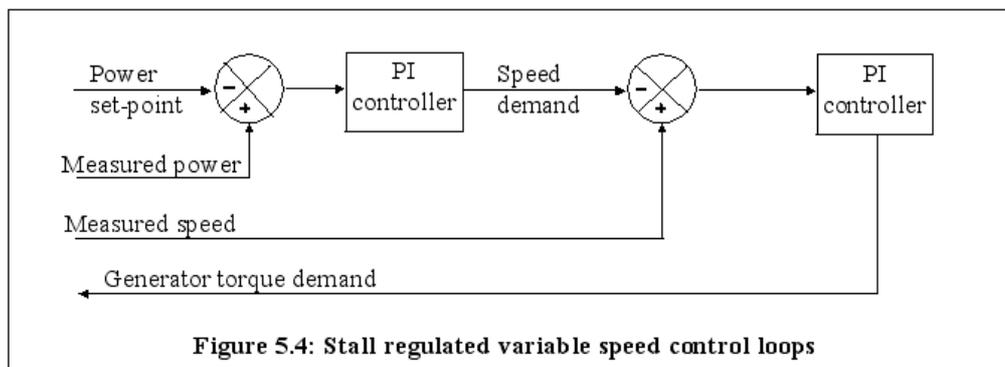


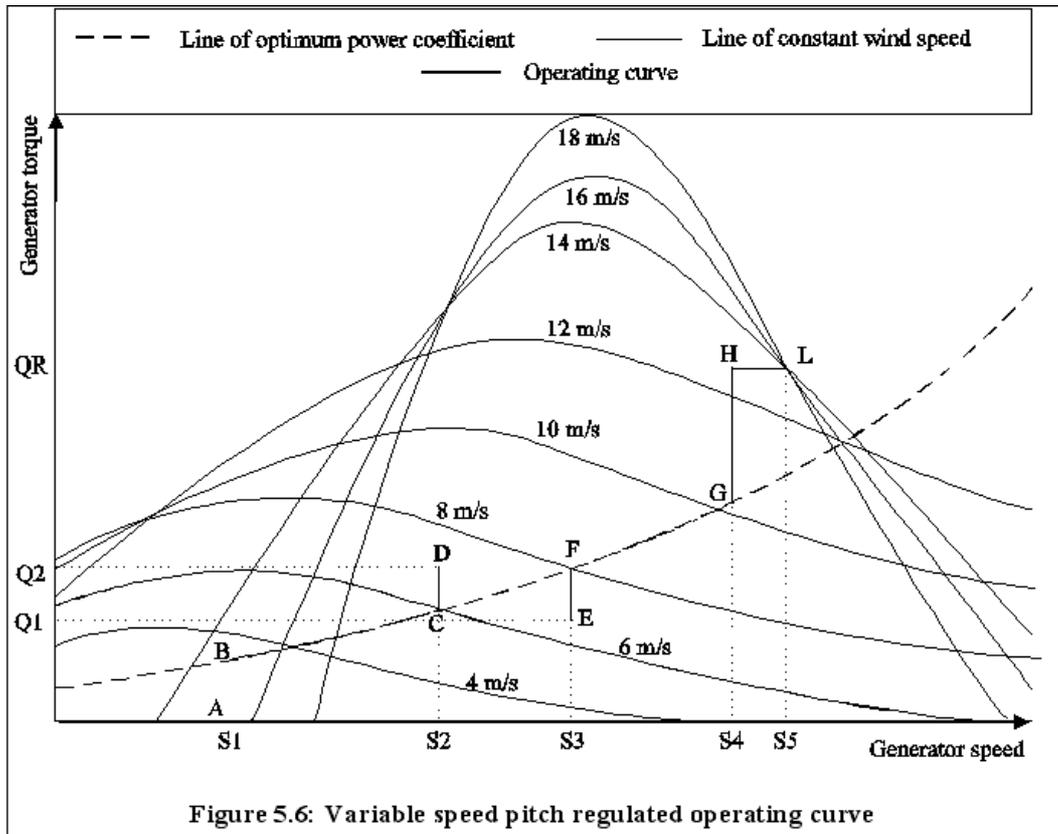
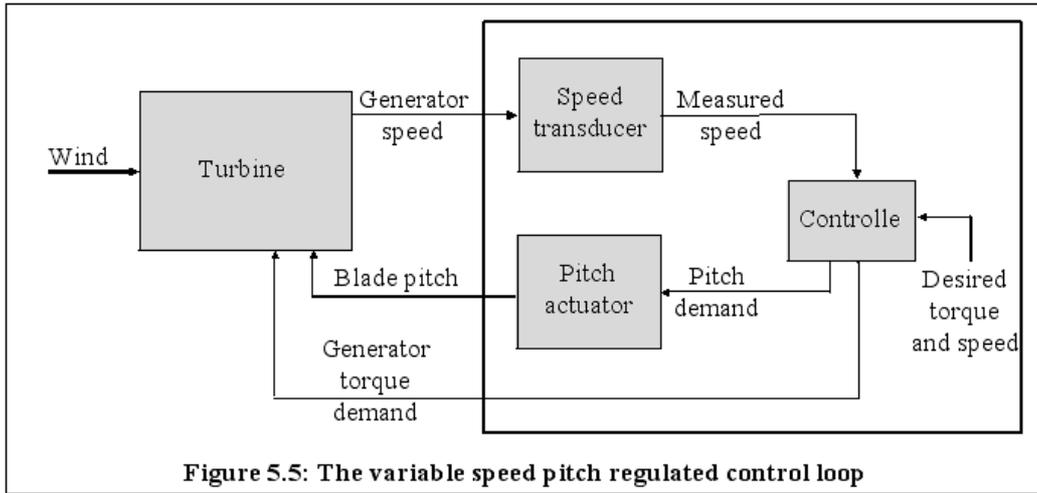
Figure 5.4: Stall regulated variable speed control loops

5.4 变速变桨距调节控制器

这个控制器模型适于变速发电机，这种发电机使用一个频率转换器从电网的恒频中解耦发电机转速，超过额定风速时使用变桨控制来限制功率。控制环展示见图 5.5。

5.4.1 稳态参数

稳态运行曲线可以由象图 5.6 那样的转矩-速度曲线图来描述。低于额定值时，即从 A 点到 H 点，运行曲线是 5.3.1 部分所描述的失速调节变速情况，见图 5.3。而超过额定值时，调解叶片桨距来维持所选择的运行点，指定的 L 点。桨距的变化改变了恒定风速曲线，迫使他们穿过所期望的运行点。



一旦额定转矩到达 H 点，对于所有较高风速转矩命令就会保持一个恒定值，桨距控制调节风轮转速。运行 H 点（转矩所达到的最大点）和 L 点（变桨控制开始点）之间存在小的（最优

的) 差值以防止低于额定控制模式和超过额定控制模式之间的额外的模式转换。然而, 可以不要求此差值, 在此情况下 H 点和 L 点是一致的。与失速调节控制器相似, 如果需要 GH 曲线可以瓦解而变成一个点。

稳态运行曲线需要指定的参数如下:

- 最小速度, S1
- 在恒叶尖速比模型中的最大速度, S4
- 超过额定值的速度置位点 (S5)。可能与 S4 相同。
- 稳态运行速度最大值。正常与 S5 相同。
- 超过额定转矩置位点, QR。
- 参数 K_λ 用来定义曲线 BG 的恒叶尖速比或者查询表。如 5.3.1 部分所定义的。

5.4.2 动态参数

要计算控制环的动态行为, 必须指定速度传感器与变桨距执行元件的动态相应, 以及控制器用来计算响应测量速度信号的变桨距和发电机转矩命令采用的实际运算法则。5.5 部分描述了可用的传感器和执行元件模型。

图 5.7 显示了用于产生变桨距与转矩命令的控制环。低于额定值时转矩命令环起作用, 超过额定值时变桨距命令环起作用。5.6 部分描述了使用双环的 PI 运算法则。

低于额定值时, 速度置位点在 S1 到 S4 之间转换。低风速时在 S1, 转矩命令输出受最优叶尖速比曲线 BG 所给出的最大值的限制。这使得运行点追踪轨迹 ABG。在较高风速时, 职位点变化到 S4, 转矩命令输出受最优叶尖速比曲线所给出的最小值限制, 使得运行点追踪轨迹 BGH, 和 QR 的最大值。当达到 H 点时转矩维持常熟, 当速度超过 S5 时变桨控制环开始起作用。

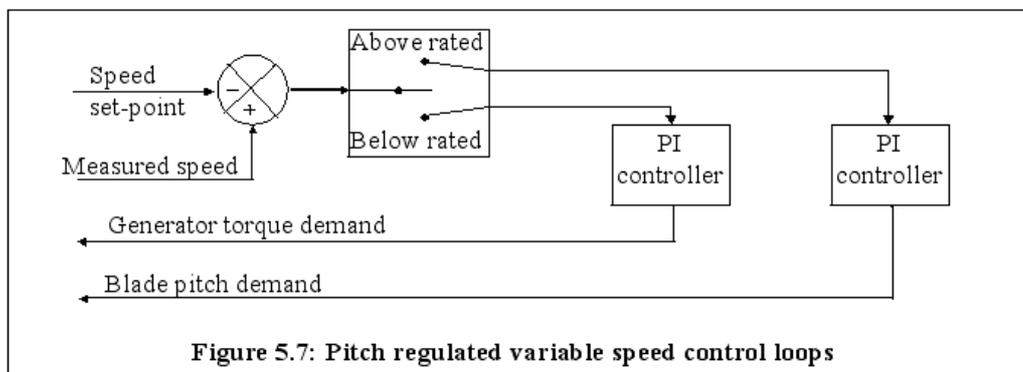


Figure 5.7: Pitch regulated variable speed control loops

5.5 传感器模型

Bladed 提供一阶滞后模型来表示功率传感器和发电机速度传感器的动态特性。一阶滞后模型表示如下:

$$\dot{y} = \frac{1}{T}(x - y)$$

其中 x 是输入, y 是输出。输入的是实际功率或速度, 输出是测量的功率或速度, 同时作为控制器的输入。

5.6 模拟变桨距执行元件

变桨执行元件可以作为变桨位置或变桨比率执行元件来仿真, 可以指定其有源动态或无源动态。

最简单的模型是一个无源执行元件, 伴随转移函数所表示的输入和输出之间的联系。对

于变桨距位置执行元件，输入是控制器发出的变桨距命令，输出是叶片的实际桨距角。对于变桨比率执行元件，输入是控制器发出的变桨比率命令，输出是叶片转动的实际变桨比率。转移函数可以是一阶滞后，二阶响应，或一个普通的转移函数，最高到 8 阶。

一阶滞后模型表示如下：

$$\dot{y} = \frac{1}{T}(x - y)$$

其中 x 是输入， y 是输出。二阶模型表示如下：

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega\dot{y} = \omega^2(x - y)$$

其中 ω 是带宽 ζ 是阻尼系数。普通的转移函数模型由拉普拉斯运算的分子和分母多项式表示。

详细的计算，特别是理解变桨距执行元件本身的负载和它所要求的责任，有可能需要一个更详细的模型。这可以考虑执行元件的任何内部闭环动力学，以及作用在俯仰惯量上的执行元件转矩所产生的桨距的运动，伴随或相对于空气动力桨叶力矩和桨叶轴承摩擦。轴承摩擦本身依赖于桨叶轴承的负载。

图 5.8 展示了控制桨距角的不同选项，从桨距位置命令或桨距比率命令开始。桨距位置命令可以通过图 5.9 所示的斜坡控制来处理，斜坡控制在具体控制器通过运用比率和/或加速度限制产生的命令里平滑了步长变化。然后变桨位置命令可以通过无源动态特性产生一个变桨位置或者通过变桨误差上的 PID 控制器产生一个变桨比率命令来发生作用。比率限制用于输出，瞬时积分减饱和以防 PID 情况下的缠绕。因此桨距比率命令可以从这里产生或直接从控制器里产生。这个比率命令可以通过无源动态特性产生变桨比率或通过变桨比率误差上的 PID 控制器产生一个执行转矩命令来发生作用。在后一种情况下桨距执行元件无源动态特性产生了一个实际执行转矩，相对于轴摩擦和任何空气动力桨叶力矩起作用来加速叶片和执行元件本身的倾仰惯量。一阶滤波器在每一个 PID 输入上的选项允许来自控制器的命令步长改变以使其平滑，当达到转矩限制时瞬时积分减饱和防止了缠绕。

两个 PID 控制器包括了一个微分滤波器来防止得到过高的频率。也可以选择微商作用，所获得的可以用于反馈（即测得的位置或比率），误差信号或命令。后面的情况表示了一个控制器的前反馈条件。

如果选择无源比率动态特性，响应将会受到由空气动力桨叶力矩、轴摩擦和作用在倾仰惯量上的执行转矩限制计算的加速度的影响。如果总的倾仰惯量为 0，则没有任何限制应用。

桨叶轴滑动摩擦转矩是作为以下四个条件的总和来仿真的：一个常数，轴承弯曲力矩的均衡条件，轴均衡条件和轴承上的半径应力。有时执行元件不能克服应用转矩且桨叶运动将粘住。在它可以在此运动之前，必须克服爆发力矩或接触面阻力力矩。这是作为桨叶不运动时摩擦力矩的额外分布模拟的。这个额外分布被指定作为常数力矩，加上一个滑动摩擦转矩的均衡条件。

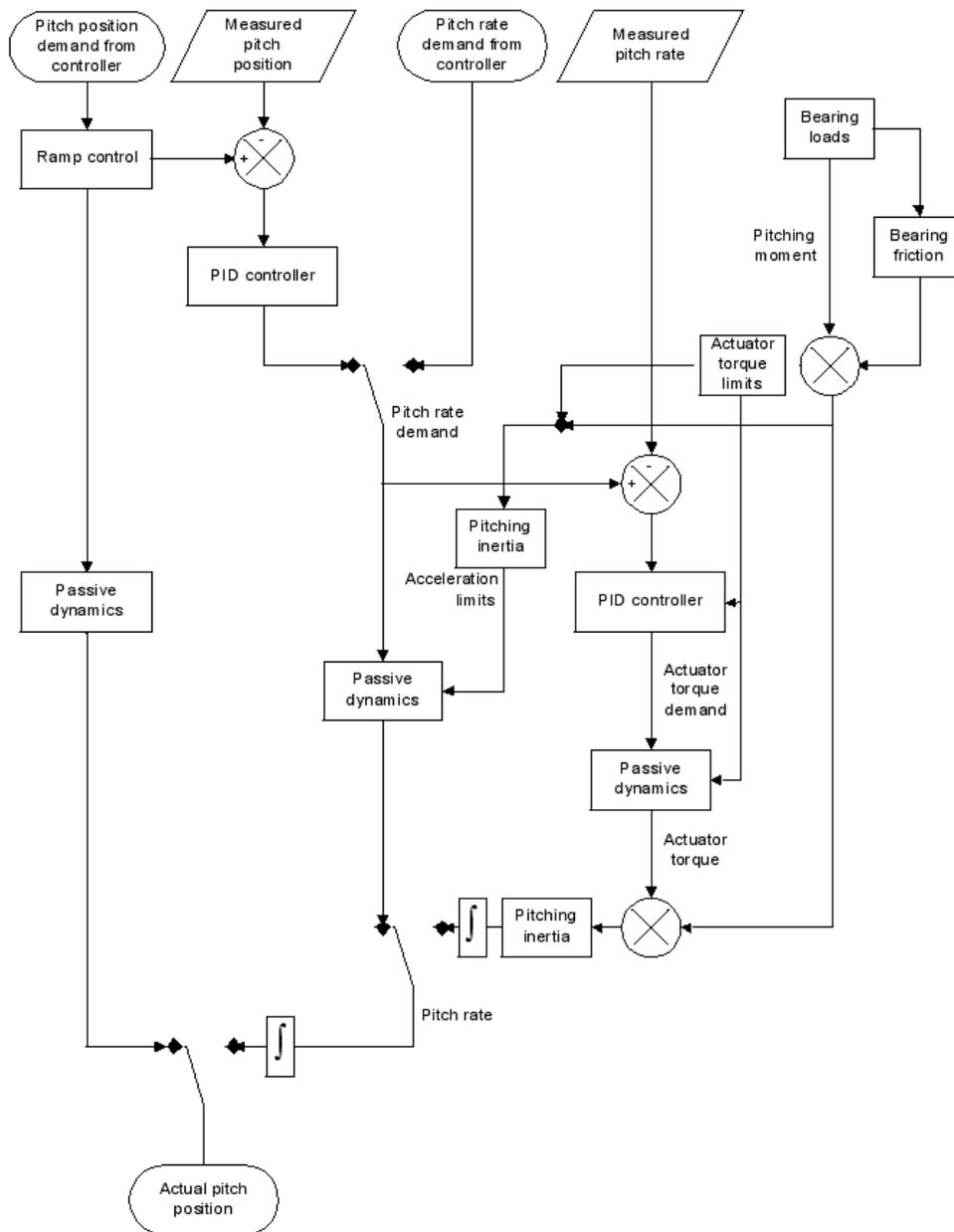
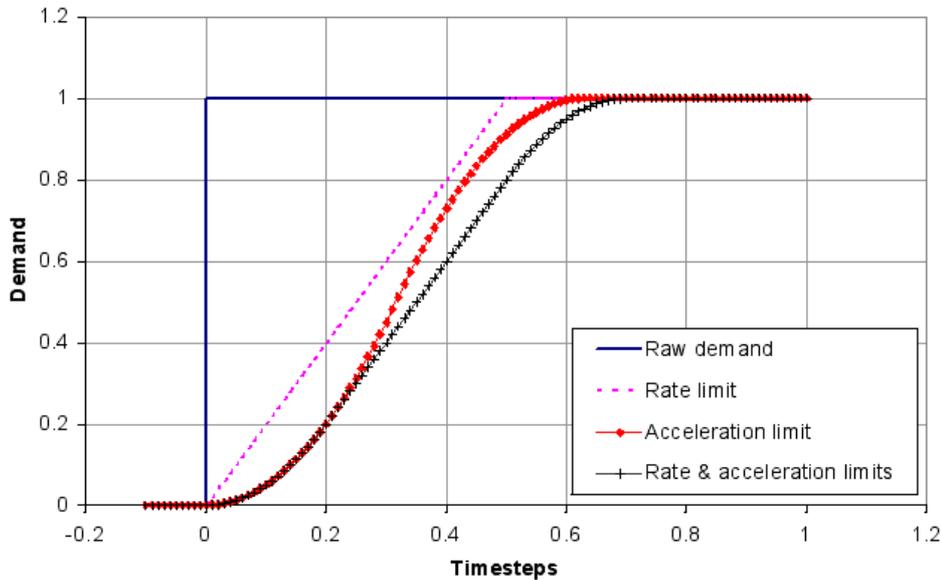


Figure 5.8: Pitch actuator options



每一个时间步长斜线都是重新开始。如果在时间步长结束处斜线没有完成且指定一个加速度限制，则下一个时间步长开始时的斜率为 0。

图 5.9：变桨执行元件位置命令的斜率控制

5.7 PI 控制运算法则

所有闭环控制运算法则 描述了以上应用的 PI 控制器来根据输入 x (功率或速度偏差) 计算输出 y (桨距, 转矩或速度命令)。基本的 PI 运算法则表示如下:

$$\dot{y} = K_p \dot{x} + K_i x$$

其中 K_p 和 K_i 分别表示比例增益和积分增益。 K_p/K_i 的比率表示积分时间常数。选取适当的增益进行计算是一项很专业的任务, 应当考虑风机的动态特性、空气动力学特性和约束应力频率, 旨在所有的运行点得到稳态控制和追踪置位点的精确度与执行元件活动程度之间的适配平衡。

此种情况下, 如果输出 y 受限则简单执行上述等式会导致‘积分缠绕’问题。这意味着即时实际输出受限上面计算的粗略输出作为积分增益 (K_i) 条件的结果依然持续发生变化。当 y 的运动方向发送变化时, 在它回来限制以使最终输出发生变化之前需要很长的时间。这被上述等式中的附加条件 $-\Delta y/T_d$ 在 PI 控制器的连续时间执行中避免, 其中 Δy 是粗略输出 y 超常限制的数量, T_d 是必须由用户提供的减饱和时间常数。

实际上控制运算法则通常用来执行离散时间步长的数字控制器的工作。在 Bladed 模型中, 尽管离散时间步长通常很快对近似值来说足以成为一个非常好的方法, 但控制器的连续执行是近似表示。既然在离散控制器中积分减饱和可以通过在每一个时间步长上充分调节粗略积分输出来执行, 则持续情况的适配的近似值可以用一个减饱和时间常数近似等于离散控制器的时间步长。

精确值或者瞬时减饱和可以通过设定减饱和时间常数至 0 来整定。

5.7.1 增益编制图表

既然发电机的特性，特别是其动态特性，不是常量但却随运行点、风速而不同，为了确保在所有的风速是都能得到适配控制环特性必须调整作为运行点函数的控制器的增益。增益编制图表就是大家所熟悉的，Bladed 所提供的增益编制图表允许任何控制环的比例与积分增益被系数 $1/F$ 除，其中 F 是在一些方式接近于控制器和代表运行点的一些变量 V 的函数。有用选项如下：

- F : 常量
- $F = F(V)$ 查询表定义
- $F = F(V)$ 由多项式定义，但伴随着用于 F 的最小和最大限制。

变量 V 的选择有赖于特殊的控制环。可提供以下选项：

恒速变桨距调节控制器：

- 电气功率，**桨距角**，风速。

变速低于额定转矩控制器：

- 电气功率，发电机速度，风速，**桨距角**（在变桨距调节情况下）。

变速失速调节超过额定值控制器：

- 电气功率，发电机速度，风速。

变速变桨距调节超过额定值控制器：

- 电气功率，发电机速度，风速，**桨距角**。

推荐粗体显示的变量。对于变速低于额定转矩控制器不希望要求增益编制图表。对于变速失速调节超过额定值控制器，无法给出通用规则。因为测量代表风速的困难风速的增益编制图表不是一个实际命题，这一选项只是对研究目的提供的。所用的风速是轮毂风速，它与任何风速计装置在机舱上测量的风速不同，特别是在上风向风机的情况下。

桨距角的增益编制图表被推荐用于变桨距调节控制器，以补偿桨距角超过运行范围在空气动力转矩的灵敏度上的大的变化。稳态载荷计算可以用于计算关于桨距角的空气动力转矩的局部微分， F 可以按比例设定。在许多情况下，按桨距角的比例简单的设定 F 是一个很好的近似值，但是 F 的较低的限制必须设定以防止在小的桨距角时过多的增益。

5.8 控制模型变化

失速调节和变桨距调节的变速控制器要求下列模式变化：

- 速度置位点从 $S1$ 到 $S4$ (参考图 5.3 和 5.6) 的变化。当测量速度穿过临界值 $(S1 + S4)/2$ 时发生此变化。这种模式变化在控制沿最优叶尖速比曲线 BG 作用时是完全良性的，与模式变化点同侧，所以不要求滞后。
- 从低于额定控制到超过额定控制的变化。

对于失速调节情况，从低于额定控制到超过额定控制的变化也是良性的。图 5.3 的 GH 部分的中间所做的转变造成了在控制行为上没有立即变化。然而， G 与 H 一致的情况，或两者相近的情况必须修正模式变化策略，这有赖于风机的特性。

对于变桨距调节的情况，当转矩命令在最大值 (QR) 和速度超过 $S5$ (参考图 5.6) 时超过额定控制的变化发生。当变桨距命令在好的变桨距情况下 (顺桨情况下的最小桨距，变桨助力失速情况下的最大桨距) 和速度降低至低于 $S4$ 时低于额定控制的变化发生。而这一策略通常很适用，依赖于发电机的特性可以对它进行修正。

模式变化发生在离散时间步长时设定一个 0.1 秒的缺省值。

5.9 客户特定控制器

以上所设计的控制运算法则已经得以发展以适合更广泛的情况。然而，这些都是基本的运算法则，对于风力发电机控制器的设计的实际认可差别很大。

因此 Bladed 在动态仿真中提供与用户定义控制器一体化的可能性。通过一个设计界面，用户用任何语言写的及执行或 DLL 汇编的外部控制程序可以用来控制仿真过程。与实际的控制器类似，外部控制器运行于离散时间步长。应用这个工具，Bladed 仿真可以采用任何实际控制运算法则，并提供测试新控制运算法则的有用方法。

例如，用户定义的控制器的可作下列任何一项：

- 在包括功率产生、停止、开始、空转等的运行的任何方面的总体或单独叶片将桨距角或桨距比例控制。
- 对于变速或变滑差风机的发电机转矩控制
- 双速风机的发电机之间的切换
- 控制发电机的电流接触器，允许开或者关发电机来仿真停机与开机。
- 控制轴刹车，模拟停车，空转，开机，停机和功率输出状态之间的转换。
- 机舱偏航控制来模拟闭环偏航控制运算法则和/或启动、停车等的偏航策略。

用户手册描述了编写一个用户定义的外部控制器。理想状态下，约束运算法则编码模块可以被在 Bladed 外部控制器编码和用在风机上的实际控制器硬件的编码之间分享。也可能使用 Bladed 外部控制器直接与风机控制器硬件通信。Bladed 也会合并一些选项进行实时运行，允许它作为一个虚拟风机测试实际控制器使用。

5.10 信号噪音及离散化

当使用一个离散的外部控制器时，Bladed 提供对送到控制器的测量信号附加随机噪音的可能性，也对指定分解离散其信号。

随机信号可能是高斯信号，此种情况下必须指定噪声的标准偏差，或者它可以来自一个矩形分布，此种情况下必须给出分布的半宽。噪音在被离散之前附加在信号上。

6 超级用户控制

手册的这部分涵盖了风机运行以下方面的仿真：

- 开机
- 停机（正常和紧急停机）
- 非运行状态（风轮停车或空转）
- 轴刹车的运行
- 摇摆限制
- 偏航控制

在仿真模型中的这些特征的标准执行被描述。像在闭环控制情况下，超级用户控制逻辑可以被合并到用户定义控制器中—参考 5.9 部分。

6.1 开机

风机开机的仿真开始于在指定速度的风轮（通常但不是必须为 0）和离线的发电机。假设制动在仿真开始时被释放（即在时间为 0 时）。

如果可以选用叶片变桨距或副翼控制，则可指定初始桨距或副翼角，持续沿着一个常数变化率直到到达一个指定角或闭环控制器接收。

当达到一个指定的旋转速度时，发电机达到线形，闭环控制器开始运行。仿真继续直到指定仿真结束时间。

对于变速风机情况下，在闭环控制器的切入之后可以有过渡周期，在风机之前处于正常运行状态。有两种不同的状况：

变速变桨距调节：在此情况下当桨距角还没有到达正常运行值时（‘好桨’）同时闭环控制

器切入，则开机桨距变化率继续应用直到达到正常运行值，或者直到开始满意闭环变桨控制器的 5.8 部分的调节为止。

变速失速调节：当闭环控制器切入时，假设上述控制模型在最初就开始应用。实际上既然在低风速时运行点将受任何情况下的二次最优 C_p 特征值限制则这种假设并不影响开机。

6.2 正常停机

正常停机开始于仿真开始后的指定时间。功率输出模型中的正常运行假设比这一点早，如果需要还有完整的结构和效果上的动态控制。完整的仿真期间结构动态在效果上持续发挥作用。

正常停机的标准的步骤是从开始停机的那一刻起以指定速率开始俯仰叶片(或者移动副翼)，持续直到达到最后的桨距角。当电气功率降到 0 时发电机解列。如果应用内置的变速功率输出控制器，转矩控制器持续正常运行直到这一点¹。

一旦旋转速度降到指定值之下，轴制动便被用来使风轮停下。

仿真持续到风轮停下，或者对于一定的时间内希望瞬时载荷可以在制动圆盘停止时被仿真。然而仿真结束时间并不考虑此，所以必须设定足够长的时间以使停机能够完成。

如果没有变桨控制，制动轨迹速度可以设定很高以致在停机开始立即应用制动。

6.4 部分描述了轴制动本身的动态特性。

6.3 紧急停机

紧急停机开始于仿真开始后的指定时间。功率输出模型中的正常运行假设比这一点早，如果需要还有完整的结构和效果上的动态控制。完整的仿真期间结构动态在效果上持续发挥作用。

紧急停机仿真有几个可用的选项。在所有的情况下都假设发电机在紧急停机开始时失去载荷，不管是因为联网失败或风机的电气或机械故障。

变桨(副翼)作用或者立即开始或者当旋转速度超过指定值时开始。然后应用一个恒变桨率直到到达最终桨距角。提供一个或更多的叶片的桨距来支持指定桨距角仿真桨叶轴承和执行元件的故障。

轴制动也可以用在停机的开始或者当达到指定过速度时。6.4 部分描述了轴制动本身的动态特性。如果因为甩负荷或超速它不再被应用得话，也有一个低于轴制动用于停车时的旋转速度。

仿真持续到风轮停下来，或者对于一定的时间内希望瞬时载荷可以在制动圆盘停止时被仿真。然而仿真结束时间并不考虑此，所以必须设定足够长的时间以使停机能够完成。

6.4 制动动态

无论是正常停机还是紧急停机，当应用轴制动时全制动转矩并未立即应用。相反，转矩在很短的时间内增达到全值。转矩增大可以作为线形转矩缓变仿真或者通过指定查询表给出时间函数所达到的制动转矩来仿真。

6.5 空转和停车仿真

对于在空转和停车状态仿真，要指定一个恒桨距角，发电机离网，且没有变桨控制行为。对于停车的风轮应用轴制动，风轮方位角必须指定。方位角被从顶部死区中心叶片 1 的 0 点开始测量。

这些仿真中的所有指定的结构动态都有效。如果轴转矩超过指定制动转矩这也允许轴制动在停车仿真期间出现滑动的可能性。

6.6 偏航控制

6.6.1 主动偏航

主动偏航运动可以被定义成这两种方式中的一种：

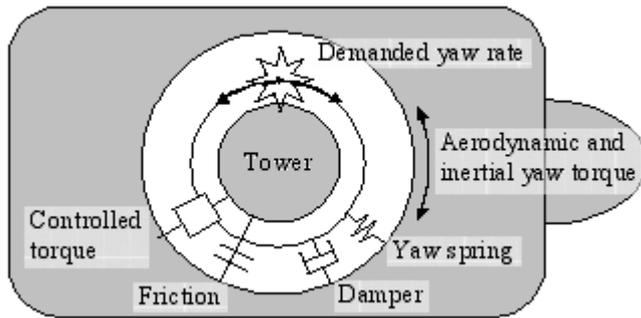
1. 可以指定定频偏航调节，在任何仿真的给定点开始。这表示在指定角速度出通过一个给定的角度在名义上的机舱位置的变化。
2. 用户定义控制器（5.9 部分）可以在任何时间被用在指定偏航比率或者偏航执行转矩上。

如果主动偏航用来控制偏航比率，其作用是以指定的方式改变‘所要求的机舱角度’。实际的机舱角度依赖于偏航的动态特性-参考下一部分。

6.6.2 偏航动态特性

定义偏航的动态特性可以使用三个选项：

1. 刚性偏航：实际机舱角度 ϕ 紧紧跟随‘所要求的机舱角度’ ϕ_0 。
2. 柔性偏航：出现了一定的弹性，通常在偏航执行系统中，所以实际机舱角度 ϕ 不能紧紧跟随‘所要求的机舱角度’ ϕ_0 。极端的情况是自由偏航，当所要求的机舱角度不起作用时。
3. 控制偏航转矩：这只用在有外部控制器可以定义偏航执行转矩命令的情况下。



偏航控制类型	所要求的偏航比率	偏航弹性与阻尼	摩擦	控制转矩
一个也没有	无	无	无	无
刚性	有	无	无	无
柔性	有	有	有	无
控制转矩	无	无	有	有

柔性或自由偏航的情况下，偏航阻尼 D_y 可以指定。它可以指定相对偏航运动的转矩 Q_d ，由下式给出：

$$Q_d = D_y(\dot{\phi}_0 - \dot{\phi})$$

在柔性偏航情况下，偏航弹性可以被指定为线性弹性或者作为水力偏航驱动中用来提供弹性的水利蓄力器系统。假设水利系统是双动的，在偏航电机的两侧各有一个蓄力器（或蓄力器的设定）。运动的反作用转矩由蓄力器里的空气压缩提供。如果正常的气体体积是 V_0 ，偏航

电机两侧的瞬时气体体积分别为 v_1 和 v_2 则反作用转矩 Q_k 由下式给出:

$$Q_k = KP_0 \left(\left[\frac{V_0}{v_1} \right]^\gamma - \left[\frac{V_0}{v_2} \right]^\gamma \right)$$

其中 $v_1 = V_0 + F(\phi - \phi_0)$, $v_2 = V_0 - F(\phi - \phi_0)$ 。 P_0 是水力系统的均衡压力。常数 K 定义了偏航轴承发展的转矩和通过偏航电机的不同的压力之间的联系, 而 F 是流过偏航电机的油的容积和导致的偏航轴承上的角运动之间的联系。 γ 是气体定律常量: $PV^\gamma = RT$ 。 令 $\gamma = 1$ 指定蓄力器的等温条件。

6.7 摇摆限制

尽管没有严格的监督控制功能, Bladed 在此还是对摇摆的风轮的摇摆限制模型进行了描述。模型允许有摇摆角的反作用力矩的线性变化, 但是也允许一个自由摇摆角和一个初始的预载。图 6.1 定义了相关的参数。允许线性阻尼, 按照摇摆比率给出附加力矩分布。

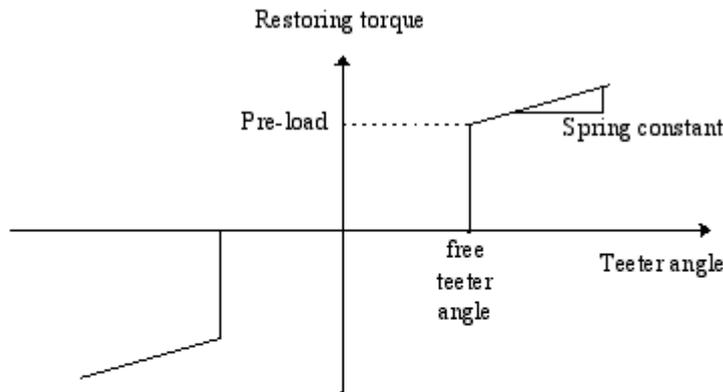


Figure 6.1: Teeter restraint model

9 模拟地震

对于位于地震活跃区的风力发电机, 估计由于地震时的载荷是非常重要的。Bladed 为用户提供了用于历史时间记录的性能计算的选项, 或者提供产生合成加速度以满足给定感应波谱的选项。

9.1 动态相应的计算

Bladed 假设土壤是刚性的所以不与结构的动态相应相合。

单个模型自由度的运动方程假定不与其他自由度耦合, 方程如下:

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = l_i\ddot{x}_g$$

其中 q_i 是时间依赖的模型偏移量, \ddot{x}_g 是地面加速度。且:

$$l_i = \int_0^H m(h)\phi_i(h)dh \quad \text{是地震参与因数。}$$

$l_i \ddot{x}_g$ 是 Bladed 里被加的广义应力。

9.2 感应波谱

受到 $-m\ddot{u}_g$ 应力的单自由度系统的运动方程展示如下：

$$\ddot{u} + 2\omega\xi\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g$$

其中 ω 是结构角频率， ξ 是阻尼比。此等式解答了许多有不同周期的单自由度结构，每一种都受到相同的地面加速度，每一种都有相同的阻尼比。相对于结构频率的最大响应的测绘被称为感应波谱 [9. 1]。设计感应光谱通常出现在相对于周期（与结构的自然频率相反）的最大加速度的测绘处。

9.3 感应光谱兼容加速度图的产生

产生感应光谱兼容加速度图的运算法则是一个迭代过程。指定随意数的初始值的以保证结果的可重复性。过程描述如下：

第一步是设置一组随意数，然后及时按照他们的位置的功能进行划分以产生典型的地震形状。用户可以在刚性或柔性特性的全部典型的形状之间选择。如果选择柔性土壤特性，固定部分及衰减常数也可以指定。时间历程通过低通和高通滤波器被传送以去除不希望的频率。

初始设置完成以后，就是迭代过程 [9. 2]，有以下几步：

- 计算感应光谱
- 在一定量的频率点与目标感应光谱的比较。
- 检查是否满足收敛性判别标准。
- 划分频域。

每一次迭代就计算一次感应光谱，就与目标感应光谱比较一次。

用户能够指定来自设计感应光谱的计算点的所获得的偏移的上限和下限。如果所有的点都在这个范围内，则满足收敛性判别准则，能完成迭代过程。如果有任何一点超出这个范围，随时间变化的傅立叶转换有如下的关系：

$$V_{g(new)} = V_{g(old)} \left(\frac{S_a^D}{S_a} \right)$$

其中 V_g 加速时间变化的傅立叶转换， S_a^D 是目标光谱值， S_a 是实际光谱值。

最后阶段是修正峰值加速度，以使它总是等于目标感应光谱的 0 周期值。也修正平均值，以使地震末端的地面速度总是为 0。

10. 后处理

Bladed 包含了一个完整的后处理工具允许风机的计算结果一不同的方式作进一步的处理。这一部分描述了这些后处理计算的理论依据。

10.1 基本统计

计算以下的信号基本统计特性：

最小值 $MIN(x)$

最大值 $MAX(x)$

平均值	\bar{x}
标准偏移量	$\sigma = \sqrt{(x - \bar{x})^2}$
偏斜	$\overline{(x - \bar{x})^3} / \sigma^3$
峰度	$\overline{(x - \bar{x})^4} / \sigma^4$

10.2 傅立叶谐波，周期和随机分量

风机载荷有周期分量和随机分量组成。载荷的周期分量是由风轮方位角作用的不同影响产生的，例如重力载荷，塔影，偏航未对准，风切变等。随机分量是由风湍流的随机自然特性产生的。在理解湍流风的载荷时区分载荷随时间变化的周期分量和随机分量是有用的，进一步根据基本旋转频率的谐波分析周期分量。

信号的周期分量是相对于风轮方位角重新分级信号得来的。方位角分级的数量由用户指定，另外它也可以从时间变化的第一个双方位角值计算而得。这些都被用来定义方位角分级宽度，以调整准确的旋转分数。

方位角分级的数量必须兼容时间变化的采样间隔。如果使用太多的分级，则它们中的某一些可能不被采样，使得计算无法继续进行。

已经得到信号的周期分量，傅立叶谐波可以通过离散的傅立叶转换得到，第一次增长以后应用线性插值分级的数量由两倍变到四倍。

对于每一个时间点，信号的随机分量通过减去此时间点方位角计算的周期分量而得到。线性插值用在方位角分级之间。

10.3 极限预测

我们希望知道风机在其使用期内的极限载荷，因而极限载荷的预测在风机的设计中是非常重要的部分。以这些极限载荷的预测为基础只是确定载荷情况的普通的练习，根据设计标准和认证规则指定的有幅值和上升时间的离散阵风来表示风的湍流。离散阵风可以如 Bladed 中 7.4.3 部分描述的进行仿真。

一个可选的方法，避免了这些离散阵风的任意性问题，以概率技术为基础，通过随机分布表示出湍流所产生的载荷的随机性。尽管这种方法已经在建筑和相似结构的极端载荷的计算上用了很多年，但它用在风机载荷上还是很少。应用它对风机的运行进行分析时非常复杂的因为必须考虑合成的随机载荷和确定载荷分量的概率分布。

任何特定的风机载荷可以表达如下：

$$y(t) = z(t) + x(t)$$

其中 z 和 x 分别表示载荷的周期与随机分量（见 10.2 部分）。对于一个好的近似值来说假定载荷的随机分量是高斯型的，则其概率分布为：

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-x^2 / 2\sigma_x^2}$$

其中 σ_x 是 x 的标准偏移量。对于这样一个信号，Rice 已经推导出信号峰值的概率分布：

$$\hat{P}(x) = \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\eta^2/2(1-\gamma^2)} + \frac{\eta\gamma}{2\sigma_x} e^{-\eta^2/2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\eta}{\sqrt{\frac{2}{\gamma^2}-2}} \right) \right)$$

其中 $\eta = x/\sigma_x$

$$\gamma = v_0/v_m$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{M_2}{M_0}} \quad (\text{零交叉或表现频率})$$

$$v_m = \sqrt{\frac{M_4}{M_2}} \quad (\text{峰值频率})$$

$$M_i = \int_0^\infty f^i H(f) df \quad (\text{第 } i \text{ 个光谱力矩})$$

f 是频率 (Hz)

H(f) 功率光谱密度 (详细计算见下一部分)

erf() 误差函数。

知道了这一过程的峰值的概率分布, 则可推导出极限值的概率分布。对于给定周期的信号的计限值 x, 其峰值必须有这个值而在此周期内的所有其他峰值必须小于次值。概率分布表示如下:

$$\hat{P}(\eta) = N\hat{P}(\eta)(1-Q(\eta))^{N-1}$$

$$\text{其中 } Q(\eta) = \int_\eta^\infty \hat{P}(\eta) d\eta \quad N \text{ 是周期内的峰值数。}$$

Davenport 利用 Rice 等式将它结合给出了下面分析极值概率分布的表达式:

$$\hat{P}(\eta) = \eta \xi e^{-\xi}$$

其中 $\xi = v_0 T e^{-\eta^2/2}$ T 是时间周期。

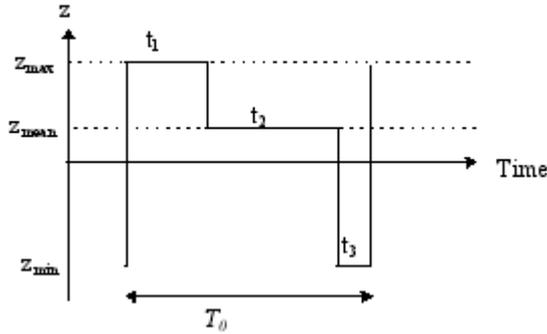
分布的平均值为:

$$\bar{\eta}_{ext} = \beta + \frac{\alpha}{\beta}$$

其中 $\beta = \sqrt{2 \ln(v_0 T)}$ $\alpha = 0.5772$ (欧拉常数)

随着 $v_0 T$ 的增长, 极值分布有一个较大的平均值且开始变窄。

对于一台载荷由随机和周期分量合成的运行的风机，Madsen 等人提出了一种以随机信号的 Davenport 模型为基础的方法，假定总信号的极值发生在周期分量的最小值和最大值时。这允许将周期时间变化理想化成下面的方波：



极值分布的平均值和标准偏移量的表达：

极值最大值：

$$\bar{y}_{e\max} = z_{\max} + \sigma_x \left(\beta_1 + \frac{\alpha}{\beta_1} \right)$$

$$\sigma_{e\max} = \sigma_x \frac{\pi}{\sqrt{6}\beta_1}$$

其中 $\beta_1 = \sqrt{2 \ln(\varepsilon_1 v_0 T)}$

$$\varepsilon_1 = \frac{t_1}{T_0} = \frac{\sigma_z^2}{(z_{\max} - z_{\text{mean}})(z_{\max} - z_{\min})}$$

而极值最小值：

$$\bar{y}_{e\min} = z_{\min} - \sigma_x \left(\beta_3 + \frac{\alpha}{\beta_3} \right)$$

$$\sigma_{e\min} = \sigma_x \frac{\pi}{\sqrt{6}\beta_3}$$

其中 $\beta_3 = \sqrt{2 \ln(\varepsilon_3 v_0 T)}$

$$\varepsilon_3 = \frac{t_3}{T_0} = \frac{\sigma_z^2}{(z_{\text{mean}} - z_{\min})(z_{\max} - z_{\min})}$$

此处 σ_z 是周期分量 z 的标准偏移量。时间周期 T 应当作为使用寿命仿真的条件的总的的时间。

10.4 光谱分析

Bladed 运行自普密度，互普数量及相位，转移函数和相干函数的计算。

包括谱分析在内的所有的计算都使用有总体均值的快速傅立叶变换技术。为了完成谱分析，信号被分成许多等长度的小段，每一段都包含许多点必须是 2 多少次幂。这些小段不需要独

立可以交迭。每一段以乘积的方式通过一个最终将分段逐渐减少至零的视窗函数来定型。这特别提高了高频率的频谱。窗口函数的选择很实用。随意地，每一小段在经过窗口函数之前可以有一个线性移动趋势，这有助于提高低频率的频谱估计。最终的频谱为每一小段频谱的平均值，且被测量以重新调整窗口函数作用的计算的变化。

所要求的信息如下：

点数：每一段上的数据点。必须是 2 的幂数；如果不是，通过程序调整。最大允许值为 4096。点数越多，频率分解越好，这一点在低频率阶段是特别重要的。然而，选择较少的点可以使频谱光滑因为有更多的片断被平均。如果拿不准，521 是一个好的开始点。

交迭百分比：片断之间的交迭。必须低于 100%。如果应用一个举行窗的话尽管 0% 更适合，但通常认为 50% 比较满意。

窗口：提供下列五种窗口函数的选择：

(a) 矩形窗（与不用窗等价）

(b) 三角窗： $1 - |2f - 1|$

(c) 汉宁窗： $(1 - \cos(2\pi f)) / 2$

(d) 哈明窗： $0.54 - 0.46 \cos(2\pi f)$

(e) 威尔窗： $1 - (2f - 1)^2$

此处 f 是沿分段方向的分点数（从 0 到 1）。推荐采用最后三个窗口中的一个。

通向移动通常是令人想要的。

10.5 概率，峰值和平面交叉分析

这些计算由重新分级值产生。所用分级的类型和范围由程序计算，除非它们已经由用户指定。

简单的概率密度分析将信号值分级。从概率密度函数看，它也计算累计的概率分布。计算与信号有相同的平均值和标准偏移量的高斯分布来进行比较。有一个移动信号平均值的选项：将计算分布的平均值移动到 0。

峰值分析只将那些是信号旋转点的信号值分级。峰和谷单独分级，以至于每一个概率分布都可以输出。

对于平面交叉分析，在每一个分级中点要计算上交叉和下交叉的数量。每一个分级中点的每一个方向上每单位时间交叉的数量被输出。

10.6 雨流周波计算

雨流周波计算是作为结构疲劳分析基础所采用的最能接受的方法。雨流周波计算方法的关键优点是它能够适当考虑到在应力应变滞后回线上下关系中应力或应变的变号。

周波计算过程包括以下几步：

- 查找应力变化过程通过旋转点的辨识来确定连续的波峰和波谷。
- 连续的波峰和波谷再重新排列使得序列以应力变化过程的最高峰值开始。
- 审视波峰和波谷的序列以确定雨流周波。雨流周波只有当范围超过用户定义的最小范围时才被记录。用户指定最小范围的目的是过滤出小的周波，这是所希望的。
- 记录每一个雨流周波的平均值与范围。
- 雨流周波的计算根据周波平均值与范围来分级。分级的分布是由用户定义的，用户需要指定应力的最小和最大值以及所用的级数。

雨流周波计算分析的输出由在周波平均值和范围上的分级的周波数的二维分布组成。

这一计算也可以拓展用来产生**损害等效载荷**。用户指定一个或更多的反向 S-N 斜面 m （见下一部分）和频率 f （恒速机械的典型的 IP），等效载荷被作为恒频 f 的正弦曲线载荷的振幅来计算的，这可以产生与初始信号相同的疲劳损害。因此等效载荷由下式给出：

$$\left(\frac{\sum_i n_i S_i^m}{Tf} \right)^{\frac{1}{m}}$$

n_i 是载荷范围 s_i 内的周波数， T 是初始时间分布的持续时间。

10.6.2 疲劳分析

如上所描述的，一个复杂的应力分布可以通过雨流周波计算技术的应用根据连续周波来表示。雨流周波的分布根据相对应力范围和平均值的分级的周波数定义。

Bladed 所提供的疲劳分析的基础是根据 Palmgren-Miner 线性累积损害率估计疲劳破坏的发生。当累积疲劳损害数达到 1.0 时破坏将发生：

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1.0$$

其中 n_i 是第 i 个应力范围的雨流周波的数量， N_i 是相应的破坏周波数。总和定义为累积损坏。

应力范围的雨流周波数 s_i ，破坏周波数 N_i 由材料的 S-N 曲线给出。Bladed 用户必须提供两种方式中的一种 S-N 曲线。第一种是 S-N 曲线作为 log-log 形式提供：

$$\log S = \frac{1}{m} \log k - \frac{1}{m} \log N$$

所以 $N = kS^{-m}$

用户必须指定 m 的值， $\log S$ 相对于 $\log N$ 关系的反向斜度。用户也必须指定 log-log 关系的截距 c 。上述参数 k 与截距 c 有关：

$$k = c^m$$

第二个选项是用户通过使用查询表指定 S-N 曲线作为通用函数。

对于一种材料作用在其上的平均应力影响到累积的疲劳损害，Bladed 提供假定 0 平均应力值的转换每一个周波排列为其等效排列的选项。（一个有 0 平均值的周波有 -1 的 R 比，其中 R 是最小应力与最大应力的比值。）这种转换通过古德曼应力图执行，用户需要提供材料的极限抗拉强度。接下来的转换，疲劳分析过程使用 Palmgren-Miner 规律和用户指定的 S-N 曲线来进行上述描述。

疲劳分析的输出由应力变化造成所造成的累积损害和在雨流周波的平均值和范围上分级的累积损害的比例的二维分布组成。

10.7 年功率生产

年功率生产是根据对发电机的功率曲线的积分和时平均风速的威尔分布来计算的。功率曲线是根据许多离散风速定义的，且假定这些点之间的变化是线性的。

威布尔分布定义如下:

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c\bar{V}}\right)^k}$$

其中 F 是风速 V 的累积分布。因此概率密度 $f(V)$ 由下式给出:

$$f(V) = -k \frac{V^{k-1}}{(c\bar{V})^k} e^{-\left(\frac{V}{c\bar{V}}\right)^k}$$

其中 k 是威布尔波形因数, c 是比例因子。对于一个真正的威布尔分布, 这两个参数的关系为:

$$c = \bar{V} \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

如果用户没有提供 c 值, 可以根据上面的方法计算得到。注意如果提供不同的值, 其结果分布将有一个不同于 \bar{V} 的平均值。

年功率生产计算公式为:

$$E = Y \int_{cutin}^{cutout} P(V) f(V) dV$$

其中 $P(V)$ 是功率曲线, 即作为风速函数的电功率。Y 是年长, 按 365 天考虑。

结果要进一步乘以风机的有效性, 假定这一目的与风速无关。

常常使用稳态功率曲线, 结合时平均风速的威布尔分布。对于更精确的计算, 希望使用动态计算功率曲线给出作为以风机风场模型为基础的一系列仿真的平均功率。通常是用 10 分钟的仿真来计算风机动力学与风的湍流的影响。严格来讲, 在此情况下适当的使用威布尔分布可以表示出一年内 10 分钟平均风速的分布。这比时平均情况要有一个稍微减小的形状因数。

10.8 最终载荷

对于验证计算经常要求最终载荷计算, 这是一个简单的概念: 分析载荷仿真结果寻找指定载荷达到其最大值和最小值的次数。在那些时刻的所有载荷的瞬时值都被记录。

称为‘最终载荷情况’的进一步的计算进一步分析了不同组的载荷情况的许多最终载荷计算结果, 并产生显示载荷情况的柱状图, 图中显示了每一组所发生的每一种载荷的最大值和最小值。

10.9 闪变

闪变计算产生了短期闪变强度值 (P_{st}), 不论是电压随时间变化的还是有功与无功功率随时间变化的。这种时间变化对于恒速感应电机的全部电气模型的仿真都是可用的, 对于变速电机模型也是。

闪变强度是对电压偏移所造成的干扰的测量, 这种干扰通过对白炽灯闪烁结果的感知来确定。来自电压随时间变化的闪变的计算定义见 [10.5]。符合这一标准的运算法则被用于 Bladed 的前期处理。也可以计算来自有功和无功功率随时间变化的闪变。这种情况下, 先计算电压随时间的变化, 然后计算风机可能连接的任何给定网络的阻抗。事实上, 一个单精度计算可以计算不同电网阻抗的闪变。电网阻抗是作为一组短路功率等级和网角被输入的, 网

角是 (X/R) 的反正切, 其中 X 和 R 分别是电网的电抗和电阻。计算电压作为下列等式的解:

$$U^4 + U^2(2\{QX - PR\} - U_0^2) + (QX - PR)^2 + (PX + QR)^2 = 0$$

其中 U_0 是无穷大母线的电压, P 和 Q 分别是有功和无功功率。

11 参考文献

- 2.1 Glauert H, "An aerodynamic theory of the airscrew", Reports and memoranda, AE. 43, No 786, January 1922
- 2.2 Prandtl L and Tietjens OG, "Applied Hydro and Aeromechanics", Dover Publications, 1957
- 2.3 Pitt D M and Peters D A, "Theoretical prediction of dynamic inflow derivatives", Vertica, Vol. 5, No 1, 1981
- 2.4 Gaonkar G H, Sastry VV, Reddy T S R, Nagabhushanam J and Peters D A, "The use of actuator disc dynamic inflow for helicopter flap lag stability", 8th European Rotorcraft Forum, France, Sept. 1982
- 2.5 Tuckerman L B, "Inertia factors of ellipsoids for use in airship design", NACA Report No 210, 1925
- 2.6 Rasmussen F R, Petersen S M, Larsen G, Kretz A and Andersen P D, "Investigations Of aerodynamics, structural dynamics and fatigue on Danwin180kW", Ris ϕ M-2727, June 1988
- 2.7 Snel H, Houwink R, Bosschers J, Piers W J and van Bussel G J W, "Sectional prediction of 3D effects for stalled flow on rotating blades and comparison with measurements", EWEC '93, Travemunde, March 1993
- 2.8 Leishman J G and Beddoes T S, "A semi-empirical model for dynamic stall", Journal of the American Helicopter Society, July 1989
- 2.9 Harris A, "The role of unsteady aerodynamics in vertical axis wind turbines", Recent developments in the aerodynamics of wind turbines, BWEA workshop, University of Nottingham, February 1990
- 2.10 Galbraith R A McD, Niven A J and Coton F N, "Aspects of unsteady aerodynamics of wind turbines", Recent developments in the aerodynamics of wind turbines, BWEA workshop, University of Nottingham, February 1990
- 4.1 Ahmed-Zaid S and Taleb M, Structural modelling of small and large induction generators using integral manifolds, IEEE trans. Energy Conversion 6, 3, September 1991.
- 4.2 Park R H, Two-reaction theory of synchronous machines, Trans AIEE 48, 1929.
- 4.3 Bossanyi E A, Investigation of torque control using a variable slip induction generator, ETSU WN 6018, ETSU, 1991.
- 4.4 Pedersen T K, Semi-variable speed operation - a compromise? Wind Energy Conversion 1995, 17th BWEA Conference (Warwick), Mechanical Engineering Publications Ltd.
- 7.1 IEC 1400-1, Wind turbine generator systems - Part 1: Safety requirements, Second edition, 1998.
- 7.2 Powles S R J, "The effects of tower shadow on the dynamics of a HAWT", Wind

- Engineering, 7, 1, 1983.
- 7.3 Veers P S, "Three dimensional wind simulation", SAND88 - 0152, Sandia National Laboratories, March 1988.
 - 7.4 Engineering Sciences Data Unit, "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: Single point data for strong winds", ESDU 74031, 1974.
 - 7.5 Engineering Sciences Data Unit, "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: Single point data for strong winds (neutral atmosphere)", ESDU 85020, 1985 (amended 1993).
 - 7.6 Engineering Sciences Data Unit, "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part III: Variations in space and time for strong winds (neutral atmosphere)", ESDU 86010, 1986 (amended 1991).
 - 7.7 IEC 1400-1, Wind turbine generator systems - Part 1: Safety requirements, Second edition, 1997.
 - 7.8 Ainslie J F, "Development of an eddy viscosity model for wind turbine wakes", Proceedings of 7th BWEA Wind Energy Conference, Oxford 1985.
 - 7.9 Ainslie J F, "Development of an Eddy Viscosity model of a Wind Turbine Wake", CERL Memorandum TPRD/L/AP/0081/M83, 1983.
 - 7.10 H Tennekes and J Lumley, "A first course in turbulence", MIT Press, 1980.
 - 7.11 L Prandtl, "Bemerkungen zur Theorie der freien Turbulenz", ZAMM, 22(5), 1942.
 - 7.12 Ainslie J F, "Calculating the flowfield in the wake of wind turbines", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 27, 1988.
 - 7.13 Taylor G J, "Wake Measurements on the Nibe Wind Turbines in Denmark", National Power, ETSU WN 5020, 1990.
 - 7.14 Quarton D C and Ainslie J F, "Turbulence in Wind Turbine Wakes", Wind Engineering, Vol. 14 No. 1, 1990.
 - 7.15 U Hassan, "A Wind Tunnel Investigation of the Wake Structure within Small Wind Turbine Farms", Department of Energy, E/5A/CON/5113/1890, 1992.
 - 7.16 Vermeulen P and Builtjes P, "Mathematical Modelling of Wake Interaction in Wind Turbine Arrays, Part 1", report TNO 81-01473, 1981.
 - 7.17 Vermeulen P and Vijge J, "Mathematical Modelling of Wake Interaction in Wind Turbine Arrays, Part 2", report TNO 81-02834, 1981.
 - 8.1 Goda Y, "A Review on Statistical Interpolation of Wave Data", Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 18, No. 1, March 1979.
 - 8.2 Hogben N and Standing R, "Experience in Computing Wave Loads on Large Bodies", OTC 2189, Offshore Technology Conference, Houston, 1975.
 - 8.3 Wheeler J D, "Method for Calculating Forces Produced by Irregular Waves", J. Petr. Techn., pp. 359-367, March 1970.
 - 8.4 Gudmestad O T, "Measured and Predicted Deep Water Wave Kinematics in Regular and Irregular Seas", Marine Structures, Vol. 6, pp. 1-73, 1993.
 - 8.5 Chaplin J R, "The Computation of Non-Linear Waves on a Current of Arbitrary Non-Uniform Profile," Den Report OTH 90 326, HMSO, 1990.
 - 8.6 Dean R G, "Stream Function Representation of Nonlinear Ocean Waves," Journal of Geophysical Research, Vol. 70, No. 18, Sept. 1965.
 - 8.7 Dean R G, "Stream Function Wave Theory: Validity and Application," Proceedings

- of the Santa Barbara Specialty Conference, Ch. 12, Oct. 1965.
- 8.8 Dalrymple R A, "A Finite Amplitude Wave on a Linear Shear Current," Journal of Geophysical Research, Vol. 79, pp. 4498-4504, 1974.
 - 8.9 Dalrymple R A, "A Numerical Model for Periodic Finite Amplitude Waves on a Rotational Fluid," Journal of Computational Physics, Vol. 24, pp. 29-42, 1977.
 - 9.1 Gupta A K, "Response Spectrum Method", Blackwell Scientific Publications, 1990.
 - 9.2 Clough R W, and Penzien J, "Dynamics of Structures", McGraw Hill, 1993.
 - 10.1 Rice S O, "Mathematical analysis of random noise", Selected papers on noise and stochastic processes, ed. N Wax, 1959.
 - 10.2 Davenport A G, "Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading", Proc. Inst. Civil Eng. 28, pp187-196, 1964.
 - 10.3 Madsen P H, Frandsen S, Holley W E, Hansen J C, "Dynamics and fatigue damage of wind turbine rotors during steady operation", Risø report R-512, 1984.
 - 10.4 Miner M A, "Cumulative damage in fatigue", Transactions of the American Society of mechanical Engineers, Vol. 67, A159-A164, 1945.
 - 10.5 Flickermeter functional and design specification, BSEN60868, 1993, and evaluation of flicker severity, BSEN60868-0, 1993, equivalent to IEC 868-0, 1991.