

风力发电机组 减速机试验规范

Test specification for reducer of wind turbines

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(征求意见稿)

2023 - XX - XX 发布

2023 - XX - XX 实施

目 次

1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 试验要求	1
5 试验内容	3
附录 A（资料性）试验报告要求	8
附录 B（规范性）试验通过判定标准	8

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由国家能源局提出。

本文件由能源行业风电标准化技术委员会风电机械设备分技术委员会（NEA/TC1/SC5）归口。

本文件起草单位：国家能源集团联合动力技术有限公司、南京高精齿轮集团有限公司、重庆清平机械有限公司、重庆减速机有限责任公司、远景能源有限公司、中车山东风电有限公司、中车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部、北京鉴衡认证中心有限公司、上海电气风电集团股份有限公司、中国长江三峡集团有限公司、金风科技股份有限公司、明阳智慧能源集团股份公司、浙江运达风电股份有限公司、哈电风能有限公司、东方电气风电股份有限公司、杭州前进减速机集团股份有限公司、湖南南方宇航高精传动有限公司、上海中任尚科新能源技术有限公司等。

本文件起草人：……。

本文件为首次发布。

风力发电机组 减速机试验规范

1 范围

本文件规定了水平轴风力发电机组减速机的试验要求与试验内容。
本文件适用于水平轴风力发电机组偏航和变桨减速机。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 3785.1-2010 电声学 声级计 第1部分：规范

GB/T 6404.1-2005 齿轮装置的验收规范 第1部分：空气传播噪声的试验规范

GB/T 6404.2-2005 齿轮装置的验收规范 第2部分：验收试验中齿轮装置机械振动的测定

GB/Z 18620.4 圆柱齿轮 检验实施规范 第4部分：表面结构和轮齿接触斑点的检验

GB/T 24607-2009 滚动轴承寿命与可靠性试验及评定

JB/T 5558-2015 减速（增）器试验方法

ISO 4406:2021 液压传动 油液 固体颗粒污染等级代号（Hydraulic fluid power- Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

新开发样机 newly developed prototype

全新开发的为验证设计或方案的合理性和正确性，或生产的可行性而制作的样品。

3.2

改型样机 modified prototype

将相同传动形式、结构形式与产品系列，且已经过长时间挂机验证或完整工厂试验验证的减速机，对其做出对产品零部件强度与寿命不会产生较大影响的局部调整(如传动比、接口尺寸、外观尺寸、润滑油/润滑脂的品牌及型号等)，可视为改型机型。

3.3

批量产品 high volume product

完成样机验证后，形成批量应用的产品。

4 试验要求

4.1 试验件要求（数量定义）

4.1.1 试验件为按风力发电机组制造商与减速机制造商双方约定的技术要求、图样、工艺等文件加工生产制造的合格产品。试验件中主要零件的材料、热处理、加工精度以及试验件的装配过程均应有检测证明文件，以备必要时进行核查或抽检。

4.1.2 试验件箱体内应配备和风力发电机组相同类型、相同体积的润滑剂，以验证减速机润滑冷却性能。

4.2 试验大纲要求

试验前，风力发电机组制造商应与减速机制造商确认试验大纲，认可试验大纲应明确试验项目，试验方法、条件及要求，技术标准，试验场所以及试验不合格处理原则等。试验过程应严格按照认可后的试验大纲进行，并出具相应试验报告，试验报告形式可参照附录A。

4.3 试验范围要求

不同类别的减速机产品进行相应的试验测试，具体试验测试项目见表1。

表1 试验测试类型表

试验项目	新开发样机	改型样机	批量产品
气密性试验	■	■	■
空载试验	■	■	■
加载试验	■	■	◎
加速疲劳寿命试验	◎	◎	◎
传动效率测试	■	◎	◎
极限负载试验	■	◎	◎
超速负载试验	■	◎	◎
频繁启停试验（试验台能力）	◎	◎	◎
破坏性耐久试验	◎	◎	◎
低温试验	◎	◎	◎

注1：■必选，◎依据实际情况确定。
注2：若确认进行加速疲劳寿命试验或破坏性试验，可免除加载试验。

4.4 试验设备要求

4.4.1 试验装置

4.4.1.1 运转试验台架应含空载试验台架和加载性能检测试验台架，台架形式可参考但不限于图1与图2。

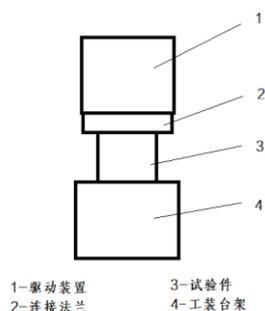


图1 空载试验台架示例

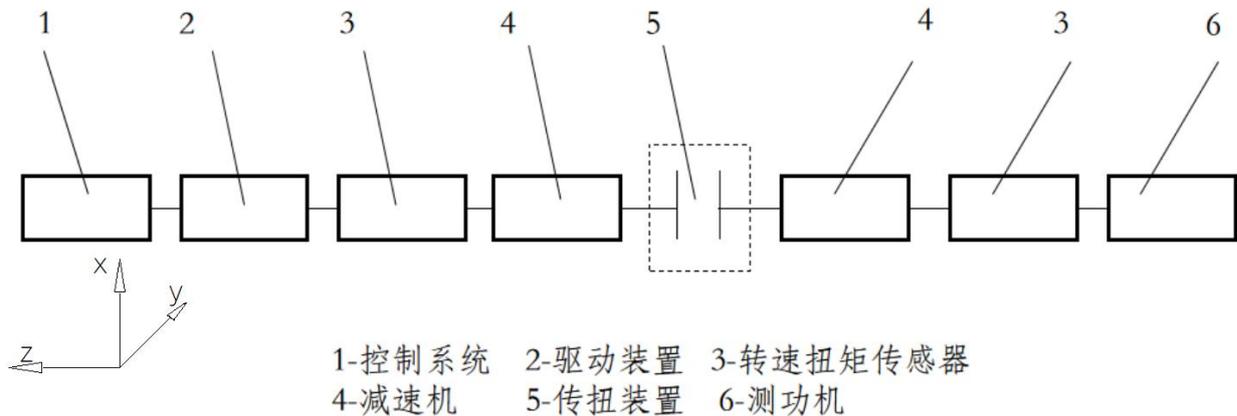


图2 加载试验台架示例

4.4.1.3 运转试验台架加载转矩和转速应稳定, 转速波动不应超过 5%, 转矩波动不应超过 10%, 运转中根据试验具体要求能够可靠地加载/卸载。

4.4.2 检测设备

4.4.2.1 试验测试应具备并能检测各项试验测试所有工况时的扭矩、转速、温度、振动、噪声和清洁度等数据的仪器, 以及数据采集等设备。

4.4.2.2 试验测试所用的检测设备均应在检定有效期内。

4.4.2.3 加载转矩(功率)、转速的测试精度不超过读数的 1%, 优先选择转矩转速传感器与转矩转速测量仪。应至少在被试与陪试减速机高速端各安装一台传感器。

4.4.2.4 减速机油池和轴承温度测定可采用经计量部门鉴定合格的温度计或各类准用测温仪器。

4.4.2.5 试验过程中的噪声测试可采用各种类型的声级计, 其测量精度应符合 GB 3785.1-2010 规定的 2 级, 噪声测试方法应符合 GB/T 6404.1 的规定

4.4.2.6 振动测试仪器与测量方法应符合 GB/T 6404.2 的规定。

5 试验内容

5.1 试验前准备

5.1.1 主试、陪试减速机装配前, 应确认试验齿轮零部件符合设计图纸的精度要求, 并记录齿轮公法线或跨棒距测量结果。

5.1.2 连接螺栓与轴承处应做好周向标识, 并在试验前后进行记录。

5.1.3 确保试验减速机加注润滑油、润滑脂充足, 齿轮及轴承的润滑条件良好、转动灵活。

5.1.4 检测加注的润滑油的油品清洁度应满足 ISO 4406:2021 规定的-/17/14 的要求。

5.1.5 参照 GB/Z 18620.4 的相关要求进行齿轮接触斑点检查的试验准备工作。

5.2 气密性试验

5.2.1 向减速机内部施加气压 0.2 MPa, 撤除气源, 保压 3 min。

5.2.2 压力数值下降不得高于 0.5%。

5.2.3 主试、陪试减速机只有通过气密性检测后才可执行后续其他试验项目。

5.3 空载试验

5.3.1 空载试验台架可采用但不限于图 1 所示型式，新开发样机与改型样机空载试验可在型式试验台架上完成。

5.3.2 新开发样机与改型样机按额定转速进行空载运行 30 min，其中正反向各 15 min。批量产品按额定转速进行空载运行 5 min，其中正反向各 2.5 min。

5.3.3 如有任何不正常声音或不正常震动、泄漏、温升异常等异常情况，立即停止试验，检查并排除问题，然后再重新试验。

5.3.4 试验判定可参照附录 B 的相关要求。

5.4 加载试验

5.4.1 加载试验台架可采用但不限于图 2 所示型式。

5.4.2 在额定转速下，按图 2 所示台位进行加载试验，新开发样机加载试验要求参见表 2。

表2 新开发样机加载试验表

序号	减速机输出端转矩	正转时间 (h)	反转时间 (h)
1	(50%额定载荷)	0.5	0.5
2	(75%额定载荷)	0.5	0.5
3	(100%额定载荷)	24	24
4	(110%额定载荷)	0.5	0.5
5	(120%额定载荷)	0.5	0.5
6	(130%额定载荷)	0.5	0.5

5.4.3 批量产品加载试验应在额定转速 130%额定载荷下正反转各运行 2 h。

5.4.4 如有任何不正常声音，立即停止试验，检查并排除问题，然后再重新试验。

5.4.5 进行振动、噪声和温度的测量，在改变运行载荷后的前 4 h，每 30 min 记录一次，后续载荷循环内每 4 h 记录一次试验数据，并将数据填入对应减速机试验记录卡中。

5.4.6 振动测量要求如下：

- a) 测量方法：在箱体轴承座处测量箱体的振动，测量必须在三个方向上进行，三个方向中的两个须位于齿轮旋转轴线相垂直的平面内，位移不得超过 80 μm；
- b) 测量方向：参考图 2 所示 X、Y、Z 三个方向进行测量；
- c) 记录数据于减速机试验记录表中。

5.4.7 噪声测试要求如下：

- a) 测量方法：在距减速机中分面四周 1 m 处测量空载时噪声，不得超过 JB/T 5558-2015 要求的 85 dB；
- b) 记录数据于减速机试验记录卡中。

5.4.8 温度测试要求如下：

- a) 测量方法：在测试位置温升不得超过 60 ℃；
- b) 测量位置：包括但不限于减速机输入端法兰以及减速机高速级、低速级齿圈处；
- c) 记录数据于减速机试验记录卡中。

5.4.9 数据处理方式按照 JB/T 5558-2015 第 7 章要求执行。

5.4.10 试验完成后应对减速机进行拆解。应对关键重要零部件的变形、磨损、裂纹和损伤等项目进行检查分析，如有需要应借助检测设备或仪器进行专项检查。

5.4.11 试验判定可参照附录 B 的相关要求。

5.5 加速疲劳寿命试验

5.5.1 加速疲劳寿命试验台架可采用但不限于图 2 所示型式。

5.5.2 试验加载前后应保证人员及设备的安全，试验台架周围应增设必要的安全防护装备。

5.5.3 加载要求可由风力发电机组制造商与减速机制造商双方商定。推荐按照基于 Palmgren-Miner 法则的线性疲劳损伤累计理论，对风力发电机组制造商提供的载荷谱进行转换；加速疲劳寿命试验载荷谱总损伤表征值应不低于原载荷谱总损伤表征值的 99%；按转换后载荷谱进行加载试验。试验表格可参考表 3。

表3 加速疲劳寿命试验载荷参考表

序号	减速机加载扭矩	时间(S)			
		正向	反向	每个载荷循环	n 个载荷循环
1					
2					
...					
n					
总计					

5.5.4 试验可分为多个循环，试验循环过程中拆箱检查需求由风力发电机组制造商与减速机制造商根据实际情况进行确认，若有异常现象，则停止试验，若无异常，则复装继续进行试验。

5.5.5 试验过程中按风力发电机组制造商与减速机制造商商定的循环周期进行试验减速机润滑油更换。

5.5.6 如有任何不正常声音，立即停止试验，检查并排除问题，然后再重新试验。

5.5.7 进行振动、噪声和温度的测量，在改变运行载荷后的前 4 h，每 30 min 记录一次，后续载荷循环内每 4 h 记录一次试验数据，并将数据填入对应减速机试验记录卡中。

5.5.8 数据处理方式按照 JB/T 5558-2015 第 7 章要求执行。

5.5.9 试验完成后应对减速机进行拆解。要求对关键重要零部件的变形、磨损、裂纹和损伤等项目的检查分析，如有需要借助检测设备或仪器进行专项检查。

5.5.10 试验判定可参照附录 B 的相关要求。

5.6 传动效率测试

在额定转速与功率条件下进行加载，在运行达到热平衡后10 min，开始记录噪音、振动、转速、输入转矩（驱动装置端）、输出转矩（测功机端）等参数。根据试验台架形式，分析计算减速机传动效率。若采用如图2所示试验台，减速机效率计算见公式（1）。

$$\eta = \frac{\left(\frac{T_M \times R_M}{T_S \times R_S}\right)^{\frac{1}{2}}}{\eta_g} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

式中：

- T_M ---主试减速机扭矩，单位为（kNm）；
- R_M ---主试减速机转速，单位为（r/min）；
- T_S ---陪试减速机扭矩，单位为（kNm）；
- R_S ---陪试减速机转速，单位为（r/min）；
- η_g ---主试减速机与陪试减速机间传动构件效率。

5.7 极限负载试验

- 5.7.1 极限试验台架可采用但不限于图 2 所示形式。
- 5.7.2 试验加载前后应保证人员及设备的安全，试验台架周围应增设必要的安全防护装备。
- 5.7.3 按照极限载荷工况对应的极限转矩进行加载，保证正反向加载至极限载荷之后再卸载。

5.8 超速负载试验

- 5.8.1 超速负载试验台架可采用但不限于图 2 所示型式。
- 5.8.2 试验加载前后应保证人员及设备的安全，试验台架周围应增设必要的安全防护装备。
- 5.8.3 按照超速工况对应的转速及转矩，通过增加动力电机转速及调整陪试端负载进行试验，正反转保持不少于 10 s。

5.9 频繁启停试验

- 5.9.1 频繁启停试验台架可采用但不限于图 2 所示型式。
- 5.9.2 试验加载前后应保证人员及设备的安全，试验台架周围应增设必要的安全防护装备。
- 5.9.3 试验转速、转矩加载要求、单个循环电机启停控制要求与循环次数要求由风力发电机组制造商与减速机制造商双方商定。
- 5.9.4 进行振动、噪声和温度的测量，在改变运行载荷后的前 4 h，每 30 min 记录一次，后续载荷循环内每 4 h 记录一次试验数据，并将数据填入对应减速机试验记录卡中。
- 5.9.5 如有任何异常，立即停止试验，检查并排除问题，然后再重新试验。

5.10 破坏性耐久试验

- 5.10.1 破坏性耐久试验台架可采用但不限于图 2 所示型式。
- 5.10.2 试验加载前应保证人员及设备的安全，试验台架周围应增设必要的安全防护装备。
- 5.10.3 加载要求可由风力发电机组制造商与减速机制造商双方商定。建议试验在额定转速下完成，为缩短试验时间，可适当增加试验载荷。
- 5.10.4 试验循环过程中拆箱检查需求由风力发电机组制造商与减速机制造商根据实际情况进行确认，若有异常现象，由双方共同判断试验是否继续进行，直至确认试验减速机失效。
- 5.10.5 试验过程中按风力发电机组制造商与减速机制造商商定的循环周期或时间周期进行试验减速机润滑油更换。

5.10.6 试验过程中如有任何不正常声音或不正常震动、泄漏、温升异常等异常情况，立即停止试验，由双方共同判断试验是否继续进行，直至确认试验减速机失效。

5.10.7 数据处理方式按照 JB/T 5558-2015 第 7 章要求执行。

5.10.8 试验完成后对减速机进行拆解。要求对关键重要零部件的变形、磨损、裂纹和损伤等项目的检查分析，并对失效部件进行失效原因分析，如有需要借助检测设备或仪器进行专项检查。

5.11 低温试验

5.11.1 应在能够模拟低温环境的试验室对减速机进行低温试验。

5.11.2 试验所用减速机应为通过加载试验验证的合格产品。

5.11.3 试验台架可采用但不限于图 2 所示型式，减速机应接入温度传感器。

5.11.4 将低温试验室的温度降低至风力发电机组制造商与减速机制造商双方协商的产品生存温度，静置 10 h。

5.11.5 将低温试验室的温度由生存温度提高至风力发电机组制造商与减速机制造商双方协商的产品工作最低温度，静置 2 h 后，按风力发电机组制造商机组运行程序控制启动和运转；试验台架需准备外部加热带，模拟机舱中的加热设备。当 $t \geq -30$ °C 时，按额定功率与转速启动减速机，如果不能，则通过试验台架配备的加热带，模拟机舱加热设备加热条件，直到可以启动减速机为止。

5.11.6 如有任何不正常声音或不正常震动、泄漏、温升异常等异常情况，立即停止试验，检查并排除问题，然后再重新试验。

5.11.7 试验完成后对减速机进行拆解。要求对关键重要零部件表面状态、密封件状态与润滑油品质进行检测。

附 录 A

(资料性)

试验报告要求

A.1 总体要求

试验报告内容包括试验标题,报告签审,试验依据,试验件信息,试验结论,各项试验监测数据记录或变化曲线、影像检查记录或报告、测量数据检测记录或报告以及相应的试验结果。

A.2 试验标题要求

试验标题应对所有试验内容高度概括,能简洁明了反映试验内容,为突出试验主题,可增加副标题。如,XX减速机疲劳寿命试验报告,XX减速机型式试验——效率测试报告。

A.3 试验报告签审要求

试验报告参与人员至少应包括编制人、校核人与审批人,并标明试验报告出具时间。

A.4 试验依据要求

试验报告中应明确试验依据,通常为风力发电机组制造商与减速机制造商双方协商制定的试验大纲。

A.5 试验件信息要求

试验报告中应明确试验件基本参数信息,包括但不限于试验零件型号、生产编号以及效率、振动等量化评判项指标。

A.6 试验结论要求

A.6.1 对试验数据记录与报告进行分析与深化,简明扼要的说明全部试验结果,评判标准依据附录B内容。

A.6.2 试验报告编制人员应从保证产品质量的角度判定产品试验结果通过与否,或与同类或相同产品测试结果进行对比评判优劣情况。

A.7 试验记录要求

A.7.1 应保留试验中的原始记录数据,以便查阅,如有必要原始记录数据可以附录形式附于试验报告后。数据记录卡参见表B.1。

A.7.2 对各项试验数据按本文件正文要求进行数据处理,包括但不限于以下项目:

- a) 绘制在额定转速与额定载荷状态下,温度、振动与噪声监测数据时序曲线;

b) 按本文件 5.6 要求进行转矩与转速数据记录，并根据试验台架形式，分析计算减速机传动效率。

A. 7.3 对拆解后的关键重要零部件是否存在变形、磨损、裂纹和损伤情况进行影像记录，对于各级齿轮啮合印记进行影像记录，原始影像数据应保留。

A. 7.4 作为判断试验结论的重要影像记录应体现在试验报告中，试验报告中影像应清晰、客观。

A. 7.5 对疲劳寿命试验中试验通过评判所需的检测项目应进行测量与记录，测量项目至少包含 B. 4 中要求，测量与记录卡参见表 A. 2、表 A. 3 形式。

A. 7.6 在各项数据记录、数据处理与分析后应给出单项试验判定结果，如果存在特殊情况，如数据存在异常等，需在报告中解释说明。

表 A. 1 试验监测数据记录表

时间	输入 转速	电机输出 扭矩	噪声	表面振动						表面温度			
				位置 1 (mm)			位置 N (mm)			°C			
				X	Y	Z	X	Y	Z	①	...	N	
min	r/min	N.m	dB										

表 A. 2 齿面摩擦磨损厚度记录表

零件名称	零件图号	零件序列号	试验前公法线或跨棒距测量值			试验前公法线或跨棒距测量值			磨损量
			①	②	③	①	②	③	
XX 齿轮									

表 A. 3 齿面硬度记录表

零件名称	零件图号	零件序列号	试验前表面硬度			试验后表面硬度		
			①	②	③	①	②	③
XX 齿轮								

附录 B

(规范性)

试验通过判定标准

B.1 目的

本附录中主要提供了空载试验通过判定标准、加载试验通过判定标准与全疲劳寿命试验通过判定标准。本附录用于指导风力发电机组偏航减速机与变桨减速机试验结果的判定。

B.2 空载试验通过判定标准

减速机完成空载试验，其通过的指标为：

- a) 在运行过程中无异常声响与异常温升；
- b) 各联接件、紧固件无松动；

B.3 加载试验通过判定标准

减速机完成加载试验，其合格的指标为：

- c) 在试验过程中各联接件、紧固件不得松动；
- d) 在试验过程中减速机运转平稳正常，无冲击振动；
- e) 各级齿轮无断齿、无胶合、无擦伤；
- f) 测试噪声不得超过 85 dB；
- g) 测试位移不得超过 80 μm ；
- h) 测量温升不得超过 60 $^{\circ}\text{C}$ ；
- i) 试验结束后拆箱检查齿轮有无损伤，要求齿轮齿高方向接触 $\geq 50\%$ ，齿宽方向 $\geq 70\%$ ；
- j) 轴承不应出现打滑；
- k) 轴承及箱体等各部件无明显失效形式发生。

B.4 全疲劳寿命试验后判定标准：

除满足加载试验通过判定标准之外，全疲劳寿命试验完成后还应对以下试验结果进行判定：

- a) 齿面点蚀面积限额判定依据 JB/T 5558-2015 中 6.3.1 的相关定量计算公式执行；
- b) 各级单面齿面摩擦磨损厚度，在齿根附近测量不超过齿轮模数值的 4%；
- c) 疲劳寿命试验后，齿面硬度复检：渗碳淬火齿轮齿面硬度 $\geq \text{HRC}58$ ；氮化齿轮齿面硬度 $\geq \text{HV}550$ ；调质齿轮齿面硬度 $\geq \text{HBW}270$ ；
- d) 轴承无疲劳失效现象发生，量化标准参考 GB/T 24607-2009 中 7.4.1 执行，即轴承的套圈或滚动体工作表面基体金属疲劳剥落深度 $< 0.05 \text{ mm}$ ，球轴承剥落面积 $< 0.5 \text{ mm}^2$ ，滚子轴承剥落面积 $< 1.0 \text{ mm}^2$ 。