

风电机组齿轮箱状态监测故障预警方法研究

王申江

国华（河北）新能源有限公司 河北 张家口 075000

摘要：作为一门融合了机械工程、传感技术、信号处理、数据科学以及人工智能等多学科知识的交叉技术领域，风电机组齿轮箱的状态监测与故障预警正日益受到重视。这一领域已不再局限于传统模式下依赖人工进行定期巡检、仅凭经验做出故障判断的方式，而是成功蜕变，构建起了一套智能化、系统化的预测性维护体系。该技术领域的核心意义与巨大价值，体现在它能够推动维护策略从被动应对转变为主动出击，将设备运行中潜藏的不确定性因素转化为可提前洞察、有效掌控的确定性信息。

关键词：风电机组；齿轮箱；监测故障；预警方法

引言

风电机组是风电场完成能量转换并网输出的关键设备，就像风电系统的“心脏”，风电机组的好坏直接决定了风电场能否安全稳定运行以及能够创造多大效益，当风电机组出现故障时会导致风电场的发电量大幅减少，维修成本大大增加，影响风电场效益。从风电机组当中各个部位而言，齿轮箱的重要性也不言而喻，它是保证风电机组运行、进行动力传递和变换的一个十分重要的部位。因此，研制出一种风电机组齿轮箱的健康状态监测系统很有必要，需要监测到齿轮箱的健康状态，可以提前发现潜在故障隐患，辅助于运维人员作出合理化的决策，提前做好预防性维护工作，可以避免故障的发生，还可以保证风电机组的可靠性及利用率，进而促进风电场的安全稳定运行，最大化风电场的经济效益。

1 风电齿轮箱

在风力发电这一庞大而精妙的能源转换系统中，风电齿轮箱占据着举足轻重的地位，它是风力发电机组不可或缺的关键构成部件。风电齿轮箱的核心功能在于高效地实现动力传递。当自然界的风以一定的速度和力量吹拂风力发电机的叶片时，叶片捕获风能并开始旋转，此时风能便初步转化为机械能。然而，这一初步转化得到的机械能所对应的转速，往往难以满足发电机正常发电的需求。因为风轮受风力特性影响，其转速通常处于较低水平，而发电机要稳定、高效地发电，则需要达到特定的较高转速。在这样的情况下，风电齿轮箱就如同一个神奇的“变速魔法师”，它凭借自身精密的齿轮传动结构，将低转速的机械能进行增速处理，把经过提升转速后的动力精准地传递给发电机，使得发电机能够在合适的转速下运转，进而将机械能进一步转化为电能，实现风能到电能的有效转换，极大地提高了风能的利用率。

2 风电机组齿轮箱的常见故障

2.1 滚动轴承故障

轴承在运行过程中最常见的难题之一就是载荷分布在轴承滚珠上不能保持均匀。由于轴承的结构和受力方式，处于轴承底部的滚珠需要承受更多的载荷，所以受力并不均匀，即造成轴承内圈和外圈运转时承受的载荷循环次数不同，产生不同的应力，若受力不平衡，则使该不均匀受力的情况变得更加严重。如此一来，则会对滚动轴承的使用造成不良的影响，使得滚动轴承极易损坏或产生故障，从而在较长的时间内无法发挥正常的功效，因此，相关人员应对产生此情况的原因予以认真分析，并采取相应的预防措施。一方面，确定如何使滚珠负荷均匀地分布于滚珠面上；另一方面要确保工作状态下滚珠面始终受力，而不管施加在外圈上的负荷多么大，这是解决上述问题的根本办法。与此同时，在离接触点有一定距离的滚珠内部，还会缓慢形成细小裂纹，这些裂纹就像装在轴承内的“定时炸弹”，慢慢向四周扩展，直至发生金属剥落现象，在轴承滚珠的表面形成点蚀。而这种点蚀会把滚珠的表面变得不再平滑，影响滚珠的正常滚动，并且还会加速轴承的磨损，增加故障的可能性，直到出现严重的损坏或者其他故障为止。当轴承长时间受到循环应力的作用，在靠近接触点一定的范围内，也会形成滚珠内部微小裂纹，当裂纹进一步发展后，就会使滚珠表层开始剥落并最终变成电蚀，这会给滚珠带来表面的破坏，影响到滚珠的顺利转动，并加剧滚珠表面磨损，加大失效的风险。除此之外，若由于安装过程的问题（例如：安装角度偏斜、安装过紧或过松，以及供油系统的供油量不够）也会使得轴承的内部发生过度磨损甚至擦伤的情况，这样的问题会造成轴承的寿命缩短很多。

2.2 齿轮故障

由于齿轮是机械传动系统的重要传动元件之一，它所处的工作状态将直接影响整个机械传动系统的整体性能及可靠程度。对于齿轮而言，在其受到不间断工作的条件下，两个齿轮之间将会始终处于连续不断的啮合状态，在这种长时间的啮合过程中，必然会造成齿面材料的损耗。显然，在两个齿轮相啮合时，其齿面在工作接触点处必然会发生相对的滑动与滚动，此时会产生相应的摩擦力，此时此摩擦力就相当于成千上万把“刻刀”不停地侵蚀着齿面材料。同样的，在较长时间的啮合传动过程中，齿轮也会发生持续的摩擦磨损，即齿面材料损耗，这使原本规整的齿面发生改变。齿面的损耗改变了齿廓的形状，原本的渐开线齿廓形状变形后会变低、变宽，齿侧隙发生变化。这样就会造成啮合的正确接触位置发生变化，且改变了齿轮的传动比，导致齿轮在运动过程中出现周期性的振动。由于振动会带动周围空气引起压力波动，进而产生噪声。

除了啮合不良和接触斑点之外，齿轮的一些常见的失效模式还有断齿。齿轮断裂是一种严重的、破坏性极大的失效模式，主要由较多原因造成的：因为过载在其中由于在实际工作中齿轮所遭受载荷远大于它的设计承载能力，使得齿轮内应力大幅提高，在达到材料的屈服极限之后，使齿轮产生塑性变形，最后断裂；再就因为冲击载荷，瞬时高负荷可以引起齿轮产生裂纹甚至直接断裂；再者是疲劳裂纹，齿轮的长期内交变载荷使齿轮材料内部产生微裂纹，当里面越积越多后，会成长为断面裂纹，当达到一定的程度后，使得齿轮断裂。齿轮断齿后，则丧失了传动功能，从而造成整个机械系统的动力传递中断，设备受损，人员伤亡等一系列的事故。

2.3 箱体共振

此处是在讲齿轮箱极易出现结构共振现象。即在某一

转速范围时，相当于齿轮箱受到某一频率的激振力，在其固有频率范围内，则会发生共振现象。结构共振是一种极其有害的振动，不是齿轮箱正常的平稳运转产生的有规则且受控的振动，它是轮箱箱体被某种很大的无形的激振力所强烈摆动，甚至发生大幅度和高强度的箱体抖动的现象。这种振动并非微小可以忽略的程度，而是剧烈的程度，看起来就像轮箱内部出现了一次严重的“风暴”，并将引起巨大的烦人噪声以及齿轮箱各个部分受到严重的损害；比如可能使箱体上螺栓松脱，焊接破裂，箱体里面齿轮及轴承之类的受极大强度应力作用可能遭到破坏，从而使齿轮箱工作失去正常及寿命提前终结等等一系列严重问题。

3 风力机齿轮箱故障预警措施

3.1 定期检查和更换轴承，实施润滑油监测以减少磨损

风力发电机组庞大的齿轮箱体系里，轴承是当之无愧的核心元件中的“关键先生”。其主要负责两方面的任务：一是为了保持转动部件平衡而使转动平稳、顺畅；二是承担从各个方向传来的各种载荷，以保证整个传动装置能平稳工作。要尽早识别并排除故障的前提条件是对相关状态进行实时准确的判断，为准确获取轴承出现的问题，预防故障的发展，定期对其进行检测和评估。振动分析是检测轴承的“心电图”根据对轴承运行过程产生的振动信号进行频率、幅值等方面的分析判断轴承是否发生故障及故障类型、程度的一种方法；温度监测则是给轴承安上了一把“体温计”，通过时刻观察轴承的工作温度，当正常温度运行的轴承在开始发生磨损后，其运行温度会开始升高，并且当发生轴承滚珠松动现象后，工作温度也会相应提高。因此，应密切关注轴承工作的温度，以免引起其他问题的发生；油温分析是对其润滑油进行检测，以此来反映轴承自身的运转情况。

表1 不同润滑油状态下的主要故障情况及发生概率

润滑油状态	粘度 (cSt)	酸值 (mgKOH/g)	水分含量 (%)	金属颗粒浓度 (ppm)	故障类型	故障发生概率 (%)
正常	60	0.2	0.05	10	无故障	5
轻度污染	55	0.4	0.1	30	轻微磨损	15
中度污染	50	0.6	0.2	60	中度磨损	30

润滑油的状态就像轴承的“生命之源”，齿轮箱故障率会因为润滑油质量好坏有较大差别。当润滑油保持良好时，发生齿轮箱故障的概率较小，约为 5%；若润滑剂产生轻度污染，则发生齿轮箱故障的概率会上升到 15%；当润滑剂处于中度污染或者重度污染状态时，其故障发生概率大幅度提升至 30%或 60%。可见润滑油污染

是造成齿轮箱故障的一个重要原因，当油液中含有大量的金属颗粒物以及水分时，油液会变成一把锋利的“砂纸”，作用于轴承表面，极易造成风机齿轮箱出现严重的磨损问题，甚至是导致风机轴承出现问题。所以需要时刻关注风力发电机组齿轮箱润滑油，发现问题及时更换风力发电机组齿轮箱润滑油，并且在使用上采用正确

的操作方式，并且要随时对设备开展维护工作，才能有效避免设备故障的发生。

3.2 云监测和大数据诊断

信息网络及物联网的发展与进步，提供了新的方法与方式来解决风电齿轮箱的检测问题。异地、实时的云监测应运而生，好比给风电齿轮箱监测装上了“千里眼”“顺风耳”，不受时空约束地实现风电齿轮箱的异地、实时监测。要想做到云监测，必须要做好以下工作：①建立风电齿轮箱状态监测数据采集系统；这好似建一座楼先要把地打牢一样。为了采集风电齿轮箱的状态监测数据，在风力发电齿轮箱上装上各类高精度的传感器（振动传感器、温度传感器、压力传感器）等装置，并实现状态监测信息实时采集。②风电齿轮箱监测数据的无线传输的研究，通过对风电齿轮箱监测数据的无线传输原理和结构研究并对其进行优化设计来保证数据在传送过程中不会出现数据的丢失、延迟等问题，从而保证了后面相关数据的处理和分析工作正常开展。通过对上述系统的研究，可以建立一套完善的风电齿轮箱无线云监测平台系统。这个平台可用来采集并储存大量的信息，并且可以将这些收集的数据加以分析和处理，去挖掘其中所隐藏的价值；而平台的终端层正是供用户去操作的那个层，用户可以使用终端的浏览器去访问平台，在这里，用户可以实现对于风电齿轮箱的实时监测、远程控制以及相关数据的分析，这样一来企业的用户就能够更加高效地实现对于自身的风电数据进行实时的监测工作，能最大程度降低企业设备运维的成本，并且会极大程度上提高风电设备自身的可靠性以及可用性，这是为风电产业的可持续发展提供可靠的技术保障。

3.3 安装振动传感器监测齿轮箱的振动异常，及时发现故障迹象

加装振动传感器能实时监测到齿轮箱振动参数，以便及时准确发现故障前兆。振动传感器的作用机理是能够对齿轮箱运行过程中振动频率和振幅的变化量进行精确测量，在此基础上通过分析数据可以判别出设备是否出现了故障；当故障刚开始时，振动信号会有特点：有的会表现为频率偏移或者振幅变大；其中垂直方向代表振幅大小，水平方向为时间轴，如若在传感器中看出由于齿轮内部出现断齿，则会在某一时刻产生瞬时冲击负载，从而产生较大的振幅。一般而言，当齿轮箱中的齿

轮发生损坏时，在齿轮啮合过程中会产生冲击载荷，从而引起较高的振动信号，此信号位于“齿轮啮合频率”及其谐波附近的频带范围之内，因而，技术人员可以在读取上述这些特定信号的状况下，得出故障发生的部位及故障的种类。由此可见，当存在齿轮损坏的情况时，其齿轮啮合频率谐波强度较大，并且 60~120Hz 这个频带范围内强度最大；如果出现轴承磨损的情况时，其振动频率主要集中在 30~80Hz。由表 2 可知，可以把实际监测到的振动信号与典型频率进行对比来判断故障的类型。若将机器学习算法嵌入其中，则结合历史故障数据进行对比判别，则可以使故障预警更为精确。从而进行有效的干预，最大限度地保证风力机的正常运转进而降低因故障造成的损失。

表2 风力机齿轮箱不同故障模式的振动频率特征

故障模式	振动频率特征	常见频率范围 (Hz)
正常运行	齿轮啮合频率，平稳低频振动	10-50
齿轮损坏	增加齿轮啮合频率和谐波频率	60-120
轴承磨损	低频振动，出现轴承旋转频率	30-80
齿轮啮合不良	高频波动，产生冲击频率	50-150

4 结束语

随着信息技术与数据分析手段的持续革新，风力机齿轮箱的故障预测与健康管理体系正逐步迈向精准化、自动化的新阶段。作为风力发电系统的核心传动部件，齿轮箱的健康状态直接关乎整个风电产业的运行安全与经济效益，因此针对其开展前瞻性故障预警研究，已成为保障行业高质量发展的关键技术支撑，同时还能进一步提高相关企业的运营效益与可持续发展水平。

参考文献

[1]戴春雷. 风电机组运行状态监测与故障预警系统[J]. 电气时代, 2025, (06): 59-62.

[2]潘丛虎,李建东. 风电机组振动监测与故障诊断技术研究[J]. 电力设备管理, 2025, (03): 109-111.

[3]张雅洁. 面向数据不平衡的风电机组状态监测和故障预警方法研究[D]. 华北电力大学(北京), 2024. DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2024.000450.

[4]王清照. 风电机组故障预警方法研究与应用[D]. 西南科技大学, 2023. DOI:10.27415/d.cnki.gxngc.2023.000071.