

风力发电机组液压制动系统泄漏故障定位及密封性优化研究

周建辉

大唐锡盟新能源事业部 内蒙古锡林郭勒盟 011200

摘要：液压制动系统是风力发电机组安全稳定运行的核心保障，承担着机组启动、停机、紧急制动等关键任务，其密封性直接决定机组运行可靠性与运维成本。泄漏是液压制动系统最常见的故障类型，不仅会导致制动压力不足、响应滞后，严重时还会引发机组停机故障，造成巨大经济损失。本文结合风力发电机组液压制动系统的工作原理与运行特点，分析泄漏故障的主要类型及成因，提出精准、高效的故障定位方法，进而从结构设计、材料选型、密封工艺、运维管理等方面制定密封性优化策略，为提升液压制动系统运行稳定性、降低泄漏故障发生率提供理论支撑与实践参考。

关键词：风力发电机组；液压制动系统；泄漏故障；故障定位；密封性优化

1 引言

作为清洁能源的风力发电以其清洁、绿色的特点得到了迅速发展，其机组功率不断提高，运行工况日益复杂。作为风电机组重要的安全保护装置——液压制动系统的性能直接影响着风电机组的安全稳定性和运行经济性，在长时间满载及工况变化较大的条件下，由于腐蚀、零件磨损、密封件老化等原因造成的液压刹车系统漏油现象十分常见，造成刹车液压油大量流失、刹车失效等问题，严重的会直接导致停车事故的发生。因此，开展液压制动系统泄漏故障定位及密封性优化研究，精准识别泄漏位置、明确故障成因，采取科学有效的优化措施，减少泄漏故障发生，对保障风力发电机组安全稳定运行、降低运维成本具有重要的现实意义。

2 风力发电机组液压制动系统工作原理

风电液压刹车装置主要包括液压站、刹车油缸、储能器、控制阀块、密封圈以及管线等部分，其基本的工作原理就是借助液压油不能被压缩的特点，经由液压站把动能转换为液压势能，从而带动刹车油缸运动，以达到刹车片与刹车盘结合或者分开的目的，最终完成风机的刹车和松开操作。

机组正常运转过程中，液压泵站有一定压力，液压油从控制阀组进入制动缸内，使得制动衬片离开制动盘，机组正常转动；需要停机或者紧急制动的时候，控制阀组动作，液压油泄压，制动缸受弹簧力的作用推动制动衬片压住制动盘，在摩擦力的作用下对机组

进行制动。蓄能器对系统进行稳压、补压，可以避免由于液压泵站瞬间的压力变化而影响制动力，还可以在泵站出现故障的情况下给系统提供临时的液压能量，以确保系统的紧急制动。

密封件作为系统密封性的核心部件，分布在制动缸、控制阀组、管路接头等各个连接部位，用于防止液压油泄漏，确保系统压力稳定。^[1]

3 液压制动系统泄漏故障类型及成因

3.1 泄漏故障类型

根据泄漏位置的不同，风力发电机组液压制动系统泄漏故障可分为内部泄漏与外部泄漏两大类。外部泄漏是指液压油从系统部件的间隙、密封处泄漏到系统外部，肉眼可直接观察到，主要表现为管路接头、制动缸活塞杆、控制阀组接口等部位出现油迹、油滴，不仅造成液压油浪费，还可能污染环境、腐蚀周边部件。

内漏是液压油在系统中由高压腔泄漏到低压腔，无法用眼睛观察到，只能根据系统的性能来判断是否存在泄漏现象，在制动缸、控制阀、单向阀等部件内部发生的泄漏都属于内漏。内漏会造成系统压力低、制动反应慢、制动力矩小，严重时甚至会失去制动作用，且故障排查难度远高于外部泄漏。

3.2 泄漏故障成因

根据风电机组的工作环境及液压刹车系统的设计特点分析，泄漏原因主要有以下几个方面。一是密封件损坏，这是造成漏油的主要因素之一。密封圈长时

间在高压、高温、低温环境下工作，在液压油的腐蚀下以及由于零部件运动摩擦、老化等原因，发生密封件变形、开裂、磨损、硬化等情况，造成密封效果变差而发生泄露。二是部件加工与装配误差，液压制动系统的制动缸、管路、接头等部件若加工精度不足，会出现表面粗糙度超标、尺寸偏差等问题；装配过程中若操作不规范，会导致部件配合间隙过大、密封件安装错位、紧固力矩不足等，均会破坏系统密封性，引发泄漏。三是液压油污染与劣化，液压油是液压系统的工作介质，若液压油中混入杂质、水分等污染物，会加剧密封件与部件的磨损，同时污染物会堵塞控制阀组的节流孔，导致系统压力异常，引发泄漏；长期使用后，液压油会发生氧化、老化，粘度下降、腐蚀性增强，也会加速密封件损坏，导致泄漏。四是环境因素影响，风力发电机组多运行在户外，长期受到温度变化、风雨侵蚀、粉尘污染等环境因素影响，管路接头会出现腐蚀、老化、松动等问题，密封件会因温度交替变化出现热胀冷缩，导致密封间隙变大，进而引发泄漏。

4 液压制动系统泄漏故障定位方法

4.1 直观观察法

直观观察法主要适用于外部泄漏故障的定位，是最基础、最便捷的定位方法。定位时，先停止液压制动系统运行，释放系统压力，清理系统部件表面的油污、灰尘，然后启动系统，使系统处于工作压力状态，通过肉眼观察系统各部件的连接部位，重点检查管路接头、制动缸活塞杆、控制阀组接口、蓄能器接口等易泄漏部位，观察是否有油迹、油滴渗出。对于轻微外部泄漏，可在疑似泄漏部位涂抹肥皂水，若出现气泡，则可确定泄漏位置；对于明显泄漏，可直接观察油滴渗出点，快速定位故障位置。该方法操作简单、无需专业设备，但仅适用于外部泄漏，无法定位内部泄漏故障。

4.2 压力检测法

压力检测法适用于内部泄漏与外部泄漏的综合定位，核心是通过检测系统各部位的压力变化，判断是否存在泄漏及泄漏大致位置。定位时，利用压力表、压力传感器等设备，分别检测液压泵站出口、蓄能器、制动缸、控制阀组进出口等关键部位的压力值，与系统正常工作压力进行对比。若某一部位压力下降速度过快，且补充压力后仍无法维持正常范围，则说明该部位存在泄漏；对于内部泄漏，可通过检测制动缸无

杆腔与有杆腔的压力差，若压力差异异常偏小，且制动缸动作迟缓，则可判断制动缸内部存在泄漏；对于管路泄漏，可分段检测管路压力，压力异常下降的路段即为泄漏路段。

4.3 流量检测法

流量检测法基于液压系统流量平衡原理，通过检测系统的进油量与回油量，判断是否存在泄漏及泄漏程度，进而辅助定位泄漏位置。定位时，在液压泵站的进油口、回油口安装流量传感器，检测系统正常工作状态下的进油流量与回油流量，若回油流量明显大于进油流量，且差值稳定，则说明系统存在泄漏，泄漏量即为流量差值。结合压力检测结果，对流量异常的部位进行重点排查，可快速定位泄漏位置。该方法适用于泄漏量较大的故障定位，能同时判断泄漏程度，为故障处理提供参考。^[2]

4.4 超声波检测法

超声波检测方法适合于隐藏处的泄漏定位，特别是内漏以及管道内部的泄漏，具有定位准确、不破坏的优点。其基本原理为：当液压油发生泄漏时，在泄漏口会产生高频超声波信号，而超声波探头能够探测到此信号并根据信号大小及频率的变化来确定泄漏的位置。在对设备进行定位过程中，需将超声波检测仪的探头靠近系统的各个零部件表面，并着重检查制动缸、控制阀组、管路接头等不易发现的位置，如果超声波检测仪显示出存在超声波，并随着仪器探头的移动出现明显的波动，那么就表明此处出现了漏气现象。该方法可定位肉眼无法观察到的泄漏故障，定位精度高，但需要专业设备与操作人员，适用于复杂泄漏故障的排查。

5 液压制动系统密封性优化策略

5.1 优化结构设计

结构设计不合理也是引起泄漏故障的原因之一，改进结构设计可以从根源上避免泄漏故障的发生。一是改进密封结构，对于制动缸、控制阀组等关键零部件，采取双密封结构代替原单密封结构，增加了密封冗余度，并对密封槽大小及形状进行合理设计，保证密封件与密封槽贴合严密，减小密封间隙；对管路接头采用集成式接头代替传统螺纹接头，并减少连接部位的数量，同时改进了接头密封面结构以提高其可靠性。二是优化部件配合精度，提高制动缸缸体、活塞杆、控制阀阀芯等部件的加工精度，降低表面粗糙度，确保部件配合间隙控制在合理范围内，避免因配合间

隙过大导致泄漏；在部件设计中，增加导向结构，减少部件运动时的偏移，避免密封件因受力不均而损坏。三是优化管路布局，结合机组运行空间，合理布置液压管路，减少管路弯曲、弯折次数，避免管路因长期受力、振动导致接头松动、管路破损；在管路易磨损、易振动的部位，增加防护套与固定支架，减少管路振动与磨损。

5.2 合理选型密封材料与液压油

密封材料及液压油品质对系统的密封性有重要影响，合理选型对于提高密封性至关重要。针对密封材料的选型，在考虑了风力发电机组工况的基础上，选择了耐高压、耐高温、耐低温、耐液压油腐蚀、耐磨性能良好的密封材料，比如氟橡胶、聚氨酯橡胶等来代替传统的丁腈橡胶密封件，延长密封圈寿命及提高密封效果；针对制动缸活塞杆类活动部位的密封采用复合型密封，既要满足密封的要求又要具有一定的耐磨性，降低对密封圈的磨损造成的泄露。在液压油选型方面，选用粘度适宜、抗氧化、抗磨损、抗乳化性能优良的液压油，确保液压油在长期运行过程中性能稳定；根据机组运行环境的温度变化，合理选用不同粘度等级的液压油，避免因温度过低导致液压油粘度增大、流动性变差，或温度过高导致液压油粘度下降、密封性能降低。

5.3 改进密封工艺与装配质量

密封工艺及装配质量影响密封效果，优化密封工艺、规范装配操作，能有效降低泄漏故障发生率。在密封工艺上，对密封件进行预处理，通过打磨、清洗等方式，去除密封件表面的毛刺、杂质，增加密封件与密封面的贴合度；使用硫化粘接工艺，将密封件与部件密封面牢牢粘接在一起，减小密封间隙，保证密封性。从装配质量上控制，在装配中制订规范的装配程序，并对装配人员进行专门培训，使其掌握规范的操作方法；在装配中严把零件配合间隙关，防止密封圈装配错位、挤压变形；对于管路接头、控制阀组等联接处，采取对称拧紧的方法，保证紧固力矩合格，防止由于紧固不均造成泄露。

5.4 加强运维管理

合理的运维管理可以及时发现泄漏隐患，延长系统使用寿命，降低泄漏故障发生率。一是建立定期巡检制度，安排专业的运维管理人员对液压制动系统进行定期巡检，重点检查密封件、管路接头、制动缸等

易出现泄漏的位置有无油迹、油滴渗出，检测系统的压力、流量等参数，及时发现泄漏隐患进行处理。二是定期更换密封件与液压油，根据密封件的使用寿命与液压油的运行状态，制定定期更换计划，及时更换老化、磨损的密封件与劣化的液压油，避免因密封件损坏、液压油劣化导致泄漏；更换密封件与液压油时，确保操作规范，避免杂质混入系统。三是加强环境保护，对液压制动系统的关键部件进行防护，避免风雨侵蚀、粉尘污染；在机组运行环境温度变化较大的区域，采取保温、降温措施，减少温度变化对密封件与液压油性能的影响。四是建立故障档案，对泄漏故障的发生时间、位置、成因、处理方法等进行详细记录，分析故障发生规律，针对性优化运维策略，减少同类故障重复发生。^[3]

6 结论

液压制动系统泄漏故障是影响风力发电机组安全稳定运行的主要故障之一，其成因复杂，涉及密封件、部件加工、装配质量、环境因素等多个方面。本文通过分析泄漏故障的类型与成因，提出了直观观察法、压力检测法、流量检测法、超声波检测法四种故障定位方法，可实现不同类型泄漏故障的快速、精准定位；从结构设计、材料选型、密封工艺、运维管理四个方面制定了密封性优化策略，可有效提升系统密封性，降低泄漏故障发生率。随着风电机组单机容量的不断提高及运行工况日趋恶劣，对液压制动系统的密封性能也提出了更高的要求，在今后的工作中可以引入智能化理念，开发以物联网、大数据为依托的漏泄故障智能化监测平台，及时对漏泄故障进行监测、预警和精确定位，提高故障处置效率。

参考文献：

- [1] 戴振冲. 风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述 [J]. 石油石化物资采购, 2023(4):193-195.
- [2] 马孙祺, 宋海良, 廖元文, 等. 风力发电机组偏航系统可靠性分析与安全管理研究 [J]. 进展, 2024(1):129-131.
- [3] 徐丽娜. 风力发电机组结构与抗风性能优化策略分析 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(13):205-207.

作者简介：周建辉（1982、11、09），男，满族，内蒙古赤峰市，硕士研究生，中级工程师，研究方向为风力发电。