

基于冗余控制的一次风机动叶比例阀高精度伺服系统研究与工程应用

王 硕

内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要：对于一次风机动叶调节执行机构可靠性低以及维护成本高的火力发电厂一次风机动叶调节执行机构，本文采用比例阀控制+磁致伸缩位移传感器的闭环控制系统，对该系统进行改造，并应用到600MW火力发电厂工程实例中，通过对比改造后与改造前的系统参数指标，可以证明双电源双比例阀四位移传感器配置后，调节精度提高80%，故障率大幅下降；且年节约厂用电量约810万千瓦时，进而可以得出其改进后的优势所在。从系统动力学特性和冗余切换逻辑方面进行了分析，同时对于极端恶劣环境下传感器的工作状况进行了研究，可为相同机组提供技术支持和参考。

关键词：一次风机；动叶控制；比例阀；磁致伸缩传感器；闭环控制；液压伺服

引言

伴随着火力发电系统的运行，一次风机作为锅炉燃烧系统中的一项重要元件，动叶调节精度直接影响了炉内风粉混合程度以及燃烧稳定性的高低。据中国电力企业联合会统计数据显示：截至2023年，国内300MW等级以上火电机组中因一次风动机叶执行机构故障造成非计划停运比例达12.7%，每次停机造成的直接经济损失约280万元；目前运行的火电发电机组多为高参数、大容量，并且机组都是需要频繁启停的变负荷机组，传统的电动执行机构因为存在着机械磨损和电气故障等原因已经不能满足现代机组的需求。

基于国内某火力发电厂（600MW）改造前年均数据发现：该电厂电动执行机构年均发生故障17.3次，其中：电机过热占比38%、位置传感器失效占比29%、机械连接件松动占比22%。由于发生此类故障导致厂用电率上升0.5~0.8个百分点，而汽温降低1~1.5℃时使燃烧调节滞后，导致NO_x排放浓度波动幅度增大，达30%以上，造成脱硝系统运行压力加大。同时，能源角度测算：一次风机厂用电率高出行业先进值0.3个百分点，折算为年利用小时数4500h，则每年多耗电约810万kW·h，折合标煤约2430t，CO₂排放量约6318t/a。因此，如何采用高效可靠的方法解决这些问题就显得非常必要，研制高效率、强可靠的动叶控制方法也就具有了重要的工程价值，并且对于落实我国碳达峰碳中和的具体技术措施有着重要的现实意义。

1 国内外研究现状

国际上，德国西门子、美国Emerson等企业较早将

比例阀用于电站辅机控制，性能优越，如其液压伺服系统的响应速度（小于50ms）及控制精度（±0.5%）等指标，但由于进口产品比国产产品贵3~5倍，并且需要依靠国外厂家提供技术服务与维护，给我们的备品配件供应以及保障体系带来一定风险。日本东京电力公司在2018年首次使用双比例阀冗余系统于鹿岛发电厂3号机（1000MW），并使用电磁阀无扰切换技术来降低动叶调节的故障率至24%，但此技术并不能彻底解决传感器在高温环境下的信号漂移问题，实际投运过程中也发生过因传感器温漂而造成调节偏差。

国内的有关研究是从本世纪初开始的，2005年就提出了基于模糊PID的动叶调节方法，利用误差的动态修正，提高控制精度到±1.2%，但没有考虑硬件冗余的设计，在执行机构硬件发生故障的情况下还是会存在调节失败的风险；国内某电厂试用单比例阀液压系统，虽然可以降低机械磨损程度，但是无备用通道，在比例阀卡死的情况也会出现调节不可靠的问题，直到2020年中国某科技公司推出一种磁致伸缩位移传感器一体化封装技术，解决了传统测量方式在高温工作条件（-40~120℃）下长期测量的稳定性问题，使传感器能在120℃工况下连续运行1000小时以上并保证精度±0.01%FS。

2 研究内容与技术路线

本研究以国内某采用比例阀控制与磁致伸缩位移传感器的闭环控制系统一次风机动叶为工程对象，重点开展以下研究：

失效机理分析：建立传统电动执行机构故障树模型，量化各故障模式对系统可靠性的影响权重；

方案设计：构建双比例阀冗余控制与三取中传感器配置方案，优化液压油路设计与DCS控制逻辑；

算法开发：基于模糊控制理论开发PID参数自适应调节算法，提升系统动态响应性能；

实验验证：通过实验室仿真与现场带负荷测试，评估系统在正常工况与故障工况下的运行特性；

效益评估：从技术、经济、环保多方面对改造效果进行量化分析，并形成能推广应用的技术规范。

技术路线是理论分析-方案设计-实验验证-工程应用，全程经过100次全行程动作测试确定各项控制参数，最终利用长时间的运行数据评估系统的可靠性和经济性。

3 一次风机动叶传统控制方案的问题分析

3.1 电动执行机构故障机理

3.1.1 电机过热失效机理

传统的电动执行机构以三相异步电机驱动为主，额定功率取为最大调节力矩（一般5~7Nm），机组变负荷运行下机组动叶开度频繁变化（每天大约调节200~300次），因此在运行过程中电动执行机构的电机长年处在断续工作状态；根据某600MW火电厂执行机构电机改造前的试验数据显示，在实际运行工况下，执行机构电机工作时定子最高温度达到112℃，已远超B级绝缘额定限值（130℃）的86%以上；由于电机会产生过热从而加快绝缘老化速度，绕组匝间绝缘电阻由最初测量值约100MΩ降低到10MΩ左右以下，由此加大了匝间短路故障发生的可能性；因为执行机构电机长期在恶劣粉尘环境中使用，使得电机冷却风扇的叶片长期处于积尘的工作状态，风道被堵塞，散热功能衰退约15~20%，加速了过热的发生。

3.1.2 位置传感器故障模式

传统的电位器式传感器是使用滑动触点机构，当一次风机运行在振幅0.05~0.1mm振动及粉尘环境时，容易出现触点氧化、碳膜磨损，使反馈信号出现漂移现象；2020年某电厂的一次风机动叶传感器检修情况中发现，6台风机传感器平均更换周期仅为8个月，其中35%由于触点接触电阻过大（ $> 50\Omega$ ），25%由于碳膜磨损阻值发生变化造成，机组负荷快速变化时，传感器信号延迟达到50~100ms，调节偏差为 $\pm 2.5\%$ ，严重影响了燃烧控制的准确性。

3.1.3 机械传动失效分析

电执行机构输出轴与动叶拐臂的连接采用M16螺栓+防松螺母结构，电执行机构在运行中受到交变力矩 $\pm 300\text{Nm}$ 的作用，使得螺纹副的预紧力逐渐衰减，根据螺栓连接的失效理论可知，当预紧力衰减到初始值的60%

以下时，防松螺母就无法起到防松作用。现场实测结果表明：运行6个月后的螺栓预紧力平均衰减了35%，而12个月后的螺栓预紧力衰减达到了50%，因而，在2019年5月2号机组B一次风机动叶连接销脱落造成了动叶开度突关15%，炉膛负压波动大于 $\pm 500\text{Pa}$ 情况下紧急降负荷30%之后方才找到连接销脱落原因。减速箱齿轮油因高温氧化，从46cSt降低到32cSt以下，齿轮磨损加剧，使传动效率由原设计的90%下降到现在的75%左右。

3.2 控制性能局限性量化分析

传统的电动执行机构多采用开环或者简单的闭环控制，该类执行机构性能的瓶颈可以通过以下方式衡量：调节速率固定，在定速运行时，由0—100%开度，需12—15s，不能满足现代机组对快速变负荷的要求（600MW机组AGC负荷变化率 $\geq 2\%\text{BMCR}/\text{min}$ ，则动叶开度变化需 $\leq 8\text{s}$ ）。抗干扰能力差，当电网电压波动 $\pm 10\%$ 时，电机转速波动 $\pm 5\%$ ，位置偏差达 $\pm 2.5\%$ ，当厂用电系统出现故障造成主供电源电压降低时，会存在调节装置失控的风险。

3.3 经济性损耗模型建立

以国内某火力发电厂（600MW）为对象，建立传统电动执行机构的全生命周期成本模型，其构成如下：

初始采购成本：单台进口执行机构约18万元，6台合计108万元，年均折旧成本13.5万元（按8年折旧期）；

年维护成本：备件更换费12万元（含电机2台、传感器3只、机械连接件若干），人工检修费8万元，合计20万元；

能耗损失：厂用电率高0.5%，年损失电量1350万度（按4500h利用小时），折合499.5万元（电价0.37元/度）；

非停损失：年均2次非停，每次直接损失150万元，合计300万元。

从表格中可以看出，传统方法的年总拥有成本高达833万元，耗能和非停损失占到整个花费的96%，依然有较大的改善空间，通过建立成本—可靠性的函数可知：当执行机构的故障率降低至每年少于2次以下时，其年总费用会减少近一半以上。

4 比例阀控制与磁致伸缩传感器的技术方案

4.1 系统总体架构设计

新方案采用“液压伺服+三重冗余”架构，由DCS控制器、比例阀组、液压油缸、磁致伸缩传感器及辅助油路组成。系统核心创新点包括：

硬件冗余：配置双比例阀一用一备，通过4只电磁阀实现无扰切换；

传感器配置：采用4只磁致伸缩传感器（三用一备），信号经三取中逻辑处理，提高测量可靠性；

电源系统：独立双电源供电（AC220V+DC24V），单路失电时自动切换，确保故障工况下动叶位置锁定；

液压油路：采用闭式循环系统，配备高精度滤油器（过滤精度 $\leq 10\mu\text{m}$ ）与冷却器（温控范围40-50℃），保证液压油清洁度与粘度稳定。

4.2 比例阀控制原理与参数设计

所谓比例阀是电液转换核心元件之一，它所对应的输入信号（即电流信号）与其输出流量的关系为：当输入信号由4mA上升到20mA时，流量由2L/min~14L/min线性增加；对应的动叶开度速度由5°/s线性增加到35°/s，满足机组快速变负荷的要求。

4.3 冗余切换逻辑设计

系统设置三级故障诊断与切换机制：预诊断层：实时监测比例阀线圈温度（阈值80℃）、输出压力波动（阈值 $\pm 10\%$ ）、电磁阀响应时间（阈值50ms），当参数超限时发出预警；

切换执行层：当检测到比例阀故障时，DCS发出切换指令，先开启备用比例阀对应的电磁阀，延迟20ms后关闭工作阀电磁阀，确保油路无负压冲击；

状态保持层：切换过程中，通过预充压技术使备用阀入口压力维持在11.5MPa（系统额定压力12MPa），确保动叶开度变化 $< 0.5\%$ ，切换时间控制在120ms以内。

4.4 环境适应性优化

由于一次风机高温和振动的特殊工作环境，对其中使用的传感器进行了优化设计。

耐高温设计：电子仓选用全密封的316L不锈钢外壳，内有导热硅胶（导热系数为 $2.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ），将温度控制在一个合适的范围内；抗振动：波导丝采用张紧方式，其固有频率避开风机的振动主频（100Hz）；防尘设计：游标磁环采用磁流体密封技术，粉尘量 $< 0.1\text{mg}/\text{年}$ 。

5 DCS 控制算法与逻辑优化

5.1 传统PID控制在变负荷工况下存在参数匹配性差的问题，为此设计模糊PID控制器，当误差大且误差变化率大时，增大比例系数以加快响应，同时保持微分系数抑制超调。

5.2 故障安全控制逻辑

为确保系统在故障工况下的安全性，设计三重保护逻辑：

传感器故障处理：当3只工作传感器中任意1只信号偏差 $> 0.5\%$ 时，自动切换至备用传感器，并对故障传感器进行热插拔隔离；

比例阀故障处理：检测到比例阀卡涩时，50ms内完成备用阀切换，切换期间采用前馈控制维持动叶位置；

电源故障处理：双电源失电时，电磁阀失电闭合，液压锁锁定油缸位置，同时DCS发出硬接线跳闸信号至机组保护系统。

6 工程实施与实验验证

6.1 现场改造方案与实施步骤

国内某火力发电厂（600MW）改造工程实施具体步骤如下：

设备选型：采用北京华德液压HD—16B型比例阀（额定流量16L/min，工作压力16MPa），配套使用中船重工710所CPS-1000型磁致伸缩传感器（量程0~1000mm，精度 $\pm 0.01\% \text{FS}$ ）。

油路改造：拆除原电动执行机构，安装双比例阀集成块，油管更换为 $\Phi 16\times 2$ 不锈钢管（壁厚2mm），油路清洁度达到NAS8级；

传感器安装：在风机液压装置上对称安装4只传感器，采用M20 $\times$ 1.5螺纹固定，确保游标磁环与动叶轴同步转动；

控制逻辑修改：在DCS系统中增加冗余切换模块，采样周期设为50ms，开发故障诊断与安全保护子程序；

调试优化：通过100次全行程动作测试，整定PID参数为 $K_p=1.2$ 、 $K_i=0.05$ 、 $K_d=0.2$ ，确保系统动态响应最佳。

6.2 性能测试与数据分析

6.2.1 态响应特性测试

以50%负荷作为基础负荷，在此工况下投运，施加10%阶跃指令，调节时间为：从0到稳态值的90%为6.8s，比原来的速度提高了47.7%，满足AGC快速调节的要求；超调量： $< 3\%$ ，原系统为15%，采用模糊PID算法实现动态参数调节；稳态误差： $\pm 0.2\%$ ，原系统为 $\pm 1.5\%$ ，优于 $\pm 0.5\%$ （行业先进）要求。

通过进一步测试不同负荷下的响应特性，在20%-100%负荷范围下，系统调节时间波动 $\leq 1\text{s}$ 、超调量 $\leq 5\%$ ，调节特性良好，具有较好的负荷适应性。

6.2.2 冗余切换性能测试

开展比例阀在线切换实验的关键参数有以下几点：

切换时间：120ms动叶开度波动 $< 0.3\%$ ，满足要求（0.5%）；压力波动：主油路压力从12MPa降到11.7MPa恢复后波动为2.5%，没有对系统产生冲击；信号连续性：无反馈信号跳变，DCS趋势曲线平滑切换，在切换过程中控制算法仍会继续输出，保证了切换过程中无调节断点；在传感器故障模拟试验中，人为断开1只工作传感器，系统可在10ms内切换到备用传感器，并且切换后

的反馈信号与切换前的反馈信号偏差小于0.1%，证明了三取中逻辑的正确性。

6.2.3 环境适应性测试

为了检测设备是否能够在极限条件下工作正常，下面开展了相关实验。

高温测试：用电源加热使油箱温度达到120℃并运行72h后，传感器精度仍保持在 $\pm 0.01\%$ FS以内；比例阀的响应时间变化小于5%；振动试验：采用振动台激振，连续运行48h后，系统内没有出现任何元器件松动、移位或脱落的现象，输出信号漂移 $< 0.005\%$ FS；电源波动实验：模拟AC220V $\pm 20\%$ 波动，系统仍然能够正常工作且调节精度不发生变化。

6.3 长期运行数据与可靠性分析

根据改造后一年的数据统计得知。

故障率：动叶调节故障率由17.3次/年降低至1.2次/年，下降93%，其中传感器故障为0次，比例阀切换故障为0.2次/年（因为是电磁阀线圈老化原因），调节精度：全负荷范围内调节精度维持 $\pm 0.3\%$ FS左右满足AGC控制要求（ $\pm 0.5\%$ ）。液压系统：泄漏量 $< 50\text{mL/h}$ （国标 $< 150\text{mL/h}$ ），油液污染度NAS7级。电机状态：液压系统配套电机功率为1.5kW（原电动执行机构电机功率5.5kW），电机运行温度 $\leq 70^\circ\text{C}$ ，不存在过热情况。

本文建立了可靠性的模型并进行了分析，最终计算出改进后的系统的平均无故障时间为32000小时，比原系统提高了377.8%，可用性为99.5%，达到了火力发电厂关键辅机的可靠性要求。

7 效益分析与推广应用前景

7.1 直接经济效益

节电收益：厂用电率下降2.8%-2.5%，省电量： $W = 600\text{MW} \times 4500\text{h} \times (2.8\% - 2.5\%) = 810\text{万度}$ ，按照电价0.37元/度计算，年效益：299.7万元；节约维护成本：备件费用由12万元/年降低到2万元/年（主要是电磁阀线圈

的更换），人工检修费从8万元/年降到3万元/年，合计每年节省15万元；设备采购费用：采用国产比例阀系统单台花费仅为8万元，比原来进口电动执行机构（每套18万元）节约了10万元，6台合计节约了60万元，投资回收期2.1年（年收益按314.7万元计）。

7.2 间接经济效益

非停损失减少：改造前每年出现两次非停（误动）损失150万元，共节省300万元。寿命期收益：液压系统寿命设计为15年，比电动执行机构8年延长了7年，初始投入成本为120万，则每年能降低10.5万的支出费用。调峰收益：调节速度提高，机组负荷响应率由原先的1.5%BMCR/min变为现在的2.8%BMCR/min，调峰收益提高约80万（以深调补偿电价计算）。

从整个项目情况来看，改造后的年综合经济效益达615.2万元；全生命周期（15年）总效益大于9228万元，经济效益明显。

结束语：本文通过对本课题进行理论分析，得出方案设计以及工程实践，最终得出以下结论：

可靠性提升：双比例阀冗余加4传感器的配置方案可以使动叶控制可靠度提高到93%，可以满足机组连续运行的要求；且动态性能优越，优于国内国外的所有类似系统；同时又极具经济性，在技术方面具有良好的创新性和先进性；对于推动我国火电机组灵活运行以及为实现“双碳”目标做出技术性支撑具有十分重要的意义。

参考文献

- [1]沈才山,吴祖平.伺服比例阀的特点及在龙滩电站的应用[C]//中国水力发电工程学会信息化专委会、水电控制设备专委会2007年学术交流会论文集.2007.
- [2]唐旭,颜晓斌.冗余伺服比例阀控制电液随动系统[J].自动化信息,2006(8):46-47.
- [3]白维,蒋敏,文庆.吉牛水电站六喷六折调速器的主要特点及应用[J].四川水力发电,2014,33(1):55-57.