

重载工况下电机拖动系统过热故障分析与防护

黄文远 雷震威 赵欣欣

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘要：重载工况下电机拖动系统易出现热累积问题，频发过热故障，严重影响设备运行稳定性与使用寿命。本文首先阐述电机拖动系统结构、发热散热机理及过热故障类型，从负载、设备、控制系统、运维环境多维度剖析故障成因，针对性提出运行优化、设备改造、智能监测、运维升级全方位防护策略。研究可有效解决重载场景电机过热难题，提升系统安全运行效率，为工业电机运维提供技术参考。

关键词：重载工况；电机拖动系统；过热故障；防护

引言：电机拖动系统是工业生产核心动力设备，长期处于重载、冲击负载工况时，极易打破产热与散热平衡，引发绕组、轴承过热故障，造成绝缘老化、设备损毁甚至停机事故。当前工业重载场景下，电机过热隐患隐蔽性强、累积性突出，常规防护手段难以适配复杂工况。为精准防控过热故障，本文系统性研究重载工况电机过热机理与故障诱因，构建系统化防护体系，为设备稳定长效运行提供支撑。

1 重载工况电机拖动系统及过热机理基础理论

1.1 电机拖动系统整体结构与工作原理

(1) 拖动系统核心组成模块包括原动机（电动机）、动力传输机构（联轴器、减速器、传动轴等）及末端负载设备（提升机、皮带机、风机等）。电动机将电能转换为机械能，经传动机构调速增矩后驱动负载做功，形成完整的动力链。(2) 重载工况下，系统长期运行于额定功率的80%~120%区间，甚至短时承受冲击性过载。此时电机输出转矩显著增大，定转子电流上升，转速可能滑差增大，传动机构承受交变应力，系统整体发热量急剧增加，热累积效应明显。(3) 系统正常运行时，温度阈值标准依据绝缘等级确定。我国标准规定：B级绝缘极限工作温度为130℃，F级为155℃，H级为180℃。实际工程中通常将绕组温升限值控制在80K（F级）以内，轴承温度不超过95℃，以确保寿命与可靠性。

1.2 电机发热与散热基础机理

(1) 电机内部热源主要包括铜损（定转子绕组电阻损耗，与电流平方成正比）、铁损（磁滞与涡流损耗，与磁通密度和频率相关）及机械损耗（轴承摩擦、风阻等）。重载时电流大幅增加，铜损呈平方级增长，成为过热主导因素。(2) 散热机制分为自然散热（热传导、对流、辐射）与强制散热（外加风扇或独立冷却器）。自然散热效率低，强制散热可通过增大风量或水

循环显著提升散热系数，但散热能力随冷却介质温度上升而下降^[1]。(3) 重载负载打破产热—散热平衡：产热速率随负载增加而超线性上升，而散热速率仅随温升线性增加。当产热持续大于散热时，电机温升不断累积，直至达到新的高温平衡点或触发保护，严重时导致过热故障。

1.3 重载工况过热故障类型与特征

(1) 持续性过载过热故障表现为绕组温升缓慢而稳定地超出允许值，热积累过程可持续数十分钟至数小时，通常由长期负载过大或冷却条件恶化引起，特征为三相电流均衡偏高，温升曲线呈单调上升趋势。(2) 冲击性重载过热故障由突发性大负载冲击（如堵转、大惯量启动）引起，电流瞬间达到额定值5~7倍，铜损激增数十倍，温升在数秒至数十秒内急剧跃升，易造成绕组局部瞬时超温甚至匝间短路。(3) 局部散热失效引发的过热故障表现为电机表面整体温度不高但局部热点突出，如风道堵塞、风扇断裂、散热片积尘等导致冷却不均，故障特征为红外测温显示明显温度梯度，热点温度可能远超绝缘极限而整体均值仍在阈值以内，隐蔽性强，危害性大。

2 重载工况电机拖动系统过热故障成因分析

2.1 负载工况因素引发的过热故障

(1) 长期额定负载超标导致持续发热。当电机实际负载持续超过设计额定值10%~30%时，定子电流相应超限，铜损按电流平方关系激增（ $P_{\text{铜}} = 3I^2R$ ），超出部分产生的额外热量使绕组温升曲线失去平衡点，即便强制散热全开，温升仍缓慢但不可逆地攀升，最终逼近绝缘等级上限。(2) 频繁启停与冲击负载造成热量累积效应。单次启动电流可达额定值5~7倍，持续时间虽短（数秒），但焦耳热呈平方倍增长；若启停间隔不足以使绕组冷却至环境温度，每次循环后残存热量叠加，形

成阶梯式温升爬坡,累积多次后等效于长时间过载,加速绝缘热老化。(3)负载卡滞与摩擦异常引发额外功耗产热。传动轴偏心、联轴器对中不良或负载机构卡涩,使电机输出扭矩中相当比例用于克服异常阻力,该部分机械能全部转化为摩擦热,且热源位于转子及端盖附近,传导路径短,易形成局部高温区域,加剧轴承与绕组的热应力。

2.2 设备本体故障引发的过热故障

(1)绕组老化与绝缘破损使损耗剧增。长期热循环导致绝缘层脆化、介质损耗角正切增大,泄漏电流上升;同时匝间绝缘破损形成局部短路环流,该环流在绕组内部产生额外铜损,叠加于工作电流之上,实测总损耗可比正常值高出15%~25%,发热量随之显著增加。(2)轴承磨损与润滑失效引发机械过热。轴承滚道点蚀、保持架磨损后摩擦系数增大至正常值2~3倍,配合润滑脂变质干涸,摩擦热急剧上升,该热量经转轴传导至转子铁心及绕组端部,可使绕组平均温度额外升高10~20℃,严重时轴承自身温度超限导致抱轴事故^[2]。(3)转子偏心与扫膛致热异常。轴弯曲或轴承间隙超差使气隙不均匀度超过10%,单边磁拉力增大,铁损分布失衡,局部铁心涡流密度骤增;扫膛发生时转子与定子铁心直接接触,产生剧烈摩擦火花,瞬时温升可达数百摄氏度,直接烧毁绝缘并引发相间短路。

2.3 散热与控制系统失效引发的过热故障

(1)散热风扇损坏或风道堵塞导致散热不畅。轴流风扇叶片断裂或积灰失衡后,风量下降30%~50%,风压不足,机壳表面散热系数大幅降低;同时风道内沉积粉尘形成附加热阻层,使定子铁心热量无法有效传递至外部环境,同负载下温升比正常状态高出25~40K,长期运行必然过热。(2)冷却介质失效严重削弱换热能力。水冷电机中冷却液结垢、微生物滋生或流量不足,使水侧对流换热系数下降;油冷电机中冷却油氧化变质,粘度增大,流动性变差,换热效率衰减。冷却介质进出口温差缩小至正常值的60%以下时,带走热量不足,热量滞留于电机内部^[3]。(3)变频与调压控制系统参数匹配失调。变频器载波频率设置过高引入谐波附加损耗,使转子铜耗增加5%~15%;V/f曲线设定不当导致低频区磁路过饱和,铁损剧增;PID调节振荡或参数漂移使输出电压电流波形畸变,电机额外发热,且保护阈值未随之调整时热积累无法及时切断。

2.4 环境与运维因素辅助致因分析

(1)高温、粉尘与潮湿环境恶化散热条件。环境温度升高使散热温差减小,散热效率呈线性下降;粉尘附

着散热片形成热阻层,潮湿降低绝缘电阻并增大泄漏电流,三者叠加显著抬高电机运行温升基准。(2)日常巡检维护不到位引发隐患累积。未按期清灰、未及时更换润滑脂、未检测绕组绝缘电阻等,使初期轻微劣化逐步发展为严重故障,缺乏预警手段时过热往往突发,缺乏渐进过渡期。(3)设备选型与重载工况适配性不足。选型裕量偏低或未考虑冲击负载工况,电机额定功率与实际峰值负载严重不匹配,即便在正常散热条件下仍长期处于过载运行状态,发热成为固有顽疾无法根治。

3 重载工况电机拖动系统过热故障防护策略与优化方案

3.1 工况运行优化防护技术

(1)重载负载动态调控与启停策略优化。建立负载分级管理制度,根据电机实时温升状态动态调整负载分配,避免单台设备长期满载运行。启停策略上采用“软启动+变频调速”组合方案,将启动电流倍数由直接启动的5~7倍降至2倍以下,减少单次启动注入热量;同时设定最短停机间隔(建议 ≥ 15 分钟),确保绕组温度回落至安全区后方可再次启动,阻断热量阶梯累积效应。

(2)冲击负载缓冲与过载限流控制方案。加装液力耦合器或永磁涡流缓冲装置于电机与负载之间,吸收瞬时冲击能量,使电机输出转矩平缓过渡。电气侧配置电子式过载继电器与快速限流电路,当电流超过设定阈值(如额定值的1.5倍)时,限流电路在毫秒级时间内将电流钳制在允许范围内,保护绕组免受体冲击电流热冲击,同时维持系统连续运行不停机^[4]。(3)系统运行参数实时匹配调节方法。基于负载转矩在线辨识技术,实时计算电机输出功率与效率,动态调节变频器V/f曲线及转差补偿系数,使电机始终运行于高效区间。针对重载工况主动调整载波频率以抑制谐波附加损耗,并根据冷却介质温度自动修正过载保护曲线,实现发热量与散热能力的动态平衡匹配。

3.2 设备结构与散热系统优化改进

(1)电机绕组、铁芯结构优化降低运行损耗。采用低损耗冷轧硅钢片(如B35A270牌号)替代普通硅钢片,降低铁心磁滞与涡流损耗约15%~20%;绕组采用更大截面铜线并优化槽满率,降低单位长度电阻值,从源头减少铜损。同时选用H级及以上绝缘材料,提升耐热裕度,延缓热老化进程。(2)强制散热系统升级与风道结构优化设计。将传统轴流风扇升级为高效离心式风机,风量提升30%以上;对机壳散热筋进行仿生优化设计(增加翅片密度与高度),扩展散热面积。风道结构采用计算流体动力学仿真优化,消除涡流死区与回流短路,确保冷

却气流均匀掠过整个机壳表面，散热系数提升约25%^[5]。

(3) 轴承、传动部件耐磨散热改造方案。选用陶瓷滚动体混合轴承，摩擦系数较钢制轴承降低约40%，摩擦生热量显著减少；轴承腔内加装导热环与散热片结构，将摩擦热直接导出至机壳外表面。传动联轴器采用弹性体缓冲结构，减少刚性冲击产生的额外摩擦功耗，同时定期加注高滴点合成润滑脂（滴点 $\geq 260^{\circ}\text{C}$ ），保证重载高温下润滑膜不破裂。

3.3 智能监测与预警防护体系构建

(1) 温度、电流、振动多参数监测系统搭建。在绕组端部预埋三组PT100铂热电阻（分别监测三相），轴承座处安装热电偶，机壳表面布置红外测温探头；电流互感器采集三相电流有效值与谐波成分；加速度传感器监测轴承振动特征频率。所有信号汇总至数据采集终端，采样频率不低于1kHz，实现运行状态全息感知。(2) 过热故障阈值判定与早期预警算法设计。建立基于温升速率（ dT/dt ）而非单一温度阈值的动态预警判据：当温升速率持续超过设定值（如 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）且电流同步上升时，判定为过载型过热；当温升速率突增而电流平稳时，判定为散热失效型故障。引入长短时记忆神经网络模型，利用历史数据训练预测未来10分钟内温升趋势，实现提前预警。(3) 故障联动保护与自动调控机制。设置三级保护动作策略：一级预警（温升速率异常）触发声光报警并自动降低负载至80%；二级报警（温度接近阈值90%）启动备用冷却系统或降频运行；三级保护（温度超限或温升速率急剧跃升）执行快速分闸断电，同时记录故障前后全程波形数据供事后分析，避免设备损坏扩大化。

3.4 常态化运维防护管理制度优化

(1) 重载设备定期巡检与专项养护规范。制定“日巡+周检+月测”三级养护制度：每日检查散热风扇运转状态、机壳表面温度及异响；每周测量绕组绝缘电阻（500V兆欧表，不低于 $2\text{M}\Omega$ ）并清理风道积尘；每月进行红外热成像全扫描，建立热像档案比对热点演变趋势，做到隐患早发现早处理。(2) 易发热部件定期检修与更换标准。明确轴承更换周期（重载工况建议3000~5000小时或振动超限时立即更换）；散热风扇叶片每季度检查裂纹与动平衡；冷却液每半年更换并清洗水道。制定量化的更换判据：绝缘电阻下降至初始值50%以下、轴承游隙超过标准值1.5倍、风量下降超20%时强制更换。(3) 运维人员专项操作与故障处置培训。每季度开展重载电机过热故障模拟演练，涵盖冲击过载识别、应急降温操作（如强制通风、减载停机）及故障复位流程。培训内容包括红外热成像仪使用、振动频谱基础解读及保护装置参数整定方法，考核合格方可上岗操作，确保运维人员具备快速响应与科学处置能力。

结束语

本文全面分析了重载工况电机拖动系统三类过热故障特征，厘清了负载异常、设备故障、散热失效及运维不当的核心致因。从运行优化、设备改造、智能监测、常态化运维四个维度，搭建了全方位、多层次的过热故障防护方案。通过工况调控、结构升级、智能预警与制度落地，可有效抑制热累积、降低过热故障发生率，大幅提升重载电机拖动系统的可靠性与使用寿命。

参考文献

本文全面分析了重载工况电机拖动系统三类过热故障特征，厘清了负载异常、设备故障、散热失效及运维不当的核心致因。从运行优化、设备改造、智能监测、常态化运维四个维度，搭建了全方位、多层次的过热故障防护方案。通过工况调控、结构升级、智能预警与制度落地，可有效抑制热累积、降低过热故障发生率，大幅提升重载电机拖动系统的可靠性与使用寿命。

参考文献

- [1]王树才,陈金华,杨久同,等.短时高过载转矩电机考虑退磁与饱和的温升特性分析[J].电机与控制学报,2025,29(03):89-97.
- [2]李刚,王浩,张启明.重载工况异步电机拖动系统热累积故障特征及防护方法[J].工矿自动化,2024,50(07):102-108.
- [3]刘军,赵鑫,吴博文.基于热网络模型的重载电机温升故障预警与保护优化[J].电气应用,2023,42(11):78-85.
- [4]葛玉清.电动机过载发热故障分析与综合保护配置优化[J].工程与管理科学,2024,6(08):45-49.
- [5]王怀光,李洪人,张磊.重载工况异步电机热累积故障机理及动态保护策略[J].工矿自动化,2023,49(06):112-117.