

# 机场柴油发电机组并机逻辑优化与可靠性研究

成华轩

四川机场集团成都天府国际机场, 四川 成都 641400

DOI:10.61369/EPTSM.2025120013

**摘要 :** 机场柴油发电机组并机系统是保障机场关键设施不间断供电的核心, 其可靠性与运行效率至关重要。本文针对现有并机系统在同步精度、负载分配灵活性和动态响应方面的不足, 展开了系统性的逻辑优化与可靠性提升研究。仿真与模拟验证表明, 本文提出的优化策略能显著提升并机系统的智能化水平、供电可靠性与经济运营效益, 为机场应急供电系统的升级改造提供了理论依据和技术方案。

**关键词 :** 柴油发电机组; 并机控制; 可靠性; 负载均衡

## Research on Logic Optimization and Reliability Enhancement for Parallel Operation of Diesel Generator Sets at Airports

Cheng Huaxuan

Chengdu Tianfu International Airport, Sichuan Airport Group, Chengdu, Sichuan 641400

**Abstract :** The parallel operation system of diesel generator sets at airports serves as the core for ensuring uninterrupted power supply to critical airport facilities, with its reliability and operational efficiency being of paramount importance. This paper conducts a systematic study on logic optimization and reliability enhancement to address the deficiencies in the existing parallel operation system in terms of synchronization accuracy, flexibility in load distribution, and dynamic response. Simulation and modeling validations demonstrate that the optimization strategies proposed in this paper can significantly enhance the intelligence level, power supply reliability, and economic operational efficiency of the parallel operation system, providing theoretical foundations and technical solutions for the upgrading and transformation of airport emergency power supply systems.

**Keywords :** diesel generator sets; parallel operation control; reliability; load balancing

## 引言

柴油发电机组因其启动迅速、运行独立、容量范围广等优点, 已成为机场应急供电系统的核心组成部分。对于负荷容量大、波动性强的机场场景, 通常采用多台柴油发电机组并联(并机)运行的方式, 以提供充足的备用功率, 并根据实际负荷灵活调整运行机组数量, 从而兼顾供电可靠性与运行经济性。然而机场负载具有典型的“潮汐式”波动特征, 且包含大量对电能质量极为敏感的精密电子设备, 这对并机系统的动态响应速度、同步控制精度和负载分配策略提出了巨大挑战。基于此, 本文聚焦于机场柴油发电机组并机系统, 旨在通过逻辑优化与智能控制策略设计, 全面提升其运行可靠性与经济性。文章系统分析现有并机系统的运行现状, 深入剖析其潜在缺陷与影响可靠性的关键因素。设计一套闭环智能并机控制框架, 重点研究基于负荷预测的自适应投切、基于改进下垂控制的动态负载均衡、基于模糊逻辑的智能同步以及基于故障诊断的容错重构等核心策略。引入预测与健康理念, 构建故障诊断与剩余使用寿命预测模型, 并设计其与并机逻辑的联动机制, 实现系统全生命周期的主动维护。研究旨在为构建新一代智能、高效、高可靠的机场应急供电系统提供理论支撑和技术方案, 具有重要的理论价值和工程应用前景。

## 一、机场柴油发电机组并机系统现状与可靠性分析

### (一) 典型并机逻辑流程剖析

在柴油发电机领域除考虑其安全性和稳定性外, 还需要考虑节能, 即电能的经济性。在负荷和频率变化大的情况下, 需要配备两台或两台以上的柴油发电机组, 供电系统因具有备用设备使

得其稳定性和安全性得到了提高, 也使其可以随着负载量的变化调整其相应的机组投入数量<sup>[1]</sup>。机场柴油发电机组并机系统作为应急供电的核心中枢, 其运行流程环环相扣。当市电异常时, 系统立即启动预设机组, 完成自检、参数加载和预热等准备工作<sup>[2]</sup>。进入同期检测阶段, 系统会精确调控待并机组的电压、频率和相位, 确保与母线参数严格匹配, 为安全并网创造条件。在

最佳时机完成合闸并机后，系统进入负载分配阶段，通过下垂控制等方式实现多台机组的功率均分，以保障机场关键负载的稳定运行。当市电恢复正常，系统会遵循平稳卸载原则，先将负载转移至市电，再逐步降低机组出力、分闸，并经过冷却后完成停机<sup>[3]</sup>。尽管这一流程能满足基本需求，但在应对机场负载的强波动性和敏感负载的高质量要求时，其在同步精度、负载分配灵活性和动态响应速度方面存在明显不足，为系统可靠性埋下隐患。

### （二）现有并机逻辑的潜在缺陷与瓶颈分析

现有机场柴油发电机组并机系统在复杂运行场景下暴露出系统性缺陷，严重威胁供电可靠性与运行效率<sup>[4]</sup>。其核心问题在于传统下垂控制逻辑无法应对机组差异、线路阻抗及频繁的负载突变，导致负载分配严重不均，部分机组长期过载而部分轻载，极大缩短了设备寿命；同时落后的模拟信号采集与固定PID同步控制精度不足、响应滞后，并机时极易产生巨大冲击电流，有烧毁设备和引发关键系统中断的风险。此外，系统缺乏自适应能力，采用固定的机组投切模式，无法匹配机场负载的潮汐式波动，造成严重的燃油浪费和无效磨损<sup>[5]</sup>。更严峻的是，系统容错机制薄弱，单点故障易引发连锁反应导致系统瘫痪，且故障定位与恢复时间远超应急标准。在机组启停、负载突变等过渡过程中，固定参数控制无法保证电压、频率稳定，加之缺乏谐波抑制能力，导致供电质量难以保障，加剧了设备损耗。

### （三）影响系统可靠性的关键因素识别

机场柴油发电机组并机系统的可靠性是多重因素共同作用的结果，发电机组本体作为核心执行单元，其可靠性是系统稳定运行的基础，故障占比高达45%–55%，主要源于发动机的燃油、润滑、冷却系统故障，发电机的绕组及励磁系统问题，以及辅助系统引发的连锁反应<sup>[6]</sup>。并机控制设备作为系统的“大脑中枢”，故障占比20%–25%，其控制器、传感器和执行机构的任何故障，特别是传感器精度下降或失效，都可能导致并机失败或系统瘫痪。控制策略的合理性同样至关重要，传统策略因参数固定、缺乏预判和环节割裂，难以适应机场负载的动态变化，易引发运行缺陷。

## 二、并机逻辑优化与智能控制策略设计

### （一）优化总体思路与框架

为应对机场负载的强波动与高敏感特性，本文提出一种闭环智能并机控制框架。框架以“感知–决策–执行–反馈”为核心，通过感知层采集系统运行参数并预测负载变化，为决策层提供精准数据；决策层作为核心，融合实时数据与预测结果，制定最优的机组投切、同步控制、负载分配及容错策略；执行层则精确执行这些控制指令；反馈层实时监测执行效果并将偏差反馈至决策层，通过动态调整形成一个自适应闭环，从而全面提升并机系统的同步精度、负载分配效率和运行稳定性。

### （二）基于负荷预测的自适应投切策略

为应对机场负载的显著波动，提升并机系统运行效率，构建了一种基于负荷预测的自适应投切策略。利用长短期记忆网络（LSTM）模型，融合历史负载数据、航班计划、季节、时段及温

度等多维因素，精准预测未来1至6小时的负荷<sup>[7]</sup>。在此基础上，根据预测负荷、单机额定功率及效率系数，并预留10%至20%的冗余功率，动态计算出最优运行机组数量。为避免投切过程对电网造成冲击，系统还采用平滑控制策略，在增减机组时逐步转移负载，确保整个过程的平稳过渡，从而在保障负载可靠供应的同时，实现机组的经济高效运行。

### （三）基于改进下垂控制的动态负载均衡优化

传统下垂控制因频率/电压下垂系数（ $k_p$ 、 $k_q$ ）固定，受机组参数差异和线路阻抗不平衡影响，存在负载分配精度低、动态响应慢问题，难以适配机场负载突变场景。通过自适应下垂系数，根据各机组实际功率与目标功率的偏差动态调整 $k_p$ 和 $k_q$ ，以提升负载分配精度；同时引入带抗饱和措施的积分补偿环节，根据功率偏差的累积值微调频率和电压，以消除静态功率偏差<sup>[8]</sup>。仿真验证表明，该策略可将功率分配偏差从10%以上降至3%以内，并显著提升负载突变时的动态响应速度和系统稳定性。

### （四）基于模糊逻辑或神经网络的智能同步控制

传统同步控制精度低、动态响应慢，难以满足机场敏感负载供电需求。基于模糊逻辑的智能同步控制策略，无需精确数学模型，以电压差 $\Delta U$ 、频率差 $\Delta f$ 、相位差 $\Delta \phi$ 为输入，调速器/调压器调节量为输出，经模糊子集划分、49条模糊规则推理及重心法解模糊，实现高精度同步控制<sup>[9]</sup>。仿真显示其可将电压/频率/相位差控制精度提升50%以上，合闸冲击电流降低30%以上。基于故障诊断与负载转移的容错重构策略，通过SVM故障诊断模型实时识别定位机组故障并快速隔离；再依剩余机组容量制定负载转移策略（容量充足则经改进下垂控制转移负载，不足则启动备用机组），确保敏感负载运行。故障模拟验证表明，该策略可0.5秒内完成故障识别隔离，1秒内实现系统重构，母线电压频率波动可控。

### （五）容错与重构控制策略

为提升并机系统的容错能力，降低故障机组对系统的影响，设计基于故障诊断和负载转移的容错与重构控制策略，实现系统故障后的快速恢复和稳定运行。感知层采集机组运行参数，通过SVM故障诊断模型实时识别故障机组及类型；识别后立即隔离故障机组并记录故障信息，再据剩余机组容量与当前负载制定负载转移策略，容量充足时通过改进下垂控制转移负载，不足时启动备用机组完成并机重构，过程中严控母线电压和频率波动。故障模拟验证显示，该策略可0.5秒内完成故障识别隔离，1秒内实现负载转移与系统重构，保障连续供电。

## 三、融合健康管理的系统可靠性提升方案

### （一）发电机组故障模式与影响分析

为实现发电机组的主动维护与故障预警，需先开展故障模式与影响分析（FMEA），结合机场柴油发电机组运行经验及相关文献识别典型故障模式，再通过风险优先数（RPN）法评估各模式风险等级，为后续故障诊断和剩余使用寿命预测提供依据<sup>[10]</sup>。所识别的典型故障涵盖发动机故障、发电机故障以及控制系统故障，RPN计算方式为严重度（S）×发生概率（O）×探测

度(D),其中S、O、D均采用1~10分制,分数分别对应故障对系统影响程度、发生可能性、被探测难易程度的高低,比如发动机气缸故障RPN=144属于高风险模式,传感器精度下降故障RPN=60属于中风险模式,通过FMEA分析可明确发动机气缸故障、发电机定子绕组短路等高风险故障模式,为后续故障诊断和健康管理锁定重点关注对象。

### (二) 基于多传感器数据融合的故障诊断

单一传感器采集的数据存在局限性,如精度不足、易受干扰,难以实现故障的准确诊断,基于此提出基于多传感器数据融合的故障诊断方法,结合多个传感器采集的不同类型数据,提升故障诊断的准确性和可靠性。在发电机组关键部位安装多种传感器,采集机械状态(振动、温度、压力)、电气状态(电压、电流等)及环境(温湿度、粉尘)数据;随后对数据进行预处理(含数据清洗、min-max标准化、特征提取),消除噪声并提升数据质量;基于D-S证据理论实现融合诊断,建立含故障模式与正常状态的识别框架,通过支持向量机获取各传感器初步诊断证据,经证据组合规则得到融合信任度,据此判定故障(信任度低于阈值则为未知故障)。

### (三) 基于数据驱动的剩余使用寿命预测

剩余使用寿命(RUL)预测是PHM核心,可为发电机组主动维护提供依据。本文采用深度学习LSTM模型开展数据驱动的RUL预测研究,构建机场柴油机组历史运行与故障数据集(含运行参数、时间、实际RUL),按7:3划分为训练集与测试集;随后进行特征工程,通过时域频域分析提取故障演化特征,采用皮尔

逊相关系数法筛选关键特征;训练LSTM模型(含输入层、2层LSTM隐藏层、全连接输出层,以MSE为损失函数、Adam为优化器);用测试集验证,通MAE、RMSE、R<sup>2</sup>评估,结果显示模型预测精度高,满足工程需求。

### (四) PHM与并机逻辑的联动机制

为实现并机系统从被动到主动维护的转变,设计PHM与并机逻辑的联动机制。该机制将PHM系统实时生成的包含故障诊断、RUL预测和健康指数的健康状态报告,直接融入并机控制器的决策过程,实现运行策略的动态调整与智能调度。当PHM诊断出轻微故障时,并机控制器会主动降低该机组负载以防恶化;若诊断出严重故障,则立即启动容错与重构,切除故障机组并转移负载,确保系统稳定。同时,基于RUL预测结果,系统会将RUL较短的机组列为重点监控对象,优先减少其运行时间,并在其RUL将尽时提前启动备用机组进行替换。

## 四、结束语

本文针对传统并机系统在应对机场负载强波动性与高敏感性时暴露出的同步精度低、负载分配不均、动态响应慢及容错能力弱等核心问题,展开了系统性的研究,并提出了一套融合智能控制与预测健康管理的综合优化方案。本文的研究成果能够为相关领域的工程技术人员和研究人员提供有益的参考,共同推动我国机场应急供电技术向着更智能、更可靠、更绿色的方向发展。

## 参考文献

- [1] 郑真福. 大功率柴油发电机组并机运行稳定性技术研究[J]. 通信电源技术, 2016, 33(6): 67-68. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3664.2016.06.021.
- [2] 李帅帅, 狄乐蒙, 徐刚强, 等. 基于CAN总线的柴油发电机组并机控制系统解决方案[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2020, 46(1): 82-86. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5337.2020.1.082.
- [3] 戴斌, 喻小涛, 肖世华, 等. 数据中心柴油发电机组并机主控冗余监控系统的设计[J]. 移动电源与车辆, 2022, 53(2): 22-26, 21. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4250.2022.02.006.
- [4] 尹国强. 某数据中心柴油发电机组并机异常的原因分析[J]. 通信电源技术, 2020, 37(10): 76-78. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2020.10.025.
- [5] 赵友诚, 朱长青, 刘金宁, 等. 虚拟同步机控制逆变器与柴油发电机组并联运行控制策略[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(4): 127-132. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.04.018.
- [6] 吕庆军. 柴油发电机组并联运行稳定性研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2012. DOI: 10.7666/d.Y2236652.
- [7] 闫利伟. 柴油发电机组并联运行分析与综合控制的研究[D]. 华北电力大学, 华北电力大学(保定), 2007. DOI: 10.7666/d.y1151374.
- [8] 李东辉, 张均东, 纪玉龙. 柴油发电机组并联运行稳定性研究[J]. 西南交通大学学报, 2014(3): 494-498. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2014.03.019.
- [9] 贾园, 王正辉. 柴油发电机组并联运行分析与控制的研究[C]//2008年中国电机工程学会年会论文集. 2008: 1-7.
- [10] 谢远党, 李维嘉. 不同容量柴油发电机组并联运行时优化控制的研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(5): 49-50, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2011.05.012.