电动机等效电路在电动机电气故障检测中的应用

曹胤劢

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃一分公司　宁夏　银川　750000

摘　要：电动机电气故障隐蔽性强、类型繁杂，传统检测手段易出现误判、漏判等问题，难以满足工业设备常态化运维需求。本文以电动机等效电路模型为研究核心，梳理其基本结构、运行特性及参数与电气故障的内在关联，分析该模型在电机故障检测中的独特优势，同时针对性探究其在定子、转子、接地及励磁异常等常见电气故障中的实际应用方式。研究证实，依托等效电路可精准捕捉电机电气参数细微变化，实现全工况在线故障识别与预警，有效简化检测流程、降低运维成本，为电机安全稳定运行提供技术支撑。

关键词：电动机；等效电路；电气故障检测；应用

引言

电动机是工业生产的核心动力设备，长期复杂工况下易出现各类电气故障，若无法及时排查处理，会大幅降低生产效率，甚至引发设备损坏与安全事故。现阶段传统故障检测方式大多依赖停机核验与基础数据观测，不仅流程繁琐、检测成本偏高，还很难识别早期隐性故障，检测精准度与时效性都存在明显短板。电动机等效电路能够将电机复杂的电磁运行机理转化为直观可控的电路参数，可动态适配电机不同运行工况，为电机电气故障在线检测提供全新解决思路。

1 电动机等效电路的核心构成与运行机理

1.1 等效电路的基础构成模块

电动机等效电路依托电机电磁转换规律构建，是电气故障检测的核心基础模型。该模型简化电机复杂机械结构与电磁耦合细节，以集中参数电路单元对应电机定子转子气隙等核心结构电气特性。电路由定子支路、转子等效支路、励磁支路三大核心模块组成，完整覆盖电机运行电能传输与电磁转换全过程。定子支路匹配定子绕组电气属性，呈现绕组通电阻抗特性与电能损耗规律。转子等效支路存在动态特征，参数跟随电机转速转差率改变，体现转子侧电能损耗与电磁感应运行状态。励磁支路承担电磁转换功能，实现电能向磁场能转化，把控气隙磁场稳定程度，可用于识别励磁相关故障。三大支路元件参数出现偏移时，能够对应电机内部不同部位运行异常，依靠该电路模型可完成电机运行状态判断与故障定位工作，为电机工况研判故障溯源提供标准化理论支撑，所有电气损耗磁场耦合能量变换过程均可通过该集中参数等效电路直观量化分析（见图 1）。

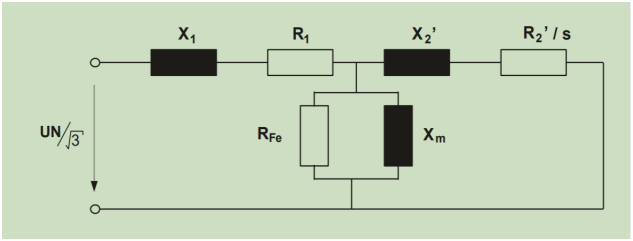


图 1 电动机等效电路图

1.2 等效电路的运行适配特性

电动机在不同工况下的运行状态存在明显差异，等效电路可根据电机空载、负载、额定运行等不同工作状态，实现参数的动态适配，精准匹配电机实际运行的电气特征。在空载运行状态下，电机无机械负载输出，转子侧电流参数趋近于临界低值，等效电路的转子支路参数趋于稳定，电路整体状态主要由励磁支路主导，能够直观反映电机空载工况下的电气损耗与磁场运行状态[1]。在带负载运行状态下，电机转子产生电磁转矩输出机械功率，转子支路参数随负载大小发生规律性波动，定子侧电流、损耗参数同步发生对应变化，等效电路可完整复现这一参数联动变化过程。相较于传统的电机运行检测方式，等效电路的核心优势在于能够剥离机械振动、环境干扰等外部因素的影响，单独聚焦电气参数的变化规律，让电气故障的识别不再受非电气因素的干扰，大幅提升故障检测的针对性。

1.3 等效电路与电气故障的关联逻辑

电动机所有电气故障的发生，都会造成内部电气参数的异常偏移，进而改变等效电路的整体运行参数与

支路状态，这是等效电路应用于故障检测的核心逻辑。电机正常运行时，等效电路各支路参数保持在固定区间内小幅波动，电路整体处于平衡运行状态，电能传输与电磁转换过程稳定有序。当电机出现绕组短路、绕组断路、接地故障、阻抗失衡等电气问题时，对应支路的电阻、电抗、损耗参数会出现持续性偏移，打破电路原有平衡状态。不同类型的电气故障，对应的异常支路、参数偏移方向、波动幅度存在固定规律，工作人员可通过捕捉等效电路的参数变化特征，反向推导电机内部故障类型与故障位置。这种一一对应的关联关系，让抽象的电机电气故障转化为具象的电路参数异常，为常态化、精准化故障检测提供了可行路径。

2 电动机等效电路用于电气故障检测的核心优势

2.1 实现故障的精准定位与类型区分

电动机内部电气结构较为复杂，各类电气故障的外在表现存在一定相似度，传统检测方式容易出现故障误判、定位模糊的问题。很多时候电机出现运行异常后，仅凭电流、电压等基础运行数据，无法区分故障是发生在定子绕组、转子回路还是励磁回路，导致后续检修工作缺乏精准方向。依托等效电路开展故障检测，可通过分支路参数监测的方式，锁定故障对应的电路模块[2]。定子绕组故障会直接引发定子支路参数异常，转子回路故障集中体现在转子等效支路的参数偏移，励磁类故障则主要反映在励磁支路的运行波动。工作人员通过对比各支路实时参数与标准参数区间的差异，就能精准区分故障类型，同时确定故障发生的核心区域，规避传统检测方式的模糊性问题，有效降低故障误判概率，提升电机检修的精准度。

2.2 适配全工况常态化故障监测

工业生产场景中的电动机大多处于连续运行状态，启停频繁、负载波动大，部分隐性电气故障不会在额定工况下显现，仅会在轻载、过载、变工况运行时出现参数异常。传统定点式、停机式检测方式，无法捕捉变工况下的隐性故障，容易造成故障漏判，导致小故障逐步发展为设备重大损坏问题。等效电路模型具备良好的工况适配性，可跟随电机运行状态的动态变化实时更新参数，实现全时段、全工况的在线监测。不管是电机空载稳定运行、额定负载运行，还是短时过载、变负载波动运行，该模型都能匹配对应的标准参数体系，实时捕捉非常规参数波动。对于早期轻微、隐性的电气故障，模型可通过细微的参数偏移特征完成识别，实现故障的提前预警，打破传统检测方式只能检测显性故障、依赖停机检测的局限。

2.3 简化故障检测流程、降低检测成本

传统电动机电气故障检测需要依托多种专业检测设备，配合复杂的接线操作和停机检测流程，不仅检测流程繁琐，还会占用设备正常运行时间，影响生产连续性，同时检测设备的采购、运维也会产生较高成本。部分高精度检测方式操作门槛高，对工作人员的专业能力要求严格，难以适配大规模、常态化的电机故障筛查工作。基于等效电路的故障检测模式，以电路参数分析为核心，无需复杂的外接检测设备，可依托现有电气监测系统完成数据采集与分析[3]。整个检测过程无需设备停机，不会干扰正常生产工作，大幅简化了故障检测的操作流程。同时，该检测方式依托标准化参数对比逻辑，操作难度较低，普通运维人员经过基础培训即可完成常规故障筛查，降低了人力成本与设备运维成本，适配工业现场大批量电动机的常态化故障检测需求。

3 电动机等效电路在各类电气故障检测中的具体应用

3.1 在定子绕组故障检测中的应用

定子绕组是电机实现电能转换与电磁感应的核心部件，也是电气故障最易频发的结构，日常运行中常出现匝间短路、相间短路、绕组断路及绝缘老化等问题。这类故障会直接改变绕组阻抗特性，致使电机等效电路定子支路参数偏离正常区间，这也是等效电路模型多用于定子故障检测的核心原因。本次基于 MATLAB/Simulink 搭建电机等效电路仿真模型，采集额定工况下各类故障的运行参数，具体数据差异如表 1 所示。匝间短路是最频发的故障类型，仿真数据显示，轻微短路时绕组阻抗可下降 12%~20%，定子支路电流增幅达 15%以上，电路损耗显著提升。相间短路会直接打破三相电路平衡，造成三相阻抗、电流参数差值超过 30%；绕组断路故障会使对应支路电流趋近于零，参数突变特征极易识别。而绝缘老化属于隐性故障，绕组阻抗会以年均 3%~5%的幅度缓慢衰减，依托等效电路长期监测微量参数变化，能够提前预判故障隐患，规避重大电气事故（见表 1）。

表 1 电机绕组故障特征诊断表

故障类型	绕组阻抗变化率	定子电流变化率	电路运行状态特征
轻微匝间短路	-12%~-20%	+15%~+25%	支路损耗小幅上升
相间短路	两相阻抗差值 ＞30%	故障相电流骤增＞30%	三相运行严重失衡
绕组断路	故障相阻抗趋近无穷大	故障相电流 ≈0	局部开路、工况异常
绝缘老化	年均衰减 3%~5%	无瞬时突变	参数缓慢劣化

3.2 在转子回路故障检测中的应用

异步电机转子回路的常见故障类型，主要包括转子绕组断条、绕组短路以及回路接触不良等，这也是电机运行过程中高发的电气故障。从实际运行效果来看，这类故障会直接干扰电机电磁转矩的正常输出，最直观的表现就是电机转速波动、带载能力大幅降低。值得注意的是，多数转子回路故障的早期特征并不明显，隐蔽性极强，常规的传统检测手段很难精准捕捉早期异常，容易出现故障漏判、误判的情况。在电机等效电路模型中，转子回路的实时运行状态可通过动态转子支路参数直观体现，转子侧出现的各类故障，最终都会直接转化为支路阻抗、电流等核心参数的动态变化，这也为故障检测提供了核心依据。当电机发生转子断条故障时，转子回路的导电性能会显著衰减，支路等效阻抗随之增大，电流传输的稳定性大幅下降[4]。在电机带载工况下，转子各项参数会呈现规律性的周期性波动，且负载工况越重，这类波动特征就越突出。检测人员可依托参数波动的规律特征，精准判定断条故障的发生，同时有效区分故障数量与严重等级。而转子绕组短路故障的作用机制恰好相反，故障发生后转子支路阻抗减小，转子运行损耗出现异常降低的情况，直接造成电机电磁转矩输出失衡，借助等效电路的参数监测便可快速识别该类故障。转子回路接触不良属于典型的间歇性故障，也是传统检测方式最难排查的故障类型。该故障会让转子支路参数处于不稳定状态，运行数据呈现无规律的波动特点。利用等效电路开展实时参数监测，能够精准捕捉这类间歇性、突发性的参数异常，有效弥补传统检测技术的短板，兼顾显性故障与隐性早期故障的检测需求，切实保障电机运行过程中转矩输出的稳定性与可靠性。

3.3 在电机接地故障与励磁异常检测中的应用

电动机接地故障多由绕组绝缘破损、线路老化、设备受潮等因素引发，分为单相接地、多相接地等类型，这类故障不仅会影响电机正常运行，还会引发漏电、设备带电等安全隐患，是电机安全运维的重点监测内容。接地故障发生后，电机绕组与机壳、大地形成导通回路，等效电路整体对地参数发生突变，电路原有绝缘平衡状态被打破。通过等效电路监测系统对地阻抗、漏电参数的变化，可快速识别接地故障的发生，同时根据参数变化特征判断接地故障的相别与故障位置，为故障排查提供精准依据[5]。相较于传统接地检测方式，该方法可实现故障实时预警，避免接地故障持续发展引发设备烧毁、安全事故等问题。励磁异常故障主要包含励磁电流过大、励磁电流不足、励磁回路失衡等问题，会直接导致电机气隙磁场畸变，造成电机发热严重、运行效率下降、转速异常等问题。励磁支路作为等效电路的核心单元，其参数直接对应电机励磁运行状态，当励磁系统出现异常时，励磁支路的电流、损耗、电磁转换参数会出现持续性偏移。通过分析励磁支路的参数变化，可精准判断励磁异常类型，区分是励磁回路阻抗失衡还是磁场转换异常引发的故障，有效解决励磁故障隐蔽性强、排查难度大的问题，强化日常巡检校验与工况调控，保障电机电磁转换过程稳定有序，提升电动机整体运行可靠性与长效安全性能。

结语

综上，电动机等效电路模型能够把电机复杂的电磁运行状态转化为标准化、可监测的电路参数，有效弥补了传统电气故障检测技术的诸多短板。该模型不仅能精准识别定子、转子、接地、励磁等各类显性与隐性故障，实现故障精准定位与提前预警，还能适配全工况在线监测，简化检测流程、控制运维成本，实用性与适配性都极强。在工业电机智能化、常态化运维的发展趋势下，等效电路检测技术具备广阔的应用前景，能够有效提升电机运行稳定性，为工业生产安全高效开展提供重要技术保障。

参考文献

[1] 刘文科. 电动机等效电路在电动机电气故障检测中的应用 [J]. 电力设备管理,2026(2):224-226.

[2] 付春雨. 电动机轴承温升检测方法及其在故障诊断中的应用 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A,2025(2):146-149.

[3] 翟勇. 电子设备和自动化生产线应用中电动机的故障分析 [J]. 消费电子,2025(1):191-193.

[4] 钟造胜, 刘志远. 卡尔曼滤波在传感器检测电动机振动中的应用 [J]. 电脑知识与技术,2025,21(34):115-118.

[5] 李雷, 陈其勇, 余华超, 肖小军. 小功率电动机产品质量分析 [J]. 日用电器,2025(2):109-112+120.