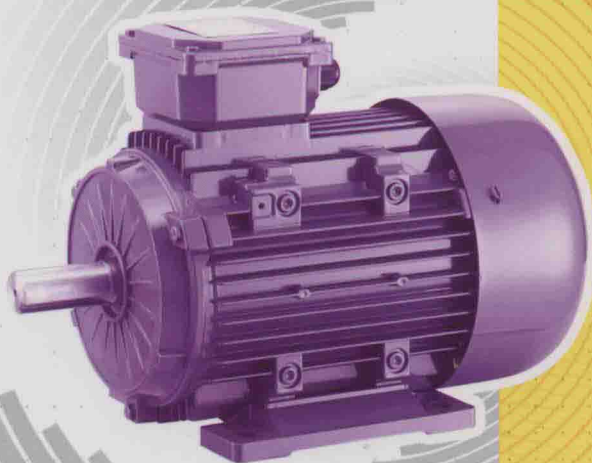


异步电动机故障 在线监测与诊断

YIBU DIANDONGJI GUZHANG
ZAIXIAN JIANCE YU ZHENDUAN

许伯强 孙丽玲 编著

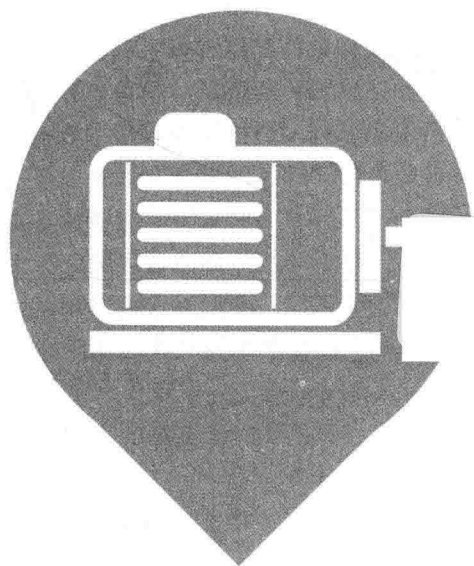


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

异步电动机故障 在线监测与诊断

YIBU DIANDONGJI GUZHANG
ZAIXIAN JIANCE YU ZHENDUAN

许伯强 孙丽玲 编著



 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是作者对异步电动机故障在线监测与诊断课题二十余年潜心研究的结晶,内容主要包括异步电动机的电磁关系、数学模型、故障检测与诊断及实践。

全书共 9 章,包括绪论、异步电动机的基本电磁关系与运行原理、异步电动机的多回路模型与数字仿真、信号特征提取技术、异步电动机定子绕组过热故障检测方法、异步电动机定子绕组匝间短路故障的检测与诊断、笼型异步电动机转子断条故障的检测与诊断、异步电动机轴承故障的检测与诊断、异步电动机故障在线监测与诊断系统。

本书集异步电动机故障检测与诊断的理论、方法及实践于一体,可以作为该领域工程技术人员的参考用书,亦可作为高等院校、科研机构有关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

异步电动机故障在线监测与诊断/许伯强,孙丽玲编著. —北京:中国电力出版社,2018.9
ISBN 978-7-5198-1769-5

I. ①异… II. ①许…②孙… III. ①异步电动机—故障监测—在线监测系统②异步电动机—故障诊断 IV. ①TM343.07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 033046 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:岳 璐 王 晶(010-63412341)

责任校对:黄 蓓 李 楠

装帧设计:王英磊 郝晓燕

责任印制:邹树群

印 刷:北京时捷印刷有限公司

版 次:2018 年 9 月第一版

印 次:2018 年 9 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:14.25

字 数:326 千字

印 数:0001—1000 册

定 价:70.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



前言

作为传动机械,异步电动机广泛应用于工业与国防领域,其安全运行至关重要。但是,异步电动机一般处于长时间连续运转状态,且工作环境恶劣,因此故障不可避免。异步电动机故障不仅损坏电机本身,而且影响整个传动系统。如果不能及时发现、检修,必将导致经济损失,甚至人身伤亡。

异步电动机故障在线检测与诊断是指通过在线监测、分析异步电动机相关运行参数信息(如电压、电流、振动、磁通、转速、温度、噪声、局部放电等),评估异步电动机当前运行状态,明确故障是否存在,即故障检测;若处于故障状态,则进一步确定故障发生部位、严重程度及发展趋势,即故障诊断。显然,通过异步电动机故障的在线检测与诊断,可以向现场技术人员及时预警并提供必要信息以合理安排、组织预知性维修,从而避免事故/停机、节约维修费用与时间,具有显著的经济与社会效益。

本书是作者对异步电动机故障在线检测与诊断课题二十余年潜心研究的结晶,内容主要包括异步电动机的电磁关系、数学模型、故障检测与诊断及实践,揭示了异步电动机定子绕组匝间短路、转子断条与轴承故障的机理、特征、检测与诊断方法,可以作为相关领域工程技术人员的参考用书,亦可作为高等院校、科研机构相关专业的研究生教材。

本书的特色在于理论与实践并重。首先,针对异步电动机的定子绕组匝间短路、转子断条与轴承故障,进行机理与特征分析,进而提出实用、灵敏且可靠的在线检测与诊断方法。在这一工作中,紧密结合工程实际中亟待解决的难点问题、关键问题。另外,提供异步电动机定子绕组匝间短路、转子断条与轴承故障在线检测与诊断的现场应用实例。这些实例,是作者对其长年积累的三百余台异步电动机现场数据、检测与诊断结果的整理与提炼,具有典型性和代表性。

本书承国家自然科学基金项目“基于高频率分辨力谱估计技术与优化算法的异步电动机初发故障检测方法研究(51277077)”资助,诚挚感谢!

全书承中国人民解放军青岛海军潜艇学院孙俊忠教授审阅,并提出诸多宝贵建议,诚挚感谢!

虽然作者力求本书内容丰实、结构严谨、行文和畅,但疏漏仍在所难免,衷心欢迎读者批评、指正。

作者

2017年12月

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 异步电动机故障在线检测与诊断的概念及意义.....	1
1.2 异步电动机故障检测与诊断的研究现状.....	2
第 2 章 异步电动机的基本电磁关系与运行原理	11
2.1 异步电动机的类型与结构.....	11
2.2 异步电动机的定子磁动势.....	14
2.3 异步电动机的转动原理.....	16
2.4 异步电动机的定转子感应电动势.....	17
2.5 异步电动机的转子磁动势.....	18
2.6 异步电动机的等效电路.....	19
2.7 异步电动机的额定值.....	20
2.8 异步电动机的工作特性.....	21
2.9 异步电动机的运行参数及其计算.....	21
2.10 笼型转子的极数、相数和匝数.....	23
本章小结.....	23
第 3 章 异步电动机的多回路模型与数字仿真	24
3.1 异步电动机的多回路模型.....	24
3.2 异步电动机多回路模型的其他形式.....	31
3.3 异步电动机多回路模型中的参数.....	34
3.4 异步电动机多回路模型的数值求解.....	43
本章小结.....	44
第 4 章 信号特征提取技术	45
4.1 噪声抑制.....	45
4.2 频谱分析及其校正.....	46
本章小结.....	53
第 5 章 异步电动机定转子绕组过热故障检测方法	54
5.1 异步电动机定转子电阻辨识算法.....	54
5.2 异步电动机转速估计方法.....	55
5.3 异步电动机定转子绕组过热故障检测方法.....	56

本章小结	60
第 6 章 异步电动机定子绕组匝间短路故障的检测与诊断	61
6.1 定子绕组匝间短路故障特征分析	61
6.2 定子绕组匝间短路故障检测方法	82
6.3 定子绕组匝间短路故障诊断方法	87
本章小结	89
第 7 章 笼型异步电动机转子断条故障的检测与诊断	90
7.1 转子断条故障特征分析	90
7.2 转子断条故障检测方法	103
7.3 转子断条故障诊断方法	136
本章小结	153
第 8 章 异步电动机轴承故障的检测与诊断	154
8.1 滚动轴承故障的机理与特征分析	154
8.2 基于振动信号分析的轴承故障检测方法	156
8.3 基于定子电流信号分析的轴承故障检测方法	162
8.4 轴承故障诊断方法	167
本章小结	167
第 9 章 异步电动机故障在线监测与诊断系统	168
9.1 MIFODor 与 MAIFODor 概览	168
9.2 MIFODor 与 MAIFODor 硬件设计	170
9.3 MIFODor 与 MAIFODor 软件开发	171
9.4 MIFODor 与 MAIFODor 实际应用	171
本章小结	179
附录 A 关于异步电动机定子绕组匝间短路故障渐进性的讨论	180
附录 B Y100L-2 型异步电动机电磁设计计算单	185
附录 C 证书	188
附录 D 主要符号表	200
参考文献	211

第 1 章 绪 论

1.1 异步电动机故障在线检测与诊断的概念及意义

作为传动机械，异步电动机广泛应用于发电厂、炼钢厂、舰艇等工业与国防领域，其安全运行至关重要。异步电动机一般处于长时间连续运转状态，且工作环境恶劣，因此故障不可避免。异步电动机故障不仅损坏机体本身，而且影响整个传动系统。如果不能及时发现、检修，将导致事故、停机，造成经济损失，甚至人员伤亡。

异步电动机故障在线检测与诊断是指通过在线监测、分析异步电动机相关运行参数信息（如电压、电流、振动、磁通、转速、温度、噪声、局部放电等），评估异步电动机当前运行状态，明确故障是否存在，即故障检测；若处于故障状态，则进一步确定故障发生部位、严重程度及发展趋势，即故障诊断。

本书着眼于异步电动机故障的“在线”检测与诊断。“在线”是指故障检测与诊断的实施不会干扰、影响异步电动机的当前运行。“故障”是指定子绕组过热故障、定子绕组匝间短路故障、转子断条故障以及轴承故障等渐进性（初发性）故障，而非定子绕组三相短路等速断性（灾难性）故障。

针对异步电动机的速断性（灾难性）故障，主要采取继电保护措施，如过电流保护、过电压保护、欠电压保护、差动保护、负序保护、逆电流保护、接地保护等。继电保护措施并不能预防事故的发生，仅能在事故发生后采取行动，仍将造成停机。

目前，通常采用“定期检修（如半年小修，一年大修）”方式避免异步电动机事故停机。但是，由于存在检修周期，异步电动机可能在检修周期之内即发生故障、事故，“定期检修”方式对此无能为力，这就是工程现场所谓的“失检”；另一方面，在检修周期来临之际，异步电动机可能并无故障，甚至状态良好，“定期检修”方式将造成工程现场所谓的“过检”。“失检”将导致异步电动机事故、停机，其损失不言而喻。“过检”将导致无谓的维修成本、停机时间。以 YTM710-10 型 1400kW、6kV、185A 异步电动机为例，其外壳防护等级为 IP54（如图 1-1 所示），仅仅拆卸其外壳一次即需要数万元人民币，遑论解体异步电动机、检修其定转子等。因此，“过检”将造成巨大浪费。

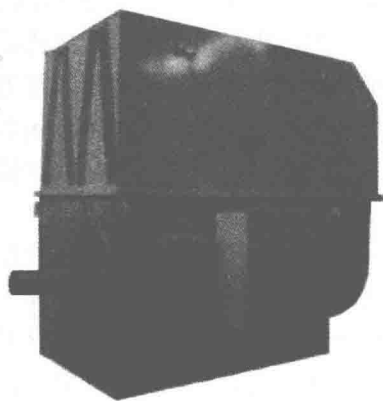


图 1-1 YTM710-10 型异步电动机

异步电动机故障检测与诊断技术的出现、发展、应用引发了异步电动机维修体制的一次革命，使传统的事后维修、定期检修方式逐步转变为预知维修方式。

统计表明，异步电动机故障主要包括定子绕组过热故障、定子绕组匝间短路故障、转子断条故障以及轴承故障，其发生概率分别约为 6%、30%、10%、40%，这些故障均是渐进的，经历发生、发展阶段而成为事故。

对于上述故障，通过灵敏、可靠的在线检测与诊断，可以在毫不干扰异步电动机当前运行状态的前提下、在故障初发阶段即行报警，并向现场技术人员提供必要信息以合理安排、组织预知维修，从而避免事故停机，减少故障损失。毋庸置疑，异步电动机故障检测与诊断是保障其安全运行的关键措施之一，具有重要意义。

1.2 异步电动机故障检测与诊断的研究现状

异步电动机故障主要包括定子绕组过热故障、定子绕组匝间短路故障、转子断条故障以及轴承故障，其发生概率分别约为 6%、30%、10%、40%。

在此，分别对定子绕组过热、定子绕组匝间短路、转子断条以及轴承故障在线检测、诊断方法予以评述，着重于其实用性、灵敏度与可靠性指标。实用性指故障检测、诊断方法便于实际应用，譬如：所需传感器是否便于现场安装、所需信号是否便于测取等。灵敏度指故障检测、诊断方法对于故障本身是敏感的，亦即：该方法可以检测、诊断出轻微的初发性故障，避免“漏检”；可靠性则指故障检测、诊断方法对于其他因素，如负载变化、供电电压波动是鲁棒的，亦即：该方法不会将其他因素“误检”为故障。

1.2.1 定子绕组过热故障检测方法评述

定子绕组过热故障主要是因为异步电动机过载运行、冷却系统故障（冷却风扇断裂、通风孔道堵塞）所致，其显著征兆是定子绕组温度升高并超过允许值。因此，定子绕组过热故障检测往往是通过实时监测定子绕组温度来实现的。此外，定子绕组过热故障检测与转子绕组过热故障检测是紧密联系的，一般同时进行。

异步电动机定子绕组过热故障检测是一个传统的保护问题，典型保护方案是根据定子电流正、负序分量形成等效热电流，将其呈送至异步电动机热模型，并实现反时限过热保护，其本质就是定子绕组过热故障检测。随着微处理器技术的飞速发展，基于微处理器的异步电动机热模型已逐渐取代机电器件热模型，定子绕组过热故障检测的可靠性与灵活性因之得以改进。

必须指出，异步电动机冷却系统故障（冷却风扇断裂、通风孔道堵塞）会导致异步电动机散热不良，这将影响热模型的准确性，最终影响定子绕组过热故障检测的准确性。根据异步电动机的实际运行情况而适当调整其热模型可以解决这一问题，在此做简要介绍。

异步电动机热模型如图 1-2 所示。其中， P_{is} ， P_{ir} 分别为定、转子热损耗，根据绕组及铁芯损耗确定； C_{is} ， C_{ir} 分别为定、转子热电容，代表定、转子热容量； R_{is} ， R_{ir} 分别为定、转子热电阻，模拟定、转子与外界环境之间的热传递； R_0 为附加加热电阻，模拟异步电动机

内冷却气体与外界气体之间的温度差。

在正常情况下， R_{i0} 、 R_{is} 、 R_{tr} 之间的典型比例关系如下： $R_{i0}=1$ 、 $R_{is}=14$ 、 $R_{tr}=20$ 。由于 R_{i0} 相对于 R_{is} 、 R_{tr} 非常小，定、转子热模型可视为彼此独立，定、转子热时间常数相差不大。一旦异步电动机冷却状况恶化， R_{i0} 的数值将显著增加，定、转子热模型也成为相互耦合的。因此，必须根据实际情况重新计算 R_{i0} 并调整异步电动机热模型，基本原理如图 1-3 所示。其中，等效电路模型用于计算异步电动机损耗（计及集肤效应）；热模型用于定、转子温度估计，即过热故障检测；定、转子电流磁场模型用于转速估计，估计转速 ω_{rc} （即转速观测器的输出）是与异步电动机定子电压 V_s 、定子电流 I_s 以及定子电阻 R_s 、转子电阻 R_r 等参数相关的；凸极磁场模型用于准确计算转子转速，计算转速 ω_{rud} 是通过

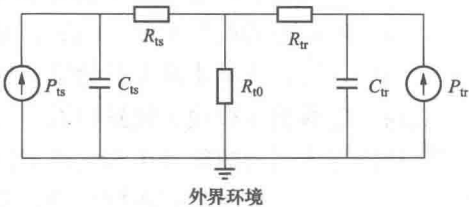


图 1-2 异步电动机热模型

通过对定子电流 I_s 做谐波分析获得的，它与异步电动机参数无关。根据 ω_{rc} 与 ω_{rud} 之差调整异步电动机热模型参数，即 R_{i0} 的数值，并进一步准确估计定、转子温度。仿真及实验结果均证明该方法是正确可行的。

上述定子绕组过热故障检测方法均以异步电动机热模型为基础，其缺点在于热模型参

数的确定非常困难。另外，从图 1-3 可见，使用这类方法对异步电动机定、转子温度实现准确监测过于复杂。

另一类方法基于电动机温度场有限元分析，但计算复杂、实时性差，尚未得到广泛应用。通过在异步电动机适当部位安装温度传感器进行直接测温，也可实现异步电动机过热故障检测，但温度传感器的安装、维护困难，因而妨碍其在工业界的广泛应用。此外，采用参数辨识技术亦可进行异步电动机转子温度监测，其基本思路是：首先，直接辨识异步电动机转子电阻，随后根据

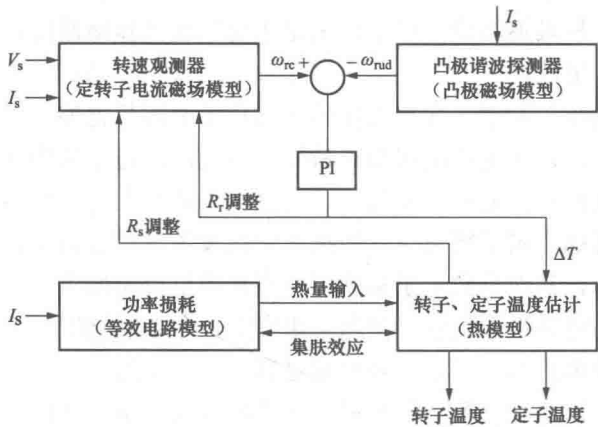


图 1-3 异步电动机热监测及热模型参数调整原理

金属电阻与其温度之间具有严格线性关系这一原理，间接计算转子温度。尽管该方法专注于异步电动机转子温度监测，但同样适用于定子温度监测。因其简捷、实用，这种基于参数辨识技术的异步电动机温度监测方法具有广阔发展前景。

1.2.2 定子绕组匝间短路故障检测与诊断方法评述

匝间短路是异步电动机定子绕组常见故障之一，其成因非常复杂，但一般可以简单归结为如下四点：

- (1) 在异步电动机开关过程中，匝间绝缘承受暂态过电压；
- (2) 异步电动机定子绕组温度过高，导致匝间绝缘性能恶化；

(3) 异步电动机定子绕组线圈承受电磁力而微弱振动, 导致匝间绝缘破损;

(4) 异步电动机在潮湿、肮脏、高温恶劣环境下长期运行。

显然, 这种故障本质上是绝缘问题, 即定子绕组匝间绝缘老化、破损而形成一短路环并流通一定数值(取决于短路匝数、过渡电阻等因素)的短路电流。一般而言, 定子绕组匝间故障发生后, 短路环中流过的短路电流将造成局部过热而使定子绕组绝缘性能进一步劣化甚至失效, 定子绕组匝间短路故障因而扩展并最终导致恶性的接地短路或相间短路事故。因此, 必须对定子绕组匝间短路故障进行检测与诊断。

必须指出, 定子绕组匝间短路故障是“渐进性”的, 亦即自发生始而发展至恶性事故乃至停机, 是需要持续一定时间的。当然, 目前对这种“渐进性”的认识尚有分歧。相对普遍的观点是: 定子绕组匝间短路电流可以达到额定值的数倍甚至更大, 数秒甚至更短时间内即会烧毁绝缘而触发保护装置动作, 因而是一种“瞬时性”故障。事实上, 这种观点有失偏颇。G. B. Kliman 等人曾经指出, 这种“渐进性”可能短至 $1/3s$, 也可能长至数分钟或者更长。J. Sottile 与 J. L. Kohler 则报道了来自工业现场的实例: 一台异步电动机发生定子绕组匝间短路故障后, 仍然持续全压运行 750h (包括 67 次起动)。因此, 严格而言, 上述“渐进性”是或长或短的。对此, 附录 A 做了深入讨论。

1.2.2.1 检测方法

异步电动机定子绕组匝间短路故障检测方法研究已经取得长足进展, 简介如下。

通过探测异步电动机轴向漏磁通并分析其谐波成分可以检测定子绕组匝间短路故障, 由于需装设磁通探测线圈, 该方法缺乏实用性。

以定子负序视在阻抗, 即定子负序电压与定子负序电流幅值之比作为故障特征亦可检测定子绕组匝间短路故障。该方法立足于: 定子绕组匝间短路故障发生之后, 定子负序视在阻抗数值减小, 并据此检测定子绕组匝间短路故障发生与否。但进一步研究表明, 异步电动机本身是存在一定程度的固有不对称的, 定子绕组匝间短路故障在发生、发展初期, 其效果可能削弱甚至抵消这种固有不对称, 从而导致定子负序视在阻抗数值反而增大。类似地, 异步电动机供电电源所固有的不对称亦可引发这一问题。事实上, 在定子绕组匝间短路故障情况下, 异步电动机的负序等效电路与其正序等效电路是耦合在一起的, 定子负序视在阻抗将同时取决于负、正序等效电路及其参数, 其数值变化情况非常复杂。因此, 在工程实际中, 不应简单地以“定子负序视在阻抗数值减小”为判据, 而须采用定子负序视在阻抗增量作为故障特征并结合样本学习策略而进行故障检测, 以尽可能地在故障初期即实现可靠检测。

根据正常异步电动机正、负序阻抗样本数据计算定子正序电压、负序电压失谐量并以此作为故障特征亦可检测定子绕组匝间短路故障, 这与上述“定子负序视在阻抗”方法在本质上是相同的。

与“定子负序视在阻抗”方法类似, 可以采用定子负序电流作为故障特征以检测定子绕组匝间短路故障, 但必须通过样本学习与检测阈值自整定策略以计及供电电压不平衡、负载变化等因素对故障检测的影响, 从而提高其灵敏度与可靠性。该方法的技术关键在于: 首先, 根据负序等效电路模型、正常样本数据确定正常电动机在当前定子电压、负载状态下应当体现的定子负序电流值; 其次, 测量、计算电动机在当前定子电压、负载状态下实

际的定子负序电流值；之后，将二者进行对比，判断匝间短路故障发生与否。

通过检测频率近似为 $\frac{1}{P}f_1, \frac{2}{P}f_1, \frac{3}{P}f_1, \dots$ 的定子电流谐波分量以及其他槽谐波分量亦可实现匝间短路故障检测（ P 为极对数， f_1 为供电频率）。

异步电动机定子三相电流彼此间的相位差亦可作为定子绕组匝间短路故障特征，原因在于：异步电动机定子某相绕组发生匝间短路故障后，定子三相电流之间的相位对称关系遭到破坏，因而定子三相电流彼此间的相位差将偏离正常情况下的数值（近似为 120° 、 240° ）。但在实际情况中，定子三相电压在相位关系上可能存在一定程度的不对称，这同样影响定子三相电流的相位对称关系，因而影响故障检测的可靠性。以定子三相绕组（等效）视在阻抗角作为故障特征，则可以排除这一影响。

另外，多重坐标变换理论、定子三相电流信号之包络检测、旋转磁场悬摆振荡理论亦被尝试用于定子绕组匝间短路故障检测领域，以期避免供电电压波动、不平衡以及负载波动等因素对故障检测之影响，从而显著提高其灵敏度与可靠性。

总之，诸多定子绕组匝间短路故障检测方法已经成功、广泛地应用于工程实际，并具有发展前景，对其加以综合、改进，将进一步提高定子绕组匝间短路故障检测的灵敏度与可靠性。

1.2.2.2 诊断方法

异步电动机定子绕组匝间短路故障诊断，即判断故障发生部位、严重程度与发展趋势对于维修工作具有向导意义。

在定子绕组端部区域安装 4 只关于转轴对称分布的轴漏磁通探测线圈，通过比对、分析所测取的 4 个轴漏磁通幅值可以粗略定位匝间短路故障。由于需装设磁通探测线圈，该方法实用性欠佳。

笔者提出了一种实用的定子绕组匝间短路故障定位方法，其基本思路如下：首先，基于异步电动机多回路数学模型，对定子绕组匝间短路故障进行系统化的暂态数字仿真，获取翔实的样本数据；进而细致分析样本数据，揭示一客观规律，即定子某相绕组发生匝间短路故障后，其相邻滞后相绕组的（等效）视在阻抗角具有最大增量；据此，即可定位匝间短路故障发生相。

定子绕组匝间短路故障严重程度一般根据故障特征的基本变化规律、具体变化数值进行粗略判断，进一步的细致判断往往借助人工智能（神经网络、模糊逻辑等）技术实现，但必须以充分的数字仿真与物理实验样本数据为前提。

定子绕组匝间短路故障的成因、机理非常复杂。因此，关于定子绕组匝间短路故障发展趋势的诊断非常困难，该项研究目前尚未取得突破。

1.2.3 转子断条故障检测与诊断方法评述

转子断条故障是指笼型异步电动机转子导条断裂（端环开裂）故障。笼型异步电动机在运行过程中，转子导条受到径向电磁力、旋转电磁力、离心力、热弯曲挠度力等交变应力的作用，加之转子制造缺陷，导致断条故障。

转子断条故障将导致电动机出力下降、运行性能恶化，因此必须对其进行检测与诊断。

1.2.3.1 检测方法

研究表明,异步电动机一旦发生转子断条故障,在其定子电流中将出现 $(1 \pm 2s)f_1$ 频率的附加电流分量 (s 为转差率),因而该电流分量(通常称为边频分量)可以作为转子断条故障特征。而定子电流信号易于采集,因此基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的定子电流信号频谱分析方法被广泛应用于转子断条故障检测领域。这类方法通常称为 MCSA (Motor Current Signal Analysis) 方法。

最初的转子断条故障检测方法是对稳态定子电流信号直接进行频谱分析,根据频谱图中是否存在 $(1-2s)f_1$ 频率分量来判断转子有无断条。由于转子轻微断条时, $(1-2s)f_1$ 频率分量的幅值相对于 f_1 频率分量的幅值非常小(二者之比约为 $0.01 \sim 0.03$),同时异步电动机运行转差率 s 很小, $(1-2s)f_1$ 与 f_1 这两个频率非常接近(相差约 $0.2 \sim 5\text{Hz}$),因而应用快速傅里叶变换直接做频谱分析时, f_1 频率分量的泄漏可能淹没 $(1-2s)f_1$ 频率分量,从而使检测 $(1-2s)f_1$ 频率分量是否存在相当困难。

自适应滤波方法与起动电流时变频谱分析方法可以克服这一困难。自适应滤波方法首先对定子电流信号做自适应滤波处理,以抵消其中的 f_1 频率分量,之后再行傅里叶频谱分析,这样就在频谱图中突出了转子断条故障特征,即 $(1-2s)f_1$ 频率分量,从而大幅提高了转子断条故障检测的灵敏度。起动电流时变频谱分析方法采集异步电动机在起动过程中的定子电流信号,并对所采集的数据做分段频谱分析,以获得起动电流时变频谱,并据此判断转子有无断条。由于在起动过程中 s 较大,因而在频谱图中 $(1-2s)f_1$ 频率分量可以远离 f_1 频率分量,这就可以降低对频谱分析频率分辨力的要求。同时,在起动过程中 $(1-2s)f_1$ 频率分量与 f_1 频率分量的幅值之比远大于稳态运行时的数值,因而使 $(1-2s)f_1$ 频率分量易于检测。该方法的不足之处是必须等待异步电动机起动时方能测试,并且往往需要延长起动过程以获取足够时长的起动定子电流信号。此外,采用时域统计分析技术追踪供电频率 f_1 、转差率 s ,并用以调整傅里叶频谱分析的参数从而提高其频率分辨力,亦可提高转子断条故障检测的灵敏度。

与上述方法直接选用定子电流作为对象信号不同,为了提高转子断条故障检测的灵敏度与可靠性,可以将定子三相电流信号的包络、磁场空间矢量悬摆角、定子电流希尔伯特模量、定子电流派克模量、励磁-转矩电流(变换自定子电流)、逆变器输入电流(适用于变频器供电异步电动机)以及瞬时功率选作对象信号而进行频谱分析以检测转子断条故障。其中,定子电流希尔伯特模量方法、瞬时功率方法最具代表性与发展、应用前景。

显然,异步电动机转子断条故障检测方法研究已经取得卓越进展,而傅里叶频谱分析是应用最为广泛、占据主导地位的故障特征提取技术。

但是,对于工程实际中广泛采用的大中型异步电动机,这类基于傅里叶频谱分析的转子断条故障检测方法面临严峻挑战,甚至失效。以定子电流信号频谱分析方法为例,解释如下:

大中型异步电动机的满载转差率一般低于 1%,且在工程实际中大多在 40%~60%的负载率下运行,转差率 s 的数值很小,因此 $(1-2s)f_1$ 与 f_1 非常接近(小型异步电动机轻载运行时情况类似)。以某电厂一次风机用 10kV、4900kW、YKK800-4 型电动机为例,满载转差率 0.47%,通常运行于半载情况,此时转差率仅为 0.2%左右。另一方面,转子断条故障

特征—— $(1-2s)f_1$ 分量的幅值相对于主频分量 (f_1 分量) 的幅值非常细微 (二者之比为 $0.01\sim 0.03$)。因此, 定子电流信号傅里叶频谱分析必须具备足够高的频率分辨力以保证灵敏提取 $(1-2s)f_1$ 分量并实施故障检测。这意味着必须连续采样足够时长的定子电流信号 (频率分辨力为采样时长的倒数), 这正是傅里叶频谱分析的固有局限之所在。并且, 傅里叶频谱分析结果的准确性在一定程度上依赖于待处理信号在采样时段内的平稳性。这就要求电动机定子电流信号、进而要求电动机负载必须在足够时长内保持平稳, 以保证傅里叶频谱分析结果的准确性、进而保证灵敏地提取细微的 $(1-2s)f_1$ 分量并可靠实施故障检测。但是, 在工程实际中, 一定程度的负载波动是不可避免的, 信号采样时间过长往往意味着引入这些干扰而影响傅里叶频谱分析结果的准确性, 并恶化转子断条故障检测性能。对于变频器供电电动机而言, 由于经常性的调频、调速操作, 这一问题愈发严重。

为了解决上述问题, 研究人员已经提出了诸多方法。其一, 利用变频器以脉振磁场激励电动机并分析对应的阻抗模式变化而检测转子断条故障。由于过多地介入变频器操作, 该方法缺乏实用性。其二, 通过测量、分析电动机定子齿磁通以检测转子断条故障。尽管有效, 但由于现场安装磁通探针困难而缺乏实用性。其三, 应用小波变换技术分析定子电流以检测转子断条故障。但在选择、应用小波分解层数与小波分解系数方面存在一定程度的不确定性, 其有效性尚待证明。其四, 另辟蹊径: 在保证高频率分辨力的前提下, 针对采样时长尽可能短的定子电流信号实施转子断条故障检测。自然, 这是解决该问题的重点所在。信号采样时长足够短, 则完全可能回避负载波动等干扰。为达此目的, 引入高频率分辨力谱估计技术——多重信号分类 (Multiple Signal Classification, MUSIC)。与傅里叶频谱分析对比而言, MUSIC 具备原信号外推能力, 其频率分辨力可以摆脱采样时长的限制, 即使针对短时信号亦可达到高频率分辨率。令人遗憾的是, 尽管另辟蹊径而颇具新意, 此类方法并未关注、涉及低转差率情况下的电动机转子断条故障检测问题。其五, 关注于低转差率情况下的电动机转子断条故障检测问题, 以定子电流希尔伯特模量作为对象信号而进行傅里叶频谱分析并实施转子断条故障检测, 该方法确实取得显著进步, 但仍然囿于傅里叶频谱分析的固有局限。

因此, 低转差率情况下的电动机转子断条故障检测问题已经成为当前亟待解决的关键问题、难点问题。事实上, 这一问题也是颇具实用价值的——工程实际中广泛采用的大中型异步电动机一般运行于低转差率情况, 而大中型异步电动机造价昂贵并往往运行于关键工位, 恰恰是故障在线检测与诊断的首要对象。本书将致力于解决这一问题。

另外, 如何正确识别转子断条故障与负荷波动是当前亟待解决的另一难点问题。与转子断条故障类似, 负荷波动同样导致异步电动机定子电流中出现附加电流分量, 其频率为 $(f_1 \pm f_L)$ (f_L 为负荷的波动频率)。显然, 若 $f_L=2sf_1$, 则负荷波动对异步电动机定子电流频率组成的作用、影响与转子断条故障完全相同, 基于定子电流信号频谱分析的转子断条故障检测方法自然无法加以正确识别, 亦即该类方法可能将正常的负荷波动错误判断为转子断条故障。一般而言, 转子断条故障主要影响异步电动机的瞬时无功功率 (Instantaneous Reactive Power, IRP), 而负荷波动则主要影响其瞬时有功功率 (Instantaneous Active Power, IAP)。换言之, 转子断条故障与负荷波动对于异步电动机无功功率、有功功率的作用、影响是不同的。据此, 已有研究人员通过对异步电动机的无功功率、有功功率信号进行傅里

叶频谱分析而实施转子断条故障检测并区别于负荷波动。类似地, 亦可对异步电动机的瞬时功率因数与相位角、瞬时无功电流与有功电流或者电流空间矢量的无功分量与有功分量进行傅里叶频谱分析而达此目的。对于转子断条故障、负荷波动独立存在情况, 该类方法是有效的。但是, 囿于理论支撑的欠缺以及傅里叶频谱分析的固有局限, 对于转子断条故障与负荷波动共存情况 (特别是当 f_L 接近甚至等于 $2sf_1$ 时), 该类方法可能、甚至必然失效。本书将致力于解决这一问题。

1.2.3.2 诊断方法

异步电动机转子断条故障诊断工作主要集中于判断其严重程度, 即断裂导条数目。至于故障部位, 由于转子是旋转的, 并不存在判断基准而无法判断。异步电动机转子断条故障严重程度, 即断裂 (连续) 导条数目可以根据式 (1-1) 近似确定:

$$\begin{cases} \frac{I'_L}{I_m} \approx \frac{\sin \alpha}{2P(2\pi - \alpha)} \\ \alpha = \frac{2\pi P Z_b}{Z_r} \end{cases} \quad (1-1)$$

式中: I_m 为定子电流基波分量幅值; I'_L 为转子断条故障所导致的定子电流 $(1-2s)f_1$ 分量的幅值; P 为极对数; Z_b 、 Z_r 分别为断裂导条数与导条总数。

异步电动机断裂 (连续) 导条数目亦可根据式 (1-2) 近似确定:

$$\frac{I'_L}{I_m} \approx \frac{Z_b}{Z_r - 2Z_b} \approx \frac{Z_b}{Z_r} \quad (1-2)$$

对于大型电动机满载运行情况, 式 (1-2) 比较准确。但对于小型电动机或轻载情况, 应采用式 (1-3) 以计及激磁电流 (或空载电流)。

$$\frac{I'_L}{I_m - I_{0m}} \approx \frac{I'_L}{I_m \cos \varphi} \approx \frac{Z_b}{Z_r - 2Z_b} \approx \frac{Z_b}{Z_r} \quad (1-3)$$

式中: I_{0m} 为励磁电流幅值; $\cos \varphi$ 为功率因数。

以此为基础, 可以推导出转速波动情况下的断裂 (连续) 导条数目诊断公式:

$$\frac{I_L + I_R}{I_m \cos \varphi} \approx \frac{Z_b}{Z_r} \quad (1-4)$$

式中: I_L 为对定子电流信号进行频谱分析所获得的 $(1-2s)f_1$ 边频分量的幅值; I_R 为对定子电流信号进行频谱分析所获得的 $(1+2s)f_1$ 边频分量的幅值。

另外, 已有研究人员根据式 (1-3)、式 (1-4), 采用定子电流空间矢量模量方法、瞬时功率方法、转矩方法而诊断转子断条数目, 并通过对比其准确性等性能进一步肯定了式 (1-4) 具有优势。尽管如此, 其准确性仍有待进一步提高。

因此, 尚需进行系统、翔实的研究工作以评估、改进异步电动机转子断条故障严重程度, 即断裂 (连续) 导条数目诊断方法。笔者依据定子电流 $(1-2s)f_1$ 、 $(1+2s)f_1$ 分量的产生机理, 分别推导出了基于定子电流信号分析与瞬时无功功率信号分析的转子断裂导条数目诊断新判据。

转子断条故障的成因、机理非常复杂。因此, 关于转子断条故障发展趋势的诊断非常困难, 该项研究目前尚未取得突破。

1.2.4 轴承故障检测与诊断方法评述

滚动轴承以压倒性优势广泛应用于异步电动机之中。滚动轴承由内滚道和外滚道组成，其间一组滚动体转动。在平衡负载、良好对中的正常工作条件下，疲劳失效从位于滚道和滚动体表面下的微小裂纹开始，并逐渐扩展而引起材料碎片脱落，导致轴承故障。

1.2.4.1 检测方法

轴承故障一般分为外滚道故障、内滚道故障、滚动体故障及保持架故障，振动固有频率分别根据式（1-5）～式（1-8）计算。

外滚道故障固有频率：

$$f_{OD} = \frac{n_b}{2} f_m \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \varphi \right) \quad (1-5)$$

内滚道故障固有频率：

$$f_{ID} = \frac{n_b}{2} f_m \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \varphi \right) \quad (1-6)$$

滚动体故障固有频率：

$$f_{BD} = \frac{PD}{2BD} f_m \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \right)^2 \cos^2 \varphi \right] \quad (1-7)$$

保持架故障固有频率：

$$f_{CD} = \frac{1}{2} f_m \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \varphi \right) \quad (1-8)$$

式中： f_m 为电动机的转频； n_b 为滚动体数目； BD 和 PD 为滚动体直径和轴承节圆节径； φ 为滚动体的接触角。

基于振动信号分析的轴承故障检测方法即立足于此。该方法采集轴承时域振动信号并变换至频域，进而将频域振动信号与轴承固有频域振动特性对比，以判断轴承故障发生与否。振动信号频谱分析是准确、可靠的异步电动机轴承故障检测方法。但需要安装振动传感器，从而增加投资与维护工作量。并且，在很多场合下（如腐蚀、高爆）装设振动传感器颇为困难，因而影响其实用性。

为此，提出了基于定子电流信号频谱分析的轴承故障检测方法。类似于转子断条故障，异步电动机轴承故障发生之后，在其定子电流中将出现式（1-9）所示频率的附加电流分量：

$$f_{CF} = |f_1 \pm m f_v|, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (1-9)$$

式中： f_1 为供电频率； f_v 为轴承振动特征频率，由式（1-5）～式（1-8）确定。

基于定子电流信号频谱分析的轴承故障检测方法即以此为立足点。鉴于定子电流信号易于采集，相对振动信号分析而言，该方法具有更广阔的发展、应用前景。因此，定子电流信号分析法业已获得广泛关注，并将逐步改进以应用于工程实际。

另外，亦可针对定子电流派克模量、瞬时功率因数进行频谱分析以检测轴承故障。

与转子断条故障检测方法类似，上述基于傅里叶频谱分析的轴承故障检测方法同样存

在局限性——无法摆脱频率分辨力/采样时长的限制，在待分析信号波动、噪声等干扰情况下可能失效。为此，已有研究人员引入 MUSIC 而改进振动信号分析法，在短时采样条件下实现高频率分辨力频谱分析并检测轴承故障，以期回避待分析信号之波动。

1.2.4.2 诊断方法

根据异步电动机轴承振动信号频谱图或定子电流信号频谱图，通过查询故障特征频率分量可以确定轴承故障类型，参见式（1-5）～式（1-9）。

轴承故障严重程度一般根据故障特征的基本变化规律、具体变化数值进行粗略判断，进一步的细致判断往往借助人工智能（神经网络、模糊逻辑等）技术实现，但必须以充分的数字仿真与物理实验样本数据为前提。

目前，轴承故障发展趋势诊断研究尚未取得突破。

第2章 异步电动机的基本电磁关系 与运行原理

异步电动机结构简单、制造方便、坚固耐用，因而广泛应用于传动领域。

异步电动机的转子转速随负载大小的变化而略有改变，与供电电源频率之间没有严格不变的关系，即“异步”。异步电动机的转子电流是依据电磁感应原理由定子磁场感应产生的，所以也称为感应电动机。

2.1 异步电动机的类型与结构

异步电动机主要用作传动机械，从不同角度出發，可以有不同的分类方法。例如：按定子相数分，有单相异步电动机、两相异步电动机和三相异步电动机（本文研究三相异步电动机）；按转子结构分，有绕线型异步电动机和笼型异步电动机。后者又包括单笼型异步电动机、双笼型异步电动机和深槽异步电动机。图 2-1 所示为一台小型异步电动机的外观图，图 2-2 所示为绕线转子异步电动机的结构图。

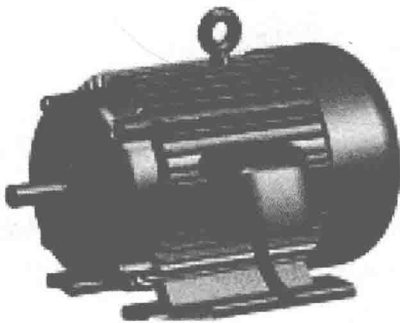


图 2-1 异步电动机的典型外观图

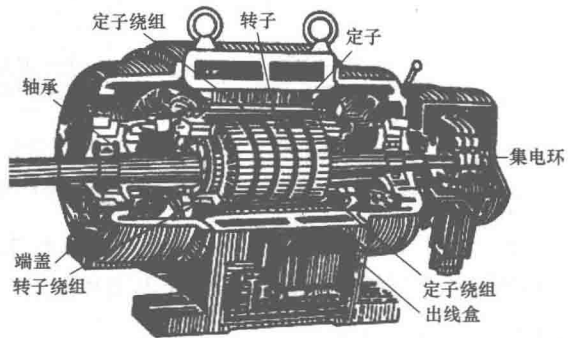


图 2-2 绕线转子异步电动机的结构图

异步电动机由静止不动的定子部分和旋转的转子部分以及定、转子之间的氣隙組成，如图 2-3 所示。

2.1.1 定子部分

定子是异步电动机固定不动的部分，它由定子铁芯、定子绕组和机座等部分组成。