

异步电动机的故障信息综合测量与分析

摘 要

通过对国内外异步电动机故障诊断方法的学习，确立了从研究鼠笼式异步电动机早期故障分析入手，研究探讨其故障下电机的等效模型；同时设计异步电动机综合测量的实验台，并获取测试数据，分析、验证当前测试方法的有效性和可行性的课题方案。

针对鼠笼式异步电动机的故障特点，列举并分析了电动机在实际工况下的典型振动故障和定子电流故障。对引发故障的各种原因和所表现出的振动、电流、频率特性进行了详尽的研究，并根据鼠笼式异步电动机的特点，列出了异步电动机故障诱因和相应的故障诊断方法。

在基于模型的故障诊断中，列举了传统无故障的电动机模型，并分析了将传统无故障的电动机模型应用于异步电动机故障诊断，会带来其等效模型失效的原因；进一步探讨了一种新的电机导条早期故障的等效模式。

在进行异步电动机综合测量与分析的过程中，针对异步电动机的轴承故障，建立了相应的测试方案。为达到所需的测试精度、准确度，探讨了试验台的建立、试验方法的设计、测试仪器的选择、测点布置和传感器选择的方法，并对所输入的信号进行数据处理，从而得出准确、有效的诊断结果。经过实际的电机轴承滚珠故障诊断的试验，验证了传统方法在电机轴承故障诊断的有效性。

在以往的故障诊断中，由于技术发展和研究条件的限制，过去故障诊断技术主要集中在故障发生中、后期，针对某一故障特征的提取和评

估故障后期的态势。随着电力电子技术的广泛应用,现场对故障监测技术的要求越来越高,为了防止故障发生后,出现设备的链式溃败,对故障早期信息的分析成为了新的发展热点。针对异步电动机的导条早期故障特点,采用了相应的故障模拟方法,确定了试验方法,建立了相应的异步电动机导条早期故障测试的试验台,进一步将异步电动机故障信息综合测量的试验结果进行数据处理,并对处理结果进行了分析。试验结果表明异步电动机导条早期故障的特征与断条后期故障特征存在差异,电动机导条早期故障特征频率反映在空载比带载情况下故障特征明显,但其数据差异并不显著;并以此进一步做了相应的理论探讨,得出运用传统断条故障诊断导条早期故障有效性不高的原因。为进一步提高故障监测的有效性,需要异步电动机导条早期故障等效模型理论的支持。而异步电动机导条早期故障等效模型的研究,需要通过对故障模型相关参数的测量,必须采用多传感器融合技术的故障诊断方法,提供外部测试结果为依据,从而实现在复杂环境下准确、及时地进行异步电动机设备的故障诊断的目的。

由于电机设备故障征兆与故障特征间复杂的非线性特性,使故障诊断及识别较为复杂,仅仅靠一种理论、一种方法是无法实现在复杂环境下准确、及时地进行电机设备的故障诊断。因此,集成型智能故障诊断系统必将是电机设备故障诊断技术的新趋势;另外,无论是什么诊断方法,真实有效的故障信号的获取是成功实现故障诊断的前提,因此,多传感器数据融合技术必将成为故障诊断学中的重要方向。通过多传感器融合技术和试验方法的学习和研究,提出基于多传感器融合技术的电动机故障诊断试验的实现框架,为今后学科发展提供试验实现方法的参考。

关键词:异步电动机, 故障诊断, 等效模型, 多传感器融合

AN INTEGRATED APPROACH TO FAULT DIAGNOSIS AND ANALYSIS OF ASYNCHRONOUS MOTOR

ABSTRACT

Through to study the domestic and foreign paper about the fault diagnostic method of asynchronous motors, the topic has been established from research of the minor faulty analysis and its faulty equivalent model about asynchronous squirrel cage induction motor. At the same time, we design the experimentation and confirmatory measurements in the laboratory.

In view of faulty characteristic of asynchronous squirrel cage induction motor, we enumerate and analyzed the faulty model about the vibration fault and the stator current fault. Moreover, we enumerate each kind of faulty reason. Base on the faulty characteristic of asynchronous motor, we discuss the faulty cause of asynchronous motor and corresponding method of fault diagnosis.

Model-based fault diagnosis of asynchronous motor, we enumerate model of the well-found motor, and analyze that it become void in fault. Meanwhile, we discuss a new motor model, which is about the squirrel cage in the minor fault.

In the process, we design the experimentation and confirmatory measurements in the laboratory. In order to achieve a precision experimentation, we discuss diagnostic methods which include the testing devices, the testing methods, the measuring instruments, the measuring points, the sensors and the data processing, thus we obtain the effective fault

diagnostic result. Comparing efficacy of the methods, we confirm the traditional diagnostic methods are validity in the bearing fault of the electromotor.

Among the former fault diagnosis, as a result of technological development and condition limit, the fault diagnostic technology mainly concentrate on the later fault diagnosis. We discuss the model of squirrel cage in the minor fault and use some corresponding methods, analyze the test results. The test results indicate the squirrel cage faulty characteristic is difference between minor and average. The fault characteristic frequency of the idling situation is more obvious than the moving load, but its data difference is not remarkable. And we discuss the corresponding theory. We obtain the reason why the squirrel cage fault diagnosis is not high validity in the minor fault.

With the electronic technology is widespread application, the technology of faulty monitor is required more and more highly. We must use the multi-sensor fusion technology in the fault diagnosis. Because the faulty characteristic of equipment is nonlinear and the faulty cause is multiple, it is unable to realize while it merely depends on one kind of theory or one method. Therefore, the fault diagnostic system of integral intelligence will certainly become a new tendency of fault diagnostic technology. Thus the multi-sensor data fusion technology will certainly become an important direction in fault diagnosis. We proposed the testing frame of fault diagnosis which is based on the multi-sensor fusion technology. In the further, it could offer for a few ideas for diagnostic methods.

KEY WORDS: asynchronous motor, fault diagnosis, equivalent model, multi-sensor fusion

第一章 绪论

1.1 选题背景和研究意义

随着经济建设的发展和电气化程度的提高,电机设备已被广泛应用于工业生产的各个领域,及时准确地发现电机设备潜在的和现有的故障是保证生产安全运行的重要措施。因此,研究不同场合、不同运行状态下电机设备故障诊断理论和技术是设备可靠运行的保证。

电机设备是组成供、用电系统的基本元件,在运行中受到电、热、机械、周围环境等各种因素的作用使其性能逐渐劣化,最终导致故障。随着现代工业及科学技术的迅速发展,特别是计算机技术的发展:现代化的工业生产都是以提高产品质量和生产效率、降低生产成本、节约能源和物料消耗为前提,因此都采用了先进的工艺和现代化的生产设备,这些设备的特点是技术先进、结构复杂、精度很高,一旦发生故障,往往会引起系统机构间的链式反应,导致整个系统不能正常运行乃至瘫痪;即使是停止工作的时间极短,也会产生很大的经济损失。^[1]一般这些故障的发生总是以各种征兆表现出来,并且故障类型也多种多样:从系统的机构分有受控对象故障、传感器故障、执行器故障和控制器故障;从故障程度分有缓变故障、突变故障和间隙故障;从故障间的相互关系分有单故障、多故障、独立故障和局部故障,其关系错综复杂,这给电机设备故障的有效、快速诊断带来一定的困难。^[2]

有效及时地通过各种检测技术和信号分析理论分离不正常状态信息,并诊断出故障隐患是实现可靠运行,减少维修率,提高生产效率的重要措施。通过对异步电动机的故障信息综合测量与分析,实现对电机常见故障信号的提取和分析,以实现电机设备故障的有效、快速诊断的目的,提高系统的安全性、可靠性、有效性以及维修的经济性;在生产过程中,避免某些生产过程发生故障而引起整个生产过程瘫痪,必须在电机故障发生伊始迅速予以报警,为进一步决策提供依据,从而保证生产过程安全可靠的进行。采用计算机监控系统检测生产过程中的故障并分离出故障源,能更好的发挥现有设备效能,同时显著提高电机故障识别能力,从而提高电机

的效率寿命、生产设计水平。因此电机设备故障诊断的准确及时对保证生产安全平稳，避免人员、财产的巨大损失具有重要意义。

1.2 国内外异步电动机故障诊断方法的发展概况

电机设备的运行受很多因素影响,如电网电压、负载性质、安装环境、产品质量等,恶劣的环境和超技术范围的运行是导致故障产生的主要原因。电机设备的工作原理都是基于电磁理论,其主要由电路(绕组)和磁路(铁心)两大部分组成,变压器为静止设备,而电机是旋转设备,它们的故障形成过程和表现形式在许多方面都有相同之处:设备的绕组过热,绝缘老化,铁心变形及电机转子偏心等。通常这些征兆是逐渐恶化并失去原有的性能。有效及时地通过各种检测技术和信号分析理论分离不正常状态信息,并诊断出故障隐患是实现可靠运行,减少维修率,提高生产效率的重要措施。

1.2.1 电动机物理测量方法

目前电动机物理测量方法一般有:

1) 电流分析法:通过频谱等信号分析方法对负载电流的波形进行检测从而诊断出电机设备故障的原因和程度;

2) 绝缘诊断法:

利用各种电气试验装置和诊断技术对电机设备的绝缘结构、工作性能是否存在缺陷做出判断,并对绝缘寿命做出预测;

3) 温度检测方法 :

采用各种温度测量方法对电机设备各个部位的温升进行监测,电机的温升与各种故障现象相关;

4) 振动与噪声诊断法:

通过对电机设备振动与噪声的检测,并对获取的信号进行处理,诊断出电机产生故障的原因和部位,尤其是对机械上的损坏诊断特别有效。

5) 磁通测量法:

通过对电动机转子磁回路进行监测,电机的磁通与各种故障现象相关。

1.2.2 电机设备故障诊断的基本方法

目前电机设备故障诊断的基本方法有:

1.2.2.1 依赖于模型的方法

基于模型的故障诊断技术的核心思想是用解析冗余取代硬件冗余。解析冗余主要是通过构造观测器估计出系统输出,然后将它与输出的测量值作比较从中取得故障信息。它可以分为两种:状态估计法和参数估计法。

1.2.2.2 不依赖于模型的方法

1) 基于直接可测信号的故障诊断方法

(1) 可测值或其变化趋势值检查的方法

这种故障诊断方法根据直接可测的输入输出及其变化趋势来进行故障诊断,其依据是:正常状况下,被控过程的输入输出及其变化趋势在一定范围内变动,即 $u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$, $y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}$ 或 $y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}$ 。文献[3]在大量实验的基础上提出了一种评价影响系数优劣的指标,有助于从数值上对影响系数的优劣进行定量的分析,提高了判断的科学性。该指标是由幅值和相位变化量作加权平均后构成的一个无量纲数,当选取的指标高于阈值时,平衡效果比较好,反之则不然。实验表明幅值变化量对影响系数优劣的贡献不大。文章并对所提指标的有效性进行了实验验证,效果良好。

(2) 基于可测信号处理的故障诊断方法

系统的输出在幅值、相位、频率及相关性上与故障源存在着某些关系^[4]。

(3) 基于信号变换的诊断方法

电机设备的许多故障信息是以调制的形式存在于所监测的电气信号及振动信号之中,如果借助于某种变换对这些信号进行解调处理,就能方便地获得故障特征信息,以确定电机设备所发生的故障类型。常用的信号变换方法有希尔伯特变换^[5]和小波变换^[6]。

小波变换既是时间尺度分析,又是时间-频率分析,它具有多分辨率的特点,且在时频两域,具有表征信号局部特征的能力,利用小波变换的奇异点(如过零点、极值点)

在多尺度下的综合表现来检测信号的局部突变点,从而进行故障诊断。

2) 基于经验知识的故障诊断方法

(1) 基于专家系统的诊断方法

基于专家系统的诊断方法是根据被诊断系统的专家以往经验,将其归纳成规则,并运用经验规则通过规则推理来进行故障诊断。基于专家系统的诊断方法具有诊断过程简单、快速等优点,但也存在着局限性,基于专家系统的方法属于反演推理,因而不是一种确保唯一性的推理方法,该方法存在着获取知识的瓶颈。对于复杂系统所观测到的症状与所对应故障之间联系是相当复杂的,专家经验归纳成规则往往不是唯一的并且有相当难度。因此该方法不适合于复杂电机设备或新的及未有经验的电机设备的故障诊断。另外,基于规则的方法对于诊断结论除了重复被采用的规则外无法做出进一步解释,通常只能诊断单个故障,难以诊断多重故障。

(2) 基于模式识别的故障诊断方法

基于模式识别的故障诊断方法实现故障诊断的步骤分两个阶段:

首先,离线分析:通过离线分析确定能够表达系统故障状态的特征向量集和以该特征向量集描述的故障模式向量,由此形成故障的基准模式集,并确定区分识别这些故障模式向量的判别函数;其次,在线诊断:实时提供故障的特征向量,由判别函数对故障进行分离定位^[7]。

(3) 基于故障树故障诊断方法

故障树时表示系统或设备特定事件或不希望事件与它的各个子系统或各部件故障事件之间的逻辑结构图,通过这种结构图对系统故障形成原因作出总体至部分按树状逐渐的细化划分。故障树分析法可以对系统或机器的故障进行预测和诊断。

(4) 基于模糊理论的诊断方法

在故障诊断领域,模糊属性常常出现,模糊理论是处理这类问题的最好的工具。模糊故障诊断有两种方法,一种是先建立征兆与故障类型之间的因果关系矩阵 R ,再建立故障与征兆的模糊关系方程,即 $F = S \cup R$ 。这时 F 为模糊故障矢量; S 为模糊征兆矢量;“ \cup ”为模糊合成算子,这是基于模糊关系及合成算法的诊断方法。另一种方法先建立故障与征兆的模糊规则库,再进行模糊逻辑推理的诊断过程,这是一种基于知识处理的诊断方法^[8]。

(5) 基于人工神经网络的诊断方法

人工神经网络(ANN)是由大量简单处理单元广泛连接而成的复杂的非线性系统,具有学习能力,自适应能力,非线性逼近能力等。故障诊断的任务从映射角度看就是从征兆到故障类型的映射。用ANN技术处理故障诊断问题,不仅能进行复杂故障诊断模式的识别,还能进行故障严重性评估和故障预测,由于ANN能自动获取诊断知识,使诊断系统具有自适应能力。将ANN应用于电机设备故障诊断是当前电机设备故障诊断的热点之一^[9]。

(6) 基于集成型智能系统的诊断方法

随着电机设备系统越来越复杂,依靠单一的故障诊断技术已难满足复杂电机设备的故障诊断要求,因此上述各种诊断技术集成起来形成的集成智能诊断系统成为当前电机设备故障诊断研究的热点。主要的集成技术有:基于规则的专家系统与ANN的结合,模糊逻辑与ANN的结合,混沌理论与ANN的结合,模糊神经网络与专家系统的结合。专家系统与神经网络的结合能充分利用专家系统的专家经验和神经网络强大的非线性映射能力^[10]。

(7) 基于遗传算法的电机故障诊断方法

遗传算法是基于自然选择和基因遗传学原理的搜索算法,它的推算过程就是不断接近最优解的方法,因此它的特点在于并行计算与全局最优,遗传算法只需较少的信息就可实现最优化控制。因此,通常用遗传算法来优化神经网络或模糊逻辑系统的参数和结构。理论上,所有故障智能诊断方法都可以用遗传算法进行优化^[11]。

(8) 基于Petri网络的电动机故障诊断

Petri网络(Petri net)是一种通用的数学模型,是在构造有向图的组合模型的基础上,形成可用矩形运算所描述的严格定义的数学对象。Petri网分析方法既可用于静态的结构分析,又可用于动态的行为分析。它以研究系统的组织结构和动态行为为目标,能够对系统中同时发生,次序发生或循环发生的各种活动过程进行定性或者定量的分析。所以Petri网络是离散事件动态系统建模和分析的理想工具。对大规模电网基于Petri网模型建模时,因设备增加和网络扩大会出现状态的组合爆炸,且基本的Petri网不能描述时间特征要求高的行为特征,因此在复杂系统建模时,需要采用高级的Petri网,如谓词变迁网,有色时间网等^[12]。

(9) 基于Agent技术的电动机故障诊断

分布式人工智能是在传统AI的基础上发展起来的,主要研究在逻辑上或物理上分

散的智能系统如何并行的,或相互协作地进行问题的求解。基于多Agent技术也引起了电机研究者的关注,人们尝试着将多Agent技术引入电机的故障诊断相关研究和应用中。从Agent的特点上看,它区别于传统智能系统的显著特征在于它所具备的与其所处环境,与其它Agent进行交互,协调和协作的能力。AI的研究目标是认识和模拟人类智能行为,单个Agent主要用于模拟个人的智能行为,而多Agent系统则是以模拟人类社会群体智能行为作为最终目标,它通过多个Agent之间的交换或通讯、合作形成了一个多Agent系统。研究多Agent系统意义下的Agent,实际是将多个Agent单元的推理和知识结合起来,创建多智能系统,以完成对更复杂、更大规模的问题的解决起到重要的作用。

(10) 基于多传感器数据融合理论方法

数据融合的基本概念就是通过对多个源的数据通过适当的融合得到一个比单个源数据更有利的结果。这里的有利是相对于应用来说。针对故障诊断对消除或者减小不确定性的要求,多传感器数据融合将是这个领域以后发展的一个重要方向^[13]。

(11) 无传感器故障诊断地探索

在传统故障诊断方法中,由于大量的传感器的使用,一方面增加了成本,另一方面增加得传感器带来了新故障点。正确选择传感器的数量,既有效降低成本,又有效降低了误诊率。在早期故障检测和诊断系统在检测达到低误诊率时,需采集高检测电流。后来,在特殊机械组件参数和设计中,希望在不增加传感器的前提下,获得最小信息来得到准确故障诊断结果。

(12) 基于数据挖掘技术的电动机故障诊断

数据库中的知识发现的核心技术——数据挖掘是近年来国际上较为活跃的研究领域,是人工智能与数据库技术相结合的产物。它应用一些专门算法从数据中抽取有效的模式,从大量数据中发现潜在规律,提取有用知识。DM技术在电动机故障诊断中的应用目前正处于起步阶段,解决如何将DM的算法与诊断对象相结合,确定出诊断对象的诊断模型如分类模型、回归模型、时间序列模型、聚类模型、关联模型、序列模型及如何将DM与传统人工智能技术相结合,如获取对象的模糊隶属度是值得进一步深入研究探讨的课题。

(13) 虚拟仪器在电动机故障诊断应用

LabVIEW运用图标代码来创建应用程序,使用数据流编程方法描述程序的执行,

LabVIEW是图形和线条的组合，是一种全新概念的编程语言，也是一种携带扩展库函数的通用程序开发系统。运用LabVIEW图形编程语言的强大功能可以构建各种传统仪器或其他虚拟仪器。虚拟仪器将微机和测量系统完美地融合于一体，对数据的分析处理和显示完全由功能强大高速的计算机执行。LabVIEW环境下开发的虚拟仪器电机振动故障检测系统，有别于其他相同功能的传统仪器，大大提高了电机振动故障诊断的效率，可及时发现电机的早期故障，排除隐患，保证电机正常运行，并大大延长电机的使用寿命。

1.3 本课题研究的主要方向

综上所述，由于电机设备故障诊断的准确及时对保证生产安全平稳，避免人员、财产的巨大损失具有重要意义。故障诊断技术作为一门交叉性科学，从60年代起至今，已在传统的方法上得到飞速发展，新的理论及现代故障诊断方法不断出现：小波变换、专家系统、模糊系统、神经网络等都在故障诊断领域得到了成功应用。

在以往的故障诊断中，由于技术发展和研究条件的限制，过去故障诊断技术主要集中在故障发生后期，针对某一故障特征的提取和认定故障后期的态势。随着电力电子技术的广泛应用，现场对故障监测技术的要求越来越高，为了防止重大故障发生后出现设备的链式溃败，对故障早期信息的分析成为了新的发展热点。由于电机设备故障征兆与故障特征间复杂的非线性特性，使故障诊断及识别较为复杂，仅仅靠一种理论、一种方法是无法实现在复杂环境下准确、及时地进行电机设备的故障诊断。因此，集成型智能故障诊断系统必将是电机设备故障诊断技术的新趋势；另外，无论是什么诊断方法，真实有效的故障信号的获取是成功实现故障诊断的前提，因此，多传感器数据融合技术必将成为故障诊断学中的重要方向。基于多传感器融合技术的电动机故障诊断技术，真正实现硬、软件的有机结合；一方面，它采用成熟的硬件检测设备多角度、全方位的提供出“全景”故障信息；另一方面，它结合现有成熟的数据处理方式，显化故障特征，有效分离故障成因，同时做出故障态势评估，实现对故障的精准的诊断目的。

因此，本课题从研究鼠笼式异步电动机早期故障分析入手，研究探讨其早期故障下电机的等效模型，同时设计异步电动机综合测量的实验台，并获取测试数据，分析、

验证当前测试方法的有效性和可行性。通过试验方法的学习、研究，探讨了基于多传感器融合技术的电动机故障诊断试验的实现框架，为今后学科发展提供试验方法的参考。

1.4 本课题的主要研究内容

通过对当前电动机故障诊断方法的学习，针对鼠笼式异步电动机常见故障：轴承故障和导条早期故障，设计异步电动机综合测试试验台；并对鼠笼式异步电动机等效模型的分析研究，探讨了针对导条早期故障的等效数学模型；同时，通过测试数据的分析和验证当前测试方法的有效性和可行性；根据当今测试技术的发展，提出基于多传感器融合技术的电动机故障诊断试验的实现框架，为今后学科发展提供试验方法的参考。

本文内容安排如下：

第一章，绪论。简单介绍交流电机异步电动机的故障信息综合测量与分析故障诊断选题背景和研究意义和发展趋势；

第二章，异步电动机故障检测的方法。介绍了异步电动机故障诊断检测方法，并针对本课题中应用的异步电动机故障诊断试验方法，提供理论依据；

第三章，异步电动机等效模型的研究。介绍了异步电动机 T 形等效电路的建立的原理，为后面提出得导条早期故障等效模型，提供理论基础。

第四章，鼠笼式异步电动机导条早期故障等效模型的研究。介绍当今鼠笼式异步电动机断条故障等效模型，并以此探讨了鼠笼式异步电动机导条早期故障等效模型。

第五章，异步电动机故障综合测量与分析。设计了针对异步电动机轴承故障、导条早期故障的测试试验台，分析试验数据和结果，进而验证测试方法的有效性。

第六章，多传感器融合技术在异步电机故障诊断方法的研究。研究了多传感器技术在异步电动机故障诊断中的应用方法，提出了一种适用于异步电动机故障诊断，多传感器融合试验方法的框架。

第七章，结束语。对本文的研究工作进行了全面的总结。

第二章 异步电动机故障综合测量的方法

2.1 异步电动机故障诊断技术特点

异步电动机供电简单、维护方便和价格便宜，广泛运用于生产和生活中。异步电动机制造原理采用由一个三相交流电产生其定子旋转磁场，该磁场和电源频率同步；其转子为一个短路的绕组，当定子旋转磁场切割转子导体时，转子产生感应电动势和感生电流，从而建立转子磁场。由于定转子磁场相互作用产生电磁转矩，因而异步电动机输出机械转矩。因此，异步电动机故障诊断的方法，转子侧故障测量部分仅能采用间接测量的特点。通常情况下，需要通过对电机定子电流频谱分析和异步电动机等效电路的计算，获取和估计转子侧的故障趋势和故障原因。

2.2 异步电动机典型故障研究分析

根据异步电动机制造原理和工艺，异步电动机典型故障可分为：

1) 定子铁心短路

由于异步电动机气隙小，装配不当，容易造成定、转子相擦，使定子铁心局部绝缘破损，至使涡流损耗增大而局部过热，甚至危及定子绕组。

2) 定子铁心松动

异步电动机由于装配工艺中，铁心压装不紧或电机长期运行定子铁心紧固件松动、脱落发生定子铁心松动，至使电机运行噪音加大，长期运行危及电机绝缘。

3) 电机轴承故障

异步电动机长期运行，由于维护不当造成电机轴承故障，至使电机运行噪音加大，长期运行造成转子绝缘破损，引发电机故障。

4) 定子绕组绝缘磨损

异步电动机长期运行后绝缘性能趋于劣化，会引发定子绕组绝缘故障；由于绝

缘涂层受温度变化后与电机制造材料热冷膨胀、收缩率不同，容易造成定子绕组绝缘磨损；以及冲击电磁力作用下，使定子绕组与槽壁产生磨损，最终造成定子绕组绝缘磨损。

5) 定子绕组绝缘破损

通常是由于电机定期检查时，定子线圈受到碰撞，或转子高速旋转部件脱落造成定子绕组绝缘破损。

6) 定子绕组匝间短路

通常由于制造过程中，绕组间含有杂质和线圈压型操作不当，造成定子绕组匝间短路。

7) 鼠笼式转子断条和端环开裂

鼠笼式异步电动机在起制动过程中，导条承受较大交变电磁力和端环还需承受较大离心力，容易造成转子断条和端环开裂。

8) 绕线式转子绕组击穿、开焊和匝间短路

由于绕线式电机制造工艺及其机械特性，在拖动大负载起动过程中，容易出现转子绕组击穿、开焊和匝间短路的故障。

9) 转子故障

转子是电动机输出机械功率的部件，运行时承受许多复杂的应力容易出现各种故障；转子在长期运行过程中，附着环境杂质以及出现零件脱落造成转子动平衡失效，导致电动机转子转轴弯曲、轴颈椭圆等，使电动机振动加大；同时，由于拖动负载在冲击载荷下，引发扭转振荡，使转子结构部件和转轴疲劳。

10) 底座螺丝松动

在电动机运行时，由于电机作为能量输出装置，承受了负载的反作用力，现场容易出现电动机底座螺丝松动的故障，导致电动机转子偏心、电机振动和噪音升高等故障，严重时出现电机跳动。

11) 电源故障

由于电动机起动电流较大，在继电器控制回路中，由于接触器触点接触不良，容易产生电网三相不平衡，造成电机定子三相磁场不平衡，引发电机电磁振动。

针对电机振动故障需要采用多种方法来寻找振源、测定振动强度，常见的电机振动故障分析方法如下^[14]：

2.3.1 定子异常产生的电磁振动

电动机运行时，转子在定子内腔旋转，由于定、转子磁场的相互作用及其磁场的均匀性，定子机座将受到一个旋转力波的作用，而发生周期性的变形并产生振动。根据电机学原理，异步电动机旋转磁场是以同步转速 $n_0 = \frac{60f_0}{p}$ 旋转，则其磁场交变频率与电网频率相同；根据电磁学原理，磁极总是成对出现；这必然使异步电动机转子在一个旋转周期中，承受 2 倍于旋转磁场频率的电磁力。也就是说，由于旋转磁场的磁极产生的电磁拉力是每转动一圈，电磁力交变 p 次（ p 为极对数）；因电磁振动在空间位置上和旋转磁场是同步的，定子电磁振动频率应为旋转磁场频率（ f_0/p ）和电动力极数（ $2p$ ）之乘积 $2f_0$ ，也就是 2 倍的电源频率。

图 2-1 列出了电磁振动异常的主要原因，定子三相磁场不平衡、定子铁心和定子线圈松动以及电动机座底脚螺丝松动。

通过上述分析，可得出定子电磁振动的故障信息的特征：

- 1) 振动频率为电源频率的 2 倍；
- 2) 切断电源，电磁振动立即消失；
- 3) 振动可以在定子基座和轴承上测得；
- 4) 振动与机座刚度和电机负载有关。

2.3.2 空气间隙不均匀引起的电磁振动

由图 2-1 知，气隙不均匀也是引起电动机电磁振动的原因。图中给出了由于电机物理特性转子椭圆、定子椭圆和定转子中心不重合会引发电动机电磁振动。而对于电动机故障诊断来讲，根据故障信号特征分类，可分为气隙静态不均匀引起的电磁振动和气隙动态偏心电磁振动；由于这两种故障信号特征不同，故分别叙述如下：

2.3.2.1 气隙静态不均匀引起的电磁振动;

电动机定子中心与转子轴心不重合,定转子之间气隙将出现偏心现象,这时气隙偏心固定在一个位置,它不随转子旋转而相应发生改变。在分析定子异常产生的电磁振动时,已经知道电磁力引起的电磁振动为 $2f_0$,而气隙静态不均匀主要原因是由于空间电磁力不平衡,所以其电磁振动频率为 $2f_0$ 。

静态气隙偏心产生的电磁振动特征是:

- 1) 电磁振动频率是电源频率 f_0 的 2 倍,即 $f=2f_0$;
- 2) 振动随偏心值得增大而增大,与电动机负荷关系也是如此;
- 3) 气隙偏心产生的电磁振动与定子异常产生的电磁振动较难区别。

2.3.2.2 气隙动态偏心电磁振动

电动机气隙的动态偏心是由于转轴挠曲或转子铁心不圆造成的,偏心位置相对转子是固定的。因此,偏心位置随转子旋转而同步移动。在电机学中,旋转磁场的同步速度为 f_0/p ,转子速度为 $(1-s)f_0/p$ (s 为异步电动机滑差)。对于偏心点来说,旋转磁场超越转子转速的速度:

$$[f_0/p - (1-s)f_0/p] \times 2p = 2sf_0 \quad 2-1$$

因此,气隙动态偏心产生电磁振动的特征是:

- 1) 转子旋转频率和旋转磁场同步转速频率的电磁振动都可能出现;
- 2) 电磁振动以 $1/2sf_0$ 周期在脉动,因此,在电动机负载增加, s 加大时,其脉动节拍加快;
- 3) 电动机往往发生与脉动节拍相一致的电磁噪声。

2.3.3 鼠笼式电动机导条异常引起的电磁振动

由图 2-1 可知,鼠笼式异步电动机因导条断裂,将产生不平衡电磁力,该不平衡电磁力频率和转子旋转频率一致,其性质与气隙动态偏心电磁振动相同。因此,转子绕组异常引起的电磁振动的特征为:

- 1) 转子绕组异常引起电磁振动与转子动态偏心所产生的电磁振动的电磁力和振动波形相似, 现象相似较难判别。
- 2) 电动机负载增加时, 这种振动随之增加, 当负载超过 50%以上较为显著;
- 3) 若对电动机定子电流波形或振动波形作频谱分析, 在频谱图中, 基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频, 根据边频与基频幅值之间的关系, 可判断故障的程度。

2.3.4 转子不平衡产生的机械振动

电动机转子质量分布不均匀时, 产生了重心位移, 不平衡重量在旋转时将产生单边离心力, 引起了变化的支撑力, 电机运行变得不稳定了, 因而产生了机械振动。转子不平衡造成机械性振动, 是最常见故障, 它具有如下特征:

- 1) 振动频率和速度频率相等;
- 2) 振动值随转速增高而加大, 但与电机负载无关;
- 3) 振动值以径向为最大, 轴向为很小。

2.3.5 滚动轴承异常产生的机械振动

2.3.5.1 滚动轴承故障频率成分分析

在电机故障中最为常见的轴承故障中, 由于使用条件和工作环境的不同, 滚动轴承会发生磨损、压痕、点蚀、锈蚀、以及变色等多种异常现象。它又可细分为轴承配合面加工精度不高、轴承不同心、固定轴承盖锁紧面精度不高、轴承盖机构特性、滚珠尺寸不同、轴承内圈径向偏摆、滚动体椭圆度棱圆度、保持架空中间隙、轴承部件中波纹度产生的动力脉冲、轴承径向间隙、轴承负荷大小等, 都会产生机械振动, 其中含有许多制造误差及工艺缺陷产生的故障。

不同规格的滚动轴承, 具有其特定的特征频率; 滚动轴承的特征频率取决于其滚动元件的几何尺寸。见表 2-1 滚动轴承的特征频率:

表 2-1 滚动轴承的特征频率

Table 2-1, the rolling bearing characteristic frequency

损坏部位	特征频率 (Hz)	备注
外套	$f_c = 0.5 \frac{n_1}{60} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$	外环的一点与一个滚动体接触的频率
内套	$f_i = 0.5 \frac{n_1}{60} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$	内环的一点与一个滚动体接触的频率
滚珠	$f_b = 0.5 \frac{D}{d} \frac{n_1}{60} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right]$	滚动体一点与内环接触的频率
保持架	$f_k = 0.5 z \frac{n_1}{60} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$	滚珠排列不规则

式中： n_1 -----电动机转速，为了简化算式，通常将 $f_r = \frac{n_1}{60}$ 定义为回转频率；

z -----钢球个数；

α -----压力角；

d -----滚动体直径；

D -----轴承节径。

2.3.5.2 因滚动轴承损伤而引起的振动

滚动轴承在运转过程中可能由于种种原因(例如落入异物、受过大的冲击载荷)而引起磨损、压痕、裂纹、表面剥落胶合等缺陷，这些缺陷必然引起冲击振动，这种振动的频率是轴承的固有频率和高次谐波^{[14][15]}。表 2-2 列出缺陷发生部位与振动的关系。

由传输振动、安装不正确和滚动体大小不一致所引起的轴承振动，其振动频率较低，通常小于 1kHz。由于加工和装配不良引起振动，其振动幅值以轴向为最大、振动频率和旋转频率相同。

由于转子不平衡旋转力和轴承内圈轴向力引起的振动，往往与轴承油膜特性有

关；其振动频率是旋转频率的整数倍 ($f_r, 2f_r, 3f_r, \dots, mf_r$) 或分数倍 ($f_r, \frac{f_r}{2}, \frac{f_r}{3}, \dots, \frac{f_r}{m}$),

而且振动是轴向的。

表 2-2 缺陷发生部位与振动频率

Table 2-2: the flaw and vibrational frequency

缺 陷	频 率 成 分	原 因
轴承有偏心	nf_r	内环严重磨损
内环有点蚀	$nzf_i \pm f_r, \dots, nzf_i \pm f_c$	内环有裂纹压痕
外环有点蚀	nzf_c	外环有裂纹、剥落
钢球有点蚀	$2nf_b \pm f_c$	钢球磨损、压痕

表中： n ——自然数；

f_i ——内环的一点与一个滚动体接触的频率；

f_c ——外环的一点与一个滚动体接触的频率；

f_b ——滚动体一点与内环接触的频率；

f_r ——轴的回转频率。

2.4 电机电流故障诊断机理研究与分析

定子电流的频谱分析是诊断和监测交流电机故障的有效方法，通过对负载电流的幅值、波形的检测和频率分析，可以诊断交流电机绕组的断条、静态气隙偏心、动态气隙偏心和转子不平衡等故障。交流电机的故障往往是由机械和电气相互联系的耦合原因引起的，这是由其设计和运行特点所决定的。异步电机因气隙较小，因而对磁动势和磁拉力的不平衡很敏感。因此，电动机导条断裂和气隙偏心等故障征兆都会通过气隙磁场在定子电流中反映出来，通过定子电流检测和频谱分析就可对这些故障进行诊断，下面将介绍断条、气隙偏心和滚动轴承的故障诊断原理和方法。

2.4.1 定子电流诊断转子绕组故障原理

电动机的转子导条和端环的故障监测和诊断^{[14][15]}。用定子电流信号来监测鼠笼式异步电动机, 转子绕组故障是最常用的, 也是较为常用的一种监测方法。

理想的异步电机定子电流的频率是单一的, 即电源频率。但是当转子回路出现故障时, 英国 Hargis 等学者证明了定子电流频谱图上, 在与电源频率相差二倍转差频率(±2sf)的位置上将各出现一个旁频带。

根据电机学可知, 一台极对数为 p 的异步电动机, 当电网供电频率为 f 时, 工作时定子绕组产生磁动势 m_1 , 其基波表达式为:

$$m_1 = K_1 N_1 I_1 \sin(\omega t - p\theta) \quad 2-2$$

式中, K_1 ——与极对数、绕组系数有关的常数;

N_1 ——定子绕组每相匝数;

I_1 ——定子电流;

ω ——电源电网角频率, $\omega = 2\pi f$;

θ ——以机械角度表示的初相角。

转子绕组相位角中

$$\Phi = \theta - \omega_r t \quad 2-3$$

式中: ω_r ——转子旋转角速度。

转子绕组在定子旋转磁场作用下, 将感应电势并产生电流, 建立起一个与定子磁动势相平衡的转子磁动势, 转子磁动势基波表达式为:

$$m_2 = K_2 N_2 I_2 \sin[(\omega - \omega_r)t - \Phi] \quad 2-4$$

式中: K_2 ——与极对数、绕组系数有关的常数;

N_2 ——转子绕组匝数;

I_2 ——转子电流;

当转子绕组存在故障时，有一根断条时，转子电流的磁势被 $\sin 2\Phi$ 所调制，这时转子绕组磁动势将变为以下表达式：

$$m_2 = K_2 N_2 I_2 \sin[(\omega - \omega_r)t - \Phi] \sin 2\Phi \quad 2-5$$

$$\text{故 } m_2 = K_2 N_2 I_2 / 2 \{ \cos[(\omega - \omega_r)t - 3\Phi] - \cos[(\omega - \omega_r)t - \Phi] \} \quad 2-6$$

由于转子磁势和定子磁势是相互平衡的，并将式(2-3)代入，则可以得到反映到定子的磁势表达式：

$$m_1 = m_2 = K_2 N_2 I_2 / 2 \{ \cos[(\omega - 2\omega_r)t - 3\theta] - \cos[(\omega - 2\omega_r)t + \theta] \} \quad 2-7$$

对于两极电机，其转差率

$$s = (\omega - \omega_r) / \omega \quad 2-8$$

即

$$\omega_r = (1 - s)\omega \quad 2-9$$

将式(2-9)代入式(2-7)可有：

$$m_1 = K_2 N_2 I_2 / 2 \{ \cos[(3 - 2s)\omega t - 3\theta] - \cos[(1 - 2s)\omega t - \theta] \} \quad 2-10$$

分析式(2-10)就可以发现，磁动势表达式中第一项磁动势分量含有 $3\omega t$ 和 3θ ，将在三相定子绕组中产生一个零序电动势，这是由于对称三相系统中各相电动势的 3 次谐波在时间上均为同相、且幅值相等，当接成星形联结时，线电压等于相电压之差，相减时 3 次谐波电动势互相抵消，所以电机线端不存在 3 次及其倍数次谐波电动势。若接成三角形联结，三相的三次谐波电动势之和 $3E$ 将在闭合的三角形回路中形成环流 I 。由于 E 完全消耗于环流的阻抗压降，所以线端亦不会出现 3 次谐波电压。但是 3 次谐波环流所产生的杂散损耗回使电机的效率下降、温升增高，所以现代的交流发电机一般采用星形而不采用三角形联结；因此，此电动势对电源电流无影响。第二项磁动势分量中含有一个比电源角频率低 $2s\omega$ 的分量，这个分量将使异步电动机定子绕组中出现一个比电源角频率低 $2s\omega$ 的三相电流分量，它与电源电流频率十分接近，由于它的调制作用，定子电流将会出现节拍性变化，电动机的转矩也随之变化，从而使异步电动机转速也将按 2 倍滑差频率波动。

转速波动将使异步电动机的电流在以电源频率为中心，在 $\pm 2sf$ 上、下限之间变化，由于电动机定子中三次谐波磁通的调制作用，这种转速和电流的波动将更加

明显。边频电流的幅值与基频电流幅值的比值大小，与异步电动机转子断条损坏程度有明显的、直接的关系。

分析和试验表明^[16]，当异步电动机的转子绕组出现不对称故障，即鼠笼式异步电动机转子导条和端环高阻或断裂时，定子绕组电流中会出现基频周围的边频带，其特征频率为^[20]：

$$f_b = (1 \pm 2ks)f_1 \quad (k=1, 2, 3) \quad 2-11$$

其中“-”表示对应频率为转子断条所引起，“+”，表示对应频率为转速的振荡所引起。

文献[19]进一步分析，得其频率为：

$$f_b = [k(1-s)/p \pm s]f_1 \quad 2-12$$

此成分也可在定子电流中检测到。

实践和理论上都可以验证，当异步电动机笼型绕组断条时，定子电流中围绕基频将出现频率为士 2sf 的边频，从边频幅值以及它与基频电流幅值的差值大小，就可以推断和估计出电动机断裂的导条数。这就是异步电机定子电流频谱分析来诊断断条的原理。但该方法预测早期故障，比较困难，因为定子电流频谱的幅值与断条早期故障的对应关系不明显。因此，针对这一故障，本文在第四章提出了更加有效的方法，通过电机断条早期故障的等效电路模型，来分析和诊断电机断条早期故障。

2.4.2 气隙偏心度诊断原理分析研究

异步电机的气隙很小，气隙的偏心往往会成为故障的诱因。气隙偏心将导致沿气隙圆周方向的磁导不均匀，造成气隙磁场的不对称分布，这种不对称磁场将在定子电流中以谐波形式反映出来。通过定子电流频谱分析，能够鉴别出这种独特的频谱成分，这些分量的频率可以用式(2-13)来计算：

理论分析和试验表明，这些特征谐波分量的频率为^[17]：

$$f_{ec} = f_1 [(R \pm n_d)(1-s)/p \pm n_w] \quad 2-13$$

式中： f_1 ——外加电源的频率，Hz；

R——鼠笼式异步电动机的转子导条数；

p——电机的极对数；

s——转差率；

n_d ——静态偏心时， $n_d=0$ ；动态偏心时， $n_d=1, 2, 3\cdots$ ；

n_w ——奇整数， $n_w=1, 3, 5\cdots$ 。

试验结果完全与理论分析相吻合。但是当转子齿数较大时，这些特征谐波频率较高，从而对数据采集及处理系统的采样频率、运算速度和内存要求较高。实际上，另有一低频分量对动态偏心的检测非常有效，其频率为：

$$f_{ec} = f_1 \pm f_r \quad 2-14$$

式中： f_r —旋转频率，其大小为 $f_1(1-s)/p$ 。

文献[17]对样机故障前后的这种特征频率时的电流幅值进行了比较，发现其变化比较明显，可以用来进行偏心监测。

通过分析证明，气隙偏心的频率成分的分布是从低频到高频都存在的，它取决于电机的设计和结构参数。

通过定子电流检测和频谱分析，如在频谱图中出现气隙偏心特征频率时，就能确定电机存在气隙偏心故障，根据特征频率分量大小和变化情况，就能确定转子在气隙中的动态位移值，从而可以完成对电机的故障诊断。

2.4.3 滚动轴承的故障诊断原理分析研究

滚动轴承的故障表现为：外圈缺损、内圈缺损、滚珠缺损、保持架故障等。不同故障形式会导致电动机以不同的特征频率振动^{[16][18]}。振动特征频率如表 2-2 所示。振动形式的改变引起定子电流的新频率成分为：

$$f_{bng} = f_1 \pm kf_g \quad 2-15$$

式中： $k=1, 2, 3, \cdots$ ； f_g 为轴承故障特征振动频率之一。

显然，频率的计算需要有关轴承结构的详细特性参数。

2.5 小结

综上所述,本课题将根据试验室条件设计试验,分析和研究电动机的综合测量;通过上述不同的检测方法,获得的电机故障信息,进行信息有效性分析的探究。

第三章 异步电动机等效模型的建立和分析

3.1 异步电动机的等效模型的发展

交流电动机的出现和发展已有一百多年的历史,人类已经研究开发了形式多样,用途各异的交流电动机。在电机的设计、制造及运行过程中,经过不断的研究和完善,人类对于交流电动机的结构原理、制造技术和运行性能的研究已相当深刻。但由于技术的发展和研究条件的限制,对交流电动机内部故障运行时,其内部性能的研究却不尽完善。随着电子计算机、数字信号处理技术和数值计算方法的发展,通过对异步电动机的故障态下的等效模型的研究,可以大大提高了电机设计、运行性能分析能力和参数计算的准确度。

3.2 异步电机的 T 形等效电路

3.2.1 折合算法的简介

在很多电机和电气传动类教材中,在介绍推导异步电机T形等效电路时,都体现了两种折合的概念^[21]:

一、定转子有效匝数不同,需要进行匝数的折合;

二、定转子的电流等是两种不同频率的量,需要将转子的频率换成定子频率。

采用电流频率折算和绕组匝数折算结合的方法,才有可能将定、转子的电磁关系画在一个电路图中。

总之,在保证了折合到定子边的转子等值电流与转子实际电流产生的气隙磁场(包括旋转速度)是相同的情况下,才可将定、转子的电磁关系画在一个电路图中。通过上述折合算法,异步电动机可以简化为 T 型等效电路。

3.2.2 异步电动机 T 形等效电路的建立

电机设备的工作原理都是基于电磁理论,其主要由电路(绕组)和磁路(铁心)两大部分组成,变压器为静止设备,而电机是旋转设备。一般情况下,在研究电动机的等效电路,先从较为简单的静止设备——变压器入手。在电机学中,通常采用这种方法,文献[22]给出了通过数学推导的方法,同样得出异步电动机T形等效电路。

3.2.2.1 三相异步电动机的定子电压方程

以同步转速旋转的气隙旋转磁场(主磁场),将在定子三相绕组感生频率为 f_1 的对称三相电动势 \dot{E}_1 。根据基尔霍夫定律,定子每相所加得电源电压 \dot{U}_1 应等于该电动势的负值 $-\dot{E}_1$ 加上定子电流所产生的漏阻抗压降 $\dot{I}_0(r_1 + jx_1)$ 。由于三相对称,仅分析一相,故定子电压方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(r_1 + jx_1) = \dot{I}_0(z_m + z_1) \quad 3-1$$

式中, r_1 、 x_1 分别为定子每相电阻和漏抗;其中 $-\dot{E}_1 = \dot{I}_0(r_m + jx_m)$ 。

3.2.2.2 三相异步电动机的转子电压方程

气隙主磁场除在定子绕组内感生电动势 \dot{E}_1 外,还在旋转的绕组内感生转差频率 $f_2 = sf_1$ 的电动势 \dot{E}_{2s} , \dot{E}_{2s} 的有效值 E_{2s} 为

$$E_{2s} = 4.44sf_1W_2k_w\Phi_1 \quad 3-2$$

当转子不转时,转子每相电动势为 E_2 ,

$$E_2 = 4.44f_1W_2k_w\Phi_1 \quad 3-3$$

转子旋转时转子绕组中感应电势的有效值

$$E_{2s} = SE_2 \quad 3-4$$

式中, E_2 是转子不转时转子绕组感应电势的有效值。

感应电机的转子绕组通常为短接,即端电压 $U_2=0$,此时根据基尔霍夫第二定律,可得转子绕组一相的电压方程

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2(r_2 + jx_2) \quad 3-5$$

式中, \dot{I}_2 为转子电流; r_2 为转子每相电阻。

3.2.2.3 基本方程式、等值电路

经过折算,定、转子的电压方程和磁动势方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) \\ -\dot{E}_1 = \dot{I}_0(r_m + jx_m) \\ \dot{E}_1 = \dot{E}'_2 \\ \dot{E}'_2 = \dot{I}'_2\left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2\right) \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 \end{cases} \quad 3-6$$

由此可画出 T 形等效电路,如图 3-1 所示。

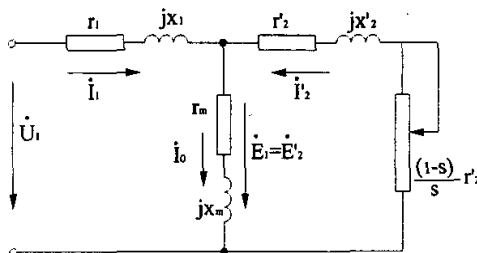


图 3-1 异步电动机 T 型等效电路

Fig.3-1 the T equivalent circuit of asynchronous motor

3.2.2.4 异步电动机功率关系

异步电动机电源输入的电功率为 $P_1^{(*)}$

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad 3-7$$

式中： U_1 是定子绕组的相电压；

I_1 是定子绕组的相电流；

φ_1 是定子相电压 U_1 和相电流 I_1 之间的夹角。

定子绕组的铜耗为

$$P_{Cu1} = 3I_1^2 r_1 \quad 3-8$$

正常情况下的异步电动机，由于转子转速接近于同步转速、气隙旋转磁密与转子铁心的相对转速很小，再加上转子铁心和定子铁心同样是用 0.5 毫米厚的硅钢片叠压而成，故转子铁损很小，可忽略不计，因此电动机的铁损耗只有定子的铁损耗。

$$P_{Fe} = P_{Fe1} = 3I_0^2 r_m \quad 3-9$$

从图 3-1T 形等效电路看出，传输给转子回路的电磁功率 P_M 等于转子回路全部电阻上的损耗。

$$P_M = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} = 3I_2'^2 \frac{r_2'}{s} \quad 3-10$$

电磁功率也可表示为

$$P_M = 3E_2' I_2' \cos \varphi_2 = m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad 3-11$$

转子绕组中的铜损耗为，

$$P_{Cu2} = 3I_2'^2 r_2' = sP_M \quad 3-12$$

电磁功率 P_M 减去转子绕组中的铜损耗就是等效电阻上的损耗。这部分等效损耗实际上是传输给点饥转轴上的机械功率。它是转子绕组中电流与气隙旋转磁密共同作用产生的电磁转矩 M ，带动转子以转速旋转所对应功率。

$$P_m = P_M - P_{Cu2} = 3I_2'^2 \frac{(1-s)}{s} r_2' = (1-s)P_M \quad 3-13$$

电动机在运行时，会产生轴承以及风阻等摩擦转矩，这也要损耗一部分功率，把这部分功率叫做机械损耗，用 p_m 表示。

在异步电动机中除了上述各部分损耗外，由于定子转子开了槽和定转子磁势中

含有谐波磁势，还要产生一些附加损耗，用 p_s 表示。 p_s 一般不易计算，往往根据经验估算，在大型异步电动机中， p_s 约为输出额定功率的 0.5%；而在小型异步电动机中满载时， p_s 可达输出额定功率的（1%~3%）或更大些。

转子的机械功率 P_m 减去机械损耗 p_m 和附加损耗 p_s ，才是转轴上真正输出的功率，用 P_2 表示。

$$P_2 = P_m - p_m - p_s \tag{3-14}$$

可见异步电动机运行时，从电源输入电功率 P_1 到转轴上输出功率 P_2 的全过程为

$$P_2 = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} - p_{Cu2} - p_m - p_s \tag{3-15}$$

如功率流程图 3-2 所示。

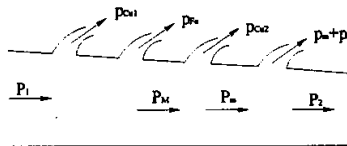


图 3-2 异步电动机的功率流程图^[24]

Fig.3-2 the power flow figure of asynchronous motor^[24]

在对电动机进行故障诊断中，当电动机出现内部故障时，往往可以通过功率关系地分析及其功率分布的不同，来鉴别故障、分离故障源，估计故障趋势，达到故障诊断的目的。

3.3 鼠笼式电动机的等效模型的建立

由于鼠笼转子绕组是由两个端环并联了许多根导条，本身无明显的极数，相数也不一定是 3 相，分别进行分析^{[23][24]}。

3.3.1 鼠笼转子的极数

在电机里，为了产生平均的电磁转矩，定转子的极数彼此应该相等，否则电机无法工作。鼠笼式异步电动机，转子都是些并联的导体，本身无所谓有几对极。运行时，它的极对数完全由气隙旋转磁密 \dot{B}_s 的极数决定。

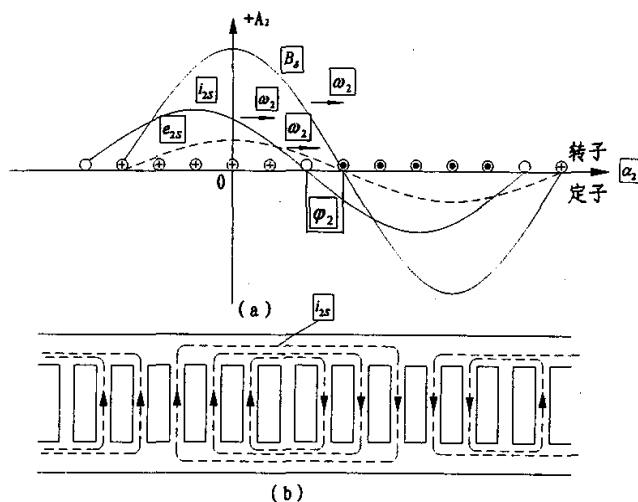


图 3-3 鼠笼式异步电动机的极对数^[24]

Fig.3-3 the number of pole-pairs of the asynchronous squirrel cage induction motor^[24]

鼠笼转子异步电动机转子的极对数决定于定子绕组的极对数。这是鼠笼异步电动机一个很突出的特点。

3.3.2 鼠笼转子的相数、匝数和绕组系数

交流电动机的相数是根据电流的相位来确定的，即同一相绕组里的电流相位应一致。如果是 $\frac{Z_2}{p}$ 整数，则说明整个转子上有 $\frac{Z_2}{p}$ 根导体处于相同的磁场位置，它

们的感应电势和电流同相位，所以转子绕组的相数就是 $m_2 = \frac{Z_2}{p}$ 。如果鼠笼转子的

每根导体在气隙磁场中的位置都不同，即它们感应的电势与电流彼此都不同相，这就是说，每一根导体就构成一个相，转子上有几根导体，就有几相。例如转子总的

导体数为 Z_2 ，则转子相数为 m_2

$$m_2 = Z_2 \quad 3-16$$

由于这种情况，整个转子绕组是一个对称的多相系统。当流过同样对称的多相电流时，照样也能产生旋转磁势。

既然每相只有一根导体，所以每相匝数 $W_2 = \frac{1}{2}$ 即半匝。这就无所谓短距分布了，即绕组系数 $k_{w2} = 1$ 。

3.3.3 鼠笼转子的参数折合

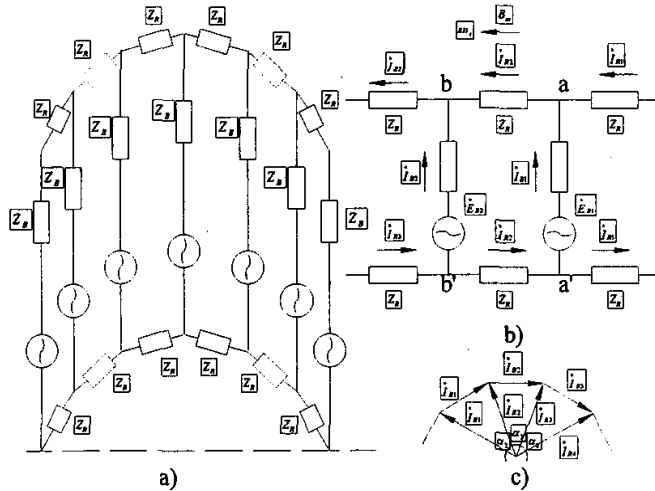


图 3-4 鼠笼型转子的电路和电流^[23]

a) 电路图 b) 部分电路图 c) 导条和端环电流的相量图

Fig.3-4 the rotor circuit and current of asynchronous squirrel cage induction motor^[23]

a) The circuit diagrams b) The partial circuit diagrams

c) The measuring figure of the rotor bar and the end ring current

上图表示鼠笼型转子的电路图 a)，图中 Z_B 和 Z_R 分别表示每根导条和每段端环的漏阻抗。不难看出，每对极下每相的阻抗由一根导条的阻抗 Z_B 和两端的一段端环阻抗 Z_R 所组成。由于导条和端环电流互不相等，故阻抗 Z_B 和 $2Z_R$ 不能直接相加，

而需要把端环的多边形阻抗化成等效的星形阻抗, 然后才能将它归并到导条阻抗中去。为此必须求出端环电流与导条电流之间的关系。

为清楚起见, 将部分电路抽出, 如图 b)。当主磁场以 sn 的相对速度“切割”导条时, 因为鼠笼形转子的结构对称, 所以相邻两根导条中的电流幅值相等, 时间相位彼此相差 α_2 电角度。同样, 相邻两段端环中的电流其幅值也相等, 相位也相差 α_2 电角度。从图 b) 可知, 导条电流等于相邻两段端环电流的相量差, 于是可画出图 c) 所示的导条和端环电流的相量图。

从图 c) 可见, 导条电流的有效值 I_B 与端环电流的有效值 I_R 之间具有下列关系

$$I_B = 2I_R \sin \frac{\alpha_2}{2} \quad 3-17$$

因此一根导条和对应的前后两段端环的铜耗为

$$P_{Cu(B+R)} = I_B^2 R_{2(B)} + 2I_R^2 R_{2(R)} = I_B^2 \left[R_{2(B)} + \frac{R_{2(R)}}{2 \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}} \right] = I_B^2 R_{2(B+R)} \quad 3-18$$

式中 $R_{2(B)}$ 和 $R_{2(R)}$ 分别为每根导条和每段端环的电阻; $R_{2(B+R)}$ 前后两段端环的电阻归并到导条以后时的等效电阻,

$$R_{2(B+R)} = R_{2(B)} + \frac{R_{2(R)}}{2 \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}} \quad 3-19$$

由于各对极下属于同一相的 p 根导条是并联的, 所以转子每相的等效电阻 R_2 应为

$$R_2 = \frac{R_{2(B+R)}}{p} = \frac{1}{p} \left[R_{2(B)} + \frac{R_{2(R)}}{2 \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}} \right] \quad 3-20$$

同理, 根据导条和端环的漏磁场储能, 可以导出转子每相的等效漏抗 X_{2s} 为

$$X_{2s} = \frac{1}{p} \left[X_{2(B)} + \frac{X_{2(R)}}{2 \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}} \right] \quad 3-21$$

式中, $X_{2(B)}$ 和 $X_{2(R)}$ 为每根导条和每根端环的漏抗。

再计及鼠笼型转子的电流比 $k_i = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} \right) = \frac{2pm_1 N_1 k_{w1}}{Q_2}$, 电压比

$k_e = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} = 2N_1 k_{w1}$, 即可得到归算到定子边时鼠笼型转子电阻和阻抗的归算值

为:

$$\begin{cases} R'_2 = k_e k_i R_2 = \frac{4pm_1 (N_1 k_{w1})^2}{Q_2} R_2 \\ X'_{2s} = k_e k_i X_{2s} = \frac{4pm_1 (N_1 k_{w1})^2}{Q_2} X_{2s} \end{cases} \quad 3-22$$

经过推导, 鼠笼转子每相电阻、电抗的折合值分别为

$$\begin{cases} r'_2 = \left(r_c + \frac{r_k}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right) \frac{4 \times 3 (W_1 k_{w1})^2}{Z_2} \\ x'_2 = \left(x_c + \frac{x_k}{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right) \frac{4 \times 3 (W_1 k_{w1})^2}{Z_2} \end{cases} \quad 3-23$$

式中: r_c, x_c 分别是每根导体的电阻和漏电抗;

r_k, x_k 分别是每一段端环的电阻和漏电抗;

$\alpha = \frac{2\pi p}{Z_2}$ 是转子槽距角;

Z_2 是转子总槽数。

3.4.电动机等效模型在故障状态下失效的原因

3.4.1 “理想”异步电动机的假设

在电机学中，设计、制造电机过程中，通过绕组的分布、短距、斜槽等措施，使常用的异步电动机的气隙磁场的空间谐波很小，因此，在这种情况下，可以将异步电动机简化为理想电动机来分析。特别强调的是，在建立交流电机的等效电路时，为了便于分析，常常要做出一些必要而合理的简化假设，假设电机为“理想电机”。其基本假设如下^[25]：

- (1) 电机的磁路为线形，铁心中的磁滞和涡流损耗忽略不计；
- (2) 气隙磁场在空间为正弦分布，磁场的高次谐波忽略不计；
- (3) 定转子表面设为光滑，齿槽的影响用卡氏系数来计及；
- (4) 直轴和交轴气隙可以不等，但气隙的比磁导可以用平均比磁导加上二次谐波比磁导来表示；
- (5) 对于三相交流电机，定子绕组为对称三相绕组。

基本上述假定，可知^[21]：

- (1) 有关磁场和相应的感应电动势的分析，可以利用叠加原理；
- (2) 定子和转子的所有电感都是线形，与绕组内的电流大小无关；
- (3) 表征铁心损耗的激磁电阻 $R_m = 0$ ；
- (4) 定转子绕组间互感可用 $M_{sr} \cos \theta_{sr}$ 来表示，其中 θ_{sr} 为两个绕组轴线间的夹角（电角）；
- (5) 对凸极电机，定子绕组的自感可用 $L_{s0} + L_{s2} \cos 2\theta$ 表示，其中 θ 为该相绕组轴线与直轴之间的夹角；互感可用 $-M_{s0} + M_{s2} \cos(\theta + \alpha)$ 表示，其中； $\alpha = 0^\circ, 120^\circ$ 或 -120° ；
- (6) 三相绕组自身的电感为循环对称。

实际运行时，电机的磁路总会出现磁饱和现象，此时可引入电感的饱和值或动

态电感来计及饱和的影响；气隙磁场的高次谐波，包括由斜槽所引起谐波磁场，则引入谐波漏抗和斜槽漏抗来近似计及其影响。

3.4.2 电动机故障状态下等效模型失效原因的分析

在电机故障动态分析中，上述假定中略缺的物理模型、数学模型往往成为故障中不可忽略的成分，故障态下电机的残余数学模型，仅仅是等效模型的局部，需要重新构造动态分析模型。

3.4.2.1 折合算法的失效

电动机的定子边和转子边虽没直接的电路联系，但有磁路联系。保持绕组磁势不变而假想改变它的匝数与电流的方法叫做折合算法。折合算法并不改变电源向电动机的功率输入，也不改变电动机向负载的功率输出。折合算法仅仅作为一个方法来使用。但折合算法是基于电动机的正常情况下，电流频率、绕组匝数进行折算得；当电动机发生内部故障时，其磁路联系也相应发生了改变。这时，已不能简单地应用折合算法；需要根据故障态下的电动机的残余数学模型，重新构造动态分析模型。

3.4.2.2 电动机 T 型等效电路的失效

T 型等效电路是采用折合算法后，依据六个基本方程式推导后找到的，因此适用的条件及其特点，也完全适合折算后及 T 型等值电路。如果前提条件变了，例如对于三相带不对称的异步电动机运行，或异步电动机从某一稳定运行情况中间的过渡过程，或者异步电动机内部发生了绕组匝间短路等，就不能简单的采用 T 型等值电路来分析。也需要根据故障态下的电动机的残余数学模型，重新构造动态分析模型。

3.4.2.3 电动机功率关系的改变

在绝缘故障情况下的异步电动机，由于转子铁心和定子铁心硅钢片间绝缘下降，故转子铁损上升，原来可忽略不计的转子铁损耗，改变为电动机的铁损耗含有定子的铁损耗和转子铁损耗；在电动机轴承故障中，会引起机械损耗上升；同时，

在电动机电网故障情况下，定、转子磁势中所含谐波磁势上升，产生附加损耗相应增加；都会带来电机等效模型参数的改变。而这一系列改变，都会引起设备运行寿命的变化，在故障诊断态势估计中，起到至关重要的作用。

综上所述，对于异步电动机故障情况下，需要进行特定的故障等效模型进行分析。

3.5 小结

由电机学可知，将鼠笼式异步电动机的结构原理折算出其 T 形等效模型，但对交流电动机内部故障运行时，却需要进行特定的故障等效模型进行分析。

第四章 鼠笼式异步电动机故障下等效电路的研究

4.1 引言

在上一章中，课题着重阐述了电机的等效电路的推导过程，在电机故障动态分析过程中，上述理想电动机的假定，所略缺物理模型、数学模型的性质，往往成为研究异步电动机故障中不可忽略的成分，故障态下异步电动机的残余数学模型，仅仅是等效模型的局部，需要重新构造动态分析模型。本章重点研究异步电动机的故障下的等效电路，以便在测量中，确定检测对象，合理布置传感器、测试点，提供理论依据。

4.2 鼠笼式异步电动机转子断条故障等效电路的建立

4.2.1 鼠笼式异步电动机转子断条、断环原因分析

鼠笼式异步电动机断条、断环是异步电动机常见故障，它可能是制造过程中的缺陷，也可能是设备运行产生的故障。

由于交流异步电机是一个高阶、时变、非线性、强耦合的多变量系统，其制造工艺也相对复杂；由于制造工艺缺陷造成电动机的故障也屡见不鲜，例如：中、小型电机的铸铝转子可能出现细条和断条；大型电机可能由于焊接不良出现导条与端环间的虚焊；电机转子动平衡出厂整定时，电机转子动平衡机校准过程中，配重破坏端环导电性能；电机导条、端环表面有毛刺，产生尖端放电都会成为故障诱发原因。

在设备设计选取电动机时，设计者对应用工况不熟悉，对电动机的接电持续率、绝缘等级和防护等级选取不当；使电动机在频繁起、制动过程中，转子导条承受过大交变电磁力，造成异步电动机转子导条断条故障；又可能由于设备设计者，对电动机拖动负载类型、工艺不了解，在选取电动机调速装置时，选取不当造成起、制动时间过长，也将造成异步电动机转子导条断条故障；由于生产工艺改变，引起异

步电动机负载变化，而未对异步电动机作相应调整，造成设备与电动机不匹配，也会引发转子断条故障。

因此，分析鼠笼式异步电动机转子绕组故障对电动机运行性能的影响，以及提供相应的测试方法，是保障安全生产的重要技术措施。

4.2.2 鼠笼式异步电动机转子断条故障稳态等效电路的建立

在上一章，总结出鼠笼式异步电动机的等效电路如图 3-5；在转子断条故障等效电路研究中，高景德等在文献[21]中提出了如下等效电路图：

4.2.2.1 转子导条的等效电路

转子导条的等效电路如图 4-1

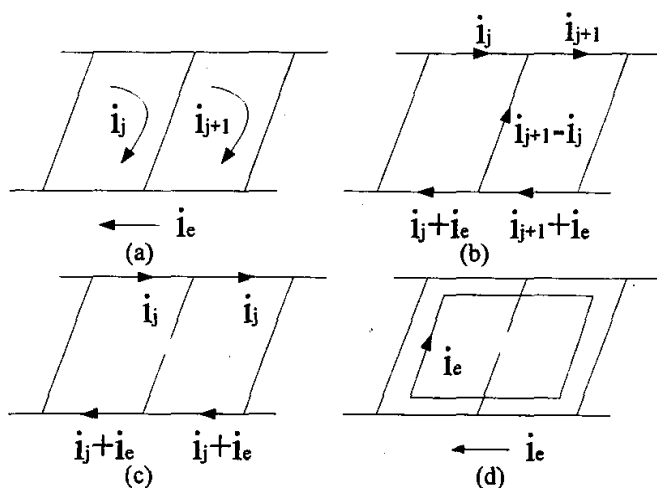


图 4-1 转子导条 j 断裂时转子回路电流的变化情况
 (a) 转子回路的一般表示；(b) 对应于图 (a) 的导条和端环电流
 (c) 导条 j 断裂后 $i_{j+1} = i_j$ 的情况；(d) 对应于图 (c) 的回路电流表示

Fig.4-1 the broken bar $\langle j \rangle$, the loop current change situation of rotor
 (a)The rotor return route general expression; (b) Corresponds to the chart (a) the bar and end ring current; (c)The bar j broken $i_{j+1} = i_j$ situation
 (d) Correspond to the map (c) the loop current expression

4.2.2.2 转子端环断裂的等效电路

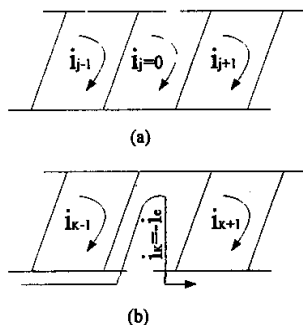


图 4-2 端环断裂的表示

Fig.4-2 the end ring break expression

并给出了一台 7.5KW 鼠笼式三相异步电机计算结果和实验结果比较见表：

表 4-1 一台 7.5KW 鼠笼式三相异步电机计算结果和实验结果比较

Table 4-1: A 7.5KW squirrel cage three-phase asynchronous motor computing result and experimental result by comparison

运行情况 性能		转子对称	转子一根导 条断裂	转子连续三 根导条断裂	转子端环一 处断裂
定子电流 I_1/A	计算值	9.51	9.27	8.53	8.86
	实验值	9.45	8.91	8.61	9.18
	相对偏差	0.63%	4.04%	-0.93%	-3.49%
平均电磁转矩 $T_{ave}/N \cdot M$	计算值	56.6	54.7	47.4	51.8
	实验值	55.4	51.9	47.3	52.2
	相对偏差	2.17%	5.39%	0.21%	-0.77%
输入功率 P_1/W	计算值	9444	9111	7893	8624
	实验值	9500	9025	8365	9008
	相对偏差	-0.59%	0.95%	-5.64%	-4.26%
功率因数 $\cos \varphi$	计算值	0.871	0.862	0.813	0.854
	实验值	0.882	0.889	0.852	0.861
	相对偏差	-1.25%	-3.04%	-4.60%	-0.78%

从实验结果可以得出，实验结果和计算结果基本相符；但是，值得注意得是此分析方法是异步电动机断条稳态情况下提出得；这时，异步电动机已经发生了较为严重的故障，在现场可能明显地增加电机起动时间，甚至起动不了，并伴随剧烈振动，电机带负载能力明显下降，影响着电机的正常运行。

因此，提出电机断条、断环缓变故障等效电路，对发现电机早期故障产生积极

的作用；实现基于数学模型对电动机故障诊断，有着极其重要的现实意义。

4.3 转子断条故障缓变过程等效电路的提出

借鉴绝缘学^[26]的研究方法，将电动机断条故障的缓变过程，本文提出等效为下列电路模型。

4.3.1 转子导条断条故障的缓变过程等效电路

转子导条断条故障的缓变过程等效电路，如图 4-3。

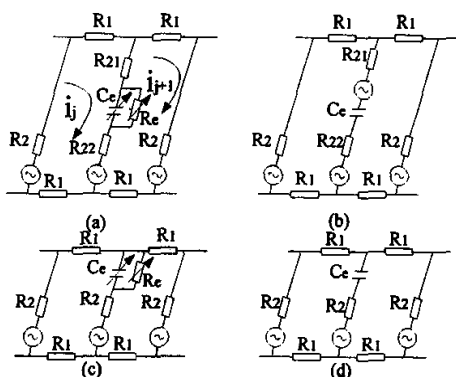


图 4-3 转子导条 j 缓变断裂时转子回路等效电路

- (a) 转子导条 j 中间出现疲劳裂痕情况；(b) 转子导条 j 中间断裂情况
 (c) 转子导条 j 与端环虚焊情况；(d) 转子导条 j 与端环断裂情况

Fig.4-3 . The equivalent circuit of the rotor bar j breaks slowly

- (a) among rotor bar j has the weary fissure situation; (b) among rotor bar j breaks the situation; (c) the rotor bar j and end ring fault soldered joint situation; (d) The rotor bar j and end ring broken situation

在电机导条出现早期故障时，电机导条等效为电容 C_e 与电阻 R_e 并联，根据物理学中电容性质的原理：

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{\delta} \quad 4-1$$

式中 ϵ -----极板间介质的相对介电系数，在空气中 $\epsilon=1$ ；

ϵ_0 -----真空中介电常数(F/m) ， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m；

(a) 转子端环中间出现疲劳裂痕的情况; (b) 转子端环断裂的情况

Fig.4-4 the slow broken expression of the end ring

(a) the end ring appears weary fissure situation; (b) the end ring broken situation

转子端环断裂的缓变过程等效电路中, 当电动机的转子端环裂痕逐渐加大时, 电动机的转子端环等效的电容极板面积加大, 也必然使转子端环等效的电容量变大, 故可等效为可变电容 C_e 。此时, 转子同一端环未断裂的连接部分, 可等效为电阻负载 R_e 。

当电动机转子端环彻底断裂, 根据上述分析可得出等效电路为固定的电容如图 (b) 中电容。这时, 根据电路学中电容的通交流、阻直流的性质简化电路, 才可采用 4.2.1 提出的方法等效。

4.4 鼠笼式异步电动机突然短路故障等效电路

三相异步电动机正常运行时, 若定子端点发生三相对称或不对称突然短路, 定子电流和电磁转矩将产生一定的冲击。三相突然短路、线间突然短路是实际运行中常见的故障之一。汤蕴璆在文献[27]对此作了研究, 给出了其等效电路, 并给出了详尽的分析方法, 本文不在赘述。

4.5 小结

本章通过对鼠笼式异步电动机断条、断环的研究, 探讨了更为精确的异步电动机的等效电路; 在分析鼠笼式异步电动机断条、断环早期故障时, 探讨了时域下的等效模型, 结合第二章频域分析电动机断条、断环故障, 探索能够获得更为直接有效的监测依据。在未来基于信息融合理论的电机故障研究中, 探索其等效模型, 有利于融合信息的种类, 方便分离故障源, 同时有利于对故障趋势估计, 提出更加优化的维护、维修策略。

由于客观条件的限制, 探索得到的故障模型无法通过试验验证其有效性。希望其故障模型的探索, 有助于异步电动机早期故障诊断方法的研究和发展。

第五章 异步电动机的故障信号的综合测量与分析

5.1 异步电动机测试方法设计

通过对上述异步电动机的原理的分析和解读，合理的选用传感器、布置传感器和相应的测试方式成为异步电动机故障诊断测试的关键。

在测试技术中，传感器的选用原则应当遵从下列原则^[26]：

- 1、灵敏度 一般来说，传感器灵敏度越高越好。但应考虑，当灵敏度越高时，与测量信号无关的外界干扰也越容易混入。
- 2、响应特性 在所测频率范围内，传感器的响应特性必须满足不失真测量条件。
- 3、线形范围 任何传感器都有一定的线形范围，在线形范围内输出与输入成正比例关系。
- 4、可靠性 可靠性是指仪器装置等产品在规定的条件下，在规定时间内可完成规定功能的能力。
- 5、精确度 传感器的精确度表示传感器输出与被测量真值一致的程度。
- 6、测量方式 传感器在实际条件下的工作方式，例如，接触与非接触测量、在线与非在线测量等，也是选用传感器时应考虑的重要因素。
- 7、实用性 选取传感器应尽可能兼顾结构简单、体积小、重量轻、价格便宜、易于维修、便于更换等条件。

通过对异步电动机的原理分析及传统测试方法的总结，再根据选用传感器上述原则，结合实验室设备条件，设计了 16 信道的实时在线测量的测试系统。其分布如图 5-1；

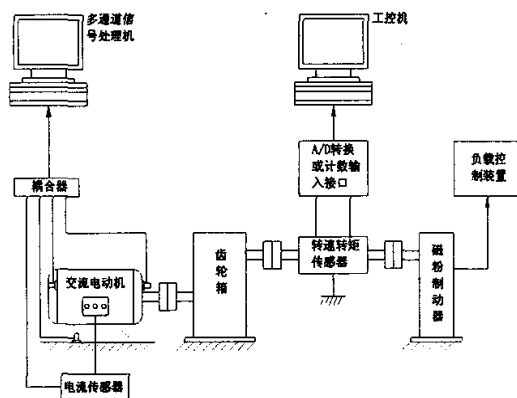


图 5-1 试验设备分布图

Fig.5-1 the distributive map of test equipment

本次测试实验根据设备特点：

1、采用了电流传感器，该传感器采用霍尔原理非接触测量，大大改善了电压分阻法接触测量对电机的影响（引起电机三相电压不平衡），提高了测试精确度、可靠性和实用性；也改变了传统采用电流互感器进行非接触测量的不便。这是由于电流互感器应用时，必须满足电流互感器副边绝对不许开路；电流互感器副边接地；电流互感器副边回路串入的阻抗值不超过有关技术标准。由于测量设备接地和电流互感器接地会带来接地回路干扰，同时测试设备一般为电压型输入，电流互感器副边串入的阻抗值有限制，会造成测试精度和灵敏度下降；

2、采用了三维一体的加速度计对电机振动的测量，本次测量试验采用三个三维一体的加速度计对电机轴承故障振动及电机底角螺丝松动，同时进行测量。这样大大降低了传感器的摄入，传感器自重对电机刚性振动的影响，即测试学中的负载效应。而且，采用同时测量，可以提供电机的振动相关性分析，由于电机是多介质设备，振动波形的幅值、频率会受介质种类的影响。通过多点测试，有利于提取更为有效的特征向量，便于分析；

3、采用磁粉制动器作为负载，由于电机负载特性对电机故障响应会有不同，所以通过不同的负载变化，鉴别故障种类，状态估计也是较为有效的诊断方法。以前，负载多采用更换负载的办法，实用性较差。通过改变磁粉制动器的励磁电流，在线调载对于在线故障诊断方法的研究，将产生积极影响；

4、采样频率的选择，根据香农采样定律，由于故障信号频率集中在低频区内，加之测试设备精度较高，故选取频率为 10kHz。

5.2 试验台的建立

为了课题研究，根据试验室的条件搭建了试验台，其具体型号与原理如下：

5.2.1 异步交流电动机

表 5-1 试验电机型号

Table 5-1.the type of test electromotor

型号：Y160M ₂ -8	工作制：S ₁	标准 JB/T9616-1999
功率：5.5KW	电压：380V	接法：Δ
电流：14A	防护等级：IP44	绝缘等级：B
转速：710r/min	频率：50Hz	
重量：120kg	噪声：69dB(A)	

试验采用两台上述型号，并为实现转子早期故障另定制一部转子。

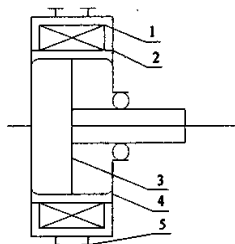
5.2.2 磁粉离合器

表 5-2 试验磁粉离合器型号

Table 5-2 .the type of test magnetic powder coupling

型号:CZ20	额定转矩: 200 N·m	滑差功率: 8KW
激磁电流:2A	重量: 60kg	产品标准: JBT598P-92

再测试电机故障诊断中,要求速度比较稳定和必须实现带负载起动的机在测试电机故障诊断中,要求速度比较稳定和必须实现带负载起动的机械,以及执行构件有调速要求,且机械运转稳定性越高,要求电机的调速性能越好。在以往的实验中通常采用液压马达经行负载变化的实现。但液压马达体积庞大,成本较高,价格昂贵。为此,采用了一种轮式磁粉制动器。利用普通交流电机与这种专用磁粉制动器组合调速,从而达到可变负载的目的。其原理如下:



1 线圈; 2 磁粉; 3 磁粉离合器定子缸筒; 4 转子(即输出); 5 导电环

图 5-2 磁粉离合器的结构图

1. The coil; 2. The magnetic powder; 3. The stator cylinder of magnetic powder coupling; 4. The rotors (namely output); 5. The collector ring.

Fig.5-2.the structure drawing of magnetic powder coupling

常用磁粉离合器^[29]的结构如图 5-2 所示。其零部件为线圈、磁粉、磁粉离合器定子缸筒、转子(即输出)、导电环。磁粉离合器定子缸筒与转子(即输出)之间留有少量间隙,一般为 1.5~2mm^[30],内装有极微小的耐磨球状磁性粉末,当励磁线圈中无电流时,散沙似的粉末不阻碍主动从动件之间的相对运动,离合器处于分离状态;接通控制电源,励磁线圈产生的主磁通沿设置的磁路形成闭合回路,气隙中磁粉迅速磁化,并沿气隙中磁路结成链状固体,通过其结合力,连接缸筒和转子,从而实现力矩传递。切断

电源后,固化了的磁粉迅速解体,在离心力的作用下,被推挤在缸筒的内壁上,缸筒与转子之间出现空隙,切断了驱动侧力矩的传递。

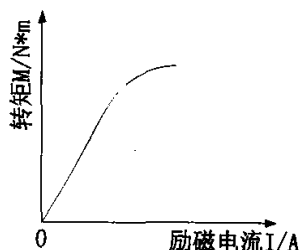


图 5-3 磁粉离合器转矩-电流特性曲线

Fig.5-3. The torque - electric current characteristic curve of magnetic powder coupling

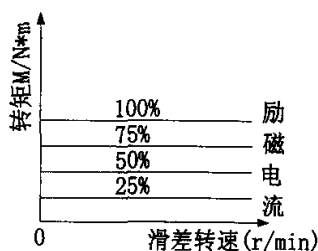


图 5-4 磁粉离合器转矩-转速特性曲线

Fig.5-4.The torque - rotational speed characteristic curve of a magnetic powder coupling

在磁粉离合器调速系统中,如图 5-3 所示,磁粉离合器转矩的变化与励磁电流基本呈线性关系,在额定转矩 10%~110%内线性可调,即可达到定转矩控制,这样就能通过调节励磁电流准确地控制转矩的大小,应答及时,并能显示很好的重复性。而且,从图 5-4 中看出,输出转矩对应于确定的电流值,而与转速无关,通过调整励磁电流值,既可保持定转矩输出,又能自由改变转矩值,从而得到更宽的调速范围,当采用剩磁很少的工业纯铁制作磁粉离合器时,调速范围可以从零至额定转速。

当处于断电状态,定子缸筒不转,转子以额定转速旋转,与磁粉磨擦发热不大,接通励磁电流,输出有负载时,缸筒转子分别与磁粉沿圆周摩擦,导致磁粉离合器发热量增大,工作区域温度升高,电阻、电流发生变化,转速不稳,需要利用循环水冷却。

5.2.3 负载控制器

型号: WLK-3A

提供磁粉离合器 0~3A 的励磁电流, 通过它可以对试验负载 (磁粉离合器) 进行调控。

5.2.4 转速转矩传感器

表 5-3 试验转速转矩传感器型号

Table 5-3.the type of testing rotational speed and torque sensor

JN338 型智能数字式转矩转速测量仪		
转矩量程: 300 牛/米	齿数: 60 齿	转速量程: 5000 转/分
准确度: 0.5 级	标准温度: 20°C	转矩系数: 17 赫/牛*米

该传感器连接在减速机负载侧, 其数据需通过速比折算到电机。这样设置虽增加了测量误差, 但可检测传动过程中隐含的各种故障。

5.2.5 电流传感器

瑞士 LEM 公司型号: LT308-S7

瑞士 LEM 模块的工作原理是磁场平衡式的, 即主电流回路所产生的磁场, 通过一个次级线圈的电流所产生的磁场进行补偿, 使霍尔器件始终处于检测零磁通的工作状态。

5.2.6 减速机

主动齿的齿数 $Z_1 = 31$; 模数 $m = 3mm$; 质量 $m_1 = 2.95kg$; 转动惯量 $J_1 = 0.0032kg \cdot m^2$ 。

从动齿的齿数 $Z_2 = 69$; 模数 $m = 3mm$; 质量 $m_2 = 15kg$; 转动惯量 $J_2 = 0.08035kg \cdot m^2$ 。

5.2.7 电机轴承

深沟球轴承型号：6309

深沟球轴承结构简单，使用方便，是生产批量最大、应用范围最广的一类轴承，主要用以承受径向负荷。当轴承的径向游隙加大时，具有角接触球轴承的性能，不承受加大的轴向负荷。此类轴承摩擦系数小，震动、噪声低，极限转速高。不耐冲击，不适宜承受较重负荷。深沟球轴承一般采用钢板冲压浪形保持架，也可采用工程塑料、铜制实体保持架。密封轴承内部根据不同的使用环境可添加相应的轴承专用润滑脂。

关于轴承内径，一般情况下轴承内径用轴承代号的后两位数 $\times 5$ =内径(mm)，例：轴承6204的内径是 $04 \times 5 = 20\text{mm}$ 。6309的后两位是09乘以5，等于45，轴承的尺寸是以mm为基本单位，以微米，也就是丝为精度单位。

因此，试验电机轴承6309，其外径为100mm，孔径为45mm，宽度为25mm。

5.2.8 加速度传感器

型号：kistler 奇石乐-8690C50

本试验使用的加速度传感器为直线加速度传感器和三轴加速度传感器。对应传感器的灵敏度如下表：

表 5-4 传感器的灵敏度对应表

Table 5-4.the corresponding table of sensor sensitivity

SN132256	1#线	485mv/g
SN132247	2#线	484mv/g
SN132251	3#线	502mv/g
SN132257	4#线	491mv/g
SN132258	5#线	500mv/g
三轴加速度	x,y,z	500mv/g

而不同的加速度传感器安装方式也有不同的频率响应。三轴加速度传感器采用了磁力安装，磁力安装时磁座表面必须保证无凹痕或高低不平。

5.2.9 信号的分析与记录设备

本实验中采用奥地利 DEWTRON 公司生产的信号分析记录仪，实现现场采集信号的分析与保存。该设备具有 16 个通道，以及 16 个扩展通道，完全可以满足信号记录的需要。

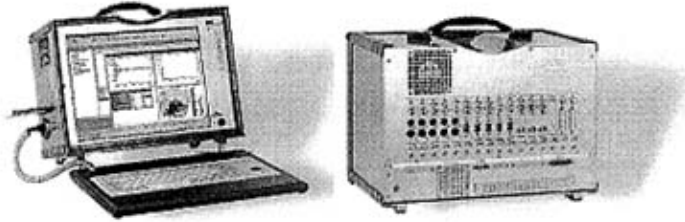


图 5-5 DEWE-2010 数据记录仪

Fig. 5-5 DEWE-2010 data acquisitive system

5.3 传感器布置方式分析

从图 5-1 中，可知电动机的振动测点选在电机的外部，外部的振动是通过传导与内部联系。图 5-6 所示为转子系统，其轴承上受到来自转子的交变力。激振力引起轴承座的振动为绝对振动，在转子和轴承座之间则有相对振动。

对于转子系统这类机械，在轴承和轴颈之间的导纳主要取决于油膜特性，它将直接影响轴颈和轴承之间的相对振动（采用相对式位移计来测量，如涡流拾振器）；而对于轴承座的绝对振动而言，其导纳则由油膜与轴承导纳两部分决定。轴颈的力通过油膜传至轴承壳。

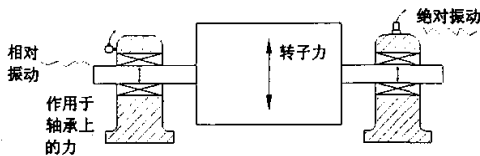


图 5-6 转子系统的振动测量^[31]

Fig.5-6 .the vibration measurement of rotor system^[31]

本次测试采用的是绝对振动测量法，在轴承座上测得振动量的大小只有上述相对振动量的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2}$ 。振动采用加速度计来测量，其动态范围可达 $10^8:1$ ，所得信号频谱范围很广，因而可以发现其中的任何频谱的变化。

对于振动仪来说，最重要的要求之一是能在足够宽的频带范围内，记下包括所有重要成分的整个频谱。这些重要的频谱成分有不平衡振动、不对中振动、滚珠通过频率、齿轮啮合频率、叶片通过频率、叶片共振频率、滚子元件的幅向共振频率等。这些频率的频率范围在 $10 \sim 10000\text{Hz}$ 或更宽。在影响机械运行能力之前，便在高频部分信息中出现故障的发展征兆，而低频信号出现异常时，则故障已经发生了^[31]。

对于多数机械来说，其振动水平通常是随频率而变化。在故障分析中，仅仅测量和关心信号的最高峰值是不够的。有些重要的指标信号，可能其振动水平并不高。这是由于测点布置的传感器，所测量的量可能是故障源经过传递途中的几次衰减后的量，振动水平自然不高了。

5.4 异步电动机的故障模拟（试验方案）

为了测试地需要，对异步电动机常见故障的模拟，成为故障检测的关键，由于故障的偶发性、随机性，对于一般故障侦测，仅能采用在线实时测量，这需要大量的数据保存和分析，但故障成因的多样性，如何用最有效的检测方法成为实验室试验的关键。

由于实验室对设备使用环境较好，异步电机故障产生会需要较长时间运行。所以，需对电动机的故障种类进行模拟，人为制造故障；本次设计了电机轴承故障、转子导条早期故障。其方法如下：

- 1、电机轴承故障的模拟，将电机轴承的保持架的铆钉拆下，将滚珠进行磨损，再将保持架复原；
- 2、电机转子导条早期故障的模拟，采用台式转床，将电机转子槽口铝条转孔，模拟电机转子导条早期故障有轻微裂纹（也可认为异步电动机导条内含有铸造气泡或细条）；

5.5 异步电动机故障特征频率的计算

5.5.1 轴承故障特征频率的计算

根据前几章的论述，可以得出轴承振动测量时，各故障的特征频率。具体计算如下：

本实验用深沟球轴承型号：6309，滚动体直径 $d = 17.5\text{mm}$ ，节圆直径 $D = 72.5\text{mm}$ ，宽度 25mm，内圈内径 45mm，外圈外径 100mm，滚动体个数 $Z = 8$ ，接触角 $\alpha = 0$ ，精度等级为 E 级，实验时空载，通过 JN338 型智能数字式转矩转速测量仪测得转速为 333r/min，经过减速机速比折算得到主轴转速为 741r/min，根据第二章的理论分析可以计算出滚动轴承的特征频率如下：

回转频率 f_r 为：12.35(Hz)；

外环的一点与滚动体接触频率 f_c 为：4.68(Hz)；

内环的一点与滚动体接触频率 f_i 为：7.66(Hz)；

滚动体一点与内环接触频率 f_b 为：24.09(Hz)；

滚珠排列不规则 f_k 为：37.48(Hz)；

轴承有偏心 nf_r 为：12.35n(Hz)，n 为自然数；

内环有点蚀 $nzf_i \pm f_r$ 为：61.28n ± 12.35(Hz)；

内环有点蚀 $nzf_i \pm f_c$ 为：61.28n ± 4.6(Hz)；

外环有点蚀 nzf_c 为：37.44n(Hz)，n 为自然数；

钢球有点蚀 $2nf_b \pm f_c$ 为：48.18n ± 4.68(Hz)，n 为自然数；

5.5.2 导条故障特征频率的计算

根据第二章的分析，若对电动机定子电流波形或振动波形作频谱分析，在频谱图中，导条故障应出现在基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频，根据边频与基频幅值之间的关系，可判断故障的程度。

5.6 异步电动机综合测量数据

5.6.1 轴承故障振动测量数据与分析

通过对电机多测点数据分析，验证了电动机轴承故障符合第二章的分析方法，现将典型的故障频谱图列出，其他测点的数据从略。

异步电动机正常情况下，电机尾部振动测量径向频谱，如图 5-7。

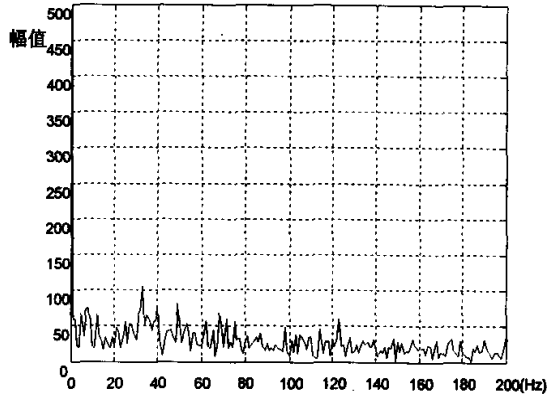


图 5-7 振动频谱图

Fig.5-7 a frequency spectrum of vibrational measurement

异步电动机轴承故障，电机尾部径向频谱图，如图 5-8。

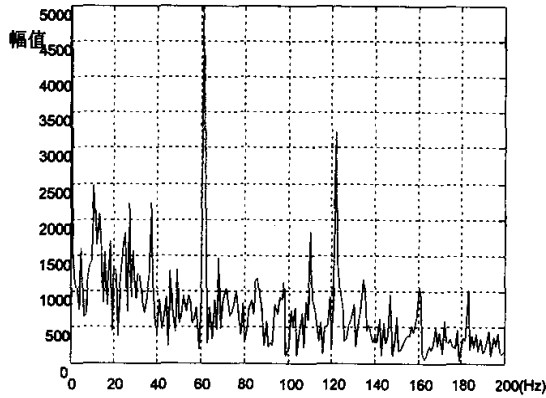


图 5-8 轴承故障振动频谱图

Fig.5-8 a frequency spectrum of vibrational measurement in the bearing fault

在图 5-7 中, 异步电动机无故障时, 其频谱幅值较低。在图 5-8 中, 异步电动机轴承故障频谱图中, 轴承故障特征频率明显, 频谱图幅值明显升高, 其中 62Hz 和 123Hz 处出现明显冲击, 这是由于频率和差的边频引起的。在回转机械中, 滚动轴承缺陷引起的激振, 使转子以一定的频率振动, 当电机存在对中不良、松动和刚度的非线性时, 使转子的振动传到定子上时形成波形的单边削平现象, 经频域变换后出现一系列的和频与差频。通过实验数据与计算值的对比, 验证了通过振动测量诊断电机轴承故障的方法和测试测点的布置方法选择的有效性。

从上两幅频谱图中, 清晰地看出, 故障时机械振动幅值有明显升高。电机轴承存在滚动体故障, 因为滚珠通过故障激起的是周期性冲击, 在频谱图上表现为离散谱线族; 同时, 故障频率符合滚珠故障特征频率^[32]。在分析异步电动机轴承故障频谱图时, 可以发现电动机频谱图除了含有轴承滚动体故障的特征频率外, 还存在电动机偏心故障的特征频率, 即回转频率的整数倍; 这是由于轴承滚珠碎裂后, 电机出现了偏心。一般情况下, 复杂设备发生一种故障时, 往往衍生出其它故障特征, 理论上需要分离故障源; 但在实际运行中, 由于标准件的选用, 在设备维修时, 不必细分其故障源, 通常以更换整个零部件来维护其设备。

5.6.2 导条故障定子电流测量数据与分析

5.6.1.1 空载 A 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下, 空载 A 相定子电流频谱图, 如图 5-9。

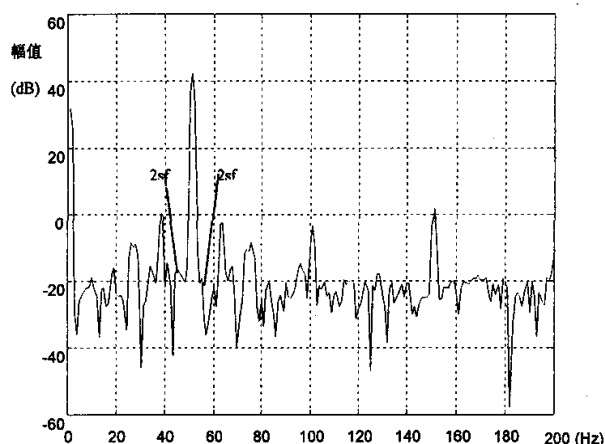


图 5-9 空载 A 相定子电流频谱图

Fig.5-9 a frequency spectrum of A-phase idling stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下，空载 A 相定子电流频谱图，如图 5-10。

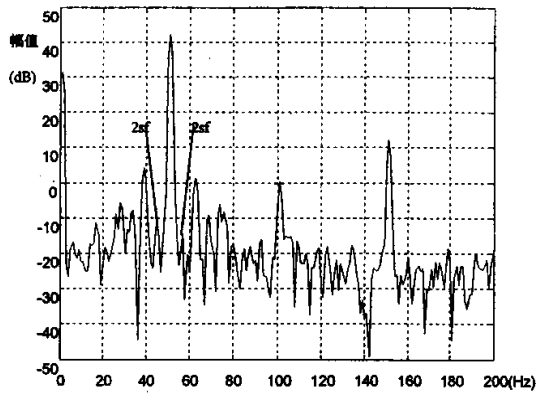


图 5-10 导条故障下空载 A 相定子电流频谱图

Fig.5-10 a frequency spectrum of A-phase idling stator current in the bar fault

从图 5-9 和图 5-10 可以看出，异步电动机转子导条早期故障情况下，空载 A 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值有轻微增高发生。

5.6.1.2 空载 B 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下，空载 B 相定子电流频谱图，如图 5-11。

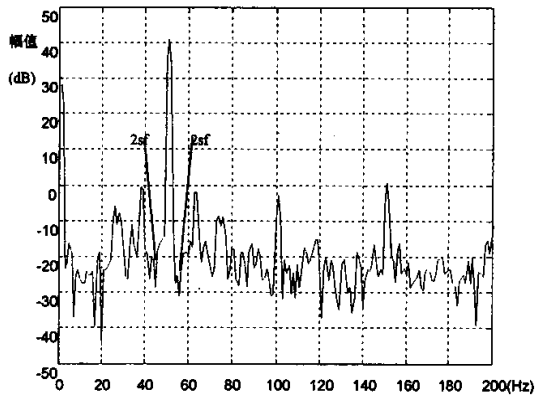


图 5-11 空载 B 相定子电流频谱图

Fig.5-11 a frequency spectrum of B-phase idling stator current

异步电动机转子导条故障情况下，空载 B 相定子电流频谱图，如图 5-12。

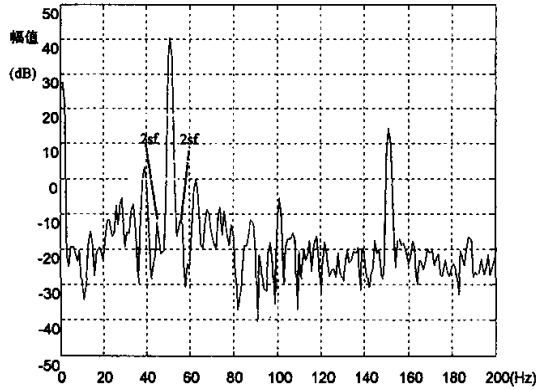


图 5-12 导条故障下空载 B 相定子电流频谱图

Fig.5-12 a frequency spectrum of B-phase idling stator current in the bar fault

从图 5-11 和图 5-12 可以看出, 异步电动机转子导条早期故障情况下, 空载 B 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值也有轻微增高发生。

5.6.1.3 空载 C 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下, 空载 C 相定子电流频谱图, 如图 5-13。

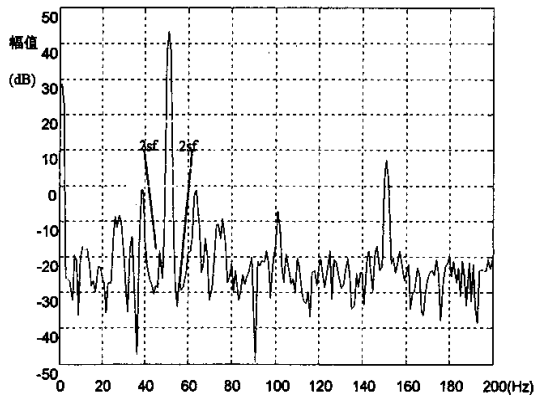


图 5-13 空载 C 相定子电流频谱图

Fig.5-13 a frequency spectrum of C-phase idling stator current

异步电动机转子导条故障情况下, 空载 C 相定子电流频谱图, 如图 5-14。

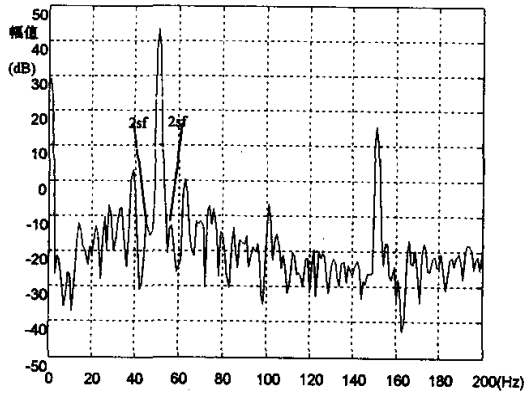


图 5-14 导条故障下空载 C 相定子电流频谱图

Fig.5-14 a frequency spectrum of C-phase idling stator current in the bar fault

从图 5-13 和图 5-14 可以看出，异步电动机转子导条早期故障情况下，空载 C 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值也有轻微增高发生。

5. 6. 1. 4 负载 73% A 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下，负载 73% A 相定子电流频谱图，如图 5-1。

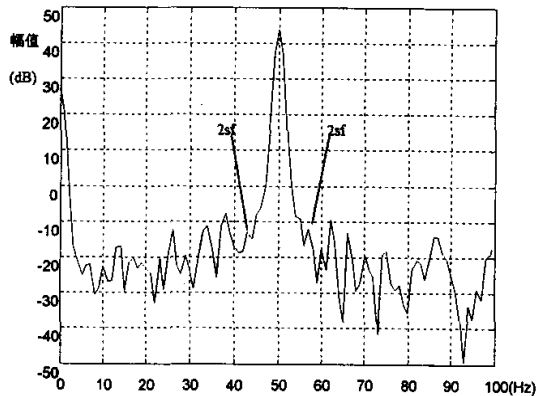


图 5-15 负载 73%A 相定子电流频谱图

Fig.5-15 a frequency spectrum of A-phase 73% loading stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下，负载 73% A 相定子电流频谱图，如图 5-16。

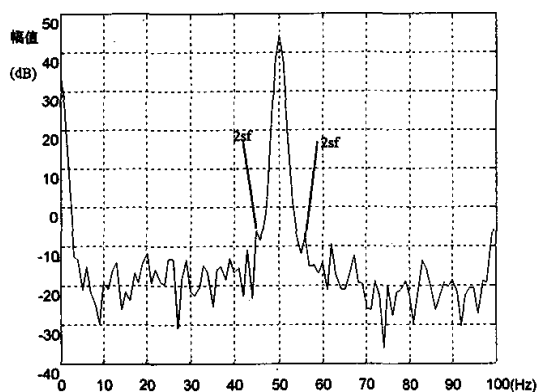


图 5-16 导条故障下负载 73%A 相定子电流频谱图

Fig.5-16 a frequency spectrum of A-phase 73%loading stator current in the bar fault

从图 5-15 和图 5-16 可以看出,异步电动机转子导条早期故障情况下,负载 73% A 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值轻微增高不明显。

5.6.1.5 负载 73%, B 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下,负载 73% B 相定子电流频谱图,如图 5-17。

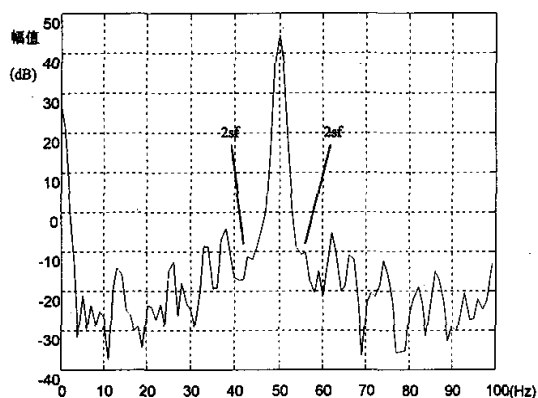


图 5-17 负载 73%B 相定子电流频谱图

Fig.5-17 a frequency spectrum of B-phase 73% loading stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下,负载 73% B 相定子电流频谱图,如图 5-18。

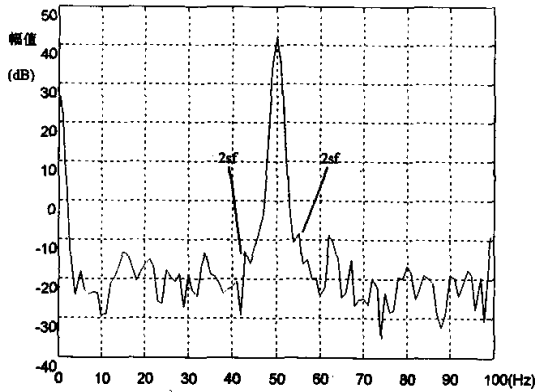


图 5-18 导条故障下负载 73%B 相定子电流频谱图

Fig.5-18 a frequency spectrum of B-phase 73% loading stator current in the bar fault

从图 5-17 和图 5-18 可以看出，异步电动机转子导条早期故障情况下，负载 73% B 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值轻微增高不明显。

5.6.1.6 负载 73%, C 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下，负载 73% C 相定子电流频谱图，如图 5-19。

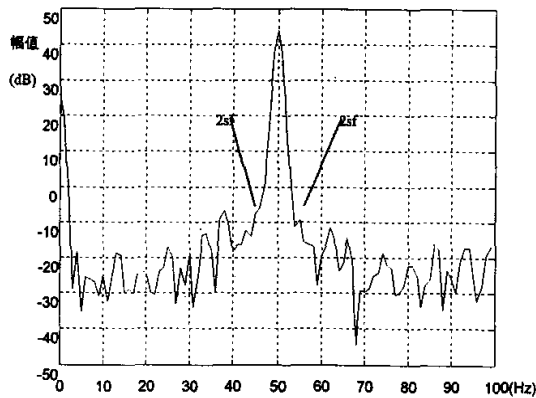


图 5-19 负载 73% C 相定子电流频谱图

Fig.5-19 a frequency spectrum of C-phase 73% loading stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下，负载 73% C 相定子电流频谱图，如图 5-20。

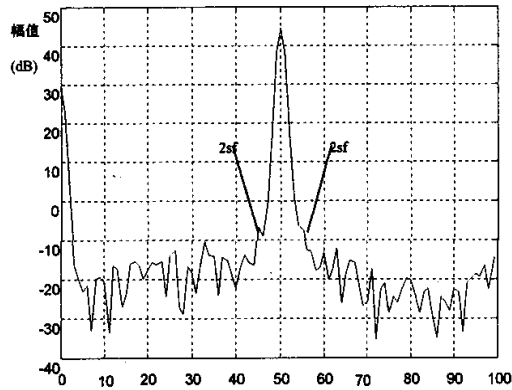


图 5-20 导条故障下负载 73% C 相定子电流频谱图

Fig.5-20 a frequency spectrum of C-phase loading 73% stator current in the bar fault

从图 5-9 和图 5-20 可以看出, 异步电动机转子导条早期故障情况下, 负载 73% C 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值轻微增高不明显。

5.6.1.7 负载 15%, A 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下, 负载 15% A 相定子电流频谱图, 如图 5-21。

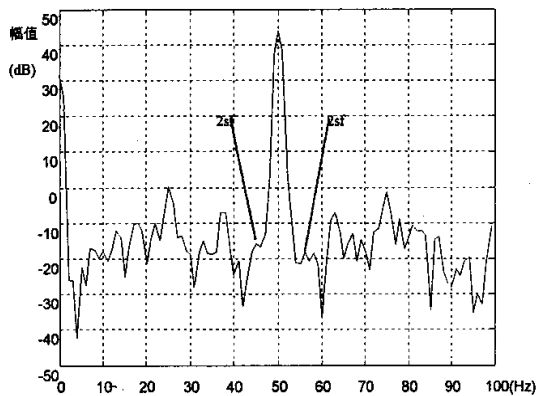


图 5-21 负载 15% A 相定子电流频谱图

Fig.5-21 a frequency spectrum of A-phase 15% loading stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下, 负载 15% 负载 A 相定子电流频谱图, 如图 5-22。

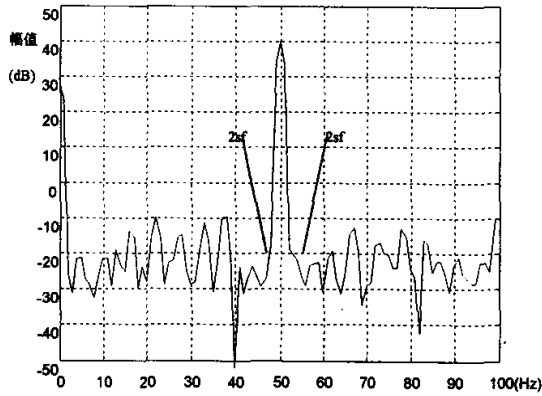


图 5-22 导条故障下负载 15%A 相定子电流频谱图

Fig.5-22 a frequency spectrum of A-phase 15% loading stator current in the bar fault

从图 5-21 和图 5-22 可以看出, 异步电动机转子导条早期故障情况下, 负载 15% A 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值轻微增高不明显。

5.6.1.8 负载 15%, B 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下, 负载 15% B 相定子电流频谱图, 如图 5-23。

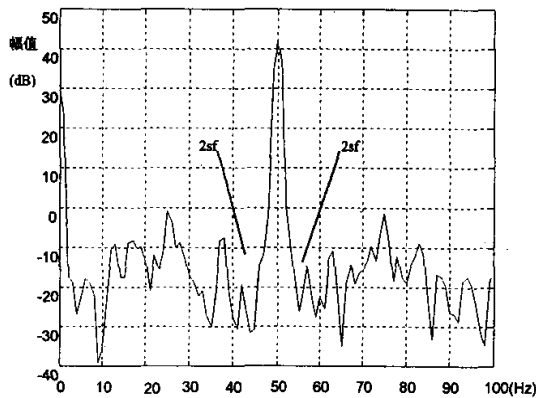


图 5-23 负载 15%B 相定子电流频谱图

Fig.5-23 a frequency spectrum of B-phase 15% loading stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下, 负载 15% B 相定子电流频谱图, 如图 5-24。

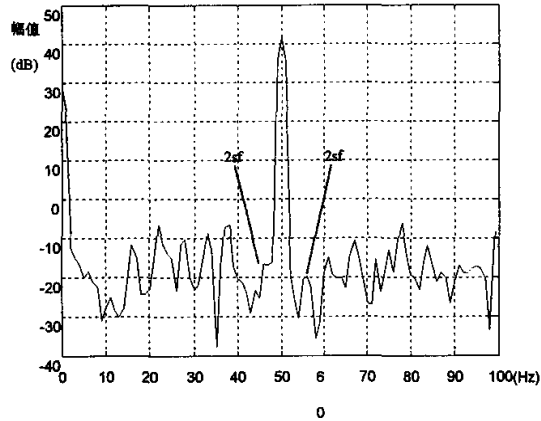


图 5-24 导条故障下负载 15%B 相定子电流频谱图

Fig.5-24 a frequency spectrum of B-phase 15% loading stator current in the bar fault

从图 5-23 和图 5-24 可以看出, 异步电动机转子导条早期故障情况下, 负载 15% B 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值轻微增高不明显。

5.6.1.9 负载 15%, C 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下, 负载 15% C 相定子电流频谱图, 如图 5-25。

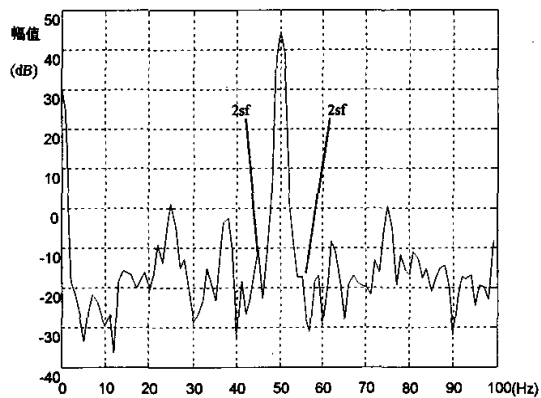


图 5-25 负载 15% C 相定子电流频谱图

Fig.5-25 a frequency spectrum of C-phase 15% loading stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下, 负载 15% C 相定子电流频谱图, 如图 5-26。

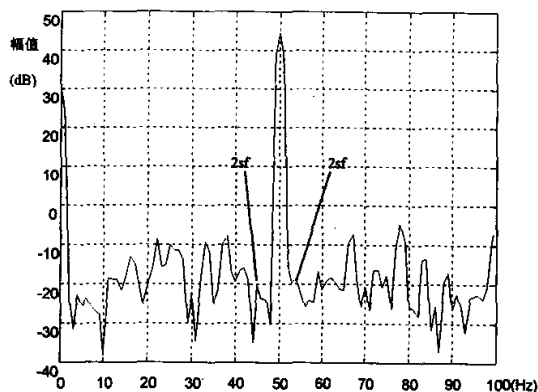


图 5-26 导条故障下负载 15% C 相定子电流频谱图

Fig.5-26 a frequency spectrum of C-phase 15% loading stator current in the bar fault

从图 5-25 和图 5-26 可以看出,异步电动机转子导条早期故障情况下,负载 15% C 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值轻微增高不明显。

5.6.1.10 负载 36% A 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下,负载 36% A 相定子电流频谱图,如图 5-27。

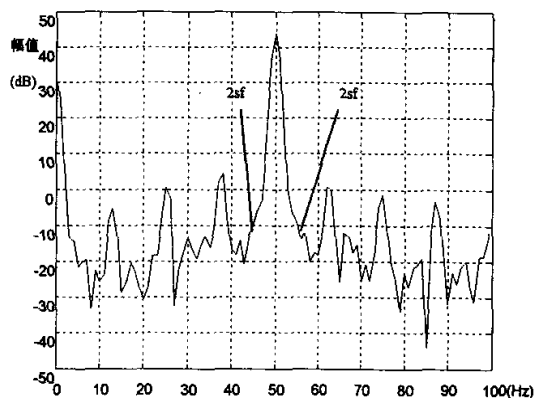


图 5-27 负载 36% A 相定子电流频谱图

Fig.5-27 a frequency spectrum of A-phase 36% loading stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下,负载 36% A 相定子电流频谱图,如图 5-28。

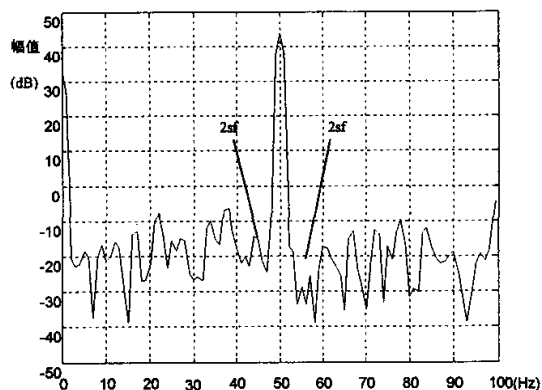


图 5-28 导条故障下负载 36% A 相定子电流频谱图

Fig.5-28 a frequency spectrum of A-phase 36% loading stator current in the bar fault

从图 5-27 和图 5-28 可以看出，异步电动机转子导条早期故障情况下，负载 36% A 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值轻微增高不明显。

5.6.1.11 负载 36% B 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下，负载 36%B 相定子电流频谱图，如图 5-29。

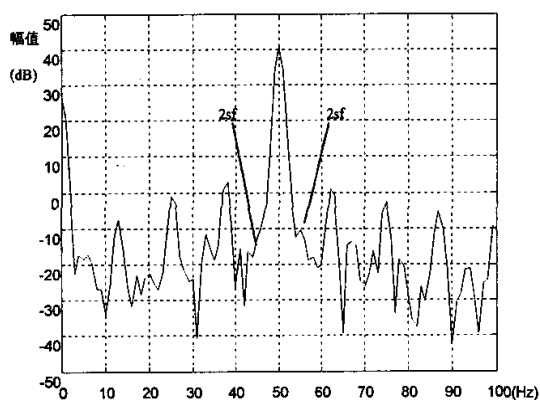


图 5-29 负载 36% B 相定子电流频谱图

Fig.5-29 a frequency spectrum of B-phase 36% loading stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下，负载 36% B 相定子电流频谱图，如图 5-30。

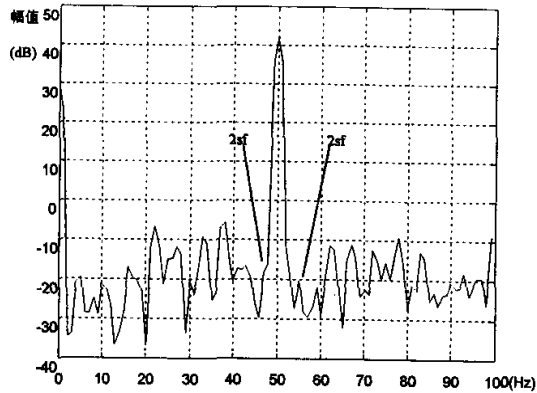


图 5-30 导条故障下负载 36% B 相定子电流频谱图

Fig.5-30 a frequency spectrum of B-phase 36% loading stator current in the bar fault

从图 5-29 和图 5-30 可以看出,异步电动机转子导条早期故障情况下,负载 36% B 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值轻微增高不明显。

5.6.1.12 负载 36%, C 相定子电流频谱图

异步电动机正常情况下,负载 36% C 相定子电流频谱图,如图 5-31。

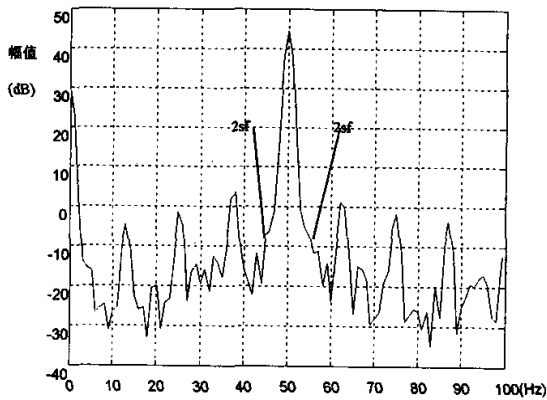


图 5-31 负载 36% C 相定子电流频谱图

Fig.5-31 a frequency spectrum of C-phase 36% loading stator current

异步电动机转子导条早期故障情况下,负载 36% C 相定子电流频谱图,如图 5-32。

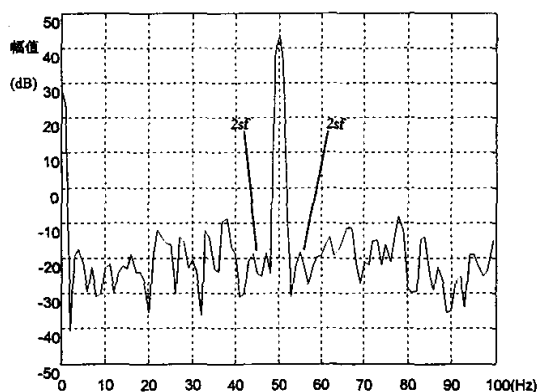


图 5-32 导条故障下负载 36% C 相定子电流频谱图
Fig.5-32 a frequency spectrum of C-phase stator current in the bar fault

从图 5-31 和图 5-32 可以看出,异步电动机转子导条早期故障情况下,负载 36% C 相定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值轻微增高不明显。

由上面一系列频谱图(图 5-11——图 5-32)可以看出在异步电动机转子导条故障情况下,空载定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值有轻微增高发生,而负载时,定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值变化却不明显。经过大量数据分析,发现异步电动机转子导条早期故障,并不符合文献[14]所提出的转子导条故障发生后期的检测方法。在数据分析中,往往是电机空载时,转子导条早期故障出现在基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值有轻微增高,而负载 15%, 36%, 73% 情况下,则无明显变化。

因此,进行了进一步的理论探索,提出了第四章分析转子导条早期故障的模型。实际上,在转子导条早期故障时,转子电流对转子导条的阻抗变化的相应变化灵敏度,往往应体现在空载转子电流基值较低时。也就是说,转子导条的阻抗发生微小变化过程中,转子空载电流较小时,其幅值相对变化较大,相应引起电机定子电流频谱基频两边出现 $\pm 2sf$ 的边频幅值有轻微增高。但仅通过这样来确定其故障,其置信度还需进一步验证^{[33][34]}。

之所以认为其置信度还需进一步验证,是因为对电机故障综合测量中,数据幅值差异很小,对于不同的电机,其数据差异也会带来不同。这需要对电机正常时进行数据测量,定期对电机进行检测。虽然,这符合当今异步电动机故障检测专家系统的方法,但自然带来检测费用的增加以及需建立相应的数据库;同时,由于供电

电网波动，异步电动机空载电流也会发生变化。鉴于上述结论，需进一步对异步电动机故障诊断进行多传感器融合技术的研究方法的探讨研究。

5.7 小结

综上所述，本课题验证了异步电动机轴承故障方法的正确性，同时提出了异步电动机转子导条故障后期诊断方法，针对转子导条早期故障的不完善性，及其理论依据。根据当今故障诊断技术发展的趋势，进一步提出对异步电动机故障诊断进行多传感器融合技术的研究方法的探讨。

第六章 基于多传感器融合的故障诊断方法的研究

6.1 引言

在故障诊断领域，信息融合主要包括多传感器的检测判断融合、多传感器综合跟踪与状态估计融合、多传感器目标识别的属性融合、监视跟踪环境的态势描述和趋势估计，以及传感器管理和数据库等。它是一个在多级别上对各传感器观测数据进行综合处理的过程，每个处理级别都反映了对原始数据不同程度的抽象，它包括从检测到威胁判断、故障趋向和维持组织的完整过程，其结果表现为在较低级别上对状态的属性的估计和在较高层次上对整体态势、威胁的评定。信息融合可以大大的减轻测试人员的工作量，扩大诊断系统的时空覆盖范围，增加置信度，减少模糊性，改善探测，提高空间分辨力，改善系统可靠性，增加信息维数，增大多传感器的侦测范围，可在“全景”测量环境中执行有源和无源探测任务^[35]。

数据（信息）融合的基本概念就是通过对多个源的数据通过适当的融合得到一个比单个源数据更有利的结果。应用多传感器数据融合方法的主要目标是通过多个传感器的数据融合得到比单个数据条件下更精确、更确定甚至无法得到的系统信息。信息融合就其融合数据来源可分为数据级融合、特征级融合、决策级融合。^{[36][37]}

6.1.1 多传感器信息融合的优点

多传感器融合在解决探测故障、跟踪故障和状态识别等问题上，具有许多优势^[35]：

(1) 增加了系统的生存（侦测）能力。在由若干传感器不能利用或受到干扰，或某一故障不在测试范围时，总还会有一部分传感器可以提供信息，使系统能够不受干扰连续运行，弱化故障，并增加检测概率。

(2) 扩展了空间覆盖范围。通过多个交叠覆盖的传感器作出区域，扩大了空间覆盖范围，一些传感器可以探测其它传感器无法探测的地方，进而增加了系统的检测能力和检测概率。

(3) 扩展了时间覆盖范围。当某些传感器不能探测时另一些传感器可以检测、测量目标或事件，及多个传感器的协同作用可提高系统的事件监视范围和检测概率。

(4) 增加了可信度。一部或多部传感器能确认同一故障或事件。

(5) 减少了信息的模糊性。多传感器联合信息降低了目标或事件的不确定性。

(6) 改善了探测性能。对目标的多种测量的有效融合、提高了探测的有效性。

(7) 提高了空间分辨力。多传感器孔径可以获得比任何单一传感器更高的分辨力。并用改善的目标位置数据支持、防御、反应能力和故障引起冲击方向的选择。

(8) 改善了系统的可靠性。多传感器相互配合使用具有内在的冗余度。

(9) 增加了测量空间的维数。使用不向的传感器来测量电磁频谱的各个频段的系统，不易受到故障或自然现象的破坏。

与单传感器系统相比，多传感器的复杂性大大增加，由此会产生一些不利因素。如成本提高了，设备的尺寸、重量、功耗等物理因素增大了，以及因辐射增多而使系统对探测对象的影响增加了。在执行每项具体任务时，必须将多传感器的性能裨益与由此带来的不利因素进行权衡。

6.1.2 多传感器融合技术的内涵的提出

结合多传感器检测技术和信息融合技术的概念；在故障诊断学中，本文提出多传感器融合技术的内涵：在系统故障诊断过程中，将被测系统中含有时间、空间异源的、异质的故障信息中，难于诊断决策的故障信息通过数物变换，使其转化为（抽象为）同源的、同质的数据（或信息），再将时间、空间同源的、同质的数据，运用现有成熟的系统性诊断方法及其变换诊断出故障源，同时做出故障状态评估的方法。

6.1.3 构造融合和虚拟融合的提出

通过对融合技术的分析理解，本文在故障诊断学领域，提出构造融合和虚拟融合的概念。

为了提高融合处理中信息的有效性，提出采取构造融合的方法。其实质就是将不同时空的信号通过数学和物理模型转化为同一时空进行分析的过程。其主要运用被测对象的重复性或周期性进行分析。它不再简单的通过故障与响应间的映射关系，进行故障诊断。而是将响应逆映射到系统中去，再对其分析。就其映射实现方法可分为硬

件映射法与软件映射法。

为了准确估计故障态，引入虚拟融合技术，在对故障准确定位或分离后，通过故障数学模型和老化数学模型，采用虚拟故障进程，对缓变故障进行估计；再采用一定的时空冗余技术，在故障未发生突变前，提出最为经济的维修决策或维持方案。

构造融合和虚拟融合概念的区别在于诊断推理思维方向的选择，构造融合的目的是找寻故障源，而虚拟融合则是对故障状态的评估。

6.2 多传感器融合系统实现故障诊断的可行性分析

机电设备故障诊断是包括运行状态检测、信号分析处理、故障模式识别、未来趋势预测、维修决策形成等内容的完整而系统的技术过程。交流异步电机是一个高阶、时变、非线性、强耦合的多变量系统。目前故障诊断技术，利用故障与响应之间存在确定性映射关系（也称为因果分析法），对于电机部分故障无法准确进行故障分离、故障定位和故障状态的评估；因此，需要采用多传感器融合技术加以解决。

6.3 传统电动机故障诊断的局限性原因分析

由于交流异步电机是一个高阶、时变、非线性、强耦合的多变量系统，故障起因、征兆往往会表现出多元性，因此，对电机进行故障诊断时，必须对电动机故障进行机理分析。

多传感器检测技术的实质就是通过对故障态的多物理模态的监测识别，建立故障与响应对应关系，从而确定故障种类、部位、严重程度。但在现实中，存在许多困难。本文总结如下：

(1) 故障征兆所对应的特征提取的困难；由于电动机的故障征兆是通过传感器的输出信号反映出来，反映早期故障征兆信号常常比较弱，有时背景噪声湮没反映早期的故障征兆信号；造成故障征兆所对应的特征提取困难。

(2) 电机的制造过程中的工艺复杂，也成为故障诱发的原因。而且部分故障引起的故障特征趋同，难于分离。由于电动机制造中存在许多诱发故障的隐患。采用传统诊断方法时，许多故障的特征趋同，如仅采用振动分析法，气隙偏心产生的电磁振动与定子异常产生的电磁振动较难区别。

针对在电机故障中最为常见的轴承故障，它又可细分为轴承配合面加工精度不高、轴承不同心、固定轴承盖锁紧面精度不高、轴承盖机构特性、滚珠尺寸不同、轴承内圈径向偏摆、滚动体椭圆度棱圆度、保持架空中间隙、轴承部件中波纹度产生的动力脉冲、轴承径向间隙、轴承负荷大小等，都会产生机械振动，其中含有许多制造误差及工艺缺陷产生的故障，而仅采用振动检测方法，会使部分故障检测特征与转子故障特征相似，无法分离出故障源，因此也需要多传感器融合技术处理。

(3) 电机结构中的强耦合所带来对故障的识别难度加大；由于电机作为能量转化设备，在设计、制造中总希望其电能、磁能、机械能可以高效率的传输，由于能量在传输过程的可逆性，决定了故障在三种结构中的浮动特性，从而使故障发生时，其集聚的能量在三种能量中随机耗散，难以捕捉。同时，其时变性对机械零件、电磁元件的损伤，更具随机性和不确定性。

(4) 在上一章中，异步电动机导条早期故障不符合断条后期故障表征，进一步说明，异步电动机不同故障程，其故障特征也会不相同。异步电动机的等效模型与实际模型近似程度，也直接影响着单一监测的精度。因此，通过多传感器融合技术，为今后提出更加有效的等效模型有着积极的作用。基于数学模型的故障监测方法，有利于找寻出故障源，以及故障趋势估计。

6.4 采用多传感器融合技术在异步电动机故障诊断中的优势

在以往的故障诊断中，通过故障激励和响应映射关系来区分故障。为了故障诊断正确率，一般采用信号处理的方法提高信号采集后的有效性，通过特征提取和人工智能技术提高其辩识度、决策度。虽然提高了故障信息的后处理的方法，但其对部分故障定位及其定位故障状态评估，却依然无法定性、定量分析。同时，由于故障成因在时域上混杂性、能量转化的强通过性，使一个检测结果对应多个故障源，而所产生的故障结果的严重程度又存在巨大差异，如果简单处之，加大了故障误诊率。

由此扩大监测范围，增加监测对象，采用多传感器融合技术，面向对象进行监测，扩大监测网络和监测通道，进而扩大诊断过程中，激励与响应之间的映射关系，便于区分其故障诱因。采用更多的监测对象对原有的故障特征趋同的故障源，提供

依据分离或定位故障。通过不同的观测器得到不同时空下的观测结果，从而提高了辨识故障能力。

多传感器融合技术在针对故障建立确定单一故障数学模型，避免了在电动机数学模型建立时，对于电动机电磁力非均匀、交变的时空函数，简化带来的故障成因的削弱和缺陷。但其依赖于传感器监测电机的外部数学模型的有效性。

6.5 针对异步电动机故障多传感器技术融合的框架

本文针对异步电动机故障提出多传感器技术融合技术的框架如下：

(1) 由异步电动机组成机械电气设备的系统对引发电动机故障的影响分析；在异步电动机负载特性，对引发电动机故障有决定性的作用。

1) 在电动机拖动负载经常正反转时，转子承受电磁交变力，转子断条的故障将大大增加；

2) 电动机采用不同的调速设备，变频器调速对电动机定子绕组产生不平衡电压，绕组匝间短路故障出现频繁^[38]；

3) 电动机拖动减速机，当减速机速比较大，减速机一次传动齿轮质量较大时或拖动大惯量负载，容易诱发转子振动以及轴承故障；

4) 在卧式电机拖动系统中，由于转子重量对两个方向刚度不同的轴的作用会产生次临界转速振动。

同时，由于拖动系统的设计者对工况不了解，接电持续率和过载热校验选取不当，也会造成故障频繁发生。

(2) 对电动机制造工艺与原理引发故障的机理分析；电动机制造过程中，会隐藏许多故障诱因，需对电机出厂检测数据分析，对电动机出厂检测手段和性能指标充分了解；交流异步电机是一个高阶、时变、非线性、强耦合的多变量系统，对于电动机长期、短时、瞬间动态分析，对电动机故障诊断也是重要的依据，如在多电机拖动系统中，电机启、制动特性，也会成为故障的诱发原因。

(3) 通过对上述技术条件充分掌握和了解后，选取和建立多传感器监测系统；根据上述条件，选取正确的状态变量，即控制变量和观测变量，这一点雷同于自动控制理论。构建出相应的故障观测器，选取适当的传感器。

(4) 在获得相应的故障监测信息,进行故障信息分类,进而选取相应的信号处理方法,同时进行数据级融合,由于多传感器的数学模型存在相似形,可进行构造融合;

(5) 根据信号处理的数据结果构造显化函数(或称为筛选函数),其目的和方法如下:为了显化状态变量,构造和选取函数(准确讲映射关系),通过函数对各状态变化的选取功能不同,显化故障特征,进而达到其成为故障诊断的依据。这时根据函数变换获得数据可进行特征级融合。

(6) 在得到函数显化后的故障信息,进行决策分析,此时,需构造决策函数,它一般采用逻辑学、模糊数学、数理统计(概率)、专家系统、人工神经网络、遗传算法等进行故障推理。该过程在信息融合技术中称为决策级融合。在构造决策函数时,需要将数据进行分层及信息通道构成分类(串联、并联、混联、嵌套),即数据结构的研究,选取相应的函数,当映射关系得不出进行决策的依据时,可采用计算机数据挖掘方法,寻找映射关系,得出决策结论。进一步可采用虚拟融合的方法,对维修时间提出预测性估计。

多传感器融合技术的故障诊断结果是系统性和封闭性的统一,故障诊断决策本身是针对异步电动机使用环境,制造工艺而提出的,当其用于不同环境中或制造工艺时,其结论会有差异。

6.6 多传感器融合技术修正技术

(1) 针对故障期多传感器融合技术的修正

故障期可以分为早期故障期、偶发故障期、耗损故障期。早期故障期,反映了设计制造工艺上的缺陷;偶发故障期,反映系统稳定运行时,故障率低近似于一常数;耗损故障期设备进入老化阶段,故障呈上升趋势,如图 6-4 所示^[14]:

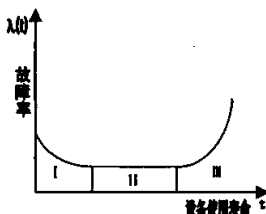


图 6-4 故障率与时间关系

Fig.6-4 the rate of failure and time relations

由图 6-4 知, 设备在时序上会有不同的故障高发期, 如果仅以简单故障数理统计作为故障诊断的权重, 会舍弃时序上重要的信息, 造成故障的误诊率增高; 在采取融合技术诊断时, 应将权重比例根据故障期进行适当的调整, 以此来提高故障诊断的准确性。

(2) 针对环境系数的修正

环境、外围故障主要包括电机维护水平, 对引发故障的影响; 以及使用环境对电机使用寿命的影响。这就需要修正人文环境、工作环境系数作相应调整。

6.7 小结

通过对异步电动机故障诊断的综合测量, 在上一章发现了转子断条早期故障的诊断, 不符合转子断条后期故障的诊断方法。因此, 根据故障学的发展, 提出了多传感器融合诊断的方法研究, 由于时间原因, 未提出多传感器融合技术应用于电机故障诊断的方法细则。本文提出的框架缺乏试验依据, 也仅为参考。希望在将来的学科发展中, 可以学习和验证其方法的可行性、有效性。

第七章 结论与展望

7.1 全本文结论

通过全文的论述和试验结果的总结，得出以下结论：

- 1) 由于交流异步电机是一个高阶、时变、非线性、强耦合的多变量系统，故障起因、征兆往往会表现出多元性，因此，对电机进行故障诊断时，需要采取面向对象的方法，针对电动机的某一故障，提出相应的等效模型；
- 2) 通过对异步电动机等效模型的研究探讨，新的电机等效模型需要对异步电动机参数的测试，进而提供数据支持，才可验证其理论有效性；
- 3) 通过对鼠笼式异步电动机轴承故障的测试，验证了传统检测方法的有效性，数据处理方式是进一步提高故障诊断准确度的有利手段；
- 4) 通过对鼠笼式异步电动机导条早期故障的模拟，以及试验数据的分析；得出设备所处故障程不同，所采用的检测方法也应适当调整；检测电动机断条故障的方法，仅适用于断条故障中、后期，早期故障的诊断需做相应调整；
- 5) 由于电动机技术的发展，电动机故障检测技术将向虚拟协同诊断方向发展，而基于多传感器融合技术的电动机故障诊断技术，真正实现硬、软件的有机结合；一方面，它采用成熟的硬件检测设备多角度、全方位的提供出“全景”故障信息；另一方面，它结合现有成熟的数据处理方式，显化故障特征，有效分离故障成因，同时做出故障势态评估，实现对故障的精准的诊断目的；因此，多传感器数据融合技术必将成为故障诊断学中的重要方向。
- 6) 多传感器融合技术的研究，需要全视角监测设备对象，通过面向对象的系统分析，结合多传感器融合技术监测封闭性，可以研究诊断对象相应故障模型；通过其鲁棒性分析，得出更为有效的检测方法。

7.2 对未来的展望

通过对课题的学习和研究,可以得出未来故障诊断技术,越来越向硬、软结合、虚拟协同诊断方向发展,多传感器融合技术兼备硬件、软件相融合的优势,必将成为未来故障检测技术的发展方向。

而面向对象系统分析的故障诊断技术,必将随着电子计算机和数值计算方法的发展,提供更为精确的故障模型,通过对故障模型相关参数的测量,可以实现分离故障、评估故障势态、预测故障趋势的作用;而这些模型的提出也依赖于多传感器融合技术对设备对象的有效检测。

由于客观条件和课题时间的约束,异步电动机早期故障的等效模型和多传感器融合技术具体试验方法,无法提供试验验证;希望在学科发展中,能够产生积极的参考意义。

参考文献

- [1]侯志祥,申群太,李河清. 电机设备的现代故障诊断方法, 电力系统及其自动化学报 [J], 2003, 15(6):61-63.
- [2]胡昌华,许化龙. 控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计. 北京:国防工业出版社, 2000. 7
- [3]韩平利,黄树红,贺国强,等. 基于实验的转子动平衡影响系数优劣评价与提取 振动与冲击[J]. 2003, 22(2):81-84.
- [4]侯新国,吴正国,夏立,等. 基于相关分析的感应电机定子故障诊断方法研究, 中国电机工程学报[J]. 2005, 25(2):83-86.
- [5]张艳霞 刘天绪 王荣琴 基于希尔伯特变换的电力振荡中再故障的识别方法 中国电机工程学报[J] 2005, 25(6):36-41.
- [6]Wesley G. Zanardelli , Elias G. Strangas, Hassan K. Khalil, John M. Mille Wavelet-based methods for the prognosis of mechanical and electrical failures in electric motors Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 411-426.
- [7]K. Kim, A. G. Parlos MODEL-BASED FAULT DIAGNOSIS OF INDUCTION MOTORS USING NON-STATIONARY SIGNAL SEGMENTATION Mechanical Systems and Signal Processing (2002) 16(2-3), 223-253.
- [8] Luis J. de Miguela, L. Felipe Bla'zquezb Fuzzy logic-based decision-making for fault diagnosis in a DC motor Engineering Applications of Artificial Intelligence 18 (2005) 423-450.
- [9]Czeslaw T. Kowalski, Teresa Orłowska-Kowalska Neural networks application for induction motor faults diagnosis Mathematics and Computers in Simulation 63 (2003) 435-448
- [10]乐波,谢恒堃. 基于模糊输出BP神经网络的电机主绝缘老化状态评估方法 中国电机工程学报[J] 2005, 25(2):76-81.
- [11]庄哲民,肖广辉,曹勤. 基于遗传神经网络的异步电动机故障诊断研究, 测试技术

学报. 2004, 18(4):377-380.

[12]Bo-Suk Yang, Seok Kwon Jeong, Yong-Min Oh, Andy Chit Chiow Tan Case-based reasoning system with Petri nets for induction motor fault diagnosis Expert Systems with Applications 27 (2004) 301-311.

[13]陈理渊,黄进,电机故障诊断的多传感器数据融合方法.电力系统及其自动化学报[J],2005,17(1):49-52.

[14]沈标正,编著.电机故障诊断技术[M].北京:机械工业出版社,1996. 215-243. 368-376.

[15]刘振兴,张哲,尹项根.异步电动机的状态监测与故障诊断技术综述[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2001,24(3):285-289.

[16]PJ 达夫勒,J 彭曼著.电机的状态监测[M].姜建国,等译.北京:水利电力出版社,1992.

[17] W T Thomson ,D Rankin ,D G Dorrell. On-line Current Monitoring to Diagnose Airgap Eccentricity in Large Induction Motors---Industrial Case Histories Verify the Predictions [J].IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999,14(4):1372-1377.

[18]Randy R Schoen, Brian K Lin, Thomas G Habetler, etal. An Unsupervised, On-line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring,[J].IEEE Transactions. on Industry Applications,1995,31(6):1280-1286.

[19] G B Kliman, R A Koegl, J Stein. Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors [J].IEEE Transactions on Energy Conversion, 1998,(3):873-879.

[20]Jafar Milimonfared, Homayoun Meshgin Kelk, Subhasis Nandi. A Novel Approach for Broken-rotor-bar Detection in Cage Induction Motors [J].IEEE Transactions on Industry Applications,1999,35(5):1000-1005.

[21]高景德,王祥珩,李发海,著.交流电机及其系统的分析[M],第二版,北京:清华大学出版社,2005,311-312. 423-438.

[22]王君艳.异步电机T形等效电路的数学推导方法[J],电子电气教学学报,2005(2),27(1),63-65.

[23]汤蕴璆,史乃,编著.电机学[M],第二版,北京:机械工业出版社,2005,173-185.

- [24] 李发海, 王岩, 编. 电机与拖动基础 [M], 北京: 中央广播电视大学出版社, 1991, 80-95.
- [25] 汤蕴璆, 张亦黄, 范瑜, 编著. 交流电机动态分析 [M], 北京: 机械工业出版社, 2005, 35-55.
- [26] 刘耀南, 邱昌容, 编. 绝缘 (电气绝缘测试技术) [M] 北京: 机械工业出版社, 38-40.
- [27] 汤蕴璆, 梁艳萍. 感应电机不对称短路的瞬态, 电机与控制学报 [J], 2003 (3)
- [28] 黄长艺, 卢文祥, 熊诗波, 主编. 机械工程测量与试验技术 [M], 北京: 机械工业出版社, 2001: 112-113.
- [29] 张力军, 赵稳. 交流电机与行星磁粉离合器组合调速方案研究 [J], 机械设计, 2005 (3): 18-19.
- [30] 西北工业大学机械原理及机械零件教研组. 机械设计基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 352.
- [31] 李德葆, 张元润, 编著. 振动测量与试验分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992: 370-372.
- [32] Sudhakar.K.V, Cruz Paredes,Joel. Failure mechanisms in motor bearings. Engineering Failure Analysis. 12(1),2005(2):35-42.
- [33] Masound Haji, Hamid A.Toliat. Pattern Recognition----A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection. IEEE, IEEE Transaction on Energy Conversion,2001,312-317.
- [34] A Bellini, F.Filippetti,G.Fracceschini,etc. ENEL's Experience with On-line Diagnosis of Large Induction Motors Cage Failure. Conference Record of 2000 IEEE,vol.1,492-498.
- [35] 何友, 王国宏, 彭应宁, 等. 多传感器信息融合及应用 [M], 北京: 电子出版社, 2000: 2-10.
- [36] 陈理渊, 黄进. 电机故障诊断的多传感器数据融合方法, 浙江大学电气工程学院, 杭州电力系统及其自动化学报, 2005 (2).
- [37] 陈非, 黄树红, 张燕平, 等. 火电机组信息融合故障诊断方法及其发展, 振动、测试与诊断, 2005 (3).
- [38] 李鸿岩, 王峰, 郭磊, 刘斌, 等. 变频电机的匝间绝缘电老化机理, 绝缘材

料, 2005(2), 57-60.

致谢

在硕士研究生学习的三年里,我得到了导师熊诗波教授的悉心指导和帮助,并在本课题的研究中学到了许多从事科研的基本思路和方法,这些都令我受益终生。熊老师所具有的渊博的知识、严谨求实的治学态度、深厚的学术造诣和高尚的师德,使我深感钦佩。在研究生学习即将结束之际,在这里我向导师表示最深的谢意!

本文的完成还要特别感谢太原理工大学机械电子研究所的权龙、杨洁明,程珩,熊小燕等老师,是他们自始至终对本文的写作给予了热情支持和鼓励,并为本文的试验提供了先进的试验设备和良好的试验条件,这对论文的完成提供了前提。对于所有辛勤工作的老师,作者在此谨表示衷心的感谢!

三年的学习历程中,我每取得的一丝进步,都凝聚着老师们的辛勤付出和同学们的关心和鼓励;这将是人生中宝贵的财富,再次深深地感谢你们!我也要感谢母校给予我学习、发展的机会,在这里传授我知识、陶冶情操、催人奋进。在这即将离开母校之际,深深地祝福你——我的母校!

李昕涛

2006年5月6日

攻读硕士学位期间发表的学术论文

[1]李昕涛,熊晓燕.基于信息融合的异步电动机故障诊断方法,机械工程与自动化,2006(2),166-168.论文署名单位为太原理工大学,第一作者,山西省一级期刊。

[2]李昕涛,王爱玲.中小型电站新型起重设备的探索,机电产品开发与创新,2005(1),44-46.论文署名单位为太原理工大学,第一作者,中文核心期刊。

山西省青年科技基金项目资助(20051029)
