

现代电机 故障诊断与容错技术

肖丽

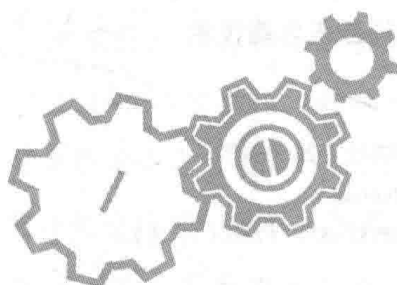
著



青岛出版社
QINGDAO PUBLISHING HOUSE

现代电机 故障诊断与容错技术

肖丽 / 著



 青岛出版社
QINGDAO PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电机故障诊断与容错技术 / 肖丽著. -- 青岛 :
青岛出版社, 2018.7

ISBN 978-7-5552-7489-6

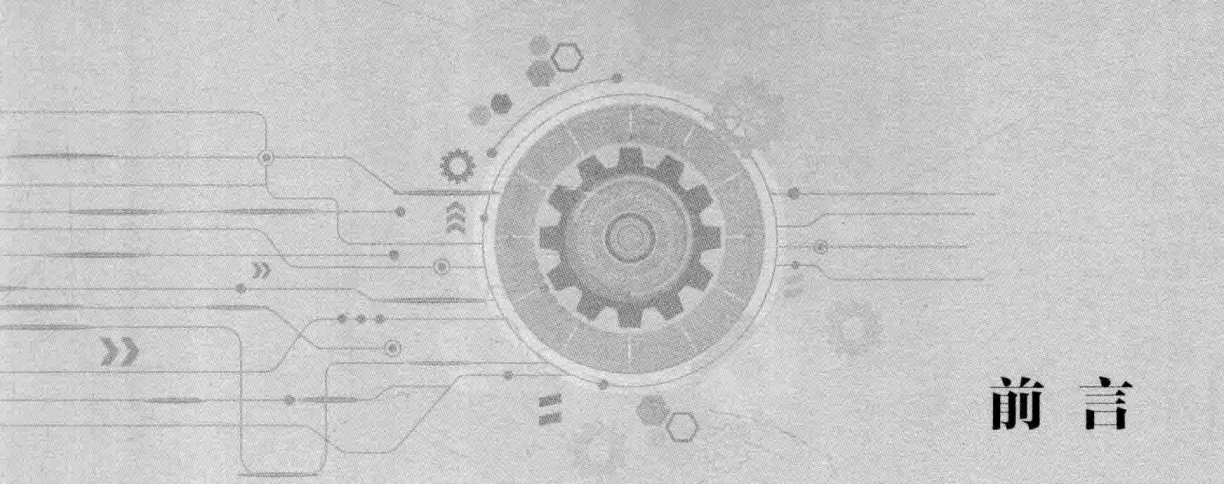
I. ①现… II. ①肖… III. ①电机-故障诊断 IV.

① TM307

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 170960 号

书 名	现代电机故障诊断与容错技术
著 者	肖丽
出版发行	青岛出版社
社 址	青岛市海尔路182号 (266061)
本社网址	http://www.qdpub.com
邮购电话	13335059110 0532-85814750 (传真)
责任编辑	程兆军
装帧设计	姜岩利
制 版	青岛乐喜力科技发展有限公司
印 刷	青岛国彩印刷有限公司
出版日期	2018年8月第1版 2018年8月第1次印刷
开 本	16开 (710mm × 1000mm)
印 张	14
字 数	280千
书 号	ISBN978-7-5552-7489-6
定 价	38.00元

编校印装质量、盗版监督服务电话: 4006532017 0532-68068638

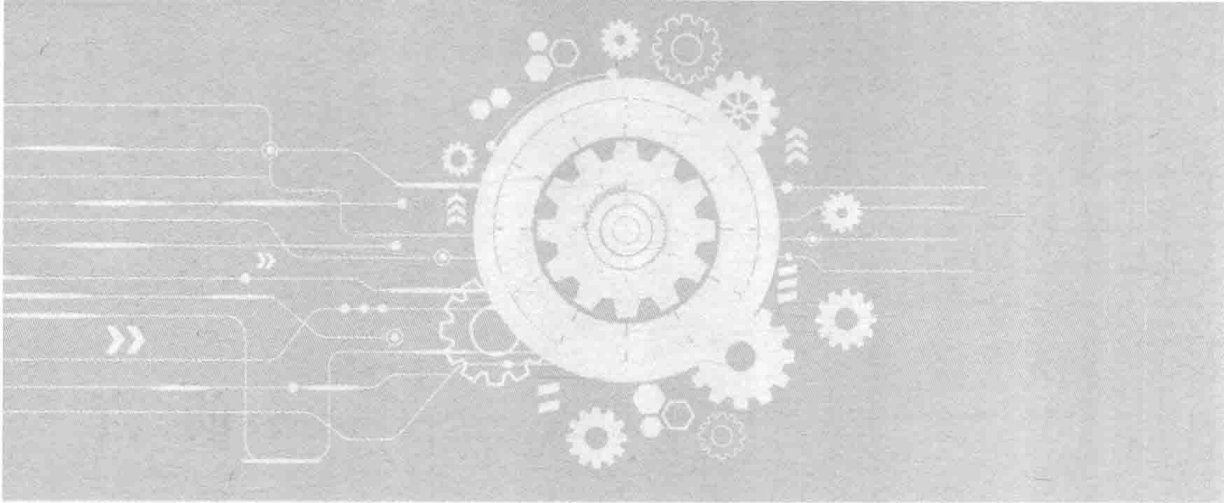


前言

随着世界科学技术与经济水平的不断发展,能源紧缺与环境污染已成为制约经济社会可持续发展的两大世界性难题。电动机作为电能转换为机械能的主要执行机构,广泛应用于工业、农业、航空航天、军事、交通、家电等各个领域。电机在运行过程中,由于受到机械加工条件限制和恶劣环境等因素的影响,极易出现机械故障与电气故障,影响电机系统安全可靠运行。电机在故障状态下运行,轻则影响整个系统输出特性,重则导致电机系统损坏,甚至危害经济利益与人身安全。为了提高电机运行系统安全性与可靠性,电机及其驱动系统故障诊断与容错技术的研究具有重要理论意义与工程应用价值。

故障诊断技术是电力电子技术、传感器技术、现代控制理论、数据统计理论、信号处理技术、人工智能技术等各领域技术综合发展的交叉产物。容错技术起源于80年代,是一种提高控制系统可靠性的技术,保证在控制系统中有某些部件发生故障时,系统仍能按原定性能指标或性能指标在可接受范围内略有降低,而安全地完成控制任务。实质上,故障诊断技术与容错技术密切相关,故障诊断结果是容错控制的基础与前提,容错控制是进行故障诊断的目的。只有两种技术同时发展,才能真正提高控制系统可靠性。

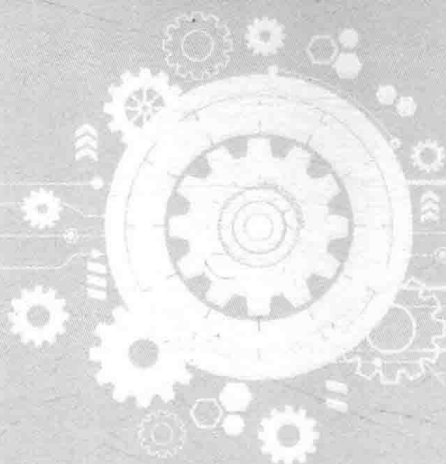
电机正朝着结构简单,成本低廉,高功率密度,调速定位性能良好,



高可靠性,便于控制与维护等方向发展。而目前电动机故障诊断在方法上仍停留在“设置故障→采集样本→数据分析→特征提取→形成方法”的以归纳经验知识为主的阶段,亟须完善与提高电机故障诊断技术理论的研究。

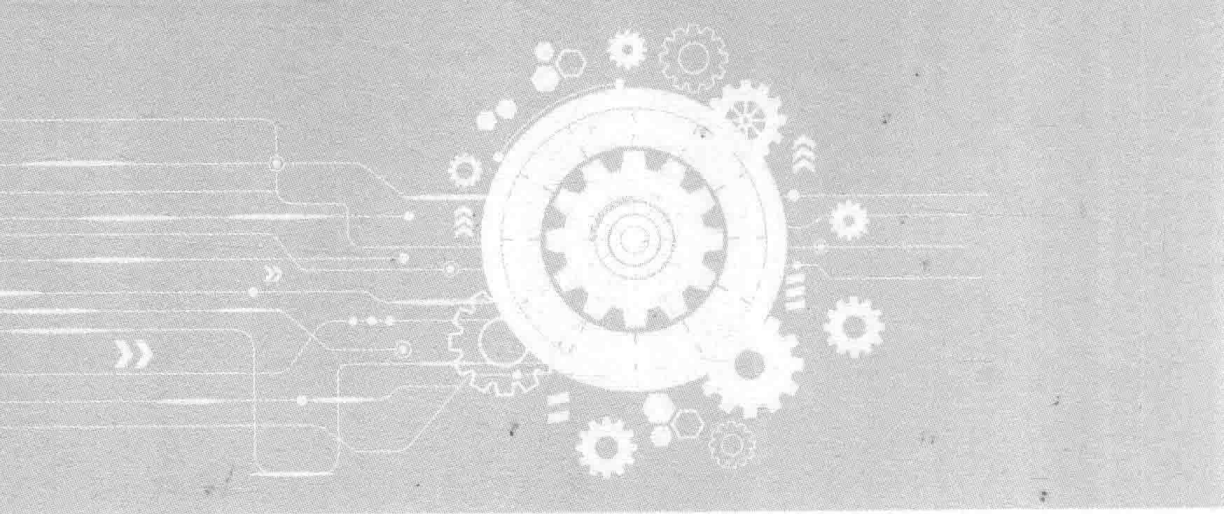
本书针对电机常见的绕组匝间短路故障、逆变器故障、气隙偏心故障的诊断方法进行研究,在对故障机理深入分析基础上,提出较为完善的诊断方法,希望在电机运行系统性能未大幅度变差或尚未达到故障极限时,能及时正确检测与诊断出故障详情。

全书共五章内容:第1章为绪论,给出了故障诊断技术定义、基本环节与所需技术,从不同角度对电机进行归类,分析了电机常见故障产生原因,综述了常见故障的现有诊断及存在问题、发展方向;第2章介绍电机绕组匝间短路故障诊断方法,主要包括对称分量法、Park 矢量法及其扩展法、负序阻抗分析法、振动信号分析法、模糊逻辑推理与神经网络智能诊断法、局部放电法、数学模型辨识法、轴向磁通检测法、三相电流相位差法、混合检测法等,并以开关磁阻电机为例详细阐述了定子绕组匝间短路故障机理分析、故障特征量提取、诊断算法实现与验证的整个过程;第3章介绍电机驱动系统中最薄弱环节——逆变器常见故障诊断技术,深入分析了逆变器主功率管开路与



短路故障机理及现有诊断方法,包括基于解析模型法、基于信号处理法、基于经验知识法,其中详细阐述了常见的基于电流信号与电压信号分析的逆变器故障诊断法,并以不对称半桥结构功率变换器为例讲述了主功率开关器件开路与短路故障机理、故障特征量提取、诊断算法实现;第4章介绍了电机气隙偏心故障诊断方法,在概述气隙偏心故障机理与类型的基础上,深入分析了电流信号频谱分析法、机械振动信号分析法、电流振动双信号分析法、磁场分析法在气隙偏心故障诊断中的应用,并仍以开关磁阻电机为例提出基于非励磁相电流差值的气隙偏心综合诊断方法;第5章介绍了新能源汽车电机驱动系统常见故障与容错技术,分析了直流电机、感应电机、开关磁阻电机、永磁电机作为新能源汽车驱动电机的优缺点,并提出新能源汽车驱动电机性能要求,详细阐述了新能源汽车容错技术常用的三种方案——容错型电机、容错型功率变换器、容错控制策略,同时介绍一种定子绕组分裂式开关磁阻容错驱动电机及其新型功率变换器拓扑结构。本书在内容安排上力求深入浅出,理论与实际应用并重,对每种故障诊断均配以实例讲解,以便读者能够更好地掌握故障诊断技术研究方法与流程。

本书是作者近几年在河北科技大学孙鹤旭教授、河北工业大学董砚教授帮助与支持下,在该领域研究工作的结晶,同时综合并参考了国



内外相关学科领域发展动态与研究成果。本书部分内容来源于天津市自然科学基金项目“开关磁阻电机功率变换器故障检测与容错控制方法的研究”（合同编号：16JCQNJC04200）的研究成果，并得到该项目与天津商业大学国家自然科学基金培育项目资助。

鉴于作者水平有限，书中错误与不妥之处在所难免，恳切希望读者给予批评指正。

作者

2018年1月于天津

· 目录 ·

第1章	绪论	001
1.1	故障诊断技术	001
1.1.1	诊断的定义	001
1.1.2	诊断的基本环节与技术	002
1.2	电机分类	002
1.2.1	按工作电源分类	002
1.2.2	按工作原理分类	003
1.2.3	按运行转速分类	003
1.2.4	其他分类方式	005
1.3	电机故障种类	005
1.3.1	常见故障原因	005
1.3.2	常见故障分类	006
1.4	常见电机故障诊断方法	008
1.4.1	电机故障诊断方法分类	009
1.4.2	主要存在问题	015
1.4.3	研究发展方向	016
1.5	本书主要研究内容	017
	参考文献	018
第2章	电机绕组匝间短路故障诊断方法	020
2.1	对称分量法	021
2.1.1	传统对称分量法	021
2.1.2	瞬时对称分量法	022
2.1.3	实例分析	023

2.2	Park 矢量及其扩展法	037
2.2.1	传统 Park 矢量法	037
2.2.2	Park 扩展法	039
2.3	负序阻抗分析法	039
2.3.1	负序阻抗	039
2.3.2	基于负序阻抗法故障诊断	040
2.3.3	诊断流程	042
2.4	振动信号分析法	043
2.4.1	振动信号	043
2.4.2	振动信号相关分析	043
2.5	人工智能法	045
2.5.1	基于模糊逻辑推理故障诊断系统	045
2.5.2	基于神经网络的故障诊断系统	055
2.6	其他检测方法	060
2.6.1	局部放电法	060
2.6.2	数学模型辨识法	063
2.6.3	轴向磁通检测法	063
2.6.4	三相电流相位差法	064
2.6.5	混合检测法	065
2.7	本章小结	074
	参考文献	076
第 3 章	逆变器故障诊断方法研究	082
3.1	逆变器故障机理与研究意义	082
3.2	逆变器故障分类	083
3.2.1	按电路结构分类	083

3.2.2	按故障性质分类	084
3.2.3	常见故障总结	084
3.3	现有诊断方法分析	085
3.3.1	现有诊断方法概述	085
3.3.2	基于电流分析的逆变器故障诊断法	090
3.3.3	基于电压分析的逆变器故障诊断法	100
3.3.4	诊断方法比较	102
3.4	实例分析	103
3.4.1	现有成果分析	103
3.4.2	功率变换器主功率管短路故障分析	105
3.4.3	功率变换器主功率管开路故障分析	107
3.4.4	故障特征量的提出及检测技术的研究	107
3.5	本章小结	125
	参考文献	126
第4章	气隙偏心诊断方法研究	133
4.1	气隙偏心故障与研究意义介绍	133
4.2	气隙偏心类型	134
4.3	现有诊断方法分析	134
4.3.1	基于电流信号频谱分析的偏心故障诊断方法	135
4.3.2	基于机械振动信号分析的偏心故障诊断方法	137
4.3.3	基于电流振动双信号分析的偏心故障诊断方法	138
4.3.4	基于磁场分析的偏心故障诊断方法	139
4.4	实例分析	140
4.4.1	各类偏心故障机理分析	140
4.4.2	基于非励磁相电流差值的气隙偏心故障综合诊断方法	158

4.4.3	诊断方法性能评价	177
4.5	本章小结	178
	参考文献	179
第5章	新能源汽车电机驱动系统常见故障与容错技术	185
5.1	电动汽车常用驱动电机	186
5.1.1	直流电机	186
5.1.2	感应电机	187
5.1.3	开关磁阻电机	187
5.1.4	永磁电机	188
5.1.5	四类驱动电机性能比较	189
5.2	电动汽车电机驱动系统故障类型	190
5.3	电动汽车容错电机驱动系统	190
5.3.1	容错型电机	191
5.3.2	容错型功率变换器	195
5.3.3	容错控制策略	196
5.4	新能源汽车容错电机驱动系统设计与实现	198
5.4.1	定子绕组分裂式开关磁阻电机模型	198
5.4.2	定子绕组分裂式开关磁阻电机驱动系统控制方案	200
5.4.3	仿真分析与实验验证	204
5.5	本章小结	207
	参考文献	207

第 1 章 绪论

近年来,全球市场中电动机的种类与数量大幅度上升。据 2012 年统计数据,全球电动机市场大约是 163 亿美元,估计后续 5 年内其数量增长将在 50% 以上^[1]。电动机应用范围广泛,大到航空航天、制造业系统、工业生产、运输业、交通汽车、建筑物空调系统、家用电器、能源转换系统等不同电气设备驱动、冷却系统,小到手机振动系统、医疗手术系统。可以说,在人类日常生活中,电动机无处不在。然而电机运行环境复杂,即便经常进行维护检修,也难以避免因设备老化等原因引起的各种故障。电机本身造价成本较高,尤其对于工业系统中的大型电机,其价格更为昂贵。

本书中所述电机均表示电动机。



1.1 故障诊断技术

1.1.1 诊断的定义

“诊断”一词源于医学,各学科诊断技术都是从医学诊断技术移植而来。故障诊断技术始源于 20 世纪 50~60 年代,随着计算机技术、电力电子技术、传感器技术、信息融合技术的不断革新,故障检测技术也飞速发展,已形成一门新兴学科,被称为“技术诊断学”,或被称为“工程诊断学”。诊断技术不仅仅限于单方面知识领域,而是涉及多方面知识领域,加之对故障设备故障机理的研究而形成一门科学技术。该门技术必须以研究设备故障产生机理、恶化过程为前提,通过采用对各状态参数的检测与分析、故障程度的检测与分析、性能强度的检测与分析等各种方法,综合分析



判断出故障运行状态, 诊断出故障位置与故障程度, 为采取合适有效的容错控制方案或修复方案奠定基础。

1.1.2 诊断的基本环节与技术

故障诊断技术的内涵包括四个基本环节与四项基本技术。“四个基本环节”分别为检测故障发生、诊断故障类型、定位故障部位、分析故障程度; “四项基本技术”为检测技术、信号处理技术、识别技术、预测技术^[2]。作为一个综合性的研究领域, 故障诊断技术具有一个明显特点, 即开放性。从近年来的研究成果可见, 人工智能技术、互联网技术、大数据技术等新型领域研究成果也不断被引入故障诊断技术之中, 而这也是故障诊断技术今后发展的又一方向。故障诊断技术只有不断融合新型技术与其他领域研究成果, 才能促进该领域萌发技术革新, 才可使得其更有效地服务于各个领域的运行设备之中, 才能使其顺应当下科学技术水平的飞快发展。



1.2 电机分类

以电磁感应为基础的机电能量转换或是信号转换的机械装置称为电机。电机种类繁多, 随着工业发展需求水平的提高, 新型电机不断问世, 增加了电机研究领域的复杂性与难度。但具有相同特性的电机种类, 在模型建立、控制驱动、性能优化、故障诊断与容错技术等方面研究中可采取相同或相近方法。因此, 可采用不同方式对电机进行分类。

1.2.1 按工作电源分类

按照工作电源种类划分, 电机可分为直流电机与交流电机两大类, 如图 1.1 所示。其中, 根据碳刷的有无, 直流电机又分为有刷直流电机、无刷直流电机。有刷直流电机包括永磁型与电磁型; 交流电机根据相数分为单相电机与三相电机。

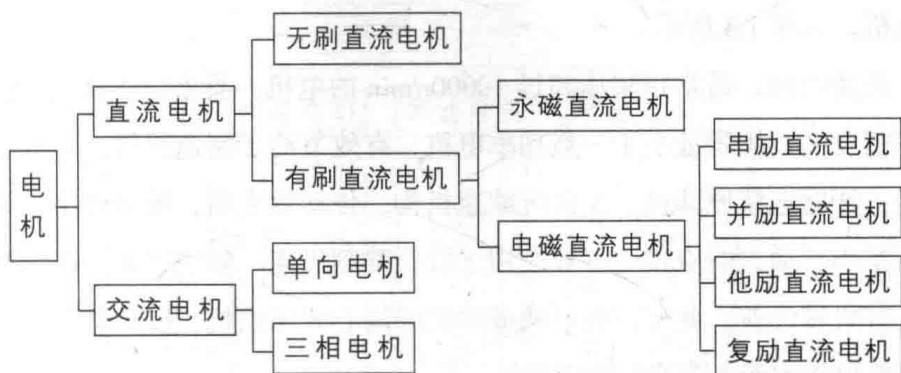


图 1.1 按照工作电源种类，电机分类

1.2.2 按工作原理分类

按照工作原理划分，电机可分为同步电机与异步电机两类，如图 1.2 所示。其中，同步电机包括永磁型、磁阻型、磁滞型；异步电机包括感应电机与交流换向器电机。

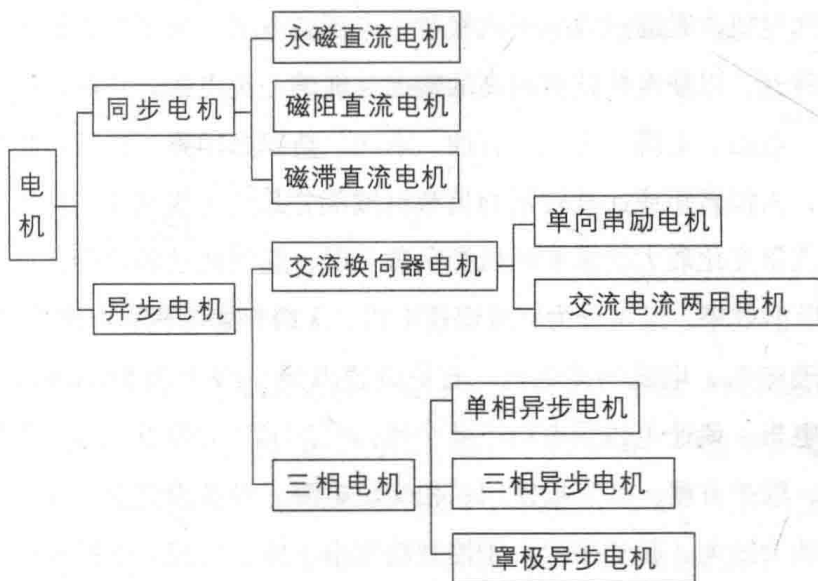


图 1.2 按照工作原理，电机分类

1.2.3 按运行转速分类

按照运转速度划分，电机可分为高速电机、低速电机、恒速电机、调



速电机,如图 1.3 所示。

高速电机,通常指转速超过 10000r/min 的电机,具备以下优点^[3]:①功率密度高,体积远小于一般功率电机,有效节约了制造材料,降低经济成本;②能连接原动机,无传统减速机构,传动效率高,噪声较小;③转动惯量小,动态响应快。一般应用于数控雕刻机床、精密磨床、高速离心设备等机械设备。此外,在空调或冰箱的离心式压缩机、混合动力汽车、燃气轮机等方面也有广阔应用场景。

低速电机又可分为齿轮减速电机、电磁减速电机、力矩电机和爪极同步电机等。以齿轮减速机为例,是一种应用较为广泛的 YE 系列低速电机,其特点为:体积小、噪声低、免维护、外形美观,转速为 0.83rmin~300rmin^[4]。该系列低速电机,作为新一代高科技产品,是在电机的内部将电磁驱动部分与减速机构部分融合为一体。由于其转速低、扭矩大,可以直接地满足客户使用需求,所以不需增加额外减速装置,使体积减小,成本降低。

调速电机,是通过改变电机级数、电压、电流、频率等参数的方法改变电机转速,以使电机达到较高的输出性能的一类电机。目前,已广泛用于钢铁、电站、电缆、化工、石油、水泥、纺织、印染、造纸、机械等工业领域,为恒转矩或递减转矩的负载机械部分起到无级调速的作用。尤其适用于流量变化较大的泵和风机类负载工况,起到托动的作用,可以获得良好的节能效果。又可分为有级恒速电机、无级恒速电机、有级变速电机、无级变速电机、电磁调速电机、直流调速电机、PWM 变频调速电机、开关磁阻电机。调速电机具有以下几个优点^[5]:①结构简单,运行稳定,使用可靠,维护方便;②直接使用三相交流电源,设备投资少;③起动性能好,起动力矩大,起动平滑;④控制功率小,便于自控、遥控和群控;⑤调速精度高,调速范围广,无失控区。常见的调速方式包括变级对数调速、变频调速、串级调速、绕线式调速、调压调速、电磁调速、耦合器调速。

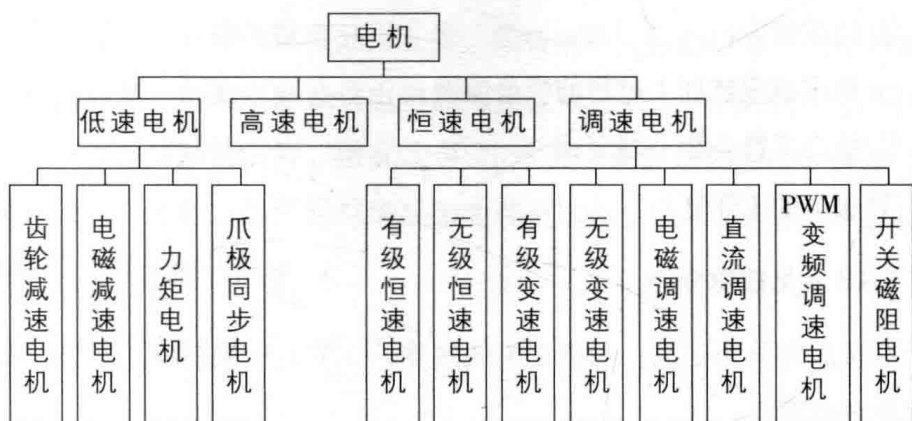


图 1.3 按照运转速度划分, 电机分类

1.2.4 其他分类方式

按照起动与运行方式, 电机可分为电容起动式单相异步电机、电容运转式单相异步电机、电容起动运转式单相异步电机、分相式单相异步电机。

按照转子结构划分, 可分为鼠笼型异步电机、绕线型异步电机。

此外, 电机还可分为电磁型与非电磁型电机, 电磁型电机包括直流电机、交流电机、步进电机, 非电磁型电机包括超声波电机、压电执行器、磁致伸缩执行器、静电执行器。



1.3 电机故障种类

1.3.1 常见故障原因

从结构上来说, 电机系统由机械与电气两部分构成。机械部分一般包括定子、转子、定子绕组、转子磁铁、轴承、齿轮箱, 一些特种电机结构除外。电机长期工作于外部恶劣环境之中, 机械、电气、主要外围设备部分均会发生不同程度、不同类型故障。即使具备一定容错能力的特种电机, 经长时间工作也难免出现故障。电机出现故障往往有以下几点原因^{[1][6]}:

- ① 电器元件超过标准使用寿命;
- ② 电压、电流幅值超过保护电路设置数值;
- ③ 供电电源电压或电流不稳定;



- ④ 负载过大;
- ⑤ 机械制造或加工过程的残余应力;
- ⑥ 检修不符合相关规定;
- ⑦ 恶劣的工作环境。

1.3.2 常见故障分类

电机故障分为三类：一类是电气故障，二类是机械故障，三类是外围驱动系统故障。

常见的电气故障主要包括：① 定子、转子绕组开路或短路；② 导线连接阻抗过大；③ 接地不良。

常见的机械故障：① 转子磨损或断条；② 磁铁破损；③ 转轴弯曲；④ 轴承故障；⑤ 齿轮箱故障；⑥ 气隙偏心。

外围驱动系统故障包括：① 逆变系统故障；② 供电电源不稳定；③ 电源线路短路或开路。

在各类故障中，机械故障占电机总体故障的 80%，而轴承故障大约又占整个机械故障的 40%，定子相关故障约占 38%，转子相关故障约占 10%^[1]。

此外，短路与开路故障为常见电气故障之一。电机多个部位都有发生短路与开路故障的潜在可能性。表 1.1 与表 1.2 将有可能发生短路、开路故障的部位进行了详细的总结。其中，短路故障类型如表 1.1 所示，开路故障类型如表 1.2 所示。

表 1.1 短路故障类型总结

序号	短路故障类型描述	序号	短路故障类型描述
①	上（或下）功率管短路	②	上（或下）二极管短路
③	全相短路（功率变换器内）	④	部分绕组匝间短路
⑤	一极绕组全部短路	⑥	全相短路（电机本体内）
⑦	直流母线与全相绕组间短路	⑧	直流母线与部分相绕组间短路
⑨	部分绕组对地短路	⑩	全相绕组对地短路
⑪	供电电源短路		