

# 电机理论与电磁场仿真分析

邱洪波 著

重庆大学出版社

## 内容提要

电机是进行电能生产、使用和电能特性变换的装置,是工业、农业、交通运输、国防及人们日常生活中常用的重要设备。

本书是作者结合工程实践、科学研究以及相关教学的总结,共分为8章,涵盖了电机工程实践环节的设计、仿真以及相应的研究成果,全书由工程仿真的具体案例和作者发表的论文组成。

本书适合工科电气工程、电机与电器方向的老师和学生科研教学使用,可以作为电机设计者、开发者、电气工程师以及从事电机技术领域科研人员的参考书籍。

### 图书在版编目(CIP)数据

电机理论与电磁场仿真分析 / 邱洪波著. -- 重庆 :  
重庆大学出版社, 2022.4

ISBN 978-7-5689-3224-0

I. ①电… II. ①邱… III. ①电机学②电磁场—计算  
机仿真 IV. ①TM3②O441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第059677号

## 电机理论与电磁场仿真分析

DIANJI LILUN YU DIANCICHANG FANGZHEN FENXI

邱洪波 著

策划编辑:杨粮菊

责任编辑:文鹏 版式设计:杨粮菊

责任校对:谢芳 责任印制:张策

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:[fxk@cqup.com.cn](mailto:fxk@cqup.com.cn) (营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

\*

开本:720mm×1020mm 1/16 印张:14.75 字数:212千

2022年4月第1版 2022年4月第1次印刷

ISBN 978-7-5689-3224-0 定价:88.00元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换  
版权所有,请勿擅自翻印和用本书  
制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 前言

电机作为机电能量转换的重要装置,是电气传动的基础部件,具有应用领域广泛、产品品种众多、规格繁杂等特点。作为工业社会中的基础产品,电机几乎渗透到了国民经济的各个领域,已经成为工业、农业、国防建设以及人民生活正常进行的重要保证。为了进一步提升工业生产运行的可靠性,需要对各类电机产品的运行性能进行计算分析。本书结合工程实践经验,尽可能详细地展示各类电机产品的仿真计算流程,对电机的性能参数进行分析,给出各类电机产品在设计分析过程中的一般规律,为电机设计提供参考。

本书内容力求反映作者多年来在电机领域中的工程实践、科学研究以及相关的教学成果。全书共分为8章。第1章论述了电机的发展历史及现状,对电机常用材料、电磁场仿真技术等进行了介绍。第2章、第3章介绍了感应电机的基本理论,给出了感应电机仿真分析方法及具体过程,并将有限元计算结果与实验数据进行了对比,在此基础上,对感应电机分裂绕组进行了重点分析与研究。第4章、第5章围绕永磁电机进行了性能仿真计算,结合有限元计算

方法分析了材料对电机性能的影响,并对分数槽集中绕组永磁电机的电抗参数特殊性展开了研究。第6章、第7章结合实验数据对自启动永磁电机的性能进行了计算与分析,研究了电机不同绕组设计参数以及电压不平衡对电机性能的影响。第8章针对轴径向磁通混合励磁电机性能进行了分析和优化,重点研究了电机调磁敏感性因素。

本项研究工作得到了“国家自然科学基金项目”(编号U2004183)、“河南省科技攻关项目”(编号202102210100)、“郑州轻工业大学重点学科建设资助项目”的资助,在此表示衷心的感谢。本书在撰写过程中,还得到了研究生梁广川、朱志豪、何坤、张钰清、王坤、刘紫阳、于文超、马晓璐、张凯、胡凯强、张书博的协助,没有他们的帮助,本书难以及时完成,因此从某种意义上说,他们也是本书的作者。

本书在写作过程中参考了大量的文献资料,对引用的资料已尽可能地列在本书最后,但其中难免有遗漏,在此特向被漏列参考文献的作者表示歉意,并向所有作者表示诚挚的感谢。由于作者的学识有限且时间紧迫,书中内容难免有局限、欠缺、疏漏、不当和错误之处,敬请有关专家和各位读者对本书给予批评、指正。

编者

2021年12月

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                    | 1  |
| 1.1 电机概况及发展方向 .....               | 1  |
| 1.2 电机发展简史 .....                  | 15 |
| 1.3 电机电磁场仿真技术 .....               | 21 |
| 第 2 章 感应电动机理论分析基础 .....           | 27 |
| 2.1 感应电动机的概述 .....                | 27 |
| 2.2 感应电动机基本运行原理 .....             | 37 |
| 2.3 感应电动机的电磁转矩及机械特性<br>.....      | 41 |
| 2.4 感应电动机工作特性 .....               | 43 |
| 第 3 章 感应电动机瞬态电磁场建模与仿真<br>分析 ..... | 46 |
| 3.1 项目创建与模型建立 .....               | 47 |
| 3.2 参数设置 .....                    | 54 |
| 3.3 电机仿真结果分析 .....                | 62 |
| 3.4 实验与仿真数据对比分析 .....             | 69 |
| 3.5 感应电机分裂绕组的设计与分析<br>.....       | 70 |
| 第 4 章 永磁电机理论分析基础 .....            | 81 |
| 4.1 概述 .....                      | 81 |
| 4.2 永磁电机结构组成 .....                | 84 |
| 4.3 永磁电机运行理论 .....                | 90 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第5章 永磁电机瞬态电磁场分析 .....                 | 99  |
| 5.1 项目创建与模型建立 .....                   | 99  |
| 5.2 参数设置 .....                        | 107 |
| 5.3 永磁电机电磁特性分析 .....                  | 114 |
| 5.4 永磁电机损耗计算与分析 .....                 | 121 |
| 5.5 永磁电机空载反电动势计算与分析<br>.....          | 122 |
| 5.6 转子铁芯材料特性对电机性能的影响<br>分析 .....      | 124 |
| 5.7 电机交直流电抗分析 .....                   | 130 |
| 第6章 自启动永磁同步电动机理论基础与<br>电磁场仿真 .....    | 140 |
| 6.1 自启动永磁同步电动机概述 .....                | 140 |
| 6.2 自启动永磁电机的转子特点与工作<br>原理 .....       | 144 |
| 6.3 自启动永磁电机瞬态电磁场建模与<br>仿真分析 .....     | 149 |
| 第7章 自启动永磁电机性能计算与分析<br>.....           | 167 |
| 7.1 绕组匝数对自启动永磁同步电机性能<br>的影响研究 .....   | 167 |
| 7.2 绕组连接方式对自启动永磁同步电机<br>性能的影响研究 ..... | 178 |
| 7.3 电压不平衡对自启动永磁同步电机<br>性能的影响研究 .....  | 184 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第 8 章 轴径向磁通混合励磁电机性能分析与<br>优化 ..... | 193 |
| 8.1 混合励磁电机概述 .....                 | 193 |
| 8.2 轴径向磁通混合励磁电机电磁场分析<br>.....      | 203 |
| 8.3 轴径向磁通混合励磁电机调磁敏感<br>因素分析 .....  | 209 |
| 参考文献 .....                         | 220 |

# 第 **1** 章

## 绪 论

---

### 1.1 电机概况及发展方向

#### 1.1.1 电机的定义

广义角度,电机泛指所有进行电能生产、传输、使用和电能特性变换的机械或装置,是工业、农业、交通运输、国防及日常生活中常用的重要设备。

电机学中所说的电机,是指依靠电磁感应原理而运行的电气设备,用于机械能和电能之间的转换、不同形式电能之间的变换,或者信号的传递与转换。这种定义更加注重理论体系,重点在于电磁感应理论在电机中的应用,因此涵盖了变压器、直流电机、异步电机、同步电机等内容。

通常所谓的电机,主要指利用电磁感应原理能够持续进行机电能量转换的电气设备,例如各种类型的发电机、电动机等。

### 1.1.2 电机的作用和地位

在自然界各种能源中,电能具有大规模集中生产、远距离经济传输、智能化自动控制的突出特点,它不但成为人类生产和生活的主要能源,而且对近代人类社会的发展起到了重要的推动作用。作为电能生产、传输、使用和电能特性变换的核心装备,电机在现代社会各行业和部门中发挥着重要作用,主要包含以下四个方面:

#### (1) 用于电能的生产、传输和分配

产生电能的方式有很多,绝大部分都需要用到发电机,而电能的传输和分配离不开变压器。发电机和变压器是发电厂和变电站的主要设备,而发电机和变压器都属于电机,所以说电机是电能生产、传输和分配的主要设备。

#### (2) 驱动各种生产机械和设备

在各种工业企业中,绝大多数都要用电动机作为原动机驱动各种生产机械设备,只要是需要转动的机械和装置,基本都需要电动机进行驱动。

#### (3) 用于自动控制系统中的执行结构

控制电机的应用范围十分广泛,从与人们生活密切相关的家电产品到办公机械的自动控制系统;从机床加工过程的自动控制到火炮、舰船、飞机的自动操作等都需要用到各种各样的控制电机类元件及其机电结合体。

#### (4) 用于实现预定功能的机电一体化系统

随着电机的发展,现代电机逐渐成为机电一体化系统,除了提供动力、实现运动控制外,还有自适应、自学习、自保护等功能,不再只是一个简单独立的部分。

电机的地位可以根据电机的作用来体现,单从驱动各种生产机械和设备来

看,电机在各类工业生产中是不可或缺的。一个现代化的大中型企业,通常要装备几千乃至几万台不同类型的电动机,各个现代化工业的运转都离不开电机,电机在国民经济中占有十分重要的地位。

此外,机电设备的消费与经济发展水平密切相关,西方发达国家每个家庭平均拥有 80 ~ 130 台微特电机,我国大城市家庭平均拥有量大约为 30 ~ 60 台。家庭生活中很多地方都会用到电机,例如空调、冰箱、洗衣机、油烟机、电扇、吸尘器、电动剃须刀、电吹风、豆浆机、破壁机、空气净化器、洗碗机、电动牙刷等电器,拥有电机的数量也在一定程度上反映了家庭生活水平。电机发展到今天,早已成为提高生产效率和科技水平以及提高生活质量水平的主要载体之一。

除此之外,还可以通过电机在电力系统中的应用来概括电机的地位,电力系统中有五个主要环节分别为发、输、变、配、用,电机至少要占到四个环节(发、变、配、用)。电力系统中的发电环节需要用到发电机,发电厂是电能生产的源头,它的作用主要是实现煤炭、水力等一次能源向电能的转化。我国的主要发电形式是火力发电和水力发电,这都需要汽轮机或者水轮机带动发电机进行发电,发电机是电力系统中发电环节的重要设备;在变电和配电的过程中需要用到变压器,电力变压器分为升压变压器和降压变压器,变压器可以使电能经济高效地传输和使用,电机在电力系统中发挥的作用如图 1.1 所示。

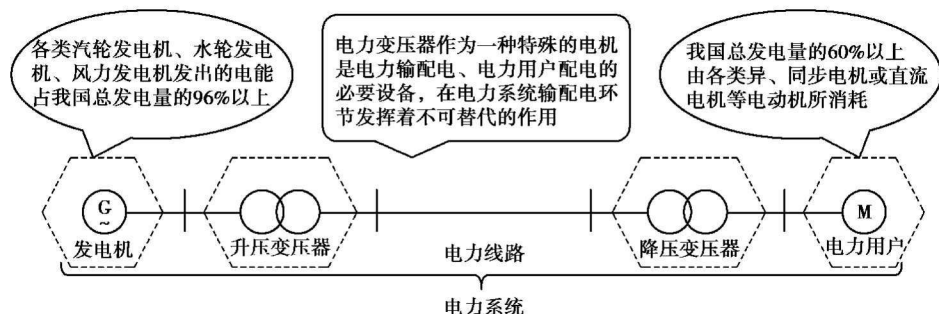


图 1.1 电机在电力系统中的作用

总之,无论从电机的作用还是从电力系统来分析,电机在人们的日常生活、国民经济、国防以及科技领域中都起着无可代替的作用,电机已成为电力工业

的基础以及支撑现代生活的重要支柱。

### 1.1.3 电机的分类

电机应用广泛、种类繁多、性能各异,分类方法也很多。不同的分类原则,对应不同的电机类别。大部分电机学教材都从电机理论体系上进行分类,首先按照运动状态可以分成静止和运动两类,静止的有变压器,运动的有直线电机和旋转电机;对于旋转电机,按照电源性质又可分为直流电机和交流电机两种;而交流电机按照运行速度与频率的关系又可分为异步电机和同步电机两大类,如图 1.2 所示。

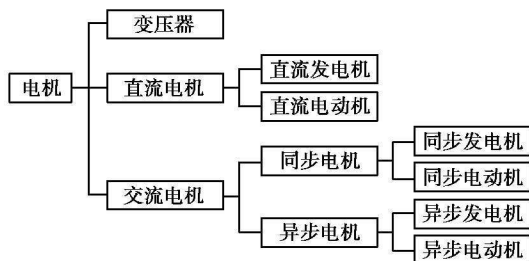


图 1.2 电机的常用分类

该分类方法也充分体现了电机理论学习由简单到复杂的学习过程,由静止的变压器学习到工作原理相对简单的直流电机,最后是电磁场耦合相对复杂的交流电机,大多数电机学教材也是按照这个思路进行编排。除此之外,由于分类方法很多,也很难将分类一一列举,为了方便读者对电机分类有整体了解,本书重点按照电机的输入输出性质、工作原理及结构特点、工作环境及要求进行分类,如图 1.3 所示。

| 电机的分类原则     |                    |                |                  |              |                       |
|-------------|--------------------|----------------|------------------|--------------|-----------------------|
| 输入输出性质      |                    | 工作原理及结构特点      |                  | 工作环境及要求      |                       |
| 能量变换原则      | 发电机、电动机、<br>变压器    | 工作原理           | 同步电机、<br>异步电机    | 冷却形式         | 风冷、水冷、<br>油冷、氢冷       |
| 工作电源相数      | 单相电机、三相<br>电机、多相电机 | 发电机<br>主极结构    | 凸极发电机、<br>隐极发电机  | 防护类型         | 防护式、封闭式、<br>密封式       |
| 电源类别        | 交流电机、<br>直流电机      | 异步电机<br>转子结构   | 笼形转子、绕<br>线式、实心式 | 绝缘材料<br>耐热等级 | A级、E级、B级、<br>F级、H级等   |
| 输出机械形式      | 旋转电机、<br>直线电机      | 直流电机<br>励磁形式   | 并励、串励、<br>复励、他励  | 电机防<br>尘等级   | IP0X—IP6X 级           |
| 输出转速        | 高速电机、低速<br>电机、调速电机 | 电机旋<br>转部件     | 旋转电枢式、<br>旋转磁极式  | 电机防<br>水等级   | IPX0—IPX8 级           |
| 电机容量<br>及尺寸 | 大型电机、中型<br>电机、小型电机 | 同步电机<br>励磁方式   | 电励磁式、<br>永磁体式    | 电机能<br>效等级   | IE1、IE2、IE3、<br>IE4 等 |
| 电压等级        | 高压电机、<br>低压电机      | 永磁电机转<br>子磁路结构 | 表面式、<br>内置式      | 电机安<br>装方式   | 立式、卧式、<br>立卧两用式       |
| 同步电<br>机用途  | 发电机、电动<br>机、补偿机    | 同步电动机<br>工作原理  | 永磁式、磁阻式、<br>磁滞式  | 电机<br>工作制    | S1—S10                |

图 1.3 电机的分类

#### 1.1.4 电机的型号与工作制

##### 1) 电机型号

电机产品型号由产品代号、规格代号、特殊环境代号和补充代号等四个部分组成。它们的排列顺序为：

产品代号—规格代号—特殊环境代号—补充代号。

### (1) 产品代号

产品代号由电机类型代号、电机特点代号、设计序号和励磁方式代号等组成。

①电机类型代号是表征电机的各种类型而采用的字母。

例如:异步电动机 Y;同步电动机 T;同步发电机 TF;直流电动机 Z;直流发电机 ZF。

②电机特点代号表示电机的性能、结构或用途,也采用字母表示。

例如:隔爆型异步电机 YB;轴流通风机用异步电机 YT;电磁制动式异步电机 YE;变频调速式异步电机 YVP;起重机用异步电机 YZD 等。

③设计序号指电机产品设计顺序,用阿拉伯数字表示。对第一次设计的产品,不标注设计序号。

### (2) 规格代号

规格代号采用中心高(毫米)、机座号、机座长度、铁芯长度、功率、转速、极数、频率等参数表示。

①中心高( $H$ )表示电机轴心到机座底角面的高度;根据中心高的不同可以将电机分为大型、中型、小型和微型四种; $H$  在 45 ~ 71 mm 的属于微型电动机; $H$  在 80 ~ 315 mm 的属于小型电动机; $H$  在 355 ~ 630 mm 的属于中型电动机; $H$  在 630 mm 以上的属于大型电动机。

②机座长度用国际通用字母表示:S—短机座;M—中机座;L—长机座。

③极数分 2 极、4 极、6 极、8 极等。

### (3) 特殊环境代号有如下规定:

高原用 G;

船海用 H;

户外用 W;

化工防腐用 F;

热带环境用 T;

湿热带环境用 TH;

干热环境用 TA。

如果同时具备一个以上的特殊环境条件,按从上到下的顺序排列。

例如,产品型号为 YB2-132S-4H 的电动机各代号的含义为:

Y:产品类型代号,表示异步电动机;

B:产品特点代号,表示隔爆型;

2:产品设计序号,表示第二次设计;

132:电机中心高,表示轴心到地面的距离为 132 mm;

S:电机机座长度,表示短机座;

4:极数,表示 4 极电机;

H:特殊环境代号,表示船用电机。

## 2) 感应电动机工作制

电机工作制是对电机承受负载情况的说明,包括起动、制动、负载、空载、断能停转以及这些阶段的持续时间和先后顺序。工作制分为以下 10 类:

S1(连续工作制):在恒定负载下的运动时间足以使电机达到热稳定。

S2(短时工作制):在恒定负载下按给定的时间运行。该时间不足以使电机达到热稳定,随后断能停转足够时间,使电机再度冷却到与冷却介质温度之差在 2 K 以内。

S3(断续周期工作制):按一系列相同的工作周期运行,每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段断能停转时间;这种工作制中每一周期的起动电流不会对温升产生显著影响。

S4(包括起动的断续周期工作制):按一系列相同的工作周期运行,每一周期包括一段对温升有显著影响的起动时间、一段恒定负载运行时间和一段断能停转时间。

S5(包括电制动的断续周期工作制):按一系列相同的工作周期运行,每一

周期包括一段起动时间、一段恒定负载运行时间、一段快速电制动时间和一段断能停转时间。

S6(连续周期工作制):按一系列相同的工作周期运行,每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段空载运行时间,无断能停转时间。

S7(包括电制动的连续周期工作制):按一系列相同的工作周期运行,每一周期包括一段起动时间、一段恒定负载运行时间和一段电制动时间,无断能停转时间。

S8(包括变速变负载的连续周期工作制):按一系列相同的工作周期运行,每一周期包括一段在预定转速下恒定负载运行时间和一段或几段在不同转速下恒定负载运行时间(例如变极多速感应电动机),无断能停转时间。

S9(负载和转速非周期变化工作制):负载和转速在允许的范围内非周期变化。这种工作制包括经常性过载,数值可远远超过基准负载。

S10(离散恒定负载工作制):包括不少于4种离散负载值(或等效负载)的工作制,每一种负载的运行时间应足以使电机达到热稳定,在一个工作周期中的最小负载值可为零。

工作制类型除用S1—S10相应的代号作标志外,还应符合下列规定:

对S2工作制,应在代号S2后加工作时限;S3和S6工作制,应在代号后加负载持续率。例如:S2—60 min、S3—25%、S6—40%。

对S4和S5工作制应在代号后加负载持续率、电动机的转动惯量和负载的转动惯量,转动惯量均为归算至电动机轴上的数值。

对S7工作制,应在代号后加电动机的转动惯量和负载的转动惯量,转动惯量均为归算到电动机轴上的数值。

对S10工作制,应在代号后标以相应负载及其持续时间的标称值。

### 1.1.5 电机中常用的材料

电机常用材料包括导电材料、导磁材料、绝缘材料、结构件材料。不同材料

的工作温度、稳定性、散热性能等特性不同,对电机的性能也会产生影响。

## 1) 导电材料

### (1) 绕组

电机绕组用的导电金属主要是高纯度的铜和铝(铝绕组在新中国成立初期由于铜资源相对匮乏而广泛采用)。为适应匝间绝缘的需要,绕组用的铜大多制成表层有绝缘层的导线,称为电磁线。电磁线种类很多,按其截面形状,可分为圆线、扁线和带状导线;按其绝缘层的特点和用途,可分漆包线、绕包线和特种电磁线等。

①漆包线由导体和绝缘层两部分组成,裸线经退火软化后,再经过多次涂漆,烘焙而成。漆包线按照最高允许工作温度分为表 1.1 所示的几个等级。

表 1.1 漆包线绝缘耐温等级

| 耐温等级        | Y  | A   | E   | B   | F   | H   | C    |
|-------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 最高允许工作温度/°C | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | >180 |

电机绕组常用的漆包线见表 1.2。

表 1.2 电机常用漆包线

| 类型      | 耐温等级 | 主要特性  |
|---------|------|---|
| 缩醛漆包线   | E    | 耐刮性、耐热冲击性好,耐水解性较好,但漆膜受卷绕力易产生裂纹  |
| 聚酯漆包线   | B    | 在干燥和潮湿条件下,耐电压击穿性能好;软化击穿性能也好。耐水解性较差,耐热冲击性一般,与聚氯乙烯、氯丁橡胶等含氯高分子化合物不相容     |
| 聚酯亚胺漆包线 | F    | 耐热冲击性能及在干燥和潮湿条件下耐电压击穿性能好。软化击穿性能较好,但在含水密封系统中易水解,与聚氯乙烯、氯丁橡胶等含氯高分子化合物不相容 |

续表

| 类型       | 耐温等级 | 主要特性   |
|----------|------|--|
| 聚酰胺亚胺漆包线 | H    | 耐刮性、耐热性、耐腐蚀、耐热冲击、软化击穿性能以及在干燥和潮湿条件下耐电压、击穿性能好,但与聚氯乙烯、氯丁橡胶等含氯分子化合物不相容   |
| 聚酰亚胺漆包线  | H    | 耐热性、耐热冲击及软化击穿性能好;耐低温性、耐辐射性好;耐溶剂及化学腐蚀性好,但耐碱性差,在含水密封系统中易水解,漆膜受卷绕力易产生裂纹 |

②绕包线可分为玻璃丝包线、薄膜绕包线和纸包线。

a. 玻璃丝包线是用无碱玻璃丝绕在裸导线或漆包线上,并经胶粘绝缘漆浸渍烘焙而成。

b. 薄膜绕包线主要有聚酯薄膜绕包线、聚酰亚胺薄膜绕包线和玻璃丝包聚酯薄膜绕包线。

c. 纸包线主要有普通纸包线,常用于油浸变压器线圈;耐高压的云母纸包线和耐高温的聚芳酰胺纸包线,主要用于大型高压电机的绕组。

③特种电磁线是用于某种特殊环境的导线。例如,漆包铜导体聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线,绞合铜导体聚乙烯绝缘尼龙护套耐水绕组线,耐冷却剂漆包线和中频绕组线等。

## (2) 电源线

电源线在单股或者多股导线上上面包覆一层绝缘材料构成,根据耐温等级确定绝缘材料的型号,根据电流大小确定线径,主要关注导体电阻、耐压、绝缘电阻、老化性、阻燃性等。

电机导电用铜通常选用工业纯铜,导电用铝通常选用含铝 99.5% 以上的工业纯铝。通常情况下,感应电动机(笼型转子感应电动机)转子绕组选用 99.5% 以上的纯铝,目前随着科技工艺的发展,部分感应电动机(笼型转子