

中小旋转电机 设计手册

黄国治 傅丰礼 主编

ZHONGXIAOXUANZHUANDIANJI
SHEJISHOUCE



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

中小旋转电机 设计手册

黄国治 傅丰礼 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

前 言

各种类型的中小旋转电机，大多作为电动机用以驱动各种机械设备的动力，广泛用于工业、农业和国民经济各部门以及家用电器中；作为发电机用作移动电源和应急备用电源。

目前我国电机行业正面临着新的机遇和挑战，中小电机的生产企业为适应市场经济和进入国际市场竞争的需要，加快了调整产品结构步伐，正在进行新一代电机产品的设计和国内外市场急需的新产品开发工作。为此，从事电机产品研究、开发和设计、制造的科技人员迫切需要能反映当代电机技术水平的设计手册。

有鉴于此，我们组织了在中小电机设计研究和教学领域内富有成就的资深专家和教授，编写了这本《中小旋转电机设计手册》，以期对电机行业从事产品开发设计的科技人员有所裨益。本手册结合电机生产实际，将电机教科书介绍的基础理论知识实用化，也可供从事电机教学和高等院校相关专业师生参考。

本手册共分12章，第1章为中小旋转电机电磁设计概要；第2章至第7章为各种类型电机设计方法，包括常用的三相异步电动机、单相异步电动机、同步发电机和直流电机，以及近期发展的永磁同步电动机、无刷直流电机；第8章至第10章为电机设计需要进行的机械计算、通风温升计算和噪声计算；第11章和第12章为电机基础标准和电机常用材料及零部件介绍。附录中有各种类型电机的技术条件和技术数据摘要。

本手册内容丰富，取材全面，程序实用，对产品的设计方法有较详细的阐述，并对其理论基础和运行原理也作扼要介绍，较完整地总结了近年来我国在中小电机设计方面的成果。

本书由黄国治教授级高级工程师和傅丰礼博士、教授级高级工程师任主编。参加编写工作的有傅丰礼（第1章、第3章、第9章），黄国治（第2章、第8章、第10章），倪文乞高级工程师（第4章），李明如教授（第5章），游寿康高级工程师（第6章），马志云教授（第

IV 前 言

7 章), 黄坚高级工程师 (第 11 章, 第 12 章), 王继勋工程师 (第 12.5 节)。

编 者

目 录

前言

第1章 中小旋转电机电磁设计

概论 1

1.1 设计技术要求 1

1.1.1 设计原始数据 1

1.1.2 设计过程及内容 1

1.2 主要尺寸 2

1.2.1 利用系数 2

1.2.2 电磁负荷 3

1.2.3 主要尺寸比 4

1.2.4 主要尺寸的确定 4

1.3 绕组 4

1.3.1 绕组构成原理 4

1.3.2 三相交流绕组 6

1.3.3 单相交流绕组 8

1.3.4 直流电枢绕组 8

1.4 气隙磁场、主磁路及感应

电动势 8

1.4.1 空载气隙磁场 8

1.4.2 磁路计算原理 8

1.4.3 励磁磁动势及励磁电流 10

1.4.4 感应电动势 11

1.5 电抗 11

1.5.1 主电抗 11

1.5.2 漏电抗 12

1.6 损耗和效率 13

1.6.1 绕组电阻损耗 13

1.6.2 基本铁损耗 13

1.6.3 风摩损耗 14

1.6.4 杂散损耗 14

1.6.5 效率 15

第2章 三相异步电动机设计 16

2.1 产品发展概况 16

2.2 基本结构 18

2.2.1 典型结构示例 18

2.2.2 定子结构型式 20

2.2.3 转子结构型式 21

2.2.4 绝缘结构 22

2.3 等效电路和相量图 24

2.3.1 转子物理量的折算 24

2.3.2 等效电路 25

2.3.3 相量图 26

2.4 功率、转矩和运行特性 27

2.4.1 功率平衡 27

2.4.2 转矩平衡 28

2.4.3 电磁转矩及转矩特性 28

2.4.4 运行特性 31

2.5 谐波分析及其影响 32

2.5.1 气隙谐波磁场 32

2.5.2 异步附加转矩 36

2.5.3 同步附加转矩 36

2.5.4 杂散损耗 37

2.5.5 电磁噪声 37

2.6 电磁计算步骤 40

2.7 额定数据、主要尺寸及绕组设计 42

2.7.1 额定数据 42

2.7.2 主要性能指标 42

2.7.3 主要尺寸的确定 43

2.7.4 气隙长度 45

2.7.5 槽配合及斜槽 46

2.7.6 定转子槽形及尺寸 48

2.7.7 绕组设计 51

2.8 磁路计算	56	3.5 主绕组设计	131
2.8.1 异步电机的磁路	56	3.5.1 绕组形式选择	131
2.8.2 每极主磁通	56	3.5.2 绕组系数计算	135
2.8.3 各段磁路截面积和磁路 计算长度	57	3.5.3 主绕组串联导体数计算	136
2.8.4 磁通密度和磁位降	59	3.5.4 主相电流估算和线径确 定	138
2.8.5 励磁电流	61	3.5.5 槽满率计算	139
2.9 参数计算	63	3.5.6 线圈平均半匝长	139
2.9.1 线圈平均半匝长	63	3.6 主相参数计算	140
2.9.2 电阻	64	3.6.1 主相绕组电阻	140
2.9.3 漏电抗	65	3.6.2 主相绕组漏抗	140
2.9.4 有效材料用量	75	3.6.3 不考虑饱和的激磁电抗	141
2.10 运行性能计算	76	3.6.4 转子电阻	141
2.10.1 满载电流和电动势	76	3.6.5 转子漏抗	142
2.10.2 损耗	78	3.6.6 总漏抗	143
2.10.3 力能指标和过载能力	79	3.7 磁路计算	143
2.11 起动性能计算	82	3.8 副绕组设计	147
2.11.1 饱和效应	82	3.9 起动性能计算	150
2.11.2 挤流效应	84	3.9.1 不考虑饱和的主绕组起 动性能计算	150
2.11.3 起动参数及性能	88	3.9.2 饱和对参数的影响	150
2.12 计算机辅助设计	94	3.9.3 考虑饱和的主绕组起动 性能计算	151
2.12.1 电机设计中计算机应 用概况	94	3.9.4 副绕组起动性能计算	152
2.12.2 异步电机电磁计算程 序	95	3.9.5 电机起动性能计算	152
2.12.3 电机的优化设计	107	3.10 运行性能计算	153
2.12.4 计算机辅助设计系统	113	3.10.1 基本关系式	153
第3章 单相异步电动机设计	119	3.10.2 电阻起动和电容起动电 动机的性能计算	154
3.1 产品发展概况	119	3.10.3 电容运转和双值电容电 动机的性能计算	156
3.2 基本结构	119	3.10.4 转子电流计算	160
3.3 数学模型	121	3.10.5 负载特性计算	162
3.4 额定数据及主要尺寸	125	3.10.6 机械特性计算	162
3.4.1 额定数据	125	3.11 计算机辅助设计	163
3.4.2 冲片主要尺寸和气隙	125	3.11.1 概述	163
3.4.3 定转子槽数选择	126	3.11.2 软件适用范围	163
3.4.4 定转子槽形选择和相关尺 寸计算	128	3.11.3 软件主要功能	164

第4章 同步发电机设计	166	4.10.2 时间常数及短路电流 倍数	219
4.1 产品发展概况	166	4.11 励磁系统设计	222
4.2 基本结构	168	4.11.1 励磁方式	223
4.2.1 一般结构	168	4.11.2 自动电压调节器	233
4.2.2 定子	170	4.11.3 无刷励磁系统设计	239
4.2.3 转子	172	4.12 单相同步发电机设计	245
4.2.4 通风	174	4.12.1 单相同步发电机的设计 特点	245
4.2.5 绝缘	177	4.12.2 小型单相同步发电机的 励磁方式	252
4.2.6 无刷同步发电机结构	178	第5章 永磁同步电动机设计	259
4.3 额定数据和主要尺寸	179	5.1 永磁材料的基本性能	259
4.3.1 额定数据	179	5.2 永磁同步电动机的基本 结构型式	263
4.3.2 主要尺寸	179	5.3 永磁电机的磁路计算	265
4.4 绕组设计	183	5.3.1 永磁体激励的主磁路计 算原理	265
4.5 磁路计算	188	5.3.2 漏磁导计算基本原理	272
4.5.1 定子铁心磁路计算	188	5.3.3 切向式结构永磁同步电 机的磁路计算	275
4.5.2 凸极转子铁心磁路计算	190	5.4 永磁同步电动机的参数 计算	278
4.5.3 空载磁路计算	192	5.5 永磁同步电动机的稳态 性能和特性计算	281
4.6 稳态参数计算	199	5.6 具有自起动能力永磁同 步电动机的异步起动计 算	284
4.6.1 绕组电阻	199	5.7 永磁同步电动机的电磁 设计特点	286
4.6.2 漏电抗	201	第6章 直流电机设计	291
4.6.3 电枢反应磁动势和电枢 反应电抗	203	6.1 产品发展概况	291
4.6.4 短路比和功角	205	6.2 基本结构	291
4.7 额定负载励磁磁动势和 励磁绕组设计	207	6.3 额定数据和主要尺寸	293
4.7.1 额定负载的励磁磁动势	207	6.3.1 额定数据	293
4.7.2 励磁绕组设计	208	6.3.2 主要尺寸	294
4.8 阻尼绕组设计	211		
4.9 损耗和效率	213		
4.9.1 定子基本铁耗和表面 损耗	214		
4.9.2 电枢绕组和励磁绕组 I^2R 损耗	215		
4.9.3 机械损耗和附加损耗	215		
4.9.4 交流励磁机损耗	215		
4.10 瞬态参数和时间常数	217		
4.10.1 瞬态参数	217		

6.3.3 磁极和气隙	295
6.4 电磁负荷	298
6.5 槽数及槽形	299
6.5.1 电枢槽数的选择原则	299
6.5.2 电枢槽形及尺寸	300
6.5.3 电枢齿尺寸	302
6.6 电枢绕组	302
6.6.1 绕组型式	302
6.6.2 电枢绕组设计	306
6.7 电刷与换向器	307
6.8 补偿绕组	310
6.9 换向性能与换向极	310
6.9.1 换向区域	310
6.9.2 换向极尺寸	311
6.9.3 绕组漏磁导	312
6.9.4 换向极绕组设计	313
6.10 磁路计算	318
6.10.1 气隙磁动势	318
6.10.2 齿部磁动势	319
6.10.3 电枢轭部磁动势	322
6.10.4 主极磁动势	323
6.10.5 机座轭部磁动势	323
6.11 空载特性计算	324
6.12 励磁绕组	327
6.12.1 励磁方式	327
6.12.2 串励绕组设计	327
6.12.3 并(他)励绕组设计	328
6.13 转速变化率	330
6.14 损耗和效率	331
6.15 整流电源供电对电机 设计要求	335
6.15.1 整流电源供电对电机的 影响	335
6.15.2 电机电感计算	336
6.16 机械计算要点	337
6.16.1 主磁极紧固螺栓计算	337
6.16.2 扎带计算	338

6.16.3 换向器计算	338
--------------------	-----

第7章 永磁无刷直流电动机

设计	344
----------	-----

7.1 永磁无刷直流电动机的 工作原理和基本结构	344
7.2 基本公式与特性	346
7.2.1 电枢绕组感应电动势	347
7.2.2 电枢电流	348
7.2.3 电磁转矩	348
7.2.4 转速	348
7.2.5 机械特性	349
7.3 电枢反应	349
7.4 磁路和绕组设计	351
7.4.1 磁路设计	351
7.4.2 绕组设计	351

第8章 机械计算

8.1 定子固有频率	352
8.2 机座	354
8.3 转轴挠度及临界转速	355
8.3.1 转轴受力分析	355
8.3.2 转轴挠度	355
8.3.3 临界转速	358
8.4 轴承寿命	358

第9章 通风温升计算

9.1 电机的通风系统	362
9.1.1 常用的通风系统	362
9.1.2 通风系统的工程算法	363
9.1.3 风扇及其选用	365
9.2 机壳表面冷却电机的通 风计算	371
9.3 内通风系统电机的通风 计算	373
9.4 电机的温升计算	374
9.4.1 热传导及对流散热方程	375
9.4.2 等效热路	377
9.5 机壳表面冷却电机的温	

升计算	377	10.1.4 径向力引起的振动	427
9.5.1 数学物理模型	377	10.1.5 噪声辐射	429
9.5.2 机座散热	378	10.1.6 计算程序框图	434
9.5.3 定子散热	381	10.2 轴承噪声计算	434
9.5.4 转子散热	387	10.3 通风噪声计算	436
9.5.5 热导方程组及其求解	389	第 11 章 电机基础标准	438
9.5.6 计算实例	390	11.1 旋转电机 定额和性能	438
9.6 内通风系统电机的温度场计算	393	11.1.1 工作制和定额	438
9.6.1 求解区域和边界条件	393	11.1.2 运行条件	440
9.6.2 物理数学模型	393	11.1.3 热性能与试验	444
9.7 异步电动机的起动温升计算	395	11.1.4 其他性能和试验	450
9.7.1 起动时间计算	395	11.1.5 其他要求	455
9.7.2 定子绕组起动温升计算	397	11.2 旋转电机 外壳防护分级	458
9.7.3 转子起动温升计算	398	11.2.1 标志	459
9.7.4 允许堵转时间计算	401	11.2.2 表征数字的含义	459
9.7.5 允许起动惯量计算	402	11.3 旋转电机 冷却方法	462
9.7.6 允许起动次数核算	403	11.3.1 表示冷却介质的特征字母	462
9.7.7 计算实例	404	11.3.2 冷却回路布置的特征数字	462
9.8 异步电动机起动时的径向温度场计算	406	11.3.3 冷却介质运动的推动方法特征数字	463
9.8.1 基本假设	407	11.3.4 标记系统	464
9.8.2 热传导基本方程和有限元计算格式	407	11.4 旋转电机结构及安装型式	465
9.8.3 导条损耗分布计算	410	11.4.1 代号 1 的形式及含义	465
9.8.4 计算实例	411	11.4.2 代号 2 的形式及含义	471
9.9 异步电动机起动时的轴向温度场计算	415	11.5 旋转电机尺寸和输出功率等级	471
9.9.1 热传导基本方程和有限元计算格式	415	11.5.1 电机尺寸标志	471
9.9.2 计算实例	419	11.5.2 接线盒位置	471
第 10 章 噪声计算	423	11.5.3 凸缘上孔的位置	471
10.1 电磁噪声计算	423	11.5.4 安装尺寸	472
10.1.1 电磁噪声产生原因分析	423	11.5.5 优先额定输出功率	476
10.1.2 谐波磁场计算	424	11.6 电机线端标志与旋转	
10.1.3 径向力计算	426		

方向	477	12.2 导电材料	508
11.6.1 符号	477	12.2.1 漆包圆绕组线	508
11.6.2 旋转方向	478	12.2.2 漆包扁绕组线	512
11.6.3 不同类型电机的绕组 标志	478	12.2.3 玻璃丝包绕组线	518
11.6.4 线端标志和旋转方向 的关系	479	12.2.4 潜水电机绕组线	521
11.6.5 常用接线图	479	12.3 绝缘材料	523
11.7 起动性能	485	12.3.1 电工纸板和布板	523
11.7.1 设计代号	485	12.3.2 绝缘薄膜复合材料	525
11.7.2 N 设计的起动转矩	485	12.3.3 漆绸和漆布	528
11.7.3 N 设计的堵转视在功率	486	12.3.4 云母带和云母板	532
11.7.4 N 设计的起动要求	486	12.4 零部件	538
11.7.5 NY 设计的起动要求	487	12.4.1 电机用换向器和集电环	538
11.7.6 H 设计的起动转矩	487	12.4.2 电机用电刷尺寸	539
11.7.7 H 设计的堵转视在功率	488	12.4.3 电机用电刷	543
11.7.8 H 设计的起动要求	488	12.4.4 电机用刷握及集电环	544
11.7.9 HY 设计的起动要求	488	12.4.5 恒压刷握	547
11.8 旋转电机 噪声限值	489	12.4.6 中小型笼型三相异步电 动机接线盒	550
11.9 轴中心高为 56mm 及 以上电机的机械振动 —振动的测量、评定 及限值	491	12.4.7 中小型异步电机用接线 板	551
11.9.1 测量量值	491	12.4.8 中小型异步电机用工程 塑料风扇	552
11.9.2 电机安装	492	12.4.9 小型异步电动机用工程 塑料风罩	554
11.9.3 轴承座振动限值	492	12.5 电动机过热保护及测温 元件	554
11.9.4 轴相对振动限值	493	12.5.1 双金属开关式热敏传感 元件	555
第 12 章 电机常用材料及零部 件	495	12.5.2 热敏电阻传感元件	557
12.1 导磁材料	495	12.5.3 热电阻温度传感器元件	560
12.1.1 冷轧晶粒取向、无取向 磁性钢带 (片)	495	12.5.4 热电偶型温度传感器	562
12.1.2 热轧硅钢薄板	497	附录	564
12.1.3 永磁铁氧体材料	499	附录 A 三相异步电动机技术 条件 (摘要)	564
12.1.4 铝镍钴永磁材料	501	A.1 YS 系列三相异步电动机	564
12.1.5 稀土钴永磁材料	504	A.2 Y 系列三相异步电动机	567
12.1.6 烧结钕铁硼永磁材料	505	A.3 Y2 系列三相异步电动机	574
		A.4 Y2-E 系列三相异步电动机	583

附录 B 单相异步电动机技术	
条件 (摘要)	585
B.1 YY 系列电容运转异步电动机	585
B.2 YC 系列电容起动异步电动机	588
B.3 YL 系列双值电容单相异步电动机	591
附录 C 小型同步发电机技术	
条件 (摘要)	594
C.1 有刷三相同步发电机	594
C.2 小型无刷三相同步发电机 ...	598
C.3 小型单相同步发电机	602
附录 D 小型直流电机技术	
条件 (摘要)	606
D.1 Z2 系列小型直流电机	606
D.2 Z4 系列直流电动机	610
D.3 ZSL4 系列 (IP23S) 直流电动机	618
D.4 ZBL4 系列 (IP44) 直流电动机	620
附录 E 三相异步电动机技术	
数据	622
E.1 Y 系列 (IP44) 小型三相异步电动机	622
E.2 Y 系列 (IP23) 小型三相异步电动机	627
E.3 Y2 系列 (IP54) 三相异步电动机	630
E.4 Y2-E 系列 (IP54) 三相异步电动机	639
参考文献	642

第1章 中小旋转电机电磁设计概论

1.1 设计技术要求

1.1.1 设计原始数据

电机设计时通常需要给定下列数据：

(1) 额定功率。发电机为线端输出的电功率 (kW 或 kVA)；电动机为轴上输出机械功率 (kW)。

(2) 额定电压 (V 或 kV)。

(3) 相数及接法 (对交流电机)。

(4) 额定频率 (Hz) (对交流电机)。

(5) 额定转速或同步转速 (r/min)。

(6) 额定功率因数。

(7) 励磁方式及额定励磁电压或电流 (对同步电机及他励直流电机)。

(8) 要求的性能指标。如效率、过载能力、堵转电流、堵转转矩、牵入转矩 (对同步电动机)、电压变化率 (对发电机)、转速变化率 (对电动机)、振动与噪声等。

在进行产品设计前，应根据产品的通用标准、技术条件、用户提出的技术要求，首先确定产品的运行环境条件 (海拔、冷却介质温度等)、工作方式、冷却方式、外壳防护等级、绕组绝缘等级等。

1.1.2 设计过程及内容

首先应根据产品通用标准、技术条件及用户要求确定设计原始数据，然后进行电磁设计和结构设计。电磁设计是根据设计技术要求确定电机的电磁负荷，计算定子、转子冲片和铁心各部分尺寸及绕组数据，进而核算电机各项参数及性能，并对设计数据作必要的调整，直至达到技术要求，提出电磁设计单。结构设计是根据设计技术要求及电磁设计确定的有关数据，确定电机总体结构、零部件尺寸、材料及加工要求，绘制总装图及零部件图，为此必须进行必要的机械计算及热计算，提出全套生产图样。

电机设计一般需要进行多种方案的分析、比较，或采用优化设计方法，以权衡电机性能、运行费用、制造成本、运行可靠性等因素，决定最优的设计。中小型电机生产量大，使用面广，品种规格繁多，一般都成系列设计及制造，设计时应充分考虑标准化、通用化、系列化的要求。

对于多品种小批量生产的电机产品，应重视模块化设计。它侧重于部件级

的标准化,在功能分析、分解的基础上建立模块,以组合成多种产品品种、规格,从而可快速和经济合理地满足用户的不同需求。

1.2 主要尺寸

1.2.1 利用系数

电机利用系数 C 为电机有效部分单位体积、单位同步转速 (或额定转速) 的计算视在功率。

对交流电机

$$C = \frac{S_c}{D_{ii}^2 l_{ef} n_N} \approx 0.116 K_{dp} AB_s \times 10^{-3} (\text{kVA} \cdot \text{min}/\text{m}^3) \quad (1-1)$$

对直流电机

$$C = \frac{S_c}{D_{ii}^2 l_{ef} n_N} \approx 0.164 \alpha_s AB_s \times 10^{-3} (\text{kW} \cdot \text{min}/\text{m}^3) \quad (1-2)$$

式中 D_{ii} ——交流电机定子内径或直流电机电枢直径 (m);

l_{ef} ——交流电机定子铁心有效长度或直流电机电枢长度 (m);

n_N ——交流电机同步转速或直流电机额定转速 (r/min);

K_{dp} ——绕组系数;

A ——线负荷 (A/m);

B_s ——对交流电机为气隙磁通密度基波幅值 (T), 对直流电机为气隙磁通密度最大值 (T);

α_s ——极弧系数;

S_c ——计算视在功率。

对交流电机

$$S_c = mEI_N \times 10^{-3} (\text{kVA})$$

式中 m ——定子相数;

I_N ——定子额定相电流 (A);

E ——满载时定子绕组每相电动势 (V)。如果忽略绕组阻抗压降, 则 $E = U_N$ (额定相电压)。

对直流电机

$$S_c = E_a I_a \times 10^{-3} (\text{kW})$$

式中 E_a ——电枢绕组电动势 (V);

I_a ——电枢绕组电流 (A)。

电机的利用系数反映了材料的利用水平,随着电机冷却技术的发展,材料和工艺水平的提高,电机的利用系数有提高的趋势。直流电机的利用系数约为

$1.5 \sim 5 \text{ kW} \cdot \text{min}/\text{m}^3$ (对应的 S_c/n_N 的范围约为 $10^{-3} \sim 1$)；中小型同步电机的利用系数约为 $2 \sim 6 \text{ kVA} \cdot \text{min}/\text{m}^3$ ；异步电机的利用系数见表 1-1。

表 1-1 异步电机的利用系数 (单位: $\text{kVA} \cdot \text{min}/\text{m}^3$)

冷却及防护型式	内通风冷却 IP23			机壳表面冷却 IP44, IP54
功率范围/kW	20 ~ 100	100 ~ 1000	1000 以上	~ 315
利用系数 C	2.5 ~ 4	3.5 ~ 5	4 ~ 6	1.5 ~ 3

注：采用短距双层绕组的 2 极电机，由于节距短、绕组系数较低，故利用系数低于表列值。

1.2.2 电磁负荷

电磁负荷 A 、 B_δ 值决定了利用系数，直接影响电机的有效材料用量，更为重要的是 A 、 B_δ 值与电机运行参数和性能密切相关。

线负荷 A 表示沿定子（或电枢）圆周上单位长度的安培导体数，即

$$A = \frac{ZN_s I}{\pi D_{11} a} \quad (\text{A/m})$$

式中 I ——绕组电流 (A)；

N_s ——每槽导体数；

Z ——槽数；

a ——绕组并联路数。

对交流电机，气隙磁通密度

$$B_\delta \approx \frac{E}{2\sqrt{2}fWK_{dp}S_\delta} \quad (\text{T})$$

式中 W ——每相串联匝数；

S_δ ——每极气隙面积 (m^2)。

对直流电机，气隙磁通密度

$$B_\delta = \frac{2p\Phi}{\pi D_{11} l_{ef} a} \quad (\text{T})$$

式中 p ——极对数；

Φ ——每极磁通 (Wb)；

a ——平均磁通密度 (对应于每极磁通 Φ) 与最大磁通密度之比。对于正弦气隙磁场分布，其值等于 $2/\pi$ 。

绕组电流密度 J 及热负荷 AJ 直接影响电机绕组用铜量及绕组温升，热负荷表示定子（或电枢）圆周单位表面上绕组电阻损耗，它们都是绕组设计的重要依据。

电磁负荷选择要点：①电机输出功率一定时，提高电磁负荷可缩小电机体积和节省有效材料；②选取较高的 B_δ ，铁心损耗一般将会增加，而绕组电阻损耗通常可降低；③选取较高的 A 或 J ，绕组电阻损耗将增加；④励磁电流标么值

与 B_p/A 成正比, 故选取较高的 B_p 或较低的 A , 励磁电流要增大, 对异步电机, 功率因数将降低; ⑤漏抗标么值与 A/B_p 成正比, 故 B_p 较高或 A 较低时漏抗减小, 电机堵转转矩及过载能力提高, 但堵转电流及短路电流也增大; ⑥直流电机的 A 过高, 电抗电动势将增加, 使换向性能恶化。

各类电机电磁负荷取值范围: 对内通风冷却 IP23 型电机 $A \approx 300 \sim 600 \text{ A/cm}$, $AJ \approx 2000 \sim 3500 \text{ (A/cm)} \cdot \text{(A/mm}^2\text{)}$; 对机壳表面冷却 IP44、IP54 型电机 $A \approx 200 \sim 350 \text{ A/cm}$, $AJ \approx 1000 \sim 2000 \text{ (A/cm)} \cdot \text{(A/mm}^2\text{)}$ 。对异步电机 $B_p \approx 0.6 \sim 0.8 \text{ T}$, $J = 4 \sim 7 \text{ A/mm}^2$ 。

1.2.3 主要尺寸比

主要尺寸比 λ 为交流电机的定子有效长度与极距之比, 而对直流电机常指电枢长度与直径之比。当有效部分体积不变时, λ 值较大的电机较细长, 反之较粗短。

λ 值选择要点: ①高速大型电机的转子直径受转子材料强度限制, 其 λ 值较大, 可达 3~4; ②转动惯量较小的电机, λ 值较大; ③在合理范围内适当选取较大的 λ 值, 可减少绕组端部用铜量及端盖等结构件的材料用量; ④ λ 值较大的电机, 绕组端部铜损耗及漏抗较小, 而槽部铜损耗及漏抗一般较大; ⑤ λ 值过大时, 通风冷却条件变坏, 转子刚性可能较差, 还会增加冲片冲剪、铁心叠压和嵌线的工时, 对直流电机还会使其换向性能变坏。

中小型交流电机的 λ 值一般为 0.5~3。

1.2.4 主要尺寸的确定

主要尺寸指定子铁心外径 D_1 、内径 D_{11} (对交流电机) 或电枢直径 D_a (对直流电机) 以及铁心长度。在已知电机的视在功率及转速情况下, 可借助利用系数的经验值或通过适当地选择电磁负荷, 由式 (1-1) 或式 (1-2) 计算 $D_{11}^2 l_{ef}$ 。然后参考推荐的数据选用适当的 λ 值, 则可由已算得的 $D_{11}^2 l_{ef}$ 分别求得主要尺寸 D_{11} 与 l_{ef} , 再参照定子内外径比的经验值可估算定子外径 D_1 。

对应于系列电机的每一机座中心高, 根据合理利用机座径向空间及考虑硅钢片的合理套裁等要求, 确定合适的定子冲片外径 D_1 。设计时按 D_1 估算值或直接按电机功率及转速, 选定某一中心高的机座及与之相适应的外径。

各类电机的定子外径 D_1 或电枢直径 D_a 与机座中心高的对应关系见下列各章。

1.3 绕组

1.3.1 绕组构成原理

电机绕组要求对称, 即各并联支路具有相同的电动势及阻抗。三相交流绕

组要求各相相轴在空间互差 120° 电角度，并有相同的有效匝数，以保证各相电动势对称（即大小相等、相位互差 120° 电角度）。同时要求绕组感应电动势和产生磁动势的基波分量尽可能大，而谐波分量尽可能小。

交流绕组有多种分类方法，按绕组布置分类，有集中绕组及分布绕组；按相带分类，有 120° 、 60° 、 30° 相带绕组及混相绕组；按每极每相槽数 q 分类，有整数槽绕组及分数槽绕组（ q 为整数或分数）；按槽内线圈边层数分类，有单层绕组、双层绕组及单双层绕组；按线圈形状和端部连接方式分类，有叠绕组、波绕组以及同心式、链式、交叉式绕组。

直流电枢绕组一般按绕组元件与换向片之间连接规律不同而分为叠绕组、波绕组和蛙绕组。

绕组由多个按一定规律连接的线圈构成，每一线圈包括置于槽中的有效部分及端接部分。槽电动势相量星形图是分析绕组的有效方法。设铁心圆周均布 Z 个槽，分别依次编号，在极数为 $2p$ 的正弦分布磁场作用下，各槽线圈感应的电动势相量的时间相位依次间隔 $\alpha = 2p\pi/Z$ 电角度。对于三相电机，可把槽电动势相量星形图中所有相量分为 3、6 或 12 等分，每一等分内有 n_s 个槽电动势相量，它们连续占有的空间电角度（ $n_s\alpha$ ）称为相带，相应地有 120° 、 60° 或 30° 相带。若各相带的某些槽的线圈有规则地改属于另一相，即为混相绕组，它有利于改善电动势或磁动势波形。相带划分见表 1-2。

表 1-2 三相绕组的相带划分（ $p=1$, $Z=24$ ）

槽号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
120°相带	U	U	U	U	U	U	U	U	V	V	V	V
60°相带	U	U	U	U	-W	-W	-W	-W	V	V	V	V
30°相带	U1	U1	U2	U2	-W1	-W1	-W2	-W2	V1	V1	V2	V2
混相	-V	U	U	-W	U	-W	-W	V	-W	V	V	-U
槽号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
120°相带	V	V	V	V	W	W	W	W	W	W	W	W
60°相带	-U	-U	-U	-U	W	W	W	W	-V	-V	-V	-V
30°相带	-U1	-U1	-U2	-U2	W1	W1	W2	W2	-V1	-V1	-V2	-V2
混相	V	-U	-U	W	-U	W	W	-V	W	-V	-V	U

120° 相带绕组在一个相带内槽数 $n_s = Z/3p$ ，用于单相绕组或三相变极多速电机，只能接成双层绕组。 60° 相带绕组 $n_s = Z/6p$ ，是应用最广泛的三相绕组，用于大、中、小容量的各种三相交流电机，可用于整数槽、分数槽，可接成单层、双层、单双层绕组及叠绕相、波绕组、同心式绕组、链式绕组、交叉式绕组等形式。 30° 相带绕组 $n_s = Z/12p$ ，每对极下 12 个相带分为两部分（以注脚 1

或 2 表示), 分别接成三相星形和三角形, 然后以串联或并联方法连接成星—三角混合联结的三相绕组, 这两部分绕组的布置在空间相差 30° 电角度, 而进入绕组的电流相位在时间上也应相差 30° 。

每极每相槽数 q ($q = Z/2pm$) 为整数的绕组是三相 60° 相带整数槽绕组, 其相带划分见表 1-2, 它有 p 个重叠的槽电动势星形图。整数槽双层绕组的最大并联路数 $a_{\max} = 2p$, 所采用的并联路数 a 应满足 $2p/a = \text{整数}$ 。

q 为分数的绕组是三相 60° 相带分数槽绕组, q 值可表示为 $q = b + c/d$ (式中 c 、 d 互为质数)。分数槽绕组相带划分示例见表 1-3, 该表中 $p = 5$ 、 $Z = 36$ 、 $q = 1\frac{1}{5}$, 绕组在一相带内的槽数为有规则的数列 2 1 1 1 1 的循环, 确定这一循环数列便可确定分数槽绕组的相带划分及绕组连接。一般情况下, 一个循环数列共有 d 个数, 其中 c 个是大数, ($d - c$) 个是小数, 大数等于 $(b + 1)$, 小数等于 b , 数列的排列次序可把大数与小数按接近均布的原则互相插入。

表 1-3 分数槽绕组的相带划分 ($p = 5$, $Z = 36$, $q = 1\frac{1}{5}$)

槽 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
所属相带	U	U	-W	V	-U	W	-V	-V	U	-W	V	-U	W	W	-V	U	-W	V
一相带内槽数	2		1	1	1	1		2		1	1	1		2		1	1	1
槽 号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
所属相带	-U	-U	W	-V	U	-W	V	V	-U	W	-V	U	-W	-W	V	-U	W	-V
一相带内槽数	2		1	1	1	1		2		1	1	1		2		1	1	1

设分数槽绕组 p 与 Z 的最大公约数为 t , 则该绕组基本对称条件为 $Z/(t \cdot m) = \text{整数}$ 。最大并联路数 $a_{\max} = 2p/d$ 。

1.3.2 三相交流绕组

常用的三相交流绕组型式有单层同心式、单层交叉式、单层链式、双层叠绕、双层波绕和单双层绕组。绕组的连接按相带划分进行。

单层绕组每槽放一个线圈边, 它等效于全距分布绕组。单层绕组的线圈数少, 槽面积利用率高, 端接线较短, 但绕组节距不能随意选择, 端部相互交叠。单层同心式绕组由几何尺寸和节距不等的线圈连成同心形状的

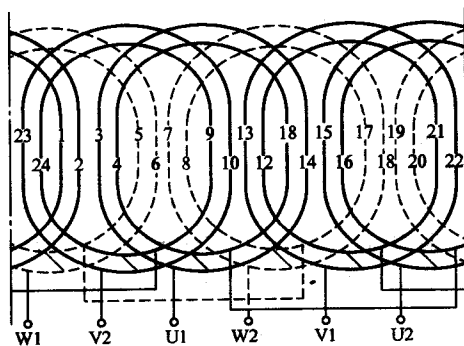


图 1-1 单层同心式绕组展开图

$$p = 1 \quad Z = 24 \quad q = 4$$