

异步电动机 设计手册

傅丰礼 主编
唐孝鎬



机械工业出版社
China Machine Press

异步电动机设计手册

傅丰礼 主编
唐孝镐

机械工业出版社

本书共七章。内容包括三相异步电动机设计、多速异步电动机设计、锥形异步电动机设计、潜水异步电动机设计、三相盘式异步电动机设计、实心转子与复合转子异步电动机设计、直线异步电动机设计。

参加编写工作的作者都是在该领域富有成就的专家。书中较完整地总结了我国在异步电动机设计方面的最新成果，特别是对各种专用电动机设计，书中都以一定篇幅介绍了其运行原理，详细介绍了设计方法，并提供了计算实例，具有较大的实用价值和参考价值。

本书可供从事电机研究、设计、运行、维修的工程技术人员作为工具书使用，也可供高等院校电机专业的师生作为教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

异步电动机设计手册/傅丰礼，唐孝镐主编. —北京：机械工业出版社，2001.12

ISBN 7-111-09078-0

I. 异… II. ①傅…②唐… III. 异步电动机—设计—技术手册 IV. TM343.02—62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 046334 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑：李振标 版式设计：冉晓华 责任校对：韩晶
封面设计：姚毅 责任印制：郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·26.125 印张·3 插页·747 千字

0 001—3 000 册

定价：60.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677—2527

前 言

随着我国加入 WTO 的日益临近，电机行业正面临着新的机遇和挑战。调整企业的产品结构，加强国内外市场需求的新产品开发，是我国电机行业目前的一项重要任务。

长期以来，我国电机行业的产品结构，一直维持着基本系列产量大，派生和专用系列产量小的局面。八五期间，上海电器科学研究所曾做过一次调查，调查结果表明，我国电机产品基本系列与派生系列的比例为 7:3，而发达国家的比例是 3:7。因此，原机械工业部在八五、九五期间，把大力发展派生系列和专用系列作为一项工作重点。经过十年的努力，目前我国电机产品基本系列与派生系列、专用系列的产量比例，已大致提高到 5:5 的水平。

当前，从事电机产品开发的科技人员，普遍感到缺少有关介绍派生系列和专用系列产品的设计资料。有鉴于此，上海电器科学研究所组织了在该领域内富有成就的专家，编写了这本异步电动机设计手册，以期对电机行业从事产品开发的科技人员有所裨益。

本书共分七章。第 1 章三相异步电动机设计是本书的基础，除了介绍经典的设计方法之外，还以较大篇幅介绍了我国电机行业在八五、九五期间所取得的最新成果，其中包括异步电机的起动计算、通风与温升计算、噪声计算、电机的优化设计和电机设计专家系统。第 2 章多速异步电动机设计，详细介绍了单绕组变极设计的最新成果，并列举了有代表性的变极绕组方案汇编。第 3 章锥形异步电动机设计，较全面地介绍了锥形异步电动机的设计特点，以及锥形异步电动机特有的轴向磁拉力、起动性能和制动性能计算。第 4 章潜水异步电动机设计，在国内是首次完整地介绍各种潜水异步电动机的结构和设计方法。第 5 章实心转子与复合转子异步电动机设计，其内容基本上都是该学科的最新成果。第 6 章三相盘式电动机设计，内容较为新颖，对盘式电动机的结构、工艺特点和设计要

点，做了较清晰的阐述。第7章直线异步电动机设计，介绍了目前最常用的扁平型和圆筒型两类直线电机的原理、结构和设计方法。

本书内容丰富、文字通顺，书中除了对设计方法有较详细的阐述外，考虑到本书所涉及的内容，都是近年来新开发的产品，因此，对其理论基础和运行原理，也做了扼要的介绍。

本书由上海电器科学研究所傅丰礼博士、华中科技大学唐孝镛教授任主编。参加编写工作的有：华中科技大学唐孝镛教授（第1章，除1.10~1.12节，第5章、第6章）；东南大学胡虔生教授（第1章1.10~1.12）；广东工业大学张城生教授（第2章）；华中科技大学冯信华教授（第3章）；上海电器科学研究所李圣年高级工程师（第4章）；上海大学蔡廷锡教授（第7章）。

限于编者水平，错误不当之处在所难免，敬请广大读者不吝指正。

2001年5月

目 录

前言

第 1 章 三相异步电动机设计	1
1.1 概述	1
1.1.1 异步电动机的主要性能指标和额定数据	1
1.1.2 异步电动机设计的主要内容和基本工作流程	2
1.2 异步电动机的结构和结构设计概述	3
1.2.1 结构设计的基本内容和原则	3
1.2.2 异步电动机的结构型式	3
1.2.3 几个主要构件的设计问题	10
1.3 铁心和绕组设计	16
1.3.1 主要尺寸确定和电磁负荷选择	16
1.3.2 铁心设计	20
1.3.3 绕组设计	30
1.4 磁路计算	35
1.4.1 异步电动机的磁路	35
1.4.2 每极磁通 Φ	36
1.4.3 磁通密度和磁位降计算	37
1.4.4 磁化 (励磁) 电流计算	41
1.5 参数计算	42
1.5.1 定子绕组平均半匝长	42
1.5.2 电阻计算	44
1.5.3 漏电抗计算	46
1.6 运行性能计算	52
1.6.1 异步电动机的等效电路和圆图	52
1.6.2 定转子电流计算	53
1.6.3 满载电动势计算	54
1.6.4 空载电动势和空载磁路计算	55

1.6.5	损耗计算	55
1.6.6	电动机的力能指标和过载能力	58
1.7	起动性能计算	60
1.7.1	饱和效应计算	60
1.7.2	集肤效应计算	70
1.7.3	起动电流和起动转矩计算	74
1.7.4	起动时间计算	75
1.7.5	起动温升的工程计算方法	77
1.8	异步电动机的通风与温升计算	80
1.8.1	异步电动机的通风型式	80
1.8.2	小型异步电动机的通风计算	83
1.8.3	小型异步电动机的温升计算	87
1.8.4	中型异步电动机的通风计算	90
1.8.5	中型异步电动机的温升计算	92
1.9	异步电动机的噪声计算	92
1.9.1	概述	92
1.9.2	轴承噪声计算	93
1.9.3	通风噪声计算	94
1.9.4	电磁噪声计算	96
1.10	异步电动机的计算机辅助设计	104
1.10.1	概述	104
1.10.2	异步电动机 CAD 中常用的数字处理方法	106
1.10.3	异步电动机的分析程序	113
1.10.4	异步电动机的综合程序	118
1.11	异步电动机的优化设计	121
1.11.1	优化设计的数学模型	122
1.11.2	优化设计方法	125
1.11.3	优化设计	129
1.12	异步电动机设计专家系统	131
1.12.1	概述	131
1.12.2	专家系统的构成	132
1.12.3	专家系统的设计	138
1.13	三相异步电动机电磁计算程序及算例	144
1.14	附录 三相异步电动机技术数据	158

参考文献	192
第 2 章 多速异步电动机设计	193
2.1 概述	193
2.2 单绕组多速异步电动机的变极原理	194
2.3 用安导调制法设计反向变极绕组	195
2.3.1 经典的反向变极双速绕组接法——“Dahlander 联结法”	195
2.3.2 用安导调制法设计 $2Y/Y$ (或 $2Y/\Delta$) 接法的反向变极绕组	197
2.4 用“槽号相位图法”设计反向变极绕组	204
2.4.1 槽号相位图的意义和画法	205
2.4.2 两极对数槽号相位图的意义和画法	206
2.4.3 用“槽号相位图法”设计 $2Y/Y$ (或 $2Y/\Delta$) 接法的反向变极绕组	208
2.4.4 用“槽号相位图法”设计非正规分布反向变极绕组	216
2.5 用“槽号相位图法”设计换相变极绕组	219
2.5.1 $3Y/3Y$ 接法的换相变极绕组设计	220
2.5.2 Δ/Δ 接法的换相变极绕组设计	240
2.5.3 $2\Delta/\Delta$ 接法的换相变极绕组设计	247
2.5.4 $\Delta\Delta/\Delta$ 接法的双速绕组设计	258
2.5.5 Δ/Δ 接法的换相变极绕组设计	261
2.6 单绕组三速电动机变极绕组设计	267
2.6.1 反向变极的 $4/6/8$ 极三速绕组设计	267
2.6.2 反向变极的 $2/4/8$ 极三速绕组设计	271
2.6.3 换相变极的 $2/4/8$ 极三速绕组设计	275
2.6.4 换相变极的 $2/4/6$ 极三速绕组设计	277
2.7 双绕组四速电动机变极绕组设计	281
2.8 变极绕组磁动势的谐波分析	291
2.8.1 Δ 接法 (或 Y 接法) 变极绕组磁动势谐波的定量计算	291
2.8.2 Δ 接法 (或 Δ 接法) 变极绕组磁动势谐波的定量计算	298
2.9 单绕组双速异步电动机的设计特点	300
2.9.1 气隙磁密比 $B_{\delta II}/B_{\delta I}$ 的估算	300
2.9.2 变极绕组方案的优选	302
2.9.3 主要尺寸的确定与磁路计算	303

2.9.4 参数计算·····	304
2.10 有代表性的变极绕组方案汇编·····	305
参考文献·····	316
第3章 锥形异步电动机设计 ·····	317
3.1 概述·····	317
3.2 锥形异步电动机的类型和使用特点·····	317
3.3 额定数据和要求·····	318
3.4 设计分析与计算·····	319
3.4.1 磁路与磁化曲线·····	319
3.4.2 磁路计算中有关系数的分析与计算·····	321
3.4.3 三段法磁路计算举例·····	322
3.4.4 轴向磁拉力计算·····	328
3.4.5 锥形异步电动机起动性能·····	332
3.4.6 锥形异步电动机制动性能·····	336
3.5 电磁设计要点·····	340
3.5.1 主要尺寸的选取·····	340
3.5.2 电磁负荷初值的确定·····	341
3.5.3 定子槽数与定转子槽配合·····	342
3.5.4 绝缘·····	342
3.5.5 制动装置型式的选择·····	342
3.6 锥形异步电动机电磁计算程序和算例·····	345
3.7 双速锥形异步电动机·····	355
3.7.1 实现双速的调速方法·····	355
3.7.2 单绕组双速锥形异步电动机性能预估·····	357
3.7.3 双速锥形异步电动机设计特点·····	364
3.8 附录·····	365
参考文献·····	367
第4章 潜水异步电动机设计 ·····	370
4.1 概述·····	370
4.1.1 潜水电动机简介·····	370
4.1.2 潜水电动机分类·····	370
4.2 潜水异步电动机的结构·····	376

4.2.1	充水式电动机	376
4.2.2	充油式电动机	381
4.2.3	干式电动机	385
4.2.4	屏蔽式电动机	386
4.2.5	外装式电动机与内装式电动机	388
4.2.6	上泵式、下泵式与贯流式潜水电泵	390
4.2.7	大型高压潜水电动机的典型结构与主要特点	394
4.2.8	串接式电动机	396
4.3	井用潜水三相异步电动机设计计算	398
4.3.1	额定数据、主要性能指标与运行条件	398
4.3.2	利用系数和主要尺寸比	399
4.3.3	机座号与额定功率	401
4.3.4	绝缘结构	402
4.3.5	电磁设计特点	403
4.3.6	井用潜水电动机的损耗	409
4.3.7	发热与冷却	414
4.3.8	井用潜水电动机的串接	415
4.3.9	井用潜水三相异步电动机电磁计算程序及算例	418
4.3.10	温升计算	431
4.4	通用潜水电动机设计计算	443
4.4.1	电动机主要结构	443
4.4.2	功率等级	444
4.4.3	电磁设计特点	444
4.4.4	通用潜水异步电动机的损耗	449
4.4.5	发热与冷却	451
4.4.6	温升计算	453
4.5	矿用隔爆型潜水电动机设计计算	461
4.5.1	概述	461
4.5.2	主要尺寸的确定	461
4.5.3	电磁设计特点	462
4.5.4	隔爆接合面参数	463
4.6	潜水单相异步电动机设计	464
4.6.1	概述	464
4.6.2	潜水单相异步电动机的类型与主要特点	465

4.6.3	额定数据与主要性能指标	468
4.6.4	运行性能的分析与计算	469
4.6.5	电动机尺寸的确定	474
4.6.6	定转子槽配合	477
4.6.7	定转子冲片主要尺寸	478
4.6.8	定子绕组设计	479
4.6.9	斜槽的选择	484
4.6.10	有效匝数比与电容器的选择	486
4.6.11	潜水单相异步电动机电磁计算程序及算例	489
4.6.12	罩极潜水电动机电磁计算程序	509
4.7	潜水电动机用主要材料	519
4.7.1	定子绕组用绝缘导线	519
4.7.2	转子导条	526
4.7.3	引出扁电缆	528
4.7.4	水润滑轴承	529
4.8	潜水电动机的主要标准	533
4.8.1	井用潜水三相异步电动机 (GB/T2818—91)	533
4.8.2	小型潜水电泵 (JB/T8092—96)	537
4.8.3	污水污物潜水电泵技术条件 (JB5803—91)	540
4.8.4	农用污水污物潜水电泵技术条件 (JB5119—91)	545
4.8.5	矿用隔爆型潜水电泵 (JB6762—93)	547
4.9	附录	551
第5章 实心转子与复合转子异步电动机设计		573
5.1	概述	573
5.2	实心转子异步电动机的等效电路	575
5.3	实心转子异步电动机的转子参数和工作特性计算	577
5.3.1	透入深度法计算实心转子参数	578
5.3.2	单位磁阻抗法计算实心转子参数	584
5.3.3	应用多层理论分析实心转子中的电磁场及参数计算	590
5.3.4	实心转子异步电动机的性能及工作特性计算	594
5.4	实心转子异步电动机的磁场分析	596
5.4.1	实心转子异步电动机电磁场问题综述	596
5.4.2	饱和、磁滞、涡流及端部效应	596

5.5 实心转子异步电动机的派生结构及性能改进	599
5.5.1 转子表面开轴向窄槽的参数计算和性能分析	600
5.5.2 转子两端加良导体端环的参数计算和性能分析	604
5.5.3 转子两端加良导体端环并开轴向槽的参数计算与性能分析	607
5.5.4 铁铜 (Fe-Cu) 合金实心转子异步电动机	608
5.6 双层转子异步电动机	608
5.6.1 双层转子异步电动机的原理	609
5.6.2 双层转子电机的相对功率	610
5.6.3 双层转子异步电动机的转子参数及工作特性计算	613
5.7 复合转子异步电动机	617
5.7.1 复合转子异步电动机的结构及运行原理	617
5.7.2 复合转子异步电动机模型及等效电路	618
5.7.3 复合转子的端部系数 K_e	619
5.7.4 复合转子异步电动机的转子参数和性能计算	620
5.7.5 钢套表面开环形槽的复合转子异步电动机	625
5.8 实心转子和复合转子三相异步电动机的设计计算	626
5.8.1 主要尺寸和定子的设计问题	626
5.8.2 实心转子三相异步电动机电磁计算框图	628
5.8.3 复合转子三相异步电动机电磁计算框图	629
5.8.4 实心转子三相异步电动机电磁计算程序	630
参考文献	639
第 6 章 三相盘式异步电动机设计	641
6.1 概述	641
6.2 盘式异步电动机结构型式和生产工艺的主要特点	642
6.2.1 基本结构型式	642
6.2.2 制动型盘式异步电动机	643
6.2.3 双定子-单转子盘式异步电动机	644
6.2.4 泵机合一的盘式异步电动机	644
6.2.5 盘式异步电动机生产工艺的主要特点	645
6.3 三相盘式异步电动机的主要尺寸和设计的基本关系式	646
6.3.1 主要尺寸	646
6.3.2 设计的基本关系式 (主要尺寸方程式)	646

6.3.3	主要尺寸比、直径比和气隙选择	648
6.4	盘式异步电动机的磁路特点和计算方法	651
6.4.1	盘式异步电动机的磁路特点	651
6.4.2	气隙磁密 $B_{\delta}(r)$ 的分布	651
6.4.3	齿磁密 $B_t(r)$ 的分布	653
6.4.4	轭部磁密 $B_j(r)$ 的分布	653
6.4.5	盘式异步电动机磁路的平均直径计算法	654
6.4.6	盘式异步电动机磁路的分环计算法	654
6.4.7	盘式异步电动机磁路尺寸的优化	658
6.5	盘式异步电动机的绕组设计	660
6.6	盘式异步电动机的参数、损耗和性能计算	661
6.6.1	参数计算	661
6.6.2	铁耗计算	662
6.6.3	轴向磁吸力计算	664
6.7	三相盘式异步电动机电磁计算程序	669
6.8	附录	686
	参考文献	690

第7章 直线异步电动机设计 691

7.1	概述	691
7.2	直线异步电动机的结构	691
7.2.1	直线异步电动机的结构型式	691
7.2.2	直线异步电动机的结构特点	695
7.3	直线异步电动机的工作原理	697
7.3.1	直线异步电动机的基本工作原理	697
7.3.2	直线电动机与旋转电动机的区别	698
7.4	直线异步电动机的气隙磁场	698
7.4.1	纵向端部效应	698
7.4.2	横向端部效应	699
7.5	直线异步电动机的等效电路	702
7.6	直线异步电动机的设计要点	706
7.6.1	原始数据	706
7.6.2	电磁负荷的取值范围	707
7.6.3	气隙长度的确定	707

7.6.4	初级槽数的选择和槽形的选择	707
7.6.5	绕组设计	708
7.6.6	次级材料的选择和尺寸	712
7.6.7	磁路计算	713
7.7	直线异步电动机的电磁计算	714
7.7.1	非磁性次级直线异步电动机的电磁计算程序和算例	714
7.7.2	钢次级直线异步电动机	720
7.7.3	圆筒型直线异步电动机	733
7.8	附录	740
	参考文献	820

第 1 章 三相异步电动机设计

根据转子结构的不同，三相异步电动机分为笼型转子和绕线转子两种类型。本章仅论述一般用途（即基本型）笼型转子三相异步电动机的设计，并且主要针对中小型低压三相异步电动机，以下简称异步电机。

1.1 概述

1.1.1 异步电动机的主要性能指标和额定数据

1. 主要性能指标

对于笼型转子三相异步电动机，其设计任务书中规定的主要性能指标：

- (1) 效率 (η)。
- (2) 功率因数 ($\cos\varphi$)。
- (3) 最大转矩倍数 (T_M/T_N)。
- (4) 起动转矩倍数 (T_{st}/T_N)。
- (5) 起动电流倍数 (I_{st}/I_N)。
- (6) 起动过程中的最小转矩倍数 (T_{min}/T_N)。
- (7) 定子绕组温升 ($\Delta\theta$)。
- (8) 噪声限值。
- (9) 振动限值。

2. 额定数据

- (1) 额定功率 P_N (kW)。
- (2) 额定电压 U_N (V) ——指定子绕组线端的线电压。我国的标准电压为 380V、6000V 及 10000V，在煤矿井下工作的电动机有 660V 及 1140V 等电压。

(3) 额定频率 f_1 (Hz)。

(4) 额定转速 n_N (r/min) ——有时给出同步转速 n_1 ，根据

$n_1 = 60f_1/p$ 的关系，也就限定了电动机的极对数 p 。

(5) 定额或工作制——连续、短时、重复短时或其他，即 S1、S2 或 S3 等。

3. 标么值和基值

在电机设计中，广泛采用标么值进行计算。标么值是实际值与基值之比，用右上角带“*”的字母表示。目前，工厂常用的中小型三相异步电动机电磁计算程序中选用的基值是：

(1) 电压基值为电动机额定相电压 $U_{N\Phi}$ (V)；

(2) 功率基值为电动机额定功率 $P_N \times 10^3$ (W)；

(3) 电流基值为每相功电

$$流 I_{KW}, I_{KW} = \frac{P_N \times 10^3}{m_1 U_{N\Phi}}, (\text{A});$$

式中 m_1 表示定子绕组相数。

(4) 阻抗基值 $Z_N =$

$$\frac{U_{N\Phi}}{I_{KW}} = \frac{m_1 U_{N\Phi}^2}{P_N \times 10^3} (\Omega);$$

(5) 转矩基值为电动机的额定转矩 (T_N) $T_N = \frac{P_N \times 10^3}{2\pi n_N/60} = 9550 \frac{P_N}{n_N} (\text{N}\cdot\text{m})。$

1.1.2 异步电动机设计的主要内容和基本工作流程

异步电动机的设计，包括结构设计和电磁计算两大部分，而结构设计又分为总体结构设计和施工图设计，后者主要是零部件设计和绘制施工图纸。电磁计算的主要内容和计算步骤，如图 1-1 的设计计算流程图。

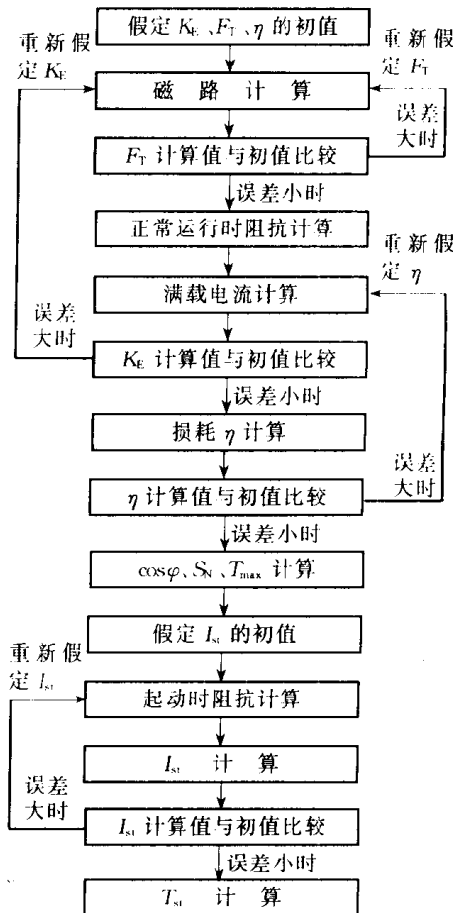


图 1-1 异步电机电磁计算流程图

1.2 异步电动机的结构和结构设计概述

按功能来分,异步电机的构件有两大类,一类是直接参与机电能量的转换,通常称为有效部分,即定子铁心和绕组,转子铁心和绕组。其大小、形状和材料的特性,直接影响电机的参数和性能价格比,它们在电磁计算过程中确定。另一类不直接参与机电能量转换,而是承担着电机的支承、安装、防护、冷却(散热)及传递电磁力或电磁转矩。所谓结构设计,主要是指对这类构件的设计。

1.2.1 结构设计的基本内容和原则

1. 基本内容

(1) 确定电机的总体结构型式,包括防护型式、安装方式、通风和冷却系统、轴承类型和数量、轴伸型式和数量等。

(2) 确定零部件的结构型式、材料、形状、尺寸、加工精度、形位公差、表面粗糙度和技术要求等。

(3) 确定某些零部件(如转子铁心与轴、机座与端盖等)之间的机械联接方式、配合种类等。

(4) 核算零部件的机械性能。

2. 设计原则

(1) 应保证电机在规定期限内能安全可靠运行。

(2) 所用结构型式一般应符合有关国家标准或行业标准的规定,并满足用户和环境保护方面的要求。

(3) 要尽量使零部件符合“标准化、系列化、通用化”的要求,尽可能采用标准件和标准规格的材料,并注意零部件的通用性。

(4) 应有良好的工艺性。

(5) 电机装拆和维护方便,并注意运输条件和使用单位的技术水平。

(6) 电机造型美观。

1.2.2 异步电动机的结构型式

1. 防护型式

根据 IEC34-5 (1981)《旋转电机外壳防护分级》及我国相应