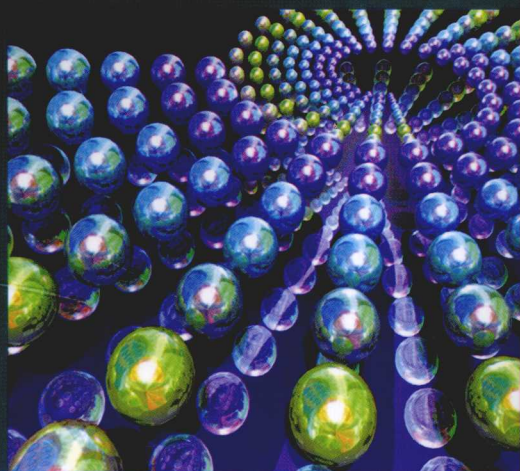


DIAN



电机系统节能 实用指南

DIANJI XITONG JIENENG SHIYONG ZHINAN

国际铜业协会(中国) 周胜 赵凯 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电机系统节能实用指南

周 胜 赵 凯 主编



机械工业出版社

本书由电动机、调速驱动系统、风机系统、泵系统、压缩空气系统和电机系统节能标准与能效标准六部分组成,其编写的主要目的就是针对目前电机系统中应用最为广泛的风机、泵和空压机系统的特点,通过分析国内外电机和驱动系统的能效现状、电机系统节能潜力的评估方法、不同系统的主要节能技术和优化方法,以及电机系统节能标准与能效标准,使政府节能主管人员、企业节能管理工程技术人员和能源服务机构的工程技术人员对我国电机系统能效现状、分析方法和改造技术进行充分的了解,为其在今后的工作中提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机系统节能实用指南/周胜,赵凯主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 10

ISBN 978-7-111-28007-1

I. 电… II. ①周…②赵… III. 电机-节能-指南 IV. TM3-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第142278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:王小东 版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.5印张·382千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28007-1

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379728

封面无防伪标均为盗版

前 言

电动机广泛应用于拖动风机、泵、鼓风机、空气压缩机、制冷机和车床等机械装置及其他各类电气设备，是量大面广的终端耗能大户。电动机系统包括电动机、被拖动装置、传动控制系统及管网负荷。据统计，2003 年我国各类电动机总装机容量约为 4.2 亿千瓦，年耗电量达 1 万亿千瓦时以上，约占全国用电量的 60%。其中，风机、泵类、压缩机和空调制冷机的用电量分别占全国用电量的 10.4%、20.9%、9.4% 和 6%。

改革开放以来，我国制造业有了长足发展，近些年企业通过自主研发和消化吸收，电动机、风机、泵、压缩机等相关产业的产品性能、质量有了显著提高，对推动电动机系统的节能工作起了很大的促进作用。但与发达国家比较，我国的电动机系统尚存在很大的节能潜力和技术升级空间，主要表现在：

1) 电动机及被拖动装置效率低。电动机系统产品效率比国外先进水平低 2~5 个百分点。虽然国产高效电动机与国外先进水平相当，但价格高、市场占有率低；风机、泵、压缩机产品效率比国外先进水平低 2~4 个百分点，虽然设计水平与国外先进水平相当，但制造技术和工艺有差距。

2) 系统运行效率低。系统匹配不合理，“大马拉小车”现象严重，设备长期低负荷运行；系统调节方式落后，大部分风机、泵类采用机械节流方式调节，效率比调速方式约低 30%。电动机系统就运行效率而言要比国外先进水平低 10~20 个百分点，相当于每年浪费电能约 1500 亿千瓦时。

提高电动机系统的能效，就是要在满足工艺要求的前提下，消耗最少的能源。其能效提高的潜力在于使电力变压器、电动机、被拖动装置的自身效率及匹配达到最优。美国电动机挑战计划和欧洲电动机挑战计划的成功经验，就是在系统诊断的基础上，分析系统存在的主要问题，进而采取合适的技术对其进行技术改造。结合我国的具体情况，目前电动机系统节能改造的技术途径主要有以下几个方面：

1) 加速设备淘汰更新。近年来，我国设备制造业通过技术引进和自主开发，研究生产出一批效率高、性能好的设备。全国风机、水泵和压缩机装机容量约 1.2 亿~1.8 亿千瓦，年耗电量约 5000 亿千瓦时。若以高效风机、泵替代低效产品，平均效率提高 2~3 个百分点，可实现年节电 100 亿千瓦时以上。加大力度对老旧设备的更新改造，要坚持使用国家推荐的节能型设备。我国已陆续公布了若干批能耗高、技术落后的淘汰机电产品目录，为电动机系统老旧设备淘汰更新提供了指南。

2) 改善电动机拖动系统调节方式。推广变频调速、永磁调速等先进电动机调速技术，改善风机、泵类电动机系统的调节方式，逐步淘汰闸板、阀门等机械节流调节方式。重点对大中型变工况电动机系统进行调速改造，合理匹配电动机系统，消除“大马

拉小车”现象。

3) 改进工艺拖动、牵引拖动调速方式。以先进的电力电子技术传动方式改造传统的机械传动方式,逐步以交流调速取代直流调速。采用高新技术改造拖动装置,重点是大型水利排灌设备、电动机总容量10万千瓦以上大型企业的示范改造等。

4) 优化电动机系统的运行和控制。采用新技术、新工艺,完善电动机系统控制,优化运行。推广软起动装置、无功补偿装置、计算机自动控制系统等,通过过程控制合理配置能量,实现系统经济运行。

本书由电动机、调速驱动系统、风机系统、泵系统、压缩空气系统和电动机系统节能标准与能效标准六部分组成。编写本书的主要目的就是针对目前电动机系统中应用最为广泛的风机、泵和空压机系统的特点,通过分析国内外电动机和驱动系统的能效现状、电动机系统节能潜力的评估方法、不同系统的主要节能技术和优化方法以及电动机系统节能标准与能效标准,使政府节能主管人员、企业节能管理工程技术人员和能源服务机构的工程技术人员对我国电动机系统能效现状、分析方法和改造技术进行充分的了解,为其在今后的工作中提供参考。

本书由国际铜业协会周胜、赵凯主持编写。第一章由秦和编写;第二章由赵争鸣编写;第三章、第五章由秦宏波编写;第四章由王才元编写;第六章由赵跃进编写。

本书在编写过程中得到了中国终端能效项目办公室等有关单位的支持和帮助;国际铜业协会王根等参加了全书的校对及出版工作,在此一并致谢。

由于编写时间仓促,本书疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 电动机	1
第一节 概述	1
第二节 电动机的分类和基本工作原理	2
第三节 电动机的损耗与效率	10
第四节 高效率电动机	13
第五节 电动机运行节能	22
第六节 电动机系统节能的主要技术措施	29
第七节 电动机节能的潜力	29
附录	30
附录 A 中国电动机能效标准 (GB18613—2006)	30
附录 B 主要电动机制造商列表	33
第二章 电动机调速驱动系统	35
第一节 电动机调速驱动系统分类	35
第二节 变频器及其调速原理	42
第三节 变频器驱动的电动机特性	49
第四节 变频调速系统匹配与节能	57
第五节 调速节能的典型应用	64
第六节 调速节能效果的合理测算	68
参考文献	76
附录	76
附录 A 变频器种类介绍	76
附录 B 主要变频器制造商列表	80
第三章 泵系统节能	82
第一节 概述	82
第二节 泵系统基础知识	85
第三节 泵系统设计和运行	90
第四节 泵系统优化的机会和措施	98

第五节 泵系统评估和经济性	110
参考文献	118
附录 典型案例分析	119
第四章 风机	122
第一节 概述	122
第二节 风机的性能	125
第三节 风机的运行	133
第四节 风机的调节	136
第五节 风机的节能	138
参考文献	141
附录	141
附录 A 主要生产厂家及相关标准	141
附录 B 南京汽车集团有限公司热电厂 锅炉风机评估报告	142
第五章 压缩空气系统节能	145
第一节 概述	145
第二节 压缩空气基础知识	147
第三节 压缩空气系统供气侧	152
第四节 压缩空气系统用气侧	162
第五节 压缩空气系统评估	166
第六节 压缩空气系统优化措施	169
参考文献	180
附录 典型案例分析	180
第六章 电机系统节能标准与能效标准	184
第一节 概述	184
第二节 我国电机系统节能标准体系	185
第三节 电机系统能效标准	190
第四节 电机系统经济运行标准	219

第一章 电动机

第一节 概述

一、电动机节能的重要性和迫切性

电动机广泛应用于工业、商业、农业、公用设施和家用电器等各个领域，作为风机、水泵、压缩机、机床等各种设备的动力。电动机系统的用电量在各个国家的总用电量中占有相当大比重。美国能源部统计，电动机系统用电量占美国工业用电总量的 70%，为其全部用电量的 50%。欧盟统计，电动机系统用电量占其整个工业用电量的 69%，为其总用电量的 42%。我国估计，电动机系统用电量占我国工业用电量的 $\frac{2}{3}$ ，约为全国总用电量的 60%。

由于电动机系统传递了大部分的工业用电，因此提高该系统的能效水平，对于各国的能源节约和环境保护具有重要意义。欧盟预测，对不同功率电动机效率提高 1% ~ 6%，可节约电能 3%，每年可节约电能 276 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，这些电能相当于 5 座 100 万 kW 电站的供电能力。英国测算，其 1995 年电动机总用电量为 1300 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，为产生这些电能排放到空气中的 CO_2 为 2400 万 t，相当于英国该年所有能源排放 CO_2 总量的 17%，因此节约电动机所使用的电能，可显著减少空气中 CO_2 的排放量。我国估计，若通用电动机的效率提高 3%，则每年约可节约电能 160 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，相当于我国 2003 年总发电量的 1%，可节省 3 座 100 万 kW 电站的投资建设，同时相应每年可减少 362 万 t CO_2 的排放。

鉴于电动机系统对于节能的重要性，美国和欧盟分别于 1993 年和 2003 年启动了“电动机挑战计划”，以促进本国和本地区电动机系统能效水平的提高。我国由于经济迅速发展，能源需求大幅上升，经济发展面临能源约束和能源环境问题日益突出，为此必须坚持节约优先，推动社会大力节能降耗，提高能源利用效率，建设节能型社会。对此国家发展与改革委员会（简称发改委）在 2004 年底发布“节能中长期专项规划”。在该规划中列出了十大节能重点工程，“电机系统节能工程”即为其中的一项。国家发改委又在 2006 年 7 月发布了“十一五”期间上述十大节能重点工程的实施意见。该意见指出，“电机系统量大面广，节电潜力巨大。全国现有各类电机系统总装机容量约 4.2 亿 kW ，运行效率比国外先进水平低 10% ~ 20%，相当于每年浪费电能约 1500 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。”我国国务院在 2006 年 8 月底发表了“国务院关于加强节能工作的决定”，指出能源问题已经成为制约经济社会发展的重要因素，必须把节能工作作为当前的紧迫任务。要求全面实施包括“电机系统节能工程”在内的十大节能重点工程。由上述可见，电动机节能工作不论在国际上还是在国内均已获得高度重视，各国政府正在采取各种有效的措施积极推进中。

二、电动机节能的基本概念

电动机从电源吸收电能，并通过其内部电磁场的作用，在其转轴上输出机械转矩来驱动各种负载机械，后者又将所获得的机械能用于各种物件的加工或是各种介质的输送。从能量传递的过程来看，电动机应用系统包括了电源、线路、配电设备和电力变换器、电动机、连

接部件、负载机械、调节器以及物件加工或传送、流体介质输送等 8 个部分,如图 1-1 所示。图中电力变换器对直流电动机调速系统为静止电力整流器,对交流电动机调速系统为静止电力变频器;连接部件为联轴器或带轮;负载机械为风机、水泵、空压机、机床、起重设备等各种被驱动机械;调节器为各种风门、节流阀和齿轮箱等设备。

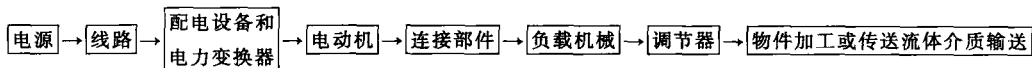


图 1-1 电动机系统的能量传递

电动机系统节能的基本要求有两方面:一方面要求构成系统的每一部分,在完成系统所赋予的特定工作任务之外,均要降低损耗提高效率;另一方面则要求各部分的参数匹配协调,从而求得整个系统的最高效率。

本章主要对电动机系统中有关电动机本身效率的提高,以及电动机运行时降低损耗提高能效水平等方面的技术内容进行介绍。

第二节 电动机的分类和基本工作原理

一、电动机的分类和应用

电动机可按供电电源、工作原理、功率大小、结构形式、产品用途等各种方式来分类。

1. 按供电电源和工作原理进行分类

一般可分为直流电动机和交流电动机。

1) 交流电动机:由交流电源供电,又分为同步电动机和异步电动机(即感应电动机)。

同步电动机:当气隙中产生电磁转矩的定、转子磁场一个由直流电流产生,另一个由交流电流产生则为同步电动机。其转速与所接电源频率之比有恒定的关系。同步电动机由于其结构较感应电动机复杂,价格也相对较贵,因此在一般的机械设备驱动中应用较少,但由于其功率因数高,较多用于大功率低转速的机械设备,如压缩机、球磨机等。

异步电动机:当气隙中产生电磁转矩的定、转子磁场分别由两个不同频率的交流电流产生,电动机转速与所接电源频率之比不是恒定关系,则为异步电动机。异步电动机特别是笼型异步电动机,由于结构简单、运行可靠、维护方便和价格低等特点,成为电机行业中生产量最大、应用面最广的驱动电动机。但因其调速性能差,功率因数低,使其长期以来主要应用于无调速要求或调速要求不高的驱动机械,例如风机、水泵等驱动。

异步电动机可分为三相异步电动机和单相异步电动机,前者广泛应用于工矿企业和公用设施,后者则主要应用于家用电器。

2) 直流电动机:由直流电源供电,其气隙中产生电磁转矩的定、转子磁场均由直流电流产生。直流电动机具有优良的起动、调速等运行性能,长期以来在有调速要求的场合,特别是有高精度、高性能控制要求的自控系统中,直流电动机得到了广泛的应用。但电刷和换向器的机械接触所带来的换向问题是它的致命弱点,近年随着交流电动机变频调速技术的日益成熟和发展,大大缩小了直流电动机的应用范围。

2. 按功率的大小或机座号或电压等级进行分类

一般分为微特电动机、小功率电动机、小型电动机、中型电动机和大型电动机等。

1) 微特电动机: 主要用于自动控制和计算机控制系统中的检测、放大、执行和解算元器件。

功率范围: 从数百毫瓦到数百瓦。机座号范围: 机座的外径一般不大于 130mm。

2) 小功率电动机: 又称为分马力电动机, 主要用于家用电器及各种小型机具等。

功率范围: 不大于 2.2kW。

机座号范围: 不大于 H90mm。

额定电压: 大多数为 220V、380V 的常用电压。

3) 小型电动机的范围一般为:

功率范围: 0.12 ~ 315kW。

机座号范围: H63 ~ 355mm。

额定电压: 在 660V 及以下, 大多数为 380V/220V 常用电压。

4) 中型电动机范围一般为:

功率范围: 315 ~ 3000kW。

机座号范围: H355 ~ 630mm。

额定电压: 常用的电压等级为 6kV 和 10kV, 少量为 3kV。

5) 大型电动机范围一般为:

功率范围: 2000kW 及以上。

机座号范围: H710mm 及以上。

额定电压: 目前常用的电压等级为 6.3kV、10.5kV、13.8kV 等。

3. 按产品的结构进行分类

按防护形式可分为封闭型电动机和防护型电动机; 按安装方式可分为卧式安装和立式安装, 以及底脚安装和凸缘安装等。

4. 按产品的类别或用途进行分类

电动机是用于驱动各种机械设备的动力源。电动机的种类繁多, 按照产品的类别或用途进行分类, 有绕线转子电动机、变极多速电动机、起重冶金专用电动机、电磁制动电动机、盘式制动异步电动机、齿轮减速电动机、摆线针轮减速电动机、电磁调速电动机、交流力矩电动机、振动电动机、井用潜水电动机、开关磁阻电动机、无刷永磁同步电动机、无齿轮永磁同步曳引机等。

在表 1-1 中列出了电动机的主要种类及其主要用途。应该指出, 表 1-1 中所列电动机种类均为传统意义上的电动机, 即这些电动机可由通用电源直接驱动, 也可根据需要在电源与电动机之间接入静止电力变换器进行驱动。实际上, 近年由于微电子技术和电力电子技术的发展, 涌现了不少新颖的电动机, 如无刷直流电动机、开关磁阻电动机等, 这类电动机必须配有特定的静止电力变换器和电子控制装置, 才能接上电源驱动负载。这些电动机或是具有优良的调速性能, 或是具有较高的性价比, 在办公自动化、医疗设备以及各种特殊场合获得越来越多的应用。

二、电动机的用电情况

从上述可知, 在国民经济的各行各业中, 大量不同种类的电动机在驱动着各种不同的机械设备, 以完成各自特定的任务。为确定电动机系统节能的重点负载机械和相应的电动机种类, 必须对电动机应用系统进行全面的调查、统计和分析。

表 1-1 电动机的主要类型及用途

种 类			主 要 用 途
交流电动机	同步电动机	有励磁同步电动机	驱动功率较大或转速较低的机械设备，用于大型船舶的推进器
		无励磁同步电动机	驱动功率较大或转速较低的机械设备，用于大型船舶的推进器，并可用于防爆等特殊场合
		永磁同步电动机	用于纺织化纤设备和各种特殊专用设备，以及年运行时间长的风机、水泵等
	异步电动机	笼型异步电动机	用于驱动一般机械设备
		绕线转子异步电动机	用于要求起动转矩高、起动电流小或小范围调速的机械设备
	交流换向器电动机		三相换向器电动机用于驱动需要调速的机械，单相换向器电动机用于电动工具和吸尘器中
直流电动机			用于冶金、矿山、交通运输等行业，主要驱动需要调速的机械设备
交直流两用电动机			用于电动工具等

表 1-2 列出了美国工业领域电动机系统在不同应用场合下的用电量分布。从该表数据可见, 电动机驱动泵类、压缩机和风机这三种以流体输送和压缩为主的机械系统占了工业领域电动机系统总用电量的 60% 左右。表 1-3 和表 1-4 分别列出了欧盟 1998 年在工业领域和第三产业中电动机在不同应用场合下的用电量分布。从表 1-3 和表 1-4 中可见, 欧盟和美国情况相似, 泵、压缩机和风机这三类系统的用电量占了电动机总用电量中很大的比例。

表 1-2 美国工业电动机系统在不同应用场合下的用电量分布 (1994)

应用方式	电动机系统用电量 [$\times 10^9$ (kW · h) / 年]	占制造部分电动机系统 总用电量的比例 (%)
泵类系统	149	27
压缩机系统	100	18
风机系统	77	14
材料输送/搬运系统	33	6
其他的材料加工系统	133	24
工业冷藏系统	33	6
其他	28	5
总的制造系统	553	100

表 1-3 欧盟工业领域电动机系统不同应用的用电量比例 (1998)

应用方式	泵类系统	空气压缩机系统	风机系统	冷藏压缩机系统	传递系统	其他
占工业电动机用电量比例 (%)	22	18	16	7	2	35

表 1-4 欧盟第三产业电动机系统不同应用的用电量比例 (1998)

应用方式	冷藏设备	风机	空调设备	泵	传递设备	其他
占第三产业电动机用电量比例 (%)	25	24	17	16	11	7

鉴于不同的特性, 各种电动机在转变电能为机械能的过程中, 所分担的电份额相差甚

大。美国 1988 年统计全国共有电动机近 10 亿台，其中小功率电动机数量最多，达总数的 90%，而 0.75kW 以上数量仅占 10%。但是从用电量来看，小功率电动机数量虽大，其用电量仅占总用电量的 14%。这主要是因为这些电动机的功率小，并有相当一部分不是长期运行的，因此该部分电动机数量虽多，但用电比例却不大。虽然 0.75kW 以上电动机数量虽少，但用电量却占电动机总用电量的 86%，因此目前不少国家都把电动机节能的重点放在 0.75kW 以上的电动机上（见表 1-5）。

表 1-5 美国 1988 年电动机的数量和用电量

功率范围/kW	电动机台数		用电量	
	× 10 ⁶	%	× 10 ⁹ / [(kW · h) / 年]	%
0.13 ~ 0.75	900	90.17	224	14.28
0.75 ~ 3.75	75	7.5	160	10.20
3.82 ~ 15	15	1.5	93	5.92
15.75 ~ 37.5	5	0.5	160	10.20
38.3 ~ 93.75	3	0.3	345	21.99
> 93.75	0.2	0.02	587	37.41
合计	998.2	100	1569	100

对于不同种类电动机的用电情况，美国有关统计分析认为直流电动机用电量约占电动机总用电量的 3%，同步电动机用电量约占电动机总用电量的 1%，而异步电动机用电量则占电动机总用电量的 96%（见表 1-6）。英国能源促进会（ETSU）对英国不同种类电动机的用电情况进行了统计（不包括用于家用电器的电动机），异步电动机用电量占到电动机总用电量的 91.4%（见表 1-7），而三相异步电动机又占到异步电动机的 94.2%，由此可见，三相异步电动机在电动机总的用电量中占据了很大部分，因此不少国家对于三相异步电动机的能效水平给予了高度重视，通过各种措施来促进高效节能三相异步电动机的推广应用，力图较大幅度地节约电能，以减轻当前日益紧迫的能源压力和环境问题。

表 1-6 美国不同种类电动机的用电量比例

异步电动机	同步电动机	直流电动机
96%	1%	3%

表 1-7 英国不同种类电动机的用电量比例

交流三相异步电动机 < 300kW	交流三相异步电动机 > 300kW	交流单相异步电动机	直流电动机
50.9%	35.2%	5.3%	8.6%

由上述可知，在工业领域电动机系统中，用电量最大的是三相交流异步电动机。而在三相交流异步电动机中，笼型异步电动机因其结构简单、维护方便和价格低廉应用最为广泛，因此本章着重介绍三相笼型异步电动机的有关工作原理、性能以及相应的节能降耗措施。

三、电动机的工作原理

1. 电磁转矩的产生

图 1-2 所示为一台最简单的双边励磁的机电装置。该装置的定、转子上各有一个绕组。当两个绕组分别通以电流 i_1 和 i_2 ，则将分别产生定子磁场和转子磁场。这两个磁场相互作用，力图使气隙中它们的方向一致，从而产生电磁转矩 T_e ，使转子转动。此转矩随定、转

子磁场轴线的角度 θ 增加而增加, 当磁场轴线重合也即角度为零时, 该转矩也即消失。

图 1-3 所示为一旋转电动机的原理图。从该图可见, 为产生电磁转矩, 使转子不断地旋转, 必须要在定子上具有一个与转子同样转速的旋转磁场, 并使定、转子磁场轴线间保持一定的角度。

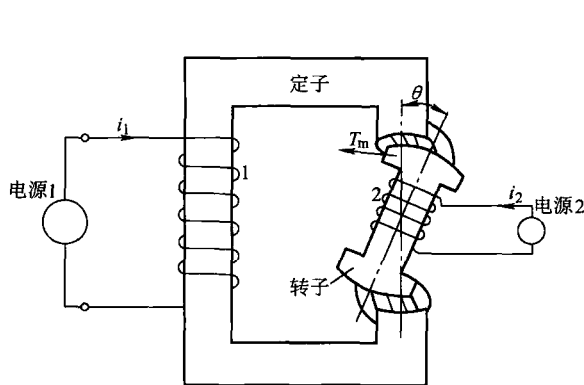


图 1-2 双边励磁的机电装置

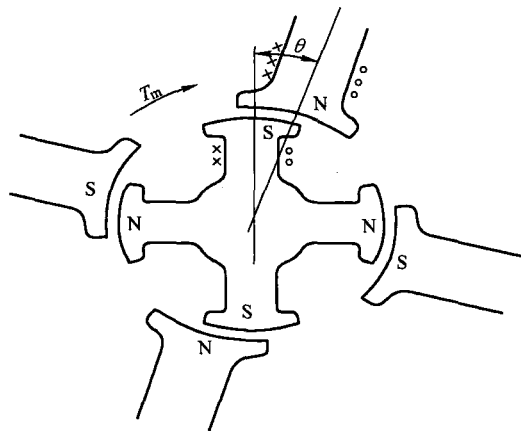


图 1-3 旋转电动机的原理图

2. 旋转磁场

实际的旋转电动机一般由两个同心的圆筒构成, 其中一个固定的, 称为定子; 另一个是可动的, 称为转子。定子和转子之间有一个空气隙, 用于储存磁场能量, 并使转子可以自由旋转。为了得到较强的磁场, 定、转子一般均用硅钢片等铁磁材料制成。定子和转子铁心上通常都装有绕组。对于三相交流电动机, 其定子铁心上装有三个相同的绕组, 各相绕组在气隙圆周上相隔 120° 电角度, 如图 1-4 所示。在三相绕组中通以三相正弦交流电流, 各相电流幅值相等, 时间相位上分别相差 120° 。三相电流的瞬态值如下所示:

$$i_a = I_m \cos \omega t$$

$$i_b = I_m \cos (\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \cos (\omega t - 240^\circ)$$

式中 I_m ——电流幅值。

图 1-5 表示该三相电流随时间变化的波形。当时间 $\omega t = 0$ 时, 由图 1-5 可知, a 相、b 相和 c 相中的电流 i_a 、 i_b 和 i_c 的幅值和方向不同, 它们相应产生三个磁场 F_a 、 F_b 和 F_c , 如图 1-6a 所示。这三个磁场相加, 在气隙中产生一合成磁动势矢量 F , 其方向在 a 相绕组的磁轴线上。

上。当时间为 $\omega t = \frac{\pi}{3}$ 时, 由于三相电流作用, 使磁动势矢量 F 逆时针方向旋转 60° 电角度,

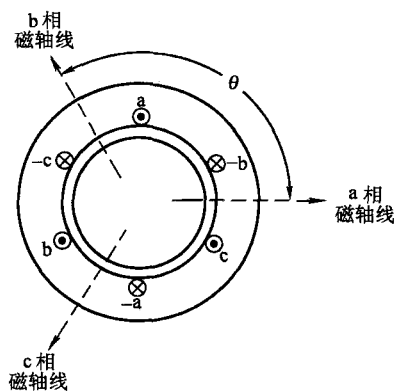


图 1-4 简化的 2 极三相定子绕组

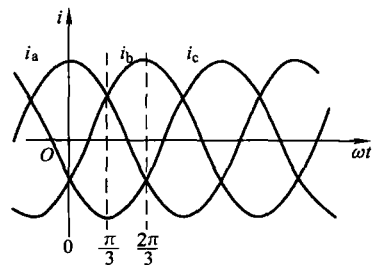


图 1-5 三相电流波形

其方向在 c 相轴线的反方向上, 见图 1-6b。当时间为 $\omega t = \frac{2\pi}{3}$ 时, 磁动势矢量 F 就旋转到 b 相, 见图 1-6c。由此可见, 当三相绕组馈以对称的三相电流后, 在电动机的气隙中就产生一幅值恒定的旋转磁场。该旋转磁场的转速 n_s (单位: /) 为

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

式中 p ——电动机极对数;

n_s ——一般称为同步转速。

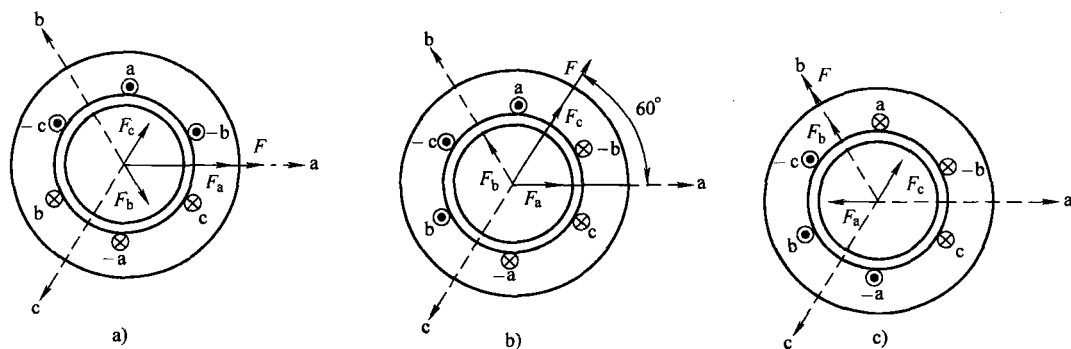


图 1-6 三相对称电流产生的旋转磁场

a) $\omega t = 0$ b) $\omega t = \frac{\pi}{3}$ c) $\omega t = \frac{2\pi}{3}$

3. 三相异步电动机的工作原理

三相异步电动机的定子由定子铁心和三相交流绕组组成, 转子则由圆柱形的转子铁心和多相转子绕组组成, 见图 1-7。常见的一种转子绕组由嵌入 (或铸入) 转子槽内的导条和两端的端环组成一闭合的多相电路, 这种绕组形如鼠笼, 故称笼型绕组, 见图 1-7b。

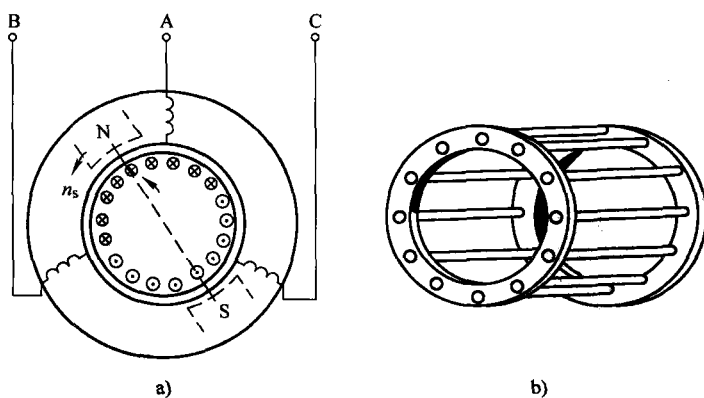


图 1-7 三相笼型异步电动机

a) 接线示意图 b) 笼型绕组

当异步电动机的定子绕组接到三相交流电源时, 流入定子绕组的三相电流就如上所述, 会在气隙内产生一个具有特定极数、推移速率为同步转速的旋转磁场波, 这一磁场“割切”转子绕组的导条时, 导条内就会产生感应电动势。由于转子导条通过端环自行闭合, 所以导

条内将有电流流过。导条电流的大小取决于导条的感应电动势和转子回路的等效阻抗，相位取决于等效阻抗的阻抗角。转子的载流导条所产生的转子磁场与气隙磁场相互作用，将产生电磁转矩。电磁转矩的方向与气隙旋转磁场的推移方向一致，若此转矩大于轴上的负载转矩，则电动机将带动机械负载顺着旋转磁场的推移方向转动起来。由此可知这种电动机的特点是：定子由三相交流激励，转子边的电流和功率借电磁感应作用由定子边传递过来，故称为感应电动机（即异步电动机）。

正常工作时，异步电动机的转速总是稍低于同步转速，因此被称作异步电动机。若转子达到同步转速，则旋转磁场对转子将无相对运动，转子导条中将不产生感应电动势和电流，电磁转矩将变为零，于是转子转速将自动下降，而在某一个稍低于同步转速的转速下运行。

同步转速 n_s 与转子转速 n 之间的差值称为转差，用 Δn 表示；即

$$\Delta n = n_s - n$$

用同步转速作为基值，转差的标么值就称为转差率，用 s 表示，即

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

由于转子导体“割切”旋转磁场的相对速率即为转差速率，所以转子电流的频率 f_2 即为转差频率，即 $f_2 = sf_1$ ，式中 f_1 为定子电流频率。所以，伴随着能量传递和转换，异步电动机的定、转子之间还有变频作用。

四、电动机的基本结构

图 1-8 表示了一台小型三相笼型异步电动机的结构。从图 1-8 可见，带有定子绕组的定子铁心置于铸铁或铝制的机座内。转子铁心槽中装有导条，后者与端环连接形成笼型的转子绕组。转子的中心置有转轴，后者的轴承置于两端端盖内的轴承室中。转轴的后端置一风扇，以供运行时冷却用。在图 1-9 和图 1-10 中分别表示了定子铁心和笼型转子。笼型转子的端环上附有风叶，作为内风扇供冷却用。

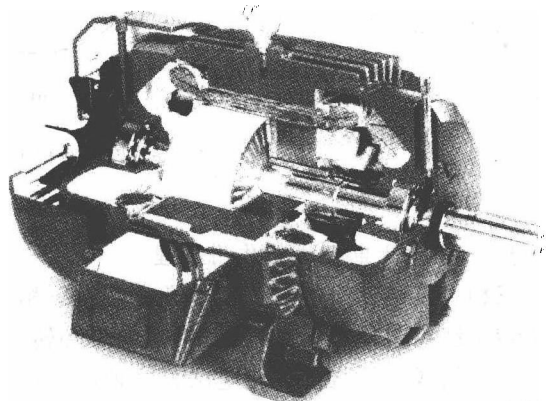


图 1-8 三相笼型异步电动机结构

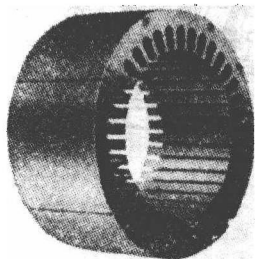


图 1-9 定子铁心

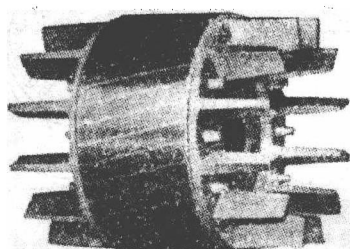


图 1-10 笼型绕组

电动机的外壳防护形式有很多种类，较常用的为封闭扇冷型（IEC—IP54、IP55）和防护型（IEC—IP23）两种。封闭扇冷型电动机机壳内部的空气不能与外界的空气自由交换，通过装在电动机上的外风扇来冷却电动机外壳的表面。这种电动机具有良好的防护性能，因

此得到广泛的应用。防护型电动机的机壳上设有若干进风口和出风口，因此电动机内部可得到较好的通风冷却。虽然这种电动机外壳是开启的，但在结构上可以防止固体或液体从上部降落至电动机内部，因此仍具一定防护性。这种电动机较多用于室内的驱动场合。

五、电动机的转矩特性

三相异步电动机的典型转矩—转速特性如图 1-11 所示。由图可见，在接上三相电源后，当转速为零时，也即转子静止时，其转矩为起动转矩 T_{st} 。随着转速的增加，电动机的转矩也增加，直至最大值然后下降。此最大转矩 T_m 也称临界转矩，它通常为额定转矩的两倍左右，以保证电动机的短时过载能力。

为适应不同负载机械的转矩特性，电动机可通过采用不同的转子槽形（图 1-12）和导条材料来获得不同的转矩—转速特性。最常用的四类异步电动机的转矩曲线示于图 1-13。这些设计的特征简要介绍如下。

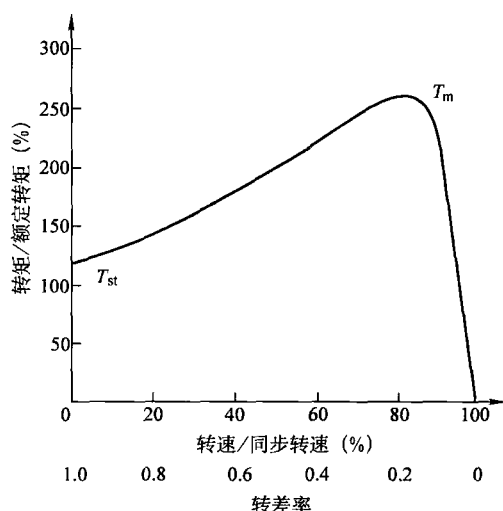


图 1-11 电动机转矩—转速特性

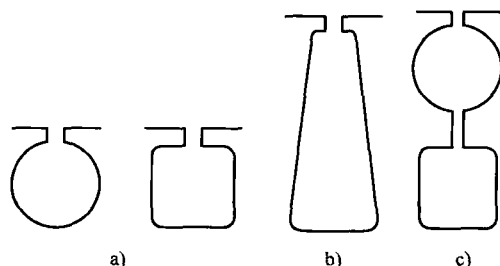


图 1-12 笼型转子槽形

a) 单笼 b) 深槽 c) 双笼

(1) A 类设计 即一般起动转矩、一般起动电流、低转差率的设计。这种设计通常是低电阻、单笼转子。它以起动性能为代价，着重于好的运行性能，满载转差率低，满载效率高，最大转矩通常超过满载转矩的 200%，并且发生在小转差率（小于 20%）处。满载电压下起动转矩在满载转矩的 200% ~ 100% 之间变化，在小型电动机中大约为 200%，在大型电动机中大约为 100%。起动电流大（当在额定电压下起动时为满载电流的 500% ~ 800%）是这种设计的主要缺点。在小于 5.5kW 的电动机中，起动电流通常在供给电动机的配电系统所能承担的冲击电流的限制范围内，因此可以采用在满载电压下直接起动，否则就要采用降压起动。降压起动会导致起动转矩的降低，这是因为起动转矩与加在电动机端线的电压的平方成正比。A 类电动机在小于 5.5kW 和大于 200kW 的电动机中是基本的标准设计，它也被用于额定值介于其间的电动机，但对于这些电动机，存在的设计问题使它们很难达到 B 类设计对起动电流的限制。它的应用场合与下面描述的 B 类设计基本相同。

(2) B 类设计 即一般起动转矩、低起动电流、低转差率的设计。这种设计的起动转矩与 A 类设计近似相等，但只有其 75% 的起动电流，因此可以使全压起动方法用于比 A 类更

大的电动机。通过设计相对较大的漏电抗来减小起动电流，同时，利用双笼或深槽转子保持转矩不变。这种设计具有很好的满载转差率和效率，与 A 类设计基本相同，但采用大电抗使功率因数略微下降，同时必然减小最大转矩（通常只能获得略超过满载转矩 200% 的最大转矩）。

这种设计对于 5.5 ~ 200kW 范围内的电动机最普遍，适用于对起动转矩要求不严格的恒速驱动，例如驱动风扇、鼓风机、泵以及工作母机等。

(3) C 类设计 即高起动转矩、低起动电流的设计。这种设计采用的双笼转子比 B 类设计具有更大的转子电阻，其结果是在低起动电流时具有较高的起动转矩。但与 A 类和 B 类设计相比，其运行效率较低，转差率较高。典型的应用是驱动压缩机和传动装置等。

(4) D 类设计 即高起动转矩、高转差率的设计。这种设计通常采用单笼、大电阻的转子（一般为黄铜条）。它在低起动电流下产生很高的起动转矩，在 50% ~ 100% 转差率处产生很高的最大转矩，但满载时以高转差率运行（7% ~ 11%），因此运行效率低。它的主要用途是驱动承担较快加速任务的间歇性负载以及驱动大的冲击性负载，例如冲床和剪床。当驱动大的冲击性负载时，电动机一般带有飞轮，它帮助提供冲击，并且减小从供电系统吸收功率的脉动，同时要求电动机的转速随着转矩的增加略微下降，以便飞轮能够缓慢下降，将它的部分动能传递给冲击。

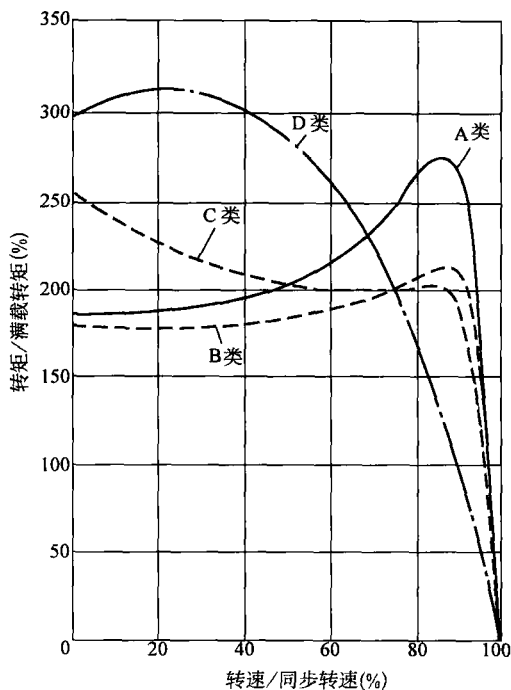


图 1-13 异步电动机四类设计的转矩—转速曲线

第三节 电动机的损耗与效率

一、损耗的构成与分布

电动机从电源输入电能后，通过电磁作用，从轴上输出机械能。在此过程中电动机本身也将消耗掉一部分电能，此部分能量即为电动机的损耗。如何降低电动机的损耗，提高电动机的效率是电动机节能的重要任务。

对于三相笼型异步电动机，其损耗由下列五部分组成：

P_{Cu1} ——定子绕组中电流通过所产生的铜耗。

P_{Cu2} ——转子绕组中电流通过所产生的（铝或铜）损耗。

P_{Fe} ——铁心中磁场所产生的涡流和磁滞损耗。

P_{Fw} ——由于风扇和轴承转动所引起的通风和摩擦损耗。

P_s ——由气隙磁场高次谐波所产生的负载杂散损耗。

三相笼型异步电动机的总损耗 ΣP 可表达如下：

$$\sum P = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{Fw} + P_s$$

应该指出, 对于不同极数、不同功率的电动机, 总损耗中的各个损耗分量的比例关系随着极数和功率的不同而不同。图 1-14 表示了从 1 ~ 1000kW 范围, 各损耗分量随额定功率 P_N 而变化的典型曲线。图 1-15 表示了 4 极 1.5kW、15kW 和 75kW 三个典型规格电动机的损耗分布。从图 1-14 和图 1-15 可见, 在小功率部分, 定子绕组损耗 P_{Cu1} 在总损耗中占了很大比例; 而在大功率部分, 铁耗 P_{Fe} 和风摩耗 P_{Fw} 则占有相当比例。因此为降低电动机损耗, 对于大小不同功率的电动机应针对不同的主要损耗分量, 采取相应的不同措施。

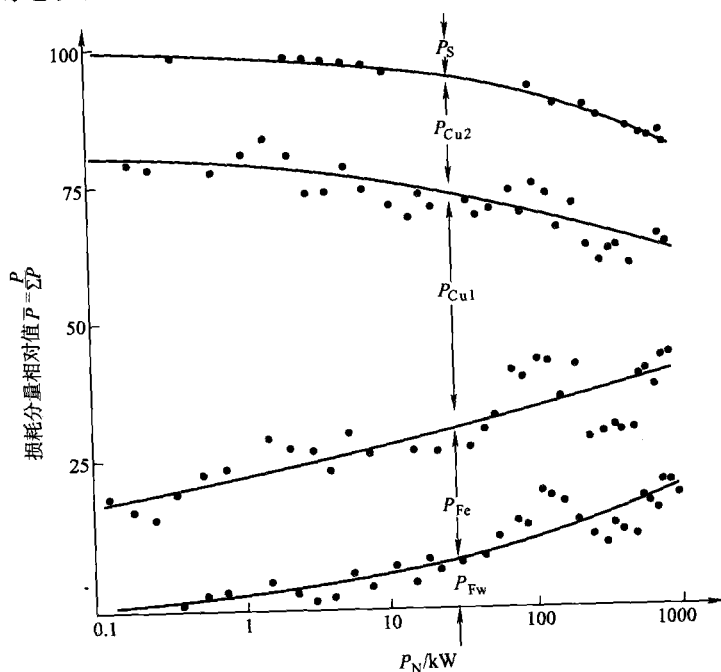


图 1-14 4 极封闭扇冷型异步电动机的典型损耗分布情况

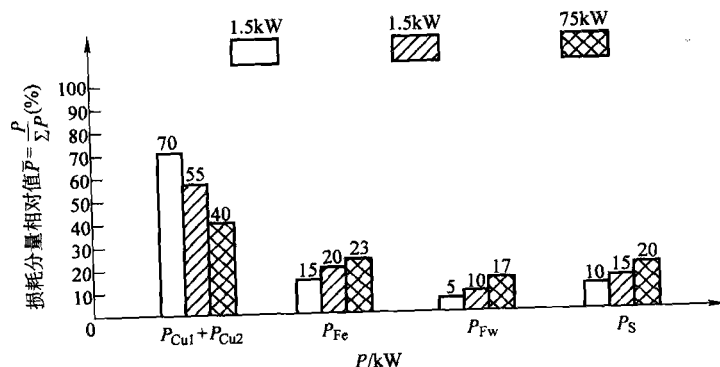


图 1-15 4 极电动机的损耗分布

二、电动机的效率及其测定

1. 电动机的效率

三相异步电动机的效率 η 表达如下: