

电力需求侧管理系列丛书

国家发展和改革委员会
电力需求侧管理培训推荐用书

电机系统节能技术

国家发展改革委经济运行调节局
国家电网公司营销部 编
南方电网公司市场营销部

The letters 'DSM' are rendered in a large, bold, teal-colored font. A thick, red, three-dimensional ribbon-like graphic weaves through the letters, starting from the left, passing behind the 'D', looping around the 'S', and passing behind the 'M' before exiting to the right. The background is a solid teal color.

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电机系统节能技术

国家发展改革委经济运行调节局
国家电网公司营销部 编
南方电网公司市场营销部

DSM



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《电力需求侧管理系列丛书》是国家发展和改革委员会开展电力需求侧管理培训工作的推荐用书，丛书共 13 个分册，涵盖电力需求侧管理工作的管理、技术、工具三个层面。本书是其中的《电机系统节能技术》分册。具体介绍了电动机和调速驱动系统节能、泵系统节能、风机系统节能、压缩空气系统节能和电机系统节能标准等内容。

本丛书可供各级政府主管部门、电网企业、能源服务机构、电力用户相关人员阅读、使用。

图书在版编目（CIP）数据

电机系统节能技术 / 国家发展改革委经济运行调节局，国家电网公司营销部，南方电网公司市场营销部编. —北京：中国电力出版社，2013.10

（电力需求侧管理系列丛书）

ISBN 978-7-5123-4957-5

I. ①电… II. ①国… ②国… ③南… III. ①电机—节能—技术培训—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 227964 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 10 月第一版 2013 年 10 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 22 印张 269 千字

印数 0001—3000 册 定价 55.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

为深入开展电力需求侧管理工作，增强全社会科学用电、节约用电、有序用电的意识，提高从业人员电力需求侧管理业务水平，国家发展和改革委员会经济运行调节局会同国家电网公司营销部、南方电网公司市场营销部组织有关单位和专家编写出版了《电力需求侧管理系列丛书》。

本丛书共 13 个分册，涵盖电力需求侧管理工作的管理、技术、工具三个层面。其中，管理层面有《中国节约能源法规与政策解析》《综合资源规划与资源选择》等分册；技术层面有《能效电厂理论与实践》《负荷特性及优化》《重点用能行业节能技术》《能源审计》《通用节能技术》《分布式能源与热电冷联产》《空调与热泵技术》《电机系统节能技术》《电蓄冷蓄热技术及技术经济评估》等分册；工具层面有《节能量和节约电力测量与核证》《欧盟能效指令与白色证书》等分册。

本丛书是国家发展和改革委员会开展电力需求侧管理培训工作的推荐用书，可供各地政府主管部门、电网企业、能源服务机构、电力用户相关人员阅读、使用。

丛书的编写得到了国家发展和改革委员会能源研究所、能源基金会、德国国际合作机构、国际自然资源保护协会、国网能源研究院、中国电力科学研究院、东南大学、北京交通大学等单位、机构和专家的大力支持。

本分册为《电机系统节能技术》，由国际自然资源保护协会游梦娜（Mona Yew）主编，秦宏波、李玉琦编写了绪论，秦和编写了第一章，赵争鸣编写了

第二章，秦宏波编写了第三章，王才元、李玉琦编写了第四章，秦宏波编写了第五章，赵跃进编写了第六章，全书由国际自然资源保护协会李玉琦主审。

由于编写时间仓促，书中难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见。

编 者

2013 年 10 月

《电力需求侧管理系列丛书》编委会

主 任 鲁俊岭

副主任 徐阿元 吴建宏 王 勤 胡兆光

编 委 (按姓氏笔画排序)

马丽华	王玉萍	王成强	王 林	王宗义	王海龙
王海波	王 榕	王德亮	王 鑫	韦加雄	卞忠庆
左松林	田永军	史景坚	冯小维	朱 炯	朱 清
乔 昆	任 泽	华普校	刘学军	刘宪明	刘继东
关长祥	江 峰	孙红光	李开明	李永宁	李 郁
李绍祥	李洪宾	李家才	李惊涛	杨仁泽	杨锦辉
何 胜	汪穗峰	张庆云	张兴华	张 军	张志飞
张 波	张南娇	张艳红	张继刚	张 磊	陈少江
陈 军	陈 枫	范继臣	林世良	金必煌	金国生
周新民	郑建平	赵小平	赵青山	胡占廷	钟树海
段学民	姜林福	羿宗胤	夏云飞	夏 鑫	顾国栋
徐 兵	徐 磊	卿三红	郭炳庆	朗 琼	陶时伟
黄永斌	黄志明	黄惠英	梅学民	曹念忠	崔海山
董 新	舒旭辉	路民辉	詹 昕	廉国海	颜庆国
薛建虎	檀跃亭	魏宏俊			

《电力需求侧管理系列丛书》编写组

组 长 陈江华

副 组 长 周 珏 徐杰彦

编写人员 (按姓氏笔画排序)

丁 胜	王振宇	王 鹤	尹玉霞	吕晓剑
闫华光	吴亚楠	吴在军	李玉琦	李 军
李铁男	李涛永	李德智	邱泽晶	张小松
陈 磊	苗常海	周伏秋	周 莉	周 晖
单葆国	钮文洁	黄学良	曹 荣	蒋利民
谭显东	Wolfgang Eichhammer			

目 录

前言

绪论	1
第一章 电动机	4
第一节 概述	4
第二节 电动机的分类和基本工作原理	6
第三节 电动机的损耗与效率	20
第四节 高效率电机	24
第五节 电动机运行节能	39
第六节 电动机节能的潜力	49
第二章 电动机调速驱动系统	52
第一节 电动机调速驱动系统分类	52
第二节 变频器及其调速原理	63
第三节 变频器驱动的电机特性	74
第四节 变频调速系统匹配与节能	87
第五节 调速节能的典型应用	98
第六节 调速节能效果的合理测算	104
第三章 泵系统节能	117
第一节 概述	117
第二节 泵系统基础知识	121
第三节 泵系统设计和运行	130

第四节	泵系统优化的机会和措施	137
第五节	泵系统的测量和评估	155
第六节	泵系统节能案例	167
第四章	风机系统节能	173
第一节	概述	173
第二节	风机的性能	179
第三节	风机的运行	190
第四节	风机的调节	195
第五节	风机的节能	198
第五章	压缩空气系统节能	204
第一节	概述	204
第二节	压缩空气基础知识	208
第三节	压缩空气系统供气侧	215
第四节	压缩空气系统用气侧	229
第五节	压缩空气系统优化机会和措施	234
第六节	压缩空气系统测试与评估	251
第六章	电机系统节能标准	257
第一节	我国电机系统节能标准体系	257
第二节	电机系统能效标准	263
第三节	电机系统经济运行标准	290
参考文献		340

绪 论

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传动装置及其他各类电气设备，是量大面广的终端耗能大户。电机系统包括电动机、被拖动装置、传动控制系统及管网负荷。据统计测算，2011 年我国各类电动机保有量约为 17 亿 kW，总耗电量约达 3 万亿 kW·h 以上，约占全国用电量的 64%。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%。电机系统快速增长的电力需求给资源供给和环境保护带来巨大压力。

我国的中小电动机平均效率约为 87%，风机、水泵平均设计效率为 75%左右，均比国际先进水平低 5 个百分点，系统运行效率低近 20 个百分点。电机系统用电占全国工业用电的 75%以上，因此提高该部分的能效水平，对于能源节约、环境保护和应对气候变化、开展需求侧管理工作具有重要而积极意义。

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) 电动机及被拖动设备效率低。电机产品效率比国外先进水平约低 2~5 个百分点，虽然国产高效电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，部分风机、泵类采用机械节流方式调节，效率比变频调速约低 30%。电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 2000 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

提高电机系统的能效, 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电力变压器、电机、拖动设备的自身效率及匹配达到最优。根据“美国电机挑战计划”和“欧洲电机挑战计划”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。经过多年努力, 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 3.2 亿~3.8 亿 kW , 年耗电量约 2 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 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 400 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 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, 为电机系统老旧设备淘汰更新提供了指南。

(2) 改善电机拖动系统调节方式。推广变频调速、永磁调速等先进电机调速技术, 改善风机、泵类电机系统调节方式, 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机系统进行调速改造, 合理匹配电机系统, 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, 逐步采用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、电机总容量 10 万 kW 以上大型企业的示范改造等。

(4) 优化电机系统的运行和控制。采用新技术、新工艺, 完善电机系统控制, 优化运行。推广软启动装置、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。

本书由电动机和调速驱动系统、泵系统、风机系统、压缩空气系统和电机系统节能标准及能效标准五部分组成, 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、泵和空气压缩机系统的特点, 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。

本书也为我国电网企业落实我国电力需求侧管理办法，开展需求侧管理工作提供技术参考。

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。

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。对此国家发展改革委在 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”即为其其中的一项。国家发展改革委又在 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 个百分点，相当于每年浪费电能约 1500 亿 kW·h。”我国国务院

在 2006 年 8 月底发布了《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和社会发展的的重要因素，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措施积极推进中。我国国家标准化委员会于 2006 年发布了强制性标准《中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价》，文件规定 2011 年 7 月 1 日以后将禁止销售低能效电机。2010 年 6 月，我国财政部、国家发展改革委联合颁布《关于印发节能产品惠民工程高效电机推广实施细则的通知》，将高效电机纳入节能产品惠民工程实施范围，采取财政补贴方式促进推广。

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等介质输送等 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皮带轮；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。

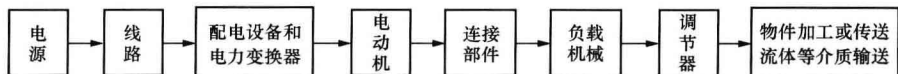


图 1-1 电动机系统的能量传递

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，然后提高整个系统的效率；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

电动机可按馈电电源、工作原理、功率大小、结构型式、产品用途等各种方式来分类。

1. 按馈电电源和工作原理分类

一般可分为交流电动机和直流电动机。

(1) 交流电动机：由交流电源馈电，又分为同步电动机和感应电动机。

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。

感应电动机（即异步电动机）：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，电机转速与所接电源频率之比不是恒定关系，则为感应电动机。感应电动机特别是笼型感应电动机，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机。但其调速性能差，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。

感应电动机可分为三相感应电动机和单相感应电动机，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：由直流电源馈电，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启动、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，大大缩小了它的应用范围。

2. 按功率的大小或机座号或电压等级分类

一般分为微特电机、小功率电机、小型电机、中型电机和大型电机等。

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

功率范围：从数百 mW 到数百 W。

机座号范围：机座的外径一般不大于 130mm。

(2) 小功率电机：又称为分马力电机，主要用于家用电器及各种小型机具等。

功率范围： $\leq 2.2\text{kW}$ 。

机座号范围： $\leq \text{H}90\text{mm}$ 。

额定电压：大多数为 220、380V 的常用电压。

(3) 小型电机。

功率范围： $0.12\sim 315\text{kW}$ 。

机座号范围： $\text{H}63\sim 355\text{mm}$ 。

额定电压：在 660V 及以下，大多数为 380V/220V 常用电压。

(4) 中型电机。

功率范围： $315\sim 3000\text{kW}$ 。

机座号范围： $\text{H}355\sim 630\text{mm}$ 。

额定电压：常用的电压等级为 6kV 和 10kV，少量为 3kV。

(5) 大型电机。

功率范围： 2000kW 及以上。

机座号范围： $\text{H}710\text{mm}$ 及以上。

额定电压：目前常用的电压等级为 6.3、10.5、13.8kV 等。

3. 按产品的结构分类

对于防护型式可分为封闭型电动机和防护型电动机；对于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分类

电动机通常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，有绕线转子式电动机、变极多速电动机、起重冶金专用电动机、电磁制动电动机、盘式制动感应电动机、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 中列出了电动机的种类及主要用途。应该指出，该表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。

表 1-1 电动机的种类及主要用途

种 类			主 要 用 途
1. 交流电动机	同步电动机	1) 有刷励磁同步电动机	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
		2) 无刷励磁同步电动机	同上，并可用于防爆等特殊场合
		3) 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
	感应电动机	1) 笼型感应电动机	用于驱动一般机械设备
		2) 绕线转子感应电动机	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