

电动机节能技术

陈丕璋 周明宝 俞鑫昌 编著

科学出版社

电动机节能技术

陈丕璋 周明宝 俞鑫昌 编著

科学出版社

1989

内 容 简 介

本书是编著者在系统总结国内外电机节能技术的基础上编写而成的。书中反映了编著者近年来所取得的最新研究成果。本书从理论上分析了电动机损耗产生的原因,提出了相应的节能措施,并列举了有关工厂的电机节能方面的典型实例。全书共十二章,主要内容包括:高效电机优化设计,降低通风及杂耗方法,运行条件对电机效率的影响,功率因数与有功损耗关系,以及各种调速方法等。

本书内容新颖,理论密切联系实际,节能技术措施先进,实用性强。书中介绍的一些节能方法与措施经首都钢铁公司、北京第三棉纺厂等单位的生产验证,已收到明显的节能效果。

本书可供从事电机设计、研究和运行方面的专业技术人员阅读,也可供大专院校电机专业的师生参考。

电动机节能技术

陈丕璋·周明宝 俞鑫昌 编著

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1989 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1989 年 3 月第一次印刷 印张:11 1/4

印数:0001—6,790 字数:255,000

ISBN 7-03-000759-X/TM·12

定价: 5.50 元

前 言

多年来我国大部分地区存在着缺电现象。有些地区的统计表明,如果电力能够充分供应,该地区的工业产值可增加20%以上,短期内这一目标还不能完全达到。用电系统中电动机负荷占80%以上,节约电动机用电有很大经济效果。近年来广大电机科技工作者在电机节电方面做了大量工作,国外也有不少书籍及论文论及这方面的成果,但系统全面地论述电机节电技术的著作还不多。作者根据广大电机技术人员的要求,在多次节电培训班授课讲义的基础上,吸取了作者在这方面的科研成果及国内外有实效的技术措施,编著了这本书,从理论到实际,从设计到运行,较系统、全面、详细地阐述了电动机节电技术。这种技术的主要特点是:

(1) 分别对待用户要求,采用优化设计研制高效电机,减少损耗。现有系列电机由于兼顾广大用户的多方面要求,效率往往不高,而具体用户一般只偏重某些性能要求,充分利用这一点,就可以设计出高效电机。再加上优化技术,使设计的高效电机或采取的技术措施符合综合经济效益高的原则。例如根据大部分机械负载只要求单方向旋转,我们设计了单向节电风扇(电机冷却用风扇),在首都钢铁公司等单位试运行后已向全国推广,年节电几千万度。又如针对一些纺织专用电机在50—100%负载率要求高效率,我们设计了细纱机专用高效电机,在北京第三棉纺厂及第一棉纺厂推广后年节电二百多万度。

(2) 分析各种运行条件对电机及其负载的影响,适当改

变运行条件和方式,获得节电的效果。例如有些工厂供电电压偏高,采用降低电网电压后一般可节约电能 2—3%,还节省了无功功率。在负载需要的情况下,电机调速运行一般可节省电能输入 20—30%。

本书前七章论述不调速电机节能原理和方法,从设计和运行角度,对电机产生损耗的各种因素进行了分析;后五章分析了电机调速节能。如果本书能在电机节能方面起些作用,这正是编著者的愿望。

我们在从事这项工作中,曾得到北京市三电办公室、北京市电机工程学会等单位的支持。书中许多论述得到了北京市电机工程学会理事长吴祖光及国务院科技办公室钱振蒙两位高级工程师和北京工业大学吕叔康副教授的赞同和支持,书中许多实例取自北京第三棉纺厂、首都钢铁公司等工厂,在此谨向上述单位及有关同志表示感谢。

本书第二、三两章由俞鑫昌编写,第五、八至十二章由周明宝编写。陈丕璋负责其他各章编写并对全稿进行了整理和统一,限于水平,书中一定会有不妥之处,欢迎读者指正。

目 录

绪论	1
§ 0-1 节电在我国社会主义建设中的作用	1
§ 0-2 国内外电动机节能技术的发展	2
§ 0-3 电动机节能的经济性和可靠性	7
第一章 电动机效率和损耗分析	10
§ 1-1 不同型式电机的效率	10
§ 1-2 电动机的损耗分类	16
§ 1-3 鼠笼异步电动机的损耗分析	19
§ 1-4 端电压变动时电机的损耗	22
§ 1-5 三相电压不平衡时异步电动机运行损耗分析	28
§ 1-6 电源频率变化对电机损耗的影响	32
§ 1-7 非正弦波形电源下的异步电动机损耗	36
§ 1-8 电机起停损耗	39
第二章 高效电机的优化设计	43
§ 2-1 概述	43
§ 2-2 电机优化问题的数学模型	44
§ 2-3 优化问题的分类	46
§ 2-4 无约束非线性优化理论	48
§ 2-5 有约束非线性优化理论	57
§ 2-6 无约束优化问题中几种常用的直接搜索法	64
§ 2-7 有约束优化问题的常用解法	82
§ 2-8 混合离散规划问题的特点	93
§ 2-9 电机优化设计中各种优化方法的比较	98
§ 2-10 高效节能电机的最佳效率论证	104
§ 2-11 几种专用高效电机的优化设计	106
第三章 高速异步电动机通风损耗的降低与节能	118
§ 3-1 概述	118

§ 3-2	电机的高效率通风系统	121
§ 3-3	节能风扇的效果与水平	124
§ 3-4	高效通风系统的设计特点	126
§ 3-5	轴流风扇设计	134
§ 3-6	轴流风扇设计步骤与例题	145
第四章	异步电动机杂耗分析	152
§ 4-1	概述	152
§ 4-2	定子相带谐波磁动势在转子中产生的损耗	155
§ 4-3	齿谐波产生的转子导条损耗	156
§ 4-4	斜槽转子横向电流损耗	159
§ 4-5	空载杂耗	162
§ 4-6	负载杂耗试验方法之一——反转法及抽出转子法 ..	164
§ 4-7	杂耗测试方法之二——热当量法	170
§ 4-8	降低杂耗的措施	173
第五章	异步电动机轻载调压节能	186
§ 5-1	调压节能原理及条件	186
§ 5-2	调压节能估计	188
§ 5-3	调压运行最佳调压系数	194
§ 5-4	调压方法及装置	201
第六章	节能的永磁电机	205
§ 6-1	小型及微型直流永磁驱动电动机	205
§ 6-2	永磁同步电动机	209
§ 6-3	永磁电动机的优化问题	214
第七章	异步电动机的功率因数及无功补偿	217
§ 7-1	异步电动机的功率因数与经济当量	217
§ 7-2	无功补偿装置之一——电容器组及静态、动态自动补 偿装置	220
§ 7-3	无功补偿装置之二——同步电动机及进相机	222
§ 7-4	线绕异步电机同步化	223
§ 7-5	线绕异步机与自励式相位补偿机串接	225

§ 7-6	无功补偿点的选择	228
§ 7-7	补偿实例	230
第八章	鼠笼交流电动机调速节能一般原理和方法	233
§ 8-1	异步电动机调速方法和分类	233
§ 8-2	交流电机调速节能与机械负载特性关系	234
§ 8-3	风机、泵类电机节能估计及计算公式	240
§ 8-4	风机负载用几种常用交流调速方法的试验分析	244
第九章	鼠笼电机变极、调压及耦合器调速	252
§ 9-1	变极调速	252
§ 9-2	定子调压调速	263
§ 9-3	电磁调速电动机	267
§ 9-4	液力耦合器	274
第十章	线绕异步机转子串电阻及串级调速	280
§ 10-1	转子串电阻调速	280
§ 10-2	串级调速	285
第十一章	变频调速及旋转矢量控制	293
§ 11-1	交直交变频调速	293
§ 11-2	脉冲宽度调制 (PWM)	303
§ 11-3	交交变频	309
§ 11-4	异步电动机旋转矢量控制	315
第十二章	可控硅电动机调速	321
§ 12-1	可控硅电动机基本构成和工作原理	321
§ 12-2	可控硅电动机的换流	324
§ 12-3	可控硅电动机的特性及调速方法	329
§ 12-4	可控硅电动机向量图	333
§ 12-5	可控硅电动机的过载能力	335
§ 12-6	可控硅电动机的效率和功率因数	336
§ 12-7	交流式可控硅电动机	336
附录		341
参考文献		345

绪 论

§ 0-1 节电在我国社会主义建设中的作用

“到本世纪末的奋斗目标定了,在不断提高经济效益的前提下,二十年工农业的年总产值翻两番”^[1]。工农业产值翻两番,电力装机容量也必须相应地翻两番,才能满足整个工农业、交通、市政及生活等用电要求。要做到这一点是不容易的。这就要求进一步增加发电设备装机容量,调整农轻重比例,改变产品品种,多生产耗电小的产品,此外还必须在各行各业中广泛实行节电,才能实现这一指标。根据我国生产用电与世界主要工业国家生产用电比较(见表 0-1),这种可能性是存在的。

表 0-1 1980 年几个国家的生产总值及电力消耗^[1]

国 别	生产总值 (亿美元)	发电量 (亿度)	工农业交通用 电量/总发电 量(%)	每度电生产总 值(美元/度)	每度电产值/ 中国每度电产 值(美元/度)
美国	25871	23578	40.94	2.68	3.19
苏联	14886	12950	84.7	1.35	1.60
日本	10701	5775	66.4	2.79	3.32
联邦德国	6717	3688	57.3	3.17	3.77
中国	2366*	3006	93.5	0.84	1.0

* 按 1 美元折合 3 元人民币计算。

从表 0-1 可见,按实际工农业生产用电量来计算,我国每度电的产值仅为苏联的 2/3,为美、日和联邦德国的 1/3 左右,这说明我国节电的潜力是很大的。

1982 年我国每度电平均产值为：轻工业 7.29 元，重工业 1.62 元，农业 5 元，乡镇企业 3.6 元。目前我国多数电力系统供电很紧张，许多地区常因供电不足，影响生产产值。每节约一度电即可多增产 2.6 元。

据电力部门统计，目前每单位千瓦电力建设投资费为 1600 元^[3]，这包括电站和输变电设备。假设设备寿命为 15 年，年利用为 5000 小时，即千瓦装机容量每年发电 5000 度，则相当于每度电投资费为 0.021 元，这不包括燃料、运输的投资。假定每年节电率为 5%，1985 年发电量超过 4000 亿度，则每年可节约国家投资 4 亿元以上，同时还赢得了时间。

节电给企业带来的经济效益是节约电费，每度电费 0.1 元左右，如节电率为 5%，每年则可节省电费 20 亿元。经济效益是很明显的。

§ 0-2 国内外电动机节能技术的发展

电动机是工农业生产及日常生活中耗电量最多的一种电气设备。表 0-2 的数据表明异步电动机消耗占发电量的 50% 左右，再加上同步电动机和直流电动机，无疑耗电量超过一半。因此国内外都把节电技术的重点放在电动机及其所带动的设备上。改进工艺流程、方法及使用高效率的设备，可以大大减少电动机的输出功率，这一方法是有效的节能方案。另一方面，对电动机节能技术广泛开展研究，是 70 年代“能源危机”以来的一项重要课题。60 年代中小型电机发展趋势是减少体积和重量，其效率反而比 50 年代的产品还有所降低（见图 0-1）。据不完全统计，1949—1982 年我国电机生产总容量为 3.5 亿千瓦，全国装机容量为 1.3 亿千瓦，而电动机耗电占 60% 左右。近几年才开始高效电机的研制以及对其他节能技

表 0-2 异步电动机耗电占总发电量的百分数^[4]

国 别	占发电量的百分数(%)
美国	64.2
英国	64
联邦德国	50
日本	60—65
民主德国	45
波兰	45—50
加拿大	25

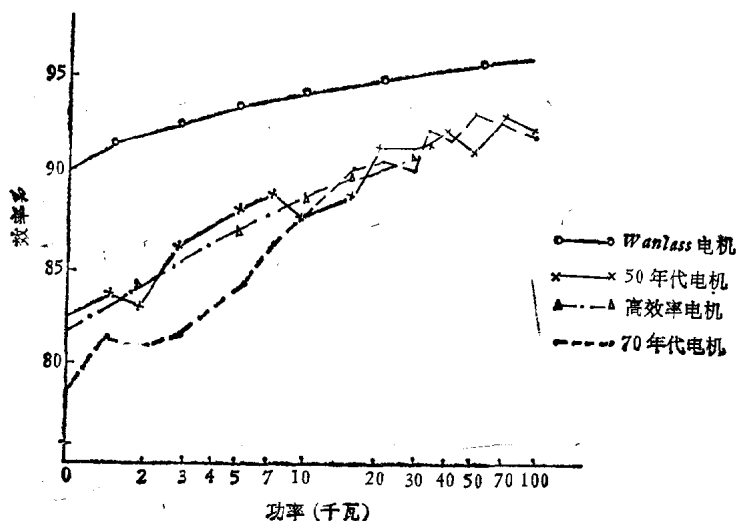


图 0-1 不同年代电机效率变化

术进行广泛研究。

异步电机的效率指标随着“能源危机”的发展而一再提高，美国生产的高效电机，有的已是第三代，GE 公司制造的原基本系列中的一种异步电动机效率为 89.5%，三次高效电机的效率分别为 92.4%、93.6% 及 95.2%，提高了 5.7%。其

表 0-3⁽⁴⁾

公 司	系列型号	功率范围 (千瓦)	总损耗比一般 电机平均下降 (百分数)(%)	成本增加 (百分数)(%)
美,西屋	MACII	0.75—150	36.5	15—25
美,GE	Triclad700	5.5—150	34.4	15—25
美, Reliance	XE	2.2—150	39.3	25
美, Emersor	Corroduty	0.75—150	26.7	15
美, Gould/ contary	E-plus	0.75—18.5	20.8	15—25
法, CEM	MZE	11—132	30	
日,三菱	SF-E Hi-Eff	0.75—37	20—30	30
日,东芝	黄金	0.75—90	20—30	30
日,日立	EX	0.2—132	20	25

他公司也是如此(见表 0-3)。

现在几乎所有大规模生产异步电机的工厂都有高效系列。产量逐年提高,据统计 1979 年美国高效电机产量已占电机总产量的 11%。

高效电机系列一般采用计算机辅助优化设计,选用低损耗硅钢片,增多用材,改进工艺等技术措施。以多用材料来提高效率,有一个经济上是否合理的问题,这是电机设计师研究的重要课题。由于系列设计生产的电机需照顾到多方面的用途,常常有多种技术性能指标必须同时满足,因而限制了效率的提高。实际上,在电机运行时,所带负载只对部分性能指标有较高要求,而对其他一些指标要求不高,利用这一特点所设计的专用高效电机,往往效率高,用材经济。例如日本研制成高效纺织专用电机系列,其中 15 千瓦 4 极电机额定效率达 95% (杂耗按 0.5% 计),比一般系列电机效率高得多。我国也正在研制高效系列异步电动机,其效率比一般系列 (Y 及 JO₂) 电机提高了一定数值^[5],与此同时,也推广了纺织专用高

效电机^[6]。

固定转速的电机经过改型一般可提高效率百分之几，而对转速有变动要求的负载(风机、泵类)选用合适的配套电机，在降速运行时，总能耗节约往往可达20—30%。因而国内外对于电机调速节能的研究都比较重视。传统的直流电机改变电枢电压调速，鼠笼异步机降压调速，线绕异步机串电阻、串接调速等方案仍在应用。异步机变极，采用各种离合器(电磁、液力等)来调速也越来越广泛。而交流机的变频和矢量控制调速装置随着电子元件价格下降及可靠性提高，在国外已在生产中得到广泛应用，国内也开始推广使用，在一定场合下使用电子换向电机是合理的，但目前其成本比较高，推广还有一定困难。对使用电子器件与电机结合的调速系统，目前尚缺乏系统的全面的理论分析，这是近几年来国内外电机界广泛开展的研究课题，鉴于分析计算尚有一定困难，采用模拟、仿真技术，也是一种研究方法。

电动机在不同的运行电压、频率、负荷率等等下运行，其效率也不尽相同。改善供电系统的质量及根据负载情况正确选用电机往往能取得较好的节能效果。国内外在这方面已发表了不少论著。

电动机容量远大于负载的“大马拉小车”现象是常见的，1979年诺拉提出并研制成的功率因数控制节能器已在外国推广，其原理为调节异步电机输入电压，减少励磁电流，在10千瓦以下，负载率小于1/3时，可获得较好的节能效果。由于成本较高，国内虽也已试制成类似产品，但未能推广。根据同一原理，国内采用串电感降压的方案及Y— Δ 转换装置，来达到同样目的。但一般Y— Δ 转换装置在带电转换过程中，有较大冲击电流，其额定电流往往达10倍以上，导致装置烧毁及电机损坏。虽然可以采用加电阻抑制方法，但装置更加复

杂,成本增高,使用受到限制。

运行电压、频率的变化,使电机效率也发生改变。负载率大小不同时,效率变化更大。这些方面的分析计算在电机学教科书及一些文献中已有论述。应用对称分量方法分析三相电源电压不对称问题,也是许多电机学书中讨论过的问题。但适合于运用人员的从能耗角度分析的实用计算,仍较缺乏。

电机的功率因数不但影响无功功率,而且对供电线路、变压器等有功损耗有直接影响。电容补偿是常用的方法,补偿点的选择对节能效果有较大影响,直接在电机输入端补偿可减少线路损耗,但往往会产生电机起动时的振荡、高次谐波增大等现象。采用进相机直接在线绕异步机转子端补偿,会有较好经济效益。Wanlass 发明的新电机(在两套绕组中的一套接上电容),以及国内研制的三相电容电机,可提高电机功率因数及减小杂耗的效果是清楚的,但对 Wanlass 电机的节能效果,国内外尚有争议^[7,8,9,10]。

分马力单相电机虽然每台电机损耗不大,但由于家用电器的发展,使用量越来越大,因而这类电机的节能也受到了重视。采用电容分相可以提高效率。运行电容价格较高,而且寿命有限,有时电容损坏后会影响到电机的寿命,使其采用受到限制。近年来对单相电机定子绕组使用不对称三相绕组^[16]可以提高效率,对于这种电机的分析,还有待于进一步研究。

对同步电动机励磁进行一定调节控制,可以取得节能的效果,其分析和装置设计已有文献专门论及^[12]。当然这必须与供电系统无功补偿统一考虑,才能得到更好的节能效果。

直流电动机采用可控硅调压调速代替电阻器调速的方案已陆续推广,节能效果较为明显。采用永磁材料来代替励磁线圈,可减少铜耗,特别是稀土材料(钕钴、钕铁硼等)的研制成功,使之可用于大型直流电机和交流同步电动机。随着稀

土材料成本的不断降低,采用永磁材料节能的电机必将得到进一步发展。

§ 0-3 电动机节能的经济性和可靠性

电动机采用节能措施后,一般需增加投资或消耗材料,因而必须确定一个具体的节能标准,以判断节能措施的合理性。

1. 经济性

节能措施投资与运行节省电费抵偿关系为:

$$\begin{aligned} & \text{年运行小时} \times \text{节电千瓦数} \times \text{每度电费} \times \text{抵偿年限} \\ & > \text{投资费用} \end{aligned} \quad (0-1)$$

节电度数与节能措施投入的物资生产时所消耗的电度数关系为:

$$\begin{aligned} & \text{年运行小时} \times \text{节电千瓦数} \times \text{抵偿年限} \\ & > \text{节能措施投入物资(千克)} \times \text{每千克消耗} \\ & \quad \text{电度数} \end{aligned} \quad (0-2)$$

由于节能措施投入物资耗能(见表 0-4)远小于节电度数,一般在满足式(0-1)的情况下,式(0-2)也定能满足。

表 0-4^[4]

材 料	铜 线	铝 锭	硅 钢 片
每公斤耗电度数	33.4	80.5	12.1

一台电机(18.5 千瓦)各部件所需的能量构成如图 0-2 所示^[3]。其中66%是硅钢片、铜和铝,这台电机满载效率为87%。如铁心增长35%,铜线增加20%,铝增加9%,则满载效率即增加到89%,而材料及加工所需用总能量增加到 2.9×10^9 焦

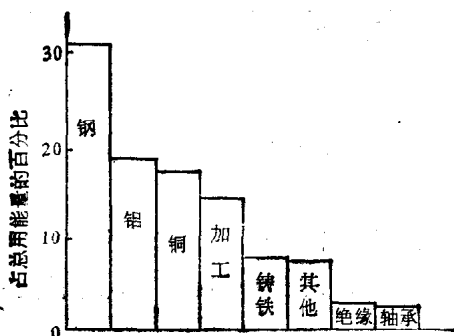


图 0-2 18.5 千瓦三相鼠笼型异步电动机(铸铁机座)
总需用能量构成比(总用能量为 22.2×10^9 焦)

耳,根据式(0-2)所计算,抵偿年限为 1,则运行 510 小时即可回收。所以在高效电机研制中一般不核算能量回收。

抵偿年限随各地能源政策而不同,我们提出的标准是 2—3 年。这是根据我国节能项目可以借用低息贷款 2—3 年,企业可以用节电费用来偿还,不另投资。从第 3 或 4 年开始,企业即可获益。

2. 可靠性

采用节能措施,改变原来电机的设计、结构以及控制等,必须考虑新的电机及其系统的可靠性。在可靠性基本不变或有所增加的情况下才能使用。改变设计,增加材料,一般不影响电机的可靠性。需特别注意的是控制系统部分,对其元件的可靠性必须估算,国内元件差别较大,表 0-5 列出了文献[14]推荐的电子元件的可靠性,以供参考。

根据表 0-5 元件的事故率,可以估算控制系统的事事故率及其电机负载停机后对生产造成的损失。获得对节能措施的全面估价。

表 0-5 电子元器件可靠性

元 器 件	每 1 千小时事故率(%)
塑料薄膜电容器	0.01
电解质电容器	0.2
电阻元件	0.005
线绕电阻	0.01
硅晶体管 >1 瓦	0.08
硅晶体管 <1 瓦	0.008
可控硅	0.1
集成电路	0.01—0.03
连接焊点	0.001
连接屏蔽线	0.0001
多孔插件(每个插头)	0.005
二极管	0.05
真空电子二极管	1.0
真空电子三极管	1.8