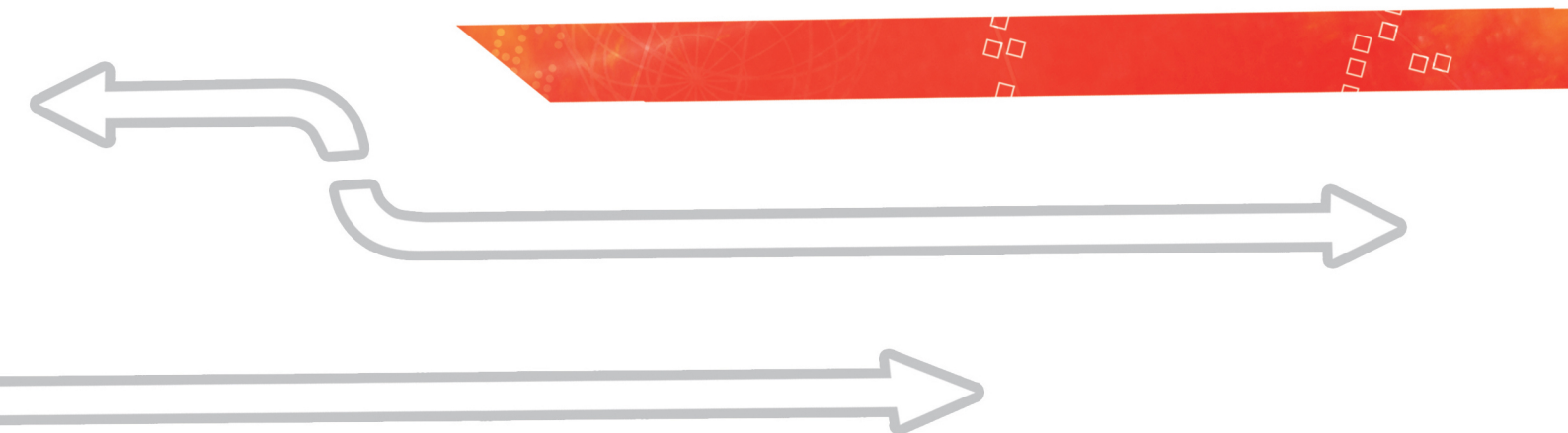


全国电机能效提升计划培训系列教材

Motor

技术指南



工业和信息化部节能与综合利用司

前 言

电机是拖动风机、泵、压缩机、机床、传输带等各种设备的驱动装置，广泛应用于冶金、石化、化工、煤炭、建材、公用设施、家用电器等多个行业和领域，是用电量最大的耗电机械。其用电量占全社会总用电量的60%以上，占工业总用电量的75%左右。近年来在国家政策的支持下，我国电机能效水平得到不断提高，但总体看能效水平仍然较低，我国电机效率平均水平比国外低3-5个百分点，电机系统运行效率比国外先进水平低10-20个百分点，大量在用的低效电机造成了电力和能源的巨大浪费。

为贯彻落实“十二五”节能减排规划和工业节能“十二五”规划，推动高效电机开发和推广应用，促进电机产业升级，全面提高电机能效水平，工业和信息化部决定组织实施《电机能效提升计划（2013—2015年）》。为便于电机系统节能工作的参与者全面了解电机能效提升的相关政策、标准及技术案例，我们委托国家中小型电机及系统工程技术研究中心编制了全国电机能效提升计划系列教材。本系列教材分为《政策汇编》、《技术指南》和《案例汇编》三个部分，分别从政策解读、技术理论和实践案例三个方面进行了阐述，旨在为企业实施电机系统节能改造提供政策导向、技术途径和改造模式。

教材主要介绍了电机的种类及电机效率不断提升的发展过程、电机与拖动的典型负载设备的特性和节能措施、电机系统节能技术和误区、电机的高效再制造以及电机系统节能改造典型技术、案例等相关内容，使企业对电机、系统能效及电机系统能效提升措施有较全面的了解和科学的认识，希望对企业采用适宜的技术措施实施电机系统节能改造有所帮助。

教材既对电机系统节能技术基本原理作了简要介绍，又结合实际，重点介绍了应用这些技术进行节能改造的典型案例，整体上通俗易懂。由于时间紧张，加上编写组的水平有限，教材中不可避免的存在一些错误和不足之处，敬请广大读者批评指正。也希望读者能够提供更多电机系统节能改造的典型案例，进一步补充和完善教材。

《全国电机能效提升计划培训系列教材》编写组

2013年6月

目 录

第一章 电机概述.....	1
1. 电机的基础知识.....	1
1.1 电机的工作原理.....	1
1.2 三相感应电动机的工作原理.....	1
1.3 电动机的基本结构.....	2
1.4 电机的分类.....	2
1.5 电动机的主要类型及用途.....	5
2. 我国中小型电机发展历程简介.....	6
2.1 解放前的历史.....	6
2.2 新中国成立后的发展.....	6
2.3 我国第一个符合 IEC 标准体系产品——Y 系列电机.....	7
2.4 Y2 系列电机.....	7
2.5 Y3 系列、YX3 系列电机.....	8
2.6 YE2 系列、YE3 系列电机.....	8
3. 其他电机.....	9
3.1 中型高压异步电机.....	9
3.2 同步电机.....	9
3.3 直流电机.....	9
4. 发展趋势.....	10
第二章 全球能效提升历程及高效电机产品.....	11
1. 高效电机的定义.....	11
2. 全球高效电机的发展过程.....	11
2.1 国外高效电机的发展过程.....	11
2.2 高效电机国际标准的统一.....	12
2.3 我国高效电机的发展历程.....	12
3. 高效电机的节能和经济效益.....	13
3.1 电能的节约.....	13
3.2 经济效益.....	14
4. 现有高效电机的主要产品.....	16
4.1 交流低压高效电机.....	17
4.2 交流低压超高效率电机.....	20
4.3 交流高压高效率电机.....	23

4.4 稀土永磁高效三相同步电动机.....	26
4.5 高效电机的主要产品族.....	26
4.6 高效机组装备产品族.....	27
第三章 影响电机系统运行效率的因素.....	31
1. 电机系统的概念和组成.....	31
2. 电机系统的应用现状和节能潜力.....	31
2.1 电机系统的应用现状.....	31
2.2 电机系统的节能潜力和作用.....	33
3. 影响电机系统运行效率的因素.....	33
3.1 电能质量对电动机效率的影响.....	34
3.2 负载特性对电动机效率的影响.....	35
3.3 负载率对电动机效率的影响.....	35
第四章 电机系统的节能技术.....	37
1. 高效异步电机的置换节能技术.....	37
1.1 高效电机的节能原理.....	37
1.2 高效电机的节能量.....	38
1.3 高效异步电机节能替换的适用范围.....	39
2. 永磁同步电机改造节能技术.....	39
2.1 永磁同步电机的特点.....	39
2.2 永磁同步电机改造节能的适用范围.....	39
3. 变频调速节能技术.....	40
3.1 变频调速节能技术的原理.....	40
3.2 变频调速节能技术的适用范围.....	41
4. 变极调速节能技术.....	42
4.1 变极调速基本原理.....	42
4.2 变极调速的基本方案.....	42
4.3 变极调速节能技术的适用范围.....	43
5. 内馈串级调速节能技术.....	44
5.1 内馈串级调速电机工作原理.....	44
5.2 内馈调速系统的组成.....	45
5.3 内馈串级调速系统的优点.....	45
5.4 内馈串级调速节能技术的适用范围.....	45
6. 调压控制节能技术.....	45
6.1 调压节能原理.....	45

6.2 相控调压节能技术的原理.....	46
6.3 相控调压节能技术的优点.....	47
6.4 相控调压节能技术的适用范围.....	47
7. 电机的减容增效节能技术.....	47
8. 与风机、水泵系统匹配的专用电机节能技术.....	48
9. 其他电机节能新产品及节能技术.....	48
9.1 新型大中型无滑环绕线转子异步电动机.....	48
9.2 无刷双馈调速电机节能技术.....	49
9.3 开关磁阻电机节能技术.....	50
9.4 永磁直驱主轴电机.....	52
9.5 伺服电机产品及系统应用技术.....	53
第五章 电机的高效再制造与节能.....	58
1. 定义、目的与意义.....	58
1.1 定义.....	58
1.2 目的与意义.....	58
2. 高效再制造要求及优势.....	59
3. 高效再制造工艺流程及关键工序.....	60
3.1 再制造整体流程.....	60
3.2 零部件的再制造.....	60
3.3 零部件的更换.....	63
4. 高效再制造与普通维修的区别.....	64
5. 高效再制造产品.....	65
第六章 电机拖动的典型负载系统的特性及节能措施.....	66
1. 风机系统基本特性及节能措施.....	66
1.1 风机分类.....	66
1.2 通风机的用电系统的构成.....	67
1.3 风机的基本参数.....	67
1.4 风机的特性曲线.....	69
1.5 风机系统的节能措施.....	69
2. 水泵系统基本特性及节能措施.....	72
2.1 水泵的分类.....	72
2.2 水泵用电系统的构成.....	72
2.3 水泵现场电能利用率的测试.....	73
2.4 离心式水泵的基本参数.....	73

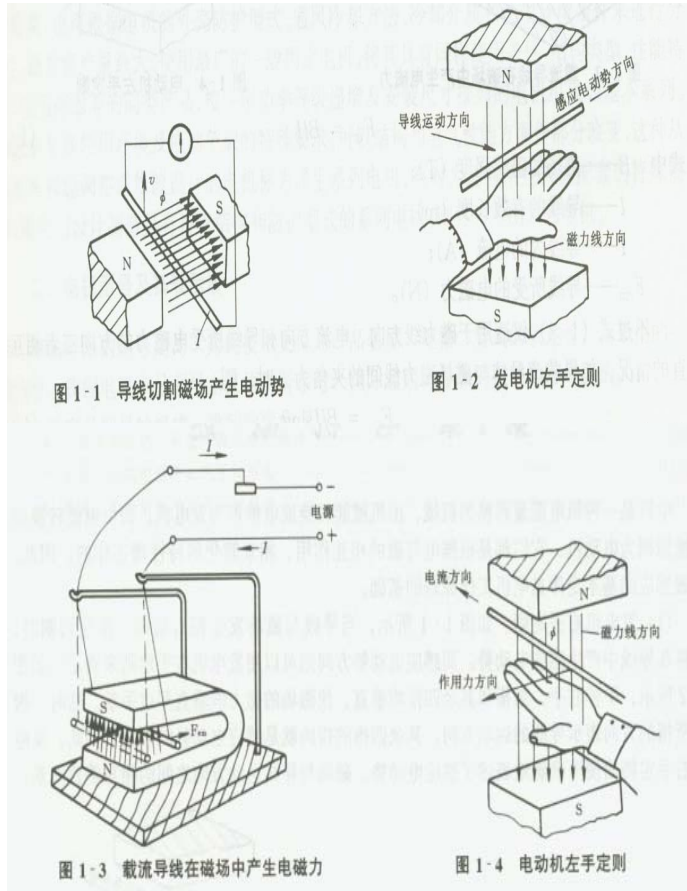
2.5 离心式水泵的特性曲线.....	74
2.6 提高泵系统效率的措施.....	75
3. 空压机系统基本特性及节能措施.....	76
3.1 空压机系统的种类.....	76
3.2 空压机的基本参数.....	77
3.3 空压机的性能曲线.....	79
3.4 空压机系统的节能措施.....	82
第七章 电机系统节能的典型误区.....	85
1. 高效电机简单替换的节能误区.....	85
2. “大马拉小车”型节能误区.....	85
3. 普通电机直接用于变频调速控制的误区.....	86
4. 盲目使用变频调速技术的误区.....	86
第八章 电机系统节能改造的工作方法.....	88
1. 包含范围.....	88
2. 术语与定义.....	88
3. 电动机系统节能改造一般要求.....	88
4. 节能诊断.....	89
5. 项目实施.....	90
5.1 电动机的更新与改造.....	90
5.2 控制装置的改造.....	93
5.3 传动装置的改造.....	96
5.4 被拖动装置的改造.....	96
5.5 管网的改造.....	97
6. 综合评估.....	97
6.1 节能效果监测及评价步骤.....	98
6.2 节能改造效果评价方法.....	98
6.3 节能改造效果检测计算方法.....	99

第一章 电机概述

1. 电机的基础知识

1.1 电机的工作原理

电机是依据电磁感应定律而制造出来的机械，主要用于实现电能和机械能之间的相互转换。根据电能和机械能之间的转换关系，电机可分为发电机和电动机。发电机是由机械能转化为电能，向电网或用电设备输送电能；电动机则是由电能转化为机械能，向机械系统输出动力。发电机和电动机的基本原理与电工学中的“右手定则”和“左手定则”相符，如图 1-1~图 1-4 所示。



1.2 三相感应电动机的工作原理

三相感应电动机的定子由定子铁心和三相交流绕组组成，如图 1-5(a) 所示；转子则由圆柱形的转子铁心和转子绕组组成。常见的转子绕组由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，如图 1-5(b) 所示。

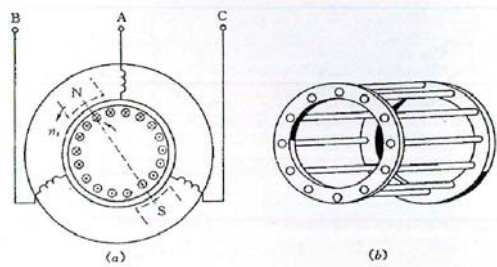


图 1-5 电机定转子结构原理

当感应电动机的定子绕组通入三相交流电源时，流入定子绕组的三相电流就会在气隙内产生一个具有特定极数和特定同步转速的旋转磁场波，这一磁场“割切”转子导条时，会在闭合的转子绕组回路中产生感应电流，通电的转子导条又会在旋转磁场中受到作用力（如图 1-4 所示），即产生了电磁转矩，从而推动转子旋转起来。由此可知这种电动机的特点是：定子由三相交流电源供电，转子边的功率借电磁感应作用由定子边传递过来，故称为感应电动机或异步电动机。

1.3 电动机的基本结构

三相笼型感应电动机主要有定子和转子两大部分组成，图 1-6 表示了一台中小型三相笼型感应电动机的典型结构。由图可见，三相笼型电动机结构定子绕组的定子铁心置于铸铁（或铝制）的机座内。转子铁心槽中的导条与端环连接形成笼型绕组。图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。

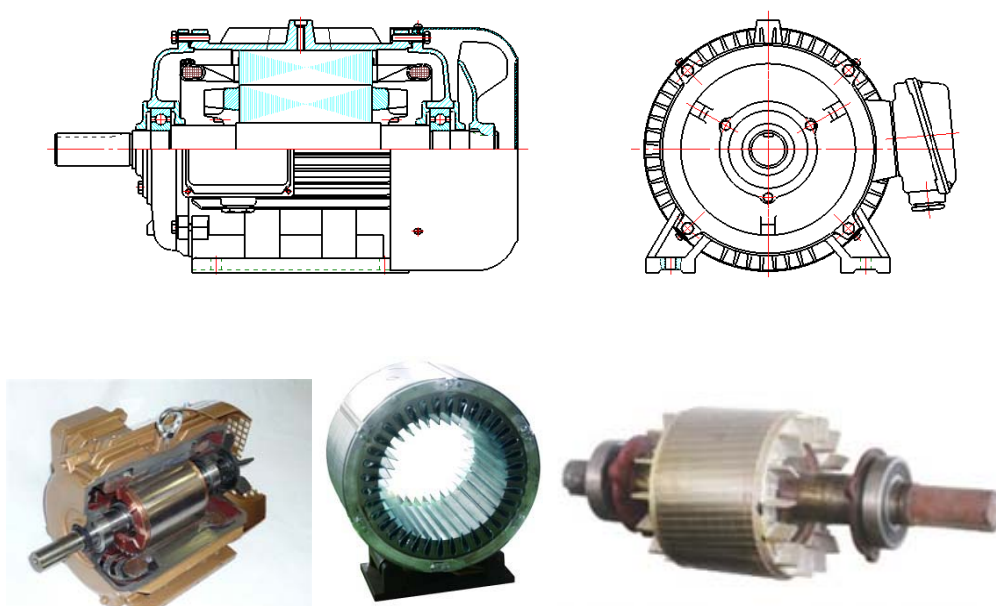


图 1-6 三相笼型感应电动机的结构

1.4 电机的分类

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

1.4.1 按馈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：由交流电源馈电，又分为同步电动机和异步电动机。

(1) 同步电动机：电机的定、转子双边同时馈电，因转子跟随定子绕组产生的“旋转磁场”同步转动，而称为同步电动机。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。

(2) 异步电动机：电机的定子单边馈电，因转子跟随定子绕组产生的“旋转磁场”转动时，转子转速与“旋转磁场”转速有一个微小的“差异”，而称为异步电动机。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。

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，近年来随着交流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。

1.4.2 按运动类型分类

电机有很多种分类方法，从电机运行原理来说、可分为交流电机、直流电机，其中交流电机又可以分为交流同步电机和交流异步电机；从电机的运动方式上来说可以分为静止电机（变压器）、旋转电机和直线电机等（见图 1-7）。

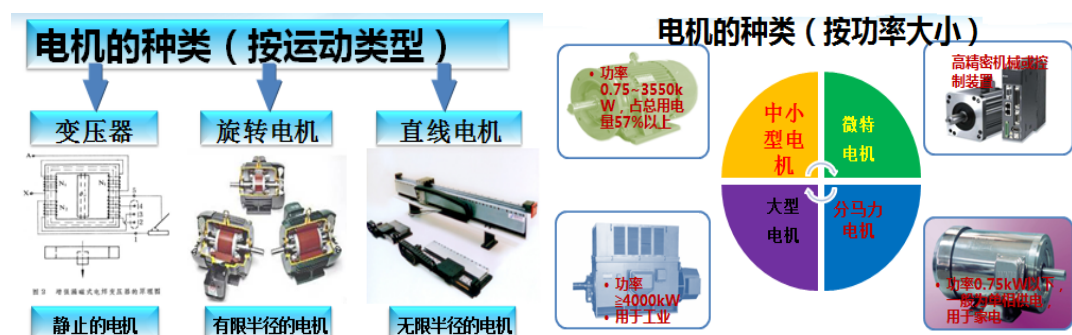


图 1-7 电机的种类

1.4.3 按功率的大小、机座号或电压等级进行分类

一般分为微特电机、分马力电机、中小型电机和大型电机等（见图 1-7）。

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

2) 分马力电机：又称为小功率电机，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) 小型电机：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。

1.4.4 按产品的结构进行分类

按照防护形式可分为封闭型电动机和开启式电动机；电动机的外壳防护形式有很多种类，较常用的有封闭扇冷型（IP54、IP55）和开启式（IP23 或 IP21）两类。按照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。

1.4.5 按产品的类别或用途进行分类

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。

1.5 电动机的主要类型及用途

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，才能够驱动负载。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 电动机的主要类型及用途

种 类		主要用途
同步电动机	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
	无刷励磁同步电动机	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，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
感应电动机	笼型感应电动机	用于驱动一般机械设备
	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
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

2. 我国中小型电机发展历程简介

2.1 解放前的历史

根据史料记载，上海是中国电机制造业的发源地。1914年上海创办了最早的电机、电器修理工场——钱鏞记电器铺，1916年在上海又创办了最早的电机制造厂——华生电器制造厂。1930年前后，开始步入中国电机工业的初级发展时期。1927年在上海成立了最早的“官办”电机厂即国民政府建设委员会电机制造厂。在该时期，华生电器制造厂已开始生产几种规格的交、直流发电机。交流发电机的最大容量达到了200kVA。1932~1933年建设委员会电机制造厂试制成功了3Hp和5Hp电动机后，于1933年开始生产供应0~10Hp笼型异步电动机。1932年上海华成电器制造厂成立并开始生产10Hp以下的小型异步电动机。1934年遇到了江南大旱，华成电器制造厂生产的异步电动机开展了与国外进口产品的竞争，他们在极端困难的条件下取得了胜利，赢得了“中国电动机比外国好”的盛誉，大长了中国人的志气，改变了过去“不相信中国电动机”的历史，奠定了民族工业的发展基础。

2.2 新中国成立后的发展

新中国成立后，中小型电机产品经过不断发展和更新换代，目前我国已经成为世界上最大的中小型电机生产、使用和出口大国。

1952年12月~1953年7月在哈尔滨组织进行了第一次全国电机统一设计，首个中小型电机J、J0系列三相异步电动机产品的诞生，第一次统一了我国中小型电机工业的技术体系，彻底改变了旧中国遗留的电机产品的混乱局面。通过开展电机的标准化、系列化、通用化工作，使产品达到统一并成系列化发展，为中国电机工业的迅速发展奠定了坚实的基础。

1958年开始了J2、J02系列三相异步电动机产品第二次全国电机统一设计。1961年12月成立了J2、J02系列调整设计核心组和工作组，1962年初江泽民同志担任了J2、J02系列调整设计核心组组长，同时从长春第一汽车制造厂调到上海电器科学研究所任副所长，于1965年完成了J2、J02系列产品的鉴定，并开始在全国范围内进行推广应用。

2.3 我国第一个符合 IEC 标准体系产品——Y 系列电机

1978 年 12 月党的“十一届三中全会”后，电机行业也迎来了“改革开放”的新时代。开展了 Y 系列三相异步电动机产品的全国统一设计，1981 年 1 月完成了系列鉴定。Y 系列为我国第一个符合国际电工委员会 IEC 标准体系的电机产品，其功率等级与机座号的对应关系符合国际 IEC 标准，与国际上通用系列产品有较



图 1-8 Y 系列电机

好的互换性，外壳防护符合 IEC 关于防护等级为 IP44 的等级要求；系列效率水平较 J02 有所提高，堵转转矩比 J02 有较大提高。Y 系列三相异步电动机的典型结构外形如图 1-8 所示。

在 Y 系列电机基础上陆续开发完成了 YR 绕线转子、YD 变极多速、YCT 电磁调速、YEJ 电磁制动、YCJ 齿轮减速、YZC 低振动低噪声、YX 高效率、YF 防腐型、YW 户外、YB 隔爆型、Y-H 船用、YM 木工用等 20 多个派生专用系列产品以及 Y 系列（IP23）电动机。自 1985 年起，Y 系列及派生专用系列产品开始全面替代 J2、J02 系列，在全国全面推广。

2.4 Y2 系列电机



1993 年上海电器科学研究所与北京电机总厂、上海电机（集团）公司、大连电机厂联合发起组织了新一代低压三相异步电动机—Y2 系列的研制工作，于 1996 年 4 月完成了系列鉴定。Y2 系列三相异步电动机采用 F 级绝缘结构；防护等级达到 IP54；并首次提出了考核电机的负载噪声及相应的测试方法，电机噪声振动水平优于 Y 系列

图 1-9 Y2 系列电机 电动机（Y 系列电机仅考核电机空载噪声）。

Y2 系列电机机座外形结构与 Y 系列电机不同，其机座上的散热筋采用了当时国际上流行的平行垂直结构，如图 1-9 所示。

2.5 Y3 系列、YX3 系列电机

原国家经贸委 1999 年第 16 号令发布了《淘汰落后生产能力、工艺和产品的目录（第二批）》，明确规定从 2002 年底起淘汰热叠轧工艺、停止生产热轧硅钢片，2002 年 5 月，又再次发布了第 34 号公告《限期淘汰热轧硅钢片》。从环保和国家产业政策的角度来看，该项



图 1-10 Y3、YX3 系列电机

法规是一项利国利民的政策，因此淘汰热轧硅钢片、推广采用冷轧硅钢片（以下简称“以冷代热”）是技术发展的必然趋势，为此，开展了以冷轧硅钢片为导磁材料的 Y3 系列三相异步电动机产品的开发，于 2003 年 3 月通过了鉴定。Y3 系列三相异步电动机同时满足了国家强制性标准《中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价值（GB18613-2002）》中的能效限定值标准要求。

在完成了 Y3 系列电机的开发后，2005 年 10 月又完成了以冷轧硅钢片为导磁材料、效率符合国标《中小型三相异步电动机能效限定值及节能评价值（GB18613-2002）》中的节能评价值标准要求的 YX3 系列高效率三相异步电动机产品的开发。Y3、YX3 系列三相异步电动机的外形结构如图 1-10 所示。

2.6 YE2 系列、YE3 系列电机

随着国际能源的日趋紧张，美国、欧盟等发达国家自 1997 年始陆续制订了推广使用高效率电机的有关法律法规，为了便于各国的技术交流及开展贸易，2008 年 10 月国际电工委员会 IEC 组织正式发布了 IEC60034-30: 2008 “单速、三相笼型感应电动机的能效分级”标准，统一了全球的电机效率标准，将电动机能效标准分为 IE1、IE2、IE3、IE4 四个等级，其中 IE1 为标准效率等级、IE2 为高效率等级、IE3 为超高效率等级、IE4 的效率指标更高。

参照国际 IEC 60034-30: 2008 标准的最新变化，对国标 GB18613 进行了修订，于 2012 年正式发布了 GB18613-2012。新国标 GB18613 将效率等级分为三级，其中 1 级为最高，与 IE4 相当；2 级为节能评价值标准，与 IE3 等同；3 级为能效限定值标准，与 IE2 等同，为三相异步电动机强制实施的最低效率要求。新国标 GB18613-2012 已于 2012 年 9 月 1 日起正式开始实施。

为此，国家中小型电机及系统工程技术研究中心组织开展了 YE2、YE3 三相

异步电动机系列产品的开发，其中，YE2 系列高效率电机符合最新的国家强制标准 GB18613-2012 中 3 级能效限定值标准、同时达到了 IEC60034-30 标准中 IE2 高效率标准要求；YE3 系列超高效率电机则符合 GB18613-2012 中 2 级节能评价标准、同时达到了 IEC60034-30 中 IE3 超高效率标准要求。

3. 其他电机

3.1 中型高压异步电机

中型高压电机主要是指电压等级为 6kV 和 10kV，少量为 3kV 的高压电机，如 Y、YKK 和 YKS 等系列产品。

为提高我国大型发电机组辅机配套电动机的技术水平，原机械部电工局组织全国主要中型电机制造企业从美国西屋公司及瑞士 BBC(现为 ABB)公司引进了大中型交流电动机设计制造技术。在对引进技术资料进行消化吸收的基础上，1988 年组织开展了中型高压电机国产化联合设计工作，在主要材料、关键设备基本立足于国内供应的前提下，通过技术攻关，完成了中型高压新系列电机的开发，缩小了该产品与国外同类产品水平的差距，提高了产品的系列化、标准化、通用化程度。

3.2 同步电机

在同步电机方面，在八十年代~九十年代期间，国内一些同步发电机的主导生产企业也引进了国外先进工业国家的同步发电机系列产品，引进方式有的是技术和图纸，有的是以软技术引进的生产工艺，还有按合作生产方式引进生产国外产品。引进的无刷发电机产品主要有：德国 AEG 公司 DKBH 系列、英国斯坦福 BC 系列、德国西门子 1FC 系列、美国 MP 系列等。

通过上述引进先进工业国家的无刷三相同步发电机系列产品，使我国中小型三相同步发电机的技术水平又有了进一步提高，尤其使国内三相同步发电机的主导生产企业的产品达到了同期的国际先进水平。

3.3 直流电机

在直流电机方面，六十年代开发完成的 Z2 系列直流电机已远不能满足国民经济各领域应用不断增长的需要，急需进行产品的更新换代。在原机械部领导下，

借“引进成套设备的同时引进技术”的东风，在八十年代中期由上海电科所、上海南洋电机厂和西安电机厂组成联合工作组，引进了德国 AEG 公司新系列直流电机技术，通过消化、分析国外的技术资料，结合我国的国情和我们自己的实践经验，历时三年多时间，完成了我国新系列---Z4 系列直流电机的开发，如图 1-11 所示。



图 1-11 Z4 直流电机

Z4 系列是在消化吸收引进技术的基础上开发的新系列，材料立足于国内，采用了适合国情的设计和工艺。Z4 系列的主要技术指标与西德 AEG 公司 4 系列相当，接近当前国际先进水平；安装尺寸符合 IEC 标准，为引进国外设备的单位提供备品，并有利于出口。Z4 系列电机比 Z2 系列同中心高输出功率增加近 10 倍，转动惯量（GD₂）平均减少 48%，电机总重平均降低约 1/4，铜线和硅钢片材料平均节省 9.5~13%，系统的效率（包括直流电源）有较大提高。

4. 发展趋势

近几年，主要发达国家都在各自的发展计划中提出了明确的强制推行高效电机的时间表。各国积极从政策、技术和市场三个方面综合加快电机及系统节能技术的发展。按照欧盟委员会颁布的电机产品 EUP 实施措施法案，欧盟各国自 2011 年已开始强制推行高效率标准电机；美国则自 2011 年起率先强制推行要求更高的超高效率标准电机。根据已掌握的数据，美国、加拿大、澳大利亚等国现有电机的最低效率水平已达到高效率指标，其中美国的实施力度最大，超高效率电机产业化推广效果最好，我国则明显落后。

第二章 全球能效提升历程及高效电机产品

1. 高效电机的定义

针对电机行业中生产和使用量最大、应用面最广的中小型交流异步电动机来说，所谓高效率电机，一般是指达到特定高效率标准要求的三相异步电动机。

2. 全球高效电机的发展过程

2.1 国外高效电机的发展过程

电动机节能对于能源节约和环境保护具有重要作用，因此在 20 世纪 70 年代第一次能源危机后，美国与欧洲的电机制造业纷纷推出了高效率电动机，或称节能电动机。这种三相感应电动机与一般的三相电动机功率等级与安装尺寸关系相同，转矩特性和起动电流指标也基本相同，所不同的是高效率电机的损耗较一般效率电机下降 20%左右，效率则随功率不同提高 1%~6%。为加快高效率电动机的推广应用，美国国会在 1992 年通过了对“能源政策和节能法令”的修订，并正式成为法律。该法令规定在美国生产和进口的电动机必须达到高效率电动机的效率指标，即所谓的 EPACT 法令。美能源政策法令 (EPACT) 所规定的电动机最低效率标准指标，在所规定的功率和转速范围内，与美国电机制造商协会 NEMA 的高效率电动机效率标准 NEMA12-10 的指标相同。

21 世纪初美国电力供应仍然紧张，美国市场上开始出现高于 EPACT 指标的超高效率电机，于是美国 NEMA 在 2001 年与以美国各州电力公司为主组成的能源效率联盟 (CEE) 联合制定了新的超高效率电机标准，称为 NEMA Premium 标准，该标准的起动性能要求与 EPACT 一致，该标准的效率指标基本上反映了目前美国市场上超高效率电机的平均水平。

自 20 世纪 70 年代起，欧洲一些电动机制造厂如德国 Siemens、法国 CEM 等公司也已开发和生产了一些高效率电动机，但一直没有得到较大的发展，1993 年欧盟成立后，情况得到了明显的改观。欧盟组织对电动机的节能潜力、政策和市场作用等进行了调研，并于 1999 年制定了电动机能效标准 (EU-CEMEP 协议)；在电动机应用方面则组织开发了高效率电动机的数据库 (Euro DEEM)。

欧盟和“欧洲电机与电力电子制造商协会 (CEMEP)”达成的 EU-CEMEP 协议对电动机的效率水平进行了分级和标识。该协议对每一规格电机规定了高、低两档

效率指标，产品效率值低于低指标的称为 eff3 电机，介于低指标与高指标之间的称 eff2 电机，高于高指标的称 eff1 电机。

EU-CEMEP 协议所覆盖的产品为全封闭扇冷型（IP54 和 IP55）三相交流笼型异步电动机，功率范围从 1.1—90kW，极数为 2 极和 4 极，电压为 400V、50Hz、S1 工作制（即连续定额），标准设计（即其起动性能符合 IEC60034-12 中 N 设计的技术要求）。

澳大利亚政府为节约能源和保护环境，自 1999 年起开始对家用电器和工业设备，实施强制能效标准计划 (Mandatory Energy Efficiency Performance Standards) 或称 MEPS 计划，由澳大利亚政府下属温室气体办公室会同澳大利亚标准委员会进行管理。据统计澳大利亚电动机使用了澳全国用电量的 30%，对应于 11% 的温室气体的排放。考虑到市场机制很难自发推进这类节能产品的应用，因此政府决定干预。澳大利亚的电动机强制性标准于 2001 年 10 月批准生效，标准号为 AS/NZS1359.5。新西兰也执行此标准。该标准功率范围为 0.73~185kW，具有 2 极、4 极、6 极、8 极。该标准除了规定了强制性的最低标准外，还规定了高效率电机指标，为推荐性标准，并鼓励用户采用。其数值与欧盟 EU-CEMEP 的 eff1 及美国的 EPACT 相近。

2.2 高效电机国际标准的统一

由于高效电机的效率指标与试验方法有直接的关系，上述各国的能效指标的试验方法有很大的差异，主要是电机附加损耗的测试方法和定子铜损耗的温度折算基准存在差异，因而各国的能效标准的数值并不一致。

因此，2006 年由 IEC 组织牵头成立了 IEC60034-30 标准起草工作小组，经过近两年的努力，于 2008 年 10 月正式发布了 IEC60034-30《电动机能效分级》标准，统一了全球的电动机能效标准等级。该标准同时也明确了高效电动机和超高效电动机的损耗测试方法——即采用附加损耗实测的 IEEE-112B 法。

在该标准中，将电动机的能效分为 4 级：分别是 IE1（普通效率）、IE2（高效率）、IE3（超高效率）和 IE4（更高的效率等级）。

2.3 我国高效电机的发展历程

中国于 1998 年颁发了“节约能源法”，并从 20 世纪 90 年代后期开始，对若

于重要用能产品规定了最低能效限值，鼓励节能产品的生产和应用，实施了节能产品的认证制度。电动机作为重要的用能产品也于 20 世纪列入了上述的节能认证计划。2002 年 1 月正式颁发了“中小型三相异步电动机能效限定值和节能评价价值(GB18613-2002)”标准。该标准规定了两套电动机效率指标，一套为最低效率限值，为强制性指标；另一套为节能电机效率评价价值，为推荐性指标。前者为同期所生产的电动机的平均效率水平，后者比前者提高 2%~3%，为节能电动机的效率水平。该标准的目的是通过最低效率限值的实施，淘汰目前冲击市场正常秩序的劣质耗能产品，逐步实现市场从一般效率电动机向高效率电动机的过渡。GB18613-2002 中的最低效率限值等同采用了欧盟 EU-CEMEP 的 eff2 指标，节能评价价值等同采用了欧盟 EU-CEMEP 的 eff1 指标。

随着我国经济的不断发展，能源供应日趋紧张，自 2005 年开始我国对上述电动机能效标准进行了修订。标准 GB18613-2006《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》于 2006 年 12 月批准发布，2007 年 7 月 1 日起正式实施。该标准规定了 4 年过渡期，即在 2007 年 7 月 1 日至 2011 年 6 月 30 日期间电动机的能效限定值仍与原标准（GB18613-2002）相同，但自 2011 年 7 月 1 日以后，原节能评价价值将作为能效限定值实施。

自 IEC60034-30: 2008 标准发布后，我国再次对国标 GB18613 进行了修订，于 2012 年正式发布了 GB18613-2012，自 2012 年 9 月 1 日起已正式开始实施。。新国标 GB18613 将效率等级分为三级，其中 1 级为最高，与 IE4 相当；2 级为节能评价价值标准，与 IE3 等同；3 级为能效限定值标准，与 IE2 等同，为三相异步电动机强制实施的最低效率要求。

3. 高效电机的节能和经济效益

3.1 电能的节约

采用高效率电机的年节电量 ΔE ，可用下式计算：

$$\Delta E = \left(\frac{1}{\eta_0} - \frac{1}{\eta_r} \right) \times P_{2N} \times H \times K_z$$

式中：

η_0 、 η_r —对应于一般电机与高效率电机的效率；

K_z —对应的负荷率；

P_{2n} —电动机额定功率；

H—一年运行小时。

以 11kW、4 极电机为例，普通电机效率为 88%，高效率电机效率为 91%，年运行时间为 4000h，负荷率为 0.75，由上式可得采用高效率电机每年的电能节约为：

$$\Delta = \left(\frac{1}{0.88} - \frac{1}{0.91} \right) \times 11 \times 4000 \times 0.75 = 1234 (\text{kW} \cdot \text{h})$$

3.2 经济效益

经济效益可通过简单的投资回收期计算或采用全寿命周期成本分析法对总费用进行分析计算，现分述如下。

1) 回收期算法

高效率电机由于电能的节约从而减少运行时的电费支出。电费的节约(ΔC_2)可用下式表示：

$$\Delta C_2 = \Delta E C_e N$$

式中： C_e —电费；N—运行年数。

高效率电机为提高效率，在制造上采用了较多或较好的材料，并往往增加一定的工艺措施，从而使电机成本增加。现用 ΔC_1 表示此成本的增加，当运行到一定的年限所节约的电费可能补偿成本的增加，即 $\Delta C_1 = \Delta C_2$ 。这段时间 N_0 称为投资回收期。超过此回收期后的电费节约将是净经济收益。仍以 11kW、4 极电机为例，在年运行时间为 4000h， $K_z=0.75$ ，当效率从 0.88 提高到 0.91，每年节电 1234kWh，电费如以 0.5 元 / (kWh) 计，则每年可节约 617 元。这时电机原售价 2000 元，现提高效率后约增加了 25%，为 500 元。因此可知在这种情况下的投资回收期为 9.7 个月。当年运行小时是 2000h 或 6000h，回收期分别变为 1.6 年或 6 个月。回收期 N_0 的计算公式如下：

$$N_0 = \frac{\Delta C_1}{\Delta E C_z}$$

一般而言，投资回收期通常控制在3年以内。

2) 全寿命周期成本分析法

采用全寿命周期成本分析法的目的是对该产品在其寿命周期内的各项成本进行综合考虑以求优化。图2-1是国内某企业以泵系统为例，采用全寿命周期成本分析法对泵系统寿命周期内的各项成本以及各自占总成本比例所做的示意图。从图2-1可知，设备采购成本和安装调试费用约占全寿命成本的23%左右，运行电费成本约占32%。

若片面追求采购成本低，而带来设备运行成本（如运行电费、维修保养费用、停工生产损失费用）的增加是不可取的。应该说全寿命周期成本最低的方案为首选方案。

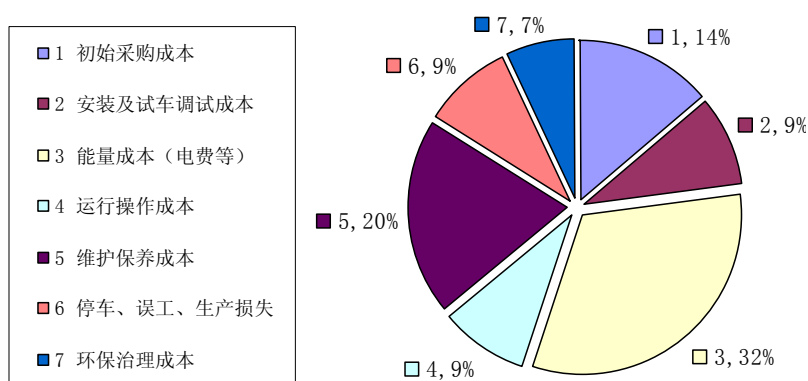


图 2-1 某泵系统全寿命周期成本分析

为估计在整个预定的运行期间 N 年内总费用（即电机售价与运行电费之和）的节约可采用下式。在该式中已考虑了电机制造一次投资和运行费用分期支付在经济效益上的差别。

$$\Delta C = \Delta C_2 - \Delta C_1 = \Delta E C_E N_E - \Delta C_1$$

$$N_E = \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N}$$

式中：

ΔC —采用高效率电机代替一般电机后总费用的减少；

Ne—考虑了投资效果的等效运行时间；

i—贴现率或利润率。

现仍以 11kW、4 极电机为例。电机寿命一般为 10~20 年，现假定运行年限取中值 N=15 年，贴现率 i=0.06，于是按上式可得等效年限 Ne=9.7 年。原效率为 88%，现采用高效率电机效率为 91%，年运行时间为 4000h，负荷率为 0.75，普通电机价格为 2000 元，高效率电机价格增加 25%，为 2500 元。将这些数据代入前式可得电机全寿命周期成本总费用的减少为：

$$\Delta C = 1234 \times 0.5 \times 9.7 - 500 = 5485 \text{ (元)}$$

表 2-1 列出了该典型规格总费用计算概况，从中可见电机初始的购置费用，相对运行电费，所占比例甚小，因此提高效率，降低电费，在经济上是有利的。

表 2-1 11kW、4 极电机总费用计算对比

电机系列	电机价格(元)	15 年运行电费(元)	总费用(元)
标准电机	2000	181864	183864
高效电机	2500	175879	178379
效益比较	超出 500	节约 5985	节约 5485

4. 现有高效电机的主要产品

按照近年国家开展高效电机惠民工程的有关分类，高效电机分为低压高效电机、高压高效电机和稀土永磁同步电机三类。

按照 IEC60034-30：2008 关于电动机能效等级及行业内约定俗成的说法，我国目前在大批量生产的 Y、Y2、Y3 系列以及 J02 系列三相异步电动机为普通效率的电动机产品；YE2、YX3 系列为高效率三相异步电动机产品，YE3 系列等则为超高效率三相异步电动机产品，如表 2-2 所示。

表 2-2 与 GB18613 最新版相对应的我国低压交流电机产品

GB18613-2012 (新标准)	GB18613-2006 (老标准)	IEC60034-30	平均效率 (%)	相对应的产品
1 级效率标准	无	IE4—更高效率等级 (目前为讨论稿)	93.1	—
2 级效率标准 (节能评价)	超高效率标准 (1 级)	IE3—超高效率等级	91.5	YE3、YZTE3 等 系列产品
3 级效率标准 (能效限定值)	节能评价或 高效率标准(2 级)	IE2—高效率等级	90.0	YE2、YX3 等 系列产品
无(已废止)	能效限定值标准 (3 级)	IE1—普通效率等级	87.0	Y、Y2、Y3 等 系列产品

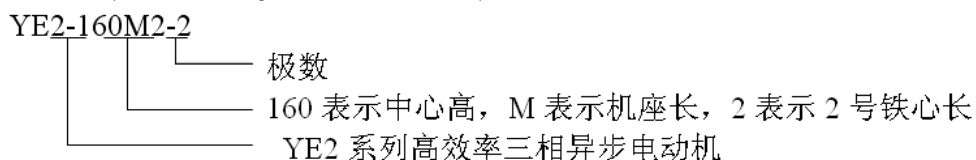
由表 2-2 可知, YX3 系列高效率三相异步电动机效率达到 GB18613-2006 中 2 级节能评价的要求, YE2 系列高效率三相异步电动机效率达到 GB18613-2012 中 3 级能效限定值的要求。实际上, 两个系列的效率水平基本相当, 属于同类的高效率三相异步电动机产品。所不同的是, YX3 系列三相异步电动机采用输入功率按 0.5% 估算杂散损耗的效率测试方法, YE2 系列三相异步电动机采用了美国 IEEE-112. B 法实测杂散损耗的效率测试方法。

4.1 交流低压高效电机

YE2 系列高效率三相异步电动机为符合国标 B18613-2012 中 3 级能效限定值产品, 同时达到 IEC60034-30: 2008 之 IE2 高效率标准要求。

YE2 系列高效率三相异步电动机产品的典型型号标识如下:

YE2 系列高效率三相异步电动机产品的典型型号标识如下:



YE2 系列高效率三相异步电动机产品的主要技术参数如下:

- ◆ 机座范围: 80~355;
- ◆ 极数范围: 2P、4P、6P;
- ◆ 功率范围: 0.75~375 kW;
- ◆ 效率等级: 符合 GB18613-2012 中 3 级能效限定值规定。

YE2 系列高效率三相异步电动机是以连续工作制 (S1) 为基准的连续定额产品, 电动机的额定频率为 50Hz, 额定电压为 380V, 采用 F 级绝缘等级; 电动机的外壳防护等级为 IP55, 电动机的冷却方法为 IC411, 电动机的结构及安装型式符合国际 IEC 60034-7 标准。YE2 系列电机的功率及机座号与转速的对应关系如表 2-3 所示。YE2 系列电机的效率与功率因数的标准保证值如表 2-4 所示。

YX3 系列是与 YE2 系列同类的高效率三相异步电动机产品, 两类产品的效率水平基本相当, 所不同的是两类产品的效率测试方法不同。YX3 系列产品自 2010 年起, 享受国家惠民工程财政补贴。各企业申报列入国家惠民工程财政补贴范围的产品名称不完全一致, 但其效率指标保证值均不应低于表 2-4 的规定。

表 2-3 YE2 系列电机的机座号与转速及功率的对应关系

机座号	同步转速 (r/min)		
	3 000	1 500	1 000
	功率 (kW)		
80M1	0.75	—	—
80M2	1.1	0.75	—
90S	1.5	1.1	0.75
90L	2.2	1.5	1.1
100L1	3	2.2	1.5
100L2		3	
112M	4	4	2.2
132S1	5.5	5.5	3
132S2	7.5		
132M1	—	7.5	4
132M2			5.5
160M1	11	11	7.5
160M2	15		
160L	18.5	15	11
180M	22	18.5	—
180L	—	22	15
200L1	30	30	18.5
200L2	37		22
225S	—	37	—
225M	45	45	30
250M	55	55	37
280S	75	75	45

机座号	同步转速 (r/min)		
	3 000	1 500	1 000
	功率 (kW)		
280M	90	90	55
315S	110	110	75
315M	132	132	90
315L1	160	160	110
315L2	200	200	132
355M1	250	250	160
355M2			200
355L	315	315	250
3551	355	355	-
3552	375	375	315

表 2-4 YE2 系列电机的效率和功率因数的保证值

额定功率 kW	同步转速 (r/min)					
	3 000	1 500	1 000	3 000	1 500	1 000
	效率 η (%)			功率因数 $\cos \varphi$		
0.75	77.4	79.6	75.9	0.82	0.76	0.71
1.1	79.6	81.4	78.1	0.83	0.77	0.72
1.5	81.3	82.8	79.8	0.84	0.78	0.72
2.2	83.2	84.3	81.8	0.85	0.80	0.72
3	84.6	85.5	83.3	0.87	0.81	0.72
4	85.8	86.6	84.6	0.88	0.81	0.74
5.5	87.0	87.7	86.0	0.88	0.82	0.75
7.5	88.1	88.7	87.2	0.89	0.83	0.78
11	89.4	89.8	88.7	0.89	0.83	0.79
15	90.3	90.6	89.7	0.89	0.84	0.82
18.5	90.9	91.2	90.4	0.89	0.85	0.80
22	91.3	91.6	90.9	0.89	0.85	0.81
30	92.0	92.3	91.7	0.89	0.85	0.82
37	92.5	92.7	92.2	0.89	0.86	0.83
45	92.9	93.1	92.7	0.89	0.86	0.85
55	93.2	93.5	93.1	0.89	0.86	0.86
75	93.8	94.0	93.7	0.89	0.87	0.84
90	94.1	94.2	94.0	0.89	0.88	0.85
110	94.3	94.5	94.3	0.90	0.89	0.85

额定功率 kW	同步转速 (r/min)					
	3 000	1 500	1 000	3 000	1 500	1 000
	效率 η (%)			功率因数 $\cos \varphi$		
132	94.6	94.7	94.6	0.90	0.89	0.86
160	94.8	94.9	94.8	0.91	0.90	0.86
200	95.0	95.1	95.0	0.91	0.90	0.86
250	95.0	95.1	95.0	0.91	0.90	0.86
315	95.0	95.1	95.0	0.91	0.90	0.86
355	95.0	95.1	-	0.91	0.89	-
375	95.0	95.1	-	0.91	0.88	-

4.2 交流低压超高效率电机

1) YE3 系列超高效率三相异步电动机

YE3 系列超高效率三相异步电动机是国内首个符合 IEC 60034-30 标准 IE3 效率等级的超高效电机系列产品，同时达到 GB18613-2012 中 2 级节能评价价值的标准规定。

YE3 系列超高效三相异步电动机产品的典型型号标识如下：

YE3-315L1-4

极数
315 表示中心高，M 表示机座长，1 表示 1 号铁心长
YE3 系列超高效三相异步电动机

YE3 系列超高效三相异步电动机产品的主要技术参数如下：

- ◆ 机座范围：80~355；
- ◆ 极数范围：2P、4P、6P；
- ◆ 功率范围：0.75~375 kW；
- ◆ 效率等级：符合 GB18613-2012 中 2 级节能评价价值规定。

YE3 系列电机的功率及机座号与转速的对应关系与 YE2 系列电机相同，如表 2-3 所示。YE3 系列电机的效率与功率因数的标准保证值如表 2-5 所示。

YE3 系列超高效电机是以连续工作制 (S1) 为基准的连续定额产品，电动机的额定频率为 50Hz，额定电压为 380V，采用 F 级绝缘等级；电动机的外壳防护

等级为 IP55，电动机的冷却方法为 IC411，电动机的结构及安装型式符合国际 IEC 60034-7 标准。YE3 系列超高效三相异步电动机也应采用 IEEE112B 法实测杂散损耗的效率测试方法。

表 2-5 YE3 系列超高效电机的效率和功率因数的保证值

功率 kW	同步转速 (r/min)					
	3 000	1 500	1 000	3 000	1 500	1 000
	效率 η (%)			功率因数 $\cos \varphi$		
0.75	80.7	82.5	78.9	0.82	0.75	0.71
1.1	82.7	84.1	81.0	0.83	0.76	0.73
1.5	84.2	85.3	82.5	0.84	0.77	0.73
2.2	85.9	86.7	84.3	0.85	0.81	0.74
3	87.1	87.7	85.6	0.87	0.82	0.74
4	88.1	88.6	86.8	0.88	0.82	0.74
5.5	89.2	89.6	88.0	0.88	0.83	0.75
7.5	90.1	90.4	89.1	0.88	0.84	0.79
11	91.2	91.4	90.3	0.89	0.85	0.80
15	91.9	92.1	91.2	0.89	0.86	0.81
18.5	92.4	92.6	91.7	0.89	0.86	0.81
22	92.7	93.0	92.2	0.89	0.86	0.81
30	93.3	93.6	92.9	0.89	0.86	0.83
37	93.7	93.9	93.3	0.89	0.86	0.84
45	94.0	94.2	93.7	0.90	0.86	0.85
55	94.3	94.6	94.1	0.90	0.86	0.86
75	94.7	95.0	94.6	0.90	0.88	0.84
90	95.0	95.2	94.9	0.90	0.88	0.85
110	95.2	95.4	95.1	0.90	0.89	0.85
132	95.4	95.6	95.4	0.90	0.89	0.86
160	95.6	95.8	95.6	0.91	0.89	0.86
200	95.8	96.0	95.8	0.91	0.90	0.87
250	95.8	96.0	95.8	0.91	0.90	0.87
315	95.8	96.0	95.8	0.91	0.90	0.86
355	95.8	96.0	-	0.91	0.88	-
375	95.8	96.0	-	0.91	0.88	-

2) YZTE3 系列铸铜转子超高效率三相异步电动机产品

YE2、YE3 等系列三相异步电动机产品的均为铸铝转子结构，但随着电动机

效率的不断提高，铜与铝相比所具有的良好导电性，引起人们的高度重视，通过采用铸铜工艺，以降低电机的转子损耗，提高效率。为此，开发了 YZTE3 系列铸铜转子超高效率三相异步电动机产品。

结合当前铸铜转子工艺特点及市场发展的需要，所开发的产品主要以小功率电机产品为主。YZTE3 系列铸铜转子超高效率的主要技术参数如下：

- ◆ 机座范围：80~200；
- ◆ 极数范围：2P、4P、6P；
- ◆ 功率范围：0.55~37 kW；
- ◆ 效率等级：符合 GB18613-2012 中 2 级节能评价规定。

YZTE3 系列铸铜转子超高效率电动机是以连续工作制（S1）为基准的连续定额，电动机的额定频率为 50Hz，额定电压为 380V，采用 F 级绝缘等级；电动机的外壳防护等级为 IP55，电动机的冷却方法为 IC411，电动机的结构及安装型式符合国际 IEC 60034-7 标准。

YZTE3 系列铸铜转子超高效率三相异步电动机的功率及机座号与转速的对应关系如表 2-6 所示，效率与功率因数的标准保证值如表 2-7 所示。

表 2-6 YZTE3 系列电机的机座号与转速及功率的对应关系

机座号	同步转速 (r/min)		
	3 000	1 500	1 000
	功率 (kW)		
80M1	0.75	0.55	-
80M2	1.1	0.75	-
90S	1.5	1.1	0.75
90L	2.2	1.5	1.1
100L1	3	2.2	1.5
100L2		3	
112M	4	4	2.2
132S1	5.5	5.5	3
132S2	7.5		
132M1	-	7.5	4
132M2			5.5
160M1	11	11	7.5
160M2	15		
160L	18.5	15	11

机座号	同步转速 (r/min)		
	3 000	1 500	1 000
	功率 (kW)		
180M	22	18.5	—
180L	—	22	15
200L1	30	30	18.5
200L2	37		22

注：S、M、L后面的数字1、2分别代表同一机座号和转速下的不同功率。

表2-7 YZTE3系列电机的效率和功率因数的保证值

功率 kW	同步转速 (r/min)					
	3 000	1 500	1 000	3 000	1 500	1 000
	效率 η (%)			功率因数 $\cos\phi$		
0.55	—	80.7	—	—	0.75	—
0.75	80.7	82.5	78.9	0.82	0.77	0.70
1.1	82.7	84.1	81.0	0.84	0.77	0.71
1.5	84.2	85.3	82.5	0.85	0.78	0.72
2.2	85.9	86.7	84.3	0.86	0.80	0.72
3	87.1	87.7	85.6	0.88	0.81	0.72
4	88.1	88.6	86.8	0.89	0.81	0.73
5.5	89.2	89.6	88.0	0.88	0.82	0.75
7.5	90.1	90.4	89.1	0.88	0.84	0.79
11	91.2	91.4	90.3	0.90	0.84	0.80
15	91.9	92.1	91.2	0.90	0.85	0.82
18.5	92.4	92.6	91.7	0.90	0.86	0.82
22	92.7	93.0	92.2	0.90	0.86	0.82
30	93.3	93.6	—	0.90	0.86	—
37	93.7	—	—	0.90	—	—

4.3 交流高压高效率电机

按照国家《节能产品惠民工程高效电机推广实施细则》的有关规定，交流高压高效电机的界定范围如下：

- ◆ 额定功率：355~25000kW；
- ◆ 额定电压：6000V、10000V；
- ◆ 极数范围：2P、4P、6P、8P、10P、12P、16P；
- ◆ 效率指标：对应6000V和10000V高压高效电机的效率值（见表2-8、表2-9）。

高压高效率三相异步电动机是在已有的高压电机系列产品的基础上,通过对电机各项损耗降低技术的研究,将原电机总损耗降低了 20%,而达到提高效率目的的产品。

高压电机一般为箱式方形钢板结构、铸铁结构等形式,有多种不同的外壳防护等级和通风冷却方式。

表 2-8 高效高压三相异步电机(额定电压 6000 伏)效率保证值

功率 (kW)	2 极	4 极	6 极	8 极	10 极	12 极	16 极
355	94.8	95.0	95.1	94.7	94.2	94.3	/
400	95.2	95.1	95.1	94.9	94.6	94.6	/
450	95.4	95.3	95.4	95.0	94.6	94.6	/
500	95.6	95.4	95.6	95.4	94.8	94.9	/
560	95.7	95.6	95.7	95.5	94.9	95.0	/
630	95.8	95.8	95.8	95.6	95.0	95.1	/
710	95.9	96.0	96.0	95.6	95.1	95.1	/
800	96.1	96.0	96.0	95.7	95.3	95.3	94.6
900	96.2	96.1	96.1	95.8	95.4	95.4	94.7
1000	96.3	96.2	96.2	95.9	95.5	95.5	94.8
1120	96.4	96.3	96.3	96.0	95.6	95.5	94.9
1250	96.5	96.4	96.4	96.0	95.8	95.6	95.0
1400	96.6	96.4	96.4	96.1	95.9	95.7	95.1
1600	96.7	96.5	96.5	96.2	95.9	95.7	95.1
1800	96.7	96.6	96.6	96.2	96.0	95.8	95.2
2000	96.8	96.7	96.7	96.3	96.1	95.9	95.3
2240	96.9	96.8	96.7	96.4	96.2	96.0	95.4
2500	96.9	96.9	96.8	96.5	96.3	96.1	95.5
2800	97.0	96.9	96.9	96.6	96.4	96.2	95.6
3150	97.0	97.0	96.9	96.6	96.4	96.3	95.6
3550	/	97.0	96.9	96.7	96.5	96.4	95.7
4000	/	97.1	97.0	96.8	96.6	96.4	95.8
4500	/	97.1	97.0	96.9	96.6	96.4	/
5000	/	97.2	97.1	96.9	96.7	96.5	/
5600	/	97.2	97.1	96.9	96.7	96.5	/
6300	/	97.3	97.2	97.0	96.8	/	/
7100	/	97.3	97.3	97.1	96.8	/	/
8000	/	97.4	97.3	97.2	96.9	/	/

9000	/	97.5	97.4	97.3	/	/	/
10000	/	97.6	97.5	97.3	/	/	/
11200	/	97.7	97.6	97.4	/	/	/
12500	/	97.7	97.7	97.5	/	/	/
14000	/	97.8	97.7	97.6	/	/	/
16000	/	97.9	97.8	97.7	/	/	/
18000	/	98.0	97.9	/	/	/	/
20000	/	98.0	98.0	/	/	/	/
22400	/	98.0	/	/	/	/	/
25000	/	98.0	/	/	/	/	/

表 2-9 高效高压三相异步电机（额定电压 10000 伏）效率保证值

功率 (kW)	2 极	4 极	6 极	8 极	10 极	12 极	16 极
355	95.0	94.6	94.4	94.4	94.2	93.9	/
400	95.2	94.7	94.6	94.5	94.3	94.1	/
450	95.4	95.1	94.7	94.6	94.5	94.2	/
500	95.5	95.1	95.1	95.0	94.6	94.5	/
560	95.6	95.3	95.2	95.1	94.7	94.7	/
630	95.6	95.5	95.5	95.5	94.9	94.9	/
710	95.7	96.0	95.6	95.6	95.1	95.1	94.6
800	95.8	96.0	95.7	95.7	95.4	95.3	94.6
900	95.9	96.1	95.9	95.8	95.6	95.3	94.7
1000	96.0	96.2	96.0	96.0	95.6	95.3	94.8
1120	96.1	96.3	96.2	96.1	95.7	95.3	94.9
1250	96.3	96.4	96.3	96.2	95.7	95.3	95.0
1400	96.4	96.5	96.5	96.2	95.7	95.4	95.1
1600	96.4	96.6	96.6	96.2	95.7	95.5	95.1
1800	96.5	96.7	96.6	96.2	95.8	95.6	95.2
2000	96.6	96.8	96.6	96.2	95.9	95.6	95.3
2240	96.8	96.9	96.6	96.2	96.0	95.7	95.4
2500	/	96.9	96.6	96.3	96.0	95.8	95.5
2800	/	96.9	96.7	96.4	96.1	95.9	95.6
3150	/	96.9	96.7	96.4	96.2	96.0	95.6
3550	/	96.9	96.8	96.5	96.3	96.0	95.6
4000	/	96.9	96.9	96.6	96.4	96.1	/
4500	/	96.9	96.9	96.7	96.4	96.2	/
5000	/	97.0	96.9	96.8	96.5	96.3	/
5600	/	97.0	96.9	96.9	96.6	/	/
6300	/	97.1	97.0	96.9	96.7	/	/

7100	/	97.2	97.1	97.0	96.8	/	/
8000	/	97.3	97.2	97.1	/	/	/
9000	/	97.3	97.3	97.2	/	/	/
10000	/	97.4	97.3	97.3	/	/	/
11200	/	97.5	97.4	97.3	/	/	/
12500	/	97.6	97.5	97.4	/	/	/
14000	/	97.7	97.6	97.5	/	/	/
16000	/	97.7	97.7	/	/	/	/
18000	/	97.8	97.7	/	/	/	/
20000	/	97.9	/	/	/	/	/
22400	/	98.0	/	/	/	/	/

4.4 稀土永磁高效三相同步电动机

稀土永磁同步电动机与异步电动机相比，不需要无功励磁电流，可以显著提高电机的功率因数（可达到1，甚至容性）。同时也减少了定子输入电流和定子电阻损耗，而且在稳定运行时没有转子铝(或铜)耗，进而可以减小风扇（小容量电机甚至可以去掉风扇）和相应的风摩损耗，一般与同规格的异步电动机相比效率可提高2~10个百分点。而且，稀土永磁同步电动机在25~120%额定负载范围内均可保持较高的效率和功率因数，轻载运行时的节能效果更为显著。随着技术的不断发展，稀土永磁同步电动机已得到越来越广泛的应用。

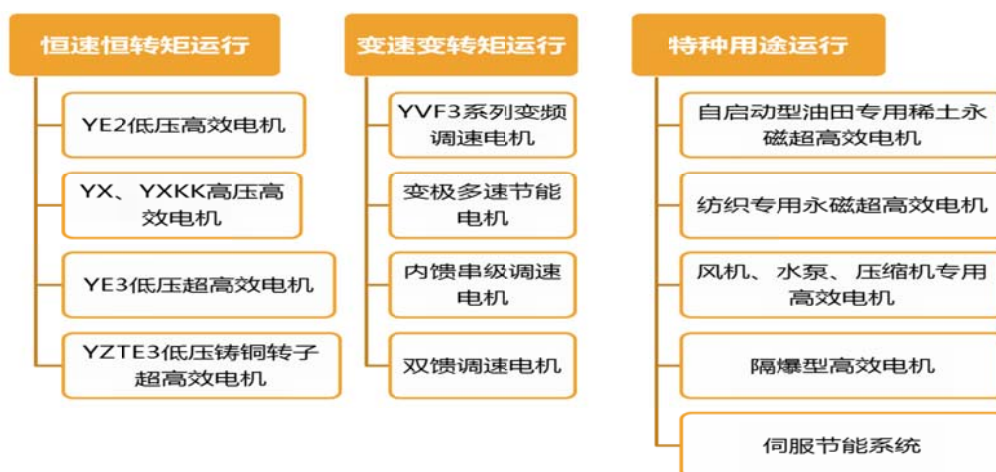
稀土永磁同步电动机的应用场合广泛，已在油田抽油机、纺织机械、电梯曳引机等应用的较多。

按照国家《节能产品惠民工程高效电机推广实施细则》的有关规定，稀土永磁同步电动机的界定范围如下：

- ◆ 额定功率：0.55~315kW；
- ◆ 额定电压：690伏及以下。

4.5 高效电机的主要产品族

电机的种类繁多，同样高效节能电机也是五花八门。按照运行方式及运行场合分类的情况如下：



4.6 高效机组装备产品族

据统计，风机、水泵、压缩机的用电量约占全国用电量的 40%左右。风机、水泵、压缩机等典型负载为电机系统节能的重点领域，为此，高效节能风机、水泵、压缩机也于 2012 年 11 月起列入国家节能产品惠民工程，并于 2013 年 1 月发布了第一批节能产品惠民工程推广产品目录。

1) 高效节能压缩机产品

列入高效节能压缩机推广产品范围的一般为微型往复式空气压缩机、全无油润滑往复式空气压缩机、一般用固定的往复式空气压缩机、一般用喷油螺杆空气压缩机、一般用喷油单螺杆空气压缩机，其能效等级必须达到国标GB 19153-2009《容积式空气压缩机能效限定值及能效等级》能效2级及以上，同时要求配套电机应优先选择能效等级2级及以上的高效节能电机。

国家发展改革委、财政部和工业和信息化部三部委于2013年1月发布的第一批压缩机节能产品有一般用喷油螺杆空气压缩机、微型往复式空气压缩机等四类产品共280个规格，如表2-10所示。

由于双螺杆式压缩机比其它类型的压缩机具有节能效果好、噪声低、结构可靠等优点，而占有较大的市场份额。在发布的第一批压缩机节能产品中，一般用喷油双螺杆空气压缩机共有 247 个规格，占了很大比例。

在发布的第一批压缩机节能产品中，有 49 个规格达到 1 级能效标准，其余 231 达到 2 级能效标准。

压缩机作为基础工业装备，广泛应用于机械制造、冶金、石油化工、矿山、纺织等工业生产的各个领域。

表2-10 节能产品惠民工程高效节能容积式空气压缩机推广企业目录（第一批）

序号	企业名称	微型往复 活塞空气 压缩机型 号个数	全无油润滑 往复活塞空 气压缩机型 号个数	一般用固定 的往复式 空气压缩机 型号个数	一般用喷 油螺杆空 气压缩机 型号个数	一般用喷油 单螺杆空 气压缩机 型号 个数	合计
1	阿特拉斯科普柯（无锡）压缩机有限公司				74		74
2	德斯兰压缩机（上海）有限公司				2		2
3	江西气体压缩机有限公司				5		5
4	上海飞和压缩机制造有限公司					5	5
5	上海佳力士机械有限公司					3	3
6	上海康可尔压缩机有限公司				10		10
7	上海稳健压缩机有限公司				10		10
8	上海优耐特斯压缩机有限公司				1		1
9	英格索兰（中国）工业设备制造有限公司				13		13
10	浙江红五环机械股份有限公司	11		4	32		47
11	浙江佳成机械有限公司				6		6
12	浙江开山压缩机股份有限公司	6		3	76		85
13	浙江志高机械有限公司			1	9		10
14	中山市艾能机械有限公司				9		9
合计		17		8	247	8	280

注：按企业名称拼音首字母排序。

2) 高效节能清水离心泵

列入高效节能清水离心泵推广产品范围的为单级单吸清水离心泵、单级双吸清水离心泵、多级清水离心泵，其能效等级必须达到国标 GB 19762-2007《清水离心泵能效限定值及节能评价值》能效 2 级及以上，同时要求配套电机应优先选择能效等级 2 级及以上的高效节能电机。

国家发展改革委、财政部和工业和信息化部三部委于2013年1月发布的第一批高效节能清水离心泵产品有单级单吸清水离心泵、单级双吸清水离心泵和多级清水离心泵等三类产品共641个规格，如表2-11所示。

表 2-11 节能产品惠民工程高效节能清水离心泵推广企业目录（第一批）

序号	企业名称	单级单吸清水离心泵型号个数	单级双吸清水离心泵型号个数	多级清水离心泵型号个数	合计
1	格兰富水泵（苏州）有限公司			282	282
2	湖南耐普泵业有限公司		1	1	2
3	南方泵业股份有限公司			192	192
4	上海东方泵业（集团）有限公司		146		146
5	上海连成（集团）有限公司	12	7		19
	合计	12	154	475	641

注：按企业名称拼音首字母排序。

3) 高效节能通风机

列入高效节能通风机推广产品范围的为一般用途的离心式和轴流式通风机、工业蒸汽锅炉用离心引风机、电站锅炉离心送风机和引风机、电站轴流式通风机、空调离心式通风机（以下简称风机），其能效等级必须达到国标 GB 19761-2009《通风机能效限定值及能效等级》能效 2 级及以上，同时要求配套电机应优先选择能效等级 2 级及以上的高效节能电机。

国家发展改革委、财政部和工业和信息化部三部委于2013年1月发布的第一批高效节能通风机产品有轴流式通风机34个规格，如表2-12所示。

表 2-12 节能产品惠民工程高效节能通风机推广企业目录（第一批）

序 号	企业名称	轴流通风机型号个数
1	上虞专用风机有限公司	9
2	浙江金盾风机股份有限公司	17
3	浙江明新风机有限公司	8

注：按企业名称拼音首字母排序。

第三章 影响电机系统运行效率的因素

1. 电机系统的概念和组成

电机系统包括电动机、被拖动装置、传动系统、控制（调速）系统以及管网负荷等，是一个涉及多学科、多专业、多领域的复杂系统，亦可称为广义的电机系统。电机系统首先是通过电动机将电能转化为机械能，再通过被拖动装置（如风机、水泵、压缩机、机床、传送带等）做功，实现所需的各种功能。图 3-1 为电机系统的典型示意图。



图 3-1 电机系统典型示意图

电动机吸收电能，并通过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、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介质输送等 8 个部分，如图 3-2 所示。

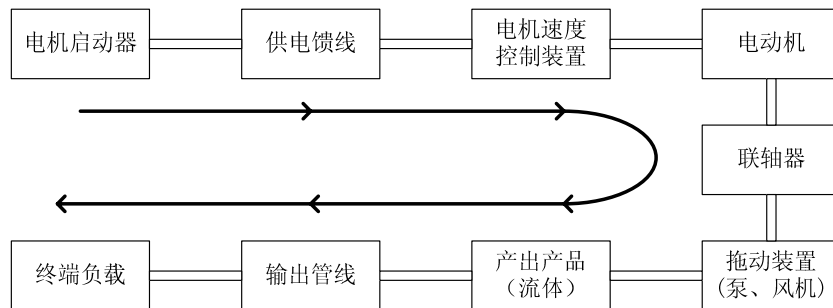


图 3-2 电机系统的能量传递过程

电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，进而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，使得整个系统的效率最佳。

2. 电机系统的应用现状和节能潜力

2.1 电机系统的应用现状

电机及系统的应用范围十分广泛，其用电量占工业系统总用电量的 75%左

右，占我国总发电量的 60%以上。世界各国政府和国际组织已公认电机及系统具有巨大的节能潜力。目前，我国电机及系统在实际应用中较为关键的问题是我们往往把电机和所拖动的设备分开考虑，在提高各设备效率的同时，没有把他们看做一个整体——也就是系统的角度来分析系统的需求、系统的匹配、系统的效率等，这也是我国电机系统运行效率比国外先进水平低比较多的主要原因。

举例来说，图 3-3 是较为典型的老式龙门刨床的组成部分。由于在上世纪很多功率器件和控制技术不过关，整流装置和调压装置无法保证直流调速系统安全可靠的使用，因此在很多较早建立的工业企业中至今还可以看到其直流电机的调速系统是按照如下方式（见图 3-4）设计组成的：



图 3-3 典型的老式龙门刨床

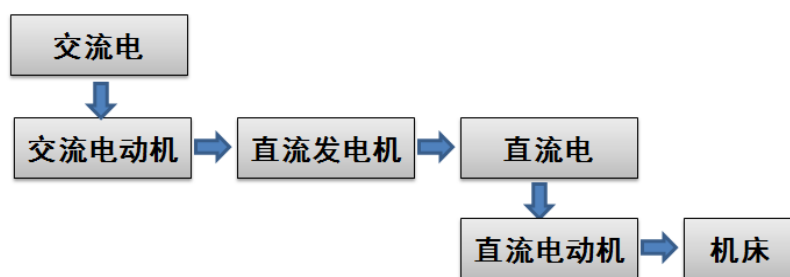


图 3-4 直流电机调速系统工作流程

因为工厂一般是交流电源供电，因此将交流电供给交流异步电机、交流异步电机拖动直流发电机发出直流电（交流变成直流），发出的直流电通过调速控制器对直流电机进行调速，驱动机床等工作。

由于存在能量的转换效率和机组拖动的机械传动效率两个方面的损耗，上述工作流程图表示的这种调速运行模式是一种能耗很高、效率很低的系统控制方式。虽然后期也曾经使用如电磁调速电机系统等其他运行控制方式，但同样存在能耗较高的问题，并至今在很多工业企业中大量存在。可见，我国工业电机系统的运行效率是比较低的。

2.2 电机系统的节能潜力和作用

中小型电机系统的用电量约占全国总发电量的 60%左右，其产量的增长速度最能反映国民经济的增长速度，是国民经济中的重要产业。我国 20 世纪末前的一、二十年，年产量基本在 3 千万 kW 左右。进入二十一世纪，国民经济高速发展，中小型电机也处于快速发展阶段。据国家统计局公布的数据，从 2003 年起首次突破 1 亿 kW 开始，2008 年我国交流电动机的产量达到创纪录的 2 亿 kW，2011 年产量达 2.5 亿千瓦，2003 年至 2008 年底，我国交流电动机的总产量已突破 9 亿 kW，相当于建国后 50 多年总和的近两倍，为建国后 50 多年总和的 1.3 倍。从国际市场需求来看，2012 年中小型电机的年出口量达 5 千多万 kW。我国已经成为世界上最大的中小型电机生产、使用和出口大国。根据国际通用估算方法，电动机装机容量为发电机装机容量的 2.5~3.5 倍，据此推算，今后较长一段时期，电动机产量还将会持续快速扩大。中小型电机产业市场巨大，充分表明了中小型电机及系统在国民经济和社会发展中有着不可替代的重要地位和作用。

电机系统节能是当今国际高度关注和重点研究的领域，也是我国“十一五”乃至“十二五”期间实施节能减排既定国策的重点关注领域。随着全球能源消耗的逐年快速增长，节能降耗、减排，减少温室气体排放已成为全球共同关注的重大问题，中小型电机系统节能潜力巨大，已经成为世界各国政府和国际组织的共识。

近年来在国家政策的支持下，我国电机能效水平得到不断提高，但总体看能效水平仍然较低。从电机自身效率看，我国电机平均水平比国外低 3~5 个百分点，目前在用的高效电机仅占 3%左右；从电机系统运行效率看，因匹配不合理、调节方式落后等原因，电机系统运行效率比国外先进水平低 10~20 个百分点。低效电机的大量使用造成巨大的用电浪费。工业领域电机能效每提高一个百分点，可年节约用电 260 亿度左右。通过推广高效电机、淘汰在用低效电机、对低效电机进行高效再制造，以及对电机系统根据其负载特性和运行工况进行匹配和节能改造，可从整体上提升电机系统效率 5~8 个百分点，年可实现节电 1300~2300 亿度，相当于 2~3 个三峡电站的发电量。

3. 影响电机系统运行效率的因素

影响电机系统运行效率的因素比较多，其中主要有电能质量问题、负载特性和电机本身效率的变化因素引起的电机系统运行效率低下等。

3.1 电能质量对电动机效率的影响

电能质量问题引起的电机系统运行效率低下有以下几种情况：

3.1.1 电压问题（电压不稳定，过、欠压）

根据国家标准 GB755-2008《旋转电机定额和性能》的规定，电源电压最大可允许±10%的偏差。由于铁耗约与电压的平方成正比，定子和转子绕组电流损耗约与电压的平方成反比，因此电动机效率与电压变化的关系，将与不同负载率时，以铁耗为主的不变损耗和定、转子绕组电流损耗为主的可变损耗的比例有关。电压不稳定、过电压或欠电压供电都使电动机不在它的设计电压点上工作，从而降低了效率。

3.1.2 三相不平衡问题

一个三相不平衡的相量可以分解为正序分量、负序分量及零序分量。三相负序分量必然导致电动机损耗增加；零序分量的存在也增加了零线的线损。由于电机损耗与电压不平衡率成平方关系增加，因此在线路设计时应尽量避免三相不平衡的现象。

3.1.3 功率因数偏低问题

由于我国电力设计系统在工厂供电的设计规划中习惯采取冗余设计，导致电机系统的整体运行功率因数偏低，视在功率增大和线路电流增大，增加了线路损耗。应通过无功补偿或无功就地补偿提高功率因数。

3.1.4 瞬变和浪涌问题

瞬变和浪涌现象会对电动机起到有害的作用。可以用压敏电阻和 MOV 器件对系统的瞬变和浪涌进行吸收。

3.1.5 高次谐波问题

电网的高次谐波（通常的高次谐波一般是 5 次，7 次，11 次谐波等），会导致电机绕组集肤效应和邻近效应的增加，使线路损耗增加；同时，高次谐波还会导致电动机定子铁心磁滞损耗和涡流损耗增加（铁耗=涡流损耗+磁滞损耗），从而引起电机额外的发热。

谐波问题对于变压器，配电系统的效率也有一定影响，特别是变频器驱动电机时，普遍反映在原电动机加装变频器拖动后电机的温度明显增加了，这些都是谐波问题带来的影响。

3.2 负载特性对电动机效率的影响

在选用电动机时，应注意负载特性对电机能耗的影响。对于一般恒定负载连续运行的场合，如图 3-5a) 所示 S1 工作制，电气损耗 P_v 不随时间而变，因此可选用在恒定负载时损耗低、效率高的电机，如采用高效率电机或超高效率电机。对于负载特性为周期工作制、短时工作制或包含起动、制动等过程的工作制，应该考虑整个工作周期的损耗最低。如图 3-5b) 所示 S4 工作制，为包含起动的断续周期工作制，其损耗 P_v 由起动加速时的损耗与恒定负载时的损耗组成。如果选用高起动转矩的电机，可缩短起动时间，减少起动损耗，从而使整个工作周期的损耗降低；一般高起动转矩的转子电阻较大，这种电机在恒定负载时的效率相对较低，为此应综合考虑。

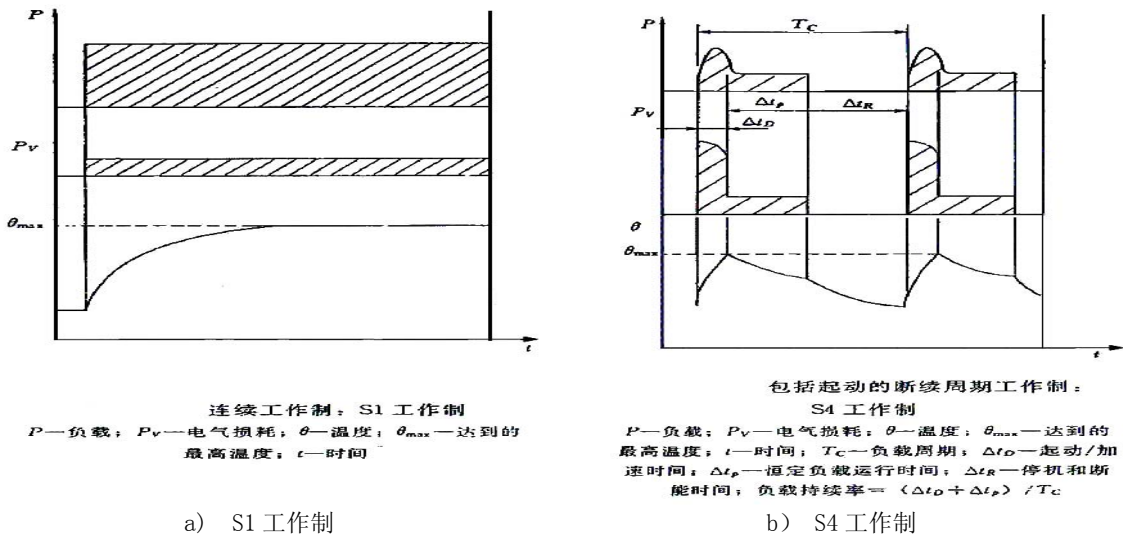


图 3-5 电机不同工作制时的损耗情况

3.3 负载率对电动机效率的影响

电动机的效率可表达如下：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = \frac{1}{1 + \frac{\sum P}{P_2}} = \frac{1}{1 + \frac{P_0 + P_L}{P_2}} = \frac{1}{1 + \frac{P_0 + P_L}{\beta P_N}}$$

总损耗为： $\sum P = P_0 + P_L$

式中： P_0 —不随负载变化的损耗，即空载损耗，包括铁耗和风摩耗；

P_L —随负载变化的损耗，即可变损耗，包括定、转子绕组电流损耗和负载杂耗；

P_N —电动机额定功率；

β —负载率， $\beta = P_z / P_N$ 。

由上式可得电动机运行时，效率最大值即 η' 发生在负载率 β' 处，后者的表达式为：

$$\beta^* = \sqrt{\frac{P_0}{P_{LN}}}$$

式中： P_{LN} —电动机额定功率时的可变损耗。

效率最大值 η' 的表达式为：

$$\eta^* = \frac{1}{1 + 2 \times \frac{\sqrt{P_0 P_{LN}}}{P_N}}$$

由以上两公式可知，只要已知电动机的空载损耗 P_0 和额定功率时的可变损耗 P_{LN} 后，即可求得电机的最大效率以及相应的负载率。例如一台电机可以有两种设计所对应的效率与负载率的关系，A 方案设计的

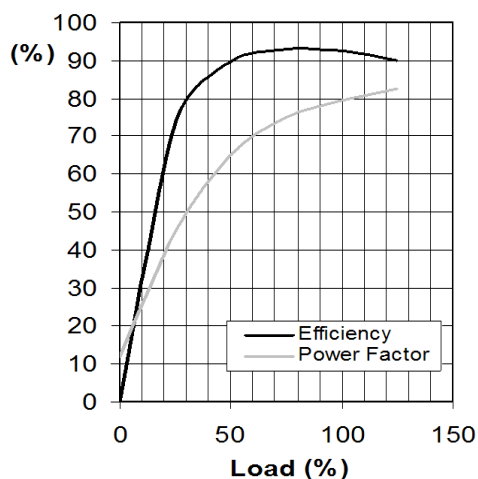


图 3-6 电机效率曲线

$P_0 = 0.03P_N$, $P_{LN} = 0.08P_N$; B 方案设计的 $P_0 = 0.06P_N$, $P_{LN} = 0.05P_N$ 。两种设计额定功率时的总损耗相同，但前者的空载损耗较低，可变损耗较大，后者的空载损耗较大，可变损耗相对较小。因此，两种设计的效率曲线相差甚大，高空载损耗的效率最高点发生在负载率为 1.095 处，即接近额定功率处；而低空载损耗的效率最高点，则发生在负载率为 0.612 处，并且负载率在 0.5~1 范围内，效率均较高。由于电动机大多运行在负载率为 0.6~1.0 的范围内，因此高效率电机均采用低空载损耗的设计，从而具有图 3-6 所示的效率曲线。另外，从图 3-6 可见，不论何种设计，当负载率低于 0.5 以后，电动机的效率急剧下降，因此选用电动机时负载率不能过低。

第四章 电机系统的节能技术

1. 高效异步电机的置换节能技术

电机的效率为电机输出的轴功率（机械功率）和电机输入功率（电功率）之比，用百分数表示为：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

其中： η 代表电机的效率， P_2 代表电机的输出功率， P_1 代表电机的输入功率。

1.1 高效电机的节能原理

电机在能量转化过程中，本身会产生了一些能量的损失，我们称之为损耗。在电机学原理中，电机的损耗一般分为五个部分：定子铜损耗（简称定子铜损或定子铜耗）— P_{cu1} 、定子铁损耗（简称铁损或铁耗）— P_{Fe} 、转子铜损耗（简称转子铜损或转子铜耗）— P_{cu2} 、机械损耗（也称风摩耗）— P_{fw} 和附加损耗（也称杂散损耗）— P_s ，总损耗如下：

$$\sum P = P_{cu1} + P_{cu2} + P_{Fe} + P_{fw} + P_s$$

电机的能量转换过程如图 4-1 所示。根据能量守恒定律，总损耗与电机的输入和输出功率的关系为：

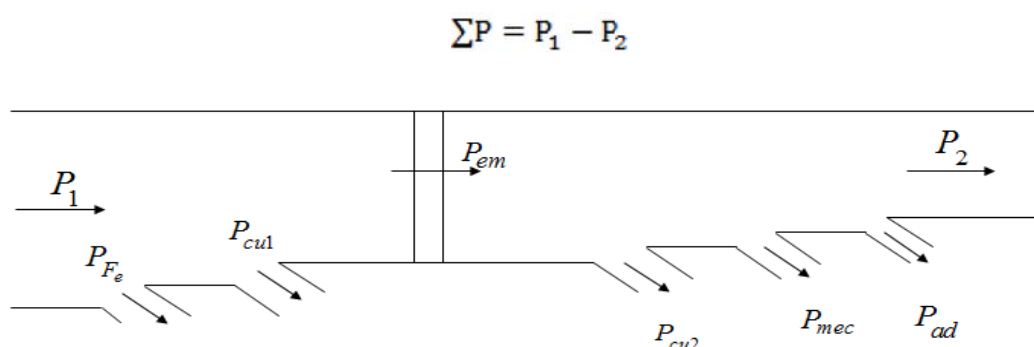


图 4-1 电机能量转换流程图

为降低电机 5 大损耗分别采取的措施和方法如表 4-1 所示。高效电机的设计思路即是通过采用各种相关的措施，来降低电机的损耗，达到提高效率的目的。

表 4-1 电机设计中提高效率的措施及成本对比

目 标	措 施	损耗降低幅度	成本是否增加
降低铁心损耗	由高损耗的热轧电工钢改为低损耗、高磁感的冷轧无取向电工钢	20%	大幅增加
降低定子铜损耗	增加定子有效材料用量、改进线圈结构	20%	大幅增加
降低转子铜损耗	增加转子有效材料用量	15%	略微增加
降低机械损耗	改善通风结构、改进风扇结构、减小风扇尺寸	35%	基本不变
降低附加损耗	改变定子绕组形式、定转子槽配合、加大气隙等	30%	略微增加

1.2 高效电机的节能量

以 YX3-132M-4 高效电机为例，其性能指标与普通效率电机 Y2-132M-4 对比情况如表 4-2 所示，不同年运行时间对应的成本回收期情况如表 4-3 所示。

表 4-2 高效电机与普通效率电机主要性能对比

型号	额定功率	能效等级	效率	功率因数	电压	电流
Y2-132M-4	7.5kW	3 级	87.0%	0.85	380V	15.23A
YX3-132M-4	7.5kW	2 级（高效）	90.1%	0.86	380V	14.71A

表 4-3 采用高效电机的成本回收期

年运行时间（小时）	3000	5000	7000
年节电量（度）	889.8	1483	2076.2
年节约电费（按 0.72 元/度）（元）	641	1068	1495
国家财政补贴（58 元/kW）（元）	435		
上海“以旧换新”补贴（20 元/kW）（元）	150		
成本回收期（按单价 2000 元计算）	2.21 年	1.32 年	0.95 年

若扣除旧电机回购的费用，采用高效电机的成本回收期会更短。

1.3 高效异步电机节能替换的适用范围

由表 4-3 采用高效电机的成本回收期的分析计算可知，交流异步高效电机节能替换的适用范围一般要求为：负载率在 50% 以上、年运行时间较长（一般认为超过 3000 小时）的恒转矩负载。

2. 永磁同步电机改造节能技术

2.1 永磁同步电机的特点

稀土永磁体是一种高性能材料，具有高剩磁密度、高矫顽力、高磁能积等优异磁性能，用它制成的永磁同步电动机与异步电动机相比，不需要用以产生磁场的无功励磁电流，可以显著提高功率因数，使永磁同步电动机的功率因数为 1，甚至达到容性，同时也减少了定子电流和定子电阻损耗；在稳定运行时，转子与定子磁场同步运行，转子中无感应电流，所以不存在转子电阻损耗，进而电机的温升有更大裕度，从而可以将风扇减小甚至不安装风扇，以减少风摩损耗，从而可进一步提高电机效率。因此，稀土永磁同步电动机很容易设计或制造成高效或超高效电机。其特点和优点是：

- ◆ 稀土永磁同步电动机无滑差，转子上无基波铁耗、铜耗；
- ◆ 稀土永磁同步电动机在满载和轻载、空载时，功率因数均可达到 1.0 左右，无功功率小，使定子电流下降，定子铜耗减少，效率提高；
- ◆ 稀土永磁同步电动机效率特性有高而平的特点，在轻载到满载之间相当宽的区域效率为最高；
- ◆ 具有较高的起动转矩。

2.2 永磁同步电机改造节能的适用范围

稀土永磁同步电机与普通的交流异步电机相比，在很宽的负载区域范围内，其效率和功率因数几乎没有什么变化，而不是像普通的交流异步电机，负载率超过一定范围时，效率和功率因数变化很大。因此，其适用于负载经常变化、要求运行节能效果较高的场所，特别是负荷变化较频繁、经常运行于空载、轻载状态的负载，在车床、冲床、化纤、纺织、拉丝类设备上应用有较好的节能效果。

3. 变频调速节能技术

3.1 变频调速节能技术的原理

根据电机学的基础理论，异步电机的转速与电源的频率成正比；与电机的极数成反比，变频调速技术的基本原理基于此，当电源的频率变化时，电机的转速也发生变化。公式如下：

$$n = (1-s) \times \frac{120 \times f}{p}$$

式中：n——电机转速；
f——电源频率；
s——转差率；
p——电机极数。

现以原阀门（或挡板）控制的水泵（或风机）改为变频调速控制为例说明变频调速节能的原理：由于传统的流量调节通过改变阀门或挡板开度来实现。这种情况下，电机总是处于全速运行状态（即使转速有变化也在很小的范围），但实际上机组负荷需要不断调整。因此，这种方法存在严重的节流损耗。下面以水泵为例，比较阀门控制和变频控制的能耗情况。泵的实际输出轴功率为：

$$P = \frac{Q \times H}{1000 \times \eta}$$

根据水泵的相似原理，其非额定点的功率与额定参数的关系为：

$$P = \frac{Q \times H \times \eta_e}{Q_e \times H_e \times \eta} \times P_e$$

由图 4-2 可见，曲线 BD、CE 分别为不同转速下水泵的压力流量关系，BF、AF 为不同的管网阻力曲线。系统消耗有效功率的大小反映于管网阻力曲线上的压力 H 和流量 Q 的乘积，而泵的输出功率大小反映于水泵特性曲线上的 H 和 Q 的乘积，A 为额定工作点。η₁、η₂ 分别为水泵在转速 n₁、n₂ 下的效率曲线，水泵在设计时应在额定

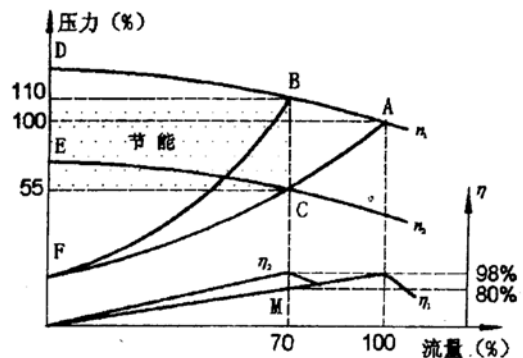


图 4-2 泵调节方式的特性对比

流量时获得最大效率。阀门开度减小时，受其节流作用，泵的管网流动阻力增加，水泵运行点沿恒转速曲线 BD 的 A 点上升到 B 点，使泵出口压力升高，流量减少。同时，水泵的工作效率沿曲线 η_1 从最高点下降到 M 点。此时耗电量减少不多而效率下降较多。

采用变频技术调节流量时，由于阀门全开，只改变水泵转速而不改变泵的管网阻力，当水泵转速降低时，其压力/流量曲线下移，运行点将由 A 点沿恒管网阻力曲线 AF 降到 C 点，即水泵流量减少，出口压力降低，同时其效率曲线随转速的改变由 η_1 移到 η_2 ，水泵始终工作在最佳效率附近，其节省能耗如图 4-2 阴影部分所示。可见，通过变频技术调节同样的流量时，总效率基本维持不变或下降不多，能耗却可大幅度减少。

由公式可知：当转速减小时，电动机的能耗将以其三次方的速率下降。如流量要求由 100% 降到 70%，则转速相应降到 70%，压力降到 49%，而电机的功率降到 34.3%，即节约电能 65.7%，因此变频调速的节能效果十分显著。

3.2 变频调速节能技术的适用范围

变频调速节能技术是根据负载变化的需要，通过改变电机的转速来实现电机系统的节能。变频调速节能与高效电机置换节能的原理、方法和适用范围以及节能效果完全是两个概念、两种途径，两种方法的对比如表 4-4 所示。

表 4-4 变频调速节能与高效电机置换节能的区别

比较项目	变频调速节能	高效电机置换节能
适用范围	负载经常变化	负载相对恒定
控制/运行方式	负载变化与电机转速变化有关，因而需要改变电机的转速	负载变化与电机转速变化无关，基本不需要改变电机的转速
效率考核方法	目前变频电机仅仅可以测量某运行点的固定效率	按额定负载点进行测量和考核
节能效果评价方法	按照调速范围进行评价	按照实际运行点与额定点参数比较进行评价

采用变频调速节能技术时，变频调速系统本身会增加整个电机系统的损耗，具体表现为，变频器自身的损耗会引起系统损耗增加 3~6%；而在变频器供电情况下电机也将增加损耗 1~2%，因此系统总损耗将增加 4~8%；同时还要考虑采用变频器增加的购置成本及增加的维护成本。因此，在调速时满足工况要求，节

能效果明显的情况下可选用。

4. 变极调速节能技术

4.1 变极调速基本原理

通过变换异步电动机绕组极数从而改变电机的转速，这种方式称为变极调速。其转速只能按阶跃方式变化，不能连续变化。变极调速的基本原理是，在电网频率不变时，电动机转速与它的极数成反比，当极数变化时，电机转速也发生变化。

以一相绕组为例，这相绕组由两部分组成，即 T1-V1 和 T2-V2。（由 2 个完全对称的半相绕组组成），当这两部分顺序串联连接，即 U1-T1-V1-T2-V2-U2（U1、U2—单相电源 2 极），则产生 4 个磁极，如图 4-3a）所示；当这两部分逆序连接，即 U1-T1-V1- V2- T2-U2（U1、U2—单相电源 2 极），则产生 2 个磁极，如图 4-3b）所示；当这两部分逆序并联连接，即 U1-T1-V1-U2 U1-V2-T2-U2（U1、U2—单相电源 2 极），则产生 2 个磁极（如图 4-3c）所示）。

目前国内开发成功的变极多速电机主要有恒转矩变极的 YD 系列和变转矩变极的 YDT 系列两类产品。YD 系列变极多速电机产品主要适用于机床类配套设备，YDT 系列变极多速电机主要适用于风机、泵类配套类设备。

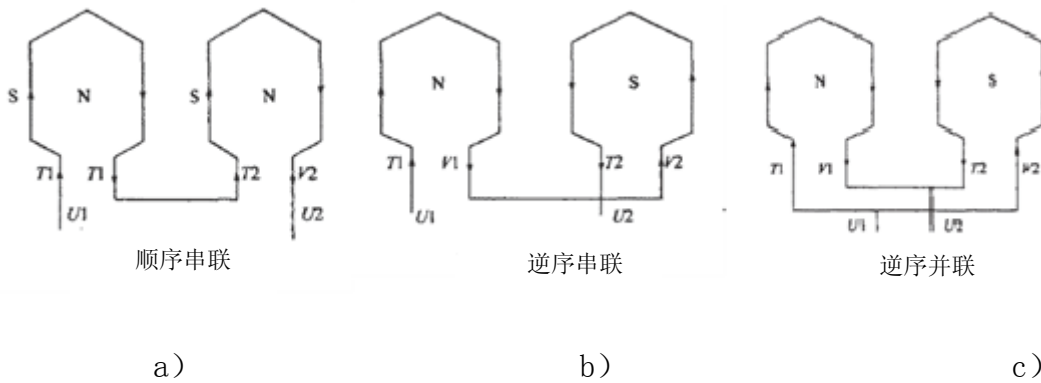


图4-3 绕组变极原理图

4.2 变极调速的基本方案

1) Y/YY 变极调速

当定子每相两个半相绕组相串联，出线端 T1、T3、T5 接三相电源，T2、T4、T6 悬空，每相有两个出线端时，则定子绕组为顺序串联连接，形成 Y 接法，如图 4-4a) 所示；当出线端 T1、T3、T5 被短接，T2、T4、T6 接三相电源，每两个半相绕组逆序并联连接，定子绕组形成 YY 型接法，如图 4-4b) 所示。

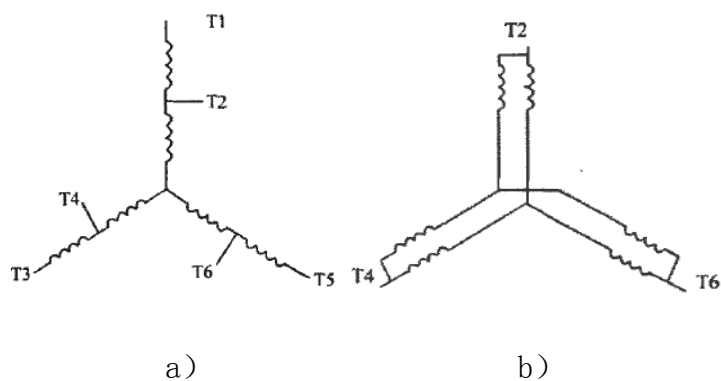


图4-4 Y/YY变极调速接线

2) Δ /YY 变极调速

当定子每相两个半相绕组相串联，出线端 T1、T3、T5 接三相电源，T2、T4、T6 悬空，每相有两个出线端时，则定子绕组为顺序串联连接，形成 Δ 型连接，如图 4-5a) 所示；当出线端 T1、T3、T5 被短接，T2、T4、T6 接三相电源，每两个半相绕组逆序并联连接，定子绕组形成 YY 接法，如图 4-5b) 所示。

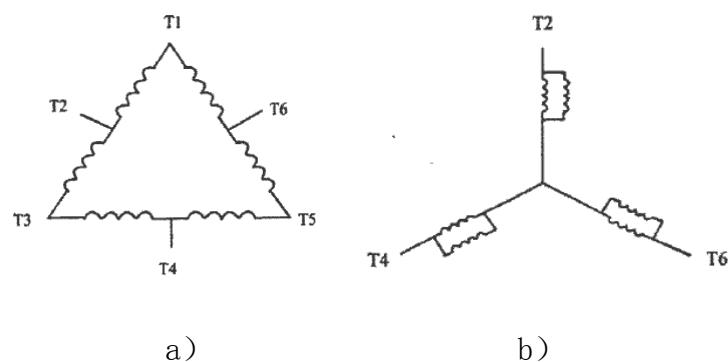


图4-5 Δ /YY变极调速接线

4.3 变极调速节能技术的适用范围

因为变极多速电动机转速的变化意味着其功率也将随之变化，而且速度的变化是一种阶梯式的，因此变极调速节能技术的适用范围是需要进行调速、但转速

调节的频次不高或随工艺要求定变速调节的场所。

5. 内馈串级调速节能技术

5.1 内馈串级调速电机工作原理

由于在传统的串级调速系统中，绕线电机转子附加电势的提供是通过逆变变压器和逆变装置把电网的交流电转换成直流电，经整流装置馈入电机转子的。同时，逆变变压器将转子的转差功率反馈给电网。这种系统的缺点就是系统结构复杂庞大，另外更重要的是，转差功率在电机定子绕组、转子绕组、整流装置、逆变变压器和电网间进行循环，而转差功率在上述的循环中，必然产生一定的损耗，造成系统效率降低，电机温升较高。而且用户都希望系统装置越小越好，节省空间。在传统的串级调速系统中把逆变变压器去掉，即用内反馈电机代替原来的普通异步电动机。这种将转差功率通过整流逆变装置反馈给电机内部(而不是电网)的电动机，我们称之为内反馈调速电机。内馈电机与普通异步电机基本相似，但其结构不同于普通的异步电机，有其自身特点。

内反馈电机是利用电机绕组多重化技术，在异步电机的定子铁心上增设一套绕组，该绕组主要是用来接收从转子反馈回来的能量以实现电机调速。因此称之为调节绕组，原来的定子绕组称为主绕组。

当电机接通电源时，通过旋转磁场的感应作用，调节绕组产生感应电势，其数值为：

$$E_3 = 4.44 f_1 N_3 K N_3 \phi_m$$

式中：

- f_1 ——电源频率；
- N_3 ——调节绕组的串联匝数；
- KN_3 ——调节绕组的绕组系数；
- 电机主磁通

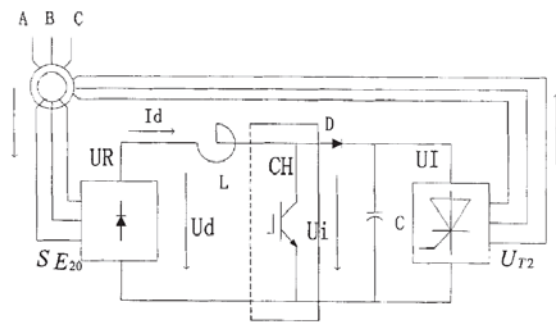


图 4-6 内馈串级调速电机原理

对于异步电机，由于随着转差率的变化，电机转子频率也将改变。为使电机获得调速，必须使反映转子绕组的附加电势与转子电势保持同频率，并且大小可以调节，因此在调节绕组和转子之间需要串接整流逆变装置。调节绕组在为转子提供附加电势的同时，吸收转子的转差功率，然后通过电磁感应的方式，将这部

分功率传输给定子绕组，如图 4-6 所示。

5.2 内馈调速系统的组成

内馈调速系统的组成如图 4-7 所示。

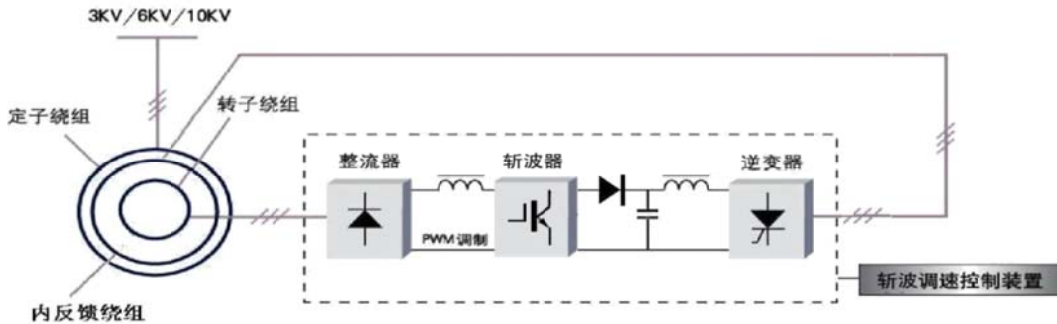


图 4-7 内馈调速系统的组成

5.3 内馈串级调速系统的优点

内馈串级调速系统回避了定子侧高压和大容量问题，以低电压控制高电压，以小功率控制大功率，节约了设备投资成本；同时，继承了内馈串级调速系统原来绕线转子串级调速平滑的优点，但又克服了串级调速功率因数低、谐波污染大的缺点。

5.4 内馈串级调速节能技术的适用范围

主要适用于高压大功率绕线转子异步电动机的调速，且调速范围不是很大的场所。特别适合于大功率风机、水泵类负载的调速。由于内馈调速设备所需要配套电机的特殊性，其适用于如火电厂、水泥厂、化肥厂等拥有大型绕线式异步电动机的各种工业场合。

6. 调压控制节能技术

6.1 调压节能原理

异步电动机在轻载时的效率和功率因数偏低，是异步电动机固有的弱点。若在轻载时降低输入电压，使电机的反电势和主磁通减小，激磁电流也随之减小；由于铁耗基本与输入电压 U_1 的平方成正比例，同样也会较大幅度减少。因此，

轻载时，调低输入电压可适当提高电机的效率和功率因数。调压节能一般适合于轻载运行的中小型异步电动机。

6.2 相控调压节能技术的原理

相控调压节电技术采用改善电动机外部运行环境实现动态电量管理，是与变频器互补的交流电机两大主流节电技术之一。

由于电动机为一感性负载，其电流与电压波形通常存在一相位差，该相位差的大小与其负载的大小有关。相控技术采用闭环反馈系统进行优化控制，通过实时测量电动机的电压与电流波形，将实际相位差与依据电动机特性的理想相位差进行比较，并依此来控制 SCR 可控硅整流桥触发角，给电动机提供优化的电流和电压，以便及时调整输入电机的功率，实现“所供即所需”。

相控技术采用了可控硅半导体与集成电路检测与控制触发系统来实现无触点开关功能，其检测和控制集成电路的高速处理特性和 SCR 的快速反应特点，使得相控器装置能自动处理各种工况下的电动机动态特性，具有软启动、节能、优化运行及保护等特性。

通过采用集成电路芯片控制技术，不断地检测电机的工作状态。当检测到电机在轻载或负载变化时，通过可控硅能在百分之一秒以内调整输入电压，使电机的输出功率与实时负载合理匹配，从而减小损耗，改善电机启动、停机性能，达到良好的节电效果。相控调压节能控制装置的原理图如图 4-8 所示。

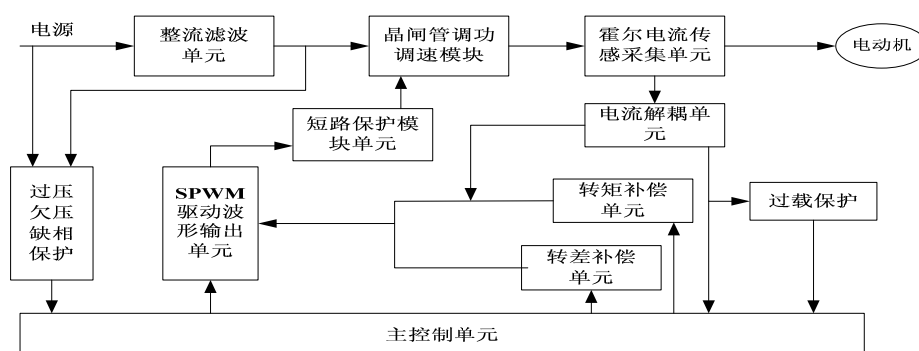


图 4-8 相控调压节能控制装置方案示意图

为满足对节能控制装置稳定性和快速性的要求，系统在晶闸管控制角调整策略中，不但采用功率因数为反馈对象，而且加入电机电流反馈，电机电流可以迅速反映电机负载变化情况。如果电机负载为缓变负荷，电机电流变化不大；如果

电机负载突然增大，电机端电流必然也随着陡增。如图 4-9 所示。

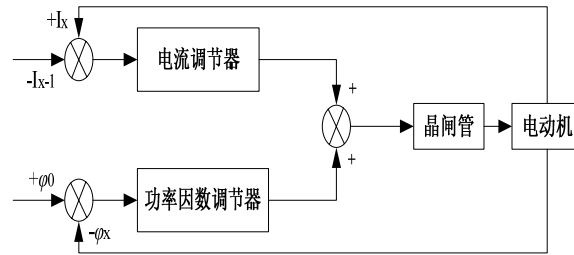


图 4-9 晶闸管控制方案示意图

6.3 相控调压节能技术的优点

- 1) 不改变电机的转速，不影响设备的正常工作；
- 2) 提升电机效率及功率因数、降低无功损耗，延长电机寿命；
- 3) 具有软启动与软停机功能，有效消除电机机械冲击和大起动电流；
- 4) 降低电机温度、噪音，改善工作环境，降低运行成本和维护费用。

6.4 相控调压节能技术的适用范围

相控调压节能技术适用于负荷率较低、功率因数低、负载变化较大且不允许速度变化的设备。相控调压节能技术在各类设备上应用的节电效果与电机的负载率密切相关，电机的负载率较低时，节电率较高；负载率较高时，节电率较低。

7. 电机的减容增效节能技术

根据电动机实际运行工况、容量需求，重新设计制造，减小电动机容量，使之与工况合理匹配，减少无谓的损耗，提高运行的效率，而达到节能的目的。

电动机减容节电主要应用于中大功率电机，中大功率电机主要应用于大型工业，例如冶金、有色、煤炭、电力、油气开采和输送、石化、牵引运输，城市供排水等（如图 4-10 所示）。并在电动机连续运行、不调速、负荷基本恒定、不频繁启动情况下，综合节电率在 15% 左右。



图 4-10 电机的减容节能技术应用工况

8. 与风机、水泵系统匹配的专用电机节能技术

风机、水泵大多是典型的转矩随转速二次方变化的负载，使用普通型的高效电机有时会出现不节能或节能效果不佳的情况。此外，由于水泵、风机厂和设计院的二次选型增容、电机功率等级限制等问题，往往造成电机功率选择过大，使得电动机处于轻载、低负荷率下运行，“大马拉小车”现象普遍，机组效率较低。

针对这一问题，可选用风机、水泵专用电机，专用电机能够与风机、水泵实现功率匹配、转速匹配和效率匹配，可提高整个系统的运行效率。

9. 其他电机节能新产品及节能技术

9.1 新型大中型无滑环绕线转子异步电动机

9.1.1 主要特点

新型大中型无滑环绕线转子异步电动机的主要特点是起动力矩大，为 1.3~2.1 倍；起动电流小，仅为 3.2~5.7 倍，起动时不需要软起动设备；功率因数高，2~10 极电机的功率因数都可达到 0.9 以上，不需功率因数补偿；效率高，160~3000kW、2~10 极电动机的效率可达到 95.4~97.3%。

新型大中型无滑环绕线转子异步电动机的起动状态和正常运行状态可分开设计，解决了普通电机两者无法同时兼顾的难题。可根据运行系统实际的使用工况，进行定向设计制造，使之满足和适合工况需要，使电机和各种成套设备同时长期在高效、高功率因数区域内运行，达到最佳的节能效果。

9.1.2 主要应用场合

该类电机可针对工况进行定向设计，适合于各种不用调速的工矿企业，如矿山、水利、冶金、石化、化工、水泥、建材等。特别“适合”于正在使用绕线滑环电机的工况，如矿山（铁矿、金矿、有色金属矿）球磨机电机、水泥磨机电机、真空泵电机、油隔泵电机、中小型轧钢电机、恒转速的风机、排烟机电机、水泵、油田磕头机专用电机等，进行节能改造，具有明显的节能效果。

9.2 无刷双馈调速电机节能技术

9.2.1 主要特点

无刷双馈调速电动机是近年发展的一种新型交流调速电机，其定子上有两套极数不同的对称三相绕组，一套是功率绕组，直接接 6~10kV 高压电网，另一套绕组是控制绕组，通过变频器接 380V 电源；转子为绕线型无刷结构，可通过低压变频器对高压电动机实现无极调速。无刷双馈调速电机在泵和风机上运用，可实现调速节能的目的，其节能效果和可靠性均优于采用高压变频器调速方案，而用户的资金投入又远小于高压变频器。

无刷双馈调速电动机去掉了电刷和滑环装置，在转子绕组自闭回路的前提下，通过定子侧的控制绕组感应转子绕组的励磁电流和频率，并与定子功率绕组的输出电流和频率耦合。该技术能最大程度地削弱其他高次谐波，与笼型绕组转子电机相比，其结构简单，运行可靠、维护方便。

9.2.2 适用领域

- 1) 各种有调速要求的运行工况，可用 1/3 或 1/2 的低压变频容量取代全功率的高压变频，比高压变频节能 3%以上，并且维护简单，体积小；
- 2) 小型水电站，可使水轮机永远在高效区运行，增加发电量 10~30%以上；
- 3) 风电、船上轴带发电，特别是小风电，与同型号的小风电相比，运行稳

定性好，且制造成本仅为传统产品的 1/2；

4) 适用于双馈移动发电机组，更适应负载的高效运行。

9.3 开关磁阻电机节能技术

9.3.1 主要特点

开关磁阻电机（SRM）是定子、转子双凸极可变磁阻电机。定子、转子均由硅钢片叠压而成，转子上既无绕组、无鼠笼条，也无永磁体，定子极上绕有集中绕组，如图 4-11

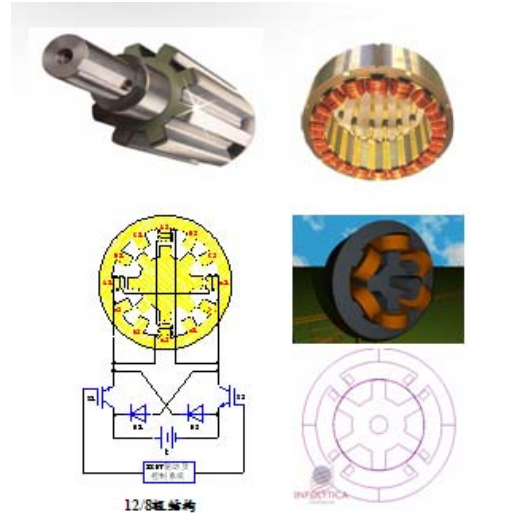


图 4-11 开关磁阻电机结构

所示。开关磁阻电机可设计成多种不同的相数，且定、转子的极数有多种不同的搭配。

图 4-11 左所示为 12/8 极结构电机，定子是 12 极，转子是 8 极，以定、转子的相对位置作为起始位置，依次给 C→A→B 相绕组通电，转子即会逆着励磁顺序以顺时针方向连续旋转；反之，依次给 B→A→C 相通电，则电机逆时针方向旋转，开关磁阻电机的转向与绕组电流方向无关，取决于绕组通电的顺序。

开关磁阻电机调速系统是一种新颖的、具有典型机电一体化结构的无级调速系统。该调速系统具有该调速系统具有以下优点：

- ◆ 系统效率高
- ◆ 调速范围宽，低速下可长期运转
- ◆ 高起动转矩，低起动电流
- ◆ 可频繁起停，及正反转切换
- ◆ 动态响应性能良好
- ◆ 过载能力强
- ◆ 功率器件控制错误不会引起短路
- ◆ 可靠性很高
- ◆ 生产工艺简单

9.3.2 开关磁阻电机节能的应用范围

1) 应用于电动螺旋压力机

直驱式电动螺旋压力机的飞轮与开关磁阻电机的转子合二为一，压力机结构简单、可靠性高、没有传动环节，效率最高。比摩擦压力机节能 50%以上。直驱式电动螺旋压力机逐步占领市场，将淘汰传统的高耗能的摩擦盘式螺旋压力机。如图 4-12a) 所示。

2) 应用于剑杆织机

与传统的采用离合器和变速箱的剑杆织机相比，采用开关磁阻电机驱动，电机可以直接驱动主轴运转，起动转矩可以达到额定转矩的 5 倍以上，主轴在一圈之内就可以达到设定转速，省掉了离合器与变速箱，大大减少了织机的维护量，而且可以根据织物的不同改变电机的转速，方便灵活。剑杆织机应用开关磁阻电机如图 4-12b) 所示。

3) 应用于立式抽油机

立式抽油机采用开关磁阻电机直接驱动，可根据油井的情况及工艺要求方便地调节冲程与冲次，节能效果明显。采用电气换向，省掉了复杂笨重的机械换向装置，简化了机械结构，降低了设备成本，减少了维护，比传统的游梁式抽油机节能 30%以上。图 4-12c) 为双井立式抽油机。



a) 电动螺旋压力机

b) 剑杆织机

c) 为双井立式抽油机

图 4-12 开关磁阻电机的应用

4) 应用于传输带

传输带在装满货物时，起动时需要输出很大的转矩起动，且要求低速运行。开关磁阻电机起动转矩大，起动电流小的特点，可以方便的解决传输带的起动、

低速运行及调速的需要，而且效率高，起动时对电网冲击小。图 4-13 为采用开关磁阻电机驱动的 30 米传输带。



图 4-13 开关磁阻电机应用于传输带

5) 其他应用

开关磁阻电机及调速系统还可以用于压砖机、机械压力机、龙门刨床等设备的节能改造；并在电动汽车、电梯、电动工具家用电器等场合也得到广泛的应用。随着对开关磁阻电机研究的不断深入，振动和噪声也在不断的减小，开关磁阻电机将会在更多的场合获得应用。

9.4 永磁直驱主轴电机

9.4.1 主要特点

针对机床主轴的使用特点和存在的缺陷，将永磁直驱电机替代机械主轴，在整体结构上，由于取消了复杂的皮带、齿轮等传动系统及离合器、制动器等部件。机床主轴与电动机合二为一直接驱动，从而把机床主传动链的长度缩短为零，实现了机床的“零传动”，精度及表面加工质量得到了大幅提升。

在控制策略上，通过主轴永磁 DDR 电机最优控制策略，实现永磁同步电动机高频稳定控制和恒转矩恒功率输出，可满足数控车床的低速重切与高速车削的要求。如图 4-14 所示。



图 4-14 新型 DDR 永磁直驱主轴电机系统

新型 DDR 永磁直驱主轴电机产品的主要优势为：

- ◆ 高性价比：比传统的车床主轴，切削效率提高了三倍，主轴成本下降 30%。
- ◆ 具有 C 轴功能。主轴具备准确、重复定位功能，对于螺纹、蜗杆、键槽等加工提供了方便，是车削加工中心的必备条件。
- ◆ 高精度：由于采用 DDR 永磁直驱电机，转子无发热源，从根本上避免了旋转轴的热变形。
- ◆ 高效率：DDR 直驱电机效率高，再加之取消了诸多的传动链，故系统综合效率比现有的主轴系统提高 20%左右。
- ◆ 高功率因数：大幅度提高了功率因数，在所有使用范围内均可保持在 0.95 以上。
- ◆ 通用性：外形及安装尺寸与现有数控车床主轴完全相同，控制方式完全相同，替换方便。

9.4.2 产品的应用前景

我国早已成为世界第一机床生产与出口大国，但距离机床强国的目标还有很大的差距，尤其是在数控高精度机床方面更是落后很多。每年仍需大量进口高精度数控机床产品。推广使用该产品能促进我国装备行业的升级换代。

全新车削用永磁直驱电主轴产品的安装和使用与传统机床相同，使用性能提高、成本降低、免维护且节能效果显著。该产品对提高国产数控车床核心部件的国产化率，替代进口等具有重要意义，将带来明显的社会和经济效益。

9.5 伺服电机产品及系统应用技术

9.5.1 基本特点

伺服系统（servomechanism）是使物体的位置、方位、状态等输出被控量能够跟随输入目标（或给定值）的任意变化的自动控制系统。伺服主要靠脉冲来定位，基本上可以这样理解，伺服电机（如图 4-15 所示）接收到 1 个脉冲，就会旋转 1 个脉冲对应的角度，从而实现位移。由于伺服电机本身具备发出脉冲的功能，所以伺服电机每旋转一个角度，都会发



图 4-15 伺服电机

出对应数量的脉冲，这样，和伺服电机接受的脉冲形成了呼应，或者叫闭环，如此一来，系统就会知道发了多少脉冲给伺服电机，同时又收了多少脉冲回来。从

而能够很精确的控制电机的转动，定位精确度可达到 0.001mm。直流伺服电机分为有刷和无刷电机。有刷电机成本低，结构简单，启动转矩大，调速范围宽，控制容易，需要维护，但维护不方便（换碳刷），会产生电磁干扰，对环境有要求。因此，适用于对普通工业和民用场合。其主要特点是：

1) 无刷电机体积小，重量轻，出力大，响应快，速度高，惯量小，转动平滑，力矩稳定。控制复杂，容易实现智能化，其电子换相方式灵活，可以方波换相或正弦波换相。电机免维护，效率很高，运行温度低，电磁辐射很小，长寿命，可用于各种环境。

2) 交流伺服电机为无刷电机，分为同步和异步电机，目前运动控制中一般都用同步电机，它的功率范围大、大惯量、最高转动速度低，因而适用于低速平稳运行的场合。

3) 伺服电机内部转子为永磁铁，同时电机自带编码器，反馈信号给驱动器，驱动器根据反馈值与目标值进行比较，调整转子转动的角度。伺服电机的精度决定于编码器的精度（线数）。

9.5.2 交流伺服电动机的结构与特点

交流伺服电动机的定子构造与电容分相式单相异步电动机相似，其定子上装有两个位置互差 90° 的绕组，一个是励磁绕组 R_f ，它始终接在交流电压 U_f 上；另一个是控制绕组 L ，联接控制信号电压 U_c 。所以交流伺服电动机又称为两个伺服电动机。

交流伺服电动机的转子通常做成鼠笼式，为了使伺服电动机具有较宽的调速范围、线性的机械特性，无“自转”现象和快速响应的性能，它与普通电动机相比，应具有转子电阻大和转动惯量小的特点。目前应用较多的转子结构有两种形式，一种是转子导条采用高电阻率导电材料做成的鼠笼转子，转子做得细长，以减小转子的转动惯量；另一种是采用铝合金制成的空心杯形转子，杯壁很薄，仅 0.2~0.3mm，为了减小磁路的磁阻，在空心杯形转子内放置固定的内定子。空心杯形转子的转动惯量很小，反应迅速，而且运转平稳，而被广泛采用。

交流伺服电动机在无控制电压时，定子内只有励磁绕组产生的脉动磁场，转子静止不动。当有控制电压时，定子产生一个旋转磁场，转子沿旋转磁场方向转动。在负载恒定的情况下，电动机的转速随控制电压的大小而变化，当控制电压

的相位相反时，伺服电动机也同时跟随反转。

9.5.3 永磁交流伺服电动机的结构与特点

20 世纪 80 年代以来，随着集成电路、电力电子技术和交流变频驱动技术的发展，永磁交流伺服驱动技术有了突出的发展，各国著名电气厂商相继推出各自的交流伺服电动机和伺服驱动器系列产品并不断完善和更新。交流伺服系统已成为当代高性能伺服系统的主要发展方向，使原来的直流伺服面临被淘汰的危机。90 年代以后，世界各国已经商品化了的交流伺服系统是采用全数字控制的正弦波电动机伺服驱动。交流伺服驱动装置在传动领域的发展日新月异。

永磁交流伺服电动机同直流伺服电动机比较，主要优点有：

- ◆ 无电刷和换向器，因此工作可靠，对维护和保养要求低。
- ◆ 定子绕组散热比较方便。
- ◆ 惯量小，易于提高系统的快速性。
- ◆ 适应于高速大力矩工作状态。
- ◆ 同功率下有较小的体积和重量。

9.5.4 伺服电动机及系统的节能应用

交流伺服电动机、永磁交流伺服电动机及其调速系统在以下方面得到了广泛的应用，并展现了较好的节能效果：

1) 应用于工业缝制行业

随着缝制行业的发展，其重要组成部分电机也随之革新，电机作为缝制设备原来单一的动力功能演变成智能化、电脑化操作、高效节能多功能机电一体化产品。其发展历程主要分为摩擦片式异步电动机（离合器电机）、涡流式异步电动机（电子马达）、混合步进式电动机（变频电机）和伺服电动机等四个阶段。伺服电机及其控制系统从 90 年代后期开发应用以来，因其高效节能和优越的性能满足了工业缝纫机机电一体化的发展方向，已被高档工业缝纫机广泛采用。随着伺服电机及其控制系统的大量应用，其他三类产品的市场份额逐渐下降。

工业缝纫机用 QD 系列伺服电机节能电机系统具有转动惯量小、体积小、重量轻、动态性能好，调速比达 1：10000，具有定位精度高、节能效果好、寿命长、免维护、能在恶劣环境下使用。将引领缝纫设备行业应用的全新时代，全面

替代离合器普通马达，同时对节能减排、环境保护起到积极的促进作用。

工业缝纫机用 QD 系列伺服电机节能电机系统主要由伺服电机（包括永磁同步电动机和异步电动机）、光学编码器、伺服驱动控制系统和模式盒构成。当脚踩下踏板时，伺服控制系统检测到变化，启动电机运转，并快速到达设定的转速，松开踏板，伺服控制系统根据光学编码器的位置信号，把缝纫机停在设定的位置。另外，其实现了智能化功能，如自动停针位、自动剪线、自动抬压脚、自动线迹、自动加固缝等等，在很大程度上减轻了工人的劳动强度，提高了工作效率。

2) 应用于液压注塑机行业：

传统的液压注塑机存在非常大的节能空间。注塑机生产塑料制品是一个高耗能过程，素有电老虎之称。传统液压式注塑机在成形时油泵始终连续运转，在无负荷状态时驱动油泵的电动机也要消耗其额定功率约 1/3 的电能，是一种典型的耗能设备。

传统注塑机改造的基本原理是，拆除原有电机及油泵，同时配置新的伺服电机、伺服驱动器、旋转编码器、齿轮油泵、滤波器、制动电阻、高精度压力传感器等附件（见图 4-16）。该伺服控制系统可以实时监测液压系统的压力和流量，及时通过改变伺服同步电机的转速和转矩，对压力、流量做出相应的调整，最终维持系统的压力快、准、稳控制。

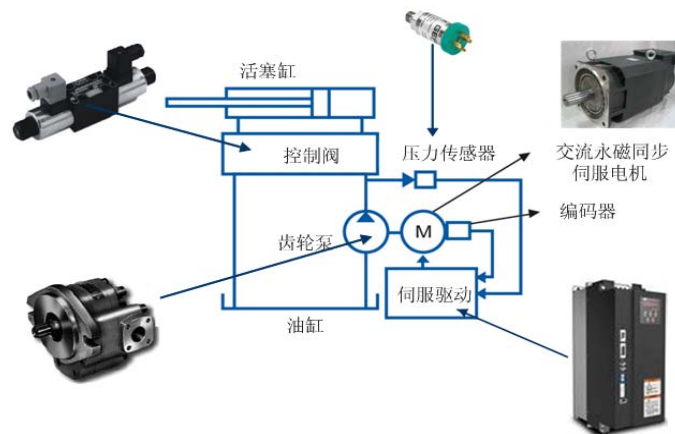


图 4-16 注塑机伺服控制系统示意图

注塑机通过伺服电机节能改造可以大大降低生产成本。通常能耗占塑胶生产成本的 7%，假设省电 45%，则企业成本可下降 3% 以上。目前塑胶加工企业的平均利润率约低于 5%，因此注塑机的伺服化改造具有明显的经济效益。注塑机各

种节能改造方法的比较如表 4-5 所示。

目前，我国“非节能型”注塑机的市场保有量已经超过 100 万台。如果按每台注射机平均功率为 30kW、每天工作 24 小时计算，每台机器一年的耗电量为 262,800 千瓦时。以平均节能 50%计算，现有的 100 万台注塑机全部数控节能改造后，可以省电 1314 亿千瓦时，节省 1615 万吨标准煤，减排 4231 万吨二氧化碳。

表 4-5 注塑机各种节能方法的效益比较

	定量泵系统	变量泵系统	变频器系统	伺服泵系统
能耗公式	$P \text{ 功率} = P \text{ 压力} * N \text{ 转速} * Q \text{ 排量} / 60$			
节能原理	恒转速恒排量	改变斜盘角度来改变排量	改变频率来改变电机转速	改变频率来改变电机转速
节能程度	恒速	压力差来工作，有底流和底压	转速不能低于 600 转	节能彻底，可以到 0 转速
响应	100ms	120ms	600ms	50ms
精度	中	中	压力特性差	高
能耗比	50%	高 20-30%	高 20-30%	以伺服泵作比较基准

第五章 电机的高效再制造与节能

1. 定义、目的与意义

1.1 定义

电机高效再制造，就是将低效电机通过重新设计、更换零部件等方法，再制造成高效率电机或适用于特定负载和工况的系统节能电机(如变极多速电机、变频电机、永磁电机等)。电机高效再制造过程示意图如图 5-1 所示。

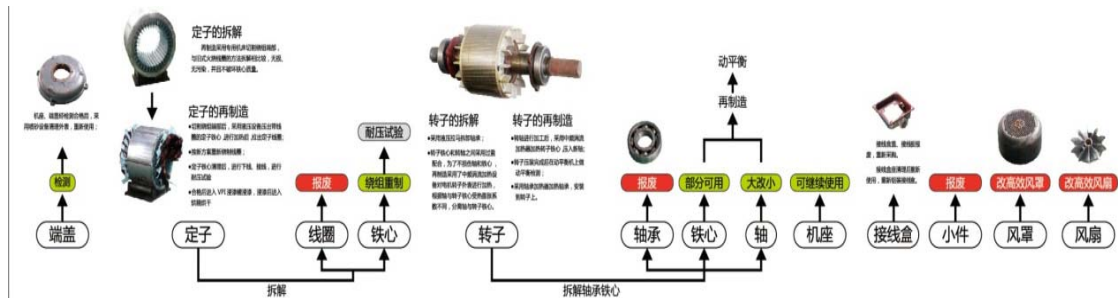


图 5-1 电机高效再制造过程示意图

1.2 目的与意义

1) **节能减排的重要手段**——根据已经完成的上海市工业企业电能平衡数据测算，上海市目前存量电机约有 2000 万千瓦，绝大部分都是存在 10 年甚至 20 年以上的淘汰电机产品，如果将其中的 1000 万千瓦通过电机高效再制造的手段予以更新，将实现节电 37 亿千瓦时，折合标煤 150 万吨，减少二氧化碳排放 390 万吨；以全国 15 亿千瓦的总保有量，如果将其中的 3.75 亿千瓦通过电机高效再制造的手段予以更新，将实现节电 1388 亿千瓦时，折合标煤 5625 万吨，减少二氧化碳排放 14625 万吨。

2) **实现资源节约和循环经济的重要途径**——如果将上海市目前存量电机中的 1000 万千瓦通过电机高效再制造的手段予以更新，将实现节约铸铁 5.5 万吨，节约电工钢 6.1 万吨，节约生产能耗 13.5 万吨标煤，减少二氧化碳排放 35 万吨；如果将全国 15 亿千瓦的总保有量中的 3.75 亿千瓦通过电机高效再制造的手段予以更新，将实现节约铸铁 206 万吨，节约电工钢 229 万吨，节约生产能耗 505 万吨标煤，减少二氧化碳排放 1313 万吨。

3) **推广高效电机使用，推进电机系统节能工作的必然之举**——据调查，电

机售出一一年内的返修率为 1%~2.3%，全国的存量电机若按 0.5%计算，每年将有 750 万千瓦电机流入社会维修市场。随着电机系统节能改造工作的推进，淘汰、替换的低效电机也越来越多，如何处理旧电机是必然面临的难题。如果不加以管理，放任自流，将造成部分旧电机重新流入市场，必然出现政府一边推广高效电机，市场一边流入低效旧电机的怪圈，必将恶化电机系统节能环境，对推广高效电机以及电机系统节能工作不利。

2. 高效再制造要求及优势

新设计电机在设计技术、制造工艺、材料成本等方面有很大提高，它可以通过调整铁心和槽形的尺寸、绕组数据来平衡电机的各项性能和铁耗、铜耗大小，达到高效目的。

而再制造的高效电机在铁心和槽形的尺寸不能调整，设计更受限制，且低效电机铁心一般采用热轧硅钢片，铁耗较大，同时不同生产厂家的旧电机，其设计裕度和铁心材料不相同，使得高效再制造电机的设计必须针对每一台旧电机进行。以上特点使得电机的高效再制造成为一项要求较高的技术。

但是，由于再制造符合资源节约与循环经济的要求，特别是能够保证旧电机不简单回流到设备配套市场，加上电机的高效再制造在成本上具有一定的优势（结合再制造案例介绍），使得电机的高效再制造成为政府愿意主推、企业能够接受的电机改造项目。

采用电机高效再制造的办法与直接更换高效电机进行电机系统节能改造的好处是：

◆ 节能效果更好

与高效电机一般 3%左右的节能量相比，电机的高效再制造因为结合了负载设备系统功率匹配（需进行电能平衡测试）和能效提升，因此一般可以获得 5%以上的节能潜力，是一种系统节能方法；

◆ 成本更为低廉

与高效电机相比，电机高效再制造的成本低了 20%以上，甚至比购买普通低效新电机还要便宜，且还有补贴政策（见政策汇编的介绍）；

◆ 无特殊尺寸安装等问题

在电机更新过程中,可能存在进口电机或旧式电机安装尺寸与国内标准电机不同而更换困难的情况,再制造由于保留了电机原机座、转轴等,不存在相关问题。

3. 高效再制造工艺流程及关键工序

3.1 再制造整体流程

电机高效再制造的整体流程如图 5-2 所示,对不同的部件根据检验结果会有针对性的措施,但一般来说,定子和转子的一部分是需要更换的,机座(端盖)等一般保留使用,轴承、风扇、风罩和接线盒等全部使用新的零部件(其中新更换的风扇和风罩是属于节能高效的新设计)。

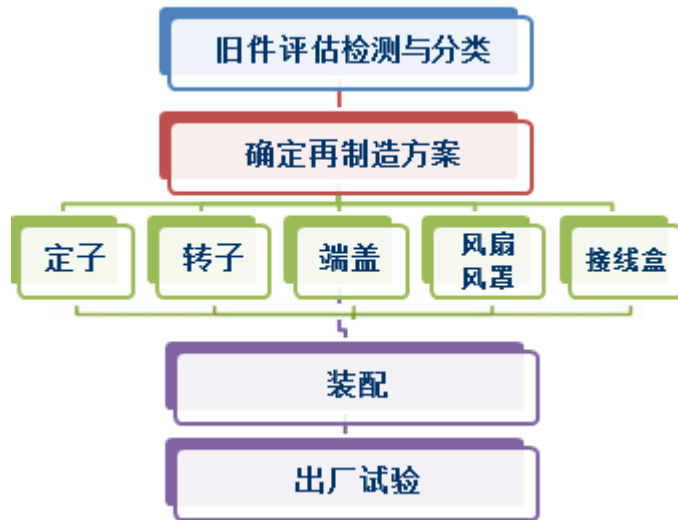


图 5-2 电机高效再制造流程图

3.2 零部件的再制造

3.2.1 定子线圈的拉出

要了解定子线圈如何能够拆解出来,一定要先知道原来的线圈是什么结构的,是怎样下进去的。

图 5-3 为典型的三相交流电机的定子槽和线圈结构剖面图(摘自 IEC60034-18-42),图 5-3a)为低压电机(一般采用圆底梨形槽),图 5-3b)为高压电机(一般采用矩形槽)。由剖面图可见,一般低压电机定子导线本身带有绝缘涂层,多股导线并绕多圈后嵌入槽内,线圈和槽底之间垫有槽绝缘(一般为绝缘纸加绝缘薄膜),对稍大一点功率电机来说,线圈分为上、下层,两层之间还有层间绝缘隔开(对小功率电机来说由于是单层线圈因此没有层间绝缘),待下线完毕,用槽楔将槽口封闭;高压电机的槽结构与此类似。

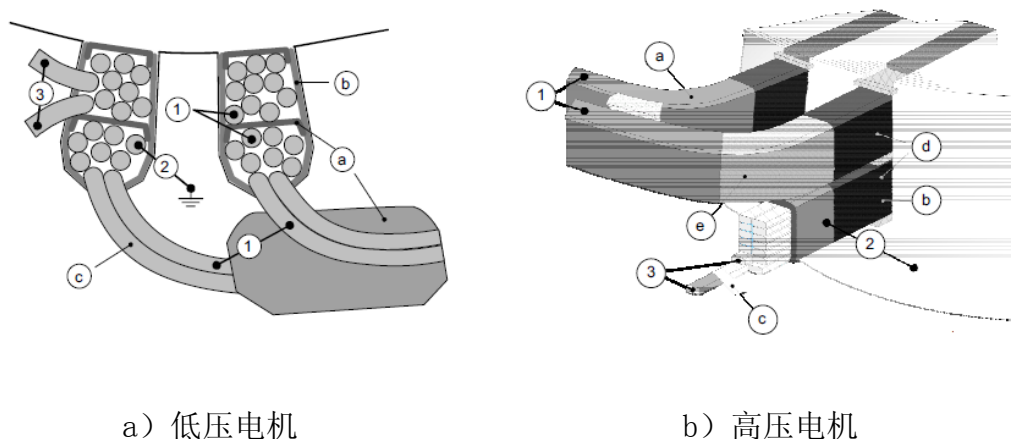


图 5-3 低压电机散嵌绕组和高压电机成型绕组

下好线后再进行绝缘处理，线圈与铁心、绝缘材料等已固化为一个坚硬的整体，甚至端部线圈和格相纸、绑扎带之间也固化为一个坚硬的整体。若在再制造过程中用手工拆解线圈是非常困难的。

在传统的电机维修过程中，对线圈拆解所采取的方法一般是先用明火对线圈或铁心炙烤，将电机的绝缘软化，而后剪断线圈的一边端部，用一字钎沿定子槽口将线圈顶出，最后再用钢毛刷将槽清理干净。这种方法有如下缺点：

- ◆ **环境差、污染大：** 由于采用明火对线圈进行加热，线圈本身涂层和绝缘漆都是可燃的，且燃烧后的烟雾属于有毒气体，会对人体产生损害；
- ◆ **铁心的损伤大：** 由于顶出线圈的过程中一般会使定子槽口破坏变形，从而影响了电机的铁心质量。

新的电机高效再制造工艺方法过程及如下所示，所采用的自动拉线机原理图如图 5-4 所示。

(1) 定子端部的斩切采用旋转斩铜机，带绕组铁心可以很快地将一端的端部切断；

(2) 定子的加热采用中频加热器加热，瞬间可使内侧的线圈部分温度升高，绝缘软化；

(3) 将端部斩切和加温后的带绕组铁芯放入自动拉线机，自动拉线机可自行完成上升—拉线—下沉—旋转—再上升—再拉线的循环，当铁心旋转一周后，

导线全部拉出，工作完成。

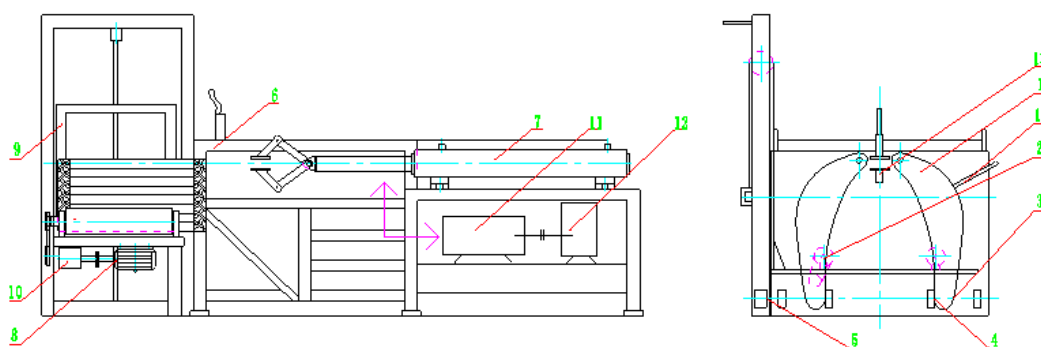


图 5-4 新型自动拉线机及原理示意图

3.2.2 转轴的再制造

电机的转轴主要与电机的安装尺寸有关，与电机的电气性能基本无关，因此对转轴的再制造来说存在三种可能性：第一种是经过研判电机的转轴已不能保留使用，对这部分转轴直接报废处理；第二种是经过研判电机的转轴可以保留使用；第三种是虽然经过研判电机的转轴基本完好，但是在使用过程或拉出过程中，电机转轴可能有锈斑、部分变形等现象，从经济角度和资源循环的要求出发，需要对转轴的再利用寻找更好的解决办法。为此，一般采用大轴改小轴的办法来解决这一问题。为提高材料的利用率，根据电机一般“前轴大、后轴小”和“同一机座号大极数电机轴粗”的特点，采取了“掉头车”的方法，即在大机座号电机转轴加工成小机座转轴的基础上，可将部分同一机座号大极数电机转头改成小极数电机转轴。

3.2.3 机壳与端盖的再制造

电机在使用过程中，周围环境条件对电机外壳结构（机座和端盖）的影响比较大，电机机座、端盖及螺栓的表面一般会有灰尘、油渍覆盖、锈蚀、油漆脱落

等现象，影响了电机外表的美观。如果这种影响没有严重到将电机外壳的支撑和防护功能破坏的程度，一般可继续使用。因此，要做到与新电机一样具有较好的外观效果，在再制造过程中应考虑翻新。

目前采取的普遍措施是，将电机拆解后，先将机座与端盖放入超声波清洗设备中，将其中的灰尘、污垢、油渍等清除；然后放入抛丸机设备中将原来的表面油漆彻底清除干净，然后再重新装配和重新油漆，完成机座与端盖部分的再制造。

由于机座和端盖中包含了几个机械加工面，即机座与端盖的配合止口面、机座内圆与定子铁芯外圆的配合面、端盖轴承室与轴承外圆的配合面，这些表面都有相应的加工要求，在抛丸前应加以保护。一般可将端盖用原来的螺栓与机座再装配好，并用带止口圆形挡板将端盖轴承室密封，使电机就成为一个封闭的整体，再抛丸处理。

3.3 零部件的更换

3.3.1 轴承的更换

电机在使用一段时间后，所用轴承由于一直在承受径向或轴向的传动力并保持架高速运动，必然存在磨损现象，加上环境中的粉尘、油脂的变性以及在变频器供电下电机轴电流的电蚀或放电破坏，都会造成轴承的损伤（见图 5-5），因此在电机再制造中，轴承一般是必须进行更换的。



图 5-5 转子发热传导至轴承粉尘进入轴承轴电流流过轴承时的波形

3.3.2 风扇与风罩的更换

Y、Y2 系列电机普遍采用的是双向离心式风扇和圆顶风罩，优点是风压高、易加工，缺点是噪声大、效果差。在高效电机设计中，采用了一种接近混流式的离心风扇配合锥顶风罩，优点是散热效率高、损耗小、噪声低。如图 5-6 所示。因此，在合适的情况下，在电机再制造中优先推荐选用。

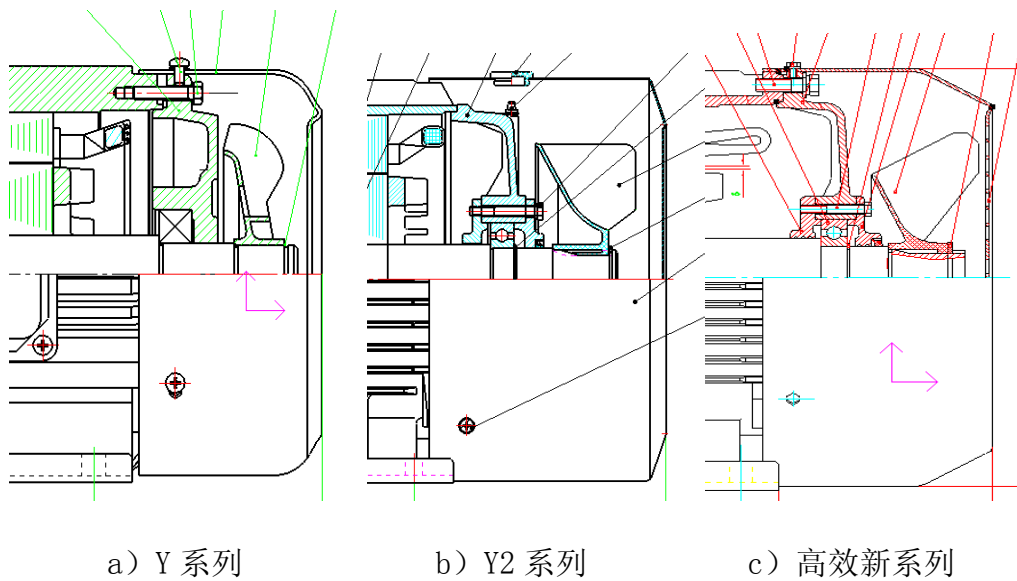


图 5-6 Y、Y2 系列和高效新系列电机风扇结构对比

3.3.3 接线盒的更换

电机在运输、安装、使用及拆解过程中，接线盒及内部的接线装置可能会因为拆卸和磕碰等造成损坏，也可能因为环境因素存在锈蚀，导致不能使用，因此，在电机再制造中，接线盒和内部的接线装置一般也是必须进行更换的。

4. 高效再制造与普通维修的区别

电机高效再制造与电机普通维修的区别如表 5-1 所示。

表 5-1 高效再制造与普通维修的区别

对比类型	普通维修	电机高效再制造
目的不同	维修的目的主要以恢复使用功能为主，修理后的电机效率指标会有所降低	电机高效再制造把低效电机改造成高效电机，提高了效率
工艺方法不同	维修工艺相对粗放、落后，不合理的拆解方法还对环境造成污染	采用无损、环保、无污染的拆解方式，最大程度地利用和回收原电机的零部件
使用寿命不同	维修只更换故障零部件，其使用寿命短	再制造电机更换新的绕组、绝缘、轴承，其使用寿命和新制造电机一致

5. 高效再制造产品

目前已开发的电机高效再制造产品有：

- (1) YX3 系列高效率三相异步电动机 (3~315kW、380V、50Hz)
- (2) YSFE2 系列水泵风机专用高效率三相异步电动机 (1.5~315kW、380V、50Hz)
- (3) YX 系列高效率高压三相异步电动机 (355~25000kW、6kV 或 10kV、50Hz)
- (4) YDT 系列变极双速高压三相异步电动机 (355~25000kW、6kV 或 10kV、50Hz)

电机高效再制造不仅符合循环经济的要求，在再制造过程中将原有材料进行了最大化的利用。再制造后的电机由于对涉及所有安全和寿命的材料进行了更新，因此与新制造电机基本无差别。重要的是，再制造后电机的能效水平进行了适当提升，满足了相关标准的使用要求。有利于国家的节能减排，应大力推广。

第六章 电机拖动的典型负载系统的特性及节能措施

根据欧盟《提高高效电动机和驱动的市场份额》—即 SAVE II 研究报告显示,工业用电动机消耗电能占其工业用电消耗的 73%。其中,欧盟工业部门中各电机驱动系统消耗电能的比例为:泵类 22%,风机 16%,空压机 18%,制冷压缩机 7%,输送机 2%,其它电机为 35%,即风机、泵类、压缩机类共占总消耗电能的 63%。如图 6-1 所示。

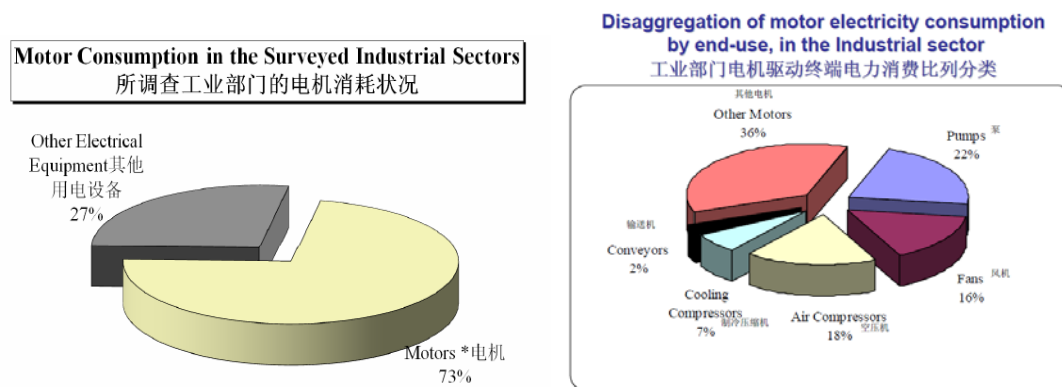


图 6-1 工业用电动机消耗电能示意图

根据上海市已完成的超过 600 家重点能耗工业企业电能平衡测试数据的汇总情况,可估算出上海市工业用电动机消耗电能占全市工业用电消耗的 75%,其主要用电类型也是风机、泵和空压机系统,这些系统在各个工业用电企业都有分布。因此,我们一般将风机、泵类和空压机系统称为电机拖动的典型负载系统。

1. 风机系统基本特性及节能措施

1.1 风机分类

风机是用来输送气体和提高气体压力的生产设备,它把外界输入的能量转变为气体的势能和动能,使气体的能量提高。

按工作原理不同,风机可分为叶轮式和容积式两大类。前者包括离心式风机和轴流式风机,后者包括活塞式风机和旋转式风机。按排气压力的高低,风机可分为通风机压力在 0.15 大气压力以下、鼓风机压力在 0.15~3 个大气压力之间和压缩机压力在 3 个大气压力以上等三类。

由于风机构造、排气压力不同,各种类型的风机效率和测试的方法亦不相同。

本部分主要介绍离心式和轴流式通风机即压力比不大于 1.15 的风机的电能利用率问题。

1.2 通风机的用电系统的构成

工厂企业中的通风机大都是使用电动机来拖动的，因此通风机的用电系统，可用能源串联图来表示，见图 6-2。

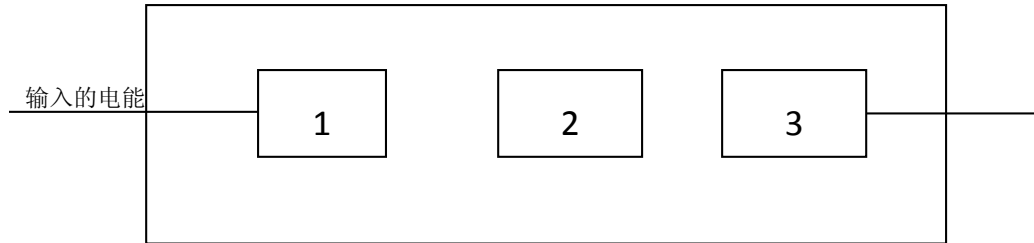


图 6-2 系统能源串联图

图 6-2 中，元件 1 是电动机，元件 2 是联轴器，元件 3 是通风机。因此，通风机的总电能利用率 η 为：

$$\eta = \frac{W_{yx}}{W_{gg}} \times 100\%$$

式中： W_{yx} —用电系统的有效电能，kWh；

W_{gg} —用电系统的供给电能，kWh；

η 的另一种表达式为：

$$\eta = \eta_d \times \eta_l \times \eta_f$$

式中： η_d —电动机的电能利用率即电动机的效率；

η_l —联轴器的电能利用率即传动效率；

η_f —通风机的电能利用率即通风机效率。

1.3 风机的基本参数

1) 流量

气体在单位时间内通过风机的体积称为体积流量，用符号 Q 表示，单位为米³/秒 (m^3/s)、米³/时 (m^3/h)；也可用重量流量 G 来表示，单位为千克/秒 (kg/s)、

吨/时(t/h)。体积流量 Q 与重量流量 G 间的关系如下:

$$G = \rho Q$$

式中: ρ — 气体的密度, kg/m^3

当大气压力为 760 毫米汞柱, 温度 20°C 时, 空气的密度取 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2) 全压

全压可理解为单位体积的气体经过风机后能量的增加值, 用符号 P 表示, 单位帕斯卡 (Pa)、毫米水柱 (mmH_2O)、千克力/米² (kgf/m^2)。全压 P 可由下式得到:

$$P = P_2 - P_1$$

式中: P_1 — 风机入口处总压, Pa;

P_2 — 风机出口处总压, Pa。

气体的全压包括静压 P_0 及动压 P_d , 即:

$$P_1 = P_{s1} + P_{d1}$$

$$P_2 = P_{s2} + P_{d2}$$

静压是气体在流动过程中所体现出来的一种状态, 可以用压力仪表测出; 动压与速度的平方成正比, 即 $P_d = 0.5 \rho v^2$ 。

故风机的全压 P 可用下式表示:

$$P = (P_{s2} + P_{d2}) - (P_{s1} + P_{d1}) = (P_{s2} - P_{s1}) + (P_{d2} - P_{d1})$$

3) 转速

风机叶轮每分钟的转动次数称为风机转速, 用符号 n 表示, 单位转/分 (rpm)。

4) 有效功率和轴功率

气体在单位时间内从通风机中所获得的总能量, 称为有效功率 (或理论功率), 用符号 N_e 表示, 单位千瓦 (kW)。

$$N_e = PQ$$

式中：P—风机的全压，Pa；

Q—风机的体积流量，m³/s。

气体通过风机时有一系列损失，如流动损失、泄漏损失和机械摩擦损失，因此原动机驱动的风机轴功率 N 应大于有效功率 N_e。

5) 风机的效率

风机的有效功率与轴功率之比称为风机的效率，用符号 N_f 表示，即：

$$N_f = N_e / N \times 100\%$$

1.4 风机的特性曲线

风机是输送气体的机械，其做功能力的大小如上文所述，可以用流量 Q 和全压 P 乘积的大小来反映。在一定转速条件下，一台风机的 Q 与 P 之间存在唯一对应关系，这个关系画在纵坐标为 P，横坐标为 Q 的曲线上，就成了风机的 P-Q 性能曲线。同样也可以做出流量 Q 与轴功率 N、效率 η_f 的 N-Q、η_f-Q 曲线参见图 6-3 所示。

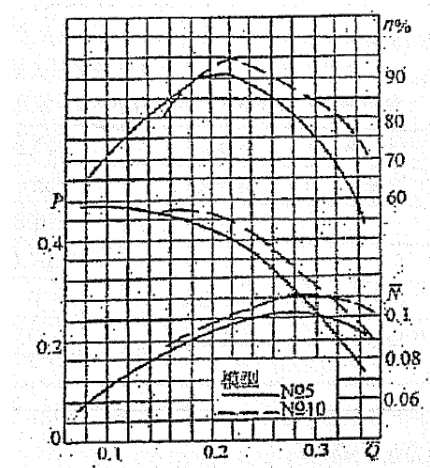


图 6-3 风机性能曲线

从性能曲线上可以知道风机在某一对应的 P-Q 值运行时将达到最高效率，这时的 P、Q 及 η_f 值即为该风机的额定参数。由于风机在特定系统中运行，其流量将根据生产工艺的需要来决定，全压根据管道阻力来决定。当风机运行点落在低效区域或节流运行时，风机的运行就不经济了。因此，掌握和应用性能曲线，可以正确选择并经济合理地使用风机。

1.5 风机系统的节能措施

1) 高效风机置换技术

一些离心风机，主板采用轻型钢板，外缘加上折边以加强结构刚度，轮毂轻

量化设计，侧盖板流线型设计，以旋压方式制作风机入风口，集流器，增加进口端长度这样可以改善风机进口的流场和叶轮流道，从而提高风机的效率，降低电能消耗。一些大中型轴流风机，叶片采用可装卸式，叶片角度可按需调节，不同的系统可以采用不同叶型和不同材质的叶轮，上述都是高效风机。

采用高效风机实际上就是根据现有的系统的工况点，以及风机的特性曲线，校核风机的运行效率。然后在此基础上进行风机置换的改造。以高效率、低能耗的风机来置换运行效率差，能耗高的风机，以达到节约能源的目的。

我国国产风机样本上标注的风机效率一般都在 55%左右，而实际上由于各个方面的原因其实际运行的效果大概在 40-45%左右。而现在高效风机的标注效率可以高达 80%上，若扣除传动以及系统的损失等原因，风机的效率至少可以维持在 77%以上的效率。其节能的效率在 20%以上。

高效风机的置换主要针对中央空调系统，系统管网比较复杂的煤矿通风系统，锅炉鼓风机系统等。

2) 风机的变频节能技术

当风机负载有经常性变化或有明显季节性变化时，可采用调速办法来解决，如多速电机，变频器调速技术等。调速是风机技术改造中广泛使用的一种方法，通过调速使风机性能曲线移动，相当于变成许多不同容量的风机，来适应负荷的变化，使风机运行尽量处于高效区域，减少节流损失。变频器调速技术内置 PID 调节功能，可对转速实现无级调节；另外，还可实现大电机的起停，避免了启动时的电压冲击，同时降低了对电网的容量要求和无功损耗，是目前主流的调速技术。

3) 风机的叶型和结构改造技术

随着风机生产工艺的进步，对风机本体改造的可能性也越来越大，我们可以通过以下方面的考虑来对风机系统进行改造：

(1) 风机的设计、工艺制造、原材料使用近年来有较大的革新，如采用机翼型的 4-72 通风机效率已达 90%以上，比一些旧的低效风机效率提高很多。因此风机的改造以采用高效型叶轮代替旧的低效风机叶轮，原有风机外壳和电机仍可使用。如一台 Y9-57-1no-16 风机，参照 4-72-11 机型叶片，用 10 只叶片代替

旧风机 32 只前弯叶片，功率从 30kW 下降到 21kW，全年节电 58000kWh。轴流风机采用玻璃钢或铝合金扭曲型叶片代替 Y-12 型平板叶片，效率可提高 40%以上。

(2) 风机的结构改造可改善风机气流的流动状态，提高效率，可以改进进气室的结构，采用流线型集流器代替一般圆柱形集流器，效率提高 8%左右；采用对数螺旋形外壳；控制蜗壳舌部与叶轮之间的间隙；保持一定的扩散角；轴流风机加装集流罩、集流罩、整流罩，效率可提高 8~10%。

(3) 轴流风机可更改叶片角度，满足变工况要求。

4) 风机系统集中控制技术

对于一些造纸、石化对通风要求比较高的行业和工艺场所，一般的风机都是以群配置的。如果系统负荷不稳定，负荷变化比较大的情况下，我们可以考虑应用风机系统集中控制技术。

风机系统集中控制技术，可以考虑工艺的实时工况，根据末端的对风量和风压的实际需求，按照设定的周期，实时的调整风机的开启台数以及风机运行的工况，使系统能够尽量长时间的处于高效区运行，以提高系统效率，使风机功耗降至较低水平。

5) 送风管网优化技术

通过对管网系统的综合评估，实行对管网的优化，减少送风过程中的能耗，降低系统设备的能耗，以达到节能的目的。对现有系统进行实地的勘察、具体检测，在此基础上进行管网改造，具体包括：

- ◆ 风管泄漏问题改造；
- ◆ 风管保温改造；
- ◆ 风管网局部阻力改造；
- ◆ 风管清洗。

送风管网改造的对象涉及到中央空调的通风系统，工厂通风系统，锅炉风系统等等。

2. 水泵系统基本特性及节能措施

2.1 水泵的分类

与风机一样，水泵也是一种流体机械，属于生产设备，它能够把外界输入的能量转变为液体的势能和动能，而使液体的能量提高。

按工作原理和结构的不同，水泵可以分为速度型，如离心泵、轴流泵等叶轮泵；体积型，如往复泵、回转泵等容积泵。离心式泵按叶轮级数可分为单级泵和多级泵。按扬程高低来分，有单级扬程低于 20 米水柱的低压泵；20~100 米水柱的中压泵；大于 100 米水柱的高压泵。按叶轮吸入口方式有单吸及双吸之分。本部分主要介绍离心式、轴流式泵，输送的介质以工业允许使用的清水或类似清水的液体为限。

2.2 水泵用电系统的构成

工厂企业的水泵大都用电动机来拖动。它的运行方式除了单机之外，有时为了增加供水能力，可采用联合运行（串联或并联）。为了便于对水泵用电状况进行分析，这里从单机的电能平衡出发，综合提高整个泵站的经济运行水平。因此其用电系统可用能源串联图来表示，与风机系统（见图 6-2）相类似，其中，元件 1 是电动机，元件 2 是联轴器，元件 3 是水泵。因此，水泵的总电能利用率 η 为：

$$\eta = \frac{W_{yx}}{W_{gg}} \times 100\%$$

式中： W_{yx} —用电系统的有效电能，kWh；

W_{gg} —用电系统的供给电能，kWh。

η 的另一种表达式为：

$$\eta = \eta_d \times \eta_l \times \eta_s$$

式中： η_d —电动机的电能利用率即电动机的效率；

η_l —联轴器的电能利用率即传动效率；

η_s —水泵的电能利用率即效率。

2.3 水泵现场电能利用率的测试

水泵在某段时间的有效电能是水泵的有效电功率平均值与时间的乘积。在现场测试过程中，水泵的有效电功率随着水泵的工况变化而变化，通常采用瞬时有效功率来计算水泵的电能利用率。

为了正确反映某台水泵电能利用情况，当水泵的工况变化较大，应分别测量负荷最大时、负荷最小时及一般常用工况下的电能利用率。

水泵用电系统中的电动机、联轴器等电能利用率或效率相对稳定，并且其能耗占整个能耗比重较小，对于整个用电系统而言，我们把注意力集中到水泵本机的效率测试中，即 η_s 的测定。

2.4 离心式水泵的基本参数

1) 流量

单位时间通过水泵的液体体积成为水泵的体积流量，用符合 Q 表示，常用单位米³/秒 (m^3/s)，升/秒 (l/s)，米³/时 (m^3/h)。

2) 扬程

把单位重量液体通过泵的叶轮后所获得的能量增加值定义为泵的扬程，用符号 H 表示，单位米液柱，当输送的介质是水时则为米水柱 (mH_2O)。根据流体力学的伯努利方程，在不考虑损失的情况下，扬程的计算式如下：

$$H = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \times 10^6 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1$$

式中： P_1 ， P_2 —水泵进出口的压力，MPa；

v_1 ， v_2 —水泵进出口的流速，m/s；

Z_1 ， Z_2 —水泵进出口压力表安装位置的高度，m；

γ —介质的重度；

g —重力加速度；

H —水泵扬程；

当进口是真空时，进口压力采用真空表，则计算公式为：

$$H = \frac{P_1 + P_0}{\gamma} \times 10^6 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1$$

式中：P₀—真空表度数，Mpa。

3) 转速

水泵轴每分钟转动的次数，用符号 n 表示，单位转/分 (rpm)。

4) 有效功率，轴功率

单位时间内液体经过水泵后获得的总能量称为有效功率，用符合 Ne 表示，单位千瓦 (kW)。

$$N_e = \frac{\gamma H Q}{1000}$$

式中：H 的单位为 mH₂O，Q 的单位由 m³/s。

液体通过水泵时有容积损失，流动损失和机械损失，因此，由原动机输入水泵的功率总要大于有效功率，这个功率称为轴功率，用符号 N 表示，单位千瓦 (kW)。

5) 水泵的效率

有效功率与轴功率之比称为水泵的效率 η_s。

$$\eta_s = \frac{N_e}{N} \times 100\%$$

2.5 离心式水泵的特性曲线

从有效功率 Ne 公式可知，水泵做功的本领与其流量 Q 及扬程 H 有关。在一定的转速下，一台水泵的流量 Q 与扬程 H 之间有一个对应关系，可以用 Q—H 曲线表示，这就是水泵的 Q—H 性能曲线。一个典型的泵性能曲线如图 6-4 所示。

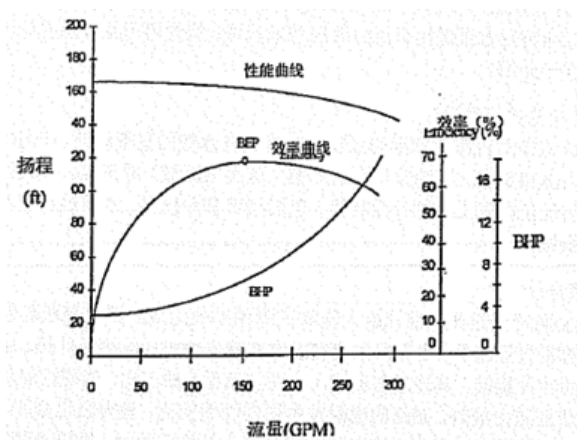


图 6-4 泵性能曲线

2.6 提高泵系统效率的措施

由于选型不当，管道设计、安装不合理，维护检修不良，使用管理落后以及设备陈旧等原因，造成了泵效率的降低，经现场调研和效率测试，有很多水泵的效率低于《GB/T13469-2008 离心泵、混流泵、轴流泵和旋涡泵系统经济运行》规定的70%要求，电力浪费严重。如经过重新选型、叶型改造、多级泵抽级、切割叶轮、转速调节等方式进行改造，一般能节电20%~30%。

运行中的水泵由于水泵种类、性能、应用场合、使用工况、管道布置等均不相同，因此低效水泵改造主要从提高水泵的运行效率和减少节流损失着手，达到水泵经济运行，节约用电的目的。主要改造方法如下：

1) 低效泵的更换

对于一些由于制造工艺结构等原因而效率较低，或因年久失修的水泵和属淘汰的水泵，当原有水泵处于其特性曲线所标识的高效区域，但其运行效率比较低时均可以采用重新选型的方法，用新的高效水泵去替换，使新水泵在输出与原有水泵相同的流量和扬程时，水泵的输入功率比原来有所减少，从而达到节能目的。

2) 置换与系统不匹配的水泵

针对目前工矿企业流体介质输送系统和中央空调循环水系统普遍存在“大流量、低效率、高能耗”的状况，按最佳工况运行原则，建立专业水力数学模型和参数采集标准，通过检测复核当前运行的工况参数和设备额定参数，准确判断产生高能耗的各种原因，准确找到最佳的工况点，并提出最佳的匹配方案；然后通过整改、消除不利的因素，按最佳的运行工况参数，选择合适流量和扬程的水泵来替换目前处于不利工况、低效率运行的水泵，消除因系统配置不合理而引起的高能耗，以达到最佳的节能效果。

3) 叶轮切削

水泵叶轮切削技术是一种把水泵的原叶轮外径在车床上切削得小一些，再安装好进行运转的节能技术。经过切削后的叶轮，其特性曲线就按一定的规律发生变化。

切削量的选择是基于大量试验资料的基础上而进行的。如果叶轮的切削量控

制在一定限度内时，则切削前后水泵相应的效率可视为不变。但叶轮的效率也会使水泵的效率有所降低，因此切割叶轮时，要逐次切割，避免一次切割过多的现象。

4) 采用调速调节，减少节流损失

当泵负载有经常性变化或有明显季节性变化时，可采用调速办法来解决，如多速电机、变频调速等技术。调速是泵技术改造中广泛使用的一种方法，通过调速使水泵性能曲线移动，相当于变成许多不同容量的水泵，来适应负荷的变化，使水泵运行处于高效区域，减少节流损失。变频调速可实现无级调节，另外，还可实现大电机的启停，避免了启动时电压冲击，同时降低了对电网要求和无功损耗，是目前主流的调速技术。

5) 优化管化，定期维修

尽量减少管道突变的连接和拐弯；拆除不必要的挡板；增加导向叶片；及清除管道水垢，减少阻力。

定期检查水泵，更换已被磨损的叶轮；保持密封良好；清洗流道，减少流道损失。

3. 空压机系统基本特性及节能措施

3.1 空压机的种类

空压机是将原动机的机械能转换成气体压力能的装置。根据工作原理不同，空压机分为容积型和动力型两大类。容积型空压机把一定的空气先吸入到气缸里，继而在气缸中强制缩小其容积，当达到一定压力气体时便被强制从气缸中排出。容积型空压机可以细分为许多种类，其中往复式及螺杆式空压机目前应用最为广泛。动力型空压机，又称速度型空压机，其工作原理是将气体的动能转化为压力能，主要有离心式和轴流式两种，其中离心式空压机比较常见。空压机的基本分类如图 6-5 所示。

根据压缩机级数不同，往复式空压机分为单级空压机和多级空压机，而多级空压机以两级为主。根据作用方式往复式空压机有单作用和双作用两种。通常情况下，单作用空压机的比功率范围为 7.8 到 8.5kW/(m³/min)，而双作用空压机为

5.3 到 5.7kW/(m³/min)。

螺杆式空压机可以分为单级和两级螺杆式空压机，在压缩相同质量流量的压缩空气时，两级压缩机的效率高于单级压缩空压机。螺杆式空压机又可以分为喷油型和无油型两种，喷油螺杆式空压机主要用于普通工业供气场合，无油型螺杆空压机通常用于食品，制药以及电子行业。一般而言，喷油螺杆式空压机的比功率范围为 5.7 至 6.7kW/(m³/min)，无油螺杆式空压机的比功率范围为 6.4 至 7.8kW/(m³/min)。

当系统流量需求比较大时通常会采用离心式空压机，其流量可达 3000m³/min 甚至更大。其比功率范围从大约 5.7 到 7.1kW/(m³/min)。当容量超过 45m³/min 时且作为基本负载时，离心式空压机在效率和运行成本方面比大型的螺杆式压缩机具有一定优势。

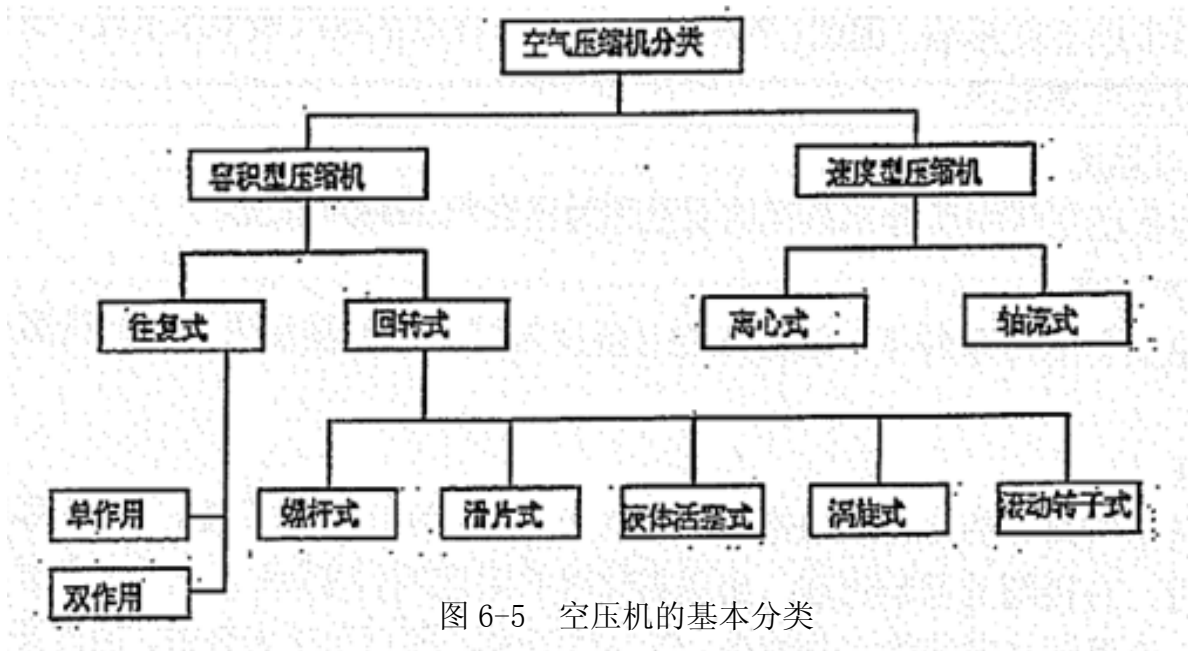


图 6-5 空压机的基本分类

3.2 空压机的基本参数

1) 压力

流体介质垂直作用于单位面积上的力称为“压强”，在工程技术一般称它为“动力”，其法定计量单位为帕斯卡，符号为 Pa。其常用单位还有兆帕、千帕、标准大气压、毫米汞柱、千克力/厘米²等等。压缩空气中常用的压力为大气压力、绝对压力和表压。

(a) 大气压力

大气压力是指包围在地球表面一层很厚的大气层对地球表面或表面物体所造成的压力。大气压力值随气象情况、海拔高度和地理纬度等不同而改变。

(b) 绝对压力

绝对压力是指以绝对真空为基准来表示的压力，它可以高于大气压力也可以等于或低于大气压力。压缩空气所有理论压缩计算是采用绝对压力来进行的。

(c) 表压

表压是指以实际大气压为基准来表示的压力，它是气体实际压力和当地大气之间的差压。表压在压缩空气系统中比较常用，是决定系统能够提供能量多少的一个关键因素。

2) 湿度

空气中的水蒸气在一定的条件下会凝结成水滴，水滴不仅会腐蚀用气设备而且还会对系统的稳定性带来不良影响。因此，常采用一些措施防止水蒸汽被带入系统。空气中所含水蒸汽的程度用湿度来表示。

(a) 绝对湿度

单位体积湿空气中所含水蒸汽的质量称为湿空气的绝对湿度。

(b) 相对湿度

在某温度和压力条件下，湿空气绝对湿度与饱和绝对湿度之比称为该温度下的相对湿度。

3) 露点

露点是指气体中的水份从未饱和水蒸气变成饱和水蒸气的温度，当水份和水蒸气变成饱和水蒸气时，有极细的露珠出现，出现露珠时的温度叫做“露点”，它表示气体中的含水量，露点越低，表示气体中的含水量越少，气体越干燥。露点和压力有关，因此又有大气压露点（常压露点）和压力下露点之分。

4) 流量

压缩空气中常用的流量单位主要有自由空气流量和标准额定流量(标准立方英尺每分钟)两种:

(a) 自由空气流量

自由空气流量是指在空压机出口获得的换算成空压机进口条件下的空气的体积流量。该流量是指在周围环境条件下空气的体积流量,压力、温度或者相对温度的改变而不能改变的值。空压机铭牌上注明的流量就是自由空气流量,其单位常用立方米,分钟(m^3/min),升/秒(L/s),实际立方英尺每分钟(acfm)表示。

(b) 标准额定流量(标准立方米每分钟)

标准额定流量是指在压缩空气流量换算到特定的温度、压力和湿/条件下流量,这是一种质量量纲,在国外的技术标准和产品中经常采用。在美国标准的技术术语当中,这个单位相当于标准立方英尺每分钟(scdrn)。尽管标准立方米/分钟和立方米/分钟听起来非常相似,但是它们是有着本质区别的,就像千克和立方米的同一不一样。对于标准立方英尺每分钟(Nm^3/min),目前存在不同的标准条件定义,参见表 6-1 所示,因此在进行设计计算前,必须咨询用户所采用的特定术语的含义。

表 6-1 不同标准的参数换算

类别	温度	压力	相对湿度	密度
DIN1343 标准	0℃	0.1013MPa	0%	1.294kg/m ³
DIN/ISO 2533 标准	15℃	0.1013MPa	0%	1.225kg/m ³
大气状态	大气温度	大气压力	大气湿度	可变
运行状态	工作温度	工作压力	可变	可变

3.3 空压机的性能曲线

1) 螺杆式空气压缩机

螺杆式空压机有加载卸载、恒压、转子长度控制和变速驱动等几种控制方法,每种控制方法导致空压机的能效特点各不相同:

(a) 加载 / 卸载 (Load/Unload, Online/Offline)

加载、卸载控制是螺杆式空压机最早使用的控制方案之一，其压力控制范围大约从 0.07MPa 到 0.1MPa。空压机将运行在全容量下，直到测定的系统压力达到压力开关的最高设定点。当该设定点达到时，发出一个信号关闭进气阀，同时释放一些或全部润滑油分离器箱的压力。通过关闭进气阀，压缩机可以空载运行。当系统压力降低到更低的压力设定点时，发出信号重新打开进气阀，同时压缩机再次在满载条件下运行。加载 / 卸载控制空压机负荷功率对比曲线如图 6-6 所示。

(b) 恒压（调节）控制方式 (Modulation Control)

恒压（调节）控制的空压机通过最低限度的阀门动作保证系统供气压力的稳定。系统压力上升时空压机进气阀关小，空压机流量降低，压缩比增加。调节压缩机部分载荷操作运行需要的功率比较大，效率明显降低。如图 6-7 所示。

(c) 转子长度控制装置

转子长度控制可以使得空压机在压缩比不增加的情况下实现空压机输出与系统要求相匹配。通过有效控制转子压缩区域的长度，空压机可以在 50%-100%容量的范围内保持并气压力和压缩比非常的稳定。该种控制方法由于在降低空气质量流量时压缩比并不增加，在部分负荷运行时比调节控制和加卸载控制空压机在效率上具有一定的优势。当空压机负荷低于 50%时，空压机首先进行入口阀恒压 (modulation)控制，控制范围一直到入口阀完全关闭，或者当负荷低于 40%时空压机进行卸载。如图 6-8 所示。

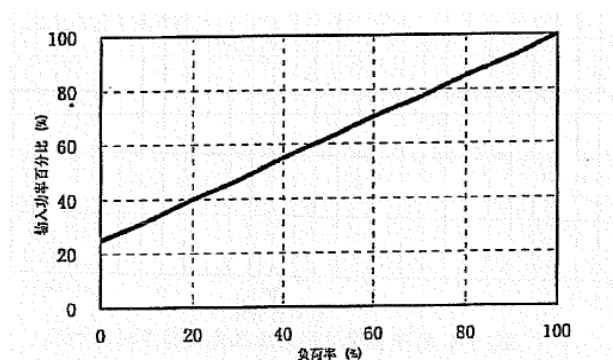


图 6-6 加载 / 卸载控制空压机负荷功率对比曲线

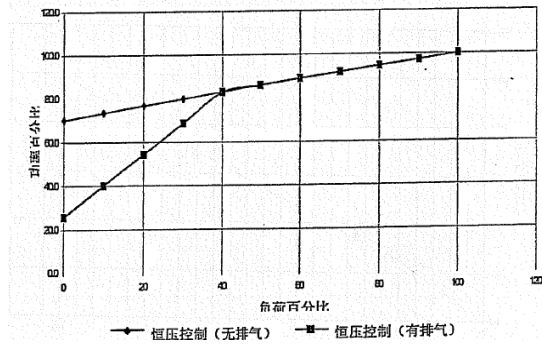


图 6-7 恒压控制空压机负荷功率对比曲线

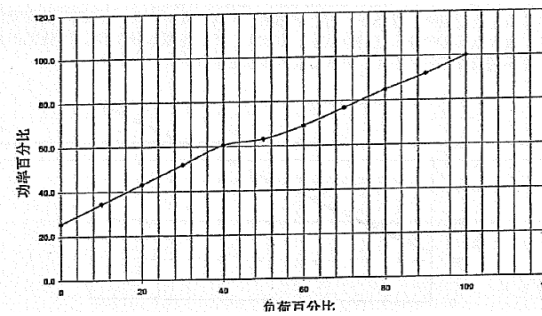


图 6-8 转子长度控制空压机负荷功率对比曲线

(d) 变速控制

变速控制是通过改变压缩机主机的速度来使压缩机的供气与用气相匹配，变速驱动通常采用变频驱动或者开关磁阻驱动实现。由于采用变频驱动后，空压机排气压力变化很小且进气口压力非常恒定，在设计和匹配合理时这种控制类型非常有效。一些变速驱动空压机在电机转速降低 20%左右时空压机会停机，或者在负荷降低到 40-50%时空压机会下载，其下载功率为加载功率的 10—15%。变速驱动压机也需要配备适当容量的储气罐。如图 6-9 所示。

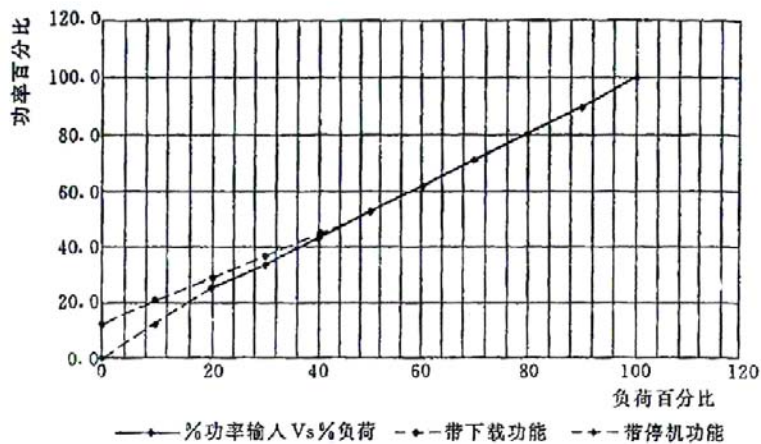


图 6-9 变速控制负荷功率对比曲线

由于变速驱动过程存在一定的损耗,因此在选用变速驱动压缩机时必须特别注意。变速驱动控制在负荷变化较大且很少处于满载状态下的单个压缩机应用场合工作效果较好,在多级压缩机应用场合,变速控制压缩机应当只作为调节压缩机使用。这种类型控制在部分负载效率最高,但是当空压机处于连续满载运行时,驱动装置的内部损耗使该控制模式的能效反而降低。

2) 离心式空压机

离心式空压机的性能曲线图 6-10 所示,排气压力随着流量的增加而降低。叶片数量越多,曲线越平坦;叶片越向后倾斜,曲线越陡。当空压机入口温度降低时空气密度增加,能会产生回流现象,称之为喘振,这对离心式空压机的运行时非常不利的,目前大多数离心式空压机负荷控制系统具有控制喘振的设定。

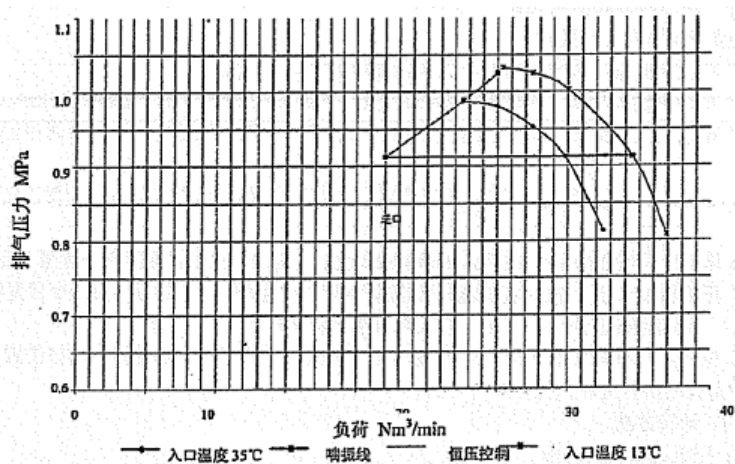


图 6-10 离心式空压机的性能曲线

3.4 空压机系统的节能措施

1) 提高空压机自身效率

提高空压机自身的运行效率是保证压缩空气系统高效运行的最基本的要求,主要是通过对现有空压机的组成部件进行周期性保养或用高效机组替换原有机组的方式达到。根据产品供应商要求对现有机组进行及时地保养对于维持机组的高效运行非常关键,一种能够指导压缩机能否得到很好维护的最好办法就是定期测试压缩机的功率、排气压力和流量,如果空压机在一定的排气压力和流量情况下的功率消耗增加了,则表明其效率已经下降。目前随着压缩机技术的不断进步,空压机效率也在逐步提高,如双级压缩螺杆式空压机。企业可以考虑在进行产品

更新时选择效率比较高的空压机，则会达到非常好的节能效果。

采用提高空压机自身效率的方法来提高整个压缩空气系统的运行效率方法比较简单易行。

对系统进行定期保养来保持空压机高效运行适用于任何机组，而用高效机组替代现有机组则更适用于企业对一些老的空压机进行更新换代时进行。

2) 空压机集中控制系统技术

空压机中央控制系统就是根据系统压力和需求变化，通过中央控制系统的分析来控制不同容量和控制方式空压机的启动 / 停止、上载/下载和容积变化等等，可以保持系统一直有合适数量和容量的空压机处于运行状态，维持系统供气压力的稳定和整个系统高效运行。

中央控制系统的特点是技术含量高，可以协调控制整个空压机系统的高效运行。与人为控制的空压机的运行相比，压力控制精度更高，对于系统需求变换做出反应的时间更及时，可靠性更高。

中央控制系统特别适合于在多台空压机同时运行的场合，如果系统负荷变化范围越大节能效果越明显。

3) 压力流量控制技术

任何一个压缩空气系统的流量负荷都是动态变化的，有时变化非常巨大，这通常会造系统供气压力的大范围频繁波动。所有压缩空气系统都具有保持系统正常运行的最低压力，一旦系统供气压力超过最低压力，那么系统将正常运行，系统供气压力设定再高则会导致系统耗气量和空压机能耗的增加。系统供气压力每增加 0.1MPa 将会使系统多消耗 14%的压缩空气量。为了保证系统供气一直满足所有生产的正常运行，通常企业会抬高整个系统的供气压力，使系统压力波动的最低点在大负荷事件发生时仍然高于最高用气压力要求设备的压力需求值。这就导致了在其它时段内系统供气压力高于系统实际的压力需求，系统耗气量随之增加，最终使空压机能耗增加。压力流量控制系统安装于供气侧（空压站）和用气侧（用气设备之间，其作用类似于水库出口的水坝，利用其前后的压力差和其上游配备的储气罐存一定量的空气在系统中，从而保证系统负荷波动时系统仍然以恒定的供气压力向系统供气，从而可以控制系统的耗气量，使系统在供应侧和

需求侧达到动态的平衡的同时，系统的耗气量最少。

压力流量控制器可以保持压缩空气系统在任何情况下的供气压力稳定通常在 $\pm 0.07\text{MPa}$ 范围内，而一般压缩空气系统的压力波动范围通常 0.07MPa ，有的甚至超过 0.3MPa 。这样可以减少系统人为虚假用气量和系统泄漏量、提高系统储气能力和供气可靠性。

压力流量控制器适用于压力波动大的系统，对于用气设备现场无减压控制的系统效果更好。

4) 变频调速技术

空压机变频调速技术目前主要应用于螺杆式空压机中，变频器控制通常低速启动，系统正常运行时，变频器通过检测安装在系统中（通常在干储气罐）的压力传感器信号，作为变频器恒压调节的反馈量，与变频器内的设定压力值相比较，经过计算得出变频器所需频率信号，自动调节电机转速，达到所需压力。当系统检测点的压力低于设定压力时，变频器输出频率升至 50Hz ，空压机电机转速达到最高。当变频器控制电机转速达到最低系统压力还高于设定值时，空压机开始下载。通常在安装变频控制后，系统原有的各项保护功能（如水压、油压过低保护等）及故障报警、运行状态等显示功能，另有手动，自动运行功能，可以实现工频和变频运行之间的切换。与离心式风机、水泵不同，空压机属于恒转矩，其功率与转速并非成三次方关系，而是近似一次方的关系。

每个压缩空气系统的负荷都是不断变化的，这就意味着在每个压缩空气系统中至少有一台空压机处于调节状态，螺杆式空压机的卸载功率通常为其加载功率的 $30\text{--}40\%$ 。对现有处于部分负载状态的空压机进行变频控制，不但可以节省空压机的空载功耗，还可以维持系统供气压力的稳定，减少系统虚假负荷和泄露量，提高系统供气可靠性。

空压机变频技术改造目前主要应用于螺杆式空压机改造中，特别是喷油螺杆空压机中。需要注意的是，与水泵和风机变频不同，在一个不同容量的多台空压机并联运行系统中，通常只对一台空压机进行变频改造即可，但由于有的压缩空气系统的负荷变化范围比较大，对哪台空压机进行变频改造需要对系统负荷特性进行全面的测试评估才能决定。如果出现了选择性错误，则很难达到预期的效果。

第七章 电机系统节能的典型误区

在前面已经介绍过，由于电机系统组成和运行的复杂性，对工业企业特定的电机系统的节能改造方法不是唯一的，不能照搬照用。由于信息不准确、方法不妥当、配套不完善，经常会出现采用节能电机、或变频控制后却得不到理想的节能效果。本章总结了儿种常见的、较为典型的节能误区，并就高效电机替换中应注意的问题进行了介绍。

1. 高效电机简单替换的节能误区

对于风机、水泵类转矩与转速的平方成正比的负载，采用高效电机时，由于转速比低效电机为高，可能导致高效电机的输出功率增大，有时会出现节能效果并不理想的情况。如图 7-1 所示，图中 IE2 为高效电机、IE3 为超高效电机。因此，简单地用同规格、高成本的高效电机替代低效电机，在远没有达到所期望的节能效果的情况下，将会增加项目的投资回收期。

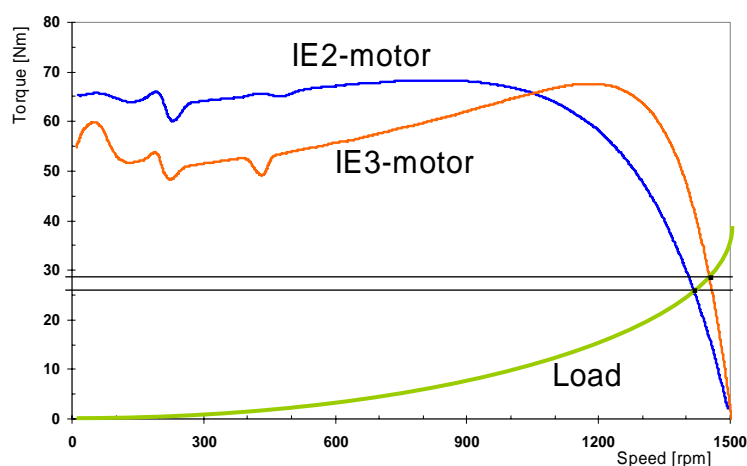


图 7-1 电机和泵转矩-转速曲线

2. “大马拉小车”型节能误区

电机长期运行在负载率 40%以下，就属于“大马拉小车”。系统运行不匹配，更换小功率档电机可使电机运行在高效区，但是单纯更换高效电机的节能计算容易走入误区。

以 Y 系列 75kW 的电机更换 55kW 电机为例，错误的节能计算直接以两者功率差计算节能量，即节能量为： $75-50=20\text{kW}$ 。这是在节能量申请材料经常出现的错

误。正确的计算如下：

(1) 75kW 电机运行在负载率 40%时的参数如表 7-1 所示。

表 7-1 75kW 电机运行参数 (负载率 40%时)

输出功率	效率 (%)	功率因数	电流 (A)	输入功率
30	91.86	74.73	66	32.65

(2) 更换为 55kW 电机时, 这时的运行功率为 30kW, 对应的负载率为 55%, 运行参数如表 7-2 所示。

表 7-2 55kW 电机运行参数 (负载率 55%时)

输出功率	效率 (%)	功率因数	电流 (A)	输入功率
30	92.36	81.489	60.58	32.497

从两表可以看出来, 75kW 电机运行负载率 40%的时候, 效率比额定点时低了很多, 属于不经济运行区, 此时更换成 55kW 电机, 负载率提高到 55%, 效率和功率因数提高了, 电流和输入功率减少了, 节省的电量为输入功率减少量, 理论上仅有 $32.65 - 32.497 = 0.153\text{kW}$ 。

3. 普通电机直接用于变频调速控制的误区

在常见的普通电机系统改为变频调速系统时, 普遍存在将普通电机简单改造、加装独立冷却风机以替代变频调速专用电机的情况, 但由于变频器供电时过高的载波频率引起的起始放电电压, 直接加载在电机的绕组接线端部, 会造成电机的局部放电, 将引起电机绝缘系统的破坏。最常见的故障是因匝间绝缘破坏引起电机烧毁。另外, 变频器供电时, 还会在电机轴承处引起轴电压和轴电流, 从而烧毁轴承。因此, 简单直接的将普通电机加装变频控制装置组成的变频调速系统是一种存在隐患的、不安全的系统。

4. 盲目使用变频调速技术的误区

随着节能需求的不断增加, 变频调速也越来越多的应用于节能, 目前已广泛

使用于流量、风量需频繁调节、且有一定调节量的水泵、风机、压缩机类负载系统中。但是，盲目使用变频器并不一定能达到很好的节能效果，例如调速范围不大，在调速节能量本身很有限的情况下，加装的变频系统本身也有 3~5%的损耗，加上资金投入较大，反而容易出现既不节能、又不省钱的情况。因此，是否采用变频调速节能技术要根据节能量的大小和投入，进行性价比分析，并结合系统的特性综合考虑，来制定不同的系统节能方案。

采用变频调速应综合考虑的主要因素有：

a. 工况的考虑：

- ◆ 调节频繁且流量调节较大的情况；
- ◆ 调节较频繁但流量调节较小的情况；
- ◆ 调节不频繁但流量调节较大的情况；
- ◆ 调节不频繁且流量调节较小的情况。

上述不同的工况应采取不同的节能措施，在调节不频繁的情况下可考虑使用多速电机；在流量调节较小，且调节不频繁的情况下可采用降压或者调节阀门等方式来实现节能措施，以达到系统运行的经济性，而不能盲目的使用变频调速进行节能。

b. 系统的寿命周期成本、变频系统本身损耗的考虑：

采用变频调速系统本身增加的损耗量：变频器自身的损耗 3%-5%，在变频器供电情况下电机将增加损耗 1%-2%，系统总损耗将增加 4%-7%。系统节电量少于，等于或稍大于增加的损耗量都是不可取的。同时，还需要考虑采用变频器增加的购置成本及增加的维护成本等。

第八章 电机系统节能改造的工作方法

1. 包含范围

本章叙述了电动机系统节能改造所必需的技术性活动,包括电动机系统节能诊断、项目的实施、节能改造综合评估。本章内容适用于各类电动机系统中的部分装置或整个系统所进行的节能改造。

2. 术语与定义

节能诊断:通过现场调查、检测以及对能源消费账单和设备历史运行记录的统计分析等,找到电动机系统能源浪费的环节,为电动机系统的节能改造提供依据的过程。

评价边界:实施节能措施的电动机系统与其周围相邻部分的分界面,边界应根据电动机系统节能改造的范围和达到的目的等因素确定。

节能量:满足同等需要或达到相同目的的条件下,能源消费减少的数量。

产品节能量:用统计报告期产品单位产量能源消耗量与基期产品单位产量能源消耗量的差值和报告期产品产量计算的节能量。

工况节能量:满足同等工况需求条件,用统计报告期单位时间能源消耗量与基期单位时间能源消耗量的差值和报告期运行时间计算的节能量。

节能率:统计报告期比基期的单位能耗降低率,用百分数表示。

数据分析法:根据使用者改造前后能源消费的结算凭证或数据以及生产记录,通过分析得到改造节能效果的方法。

3. 电动机系统节能改造一般要求

电动机系统节能改造应在满足生产工艺需求和不降低劳动生产率的基础上,提高电动机系统的能源利用效率,降低能源消耗。还应根据节能诊断结果,结合节能改造判定原则,从技术可靠性、可操作性和经济性等方面进行综合分析,选取合理可行的节能改造方案和技术措施。节能改造时,用能设备应采用节能型产

品或高效低耗产品，不得使用已被明令禁止生产、使用的低效高耗产品。节能改造后，各用电系统经济运行指标应符合以下相关的国家标准要求：

- ◆ GB/T 13466-2006 交流电气传动风机（泵类、空气压缩机）系统经济运行通则
- ◆ GB/T 13469-2008 离心泵、混流泵、轴流泵和漩涡泵系统经济运行
- ◆ GB/T 13470-2008 通风机系统经济运行
- ◆ GB/T 15913-2009 风机机组与管网系统节能监测方法
- ◆ GB/T 16665-1996 空气压缩机组及供气系统节能监测方法
- ◆ GB/T 16666-1996 泵类及液体输送系统节能监测方法
- ◆ GB/T 17166-1997 企业能源审计通则
- ◆ GB/T 17167-2006 用能单位能源计量器具配备和管理通则
- ◆ GB/T 17981-2007 空气调节系统经济运行
- ◆ GB 18613-2012 中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级
- ◆ GB 19153-2009 容积式空气压缩机能效限定值及能效等级
- ◆ GB 19761-2009 通风机能效限定值及能效等级
- ◆ GB 19762-2007 清水离心泵能效限定值及节能评价值

电动机系统节能改造诊断评估、设计、实施及节能评价应参照流程图进行。电动机改造评价程序和参数测试应参照 GB/T 21205-2007 等相关流程及相应电动机试验方法进行。电动机系统的能效检测方法应符合现行国家标准或行业标准的有关规定，电动机系统能效检测的机构应具备相应资质。

4. 节能诊断

电动机系统节能改造前应对电动机系统的设备、装置、控制方式和运行管理措施进行节能诊断，通过分析电动机系统使用环境及运行要求，在检测现有系统运行能效的基础上，对节能改造可行性和改造方案进行论证，并预估改造效果。

电动机系统节能诊断前，根据电动机系统节能改造的目的和需求，可以选择性提供下述部分或全部资料：

- a) 设备运行图纸和技术文件以及电动机系统的改造记录；
- b) 相关设备技术参数和运行记录；
- c) 系统工艺需求及技术条件。

节能改造前应制定详细的诊断方案，进行检测，编写节能诊断报告。节能诊断报告应包括系统概况、检测结果、能效诊断与能效分析、改造方案建议、节能

效果预测和投资回报分析等内容。

5. 项目实施

项目实施时，首先应对按确定好的评价边界内的能耗情况进行能效检测或收集能耗及运行等相关数据，能效检测宜采用全面测试的方法进行。

建设单位应委托具备相应资质条件的改造实施单位进行改造施工，改造实施单位应按照经评审通过的改造方案进行设计、安装、调试、试运行和测试，同时负责培训企业有关工程技术人员和有关操作人员。

试运行前建设单位要会同改造实施单位编制完善的试运行方案，落实好各项安全生产措施，保障停、开车安全。系统正常运行后，使用单位负责其日常维护。涉及的检测、检验，属法定检测、检验的，必须由有资质的单位进行，其他的可委托改造实施单位承担。

5.1 电动机的更新与改造

5.1.1 电动机类型的选择

电动机类型的选择一般应遵循以下原则：

- ◆ 依据电动机的工作是否处于易燃、易爆、粉尘污染、腐蚀性气体、高温、高海拔、高湿度、水淋和潜水工作环境，选择相应的防护类型、外壳防护等级和电动机的绝缘等级；
- ◆ 电动机的额定电压应根据其额定功率和所在系统的配电电压或供电电源的输出电压选定；必要时，应通过技术经济的比较确定；
- ◆ 负载对起动、制动、调速有特殊要求时，应更换为与负载特性相匹配的专用电机，所选电动机应能与调速方式合理匹配；
- ◆ 电动机的起动转矩、最大转矩、最小转矩、转速及其调节范围等，应满足电动机所拖动的负载在各种运行方式下的要求；
- ◆ 在有频繁起动、高起动转矩和冲击负载等特殊要求时，选用相应的专用电动机并进行转矩校验；
- ◆ 对于有规律变化的负载，应根据其工作制类型和定额，按 GB 755-2008 的规定选择相应的工作制类型和定额的电动机；
- ◆ 年运行时间大于 3 000 h、负载率大于 60 %的、恒速运行的中小型三相异步电动机，应选用能效指标符合 GB 18613-2012 节能评价值的电动机。

5.1.2 电动机额定功率的选择

电动机额定功率的选择一般应遵循以下原则：

- ◆ 选择额定功率时，应使电动机的平均负载率不低于 60%。电动机的平均负载率低于 50%时，应更换成较小额定功率的电动机；
- ◆ 拖动连续运行、稳定负载的电动机，其额定功率应大于负载轴功率。对于三相异步电动机，应使电动机长期运行在 75%负载率时，按 GB/T 12497-2006 计算的综合效率最高；
- ◆ 对于运行工况变化、但连续工作的电动机，应根据负载变化情况求出平均等效功率，电动机的额定功率应大于等效功率，并应对电动机的起动性能和过载能力进行校核；
- ◆ 对于短时或断续工作的电动机，宜选用相应工作制的电动机，并使电动机额定功率略大于负载的功率；也可选用连续工作制电动机来替代，此时，应采用等效法求出工作时间内的等效功率，电动机的额定功率应略大于等效功率，并应对电动机的起动和过载能力进行校核。

5.1.3 电动机的改造

电动机的改造宜充分分析对原电动机进行高效再制造的可行性，并在再制造过程中充分分析、判断和选择可利用或可回收部件，提高资源循环利用效率。

5.1.3.1 电动机的高效再制造

电动机的高效再制造，就是将低效电机通过重新设计、更换零部件等方法，再制造成高效率电动机或适用于特定负载和工况的系统节能电动机（如变极电动机、变频电动机和永磁电动机等），一般包含以下几种情况：

- ◆ 对一般效率电动机通过重新设计，再制造成高效电机或超高效电动机的改造活动；
- ◆ 对一般效率电动机通过重新设计，再制造成变极变速专用电动机的改造活动；
- ◆ 对一般效率电动机通过重新设计，再制造成变频调速专用电动机的改造活动；
- ◆ 对一般效率电动机通过重新设计，再制造成高效永磁电动机的改造活动；
- ◆ 对一般效率电动机通过重新设计，再制造成系统匹配的专用电动机的改造活动。
- ◆ 适用范围：对年运行时间大于 3 000 h、负载率大于 60 %的、恒速运行的普通三相异步电动机，宜对电动机再制造成高效或超高效三相异步电动机；对负载率变化较大，速度变化范围较大但不要求连续平滑变化的普通三相异步电动机，宜对电动机再制造成变极变速专用电动机；对负载率变化较大，速度变化范围较大且连续平滑变化的普通三相异步电动机

机，宜对电动机再制造成变频调速专用电动机；对年运行时间大于 3000 h、负载率大小变化，轻载运行时间较长，恒速运行的三相异步电动机，对电动机可进行高效再制造，改造成高效或超高效永磁同步电动机。对年运行时间大于 3 000 h、负载匹配不合理的普通三相异步电动机，宜对电动机再制造成系统专用的三相异步电动机。

5.1.3.2 电动机的降容改造

电动机的降容改造就是对电动机的额定功率（或标称功率）进行降低或减少的重新设计和改造活动。

适用范围：当电动机驱动系统经实测或评估，系统最大功率未能达到电动机的额定功率时，对电动机可进行降容改造。

5.1.3.3 电动机的增容改造

电动机的增容改造就是对电动机的额定功率（或标称功率）进行提高或增加的重新设计和改造活动。

适用范围：当电动机驱动系统经实测或评估，系统所需的最大功率虽然超过电动机的额定功率，但电动机的原始设计较为富裕，对电动机可进行增容改造，但同时应对改造后的系统安全性进行评估。

5.1.3.4 电动机的降压改造

电动机的降压改造就是对电动机在适当范围内降低控制电压时的节能改造。

适用范围：当电动机系统的负载率在运行范围内有较大变化，但同时不适用于变频改造时，可对电动机进行降低电压的控制方式。

5.1.3.5 电动机的升压改造

电动机的升压改造就是对电动机在适当范围内提高控制电压时的节能改造。

适用范围：当电动机系统由于线路损耗等原因需对电动机由低压改造为高压时，应对电动机的材料等进行全面重新设计和改造。

5.1.3.6 电动机的变极改造

电动机的变极改造就是对电动机由单一转速改变为多极变速运行下的节能改造。在满足负载变化的要求下，可采用多速三相笼型异步电动机。

适用范围：当存在因某种因素周期变化（如季节），系统所需亦可随之周期变化，在调速可满足需求时，可对电动机及系统进行变极调速改造，但此种改造所使用的控制方式应允许电动机停止运行后自由进行。或当运行工况非频繁变化，且系统所需呈阶梯状，在调速可满足需求时，可采用多速电动机，一般可选用双速三相笼型异步电动机。变极电动机宜采用全压起动。

5.1.3.7 通用电动机改专用电动机的改造

通用电动机改专用电动机的改造就是对拖动典型负载的电动机再制造成与被拖动设备负载特性匹配的专用电机的节能改造。

适用范围：当电动机与被拖动设备负载特性不匹配，可对电动机进行重新设计，再制造成与被拖动设备负载特性相匹配的专用电动机。

5.2 控制装置的改造

对电动机系统通过改变控制装置来达到最佳的节能效果所进行的节能改造。控制装置的改造时应对改造后的电动机系统运行安全性进行评估。

5.2.1 变频调速控制改造

对电动机由单一转速或由低效的调速方式改变为在变频器控制下的平滑调速运行时的节能改造。

适用范围：当负载运行工况频繁变化，且变化范围较大，系统所需电动机的功率亦随之频繁变化时，可对电动机及系统进行变频调速改造，但此种改造所使用的控制方式应允许电动机停止运行后自由进行。

变频调速改造时宜将原电动机再制造成变频调速专用三相笼型异步电动机。

5.2.1.1 变频器与电动机匹配的要求

变频器与电动机的匹配一般应遵循以下原则：

- ◆ 电压匹配，变频器输出额定电压与电动机额定电压相符；
- ◆ 电流匹配，变频器额定电流应大于电动机实际运行最大电流；
- ◆ 变频器与电动机之间安装距离较远时，应适当增大变频器容量或在变频器输出端加装电抗器。

5.2.1.2 对变频器的要求

对变频器的一般要求是：

- ◆ 变频器输出电压、频率连续可调；
- ◆ 变频器一般性能应符合 GB/T 12668.2-2002 和 GB/T 12668.4-2006 的规定；
- ◆ 对于风机、水泵专用低压变频器，应符合 GB/T 21056-2007 的规定；
- ◆ 对于电力行业所用高压变频器，应符合 DL/T 994-2006 的规定，其他行业可参考执行；
- ◆ 变频器的过载能力应大于额定电流的 20%，并持续 60s；
- ◆ 变频器应具有各种保护功能，如输入过压、欠压保护，缺相保护，过流保护，短路保护，防雷电冲击保护等；
- ◆ 高压大容量变频调速电动机系统应采取限制产生轴电流的措施；
- ◆ 变频器的电磁兼容性能应符合 GB/T 12668.3-2003 的规定。

5.2.2 变极变速控制改造

变极变速控制改造是对电动机由单一转速改变为在逻辑组合开关控制下的变速运行时的节能改造。

适用范围：当负载运行工况变化，但呈周期性变化时，系统所需电动机的功率和转速亦随之周期变化时，可对电动机的控制系统进行变极变速改造，但此种改造所使用的控制方式应允许电动机停止运行后自由进行。

变极变速改造时宜将原电动机再制造成变极变速专用三相笼型异步电动机。

5.2.3 相控节能控制改造

对电动机在适当范围内降低控制电压时的节能改造。

适用范围：当电动机系统的负载率在运行范围内有较大变化，但同时不适用

于变频改造时，可对电动机进行降低电压的控制方式。

5.2.4 串级调速控制改造

对于额定电压为 6kV、10kV，功率较大的场合，电动机由单一转速或由低效的调速方式改变为在一定范围内平滑调速运行时的节能改造，可选用串级调速方式。

适用范围：当负载运行工况呈周期性变化（非季节性周期），且变化范围不大，系统所需电动机的功率亦随之周期变化时，可对电动机及系统进行串级调速改造，但此种改造所使用的控制方式应允许电动机停止运行后自由进行。

串级调速改造宜选用内馈或外馈调速装置，对采用三相异步电动机的设备在进行串级调速改造时宜对原电动机进行重新设计再制造成与调速设备相匹配的专用电动机。

5.2.5 开关磁阻电动机及控制器调速改造

对电动机由单一转速或由低效的调速方式改变为在开关磁阻电动机及控制器控制下的平滑调速运行时的节能改造。

适用范围：当负载运行工况频繁变化，且变化范围较大，系统所需电动机的功率亦随之频繁变化，并且可选择到需求功率的开关磁阻电机及控制器时，可对电动机及系统进行开关磁阻电机及控制器调速改造。

5.2.6 控制模式的改造

对于适合采用更节能的控制模式进行控制的电动机系统，可进行控制模式改造。控制模式改造可对控制装置进行闭环控制改造、反馈信号采样点或采样信号类型改造、细化运行分级改造、优化控制算法改造等。控制模式改造时应尽可能利用原控制装置或原控制装置的零部件。控制模式改造时应充分考虑改造后对相关电动机系统的影响，一般控制模式改造宜对相关的所有电动机系统进行综合改造，保证所有相关的电动机系统运行的协调一致和运行的综合能效水平提高。控制模式改造时应对改造后的运行情况与预分析，确认改造后不影响生产时进行。

适用范围：在不影响电动机系统的运行效果，通过改变电动机系统的控制模

式可提高电动机系统能效的电动机系统，可进行控制模式改造。

5.3 传动装置的改造

对于可采用高效传动装置替代现有低效传动装置的电动机系统，可进行传动装置改造（可同时结合调速改造、电动机改造）。对传动装置改造时应应对改造后的电动机系统运行安全性进行评估。

5.3.1 液力耦合器的改造

在电动机系统进行调速改造或启动方式改造时，可同时对液力耦合器进行改造。

适用范围：液力耦合器起调速作用，在进行控制装置调速改造时宜将液力耦合传动装置改造成联轴器连接；液力耦合器有软启动作用，在进行控制装置调速改造或软启动改造时宜将液力耦合传动装置改造成联轴器连接。

5.3.2 齿轮变速箱的改造

在电动机系统进行电动机改造时，可同时对齿轮箱进行改造；或传动装置采用普通齿轮变速箱时，可进行齿轮变速箱的改造。

适用范围：电动机改造时选用的新电动机的转速运行范围较宽，足以取消齿轮箱时宜将齿轮箱传动装置改造成联轴器连接；或当高效变速装置足以代替普通齿轮变速箱时；或普通齿轮箱需要更新时。

5.4 被拖动装置的改造

对于可采用高效被拖动装置替代现有低效被拖动装置的电动机系统或可提高被拖动装置的能效时，可进行被拖动装置的改造。被拖动装置的改造时应应对改造后的电动机系统运行安全性进行评估。

5.4.1 高效替代改造

对于有成熟的高效被拖动装置足以代替现有拖动装置，可进行高效替代改造；对于机组的工作点不合理的机组，可进行机组替代改造。

适用范围：高效被拖动装置的性能完全满足使用需要，现有运行环境或通过改善运行环境能完全满足高效被拖动设备的运行环境要求；通过重新设计、计算或测试，确认机组运行工作点在非高效工作区，替代改造后能提高能效的机组。

5.4.2 被拖动设备的改造

对于现有被拖动装置可以通过改造或更新部分零部件的方法提高被拖动设备的实际运行效率时，可进行被拖动设备改造。

适用范围：不改变现有设备的安装方式和连接方式，被拖动设备的实际运行能效水平低下或工作在非高效工作区。

5.4.3 被拖动设备的损耗能量回收改造

对于被拖动装置损耗的能量型式可进行回收再利用时，可进行被拖动设备的损耗能量回收改造。

适用范围：被拖动设备损耗的能量具有回收价值，且回收后的能量有足够的再利用的场所。

5.5 管网的改造

以提高综合能效水平为目标可对管网进行如下改造，包括：

- ◆ 改造管网的排列形式连接形式和减少阀门数量，降低管网管阻；
- ◆ 提高管网的保温性能，减少管网传输过程中能量损失；
- ◆ 增加管网中的阀门数量，进行管网调度管理；
- ◆ 改变管网中阀门类型，实现自动控制；
- ◆ 增加管网间互通管路，满足跨区调度；
- ◆ 隔离不同类型的管网，实现分类供给。

6. 综合评估

电动机系统节能改造后，应对设备运行效果进行评估，改造后系统的生产效率和系统分界点指标应达到改造设计要求。

电动机系统改造后，应对与改造设备相关的设备及其运行情况进行全面检查。

电动机系统节能改造后，应对被改造的系统或设备进行能效检测和评估，并在条件允许的情况下，应在相同的运行工况下采取同样的检测方法，改造前后能效检测应由同一个检测单位进行。

6.1 节能效果监测及评价步骤

节能效果监测及评价步骤是：

- ◆ 针对项目特点制定具体的检测和评价方案；
- ◆ 收集或检测改造前的能耗及运行数据；
- ◆ 收集或检测改造后的能耗和运行数据；
- ◆ 计算节能量及节能率并进行评价；
- ◆ 撰写节能改造效果检测评价报告。

6.2 节能改造效果评价方法

计算节能量时，应进行偏差分析。

6.2.1 测量法

符合下列情况之一时，宜采用测量法进行评价：

- ◆ 仅需评估改造的电动机系统能效时；
- ◆ 节能改造项目之间或与其他设备之间的相互影响可忽略不计或可测量和计算时；
- ◆ 影响能耗的变量可以测量，且测量成本较低时；
- ◆ 期望得到单个节能措施的节能量和节能率时。
- ◆ 采用测量法进行评估时，应符合下列规定：
 - 当被改造系统或设备运行负荷较稳定时，可只测量关键参数，其他参数宜估算确定；
 - 当被改造系统或设备运行负荷变化较大时，应对与能耗相关的所有参数进行测量；
 - 当实施节能改造的设备数量较多时，宜对被改造的设备进行抽样测量。

6.2.2 数据分析法

符合下列情况之一时，宜采用数据分析法进行评估：

- ◆ 需评估改造前后相关所有设备的综合能效状况时；
- ◆ 采取了多项节能措施，且存在显著的相互影响时；

- ◆ 被改造系统与其他设备系统之间存在较大的相互影响，很难采用测量法进行测量或测量费用很高时；
- ◆ 很难将被改造的系统或设备与其他部分的能耗分开时；
- ◆ 预期的节能量比较大，足以摆脱其他影响因素对能耗的随机干扰时。

6.3 节能改造效果检测计算方法

改造完成后应根据实际采用以下几种方式的一种或几种方式进行节能改造效果评估。

6.3.1 按统计报告期核算的节能量和节能率

统计报告期节能量按下式计算：

$$\Delta E_T = E_{Th} - E_{Tq} + E_X$$

式中： ΔE_T ——统计报告期节能量，单位为千瓦时（kWh）；

E_{Tq} ——基期总耗能量；

E_{Th} ——统计报告期总耗能量；

E_X ——建设方和施工方认可的修正值（主要由统计报告期和基期不可消除的影响决定）。

统计报告期节能率按下式计算：

$$\xi_T = \frac{\Delta E_T}{E_{Tq}} \times 100\%$$

式中： ξ_T ——统计报告期节能率，%。

6.3.2 按单位产品核算的节能量和节能率

单位产品节能率按下式计算：

$$\xi_q = \frac{e_{dj} - e_{dy}}{e_{dy}} \times 100\%$$

式中： ξ_q ——产品节能率，%；

e_{dy} ——基期单位产品平均耗能量，单位为千瓦时（kWh）；

e_{dj} ——统计报告期单位产品平均耗能量，单位为千瓦时（kWh）。

注：产品节能率 ξ_q 可以为产品有功节能率、无功节能率和综合节能率中的任何一种，只需注意在计算时将相应的基期单位产品耗能量 e_{dy} 和统计报告期单位产品耗能量 e_{dj} 赋以相对应的值即可。

单位产品节能量按下式计算：

$$\Delta E_d = \xi_q \times e_{dy} \times M$$

式中： ΔE_d ——产品节能量，单位为千瓦时（kWh）；

M ——统计报告期产出的合格产品数量。

6.3.3 按工况核算的节能率和节能量

工况节能率按下式计算：

$$\xi_g = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_{gi} \times T_i}{\sum_{i=1}^n T_i}$$

式中： ξ_g ——工况（工艺）节能率，%；

ξ_{gi} ——第*i*种工况（工艺）节能率，%，按下式计算；

T_i ——统计报告期，在第*i*种工况（工艺）运行时间，单位为小时（h）；

n ——统计报告期系统工况（工艺）的数量。

$$\xi_{gi} = \frac{e_{gvi} - e_{gyi}}{e_{gyi}} \times 100\%$$

式中： e_{gyi} ——基期系统在第*i*种工况单位时间平均耗能量，单位为千瓦时（kWh）；

e_{gvi} ——统计报告期系统在第*i*种工况（工艺）单位时间平均耗能量，单位为千瓦时（kWh）。

注：工况节能率 ξ_g 可以为工况有功节能率、无功节能率和综合节能率中的任何一种，只需注意在计算时将相应的基期工况单位耗能量 e_{gyi} 和统计报告期工况单位产品耗能量 e_{gvi} 赋以相对应的值即可。

工况节能量按下式计算：

$$\Delta E_g = \sum_{i=1}^n \xi_{gi} \times e_{gvi} \times T_i$$

式中： ΔE_g ——工况节能量；单位为千瓦时（kWh）。

6.3.4 综合节能量和综合节能率

综合节能量按下式计算：

$$\Sigma E_C = E_p + K_Q \times E_Q$$

式中： ΣE_C ——综合节能量；单位为千瓦时（kWh）；

E_p ——有功节能量；单位为千瓦时（kWh）；

E_Q ——无功节能量；单位为千瓦时（kvarh）；

K_Q ——无功经济当量，其具体取值按GB12497-2006 附录A.3中的规定；单位为（kW/kvar）。

综合节能率按下式计算：

$$\xi_C = \frac{\Sigma E_{Cj} - \Sigma E_{Cy}}{\Sigma E_{Cy}}$$

式中： ξ_C ——综合节能率，%；

ΣE_{Cy} ——基期综合节能量；单位为千瓦时（kWh）；

ΣE_{Cj} ——统计报告期综合节能量；单位为千瓦时（kWh）。

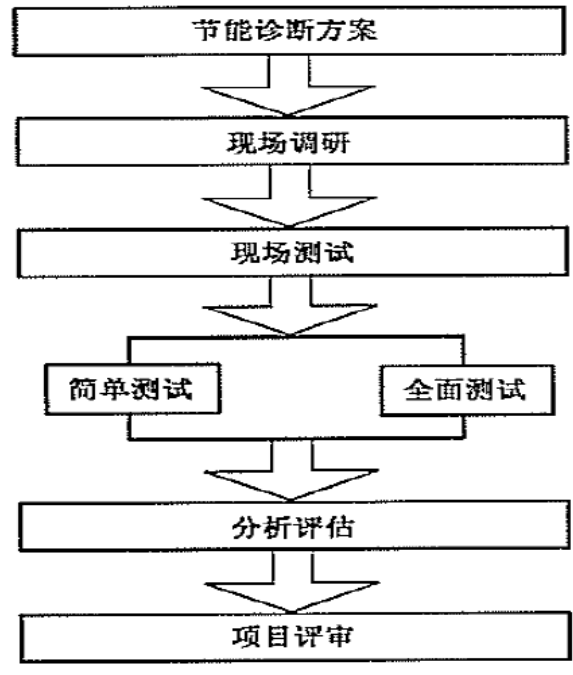


图 8-1 节能诊断流程图

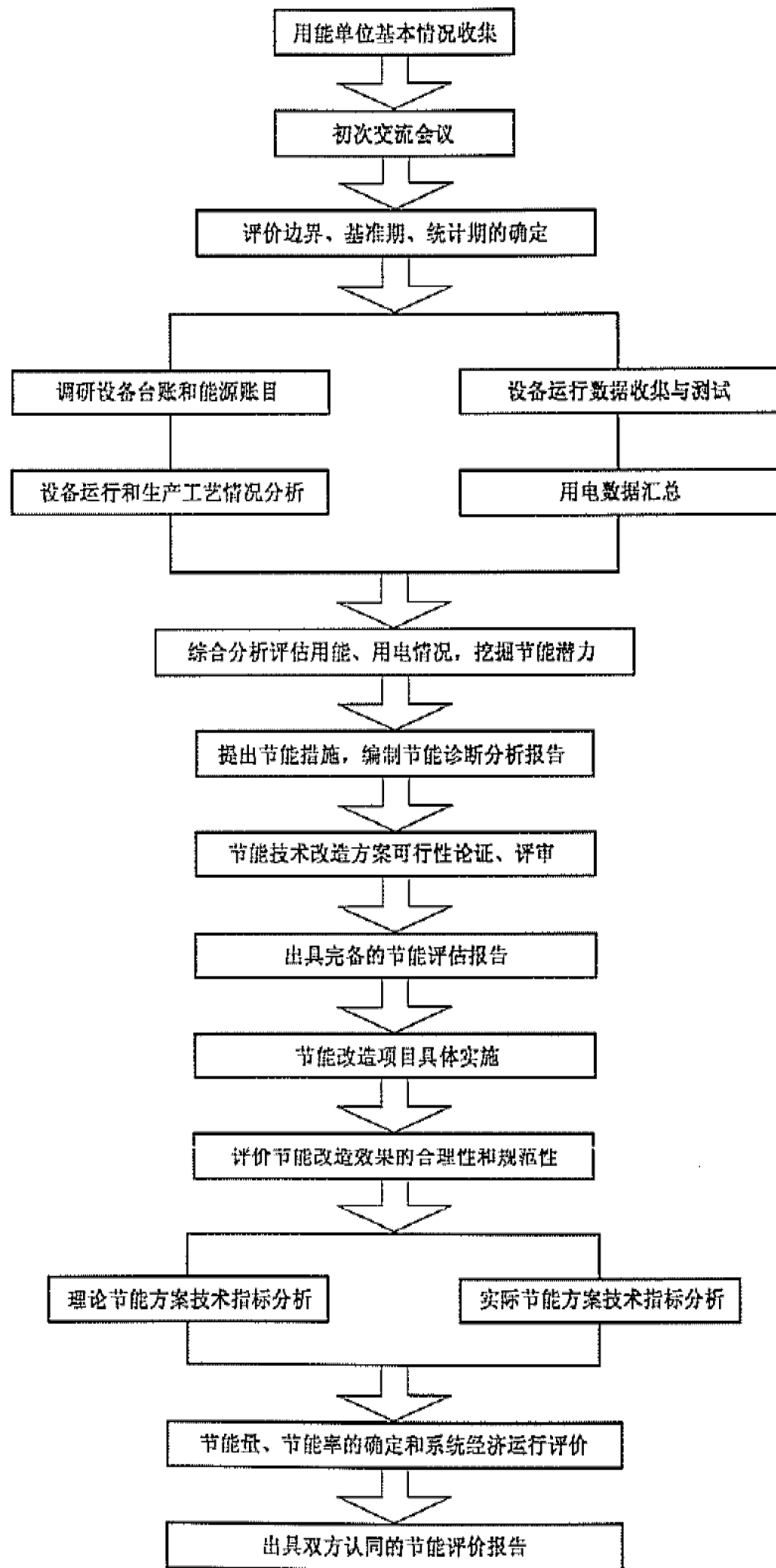


图 8-2 节能改造诊断、设计实施及节能评价流程图