

# 电动机

1. 简介 .....	1
2. 电动机的类型 .....	2
3. 电动机的评估 .....	10
4. 提高电动机效率的可能性.....	14
5. 方案清单 .....	19
6. 工作表 .....	21
7. 参考文献 .....	22

## 1. 简介

本章介绍电动机的主要特点。

### 1.1 电动机的运用。

电动机是一种将电能转化为机械能的电机装置。转化的机械能被用于例如转动泵转叶、风扇或者鼓风机、驱动压缩机、举起物体等等。电动机被用于家庭（搅拌器、电钻、风扇）和工业领域。据估计电动机使用了工业领域70%的电力负载，因而有时被称为拉动工业的“马”。

### 1.2 电动机的工作原理

所有电动机的基本工作原理是一样的（图1）：

- 在磁场中的电流会受到一个力。
- 如果电流通过的电线完成一个环，环的两边如果与磁场成直角，其两边所受到力的方向正好相反。
- 这一对力形成一个转动线圈的转动力矩。
- 实际的电动机在电枢有多个线圈来提供一致的力矩，并且电磁场通过场线圈排列产生的电磁提供。

了解电动机需要理解电动机负载的含义。负载指的是扭力输出和其相应所需要的速度。负载通常有三种（印度能效局，2004）：

- **恒定扭力负载电动机：**输出功率要求虽然会随着运行速度而变化，但是扭力不会变化。恒定扭力负载电机的典型应用有传送带、转炉和恒定排量泵。
- **可变扭力负载电动机：**所需要的扭力随着运行速度的变化而变化。离心泵和离心风扇是扭力负载电动机的典型例子（扭力与速度的平方成正比）。
- **恒定功率负载电动机：**所需要的扭力通常随着运行速度的变化而反向变化。机械工具是恒定功率负载电动机的典型例子。

电动机的组成根据不同电动机的类型而不同，因此在第二章中将分别介绍。

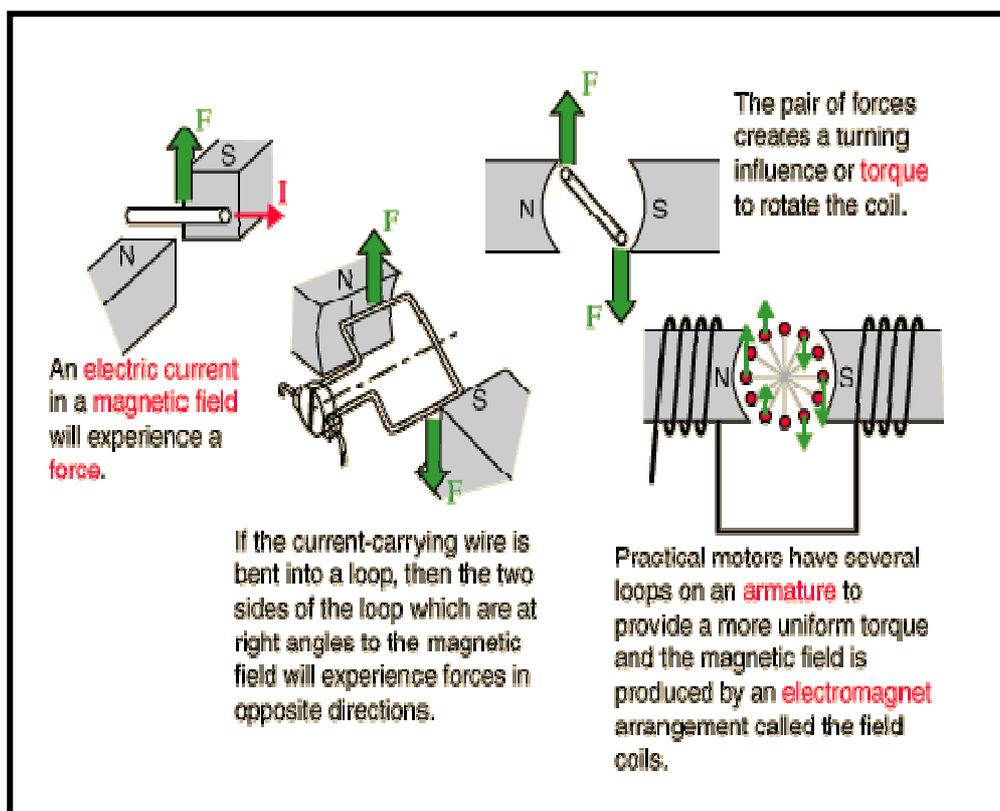


图 1. 电动机的工作原理 (Nave, 2005)

## 2. 电动机的类型

本章介绍两种主要的电动机：直流电电动机和交流电电动机。在以下网络链接中提供了一些电动机供应商名录：[www.directindustry.com/find/electric-motor.html](http://www.directindustry.com/find/electric-motor.html)。

图 3 是最常见的电动机。其分类根据供电输入、构造、和运行机制；具体如下：

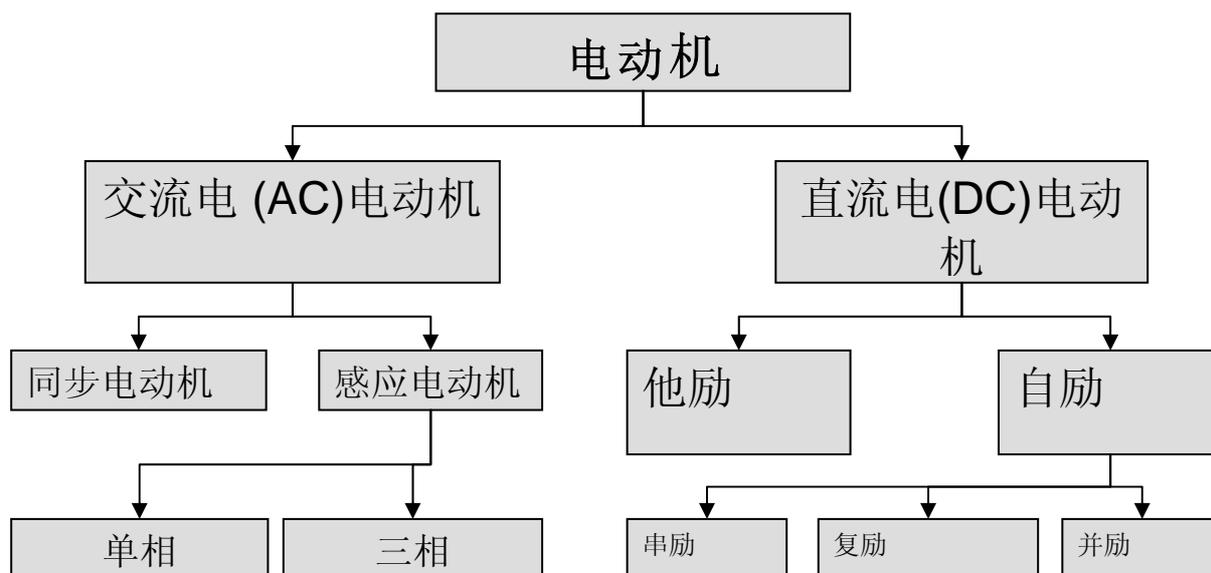


图 2. 电动机的主要类型分类

- **场磁极。**简单的说，两个磁场的相互作用导致了直流电电动机的转动。直流电电动机有多个固定的场磁极和一个在磁场极之间推动轴承的电枢。简单的直流电电动机有两个场磁极：北极和南极。磁力线在两极之间从北到南。在更大更复杂的电动机中，有一个或者多个电磁体。这些电磁体从外部电源接受电量，可以起到磁场的作用。
- **电枢** 当电流流过电枢时，就会变成一个电磁体。圆柱形电枢在电极形成的磁场中转动，直到磁场的北极和南极和电枢的相对方向发生改变。一旦电枢和磁场两极的位置变化，电流的方向也会改变到相反方向，这样电枢的两极也改变了。
- **转向器** 这种部件主要用于直流电电动机，其作用主要是转换电枢中的电流方向。变流器也帮助在电源和电枢之间传输电流。



图 3. 直流电动机  
(Direct Industry, 2005)

直流电电动机的主要优点是速度控制不会影响供电的质量。速度可以通过调整以下参数来控制：

- 电枢电压—增加电枢电压能够增加速度
- 场电流—降低场电流能够增加速度。

直流电电动机在很大的大小范围内都可以运用，但是其应用主要限于一些低速，中低速电器，例如机械工具和滚轧机，主要是因为在大中型电动机机械转换方面的问题。另外，由于电刷的电火花问题，直流电电动机也仅限于清洁无害的环境中工作。直流电电动机也比交流电电动机价格更贵。

速度、磁场通量和电枢电压之间的关系可以通过如下公式表示：

$$\text{反电动势: } E = K\Phi N$$
$$\text{扭力: } T = K\Phi I_a$$

其中：

- E = 电枢终端的电磁力 (伏特)
- $\Phi$  = 和场电流成正比的磁场通量
- N = RPM 速度 (每分钟转速)
- T = 电磁扭力
- $I_a$  = 电枢电流
- K = 公式常数

### 2.1.1 他励直流电电动机

如果场电流由单独的电源供电，这种电动机就是他励直流电电动机。

### 2.1.2 自励直流电电动机：并励电动机

在并励电动机中，场绕组（并激磁场）和电枢绕组（A）平行连接，如图 4。因此总线电流是场电流和电枢电流的和。

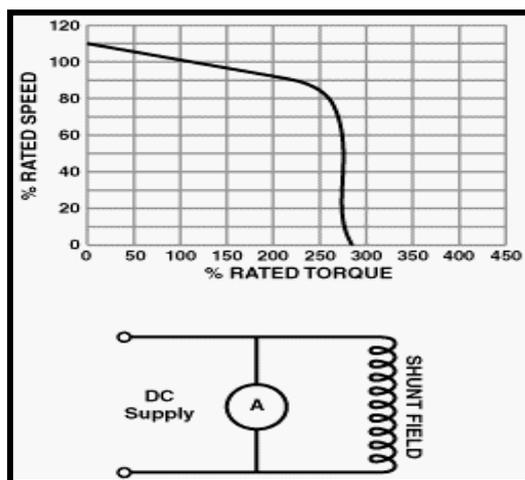


图 4:直流并励电动机的特征  
(Rodwell International Corporation, 1999)

关于并励电动机的速度有以下几点 (E.T.E., 1997):

- 速度实际上保持恒定，与负载无关（直到一个特定的扭力，然后速度下降，见图 4），因此适用于低启动负载的商用电器，例如机械工具。
- 能够通过接入与电枢串连的电阻（降低速度）或者通过在场电流中接入电阻（增加速度）来控制速度。

### 2.1.3 自励直流电电动机：串励电动机

在串励电动机中，场绕组（电枢绕组）串连，见图 5。场电流因此等于电枢电流。关于串励电动机的速度，有以下几点：(Rodwell International Corporation, 1997; L.M. Photonics Ltd, 2002)

- 速度不超过 5000 转每分钟
- 必须避免在空负载下使用串励电动机，因为速度会不可控制的增加。

串励电动机适用于需要较高启动扭力的电器，例如起重机和吊车(见图 5)。

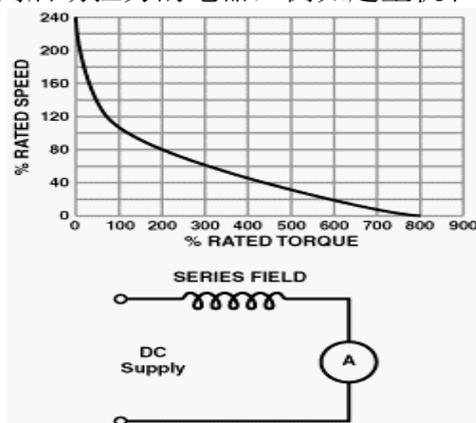


图 5:直流电串励电动机的特征  
(Rodwell International Corporation, 1999)

## 电力能源设备：电动机

### 2.1.4 直流复励电动机

直流复励电动机由并励电动机和串励电动机的结合。在复励电动机中,场绕组(并激磁场 A) 和电枢绕组并联并且串联(见图 6)。因此,这种电动机既有较好的启动扭力也有比较稳定的速度。负载的比例越高(即串连中场绕组的比例),发动机启动扭力也就越大。例如,40—50%的复合比率的电动机适合于升降机和起重机,但是标准的复励电动机(12%)却不适合(myElectrical, 2005)。

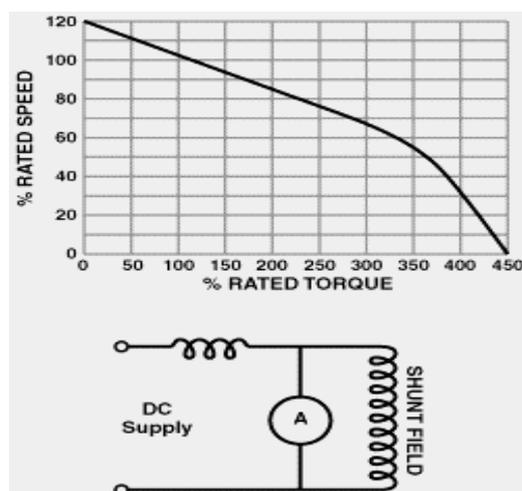


图 6:直流复励电动机的特点  
(Rodwell International Corporation, 1999)

## 2.2 交流电电动机

交流电(AC)电动机使用的电流按照固定的频率改变方向。交流电电动机由两个基本的电子部件:“定子”和“转子”,如图 7。定子是固定的电子部件。转子是转动的电子部件,依次转动电动机的轴。

直流电电动机相比交流电电动机的主要优点在于交流电电动机更难控制速度。为了弥补这一点不足,交流电电动机可以安装变速驱动;但是往往速度控制得到改进之后,功率质量却会下降。感应电动机是目前行业最受欢迎的电动机,因为其强度和较低的维护要求。直流感应电动机价格不贵(直流电电动机价格的一半或者更少),并且能够提供更高的功率重量比(比直流电电动机高 2 倍)。

### 2.2.1 同步电动机

同步电动机是通过系统频率调整后恒速运行的交流电电动机,它需要直流电激励并且有较低的启动扭力,因此适用于启动负载较低的电器,例如空气压缩机、变频器和电动发电机。同步电动机能够改进系统的功率因数,因此经常被用于使用大量电力的系统。

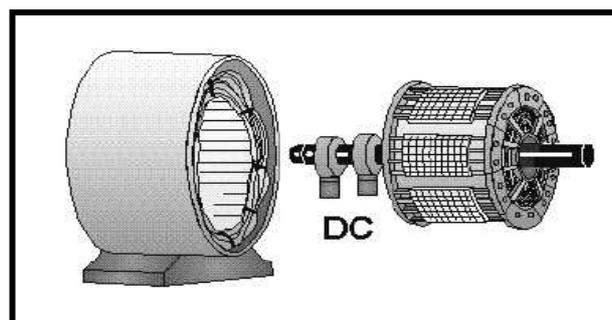


图 7. 同步电动机  
(Integrated Publishing, 2003)

同步电动机的主要部件有：(图 7):1

- **转子.** 同步电动机和感应电动机的主要区别在于同步电动机的转子和转动磁场的转速的速度一致。由于转子的磁场不再是感应的，这就能够实现。转子使用永磁体，或者使用直流电电流。转子的直流电流在遇到另外一个磁场时会被锁定到一个固定的位置。
- **定子.** 定子产生一个和输入频率成正比的转动磁场。

电动机按照同步的速度转动，根据如下公式(Parekh, 2003):

$$N_s = 120 f / P$$

其中:

f = 输入频率

P=极的数量

### 2.2.2 感应电动机

感应电动机是工业领域运用最光的电动机。其原因可以归于其设计简单，价格低廉并且易于维护，而且能直接和交流电电源连接。

#### a. 组成部件

感应电动机有两个主要的电器部件 (图 8):

- **转子:** 感应电动机使用两种类型的转子:
  - 鼠笼型转子由置于平行狭缝中的导电棒组成。这些导电条两端都通过短路环短路。
  - 绕线式转子有一个三相、双层、分布式绕线。其绕线的极数和定子一样多。三相在内部布线，并且其他端都和安装在轴上的集电环连接，上面有电刷。
- **定子:** 定子由一组带有用于三相绕线的冲压片组成。绕线绕成一定数量的极。绕线的集合分布为 120 度间隔。

<sup>1</sup> 受印度能效局 2005 年许可，摘自《电动机的组成部件》

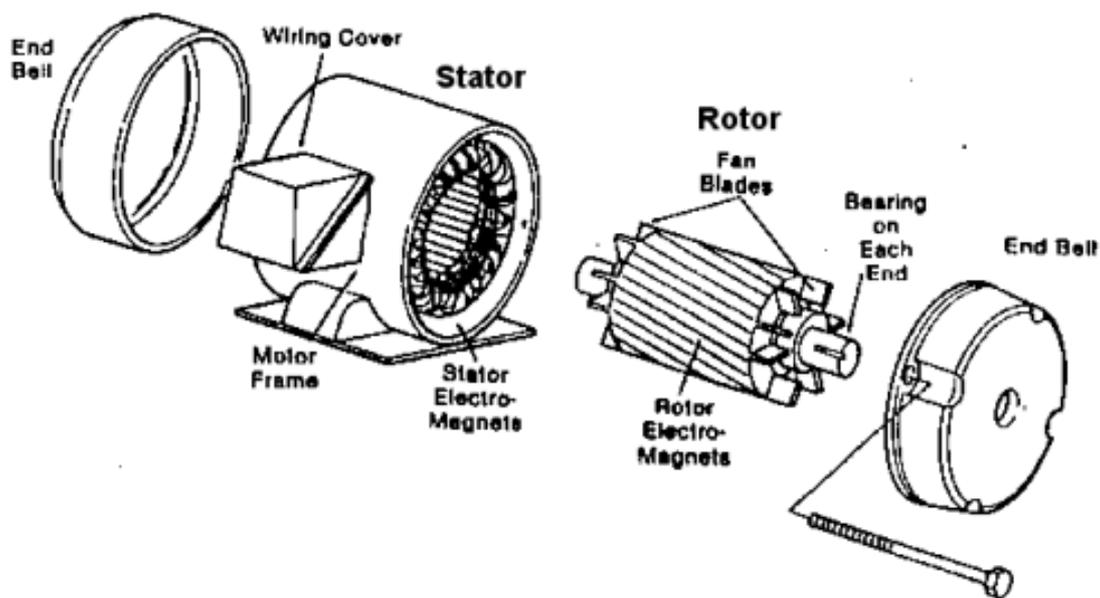


图 8. 感应电动机 (自动化建筑)

### c. 感应电动机的分类

感应电动机可以分为以下主要两种类型 (Parekh, 2003):

- 单相感应电动机。只有一个定子绕线，利用单相电供电工作，有一个鼠笼型转子，并且需要一个启动电动机的设备。这是家用电器里面最为普遍使用的一种电动机，广泛应用在风扇、洗衣机、干衣机和其他马力不超过3到4个的电器中。
- 三相感应电动机。转动的磁场由平衡的三相电产生。这类电动机具有高功率、可以采用鼠笼型转子或者绕线型转子（虽然90%采用鼠笼型转子），并且能够自启动。据估计工业上70%的电动机是这种类型，被广泛应用于例如泵、压缩机、传动带、重型电动网络和研磨机械。这些电动机的功率从33马力到几百马力不等。

### d. 感应电动机的速度

感应电动机的工作原理如下：电力输入到定子，定子然后产生磁场。磁场围绕转子同步转动，并在转子上产生感应电流。转子的感应电流产生第二个磁场，并和定子磁场产生反作用，从而使转子转动。

然而实际上，发动机永远不会真正同步运转，而是以一个稍低的“基本速度”转动。这两个速度之间的差称为“滑差”，差异会随着负载的增加而增加。并且滑差只发生在感应电动机上。为避免产生滑差，可以安装滑环，这类电动机因而被称为“划环式电动机”。下面的公式用来计算滑差百分比 (Parekh, 2003):

$$\text{滑差}\% = \frac{N_s - N_b}{N_s} \times 100$$

其中:

$N_s$  = 同步速度 (RPM)

$N_b$  = 基本速度 (RPM)

### e. 负载、速度和扭力之间的关系

## 电力能源设备：电动机

图9是一个三相直流感应电动机恒定电流下的典型扭力/速度曲线。当电动机(Parekh, 2003)

- 启动时，启动电流高而扭力低（“拉升转矩”）
- 当达到全速的80%后，扭力达到最高（“拉升转矩”）并且电流开始下降。
- 当速度达到最全速时，或者同步速度时，扭力和定子电流降到零。

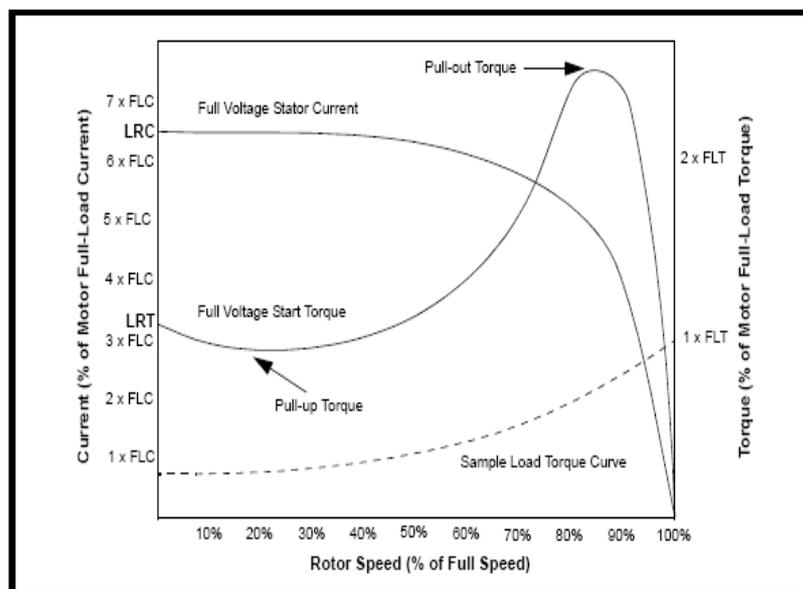


图 9. 三相直流感应电动机典型扭力—速度曲线(Parekh, 2003)

### 3.电动机的评估

本章极少如何评估电动机的性能。<sup>2</sup>

#### 3.1 电动机的效率

电动机将电能转化为机械能来完成一定负载。在这个过程中，能量的损耗如图 11。

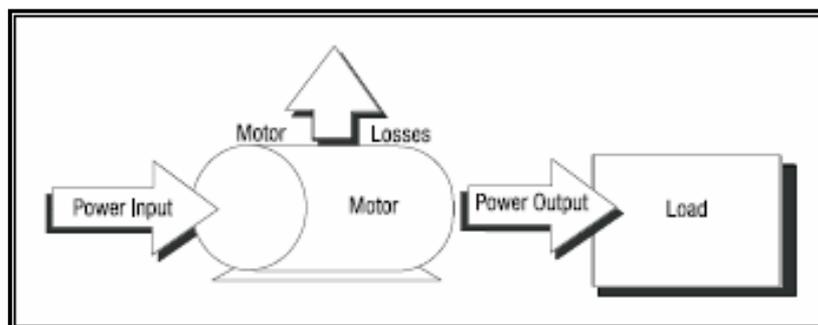


图 10 . 电动机损失 (美国能源部)

电动机的效率取决于其内在损耗。内在损耗只能通过改变电动机设计或者运行条件来降低。损耗的比例变化范围大概从 2%到 20%不等。表 1 中列出了感应电动机的各种损耗类型。

表 1. 感应电动机损耗的类型 (印度能效局, 2004)

损耗的类型	总损耗的比例(100%)
固定损耗或者核心损耗	25
可变损耗：定子I <sup>2</sup> R损耗	34
可变损耗：转子I <sup>2</sup> R损耗	21
摩擦和重绕损耗	15
杂散负载损耗	5

电动机的能效定义为“电动机有用输入功率和总输出功率的比率”。

影响电动机效率的因数有：

- 使用时间 新电动机效率更高
- 功率 和大多数设备一样，电动机效率随着设定功率的增加而增加
- 速度 高速电动机通常效率更高
- 类型 例如鼠笼型 电动机通常比滑环型电动机效率更高
- 温度 全封闭风扇致冷 (TEFC) 通常比防滴网罩式电动机 (SPDP) 效率更高
- 电动机的重绕会导致效率降低
- 负载，具体如下

<sup>2</sup>本节主要依据美国能源部电动机挑战项目编《判定电动机的负载和效率》的 16 页说明书；推荐参考该说明书了解进一步细节。

## 电力能源设备：电动机

电动机的效率和负载之间有清楚的联系。生产商在设计电动机时让电动机可以在 50—100% 负载范围工作，并且工作效率在 75% 时最高。但是一旦负载降低到 50% 以下，效率就会迅速下降，如图 11。在设定负载的 50% 以下工作时，对电动机的效率有相似但是稍弱的效果。电动机的高效和接近于 1 的功率因数不仅对于电动机很重要，对于整个工厂的高效和低成本运行非常有用。

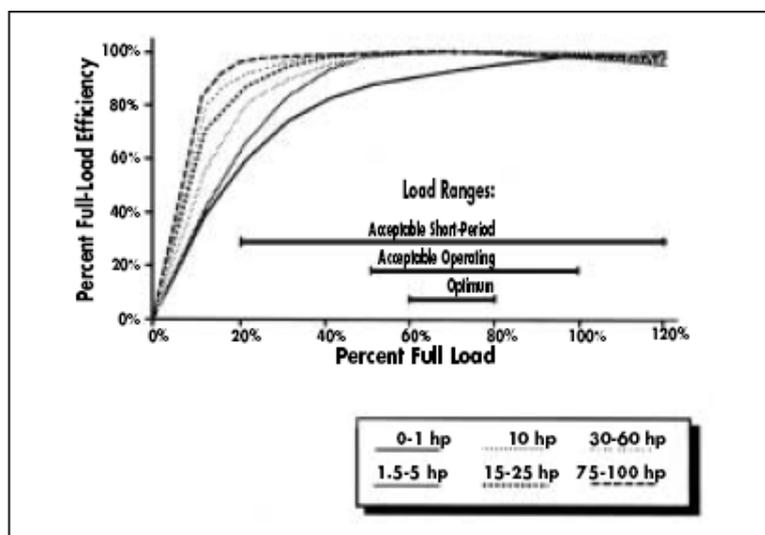


图 11. 电动机不完全负载效率（满负载效率的百分比）（美国能源部）

因为这个原因，在评估电动机性能时，负载和效率都需要确定。在大多数国家，生产商被要求在电动机的铭牌上注明满负载效率。但是，电动机使用很久之后，通常没有办法确定其效率，因为铭牌往往丢失或者被涂抹了。

要测量电动机的效率，必须先将电动机与负载断开然后在测试工作台完成一系列的测试，然后将这些测试的结果和生产商提供的性能曲线进行比较。

如果无法将电动机和负载断开，可以通过典型电动机效率值表格获得大致的效率值。美国能源部的数值表([www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/10097517.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/10097517.pdf))提供了标准电动机的典型效率值，可以在无法从厂商获效率值得时使用。数值表提供了以下效率值：

- 900、1200、1800 和 3600 每分钟转速标准效率电动机
- 10 到 300 马力电动机
- 两种类型电动机：开放防滴电动机（ODP）和全封闭风扇制冷电动机（TEFC）
- 25%、50%、75% 和 100% 负荷水平。

说明书也解释了三类更加复杂的电动机效率评估方法：特殊装置、软件方法和分析方法。

另外一种方法，也可以使用电动机调查来确定负载，因为负载也指示出了电动机的性能，这一点在下一节里有解释。

## 3.2 电动机负载

### 3.2.1 如何评估电动机负载

由于电动机的效率在通常的运行条件下很难评估，电动机的负载可以左右一个电动机的指数进行测量。随着负载的增加，功率因数和电动机效率都会在满负载时达到一个最佳值。

### 3.2.2 如何评估电动机负载

以下公式可以用来确定负载：

$$\text{负载} = \frac{P_i \times \eta}{\text{HP} \times 0.7457}$$

其中，

- $\eta$  = 电动机运行效率百分数
- HP = 铭牌标定设定马力
- Load = 输出功率占设定功率的百分比
- $P_i$  = 三相电千瓦功率

电动机负载调查可以用来测量工厂所有不同电动机的运行负载。结果可以用来找出功率过小（会导致电动机烧坏）和功率过大（导致效率过低）的电动机。美国能源部建议通过对所有每年运行时间超过 1000 小时的电动机进行调查。

以下是确定单独工作电动机负载的三种方法：

- **输入功率测量** 这种方法计算输入功率（通过功率分析仪）和 100% 负荷下的设定功率的比值。
- **线性电流测量** 通过比较测量所得的安培数（通过功率分析仪测量）和设定安培数。这种方法可以在功率因数未知并且只能得到安培数的情况。在负荷百分比低于 50% 时，也推荐使用这种方法。
- **滑差方法** 通过比较电动机运行时的滑差和电动机满负载运行的滑差来确定负载。这种方法的精确度有限，但是可以在只有转速计的情况下使用（不需要使用功率分析仪）。

由于输入功率测了是最为常用的方法，对于三相电动机，只介绍这种方法。

## 电力能源设备：电动机

### 3.2.3 I 输入功率测量

分三步测量负载

**第一步** 通过如下公式确定输入功率

$$P_i = \frac{V \times I \times PF \times \sqrt{3}}{1000}$$

其中,

- P<sub>i</sub> = 三相电功率千瓦数
- V = RMS (均方根) 电压, 三相的线到线 RMS
- I = 均方根电流, 三相的平均数
- PF = 功率因数

这里说明一下, 功率分析仪直接给出功率值。没有功率分析仪的行业可以使用万用表或者钳型电表来分别测量电压、电流和功率因数, 从而计算输入功率。

**第二步** 通过获取铭牌上的设定功率或者通过如下公式来计算:

$$P_r = hp \times \frac{0.7457}{\eta_r}$$

其中,

- P<sub>r</sub> = 满负载情况下输入功率千瓦数
- HP = 铭牌设定马力数
- η<sub>r</sub> = 满负载时效率 (铭牌显示或者从电动机效率表获取)

**第三步** 确定下面公式来确定负载百分比

$$Load = \frac{P_i}{P_r} \times 100\%$$

其中,

- Load = 输出功率占设定功率百分比
- P<sub>i</sub> = 测量所得三相电功率千瓦数
- P<sub>r</sub> = 满负荷时输入功率千瓦数

### 3.2.4 示例

#### 问题:

以下功率测量结果是一台45千瓦感应电动机在88%满负荷运行效率下获得。

- V = 418 伏特
- I = 37 安培
- PF = 0.81

计算负荷

#### 回答:

## 电力能源设备：电动机

- 输入功率 =  $(1.732 \times 418 \times 37 \times 0.81) / 1000 = 21.70 \text{ kW}$
- 负荷百分数 =  $[21.70 / (45 / 0.88)] \times 100 = 42.44 \%$

### 4. 提高电动机效率的可能性

本章包括了影响电动机性能的因数。<sup>3</sup>

#### 4.1 用高效电动机替换标准电动机。

高效电动机是为了增加运行效率而专门设计的电动机。设计上的改进主要集中在降低内在电动机损耗，并且使用低损耗硅铁、更长的铁芯（增加活性物质）、更厚的线（降低阻力）和更细的叠层、定子核转子之间更小的空气间隙、转子中用铜棒代替铝棒、更好的轴承和更小的风扇等等。

高效电动机包含了很多级别和满负荷。其效率比标准电动机高3%到7%，见图12。表2描述了在电动机设计中能够用来提高效率的方案。

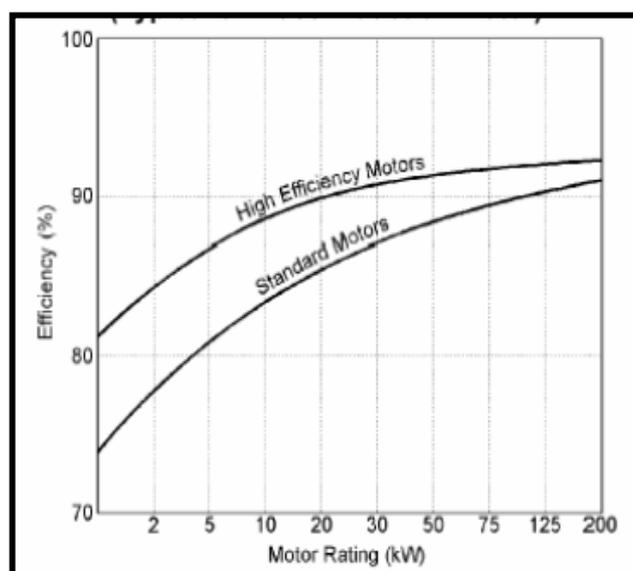


图 12. 高效电动机和标准电动机的比较  
(印度标准局)

由于提高性能的改进措施，高效电动机的成本比标准电动机更高。通常这些更高的花费可以很快就通过降低运行费用收回，尤其是在新设备或者已达到使用寿命电动机的更换方面。用高效电动机替换现有的未到使用寿命的电动机在经济上并不总是可行的，因此建议只是在旧的电动机出现故障时才进行更换。

表 2. 高效电动机效率改进的部分

<sup>3</sup> 第四节摘自（有改动）《电动设施的能效》，2004；得到印度能效局许可。

(印度能效局, 2004)

能量损耗部分	效率改进
1. 铁	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用更细的标尺，因为更低铁芯用钢的损耗能够降低涡流损耗设计时采用更长的铁芯可以由于运行流量密度而产生的低降低损耗。</li> </ul>
2. 定子 I2R	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用更多的铜核更大的导体可以增加定子绕线的横截面面积，从而降低绕线的电阻 (R) 并降低电流 (I) 损耗</li> </ul>
3 转子 I2R	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用更大的转子导棒可以增加横截面面积，从而降低导体电阻 (R) 和电流 (I) 损耗</li> </ul>
4 摩擦和绕线	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用低损耗风扇设计可以降低由于空气流动而产生的损耗</li> </ul>
5. 杂散负载损耗	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用最佳的设计和严格的质量控制程序降低杂散负载损耗</li> </ul>

## 4.2 减少负载不足的情况（并且避免过大功率的电动机）

第三节中介绍过，负载过低会增加电动机损耗并降低电动机效率和功率因数。这可能是造成低效率的最常见原因，因为：

- 在挑选电动机时，设备制造厂商常常倾向于选择更大的安全因数。
- 设备的使用率通常较低。例如，机械工具设备制造厂商按照设备的满功率负载提供电动机。而在实际中，使用者却很少需要满功率，从而导致大多数时间都是低负载运行。
- 大电动机用来确保低电压的情况下，输出功率仍然可以达到满意的程度。
- 大电动机用于需要较高启动扭力的设施，但是这种情况下设计用于高扭力的小电动机其实更加适合。

电动机功率大小的选择应该基于对负载的仔细分析。但是在替换功率过大电动机时，因该考虑到潜在的效率增加。大电动机本身就比较小电动机有更高的设定功率，因此，不推荐替换运行功率在设定功率60—70%的电动机。而在另外一个方面，在电动机选择和能量节省潜力上面也没有一定的规律，因此需要根据具体情况进行判断。例如，如果小的电动机是高效电动机，而现有的电动机不是，就可以替换来提高效率。对于长期运行负载在设定功率40%以下的电动机，一个便宜而有效的解决方法是在星状模式下运行。从三角模式运行改到星状模式运行需要从行分布终端盒三相电输入的布线。

星状模式运行可以使电压降低，降低程度为除以因数‘ $\sqrt{3}$ ’。通过采用星状模式，电动机的电压降低，但是其性能特征例如负载仍然不变。因此星状模式电动机在满负载状态下运行比三角模式电动机有更高的效率和功率因数。

但是，采用星状模式电动机运行只能用于扭力到速度转化要求较低的设施。另外，如果电动机的速度（因为在星状模式下速度会降低）和生产工厂的产出相关，也应该避免转换为星状模式。对于要求高的启动扭力和低的运行扭力的设备，三角模式启动器也可以用来克服高的启动扭力。

## 4.3 为可变负载确定电动机功率

由于过程的需要，工业电动机通常会在变化的负载下工作。通常这种情况下的做法是选用适用于最高可能出现的负载下的电动机。但是这会使电动机更加昂贵，因为电动机只是在很短的时间内才会满功率工作，并且会有低负载的风险。

## 电力能源设备：电动机

另外一种办法是根据特定设备的负载曲线图来选定电动机。这就意味着选定的电动机功率会比最高预期负载要高，因此偶尔会出现超负载运行。但是由于厂商在设计电动机时通常考虑到了一个服务因数（通常比设定负载高出15%）来确保电动机在超负载运行时不会出来重大损害，这种方法因此也可以应用。

最大的风险是电动机过热，从而给电动机寿命效率带来负面影响，并且增加运行费用。因此，在选择电动机时，一个标准是电动机实际工作周期内的平均温度不要超过连续满负载（100%）工作下的温度。过热会在以下情况下发生：

- 极端的负载变化，例如频繁的启动/停止，或者高启动负载。
- 频繁和/或者长时间的超负载。
- 电动机冷却能力有限，例如在高海拔、较高的环境温度或者电动机封闭或者有积垢。

在负载随着时间发生巨大变化时，可以采用速度控制方法来配合合适的电动机选择（见4.8节）。

### 4.4 提高功率质量

电动机的性能受到输入功率的较大影响，而输入功率又受到实际电压和频率决定。电压和频率在能够接受的范围之外变动时会对电动机的性能造成有害影响。表6中说明了电压和频率变化对电动机性能的通常影响。

电压的不平衡会对电动机的性能造成更大的负面影响，这会在三相电不均的情况下发生。这通常是因为三相电供电电压不同。这也可能是由布电系统中使用不同规格的电缆造成。电压不平衡对电动机性能的影响参见表7。

- 三相电系统中每一相的电压应该同等大小、相互对称并且彼此相隔120°。相平衡应该在1%内，以避免电动机偏离正常并导致厂商质保失效。影响电压平衡的因素有几个：在任何一相电上增加单相负载，不同的电缆规格或者电路错误。不平衡的系统会增加分布系统的损耗并降低电动机效率。

表 7.感应电动机电压不平衡的影响 (印度能效局, 2004)

	例 1	例 2	例 3
电压不平衡百分数*	0.30	2.30	5.40
电流不平衡 (%)	0.4	17.7	40.0
温度增加 (°C)	0	30	40

\*电压不平衡比例=（与平均电压最大偏离/平均电压）x 100

电压不平衡可以通过以下方式最小化：

- 在三相电上均匀分配任一单相上的负载
- 将影响负载平衡的单相电负载分离，而采用单独的电路或变压器给其供电。

### 4.5 重绕

在工业领域对烧掉的电动机重新绕线是常见的事情。在一些行业，重绕的电动机超过了行业所有电动机数量的50%。仔细的重绕能够将电动机效率维持在原有水平，但是在大多数情况下都会造成功率下降。重绕会影响一些导致电动机功率下降的因素：绕线

## 电力能源设备：电动机

和狭缝设计、绕线材料、绝缘性能和运行温度。例如，当用热来清除就的绕线时，迭片之间的绝缘层可能会被损坏，从而增加涡流电流损耗。改变空气间隔可能会影响功率因数和输出扭力。

但是，如果采取合适的措施，电动机效率在重绕之后仍然能够维持，有时甚至可以通过改变绕线设计来提高效率。然而，仍然推荐在重绕时仍然维持原有设计，除非有特殊的和负载相关的原因需要重新设计。

如果绕线前后电动机的无负载损耗情况很清楚，重绕对于电动机效率和功率因数的影响很容易评估。在购买时的电动机说明书中可以找到电动机的无负载损耗和无负载速度。评估电动机重绕成功与否的一个指标是比较重绕的电动机和原有电动机的无负载电流和定子每相电阻。

在重绕电动机时，考虑以下几点非常重要

- 采用经过ISO 9000认证的企业或者电气设备服务协会会员企业。
- 马力低于40马力并且使用超过15年的电动机（尤其是以前已经重绕过的电动机）效率通常比现有高效电动机效率低很多，最好将其更换。对于马力低于15马力的电动机，更换总是更好的选择。
- 如果重绕的费用超过新高效电动机价格的50到65%，购买新的电动机。增加的可靠性和效率能够很快收回投资。

### 4.6 通过安装电容来校正功率因数

如前所述，感应电动机的特征是功率因数低于1，从而导致工厂的电气系统的总体效率偏低（和总体运行费用偏高）。

和电动机平行相联（并联）的电容常常被用来提供功率因数。电容不会提高电动机本身的功率因数，而是提高产生或者分配电的启动终端的功率因数。功率因数校正的好处有降低kVA需求（从而降低用电需求功率），降低电容上流电缆的 $I^2R$  损耗（从而降低能荷，降低电缆的电压差（从而提高电压规范），提高工厂电气系统的整体效率的增加。

电容的大小取决于电动机的无负载反应kVA（kVAR）。电容不能超过电动机无负载kVAR的90%，因为太高的电容会导致过高的电压并烧毁电动机。电动机的kVAR只能通过无负载测试电动机获得。另外一个方法是通过使用标准电动机的典型功率因数来确定电容大小。

在供电一章中提供了关于功率因数和电容的更多信息。

### 4.7 改进维护

大多数电动机机芯用硅铁或者冷轧去碳钢制造，其属性不会随着时间发生可见变化。然而，维护不当却会导致电动机效率随着时间下降从而导致运行可靠性下降。例如，润滑不当会导致电动机和相关驱动转换设备摩擦增加。电动机的中随温度增加电阻损耗也会增加。

环境条件也会对电动机性能造成损害。例如，极端的温度、高灰尘负载、腐蚀性空气以及潮湿都会损害绝缘性；由于负载循环导致的机械压力也会导致对准偏差。

维持电动机的性能需要合适的维护措施。良好的维护措施包括：

## 电力能源设备：电动机

- 定期检查电动机的轴承和机架的磨损（降低摩擦损耗）和电动机通风管的污垢和尘土（确保良好的散热）。
- 检查负载情况来确保电动机没有负载过高或者过低。电动机负载同上次测试之间的变化表明驱动负载的变化，应该明白其原因。
- 适当润滑。生产厂商通常提供了如何和何时对电动机进行润滑。润滑不够会导致前面所说的一些问题。过渡润滑也会导致问题，例如电动机轴承上过多的润滑油会流入电动机从而导致电动机绝缘层的膨胀，导致电动机过早损坏甚至起火。
- 定期检查电动机和驱动设备的一致。位置偏移能导致轴和传动带快速损耗，从而损坏电动机和驱动设备。
- 确保供电线路和终端盒大小和安装合理。定期检查电动机和启动器之间的连接，并确保其清洁和牢固。
- 提供足够的通风并维持电动机冷却管的清洁来帮助散热降低过多损耗。电动机绝缘层的寿命可以更长：电动机运行温度每超过建议运行峰值温度10度，到需要重绕的时间就会降低一半。

### 4.8 感应电动机的速度控制

过去，直流电动机常常用于需要可变速度的情况。但是由于直流电动机的局限性，交流电动机也越来越多的用于可变速度设施。交流同步电动机和感应电动机都适用于可变速度控制。

由于感应电动机也是同步电动机，改变供电频率就能改变速度。对于一个特定电动机的控制策略通常取决于包括资金投入、负载可靠性和特殊控制要求等一系列因素。这需要对负载特性、过程流程的历史数据、速度控制系统所需特点、电价和资金投入进行仔细分析。

负载的特性在决定是否需要速度控制是非常重要的考虑因素。变速驱动最大的省电潜力通常在于可变扭力应用设备，例如能量需求和速度的立方成正比变化的离心泵或者离心风扇。恒定扭力负载也适合采用变速驱动设备。

#### 4.8.1 多速电动机

电动机通过绕线可以具有两个速度，相互比值为2: 1。电动机也可以采用两个相互分开的绕线，分别提供两个运行速度，从而电动机拥有四个速度。对于需要恒定扭力、可变扭力或者恒定输出功率的设备，可以设计多速电动机。多速电动机适用于所需要的速度控制有限（两个或者四个固定速度而不是连续可变速度）。这些电动机亲通常更加经济因为其效率比单速电动机要低。

#### 4.8.2 变速驱动 (VSD)

变速驱动也叫变流器，能够改变电动机的速度。它们适用于功率从几千瓦到750千瓦的范围。变速驱动设计用于运行标准感应电动机并且因此能够很容易的安装在现有的系统中。变流器也常常单独销售，因为有时间电动机可能已经有了，但是也可以和电动机一起购买。

当负载变化时，变速驱动或者两速电动机通常能够降低离心泵系统或者离心风扇系统50%或者更高的电能消耗。

## **电力能源设备：电动机**

基本的驱动由变流器组成，变流器能够将50赫兹输入电流转换为可变频率可变电电压的电流。可变频率从而能够控制电动机的速度。

现有的变流器主要有三种类型。分别被称为流型变流器（CSI），可变电电压变流器（VVI），和脉冲宽度调整变频器（PWM）。

### **4.8.3 直流驱动（DC）**

直流驱动技术是最古老的电器速度控制形式。驱动系统由直流电动机和控制器组成。

电动机由电枢和磁场绕线组成。电动机工作需要磁场绕线受到直流激励，通常由来自控制器的恒定电压提供。电枢的连接通过电刷和转接器集合完成。电动机的速度直接和电压成正比。

控制器是一个相位控制的桥式整流器，由逻辑电路来控制输送到电枢的直流电电压。通过调控电动机电枢的电压获得速度控制。测速机也常常用来获得好的速度调控。测速机被安装到电动机上来产生一个用于控制器内部的速度反馈信号。

### **4.8.4 绕线转子交流电电动机驱动（滑环感应电动机）**

绕线转子电动机驱动使用一种特殊建造的电动机来完成速度控制。电动机转子由被电动机轴上的滑环提到电动机外部的绕线构成。这些绕线和一个控制器相联，控制器将绕线与可变电阻串联。绕线转子电动机在300马力和以上的范围内最为常见。

## 5. 方案清单

本节列出了提高电动机效率的最重要的方案：

- 维持电压水平与铭牌上所示值5%范围内
- 尽量减少电动机的不平衡相位，将其控制在1%的范围内，以避免电动机功率衰减
- 通过在电动机最近的地方安装电容来维持电动机较高的功率因素
- 选择合适的电动机来避免低效率和低功率因数
- 确保电动机的负载超过60%
- 采用合适的电动机维护策略
- 在任何适用的情况下采用可变速驱动（VSD）或者两速系统。
- 用高效电动机替换过大、过小和损坏电动机
- 用合格的专家来完成电动机的重绕
- 通过合理的安装维护轴、传动带、链条和齿轮来优化传动效率。
- 控制环境温度来最大化绝缘寿命和电动机可靠性，例如避免在阳光下暴露、置于通风的环境并维持清洁。
- 按照生产商的说明书来润滑电动机并且使用高质量的润滑剂或者润滑油来避免灰尘或者水的污染。





## 7. 参考文献

- 自动化建筑 [www.automatedbuildings.com/news/jul01/art/abbd/abbf2.gif](http://www.automatedbuildings.com/news/jul01/art/abbd/abbf2.gif)
- 印度电力部能效局(BEE). 《电动机的构成》. 2005.  
[www.energymanagertraining.com/equipment\\_all/electric\\_motors/eqp\\_comp\\_motors.htm](http://www.energymanagertraining.com/equipment_all/electric_motors/eqp_comp_motors.htm)
- 印度电力部能效局 《电气设备的能效》 第三册 3. 2004
- 印度标准局. 《印度电动机标准》 – *IS1231*.
- C.R. Nave, 乔治亚州立大学物理和天文学系 《电动机的工作原理》选自:  
《基础物理: 电磁学》. 2005 <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- Direct Industry. 虚拟工业展览. 2005. [www.directindustry.com](http://www.directindustry.com)
- 电气工程师工具箱 (E.T.E.). 《电动机的特征》 1997. [www.elec-toolbox.com/motorchar.htm](http://www.elec-toolbox.com/motorchar.htm)
- Integrated Publishing. 《同步电动机》, 选自: Neets, Module 01, 物质、能量和直流电, 第四章, 交流电电动机. 2003  
[www.tpub.com/content/neets/14177/css/14177\\_92.htm](http://www.tpub.com/content/neets/14177/css/14177_92.htm)
- L.M. Photonics Ltd. 《直流电电动机控制》. 2002.  
[www.lmphotronics.com/vsd/vsd\\_02.htm](http://www.lmphotronics.com/vsd/vsd_02.htm)
- myElectrical. 《直流电机器构造.》 2005.  
[www.myelectrical.com/book/Machines/DC%20Machine%20Construction%20\(Field%20Winding\).aspx?%09%09%09ID=P040507102940](http://www.myelectrical.com/book/Machines/DC%20Machine%20Construction%20(Field%20Winding).aspx?%09%09%09ID=P040507102940)
- Parekh, R., Microchip Technology Inc. 《交流感应电动机基础》, AN887. 2003.  
[www.microchip.com](http://www.microchip.com), [ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00887a.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00887a.pdf)
- Rodwell International Corporation. 《电动机理论基础》. 可靠性电动机技术参考主页, 1999. [www.reliance.com/mtr/mtrthr.htm](http://www.reliance.com/mtr/mtrthr.htm)
- 美国能源部 (US DOE). 《确定电动机负载和效率》. 作为美国能源部挑战电动机项目的一部分开发完成  
[www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/10097517.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/10097517.pdf)

### **Copyright:**

Copyright © United Nations Environment Programme (year 2006)  
*This publication may be reproduced in whole or in part and in any form for educational or non-profit purposes without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. UNEP would appreciate receiving a copy of any publication that uses this publication as a source. No use of this publication may be made for resale or any other commercial purpose whatsoever without prior permission from the United Nations Environment Programme.*

### **版权声明:**

## 电能设备: 电动机

本出版物可供任何形式的培训或非盈利活动全部或部分复制使用，无需经过版权所有者的特别许可，而只需在副本中注明出处即可。如需在其他出版物中引用本出版物中的内容，请向 UNEP 发送一份该出版物的副本。

未经联合国环境规划署的书面许可，禁止将此出版物用于转售或任何其他商业用途。

### **Disclaimer:**

*This energy equipment module was prepared as part of the project "Greenhouse Gas Emission Reduction from Industry in Asia and the Pacific" (GERIAP) by the National Productivity Council, India. While reasonable efforts have been made to ensure that the contents of this publication are factually correct and properly referenced, UNEP does not accept responsibility for the accuracy or completeness of the contents, and shall not be liable for any loss or damage that may be occasioned directly or indirectly through the use of, or reliance on, the contents of this publication, including its translation into other languages than English. This is the translated version from the chapter in English, and does not constitute an official United Nations publication.*

### **免责声明:**

该能源设备简介是“亚太地区工业温室气体排放削减计划”(GERIAP)的一部分，由印度国家生产力委员会编写。尽管 UNEP 为保证此出版物的内容的正确性做出了不懈的努力，但是 UNEP 不承担其内容的准确性和完整性的责任，对任何通过直接或间接使用或者依赖该出版物内容，包括其非英语译本，而遭受的损失或者伤害，UNEP 概不负责。本材料是英文原版的中文译本，不属于联合国的官方出版物。