

节能电动机及其应用

编译 杨 运 均
审校 谢 永 茂

重庆建筑工程学院

一九八六年元月

《节能电动机及其应用》

简 介

节能电动机大大有助于节能计划的实施，并可为用户大幅度节约能耗。该书全面探讨了各种形式的廉价电动机并对其节能潜力进行了评价。对节能电动机工艺的各个方面作了剖析、包括电动机运转时的能耗率、损失、减少损失的计算和经济补偿计算。

可使你识别电动机中的佼佼者，从而指示你如何去选择和运用电动机。还将使你学会如何匹配电动机的负荷，如何在卸载时节能，以及何时该替换电动机而不必再枉费心机地去修理。

该书还讨论了影响电动机效率的诸变量以及国际试验标准。巧妙地分析了功率因素及其对能耗的影响。解释了感应电动机的自激原理并描述了单相和同步电动机如何节能。

该书还告诉你在电动机运转时如何调速方可比恒速运转时更能节能。研究了恒速与变速运转时的各种技术措施，主要包括：

- △用于水泵和风机时的调速，
- △直流驱动，
- △交流驱动——逆变器，
- △转换负荷的逆变器驱动，
- △频率—电压关系和有调速装置电动机的启动。
- △谐波及其对电动机损失的影响。

该书还提供了有关直流电动机控制和保护的实践经验。包括直接启动和控制，自耦变压器启动、电子器件启动和利用同步电动机启动。你还可得到有关电动机的过热保护元件、过负荷继电器、热动开关、嵌入式温度计、固态保护和浪涌保护等等的实用宝贵资料。

机械、汽车、电气和土木工程师们有了这本必备的手册作助手，就能帮助你解决天天要遇到的节能降价难题。广大技术人员和电动机的实际操作人员有了这本通俗的小书，会使你的技术革新早出成果。

目 录

第一章 介绍	1
第1节 对节能电动机的要求	1
第2节 能耗概观	1
第3节 电动机的型式及其节能潜力	1
第二章 节能电动机制造工艺	2
第1节 电动机使用中的能耗	2
第2节 电动机损失的五个方面	3
第3节 减少损失计算	5
第4节 经济补偿计算	8
第三章 节能电动机的选择和使用	11
第1节 节能电动机的应用效益	11
第2节 电动机与负荷的匹配	12
第3节 节能电动机不能受益的场合	13
第4节 替换还是维修	15
第5节 多速电动机	16
第6节 减载节能	20
第7节 出现减速负荷转矩时的加速损失计算	24
第8节 不平衡电压	25
第9节 正确的使用条件	28
第10节 保持电动机运行状态	28
第四章 节能的标志和验证	30
第1节 电动机效率的变化	30
第2节 效率标志	31
第3节 感应电动机试验	32
第4节 电动机的国际试验标准	35
第五章 功率因数	36
第1节 功率因数及其对能耗的影响	36
第2节 功率因数补偿费计算	39
第3节 功率因数改正	39
第4节 功率因数改正 K _{VAC} 的计算	41
第5节 感应电动机的自激	43
第六章 单相和同步电动机	44
第1节 单相电动机的类型	45

第2节	单相电动机的节能	47
第3节	同步电动机——激励磁场型	48
第4节	永磁同步电动机	50
第七章	调速运转	51
第1节	调速用于水泵和风机	51
第2节	直流驱动	53
第3节	交流驱动——逆变器	54
第4节	负荷—换向的逆变器驱动	56
第5节	频率—电压关系和有调速驱动装置的电动机起动	57
第6节	谐波及其对电动机损失的影响	57
第八章	交流电动机的控制和保护：起动、运转保护和电涌保护	62
第1节	起动要求和控制概况	62
第2节	直接起动	63
第3节	原线圈阻抗起动	64
第4节	自耦变压器起动	65
第5节	星—三角形起动	66
第6节	部份绕组起动	67
第7节	固态电子起动	69
第8节	同步电动机的起动	70
第9节	电动机过热保护方法	71
第10节	固有过热保护元件	71
第11节	过载继电器	72
第12节	恒温器	74
第13节	嵌入式温度探测器	74
第14节	固态保护	75
第15节	浪涌保护	75

第一章 介绍

第1节 对节能电动机的要求

在能量丰足的时代，电动机产品工艺的发展方向是适用，经济和耐用。而1970年能源危机的冲击把电机工业也卷入了一个新时代。本书的目的就是探讨由于缺能而对电动机带来的影响，如何通过合理选择和使用电动机以达到节能的目的。

回顾过去几十年电动机工艺的进程可看出，1930年一般设计的额定功率（在1800rpm时）为50马力电机，而今天一般用途的交流电动机其额定值已达200马力。之所以如此巨增，是经历了从设计、材料到制造工艺综合改进的结果。而且，今天200马力的电动机，即使在恶劣的环境中使用也比以前设计的使用寿命长。

现在，电动机要求节能，这就增加了新的工艺目标。已出现了节能电动机的生产线，为用户提供了如何选择节能电动机的目录和标准。

第2节 能耗概况

观察下工商厂矿和家庭，就不难发现能量的主要方面都是消耗在电动机驱动设备上。而其他如汽车、供热、照明等都相形见绌。美国能源部在1980年1月公布了对电动机和水泵能耗情况的调查研究报告。报告指出，1977年美国全国电动机牵引机械的能耗占总能耗的18.3%。而汽车只为13.5%。估计有58%的电能是消耗在由电动机牵引的设备上。其他42%用于供热、照明等。其中制造业又占58%中的45.2%，其他大用户是运输、通讯和公共事业，这一组共消耗20%，商业系统的总耗电能占18%。虽然标准家庭所用的一些电器设备，如电冰箱、洗衣机、干燥器和电推子等名目繁多，但只占电动机牵引设备总能耗的4.8%。

显而易见，电能消耗的主要方面是由电动机牵引的设备独占鳌头。因此，节能的主攻方面就理所当然地应放在电动机及其牵引设备上。

第3节 电动机的型式及其节能潜力

电动机可分为两大类：交流电动机和直流电动机。由于电源主要是交流，并有易于分配电能的优点，故大多数电动机都是交流。直流电动机主要限于运输牵引和在运转过程中要求调速的工业设备。直流电动机之所以最适用于变速的情况，是因为它易于变化电枢电压，励磁磁场或二者结合以达变速目的。复杂的驱动系统都包含有许多直流电机，并且是利用固态电源和电子控制器件以实现对各驱动部份的良好协调。当前的许多工业生产流程在很大程度上都要依赖直流驱动。

运输牵引部份也要用直流驱动，不单是由于控制方便，还因为车上的电源也是直流，例如通常是蓄电池组。虽然直流电动机对工业和运输有不可低估的重要作用，但其总的驱动用电能，在美国也不过只占全部电动机用能的1%。交流电动机也有各式各样，而一般也分为两大类：同步和异步。电动机的同步转速决定于绕组的极数和电源的频率。按方程(1.1)计算：

$$\text{同步转速} = \frac{120 \times \text{频率}}{\text{磁极数}} \quad (1.1)$$

这也是同步电动机的平均转速，而异步电动机则有不同的转速。

马力极大或极小的同步电动机都各有用途。例如，电钟是用同步电动机，其轴马力就很小。要求准确同步化的工艺流程所用的同步电动机，大部份都只用1马力以下。

小马力和大马力之间的范围内，主要是用感应电动机，它是异步电动机。当同步与异步电动机的马力相同时，究竟选用谁？这决定于要求的转速和工厂对单位功率因数的需要或是否用了超前功率因数去改善工厂中其他负荷的滞后功率因数。有关功率因数及其对耗电量的影响放在第5章讨论。同步电动机的功率因数由其励磁控制。电动机超励磁就可控制超前功率因数，这时就很容易补偿在同一电力系统内的滞后功率因数。根据美国能源部的报告，同步电动机只占电动机总能耗的1%。

交流多相感应电动机的使用最广，其能耗也居支配地位。特别是额定功率在5.1马力以上者，占电动机总能耗的93%。其额定功率在5马力以下者，包括微型电动机，其能耗只占电动机总能耗的5%。尽管在日常生活中微型或次微型电动机在数量上比5马力以上者多十倍。能源部的报告还指出，多相感应电动机的马力。主要是在5.1~125马力范围内，它们占电动机总能耗的50%。因此，这种电动机的节能潜力最大。

基于上述用能情况，本书内容主要放在讨论感应电动机，其他类型的电动机也有所涉及。

第二章 节能电动机的制造工艺

第1节 电动机使用中的能耗

电动机的作用是将电能转换为机械能。众所周知，这是能量转换的最有效途径。在转换过程虽然也有些损失，而绝大部分能量都变成机械形式传给了负荷。图2.1示出了一台50马力的电动机驱动等值的一台水泵的功率分配情况：输入电动机的电量为41.2kw，其中有37.3kw转换成机械能传递给水泵，并通过水泵运转消耗在抽送液体上。当然，泵中有损失。电动机的损失是输入电能与传递给泵的转换能之差。本例为3.9kw，电动机的效率为90.5%。

从此例中了解典型电动机的应用时应注意两点：

首先，本例中电动机的功率“损耗”占总功率的9.5%，即3.9kw。这些功率是消耗在

电动机本身的损失上，以热形式散失。还有掉 37.3kw 都转换并传给了电动机负荷——泵。有些技术出版物中所引用的能耗数据有所错误，常见的错误结论之一是认为美国电动机消耗了总电能的 58%。应该说电动机只消耗了 58% 中的一小部份——耗费在电动机本身的损失上。绝大部份电能则是发生了转变供给负荷而作功。

另一点是应提供良好的能量管理方案，力求整个电动机负荷系统的废能最少。显然，要达此目的，就要把注意力集中在电机动损失的 3.9kw 上，即放在系统总功率的 9.5% 上。要实现 100% 的节能电动机是不可能的，但应用节能电动机可力争实现最大幅度的节能。当然，也必须意识到节能的潜力也可在电动机驱动的设备上去挖掘。NEMA（美国电机制造业协会），对电动机驱动时如何实现最佳效率的推荐如下：

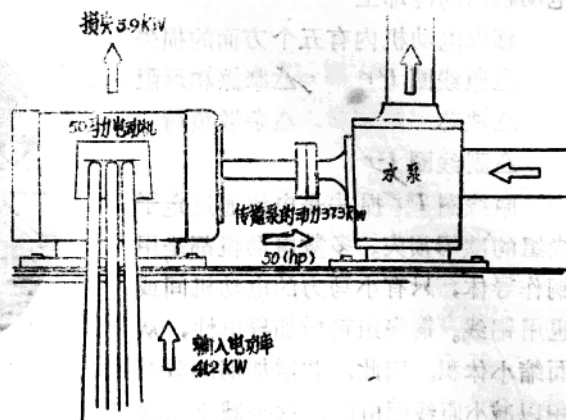


图2.1 电动机驱动水泵系统中的动力分配

1. 电动机的额定值。负荷不变时的额定值为最佳。由于电动机的效率在正常负荷范围内近于常数，故电动机与负荷可不要求作到精确匹配。当然，为了避免不必要的损失（能耗和使电动机过热），仍应力求让电动机的额定功率与负荷相适应。若选用电动机的输出额定值大于负荷。会使系统中的功率因数减小，这是由于分配系统中损失增加之故。
2. 使用分析——如果驱动机械的负荷变化很大，包括经常起停，那么要节能就得具体分析使用情况。如运行中的起、停、换向、制动等，都会使能耗比在额定负荷下连续运转时高，若变化工作周期，则有两种办法可减少能耗：一是尽可能减少运动部件的重量、二是全面分析各种负荷情况。为此就得与制造厂家相配合，为厂家推荐最适于应用的电动机性能。按全负荷高效的情况设计电动机，在许多场合可能不适用。如在频繁起动、周期起动和有重复冲击负荷等。对这些情况，电动机的转矩和转差率性质将是影响的重要因素。
3. 程序和机械——应选择最有效的程序和机械。频繁交替的程序只适于作一种工作，幸好多数机械一般都被指定完成一种工作，故一经确定工作方式，就应选择与之适应的专门设计电动机，使额定值与系统的经济性相一致。
4. 初期投资与长期能耗费相比较——为了适应变化和变速驱动，就应对初期投资与长期能耗费进行比较评价。例如，多速或调速电动机与减速控制相比较；有减速的多速电动机与低速电动机相比较。因为系统的初期投资与使用效率的关系很大。

第2节 电动机损失的五个方面

从能耗的观点评议，感应电动机的使用面最广，故作重分析。感应电动机的结构剖面见图2.2。

中等容量的感应电动机，其转子通常是内由一迭矽钢片组成，并与铝导体和端环铸成一

体。导体和端环用来传递感应电动机的电流。杆的一端通过矽钢片中的槽延伸，另一端通过端环形式短路。铸铝杆和端环装在类似于鼠笼的设备中，故称该型电动机为鼠笼式电动机。伸出端环的叶片是风扇叶片，用以循环电动机内的冷却空气。

感应电动机内有五个方面的损失

△原线圈 I^2r △摩擦和风阻

△铁芯 △杂散负荷

△副线圈 I^2r

原线圈 I^2r 损失是电流通过定子绕组的欧姆损失。多数电动机都是用铜作导体，只有小马力的电动机间或也用铝线。铜绕组可增加导电性，从而缩小体积。因此，若增加铜的截面积以减小原线圈电阻，这是减小原线圈 I^2r 损失的有效方法。该法几乎用于所有节能电动机的设计中。当然这会相应增加一些电动机的造价。

铁芯损失存在于定子迭钢芯片中，是滞磁效应和涡流损失的综合。其损失会由于定子铁芯中的磁场在导线频率波动时也随之变化、铁芯中的磁通密度大于 1。因此，铁损可通过减小磁通密度而得以减少，这也是通过增加定子铁芯的长度来实现的。总之，多数节能电动机比同功率的标准电动机含有较多的铜和铁。

减少铁损的另一个有效方法是用优质硅钢片，这还可以减少迭片的密度。当然，这又要取决于硅的含量和钢的制造工艺。对于热轧钢其硅含量较高，但可控制到某个极限值。减少了铁芯片的厚度，还可使涡流损失有所减少。

副线圈 I^2r 损失与原线圈 I^2r 损失一样，也是转子导体中的欧姆损失。然而，对副线圈 I^2r 损失，并不是简单地给鼠笼结构多加点导体材料就能控制的。电动机的起动转矩与副线圈电阻成比例。由于电动机必须有起码的起动转矩值，一般是规定按 B 类电动机设计。由于副线圈的电阻变化有个极限范围，才使电动机的起动性能达到满意的效率。所以，节能电动机设计的损失变化很少受副线圈 I^2r 损失的影响。

设计 A 型电动机比设计相同额定值的 B 型电动机更见效，因为 A 型得规定同步转子电流的极限值，而且副线圈电阻的变化可以灵活。电动机效率的增加，可通过消耗较高的起动电流来实现，但在应用中会影响电力系统。因此，为达到节能效果可采用折中的 A 方案设计。

在转子迭片中，由于转子磁场的差频振荡只限于少数周期，故不会出现基频铁损，因而一般不考虑低频铁损。而对于转子中有高频磁通脉冲时，特别是在靠近气隙的表面，应将其纳入一般损失类的杂散负荷损失。

摩擦和风阻损失与转动有关，用风扇冷却的电动机，如图 2.2 所示，其摩擦和风阻损失

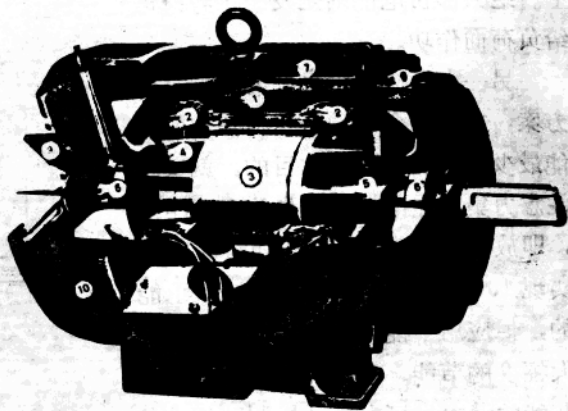


图2.2 XE型节能电动机的结构剖面图

注：1. 定子铁芯，2. 定子绕组，3. 转子铁芯，4. 转子风扇叶片，5. 轴，6. 轴承，7. 机架，8. 机座，9. 外风扇，10. 风扇盖。

一般取决于外风扇的功率。这种电动机的内外之间没有空气交换。因此，所有的热必须通过对流排除，伴随这一过程的降温是借助电动机机壳的高速空气来实现的。

附加的风阻损失是由转子风扇叶片造成的，因为循环空气是在电动机内部。当然，在轴承中也有些摩擦损失。而节能电动机比标准电动机的损失小，因此只需用较小的外风扇，从而可增加电动机的效率。

杂散负荷损失的定义是电动机总损失与其他四种损失（即原线圈 I^2r 损失，铁损，副线圈 I^2r 损失和摩擦与风阻损失）之和的差。在电动机内，这种损失最难避免，因为它是由多种因素造成。本书只扼要讨论一些主要因素。

气隙和磁通密度一般应是按正弦波型考虑，但事实上，由于定子和转子间的缝隙以及饱和效应，使所含的并非全是正弦波。这些非正弦波型导致转子导体中出现高频电流，并在靠近转子和定子齿间的气隙中出现高频铁损。这些谐波转子电流虽然也可提供一些有效转矩，但是在转子导体中要造成欧姆损失。对于铁件部份，如隔板，因其位置紧靠线圈端部的磁场，为了减少属于杂散失损类的铁损，可使之旋转。

要控制杂散负荷损失，必须通过设计和精密的制造相结合才能完成。这些损失是整个电动机损失的重要部份，可以说节能电动机实际上就是要减少这方面的损失。

表 2—1 示出了一台 50 马力的标准电动机和有相同额定值的节能电动机的典型损失分布，表的最后一项列出了五种损失的各自改进。可以看出，损失获得改进的主要是杂散负荷，原线圈 I^2r 和铁损三项；对摩擦损失和风阻损失也有一些改善，而副线圈 I^2r 损失实际上变化甚微。本例中节能电动机损失的净减少比标准 50 马力的电动机要少 40%。如果节能电动机能进一步实现为工业应用提供标准同步转矩，故障转矩和同步电流的话，那么就完全可将标准电动机取而代之。

表 2—1 典型损失——50 马力，4 极电动机

	标准电动机(50马力)	节能电动机(50马力)	KW 损失改进
	损失—KW	损失—KW	
原线圈 I^2r	1.319	0.911	0.408
铁损	0.725	0.180	0.545
副线圈 I^2r	0.646	0.668	(0.022)
摩擦和风阻	0.373	0.281	0.092
杂散负荷	0.852	0.299	0.553
总 计	3.915	2.339	1.576

第 3 节 减少损失计算

使用节能电动机的目的就是在完成将机械能传给荷载时，使能量损失最少。因此，在选择交流电动机作某种特殊应用时，对电动机损失的评价仍是主要方面。在对功率、能和效率进行评论时，就得首先介绍对损失、损失减少和经济补偿的计算。

功率的单位是瓦 (W) 或千瓦 (KW)，而对其输出额定值通常以马力 (hp) 表示，一马力约等于 746 瓦。

能则是功率和时间之乘积。如果功率是常数，则：

$$W = pt \quad (2.1)$$

式中：W = 能，p = 功率，t = 时间

电能一般以千瓦-小时 (Kwh)。即用一千瓦的功率运行 1 小时，则所耗的能就是 1 千瓦-小时。如果电费是每千瓦-时为 5 元，则能耗价也就是 5 元/千瓦时。

任一器件的效率按方程式 (2.2) 计算：

$$\text{效率} = \frac{\text{输出}}{\text{输入}} \quad (2.2)$$

将 (2.2) 式改写成方程 (2.3)

$$\text{效率} = \frac{\text{输出}}{\text{输出} + \text{损失}} \quad (2.3)$$

注意，在为节能而选择电动机或其他设备时，其考虑重点应放在损失这一项。

进行能耗计算时，一般已知量是电动机的额定输出马力和在额定荷载时的效率，则以 KW 计的输出功率为：

$$P_i = \frac{hp \times 0.746}{\eta} \quad (\text{KW}) \quad (2.4)$$

式中：P_i = 输出功率，hp = 输出马力

η = 以小数表示的效率。

电动机损失 (以 KW 计) 的计算式为

$$L = hp \times 0.746 \left[\frac{1.0}{\eta} - 1.0 \right] \quad (2.5)$$

当然，如果在运转时考虑额定负荷点，则运行点的效率和损失就得用公式 (2.4) 和 (2.5)。

例如，一台 10 马力的电动机，其效率为 90%，若用方程 (2.5)，则电动机的损失为：

$$L = 10 \times 0.746 \left[\frac{1.0}{0.9} - 1.0 \right] = 0.829 \text{ KW}$$

为了能减少损失 20%，则要求电动机的效率必须改进到 91.8%。然而，如果有同样额定值为 10 马力的电机，其初始效率只有 72%，则其效率就应提高到 76.3% 才能实现同样减少 20% 的损失。仍取此例，设电动机仍为 10 马力，而其初始效率为 97%，为减少 20% 的损失，则要求将效率改进到 97.6% 才行。这些例子的各自损失均是按方程 (2.5) 算出，并列在表 2.2 中。对于只有 10 马力的电动机设计，要使效率由 72% 改进到 97.6% 这样大的范围是不现实的。此例说明，对损失不同的电动机，选择时应有个侧重点，并不是效率百分比的变化不同。

通常，电动机的效率值随其额定功率而增加。对一台有 500 马力电动机的典型效率是 95%，而对 5 马力者只为 85%。如果这两种电动机的节能方案都可取，但其效率改进相应是

95.5% 和 87%。通过对节能设计的选择所节约的千瓦数见表2.3, 可见, 取许多台 5 马力的电动机所实现节能之和也才不过相当于 1 台 500 马力电动机只要改进效率 0.5% 就能取得的效益。

表2.2 因效率变化使电动机损失之差

10 马力 输出

效率 %	输入 (KW)	输出 (KW)	损失 (KW)	损失差 (%)
72.0	10.361	7.460	2.901	20.1
76.3	9.777	7.460	2.317	
90.0	8.289	7.460	0.829	
91.8	8.126	7.460	0.666	19.7
97.0	7.691	7.460	0.231	
97.6	7.643	7.460	0.183	20.8

表2.3 节约的千瓦数比较

马力	输出 (KW)	效率 (%)	输入 (KW)	损失 (KW)	节约 (KW)
500	373.0	95.0	392.6	19.6	2.0
500	373.0	95.5	390.6	17.6	
5	3.730	85.0	4.388	0.658	0.101
5	3.730	87.0	4.287	0.557	

评价电动机损失时, 下面两个方程 (2.6) 和 (2.7) 也很有用。

$$L_s = hp \times 0.746 \left[\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right] \quad (2.6)$$

式中, L_s = 电动机减少损失千瓦;

hp = 输出马力;

η_1 = 以小数表达的低效率值;

η_2 = 高效率值。

电动机损失之差, 以低效率电动机损失的百分数表。

$$\% \text{ 损失的变化} = \frac{\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2}}{\left[\frac{1}{\eta_1} - 1.0 \right]} \times 100 \quad (2-7)$$

典型电动机效率与千瓦损失和马力对照的关系见图 2.3 之例。

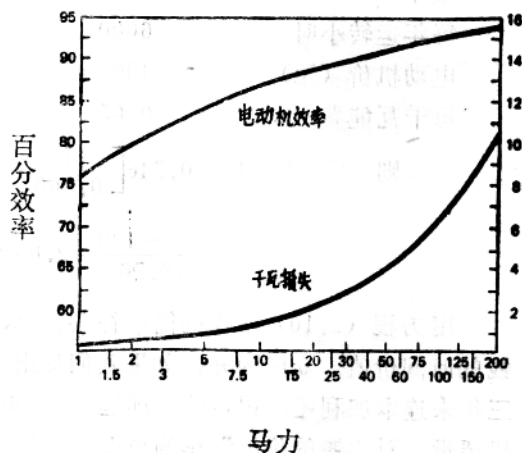


图2.3 效率和千瓦损失与马力对照

第4节 经济补偿计算

电动机损失的减少可以确切地体现为能量费用的节约。现在需考虑两个附加因素，即运转小时数和电价，则每年（或月）所节约的电费就可用方程（2.8）表：

$$S = L_s \times H \times C \quad (2.8)$$

式中：S = 每年（或月）的节约元

L_s = 按方程（2.6）所得的电动机减少损失

H = 每年（或月）运转时间，小时。

C = 电价，元/千瓦时

将方程（2.6）与（2.8）合并成一个简单的计算方程：

$$S = h_p \times 0.746 \left[\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right] H \times C \quad (2.9)$$

方程（2.8）和（2.9）用于恒载运转的电动机，如果负荷有变化，其节约费就得分区计算，即视各个运转时区的负荷为常数，分别算出各时区的节约后再追加就是全年的节约。

用以补偿两种不同效率电动机的费用差所需的补偿期是用方程（2.10）。

$$PBP = D/S \quad (2.10)$$

式中：PBP = 补偿期，年（或月）；

S = 方程（2.9）的节约；

D = 两种电动机的价差，元。

再以前述两台10马力的电动机为例，其效率各为90%和91.8%，其每年节约的费用和补偿期计算于下：

节约费用和补偿期计算例

	电动机 N0.1	电动机 N0.2
马力	10	10
效率	90.0%	91.8%
每年运转小时	6000	6000
电动机价（元）	400	500
每千瓦能费	0.05	0.05

则
$$S = 10 \times 0.746 \left[\frac{1}{0.900} - \frac{1}{0.918} \right] \times 6000 \times 0.05 = 48.76 \text{元}$$

$$PBP = \frac{500 - 400}{48.76} = 2.05 \text{年（或24.6月）}$$

用方程（2.10）所作的简单补偿计算，忽略了我们经济生活中一个十分重要的因素，即钱的时间价值。众所周知，如果我们从银行凭6000元买一辆汽车，偿还期为三年，则在第三年末连本加利还给银行的就远远超过6000元。同样的道理，买节能电动机比买标准电动机要贵。对“钱的价值”影响也得考虑到。为此，在计算补偿期时得应用现值因数。

现值因数（PWF）见方程（2.12），是现金价值P和未来价值F的关系。

$$PWF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2.11)$$

式中: i = 以小数表示的利率;

n = 利息时间, 年 (或月)。

$$P = (PWF) \times F \quad (2.12)$$

将前述例算得的补偿期重现在表 2.4 中, 并包括利息对费用的影响。在表 2.4 中, 是假设年利效为 12%, 或月利效为 1%, 再按正常的现金价值因数而算出的每月节能费。在计算补偿期时, 应考虑利息对费用的影响, 而在前例中是从 24.6 个月开始延长, 将近有 29 个月未考虑利息。

表 2.4 贴现投资补偿计算

	电动机 No.1	电动机 No.2
马力	10	10
效率	90.0%	91.8%
每年运转小时	6000	6000
电动机价, 元	400	500
每千瓦能费、元	0.05	0.05

$$S = (\text{每月}) = 10 \times 0.746 \left[\frac{1}{0.900} - \frac{1}{0.916} \right] \times \frac{1000}{12} \times 0.05$$

$$= 4.06 (\text{元})$$

$$\text{利率} = 12\% (\text{每年}) = 1\% (\text{每月})$$

$$\therefore PWF = \frac{1}{(1+0.01)^n}$$

月	电费节约 元	PWF	贴现能费节约 元	累计贴现能费节约 元
1	4.06	.9901	4.02	4.02
2	4.06	.9803	3.98	8.00
3	4.06	.9706	3.94	11.94
4	4.06	.9610	3.90	15.84
5	4.06	.9515	3.86	19.70
6	4.06	.9420	3.82	23.52
7	4.06	.9327	3.79	27.31
8	4.06	.9235	3.75	31.06
9	4.06	.9143	3.71	34.77
10	4.06	.9053	3.68	38.45
11	4.06	.8963	3.64	42.09
12	4.06	.8874	3.60	45.69

13	4.06	.8787	3.57	49.26
14	4.06	.8700	3.53	52.79
15	4.06	.8613	3.50	56.29
16	4.06	.8528	3.46	59.75
17	4.06	.8444	3.43	63.18
18	4.06	.8360	3.39	66.57
19	4.06	.8277	3.36	69.93
20	4.06	.8195	3.33	73.26
21	4.06	.8114	3.29	76.55
22	4.06	.8034	3.26	79.81
23	4.06	.7954	3.23	83.04
24	4.06	.7876	3.20	86.24
25	4.06	.7798	3.17	89.41
26	4.06	.7720	3.13	92.54
27	4.06	.7644	3.10	95.64
28	4.06	.7568	3.07	98.71
29	4.06	.7493	3.04	101.75

另一个用来评价购买节能电动机的投资分析方法，是对使用寿命的节约 (L_s)。先按方程 (2.13) 计算使用期的节约。

$$KWC = H \times C \times n \quad (2.13)$$

式中: KWC = 千瓦损失费用;

n = 电动机使用寿命;

H 和 C = 见方程 (2.8) 的定义。

$$\text{则} \quad L_s = hp \times 0.746 \left[\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right] (KWC) \quad (2.14)$$

如果使用期节约 L_s 超过两种电动机初期投资费之差，则说明应买节能电动机。

现举例说明，利用前述例子中的数据，并设电动机的使用寿命为10年，则由方程 (2.13) 和 (2.14) 可算出使用期的节约。

$$KWC = 6000 \times 0.05 \times 10 = 3000 \text{ 元/KW}$$

$$L_s = 10 \times 0.746 \left[\frac{1}{0.900} - \frac{1}{0.918} \right] (3000) = 487.58 \text{ 元}$$

由于使用期节约了 487.5 元，超过了买节能电动机要贵出 100 元的支出，故仍值得投资买节能电动机。

使用期节约计算也应考虑现金价值的影响。一千瓦小时的能费是按“等补偿级的现值因数”来定的。它考虑了在将来能得到的节约，该因数由方程 (2.15) 给出：

$$\text{等补偿级数的现值因素} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (2.15)$$

考虑利率的影响，重用方程 (2.13) 和 (2.14)，若年利率为12%，则10马力电动机的千瓦损失费和使用期节约应为：

$$KWC' = H \times C \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (2.16)$$

$$Ls' = hp \times 0.746 \left[\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right] (KWC') \quad (2.17)$$

代入相应值则

$$KWC' = 6000 \times 0.05 \times \left[\frac{(1+0.12)^{10} - 1}{0.12(1+0.12)^{10}} \right] = 1695.07 \text{ 元/KW}$$

$$Ls' = 10 \times 0.746 \times \left[\frac{1}{0.900} - \frac{1}{0.918} \right] 1695.07$$

虽然按现值因数已大大减少了使用期节约，而节约数仍超过两种电动机初期投资之差。

补偿计算有时比这里所作的计算更复杂，因为还得考虑到各种税收，都是在投资应包括在财经分析中。这里提供的几种方法是判断买节能电动机是否可取，如果分析结果证明可取，购买的范围也定了，就再作更严格的财经分析，作为最后投资决算的依据。

第三章 节能电动机的选择和应用

第1节 节能电动机的应用效益

建议使用节能电动机的特征之一，是在接近额定负荷时，它可长期连续运转。由于每年的运转时间是计算节约费用的一个因素，由方程 (2.8) 可见，有效运转时间越长，节约就越大。风扇就是个很好的例子，若每天24小时都在运转，则从改进了电动机效率的角度来看，就能实现很大的节能，反之，若每天只运转几次，每次又只运转几秒钟，尽管用节能电动机也可减少能耗，但毕竟一年的总节约仍微不足道。

节能电动机的特征之二，是应在损失最大的场合下应用，图 3.1 示出了典型电动机的效率及千瓦损失与输出马力的对照关系。由图可知，一台普通型 100 马力电动机的效率是91.8%，而在额定负荷运转时，其损失是

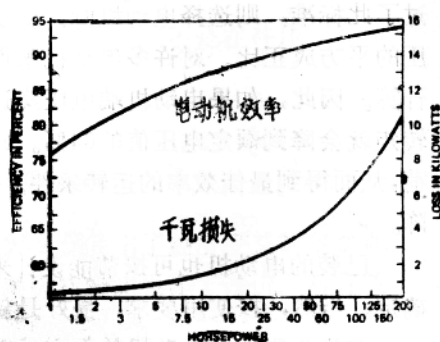


图3.1 电机效率和千瓦损失

6.664千瓦。现在，如果代之以节能电动机，则其效率可提高为93.3%。大约可少损失20%，即为1.307千瓦。另一方面，一台普通型3马力的电动机，其效率为82.0%，按该图，其损失为0.491千瓦，若代之以同样马力的节能电动机，则效率可提高到85%，从而可减少约20%的损失，即为0.096千瓦。虽然3马力电动机的效率提高了3%，而100马力的电动机只提高了效率1.5%，但显然，从实际节能的潜力看，还是100马力的电动机大。所以，为了选择投资方案，就应计算工厂或建筑物各部份的千瓦损失，应把重点放在损失大的和实际运转时间长的场合。

第2节 电动机与负荷的匹配

要充分发挥节能电动机的效益，重要的是应使电动机与负荷相匹配。图3.2示出了一台10马力典型电机的效率与马力荷载特性的比较。其他马力的电动机也有相似情况。如果电动机效率在1/2负荷和全负荷之间保持不变，即实际上是在3/4负荷下运转，这种情况要比在全负荷下运转时的效率要低。当然，也有例外，但对B型电动机均有此特性。至于效率与负荷相对照所显的一般特性，无论对标准或节能电动机都适用。

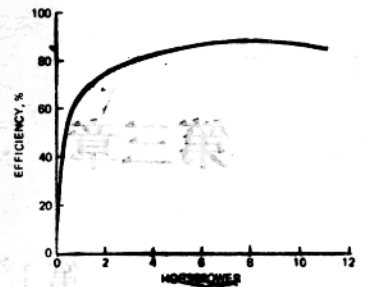
根据效率与负荷特性的对比可见，在选择电动机时，应让多数时间在（3/4—全负荷）范围内运转为好。若负荷不知，就只得选较大容量的电动机以满足运转。从图3.2可看出，电动机在轻负荷下运转的效益不好，但可通过选用较大容量的电动机来实现其改善效率。如果可能，在确定负荷转矩和选择电动机时，应匹配转矩使之接近电动机的名牌额定值。

对下例情况必须小心处理：如果负荷变化范围大，所选电动机就必须有足够的制动转矩，以承受峰值负荷。规范的制动转矩值是用额定电压表示。如果峰值转矩超过了电动机的制动转矩，则应选择较大的电动机以满足峰值负荷之需，不管效率如何。

电力系统的电压变化也会影响选择电动机。电压变化允许的工业标准正常为 $\pm 10\%$ 。如果电动机运转的电力系统超过了此标准，则选择电动机时，就要考虑过剩电压的影响。理论上，感应电动机的转矩随电压的平方成正比。对许多电动机来说，尽管磁饱和指数超过2，但一般仍可按平方定律来计算。因此，如果电动机端电压降达到电动机额定值的80%，则电动机的起动、制动和停止转矩就会降到额定电压值的64%。此时的最好解决办法是改善电压条件使电动机能适应其负荷，从而得到最佳效率的运转条件。如果在偏离额定电压 $\pm 10\%$ 的情况下运转，会导致效率下降。

已装的电动机也可按节能设计来代替，电动机的转速、额定功率、设计形式等均可重新确定。当然，按使用要求，最好是新选节能电动机，更能提高能效。

有些2和4极电动机的额定功率，其同步转速相对为3600和1800rpm，这比速度较慢的电动机效率要高。如果减少传动装置，总效率还会提高。电动机效率随功率大小而增减，



10马力电动机百分效率
与负荷的关系

如图 3.1 所证。所以，如果选择一台较大容量的电动机比起选几台较小的电动机来，前者更有利于节能。

同步转速和感应电动机的转差率按方程 (3.1) 和 (3.2) 定义：

$$\text{同步转速} = \frac{120 \times \text{频率}}{\text{磁极数}} \quad (3.1)$$

$$\text{转差率} = \frac{\text{同步转速} - \text{运转速度}}{\text{同步转速}} \quad (3.2)$$

感应电动机的功率损失与转差率成比例。因此，转差率低的电动机比转差率高的有效。但如果选择得当，也可用高转差率。总之，转差率设计得当，效率就高。

NEMA 对感应电动机确定了几种设计类型。

A 型——同步转子（起动涌入）电流超过 B 型电动机的额定值。转矩值则等于或超过 B 型之值。同步转子电流的增加通常要使转差率随之减少。因此，A 型电动机比 B 型有较好的效率。为了改进效率而作增加起动电流的设计调整，这对供电系统来说，在电动机起动时也是可以容忍的。

B 型——有最大的同步转子电流和最小的制动、同步和停止转矩。按节能分类的交流电动机和许多其他电动机一般都是用 B 型。设计 A、B、C 和 D 型的转速—转矩特性见图 3.3 所示。在额定负荷下，B 型电动机的转差率低于 5 %。

C 型——该设计型的特点是比 B 型有较高的同步转矩。同步转子电流规范则与 B 型相同。该型电动机用于有较高制动转矩的场合，带负荷起动时就属这种情形。其典型应用就是传送带。

D 型——有较高的转差率，其转速—转矩特性与其他设计类型完全不同，这点可从图 3.3 中得到证实。图中显示了比 B 型有较高的同步转矩。在起动和加速负荷时更要求具有这种特性，额定负荷下 D 型电动机的转差率等于或超过 5 %。转差率高的电动机与 D 型相配合会使运转效率降低。因此，对于接近按额定输出功率作连续运转的电动机，一般不选用 D 型，D 型电动机的典型应用是在冲压、起重和绞车。

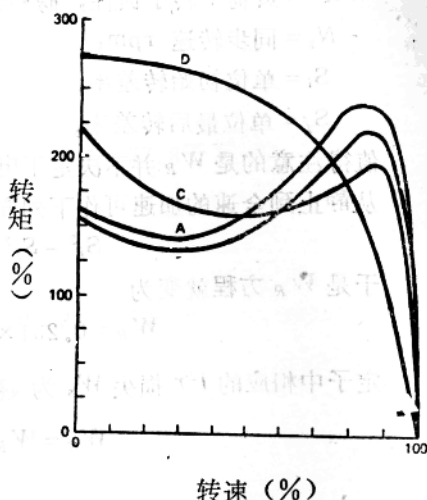


图 3.3 NEMA 设计的 A、B、C 和 D 型电动机，转速—转矩曲线的一般形式

第 3 节 节能电动机不能受益的场合

运转时间是决定是否选用节能电动机的重要因素之一。第 2 节给出了经济受益的定量评价方法，它是通过提高电动机的效率来实现。在这些方法中对运转时间也作了评价。对有较大间歇性的使用场合。如操纵阀门、控制启闭等不宜选用节能电动机。

对 D 型电动机来说，也未发现有可用节能电动机的场所，只是当负荷要求比 B 或 C 型