

电动机运行 与节能技术

机械工业出版社

〔日〕

森
勲
著



电动机运行与节能技术

〔日〕 森 勲 著

赵家礼 译

邵富春 校



机械工业出版社

本书较全面地介绍了各种电动机的合理选用、节能运行以及转速控制节能等新技术，同时还列举了日本近期许多先进的节能实例和计算方法。

全书共分5章。第1章介绍各种电动机的节能措施；第2章从节能的观点出发，介绍电动机的合理选用；第3章介绍各种电动机的运行节能技术和计算；第4章介绍各种电动机转速控制的节能技术；第5章介绍转速控制的节能实例。

本书内容深入浅出，密切联系实际，书中介绍的各种节能的先进技术，能满足当前节能工作的急需。因此，本书可供从事电动机运行、维修、制造的工人和工程技术人员阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。

電動機と回転数制御

森 勲 著

省エネルギーセンター

昭和59年2月1日，第一版

* * *

电动机运行与节能技术

〔日〕森 勲 著

赵家礼 译

邵富春 校

责任编辑：李振标 版式设计：张世琴

封面设计：姚 毅 责任校对：熊天荣

责任印制：郭 炜

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

开本 787×1092¹/₃₂·印张 9¹/₂·字数 206 千字

1989 年 7 月北京第一版·1989 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—4,700·定价：7.10 元

ISBN 7-111 00799-9/TM·112

译 者 序

本书是日本 1984 年出版的专门论述各种电动机节能的书籍。原书译名为《电动机与转速控制》，分为上下两卷。上卷是以电动机作为电磁能量转换装置的观点进行叙述的，其中重点介绍了电动机的选用和运行节能技术；下卷是以电动机作为控制装置的观点进行叙述的，其中重点介绍了通过调速达到节能。本书特点是密切结合实际，内容深入浅出，从节能的角度介绍日本近期各种电动机的节能新技术、新理论，并且给出电动机的各种运行状态下的节能计算和示例，这在一般节能书籍中是少见的，尤其是本书用一章篇幅（第 5 章）介绍了日本近期在电动机运行方面的节能措施和实例，这对从事节能工作的人员是有帮助的。

当前，随着我国四化建设的发展以及人民生活水平的提高，对于电能的需求也日益增加。电能的短缺，迫使我们将节能、节电的工作摆在重要的工作日程上。所以，可以预料，这本书的出版是广大读者迫切急需的。本书可供从事电动机运行、维修、制造的工人和工程技术人员阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。

考虑到本书的主要内容是节能，为了使其内容和书名一致，故将书名改为《电动机运行与节能技术》，并将原书上、下卷合并为一册出版。

本书由赵家礼同志翻译，天津大学邵富春副教授校阅。限于译者水平，书中不妥之处请广大读者指正。

译者

前 言

由于电动机使用简便，效率较高，所以是所有企业中的动力，应用十分广泛。

特别是 20 世纪以来的现代工业的发展，电动机起着很大的作用。现在日本应用电动机的设备所消耗的电量要占全国总发电量的 60%，可以预见今后会越来越多。

由此看来，合理地有效地应用电动机，对于能源的有效利用是非常重要的。本来电动机的效率是很高的，但如使用方法不对，不但不能充分发挥其性能，而且往往会造成生产设备不能使用。

电动机具有两种作用，即能量转换机和能量控制机。为了有效地使用电动机，必须掌握这两方面的功能。

因此，本书上卷是从能量转换机的观点叙述如何有效使用的问题，而在下卷是从能量控制机的观点进行叙述的。

为了有效地使用作为能量转换机的电动机，必须充分了解电动机的特性、性能和相应的机械负载特性，以及其力学性质。其中，选择与负载相配合的电动机，使之合理运行是十分重要的。

另一方面，根据负载变动情况，对电动机的转速进行控制，也可以节省相当多的能量。近来随着半导体技术的发展，有可能使用经济（节能）电动机的控制装置，并积极地引进和吸收。

就电动机转速的控制方法而言，已有多种方法，在本书

下卷将重点介绍与节能有关的方法，以及这些方法的特点和应用中的有关问题。

同时，本书在尽可能援引实际运行的具体技术数据的同时，还作了简单的说明。本书内容如对读者有帮助的话，笔者将感到荣幸。由于笔者经验不足，水平有限，也许书中不妥之处很多，希望读者给予批评指正。

森 勲

1984 年 1 月

目 录

第1章 节能与电动机	1
1.1 电动机的基本应用系统	1
1.2 电动机应用的节能	6
1.2.1 新设备的节能	6
1.2.2 现有设备的节能	8
1.2.3 增添附加设备的节能	9
1.2.4 更换一部分现有设备的节能	9
1.3 电动机的种类和生产规模	9
第2章 从节能观点选择电动机	14
2.1 直流电动机	14
2.1.1 直流电动机原理	14
2.1.2 直流电动机的种类和特性	17
2.2 异步电动机	24
2.2.1 异步电动机原理	25
2.2.2 异步电动机的特性	28
2.2.3 异步电动机的种类	33
2.3 同步电动机	35
2.3.1 同步电动机原理	36
2.3.2 同步电动机的种类	37
2.3.3 同步电动机的特性	38
2.4 电动机的效率、功率因数及其改善	45
2.5 电动机的种类、效率和功率因数	55
2.6 异步电动机的电压特性	61
2.7 电动机的电压等级	75

2.8 电动机效率的提高	79
第3章 电动机的运行与节能	92
3.1 旋转运动的基础知识	92
3.1.1 角速度	92
3.1.2 转矩	93
3.1.3 功	93
3.1.4 功率	94
3.1.5 惯性矩	94
3.1.6 转动惯量	94
3.1.7 运动方程式	96
3.1.8 各种公式的归纳整理	98
3.2 负载特性	98
3.2.1 转矩特性	98
3.2.2 负载运转的功率	99
3.2.3 变负载、断续运行时的等值容量	105
3.3 负载运行的基本条件	108
3.4 起动和制动时的损耗及降低措施	110
3.4.1 三相异步电动机的损耗	110
3.4.2 直流电动机的损耗	113
3.4.3 机械摩擦抱闸的损耗	115
3.4.4 起动和制动损耗的降低	116
3.5 防止电动机空转	121
3.6 电动机的控制与节能	124
3.6.1 重力负载的节能运行	126
3.6.2 泵和鼓风机的节能运行	134
3.6.3 具有机械能传递的负载的节能	140
3.6.4 具有峰值转矩负载的节能运行	152
第4章 电动机转速控制与节能	163
4.1 转速控制与节能	163

4.2 直流电动机的转速控制	164
4.2.1 电枢电压控制法	164
4.2.2 磁场控制法	171
4.2.3 串联电阻控制法	172
4.3 异步电动机的转速控制	173
4.3.1 变极调速	174
4.3.2 转子电阻控制	175
4.3.3 定子电压控制	180
4.3.4 克雷默控制	184
4.3.5 静止谢勒毕乌斯控制	187
4.3.6 定子频率控制	194
4.4 同步电动机的转速控制	222
4.4.1 同步电动机的控制	222
4.4.2 无换向器电动机	223
4.5 滑差电动机	237
4.6 各种转速控制装置的选择	240
4.6.1 适用范围	240
4.6.2 综合效率	243
4.6.3 电源功率因数	243
4.6.4 备用运行	245
4.6.5 瞬间停电的对策	246
4.6.6 维护检修	247
4.7 应用转速控制装置的注意事项	248
4.7.1 转矩脉动引起振动	248
4.7.2 电动机的温升	251
4.7.3 电动机的起动	254
第5章 转速控制的节能实例	256
5.1 泵类的转速控制	256
5.1.1 节能效果的估计	256

5.1.2	工厂供水和给水泵的节能	262
5.1.3	大容量给水泵的节能 (安房和上总引水道的扬 水机场实例)	264
5.1.4	大容量油泵的节能	267
5.2	鼓风机的转速控制	270
5.2.1	节能效果的估计	270
5.2.2	冷却塔用冷却风扇的节能	274
5.2.3	大容量排风扇的节能	278
5.3	企业用锅炉辅机的节能	279
5.3.1	普通锅炉辅机的节能	279
5.3.2	发电用锅炉辅机的节能	282
5.4	起重机的转速控制	287

第1章 节能与电动机

日本能量资源的90%是依赖国外进口，因此，节能工作是必须从全国的观点来看待的重要课题。

特别是在日本，从能量需求的结构上看，与其他先进工业国比较，企业部门的能量消耗占总体的60%，比民用部门的20%大得多，所以期待于企业的节能是非常迫切的。

尽管电动机价廉、操作简单、效率高，以致在所有的企业中广泛应用，特别是由于它的电力消耗占总体的60%，因此有效地使用电动机，在企业设备的节能方面是非常重要的因素。

提高使用电动机的设备的效率，不仅仅是单纯提高电动机本身的效率，还有合理选用电动机的种类和输出功率、运行方法及控制办法等来提高效率，因此有必要进行综合分析研究。

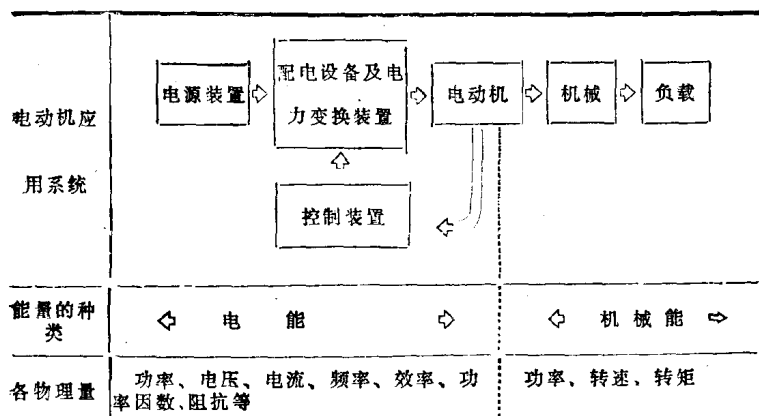
使用电动机的设备是由各种器具所组成，在使用方法上也有许多不同，因此，为了有效地合理地使用，必须了解电动机的性能和最大限度地发挥其性能。

1.1 电动机的基本应用系统

在考虑电动机的应用时，应使电动机与其负载相适应，且能供给负载所需的功率。

表1.1所示是电动机的应用系统，它把电能从电源通过配电设备和电力变换装置供给电动机；电动机的定子和转

表1.1 电动机的基本应用系统



子之间通过电磁耦合把电能转换为机械能，满足负载所需的转矩和转速。

所以电动机的输入是吸收电能的。对于其输入的有电功率、电压、电流、阻抗等各种电气参数，而电动机的输出主要是机械功率、转速、转矩、惯性矩等各种机械参数。电动机是将电能转换为机械能的转换装置，所以必须处理好电气参数和机械参数这两个方面。

与电动机配合的机械负载有各种类型，其使用方法也是各不相同，所以，对电动机进行输出功率控制的同时，也要监视运行状态，甚至还要附带保护装置等等。下面分别考虑其各种因素。

(1) 电源设备

做为供给电动机能源的电源设备，是不可缺少的。电源设备分为直流电源和交流电源，但通常所用的电源，绝大多数是从发电厂供电的交流电源。众所周知，日本的交流电源由于地区不同，有 50Hz 和 60Hz 的两种。

各种电气设备的供电是来自大规模的水力发电厂、火力发电厂及原子能发电厂所发出的电能，通过输电线及变电站，再把电能输送到用户使用。做为其它的电源设备，如自备发电设备虽然也用，可是由于与其他能量混合使用，除了为发挥各自优点之外，由于电费高昂，很少使用。

用户使用的电能，是依赖发电厂供给的，所以输配电时，就供电方面来说，应该考虑提高电能的有效利用率。就是说，应提高供给用户功率（视在功率）的利用率，也就是想办法提高功率因数。为此，九州电力公司在电费规程中规定有关功率因数的条款，比如功率因数以85%为基准，高于这个基准时，电费降价，低于这个基准时，电费提高。

再有，作为电源设备的还有移动电源装置（比如电瓶车、发电车等）、移动电池组或通过架空线等采用直流供电。使用在直流电源上的电动机，是直流电动机。

但是，直流电动机也在固定场合应用。为了控制电动机的输出功率，通常是将发电厂供给的交流电通过电力变换装置转换成直流电供给直流电动机使用。

（2）配电设备和电力变换装置

电动机不是与发电厂供给的电源直接联接的。通常是把发电厂发出的电力通过配电设备及电力变换装置才能供给电动机。

其中的配电设备，是为了使电动机得到经济而有效的电压，它是将供电的电压进行改变后再分配给电动机的一种设备。

在同一配电系统中，要联接许多台电动机，如果这个配电电压不合适，将导致电动机的效率和功率因数降低，所以从节能的观点来确定电压大小是很重要的。另外，在同一配

电系统中要联接各种负载，用电情况随时都在改变。于是配电电压随负载大小而变化，也就是说，电动机的特性要受到电压的影响，所以对电源电压进行监视或管理是很重要的。

从配电设备供给的电能，是通过开关和断路器控制的。当然，这些开关及断路器也应该同时对电动机的配电系统进行保护，如电动机的过载、超速、过电压、接地等异常现象的检测和保护。

其次，为使直流电动机能够运行，应利用电力变换装置把交流电改变为直流电。而对于交流电动机也可利用电力变换装置改变供给电动机的频率和电压。

这些电力变换装置，随着半导体技术的发展，有了飞跃的变革。由于晶闸管元件、可关断晶闸管元件以及电力用晶体管等电力变换元件的出现，已经能够进行经济的、效率良好的电力变换。为此，以前为了进行调速，绝大多数采用直流电动机，而现在已经出现能适应各种用途的交流电力变换装置，所以广泛采用了交流电动机调速，并已得到实际应用。

特别是交流电力变换装置，可达到节能的目的，大都采用电动机的转速控制来实现，并与容易维护的交流电动机组合在一起做成可调速的控制系统，已逐渐成为主要方式。

(3) 控制装置

控制装置是通过上述的电力变换装置对电动机的转速或转矩等进行控制的一种装置。现在电子技术的发展，电动机应用范围也有很大变化。可以使以前难以进行调速控制的交流电动机与直流电动机一样实现各种性能的控制。尤其由于 IC[⊖] 微型计算机等的 LSI[⊖] 的出现，可把复杂的控制电路做

⊖ IC——集成电路。

⊖ LSI——大规模集成电路。

成经济而可靠性高的控制设备。比如，异步电动机的矢量控制，是对于电动机的转差效率和由定子电流构成的转矩分量和励磁分量的电流进行运算，以确定出电动机的最合理的电压，同时对滑差频率及其相位也要进行瞬时运算以便得到高于直流电动机的快速反应，并且控制的敏感性也高于直流电动机。像这样的微型计算机如果出现，可以想像，由于它的经济性和可靠性，会在工业上获得广泛的应用。再有，从当前的节能需要出发，电力变换技术也包含电动机在内，产生了效率较高的电力变换方法，在控制方面也进行了各种各样的研究。比如，电力变换的正弦 PWM（脉冲调幅变速）控制，就是一例。

（4）电动机

当然，它是把电能转换为机械能的电磁转换装置，其输出机械功率除驱动作为直线运动的直线电动机外，通常是供给作旋转运动的能量。所以，在这里必须把我们经常碰到的直线运动转换为旋转运动的物理概念予以叙述。为了恰如其分地应用电动机，必须充分了解做为旋转运动的各个物理量。

就电动机而言，现在已有适用于各种用途的电动机。但总的来说，还是分成直流电动机和交流电动机两种。

在电动机把电能转化为机械能的过程中，并不是把全部的电能都转化为有效的机械能。即在能量转换过程中多多少少要产生损耗。电动机的损耗，根据电动机的种类而不同，所以有必要使其合理使用。

（5）相配合的机械

电动机所配合的机械是做机械功的一种装置。通常，它承受旋转运动能量，并保持使之旋转而做功（如泵、鼓风机

等), 或者把旋转运动改变为直线运动而做功 (如起重机的卷扬、走行等)。

在任何情况下都必须选用适合于机械或负载所要求的特性的电动机。

为此, 最关键的问题是掌握所配合的负载特性并充分了解电动机特性。根据负载变动情况进行转速控制和合理控制, 可以获得很大的节能效果。

1.2 电动机应用的节能

在电动机应用方面的节能技术, 虽然需根据电动机的种类、用途或系统等有各种各样的方法, 但在做为现在企业动力源所使用的范围内, 有下列几个方面:

- 1) 新设备和电动机应考虑节能。
- 2) 在已有的设备中, 应尽可能在使用上力求节能。
- 3) 对已有设备增加附属设备时, 应力求节能。
- 4) 更换已有设备的一部分机械时, 应力图节能。

关于以上各点, 如何采取具体对策, 分述如下:

1.2.1 新设备的节能

不只是应用电动机的设备, 对于所有设备, 其能量消耗的程度, 可以说是在设计阶段就决定了。设备容量过大, 又不适合负载要求时, 就不能做到合理利用能量。所以, 设计新设备或安装新设备时, 需要考虑的事项列举如下。

(1) 选择合适的输出功率

电动机的设计和制造是以额定输出功率连续运行为前提的, 因此, 通常电动机的效率只有使用在额定输出功率的 75~100% 时, 才能达到较高值。因此, 在选择设备容量或电动机容量时, 应该使两者的容量差为最小。在新增设备阶

段，由于容量选择不当，设备安装后再更换，则要增加原计划成本的经济负担，难以实现节能目的，所以必须注意到这一点。

（2）选择合适类型的电动机

电动机有各种型式，必须考虑负载特性要求、电源状态、经济性和效率等方面，选择合适的电动机。

电动机的体积和重量取决于输出转矩的大小。输出功率相同的电动机，由于转速不同，其制造成本也有很大差别。电动机转速的选择不仅考虑电动机本身的效率，还应注意研究传动机构在内的整个系统的高效率。

（3）配电电压的确定

电动机的电压与其效率和经济性有密切的关系，所以确定配电电压对于节能是重要的因素。配电电压不是根据每台电动机来确定的，而是在工厂设计阶段就已确定的。如果这个配电电压选择不当，则会影响配电系统总的效率。

（4）采用高效率电动机

自电动机出现以来，经过一个世纪以上的积极改进，并没有大幅度地提高效率。不论是损耗少的高效率电动机，还是有效地运用电动机方面，仅处于提高一定的百分数上。但是，电动机在所有企业中被广泛地使用着，同时考虑到，其能量的消耗和改善效率的百分数不仅从国家的全面观点来看是最重要的，就是对于用户来说也是最重要的课题。

可是，有些电动机的节能，从提高效率的百分数上看，改善的效果不大，因此忽视了节能工作。但是，这种认识对电动机的节能来说是不恰当的，从能源的消费量上来看，在总体的效果上是显著的，因此必须积极地、持久地进行节能工作。当前的电动机寿命长，并且长时间连续地运行，同