

通用设备的 节能优化控制方法 和调度方法

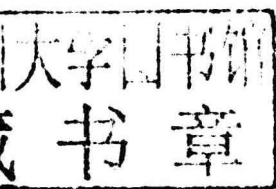
姚福来 孙鹤旭○等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

通用设备的节能优化控制方法和调度方法

姚福来 孙鹤旭 等编著



机械工业出版社

本书对工业领域中节能系统常用的传感器、执行器、电动机、变频器进行了深入浅出的讲解,并对社会用电量很大的水泵风机、输送电网、高速列车、长距离输送机、锅炉、空调器、变压器、无功补偿器等设备,给出了迄今为止最前沿的节能节电优化调节和优化调度方法。本书针对工业领域中存在的大量通用设备,分析了实质,总结了共性,给出了一种简单通用的节能调节与节能调度方法——量子优化法则。本书力图使读者在短期内掌握节能工作中常用的一些实用知识,并为从事节能节电工作的大中专毕业生、本科毕业生及研究生掌握核心节能技术提供帮助。本书也可作为从事节能节电工作的工程师的培训教材和自学教材。

图书在版编目(CIP)数据

通用设备的节能优化控制方法和调度方法/姚福来等
编著. —北京:机械工业出版社, 2012. 6

ISBN 978 - 7 - 111 - 37861 - 7

I. ①通… II. ①姚… III. ①通用设备—节能—技术
IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 054280 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:顾 谦 责任编辑:任 鑫

版式设计:刘 岚 责任校对:陈立辉

封面设计:陈 沛 责任印制:乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15 印张 · 365 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 37861 - 7

定价:39.90 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

在工业、农业、交通、市政等国民经济中的各行各业有着种类繁多的各种设备，只要需要用能量维持其运行，就面临着节能的需求；只要需要多设备合作完成同一件工作，就存在最节能节电的优化调节和优化调度问题。那么，这些繁杂的领域和多样的设备是否存在并遵从一个共同且通用的节能技术和节能理论呢？如何避开各种表象，分析节能的实质，总结其共性，给出简单易学的节能节电方法，是本书区别于其他大量节能书籍的最大不同。

作者长期从事节能方面的研究工作和实际应用工作，在很多领域完成过大量且成功的节能案例。本书对占社会用电量30%~35%的水泵风机进行了量化的节能分析，给出了该领域最前沿的节能调速定律和节能切换定律；对占社会用电量10%左右的输配电系统进行了节能分析，给出了节能的调度方法和负荷分配方法；对多动力驱动的高速列车及输送机械进行了节能分析，给出了节能的调速方法、负荷分配方法和切换方法；对多锅炉供热系统进行了节能分析，给出了节能的负荷分配方法和切换方法。本书最后针对各种不同的系统和不同的设备，首次提出并证明了一种统一的通用设备优化调节和优化切换理论——量子优化法则。这一法则给出的结论简单易学，在实际节能工程中推广应用十分方便，它可以指导从事节能工作的科技人员对各种各样的实际系统进行节能优化调节和节能优化调度。

本书对工业领域中节能系统最常用的传感器、执行器、电动机、变频器进行了深入浅出的讲解，并对水泵、风机、输配电网、高速列车、锅炉、输送机、空调器、变压器、无功补偿器等设备，给出了具体的节电优化调节方法和优化调度方法。本书可以为从事节能工作的大中专毕业生、本科毕业生及研究生快速掌握节能方法提供帮助，也可作为从事节能节电工作的工程师的自学教材。

本书第6章的第6.1、6.2节和第7章的第7.8、7.9节内容由孙鹤旭教授编写，第3章3.3节的部分内容由张艳彬工程师编写，第7章7.6节的部分内容由王红霞工程师编写，第16章第16.1、16.2节的部分内容由姚泊生工程师编写，第16章16.3节的部分内容由张艳芳高级工程师编写，姚雅明参与了第7章7.13节部分内容的编写，其余章节由姚福来研究员编写。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中错漏之处在所难免，还望广大读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第1章 节电与节能技术的本质..... 1

- 1.1 节能与节电问题的提出 1
- 1.2 效率优化的研究和发展概况 3
- 1.3 节电与节能的实质 5
- 1.4 量子优化法则 5

第2章 能耗的表现形式与系统整体效率..... 6

- 2.1 能量消耗系统的分类 6
 - 2.1.1 以提高势能为目的的系统 6
 - 2.1.2 以输出电能为目的的系统 6
 - 2.1.3 以提供热能为目的的系统 7
 - 2.1.4 克服摩擦力做功的系统 8
 - 2.1.5 以能量函数为动能的系统 8
 - 2.1.6 以能量函数为磁能的系统 8
- 2.2 效率函数 9
- 2.3 加权效率函数 10

第3章 节能系统中常用的传感器 11

- 3.1 力传感器 11
- 3.2 液位传感器 12
- 3.3 压力传感器 14
- 3.4 温度传感器 15
- 3.5 流量传感器 18
- 3.6 角度传感器 19
- 3.7 电压变送器 21
- 3.8 电流变送器 22
- 3.9 功率因数变送器和功率变送器 22

第4章 节能系统中常用的执行装置 23

- 4.1 电磁阀和气动阀 23
- 4.2 电动调节阀和气动调节阀 24
- 4.3 电气转换器 25
- 4.4 气动和液压换向电磁阀 26
- 4.5 电液比例阀 28

4.6 电液伺服阀 30

4.7 电液数字阀 31

4.8 磁粉离合器和磁粉制动器 31

4.9 电磁离合器和电磁制动器 32

4.10 自力式调节阀 33

4.11 其他电动装置 33

第5章 工业领域常用的电动机 34

5.1 三相交流电动机 34

5.1.1 三相交流异步电动机的基本 原理 35

5.1.2 三相交流电动机的反向运行 38

5.1.3 三相交流电动机的极数 40

5.1.4 三相交流异步电动机的实际 结构 43

5.1.5 三相交流电动机定子绕组的基本 知识 43

5.1.6 三相交流电动机的几种外部和 内部的接线方式 48

5.1.7 三相交流电动机的常用参数的 计算和估算 51

5.1.8 三相永磁同步交流电动机 53

5.1.9 三相交流同步电动机 54

5.1.10 绕线转子三相交流异步 电动机 54

5.1.11 三相变频调速电动机 54

5.2 单相交流电动机 55

5.3 直流电动机 56

5.4 直流无刷电动机 57

5.5 步进电动机 60

5.6 伺服电动机 63

5.7 直线电动机 64

5.8 开关磁阻电动机 66

第6章 设备的调速方法 67

6.1 交流电动机的转速 67

6.2 交流电动机的效率	67	7.13.4 富士变频器的接线	107
6.3 交流电动机的调速方法	68	7.13.5 富士变频器的参数设定	109
6.3.1 改变极对数的调速方法	69	7.13.6 富士变频器的数据快速查询和运行 状态监视	112
6.3.2 改变转差率的 12 种调速方法	72	7.13.7 富士变频器的使用高度及散热 等问题	112
6.3.3 改变频率的调速方法	79		
6.4 其他调速设备	84	第 8 章 电动机无功功率的节能 补偿	114
6.5 电磁转差离合器	84	8.1 无功电流和无功功率	114
6.6 液力耦合调速器	85	8.2 无功电流和无功功率的补偿	115
6.7 液粘调速离合器	85	8.3 电动机的无功补偿	115
6.8 机械调速器	86	第 9 章 变压器的合理配置与节能 运行	119
6.9 直流电动机的调速方法	87	9.1 变压器的基本数据	119
6.10 交流伺服电动机驱动器	88	9.2 变压器的经济运行判别方法	122
6.11 步进电动机与步进电动机驱动器	89	9.3 变压器容量选择和经济运行应该 注意的问题及误区	124
第 7 章 变频器的调速原理及使用 方法	90	第 10 章 水泵风机的节能优化调速 定律和切换定律	127
7.1 通用变频器的主电路结构	90	10.1 引言	127
7.2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 方式及其 实现方法	91	10.2 水泵的特性	129
7.3 变频器的谐波和应对措施	93	10.3 水泵站消耗的总功率	130
7.4 输入输出电抗器的估算	94	10.4 定速泵站的最优负荷分配控制	131
7.5 变频器输入输出电压、电流和功率的 测量	94	10.5 定速泵站的最优切换控制	133
7.6 变频器的基本使用方法	96	10.6 定速泵站的一个优化案例	134
7.6.1 变频器的选型	96	10.7 变速水泵的特性	135
7.6.2 变频器的主要动力和控制 接线	96	10.8 调速泵站的总功耗	137
7.6.3 变频器的基本参数设定	97	10.9 调速泵站的负荷优化控制	137
7.6.4 变频器的外形	97	10.10 调速泵站运行数量的优化切换	139
7.7 变频器的散热问题和无功补偿 问题	98	10.11 调速泵站的一个实际案例	142
7.8 变频器的压频控制	98	10.12 节电比例可实现的必要条件	143
7.9 变频器的矢量控制	100	10.13 关曲线和开曲线	144
7.10 变频器的直接转矩控制	102	第 11 章 多动力系统的优化节能	147
7.11 制动电阻的计算和估算	103	11.1 引言	147
7.12 变频器中的 PID 及电源反接问题	104	11.2 多动力驱动系统消耗的总功率	147
7.13 富士变频器的基本使用方法	104	11.3 多动力系统的最优负荷分配 控制	148
7.13.1 需要掌握的要领	104	11.4 多动力系统运行动力台数的优化 切换	150
7.13.2 富士变频器外形	105		
7.13.3 富士变频器型号及总体框图	105		

第 12 章 电网输电和配电的优化控制与**调度 153**

- 12.1 引言 153
- 12.2 电网消耗的总电能 154
- 12.3 电网的最优调度 154
- 12.4 一个电网下多个变压器供电的能量
关系 156
- 12.5 一个电网下多个变压器供电的最优
调度 156
- 12.6 一个电网下多个变压器供电的最优运行
台数 158
- 12.7 一个电网下多个变压器供电的整体
最高效率 159
- 12.8 一个电网下多个变压器供电的最优
切换法则 159

第 13 章 多锅炉系统的优化调节与优化**调度 160**

- 13.1 引言 160
- 13.2 多个锅炉共同供热系统的能量
关系 160
- 13.3 多个锅炉共同供热系统的最优
调度 161
- 13.4 多个锅炉共同供热系统的最优运行
台数 163
- 13.5 多个锅炉共同供热系统的整体最高
效率 163
- 13.6 多个锅炉共同供热系统的最优切换
法则 163

第 14 章 降低运行费用的调度方式 164

- 14.1 通过优化调度降低基本电费 164
- 14.2 通过优化调度降低总运行费用 165
- 14.3 抽水蓄能电站 166
- 14.4 通过优化调度降低总用电量 167

第 15 章 空调系统和热交换站的节能**和降低运行费用 169**

- 15.1 中央空调泵站和城市供热系统采暖
泵站的节能方法 169
- 15.2 中央空调泵站的节能分析 170
- 15.3 中央空调系统降低运行费用的
冰（或水）蓄冷技术 172

- 15.4 地源热泵室内空调技术 172

第 16 章 无负压节能供水 175

- 16.1 二次加压泵站 175
- 16.2 无负压供水方式的节能优点 175
- 16.3 无负压供水设备的基本构成 176
- 16.4 存在的 6 个问题 177
 - 16.4.1 水泵选型面临的问题 177
 - 16.4.2 有时仍存在大量的电能浪费
问题 177
 - 16.4.3 卫生隐患问题 177
 - 16.4.4 水泵气蚀问题 177
 - 16.4.5 胶囊式无负压供水设备的胶囊
寿命问题 178
 - 16.4.6 容积及成本问题 178
- 16.5 清洁型无负压无气蚀胶囊式节能供水
设备 178

第 17 章 其他常用的节能方法 182

- 17.1 电动机轻载时降压节电 182
- 17.2 液压机、注塑机、除尘风机等设备的
节电控制 183
- 17.3 照明降压节电 184
- 17.4 余热回收 185
- 17.5 太阳能光伏发电技术 186
- 17.6 风力发电技术 187

第 18 章 工业领域中相同设备组成**系统的量子优化法则 188**

- 18.1 问题的提出 188
- 18.2 一类函数的极值点和极值 188
 - 18.2.1 k 值固定找出极值和极值点 188
 - 18.2.2 k 值变化找出最大或最小极
值点 189
- 18.3 加权效率优化的负荷分配法则 190
- 18.4 加权效率优化运行数量法则 191
- 18.5 加权效率优化切换法则 192
- 18.6 有约束的加权效率优化负荷分配
法则 193
- 18.7 有约束的加权效率优化运行数量
法则 193
- 18.8 有约束条件的加权效率优化切换
法则 194

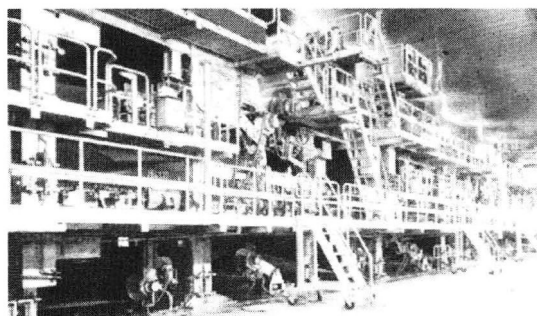
18.9 加权效率优化系统的几个重要特点	194	19.8 三种以上不同设备组成系统的理论优化方法	210
18.10 更一般意义上的通用设备的效率优化	195	19.9 两种不同设备组成系统的工程优化方法——梯度循环法	210
18.11 更一般意义上的最优切换控制	198	19.10 两种不同设备的优化分析	212
18.12 一种工程上方便使用的近似最优运行台数判别法则和近似最优切换法则	201	19.11 两种不同设备组成系统的设备切换优化法则	214
第 19 章 工业领域中不同设备组成系统的量子优化法则	203	19.12 效率优化的几个重要特点	214
19.1 问题的提出	203	19.13 三种不同设备组成系统的工程优化方法——梯度循环法	216
19.2 两种不同设备构成系统的总效率 ...	203	19.14 三种不同设备组成系统的优化分析	220
19.3 两种不同设备构成系统的效率优化	205	19.15 三种以上不同设备组成系统的工程优化方法——梯度循环法	221
19.4 局部最优和整体最优的关系	206	19.16 不同型号的同类设备的效率相似性及负载率	222
19.5 三种不同设备组成系统的总效率 ...	206	19.17 不同型号的同类设备的相似优化法则	223
19.6 三种不同设备组成系统的效率优化	209	参考文献	224
19.7 三种以上不同设备组成系统的总效率	210		

第 1 章 节电与节能技术的本质

1.1 节能与节电问题的提出

在人类社会的发展中，人类发明了各种各样的设备，它们帮助人类利用自然和改造自然。这些设备包括电动机、变压器、汽油机、柴油机、蒸汽机、燃气机、水泵、风机、吊车、轮船、发电机、汽轮机、汽车、火车、飞机、电动机车、水轮机、锅炉、提升机、带式输送机、变频器、调速器、液力耦合器、转差调速器、直流调速器、供电电网、高频加热炉等，我们把这些设备通称为通用设备。

在工业、农业、航天、军工、运输、通信、建筑、办公等领域，都是靠能量的消耗来维持系统运行的，只要使用能量，就存在节能问题，所以节能工作几乎涉及国民经济的各个领域（见图 1-1 ~ 图 1-4）。

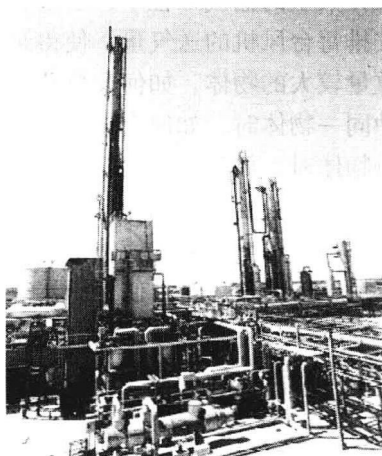


纸机自动化生产线

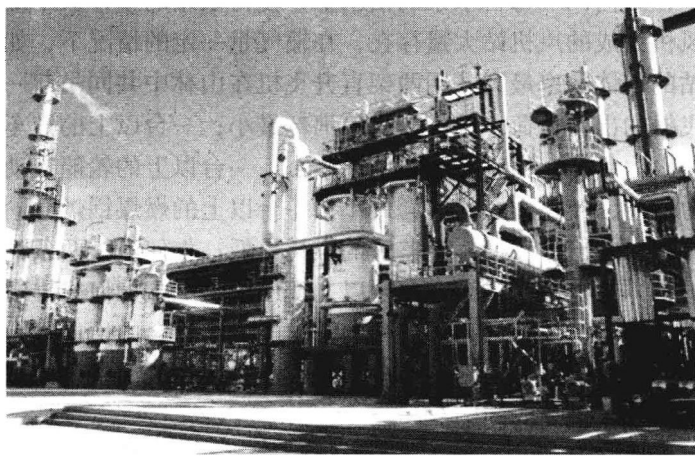


高速列车

图 1-1

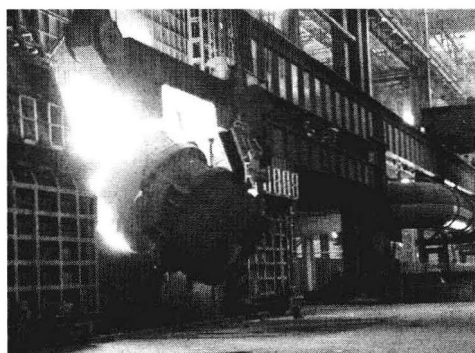


化肥厂

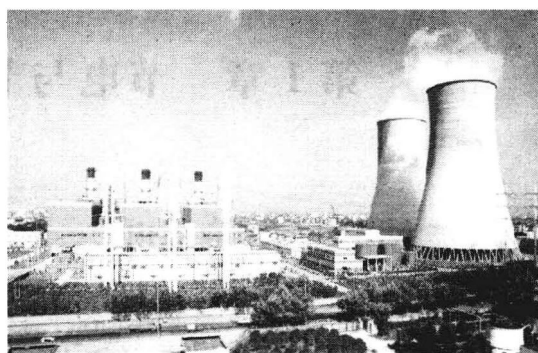


炼油厂

图 1-2



炼钢厂



火力发电厂

图 1-3



污水处理厂



南水北调东线泵站

图 1-4

一台以上的调速电动机共同拖动一条长距离的矿石输送带，如何分配各个电动机的出力负荷，使整体的电耗最低；高速列车运行时，如何调节各车厢调速电动机的出力，使整体的电能消耗最小；在大型调水工程中，由多台水泵组成的泵站大量存在，在输水量一定的情况下，如何调节每台水泵的出水量，使得泵站的整体效率最高；在大型的输气工程中，由多台风机组成的风机站大量存在，在输气量一定的情况下，如何安排每台风机的送气量，使得泵站的整体效率最高；用两架直升飞机在山林中共同吊起一个重量较大的物体，如何安排两架飞机的出力负荷，使整体燃料消耗最小；一台以上的汽车拖动同一物体时，如何安排各汽车的出力负荷，使整体燃料消耗最小；一台以上的轮船拖动同一物体时，如何安排各轮船的出力负荷，使整体燃料消耗最小；一台以上的燃煤锅炉共同产生一定热量的蒸汽，如何分配各个锅炉的出力负荷，使整体的煤耗最低；如何安排两条输电线路中的输电负荷，使输电线路的整体输电效率最高；两台以上变压器供电，如何安排每台变压器下的负荷量，使变压器组的整体运行效率最高。这样的需求在当今社会中比比皆是。

只要需要多台设备和多个人或动物来完成一件事，就存在节能问题，这也就是保持系统整体效率最高的问题。

1.2 效率优化的研究和发展概况

对于人类从事的每一项工作,自古至今,人们都希望用最小的代价来获得最多的工作成果,这就是效率优化问题的由来;而如何获得最好结果的方法,就是最优化方法。

如果优化变量是独立参数,且不随时间变化,对于这样的系统,其优化问题被称为静态优化问题或参数优化问题。其主要任务是求解函数的极值,这类优化问题包括优化变量、目标函数和约束条件三个基本要素。优化过程就是在满足约束条件的前提下,改变并最终确定优化变量,使得目标函数取极小值或极大值^[1]。

如果目标函数是优化变量的线性函数,约束条件是优化变量线性等式或不等式,则归为线性规划问题^[2]。傅里叶提出了最初的线性规划问题的想法,康托罗维奇首先提出了线性规划问题,丹齐克提出了解决线性规划的单纯形法,这些都成为了线性规划问题的里程碑。如果目标函数或约束条件中有一个及一个以上是优化变量的非线性函数,则归为非线性规划问题^[3]。在这方面,卡鲁什首次提出非线性规划问题,库恩和塔克尔给出了最优化的判别条件。在非线性规划中,如果目标函数是优化变量的二次函数,且约束条件均为优化变量的线性函数,则为二次规划问题^[4];如果目标函数为凸函数,且约束条件构成的可行域为凸集,则为凸优化问题^[5]。凸优化的一个鲜明特点是存在局部最优解即全局最优解。

求解函数极值问题最常用的方法是高等数学^[6-7]中的经典微分法,目标函数对各个最优变量求偏导数,令其等于零,解出最优解。

对于目标函数较复杂或无法用解析方法求解的非线性化最优问题,多采用数值法^[8]。它的基本做法是通过搜索或迭代的方法逐渐得到最优解。数值法包括曲线拟合法、区间消去法和爬山法。曲线拟合法是在若干点估计出目标函数值,得出目标函数的近似曲线,再用区间消去法求解;区间消去法是在搜索中逐渐靠近最优解空间,直到收敛到满足一定准确度时的最优解;爬山法是根据已知的信息和已经求出的目标函数值,通过点的移动,比较改善目标函数,直到得出最优解,这类方法中有黄金分割法、Fibonacci法、步长加速法、单纯形法、随机搜索法、变量轮换法和方向加速法等。此外,还有一些优化求解方法是將解析方法和数值法结合在一起,如对于多变量无约束优化问题的求解方法有牛顿法、最小二乘法、最速下降法、共轭梯度法、共轭方向法、拟牛顿法和变尺度法等。当然还有一些利用网络图为模型的图论寻优方法。为了在兼顾通用性的基础上提高计算效率,人们又发展了很多工程数值优化的方法^[9-10]。

如果系统从一个工况变化到另一个工况,系统中的参数是时间的函数,对于在这个变化过程中的最优化问题,它的目标函数就不再是函数,而是函数的函数,即泛函。这样的系统其特性用微分方程或差分方程来表示。这种最优化问题就是动态最优化问题,也叫优化控制问题^[11-13]。

解决动态优化问题需要使用变分法^[14-16]。这类系统也有三个基本要素:被控系统的数学模型、物理约束条件和性能指标。最优控制问题^[17-18]概括为:对于一个动力学系统,从允许的控制方式中找出一个最优控制方案,使该系统从一个状态转移到另一个状态时,对于所选定的性能指标是最优的。动态优化的本质是求泛函的极值问题,根据不同的目的,最优控制分为时间最优控制、终端最优控制、燃料最优控制、能量最优控制等^[19-20]。对于确定

系统用精确最优控制；对于系统中存在随机变量的随机系统采用随机最优控制^[21-22]；当控制变量无约束时，采用经典变分法求解；当控制变量有约束时，采用贝尔曼提出的动态规划^[23]或庞特里亚金提出的极小值原理^[24]求解；对于用二次型表示性能指标的线性系统，可以用卡尔曼提出的二次型线性最优方法^[25]来解决。

随着环境的变化或设备的老化，一个系统的数学模型也将发生变化，原来最优的系统就不再是最优的了。为了解决这一问题，又产生了很多在线优化方法，如预测控制中的滚动优化算法和稳态递阶控制方法等^[26-29]。预测控制中的滚动优化算法使得优化过程反复在线进行，对时变、干扰和模型失真等不确定因素进行补偿，持续得到反应实际的全局次优解；在稳态递阶控制中，对各分单元进行子过程优化，上一级协调单元统筹各单元的优化进程，各分单元和协调单元通过迭代方法找到最优解。对于复杂的难于建立精确模型的多目标优化被控对象，Holland 提出的遗传算法、神经网络优化方法、模糊优化方法，它们比经典的优化方法更具优越性^[30-35]。遗传算法是一种搜索寻优方法，按照优胜劣汰的生物进化规则，从初始解逐步地逼近全局最优解和次优解；神经网络的运动总是朝着减小能量的方向进行，最终到达系统的平衡点（即能量极小点）；在模糊优化方法中，控制变量、目标函数和约束条件可能都是模糊的，也可能只有一个方面是模糊的，该方法主要是利用截集或隶属函数将模糊问题转化为经典的规划问题。

对于人类社会中大量存在的整体最优问题，大都是静态优化和动态优化的结合体。例如对于一个大型的供水系统，水厂的供水量是由大量的用户随机确定的，满足工艺要求的水量和水压可能会随时变化，这就需要进行动态优化。如果在一段时间内的供水量和水压是稳定不变的，则需要用静态优化方法进行求解。大型输气系统与此类似，动车组在加速、减速、上坡、下坡、风速、载客量等因素的作用下，也会有静态优化和动态优化两种问题。这些系统有多台电动机提供动力，所以动力投切的优化问题也需要考虑。对于有些流体系统目前还很难给出准确的数学模型，设备的特性也多是以离散的数据或曲线的形式给出。对于这些复杂的系统，不仅有静态优化和动态优化相结合的问题，也有如何提取出系统的数学模型和如何建立目标函数的问题。

随着能源的日益紧张，以及人类对节能目标的追求，人们对各种系统的效率优化的研究也越来越广泛^[36-42]，如城市供水系统的优化节能^[43-51]、热力系统的优化节能^[52-58]、电力系统的优化节能^[59-65]、汽轮机系统的优化节能^[66-68]、油田注水系统的节能优化^[69-71]、电动机系统的优化节能^[72-78]、交通运输优化调度系统^[79-82]，以及中央空调、通风系统、压缩机系统的优化节能等。可以这样说，只要使用能源，就存在着优化节能问题。

自从1988年参加“简易经济型三相交流电机调速装置”的研究开始，作者就一直对节能工作给予了极大的关注，并进行了一些的实际节能优化的研究和应用工作^[37,41,83-104]。

很多大学，每年都有不少博士在从事优化方面的研究工作^[105-111]。

目前，针对自然界的生物和人造机器普适性的优化方法还没有统一的结论。再有一个问题就是，很多被广泛采用的典型控制方法本身并不能说明是最优的，但是人们又没有发现最优的控制方法是什么。例如，对于占全世界用电量20%~25%的水泵系统，常规的运行方式是采用单闭环控制手段实现满足工艺要求的控制，采集工艺参数实际值，与设定值做对比，根据误差值大小，增加或降低水泵的转速，也就是调节调速水泵的负荷量，同时根据全速和零速时的实际工艺参数，增减水泵的运行数量。这种方法虽然被全世界所采用，但是它

却不是最优的。因为这种方法在控制过程中，并没有考虑能耗问题，所以也就不可能自然而然地实现满足工艺条件下的最低能耗运行。令人担忧的是，即使是像南水北调这样世界上最大的水利工程，此问题依然存在。

对于静态优化的经典微分法，求各个变量的偏导数，令其等于零，解出最优结果。然而由于实际系统的变量中，有些是实数，如每台设备所承担的负荷，有些是正整数，如用几台设备或几个人或用哪种设备等，对于整数变量解出的最优点可能是带有小数的实数，这与实际不符。另一个问题是，对于系统需要的一个总负荷和确定的现有设备，其总效率的最佳点不一定是导数为零的点，而是可以实现的所有方案中的最好的一个方案。再一个问题是，很多优化方法都存在非唯一解，也就是这样安排和那样安排的优化结果是相同的。对于很多复杂系统，由于难于给出准确的数学描述或数学模型，所以不论是动态优化方法还是静态优化方法有时都很难给出优化问题的准确数学表达式。

1.3 节电与节能的实质

节电与节能问题，其实质问题就是使被调节与被调度的系统最大限度地维持在整体高效区（点）。当整体效率为可以实现的最高值时，我们说这个系统已经运行在最节能与最节电状态，所以节能与节电的实质就是提高系统的整体运行效率。

1.4 量子优化法则

工业中大量存在的各种系统，其效率优化所包含的变量与求解方法，与过去我们在高等数学中所讲的有所不同。不同点之一，变量中有些是实数有些则是正整数，实数如每台设备所承担的负荷，整数如用几台设备或几个人，使用哪种设备等。对于整数变量求导数，解出的最优点可能是带有小数的实数，这显然是不符合实际的。不同点之二，对于系统需要的一个总负荷和确定的现有设备，其总效率的最佳点不一定是导数为零的点，而是可以实现的所有方案中的最好的一个方案。还有一个不同点是，在很多优化点都存在非唯一解，也就是这样安排和那样安排的优化结果是相同的，我们把求解这种优化问题的方法称为量子优化法则。

针对存在的问题，本书给出一种适用于通用设备的量子优化法则，其方法基于：

- 1) 效率函数可以近似地看做是过原点的凹函数，效率函数的二次导数小于零。
- 2) 假设每台工作的设备负荷率大于零，对多变量求偏导，推导出各台运行设备的最优控制方法。
- 3) 以单位产量能耗为目标函数，推导出最优切换方法。总负荷增加时，确定出 n 和 $n+1$ 台运行设备的最佳切换点，总负荷减小时，确定出 n 和 $n-1$ 台运行设备的最佳切换点。

第2章 能耗的表现形式与系统整体效率

2.1 能量消耗系统的分类

2.1.1 以提高势能为目的的系统

以提高势能、压力内能目标的系统，如水泵、风机、压缩机、鼓风机、蓄能电站和起重机等，系统结构分为并联做功或串联做功。

1) 对于并联做功，则将系统要求的总流量 Q_t 作为总负荷， n 台运行设备，每台设备输送总流量的一部分 Q_i ，各台设备输出物质的高度为 h_i ，总能耗 P_t 表达式为

$$P_t = k \sum_{i=1}^n \frac{Q_i h_i}{\eta_i(Q_i, h_i)} \quad (2-1)$$

式中， k 为常数。

如果设备提供的 h 恒定，比如使用了调速装置的风机、水泵，或输送水到固定高度的水泵，且为要求的高度 h_0 ，则能耗表达式可以变为

$$P_t = k h_0 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\eta_i(Q_i)} = k h_0 Q_t \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_t} \times \frac{1}{\eta(Q_i)} \quad (2-2)$$

2) 对于串联做功，则将系统要求的总扬程 H_t 作为总负荷，每台设备输送总扬程的一部分 h_i ，系统输送的总流量为 Q_t ，对于水泵串联， n 台设备运行，每台设备输送的流量相同为 Q_t ，则能耗表达式为

$$P_t = k \sum_{i=1}^n \frac{Q_t h_i}{\eta_i(Q_t, h_i)} \quad (2-3)$$

设备提供的输出总扬程恒定，且为要求的 h_0 ，能耗表达式变为

$$P_t = k Q_t \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\eta_i(h_i)} = k h_0 Q_t \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{h_0} \times \frac{1}{\eta(h_i)} \quad (2-4)$$

2.1.2 以输出电能为目的的系统

发电机、核电站、蓄电池、电力变压器、风力发电机、电网等产生电能和输送电能的设备结构有并联或串联两种方式。例如蓄电池串联、多火力发电机并联、电力变压器并联等设备的能耗函数结构基本相同。

1) 对于并联系统，每台设备的电压为 U_i ，系统的总电流 I_0 为总负荷，每台设备输送或使用总电流的一部分 I_i ，能耗表达式为

$$P_t = k_1 \sum_{i=1}^n \frac{U_i I_i}{\eta_i(U_i, I_i)} \quad (2-5)$$

式中， k_1 为常数。

如果每台设备的端接电压近似相同为 U_0 ，则能耗表达式可以变为

$$P_t = k_1 U_0 \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{\eta_i(I_i)} = k h_0 I_0 \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_0} \times \frac{1}{\eta(I_i)} \quad (2-6)$$

2) 对于串联系统，则系统要求的总电压 U_0 为总负荷，每台设备输出的电压为总电压一部分 U_i ，每台设备输送的电流为 I_i ，则能耗表达式为

$$P_t = k_1 \sum_{i=1}^n \frac{U_i I_i}{\eta_i(U_i, I_i)} \quad (2-7)$$

串联系统，每台设备输出的电流相同为 I_0 ，能耗表达式变为

$$P_t = k_1 I_0 \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{\eta_i(U_i)} = k_1 I_0 U_0 \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{U_0} \times \frac{1}{\eta(U_i)} \quad (2-8)$$

3) 对于供电线路，假设一个电网下的某个区域用电设备的电压为 U_i ，总电流为 I_0 ，共有 n 条线路向该区域供电，每条线路的电阻为 R_i ，每条线路流过的电流为 I_i ，则该区域的电网的能耗表达式为

$$P_t = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i = I_0 \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_0} \frac{I_i R_i}{I_0} \quad (2-9)$$

$$I_0 = \sum_{i=1}^n I_i$$

式中，电流的单位为 A，电阻的单位为 Ω ，功率单位为 W。

如果每条线路的电阻相同为 R_0 ，也就是都使用相同的线路，则电网的能耗表达式变为

$$P_t = I_0 R_0 \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_0} \times \frac{I_i}{I_0} \quad (2-10)$$

式中

$$\sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_0} = 1 \quad (2-11)$$

2.1.3 以提供热能为目的的系统

以提供热量为目标的热源或冷源交换系统，如换热器、热交换器、冷凝器、锅炉、中央空调等，其系统结构也有并联和串联两种方式。

1) 对于并联系统，流过每个设备的介质产生的温差为 T_i ，流过系统的总流量 Q_0 固定，总负荷为总温差，每个设备的流量是总流量的一部分 Q_i ，能耗表达式为

$$P_t = k_2 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i T_i}{\eta_i(Q_i, T_i)}$$

式中， k_2 为常数。如果总温差恒定为 T_0 ，能耗表达式为

$$P_t = k_2 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i T_i}{\eta_i(Q_i, T_i)} = k_2 Q_0 T_0 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_0} \times \frac{1}{\eta_i(Q_i)}$$

2) 对于串联系统，系统流过介质的总流量 Q_0 相等，总负荷为总温差恒定为 T_0 ，每个设备产生的温差是总温差的一部分为 T_i ，能耗表达式为

$$P_t = k_2 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i T_i}{\eta_i(Q_i, T_i)} = k_2 Q_0 T_0 \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{T_0} \times \frac{1}{\eta_i(T_i)}$$

2.1.4 克服摩擦力做功的系统

运输物体的车辆主要为克服道路的摩擦做功,例如汽车、电车、火车、动车组、拖动同一传送带的多个电动机或内燃机等。

如果系统要求的总动力 F_0 为总负荷,每台机组的车速相等为 V_0 ,每台设备输出的力为总动力的一部分 F_i ,则能耗表达式为

$$P_1 = k_3 \sum_{i=1}^n \frac{F_i V_i}{\eta_i(F_i, V_i)} = k_3 F_0 V_0 \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{F_0} \times \frac{1}{\eta_i(F_i)}$$

式中, k_3 为常数。写成转矩和转速的能耗表达式为

$$P_1 = k_3 M_0 n_0 \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{M_0} \frac{1}{\eta(M_i, n_0)}$$

式中,系统要求的总转矩 M_0 为总负荷,每台机组的转速相等为 n_0 。

2.1.5 以能量函数为动能的系统

能量表达式为

$$P_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{\eta_i(m_i, v_i)}$$

如果速度 v_i 恒定为 v_0 , 总的质量为 m_0 , 每部分的 m 不同, 则能量表达式可以变为

$$P_1 = \frac{m_0 v_0^2}{2} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m_0} \frac{1}{\eta_i\left(\frac{m_i}{m_0}, v_0\right)}$$

如果质量 m_i 恒定为 m_0 , 总的速度为 v_0 , 每部分的速度 v 不同, 则能量表达式可以变为

$$P_1 = \frac{m_0 v_0^2}{2} \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{v_0} \frac{\frac{v_i}{v_0}}{\eta_i\left(m_0, \frac{v_i}{v_0} v_0\right)}$$

2.1.6 以能量函数为磁能的系统

能量表达式为

$$P_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{L_i I_i^2}{\eta_i(L_i, I_i)}$$

如果电感 L_i 恒定为 L_0 , 总的电流为 I_0 , 每部分的 I_i 不同, 则能量表达式可以变为

$$P_1 = \frac{L_0 I_0^2}{2} \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_0} \frac{\frac{I_i}{I_0}}{\eta_i\left(L_0, \frac{I_i}{I_0} I_0\right)}$$

如果电流 I_i 恒定为 I_0 , 总的电感为 L_0 , 每部分的 L_i 不同, 则能量表达式可以变为

$$P_1 = \frac{L_0 I_0^2}{2} \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{L_0} \frac{1}{\eta_i\left(\frac{L_i}{L_0} L_0, I_0\right)}$$

2.2 效率函数

自然界中的生物和人类制造的各种机器或设备都有一个最高效率的运行点，我们总是要求在完成同等负荷量的情况下，使所有参与工作的设备或生物所消耗的能量最低。所谓能耗最低也就是保持总效率或加权效率最高。

一般设备（或生物）的效率曲线 $\eta(\beta)$ 的形状如图 2-1 所示。在图 2-1 中， β 为负荷量， η 为效率。

图 2-1 中， η_e 为最高效率点，对应最佳负荷量为 β_e ； β_M 为最大允许负荷量， $f(\beta)$ 为过 (β_1, η_1) 和 (β_2, η_2) 两点之间的直线， θ 取值在 $[0, 1]$ 区间，有

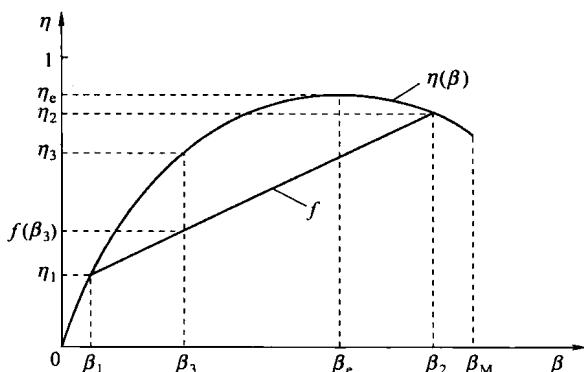


图 2-1 设备（或生物）的效率曲线 $\eta(\beta)$

$$f(\theta \times \beta_1 + (1 - \theta) \times \beta_2) = \theta \times \eta(\beta_1) + (1 - \theta) \times \eta(\beta_2)$$

从工程意义来讲， $\eta(\beta)$ 近似符合凹函数的特征，因为当 θ 取值在 $[0, 1]$ 区间时，满足下式：

$$\eta(\theta \times \beta_1 + (1 - \theta) \times \beta_2) \geq \theta \times \eta(\beta_1) + (1 - \theta) \times \eta(\beta_2)$$

β_3 位于 β_1 和 β_2 之间，所以有

$$\eta(\beta_3) \geq f(\beta_3)$$

效率曲线近似按凹函数处理，则效率函数的倒数近似为凸函数。

凹函数的二次导数小于 0，且只在最高点处导数等于 0，即

$$\eta(\beta)'' < 0$$

$$\eta(\beta_e)' = 0$$

$$\beta < \beta_e, \eta'(\beta) > 0$$

$$\beta > \beta_e, \eta'(\beta) < 0$$

假设效率函数的形式为

$$\eta(\beta) = a_0 + a_1\beta + a_2\beta^2 + a_3\beta^3 + \cdots$$

由于效率函数过 $(0, 0)$ 点，所以 $a_0 = 0$ 。所以效率函数可以变为以下形式：

$$\eta(\beta) = \beta(a_1 + a_2\beta + a_3\beta^2 + \cdots) = \beta f_0(\beta)$$

$$f_0(\beta) = a_1 + a_2\beta + a_3\beta^2 + \cdots = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \beta^{i-1}$$

如果效率函数用二阶函数近似代替，根据效率函数的形状和二阶导数为负，有

$$\eta(\beta) = a_1\beta + a_2\beta^2 = \beta(a_1 + a_2\beta) \geq 0$$

$$a_1 + a_2\beta > 0$$

$$a_1 > 0$$

$$a_2 < 0$$