

节能控制系统

任秀珍 王永初 著



中國石化出版社

节能控制系统

任秀珍 王永初 著

中国石化出版社

(京)新登字048号

内 容 提 要

节能控制是一门新技术,在生产过程中有广泛的应用。作者在总结国内外许多节能控制系统成功经验的基础上,结合自己多年的研究成果写成本书。本书重点阐述改变控制方式实现节能的途径,并列举许多节能控制应用的实例。其特点是:1.系统设计注意工艺特点与控制理论的运用;2.系统设计方法定量化;3.注意新型控制系统的推广与应用;4.有较多设计范例,包含着丰富的技巧性内容。

本书可供化工、石油、冶金、电站、轻工以及机械行业的有关工程技术人员和大专院校师生阅读。

节能控制系统

任秀珍 王永初 著

*

中国石化出版社出版发行

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码:100029)

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092毫米 32开本 13⁷/₈印张 310千字 印1—2500

1994年7月北京第1版 1994年7月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-487-7/TK·004 定价:11.50元

序

节能控制是当前控制系统研究的一个重要课题。节能控制涉及生产过程工艺、控制理论与自动化仪表诸多方面，作者根据多年从事系统设计、控制理论与工业自动化仪表的研究经验，并吸收国内外节能控制的某些成功经验，总结成《节能控制系统》一书。书中大量材料是引自作者自己的论文，有些是首次公开发表的，有较高的学术价值与应用价值。本书具有如下几方面的特点：（1）系统设计注意工艺特点与控制理论的运用；（2）系统设计方法的定量化；（3）注意新型控制系统的推广与应用；（4）设计范例较多，包含着丰富的技巧性内容。

我相信这本书的出版，对节能控制技术的研究和过程控制系统的发展，会有积极的促进作用。

周春晖

前 言

节能是我国一项能源政策。自从70年代初期世界能源产生危机以来,开发新能源、减少能源的消耗和损失成为人们普遍关注的一大课题。大量的工厂节能经验证明,在工艺革命的同时,采用节能的控制技术,可以减少大量无用能损失。哪些控制方法可以减少生产过程的能耗?其应用效果又是如何?这正是本书所要讨论的中心议题。节能控制是以节能为目标的控制,因此同一般的生产过程控制系统是有区别的,表现在如下几点:(1)响应速度慢,譬如通常的控制系统控制速度要求高,系统响应要求快,而为了节能目的,有些系统的要求正好相反,如精馏塔浮压调节,化工厂中间容器与贮槽的P-L均匀调节,都希望系统的响应比原控制对象慢得多,这就要求扩大系统的等效时间常数,这是目前系统设计工作的一个难题;(2)有意识地使线性系统非线性化,这就增加了系统分析的复杂性,如中和过程的分程调节,重油加热的具有抗积分饱和限的限幅调节,换热器引入乘、除部件的前馈调节等,都是为了节能要求提出的新课题;(3)发展了优化控制,在节能技术中发展了独特的控制方式,如卡边控制、慢速质量监督控制等;(4)广泛采用了低能耗的终端操作设备,如低 S 值调节阀或采用直接控制泵或压缩机动力的方式;(5)减少或消除谐振振荡,提高能量的利用率;(6)人工智能与专家系统在环境条件变化的情况下,具有显著的节能效果。我们可以在石化工业生产过程、工业锅

炉、钢材的热处理炉、电炉、药物或油漆远红外烘干炉、玻璃或陶瓷窑炉、精馏过程的加热器与换热器、制糖工业的蒸发器，连续铸锭过程的结晶器、印染或造纸烘干机的使用中见到节能控制技术的大量应用。

著者长期从事节能控制方法与系统的研究，曾以著者原名或以库亦啸为笔名发表一系列的论文与文章。近年来我们的研究工作又有了某些进展，为保持完整的学术体系，我们以自己的论著及研究成果为主体，结合国内外在此专题研究的成就，对其发展与应用作出评述，有些内容是本书首次发表的，本书还有部分内容是属于应用现代控制理论探讨节能控制的方法。浙江大学周春晖教授在百忙中审阅了本书，提出许多宝贵的修改意见，我们表示衷心的感谢。重庆大学周其鉴教授、成都电子科技大学周立峯教授对本书的原稿也曾提出一些修改意见，在此一并致谢。由于著者水平不高，错误在所难免，欢迎专家与读者批评指正。

著者于华侨大学

目 录

第一章 概述	1
一、节能与节能控制	2
(一) 工艺节能为主的指导思想	2
(二) 凡是仪表都是耗能的	3
(三) 关于节能控制	6
(四) 控制理论应用于节能系统设计	9
二、能量利用率的测定与计算	15
(一) 能量利用率的概念	15
(二) 能量损失	16
三、节能控制研究的重点对象	18
(一) 工业锅炉的节能控制	18
(二) 工业余热的利用与控制	19
四、控制是可以节能的	20
第二章 利用控制扩大对象时间常数的方法	24
一、扩大时间常数概念	24
(一) 反馈控制遇到的问题	24
(二) 补偿方法	26
(三) 等效时间常数的概念	30
二、扩大等效对象时间常数的几种控制方法	42
(一) 典型结构	42
(二) 流图的简化	43
(三) 补偿支路的选择	49
三、扩大时间常数方法的应用	58
(一) 浮压调节系统的设计分析	58
(二) P-L 调节系统的设计分析	71
第三章 线性系统的非线性化方法	81

一、典型的实例·····	81
二、非线性系统的设计方法·····	84
三、典型非线性环节的描述函数·····	91
(一) 继电器的描述函数·····	94
(二) 非线性比例器的描述函数·····	100
(三) 传动齿轮·····	106
四、描述函数方法的应用·····	108
(一) 改变分程调节方式的节能控制系统·····	108
(二) 阀位限幅的节能控制系统·····	121
五、加入乘除部件的非线性控制系统·····	126
六、切换型控制系统·····	138
第四章 改进控制终端部件的节能方法·····	141
一、低 S 值调节阀的应用·····	141
(一) 低 S 值调节阀的节能原理·····	141
(二) 流体在管道中流动的能量损失·····	142
(三) 调节阀的若干指标·····	143
(四) 低 S 值调节阀的选择·····	155
(五) 低 S 值在节能控制系统中的应用·····	164
二、直接控制动力能源·····	176
(一) 调节汽轮机的供给蒸汽流量·····	176
(二) 调整直流电动机的出轴转速·····	176
(三) 调整交流电动机的出轴转速·····	183
(四) 复合式控制流量的方法·····	187
第五章 质量监督控制的节能方法·····	190
一、质量定期监督的修改方法·····	190
(一) λ_m 检测系统·····	190
(二) 控制系统的组成·····	193
二、质量长期监督的在线慢速修改方法·····	194
(一) 氧量检测系统·····	196
(二) 氧含量与空气过剩率·····	198

(三) 燃/空比调节	200
(四) 引入氧量修正信号	207
三、安全与能效监控系统	209
(一) 火焰监督系统	209
(二) 事故诊断	212
(三) 能效诊断	228
第六章 卡边控制方法	237
一、单变量极值卡边系统	237
(一) 寻优原理	237
(二) 数值卡边方法在变换炉节能控制中的应用	239
二、条件边界值卡边系统	245
(一) 寻优原理	245
(二) 条件卡边方法在稳定塔节能控制中的作用	247
三、部分系统变量卡边系统	252
(一) 卡边原理	252
(二) 甲醇回收精馏塔卡边控制系统	253
四、多变量极值卡边系统	258
(一) 寻优原理	258
(二) 寻优方法在变换炉转化率控制中的应用	262
五、建立在规划基础上的卡边控制	266
(一) 线性规划与卡边控制	267
(二) 规划方法在合成炉耗损最小控制系统中的应用	270
六、终端时间卡边控制	275
(一) 生长过程的终端控制	275
(二) 衰减过程的终端控制	284
第七章 减少谐振能耗的控制系统	290
一、消除设备运行的条件振荡	291
(一) 单机组系统	291
(二) 多机组系统	293
(三) 系统的组态	298

二、消除系统间干涉作用引起的振荡	306
(一) 一种优化的多变量系统结构	306
(二) $D(s)$ 与 $F_D(s)$ 模块的构成与应用	308
(三) 设计举例——多侧线精馏塔馏出量控制系统	316
三、利用补偿方法提高系统的稳定度	323
(一) 外模补偿系统	323
(二) 内模补偿系统	329
四、利用逆阻尼器提高系统的响应速度	347
(一) 系统逆阻尼的有关概念	347
(二) 逆阻尼器的实现	350
(三) 逆阻尼器增加系统的响应速度	352
第八章 优化与自适应控制的节能系统	362
一、电动阀门节能操作的控制系统	363
(一) 控制对象的特性描述	363
(二) 直流电机端电压 U_m 的控制线路	365
(三) 节能控制回路电网的组成	366
二、双模式切换控制系统	372
(一) 开关-PID双模式控制系统	372
(二) 经验双模式控制系统	379
三、静态增益自适应控制系统	383
(一) 按流程顺序组成系统	383
(二) 具有自学习功能的系统	386
四、综合性自适应控制系统	388
(一) 换热器温度自适应控制系统	388
(二) 采用相关仪的PID分离型自适应控制系统	391
五、智能控制系统	397
(一) 智能PID调节器及其应用	398
(二) 理论控制模型的自适应化	414
名词索引	427
参考文献	429
后 记	432

第一章 概 述

降低生产过程的能耗是引人注目的一个课题。地球上的化石燃料（煤、石油、天然气）的消耗以指数曲线上升，全世界的总能耗1950年为2670百万吨标准煤当量，1968年为6304百万吨标准煤当量，1990年为15000百万吨标准煤当量。地球上的化石燃料贮量正在迅速地减少，这不能不引起人们的普遍忧虑，因此节能与开辟新能源将成为人类奋斗的一个新目标。广开新能源是一个努力的方向，如太阳能的利用。太阳每秒钟以光能的形式辐射出的能量相当于115亿吨的标准煤当量，进入地球的光能大约只有0.5%~1%被利用，这些被利用的光能主要是通过绿色植物的光合作用转化成生态系统的化学能，大部分的能量亦都是散射掉的。如果这些被利用的光能按“十分之一定律”（在食物链上，一个营养级至另一个营养级传递的能量大约只有十分之一被利用）计算，人类直接利用的太阳能不到太阳辐射到地球上光能的万分之一，因此太阳能具有广泛的应用前景。近几十年来核能、水力资源、风能等的利用也受到极大的重视。但是从目前的趋势看，新能源利用的增长率大大低于能源的消耗率，这就促使许多国家耗资巨大地研究代用能源，如日本1950年的代用油只占7.6%，而1970年增加至73.2%，并在生产企业中开展节能活动。我国对能源的充分重视，制定了“开发与节约并重，近期把节能放在优先地位，大力开展以节能为中心的技术改造和结构改革”的能源方针，根据某城市治

金、石化、建材等部门的统计，这些部门的余热资源达170万吨标准煤当量，加上减少燃烧损失，换热能量的有效利用，可以节省的能源是相当可观的，仅此一项就可以说明节能在全国具有广泛的应用前景。

一、节能与节能控制

(一) 工艺节能为主的指导思想

节能一般是指采用合理的工艺设备与合理的操作规程达到节能的效果，这就是人们通常所称的工艺节能。控制节能是指由自动化仪表与装置代替人工操作，减少人工操作过程中因疲劳引起的疏忽，或减少因工况变化频繁、造成人工操作的不及时性而达到的节能效果。著者认为就节能效果来说，前者是主要的，工艺的改变或新型设备的利用往往产生“技术革命”性质的作用，节能的效果有时会成倍提高能源的利用率。控制节能即属于“技术革新”的性质，控制系统的设计指标是由工艺确定的，其目标在于实现生产过程操作的仪表化或微处理机化，其节能效果主要属于工艺，控制能有百分之几的节能已属不错。我们这里要介绍的“节能控制”是介乎上述两者之间，是在工艺革命与控制革新之间，寻找工艺无法解决而由控制方法容易得到解决的一些新型控制方法，这些方法的实现可以使自动化仪表与装置的应用开辟新的应用途径，将工艺无法节省的能量继续节省下来，因此“节能控制技术”对国计民生无疑是有重要的作用。

我们强调工艺的作用，实际上是强调仪表的应用同工艺改革密切结合，国内大量的例子证明这条道路是正确的。例如上海的某仪表厂为配合改革纺织物整理工艺——PZ-160型泡沫整理，设计成套的气液自动配比装置，保证新工艺的

及时投入使用，仅这项改革就提高产量30%~40%，节电13.84万度/年，节煤160吨/年，节省树脂3%~5%。这说明工艺改造需要仪表作支援，同样，新型仪表与节能方法的推广也需要工艺的密切配合。例如某厂的精馏塔内回流测量系统是在工艺的配合下获得重大的节能效果。以前炼油厂精馏塔都是采用稳定外回流的办法来稳定内回流的，因此对塔内液相流量往往不够了解，实际上都偏小。某厂采用隔离两块塔板，将其流动介质通过塔外联系，在联系的管道上直接安装节流式流量计，发现内回流量太小，因此在工艺的配合下降低再沸器的供热量，约节省了近1/3的热量，又如某炼油厂采用低 S 值调节阀，在动力部门的配合下取得显著的节能效果。原来泵电机的功率据统计有50%~65%的功率消耗在调节阀上，如塔顶回流调节阀 S 值由0.42降低至0.2时，实际节能11kW/h。如果全厂532台调节阀都采用低 S 值，估计节能800~1000kW/h，全年计算则是一个相当可观的数值。假如此项工作没有工艺的配合，压缩机和泵的动力可以节省的电能是无法收回的。

工艺对象同仪表的密切关系已越来越受到人们的重视。离开控制对象就没有系统，这个结论愈来愈为大家所接受。

（二）凡是仪表都是耗能的

最近关于“节能仪表”与“节能控制”的说法颇为盛行，著者认为这种提法是不科学的，有些仪表可以用于能源计量（如热值仪、流量表、电表及水表等），但就仪表本身而论都是耗能的，仪表在动作时必须要有能源。能量是某一物质作功能力的一个度量，它具有两种形式即动能与势能，动能指正在作功的能量，势能指的是可以作功但又尚未进行作功的能量，正像人类维持生命活动需要能量一样，仪器仪表

投入运行后同样需要能量，不过由于人们的聪明才智，将仪器仪表消耗的能量降低到一个很低的水平而已。譬如用低 S 值调节阀代替普通 S 值调节阀可以减少机泵房能耗损失1/3。许多用户安装了蒸汽流量计、水表或电表，加强了管理，以便减少能源浪费，但又不能说这些仪表是节能仪表。热力学第一定律告诉我们：能量不能消灭或凭空产生，只能在一定的条件下按一定的比例关系转化。热力学第二定律告诉我们：在一个封闭的系统中，一切过程伴随着能量的改变，在能量的转化过程中，只有其中属于自由能的部分可以作功，而其中另一部分称为熵的是不能作功的，这部分不能作功的能量以热的形式消散。封闭系统的自由能按能级的高低由高能级流向低能级，直至最后完全消失，是一个不可逆的过程。一台仪表或一台装置本身不是一个封闭的系统，需要依靠外界供入能源维持使之处于一个较高的自由能的平衡状态。理解热力学这些定律，我们就容易理解仪器与仪表的本质是耗能的，从而根据仪表主要的耗能特点采取相应的对策减少其能耗，这才是仪表工作者寻找仪表节能的真正目标。例如我国北方地区冬季气温较低，仪表管道都需要采取防冻措施，常规的做法是利用蒸汽伴热，大连某石油厂采用一种自伴热和内伴热的方法，每年节省2.5万吨的低压加热蒸汽。所谓自伴热是将取压管道与隔离器贴紧工艺管道，依靠从工艺管道获取的能量不使取压介质凝冻；所谓内伴热是采用一种有内插芯管的隔离器（如图1-1所示），测量介质由引压短管及芯管进入隔离器的顶部，隔离器大部分空间充满隔离液（隔离液一般有两个作用：即防腐与防冻，如炼油厂的隔离液差不多是用相对密度为1.068~1.106的乙二醇水溶液或相对密度为1.153~1.190的甘油水溶液），因此测量热介质可

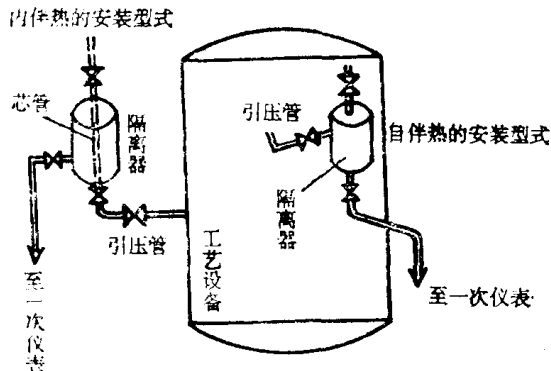


图 1-1 测量仪表节能的伴热方式

以将隔离液加热，冷凝后的介质由芯管管壁返回工艺设备（或管道）。

仪表是耗能的概念对我们从事控制系统的设计是有意义的。譬如一个热电阻插入管道会增加管道的局部阻力，一个节流装置装入管道，使流体形成局部的收缩与膨胀，会白白消耗许多能量。正因为这样，从全局的观点出发，减少管道

中不必要的检测点与采用低压损失的节流装置都是有意义的。值得提出的是作为能量监督的仪表近年来已不单纯只有简单的电表、水表了，发展了像热值仪、窝比计、热流计等。图1-2表示热流计的工作原理：热流计由温差传感器、信号转换器与表头组成，温差传感器是由热电堆组成，面对热流的一面为一极，反面为另一极，热流密度 q 同测量温差的关系为

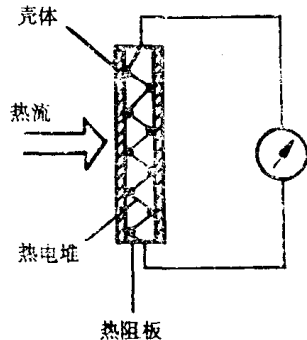


图 1-2 热流计的工作原理说明

$$q = \left[\frac{\lambda}{D} + f(D) \right] \Delta T \quad (\text{J/m}^2 \cdot \text{h})$$

式中， λ 为热阻板的传热系数， $\text{J/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ， D 为热阻板的厚度， m ； ΔT 为热阻板正、反面的温差， $^\circ\text{C}$ ； $f(D)$ 为与热流干扰有关的常数， $\text{J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 。热流计已广泛应用于管线散热大小的检查，及时发现管线的保温与保冷的效果，对于热管道或制冷管道都有重要的经济价值。

(三) 关于节能控制^{[1]~[3]}

我们这里将比工艺要求更合理更省能的一类控制称为节能控制，这里我们以连续加热为例说明。图1-3的实线为生产过程要求的典型升温、保温及降温曲线，点划线为某些工况的实际操作升温线，虚线为控制系统改进的升温曲线。根

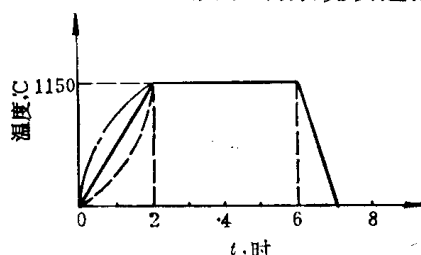


图 1-3 典型加热曲线

据系统学知道，被控制对象都具有一定惯性，这种惯性变化的规律可以用指数函数来描述。生态学及社会学中许多实例如细菌繁殖、人口自然增长、核能衰减、国家人均产值、科学技术进步等等都符合指数变化规律，因此指数规律是一种比较普遍的现象。如果将此法引入加热体制可以减少大量的能耗，虚线（指数变化）与时间轴所围成面积是最小的，这是节能的一个重要依据。另外还可以通过必要的计算加以验证。

连续加热炉的热损失有六个方面，下述仅说明其中的几项：

1) 炉门及炉床上冰箱带走的热损失

$$Q_q = CW(\theta_w^2 - \theta_w^1) \quad (W) \quad (1-1)$$

式中， C 为水的比热容， J/kg ； W 为冷却水流量， kg/h ； $(\theta_w^2 - \theta_w^1)$ 为冷却后与冷却前的水温差， $^{\circ}C$ 。在升温阶段，由于整体温度降低导致 $(\theta_w^2 - \theta_w^1)$ 的减少，所以冷却水带走的热量同样减少。

2) 汽化冷却带走的热损失

连续加热炉炉底运动部分一般采用汽化冷却，其带走的热损失为

$$Q_q = Q_s[(i_v - i_s^1)A + (i_s^2 - i_s^1)(1-A)] \quad (1-2a)$$

式中， Q_s 为蒸汽的蒸发量，公斤； i_v 为蒸汽出汽包时的热焓， J/kg ； i_s^2 与 i_s^1 为进、出汽包的水的热焓， J/kg ； A 为蒸汽的干度， $\%$ 。蒸汽的干度 A 由下式确定

$$L_{vs} = LA + L_s(1-A) \quad (1-2b)$$

其中， L_{vs} 为蒸汽冷凝液的导电率； L 为蒸馏水的导电率； L_s 为汽包上水的导电率。由于 Q_s 与炉内温度差不多成正比，因此炉里温度越低， Q_q 亦越低。

3) 炉围散热损失

$$Q_q = \alpha(\theta_r - \theta_e)FK \quad (1-3)$$

式中， Q_q 表示炉围散热量， J/h ； α 为结构系数，一般为16~17； θ_r 与 θ_e 为炉围温度与环境温度， $^{\circ}C$ ； F 为散热面积， m^2 ； K 为散热系数， $J/m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C$ 。由式(1-3)可以看出在升温阶段，由于 θ_r 降低，在这段时间内的 Q_q 亦降低。

4) 热辐射损失

$$Q_q = 19.52 \left(\frac{\theta_t}{100} \right)^4 F \phi (1 - \psi) \quad (1-4)$$