

李遵基科技论文集

郭预衡题 

(1986~1996)

天津科学技术出版社

李遵基科技论文集

查克明

九六年七月

责任编辑：刘 彤

特约编辑：苑兰芝

李遵基科技论文集

(1986~1996)

*

天津科学技术出版社出版、发行

天津市张自忠路 189 号 邮编:300020

河北供销印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 15.75 字数 368 000

1996 年 11 月第 1 版

1996 年 11 月第 1 次印刷

印数：1—1 000

ISBN 7-5308-2231-4

TH·49 定价:36.00 元

内 容 提 要

本论文集收录了自动控制领域中的理论及实践方面的论文 43 篇,分协调控制、全程控制、模糊控制、变频控制、自整定预测控制和其它控制等六部分。文集重点讨论了热工生产过程中具有严重耦合、大时延及惯性系统的自动控制。在理论方面,文集不仅涉及到经典的 PID 控制,而且还涉及到预报控制、自适应控制、模糊控制和状态空间控制等现代新兴的控制理论。在实践方面,论文集中的对协调控制、给水全程控制、主汽温控制、球磨机制粉控制、变频调速系统等做了充分的讨论。文集集中反映了电力工业生产过程自动化领域的新理论、新方法、新策略和新技术,是一本有关火电厂热工过程控制的专业文献。

本文集可作为有关院校、科研、设计、运行等单位的专业资料,对从事于热工自动控制系统研究、设计、运行、改造的科技工作者及研究生也是一本有价值的参考书。

序

《李遵基科技论文集》出版了，一位大学的教授把自己近十年来撰写并在国内外杂志上公开发表的论文收集成册，予以出版，这在国内还不多见，这件事本身充分说明，科技工作者不仅有能力写出高水平的论文，而且也有能力把知识推向社会，向社会传播，尽快地转化成生产力，为社会主义的物质文明建设作出贡献，我为此而感到高兴和欣慰。

论文集以李遵基教授的名字命名，但实际上也是集体智慧的结晶，这些论文离不开李遵基教授课题组成员、他辅导的几十名研究生以及其他合作者的艰苦工作和辛勤劳动。其中许多论文都是从科研成果中总结提炼出来的，是实践的理性化，而任何一个科技成果都不可能一个人完成。因此，在这个角度上看，论文集是一部集体的创作。

《李遵基论文集》分协调控制篇、全程控制篇、模糊控制篇、变频控制篇、自整定预测控制篇和其他控制篇几部分，论文集中反映了电力工业生产过程自动化领域的新理论、新方法、新策略和新技术。

协调控制是发电机组中的一种新的控制方法，80年代中期随着计算机分散控制系统的发展而逐步完善起来。论文集这一篇中的文章，不仅在理论上有所突破，而且能在实践上得到应用和验证，特别是供热机组的协调控制的研究成果在世界自控联（IFAC）年会上发表后受到了国外同行的重视，正因为如此，李遵基教授课题组研究的供热机组协调控制和数字式协调控制系统分别获得了1989年和1992年电力部科技进步二等奖。他们是受之无愧的。

全程控制是发电机组控制方式发展的必然趋势，目前国内仅限于锅炉给水控制系统中的应用，而作者早在1988年就写出了“给水全程控制的理论与实践”论文，系统地总结了给水全程控制系统的特点、类型、结构和组成，并提出了设计方法，同时在国产200MW、300MW机组中进行了实践，取得了成功，对全程控制理论和技术的发展起到了推动和促进作用。

变频控制是节能效益十分显著的新技术，作者为国内首次在国产机组的锅炉给粉中应用变频控制取得成功，成果还通过了电力部科技司组织的专家鉴定，目前已在各类机组中得到广泛应用。这标志着我国锅炉给粉控制中控制手段的新转折，它解决了滑差控制中很多令人烦恼的问题。可以预料，在不久的将来，这项成果不仅在锅炉给粉中会得到更大规模的应用，而且在送引风机，给水泵等高压设备的控制中具有广阔的应用前景。

模糊控制是近年来崛起的新的控制策略，它对非线性、大时延、纯滞后等被控制对象有着十分有效的控制效果，作者在理论研究和计算机仿真的基础上，在电厂中储式球磨机的控制中进行了实践，不仅解决了球磨机三大系统无法投入自动运行的难题，而且使球磨机运行在最佳经济负荷下。应该说，这是一大很好的成果。

听过李遵基教授讲课的人，无不钦佩他丰实的词汇，生动的语言和循循善诱的教学方法，这与他的生活经历是分不开的。60年代后期他在电站建设的最基层劳动锻炼，后来又当过电气技术员，对现场的情况从拧一个个螺丝到整个系统调试都有着亲身的体会。70年代末期，他到高校从事教学和科研工作。因此，在他的文章中充分体现了他重视实践、重视应用的风格。他的论文写得深入浅出、有血有肉，这是时事造就的结果。

论文集也还存在着不足之处。我衷心希望读者同行相互探讨，共同提高，殷切地期望着有更多更好的论文集出现！

王平译

1996.11.7

目 次

●协调控制篇●

对协调控制系统中几种锅炉主控前馈信号的分析	(2)
200MW 供热单元机组协调控制系统	(6)
单元机组数字式协调控制系统	(14)
数字式协调控制理论与实践	(19)
用“SPEC Micro”实现 200MW 机组协调控制	(27)
苏制 210MW 机组协调控制系统分析	(33)
SPEC200Micro 自整定功能的应用	(40)

●全程控制篇●

给水全程控制理论与实践	(46)
给水全程控制理论与实践(续).....	(51)
用 SPEC200 仪表实现给水全程控制	(56)
500MW 机组给水全程控制系统.....	(61)
CLC 单回路调节器在给水全程控制中的应用	(69)
TCS6382 双回路智能控制器在锅炉给水全程控制中的应用	(71)
125MW 机组给水全程控制系统.....	(77)

●模糊控制篇●

中间储仓式制粉系统球磨机模糊控制理论与实践	(82)
中储式球磨机制粉系统模糊控制算法研究	(89)
模糊控制理论在球磨机制粉系统中的应用	(94)
一种新型模糊控制系统及其仿真研究	(106)
一种新型自学习模糊控制器	(112)
参数自整定多变量模糊解耦控制器	(120)
基于模糊逻辑的自整定方法及其应用研究	(128)
国产 200MW 机组制粉系统微机自动控制研究	(135)

●变频控制篇●

变频调速在电厂锅炉给粉控制中的应用	(142)
采用 1305 型变频器实现锅炉给粉变频控制	(147)
1305 型变频器在锅炉给粉系统中的应用	(150)
直接能量平衡式主汽压力控制系统	(156)
直吹式锅炉主汽压力调节系统研究及应用	(160)

●自整定预测控制篇●

自整定调节器的应用研究	(166)
热工对象时变系统的自校正预报	(172)
一种多步自校正预报方法	(176)
自适应 Smith 预估控制器的研究与应用	(181)
主汽温自适应预估控制方法的研究	(185)
用微机整定串级系统调节器的参数	(189)
状态观测器主汽温控制系统的设计与应用	(196)

●其他控制篇●

热工控制系统中的跟踪技术	(202)
用 T640 回路控制器对一种再热汽温控制系统的实现	(207)
苏制脉冲调节器特性分析及系统应用	(211)
电厂系统逻辑图键盘编辑系统设计与实现	(215)
一种碎煤机实时监控装置研究	(220)
500MW 机组主蒸汽温度的新型控制方法	(223)
500MW 机组热应力监控系统分析	(228)
ELIN 公司电除尘控制系统分析与研究	(235)
电除尘器在线监控系统的开发与研究	(239)
书名题写	郭预衡
扉面题字	查克明

协 调 控 制 篇

对协调控制系统中 几种锅炉主控前馈信号的分析

1. 问题的提出

目前,大多数单元机组控制系统的结构是以炉跟机方式为基础的。为了使机炉更好地协调动作,以提高负荷适应性和减少节流压力动态偏差,在锅炉主控系统中加入了前馈信号,该信号的形式主要有3种:

(1) 在协调控制系统出现初期,锅炉主控前馈信号为汽机第一级压力 P_1 (见图1)。

(2) 目前我国技术引进的300MW及600MW单元机组上采用的锅炉主控前馈信号,为美国FOXBORO公司推出的 $P_1[1+K(P_{TS}-P_T)]$, 还附加了 $f(t)$ 及 $f(x)$ 两个环节 (见图2)。其中, P_1 为汽机第一级压力,可代表进入汽机的蒸汽流量; P_T 为节流压力; P_{TS} 为节流压力定值; K 为系数。

(3) 目前国内外应用较多的、美国L&N公司推出的锅炉主控前馈信号为 $P_1 P_{TS} / P_T$ 。

本文对上述3种系统作以下分析比较。

2 以 P_1 作为锅炉主控前馈信号

因为 P_1 代表进入汽机的主蒸汽流量,故它与汽机输入能量和机组负荷都成正比。同时,当汽机调节门开度变化时,即从汽机侧改变机组负荷时, P_1 对汽机调节门开度变化的极快。此外,以 P_1 作为锅炉主控的前馈信号,可以较直接地去增减锅炉输入能量。因此,在以炉跟机为基础的协调控制系统中, P_1 作为机炉能量平衡的主要联络信号,具有直接和及时的特点。用 P_1 作为前馈信号,对提高机组负荷跟踪的快速性和减少节流压力动态偏差,都有较好的作用。

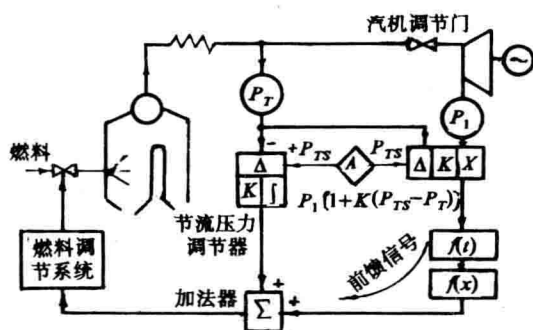


图1 只用 P_1 为前馈信号的

锅炉主控原理图

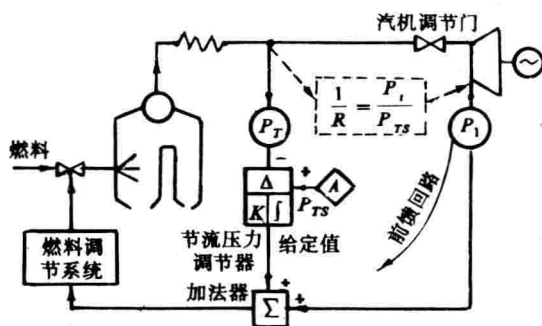


图2 应用 $P_1[1+K(P_{TS}-P_T)]$ 等为前馈

信号的锅炉主控原理图

但是, 当用 P_1 作为前馈信号后, 就使系统又增加了一个正反馈回路。该正反馈回路表现在图 1 外圈实线各环节形成的回路中。假如 P_T 由于某种原因增大了, 就会使进入汽机的蒸汽流量增加, 也使 P_1 增大; 而 P_1 信号的增大则会通过前馈信号部分, 使进入锅炉的燃料量增加, 其结果又会使 P_T 增大。总之, 当 P_T 增大后, 经上述闭路的传递又使 P_T 增大的过程, 就是正反馈作用的体现。

在单元机组中, 若用阻力系数 R 来代表汽机第一级压力 P_1 与节流压力 P_T 之间的关系, 则图 1 所示系统中 P_T (压力) 对 P_1 (流量) 的传递系数为 $1/R$, 其数值等于当时机组的蒸汽流量与节流压力调节器所保持的节流压力值 (即定值 P_{TS}) 之商。

从机组实际运行工况中不难看出, R 值是随机组负荷变化而变化的。在机组负荷为零 (即 $P_1 \approx 0$) 时, 汽机调节门接近全关, $R \rightarrow \infty$; 而在机组负荷达到最大 (即 $P_1 = P_{1\max}$) 时, 汽机调节门开到较大位置, $R = R_{\min}$ (图 3)。

上述正反馈作用, 相当于等值地增加了一个虚线所示的环节 (见图 1), 它是一个与 PI 调节器相并联的环节。为了看得更清楚, 将图 1 中各信号作用的关系用等效框图 (见图 4) 来表示。

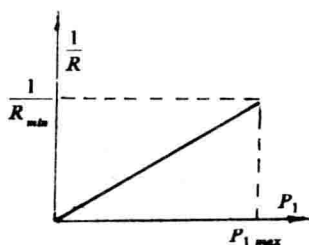


图 3 $1/R$ 与机组负荷的关系

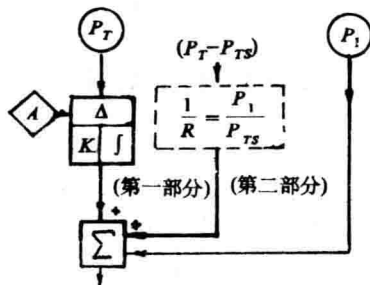


图 4 图 1 系统中各信号作用等效框图

图 4 表明, P_1 的作用可分解为两部分: 单纯的 P_1 作用和由它所引起的正反馈作用。其中, 正反馈作用的输入信号为 $(P_T - P_{TS})$, 这是因为只有在节流压力 P_T 值偏离于定值 P_{TS} 时, 才会出现这种正反馈作用。图 4 中虚线所示的, 由于正反馈作用产生的附加部分, 等值于使原来的 PI 调节器又增加了一个并联的比例环节, 而且由于 $1/R$ 值是随机组负荷变化而变化的, 故在不同负荷情况下, 原来的调节器必须有不同的最佳整定参数, 才能使机组控制系统调节品质最佳。这就给该 PI 调节器的参数整定带来困难, 涉及到应用变整定参数调节器的问题。因此, 只用 P_1 作为前馈信号时, 会给协调控制系统带来不良的影响。

3 以 $P_1[1+K(P_{TS}-P_T)]$ 等作为锅炉主控前馈信号

从图 2 可以看到, $P_1[1+K(P_{TS}-P_T)]$ 信号可分为 P_1 和 $KP_1(P_{TS}-P_T)$ 两个部分, 而 P_1 信号部分又等值于 P_1 的作用和 P_1 引起的正反馈作用两个部分 (见图 4)。这样, 该前馈信号可看成由 3 部分组成, 如图 5 (特殊点为 $K=1/P_{TS}$) 所示。

由图 5 可见, 前馈信号的第一部分是正反馈作用部分, 需要强调指出, 这部分起作用的信号是 $(P_T - P_{TS})$, 而该信号的作用方向, 由于当 P_T 大于 P_{TS} 时会使锅炉指令增大,

故在图 5 加法器处该信号作用方向应为正。第二部分是单纯的 P_1 作用部分。第三部分为 $K=1/P_{TS}$ 时的 $[P_1K(P_{TS}-P_T)]$ 项。从图 5 中不难看出前馈信号中的第一和第三部分是相互抵消的, 即当 $K=1/P_{TS}$ 时, $[P_1K(P_{TS}-P_T)]$ 项是能完全抵消正反馈作用的。

当 $K>1/P_{TS}$ 时, $[P_1K(P_{TS}-P_T)]$ 项中 $K>1/P_{TS}$ 的部分有何作用呢? 从机炉能量供求关系看, $P_T>P_{TS}$ 是由于锅炉供出能量大于汽机需求能量, 从而导致锅炉蓄热量增加的结果。因此当 $P_T>P_{TS}$ 时, 应适当减少锅炉的燃料量和风量, 以促使机炉能量达到新的平衡。同理, 当 $P_T<P_{TS}$ 时, 则应适当增加锅炉燃料量和风量。 $[P_1K(P_{TS}-P_T)]$ 项中 $K>1/P_{TS}$ 的部分, 就是为加强动态能量平衡的作用而设置的 (静态能量平衡关系由节流压力调节器最后完成)。

图 2 中函数发生器 $f(x)$ 的作用, 是将前馈信号转化成为数值上与燃料、风量标度相匹配的信号。超前滞后环节 $f(t)$ 的传递函数为:

$$W(s) = \frac{KT_1s + 1}{T_2s + 1}$$

经简单变换后, 得:

$$W(s) = \frac{(KT_1/T_2)T_2s}{T_2s + 1} + \frac{1}{T_2s + 1}$$

$f(t)$ 环节的输入输出关系如图 6 所示。

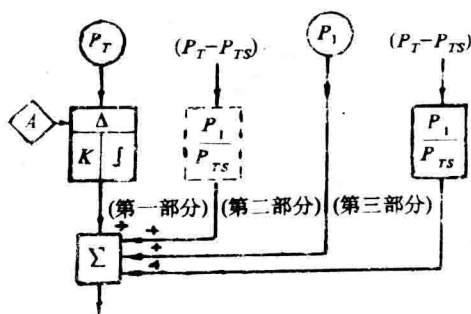


图 5 图 2 系统中 $K=1/P_{TS}$ 时的信号作用等效框图

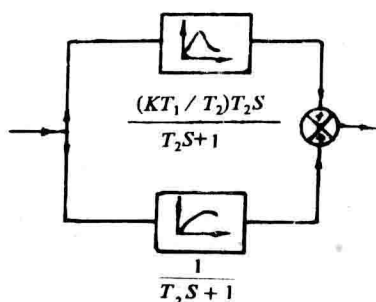


图 6 $f(t)$ 环节等效框图

由图 6 可见, $f(t)$ 由一个放大倍数为 KT_1/T_2 、时间常数为 T_2 的实际微分环节与惯性环节 $1/(T_2s+1)$ 相加组成。微分环节在汽机负荷变化的初始阶段起作用, 它通过前馈信号多给予锅炉一定的能量, 以加速锅炉能量输出。惯性环节则有使 $f(t)$ 输出曲线峰值前后移动的功能, 通过适当调整 $f(t)$ 的各个参数, 可以使前馈信号有较合适的动态性能。

4 以 P_1P_{TS}/P_T 作为锅炉主控前馈信号

在节流压力 P_T 瞬变过程中, 由于此时汽机阻力系数 $R=P_T/P_1$, 故前馈信号为:

$$\frac{P_1P_{TS}}{P_T} = \frac{1}{R}P_{TS}$$

式中：节流压力定值 P_{TS} 是有单位的常数，它使 $P_1 P_{TS} / P_T$ 的单位与 P_1 的单位相同。由上式可见，在节流压力瞬变过程中，前馈信号 $P_1 P_{TS} / P_T$ 起着汽机阻力系数倒数的作用。由于汽机阻力系数本身只与汽机调节门开度和汽机通流部分的结构特性有关，故它不受 P_T 变化的影响，也即无正反馈作用，不会出现只用 P_1 作为前馈信号时产生的不良影响。

节流压力 P_T 处于静态时， $P_T = P_{TS}$ ，且两者单位相同，故可抵消。因此，在静态时，前馈信号为：

$$\frac{P_1 P_{TS}}{P_T} = P_1$$

5 3 种信号的比较

(1) 只用 P_1 作为锅炉主控前馈信号时，会出现正反馈问题，给节流压力调节器的最佳整定参数的选择带来困难。为此，FOXBORO 公司采取了直接补偿正反馈作用的办法，L&N 公司则采用了只与汽机阻力系数有关的锅炉主控前馈信号。

(2) 在节流压力 P_T 瞬变过程结束后，3 种前馈信号都是 P_1 ，这是它们的共同点。这也从另一个角度说明了 P_1 是公认的性能较好的锅炉主控前馈信号。此外，后两种前馈信号都是由 3 个信号输入和一个综合组件形成，其繁简程度类似。

(3) FOXBORO 公司采用的 $f(x)$ 环节，在其它形式的锅炉主控前馈信号中，也可附加应用。

(本文发表于《电力技术》1986 年第 9 期，1988 年获河北省电机工程学会二等奖)

合作者 张贻琛)

200MW 供热单元机组协调控制系统

摘 要 阐述了 200MW 供热单元机组三输入三输出控制对象的协调控制系统基本方案的原理。对实际负荷指令的形成, 锅炉汽机主控器的组成及它们的工程实现作了较详细的说明。着重解决了 4 个方面的问题: ①协调控制系统使电热负荷变化互不干扰。②在不同供热负荷条件下, 电负荷允许变化范围及上下限问题。③锅炉主控前馈信号的分析与实现。④机组局部故障自动处理功能的实现。

1 控制对象及控制装置概况

本文介绍的协调控制系统是为北京石景山热电厂供热单元机组研制设计的。所用燃煤锅炉为哈尔滨锅炉厂产品, 型号是 HG670/140。供热汽机为哈尔滨汽轮机厂产品, 型号是 C145N200-130/535/535/2F710, 供热抽汽压力为 4Pa。

控制系统中所采用的液压控制设备, 由哈尔滨汽轮机厂供给。SPEC200 型电气控制设备, 由中美合营的 FOXBORO 公司供给。辅助支持控制系统中, 无喷燃器自动切换及汽机调节阀自动切换功能。

图 1 表示了机组在供热供电工况下协调控制系统框图, 从图中可以看出它包括三部分: 锅炉控制部分, 汽机控制部分和电负荷管理控制系统部分。前两部分是协调控制系统的基本部分, 第三部分又可分为控制方式切换逻辑系统和实际负荷指令形成两部分。协调控制系统的不少功能是由第三部分实现的。

2 单元机组对协调控制系统的功能要求

2.1 机组在纯供电负荷工况下对协调控制系统的功能要求

- (1) 电负荷适应性好。
- (2) 节流压力变化幅度小。
- (3) 变化机组负荷可在控制室进行, 也可按电网调度指令 (ADS) 调动。
- (4) 应有机组不超越最大最小安全负荷范围的安全保护措施。
- (5) 根据机组运行的不同要求, 能进行“控制方式”的切换, 切换过程应是无平衡、无扰动的。
- (6) 机组局部故障时应有自动增、降或保持机组负荷措施, 以避免因局部故障而引起机组全停等重大事故。
- (7) 有必要的显示仪表, 指导运行人员监视机组及自动装置运行。

本文为在印度召开的国际自动控制协会(IFAC)电站自动化及装置研讨会会议论文, 宣读并收入论文集。

2.2 机组在供热供电工况下对协调控制系统的功能要求

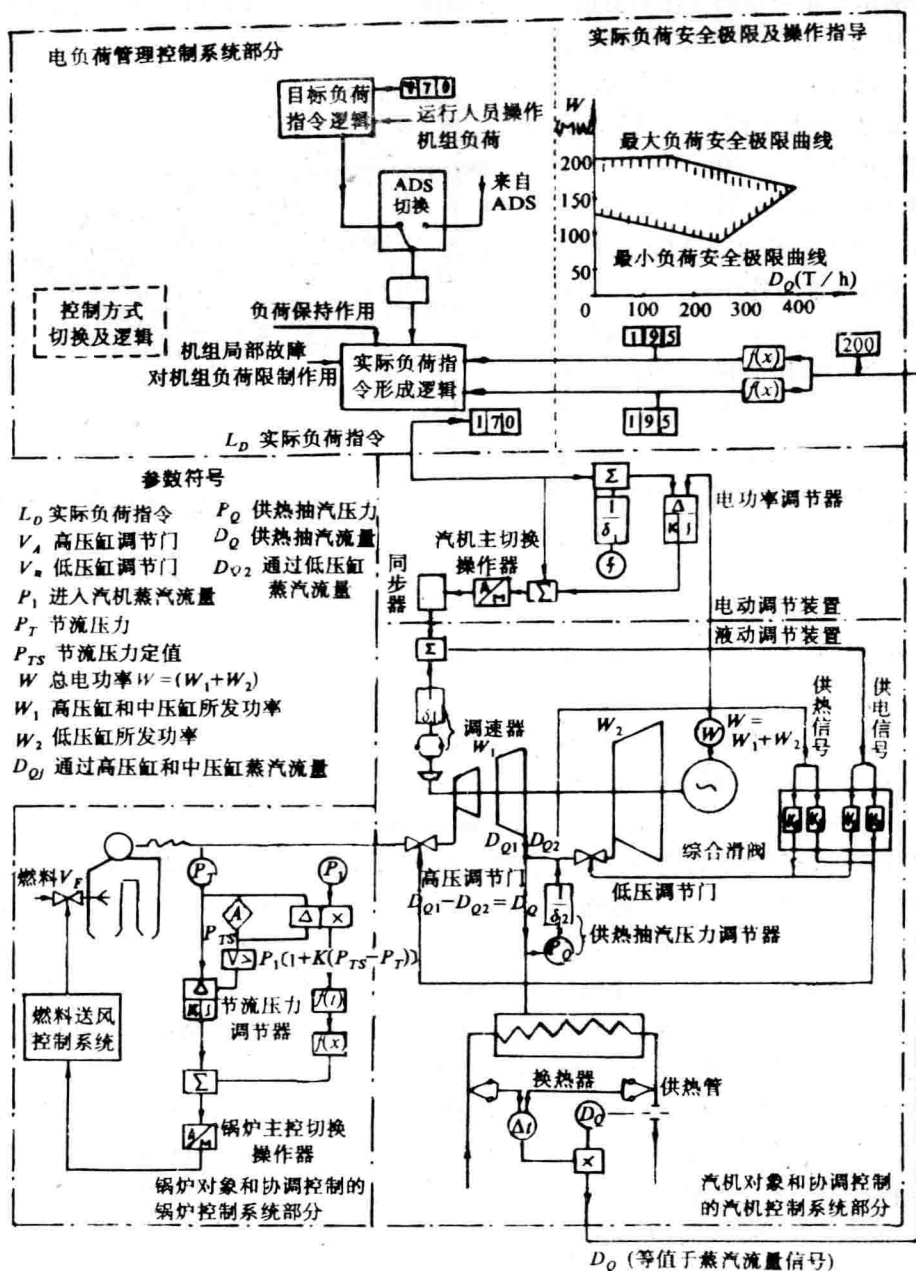


图1 供热机组协调控制系统总体结构原理图（供热供电工况）

除满足上述纯供电负荷时的功能要求外，还必须满足以下特殊要求：

- (1) 应满足保持供热参数的要求。这里要维持的供热参数主要是指供热抽气压力 P_Q 为规定值。
- (2) 当供热负荷需要变化时，协调控制系统应使供电负荷参数不受干扰。
- (3) 当供电负荷变化时，协调控制系统应使供热参数不受干扰。

(4) 这里应强调的是在机组同时供热供电条件下, 电负荷最高最低安全极限及允许变化范围是随供热负荷量的变化而变化的。该机组的这种关系曲线如图 2 所示。变化曲线是根据单元机组的有关特性计算得到的。

从图 2 中可以看出, 不同供热负荷时电负荷高低限及变化范围均不相等。例如, 当供热抽汽量为 300t/h 时, 机组带电负荷上限约为 180MW , 下限约为 120MW , 变化范围为 60MW 。而在 450t/h 供热汽量的特殊点, 机组只能带 160MW 电负荷, 而且, 没有变化范围。因此, 应根据图 2 特性曲线, 设计电负荷上限、下限允许变化范围的显示和自动限制装置, 以帮助电网调度员及机组值班人员监视运行和指导操作。这对机组的安全运行具有十分重要的意义。

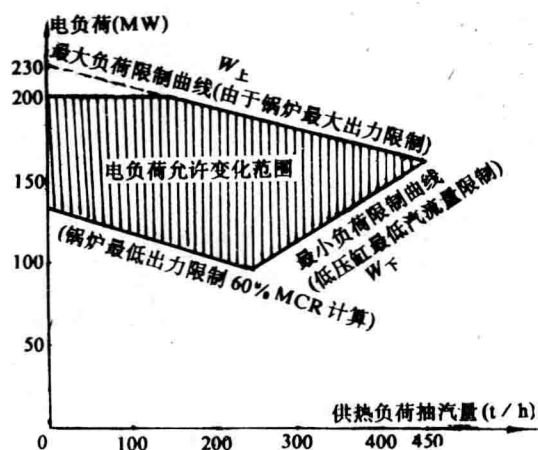


图 2 单元机组在不同热负荷条件下允许电负荷变化曲线

3 供热机组协调控制系统基本方案

如图 3 所示, 这是从图 1 中摘出的基本部分。系统被控制对象的基本被调量有: W 、 P_T 、 P_Q , 基本调节量 (调节机构开度) 有 V_F 、 V_A 和 V_B (这些符号的物理意义表示在图 1 及图 3 中)。这是一个互相牵连的三输入三输出被控制对象。

为了保证有较好的电负荷适应性, 选择了汽机基本锅炉跟随的协调控制方案。即由汽机担负电功率 W 的控制任务 (这部分表示在图 3 右侧), 由锅炉担负节流压力 P_T 的控制任务 (这部分表示在图 3 左侧)。供热机组特有的抽汽压力控制部分表示在图 3 的下方。

为了清楚地表达该 3×3 对象控制系统的设计思想, 把图 3 画成图 4 的形式 (图 4 中未表示前馈信号), 首先设计图 4 下部虚框内热汽机 2×2 对象的自治系统, 即使调节器 T_2 输出 (供电信号) 只影响被控制量 W , 对 P_Q 无影响; 而 T_3 调节输出 (供热信号) 只影响被控制量 P_Q , 对 W 无影响。然后, 再设计图 4 上部虚框内 2×2 对象的控制系统, 这是一个正常的机炉协调控制系统。这两个 2×2 系统之间又是互相关联的, 但由于供热机组的结构特点, 决定了燃料量对 P_Q 的影响和供热抽汽量对 P_T 的影响是微弱的, 故可把一个 3×3 的难以设计的复杂系统按两个 2×2 系统进行设计。

供热汽机自治调节系统的原理可从图 3 中看出, 电功率调节器的输出 (汽机的供电信号) 和抽汽压力调节器的输出 (汽机的供热信号) 通过 K_1 、 K_2 、 K_3 及 $(-K_4)$ 比例环节, (其中 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 均为正值) 分别去控制汽机调节门 V_A 及 V_B 。供电信号通过 K_1 和 K_2 的目的, 是为了使供电负荷变化时热负荷参数不受干扰。供热信号通过 K_3 及 $(-K_4)$ 的目的, 是为了使供热负荷变化时, 电负荷参数不受干扰。这种互不干扰功能, 是利用汽机电热负荷的不同特点, 即 $W = W_1 + W_2$; $D_Q = D_{Q1} - D_{Q2}$ 而设计的。其中, W 为

机组总功率, W_1 为高中压缸电功率, W_2 为低压缸电功率。 D_Q 为总供热蒸汽量, D_{Q1} 为通过高、中压缸的蒸汽量, D_{Q2} 为通过低压缸的蒸汽量。

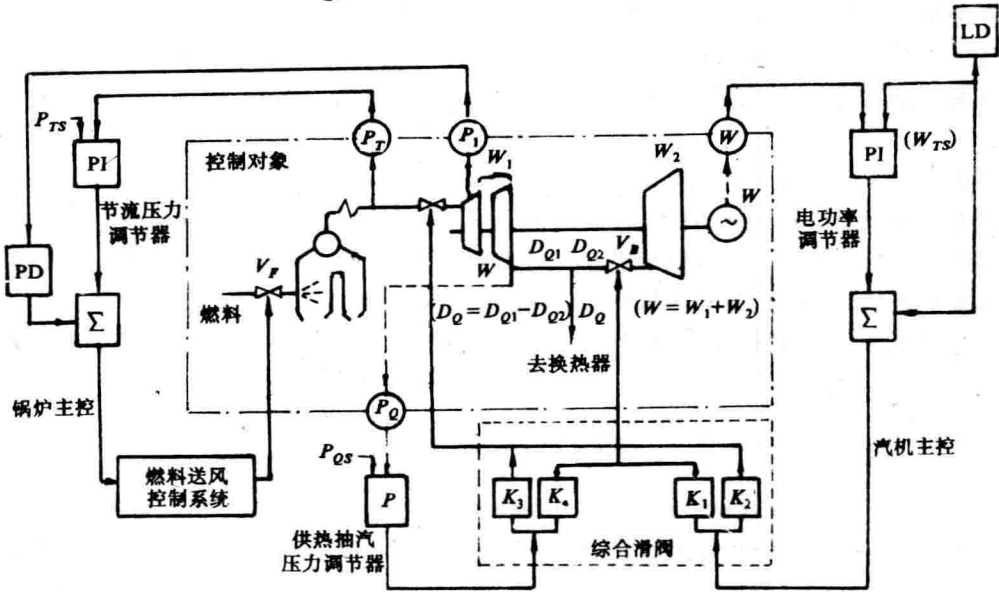


图3 在供电供热条件下协调控制系统基本方案

供电信号通过的两个比例环节 K_1 和 K_2 的数值可以适当选择, 使供电信号变化时引起的蒸汽流量增量 $\Delta D_{Q1} = \Delta D_{Q2}$, 这样就可以得到以下结果: 当供电信号增加 (或减少) 时, V_A 及 V_B 均将开大 (或关小), 则可使抽汽供汽量 $D_Q = (D_{Q1} + \Delta D_{Q1}) - (D_{Q2} + \Delta D_{Q2}) = D_{Q1} - D_{Q2}$ (因为 $\Delta D_{Q1} = \Delta D_{Q2}$)。这一结果表明: 供电信号变化 D_Q 始终保持不变, 当供电信号变化时供电负荷 W 将单独变化, 供热参数则不受干扰。

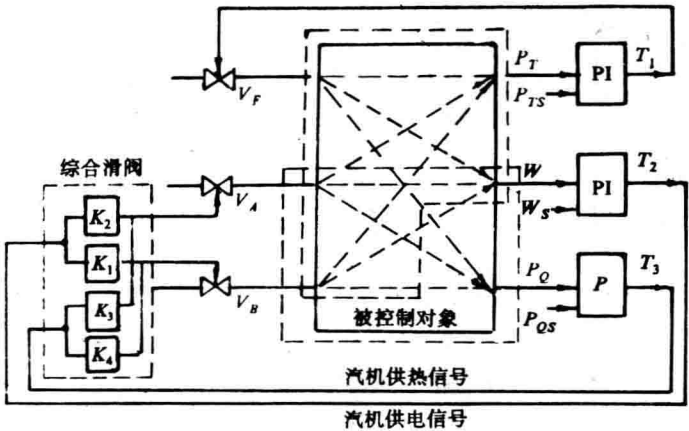


图4 单元供热机组 3×3 系统控制原理图

供热信号通过的 K_3 和 $(-K_4)$ 两个比例环节的数值可以适当选择, 使供热信号变化时引起的各汽缸中电负荷增量 $\Delta W_1 = -\Delta W_2$ (因为 $-K_4$ 为负值), 这样就可以得到以下结果: 当使供热信号增加时, V_A 将开大, V_B 则要关小, 这样总电功率 $W = (W_1 + \Delta W_1) + (W_2 + \Delta W_2)$