

157

锅炉汽轮机自动调节

徐基豫 王淑琳 张子栋 编著
叶道益 郭维彰

GUOLU
QILUNJI
ZIDONG
TIAOJIE

机械工业出版社

锅炉汽轮机自动调节

徐基豫 王淑琳 张子栋 编著
叶道益 郭维彰



机械工业出版社

√ 102438

前言

自动调节系统是锅炉、汽轮机安全运行的关键，对火电厂的经济性也起着非常重要的作用。

我国电力工业的发展迄今还不能满足国民经济的需要。在第七个五年计划期间将要建立大量的火电站，需要更多的人掌握锅炉与汽轮机的自动化技术，随着电站自动化水平的日益提高，也需向有关方面介绍自动化技术的进展情况。为满足上述需要，本书除了介绍自动控制、锅炉与汽轮机自动调节的基本原理以外，同时也介绍与之相应的先进技术。

随着锅炉汽轮机容量的增大和自动化水平的提高，锅炉与汽轮机控制的关系更加密切，因此作为尝试，我们将锅炉与汽轮机的自动调节结合编写，而且在第十二章介绍了单元机组的机炉协调控制问题，在第二十四章中介绍了汽轮机控制与电网稳定性的关系，目的是使读者对火电站中机、炉、电自动控制的相互关系有更深入的了解。

本书除了供发电厂和制造厂的技术人员阅读以外，也可作为大专院校师生的参考书。

本书由徐基豫副教授主编，经李之光教授审阅。第一篇（第1~6章）为自动控制原理，由王淑琳副教授编写；第二篇（第7~14章）为锅炉自动调节，由张子栋同志编写；第三篇为汽轮机自动调节，其中第15~18章由郭维彰同志编写，第19~22章由叶道益同志编写，第23~26章由徐基豫副教授编写。

李之光教授除仔细审阅本书全文以外，还在组织本书的编写与出版方面做了大量工作，在此深表谢意。

本书采用中华人民共和国法定计量单位，为便于读者与目前惯用的工程单位相对比，书中附有单位换算表。

由于编者水平和资料所限，可能难以满足各方面的需要，而且还会有差错之处，希读者多予批评指正。

作者

1985年5月27日

常用符号

B 燃料量	T 时间常数
c 比热, 容量系数	t 时间, 温度
$c(t)$ 输出量	$U(t)$ 输入量 (向量)
D 蒸汽量	$W(t)$ 扰动量 (向量)
D_q 热量信号	W 储水量
$e(t)$ 偏差量	$w(t)$ 扰动量
F 力, 截面积, 送风量	$X(t)$ 状态变量 (向量)
f 面积	$Y(t)$ 输出量 (向量)
G 蒸汽量, 给水量	Y 引风量
H 水位	$y(t)$ 输出量
I 电流, 积分作用	α 流量系数, 空气过量系数
i 焓, 积分作用	β 自平衡系数
K 放大倍数, 弹簧刚度	δ 比例带, 不等率
$\mathcal{L}$ 拉氏变换	$e(t)$ 误差量
$\mathcal{L}^{-1}$ 拉氏反变换	ζ 阻尼系数
M 力矩, 燃料量	θ 温度
N 功率	μ 位移相对变量
n 转速, 分流系数	ρ 压力相对变量, 自平衡率
O_2 氧量	σ_p 最大超调量
P 压力, 比例作用	τ 延迟时间, 时间
p 比例作用, 压力相对量	φ 转速相对变量
Q 流量, 热量	ω 频率, 角速度
R 电阻, 阻力	ω_n 无阻尼自振频率
$r(t)$ 输入量	ω_d 阻尼自振频率
s 算子符号	ω_p 谐振频率

角 码 说 明

B 燃料	DW 低位	I, i 积分作用	n 内回路
b 锅筒	f 负压	j 减温水	q 蒸汽
bq 饱和蒸汽	G 给水	js 金属	s 水
bs 饱和水	g 给定	k 空气	w 外回路
D, d 蒸汽	gr 过热	m 母管	0 平衡状态

单 位 换 算

力, 重力	$1 \text{ N} = 0.102 \text{ kgf}$
压力, 应力	$1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar} = 10.2 \text{ kgf/cm}^2 = 7501 \text{ mmHg}$
能量, 功, 热	$1 \text{ J} = 0.102 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 0.2388 \text{ cal}$
力矩	$1 \text{ N} \cdot \text{m} = 0.102 \text{ kgf} \cdot \text{m}$

目 录

前言

常用符号

单位换算

第一篇 自动控制原理

第一章 概述..... 1

§ 1-1 自动控制的发展概况 1

§ 1-2 自动控制的基本概念与术语 3

§ 1-3 自动控制系统的类型 7

§ 1-4 自动控制系统的动态过程 9

第二章 线性系统的传递函数

和方框图 11

§ 2-1 数学模型的建立 11

§ 2-2 物理系统微分方程式的建立 14

§ 2-3 传递函数 26

§ 2-4 方框图 28

§ 2-5 方框图的简化 34

第三章 线性控制系统的过渡

过程分析法 39

§ 3-1 自动控制系统的过渡过程

与性能指标 39

§ 3-2 稳定性与劳斯判据 48

§ 3-3 稳态误差分析 52

第四章 线性控制系统的频率

特性分析法 60

§ 4-1 频率特性 60

§ 4-2 典型环节的频率特性 64

§ 4-3 乃奎斯特稳定判据 75

§ 4-4 闭环频率特性与系统动态

性能间的关系 84

§ 4-5 开环频率特性与系统动态性能

间的关系 92

第五章 线性控制系统的设计..... 94

§ 5-1 线性控制系统设计的基本步骤

与指标 94

§ 5-2 伺服系统的设计 96

§ 5-3 过程系统的设计 103

第六章 非线性控制系统的描述

函数分析 112

§ 6-1 非线性系统概述 112

§ 6-2 描述函数 117

§ 6-3 非线性控制系统的描述函数

分析法 127

第二篇 锅炉自动调节

第七章 概述 135

§ 7-1 锅炉自动控制的内容 135

§ 7-2 锅炉自动控制的意义 136

§ 7-3 工业锅炉自动控制仪表成套

供应范围 137

第八章 锅筒锅炉给水自动调节 141

§ 8-1 水位调节对象的特性 141

§ 8-2 位式给水自动调节 150

§ 8-3 单冲量给水自动调节 154

§ 8-4 双冲量给水自动调节 156

§ 8-5 三冲量给水自动调节 158

第九章 锅筒锅炉过热蒸汽温度的

自动调节 161

§ 9-1 汽温自动调节的任务 161

§ 9-2 汽温调节对象的动态特性 162

§ 9-3 单冲量汽温自动调节系统 163

§ 9-4 具有导前微分信号的双冲量汽

温自动调节系统 164

§ 9-5 串级汽温自动调节系统 166

第十章 燃烧过程自动调节系统 168

§ 10-1 汽压调节对象的动态特性 168

§ 10-2 小型燃气、燃油锅炉燃烧

过程自动调节 176

§ 10-3 小型燃煤锅炉燃烧过程

自动调节 179

§ 10-4 有中间粉仓的锅筒锅炉燃烧

过程自动调节系统 180

§ 10-5 煤粉直吹制锅炉的燃烧过程

自动调节 1

§ 10-6	大型燃油锅炉燃烧过程 自动调节系统	188
第十一章	直流锅炉自动调节	190
§ 11-1	直流锅炉的调节特点和 调节任务	190
§ 11-2	直流锅炉的动态特性	190
§ 11-3	带基本负荷的直流锅炉自动 调节系统	193
§ 11-4	带变动负荷的直流锅炉自动 调节系统	194
第十二章	单元机组的负荷调节	197
§ 12-1	单元机组的特点	197
§ 12-2	单元机组的调节方式	198
§ 12-3	单元机组协调控制的 主控系统	199
§ 12-4	负荷指令处理装置	202
§ 12-5	机炉主控制器	209
第十三章	锅炉自动调节系统的 工程整定	216
§ 13-1	简单调节系统的整定方法	216
§ 13-2	单级三冲量给水自动调节 系统的整定	221
§ 13-3	串级三冲量给水自动调节 系统的整定	225
§ 13-4	具有导前微分信号的双冲量 汽温自动调节系统的整定	228
§ 13-5	串级汽温自动调节系统 的整定	240
§ 13-6	并列运行燃煤锅炉燃烧自动 调节系统的整定	243
第十四章	对象动态特性的测试	252
§ 14-1	反应曲线法原理	252
§ 14-2	对象数学模型的基本形式	254
§ 14-3	由飞升曲线求传递函数	257
§ 14-4	锅炉自动调节系统微机 模拟分析	265

第三篇 汽轮机自动调节

第十五章	概述	273
§ 15-1	汽轮机自动控制的任务	273
§ 15-2	转速自动调节的基本概念	274
§ 15-3	调节系统的静特性	277
§ 15-4	汽轮机调节系统的动态特性	278

第十六章	汽轮机自动调节系统的 基本元件	279
§ 16-1	测量元件	279
§ 16-2	中间放大元件	289
§ 16-3	电液转换器	297
§ 16-4	油动机及其错油门	300
§ 16-5	调节阀和配汽机构	305
第十七章	汽轮机转速自动调节 系统的静特性	309
§ 17-1	静特性曲线的绘制	309
§ 17-2	并列运行时的调节系统	310
§ 17-3	同步器	312
§ 17-4	静特性曲线的合理形状	314
第十八章	凝汽式与中间再热式汽 轮机调节	315
§ 18-1	凝汽式汽轮机转速调节的 原理	315
§ 18-2	凝汽式汽轮机调节系统实例	317
§ 18-3	中间再热式汽轮机调节 的特点	320
§ 18-4	中间再热式汽轮机调节系统 实例	324
第十九章	背压式和抽汽式汽轮机 的调节	329
§ 19-1	背压式汽轮机的调节 及其实例	329
§ 19-2	抽汽式汽轮机调节的基本 原理	333
§ 19-3	抽汽式汽轮机调节系统实例	350
§ 19-4	抽汽式汽轮机液压联系调节 系统静态计算实例	354
第二十章	变转速汽轮机的调节	360
§ 20-1	变转速汽轮机调节的特点	360
§ 20-2	给水泵汽轮机的调节系统	368
§ 20-3	给水泵汽轮机调节系统举例	370
§ 20-4	拖动鼓风机、压缩机的汽轮 机调节系统	375
§ 20-5	拖动压缩机的汽轮机调节 系统举例	377
第二十一章	电液调节系统	379
§ 21-1	纯速度电液调节系 统	379

§ 21-2 功频电液调节系统	381	第二十四章 汽轮机的快关控制	470
§ 21-3 功频电液调节系统举例	386	§ 24-1 汽轮发电机的功角特性	470
第二十二章 汽轮机调节系统的		§ 24-2 “快关”对电力系统稳定性	
动态分析	394	的作用	472
§ 22-1 调节对象和调节元件的运动		§ 24-3 “快关”装置的作用	475
方程式	394	§ 24-4 “快关”的控制规律	476
§ 22-2 凝汽式汽轮机调节系统的		§ 24-5 “快关”对汽轮机本体的影响	483
动态分析	405	第二十五章 汽轮机的监控与保护	
§ 22-3 中间再热式汽轮机调节		系统	485
系统的动态分析	410	§ 25-1 超速保护装置	486
§ 22-4 背压式和抽汽式汽轮机调节		§ 25-2 附加超速保护装置	490
系统的动态分析	423	§ 25-3 轴向位移的监视与保护装置	491
§ 22-5 变转速汽轮机调节系统的		§ 25-4 相对膨胀的监视与保护装置	495
动态分析	430	§ 25-5 润滑油压降低保护装置	496
§ 22-6 功频电液调节系统的		§ 25-6 凝汽器低真空保护装置	496
动态分析	438	§ 25-7 振动测量和监视	496
第二十三章 汽轮机的辅助控制		第二十六章 国外汽轮机调节系统	499
系统	447	§ 26-1 法国CEM公司300MW汽轮	
§ 23-1 轴封自动调节系统	447	机的调节系统	499
§ 23-2 低压旁路系统的自动调节	448	§ 26-2 日本三菱公司350MW汽轮	
§ 23-3 汽轮机的热应力监视器	453	机的调节系统	518
§ 23-4 汽轮机的自动启停	462	参考文献	525

第一篇 自动控制原理

第一章 概 述

§1-1 自动控制的发展概况

自动控制技术和其它科学技术一样，是人们在同自然界进行斗争以及生产实践活动中逐渐发展起来的。

在1765年瓦特发明蒸汽机之前，人们以风力和水力作为动力源，而更多的则是依靠畜力。自从发明蒸汽机以后，人们不仅得到可自由使用的机械动力，而且导致了以机械代替人的体力劳动的第一次产业革命的发生。1784年瓦特又发明了蒸汽机离心摆调速装置，如图1-1所示。离心摆调速器可自动地将蒸汽机的转速调节到给定值附近。原理与现在应用的汽轮机调节装置相同。与此同时，1766年波尔祖诺夫发明了锅炉给水调节装置，如图1-2所示。这两项发明不仅是最早的锅炉和汽轮机的自动控制技术成果，也是整个自动控制技术领域的最早成果。

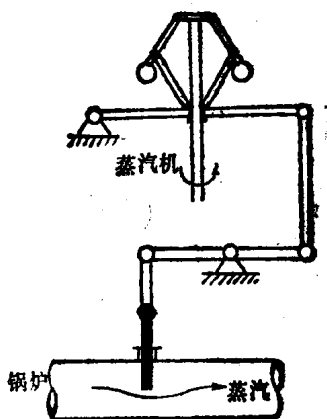


图1-1 蒸汽机离心摆调速器

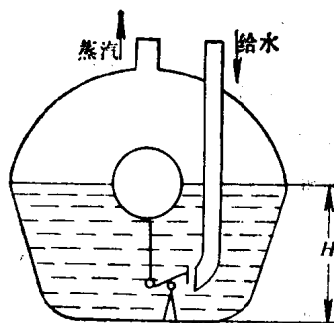


图1-2 锅炉给水自动调节装置

对采用离心摆调速器的蒸汽机，为了提高转速自动调节系统的精度，人们对改进离心摆调速器作了大量试验工作。当为提高调节系统的精度而提高离心摆的灵敏度时，发现系统易产生振荡而难以稳定地运行。人们认为这是由于摆的特性不良所致，因此为改进零件的精度而煞费苦心。

1868年马克斯威尔（电磁定律的创造者）发表了有关论文指出，不要只是研究离心摆，必须将调速系统作为一个整体建立其运动方程式（微分方程式）来研究振荡问题，即稳定性

问题。他还指出,调节系统的稳定性与从微分方程式导出的代数方程式——特征方程式的特征根的实部有关,若能将特征根的实部调整为负值,系统就可稳定地运行。这就是早期自动控制理论的开端。之后,劳斯提出了判别特征方程式根的实部为负的方法——劳斯稳定判据。与此同时古尔维茨也提出用行列式判别系统稳定性的方法,即古尔维茨稳定判据。这些判据至今仍在应用。

之后随着机械工业的发展,自动控制的应用更为广泛,逐渐出现了压力、流量、温度等自动控制系统。

本世纪初,采用电动机和液压马达作为执行机构的自动控制装置得到了迅速推广。火力发电厂应用了恒温管给水调节装置、直接式给水调节装置以及调节通风机进风量的锅炉燃烧自动控制等。那时的锅炉蒸汽压力、炉内压力、汽鼓水位等自动控制系统都是独立的。

1932年贝尔电话研究所的乃奎斯特提出用频率特性分析反馈放大器稳定性理论。稍后由同一研究所的伯德提出了绘制方便的对数频率特性——伯德图。这就是用图解法分析系统稳定性的乃氏判据。

1945年以前由于兵器工业中大力应用自动控制技术,因此将乃奎斯特的成果移用于火炮、雷达等伺服系统的研究工作,并发展成为分析和设计自动控制系统的工程实用方法——频率特性法,也就是古典线性自动控制理论。这种方法至今仍然广泛地用来分析与设计系统。

频率特性法是在频率域内研究自动控制系统,所以是一种间接法。1948年伊文思提出在时间域内研究控制系统的直接方法——根轨迹法。这个方法也经常用于分析和设计控制系统,尤其是在伺服系统中应用较多。1945年以后上述自动控制理论很快地应用于一般工业生产中,因此促进了机械制造、石油、化工、动力等生产过程自动控制技术的应用与发展。

五十年代后期由于宇宙开发的需要,例如人造卫星的发射控制必须在严格的条件下进行,这样就需要建立一个使其性能指标达到极大或极小的最佳控制方法。庞特里亚金在古典变分法的基础上提出了极大值原理,而贝尔曼提出了应用数字计算机计算最佳控制规律的动态规划法。这两者就是最佳控制理论的基础。此外,在人造卫星的状态变量的信息中混杂了噪声,为此卡尔曼提出了估计理论,即卡尔曼滤波理论。这些理论对宇宙开发研究作出了极大贡献。这些理论都是以状态变量为基础,称为现代控制理论,而称频率特性法和根轨迹法等自动控制理论为古典控制理论。古典控制理论是以传递函数为基础的。

现代控制理论在许多领域,例如航空、航海的自动控制与导航;现代机械制造业的自动化;大规模生产过程自动控制;核电站、水电站、火力发电厂自动控制;经济管理以及生物与医学等领域中都得到广泛地应用。

自动控制技术之所以能得到如此迅速的发展,是由于现代科学实验和各工程领域中的科研、生产与经济管理等方面提出高精度、高性能、高效率、高经济效益等要求。只有以现代控制理论为基础,以电子数字计算机作为手段的现代控制技术才得以实现上述要求。

电子数字计算机的精确计算与数字化传感器,数字化执行机构等组合可实现高精度的工业生产过程控制。数字计算机有很高的计算能力,可根据生产过程运行情况的变化而自动地调整参数,可计算出生产过程变化的趋势以便预先决定调整哪些操作条件。因此对复杂的大规模工业生产过程能实现综合自动控制。

应用数字计算机不仅可实现最佳控制,而且对包括传感器、执行机构以及计算机本身在内的全部生产设备进行监督控制,还可对生产过程实现自动启停。因此,能实现整个企业或

工厂的生产过程全盘自动化。

应用高精度、高可靠性的自动调节设备、自动控制和自动监视系统可实现核电站的全盘自动化，在运行中还能随电网负荷的变化自动地调整功率输出。同样，有的火力发电厂也已经实现全盘自动化。

§1-2 自动控制的基本概念与术语

所谓控制，粗略而言就是为达到某一目的，对作为对象的机器或设备进行操作。手动控制是由人完成所需要的操作，自动控制则是由一些元件组合自动地完成所需要的操作。下面结合锅炉的给水控制来说明手动控制和自动控制的特点。

给水控制的目的是保持锅炉的水位恒定，这对于锅炉的安全和效率是很重要的，尤其对大型锅炉更为重要。图1-3所示为锅炉给水的手动控制，也称手动调节。当蒸汽流量增加时操作人员通过水位计2观测到锅筒水位下降，在低于给定水位时，便操作给水阀门3使开度加大，增加给水流量，从而水位上升并恢复至给定水位。反之，当蒸汽流量减少时，水位上升，操作人员关小阀门开度，从而保持水位不变。此操作过程可用图1-4形象地描述，每一作用用一方框表示。操作人员用眼睛观察水位计的指示，了解水位的变化，经头脑思考并与给定水位相比较（意味着相减），判断是高于还是低于给定值，而后用手操作给水阀门改变给水流量，使锅筒的水位保持在给定水平。

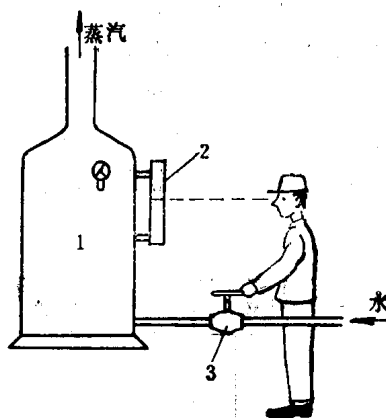


图1-3 锅炉给水的手动控制原理图

1—锅筒 2—水位计 3—给水阀门

如果用某些元件和装置代替操作人员的上述操作功能就可实现自动控制。图1-5所示即为锅炉水位自动控制的原理图。当锅炉的蒸汽流量改变时汽鼓1的水位发生变化，浮子式传感

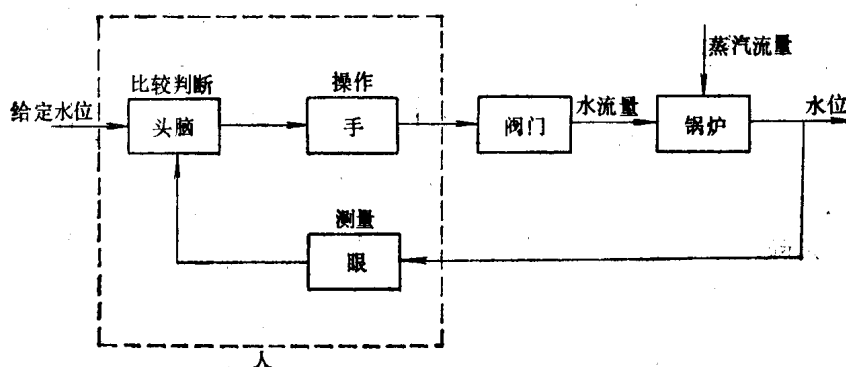


图1-4 锅炉给水手动控制的方框图

器2测量出水位的变化并将这一信号送出和给定值相比较，比较后的信号经调节器3传送到执行机构4，执行机构操纵阀门5的开度改变给水流量，使汽鼓水位恢复至原给定水位附近。这一控制过程可用图1-6所示的方框图加以描述。这里，浮子式传感器代替人眼，而水位的实测值与给定值比较元件和调节器相当人的头脑，执行机构则代替人手的功能。

图1-2所示是一个简单的锅炉水位自动调节的例子。当蒸汽流量为额定时给水挡板开度为某一定位置，水位处于给定水平则杠杆处于水平位置。如果蒸汽负荷变化，水位就变化，因此浮子浮动并带动杠杆或上或下倾斜以使挡板开度减小或增大，改变给水流量使水位得以保持在给定水平附近。其动作方框图示于图1-7。

为使锅炉水位保持给定水位，还可应用图1-8所示的自动控制来完成。这是按照蒸汽流量的增减，经调节器2自动地操作给水阀门4的开度以保持水位为给定水平的调节装置。图1-9为其方框图。

图1-10为早期的汽轮机转速自动调节的图例。其方框图示于图1-11。如果电负荷为额定值时汽轮机的转速为额定转速，这时与调节阀7相连接的杠杆6处于水平位置，经阀门7进入汽轮机的蒸汽流量为额定流量。为保证电能的质量，希望在不同的电负荷下驱动发电机2的汽轮机1的转速保持在一定范围之内。例如当电负荷下降时，由蒸汽产生的汽轮机的主动力矩大于发电机的阻力矩，因此汽轮机转速上

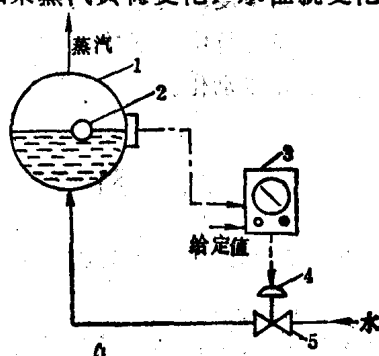


图1-5 锅炉水位自动控制原理图

1—汽鼓 2—浮子 3—水位调节器
4—执行机构 5—阀门

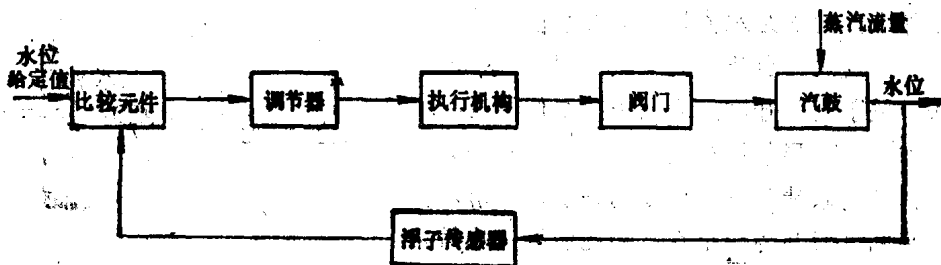


图1-6 锅炉水位自动控制方框图

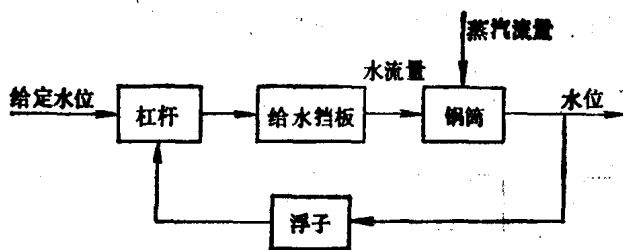


图1-7 图1-2所示的给水自动调节的方框图

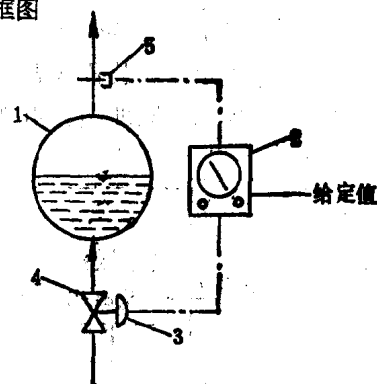


图1-8 按蒸汽流量控制汽鼓水位系统原理图
1—汽鼓 2—给水调节器 3—执行机构 4—给水阀门 5—测量元件

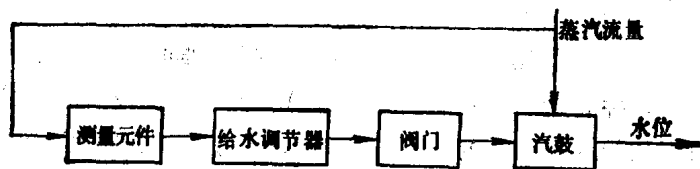


图1-9 图1-8所示系统的方框图

升，调速器的飞锤3的离心力增大而超过弹簧4的约束力，飞锤向外张开使滑环5上移，通过杠杆带动调节阀使其开度关小，这样进入汽轮机的蒸汽流量减少而使转速下降。反之，当电负荷增大时汽轮机的主动力矩小于发电机的阻力矩，所以转速下降，飞锤离心力减小，弹簧约束力大于飞锤离心力，飞锤向内收缩，滑环下移并通过杠杆带动调节阀使开度加大，因此进入汽轮机的蒸汽流量增加从而使转速上升。这样就可自动地使转速保持在额定转速附近。

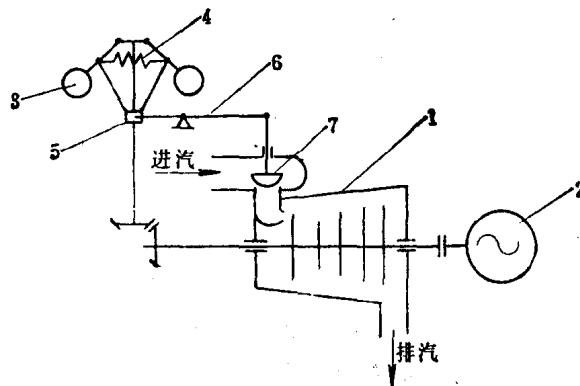


图1-10 汽轮机转速自动调节原理图

1—汽轮机 2—发电机 3—飞锤 4—弹簧 5—滑环 6—杠杆
7—调节阀

上述由被控对象（锅炉、汽轮机）和附加的一些元件或装置（浮子，离心摆，杠杆，调节器，执行机构，阀门等）为达到某一目的

（保持水位或转速为某一定值）的组合称为自动控制系统或自动调节系统。下面说明自动控制系统的有关术语和定义：

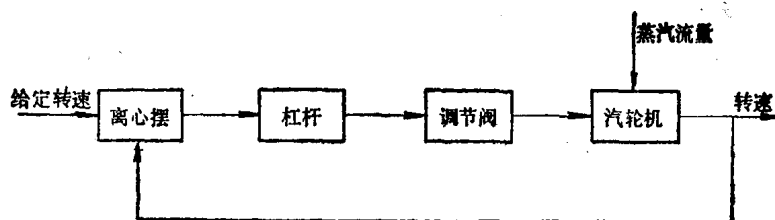


图1-11 汽轮机转速自动调节的方框图

被控对象——为完成一特定的动作或作用的机器、设备、生产过程以及物体等。也称为调节对象或简称对象。例如锅炉、汽轮机、发电机、电网、宇宙飞船、反应炉(塔)、机床等。

被控量——属于被控对象的物理量。也称被测量。例如锅炉的水位、蒸汽压力、蒸汽流量、蒸汽温度、汽轮机转速、发电机的电压和频率、飞船的姿态角、仿型铣床的刀架位置等。

给定量——从控制系统外部给出的恒定的或随时间变化的量，是被控量的希望值，也称输入量。例如汽轮机的转速希望为3000r/min；锅炉希望蒸汽压力为140bar和蒸汽温度为540℃

给定装置——为便于被控量的测量值和给定量进行比较（要同一量纲的物理量方能比较）而引入的变换装置。例如锅炉水位自动控制系统的水位测量经传感器送出的信号是电压或电流，那么给定水位值也必须变为与之相应的物理量。

基准输入——由给定装置给出的对应给定量的信号，可直接与被控量的测量值进行比较。

反馈元件——该元件的输入为被控量，输出是被控量的测试量，也称反馈量。反馈元件一般也称为测量元件。例如浮子式传感器，离心摆等。

偏差量——是基准输入与反馈量的差值，也称偏差信号。将两个量进行比较的元件称为比较元件。

误差量——是给定量与被控量的差值，也称误差信号。

扰动量——破坏被控量与给定量相一致的一切外作用，也称干扰。例如锅炉水位自动控制系统的扰动量是蒸汽流量的变化，抽汽式汽轮机自动调节系统的扰动量是电负荷与抽汽流量的变化。

控制装置——为使被控量具有一定动态行为所需要的附加装置，也称控制器。例如伺服系统中应用的超前校正装置，滞后校正装置以及最佳控制装置等。

调节器——用于自动调节系统和过程控制系统中的控制装置。例如比例调节器，比例积分调节器，最佳调节器等。

执行机构——接受来自控制装置（调节器）的信号对被控对象（调节对象）施加作用的机构，也称执行元件。例如杠杆机械执行机构，电动执行机构，液压执行机构等。

输入量——对自动控制系统而言，是指从系统外部作用于系统中的信号，也称输入信号，例如基准输入和扰动量。对元件或装置，则是指加至输入端的信号。

输出量——对控制系统而言，是指被控量。对元件或装置则是指输出端送出的信号，也称输出信号。

下面，用自动控制的术语描述某自动控制系统的工作过程示于图1-12。如果系统的给定量 $c_d(t)$ 或基准输入 $r(t)$ 为定值，系统也未受到扰动，即 $w(t)=0$ ，这时被控量 $c(t)$ 与 $r(t)$ 相一致，无偏差信号 $e(t)$ 产生，因此调节器与执行机构不动作，系统处于平衡状态。当系统的基准输入为定值而受到扰动量作用后，被控量 $c(t)$ 经反馈元件送出一与 $c(t)$ 有一定比例关系的反馈信号 $b(t)$ 作用于调节器产生调节信号 $m(t)$ ，又经执行机构操纵被控量 $c(t)$ 使与 $r(t)$ 接近，直到偏差 $e(t)$ 消失或达到某一允许范围时这一调节过程方结束，否则系统将继动作。

同样，若没有扰动作用，而是给定量或基准输入变化时被控量与基准输入也产生偏差 $e(t)$ ，此偏差作用于调节器，经执行机构操纵被控量 $c(t)$ 使其跟踪 $r(t)$ 变化，直到偏差消失或减小至允许范围为止。

将被控量从输出端取负值馈送至产生控制作用的输入端的现象称为负反馈作用。被控量与基准输入比较产生偏差并利用此偏差去控制被控量使其与基准输入相一致的控制称为负反馈控制，也称按偏差控制。偏差控制是自动控制的基本组成原则。完成此控制功能的组合称为负反馈控制系统或负反馈自动调节系统。

由图1-12可见，反馈控制系统中的信号传递回路是闭合的，即 $c(t)$ 从输出端反馈至输入端，经调节器、执行机构又回至输出端。因此负反馈控制系统也称闭环控制系统。

从图1-4所示的锅炉水位手动控制的方框图可见，它也是按偏差控制的系统，只不过是操作人员与被控对象一起组合成闭环系统。

从图1-9所示的锅炉水位自动控制的方框图而知，该系统的组成原则与负反馈控制原则大不一样，它是按扰动量——蒸汽流量的变化进行控制的。系统中信号的传递是单方向的，即没有被调量与其基准输入相比较，因此信号流通回路没有闭合。所以，通常称此种控制为开环控制或按扰动控制。

显然，如图1-8所示的开环控制系统，当负载扰动没有变化而受到其它扰动，例如燃烧情况变化等也会使水位发生变化。但是，由于系统是开环的，所以无从使水位保持在给定水平，这就是开环控制的主要缺点。闭环控制系统则无此缺点，因为系统对无论来自外部或内

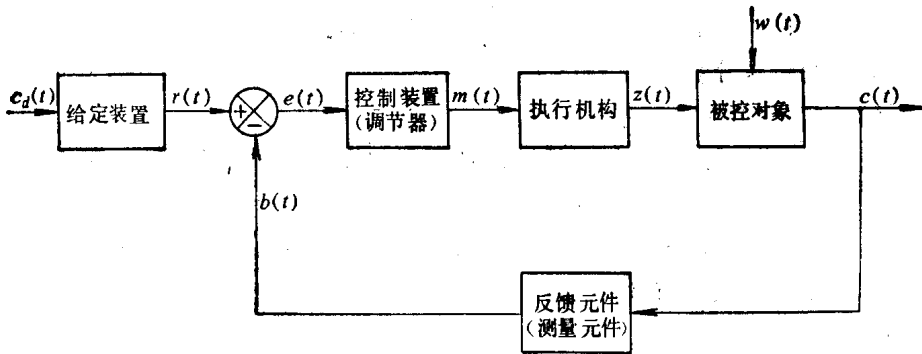


图1-12 自动控制系统的方框图

$c_d(t)$ —给定量 $r(t)$ —基准输入 $c(t)$ —被控量 $w(t)$ —扰动量 $b(t)$ —反馈量 $e(t)$ —偏差量 $m(t)$ —控制装置的输出 $z(t)$ —执行机构的输出

部的扰动作用，最终都导致被控量发生变化并产生偏差，所以系统就产生动作，直到偏差消失或减小到允许范围为止。这就是为什么大量采用闭环控制的原因。

§1-3 自动控制系统的类型

自动控制系统的形式繁多，为了研究方便经常将其分类。下面介绍常用的一些分类形式。

一、根据给定量的性质分类

1. 定值控制系统 给定值为恒定的控制系统，也称镇定控制系统。例如锅炉的水位、蒸汽压力、蒸汽温度的自动控制系统，汽轮机的转速、抽汽压力的自动控制系统均属此类。

2. 跟踪控制系统 给定量随时间变化的控制系统。又分：

(1) 伺服系统 给定量为时间的任意函数的控制系统，也称随动系统。例如雷达跟踪系统，自动记录仪等。

(2) 程序控制系统 给定量按预定规律而变化的控制系统。例如仿型铣床，热处理炉的温度控制系统等。

(3) 比例控制系统 两个变量需要保持一定比例时，系统的给定量为另一系统的被控量的控制系统。例如锅炉的自动燃烧系统就是燃料与空气成比例的控制系统。

二、根据被控量分类

1. 自动调节系统 被控量是转速、电压、频率等物理量并要求保持恒定的系统。

2. 伺服机构 被控量是机械装置的位置、姿态等跟踪系统。

3. 过程控制系统 被控量为温度、压力、流量、液位、浓度等定值系统。

三、根据控制作用分类

1. 连续控制系统 控制作用在空间和时间都是连续的系统。一般应用线性模拟调节器或校正装置的控制系均属此类。

2. 断续控制系统

(1) 开关控制系统 控制作用在空间上不连续的系统。例如两位式、三位式锅炉水位和压力等自动控制系统。

(2) 离散控制系统 控制作用在时间上不连续的系统, 也称采样控制系统。例如采用数字调节器的控制系统, 用数字计算机直接控制的系统等。

四、根据系统的参数分类

1. 集中参数系统和分布参数系统

用常微分方程描述的系统称为集中参数系统。例如旋转运动的系统、电路等一般是集中参数。

用偏微分方程式描述的系统称为分布参数系统。例如热传导系统、反应炉的扩散过程、送电网路、通信网路等都是分布参数系统。

2. 定常系统和时变系统

参数不随时间变化的系统称为定常系统, 也称时不变系统, 其微分方程式的系数均为常数。

参数随时间变化的系统称为时变系统或称变参数系统, 其微分方程式的部分系数为时间 t 的函数。例如宇宙飞船的燃料不断消耗, 因此其质量不断地变化, 而且当飞出地球后, 重力也在发生变化, 所以这种系统即为时变系统。

五、根据系统中元件的输入-输出特性分类

1. 线性系统 每个元件的输入-输出特性为线性特性或描述系统的运动方程式是线性微分方程式的系统。

2. 非线性系统 系统中有的元件其输入-输出特性为非线性特性, 或用非线性微分方程式描述的系统。例如系统中元件具有饱和特性, 或采用双位和三位式调节器的系统都是非线性系统。

六、根据系统的输入量和输出量的维数分类

1. 单变量系统 只有一个输入量和一个输出量的系统。例如凝汽式汽轮机转速自动调节系为单变量系统。

2. 多变量系统 有一个以上输入量或一个以上输出量的系统。例如双抽汽汽轮机自动调节系统是三输入三输出的多变量系统, 锅炉压力-水位自动控制系统是两输入两输出的多变量系统。一个大规模的生产过程控制系统的输入和输出可多至几十或上百个。

七、根据输入量是否为固定时间函数分类

1. 确定系统 给定量或扰动量为固定时间函数的系统。例如汽轮机转速和锅炉水位、蒸汽压力等自动控制系统可视为确定系统。因为它们的给定量可用一些典型函数, 如阶跃函数等表示。

2. 随机系统 给定量和扰动量不能用固定时间函数表示, 或输入量杂有噪音的系统。例如雷达伺服系统的输入量是目标运动的轨迹, 它是随机变化的, 不能用一固定时间函数加以描述。

此外还有许多其它分类方法。例如, 按自动控制系统有否能源而分为直接式控制系统(无能源)和间接式控制系统(有能源); 按自动控制系统受到输入量作用, 当动态过程结束进入新的平衡状态后, 系统有无稳态误差而分为有差系统和无差系统; 按能源的种类可分电动、气动、液压以及电液系统等。

不同类型的系统其研究方法也有所不同。例如频率特性法只适用于研究单变量线性确定定常控制系统, 单变量非线性确定定常控制可用描述函数法、相平面方法等研究, 对于多变

量系统要用现代控制理论研究,对随机系统要用概率统计的数学模型描述和研究等等。

§1-4 自动控制系统的动态过程

自动控制系统的被控量 $c(t)$ 在受到给定量或扰动量作用时,从一个平衡状态过渡到新的平衡状态需要一段过程。这段过程称为控制系统的动态过程或称为过渡过程。对系统动态过程的评价,一般是通过系统反应特定输入信号的过渡过程及稳态的一些特征值来表征。

控制系统反应单位阶跃给定信号时的过渡过程一般形式示于图1-13。

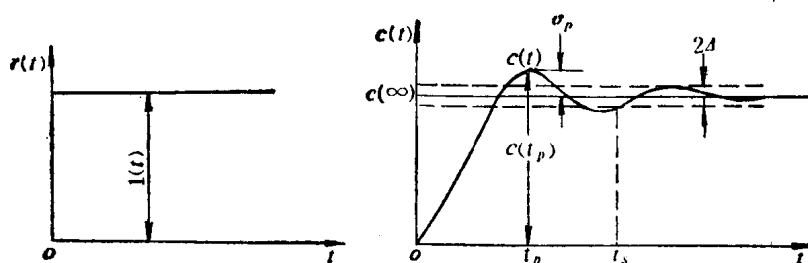


图1-13 单位阶跃给定信号作用下系统的过渡过程

$r(t)$ —给定输入信号 $c(t)$ —被控量 $c(\infty)$ —被控量的稳态值

当 $t \geq t_s$ 之后,若有 $|c(t) - c(\infty)| \leq \Delta$, 则认为过渡过程基本结束,系统已进入新的平衡状态。 Δ 一般取 $0.02 \sim 0.05$ 。这时过渡过程可用如下定义的特征值加以描述:

σ_p ——最大超调量

$$\sigma_p = \frac{c_{\max} - c(\infty)}{c(\infty)} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)}$$

t_p ——被调量达到最大值的时间;

t_s ——系统的过渡过程时间或调整时间;

N ——振荡次数。

这些特征值也称为系统过渡过程的性能指标。此外,被控量的稳态值 $c(\infty)$ 与给定信号的差值称为稳态误差。它是表征控制精度的一项性能指标,也称稳态性能指标。

系统的过渡过程时间 t_s 和超调量 σ_p 是描述过渡过程的两个重要性能指标。 t_s 越小,说明系统从一个稳态过渡到另一个稳态所需要的时间越短,反之则越长。 σ_p 越小,则说明系统的过渡过程进行得越平稳。 σ_p 与振荡次数 N 表示系统的阻尼程度,而 t_p 与 t_s 表示系统的反应速度。 σ_p 、 N 、 t_p 、 t_s 也称为系统的瞬态性能指标。

如果某些系统的过渡过程希望单调上升趋近稳态值,如图1-14中的曲线1所示那样,这时对系统的结构形式与元件参数均有严格要求。如果系统的过渡过程 $c(t)$ 随时间推移而发散,如图1-14中的曲线2为单调发散,而曲线3为振荡发散。这时系统不可能达到平衡状态,称这类系统为不稳定系统。显然,不稳定系统在实际中不能应用。

另外,在非线性控制系统中除了上述单调及振荡过程(包括衰减振荡和发散振荡)外,还可能出现等幅振荡,如图1-14中的曲线4所示。这种现象称为自振荡,是由系统本身特性

所决定的。如果能将自振荡的幅值限在允许范围内,那么这类系统在工程实际中还是可用的。

综上所述,对自动控制系统的动态过程要求必须是稳定的,而且还须具有一定要求的性能指标。

控制系统在扰动量作用下的过渡过程一般形式示于图1-15。假定给定信号不变,因此 $c(t) = -e(t)$ 。其瞬态性能指标为:

- e_p ——最大偏差量;
- t_p ——系统达到最大偏差的时间;
- t_s ——调整时间;
- Δ ——一般取基准输入的0.02~0.05;
- e_2/e_p ——振荡衰减比。

此外,以稳态偏差 e_s 表示稳态性能指标。

自动控制理论是研究各类型控制系统的稳定性与动态过程性能的理论,提供分析与设计控制系统的各种方法。本篇将介绍分析与设计线性系统的频率特性法,数学模型及其建立,介绍非线性系统的描述函数分析法。

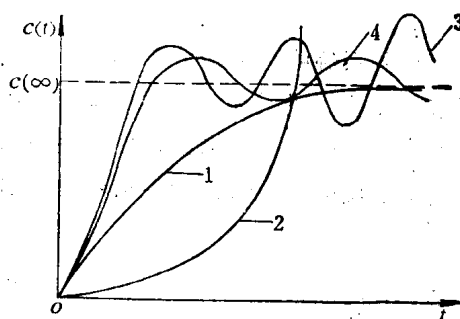


图1-14 控制系统的过渡过程曲线

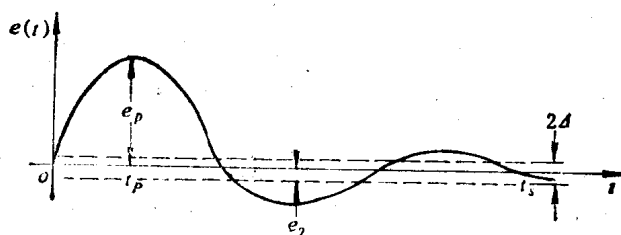


图1-15 扰动量作用下系统的过渡过程