

冶金自动化设计参考资料

第三分册

生产过程自动调节系统

设计和整定手册

冶全部钢铁自动化设计业务建设组出版

冶金自动化设计参考资料
第三分册

生产过程自动调节系统 设计和整定手册

本手册编写组 编

471

冶金部钢铁自动化设计业务建设组出版

一九八四年五月



R 11.1.11

冶金自动化设计参考资料

第三分册

生产过程自动调节系统设计 and 整定手册

本手册编写组编

冶金部钢铁自动化设计业务建设组出版

包头钢铁设计研究院 · 发行 ·

包头钢铁设计研究院印刷厂 · 印刷 ·

1984年5月第一版

开本：787×1092(1/16)

1984年5月第一次印刷

字数：490千字

印数：1~2500册

定价：4.50元

簡 介

本手册总结了二十多年来自动调节系统设计及调整的经验，由设计、科研、学校、施工、生产几个方面的九个单位联合编写而成。全书内容着重于满足实际应用的需要。

全书共六章。第一、二章列出自动调节基础理论（经典控制论）的要点；第三章叙述了自动调节系统的设计方法，以及如何通过实验和计算方法来选定自动调节器及计算其动态参数值，并举实例说明；第四章介绍了各种复杂的调节系统的调节方法的设计；第五章列举了常用各种调节系统的整定方法；第六章提供了利用DDZ—Ⅰ和DDZ—Ⅱ型电动单元组合仪表和QDZ气动单元组合仪表组成的各种常用自动调节系统的方框图。最后还附录了自动调节原理必备的数学基础知识的资料，以便查阅。全书尽量以图表方式提供常用的资料，使用方便。它是一本供从事生产过程自动化技术工作的常备简明手册。

本手册适用于从事自动化技术工作的工程技术人员、工人、教师及有关方面的工作人员，也可作为教学的参考书用。

序 言

在向实现四个现代化进军的新长征中，生产过程自动化战线上的广大设计工作者早就希望有一本关于自动调节系统设计的理论及其应用方面的参考资料，以便随时查阅，为作好自动控制设计方面的工作提供方便条件。本手册就是根据这一要求，组织了科研、设计、生产、施工和教学方面的力量，在学习和总结了过去多年的实践经验、征求了有关方面意见的基础上编制的。

自动控制理论在近年来得到了飞速的发展。它由四十年代的经典控制论发展到六十年代的现代控制论，七十年代则进入了大系统理论的阶段。虽然是这样，但目前工业生产上大量应用的仍然是经典控制理论，并且新的控制理论也都是在经典控制论的基础上逐步发展起来的，因此，掌握好经典控制论的方法，不仅是当前实际工作的需要，同时也将便于进一步学习新的控制理论。根据这一认识，本手册从实际出发，对经典控制论讨论的基本问题及其在生产过程自动化设计方面的应用作了必要的介绍，并提供了有关的资料。

本手册的内容分三个主要部份，即：(1)自动调节原理(第一、二章)；(2)自动调节系统的设计(第三、四章)；(3)自动调节系统的整定(第五章)。最后还提供了常用调节系统实施方案的方框图集(第六章)，考虑到DDZ—Ⅱ型电动单元组合仪表即将得到广泛采用，图集中介绍了由DDZ—Ⅱ型仪表组成的调节系统方框图。本手册还尽力蒐集了各种典型环节的传递函数、根轨迹图、频率特性图，以及常见冶金焦化机组的动态参数值(141项)等资料，并尽量将各种资料表格化，以便查阅。

本手册是在冶金部钢铁自动化设计业务建设组的统一领导下，由包头钢铁设计研究院、上海冶金专科学校、冶金自动化研究所、首钢总计控厂、马鞍山钢铁设计研究院、洛阳有色金属加工设计研究院、南昌有色冶金设计院、沈阳铝镁设计院和鞍山焦化耐火设计研究院等九个单位参加编写的，由包头院、上海冶专负责主编，编写者有：何功晨、葛智龙、马竹梧、王瑞兰、邹双、芮健康、张永盛、王俊威、李振发、顾克诚等十位同志，并由包头院、上海冶专、洛阳院、南昌院等四个单位的同志作了最后的修改和审校。编写过程中，曾得到冶金部各有关设计院、第一、二冶建公司的计器队，北京钢铁学院和北京自动化技术研究所等兄弟单位参加中间审核，上海工业自动化仪表研究所的同志提供了有用的资料，包头院自动化科自动化组协助誊清，特在此一并表示感谢。

由于我们水平不高，又缺乏编写的经验、本手册中错误、不当之处一定不少，衷心希望读者批评指正。(通信处：内蒙古包头市包头钢铁设计研究院自动化科转本手册编写组)

本手册编写组

一九八〇年十月二十五日

目 录

序 言

第一章 自动调节系统的基础知识	1
第一节 自动调节系统的组成.....	1
第二节 自动调节系统的分类.....	2
第三节 自动调节系统的特性及其描述.....	5
一、系统的特性.....	5
二、系统特性的描述.....	6
第四节 传递函数.....	10
第五节 自动调节系统的方块图.....	11
第二章 自动调节系统的分析和校正	16
第一节 时间特性分析法.....	16
一、时间特性的获得及典型环节的时间特性.....	16
二、一阶系统的时间特性.....	19
三、二阶系统的时间特性.....	20
四、高阶系统的时间特性.....	24
五、系统的动态性能指标.....	25
六、系统的静态性能指标.....	29
第二节 根轨迹分析法.....	32
一、闭环系统的特征根及其与系统动态特性的关系.....	32
二、根轨迹及其特点.....	36
三、根轨迹的绘制.....	39
四、根轨迹在系统分析中的应用.....	43
第三节 频率特性分析法.....	46
一、频率特性及其图示.....	46
二、对数频率特性及其图示.....	49
三、频率特性和系统稳定性的关系.....	60
四、系统的频率特性和时间特性的关系.....	66
五、闭环频率特性和开环频率特性的关系.....	68
第四节 自动调节系统的校正.....	74
一、超前校正.....	75
二、滞后校正.....	82
三、滞后-超前校正.....	88
四、几种典型的调节规律.....	95
第三章 自动调节系统的设计	100

第一节	概述	100
第二节	工业调节对象的动态特性测试	101
一、	概述	101
二、	时间特性的测试	103
三、	频率特性的测试	114
四、	常用热工对象的动态参数	123
第三节	设计的一般原则	135
一、	被调量的选择	135
二、	操作量的选择	136
三、	调节机构的选择	136
四、	测量系统的选择	149
五、	调节规律的选择	151
六、	调节系统间的相互影响及克服办法	167
七、	自动调节系统的安全措施	169
八、	自动调节系统的经济比较	169
第四节	设计示例	169
一、	生产工艺简介和调节系统的选择	170
二、	被调量、操作量和测量点的选择	171
三、	调节器的选择及系统稳定性分析	172
第四章	典型的调节系统及调节方法	176
第一节	位置式调节系统	176
一、	两位式调节系统的原理及特点	176
二、	调节系统的性能指标	178
三、	应用范围	179
四、	系统的设计方法和步骤	179
五、	设计举例	182
第二节	比值调节系统	185
一、	比值调节系统的方案	185
二、	比值调节系统的实施方案	192
三、	比值系数的计算实例	199
四、	应用比值调节系统的几个问题	201
第三节	串级调节系统	202
一、	概述	202
二、	串级调节系统对改善调节性能的作用	203
三、	串级调节系统的应用场合	206
四、	串级调节系统的设计	207
五、	串级调节系统实施时的注意点	210
第四节	多冲量调节系统	211
一、	概述	211

二、系统的结构形式	213
三、多冲量调节系统的组成	216
第五节 前馈调节系统	217
一、概述	217
二、前馈补偿装置的设计	219
三、前馈调节系统的选择	225
四、设计举例	226
第六节 超驰调节系统	235
一、概述	235
二、超驰调节系统设计示例	235
三、积分饱和及其防止	238
第七节 极值调节系统	239
一、自寻最佳值的作用原理	240
二、应用极值调节系统的必要条件	241
三、极值调节的几种方法简介	242
四、极值调节系统的应用举例	242
第八节 均匀调节	244
一、概述	244
二、均匀调节方案的选择	245
三、调节器型式的选择	247
第九节 程序调节	248
一、特点及应用范围	248
二、系统的设计	248
三、设计举例	249
第十节 纯滞后对象的调节	250
一、基本概念	250
二、纯滞后对象的调节方法	251
第十一节 非线性对象的调节	254
一、概述	254
二、非线性对象的调节方法	255
第五章 自动调节系统的整定	258
第一节 典型系统的整定方法	258
一、两位式调节系统的整定	258
二、连续式调节系统的整定	259
第二节 复杂调节系统的整定	271
一、串级调节系统的整定	271
二、随动调节系统的整定	272
三、多冲量调节系统的整定	272
四、并列的调节系统的整定	273
五、相互干扰的两个调节系统的整定	273

第三节	自动调节系统整定中应注意的问题	274
一、	调节器整定参数的干扰系数问题	274
二、	对象特性变化问题	275
三、	对象特性中的非线性问题	275
四、	在凑试过程中观察过渡过程曲线要注意的几个问题	275
第四节	最佳调节理论在自动调节系统整定中的应用	276
一、	获得最佳调节性能的条件	276
二、	最佳调节的第一类型	276
三、	最佳调节的第二类型	279
第六章	自动调节系统方框图集	283
第一节	单参数调节系统	283
第二节	串级调节系统	290
第三节	比值调节系统	296
第四节	多冲量调节系统	301
第五节	其他调节系统	307
附录:	有关数学基础简述	310
一、	复数及复变函数	310
二、	拉氏变换及其应用	313
参考文献		327

第一章 自动调节系统的基础知识

在生产中，为了使工艺过程能够正常进行，往往需要适当控制某些物理参数（如加热炉炉膛温度和压力，锅炉汽包的水位等），使其自动保持定值，或按预先确定的规律变化，这个控制过程就称为自动调节。自动调节是实现自动化的主要手段之一。

生产过程采用了自动调节后，可以大大提高生产率，改善产品的质量，降低操作工人的劳动强度和确保生产的安全，对于某些高温、高压的场所，或者存在有毒、有害气体的地方，以及参数变化迅速，人工操作无法适应的生产过程，自动调节就更为必要了。

第一节 自动调节系统的组成

为了实现自动调节，必须给需要调节的对象配以必要的仪表，设备和装置，它们之间又必须按一定方式联接，所有这些仪表、设备和装置，包括需要调节的对象本身及其联接，就组成了自动调节系统。

一种典型的自动调节系统的组成方框图如图1.1—1所示。图示系统的自动调节过程是：当被调量 y 符合工艺要求时，它通过测量变送器转换成的反馈信号 f 跟给定值 x 没有差值，也就是偏差信号 e 为零，这时，调节器、执行器维持原状，被调量保持不变；当被调量因扰动 v 的作用偏离工艺要求时，这个偏差值通过测量变送器转换成的反馈信号与给定值就不再相等，而形成偏差信号进入调节器，从而使调节器发出相应的调节作用，操纵执行器动作，改变操作量 m ，致使被调量发生变化，直至其恢复到符合工艺要求值时为止。

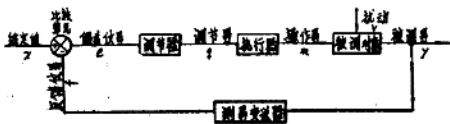


图1.1—1 自动调节系统组成方框图

图1.1—1中的名词符号意义如下：

- 1、被调对象——需要调节其工艺参数的生产过程、设备或装置，如加热炉、锅炉汽包等。
- 2、被调量 y ——需要调节的工艺参数，如加热炉炉膛温度，汽包水位等一般被调量是系统的输出量（或简称输出）。

3、测量变送器——将被调量转换成便于比较的物理量，以作为显示或反馈比较用的元件装置，如热电偶、热电阻、温度变送器、压力变送器等。

4、给定值 x ——对应于生产中要求保持的工艺指标即被调量的希望值，但可用与被调量不相同的物理量的形式表现，例如被调量是温度，给定值可以用电流形式表现，其值与温度的希望值相对应，一般给定值是系统的输入量（或简称输入）。

5、比较单元——具有二个输入和一个输出，且能使该二个输入信号进行比较，其比较结果（差值）就作为输出信号的一种机构。单元组合仪表中的加法器可以作为比较单元使用，目前生产的各种调节器常常在结构上包含了比较单元。

6、反馈信号 f ——被调量通过测量变送器转换后，返回到输入端的比较单元上的信号，其量值与被调量值相对应，一般反馈信号与给定值取同一种物理量。

7、偏差信号 e ——比较单元的输出信号，即给定值与反馈信号之差。

8、调节器——接受偏差信号并按照偏差信号产生使误差达到零或微小值的调节作用的设备或装置。

9、调节量 q ——调节器的输出量，用以操纵执行器的。

10、操作量 m ——施于被调对象上的一种作用量，这种作用量能够直接控制被调量，例如当燃油炉的炉温是被调量时，改变喷油量可以控制炉温，那么喷油量可以视为该系统的操作量。有时也把操作量称为调节作用。

11、扰动（或称干扰） v ——使被调量产生波动的因素，它的作用正好与调节作用相反。扰动有时来自系统内部，此时称为内扰，而有时则来自系统的外部，称为外扰，外扰也属于系统的输入量。

12、执行器——由调节器发出的调节量进行操纵，而产生的动作能直接改变操作量，以调节被调量的装置。例如：在电动调节系统中执行器大致包含伺服放大器、电动执行机构和调节机构（调节阀）三部分；在气动调节系统中，气动薄膜调节阀就是执行器。

组成自动调节系统的各主要部分（或元件）常按其性能分成若干环节，例如：调节环节、执行环节、测量环节、比较环节等，有时也用微分环节、积分环节、滞后环节等。这样划分往往便于分析系统的性能。

第二节 自动调节系统的分类

为便于对自动调节系统进行分析、研究，常根据调节系统的不同特点予以分类，分类的方法有很多种，现将常用的列述如下：

一、按照调节系统的结构特点分：

（一）反馈调节系统——按照把被调量引到输入端与给定值比较而得的偏差进行调节的系统。当系统受到外界扰动作用时，对象的被调量偏离了给定值，产生了偏差信号，调节器就按照偏差信号产生调节作用，以补偿扰动的影响，图1.1—1所示的系统就属于反馈调节系统，目前生产中应用得最多的也是这种系统。

（二）前馈调节系统——按照扰动作用大小进行调节的系统，如图1.2—1所示。在这种系统中调节器直接受扰动，产生调节作用，以校正被调量，从而补偿了扰动对被调量的



影响，而不必等到扰动影响到被调量，造成给定值与被调量的偏差后才进行调节，所以说这种系统克服扰动比较及时、迅速。

图1.2—1 前馈调节系统方框图

（三）复合调节系统——即按被调量与给定值

的偏差进行调节，同时又按扰动作用直接进行调节，即它是反馈调节和前馈调节系统的联合使用，这样它就综合了反馈调节和前馈调节两者的优点。其组成如图1.2—2所示。

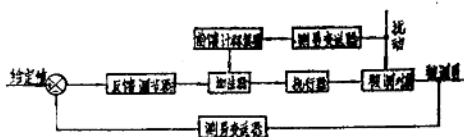


图1.2—2 复合调节系统组成方框图



图1.2—3 开环系统方框图

二、按照系统的输出量与调节作用的关系分：

(一) 闭环系统——输出量对调节作用有直接影响的系统，如图1·1—1所示。显然闭环系统也就是反馈系统，其反馈信号可以是输出信号本身，（此时系统称作单位反馈系统），也可以是输出信号的函数或导数。这里的反馈一般均指负反馈，即反馈信号与给定值方向相反，只有这种负反馈作用才能减小系统的偏差。同时由于采用了反馈，系统的输出量对外扰和内部系统参数的变化显得不敏感了，这就是闭环系统能够克服扰动的原理。对于闭环系统稳定性是必须考虑的重要问题，如果参数整定得不恰当，很可能使系统的输出量振动不息。

(二) 开环系统——输出量对调节作用无直接影响的系统，如图1·2—3所示。在开环系统中既不对输出量进行测量、又不将输出量反馈到系统的输入端与输入量进行比较、系统的工作状态仅跟输入量相对应，系统的精度取决于预先校正的精度。这里系统的输入量可以是给定值，也可以是某一个扰动量，前述的前馈调节系统属于后者。由于系统是开环的，所以若系统中出现不作为开环输入的扰动时，系统便不能完成既定任务了。由于开环系统一般地说构造简单，故成本低，功耗小，维护方便。此外开环系统不存在稳定性问题。

三、按照系统给定值的形式分：

(一) 定值系统——给定值或者保持常量，或者随时间缓慢变化的系统。这种系统的基本任务是在存在扰动的情况下，将实际输出量保持在希望的数值上。一般压力的自动调节，电压的稳定控制等都属于这类系统。

(二) 随动系统——根据被调量的希望值设置给定值，该值是在不断变化的，实际值则始终跟踪希望值而变化的系统。例如利用离心调节器实现的速度控制系统就属于这种系统。各种变送器均可看作一个随动系统，其输出（指示值）是随着输入（被测值）而变化的。随动系统的输出量一般是机械位移，速度或者加速度。

(三) 程序调节系统——根据预先制定的程序对温度、压力、流量、液面或PH值（氢离子浓度）等表征生产过程特征的物理量进行自动调节的系统，例如：热处理用加热炉的炉温控制常常采用程序调节。在这里给定量是按照预先制订的规律变化的。而输出量紧紧地跟着给定量变化。

四、按照系统稳定后被调量与实际值之间是否存在误差分：

(一) 有差系统——调节过程结束后被调量的实际值与希望值之间存在一定的误差的系统，因为一般来说有差系统所采用的调节器比较简单，所以在允许存在一定误差的情况下可以采用这种系统。

(二) 无差系统——调节过程结束后被调量的实际值与希望值恒等的系统。

五、按照系统的输出—输入特性分：

(一) 线性系统——输出—输入特性可以用一组线性方程描述的系统。对于线性系统可以应用叠加原理，即若干个信号对系统的总的的作用等于将这些信号分别地单独施于系统产生的作用之和，这样分析系统就简单了。

(二) 非线性系统——输出—输入特性是用一组非线性方程描述的系统。对于非线性系统不能应用叠加原理。由于研究非线性系统比研究线性系统困难，所以工程上，在一定条件下往往将非线性系统近似为线性系统来研究。

六、按照调节规律分：

(一) 两位（或继电器型）调节系统——调节机构只有简单的通或断两个固定位置的系统。因为这种系统所采用的调节器简单便宜，所以在中、小型厂得到广泛应用。近几年来，在两位的基础上又发展出三位调节系统，它有两组继电器，三种继电状态，即二组全通二组全断和一组通另一组断，因此执行机构就有三个工作状态，如果调节的是炉温，那么炉温的加热状态就有三种状态：全加热、半加热和停止加热，这样调节的精度就比两位式的有所提高。

(二) 比例调节系统——调节机构的动作量与偏差信号成比例的系统。在比例调节系统中采用的调节器—比例调节器，实质上就是具有可调增益的放大器。应该指出，比例调节系统的输出实际值与给定值之间始终存在一个偏差，因此这种系统属于有差系统，这个误差的大小与调节器增益成反比。

(三) 比例积分调节系统——调节器的输出由两个部分合成，一部分与偏差信号成比例，另一部分与偏差信号随时间的积分成比例的系统，这种系统的输出实际值能够准确地等于希望值，也即系统不存在偏差，故属于无差系统。

(四) 比例微分调节系统——调节器的输出由两部分组成，一部分与偏差信号成正比，另一部分与偏差信号对时间的微分成正比的系统。由于微分部分能够反应偏差信号变化的速率，并能在偏差信号变得太大之前产生一个有效的校正作用，因而有助于增加系统的稳定性，微分作用还使系统阻尼加大，因而允许调节器的增益提高，这样系统的误差可以减少。

(五) 比例积分微分调节系统——调节器的输出由三部分组成：第一部分与偏差信号成比例；第二部分与偏差信号的积分成比例；第三部分与偏差信号的微分成比例的系统。这种系统综合了上述两种系统的优点，并且在目前调节器厂已大量制成单一的比例积分微分参数可调的调节器，所以在工业自动控制中这种系统获得广泛的应用。

七、按照调节作用是否连续分：

(一) 断续调节系统——调节器发出的调节作用是断续的，例如，两位调节系统即属于这类系统。

(二) 连续调节系统——调节器发出的调节作用是连续的，一般比例调节，比例积分微分调节系统都属于连续调节系统。

此外，还有按被调参数分为：压力调节系统、温度调节系统等；按系统工作能源分为：电动、气动、和液动调节系统等；按系统结构简繁分为简单（单回路）调节系统和复杂（多回路）调节系统等。

不同的分类有其不同的用途。例如在分析自动调节系统的特性时，给定值的形式不同会涉及到不同的分析方法，所以宜用按给定值形式的分类方法。

第三节 自动调节系统的特性及其描述

设计和研究自动调节系统，必须了解和掌握系统的特性及描述系统特性的方法。

一、系统的特性

自动调节系统的特性是指系统的输出量（被调量）随输入量（给定值和扰动）而变化的关系，亦即二者的函数关系。当输入量一定，输出量也不变，这时二者处于平衡（相对静止）状态，也叫做稳定状态，其关系为静态特性；当输入量改变，输出量也随着时间而变化，系统处于变动状态，这时二者的关系称为动态特性。由于自动调节系统经常是处于运动状态的，所以重点是研究系统的动态特性。

当调节系统的输入发生变化时，原来的稳定状态就被破坏，其输出在调节装置的作用下，经过一段时间变化后，又达到一个新的稳定状态。这样，系统由一个稳定状态过渡到另一个稳定状态的过程，或者说，输出量随时间而变化的调节过程，就成为自动调节系统的过渡过程或动态过程，也称时间特性。工程上常常以在一个突变的输入，即阶跃输入（或称阶跃扰动）下，系统的过渡过程来研究系统的特性。阶跃输入是一种常见的、也是最不利的输入信号，一经加入就持续下去不再消除，如果调节系统的作用能克服这种输入的影响而得到满意的效果，则在其他类型输入作用下也必然能满足要求。阶跃输入常取输入量可能的最大值，由于研究系统特性时都取相对值表示各量，输入最大量的相对值就是1（即100%），因此，常称之为单位阶跃输入。在单位阶跃输入下，调节系统的过渡过程一般表现为下列四种基本形式：

1、单调过程，如图1·3—1（b）所示，这是非振荡的调节过程，输出量只作单调变化以达到稳定状态。这种过程对原稳定值的偏离较大，达到新的稳定的时间较长。

2、衰减振荡过程，如图1·3—1（c）所示，输出量的振幅随时间的增加而逐渐衰减，最后达到稳定状态。

上述两种是稳定的过渡过程，是自动调节系统希望得到的，也是工程设计中常用的。

3、持续振荡过程，如图1·3—1（d）所示，调节过程一直振荡（其振幅常是等值的），不能达到稳定状态。这种过程属于不稳定的过渡过程，只有当工艺参数允许有一定范围的波动时才能使用。

4、发散振荡过程，如图1·3—1（e）所示，输出量的振幅随时间的增加而逐渐增大，以致超过规定范围，使自动调节不能进行，甚至发生事故。这也是一种不稳定的过渡过程，在工程设计中必须尽力避免。

阶跃输入有两种形式，即给定值改变和扰动量改变，其过渡过程的形式也不同，以衰减振荡过程为例，其过渡过程曲线如图1·3—2所示。

过渡过程对自动调节系统工作质量的影响很大，是衡量调节质量的依据。

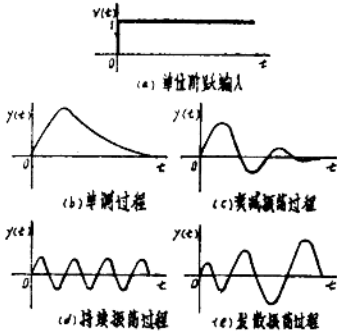


图1.3—1 在单位阶跃输入下过渡过程的几种基本形式图

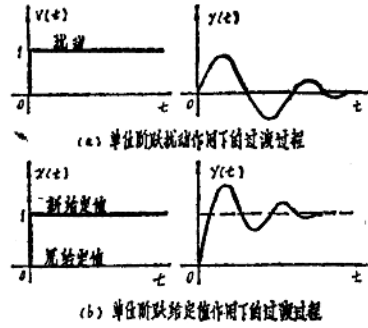


图1.3—2 在不同的阶跃输入作用下的衰减振荡过渡过程曲线图

对于一个自动调节系统，其特性能满足下列三点最基本的要求，即应具有：

1、稳定性 即系统保持和恢复稳定状态的能力。要求调节系统的过渡过程偏离稳定值的波动小，并能很快衰减达到稳定状态，即绝对稳定。这是工程设计上首先要考虑的。同时也应考虑到要有一定的稳定裕量，即让系统工作在距不稳定状态有一足够的“距离”，就是相对稳定。

2、准确性 即系统输出量在经过过渡过程而达到新的稳态后，要求恢复原稳定值或跟随新给定值的误差尽可能小。

3、快速性 要求系统能迅速克服输入量变化的影响达到稳定，即其过渡过程所经历的时间应是最短的。

作为定量地衡量系统满足上述要求的程度，规定了一些指标，例如：衰减比、余差、最大偏差或超调量、过渡过程时间等，称为自动调节系统的性能指标(或称品质指标、质量指标)，将在第二章中具体说明。

二、系统特性的描述

采用数学方法来研究自动调节系统的特性是比较方便的。一般，系统的特性都可以用微分方程来描述，这种描述系统特性的数学表达式，叫做系统的数学模型。当系统的数学模型推导出来后，就可采用各种分析方法和计算工具，对系统进行分析 and 综合。

列写系统微分方程的步骤如下：

(一) 绘出调节系统组成的方框图，标出相关的各量；

(二) 根据有关的物理学定律(如：牛顿定律、流体流动定律、气体定律、热力学定律、克希霍夫定律、欧姆定律、等等)列出表示输入量、输出量，以及各环节中间变量之间相互联系的一系列方程式及微分方程式；

(三) 消除中间变量，并通过简化、合并、最后获得只包含输入量与输出量的微分方程式，这就是调节系统的微分方程式。

下面以一加热炉炉膛温度自动调节系统为例，说明列写系统微分方程式的过程和方法。图1·3—3和图1·3—4分别给出了该系统的原则系统图和方框图。

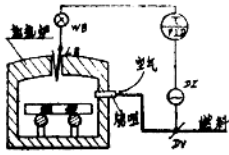


图1.3-3 加热炉温度自动调节原则系统图

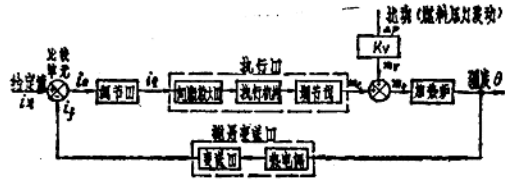


图1.3-4 炉温自动调节系统方框图

首先，分析对象——加热炉的输出量和输入量之间的关系。这里输出量是炉膛温度 θ ，输入量是单位时间燃料进入量 m_0 ，它们之间的关系要从热平衡的角度分析。设燃料的发热系数为 γ ，则单位时间流入炉内的热量 q 就等于 γm_0 ，即

$$q = \gamma m_0$$

由于炉子具有一定的蓄热能力，其热容量以系数 C 表示，含义是炉子温度每升高 1°C 所需要的热量（卡）数。那么，在 dt 时间内因热量的流入而使炉温升高 $d\theta$ 的值，就可用下式计算：

$$d\theta = \frac{q dt}{C}$$

又因为炉子的热量同时也在向外散发，散发量还与当时的炉温成正比。设散发量为 q_s ，则有

$$q_s = \frac{\theta}{R}$$

式中 R 为炉子的热阻。如果同时考虑流入热量和散发热量，则在微小时间 dt 内炉温的变化应为：

$$d\theta = \frac{(q - q_s) dt}{C}$$

或

$$d\theta = \frac{(\gamma m_0 - \frac{\theta}{R}) dt}{C}$$

经过变换后可以写成：

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = R\gamma m_0$$

令 $RC = T$ 称为炉子的时间常数，

$R\gamma = K_0$ 称为比例系数，

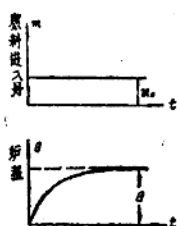
则上式可以写成：

$$T \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_0 m_0 \quad (1.3-1)$$

由此可见，加热炉的炉膛温度 θ 与燃料进入量 m_0 之间的关系，可以用一个一阶微分方程式来描述。这个微分方程的解是：

$$\theta = K_0 m_0 (1 - e^{-t/T}), \quad (1.3-2)$$

当燃料进入量 m_0 有一个阶跃变化时，炉温 θ 的变化规律示于图1.3-5上。



第二，写出测量变送器的输出电流 i_f 与输入温度 θ 的关系式。在可以忽略热电偶和温度变送器的惯性滞后时，这种关系可以近似地认为是线性的，即可写成：

$$i_f = K_f \theta \quad (1.3-3)$$

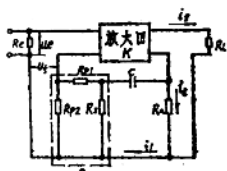
式中 K_f 为比例系数。

图1.3-5 炉温变化曲线图

第三，写出比较单元上的给定电流 i_x 、反馈电流 i_f 和偏差电流 i_e 之间的关系式：

$$i_e = i_x - i_f \quad (1.3-4)$$

第四，列写调节器的输出电流 i_q 与输入电流 i_e 之间的函数表达式。设在该系统中采用的是电流型的比例-积分调节器，其电路原理示于图1.3-6上。



根据电学原理可以列出一组方程式：

$$i_2 R_a = i_1 R + \frac{1}{C} \int i_1 dt,$$

$$u_f = i_1 R N; \quad u_e = i_e R_e;$$

$$i_q = (u_e - u_f) K = i_1 + i_2$$

图1.3-6 比例积分电动调节器
电路原理图

式中，总电阻 $R = \frac{R_f (R_{p1} + R_{p2})}{R_f + R_{p1} + R_{p2}}$ ；

分压比 $N = R_{p2} / (R_{p1} + R_{p2})$ 。

解上述方程组，可以求得 i_q 和 i_e 的关系式：

$$\begin{aligned} i_q \left(1 + \frac{1}{KRN} + \frac{1}{KR_s N} \right) + \frac{1}{RCR_s N} \int i_e dt \\ = i_e \left(\frac{R_e}{R_s N} + \frac{R_e}{RN} \right) + \frac{R_e}{RCR_s N} \int i_e dt \\ = \left(\frac{R_e}{R_s N} + \frac{R_e}{RN} \right) \left[i_e + \frac{1}{C(R+R_s)} \int i_e dt \right]. \end{aligned}$$

令 $\frac{1}{C(R+R_s)} = T_i$ ， $\frac{R_e}{R_s N} + \frac{R_e}{RN} = K_p$ ，且使放大器的放大倍数 K 足够大，以致