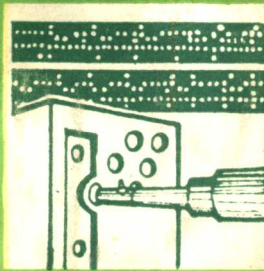
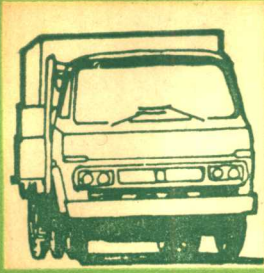


高等学校试用教材



自动调节原理与 透平机械自动调节

清华大学倪维斗 主编
哈尔滨工业大学徐基豫



机械工业出版社

高等学校试用教材

自动调节原理与 透平机械自动调节

清华大学倪维斗 主编
哈尔滨工业大学徐基豫



机械工业出版社

自动调节原理与透平机械自动调节

清华大学倪维斗 主编
哈尔滨工业大学徐基豫

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 24 · 字数 593 千字

1981年9月北京第一版·1986年6月北京第四次印刷

印数 8,501—9,720 · 定价4.00元

*

统一书号: 15033·5062

前 言

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会的精神,以及同年在黄山召开的涡轮机专业教材会议所拟定的《透平机械自动调节》教材编写大纲编写的。

本书共分两篇。第一篇是自动调节原理概述,重点地介绍经典自动调节原理的主要内容,如拉普拉斯变换及其应用、传递函数、物理系统的数学模型、用频率法分析与校正自动调节系统与控制系统、用电子模拟计算机分析系统等。此外,在第一篇中还对现代控制理论的基本方法——状态空间法作了扼要的叙述。在这一篇中还有专门的章节介绍如何用现代方法对物理系统进行识别的原理。第一篇的内容是分析、研究自动调节系统所必须具备的基础知识。

第二篇介绍作为调节对象的蒸汽轮机与燃气轮机的动态方程、调节系统组成元件的静态与动态特性,并对不同用途和不同形式的蒸汽轮机与燃气轮机的调节系统的动态特性作了分析。

在编写过程中编者力图使第一篇的基本理论在第二篇中得到应用,而第二篇的应用又能进一步加深对第一篇中理论的理解,使两篇有机地结合。

本书可作为透平机械专业和其他动力机械、能源等专业高年级学生的教材,也可供有关专业的工程技术人员参考。

本书由清华大学倪维斗同志和哈尔滨工业大学徐基豫同志主编。第一篇(1~8章)由倪维斗同志编写,第二篇的 9~12 章由徐基豫同志编写,第二篇的第 13 章由清华大学叶柏生同志编写。

本书由上海机械学院吴福成同志和西安交通大学朱汉鼎同志主审。两位主审和西安交通大学的张镇一同志对原稿进行了仔细的审阅,并提出了很多宝贵的意见。上海机械学院的陈耀章同志、上海交通大学的张伯年同志、上海电专的车雄夫同志亦对书稿提出了宝贵的意见。一机部教材编辑室的朱骥北同志对本书进行了编辑与校核,在此,编者深表感谢。

由于编者水平有限,时间也比较仓促,错误在所难免,希读者指正。

目 录

第一篇 自动调节原理概述

第一章 绪论	1	第五章 对象特性的测量与识别	86
§ 1-1 引言	1	§ 5-1 飞升曲线法	86
§ 1-2 自动调节的基本概念	1	§ 5-2 频率特性法	92
§ 1-3 自动调节系统的静态特性	2	§ 5-3 用伪随机信号相关仪对系统在线 识别	94
§ 1-4 自动调节系统的动态特性	3	§ 5-4 用数据处理计算机测定对象的频 率特性	101
§ 1-5 其它自动调节与控制系统示例	6		
§ 1-6 定义与术语	7		
第二章 数学基础	10	第六章 自动调节系统的性能指标与 稳定性分析	106
§ 2-1 复数与复变函数	10	§ 6-1 稳定性与敏感性	106
§ 2-2 拉普拉斯变换及其应用	14	§ 6-2 稳态精度	108
§ 2-3 矩阵	28	§ 6-3 过渡过程	112
习题	33	§ 6-4 稳定性准则	115
		§ 6-5 系统的闭环频率特性及尼科斯图	135
第三章 传递函数与方块图	35	习题	130
§ 3-1 传递函数	35	第七章 线性自动调节系统的分析与 校正	133
§ 3-2 调节系统中典型环节的传递函数	37	§ 7-1 概述 复频域与时域	133
§ 3-3 典型环节的组合——各种调节器	46	§ 7-2 校正环节的特性及其应用	136
§ 3-4 环节的连接及方块图的等效变换	48	§ 7-3 电子模拟计算机及其在分析自动 调节系统中的应用	150
§ 3-5 自动调节系统的开环与闭环传递 函数	53	习题	161
§ 3-6 多变量系统与传递矩阵	55	第八章 状态空间法概述	163
§ 3-7 信号流程图	56	§ 8-1 引言	163
§ 3-8 物理系统的数学模型	60	§ 8-2 系统的状态空间表达式	164
习题	67	§ 8-3 定常系统状态方程的解法	177
		§ 8-4 状态空间分析中的有关稳定性判 别	185
第四章 频率特性	70	§ 8-5 状态空间分析法在自动调节系统 设计中的应用	188
§ 4-1 频率特性的物理意义	70	§ 8-6 线性时变系统	195
§ 4-2 典型环节的频率特性	72	习题	198
§ 4-3 振荡环节的频率特性以及它和过 渡过程之间的联系	75		
§ 4-4 对数频率特性	79		
习题	85		

第二篇 透平机械自动调节

第九章 透平机械自动调节概述	201	第十章 蒸汽及燃气轮机自动调节系 统中的基本元件	205
§ 9-1 引言	201	§ 10-1 测量元件	205
§ 9-2 典型系统介绍	202		

IV

§ 10-2	液压式中间放大及执行元件	217	§ 12-4	功频电液调节系统分析	277
§ 10-3	电液转换器	231	§ 12-5	工业用汽轮机调节系统分析	283
§ 10-4	调节汽阀	234	§ 12-6	背压式与余热利用汽轮机调节系统分析	292
§ 10-5	燃气轮机的燃料调节机构	238	§ 12-7	抽汽式汽轮机调节系统分析	297
第十一章	调节系统的静态特性	246	§ 12-8	汽轮机的自动起停	306
§ 11-1	调节系统的不等率	246	§ 12-9	汽轮机的保护系统及其主要元件	309
§ 11-2	发电用蒸汽及燃气轮机调节系统静态特性曲线的绘制	247	第十三章	燃气轮机调节	313
§ 11-3	发电用蒸汽及燃气轮机的运行方式及负荷分配	249	§ 13-1	引言	313
§ 11-4	静特性的平移——同步器	250	§ 13-2	作为调节对象的单轴燃气轮机特性分析	315
§ 11-5	静特性曲线的合理形状	253	§ 13-3	作为调节对象的单轴燃气轮机动态方程组	326
§ 11-6	汽轮机调节系统静特性的试验	254	§ 13-4	发电用单轴燃气轮机调节	341
第十二章	汽轮机调节	256	§ 13-5	机车用单轴燃气轮机调节	357
§ 12-1	汽轮机的动态特性——转子方程和容积方程	256	§ 13-6	作为调节对象的分轴燃气轮机的特性分析和动态方程组	365
§ 12-2	凝汽式(发电用)汽轮机调节系统分析	262	§ 13-7	分轴燃气轮机调节	373
§ 12-3	中间再热式汽轮机调节系统分析	263	参考文献	380	

第一篇 自动调节原理概述

第一章 绪 论

§ 1-1 引 言

“自动调节原理”原是自动化专业的主要课程,但近年来随着科学技术的迅速发展,这门课程的主要内容已成为涡轮机专业和其它非自动化专业技术人员所必须具备的知识,这是因为:

1. 随着蒸汽轮机装置与燃气轮机装置自动调节系统的不断改进,被调节对象的复杂化以及自动化程度的提高,要设计、分析它们的调节系统必须具备自动调节原理的基础知识。

2. 设计一个产品、一套设备、一个装置,不能仅仅只从结构、强度、材料、工艺角度加以考虑,还必须对这个设备的调节、控制、工作稳定性及从一个工况向另一个工况的过渡等方面进行综合分析研究。

3. 技术人员在实际工作中将会遇到大量的与自动调节、控制有关的问题。如叶片加工中的靠模铣、靠模刨、数控机床、热处理时的温度自动控制……,没有自动调节原理的基本知识,就不可能很好地使用、调整与分析这些设备。

4. 随着产品的更新换代,科学试验的比重将会不断增加。被测参数在绝大多数情况下是随时间而变化的,即使被测的是稳态参数,从一个工况到另一个工况也有一个过程,如不具备动态分析的能力,就不能正确地设计、选择测试设备,合理地配置测试系统,从而不能有效地进行科学试验。

5. 随着系统工程学科的迅速发展,最佳化、最优化、动态模拟、线性规划等这些学科不断地深入到机械设计的各个领域,将逐渐成为有关技术人员考虑问题的基本出发点之一。这些新学科与自动调节原理有密切联系。

本教材的目的是:

1. 给予读者考虑问题的动态概念。在以前的有关课程中,如物理学、力学、电子学、机械零件等,绝大多数只从稳态的角度分析问题,而不考虑工作的稳定、一个工况到另一个工况的过渡。

2. 使读者掌握动态分析的基本方法。自动调节原理是一门迅速发展的学科,内容十分丰富,不可能在 35~40 学时内全部加以叙述。本书只介绍线性系统的基本原理,同时,被测量和控制的信号都是连续变化的。至于非线性系统和离散的采样控制系统,本书中就不涉及了。

3. 为进一步较深入的学习打下初步基础。

§ 1-2 自动调节的基本概念

自动调节这个概念是十分广泛的,在日常生活和各个技术领域都会遇到。譬如说,人体

就具有十分精确的温度调节系统。不论是冬天或是夏天、是吃冰棍或是喝热汤,人体的温度在正常情况下,一般总是 36.8°C 左右,偏差不超过 0.2°C 。也就是说,人体内的温度调节系统根据外界和内部条件,调节人体自身发出的热量与散热量,使体温保持为常值。

以一台汽轮机的转速调节为例。为了保证电的质量,我们希望在不同负荷下,汽轮发电机的转速基本保持不变。这个任务可用图 1-1 所示的方式来完成。例如,由于电负荷减少,原来进入汽轮机的蒸汽所产生的扭矩将大于发电机的阻力矩,机组转速上升,在转速表 3 上可以观察到这个变化。操作人员 2 看到机组转速超过给定值用手关小进汽阀门 1,使进入汽轮机的蒸汽量减少,以保持转速基本不变。这就是一个典型的调节系统,可用图 1-2 来表达。操作人员用眼睛观察转速表,经过头脑思考,即对比实际转速与给定转速,是高还是低,差距是多少,然后发出指令,让手去执行,开大或是关小阀门。如果把图 1-2 中操作人员的功能用一台仪表来代替,就成了转速自动调节系统(图 1-3)。调节器 2 接受从转速敏感元件来的信号,与给定转速对比后,发出信号去改变阀门的开度。这个系统的方块图如图 1-4 所示。

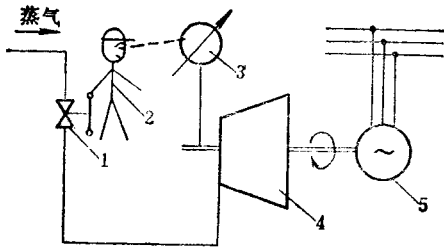


图 1-1 汽轮发电机转速调节

1—进汽阀门 2—操作人员 3—转速表
4—汽轮机 5—发电机

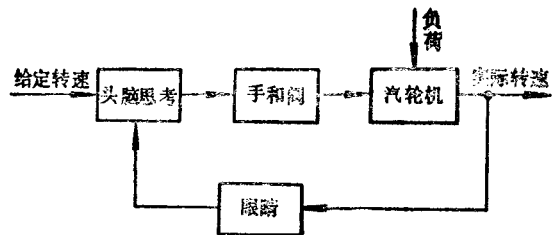


图 1-2 调节系统示意图

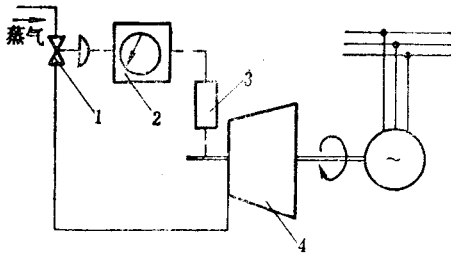


图 1-3 转速自动调节系统

1—蒸汽阀门 2—调节器 3—转速敏感元件
4—汽轮发电机

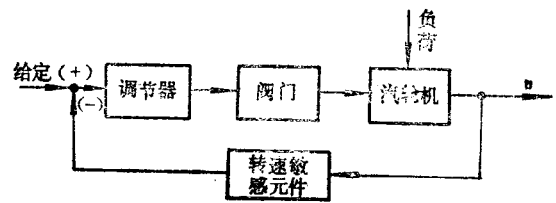


图 1-4 转速调节系统的方块图

§ 1-3 自动调节系统的静态特性

我们来较仔细地观察一个最简单的、汽轮机的转速自动调节系统(图 1-5)。因为移动汽轮机的阀门 4 需要很大的提升力,所以不可能直接由调速器来带动。在调速器与阀门之间装了一个由外界提供能量的中间放大机构,在图 1-5 上是一个利用高压油的油动机。这种系统称之为间接调节系统。蒸汽轮机 2 带动发电机 1 单独运行,给用户供电。当用户用电量减少时,汽轮机负荷减少,转速升高,飞锤 7 的离心力超过弹簧 6 的约束力,飞锤向外张开,使滑环 8 上升 Δx 。原来滑阀 9 用自己的两个凸肩封住油口 a 与 b ,使油动机活塞 5(也就是进汽阀)

处于某一位置。现滑环 8 上移 Δx , B 点也随着上升, 高压油通过油口 a 进入油动机活塞上腔, 而下腔的油通过油口 b 与回油相连, 油动机活塞下行, 关小阀门, 减小蒸汽量。在活塞下行的同时, A 点下移, 带着 B 点下降, 使油口 a 与 b 关小。直到杠杆 ABC 到达图 1-5 上虚线所示位置, 滑环 9 用凸肩把油口 a 、 b 重新封死, 油动机活塞才停止移动。此时, 阀门的开度比负荷变化前小了 Δz , 与新的负荷值相适应, 转速便稳定在某一个值上。如是负荷增加, 杠杆 ABC 将稳定在图 1-5 上点划线所示位置。从图上可以看出, 不同负荷对应不同的阀门开度, 不同的阀门开度对应不同的滑环位置(因为 B 点在工况稳定后总是回到原来位置), 不同的滑环位置对应不同的汽轮机转速。显然, 这样的系统并不能在不同负荷下保持转速完全不变, 而是负荷大时对应的转速较低, 负荷小时对应的转速较高。负荷与转速的关系可用图 1-6 的曲线来表示, 这条曲线称之为静态特性曲线, 它表明在工况稳定下来以后转速与负荷之间的关系。若需要还可以得出转速 Δn 与滑环位移 Δx , Δx 与阀门开度 Δz , Δz 与汽轮机功率 ΔN (即负荷)之间的关系曲线。

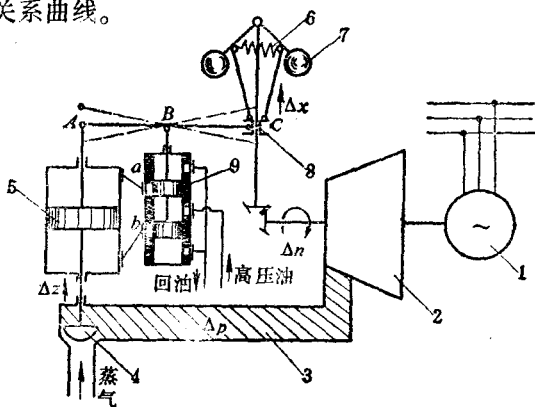


图 1-5 汽轮机转速间接调节系统简图

- 1—发电机 2—汽轮机 3—调节阀与喷嘴之间的容积
4—调节阀 5—油动机活塞 6—调速器弹簧 7—调速器飞锤 8—滑环 9—油动机滑阀

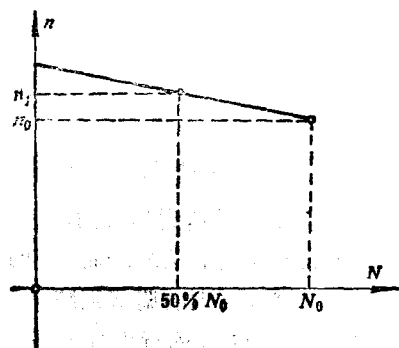


图 1-6 转速调节系统的静态特性曲线

调节系统设计者的任务之一就是按所要求的静态特性曲线来设计调节系统中的各个部件, 使得到应有的、一一对应的关系。如: 选择离心调速器的弹簧刚度, 重锤重量, 与汽轮机之间的传动比……, 以得到所需要的 Δn 与 Δx 之间的关系; 选择杠杆 ABC 的杠杆比 AB/BC 使得到合适的 Δx 与 Δz 之间的关系; 设计调节阀并根据阀门流量特性得到应有的 Δz 与阀门喷嘴间的压力 Δp , 以及蒸汽流量 ΔG 、功率 ΔN 之间的关系……。

§ 1-4 自动调节系统的动态特性

上一节所说的静态特性并不能全部反映一个调节系统的性能。一台机组所带的负荷不可能长时间固定不变, 而总是或大或小、或快或慢地不断变化着。即使负荷严格不变, 也总存在着这样或那样的扰动, 使各调节部件和汽轮机参数处于不停地变化过程之中。所以, 不仅要知道工况稳定下来以后各参数之间的关系, 更重要的是要分析从一个工况到另一个工况的过渡过程中各参数的变化规律。为了建立动态的基本概念, 对图 1-5 所示系统我们来分析一下它的甩负荷过程。

设机组原在满负荷工况下运行, 转速为 n_0 (图 1-6), 现突然减去 50% 负荷, 汽轮机的转速开始上升。因为汽轮机的转子具有转动惯量, 转速的增加不会象负荷减小那样立即发生, 而是有一个过程, 即转速的变化落后于负荷的变化。转速的上升使压力油通过油口 a 进入活塞上腔, 去关小调节阀门, 但高压油进入油动机也有一个过程, 它的活塞移动速度和滑阀套的油口开度成比例, 即阀门的开度变化也要落后于滑环位置的变化。阀门关小后, 由于阀门与汽轮机喷嘴之间有一个容积 (在图 1-5 上用剖面线示出), 在这个容积中储存了一部分高压蒸汽, 阀门虽然已经关小了, 但这个容积中的压力却一时降不下来, 仍有较多的蒸汽进入汽轮机做功, 转子仍在剩余扭矩作用下继续升速, 阀门进一步关小。直到转速升高到 n_D (这个转速要比图 1-6 上静态特性曲线 50% 负荷所对应的转速 n_1 高不少, 见图 1-7) 进入汽轮机的蒸汽量才与 50%

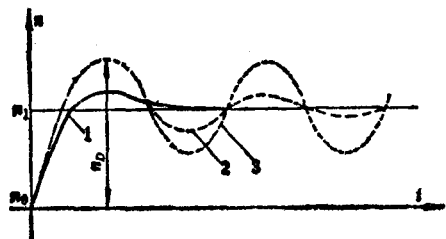


图 1-7 不同的转速过渡过程曲线

负荷相适应, 转速停止升高, 但此时阀门已经关“过头”了。由于容积中所储存的多余蒸汽量已放完, 而阀门的过关使进入的蒸汽量不足, 转子的转速从 n_D 开始下降, 而这个转速下降要求打开阀门的信号仍是层层落后, 各个部件的动作仍不能协调一致, 阀门又有可能开过头。不过, 这个过开量比前面的过开量要小一些。这样来回反复, 振荡的幅值逐渐衰减, 最后转速在 n_1 值稳定下来, 如图 1-7 上曲线 2 所示。在过程中转子达到的最高转速 n_D 和稳态转速 n_1 的比值叫做超调量, 它的数值大于 1.0。对一个较完善的调节系统, n_D/n_1 接近于 1.0, 过程结果得很快, 如图 1-7 中曲线 1。对一个较差或一个不符合要求的调节系统, n_D/n_1 的比值较大, 过程也拉得比较长。甚至可能有这种情况, 转速总是在 n_1 附近大幅度摆动, 稳定不下来 (图 1-7 上曲线 3)。显然, n_D 很大就会在叶轮和叶片中产生过大的离心应力, 转速来回摆动就会影响所发电的质量……这些都是我们所不希望的。

由此可见, 对一个调节系统来说, 除了静态以外, 十分重要的问题就是要研究它的动态。如上所述, 由于层层落后, 调节系统各部件位移和汽轮机有关参数在过渡过程中偏离了静态特性所给定的一一对应的关系, 而是按其自己的规律、但又相互约制地各自变化。在静态时各元件和参数之间的一一对应的关系可用代数方程来表达, 如:

$$\Delta x = K_1 \Delta n \quad (1-1)$$

$$\Delta z = -K_2 \Delta x \quad (1-2)$$

$$\Delta p = K_3 \Delta z \quad (1-3)$$

$$\Delta N_T = K_4 \Delta p \quad (1-4)$$

式中 K_1, K_2, K_3 与 K_4 ——有关比例常数。

但在动态过程时这些关系就必须用微分方程来描述, 如:

1. 转速与剩余扭矩之间的关系

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_4 (\Delta M_T - \Delta M_L) \quad (1-5)$$

式中 ω ——角速度, $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ 。

经简单推导后可得

$$T_0 \frac{d\varphi}{dt} = K'_4(\rho^* - \psi) \quad (1-6)$$

2. 油动机位移与滑环位移之间的关系

$$T_s \frac{d\mu}{dt} + \mu = K'_2 \zeta \quad (1-7)$$

3. 阀门位移与喷嘴前压力的关系

$$T_0 \frac{d\rho^*}{dt} + \rho^* = K'_3 \mu \quad (1-8)$$

式中 J ——转子的转动惯量;
 ΔM_T ——蒸汽做功产生的扭矩变化;
 ΔM_L ——负荷变化所引起的扭矩变化;
 T_a, T_s, T_0 ——相应的常数,具有时间的量纲;
 K'_2, K'_3, K'_4 ——相应的系数。

$$\varphi = \Delta n/n_0, \zeta = \Delta x/x_0, \mu = \Delta z/z_0, \rho^* = \Delta p/p_0, \psi = \Delta N_L/N_{L0}$$

(下标带“0”的都是该参数的额定值)

上述几个微分方程就是转子、油动机和中间容积的数学模型,在第二篇中将会详细讲到它们的推导方法。这样,整个系统各参数之间的关系可用图 1-8 所示的方块图来表达,系统就由一组微分方程来描述。自动调节原理的主要任务就是从稳定性和过渡过程的角度来研究、分析类似的微分方程组。例如:当机组原在某一工况稳定运行时,如外界有一个小扰动,机组的转速是否能很快地回复到原来稳定工况,还是来回摆动?在甩负荷时输出参数(在图 1-5 所示情况是转速)是否有很大的过调量,振荡过程是否能很快地衰减?系统中的一些参数,如 $T_a, T_s, T_0, K_1 \cdots K'_4$ 对稳定性与过渡过程有什么影响,应如何合理地匹配?如果稳定性和过渡过程不符合要求应采取什么措施加以改善?

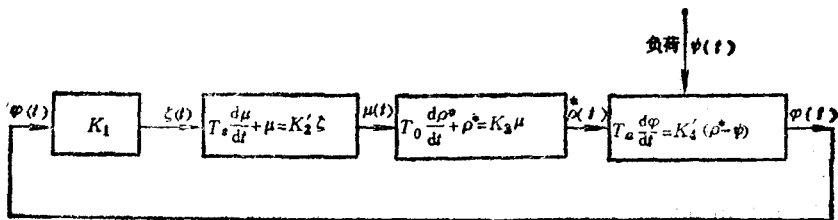


图 1-8 图 1-5 所示系统动态方块图

研究系统动态特性的方法很多。通常先把描述各个组成元件(包括调节系统本身与调节对象)的微分方程与代数方程按系统的输入与输出关系合成一个高阶微分方程,如

$$a_0 \frac{d^3 \varphi}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + a_2 \frac{d\varphi}{dt} + a_3 \varphi = b_0 \frac{d^2 \psi}{dt^2} + b_1 \frac{d\psi}{dt} + b_2 \psi \quad (1-9)$$

这个高阶微分方程(对图 1-5 所示系统为三阶)可用拉普拉斯变换来解,即把原为时间 t 的函数的变量 $\varphi(t)$ 变换成复变量 s 的函数 $\varphi(s)$,从时间域变到复频域来解方程,然后再进行反变换回到时间域来。在复频域中研究自动调节系统的动态特性除直接用拉普拉斯变换求解方程外还有一系列更为方便的办法,如传递函数,频率特性等。用这些方法可以不求解方程而对整个系统的稳定性进行判断和对过渡过程进行估算与计算,提出改进的措施。这些内容我们将在本教材中作较详细的介绍,是古典自动调节原理的主要内容,它以复数、复变函数以及拉普

拉斯变换为数学基础。本教材的第二章《数学基础》、第三章《传递函数及方块图》、第四章《频率特性》、第六章《自动调节系统的性能指标与稳定性分析》及第七章《线性自动调节系统的校正与分析》都是在复频域的基础上研究描述系统的微分方程组的。

随着计算机的发展与广泛应用,现代控制论得到迅速的发展,它可以直接在时间域中得出微分方程的解,判断系统的稳定性和求得过渡过程。现代控制论包括的内容很多,目前大多数还处于理论分析阶段,和实际应用还有一段距离。在本教材中只准备重点介绍状态、状态变量和状态空间的概念,掌握这些概念必须具备矩阵运算的数学基础。现代控制论与古典理论相比,具有许多优点,但是必须指出,它不能完全取代古典理论,而是各有各的用处,两种方法互为补充。现在,在工程中常用的方法正是建立在古典自动调节理论与现代控制理论两者优点的基础上的。

§ 1-5 其它自动调节与控制系统示例

为了开阔眼界,这一节介绍几个自动调节与控制系统的具体例子。

一、压力调节系统(图 1-9)

由燃气轮机 1 带动天然气压缩机 2 远距离输送天然气。 p_1 是增压站天然气进站压力, p_2 是出站压力。从运行的技术经济指标出发,要求在不同供气量 Q_g 和不同 p_1 时保持 p_2 不变。由测压元件测出 p_2 值,压力信号进入压力调节器 6 与给定值进行比较,然后输出信号通过执行机构去改变燃气轮机燃烧室的燃料量,使机组的转速 n 升高或降低,从而使 p_2 基本保持不变。

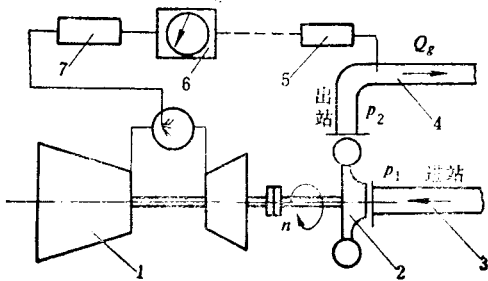


图 1-9 增压站出口压力调节系统

1—燃气轮机 2—天然气压缩机 3—进站管道 4—出站管道 5—测压元件 6—压力调节器 7—执行机构

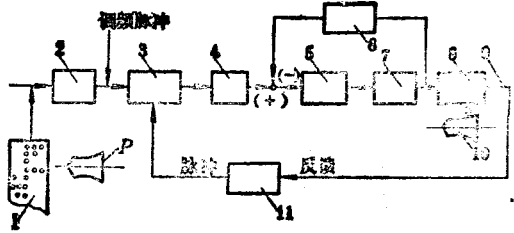


图 1-10 机床的数字控制系统方块图

1—纸带 2—读出器 3—控制器 4—数模转换器
5—放大器 6—测速发电机 7—伺服马达 8—刀具(工作台) 9—输出量(刀具位置) 10—被加工工件 11—模数转换器

二、数字控制系统(图 1-10)

数字控制是一种用数字来控制机器部件运动的方法。在数控机床中,工作台的运动可由纸带上的二进制的信息来控制。

图 1-10 是系统的工作原理图。按照对工件 P 的要求,在纸带上进行二进制编码。系统起动后,纸带上的信息通过读出器 2 送进系统。纸带的信息与调频脉冲组成输入调频脉冲信号,后者进入控制器 3 与反馈脉冲信号(也就是刀具 8 的实际位置的信号)进行比较。数模转换器 4 将输入与反馈两个脉冲信号的差值转变为模拟信号,即转变为具有一定数值的电压值。这个电压值经过放大器 5 放大后输到伺服马达 7,带动刀具 8 移动,刀具的位置由伺服马达的

输入信号控制。有一个检测元件与刀具相连,它把刀具运动转变为电信号,后者通过模数转换器 11 转换成为数字脉冲信号。控制器根据两个脉冲信号的差值进行运算。从图 1-10 还可以看到,在伺服马达输出端还有一个信号用测速发电机测出,然后返回到放大器的输入端。这条回路使数字控制系统工作得更平稳、更精确。

三、计算机控制系统(图 1-11)

一些大型、复杂的系统,如大型电网、蒸汽-燃气联合循环、由很多站组成的长距离输送天然气的管线等,在这些系统中所需要控制的参数很多,这些参数是互相影响互相联系的。如何使大量的参数之间有合理的匹配,在不同的外界条件与工艺要求下使整个设备在最佳条件下运行,这是一个十分复杂的问题,用人工控制是十分困难的。这个任务可用计算机控制来完成。

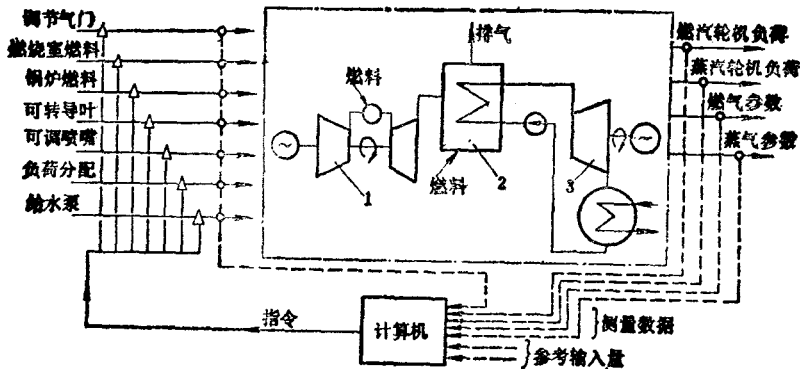


图 1-11 蒸汽-燃气联合循环计算机控制原理图

图 1-11 是蒸汽-燃气联合循环计算机控制原理图。燃气轮机 1 输出功率,它的排气进入废热锅炉 2,在后者中加入一定量的补燃燃料。从废热锅炉出来的蒸汽进入汽轮机 3 做功,为了有效利用热量蒸汽可分成高压、低压两个回路。当采用计算机控制时,可将燃气轮机与汽轮机的负荷,燃气及蒸汽的参数方面的信息,以及进入燃气轮机燃烧室与废热锅炉的燃料量,蒸汽轮机调节汽门的开度,压气机可转导叶与透平可调喷嘴的角度等方面的信息,每隔一定的时间间隔,送入计算机,通过后者的复杂运算,确定最佳燃料比例,负荷分配与其他运行条件,发出各种指令,从而保证装置在最佳条件下稳定地运行。

但是,在这种计算机控制过程中,必须有一个合适的数学模型,即有一个描述整个装置或过程各个参数之间动态关系的数学表达式。而要推导一个合适的数学模型,往往是一件很困难的事情,因为并非所有影响系统动态性能的因素都是已知的。此外,在计算机控制中,所需要的各种变量的测量,可能是不易实现的,有时甚至是不可能的。在这种情况下,对那些不能进行测量的参数,必须用统计的方法予以估值。

§ 1-6 定义与术语

有了上几节中自动调节与自动控制系统中的例子以后,就可以对本教材中的一些常用术语加以说明。

被调量(或称输出量)指被自动调节系统调节的物理量,如图 1-5 中转速调节系统中的转速,图 1-9 中压力调节系统中的站出口压力 p_2 ……。这个量一般是自动调节系统的输出量,

若一个自动调节系统只调节一个物理量,则称为单变量自动调节系统。调节两个以上物理量的称为多变量自动调节系统。

被调对象(或简称对象) 指与被调节物理量相应的那个装置或设备或生产过程。例如图 1-5 中的汽轮发电机组,图 1-9 中的燃气轮机——天然气压缩机等。

系统与环节 系统是调节对象和调节系统元件组合后的总称,如图 1-5 中的汽轮发电机、调速器、油动机、……组合在一起,成为一个系统。我们称这些组成元件为环节。

数学模型 描述调节对象、各环节和系统总体的动态特性的数学表达式,称之为对象、环节和系统的数学模型。这些数学表达式可以是线性微分方程或非线性微分方程或偏微分方程……。

给定值(或称给定信号) 指根据运行要求被调节量必须保持的数值。例如,转速调节系统把汽轮机的转速在不同负荷下都保持在 3000 转/分左右。

扰动 主要是指引起输出量变化的各种外界原因(即外扰),如图 1-5 中发电机负荷的变化,图 1-9 中用户用气量 Q_0 的变化。

输入量 泛指输入到自动调节系统中的各种信号,包括给定值变化和扰动。

反馈 将输出量的全部或一部分信号返回到输入端称之为反馈。反馈的结果如有利于加强输入信号称为正反馈,如图 1-12b 所示。反之,如反馈作用减弱输入信号,则称为负反馈,如图 1-12a 所示。从此图看出,输入系统的信号是 $r(t)$,从输出量反馈回来的信号是 $b(t)$, $r(t)$ 与 $b(t)$ 相减,实际上真正输入系统的第一个环节的信号是 $e(t)$,是 $r(t)$ 与 $b(t)$ 两者之间的差值,这就是负反馈。通常在自动调节和自动控制系统中用的都是负反馈。在有反馈的系统中(图 1-12),箭头 A 所示的是系统的向前通路,箭头 B 所示的是反馈回路。

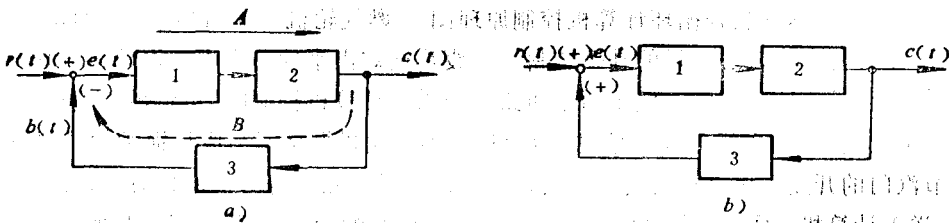


图 1-12 有反馈系统示意图

a) 正反馈 b) 负反馈

在一些较复杂的系统中,不仅有环绕整个系统、输入与输出之间的反馈,同时还有环绕一个或一、二个环节的局部反馈,如图 1-10 机床数字控制系统中环绕环节 7 与 8 的反馈。这些局部反馈的目的是增加系统的稳定性,使调节系统中各个环节之间更好地协调动作,防止过多的过调发生。反馈信号可以是机械位移信号(如图 1-5 中的 A 点),也可以是液压或电信号,这取决于调节系统的具体形式和结构。有时还采用弹性反馈(或称软反馈),即这种反馈只在调节系统动作的初期起作用,然后,随着时间的延伸,反馈信号逐渐消失。

闭环与开环系统 系统的被调量和输入之间存在着反馈回路的系统称之为闭环系统。图 1-5,图 1-9 与图 1-10 所示的都是闭环系统,因为系统的输出量(相应为转速,站出口压力 p_2 ,刀具位置)都反馈到系统的输入端,系统是根据给定值与实际值之间的偏差来进行调节的。由于存在着反馈回路,只要实际输出量不等于给定值,调节过程将继续进行,直到给定值与实际输出量基本相等为止。这种系统对外扰和内部组成环节参数的变化的影响有抑制作用,因

而就有可能用精度较低、价格较便宜的元件来构成较精确的自动控制 and 自动调节系统。但是，在闭环系统中，稳定性始终是一个重要问题，因为闭环系统容易引起过调，使系统长时期来回摆动。

如果被调量并未以任何形式反馈到输入端，则这种系统称之为开环系统。如图 1-13 所示，输入量经过几个环节以后转换为输出量，而对输出量不进行测量，也没有把它的信号返回到前面去。图 1-14 是汽轮机开环转速调节系统，它不是通过输出量(转速)的变化去控制进汽阀门的开度，而是由负荷去直接控制。例如，当负荷减少时，由负荷的信号把进汽阀门关小，以保持转速基本不变。显然，这样的开环系统很难保证输出量的调节质量。一些偶然的扰动和系统组成环节参数的变化(如进汽阀门特性的改变，蒸汽温度、压力的变化)都会在一个负荷、同一个阀门开度下，使进入汽轮机蒸汽的作功能力和作功量变化，从而导致转速的变化，而开环系统对此却毫无“感觉”，因为系统中根本没有转速信号。所以，只能在对输出量的精度要求不高时才能采用开环系统。开环系统比较简单，稳定性也较好。对某些具体情况可将开环系统和闭环系统适当地结合在一起，既简单、经济，又能满足整个系统的性能要求。



图 1-13 开环系统

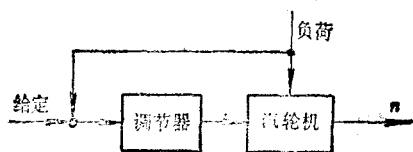


图 1-14 汽轮机开环转速调节系统

自动调节系统 是指这样的反馈系统，它的输出量基本保持某个不变值或是随时间和其它要求缓慢地变化。例如图 1-5 的转速调节系统的任务就是不同电负荷的情况下使汽轮机转速保持在 3000 转/分左右。图 1-9 的压力调节系统的任务就是不同供气量的情况下使 p_2 基本不变。

一般来说，自动控制系统的含义要比自动调节系统更广泛一些，但在本教材的范围内自动调节与自动控制之间没有原则区别，所以在下面的叙述中没有把两者加以区分。

过渡过程与响应 系统在外界扰动下(例如负荷变化)和给定值变化时，输出量或系统的其它参数随时间的变化叫做它的过渡过程，或是系统对某输入的反应。

第二章 数学基础

学习本篇需用的数学基础主要有复数、复变函数、拉普拉斯变换与矩阵运算。这些内容读者已在有关课程中学习过。为了便于读者回忆与应用，在本章中把这些数学基础中和我们有关的主要内容作一简要的复习。拉普拉斯变换是在复频域中研究自动调节系统的出发点，故在本章中作了较详细的叙述。

§ 2-1 复数与复变函数

一、复数

一个复数 s 有一个实部 σ 和一个虚部 $j\omega$ ，即 $s = \sigma + j\omega$ ，它可以用在 s 平面上的一个点来表示。图 2-1 表示 s 平面和典型点 $s_1 = \sigma_1 + j\omega_1$ 。

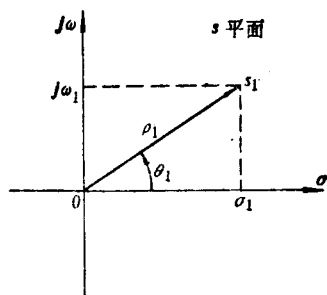


图 2-1 s 平面和一个典型的点

除了上述表达式以外，复数平面 s 上的一个点还可以用其他两种常见的方式来表达。

三角表达式：

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \rho \cos \theta \\ \omega &= \rho \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中 ρ ——从原点到某一点的距离，称为幅值或模；

θ ——从原点到某一点连线与正实轴之间的夹角(反时钟方向)，称为相角。

显然，从三角关系可以得出

$$\rho = \sqrt{\sigma^2 + \omega^2} \quad (2-2)$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega}{\sigma} \quad (2-3)$$

这样，

$$s_1 = \sigma_1 + j\omega_1 = \rho_1 \cos \theta_1 + j\rho_1 \sin \theta_1 = \rho_1 (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1) \quad (2-4)$$

指数表达式：

利用欧拉公式

$$\sin \theta = \frac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j}, \quad \cos \theta = \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2}$$

把上述关系代入式(2-4)，得

$$s_1 = \rho_1 \left(\frac{e^{j\theta_1} + e^{-j\theta_1}}{2} + j \frac{e^{j\theta_1} - e^{-j\theta_1}}{2j} \right) = \rho_1 e^{j\theta_1} \quad (2-5)$$

不同的表达式在运算时有所不同，例如：

$$s_1 - s_2 = (\sigma_1 + j\omega_1) - (\sigma_2 + j\omega_2) = (\sigma_1 - \sigma_2) + j(\omega_1 - \omega_2)$$

$$s_1 + s_2 = (\sigma_1 + j\omega_1) + (\sigma_2 + j\omega_2) = (\sigma_1 + \sigma_2) + j(\omega_1 + \omega_2)$$

$$s_1 s_2 = (\sigma_1 + j\omega_1)(\sigma_2 + j\omega_2) = (\sigma_1 \sigma_2 - \omega_1 \omega_2) + j(\sigma_1 \omega_2 + \sigma_2 \omega_1)$$

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\sigma_1 + j\omega_1}{\sigma_2 + j\omega_2} \frac{\sigma_2 - j\omega_2}{\sigma_2 - j\omega_2} = \frac{\sigma_1\sigma_2 + \omega_1\omega_2}{\sigma_2^2 + \omega_2^2} + j \frac{\sigma_2\omega_1 - \sigma_1\omega_2}{\sigma_2^2 + \omega_2^2}$$

若用三角表达式,则为

$$s_1 = \rho_1(\cos \theta_1 + j \sin \theta_1)$$

$$s_2 = \rho_2(\cos \theta_2 + j \sin \theta_2)$$

$$\begin{aligned} s_1 s_2 &= \rho_1 \rho_2 [\cos \theta_1 \cos \theta_2 + j(\cos \theta_2 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 \sin \theta_2) - \sin \theta_1 \sin \theta_2] \\ &= \rho_1 \rho_2 [\cos(\theta_1 + \theta_2) + j \sin(\theta_1 + \theta_2)] \end{aligned} \quad (2-6)$$

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} [\cos(\theta_1 - \theta_2) + j \sin(\theta_1 - \theta_2)] \quad (2-7)$$

式(2-6)与式(2-7)表明,若用三角表达式,两个复数相乘的乘积为它们的幅值相乘,相角相加。如是除法运算,则是幅值相除,相角相减。

若用指数表达式,则为

$$s_1 = \rho_1 e^{j\theta_1}$$

$$s_2 = \rho_2 e^{j\theta_2}$$

$$s_1 s_2 = \rho_1 \rho_2 e^{j(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2-8)$$

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} e^{j(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2-9)$$

复数的 n 次方或是 n 次根可写为

$$s_1^n = \rho_1^n e^{jn\theta_1} \quad (2-10)$$

$$\sqrt[n]{s_1} = (s_1)^{\frac{1}{n}} = (\rho_1)^{\frac{1}{n}} e^{j \frac{\theta_1}{n}} \quad (2-11)$$

可以看出,在做复数的乘、除法运算时,用三角表达式和指数表达式比较方便。

二、复变函数

复变函数 $G(s)$ 是复数 s 的函数,它也有一个实部和虚部,即

$$G(s) = G_x + jG_y \quad (2-12)$$

式中 G_x 与 G_y 都是实数。复变函数的幅值为 $\sqrt{G_x^2 + G_y^2}$,

它的相角 $\phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{G_y}{G_x} \right)$ 。图 2-2 示有 $G(s)$ 平面和两个复数量的点。角度 ϕ 从正实轴开始度量,并规定逆时针方向为正。

在线性控制系统中通常遇见的复变函数 $G(s)$ 是 s 的单值函数,一个 s 给定以后, $G(s)$ 就唯一地被确定。如果在某一域内存在 $G(s)$ 和它所有的导数,则此复变函数在该域内是解析的。

(一) 柯西-黎曼条件

解析的复变函数 $G(s)$ 的导数可由下式给出:

$$\frac{d}{ds} G(s) = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{G(s + \Delta s) - G(s)}{\Delta s} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta s}$$

$\Delta s = \Delta \sigma + j\Delta \omega$, 如导数与 Δs 的路线的选择无关,则 Δs 能沿无穷多个不同的路线趋近于零。显然,如果沿两个特殊的路线,即 $\Delta s = \Delta \sigma$ 和 $\Delta s = j\Delta \omega$, 所得到的导数是相等的,则对于沿其他所有路线取的导数也是唯一的。

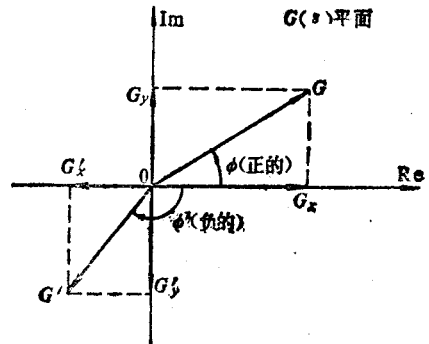


图 2-2 复平面 $G(s)$ 和两个典型复数量的点