

[苏] B. A. 别塞克尔斯基

自动调节系统的 动态综合

科学出版社

73.823
2/0

自动调节系统的动态综合

〔苏〕B. A. 别塞克尔斯基 著

冯 明 义 译

何 欣 年 等 校

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书叙述了满足给定精度和主要动态特性要求的自动调节系统的最优综合方法以及使结构简化的途径。同时也探讨了各种自动调节系统的实际计算,并列举了一些实例。对具有数字计算机控制的调节系统的实际计算也作了一定的讲述。

本书可供研究、设计自动调节系统的工作人员和大专院校的师生参考。

В. А. Бесекерский

ДИНАМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Издательство «Наука»

Москва, 1970

自动调节系统的动态综合

[苏] В. А. 别塞克尔斯基 著

冯 明 义 译

何 欣 年 等 校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1977 年 2 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1977 年 2 月 第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 0001—12,120 字数: 394,000

统一书号: 15031·132

本社书号: 707·15—8

定 价: 1.75 元

译 者 序

本书是作者在《小功率随动系统设计》一书的基础上、进一步充实完善的著作。

本书的特点是用振荡指标为基本判据，按对数频率特性综合自动调节系统。这种方法使用起来比较简单，而且便于实验研究，对工程实践来说比较实用。

书中讲述的具有数字计算机的断续系统的综合方法，是连续系统综合方法的延续。这对于熟悉连续系统综合方法的工程技术人员来说，在今天数字计算机广泛用于各种自动调节系统的情况下，无疑会有帮助的。

但是本书只讲一种综合方法，而且是属于古典调节理论范畴的，许多新的理论并未涉及，因此有一定的局限性。

我们遵照毛主席关于“**洋为中用**”的教导，在工作之余翻译了本书，对原书中许多明显有误的地方作了更正，个别地方加了注解。由于我们水平有限，错误之处在所难免，望广大工农兵学员及有关同志批评指正。

本书出版过程中，承蒙何欣年、贺清阳、郭爱力、李俊鹏、王振华等同志的校对和帮助，在此一并致谢。

译者

32575

· i ·

目 录

第 一 篇

按给定品质指标进行最优综合的基础

第一章 依据的原则	(1)
§ 1.1 对自动调节系统的要求	(1)
§ 1.2 自动调节系统中的基本关系式	(3)
§ 1.3 对数频率特性曲线的绘制	(6)
§ 1.4 复现输入作用所需精度的保证	(16)
§ 1.5 对稳定余量的要求	(25)
第二章 典型传递函数	(30)
§ 2.1 二阶无差系统	(30)
§ 2.2 一阶无差系统	(36)
§ 2.3 有差系统	(40)
§ 2.4 包含振荡环节的系统	(43)
§ 2.5 包含不稳定环节的系统	(47)
§ 2.6 具有典型传递函数的系统的过渡过程	(54)
§ 2.7 相关调节系统	(59)
§ 2.8 最优条件的满足	(68)
第三章 连续校正装置	(74)
§ 3.1 概述	(74)
§ 3.2 串联校正装置	(78)
§ 3.3 并联校正装置	(89)
§ 3.4 反馈	(97)
第四章 调节对象参数的偏差和变化的计算	(107)
§ 4.1 自动调节系统灵敏度的概念	(107)

§ 4.2	在满足精度要求时,参数变化影响的计算	(109)
§ 4.3	应用对称形对数幅频特性时, 参数变化对稳定余量影响的计算	(115)
§ 4.4	应用不对称形对数幅频特性时, 参数变化对稳定余量影响的计算	(118)

第 二 篇

连续调节系统

第五章	角复现随动系统	(122)
§ 5.1	基本结构图	(122)
§ 5.2	执行马达	(125)
§ 5.3	当作用于输入端的速度和加速度的幅值受限制时, 精度要求的实现	(135)
§ 5.4	复现随机输入信号时精度要求的实现	(144)
§ 5.5	期望对数幅频特性曲线中频与高频段的绘制和校正装置的计算	(156)
§ 5.6	计算举例	(160)
§ 5.7	复合控制随动系统	(177)
§ 5.8	平稳性和速度范围要求的实现	(183)
§ 5.9	考虑减速器的影响	(197)
§ 5.10	考虑减速器间隙的影响	(204)
§ 5.11	无减速器的随动系统	(209)
第六章	复现和稳定转速的机电系统	(213)
§ 6.1	基本线路	(213)
§ 6.2	原始的和被采用的传递函数	(216)
§ 6.3	误差的主要分量和工作范围	(220)
§ 6.4	期望对数幅频特性的绘制	(226)
§ 6.5	动态特性的改善	(229)
第七章	陀螺稳定器	(235)
§ 7.1	动力陀螺稳定器	(235)

§ 7.2	两自由度积分陀螺稳定器	(264)
§ 7.3	球形陀螺稳定器	(273)
§ 7.4	可控稳定器	(280)
第八章	工业调节系统	(293)
§ 8.1	基本结构图	(293)
§ 8.2	调节对象	(295)
§ 8.3	执行元件	(296)
§ 8.4	调节装置	(300)
§ 8.5	必须的精度和稳定余量的保证	(303)
第九章	平滑装置	(308)
§ 9.1	结构图和传递函数	(308)
§ 9.2	平滑性能	(316)
§ 9.3	平滑装置结构的确定及参数的选择	(326)
§ 9.4	最优平滑装置	(330)
第十章	深反馈放大器	(343)
§ 10.1	基本线路	(343)
§ 10.2	非调制信号的放大器	(345)
§ 10.3	调制信号的放大器	(349)
§ 10.4	计算例子	(361)
第十一章	具有调制信号的调节系统的工作特点	(368)
§ 11.1	按照调制信号的包络确定环节的传递函数	(368)
§ 11.2	对元件相位特性稳定性的要求	(376)
§ 11.3	调节系统输入端高次谐波的作用	(378)
§ 11.4	有干扰时对放大器线性度的要求	(380)
§ 11.5	相敏解调器输出端谐波的滤除	(383)

第 三 篇

脉冲和数字调节系统

第十二章	结构图和研究断续系统的数学工具	(395)
------	-----------------------	-------

§ 12.1	基本原理	(395)
§ 12.2	z 变换的应用	(399)
§ 12.3	脉冲滤波器	(405)
§ 12.4	频率特性	(407)
第十三章	断续系统的传递函数	(411)
§ 13.1	脉冲系统	(411)
§ 13.2	具有零阶外推器的数字系统	(414)
§ 13.3	具有一阶外推器的数字系统	(416)
§ 13.4	具有任意阶外推器的数字系统	(420)
§ 13.5	具有断续校正的数字系统	(425)
第十四章	断续系统对数频率特性的绘制	(427)
§ 14.1	低频部分的绘制	(427)
§ 14.2	脉冲系统高频部分的绘制	(430)
§ 14.3	具有零阶外推器数字系统高频部分的绘制	(438)
§ 14.4	具有一阶外推器的数字系统高频部分的绘制	(443)
§ 14.5	绘制振荡环节对数特性的特点	(448)
第十五章	脉冲和数字自动调节系统的综合	(456)
§ 15.1	综合精度的保证	(456)
§ 15.2	给定稳定余量的保证	(459)
§ 15.3	连续校正装置的计算	(467)
§ 15.4	断续校正装置的计算	(472)
§ 15.5	复合调节系统	(478)
§ 15.6	电平整量化影响的计算	(484)
§ 15.7	数字调节系统中的周期状态	(489)
§ 15.8	数字调节系统中的准周期状态	(497)
§ 15.9	数字计算机输出变换器位数的选择	(508)
第十六章	数字平滑装置	(522)
§ 16.1	干扰特性	(522)
§ 16.2	典型传递函数	(525)
参考文献		(534)

第 一 篇

按给定品质指标进行最优综合的基础

第一章 依据的原则

§ 1.1 对自动调节系统的要求

在研制自动调节系统的过程中,设计人员必须综合考虑与自动调节系统的各种特性有关的一系列要求。这些要求可以归纳为以下几大类:

与调节系统静态和动态特性有关的要求属于第一类。其中精度特性占有最重要的位置,调节系统在不同状态下可能产生的误差都是由它决定的。如果预先已经知道输入和扰动作用随时间的变化规律,那么每一瞬时内自动调节系统的已知误差,便是它的详尽的动态特性。

其实,这些规律实际上任何时候也不可能知道。因此必须利用对于某些确定形式的,或随机形式的典型输入和扰动作用的精度特性。但是,典型状态下的误差,不能完全说明调节系统的动态特性,这就不得不使用一些辅助的判据(准则或品质)。其中主要有:1)稳定余量的判据,它是根据自动调节系统对稳定性振荡极限的近似程度而确定的;2)快速作用的判据,它是根据过程的快速程度或根据通频带宽度而确定的。

也可以采用其他的一些判据,例如:确定着所设计的系统按某一最优准则趋于最优的判据;系统的动态工作范围(工作速度范围和输入作用范围);在“爬行”运动速度时,系统工

作的平稳性;当被调对象的参数有工艺偏差时,能保持自己动态特性的能力等等。

与下列几方面有关的要求属于第二类:调节系统工作的可靠性;系统对外部作用(气候、机械、化学等)影响的稳定性;以及在一定的时间内保持调节系统本身特性的能力。属于这一类的最主要的要求有:无故障工作的概率,工作温度范围,抗振性和抗振强度,抗振储备,所需要的保存时间和条件等等。

与调节系统使用条件有关的要求属于第三类。属于这一类的有:调节系统在其工作过程中的使用条件,使用人员的熟练程度,修复的可能性,进行检修的周期等等。

与调节系统容许重量、轮廓尺寸及消耗功率有关的要求属于第四类。除了所要求的总功率之外,能源的形式(直流或交流、气源等)以及能源的稳定度,常常也是重要的。

与调节系统制造工艺有关的要求属于第五类。这一类中大致包括这样一些要求:必须使用已经生产的或通用的元件和组件,装配和调整过程的简单性,经济指标等等。

与设计时出现的总情况有关的要求属于第六类。属于这类的要求有:专利新技术和清洁要求,应用已有的科研、设计和生产成果,具有固定的研究和设计人员等等。

从上面简单地叙述中就可看出,在自动调节系统的设计过程中,必须考虑非常广泛的技术要求。如果将一个或几个技术特性,当作最优准则的基础,而后再决定获得它的极值条件,那么,原则上说是能够设计出最优调节系统的。然而还不能说用这种方法得到的系统,从满足对它提出的全部综合要求的观点来看是最好的(最优的)。到目前为止,调节系统最优综合的数学理论还不能解决这一类问题。

下面,我们从满足第一类要求的观点出发,研究自动调节

系统的动态综合。将以已得到广泛推广的,以对数频率特性为基础的频率法作为进行综合的基础。

§ 1.2 自动调节系统中的基本关系式

本书研究具有一个被调量的系统。根据系统所要处理的输入作用特性的不同,这个系统可能是自整定系统,或者是程序调节系统,也可能是随动系统。

具有一个被调量的系统的典型结构图,示于图 1.1。图中符号说明如下:

g ——给定量(输入作用);

y ——被调量(输出作用);

$x = g - y$ ——调节误差;

y_0 ——被检测量;

$x_0 = g - y_0$ ——失调量;

u ——控制(调节)作用;

f ——扰动作用;

1——将失调量转换为便于沿控制通道传送的物理量的元件;

2——串联校正环节;

3——放大元件;

4——执行元件;

5——局部反馈环节;

6——实现比例作用或起转换作用的传递函数为 $W_{oc}(p)$ 的主反馈元件。

自整定系统的给定量 $g(t) = \text{常数}$, 程序调节系统的 $g(t)$ 是已知的时间函数, 而随动系统的 $g(t)$ 是预先不知道的时间函数。

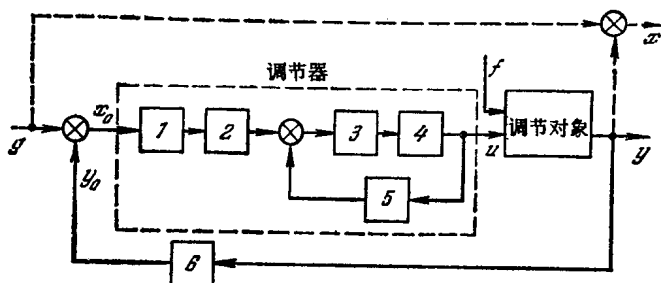


图 1.1 调节系统的典型结构图

我们引入下列传递函数：

1) 开环正向通道

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X_0(p)} = W_p(p)W_0(p), \quad (1.1)$$

其中 $W_p(p)$ 是调节器的传递函数；而 $W_0(p)$ 是调节对象的传递函数；

2) 开环系统

$$\begin{aligned} W'(p) &= \frac{Y_0(p)}{X_0(p)} = W_p(p)W_0(p)W_{oc}(p) \\ &= W(p)W_{oc}(p); \end{aligned} \quad (1.2)$$

3) 对输出作用的闭环系统

$$\Phi(p) = \frac{Y(p)}{G(p)} = \frac{W(p)}{1 + W'(p)}; \quad (1.3)$$

4) 对被检测量的闭环系统

$$\Phi'(p) = \frac{Y_0(p)}{G(p)} = \frac{W'(p)}{1 + W'(p)} = \Phi(p)W_{oc}(p); \quad (1.4)$$

5) 对误差的闭环系统

$$\Phi_x(p) = \frac{X(p)}{G(p)} = 1 - \Phi(p) = \frac{1 + W'(p) - W(p)}{1 + W'(p)}; \quad (1.5)$$

6) 对失调量的闭环系统

$$\Phi'_x(p) = \frac{X_0(p)}{G(p)} = 1 - \Phi'(p) = \frac{1}{1 + W'(p)}; \quad (1.6)$$

7) 对扰动作用的闭环系统

$$\Phi_i(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = - \frac{Y(p)}{F(p)} = \frac{W_i(p)}{1 + W'(p)}, \quad (1.7)$$

其中 $W_i(p)$ ——调节对象对扰动 $f(t)$ 的传递函数。

由公式(1.5)—(1.7)可得误差的表达式

$$\begin{aligned} X(p) &= \Phi_x(p)G(p) + \Phi_i(p)F(p) \\ &= \frac{1 + W'(p) - W(p)}{1 + W'(p)} G(p) + \frac{W_i(p)}{1 + W'(p)} F(p) \end{aligned} \quad (1.8)$$

以及失调量的表达式

$$\begin{aligned} X_0(p) &= \Phi'_x(p)G(p) + \Phi_i(p)W_{oc}(p)F(p) \\ &= \frac{G(p)}{1 + W'(p)} + \frac{W_i(p)W_{oc}(p)}{1 + W'(p)} F(p). \end{aligned} \quad (1.9)$$

除了特殊说明之外,在以后的叙述中将取 $W_{oc}(p) = 1$, 于是误差和失调将相等,即 $x(t) = x_0(t)$, 其传递函数也相等,即 $W'(p) = W(p)$, $\Phi'(p) = \Phi(p)$ 和 $\Phi'_x(p) = \Phi_x(p)$ 。

由于调节对象和调节器特性的不同,调节系统可能有不同阶次的无差度,计算出相对于输入作用 $g(t)$ 的调节系统的无差度,是比较简单的。这时,它完全可以由开环系统传递函数的形式求出

$$W(p) = \frac{K_r(1 + B_{m-1}p + \cdots + B_0p^m)}{p^r(1 + C_{n-r-1}p + \cdots + C_0p^{n-r})}, \quad (1.10)$$

其中 r ——相对于输入作用的无差度;

K_r [秒^{-r}]——开环系统的总放大系数。

$r = 0$ 时,是有差系统, $r = 1$ 时,是一阶无差系统, $r = 2$ 时,是二阶无差系统,等等。

方程(1.10)的分子和分母,用最简因式乘积的形式表示比较方便,即:

$$W(p) = \frac{K \prod_{j=1}^m (1 + T_j p)}{p^r \prod_{i=1}^{n-r} (1 + T_i p)} \quad (1.11)$$

如果(1.10)式的分母或分子包含复根,则在(1.11)式中将出现 $(1 + ap + bp^2) = 1 + \zeta Tp + T^2 p^2$ 形式的因子,它是振荡型环节的特征方程式。

§ 1.3 对数频率特性曲线的绘制

为了计算自动调节系统,利用根据开环系统传递函数(1.1)或(1.2)式绘制的对数幅频特性曲线,和对数相位特性曲线,是比较方便的。

为了绘制对数幅频特性曲线,应用以分贝表示的频率传递函数 $W(j\omega)$ 的模值,即

$$L(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)| = 20 \lg A(\omega). \quad (1.12)$$

贝尔是相当于功率增大十倍的对数单位, 1 贝尔相当于功率增大 10 倍, 2 贝尔相当于增大 100 倍, 3 贝尔相当于增大 1000 倍,等等。

分贝等于贝尔的十分之一。假若模 $A(\omega)$ 是功率之比,则在(1.12)式右侧部分应乘以 10 的系数。因为模 $A(\omega)$ 不是功率之比,而是输出量和输入量(位移、速度、电流等)之比,故这个比值增大 10 倍,相当于功率增大 100 倍,即相当于 2 贝尔,或 20 分贝。因此在(1.12)式的右侧应乘以 20 的系数。1 分贝相当于振幅变化 $\sqrt[20]{10}$ 倍。

在绘制对数幅频特性曲线时,在横坐标轴上标注对数尺

度的角频率,也就是十进制对数频率,而将频率的真值标注在刻度旁边(图 1.2)。在横坐标轴上也可以注以十进制对数频率 $\lg \omega$ 的值,或注明以 2 为底的对数频率 $\log_2 \omega$, 见图 1.2 下面两条标度。

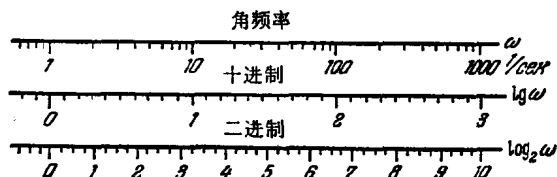


图 1.2 频率标度

1/сек, 1/秒

当采用十进制对数 $\lg \omega$ 时, 它的增量单位相当于频率的十倍, 称谓 10 倍频程。当采用 $\log_2 \omega$ 时, 它的增量单位相当于频率的两倍, 称谓倍频程。因为 $\lg 2 = 0.303$, 所以一倍频程相当于 0.303 十倍频程。

在横坐标轴上采用十倍频程或倍频程, 相当不方便, 因为这时得到的标度数字不是频率单位, 而是对数频率单位, 这就为使用对数特性曲线增加了困难, 实际上它们的优点也就没有意义了。因此在绘制对数特性曲线时, 应在横坐标轴上标注对数尺度的角频率, 就象图 1.2 上面那条标度所示的那样。

绘制对数幅频特性曲线时, 在纵坐标轴上画出以分贝表示的模值标度。

为了绘制对数相位特性曲线, 在横坐标轴上可采用类似的以分贝表示的模值标度, 而在纵坐标轴上标注相位移, 即以度表示的 $W(j\omega)$ 的相角。

为了便于同时绘制对数幅频特性曲线和对数相位特性曲线, 它们的频率标度可合绘为一个, 而相移标度可这样来画: 使 -180° 相移和模值标度的零分贝线重合(图 1.3), 且将负

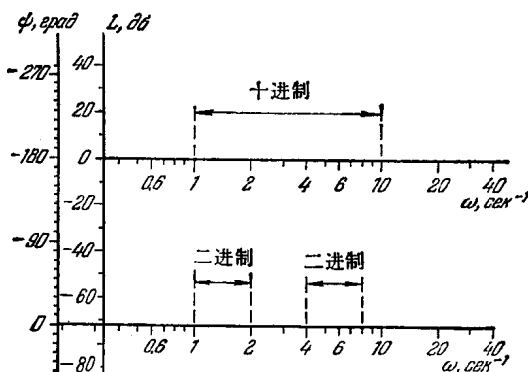


图 1.3 绘制对数幅频特性曲线和对数相位

特性曲线的典型图表

дБ. 分贝 град. 度

相移画在上面。今后我们将采用这种图表。

在绘制对数幅频特性曲线时，公式(1.11)是特别方便的，因为 T_i^{-1} 和 T_i^{-1} 相当于所谓渐近对数幅频特性曲线的交接频率。当已知时间常数 T_i 和 T_i 时，渐近对数幅频特性曲线，实际上不用计算，就可以绘成。

我们举个绘制渐近对数幅频特性曲线和对数相位特性曲线的例子。设有差系统的开环传递函数为

$$W(p) = \frac{K(1 + T_2 p)}{(1 + T_0 p)(1 + T_1 p)(1 + T_3 p)}, \quad (1.13)$$

其中 $K = 31.5$ ， $T_0 = 0.5$ 秒， $T_1 = 0.25$ 秒， $T_2 = 0.1$ 秒， $T_3 = 0.01$ 秒。本书这里和以后，我们都依时间常数减小的次序使用脚注，即 $T_{i+1} < T_i$ 。

我们写出频率传递函数的表达式

$$W(j\omega) = \frac{K(1 + j\omega T_2)}{(1 + j\omega T_0)(1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_3)}, \quad (1.14)$$

和对数幅频特性的表达式

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{K \sqrt{1 + \omega^2 T_1^2}}{\sqrt{1 + \omega^2 T_0^2} \sqrt{1 + \omega^2 T_2^2} \sqrt{1 + \omega^2 T_3^2}} \quad (1.15)$$

求出交接频率: $\omega_0 = T_0^{-1} = 2(1/\text{秒})$, $\omega_1 = T_1^{-1} = 4(1/\text{秒})$, $\omega_2 = T_2^{-1} = 10(1/\text{秒})$ 和 $\omega_3 = T_3^{-1} = 100(1/\text{秒})$. 在典型图表上 (图 1.4) 画出各交接频率值处的垂直线。

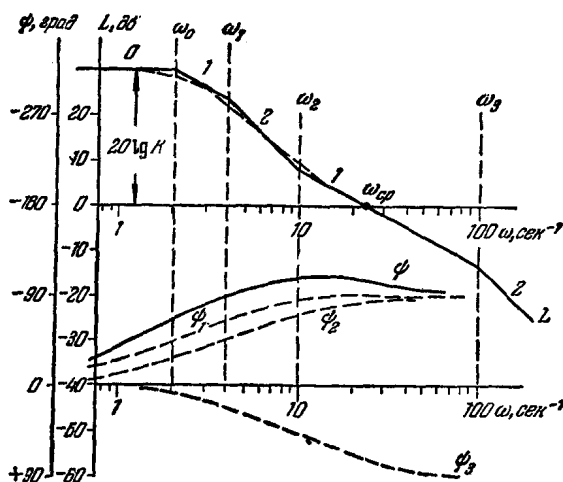


图 1.4 有差系统的对数幅频特性曲线和对数相位特性曲线

对于小于最小交接频率的频率, 即对于 $\omega < \omega_0$ 的频率 (相当于图 1.4 上位于垂线最左面的频率区域), 在表达式 (1.15) 中可以忽略每个根号中的 $\omega^2 T^2 \ll 1$ 项的影响, 于是, 对于这些频率, 可以近似地将 $L(\omega)$ 看作是它的第一条渐近线

$$L^1(\omega) = 20 \lg K. \quad (1.16)$$

根据 (1.16) 式, 在图 1.4 上, 频率 $\omega < \omega_0$ 的区域, 就构成了对数幅频特性曲线的低频部分, 这是 $L^1(\omega) = 20 \lg 31.5 \approx 30$ 分贝的一条直线。

在 $\omega_0 < \omega < \omega_1$ 的频率区域里, 与 $\omega^2 T_0^2 > 1$ 相比, 可以