

控制工程基础

下 册

〔英〕J. Monk 等编

牛振冬 廖祖炜 王光曾 译

4.2

中央广播电视大学出版社

控制工程基础

下 册

[英] J. Monk 等编

牛振冬 廖祖炜 王光普 译

*

中央广播电视大学出版社出版、发行

国防科工委印刷厂印装

开本787×1092 1/16 印张14¹/₄，字数431,000

1982年第1版 1982年12月第1次印刷

印数00,001—50,000

统一书号：15300·2

定价：1.35元

目 录

第八单元 调节器和补偿器	1
目的	1
要求	1
学习指导	2
1 简介	3
2 跟踪控制系统——综述	4
2.1 性能要求	4
2.2 稳态性能	4
2.3 动态性能	5
2.4 增益裕度、相位裕度和瞬态响应	7
2.5 设计问题——小结	9
3 S 平面上的补偿	9
3.1 系统的稳定	10
3.2 根轨迹的说明	11
3.3 增益的选择	12
3.4 阻尼线	13
3.5 用根轨迹设计的一个问题	16
4 利用频率响应的补偿	17
4.1 减少相位滞后	17
4.2 选择补偿参数	19
4.3 瞬态响应的估计	21
4.4 增益的选择	24
4.5 一个设计练习	27
4.6 补偿——小结	29
5 频率域内的扰动	29
5.1 扰动传递函数	29
5.2 频率域内信号的表示	32
5.3 随机信号	34
5.4 扰动响应预测	38
5.5 闭环扰动响应	40
5.6 小结	42
6 调节器调整的经验方法	42
6.1 开环方法	42
6.2 闭环方法	44
6.3 小结	45
7 单元总结	45
自评题答案	46

第九单元 多环策略..... 55

目的 55

要求 55

1 简介 57

2 单环控制中存在的问题 57

2.1 扰动的特性 58

2.2 扰动进入点的影响 61

2.3 调节器增益变化的影响 61

2.4 小结 64

3 级联控制 64

3.1 什么是级联控制 64

3.2 级联控制应用的特例 68

3.3 级联控制的若干一般性考虑 70

3.4 级联控制的常用例子 73

3.5 小结 74

4 顺馈控制 74

4.1 什么是顺馈控制? 74

4.2 锅炉水位控制系统 76

4.3 小结 80

5 比例调节 80

5.1 一个特例 80

5.2 小结 81

6 双变量控制 82

6.1 简介 82

6.2 一个特定的双变量控制系统 82

6.3 为何互相干扰构成问题 84

6.4 通过重新组织控制策略来减少互相作用 86

6.5 小结 90

7 单元总结 91

自评题答案 91

第十单元 非线性 95

目的 95

要求 95

学习指导 96

1 简介 96

2 非线性 97

2.1 线性模型 97

2.2 非线性模型 98

2.3 非线性特性举例 99

2.3.1 间隙——当齿轮不匹配时产生	99
2.3.2 死区	100
2.3.3 开关元件	100
2.3.4 摩擦力	101
2.4 小结	101
3 线性化	101
3.1 利用反馈使元件线性化	102
3.2 模型的线性化	103
3.3 小结	103
4 描述函数	104
4.1 描述函数的求取	104
4.2 一种应用	106
4.3 卫星跟踪天线	111
4.4 小结	113
5 根据微分方程预测响应	114
5.1 系统的状态空间表示法	114
5.2 状态的图解表示法	115
5.3 闭环响应的预测	117
5.4 相平面图的绘制	123
5.5 小结	126
6 仿真——当其它方法失败时	126
6.1 仿真意味着什么	126
7 单元总结和注意点	127
自评题答案	128

第十一单元 调节器和计算机 132

目的	132
要求	132
学习指导	133
1 简介	134
2 工业调节器	134
2.1 调节器的基本组成	134
2.2 前部面板	136
2.3 侧面板	137
2.4 小结	141
3 补偿器	141
3.1 超前补偿	141
3.2 利用频率响应设计补偿器	145
3.3 超前补偿器的作用	148
3.4 迟后补偿	148
3.5 频率域内的迟后补偿	149

3.6 滞后-超前补偿	151
3.7 补偿网络	153
3.7.1 超前网络	153
3.7.2 滞后网络	154
3.7.3 滞后-超前网络	154
3.8 小结	155
4 过程控制系统中的数字计算机	155
4.1 第4节至第8节的简介	155
4.2 计算机在控制中的功能	157
4.3 发电站上的应用	160
4.4 化学工业中的一种应用	161
4.5 小结	162
5 计算机控制的特点	162
5.1 数据的数字表达	162
5.2 数字量与模拟量的相互转换	163
5.3 采样和扫描	164
5.4 计算机-过程的接口	165
5.5 计算机-操作手的接口	165
5.6 小结	167
6 控制计算机	167
6.1 计算机的运行	167
6.2 直接数字控制	168
6.3 小结	171
7 计算机控制的若干定时考虑	177
7.1 定时之举例	177
7.2 小结	178
8 计算机控制的前景	178
自评题答案	180
附录 I 超前补偿网络的传递函数的推导	183
附录 II 滞后补偿网络的传递函数	184

第十二单元 最优控制

目的	185
要求	185
学习指导	185
1 简介	186
2 性能指标	186
2.1 数学表述	187
2.2 小结	189
3 登山法	189
3.1 性能等值线	190

3.2 参数的逐次变分法	192
3.3 登山法中的问题	193
3.4 利用解析方法求顶点	194
3.5 小结	195
4 庞特里雅金方法	195
4.1 问题的提出	196
4.1.1 建立状态空间模型	196
4.1.2 构成评价函数	196
4.1.3 把评价函数转化为微分方程	197
4.1.4 建立哈密尔顿函数	197
4.1.5 求哈密尔顿函数的极小值	198
4.1.6 构成协态方程	199
4.1.7 算出协态变量的变化	200
4.1.8 边值问题	201
4.1.9 建造控制器	202
4.2 算入成本	203
4.2.1 构成评价函数	203
4.2.2 建立状态空间模型	203
4.2.3 把评价函数转化为微分方程	203
4.2.4 建立哈密尔顿函数	203
4.2.5 求哈密尔顿函数的极小值	203
4.2.6 构成协态方程	204
4.2.7 求出协态变量的变化	204
4.2.8 求解边值问题	204
4.2.9 是否存在一个‘最好的’最优?	205
4.2.10 解释数学解	206
4.3 一种重新评价	207
4.3.1 建立状态空间模型	207
4.3.2 构成评价函数	207
4.3.3 将评价函数转化为微分方程	208
4.3.4 建立哈密尔顿函数	208
4.3.5 求哈密尔顿函数的极小值	208
4.3.6 构成协态方程	208
4.3.7 算出协态变量的变化	209
4.3.8 边值问题	209
4.3.9 开环还是闭环?	210
4.4 小结	212
5 带有计算机的最优控制	213
6 总结	214
自评题答案	214
附录一 述语索引	217
附录二 单位制索引	223

第八单元 调节器和补偿器

目 的

本单元的目的是:

1. 利用跟踪天线系统的实例分析, 说明补偿器或调节器怎样才能用于改变天线控制系统的动力学关系, 以达到规定的闭环性能。
2. 表明利用频率响应技术能够预测跟踪控制系统中阵风扰动对天线轴承的影响。
3. 介绍两种估计调节器整定值的经验方法。

要 求

兹将你应该达到的要求连同有关的内容段落一起列举如下:

内容段落	要 求
第 3 节 S 平面上的补偿; 系统的稳定	给定 (a) 开环频率响应的尼柯尔斯图; (b) 系统的根轨迹图, 说明降低开环增益能使不稳定的闭环控制系统达到稳定。(自评题 1)
增益的选择	给定开环传递函数, 利用劳斯准则, 确定驱使闭环系统到达不稳定边缘的开环增益值。(自评题 2, 复习)
阻尼线	给定根轨迹图和要求的主导二阶瞬态响应的阻尼比, 画出一条阻尼线, 并确定系统主导闭环极点的位置。给定主导闭环极点的位置, 确定系统主导二阶响应的阻尼比。(自评题 3)
第 4 节 利用开环频率响应设计补偿器	给定 r 值, 给出 $(1+j\omega r)$ 项的伯德图, 利用伯德图, 确定其对一给定系统的开环频率响应的作用。(自评题 4, 5, 7)
降低相位迟后	提出一种简单的方法以降低与积分器相联系的相位迟后, 并能够在一定的给定频率下, 估计出最终补偿器的实际相位迟后。(自评题 4) 从给定的开环频率响应数据出发,

选择补偿器参数

瞬态响应的估计

增益的选择

第5节

频率域内的扰动

开环扰动传递函数, 闭环扰动传递函数, 频谱, 线频谱, 确定性信号, 随机信号, 均方值, 均方根值, 能量谱, 功率密度谱。

频率域内信号的表示方法

随机信号

预测扰动响应

确定调节器整定值的经验方法

测定系统的增益和相位裕度。(自评题5, 8)

给定补偿器的形式和系统的未经补偿的开环频率响应, 选择补偿器参数, 以达到一定的相位裕度。(自评题6)

给定(a)系统的闭环频率响应或(b)系统的增益和相位裕度, 估计闭环系统的主导二阶响应的阻尼比, 并绘出其阶跃响应。(自评题5, 9)

给定系统的开环频率响应, 确定补偿器的增益值, 以达到预定的增益裕度。(自评题8)

区分有关这些术语的正确的和错误的表述。

给定其变换, 写出并绘出一个确定性信号的能量谱形式。(自评题10)

给定输入信号的频谱和系统的频率传递函数, 确定系统响应的能量谱。(自评题11)

给定扰动的能量谱以及系统的扰动频率传递函数, 绘出扰动响应的能量谱。

给定响应的能量谱, 计算系统的扰动响应的均方值和均方根值。(自评题12)

给定某一系统开环或闭环的阶跃响应的测试结果, 以及齐格勒和尼柯尔斯建议的整定值, 估计 P , PI , PID 调节器的整定值。(自评题13)

学 习 指 导

本单元的第2、3、4、5节完成了跟踪控制系统的设计。本单元集中了你自己遇到过的许多方法, 并把它们用于跟踪系统的设计问题。你不必去死记这些方法的细节, 但你能应用这些方法。各项要求告诉你, 你应掌握哪些技巧并用哪些自评题来检验这些技巧、重要的是, 你应力图解这些自评题, 从而使你有能力处理实际设计工作。

第6节处理确定调节器整定值的经验方法。不要求你记住计算调节器整定值的过程和表达式, 但你能运用这些方法。

1. 简介

许多控制系统设计技巧的一个共同方法就是改变系统的开环性能,使得当控制回路闭合后,整个系统被迫按一确定的方式行动。如你在第七单元中所见,这样做的一种方法就是选择某一调节器并调整其整定值以达到性能要求。

然而,并非所有的控制系统均包含有单独的调节器;正如天线跟踪的实例分析那样,即使由于性能不合适而有必要改变控制回路的动力学关系,也不含单独的调节器。具体作法就是在控制回路中加一些元件,这些元件的唯一作用就是改变系统性能。这些元件称为**补偿器**,因为它们加到控制系统中是去补偿不合理想的性能。

确定补偿器类型和确定所需的调节器类型只有微小的差别。也许唯一的差别就是,补偿器仅包括改变控制系统动态性能的元件,而调节器还包括一些其它元件,例如从要求值减去输出测量值的比较元件和调节整定点的一些机构等。

补偿器的形式及其传递函数的极点和零点的位置均由设计者确定。设计者的任务是要确定补偿器的类型,计算其参数值,以按照他的预测,使闭环系统按照要求的方式动作。设计可以利用根轨迹方法在 S 平面上实现,或利用开环频率响应数据在频率域内实现。

根轨迹方法的优越性在于,利用这种方法,设计者能比较容易地看出闭环瞬态响应随不同的补偿器零点、极点的分布和不同的开环增益的变化。不足之处在于必须要有被控制系统的传递函数模型,除了极简单的系统外,任何系统的准确设计都要进行繁琐数字计算,最好由计算机协助解决。

在另一方面,利用开环频率响应数据的设计方法更适合于一张纸、一支笔的条件。对于只能通过试验取得频率响应数据的系统也能得到容易的处理,如同得到了传递函数模型一样。在根轨迹设计中造成困难的时延,可以轻而易举地并入频率域的设计程序里。这种方法的不足之处不同于根轨迹方法,而在于频率域和时间域之间并无简单的或直接的关系。为了克服这种缺点,控制工程师们研究了许多经验法则,利用这些法则从容易测得的开环频率响应的参数可以估计出闭环瞬态响应。

在本单元里,我们打算完成卫星跟踪天线控制系统的设计。我们打算用根轨迹和频率响应这两种观点来解决这个问题,从而给你关于设计一个控制系统以满足一定性能要求的必要程序的若干概念。

第2节继续进一步考察天线系统实例分析,并扼要地提出了该系统的性能要求。

第3节处理 S 平面上的补偿,并为天线系统研究出一个简单的补偿器。在第4节里,利用频率响应方法解决选择补偿器参数值的设计问题。

许多控制系统受到影响其输出的外部扰动。设计时关心的一个重要方面就是系统抗扰动的能力。天线控制系统的主要要求之一就是它应该在阵风条件下顺利运行。作用在天线结构上的风的力矩力图转动天线使它离开卫星的方向。为了保持此方向,控制系统必须能对抗阵风干扰的作用。在第5节里我们将讨论整个系统在减少扰动影响方面的性能。这就结束了卫星跟踪控制系统的实例分析。

最后,在第6节里我们将简短地考察调整调节器的若干经验方法。在根轨迹法或频率响应方法不能应用的场合,这些方法用于估计调节器整定值。从被控制对象的测量结果出发计算调节器整定值。

2. 跟踪控制系统——综述

到目前为止在本教程里，天线控制系统的实例研究与系统设计的许多阶段有关。在本节里我们要简要地综述该系统发展中的主要点使你回忆起这些设计问题。当你在心中记住这些要点之后，我们再继续描述完成此设计所使用的程序。

2.1 性能要求

在第二单元里说明了基本的自动跟踪反馈控制系统。系统的性能指标要求天线直接对准卫星，这就是说，在两种情况下跟踪误差应为零。(a)当卫星与天线两者均处于静止状态；(b)当天线跟踪卫星，并以恒定的角速度随方位轴运动。

设计者用频率响应的术语确定系统要求的动态性能，并用系统的增益和相位裕度作为性能指标。本节后一部分将讨论增益和相位裕度与系统瞬态性能之间的关系。

性能指标的最终要求是，即使在阵风作用于天线结构而产生干扰力矩的情况下，控制系统仍能保持天线和卫星的一致。性能指标要求，由于结构偏转造成的跟踪误差，对于每小时七十二公里以下的阵风，不应大于 ± 3 角分。

2.2 稳态性能

图1表明基本的自动跟踪控制系统的模型。模型是四阶的。把劳斯判据应用到闭环系统的特征方程，很容易表明控制回路是稳定的。图2绘出的系统开环频率响应的尼柯尔斯图也预示出闭环系统是稳定的，因为如果我们沿着频率增长的方向观察频率响应曲线，图表上的(0分贝， -180°)点落在曲线的右面。在第二单元里，图1的系统的稳态分析表明，当卫星和天线两者均静止时，跟踪误差将为零。然而分析也揭示，当系统以恒定的角速度跟踪时，天线的方位将迟后于卫星的方位，迟后量正比于角速度。与性能指标的要求相反，在系统中有一个恒定的跟踪误差。

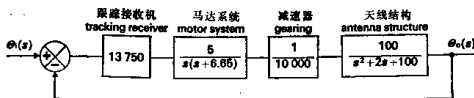


图1 基本自动跟踪控制系统

你已知道通过提高开环增益可能降低恒速下的位置误差。在尼柯尔斯图线上提高开环增益相当于把频率响应垂直向上移动。开环相位移不受增益提高的影响，所以图形没有侧向的运动。从图2你可以看到，将增益提高13分贝，驱使系统进入不稳定的边缘。13分贝是增益提高的允许最大值。这意味着用这种方法跟踪误差的降低不能低于某一特定极小值。再进一步提高开环增益的结果会造成不稳定的闭环系统。你也许能回忆起，驱使系统到不稳定边缘的增益的提高值称为系统的增益裕度。

图3表明为了完全消除恒定速度造成的位置误差，要在控制回路的前向通路中加一个积分器。如你在第九单元中所见，积分器可以当作用于改善稳态性能的简单补偿元件。在第二单元中完成了新的五阶系统的稳态分析。分析表明系统的稳态性能现在能满足要求。当天线是静止的或以恒定角速度运动时，跟踪误差均为零。

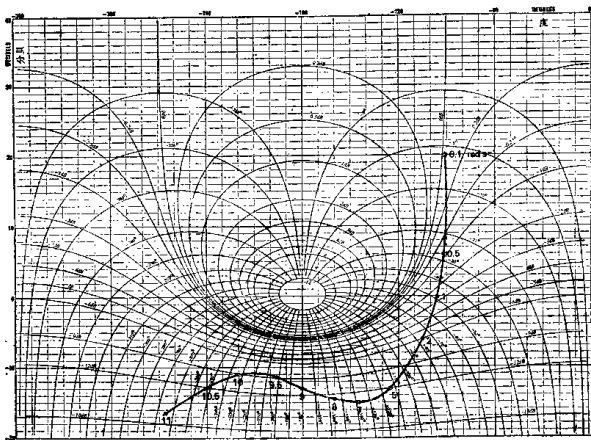


图2 图1所示系统的频率响应

2.3 动态性能

然而，积分器对开环动态性能的作用，是使闭环系统不稳定。积分器对稳定性的破坏性的影响来源于它为整个开环相位移造成的 -90° 相位移。在尼柯尔斯图线上，开环相位移的增大表现为开环频率响应曲线向左的水平运动。在图2上，开环相位迟后增大 85° 将造成频率响应曲线通过 $(0 \text{ 分贝}, -180^\circ)$ 点，从而表明闭环系统处于不稳定的边缘。对于该特定系统，相位裕度为 85° 。很清楚，积分器带来的 -90° 的额外的相位移，超过了相位裕度，驱使系统进入不稳定；因为在尼柯尔斯图线上当从频率增长的方向观察， $(0 \text{ 分贝}, -180^\circ)$ 点落在不稳定系统的频率响应曲线的左侧。

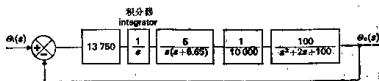


图3 具有积分器的跟踪系统

积分器改变了开环幅值比，同样也增大了开环相位迟后。积分器的频率传递函数为 $1/j\omega$ ，所以幅值比用分贝表示为 $20 \log(1/\omega)$ 。在 $\omega=1$ 弧度/秒点上，幅值比为0分贝，所以在该频率下，积分器不改变开环幅值比。对于小于1弧度/秒的频段，积分器的作用是提高开环幅值比；而对于1弧度/秒以上的频段，积分器降低总的开环幅值比。

图4表明积分器的影响。积分器使图2的频率响应曲线发生改变。从0.1弧度/秒到1弧度/秒段的轨迹向上延伸直至图表的顶部。相类似地，从1弧度/秒到12弧度/秒间的轨迹向下延伸一直到在图表上消失。 -90° 相位移使曲线水平移动，从而使 $(0 \text{ 分贝}, -180^\circ)$ 点，从频

率增长的方向来观察，落在频率响应曲线的左侧。

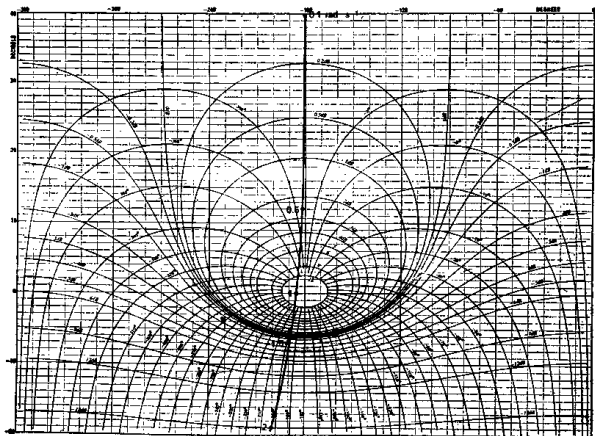


图4 积分器对频率响应的影响

确定积分器对系统动态性能的影响的另一种方法是利用根轨迹。图5(a)表明原来的四阶系统的根轨迹的草图。该草图是利用你在第七单元里遇到过的作根轨迹图的若干法则构造出来的。根轨迹分支的四根渐近线交于 σ 轴上的一点。该点的位置由下列计算给出：

$$\frac{(\text{极点位置之和})}{(\text{极点数}-\text{零点数})}$$

在我们的情况下计算给出：

$$\{0 + (-6.65) + (-1 + j9.95) + (-1 - j9.95)\} / 4 = -2.16$$

渐近线与 σ 轴的交角决定于 $(n\alpha - \alpha/2)$ ，其中 α 值： $\alpha = 360^\circ / (\text{极点数} - \text{零点数})$ ， n 的取值从1到 $(\text{极点数} - \text{零点数})$ 。在我们的情况下， $\alpha = 360^\circ / 4 = 90^\circ$ ， n 取值从1到4，渐近线的角度分别为 $(1 \times 90^\circ - 45^\circ) = 45^\circ$ ， $(2 \times 90^\circ - 45^\circ) = 135^\circ$ ， $(3 \times 90^\circ - 45^\circ) = 225^\circ$ ， $(4 \times 90^\circ - 45^\circ) = 315^\circ$ 。

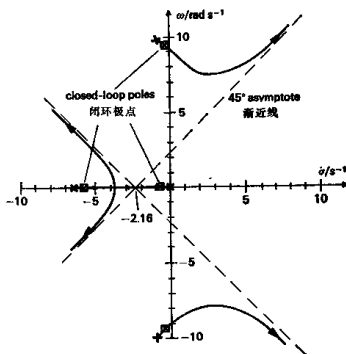


图5 (a)四阶跟踪系统的根轨迹图

你能从图5(a)看到, 对于低的开环增益值闭环系统是稳定的, 因为在低增益下所有的闭环极点很接近位于 S 平面左半部的开环极点的位置。

在图5(b)上, 我们绘出了在前向通道中包含有积分器情况下, 闭环极点的根轨迹。积分器在 S 平面的原点上再增加了一个极点。你能见到根轨迹的两个分支完全落在 S 平面的右半部分, 表示在所有开环增益值下系统都是不稳定的。

2.4 增益裕度、相位裕度和瞬态响应

在引言里我们曾指出基于开环频率响应数据的设计方法的弱点之一是, 系统的频率响应的形式和它在时间域内的瞬态性能间没有简单的相关性。增益裕度和相位裕度是开环频率

响应的两个易测的参数, 控制工程师们研究了许多经验法则, 可以从增益和相位裕度值出发估计闭环瞬态响应。这些经验法则建立在系统的二阶模型的基础上。

在尼柯尔斯图上, 增益和相位裕度可以看作频率响应曲线和 $(0 \text{ 分贝}, -180^\circ)$ 点接近程度的度量。因为尼柯尔斯图允许从开环数据确定闭环频率响应, 所以增益和相位裕度可用于粗略地度量闭环谐振峰值的高度。因为我们可以找到系统的谐振峰值高度与阻尼比值的相互关系, 这就意味着从增益和相位裕度出发, 我们能估计出与系统有关的阻尼比, 从而估计出系统瞬态响应的形式。在估计阻尼比时我们假设, 系统的闭环响应可以适当地用欠阻

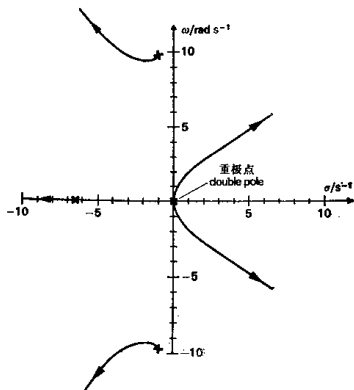


图5 (b) 积分器对根轨迹的影响

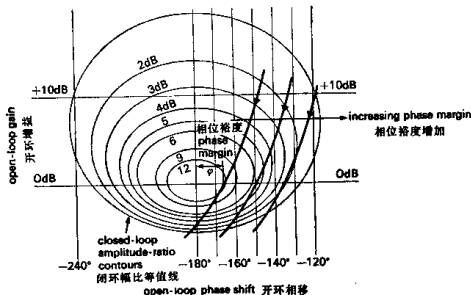


图6 开环相位移

尼的主导二阶响应来近似。

首先考虑相位裕度。图 6 表示一组具有三条开环频率响应曲线的尼柯尔斯图线，这些曲线都接近通过（0 分贝， -180° ）点。具有最小相位裕度 ϕ 的曲线最接近通过（0 分贝， -180° ）点。这意味着，与该系统相应的闭环谐振峰值将是最高，即表明具有低的阻尼比。峰值的高度由闭环幅值比曲线指示。增加系统的相位裕度将开环频率响应曲线向右移动，并降低了闭环谐振峰值的高度。图 7(a)表明一组二阶幅值比频率响应曲线，图 7(b)说明阻尼比与谐振峰值高度的分贝值之间的关系。

图 8 表示对于一个二阶模型的相位裕度和阻尼比的直接关系。该曲线可以用一根斜率为 $0.01/1^\circ$ 的直线来逼近，在图 8 上用虚线表示出来。它近似表明对于一给定系统主导闭环特性的阻尼比可以粗略地当作： $\zeta = 0.01 \times$ 相位裕度（以 $^\circ$ 为单位）。举例来说， 40° 的相位裕度指出闭环响应的阻尼比约为 $0.01 \times 40 = 0.4$ 。这相应于谐振峰值略低于 3 分贝。在尼柯尔斯图线上，该系统的开环频率响应曲线将趋近于 3 分贝的闭环曲线。

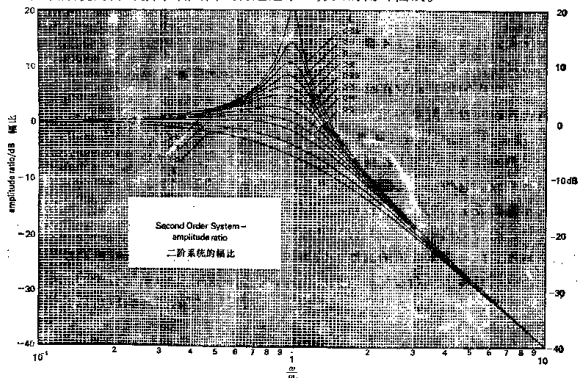


图 7 (a) 二阶系统的幅值比曲线

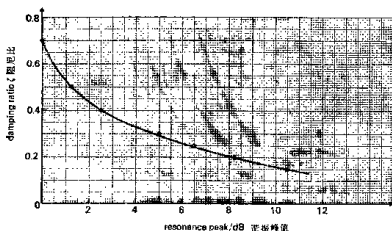


图 7 (b) 谐振峰值与阻尼比的关系

对于二阶系统阻尼比决定阶跃响应的超调量百分比。从图 9 你能看到, 0.4 的阻尼比指示出大约 25% 的超调量百分比。

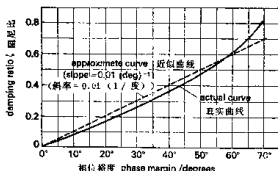


图 8 相位裕度与阻尼比的关系

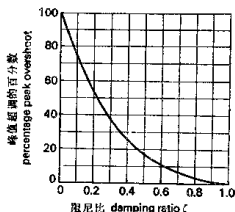


图 9 二阶系统超调量百分数和阻尼比的关系

增益裕度亦可用于指示系统的有效阻尼比。图10粗略表明随着增益裕度的变化系统有效阻尼比的变化情况。该图表适用于比具有一对主导极点的二阶系统更高阶的系统。对于某一给定的增益裕度，它粗略地指出与瞬态响应主导部分有关的阻尼比。重要的是要记住，这种近似方法对于控制系统的设计者来讲只可以当作向导。获得系统瞬态响应的准确预测的唯一方法包括求解微分方程的模型。如你已知那样，这可以在变换的帮助下用人力计算来完成；当系统比较复杂时可以较快地在计算机帮助下完成。

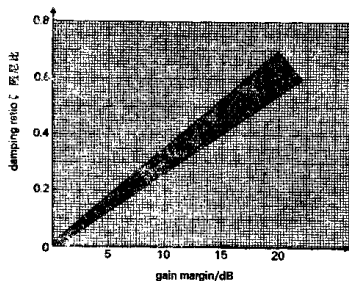


图10 增益裕度与阻尼比间的近似相互关系

在设计跟踪系统时，设计者可以认为当增益裕度为 6 到 8 分贝之间，相位裕度在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间，说明动态特性是合格的。

2.5 设计问题——小结

稳态计算表明，系统的稳态性能指标可以用加积分器来解决。然而这却导致不稳定的控制回路。补偿器在稳定系统的同时又能保持积分器的有用特性。所以在系统中应增加补偿器。进一步说，为了确保合格的瞬态性能，补偿器应使整个系统的增益裕度达到约 6~8 分贝，相位裕度为 40° 到 50° 。最终还必须检验，可能出现的风的扰动不至于偏转天线，造成超过 ± 3 角分的最大跟踪误差。

3. S 平面上的补偿

往往不存在设计的捷径和直接的解决办法。设计者必须运用他的经验和判断来提出解决方法，并进一步评价这些方法。他必须选择补偿器或调节器，并选择这些装置的元件值或整

定值以满足给定的性能指标。系统的根轨迹和频率响应两者均有助于评价不同控制器和补偿器的作用，也有助于计算调节器的整定值和补偿器的元件值。

重要的是你应该认识到设计者的任务是一种迭代过程——他提出解决办法，对这种办法作出评价，然后再以此为根据提出更好的解决办法。这是不断探测不断纠正错误的过程，随着各种不同类型的调节器或补偿器对各种不同类型系统的影响的经验累积，这种过程变得更有效。

在本节里，我们打算告诉你设计天线系统的头几步。用这个系统为例子的优点是，它已经建成而且确实能工作。我们能立即采用设计者所采用的补偿器形式。本节利用根轨迹方法考察补偿器的作用。

3.1 系统的稳定

自评题 1

往往可以通过降低开环增益来稳定反馈控制系统。将天线系统的开环增益降低10倍对下列各方面会发生些什么影响呢？

(a) 对图 4 的尼柯尔斯图表上的频率响应曲线；

(b) 对图 5(b) 上的根轨迹的形状。

在这种方法下系统是否能稳定？

从自评题 1 的解答你应该看到，天线系统开环增益的改变并不会使闭环系统稳定。要使闭环系统稳定，极点必须落在 S 平面的左半面。所以改变增益只能应用于稳定某些系统，其根轨迹分支全部落在、或至少部分地落在 S 平面的左半面。在天线系统中，根轨迹的两个分支完全落在右半平面。所以，为了稳定系统，我们必须改变根轨迹的形状，使得所有的分支落在左半平面，至少在一定开环增益值的范围内落在左半平面。

单纯地改变开环增益仅仅改变闭环极点的位置，但不改变根轨迹的形状。只有附加的极点和零点才改变轨迹的形状。左半平面的极点力图将轨迹弯向右半平面，所以起破坏稳定性的影响。另一方面，开环零点有相反的作用。如你在第七单元中所见，在负 σ 轴上零点的作用是要将根轨迹扭回到左半平面，从而对系统发生稳定的影响。

设计者利用图 11 所示的简单方法在跟踪系统的开环 S 平面模型上增加零点。包围积分器引入了一个附加的信号通路。该积分器用于消除恒定速度带来的位置误差。该通路包含增益 τ 元件，该元件的输出加到积分器的输出。

如果跟踪接收机来的输入电压用变换式 $V_i(s)$ 代表，而补偿器输出用 $V_o(s)$ 表示，则输出信号为

$$V_o(s) = \frac{1}{s} V_i(s) + \tau V_i(s)$$

所以补偿器的传递函数为

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s} + \tau = \frac{1 + s\tau}{s} = \frac{\tau(s + 1/\tau)}{s}$$

围绕积分器增加的旁路元件在传递函数的分子中产生了 $(s + 1/\tau)$ 项。该项在 $s = -1/\tau$ 时等于 0。补偿器仍然在原点包含由积分器产生的单极点。这意味着系统的稳态性能并不由于开环传递函数增加了零点而发生变化。你也许已发现补偿器的传递函数正好与 PI 控制器的传递函数一样。所以跟踪系统有效地处于 PI 控制。