

现代伺服系统的 分析与设计

冯国楠 著



机械工业出版社

现代伺服系统的 分析与设计

冯国楠 著



机械工业出版社

内 容 简 介

本书通过实例,详细地介绍了:现代高性能伺服系统基于经典控制理论的分析方法与设计技巧;PWM放大器的特性及实用电路;齿槽效应及干摩擦对伺服系统低速特性的影响;数字式及数-模混合式计算机控制伺服系统的构成;伺服系统尤其是微型计算机控制伺服系统基于现代控制理论(包括状态观测器理论、最优控制理论、极点配置法、鲁棒调节器理论、自适应控制理论及参数优化技术)的设计方法与应用实例。

本书可作自动化技术领域里广大工程技术人员的参考书,也可作大专院校自动化专业师生的教学参考书和选修教材。

JS450/39 04

现代伺服系统的分析与设计

冯国楠 著

责任编辑:秦起佑 责任校对:刘志文

封面设计:郭景云 版式设计:霍永明

责任印制:张俊民

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)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092¹/₃₂·印张87/8·字数194千字

1990年4月北京第一版·1990年4月北京第一次印刷

印数0,001—2,195·定价:6.60元

ISBN 7-111-01925-3/TP·106

前 言

科学技术的进步，对伺服系统提出了愈来愈高的要求。以计算机作控制器，用现代控制理论进行分析和设计，已成为伺服系统技术进一步发展的必然趋势。在这一发展趋势的激励下，著者在总结自己20余年从事伺服系统教学、科学研究和工程设计经验的基础上，写成《现代伺服系统的分析与设计》一书，奉献给致力于伺服系统设计、研究和教学的读者们。

书中材料全部取自著者本人的学术论文、设计资料 and 教学讲稿。

在编写过程中，清华大学吴麒教授曾热情地审阅写作提纲，谢新民副教授仔细地审定全稿，提出了许多宝贵意见。北京联合大学吕炳仁副教授、北京工业大学王福珍工程师及研究生陈建国、于睿、张珍等，曾协助著者做过一些工作，在此一并向他们致谢。

由于水平有限，缺点错误在所难免，敬请读者不吝指教。

目 录

第一章 伺服系统经典设计方法	1
一、技术指标的提出和系统性能分析	1
1. 技术指标的提出	1
2. 灵敏度分析	2
3. 误差分配	5
4. 伺服系统的等效开环频率特性	7
5. 确定系统的结构	12
二、主要元、部件的选择和设计	15
1. 伺服电机	15
2. 驱动放大器	20
3. 位置检测元件	21
4. 测速发电机	23
5. 运算放大器	23
三、系统设计计算	24
1. 静态误差分析	24
2. 设计电压环	26
3. 设计速度环	29
4. 设计位置环	34
5. 设计前馈补偿装置	38
6. 输入积分器	44
7. 设计结果	44
四、辅助设备及系统操作方法	46
1. 电源	46
2. 检查测试电路	47

3. 继电器控制线路和系统控制操作方法	48
五、模拟式伺服系统数字化	55
1. 数字式伺服系统的构成	55
2. 控制方程的转换	57
第二章 PWM式晶体管功率放大器	62
一、工作原理和特性分析	63
1. 工作原理	63
2. 特性分析	64
二、用PWM式功率放大器改善伺服系统低速特性的分析	75
1. 干摩擦对伺服系统运动过程的影响	75
2. 伺服电机的微振特性分析	78
3. 切换频率的选择	82
4. $N(\rho, t)$ 同正弦信号的比较	84
三、一种实用电路	85
1. 电路	86
2. 电路的特点	88
3. 特性参数计算	90
第三章 齿槽效应和干摩擦对伺服系统低速特性影 响的分析	93
一、齿槽效应对伺服系统影响的分析	93
1. 系统运动过程的数学描述	94
2. 系统运动过程的分析	97
3. 讨论和结论	104
二、干摩擦对伺服系统影响的分析	105
1. 系统运动过程的分析	106
2. 讨论和结论	118
第四章 微型计算机控制最优伺服系统的设计	121
一、理论准备	121
1. 最优性原理和离散动态规划	121

2. 离散线性二次型问题	127
3. 离散状态观测器	137
二、一种微型计算机控制的直流伺服系统	144
1. 系统的构成	145
2. 接口电路的设计	146
三、离散最优控制器和离散加速度观测器设计	152
1. 控制对象离散状态方程	152
2. 综合离散最优控制器	158
3. 设计离散加速度观测器	170
4. 设计结果	174
第五章 几种改进的直流伺服系统	176
一、PID控制直流伺服系统	177
1. 闭环系统数学模型	177
2. 设计计算	180
3. 控制器的结构	182
二、微处理机控制的次优直流伺服系统	185
1. 控制对象数学模型	186
2. 一种次优控制综合方法	188
3. 举例	194
三、一种自适应鲁棒伺服系统	198
1. 鲁棒调节器	198
2. 一种自适应鲁棒伺服系统的设计	204
第六章 自适应伺服系统的设计	219
一、模型参考自适应控制	219
1. 模型参考自适应控制的一般概念	219
2. 基于李雅普诺夫稳定性理论的设计方法	221
3. 基于波波夫超稳定性理论的设计方法	226
二、一种基于李雅普诺夫稳定性理论的自适应伺服系统	231
1. 复合控制伺服系统的时域分析	231

2. 一种自适应复合控制伺服系统的设计	237
3. 计算机辅助自适应系统参数寻优方法	242
4. 举例	247
三、一种基于波波夫超稳定性理论的自适应伺服系统	250
1. 控制对象数学模型	251
2. 设计速度环自适应机构	253
3. 综合位置环最优控制	261
4. 用参数优化技术确定自适应律系数及位置环增益矩阵	264
5. 实例	269
参考文献	273

第一章 伺服系统经典设计方法

伺服系统是应用十分广泛的技术设备。要设计出性能优良的伺服系统，有许多问题需要解决。例如：怎样根据伺服系统的用途提出设计指标；怎样确定系统的结构；怎样选择组成系统的元、部件；怎样应用自动控制理论设计控制器或校正装置；怎样设计电气控制电路使伺服系统各部分协调一致地工作；怎样解决影响伺服系统性能的某些实际问题（如干摩擦问题）等等，都是需要在设计过程中解决的。

本章通过理论分析，并以251-K2单轴电动模拟转台伺服系统的设计为实例，来介绍直流伺服系统基于经典控制理论的设计方法与技巧。

一、技术指标的提出和系统性能分析

1. 技术指标的提出

设计一种控制系统，首先必须提出这个系统应达到的技术指标，再根据技术指标确定控制方案、系统结构以及组成系统的元、部件。

怎样正确地提出技术指标，是一个十分重要的问题。然而，在一般教科书上很少提及。技术指标应当包括哪些内容，每项指标应当达到什么水平，都必须从实际控制对象的要求出发进行科学地分析。如果提出的内容不全或者指标偏低，以致不能满足工程上的实际要求，显然是不行的。反之，如果技术指标提得过高，内容繁杂，超过了实际需要，

不但会增加造价而且会造成设计上的困难。因此，正确地选择技术指标是自动控制系统设计过程中十分重要的一环。

转台伺服系统的主要技术指标包括静态精度、角速度范围、最大角加速度和频率响应。具体指标是通过详细考察和分析实际对象的各种可能工作状态（比如运行速度、加速度等），取其极限值，同时参考国内、外现有同类装置的技术指标而确定。

依照上述原则，针对具体应用对象进行分析和论证，提出251-K2单轴电动模拟转台伺服系统的技术指标。现将主要技术指标列于表1-1。表中 f 表示正弦输入信号频率， $\Delta\varphi$ 和 ΔA 分别表示在正弦信号作用下闭环系统输出与输入之间的相位误差和幅值误差。

表1-1 技术指标

项 目	技 术 指 标		
静态精度	6'		
角速度范围	$(0.05^\circ \sim 150^\circ)/s$		
最大角加速度	$4000^\circ/s^2$		
频 率	$f \leq 3\text{Hz}$	$\Delta\varphi \leq 5^\circ$	$\Delta A \leq 5\%$
响 应	$f \leq 10\text{Hz}$	$\Delta\varphi \leq 10^\circ$	$\Delta A \leq 10\%$
最 大	245N		
负 载	转动惯量 $0.492\text{kg}\cdot\text{m}^2$		

2. 灵敏度分析

一个自动控制系统是由众多的元、部件组成的。这些元、部件的特性和参数往往不能十分精确地确定，而且还会随着环境（如温度、湿度等）变化和时间的推移（经过长时间工作后会老化、磨损等）而发生变化。这种变化会在不同

程度上影响整个系统的性能。那么，它们会对系统性能产生多大影响？哪些元、部件由于不精确或特性发生变化后对系统性能影响小而可以忽略不计？哪些元、部件对系统性能影响大而必须认真对待？设计人员应当心中有数。要弄清楚这些问题，需要对系统进行灵敏度分析。

灵敏度是控制系统的特性对于特定元、部件特性依赖性的量度。闭环系统传递函数 T 对于特定元、部件 K 的微分灵敏度

$$S_k^T = \frac{dT/T}{dK/K} \quad (1-1)$$

式中 dK 表示元、部件 K 的特性或参数的变化量； dT 是由于 K 变化 dK 后引起的闭环系统特性 T 的变化量； S_k^T 叫做 T 对于 K 的变化的灵敏度。如果 S_k^T 很小，则 T 对于 K 的变化不灵敏，说明这个元、部件特性和参数不精确或变化后对闭环系统性能影响小。这是所希望的。如果 S_k^T 很大，说明 T 对于 K 的变化很灵敏。在这种情况下，要保证闭环系统具有良好而且稳定的性能，必须把用作 K 的元、部件选择为或设计成高精度、高稳定度的。

图1-1是一般伺服系统简化后的结构图。图中 L 、 P 和 H 分别表示输入装置、输出装置和反馈装置传递函数； G 表示前向通道内放大器、校正网络和伺服电机的传递函数； r 和 c 分别表示闭环系统的输入和输出。由图1-1可求出闭环系统传递函数

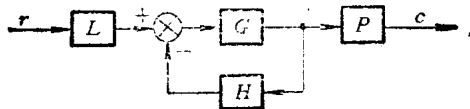


图1-1 伺服系统简化结构图

$$T = \frac{c}{r} = \frac{LGP}{1+GH}$$

根据闭环系统传递函数和微分灵敏度的定义式 (1-1), 可求出闭环系统特性对于系统各部分特性变化的灵敏度。

(1) 闭环系统特性对输入装置特性变化的灵敏度

$$\begin{aligned} S_L^T &= \frac{dT/T}{dL/L} = \frac{L}{T} \frac{dT}{dL} \\ &= \frac{LGP}{T(1+GH)} = 1 \end{aligned} \quad (1-2)$$

(2) 闭环系统特性对输出装置特性变化的灵敏度

$$\begin{aligned} S_P^T &= \frac{dT/T}{dP/P} = \frac{P}{T} \frac{dT}{dP} \\ &= \frac{PLG}{T(1+GH)} = 1 \end{aligned} \quad (1-3)$$

(3) 闭环系统特性对反馈装置特性变化的灵敏度

$$\begin{aligned} S_H^T &= \frac{dT/T}{dH/H} = \frac{H}{T} \frac{dT}{dH} \\ &= -\frac{GH}{1+GH} \end{aligned}$$

在一般情况下 $GH \gg 1$, 把这个关系代入上式, 可得

$$S_H^T = -1 \quad (1-4)$$

(4) 闭环系统特性对前向通道内元、部件特性变化的灵敏度

$$\begin{aligned} S_G^T &= \frac{dT/T}{dG/G} = \frac{GLP}{T(1+GH)^2} \\ &= \frac{1}{1+GH} \end{aligned} \quad (1-5)$$

式 (1-2) ~ 式 (1-5) 表明: 闭环系统特性 T 对于输入装置 L 、输出装置 P 和反馈装置 H 的变化十分灵敏, 它们的

任何变化都要引起总传递函数发生同样程度的变化。因此，用作 L 、 P 和 H 的元、部件必须具有精密而稳定的特性。而 T 对于 G 的灵敏度是 $1+GH$ 分之一，当 $1+GH \gg 1$ 时， T 的特性对于 G 的变化不灵敏。因此，从灵敏度的观点来看， GH 应当具有尽可能大的数值，但是，用作 G 的元、部件不必十分精密。这就是说，从灵敏度的观点来分析图1-2所示的位置伺服系统，可以得出如下结果：输入变换装置、前馈补偿装置、位置检测元件、齿轮 N_1 、 N_2 的配合关系以及求和放大器的求和特性必须是高精度的，而求和放大器的增益，以及电压放大器、校正网络、伺服电机和功率放大器等元、部件不必十分精密。上述结果对于确定系统的精度、合理地选择和设计元、部件是很有意义的。

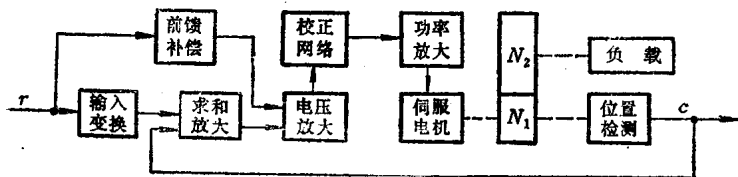


图1-2 复合控制位置伺服系统

3. 误差分配

伺服系统的静态误差包括两部分：一部分是元、部件的固有误差造成的；另一部分是干扰和参考输入引起的。前者取决于元、部件的精度，后者取决于系统设计。为了保证系统静态精度符合规定的设计指标，必须对各元、部件的精度和设计系统时的静态误差指标提出具体要求。现在，根据前面提出的静态精度指标和已知的干扰，来确定组成系统的各元、部件应具有精度，进行误差分配。

灵敏度分析结果表明，影响闭环系统性能的主要元、部件是组成输入装置、输出装置和反馈装置的元、部件。构成前向通道的元、部件对闭环系统性能影响较小。

在251-K2转台伺服系统中，伺服电机及负载同位置检测元件直接连接，因此，不包含输出装置 P 。假设构成 L 、 H 和 G 的各元、部件的固有误差造成的闭环系统静态误差分别为 e_1 、 e_2 和 e_3 ，系统设计不够理想而由于干扰造成的静态误差为 e_4 ，则总的概率误差

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2}$$

假若规定系统静态精度为 e_0 ，则意味着

$$e_0 \geq \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2}$$

根据 e_0 确定 e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4 的问题，就是误差分配问题。

那么，怎样进行误差分配呢？这是一个比较复杂的问题，没有一般的公式可循。要对误差进行合理分配，必须对现有各类元、部件的性能，可达到的精度以及价格等等进行充分了解和他析。同时，还必须对各种扰动或干扰的类型、性质及其对系统精度的影响进行深入了解和分折。然后进行折衷以求得在总体上达到静态精度指标的前提下，使系统易于实现，且工作可靠、造价低廉。

对于251-K2单轴电动模拟转台伺服系统，技术指标规定 $e_0 = 6'$ ，影响系统静态精度的主要干扰是执行轴上的干摩擦。根据上面提出的分配误差的原则，取 $e_1 = 4'$ ， $e_2 = 4'$ ， $e_3 = e_4 = 1'$ 。于是满足

$$\sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2} = (\sqrt{34})' < 6'$$

这就是说：如果输入装置 L 、反馈装置 H 、前向装置 G 以及干摩擦引起的静态误差折算成输出转角分别不大于 $4'$ 、 $4'$ 、

$1'$ 、 $1'$ ，便能够满足整个系统的静态精度指标。这些要求将反映到各元、部件应达到的技术指标中以及系统应具有的特性上。具体地说，输入变换及位置检测元件的精度、运算放大器的零点漂移指标、设计闭环系统时的稳态误差指标等，都要根据上面分配的误差来确定。

4. 伺服系统的等效开环频率特性

转台伺服系统的一项重要技术指标是频率响应指标。那么，什么样的系统才能满足规定的频率响应指标呢？或者反过来问，为了满足规定的频率响应指标，伺服系统应具有什么样的特性和结构呢？为了回答这个问题，可根据规定的频率响应指标分析伺服系统的等效开环频率特性的大致形状，估算系统等效截止频率 f_c (Hz)或 ω_c (rad/s)，为确定伺服系统的结构、设计或选择某些同频率响应指标有关的元、部件提供依据。

假设所设计的伺服系统可以等效成图1-3所示的单位反馈系统，参考输入为正弦信号，其最大幅值误差和相位误差受到技术指标的限制。图1-3中：

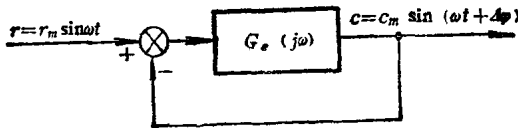


图1-3 等效单位反馈系统

- r —— 参考输入；
- r_m —— 参考输入的幅模；
- ω —— 参考输入的角频率；
- c —— 输出信号；

c_m ——输出信号的幅模；

$\Delta\varphi$ ——输出信号相位移，即相位误差；

$G_e(j\omega)$ ——系统等效开环频率特性。

由图1-3，可求出闭环系统频率特性

$$T(j\omega) = \frac{G_e(j\omega)}{1+G_e(j\omega)} = \frac{c_m}{r_m} e^{j\Delta\varphi}$$

因此幅模

$$\frac{c_m}{r_m} = \left| \frac{G_e(j\omega)}{1+G_e(j\omega)} \right| \quad (1-6)$$

其幅角

$$\Delta\varphi = \left\{ \frac{G_e(j\omega)}{1+G_e(j\omega)} \right\} \quad (1-7)$$

图1-4示出了闭环频率特性表达式中矢量 $G_e(j\omega)$ 、 $1+G_e(j\omega)$ 及幅角 $\Delta\varphi$ 之间的关系。

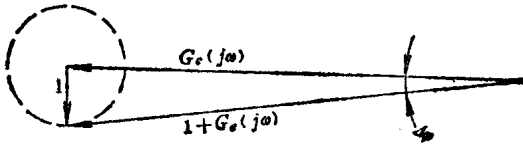


图1-4 频率特性中的矢量关系图

幅值误差

$$\Delta A = \frac{r_m - c_m}{r_m} = 1 - \frac{c_m}{r_m} \quad (1-8)$$

将式(1-6)代入式(1-8)，得

$$\Delta A = 1 - \left| \frac{G_e(j\omega)}{1+G_e(j\omega)} \right|$$

由图1-4可知,最大幅值误差出现在 $\Delta\varphi=0$ 时。用 ΔA_m 表示输入信号角频率为 ω 时可能出现的最大幅值误差,则

$$\Delta A_m = 1 - \frac{|G_e(j\omega)|}{|G_e(j\omega)| \pm 1} = \pm \frac{1}{|G_e(j\omega)| \pm 1}$$

若 $|G_e(j\omega)| \gg 1$,则上式简化成

$$\Delta A_m \approx \pm \frac{1}{|G_e(j\omega)|} \quad (1-9)$$

即正弦输入时可能产生的最大幅值误差等于等效开环频率特性幅模的倒数。

当矢量 $1+G_e(j\omega)$ 与单位圆相切时, $\Delta\varphi$ 最大。用 $\Delta\varphi_m$ 表示输入信号角频率为 ω 时可能出现的最大相位误差,由图1-4可求出

$$\Delta\varphi_m = \sin^{-1} \frac{1}{|G_e(j\omega)|}$$

当 $\Delta\varphi_m$ 很小时,上式可近似为

$$\Delta\varphi_m \approx \frac{1}{|G_e(j\omega)|} \quad (1-10)$$

技术指标规定:当 $f \leq 3\text{Hz}$ 时

$$\Delta A \leq 5\% = 0.05 \quad (1-11)$$

$$\Delta\varphi \leq 5^\circ = \frac{5\pi}{180} = 0.087\text{rad} \quad (1-12)$$

将式(1-8)与式(1-11)、式(1-9)、式(1-12)比较后可知,当

$$f \leq 3\text{Hz} \text{ 或 } \omega \leq 6\pi1/\text{s}$$

应满足

$$\frac{1}{|G_e(j\omega)|} \leq 0.05 \text{ 或 } |G_e(j\omega)| \geq 20 \quad (1-13)$$

且