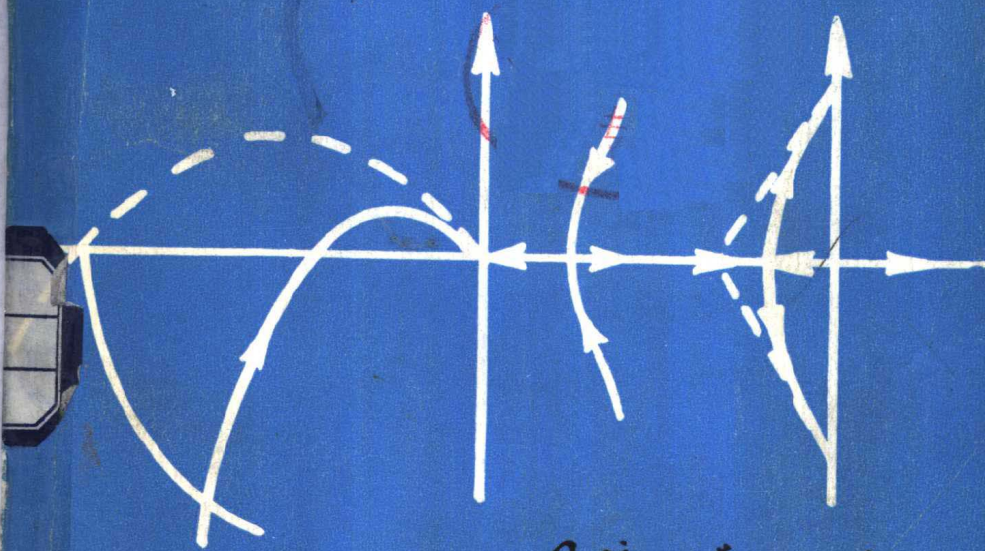


伺服机构设计原理

〔日〕富成 襄
背户一登 合著
岡田養二
宋 辉 陶元山 译



国防工业出版社

伺服机构设计原理

富成 襄
〔日〕 背戸一登 合著
岡田養二

宋 辉 陶元山 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共有八章。第一章到第四章详尽地论述了伺服机构设计的基础理论、利用信号流程图和传递矩阵进行系统分析的方法、伺服机构的构成和控制对象的特性；第五章到第八章介绍了伺服机构的系统设计、利用模拟计算机和数字电子计算机对伺服机构进行分析和设计的方法、伺服系统的设计举例。每节后面均有例题，以进一步启发读者熟悉和掌握所叙内容。

本书适于科研、设计和生产部门的科技人员参阅，也可供大专院校师生参考。

計一ホ設計論

富成 襄

背戸一登 共著

岡田養二

コロナ社

1979

*

伺服机构设计原理

富成 襄

〔日〕 背戸一登 合著

岡田養二

宋 辉 陶元山 译

*

国防工業出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张13¹/₄ 292千字

1986年2月第一版 1986年2月第一次印刷 印数：0,001—2,780册

统一书号：15034·2932 定价：2.70元

目 录

第一章 伺服机构设计的基础理论	1
§ 1.1 绪言	1
1.1.1 什么是伺服机构	1
1.1.2 为什么要使用反馈	2
§ 1.2 伺服机构的构成和要求的性能	3
1.2.1 电-机械伺服机构	4
1.2.2 液-气压伺服机构	6
1.2.3 伺服机构所要求的性能	7
§ 1.3 传递函数及其响应	10
1.3.1 拉普拉斯变换公式	10
1.3.2 部分分式展开	13
1.3.3 传递函数	15
1.3.4 方框图	18
1.3.5 传递函数的频率响应	21
1.3.6 波德图	24
1.3.7 传递函数的脉冲响应	32
1.3.8 传递函数的阶跃响应	35
1.3.9 稳态误差系数	42
§ 1.4 稳定性判据	44
1.4.1 反馈控制系统的稳定性	44
1.4.2 劳斯-古尔维茨稳定性判据	45
1.4.3 奈奎斯特稳定性判据	49
1.4.4 奈奎斯特简易稳定性判据	52
§ 1.5 根轨迹法	56
1.5.1 根轨迹概述	56
1.5.2 根轨迹的绘制方法	57
1.5.3 利用电子计算机求根轨迹的方法	64
1.5.4 随参数变化的根轨迹	68

§ 1.6	反馈控制系统的频率响应	70
1.6.1	开环与闭环的频率特性, 尼柯尔斯图	70
1.6.2	二阶系统的频率特性	74
§ 1.7	伺服机构所要求的设计指标和性能评定方法	75
1.7.1	特性设计的性能评价	76
1.7.2	由瞬态响应和频率响应决定的性能指标的关系	77
1.7.3	根据 s 平面上的根配置决定的性能指标	83
1.7.4	稳态特性和回路增益	85
1.7.5	评价函数	87
参考文献	88
第二章	利用信号流程图和传递矩阵进行系统分析	89
§ 2.1	绪言	89
§ 2.2	信号流程图的基本理论	91
2.2.1	什么是信号流程图	91
2.2.2	信号流程图的简化	95
2.2.3	直接求解的方法——梅森公式	102
§ 2.3	传递矩阵和信号流程图的结合	107
2.3.1	力学系统的矩阵表示和分析	107
2.3.2	传递矩阵的信号流程图表示	111
§ 2.4	在电路分析中的应用	117
§ 2.5	在机械系统分析中的应用	122
2.5.1	变量和坐标系	123
2.5.2	直线运动系统	124
2.5.3	旋转运动系统	127
2.5.4	直线运动和旋转运动的复合机械系统	135
2.5.5	关于轴扭转的传递矩阵	137
2.5.6	横梁的八端网络信号流程图表示	141
参考文献	150
第三章	伺服机构的构成环节	151
§ 3.1	绪言	151
§ 3.2	误差检测器	152
3.2.1	电位计	152

3.2.2	同步变换器	155
3.2.3	使用运算放大器的误差检测器	162
3.2.4	其他误差检测器	163
3.2.5	数字式误差检测器	167
§ 3.3	伺服放大器	169
3.3.1	应用运算放大器的伺服放大器	170
3.3.2	运算放大器的特性	173
3.3.3	直流放大器的特性	180
3.3.4	交流放大器	183
3.3.5	调制器和解调器	183
§ 3.4	反馈补偿用检测器	187
参考文献	187
第四章	控制对象的特性	188
§ 4.1	绪言	188
§ 4.2	液压驱动机构	188
4.2.1	滑阀的特性	189
4.2.2	滑阀和油缸相结合的动特性	194
4.2.3	滑阀和油马达相结合的动特性	204
§ 4.3	伺服阀	210
4.3.1	伺服阀的结构、工作原理和种类	210
4.3.2	力反馈式伺服阀	212
4.3.3	弹簧平衡式伺服阀	220
4.3.4	位置反馈式伺服阀	221
4.3.5	伺服阀三个常数的决定方法	224
4.3.6	伺服阀的信号流程图	226
§ 4.4	电气驱动装置	227
4.4.1	直流伺服电动机	227
4.4.2	交流伺服电动机	232
参考文献	234
第五章	伺服机构的系统设计 (之一)	235
§ 5.1	绪言	235
§ 5.2	增益调整	237

§ 5.3 采用串联补偿的系统设计	243
5.3.1 串联补偿环节	243
5.3.2 采用相位超前补偿的设计	252
5.3.3 采用相位滞后补偿的设计	269
5.3.4 采用超前滞后补偿的设计	279
§ 5.4 采用反馈补偿系统的设计	282
5.4.1 速度反馈补偿	283
参考文献	289
第六章 伺服机构的系统设计 (之二)	290
§ 6.1 绪言	290
§ 6.2 多变量控制和状态控制	290
6.2.1 矩阵传递函数	290
6.2.2 利用状态变量描述伺服系统	293
6.2.3 特征值矩阵和状态矩阵	296
6.2.4 状态控制论	303
§ 6.3 Chang 的最佳设计理论	310
6.3.1 控制系统的评价函数	310
6.3.2 对于判定理论输入的最佳设计	311
6.3.3 定常随机信号和功率谱密度	320
6.3.4 对于随机信号的最佳设计	323
参考文献	328
第七章 利用计算机进行伺服机构的分析和设计	329
§ 7.1 绪言	329
§ 7.2 运算器的功能	330
7.2.1 运算放大器	330
7.2.2 加法器	331
7.2.3 积分器	332
7.2.4 比例尺	334
7.2.5 非线性环节	334
7.2.6 简单系统的模拟	337
§ 7.3 利用信号流程图进行直接模拟	339
7.3.1 直流伺服机构	340

7.3.2	旋转运动系统	342
7.3.3	具有间隙和库仑摩擦的力学系统	344
7.3.4	比例变换法及其应用	346
§ 7.4	利用 FORTRAN 进行伺服机构的模拟	349
7.4.1	直流伺服机构的模拟	350
7.4.2	传递函数的频率响应	357
§ 7.5	伺服机构的特性分析和补偿	359
参考文献		364
第八章 伺服系统的设计举例		365
§ 8.1	绪言	365
§ 8.2	驱动机构的设计	365
8.2.1	根据负载图确定驱动机构	366
8.2.2	采用直流伺服电动机的驱动	367
8.2.3	液压伺服阀和伺服油缸	369
§ 8.3	液压伺服激振器的设计举例	372
8.3.1	驱动机构的确定	373
8.3.2	包含补偿电路系统的总体设计	744
§ 8.4	数值控制工作台定位装置的设计	378
8.4.1	混合数控装置的设计	379
8.4.2	定位装置的结构及其信号流程图	385
8.4.3	进给驱动机构的动特性及其极点和零点轨迹	390
8.4.4	工作台定位装置的特性设计	394
参考文献		404
附录		405

第一章 伺服机构设计的基础理论

§ 1.1 绪 言

作为控制对象的伺服机构，对于初学自动控制的人来说，大概是最容易理解的。因为研究一个对象，可以使理论和实际进行比较。而且伺服机构的输入量和输出量都比较明确，伺服机构一般所要求的性能，在直观上具有高精度、快速响应及抗干扰较强等特点。本章将主要介绍对伺服机构设计有用的线性控制理论基础，并力求通俗易懂，故略去公式的推证。在以后各章中，只引用公式、图表或解析方法进行分析，利用计算机进行分析也根据需要加以引用。已经学过线性控制理论的读者，也可以从第二章起阅读，但最好还是从第一章开始。

1.1.1 什么是伺服机构

所谓伺服机构，是指把机械运动产生的位移或速度的输出变量作为输入变量，能自动精确地进行动作的控制系统。作为简易的例子，我们来研究一下图 1.1 所示的仿形车床的液压仿形机构。在加工一批形状大小相同的零件时，效率较高的方法是，制造一个靠模，按靠模进行机械加工。在图 1.1 中，把靠模指沿靠模移动的动作作为输入，利用液压滑阀将输入量进行功率放大后变为液压油流，通过油缸使刀架运动。油缸、刀架和滑阀的壳体做成整体，可以构成后面所述的反馈，刀具就能精确地按靠模指的动作进行加工。别的例子，可以研究飞机和船舶的操舵机构。大型飞机和船舶，利用人力直接操

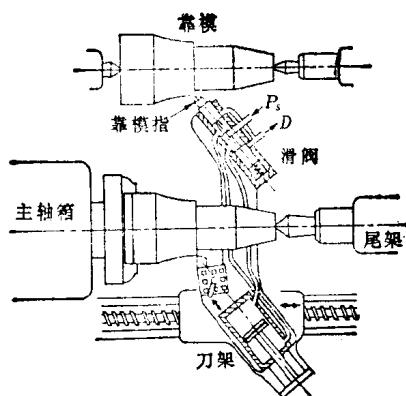


图1.1 液压仿形机构

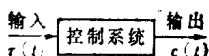


图1.2 伺服机构的模型化

舵是不可能的。因此，要求有一种控制系统能把人移动手柄作为输入，将它进行功率放大之后来精确地操舵。伺服机构最简单的模型如图 1.2 所示。在控制系统中引入了 $r(t)$ 作为输入量，控制系统把此输入量进行功率放大，并要求它如何才能使输出量 $c(t)$ 迅速而精确地进行跟踪。所以，有时把象伺服机构那样的控制系统称为跟踪控制系统。

1.1.2 为什么要使用反馈

所谓反馈，是指检测出输出信号 $c(t)$ 后再回授到前面，按照与输入信号 $r(t)$ 之差来建立误差信号 $e(t) = r(t) - c(t)$ ，使控制系统动作的系统，如图 1.3 所示。大部分伺服机构都使用反馈，其主要理由是因为要求伺服机构

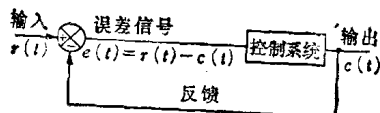


图1.3 简单的反馈控制系统

具有所需的功率放大和高精度这两种相矛盾的性能所致。利用简单的控制系统来放大能量且获得良好精度的情况，并不是很多。如果允许使用反馈的话，虽然前向控制元件精度不那么高，但使用功率放大并具有较高检测精度的反馈元件，在整体上可构成增加能量级的高精度控制系统。此外，即使能构成不用反馈的伺服机构，也可以作为反馈控制理论的简单情况进行分析，所以我们主要来研究一下反馈控制系统。

反馈控制系统的最大缺点，是由反馈环节产生的不稳定问题。反馈就必然要建立闭路，由于闭路内信号的流动，整个系统会引起激烈振荡，使控制系统产生不稳定。因此，反馈控制系统的最重要问题，就是要建立满足性能要求并稳定运行的控制系统。

§ 1.2 伺服机构的构成和要求的性能

伺服机构一般有几种基本构成，其基本动作可用方框图表示。简单的方框图如图 1.4 所示。伺服机构的前向元件可分解为两个（或三个）。控制对象特性是由被控制机械决定

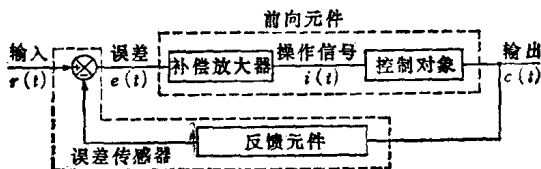


图1.4 基本的伺服机构

的，一般地说，控制设计人员不能随意选择。这将在第四章中阐述，而控制对象中的驱动装置有一些选择的自由，但控制设计者不能随意决定其特性。例如机床的仿形控制，控制对象是油缸和刀架，虽然油缸截面积可以改变，但整体特性取决于机床。

对于这种情况，补偿放大器可由控制设计者自由选择。补偿放大器不仅使误差信号 $e(t)$ 放大，而且建立控制信号 $i(t)$ ，以便满足控制系统的全部设计性能。传感器可以和反馈元件组成一体，也可以分开，都是为了检测输入输出信号，产生误差信号。

作为控制系统设定值的输入信号可采取各种形式。例如，机械的位移信号、由电压产生的信号或象数控(NC)那样由电脉冲数形成的信号等。下面我们来研究典型控制系统的构成例子。

1.2.1 电-机械伺服机构

这是一种利用电动机来产生机械能的伺服机构，随电动机的种类不同可分为直流伺服机构和交流伺服机构。直流伺服机构如图 1.5 所示，由电位计、直流放大器、直流电动机

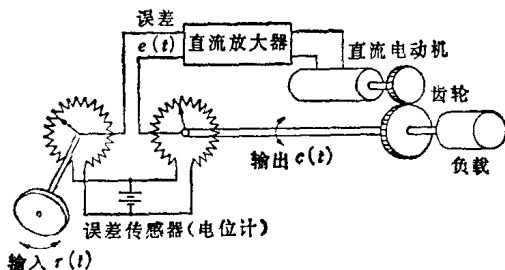


图1.5 电-机械直流伺服机构

及齿轮、负载系统构成。为了说明这种系统的动作，把各点的波形画成曲线，如图 1.6 所示。亦即输入信号在某一时刻急剧增加时，在输入量 $r(t)$ 与输出量 $c(t)$ 之间产生误差，该误差被电位计测出之后建立误差信号 $e(t)$ 。放大器将该误差信号放大来驱动电动机，使负载系统的位移 $c(t)$ 与输入量相同。这种伺服机构的结构比较简单，动作容易理解，但其缺点是难于建立一个响应快速精度较高的伺服机构。

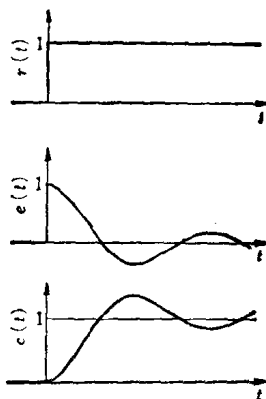


图 1.6 直流伺服机构的响应

交流伺服机构则把电信号全部变为交流，结构见图 1.7。亦即电信号由交流电压调幅，在一般伺服机构中使用 50/60 赫的交流频率，在飞机等精密伺服机构中，使用 400 赫或 1.5 千赫。这种伺服机构可使用高精度同步变换器来检测误差，因此适用于小型高精度伺服机构。其缺点是信号被调幅，如图

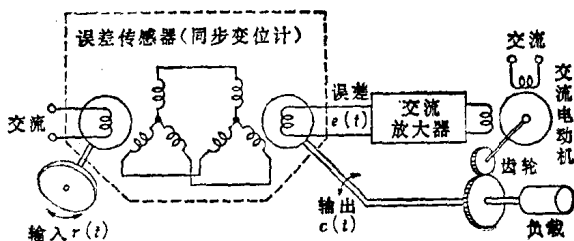


图 1.7 电-机械交流伺服机构

1.8 所示，所以进行分析和控制系统的补偿都较困难，往往不容易建立大功率的伺服机构。

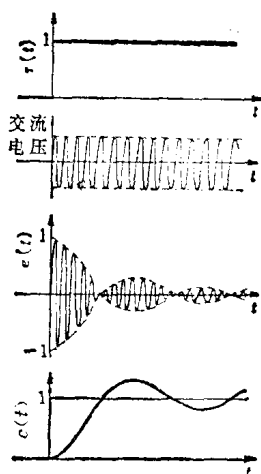


图1.8 交流伺服机构的响应

1.2.2 液-气压伺服机构

利用电动机的伺服机构不适用于大功率控制机构。因为大功率电动机，外形大，安装困难，并且电动机转子大，达到最高转速的时间长，响应缓慢。因此，大功率伺服机构利用油和气体作为工作流体来构成。典型的例子是图 1.1 所示的液压仿形机构，油缸的体积小并能产生很大的功率，适用于大型高速伺服机构。在这里我们来研究一下如图 1.9 所示的可获得最高性能的电-液-压伺服机构。这种伺服机构的动作，首先当输入量 $r(t)$ 在某一时刻增加时，则产生误差 $e(t)$ ，利用放大器使误差放大。放大的误差信号使圆筒形线圈内的电流发生变化，通过电磁力推动滑阀。在图中画出了滑阀移动到左端时油流方向，该油流操纵油缸负载跟踪输

入。这种伺服机构的缺点是需要油源，油液管理要求严格（防止灰尘污染）。

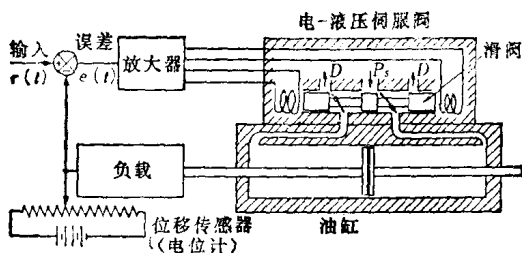


图1.9 电-液压伺服机构

气压伺服机构是通过把工作流体变为气体来构成的，可用于要求大功率的控制系统中，但气体具有压缩性，不能期望高速响应。可是气体的漏泄容易控制，气源便宜，所以在一般工厂中得到了广泛应用。

1.2.3 伺服机构所要求的性能

如上所述，伺服机构是一种跟踪控制系统。因此，要求伺服机构的输出变量要快速且高精度地跟踪输入量。评价这些伺服机构的性能，可以考虑两组指标。一组是控制系统的输入变量 $r(t)$ 在时间 $t = 0$ 急剧增加时的响应 $c(t)$ ，这是所谓阶跃响应的跟踪性能的指标。另一组是输出变量在输入变量 $r(t)$ 以正弦波重复变化时的跟踪性能，这是所谓频率响应的指标。

典型控制系统的阶跃响应示于图 1.10。作为表示这种响应的上升时间快慢和精度的指标，一般有下列几项：

〔超调量 $c_p\%$ 〕衡量控制系统稳定性的大致标准

$$\frac{\text{最大超调量}}{\text{稳态值}} \times 100\%$$

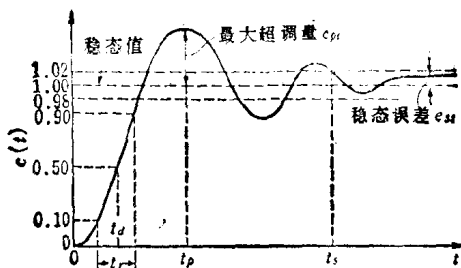


图1.10 典型的阶跃响应

- 〔超调时间 t_p 〕 出现最大超调的时间
- 〔调整时间 t_s 〕 达到小于稳态值的 $\pm 2\%$ (或 $\pm 5\%$) 的时间
- 〔半值时间 t_d 〕 达到稳态值 50% 的时间
- 〔上升时间 t_r 〕 输出响应从稳态值的 10% 达到 90% 所需要的时间
- 〔稳态误差 e_{ss} 〕 输出响应达到稳态时的误差

其次，我们来研究一下频率响应。当给输入施加一个正弦波形交变信号时，输出频率响应将形成频率相同的正弦波，根据频率响应能跟踪到多高频率，可用来评价系统的性能。典型的频率响应示于图 1.11。图中横轴取为频率，纵轴取为输出量和输入量之比，频率响应可用下列指标来评价。

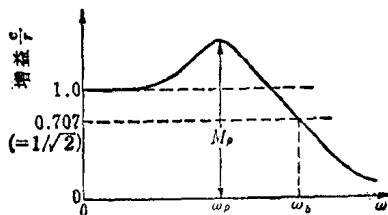


图1.11 典型的频率响应

〔频率响应的共振峰值 M_p 〕

〔共振频率 ω_p 〕

〔带宽 ω_b 〕 即输出频率响应降低到 $1/\sqrt{2}$ (0.707) 时的频率

此外，用来评价伺服机构的指标还有抗干扰的特性。例如，在图 1.1 液压仿形控制的情况下，施加在车刀上的切削力相当于伺服系统的干扰。尽管在仿形切削中产生切削阻力，刀架仍然按照输入量移动，输出量相对干扰的变化越小越好。对于一般控制系统都是如此，受外界干扰的控制系统模型示于图 1.12。在一般的伺服机构中，外界干扰往往是施加于负载的外力，而输出则是位移。在这种情况下，对于外

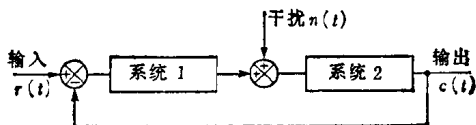


图1.12 受外界干扰的反馈控制系统

界干扰的特性可用输出阻抗来表示。阻抗象征抗干扰性，用力除以位移表达。因此，表示对外界干扰的反应的输出阻抗可用

$$\text{输出阻抗} = \frac{\text{干扰 } n(t)}{\text{输出量 } c(t)}$$

表征。一般伺服机构要求输出量受外界干扰所产生的变化要小，而希望输出阻抗要高。

此外，有的控制系统输入量中含有噪声。一般噪声的频率较高，因此为了抑制噪声，输入输出传递函数的带宽受到了限制。