

伺服系统设计的 现代实践

国防工业出版社

伺服系统设计的现代实践

〔美〕 D.R. 威尔桑等 编著

韦登谷、薛友谊、吴金水、李良巧 译

张明廉、王行仁 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是一本讲述大功率伺服系统设计的专著。书中介绍了关于伺服系统的理论基础和一般的设计方法，并深入讨论了设计中的某些问题；书中对于数字技术、数字及模拟计算机、集成电路、可控硅等在伺服系统设计、制造中的应用，以及伺服系统安装、调试中的实际问题 and 可靠性问题，均作了详细介绍和讨论。

本书可供从事自动控制技术的工程技术人员和工人参考，而对于工业院校有关专业的师生亦有裨益。

Modern Practice in Servo Design

D.R. WILSON

Pergamon Press 1970

*

伺服系统设计的现代实践

〔美〕D.R.威尔森等 编著

韦登谷、薛友谊、吴金水、李良巧 译

张明廉、王行仁 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

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

•

787×1092¹/₁₆ 印张 16 368 千字

1977年10月第一版 1977年10月第一次印刷 印数：00,001—10,800 册

统一书号：15034·1539 定价：1.65 元

出版说明

遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们翻译出版了《伺服系统设计的现代实践》一书，供从事这方面工作的同志们参考。

本书着重于如何根据已经成熟的理论设计、制造出符合给定技术要求的伺服系统。通过工程实践中的例题来介绍设计方法，从分析技术条件到各个环节的选择都作了详细说明；其中关于安装调试中的实际问题及其解决方法比较实用。书中摒弃了烦琐的数学推导，对各部分的讲解比较深入浅出，有些内容也比较新颖。读者只须具备一般的控制理论知识即可理解其部分章节的内容。

在翻译过程中，对原书中的一些技术性错误作了更正，并对其中宣扬资本主义的内容作了删节。但由于我们水平所限，书中必将有不少缺点和错误。希望读者批判地吸取其中有用的内容，并恳请及时地指出书中的缺点和错误。

本书在翻译过程中得到何平伟同志的许多帮助。

目 录

序言 (节译).....	9
--------------	---

第一章 伺服机构理论基础

(D. R. 威尔桑)

1.1 引言	11
1.2 拉普拉斯变换和复频率	11
1.3 传递函数	13
1.4 复频率平面	14
1.5 方框图	14
1.6 闭环传递函数	16
1.7 绝对稳定性	17
1.8 频率响应设计法	17
1.8.1 奈奎斯特曲线	18
1.8.2 伯德曲线	19
1.8.3 尼科尔斯图	21
1.8.4 根轨迹法	22
1.8.5 利用根轨迹法设计伺服系统	23
1.8.6 饶斯稳定性判据	24
1.9 伺服系统元件	26
1.9.1 误差检测器	26
1.9.2 电位器检测器	26
1.9.3 同步机误差检测器	27
1.9.4 误差检测器的方框图	28
1.10 伺服系统的补偿	28
1.11 功率放大器	29
1.12 直流伺服电动机	30
1.13 传动装置和机械负载的谐振	31
1.14 结论	32
参考资料	32

第二章 大功率伺服系统的初步设计

(D. R. 威尔桑 和 J. B. 欧怀恩斯)

2.1 引言	33
2.2 性能指标	34
2.3 稳态和瞬态性能	35
2.3.1 伺服机构的误差	35
2.3.2 稳态误差系数	37
2.4 电动机和传动比的选择	39

2.4.1 直流伺服电动机	39
2.4.2 传动比的选择	40
2.4.3 电动机额定功率	41
2.5 扰动的影响	42
2.5.1 根据谱密度函数估价误差	43
2.6 实例: 涅德-勒奥那尔多 速度调节器	46
2.6.1 串联补偿	48
2.6.2 反馈补偿	50
参考资料	50

第三章 伺服系统设计研究

(J. E. 亚雷斯)

3.1 引言	51
3.2 机械部分	52
3.3 电动机	54
3.4 功率级	56
3.4.1 一般要求	56
3.4.2 旋转功率传动装置	57
3.5 励磁级和伺服放大器	62
3.6 全部控制回路及其稳定性	62
3.7 饱和电平和引入的非线性	64
3.7.1 饱和对稳定性的影响	64
3.7.2 误差通道	65
3.7.3 饱和电平	67
3.7.4 粗通道的制动	67
3.8 机械谐振	69
3.8.1 反馈回路内部的谐振	69
3.8.2 谐振	72
3.8.3 反谐振	72
3.8.4 锁定转子的谐振频率	72
3.8.5 转子的反谐振频率	73
3.8.6 自由转子和负载的谐振	73
3.8.7 伺服回路以外的谐振	73
3.8.8 级联谐振和补偿	74
3.8.9 例题	74
3.9 其它因素	76
3.10 小结	77
3.11 附录	78
参考资料	

第四章 数字伺服技术

(P. W. 透里)

4.1 引言	79
4.2 速度控制	80
4.3 数字代码	83
4.3.1 二进制码	83
4.3.2 二十进制码	84
4.3.3 格雷码	85
4.4 数字电路	86
4.4.1 逻辑功能	86
4.4.2 布尔代数	87
4.4.3 双稳态记忆部件	87
4.4.4 二进制计数器	88
4.4.5 8421二十进制计数器	88
4.4.6 2421二十进制码计数器	89
4.4.7 双向计数器	89
4.4.8 数字减法器	89
4.5 数字式编码器	91
4.5.1 电刷接触式编码器	91
4.5.2 光电编码器	92
4.5.3 磁编码器	93
4.5.4 感应式编码器	93
4.5.5 电容式编码器	93
4.5.6 编码器的模糊性	93
4.6 数-模转换器	94
4.7 步进电动机	96
4.8 大型天线的数字式位置控制	97
4.9 结论	99
参考资料	99

第五章 用于射电望远镜和卫星

跟踪的大型天线的设计

(R. G. 伍黑勒)

5.1 引言	100
5.2 伺服系统性能	101
5.2.1 射电望远镜	101
5.2.2 卫星跟踪系统	102
5.3 伺服控制的输入设备	103
5.3.1 射电望远镜	103
5.3.2 极坐标转换成高低(或方位)坐标 的其它方法	105
5.3.3 卫星跟踪系统的输入设备	107
5.4 伺服系统的结构选择	108
5.4.1 伺服系统设计的基本原则	108
性能	111

5.5.1 天顶角速度	112
5.5.2 方位角速度	112
5.5.3 加速度	112
5.6 跟踪精度要求	113
5.6.1 误差分配	113
5.6.2 加速度误差	114
5.6.3 跟踪接收机噪音引起的误差	114
5.6.4 跟踪系统零位漂移误差	114
5.6.5 阵风引起的机械偏差	115
5.6.6 伺服系统带宽	115
5.6.7 天线惯量	116
5.6.8 电动机的额定参数	116
5.6.9 机械的自然频率	117
5.7 闭环回路的性能	119
5.7.1 阵风: 伺服误差	121
5.7.2 快速协调	122
5.8 检查和试验	123
5.8.1 最大加速度和速度检查	125
5.8.2 响应试验	125
5.9 小结	129
参考资料	129

第六章 控制系统的若干实际问题

(D. S. 休特柴恩桑)

6.1 引言	130
6.2 伺服系统的一些实际问题	130
6.2.1 干扰	130
6.2.2 环境	131
6.2.3 使用者的要求	132
6.2.4 饱和	133
6.2.5 齿隙	134
6.2.6 摩擦	134
6.3 现场调整	135
6.3.1 零位调整	135
6.3.2 伺服系统的调整	136
6.3.3 特性曲线	137
6.3.4 最佳化	138
6.4 测量装置和误差检测	139
6.4.1 电位器	140
6.4.2 同步机	140
6.4.3 感应同步器	143
6.4.4 光学测量装置	144
6.4.5 数字误差检测器	145
6.4.6 机械轴位编码器	145
6.4.7 光学编码器	145
6.4.8 磁性编码器	146
6.5 伺服机构输入指令的程序设计	147
6.5.1 模拟输入	147

6.5.2 数字输入	148
6.5.3 数-模转换器	149
6.5.4 联机程序控制	150
6.5.5 卫星跟踪天线	151
参考资料	151

第七章 模拟计算机在伺服

机构设计中的应用

(C. V. 威尔斯)

7.1 引言	152
7.2 模拟计算机各种功能的定义	153
7.2.1 高增益直流放大器	153
7.2.2 虚地概念	153
7.2.3 积分	153
7.2.4 微分	154
7.2.5 加法	154
7.2.6 电位器的应用	155
7.2.7 模拟计算机基本运算方式概述	155
7.2.8 读出设备	155
7.2.9 一个简单例子的程序编制	156
7.3 计算机的解题准备	156
7.3.1 问题的描述	156
7.3.2 问题的定义	157
7.3.3 比例尺系数	157
7.3.4 绘制计算机模型结构图	158
7.3.5 静态校验程序	158
7.4 位置伺服机构的模拟	159
7.4.1 系统方程	159
7.4.2 已选定比例尺的方程	161
7.4.3 时间比例尺	162
7.4.4 问题的校验程序	163
7.5 补偿网络的设计	165
7.5.1 补偿网络的模拟	168
7.6 非线性模拟方法	168
7.6.1 引言	168
7.6.2 非线性的综合	168
7.6.3 限幅器	169
7.6.4 库仑摩擦	169
7.6.5 死区	170
7.6.6 硬限幅器	170
7.6.7 半波整流器	171
7.6.8 磁滞	172
7.7 非线性计算装置	172
7.7.1 任意函数发生器	172
7.7.2 双变量函数的产生	173
7.7.3 特定函数发生器	173
7.7.4 乘法器	173
7.7.5 除法	174

7.7.6 继电比较器	175
参考资料	175

第八章 伺服系统设计中的

混合计算机

(C. V. 韦尔斯)

8.1 引言	176
8.2 并行混合计算机	177
8.2.1 并行混合计算机部件	177
8.2.2 模拟部件	177
8.2.3 逻辑部件	178
8.2.4 连接部件	182
8.3 并行混合计算机的应用	183
8.3.1 系统对于扰动增值, 例如阶跃输入 增值的瞬态响应的计算	183
8.3.2 初始条件增值的瞬态响应的计算	183
8.3.3 参数增量的瞬态响应的计算	183
8.3.4 边界值问题	184
8.3.5 含有判别部件的系统的模拟	184
8.4 位置伺服机构的最佳化	184
8.4.1 求解方法	184
8.4.2 用并行混合计算机求解	185
参考资料	187

第九章 伺服放大器的设计

(F. 加尔内尔)

9.1 引言	188
9.2 大型位置伺服系统中的放大器	188
9.2.1 直流晶体管放大器	190
9.3 小功率交流伺服放大器	195
9.4 小功率直流伺服放大器	195
9.5 功率输出级	197
9.6 低电平放大器	199
9.7 现代技术和结构	200
9.7.1 硅集成电路	201
9.7.2 薄膜电路	201
9.7.3 厚膜电路	202
9.7.4 微型焊接技术	202
9.7.5 封装和密封	202
9.7.6 多层印刷电路板和金属化孔技术	202
9.7.7 半导体致冷器件和汽相冷却系统	203
9.8 未来的发展趋向	203
9.9 实例	203
参考资料	212

第十章 可控硅的应用

(N. J. 杜恩卡恩和D. R. 威尔森)

10.1 引言	213
10.2 可控硅、点火电路和额定参数	214
10.2.1 可控硅器件的构造和工作原理	214
10.2.2 触发要求	215
10.2.3 相位控制的典型点火电路	215
10.2.4 可控硅的额定值	217
10.3 可控硅功率放大器	218
10.4 50马力直流电动机速度伺服系统 的可控硅功率放大器设计	220
10.4.1 系统的技术要求	221
10.4.2 放大器形式的选择	221
10.4.3 可控硅的电压额定值及其保护	222
10.4.4 可控硅的电流额定值及其保护	223
10.4.5 放大器熔断保护器的计算	225
10.4.6 系统稳态设计	225
10.4.7 再生制动和反转	227
10.4.8 纹波的不稳定性	228
10.5 速度可变的交流电动机传动装置	229
10.5.1 变频控制	229
10.5.2 可变电压控制	230
10.5.3 改进的 Kramer 装置	230
参考资料	232

第十一章 可靠性

(F. 加尔内尔)

11.1 引言	233
---------------	-----

11.2 可靠性理论基础	234
11.2.1 指数式可靠性模型	235
11.3 元件和设备试验法	237
11.3.1 “确定可靠性”法	237
11.3.2 AGREE 试验	238
11.3.3 设备可靠性的“特殊试验法”	240
11.4 提高设备可靠性的方法	240
11.4.1 降低使用标准以提高可靠性	240
11.4.2 降低半导体器件的使用标准	240
11.4.3 降低电容器的使用标准	243
11.4.4 降低电阻的使用标准	243
11.5 通过结构设计提高设备的可靠性	244
11.5.1 设备密封	245
11.5.2 使用金属化孔印制电路板	245
11.5.3 板间连接用的印制电路接插件	245
11.5.4 线绕式接点	246
11.5.5 元件或组件的密封	246
11.5.6 放热现象	246
11.5.7 收缩应力	246
11.5.8 使用填料	247
11.5.9 潮气的侵入	247
11.6 通过元件选择提高设备可靠 性及实例	247
11.7 采用余度技术提高设备可靠性	248
11.8 利用微电子学技术提高可靠性	250
11.9 设备设计法概要	250

参考资料	251
------------	-----

附录	252
----------	-----

序 言 (节译)

本书的基本主题,是将伺服系统设计和补偿的理论方法(诸如奈奎斯特判据、尼科尔斯曲线图和根轨迹法)作为伺服系统技术人员的“专业工具”,而将它作为讲课的材料时,也能使读者在阅读和理解本书之后掌握这些理论方法。

本书不是为了阐述理论原理,而是关于这些理论原理的应用和实现。这些理论原理已在所有开设反馈系统课程的大学和工艺学校的深度适中的正式教程中讲授了。本书是许多作者合写的,其特点在于:每章中的实际知识和对设计要点的介绍,较之单个作者的出版物所希望达到的深度要深得多。尤其是在电子技术以这样快的速度发展的今天,更是如此。本书的每一位作者都曾亲自参与一个专门的具体项目,具有解决设计和调整大功率随动系统中的实际问题的多年经验。

在第一章里,简要地概括了所有的伺服系统技术人员通用的所谓专业工具。这些工具可概括为一个在大多数工业设计机关都通用的名称,即设计的频率响应法。如前所述,以后各章的作者都将这些方法看作为伺服系统设计者的基本技术并以它们来帮助阅读和理解。据我的经验看来,在理论内容方面,这本书被有关技术人员所完全理解是现实而又可能的。

第二章和第三章更仔细地考虑了高性能伺服系统的设计,从设备的各项技术要求到具体方案的实现。第五章考虑专门的设计问题——重量在500吨范围内的大直径天线系统的伺服系统的设计问题。这样的天线系统在世界通讯中正起着越来越大的作用,所以伺服系统的性能是地面站的总效率的一个重要方面。第六章仔细地考虑了伺服控制线路的装配和检查,讨论范围从同步传送的调整到伺服系统运行性能的最佳化。

所有的伺服控制方案都建筑在伺服系统回路内放大过程效能的基础上。第九章讨论伺服系统的控制过程,并进而讨论在特殊的应用中所设计的补偿网络的实现,例如解调器,同时又讨论了交流仪器伺服系统。第十章特别考虑了可控硅的功率放大,同旋转式功率放大器,如微场扩流发电机、微场电机放大器和Ward-Leonard功率放大器相比较,常常又将可控硅功率放大器称为静止式功率放大器。

第十一章考虑一个极为重要的,尤其是在军事设备中,而在工业设备中也变得越来越重要的课题——可靠性。初读时对第十一章的数学运算显得困难些,但可靠性本身是一个非常重要的问题,而且每一个有经验的技术人员都必须对这个问题有所了解。

数字计算机在工程设计中的地位是非常重要而又不容误解的。数字计算机对伺服系统设计者来说,有三种主要使用方式,而其使用范围决定于每位技术人员的专业职责。这些方式是:

- (a) 作为技术人员的计算尺的一种延伸,即计算奈奎斯特、尼科尔斯或伯德式的频率响应,计算根轨迹和估价复数线积分[例如方程(2.14)],
- (b) 在实现特殊的控制方式时作为一个设备使用;

(c) 在混合计算装置中作为基本的模拟计算装置的延伸。

如能提供所需的计算机, 方式(a)仅提出程序设计问题, 本文不予讨论。方式(b)在第四章讨论, 而方式(c)在第八章讨论。

模拟计算机——伺服系统设计者的一件强有力的工具, 特别是当研究非线性问题时, 例如间隙、粘滞、放大器饱和等等更是如此——这些在第七章中讨论。重点放在正式的程序设计法上, 并通过实例加以说明。

本书对近代的理论方法, 即状态空间分析法、最大值原理等不予介绍, 因为这些方法在一般的工业应用中过去没有采用过, 现在也的确未加采用。而且在至少可以预见的将来, 在单回路的伺服系统的设计中也未必能有大量的工业应用, 而本文的宗旨和首先关心的是单回路的伺服系统设计。

首先, 本书非常适合那些初踏入工业部门具有一定的理论知识但缺乏设计经验的年轻大学生; 第二, 本书将证明, 对于从事控制工作的技术人员来说, 它是一本很值得参阅的参考书, 并可用作控制实践的工作手册; 第三, 本书包含很多适合于控制系统课程中伺服系统设计专门化课程的材料。

作 者

第一章 伺服机构理论基础

D. R. 威尔桑

1.1 引言

这一章的目的在于回顾工程设计部门设计伺服机构常用的理论原理。技术上常用的方法主要是频率响应法，这种方法已由奈奎斯特、伯德、尼科尔斯、伊文斯等人的著作阐述清楚。因此，这一章仅简述设计方法的理论原理，而不做严谨的论述。参考资料中给出的几本教科书对此有详细的讨论，本书也给出了弄清这些方法和技巧所必需的材料，因此，即使没有严格的数学证明，不熟悉这些方法的读者也同样可以理解。

任何一种伺服机构基本上都基于反馈原理。即无论被控变量是什么形式，使之与所希望的值进行比较，以形成一个误差信号或误差的度量。而伺服机构的运转应使误差减小为零，以使输出等于指令输入。虽然一般可根据各种形式的变量，例如蒸气流量，液面高度或温度等构成伺服系统。但实际上绝大多数而且非常重要的伺服机构都是机电式的，这是因为伺服机构的目的是用电动机和齿轮箱确定庞大物体的位置。

在军事方面这些庞大物体可能是导弹发射装置，导弹发射前必须使其方位(地平面内)和仰角(关于方位轴的倾斜角)都大致对准正确方向。因此，如果导弹安装在平台上，其仰角和方位可由工作于每一轴上的由操作员控制的伺服机构确定，或由指令控制计算机控制的全自动武器系统中的伺服机构确定。伺服机构的另一军事应用是火炮控制系统，其作用类似于导弹发射装置中的伺服机构，但当火炮底座运动时，例如坦克中的火炮，其控制系统格外难以实现。

高性能的动力伺服系统在工业上可用于轧钢机，将钢轧成钢板。此外，诸如船舶上用以消除船体摆动的稳定器，以及用于空间研究和卫星通讯的大型天线，例如 Jodrell Bank 天线以及更近代的 Goonhilly 和 Chilbolton 天线也都是高性能大功率伺服机构的应用实例。

所以，本书的主题是大功率机电伺服机构的设计。以下各节将介绍设计的基本理论概要。

1.2 拉普拉斯变换和复频率

伺服机构各部件在线性范围的工作可用一系列微分方程来描述。对于一个特定的输入，微分方程的解包括瞬态和稳态两部分，将各部件的微分方程式联立就可推导出描述伺服机构工作，同时又能预测伺服机构性能的总的微分方程式。

求解这些微分方程一般是很烦琐而又很费时间，此外，虽然方程预示了系统的响应，但因设计者一般先选择伺服机构的某些部件，例如，负载惯量，电动机和齿轮箱等，然后综合电子线路以闭合伺服回路，所以方程对于综合未定的部件并不是特别有帮助的。这些综合和设计问题大多可通过转换描述伺服机构的微分方程的定义域来解决，这是指从时

域转换到等价的复频率域，结果，微分方程即转换为复频变量的线性多项式。从时间域转换到复频率域由拉普拉斯变换来实现，本书以字母 s 作为复频率变量的符号。

因此，拉普拉斯变换以及拉普拉斯变量的性质是技术人员用来设计伺服机构的许多频率响应设计法的基础。拉普拉斯变量，如上所述是一复频率变量，故一般有

$$s = \sigma + j\omega$$

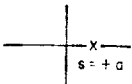
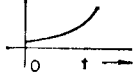
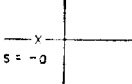
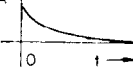
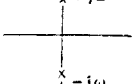
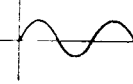
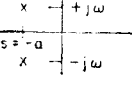
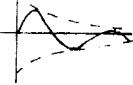
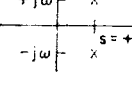
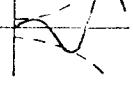
拉普拉斯变换定义为

$$F(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt$$

式中 $f(t)$ 是被变换的时间函数，并且 $f(t)$ 一般都是微分方程式，也就是说，拉普拉斯变换是将定义和描述在时间域中的给定系统转换到复频率域，这里必须假定系统在时间域内的方程是可以进行拉氏变换的。实际上这仅意味着系统必须是线性的。在标准教材中^[1]推导了各种时间函数的拉普拉斯变换，表 1.1 说明了时间域函数与其复频率定义之间的关系。

本书充分注意到，而且经验也已经证明，基于拉普拉斯变换和相应的频率响应设计法的线性化系统设计，对于学习基本设计方法是很合适的。虽然几乎伺服系统的所有部件都具有非线性特性，但对于实际应用，它们都有一个理论与实际相符的线性区。包括固有的

表1.1 拉普拉斯变换表

函数	拉普拉斯变换	s 平面	时间域响应
e^{+at}	$\frac{1}{s-a}$		
Ae^{-at}	$\frac{A}{s+a}$		
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$		
$Ae^{-at} \sin \omega t$	$\frac{A\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$		
$e^{+at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s-a)^2 + \omega^2}$		

和设计时引入的非线性因素的系统最终设计可用连续过程模拟或数字模拟更好地处理（参看第七章）。

1.3 传递函数

系统的传递函数就是以拉普拉斯变量 s 表示的系统输入与其相应的响应之比。比值称为系统的传递函数，即

$$\text{传递函数} = \frac{\text{输出信号的拉普拉斯变换}}{\text{输入信号的拉普拉斯变换}}$$

其中输入和输出信号一般可表示各种形式的变量，例如输入电压对电动机轴位。

例 1

图 1.1 所示网络可由下述微分方程来描述：

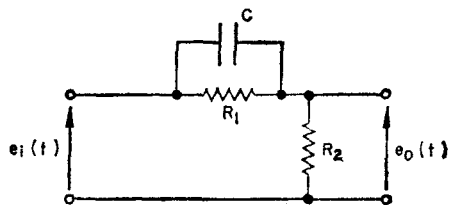


图 1.1 简单的直流相位超前网络

$$\frac{de_o(t)}{dt} + \frac{1}{\alpha T} e_o(t) = \frac{de_i(t)}{dt} + \frac{1}{T} e_i(t) \quad (1.1)$$

式中， $e_o(t)$ 是输出信号， $e_i(t)$ 是输入信号， t 是时间变量， $T = R_1 C$ ， $\alpha = R_2 / (R_1 + R_2)$ 。

利用拉普拉斯变换，并假定初始条件为零，即电容器上电荷为零，可得

$$s e_o(s) + \frac{1}{\alpha T} e_o(s) = s e_i(s) + \frac{1}{T} e_i(s) \quad \bullet$$

为方便起见，令

$$a = \frac{1}{T} \text{ 及 } b = \frac{1}{\alpha T} \quad \bullet$$

因此

$$\frac{e_o(s)}{e_i(s)} = \frac{s + a}{s + b} \quad (1.2)$$

此式常写成以下形式：

$$\frac{e_o(s)}{e_i(s)} = G(s)$$

式中

$$G(s) = \frac{s + a}{s + b} \quad \bullet \quad (1.3)$$

根据上述定义，函数 $G(s)$ 即称为网络的传递函数。系统的传递函数通常是特别有用的，由于它确定了所考虑系统的变量（即输入量和输出量）之间的关系，因此输出变量，例如电动机轴的位置，将可预先判断。伺服机构传递函数某些部分，即负载惯量，传动比和电动机等的传递函数一般是固定不变的，设计任务之一就是选择一种放大器的结构形式

● 原书误为 $\frac{de_o(t)}{dt} + \frac{1}{T} e_o(t) = \frac{de_i(t)}{dt} + \frac{1}{T} e_i(t)$ 。——译者

● 原书误为 $s e_o(s) + \frac{1}{T} e_o(s) = s e_i(s) + \frac{1}{T} e_i(s)$ 。——译者

● 原书误为 $a = \frac{1}{\alpha T}$ ， $b = \frac{1}{T}$ 。——译者

以使总的传递函数具有所希望的形式, 这种形式或已知是合适的, 或能证明它是合适的。这些方法将在第二章和第三章中讨论。

1.4 复频率平面

频率变量可表示在有两个坐标轴的图上 (图1.2), 这种图有四个与复数相联系的象限。另外, 任何转换到复频率域的并用传递函数描述的系统都可以表示在这种复频率图上, 这种图一般称为 s 平面。为此, 将称为极点和零点的两个附加术语定义如下:

极点: 使系统传递函数趋于无穷大的 s 值定义为极点。

零点: 使系统传递函数趋于零的 s 值定义为零点。

考虑以上所确定的简单网络的传递函数, 即

$$G(s) = \frac{s + a}{s + b}$$

根据零点和极点的定义可知 $s = -a$ 为一零点, 反之, $s = -b$ 为一极点。在 s 平面图上极点以 “ $\times$ ” 表示, 零点以 “ $\circ$ ” 表示。因此, 网络可用极点和零点的符号表示在 s 平面上如图 1.2 所示。极点和零点一般可位于 s 平面的任何地方, 但是复数极点和零点总是以共轭对出现, 而对于稳定系统来说, 所有极点必须都位于 s 平面的左半部 (见后面关于系统稳定性的讨论)。

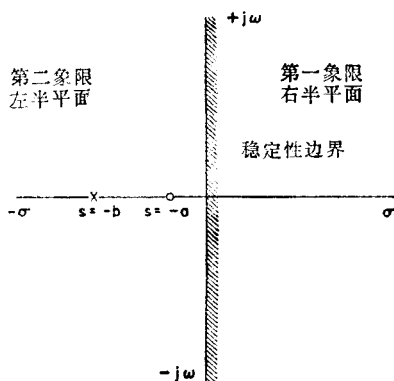


图1.2 s 平面

1.5 方框图

在伺服系统设计中, 根据传递函数的概念很容易画出系统的方框图。图 1.3 示出一个直流电动机, 它由加到激磁绕组上的电压激励, 而由外电源供给电枢绕组恒定的直流电流。可以认为, 在流过电枢绕组的电流为恒定直流时电动机所产生的电力矩与激磁电流成正比, 因而可写出下列方程, 以数学术语说明电动机在作用于激磁绕组的电压控制下的工作。

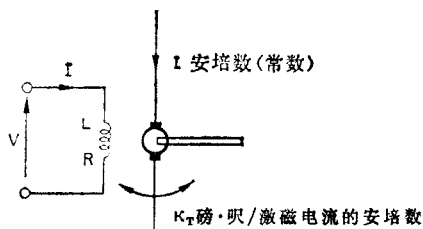


图1.3 激磁受控的直流电动机

(1) 激磁电流 $I_f(t)$ 由下式确定:

$$V(t) = L \frac{d}{dt} [I_f(t)] + R I_f(t) \quad (1.4)$$

(2) 电动机产生的电力矩 T_E 由下式确定:

$$T_E = K_T I_f(t) \quad (1.5)$$

(3) 假定损耗为零, 反作用力矩 T_M 就等于电动机所产生的力矩, 即

$$T_M = T_E \quad (1.6)$$

(4) 设想一个简单的系统, 即仅有惯性和粘性摩擦阻尼, 而没有非线性摩擦项 (例如, 库仑摩擦、不平衡的反作用力矩或负载扰动力矩) 的系统。那末, 与电动机产生的电

力矩相对抗的力矩，即加速电枢和负载所必需的力矩，可写为下列形式：

$$T_M = J \frac{d^2}{dt^2} \theta(t) \ominus + F \frac{d}{dt} \theta(t) \quad (1.7)$$

利用拉普拉斯变换可将每一时间域的方程变换到复频率域，并可推导出一组传递函数。

从方程 (1.4) 可得：

$$\frac{I_f(s)}{V(s)} = \frac{1}{R + sL} = \frac{1/R}{1 + sT_f}, \quad T_f = \frac{L}{R} \text{ 秒} \quad (1.8)$$

为方便起见，令所加电压和由它所产生的激磁电流之间的传递函数为 $G_1(s)$ ，即

$$\frac{I_f(s)}{V(s)} = G_1(s) \quad (1.9)$$

式中

$$G_1(s) = \frac{1/R}{1 + sT_f}$$

由方程 (1.5) 可得

$$\frac{T_E(s)}{I_f(s)} = K_T \quad (1.10)$$

并假定 $G_2(s)$ 定义为

$$\frac{T_E(s)}{I_f(s)} = G_2(s) \quad (1.11)$$

式中

$$G_2(s) = K_T$$

由方程 (1.6) 可得

$$\frac{T_M(s)}{T_E(s)} = 1.0 \quad (1.12)$$

并假定 $G_3(s)$ 定义为

$$\frac{T_M(s)}{T_E(s)} = G_3(s) \quad (1.13)$$

式中

$$G_3(s) = 1.0$$

由方程 (1.7) 可得

$$\frac{\theta(s)}{T_M(s)} = \frac{1}{Js^2 + Fs} \quad (1.14)$$

此式可写为

$$\frac{\theta(s)}{T_M(s)} = G_4(s) \quad (1.15)$$

式中

$$G_4(s) \ominus = \frac{1/F}{s(1 + sT_m)}, \quad T_m = \frac{J}{F} \text{ 秒}$$

● $\theta(t)$ 为电动机轴的转角。——校者

⊖ 原书误为 $G(s)$ 。——译者

应该注意, 若干传递函数串联可联乘在一起形成总的传递函数, 因此, 图 1.4 中方框图所示激磁受控的直流电动机, 可由电动机轴位和加在激磁绕组上的电压之间总的传递函数

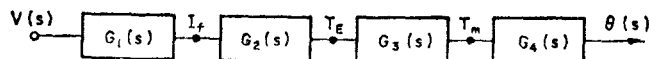


图1.4 激磁受控的直流电动机方框图

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)$$

$$G_1(s) = \frac{1/R}{1+sT_f}$$

$$G_2(s) = K_T$$

$$G_3(s) = 1$$

$$G_4(s) = \frac{1/F}{s(1+sT_m)}$$

注: 图中 I_f 原书误为 T_f 。

数来描述, 即

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)$$

利用传递函数定义可得

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{1/R}{1+sT_f} K_T \frac{1/F}{s(1+sT_m)}$$

即

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s(1+sT_f)(1+sT_m)} \quad (1.16)$$

式中

$$K = \frac{K_T}{RF} \quad (1.17)$$

系统中常数的统一单位是:

电动机增益常数 K = 弧度/秒/伏;

电动机转矩常数 K_T = 磅·呎/安;

粘性摩擦阻尼常数 F = 磅·呎/弧度/秒;

激磁绕组电阻 R = 欧;

激磁绕组电感 L = 亨;

电动机轴的总惯量 J = 斯 (质量单位)·呎² = 磅·呎·秒²。

注意: 电动机空载时, 电动机轴上的惯量仅是电枢的惯量, 但当电动机通过齿轮箱驱动某负载时, 电动机轴上的总惯量为电枢惯量加上负载折合到电动机轴上的惯量 (详见第二章)。

1.6 闭环传递函数

图 1.5 所示为基本闭环系统, 闭环传递函数可简单推导如下,

$$e(s) = \theta_i(s) - \theta_o(s)H(s)$$

$$\theta_o(s) = G(s)e(s)$$

所以

● 原书误为 F_m 。——译者