



电液控制工程实践

张琦 孙秀荣 林崧 等编著

西北工业大学出版社

内 容 简 介

电液控制工程实践

秦峰航空液压公司
西北工业大学流体控制教研室 合编
烟台航空液压控制公司

江苏工业学院图书馆
藏书章

西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书对电液控制技术的电器检测、液压放大和执行装置、液压能源的传输和控制作了阐述；并结合工程实践，着重介绍了电液控制系统在航空、航海、化工、冶金、机械加工等方面的应用实例。

本书以阐明概念、仿真、设计计算和特性分析、应用为主，采用了实际工程图表，可供从事液压技术工作的广大工程技术人员参考。

西安理工大学出版社

西北工业大学出版社
陕西省新华书店经销

电液控制工程实践

编 者 张 琦 孙秀荣 林 崧 等
责任编辑 李 珂

*

西北工业大学出版社出版发行

（西安市友谊西路127号）

陕西省新华书店经销

航空航天部〇一二基地印刷厂印装

*

开本787×1092毫米 1/16 14印张 329千字

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数1—2500册

ISBN7-5612-0072-2/TP·20 定价：3.95元

前 言

随着自动控制技术和液压技术的发展，液压控制技术以它特有的平稳、大功率输出和便于高精度控制而形成了一门新兴学科。近些年来，国内外无论在国防工业或民用工业中都广泛地采用了液压控制技术。特别是计算机的应用，更促进了液压控制工程的发展。在我国，很多工程设备也面临着技术改造和更新，新的控制设备和自动流水线不断地建成，广大工程技术人员需要一本通用性和实践性较强的工程实践用书。

本书对电液控制各类元件的介绍，除阐明其工作原理、工程计算外，还介绍了在实际工程中典型产品的结构、工艺和选型等问题，并总结和收集了一些典型的电液伺服控制系统的实例，作为读者在实际工作中的借鉴。

本书由航空工业部秦峰航空液压公司（陕西汉中、西乡）西北工业大学流体控制教研室和烟台航空液压控制公司（烟台市福山）联合编著。具体参加编著工作的有张琦（第一、三、四、七章）、王文彬（第二章）、孙秀荣（第三、七章）、林崧（第五、七章）、吕鹏（第六章）、朱盘生和焦立泉（第七章）等同志。全书最后由张琦、孙秀荣、林崧审编，由刘艳芬和陈秀禾同志绘图。

由于编者水平的限制和成书的仓促，缺点和错误一定不少，恳切地希望读者给以批评指正。

编著者

1987年11月

目 录

第一章 电液伺服控制系统概述	(1)
1.1 电液伺服控制系统的组成和分类.....	(1)
1.1.1 系统的组成.....	(1)
1.1.2 系统的分类.....	(2)
1.2 电液伺服控制系统的品质评定指标.....	(3)
1.3 电液伺服控制的特点及应用.....	(5)
第二章 电气放大与传感器件	(6)
2.1 放大器.....	(6)
2.1.1 运算放大器.....	(6)
2.1.2 实现数学运算的基本电路.....	(8)
2.1.3 伺服放大器.....	(10)
2.2 传感器与同步器.....	(12)
2.2.1 位移与角位移传感器.....	(12)
2.2.2 速度与角速度传感器.....	(17)
2.2.3 加速度传感器.....	(21)
2.2.4 拉压力传感器.....	(24)
2.2.5 自整角机.....	(25)
第三章 液压放大元件与伺服阀	(28)
3.1 液压放大元件.....	(28)
3.1.1 滑阀式液压放大元件的分析与设计.....	(28)
3.1.2 喷嘴-挡板式液压放大元件的分析与设计.....	(36)
3.2 力矩马达.....	(39)
3.2.1 极化式永磁力矩马达.....	(40)
3.2.2 力矩马达分析.....	(40)
3.2.3 力矩马达静动特性.....	(45)
3.3 电液伺服阀.....	(49)
3.3.1 电液伺服阀的分类.....	(49)
3.3.2 电液流量伺服阀.....	(51)
3.3.3 电液伺服阀的主要指标.....	(54)
3.3.4 如何选用电液伺服阀.....	(58)
3.3.5 电液伺服阀的装调试验及使用注意事项.....	(61)
3.3.6 力反馈电液伺服阀的动态参数识别.....	(66)

第四章 液压执行机构	(72)
4.1 阀控作动筒.....	(72)
4.2 阀控液压马达.....	(76)
4.3 泵控液压马达.....	(77)
4.4 液压执行机构的选择.....	(79)
4.5 静压支承阀控作动筒.....	(80)
4.5.1 静压支承结构形式.....	(81)
4.5.2 圆锥形静压轴承设计计算.....	(83)
第五章 液压伺服控制系统的设计	(86)
5.1 液压绞车系统的初步设计.....	(86)
5.1.1 液压绞车的使用要求与系统结构.....	(86)
5.1.2 液压绞车的静态性能计算与元件选择.....	(86)
5.1.3 液压绞车系统的动态方程和性能估算.....	(87)
5.2 伺服系统计算机辅助设计.....	(90)
5.2.1 计算机辅助设计的概念与内容.....	(90)
5.2.2 伺服系统的数字仿真.....	(91)
5.2.3 伺服系统的频域辨识.....	(93)
第六章 液压油源系统	(97)
6.1 液压油源系统概述.....	(97)
6.1.1 液压油源系统的组成.....	(97)
6.1.2 电机与液压泵的连接.....	(97)
6.1.3 液压油源系统输出功率的确定.....	(98)
6.1.4 液压油源系统的噪声.....	(99)
6.2 蓄能器与缓冲瓶.....	(100)
6.2.1 蓄能器.....	(100)
6.2.2 缓冲瓶.....	(103)
6.3 油箱.....	(104)
6.3.1 油箱容量.....	(104)
6.3.2 油箱发热量计算.....	(104)
6.3.3 油箱散热计算.....	(105)
6.3.4 油箱中油的加热与加热器.....	(110)
6.3.5 油箱的结构布局.....	(110)
6.4 滤油器.....	(111)
6.4.1 滤油器的作用.....	(111)
6.4.2 对滤油器的要求.....	(111)
6.4.3 滤油器的分类.....	(112)

6.4.4	滤油器在系统中的安装	(113)
6.4.5	滤油器的选择	(114)
6.5	导管与连接	(115)
6.5.1	导管类型	(115)
6.5.2	管径与壁厚的确定	(116)
6.5.3	软管连接与管接头	(118)
6.5.4	导管的安装	(120)
第七章	电液伺服控制系统的应用	(123)
7.1	直升机用四通道电液伺服舵机	(123)
7.2	电液伺服位移信号发生器	(130)
7.3	数字式飞行模拟机器人感系统	(135)
7.4	微摩擦高频宽静压支承电液伺服作动器	(142)
7.5	飞机进气锥位置控制系统	(147)
7.6	动圈式伺服阀的动态性能仿真	(149)
7.7	液压伺服激振器	(154)
7.8	电液高速冲击试验机	(159)
7.9	模拟海浪的水池造波机	(167)
7.10	电火花机床的电极给进伺服系统	(172)
7.11	带钢卷取机电液伺服跑偏控制回路的分析	(174)
7.12	岩土电液伺服刚性试验机用变增益伺服阀	(177)
7.13	大型修磨机的电液控制系统	(179)
7.14	电液伺服速度控制系统在水平连铸设备上的应用	(182)
7.15	热塑性塑料注射成型机的控制	(188)
附 录		(201)
附录一	频域辨识程序及使用说明	(201)
附录二	常见单位换算表	(209)
主要参考资料		(212)

第一章 电液伺服控制系统概述

所谓伺服 (Servo)，是出自拉丁语“奴隶”一词，作为科技词汇，是指能自动按照指令从属工作的含义。

电液伺服控制系统，是一种以电气信号为指令，以油液为工作介质的自动控制系统。在这类系统中，电气部分常作为系统信号的接收、放大、反馈和校正的装置；液压部分则用以作为功率放大和执行机构，而液压执行机构将能以一定精度自动地按照输入指令的变化规律来运动。

1.1 电液伺服控制系统的组成和分类

1.1.1 系统的组成

图 1-1 是一个典型的伺服控制系统框图。就控制作用来看，是由给定环节、反馈环节、比较环节、放大运算环节和执行环节所组成系统的控制部分，来对被控制对象实现控制。

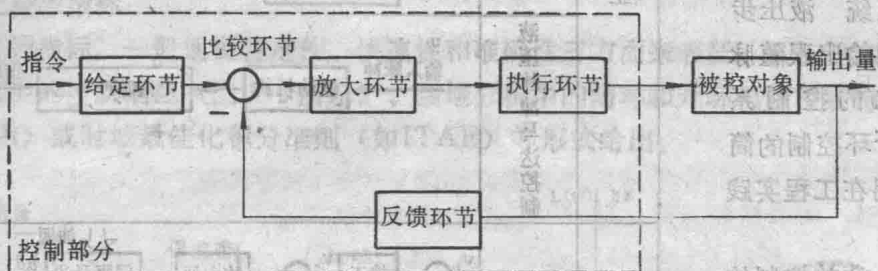


图 1-1 典型闭环控制系统的组成

1. 给定环节 它是给出被控制对象“目标值”相应输入信号的装置。如电位计、PC 控制机等。
2. 反馈环节 将被控制量转换为主反馈信号的装置。如工程上经常采用的测速发电机、反馈电位计等。
3. 比较环节 输入信号与主反馈信号综合比较的装置。如差动放大器、计算机等。
4. 放大、校正及运算环节 接受比较信号，并将其进行必要的校正、放大和变换，从而产生相应的控制量。常用的有运算放大器、伺服放大器、二端网络、电液伺服阀等。
5. 执行环节 驱动被控对象按照预定的规律运动的装置。在电液伺服系统中，经常采用兼有功率放大的液压作动筒和液压马达作为系统的执行机构。
6. 被控对象 是响应控制量并产生被控制量的部分。被控对象可以是系统、过程或一个具体的对象。

1.1.2 系统的分类

就物理结构来说，电液伺服控制系统组成是多种多样的。这里我们只介绍按系统控制元件类型和被控制的物理量所进行的分类。

(一) 按控制元件的类型和驱动方式，液压伺服系统可分为节流控制系统、容积控制系统和液压脉冲马达控制系统。

1. 节流控制系统
(简称阀控系统) 它是利用液压控制阀的节流原理来控制流入执行机构的流量和压力的系统。

2. 容积控制系统
(简称泵控系统) 这是利用改变伺服变量泵的排量，从而控制流入执行机构的流量和压力的系统。

3. 液压脉冲步进马达控制系统 液压步进马达转角输出跟随脉冲指令变化的控制系统，常以开环控制的简单形式应用在工程实践中。

(二) 按被控制的物理量的不同可分为

1. 位置控制系统 (直动式或回转式)。

2. 速度控制系统 (直动式或回转式)。

3. 力控制系统 (直动式或回转式)。

4. 其它物理量控制系统。

表 1-1 列出了不同控制方式的常用系统框图。

表 1-1 电液伺服系统分类及常用框图

分类	控制方式	常用系统框图示例
按控制元件类型	节流控制	
	容积控制	
	液压脉冲马达控制	
按被控制的物理量	位置控制	
	速度控制	
	压力控制	

1.2 电液伺服控制系统的品质评定指标

一个满足设计要求的电液伺服控制系统，其组成的元、部件应具有良好的静、动态性能。但是一些好的元、部件不一定能组成一个满意的控制系统。设计者必须充分考虑到组成系统的元、部件合理参数选择和匹配。

一般地说，对一个电液伺服控制系统的性能评估要从静态和动态两方面提出要求。因系统使用条件和所控制的物理量不同，故对系统静、动态定量指标也就得视不同情况而异。通常提出下列静态和动态指标，作为设计和评定系统品质的依据。这里，推荐一些品质指标的取值范围，供设计者借鉴。

(一) 静态指标

1. 最大的输出力（或力矩）即要求系统有足够拖动负载的能力。
2. 最大的输出速度、加速度、位移量 即视系统被控物理量不同，应能满足的系统最大输出。
3. 最大摩擦力、死区、间隙 以保证系统的线性度；避免极限环振荡和爬行等现象的出现。
4. 具有良好的密封性 如在低压、超压和循环工作的条件下，允许有可见油膜而不得有滴油落下。
5. 对系统工作介质、使用寿命、重量、尺寸的要求。

(二) 动态指标

动态性能指标，一般地由稳定性、快速性和准确性三方面来表征。系统动态性能指标常以时域分析中的阶跃响应（图 1-2 所示）、频域分析中的闭环和开环幅频相频特性（图 1-3 和图 1-4 所示）或时域最佳化积分准则（如 ITAE）等形式给出。

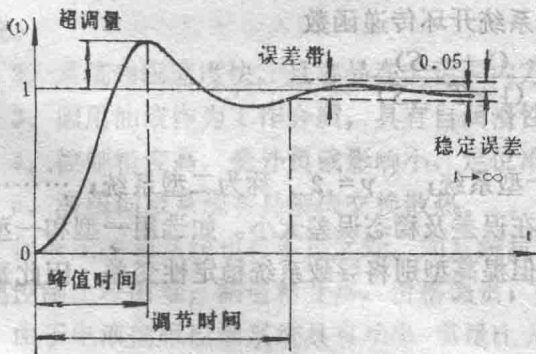


图 1-2 系统的阶跃瞬态响应

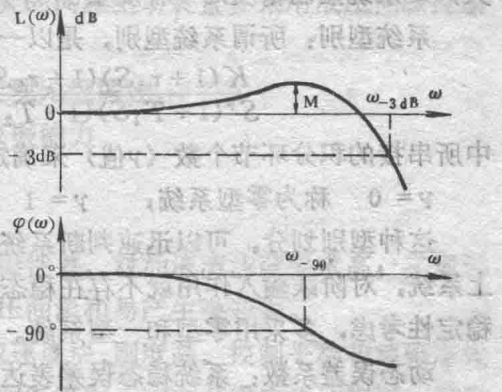


图 1-3 系统闭环对数幅频相频特性

1. 稳定性指标 稳定是控制系统主要性能，是系统能够正常运行的首要条件。描述系统稳定性经常采用：

超调量：超调量 $\sigma\% = \frac{\text{输出量最大值} - \text{稳态值}}{\text{稳态值}} \times 100\%$ 。一般地说，系统超调量限定在

不大于 25%~30%。若系统简化为二阶主导极点系统，则选 $\sigma\% = 10\%$ 更为合理，这时阻尼系数 $\xi \approx 0.6$ 。

幅值稳定裕量：幅值稳定裕量 L_h 是指系统开环对数幅相频率特性 (Bode图), 相角滞后 180° 所对应的幅频分贝值。通常要求伺服控制系统幅值稳定裕量 L_h 为 $10\sim 20$ 分贝为适宜。

相角稳定裕量：相角稳定裕量 γ 是指伯德 (Bode) 图上幅频特性曲线与零分贝线交点频率处所对应的相频 φ 角值与 -180° 之差。伺服控制系统的相角稳定裕量 γ 常见取值范围在 $40\sim 65^\circ$ 之间。

谐振峰值：谐振峰值 M 是系统闭环对数幅相频率特性出现谐振的最大振幅值。通常取 0 分贝 $< M < 3$ 分贝。

2. 快速性指标 这是描述控制系统完成调节作用快慢和复现输入信号能力强弱的性能指标。

调节时间：调节时间 t_s 是系统输出量到达稳态值 $\pm 5\%$ 区间不再超出所需最短时间。多在毫秒~秒数量级。

幅频宽：幅频宽 ω_{-3dB} 是系统闭环对数幅频特性幅值下降到 -3 分贝时的频率。

相频宽：相频宽 ω_{-90° 是系统闭环对数相频特性相角滞后 90° 时的频率。

一般的电液伺服系统幅频宽和相频宽在几~几十赫, 相频宽往往低于幅频宽。

3. 准确性指标 一个稳定的线性伺服系统在动态过程结束以后, 其稳态输出量不可能在任何情况下都保持与输入量一致, 也不可能在任何形式的扰动作用下都准确地恢复到原来的平衡位置, 最终结果的误差, 称为稳态误差。这种误差与系统本身结构、输入作用形式有关, 是系统控制精度的一种度量。

系统型别：所谓系统型别, 是以一般控制系统开环传递函数

$$\frac{K(1+\tau_1 S)(1+\tau_2 S)\cdots(1+\tau_n S)}{S^\nu(1+T_1 S)(1+T_2 S)\cdots(1+T_m S)}$$

中所串接的积分环节个数 (ν 值) 来确定的。

$\nu = 0$ 称为零型系统, $\nu = 1$ 称为一型系统, $\nu = 2$ 称为二型系统, ……………

这种型别划分, 可以迅速判断系统是否存在误差及稳态误差大小。如选用一型和一型以上系统, 对阶跃输入作用就不存在稳态误差。但提高型别将导致系统稳定性变差, 因此基于稳定性考虑, 多采用零型和一型系统。

动态误差系数：系统稳态误差表达式

$$e(t) = \phi_s(0)r(t) + \dot{\phi}_s(0)\dot{r}(t) + \frac{1}{2!}\ddot{\phi}_s(0)\ddot{r}(t) + \dots$$

$$= C_0 r(t) + C_1 \dot{r}(t) + C_2 \ddot{r}(t) + \dots$$

式中 $\phi_s(0)$ 是 $S = 0$ 时的稳态误差传递函数;

$r(t)$ 是输入信号;

发展, 液压伺服控制系统的应用领域将愈来愈广泛。从发展的趋势来看, 电液控制系统正向着集成小型化、高压化, 低噪音和微机控制等方向发展着。

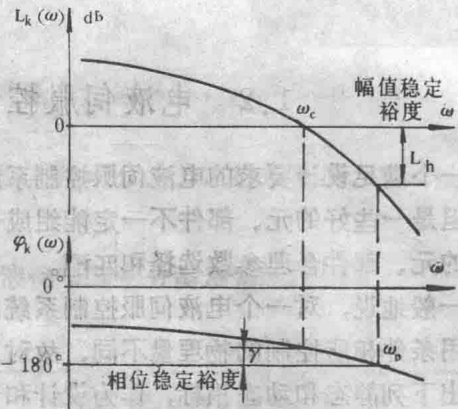


图 1-4 系统开环对数幅频相频特性

C_0 、 C_1 、 C_2 、……分别称为动态位置、速度、加速度误差系数。

对工作时间很短的系统，在控制精度要求上只能以动态误差系数指标来描述误差过程为适宜。

4. 综合性能指标 常采用的是时间乘绝对误差的积分(ITAE)准则，使 $\int_0^{\infty} t|e(t)| dt$ 值为最小。表 1-2 表示基于 ITAE 准则的闭环传递函数的最佳形式，供设计时参考。

表 1-2 阶跃零误差系统 ITAE 最小标准形式

系统闭环传递函数
$\frac{\omega_n^n}{S^n + a_1 S^{n-1} + \dots + a_{n-1} S + \omega_n^n}$
$\frac{S + \omega_n}{S^2 + 1.4\omega_n S + \omega_n^2}$
$\frac{S^3 + 1.75\omega_n S^2 + 2.15\omega_n^2 S + \omega_n^3}{S^4 + 2.1\omega_n S^3 + 3.4\omega_n^2 S^2 + 2.7\omega_n S + \omega_n^4}$
$\frac{S^5 + 2.8\omega_n S^4 + 5.0\omega_n^2 S^3 + 5.5\omega_n^3 S^2 + 3.4\omega_n^4 S + \omega_n^5}{S^6 + 3.4\omega_n S^5 + 5.9\omega_n^2 S^4 + 5.4\omega_n^3 S^3 + 3.4\omega_n^4 S^2 + \omega_n^5}$

1.3 电液伺服控制的特点及应用

随着自动控制技术的发展，液压技术以它特有的生命力而形成一门新兴学科——液压控制工程。在现代控制工程中，液压控制工程实践充分显示出它比电气、气动等伺服控制具有优越之处。

1. 具有大的输出力（或力矩），对要求输出功率大的伺服驱动装置多采用液压伺服控制系统。
2. 系统响应速度快，且容易在大范围内方便地实现无级调速。
3. 因用油液作为工作介质，具有自润滑性能和吸振能力。
4. 控制精度高，受外负载影响小，定位准确。
5. 液压伺服系统容易解决交换散热。

但液压控制系统也有不足之处。如系统抗油液污染性差，对油液清洁度要求高；实现远距离控制比较困难，制造精度高，价格偏贵；要有高压油源和易产生噪音等。

由于电液伺服控制系统具有功率-重量比大、响应速度快、刚度高、控制平稳和精确等优点，故不但在飞机、导弹舵面操纵和控制、雷达火炮跟踪等军工方面获得广泛的应用；而且还渗透到其它工业领域。如船舶舵面操纵和汽车转弯的助力机构；动力设备中的燃气轮机和水轮机转速调节系统；材料的疲劳和静力试验机；海洋波浪模拟、地震模拟、道路模拟和飞行模拟装置；机床的仿形设备；冶金的压延和机器人的操作机构等等。在我国的机械、兵器、航空、航天和船舶等各工业部门都有相应的厂家和科研机构进行部件和整机的研制和生产。彩照插页为航空工业部秦峰航空液压公司和烟台航空液压控制公司提供的液压伺服系统，或与整机配套的部分元部件商品群。

应该指出的是，由于计算机普遍采用和新型传感器不断出现，更促进了液压控制工程的

第二章 电气放大与传感器件

2.1 放大器

2.1.1 运算放大器

运算放大器是一个具有高增益并直接耦合的放大器,它有两个输入端,一个输出端和一个接地端,常以图 2-1 所示符号表示。一个运算放大器,它的输出电压 V_0 与两个输入电压 V_1 、 V_2 之间的关系应符合

$$V_0 = A(V_1 - V_2) \quad (2-1)$$

式中 A 称为开环增益,为频率的函数。在零频率时 A 值最大。

对于一个理想的运算放大器应具备下列条件,即:

开环增益 A 为无穷大;

输入电流 I_{B1} 、 I_{B2} 为零,即 $I_{B1} = I_{B2} = 0$;

输入阻抗 Z_i 为无穷大;

输出阻抗 Z_o 为零;

放大器的频率范围为 $0 \sim \infty$ 赫

以上这些理想特性是设计运算放大器时应力争达到的指标。然而实际的运算放大器由于种种原因,不可能达到理想状态。理想运算放大器的指标常做为分析实际运算放大器各参数之间关系的依据。

当给运算放大器施加适当的反馈后,可以改变其特性。现介绍两种常用的负反馈放大器的基本线路。

一、倒相负反馈放大器

图 2-2 为一个具有负反馈网络的倒相放大器线路。将其输出电压的一部分返回到负相输

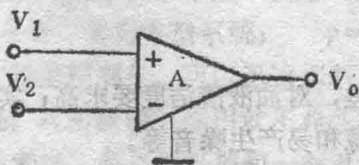


图 2-1 运算放大器

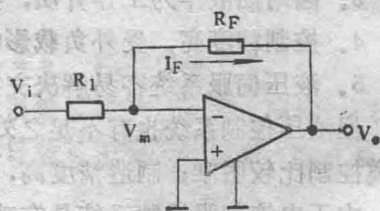


图 2-2 倒相负反馈放大器

入端。输入信号 V_i 通过输入电阻 R_1 与反相端相连,正相输入端接地,定为基准点。这时输出电压 V_0 与输入电压 V_i 反相,故称之为反相放大器。按照理想运算放大器的条件,可以得到下列关系式,即

$$V_0 = -AV_i \quad (2-2)$$

根据叠加原理可以把 V_0 看成是 V_i 和 V_0 分别作用的结果,即

$$V_0 = \frac{R_f}{R_1 + R_f} V_i + \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_0 \quad (2-3)$$

从(2-2)、(2-3)式中消去 V_n ，得出 V_o 与 V_i 的关系式，即

$$\frac{V_o}{V_i} = - \frac{A}{1 + \frac{R_1}{R_f} (1 + A)} \quad (2-4)$$

式中 $R_1/R_f = F$ ，称为反相放大器的反馈系数；

$V_o/V_i = M$ ，称为反相放大器的闭环增益。

则
$$M = - \frac{A}{1 + F(1 + A)}$$

当开环增益 $A \rightarrow \infty$ ，该反馈因数 $AF \gg 1 + F$ 时，上式可简化为

$$M \approx - \frac{A}{AF} = - \frac{1}{F} = - \frac{R_f}{R_1} \quad (2-5)$$

由此可知：闭环增益 M ，仅与运算放大器外部元件 R_f 和 R_1 的比值有关，而与运算放大器本身参数无关。因运算放大器的输出幅值有限，开环增益 $A \rightarrow \infty$ ，则使得相加点的电位 V_n 趋近于零，即 $V_n = -V_o/A \rightarrow 0$ ，故称相加点为虚地点。通过 R_1 的电流为 $I_n = (V_i - V_n)/R_1 = V_i/R_1$ ，说明 I_n 值与 R_f 无关；又因运算放大器的输入阻抗 $Z_i \rightarrow \infty$ ，所以没有电流注入放大器的输入端。反馈电阻一端为虚地点，一端接输出端，无疑输出电压为

$$V_o = -I_f R_f \quad (2-6)$$

可见流过 R_f 的电流 I_f 就是 I_n ，即 $I_f = I_n$ ，其值随输入电压 V_i 而变化。

当 $R_f/R_1 = 1$ 时，放大器即为反相器；当 $R_f/R_1 \neq 1$ 时，则称之为比例放大器或称系数电路。

二、同相负反馈放大器

图2-3所示为具有负反馈的同相放大器线路。信号 V_i 加到放大器的同相输入端，输出电压的一部分反馈到反相输入端。这类放大器的输出电压 V_o 与输入电压 V_i 是同相，所以称为同相负反馈放大器。利用理想运算放大器的特性，可以得到闭环电路方程式

$$V_n = \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_o \quad (2-7)$$

式中 $\frac{R_1}{R_1 + R_f} = F_N$ ，称为同相放大器的反馈系数，则

$$\begin{aligned} V_n &= F_N \cdot V_o \\ V_o &= A(V_i - V_n) \end{aligned} \quad (2-8)$$

将(2-7)式代入(2-8)式得

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 + AF_N} \quad (2-9)$$

式中 $V_o/V_i = M_N$ 称为同相负反馈放大器闭环增益，并可写成：

$$M_N = \frac{A}{1 + AF_N}$$

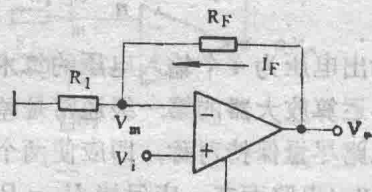


图 2-3 反相负反馈放大器

当运算放大器的开环增益 A 足够大时,则同相放大器的反馈因数 $AF_N \gg 1$,闭环增益可近似为

$$M_N \approx \frac{A}{AF_N} = \frac{1}{F_N} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} \quad (2-10)$$

由(2-10)式可见,同相放大器的闭环增益 M_N 仅与反馈系数有关,即由 R_1 和 R_f 所决定,而且其数值总会大于1或等于1。如果 $R_f = 0$ (或 $R_1 = \infty$,开路),闭环增益精确地等于1,这时,输出电压跟随输入电压而变化,这就是电压跟随器。从而可知同相放大器具有高的输入阻抗,低的输出阻抗,这是此类放大器突出的优点,故常用做隔离放大器,以匹配前后电路的阻抗。

2.1.2 实现数学运算的基本电路

一、加法电路

1. 反相型加法电路 图2-4所示电路就是根据理想运算放大器的特性,利用电流相加的原理进行求和运算。

由图2-4可见,输入电阻 R_1, R_2, R_3 的公共端与虚地点相连接,使各输入信号之间相互没有影响,各输入信号电流是独立的,则得电路方程

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}; \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2}; \quad I_3 = \frac{V_3}{R_3} \quad (2-11)$$

流经 R_f 的电流 I_f 为三个输入信号电流之和,即

$$I_f = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \quad (2-12)$$

放大器的输出电压

$$\begin{aligned} V_o &= -I_f R_f = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3\right) \\ &= -(k_1 V_1 + k_2 V_2 + k_3 V_3) \end{aligned} \quad (2-13)$$

式中 $k_i = R_f/R_i$ 称为比例系数 ($i = 1, 2, 3 \dots$)。(2-13)式表明输出电压是若干个输入电压任意加权后相加的结果。同时还可看出:

- (1) 反馈电阻 R_f 值越大,输出电压的绝对值越大;
- (2) 如果 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$,则 $V_o = -(V_1 + V_2 + V_3)$;
- (3) 如果 $R_1 + R_2 + \dots + R_n = nR_f$,则

$$V_o = -\frac{1}{n}(V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$

即输出电压为 n 个输入电压的算术平均值。

运算放大器的第一级通常是差动级,要求这两个输入电路尽量保持对称,即应使两个输入端的电阻相等,对图2-4电路而言,应保持 $R_4 = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$ 。

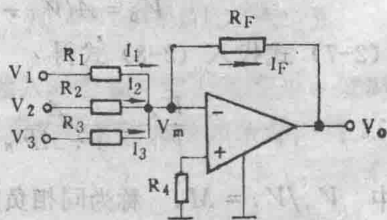


图 2-4 反相型加法电路

2. 同相型加法电路 图2-5所示电路,输入信号 V_1, V_2, V_3 分别输入放大器的同相端,

则B点的电位 V_i 为:

$$V_i = k'_1 V_1 + k'_2 V_2 + k'_3 V_3 \quad (2-14)$$

式中

$$k'_1 = \frac{R_2 // R_3 // R_f}{R_1 + R_2 // R_3 // R_f}, \quad k'_2 = \frac{R_1 // R_3 // R_f}{R_2 + R_1 // R_3 // R_f},$$

$$k'_3 = \frac{R_1 // R_2 // R_f}{R_3 + R_1 // R_2 // R_f} \text{ 称为比例函数。}$$

输出信号 V_o 反馈至反相端,其相加点的电位 V_n 为

$$V_n = \frac{R_4}{R_4 + R_f} V_o \quad (2-15)$$

在电路中反相端是浮动接地的,其电位随同相端电位而变化,当 $A \rightarrow \infty$ 时, $V_n \approx V_i$

由(2-14)、(2-15)式可求得输出电压

$$V_o = \frac{R_4 + R_f}{R_4} (k'_1 V_1 + k'_2 V_2 + k'_3 V_3) = M_n V_i \quad (2-16)$$

为了使放大器的输入差动级线路对称,反相输入端与同相输入电阻之间应满足下式:

$$R_4 // R_f = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$$

二、减法电路

图2-6所示 V_1 和 V_2 之差的减法电路。具有理想特性的运放,其电路方程式为

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 \quad (2-17)$$

因为

$$V_o = V_n$$

$$I_2 = \frac{V_n - V_2}{R_1} \quad (2-18)$$

$$I_1 = \frac{V_o - V_n}{R_2}$$

又知 $I_2 = I_1$, 则所求输出电压

$$\begin{aligned} V_o &= V_n + I_2 R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 + \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 - V_2 \right) \\ &= \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2) \end{aligned} \quad (2-19)$$

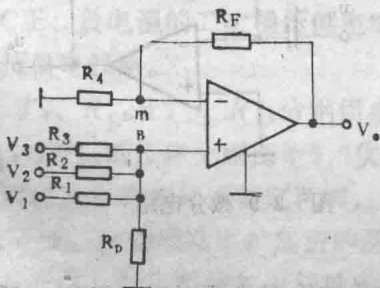


图 2-5 同相型加法电路

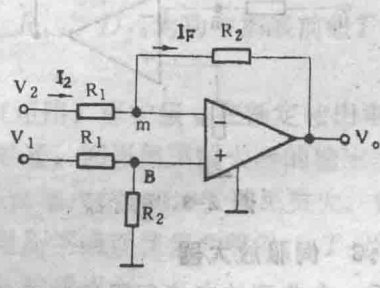


图 2-6 减法电路

此时两个输入信号 V_1 和 V_2 的增益相等为 R_2/R_1 。

三、加减法电路

实现加权的加减法电路如图2-7所示。该电路的计算方法同减法电路（差动放大器），由于输入信号较多，免去推导，只写出输出电压的表达式，即

$$V_o = (k_1 V_1 + k_2 V_2 + k_3 V_3) - (k_4 V_4 + k_5 V_5 + k_6 V_6) \quad (2-20)$$

式中 k_i 为对应输入信号放大的比例系数或称权 ($i=1, 2, \dots, 6$)。

四、积分电路

图2-8的电路中反馈网络是电容器 C ，输入信号 u_i 是时间 t 的函数，此时电容器 C 两端的电压为 $u_n - u_o = \frac{1}{C} \int i_i dt = u_o$ 。当 $A \rightarrow \infty$

时， u_n 值为有限值，则 $u_n \approx 0$ ，输入电流

$i_i = \frac{u_i - u_n}{R}$ ，故 $i_i \approx \frac{u_i}{R}$ 。可见输出电压 u_o 随电容器 C 之电压 V_c 而变化，即

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_i dt \quad (2-21)$$

上式表明输出电压 u_o 与输入电压 u_i 的积分成比例。式中的乘积 RC 称为积分器的时间常数。

如果 u_i 为常数，即 $u_i = E$ ，则有恒定的充电电流 $I = u_i/R$ 向 C 充电，输出电压

$u_o = -\frac{E}{RC} \cdot t$ 将随时间 t 作线性增长直到输出电压达到最大值。

五、微分电路

由图2-9所示电路得知在输入电路中接入一个电容器 C 后，在反馈网络上却接入一个电阻 R_f 。经过 C 的电流为 $i = C \frac{du_i}{dt}$ ，该电流 i 也流经 R_f ，则输出电压为

$$u_o = -i R_f = R_f C \frac{du_i}{dt} \quad (2-22)$$

上式表明了输出电压与输入电压的微分成比例。

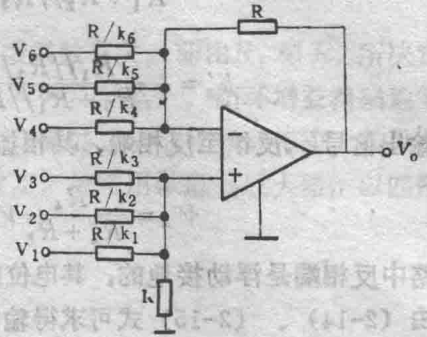


图 2-7 加减法电路

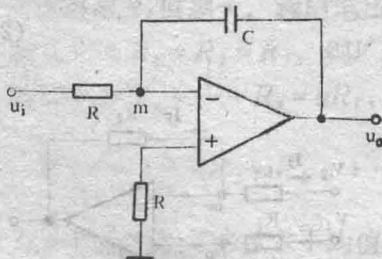


图 2-8 积分器

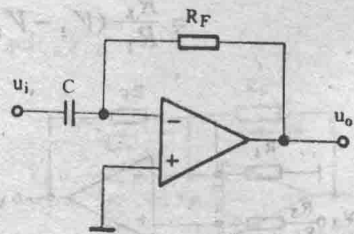


图 2-9 微分电路

2.1.3 伺服放大器

对于一个典型的电液伺服控制系统来说，尽管系统的结构形式可以千差万别，例如有的系统的基本环节是阀控作动筒，有的是阀控马达；有的是阀控泵——泵控马达……；或者