

# 电液伺服机构及元件

[日] 池 边 洋  
池 边 润  
中 野 和 夫  
松 岛 皓 三

机械工业出版社

# 电液伺服机构 及 元 件

---

池 辺 洋  
池 辺 潤  
〔日〕 中野和夫  
松岛皓三

---

钟永隆  
孟繁华  
胜 帆  
谢清慧  
许仰曾

---

机械工业出版社

本书共分三篇。第一篇介绍自动控制理论；第二篇重点介绍电液伺服机构的常用元件；第三篇介绍电液伺服机构的应用实例。

本书可供从事自动控制及液压技术工作的科技人员及大专院校有关专业师生参考。

## 解说 サーボ機構とその要素

(第2版)

池 辺 洋 池 辺 潤 共著  
中野和夫 松岛皓三

オーム社 1978

\* \* \*

## 电液伺服机构及元件

(日) 池 辺 洋 池 辺 潤 著  
中野和夫 松岛皓三

钟永隆 孟繁华 译  
胜 帆 谢清慧

许仰曾 校

\*

机械工业出版社出版(北京市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)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

\*

开本787×1092 1/32·印张15<sup>3</sup>/<sub>4</sub>·字数345千字  
1982年8月重庆第一版·1982年8月重庆第一次印刷  
印数0,001—5,400·定价1.60元

\*

统一书号: 15033·5268

## 出版说明

电液伺服机构将电气信号传输速度快、运算与处理方便、易于实现远距离控制等优点与液压伺服机构响应快、输出功率大、体积小、重量轻等优点紧密结合起来，成为最有前途的伺服机构，并已越来越广泛地应用于各民用和国防工业部门。学习和掌握电液伺服机构的理论、元件和系统设计方法，已成为有关专业读者的迫切要求。

本书原版是日本出版的关于电液伺服机构的专著。它将自动控制理论，电液伺服机构元件和电液伺服机构的应用实例三部分有机地结合起来。全书内容完整，取材丰富、叙述简明扼要。既便于对电液伺服机构不熟悉的同志系统学习，又便于根据需要参考其中部分内容。

本书按原名应译为《伺服机构及元件》，但考虑到本书的主要篇幅和核心是介绍电液伺服机构及其元件的，所以改译为《电液伺服机构及元件》。

译者分工情况为：谢清慧译第一篇的一~六章，胜帆译第一篇的七~十二章，钟永隆译第一篇的十三~十五章和第二篇的一~五章，孟繁华译第二篇的六~十二章和第三篇全部。全书校订许仰曾。

1980年11月

## 前 言

本书自从第一版发行以来已经十年了。众所周知，这期间技术的发展是惊人的。

例如，当时一谈到放大器，就会使人立即联想到真空管，而现在几乎不再会有这种想法了。

鉴于此种情况，几年前就深感必须修订第一版，但因未能抓紧这项工作，以致今天才发行第二版。

本书第一篇为基础篇，所以虽有些修改，但基本上沿用了第一版的第一篇。

第二篇为元件篇，为了反映第一版发行以来作者的研究成果和这期间技术发展的情况，与第一版第二篇相比，在内容和编排上都作了较大的修改。

第三篇为第一版中完全没有的应用篇，其内容都是作者们亲身做过的实例。

因此，本书60%的内容是重新撰写的，撰写的基本原则和第一版相同。在需要引用其它书中的有关内容时，避免原封不动地照搬，而是在作者理解的基础上，根据需要改写或增添新的说明，以便读者容易看懂。

第二篇以后讲具体元件和设备 (Hardware)。其中包括了根据现有经验总结出来的规律，其目的是为了阐明这些元件与设备。但请读者注意，不要产生这些规律是有理论根据的误解。

关于参考文献，考虑到当前情报资料太多，所以仅列出

其中最重要的几篇。

众所周知，近年来单位制正逐步向国际单位制过渡。但本书中仍采用原有单位制，其中最大的缺点在于kg有时作为质量单位，有时又作为力的单位使用。因此，在本书再版时，遵照日本工业标准（JIS）的规定，在力的单位上加f，即采用kgf。所以，由力导出的压力，扭矩单位分别为kgf/cm<sup>2</sup>和kgf·cm。

最后，对给本书作者以大力支持的欧姆公司的鹤岡先生表示感谢。

池边 洋 1973年8月

# 目 录

## 第一篇 伺服机构的基础

<b>第一章 伺服机构</b> .....	1
1.1 伺服机构概述 .....	1
1.2 伺服机构的应用 .....	4
1.3 伺服机构的分类 .....	8
<b>第二章 伺服机构的被控对象和环节的特性</b> .....	10
<b>第三章 拉普拉斯变换</b> .....	16
3.1 拉普拉斯变换的基础 .....	16
3.2 拉普拉斯变换的有关公式 .....	22
<b>第四章 方块图</b> .....	28
4.1 方块图 .....	28
4.2 方块图的实例 .....	30
4.3 方块图的等效变换 .....	32
4.4 伺服机构环节的连接及其方块图 .....	34
<b>第五章 过渡响应</b> .....	39
5.1 静特性与动特性 .....	39
5.2 过渡响应 .....	42
<b>第六章 频率响应</b> .....	51
6.1 频率传递函数 .....	52
6.2 频率响应的实例 .....	55
<b>第七章 频率响应的表示</b> .....	59
7.1 矢量轨迹 .....	59
7.2 矢量轨迹的实例 .....	60
7.3 倒矢量轨迹 .....	62
7.4 伯德图 .....	64

7.5	伯德图的实例 .....	64
7.6	伯德图的优点 .....	72
7.7	增益-相位图 .....	73
第八章 尼柯耳斯图 .....		74
8.1	尼柯耳斯图及其使用法 .....	74
8.2	增益-相位图的性质 .....	77
第九章 稳定性判据 .....		80
9.1	稳定判据的基础 .....	81
9.2	霍维茨稳定判据 .....	86
9.3	奈魁斯特稳定判据的原理 .....	88
9.4	奈魁斯特稳定判据 .....	92
第十章 稳定度 .....		95
10.1	增益裕量和相位裕量 .....	95
10.2	M <sub>p</sub> 准则 .....	100
第十一章 根轨迹法 .....		105
第十二章 稳态误差 .....		113
第十三章 频率响应与单位阶跃响应的关系 .....		120
13.1	理想滤波器法 .....	121
13.2	约翰逊法 .....	123
第十四章 伺服机构的特性校正 .....		126
14.1	串联校正 .....	128
14.2	反馈校正 .....	138
第十五章 用描述函数处理非线性系统 .....		142
15.1	定义 .....	144
15.2	描述函数 .....	148
15.3	非线性控制系统的稳定性 .....	151

## 第二篇 伺服机构元件及相关事项

第一章	偏差检测用电气元件 .....	158
-----	-----------------	-----



1.1	电阻式检测元件 .....	159
1.2	电磁感应式检测元件 .....	168
1.3	电容式检测元件 .....	193
1.4	光电式检测元件 .....	197
<b>第二章</b>	<b>调制器、解调器和放大器 .....</b>	<b>199</b>
2.1	调制和调制器 .....	200
2.2	解调和解调器 .....	202
2.3	放大器 .....	207
<b>第三章</b>	<b>执行电气元件 .....</b>	<b>219</b>
3.1	直流伺服电机 .....	219
3.2	交流伺服电机 .....	232
3.3	齿轮系 .....	250
3.4	测速发电机 .....	254
<b>第四章</b>	<b>液压控制元件 .....</b>	<b>259</b>
4.1	喷嘴挡板阀 .....	260
4.2	射流管伺服马达 .....	267
<b>第五章</b>	<b>滑阀-伺服马达 .....</b>	<b>272</b>
5.1	构造和原理 .....	272
5.2	轻负载伺服马达的特性 .....	274
5.3	滑阀的遮盖量 .....	283
5.4	重负载伺服马达的特性 .....	289
5.5	阀芯的轴向力 .....	298
5.6	伺服马达的应用 .....	304
<b>第六章</b>	<b>伺服阀 .....</b>	<b>307</b>
6.1	伺服阀的原理 .....	308
6.2	伺服阀主要元件的特性 .....	309
6.3	伺服阀的分类 .....	316
6.4	各种伺服阀的实例 .....	320
6.5	伺服阀的应用 .....	321

6.6 利用电致伸缩元件的伺服阀 .....	324
<b>第七章 液压源 .....</b>	<b>334</b>
7.1 容积式泵 .....	335
7.2 容积式泵的种类 .....	337
7.3 泵的排量与功率 .....	338
7.4 齿轮泵 .....	342
7.5 叶片泵 .....	345
7.6 柱塞泵 .....	349
7.7 溢流阀 .....	359
7.8 蓄能器 .....	362
7.9 液压站 .....	363
<b>第八章 液压传动装置 .....</b>	<b>365</b>
8.1 液压马达的输出扭矩与功率 .....	365
8.2 齿轮液压马达与叶片液压马达 .....	367
8.3 柱塞液压马达 .....	368
8.4 液压传动装置 .....	375
<b>第九章 油在管路内的流动 .....</b>	<b>384</b>
9.1 非粘性液体的一维流动 .....	384
9.2 考虑层流阻抗时的流动情况 .....	395
9.3 考虑管路横断面上的速度分布时的流动情况 .....	398
9.4 考虑管壁径向膨胀时的流动情况 .....	406
9.5 实验举例 .....	410
<b>第十章 颤振 .....</b>	<b>414</b>
10.1 颤振与固体摩擦 .....	414
10.2 颤振的选定 .....	418
10.3 对阀(滑阀)控伺服马达静特性的影响 .....	421
<b>第十一章 机械式运算元件 .....</b>	<b>424</b>
11.1 加减法运算机构 .....	425
11.2 积分机构 .....	427

11.3 微分机构 .....	429
11.4 乘法机构 .....	431
第十二章 频率响应试验机 .....	434
12.1 旋转记录盘式频率响应试验机 .....	434
12.2 固定记录盘式频率响应试验机 .....	437

### 第三篇 应 用

第一章 闭环材料试验机 .....	445
1.1 闭环材料试验机的组成 .....	446
1.2 试验机主要构成元件的特性 .....	449
1.3 伺服液压缸的动作界限 .....	450
1.4 闭环系统的设计 .....	451
1.5 变形控制 .....	452
1.6 载荷控制的讨论 .....	454
第二章 考虑原动机效率的调速系统 .....	455
2.1 系统的概要与速度控制 .....	456
2.2 直流电动机的效率 .....	457
2.3 效率控制系统的构成 .....	458
2.4 综合系统 .....	460
2.5 功率分流式液压传动装置 .....	464
第三章 应用伺服机构的振动计 .....	466
3.1 伺服振子 .....	469
3.2 伺服振动计的构成 .....	472
3.3 长周期伺服振动计的实例 .....	475
3.4 用长周期伺服振动计测量振动的实例 .....	478
附 录 .....	481
1. 贝塞尔函数的展开式 .....	481
2. 重要公式 .....	483
3. $n$ 的数值及其dB值 .....	491

# 第一篇 伺服机构的基础

## 第一章 伺服机构

### 1.1 伺服机构概述

如将自动控制系统按应用领域进行分类，可分为过程控制和伺服机构（伺服系统）。

我们知道，在化学工业中对原料进行各种处理的产品制作过程（Process）中，表示其状态的量是温度、压力、pH值、浓度等，它们对产品的质量有很大的影响。对这些量的自动控制就是过程控制，在大多数情况下，它是以使这些量保持恒定（定值控制）为目的的。

此外，如水轮机，透平等原动机的调速；用高速轮转机印刷时纸张的张力控制；交流电源的频率控制等属于速度、张力、电量等的自动控制，在大多数情况下它们也是定值控制。

与此相反，伺服机构是控制物体的（角）位置、方位、状态等的，其目的是使物体的位置跟踪进入伺服机构的指令（随动控制）。

图 1.1 为一个简单伺服机构的例子。图中右端回转物体的转角  $x$  是跟踪左端手柄的转角  $v$  而转动的。其主要组成元件为两个电位器、放大器、伺服马达和齿轮系。

这个装置的目的是使  $v=x$ ，所以如用小的动力就能使回转物体转动的话，则用齿轮、皮带等把手柄和回转物体的轴

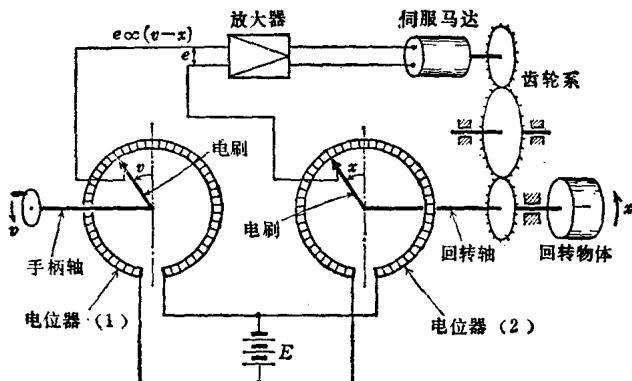


图1.1 伺服机构举例

机械地连接起来即可，显然没有必要采用这样复杂的结构。

如将本装置左端手柄旋转一个  $v$  量 $\ominus$ ，则左侧电位器 (1) 的电刷也旋转一个  $v$  量。从图中可看出，这种电位器是一种滑线电阻器，在其电阻的两端加有恒定电压  $E$ 。由于从电刷到放大器输入端电线上流过的电流近似为 0，所以电刷和电池负极之间的电位差，也就是电位器 (1) 的输出电压  $e_v$ ，如图 1.2 所示，它与该电位器电刷的转角  $v$  成正比。另外，电位器 (2) 输出电压  $e_x$  也与回转物体的转角  $x$  成正比，其关系与电位器 (1) 的情况相同。

如图 1.1 所示，(伺服)放大器的输入端分别与两电位器上的电刷相连。因此，这个放大器的输入电压  $e$  与  $(v-x)$  成正比，所以放大器的输出电压也与  $(v-x)$  成正比。

由于伺服马达的速度与加在其上的电压，即放大器的输

$\ominus$  在图1.1中，设  $v=0$ ， $x=0$  为最上端的位置，所以  $|v| < 180^\circ$ ， $|x| < 180^\circ$ 。

出电压[与  $(v-x)$  成正比]大致成正比 $\ominus$ 。所以,在左端手柄和右端回转体的转角之间如有角度偏差,伺服马达便开始旋转。结果使通过齿轮系与马达连接起来的回转物体也开始旋转,以减少上述转角偏差。这样,当此伺服机构再次静止时,加于伺服马达的电压为0,也就是放大器的输入电压为0,即  $v=x$ 。

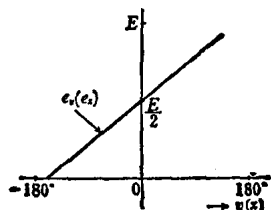


图 1.2 电位器电刷的转角  $v$  (或  $x$ ) 和输出电压  $e_v$  (或  $e_x$ ) 的关系

此外,在  $v=x$  后,处于静止状态的系统中,如不动手柄而使回转物体旋转一定角度,即使系统状态受到干扰,则因  $(v-x)$  暂时不为0,所以在上述干扰之后,回转物体会再次回到原来的位置而静止。

因此,在大多数情况下,伺服机构是把测得的后转物体的实际转角和稳态指令相比较,并根据比较后得出的偏差为正为负还是为零来校正动作的闭环系统(即反馈控制系统)。

船舶的舵机装置是应用上述原理的例子。如将手轮装于船桥,将大功率马达装于船尾操纵船舵,则人们便能在船桥上自由操纵大型船舶的舵了。

下面将 JIS (日本工业标准) 自动控制术语中最基本的术语作一说明。

**被控(或被调)对象:** 系指被控制的有关机械、生产过程、系统等的全部或一部分。

例 图 1.1 所示伺服机构中的回转物体。

$\ominus$  加在伺服马达上的电压与其速度的关系详见第一篇第四章 4.4。

被控（或被调）量，这是一种属于被控对象的量，如对它进行控制就能达到目的的量。

例 图 1.1 的伺服机构中回转物体的转角( $\alpha$ )。

目标值，在控制系统中，作为被控量的取值目标所给定的值（在过程控制中又称为给定值）。

例 在图 1.1 的伺服机构中，左端手轮的转角( $\nu$ )为目标值。

干扰，能扰乱控制系统状态的外作用。

例 采用伺服机构的船舶舵机机构，即使装在船桥上的手柄的转角保持不变，但当受到横向潮流或波浪冲击时所产生的力的作用，会使舵的方向偏离目标值。此时的潮流及波浪可认为是干扰。

如图 1.1 的例子那样，伺服机构的目标值多数情况为“(角)位置”。这时，尽管输出（被控量）端有负载，但(角)位移最终与输入（目标值）是一致的。换句话说，伺服机构虽然没有作位移的放大，但力（或扭矩）却放大了。因此，可以将伺服机构看成是一种力（或扭矩）的放大机构。过程控制系统中阀的位置控制等就是其应用例子。

本来，从伺服机构的发展历史来看，可以说是由于在武器方面的应用而发展起来的技术领域，因此对其要求往往很严格，特别是快速响应性这一点。随着将它应用于机械加工，要求也相应严格起来了，频带宽 $\ominus$ （通频带）有的竟要求达到 100 赫（Hz）左右。但与此相反，目前过程控制系统和自动调节系统中的带宽最多不过是 1Hz 左右。

## 1.2 伺服机构的应用

从历史看，最早应用伺服机构的是鱼雷、飞机、船舶的

---

$\ominus$  频率响应的增益（振幅）特性大致平坦的频率范围（详见本书第十四章）。

运动控制。它们的运动状态是用陀螺仪来检测控制的。

在武器方面，则是用雷达、光学瞄准仪计算射击目标（如飞机）的速度、方向、距离等，进而考虑风力的影响加以修正，然后给驱动高射炮的伺服机构以指令，使炮身对准射击目标。

还有，在射击瞄准仪的机械运算器中所用的扭矩放大器，以及机械式微分解析仪中的积分元件（摩擦盘）输出轴的扭矩放大器，也使用了伺服机构。

相似的使用方面，还有低速模拟计算机的乘法器，它是将电压 $a$ 乘以电压 $b$ 得电压 $c=a \cdot b$ 。例如，将电压 $b$ 加在电位器的电阻丝两端，使伺服机构的输出端和上述电位器的电刷相连，并在伺服机构的输入端给以指令电压 $a$ ，则电刷上就会产生与 $a \cdot b=c$ 成正比的电压。我们将这种由闭环系统构成的运算称为伺服运算器（Servo Computer）。

在一般工业中，伺服机构在机械加工方面应用最普遍。

模拟式仿形机床是利用伺服机构使刀具跟踪在样板或靠模上移动的触头，从而得到与样板或靠模具有相同轮廓的加工件。

在造船工业中，切割大钢板时，先将要切割的形状按原形或将其缩小后再精确地绘于图纸上，然后用光电检测头在二维空间检测它，从而对切割喷嘴的位置进行二维控制。

所谓“磁带录制”方式，就是让熟练操作人员用机床进行一次按要求的加工。与此同时，将机器各主要部件的动作变换为电量，并将它记忆在磁带上。然后使记忆再现，并以此为指令控制机床，使机床进行与熟练操作人员相同的动作，从而得到所需要的加工件。

在数控机床中，首先把加工所必要的信息转换为数码，



然后在穿孔带上打孔，再用穿孔带作为指令，使机床读得后，刀具按指令进行所要求的加工。

将数字控制进一步细分，又可分为点位控制和轮廓控制。前者用于座标镗床和冲床等处，在刀具定位时，并不要求刀具从第一位置至第二位置移动途中所经路径和所需时间很准确。与此相反，轮廓控制则用于如铣床、车床等的二维、三维控制中，因为其加工是连续的，所以它不同于点位控制，其加工路径必须严格控制，否则便会产生加工误差。

轮廓控制方式的目的和模拟控制方式相同，是一种仿形切削。用模拟方式加工时，如要变换产品的外形，就必须重新制作精密的母型<sup>⊖</sup>；而轮廓数字控制方式，则只需重新制作穿孔带（通常利用电子计算机自动穿孔），而它不需要高度熟练的技术。此外在数字控制系统中，其主要信号的传输不同于模拟式，是用电脉冲数进行的。因此它与波形本身无关，具有不易受干扰影响的优点，其精度一般也较高。因此，这种方式对少品种大批量生产和多品种小批量生产均适用。但它存在元件数量多、设备费昂贵这个不能忽视的缺点。

此外，为提高机床精度，也有将伺服机构用于螺纹车床和滚齿机的例子<sup>⊖</sup>。

例如在一般情况下，螺纹车床中的丝杠与主轴转速以一定的速比旋转，构成往复工作台的进给机构。但由于丝杠要驱动沉重的往复工作台会逐渐磨损，所以其切削的螺纹螺距

⊖ 粗加工变为精加工时有时也要变换靠模。

⊖ 中田 孝：工作機械の工作精度を向上するための自動制御の応用。  
機械学会誌，Vol.61，No473，1958—6，P.640。