



液 压 及 气 动 技 术

王 庭 树 主 編

成 都 电 訊 工 程 学 院

前 言

本书系高等学校工科电子类无线电专用机械专业统编试用教材之一。

本书按 80 学时的教学大纲编写。绪论及第一章介绍液压及气动传动系统的基本概念及分析液压及气动系统的基本理论。第二章至第五章介绍液压及气动系统中的各种元件的工作原理及选用原则。第六章介绍各种液压及气动系统的典型回路。第七章介绍自动控制原理的基本概念及其在液压及气动伺服系统中的应用。第八章介绍气动逻辑元件、射流元件及组成逻辑回路的原则。第九、十两章是气动系统及液压系统的设计计算方法。第十一章为无线电专用机械设备应用液压及气动技术的实例。本书对各种元件只从使用的观点介绍其工作原理及选用原则，而着重于论述由这些元件组成系统的分析和设计。书中基本理论、系统的分析和设计与元件介绍所占的篇幅比例约为 7:3。在叙述方法上力求将液压及气动技术综合为一体。虽然本书只介绍了自动控制原理在液压及气动伺服系统中的应用，但是分析系统和分析元件的方法却是相同的。所以当掌握了分析系统的方法之后，读者需要用自动控制原理去分析液压及气动元件而需阅读有关文献时，是不会产生困难的。对于专业类似的学校、职工大学及中等专业学校，在使用本书时，或者因教学计划规定的学时有限（低于 60 学时），或者因数学工具不敷使用，则可删去第七章进行讲授。

本书第一、三、四章由成电李睿同志编写；第五、六章由成电余从晞同志编写。第八章由西交大林文坡同志编写；第二、十一章由南工党根茂同志编写；绪论，第七、九、十章由成电王庭树同志编写。本书由林文坡同志主审，王庭树同志主编。

本书编写过程中得到四机部有关专用设备厂及元器件厂的大力支持和帮助，特此表示感谢。

本书将液压及气动两类技术综合为一体进行叙述，这是首次尝试，加之我们水平有限，因此其中一定会有许多错误和不当之处，希望广大读者批评指正。

编 者 1979.10

内 容 简 介

本书介绍液压及气动技术在传动系统中的应用，着重讨论液压及气动控制系统的分析和设计。对系统中采用的各种元件只从使用的观点介绍其工作原理及选用原则。本书不仅涉及断续生产过程的控制系统，也涉及连续的自动控制系统。介绍了自动控制原理的最基本的概念及其在液压和气动伺服系统中的应用。为了提供分析液压及气动系统的理论基础，本书介绍了流体在管路中运动规律的各种必要的知识。在最后一章还介绍了液压及气动技术在无线电专用机械设备中的应用实例。

本书可作为高等学院无线电专用机械专业及其类似专业的教材或参考用书，也可供从事生产过程自动化的技术人员参考。

目 录

緒 論

§1 引言	1
§2 液压及气动系统的组成及分类	1
一、液压及气动系统的组成	1
二、液压及气动系统的分类	4
§3 电动系统、机械系统与液压、气动系统的比较	4
一、动力拖动能力的比较	4
二、控制方式性能的比较	5

第一章 液压和气动技术的基本理論

§1—1 流体的物理性质	7
一、流体的密度和重度	7
二、流体的压缩性	7
三、流体的粘度	8
§1—2 流体的压力	10
§1—3 巴斯加原理	11
§1—4 空气的组成及其状态变化过程	11
一、空气的组成	11
二、气体的状态方程	12
三、气体的等温和绝热状态变化过程	12
四、湿空气	13
§1—5 流体运动的某些基本规律	14
一、流量	14
二、流体运动的连续方程	15
三、伯努利方程	15
四、音速及马赫数	16
五、管路截面变化的气流流动	17
六、压力比对管内气流的影响	18
§1—6 不可压缩流体的定常管流	19
一、流体运动的两种状态和雷诺数	19
二、直管中沿程压力损失计算	19
三、圆管中层流时摩擦阻力系数计算	20
四、管道中局部压力损失计算	22
§1—7 油液和空气流经小孔及缝隙的流量计算	24
一、油液流经薄壁小孔的流量计算	24
二、油液流经细长小孔的流量计算	25
三、油液流经平面缝隙的流量计算	25

四、油液流经环状缝隙的流量计算	27
五、油液流经偏心环状缝隙的流量计算	28
六、空气流经小孔和平面缝隙的流量计算	29
§1—8 流经气动元件的空气流量和 c_v 值计算法	29
一、有效截面积	30
二、 c_v 值法	30
§1—9 气阻和气容	31
一、气阻	31
二、气容	32
第二章 动力缸	
§2—1 动力缸的分类及结构	34
一、动力缸的分类	34
二、动力缸的结构	36
§2—2 动力缸的设计计算	37
一、设计的依据及要求	37
二、动力缸一般性能计算	48
三、动力缸的结构设计	58
第三章 油泵、油马达和气马达	
§3—1 齿轮油泵	67
一、外啮合齿轮油泵	67
二、内啮合齿轮油泵	71
三、齿轮油泵的特点	71
§3—2 叶片油泵	72
一、单作用式叶片油泵	72
二、双作用式叶片油泵	73
三、双联叶片油泵和双级叶片油泵	75
四、叶片油泵的特点	75
§3—3 轴向柱塞油泵	77
§3—4 油泵性能比较	77
§3—5 油马达	77
一、齿轮油马达	77
二、叶片油马达	79
三、轴向柱塞油马达	80
四、油马达的应用	80
§3—6 气马达	81
一、齿轮气马达	81
二、叶片气马达	81
第四章 液压和气动控制阀	
§4—1 控制阀的分类和阀芯形式	82

一、控制阀的分类	82
二、阀芯的结构形式	82
§4—2 压力控制阀	83
一、溢流阀（安全阀）	83
二、减压阀	85
三、顺序阀	88
§4—3 流量控制阀	90
一、节流口的形状	90
二、节流阀	91
三、行程节流阀	92
四、速度控制阀	92
§4—4 方向控制阀	95
一、电磁换向阀	95
二、液压控制和气压控制换向阀	98
三、机械控制换向阀	100
四、人力控制换向阀	101
五、单向型阀	102
六、几种典型的三位换向阀的滑阀机能	104
第五章 液压和气动辅助装置	
§5—1 油箱及冷却、加热装置	106
一、油箱	106
二、冷却与加热装置	106
§5—2 过滤器	107
一、对过滤器的要求	107
二、滤油器的类型	108
三、滤气器的类型	109
§5—3 管道及管接头	111
一、管子类型	111
二、管子截面尺寸的确定	111
三、管接头	112
§5—4 蓄能器与贮气罐	114
一、蓄能器与贮气罐的作用	114
二、蓄能器的类型及贮气罐的结构	116
三、容量计算	116
§5—5 密封装置	116
一、间隙密封	117
二、O形密封圈	117
三、Y形密封圈	118
四、V形密封圈	118

五、L形密封圈	119
六、回转轴的密封装置	119
七、聚四氟乙烯密封圈	119
§5-6 压力继电器	120
§5-7 油雾器	121
一、一次油雾器	121
二、油雾器的使用	122
§5-8 消音器	122
一、消音器的种类和结构	122
二、消音器的使用	123
第六章 液压和气动基本回路	
§6-1 压力控制回路	125
一、调压回路	125
二、卸荷回路	125
三、增压回路	127
四、多级压力控制回路	129
五、缓冲回路	129
六、平衡回路	130
七、顺序动作回路	130
§6-2 速度控制回路	132
一、节流调速回路	132
二、增速回路	134
三、同步回路	135
四、速度换接回路	137
五、气动液压阻尼调速回路	138
六、采用变量泵控制速度的回路	139
§6-3 方向控制回路	139
一、换向回路	140
二、锁紧回路	140
三、多缸控制回路	140
§6-4 液压、气动系统组成时的注意事项	141
第七章 自动控制原理及液压、气动伺服机构	
§7-1 自动控制的基本概念	142
§7-2 系统的微分方程及拉氏变换	144
一、系统的微分方程	144
二、线性化	145
三、拉氏变换	146
§7-3 传递函数及频率响应	149
一、传递函数及典型环节	149

二、频率响应	160
§7-4 液压、气动伺服系统的数学模型及传递函数	171
一、伺服马达	171
二、液压力矩放大器	182
三、力反馈电液伺服阀	183
四、气动伺服马达中的平衡气瓶	186
§7-5 稳定性分析	188
一、劳斯判据	189
二、奈魁斯特判据	191
三、博德图上的奈魁斯特判据	193
四、稳定性分析实例	193
§7-6 稳态误差	196
一、系统稳态误差的基本概念	196
二、稳态误差的计算	197
三、系统的无差度和稳态误差数值表	200
§7-7 伺服系统的分析步骤与设计方法	203
一、分析伺服系统的步骤	204
二、伺服系统的分析实例	206
三、伺服系统的设计	209
第八章 气动逻辑元件及逻辑回路的设计基础	
§8-1 概述	216
一、逻辑运算在生产中的作用	216
二、逻辑运算的基本符号和术语	216
三、逻辑函数“与/或”表示式的写法	219
§8-2 气动逻辑元件	220
一、高压截止式逻辑元件	220
二、滑柱和滑块式高压逻辑元件	224
三、高压膜式元件	226
四、低压逻辑元件	228
五、射流逻辑元件	229
§8-3 逻辑代数的基本运算	238
一、基本逻辑运算公式	238
二、卡诺图	241
三、最小化或非元件线路的设计	242
§8-4 应用举例	245
第九章 行程程序控制系统的設計方法	
§9-1 行程程序系统的组成	253
一、程序控制系统	253
二、气动行程程序控制系统的组成	253

§9—2 障碍信号及其分类	254
一、消除障碍信号的必要性	255
二、障碍信号的类型	255
§9—3 X—D 线图的设计方法	256
一、确定工作程序图	256
二、绘制 X—D 线图, 找出障碍信号	256
三、排除有障碍信号障碍段	260
四、进行辅助设计	263
五、绘制气动控制逻辑框图及气动控制原理图	264
第十章 液压及气动系统的设计及计算	
§10—1 液压及气动系统的设计步骤	266
一、分析主机的工作要求明确设计的依据	266
二、液压及气动回路的设计	266
三、系统元件的选择和计算	266
四、对系统进行必要的验算	267
五、绘制正式工作图和编制技术文件	267
§10—2 气动元件的选择和计算	267
一、执行元件的选择和计算	267
二、控制元件的选择	268
三、气动辅助件的选择	269
四、压缩机的选择	269
五、管道直径的确定	270
§10—3 气动系统性能的实用验算方法	270
一、有效截面积的计算	270
二、具有气罐系统的充放气特性	273
三、气缸的动作时间	275
§10—4 液压元件的选择和计算	276
一、油缸的工作面积、工作流量及压力的计算	276
二、油泵的工作压力、流量和传动功率的确定	279
三、阀类的选择	279
四、油管 and 辅助件的选择	279
§10—5 液压系统性能的验算	280
一、液压系统压力损失的验算	280
二、液压系统发热温升的计算	280
§10—6 液压及气动系统的设计实例	281
一、半自动落料机床的气控系统的设计和计算	281
二、组合机床液压系统设计计算实例	284
第十一章 专用设备的典型液压及气动系统	
§11—1 J5040—1 型内圆切片机的液压系统	290

§11—2 带机械手的注塑机的液压系统.....	291
§11—3 十一位玻璃屏压机的液压系统.....	293
§11—4 P—102 型封帽机的气动系统.....	296
§11—5 H 94—14 型半自动光刻机的气动系统.....	299

緒 論

§1 引 言

由原动机产生的动力必须通过一定的传动装置传送到工作机构，并进行必要的控制，以使工作机构获得所需的运动、力或力矩。所用的传动装置可以是机械的、电动的和流体动力的，或者是它们的组合。在流体动力系统中，又可分为气动和液压传动两类。本书是研究流体动力的传动系统及其控制的问题。

流体传动是一门新型的技术学科，它在近二十年来发展很快，获得了广泛的应用，并成为自动控制系统的一个重要分支和组成部分。

气动传动与液压传动相比较，气动传动处于更为年轻的发展阶段。液压传动起源于水力机械的应用，直到三十年代它才较普遍地用于起重机、机床（车、铣、磨、镗、拉床等）及工程机械（如推土机、挖掘机等）。在第二次世界大战期间，由于帝国主义战争的需要，出现了响应迅速、精度高的液压传动和控制机构装备的军舰、大炮、战车、飞机和雷达等，其中应用的主要是电液伺服机构。世界各国战后经济的恢复和发展，生产过程的自动化要求不断增涨，液压、气动技术不断应用于各种自动机及自动生产线。在航空及航天工程中，由于飞机、导弹及宇宙飞船等均可采用空气或燃烧后的气体作直接的动力源，不需要再作工作介质的转换，所以近年来又出现了所谓的热气伺服机构。近年来气动控制装置发展很快，它与电气装置一样，可以完成惯用于自动化领域所要求的各种任务，虽然它的工作频率及响应速度上远不如电气装置，但在装置的抗干扰能力、抗辐射能力及牢固性上则是电控技术所没有的优点。由于无油气动系统的出现，所以它特别适用于要求防火防爆及防污染的生产过程。在无线电元器件的某些生产过程中，对环境的净化提出了越来越严格的要求，因此无油气动系统必然会在这一领域得到越来越广泛的应用。

解放前我国是一个半封建半殖民地国家，在三座大山的压迫和剥削下，经济极为落后，因而在液压气动技术方面也是一穷二白的。解放后，我国成为了一个伟大的社会主义国家，在毛主席及党中央正确领导下，液压、气动技术也和整个国民经济一样，有了一定的发展。在1966年及1975年，由一机部主持分别开展了液压及气动元件的系列化工作，组织了联合设计组，按系列对元件进行了设计，并定点进行生产，若干产品已有销售，为各工业部门应用液压及气动技术创造了有利条件。近年来，虽然各工业部门尤其是机械制造业在应用液压及气动技术上取得了不少成绩和进展，但是我们的工作仍作得很不够，距离世界先进水平还有差距。我们一定要响应党中央的赶超世界先进水平的号召，刻苦学习，努力工作，坚决完成时代赋予我们的这个伟大而艰巨的任务，为液压及气动技术尽快赶上和超过世界先进水平作出贡献。

§2 液压及气动系统的组成及分类

一、液迅及气动系统的组成

图1是一个最简单的液压传动系统。用它使真空镀机的机罩产生升降动作。它由齿轮油泵1、液压缸2、阀门3及油箱4等组成。在打开油泵时使机罩升起，当关闭油泵并打开阀

门时，机罩在自身重力作用下下降。这就完成了升降机罩的两个动作。如果用车间内压缩空气管道为气源，用气动动力缸及气动阀门代替液压缸及液阀门则构成了如图 2 所示的气动传动，也能实现真空镀膜机机罩的升降动作。

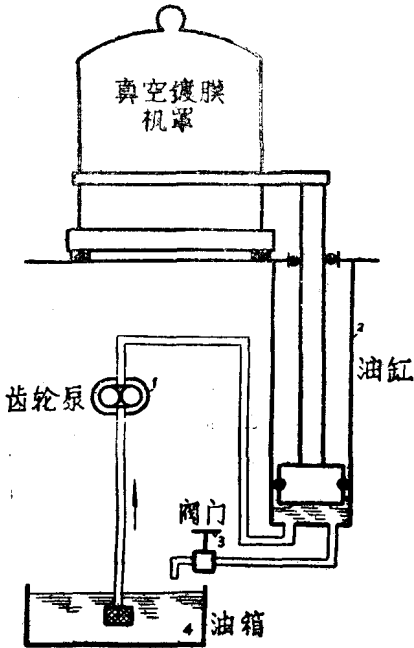


图 1 最简单的液压传动系统

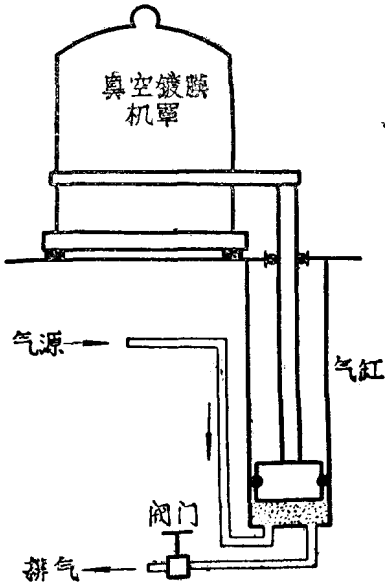


图 2 最简单的气动传动系统

显然上述两种系统在操作上都是不方便的（既要开关油泵又要开关液压阀门或者既要开关进气阀门又要开关排气阀门），幸而真空镀膜机不需经常升降机罩，所以它们都能适应工作的需要。图 3 为一需要经常反向运动的工作台，除了需要油泵 3、液压缸 7 之外还应加设必要的控制装置，如图中所示手动滑阀 6。其中的节流阀 4、溢流阀 5 是控制工作台运动速度和管路压力的装置。

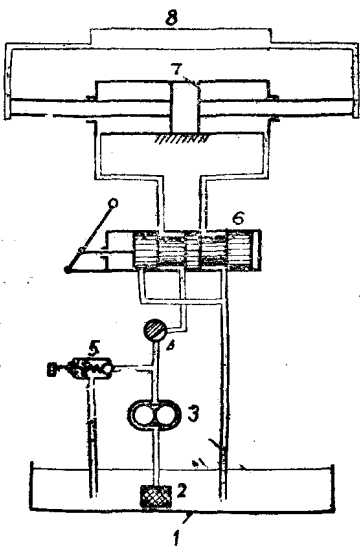


图 3 手操作的换向工作台

此外还有油滤 2 及油箱 1 等。

如果要求机器实现某种自动化的过程，则需要将各种装置和元件组成一个完备的回路，图 4 为一可自动完成某种程序动作的气动系统。其中的控制装置是由若干元件组成的气动逻辑回路。它可根据气缸活塞的行程始末由传感器（行程开关及紊流放大器等）传回的信号，作出逻辑判断，并指挥气缸下一步动作（详见第七、八、九章），从而实现机器动作的自动化。

综上所述，液压及气动系统的组成是：

- (1) 气（液）压的发生装置。指空气压缩机或油泵。
- (2) 执行元件。即气缸、气马达或液压缸、液压马达。
- (3) 控制元件。包括各种压力、流量、方向控制阀及其它各种控制元件。

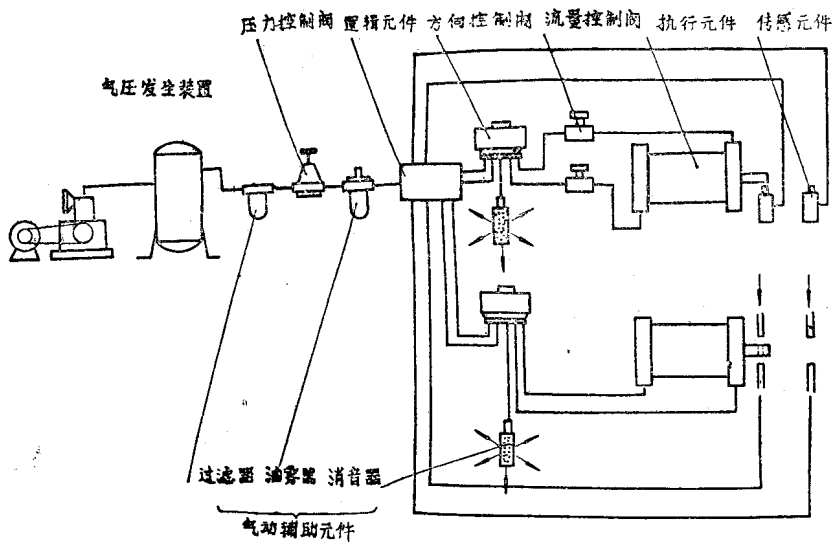


图4 气动系统的组成

(4) 传感元件。

(5) 辅助件。如气动系统不可缺少的分水滤气器、空气调压器、油雾器（习称三大件）及蓄能器、消音器等。对液压系统则指油箱、滤油器及冷却器等。以及气动及液压的各种控制仪表和管道、管接头等。

在图1~图4中，我们不是用形象的原理示意图，就是用方块图加文字说明来表明组成各种系统的元件的。这样作图方法既不明确也不简洁，所以工程上常用的图形是另一形式，即用一系列的标准的职能符号表示各种元件，由这些符号组成各种液压或气动系统的工作原理图，称为职能符号式的液压及气动原理图。这些符号的画法及定义可详见国家标准GB786—76。图3的手操作换向工作台的职能符号的液压原理图如图5所示。本书将在介绍各种元件时对它们的职能符号作逐一介绍。在使用元件的职能符号时应注意GB786—76的各种规定，特别注意的是GB786—76规定的符号均以元件的静止位置或零位置来作图的。所以图5(a)中的换向阀是处在中间位置的，即工作台不动的位置。工作台8向右或向左移动时，换向阀6的相应工作位置如图5(b)及(c)所示。

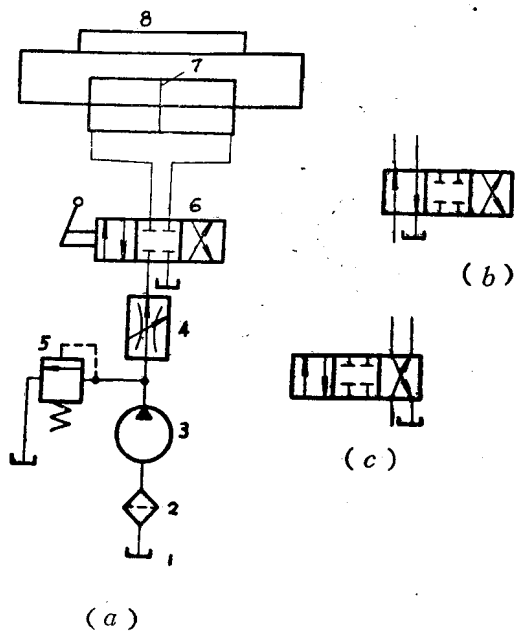


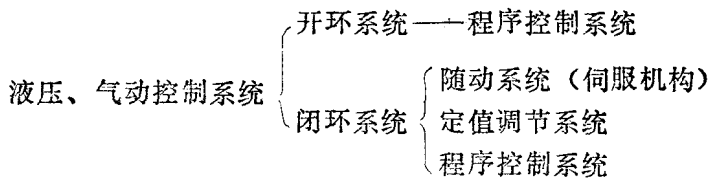
图5 换向工作台职能符号表示的液压系统原理图

本书将介绍各种元件的工作原理及其应用，不涉及元件本身的设计问题；重点在论述如何应用各种元件组成所需系统的分析和设计。

二、液压及气动系统的分类

在液压及气动系统中，即使它是一种最简单的系统，也需要一些控制元件对其执行元件的输出量进行控制。例如动力缸的运动方向、速度或压力等，需要用方向控制阀、节流阀或压力控制阀等来控制，所以一般的液压及气动系统都是一种控制系统。控制系统的完善定义是指这样一种装置或一些装置的组合，即其输出量（因变量）是按预先安排的规律由输入量（自变量）来控制的。

控制系统分为开环控制和闭环控制两大类，开环控制的输入量和输出量之间没有连续的比较；而闭环控制则是连续地对输出进行测量并随时进行比较。其输入信号与来自输出量的反馈信号之差称为偏差信号。因此闭环系统又称为反馈系统。反馈系统是依靠偏差信号来调节供应到系统的能量，以使输出量向着减小偏差的方向变化。第七章将说明反馈及偏差信号等术语的含义，并要说明开环系统由于没有反馈，不存在偏差信号，因此不适用于要求精确控制场合。以下列出各种控制系统的分类：



其中的程序控制系统又叫过程控制系统，既有开环的，也有闭环的。在液压及气动系统中，尤其是气动系统常常应用开环的程序控制系统。

对于液压系统按油液循环方式不同，则又可分为开式和闭式传动。

在开式的液压系统中，油泵从油箱吸油，供入液压缸或油马达之后，再排回油箱。其结构简单，散热良好，油能在油箱内澄清，应用较普遍。在闭式液压系统中，油泵进口油管直接与油缸或油马达的排油管相通，形成一闭合循环。为了补偿系统的泄漏，因而常需附设一只小型辅助油泵。因而其结构较复杂，散热差，要求高的过滤精度，因此应用较少。但油箱体积小，结构紧凑；空气进入油液机会少，工作平衡，并允许能量反馈。

§3 电动系统、机械系统与液压、气动系统的比较

一、动力拖动能力的比较

因为气动系统的使用压力一般限制在 $2\sim 8$ 公斤力/厘米² 范围之内，所以它不适于作功率大的动力系统。因此应将液压系统与电力拖动系统作比较。从所能达到的最大功率看，前者只能达几百个千瓦，后者可达几千个千瓦以上，但是液压传动仍有很多优点。其中最突出的优点是液压系统出力大、重量轻、惯性小及输出刚度大。这些优点可用以下指标表示：

功率重量比——液压为 $1.68:1$ 千瓦/公斤，电机为 $0.168:1$ 千瓦/公斤。

出力——液压缸 $70\sim 350$ 公斤力/厘米²，直流直线式电马达 3 公斤力/厘米²（用直径均为 50 毫米的液压缸与电机比较）。

力质量比——液压缸 1300:1 公斤力/公斤力·秒²/米, 直线式电机 130:1 公斤力/公斤力·秒²/米。

扭矩惯量比——液压马达比一般的电动机大 10~20 倍, 只有无槽式的直流力矩马达才能与液压传动相当。

此外, 对于开环系统液压系统的输出刚度大, 而电机系统的输出刚度很小。但是液压系统有污染环境、不能防火及效率较低 (60~90%) 等缺点。

二、控制方式性能比较

液压及气动技术在组成控制系统时, 与机械装置相比较的主要优点是操作方便、省力, 在组成系统时在结构空间上的自由度较大。所以它们易于实现自动化。如与电气控制相配合可实现复杂的程序动作和远程控制。

此外, 液压及气动系统均可应用溢流装置, 所以易于实现过载保护; 并且液压及气动元件易于实现系列化、标准化、通用化, 便于缩短机器的设计和制造周期及降低制造成本。

气动控制系统与液压控制系统相比较的优缺点是:

(1) 空气可以从大气中取之不竭, 无介质费用和供应上的困难。将用过的气体排入大气, 处理方便。泄漏不会严重的影响工作, 不污染环境。

(2) 空气粘性很小, 在管路中的沿程压力损失为液压系统的千分之一。宜于远程传输及控制。

(3) 工作压力低, 可降低对气动元件的材料和制造精度要求。

(4) 对开环控制系统, 它相对液压传动而言有动作迅速、响应快的优点。

(5) 维护简便, 使用安全, 没有防爆问题, 适用于石油、化工、农药及矿山机械等的特殊要求。对于无油的气动控制系统则特别适用于无线电元器件生产过程, 显然也适用于食品及医药的生产过程。

(6) 气动元件可以根据不同场合, 采用相应材料, 使元件能够在恶劣的环境 (强振动、强冲击、强腐蚀和强辐射等) 下进行正常工作。

气动传动与电气、液压传动比较有以下缺点:

(1) 气动装置的信号传递速度限制在声速范围之内, 所以它的工作频率和响应速度远不如电子装置, 并且信号要产生较大失真和延迟。也不便于构成十分复杂的回路。但这个缺点对工业生产过程不会造成困难。

(2) 空气的压缩性远大于液压油的压缩性, 因此在闭环系统中, 液压传动的动作迅速、响应能力又优于气动系统; 对于开环系统, 工作速度的稳定性也以液压传动为佳。

(3) 气动传动的效率比液压传动还要低。

(4) 气动传动出力也不如液压传动大。

表 1 为不同控制方式性能对比表。

表1 不同控制方式性能对比表

项 目		机械方式	电气方式	电子方式	油 压 方 式	气 压 方 式
操 作 力		较 大	不 大	小	大(可达数十吨以上)	稍大(约可达一吨)
操 作 速 度		小	大	大	稍大(可达1米/秒)	大(可达10米/秒)
敏 感 性		中 等	大	大	大	小
载 荷 变 化 影 响		几乎没有	几乎没有	几乎没有	很 少 有	特 别 大
准 确 性		良 好	良 好	良 好	稍 好	不 好
构 造		一 般	稍复杂	复 杂	稍 复 杂	简 单
配 线、配 管		没 有	较简单	复 杂	复 杂	稍 复 杂
环 境	温 度	一 般	要求高	要 求 高	一般(70℃以下)	一般(100℃以下)
	湿 度	一 般	要求高	要 求 高	一 般	排气时应注意
	腐 蚀 性	一 般	要求高	要 求 高	一 般	一 般
	振 动	一 般	要求高	要求特别高	不 怕 振 动	不怕振动
维 护		简 单	要求较高	要求较高	要 求 较 高	简 单
危 险 性		无特殊问题	注意漏电	无特殊问题	注 意 防 火	安 全
信 号 变 换		困 难	容 易	容 易	较 容 易	较 容 易
远 距 离 操 作		困 难	特别容易	特别容易	容 易	容 易
动力源故障时		动作停止	动作停止	动作停止	有蓄压器时可有若干动作	消耗系统,内线余气量后动作停止
安装位置自由度		很 少 有	有	有	有	有
无 级 变 速		稍 困 难	稍困难	良 好	良 好	稍 好
速 度 调 节		稍 困 难	容 易	容 易	容 易	容 易
价 格		一 般	稍 贵	稍 贵	稍 贵	一 般

第一章 液压和气动技术的基本理论

本章叙述与液压和气动技术有关的一些基本理论,以了解流体的一些基本特性和基本概念,这样有助于正确理解液压和气动技术的基本原理和规律,从而更好地使用和设计液压和气动系统。

§1-1 流体的物理性质

一、流体的密度和重度

单位容积中流体的质量称为该流体的密度,用 ρ 表示:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ 克/厘米}^3 \quad (1-1)$$

式中 m ——流体的质量(克);

V ——流体的容积(厘米³)。

上式中,密度 ρ 的单位是用绝对制表示,若用工程制表示则为公力斤·秒²/米⁴或公斤力·秒²/厘米⁴。

单位容积中流体的重量称为该流体的重度,以 γ 表示:

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ 公斤力/厘米}^3 \text{ 或 公斤力/米}^3 \quad (1-2)$$

式中 G ——流体的重量(公斤力);

流体的重度和密度的关系为:

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度,等于981厘米/秒。

对于液压系统用矿物油,在一般使用温度和压力范围内可取:

$$\rho = 0.9 \text{ 克/厘米}^3 \text{ (绝对制);}$$

或

$$\rho = 0.9 \times 10^{-3} / 981 = 0.92 \times 10^{-6} \text{ 公斤力} \cdot \text{秒}^2 / \text{厘米}^4 \text{ (工程制)}。$$

基准状态的干燥空气(温度为0℃,绝对压力为760毫米汞柱的干燥空气)的重度为1.293公斤力/米³,因此当温度为 t ℃及绝对压力为 p (毫米汞柱)时,空气的重度为

$$\gamma = 1.293 \times \frac{273}{273+t} \times \frac{p}{760} \text{ 公斤力/米}^3 \quad (1-4)$$

注意物体的比重是物体在20℃时的重度与4℃时的蒸馏水重度之比,没有单位,不能混淆。

二、流体的压缩性

流体由于压力的作用改变容积的特性称为压缩性,用压缩系数 β_p 表示,相当于单位压力变化时流体容积的相变化值,即