

宋志安 王成龙 曹连民◎等编著

# 液压传动与控制的 FluidSIM 建模与仿真

通过扫描二维码查看“动图”，直观易懂，易于理解掌握  
液压元件与FluidSIM软件应用相结合，实现机电液一体化设计

# 液压传动与控制的 FluidSIM 建模与仿真

宋志安 王成龙 曹连民 于 晓 编著  
宋玉凤 周 荃 李 佳 王 亮



机械工业出版社

本书主要内容包括：绪论、液压流体力学基础、液压动力源元件、液压执行元件、液压辅助元件、方向阀及应用回路、压力阀与压力应用回路、节流阀及节流调速回路、容积调速回路和容积节流调速回路、其他基本回路、液压系统设计及实例分析、液压系统的使用等。“动图”是本书的显著特点，液压元件结构图、液压控制系统职能符号图的 FluidSIM 建模运行仿真过程动图，可通过扫描二维码查看。本书面向初学者，讲清基本内容、基本理论和基本方法，使读者受到启发，并了解进一步解决问题的途径，熟练掌握利用 FluidSIM 绘制液压控制系统的职能符号图、电控图和动态仿真图的技术，为液压技术的创新打下坚实的理论基础。

本书可供液压传动与控制领域的工程技术人员参考，也可作为高等院校液压传动与控制课程的教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

液压传动与控制的 FluidSIM 建模与仿真/宋志安等编著. —北京：机械工业出版社，2020. 4

ISBN 978-7-111-64926-7

I. ①液… II. ①宋… III. ①液压传动—系统建模②液压控制—系统建模③液压传动—系统仿真④液压控制—系统仿真 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 035428 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：陈保华 责任编辑：陈保华 高依楠

责任校对：肖琳 封面设计：马精明

责任印制：张博

北京铭成印刷有限公司印刷

2020 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20 印张 · 544 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-64926-7

定价：69.00 元

电话服务

网络服务

客服电话：010-88361066 机工官网：www.cmpbook.com

010-88379833 机工官博：weibo.com/cmp1952

010-68326294 金书网：www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版 机工教育服务网：www.cmpedu.com

# 前 言

人们学习过液压传动课程时都有一种感受，就是难以理解液压元件中的“动作”，如滑阀的位和通、先导式溢流阀和调速阀等的通断机理等。目前，液压类课程中液压控制系统的职能符号图等无法“动起来”。本书的特色在于：

(1) 用手机扫描书中所附的二维码，即可出现动图，简单直观；在超星学习通，通过“一平三端”，根据学习进度情况，有的放矢地进行演示，打造智慧教学系统。

(2) “动图”使读者直观而详细地理解液压控制系统的开式与闭式、开环与闭环的区别和工作原理。

(3) 帮助读者利用 FluidSIM 识图解决了初学者识读液压控制系统职能符号图这一难点。

1) 很好地掌握液压传动的基础知识，了解液压系统的基本组成部分、液压传动的基本参数等。

2) 熟悉各种液压元件（特别是各种阀和变量机构）的工作原理和特性。

3) 熟悉油路的一些基本性质及液压系统中的一些基本回路。

4) 熟悉液压系统中的各种控制方式及符合国家标准要求的液压图形符号的含义。

读者经过多读多练，特别是多读各种典型设备的液压传动系统图，并了解其特点，对液压控制系统识图的学习将达到触类旁通、举一反三和熟能生巧的效果。

(4) 利用 FluidSIM 计算机辅助完成液压控制系统职能符号图、电控图和动态仿真曲线的自动生成，能观察到控制机构位和执行机构位的位置变化以及液体的流向变化。

(5) 利用 MATLAB 的计算功能和图形可视化实现液压控制系统设计，与利用 FluidSIM 计算机辅助完成液压控制系统职能符号图相结合，自动完成设计的全过程。

(6) 利用 MATLAB 编程实现限压式单作用变量叶片泵的流量和压力特性曲线的自动生成及特征参数的计算机辅助求取。

(7) 利用超星学习通登录在线课程，进行讨论、考试、抢答等，调动学习兴趣，提高学习的主动性；同时利用通知功能，随时回答学习中遇到的问题。网址：<https://mooc1-1.chaoxing.com/course/202900690.html>。

(8) 本书资料中提供了许多与液压传动相关的参考书和国家标准等，供学习者开阔眼界，扩大知识面。

(9) 对电子作业提出了以下要求：

1) 包含原图的原题，解或答。

2) 数字及符号要使用公式编辑器完成。

3) 一般图形使用 AutoCAD 绘制、液压系统图使用 FluidSIM 绘制。

为什么学？本书把液压元件与 FluidSIM 等软件应用相结合，实现机电液一体化设计，把抽象难懂的结构图和复杂的液压系统图动态展示，直观易懂，易于理解掌握，全书内容紧跟现代液压技术的发展，与时俱进。

学什么?本书共12章,内容包括:绪论、液压流体力学基础、液压动力源元件、液压执行元件、液压辅助元件、方向阀及应用回路、压力阀与压力应用回路、节流阀及节流调速回路、容积调速回路和容积节流调速回路、其他基本回路、液压系统设计及实例分析、液压系统的使用等。“动图”是本书的显著特点,液压元件结构图、液压控制系统职能符号图的FluidSIM建模运行仿真过程动图,可通过扫描二维码查看。本书按照GB/T 786.1—2009《流体传动系统及元件图形符号和回路图 第1部分:用于常规用途和数据处理的图形符号》,利用FluidSIM实现计算机辅助液压控制系统职能符号图和电控图同步绘制,实现了机电液一体化;利用FluidSIM状态图能实时仿真液压系统职能符号图里的所有元件;可利用FluidSIM状态图形成结果文件,用MATLAB等软件进行数据处理,输出标准二维图形。

怎么学?根据专业面适当放宽的原则,本书着重于基本内容的掌握和应用,而不局限于对某个专业典型设备的了解。

本书以FluidSIM的应用为主线,根据液压系统由基本回路组成,回路由基本元件组成的从属关系,将元件和基本回路紧密结合。对于标准元件,利用“动图”,侧重于基本原理及选用原则介绍,不过多地讲述具体结构,读者可根据原理自行分析具体结构。对于辅助元件,按其在系统中的功能分述,使之与内容密切联系,学以致用。本书面向初学者,讲清基本内容、基本理论和基本方法,使读者受到启发,并了解进一步解决问题的途径,熟练掌握利用FluidSIM绘制液压控制系统的职能符号图、电控图和动态仿真图的技术,为液压技术科技创新打下坚实的理论基础。

本书的第1章、第7章~第11章由山东科技大学宋志安教授编写,第2章由山东科技大学机电学院的王成龙博士编写,第3章由山东科技大学宋玉凤老师编写,第4章由黄海学院于晓博士编写,第5章由山东科技大学机电学院曹连民博士编写,第6章由潍坊职业学院机电工程学院周荃编写,第12章由山东管理学院机电学院李佳和山东科技大学机电学院王亮博士编写,全书由宋志安教授统稿。

在本书编写过程中参考了大量同仁的论著,均列入参考文献之中,在此谨向各位作者表示衷心的感谢。在本书的编写过程中,得到了山东万通液压有限公司王万法董事长和山东龙鑫集团刘兆涛总经理等的大力协助,同时,机设订单2013、机设订单2014和机设2016-3班的同学们在“液压传动与控制”课程计算机辅助教学中给予了大力的支持和帮助,在此一并致谢!同时感谢烟台南山学院工学院对于本书写作的支持和帮助。

由于作者水平有限,加之液压技术日新月异,书中难免有些缺点和错误,敬请读者批评指正。

本书备有教学课件,有需要的读者请凭学校的授课和用书证明与宋志安联系,邮箱:15269200978@139.com。

作者

# 目 录

## 前 言

第1章 绪论	1	例题	40
1.1 传动技术的比较	1	习题	43
1.2 液压传动的工作原理	2	第3章 液压动力源元件	46
1.3 液压系统的组成与表示	4	3.1 概述	46
1.3.1 液压系统的组成部分及其功用	4	3.1.1 液压泵的工作原理	46
1.3.2 液压系统图的表示——图形符号	5	3.1.2 液压泵的职能符号	46
1.4 FluidSIM 建模与仿真	7	3.1.3 液压泵的主要性能参数	47
1.4.1 FluidSIM 软件的特点	7	3.2 齿轮泵	48
1.4.2 FluidSIM 建模与仿真实例	7	3.2.1 外啮合齿轮泵	48
1.5 液压传动的控制方式	9	3.2.2 内啮合齿轮泵	51
1.6 电气控制装置	10	3.2.3 螺杆泵	52
1.6.1 电气控制线路原理图的组成及 绘制原则	10	3.3 叶片泵	52
1.6.2 设计要点及注意事项	11	3.3.1 单作用叶片泵	53
1.6.3 电控机床工作台液压系统	12	3.3.2 双作用叶片泵	56
1.7 液压传动的特点及应用	12	3.4 柱塞泵	56
1.7.1 液压传动的优点	12	3.4.1 斜盘式轴向柱塞泵	57
1.7.2 液压传动的缺点	13	3.4.2 斜轴式轴向柱塞泵	61
1.7.3 液压传动应用	13	3.4.3 径向柱塞泵	62
习题	14	3.5 液压泵的噪声与控制	63
第2章 液压流体力学基础	15	例题	64
2.1 液压油	15	习题	68
2.1.1 液压油的特性	15	第4章 液压执行元件	70
2.1.2 液压油的物理性质	16	4.1 液压缸的工作原理	70
2.2 液体静力学	22	4.1.1 液压缸的分类	70
2.2.1 液体静力学及其特性	22	4.1.2 液压缸的工作原理	71
2.2.2 重力作用下静力学的基本规律	24	4.2 液压缸基本参数的计算	72
2.2.3 静压力对固体壁面的总作用力	25	4.2.1 活塞式液压缸	72
2.3 液体动力学	25	4.2.2 柱塞式液压缸	74
2.3.1 基本概念	25	4.2.3 摆动式液压缸	75
2.3.2 流量连续性方程	27	4.2.4 组合式液压缸	76
2.3.3 伯努利方程	27	4.3 液压缸的结构	77
2.3.4 动量方程	30	4.3.1 双作用单杆活塞缸典型结构	77
2.4 孔口的压力流量特性	31	4.3.2 液压缸的组成部分	78
2.4.1 液体流经孔口的力学特性	31	4.4 液压缸的设计计算	81
2.4.2 液体流经缝隙的力学特性	33	4.4.1 液压缸的设计步骤及 要考虑的问题	81
2.5 液压冲击及气穴现象	38	4.4.2 计算液压缸的结构尺寸	81
2.5.1 液压冲击	38	4.4.3 强度校核	83
2.5.2 气穴现象及气蚀	40	4.4.4 稳定性校核	83

4.4.5 缓冲计算	84	6.3.5 机动换向阀	135
4.4.6 液压缸的试验	84	6.3.6 电磁换向阀	135
4.5 液压马达	84	6.3.7 液动换向阀	136
4.5.1 液压马达的特点及分类	84	6.3.8 电液换向阀	137
4.5.2 液压马达的性能参数	85	6.3.9 手动阀控制液动阀	138
4.5.3 齿轮马达	88	6.3.10 换向阀的应用	138
4.5.4 叶片马达	89	6.4 方向回路	139
4.5.5 柱塞马达	90	6.4.1 换向回路	139
例题	93	6.4.2 锁紧回路	140
习题	99	例题	142
<b>第5章 液压辅助元件</b>	<b>101</b>	习题	146
5.1 概述	101	<b>第7章 压力阀与压力应用回路</b>	<b>148</b>
5.2 滤油器	102	7.1 溢流阀及调压回路	148
5.2.1 滤油器的作用及过滤精度	102	7.1.1 直动式溢流阀	148
5.2.2 滤油器的类型及结构	103	7.1.2 先导式溢流阀	150
5.2.3 滤油器的主要参数和特性	104	7.1.3 溢流阀的性能	151
5.2.4 滤油器的选用	105	7.1.4 溢流阀的应用	154
5.2.5 滤油器的安装	105	7.1.5 应用回路	155
5.3 油箱	106	7.2 减压阀及减压回路	159
5.3.1 油箱的结构及设计要点	107	7.2.1 定值减压阀结构及工作原理	160
5.3.2 油箱容量的确定	107	7.2.2 定值减压阀的性能	162
5.4 蓄能器	108	7.2.3 减压回路	162
5.4.1 蓄能器的功用	108	7.3 顺序阀及顺序控制回路	163
5.4.2 蓄能器的类型和结构	109	7.3.1 顺序阀的结构及工作原理	163
5.4.3 蓄能器的容量	110	7.3.2 顺序阀的应用	165
5.4.4 蓄能器的选用和安装	111	7.3.3 平衡阀	165
5.5 热交换器	112	7.3.4 顺序回路	166
5.6 密封装置	114	7.4 压力继电器与应用回路	171
5.7 管件	120	7.4.1 工作原理与结构	171
5.7.1 油管	120	7.4.2 压力继电器的性能参数	171
5.7.2 管接头	121	7.4.3 压力继电器的应用回路	171
5.7.3 压力表及压力表开关	122	7.5 插装阀	173
5.7.4 中心回转接头	122	7.5.1 插装阀的结构和工作原理	173
例题	123	7.5.2 插装方向阀	174
习题	124	7.5.3 插装阀用作压力控制阀	180
<b>第6章 方向阀及应用回路</b>	<b>126</b>	7.5.4 插装阀用作流量阀	180
6.1 概述	126	7.5.5 逻辑阀的应用特点	181
6.2 单向阀	127	例题	182
6.2.1 普通单向阀	128	习题	191
6.2.2 液控单向阀	129	<b>第8章 节流阀及节流调速回路</b>	<b>193</b>
6.3 换向阀	131	8.1 概述	193
6.3.1 换向阀的结构特点和工作原理	131	8.1.1 调速方法	193
6.3.2 换向阀的职能符号	133	8.1.2 流量控制原理和节流口的 流量特性	193
6.3.3 滑阀机能	133	8.2 节流阀	194
6.3.4 手动换向阀	134		

8.2.1 节流阀的结构和工作原理 .....	194	<b>第 11 章 液压系统设计及实例分析</b> .....	262
8.2.2 节流口的形式和流量特性 .....	195	11.1 液压系统的设计步骤 .....	262
8.2.3 节流口的堵塞现象及最小 稳定流量 .....	196	11.1.1 液压系统的设计要求 .....	262
8.2.4 节流阀的应用 .....	197	11.1.2 液压系统的工况分析 .....	262
8.3 节流回路 .....	197	11.1.3 液压系统的设计方案 .....	264
8.3.1 进口节流调速回路 .....	197	11.1.4 液压系统的计算与元件选择 .....	266
8.3.2 出口节流调速回路 .....	201	11.1.5 液压系统的校核 .....	269
8.3.3 旁路节流调速回路 .....	204	11.1.6 绘制液压系统工作图和编写 技术文件 .....	271
8.4 压力补偿流量阀 .....	207	11.2 卧式单面多轴钻孔组合机床液压 系统设计 .....	271
8.4.1 调速阀的结构和工作原理 .....	207	11.2.1 负载分析 .....	271
8.4.2 溢流节流阀 .....	208	11.2.2 速度计算和 $v-t$ 图绘制 .....	273
8.4.3 速度稳定问题 .....	209	11.2.3 初步确定液压缸参数 .....	274
8.5 分流集流阀 .....	211	11.2.4 拟定液压系统图 .....	278
例题 .....	212	11.2.5 液压系统图 .....	278
习题 .....	222	11.2.6 选择液压元件 .....	278
<b>第 9 章 容积调速回路和容积节流 调速回路</b> .....	225	11.2.7 液压系统性能验算 .....	280
9.1 容积调速回路 .....	225	11.3 板料折弯液压机系统设计计算 .....	281
9.1.1 变量泵和定量执行元件组成的 调速回路 .....	225	11.3.1 技术要求及已知条件 .....	281
9.1.2 定量泵和变量马达组成的 调速回路 .....	228	11.3.2 液压缸设计 .....	281
9.1.3 变量泵和变量马达组成的 调速回路 .....	228	11.3.3 负载和运动分析 .....	283
9.2 容积节流调速回路 .....	229	11.3.4 确定系统主要参数 .....	285
9.2.1 限压式变量泵和调速阀组成的 容积节流调速回路 .....	229	11.3.5 制定基本方案, 拟定液压 系统图 .....	289
9.2.2 差压式变量泵和节流阀组成的 容积节流调速回路 .....	230	11.3.6 液压元件选型计算 .....	290
例题 .....	231	习题 .....	292
习题 .....	236	<b>第 12 章 液压系统的使用</b> .....	294
<b>第 10 章 其他基本回路</b> .....	238	12.1 液压系统的安装与调试 .....	294
10.1 快速运动回路 .....	238	12.1.1 液压系统的安装和清洗 .....	294
10.2 顺序动作回路 .....	241	12.1.2 液压系统的压力试验与调试 .....	295
10.2.1 行程控制 .....	241	12.1.3 液压系统的使用与维护 .....	297
10.2.2 压力控制 .....	243	12.2 液压系统的故障诊断方法 .....	298
10.2.3 时间控制顺序动作 .....	244	12.2.1 液压系统故障诊断方法 .....	298
10.3 速度切换回路 .....	245	12.2.2 液压系统故障诊断步骤 .....	299
10.4 同步回路 .....	249	12.3 液压系统的故障排除方法 .....	300
10.5 防干扰回路 .....	251	12.3.1 液压系统各阶段常见故障 .....	300
例题 .....	253	12.3.2 液压系统故障的特点 .....	301
习题 .....	258	12.3.3 液压系统常见故障及其 排除措施 .....	301
		例题 .....	305
		习题 .....	309
		<b>参考文献</b> .....	311

# 第1章 绪 论

在密闭系统里，以液压油为工作介质，以压力和流量为特征参数，实现能量的转换、传递、控制和分配的技术称为液压技术，它相对于机械传动来说是一门新技术，但如从1650年帕斯卡提出静压传递原理、1850年英国开始将帕斯卡原理先后应用于液压起重机、压力机等算起，也已有二百年历史了。在第二次世界大战期间，由于战争需要，出现了响应迅速、精度高的液压控制机构，装备了各种军事武器。第二次世界大战结束后，液压技术迅速转向民用工业，不断应用于各种自动化生产线。

20世纪60年代以后，液压技术随着核能、空间技术、计算机技术的发展而迅速发展，因此液压技术真正的发展也只是近四五十年事。当前液压技术正向迅速、高压、大功率、高效、低噪声、经久耐用、高度集成化的方向发展。同时新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助测试(CAT)、计算机直接控制(CDC)、机电一体化技术、可靠性技术等方面也是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。机电一体化技术由传动技术、控制技术、电子技术、机械技术、计算机技术和传感与检测技术等组成。

本章主要介绍液压传动的概念、组成部分，FluidSIM绘制液压系统职能符号图及如何识图，用FluidSIM绘制液压系统图介绍闭式与开式、闭环与开环的异同，以及液压传动与控制的优缺点和应用等。

## 1.1 传动技术的比较

按照所采用的机件或工作介质的不同，目前广泛应用的四大传动类型为机械传动、电气传动、气压传动和液压传动。

### 1. 机械传动

机械传动是通过齿轮、齿条、蜗轮、蜗杆、带、链条等机械零件传递动力和进行控制，其发展最早且应用最为普遍。机械传动的优点是传动准确可靠、操作方便，机构直观，制造容易，维修简单，负载变化对传动比影响小等；但靠机械传动进行自动控制时也存在结构复杂笨重，一般不能无级调速，远距离操作困难、操作力大，安装位置变化的柔性小等缺点。因此在许多场合或逐步被其他传动方式所代替，或需与其他传动方式融合才能满足主机的动作要求。

### 2. 电气传动

电气传动是利用电动机等电力设备，通过调节电参数来传递动力和进行控制的一种传动方式。电气传动的优点是能量传递方便，信号传递迅速，标准化程度高，便于远距离操作，容易实现自动化；缺点是运动平稳性差，易受外界负载的影响，惯性大，起动及换向慢，受温度、湿度、振动、腐蚀等环境因素影响较大。为了改善其传动性能，在许多场合，往往与机械、气压或液压传动结合使用，作为各种传动的组成部分。

### 3. 气压传动

气压传动是以压缩空气为工作介质来传递动力和进行控制的一种传动方式。气压传动的优点是结构简单，元件和管线布置柔性较大；空气取之不尽，气源价格低廉，易于通过调节气流量实现无级调速；传动及变换信号方便，反应快；泄漏可直接排向大气，不会引起污染；气体黏性

小，故阻力损失小，流速高，可获得高速运动（例如气动内圆磨头的转速高达十万转每分钟）；环境适应性好，能在易燃、易爆和高温环境下工作。气压传动的缺点是空气容易压缩，无法获得均匀稳定的运动，定位性差，气动系统排气噪声较大；为了减少泄漏，提高效率，气动系统工作压力一般小于 0.7~0.8MPa，只适用于小功率传动。

#### 4. 液压传动

液压传动则是以液体为工作介质，利用封闭系统中的静压能实现动力和信息的传递及工程控制的传动方式。与其他传动方式相比，液压传动具有独特的技术优势。各种传动方式的综合比较见表 1-1。

表 1-1 各种传动方式的综合比较

性能	液压传动	气压传动	机械传动	电气传动
输出力或转矩	大	稍大	较大	不太大
速度	较高	高	低	高
质量功率比	小	中等	较小	中等
响应性	高	低	中等	高
定位性	稍好	不良	良好	良好
无级调速	良好	较好	困难	良好
远程操作	良好	良好	困难	特别好
信号变换	困难	较困难	困难	容易
直线运动	容易	容易	较困难	困难
调整	容易	稍困难	稍困难	容易
结构	稍复杂	简单	一般	稍微复杂
管线配置	复杂	稍复杂	较简单	简单
环境适应性	较好，但易燃	好	一般	不太好
危险性	注意防火	几乎无	无特别问题	注意漏电
动力源失效时	可通过蓄能器完成若干动作	有余量	不能工作	不能工作
工作寿命	一般	长	一般	较短
维护要求	高	一般	简单	较高
价格	稍高	低	一般	稍高

## 1.2 液压传动的工作原理

液压传动是利用液体静压传动原理来实现的，现以图 1-1 所示的液压千斤顶为例来说明液压传动的工作原理。

### 1. 顶起重物

液压千斤顶在顶起重物时，先关闭截止阀 8。

(1) 容积扩大吸油 向上抬起杠杆 1 的手柄，泵缸 2 的活塞向上运动，泵缸 2 的容积扩大  $s_1 A_1$  而形成局部真空，排油单向阀 3 关闭，油箱 5 内的油液在大气压作用下顶开吸油单向阀 4 进入泵缸的下腔。

设杠杆末端到支点的长为  $L_1$ ，杠杆上与泵缸活塞相连处与支点的距离为  $L_2$ ，杠杆末端施加的载荷为  $F_1$ ，按杠杆原理，得

$$F = F_1 \frac{L_1}{L_2} \quad (1-1)$$

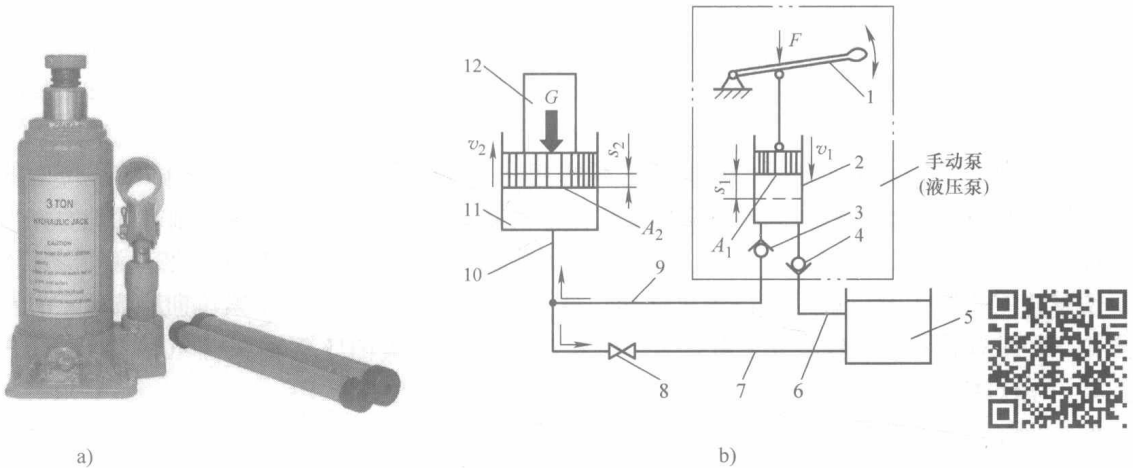


图 1-1 液压千斤顶和工作原理

a) 液压千斤顶 b) 工作原理图

1—杠杆 2—泵缸 3—排油单向阀 4—吸油单向阀 5—油箱 6, 7, 9, 10—管路  
8—截止阀 11—液压缸 12—重物  $G$

由于  $L_1 > L_2$ , 得出  $F > F_1$ , 长度比值引起的力的放大。

(2) 容积缩小排油 向下压下杠杆 1 的手柄, 泵缸 2 的活塞向下运动, 泵缸 2 的容积缩小, 油液受挤压, 压力升高, 吸油单向阀 4 关闭, 顶开排油单向阀 3, 油液经管路 9、10 进入液压缸 11 的下腔, 推动活塞带动重物向上运动一个距离  $s_2$ , 顶起重物  $G$  做功。这里的泵缸 2 腔, 管路 9、10 和液压缸 11 活塞腔共同组成了一个密闭系统, 按帕斯卡定律, 密闭系统里的液体压力 (强) 等值传递。设泵缸活塞面积为  $A_1$ , 液压缸活塞的面积为  $A_2$ , 则密闭系统的压力为

$$p = \frac{F}{A_1} = \frac{G}{A_2} \quad (1-2)$$

由式 (1-2) 得出

$$p = \frac{G}{A_2} \quad (1-3)$$

由  $G=0$ , 则  $p=0$ , 压力随负载变化而变化, 得出了液压传动的一个重要概念: 压力取决于负载。

$$G = \frac{A_2}{A_1} F \quad (1-4)$$

由于  $A_2 > A_1$ , 容易得到  $G > F$ , 面积比值引起的力放大。

按照变化的容积变化相等, 得

$$A_1 s_1 = A_2 s_2$$

两边同除以  $\Delta t$

$$A_1 \frac{s_1}{\Delta t} = A_2 \frac{s_2}{\Delta t} \Rightarrow A_1 v_1 = A_2 v_2 = q \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 得出一个流量连续性定理。

(3) 液压功率 泵缸输入功率  $P_1$  为

$$P_1 = F \frac{s_1}{t} = F v_1 = p A_1 v_1 = p q \quad (1-6)$$

液压缸 11 的输出功率  $P_2$  为

$$P_2 = G \frac{s_2}{t} = Gv = pA_2v_2 = pq \quad (1-7)$$

由此可以看出：在不计损失的情况下，液压缸的输入液压功率等于液压泵的泵缸的液压输出功率。

(4) 配油装置 图 1-1 所示的液压千斤顶采用两个单向阀的阀式配油装置，循环可变的容积实现单向阀吸排油的转换。此外还有轴向柱塞泵的盘式配油、径向柱塞泵的轴式配油等。

(5) 顶起重物 按照 (1)、(2) 不断地上下扳动杠杆 1，则不断有油液进入液压缸 11 下腔，使重物  $G$  不断上升。如果杠杆停止动作，液压缸 11 中的液体压力压紧单向阀 3，大活塞连同重物一起被锁住不动，停止在举升位置。

## 2. 下放重物

液压千斤顶在下放重物时，开启截止阀 8，液压缸的活塞腔与油箱接通，大活塞将在重物的重力作用下向下移动，回到原始位置。

由上述液压千斤顶的工作原理可知：泵缸 2 与吸油单向阀 4、排油单向阀 3 一起完成吸排油动作，将杠杆的机械能转换为油液的压力能输出，称为（手动）液压泵；液压缸 11 将液压能转换为机械能输出，抬起重物，称为（举升）液压缸。图 1-1 中的泵缸 2、液压缸 11 等组成了最简单的液压传动系统，但满足了液压泵工作的三个条件：循环可变的容积、配油装置和油箱液面与大气系统相通，并实现了力与运动的传递。

# 1.3 液压系统的组成与表示

## 1.3.1 液压系统的组成部分及其功用

液压控制系统由液压元件（包括能源元件、控制元件、执行元件和辅助元件）和工作介质两大部分组成。各部分的功用见表 1-2。液压元件多数已经实现了通用化、系列化和标准化，从而为液压系统的设计制造和使用维修，以及缩短液压设备的研发生产周期、降低生产成本提供了有利条件。

表 1-2 液压系统的组成部分及其功用

组成部分		功用
液压元件	能源元件 液压泵及其驱动原动机 (电动机或内燃机)	将原动机产生的机械能转换成液体的压力能，输出具有一定压力的油液
	执行元件 液压缸、液压马达和摆动 液压马达	将液体的压力能转换为机械能，用以驱动工作机构的负载做功，实现往复的直线运动、连续回转运动或摆动
	控制元件 压力、流量和方向控制阀 及其他控制元件	控制调节液压系统中从液压泵到执行元件的油液压力、流量和方向，从而控制执行元件输出的力或转矩、速度或转速和方向，以保证执行元件驱动的主机工作机构，完成预定的运动规律
	辅助元件 油箱、管件、过滤器、热 交换器、蓄能器及指示仪表	用来存放、提供和回收液压介质，实现液压元件之间的连接及传输载能液压介质，滤除液压介质中的杂质、保持系统正常工作所需的介质清洁度，系统油液的加热或散热，存储、释放液压能或吸收液压力脉动和冲击，显示系统压力、流量和温度等
工作介质	液压油或其他合成液体	作为系统的载能介质，在传递能量的同时起润滑、冷却、除锈等作用

### 1.3.2 液压系统图的表示——图形符号

液压传动系统的图示法有三种：装配结构图、结构原理图和职能符号图。

#### 1. 装配结构图

装配结构图能表达系统和元件的结构形状、几何尺寸和装配关系，但绘制复杂，不能简明、直观地表达各个元件的功能。它主要用于设计制造、装配和维修等场合，而在系统性能分析和设计方案论证时不宜采用。

#### 2. 结构原理图

如图 1-2 所示的结构原理图近似于实物的剖面图，可以直观地表达各种元件的工作原理及其在系统中的功能，并比较接近元件的实际结构，故易于理解，当液压系统出现故障时，根据此原理图进行检查、分析也比较方便。但是，原理图绘制复杂，难于标准化，并且它对元件的结构形状、几何尺寸和装配关系的表达也很不准确。这种图形不能用于设计、制造、装配和维修，它对系统分析又过于复杂，常用于液压元件的原理性解释和说明，在液压元件的理论分析和研究中也常用到。

#### 3. 职能符号图

在如图 1-3 所示的液压系统中，凡是功能相同的元件，尽管结构和原理不同，均用同一种符号表示。这种仅仅表示功能的符号称为液压元件的职能符号。职能符号图是一种工程计算语言，其图形简洁标准、绘制方便、功能清晰、阅读容易，便于液压系统的性能分析和设计方案的论证，这些符号只表示元件的职能和连接系统的通路，并不表示元件的具体结构。这对专利元件更具有保密性。用职能符号绘制液压系统图时，它们只表示系统和各个元件的功能，并不表示具体结构和参数以及具体安装位置。我国目前执行的液压元件和气动元件符号标准为 GB/T 786.1—2009，其中规定，符号都以元件的静止位置或零位置表示。现在用液压传动的设备很多，型号也复杂。但是每一台设备上都有一本说明书，每一本说明书中都有一份该设备的液压系统图。通过说明书不但要了解该设备的结构、性能、技术规范、使用和操作要点，而且通过阅读液压系统职能符号图，还应该了解该设备液压力学原理，了解使用、操作和调整的方法。因此学会看懂液压系统职能符号图，对于学习、操作和维修液压设备的学生、工人和技术人员来说，是非常重要的。下面介绍阅读液压系统职能符号图的要求、方法和步骤。

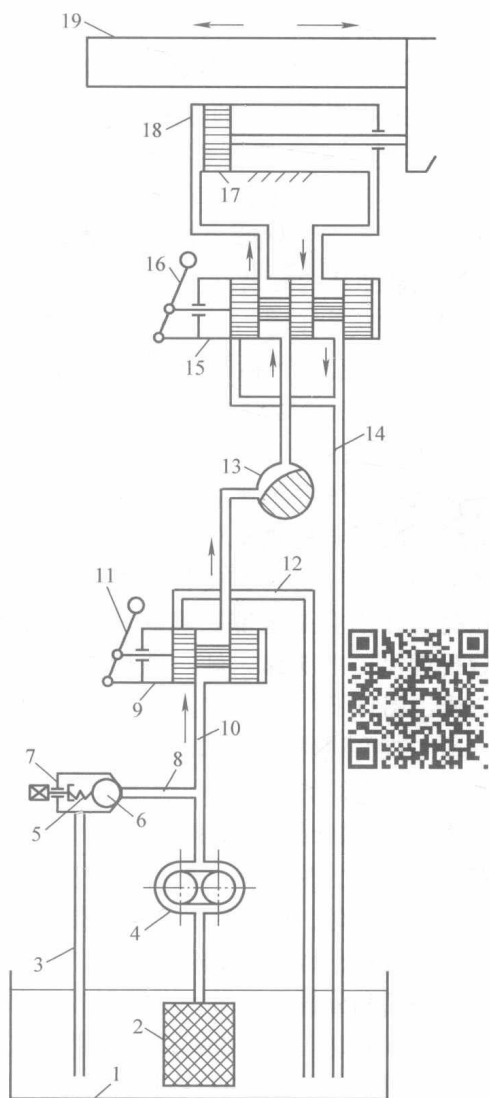


图 1-2 半结构式机床工作台液压系统的结构原理

- 1—油箱 2—过滤器 3、12、14—回油管  
4—液压泵 5—弹簧 6—钢球 7—溢流阀  
8—压力支管 9—起停阀 10—压力管  
11—起停手柄 13—节流阀 15—换向阀  
16—换向阀手柄 17—液压缸活塞 18—液压缸  
19—工作台

### (1) 要求

1) 应很好地掌握液压传动的基础知识, 了解液压系统的基本组成部分、液压传动的基本参数等。

2) 熟悉各种液压元件(特别是各种阀和变量机构)的工作原理和特性。

3) 熟悉油路的一些基本性质及液压系统中的一些基本回路。

4) 熟悉液压系统中的各种控制方式及符合国标要求的液压图形符号的含义。

除以上所述的基本要求外, 还要多读多练, 特别是多读各种典型设备的液压传动系统图, 了解各自的特点, 这样就可以收到触类旁通、举一反三和熟能生巧的效果。

### (2) 方法和步骤

1) 尽可能地了解或估计该液压系统所要完成的任务, 需要完成的工作循环, 及为完成工作所需要具备的特性。

根据系统图的标题名称, 或液压系统图上所附的循环图或电磁铁工作表, 可以估计该系统实现的运动循环、所具有的特性和满足的要求, 当然这些估计不会是全部正确的, 但它会为进一步的分析理出一些头绪, 做一些思想准备, 为下面进一步读图打下一定的基础。

2) 查阅系统图中所有的液压元件及它们的连接关系, 并搞清各个液压元件的类型、性能和规格, 估计它们的作用。

查阅和分析元件, 就是要了解系统中用的是一些什么元件, 要特别搞清它们的工作原理和性能。

查阅元件时, 首先要找出液压泵, 然后找出执行元件(液压缸或液压马达), 其次是操作装置和变量机构, 再其次是辅助装置。

在查阅和分析元件时, 要特别注意各种操纵装置(尤其是换向阀、顺序阀等元件)和变量机构的工作原理、控制方式及各种发信元件(如挡铁、行程开关、压力继电器等)的内在关系。

3) 仔细分析实现执行机构各种动作的油路, 并写出进出油和回油路线。

对于复杂的系统图, 最好从液压泵开始直到执行机构, 将各元件及各条油路分别编码表示, 以便于用简要的方法写出油路路线。

在分析油路走向时, 首先从液压泵开始, 并要求将每一个液压泵的各条输油路的“来龙去脉”搞清楚, 其中要着重分析清楚驱动执行机构的油路——主油路及控制油路。写油路时, 要按每一个执行机构来写, 从液压泵开始到执行机构, 再回到油箱, 成一个循环。

液压系统有各种工作状态, 在分析油路路线时, 可先按图面所示的状态进行分析, 然后再看它的工作状态。在分析每一工作状态时, 首先要分析换向阀和其他一些操纵元件(如起停阀、顺序阀、先导阀等)的通路状态和控制的通路情况, 然后再分别分析各个主油路, 要特别注意

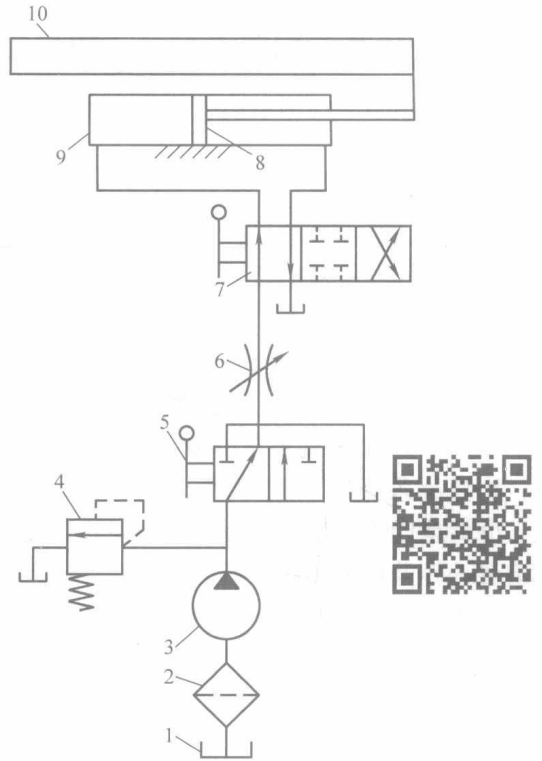


图 1-3 机床工作台液压系统的职能符号图  
1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—溢流阀  
5—起停阀 6—节流阀 7—换向阀 8—液压缸活塞  
9—液压缸 10—工作台

系统从一个工作状态转换到另一个工作状态，是由哪些发信元件发出信号，使换向阀或其他操纵控制元件动作，改变通路状态而实现的。对一个工作循环，应在一个动作的油路分析完以后，接着做下一步油路动作的分析，直至全部动作的油路分析依次做完为止。

以上所介绍的阅读液压系统职能符号图的要求、方法和步骤，只是一些原则性的提法，在遇到具体问题时还要仔细地推敲和具体分析。

## 1.4 FluidSIM 建模与仿真

### 1.4.1 FluidSIM 软件的特点

FluidSIM 软件是 Festo 公司开发的液压与电气系统仿真软件，它的用户界面如图 1-4 所示，它的主要特点归纳为如下：

1) 方便快捷的绘图建模功能。一般绘制液压系统职能符号图大多采用 AutoCAD 等计算机辅助绘图软件，按照 GB/T 786.1—2009 的规定，把单个职能符合做成图块，建立液压系统职能元件库，采用插入的方式将图块拉进绘图区，连线后构成液压系统职能符号图，工作量相当大。而 FluidSIM 的 CAD 功能是专门针对液压控制系统而特殊设计的，用户界面直观，易于学习。它的图库中有 100 多种标准液压和电气等元件，如图 1-4 所示，绘图时可把相应的元件拖到绘图区，各种元件油口间油路的连接，只需在两个连接点之间按住鼠标左键移动，即可自动生成所需的油路。并且可根据需要自由调节已生成油路的位置，避免了油路间的相互交叉，可以大幅度地提高液压系统职能符号图的绘制效率。

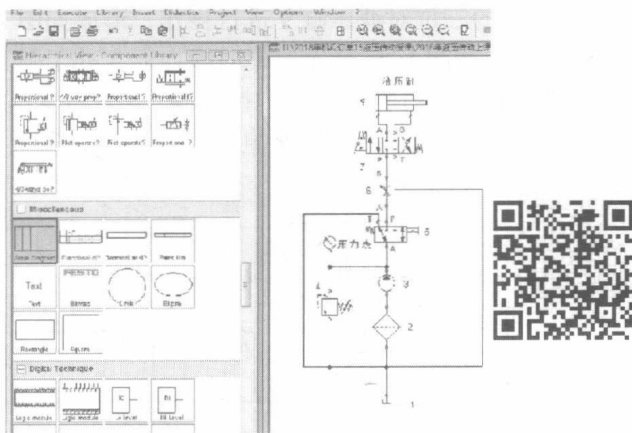


图 1-4 机床液压系统建模

2) 先进的回路仿真功能。FluidSIM 可以对绘制好的回路进行仿真，通过强大的仿真功能可以实时显示和控制回路的动作，因此可以发现设计中存在的错误，帮助设计者设计出结构简单、工作可靠、效率高的最优回路。在仿真中还可以观察到各个元件的物理量值，如液压缸的位移、运动速度、输出力、节流阀的开度、油口的压力等，这样就能够预先连接回路的动态特性，从而准确地估计回路实际运行时的工作状态；另外，在仿真时还可显示回路中的关键元件的状态量，如液压缸活塞杆的位置、压力表的压力、流量计的流量。FluidSIM 的 CAD 功能和仿真功能紧密联系在一起。

3) 可设计和液压回路相配套的电气控制回路。弥补了以前液压教学中，学生只见液压回路不见电气回路，从而不明白各种开关和阀动作过程的弊病。电气-液压回路同时设计与仿真，可以提高学生对它们的认识和实际应用能力。

### 1.4.2 FluidSIM 建模与仿真实例

#### 实例一：开环液压控制系统

(1) 开式系统 如图 1-3 所示的机床工作台液压系统是一个开式进口节流调速系统，油液

的液流方向是油箱→液压泵→起停阀→节流阀→换向阀→液压缸→油箱，完成了一个机械能与液压能相互转换、冷油变成热油的过程。由于系统工作完后的油液回油箱，因此可以发挥油箱的散热和杂质沉淀的作用。但因油液经常与空气接触，使空气易于渗入系统，导致油路上需设置背压阀，这将引起附加的能量损失，使油温升高。开式系统一般采用大容量的油箱。

在开式系统中，采用的液压泵为定量泵或单向变量泵，考虑到泵的自吸能力和要避免产生空穴现象，对自吸能力差的液压泵，通常将其工作转速限制在额定转速的75%以内。工作装置的换向则借助于换向阀，换向阀换向时，除了产生液压冲击外，运动部件的惯性能将变为热能，而使液压油的温度升高。由于开式系统结构简单，仍被大多数机床、起重机等设备所采用。

(2) 建模 按图 1-3 所需要的液压元件从 FluidSIM 符号库拉到 FluidSIM 绘图区，连线后构成如图 1-4 所示的绘图区的液压系统职能符号图，为了统一性，图 1-4 与图 1-3 中各个元件的标号一致。

(3) 仿真 对图 1-4 中各个元件进行配置后，运行图 1-4 的 FluidSIM 系统，按起停阀 5 的两位、换向阀 7 的三位对液压缸 9 进行操作，形成如图 1-5 所示的仿真曲线图。

1) 卸荷：如图 1-5a 所示，此时换向阀 5 处于弹簧位，电动机空载起动或卸荷。

2) 液压缸活塞杆伸出：此时换向阀 5 处于手动位，换向阀 7 左位工作，油液从 A 端进入液压缸 9 的活塞腔，推动活塞杆外伸。

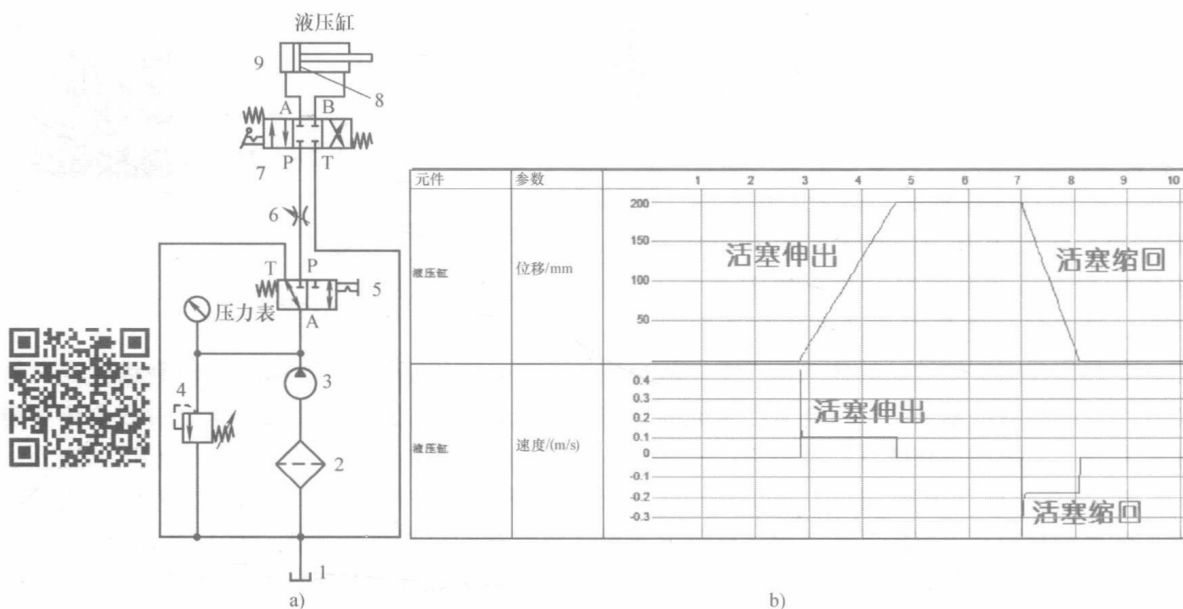


图 1-5 液压缸动作仿真曲线

a) 回路建模 b) 仿真曲线

1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—溢流阀 5—手动二位三通换向阀 6—节流阀 7—手动三位四通换向阀  
8—液压缸活塞 9—液压缸

3) 液压缸活塞杆伸出：此时换向阀 5 处于手动位，换向阀 7 中位工作，油液不动活塞杆全行程外伸进行夹紧保持。

4) 液压缸活塞杆缩回：此时换向阀 5 处于手动位，换向阀 7 右位工作，油液从 B 端进入液压缸 9 的活塞杆腔，推动活塞杆的环形面积，活塞杆缩回。

上述的仿真过程可以记录下来状态，如图 1-5b 所示，液压缸位移特性仿真曲线真实地把上述过程直观描述出来了。

## 实例二：闭式液压控制系统

(1) 闭式系统 在闭式系统中，油箱较开式系统容积小，液压泵的进油管直接与执行元件的回油管相连，工作液体在系统的管路中进行封闭循环。闭式系统结构紧凑，与空气接触机会少，空气不易渗入系统，故传动的平稳性好；执行装置的变速和换向靠调节泵和马达的变量机构来实现，避免了开式系统换向过程中所出现的液压冲击和能量损失。但是，闭式系统与开式系统比较，由于工作完的油液不回油箱，油液的散热和过滤的条件较开式系统差。为了补偿系统中的泄漏，通常需要一个较小容量的补油泵进行补油和一个液控换向阀进行热交换，因此闭式系统其实是一个半闭式系统。

一般情况下，闭式系统中的执行元件采用双作用单活塞杆液压缸时，由于液压缸的大小腔流量不相等，在工作过程中会使功率利用率下降，所以闭式系统中的执行元件一般为液压马达。行走机械的闭式液压系统如图 1-6 所示。

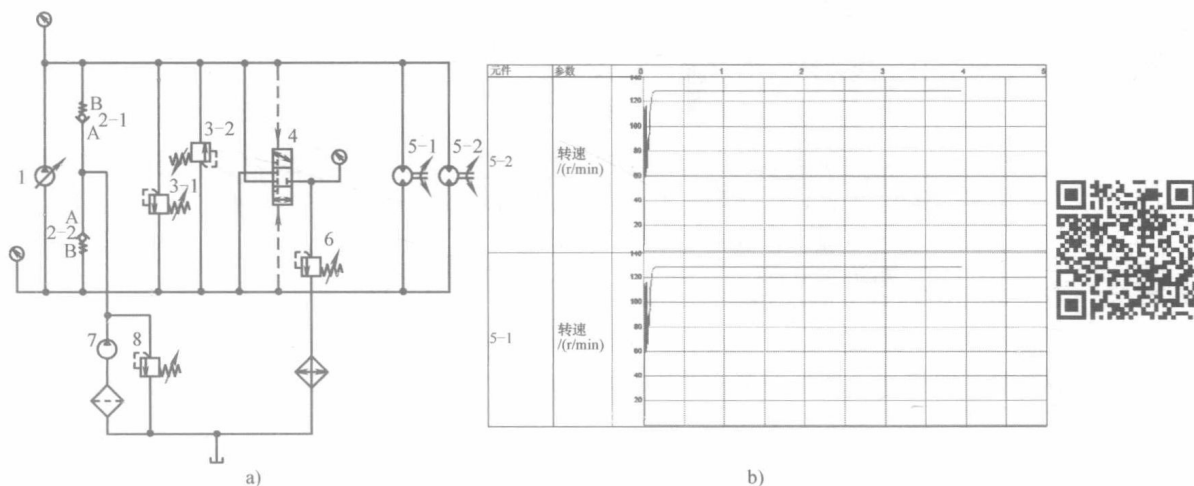


图 1-6 行走机械的闭式液压系统建模与仿真

a) 回路建模 b) 仿真曲线

1—变量泵 2—低压单向阀 3—安全阀 4—热交换阀 5—液压行走马达  
6—低压溢流阀 7—补油泵 8—补油溢流阀

(2) 闭式系统建模与仿真 按行走机械的闭式液压系统所使用的液压元件，在 FluidSIM 中进行建模，如图 1-6a 所示，进行必要的设置后，运行仿真，仿真结果如图 1-6b 所示。从图示可以直观地看出：

- 1) 闭式系统液流是由变量泵出口进入马达的入口，由马达出口到变量泵的入口。
- 2) 补油单向阀的作用，补油只能补入变量泵的低压侧。
- 3) 高压位推动热交换阀，使低压侧的热油流入低压溢流阀、冷却器再回到油箱。
- 4) 两侧的高压安全阀起到过载保护作用。

## 1.5 液压传动的控制方式

所谓液压传动的“控制方式”有两种不同的含义：一种是指对传动部分的操纵调节方式；另一种是指控制部分本身的结构组成形式。

液压传动的操作调节方式可以概括成手动式、半自动或全自动式三种。凡需由人拨动或按下按钮才能使系统实现其动作或状态的，便是手动式的控制，图 1-2 所示的系统就属于手动式控