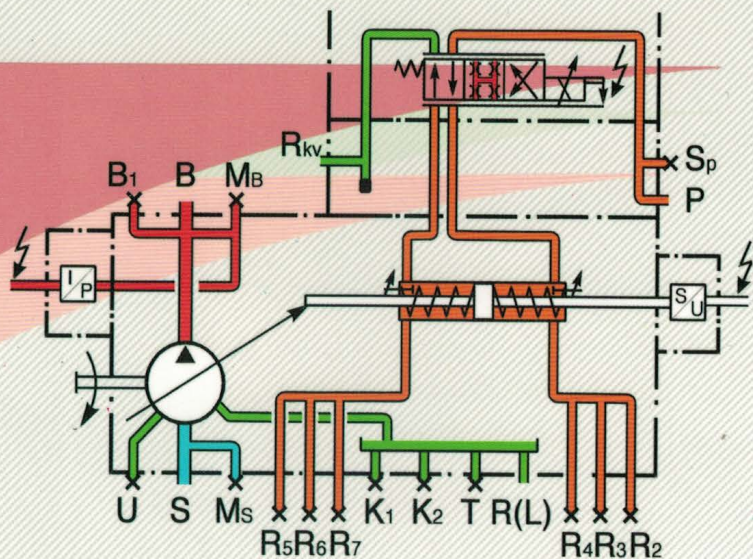




21世纪液压气动元件经典图书系列

液压变量泵(马达) 变量调节原理与应用

机械工程学会流体传动与控制分会 组编
吴晓明 高殿荣 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪液压气动元件经典图书系列

液压变量泵(马达) 变量调节原理与应用

机械工程学会流体传动与控制分会 组编

吴晓明 高殿荣 编著



机械工业出版社

本书侧重从工程应用出发,介绍了液压变量泵(马达)变量机构的调节原理、性能和功能特点,以及采用变量泵(马达)液压系统的节能分析、故障排除和实际应用。主要内容包括:容积式调节液压变量泵(马达)的基本工作原理、分类和特点,液压变量泵(马达)的主要性能指标,液阻、液压桥路和泵源阀控系统理论;典型液压变量泵(马达)的变量调节方式与分类方法,液压系统对泵(马达)变量控制的要求;液压变量泵(马达)的变量机构和变量调节原理;液压变量泵的节能应用与发展,液压变量泵(马达)的应用举例;液压变量泵(马达)的选择、安装、调试、故障排除和维修。

本书适合于液压专业的科研设计、制造调试和使用维护部门的工程技术人员、相关现场工作人员、大专院校有关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

液压变量泵(马达)变量调节原理与应用/吴晓明,高殿荣编著.
—北京:机械工业出版社,2012.4(2015.4重印)
(21世纪液压气动元件经典图书系列)
ISBN 978-7-111-37113-7

I. ①液… II. ①吴…②高… III. ①液压泵-变量调节 IV. ①
TH137.51

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第006999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:张秀恩 责任编辑:张秀恩

版式设计:霍永明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015年4月第1版第3次印刷

169mm×239mm·18印张·349千字

3 801—4 600册

标准书号:ISBN 978-7-111-37113-7

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010)88379770

社服务中心:(010)88361066 网络服务

销售一部:(010)68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

液压变量泵及变量马达在变量控制装置的作用下能够根据其工作的需要在一定范围内调整自己的输出特性，这一特点已被广泛地应用在众多的液压设备中。采用变量泵及变量马达系统，具有显著的节能效果，近年来使用得越来越广泛。

变量泵和变量马达经常组成容积调速回路应用于液压系统的开式和闭式回路中。容积调速回路是通过改变回路中液压泵或液压马达的排量来实现调速的。其主要优点是功率损失小（没有溢流损失和节流损失）且其工作压力随负载变化，所以效率高、油的温度低，特别适用于高速、大功率系统。

液压变量泵和变量马达的变量机构有多种多样，其主要可以分为两大类：第一类按操纵型式分为手动、机动、电动、液控和电液比例控制等，属于外加信号控制变量；第二类按调节方式区分，即自动控制泵（马达）基本参数（包括压力、流量、功率等）按一定规律变化，如恒功率、恒压力、恒流量等。变量泵（马达）的变量控制涉及A、B、C三类液压半桥和阀控液压缸反馈控制原理（直接位置反馈，位移-力反馈，流量-位移反馈等机械反馈型式）等方面的知识，因此往往使缺乏这些知识的有关技术人员难以真正理解和掌握，有时甚至看不懂变量泵（马达）的系统原理图。而以往的一些教科书、手册当中专门介绍变量泵（马达）变量原理方面的内容尚不多见，这给读者特别是从事液压专业的广大技术人员带来诸多不便，因此也很难做到正确使用、调试和维护液压变量泵和变量马达。为了适应当今变量泵（马达）技术的发展变化并满足各类读者特别是从事液压技术用户的需要，提高变量泵（马达）的使用维护水平，促进液压技术的普及和提高，在总结多年从事液压技术教学、科研、生产和维护维修的基础上，作者广泛收集了国内外液压变量泵（马达）方面的最新资料，编写了《液压变量泵（马达）变量调节原理与应用》这本书，希望能对有关从事液压技术方面的人员有所帮助。

本书侧重从工程应用角度，介绍了液压变量泵（马达）的发展简况、现状和应用；液压桥路和泵源阀控制系统的理论；变量泵变量马达变量机构的调节原理，性能和功能特点，以及采用变量泵（马达）液压系统的节能分析，故障排除和实际应用。本书可供各行业从事液压专业的科研设计、制造调试和使用维护部门的工程技术人员、现场工作人员学习参考，也可作为大专院校有关专业师生的教学参考资料。

在本书的编写过程中，部分引用了博世力士乐、萨澳、派克、林德、峰利等公司的产品样本资料，在此表示感谢。

本书第1章、第3章和第6章由吴晓明编著；第2章、第4章和第5章由高殿荣编著，全书由吴晓明统稿。由于时间和条件限制，书稿虽几经修改，难免还有疏漏和错误之处，请读者指正。

作者

2011-11-25

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 液压变量泵（马达）的发展简况、现状和应用	1
1.1.1 简述	1
1.1.2 变量泵（马达）的研发历史和发展	3
1.1.3 变量控制技术	8
1.1.4 我国的发展现状和差距	9
1.1.5 发展趋势	10
1.2 容积调节液压变量泵（马达）的基本工作原理、分类和特点	11
1.2.1 容积泵（马达）的工作原理	11
1.2.2 容积泵（马达）变量调节的基本原理与特点	12
1.3 液压变量泵（马达）的主要技术指标	21
1.3.1 液压变量泵的主要性能参数	21
1.3.2 液压变量马达的主要性能参数	24
1.4 典型液压变量泵（马达）的变量调节方式与分类方法	25
1.5 液压系统对泵（马达）变量控制的要求	31
1.6 选择液压变量泵（马达）需要考虑的因素	32
第2章 液阻、液压桥路和泵源阀控系统的理论	36
2.1 液阻的类型	36
2.1.1 两种依赖关系	37
2.1.2 三种边型的液阻的流量方程和阻力函数	37
2.2 液阻的结构形式	39
2.3 液桥的基本功能	41
2.4 基本的液压半桥	41
2.5 半桥的基本类型	42
2.6 半桥构成的基本原则	43
2.7 液压平衡位置调节	44
2.8 流量及速度调节回路	47
2.9 压力及负载调节回路	47
2.10 滑阀式液压放大器	48
2.10.1 滑阀的工作边数	48
2.10.2 通路数	50
2.10.3 凸肩数与阀口形状	50
2.11 阀控系统的工作原理	50

2.12	位移直接反馈型比例排量变量泵的特性分析	51
2.12.1	伺服变量机构特性方程	51
2.12.2	泵的流量方程	53
第3章	液压变量泵（马达）的变量机构和变量调节原理	54
3.1	比例控制排量调节泵	54
3.1.1	直接控制-直接位置反馈式排量调节	54
3.1.2	DG型2点式直接排量控制	57
3.1.3	HD型液压排量控制	58
3.1.4	CY泵伺服变量控制	60
3.1.5	EP型电液比例排量控制	61
3.1.6	位移力反馈式排量控制	62
3.2	比例控制压力调节泵	63
3.2.1	基本功能与主要应用	63
3.2.2	限压式变量叶片泵的工作原理	67
3.2.3	DR型恒压变量控制	70
3.2.4	DR.G型远程恒压变量控制	72
3.2.5	POR型压力切断控制	74
3.3	FR型流量控制	74
3.3.1	传统压差控制型流量控制	75
3.3.2	内含流量传感器检测反馈型流量控制	76
3.3.3	电反馈型流量控制	77
3.3.4	DFR (DFR1) 型压力/流量控制	78
3.3.5	DRS型恒压/负载敏感控制	80
3.3.6	DP型同步变量控制	84
3.4	恒功率控制	86
3.4.1	LR型恒功率控制	87
3.4.2	LR3型遥控恒功率控制	88
3.4.3	LR.D型带压力控制的恒功率控制	89
3.4.4	LR.G型带遥控压力控制的恒功率控制	90
3.4.5	LR.M型带行程限制器的恒功率控制	91
3.4.6	LR.Z型液压两点恒功率控制	92
3.4.7	LR.Y型具有内部先导压力的电气2点恒功率控制	92
3.4.8	LRH1型带液压行程限制器的恒功率控制	93
3.4.9	LRF型恒流量控制+恒功率控制	95
3.4.10	LRGF型恒流量+恒功率+远程调压控制	96
3.4.11	LR.S型带负载敏感阀和遥控压力控制的恒功率控制	98
3.4.12	LRN型功率控制+液压行程控制	99
3.4.13	LR2GN型复合控制（几种控制结合例）	101

3.5 压力、流量、功率 (p 、 q 、 P) 复合控制	101
3.5.1 传统型压力流量复合控制	102
3.5.2 电反馈多功能复合比例控制	103
3.5.3 LR2DF 型压力 + 流量 + 功率复合控制	109
3.5.4 压力流量功率复合控制变量泵的压力切断和正负流量控制	111
3.6 用于闭式回路的液压变量泵的变量控制方式	113
3.6.1 MA 型人工控制	113
3.6.2 EM 型电动机排量控制	113
3.6.3 HD 型与先导控制压力相关的液压控制	114
3.6.4 HW 型液压控制、手动伺服	115
3.6.5 HM1/2/3 型液压排量控制	116
3.6.6 与转速有关的 DA 型液压控制 (速度敏感控制)	116
3.6.7 DG 型液压直接控制	120
3.6.8 EP 型带比例电磁铁的电气控制	120
3.6.9 EZ 型带开关电磁铁的电气两点控制	121
3.6.10 E01/2 型比例液压控制	121
3.6.11 HS 型液压排量控制	121
3.6.12 DS1 型速度控制 (二级受控)	122
3.7 液压变量马达变量调节	124
3.7.1 HD 型液压控制	124
3.7.2 HD1D 型液压控制 + 恒压变量控制	126
3.7.3 HS 型液压两点变量控制	127
3.7.4 HA 型高压自动变量控制	127
3.7.5 ES 型电动双速两点变量控制	128
3.7.6 EP 型电液比例变量	129
3.7.7 DA 型转速液压控制	131
3.7.8 MO 型转矩变量控制	132
第 4 章 液压变量泵的节能应用与发展	134
4.1 泵控系统和节流阀控系统的节能对比	134
4.1.1 泵控系统	134
4.1.2 阀控系统	135
4.2 A10VSO 变量泵节能技术	137
4.2.1 A10VSO 变量泵概述	137
4.2.2 A10VSO 变量泵节能原理及应用	137
4.2.3 A10VSO 变量泵节能技术应用	141
4.3 变量泵系统的节能特性	141
4.3.1 负载传感变量泵	141
4.3.2 比例变量泵	144

4.4	恒压变量泵的节能分析	146
4.4.1	定量泵 + 二通节流阀	146
4.4.2	定量泵 + 蓄能器 + 二通调速阀	147
4.4.3	恒压变量泵 + 二通节流阀	147
4.4.4	电液比例控制组合变量泵的节能原理	148
4.5	工程机械闭式静压传动技术节能原理	150
4.5.1	节流调速回路能耗分析	151
4.5.2	负载敏感变量泵节能原理	152
4.5.3	负载敏感变量泵在工程机械上的应用	153
4.6	电液比例压力阀控制变量泵系统的节能分析	154
4.6.1	电液比例压力阀控制系统的功率特性分析	155
4.6.2	并联双液阻控制系统的分析及节能	157
4.7	挖掘机发动机-变量泵系统最佳经济匹配	158
4.7.1	挖掘机功率匹配原则与节能原理	159
4.7.2	液压挖掘机泵控系统节能分析	159
第5章 液压变量泵、马达的应用举例		163
5.1	钢包液压升降系统比例变量泵的调速控制	163
5.1.1	RH 液压系统的设备用途	163
5.1.2	主要设备组成及其功能描述	163
5.2	带 DA 控制 A4VG 变量泵在工程机械上的应用	165
5.3	比例液压变量泵系统在注塑机上的应用	167
5.4	负载敏感泵与比例多路阀在大型养路机械上的应用	170
5.5	钢坯修磨砂轮转速电液比例变量泵（马达）调节系统	174
5.5.1	液压无级调速系统的构成及调节原理	174
5.5.2	转速调节系统静特性	175
5.6	LUDV 负载传感系统在液压挖掘机上的应用	175
5.6.1	负载传感控制系统	176
5.6.2	LUDV 系统的工作原理及其与普通负载传感控制系统的区别	178
5.6.3	LUDV 液压系统的应用	179
5.7	电液伺服复合控制变量泵的应用	180
5.7.1	基本原理及特性	180
5.7.2	系统应用实例	182
第6章 液压变量泵（马达）的选择、安装、调试、故障排除和维修		183
6.1	液压变量泵（马达）的选择	183
6.1.1	功率范围的计算	183
6.1.2	液压变量泵的选择	187
6.1.3	液压马达的选择	193
6.1.4	最终驱动速比的选择	197

6.1.5	液压马达的制动和超速计算	199
6.2	液压变量泵（马达）正确安装	204
6.2.1	液压变量泵（马达）安装前的准备	204
6.2.2	液压变量泵（马达）的正确搬运	204
6.2.3	液压变量泵（马达）的安装	205
6.2.4	过滤器的安装	210
6.2.5	配管的安装要求	210
6.2.6	电控制器的连接	212
6.2.7	检查和维护	212
6.3	变量泵的调节方法	213
6.3.1	恒压变量泵的调节方法	213
6.3.2	负载敏感变量泵的调整方法	214
6.3.3	DFS 型负载敏感变量泵の設定	215
6.3.4	压力补偿变量泵の設定	216
6.3.5	DFR/DFR1 型压力/流量控制泵变量调节方法	217
6.4	液压变量泵（马达）的起动和试运行	219
6.4.1	保证液压油的清洁度	219
6.4.2	液压变量泵（马达）的注油和排气	219
6.4.3	检查发动机的旋转方向	219
6.4.4	测试液压油的供给	220
6.4.5	进行功能测试	220
6.4.6	进行循环冲洗	220
6.4.7	液压变量泵的起动	220
6.4.8	液压变量泵的试运转	221
6.5	斜盘式轴向柱塞变量泵的常见故障与处理方法	222
6.5.1	系统噪声或振动异常的原因和处理方法	222
6.5.2	工作元件响应迟缓的原因和处理方法	223
6.5.3	系统温度过高的原因和处理方法	223
6.5.4	输出流量过低的原因和处理方法	224
6.5.5	压力流量不稳定的原因和处理方法	224
6.5.6	系统压力不能达到恒压阀设定值的原因和处理方法	225
6.5.7	高吸油真空度故障及处理方法	226
6.6	液压变量泵（马达）的正确拆装	226
6.6.1	对维修人员的要求	226
6.6.2	拆装液压变量泵（马达）的安全规定	226
6.6.3	拆装注意事项	227
6.6.4	检修技术要求	228
6.6.5	变量泵的修理	229
6.6.6	SAUER20 系列液压泵维修程序图解	230

6.7 斜盘式轴向柱塞变量泵（马达）合理使用	253
6.7.1 一般规定	253
6.7.2 变量泵工作压力的选定	253
6.7.3 变量泵流量的选定	254
6.7.4 正确管路连接	254
6.7.5 变量泵（马达）的合理使用	255
6.7.6 液压马达使用注意事项	256
6.7.7 合理维护	256
6.7.8 捕捉故障信号并及时采取措施	257
6.7.9 对使用恒压变量泵的几点建议	257
6.8 DFR1 型变量泵的实用控制回路	259
6.8.1 节流阀控制回路	259
6.8.2 比例阀控制回路	259
6.8.3 车辆用多路阀控制回路	259
6.8.4 固定节流器控制回路	260
6.9 闭式静液压传动系统及其现场调试	261
6.9.1 概述	261
6.9.2 闭式静压传动所采用的液压泵和液压马达	263
6.9.3 闭式液压系统的高速和低速传动方案	264
6.9.4 闭式液压系统的调节	264
6.9.5 闭式系统使用注意事项和运行参数整定	265
6.9.6 液压泵（马达）现场安装调试方法	266
6.9.7 常见进口品牌液压泵（马达）的压力参数	268
6.9.8 液压系统的维护保养	271
参考文献	275

第 1 章 概 述

1.1 液压变量泵（马达）的发展简况、现状和应用

1.1.1 简述

液压变量泵及变量马达能在变量控制装置的作用下能够根据工作的需要在一定范围内调整输出特性，这一特点已被广泛地应用在众多的液压设备中，如：恒流控制、恒压控制、恒速控制、恒转矩控制、恒功率控制、功率匹配控制等。采用变量泵（马达）系统，具有显著的节能效果，近年来使用越来越广泛，而且新的结构和控制方式发展迅速，各个生产厂也在不断改进设计，用以满足液压系统自动控制的不断发展需要。

使用液压系统的目的在于可使某一执行对象以预定的速度向正反两个方向运动。此时，为调节速度需进行节流，致使能量有所损失，并导致系统效率降低，为此需采用变量泵实现容积控制。使用变量泵进行位置和速度控制时，能量损耗最小。正确地使用和调节泵的流量，可使其只排出满足负载运动速度需要的流量，而使用定量泵时只有部分流量供给负载，其余的流量需要旁通至油箱。

此外，为了在不增加管路阻力的条件下提高液压马达的速度，也有必要为减少液压马达的排量而采用变量马达。

液压泵若以 Williams 与 Janney 在 1905 年首次应用液压油为工作介质并推出轴向柱塞泵为开端，至今已有 100 多年的历史，在这百年之中，液压泵的三种主要型式，即齿轮泵、叶片泵、柱塞泵（摆线类液压泵可以归属到齿轮泵类型）几乎没有突破性的变化。这三种型式的泵仍以其各自的性能特点占据了不同的应用领域，这点从近期看依然如此。这三大类泵的主要应用现状见表 1-1。

表 1-1 三大类泵的主要应用现状

类 别	类 型	应用优势	应用弱点	主要应用领域
齿轮泵	外啮合式	使用压力在 21MPa 以下，价格低，体积小，污染敏感度相对较低，允许转速最高	效率最低，不能变量，噪声较大，最大变量比其他两种形式小	农业机械 工程机械
	内啮合式 (模块式、摆线式)	自吸性好，噪声低，流量振动小，摆线式在液压马达方面优势更强	价格高于外啮合，性能在主要方面改善不突出，生产厂商少，可选择性差	

				(续)	
类别	类型	应用优势	应用弱点	主要应用领域	
叶片泵	双作用式	噪声低，价格明显低于柱塞泵，泵芯插装式使维修简捷，连接口可选择或调整，应用压力在28MPa以下，可与柱塞泵竞争，联轴器连接容易，使用寿命长	不能变量，最低转速有限制（不允许低于600r/min），价格中等	塑料机械 机床 锻压机械	
	单作用式	变量泵中价格最低，只要压力符合应优选，但一般只用于恒压变量	使用压力很低，一般在10MPa左右，最高使用压力才18MPa，目前采用渐少，几乎被淘汰		
柱塞泵	轴向式	斜盘式	使用压力超过31.5MPa，变量形式丰富，能实现变量的智能化与网络化，通轴型式便于与回路组合，在结构上可与任何其他型式组合，易获大流量高转速，外形尺寸小，便于布置（功率质量比大），总效率高	价格贵，自吸性差，对污染敏感，维护维修要求高	工程机械 运输机械 冶金机械
		斜轴式	使用压力是所有泵中最高的，排量大，转速高，这三项性能均优于其他类型泵，可用于闭式回路	不能通轴，外形尺寸大，回路组合与安装布置不便，维修拆卸要求较高	
	径向式	使用压力可超过斜轴泵，可通径，寿命最长，变量型式与轴式相当，在液压马达方面优势明显	外径偏大，允许转速偏低，在某种情况下不便安装布置		

图1-1对这三大类泵是否能够进行变量调节做了进一步的说明。其中可以看到，齿轮泵由于结构上的原因，没有变量调节机构。叶片泵也只有单作用式的存在有变量类型（其实双作用叶片泵也有变量形式，只是用得很少，在此不再讨论）。当前采用变量调节机构的泵的种类，仍然首推柱塞式变量泵，包括径向柱塞式和轴向柱塞式。从结构形式上看，采用变量控制的液压马达也多采用柱塞式。

液压马达按其结构类型来分也可分为齿轮式、叶片式、柱塞式和其他型式。按其额定转速分为高速和低速两大类，额定转速高于500r/min的属于高速液压马达，额定转速低于500r/min的属于低速液压马达。

高速液压马达的基本型式有齿轮式、螺杆式、叶片式和轴向柱塞式等。它们的主要特点是转速较高、转动惯量小，便于起动和制动，调速和换向的灵敏

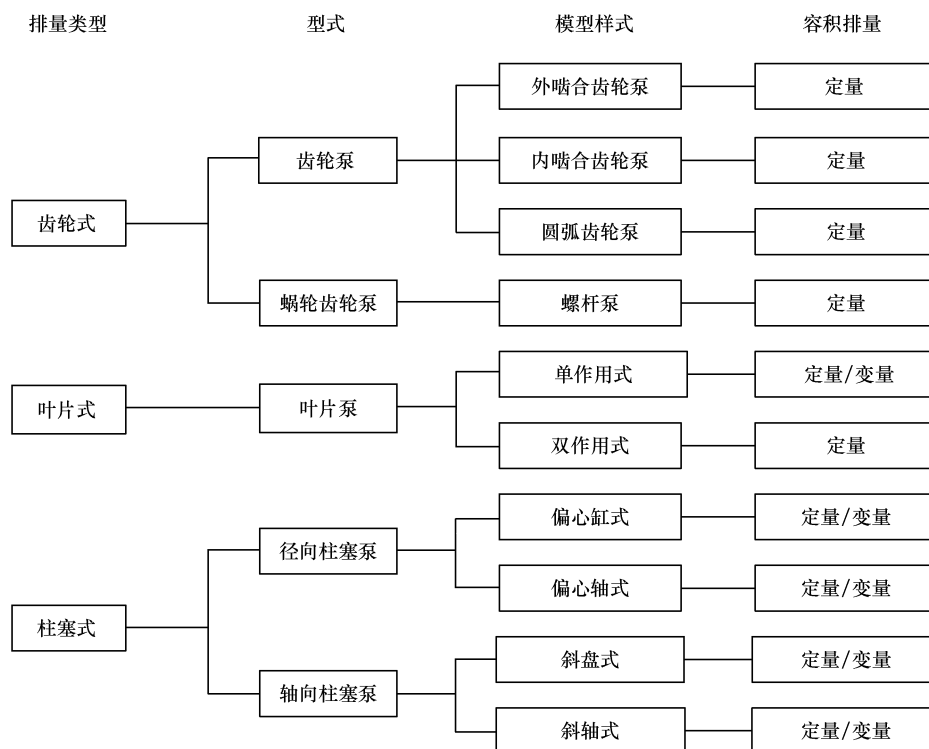


图 1-1 三大类泵的变量调节

度高。通常高速液压马达的输出转矩不大（仅几十 $N \cdot m$ 到几百 $N \cdot m$ ），所以又称为高速小转矩液压马达。

低速液压马达的基本型式是径向柱塞式，例如单作用曲轴连杆式、液压平衡式和多作用内曲线式等。此外在轴向柱塞式、叶片式和齿轮式中也有低速的结构型式。

低速液压马达的主要特点是排量大、体积大、转速低（有时可达每分钟几转甚至零点几转），因此可直接与工作机构连接，不需要减速装置，使传动机构大为简化。通常低速液压马达输出转矩较大（可达几千 $N \cdot m$ 到几万 $N \cdot m$ ），所以又称为低速大转矩液压马达。变量马达以叶片式和柱塞式两种结构类型最多。

1.1.2 变量泵（马达）的研发历史和发展

下面仅讨论具有变量调节功能的叶片泵和柱塞泵（马达）的历史和发展。

1.1.2.1 变量叶片泵（马达）的发展历史

1925 年维克斯（F. Vickers）发明了压力平衡式叶片泵（压力 7.0MPa、排量

7~200mL/r、转速 600~1800r/min)，首先应用于机床液压传动，为近代液压元件工业或液压传动的逐步发展奠定了基础。20 世纪 30 年代，发明了限压式变量叶片泵，其可利用液压泵排油压力的反馈作用来实现液压系统的自动调速，这是机械技术发展的一次重大飞跃。之后，Vickers 又开发了方型叶片泵（压力 10.5MPa）。20 世纪 70 至 80 年代，美国、德国、日本等相继研制成功了弹簧叶片泵、双叶片泵、母子叶片泵、圆弧头叶片泵、柱销叶片泵和定比减压阀叶片泵等各类中高压叶片泵（压力 16.0~21.0MPa）；20 世纪末，以 Denison 公司为首的柱销式高压叶片泵（压力 24.0~32.0MPa、排量 5.8~268mL/r、转速 600~3600r/min）进入全球液压产品市场，并受到液压界的关注。

目前工业上叶片泵用得最多的类型是圆弧头叶片式、母子叶片式和柱销式等高压叶片泵。柱销式结构的高压叶片泵是利用柱销的顶力去卸荷叶片作用于定子内曲面的顶力，故其叶片的顶力可被卸载至 1/24~1/15，它是一种性能稳定、运行可靠与使用寿命长的高压叶片泵。

根据密封工作容积在转子旋转一周吸、排油次数的不同，叶片泵分为两类，即完成一次吸、排油的单作用叶片泵和完成两次吸、排油的双作用叶片泵。根据叶片泵输出流量是否可调，又可分为定量叶片泵和变量叶片泵，双作用叶片泵均为定量泵。根据叶片变量泵的工作特性不同可分为限压式、恒压式和恒流量式三类，其中限压式应用较多。

恒压式变量泵一般系单作用泵。该泵的定子可以沿一定方向作平衡运动，以改变定子与转子之间的偏心距，即改变泵的流量。它的变量机能由泵内的压力反馈伺服装置控制，能自动适应负载流量的需要并维持恒定的工作压力。在工作中，还可根据要求调节其恒定压力值。因此，在使用该泵的系统，实际工况相当于定量泵加溢流阀，且没有多余的油液从系统中流过，使能耗和温升都大大降低，缩小了泵站的体积。该泵如与比例电磁阀匹配，可以在系统中实现多工作点自动控制。

限压式变量叶片泵有内反馈式和外反馈式两种。内反馈式变量泵的操纵力来自泵本身的排油压力，外反馈式是借助于外部的反馈柱塞实现反馈的。

限压式变量叶片泵具有压力调整装置和流量调整装置。泵的输出流量可根据负载变化自动调节，当系统压力高于泵调定的压力时流量会减少，使功率损失降为最低，其输出功率与负载工作速度和负载大小相适应，具有高效、节能、安全可靠等特点，特别适用于作容积调速液压系统中的动力源。先导式带压力补偿的变量叶片泵允许根据系统要求自动调节其流量，可在满足工作要求的同时降低能耗。压力补偿的工作原理是：在先导压力作用下，被控柱塞移动，从而使泵的定子在某位置平衡。当输出压力与先导压力相等时，定子向中心移动，并使输出流量满足工作要求。在输出流量为零的情况下，泵的输出为补偿

泄漏和提供先导压力油，而系统压力保持不变。补偿器的响应时间非常短，不会产生压力超调。

目前变量叶片泵的最高压力仅 16MPa，首推意大利 Atos 公司的 PVL 型柱销式变量叶片泵和德国 Rosch Rexroth 公司的 V4 型双叶片式变量叶片泵与 PV7 型先导式变量叶片泵，但其与轴向变量柱塞泵相比，无论在转速、压力、变量特性和寿命等方面都还有着较大差距。因此，研制新型的压力为 32MPa 的负载敏感型高压变量叶片泵，应是叶片泵制造商的当务之急。

叶片马达和叶片泵一样，也有单作用式和双作用式之分。由于单作用式液压马达的偏心量小，容积效率低，结构复杂，故一般所用的液压马达都是双作用式的。因此，变量叶片马达很少在工业上使用。

1.1.2.2 轴向柱塞泵（马达）的发展历史

轴向柱塞泵（马达）是现代液压传动中使用最广的液压元件之一。由于其可以很方便地实现变量，使液压系统容易实现功率调节和无级变速，因此被广泛地应用于各种液压系统中。

轴向柱塞泵（马达）的雏形可以追溯到 16 世纪初，Ramelli 开发了用于从矿井里往外汲水的皮革密封的轴向柱塞泵，从结构上看，它和现在的柱塞泵已经十分相似。直到 1905 年，美国 Harvey William 教授和 Reynold Janny 工程师设计了端面配流的斜盘泵（马达）的静液传动装置，用在军舰炮塔转向的液压系统中，后来人们称此结构的泵为 Janny 泵，而且他们首次把矿物油引入传动介质，为现代液压技术的发展拉开了序幕。

1907 年，美国人 Renault 改进了 Janny 泵柱塞传动机械，有效地提高了其运行效率。

斜轴式柱塞泵发展较晚，1930 年，瑞士 Hans Thomas 教授设计了第一台斜轴泵，后人常把斜轴泵称为 Thomas 泵，其缸体中心线与传动轴中心线成一夹角，使缸体对配流盘的倾复力矩减小，因此允许的倾角较大。

20 世纪 50 年代中期，美国 Denison 公司和英国 Lucas 公司摆脱 Janny 泵的传统，设计了轴承支承缸体的斜盘泵。这种泵传动轴只传递转矩，不传递弯矩，保障了配流副的良好接触，加上制造水平的提高，使其工作压力提高到 35MPa，转速也大幅提高，引起斜盘泵历史上的一次飞跃。

20 世纪 60 年代中期，由于对液压系统集成化的要求，特别是在行走车辆闭式回路的应用，通轴泵获得了新的发展。由于主轴尾端可以安装辅助泵或其他作用的泵，使通轴泵具有集成多种元件的复合功能，大大简化了液压系统，这是斜盘泵（马达）发展的另一次飞跃。

20 世纪 70 年代以后，欧美很多轴向柱塞泵（马达）的制造商逐渐崛起，针对不同领域做了很多技术革新，比如 Vickers 公司针对注塑机节能的要求推出

PVB 轻型泵；泵（马达）和电子技术的结合也越来越紧密，出现了多种多样的控制方式。

1966 年，我国综合了国外斜盘式柱塞泵的特点后，设计出了 CY14-1 型轴向柱塞泵（马达）。经过 30 多年的实践，对 CY14-1 型泵（马达）相继做过四次大的改进，前两次以标准化和缩小体积为主，改进为 CY14-1A 型；第三次针对配油盘烧损和斜盘磨损以及工艺问题，形成了 CY14-1B 型泵（马达）；第四次针对 CY14-1B 型噪声高、转速低、易松靴脱靴、可靠性差、自吸能力差、规格不全和无通轴泵等缺陷，开发了 Q** CY14-1Bk 系列开式低噪声泵和 QT** CY14 -1Bk 系列通轴泵。

进入 20 世纪 90 年代后，德国 Bosch Rexroth 公司开发出了 A4V 泵。柱塞与传动轴成一交角，工作时离心力有助于柱塞的回程，也有利于减小配流盘直径，降低缸体配流面的线速度；采用球面配流，有利于补偿轴向偏载对缸体产生的倾覆力矩，这种类型的泵已经广泛应用于现代工业领域。目前，作为变量泵和变量马达使用的几乎全部是轴向柱塞泵，它又分为斜轴式与斜盘式两种，现分别叙述如下。

(1) 弯轴或轴向柱塞泵（马达） 这是汉斯·托马（Hans Thoma）1940 年的发明。此后于 1946 年，他又对缸体的同步驱动进行了改进，将万向接头改为连杆方式，将阀板由平面改成球面。最近，博世力士乐（Bosch Rexroth）公司又推出了将连杆与柱塞组成一体的采用锥形柱塞（柱塞杆装在密封部上）的改进型式。该发明自问世以来 60 多年间内不断进行改进，现在已经成为各领域最广泛应用的产品。

目前只有博世力士乐公司生产变量弯轴泵，主要品种有 A7V 系列，排量为 20 ~ 1000mL/r，最高压力为 35MPa，变量角为 18°。该公司还开发了 A7VO 系列泵，该泵为锥形连杆活塞式，排量为 28 ~ 1000mL/r，最高压力为 40MPa。

在 A7V 和 A7VO 基础上，博世力士乐公司还开发了 A6V 和 A6VM 变量马达。此外，林德公司也生产 BMV/R 型变量弯轴马达，但最大排量只有 50.2 ~ 60.3mL/r，额定压力为 42MPa，最高压力为 50MPa，供小型液压设备闭式回路用。目前，北京华德液压集团有限公司、上海液压泵厂、贵阳 501 厂等生产博世力士乐的弯轴泵和马达。弯轴泵和马达的发展趋势如下。

1) 由于结构原因，弯轴泵不能带辅助泵，因此只能作为开式回路用泵；此外，由于弯轴泵的变量机构带动缸体一起摆动，因此变量的响应速度较低。

2) 作为变量泵，由于其制造工艺复杂，成本较高，因此，排量在 250mL/r 以下的变量泵正逐步丧失竞争优势，但大排量泵还非其莫属。

3) 无论定量还是变量马达，特别是弯轴角 40°的锥形连杆活塞结构，由于其具有起动和传递转矩大的独特优点，有较好的发展前途。