



# 液压传动及控制I

## — 调速回路（下）

浙江大学  
流体动力与机电系统国家重点实验室  
2022.12



# 调速回路目录

## □ 节流调速回路

- 定压式节流调速回路
- 变压式节流调速回路
- 工作性能的改进

## □ 容积调速回路

- 泵-缸式容积调速回路
- 泵-马达式容积调速回路

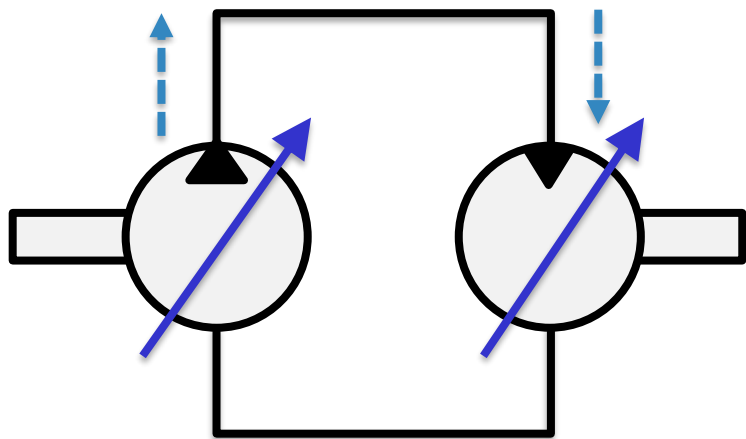
## □ 容积节流调速回路

- 定压式容积节流调速回路
- 变压式容积节流调速回路

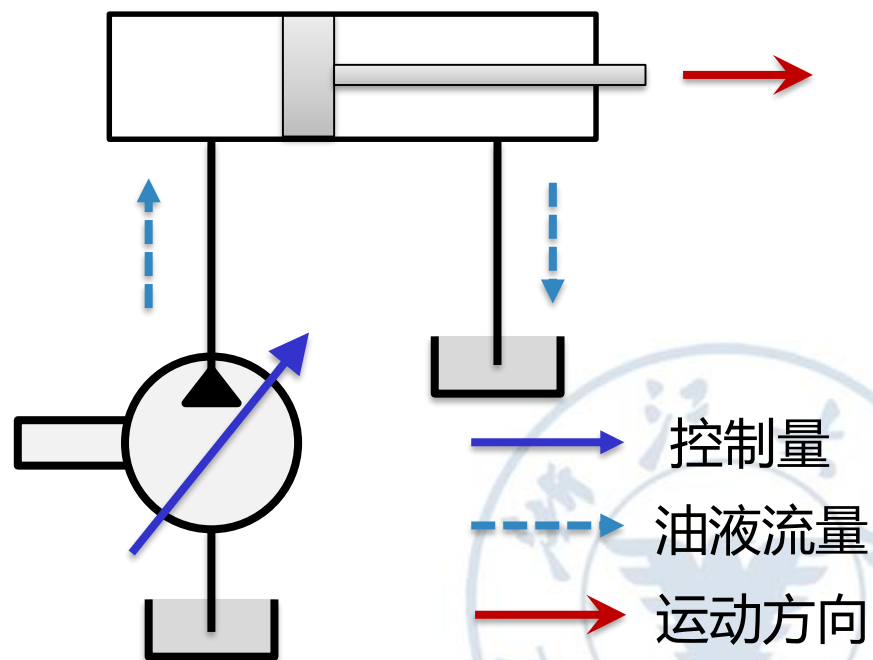


# 容积调速回路

- **工作原理**：通过改变**变量泵或变量马达的排量**来调节执行元件的运动速度
- **特点**：液压泵输出的油液直接进入执行元件，**工作压力随负载变化而变化**，**没有溢流损失和节流损失**，**效率高，发热少**



泵-马达式容积调速回路



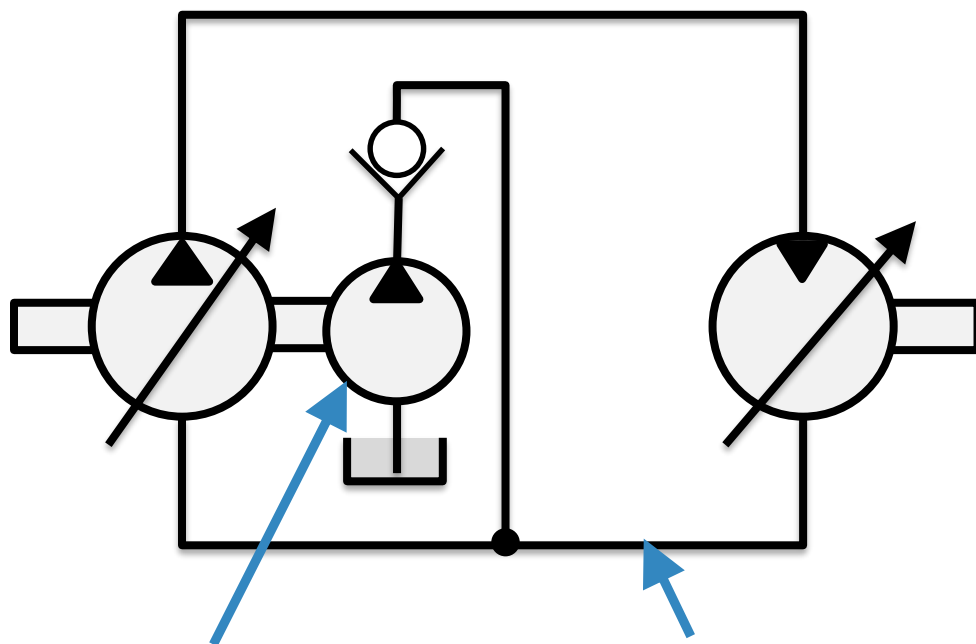
泵-缸式容积调速回路

# 容积调速回路分类

## □ 按油路循环方式

### 闭式回路

结构紧凑、抗污染

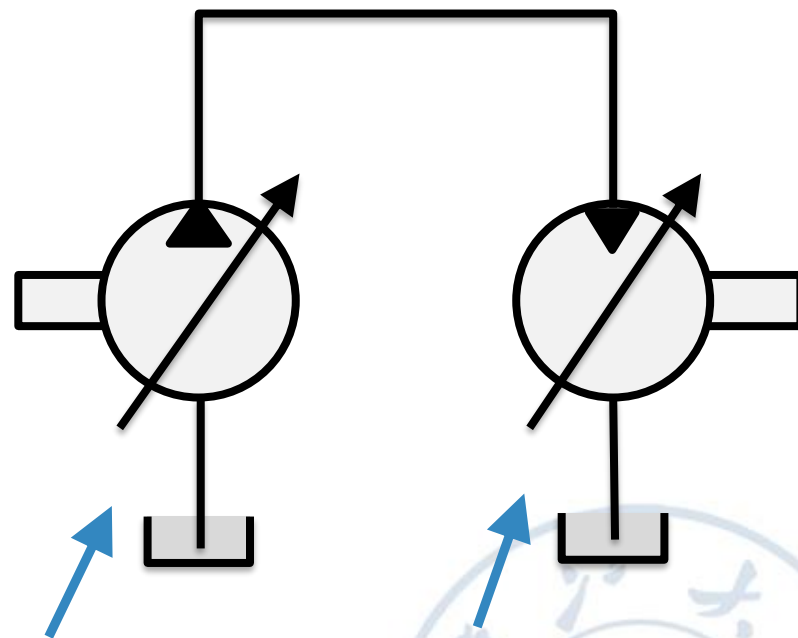


需要增加补油泵  
补偿泄漏

回油直接与泵的  
吸油腔相连

### 开式回路

结构简单、冷却性能好

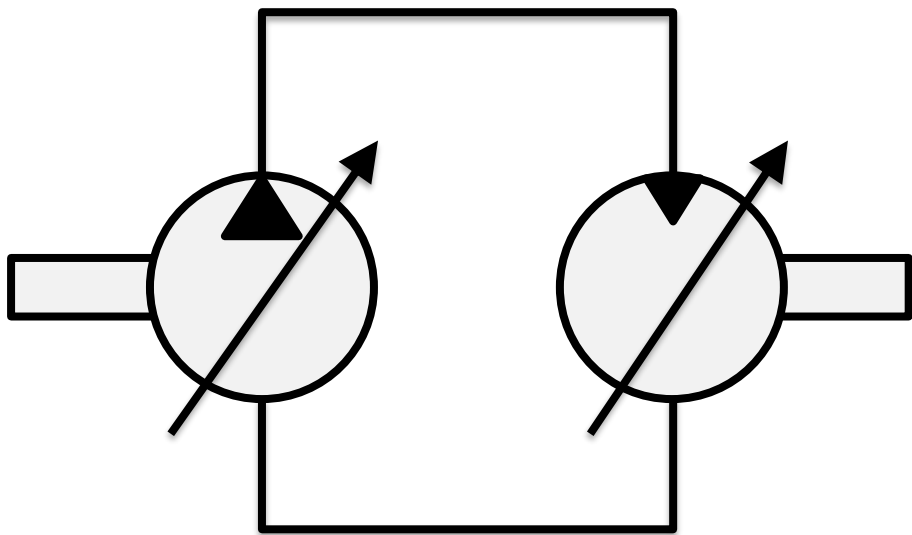


液压泵从油  
箱吸油

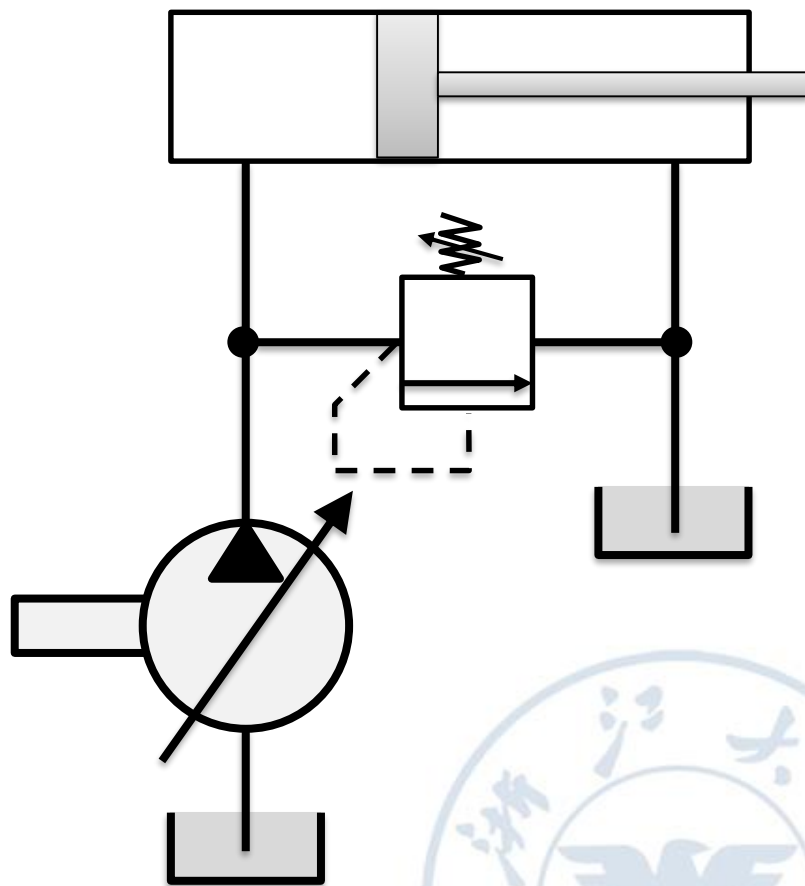
回油直接进  
入油箱

\*补油泵流量一般为主泵流量的10%-15%，压力通常为0.3-1.0MPa

## □ 按执行器类型分



泵-马达式容积调速回路



泵-缸式容积调速回路

# 泵-缸式开式容积调速回路

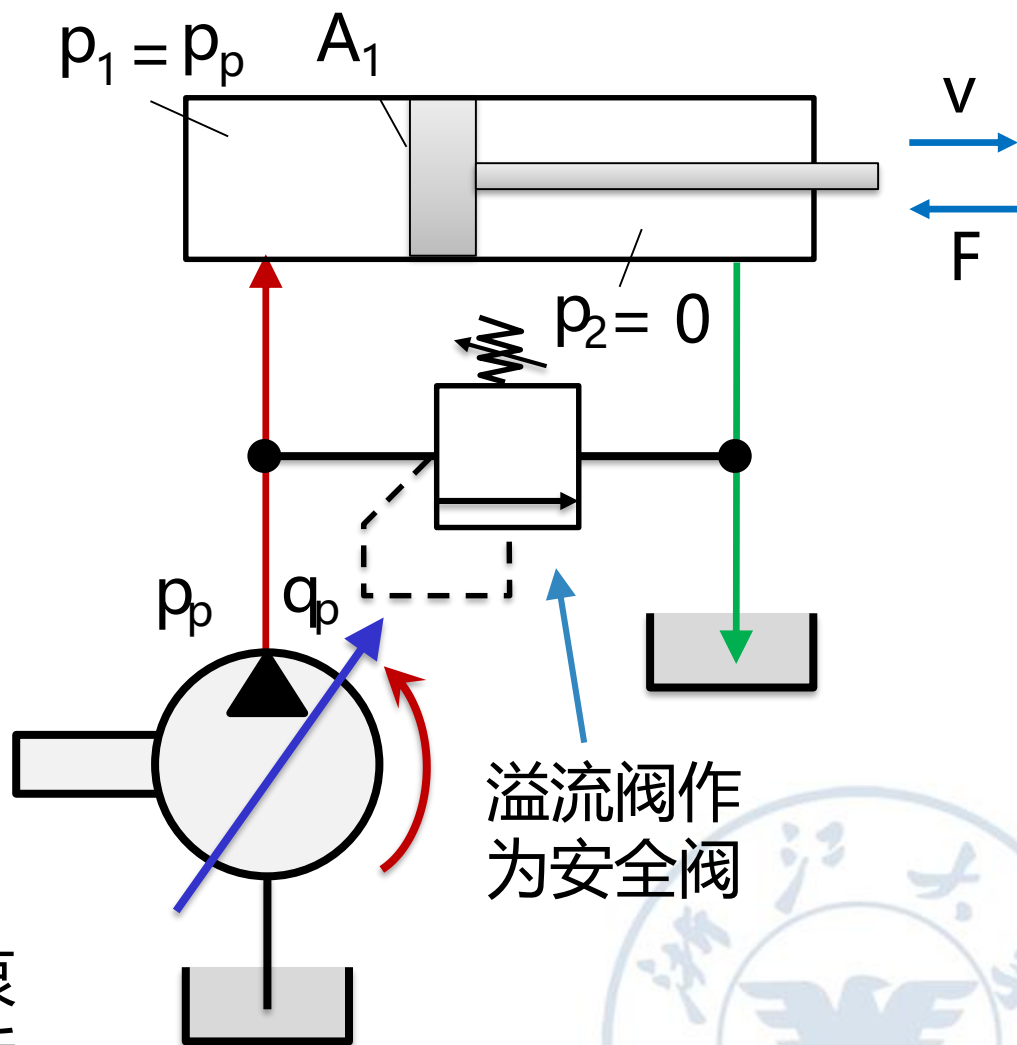
## □ 工作特性

➤ 活塞运动速度：

$$v = \frac{q_p}{A_1} = \frac{q_t - k_1 \frac{F}{A_1}}{A_1}$$

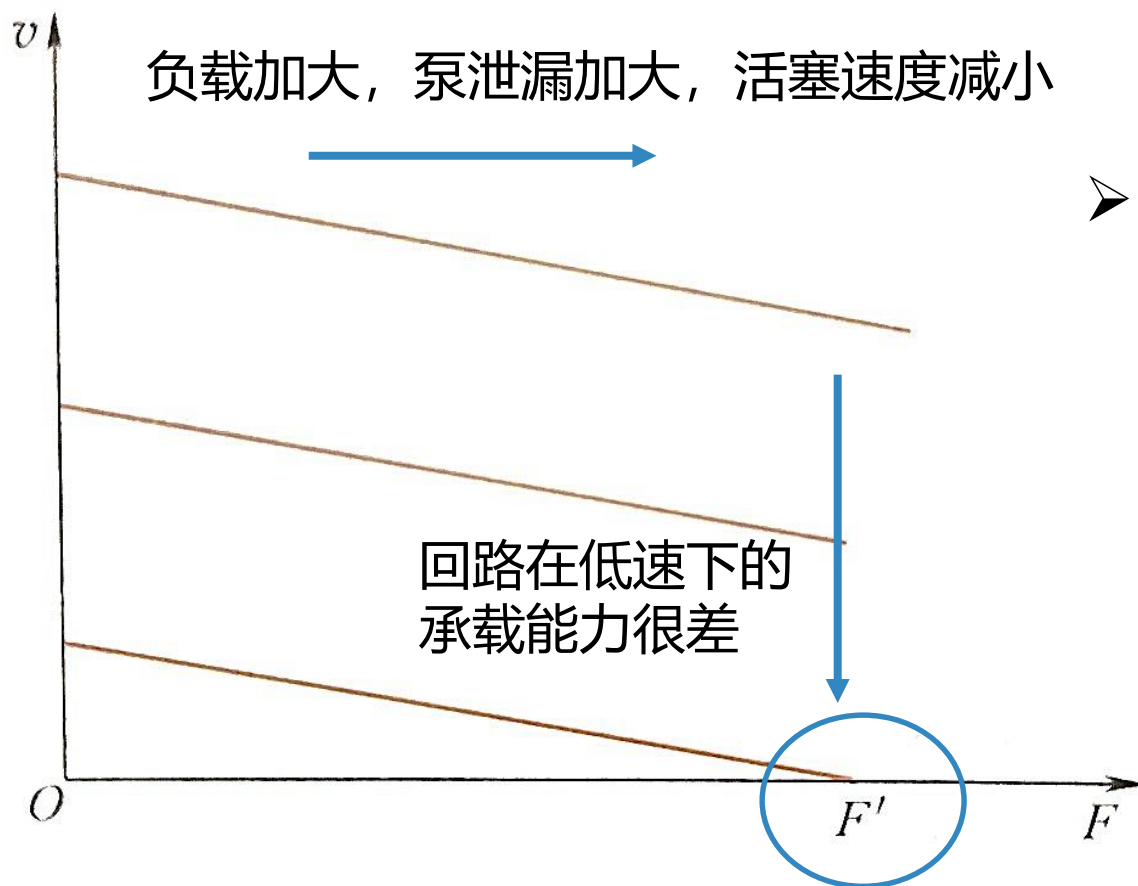
泵泄漏对运动速度影响较大

通过改变变量泵的排量，调节活塞运动速度



泵-缸式开式容积调速回路

□ 泵-缸式开式容积调速回路机械特性曲线为一组平行直线



➤ 活塞运动速度:

$$v = \frac{q_p}{A_1} = \frac{q_t - k_1 \frac{F}{A_1}}{A_1}$$

泵-缸式容积调速回路的机械特性

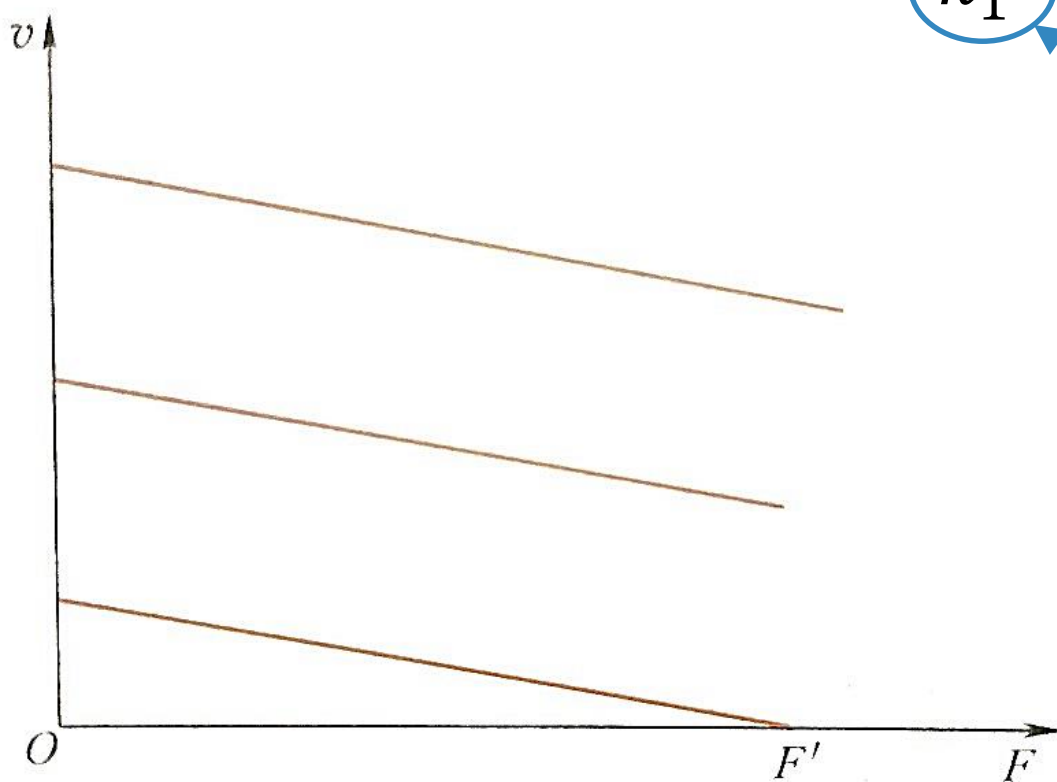
## □ 回路速度刚度

$$F = \frac{A_1}{k_1} q_t - \frac{A_1^2}{k_1} v \rightarrow$$

$$k_v = \frac{A_1^2}{k_1}$$

加大液压缸的有效  
工作面积可增加速  
度刚性

减小泵的泄漏可增  
加速度刚性



泵-缸式容积调速回路的机械特性



## □ 调速特性——回路调速范围

$$R_C = 1 + \frac{R_p - 1}{1 - \frac{k_1 F R_p}{A_1 q_{1max}}}$$

与负载 $F$ 有关

与泵的泄漏系数 $k_1$ 有关

与泵的变量机构调  
节范围 $R_p$ 有关

式中  $R_p$  ——变量泵变量机构的调节范围,  $R_p = q_{tmax}/q_{tmin}$  ;

$q_{tmax}$ 、 $q_{1min}$ ——变量泵最大和最小集合流量;

其他符号意义同前。

## □工作原理



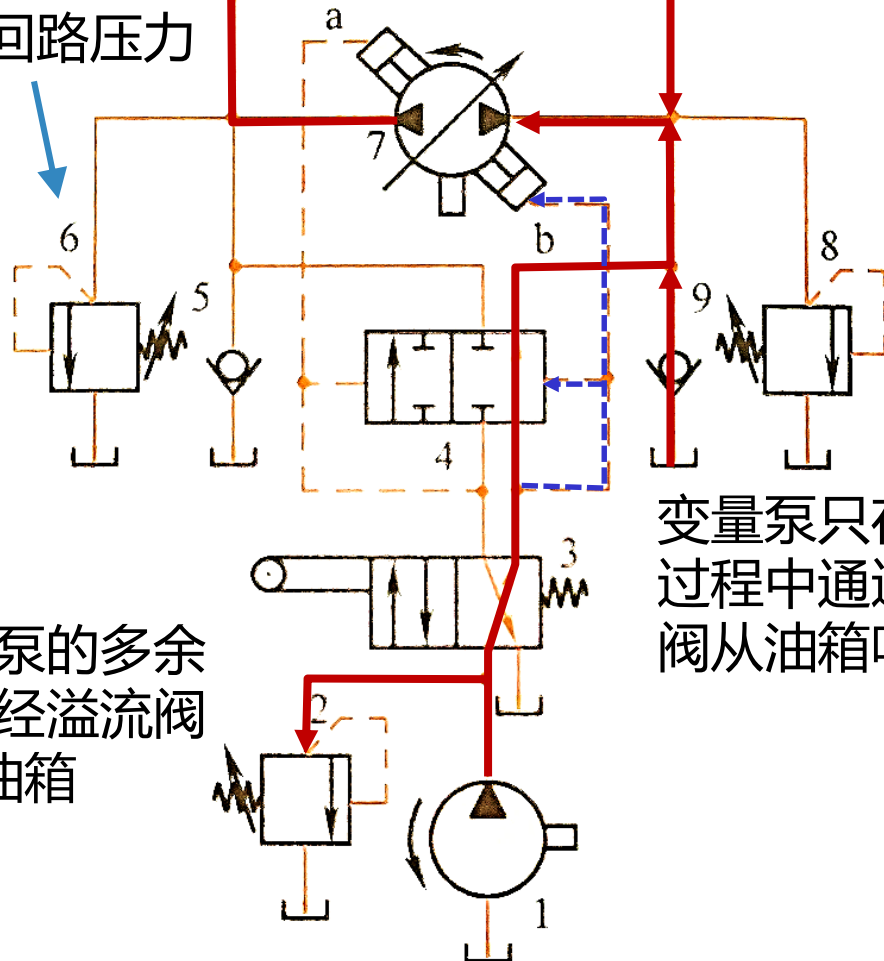
4—液动阀 5、9—单向阀

6、8—安全阀 7—变量泵



1. 换向阀3变换工作位置
2. 辅助泵1改变换向阀4的工作位置，并使变量泵改变输油方向
3. 换向阀4接通，辅助泵接通变量泵吸油路，进行补油

- 工作特性：与开式回路完全相同

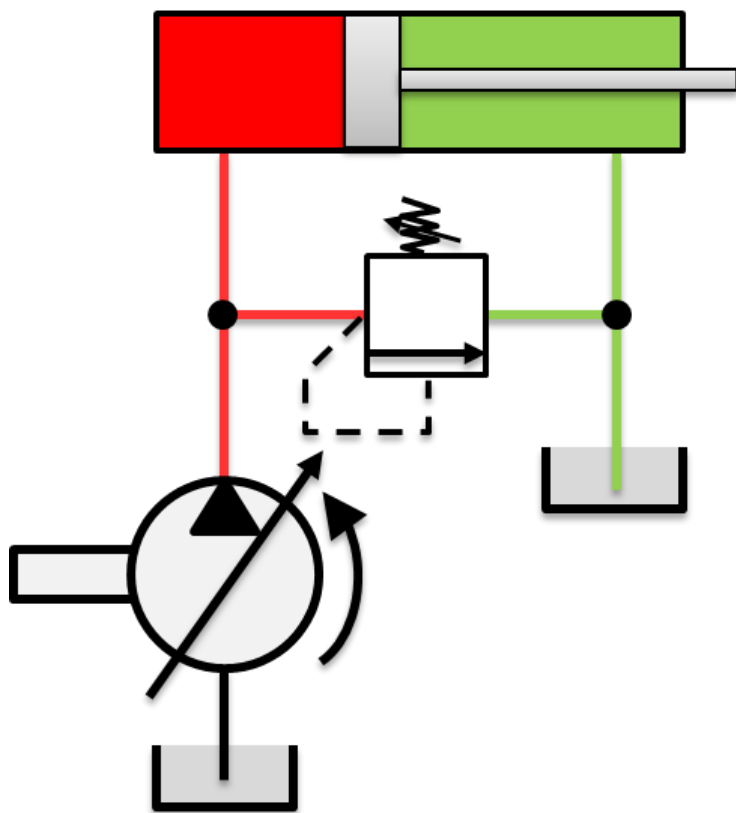


变量泵只在换向过程中通过单向阀从油箱吸油

图 8-15 泵-缸式的闭式容积调速回路

# 总结

- 泵-缸式容积调速回路适用于负载功率大、运动速度大的场合，例如大型机床的主体运动系统或进给运动系统。



泵-缸式开式容积调速回路

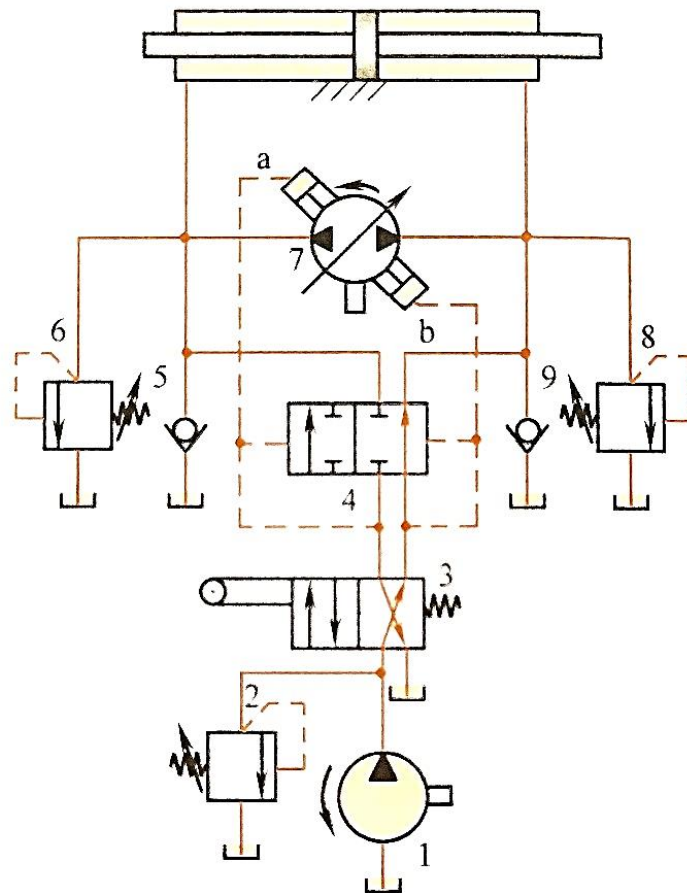
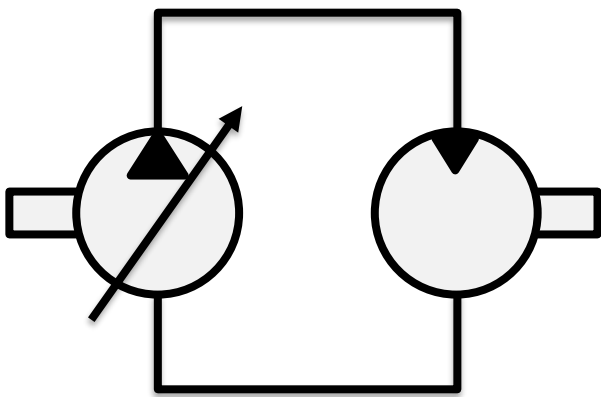


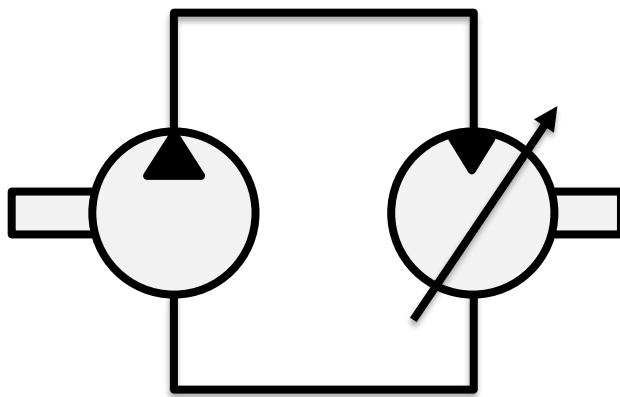
图 8-15 泵-缸式的闭式容积调速回路

# 泵-马达式容积调速回路

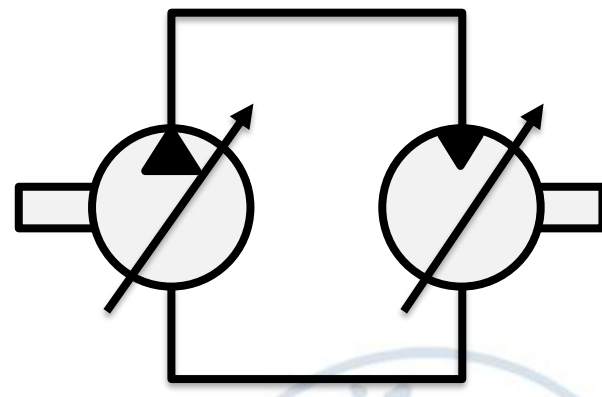
- 组合形式：变量泵和定量马达、定量泵和变量马达、变量泵和变量马达
- 普遍用于**工程机械**、**行走机械**以及**无级调速装置**中。



变量泵-定量马达式



定量泵-变量马达式



变量泵-变量马达式

# 变量泵-定量马达式调速回路

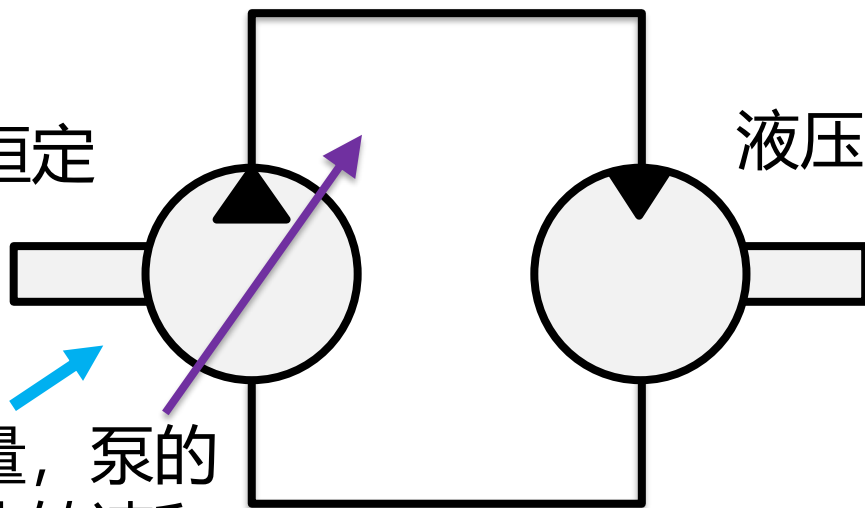
## □ 工作原理

回路的工作压力 $p$ 由负载 $F$ 决定： $p = \frac{T_L}{V_M}$

液压泵转速 $n_p$ 恒定

液压马达排量 $V_M$ 固定

改变液压泵排量，泵的  
输出流量、马达转速和  
输出功率随之变化



变量泵-定量马达式

□ 液压马达的输出转矩 $T_M$ 由负载 $T_L$ 决定，不因调速变化，也称  
恒转矩调速回路

# 变量泵-定量马达式调速回路

## □ 工作特性

➤ 液压马达转速，转矩：

$$n_M = \frac{q_1 - k_1 \Delta p}{V_M} = \frac{V_p n_p - k_1 \Delta p}{V_M}$$

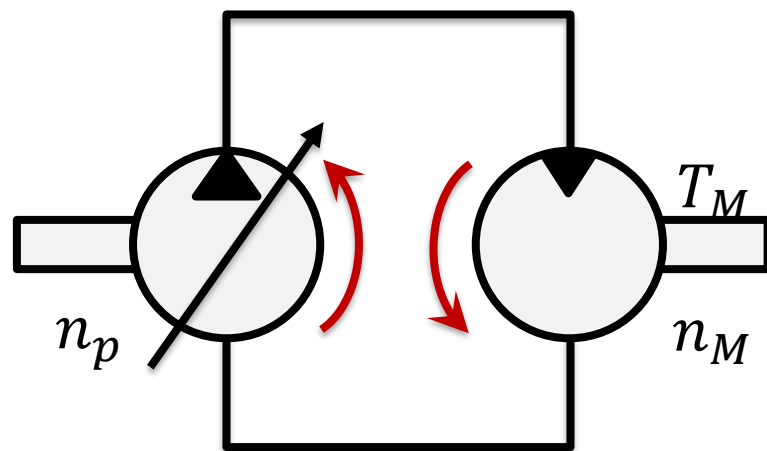
$$T_M = \frac{\Delta p V_m}{2\pi} - k_T n_M$$

式中

$\Delta p$ ——回路的工作压差；

$k_1$ ——回路的总泄漏系数；

$k_T$ ——转矩损失系数。



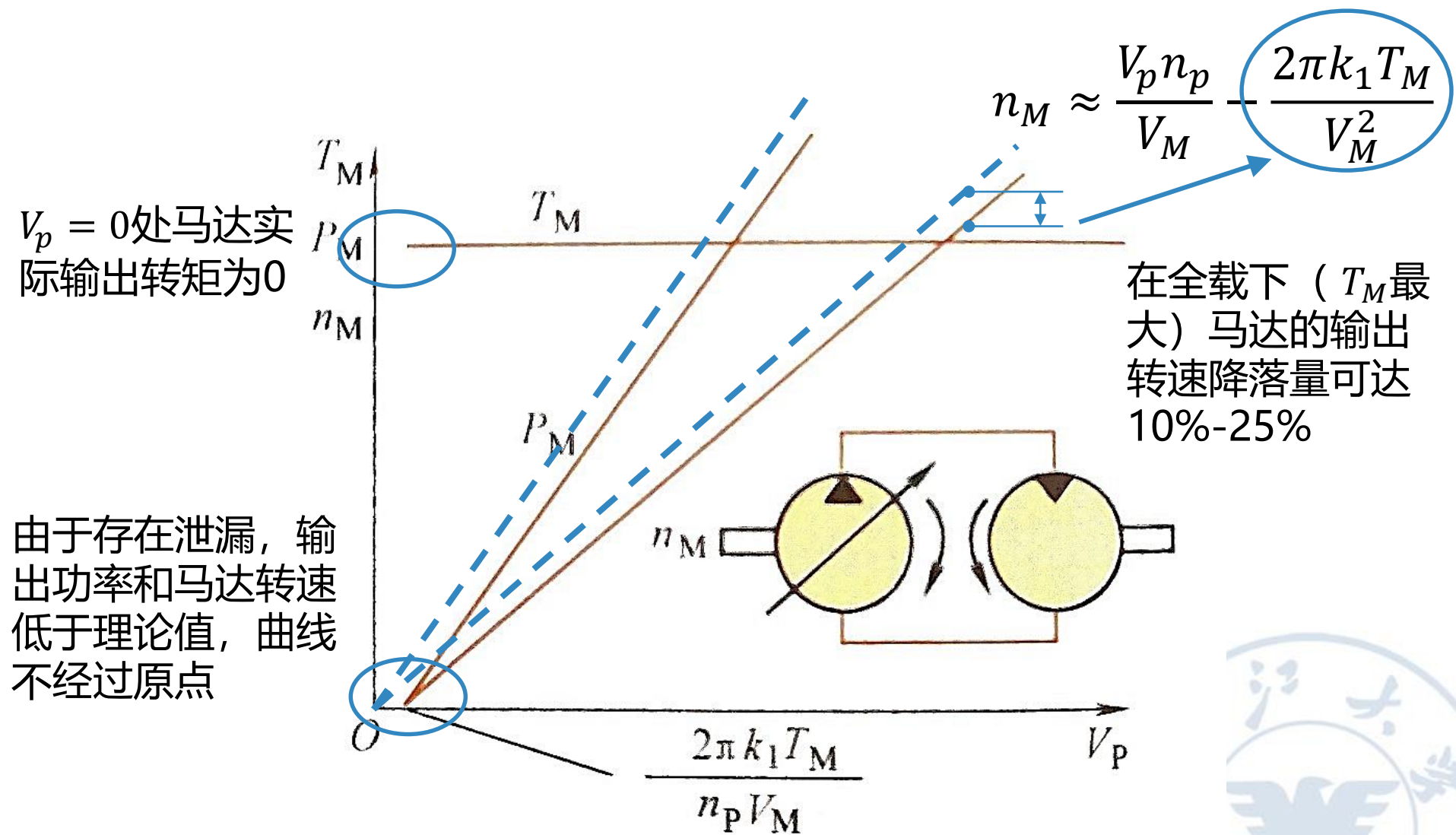
变量泵-定量马达式

➤ 特性曲线：  $n_M \approx \frac{V_p n_p}{V_M} - \frac{2\pi k_1 T_M}{V_M^2}$

由于泵泄漏，液压马达的转速  $n_M$  不完全由泵转速  $n_p$  确定，还受负载  $T_M$  影响



# 变量泵-定量马达式调速回路



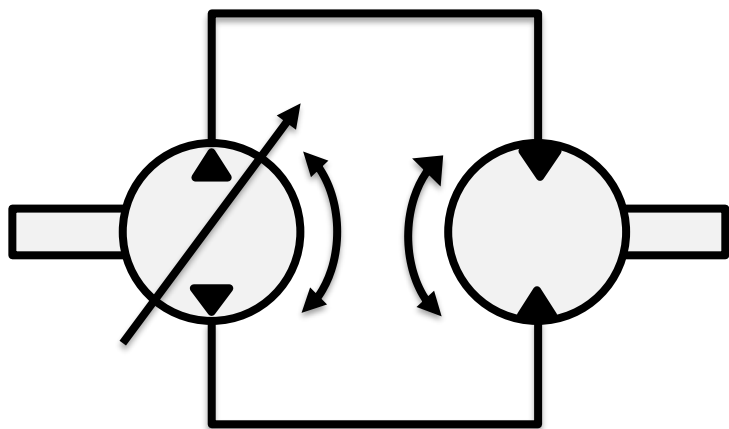
变量泵-定量马达式容积调速回路的工作特性



# 变量泵-定量马达式调速回路

## □ 适用场合

- 回路调速范围大，一般可达 $R_C = 40$ 。
- 当泵和马达都可以双向作用时，马达可以实现平稳的反向。
- 这种回路在小型内燃机车、液压起重机、船用绞车等处的有关装置上都得到了应用。



可双向作用的变量泵-  
定量马达式



船用绞车



液压起重机

# 定量泵-变量马达式调速回路

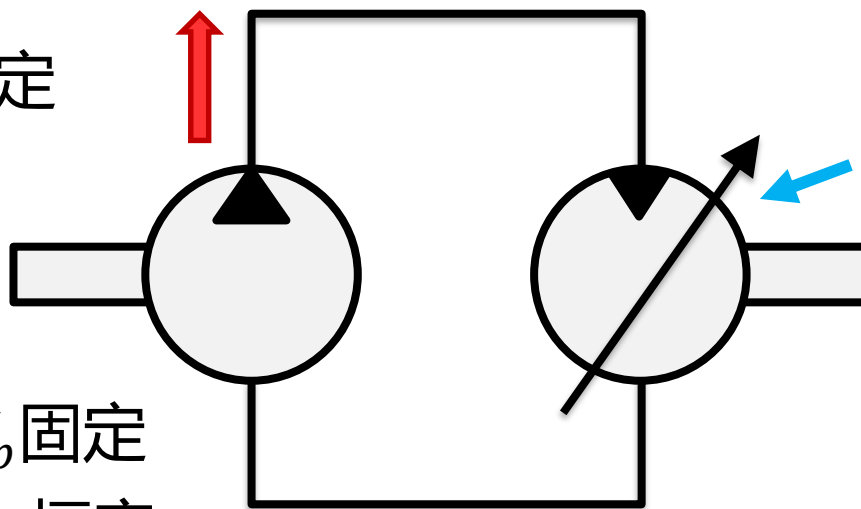
## □ 工作原理

回路的工作压力 $p$ 由负载  
 $T_M$ 和马达排量 $V_M$ 决定

泵流量 $Q_p$ 一定

$$Q_p = n_p V_p$$

液压泵排量 $V_p$ 固定  
液压泵转速 $n_p$ 恒定



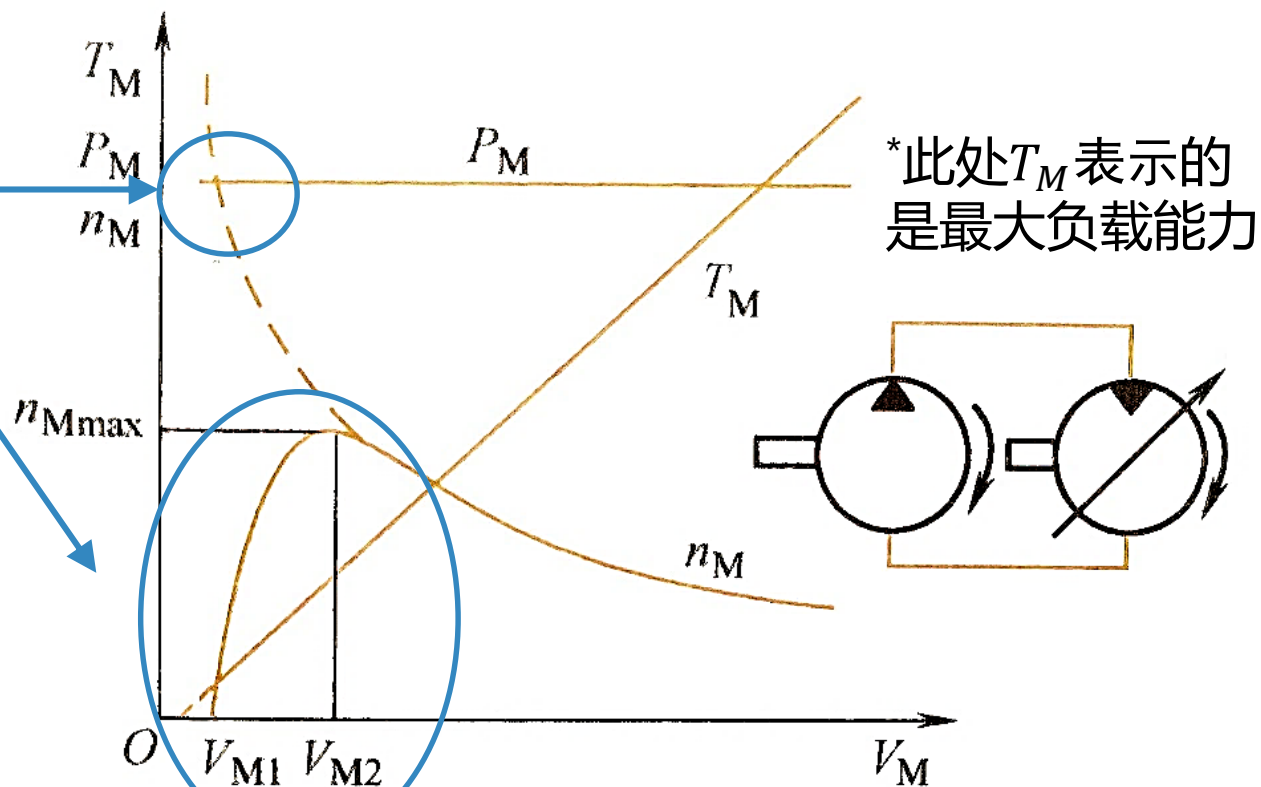
增加马达排量->  
输出转速下降  
减小马达排量->  
输出转速上升

定量泵-变量马达式

输出功率由负载决定，不因调速变化，也称为恒功率调速回路

# 定量泵-变量马达式调速回路

由于泵和马达的泄漏  
 损失和摩擦损失，在  
 $V_M = 0$ 附近，实际 $n_M$   
 、 $T_M$ 和 $P_M$ 都等于零



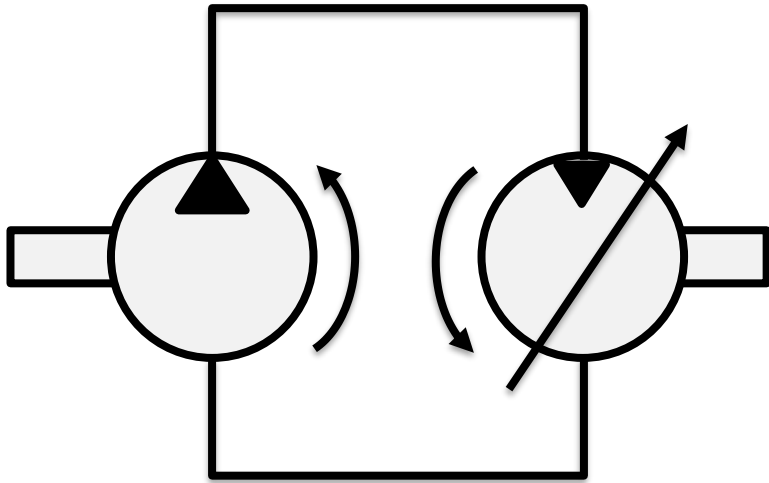
由于泄漏，液压马达  
 转速存在极值，之后  
 才进入恒功率调速区

图 8-17 定量泵-变量马达式容积  
 调速回路的工作特性

# 定量泵-变量马达式调速回路

## □适用场合

- 这种回路的调速范围很小，一般只有 $R_C \leq 3$ 。
- 且它不能用来使马达实现平稳的转向，所以这种回路已很少单独使用。

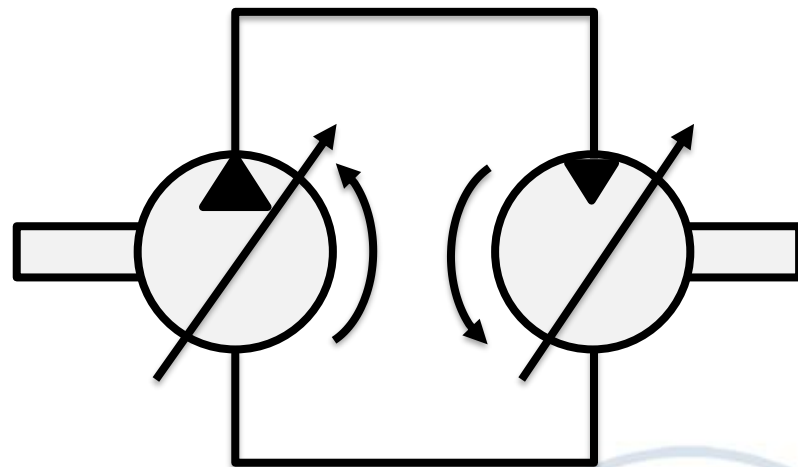
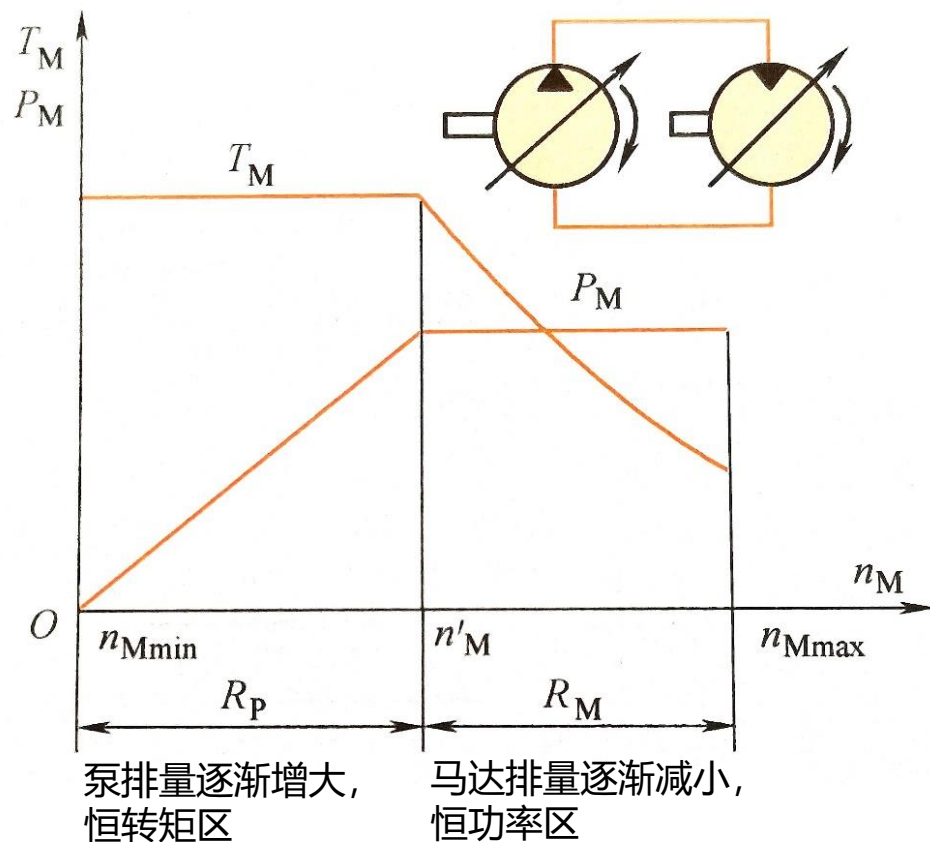


定量泵-变量马达式



# 变量泵-变量马达式调速回路

- 工作特性：上述两种回路工作特性的综合
- 调速范围：等于泵的调速范围和马达调速范围的乘积



变量泵-变量马达式

变量泵-变量马达式容积调速回路  
 工作特性

# 变量泵-变量马达式调速回路

## □适用场合

- 大功率的液压系统，特别是系统中有两个或多个液压马达要求共用一个液压泵又能各自独立调速的场合，如港口起重运输机械、矿山采掘机械、工程机械等。





# 容积节流调速回路

- ❑ 原理：用压力补偿型变量泵供油，用流量控制元件调节活塞的运动速度
- ❑ 分类：定压式和变压式
- ❑ 特点：没有溢流损失、**效率较高**，**速度稳定性**比单纯的容积调速回路好

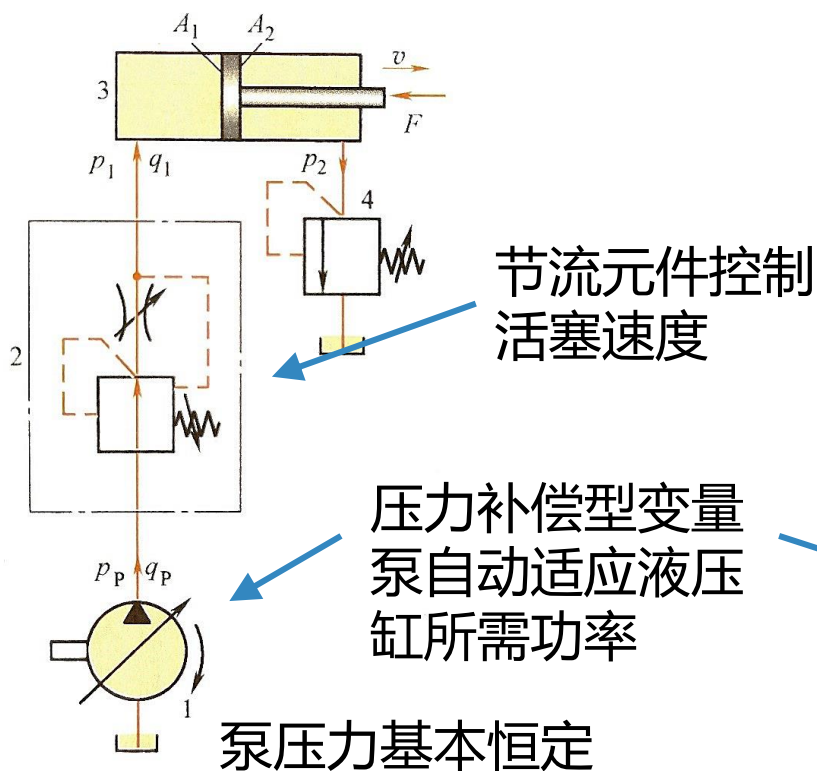


图 8-19 定压式容积节流调速回路

1—限压式变量叶片泵 2—调速阀 3—液压缸 4—背压阀

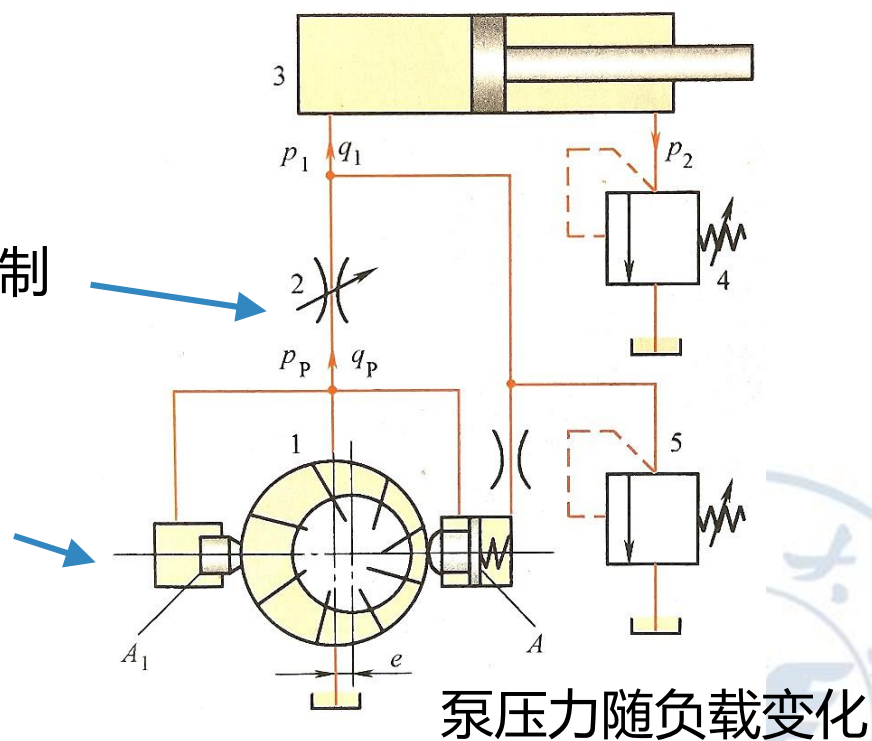


图 8-21 变压式容积节流调速回路

1—稳流量泵 2—节流阀 3—液压缸

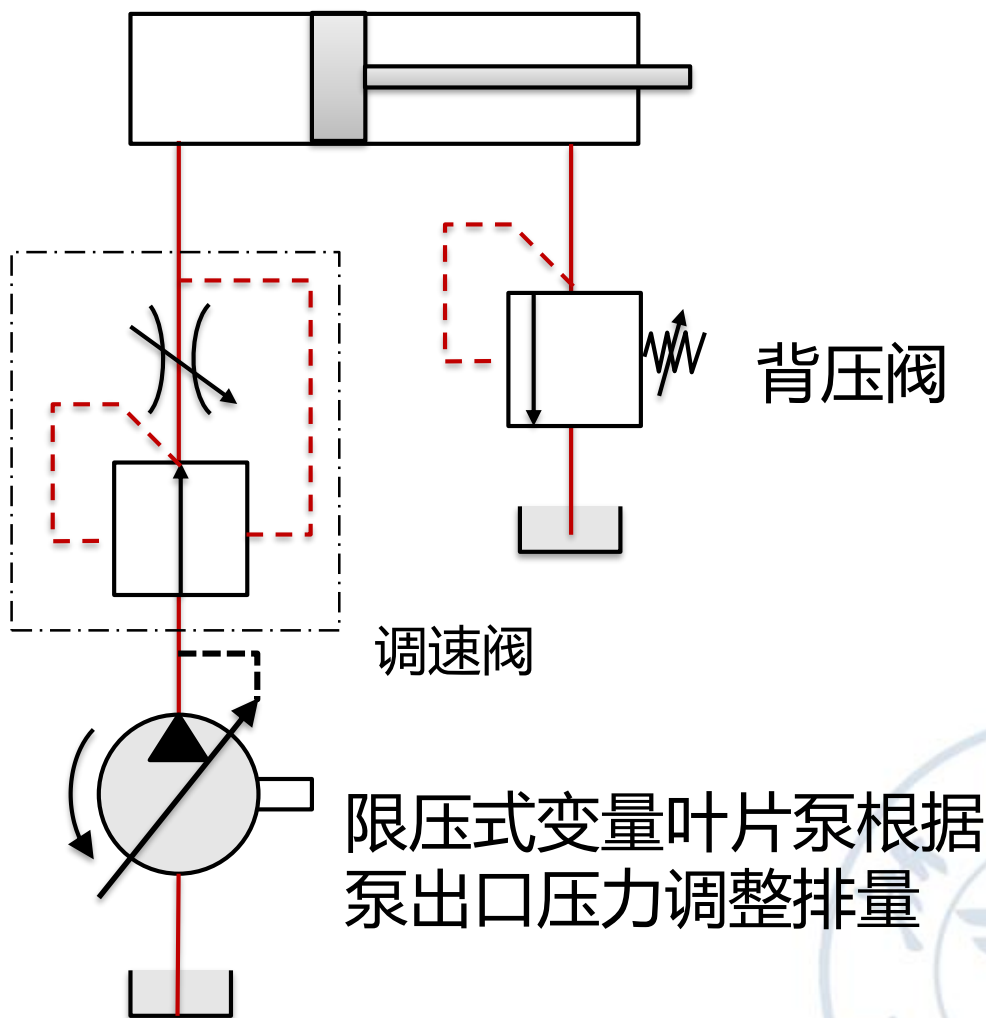
4—背压阀 5—安全阀

# 定压式容积节流调速回路

## □ 工作原理

调速阀控制活塞运动速度，也可装在回油路上

压力补偿变量泵能自动匹配液压缸流量



限压式变量叶片泵根据泵出口压力调整排量

定压式容积节流调速回路



# 定压式容积节流调速回路

## 机械特性

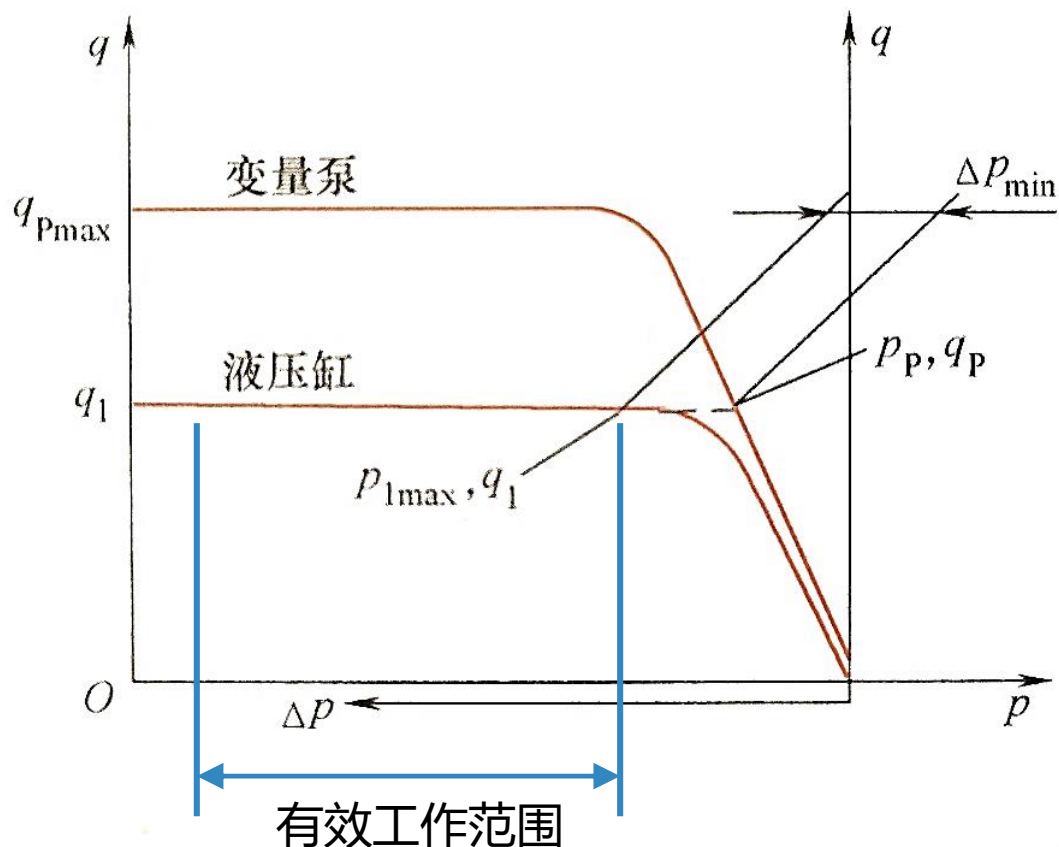
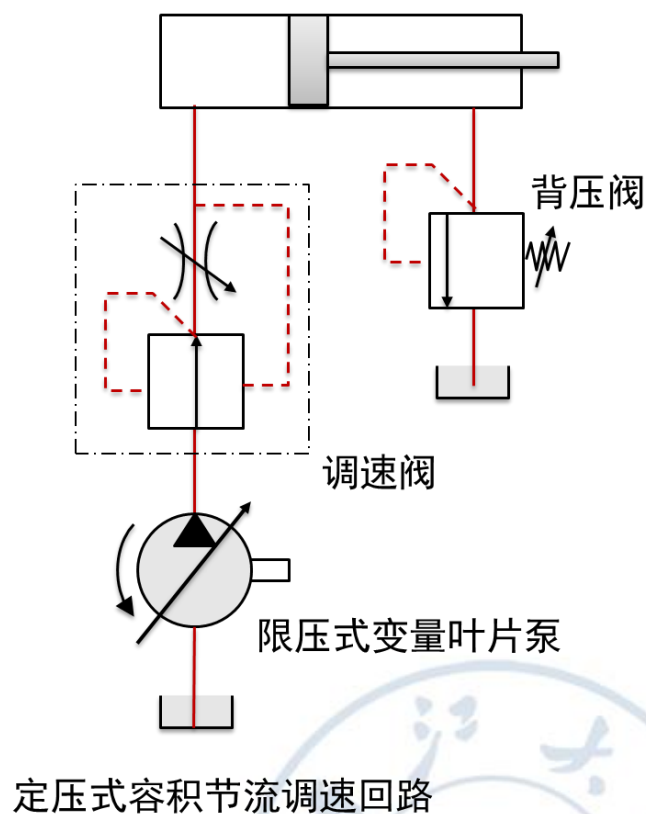


图 8-20 定压式容积节流调速回路的调速特性



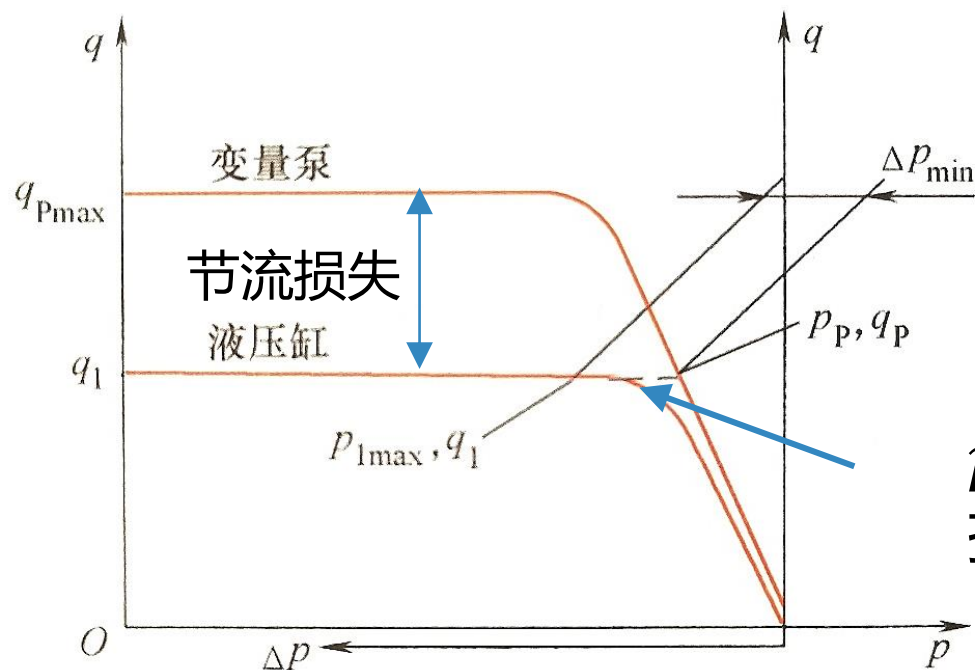
$$p_2 \frac{A_2}{A_1} \leq p_1 \leq (p_p - \Delta p) \quad * \Delta p \text{一般在} 0.5 \text{MPa 以上}$$

# 功率特性

□ 无溢流损失，节流损失与液压缸工作腔压力 $p_1$ 有关。

□ 回路效率为：

$$\eta_c = \frac{\left(p_1 - p_2 \frac{A_2}{A_1}\right) q_1}{p_p q_p} = \frac{p_1 - p_2 \frac{A_2}{A_1}}{p_p}$$



工作压力 $p_1$ 越大，效率越高

$p_1 = p_{1max}$ 时，回路中的节流损失最小

工作压力 $p_1$ 越小，节流损失越大

图 8-20 定压式容积节流调速回路的调速特性

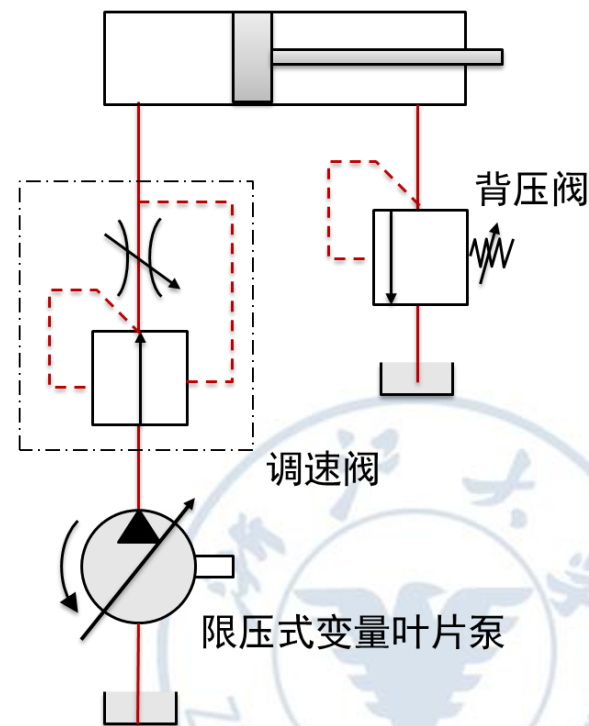
# 功率特性

$$\eta_c = \frac{\left(p_1 - p_2 \frac{A_2}{A_1}\right) q_1}{p_p q_p} = \frac{p_1 - p_2 \frac{A_2}{A_1}}{p_p}$$

□ 上式没有考虑**泵的泄漏损失**，限压式变量叶片泵最高压力时泄漏量可达**最大输出流量的8%**。

□ 当考虑泄漏损失时：  $q_p = q_t - k_1 p_p$

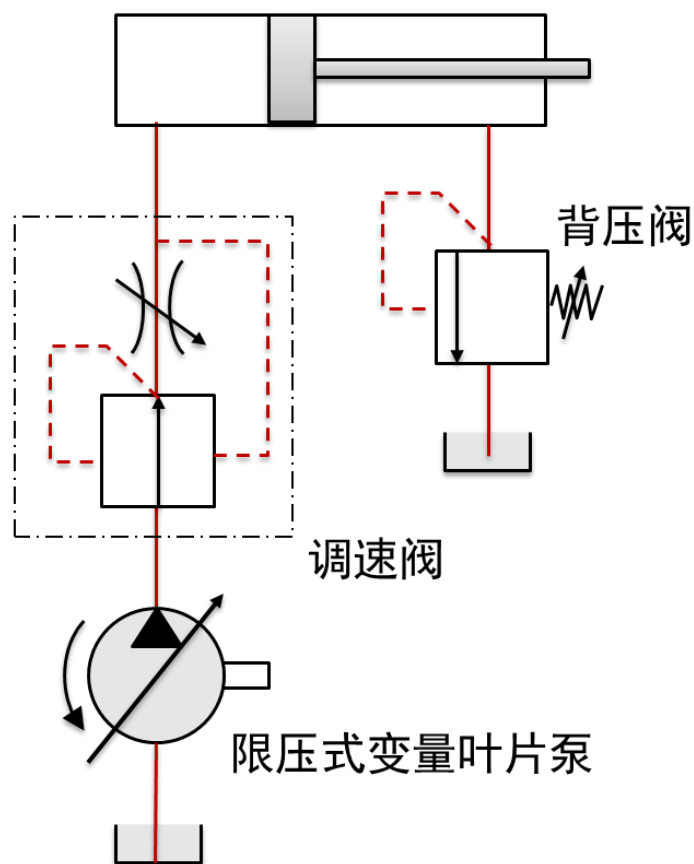
- 泵的输出流量 $q_p$ 越小，限压式变量泵的的压力 $p_p$ 越高，泵的泄漏损失越大。
- 因此,在速度小 ( $q_p$ 小)、负载小的场合下，这种回路效率较低。



定压式容积节流调速回路

# 定压式容积节流调速回路

□ 这种回路最宜用在负载变化不大的中、小功率场合如机床进给系统等处。



定压式容积节流调速回路

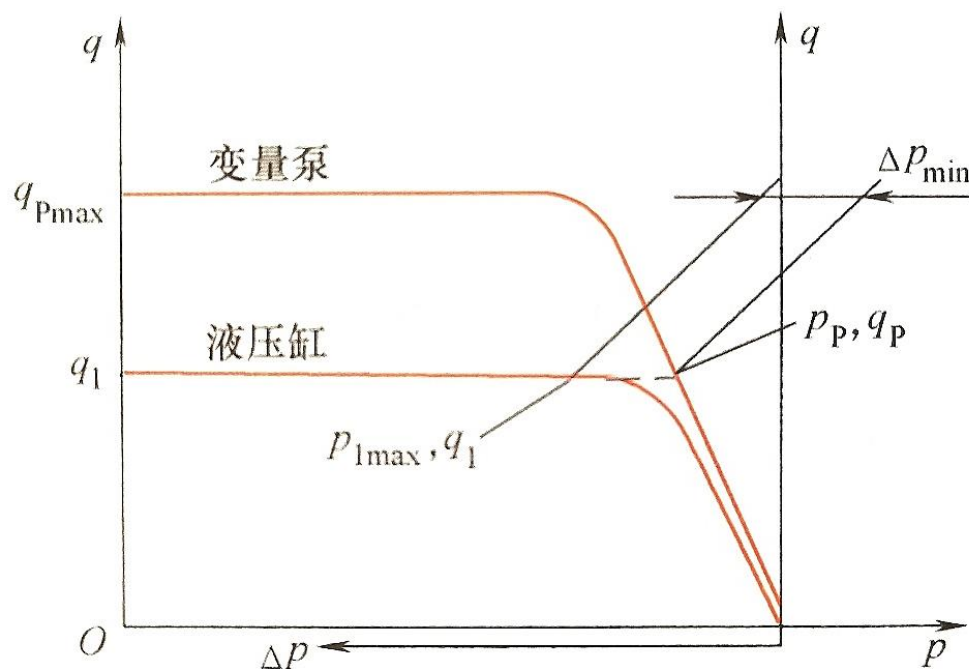


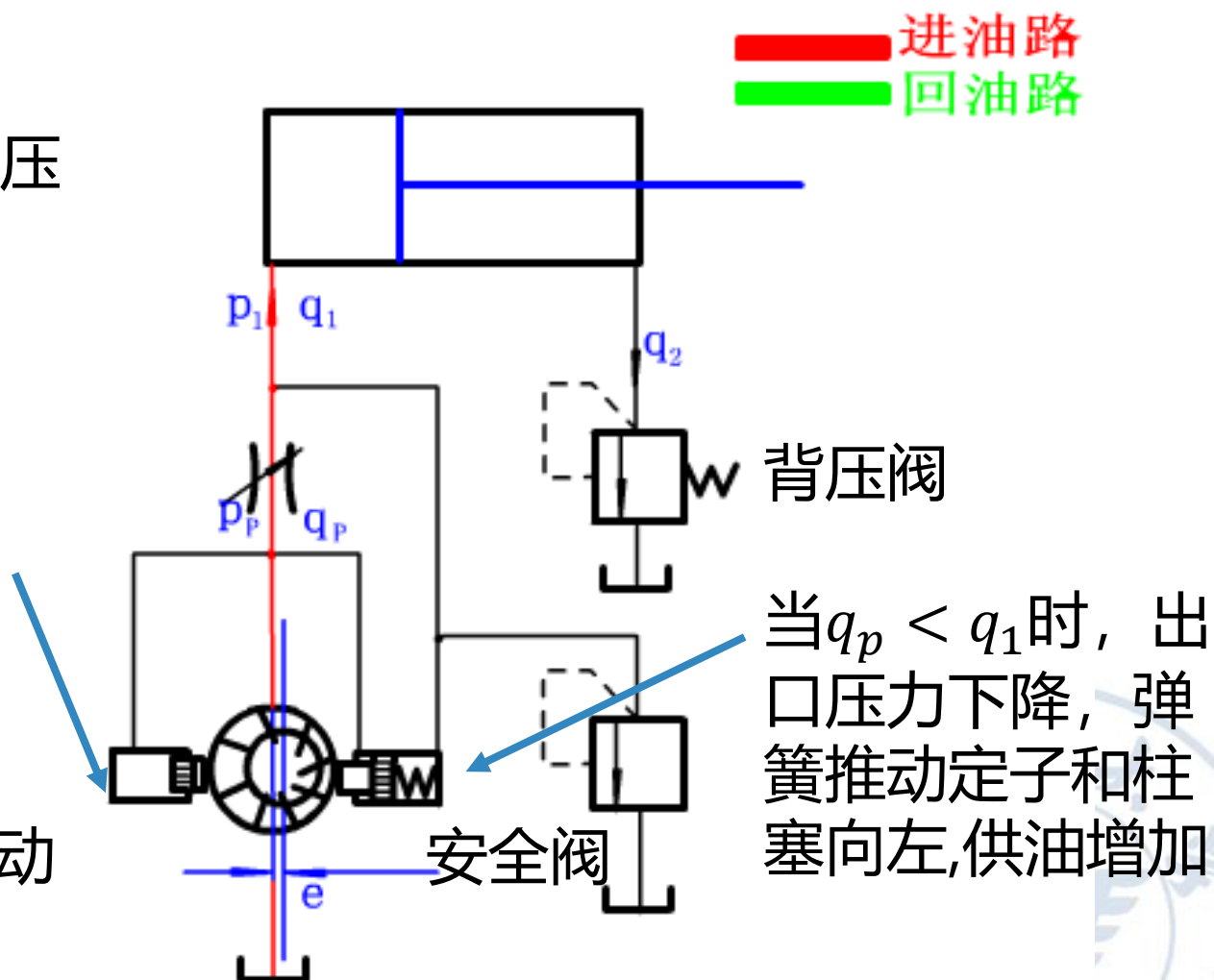
图 8-20 定压式容积节流调速回路的调速特性

## □工作原理

## 节流阀控制着进入液压缸的流量

当 $q_p > q_1$ 时，出口  
压力上升，柱塞推动  
定子向右，供油减少

## 变量泵输出流量 $q_p$ 自动 和 $q_1$ 适应



# 变压式容积节流调速回路

## □ 工作特性

- 回路速度刚性、运动平稳性和承载能力都较好
- 输入液压缸的流量基本上不受负载变化的影响
- 节流阀两端的压差基本由作用在稳流量泵控制柱塞上的弹簧力确定

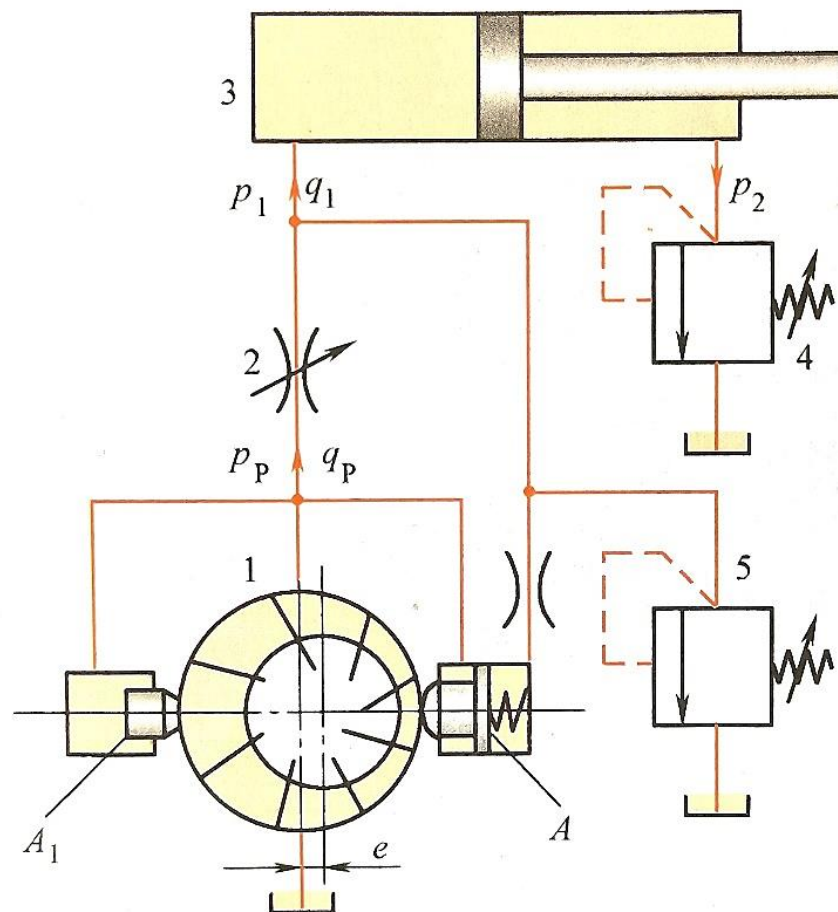


图 8-21 变压式容积节流调速回路

1—稳流量泵 2—节流阀 3—液压缸

4—背压阀 5—安全阀



- [illegible]

图 8-21 变压式容积节流调速回路

# 变压式容积节流调速回路

□ 容积式节流调速回路不但没有溢流损失，而且泵的供油压力随负载而变化，回路中的功率损失只有节流阀处压降 $\Delta p_T$ 所造成的节流损失，比定压式容积节流调速回路调速阀处的节流损失还要小，因此发热少，效率高。

□ 这种回路当 $p_2 = 0$ 时的效率表达式为：

$$\eta_c = \frac{p_1 q_1}{p_p q_p} = \frac{p_1}{p_1 + \Delta p_T}$$

□ 这种回路宜用在负载变化大、速度较低的中小功率场合，如某系额组合机床的进给系统中。





# 容积节流调速回路

## □ 适用场合

- 定压式容积节流调速回路最宜用在**负载变化不大的中、小功率场合**如机床进给系统等处
- 变压式容积节流调速回路宜用在**负载变化大、速度较低的中小功率场合**，如某些组合机床的进给系统中
- 由于液压泵的输出流量能与阀的调节流量自动匹配，节省能量消耗，因此也称**流量适应回路**



## □ 调速回路比较的依据

- 能在规定的调速范围内调节执行元件的工作速度。 【调速特性】
- 在负载变化时，已调好的速度变化越小越好，并应在允许的范围  
内变化。 【速度刚性】
- 具有驱动执行元件所需的力或转矩。 【承载能力】
- 使功率损失尽可能小，效率尽可能高，发热尽可能小（这对保证  
运动平稳性也有利）。 【功率特性】



# 三类调速回路的比较和选用

表8-2 三类调速回路主要性能的比较

调速回路类型  主要性能		节流调速回路				容积调速回路	容积节流调速回路	
		用节流阀调节		用调速阀或溢流节流阀调节		(变量泵-液压缸式)	定压式	变压式
		定压式	变压式	定压式	变压式			
机械特性	速度刚性	差	很差	好		较好	好	
	承载能力	好	较差	好		较好	好	
调速特性 (调速范围)		大	小	大		较大	大	
功率特性	效率	低	较高	低	较高	最高	较高	高
	发热	大	较小	大	较小	最小	较小	小
适用范围		小功率、轻载或低速的中、低压系统				大功率、重载高速的中高压系统	中小功率的中压系统	



## □ 调速回路的选用

执行元件的运动  
速度和负载性质

- 速度低：节流调速回路
- 速度稳定性要求高：调速阀式调速回路
- 速度稳定性要求低：节流阀式调速回路
- 负载小、负载变化小：节流调速回路
- 负载大、负载变化大：容积调速回路或容积节流调速回路

功率大小

- 3kW以下：节流调速回路
- 3-5kW：容积节流调速回路或容积调速回路
- 5kW以上：容积调速回路

设备费用

- 要求费用低廉：节流调速回路
- 允许费用高：用容积节流调速回路或容积调速回路。

□课后作业：8-2, 8-5, 8-7, 8-9, 8-10, 8-11

