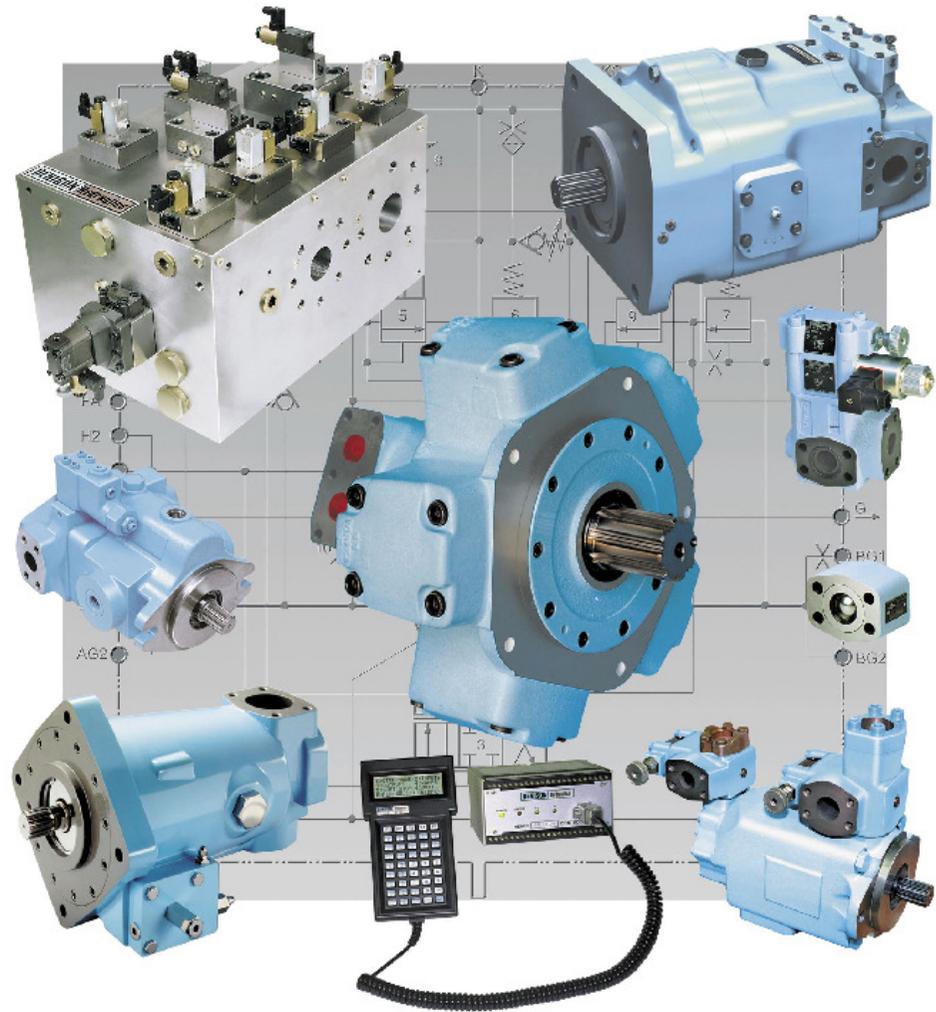


# Hydraulic Circuit Foundation

## 液压回路基础



ENGINEERING YOUR SUCCESS.

2014/05/25

# 液压回路 Hydraulic Circuits



系统中能满足特定功能的某一部分或全部。例如：压力控制回路、流量控制回路、同步回路等。

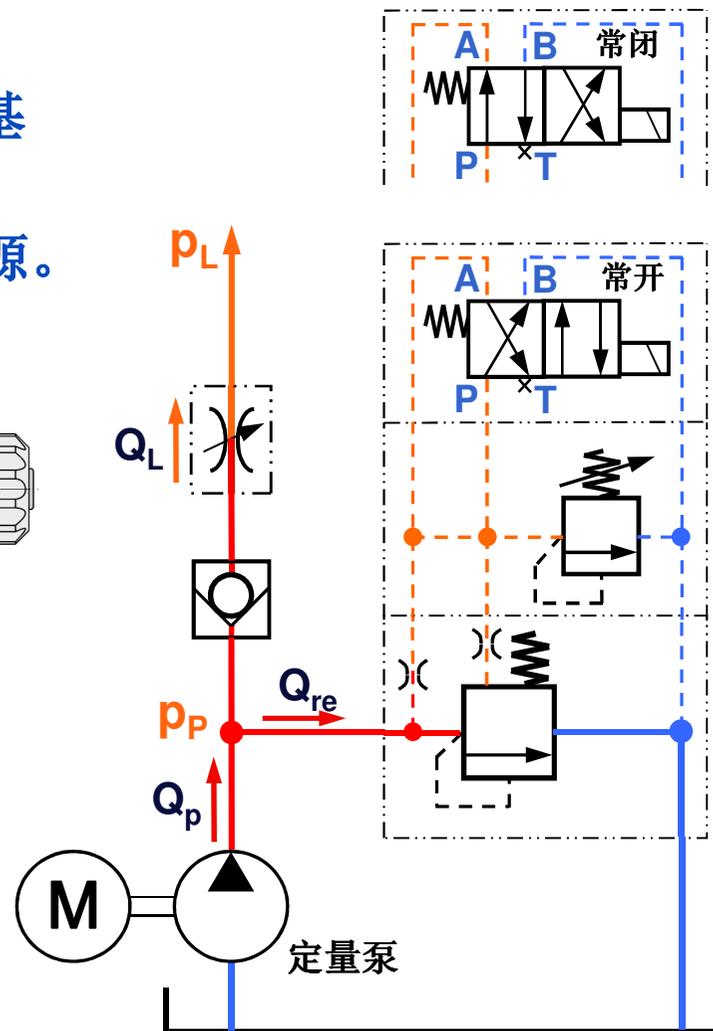
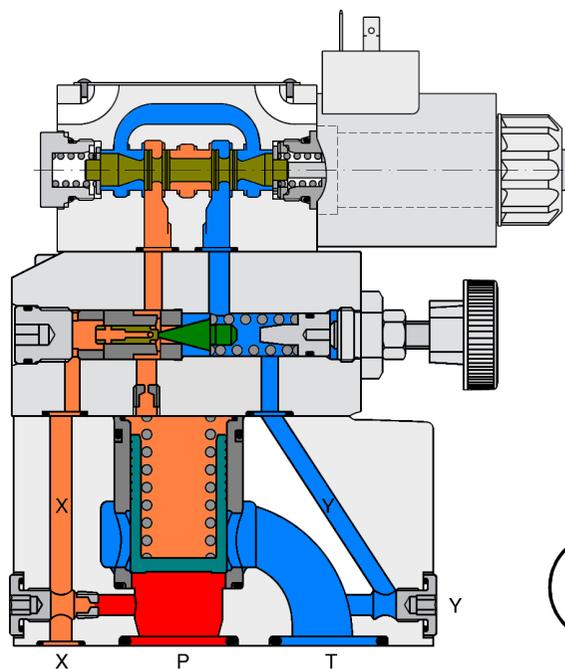
- **方向控制回路 Directional Control Circuits**  
控制负载运动方向的回路。
- **压力控制回路 Pressure Control Circuits**  
调节系统或系统中某一部分压力为其主要目的的回路。如：溢流回路、减压回路、卸荷回路以及顺序控制回路等。
- **速度控制回路 Speed Control Circuits**  
控制操作速度的回路，通常用调节流量的方法来达到。如：进油调速回路、回油调速回路、同步回路等。
- **(先导) 控制回路 Pilot Circuits**  
控制系统元件动作的回路，该回路仅处理和传递压力信号。

# 压力控制回路 Pressure Control Circuits



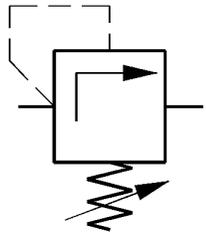
## 溢流回路

- 系统压力(液压泵出口) 由溢流阀调节，基本保持恒定，溢流阀始终处于工作状态。此时，液压泵犹如一个恒定电压的供电电源。
- 系统流量由系统流量调节阀调整决定，多余的流量从溢流阀溢流回油箱。在溢流阀上有能量损耗。
- 可采用先导电磁方向阀实现卸荷。

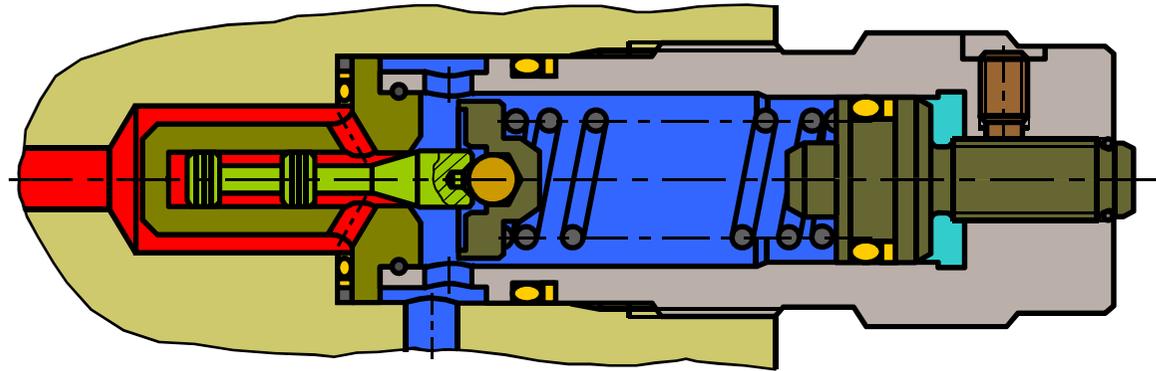


# 压力控制阀

## 直动式溢流阀工作原理



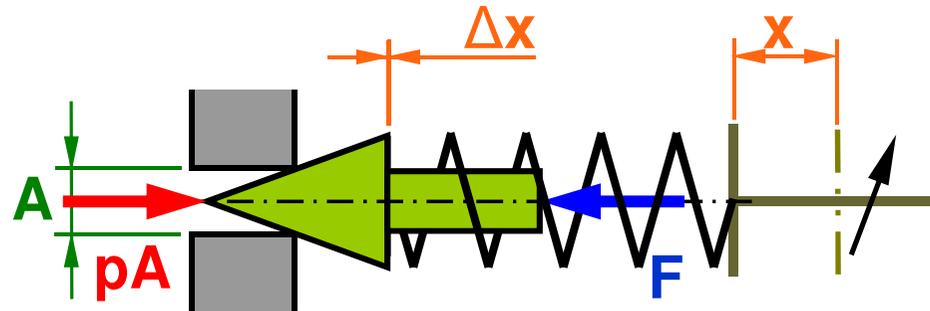
图形符号



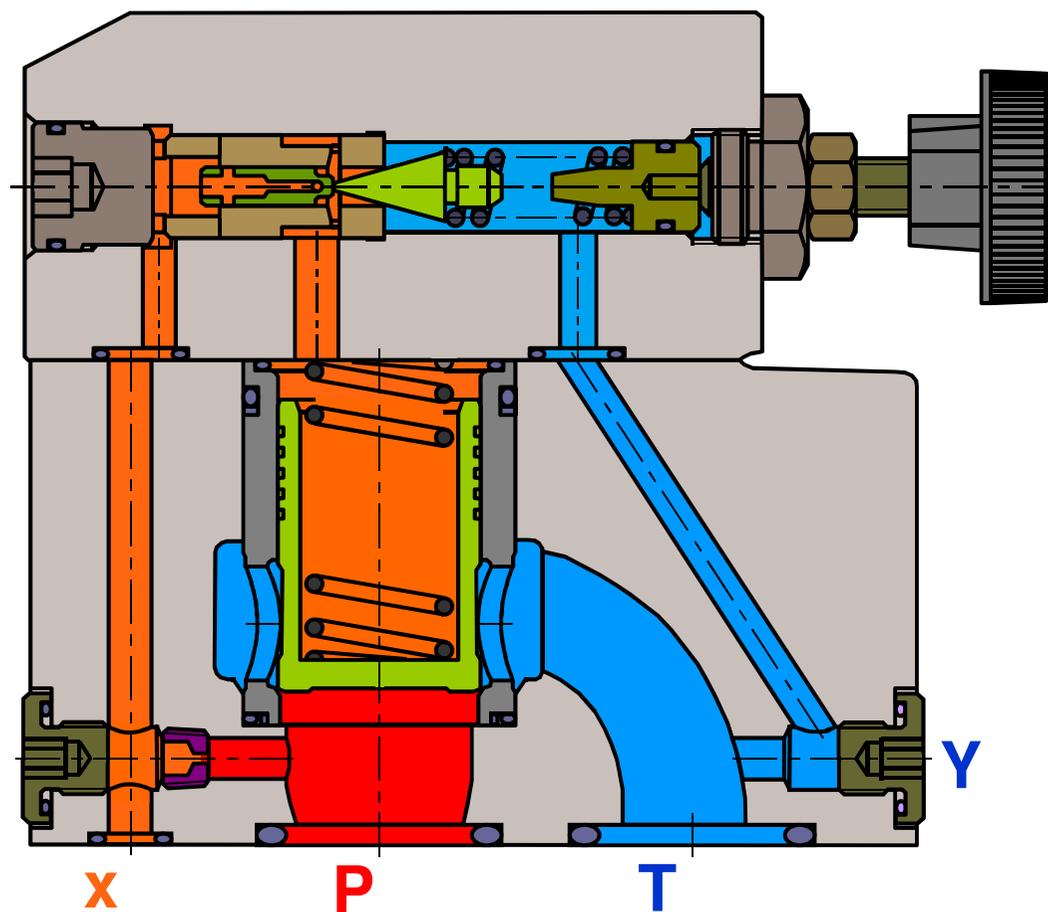
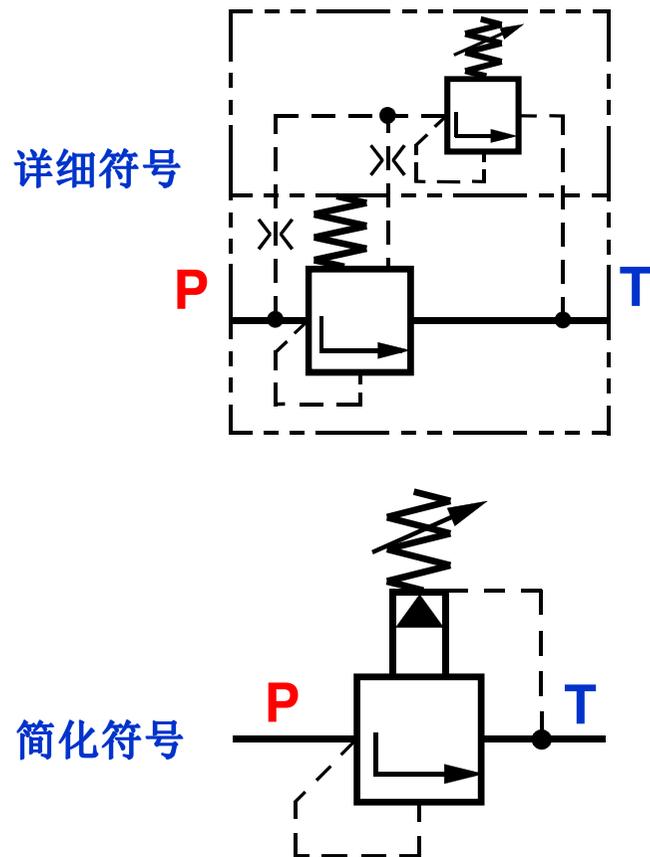
$$pA = F = k(x + \Delta x)$$

$$p = \frac{k(x + \Delta x)}{A} \approx \frac{kx}{A}$$

- 液压力与弹簧力平衡
- 静态超压（调压偏差）较大
- 规格不可能大



# 压力控制阀 先导式溢流阀图形符号



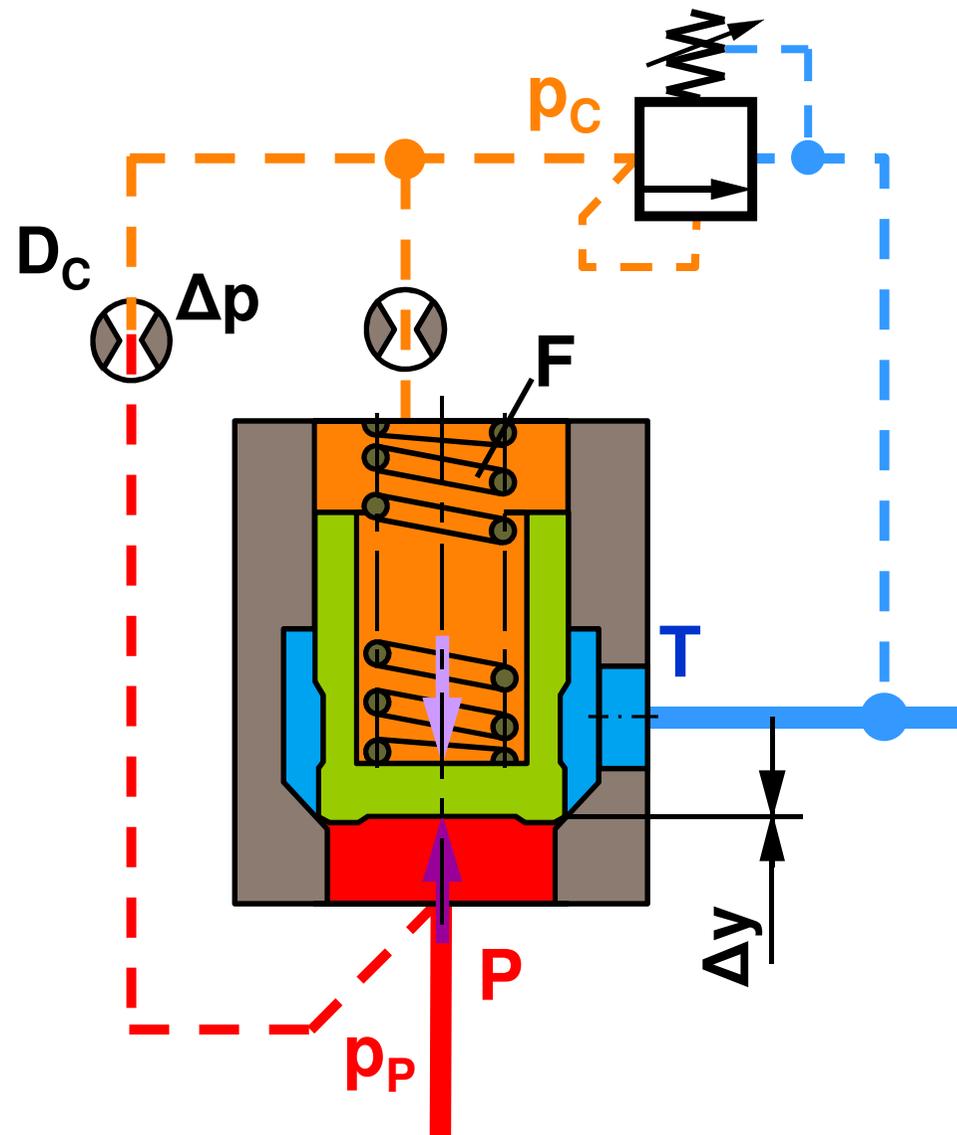
# 压力控制阀 先导式溢流阀工作原理



- ▶ 进口压力未达到先导阀的设定压力时，先导阀关闭，先导腔为封闭，主阀上下两腔压力相等，主阀芯在复位弹簧的作用下**关闭**。
- ▶ 一旦进口压力达到先导阀的设定压力，先导阀开启。
- ▶ 先导回路内有流量通过，于是在节流口 $D_c$ 上产生压差 $\Delta p$ ，随着先导流量的增大， $\Delta p$ 也增大，至其作用在主阀芯上的液压力足以克服弹簧力时，**主阀开启溢流**。同时，主阀芯处于新的力平衡状态，即有：

$$p_p A = p_c A + F$$

$$p_p = p_c + \frac{F}{A} = p_c + \Delta p$$

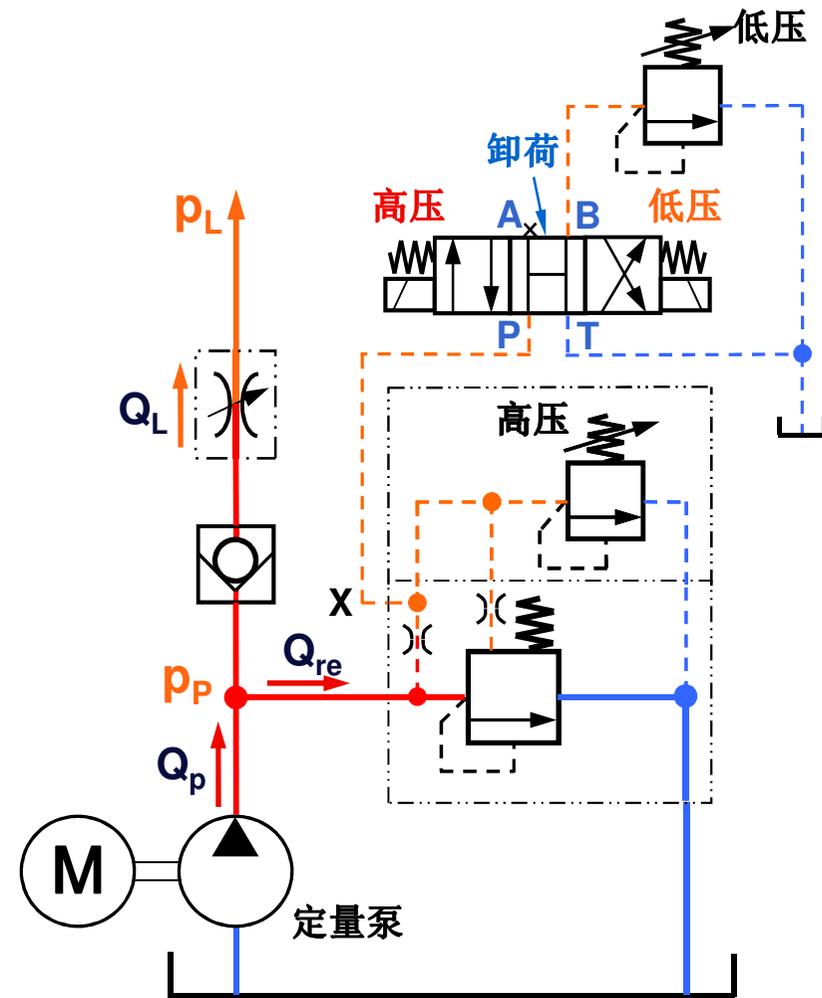
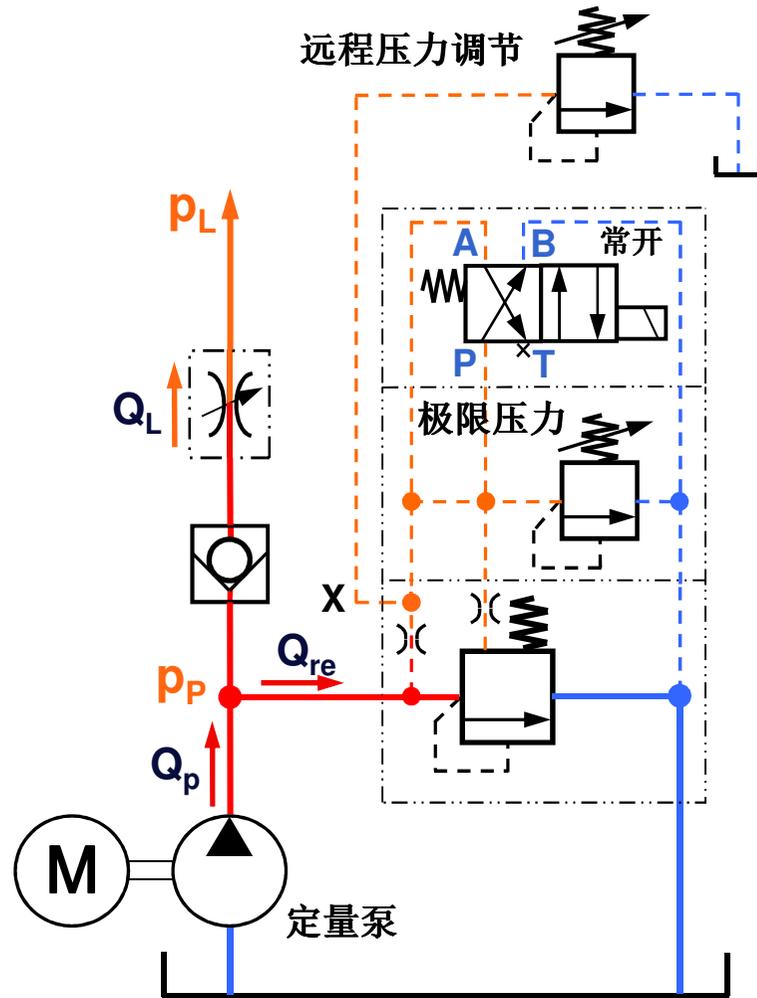




# 压力控制回路 Pressure Control Circuits



## 溢流回路 (遥控及两级压力控制)

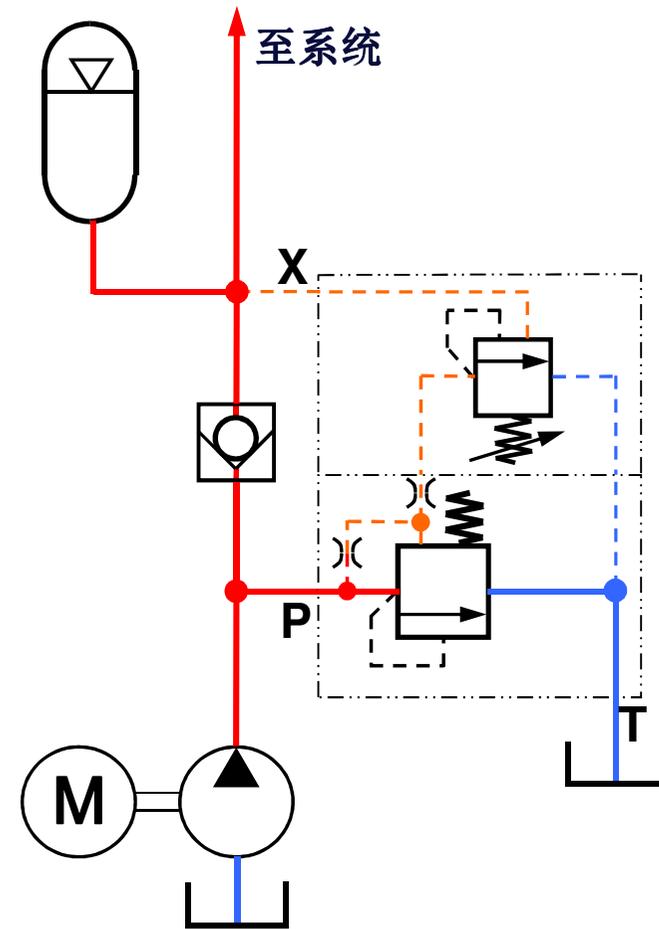
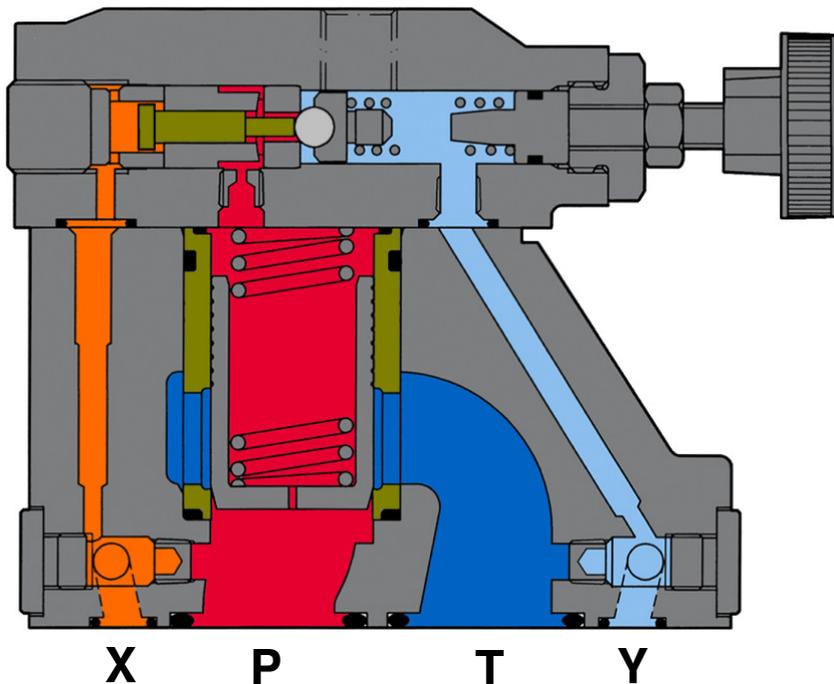


# 压力控制回路 Pressure Control Circuits



## 蓄能器保压回路(卸荷阀)

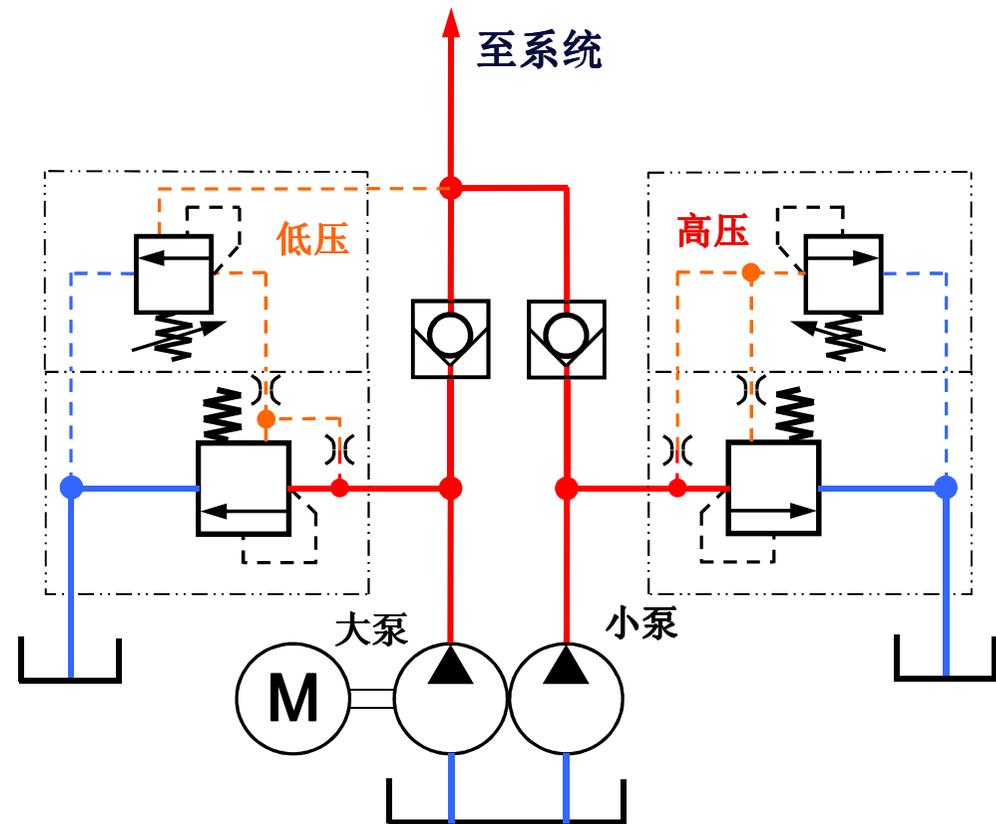
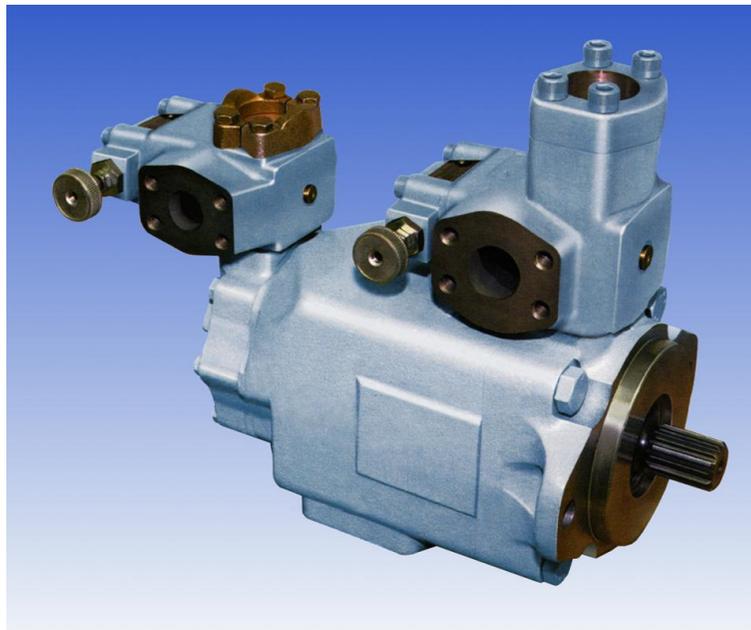
- 卸荷阀主阀芯具有面积差，故存在卸荷压差。  
压差比为：210bar 以下范围：20~28%  
350bar 压力级：12~15%  
(动态~静态)



# 压力控制回路 Pressure Control Circuits



## 高低压双泵回路 (低压大流量 + 高压小流量)

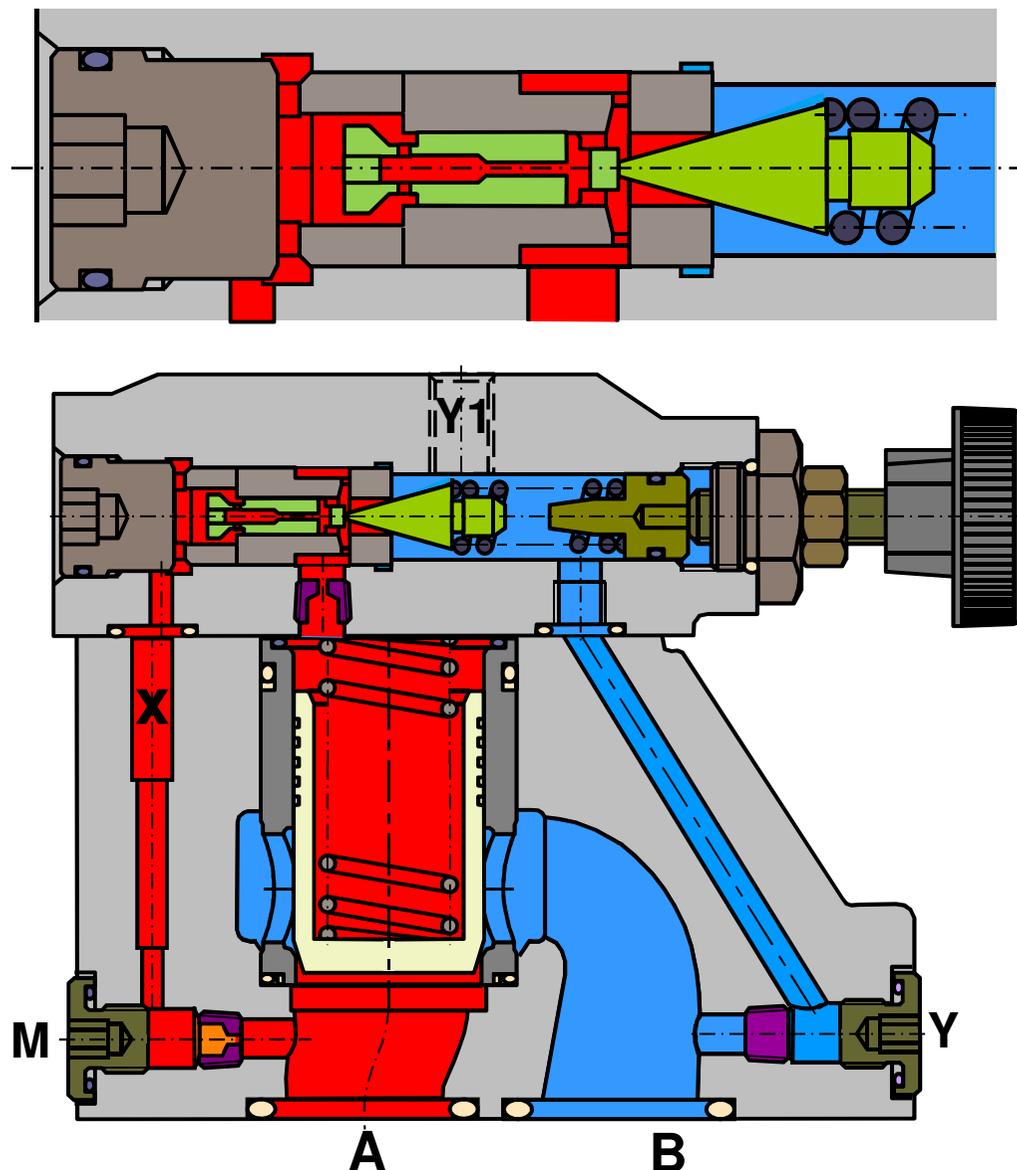




# 压力控制阀 R4S 系列顺序阀



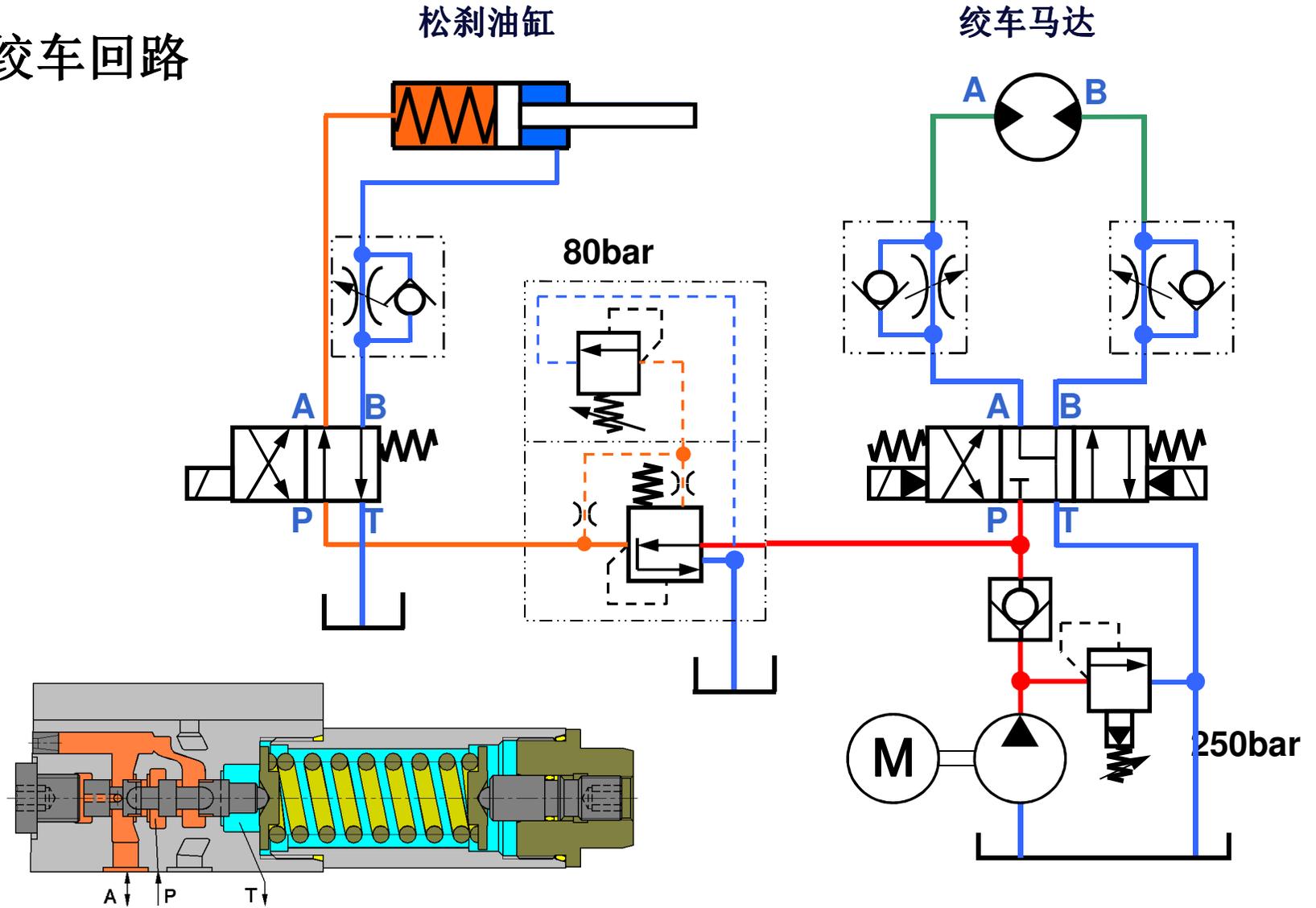
- 结构与压力阀基本相同，主要差别有：
  - 主阀芯面积比为：1:1.02；
  - 先导阀推销带有锥面，开启时无先导控制流量；
  - 要求外泄 (Y, Y1)。
- 若进口 A 处压力未到设定压力，则主阀芯上腔与进口压力相等，主阀关闭。
- 当进口 A 处压力达到设定压力时，先导阀在推销的作用下开启，并至推销锥面压靠在阀套上为止，先导阀全开，主阀芯上腔完全卸荷，主阀完全开启。



# 压力控制回路 - 减压回路

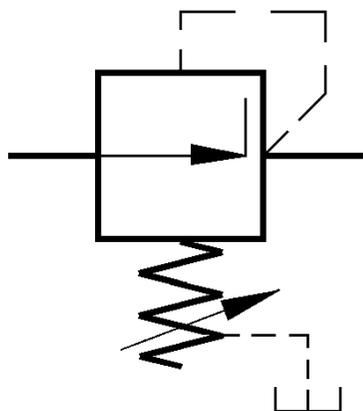


## 液压绞车回路

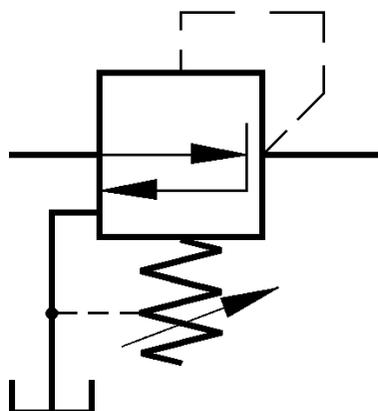


# 压力控制阀

## 直动式减压阀



直动式减压阀

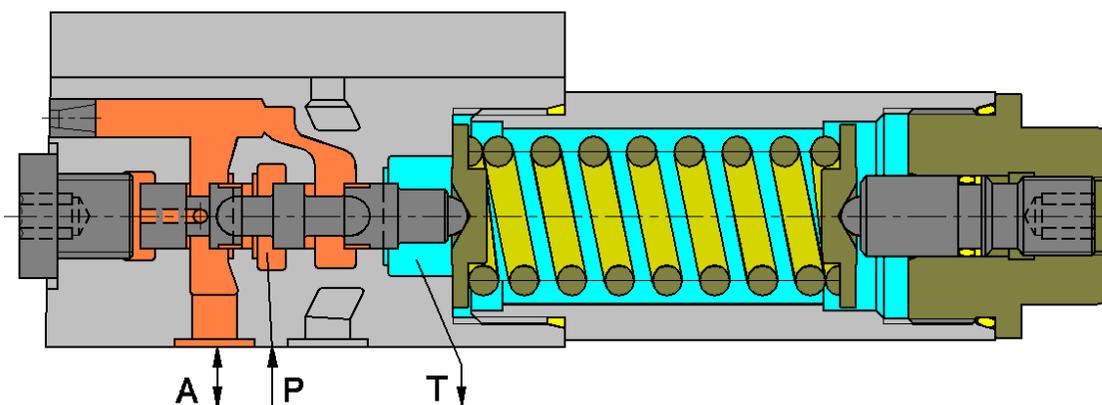


直动式减压溢流阀

图形符号

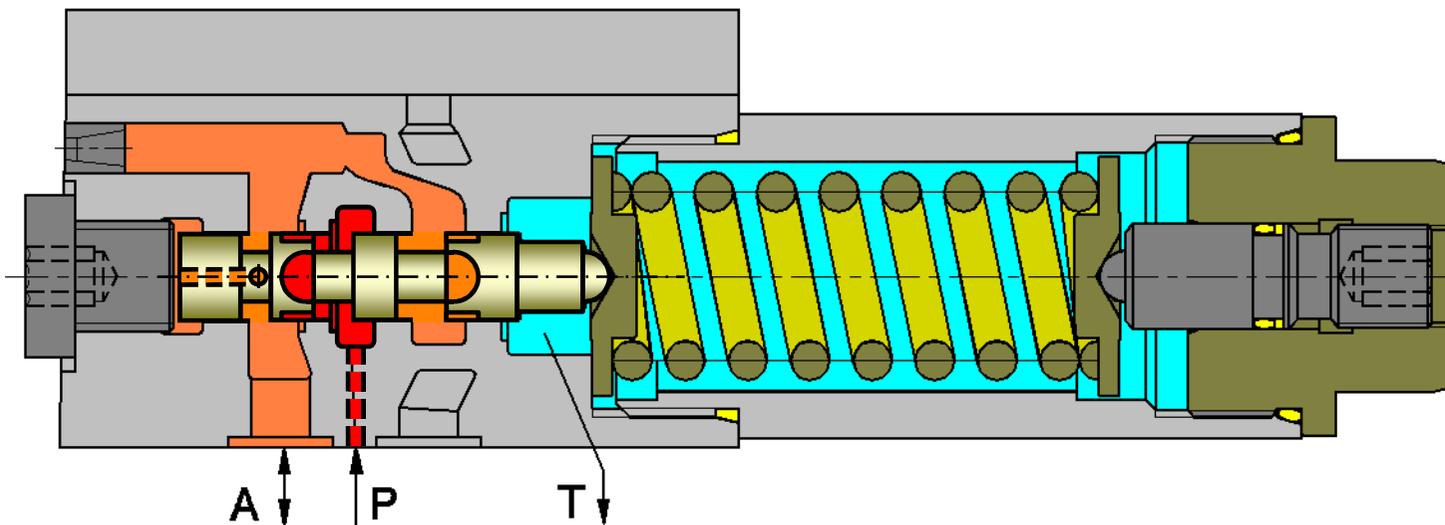


Parker VM型减压溢流阀



剖面图

# 压力控制阀 直动式减压阀工作原理

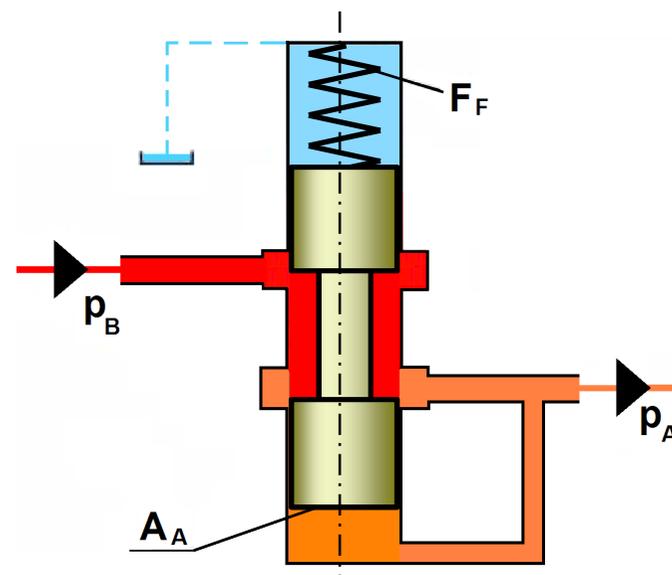


- 初始状态为全开
- 减压工况:

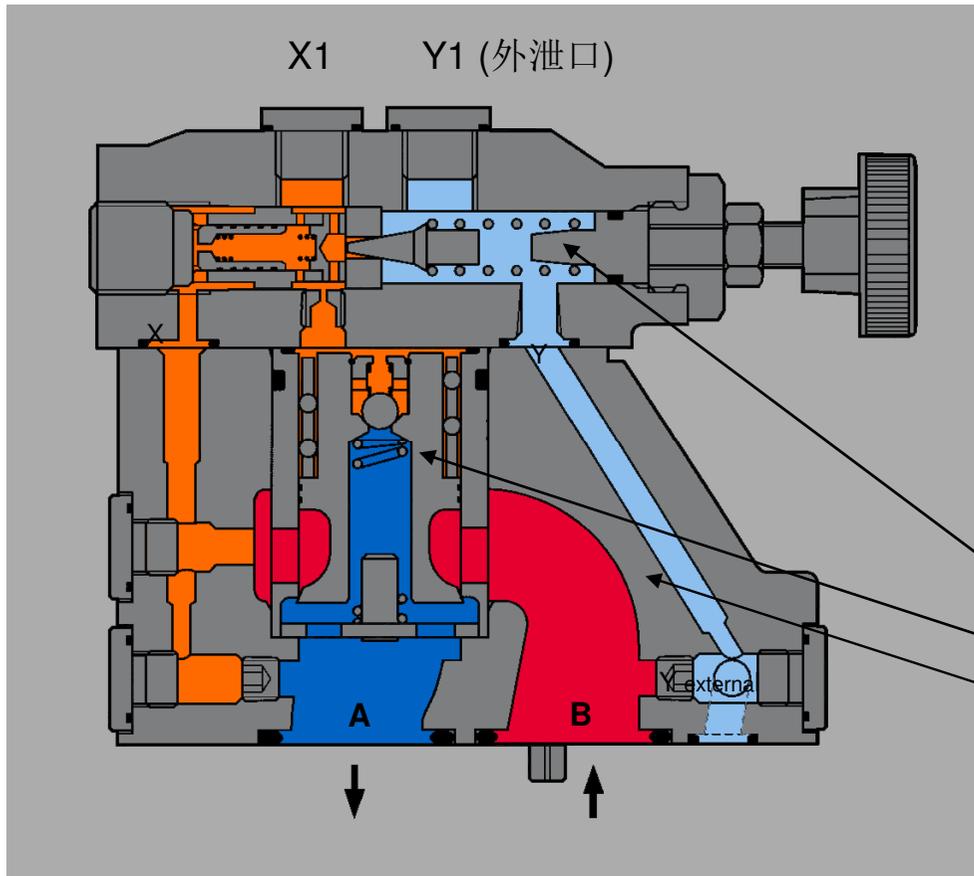
$$p_A A_A = F = k(x + \Delta x)$$

→ 
$$p_A = \frac{k(x + \Delta x)}{A_A} \cong \frac{kx}{A_A}$$

- A口压力有异常升高时，则工作在溢流工况



# 压力控制阀 R4R 系列先导式减压阀



| Type | Nom. Size  | max. Flow | max. Pressure | Mounting |
|------|------------|-----------|---------------|----------|
| R4R  | 03 (NG 10) | 90 l/min  | 350 bar       | Subplate |
|      | 06 (NG 25) | 300 l/min | 350 bar       | Subplate |
|      | 10 (NG 32) | 600 l/min | 350 bar       | Subplate |

## 主要零件

先导头

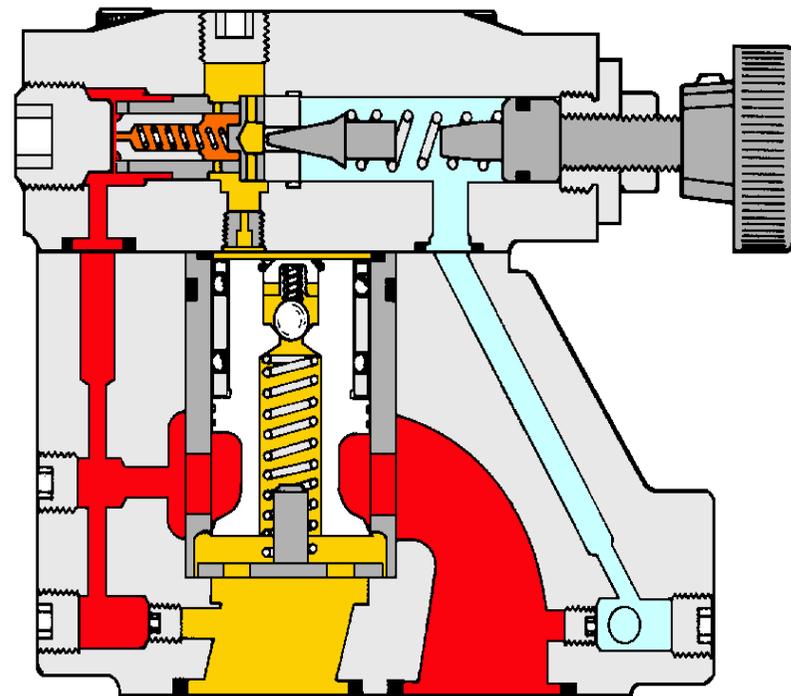
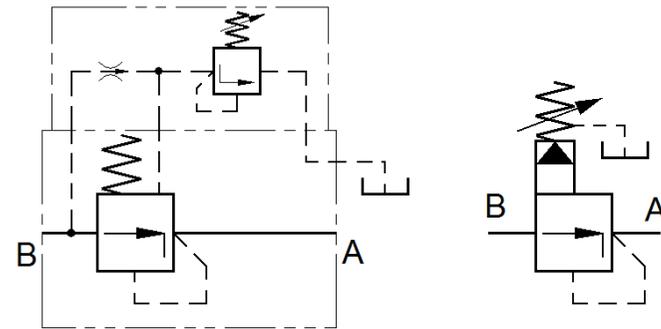
减压控制插件

阀体 (板式配置)

# 压力控制阀 R4R 系列先导式减压阀



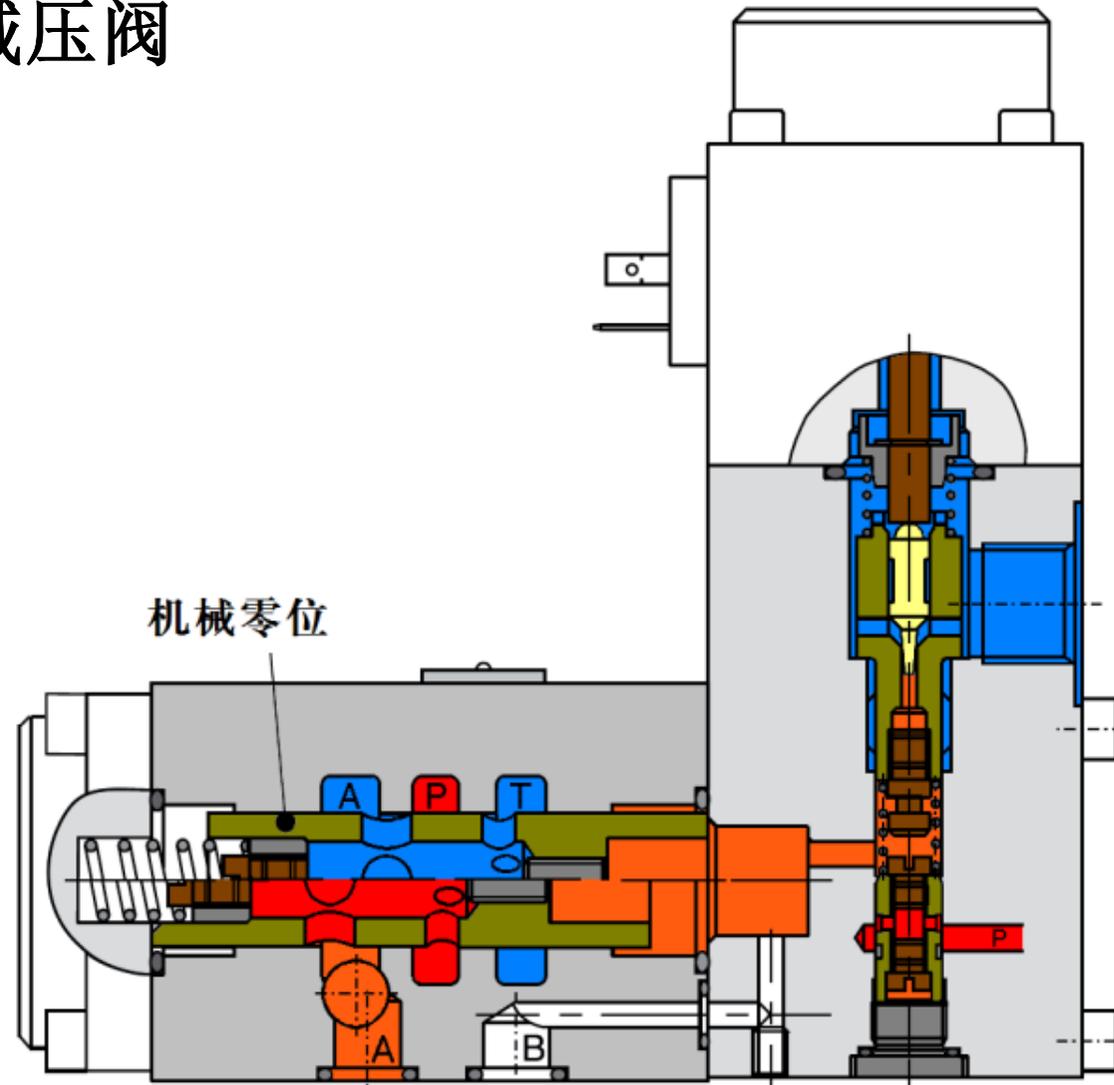
- 液流方向为“B”到“A”；
- 主级插件为：“常闭型”；
- 由于先导控制流量由带压力补偿的微流量调节阀控制，故开启柔和，无压力超调，使执行机构启动时不发生冲击。
- “A”口处具有溢流功能，但溢流流量有限制 (约 5 L/min)；
- 平衡式阀芯 (面积比: 1:1)，带有滚珠轴承以减小摩擦力。是市场上滞环最小的产品；
- 阀体与标准压力阀阀体的差异很小；
- 必须是“外泄式”。



# 压力控制回路 Pressure Control Circuits



## VMY电液比例减压阀



# 流量控制回路 Flow Control Circuits



## 进油节流 (meter in) 调速回路

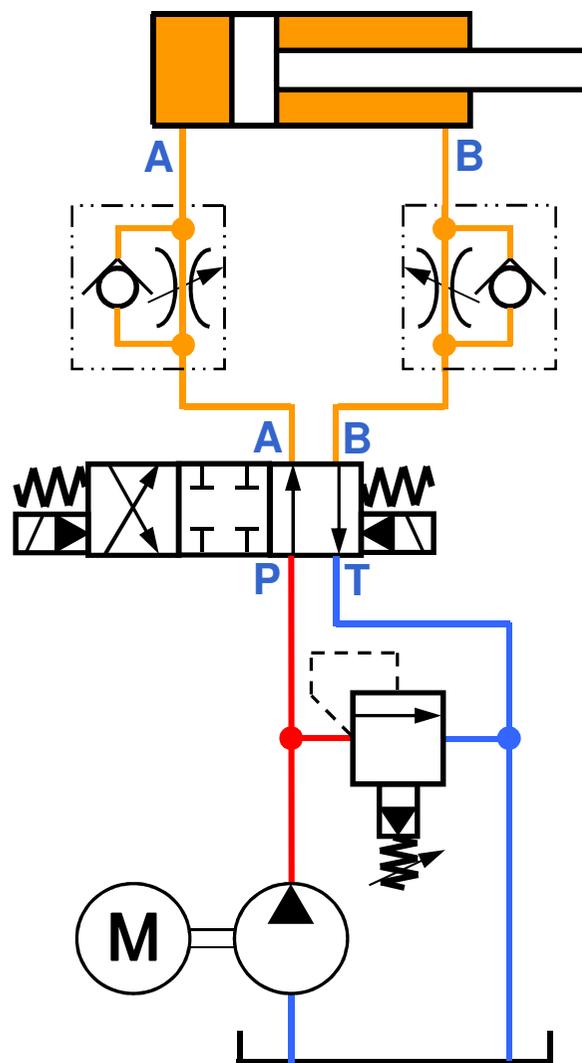
- 对于单杆缸  $Q_A \neq Q_B$

$$Q_A = iQ_B$$

$i$  – 液压缸面积比

$$i = \frac{A_A}{A_B} = \frac{D^2}{D^2 - d^2}$$

- 液压缸工作在较低压力状态。  
无背压，故压力波动对运行的影响  
相对较大，工作欠平稳。
- 使用O型机能方向阀时，由于泄漏，  
中位停止时，液压缸会发生伸出的  
现象



# 流量控制回路 Flow Control Circuits



## 回油节流 (meter out) 调速回路

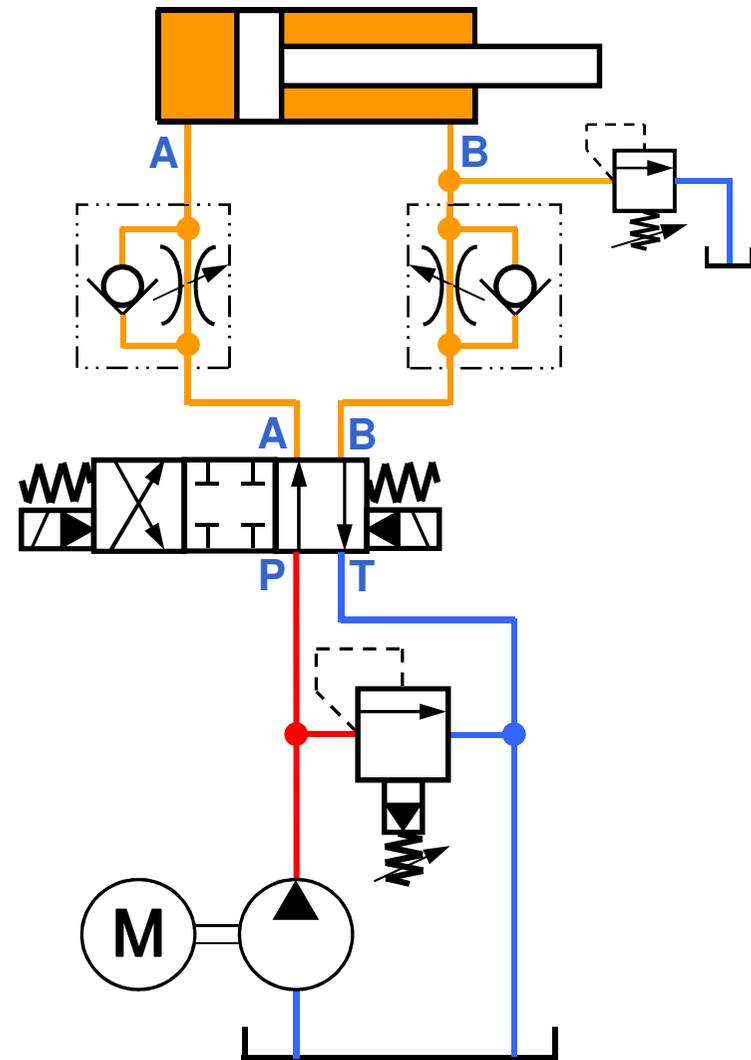
- 对于单杆缸  $Q_A \neq Q_B$

$$Q_A = iQ_B$$

$i$  – 液压缸面积比

$$i = \frac{A_A}{A_B} = \frac{D^2}{D^2 - d^2}$$

- 有背压存在故压力波动对运行的影响相对较小，工作较平稳。  
但，液压缸工作在高压状态，无杆腔压力可能升得很高，极端状况下最高可为系统压力的  $i$  倍，故有必要在有杆腔处设置安全阀。
- 使用O型机能方向阀时，由于泄漏，中位停止时，液压缸会发生伸出的现象

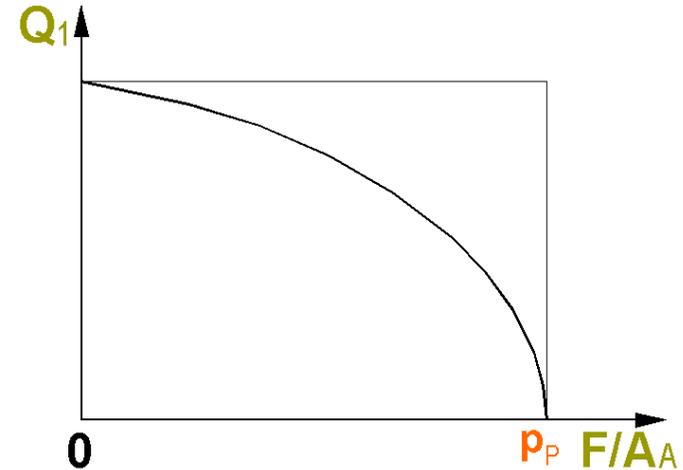
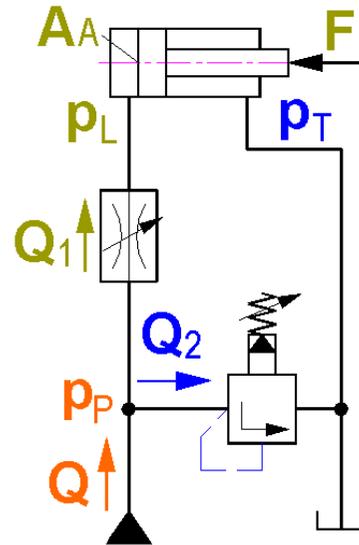


# 流量控制回路 Flow Control Circuits



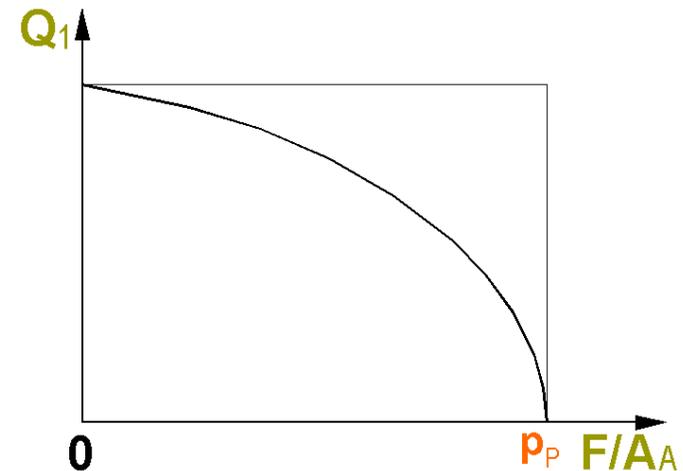
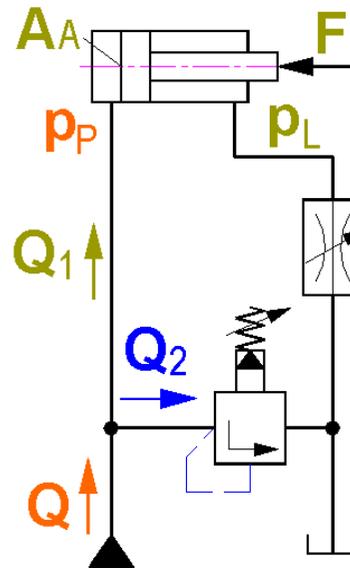
- 进油节流调速回路

$$Q_1 = kA \sqrt{p_P - \frac{F}{A_A}}$$



- 回油节流调速回路

$$Q_1 = 2\sqrt{2kA} \sqrt{p_P - \frac{F}{A_A}}$$

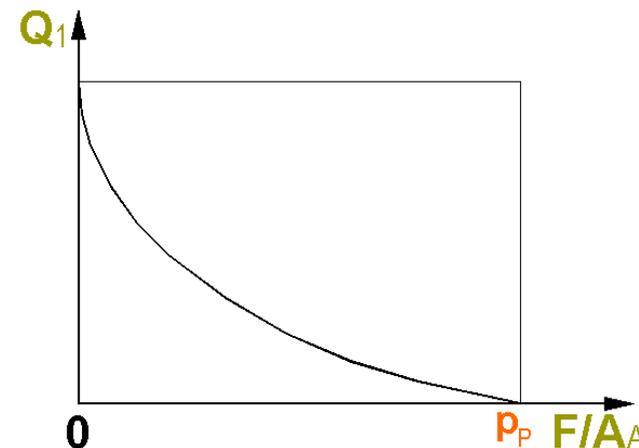
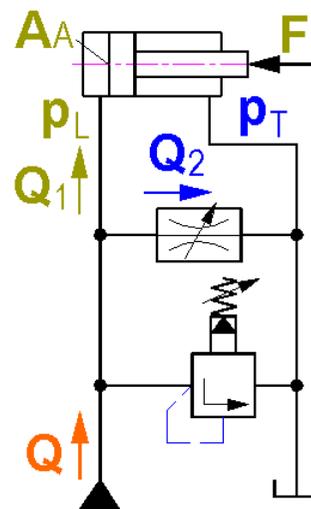


# 流量控制回路 Flow Control Circuits



- 旁路节流调速回路

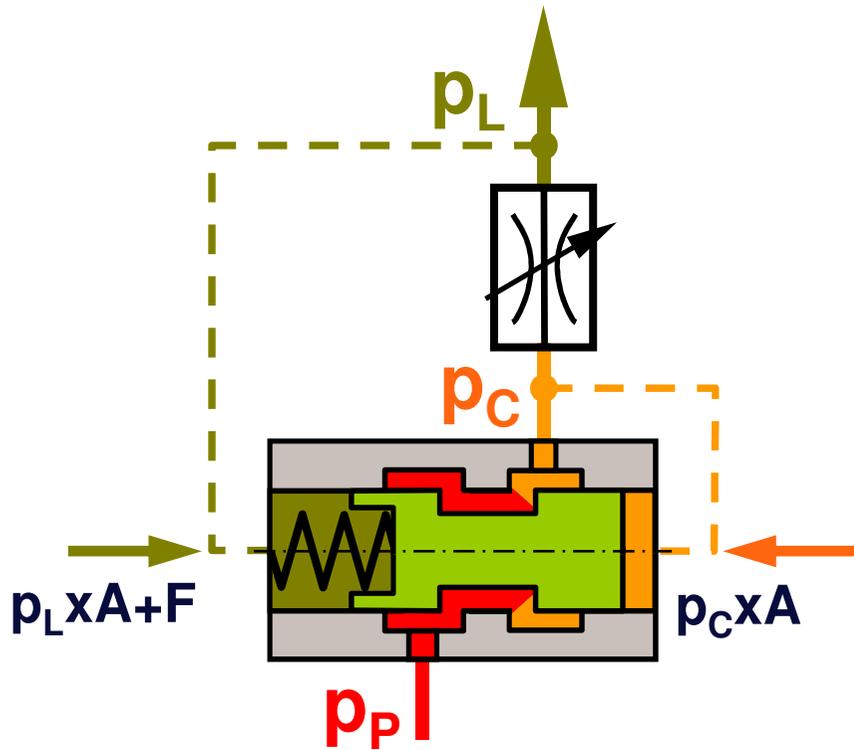
$$Q_1 = Q - kA \sqrt{\frac{F}{A_A}}$$



- 进油、回油、旁路节流调速回路比较

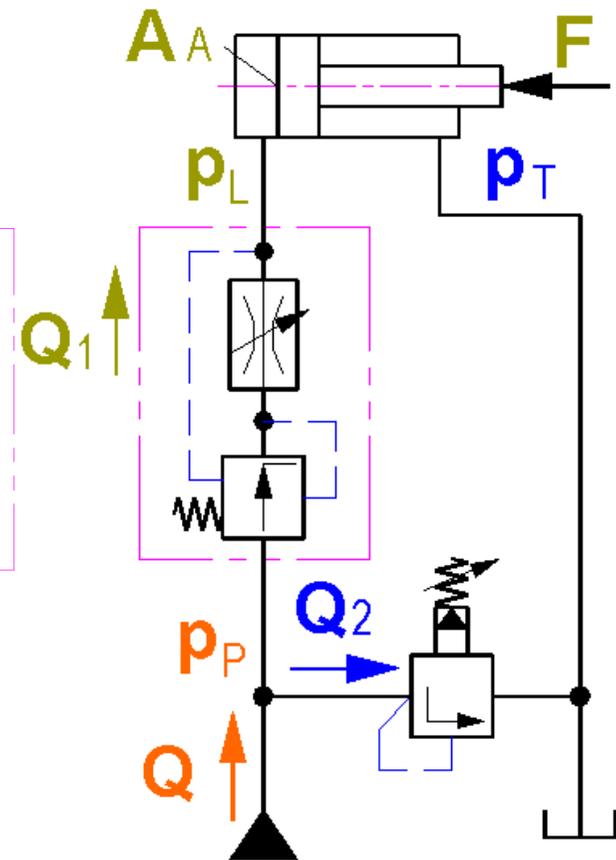
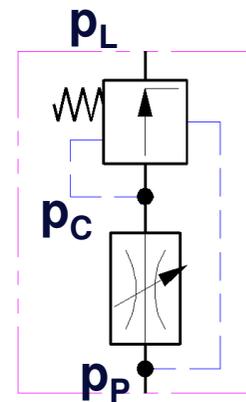
- ★ 回路负载特性
- ★ 节能效果
- ★ 工作平稳性

# 调速阀—带二通压力补偿的流量阀



$$p_L \times A + F = p_C \times A$$

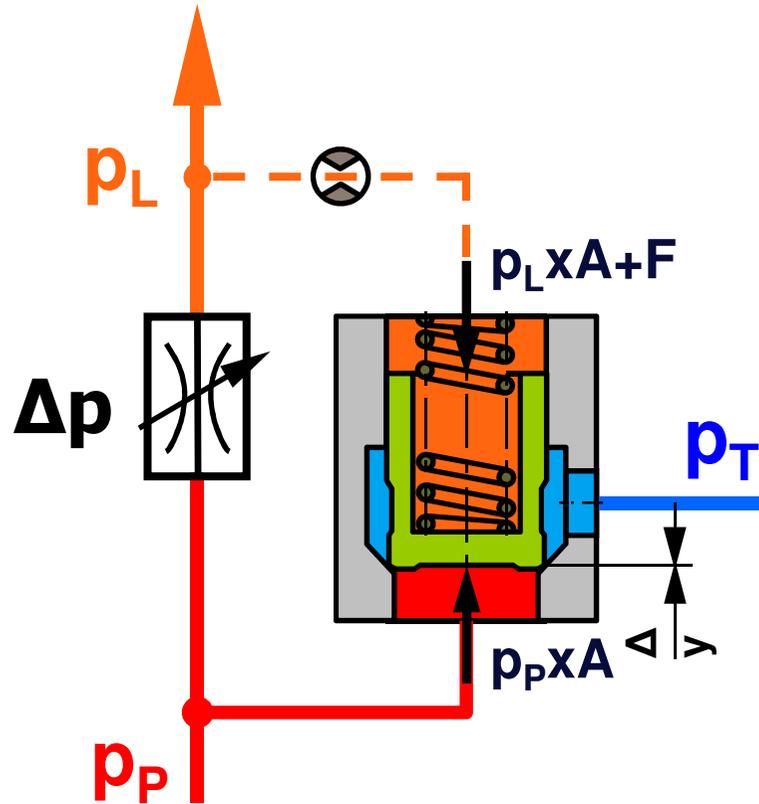
$$\Delta p = p_C - p_L = \frac{F}{A}$$



有用功率:  $p_L \times Q_1$

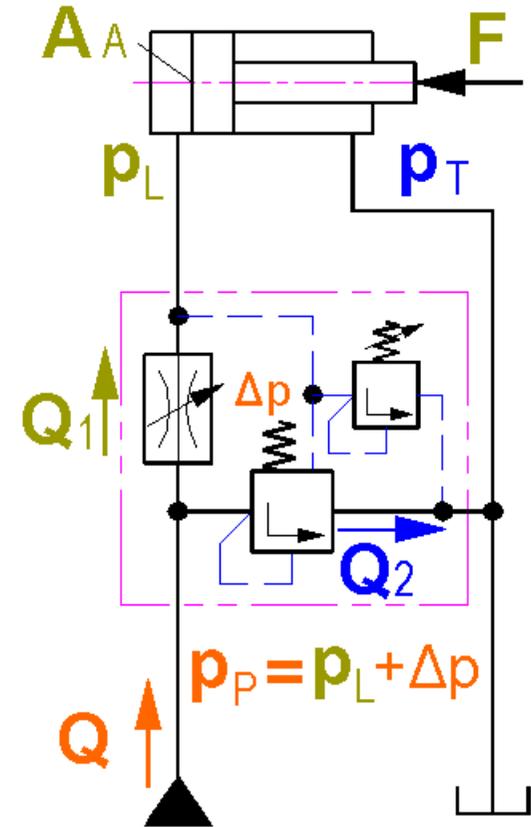
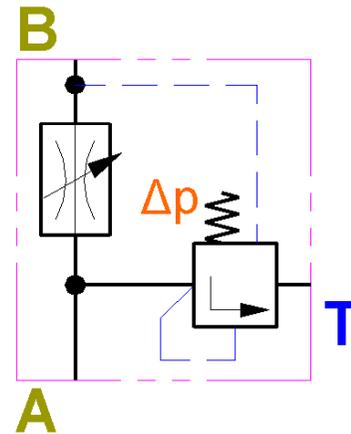
损耗功率:  $(p_P - p_L) \times Q_1 + p_P \times (Q - Q_1)$

# 溢流节流阀 - 带三通压力补偿器的流量阀



$$p_L \times A + F = p_P \times A$$

$$\Delta p = p_P - p_L = \frac{F}{A}$$



有用功率:  $p_L \times Q_1$

损耗功率:

$\Delta p \times Q_1 + (p_L + \Delta p) \times (Q - Q_1)$

# 负载传感压力补偿 (LSPC) - 节流阀后补偿



要求负载传感变量泵

待机压力低

成本高 - 增加：梭阀选择系统 + 压力补偿阀

功率损耗 - 低

优点：

- 液压泵流量不足时，各负载按调定比例分配流量；

需注意：

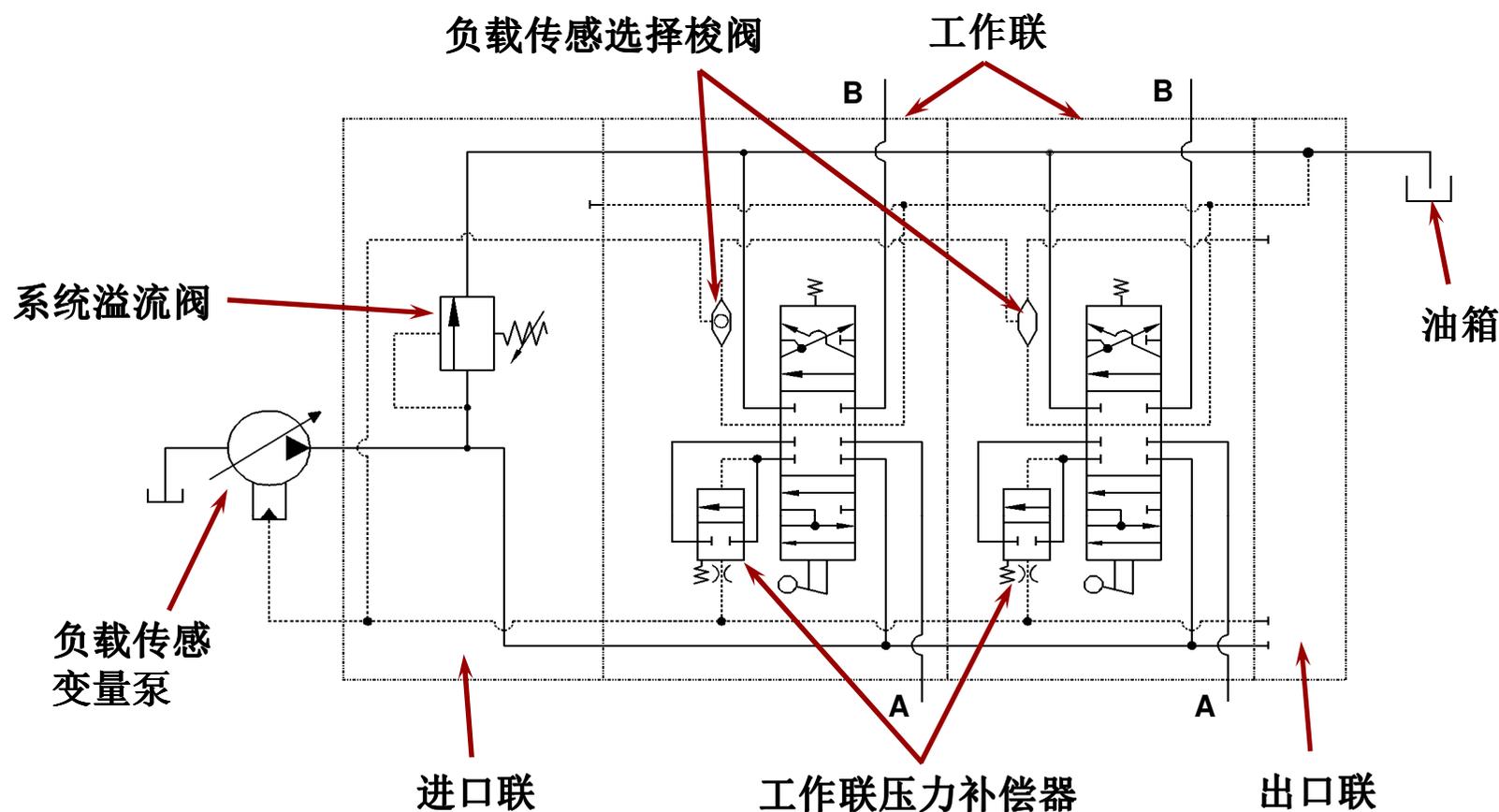
- 在负载传感 (LS) 设定压力以下无限制工作油口压力功能，在工作油口压力补偿阀处将耗能发热。

# 负载传感压力补偿 (LSPC) - 节流阀后补偿



## 节流阀后负载传感补偿阀功能压力图

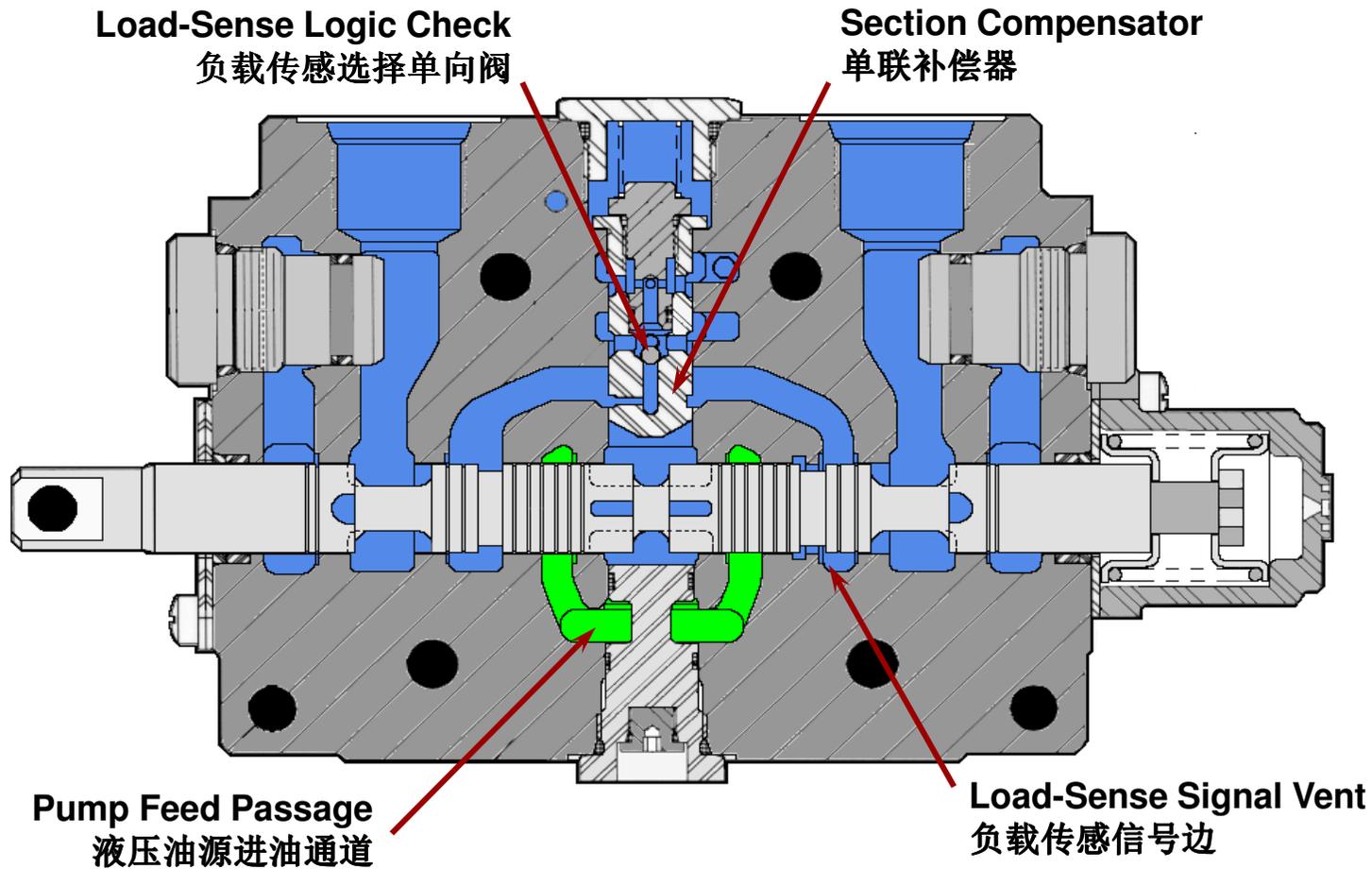
**注：** 液压泵流量在主阀芯后流过补偿器



# 负载传感压力补偿 (LSPC) - 节流阀后补偿



## 单联阀芯横截面

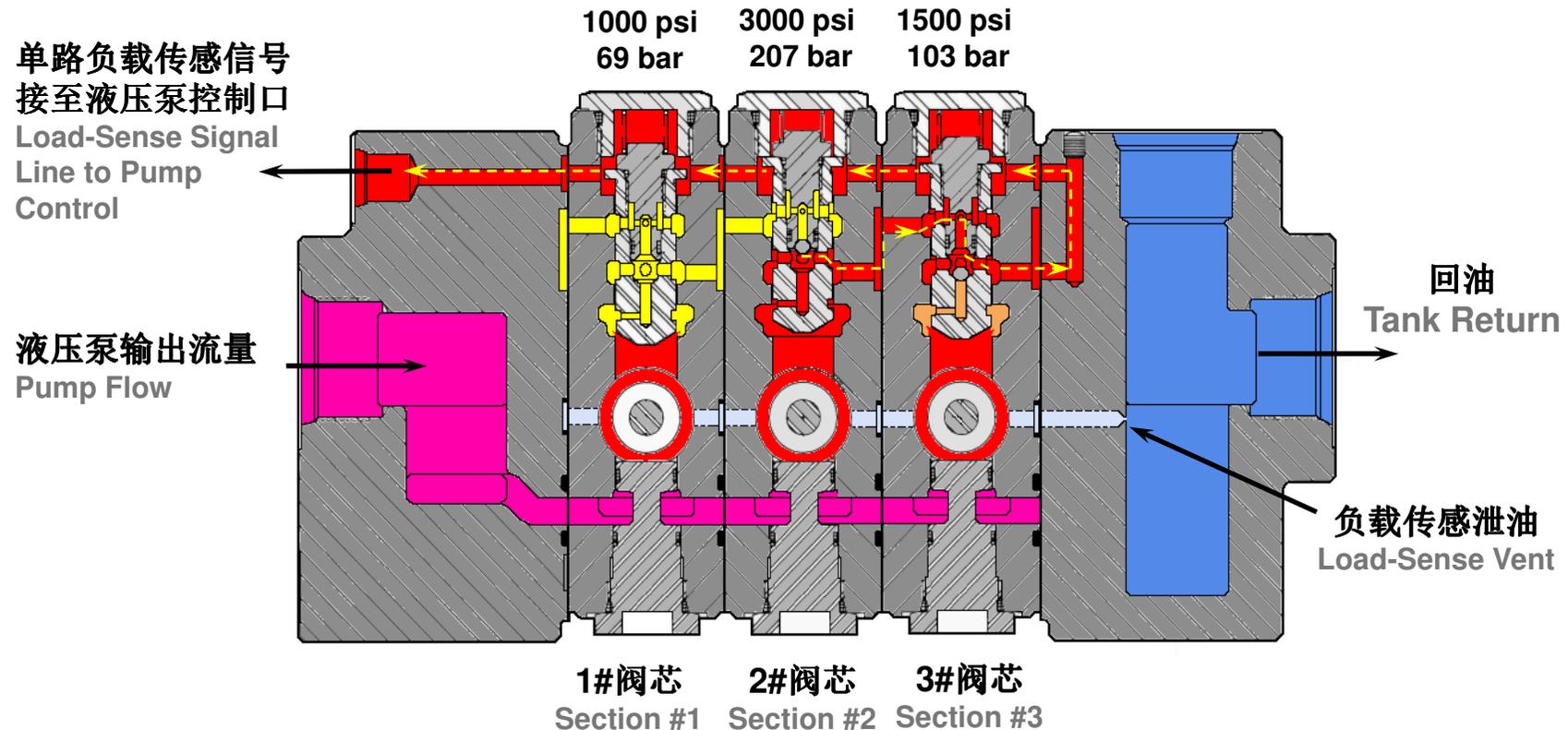


# 负载传感压力补偿 (LSPC) - 节流阀后补偿



## 优点 Advantage:

- 在液压泵输出流量不能满足要求时可实现各负载流量分享  
**Flow sharing during pump overdemand**
- 应注意最高系统工作压力位于压力补偿器的上端!  
**Note highest system pressure on top of compensators!**



# 负载传感压力补偿 (LSPC) - 节流阀后补偿



## 负载传感节流阀后补偿阀 等效原理图

$$p_{Vi} = p_{Lmax} + \Delta p_{Ri} \quad (i = 1, 2, 3 \dots)$$

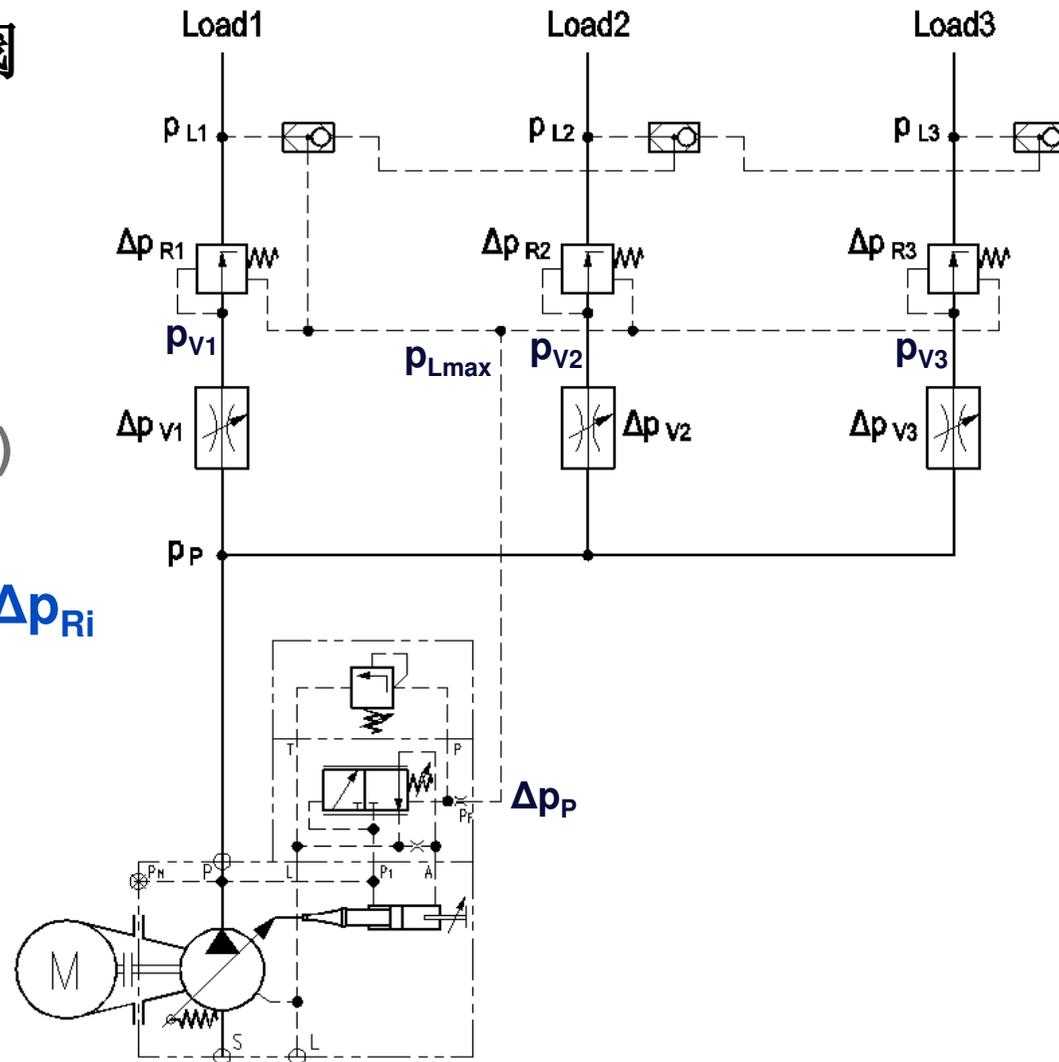
$$\Delta p_{Vi} = p_P - p_{Vi}$$

$$= p_{Lmax} + \Delta p_P - p_{Lmax} - \Delta p_{Ri}$$

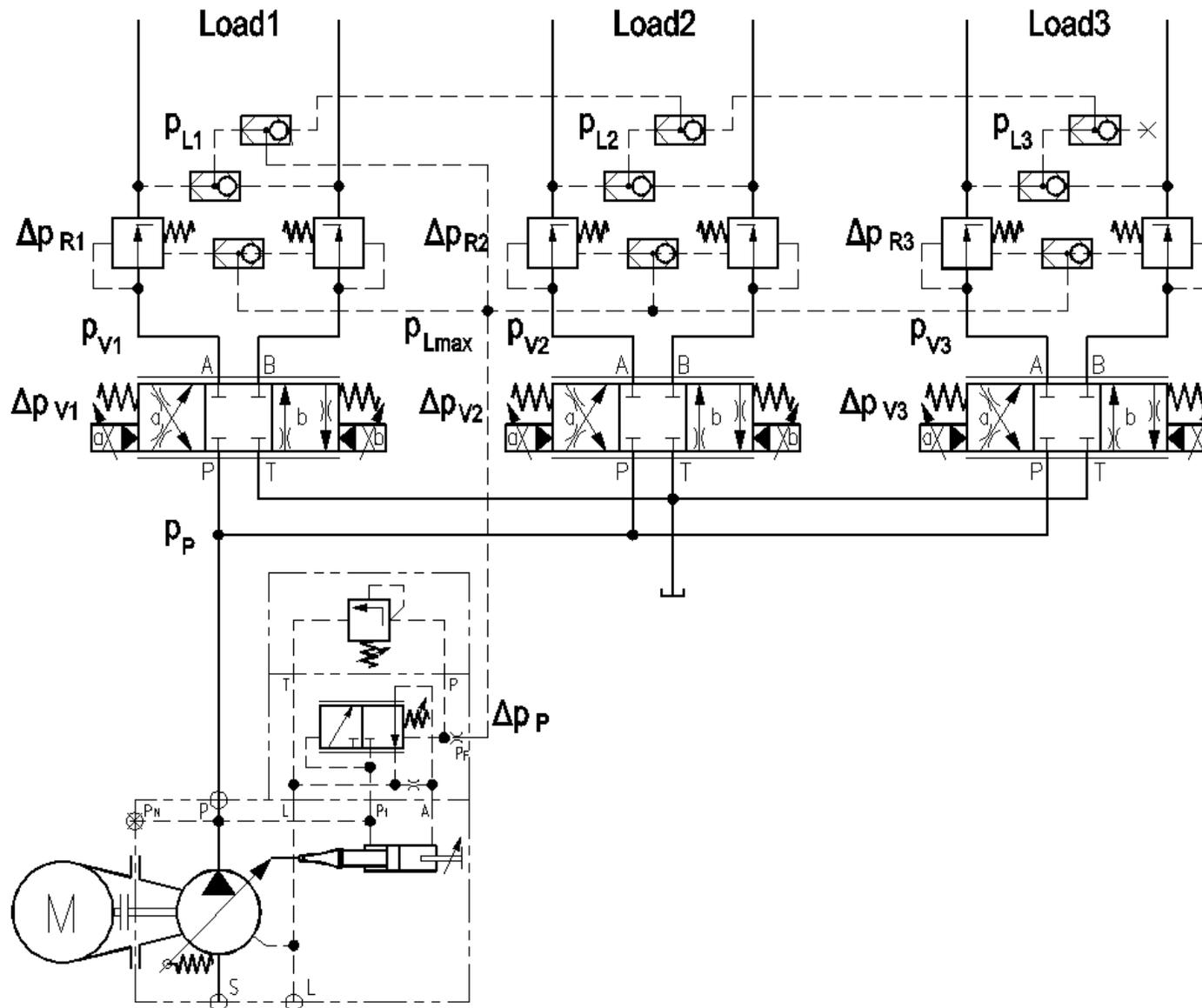
$$= \Delta p_P - \Delta p_{Ri}$$

流量不足时  $p_P \downarrow$

$\Delta p_P \downarrow, \Delta p_{Vi}$  均相应  $\downarrow$



# 负载传感压力补偿 (LSPC) - 节流阀后补偿



# 差动回路 Regenerating Circuits

## 差动 (regenerating) 回路

- 使用 21或31型阀芯 (带有P型机能阀位) 的方向阀。
- 油缸伸出速度:

$$Q_A = Q + Q_B$$

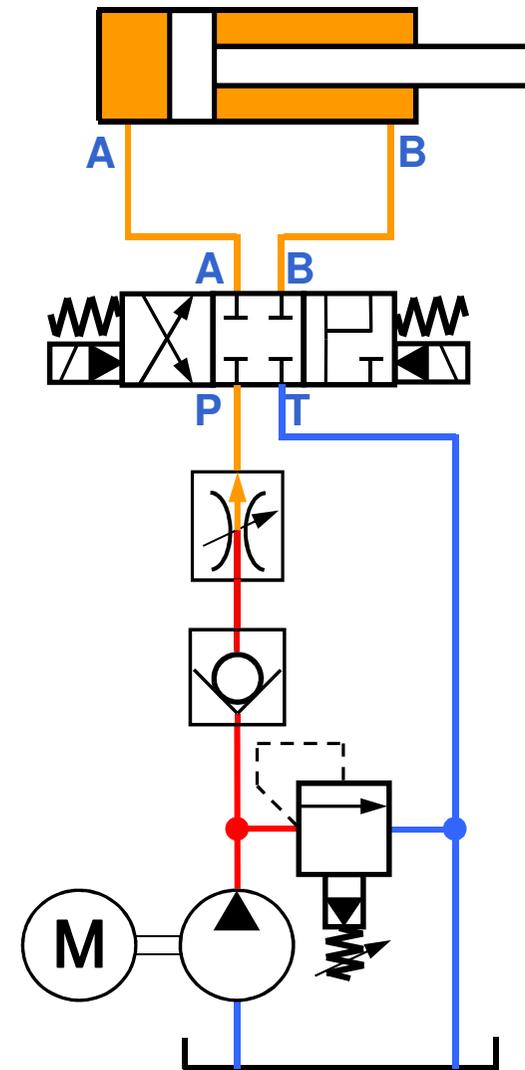
$$V_{\text{ext}} A_A = Q + V_{\text{ext}} A_B$$

$$V_{\text{ext}} = \frac{Q}{A_A - A_B} = \frac{4Q}{\pi D^2 - \pi(D^2 - d^2)} = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

- 油缸缩回速度:

$$V_{\text{ret}} = \frac{Q}{A_B} = \frac{4Q}{\pi(D^2 - d^2)}$$

- 若油缸的面积比  $i = 2:1$ ，则伸出和缩回的速度相等。

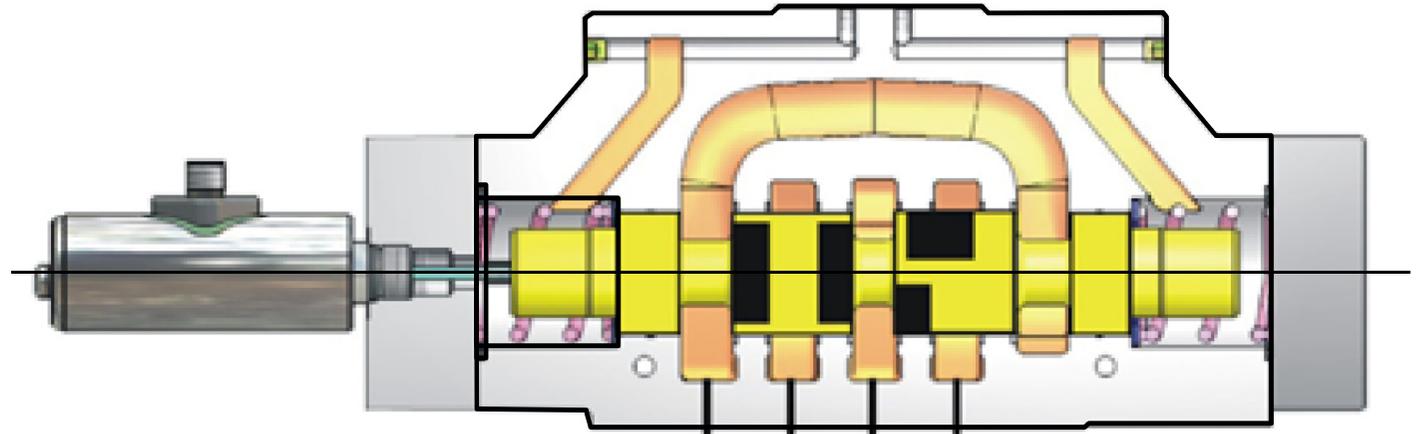


# 差动回路 Regenerating Circuits

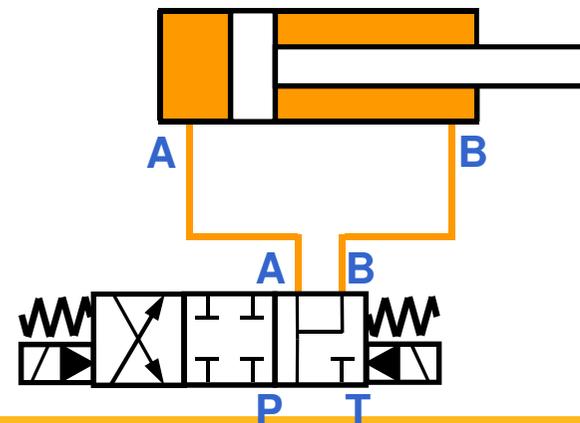


## P口差动及A口差动的概念

- A口差动:

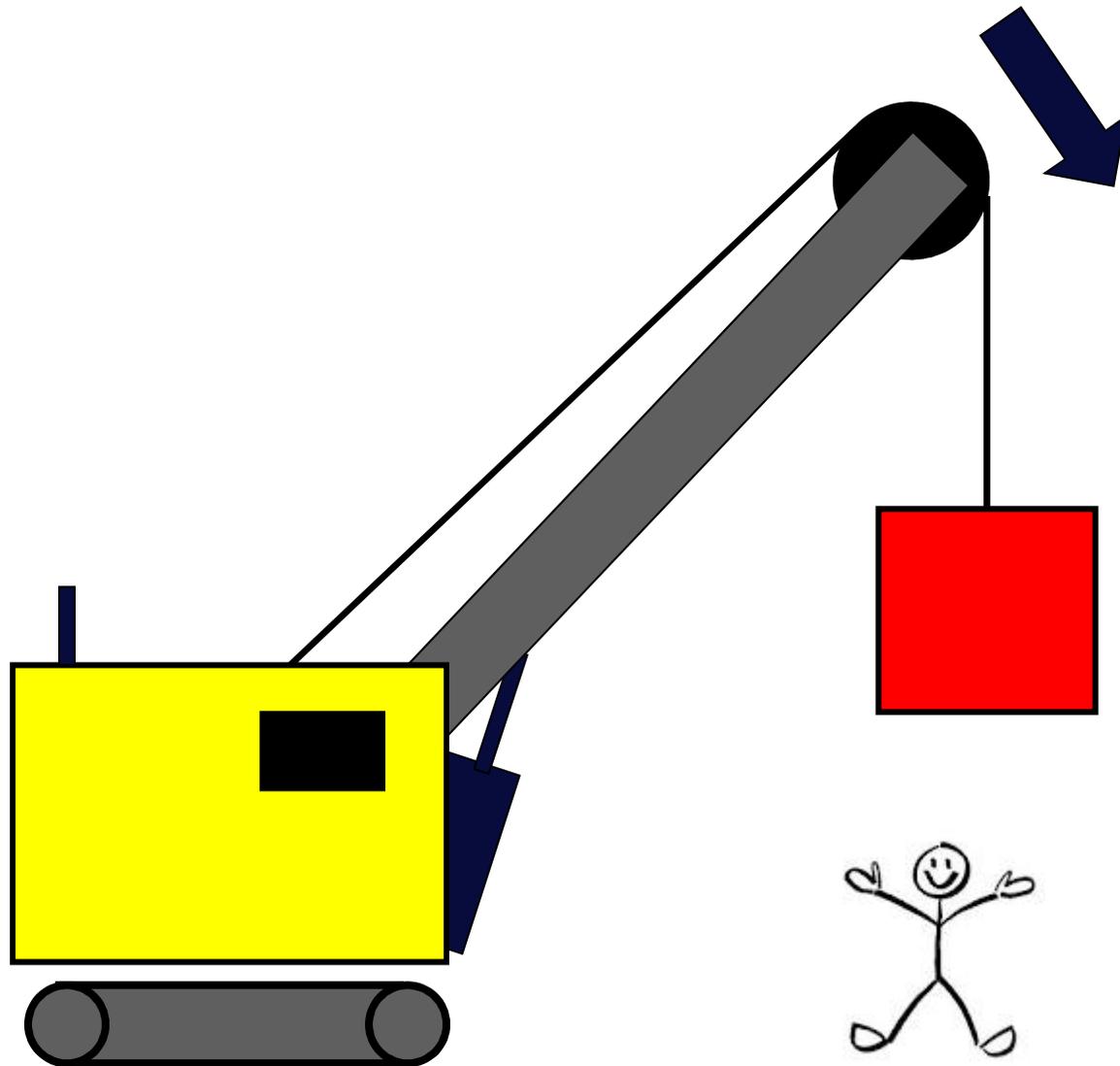


- 若油缸的面积比  $i = 2:1$ ，则伸出和缩回的速度相等。



# 失速负载

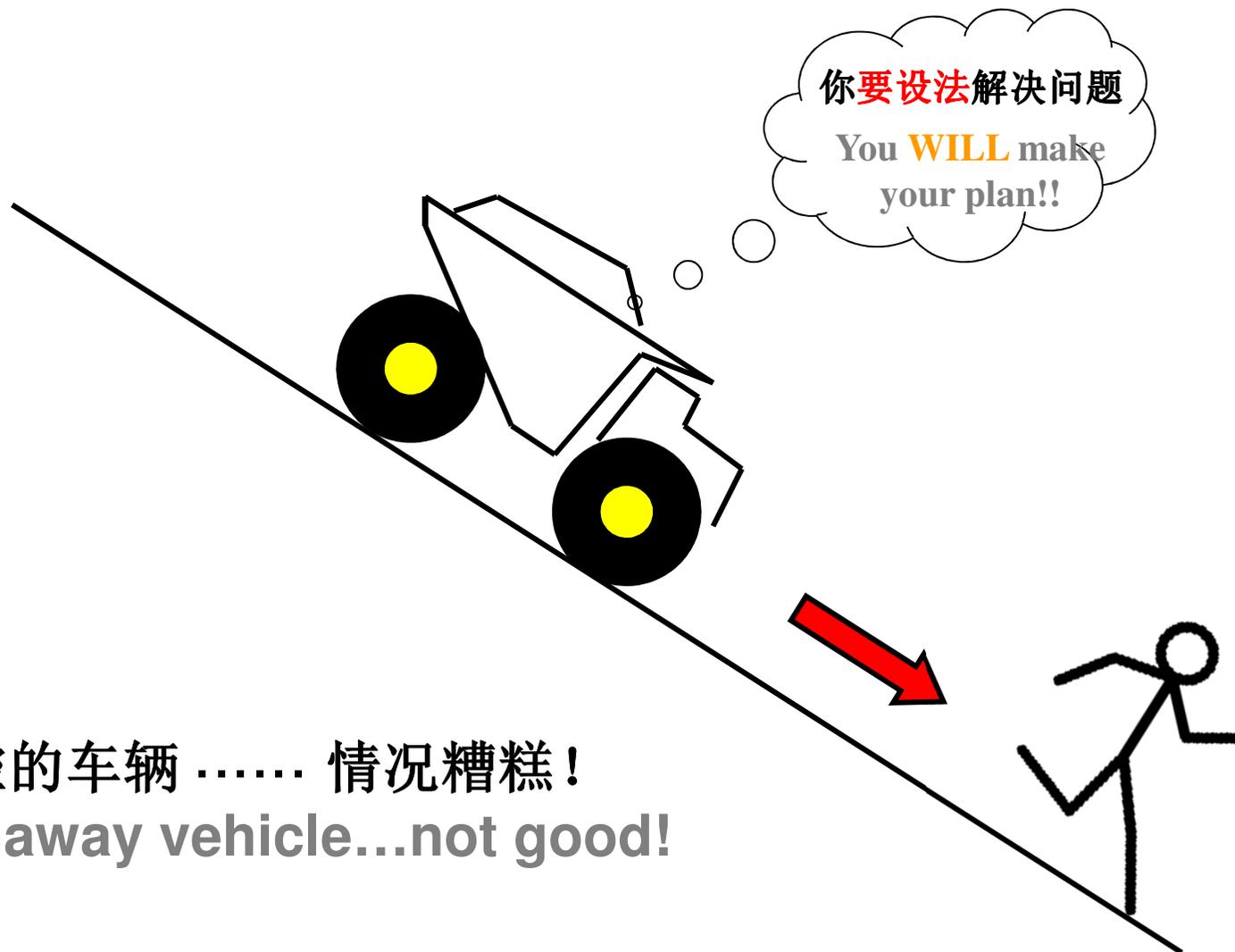
# Overrunning Loads



吊臂运动  
Boom motion

# 失速负载

# Overrunning Loads

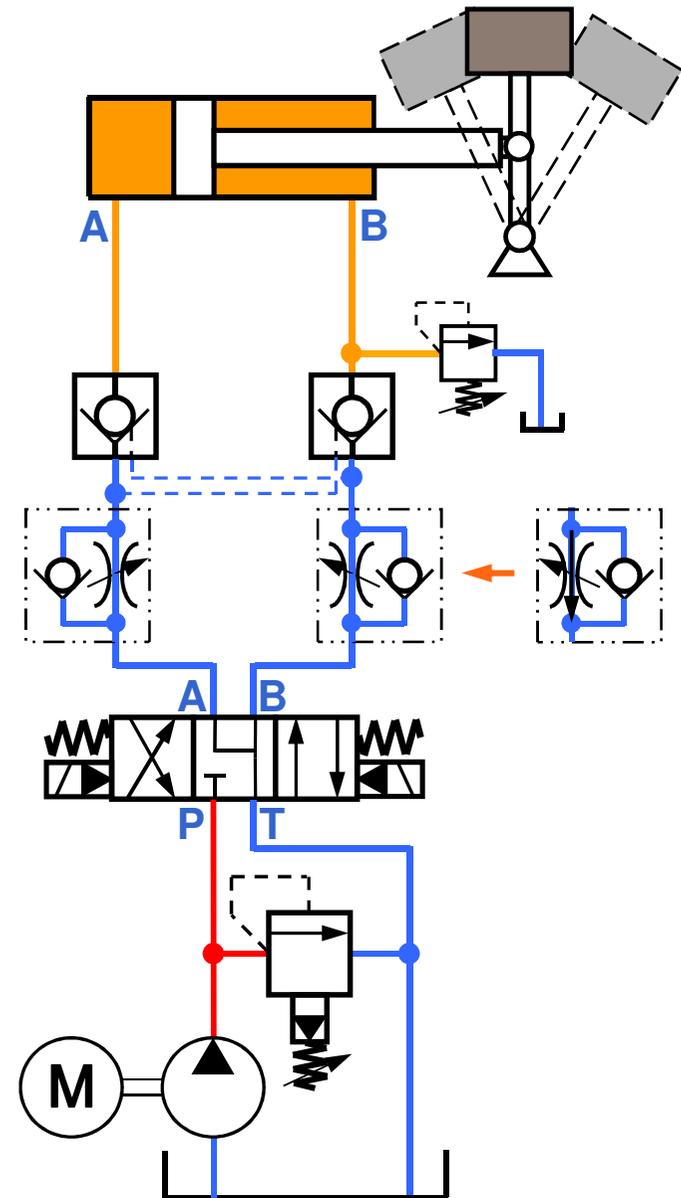


# 失速控制回路 Overcenter Load Control



## 液控单向阀+回油节流回路

- 使用液压锁 (即双液控单向阀, 且互控开启) 可锁定油缸的位置。
- 必须使用 Y 型机能或其它中位时 A、B 油口均卸荷 (如 H 型等) 方向阀, O 型机能阀不可用, 否则液压锁会失效。
- 注意液控单向阀面积比的选择:  
工作压力高, 面积比可选得较大; 液控单向阀的最低控制压力不得低于 10 bar。
- 通过回油节流产生背压支承负载, 并限制负载速度。
- 改用回油调速, 则负载速度可控。
- 无杆腔压力可能超高。

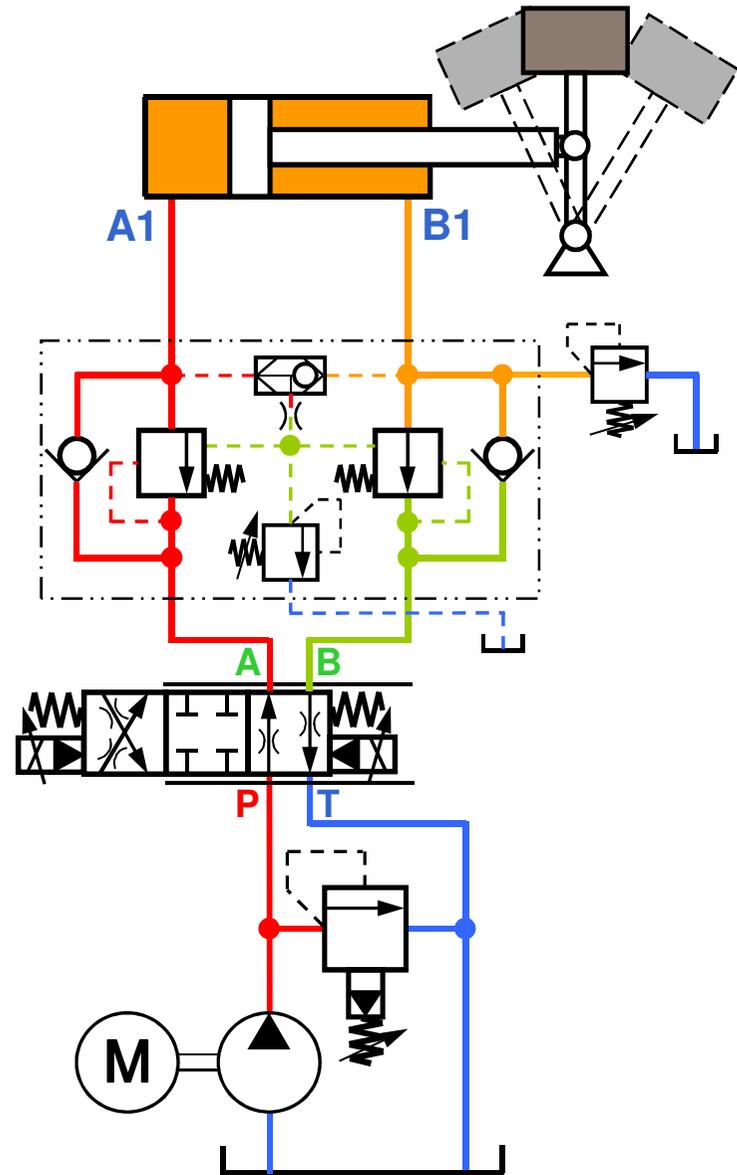


# 失速控制回路 Overcenter Load Control



## 比例方向阀+回油压力补偿回路

- 比例阀B→T控制边为节流口，节流面积与输入信号成正比。
- B口上游为一个减压阀，控制B口处的压力由先导压力阀调节，为常数。
- 故B→T控制边两端的压差为常数，流经该节流口的流量恒定，负载的速度将保持恒定。避免了失速工况的发生
- 无杆腔压力可能超高。



# 负载平衡回路 Counterbalance Circuits

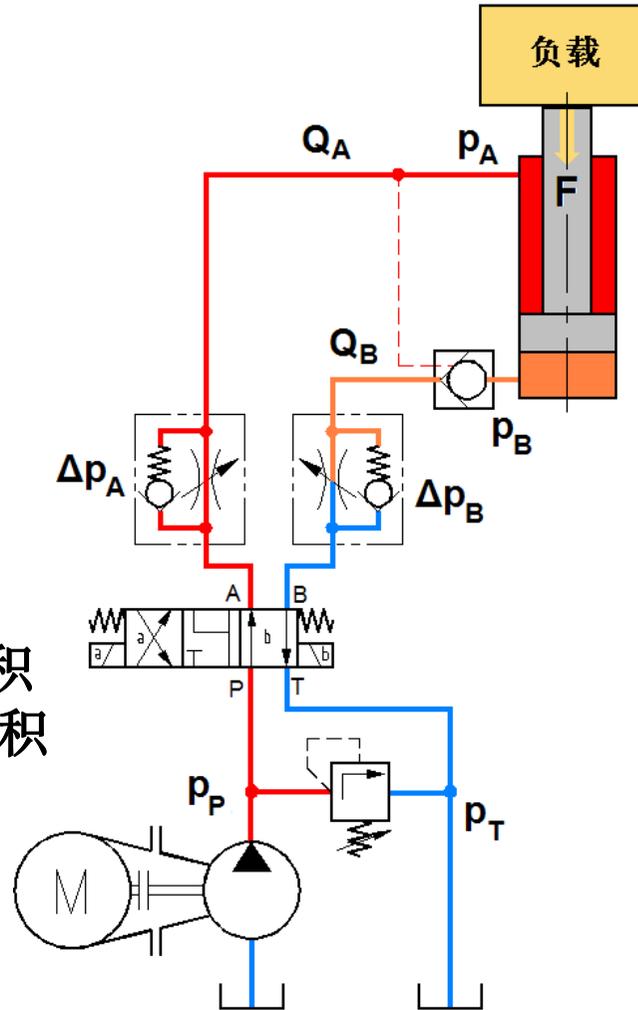


持住回路

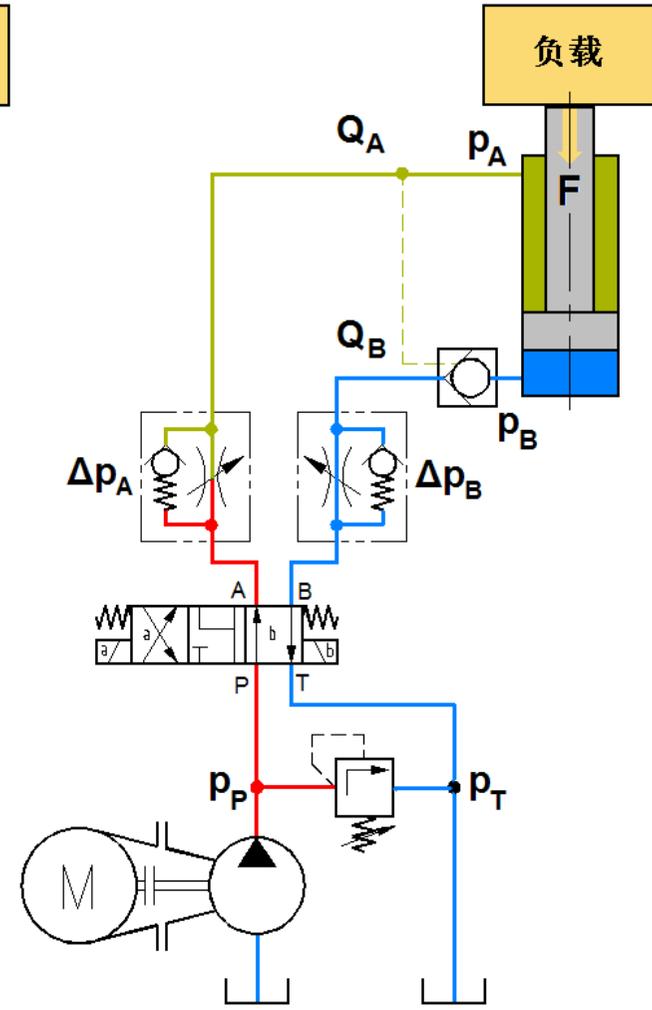
$$p_B = \frac{F}{A} + \frac{p_P}{i}$$

$$= p_L + \frac{p_P}{i}$$

$i$  = 面积比  
 = 有杆腔承压面积 / 无杆腔承压面积



回油节流



~~进油节流~~

# 负载平衡回路 Counterbalance Circuits



液控单向阀+回油节流回路

下(有杆)腔压力会超高

$$p_A A_A + F_{load} = p_B A_B$$

$$p_B = \frac{p_A A_A}{A_B} + \frac{F_{load}}{A_B}$$

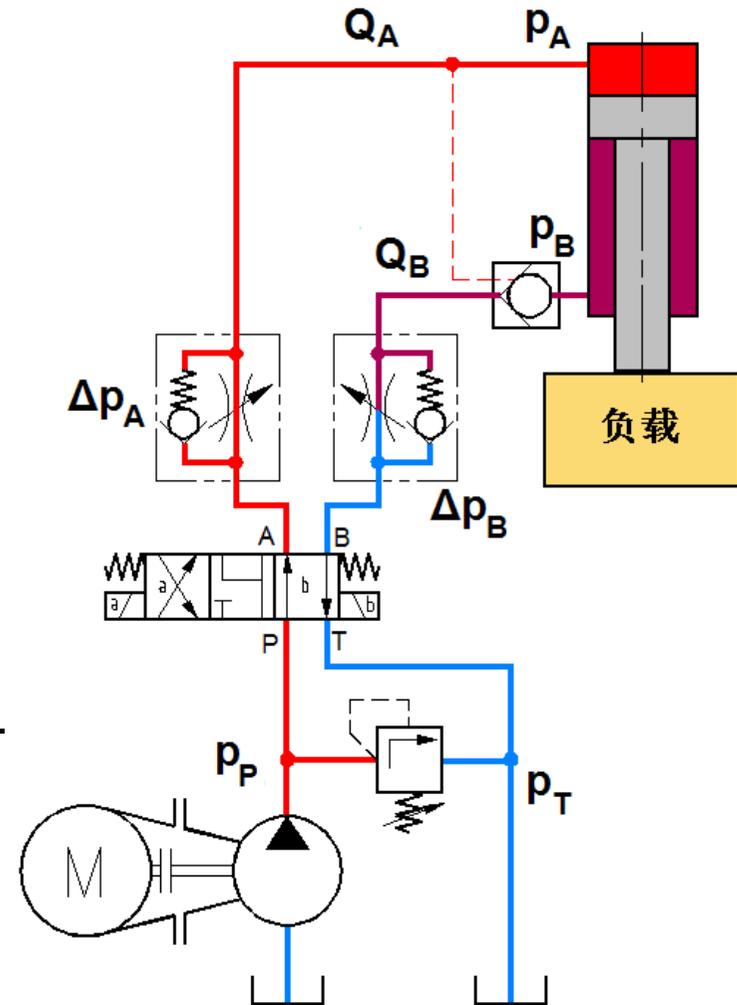
$$= i p_P + p_{Load}$$

$$i \text{ (液压缸面积比)} = \frac{A_A \text{ (无杆腔承压面积)}}{A_B \text{ (有杆腔承压面积)}}$$

液控单向阀起负载位置锁定功能；

负载下降速度与负载有关；

负载重速度快，负载轻则速度慢；



液控单向阀+回油节流  
负载下降速度 → 负载

# 负载平衡回路 Counterbalance Circuits



液控单向阀+回油调速回路

下(有杆)腔压力会超高

$$p_A A_A + F_{load} = p_B A_B$$

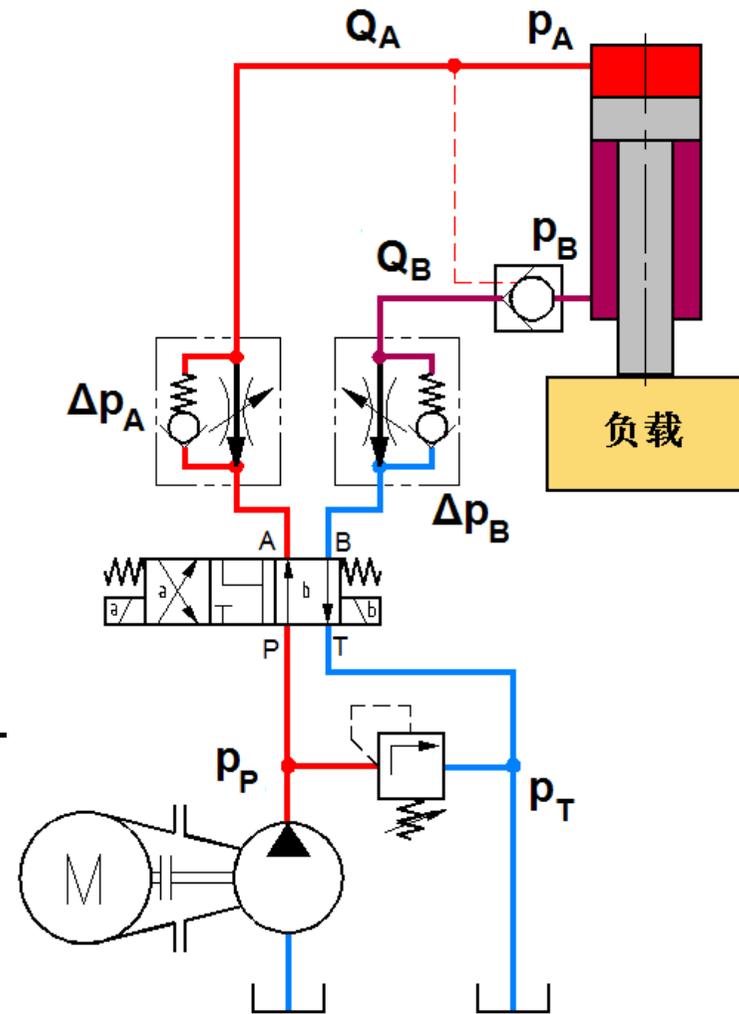
$$p_B = \frac{p_A A_A}{A_B} + \frac{F_{load}}{A_B}$$

$$= i p_P + p_{Load}$$

$$i \text{ (液压缸面积比)} = \frac{A_A \text{ (无杆腔承压面积)}}{A_B \text{ (有杆腔承压面积)}}$$

液控单向阀起负载位置锁定功能；

负载下降速度由回油调速阀调整确定，速度稳定可控而与负载无关。

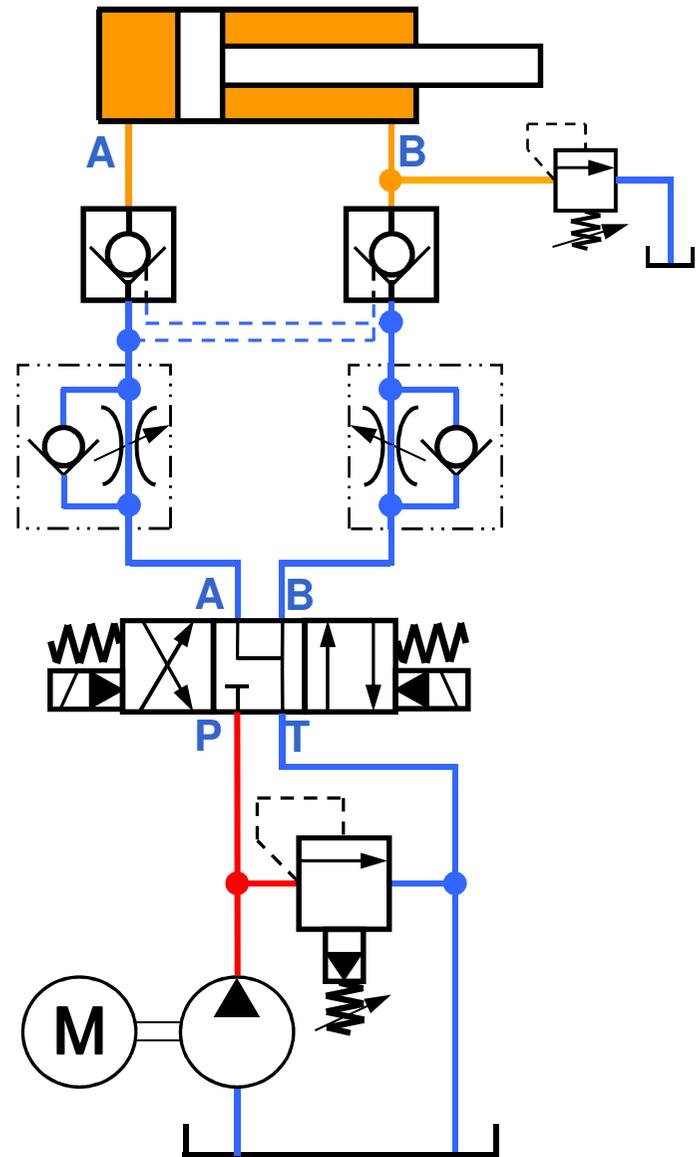


液控单向阀+回油调速  
负载下降速度 → 恒定

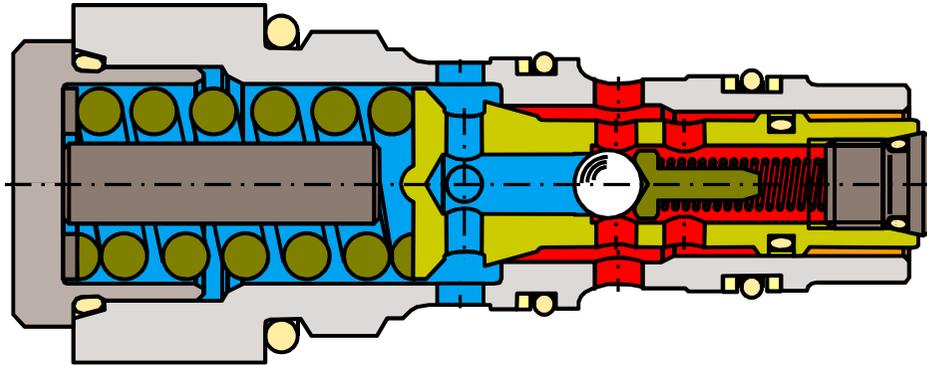
# 位置锁定(液压锁)回路

## 位置锁定 (position holding) 回路

- 使用液压锁 (即双液控单向阀,
- ~~必须使用H型机能确定其它的位置~~  
A、B 油口均卸荷 (如 H 型等) 方向阀, O 型机能阀不可用, 否则液压锁会失效。
- 注意液控单向阀面积比的选择:
  - ▶ 工作压力高, 面积比可选得较大, 利于节能
  - ▶ 液控单向阀的最低控制压力不得低于 10 bar, 以确保位置锁定的可靠



# 压力型平衡阀 Counterbalance Valves (Holding Valves, Overcenter Valves, Boom Lock Valves)

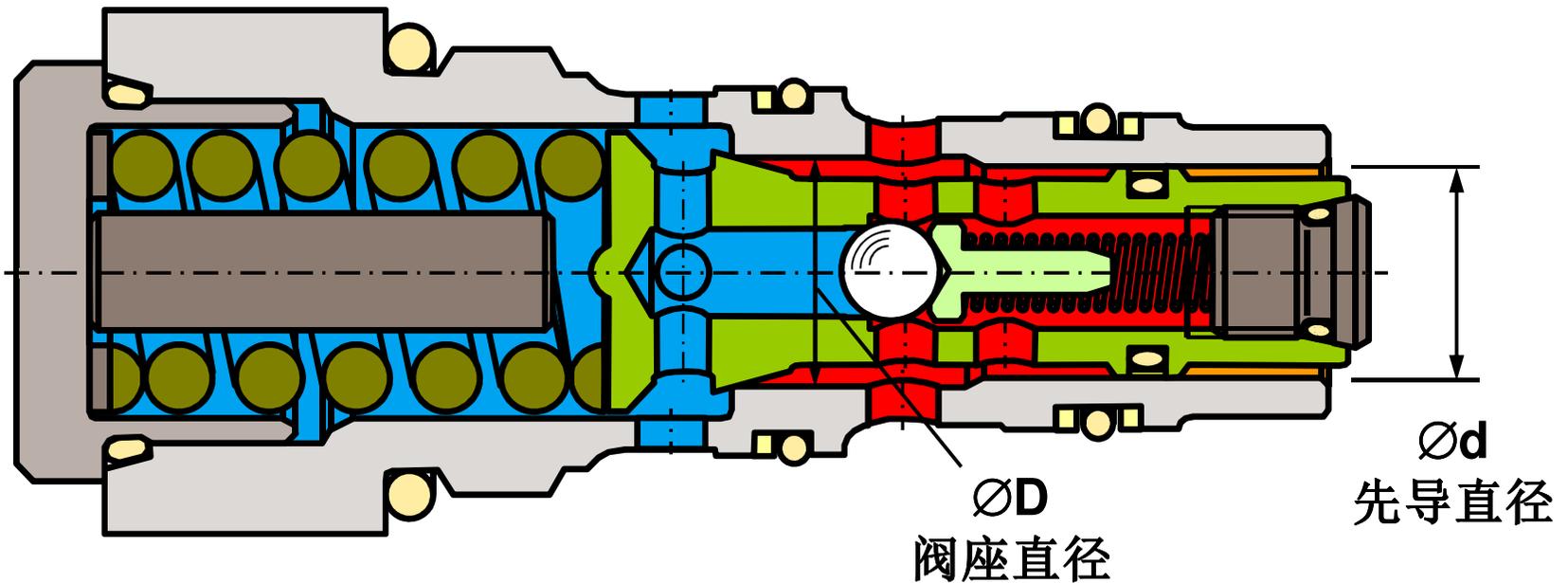


- 具有负载位置锁定功能，防止因传统阀芯的泄漏引起的漂移；  
Hold loads in position to prevent drift from typical spool leakage;
- 负载速度由进油流量阀调整确定，可防止负载力造成的液压泵超速；  
Prevent loads from overrunning the pump;
- 具有软管或管道破裂时的安全功能；  
Safety from hose or line ruptures;
- 提供对负载的缓慢加速功能 (类型拍打作用)；  
Provides slow deceleration of load (Like flaps);
- 提供热胀溢流功能。  
Provides thermal relief protection.

# 压力型平衡阀 Counterbalance Valves



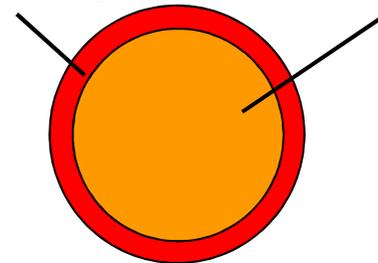
压力型平衡阀



$$A_B = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$$

$$A_C = \frac{\pi d^2}{4}$$

主阀作用面积  $A_B$       先导作用面积  $A_C$

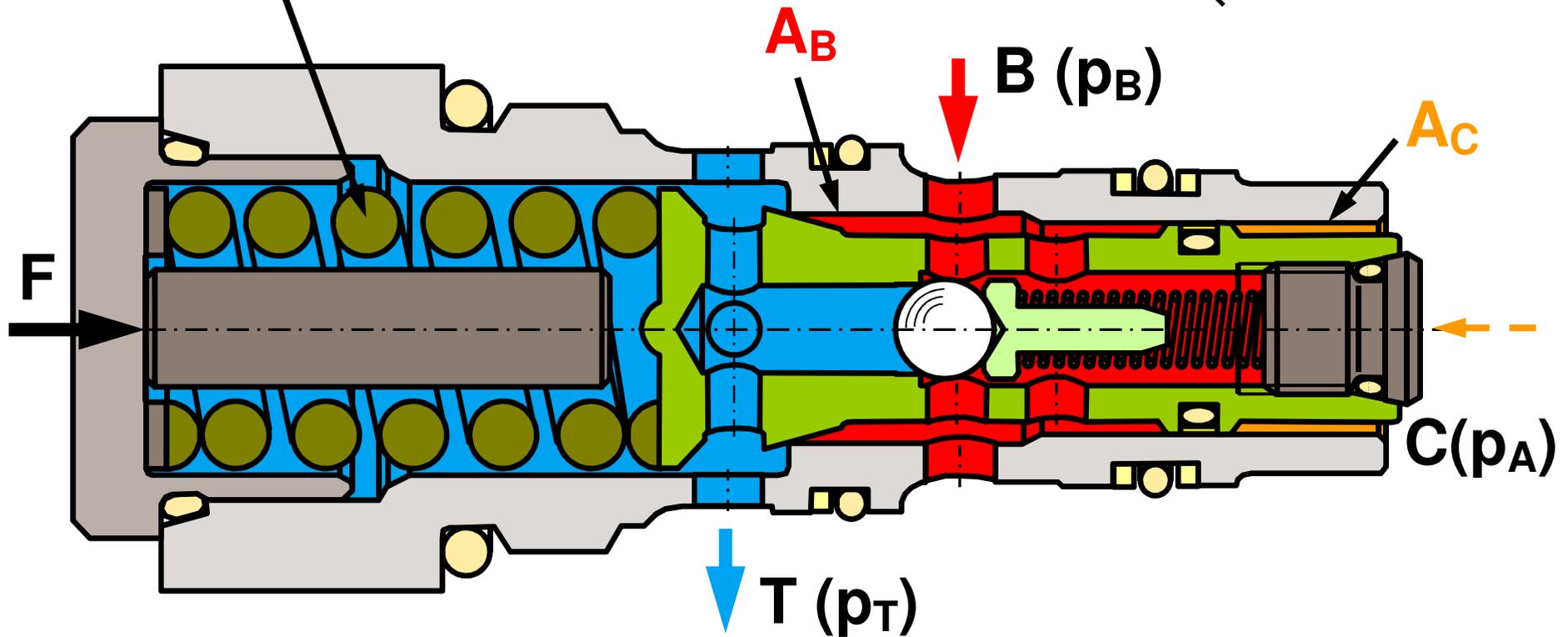
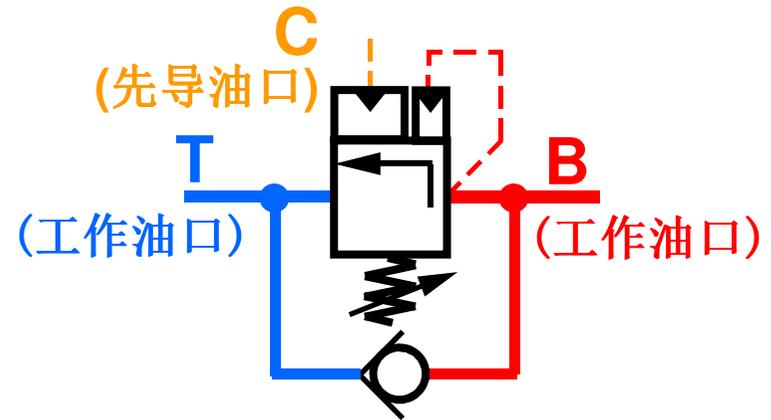


# 压力型平衡阀 Counterbalance Valves



$$j = \frac{A_C}{A_B} \quad \text{— 平衡阀面积比}$$

$$P_V = \frac{F}{A_B} \quad \text{— 平衡阀设定压力}$$



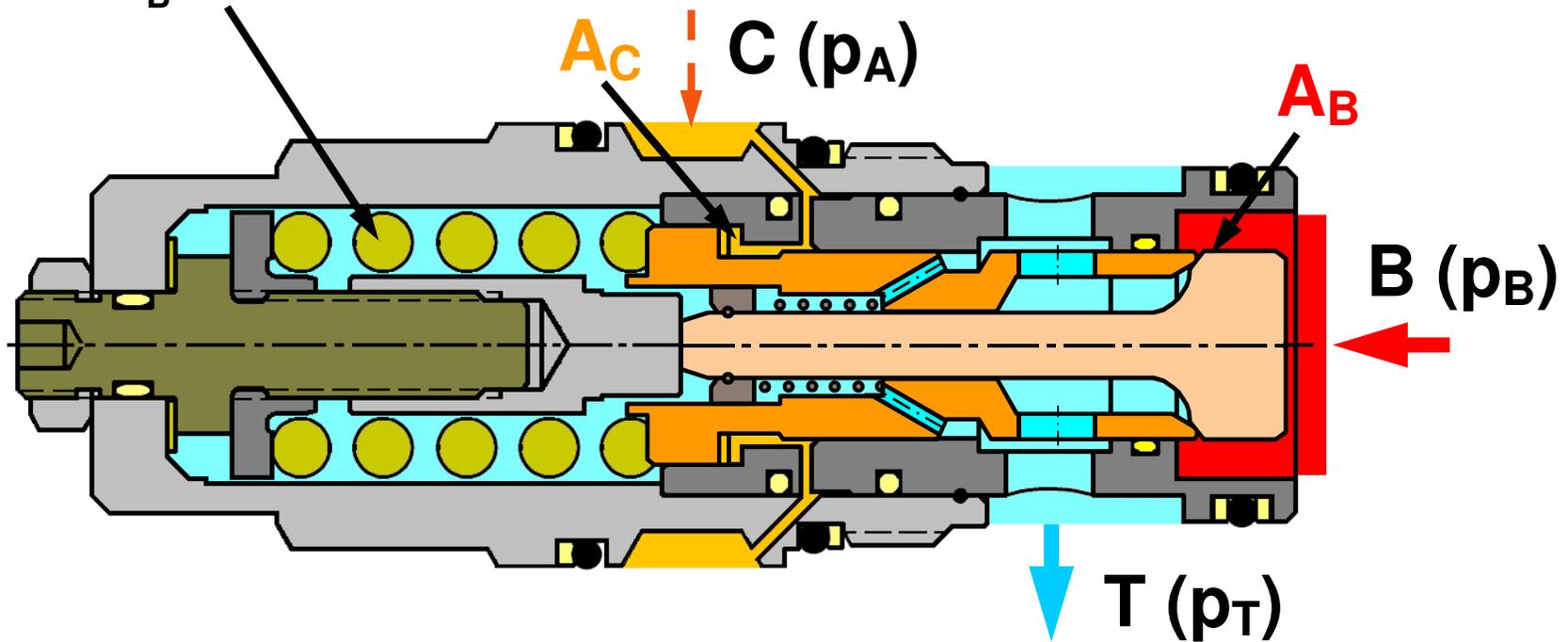
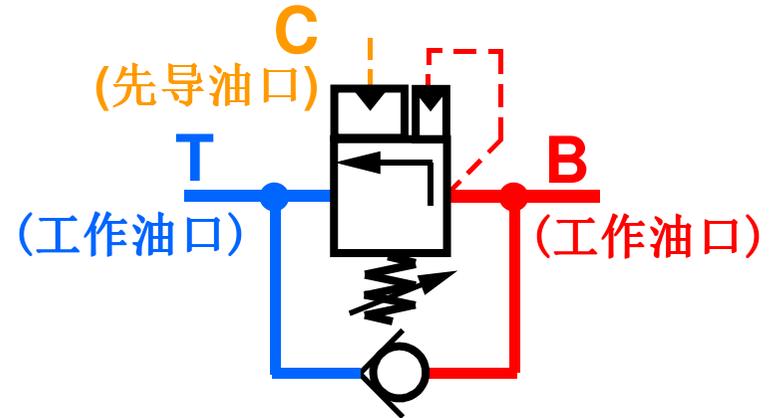
# 压力型平衡阀 Counterbalance Valves



## 压力型平衡阀

$$j = \frac{A_C}{A_B} \quad \text{— 平衡阀面积比}$$

$$P_V = \frac{F}{A_B} \quad \text{— 平衡阀设定压力}$$



# 负载平衡回路 Counterbalance Circuits



## 压力型平衡阀回路

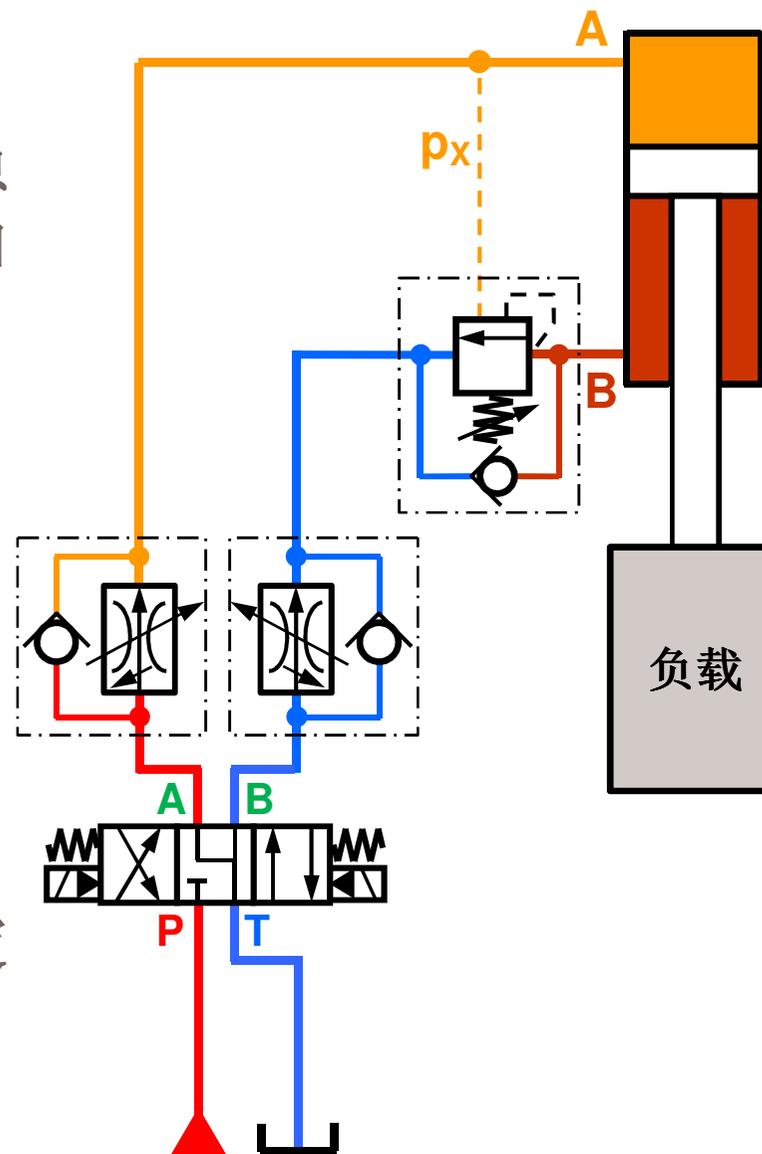
- 平衡阀设定压力  $p_v$  应高于最大负载引起的负载压力  $p_L$ ，负载可由平衡阀持住；
- 若平衡阀的面积比为:  $j$ ，液压缸的面积比为:  $i$ ，则：

$$p_B = \frac{ip_v + jp_L}{i+j} \quad \text{下腔压力低}$$

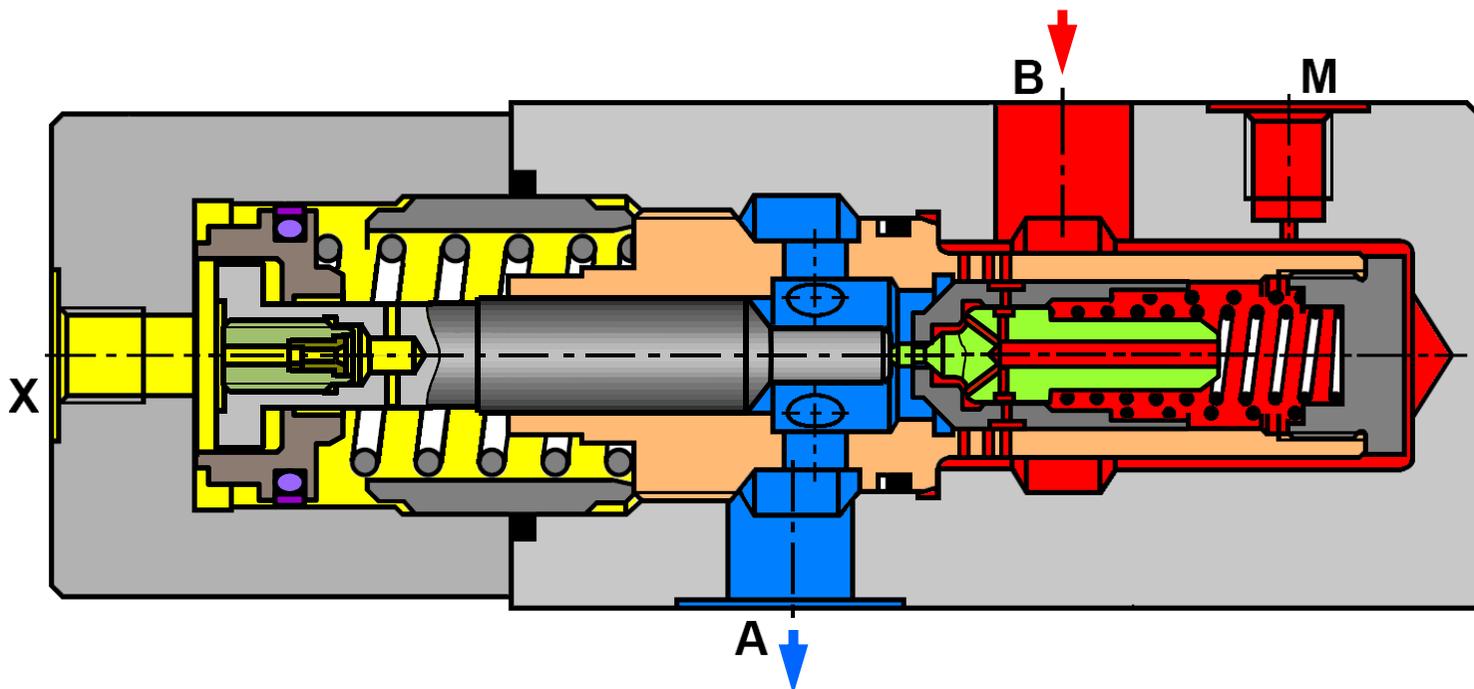
$$p_x = p_A = \frac{pv - p_L}{i+j}$$

- 负载下降速度由进油流量阀调定

$$v = \frac{Q_A}{A_A} \quad \text{采用进油调速}$$

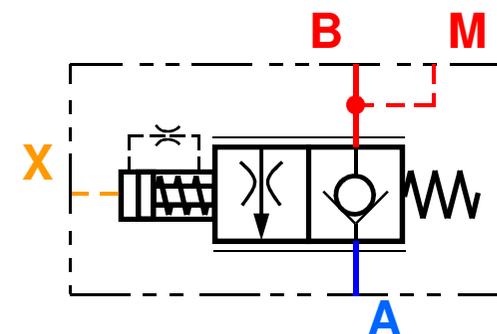


# 负载平衡回路 Counterbalance Circuits



## ● 流量型 (Check-Q)

- 本质上是带预卸荷的液控单向阀, 面积比**20:1**
- 打开预卸荷小阀芯的先导压力为:  $p_x = \frac{p_L}{j-i}$
- 打开主阀芯的起始先导控制压力为: **20bar**
- 主阀芯全开时的先导控制压力为: **50bar**



# 负载平衡回路 Counterbalance Circuits



## 流量型平衡阀回路

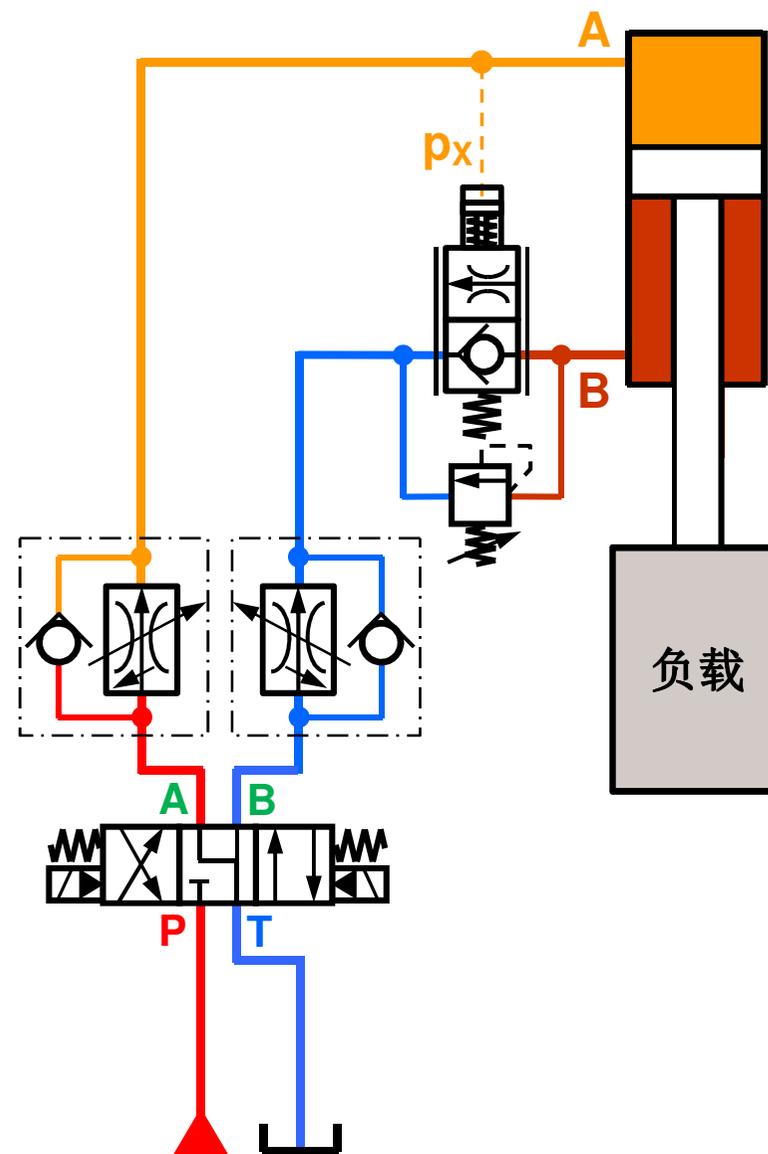
- 若液压缸的面积比为:  $i$ , 则:

$$p_B = p_L + ip_A$$

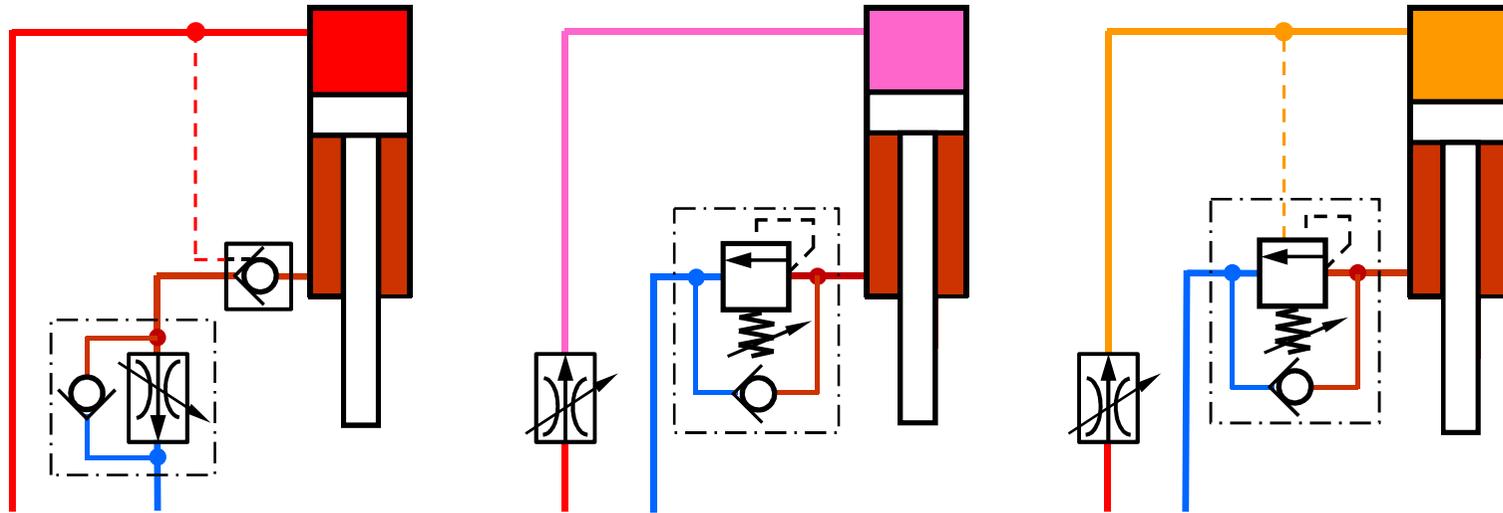
$$p_X = p_A = 20 \sim 50\text{bar}$$

- 负载下降速度由进油流量阀调整确定

$$v = \frac{Q_A}{A_A}$$



# 不同负载平衡回路方案比较



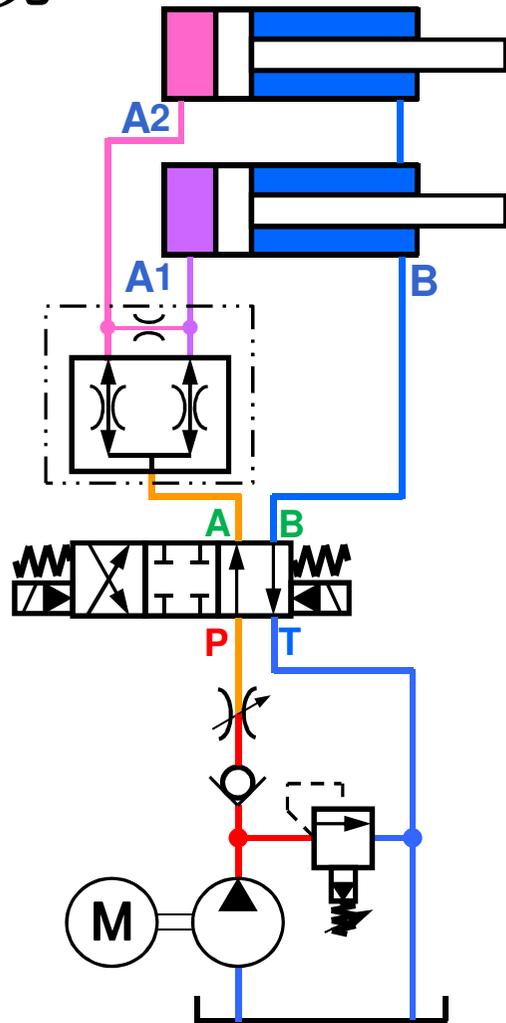
|           | 流量阀+液控单向阀方案   | 溢流(背压)阀方案   | 平衡阀方案  |
|-----------|---|---|--|
| <b>特征</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>防止失速，下行速度由回油调速阀设定</li> <li>由液控单向阀提供负载支承</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>防止失速，下行速度由进油调速阀设定</li> <li>提供负载支承</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>防止失速，下行速度由进油调速阀设定</li> <li>提供负载支承</li> <li>下行压力低</li> </ul> |
| <b>缺点</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>下行压力高</li> <li>液控单向阀开启增益大，下行起始时有下冲现象</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>下行压力高</li> </ul>                             |  |

# 分集流阀同步回路

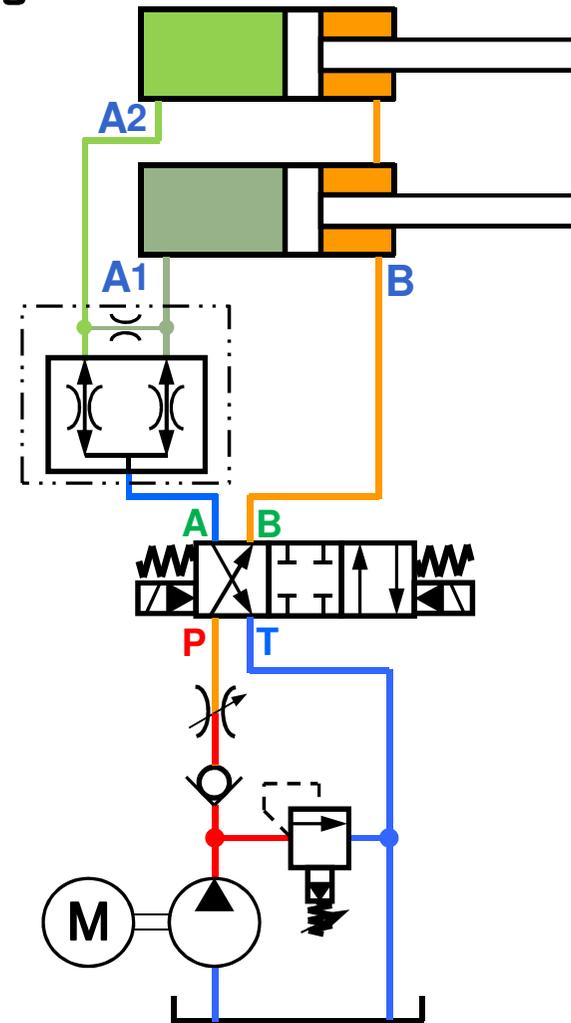


## Synchronizing Circuits with Flow Divider and Combiner

分流工况



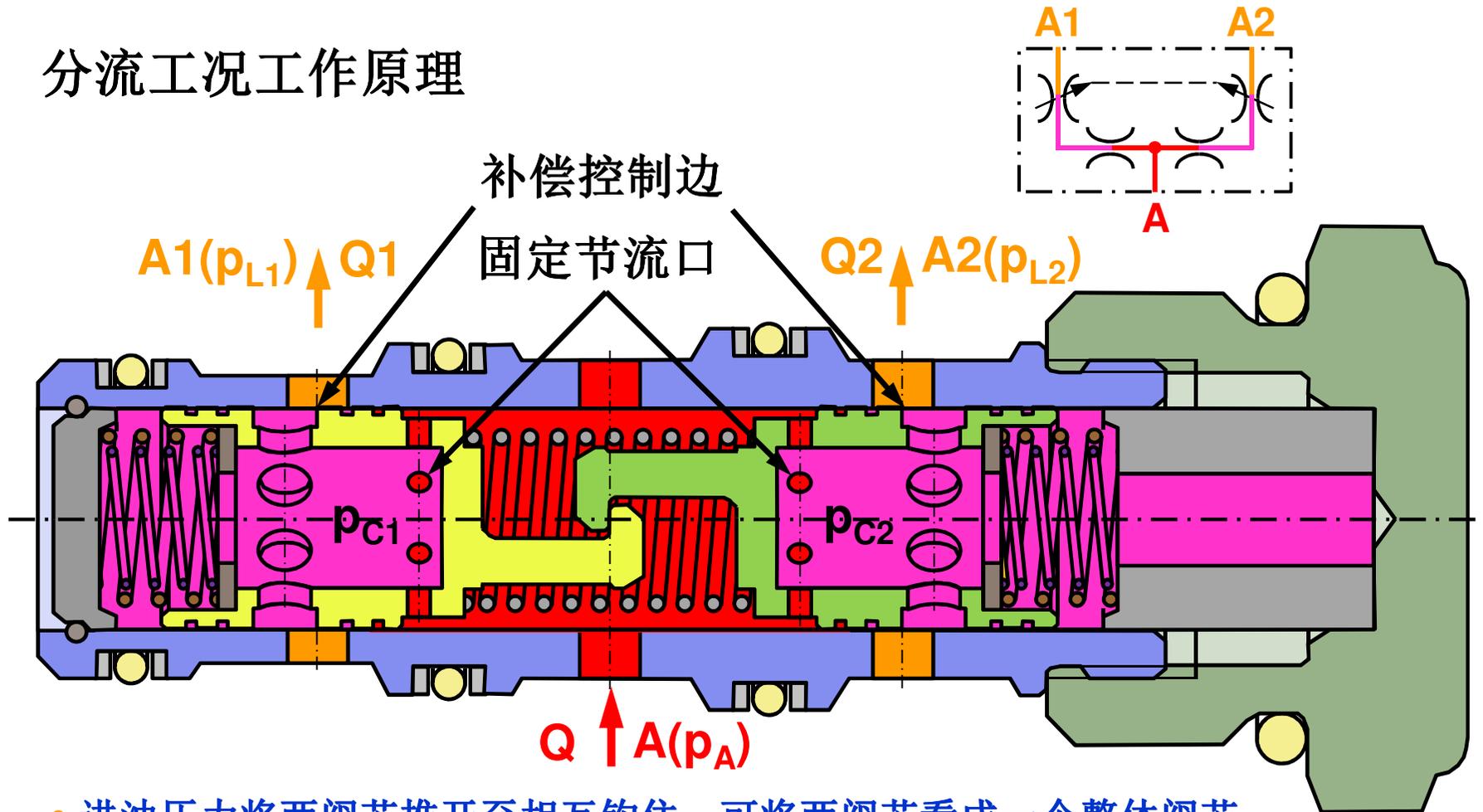
集流工况



# 分流集流阀 Flow Divider and Combiner, How to



## 分流工况工作原理

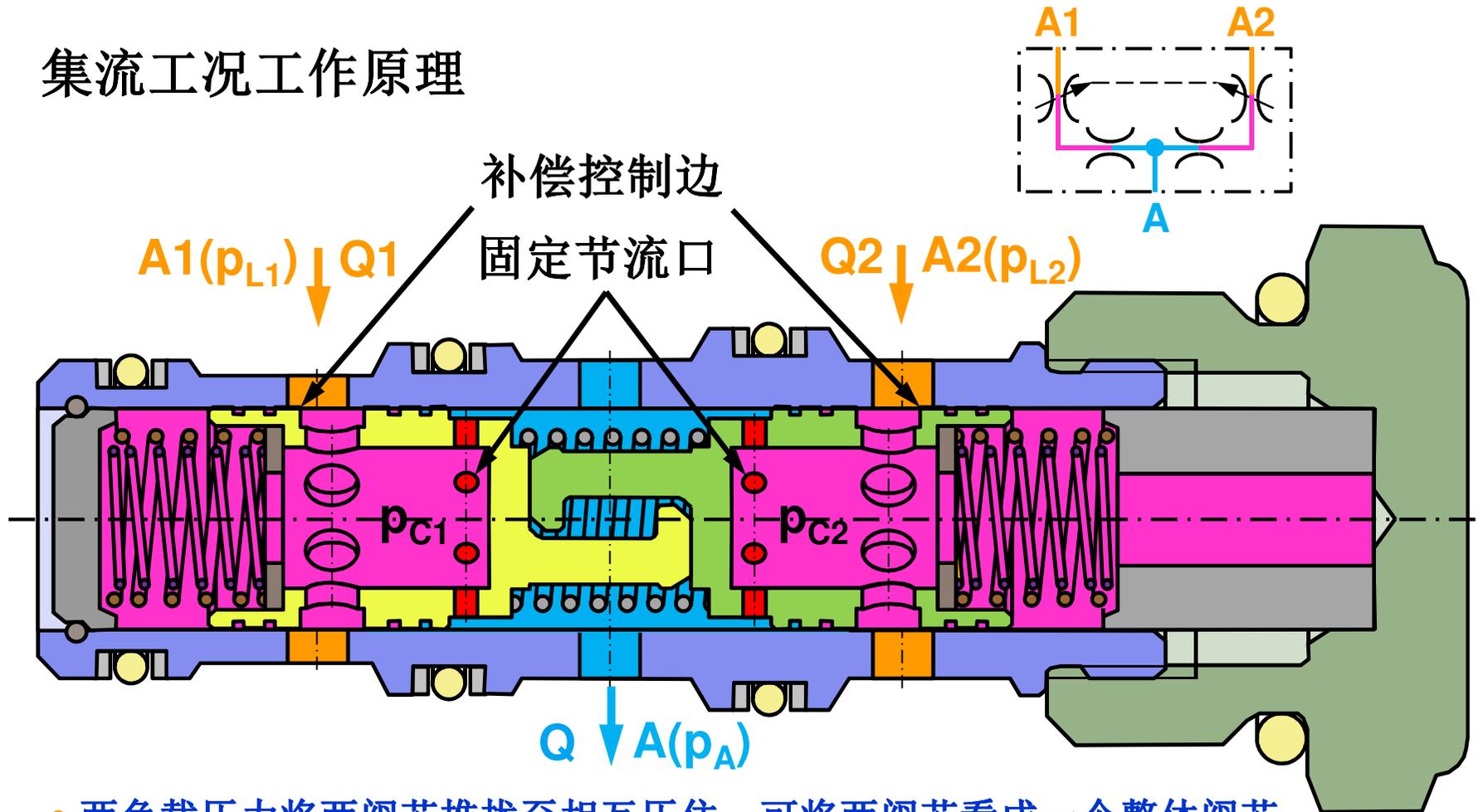


- 进油压力将两阀芯推开至相互钩住，可将两阀芯看成一个整体阀芯；
- 该整体阀芯在工作时应保持力平衡状态，忽略两端弹簧力变化的影响，两端压力应相等，即： $p_{C1} = p_{C2}$ ，故两节流口上的压差应相等： $\Delta p_i = p_A - p_{Ci}$  ( $i = 1, 2$ )；
- 由此，流过两固定节流口的流量应相等： $Q1 = Q2 = Q/2$ 。

# 分流集流阀 Flow Divider and Combiner, How to



集流工况工作原理



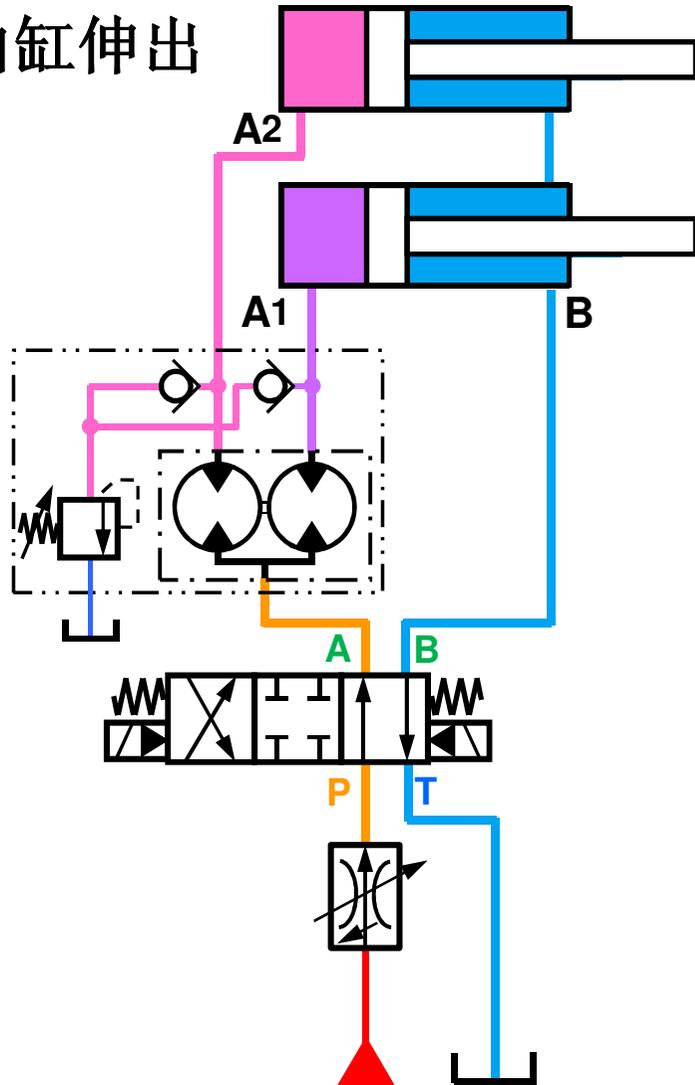
- 两负载压力将两阀芯推拢至相互压住，可将两阀芯看成一个整体阀芯；
- 该整体阀芯在工作时应保持力平衡状态，忽略两端弹簧力变化的影响，两端压力应相等，即： $p_{C1} = p_{C2}$ ，故两节流口上的压差应相等： $\Delta p_i = p_{Ci} - p_A$  ( $i = 1, 2$ )；
- 由此，流过两固定节流口的流量应相等： $Q_1 = Q_2 = Q/2$ 。

# 分流马达同步回路

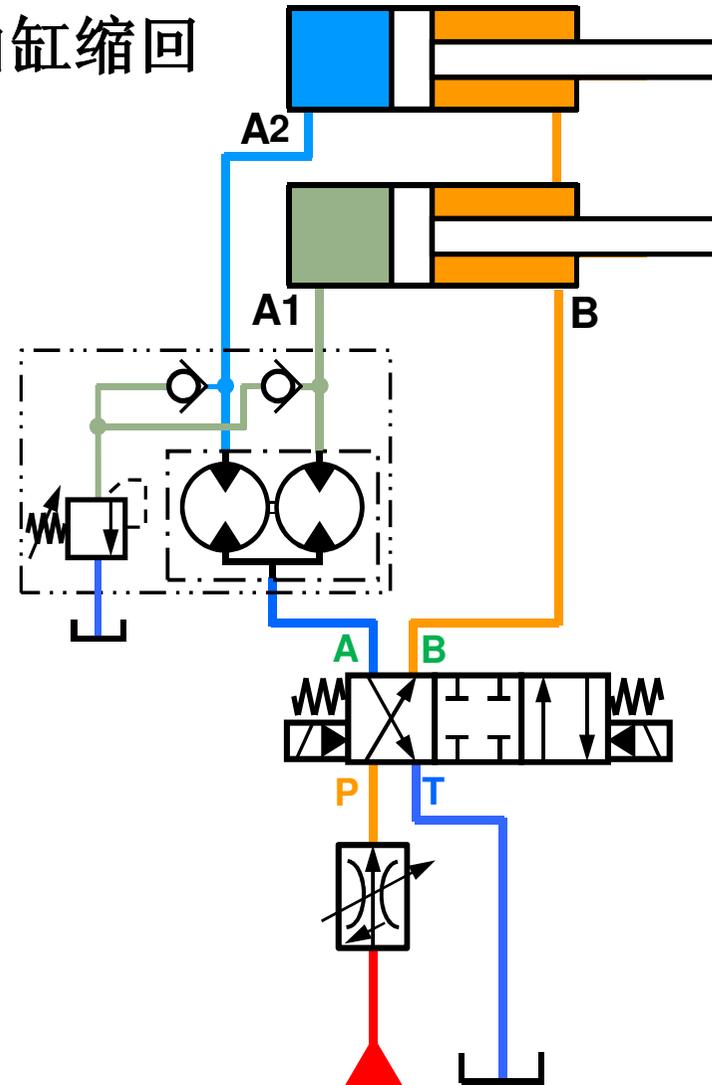
## Synchronizing Circuits with Dividing Motor



油缸伸出



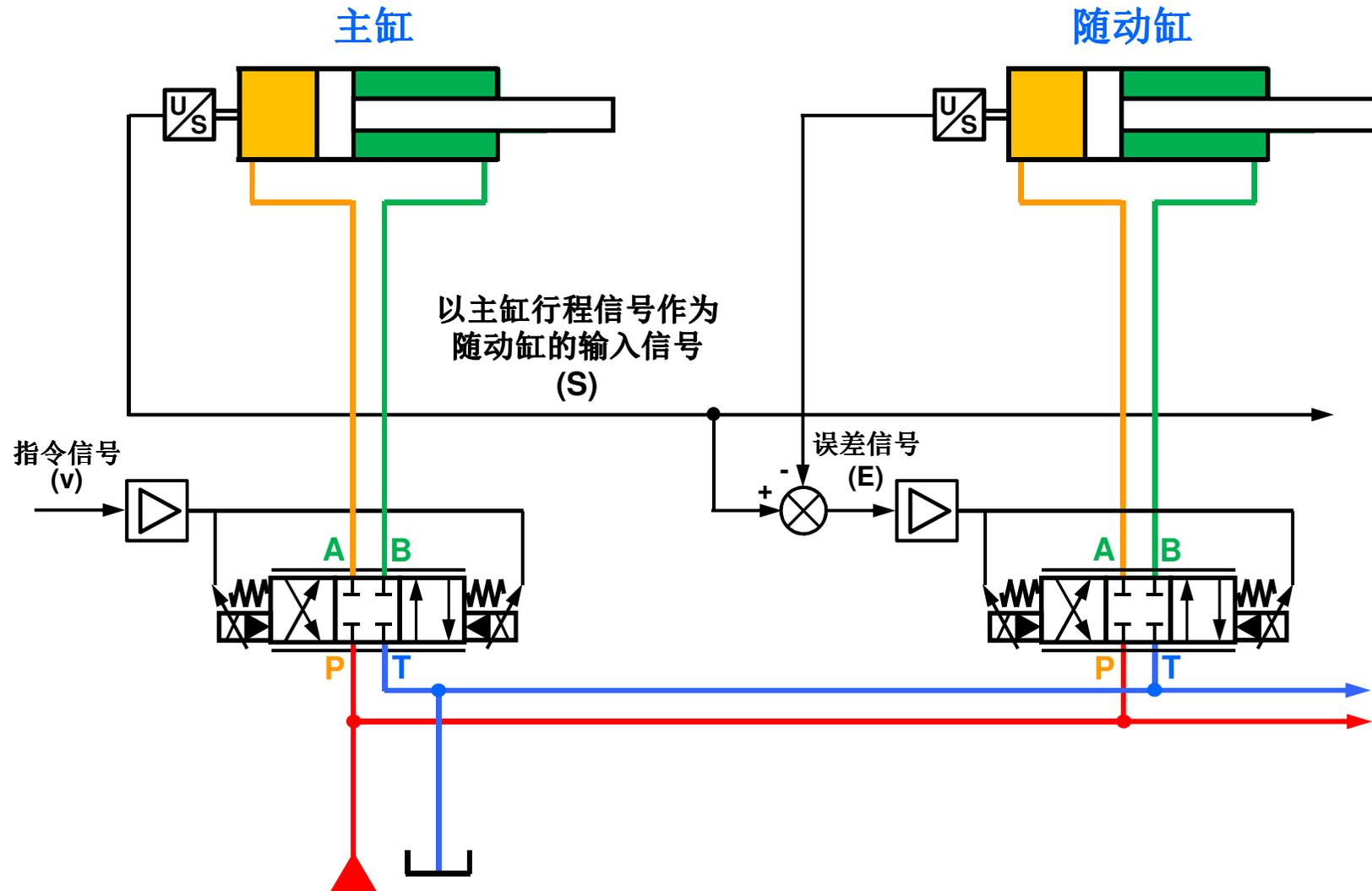
油缸缩回



# 使用比例方向阀的同步回路

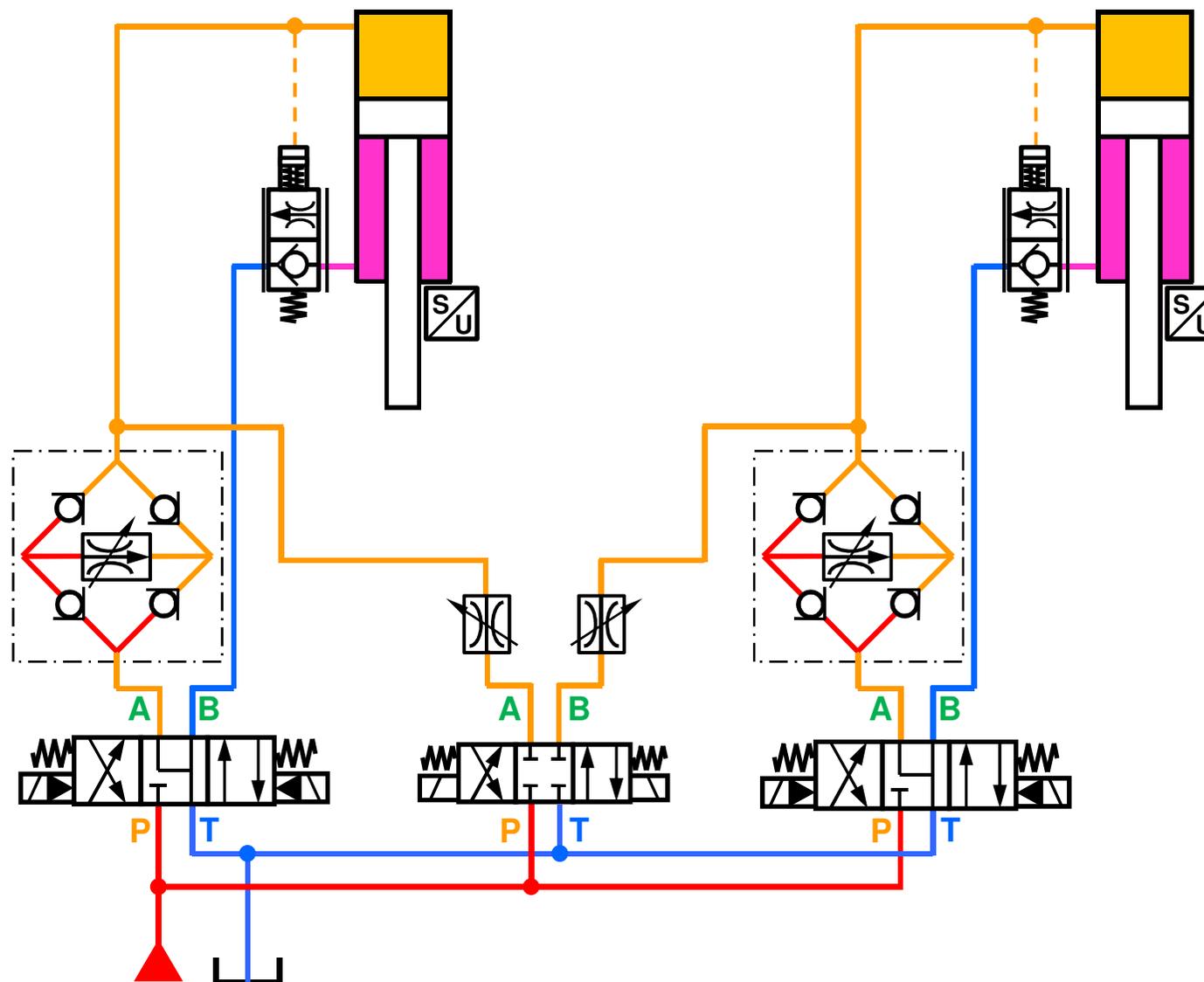


## Synchronizing Circuits with Prop. Directional Valves



# 采用流量修正的同步回路

## Synchronizing Circuits with Flow Compensating



- 调整两油缸的速度控制流量阀，使之基本同步。
- 比较两油缸的实际行程信号，得到一个行程误差。
- 当误差到达规定的最大容许值时发出一个开关信号，激活补偿电磁方向阀，向慢速油缸补充流量，而旁路快速油缸的小部分流量，直至误差为零为止。
- 如此不断修正，满足行程误差不超过规定范围的同步条件。