



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

饮水思源 爱国荣校



机械与动力工程学院
Shanghai Jiao Tong University School of Mechanical Engineering

液压系统的节能技术与应用

施光林

上海交通大学

2014年10月28日



提纲:

- 一. 液压系统的驱动与能量消耗
- 二. 液压节能技术的研究现状
- 三. 液压节能技术存在的主要问题
- 四. 液压节能新技术及元件
- 五. 结束语



一. 液压系统的驱动与能量消耗

- 液压系统的驱动

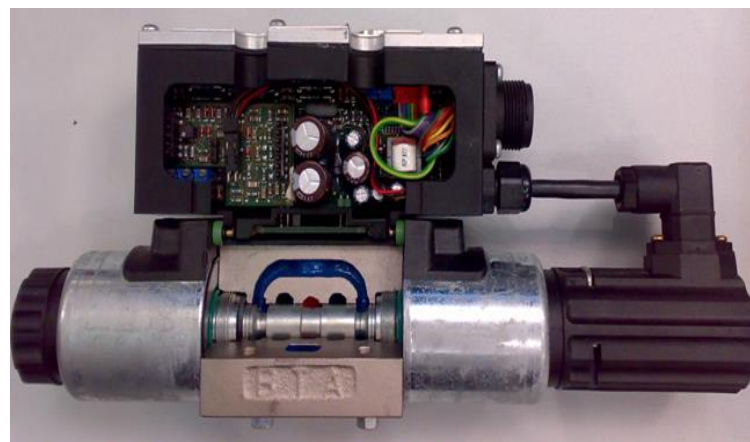
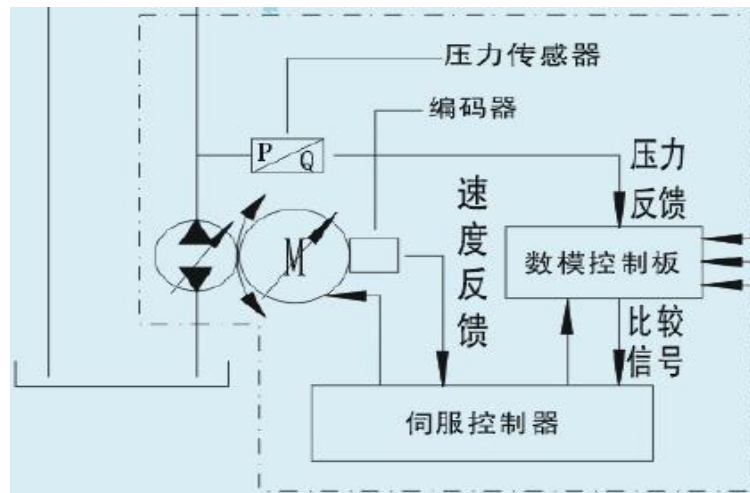
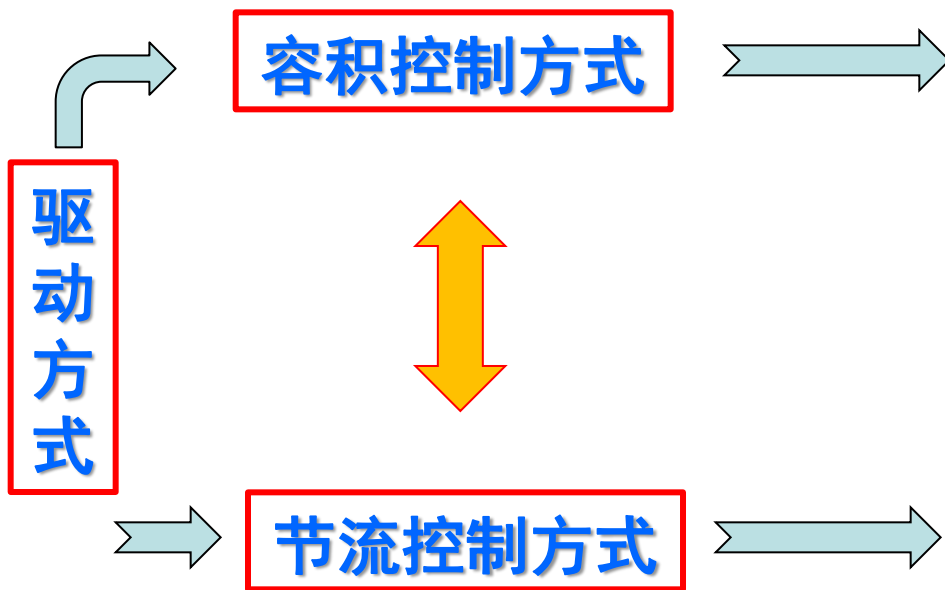
- 液压系统的能量消耗

● 液压系统的驱动

➤ 主要有两种方式

1) **阀控制式**：利用各类液压控制阀，通过阀口开度大小的调节，实现液压缸或液压马达的驱动与速度控制，也叫节流控制方式。

2) **变量泵/变量马达控制式**：利用各类变排量控制机构，通过改变液压泵/液压马达的排量，实现液压缸或液压马达的驱动与速度控制，也叫容积控制方式。



传统式液压驱动技术示意图

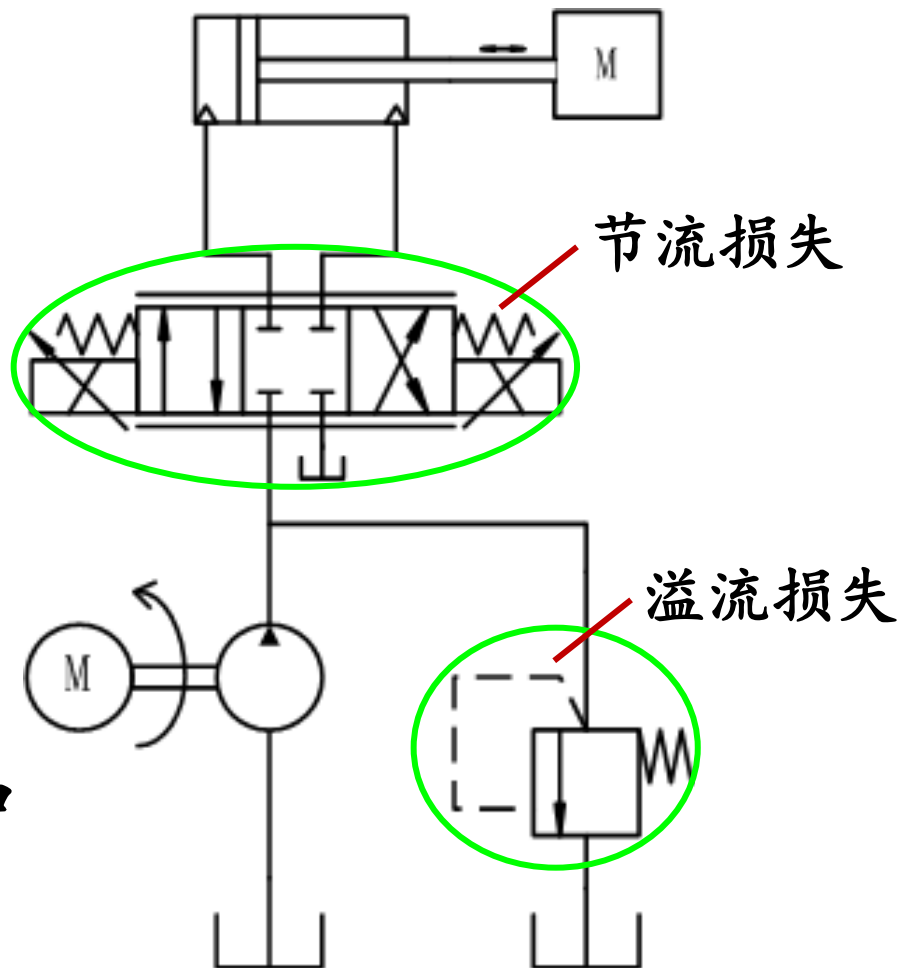
◆ 阀控制式

优点：

- ✓ 响应速度快；
- ✓ 控制精度高；
- ✓ 输出力大；
- ✓ 易于过载保护。

缺点：

- ✓ 能量损失大，效率低；
- ✓ 需要单独的供油系统和管路，结构不紧凑。



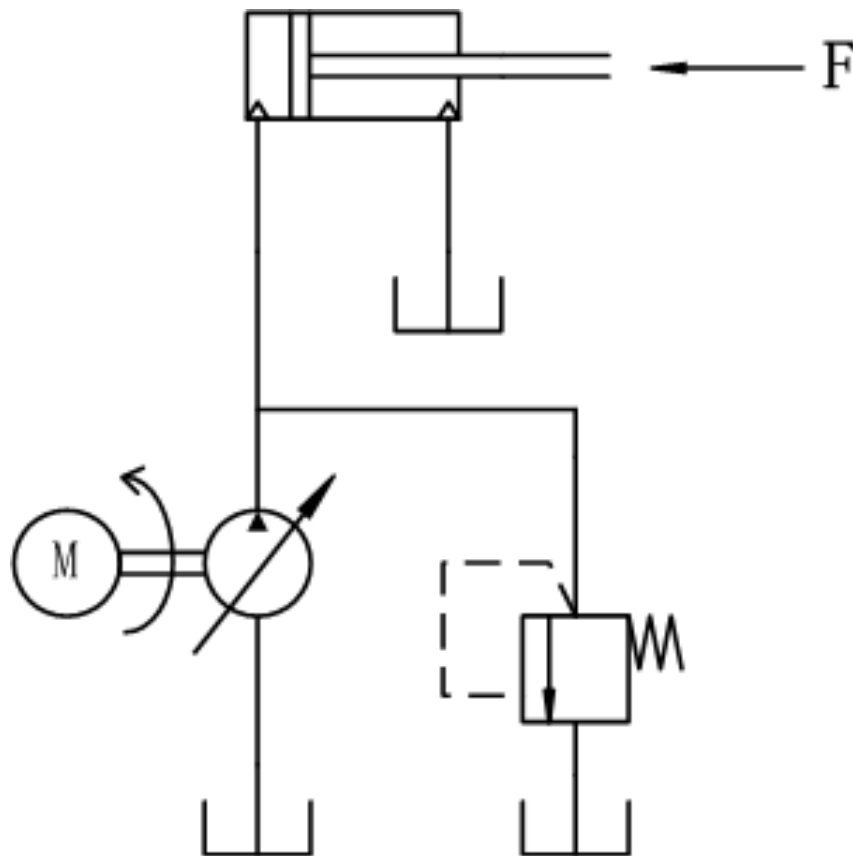
◆ 变量泵/变量马达控制式

优点：

- ✓ 能量损失小，效率高；
- ✓ 输出力大；
- ✓ 易于过载保护。

缺点：

- ✓ 响应速度慢；
- ✓ 不易实现双向调节。



➤ 此外，还有复合控制式

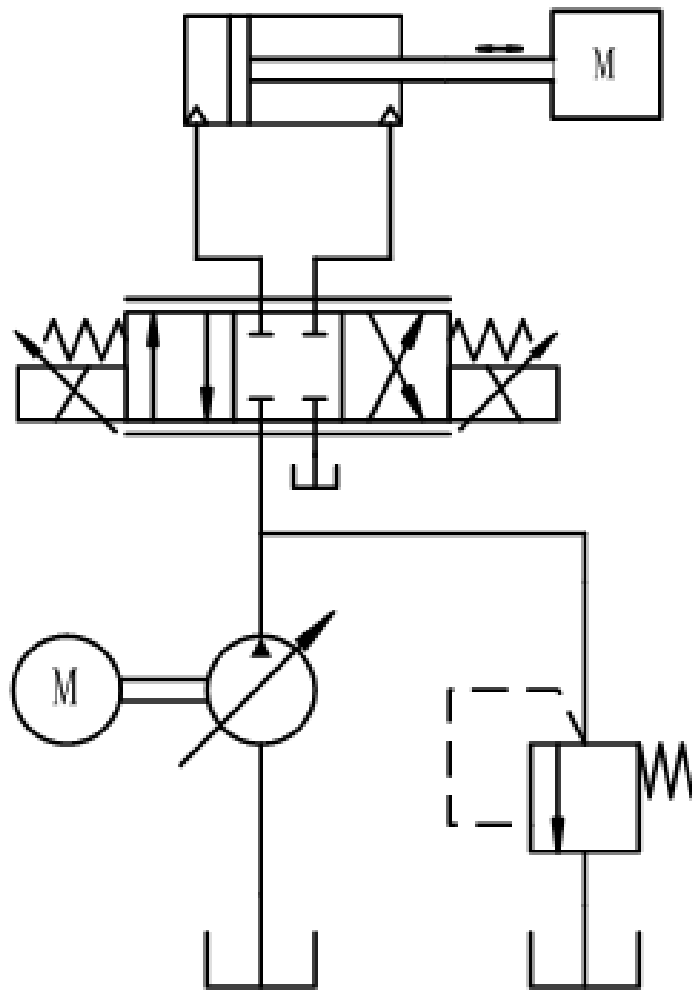
即将阀控制式与变量泵/变量马达控制式组合在一起，可以实现单一方式控制，也可以实现两种方式的组合控制。

优点：

✓ 取两者的优点；

缺点：

✓ 结构复杂，成本增加。



● 液压系统的能量消耗

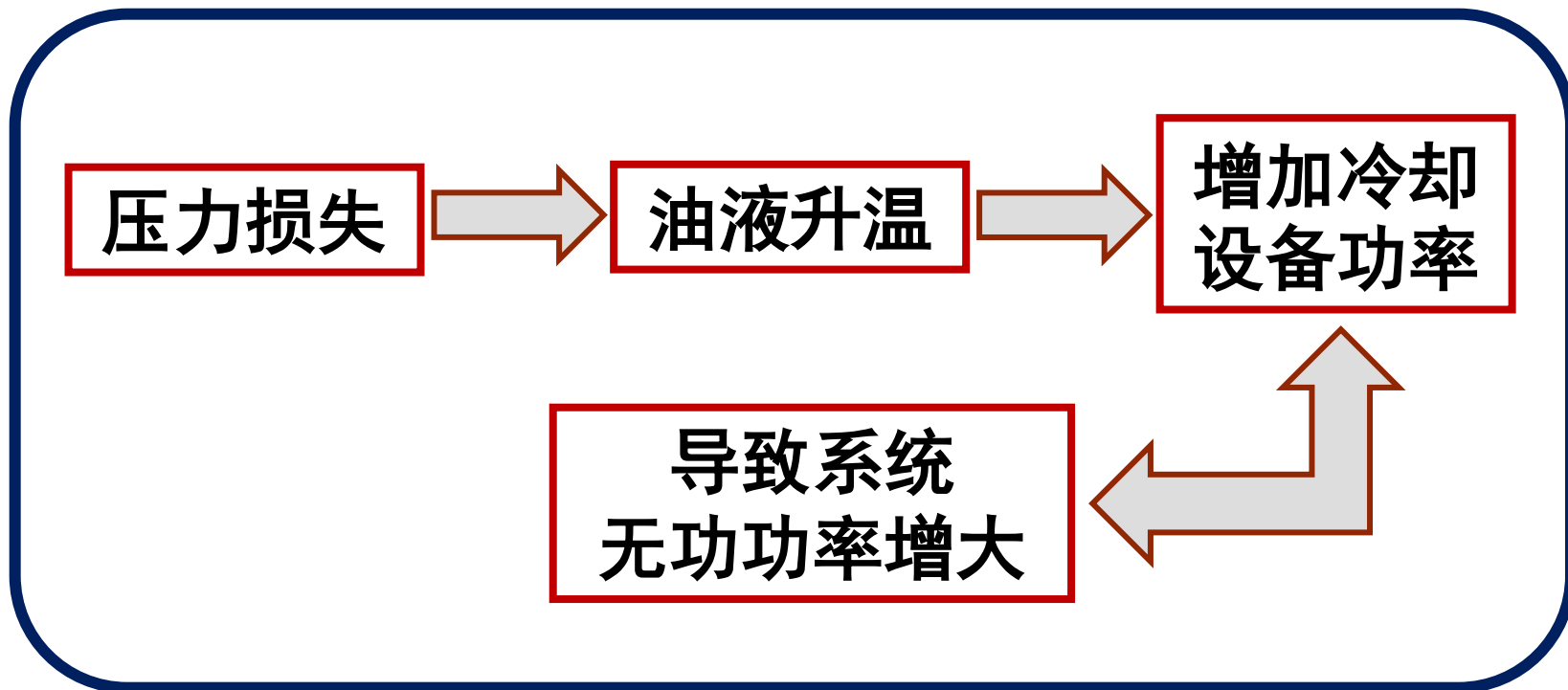
➤ 主要的能量消耗形式

1) 阀口压力损失

阀口节流压力损失；
阀口溢流压力损失。

2) 管道压力损失

沿程压力损失；
局部压力损失。





二. 液压节能技术的研究现状

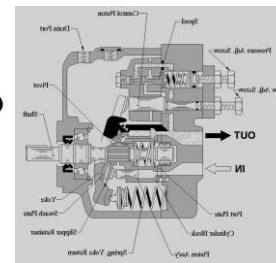
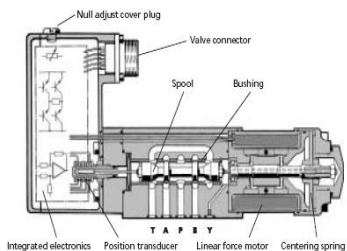
对于液压系统来说，节能就应该减小系统各种压力损失，目前可以采用的技术措施有：

- ✓ 采用合适的控制方式；
- ✓ 采用合适的动力油源；
- ✓ 采用合适的管道结构。

● 采用合适的控制方式

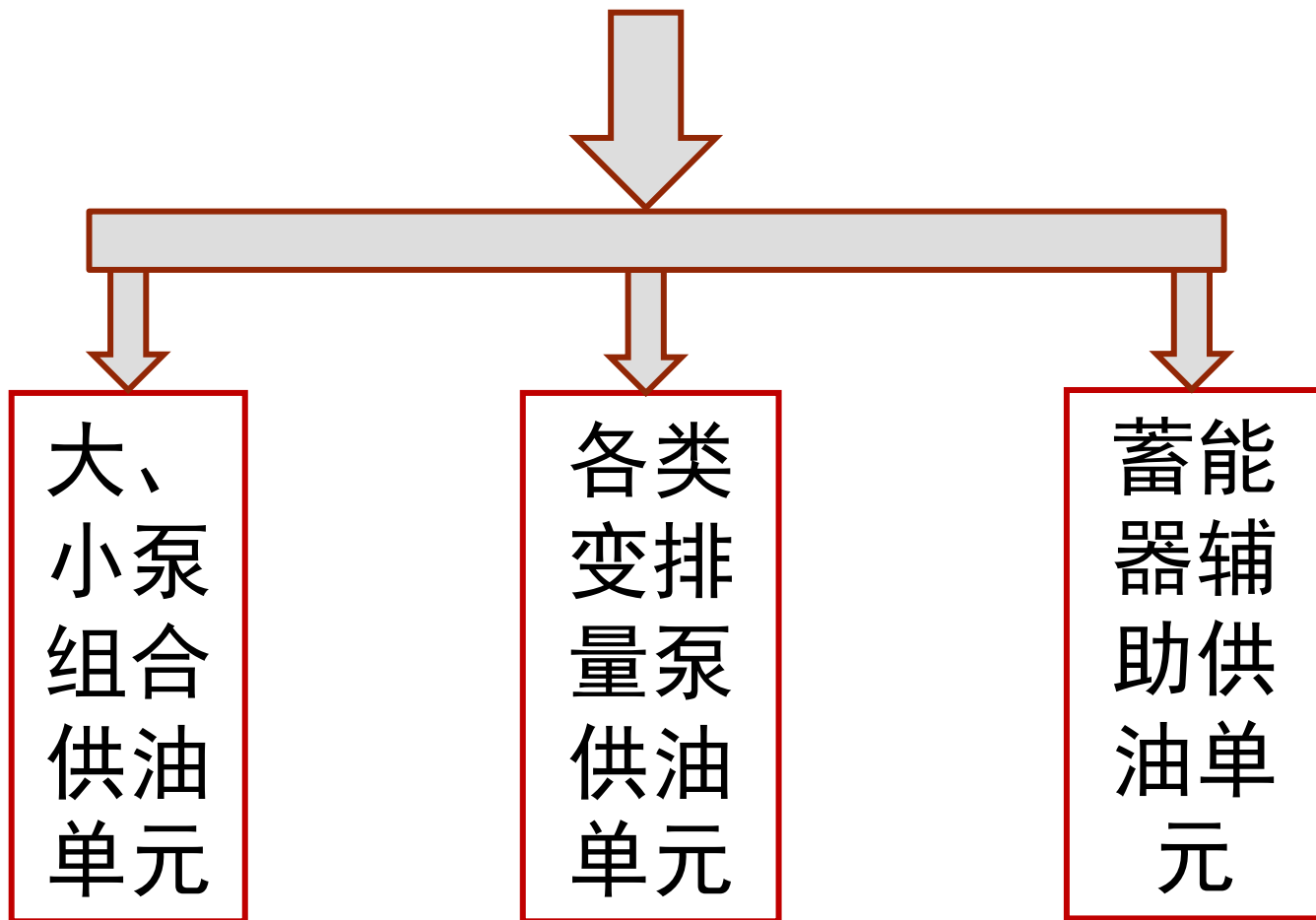
阀控制方式

变排量泵/马达
控制方式



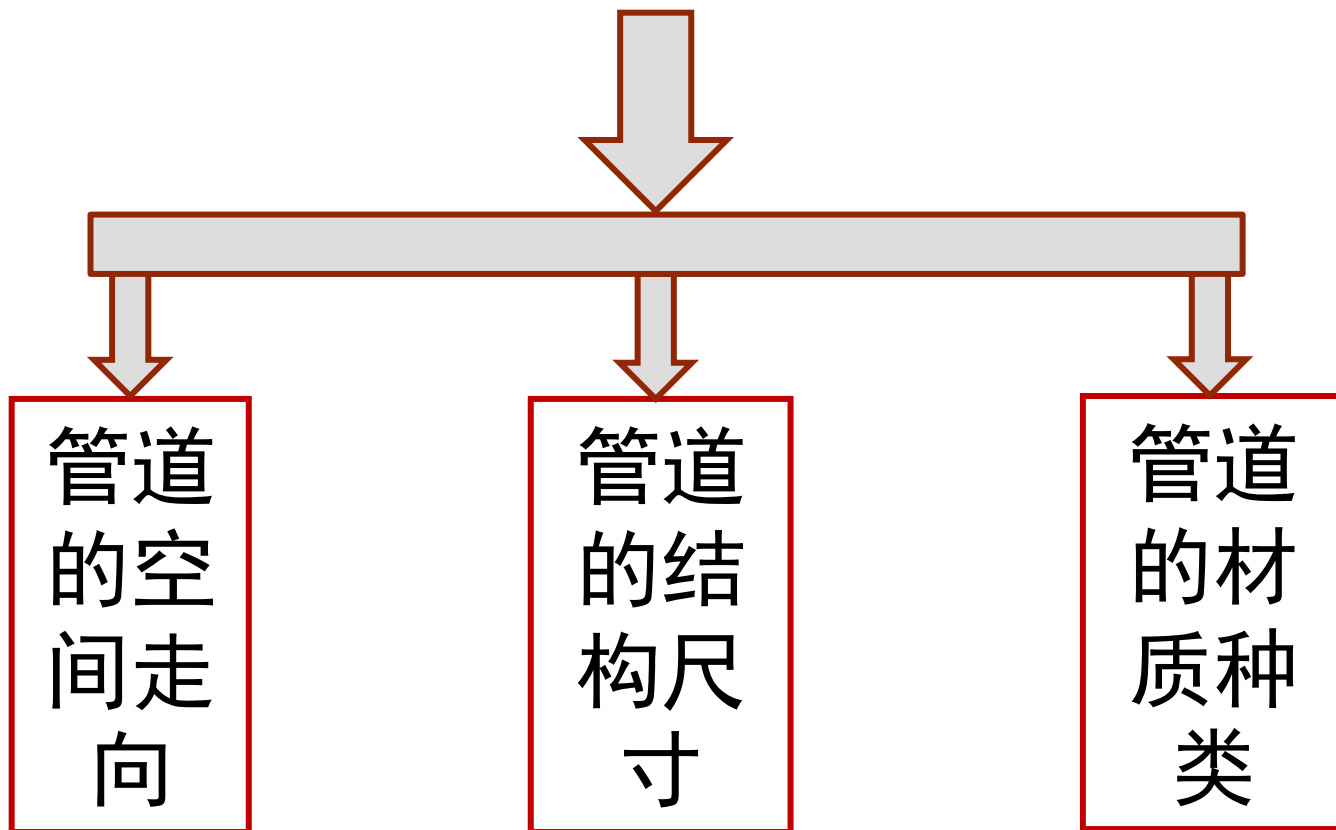


● 采用合适的动力油源





● 采用合适的管道结构



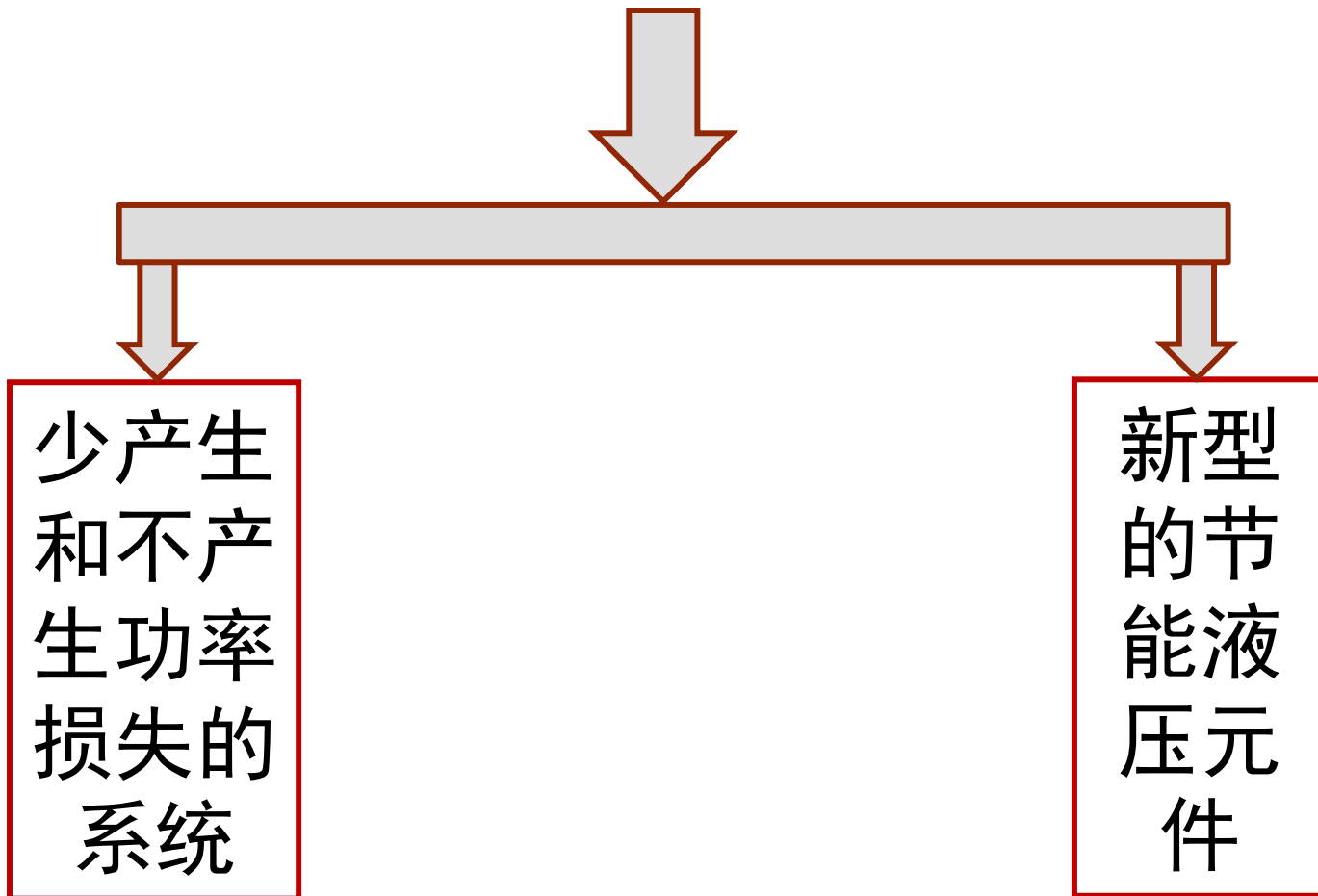


三. 液压节能技术存在的主要问题

目前液压节能技术主要围绕减小系统各种压力损失而展开，但技术手段还相对单一和传统，效果还不甚理想和高效。因此，有必要在传统节能技术方法的基础上，结合各类负载特性探讨更为合理、高效的节能新技术和新方法的研究。

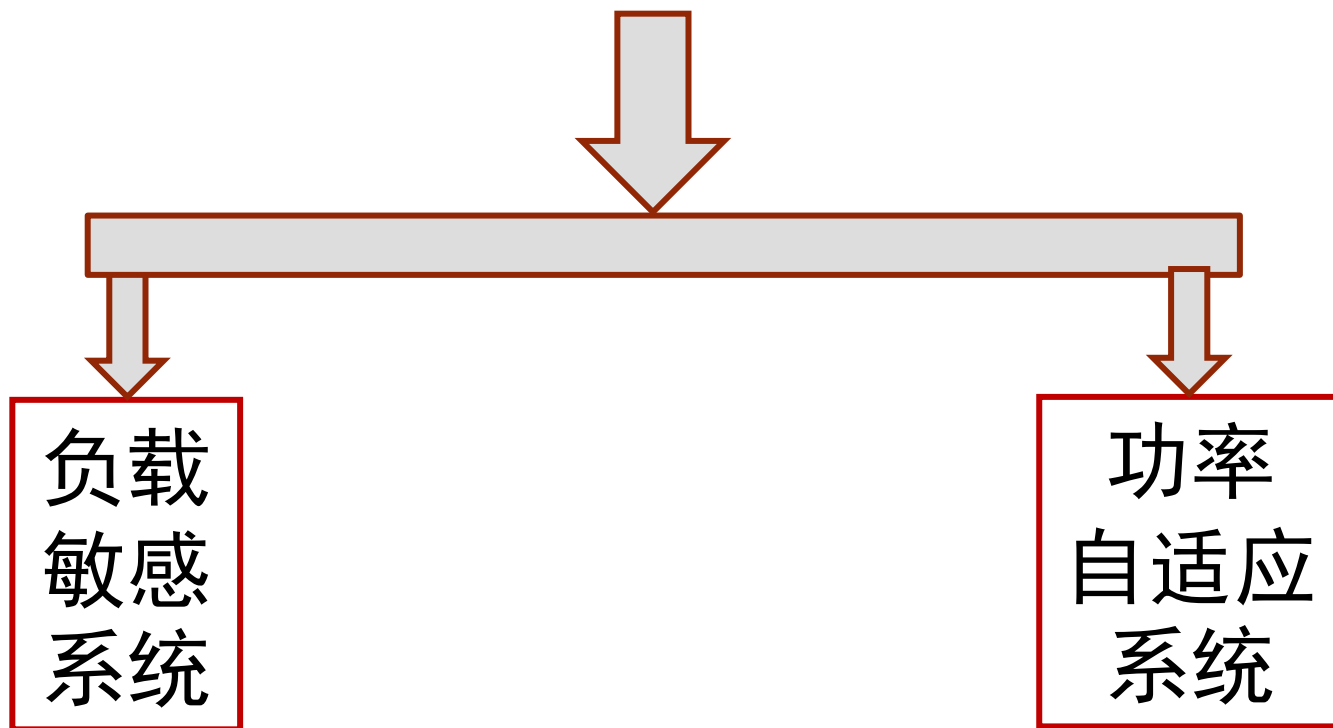


● 更为合理、高效的节能新技术和新方法



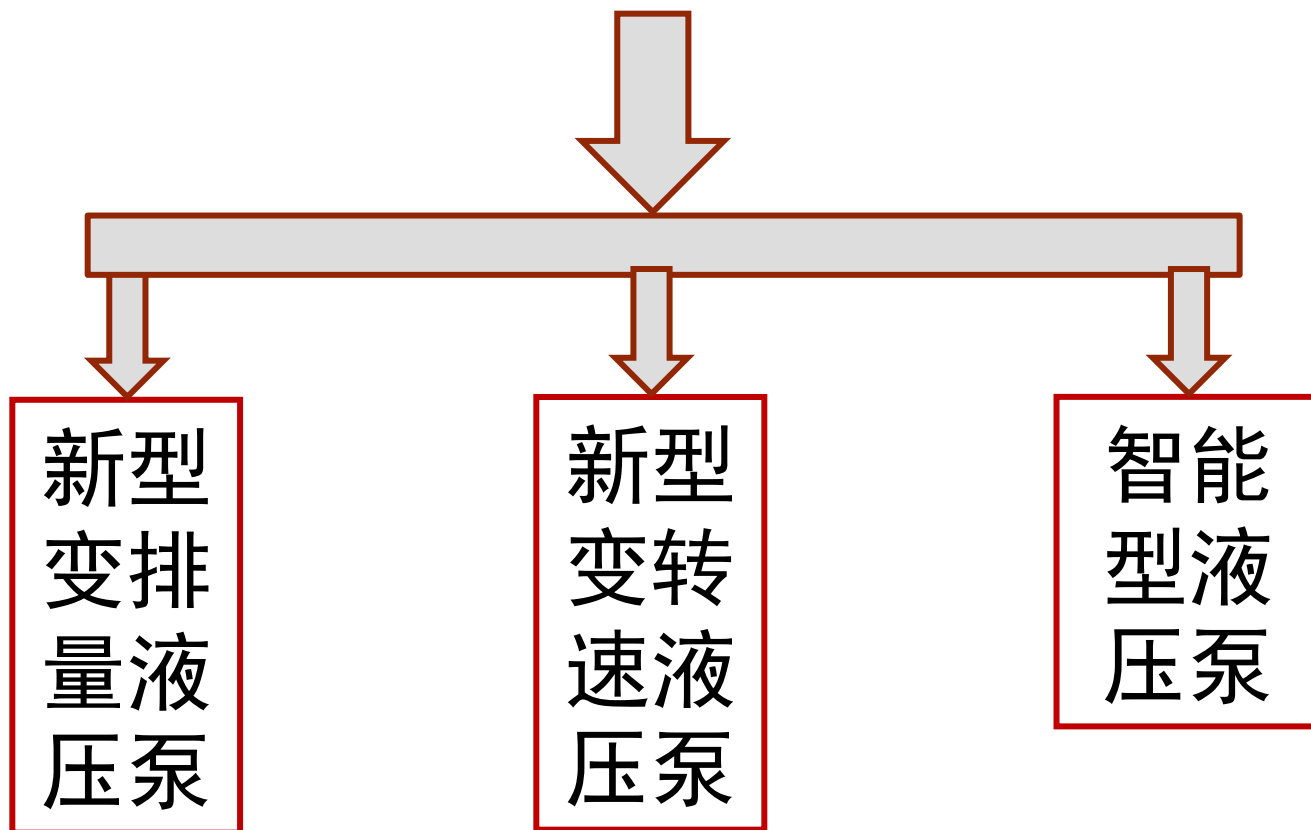


● 少产生和不产生功率损失的系统





● 新型的节能液压元件





四. 液压节能新技术及元件

- 液压节能新技术
- 新型节能液压元件



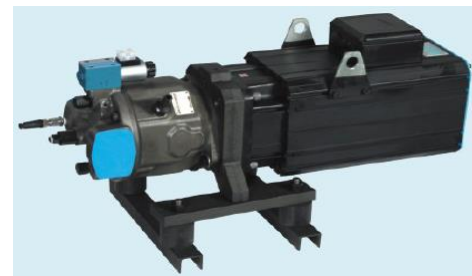
● 液压节能新技术一：

伺服直驱式液压驱动技术

➤ 采用伺服电机+定量泵来直接驱动液压缸或液压马达

定量泵可以为：

- 1) 内啮合齿轮泵；
- 2) 外啮合齿轮泵；
- 3) 螺杆泵。

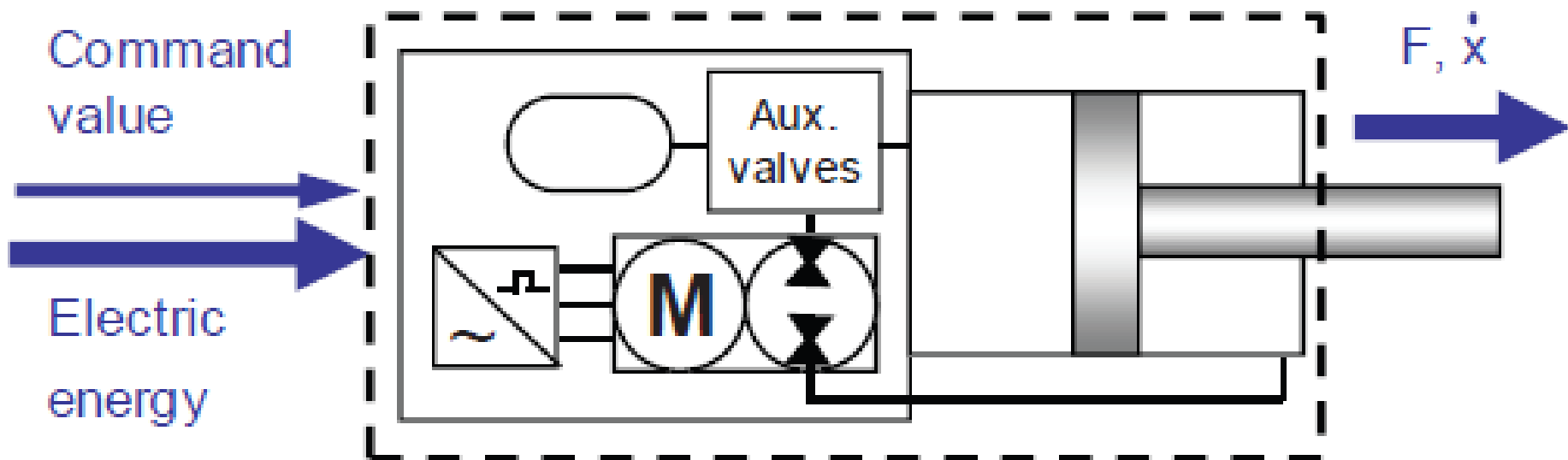


螺杆泵+伺服电机



齿轮泵+伺服电机

◆ 原理与结构简介



注意：

✓ 采用伺服电机驱动双向液压泵来直接驱动液压缸，并通过控制伺服电机转速来调节液压泵输出流量，以实现液压缸的速度、力控制。

◆ 主要特点

优点：结合了传统式液压驱动技术和伺服直驱式电动缸驱动技术的大多优点，即：

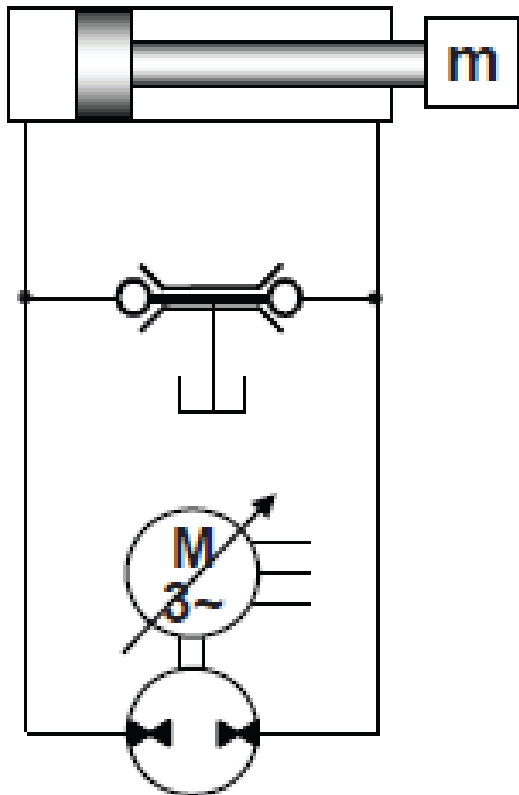
- ✓ 能量损失小，效率高；
- ✓ 结构紧凑；
- ✓ 输出力大；
- ✓ 易于过载保护、安装与维护。

缺点：

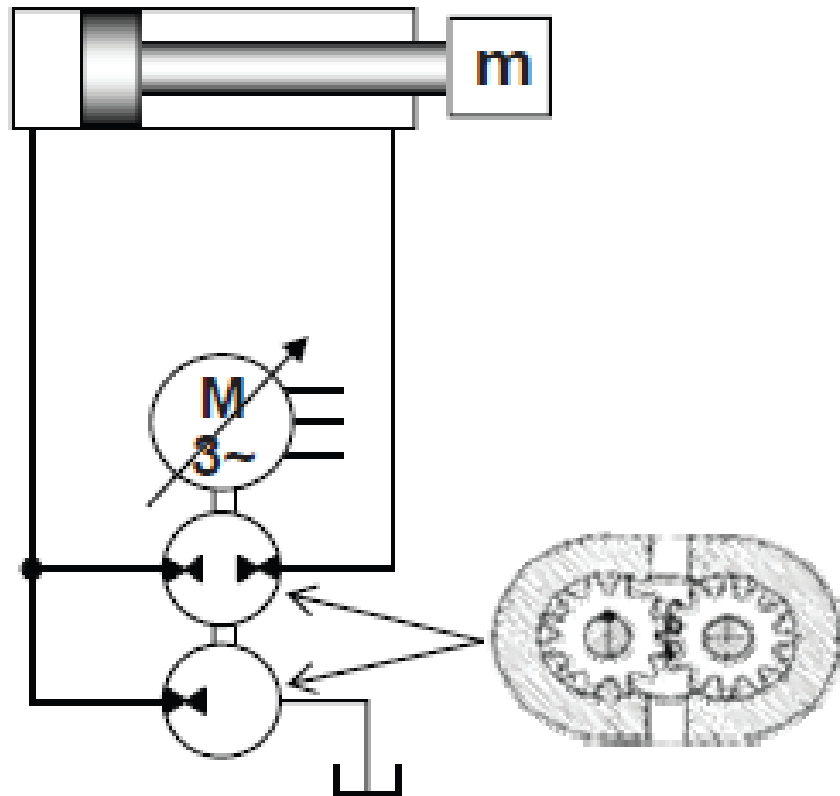
- ✓ 响应速度慢（与阀控式相比）。

注意：目前更易于用在小功率场合（受到伺服电机的功率限制）。

◆ 典型结构示例

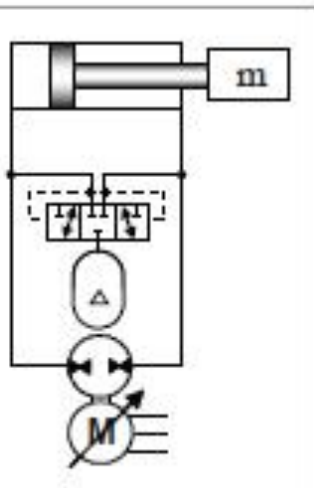


带有梭阀的结构



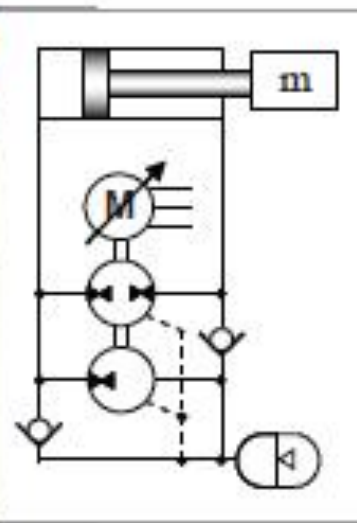
双齿轮泵的结构

◆ 典型结构示例（国外研究）



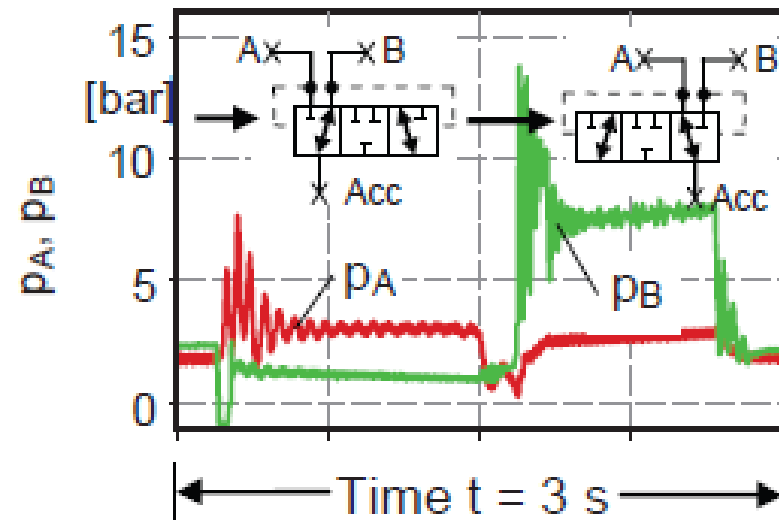
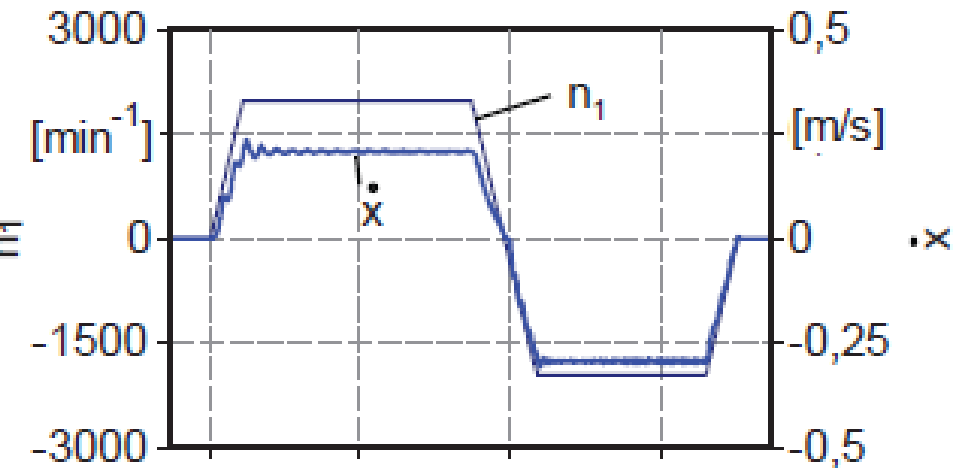
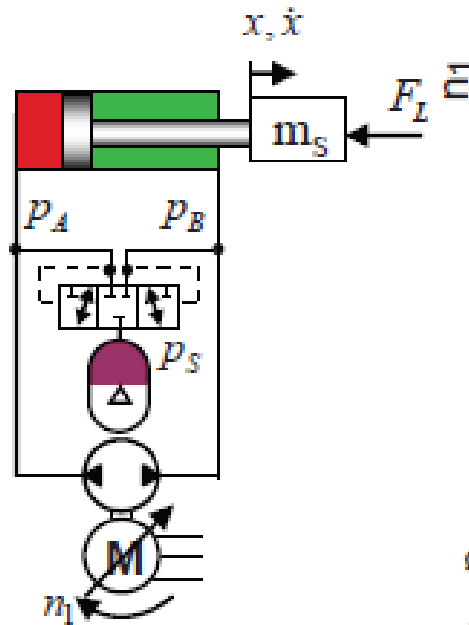
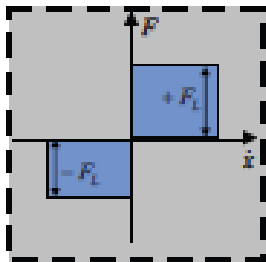
双齿轮泵结构实验装置

带有梭阀的结构实验装置



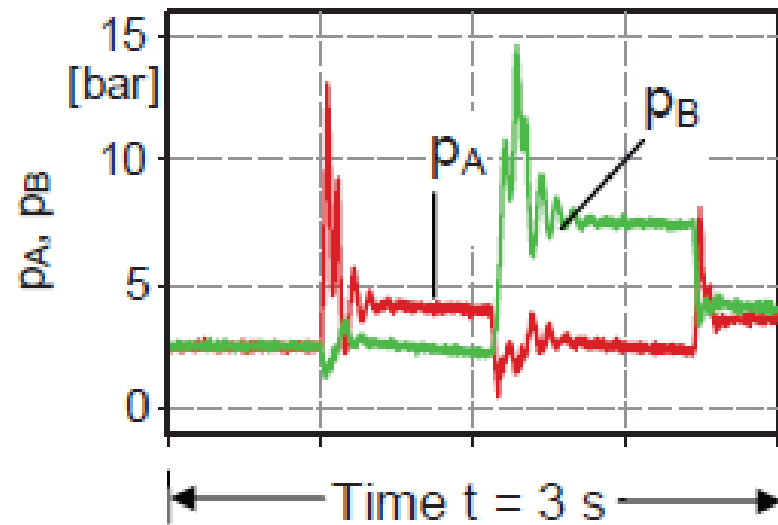
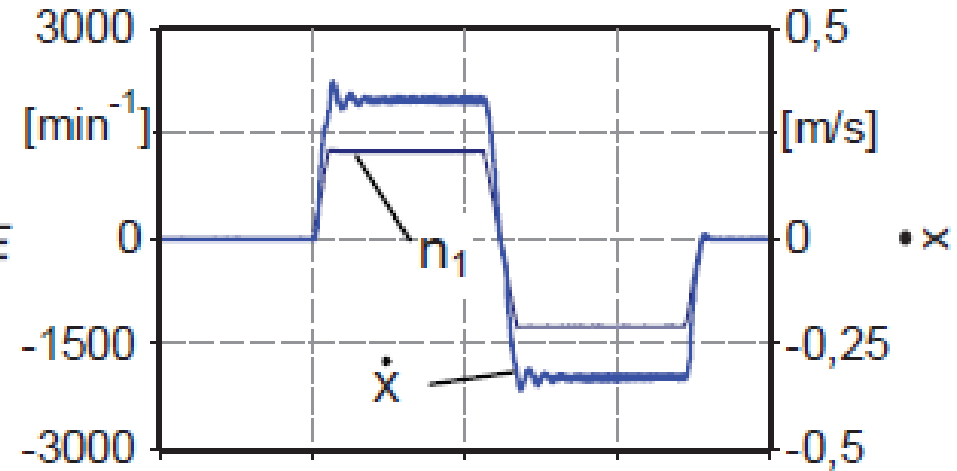
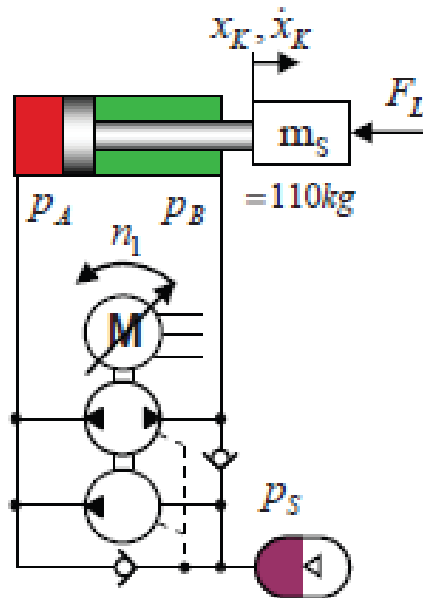
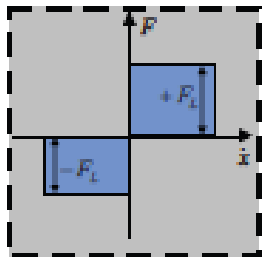
◆ 典型结构示例（国外研究）

Load case B
„Resistive load“

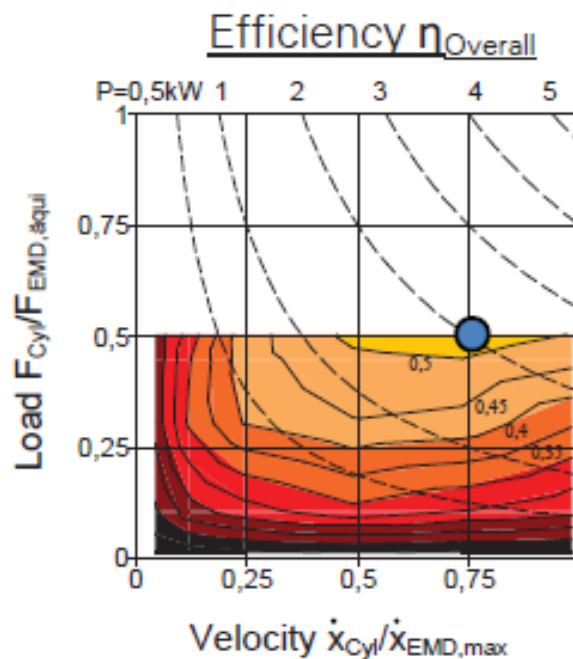
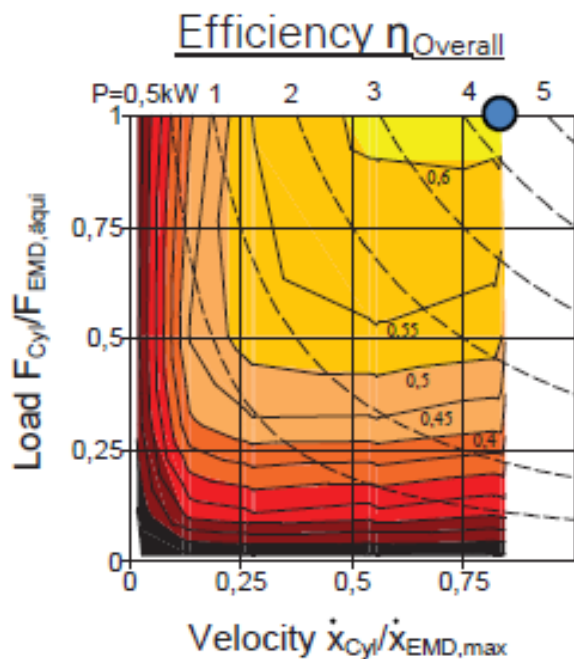
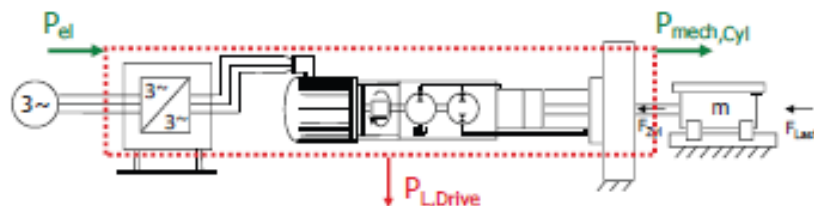
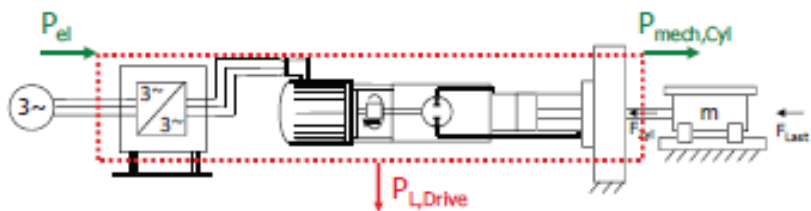


◆ 典型结构示例（国外研究）

Load case B
„Resistive load“

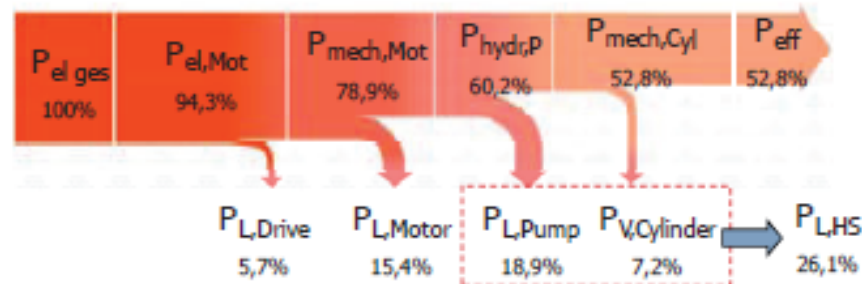
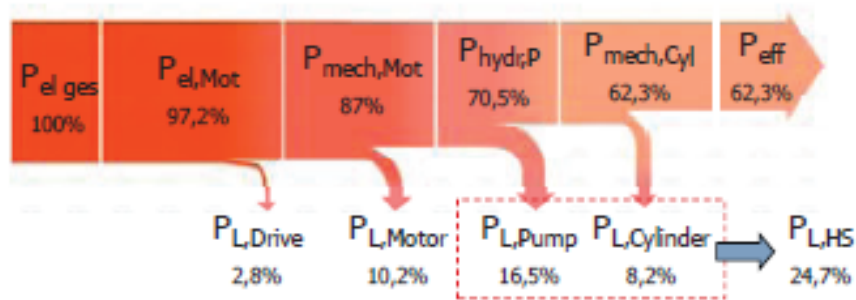
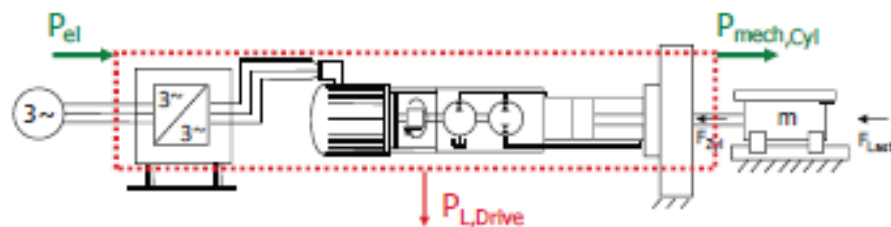
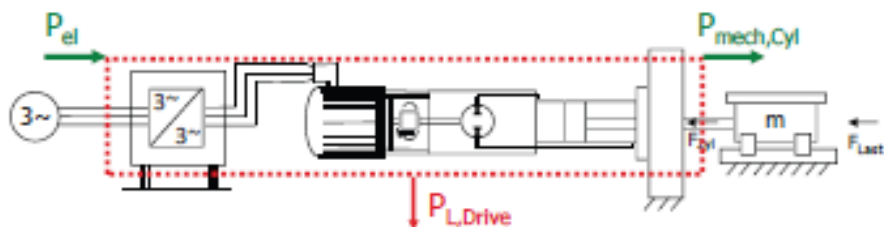


典型结构示例（国外研究）



节能特性实验与比较

◆ 典型结构示例（国外研究）



节能特性实验与比较

注意:

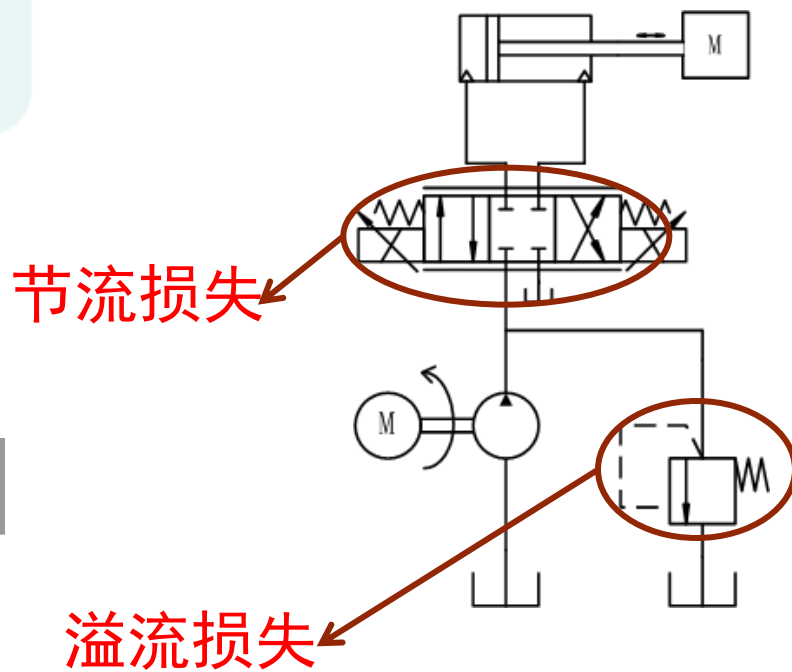
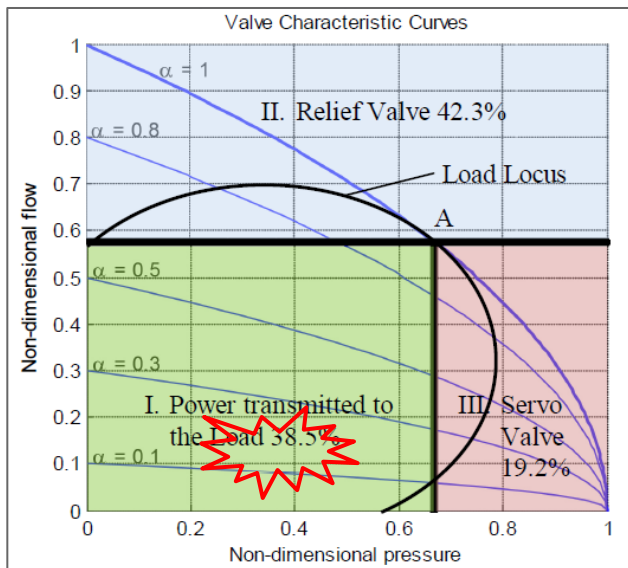
- 1) 因为伺服直驱式液压驱动技术更加节能，所以适用于工作时间长、负载速度多变的一类主机；
- 2) 考虑到当前伺服电机的功率限制，因此可以优先在小功率驱动系统上应用。

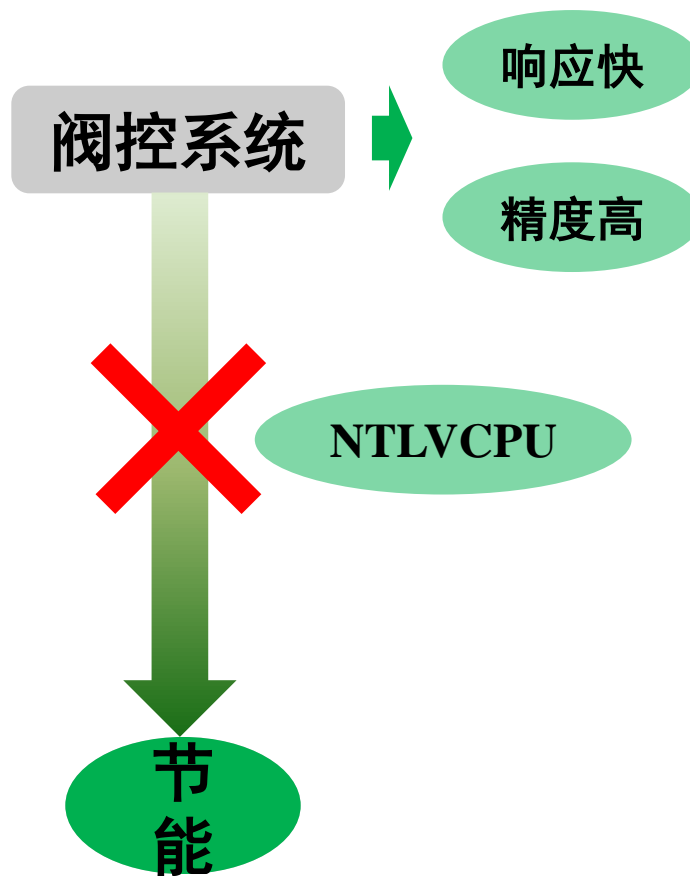
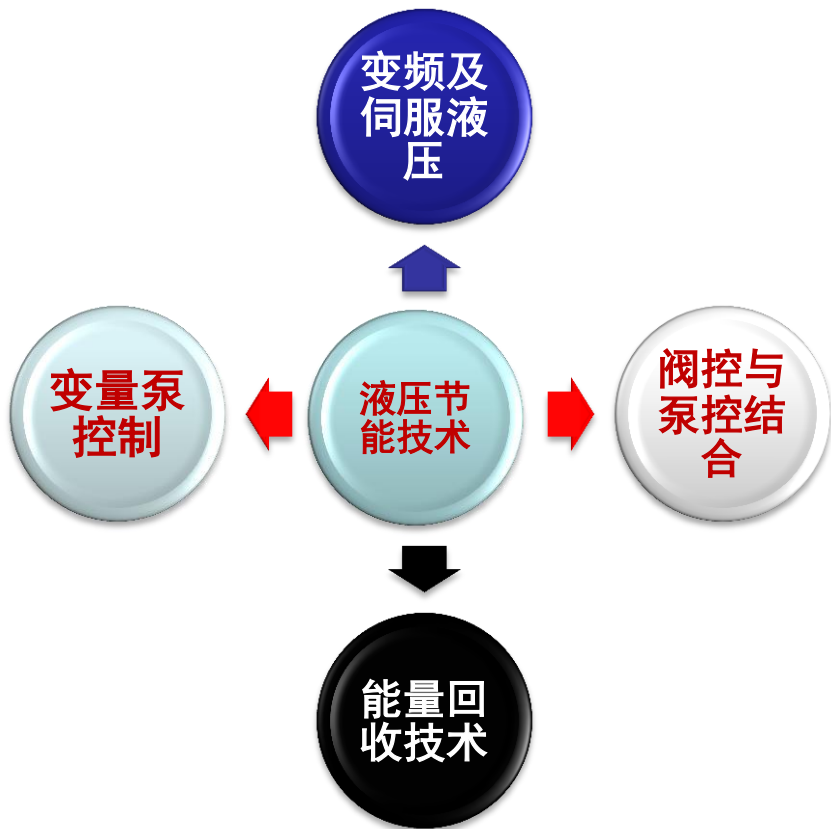
● 液压节能新技术二（自主研究）： 无节流损失阀控动力单元技术

液压传动系统

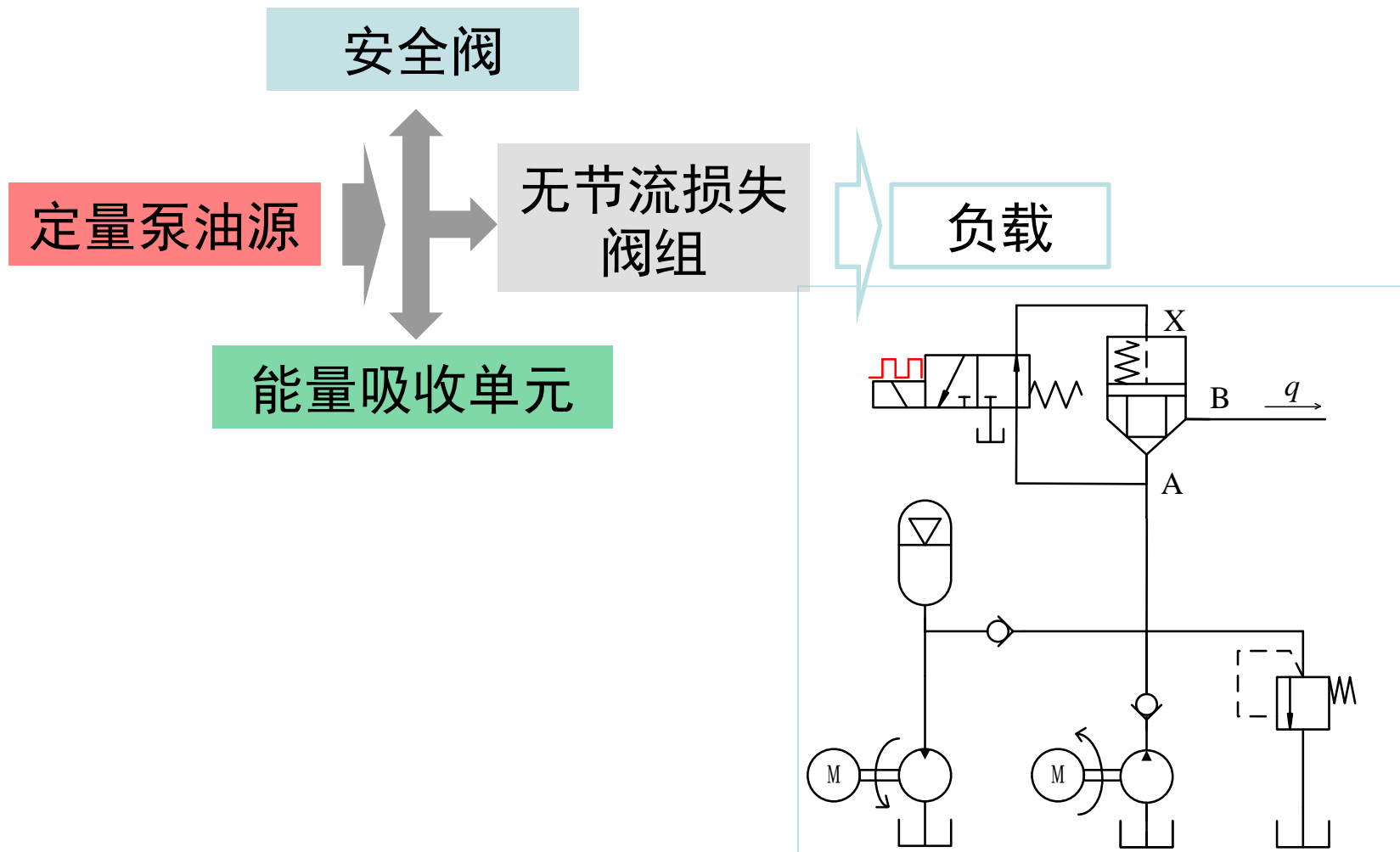
优点：功率密度大、易于实现无级调速和过载保护。

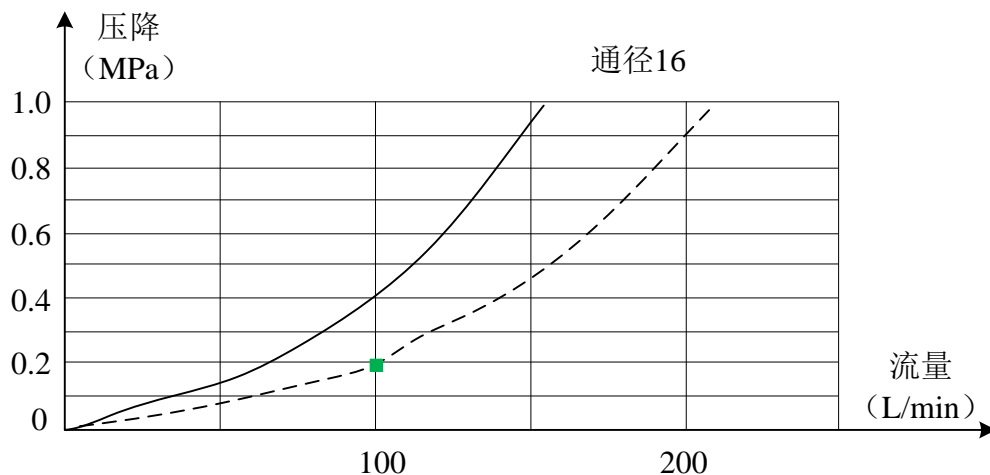
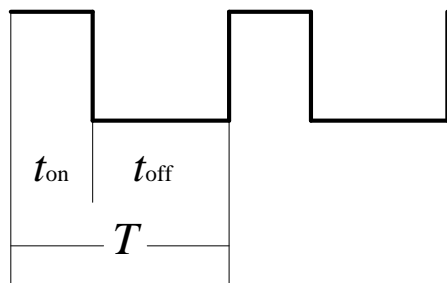
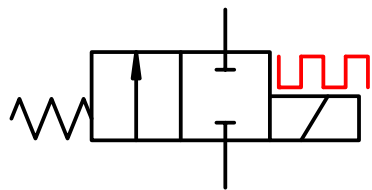
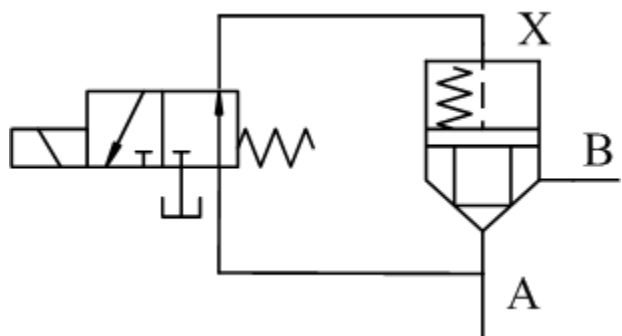
缺点：效率低，传统液压系统





◆ 无节流损失阀控动力单元技术





0.2MPa @ 100L/min

无节流损失

“1” A_v 足够大，无压降，无节流损失

“0” 阀口关闭，无流量，无节流损失

$$\alpha = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

$$\bar{q} = q_{max} \cdot \alpha$$

调速

$$p_L < p_M < p_R$$

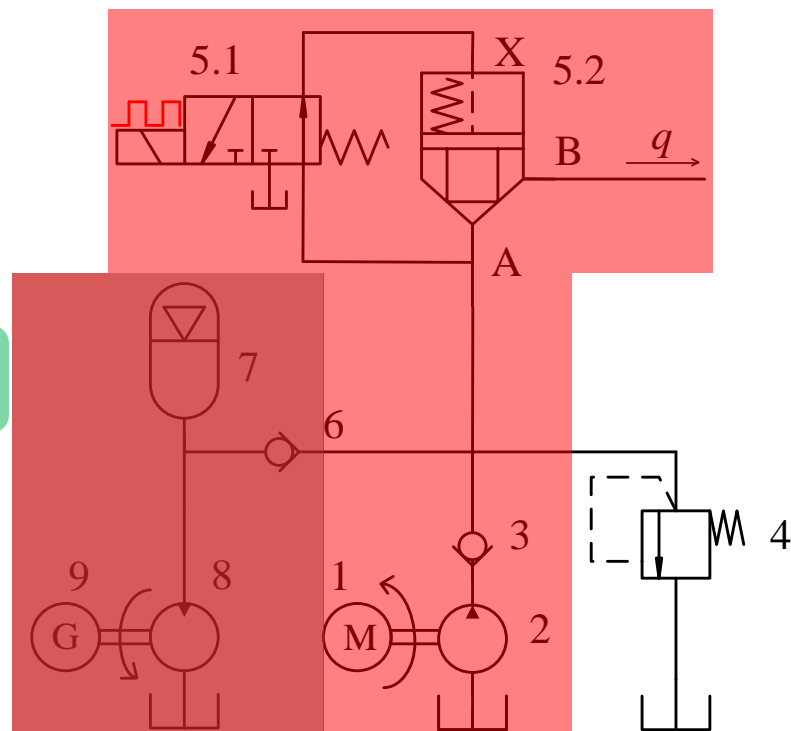
PWM控制方式：

“1”：主阀完全打开

无节流损失；无溢流损失

“0”：主阀关闭；能量被吸收

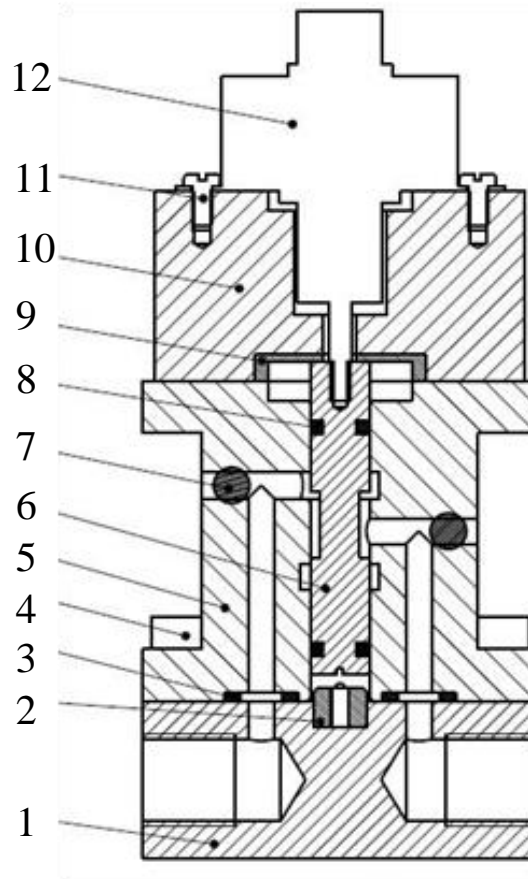
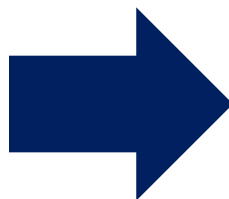
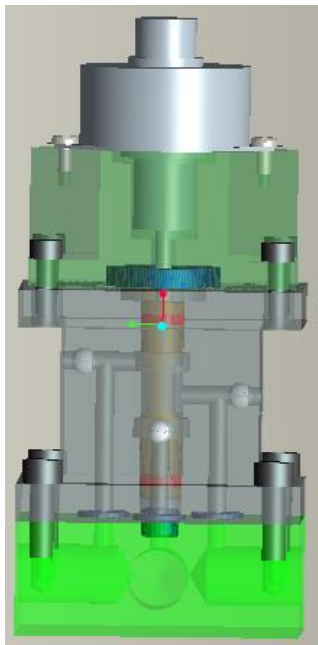
无节流损失；无溢流损失

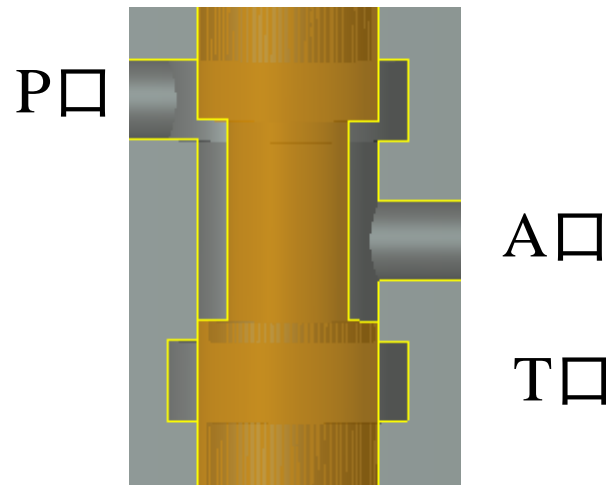
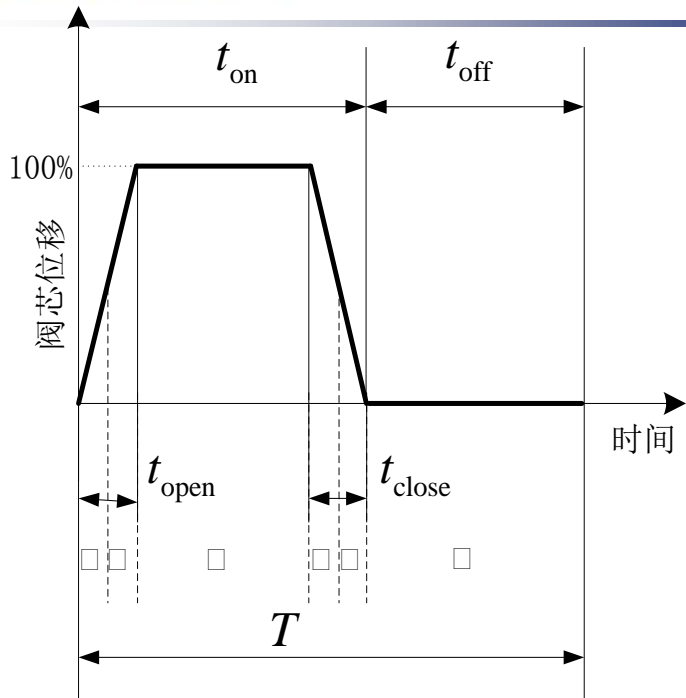




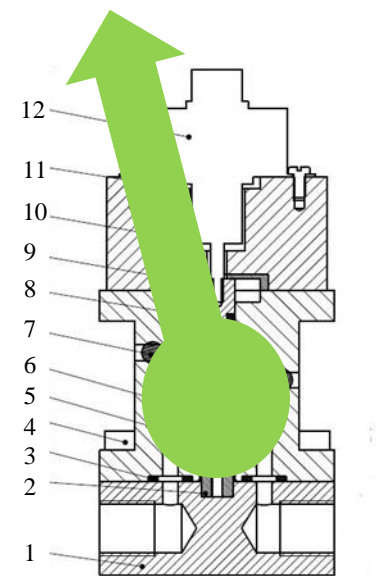
2/3高速开关阀

额定压力：20MPa
最高工作压力：31.5MPa
最大流量：>15L/min
阀口打开时间：<15ms
阀口关闭时间：<15ms





时间段	P口和A口 过流面积	A口和T口 过流面积
I	max→0	0
II	0	0→max
III	0	max
IV	0	max→0
V	0→max	0
VI	max	0





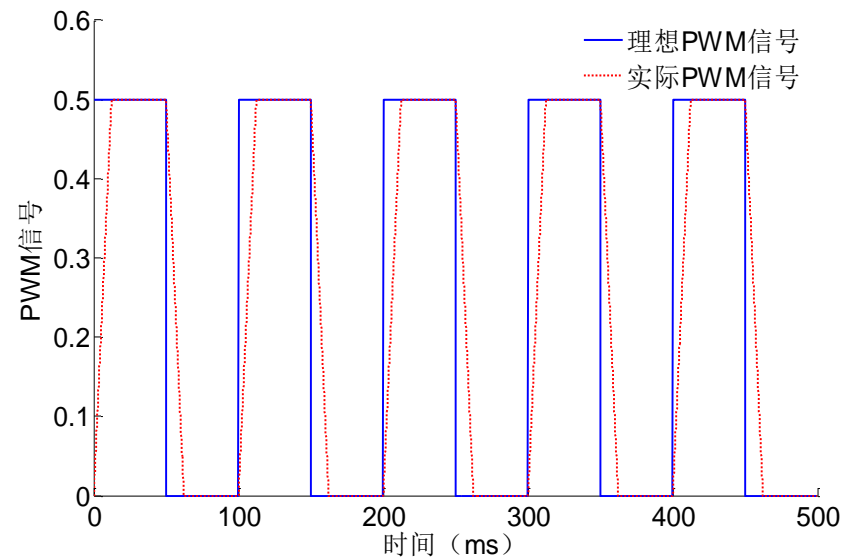
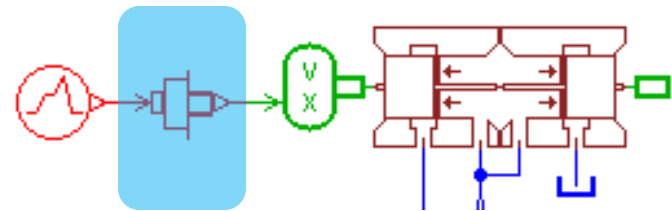
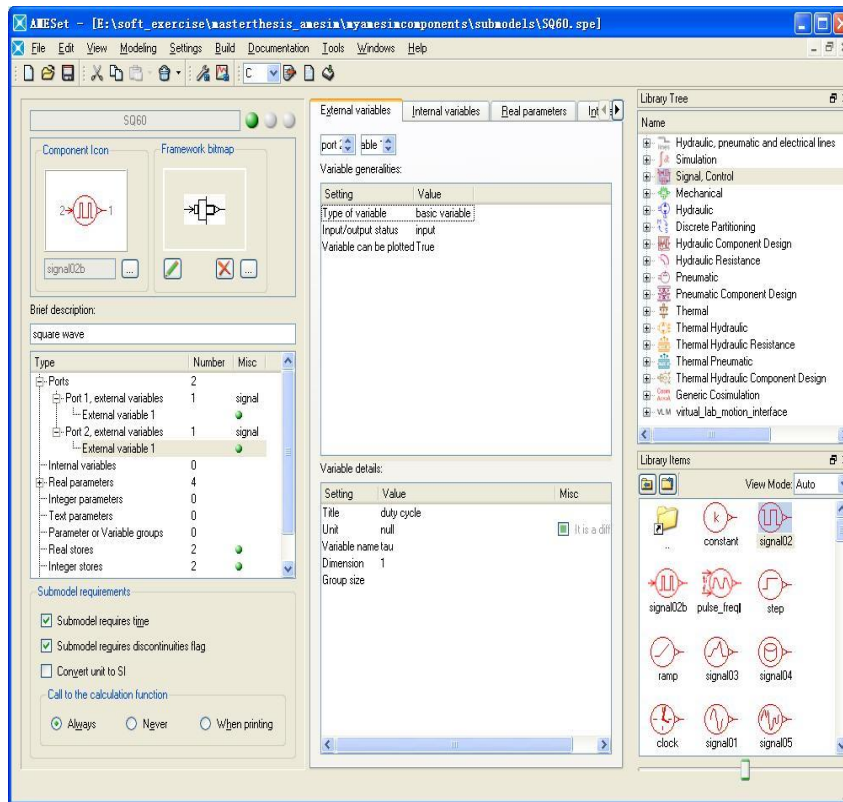
P、A口之间 流量

$$q = C_q w x \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \begin{cases} C_q w f x_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \left(\frac{t_{\text{open}}}{2} - t\right) & 0 \leq t < t_{\text{open}} / 2 \\ 0 & t_{\text{open}} / 2 \leq t < t_{\text{on}} - t_{\text{close}} / 2 \\ C_q w f x_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \left(t - t_{\text{on}} + \frac{t_{\text{close}}}{2}\right) & t_{\text{on}} - t_{\text{close}} / 2 \leq t < t_{\text{on}} \\ C_q w f x_0 \frac{t_{\text{open}}}{2} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} & t_{\text{on}} \leq x < T \end{cases}$$

A、T口之间 流量

$$q = C_q w x \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_{\text{open}} / 2, t_{\text{on}} - t_{\text{close}} / 2 \leq t < t_{\text{on}} \\ C_q w f x_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \left(t - \frac{t_{\text{open}}}{2}\right) & t_{\text{open}} / 2 \leq t < t_{\text{open}} \\ C_q w f x_0 \frac{t_{\text{open}}}{2} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} & t_{\text{open}} \leq t < t_{\text{on}} - t_{\text{close}} \\ C_q w f x_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \left(t_{\text{on}} - \frac{t_{\text{close}}}{2} - t\right) & t_{\text{on}} - t_{\text{close}} \leq t < t_{\text{on}} - t_{\text{close}} / 2 \end{cases}$$

利用AMESet定制步进电机子模型





二通插装阀



TJ016-0/0H4-15-20

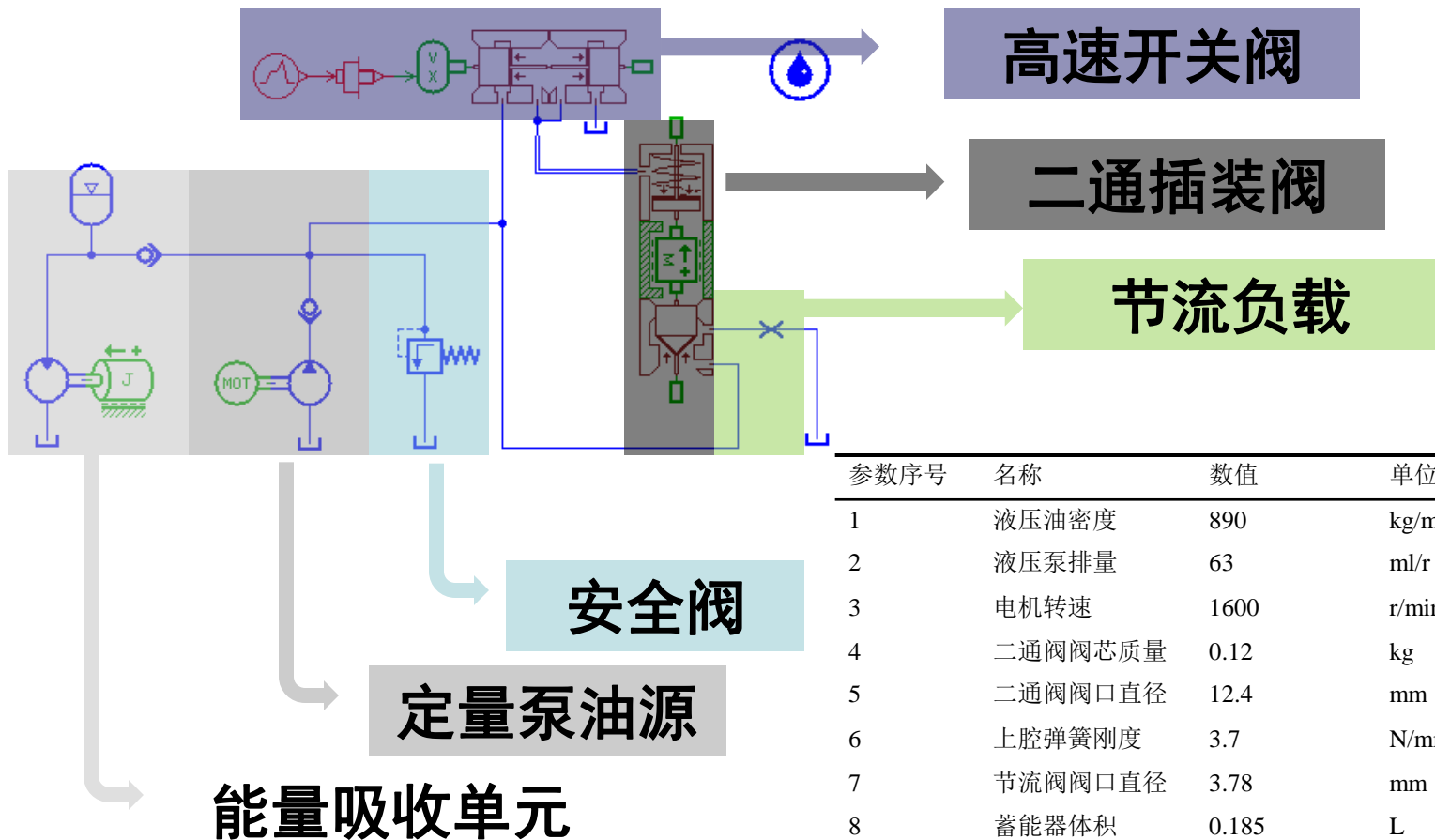
参数序号	名称	数值	单位
1	工作压力	31.5	MPa
2	面积 A_A	120	mm ²
3	面积比 $A_A: A_X$	1:1.1	
4	阀芯行程	4	mm
5	先导体积	1.53	ml
6	10ms时的控制流量	9.18	L/min
7	阀芯质量	0.12	kg
8	开启压力	0.4	MPa

直线步进电机

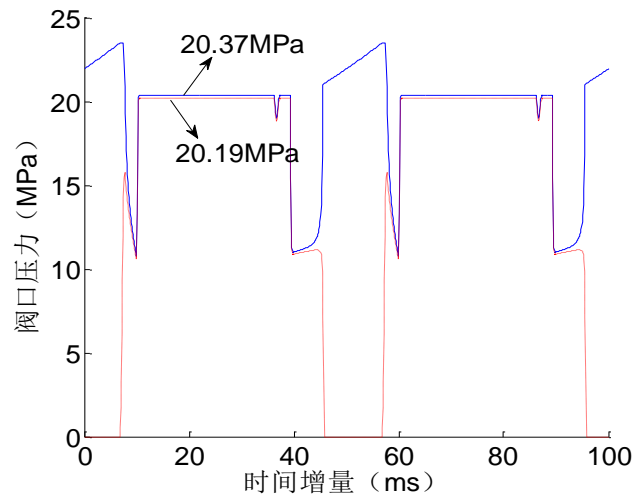
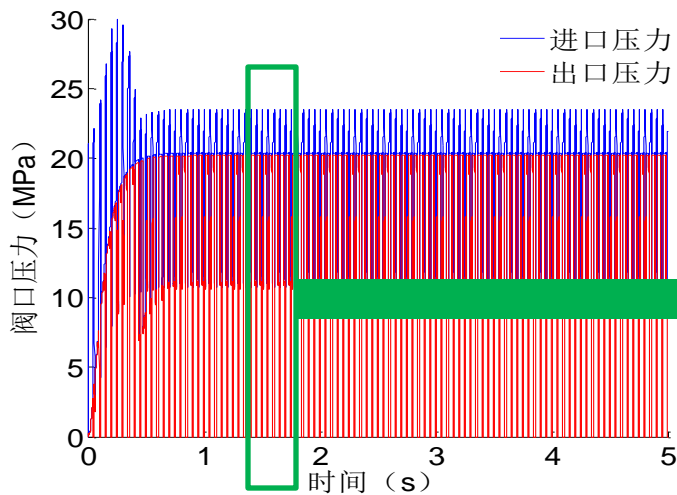


35YC25Z-A01

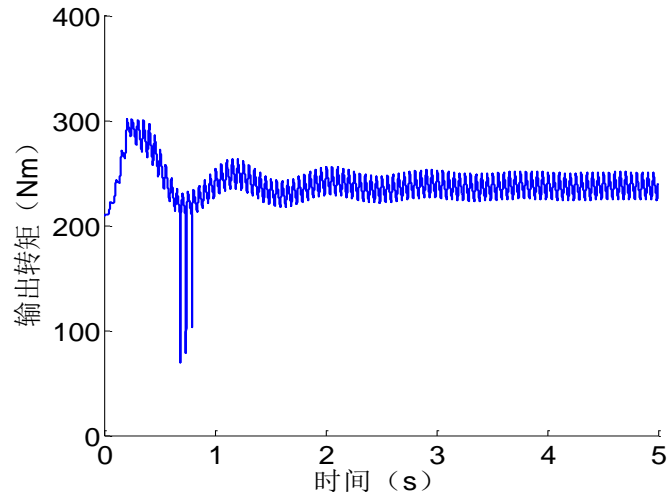
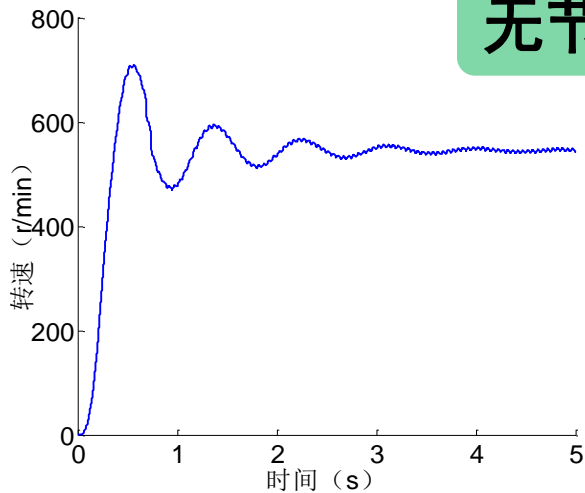
参数序号	名称	数值	单位
1	额定电压	24	V DC
2	相数	2	相
3	相电阻	80±10%	欧
4	电感	41.3±20%	mH
5	相电流	0.6	A
6	步长	0.0508	mm
7	最大推力	100	N
8	最大拉力	100	N
9	总行程	≥5.3	mm



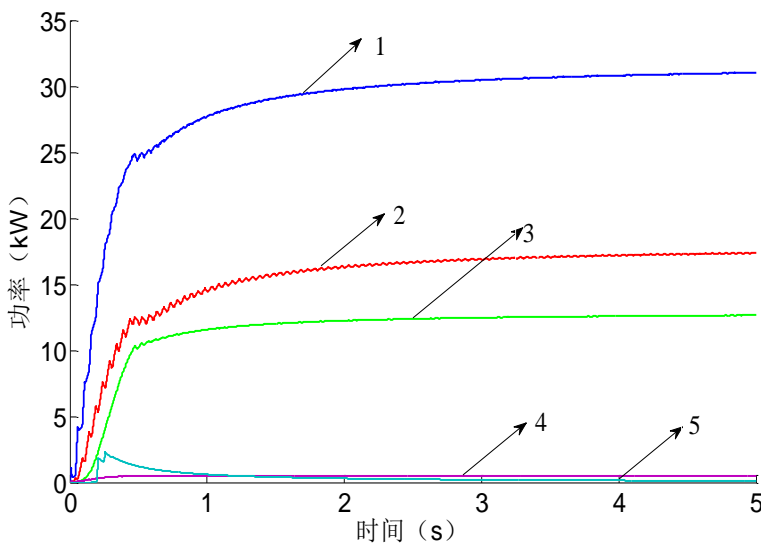
参数序号	名称	数值	单位
1	液压油密度	890	kg/m ³
2	液压泵排量	63	ml/r
3	电机转速	1600	r/min
4	二通阀阀芯质量	0.12	kg
5	二通阀阀口直径	12.4	mm
6	上腔弹簧刚度	3.7	N/mm
7	节流阀阀口直径	3.78	mm
8	蓄能器体积	0.185	L
9	蓄能器预充压力	21	MPa
10	液压马达排量	63	ml/r
11	负载旋转惯量	0.265	kgm ²
12	溢流阀设定压力	30	MPa



无节流损失



能量吸收单元转速和扭矩趋于稳定



1-总功率 2-主回路负载功率 3-旋转负载功率
4-主阀口节流损失功率 5-溢流损失功率

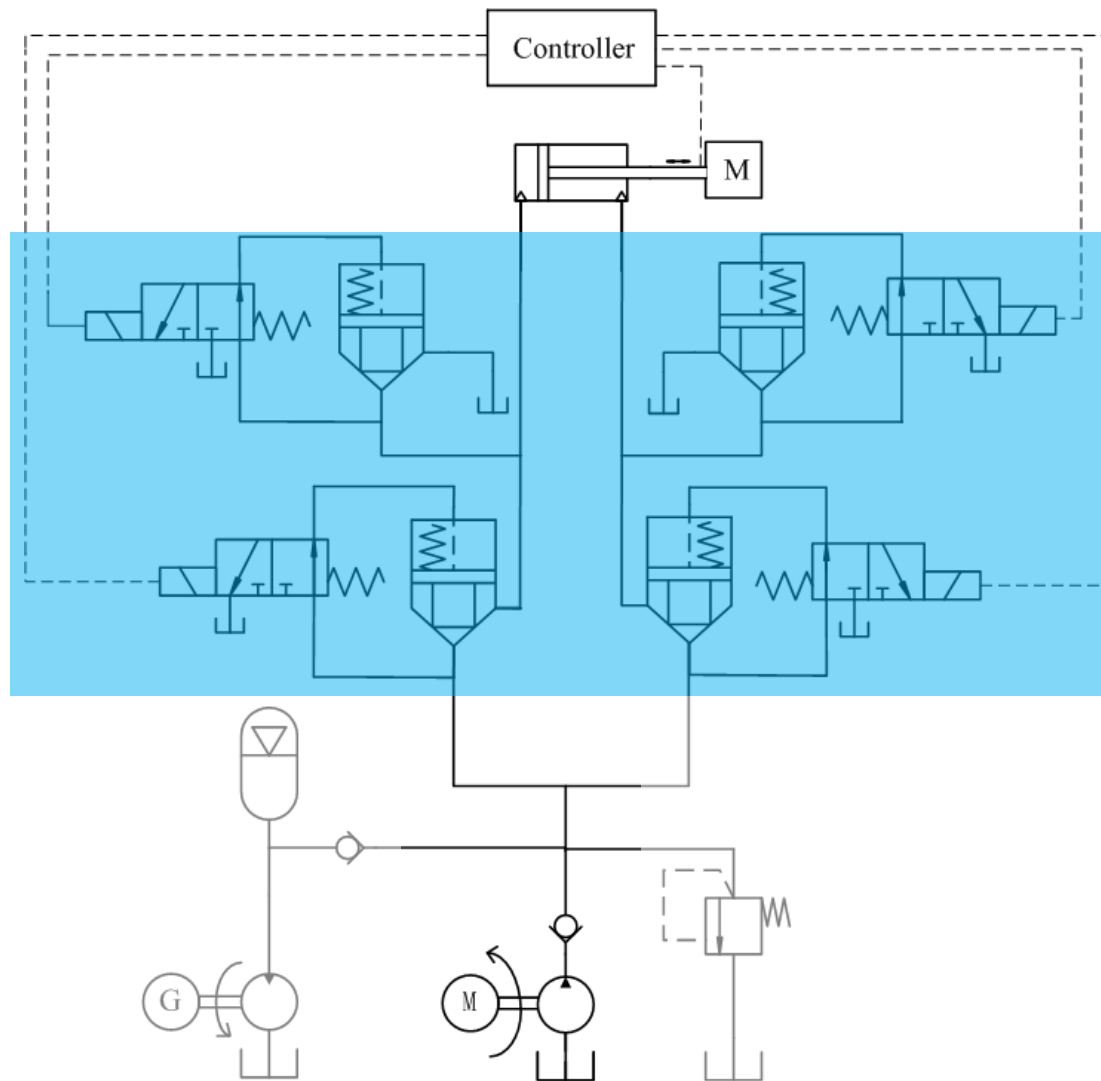
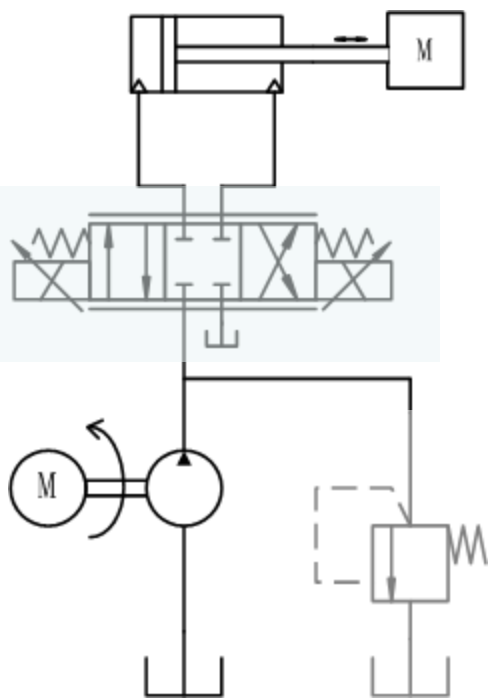
节流损失功率4%

避免了溢流损失

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{throttle}} + P_{\text{hsv}} + P_{\text{relief}}}{P_{\text{total}}}$$

$$= 1 - \frac{0.61 + 0.75 + 0}{33.83} \times 100\% = 96\%$$

位置控制系统构成

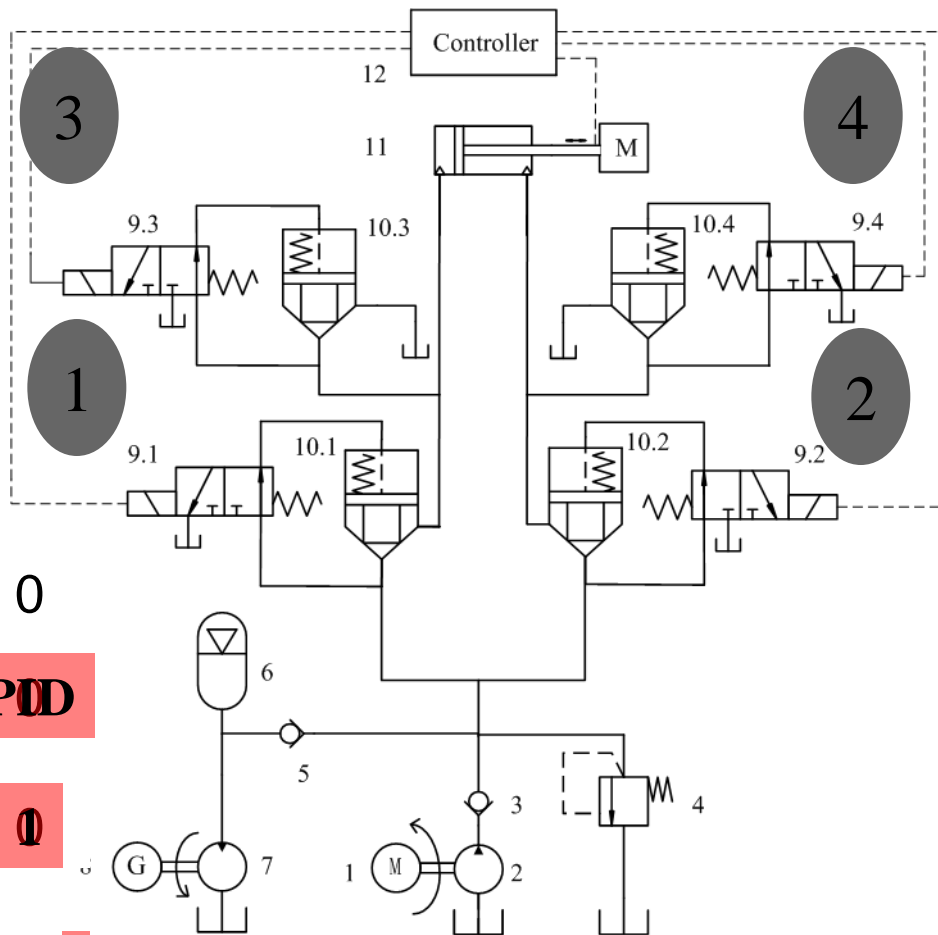
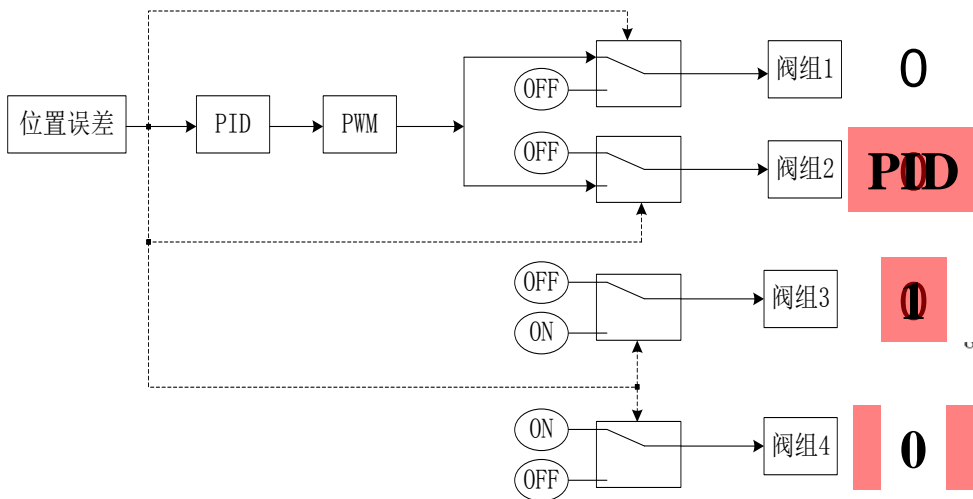


系统工作原理

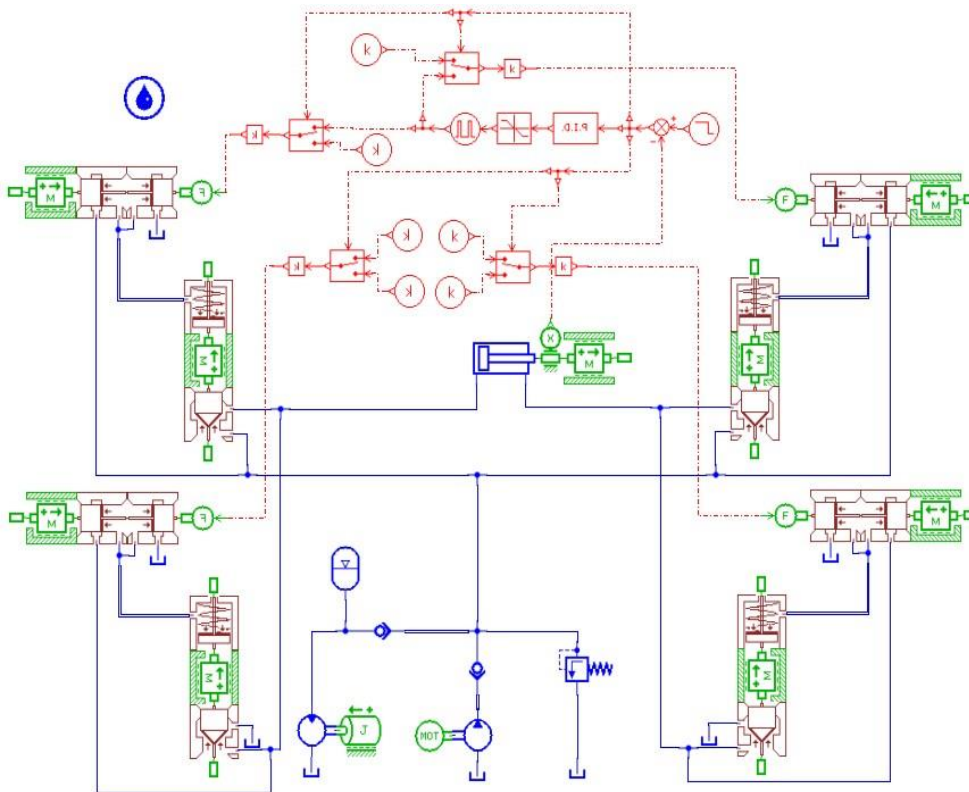
$$p_L < p_M < p_R$$

$e > 0$ 伸出

$e < 0$ 缩回



AMESim模型



主要参数

参数序号	名称	数值	单位
1	缸径	50	mm
2	活塞杆直径	20	mm
3	行程	250	mm
4	负载质量	200	kg
5	黏性阻尼系数	0.1	mm
6	摩擦力	32987	N

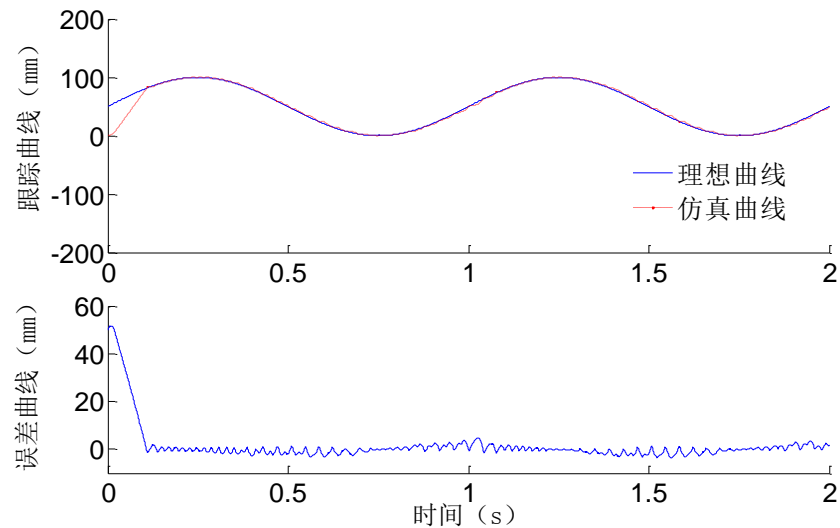


控制性能分析

正弦响应:

频率: 1Hz

跟踪误差: <5%

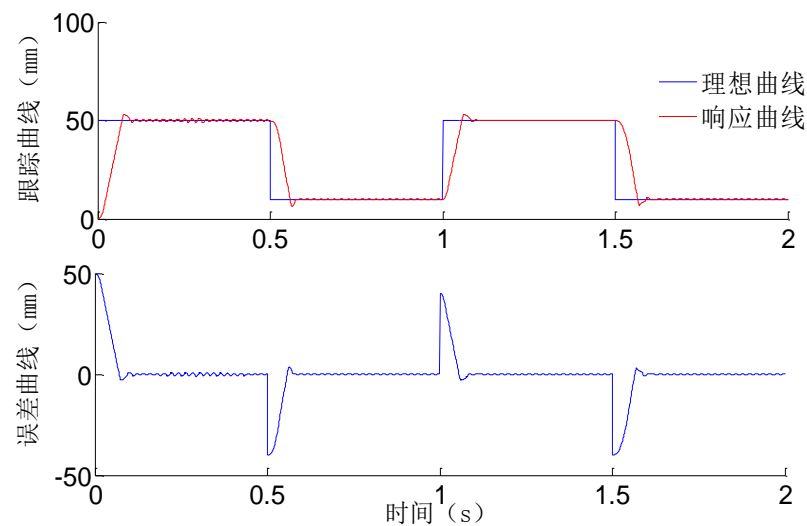


方波响应:

频率: 1Hz

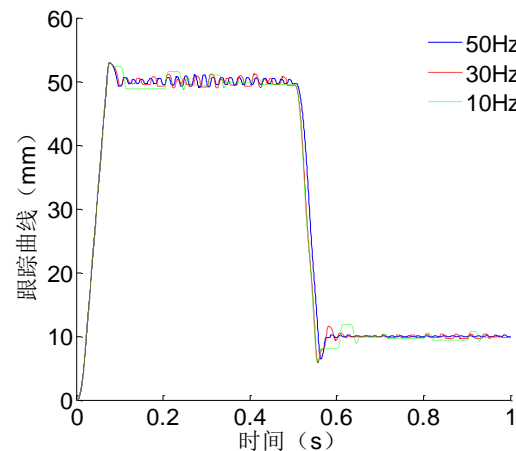
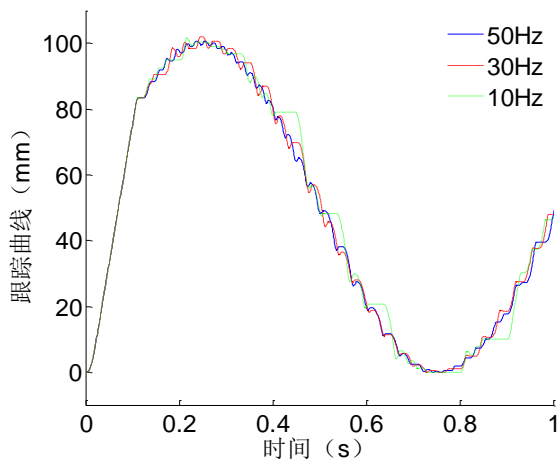
超调: <5%

跟踪误差: <3%

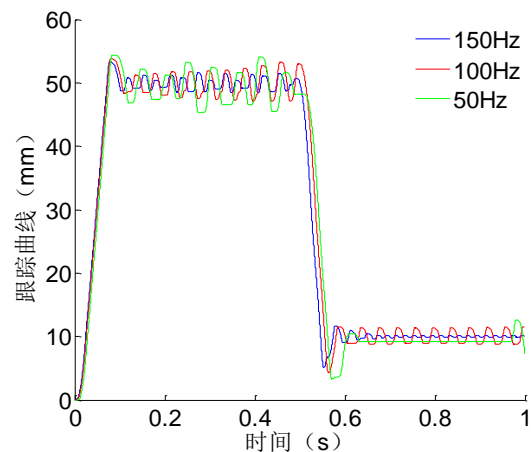
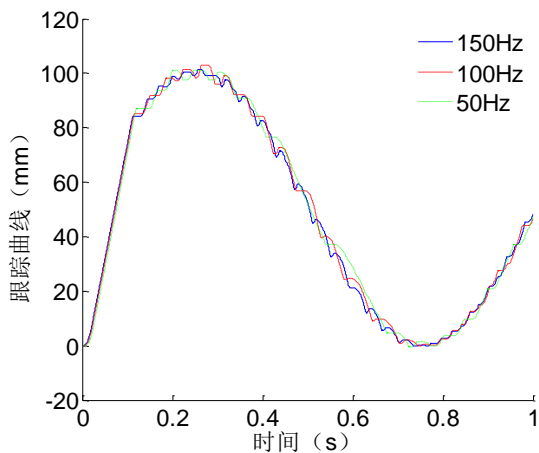


影响因素分析

控制频率 ↓
控制性能 ↓

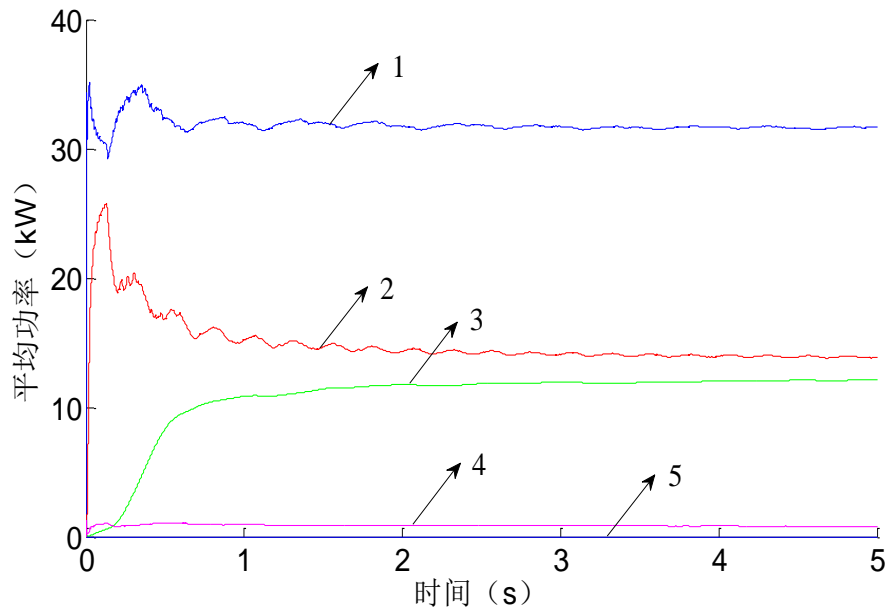


高速开关阀
频率 ↓
控制性能 ↓



节能性分析

输入信号：2Hz正弦
信号，幅值50mm，
均值50mm
控制频率：50Hz



1-总功率 2-主回路负载功率 3-旋转负载功率
4-主阀口节流损失功率 5-溢流损失功率

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{throttle}} + P_{\text{relief}}}{P_{\text{total}}}$$

$$= 1 - \frac{0.813 + 0}{31.5} \times 100\% = 97.4\%$$

**系统节流损失极小；
系统避免了溢流损失。**

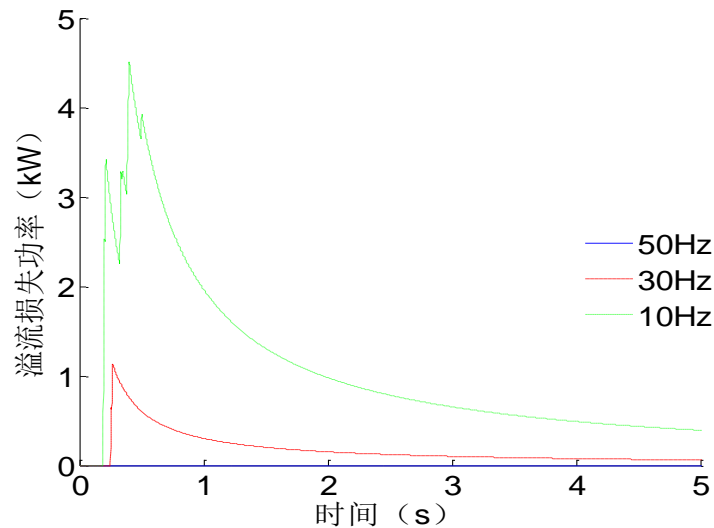
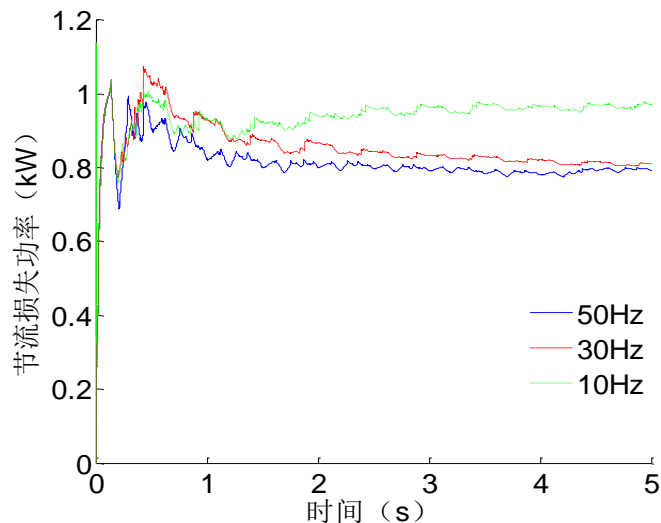


影响因素分析

控制频率↓
节流损失功率↑

控制频率↓
溢流损失功率↑

控制频率低于50Hz
时，出现溢流损失

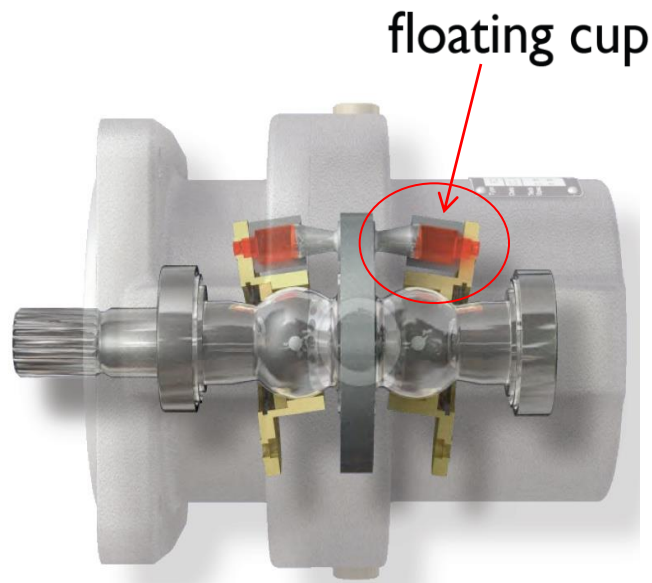
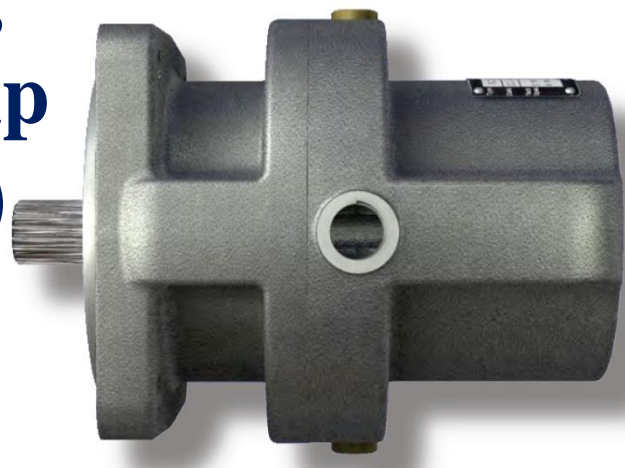




● 新型液压节能元件一（国外研究）： 浮杯泵

结构上的创新：

**Floating
Cup Pump
(浮杯泵)**





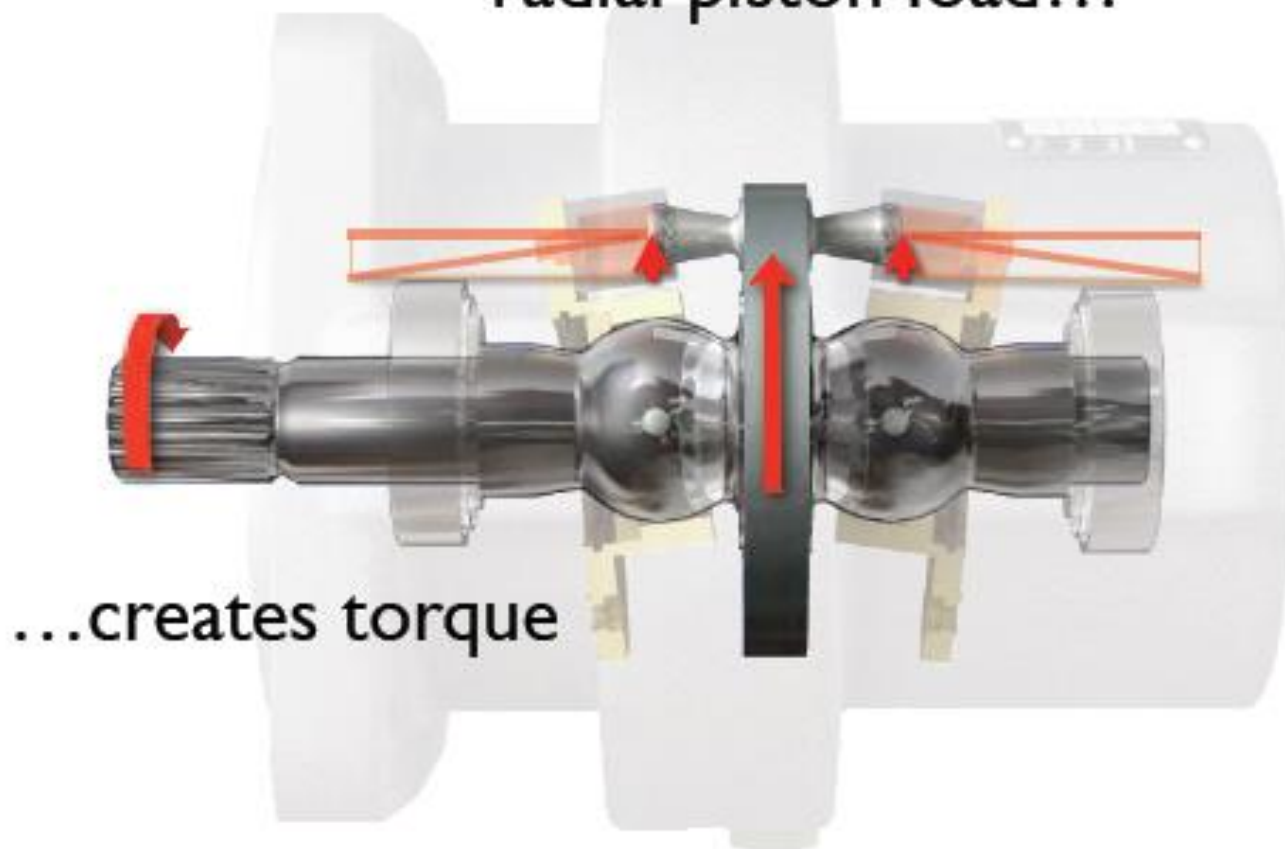
结构上的创新：独立柱塞和缸体，对称式结构





结构上的创新：对称式结构，轴向受力平衡

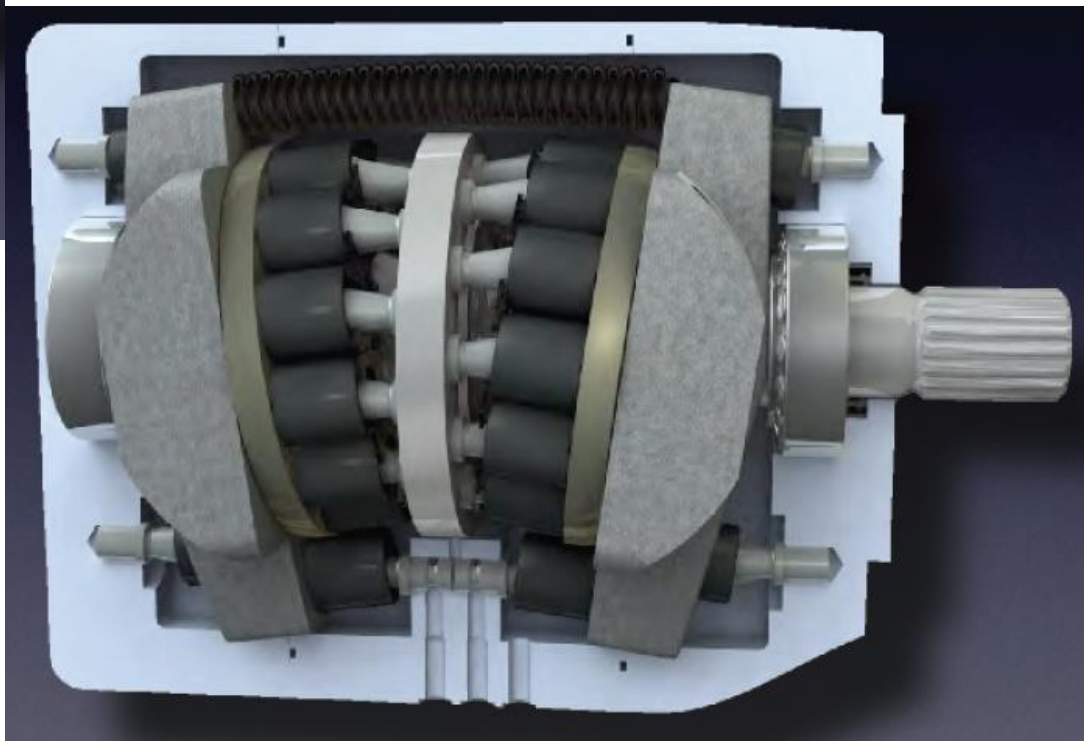
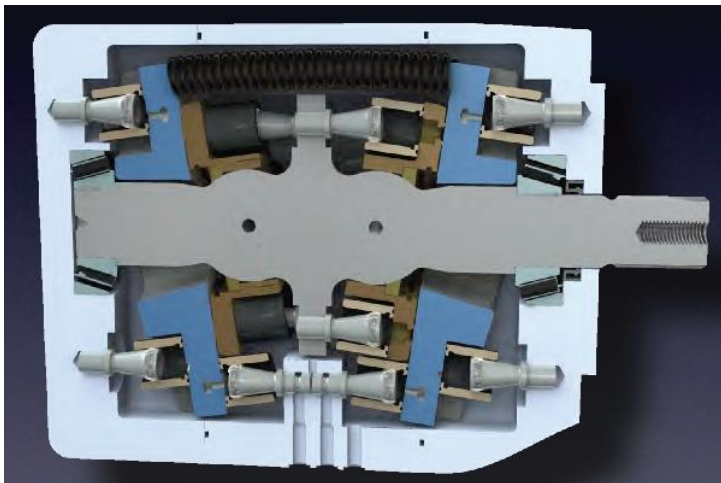
radial piston load...



...creates torque



变量方式上的创新：对称式变量机构

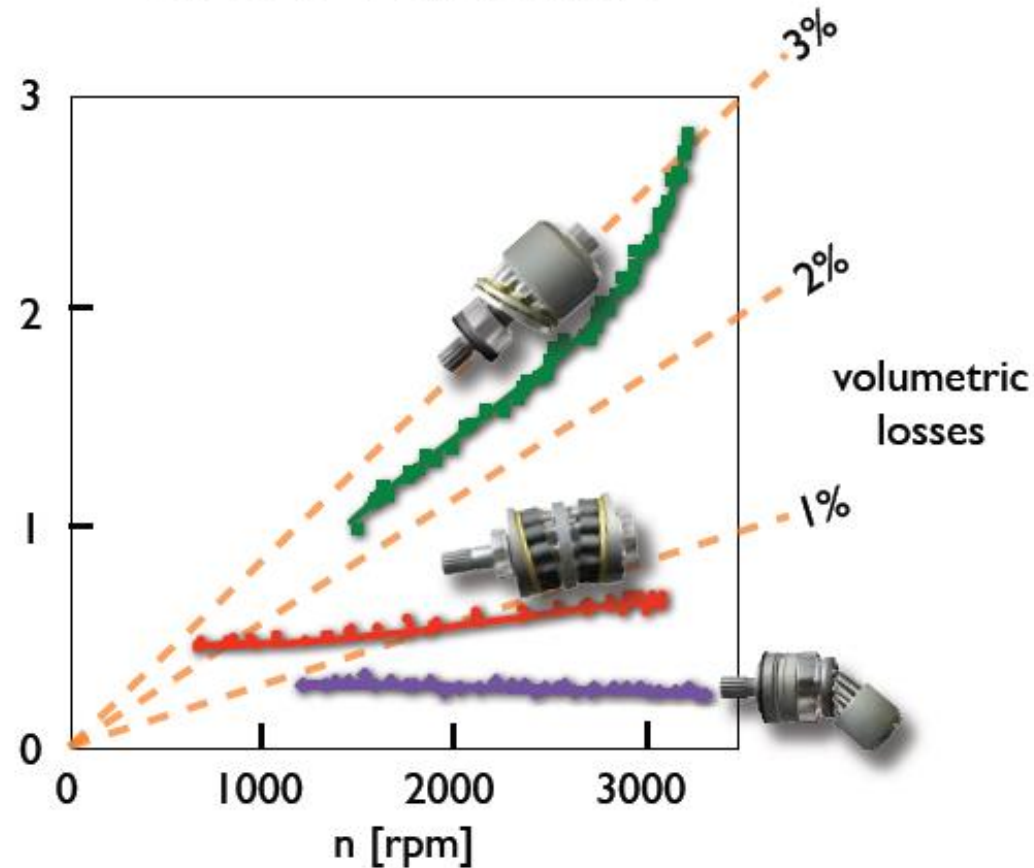




测试结果：容积损失介于1%~2%。 test results

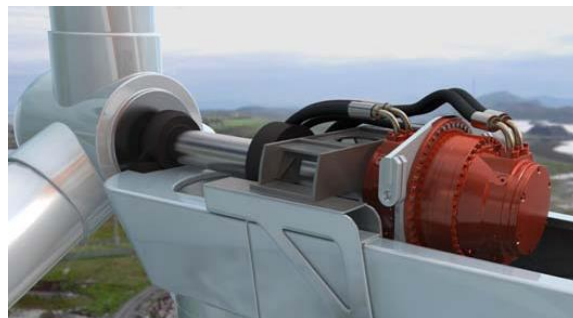
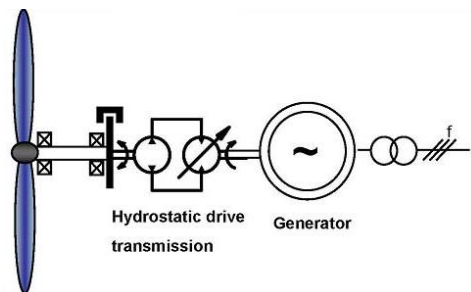
Q-leak
[L/min]

HLP 46
T = 60°C
P_A = 20 MPa
P_T = 1 MPa

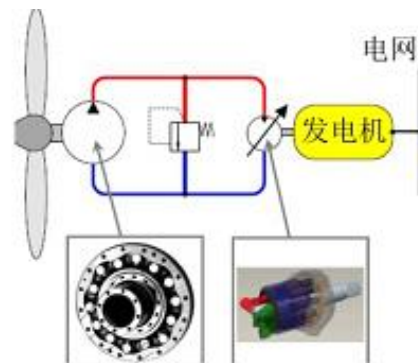
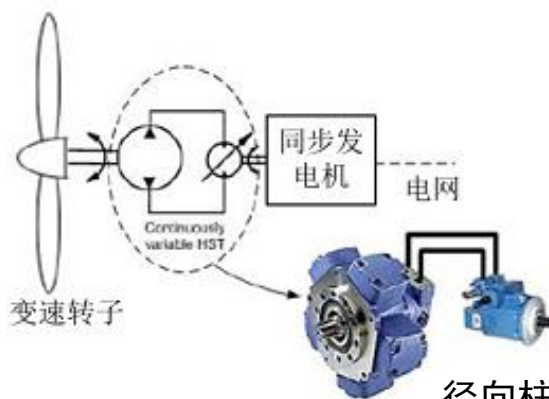


● 新型液压节能元件二（自主研究）： 数字配流式低速径向柱塞液压泵

研究背景：风力发电与海洋发电技术的需求



风力发电

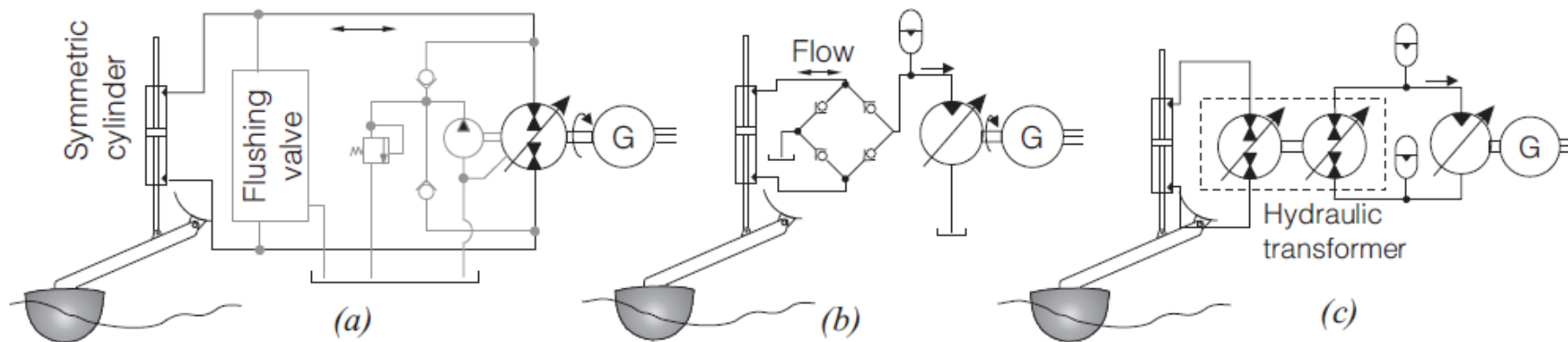
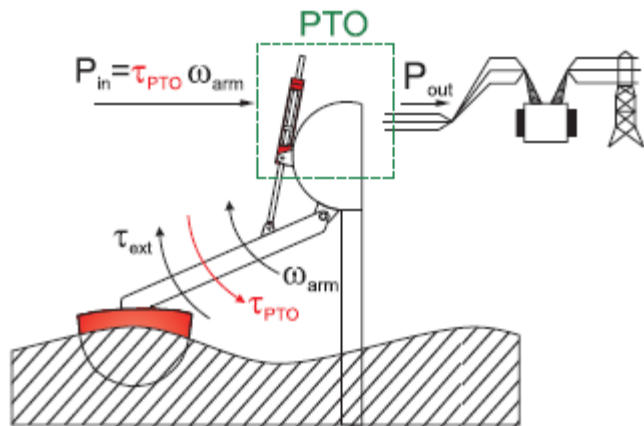


径向柱塞泵

轴向柱塞马达



波浪发电



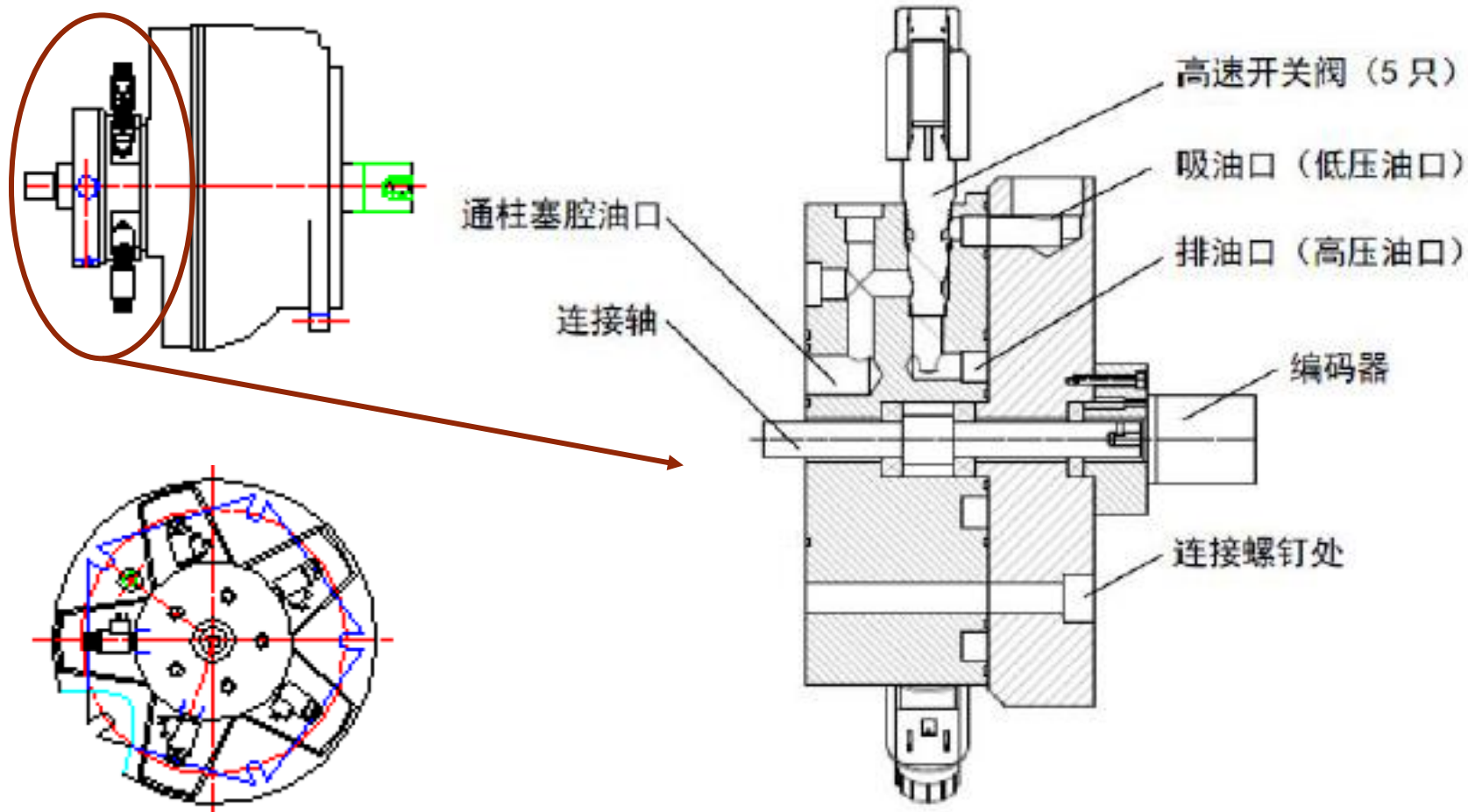
采用数字阀配流的低速液压泵，与传统机械配流式液压泵相比，其在节能上的贡献主要体现在：

- ✓ 提高了泵在配流部分的容积效率；
- ✓ 利用数字阀的配流功能，当泵转速升高使得泵输出流量过高时，立即进入恒流量调节过程，保证泵输出流量始终与负载相适应；
- ✓ 在实现泵输出近似恒流量控制功能时，当转速升高时，直接将泵吸油口始终与油箱相通，保证泵不产生高压油后再通过溢流阀溢流，因而是“低压溢流”。



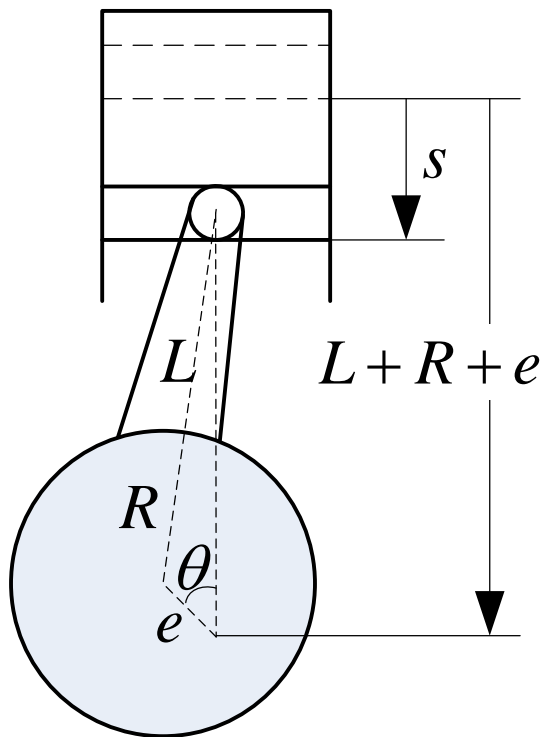
逆时针旋转配流状态表

角度(°)	吸油阀断电	排油阀得电
0~36	I、II、III	IV、V
36~72	I、II	III、IV、V
72~108	V、I、II	III、IV
108~144	V、I	II、III、IV
144~180	IV、V、I	II、III
180~216	IV、V	I、II、III
216~252	III、IV、V	I、II
252~288	III、IV	V、I、II
288~324	II、III、IV	V、I
324~360	II、III	IV、V、I



数字式配流机构机械结构

变转速时的输出流量特性分析



液压泵输入轴转角与
柱塞行程间关系

$$s = L + R + e - e \cos \theta - \sqrt{(L + R)^2 - e^2 \sin^2 \theta}$$

$$\cos \theta = \frac{e^2 + (L + R + e - s)^2 - (L + R)^2}{2e(L + R + e - s)}$$

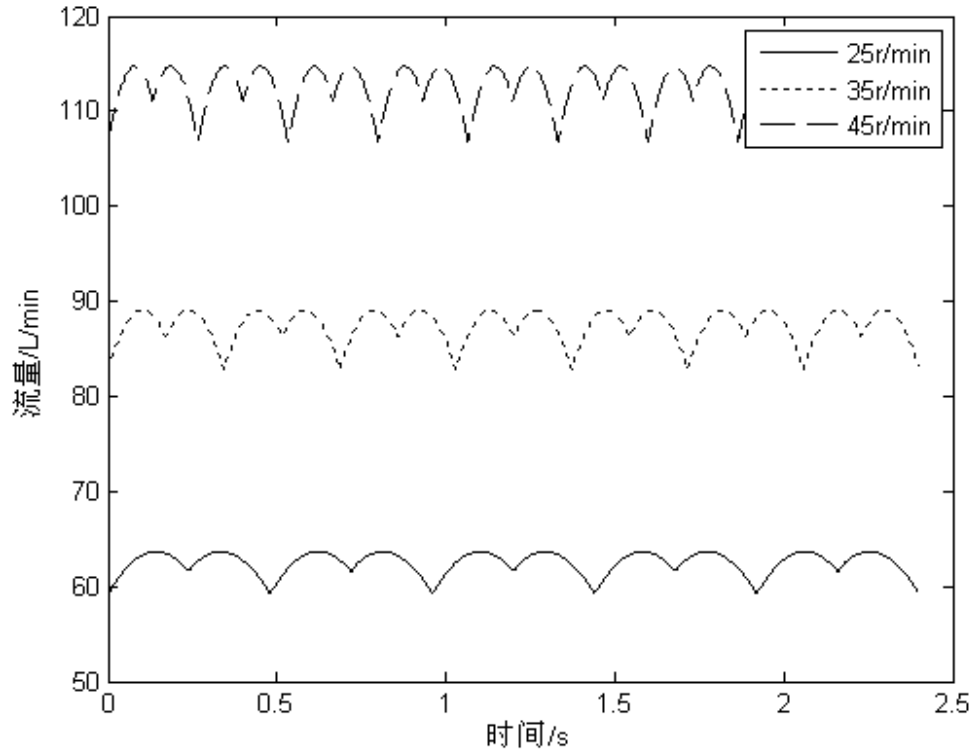
$$s \in [0, 2e]$$

由 $V_i = sA_i \longrightarrow dV_i/dt = q_i$

泵瞬时流量：
$$q = \sum_{i=1}^n q_i$$



泵输出流量与驱动转速的关系

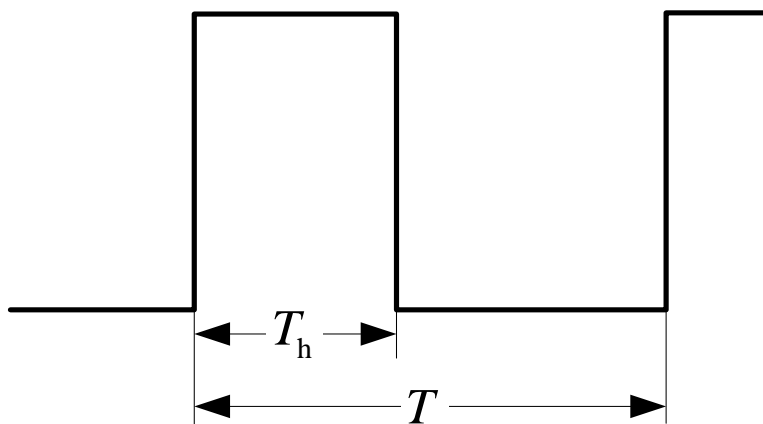


液压泵的流量脉动值

转速 (r/min)	25	35	45
理想流量 (L/min)	62.5	87.5	112.5
流量脉动上限 (L/min)	+1.17	+1.59	+2.2
流量脉动下限 (L/min)	-3.28	-4.62	-5.8

实现恒流量输出的方法

● PWM控制方法



占空比示意图

数字配流式液压泵的理论输出流量为：

$$q = nV \frac{T_h}{T}$$

实现恒流量输出的方法

● 行程比控制方法

该方法的基本原理：

考虑柱塞的一个完整排油行程，设 $0 < \lambda \leq 1$ ；
若在排油行程的前 $\lambda \times 100\%$ ，控制高速电磁开关
阀正常得电，在余下的排油行程让高速电磁开
关阀断电，则实际有效的排油行程占总有效行
程的百分比为 $\lambda \times 100\%$ ，从而相当于把数字配流
式液压泵的有效排量调整为 λV ；

实现恒流量输出的方法

● 行程比控制方法

故数字配流式液压泵的理论输出流量为：

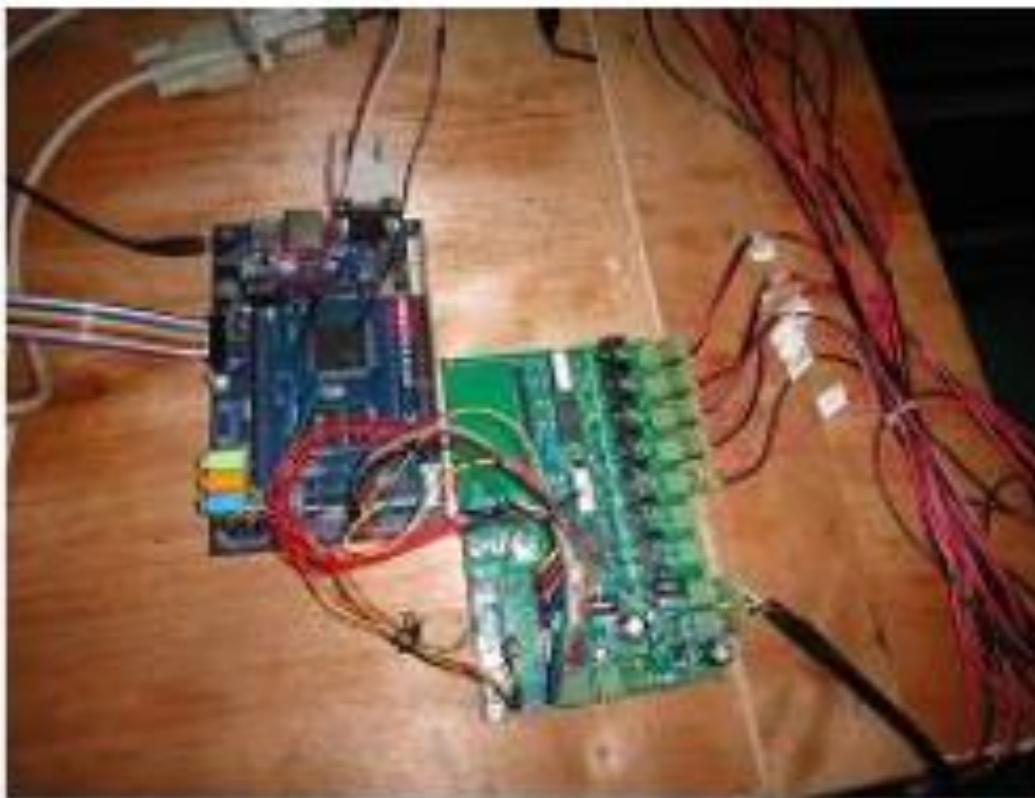
$$q = n\lambda V$$

即当转速变化时，通过控制 λV ，使得 $n\lambda V$ 为一定值，则可以使数字配流式液压泵实现恒流量输出。



样机实验及结果分析

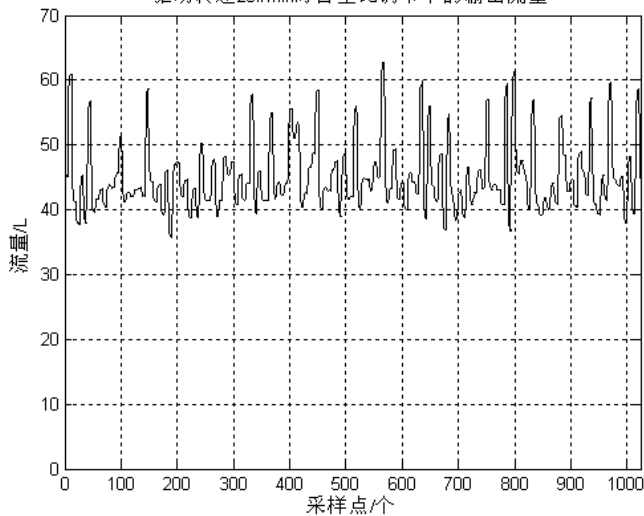
● 样机制作



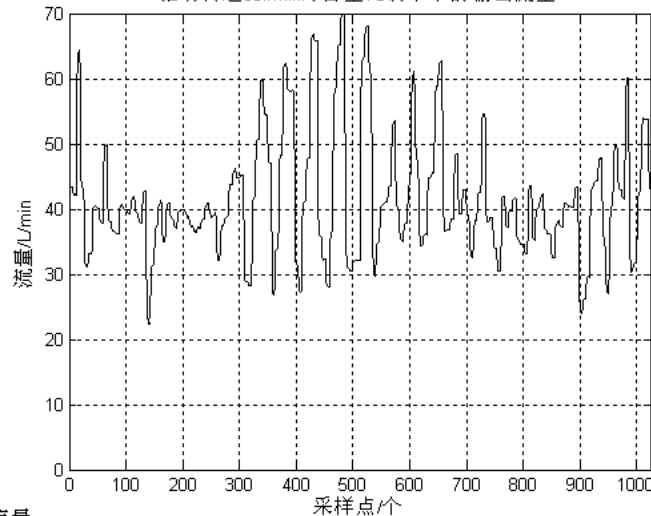


PWM控制方法实验结果与分析

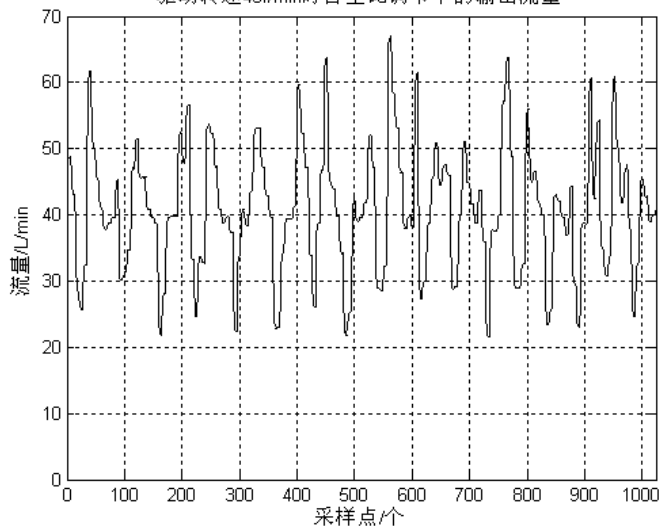
驱动转速25r/min时占空比调节下的输出流量



驱动转速35r/min时占空比调节下的输出流量



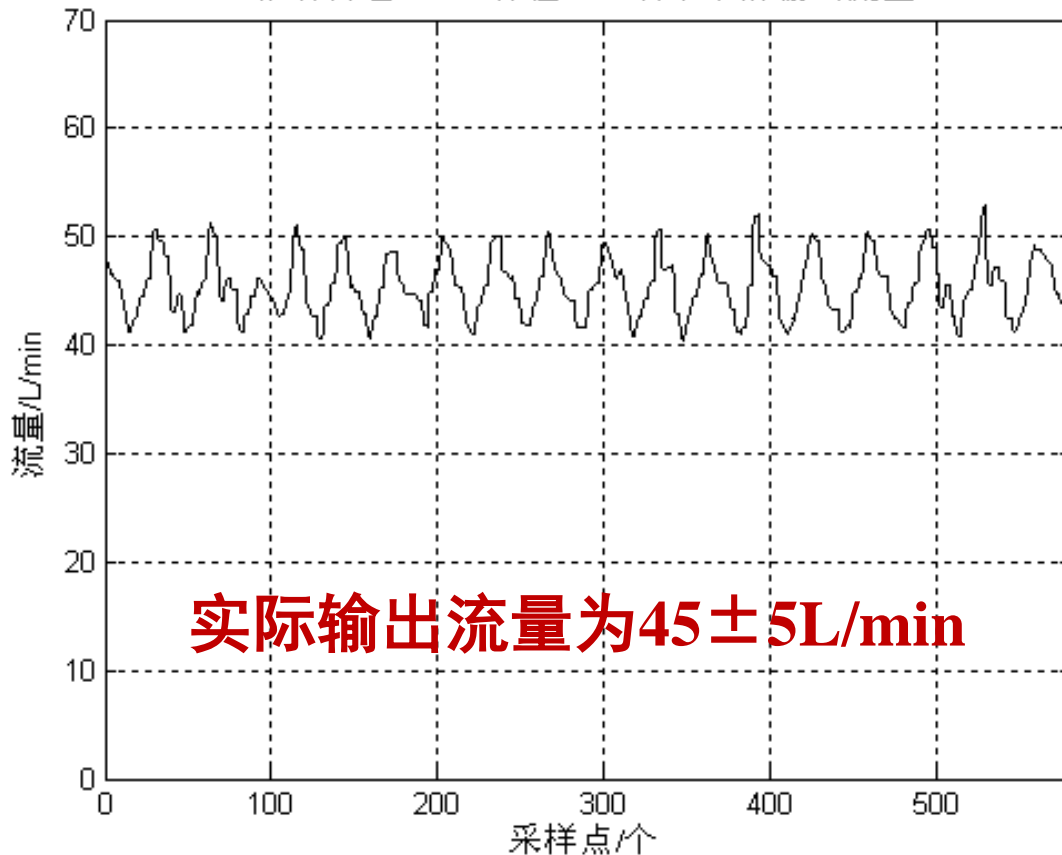
驱动转速45r/min时占空比调节下的输出流量





行程比控制方法实验结果与分析

驱动转速30r/min行程比比调节下的输出流量



行程比设定为60%，理论控制流量为45L/min



五. 结束语

● 今后的发展

- ✓ 高效、可靠；
- ✓ 节能、环保；
- ✓ 精确、智能。

但随着发展，液压技术的节能和环保将更加重要！！



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

饮水思源 爱国荣校



机械与动力工程学院
Shanghai Jiao Tong University School of Mechanical Engineering

谢谢关注!