



国外电机驱动调节液压阀 技术研究与分析应用

林 广

主办：中国力学学会流体控制工程专业委员会

承办：浙江工业大学2D阀团队
上海液压气动密封行业协会
重庆理工大学期刊社
昆明理工大学资产经营有限公司

2019年9月25日 · 杭州



目 录

- 一、从R-DDV到Domin阀
- 二、电机驱动调节液压阀
- 三、电驱配套是技术核心
- 四、旋转驱动应用大市场

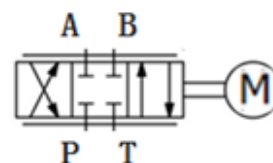
一. 从R-DDV阀到Domin阀



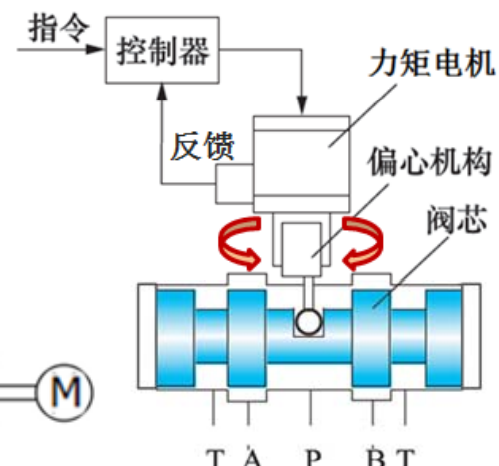
● 旋转直驱伺服阀（R-DDV）



产品外形



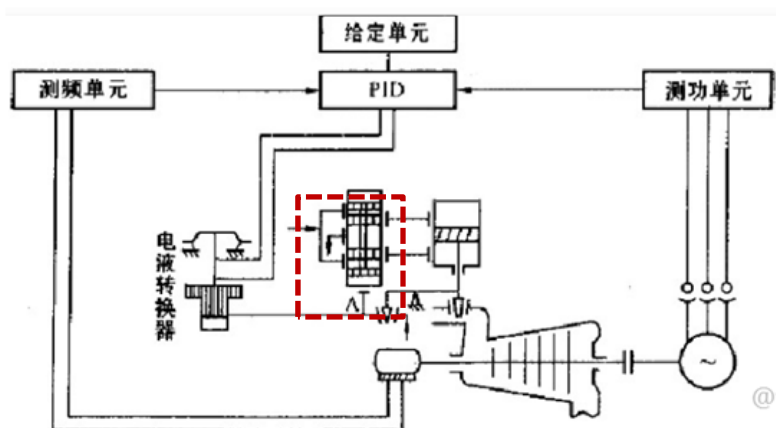
图形符号



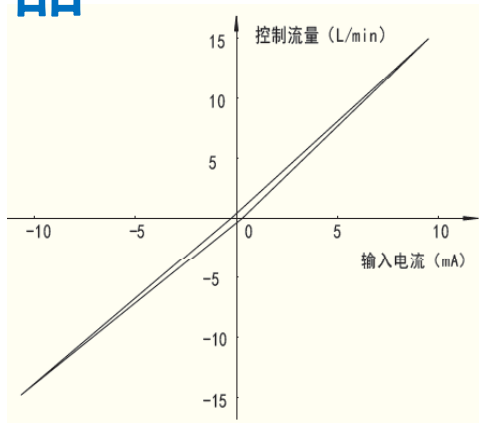
原理示意图

- 美国WOODWARD（伍德沃德）R-DDV 伺服阀，采用有限角度力矩电机+角位移霍尔传感器，电机旋转轴有偏心转动球头，实现阀芯直线运动。

● 为发电机调速器开发应用



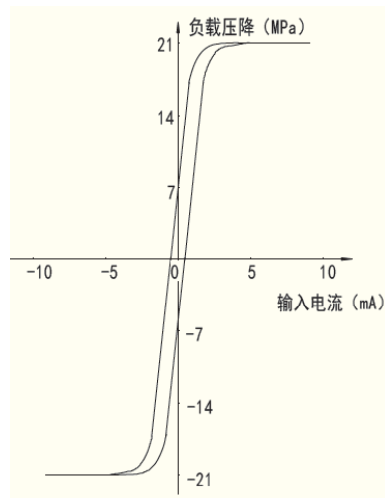
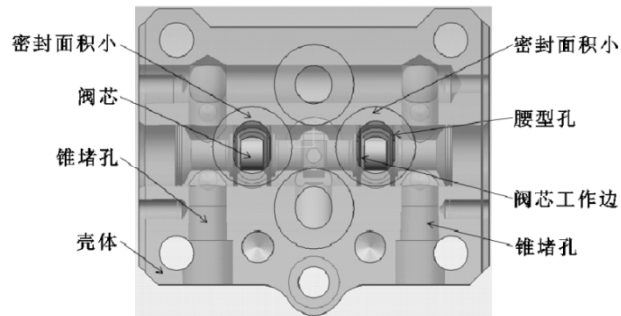
● 国内开发的产品



1 L/min
2 L/min
5 L/min
10 L/min
15 L/min

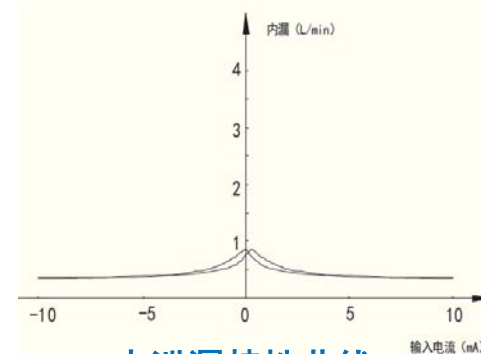
流量特性曲线

额定压力：21MPa
最大流量：40L/min



压力特性曲线

试验项目		计量单位	FF-280 系列				
			FF-280/1	FF-280/2	FF-280/5	FF-280/10	FF-280/15
供油压力范围		bar	20~280				
额定供油压力 P _N		bar	210				
		psi	3050				
		MPa	21				
额定流量 Q _n		L/min	1	2	5	10	15
		gpm	0.26	0.52	1.3	2.6	3.9
控制信号 I _n		mA	±10				
		V	±10				
绝缘电阻		MΩ	≥50				
滞 环		%	≤4				
分 辨 率		%	≤1				
线 性 度		%	≤7.5				
对 称 度		%	≤10				
压力增益		%	≥30				
内 漏		L/min	≤0.3	≤0.35	≤0.5	≤0.75	≤1
		gpm	≤0.08	≤0.09	≤0.13	≤0.20	≤0.26
零 偏		%	-3~-+3				
频率特性	幅频宽 (-3dB)	Hz	≥100				
	相频宽 (-90°)	Hz	≥100				
工作温度		℃	-30~-+80				
净 重		Kg	≤0.5				



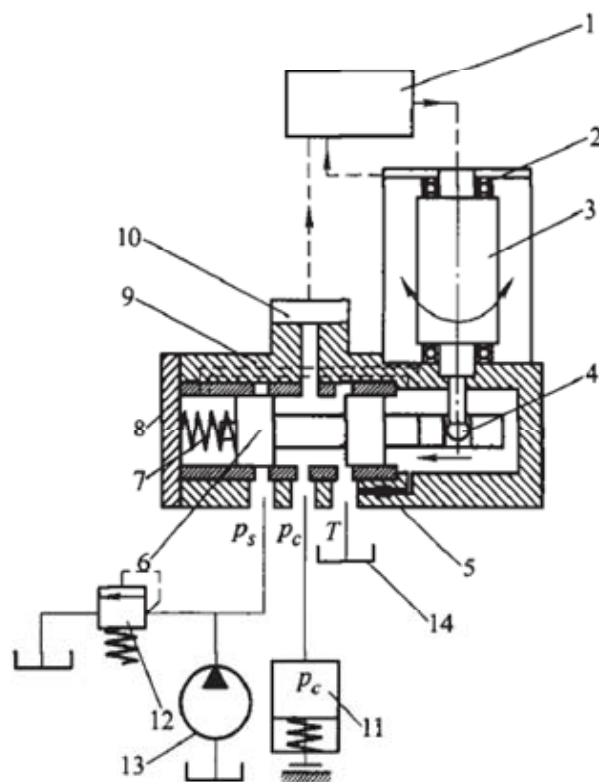
0.3 L/min
0.35L/min
0.5 L/min
0.75L/min
1 L/min

内泄漏特性曲线

试验项目	计量单位	FF-281 系列				
		FF-281/20	FF-281/25	FF-281/30	FF-281/35	FF-281/40
供油压力范围	bar	20~280				
	bar	210				
额定供油压力 P_N	psi	3050				
	MPa	21				
额定流量 Q_n	L/min	20	25	30	35	40
	gpm	5.28	6.61	7.93	9.25	10.57

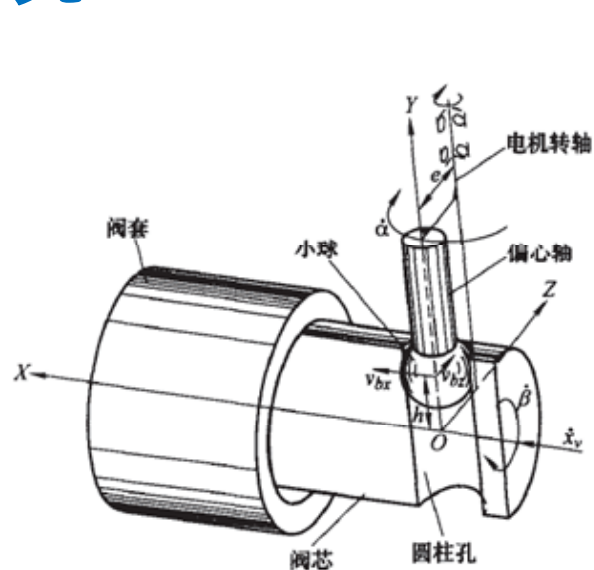
● 进一步的创新与研究

● R-DDPV压力伺服阀

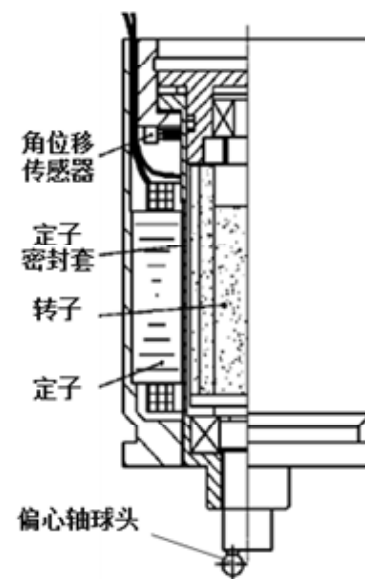


带压力反馈直驱伺服阀原理图

1. 电子控制器 2. 转角位移传感器 3. 有限转角力矩电机
4. 偏心驱动机构 5. 回油单向阀 6. 功率滑阀 7. 偏置弹簧
8. 阀套 9. 阀体 10. 压力传感器 11. 负载容腔 12. 溢流阀
13. 液压泵 14. 油箱



阀芯-球头偏心机构



有限转角力矩电机



试验产品

1. 旋转变压式角位移传感器 2. 有限转角力矩电机 3. 压力传感器

● Domin 阀



85%

减轻重量

4x

减小体积

25%

流量提升

30%

减少泄漏

最大压力: 35MPa

Mini
1 ~ 7 L/min

S4 PEO
2 ~ 18 L/min

S6 PRO
4 ~ 65 L/min

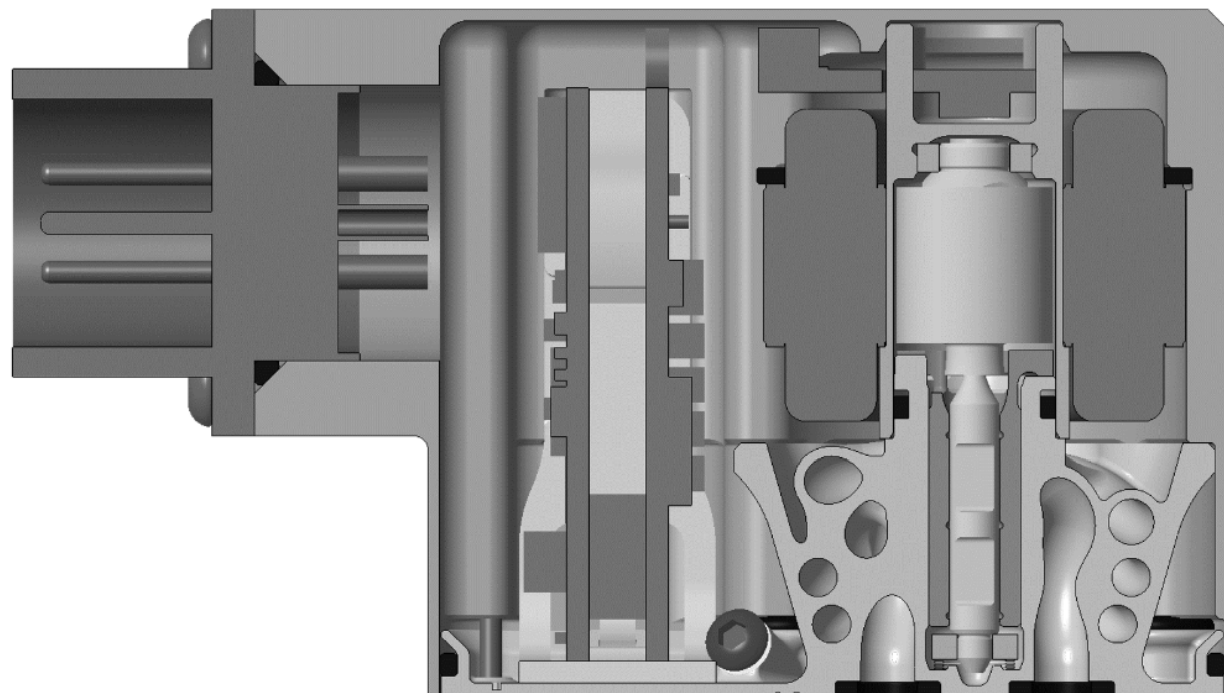
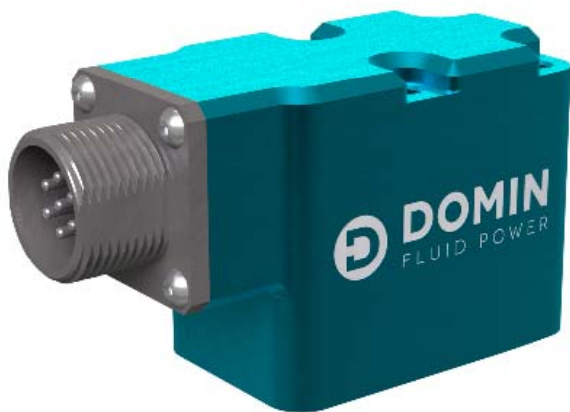
S10 PRO
20 ~ 250 L/min

S14 PRO
300 ~ 1000 L/min



● Mini

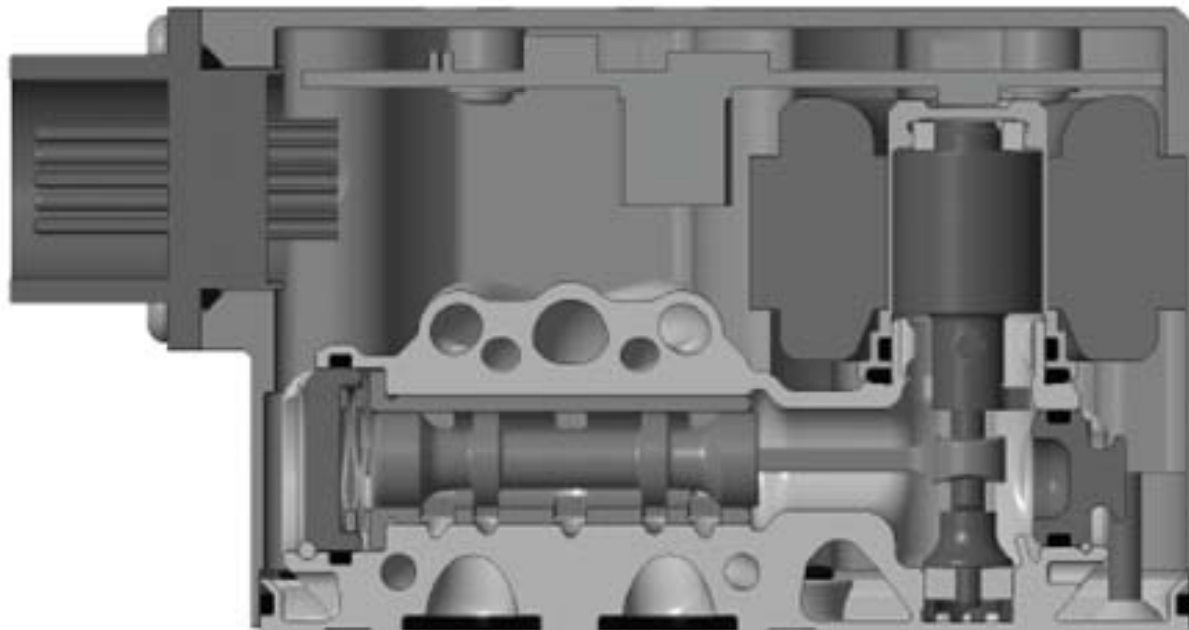
● 旋转直驱旋转阀



- 市场上唯一带有旋转滑阀的伺服阀
- 旋转阀芯代表了控制阀的终极简便性
- 通过使用AM解决线轴摩擦问题
- 使用永磁无刷电机进行双向控制
- 膜用于将电子与流体分离无需动态密封
- 配置允许在电机和阀芯之间进行齿轮传动优化动态并最小化结构
- 旋转电机更容易设置精确的反馈，
- 最小成本和尺寸

Mini型因产量原因，暂时不对欧洲以外国家销售。

● S6 PRO



● 旋转直驱滑阀



通径:	NG 06
额定流量:	60 L/min (压降70bar)
最大流量:	130 L/min
泄漏量:	< 1.2 L/min
频响:	250 Hz (-3dB, ±25%)
阶跃响应:	4 ms (100%信号)
滞环:	0.1 %
分辨率:	0.05 %
输入信号:	±10V, 4~20mA
能耗:	<5W, 额定流量时
重量:	550 g

● S14 PRO

NG 25 两级伺服阀

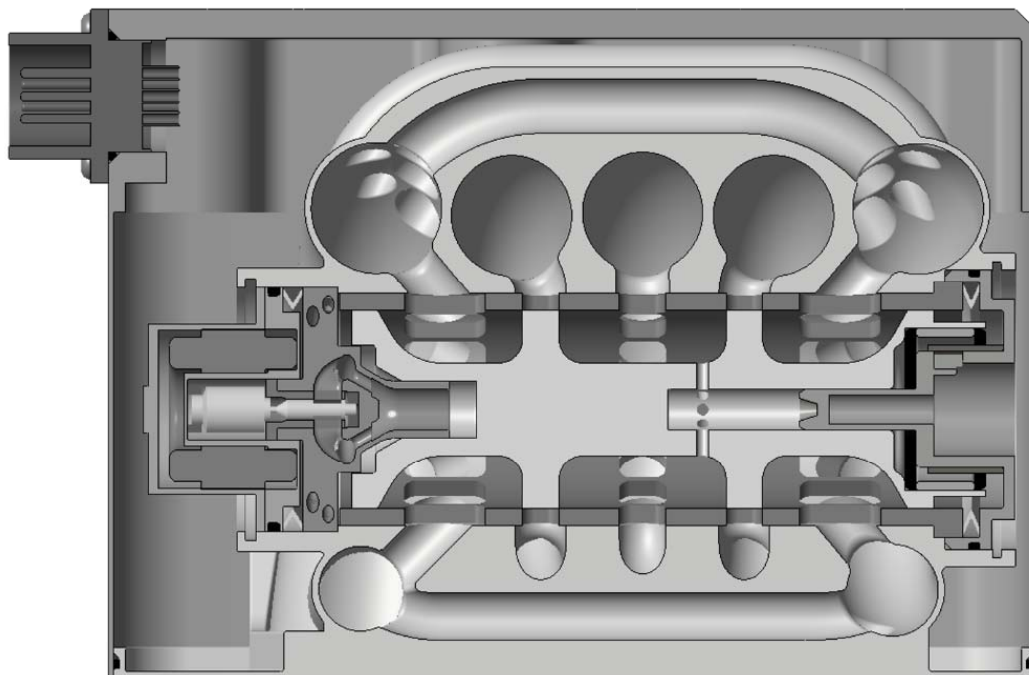
用于机载电子设备。

两个旋转级和线性主级控制滑阀口动态响应。

带主、副线性位置反馈功能

车载电子设备（OBE）配置模拟或数字接口（TBC）。

超常大流量设定。



额定流量:	1000 L/min (7 Mpa, ΔP 时)
最大流量:	2000 L/min
频 宽:	>100 Hz (-3 dB, $\pm 25\%FS$)
阀口剪切力:	>1 kN
额定流量下功耗:	<5 W
阀质量:	4000 g

● Domin 阀的特点

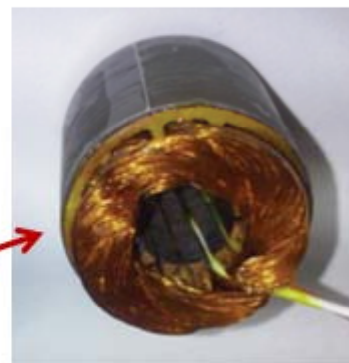
永磁无刷电机双向控制曲柄机构操作阀芯直线运动。电机转角控制阀芯低摩擦低反冲直线动作。**3D** 打印流道符合流体运动特性，减少体积和质量。斯迈利弹簧紧凑。金属膜提供流体屏障，使用涂膜技术将电子密封并与液压隔离。集成电子器件。最小化的成本和尺寸。



S6 PRO阀外观

电子集成器件

旋转驱动反馈控制线性



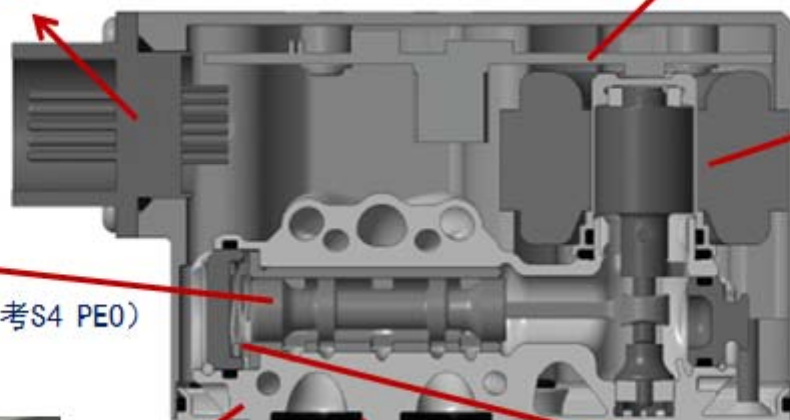
永磁无刷电机

电接口



3D技术应用

阀芯（参考S4 PE0）



标准安装面

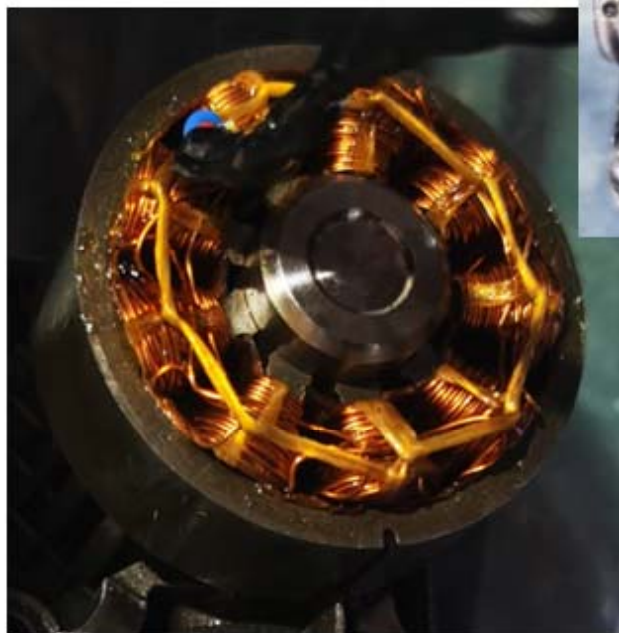


激光熔焊
增材阀体
(参考S4 PE0)



● S6 PRO拆解

S6 PRO的特点是通过一个简单的曲柄机构操纵滑阀运动。曲柄产生位移具有高效敏感又无反冲。许多专利涵盖了设计特征。金属膜提供了一个密封屏障，将阀的旋转元件与电机和传感器的电气元件隔离。解决旋转件和内部高压密封。

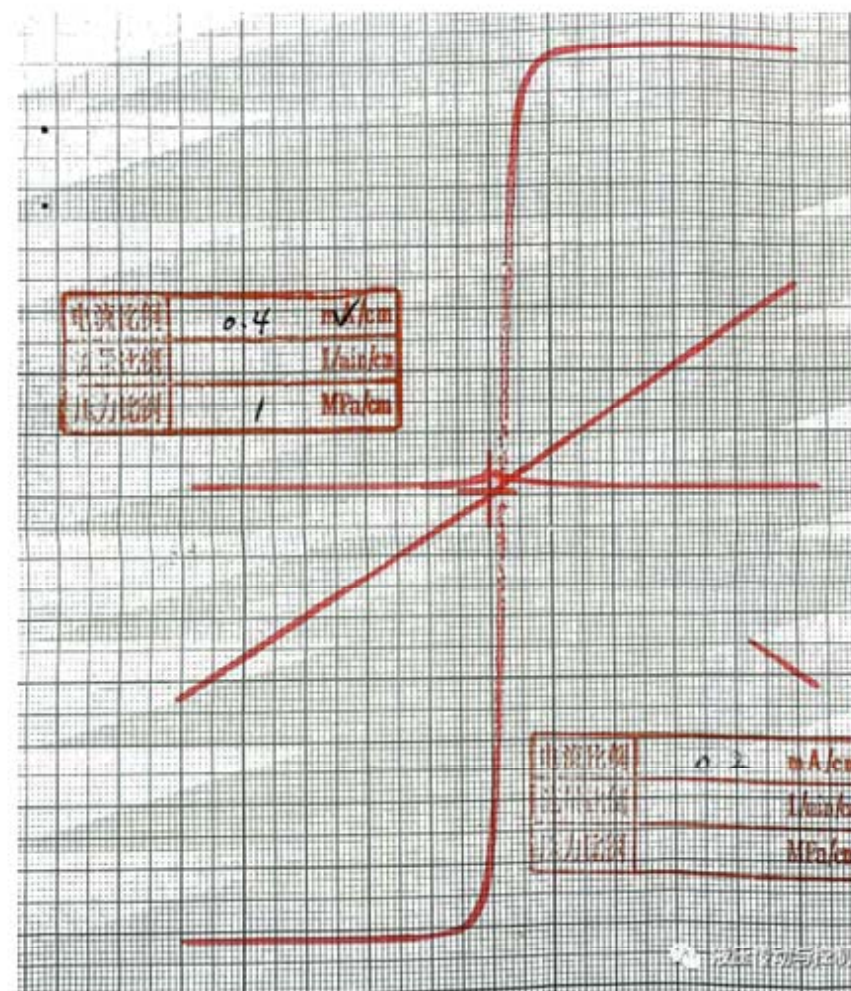


● S6 PRO阀的试验台测试

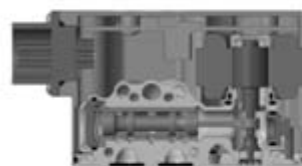
●试验显示：

产品测试性能虽然与产品样本指标略有差异，但依然掩盖不了其优异特性。

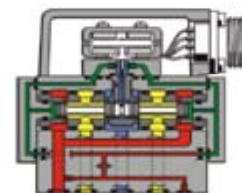
检测数据 报 告						
被 试 产 品		电液伺服阀	客 户			
规 格 型 号		DOMIN	修理日期		2020/8/28	
出 厂 编 号			本批数量		1	
制 造 号			任务单号			
性 能 测 试 报 告						
维修依据		按 HB2610-88 规定的试验方法及伺服阀技术标准进行				
实验条件	测试设备	SY10-40M	流量计	计量油缸	压力传感器	
	工作介质	液压油 15 号	油液温度	45℃	环境温度	25℃
实验项目	计量单位	测 试 条 件		允许值	判定	检测数据
控制电压	V	线圈连接		±	24V	24V
额定流量	L/min	阀压降为 7MPa 输入电压为± 10V		60±6		/
		/阀压降为 7MPa 输入电压为± 5V		30±3		+27.9 -27.4
内部泄露	L/min	阀压降为 7MPa		≤1.7		0.9
零偏	%	供油压力为 7 MPa		≤±3		+0.6
滞环	%			≤4		2
分辨率	%			≤1		0.2
压力增益	%			>30		100
线性度	%			≤		2
重叠	%			≧		+0.2
绝缘电阻	MΩ	(500V AC 10S)		≥20		/合格
阶跃响应	Ms	在环境温度为 20℃测				4
动态特性	-3db	≥60HZ				247
	-90°	≥70HZ				216
	超调	≤1.2db				0.8



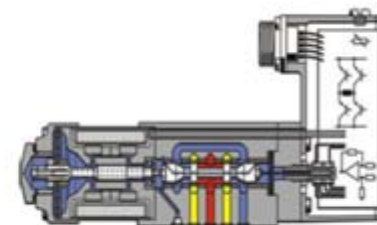
● 测试结果对比



直动式DDV伺服阀



双喷嘴挡板伺服阀



直动式DDV伺服阀



● 以额定流量对标：

型号	DOMIN L060 出厂测试参数	DOMIN L060 国内实测参数	MOOG G761-3005	MOOG D634
额定流量 L/min	60	60	63	60
泄漏量 L/min	0.4	0.9	2.3	1.2
频响 Hz	250@25%	216	120@40%	40@25%
阶跃响应 ms	5	4	8	20
滞环 %	0.1	2	3	0.2
分辨率 %	0.05	0.2	0.5	0.1
对称性 %			10	
零漂 %	0.8		2	1.5
压力增益	150	100		

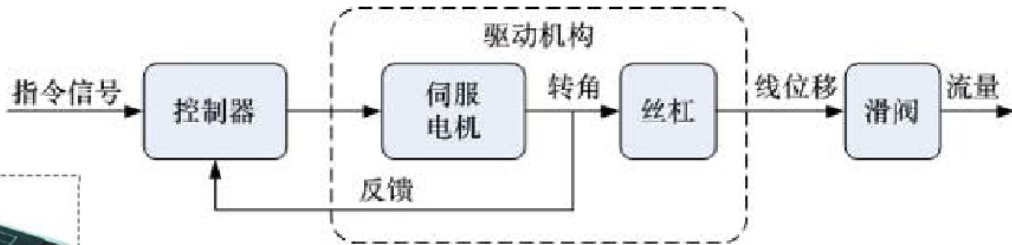
- 另一种旋转直接驱动伺服阀



- 伺服电机驱动，连续调节，硬连接，阀芯旋转，大流量，伺服阀
- 用于村田数控冲孔机



● 国内专利技术，伺服电机直驱，大流量，伺服阀



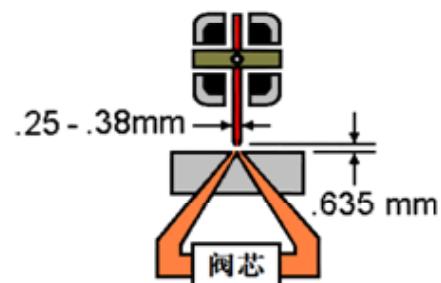
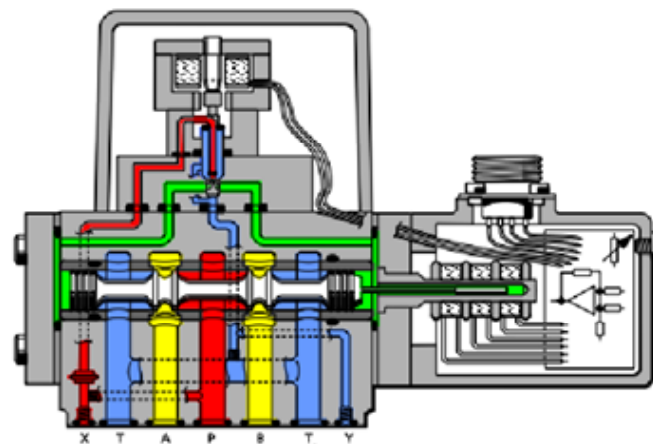
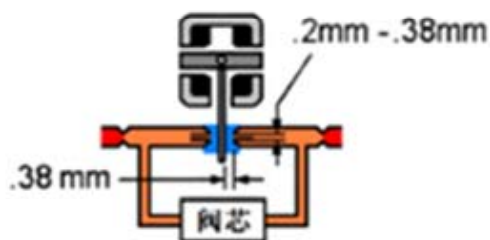
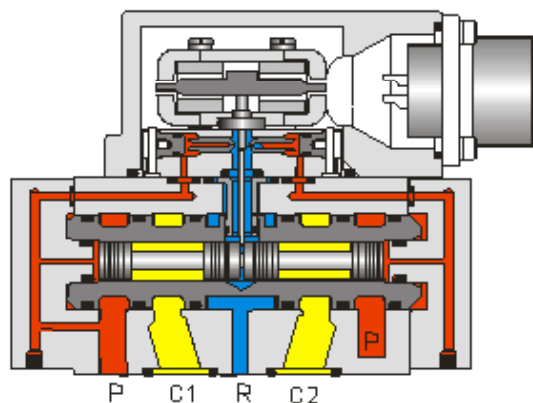
型号		SFS-8-1500J10
项目		
供油压力范围 [MPa]		2~35
额定流量 Qn [L/min]		1500 (可选 700、1000、1300)
滞环 [%]		≤0.5
分辨率 [%]		≤0.2
非线性度 [%]		≤±1
不对称度 [%]		≤±1
内泄漏 [L/min]		≤2%Qn
温度零漂[%] (ΔT=55℃)		≤2
压力零漂[%] (ΔP=7MPa)		≤0.5
频率特性 (±40%)	幅频宽 (-3dB) [Hz]	≥65
	相频宽 (-90°) [Hz]	≥45
工作温度 [℃]		-15~150
净重 [kg]		16.5 (钢壳体)

额定压力(MPa)	流量规格 (L/min)	可选流量规格 (L/min)
21	70	35
21	400	150, 250
21	600	350
21	1500	700, 1000, 1300

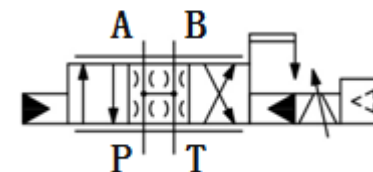


● 与传统伺服阀相比较—技术特性

● 两种典型伺服阀：需要先导级能耗



- 采用“液压放大”第1级有能量消耗
- 第1级在小信号下，泄漏使阀效率低
- 通过机械获得控制频响反馈
- 低振幅，需要电反馈改善性能
- 滞环和零位稳定的解决，动态过冲
- 制造成本昂贵，对油液污染非常敏感



图形符号

- 与传统伺服阀相比较—产品特点
- 重要的是产品特点与市场需求相结合

电液伺服阀

双喷嘴挡板式MFB伺服阀

伺服射流管式EFB伺服阀

伺服射流管式EFB伺服比例阀

DDV直动式伺服阀

79系列三级伺服阀

P-Q 伺服阀

压力控制伺服阀

数字式伺服阀 (DIV)

.....



二. 电机驱动调节液压阀

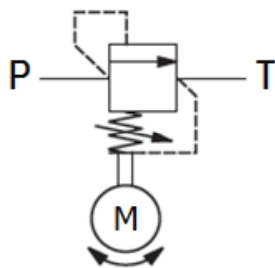
- 直流电机驱动，连续调节，弹簧调压，直动式溢流阀
- DBGT型直动式比例溢流阀

从结构示意图和图形符号看，主要由五个部分组成：

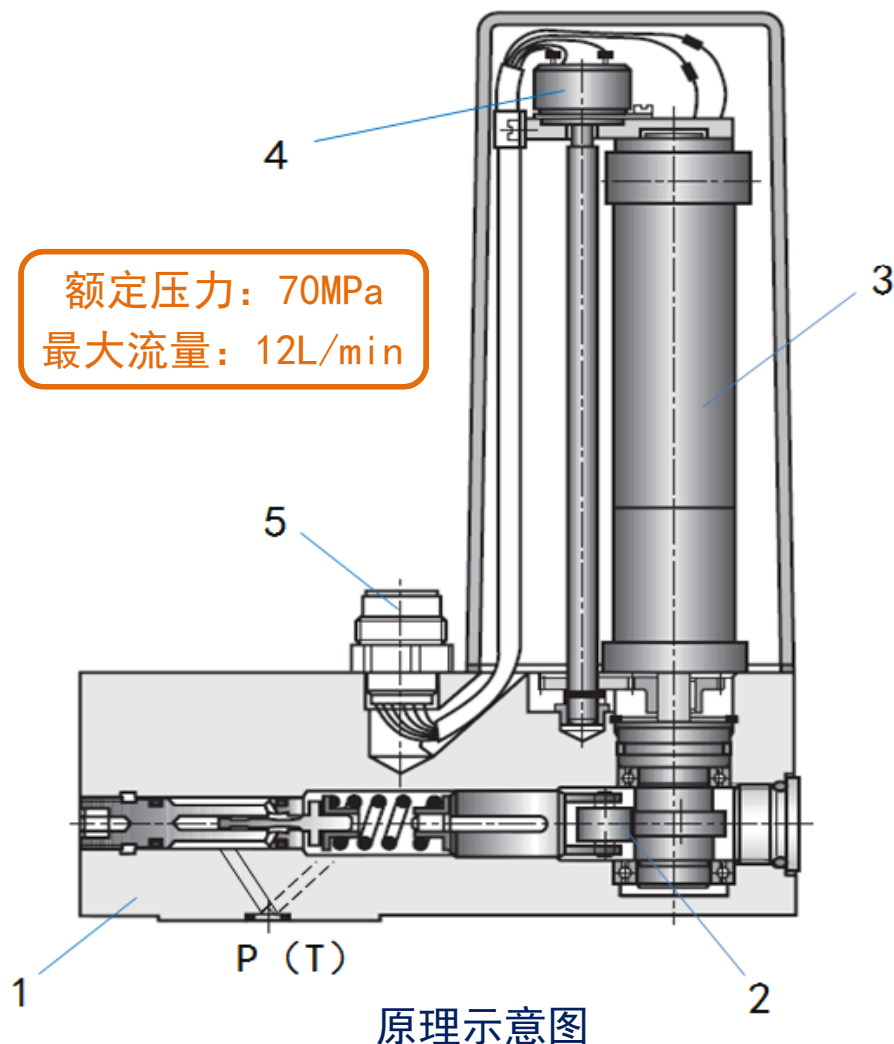
- 1、弹簧调压的溢流阀；
- 2、具有自锁功能的凸轮调压机构；
- 3、带减速器的直流电机；
- 4、调压弹簧行程反馈用旋转电位器；
- 5、电接口。



产品外形



图形符号

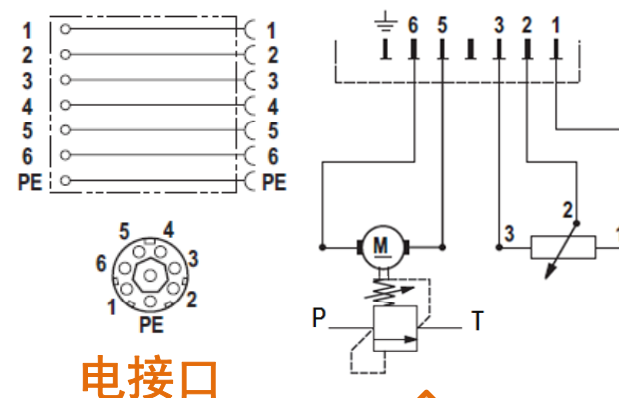


原理示意图

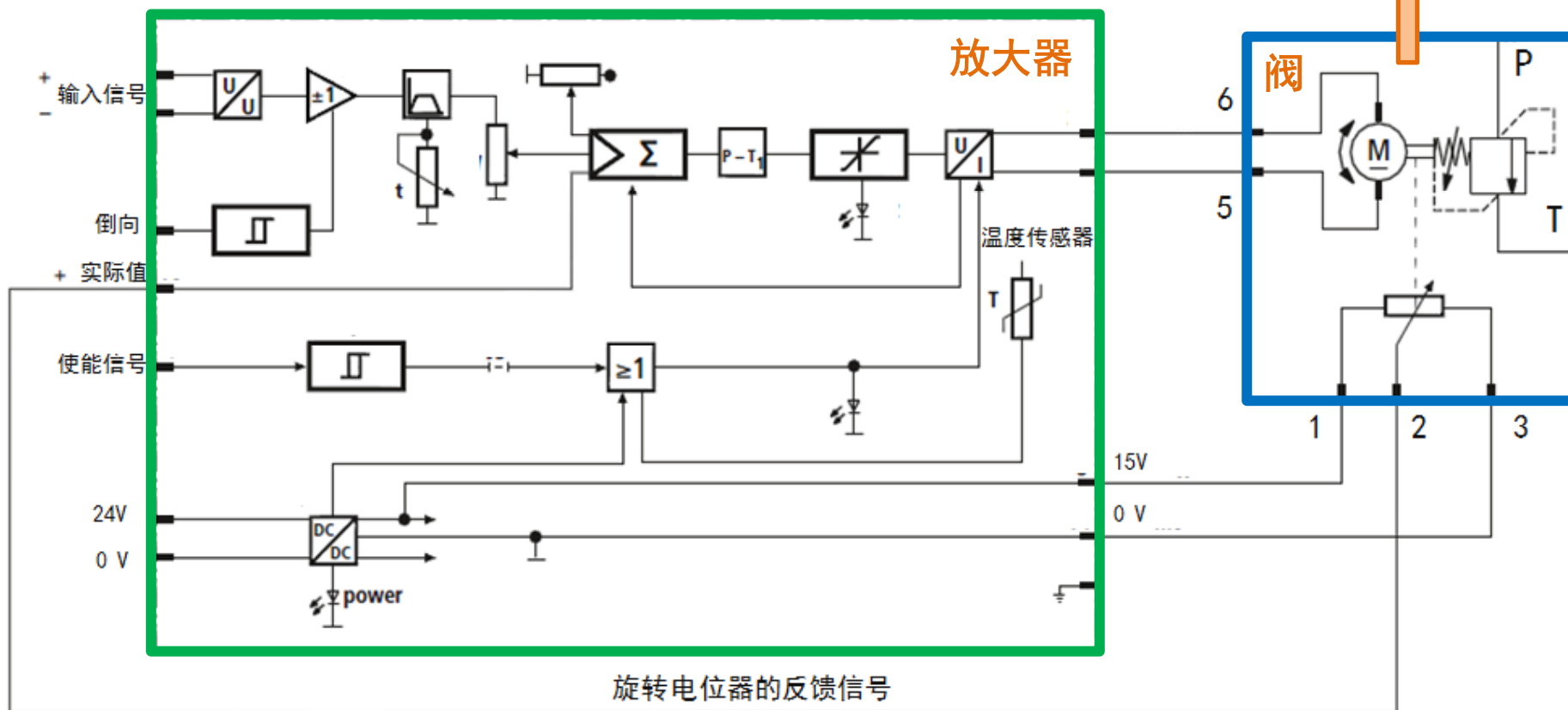
● 电接口与放大器

直流永磁电机，额定转速 6000r/min，由其前端的行星减速器，速比2520:1，输出额定扭矩下的转速 2.381r/min，用以驱动凸轮旋转。凸轮旋转角度变化，可产生调压弹簧直线行程的位移变化。其所对应的弹簧预压紧力，通过旋转电位器反馈外置的放大器中构成位置闭环控制。

- 确定弹簧预压紧力不变，实现调节溢流阀的压力。



电接口



- 直流电机驱动，连续调节，弹簧调压，先导式溢流阀

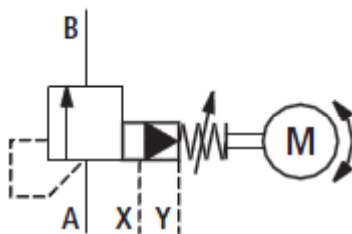
- DBG型先导式比例溢流阀

- 在板式先导溢流阀基础上，将手动调压螺纹调节机构换成了凸轮电机驱动机构；
- 凸轮位置由电位器显示并确定。压力从最小到最大变化的最快调节时间为 0.65 s；
- 外部可增加2个电气开关以限制最小、最大压力。
- 凸轮机构具有自锁功能，一旦出现电缆中断、保险丝故障、短路等，阀调节压力保持不变。

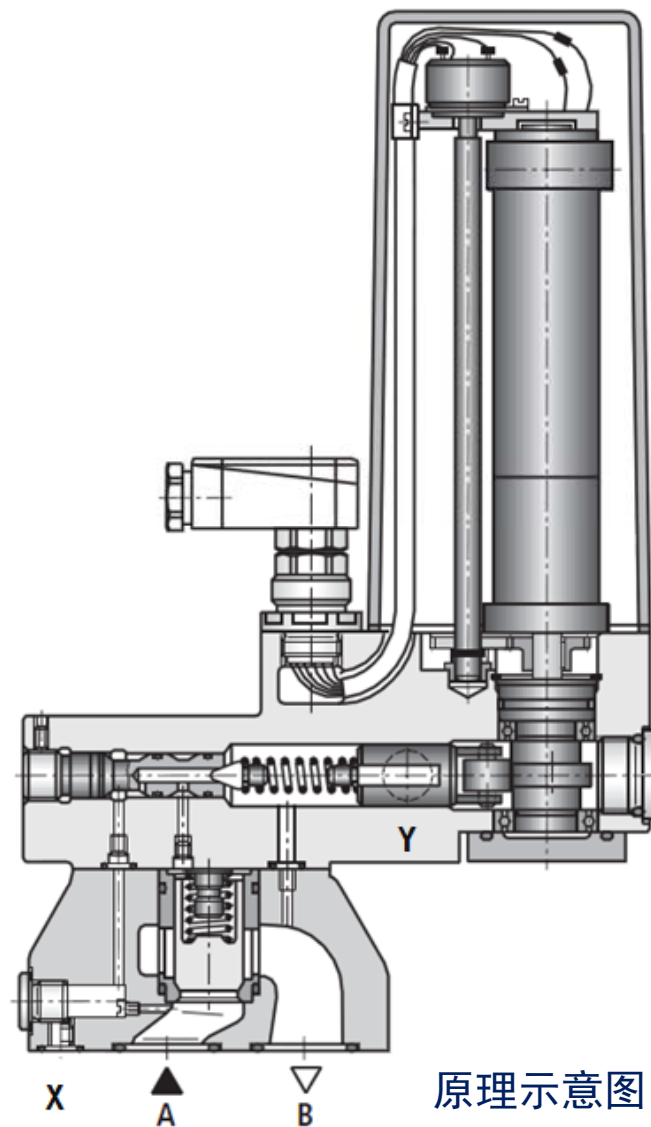


产品外形

额定压力：31.5 MPa
最大流量：600L/min

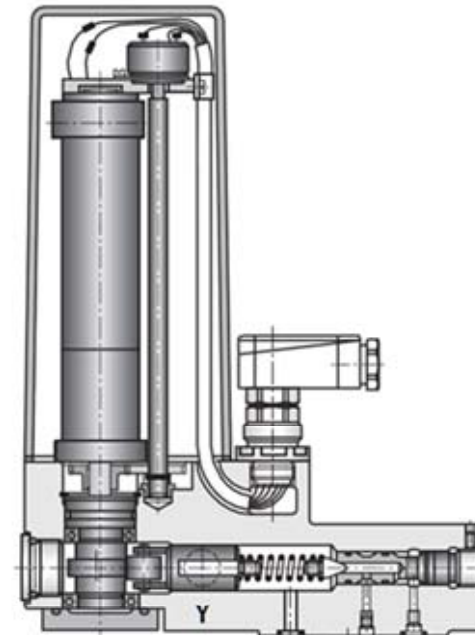


图形符号



原理示意图

● 电机驱动机构拆解



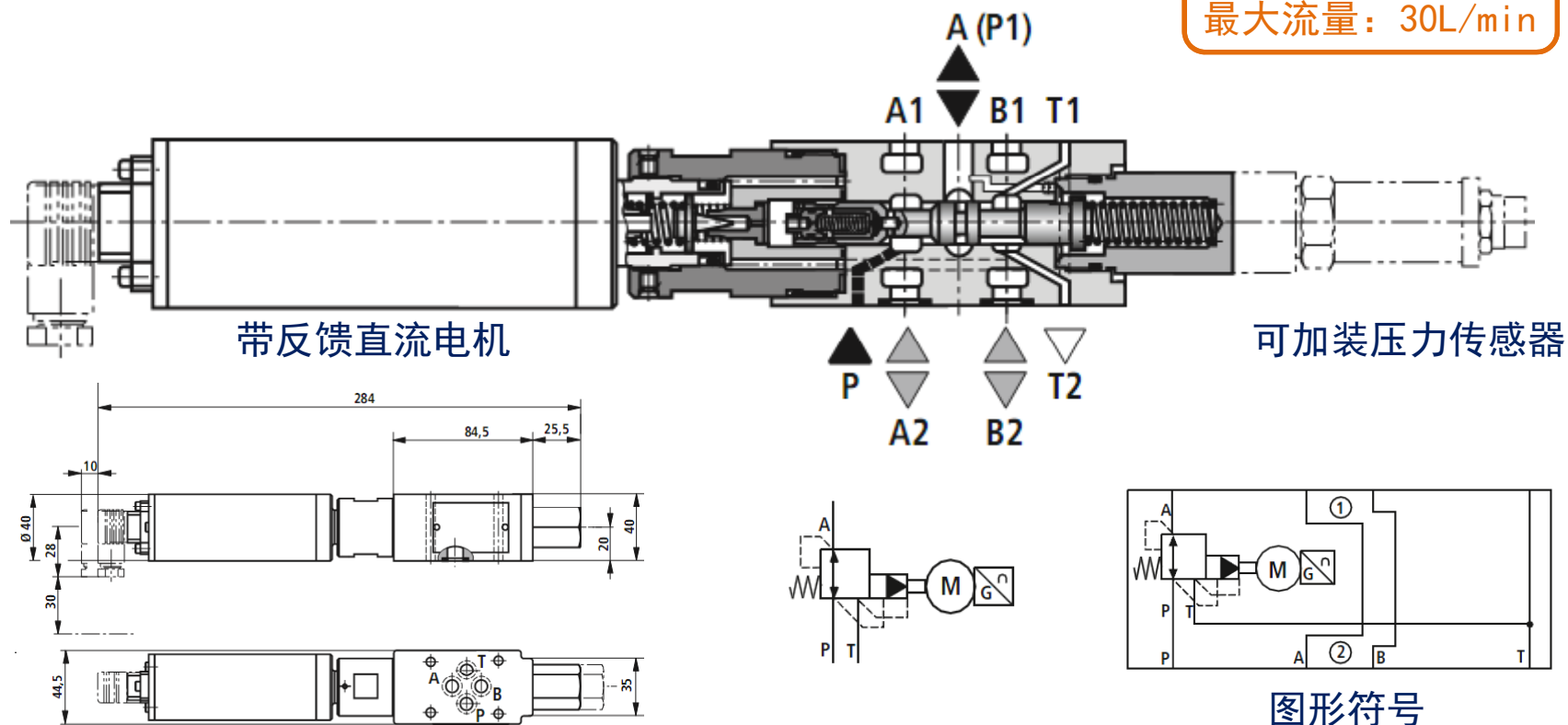
● 直流电机驱动，连续调节，弹簧调压，先导式减压阀

● DRS6型叠加先导式比例减压阀

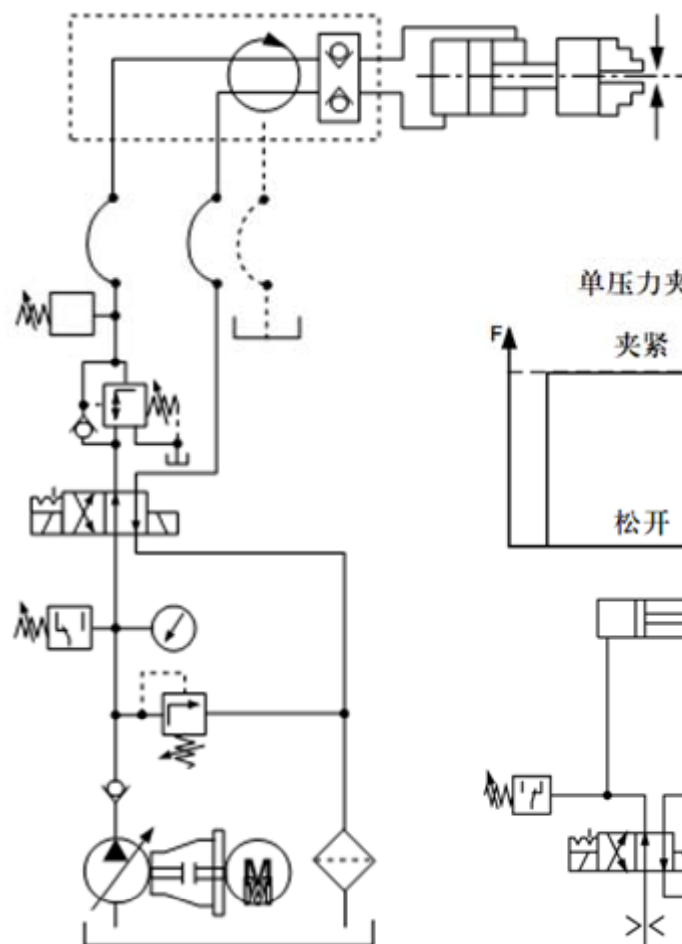
- 符合ISO4401-01叠加阀安装面和ISO7790夹紧尺寸；
- 调压弹簧调节采用直流电机+减速装置+编码器机构；
- 三通减压溢流阀工作原理；
- T油口压力如超过 1MPa，可能导致电机损坏；
- 电机具有自锁功能，断电后保持调节压力不变。



额定压力：21MPa
最大流量：30L/min

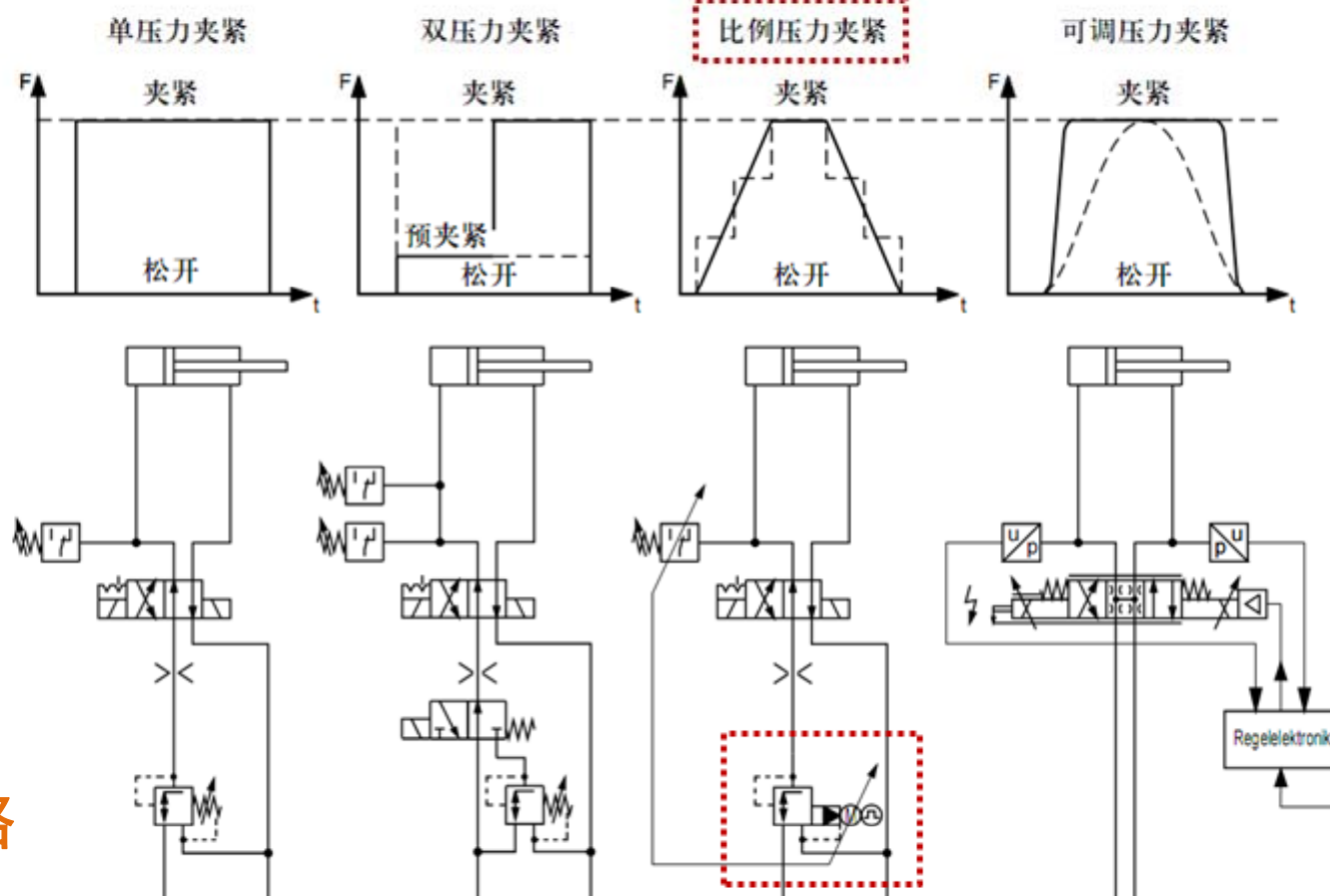
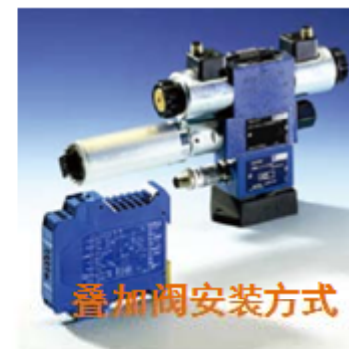
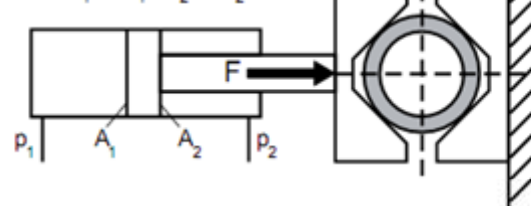


● 典型应用



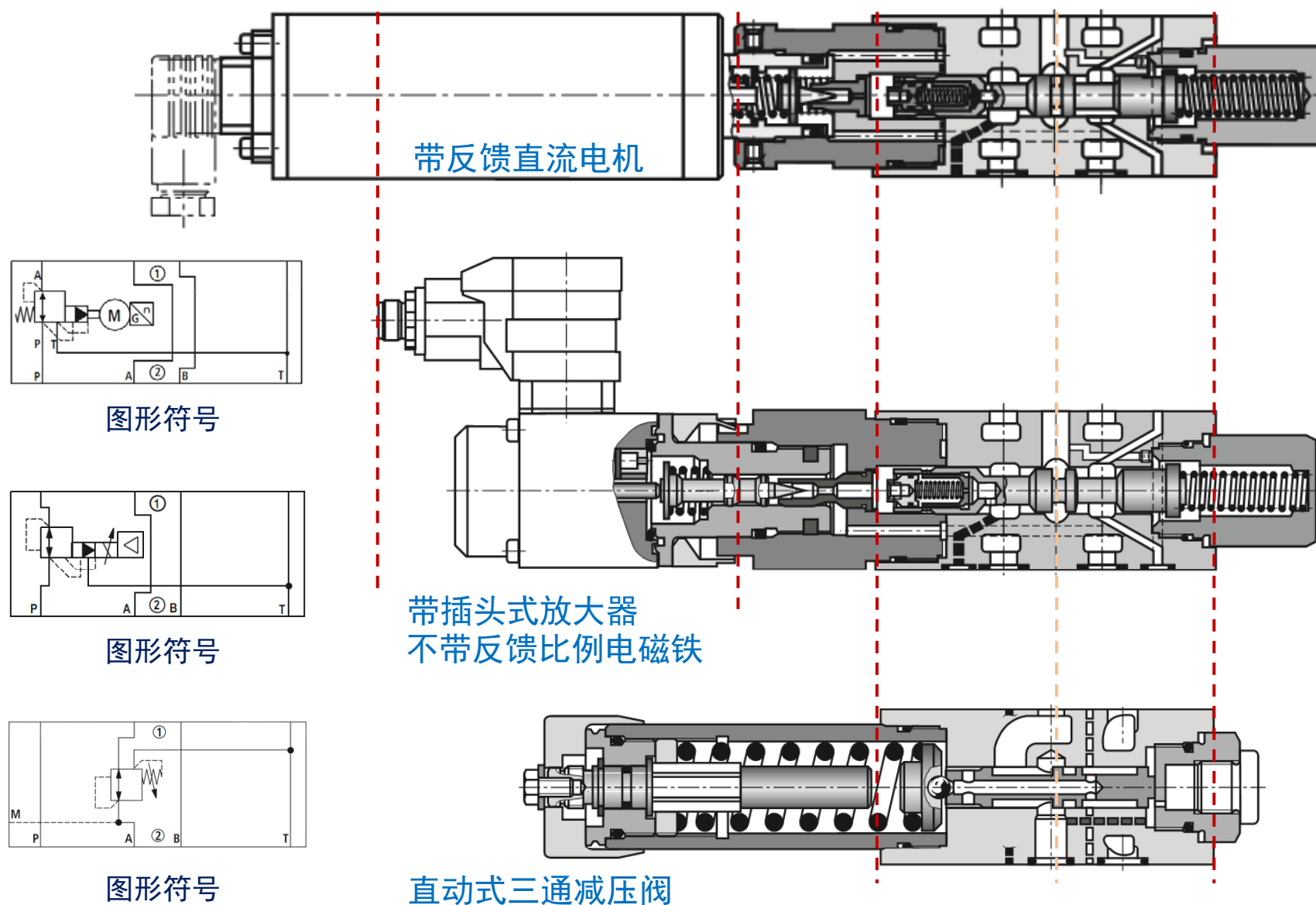
夹紧力的定义

$$F = p_1 \cdot A_1 - p_2 \cdot A_2$$



● 机床夹紧回路

● 相似定理 — 调节性能由驱动调压元件决定



- 步进电机驱动，数字信号调节，
液压三类（压力、流量、换向）控制阀

- 日本东京计器系列化产品—数字阀

- 采用数字化输入信号，步进电机进行位置控制；
- 通过开环控制（无反馈元件）实现位置精度；
- 阀内置复位弹簧，弹簧力始终作用于阀芯，使其返回原点（溢流阀卸载、其它阀关闭）；
- 步进电机上内置动作指示器，直接观察阀工作状态；
- 外置专用控制器。

TOKYO
KEIKI

数字阀：
由步进电机
驱动的液压阀。



先导式溢流阀

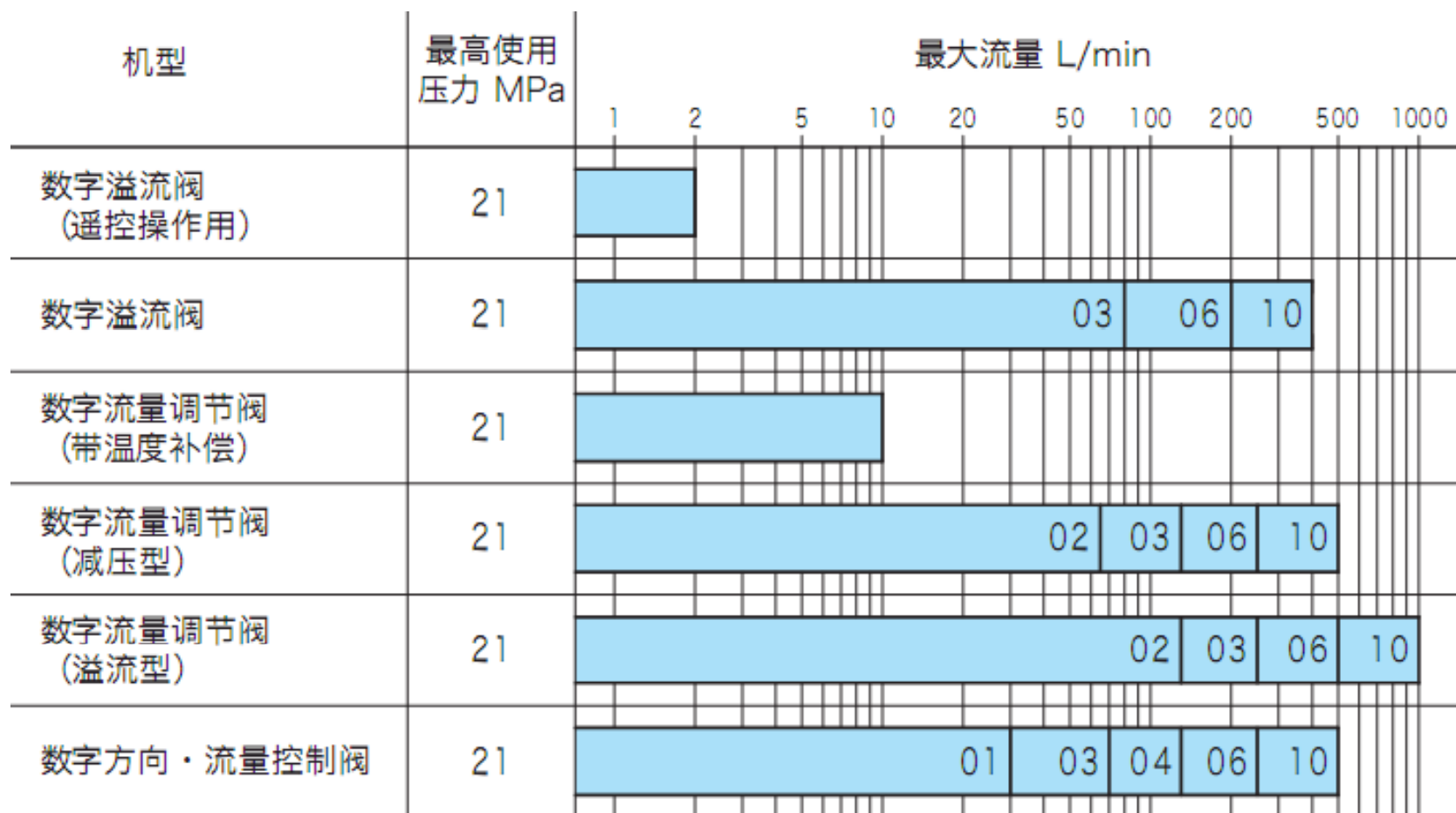


流量控制阀



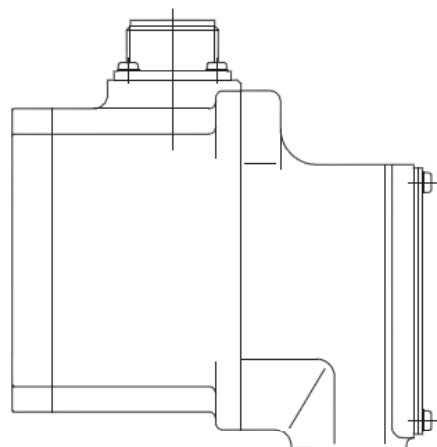
换向（节流）阀

● 步进电机，驱动调节，数字信号，液压控制阀

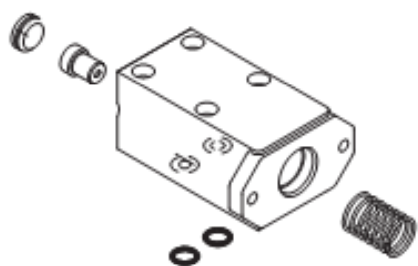


● 溢流阀

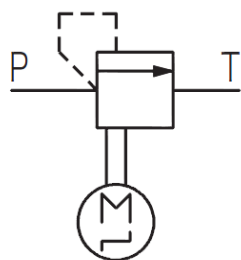
- 输入信号断电后，步进电机动作停止，调压机构保持设定压力值不变。
- 输入复位信号后，阀的复位机构的动作变为最低控制压力。



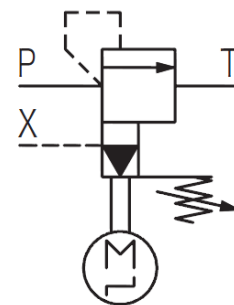
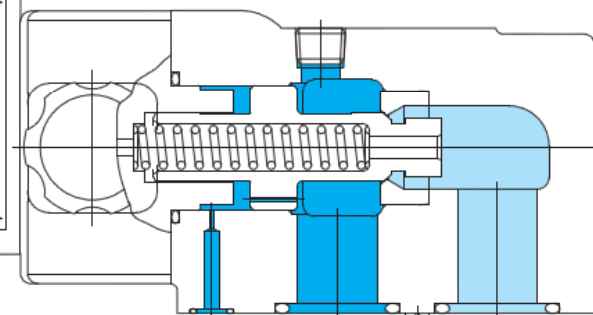
先导式溢流阀



额定压力：21MPa
最大流量：200L/min



图形符号



图形符号

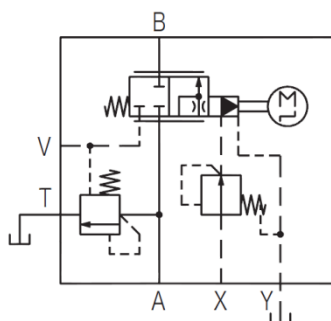
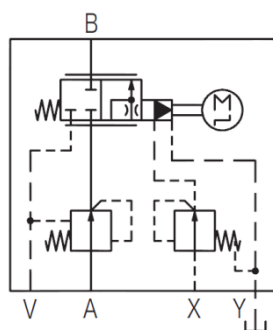
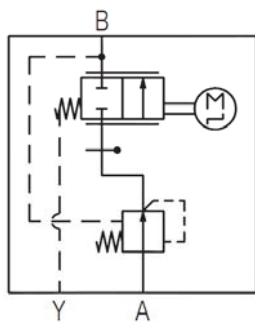
● 流量调节阀

额定压力：21MPa

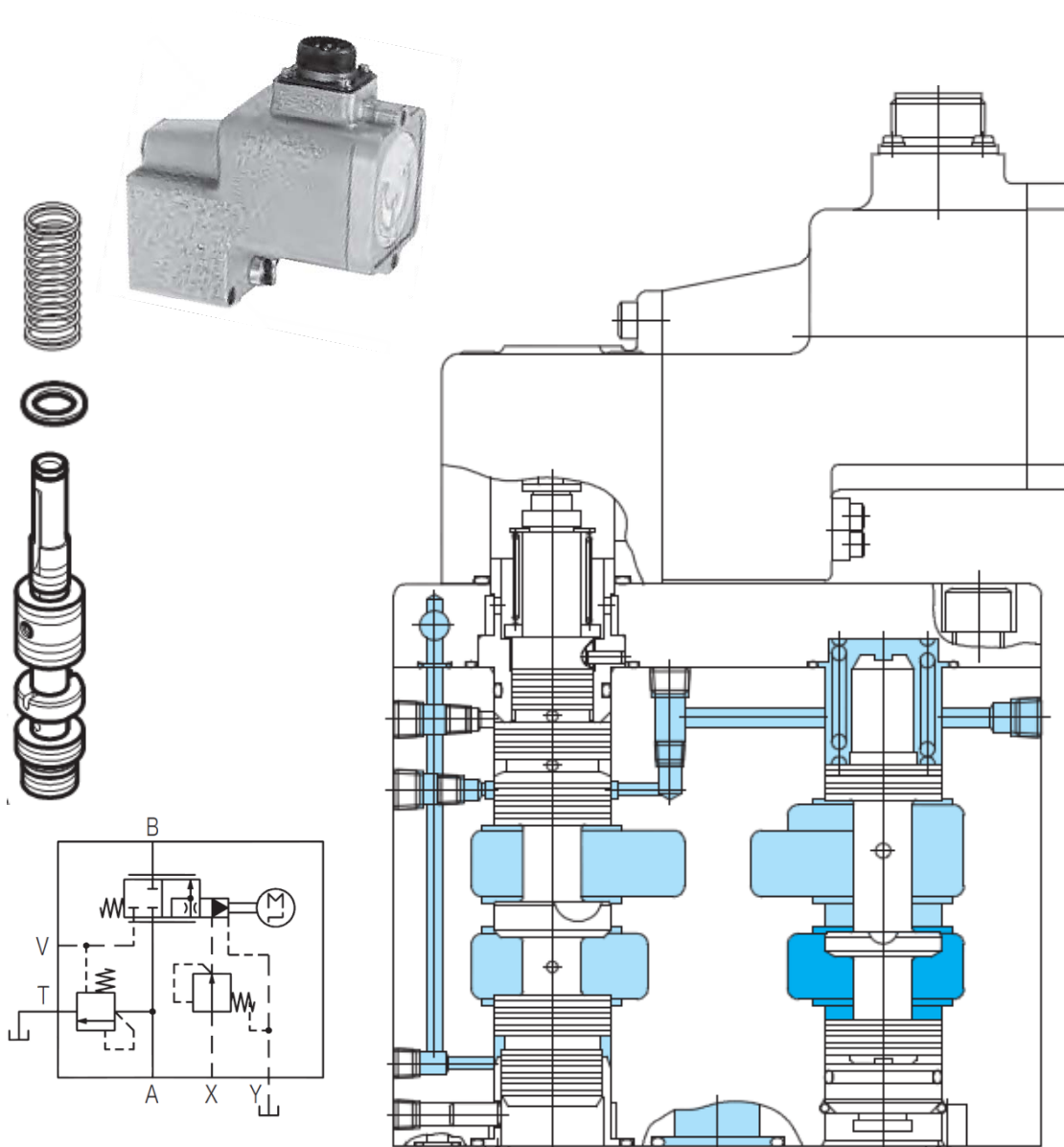
最大流量：1000L/min



流量控制阀



图形符号



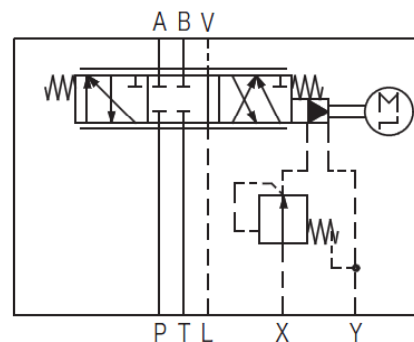
● 换向流量调节阀

额定压力：21MPa

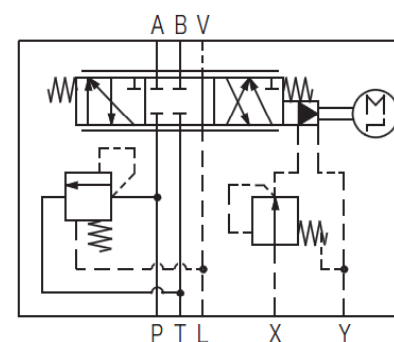
最大流量：400L/min



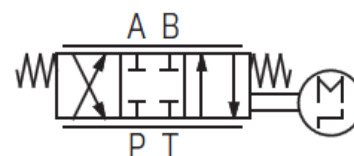
换向（节流）阀



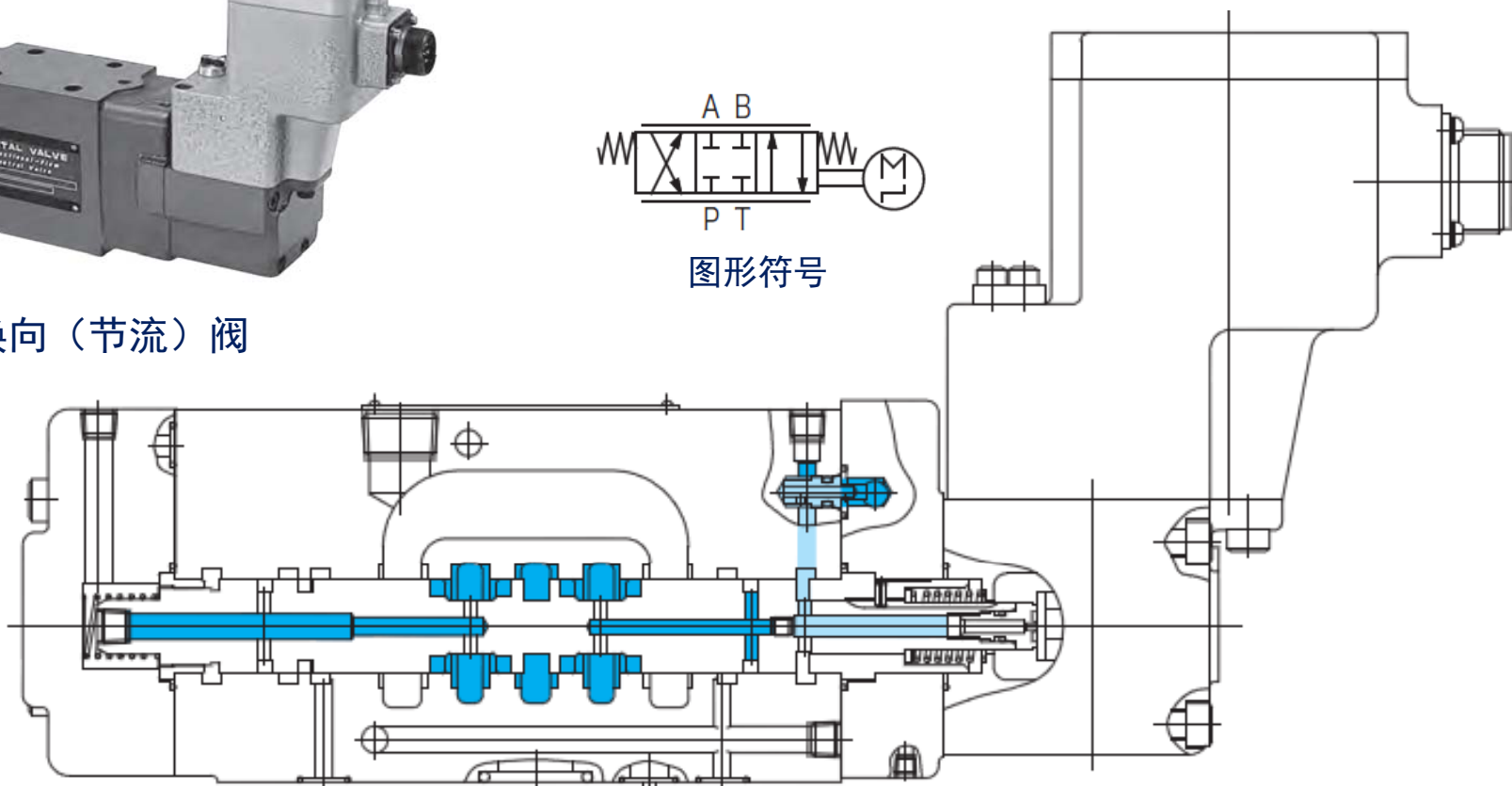
图形符号



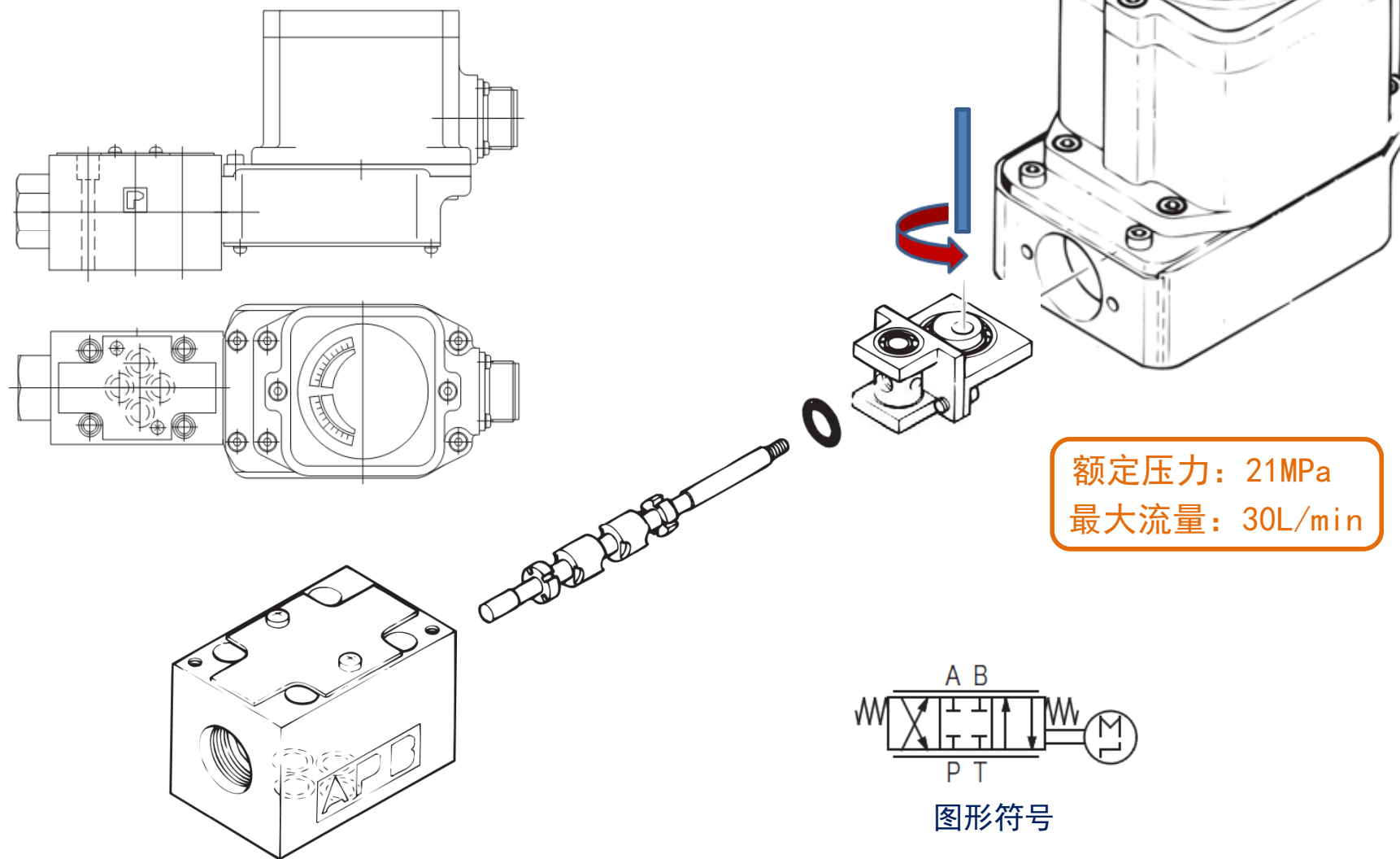
图形符号



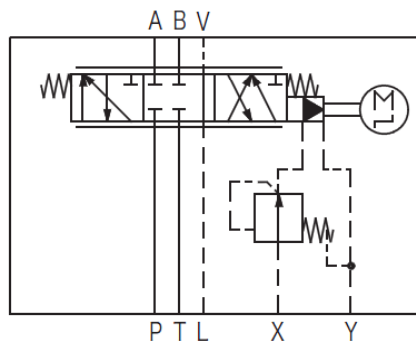
图形符号



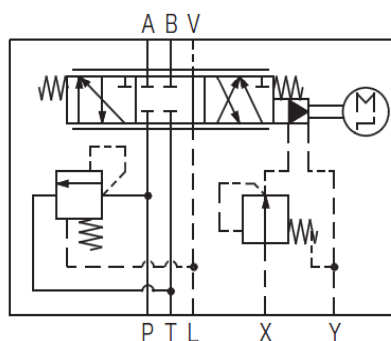
- 换向流量调节阀
- 与电磁铁驱动相比较的问题



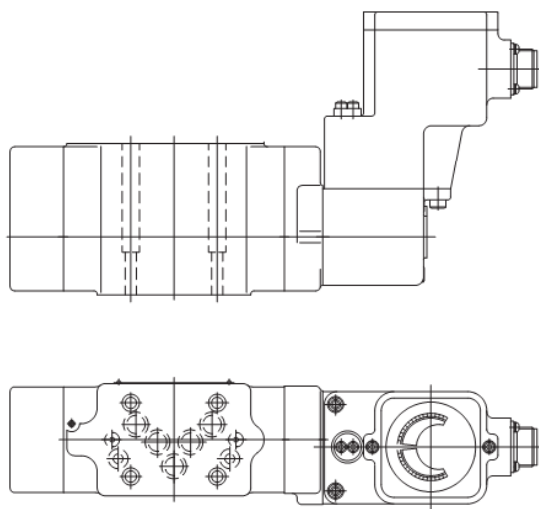
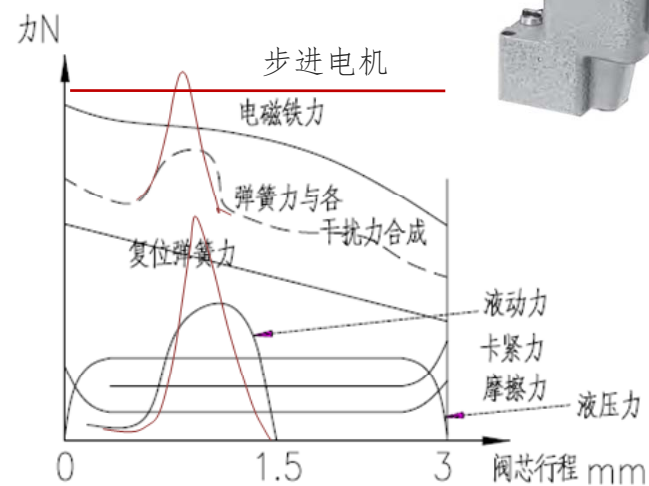
- 换向流量调节阀
- 存在原理结构问题



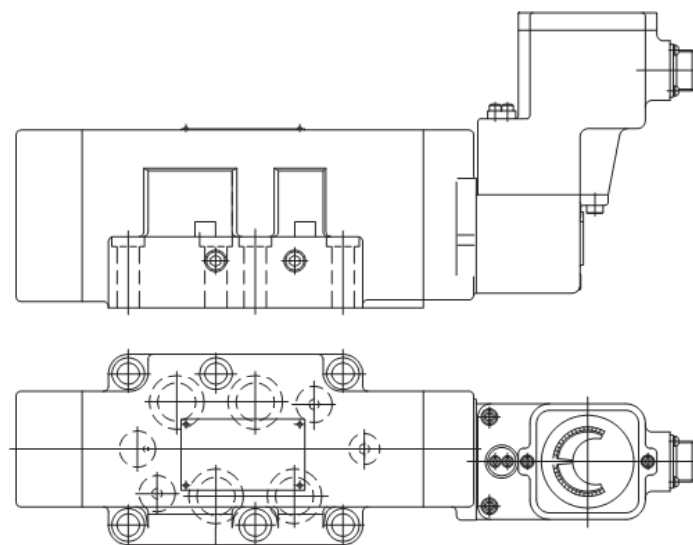
图形符号



图形符号

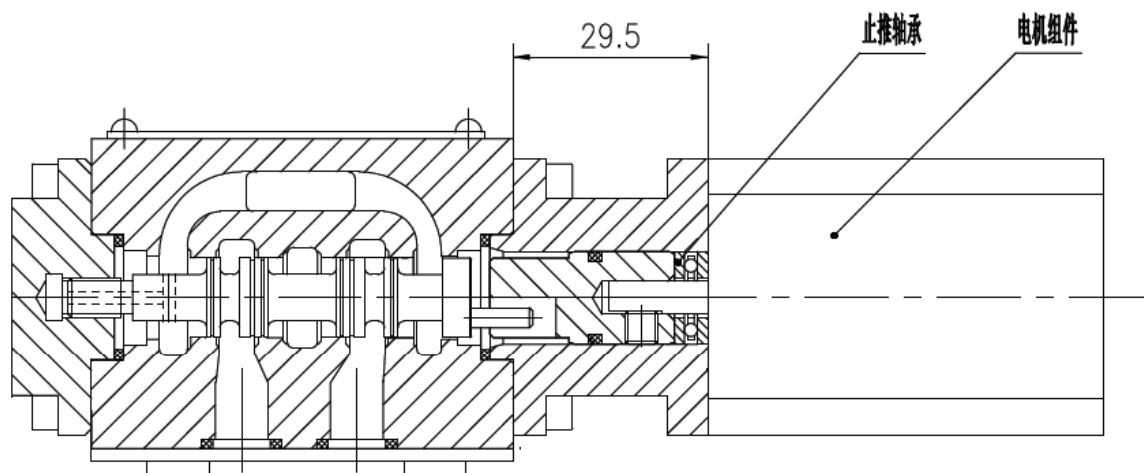


10通径规格 换向（节流）阀

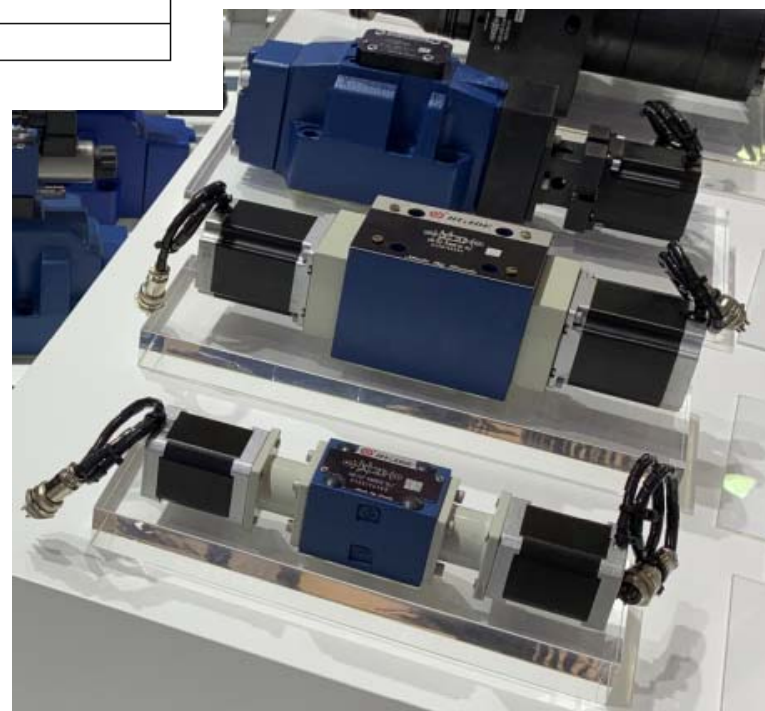


25通径规格 换向（节流）阀

- 换向采用螺旋移动位置



- 为抵消液动力对电机的受力影响，增加止推轴承。



- 没有成本应用优势

三. 电驱配套是技术核心

- 电机种类繁多
- 电机驱动器
- 连接接口
- 密封装置
- 驱动调节控制阀
- 应用环境



● 步进电机的新特点

操作简单
“立即启动”

在电机驱动器上搭载了操作开关和显示器。实现传感器般灵敏的操作。

利用伺服技术
“精确控制”

在步进电机上搭载了编码器。兼具伺服电机优点的高性能。

发生故障时
“立即复原”

在电机上搭载了大型3色LED。发生故障时可尽快找到原因并复原。

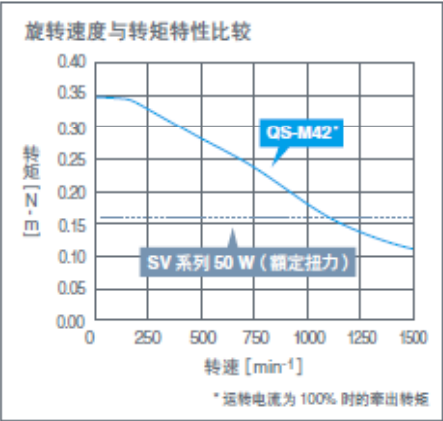
步进电机的
“优势”

可充分发挥高响应性、高转矩等步进电机优势的基本性能。



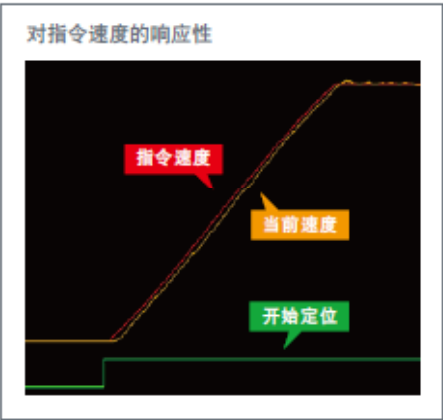
高转矩

与同尺寸的伺服电机相比，可在低速区域内输出高转矩，因此可用于频繁实施急加速急停的高速寸动动作及旋转台控制。



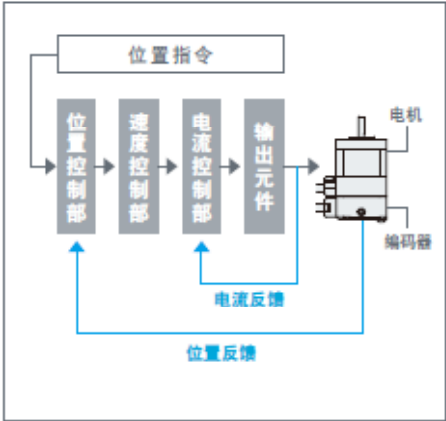
高响应性

步进电机与指令同步动作，因此不存在对脉冲指令的响应延迟。用于单件产品生产时间要求高的高速定位用途时便可发挥其威力。



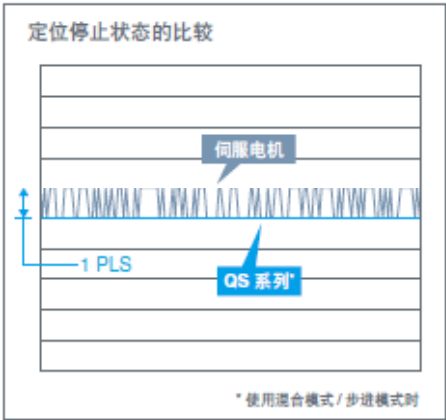
无失步

监控电机搭载的编码器的反馈调整电流值，因此即使在急剧的负载变化或急加速时也不会失步，可持续运转。



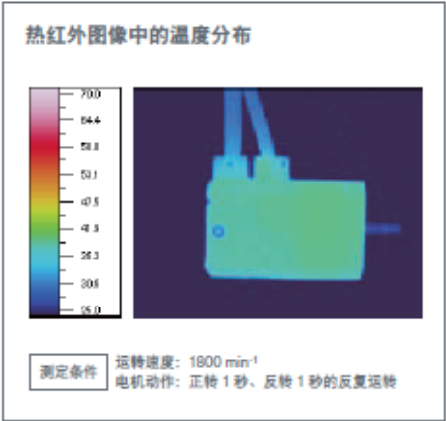
无振荡

由于定位停止时无振荡，因此对于不允许振动的用途，或不希望皮带传动等低刚性结构发生振动时，可放心使用。



低热 / 低振动

根据电机的负载状态控制电流，大幅减少了步进电机所特有的发热及振动。进行控制时，不必担心发热或振动。



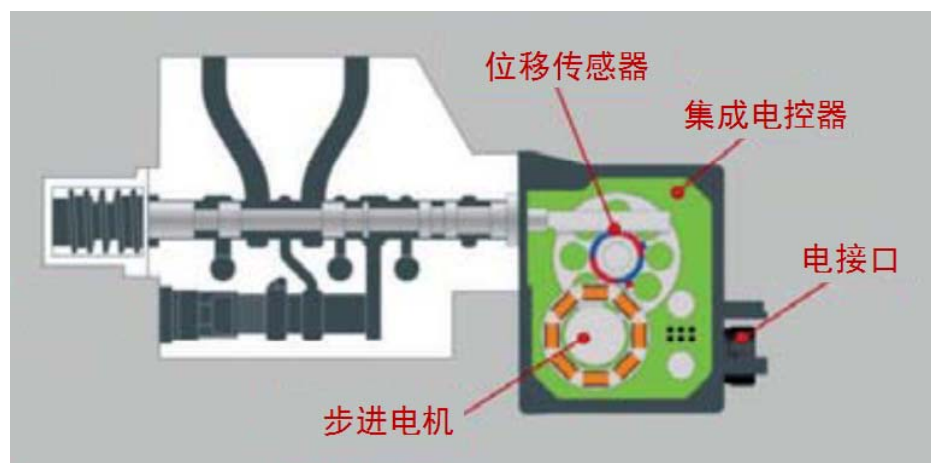
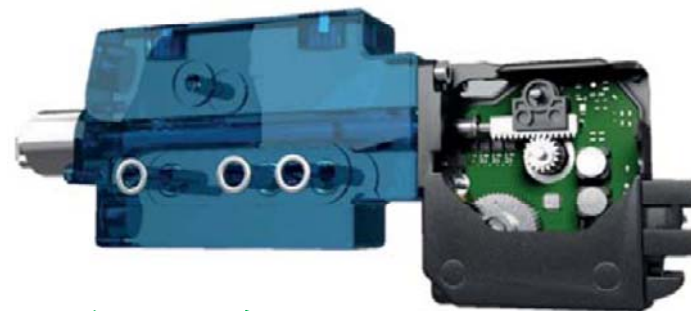
用 3 个模式进行最佳控制

有步进模式、伺服模式、混合模式等 3 个模式，可根据用途或结构选择最佳控制模式，1 种机型可满足多种需求。

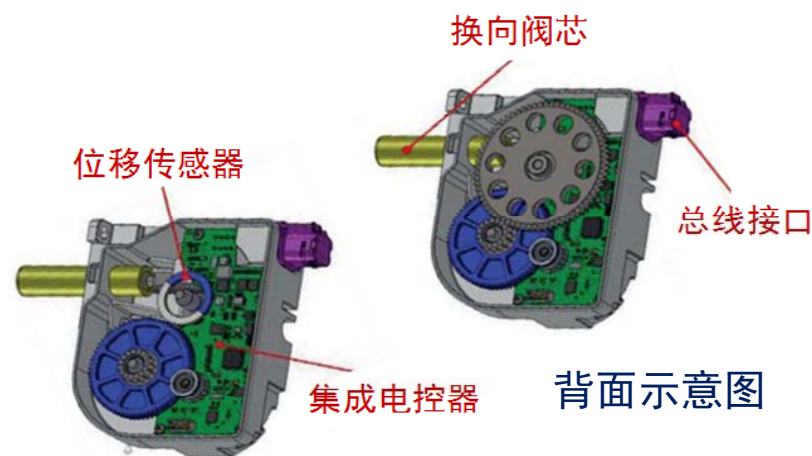
模式	说明	特点
伺服	按照负载调整电流。 (闭环控制)	无失步 发热较少 消耗电流较少
步进	流过固定电流。 (开环控制)	响应性较高 无振荡
混合	移动中为伺服模式， 停止时切换为步进模式。	无失步 (运转中) 无振荡 (停止时) 消耗电流较少

● 电机直驱连续调节具有智能化优势

- 电机直接驱动，没有先导油
- 步进电机开环控制误差低
- 直流电机闭环控制精度高
- 集成电控器，分散控制，多种模式，智能诊断
- 扩展和提高阀性能、功率密度、可靠性、功能监控

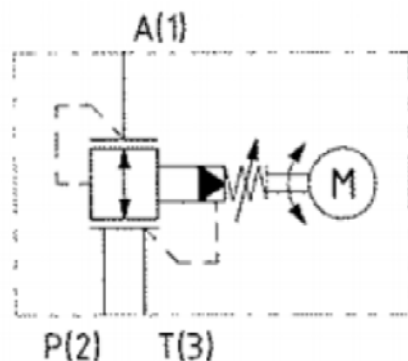
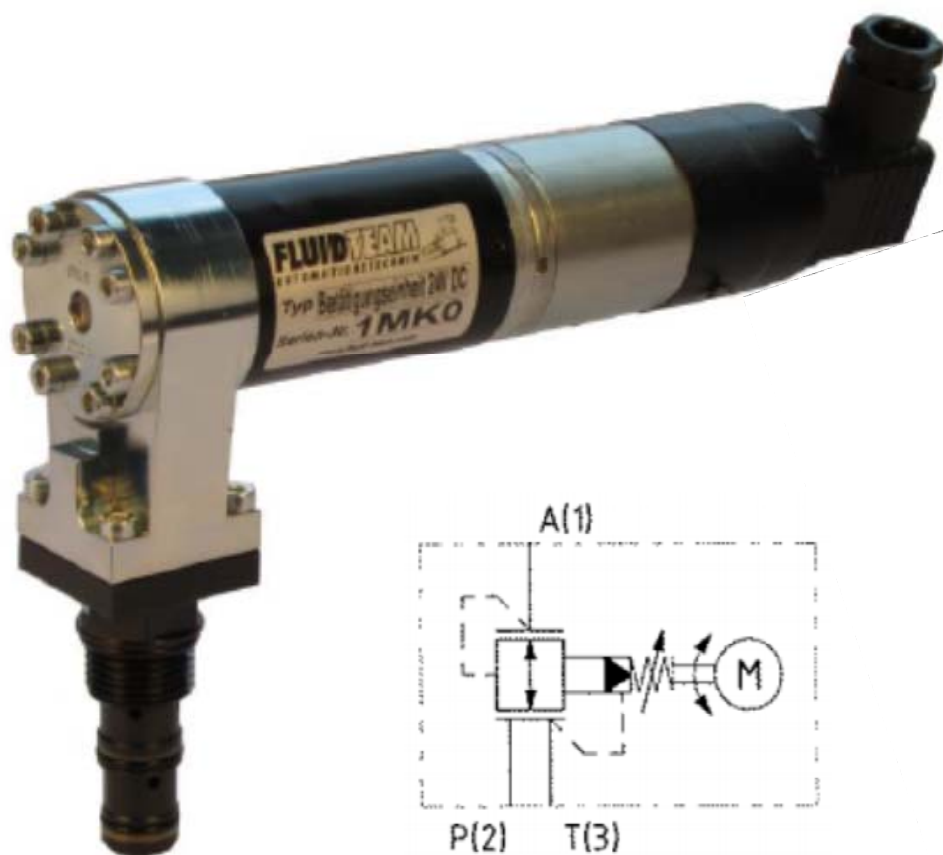


电机直驱多路换向阀



电机驱动装置

- 电机驱动调节如何发挥优势
- 直流电机驱动螺纹插装减压阀
- 模块化设计可用于转向系统



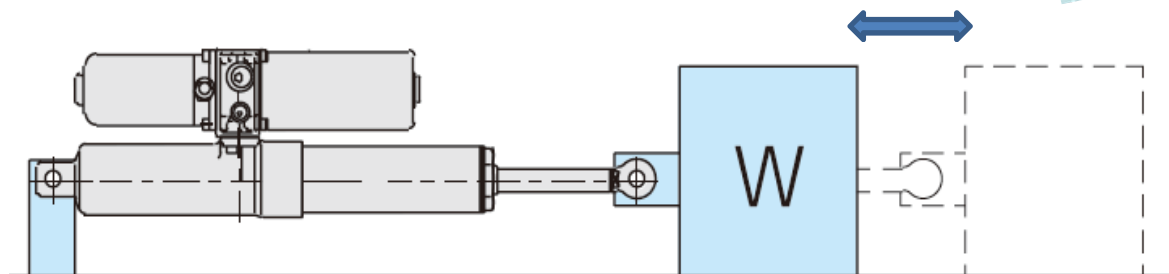
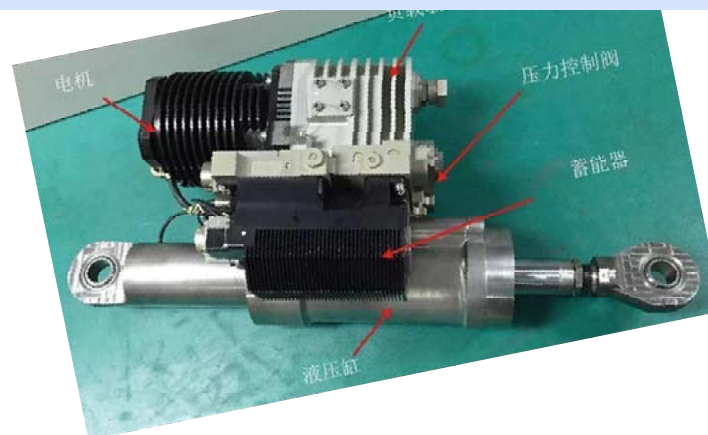
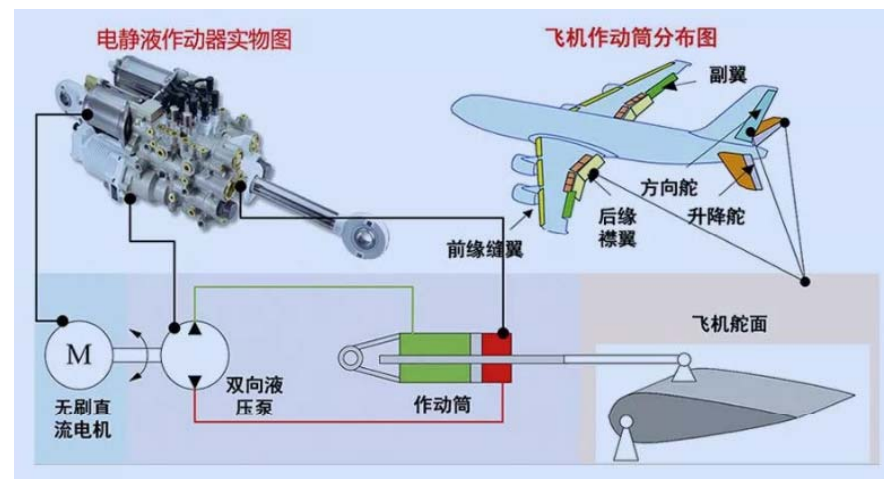
图形符号



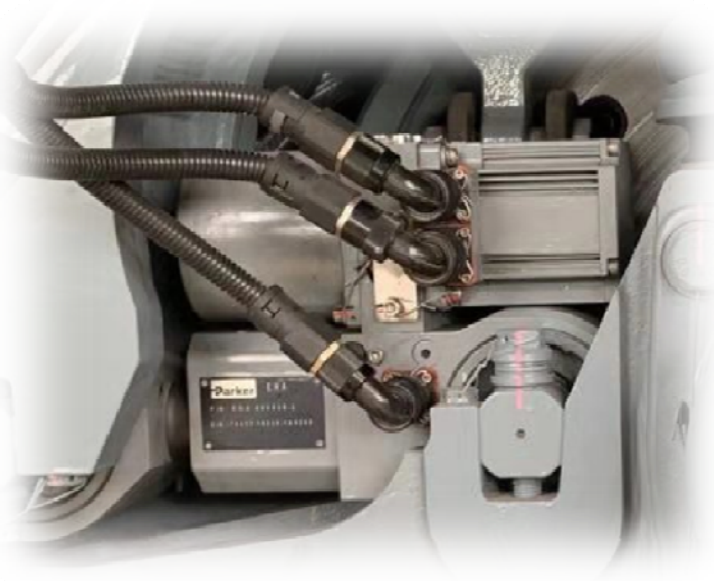
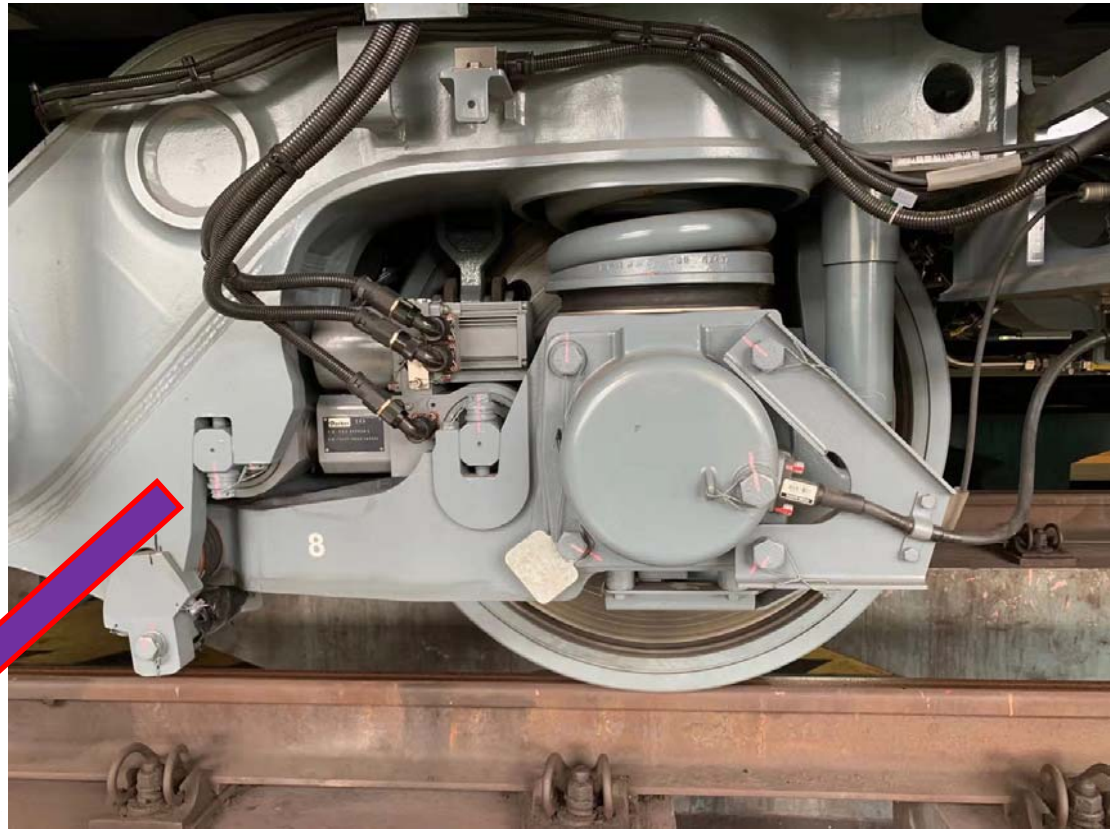
四. 旋转驱动应用大市场

● 通用化简单化产业化

液压传动具有小型而大输出力，可获得高加速且高功率密度，传递方便灵活，以及抗冲击性强而坚固等特征。旋转电驱技术充分发挥液压优势，为液压竞争提供广阔空间。



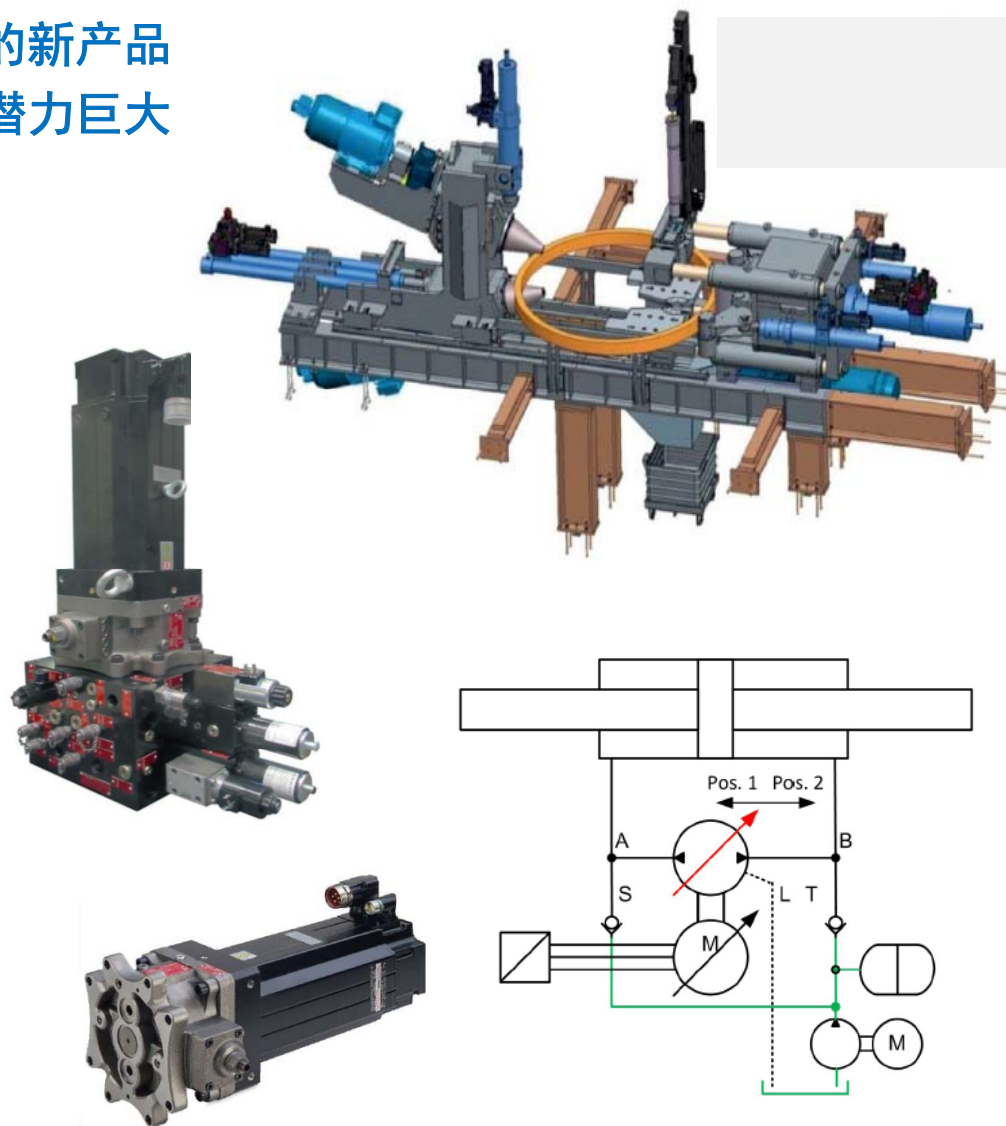
- Parker公司 EHA产品
用于轨道交通 主动转向



● Moog公司用于环形轧制机的EHA

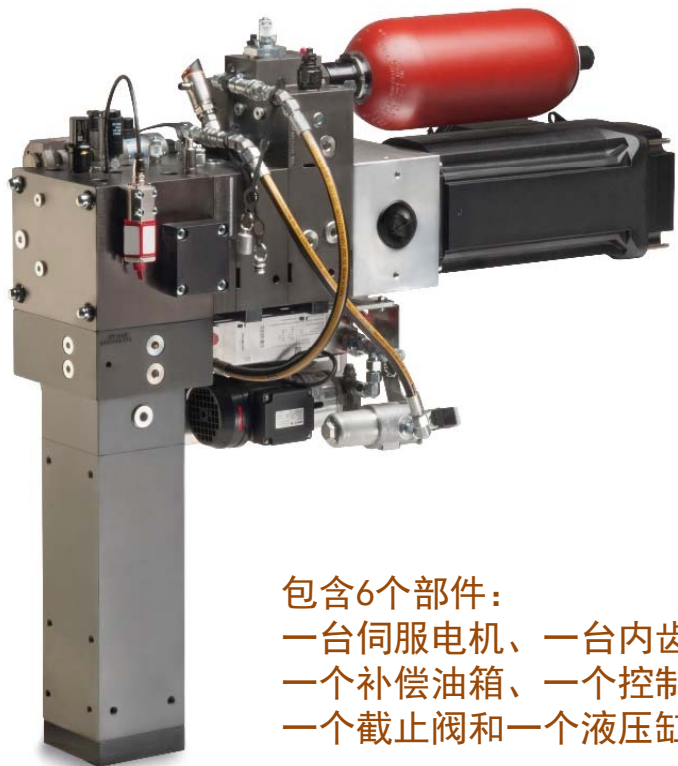
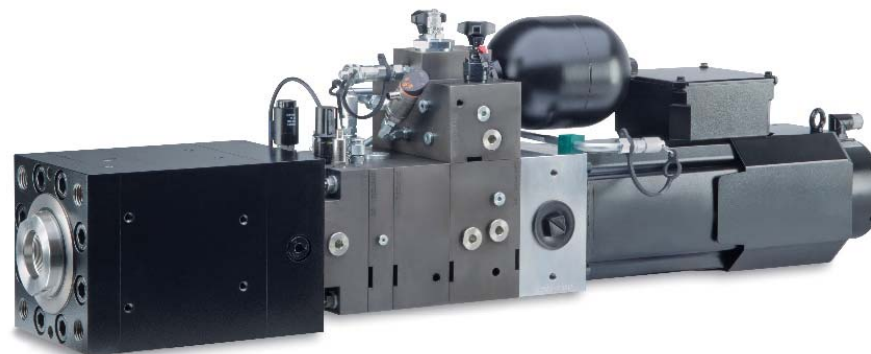
- 西马克集团与穆格公司合作开发的新产品
- 具有极高轧制力和最小的功耗，潜力巨大

Pump Vol. [cm ³]	Q max [l/min]	p max [bar]
19	85	350
32	118	350
80	216	350
140	322	350
250	450	350



● 福伊特公司电动伺服泵控系统 (EAS)

- 液压缸最高运动速度：640 mm/s
- 最大输出力：500 kN
- 行程范围：50 - 400 mm
- 位置准确度：0.01 mm内
- 位置可重复性：0.01 mm



包含6个部件：
一台伺服电机、一台内齿轮泵、
一个补偿油箱、一个控制阀组、
一个截止阀和一个液压缸。



● Rexroth变速度泵单元



Sets for constant pressure
• Pressure and flow control



Sets for axis control
• Pressure and flow control
• Force and velocity control
• Positioning



Sets for axis control
• Pressure and flow control with variable displacement pump
• Power control

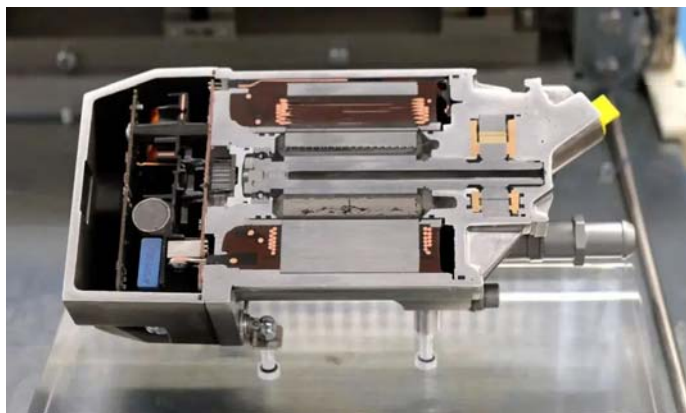


- Communication via Ethernet and other fieldbuses
- Modular or compact power unit cluster
- Master/Slave operation
- Cascaded pumps
- Safety on Board
- Custom system functions

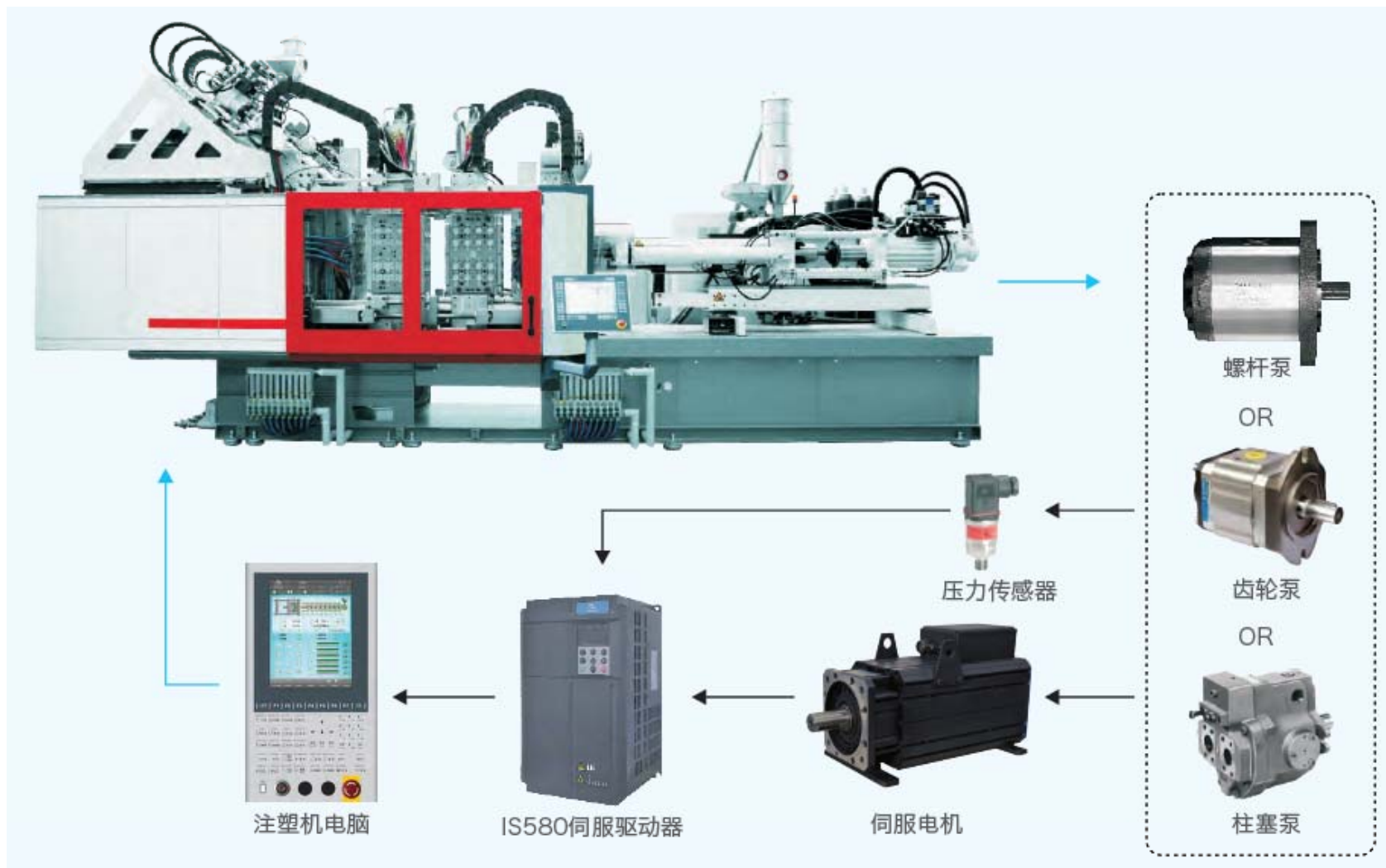


- 集成电机泵单元
- 跳跃的动力来自电机泵

RAPA 电动泵由齿轮液压泵、永磁同步电机和 48V 控制设备组成，通过一体化设计，并集成电路板等设备实现紧凑的布局。轴向尺寸减小，重量降低，可靠性提高。

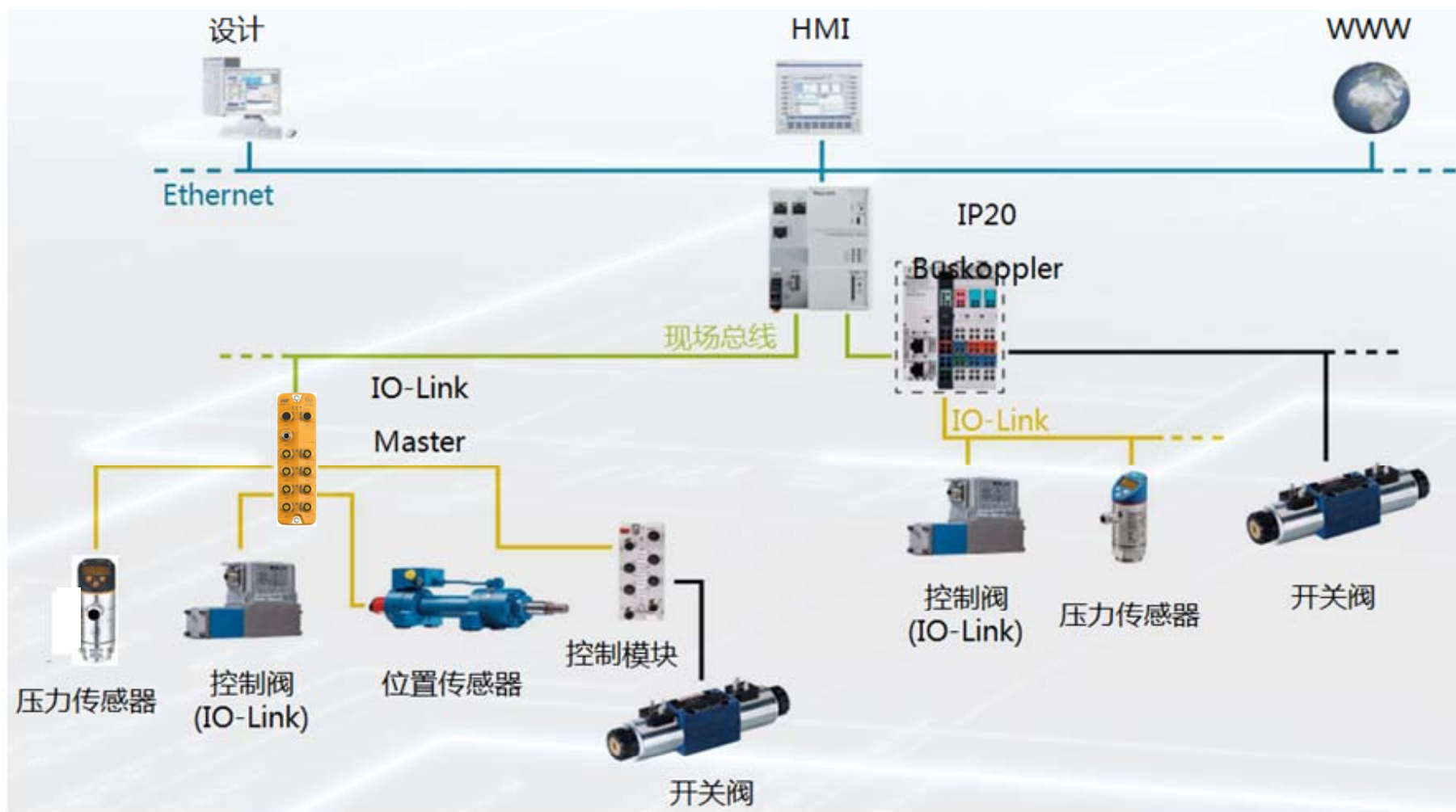


- 注塑机
- 国内配套产量超过10万台



● 数字化接口技术

工业4.0给液压传动与控制带来重要变化是现场总线和数字化控制接口技术（CAN-bus或 IO-Link）应用。电机是实用化选择方案之一。



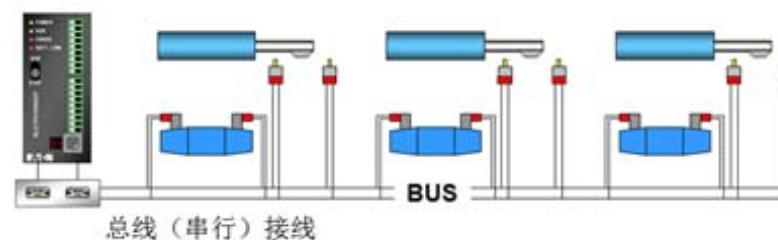
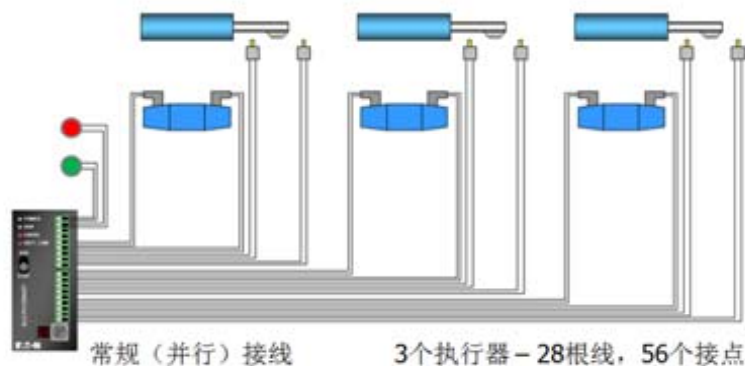
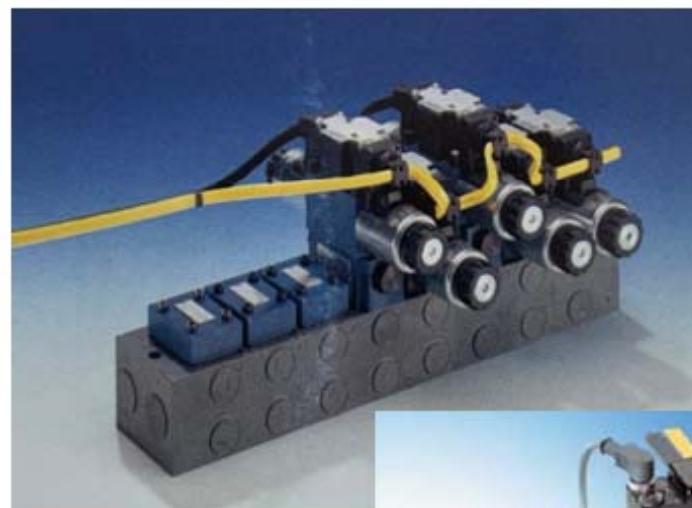
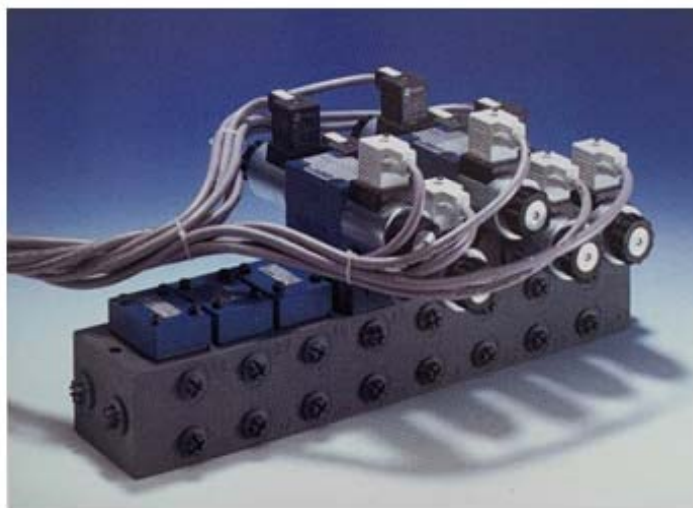
ifm公司-世界传感器 IO-Link 技术领先者

● 第三届液压气动数智论坛介绍

IO-Link master II-基本型



● 现场总线技术在电磁换向阀应用存在的可靠性问题（90年代）



借助现场总线实现网液电一体化信息系统，提高液压应用、调节、诊断及维护能力。
对电磁换向阀性能降格又出现新的低功率电磁滑阀动作可靠性问题。

● IO-Link 是模拟接口的高性价比数字化高效应用

由于开放标准而通用。

IO-Link 具有成本效益的模拟接口数字化，可通过统一、简单的布线降低成本。

诊断功能可实现预测性的维修和保养

即插即用节省了更换设备时的时间和精力。

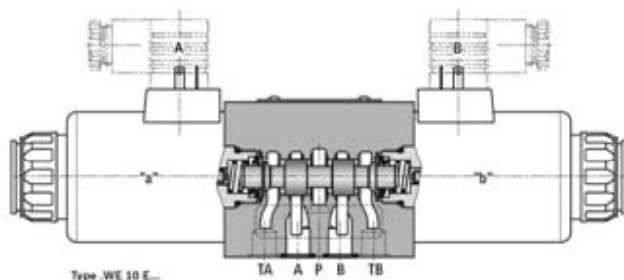
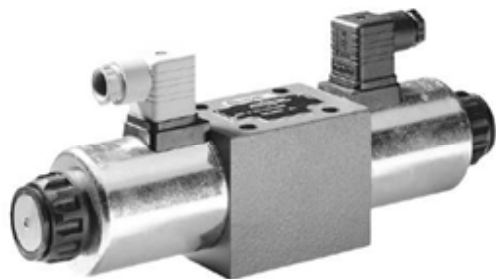
不需要专业人员。

IO-Link 依赖于M12 连接器和最长20m 的非屏蔽电缆等标准。

通过经济高效的控制级点对点连接进行集成。



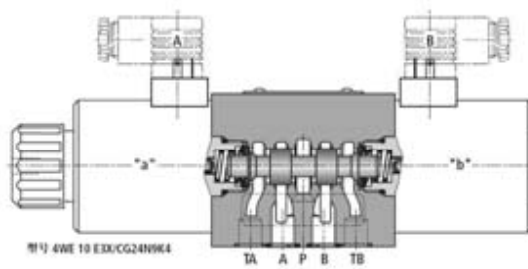
● 借鉴电磁换向阀—改进成果—竞争力



最大压力31.5 MPa

最大流量120 L/min

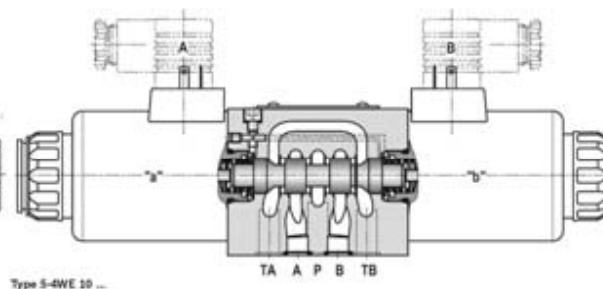
60L/min全口压力损失0.35MPa



最大压力35 MPa

最大流量160 L/min

60L/min全口压力损失0.6 MPa



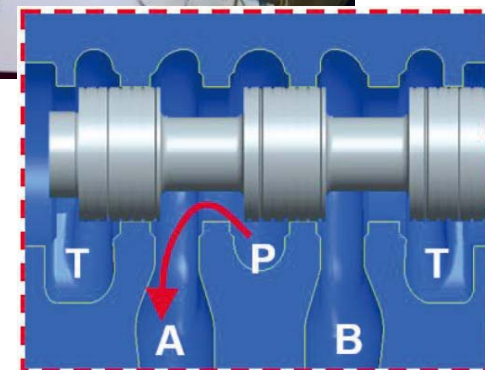
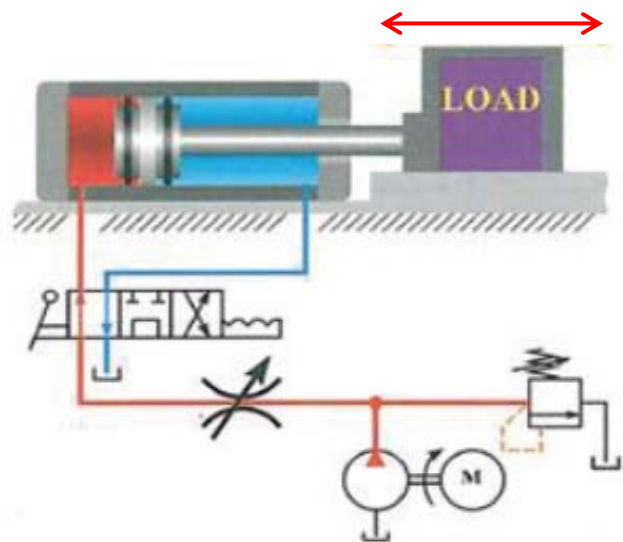
最大压力42 MPa

最大流量150 L/min

60L/min全口压力损失0.7 MPa

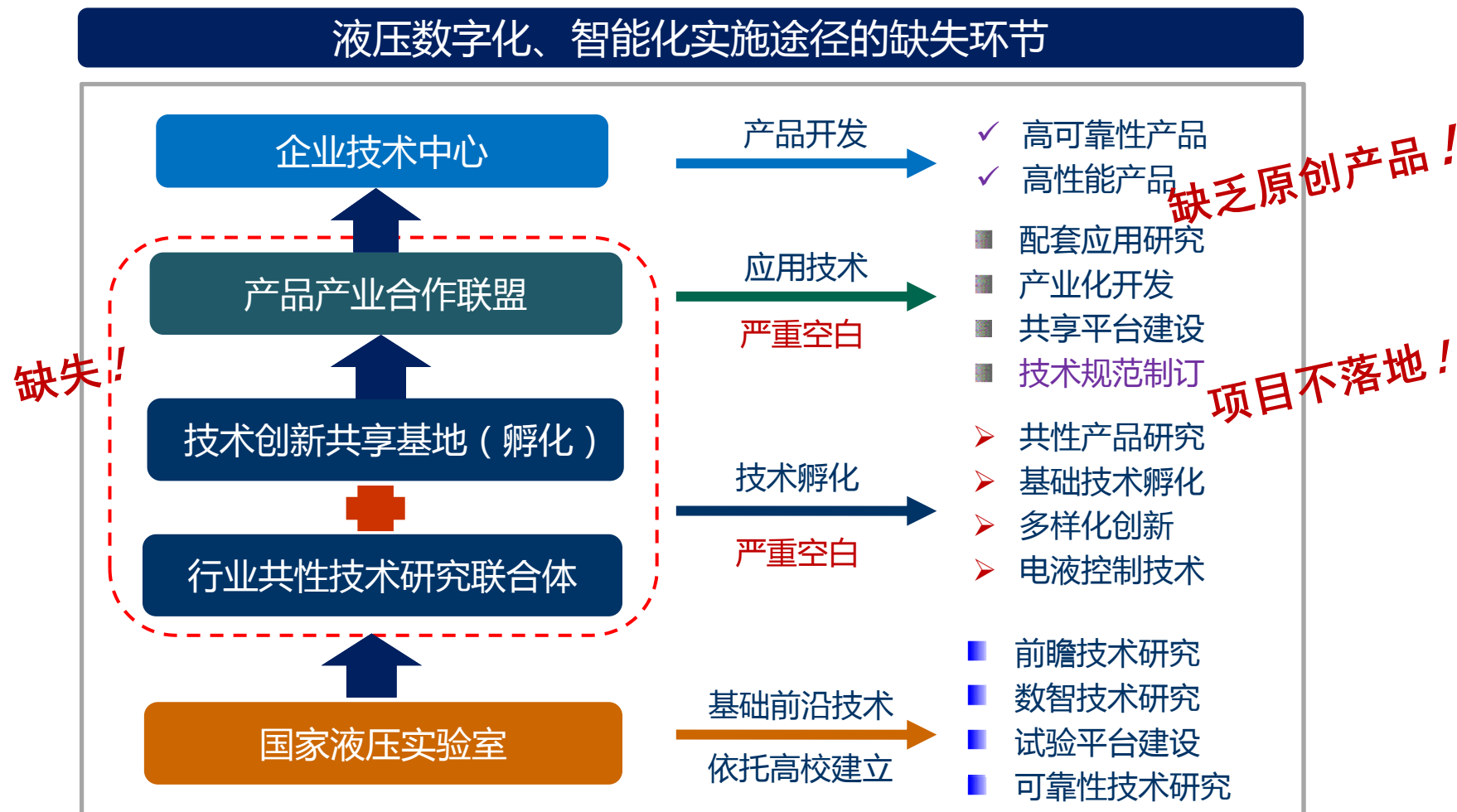
实测通径：Φ11 mm，阀中位机能 E型。

- 需要进行基础测试的目标：
通过压力测试阻力扩大性能范围而不增加复杂性和成本。



- 简化机械结构。
- 减小液动力影响。
- 提高换向寿命和可靠性。
- 测量总阻力的试验研究，出现在换向阀的切换瞬时过程中。
- 分析阻力大小及变化，确定电机推力或驱动机构尺寸。

● 国内液压行业存在的缺失问题



● 液压过去缺电控！缺软件！缺寿命数据！

● 液压现在缺乏对数字化智能化液压元件的创新开发。

谢谢

让我们一起做得更好！



Linguang61@163.com

