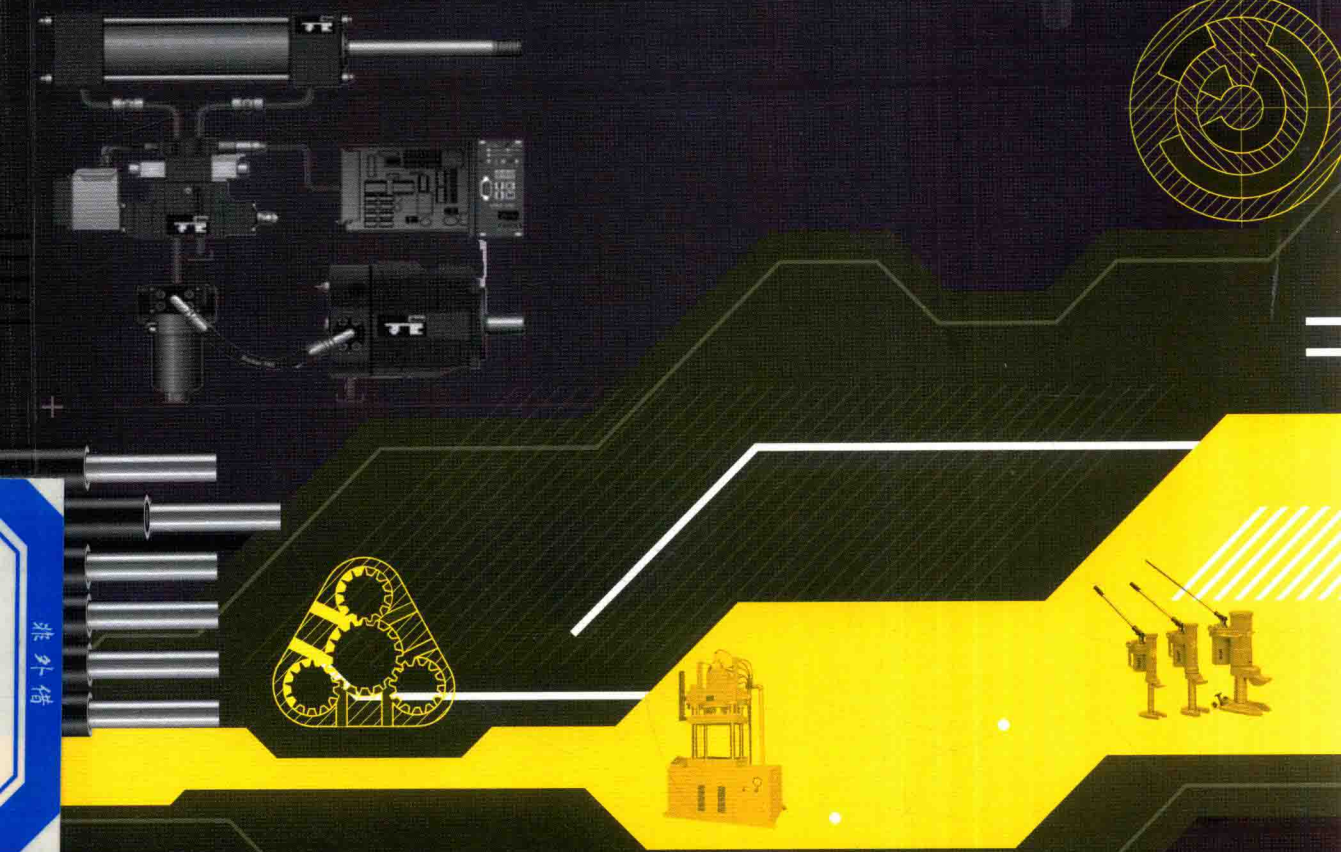




ZHINENG YEYA QIDONG YUANJIAN  
JI KONGZHI XITONG

# 智能液压气动元件 及控制系统

黄志坚 编著



化学工业出版社



ZHINENG YEYA QIDONG YUANJIAN  
JI KONGZHI XITONG

# 智能液压气动元件 及控制系统

黄志坚 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

智能液压气动元件是在原有元件的基础上,将传感器、检测与控制电路、保护电路及故障自诊断电路集成为一体并具有功率输出的器件。智能传感器与智能仪表应用于液压与气动系统,能够使系统测控精度、信息处理与通信能力、抗干扰能力以及稳定性与可靠性有很大提高。

本书结合实例系统地介绍了液压与气动智能元件及集成应用技术,较为全面地汇集并梳理了国内专家学者近年在本技术领域探索、实践与创新的理论成果。全书共分4章,分别是智能液压元件及集成应用、智能传感器及其在液压系统中的应用、智能仪表及其在液压系统中的应用、智能气动元件及集成应用。

本书的读者是液压与气动、电控设备及智能控制系统设计、开发、制造、使用、维修人员;本书亦可供相关专业的人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

智能液压气动元件及控制系统/黄志坚编著. —北京:  
化学工业出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-122-31015-6

I. ①智… II. ①黄… III. ①液压元件-自动控制系统  
②气动元件-自动控制系统 IV. ①TH137.5 ②TH138.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第281790号

---

责任编辑:张兴辉

文字编辑:陈喆

责任校对:王素芹

装帧设计:王晓宇

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张16 $\frac{1}{4}$  字数405千字 2018年2月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

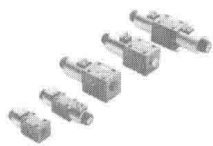
网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价: 89.00 元

版权所有 违者必究



## 前言

FOREWORD

智能液压气动元件是在原有元件的基础上,将传感器、检测与控制电路、保护电路及故障自诊断电路集成为一体并具有功率输出的器件。这样它可替代人工的干预来完成元件的性能调节、控制与故障处理功能。其涉及的参数包括压力、流量、电压、电流、温度、位置等,甚至包括瞬态性能的监督与保护。智能传感器与智能仪表应用于液压与气动系统,使系统测控精度、信息处理与通信能力、抗干扰能力以及稳定性与可靠性有很大提高。这是液压与气动技术智能化的又一重要途径。

当前人类的技术发展已经进入了智能化的阶段,形成了工业向智能化发展的工业革命。德国正在推行以实现智能制造为目标的工业 4.0 战略规划。“中国制造 2025”核心是应用互联网+智能装备,将无处不在的传感器、嵌入式终端系统、智能控制系统、通信设施通过互联网形成一个智能网络。液压与气动元件智能化是大势所趋,恰逢其时。

采用智能元件效益是显著的:可获得更多更好更符合工况的功能,有利于提高控制精度、提高效率 and 节约能源;调试手段与方式更灵活;提高了安全可靠,降低了额外故障产生的成本;易于实现远程诊断与维护,使用维修更方便。

智能液压与气动元件是流体传动与控制学科的发展前沿,涉及多学科,是一典型的交叉学科,掌握其技术原理与方法,对大多数从业人员来说,是一不小的挑战。

本书结合实例系统地介绍了液压与气动智能元件及集成应用技术,较为全面地汇集并梳理了国内专家学者近年在本技术领域探索、实践与创新的理论成果。本书的内容主要包括智能液压与气动元件结构与原理、技术特点、相关学科、设计开发与调整试验方法等。所选实例涉及国民经济与国防工业多个应用液压与气动技术的工业门类,既具有典型性也较为详尽具体,对读者有参考价值。全书共分 4 章,分别是智能液压元件及集成应用、智能传感器及其在液压系统中的应用、智能仪表及其在液压系统中的应用、智能气动元件及集成应用。

本书的读者是液压与气动、电控设备及智能控制系统设计、开发、制造、使用、维修人员;本书亦可供相关专业的人员阅读。

编著者



## 第 1 章 智能液压元件及集成应用 1

- 1.1 智能液压元件概述 /2
  - 1.1.1 液压技术的发展 /2
  - 1.1.2 智能液压元件的特点 /2
  - 1.1.3 智能液压元件应用的效益 /5
- 1.2 数字液压元件及应用 /6
  - 1.2.1 数字液压阀现状与发展历程 /6
  - 1.2.2 数字液压阀控制技术 /11
  - 1.2.3 可编程阀控单元 /12
  - 1.2.4 数字液压阀技术展望 /13
  - 1.2.5 基于数字流量阀的负载口独立控制 /14
  - 1.2.6 电液比例数字控制 /18
  - 1.2.7 电液伺服数字控制 /21
  - 1.2.8 2D 高频数字阀在电液激振器的应用 /23
  - 1.2.9 内循环数字液压缸 /26
- 1.3 现场总线在液压智能控制中的应用 /28
  - 1.3.1 现场总线的概念 /28
  - 1.3.2 基于嵌入式控制器与 CAN 总线的智能监控系统 /29
  - 1.3.3 基于 CAN 总线的液压混合动力车智能管理系统 /33
  - 1.3.4 CAN 总线在平地机液压智能控制系统中的应用 /36
  - 1.3.5 液压驱动四足机器人控制系统 /39
  - 1.3.6 基于双 RS485 总线的液压支架运行状态监测系统 /43
  - 1.3.7 数控液压板料折弯机控制系统 /48
  - 1.3.8 现场总线型液压阀岛 /52
- 1.4 智能液压泵及应用 /55
  - 1.4.1 军用机机载智能泵源 /55
  - 1.4.2 机载智能泵源系统负载敏感控制 /59
  - 1.4.3 大型客机液压泵系统 /64
- 1.5 智能化的液压元件及应用 /74
  - 1.5.1 DSV 数字智能阀 /74
  - 1.5.2 分布智能的电子液压元件 /75

- 1.5.3 数字阀 PCC 可编程智能调速器在水电站的应用 /77
- 1.5.4 新型与智能型伺服阀 /82
- 1.6 基于双阀芯控制技术的智能液压阀及应用 /85
  - 1.6.1 双阀芯控制技术 /85
  - 1.6.2 双阀芯控制技术在挖掘机的应用 /87
- 1.7 智能控制器与液压元件集成系统及应用 /89
  - 1.7.1 汽车液压支腿集成式智能调平系统 /89
  - 1.7.2 阀门液压智能控制装置 /91
  - 1.7.3 电液智能控制器在风洞控制的应用 /93
  - 1.7.4 新型与智能型集成电液伺服控制系统 /97
- 1.8 基于智能材料的液压元件 /100
  - 1.8.1 压电晶体及其在液压阀的应用 /100
  - 1.8.2 电流变液技术在液压控制中的应用 /105

## 第 2 章 智能传感器及其在液压系统中的应用 109

- 2.1 智能传感器概述 /110
  - 2.1.1 智能传感器的定义与结构 /110
  - 2.1.2 智能传感器的功能 /111
  - 2.1.3 智能传感器的实现途径 /112
  - 2.1.4 机电控制系统智能传感器技术的发展 /113
- 2.2 智能传感器液压系统典型应用 /114
  - 2.2.1 基于集成技术的智能液压传感器 /114
  - 2.2.2 智能传感器在电液伺服同步控制中的应用 /118
  - 2.2.3 基于 IEEE1451.2 标准的智能液压传感器模块 /121
- 2.3 基于智能传感器的火炮姿态调整平台设计实例 /124
  - 2.3.1 整体设计 /124
  - 2.3.2 液压控制系统设计 /125
  - 2.3.3 智能倾角传感器设计 /126
  - 2.3.4 倾角控制系统软件设计 /132
- 2.4 基于智能传感器的液压支柱压力检测系统设计实例 /134
  - 2.4.1 系统整体设计 /134
  - 2.4.2 电阻应变压力传感器设计 /136
  - 2.4.3 A/D 转换通道设计 /137
  - 2.4.4 CAN 总线通信网络设计 /140
  - 2.2.5 智能化的实现 /142

## 第 3 章 智能仪表及其在液压系统中的应用 145

- 3.1 智能仪表及应用概述 /146
  - 3.1.1 智能仪表 /146
  - 3.1.2 我国智能仪表工业概况 /148
  - 3.1.3 智能仪表技术发展方向 /150
- 3.2 智能仪表液压系统典型应用 /151

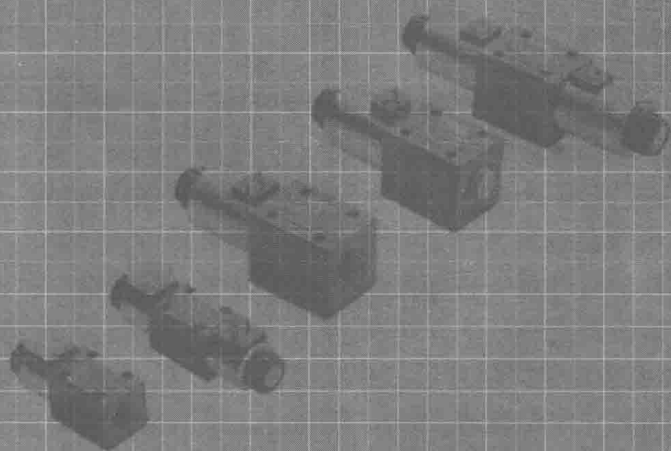
- 3.2.1 基于现场总线的液压智能仪表 /151
- 3.2.2 高温液压源智能温度控制 /154
- 3.2.3 基于 PLC 及 SWP 智能仪表的步进梁液压监控系统 /157
- 3.2.4 液压道岔智能数字压力表及应用 /160
- 3.3 船舶液压系统功率智能仪表设计应用实例 /161
  - 3.3.1 船舶液压系统功率传感器设计 /162
  - 3.3.2 智能仪表电路的硬件设计 /163
  - 3.3.3 智能仪表电路的软件设计 /169
  - 3.3.4 液压功率智能仪表的实验与分析 /173

## 第 4 章 智能气动元件及集成应用 177

- 4.1 气动元件与系统的智能控制 /178
  - 4.1.1 气动技术及智能气动元件 /178
  - 4.1.2 气动技术的发展趋势 /178
  - 4.1.3 我国气动技术智能化发展 /180
- 4.2 气动数字控制元件及应用 /180
  - 4.2.1 气动数字控制阀 /181
  - 4.2.2 高压气动压力流量复合控制数字阀 /183
  - 4.2.3 压电开关调压型气动数字阀及应用 /186
- 4.3 智能阀岛及应用 /192
  - 4.3.1 阀岛概况 /192
  - 4.3.2 阀岛的安装控制方式 /195
  - 4.3.3 智能阀岛在分散式控制系统的应用 /197
  - 4.3.4 自动抄片三自由度气动机械手 /203
  - 4.3.5 CPX 终端阀岛在自动化生产实训台中的应用 /207
  - 4.3.6 单片机控制的阀岛 /212
- 4.4 智能气动阀门定位器及应用 /215
  - 4.4.1 智能阀门定位器的气动部件 /215
  - 4.4.2 基于 HART 通信协议的智能阀门定位器 /220
  - 4.4.3 基于 PROFIBUS-DP 的智能阀门定位器 /224
  - 4.4.4 ZPZD3100 型智能阀门定位器 /228
- 4.5 智能气动集成装置及应用 /231
  - 4.5.1 CAN 总线技术在气动系统中的应用 /231
  - 4.5.2 智能气动平衡吊 /234
  - 4.5.3 数字式、智能型定量包装秤 /239
  - 4.5.4 智能气动测量系统 /244
  - 4.5.5 基于气动柔性技术的智能脉诊仪 /248

01

# 第1章 智能液压元件及集成应用





## 1.1 智能液压元件概述

液压技术是传动与控制不可或缺的技术，重要性日益受到重视。在大功率、体积限制严、特殊场合或电难以获得的领域（如风能、海洋能、太阳能、工程机械、海洋装备、航空航天、机器人等）无可替代。

### 1.1.1 液压技术的发展

液压技术的发展与人类社会工业的发展是一脉相承的。

表 1-1 为工业革命与液压行业的关系，可以看到：

① 液压技术的发展阶段完全与历次工业革命阶段同步，几乎一致。这也证明行业的发展离不开整个工业的发展趋势。

② “液压 2.0” 是油液压时代，就技术而言已经成熟。

③ “液压 3.0” 是液压与信息自动化相联系产品与技术手段发展的时代，就是液电一体化的时代。这一时代的典型产品就是比例阀、电子泵、电液泵、数字阀、数字缸等。

④ “液压 4.0” 的时代正在来到。对于液压行业而言，“液压 4.0” 包括三大部分：液压智能生产，液压智能工厂，液压智能元件，以及液压智能服务。

表 1-1 工业革命与液压行业的关系

| 工业时代            | 年代             | 核心创新技术          | 工业生产效果                                | 液压时代                      | 年代              | 核心创新技术                       | 行业效果                                 |
|-----------------|----------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 工业 1.0<br>机械化   | 18 世纪末         | 蒸汽机             | 机械化                                   | 液压 1.0 低<br>压水液压          | 1795 年          | 水压机及<br>其低压元件                | 液压应用主机                               |
| 工业 2.0<br>电气自动化 | 20 世纪初         | 电力              | 电气化形成的<br>自动化                         | 液压 2.0 油<br>液压            | 20 世纪初          | 油介质元件                        | 现代液压元件                               |
| 工业 3.0<br>信息自动化 | 20 世纪 70<br>年代 | 电子与 IT          | 机电一体化与<br>信息化形成的<br>自动化               | 液压 3.0 机<br>电一体化          | 20 世纪 70<br>年代后 | 电液一体<br>化控制比例<br>元件与数字<br>元件 | 电液比例控<br>制元件高速开<br>关等数字元件            |
| 工业 4.0<br>智能自动化 | 2011 年         | 物联网(信<br>息物理系统) | 由移动物联网、<br>云计算与大数据<br>形成的智能化生<br>产与工厂 | 液压 4.0 网<br>控液压+高压<br>水液压 | 2000 年          | 总线控制<br>元件系统<br>高压水压<br>元件   | 智能液气件<br>生产<br>智能液压件<br>工厂<br>智能液气元件 |

### 1.1.2 智能液压元件的特点

智能液压元件一般需要具备三种基本功能：

- ① 液压元件主体功能；
- ② 液压元件性能的控制功能；
- ③ 对液压元件性能服务的总线及其通信功能。

实际上它是在原有液压元件的基础上，将传感器、检测与控制电路、保护电路及故障自诊断电路集成为一体并具有功率输出的器件。从结构上看，智能液压元件具有体积小、重量轻、性能好、抗干扰能力强、使用寿命长等显著优点。在智能电控模块上，往

往采用微电子技术和先进的制造工艺，将它们尽可能采用嵌入式组装成一体，再与液压主体元件连接。

智能液压元件技术是成熟的，工程实施是可以进行的，但是作为元件增加的功能无疑会对现有液压行业提出极大的挑战。这个挑战来自技术、人员素质、上下游关系与经营理念等，因此必须不断通过创新解决面临的液压技术智能化新的问题。

### (1) 智能液压元件的主体

作为智能液压元件与液压传统无智能元件主体，在原理上可以完全相同，在结构上也可以基本相同。所不同的是作为智能液压元件往往要将微处理器嵌入在元件中，因此结构需要有所适应而变化。同时，现在也在发展更适合发挥液压元件智能作用的新结构，元件的功能与外形甚至都会有所改变。

智能液压元件必须是机电一体化为基体的元件，智能液压元件一定具有电动或电子器件在内，与此同时还必须具备嵌入式微处理器在内的电控板或电控器件，以及在元件主体内部的传感器。实际上，一个元件也就是一个完整的具有闭环自主调整分散控制的控制系统。

以 Danfoss 的 PVG 比例多路阀为例，这是一款 20 世纪开发在市场有一定占有率的比较有代表性的智能液压元件，如图 1-1 所示。

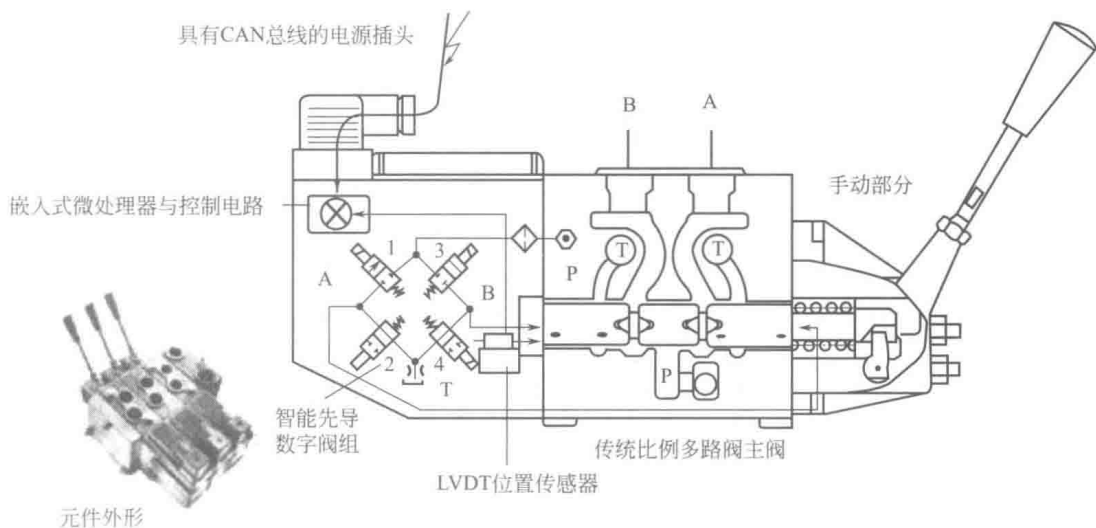


图 1-1 Danfoss PVG 智能元件的组成与智能阀组

### (2) 智能液压元件的控制功能与特点

在一般液压比例元件的基础上，带有电控驱动放大器配套，归属于电液控制元件。这种元件的比例控制驱动放大器是外置的。这就是液压 3.0 时代的产品。

将控制驱动放大器与一个带有嵌入式微处理器的控制板组合并嵌入液压主元件体内形成一个整体，这样这个元件就具有分散控制的智能性。从而带来下列好处：减少外接线，无需维护，降低安装与维护成本，简化施工设计，免除电磁兼容问题，可以故障自诊断自监测，可以进行控制性能参数的选择与调整，能源可管理，仅在需要时提供能源，可以快速插接并通过软件轻易获得有关信号值，可以通过软件轻易地设置元件或系统参数等等。这样一来，智能元件就将传统的集中控制的方式，转变成为分散式控制系统。不仅实现了智能控制功能，系统设置也是柔性的，通信连接采用标准的广泛应用的 CAN

总线协议，外接线减到最少，系统是可编程的可故障诊断的。这种演变从 20 世纪的 80 年代就开始了，现在已经在液压元件上采用了较长时间，结构、外形、质量、性能等各方面都比较成熟。

智能液压元件在控制与调节功能上与传统的液电一体化产品相比，有相同地方，如流量调节、斜坡发生调节、速度控制、闭环速度控制、闭环位置控制与死区调节等等，但性能参数会有提高，这包括控制精度的提高、CAN 总线的采用、故障监控与报警电路等。例如 PVG 阀的比例控制的滞环可以降低到 0.2%（一般可能 3%~5%）。在故障监控上，具有输入信号监控、传感器监控、闭环监控、内部时钟方面。

### (3) 对液压元件性能服务的总线及其通信功能

智能性液压元件的分散控制的智能性表现在它不仅可以有驱动电流以及电信号的输入，也可以有信息输出。由于元件部分增加了需要的传感器，因此液压元件具有自检测与自控制、自保护及故障自诊断功能，并具有功率输出的器件。这样它可替代人工的手动干预来完成元件的性能调节、控制与故障处理功能。其中可能包括压力、流量、电压、电流、温度、位置等性能参数的监控，甚至包括瞬态性能的监督与保护，从而提高系统的稳定性与可靠性。这里一些传感器是根据液压元件的特点与特性开发出来的，体积小、适合液压元件应用，诸如溅射薄膜压力传感器就是其中的一种。

图 1-2 为汽车控制 CAN 连接，智能液压元件 CAN 连接与其相近。

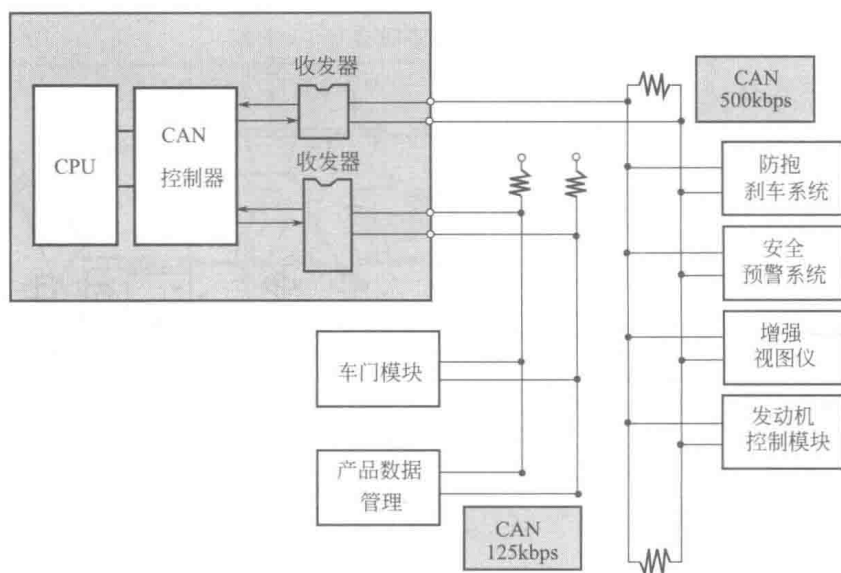


图 1-2 用于汽车控制的 CAN 连接图

### (4) 智能液压元件配套的控制器与软件

智能液压元件在系统的使用与传统元件是完全一样的。但是它的性能参数的设置、调整等需要提供外设进行，这些外设可以是公司专设的控制器或者一般的 PC 机，但都需要该产品所对应的该公司提供的开发软件系统。

图 1-3 为智能元件配套控制器与软件。智能液压元件需要该厂商提供相应的控制器与配套软件，用来进行对该元件的设置、控制以及监控等。这部分是对应于该系列元件或该公司同类型智能元件的，因此对用户而言，可以只购买一次即可以用于相应所有同类型元件设置等功能。

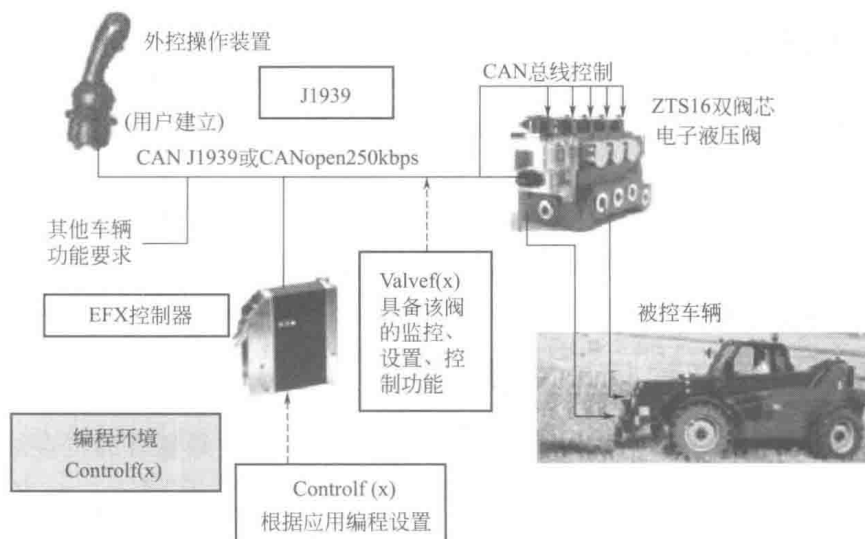


图 1-3 智能元件配套控制器与软件及其作用

### 1.1.3 智能液压元件应用的效益

当前人类的技术发展已经进入了智能化的阶段，但是在此过程中，要用更大的经济代价来换取这种生产方式还存在不少难点。例如人们还在意价格战，就对智能装备的采用产生困惑性，还有人们追求的是采购成本还是运营成本会对智能化的应用产生决定性影响。因此这种效益的比较还需要人们用更多的创新去解决。

采用智能元件，不论用户还是生产商，都能获得效益。

对于用户来讲，采用上述的智能元件显示得到了更多更好更符合工况的功能，例如采用上述比例阀，会增加不少功能，对双阀芯电子液压阀而言，可以实现挖掘机铲斗振动、电子换挡、水平挖掘、软掘、抗流量饱和等，还可以实现高低速自动换挡、多级恒功率控制、熄火铲斗下降、无线遥控、自动程序动作等。这些功能最后所表现的是发动机与液压系统功率的匹配，从而节能在 15%~20% 以上。

智能化给用户带来的是两方面的利益。在功能上更全面更有效率。在经济上，主机运转工作效率的提高，节省了工时即人力成本；机器消耗能量的降低，即耗油量的降低，节省了运营成本。另外则是机器提高了安全可靠，降低了不可预计的故障产生的额外成本。

对于生产商来说，也能获得多方面的效益。

首先是电控智能使主机的性能提高通过控制方面来解决，而不是过去只能通过机械或机械加工的方面解决。

由于采用开放式电控平台，方便了面向个体需求的设计，降低了设计成本；由于采用分散式的控制方式，系统能实现动态可变参数配置，系统运行更可靠，调试更灵活，调试维修成本更低；由于采用 CAN 总线，电控接线更简单，省线、省查、省工时，可以取消传统控制必需的接线箱，提高了生产效率，降低了劳动强度与难度，降低了人力成本与采购成本；由于采用总线，不仅电控布线简单易行，而且硬件管路的放置也更加灵活，便于安装，可以降低安装成本；由于故障的便捷诊断与远程维护，降低了售后服务成本；产品开发方便快捷，可以个性化定制，降低了营销成本，增加了市场的竞争性。

## 1.2 数字液压元件及应用

数字液压元件 (digital hydraulic component), 是具有流量离散化 (fluid flow discretization) 或控制信号离散化 (control signal discretization) 特征的液压元件, 含有数字液压元件的液压系统为数字液压系统 (digital hydraulic system)。

数字液压元件节流损失小、重复性好、与计算机接口方便、抗干扰性好, 适宜在液压控制系统中应用, 数字控制是液压元件智能化的重要基础。

### 1.2.1 数字液压阀现状与发展历程

数字阀的出现是液压阀技术发展富有意义的成就, 其效益是显著的: 直接与计算机连接, 无需 D/A 转换元件, 极大提高了控制的灵活性; 机械加工相对容易, 成本低; 功耗小; 对油液不敏感。

#### (1) 数字阀概述

图 1-4 为现有数字阀产品及分类。从现有的液压阀元件来看, 狭义的数字阀特指由数字信号控制的开关阀及由开关集成的阀岛元件。广义的数字阀则包含由数字信号或者数字先导控制的具有参数反馈和参数控制功能的液压阀。

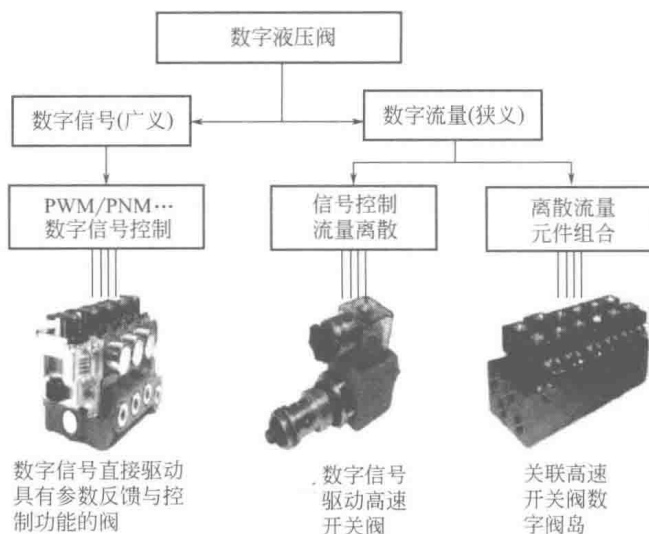


图 1-4 数字液压阀分类

从数字液压阀的发展历程可以将数字阀的研究分为两个方向: 增量式数字阀与高速开关式数字阀。增量式数字阀将步进电机与液压阀相结合, 脉冲信号通过驱动器使步进电机动作, 步进电机输出与脉冲数成正比的步距角, 再转换成液压阀阀芯的位移。20 世纪末是增量式数字阀发展的黄金时期, 以日本东京计器公司生产的数字调速阀为代表, 国内外很多科研机构与工业界都相继推出了增量式数字阀产品。然而, 受制于步进电机低频、失步的局限性, 增量式数字阀并非目前研究的热点。

高速开关式数字阀一直在全开或者全闭的工作状态下, 因此压力损失较小、能耗低、对油液污染不敏感。相对于传统伺服比例阀, 高速开关阀能直接将 ON/OFF 数字信号转化成流量信号, 使得数字信号直接与液压系统结合。近些年来, 高速开关式数字阀一直是行业研

究热点，主要集中在电-机械执行器、高速开关阀阀体结构优化及创新、高速开关阀并联阀岛以及高速开关阀新应用等方面。

### (2) 高速开关电-机械执行器

20世纪中期开始，对于高速开关电磁铁的研究就一直是高速开关阀研究的重点。英国 LUCAS 公司、美国福特公司、日本 Diesel Kiki 公司、加拿大多伦多大学等对传统 E 型电磁铁进行改进，提高了电磁力与响应速度。浙江大学研发了一种并联电磁铁线圈，增大了电磁力，试验显示电磁铁的开关转换时间与延迟都明显缩短。芬兰阿尔托工程大学 (Aalto University School of Engineering) 研究了 5 种软磁材料，用于探讨电磁铁线圈的效果以及不同匝数及尺寸对驱动力的影响。奥地利林茨大学 (University Linz) 对加工误差、摩擦力和装配倾斜造成的电磁铁性能差异进行了详细的分析。

超磁致伸缩材料与压电晶体材料的应用为高速开关阀的研发提供了新思路。瑞典用超磁致伸缩材料开发了一款高速燃料喷射阀。通过控制驱动线圈的电流，使超磁致伸缩棒产生伸缩位移，直接驱动阀口开启或关闭，达到控制燃料液体流动的目的。这种结构省去了机械部件的连接，实现燃料和排气系统快速、精确的无级控制。超磁致伸缩材料对温度敏感，应用时需要设计相应的热抑制装置和热补偿装置。中国航天科技集团公司利用 PZT 材料锆钛酸铅二元系压电陶瓷的逆压电效应，研发了一款由 PZT 压电材料制作的超高速开关阀，如图 1-5 所示。该阀在额定压力 10MPa 下流量为 8L/min，打开关闭时间均小于 1.7ms。压电材料脆性大，成本高，输出位移小，容易受温度影响，因此其运用受到限制。浙江大学欧阳小平等与南京工程学院许有熊等就压电高速开关阀大流量输出和疲劳强度问题设计了新的结构，并进行了仿真与实验分析。

美国 Purdue 大学研制了一种创新型的高速开关阀电-机械执行器 EAC (energy coupling actuator)，如图 1-6 所示。其包括一个持续运动的转盘和一个压电晶体耦合装置。转盘一直在顺时针运动，通过左右两个耦合机构分时耦合控制主阀芯的启闭。试验表明 5ms 内达到 2mm 的输出行程。

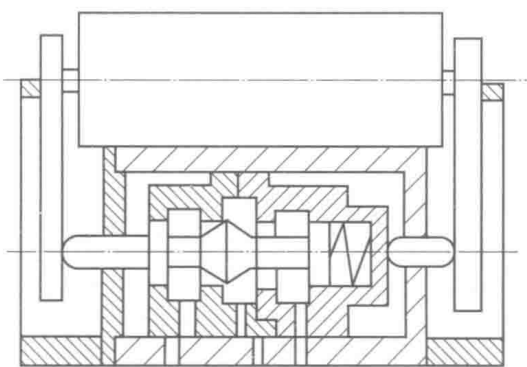


图 1-5 PZT 高速开关阀结构示意图

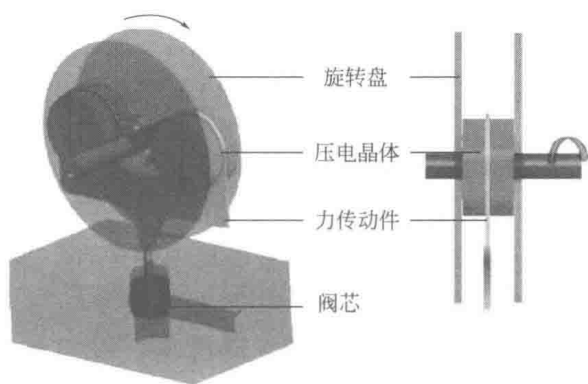


图 1-6 压电 EAC 原理概念图

### (3) 高速开关阀阀体结构优化与创新

高速开关阀常用的阀芯结构为球阀式和锥阀式。浙江大学周盛研究了不同阀芯阀体结构液动力的影响及补偿方法。通过对阀口射流流场的试验研究，观测了流场内气穴现象及压力分布状况。美国 BKM 公司与贵州红林机械有限公司合作研发生产了一种螺纹插装式的高速开关阀 (HSV)，使用球阀结构，通过液压力实现衔铁复位，避免了弹簧复位时由于疲劳带

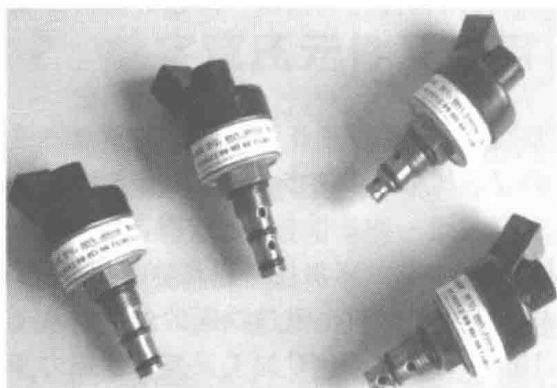


图 1-7 贵州红林 HSV 高速开关阀

来的复位失效。推杆与分离销可以调节球阀开度，且具有自动对中功能。该阀采用脉宽调制信号（占空比为 20%~80%）控制，压力最高可达 20MPa，流量为 2~9L/min，启闭时间 $\leq 3.5\text{ms}$ 。该高速开关阀代表了国内产业化高速开关阀的先进水平，如图 1-7 所示。

美国 Caterpillar 公司研发了一款锥阀式高速开关阀，如图 1-8 所示。该阀的阀芯设计为中空结构，降低了运动质量，提高了响应速度与加速度。复位弹簧从衔铁位置移动

至阀芯中间部位，使得阀芯在尾部受到电磁力，中间部位受到弹簧回复力，在运动过程中更加稳定。但是此设计使得阀芯前后座有较高的同轴度要求，初始气隙与阀芯行程调节较难，加工难度高，制造成本大。该阀开启、关闭时间为 1ms 左右，已经在电控燃油喷射系统中得到运用。美国 Sturman Industries 公司开发了基于数字阀的电喷系统，所用高速开关阀最小响应时间可达 0.15ms。

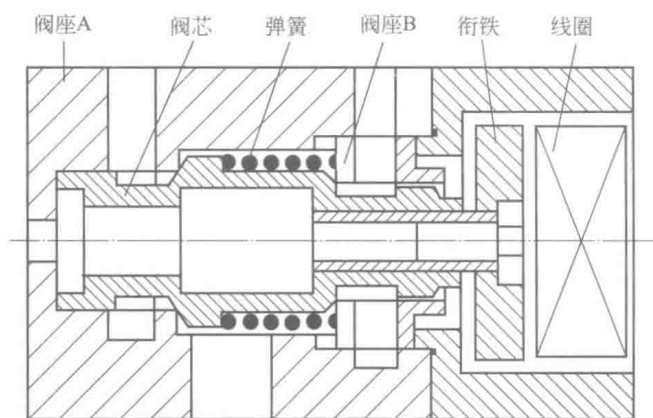


图 1-8 Caterpillar 公司的锥阀式高速开关阀

除了采用传统结构的高速开关阀，新型的数字阀结构也是研究的重点。明尼苏达大学（University of Minnesota）设计了一种通过 PWM 信号控制的高速开关转阀，如图 1-9 所示。该阀的阀芯表面呈螺旋形，PWM 信号与阀芯的转速成比例。传统直线运动阀芯运动需要克服阀芯惯性，电-机械转换器功率较大，而该阀的驱动功率与阀芯行程无关。在试验压力小于 10MPa 的情况下，该阀流量可以达到 40L/min，频响 100Hz，驱动功率 30W。

浙江工业大学在 2D 电液数字换向阀方面展开研究，如图 1-10 所示。其利用三位四通 2D 数字伺服阀，在阀套内表面对称地开一对螺旋槽。通过低压孔、高压孔与螺旋槽构成的面积，推动阀芯左右移动。步进电机通过传动机构驱动阀芯在一定的角度范围内转动。该阀利用旋转电磁铁和拨杆拨叉机构驱动阀芯作旋转运动；由油液压力差推动阀芯作轴向移动，实现阀口的高速开启与关闭。用旋转电磁铁驱动时，在 28MPa 工作压力下，阀芯轴向行程为 0.8mm，开启时间约为 18ms，6mm 通径阀流量高达 60L/min。

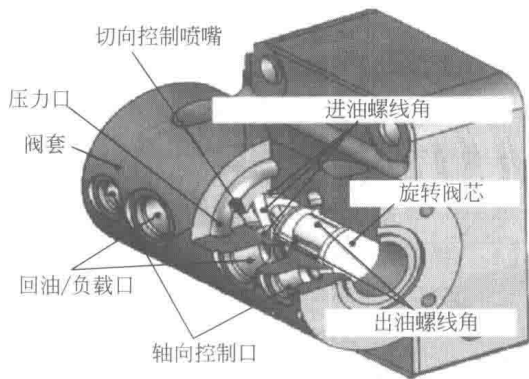


图 1-9 高速开关转阀

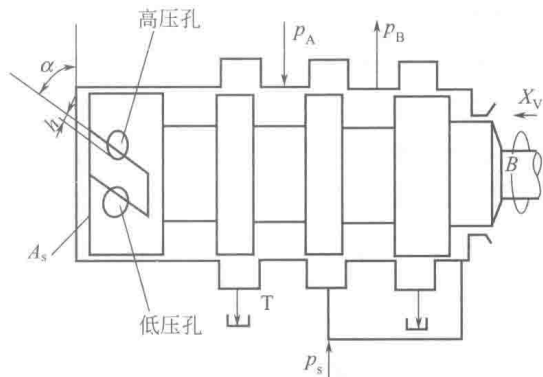


图 1-10 2D 电液数字换向阀

#### (4) 高速开关阀并联阀岛

由于阀芯质量、液动力和频响之间的相互制约关系，单独的高速开关阀压力低、流量小，在挖掘机、起重机等工程机械上应用还有一定的局限性。为解决在大流量场合的应用问题，国外研究机构提出了使用多个高速开关阀并联控制流量的数字阀岛结构。以坦佩雷理工大学为代表，丹麦奥尔堡大学（Aalborg University）与巴西圣卡塔琳娜州联邦大学（Federal University of Santa Catarina）都在这方面有深入的研究。

坦佩雷理工大学（Tampere University of Technology）研究的 SMISMO 系统，采用  $4 \times 5$  个螺纹插装式开关阀控制一个执行器，使油路从  $P \rightarrow A$ 、 $P \rightarrow B$ 、 $A \rightarrow T$ 、 $B \rightarrow T$  处于完全可控状态，每个油路包含 5 个高速开关阀，每个高速开关阀后有大小不同的节流孔，如图 1-11 所示。通过控制高速开关阀启闭的逻辑组合，实现对流量的控制。通过仿真和实验研究，采用 SMISMO 的液压系统更加节能。

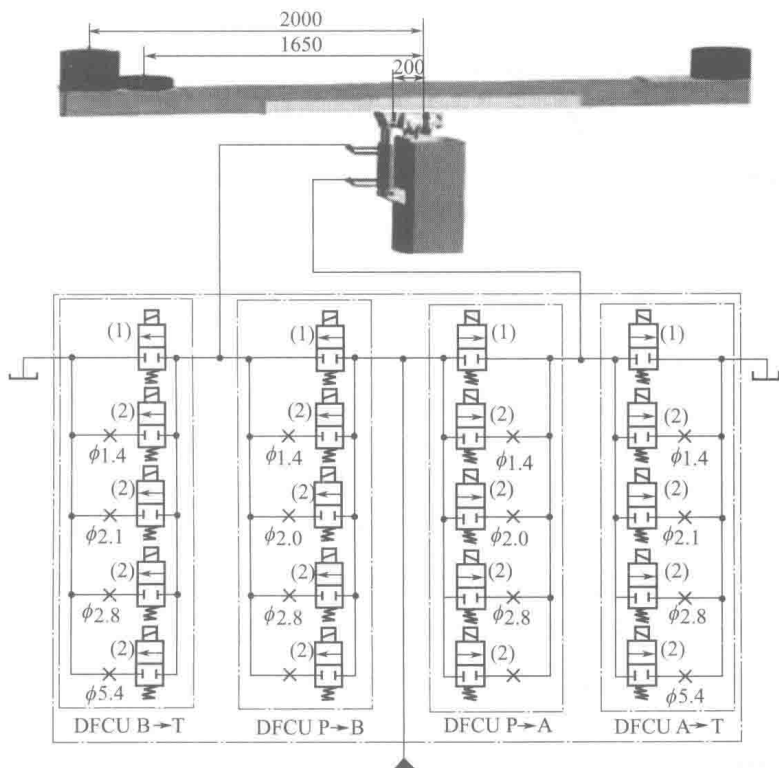


图 1-11 SMISMO 系统原理图



由此发展的 DVS (digital hydraulic valve system) 将数个高速开关阀集成标准接口的阀岛, 如图 1-12 所示。其采用层合板技术, 把数百层 2mm 厚的钢板电镀后热处理融合, 解决了高速开关阀与标准液压阀接口匹配的问题。目前, 已经成功地在 一个阀岛上最高集成 64 个高速开关阀。关于数字并联阀岛, 近期研究关注数字阀系统的容错及系统中单阀的故障对系统性能的影响。

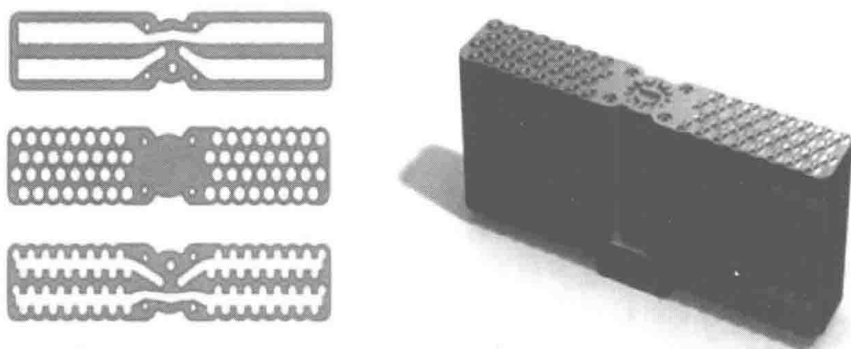


图 1-12 数字阀层板与集成阀岛

#### (5) 高速开关阀应用新领域

高速开关阀的快速性和灵活性使得其迅速应用在工业领域。目前在汽车燃油发动机喷射、ABS 刹车系统、车身悬架控制以及电网的切断中, 高速开关阀都有着广泛的应用。维也纳技术大学 (Vienna University of Technology) 将高速开关阀应用于汽车的阻尼器中, 分析了采用并联和串联方案的区别, 并且通过实验与传统阻尼器的性能进行对比, 比较结果说明了数字阀应用的优点。

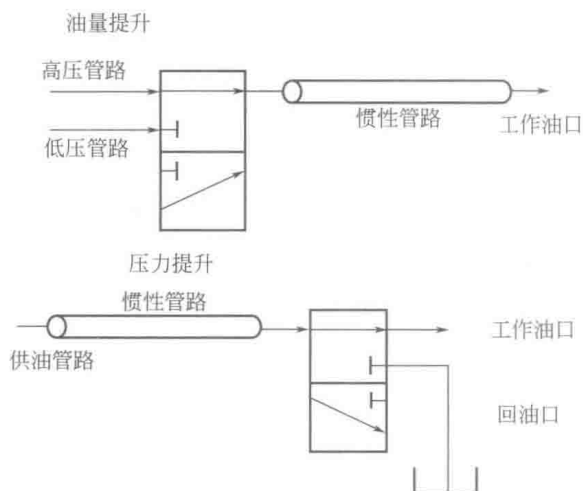


图 1-13 SID: 流量提升与压力提升原理图

英国巴斯大学 (University of Bath) 利用流体的可压缩性以及管路的感抗效应建立了 SID (switched inertance device) 以及 SIHS 系统, 其最主要的元件为二位三通高速开关阀和一细长管路, 如图 1-13 所示。SIHS 系统有两种模式: 流量提升和压力提升, 压力的升高对应流量的减小, 反之流量的增加对应压力的降低。在流量提升时, 首先是高压端与工作油口连通使得在细长管路内的流体速度升高。高速开关阀此时快速切换使得低压端与工作油口联通, 因为细长管在液压回路中呈感性, 会将流量从低压端拉入细长管, 实现提高流量降低

压力的效果。对于压力提升, 供油端通过细长管与高速开关阀相连。初始细长管与工作油口相连, 高速开关阀换向使得细长管的出口连接回油端。因回油压力远小于供油压力, 此时细长管中的流体开始加速。此后再将高速开关阀切换到初始位置, 因流体的可压缩性使得工作油口的压力升高。通过仿真和实验证实了使用高速开关阀快速切换性带来压力和流量提升的正确性。功率分析结果与实验表明, 如果进一步提高参数优化和控制方式, 此方案能够提升液压传动效率。