

# 亿美博谈数字液压

杨涛

北京亿美博科技有限公司  
天津亿美博数字装备科技有限公司  
<http://www.hydraulic.com.cn>

## 目录

1	引言 .....	1
2	数字液压的类型与定义 .....	2
2.1	“数字液压”名字的由来 .....	2
2.2	数字液压的门类 .....	2
3	数字液压与伺服液压的异同 .....	3
3.1	机械闭环反馈与电闭环反馈 .....	3
3.2	频响问题 .....	4
3.3	精度问题 .....	4
3.4	传感器闭环问题 .....	4
3.5	力控制方式 .....	5
3.6	环境耐受性 .....	6
3.7	步进电机丢步问题 .....	6
3.8	四十年不懈的坚持 .....	7
4	数字液压技术的发展 .....	7
4.1	从关注液压到关注自动化直至工艺需求 .....	7
4.2	从器件的自动化到系统的智能化 .....	8
5	创新发展是中国制造业未来之路 .....	8

## 1 引言

一说到液压精密控制，自然想到的就是伺服阀、传感器、闭环反馈、自动控制、传递函数、算法理论、频响等等，综合了机械、流体力学、电气、自动化、计算机、测量，甚至包括材料、工艺等多个学科的一大堆“高大上”现代科学技术，因而液压技术发展举步维艰，因为有多少人能掌握这么多“高大上”的科学于一身呢？

不知大家研究过原理简单、造价低廉、安全可靠、实用方便的抽水马桶吗？对，就是抽水马桶！三个关键原件：浮球、杠杆、锥阀，简简单单地构成了精确的液位（容积）控制。这么简单有效廉价可靠的机械反馈控制装置，试想要是用“高大上”的现代科学技术替代，将会是什么样子？其实数字液压的核心也是类似的机械反馈伺服调节原理。

解决问题简单就是“美”！正所谓：大道至简。

自上世纪 70 年代末，北京亿美博科技有限公司创始人——杨世祥教授即对数字液压技术进行了深入研究，并于 80 年代初的钢铁年会上发表了中国国内首篇关于数字液压的研究论文，后经《液压与气动》于 1983 年缩减公开发表。1989 年第一代数字液压缸即应用于国防重点项目上，后续杨教授不断推动数字液压技术的发展，克服其存在的缺陷和不足，第二代、第三代技术相继诞生并成功应用于重要的国防项目及国家重点工程应用中。经过近四十年的不断努力，现在数字液压已经形成系列产品并批量应用于众多领域，包括：国防、冶金、能源、机械制造等，在传统液压器件、比例伺服液压器件之外，形成了独树一帜的、具有性能可靠、精度高、从设计安装调试直至使用维护大为简化等众多优势的一类新器件或者新方案，受到了众多用户的青睐。近些年，随着信息化技术的发展和智能制造的兴起，作为传动的核心基础件数字化发展也日趋受到重视，2016 年十三五液气密行业发展规划更是将亿美博申报的共计 7 项数字液压系列技术列入，数字液压自然引起了国际和国内学术界及产业界的关注。2015 年初，就数字液压的起源、发展和技术特点等，在网上有一些激烈讨论，2016 年 8 月，网络上更是就数字液压一些技

术特性等展开更深入的讨论。为了能客观的阐述亿美博数字液压的特点，我们谈谈自己的看法，算是抛砖引玉。

## 2 数字液压的类型与定义

### 2.1 “数字液压”名字的由来

现在被称之为数字液压的技术不算少，或许是“数字”这个词更贴近于现代科技发展的前缘，因此数字“一切”变得很时尚。“数字液压”这个词据我们考证官方使用应最早出现在 2002 年“十五”国家科技攻关计划，有幸亿美博承担了“数字液压缸系列产品的研究与开发”攻关任务，并于 2003 年通过科技部组织的专家验收，验收专家意见中最后一句话画龙点睛地写到：“该产品（数字缸）的研制成功，对推广工业自动化做出贡献”。其实“数字液压”这个词早在 1989 年笔者对之前被称为：“数控脉冲液压缸”或称：“电液脉冲步进缸”的技术其特征与数字电子技术有异曲同工之类同而内部使用。1995-96 年笔者在美国期间，还专门申请了 digital-hydraulic.com 这个网络域名，2002 年该域名转回国内，因此查询记录从 2002 年开始记载。之所以笔者最早使用“数字液压”，也是源于笔者是从无线电、数字电子技术“出身”，接触到之前的“数控脉冲液压缸”技术后，发现它很像数字电子技术，即：具有标量化特征，也就是这种液压缸的运动特性完全与电脉冲对应，脉冲的数量准确的对应油缸的运动行程，脉冲的频率对应着油缸的速度，理论上它几乎不受负载和油压波动的影响，甚至它的设计、制造、使用和维护等，都大为简化，与数字电子技术的很多特征极其类似，因此才将原本更专业化或技术化的名词改为更形象化的称其为：“数字液压”。

### 2.2 数字液压的门类

总的来说目前被称为数字液压的技术分为：阀控式和一体式两大类，而以阀控式数字液压种类繁多，其中又包括细分种类繁多的：高速开关式、PWM、增量式等细分大类，而近些年，随着国外研究机构对类似数字电子技术的 1、2、4、8、……加权排列组合形式的数字液压研究，国内也有权威院校从事跟踪研究，更将“数字液压”技术丰富了起来。而亿美博创始人

杨世祥教授多年来从事研究的数字液压则与上述阀控式有着巨大不同。亿美博沿袭的是一体式数字液压技术的研究和推广。简单说一体式数字液压是将：缸、阀、反馈与驱动控制巧妙的组合为一个整体，利用简单有效且精密的机液反馈，构成对外体现为一个独立且自成系统的液压器件。用户无需关心其内部构成与特性，仅需了解输入与输出固定的关系后，即可轻松掌握和使用，并且这种一体式数字液压整体性好、抗污染能力强、精度高、温度适应范围宽、电磁兼容性好、稳定可靠、综合成本低廉等，更突出的优势在于其无需阀控闭环系统需要整定控制参数的麻烦，具有比其它类型液压（包括阀控数字液压）更突出的特点及优势，因此在众多数字液压技术分类中，应用案例最多，实现的技术水平最高，获得最终用户的评价也是最好的，同时也是数字液压群体中最成熟可靠的产品。这些都在实际应用中得以验证（日本、瑞典和美国等国家自上世纪 80 年代也有一体式数字液压缸产品并沿用至今，只是技术一直停滞在较早年代水平上，不仅制造难度和成本高，售价也很昂贵）。

### 3 数字液压与伺服液压的异同

#### 3.1 机械闭环反馈与电闭环反馈

亿美博一体式数字液压采用的是机械反馈调节与控制方式，这也是一体式数字液压技术的关键所在。伺服液压系统采用的是电气方式闭环反馈调节，相比机械反馈，其不仅精度低、响应慢，更大的问题在于其存在严重的不确定性，这里所指的不确定性是所有阀控系统，无论是伺服液压亦或是阀控“数字液压”，均存在控制调节算法中参数的不确定性，而这个不确定性问题，往往是影响整个系统精度、响应速度，甚至是成败的至关重要环节。单就这一点我们就可以说，一体式数字液压采用机械反馈装置实现闭环调节控制更有效和准确，加之机械远比电子器件的环境耐受能力强很多。其实如果细研究伺服阀内部机理也不难得出这个结论，因伺服阀也是利用了机液反馈构成的闭环而实现其完美的控制能力，这里就不展开介绍伺服阀的工作原理了，大家有兴趣可以自行深入研究。

### 3.2 频响问题

无论任何系统其频率响应均与其所有环节的累计滞后时间构成反比关系。大家可以对比一下，油缸运动通过传感器检测、计算机算法计算（这里暂且认为控制算法和参数准确高效）、力矩马达响应调节输出、机液闭环推动主阀芯、阀口开闭，油液进入油缸前后腔，油液推动油缸产生移动这些过程，对比油缸运动通过机械直接推动阀口开闭哪个更快？显然是后者环节少速度快且更直接并精准，而后者就是一体式数字液压的关键优势所在。正是因其通过机械反馈具有比伺服阀和阀控数字液压更快速、准确、有效的反馈，使其体现出更高的频响范围和精度（高频响也是高精度的基础），这也是被亿美博在大量实际应用案例中验证的结论。一位资深专家曾一语道破了数字液压的频响问题，即：活塞与阀芯通过机械连接在一起，所以油缸的频响就是阀的频响，阀的频响就是数字缸的频响。例如：亿美博采用数字缸驱动控制的 20 辊硅钢薄带轧机板厚自动控制系统的成功应用，实现取向硅钢薄带成品 0.257 毫米±3 微米的控制精度，这是原本仅有较高频响伺服阀才能胜任的领域。关于具体理论依据的表述早已在上世纪 80 年代初杨世祥教授发表的论文中关于数字液压缸传递函数中有了详述，这里不再表述。

### 3.3 精度问题

这里也不得不提一个核心问题，就是关于机械传递中的各种间隙和精度等问题造成数字液压的精度保障问题。数字液压产品的制造可以采用不同的设备、不同的工艺、不同的材料选型、不同的精度配合等，以至于体现出最终产品的技术性能不同。亿美博创始人杨世祥教授潜心近 40 年对数字液压的不断研究和创新，使得我们的产品早在十五攻关验收时就能够实现微米级的重复精度，现在更可以大批量制造生产，其中大量借鉴了伺服阀的加工制造工艺、材料、设备要求等，因此实现微米级的控制能力已得到解决，这也正是亿美博始终保持引领的关键基础。

### 3.4 传感器闭环问题

亿美博推崇的一体式数字液压由于其内部已经具有了位置闭环能力，因此其实现精确的微米级重复定位时就不再需要额外的传感器对其闭环反馈，即使是在速度控制上，由于其运动特性的数字化，脉冲频率对应数字液压缸的运动速度特性，也使其不必再采用传感器对其实施闭环控制。这里不得不说的是很多人对传感器的误解。普遍认为电传感器精度高，其实这是很多人的认知误区。就拿磁致伸缩位移传感器来说吧，大家仔细看一下它的技术性能参数即可发现，它的误差、线性度、温度稳定性等这些指标中都有一个“xx%FS”，这里的“FS”是英文“Full Scale”也就是“全量程”的缩写，一般精度可以做到万分之1-3FS，这个精度很高吗？其实不然，1米的行程，将会有0.1毫米的误差。而滚珠丝杠精度分级是：0, 1, 2, 3, 5, 7, 10 共7级，一般机械采用C7, C10级，数控设备一般采用C5, C3级（C5较多，国内大部分数控机床都是C5级），航空制造设备，精密投影及三坐标测量设备等一般采用C3, C2精度，可见滚珠丝杠比磁致伸缩位移传感器精度高出很多。所以在此提请大家关注和了解电传感器中还有很多相互关联影响的技术参数指标，例如：线性度、温度稳定性和误差精度之间的关系。而亿美博一体式数字液压缸虽然内部具有了更高精度的机械反馈装置，但并不排除额外再装上一个电传感器用于冗余监测保护使用。这样能让数字液压缸具有双保险能力，工作得更安全可靠。这也是亿美博在很多要求安全级别更高的应用中惯用的方法，例如：几项国防重点应用、大型水利项目、机器人应用等，均采用了这种冗余保护设计。除此之外，亿美博一体式数字液压产品还装有压力传感器用于实现力的控制能力。

### 3.5 力控制方式

力加载控制分为对一般刚度和高刚度（形变量极小）物体两种不同方式。我们先讨论对一般刚度物体的力加载。我们都知道通过对物体施加外力，物体会发生形变，且这两者关系是正比的，而物体刚度越大，体现其形变就越微小。因而能够精确实现位置控制，正是精确实现力加载闭环调节的基础保障。一体式数字液压缸能够实现微米级的重复精度，也就满足了大多

数要求精确力加载控制的要求。即：通过精确的位置控制实现力加载的闭环控制。再说说对于高刚度物体的力加载控制。亿美博通过采用数字液压中特有的线性阀开口控制能力,相对于伺服阀开口控制的线性度和分辨率更高（数字阀阀口控制是通过伺服或者步进电机实现的，相比通过力矩马达控制的伺服阀阀口，更容易实现精确的线性和  $1/1000 \sim 1/10000$  开口分辨率），加上亿美博特殊设计的流量压力转换系统，就可以实现对高刚度体的精密力加载控制。

### 3.6 环境耐受性

用户购买产品，首先是要使用它、让其发挥应有的功能与作用，如果一个产品不能广泛的适应恶劣的环境，再“高大上”的技术，也会被市场所淘汰。亿美博数字液压具有顽强的“生命力”，无论是在高达  $200^{\circ}\text{C}$  的高温或是零下  $40^{\circ}\text{C}$  的环境，无论是 9-11 级过滤清洁度的系统，无论是在超强的电磁辐射乃至电离辐射环境下，亿美博数字液压均表现了惊人的耐受能力，依然可以实现微米级的超高精度控制能力，为用户创造出其应有的价值，这是现有精密液压控制器件难以胜任的。

### 3.7 步进电机丢步问题

经常听到有人说步进电机丢步问题，因而数字缸采用步进电机控制就不可靠。这依然是一个认知问题，而且数字缸并不限于采用步进电机控制，伺服电机作为数字缸控制的案例也比比皆是。首先我想说任何一个产品，都有它的设计、使用边界条件，如果将其工作在边界条件范围之外，再好的产品恐怕都是无法正常发挥功能作用的，步进电机也是如此。步进电机有两个重要指标，一个是启动矩频特性，一个则是运行矩频特性。启动矩频特性：是指步进电机在一定的负载惯量下，起动频率随负载转矩变化的特性称为启动矩频特性；运行矩频特性：是指当电机带着一定负载运行时，运行频率与负载转矩大小有关，两者的关系称为运行矩频特性。除此之外，步进电机的特性还包括：步距角、转矩、启动频率、运行频率、额定电流和电压等。以上这些指标均关乎步进电机可否正常工作，缺一不可。

而很多使用者认为步进电机原理很简单，并未认真了解其独有特性便将出现的问题简单粗暴的归结为步进电机自身的不足或缺陷，这显然是错误的。给大家举个例子：针式打印机，之所以廉价耐用，就是由于采用了步进电机驱动打印头往复运动而非采用伺服电机的原因。而且很多人都有一个经验：步进电机驱动的打印头在没有外力卡阻是绝不会出现打印错误的。因此用好一个器件，让其发挥应有的功效，必须了解其原理及特性，不能简单粗暴，更不应想当然的错下结论。这里顺带说一下伺服电机不丢步的原因并不在于电机本身，而是通过电机尾部带有的编码器进行闭环补偿修正，才避免了丢步的出现。其实，步进电机也有带有编码器进行闭环控制的方式，这里就不详述了，大家有兴趣可以深入了解。

### 3.8 四十年不懈的坚持

亿美博创始人杨世祥教授潜心研究数字液压近 40 年，解决的问题从第一代简化设计，解决加工难题；第二代避免特殊工况发生严重故障；第三代降低制造难度，提升产品精度；后续还有第四、第五、第六代等技术不断创新，这其中还包括：提升产品温度耐受范围、抗污染能力、增加产品电磁兼容度、耐受电离辐射、抗受高冲击振动、不同金属材料、不同热处理工艺、不同油液介质、不同加工方法、不同密封方式、不同外形结构……。

因此，正是 40 年风风雨雨不懈的努力和坚持，把问题一个个的突破，才让亿美博数字液压有了今天众多成功应用和丰富的技术解决能力。成功不是一蹴而就的，需要的是耐心和坚持，需要的是耐得住寂寞，忍得下常人接受不了的痛苦，更需要的是不断总结、完善和提高来突破重重障碍，自信、创新和不断地挑战自我更是引领发展的核心。杨世祥教授曾风趣和谦逊的说，40 年的坚持让很多聪明人转了方向，而留下的也只有他一个人还在努力。这或许就是当下推崇的“工匠精神”吧。

## 4 数字液压技术的发展

### 4.1 从关注液压到关注自动化直至工艺需求

液压作为传动的一员，原本应该是为自动化服务，但由于液压的技术难度高、实施中往往遇到各种意想不到的困难，因此在很多系统应用中，液压反而变为了项目的主要被关注环节。由于数字液压技术的出现使得液压传动得以简化，正如十五科技攻关验收专家评语写到的：“数字液压的成功，对推广工业自动化做出贡献”。因而我们可以将精力更多的关注在自动化系统的实施方面，而作为自动化是为了工艺目标的达成而设计和实施的，因此亿美博通过十八年在重多行业的学习和研究，积累了大量的行业知识和经验，因此我们早已不再是仅将着眼点放在液压元件、液压系统构成这些单一方面，而是更关注如何利用包括：机械、液压、电气、自动化、信息技术甚至是大数据、云计算和智能化等，集成一体的综合解决方案上。努力将更贴近于用户需求的解决方案完美的展现在用户的面前，解决用户的需求，甚至是引领不同行业的创新。这些方面也是被亿美博不断在实践中证明的，例如：工程机械的机器人化和智能化发展等。

#### 4.2 从器件的自动化到系统的智能化

数字液压的出现，让设计者、使用者得以将自动化系统向信息化和智能化快速推进。正如中国工程院周济院长在调研数字液压时指出的：数字液压的成功，可以推进中国装备快速实现数字化一代，而实现数字化的目的是为了信息化和智能化奠定基础。数字液压作为一个基础级核心器件，亿美博最新推出了具有现场总线网络连接的数字液压缸、数字液压马达和数字可编程功率敏感泵，为接下来传动迈向信息化和智能化做好基础准备工作。

### 5 创新发展是中国制造业未来之路

其实深入研究我们的制造业不难发现，我们的基础设施是完善的、产业队伍是完整的、管理手段也是有较高效率的，但由于我们整个制造业 30 年的发展过程中，注重了引进、消化、吸收，但忽略了创新发展，迷失了自我。而跟着人家走，势必会处在落后的地位、竞争不利的地位，加上这些年全球经济乏力，市场需求大幅度减少，人力成本的不断增加，环保压力

越来越重，这些综合因素的叠加，中国装备制造业出现困境是可想而知的。中国用 30 年的改革开放已经实现了经济的腾飞，实现了世界第二经济体的壮举，而我们永远要停留在这个第二的位置上吗？要想超越对手，学习是基础，但创新才是根本。中国装备制造业接下来的发展，创新将是主旋律。国家提出产业升级、供给侧改革等一系列政策，就是要引领我们制造业尽快接受、习惯、掌握和爱上创新，让我们的装备制造业在工业 4.0 时代，不仅不会掉队，还要实现引领发展，让“中国制造 2025”为世界科技发展做出贡献。因此我们学术和产业界要深刻体会创新的意义和价值，让我们大家携手营造创新氛围，包容创新、鼓励创新，让创新发展首先在我们液压行业形成风尚。

**作者简介：**杨涛，1989 年作为首届全国十大杰出青年候选人被清华自动化系特招。工作后一直从事与自动化相关研发、系统设计和实施等工作，具有丰富的软件和控制算法设计、实施经验。