

定压差阀在液压系统的应用研究

陈献华

湖南中联重科智能高空作业机械有限公司, 湖南 长沙 410018

[摘要]定压差阀属于液压系统里的核心控制部件,它凭借维持阀口压差处于恒定状态这一点,给系统性能带来了极为重要的影响。本文全面且细致地剖析了它的具体工作原理以及结构方面的特征,并且对其在液压系统当中所发挥出来的诸多核心功能也展开了分析,这些功能包括压力补偿、对流量实现稳定控制、让系统效率得以优化以及达成协同增效等等。另外还对一些关键因素作用于阀性能的机制展开了较为深入的探讨,像阀芯结构参数、油液所具有的特性、工作压力和匹配程度以及温度出现的波动等情况都是需要着重关注的。把参数化设计、动态响应优化、抗污染设计以及与智能化相融合等前沿技术相互结合起来,进而提出了一些在实际操作层面能够行得通的设计以及应用方面的优化策略。相关研究显示,针对复杂工况去开展智能化且具备高可靠性的定压差阀设计,这将会成为提升现代液压系统整体效能的关键所在。

[关键词]定压差阀; 液压系统; 压力补偿; 流量稳定性

DOI: 10.33142/ec.v8i6.17204

中图分类号: TH137

文献标识码: A

Research on the Application of Constant Pressure Differential Valve in Hydraulic System

CHEN Xianhua

Hunan Zoomlion Intelligent Access Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410018, China

Abstract: The constant pressure differential valve is a core control component in hydraulic systems, which has a significant impact on system performance by maintaining a constant pressure differential at the valve port. This article comprehensively and meticulously analyzes its specific working principle and structural characteristics, and also analyzes the many core functions it plays in hydraulic systems, including pressure compensation, stable control of flow, optimization of system efficiency, and achieving synergistic efficiency. In addition, a more in-depth exploration was conducted on the mechanisms by which key factors affect valve performance, such as valve core structural parameters, oil characteristics, working pressure and matching degree, as well as temperature fluctuations, which require special attention. By combining cutting-edge technologies such as parametric design, dynamic response optimization, anti pollution design, and integration with intelligence, some design and application optimization strategies that can be implemented in practical operations have been proposed. Related studies have shown that designing intelligent and highly reliable constant pressure differential valves for complex working conditions will be the key to improving the overall efficiency of modern hydraulic systems.

Keywords: constant pressure differential valve; hydraulic system; pressure compensation; traffic stability

现代液压系统在工程机械、航空航天以及高端制造等领域有着广泛的应用,其控制精度和能量效率逐渐成为核心竞争力所在。定压差阀又叫压力补偿阀,在液压回路里担负着维持关键节点压力差保持恒定的重要任务,可说是系统流量的‘稳定器’以及能耗的‘调节阀’,其性能的好坏直接决定了执行机构运动的平稳性、系统响应的速度以及整体的能耗水平。所以近些年,针对定压差阀设计理论、动态特性以及与系统匹配性的研究一直在不断推进,其目的是要满足高精度、高效率、高可靠性系统的相关需求。而本文主要在于系统地梳理定压差阀的应用机理,深入剖析影响其性能的制约要素,并且探讨设计优化以及智能化升级的可行途径。

1 定压差阀的工作原理与结构

定压差阀的主要功能在于可自动对阀口开度加以调节,从而确保其进出口两端的压力差值(ΔP)大致维持在一个恒定的状态。其典型的结构是由阀芯、调压弹簧、阀体以及控制腔等部分构成的。在工作的时候,进口处的

压力 P_1 会作用在阀芯的端面之上,而出口处的压力 P_2 则会反馈到弹簧腔当中。一旦负载出现变化导致 P_2 产生波动的情况发生,阀芯就会在液压力和弹簧力的共同作用之下产生沿轴向的位移,进而改变节流口的通流面积,最终使得 $\Delta P = P_1 - P_2$ 逐步趋向于预先设定的数值。这种依据力平衡原理所形成的闭环调节机制,恰恰构成了定压差功能得以实现的基础所在^[1]。并且需要关注的是,阀芯的结构形式,如滑阀、锥阀或者插装式等不同类型、弹簧的刚度特性以及控制腔的阻尼设计等方面,它们共同决定了该阀所具有的静态精度以及动态响应品质,这些无疑都是在设计过程中需要重点去考量的关键点。

2 定压阀在液压系统中的作用

2.1 压力补偿功能

在多执行器系统或者负载出现剧烈变化的情况下,定压差阀在其中起到极为关键的作用,它能够必不可少地给予压力补偿。定压差阀是串联在节流阀或者是比例方向阀

的上游位置的,如此一来便能够确保阀口的压差不会随着负载压力的起伏而发生变化。这样的设计安排让通过节流元件的流量仅仅是由其开口面积来决定的,和下游的负载压力几乎是没有什么关系的。如此一来,系统的速度刚性以及抗负载扰动的能力都得到了显著的提升。在2024年的《液压与气动》期刊所报道的内容当中指出,那种集成了高性能定压差阀的挖掘机主控系统,其动臂举升速度的波动率能够降低40%以上,这一效果可以说是相当明显的。

2.2 流量稳定性控制

流量的稳定性算得上是评价液压系统品质的关键指标中的一个。定压差阀能够凭借维持节流口压差处于恒定状态这一方式,切实有效地对由于泵源出现脉动情况、油温发生升降变化或者油液黏度有所改变等原因而引发的流量漂移现象加以抑制。特别是在比例阀或者是伺服阀所控制的系统当中,此阀能够确保流量指令和输出流量之间具备良好的线性度以及较高的重复精度^[2]。相关研究已经明确证实,在温度范围从-20°一直80°这样极为宽泛的温域工况之下,要是给进油节流调速回路配置上定压差阀,那么其流量变化率就能够被控制在百分之五这样的范围之内。

2.3 系统效率优化

在当下节能需求变得日益紧迫之时,定压差阀对于系统效率所起到的提升作用开始受到人们的关注。传统节流调速方式由于阀口存在很大的压损,使得能量出现较为严重的浪费情况。而将定压差阀和负载敏感泵或者变量泵相互配合起来,进而构成负载敏感系统,如此一来便仅仅会向执行器给予其所需的相应压力以及流量,从而大幅度地降低节流以及溢流方面的损失。从工程实践当中能够看出,当装载机转向液压系统运用了负载敏感技术之后,其平均节能的效果能够达到20%到30%这样的程度,由此产生的经济效益以及环境效益都是非常突出的。

2.4 与其他元件的协同作用

定压差阀极少处于孤立工作状态,它的效能发挥程度上依靠和泵、换向阀、执行器等各个元件的协同匹配情况。在负载敏感系统当中,它和变量泵的联动控制能够达成泵输出压力针对负载压力的自适应跟踪效果;要是和比例方向阀相互配合起来,那么便可以实现对流量进行精确且无级的调控操作。要是协同设计出现不当的情况,比如说压差设定值和泵控参数之间不匹配,那就极容易导致系统出现震荡状况或者产生响应迟滞的问题,这一点是设计者务必要予以高度关注的地方。

3 关键性能影响因素分析

3.1 阀芯结构参数的影响

阀芯直径以及阀口的几何特征,这二者构成了对流量控制精度产生影响的关键核心变量。当处于高压且大流量的工作状况之下时,较大直径的阀芯能够呈现出较为出色的通流能力,然而与此其运动惯性以及粘性摩擦阻力也会相应地增大,进而使得阶跃响应的的时间大约延长了40%

至60%左右。阀芯半锥角一旦发生改变,那么液动力的方向以及幅值也会随之出现明显变化。较小的锥角能够在一定程度上降低稳态液动力给阀芯位移带来的干扰,从而提高压力的稳定性;而较大的锥角虽说有助于强化流量增益,可却会让阀芯径向不平衡力引发的卡滞风险变得更加严重。阻尼孔直径哪怕仅仅做出毫米级别的细微调整,都会和控制腔压力建立的速度有着直接的关联。要是把直径减小20%,那么阀芯响应延迟就有可能增加到原来的1.5倍之多^[3]。所以现代的设计通常都会采用多级阻尼的结构,在阀芯的台肩部位设置不同差异的节流槽,以此来兼顾动态响应以及稳定性这两个方面的要求。在2025年的时候,北京航空航天大学的团队借助拓扑优化算法重新对非对称导流槽结构加以设计,最终成功地将某航空液压系统的定压差阀的压差波动控制在2%以内,相较于传统的设计方式,其精度提升了足足68%之多。

3.2 油液特性的影响

油液黏度指数的差异造成低温启动与高温运行时的控制特性漂移。当油温从-30℃升至100℃时,ISO VG46液压油的运动黏度将从约450mm²/s骤降至约10mm²/s,直接导致阀芯运动阻尼系数变化3倍以上。这种黏温效应不仅改变阀芯动态响应,更引发内泄漏量的非线性增长,研究证实油温每升高40℃,典型滑阀式定压差阀的内泄漏量增加15%~25%。油液弹性模量则深刻影响压力波传播特性:矿物油弹性模量约为1400MPa~1800MPa,而水-乙二醇溶液仅为1000MPa~1200MPa,使得后者在高压突变工况下产生更显著的流量超调现象。值得警惕的是,液压油中尺寸大于阀芯配合间隙30%的硬质颗粒,2023年中国液压气动密封件行业协会故障案例库统计,单次卡滞事件即可造成阀芯表面永久性划伤,导致压差设定值永久偏移3%~5%。

3.3 系统工作压力的匹配性

设定压差与系统工作压力的比值需通过严格的能耗分析与动态特性验证确定经验性优化区间。工程实测数据表明,该比值宜控制在8%~15%范围内才能兼顾调节性能与能耗效率:当比值低于6%时,阀口有效调节行程不足,难以克服负载阶跃变化引起的流量瞬态波动;比值超过18%则导致节流损失呈非线性增长,系统压力损失增加1.5~2倍。对于21MPa级工程机械液压系统,设定压差推荐采用1.7MPa~3.2MPa;35MPa级航空系统则需2.8MPa~5.3MPa的设定值。在多模式系统中,工作压力的动态切换要求压差设定具备自适应能力,此时应建立压力比-流量特性的三维映射模型,通过实时反馈调整确保不同压力级下的压差比稳定在优化区间。温度变化对材料刚度的影响亦需纳入考量——油温每升高40℃,弹簧刚度衰减约0.8%,直接导致设定压差偏移0.5%~1.2%,这要求设计阶段预留温度补偿余量或采用变刚度补偿机构。

3.4 温度变化对性能的干扰

温度波动通过双重物理机制干扰定压差阀性能:材料

热变形效应与油液黏温特性耦合作用。典型铸铁阀体的线膨胀系数约为 $11\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，而合金钢阀芯为 $13\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，当油温从 20°C 升至 120°C 时，两者热膨胀差异导致配合间隙增大 $8\sim 12\mu\text{m}$ ，内泄漏量随之增加 $2.5\sim 4$ 倍。油液黏度变化更为关键：矿物油黏度在 $40^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 区间通常下降 $80\%\sim 90\%$ ，直接削弱阀芯运动的阻尼效应，使动态响应超调量增加 $15\%\sim 25\%$ 。密封系统受温度影响尤为显著，丁腈橡胶密封件在 -20°C 环境下硬度提升 $12\sim 18$ Shore A，运动摩擦系数增加 $1.8\sim 2.2$ 倍；当温度超过 110°C 时其永久压缩变形率可达 $30\%\sim 35\%$ ，造成密封失效风险。先进设计需集成多级补偿策略：采用温度-压力复合传感器实时监测工况，通过电控单元动态修正弹簧预紧力；或应用双金属热补偿片自动调节阀芯初始位置，在 $-30^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ 宽温域内将压差控制精度维持在 $\pm 2.5\%$ 以内，该技术已纳入 2025 版 ISO 10767-1 标准修订草案。

4 设计与应用优化策略

4.1 参数化设计方法

响应面模型 (RSM) 为基础的多目标优化正逐渐发展成为一种新的设计范式。把阀芯位移精度、压力超调量以及能耗系数当作优化目标来构建一个数学模型，这个模型包含了多达 12 个关键参数，像阀芯质量、弹簧刚度、阻尼孔径、锥角角度等这些核心变量都在其中。借助拉丁超立方采样的方式生成了 300 组设计样本，之后再和计算流体动力学 (CFD) 还有多体动力学 (MBD) 联合仿真相结合，以此来获取响应值。最后运用 NSGA-II 遗传算法得到了帕累托前沿解集，从而使得设计迭代的效率相较于传统的试错法提升了足足 20 倍。

4.2 动态响应优化技术

控制腔容积压缩效应构成了制约响应速度的物理方面瓶颈所在之处。一旦控制腔的直径超出 20mm ，并且其长度还大于 30mm 的时候，油液所具有的压缩性就会致使阀芯响应出现延迟的情况，而且延迟的时间会增加 15 毫秒以上。针对这一情况，创新性的方案是把微型蓄能器集成到阀芯内部。博世力士乐在 2025 年所发布的 REXROTHDZ 系列相关产品当中，采用了直径为 3mm 的薄膜式蓄能腔，借此能够有效地对油液压缩量加以补偿，进而使得阶跃响应时间得以缩短，最终可缩短至 20ms 以内。而对于摩擦力所造成的非线性干扰问题，则是依靠材料方面的革新来予以应对。德国贺德克公司所开发出来的类金刚石 (DLC) 涂层阀芯，再配合上聚醚醚酮 (PEEK) 复合材料制成的阀套，成功地将运动摩擦系数降低到了 0.05 以下，同时还将滞环误差减少了 75% 之多。

4.3 抗污染与耐久性设计

表面织构技术开辟了抗污染的新途径。在阀芯表面利用激光加工出深度介于 $5\mu\text{m}$ 到 $10\mu\text{m}$ 之间且直径为 $50\mu\text{m}$ 的微凹坑阵列，如此一来便能够形成稳固的微观流体动压

膜，进而使得颗粒污染物没办法接触到基体表面。清华大学所组成的团队在 2024 年开展的实验已经证实，经过织构化的阀芯在 NAS10 级污染油液当中连续运行长达 1000 小时之后，其磨损量仅仅只有传统阀芯磨损量的 30% 而已。而在流道设计方面，则是引入了生物仿生的理念，具体而言就是模仿鲨鱼皮肤上肋条结构的非光滑流道，这样的设计可有效地对污染物沉积的边界层起到破坏作用，某军工项目在应用该项技术之后，其污染物沉积量足足减少了 60% 之多。

4.4 智能化控制融合趋势

数字孪生技术能够达成阀的寿命周期管理目标，在阀体当中嵌入 MEMS 压力传感器以及温度传感器，每隔 5ms 便采集一次工作参数，借助边缘计算节点提取出特征值，像是压差波动方差、响应时间趋势等，然后将这些数据上传到云端的数字孪生体。徐工集团在 2025 年所搭建的液压阀健康预测平台，通过对 300 台装载机定压差阀的实时数据展开分析，成功达成了剩余寿命预测误差低于 10% 的精度水平。更为前沿的当属自学习控制算法，中航工业某型号飞机液压系统所采用的强化学习控制器，能够在 30 个起降周期以内自主地对压差控制参数加以优化，使得襟翼作动器流量控制精度提高了 40% 。

5 结束语

定压差阀在现代液压系统里充当着极为关键的角色，它既是压力的守护者，又是流量的稳定器。其性能的好坏，会对系统的整体表现产生重大影响。本文系统论述了其核心功能、性能制约因素以及优化策略。研究表明，阀芯结构参数的精细化设计、油液污染与温度效应的有效抑制、以及系统工作压力的精准匹配，是提升其静态与动态性能的基础。面向未来，参数化设计、动态响应优化、高可靠性的设计以及智能化的融合，共同构成了定压差阀技术演进的主要脉络。尤其值得强调的是，在智能制造与绿色发展的双重驱动下，实现高精度、快响应、强鲁棒、低能耗且具备状态感知与智能决策能力的定压差阀，将是学术界与工业界持续攻坚的核心目标。该领域的持续突破，对于推动液压传动技术向高端化、智能化、绿色化转型升级，具有非常重要的意义。

[参考文献]

- [1]张灿罡.恒功率轴向柱塞泵变量机构的研究[D].甘肃:兰州理工大学,2016.
- [2]冯书亮,蔡留金.恒压系统与负载敏感系统的运用对比分析[J].液压气动与密封,2020,40(2):52-56.
- [3]徐霄.轮式挖掘机全轮液压力转向系统研究[D].甘肃:兰州理工大学,2022.
- [4]鞠超,史金钟,罗明泉.负载敏感技术在拖拉机液压系统上的应用[J].拖拉机与农用运输车,2023,50(2):19-24.

作者简介:陈献华(1984.10—),男,学历:本科,毕业院校:湖南工程学院,所学专业:机械设计制造及其自动化,目前职称:机械工程师。