

## 低温环境中液压油的流变特性对舵机性能的影响

田燕宾 谢欣 孙婷 王进

石家庄海山实业发展总公司, 河北 石家庄 053000

**[摘要]**随着国防、航空以及极地工程建设领域的不断发展,对舵机系统的稳定性和响应精度的要求变得越来越高。在低温条件下,液压油的流变特性会直接影响舵机的表现效果。液压油是舵机传动系统中用来传递动力和控制信号的关键物质,当温度降低时,液压油的粘度和流动能力会发生变化,这些问题会干扰到系统的启动速度、响应的灵敏程度以及控制的准确水平。针对低温条件下液压油的流变行为开展了专门的研究,利用实验测量和理论计算的方式进行了详细分析,测定了液压油在低温环境中的粘度、流动情况和剪切强度的表现,同时探讨了这些变化如何影响舵机的动态反应和稳定性控制。随着温度不断下降,液压油的粘度会变得更高,流动起来遇到的阻力也会逐渐增加,这样就导致液压传动系统的启动速度变慢,反应不够迅速,控制出现的误差也会越来越大,同时振动现象可能会变得不正常,这些情况都会严重损害舵机的工作效率和稳定性。研究过程中还发现,如果采取一些改进措施来优化液压油的化学配方,或者加强系统的温度管理技术,就能有效减少因流变特性变化而带来的负面影响,让舵机在极寒天气下的表现更加出色。这项研究的结果可以为液压系统在极端寒冷环境中的设计和实际应用提供重要的理论支持和实践参考意见,同时也帮助改善舵机的整体性能,保证整个系统的安全可靠运行,展现出非常重要的工程实用价值和推广潜力。

**[关键词]**低温环境; 液压油; 流变特性; 舵机性能; 动态响应

DOI: 10.33142/sca.v9i5.19753

中图分类号: TP602

文献标识码: A

## The Influence of Rheological Properties of Hydraulic Oil on Servo Performance in Low-temperature Environment

TIAN Yanbin, XIE Xin, SUN Ting, WANG Jin

Shijiazhuang Haishan Industrial Development Company, Shijiazhuang, Hebei, 053000, China

**Abstract:** With the continuous development of national defense, aviation, and polar engineering construction fields, the requirements for the stability and response accuracy of servo systems are becoming increasingly high. Under low temperature conditions, the rheological properties of hydraulic oil directly affect the performance of servo motors. Hydraulic oil is a key substance used in the servo transmission system to transmit power and control signals. When the temperature decreases, the viscosity and flow capacity of hydraulic oil will change, which will interfere with the system's starting speed, response sensitivity, and control accuracy. A specialized study was conducted on the rheological behavior of hydraulic oil under low-temperature conditions. Detailed analysis was carried out using experimental measurements and theoretical calculations to determine the viscosity, flow conditions, and shear strength of hydraulic oil in low-temperature environments. At the same time, how these changes affect the dynamic response and stability control of servos was explored. As the temperature continues to decrease, the viscosity of hydraulic oil will become higher, and the resistance encountered during flow will gradually increase. This will cause the starting speed of the hydraulic transmission system to slow down, the response to be less rapid, and the errors in control to increase. At the same time, the vibration phenomenon may become abnormal, which will seriously damage the efficiency and stability of the servo. During the research process, it was also found that if some improvement measures were taken to optimize the chemical formula of hydraulic oil or strengthen the temperature management technology of the system, the negative effects caused by changes in rheological properties could be effectively reduced, making the servo performance better in extremely cold weather. The results of this study can provide important theoretical support and practical reference opinions for the design and practical application of hydraulic systems in extreme cold environments, and also help improve the overall performance of servos, ensuring the safe and reliable operation of the entire system, demonstrating significant engineering

practical value and promotion potential.

**Keywords:** low temperature environment; hydraulic oil; rheological properties; servo performance; dynamic response

## 引言

在国防、航空以及极地工程建设这些尖端领域里面,舵机系统变成非常重要的执行部件,稳定程度和反应速度高低会直接决定整个系统能否正常可靠工作。液压油成为舵机传输能量和传递信号的关键物质,温度降低的时候,黏稠度和流动速度都会出现很大改变,这种变化明显影响到舵机的工作表现。当温度降到很低的时候,液压油的黏稠度增加很多,流动速度变得很慢,导致舵机启动变得特别困难,反应速度变慢,控制出现明显偏差的情况,在一些实验数据中已经能够清楚看到这些问题。最近几年,相关研究方向已经有学者利用计算机仿真计算加上实际实验测量两种方式来仔细考察液压油黏稠度变化规律,但目前仍然存在温度调节不够稳定、测试数据分布比较分散等问题,所以无法完整清楚说明低温环境到底如何改变液压油基本物理性质的变化过程。这次研究使用实验观测加上理论推导两种手段一起开展,详细测量了液压油在各种低温情况下的黏稠度、流动快慢以及剪切强度这些具体数值,并且深入考察这些变化到底怎样影响舵机快速响应能力以及稳定控制水平。这次研究在数据采集方式、实验环境控制水平以及理论模型建立过程这几个方面都做了全新改进,目的是给开发更好的液压油配方以及改进整个系统温度控制策略提供非常可靠的理论依据。通过仔细检查低温环境里面液压油黏稠度变化规律对于舵机实际工作性能造成的影响,这篇文章希望为将来舵机系统面对极端恶劣天气条件的设计工作和实际使用过程提供坚实的技术支持,从而提高整个系统在各种复杂情况下的运行效果,并且给实际工程操作提供实用并且容易实施的改进意见和参考方案。

## 1 低温环境与液压油基本特性

### 1.1 液压油流变基础

液压油成为液压传动系统里面非常重要的液体材料,负责传递能量、提供润滑作用并且完成控制信号的传递任务,流变特性会直接决定整个系统的工作效率和稳定程度。从流体力学这个角度来分析,液压油的流变表现完全取决于分子结构特点、周围环境温度高低、内部承受的压力大小以及剪切速度快慢这些因素共同影响的结果。粘度是液压油流变特性的关键参数之一,能够反映出油液内部分子之间相互摩擦产生的阻力大小。粘度是否合适,会明显影响到能量传递的效率高低,同时也会影响到系统各个部件

之间的摩擦损耗程度和密封效果的好坏。

外界温度发生变动的时候,液压油的粘温特性成为系统设计需要重视的关键问题。低温环境之下,液压油分子之间的热运动能力下降,分子之间的作用力增加,导致油液粘度明显升高,引起油液流动阻力增大。油液在剪切作用下的变形能力同样会发生改变,进而影响油液通过管道和阀体时的顺畅程度。液压油的非牛顿特性在低温环境中的表现特别突出,表现出粘度随剪切速率变化的特点,可能会出现剪切稀化或者剪切增稠的情况。以上流变特性的变化会严重影响液压系统的运行效果和稳定性,急需开展详细的研究工作并进行改进调整。

### 1.2 低温条件下物性变迁

液压油在低温环境下,物理性质会发生明显的变化,变化主要表现在粘度、流动速度、重量以及与热量相关的物理属性这几个方面。温度降低以后,液压油分子的活动会变得缓慢,分子之间的相互作用力量会变得更强烈,这样就导致粘度增加。粘度变高以后,液压油内部各部分之间的摩擦力会变大,这会严重影响到能量传递的效率和动力反应的速度。流动速度在低温情况下会明显变慢,液压油遇到的阻力会增加,这种情况容易造成液压组件内部出现压力不稳定或者流动突然停止的问题。重量在低温条件下会略微增加,虽然这种增加量不算很大,但是在液压油传输过程中,很容易与其他各种复杂因素结合在一起,最终引发整个系统的运行状态发生异常。液压油在低温环境下的热膨胀能力会变弱,这样就使得温度变化对液压系统内部压力的精确调控带来更大的不利影响。物理性质在低温情况下的改变,会直接决定液压油在舵机系统中进行能量传输的能力,它会对动能的快速释放造成一定的阻碍,同时也会对控制信号的准确传递产生延迟,这些问题都会明显拖慢舵机工作的速度,并且降低舵机工作的精确程度,因此可以说这是低温工作环境下舵机整体性能下降的一个关键原因。仔细研究液压油在低温条件下的物理性质变化,对于提升舵机系统的稳定性具有非常重要的意义。

## 2 舵机性能关键要素

### 2.1 舵机结构及动力机理

舵机属于重要动力操控部件,其构造特点以及工作原理共同决定了整个系统的运行效果和稳定程度。舵机构造主要包括液压传动部分、驱动部件以及反馈调节部件,液压传动部分充当能量传输的主要环节,依靠液压油流动规

律来实现驱动力输出。液压泵将液压油加压之后,利用管道将压力能输送给驱动部件,驱动部件再把压力转化成机械力,用来完成舵面转动操作。反馈调节部件承担数据收集和修正任务,依靠传感器获取实时信息并进行调整,从而提升系统工作效率,这个环节的准确性会明显影响到舵机的反应速度以及控制精确程度。

舵机的动力原理主要依靠压力流动来实现平衡,液压油通过管道内部的流动和压力的高低差异来完成能量的传递。液压系统在运行的时候,流体的黏稠程度、流动能力以及剪切特性的表现会直接影响到驱动力的传递效果和执行动作的反应速度。如果遇到低温环境,液压油的流动能力会变得很差,压力分布也会出现不平衡的情况,流动中遇到的阻力会不断增加,最终导致舵机产生的驱动力明显减少,动作响应的速度也变得很慢。舵机的核心功能不仅仅依赖于结构设计和动力转换的方式,还要特别关注液压油的流变特性的表现,只有这样才能让设备在各种复杂的条件下保持稳定运行。

## 2.2 性能参数与响应要求

舵机的好坏会明显影响整个系统在遇到突然变化或者遇到干扰时的表现是否快且稳,主要关键指标包括反应速度快慢、控制精确度高、稳定余量大小以及抵抗外部干扰的能力强弱。反应速度快慢就是指从接收到控制指令到实际开始动作所需要花费的时间长短,时间越短说明系统的实时控制能力越强。控制精确度高是指舵机执行指定动作时能否达到很高的准确程度,这个表现会受到传动系统的刚性大小、液压回路的具体特性以及反馈机制好坏等多种因素共同作用。稳定余量大小是指在各种复杂工作条件下,舵机能够保持正常工作的安全范围,具体包括阻尼特性、振动频率和系统谐振点的控制范围等方面内容。抗干扰能力强弱是指系统面对各种复杂情况时,能够很好地抵挡来自外部的各种干扰,同时还能把舵机性能保持在稳定状态的能力大小,尤其是在气温特别低的时候,这种能力显得尤为重要。气温低的时候,液压油的流动性会变得很差,导致系统启动时反应变慢、控制精度下降,并且还可能引发振动特性发生突变,因此必须想办法更好地协调和平衡这些关键指标,才能有效提升舵机的整体性能水平。

## 3 低温下液压油流变行为

### 3.1 粘度与流动性演变

低温环境让液压油的粘度和流动性受到很大干扰,这是因为液压油分子结构在低温状态下热运动变得很慢,几乎停止了。温度下降后,液压油分子之间的相互作用力会变强,导致油液的粘度不断增加,呈现出一种不规则的增

长模式。如果温度继续降低,逼近液压油的倾点,分子间的粘附特性会变得非常突出,油液内部抵抗剪切变形的能力明显提升,这样就会造成流动阻力增大,系统的运行效率也会随之下降。

研究发现,不同种类的液压油在温度变化时表现出不一样的粘度特点。矿物油跟天然酯基液压油相比,在低温条件下,粘度变化特别明显,原因在于这两种油的分子结构特点和分子之间的相互作用方式存在很大不同。随着温度降低,粘度会不断升高,油液从容器中流出所需的时间会变得越来越大,而油液流动时的速度也会逐渐减慢。这样的情况会导致液压传动系统中的管道和通道内部压力增大,流体传递效率降低,最终使得整个系统的反应速度变慢。

流动情况的变化也导致油液在受到剪切力作用时流变特性的改变。在温度较低的情况下,液压油的非牛顿性质表现得特别明显,尤其是在剪切速度较高时,油液呈现出很强的黏弹性,这样就造成液压系统的动力传输变得不稳定。低温环境对液压油粘度和流动性的影响非常严重,对液压传动的效果造成了很大的限制。深入研究液压油在低温条件下的粘度和流动性的变化规律,对于改进舵机系统的性能有很大的帮助和实际应用价值。

### 3.2 剪切特性与阻滞现象

低温环境会对液压油的剪切特性产生明显作用,具体表现就是剪切应力和剪切速率之间存在一种非线性的联系,这种联系会变得更加复杂。在低温条件下,液压油分子的活动受到阻碍,内部的粘滞阻力会变得更大,屈服应力也会出现明显的上升。实验数据清楚地显示,如果剪切应力无法有效突破液压油的屈服临界点,那么流体会表现出一种接近固体的状态,流动中会出现明显的停滞现象。温度持续下降,液压油可能会发生剪切变稠的现象,在高速剪切的情况下,粘度会出现不规则的增加,这样会加大系统内部能量传递的不稳定问题。流动中的停滞和剪切变稠的情况叠加起来,容易造成液压系统的反应速度变慢、控制精度下降,并且还会让系统振动的情况变得更加严重。低温环境下的液压油剪切特性变化,成为限制舵机动态性能和稳定运行的一个重要原因,急需采取有针对性的改进和优化措施来加以解决。

## 4 舵机动态响应与稳定性表现

### 4.1 启动时延与控制偏差

低温环境对液压油的流动性能产生明显作用,这种作用直接影响到舵机的反应速度和控制效果。液压油的粘度在低温条件下会不断上升,流动时遇到的摩擦力也会增加,

导致液压系统启动时需要的压力变得更大。因为液压油无法快速到达一个平稳的工作状态,信号传递和能量传输都会出现明显的延迟,舵机的动作慢下来,整体启动的表现不如正常时候好。低温环境下,液压油的粘度变得很高,流动起来很困难,系统内部的压力分布会出现忽高忽低的情况,这样就让舵机的控制精度下降很多。液压控制系统面对微小的位置变化时,反应速度慢得不得了,位置偏差随着温度降低变得越来越严重。液压油在流动过程中受到低温的影响,会产生一些奇怪的流动特点,比如流动方向不稳定,这样就降低了舵机输出跟踪任务的能力,也让舵机在应对各种复杂工作时显得不够灵活。所有这些不利情况加在一起,让舵机运行变得很不稳定,难以满足一些重要的工作任务要求。不同的系统功率和实际使用的环境条件不一样,必须全面分析液压油流动性能的变化对舵机启动和控制带来的多方面影响,找到合适的办法来缓解这些问题,保证系统的反应能够得到很好的控制并且保持稳定可靠的状态,尽量减少麻烦和损失。

#### 4.2 系统振动与调节困难

低温环境让舵机系统产生振动特点和调节效果受到液压油流动性质变化的明显影响。液压油的粘度随着温度下降而急剧增加,造成系统内部压力分布不平衡并且液体流动出现延迟,这样就引发了舵机动力系统发生非线性振动。在粘度很高的情况下,液压油不能快速完成压力传递,出现响应延迟以及多次振荡的情况,这种情况直接影响舵机动作的精确程度,同时也会加重系统长时间运转时的能量消耗和部件疲劳破坏。液压油在低温情况下的剪切特性发生变化,舵机调节过程中遇到的阻力明显变大,控制参数容易偏离预定数值,很难保持期望的稳定工作状态。振动持续存在容易与系统驻波现象叠加起来,进一步加大调节的难度,这种不稳定情况严重影响舵机的正常工作。需要特别关注液压油流动性质的改进工作,并且配合使用温度控制手段,减少粘度突变对系统振动和调节效果带来的不利影响,从而提升舵机在低温环境中的可靠性和使用寿命。

#### 5 结束语

这项研究使用了实验测试和理论分析两种方式,详细

检查了低温天气对液压油流动特性的具体影响。随着温度不断下降,液压油的粘度会变得非常大,流动起来特别困难,剪切能力也出现了很大的改变,这些情况直接导致液压传动系统的工作速度变慢,控制效果变差,还容易产生振动等异常现象,最终造成能量传递效率低,控制工作的效果也不理想。针对低温天气中舵机表现不佳的情况,研究人员仔细测量了液压油的各项物理性质数据,并且根据这些数据设计了一套改善液压油配方的具体方案,还提出了优化温控系统的实用建议,这些措施能够帮助海军部队、航空航天部门以及极地工程项目顺利开展。不过,实验中使用的样品数量不够多,覆盖的使用场景也比较狭窄,理论上的计算模型在分析极端低温条件下舵机动态表现时,由于数据不够全面,存在一些不够准确的地方。另外,长期使用的磨损和温度分布不均带来的影响没有被充分考虑到,研究工作还是有一些不足之处。接下来的研究计划是增加液压油样品的种类,全面分析各种不同的配方和添加物质如何改变流动特性的具体效果,还要结合高精度的数值模拟和多种实验验证手段,不断改进低温环境下舵机动态表现的理论计算模型,同时寻找更加高效的温控技术和能量传递优化方法,为极端天气条件下的舵机技术进步提供强有力的支持,希望能尽快落实到实际应用当中,期待未来取得更好的成果。

#### [参考文献]

- [1]高显振,杨超,李猛,等.减速顶对液压油的性能要求[J].润滑油,2022,37(1):57-60.
- [2]苗新峰,张海明,刘中国,等.超低温液压油技术规格综述[J].液压气动与密封,2022,42(4):1-5.
- [3]朱伟伟,安海珍,孙园园,等.工程机械液压油黏温特性研究[J].工程机械,2021,52(2):79-84.
- [4]刘中国,李新照,张玲,等.液压油防锈性能研究[J].液压气动与密封,2022,42(11):30-33.
- [5]叶旺盛.液压油缸启动压力及响应特性研究[J].建筑机械,2021(3):63-65.

作者简介:田燕宾(1988—),男,汉族,河北邯郸人,硕士研究生,从事飞机液压舵机维修。