

机械油在液压系统中的污染控制与寿命预测

顾鹏程

北京唐浩电力工程技术研究有限公司 内蒙古 赤峰 024000

摘要: 本文聚焦于机械油在液压系统中的污染控制与寿命预测问题。剖析液压系统中机械油污染的来源。接着全面介绍机械油污染控制的常用方法, 涵盖过滤技术、防污染设计、运行维护管理等, 结合实际应用场景给出具体技术参数。然后探讨机械油寿命预测的相关理论与方法, 通过实际案例分析验证方法的准确性与可靠性。旨在为提高液压系统的可靠性和使用寿命提供理论支持和实践指导。

关键词: 机械油; 液压系统; 污染控制; 寿命预测

1 引言

液压系统作为一种重要的动力传输和控制装置, 凭借其功率密度大、响应速度快、传动平稳等优点, 广泛应用于工业生产、航空航天、工程机械等众多领域。机械油作为液压系统的工作介质, 不仅起到传递能量和信号的作用, 还对系统中的运动部件进行润滑、冷却和防锈等, 其性能直接影响液压系统的可靠性和使用寿命。然而, 在液压系统的运行过程中, 机械油容易受到各种污染物的侵入, 导致其性能下降, 进而引发系统故障。据统计, 液压系统故障中约有70%-85%是由油液污染引起的。因此, 对机械油在液压系统中的污染进行有效控制, 并准确预测其使用寿命, 具有重要的理论意义和实际应用价值。

2 机械油污染的来源

2.1 固体颗粒污染

固体颗粒是液压系统常见污染物, 来源包括外界侵入和系统内部磨损。外界侵入方面, 安装、调试、维修时若环境清洁度控制不当, 灰尘、砂粒等杂质易进入系统, 油箱呼吸孔未装有效空气滤清器、密封件损坏等也会使外界固体颗粒进入油液; 系统内部磨损方面, 液压元件运动如泵的齿轮、叶片与定子之间, 阀的阀芯与阀体之间等会产生金属磨屑, 油液中的添加剂长期使用后也可能形成沉淀物成为固体颗粒污染源。

2.2 水分污染

水分进入液压系统途径有环境湿度、冷却器泄漏、油箱密封不良等^[1]。高湿度环境下空气中的水分会在油箱内凝结成水滴, 如环境相对湿度达80%以上且油箱内温度低于环境露点温度时易产生冷凝水; 冷却器泄漏时冷却水可能混入油液, 导致油液乳化、性能下降; 油箱密封不严时, 如户外作业的工程机械雨天油箱盖密封不好, 雨水会直接灌入油箱。

2.3 空气污染

空气污染源于油液吸油过程和系统压力变化。吸油

过程中, 若吸油管路密封不好或油液液面过低, 空气会以气泡形式混入油液, 气泡直径可达0.1-5mm; 系统压力变化时, 溶解在油液中的空气会析出形成气泡, 液压系统的减压阀、溢流阀等元件处因压力突变易产生气泡。

3 机械油污染控制方法

3.1 过滤技术

3.1.1 滤油器的类型

过滤是控制机械油污染常用方法, 通过滤油器截留固体颗粒污染物净化油液。滤油器类型多样, 网式结构简单、通油能力大但过滤精度低, 常用于吸油路保护液压泵; 线隙式过滤精度较高、通油能力大, 适用于压油路过滤中等颗粒污染物; 纸芯式过滤精度高但易堵塞且不能清洗, 常用于精密液压系统; 烧结式过滤精度高、耐高温且能承受高压, 适用于高温高压液压系统。

3.1.2 滤油器的安装位置

吸油路滤油器主要用于保护液压泵, 防止较大的固体颗粒进入泵内, 一般采用低精度滤油器, 如网式滤油器。其安装位置应尽量靠近油箱, 以减少吸油阻力。压油路滤油器用于保护系统中的其他元件, 过滤精度较高, 可根据系统要求选用线隙式、纸芯式或烧结式滤油器。一般安装在泵的出口压力管路上。回油路滤油器可以对整个系统的油液进行过滤, 但要注意其通油能力应足够大, 以免影响系统的正常回油。通常采用纸芯式滤油器, 安装在油箱回油口处。

3.1.3 过滤精度选择

过滤精度的选择应根据液压系统的要求和元件的耐污染能力来确定。一般来说, 对于普通的液压系统, 过滤精度可选用10-20 μm ; 对于精密的液压系统, 如数控机床液压系统, 过滤精度应选用5 μm 以下^[2]。例如, 在一个高精度的液压伺服系统中, 为了保证系统的控制精度和稳定性, 要求油液的污染度达到NAS1638标准5级, 此时应选用过滤精度为3 μm 的滤油器。

3.2 防污染设计

3.2.1 合理设计油箱结构

油箱应具有足够的容积,以保证油液的散热和沉淀污染物的时间。一般来说,油箱的有效容积应为液压泵额定流量的3-7倍。同时,油箱应设置隔板,将吸油区和回油区分开,减少油液的搅拌和气泡的产生。隔板高度一般为油箱高度的2/3-3/4。此外,油箱还应设置排污口和液位计,方便定期排污和观察油液液位。排污口应设置在油箱底部最低处,以便彻底排出沉淀的污染物。

3.2.2 选用合适的密封件

密封件的质量直接影响系统的密封性能,应选用耐油、耐磨、耐高温的密封件,如丁腈橡胶、氟橡胶等。并正确安装,防止密封件损坏导致污染物进入系统。例如,在安装O形密封圈时,应保证其压缩量适中,一般为15%-30%,过大会导致密封件过早损坏,过小则会影响密封效果。

3.2.3 优化管路设计

管路材质选择需综合系统压力、温度和油液类型等因素。高压系统通常选无缝钢管,压力可达32MPa以上;中低压系统可选紫铜管或橡胶软管,紫铜管柔韧耐腐蚀,橡胶软管便于安装布置,但要注意其耐压和耐油性。如16MPa液压系统用橡胶软管,额定压力须不低于20MPa且与机械油相容。管路安装要牢固,避免振动松动。固定时用合适管夹,管径25mm以下,管夹间距1-1.5m;管径25-50mm,间距1.5-2m。同时避免管路接触尖锐物体,防止破损泄漏和污染。

3.3 运行维护管理

3.3.1 定期检测油液污染度

采用专业的油液检测设备,如颗粒计数器、污染度检测仪等,定期对油液的污染度进行检测。按照NAS1638或ISO4406等标准对油液的污染度进行分级评定。例如,对于一般的工业液压系统,建议每3-6个月检测一次油液污染度;对于关键的精密液压系统,检测周期可缩短至1-3个月。当检测到油液污染度超过系统允许的范围时,应及时采取过滤或更换油液等措施。

3.3.2 定期更换滤油器滤芯

根据滤油器的使用说明书和实际运行情况,定期更换滤芯。一般来说,网式滤油器滤芯的更换周期可根据其堵塞情况进行判断,当发现滤芯表面堵塞严重或压差超过规定值时,应及时更换;线隙式、纸芯式和烧结式滤油器滤芯通常有明确的使用寿命,如纸芯式滤芯一般使用500-1000工作小时后需更换^[3]。在更换滤芯时,要注意选择与原滤芯规格型号相同的产品,并确保安装正确,防止泄漏。

3.3.3 控制油液温度

油液温度过高会加速油液的氧化变质,降低油液的性能,同时也会促进污染物的生成和扩散。因此,要合理设计液压系统的散热装置,如散热器、冷却风扇等,并控制油液的工作温度在合适的范围内。一般来说,液压系统的工作温度宜控制在30-60℃之间。当油液温度超过60℃时,应采取散热措施,如加大散热器的散热面积、提高冷却风扇的转速等;当油液温度低于30℃时,应采取预热措施,如安装加热器等,以保证油液具有良好的流动性和润滑性能。

3.3.4 规范操作和维护人员行为

操作和维护人员要经过专业培训,熟悉液压系统的工作原理和操作规程。在操作过程中,要避免粗暴操作,防止系统产生冲击和振动,导致元件损坏和污染物进入。在进行系统维护和检修时,要严格遵守清洁操作规范,如穿戴干净的工作服、手套,使用干净的工具和容器等,防止将外界污染物带入系统。例如,在更换液压元件时,应先将元件清洗干净,并在干净的环境中进行安装,避免灰尘和杂质进入系统。

4 机械油寿命预测方法

4.1 基于理化指标的寿命预测

4.1.1 常用理化指标

酸值:反映油液中酸性物质含量及氧化程度。使用中酸性物质增多,酸值升高,超限会降低润滑和防锈性能,腐蚀元件。工业液压油酸值一般应控制在0.5mgKOH/g以下,超1mgKOH/g应考虑换油。

粘度:直接影响液压系统传动效率和元件润滑效果。使用中因氧化、污染等粘度会变,过大增加压力损失和能耗,过小导致润滑不良、加速磨损。液压油粘度变化范围通常不应超标称粘度 $\pm 15\%$,超出需处理或换油。

水分含量:水分影响油液性能,会导致乳化、氧化变质、腐蚀元件等。一般工业液压油水分应不超0.1%,超此值应采取脱水措施。

4.1.2 寿命预测模型

基于理化指标的寿命预测模型通常采用回归分析、神经网络等方法建立。以回归分析为例,收集不同使用时间下油液的理化指标数据,如酸值、粘度、水分含量等,然后通过回归分析建立理化指标与使用时间之间的数学模型。例如,假设酸值与使用时间呈线性关系,可建立模型 $y = ax + b$,其中 y 为酸值, x 为使用时间, a 和 b 为回归系数。通过最小二乘法确定 a 和 b 的值后,就可以根据当前油液的酸值预测其剩余使用寿命。

4.2 基于性能退化的寿命预测

4.2.1 性能退化指标

泵的容积效率:泵的容积效率是反映泵性能的重要

指标之一，它表示泵实际输出的流量与理论输出流量的比值。随着油液污染和磨损的加剧，泵的内部泄漏会增加，容积效率会逐渐下降。当泵的容积效率下降到一定程度时，泵的性能将无法满足系统要求，需要进行维修或更换^[4]。一般来说，当齿轮泵的容积效率下降到75%以下，叶片泵和柱塞泵的容积效率下降到80%以下时，应考虑对泵进行检修或更换油液。

阀的响应时间：阀的响应时间是衡量阀性能的关键指标，它反映了阀对控制信号的反应速度。在油液污染和元件磨损的影响下，阀的运动部件会受到阻碍，导致响应时间延长。当阀的响应时间超过规定值的20%时，可能会影响系统的正常工作，需要对油液进行处理或更换。

4.2.2 寿命预测方法

基于性能退化的寿命预测方法通常采用状态监测和故障诊断技术，通过对系统性能参数的实时监测和分析，预测油液的剩余使用寿命。例如，采用传感器实时监测泵的流量和压力，计算出泵的容积效率，并绘制容积效率随时间的变化曲线。根据曲线的趋势和预设的阈值，预测泵的剩余使用寿命，进而推断油液的剩余使用寿命。同时，结合其他性能退化指标，如阀的响应时间等，进行综合分析，提高寿命预测的准确性。

4.3 案例分析

4.3.1 案例背景

某工程机械液压系统，使用L-HM46抗磨液压油，系统工作压力为20MPa，工作温度为40-60℃。在系统运行过程中，定期对油液进行检测和性能监测。

4.3.2 数据采集与分析

理化指标数据：每隔3个月对油液的酸值、粘度和水分含量进行检测，检测结果如下表1所示：

表1 油液的酸值、粘度和水分含量检测表

检测时间 (月)	酸值 (mgKOH/g)	粘度 (mm ² /s)	水分含量 (%)
0	0.2	46.5	0.05
3	0.3	46.2	0.07
6	0.4	45.8	0.09
9	0.6	45.0	0.12
12	0.8	44.2	0.15

性能退化数据：每隔1个月对泵的容积效率和阀的响应时间进行监测，监测结果如下表2所示：

表2 泵的容积效率和阀的响应时间监测表

监测时间 (月)	泵的容积效率 (%)	阀的响应时间 (ms)
0	92	15
1	91	16
2	90	17
3	89	18

续表：

监测时间 (月)	泵的容积效率 (%)	阀的响应时间 (ms)
4	88	19
5	87	20
6	86	21
7	85	22
8	84	23
9	83	24
10	82	25
11	81	26
12	80	27

4.3.3 寿命预测结果

基于理化指标的预测：以酸值为例，采用回归分析建立酸值与使用时间的模型 $y = 0.06x + 0.2$ ，当酸值达到1mgKOH/g时，解方程可得 $x \approx 13.3$ 个月，即预计油液在13.3个月时酸值超标。同理，对粘度和水分含量进行分析，综合考虑三个指标，预测油液的剩余使用寿命约为12个月。

基于性能退化的预测：当泵的容积效率下降到80%时，从监测数据可知，此时使用时间为12个月；当阀的响应时间超过规定值（假设规定值为20ms）的20%即24ms时，使用时间为9个月。综合考虑泵和阀的性能退化情况，预测油液的剩余使用寿命约为10个月。

综合两种预测方法的结果，并考虑一定的安全系数，确定该液压系统油液的更换周期为10个月。

结语

机械油在液压系统中的污染控制与寿命预测是保障液压系统可靠运行和延长使用寿命的关键环节。本文详细分析了液压系统中机械油污染的来源与危害，介绍了多种污染控制方法，包括过滤技术、防污染设计和运行维护管理等，并阐述了基于理化指标和性能退化的寿命预测方法，通过实际案例验证了方法的可行性。同时，对机械油污染控制与寿命预测的发展趋势进行了展望。在实际应用中，应根据液压系统的具体要求，综合运用各种污染控制方法和寿命预测技术，加强油液的管理和维护，以提高液压系统的可靠性和使用寿命，降低运行成本。

参考文献

[1]姜鹏.工程机械液压油污染分析[J].露天采矿技术,2022,37(02):110-112.
[2]钟建.工程机械液压油污染原因及控制措施探析[J].中国机械,2024,(05):94-97.
[3]闫志勇,王建虎,魏傲,等.污染状态下液压油抗磨损性能分析[J].润滑与密封,2025,50(02):178-184.
[4]刘卜瑜.影响液压油寿命的外在因素[J].化工管理,2020,(19):79-80.