

液压泵污染寿命预测技术研究

Study of the Contaminant Life Prediction for the Hydraulic Pump

李昆 高亚奎 刘红 / 中航工业第一飞机设计研究院

摘要: 利用污染敏感度建模理论, 建立液压泵污染敏感度分析模型, 采用污染敏感系数来描述液压泵的污染耐受程度, 结合实际情况推导得到液压泵的污染寿命预测公式, 并对某型定量液压泵进行了寿命预测, 绘制出液压泵污染耐受曲线, 为液压泵的设计和系统构建提供了有效的依据。

关键词: 液压泵; 污染敏感系数; 寿命预测; 污染耐受曲线; 污染敏感度试验

Keywords: hydraulic pump; contaminant sensitivity coefficient; life prediction; contaminant tolerance curve; contaminant sensitivity test

0 引言

液压系统工作寿命的长短, 直接关系到系统在整个使用周期内的使用成本和维护强度, 因此, 如何在设计之初对系统的设计寿命进行有效预测和评估, 进而在附件制造、系统集成过程中体现系统的可靠性、维修性等指标, 就成为工程中遇到的实际问题。本文利用污染敏感度建模理论, 建立基于流量衰减的液压泵污染敏感度分析模型, 结合实际使用情况, 通过理论推导得到液压泵污染寿命预测模型, 并针对某台液压泵污染加速试验所得数据, 对其工作寿命进行预测分析。

1 液压泵污染敏感度建模

液压泵污染敏感度理论的基础是, 当一定量的污染颗粒流过液压泵时, 液压泵就丧失一定的流量输出能力, 即可以用液压泵的污染敏感系数(S_j)来描述单个污染颗粒所造成的泵

流量衰减能力, 因此, 液压泵输出流量的衰减量就等于所有颗粒尺寸区间上的污染颗粒流量与液压泵相对于所有尺寸区间中颗粒污染敏感系数的乘积之和。

上述理论可表示为

$$\frac{dQ_j(t)}{dt} = -S_j Q_j(t) n_j(t) \quad (1)$$

式中, j 表示颗粒尺寸区间为 j 的污染颗粒数; $Q_j(t)$ 为过流流量; $n_j(t)$ 为尺寸区间 j 中的颗粒浓度; “-” 表示的是性能的衰减。

实际上, 各尺寸区间中的颗粒污染浓度是不断变化的, 原因在于, 当具有磨损能力的颗粒污染进入液压泵之后, 颗粒在通过液压泵内部的运动副间隙时, 一方面引起液压泵运动表面产生磨损, 另一方面颗粒本身也由于工作表面的相对运动而重新被破碎为更细小的颗粒, 当这些被重新破碎的颗粒的直径小到一定程度后, 这些颗粒就失去了对

运动表面产生磨损的能力。国外的研究表明: 能对元件产生磨损的污染颗粒浓度随时间成指数关系变化, 其变化曲线如图1所示。

用数学方程对图1所示的浓度变化关系进行描述, 得到:

$$n_j(t) = n_{0,j} e^{-t/\tau_j} \quad (2)$$

式中, $n_{0,j}$ 为初始颗粒浓度, $n_{0,j} = N_j(t) - N_{j+1}(t)$; $n_j(t)$ 为 t 时间段后的污染浓度; τ_j 为颗粒磨灭时间常数, 一般为颗粒浓度降低到初始浓度的37%所用的时间, 通过对大量液压泵进行的统计分析表明, 颗粒磨灭时间常数一般为9分钟。

由式(2)可知, 在确定区间 j 中的

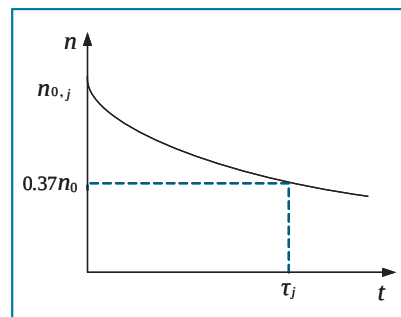


图1 磨损性颗粒浓度变化

* 航空基金 (2008ZC03005) 项目资助

污染颗粒浓度 $n_{0,j}$ 时,需要首先确定 $N_j(t)$ 和 $N_{j+1}(t)$ 。在液压系统中,一般使用对数曲线来描述颗粒的累积污染浓度,用数学方程描述对数曲线为:

$$\log(N_D) = A + B(\log(D))^2 \quad (3)$$

式中, N_D 为单位容积内颗粒尺寸大于 D 的数量。

对式(3)进行变换,得到:

$$N_D = 10^{A+B(\log(D))^2} \quad (4)$$

分别使用空气滤清器对试验粉尘(ACFTD)和粗试验粉尘(ACCTD)进行试验,并在对数坐标中绘制每毫升液压油中特定尺寸的累积颗粒尺寸分布情况,发现不论是ACFTD还是ACCTD试验,其对数曲线都趋近于直线,如图2所示。

因此,常数 A 和 B 可以通过曲线拟合得到。ACFTD粉尘条件下, $A=3.246, B=-1.086$; ACCTD粉尘条件下, $A=2.93286, B=-0.98807$ 。

由上述常数,即可通过式(2)确定特定时间区间 j 中的污染颗粒浓度 $n_j(t)$ 。

将式(2)带入式(1),可得:

$$\frac{dQ_j(t)}{Q_j(t)} = -S_j n_{0,j} e^{-t/\tau_j} dt \quad (5)$$

对式(5)进行 $[0, f]$ 时间区间上的积分,即得:

$$\ln \frac{Q_f(t)}{Q_0(t)} = S_j n_{0,j} \tau_j [e^{-f/\tau_j} - 1] \quad (6)$$

当 $f \rightarrow +\infty$ 时,式(6)可以写为:

$$S_j = \frac{-1}{\tau_j n_{0,j}} \ln \left(\frac{Q_{f,j}}{Q_{0,j}} \right) \quad (7)$$

式中, $Q_{f,j}$ 为泵的实际输出流量; $Q_{0,j}$ 为泵的初始流量。

假设流量的衰减量与油液中所有尺寸大小的污染颗粒有关,即由 $0 \sim 10\mu\text{m}$ 大小的颗粒污染物造成的流量衰减量等于由 $0 \sim 5\mu\text{m}$ 颗粒污染物和 $5 \sim 10\mu\text{m}$ 颗粒污染物造成的流量衰减的总和。基于以上假设和式(7),各种不同尺寸污染颗粒的污染敏感系数 S_j 可由 $0 \sim 5\mu\text{m}$ 大小的颗粒污染系数 S_1 导出。

$$S_1 = \frac{-1}{\tau_j n_{0,j}} \ln \left(\frac{Q_{f,1}}{Q_{0,1}} \right) \quad (8)$$

而对于更大一点的颗粒区间,其污染敏感系数计算公式为:

$$S_j = \frac{-1}{\tau_j n_{0,j}} \ln \left[\frac{Q_{f,j}}{Q_{0,1}} - \sum_{j=1}^{j-1} (e^{-S_j n_{0,j} \tau_j} - 1) \right] \quad (9)$$

2 液压泵污染寿命预测模型

液压泵污染寿命是指泵在特定污染等级条件下的工作寿命。在液压泵的实际工作条件下,一方面,由于环境和系统不断摄入和产生污染物,使得系统内的污染浓度不断增加;另一方面,液压系统中设置的油滤又逐渐降低油液的污染浓度。在这两方面的共同作用下,液压泵实际的颗粒污染浓度基本处于一个稳定状态。综上所述,可确定在实际工作条件下,系统油液污染浓度为一定值,即:

$$n_j(t) = n_{f,j} \quad (10)$$

而液压泵的输出流量从初始流量衰减至最低允许流量所经历的时间,就为液压泵的污染使用寿命,流量的衰减量等于所有污染颗粒区间中,颗粒对流量产生衰减的总和,即:

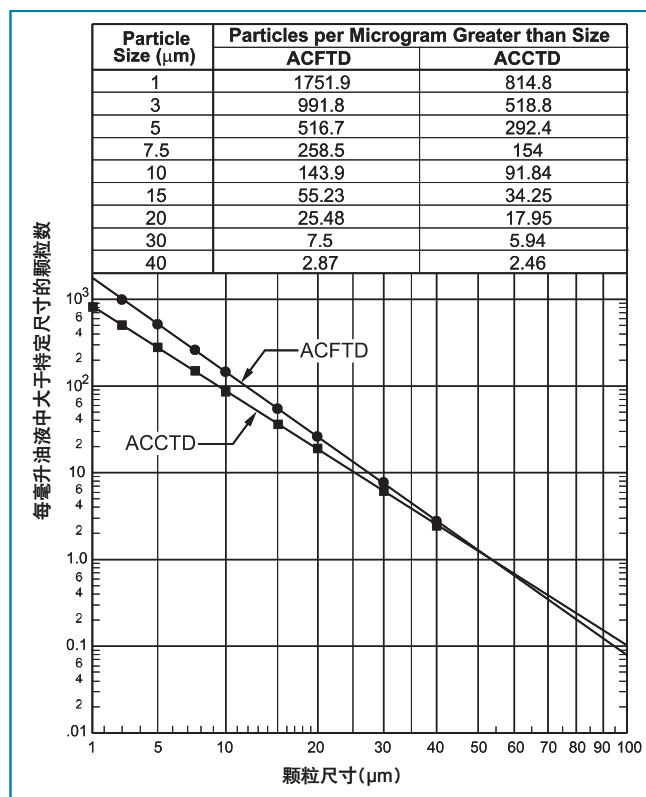


图2 ACFTD和ACCTD粉尘对数坐标曲线

$$Q(t+dt) - Q(t) = - \sum_{j=1}^{j_{\max}} [(N_j(t) - N_{j+1}(t))Q(t)dt] S_j \quad (11)$$

将式(11)写为微分形式,得:

$$\begin{aligned} Q(t+dt) &= Q(t) - \sum_{j=1}^{j_{\max}} n_{f,j} Q(t) S_j dt \\ \Rightarrow \frac{1}{Q(t)} dQ &= \sum_{j=1}^{j_{\max}} n_{f,j} S_j dt \end{aligned} \quad (12)$$

对式(12)两端进行时间0~T的积分:

$$\begin{aligned} \int_{Q_0}^{Q_T} \frac{1}{Q(t)} dQ &= - \int_0^T \sum_{j=1}^{j_{\max}} n_{f,j} S_j dt \\ \Rightarrow \ln \frac{Q_T}{Q_0} &= -T \sum_{j=1}^{j_{\max}} n_{f,j} S_j \end{aligned}$$

最终得到液压泵污染寿命预测公式为:

$$T = \frac{-\ln(Q_T / Q_0)}{\sum_{j=1}^{j_{\max}} S_j n_{f,j}} \quad (13)$$

基于以上要求,设计了液压泵污染敏感度试验台架的原理图,如图3所示。

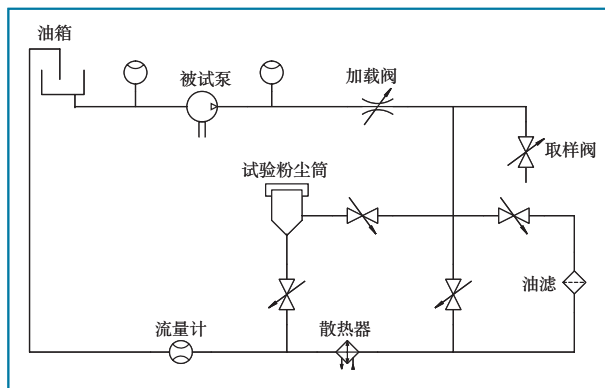


图3 定量泵污染敏感度试验台架原理图

表1 定量泵污染敏感度试验数据

颗粒尺寸范围 (μm)	初始流量 (L/min)	最终流量 (L/min)	流量 衰减比
0~5	100	100	1
0~10	100	100	1
0~20	100	98.90	0.988
0~30	98.90	91.19	0.911
0~40	91.19	79.28	0.792
0~50	79.28	53.05	0.530

表2 液压泵污染敏感系数

颗粒尺寸范围(μm)	污染敏感系数 S_j
0~5	$3.1023\text{e}-13$
5~10	$1.3481\text{e}-12$
10~20	$3.6540\text{e}-11$
20~30	$4.8289\text{e}-10$
30~40	$2.9257\text{e}-9$
40~50	$1.1673\text{e}-8$
50~60	$3.6125\text{e}-8$
60~70	$9.4598\text{e}-8$
70~80	$2.2077\text{e}-7$

表3 每毫升油液中的颗粒分布

颗粒尺寸范围 (μm)	6级油液	7级油液	8级油液
1	538.84	1077.68	2155.36
5	187.98	375.97	751.93
15	27.33	54.66	109.32
25	7.98	15.96	31.93
50	1.07	2.14	4.28
100	0.09	0.19	0.39

3 定量泵污染敏感度试验

通过上面的理论分析,得到了能够用于预测液压泵污染寿命的计算公式,但在实际使用上述公式时, $n_{f,j}$ 、 Q_0 和 Q_T 等参数需要进行实际试验测定。因此,需要设计专门的液压泵污染敏感度试验,用以确定实际泵对于颗粒污染的敏感程度。

目前,在进行污染敏感度试验时,一般用标准的AC(ACFTD)试验粉尘或MTD试验粉尘代替实际系统中的颗粒污染成分。

针对定量泵的工作特点,设计了专门试验台架和试验程序,试验台架的要求如下。

1) 将环境侵入系统的污染物和台架自身生成的污染物控制在最少;

2) 能够不断向试验台架注入标准污染试验粉尘,且注入系统的粉尘量能够量化,保证在各级污染粉尘注入后,系统油液的污染浓度达到300mg/L;

3) 台架中使用的油液总量是限定的并受控;

4) 试验系统自身对污染有足够的耐受性,以保证污染试验的顺利实施;

5) 试验系统必须具备对污染进行控制的元件,以保证系统内的污染状况可控,不发散。

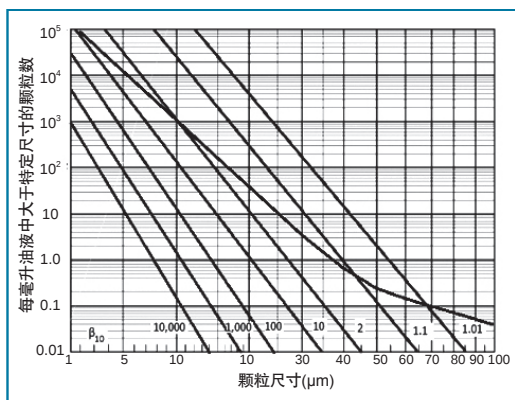


图4 1000小时寿命条件下的污染耐受度曲线

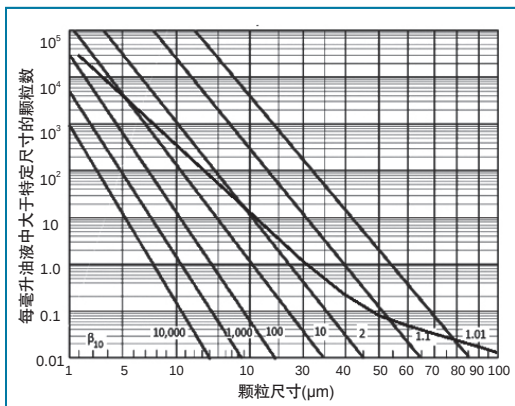


图5 2000小时寿命条件下的污染耐受度曲线

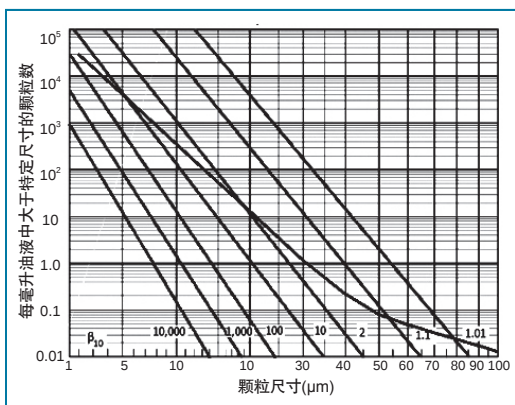


图6 3000小时寿命条件下的污染耐受度曲线

4 某型液压泵污染寿命预测

对某型定排量液压泵进行污染敏感度试验,在分别加入 $0 \sim 5\mu\text{m}$ 、 $0 \sim 10\mu\text{m}$ 、 $0 \sim 20\mu\text{m}$ 、 $0 \sim 30\mu\text{m}$ 、 $0 \sim 40\mu\text{m}$ 、 $0 \sim 50\mu\text{m}$ 、 $0 \sim 60\mu\text{m}$ 、 $0 \sim 70\mu\text{m}$ 、 $0 \sim 80\mu\text{m}$ 的标准AC试验粉尘后,分别测量液压泵的输出流量,并计算出在各级粉尘

条件下的流量衰减比,试验数据如表1所示。

根据污染敏感度试验结果和式(8)、式(9),计算液压泵对于各级污染粉尘的污染敏感系数,如表2所示。

根据式(4),分别计算液压泵在GJB 420B-6级、7级、8级工作条件下,油液中对应的各尺寸的颗粒数,如表3所示。

根据式(11),分别计算出液压泵工作在6级、7级和8级油液条件下的工作寿命分别为:6级油液,污染寿命为226.37小时;7级油液,污染寿命为113.18小时;8级油液,污染寿命为56.59小时。

设液压泵工作在6级油液条件下,分别绘制出液压泵工作寿命为1000小时、2000小时、3000小时的污染耐受度曲线,如图4、图5、图6所示。

由图4、图5、图6可知,在6级油液条件下,希望液压泵的工作寿命分别为1000小时、2000小时和3000小时,需要分别使用 β_{10} 为10、25、75的油滤对油液进行污染控制,否则液压泵的工作寿命将不能满足要求。

5 结论

通过污染敏感度理论,建立液压泵的污染敏感度方程,利用污染敏感系数对液压泵的污染耐受性进行了描述,进而通过试验数据计算获得实际液压泵的污染敏感系数。通过对液压泵的污染敏感度试验,有效地对液压泵在各种污染等级条件下的工作寿命和污染耐受性进行了定量的分析,更加便于对液压泵的优化设计和可靠性分析,并能够为系统油滤的选择提供指导性依据。

参考文献

- [1] E.C.Fitch, I.T.Hong. HyDraulic system design for service assurance BarDyne, Inc.
- [2] E.C.Fitch. Fluid contamination control. FES, Inc.
- [3] E.C.Fitch. A new theory for the contamination sensitivity of fluid power pumps. Paper No.P72-CC-6. Basic power research program. OSU, 1972.
- [4] OSU-P-C4. Accelerated lift test pump contamination sensitivity sure compensated. BarDyne, Inc.
- [5] The Accelerated Lift Test for Hydraulic Pump. BarDyne, Inc.
- [6] MIL-STD-19692. General specification for pressure compensate pump.
- [7] 夏志新. 液压系统污染控制. 机械工业出版社, 1992.
- [8] GJB 420A-96. 飞机液压用油液固体污染度分级.
- [9] 郭辉, 王平军. 飞机液压系统固体颗粒污染分析与控制. 机床与液压, 2007(1).
- [10] 冯雷星, 杨钰, 卢大鹏. 飞机液压系统污染控制理论研究. 液压与气动, 2007(1).
- [11] 刘振岗, 王占勇, 唐有才, 孙敬. 飞机液压系统污染的分析与控制. 航空科学技术, 2005(4).

作者简介: 李昆, 工程师, 主要研究方向为液压系统设计与仿真。

高亚奎, 研究员, 主要研究方向为液压系统设计。

刘红, 研究员, 主要研究方向为液压系统设计。

AST