

轴向柱塞泵可靠性测定试验回路设计与可靠性分析

吕洪磊

北京天玛智控科技股份有限公司, 北京

收稿日期: 2024年5月28日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月28日

摘要

本研究致力于轴向柱塞泵可靠性的评估, 通过设计功率回收型试验回路, 实现能耗与成本的有效降低, 同时保障试验的准确性。通过收集泵的流量、压力、温度等关键性能参数, 并采用威布尔分布参数估计法进行数据深入分析, 本文旨在量化评估轴向柱塞泵的可靠性及预测其失效率。研究发现, 经优化设计的试验回路能够有效模拟泵在实际工作条件下的运行状态, 威布尔分布方法对泵的可靠性预测显示出高度的准确性。研究还探讨了轴向柱塞泵的两大大非常识性失效模式: 密封失效和控制系统故障, 并提出了相应的预防措施及改进方案。本研究成果对于提高轴向柱塞泵设计与运行的可靠性具有重要价值, 为液压系统设计与维护提供了重要参考, 有助于推动液压技术的进一步发展与应用。

关键词

轴向柱塞泵, 回路设计, 可靠性试验, 可靠性分析

Design and Reliability Analysis of Axial Piston Pump Reliability Test Loop

Honglei Lv

Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co. Ltd., Beijing

Received: May 28th, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jun. 28th, 2024

Abstract

This research is devoted to the reliability evaluation of axial piston pump, through the design of power recovery test loop, to achieve the effective reduction of energy consumption and cost, while ensuring the accuracy of the test. By collecting the key performance parameters of the pump such

as flow, pressure and temperature, and using Weibull distributed parameter estimation method for in-depth data analysis, this paper aims to quantify the reliability of the axial piston pump and predict its failure rate. It is found that the optimized design of the test circuit can effectively simulate the running state of the pump under the actual working conditions, and the Weibull distribution method shows high accuracy in the reliability prediction of the pump. The paper also discusses the two non-common failure modes of axial piston pump: seal failure and control system failure, and puts forward the corresponding preventive measures and improvement schemes. The research results are of great value for improving the reliability of the design and operation of the axial piston pump, and provide an important reference for the design and maintenance of the hydraulic system, which is conducive to the further development and application of hydraulic technology.

Keywords

Axial Piston Pump, Loop Design, Reliability Test, Reliability Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 液压传动与控制技术取得了显著进展, 其核心成就体现在提高系统效率、节能减排、智能化操作, 以及推动环保与可持续发展等方面。研究者通过优化泵与马达设计、探索高效能液压流体以及采用新型材料制作液压元件, 显著提升了系统的性能与可靠性。同时, 智能控制系统和物联网技术的应用, 为液压系统提供了精准控制和远程监控能力, 极大地增强了系统的智能化水平。此外, 开发环保型液压油和低噪音液压系统等努力, 反映了液压技术朝着环保和可持续发展的方向迈进。集成化和模块化设计的采纳, 简化了系统设计与安装, 提高了系统的适应性和灵活性[1]。这些创新不仅推动了液压技术在工程机械、自动化制造、航空航天等领域的应用, 也为未来的研究和应用开辟了新的路径。液压传动与控制技术的这些优势, 使其在推动国家经济发展、提高人民生活水平、助力国家现代化进程中发挥了重要作用。

(一) 研究内容

在本研究中, 对轴向柱塞泵的可靠性进行了深入探讨, 重点分析了其在长期运作中的性能稳定性。通过构建一套综合性的试验回路, 本研究不仅模拟了轴向柱塞泵在实际工况下的运行状态, 而且对其关键性能指标进行了精确测定, 包括流量、压力、温度等。这些测量数据为评估轴向柱塞泵的工作效率、能量消耗以及耐用性提供了全面的信息。

此外, 本研究采用威布尔分布参数估计法对收集到的数据进行了详细分析, 旨在预测轴向柱塞泵的失效率并对其可靠性进行量化评价。该统计方法不仅有助于揭示轴向柱塞泵在长期使用过程中可能出现的缺陷, 也为泵的设计优化提供了科学依据。通过案例分析, 进一步验证了威布尔分布参数估计法在轴向柱塞泵可靠性评估中的适用性与准确性。

(二) 研究方法

在本项研究中, 旨在全面评估轴向柱塞泵的可靠性, 采纳了一种多阶段的研究方法, 确保了对泵性能深入的探讨与分析。研究方法的核心包括设计实施可靠性试验回路、系统性数据收集与处理, 以及应

用高级统计分析技术。

首先，基于对轴向柱塞泵工作原理和应用需求的深入理解，设计了一个包含功率回收技术的可靠性试验回路。该试验回路旨在模拟泵在实际工况下的运行状态，并能够准确地测量流量、压力、温度等关键性能参数。试验回路的设计充分考虑了能效和成本效益，通过集成高精度的电磁溢流阀、流量计、压力传感器和温度传感器，为后续的数据分析提供了可靠的数据来源。

随后，通过自动化数据采集系统对轴向柱塞泵的性能参数进行了全面收集，包括泵的流量、压力、温度和功耗等。为了提高数据质量，采取了数据预处理措施，如去噪、平滑和归一化，确保了数据的准确性和一致性。

最终，应用高级统计分析方法，特别是威布尔分布参数估计，对收集到的数据进行了深入分析。这种方法不仅允许我们预测轴向柱塞泵的失效概率，还能量化其可靠性，为泵的设计优化和性能改进提供了科学依据。

2. 轴向柱塞泵可靠性试验回路设计

轴向柱塞泵的可靠性试验回路设计与其它类型的回路设计并没有什么本质上的区别，它都是根据回路所需满足的要求，合理选用各种液压元件，并将其组合成回路，使其能够达到所需回路要求。下文将对所设计的轴向柱塞泵可靠性回路进行介绍。

(一) 试验回路简介

如图 1 所示，电动机 8 与扭矩转速仪 6 连接，扭矩转速仪再通过联轴器 5 与被试轴向柱塞泵 4 连接，被试轴向柱塞泵进油口直接与油箱相连，出油口直接与液压马达 10 相连，其泄漏油口也与油箱相连并在管路上安装有流量计 1、温度传感器 2、压力传感器 3。液压马达进油口通过电磁溢流阀 13 与流量计 15 同油箱相连，并在其相连的管路上安装有压力传感器 11 和温度传感器 12。电磁溢流阀 13 与远程调压阀 14 相连接。

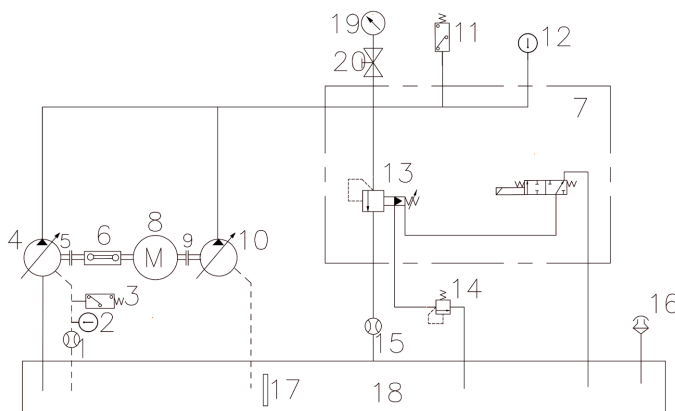


Figure 1. Experimental circuit diagram

图 1. 实验回路图

(二) 试验回路原理介绍

轴向柱塞泵的可靠性寿命试验能耗大、耗时长，为降低成本，本试验回路以功率回收为起点进行回路设计，而功率回收方式有许多种，此设计回路则采用的是机械补偿式功率回收。电动机与扭矩转速仪相连，再通过联轴器与被试轴向柱塞泵相连，以此带动被试轴向柱塞泵工作，扭矩转速仪用于测量电动机输出的扭矩、转速以此获得电动机所输出的功率，联轴器则起到将电动机输出的扭矩传递给被试轴向

柱塞泵的作用。被试轴向柱塞泵的泄漏油口管路上的流量计、温度传感器、压力传感器分别测量泄漏油液的流量、温度、压力。液压马达作为被试轴向柱塞泵的负载，模拟被试泵的工作情况，同时液压马达通过联轴器与电动机相连，在试验时，通过被试泵输出油液驱动，进而驱动电动机，以此达到功率回收，降低能耗。而在液压马达的进油口通过电磁溢流阀与流量计与油箱相连，电磁溢流阀可控制整个回路的压力，保护回路，防止超压造成试验回路损坏，并且可以实现被试泵空载运行的工况模拟，在此管路上的流量计则用于测量溢流油液的流量，而与溢流阀先导油口相连的远程调压阀则起到调节溢流阀溢流压力的作用。

3. 试验回路元件选型

选定 2.5MCY14-1B 型号轴向柱塞泵为被试轴向柱塞泵，其技术规格为：排量：2.5 mL/r；压力：31.5 MPa；转速：1500 r/min；容积效率：92%以上。并以此为基准，进行元件选型。

(一) 电动机的选型

液压泵作为整个液压系统的动力源，将油液吸入液压回路并使其产生压力能，以此使整个液压系统正常工作，而液压泵能够正常工作则依靠的是电动机的带动。电动机通过联轴器与液压泵连接，通过转速与扭矩的传递实现功率的传递，将电能转化为液压系统中的压力能。而为了使被试轴向柱塞泵能够做到额定工况，则需要电动机传递足够的功率[2]。电动机的功率可以通过以下公式计算：

$$P \geq \frac{P'Q}{60} \quad (1)$$

其中 P 为电机功率， P' 为系统最大工作压力， Q 为系统流量。

而系统流量通过以下公式计算：

$$Q = \frac{V \cdot n}{1000} \quad (2)$$

其中 V 为排量， n 为转速。

而由于本试验电动机除了需要通过联轴器带动被试轴向柱塞泵以外，还需要通过联轴器与液压马达连接，使被试轴向柱塞泵在带动液压马达时，液压马达能够将功率传递给电动机，以此实现功率回收，因此电动机需要是双出杆，最后选定电动机型号为 Y2-112M-4P-B35-4KW。

(二) 液压马达的选型

液压马达时液压系统中转动输出能量的执行机构，在本试验回路中作为被试轴向柱塞泵的负载，由被试泵驱动，再通过联轴器与电动机相连，以此驱动电动机，实现功率回收。则液压马达的选型需要根据液压系统回路最大压力不能高于其额定压力，被试轴向柱塞泵所输出的流量也不得高于其额定流量，而电动机作为液压马达的负载对液压马达也存在约束，液压马达传递给电动机的转速以及扭矩不得超出电动机的额定范围，但由于整个系统有电动机带动，功率在传递过程中一定会存在损失，故液压马达只需满足液压泵所传递流量小于其额定流量，以及系统压力在其额定压力范围内即可，故最终选择液压马达型号为 BMR-1。

(三) 液压阀的选型

液压阀的种类有许多种，根据其所实现的功能作用分为三大类：压力控制阀、流量控制阀、方向控制阀。压力控制阀用于控制液压系统工作压力；流量控制阀用于控制液压系统的液流量；方向控制阀用于控制液压系统中油液的流向。本设计回路中需要电磁溢流阀和远程调压阀，电磁溢流阀的实质是先导式溢流阀与电磁换向阀的组合，其中电磁换向阀的选用是根据所需实现的换向需求，系统压力以及通过的流量进行选型。而先导式溢流阀的选用是根据系统中液压泵的最大流量决定其流量，根据系统的实际

控制压力决定其最大控制压力，故选定电磁溢流阀型号为 DBW10B-1-5X-315-6EG24N9K4。远程调压阀的实质是溢流阀，其进油口连接先导式溢流阀的遥控油口，用于调节溢流压力，故选定远程调压阀的型号为 DBDS6K-1X-315。

(四) 油箱设计

液压传动是依靠流体介质来传递功率的，每个液压系统都需要这样的流体介质，而油箱则起到了存储这样的流体介质的作用。由于油箱的作用是存储油液，则油箱必须能够盛放系统中的所有油液。除了存储油液外，油箱还需起到散热的作用。液压系统在工作时避免不了存在功率损失，损失的功率很大一部分以热量的形式输出，致使油液的温度升高，绝大多数油液都会经管路回到油箱，这就要求油箱有足够的大小，以通过增大散热面积来帮助油液散热降温。并且油箱还能起到沉淀污染物的作用，油液在经过系统回路后，或多或少会产生污染，而当回到油箱后，污染物随重力的影响会沉降到油箱的底部，以达到净化油液的效果。而在一些中小型设备中，通常会将泵和阀等装置直接安装在油箱顶，则油箱必须足够牢固以支持这些元件。

油箱的总容量包括油液容量和空气容量。油液容量是指油箱中有也最多是的液体体积。按照经验法则，固定设备用的油箱的油液体积应是系统油泵 3~5 分钟的输油量。则油箱容量可以按照以下公式计算：

$$V = (3 \sim 5)Q \quad (3)$$

其中 Q 为被试轴向柱塞泵的流量。

但为使被试轴向柱塞泵以及液压马达等其它液压元件的安装方便，需进一步增大油箱的容量，最后设计油箱的容量为 140 L。

(五) 散热方式的选择

在液压系统工作时，电能依靠电动机驱动被试轴向柱塞泵转化为油液中的压力能，由于被试泵的效率不可能达到 100%，会不可避免的产生能量损耗，而这损耗的能量很大程度上都是以热量的形式散发出去，这就会导致油液温度升高。其次，液压马达在运行时，溢流阀、换向阀等各类阀在开闭时也会或多或少的产生热量，使油液温度升高。而油液的很多属性都与温度息息相关，特别是粘度，当温度升高时，油液粘度下降，这会导致系统内部泄漏增大，使泵的工作效率降低导致试验的准确性降低；当温度过低时，油液粘度升高，这会导致液压元件摩擦和发热，动作不灵敏，系统内压力损失增大。因此，在进行试验时，需要控制油液的温度在合适的范围，以此来减小油液粘度对试验的影响[3]。

液压系统的散热方式有多种：水冷式散热、空冷式散热、风冷式散热等。水冷式散热是液压系统通过散热器中的冷水来冷却油液，通常适用于大功率、长时间工作的液压系统，可以有效降低油温并保持在恒定的温度范围内；空冷式散热是液压系统通过风扇或自然风来冷却油液；风冷式散热则是采用高速旋转的风扇冷却油液[4]。

液压系统工作时，除去各执行元件输出的有效功率外，其余功率损失全部转化成热量，从而使工作油液的温度升高，则要对液压系统的功率损失进行计算。系统的发热功率按照以下公式计算：

$$P_{hr} = Pr(1 - \eta) \quad (4)$$

其中 P_{hr} 为系统发热功率， Pr 为被试轴向柱塞泵输入功率， η 为系统总效率。

同时，系统自身也会产生散热，当不设冷却器时，液压系统一般通过油箱以及油液管路散热。于是系统存在散热功率按照以下公式计算：

$$P_{hc} = (k_1 A_1 + k_2 A_2) \Delta T \quad (5)$$

其中 P_{hc} 为系统散热功率， k_1 、 k_2 分别为油箱、液压管路的散热系数， A_1 、 A_2 分别为油箱、液压管路的散热面积， ΔT 为液压油温度与周围环境温度的温差。

以上计算更为详细公式可查阅液压技术手册。

因此，通过对比可以得出系统自身的散热功率大于系统的发热功率，故无需增加冷却器。

4. 轴向柱塞泵需关注的特殊失效模式

轴向柱塞泵在使用过程中，尽管以其高可靠性而被广泛应用于多种液压场合，仍然无法完全避免失效问题。其失效模式多样，但在众多失效形式中，有两种非常识性的失效模式值得特别关注：密封失效和控制系统故障。

(一) 密封失效

轴向柱塞泵的密封失效是一种复杂且具有挑战性的问题，其原因并不仅限于常规的磨损或老化。实际上，该问题往往与液压系统内部的多种因素紧密相关。例如，系统压力的不稳定波动可能导致密封组件受到不均匀的力，从而引发微小的裂纹或形变，这种微观损伤最终可能演变为显著的泄漏。此外，液压油的污染，如颗粒杂质的存在，也会加速密封组件的磨损和损坏，进一步增加泄漏的风险。安装误差，如密封装配不当，也是导致早期失效的常见原因。这些因素共同作用下，密封失效可能导致液压油泄漏，不仅会降低泵的工作效率，还可能污染整个液压系统，对环境造成不利影响，并加剧系统其他部件的磨损，最终导致整个系统的性能下降。

(二) 控制系统故障

轴向柱塞泵的控制系统故障同样是一个影响其性能的关键因素，这种故障通常涉及泵的控制和调节相关的元件和电路。故障的原因多样，可能包括电子控制单元的损坏，这会直接影响到泵的运行模式和效率；传感器精度的下降，这可能导致控制系统基于错误的的数据做出调节决策，从而影响系统的正常工作；或者是控制算法与实际工作条件不匹配，导致无法达到预期的控制效果。这些问题都会导致泵无法正确响应负载变化，从而影响系统的稳定性和响应速度。在一些极端情况下，控制系统的严重故障甚至可能导致液压系统的完全失效，使得相关的机械设备无法正常运行，造成严重的生产事故和经济损失。

针对密封失效和控制系统故障这两种非常识性的失效模式，必须采取相应的预防措施和维护策略。对于密封失效，这意味着需要选择合适的密封材料，定期检查和更换损坏的密封，以及保持液压油的清洁和系统压力的稳定。对于控制系统故障，则需要定期进行系统的检查和测试，更新和维护电子控制单元和传感器，以及根据实际工作条件调整控制策略。通过这些措施，可以有效地减少失效发生的风险，提高轴向柱塞泵及整个液压系统的可靠性和工作效率。

5. 轴向柱塞泵可靠性试验数据分析

通过轴向柱塞泵的可靠性试验回路进行试验，在试验结束之后我们能够得到一系列轴向柱塞泵的可靠性数据，但并不能直接通过这些数据得到被试轴向柱塞泵的可靠性结果，而需要对这些数据进行进一步的分析处理，在通过分析处理的数据才能最终得到被试轴向柱塞泵的可靠性高低。本文采用的数据分析处理方法为威布尔分布参数估计，下文将加以介绍并运用威布尔分布参数估计进行案例分析。

(一) 威布尔分布参数估计概要

威布尔分布是概率统计学中常用的分布函数之一，它适用于描述发生时间或生存时间的随机变量。威布尔参数估计时指通过数据统计方法，对威布尔分布的参数进行估计的过程。

如果随机变量 T 的分布函数 $F(t)$ 为：

$$F(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} & t > 0 \end{cases} \quad (6)$$

则称随机变量 T 服从威布尔分布, 其中 $m > 0$, $\eta > 0$, m 为形状参数, η 为刻度参数。

形状参数 m : 在威布尔分布中形状参数是最重要的参数, 它的值决定了密度函数曲线的形状

刻度参数 η : 当 m 固定时, 随着刻度参数的增大, 图像的峰值越低, 图像变得扁平。

威布尔参数估计的目的就是估计这两个参数的值, 以使得威布尔分布能较好地拟合给定的数据。

(二) 案例分析

根据刘登科在工作压力为 33 MPa 通过统计方法得到 HLA4VS 型号 180 mL/r、355 mL/r 排量轴向柱塞泵的相关参数, 并通过蒙特卡洛模拟得到轴向柱塞泵失效数据。

下表 1 和表 2 为模拟可靠性实验数据, 以下表为基础, 对其进行威布尔分布参数估计。以此得到可靠性数据并对其进行线性拟合, 最终可以通过拟合曲线以此得到被试轴向柱塞泵的可靠性参数。

Table 1. Data record table

表 1. 数据记录表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
样本 编号	初始泄漏量(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	20 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	43 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	60 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	80 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	100 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	120 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	140 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	160 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	180 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)	200 万次时(ml/min 21 MPa, 油温 40℃~45℃)
1	12	14	20	22	20	20	36	40	40	30	20
2	16	19	15	19	20	22	43	30	35	30	36
3	18	20	18	24	38	33	93	60	65	48	50
4	28	33	35	37	48	43	68	70	70	65	60
5	15	17	22	27	40	31		50	65	62	60
6	35	38	40	41	38	23	49	40	46	70	44
7	23	25	35	35	48	30	62	55	58	70	52
计数器 数值	2018.7.10	2018.10.31	2018.12.17	2019.2.15	2019.04.11	2019.05.27	2019.07.23	2019.09.04	2019.11.05	2020.01.11	2020.04.11
		60,382	281,096	453,518	653,330	841,482	1,069,326	1,250,106	1,453,826	1,649,956	1,863,628
	153,560 时 更换 计数器										

Table 2. Data analysis table

表 2. 数据分析表

失效序号	失效次数	平均排名	X	Y
1	80	0.094594595	4.382026635	-2.308880127
2	80	0.22972973	4.382026635	-1.343181902
3	80	0.364864865	4.382026635	-0.789839834
4	120	0.5	4.787491743	-0.366512921

续表

5	120	0.635135135	4.787491743	0.00819456
6	120	0.77027027	4.787491743	0.385841654
7	180	0.905405405	5.192956851	0.85787951

6. 结语

本研究通过系统地设计和执行轴向柱塞泵的可靠性试验回路,采集并分析了大量实验数据,进而应用威布尔分布参数估计法对泵的可靠性进行了量化评估。研究结果表明,通过精确控制试验参数和条件,轴向柱塞泵展现了在特定工作条件下的高度可靠性。此外,研究还揭示了泵性能随时间的变化趋势,为预测其长期运行的可靠性提供了重要依据。

通过深入分析轴向柱塞泵的密封失效和控制系统故障两种主要非常识性失效模式,本研究不仅识别了影响泵可靠性的关键因素,还提出了相应的预防措施和改进策略。例如,优化密封设计和采用高质量的液压油可有效降低密封失效的风险,而对控制系统的定期检测和维护则有助于减少控制系统故障的发生。

此外,本研究所采用的威布尔分布参数估计法在轴向柱塞泵可靠性评估中表现出高度的适用性和准确性。通过对实验数据的统计分析,不仅能够准确预测泵的失效概率,还能为泵的设计优化提供科学依据。

综上所述,本研究的发现对于提高轴向柱塞泵的设计和运行可靠性具有重要意义。通过实施针对性的改进措施,可以显著提升泵的性能和寿命,进一步推动液压技术的发展和应用。本研究的成果为液压系统设计和维护提供了宝贵的参考,有助于液压行业更好地满足工程应用的需求。

参考文献

- [1] Yao, C.Y. and Zhao, J.Y. (2005) Reliability-Based Design and Analysis on Hydraulic System for Synthetic Rubber Press. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **18**, 159-162.
<https://doi.org/10.3901/CJME.2005.02.159>
- [2] 张鑫宇,曹明,焦玲,等.一种轴向柱塞泵增速设计及特性分析[J].*液压气动与密封*,2023,43(12):100-105.
- [3] 许昕蕾,黄伟迪,于斌,等.基于倒频谱的轴向柱塞泵松靴故障特征提取[J].*液压与气动*,2023,47(11):1-9.
- [4] 唐宏宾,杨婧,唐一.轴向柱塞泵疲劳损伤分析及寿命预测[J].*机床与液压*,2023,51(16):165-171.