

# Large forging equipment life cycle management and maintenance

Xiuguo Zhang

Shaanxi Hongyuan Aviation Forging Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi, 713801, China

## Abstract

Large forging equipment, as core equipment in the high-end manufacturing sector, directly impacts the quality and cost of industrial production through its reliability and maintenance efficiency. This paper systematically analyzes the fault evolution patterns of large forging equipment during the three stages of break-in, stabilization, and aging, based on the “bathtub curve” theory. By integrating automated control technology, predictive maintenance strategies, and standardized repair processes, a comprehensive lifecycle management system is established, covering design and manufacturing, use and maintenance, and decommissioning and renewal. Case studies have shown that this system can significantly reduce equipment failure rates and extend service life, providing theoretical and practical references for enhancing equipment reliability.

## Keywords

large forging equipment; full life cycle management; bathtub curve; predictive maintenance; standardized maintenance

# 大型锻造设备全生命周期管理与维护

张秀国

陕西宏远航空锻造有限责任公司, 中国·陕西 咸阳 713801

## 摘要

大型锻造设备作为高端制造领域的核心装备,其可靠性与维护效率直接影响工业生产的质量与成本。本文基于“浴盆曲线”理论,系统分析大型锻造设备在磨合、稳定、老化三阶段的故障演化规律,结合自动化控制技术、预测性维护策略及标准化维修流程,构建覆盖设计制造、使用维护、退役更新的全生命周期管理体系。通过案例验证,该体系可显著降低设备故障率、延长服役周期,为提升装备可靠性提供理论与实践参考。

## 关键词

大型锻造设备;全生命周期管理;浴盆曲线;预测性维护;标准化维修

## 1 引言

在航空航天、核电、汽车制造等高端领域,大型锻造设备是实现精密锻件生产的关键装备。例如,6万吨大型模锻压力机可制备航空发动机涡轮盘,其锻造精度(晶粒尺寸 $\leq 5$ 级,直径公差 $\leq \pm 0.5\text{mm}$ )直接决定部件性能;2万吨模锻压力机用于核电压力容器封头成型,精度不足将导致机组安全风险。然而,这类设备集机、电、液于一体,结构复杂且长期承受高频冲击载荷(如锻锤打击力达50~200MN),导致故障诊断难度大、维护成本高。数据显示,国内企业因设备故障导致的非计划停机时间占比达12%,年维护成本占设备原值的15%以上<sup>[1]</sup>。

传统故障后维修模式已难以满足高精度生产需求,亟需构建覆盖设备全生命周期的管理体系。“浴盆曲线”理论

揭示了设备故障率随时间变化的三阶段特征(磨合期、稳定期、老化期),为针对性制定维护策略提供了理论基础。本文结合企业实践,从设计制造、使用维护、退役更新三阶段,探讨全生命周期管理的关键技术与实施路径<sup>[2]</sup>。

## 2 大型锻造设备全生命周期管理理论基础

### 2.1 浴盆曲线与故障演化规律

浴盆曲线(Bathtub Curve)描述了设备从投入到报废的故障率变化趋势,分为三个阶段(图1):

早期失效期(磨合期,0~1年):因安装精度不足(如齿轮箱同轴度误差 $> 0.15\text{mm}$ )、程序逻辑错误或电气接线故障(占比45%),故障率高达1.2次/千小时。典型问题包括PLC参数失配(30%)、传感器初始校准偏差(25%)<sup>[3]</sup>。

偶然失效期(稳定期,1~5年):故障以偶发随机事件为主,如液压密封件老化(年均失效概率8%)、传感器信号干扰(25%)、润滑不足(40%),故障率稳定在0.4次/千小时。

损耗失效期(老化期,5年以上):核心部件疲劳失效加剧,液压系统泄漏(占比40%,泵组磨损、接头裂纹)、

【作者简介】张秀国(1979-),男,中国甘肃民乐人,本科,工程师,从事电气自动化控制研究。

电气触点氧化(25%, PLC 模块、接触器失效)成为主导故障,故障率攀升至 1.8 次/千小时,维护成本较稳定期增加 3 倍<sup>[4]</sup>。

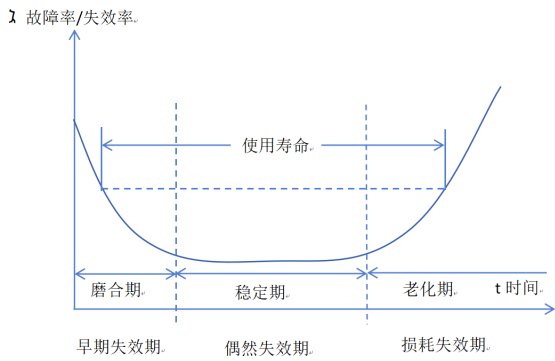


图 1 浴盆曲线

## 2.2 故障影响因素分析

①机械部件疲劳: 锻锤、压力机的高频打击(10~30 次/分钟)导致齿轮、轴承、模具等部件承受交变载荷,疲劳裂纹发生率随使用时间呈指数增长。

②高温环境劣化: 加热炉(1000℃以上)与模具长期高温运行,引发材料蠕变、润滑脂失效,导致传动系统卡滞或模具开裂(裂纹发生率年均增长 15%)<sup>[5]</sup>。

③控制系统失效: PLC 模块在振动环境(加速度 > 2g)下焊点疲劳开裂(5%/年),传感器受电磁干扰(信噪比 < 15dB 时误码率 > 0.1%),导致控制延迟(> 50ms)。

④液压系统泄漏: 密封件(O 型圈、油封)老化、管路振动疲劳是泄漏主因,泄漏量每增加 10%,系统效率下降 5%,油温升高 10℃。

## 3 全生命周期各阶段管理策略

### 3.1 设计与制造阶段: 可靠性强化

#### 3.1.1 冗余设计与容错架构

①关键部件冗余: 对液压泵组采用“2 用 1 备”配置(自动切换时间 < 30ms),控制系统电源模块配备双路 UPS(续航 45 分钟),单点故障导致的停机风险从 15% 降至 5%。

②分布式控制架构: 将集中式 PLC 控制系统升级为分布式 DCS(集散控制系统),每个子系统独立运行并互备,通信中断时可切换至本地控制模式,确保锻造过程不中断。

#### 3.1.2 耐疲劳材料与工艺优化

①材料升级: 曲轴采用 42CrMo 高强度合金(疲劳强度提升 20%),模具表面镀 TiN 涂层(硬度达 2000HV,寿命延长 30%)。②结构优化: 通过有限元分析(FEA)模拟锻造载荷下的应力分布,在齿轮箱薄弱区域增加加强筋(应力集中降低 40%),轴承座采用柔性支撑设计(振动幅值下降 25%)。

#### 3.1.3 数字化仿真与测试

①虚拟调试: 利用 PlantSimulation 软件构建锻造生产线数字孪生模型,模拟坯料加热、锻压成型、物料输送等全流程,提前发现程序逻辑冲突与设备干涉问题,缩短现场调试时间 40%。②可靠性试验: 在出厂前进行 1000 小时连续

加载测试,采集振动、温度、压力数据,建立早期故障数据库,指导设计改进(如某型号压力机磨合期故障率从 1.5 次/千小时降至 1.0 次/千小时)。

### 3.2 使用与维护阶段: 预测性维护体系

#### 3.2.1 多维度状态监测

传感器部署: 在轴承(振动加速度传感器,采样频率 10kHz)、电机(温度传感器,精度 ±1℃)、液压系统(压力传感器,精度 ±1%FS)等位置安装监测点,通过 OPCUA 协议实时上传数据至中控系统,数据延迟 < 50ms。

可视化监控: 开发设备健康监控平台,动态显示各部件状态参数,当液压油温超过 85℃时自动触发冷却泵并降速 30%,响应时间 < 200ms。

#### 3.2.2 预防性维护(PM)与预测性维护(PdM)

①预防性维护计划: 制定“三班点检+每周保养+年度大修”制度,定期更换润滑脂(每 200 小时)、液压滤芯(压差 > 0.35MPa)、密封件(每年)。某锻造分厂实施后,稳定期故障率下降 30%。

#### ②预测性维护技术:

机器学习模型: 采用 LSTM 神经网络训练轴承剩余寿命预测模型,输入振动信号时域、频域特征,提前 2~4 周预警磨损故障,预测准确率达 85%。

设备健康指数(HI): 综合振动、温度、压力等参数,构建  $HI=0.4A+0.3T+0.3P$  (A 为振动幅值, T 为温度, P 为压力偏离度),当  $HI > 0.8$  时触发预警。

#### 3.2.3 故障根源分析(RCA)与知识沉淀

5Why 法应用: 针对模具频繁断裂问题,追溯发现主因为加热炉温控精度不足(±10℃)导致坯料温度不均,锻打载荷超标。通过升级温控系统(精度 ±5℃),同类故障下降 60%。

故障知识库: 收集 1000+ 维修案例,按“故障现象—原因—处理方案”分类存储,支持维修人员快速检索(平均检索时间 < 5 分钟),新故障处理效率提升 50%。

### 3.3 退役与更新阶段: 经济性评估与再制造

#### 3.3.1 剩余寿命(RUL)评估模型

建立 RUL 计算公式:

$$RUL=k \cdot (1+\alpha \cdot t)L_0 \cdot (1-\lambda t/\lambda_0)$$

其中,  $L_0$  为设计寿命(10 年),  $\lambda t$  为当前故障率,  $\lambda_0$  为初始故障率,  $\alpha$  为老化系数(0.08/年),  $k$  为维护水平系数(预防性维护取 1.2,事后维修取 0.8)。当  $RUL < 2$  年且大修成本 > 设备重置价 40% 时,建议设备更新(如传统机械压力机替换为伺服压力机,能耗降低 30%,精度提升 50%)。

#### 3.3.2 再制造与资源化利用

核心部件翻新: 对退役电机进行绕组重绕(效率恢复至 95%),液压阀研磨修复(泄漏量 < 10mL/min),再制造部件寿命可达新品的 80%,成本仅为 50%。

绿色拆解: 采用环保工艺回收润滑油(回收率 > 90%)、金属废料(利用率 > 95%),减少环境污染。

## 4 关键系统标准化维修流程构建

### 4.1 电气与控制系统故障诊断规范

#### 4.1.1 常见故障与处理

常见故障与处理如表1所示。

#### 4.1.2 三级诊断法

一级目视检查：5分钟内发现线缆破损、端子氧化等明显异常，处理耗时≤30分钟。

二级仪表检测：使用万用表测量电压、阻抗，定位短路/断路点，精度±0.1Ω，耗时≤60分钟。

三级程序仿真：通过HMI回放日志，模拟PLC程序运

行，检测逻辑错误，耗时≤90分钟。

### 4.2 液压系统高效维修技术

#### 4.2.1 典型故障处理

压力异常：分段测试泵站（100%额定压力）、阀组（90%）、执行机构（80%），使用精度±1%FS的便携式测试仪，升压速率≤5MN/s，30分钟内定位泄漏或磨损部件。

泄漏检测：采用红外热像仪（精度±2℃）扫描温差>5℃区域，结合肥皂水涂抹法，漏点定位精度±5mm，耗时≤45分钟。

#### 4.2.2 标准化维修步骤

标准化维修步骤如表2所示。

表1 常见故障与处理

故障类型	原因分析	应对措施
传感器误信号	光栅尺污染、编码器干扰	定期清洁（每季度），加装电磁屏蔽罩（屏蔽效能≥30dB），接地电阻<1Ω
PLC程序逻辑错误	互锁缺失、定时器设置不当	模块化编程（功能块封装率≥80%），单步调试定位异常点，建立SVN版本管理
变频器过载	谐波畸变率>15%、散热不足	调整加减速时间(≥6s)，更换高散热风扇（风量≥250CFM），定期清理散热孔（每月）

表2 标准化维修步骤

步骤	内容	技术要点	时间效率
故障确认	分析压力表波动(>±5%)、异常噪声(>85dB)	对比系统原理图，调取24小时日志	≤30分钟
压力测试	分段加压测试，记录压力衰减率(>5%/分钟异常)	测试仪精度±1%FS，升压速率≤5MN/s	≤60分钟
泄漏修复	更换密封件（材质NBR，硬度75±5邵氏A），保压测试（1.5倍工作压力，10分钟泄漏<5mL）	专用工具安装，避免划伤密封面（粗糙度Ra≤1.6μm）	≤120分钟
系统调试	空载/负载试运行，记录压力、响应时间（偏差<3%）	10次空载循环+5次负载循环	≤90分钟

## 5 案例分析：某锻造企业2500吨块锻机维护实践

### 5.1 实施背景

该企业2012年投产的2500吨块锻机，初期磨合期因PLC程序逻辑错误、传感器安装偏差，导致月均故障3次，停机时间达48小时。进入老化期后，液压泵泄漏、接触器触点氧化频繁发生，维护成本年增20%。

### 5.2 全生命周期管理措施

①设计改进：对液压系统增加冗余泵组（2用1备），控制系统电源升级为双路UPS，磨合期故障下降60%。②预测性维护：部署振动、温度传感器，基于LSTM模型预测轴承磨损，提前更换避免非计划停机，稳定期故障频次降至0.2次/月。③标准化维修：实施电气三级诊断法，故障排查时间从4小时缩短至2.5小时；液压系统泄漏修复时间稳定在3.5小时，维护成本降低25%。

### 5.3 实施效果

①设备综合效率(OEE)从65%提升至82%，年产能增加15%；②非计划停机时间下降60%，MTTR（平均修复时间）从4.8小时缩短至2.2小时；③服役周期从设计10年延长至12年，预计节约设备重置成本3000万元。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

①故障演化规律：大型锻造设备故障率随生命周期呈现“浴盆曲线”特征，磨合期以电气与控制故障为主，稳定

期以液压与传感器故障为主，老化期以机械与电气疲劳失效为主。②管理策略有效性：通过设计阶段冗余强化、使用阶段预测性维护、退役阶段经济性评估，可显著降低故障率（稳定期下降30%）、延长服役周期（18%）、降低维护成本（25%）。③标准化价值：电气三级诊断法与液压系统标准化维修流程，将故障排查时间压缩40%，修复效率提升50%，为同类设备维护提供可复制模板。

### 6.2 未来展望

①智能化诊断：融合深度学习（如卷积神经网络）与数字孪生技术，构建多模态故障预测模型，实现故障预测准确率>90%。②物联网应用：通过工业互联网平台集成跨厂区设备数据，建立远程诊断专家系统，实现维修资源跨区域协同调度。③绿色维护技术：研发自润滑密封材料、免维护传感器，推广油液在线净化与余热回收技术，推动锻造设备维护向低碳化转型。

### 参考文献

- 王建国,李志强.锻压设备液压系统可靠性分析[J].机械工程学报,2020,56(5):180-187.
- ISO 13373-1:2021,Mechanicvibration—Condition monitoring of machines—Part 1: General guidelines[S].
- 张朝阳,刘宏伟.基于LSTM的工业设备剩余寿命预测[J].仪器仪表学报,2022,43(3):350-357.
- 李强.机电设备故障诊断技术[M].机械工业出版社,2020.
- 姜春雨.PLC技术在电气工程及其自动化控制中的应用分析[J].山东工业技术,2019(12):143.