

汽轮机润滑油系统研究与优化设计

徐健 岳瑞东 童金生

中国船舶集团公司第七〇三研究所无锡分部, 江苏无锡, 214151;

摘要: 汽轮机作为核心动力设备, 其安全停机是保障整个机组乃至工厂安全的关键。润滑油系统为主轴轴承、减速齿轮等关键部件提供润滑和冷却, 是保障机组安全稳定运行的必要辅助系统。当主油泵因断电或机械故障而失效时, 必须立即启动应急供油系统, 为转动和摩擦部件提供不间断的润滑油, 直至其完全惰走停机, 避免发生轴瓦烧毁、大轴弯曲等灾难性事故。本文基于某型汽轮机(主泵供油压力 0.2-0.25MPa, 流量 200L/min)的技术要求, 针对应急供油系统(压力 $\geq 0.05\text{MPa}$, 流量 $\geq 50\text{L/min}$, 持续时间 ≥ 10 分钟)进行了深入研究和方案设计。文章详细分析了 UPS 驱动应急油泵、高位油箱重力供油、蓄能器稳压供油等三种主流应急方案的原理、系统构成, 结合某工程实际提出了一种高压油箱的应急供油方案, 为汽轮机润滑油系统安全设计提供理论依据和实践参考。

关键词: 汽轮机; 润滑油; 应急供油; 高压油箱; 优化设计

Research and Optimal Design of Steam Turbine Lubrication Oil System

Xu Jian, Yue Ruidong, Tong Jinsheng

Wuxi Branch of the 703rd Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Wuxi, Jiangsu, 214151;

Abstract: As a core power equipment, the safe shutdown of a steam turbine is crucial for ensuring the safety of the entire unit and even the factory. The lubricating oil system provides lubrication and cooling for key components such as main shaft bearings and reduction gears, and is an essential auxiliary system for ensuring the safe and stable operation of the unit. When the main oil pump fails due to power outage or mechanical failure, the emergency oil supply system must be immediately activated to provide uninterrupted lubricating oil for rotating and friction components until they completely coast to a stop, avoiding catastrophic accidents such as bearing burnout and shaft bending. Based on the technical requirements of a certain type of steam turbine (main pump oil supply pressure 0.2-0.25 MPa, flow rate 200 L/min), this paper conducts in-depth research and designs a scheme for the emergency oil supply system (pressure ≥ 0.05 MPa, flow rate ≥ 50 L/min, duration ≥ 10 minutes). The article analyzes in detail the principles and system configurations of three mainstream emergency schemes: UPS-driven emergency oil pump, high-level oil tank gravity oil supply, and accumulator pressure stabilization oil supply. Combined with a practical engineering example, an emergency oil supply scheme for a high-pressure oil tank is proposed, providing theoretical basis and practical reference for the safe design of the steam turbine lubricating oil system.

Keywords: steam turbine; lubricating oil; emergency oil supply; high-pressure oil tank; Optimized Design

DOI: 10.69979/3041-0673.26.05.017

引言

汽轮机转子具有巨大的转动惯量, 在紧急停机或厂用电中断时, 其惰走时间可达十数分钟甚至更长。在此期间, 即便主驱动力已切断, 转子仍在高速旋转, 必须持续向各轴承提供足量、足压的润滑油, 以形成稳定的油膜, 带走摩擦产生的热量, 确保机组平稳过渡至静止状态。若润滑油供应中断, 将在极短时间内导致轴瓦温度急剧升高, 合金层熔化, 最终造成转子抱死、大轴弯曲等严重事故, 带来巨大的经济损失和安全风险^[1]。

因此, 一套设计可靠、响应迅速的应急供油系统是汽轮机安全体系中不可或缺的组成部分。本文以某汽轮

机项目实例, 研究满足特定技术参数(应急压力 $\geq 0.05\text{MPa}$, 流量 $\geq 50\text{L/min}$, 持续时间 ≥ 10 分钟)的应急供油方案, 并对不同技术路径进行综合对比。

1 常用应急供油方案分析

目前, 工程上广泛应用且技术成熟的应急供油方案主要有以下三种:

1.1 UPS 不间断电源驱动直流应急油泵方案

该方案是当前中大型机组最主流、最可靠的方案之一。工作原理为利用蓄电池储能的电能, 在厂用电中断时驱动直流电机, 带动油泵工作, 直接从主油箱吸油并

向润滑油母管供油。

系统构成：在润滑油管路中并联一台直流电动应急油泵。该泵的动力来自一组大容量蓄电池组，并通过不间断电源（UPS）为其提供稳定电力。控制系统实时监测主油泵出口压力，一旦压力低至设定值（如0.15MPa），立即自动启动直流应急油泵。主要优点为响应迅速，可提供流量和压力稳定的润滑油；缺点为依赖蓄电池组和直流电机的状态，需定期进行充放电维护和功能测试，初期投资较高^[2]。

1.2 高位油箱重力应急供油方案

这是一种纯机械式的传统应急方案，以其极高的可靠性被广泛应用于各类汽轮机组及其他动力设备。在机组启动前，先启动主油泵，打开高位油箱补油阀，主油泵输出的部分油液克服位差注入高位油箱并将其充满，随后关闭补油阀。当主油泵压力丧失时，逆止阀关闭，高位油箱与主油泵隔离。此时，油箱中的油在重力作用下，利用其与轴承之间的静压头（H），通过管道自流至各轴承。静压头产生的压力 $P = \rho gH$ （ ρ 为油密度， g 为重力加速度），通过设计安装高度，可轻松满足0.05MPa的最低压力要求^[3]。

系统构成：在汽轮机组上方一定高度（通常 ≥ 5 米）安装一个高位油箱（事故油箱）。该油箱在机组正常运行时充满符合要求的润滑油，其进油管路上设有逆止阀。油箱出口管道直接接入润滑油母管至各轴承的前端。主要优点为无需任何外部动力，完全依靠物理原理工作，故障率极低；维护简单，日常只需检查油位和阀门状态即可。缺点为多了一路并联管路系统，且高位油箱中的油长期相对静止，可能存在析水、劣化或被污染的风险。

1.3 蓄能器稳压应急供油方案

该方案作为一种短时、高效的补充方案，常用于提供初始瞬间大流量或稳定系统压力。工作原理为在润滑油母管上并联一组皮囊式蓄能器，蓄能器预充一定压力的氮气。当主油泵压力骤降时，蓄能器内被压缩的氮气迅速膨胀，将储存的油液瞬间压入系统，提供紧急油量，弥补了备用油泵启动前的压力空窗期。随后，由启动的交流应急油泵接续供油^[4]。

主要优点为响应极快，能在毫秒级内释放压力油，有效抑制系统压力暴跌，提供平稳的油压。缺点也很明显，单靠蓄能器储量有限，无法独立维持长时间供油，必须与应急油泵配合使用；需定期检查蓄能器预充氮气压力，皮囊有老化风险。

2 汽轮机润滑油系统优化设计

2.1 某型汽轮机应急供油系统技术要求

某型汽轮机的主润滑油系统正常运行参数为：

主油泵供油压力：0.2-0.25 MPa

供油温度：25-45 °C

供油流量：200L/min

应急工况下的核心技术要求为：

应急供油压力： ≥ 0.05 MPa（此压力需克服管道阻力并确保各轴承入口有足够油压建立油膜）

应急供油流量： ≥ 50 L/min（此流量需满足机组惰走过程中最基本的润滑和冷却需求）

应急持续时间： ≥ 10 mins（必须覆盖从主泵停运到转子完全静止的全过程）

2.2 系统原理

根据上述三种应急供油主流设计方案，结合某工程实际，现提出一种新的润滑油系统方案。系统图如图1所示

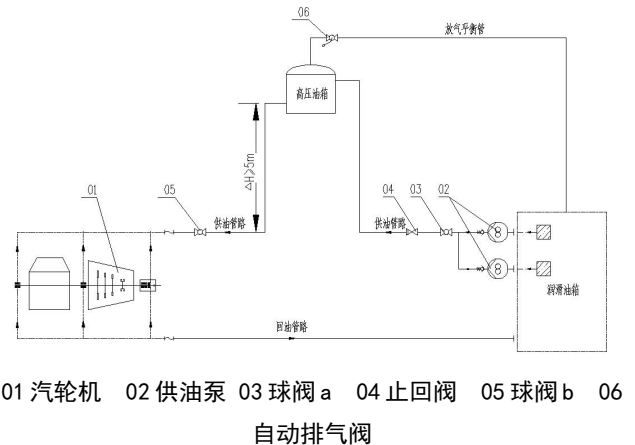


图1 优化设计后的润滑油系统原理图

如图所示，经过优化后的系统主要由润滑油箱、主供油泵、备用供油泵、高压油箱、供油管路、回油管路、放气平衡管等组成。机组启动前，先开启主供油泵，通过主供油泵把润滑油通过供油管路泵入高压油箱，随着润滑油的进入，高压油箱中的空气通过顶部连接的放气平衡管排入润滑油箱中，当油箱充满润滑油后，自动排气阀06自动关闭，高压油箱开始建立压力给汽轮机供油，最终润滑油通过回油管返回润滑油箱。该方案通过把高位油箱升级为高压油箱，把供油泵出口管路与高压油箱串联，简化了管路系统，避免了润滑油与空气接触，保证了润滑油品质不被空气污染。

2.3 应急供油系统设计

2.3.1 设计计算

(1) 管道通径计算

管道通径计算公式:

$$d = 0.0188 \sqrt{\frac{Q}{v}}$$

Q—体积流量, m³/h

d—管道通径, mm

v—滑油流速, m/s (推荐流速 1.0m/s)

应急供油最小流量为 0.5m³/h, 按管道通径计算公式计算得管道通径为 $\phi 13$ mm, 选用滑油供油管路通径为 DN50, 能够满足供油流量要求。

(2) 高压油箱容量设计计算

管径为 DN50, 流速取 1.0m/s, 时间为 10 分钟的最小油箱容积:

$$V = \frac{G_1}{R \times A} = \frac{1036.2}{880 \times 0.8} = 1.47m^3$$

V—高压油箱容积, m³;

G₁—应急滑油流量, kg/h;

R—润滑油密度, kg/m³ (取 880 kg/m³);

A—油箱充满系数 (取 0.8);

试验台高位燃油箱容量为 1.5m³, 能够满足机组用油需求。

(3) 应急滑油供油压力计算

高压油箱高 1500mm, 布置在标高 8.5m 的平台上, 应急供油时取最低液位标高 8500mm, 机组滑油进口标高为 2160mm, 由此可计算得机组供油压差为:

$$\Delta P_1 = \rho gh = 880 \times 9.8 \times (8500 - 2160) / 1000 = 0.0547MPa$$

供油管直径为 $\phi 57 \times 3.5$ 的管道长 8m, 密度 ρ 取

880 kg/m³, 运动粘度 ν 取 $4.17 \times 10^{-6} m^2 / s$, 则,

对于 DN50 管道: 雷诺数

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{1 \times 0.05}{4.17 \times 10^{-6}} = 11990$$

对于无缝钢管, 取绝对粗糙度 $\varepsilon = 0.15mm$

由于 $4000 < Re < 22.2 \left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^{\frac{8}{7}}$, 管内流动处于湍流光滑区, 采用布拉修斯公式计算得出沿程阻力系数:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} = 0.03024$$

$$\Delta P_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho V^2}{2} = 0.0021MPa;$$

管路局部阻力采用当量长度法计算。

供油管路中含有长半径弯头 2 个, 球阀 2 个, 止回阀 1 个,

$$\Delta P_j = \lambda \frac{Le}{d} \frac{\rho V^2}{2} = 0.0017MPa$$

管道阻力损失:

$$\Delta P_G = \Delta P_f + \Delta P_j = 0.0038MPa$$

机组润滑油入口前供油压力为:

$$\Delta P_o = \Delta P_1 - \Delta P_G = 0.0509MPa > 0.05MPa$$

ΔP_o 在机组应急供油压力要求范围之内, 满足机组供油压力要求。

2.3.2 调试运行

机组和管路系统按照工艺安装完成后, 进行应急供油系统调试。先打开主油泵, 把润滑油进口压力调整到 0.25MPa, 如图 2 滑油进口压力曲线。

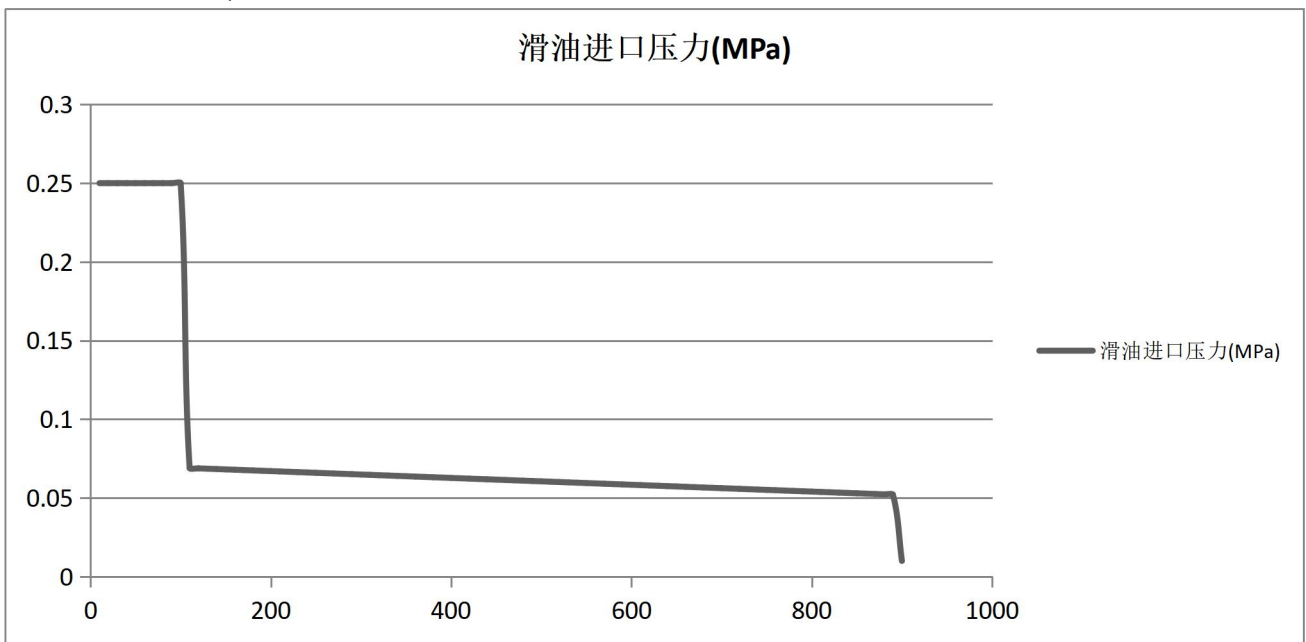


图 2 滑油进口压力曲线

稳定运行 100s 后关闭主油泵, 进入高压油箱应急供油模式, 滑油进口压力突降至 0.069MPa, 随着高压油箱中的液位逐步降低, 供油压力逐步下降, 892s 后高压油箱中的润滑油流尽, 最后管道中的剩余滑油继续流入机组直至彻底排空。滑油压力大于 0.05MPa 的供油时间为 792s, 符合应急供油技术要求。

3 结论

汽轮机润滑油应急供油系统是保障机组安全最后一道防线。本文研究的三种应急供油方案各有其技术特点和适用性。结合某工程实际进行优化设计的润滑油供油系统可以满足机组的应急用油要求, 同时简化了管路系统, 减少了阀门的数量和操作次数, 提高了机组运行的安全性和稳定性。

参考文献

- [1] 陈沛. 船舶主机润滑油管路与燃油管路建模与仿真: (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2007.
- [2] 林松海. 糖厂汽轮机高压油箱的设计及应用[J]. 广西糖业. 2017-03
- [3] 蒋鲸峰. 浅谈高位应急油系统在大型高压同步电动机中的应用[J]. 中小企业管理与科技. 2019-05
- [4] 王磊. 皮囊式蓄能器在液压系统中的应用[J]. 能源信息和研究, 2005, 21(2)

作者简介: 徐键, 男, 汉, 19901214, 江苏泗阳, 工程师, 大学本科, 热能与动力工程。