

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-103-03

宽温区控温型自复叠 制冷系统回油管路优化设计与实验研究

刘家林 王晓占 冯蕾 李灿伦 季琨 张世一 黄贇
(上海卫星装备研究所 上海 200240)

【摘要】 结合某宇航产品试验用自复叠制冷系统项目案例, 针对此系统因回温问题导致机组发生故障进行分析, 并对原系统回油管路进行优化设计, 通过具体实验测试, 通过观察油回路视镜及回油量, 结果表明优化后的回油管路设计合理, 性能可靠, 整个系统能实现顺利回油, 延长了压缩机运行寿命, 同时, 使整个系统的试验可靠及稳定性得到极大的提升。

【关键词】 自复叠; 回油; 故障; 优化

中图分类号 TB657 文献标识码 B

Optimization Design and Experimental Study of Oil Return Pipe of Auto-cascade Refrigeration System in Wide Temperature Zone

Liu Jialin Wang Xiaozhan Feng Lei Li Canlun Ji Kun Zhang Shiyi Huang Yun
(Shanghai Institute of Satellite Equipment, Shanghai, 200240)

【Abstract】 Combined with the project of auto-cascade refrigeration system used in one aerospace product test, to analyzing the failure caused by the oil return problem, and optimized the oil return pipeline of the original system. Through the experimental tests, by observing the oil mirror and oil return amount, the results show that the optimized oil return pipeline is reasonable and reliable, and the whole system can achieve smooth oil return. The life of the compressor is extended, and the reliability and stability of the whole system are greatly improved.

【Keywords】 Auto-cascade; Oil return; Failure; Optimization

0 引言

宽温区控温型自复叠制冷系统主要用于航天器空间环模设备, 提供真空、黑冷背景和热辐射环境, 主要用于宇航单机及舱内部组件的模拟测试及试验。由于此类试验频率高、周期长, 对所配制冷系统的稳定性及可靠性提出了更高的要求。

其中, 可靠的回油是此制冷系统稳定高效运行的关键因素之一^[1]。由于试验的特殊性, 在试验过程中, 系统的热负荷一直随着负载在不断变化, 且很长时间系统停留在极限工况下运行, 此时, 大部分制冷剂呈气液两相, 流速降低, 制冷剂大都存留

在蒸发器里, 润滑油易积存在蒸发器和低压管路段, 一方面导致压缩机由于缺润滑, 轴承或活塞缸抱死, 造成压缩机损坏; 另一方面也极易引起压缩机“液击”, 造成阀片击穿或连杆断裂等等^[2]。

1 回油故障原因分析

某项目宇航产品试验用自复叠制冷系统, 其原理如图 1 所示。

此制冷循环系统回油管路如图 1 虚线所示, 采用 $\phi 12$ 紫铜管直接连接到压缩机。为避免系统回油问题, 此系统在设计时, 已考虑将管路沿制冷剂流

动方向倾斜一定角度，在合适位置，设计了回油弯等^[3]。但在系统正常运行约两年时间时，在极限工况下，突然整机开始出现较大的振动，并伴随着轰隆声，现场人员立马采取了停电停机措施。后经拆机发现，曲轴箱内一转子连杆出现断裂，如图 2 所示。

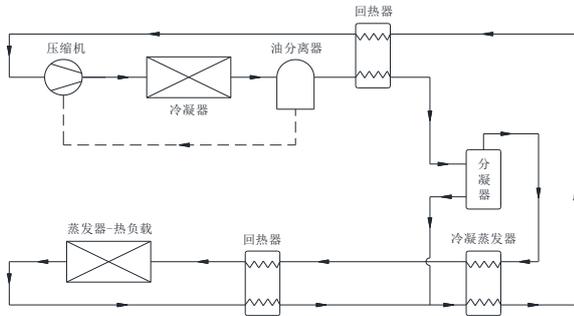


图 1 某项目宇航产品试验用自复叠制冷循环系统原理图
Fig.1 Principle diagram of auto-cascade refrigeration cycle system of a project for aerospace product test



图 2 压缩机连杆断裂图

Fig.2 Fracture diagram of compressor connecting rod

经分析，出现上述问题的原因主要有以下几点。

系统发生液击。在系统运行到极限工况时，由于大量制冷剂呈现气液两相，特别是在蒸发器中，聚集了很多液态的制冷剂，这时候很容易发现液击，导致转子或连杆断裂。由于系统中配置了合适大小的气液分离器，所以这种情况发生的概率较小。

系统缺油。压缩机排气口排出的润滑油，分成两部分回到压缩机，一小部分润滑油随着高温制冷剂进入到系统管路中，伴随着制冷剂流动回到压缩机吸气口。另外，绝大部分润滑油经油分离器分离后，回到压缩机曲轴箱内。经分析，此次故障大概率是在极限工况下，由于油分离器回油管路设计不合理，回油阻力大，长期运行后，回到压缩机的油

量逐渐减少，最终导致系统由于缺油造成压缩机故障。

2 回油管路优化设计

此系统配置进口品牌 ESK 油分离器，回油管路采用φ12 紫铜管，经过几个倒 U 型后，直接连接油分和压缩机。中间经过了几个倒 U 字型，由于试验过程的特殊性，一定时间内，在极限工况下，高压压力会骤降，导致高压压力不足，会导致回油不畅。正常情况，当系统运行稳定后，回油量会保持一个相对不变的值，连续的经油分回到压缩机中。结合以上分析，为避免系统在极限工况下出现回温困难，特对现有回油管路进行优化设计。

首先将原有回油管路段径由φ12 减小到φ10，忽略增加的阻力，增强了管路中润滑油的虹吸作用，且在此回油管路上增加安装一电磁阀和油视镜，用于控制此回路的通断，通过油视镜可以清晰的看出润滑油的流动状态及含量，此路适用于热负载温度在达到≥-70℃。另外，在此回油管路的两端并联一新的回路，管径选择φ10，增加安装一控制通断的电磁阀和增强虹吸作用的φ6 毛细管，此路适用于热负载温度达到<-60℃。其中，此毛细管的长度可根据单相流阻力计算公式^[4]进行计算。

$$\Delta P = f \left(\frac{1}{2} \rho w^2 \right) \frac{\Delta L}{D_c} \tag{1}$$

其中， ΔP 为毛细管两端的压力差，Pa； f 为摩擦阻力系数； ρ 为润滑油密度，kg/m³； w 为流速，m/s； ΔL 为毛细管长度，m； D_c 为毛细管公称直径，m。

经计算可知，设计用毛细管长度约为 90cm。

优化后的回油管路如图 3 虚框所示。

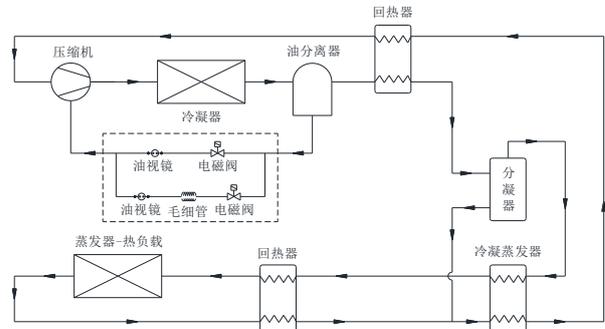


图 3 优化设计的回油管路图

Fig.3 The return pipeline diagram after optimizing design

3 实验研究

借助于此制冷系统平台, 在优化后的管路上再增加两个量程范围 1~1000g/min 流量计, 原理图如图 4 所示。本文的实验周期满足常规产品一个试验周期, 大约 180h, 测量制冷系统稳定一个试验周期内回油量数据。本实验压缩机自带有特制的油视镜, 通过油视镜对压缩机内部润滑油的油面及液面进行判定, 如图 5 所示。通过试验周期内流量计变化值及油视镜液面位置, 判断优化后的回油管路效果。实验全程开启视频监控。

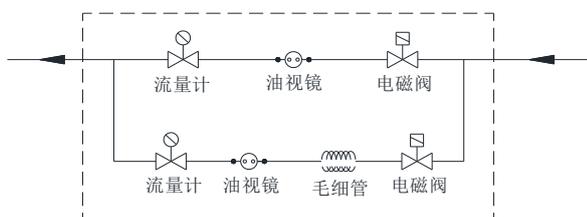


图 4 回油优化测试图

Fig.4 Test diagram of oil return optimization

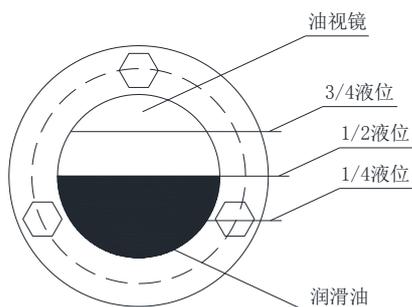


图 5 压缩机油视镜液位位置图

Fig.5 Liquid level diagram of compressor oil mirror

当系统开启运行时, 压缩机高低压差慢慢建立起来, 通过油视镜可以观察到透明清澈的油里有很多白色小气泡, 这是由于混合在润滑油里的制冷剂由于压差的原因分离出来^[5]。如图 6 及图 7 实验结果所示, 运行前期阶段, 回油量呈现快速上升状态, 当运行时间达 15h 左右时, 这时, 压缩机高低压压差达到最大, 回油量也达到最大值, 约为 22.5L/min, 油液位也达到最大位置 3/4 刻度。这时, 热负载温度已达到 -60℃, 随着热负载温度、排气及吸气压力的降低, 回油量呈现下降趋势, 当运行时间约 50h 时, 回油量达到最低, 约为 19.8L/min, 油液位达到最低位置 1/4 刻度。当热负载温度达 ≤-68℃时, 打开下路电磁阀, 关闭上路电磁阀, 回油量及油液位均由上升趋势, 这是因为下路管路装

有毛细管, 起到了降压作用, 增加了回油管路中的虹吸作用。当系统运行约 80h 后, 整个系统回油量及油液位均达到一个稳定平衡状态, 回油量在 22.4L/min 附近浮动, 油液位也基本在 3/4 刻度附近。

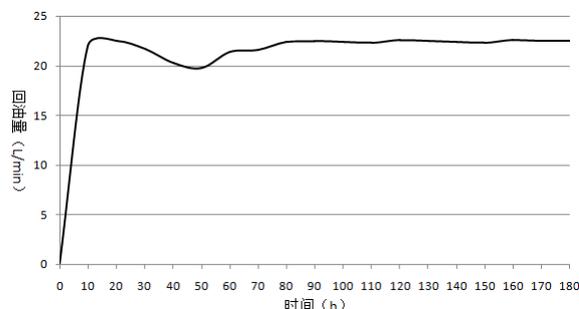


图 6 优化后回油管流量变化趋势图

Fig.6 The chart of changing trend of return pipe after optimizing

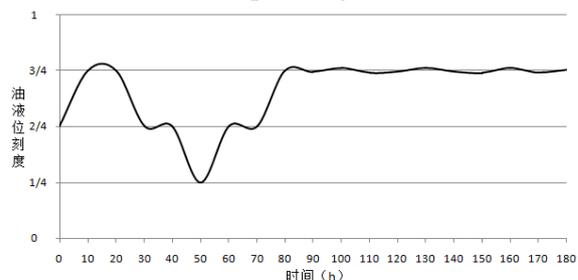


图 7 优化后油视镜液位刻度变化趋势图

Fig.7 The chart of changing trend of liquid level of oil mirror after optimizing

通过实验结果可知, 验证对此系统回油管路优化设计的合理性。另外, 整个系统在试验周期内, 其主要性能参数如排气温度、吸气温度、排气压力、吸气压力等均在合理运行范围内。在对系统优化设计后, 在进行了近百次宇航产品试验后, 观察压缩机油位, 发现其仍然保持在 1/2~3/4 刻度之间, 满足使用需求。

4 结论

根据实际应用案例, 对现有故障设备进行原因分析, 根据最大可能的原因, 对系统回油管路进行优化设计。经实验, 优化后的回油管路解决了原有系统回油困难的问题, 极大的提高了压缩机及整个系统的运行寿命, 提高了宇航产品试验的可靠及稳定性。同时, 也为解决此类系统在极限工况下可能出现回油困难提出了一种实际可行的方法, 也为其他制冷系统回油管路设计提供一定参考价值。

(下转第 147 页)