

# Structural Optimization of the Centrifugal Pump Based on Vibration Analysis

Xiqing Yin, Zhao Zhang

Naval Deputy Office of 438 Factory, Wuhan Hubei  
Email: [46778518@qq.com](mailto:46778518@qq.com)

Received: Sep. 1<sup>st</sup>, 2015; accepted: Sep. 21<sup>st</sup>, 2015; published: Oct. 7<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The centrifugal pump is widely used in ship and ocean engineering, and reducing the operation noise and vibration is of great practical significance to the green ship design. In this paper, as the research object, a certain type of centrifugal pump was tested for the vibration. According to the analysis of test results, the cause of excessive vibration may be the bearing fault or the structure resonance. Through the calculation and analysis, the bearing fault was excluded, so the resonance structure was re-designed. The results showed that the total vibration level of low frequency reduced about 2.5 dB after the resonance structure was adjusted.

## Keywords

Centrifugal Pump, Vibration Analysis, Improvement for the Structure

---

# 基于振动分析的离心泵结构优化

尹喜庆, 张 昭

海军驻武汉四三八厂军事代表室, 湖北 武汉  
Email: [46778518@qq.com](mailto:46778518@qq.com)

收稿日期: 2015年9月1日; 录用日期: 2015年9月21日; 发布日期: 2015年10月7日

---

## 摘 要

离心泵在船舶与海洋工程中应用广泛, 降低其运行振动和噪声, 对绿色船舶设计具有很大的现实意义。

本文以某型离心泵为研究对象, 对其进行振动测试, 根据对测试结果的分析, 确定振动超标的原因可能是由轴承故障或结构共振所造成的, 经计算分析排除轴承故障, 因此对共振结构进行重新设计。结果表明: 经对共振结构的调整, 低频段总振级降低2.5 dB左右。

## 关键词

离心泵, 振动分析, 结构改进

## 1. 引言

近年来, 一般工业机械的振动噪声, 已作为工业公害而引起了人们注意。低振动低噪声泵在应用中成为很重要的被选因素之一 [1]-[3]。同时, 随着人们对离心泵运行稳定性和振动问题的日益重视, 对其内部及外部振动的研究显得十分必要。

随着科技生产的突飞猛进, 人们对振动的研究越来越深入。通过在泵管路上安装缓冲包减小振动的方法来分析泵管系统的振动原因 [4]; 通过分析计量泵系统产生振动的原理, 从结构设计、管路系统配置以及材料选择等方面提出了消减计量泵振动的措施 [5]; 通过对海洋石油平台注水系统泵管系振动的原因进行分析, 提出了相应的改进措施, 得到了比较好的减振效果, 为平台安全、高效生产提供了保障 [6]; 针对双缸双作用液压驱动往复泵, 在试验的基础上, 分析并计算了进油路和回油路上的液压冲击现象, 得出了液压驱动往复泵在工作过程中进、回油路产生液压冲击现象的主要原因及其对往复泵整体性能和排出性能的影响 [7]。所涉及的方面真可谓是广且深。

本文通过对某型离心泵的振动测试及分析, 判断振动超标的原因, 并对其进行振动治理。经治理维修后, 机脚考核点低频段总振级有一定的降低。

## 2. 离心泵响应测试及振动特性分析

### 2.1. 振动响应测试

针对某型离心泵振动过大问题, 对其进行振动响应测试。具体测点布置如图 1 所示, 15、16、17、18 四个响应点分别布置在工字型支架的四个机脚, 考核方向垂直于安装面, 具体考核点考核方向测试结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出低频段(10 Hz~315 Hz)主要在 171 Hz 与 242 Hz 下响应比较大, 且两个频率之间存在明显的连续谱, 在 210 Hz 附近存在较大的峰值。而由泵的工作参数可知, 171 Hz 与 242 Hz 是离心泵

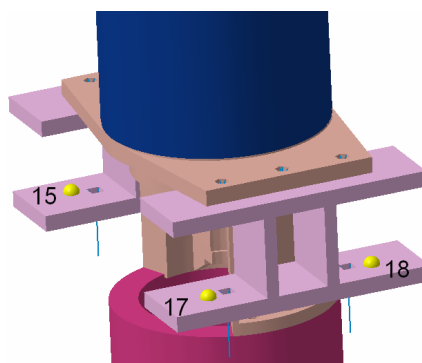
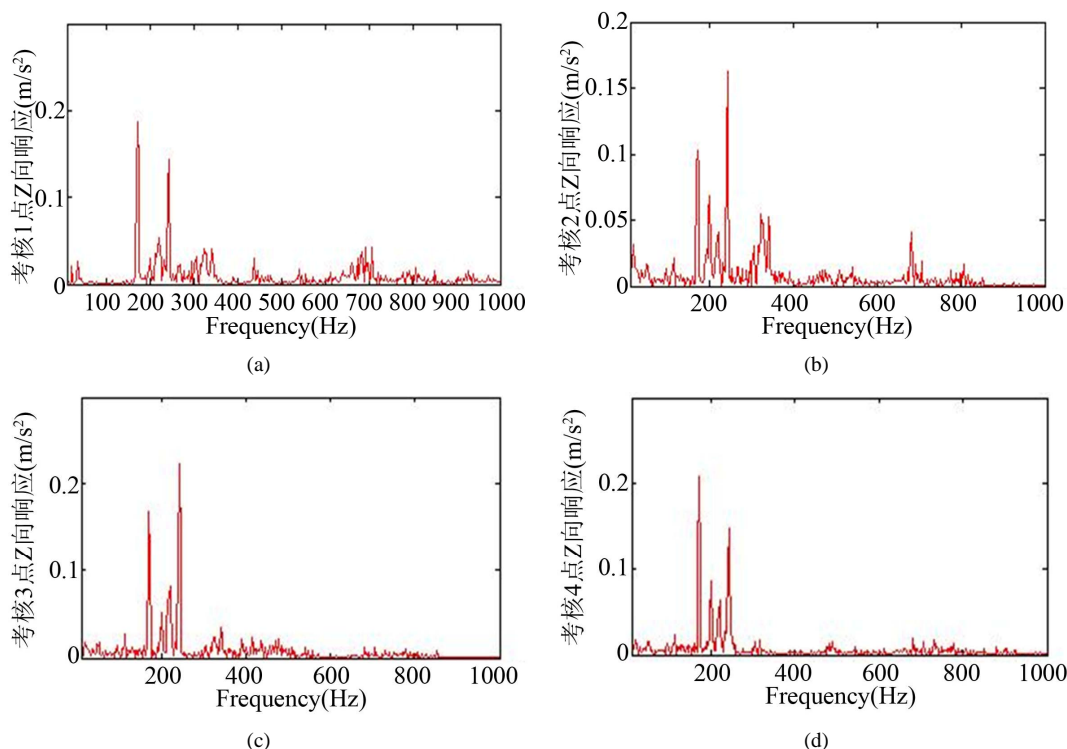


Figure 1. Layout of points  
图 1. 测点布置图



**Figure 2.** Low frequency response of the check points: (a) The first check point; (b) The second check point; (c) The third check point; (d) The fourth check point

**图 2.** 考核点低频段响应: (a) 考核点一; (b) 考核点二; (c) 考核点三; (d) 考核点四

的一二级叶轮的叶频, 这是由于流体激励力产生的, 要想降低该频率下响应, 需对离心泵流场进行改进, 从力源上进行优化, 相对是比较困难的。而对于其间的连续谱并不是由力源引起的, 可能是由于轴承故障或工字型支撑结构产生的共振造成, 相对容易治理。

## 2.2. 轴承故障频率分析

为了确定连续谱线的根源, 首先对离心泵轴承故障频率进行计算。目前用于滚动轴承监测和诊断的方法很多, 主要有振动监测技术、光纤监测技术和接触电阻诊断法。滚动轴承在工作过程中会产生各种各样的异常和损伤, 多数故障都会使轴承的振动加剧。这样, 将振动信号作为诊断轴承故障的主要信息, 通过对各种异常所特有的频率进行分析便可探明异常原因 [8] [9]。而在此我们只计算一下轴承的固有频率, 看是否产生共振响应即可。图 3 为滚动轴承的结构示意图。

设轴承直径为  $D$ , 滚动体直径为  $d$ , 接触角为  $\alpha$ 。通过滚动轴承运动学的分析, 可以求得滚动体通过内、外圈滚道的频率, 以及滚动体相对保持架的回转频率等。这些频率与故障密切相关的 [10] [11]。

如果在外圈滚道上有故障时, 则产生以  $f_{op}$  为频率的脉冲激励, 所以称  $f_{op}$  为外圈的故障频率, 同理  $f_{ip}$  为内圈的故障频率。若滚动体上有故障时, 因其自转一周通过内外圈各一次, 故滚动体的故障频率为  $f_b = 2f_{bm}$ 。一般径向滚珠轴承  $\alpha = 0$ , 一般外圈固定, 即  $f_o = 0$ , 则  $f_r = f_i$ , 其故障频率如表 1 所示(其中  $N$  为滚动体个数)。

本文采用的轴承由 15 个滚珠, 内圈直径为 40 mm, 外圈直径为 90 mm, 则计算的频率情况如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 轴承引起故障的频率并没有 210 Hz 存在, 因此可以判断振动过大不是由于轴承故障引起的, 需对离心泵进行模态测试来进一步确定连续谱产生原因。

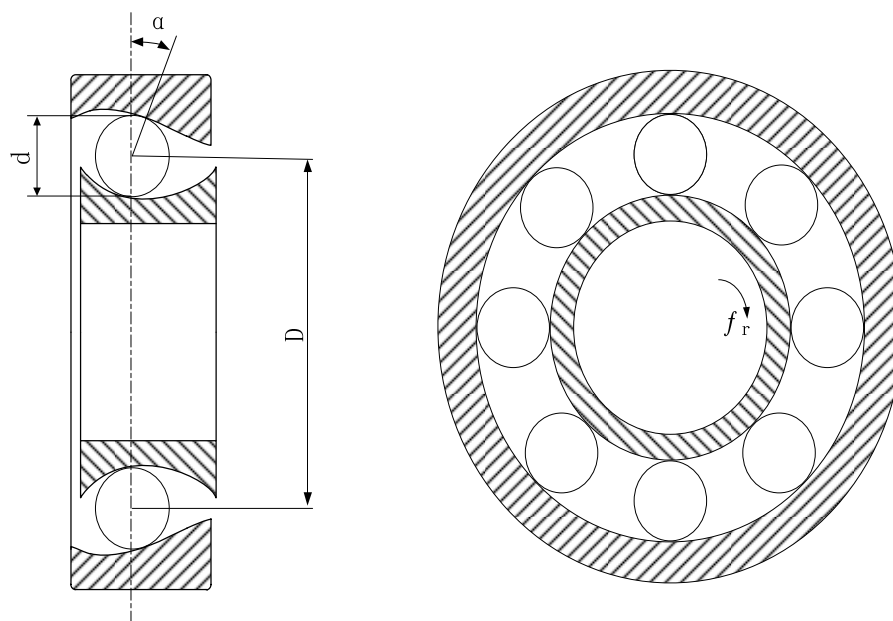


Figure 3. Bearing map

图 3. 轴承图

Table 1. Fault frequency formula of radial ball bearing

表 1. 径向滚珠轴承故障频率公式

元件	故障频率公式
内圈	$0.5N_f(1 - d\cos\alpha/D)$
外圈	$0.5N_f(1 + d\cos\alpha/D)$
滚珠	$0.5f_r(1 - d^2\cos^2\alpha/D^2)D/d$

Table 2. Fault frequency of radial ball bearing

表 2. 径向滚珠轴承故障频率

元件	故障频率(Hz)
内圈	102.1
外圈	365.4
滚珠	331.2

### 2.3. 离心泵模态测试及分析

本文对离心泵进行了模态测试, 确定该频段内是否存在工字形支架的模态。首先建立测试模型, 建模过程中可以忽略电机, 只对泵体与支撑结构进行建模, 并且泵体可以简化成圆桶。具体模型如图 4 所示, 模型共有 22 个测点组成, 支撑结构有 10 个点, 泵体有 12 个点, 采用单点激励多点响应进行模态测试。

对测试结果进行分析, 发现在 210 Hz 处存在较明显的工字型支撑结构的模态, 具体模型如图 5 所示。因此可以判断连续谱是由工字型支撑结构共振造成的, 因此需对其进行重新设计。

### 3. 离心泵结构改进仿真及实验验证

对支撑结构重新设计后, 需对其进行仿真计算, 在仿真计算可行后, 再进行实际加工生产, 这样既

可以节约时间又可以节约成本。再对模型进行反复计算与修正后, 得到如 图 6 所示仿真模型。对其进行计算, 确定在 171 Hz 与 242 Hz 之间不存在离心泵的模态后, 对其进行加工生产。两种支撑结构对比如 图 7 所示。

对其加工生产后, 进行实验验证, 首先测试其模态, 验证仿真计算结果的准确性。经计算在该频段内不存在支撑结构的模态, 与仿真结果基本吻合。而后对其进行实际振动测试, 以验证最终效果。测点布置图如 图 8 所示。

改变支撑结构前后测试结果对比如 图 9 所示, 从图中可以看出, 经设计后连续谱响应得到明显改善。可见对其进行振动分析是准确的, 进行的改进是合理有效的, 具体优化效果见 表 3。从 表 3 可以看出, 经改进后低频段总振级降低 2.5 dB 左右。

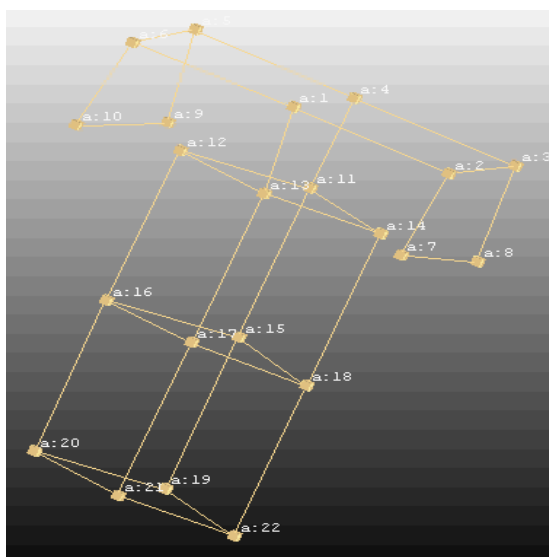


Figure 4. Low frequency response of the check points  
图 4. 考核点低频段响应

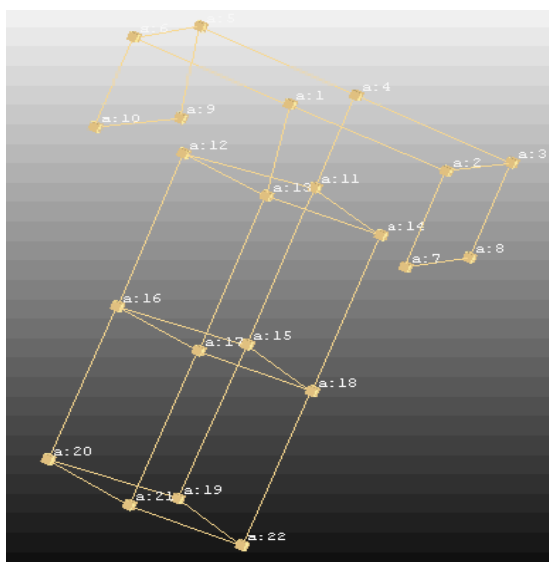


Figure 5. The mode shapes for 210 Hz  
图 5. 210 Hz 模态振型

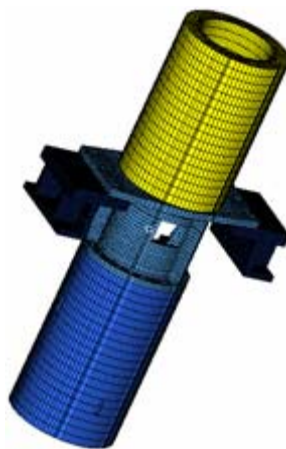


Figure 6. Improved finite element model of centrifugal pump  
图 6. 改进后离心泵有限元模型

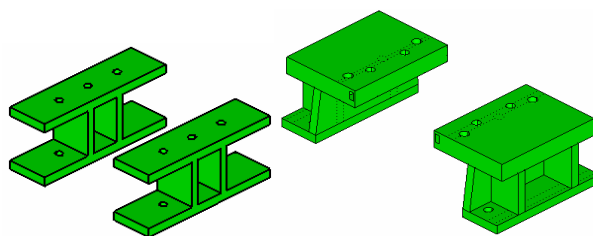


Figure 7. The models before and after optimization  
图 7. 优化前、后模型

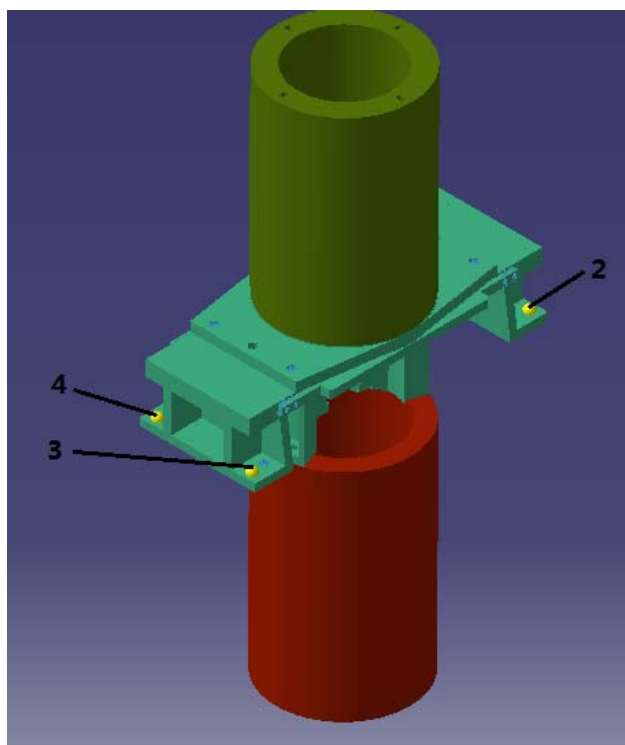
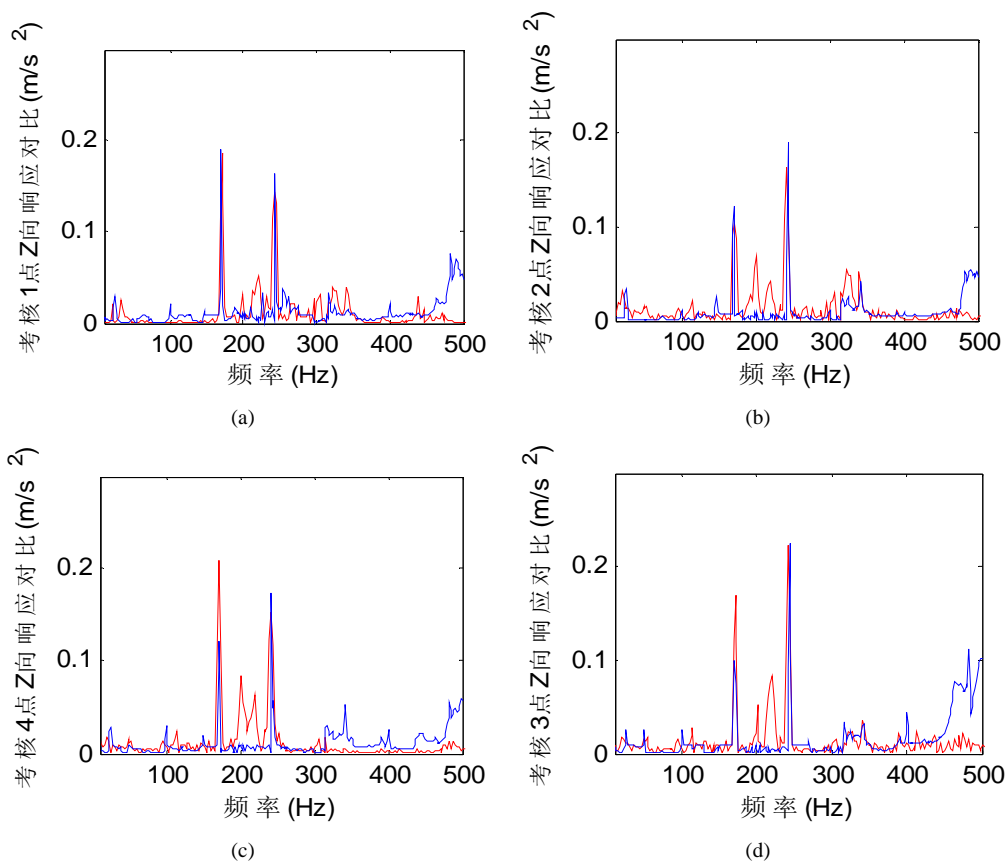


Figure 8. Layout of points  
图 8. 测点布置图



**Figure 9.** Low frequency response of the check points: (a) The first check point; (b) The second check point; (c) The third check point; (d) The fourth check point

**图 9.** 考核点低频段响应: (a) 考核点一; (b) 考核点二; (c) 考核点三; (d) 考核点四

**Table 3.** Vibration acceleration responses for the test direction

**表 3.** 考核方向振动加速度响应

考核点(dB)	1 点	2 点	3 点	4 点	低频段振级
优化前实测	109.7	108.2	110.5	110.3	109.6
优化后实测	107.2	107.4	108.1	106.3	107.1

## 4. 结论

1) 本文从离心泵振动测试响应入手, 对其进行了一定分析, 预判其中连续谱产生的原因, 并对其进行了逐一排除治理, 最终确定其产生的原因, 并对进行重新设计。

2) 经仿真计算, 预测改进的可行性。最后进行实验验证, 确定仿真的准确性及设计的合理性, 并且得到 2.5 dB 的优化效果。

## 参考文献 (References)

- [1] Krasnyuk, A.M., Russky, E.Yu. and Popov, N.A. (2012) Estimating strength of high-loaded impellers of large-size mine axial fans. *Journal of Mining Science*, **48**, 314-321. <http://dx.doi.org/10.1134/S1062739148020128>
- [2] 蒋爱华, 李国平, 周璞, 等 (2014) 离心泵流体激励力诱发的振动: 蜗壳途径与叶轮途径. *振动与冲击*, **10**, 2-7.
- [3] 陈果, 何立东, 韩万富, 等 (2013) 丁烯离心泵和柱塞泵的管道振动分析及阻尼减振研究. *机电工程*, **2**, 168-170.

- [4] 宋玲 (1997) 往复泵管路振动的分析与治理. *湖北化工*, **2**, 58.
- [5] 华锁宝, 潘政广, 顾则红, 等 (2010) 计量泵振动机理分析和减振措施. *流体机械*, **2**, 45-49.
- [6] 郝伟华, 朱强, 周兵 (2011) 海洋石油平台注水系统往复泵管系振动的原因及对策. *实践与探索*, **35**, 242.
- [7] 王新华, 张永红, 刘世强, 等 (2002) 液压驱动往复泵中的液压冲击现象分析. *石油矿场机械*, **5**, 53-55.
- [8] 杨爱玲, 徐洋, 李国平, 等 (2014) 叶片载荷对离心泵内流动激励力及噪声的影响. *排灌机械工程学报*, **1**, 24-29.
- [9] 席玉洁 (2011) 离心泵故障诊断专家. 硕士论文, 北京化工大学, 北京.
- [10] 姜磊 (2011) 石化设备管道系统阻尼减振技术研究及疲劳寿命分析. 硕士论文, 北京化工大学机电工程学院, 北京.
- [11] 于红 (2008) 离心泵滚动轴承故障诊断方法研究及应用. 硕士论文, 中国石油大学, 青岛, 9-12.