

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.02.010

在弹性安装条件下的柴油机组轴系对中

王树纲, 朱奎, 刘凯

(上海船用柴油机研究所, 上海 200090)

摘要: 精确对中是保证柴油机组安全、可靠运行的前提, 在柴油机与中间支架均为弹性安装的情况下, 机组轴系对中对精度要求更高。基于百分表对中法开展在弹性安装情况下的柴油机组轴系对中, 通过规范对中工序、分析对中机理, 确保轴系对中精度, 从而提高柴油机组运行的安全性和可靠性。

关键词: 柴油机组; 弹性安装; 对中

中图分类号: TG8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2023)02-0048-06

Shafting Alignment of Diesel Engine Sets under Flexible Installation Conditions

WANG Shugang, ZHU Kui, LIU Kai

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: Accurate alignment is a prerequisite to ensure the safe and reliable operation of the diesel engine set. When the diesel engine and the intermediate support are installed elastically, the unit shafting puts forward higher requirements to the alignment accuracy. A dial indicator was used to carry out the diesel engine shafting alignment under flexible installation conditions. Through standardizing the alignment process and analyzing the alignment mechanism, the shaft alignment accuracy was ensured, and the operation safety and reliability of diesel engine sets was improved.

Key words: diesel engine set; flexible installation; alignment

0 引言

2019年11月某推进柴油机组在试验台架安装, 柴油机与中间支架均为弹性安装。在运行过程中, 柴油机和中间支架的振动频率、振幅不一致, 轴系连接处易产生较大偏移波动, 为确保柴油机组安全、可靠运行, 要求机组轴系对中方法更可靠、测量更精确。本文以某推进柴油机组为研究对象, 对在弹性安装条件下的机组轴系对中方法进行介绍。

1 安装过程

某推进柴油机组组成设备的主要参数见表1, 其中, 柴油机隔振器与中间支架减振机架为弹性设备, 柴油机安装在隔振器上, 中间支架安装在中间支架减振机架上。隔振器和中间支架减振机架布置如图1所示。机组安装流程如图2所示, 其中关键的步骤为柴油机与中间支架的对中工艺。对中的目的是使柴油机的曲轴和中间支架的主轴保持轴线一致, 对中越精确, 柴油机和传动装置

的传动效率越高、轴系磨损越少、使用寿命越长。轴系不对中会对旋转部件和静态部件造成很大的压力和弯曲应力，导致轴系疲劳失效，严重时会导致柴油机轴瓦烧损，止推轴承磨损，甚至会导致柴油机连杆故障、高弹性联轴器断裂等。

表 1 某推进柴油机组组成设备的主要参数

设备名称	型号	尺寸/mm	重量/t
柴油机	16V270	6 070×2 430×3 930	48.50
高弹性联轴器	LSRF3620	Φ1 100×609	0.80
中间支架	ZZ400	850×530×875	0.95
万向联轴器	WL440.5	Φ550×1 650	0.17
柴油机隔振器	CMXW-60	480×330×205	0.10
中间筏体 (含中间支架减振机架)		7 500×2 800×1 100	21.00

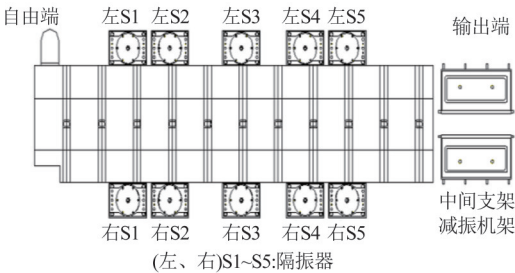


图 1 隔振器和中间支架减振机架布置图

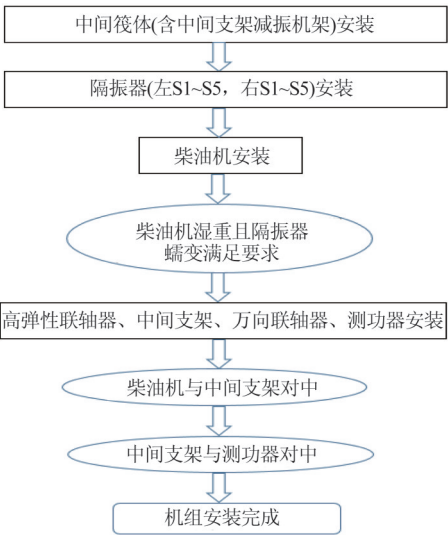


图 2 推进柴油机组安装流程

2 对中前的准备

机组对中前各设备的安装情况如图 3 所示。



图 3 推进柴油机组装置简图

2.1 柴油机保持湿重状态

滑油和冷却水的重量会使柴油机下面的隔振器产生一定的压缩量，故柴油机安装到隔振器上后，要加入满足工作状态需求的滑油和冷却水，滑油重量约为 1.9 t，冷却水重量约为 1.0 t。

2.2 隔振器的蠕变

柴油机为湿重状态时隔振器处于静压状态，对其预压，直到隔振器蠕变非常小，即隔振器变形稳定后预压才能结束。用内径千分尺每天定时定点测量每个隔振器的高度，直到隔振器的高度变化量 $\leq 0.05\text{ mm/d}$ ，即蠕变满足要求，一般预压 2 d 以上。测量预压后每个隔振器的高度（测量点应在相同的位置，宜选择侧面中间位置），要求同列隔振器的高度偏差 $\leq 2\text{ mm}$ ，左 S1~S5 隔振器与右 S1~S5 隔振器的高度平均值偏差 $\leq 1\text{ mm}$ 。一般情况下不予调整即满足要求，若不满足以上要求，可通过在中间筏体与隔振器接触平面间插入薄垫片（如 1.0 mm、0.5 mm）来调整隔振器的高度，直至隔振器的高度满足要求。

2.3 对中工装设计

根据柴油机、高弹性联轴器、中间支架及中间筏体等设备组成的有限空间，设计对中工装，如图 4 所示。

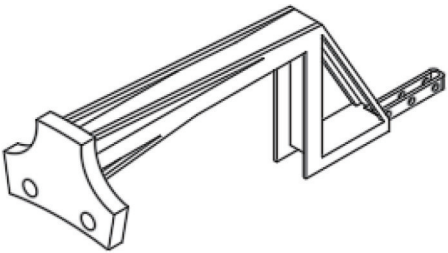


图 4 推进柴油机组对中工装

2.4 挠度测量工装

推进柴油机组对中工装为悬垂结构，工装、百分表及百分表接杆的重力会使工装产生弹性变形，工装向下弯曲，即为工装挠度。挠度会严重影响同心度和平行度测量数值的准确性，因此，用百分表法对中的时候，一定要考虑对中工装的挠度。设计的挠度测量工装如图 5 所示。

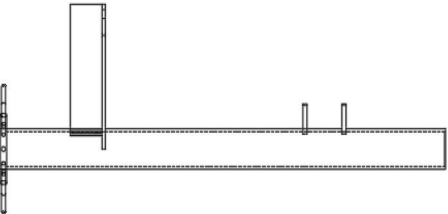


图 5 推进柴油机组挠度测量工装

2.5 对中工装挠度分析及测量

2.5.1 工装挠度分析

工装挠度分为垂直挠度 $\delta_{y,0}$ 和水平挠度 $\delta_{x,0}$ 。如图6所示,建立力学模型^[1]:AB段表示工装的横杆,长度为 a ;BC段表示工装的立杆,长度为 l ,A点的集中载荷 p 表示百分表及接杆重量;均布载荷 q 表示AB段工装的自重。若不计轴向力和剪力对位移的影响,则A点的垂直位移和水平位移即为工装的垂直挠度 $\delta_{y,0}$ 和水平挠度 $\delta_{x,0}$ 。垂直挠度即柴油机轴线与中间支架轴线的同心度挠度,水平挠度即柴油机轴线与中间支架轴线的平行度挠度。

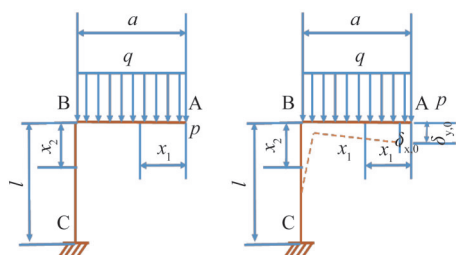


图6 对中工装挠度简图

$\delta_{y,0}$ 和 $\delta_{x,0}$ 是工装在 0° 位置的挠度,挠度方向与百分表指针方向一致,随着工装的转动,挠度对百分表指针读数的影响呈正弦变化^[2],百分表测点与 0° 初始位置相对于轴心形成的夹角为 α ,则在不同位置工装挠度对表针读数的影响为:

$$\delta_y = \delta_{y,0} \cos \alpha \quad (1)$$

$$\delta_x = \delta_{x,0} \cos \alpha \quad (2)$$

在百分表法对中过程中,一般只记录 0° , 90° , 180° , 270° 这4个特殊位置的百分表读数,所以只要计算这4个点的挠度,即

同心度的挠度为: $\delta_{y,0} = -\delta_{y,180}$, $\delta_{y,90} = \delta_{y,270} = 0$,
可得: $\delta_{y,0} - \delta_{y,180} = 2\delta_{y,0}$

平行度的挠度: $\delta_{x,0} = -\delta_{x,180}$, $\delta_{x,90} = \delta_{x,270} = 0$

可得: $\delta_{x,0} - \delta_{x,180} = 2\delta_{x,0}$

从以上分析可以得出:同心度挠度和平行度挠度在垂直方向(0° 和 180°)为百分表在两点位置读数差值的一半;在水平方向(90° 和 270°)百分表的测量数值可以相互抵消,对中结果不受影响。

2.5.2 工装挠度测量

对中工装及挠度测量工装加工完成后,用挠度测量工装对对中工装进行挠度测量,如图7所示。百分表测量值见表2,经计算,同心度挠度 δ_y 为0.09 mm,平行度挠度 δ_x 为0.06 mm。



图7 对中工装挠度测量

表2 百分表测量值

单位: mm

项目	数值	
百分表在 0° 测量值	6.72	5.56
百分表在 180° 测量值	6.90	5.68

3 对中主要工序

3.1 安装高弹性联轴器

由于柴油机为弹性安装,高弹性联轴器的重量足以使柴油机下部的隔振器产生压缩变形,因此,必须先将高弹性联轴器安装在柴油机飞轮上,对中结果才会准确。在安装前,先把柴油机飞轮与高弹性联轴器的贴合面清洗干净,将高弹性联轴器贴合在飞轮上,并将连接螺栓拧紧至规定转矩。

3.2 安装及调整中间支架

将中间支架吊装在中间支架减振机架上,通过中间支架地脚的4个顶丝来调整中间支架的高度,直至高弹性联轴器的法兰凹止口与中间支架的凸止口贴合,将中间支架地脚螺栓穿过中间支架地脚安装于中间支架减振机架。

测量中间支架地脚与中间支架减振机架之间的间隙,根据测量值,现场制作中间支架地脚垫片(一般为钢制垫片或铜皮垫片,垫片厚度一般为2.00 mm、1.00 mm、0.50 mm、0.30 mm、0.20 mm、0.10 mm、0.05 mm),将垫片组合后由内向外插入中间支架地脚与中间支架减振机架之间。将中间支架地脚螺栓拧紧至规定转矩。

将高弹的法兰与中间支架的法兰用螺栓连接并保持松装,目的是在对中时使柴油机飞轮与中间支架能保持同步转动。同步转动可以消除中间支架法兰由于加工几何误差对对中造成的不利影响。

3.3 安装万向联轴器

万向联轴器的重量会使中间支架减振机架发生压缩形变,因此一定要将万向联轴器安装完成后再进行对中。万向联轴器的一端与中间支架连接,另一端与水力测功器连接,两端的螺栓均须

拧紧至规定转矩。

3.4 安装对中工装及百分表

将对中工装安装在输入法兰背面，拧紧螺栓。将百分表安装在对中工装上，百分表的安装方式与在测量工装挠度时的安装方式一致，如图8所示。测量点分别在中间支架输入法兰外圆（径向测点）和端面（角向测点），百分表的探针要尽量垂直于测量点所在平面。百分表的指针应指在量程的1/3~2/3，百分表套筒要夹牢，验证方法是提起百分表，使测量头离开被测物体表面，随后松手，观察指针是否回到初始位置，重复操作3次以上，如果指针均回到原位，则证明套筒已夹牢。

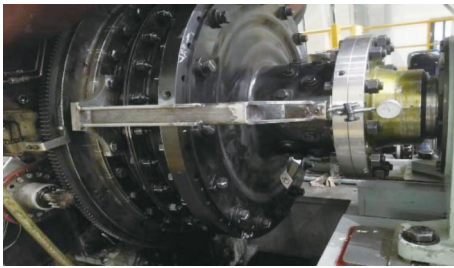


图8 对中工装及百分表安装

3.5 初对中，确定中间支架地脚新加工垫片尺寸

3.5.1 明确对中要求

对中合格的判据是柴油机与中间支架的径向（即同心度）允差 ΔR 、角向（即平行度）允差 ΔW 、轴向（即开档）允差 ΔX 均满足要求。柴油机与中间支架的对中要求为：（1）径向允差 $\Delta R \leq 0.10$ mm，且中间支架轴线必须高于柴油机曲轴轴线。（2）角向允差 $\Delta W \leq 0.10$ mm（测点 $R \geq 230$ mm，中间支架输入法兰直径为475 mm）。（3）轴向允差 $\Delta X \leq 0.50$ mm。

3.5.2 初始状态测量

（1）径向对中测量

使百分表探针与中间支架输入法兰外圆接触，通过盘车机对柴油机盘车1周（盘车机可以暂停，但不要逆向盘车），依次记录百分表在 0° 、 90° 、 180° 、 270° 等4处的数值 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 ，如图9所示。当百分表重新回到 0° 时，百分表指针应能回到初始位置，如果差值大于0.02 mm，一般可通过重新加固百分表解决。

检验百分表数据的有效性可根据式3^[3]确定：

$$r_1 + r_3 = r_2 + r_4 \quad (3)$$

由于读数误差，一般要求 $r_1 + r_3$ 与 $r_2 + r_4$ 差值（与数值正负无关）应不大于0.02 mm。如果 $r_1 + r_3$ 与 $r_2 + r_4$ 差值大于0.02 mm，一般为读数误差或者百分表夹持不牢导致。利用下述公式计算得出1、

2、3、4点处的实际数据 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 以及径向偏差 ΔR 。

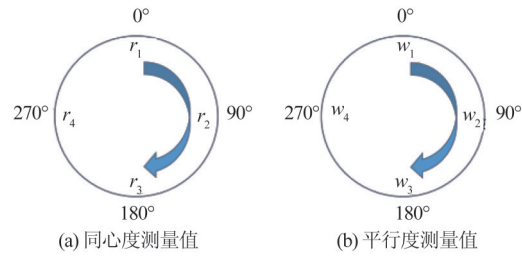


图9 对中测量值简图

上下位置： $R_1 = r_1 - \delta_y$ 、 $R_3 = r_3 + \delta_y$ ；

左右位置： $R_2 = r_2$ ， $R_4 = r_4$ ；

$$\Delta R_{1,3} = \frac{R_3 - R_1}{2} \quad (4)$$

$$\Delta R_{2,4} = \frac{R_4 - R_2}{2} \quad (5)$$

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_{1,3}^2 + \Delta R_{2,4}^2} \quad (6)$$

对推进柴油机组的径向进行测量，百分表在 0° 、 90° 、 180° 、 270° 等4处的数值分别为5.00 mm、4.82 mm、4.05 mm和4.22 mm。首先检验百分表数据的有效性： $5.00 \text{ mm} + 4.05 \text{ mm} - (4.82 \text{ mm} + 4.22 \text{ mm}) = 0.01 \text{ mm}$ ，小于0.02 mm，数值有效。

已知挠度 $\delta_y = 0.09 \text{ mm}$ ，利用上述径向偏差公式计算，得到 $\Delta R = 0.49 \text{ mm}$ ，因0.49 mm大于径向允差0.10 mm，所以径向偏差不符合要求。

（2）角向对中测量

将百分表探针指在中间支架输入法兰端面上，百分表在 0° 、 90° 、 180° 、 270° 等4处的数值为 w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 ，如图9所示。当百分表回到 0° 时，百分表指针应能回到初始位置。检验百分表数据有效性的方法与在径向测量时一致，即 $w_1 + w_3 = w_2 + w_4$ 。利用下述公式计算得出1、2、3、4点处的实际数据 w'_1 、 w'_2 、 w'_3 、 w'_4 以及角向偏差 ΔW 。

上下位置： $w'_1 = w_1 - \delta_x$ ， $w'_3 = w_3 + \delta_x$ 。

左右位置： $w'_2 = w_2$ ， $w'_4 = w_4$ ；

$$\Delta W_{1,3} = |w'_3 - w'_1| \quad (7)$$

$$\Delta W_{2,4} = |w'_4 - w'_2| \quad (8)$$

$$\Delta W = \sqrt{\Delta W_{1,3}^2 + \Delta W_{2,4}^2} \quad (9)$$

对推进柴油机组的端面进行测量，百分表在 0° 、 90° 、 180° 、 270° 等4处的数值分别为5.00 mm、5.15 mm、4.51 mm、4.37 mm。首先检验百分表数据的有效性： $5.00 \text{ mm} + 4.51 \text{ mm} - (5.15 \text{ mm} + 4.37 \text{ mm}) = -0.01 \text{ mm}$ ，差值绝对值小于0.02 mm，数值有效。

已知挠度 $\delta_s = 0.06 \text{ mm}$ ，利用上述角向偏差公式计算得到 $\Delta W = 0.86 \text{ mm}$ ，因 0.86 mm 大于角向允差 0.10 mm ，所以角向偏差也不符合要求。

(3) 轴向对中测量

测量飞轮端齿圈端面与中间支架输入法兰背面的轴向距离 X' ，通过式(10)计算柴油机和中间支架的轴向偏差 ΔX ，如图10所示。其中， X_0 为高弹性联轴器的实际长度。

$$\Delta X = X' - X_0 - 55 - 40 \quad (10)$$

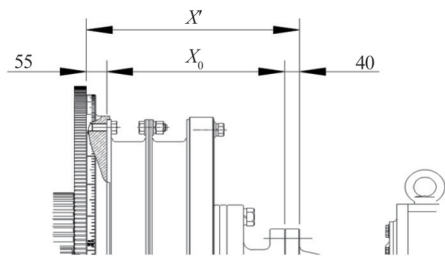


图10 对中偏差测量

用游标卡尺对推进柴油机组的轴向距离进行测量，测得 $X' = 703 \text{ mm}$ ，已知高弹性联轴器的实际长度 $X_0 = 609 \text{ mm}$ ，通过轴向测量公式得到 $\Delta X = -1.00 \text{ mm}$ ，数值绝对值大于轴向允差 0.50 mm ，说明轴向偏差不符合要求。

3.5.3 初对中的调整及测量

将4个中间支架对中调整工装按图11所示位置布置于中间支架减振支架安装平面上，用8个M12×60螺栓依次穿过对中调整工装和中间支架安装面板螺栓孔后装入螺母并拧紧。将8个M12×30螺栓装入对中调整工装侧面的水平螺纹孔中，螺栓旋紧方向朝向中间支架地脚。

松开中间支架地脚的紧固螺栓，通过调节中间支架地脚上的4个顶丝来调整中间支架的高低位置和倾斜角度，通过调节对中调整工装上纵向（平行于曲轴轴线方向）布置螺栓的旋入距离调整中间支架的前后位置，通过调节对中调整工装上横向（垂直于曲轴轴线方向）布置螺栓的旋入距离调整中间支架的左右位置。注意两端相对的螺栓不要同时朝向中间支架地脚旋入。

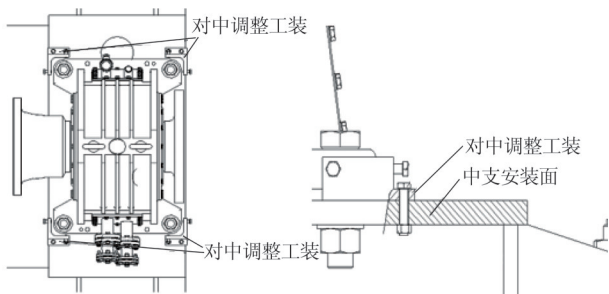


图11 对中偏差测量

根据前述实测对中数据调整中间支架的位置来满足对中要求，即：① $\Delta R \leq 0.10 \text{ mm}$ 且 $R_1 > R_3$ 。② $\Delta W \leq 0.10 \text{ mm}$ 。③ $\Delta X \leq 0.50 \text{ mm}$ 。

中间支架的调整方向分为：

(1) 若 $R_1 - R_3 > 0.10 \text{ mm}$ ，须降低中间支架输入法兰位置。

(2) 若 $R_1 < R_3$ ，须抬高中间支架输入法兰位置。

(3) 若 $|R_2 - R_4| > 0.10 \text{ mm}$ ，须向 R_2 、 R_4 中数值较小的位置调整中间支架输入法兰位置。

(4) 若 $\Delta X < -0.50 \text{ mm}$ ，须增大中间支架与柴油机间的距离。

(5) 若 $\Delta X > 0.50 \text{ mm}$ ，须减小中间支架与柴油机间的距离。

(6) 角向偏差须通过缩短角向测点数值最大处的法兰间距离，并增加角向测点数值最小处的法兰间距离来调整。

中间支架的三向对中调整应同时进行，若调整过中间支架的位置，应重新拧紧中间支架地脚螺栓并测量中间支架的三向偏差。多次调整中间支架后，记录百分表数值及卡尺数值，如图12所示。

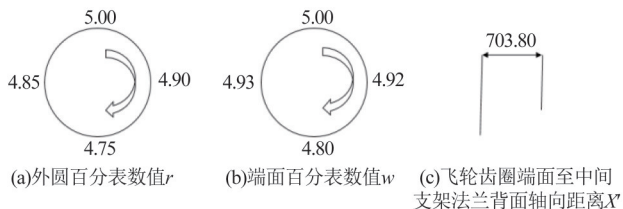


图12 中间支架经调整后的三向对中数值

经公式(6)、(9)和(10)计算得到：

径向偏差： $\Delta R = 0.04 \text{ mm}$ ，且 $R_1 > R_3$ ，符合要求；

角向偏差： $\Delta W = 0.08 \text{ mm}$ ，符合要求；

轴向偏差： $\Delta X = -0.20 \text{ mm}$ ，符合要求。

3.5.4 中间支架地脚新加工垫片的测量及加工

用量块测量中间支架地脚下端面与中间支架减振机架之间的间隙值，一般每列地脚在4个角处测量4个点，作为新垫片加工的厚度，外形轮廓按照中间支架地脚的轮廓设计即可。新加工的垫片如图13所示。

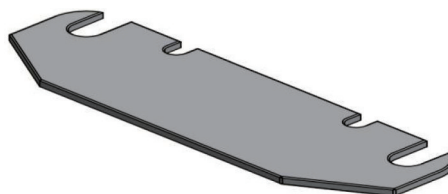


图13 中间支架地脚新加工垫片

3.6 再对中

新垫片加工完成后，将新垫片替换原自制垫片，复测并记录柴油机与中间支架的三向对中数据。如果不满足要求须按照 3.5.3 步骤进行调整，直至对中满足要求。更换新垫片并拧紧中间支架地脚螺栓后测量中间支架的三向偏差，记录百分表数值及卡尺数值，如图 14 所示。

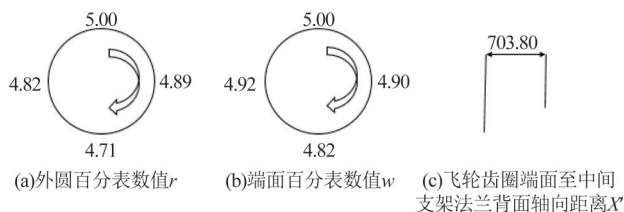


图 14 更换新垫片的三向对中数值

经公式 (6)、(9) 和 (10) 计算得到：

径向偏差： $\Delta R = 0.07 \text{ mm}$ ，且 $R_1 > R_3$ ，符合要求；

角向偏差： $\Delta W = 0.06 \text{ mm}$ ，符合要求；

轴向偏差： $\Delta X = -0.20 \text{ mm}$ ，符合要求。

3.7 检查柴油机曲轴曲臂差及轴向间隙

柴油机曲轴曲臂差及轴向间隙符合要求是验证柴油机与中间支架对中成功的基础，因此柴油机曲轴曲臂差及轴向间隙的测量是柴油机与中间支架对中的最终步骤，测量结果见表 3。由表 3 可知，柴油机曲轴曲臂差及轴向间隙都合格，确定柴油机与中间支架的对中符合要求。

表 3 柴油机曲轴曲臂差及轴向间隙测量结果

项目	要求	实测值	检验结论
各缸曲轴曲臂差	第一缸曲臂差 $\leq 0.09 \text{ mm}$ ；其余各缸曲臂差 $\leq 0.06 \text{ mm}$	第一缸曲臂差 $\leq 0.09 \text{ mm}$ ；其余各缸曲臂差 $\leq 0.06 \text{ mm}$	合格
曲轴轴向间隙	$0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$	0.23 mm	合格

对中完成后，柴油机与中间支架的状态如图 15 所示，后续柴油机经长达 2 000 h 的试验验证表明：柴油机、高弹性联轴器、中间支架等设备均运行良好。试验完成后，对柴油机轴瓦、止推轴承、高弹性联轴器进行拆检，见图 16，各零件均未出现异常磨损及其他损害，状态良好。由此可

见，规范且良好的对中能确保柴油机组运行的安全性和可靠性。

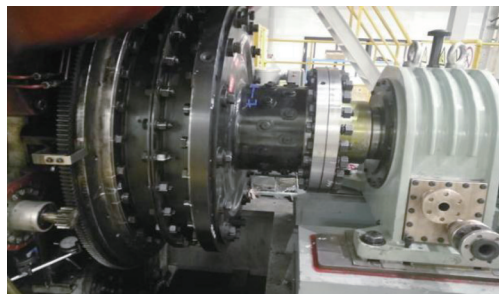


图 15 对中完成后柴油机与中间支架的状态

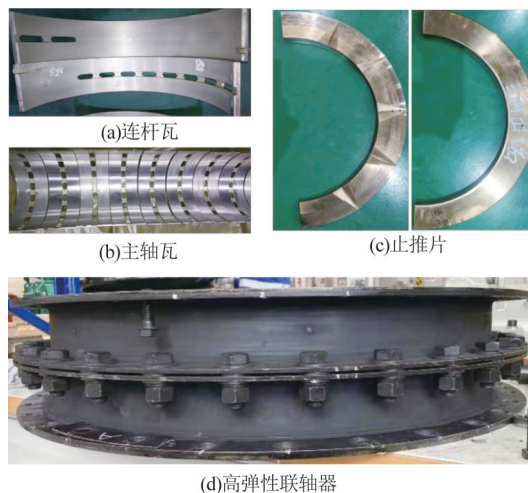


图 16 试验完成后连杆瓦轴瓦、止推片、高弹性联轴器等的拆检状况

4 结论

轴系对中是一项复杂的工艺，要想确保轴系对中精度满足要求，应深刻了解对中机理、准确测量对中工装的挠度、规范对中工序。对中的难点在于中间支架的调整与测量。

参考文献

- [1] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 5 版. 北京：高等教育出版社，2011.
- [2] 范安全. 转动设备对中表架的挠度误差及其消除 [J]. 安装，2007 (3)：28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3607.2007.03.011.
- [3] 禹韶松. 浅述单表找正法和三表找正法 [J]. 石油和化工设备，2011，14 (10)：54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8980.2011.10.017.