

# 发电柴油机两侧排温偏差大故障分析和处理

贾付泽

中海石油（中国）有限公司深圳分公司 广东 深圳 518064

**【摘要】**：排烟温度是反映柴油机燃烧质量和柴油机运转状况的一项重要指标，柴油机两侧温差大，会导致柴油机热应力增大，降低材料的机械性能，还会破坏柴油机的润滑条件，加剧柴油机磨损，缩短柴油机使用寿命。本文主要叙述了实际工作中遇到的MAK16VM32C型发电柴油机组两侧排烟温度差大的故障，通过分析找到了导致故障的两个主要因素：供油量不均匀和燃烧不均匀，通过对可能导致供油量不均匀和燃烧不均匀的因素进行逐一排查，找到了问题所在：油门总杆设计不当、增压器过滤装置不适用，通过改造柴油机油门控制机构、增加外置过滤网等措施，成功解决了发电机C柴油机两侧排温偏差大的故障，同时也大大降低了整体故障率。

**【关键词】**：排温偏差；增压器过滤装置；油门总杆

## Troubleshooting on the Malfunction of Large Temperature Difference Between Two Sides of Generator Diesel Engine

Fuze Jia

CNOOC (China) Co., Ltd. Shenzhen Branch Guangdong Shenzhen 518064

**Abstract:** The exhaust gas temperature is an important indicator to reflect the combustion quality of the diesel engine and the operation status of the diesel engine. The large temperature difference between the two sides of the diesel engine will increase the thermal stress of the diesel engine, reduce the mechanical properties of the material, and also destroy the lubrication conditions of the diesel engine and aggravate the wear of the diesel engine. Shorten the service life of the diesel engine. This paper mainly describes the fault that the temperature difference of exhaust smoke on both sides of the MAK16VM32C generator diesel unit encountered in actual work is large. Through analysis, two main factors causing the fault are found: uneven fuel supply and uneven combustion. The factors that lead to uneven fuel supply and uneven combustion were investigated one by one, and the problem was found: improper design of the throttle lever, unsuitable supercharger filter device, and measures such as reforming the diesel engine throttle control mechanism and adding an external filter screen, etc. The failure of the large deviation of exhaust temperature on both sides of the diesel engine of generator C was successfully solved, and the overall failure rate was also greatly reduced.

**Keywords:** Exhaust temperature difference; Booster filter; Throttle lever

### 1 引言

某海上生产钻井平台发电机系统配置四台（A/B/C/D）MAK16VM32C型四冲程柴油机，单机额定功率8000kW，额定转速750r/min。

其中C柴油机运转至19186小时，两侧温差进一步增大，不同工况下B侧各缸排温温度均比A侧高（见表1）。在柴油机常用工况下（50%负载）AB两侧温差最大值为 $B2-A6=442-381=61^{\circ}\text{C}$ ，排温超差比= $(B2-A6)/A6=16.01\%$ 。增压器两侧进气温度温差为 $41^{\circ}\text{C}$ ，A\B两侧各缸排温温度最大温差为 $B2-A6=483-410=73^{\circ}\text{C}$ ，排温超差比为17.8%。

表1 C柴油机排温温度及温差统计

序号	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均	标准差	备注
100%	+	347	356	345	261	258	224	261	251	251	251	251	251	20.25
	-	205	208	203	204	206	200	204	205	205	205	205	205	
75%	+	395	382	385	333	332	314	303	303	303	303	303	303	20.875
	-	404	443	404	415	435	415	415	444	444	444	444	444	
50%	+	401	390	393	329	328	303	303	302	302	302	302	302	19.375
	-	409	442	411	438	431	415	430	392	411	411	411	411	
25%	+	425	407	407	429	411	392	423	400	411	411	411	411	19.3
	-	434	435	425	451	434	425	431	395	424	424	424	424	

### 2 故障原因分析

结合柴油机的结构特征以及《某平台C柴油机维保台账》进行调查分析，对出现的问题进行统计、归类，做出C柴油机排温温度偏差故障率统计表（见表2）。

表2 C柴油机两侧排温偏差故障率统计表

序号	存在问题	频数 (h)	频率 (%)	累计频率 (%)
1	供油量不均	65	45.78	45.78
2	燃烧不充分	60	42.25	88.03
3	气门间隙变化	6	4.22	92.25
4	探头故障	6	4.22	96.47
5	其它故障	5	3.53	100.00
	合计	142	100	NA

根据表2画出C柴油机两侧排温偏差大故障率排列图（见图1）。



某平台柴油机增压器配备了专用滤网，维保手册要求为每500小时进行一次清洗。为此，查找并整理了2019年12月-2020年3月D柴油机增压器滤网清洗记录制成图表（见表3）。增压器滤网清洗频率为约每300小时进行一次，满足作业规范。

表3 增压器滤网清洗记录表

时间	项目	柴油机运转时间	作业内容
2019.12.1	1500	20982	滤网清洗
2020.12.13	300	21294	滤网清洗
2019.12.29	300	21618	滤网清洗
2020.1.12	300	21918	滤网清洗
2020.1.26	300	22165	滤网清洗
2020.2.9	1500	22441	滤网清洗
2020.2.23	300	22852	滤网清洗
2020.3.9	300	23181	滤网清洗

增压器过滤器不适用，过滤效果差，灰尘等颗粒物进入空冷器，会导致空冷器散热翅片脏污。翅片脏污会降低空冷器对压缩空气的冷却效果，同时风阻增大会导致缸内进气量不足，燃烧不充分，使排烟温度升高。

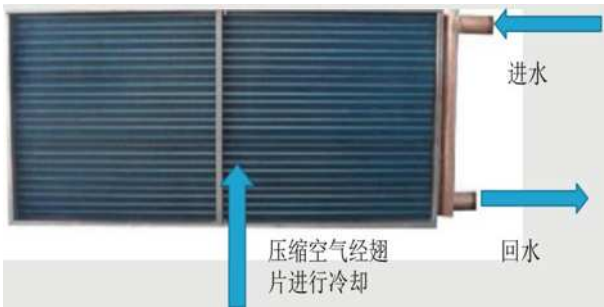


图5 空冷器工作原理简图

2020年2月，对增压器滤网进行了清洗检查，对压气机和空冷器进行了拆检，发现空冷器散热翅片存在较多灰尘，对空冷器翅片进行了清洗。完成上述作业后柴油机每运行25小时统计一次排烟温差数据，总计统计40组数据进行分析，并制作了散布图（见图6）。

表4 柴油机排烟温差与冲洗后运行时间分析表

时间(h)	温差(°C)	时间(h)	温差(°C)	时间(h)	温差(°C)	时间(h)	温差(°C)
0	5	250	8	500	11	750	15
25	5	275	8	525	11	775	15
50	6	300	9	550	13	800	15
75	6	325	9	575	13	825	17
100	6	350	9	600	13	850	17
125	7	375	9	625	13	875	17
150	7	400	9	650	13	900	19
175	7	425	9	675	14	925	19
200	8	450	11	700	14	950	19
225	8	475	11	725	14	975	20

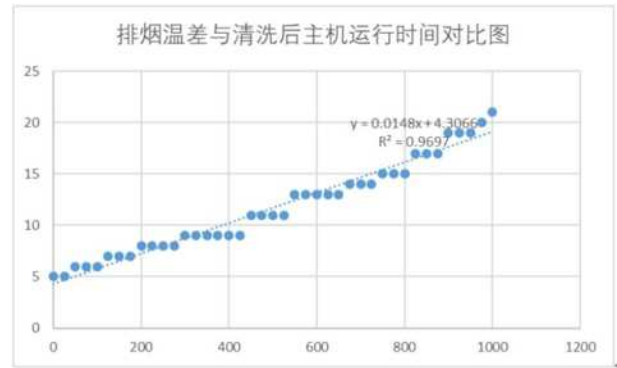


图6 排烟温差与清洗后柴油机运行时间对比散布图

从散布图可以看出， $y = 0.0148x + 4.3066$ ， $R^2 = 0.9697$ ， $R = 0.9847$ ，取  $N = 40 - 2 = 38$ ， $\alpha = 0.01$  查相关系数检验表， $R_{\alpha} = 0.40264$ ， $R > R_{\alpha}$ ，排烟温差和清洗后柴油机运行时间成正强相关。可见增压器防污装置不适用是导致排烟温度升高的故障原因。

### 3.3 检查确认总油门杆设计是否满足要求

验证过程：

油门总杆是原油发电机组油量供给执行机构，当调速器控制器723给出增减油门信号后，油门总杆会驱动油门齿条动作，达到控制高压油泵供油量的目的。国标 GB/T 5770-2020 规定喷油泵的油量调节机构应灵活无阻滞。

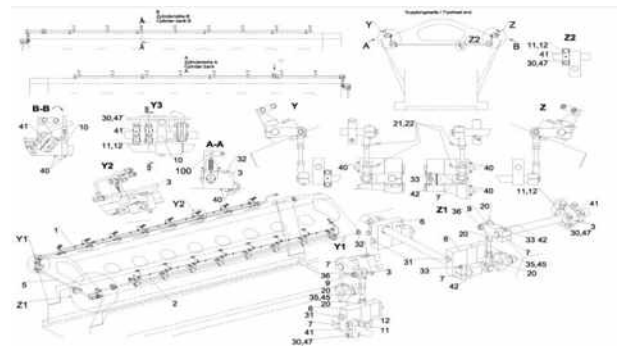


图7 原油发电机组油门总杆

QC小组对油门总杆进行检查时发现油门总杆传动轴存在润滑不良，转动卡阻的情况。下图8中6是油门总杆传动轴，存在设计缺陷，无法加注润滑脂，仅从侧面加注润滑油，无法起到良好润滑，存在卡阻，转动不灵活的情况。当负载变化需要增减油门时，由于传动杆卡阻，无法及时响应，会导致高压油泵齿条偏差，使缸温异常。

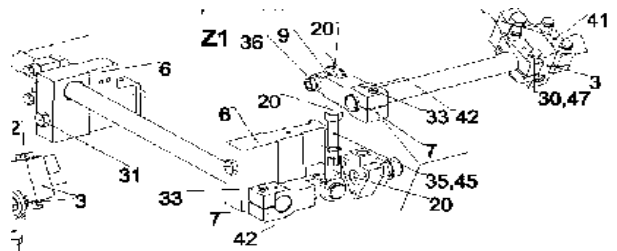


图8 油门总杆传动轴结构图

国标 GB/T 5770-2020, 对各缸供油量不均匀度规定见下表 (表 5)。

多缸喷油泵各缸供油量不均匀度计算公式:

$$\delta = 2(Q_{max} - Q_{min}) / (Q_{max} + Q_{min}) \times 100\%$$

式中:  $\delta$ : 各缸供油量不均匀度;

$Q_{max}$ : 各缸中的最大油量, 单位为毫升 (mL);

$Q_{min}$ : 各缸中的最小油量, 单位为毫升 (mL)。

表 5 多缸喷油泵各缸供油量不均匀度

序号	齿条 刻度差	两侧 排温差	序号	齿条 刻度差	两侧 排温差	序号	齿条 刻度差	两侧 排温差
1	0.6	16	15	1.3	30	29	1.1	22
2	0.5	22	16	0.4	5	30	1.2	24
3	1.1	24	17	0.5	11	31	1.5	29
4	1.2	27	18	0.7	13	32	1.4	26
5	1.5	25	19	0.2	14	33	0.3	20
6	0.6	11	20	1.3	29	34	1	21
7	0.8	15	21	1.9	38	35	1.5	26
8	0.7	13	22	1.7	33	36	1.3	32
9	1.4	26	23	1.6	35	37	1.7	35
10	1.1	28	24	1.6	47	38	1.2	24
11	0.6	12	25	0.6	13	39	1.1	20
12	0.6	10	26	0.5	10	40	1.4	30
13	2	41	27	0.2	5			
14	1.1	26	28	0.8	16			

喷油泵缸数	各缸供油量不均匀度 $\delta$ %	
	额定工况	怠速工况
2	6	25
3-4		30
5-6		35
8-10		40
$\geq 12$	8	45

对柴油机 16 缸停车零位进行检查, 将油门手柄置于停车位置, 检查并统计齿条刻度。当停车时齿条刻度小于刻度位置 2 时, 可保证各缸喷油器供油为零, 保证可靠停车。通过下表 (表 6) 可见, 各缸停车刻度均在齿条刻度 0-2 内, 单侧刻度较均匀。但 C 柴油机各缸齿条停车零位 B 侧比 A 侧大, 需要进一步验证。

表 6 高压油泵齿条停车刻度

柴油机	长度 mm	1	2	3	4	5	6	7	8
A 柴油 机	A 侧	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	B 侧	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
B 柴油 机	A 侧	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	B 侧	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
C 柴油 机	A 侧	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	B 侧	0	0	0	0	0	0	0	0
D 柴油 机	A 侧	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
	B 侧	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

在不同负载下对柴油机齿条刻度进行检查, 不同负载下两侧油门刻度均存在偏差。但在额定工况下, 最大不均匀度  $\delta = 8.5\%$ , 超过国标规定范围。

表 7 高压油泵齿条停车刻度

柴油机	长度 mm	1	2	3	4	5	6	7	8	不均匀度
20%	A 侧	11	10.9	11.1	10.8	11	11	10.9	10.8	21.6%
	B 侧	11.5	12	11.6	12.2	11.7	11.8	12.3	11.6	
80%	A 侧	46.2	46.5	45.0	46.5	46.2	45.9	46.1	46.2	8.5%
	B 侧	48.0	48.1	47.9	48.2	49	48.2	48.1	47.9	

QC 小组在 2019 年 11 月-2020 年 3 月, 检查记录各缸高压油泵齿条刻度 (见表 8), 计算两侧平均刻度差并与增压器排温差进行对比, 并绘制散布图进行分析 (图 9)。

表 8 高压油泵齿条刻度差与增压器两侧排温差对比表

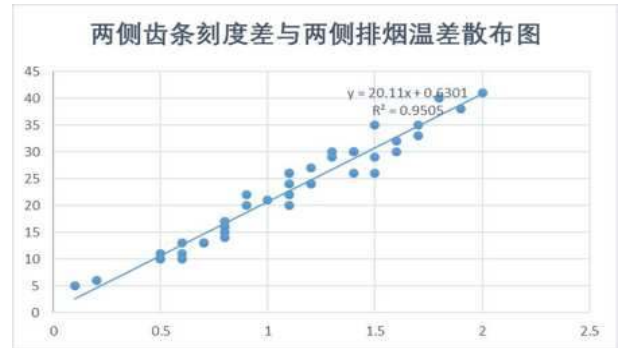


图 9 高压油泵齿条刻度与增压器排温对比散布图

从散布图 9 可以发现, 随着齿条刻度偏差的增大, 柴油机两侧排温温差增大。根据散点图预测出两者关系式为  $y = 20.11x + 0.6301$ ,  $R^2 = 0.9505$ ,  $R = 0.9749$ , 取  $N = 40 - 2 = 38$ ,  $\alpha = 0.01$  查相关系数检验表,  $R_\alpha = 0.40264$ ,  $R > R_\alpha$ , 两者为正强相关。

2020 年 1 月至 2 月, 柴油机每运转 150 小时, 对油门总杆卡阻情况进行统计如下表 (表 9), 并绘制了排温折线图 (图 10), 从图 10 中可知当出现油门卡阻情况时, 排温温差明显增大。2020 年 1 月至 2 月, 共采集数据 16 次, 油门卡阻 4 次, 故障率 25%, 严重不满足国标要求。

表 9 油门卡阻情况与排温温差对比表

时间	机组	卡阻情况	排温温差
2020.1.3	D	卡阻	25°C
2020.1.11	B	不卡阻	9°C
2020.1.15	C	不卡阻	10°C
2020.1.19	B	卡阻	32°C
2020.1.20	D	不卡阻	10°C
2020.1.22	A	不卡阻	6°C
2020.1.29	D	不卡阻	7°C
2020.2.3	B	不卡阻	3°C
2020.2.6	A	不卡阻	5°C
2020.2.9	D	不卡阻	10°C
2020.2.16	B	卡阻	30°C
2020.2.17	D	不卡阻	10°C
2020.2.21	A	不卡阻	6°C
2020.2.24	D	卡阻	36°C
2020.2.28	A	不卡阻	10°C
2020.2.29	D	不卡阻	6°C

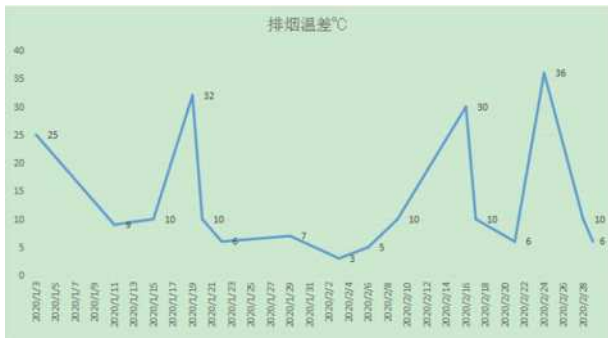


图 10 排烟温差折线图

结论：当前油门总杆结构设计不当，易导致油门总杆卡滞和磨损，不满足国标 GB/T 5770-2020 中对油量调节机构灵活性的要求。通过散布图分析， $R=0.9749$ ，取  $N=40-2=38$ ， $\alpha=0.01$  查相关系数检验表， $R_\alpha=0.40264$ ， $R>R_\alpha$ ，高压油泵齿条刻度与增压器排温成正强相关关系。在 80% 负载下，计算各缸油门不均匀度，最大不均匀度  $\delta=8.5\%$ ，超过国标规定范围。当油门总杆卡阻时，柴油机排烟温差明显升高，油门总杆结构设计不当。

### 3.4 检查确认 AB 两侧 16 缸喷油器启喷压力设置是否均匀

将所有喷油器拆检，更换易损件并校验喷油器启喷压力。记录喷油器启喷压力（见表 10）和雾化效果，并进行分析。

表 10 四台柴油机各缸喷油器启喷压力表

柴油机	喷油器启喷压力 (参考值 360-450bar)							
A 柴油机	371	411	420	422	433	432	425	449
	433	423	442	434	440	405	406	407
B 柴油机	383	389	423	415	386	407	401	421
	387	416	419	413	392	396	410	422
C 柴油机	399	417	418	414	448	373	409	423
	396	415	409	406	425	382	403	396
D 柴油机	394	414	396	430	438	405	376	402
	413	418	408	388	413	406	377	426

根据上表制作直方图（图 11）分析喷油器校验质量，直方图呈现中间高两边低，属于正常形态。

最大值： $X_{max}=449bar$ ；最小值： $X_{min}=371bar$ ；极差： $R=X_{max}-X_{min}=449-371=78bar$ ；标准差：18.16bar；中位数：410bar。

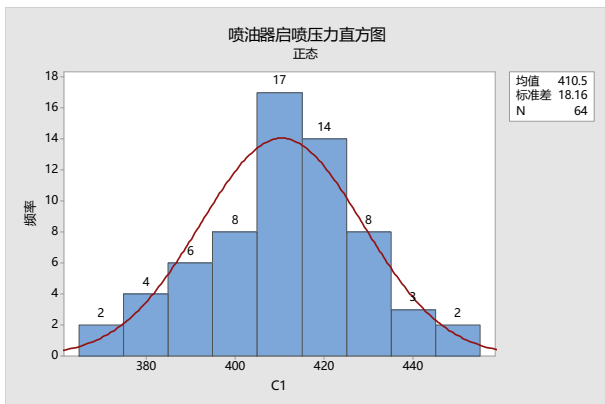


图 11 喷油器启喷压力直方图

### 3.5 检查确认气门间隙设置是否均匀

柴油机每次 150 小时维保，测量柴油机各缸气门间隙，将两侧平均偏差值和增压器温度进行对比，并制作散布图进行分析。

根据散布图预测出两者关系式为  $y=23.042x+29.098$ ， $R^2=0.0651$ ， $R=0.2551$ ，取  $N=40-2=38$ ， $\alpha=0.01$  查相关系数检验表， $R_\alpha=0.40264$ ， $R<R_\alpha$ ，出气门间隙的偏差与排温排查为弱相关关系，因此气门间隙设置不当为非主要因素。

表 11 柴油机各缸气门间隙偏差与增压器排温表

序号	气门间隙偏差	排温偏差	序号	气门间隙偏差	排温偏差	序号	气门间隙偏差	排温偏差
1	0.05	24	11	0	28	21	0.1	45
2	0.15	32	12	0.02	27	22	0.1	31
3	0.1	45	13	0.05	33	23	0.13	29
4	0.1	31	14	0.02	32	24	0.05	32
5	0.13	29	15	0.01	44	25	0	32
6	0.05	32	16	0	27	26	0.09	24
7	0	32	17	0.04	34	27	0	25
8	0.09	24	18	0.12	33	28	0.04	26
9	0	25	19	0.05	24	29	0	26
10	0.04	26	20	0.15	22	30	0.02	27

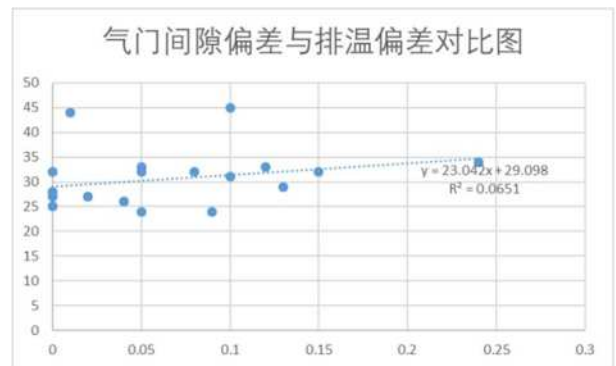


图 12 气门间隙与增压器排温关系散布图

综上所述，确认的主要故障原因为：

- ①油门总杆结构设计不当；②增压器滤器不适用；

## 4 故障处理过程

### 4.1 对总油门传动杆进行改造

#### 4.1.1 实施方案内容确定

(1) 在油门杆传动轴承处钻孔，加装黄油嘴，并在传动轴上切割出油道，每次 750 小时维保时加注黄油，保证传动轴良好润滑。

(2) 油门总杆用黄油布包裹保养，减少腐蚀。

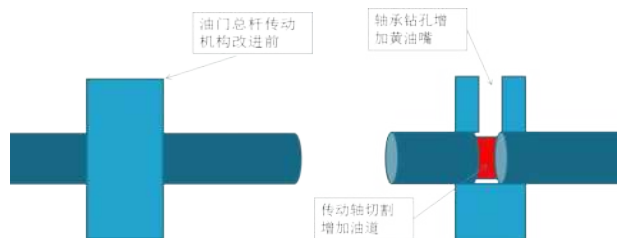


图 13 总油门杆传动机构改进前后对比示意简图

#### 4.1.2 实施过程

将柴油机油门横杆和 A/B 两侧油门杆拆下，对油门杆支架钻孔并更换衬套，用丝攻攻出螺纹加装黄油嘴，每台柴油机更换衬套加装黄油嘴各 14 个。针对传动杆支架衬套无法及时加注黄油的问题，在支架对应位置油门传动杆上钻孔并切割出凹槽油道，以便及时更加注油。



图 14 改造前的传动机构



图 15 传动杆固定机构钻孔



图 16 传动杆传动机构加装黄油嘴

#### 4.1.3 实施效果检查

总油门传动杆改造后，2020 年 4 月至 5 月，在 50% 负载下对柴油机两侧齿条刻度差进行统计，并制作直方图进行分析。

表 12 柴油机两侧齿条刻度差统计表

0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
0.02	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.03	0.03
0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01
0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.03	0.03	0.02	0.00	0.02
0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
0.02	0.04	0.04	0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.03	0.03
0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01
0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.03	0.03	0.02	0.00	0.02

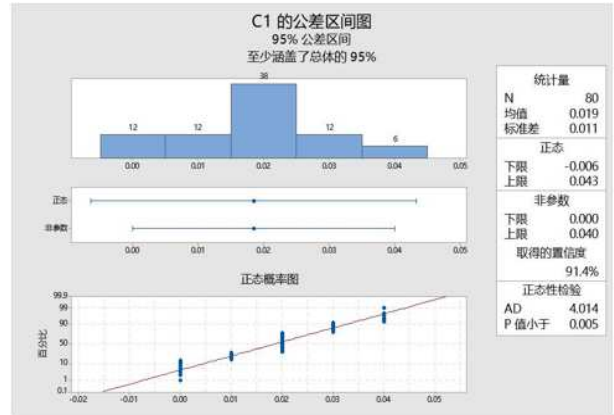


图 17 齿条刻度差直方图

均值=0.019mm;

中位数=0.02mm;

标准差=0.011mm;

最小值=0mm;

最大值=0.04mm;

直方图呈现中间高两边低，属于正常形态，最大值小于 0.05mm，表示柴油机运行过程中，柴油机两侧油门齿条刻度差，处于可控制状态，问题解决。

#### 4.2 增加外置过滤网

(1) 实施方案内容确定：在增压器进气消音器外增加带式过滤网，增加过滤效果，对新增加的滤网每 150 小时进行一次清洗。

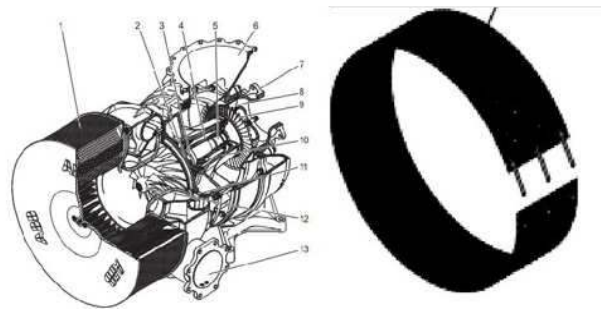


图 18 在消音器滤器外增加带式滤网



图 19 现场安装外置滤网

(2) 实施过程：选择目数为 500 目耐高温尼龙网，根据消音器的周长和宽度进行加工（280mm×36mm），滤网带搭口使用卡销进行锁紧。

(3) 实施效果检查：2020 年 5 月外置滤网安装后，在柴油机每运转 150 小时对滤网进行一次清洗，并每 3 天记录扫气箱内空气温度，同时与不使用外置滤网柴油机进行对比分析。从下表可见使用外置滤网柴油机扫气箱内空气温度在 45.3℃-46.5℃之间，无明显升高趋势。未使用外置滤网柴油机扫气箱内空气温度有明显升高趋势。2020 年 6 月对按照外置滤网柴油机空冷器进行拆检，未发现散热翅片异常脏堵情况，扫气箱进气格栅无污垢，外置滤网过滤效果满足要求。从下表可见使用外置滤网柴油机扫气箱内空气温度在 45.3℃-46.5℃之间，无明显升高趋势。达到扫气箱温度低于 48℃的控制目标。

表 13 扫气箱温度对比统计表

时间	使用外置滤网扫气箱内空气温度 (°C)	不使用外置滤网扫气箱内空气温度 (°C)
5.1	45.6	43.7
5.3	45.4	43.6
5.6	45.5	46.1
5.9	45.5	46.4
5.12	45.4	47.1
5.15	45.6	47.3
5.18	46.1	47.4
5.21	46.5	47.2
5.24	45.6	47.5
5.27	45.2	47.9
5.30	46.3	48.1
6.2	45.7	48.2



图 20 扫气箱温度变化趋势图

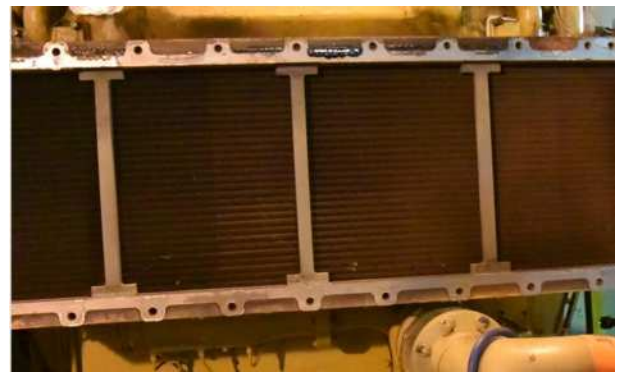


图 21 空冷器拆检

### 4.3 效果检测

对 2020 年 7-12 月柴油机两侧排烟温偏差大故障的因素再次进行了统计，并绘制了排列图。

表 14 2020 年 7-12 月柴油机两侧排温偏差大故障率统计表

存在问题	频数 (h)	频率 (%)	累计频率 (%)
温度探头故障	7	36.84	36.84%
气门间隙变化	2	10.52	47.35%
供油量不均	2	10.52	57.88%
燃烧不均匀	2	10.52	68.4%
其它故障	6	31.6	100.00%
合计	19	100	NA

根据柴油机两侧排温偏差大故障率统计表得到柴油机两侧排温偏差大故障率排列图。

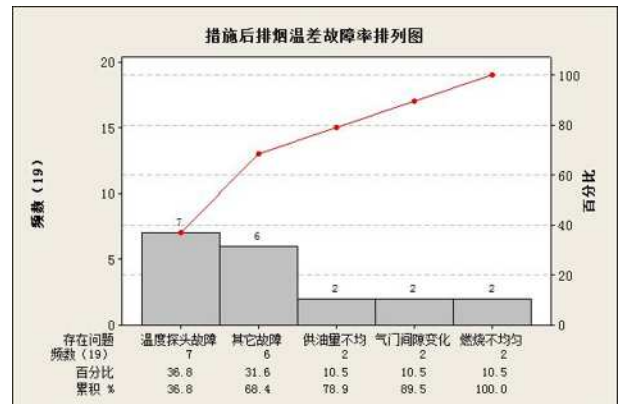
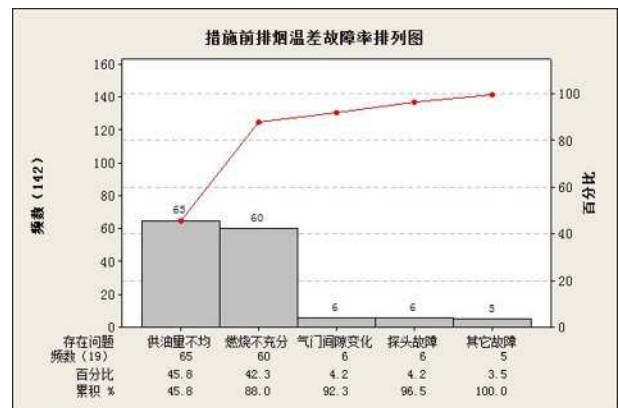


图 22 措施前、后排温偏差大故障率排列图

检查结论：从图 22 可以看出，供油量不均和燃烧不均匀已经从关键多数成为次要少数，总频数大大减少，主要问题有效解决，而且总体故障率明显降低。

## 5 结语

通过逐项排查找找到柴油机两侧排温偏差大故障主要原因，

通过改造柴油机油门控制机构、增加外置过滤网等措施，成功解决了发电机 C 柴油机两侧排温偏差大的故障，也大大降低了整体故障率，提高了柴油机整体系统效率，提高平台发电系统的稳定性，消除了设备隐患和由此可能导致生产关停的潜在隐患，同时也降低了作业风险和成本。

## 参考文献：

- [1] Caterpillar Marine Trading. Calculation of the Resistance in Exhaust Gas Piping.2015.
- [2] GB/T 5770-2020.柴油机柱塞式喷油泵总成技术条件[S].
- [3] 孙培延.船舶柴油机[M].大连.大连海事大学出版社,2002.
- [4] Caterpillar Marine Trading. Index of Contents Engine Documentation CM32C[M].2014.
- [5] ABB Turbo Systems Ltd. Turbocharging Operation Manual TPL65-A36[M].2011.