

关于朔黄铁路黄骅港站直流电力机车功补柜 RC 回路电阻过热原因分析与研究

王马俊

国能朔黄铁路发展有限责任公司机辆分公司 河北 沧州 061000

【摘要】：2024年5月至9月份朔黄铁路黄骅港车站SS4型直流电力机车功补柜RC回路过压吸收电阻频繁过热、接线端子与防护管烧损故障，本文通过多单位联合试验，系统测试牵引网谐波、直流机车RC回路谐波电流与温度特性，明确故障根源为交流机车产生的31-41次高次谐波与牵引网发生谐波谐振，导致大量谐波电流注入直流机车RC回路引发过热。通过阻抗特性计算与实车验证，提出将RC回路电容由18 μ F改为6 μ F的优化方案，可显著降低谐波发热功率；同时给出交流机车变流器控制策略优化建议。现场应用表明，该整改措施有效抑制电阻过热，保障交直流机车混跑线路安全稳定运行。

【关键词】：直流电力机车；功补柜；RC回路；谐波谐振；电阻过热；谐波抑制

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.005

1 引言

黄骅港车站作为朔黄铁路的终点车站，同时也是全国最大的煤炭下水港车站，位于河北省沧州市黄骅市，核心承担着煤炭接卸、列车编组、空车疏运及港铁联动的关键功能。作为港铁一体化运营的核心节点，实现了“铁路—港口—船舶”的全链条无缝衔接，支撑黄骅港成为全球最大的煤炭下水港。近年来，黄骅港车站运量持续攀升，2025年煤炭运量达2.19亿吨，占朔黄铁路全年运量的62%，建站以来累计接卸煤炭超32亿吨，连续八年运量突破2亿吨，成为西煤东运通道终端的核心枢纽。

朔黄铁路电力机车主要包含SS4B、SS4G直流电力机车，HXD1型、神华号、国能号交流电力机车。2024年5月至9月，站内直流机车频繁出现功补柜RC回路过压吸收电阻过热故障，伴随接线端子熔化、蛇形防护管烧损，严重威胁行车安全与设备可靠性，影响港口运输效率。

RC回路是直流机车功补柜核心过压吸收单元，正常工况下用于吸收操作过电压与低频瞬态谐波。当牵引供电系统发生高次谐波谐振时，RC回路阻抗随频率升高急剧下降，谐波电流大幅增大，电阻发热功率远超设计阈值，引发过热烧毁。目前针对交直流混跑线路下谐波谐振导致直流机车RC回路过热的系统性研究较少，现场缺乏成熟、经济、可快速落地的治理方案。

本文依托国家能源集团朔黄铁路机辆分公司牵头，联合西南交通大学、中车株洲电力机车有限公司、中车株洲研究所等单位开展的现场谐波测试与机理分析，系统阐明过热根源，提出高效整改方案并完成实车验证，为同类交直流混跑铁路牵引供电系统谐波治理提供技术参考与工程范例。

2 事件概况

2024年5月至9月黄骅港车站连续发生直流电力机车功补

柜RC回路电阻过热故障，主要表现为：

- (1) 过压吸收电阻温度快速攀升，短时内最高达270℃；
- (2) 接线端子、连接线蛇形防护管过热烧损、老化变形；
- (3) 故障集中发生于多台交流机车同时投入运行时段。

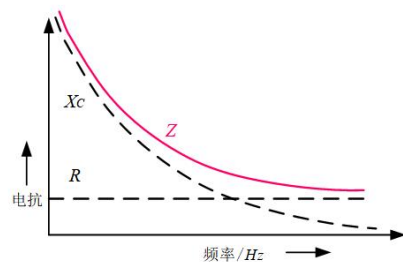
为快速定位故障根源，机辆分公司成立故障攻关小组，在黄骅港车站开展多工况联合试验，测试内容包括：

- (1) 直流机车RC回路谐波含量、谐波电流、电阻温度实时监测；
- (2) 1.0平台、2.0平台变流器交流机车在不同四象限启动重数下牵引网谐波特性；
- (3) 牵引变电所谐波畸变率、特征谐波含量同步测试。

3 故障机理与测试分析

3.1 原理分析

谐波谐振原理：谐波谐振是线性无源网络里感性元件和容性元件耦合的一种固有振荡现象。产生条件满足：(1) 牵引供电系统（电力系统、牵引变压器、牵引网）存在谐振点；(2) 机车作为谐波源注入谐波电流；(3) 机车谐波电流覆盖了牵引供电系统的谐振点。如果满足以上三个条件，牵引网电压和电流会产生高频畸变，出现过电压和过电流。



直流机车功补柜RC回路阻抗频率特性

- ◆ SS4₂型机车RC回路参数 $R = 3.1\Omega \quad C = 18\mu F$
- ◆ RC回路基波总阻抗 $Z_{f1} = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f_1 C}\right)^2} = 176.86\Omega$
- ◆ RC回路21次谐波总阻抗 $Z_{f21} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f_{21} C}\right)^2} = 8.97\Omega$
- ◆ RC回路31次谐波总阻抗 $Z_{f31} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f_{31} C}\right)^2} = 6.49\Omega$

牵引网电压经车载变压器耦合，牵引侧表现为高次谐波电压源，该谐波电压作用在 RC 回路上，产生谐波电流，引起发热。谐波频率越高时谐波总阻抗越小，RC 回路谐波电流越大，进而导致电阻温度快速升高。

3.2 直流机车数据分析

5月8日至5月10日在黄骅港车站对 SS4B0055 机车 RC 回路电压、电流进行测试。5月9日 18:57-19:20 时刻 RC 回路电阻温度上升较快，于 19:20 上升到 270℃；5月11日 14:46-15:20 时段 RC 回路电阻温度上升较快，于 15:20 上升到 199℃。其他时段未见明显异常。5月9日 RC 回路电阻温度异常时段谐波测试结果如下：

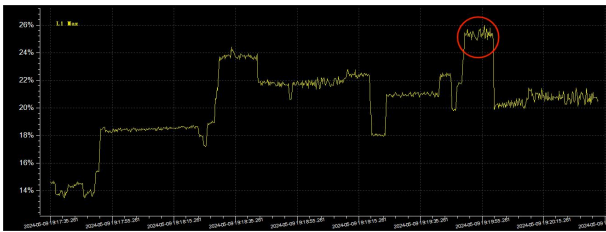


图 2-1 牵引侧网压谐波畸变率趋势图

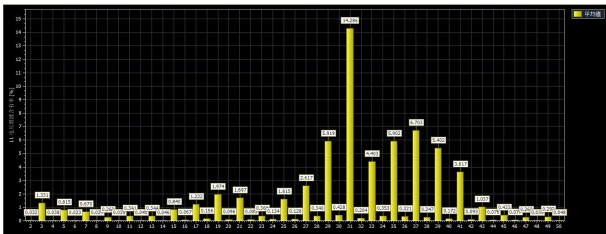


图 2-2 牵引侧网压各次谐波含有率柱状图

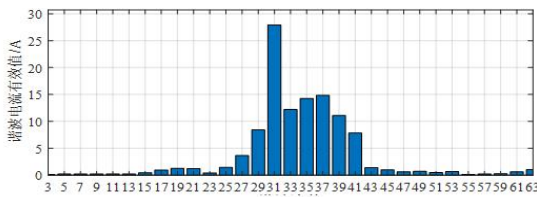


图 2-3 18 μ f 5 月 9 日 18:57-19:22 时段 RC 回路电流各次谐波有效值

表 2-1 牵引侧网压奇次谐波含有率

奇次谐波含有率/%	含有率	次数	含有率	次数	含有率
3	1.331	19	1.974	35	5.902
5	0.815	21	1.697	37	6.703
7	0.670	23	0.469	39	5.402

9	0.263	25	1.615	41	3.617
11	0.341	27	2.617	43	1.037
13	0.344	29	5.919	45	0.433
15	0.840	31	14.286	47	0.073
17	1.222	33	4.4403	49	0.293

表 2-2 18 μ f RC 回路电流奇次谐波有效值

奇次谐波有效值/A	有效值	次数	有效值	次数	有效值
3	0.15	19	1.25	35	14.23
5	0.21	21	1.23	37	14.84
7	0.17	23	0.421	39	11.1
9	0.21	25	1.422	41	7.824
11	0.244	27	3.461	43	1.386
13	0.219	29	8.409	45	1.005
15	0.461	31	27.92	47	0.642
17	0.95	33	12.2	49	0.709

表 2-3 18 μ f 网压谐波畸变率及 RC 回路谐波总电流

	时刻		19:10-19:20	20:40-21:09
	5月9日 测试数据	网压有效值最大值	最大值	28.14kV
95%值			27.89kV	27.01kV
网压 THD		最大值	26.152%	14.012%
		95%值	23.697%	13.516%
RC 回路总谐波电流		最大值	41.232A	19.203A
		95%值	33.644A	15.184A
电阻温度			270℃	103℃

5月9日 18:57-19:20 直流车 RC 回路电阻温度快速上升，对应时刻网压畸变率明显升高，达到 26.152%，接近正常时刻网压畸变率的 2 倍。RC 回路 31 次至 41 次奇次谐波电流含量升高，总谐波电流含量达到 41.232A。其中网压 31 次电压谐波含有率达到 14.286%，31 次电流谐波有效值达到 27.92A。

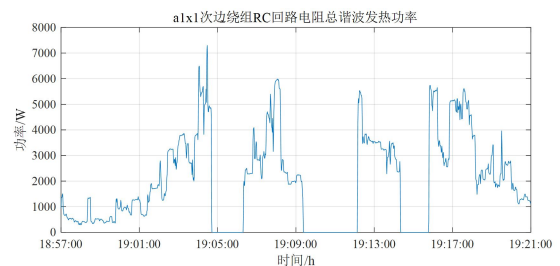


图 2-4 18 μ f 5 月 9 日 18:57-19:21 时段 RC 回路实时发热功率曲线

5月9日 18:57-19:21 时段 RC 回路发热功率趋势图如图 2-4 所示，根据功率计算公式计算特定次数谐波发热功率，21 次谐波引起 RC 回路电阻发热功率瞬时值能够达到 70.02W，31 次谐波引起 RC 回路电阻发热功率能够达到 2417.38W，RC 回路电阻总发热功率可以达到 5068.12W，且变化趋势与 31 次谐波

引起 RC 回路发热功率基本相同。

3.3 交流机车数据分析

交流机车牵引变流器开关频率为 450HZ,根据谐波产生机理分析,交流机车牵引变流启动 2 重四象限工况下会产生 36 次频率特性谐波 ($2n \pm 1$),谐波频谱带对应 31-41 次谐波频谱带。交流机车在升弓闭合主断不给流工况下,牵引变流器处于不控整流模式,机车会根据辅助回路负载变化启动 2 重四象限。

1.7 月 16 日对国能号 1016 机车启动 2 重四象限与启动 4 重四象限工况原边电流谐波电流测试分析,通过测试 2 重四象限工况下 31 次至 41 次谐波电流明显高于 4 重四象限工况,如下图所示:

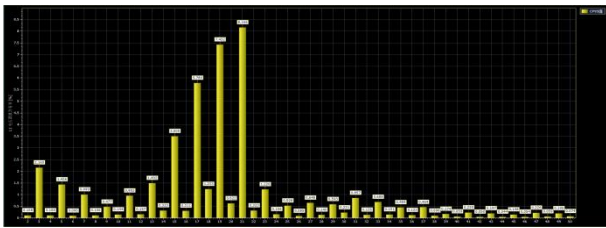


图 2-5 国能号 1016 启动 4 重四象限时电流谐波有效值

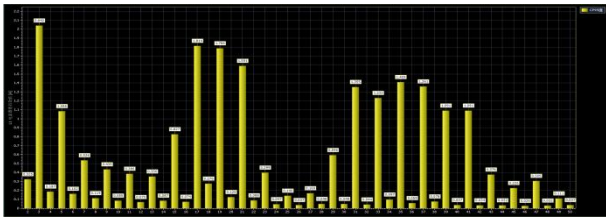


图 2-6 国能号 1016 启动 2 重四象限时电流谐波有效值

2.8 月 9 日 8:30-9:00 天窗点利用一台直流机车 SS4B0142,6 台交流机车(1001、1015、7007、7144、2019、2020)在黄骅港开展谐波测试试验。通过对各台交流机车依次升弓后网侧电压电流谐波情况分析可知,当增加交流机车升弓数量时,网侧电压高次谐波含有率呈上升趋势,其中 31 次谐波含量有明显增大趋势,且在各次谐波中含量逐渐变为最大,电流谐波有效值也呈现相同态势。第一次升弓试验,4 重四象限工况下,网侧电压谐波含有率最大值为 31 次谐波 1.575%,电流谐波有效值最大为 31 次 0.371A;第二次升弓试验,2 重四象限工况下,网侧电压谐波含有率最大值为 31 次谐波 2.09%,电流谐波有效值最大为 31 次 0.498A。4 重四象限较 2 重四象限对谐波有一定的抑制作用。测试数据如下:

表 2-4 18 μ f:34-8:43 交流机车依次升弓后网压谐波含有率 (%)

交流机车升弓顺序	4 重四象限工况下交流车依次升弓后牵引网 31 次至 41 次谐波含有率%	2 重四象限工况下交流车依次升弓后牵引网 31 次至 41 次谐波含有率%
----------	---------------------------------------	---------------------------------------

谐波次数	31 次	33 次	35 次	37 次	31 次	33 次	35 次	37 次
1001	0.01	0.005	0.005	0.007	0.016	0.01	0.006	0.01
1005	0.06	0.037	0.055	0.039	0.347	0.313	0.244	0.221
7007	0.638	0.556	0.443	0.382	0.462	0.379	0.31	0.254
7144	1.095	0.923	0.694	0.613	0.456	0.36	0.328	0.263
2019	1.308	1.063	0.787	0.686	1.051	0.886	0.713	0.605
2020	1.575	1.195	0.909	0.746	2.09	1.177	1.365	1.159

表 2-5 18 μ f:34-8:43 交流机车依次升弓后 142 机车 RC 回路谐波电流有效值 (A)

交流机车升弓顺序 谐波次数	4 重四象限工况下交流车依次升弓后 SS4B0142 机车 RC 回路谐波电流有效值 (A)				2 重四象限工况下交流车依次升弓后 SS4B0142 机车 RC 回路谐波电流有效值 (A)			
	31 次	33 次	35 次	37 次	31 次	33 次	35 次	37 次
1001	0.023	0.015	0.025	0.014	0.485	0.452	0.389	0.340
1005	0.049	0.034	0.047	0.033	1.206	1.14	0.926	0.852
7007	0.992	0.942	0.791	0.716	0.724	0.644	0.55	0.478
7144	1.707	1.558	1.244	1.50	0.711	0.601	0.589	0.498
2019	2.039	1.784	1.415	1.268	1.91	1.722	1.489	1.323
2020	2.462	2.007	1.631	1.381	3.269	2.965	2.444	2.192

3.4 牵引变电所测试数据分析

自 5 月 3 日黄骅港供电所对牵引网谐波开始测试。5 月 6 日总谐波畸变率为 42.39%, 31 次谐波含量 26.74%, 5 月 7 日总谐波畸变率为 38.36%, 31 次谐波含量 23.99%, 均造成直流机车 RC 支路过热。5 月 9 日变电所谐波总畸变率最高 27.9%, 31 次谐波含量 20.16%, 与 SS4B0055 号试验机车车上监测数据一致。

表 2-5 18 μ f 牵引变电所测试数据

牵引变电所谐波分析	日期	5 月 6 日	5 月 7 日	5 月 9 日
	时间	2:00-2:10	17:30-18:00	19:00-20:00
	直流机车 RC 情况	54、63 机车过热	71、6196、55 过热	55 试验机车 RC 温度从 100°C 上升至最高 270°C
	总谐波畸变率最大值	42.39%	38.36%	27.90%
	最大谐波	31 次	31 次	31 次
	最大谐波含量	26.74%	23.99%	20.16%
	电压有效值	30390.06V	28539.72V	28295.58V

3.5 分析结论

1.直流机车 RC 温度过高原因主要是牵引网中 31 次至 41 次谐波电压过高,导致大量高次谐波电流渗透入直流机车,引起 RC 回路电阻过热。

2.通过对典型时间段电阻发热功率分析,现有直流机车 RC

支路（3个9.3Ω/3000W的特制线绕电阻）满足机车运行安全需要。对测量RC支路过热机车电阻的接线端子接触电阻为0.014mΩ，连接线整体阻值为2.1mΩ，结合RC支路电阻发热原因，表明RC支路接线端子及蛇形防护管过热为电阻发热灼伤，非接触电阻过大导致。

3.当牵引网谐波总畸变率达到25%以上，31次谐波含量达到20%以上时，直流机车RC回路温度会明显升高。当牵引网谐波总畸变率达到30%以上，31次谐波含量达到24%以上时，极易引发直流机车RC回路电阻过热。

4.交流机车在2重四象限工况下，会发出明显31次-41次谐波电流，在4重四象限工况下31次-41次谐波电流较低。

4 整改方案设计 with 验证

4.1 直流机车整改措施

提升直流机车RC回路高次谐波抵抗能力，减少电阻发热功率。调研国铁路局及包神铁路交直流机车混跑线路直流机车功补柜整改方案，对比朔黄线直流电力机车现使用方案，主要存在两点差异：一是国铁及包神铁路功补电容直流机车为6μF，朔黄线直流机车为18μF；二是电阻包神为两个5Ω、2000W电阻串联，朔黄线机车采用三个9.3Ω、3000W电阻并联方式。经过理论计算对比，国铁及包神铁路方案功补柜使用方案对高次谐波有明显的抑制作用，朔黄线机车仅需改变电容大小可取得同样的效果，计算对比结果如表3-1所示：

表3-1 功补柜阻抗对比表

谐波次数		基波阻抗	21次谐波阻抗	31次谐波阻抗	41次谐波阻抗
朔黄现使用方案 R=3.1Ω C=18μF	阻抗	176.86Ω	8.97Ω	6.49Ω	5.28Ω
国铁及包神铁路使用方案 R=10Ω C=6μF	阻抗	530.87Ω	27.18Ω	19.82Ω	16.36Ω
	对比朔黄现方案阻抗增加倍数	3	3.03	3.05	3.1
	对比朔黄现方案电阻发热功率降低倍数	9	9.2	9.3	9.6
朔黄计划整改方案 R=3.1Ω C=6μF	阻抗	530.78Ω	25.45Ω	17.4Ω	13.29Ω
	对比朔黄现方案阻抗增加倍数	3	2.83	2.68	2.52
	对比朔黄现方案电阻发热功率降低倍数	9	7.84	7.2	6.3

4.2 实车验证

10月14日，将SS4B0136、SS4B0173两台直流机车A节功补柜在现有基础上电容由18μF改为6μF，并在黄骅港进行测试验证。10月23日17:30，SS4B0136机车B节RC回路电阻温度最高211℃，A节RC回路电阻温度最高58.2℃，温度相差3.6倍。其他时间段A节RC回路电阻温度明显低于B节，实际测试验证效果明显，测试结果如表3-2所示：

表3-2 SS4B0136RC电容改造后温度记录表

SS4B0136RC 电容改造后温度记录表			
日期	时间	A节功补电阻温度℃	B节功补电阻温度℃
10.23	14:45	43.4	136
10.23	15:05	37.6	90.2
10.23	15:35	38	90.8
10.23	16:05	36.8	90.8
10.23	16:35	34.4	73.8
10.23	17:10	51	209
10.23	17:30	58.2	211
10.23	20:20	21.2	21.6
10.23	20:50	23.6	42.4
10.23	21:20	25.2	49.8
10.23	21:50	26	47.4
10.23	22:20	26.6	53.2

整改措施：直流电力机车功补柜RC回路在现有基础上将电容由18μF改为6μF，对RC回路的谐波发热功率有很好的抑制作用，且方案实施便捷。

4.3 交流机车整改措施

交流机车牵引变流器在启动2重四象限工况下，会发出明显的31-41次特征谐波，且在机车升弓闭合主断不给流时，牵引变流器处于不控整流模式，机车会根据辅助回路负载变化启动2重四象限。

整改措施：优化牵引变流器控制程序，机车牵引变流器在不控整流模式下，取消2重四象限的启动，改为4重四象限启动，减少31次至41次谐波的产生。此项措施无法从根本上消除交流机车31次至41次谐波的产生，建议以直流车整改方案为主，交流车整改措施作为备用方案暂不实施。

5 整改实施与效果

5.1 实施内容

(1) 直流机车批量改造：所有直流电力机车功补柜RC回路电容由18μF统一改为6μF；

(2) 交流机车控制策略优化：作为备用方案，视现场运行情况择机实施。

5.2 治理效果

(1) RC 回路谐波电流大幅下降, 电阻温度稳定控制在 100℃ 以下;

(2) 彻底消除接线端子、蛇形防护管烧损故障;

(3) 交直流机车混跑系统运行平稳, 未再发生同类过热事件;

(4) 改造工期短、成本低, 不影响正常运输生产。

6 结论

(1) 黄骅港直流机车功补柜 RC 电阻过热, 由交流机车产

生的 31~41 次高次谐波与牵引网发生谐振引发, 谐波电流导致电阻发热功率严重超标。

(2) 将 RC 回路电容由 18 μ F 改为 6 μ F, 可显著提高高次谐波阻抗、降低发热功率, 是高效、低成本、易实施的工程化方案。

(3) 交流机车变流器由 2 重四象限改为 4 重四象限, 可进一步抑制谐波源, 作为辅助治理手段。

(4) 本研究建立的“现场测试—机理分析—方案设计—实车验证”体系, 可为国内同类交直流混跑铁路牵引供电系统谐波治理提供标准化解决方案与技术支撑。

参考文献:

[1] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统谐波与谐振分析及治理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.

[2] 中车株洲电力机车有限公司. 直流电力机车功补柜设计与应用技术规范 [S]. 2018.

[3] 王顺森, 刘斗斗, 李鹏. 交流机车四象限变流器谐波特性与抑制策略研究 [J]. 机车电传动, 2022 (3): 45-50.