

环境适应性设计与分析

提升汇流环湿热环境适应性方法研究

文孟军

(中国电子科技集团公司第29研究所, 成都 610036)

摘要: **目的** 提高汇流环在湿热环境下的适应能力。**方法** 实物解剖, 观察汇流环绝缘材料损坏情况、碳粉堆积情况, 在不同温度、湿度下测试绝缘材料绝缘度、抗电强度, 碳粉堆积和导电情况, 比对不同绝缘材料性能, 并找出最适合的绝缘材料, 比对滚动汇流环、碳刷组件、刷丝组件, 找到解决碳粉堆积的方法。**结果** 汇流环受湿热影响会从接缝处和电缆连接处进入湿气, 温度、湿度的上升会使得原绝缘材料性能下降, 长时间使用汇流环, 碳粉会在汇流环内堆积并受到湿热的影响而导电, 局部密封汇流环可以减少湿气进入。PPO 材料性能优异, 可以替换原绝缘材料从而减少湿热的影响, 使用刷丝组件替代碳刷可以避免碳粉的产生。**结论** 综合运用局部密封、绝缘材料改进、碳刷组件改进三种措施, 可以有效提高汇流环在湿热环境下的适应能力。

关键词: 汇流环; 湿热环境; 绝缘材料; 碳粉

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.08.009

中图分类号: TJ01 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)08-0050-05

Method for Adaptability Improvement Slip-ring in Hygrothermal Environment

WEN Meng-jun

(The 29th research institute of CETC, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: Objective To improve slip-ring's adaptability in hygrothermal Environment. Insulating material damage and carbon powder accumulation were observed by anatomizing samples. Insulativity, anti-electric strength, carbon powders accumulation and electrical conductivity of insulating material were theoretically analyzed and tested at different temperature and humidity to compare performance of different insulating materials to find out the most suitable one for the sealing slip ring, and find out the method to solve the carbon powders accumulation by comparing the rolling slip ring, carbon brush and brush filaments. **Results** In hygrothermal environment, the moisture from the joint and the cable connection would impact the slip ring. The increase of temperature and humidity decreased the performance insulating material. The carbon powders would accumulate in the slip ring and conduct electricity with the influence of the hygrothermal environment in a long time service. Sealing the slip ring partially could decrease the moisture percolation. PPO with excellent performance can replace the insulating material in the slip ring to reduce the influence of the hygrothermal environment. Replacing the carbon brush with brush filaments could avoid the production of carbon powders. **Conclusion** The adaptability of slip-ring in the hygrothermal environment might be improved by integrating local seal, insulation material and carbon brush improvement measures.

KEY WORDS: slip-ring; hygrothermal environment; insulating materials; powdered carbon

汇流环又称导电滑环, 或集成环, 主要由动环、静环、电刷、联轴器等组成, 用于实现旋转部分与固

定部分能量、信号的传输。适合应用于无限制的连续旋转, 同时又需要从固定位置到旋转位置传送功率或

收稿日期: 2018-05-15; 修订日期: 2018-06-17

作者简介: 文孟军 (1981—), 男, 四川成都人, 工程师, 主要研究方向为电子设备系统集成。

数据的场所^[1-2]。汇流环的种类较多，常见的有差动汇流环、柱式汇流环和盘式汇流环。

某电子设备使用了一种柱式汇流环，用于实现从固定位置到旋转位置数据和功率的传输，安装在相对裸露的自然环境中，其尺寸小、环数多，同时具有数据环和功率环。当设备在温度、湿度高的环境中使用时，功率环容易发生相邻环路间短路的现象，而在温度、湿度低的环境中则不易发生此类故障。

由于汇流环使用环境的不同，造成了故障率相差很大。文中从工艺防护、材料选择等方面入手，找到提升汇流环湿热环境适应能力的方法，提高设备的可靠性^[3]。

1 原因分析

环境适应性是指装备（产品）在其寿命期预计可能遇到的各种环境的作用下，能实现其所有预定功能与性能和（或）不被破坏的能力^[4-5]。现实情况是汇流环适应湿热环境能力不够，在湿热环境中使用的汇流环，故障率较高。

1.1 故障检测

通过查阅故障检测维修报告，发现所有故障汇流环都是由于功率环中传输高压直流电的环路短路引起的故障。湿热环境下，汇流环内部有潮气进入，会出现两种情况，一是吸附在绝缘片上，导致绝缘片绝缘电阻变低从而在高压情况下短路；二是吸附在掉落的碳粉上，使得碳粉在潮湿环境下导电，从而短路，最终造成汇流环故障。对其中的 5 个故障件进行检查，发现其中 2 个汇流环绝缘片烧毁，如图 1 所示。另外 3 个汇流环碳粉堆积严重且由于潮湿结成小块，如图 2 所示。



图 1 烧毁的绝缘片

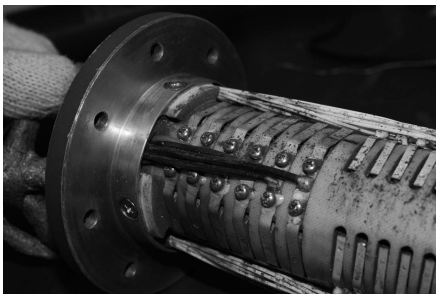


图 2 碳粉堆积情况

1.2 机理分析

1) 湿热的进入。湿热环境对设备的影响大部分是温度和湿度综合作用的结果，温湿度的变化可以导致设备内部出现凝露现象^[6]。由于汇流环内部腔体为非密封状态，在高温高湿环境下，湿热环境中的潮气很容易就进入汇流环的内腔体，从而使绝缘片表面附着一层薄薄的水汽。

2) 湿热对绝缘片绝缘度和抗电强度的影响。将汇流环放入湿热试验箱，分别测试不同温度、湿度条件下绝缘材料的绝缘特性，结果见表 1—4。

表 1 25 ℃时绝缘度测试情况

绝缘材料厚度/mm	汇流环通道	绝缘电阻/MΩ		
		相对湿度 55%	相对湿度 75%	相对湿度 90%
2.2	1-2	1000	200	20
2.2	2-3	1000	150	10
1.2	3-4	1000	400	10
1.2	4-5	1000	500	10

表 2 45 ℃时绝缘度测试情况

绝缘材料厚度/mm	汇流环通道	绝缘电阻/MΩ		
		相对湿度 55%	相对湿度 75%	相对湿度 90%
2.2	1-2	1000	60	11
2.2	2-3	1000	45	7
1.2	3-4	1000	40	7
1.2	4-5	1000	50	9

表 3 65 ℃时绝缘度测试情况

绝缘材料厚度/mm	汇流环通道	绝缘电阻/MΩ		
		相对湿度 55%	相对湿度 75%	相对湿度 90%
2.2	1-2	1000	5	3
2.2	2-3	1000	5	3
1.2	3-4	1000	6	4
1.2	4-5	1000	10	8

表 4 80 ℃时绝缘度测试情况

绝缘材料厚度/mm	汇流环通道	绝缘电阻/MΩ		
		相对湿度 55%	相对湿度 75%	相对湿度 90%
2.2	1-2	1000	5	2
2.2	2-3	1000	4	2
1.2	3-4	1000	5	3
1.2	4-5	1000	2	短路

上述实验中，绝缘材料为聚矾。实验结果表明，

在相同的温度下，湿度越高，绝缘电阻越低；相同湿度下，温度越高，绝缘电阻越低。由此可见，温度和湿度对绝缘片影响极大。

抗电强度的测试结果见表 5—8。

表 5 25 ℃时抗电强度测试情况

绝缘材料 厚度/mm	汇流环 通道	抗电强度/kV		
		相对湿度	相对湿度	相对湿度
		55%	75%	90%
2.2	1-2	√	√	√
2.2	2-3	√	√	√
1.2	3-4	√	√	1.5
1.2	4-5	√	√	1.1

表 6 45 ℃时抗电强度测试情况

绝缘材料厚度 /mm	汇流环 通道	抗电强度/kV		
		相对湿度	相对湿度	相对湿度
		55%	75%	90%
2.2	1-2	√	√	√
2.2	2-3	√	√	√
1.2	3-4	√	√	1.4
1.2	4-5	√	√	0.8

表 7 65 ℃时抗电强度测试情况

绝缘材料厚度 /mm	汇流环 通道	抗电强度/kV		
		相对湿度	相对湿度	相对湿度
		55%	75%	90%
2.2	1-2	√	√	√
2.2	2-3	√	√	√
1.2	3-4	√	1.3	1.2
1.2	4-5	√	√	0.5

表 8 80 ℃时抗电强度测试情况

绝缘材料厚度 /mm	汇流环 通道	抗电强度/kV		
		相对湿度	相对湿度	相对湿度
		55%	75%	90%
2.2	1-2	√	√	√
2.2	2-3	√	√	√
1.2	3-4	√	0.8	0.5
1.2	4-5	短路	短路	短路

上述表格中，“√”表示能通过 1100 V 抗电强度测试。实验表明，温度和湿度对抗电强度有较大影响。当温度达到 80 ℃，湿度 90%左右时，1.2 mm 聚矾绝缘材料接近抗电强度临界点，几乎全部被击穿。

试验完成后，恢复至实验前的温度和湿度，再次测试绝缘度和放电强度。结果发现，被击穿环路无法恢复，依然保持击穿状态。

3) 潮湿环境下碳粉的影响。在室温 25 ℃、湿度 65%的状态下，将收集的碳粉分别放置于 10 环信

号环上，在磨合机上转动汇流环，24 h 后测量相邻环间电阻。同样在此状态下改变汇流环湿度为 75%，24 h 后对此 10 环进行测试，再次增加汇流环湿度为 90%，24 h 后对此 10 环进行测试。实验发现，随着湿度的增加，各环路上逐渐有黑点凝结，并越来越严重，测试相邻环路间电阻，结果见表 9。实验表明，潮湿环境下，碳粉会逐渐凝结在汇流环上，并存在导电可能。

表 9 不同湿度下碳粉受影响情况

汇流环 环路	电阻/Ω		
	相对湿度	相对湿度	相对湿度
	65%	75%	90%
1-2	13×10^6	512	2.5
2-3	13×10^6	613	2.2
3-4	13×10^6	713	1.6
4-5	13×10^6	500	1.7
5-6	12×10^6	412	0
6-7	12×10^6	543	0.23
7-8	13×10^6	438	1.2
8-9	13×10^6	467	2.1
9-10	13×10^6	533	1.8

1.3 故障定位

1) 汇流环潮气进入点定位。汇流环有一个封闭的外壳，但是在内外环交接处和电缆接头处没有完全密闭，如图 3 所示，由于呼吸效应，潮气可能从这两处进入。

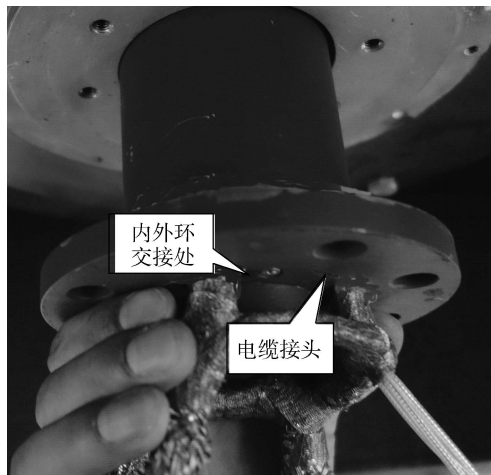


图 3 呼吸作用潮气进入点

2) 绝缘材料击穿定位。汇流环各环路间均通过聚矾绝缘片来进行隔离。聚矾材料存在吸湿性较大的特点。在湿热环境工况下，绝缘片会逐渐吸收空气中的湿气，使绝缘电阻降低，而且在高温碳化后会进一步使自身的绝缘性下降。长期置于高温高湿的环境下，其原有的介电常数恢复较慢，在湿热试验后，绝

缘电阻不能恢复到初始状态。对拆解的 5 套汇流环检测后发现，有多个绝缘片存在击穿烧毁的现象。

3) 碳粉堆积定位。汇流环在转动过程中，会产生碳粉（主要成分为银石墨粉），这些粉末会随汇流环的旋转磨损而脱落，从而滞留在汇流环内。对拆解的 5 套汇流环检测发现，在烧毁的相邻环路间均堆积了较多的碳粉。

2 方法研究与验证

汇流环内部的潮气是由于汇流环没有完全密封导致的。由于汇流环需要旋转和传输数据，很难做到完全密封，因此只能采取多种措施，降低湿热带来的影响^[7-8]。

1) 尽可能对汇流环进行密封。考虑到汇流环需要相对转动，不可能对汇流环整体加上防护罩进行密封，所以采用局部单独防护的措施。可靠的密封方法主要有焊接密封、胶接密封、灌封、O 型密封圈密封、油封和包装密封^[9]等。对于内外环交接处，考虑到需要相对转动，在所有的密封方法中，对活动部分的密封一般以油封为主，所以采用在接合面涂抹高低温润滑脂进行密封^[10]。对电缆接头处，由于无需转动，考虑到成本和可操作性，选择用环氧胶粘剂（如双组分环氧胶）进行胶接密封^[11]。

2) 改进绝缘材料。湿热环境另一个重要的影响就是对绝缘材料的影响，为了减少这种影响，对比了几种常见的绝缘材料。

聚砜力学性能优异，刚性大、耐磨、高强度，即使在高温下也保持优良的力学性能，其温度适用范围为 $-100\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，尺寸稳定性好、成型收缩率小、无毒、耐辐射、耐燃、有熄性。在宽广的温度和频率范围内有优良的电性能。缺点是吸湿性较大，吸湿后烘干温度需到达 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，保持时间在 10 h 以上^[12]。

环氧树脂具有良好的物理、化学性能，它对金属和非金属材料的表面具有优异的粘接强度，介电性能良好，变定收缩率小，制品尺寸稳定性好，硬度高，柔韧性较好，对碱及大部分溶剂稳定。缺点是耐磨性较差，和碳刷或刷丝磨擦易产生沫状颗粒，使电阻不稳定。

PPO 是世界五大通用工程塑料之一，它具有刚性大、耐热性高、难燃、强度较高电性能优良等优点。介电常数和介电损耗在工程塑料中是最小的品种之一，几乎不受温度、湿度的影响，可用于低、中、高频电场领域。在潮湿、负载、高温的条件下具有优良的电绝缘性^[13]。

通过对比，发现由于聚砜的吸湿性比较大，在湿热方面的性能相对环氧树脂和 PPO 要差很多，且不易恢复。环氧树脂和 PPO 材料也是电子行业及汇流环常用的绝缘材料，但由于环氧树脂和电刷接触会产

生屑沫，长时间运行影响电刷的导电性。因此选择 PPO 作为环芯的绝缘材料。

3) 避免碳粉的产生。由于湿热环境下碳粉对汇流环性能影响较大，而碳刷式汇流环在工作过程中电刷和导电环间存在一定的磨损，产生的碳粉容易滞留在汇流环内。为了避免碳粉的产生，常见的方法有将原汇流环改为滚动汇流环^[14]，或者更改碳刷为刷丝组件^[15]。

滚动汇流环具有信号噪声低、传输效率高、免维护、寿命长、不产生碳粉的优点，但是其结构复杂、技术难度大、成本较高，尺寸相对较大。此设备中汇流环尺寸较小，无法采用滚动汇流环。

刷丝组件由刷丝和刷丝固定轴组成，其中刷丝材料为银铜镍合金拉拨定制而成，将多根丝组成一束，这样能同时满足导电及传导信号要求，如图 4 所示。采用刷丝组件替代碳刷，可以有效避免碳粉的产生，且刷丝组件形状和结构跟碳刷相似，对尺寸要求不大，替换时对汇流环改动较小，易于实现。

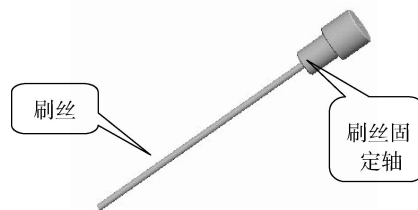


图 4 刷丝组件

通过比较，发现刷丝组件更适合用于对此汇流环的改进。因此选择用刷丝组件替换碳刷。

按照以上制定的方法对 5 个汇流环进行处理，然后进行湿热试验。试验结束后，对 5 个汇流环进行测试，各项功能指标均符合要求。最后，到达设备实际工作现场，对安装在相对裸露自然环境中的汇流环，按照制定的措施进行处理。经过 3 年时间的使用验证，安装在裸露自然环境中的全部汇流环均未发生故障，其湿热环境适应性有了显著提高，证明改进方法有效。

3 结语

文中通过理论分析、数据比对、实验室试验对汇流环的环境适应性进行了一系列改进。通过实验验证、工作环境使用验证，证明改进措施可以使汇流环湿热环境适应能力得到很大程度的提高。

汇流环作为一个关键器件，在众多领域都有应用和研究，其所面对的环境也复杂多变，提升汇流环的环境适应性是一项复杂的系统工程。随着新工艺、新材料的发展，采用更加经济可靠的措施来提高汇流环的环境适应能力是一个重要的研究方向，对增强高科

技产品的市场竞争力有着非常重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 张武. 汇流环接触问题分析[J]. 火控雷达技术, 2009, 38(3): 78-82.
- [2] 李坤芝. 导电滑环技术研究[J]. 舰船科学技术, 1994(5): 56-58.
- [3] GJB 451A—2005, 可靠性维修性保障性术语[S].
- [4] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
- [5] 魏艳娟, 明志茂. 机载设备气候类环境试验标准分析[J]. 环境技术, 2017, 35(1): 55-61.
- [6] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].
- [7] 李起, 朱涵一. 功率汇流环的设计及应用[J]. 电子机械工程, 2005, 21(5): 41-43.
- [8] 刘文科, 赵克俊, 郑传荣. 汇流天馈环线结构伺服系形统式及选型探讨[J]. 火控雷达技术, 2015, 44(1): 94-98.
- [9] 龚光福. 呼吸效应研究[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(3): 238-239.
- [10] 杨正瑛, 赵忠兴. 润滑脂与润滑脂杯[J]. 机械工程师, 2001(3): 54-55.
- [11] 张秀菊, 李波, 林志丹, 等. 电子封装用复合导热绝缘环氧胶粘剂的研制[J]. 绝缘材料, 2009, 42(1): 1-4.
- [12] 张甲敏, 连照勋. 聚砜注塑工艺及制品缺陷对策[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(2): 26-29.
- [13] 田勇, 王秀芳, 杨卓如. 玻璃纤维布增强 EP/PPO 复合材料性能及应用[J]. 工程塑料应用, 2008, 36(6): 46-49.
- [14] 刘文科, 郑传荣, 赵克俊. 滚动汇流环技术的发展和应
用综述[J]. 火控雷达技术, 2014, 43(2): 107-111.
- [15] 陆传琴. 汇流环新材料配对试验与分析[J]. 火控雷达技术, 1993, 28(1): 45-50.