

文章编号: 2097-1974(2024)03-0085-08

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240313

运载火箭中频交流供电线路的远程漏电检测技术研究

徐文晓, 卢 颀, 张学英, 路 航, 李 璨
(北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076)

摘要: 为提升运载火箭测试效率, 优化射前测发流程, 改变传统手动断开电缆进行漏电检测的方法, 面向运载火箭远程漏电检测需求, 开展了运载火箭中频交流供电线路的远程漏电检测技术研究, 保持原有箭地供电线路, 对漏电检测电路进行设计及精度计算分析, 并采取自检测等设计提高系统的可靠安全性。经试验验证, 该系统满足在线连续漏电检测不少于24h, 精准漏电检测范围为500k Ω ~50M Ω , 漏电检测精度为 $\pm 10\%$, 具有高可靠、高精度、高效率等特点, 并成功应用于大型低温运载火箭的测发流程中, 对于提升运载火箭自动化测试水平、实现前端无人值守具有重要意义。

关键词: 运载火箭; 中频; 交流电供电线路; 远程控制; 漏电检测

中图分类号: V442

文献标识码: A

Research on Remote Leakage Monitoring Technology for Medium Frequency AC Power Supply Circuit of Launch Vehicle

XU Wenxiao, LU Di, ZHANG Xueying, LU Hang, LI Can
(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing, 100076)

Abstract: In order to improve test efficiency of launch vehicle and optimize the process of prelaunch testing, and to alter the traditional method of disconnecting electric cables manually for leakage monitoring, based on maintaining the original power supply circuit, a leakage monitoring technology research for the medium frequency alternating current supply circuit is proposed and developed. At the same time, the precision of leakage monitoring circuit is analyzed and the self-detection method is used to advance the reliability and safety of the system. The test results show that the system realized online leakage monitoring lasting no less than 24hours, and the range of leakage monitoring is 500K Ω ~50M Ω with the precision better than 10%, satisfying the monitoring requirements. Finally, the system experiment is carried out in the prelaunch testing of large cryogenic launch vehicle with high-reliability, high-precision and high-efficiency, and has significance of improving the level of automated testing and realizing unattended fore-end of launch vehicle.

Keywords: launch vehicle; medium frequency; AC supply circuit; remote control; leakage monitoring

0 引言

随着中国载人航天事业的蓬勃发展, 运载火箭发射高密度已成为常态, 提升测试自动化水平、逐步实现射前无人值守的需求迫在眉睫, 用电安全问题也愈发引起重视, 漏电检测技术也越来越广泛地应用在各行各业的供电系统中^[1-3]。

由于运载火箭发射场环境复杂, 对于各电气系统的供电线路需要持续进行漏电检测, 以提前发现漏电隐患。目前中国主要针对低压直流电的供电线路开展在线实时检测, 提出多种漏电检测方法, 如基于信号触发、嵌入式处理器等的漏电检测方法^[4-8], 而伺服

机构电机、动力循环泵电机等中频交流供电线路目前只采用传统的手动断开供电电缆的方法, 使用万用表进行绝缘电阻测试。这种测试方法不能实现长时间在线持续检测, 且需要反复断开插头, 破坏系统完整连接状态从而影响测试覆盖性, 此外射前低温推进剂加注后需要前端人员上塔测试, 降低了测试效率, 不利于实现前端无人值守。

目前的漏电检测方法大多数为执行接通继电器后测得的大阻值即代表实际绝缘性能, 但未考虑到继电器接通异常时仍可呈现漏电阻值较大的误导现象, 而仅靠继电器辅触点的状态采集反馈无法真实代表继电

器主触点的真实接通状态，故测试可靠性仍有待提升。

为降低射前中频交流供电线路绝缘性能复测操作风险，实现前端无人、后端远程进行漏电检测，彻底消除在进入射前流程后再断开电缆进行漏电测试的状态变化及连接器插拔等操作隐患，本文对运载火箭中频交流供电线路的远程漏电检测开展研究，不改变原有箭地供电电路，不影响中频交流的正常供电工况，通过漏电检测设计及自动化算法实现远程长时间在线连续漏电检测。该技术的高可靠、高精度、高效率等特点对于提升运载火箭自动化测试水平、优化射前测发流程、实现前端无人值守具有重要意义。

1 系统设计

1.1 系统架构

中频交流供电系统一般由中频交流电源、供电电缆和负载电机组成。如图1所示，本文设计出一种远程漏电检测系统，集成至中频交流供电系统中进行实时漏电检测，并通过有线以太网上传至远端上位机监控软件，实现漏电检测数据实时判读、显示及存储。

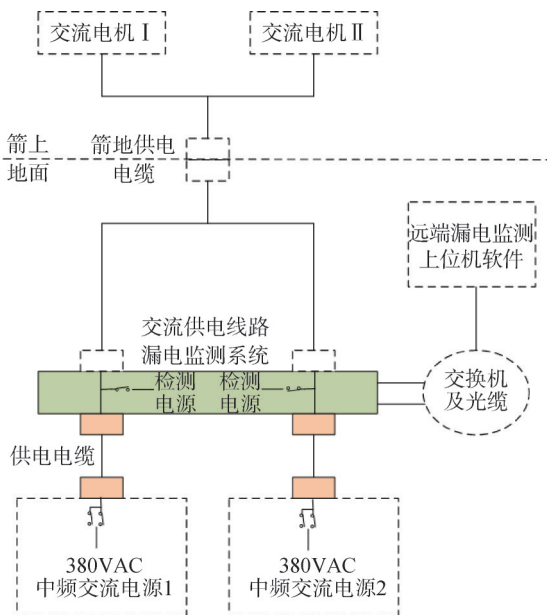


图1 中频交流供电系统原理

Fig.1 Schematic of the medium frequency alternating current power supply system principle

1.2 系统功能模块组成

交流供电线路远程漏电检测系统由电源模块控制

模块、继电器模块、采集模块、网络模块及远程上位机软件组成，如图2所示。

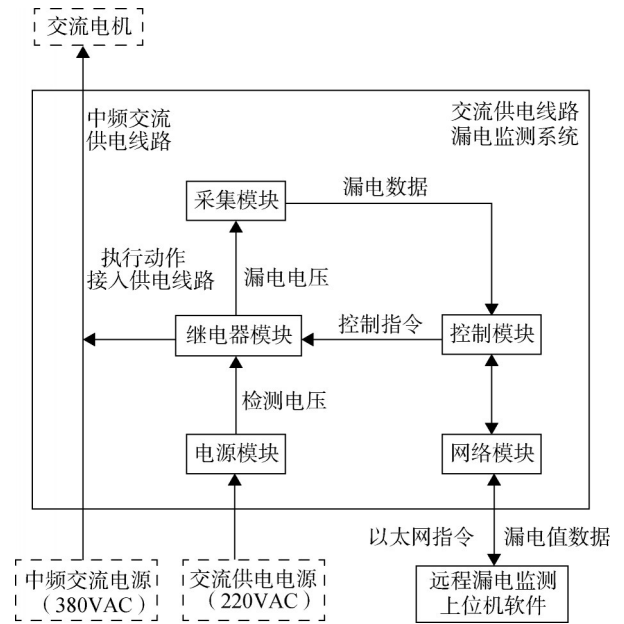


图2 远程漏电检测系统功能模块组成

Fig.2 The remote leakage monitoring system composition

各模块功能如下：

- a) 电源模块：接入外部220 V供电，转换为隔离电压，为漏电检测系统提供漏电检测电压并为各模块供电。
- b) 控制模块：作为远程漏电检测系统的核心器件，接收上位机控制指令，完成对继电器模块的控制及采集模块的数据。
- c) 采集模块：通过高精度AD采集漏电流在分压电阻上的漏电压值。
- d) 继电器模块：接收控制模块的指令，执行继电器动作，实现接入和隔离中频交流供电线路。
- e) 网络模块：与上位机软件进行以太网指令交互及数据上传。
- f) 远程漏电检测上位机软件：通过以太网控制漏电检测系统执行指令并获取数据。

1.3 漏电检测电路设计

图3为中频交流供电线路的漏电检测电路原理， $S_1 \sim S_6$ 为交流继电器，其中 S_{N-1} 、 S_{N-2} ($N=1 \sim 6$)分别为继电器 S_N 的2个触点。执行漏电检测时，首先控制闭合 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 进行漏电检测电路自检，再断开 S_5 、 S_6 进行供电线路漏电检测，测试后断开 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 ，断开后再进行中频交流供电。

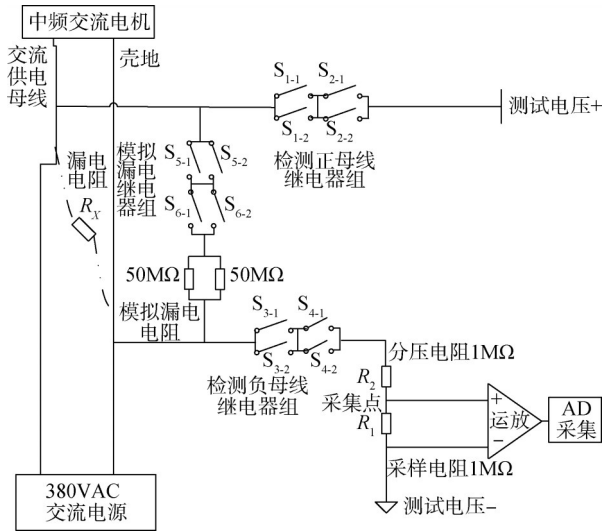


图3 漏电检测电路原理

Fig.3 Schematic of leakage monitoring circuit

图3中 R_x 为供电线路与壳之间的漏电阻， R_1 、 R_2 分别为1 MΩ的采样电阻和分压电阻，精度1%。通过AD采集采样点电压 V_x 后进行计算来实现漏电阻检测功能。记 V_0 为漏电检测测试电压，漏电检测分压电压为

$$V_x = V_0 \frac{R_1}{R_x + R_2 + R_1} \quad (1)$$

由此推算出，漏电阻计算公式为

$$R_x = R_1 \left(\frac{V_0}{V_x} - 1 \right) - R_2 \quad (2)$$

因此，通过采集 V_x 并计算即可得出供电线路与壳之间的漏电阻 R_x ，从而实现实时漏电检测功能。

V_0 激励源设定为9 V时，求得两种极限条件下 V_x 的情况：

- a) 当外部回路短路时，即 $R_x=0$ 时， $V_x=4.5$ V；
- b) 当外部回路断路时，即 $R_x=\infty$ 时， $V_x \approx 0$ V，故 $0 \text{ V} \leq V_x \leq 4.5 \text{ V}$ 。

故选用量程为-10~10 V，采集精度为16位的AD采集电路，绝对误差值 $\pm \Delta V_x$ 为6.230 mV，理论上能够采集到覆盖100 kΩ~100 MΩ的电阻值。

影响采集精度的因素主要有两项，分压电阻的精度以及采集电路的绝对精度。分压电阻选用精密电阻，其精度为1%，同时考虑叠加AD采集模块的绝对精度最大误差 $\pm \Delta V_x$ ，进而得到采集电压 V_x 的最大理论偏差值 V_{x+} 、 V_{x-} 如下：

$$V_{x+} = \frac{R_5(1+1\%)}{(R_5+R_6)(1-1\%)+R_x} + \Delta V_x \quad (3)$$

$$V_{x-} = \frac{R_5(1-1\%)}{(R_5+R_6)(1+1\%)+R_x} - \Delta V_x \quad (4)$$

将 V_{x+} 、 V_{x-} 的值代入到漏电阻计算公式中，得到 R_x 最大理论偏差值 R_{x+} 、 R_{x-} 如下：

$$R_{x+} = R_1 \left(\frac{V_0}{V_{x+}} - 1 \right) - R_2 \quad (5)$$

$$R_{x-} = R_1 \left(\frac{V_0}{V_{x-}} - 1 \right) - R_2 \quad (6)$$

因此可计算出正、负相对误差 δ_+ 、 δ_- 分别为

$$\delta_+(\%) = ((R_{x+} - R_x)/R_x) \times 100\% \quad (7)$$

$$\delta_-(\%) = ((R_{x-} - R_x)/R_x) \times 100\% \quad (8)$$

按照上述公式计算出漏电检测电路理论精度如表1所示，可得出漏电阻值的测量精度理论误差小于 $\pm 10\%$ ，满足检测要求。

表1 漏电检测电路理论精度分析

Tab.1 Theoretical analysis of precision of the leakage resistance

漏电阻 $R_x/\text{M}\Omega$	理论电压 V_x/V	相对正偏差 $\delta_+/\%$	相对负偏差 $\delta_-/\%$
0.5	3.6000	7.962	-9.744
0.8	3.2143	5.496	-6.595
1	3.0000	4.682	-5.552
1.5	2.5714	3.612	-4.177
2	2.2500	3.095	-3.506
2.5	2.0000	2.799	-3.117
3	1.8000	2.613	-2.869
5	1.2857	2.314	-2.440
8	0.9000	2.280	-2.324
10	0.7500	2.340	-2.352
15	0.5294	2.591	-2.543
20	0.4091	2.899	-2.803
25	0.3333	3.232	-3.088
30	0.2813	3.579	-3.386
35	0.2432	3.934	-3.689
40	0.2143	4.296	-3.995
50	0.1731	5.036	-4.610

1.4 远程检测控制自动化设计

远程漏电检测上位机软件部署于远端工作站，通过光缆及交换机与近端漏电检测设备的通信采用TCP/IP协议，软件设计采用Windows Sockets标准网络程序设计。

漏电检测设备接收上位机的漏电测试指令采用TCP通信，上位机软件作为TCP通信服务器端。漏电检测设备发送测试参数采用UDP单播，发送周期为1 fps，发送周期可设置。

远程漏电检测功能采用自动化流程设计，如图4所示。上位机界面点击“一键测试”后，首先软件主动执行TCP连接漏电检测设备，网络连接成功后开始设备功能自检，依次接通所有继电器，同时采集模

拟漏电阻值,通过自动判读模拟漏电阻值是否处于 $22.5\sim 27.5\text{ M}\Omega$ 的范围(考虑 $25\text{ M}\Omega\pm 10\%$ 的精度误差),再加上控制模块反馈的指令输出结果,以及采集的继电器辅触点电压信号,以此来综合判断出继电器是否全部正常接通。

判断正常接通后,断开用于自检测的模拟漏电继电器,持续采集检测漏电值,若不小于 $100\text{ M}\Omega$ (可根据实际需求设置),则认为漏电值正常,否则亮红色灯报警且弹出提示框进行人工确认。

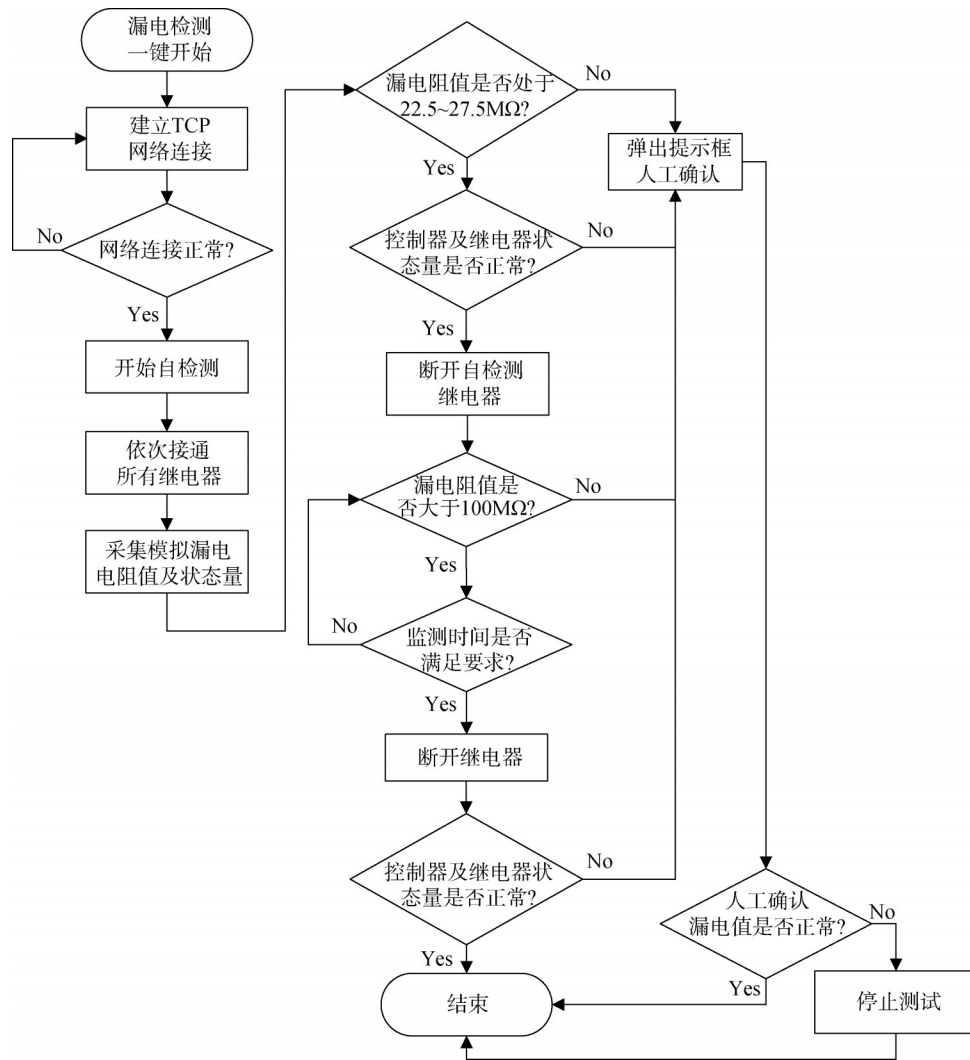


图4 远程漏电检测自动化控制软件流程

Fig.4 Flow chart of the auto-control software for the remote leakage monitoring

2 可靠安全性设计分析

为实现射前无人值守,远程漏电检测系统的可靠性和安全性至关重要,本文开展了系统的可靠、安全性设计分析,具体如下。

2.1 继电器控制可靠性设计

远程漏电检测系统采用冗余、容错、降额等设计技术,提高系统可靠性,无单点故障模式,保证一度故障下不影响系统功能,冗余设计包括双电源模块热备、双控制器工作、双网口收发、双继电器串并联设

计、线路双点双线等,元器件选型满足一级降额要求。

继电器的开关控制涉及到漏电检测电路与中频交流供电电路的接通或隔离,可靠接通保证漏电检测功能正常,可靠隔离保证交流供电电路不影响漏电检测电路的安全,因此保证继电器的开关控制尤为重要。

每个漏电检测支路正负母线接入处各设置2个继电器,并将双触点串并联设计,避免出现单触点未接通或粘连的情况,实现“既保通又保断”的效果。

此外,通过内置2个并联的 $50\text{ M}\Omega$ 模拟漏电阻

及自检继电器组实现漏电检测电路的实时自检测功能。执行漏电检测时,依次接通漏电检测电路组中所有继电器触点,若被测供电线路绝缘性能良好,漏电自检测理论阻值应为25 MΩ左右,证明全部继电器已正常接通,否则认为漏电检测电路接通异常。再执行断开模拟漏电继电器组,其他继电器不执行新的接通或断开动作,此时检测正母线与检测负母线继电器组保持接通状态不变,测得的结果正是外部被测交流供电线路的漏电结果。此方法在完全确保继电器真实动作状态的结果下进行漏电检测,相比于直接接通继电器而未知其是否真实动作的状态下测试,可靠性得到一定程度的提升。

2.2 耐交流高压安全性设计

在系统使用流程中,通过软件或人工避免交流供电输出和漏电检测同时接通,即当380 V交流供电断开时,漏电检测继电器触点闭合执行阻值检测;当380 V交流供电时,漏电检测继电器触点应全部断开。漏电检测继电器的断开可靠性靠双触点串并联设计保证。

为确保外部380 V交流供电输出至电机前,可靠隔离断开漏电检测电路,还需要保证继电器不被380 V交流电击穿失效。

按照大功率电磁继电器使用规范及绝缘介质强度相关要求,额定电压380 V对应的器件的介质耐电压指标应不低于2000 V。继电器采用全密封设计,为永磁驱动结构,线圈具有瞬态抑制功能。继电器内部采用抗力学环境能力强的平衡力式磁路结构,具有功耗低、切换负载大等特点。

继电器按大于1250 V交流电的抗电强度开展设计,且有一定设计裕度。继电器断开触点间的间隙大于0.6 mm,触点到外壳(与外壳导通所有内部金属件)间隙大于0.3 mm。继电器的性能指标如表2所示。

系统采取了继电器触点串并联设计,避免单触点故障对安全性造成影响。此外,在继电器安装设计上,采用继电器壳体与机箱之间3 mm的玻璃布板实现绝缘,可以耐20 kV的电压。

表2 继电器性能指标

Tab. 2 Performance index of the electric relay

继电器特性	性能指标
绝缘电阻	500MΩ(500V)
介质耐压	常温常压下2000V
寿命	100000次
转换触点数量	4组(3主1辅)

此外对系统进行防差错设计,包括漏电检测继电器打开指令与中频电源供电输出指令互锁;设备指示灯状态、电缆标签及连接器刻字清晰正确;不同的对外接口选用不同规格的连接器的防止误插,并进行必要的防护遮盖等。

2.3 环境适应性设计分析

为实现射前无人值守,远程漏电检测系统的可靠性和安全性至关重要,因此需要开展继电器控制可靠性分析、耐交流高压的安全性分析、环境三防设计分析以及故障预案处置分析。

2.3.1 力学设计分析

系统会经历火箭起飞的振动环境,需针对力学环境条件进行抗振设计并开展力学环境试验,具体抗振设计包括:设备结构金属材料采用铝合金刚性框架,具有较高的强度且比重较轻;采用拼接框架结构,结构采用加强筋,有效提高整机抗振性能;各个模块与壳体之间通过锁紧机构加固,在支撑约束的条件下,提高机箱自身的刚度及抗振性能;对质量较大的模块采用盒体约束加固方式或点胶固定,克服在振动作用下产生印制件弯曲挠度的缺点,降低共振频率;为降低结构在振动过程中的响应,整机装配前需进行固封,包括机箱上电源开关、接插件和印制板上大的插装器件等。

对整机结构开展有限元建模及力学环境仿真分析,按照如下原则开展结构校核。

a) 刚度校核:电子产品必须具备足够的刚度,有足够高的结构固有频率,要求电子设备的基频应该大于100 Hz。

b) 强度校核:结构在经受准静态过载、正弦振动及随机振动中不发生破坏,其安全裕度应该满足要求。电子设备结构件的安全裕度如下:

$$M = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max} \cdot f} - 1 \quad (9)$$

式中 M 为安全裕度; $[\sigma]$ 为结构材料的极限应力(屈服极限或强度极限); σ_{\max} 为载荷作用下设备结构件的最大应力; f 为安全系数。机箱结构件的安全裕度要求大于0,印制板的安全裕度要求大于0.25,其中 $[\sigma]$ 选取材料的许用应力 $\sigma_{0.2}$,安全系数 $f=1.5$ 。

c) 印制板的变形判定:印制板是否产生过分的弯曲变形是验证印制板刚度的关键点。弯曲变形的量度以板的最大挠度除以板的宽度,正则化为单位长度的变形来表达,通过与许用极限比较来判断印制板的变形是否过大,规定的弯曲极限为0.006。

通过仿真计算及结果校核可得,设备整机及印制板的刚度和强度满足要求,印制板变形满足要求,具体结果见表3。

表3 力学仿真分析结果

Tab. 3 Result of mechanical simulation analysis

力学要求	参数名称	参数值	校核标准值	是否满足要求
刚度要求	整机基频	138.45Hz	>100Hz	满足
强度要求	整机结构强度安全裕度	9.1	>0	满足
	印制板强度安全裕度	43.8	>0.25	满足
印制板变形要求	弯曲极限	0.0027	<0.006	满足

2.3.2 热设计分析

系统经历火箭起飞的热环境,且内部继电器数量较多、持续通电时间较长,需要开展热设计及高低温环境试验,具体措施包括:设备金属材料采用具有较高热传导性能的铝合金,合理布局发热源,利用热传导方式将发热源的热量引至壳体;保证元器件一级降额,在高温工况下发热元器件仍能可靠正常工作;增大热源器件与散热器的接触压力面积,接触面均匀涂布导热硅脂以降低接触热阻;非金属材料选用耐高温、耐火、阻燃性高材料;热流通道尽可能短,横截面尽量大,热通道中无绝热或隔热物体。

对整机开展热分析建模,根据稳态分析可以得出大功率元器件的温度分布,其结温可用以下公式计算,由计算结果可知,大功率器件满足温度要求,如表4所示。

$$T_j = T_c + Q \cdot R_{j-c} \quad (10)$$

式中 T_j 为元器件的结温,单位 $^{\circ}\text{C}$; T_c 为元器件的壳温,单位 $^{\circ}\text{C}$; Q 为元器件热耗,单位W; R_{j-c} 为元器件的结壳热阻,单位 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

表4 大功率元器件热分析结果

Tab. 4 Result of high power component's thermal analysis

元器件名称	热耗/W	结壳热阻/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$)	壳温/ $^{\circ}\text{C}$	结温/ $^{\circ}\text{C}$	结温是否满足 小于125 $^{\circ}\text{C}$ 要求
DC/DC(1)	1.106575	0.6	53.7	54.3	是
DC/DC(2)	0.092	0.6	51.2	51.3	是
DC/DC(3)	0.05	0.6	51.3	51.3	是
FPGA	0.375	0.6	48.4	48.6	是
PHY 芯片	0.05	0.6	46.4	46.4	是

2.3.3 电磁兼容设计

系统使用环境附近存在大功率中频交流电源,且内部存在高低压电源、电磁继电器时,需要开展电磁兼容设计,降低自身对外的辐射,防止外部电磁干扰,具体如下:

a) 采用屏蔽设计,符合接地要求,检测地与安全地隔离设计。

b) 接口抗干扰设计,模拟量输入电路与数字电路部分使用光耦隔离;电源输入端使用去耦滤波电容及屏蔽电缆,抑制电源纹波。

c) 印制板布线按照电磁兼容要求进行设计,通信接口采用差分信号线方式走线,减少信号间的串扰。

2.3.4 三防设计

系统使用的自然环境覆盖多个发射场,特别是海南存在高温、高湿、高盐雾等恶劣环境条件,需要开展三防设计,具体措施如下:

a) 设备材料导电氧化处理,外表面进行喷漆处理,提高三防性能。

b) 采用密闭机箱设计,安装密封衬垫,防止水分、灰尘、盐雾的沉积。

c) 相互接触的金属材料选用电极电位接近的,并减少接触面积,防止产生电化学腐蚀。

d) 喷涂或浸渍三防漆及硅橡胶,重点防护电路板焊盘、连接器的焊点。

2.4 故障模式及预案分析

由于远程漏电检测系统可能应用于低温运载火箭的射前流程中,为确保射前流程不受系统故障影响,应对远程漏电检测系统进行故障模式分析,并制定相应的可执行预案。

交流电机未启动加电时,远控进行中频交流供电线路漏电检测,自检测阻值正常后关闭漏电检测继电器,测得的对壳阻值可存在以下故障现象及预案措施。

a) 若漏电阻值处于27.5~100 M Ω 之间,人工单点操作漏电检测上位机软件进行复测3次,若现象依旧,由于外部供电线路绝缘性能下降至低于100 M Ω 时,上一步骤的自检测阻值不会处于22.5~27.5 M Ω ,在只考虑一度故障的前提下,可判定为漏电检测系统

故障，故需要前端测试人员使用万用表手动辅助测量供电线路的绝缘性能，并将交流供电电缆跨过漏电检测系统直连至负载电机端。

b) 若漏电阻值处于 22.5 MΩ 以下，人工单点操作漏电检测上位机软件进行复测 3 次，若现象依旧，则需要前端测试人员使用万用表手动复测供电线路的绝缘性能，复测结果若与漏电检测系统一致，则判定为交流供电线路的绝缘性能下降，必要时再次进行远程漏电复测，持续检测绝缘性能是否满足测发流程条件；复测结果若与漏电检测系统不一致，则将交流供电电缆跨过漏电检测系统直连至负载电机端，保障中频交流供电系统正常运行。

3 试验结果与分析

设计研制了远程漏电检测设备，开展了漏电测量精度试验、耐高压交流电摸底验证试验、远程漏电检测系统联试，试验结果表明，漏电检测精度符合要求，耐高压交流电工作正常，远程漏电检测功能正常。

3.1 漏电检测精度试验验证

使用 500 kΩ~50 MΩ 的标准电阻对漏电检测系统进行精度等效测试，试验结果显示，漏电检测精度误差为±10%，满足测量要求。试验结果详见表 5。

表 5 漏电检测精度试验结果

Tab. 5 Result of leakage measuring accuracy test

模拟漏电阻阻值/MΩ	测量漏电阻阻值/MΩ	测量精度误差/%	精度是否满足为±10%
0.5	0.53~0.54	+8	满足
0.8	0.86~0.87	+8.75	满足
1	1.07~1.08	+8	满足
1.5	1.58~1.59	+6	满足
2	2.08~2.10	+5	满足
2.5	2.59~2.62	+4.8	满足
3	3.09~3.12	+4	满足
5	5.18~5.25	+5	满足
8	8.08~8.15	+1.8	满足
10	10.13~10.20	+2	满足
15	14.94~15.02	-0.4	满足
20	19.54~20.45	-2.3	满足
25	24.28~25.69	-2.8	满足
30	28.94~30.69	-3.5	满足
35	34.35~35.53	-1.85	满足
40	37.63~40.11	-5.92	满足
50	49.25~50.53	-1.5	满足

3.2 耐高压交流电试验验证

对漏电检测设备开展了抗电强度摸底试验，能够承受 2 500 V（有效电压值）、加电时间 1 min 的高压条件，试验结果正常，详见表 6。

表 6 耐高压试验结果

Tab. 6 Result of high voltage test

试验条件	试验结果
单继电器触点间施加电压 500V(有效电压值),加电时间 24h	合格
单继电器触点间施加电压 2000V(有效电压值),加电时间 1min	合格
继电器串并联触点间施加电压 2500V(有效电压值),加电时间 1min	合格

3.3 远程漏电检测系统联试验证

将远程漏电检测系统加入电机中频交流供电系统中开展联试，测试人员在测发控后端运行漏电检测上位机软件进行远端控制。软件运行后开启自动化测试，设备自检正常，继电器接通执行及状态反馈正常，对交流供电线路的漏电检测功能正常，持续检测 24 h，漏电电阻均大于 100 MΩ，满足系统绝缘性能要求。之后断开漏电检测继电器，执行中频交流电源输出供电至负载电机，持续供电 2 h，漏电检测设备工作正常。试验表明，远程漏电检测系统应用在电机中频交流供电系统中功能运行正常且互不干扰。

4 结论

本文面向运载火箭中频交流供电的漏电检测需求，开展远程漏电检测技术研究，通过漏电检测设计、远程检测控制自动化设计及可靠安全性设计分析，实现交流供电线路的在线连续漏电检测。同时设计研制出远程漏电检测系统，经试验验证，系统持续正常工作 24 h 以上，漏电检测精度为±10%，并成功应用于大型低温运载火箭发射场试验任务。

该系统实现了无需手动断开电缆即可进行在线漏电检测，具有高可靠、高精度、高效率等特点，对于提升运载火箭电气自动化水平、实现前端无人值守、优化射前测发流程具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 朱领军. 漏电检测的研究与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
ZHU Lingjun. Research and analysis of leakage detection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[2] 刘路琴. 煤矿电力系统中漏电检测技术研究[J]. 矿业装备,

- 2023(7): 108-110.
LIU Luqin. Research on leakage detection technology in coal mine power system[J]. Mining Equipment, 2023(7): 108-110.
- [3] 海涛, 邓樟波, 韦文, 等. 基于物联网的电气设备漏电监测系统[J]. 检测技术与数据处理, 2021, 36(2): 33-38.
HAI Tao, DENG Zhangbo, WEI Wen, et al. Lectrical leakage monitoring system for electrical equipment based on IoT[J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36(2): 33-38.
- [4] 严伟中. 基于信号触发的电气线路漏电故障检测系统[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1348-1350.
YAN Weizhong. Electric line fault leakage detection system based on signal trigger[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(5): 1348-1350.
- [5] 梁淇源, 王永杰. 基于STM32的智能漏电检测系统设计[J]. 电子制作, 2021(3): 22-24.
LIANG Qiyuan, WANG Yongjie. Design of intelligent leakage detection system based on STM32[J]. Practical Electronics, 2021(3): 22-24.
- [6] 全云海. 基于嵌入式Modem的漏电远程监测系统[J]. 浙江科技学院学报, 2014, 22(5): 1348-1350.
QUAN Yunhai. Electric leakage remote monitoring system based on embedded Modem[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2014, 22(5): 1348-1350.
- [7] 侯晓宝, 潘松峰, 王瑞奇, 等. 低压供电系统漏电监测装置的研究与设计[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(10): 130-131.
HOU Xiaobao, PAN Songfeng, WANG Ruiqi, et al. Design of leakage current monitoring device for LV supply system[J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(10): 130-131.
- [8] 熊子亿, 季鹏鹏, 邓宏涛, 等. 基于ARM控制器的漏电监测系统设计与实现[J]. 信息通信, 2020, 9(4): 109-111.
XIONG Ziyi, JI Pengpeng, DENG Hongtao, et al. Design and implementation of leakage current monitoring system based on ARM microcontroller[J]. Information & Communications, 2020, 9(4): 109-111.

作者简介

徐文晓 (1994—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭指挥信息系统、地面测发控系统。

卢 嶝 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭指挥信息系统、地面测发控系统。

张学英 (1972—), 女, 研究员, 主要研究方向为运载火箭地面测发控系统。

路 航 (1993—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭地面测发控动力测控系统。

李 璨 (1984—), 女, 研究员, 主要研究方向为运载火箭地面测发控网络系统、健康监测与故障诊断。

(上接第72页)

- [4] 姜士鸿. 轨道交通车辆金属蜂窝式防爬吸能器的设计[J]. 机械工程师, 2014(10): 53-56.
JIANG Shihong. Design of metal honeycomb anti-creep energy absorber for rail transit vehicles[J]. Mechanical Engineer, 2014(10): 53-56.
- [5] 徐婷婷. 大载重缓冲气囊性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
XU Tingting. Research on performance of large load buffer airbag [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [6] 宋志强, 曹立波, 喻志强. 新型车用吸气式安全气囊的分析[J]. 汽车工程师, 2018(2): 41-43.
SONG Zhiqiang, CAO Libo, YU Zhiqiang. Analysis of new air-breathing airbag for vehicle[J]. Automotive Engineer, 2018(2): 41-43.
- [7] 刘丰嘉. 机车车辆耐撞性仿真与端部结构拓扑优化设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
LIU Fengjia. Crashworthiness simulation and topological optimization design of end structure of locomotive and vehicle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [8] 喻涛, 周翔, 李琦, 等. 客车SR6107TS侧围立柱侧翻分析技术研究[J]. 江西化工, 2019(6): 146-149.
YU Tao, ZHOU Xiang, LI Qi, et al. Research on rollover analysis technology of side wall column of passenger car SR6107TS[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2019(6): 146-149.

作者简介

邵健帅 (1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为宇航发射系统。

姚曙光 (1970—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为列车撞击动力学。

梁平路 (1969—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为导弹发射装备。

孔令香 (1986—), 女, 主要研究方向为列车撞击动力学。