

甲方（委托方）合同编号：

乙方（受托方）合同编号：

技术开发合同



技术开发合同

项 目 名 称 : 复合横担多因素老化及力学特性研究

甲 方 (委 托 方) : 南方电网科学研究院有限责任公司

乙 方 (受 托 方) : 华北电力大学（保定）

签 订 时 间 : 2017 年 12 月

签 订 地 点 : 广州

技术开发合同

甲方（委托方）：南方电网科学研究院有限责任公司

负责人：饶宏

住所：广州市黄埔区科翔路 11 号

乙方（受托方）：华北电力大学（保定）

法定代表人
（负责人）：杨勇平

住所：河北省保定市莲池区永华北大街 619 号

甲方委托乙方研究开发复合横担多因素老化及力学特性研究项目，并支付研究开发费用，乙方接受委托并进行此项研究开发工作。根据《中华人民共和国合同法》及相关法律法规的规定，双方经过平等协商，达成如下合同条款，共同遵守。

第一条 项目名称：复合横担多因素老化及力学特性研究。

第二条 项目的目标、内容、指标要求和完成时间

一、目标：

针对目前复合横担存在的内绝缘及老化问题，开展复合横担塔多因素老化及力学特性研究，论证双回路复合横担大范围应用的可行性和可靠性。

二、内容：

(1) 多因素老化试验系统研究

结合复合横担的机械受力、周期性振动的特点，附加考虑昼夜温差和机械应力等对复合横担长期运行特性的影响情况，设计综合老化试验方案，定制 500kV 复合横担试品缩比模型（满足 DL/T376-2010 和 DL/T 1580 相应要求），确定老化因素和试验条件，进行多因素综合老化试验。

(2) 老化因素对复合横担材料性能影响试验研究

对复合横担材料进行综合老化试验，测试评估复合横担覆层硅橡胶材料、FRP 空心绝缘管老化特性。试验对比分析不同老化因素对复合横担的影响。

(3) 复合横担 FRP/聚氨酯界面缺陷检测方法

分析复合横担 FRP/聚氨酯界面缺陷严重程度与局部放电及异常发热关联特性。探索基于电、磁、声、热等方法相结合的复合绝缘横担内部缺陷监测方法，分析缺陷严重程度对监测结果准确性及灵敏度的影响。

(4) 气压泄漏对复合横担内绝缘凝露特性的影响

设计充气型绝缘横担缩比模型，调整充气型复合横担内部气压以模拟气压泄漏。将不同气压试品同时放置于人工气候室中进行凝露实验，凝露实验完成后通过内窥镜观测凝露结果，研究气压泄漏对充气型复合横担内绝缘凝露特性的影响特性。

(5) 复合横担力学特性仿真及实验研究

根据设计研制的 500kV 双回路复合横担塔，对复合横担直线塔有限元模型进行构件强度和整体变形的力学仿真计算。针对复合材料构件，开展强度和稳定性计算方法和实验研究，提出复合横担强度和稳定性计算方法和设计条件。通过实验和理论方法研究复合横担节点力学性能。

三、指标要求：

1、研究报告：

《复合横担综合老化试验及影响分析报告》、《复合横担界面缺陷检测方法报告》、《气压泄露对复合横担内绝缘凝露特性的影响报告》、《双回路复合横担力学性能研究报告》4 份研究报告。2020 年 4 月 30 日前交付。

2、论文：发表（含录用）中文核心及以上期刊论文 3 篇，其中甲方第一作者文章至少 1 篇，2020 年 4 月前交付；

3、专利：申请发明或实用新型专利不少于 5 项，专利所有权归甲独有。

四、完成时间： 2020 年 4 月 30 日前。

第三条 研究开发人员组成

乙方指派技术人员刘云鹏、安利强、梁英、刘贺晨、谢军组成研究开发团队，同时指派刘云鹏作为本项目的负责人。未经甲方同意，乙方不得随意更换研究开发人员。如果甲方认为乙方指派的研究开发人员不能胜任的，乙方应当及时更换。乙方指派的项目负责人和研究开发人员应实际参与本合同的技术开发工作。

第四条 研究开发计划书

乙方应在本合同生效之日/本合同生效后 15 日向甲方提交研究开发计划书。研究开发计划书应包括以下内容：

一、研究开发工作内容。

二、研究开发工作的人员安排。

三、时间进度安排。

四、研究费用的使用安排。

五、研究方法和技术路线。

六、研究开发工作可能遇到的主要技术难点及相应解决方案。

合横担界面缺陷检测方法报告》，申请发明或实用新型专利 2 项，投稿论文 1 篇，经甲方认可（验收），并按甲方要求提供相应金额的合法有效发票，甲方在 45 个工作日内，向乙方支付研究开发费用总额的 30 %，¥ 318000 （大写：人民币 叁拾壹万捌仟元整）；

（三）乙方提供合同中要求的所有指标和相关验收资料，通过甲方项目验收，并按甲方要求提供相应金额的合法有效发票，甲方在 45 个工作日内，向乙方支付研究开发费用总额的 40 %，¥ 424000 （大写：人民币 肆拾贰万肆仟元整）。

三、甲方支付给乙方的研究开发费用，乙方应合理使用，甲方不再另行支付合同约定之外的研究开发费用。研究开发费用不足，不足部分由乙方自行承担。

四、每次付款前乙方需根据投标报价时承诺开具发票的类型及税率提供相应金额的合法有效发票。

序号	发票类型	税率	开票金额(含税, 元)	备注
1	增值税专用发票（含自行开具及税局代开）			按不同税率分行填列
1.2	税局代开增值税专用发票	3%	1060000	
小计				
2	其他类型发票			
合计			1060000	合计与投标总价相等

甲方增值税专用发票开票信息如下：

名称：南方电网科学研究院有限责任公司

纳税人识别号：9144 0000 5645 5643 42

地址、电话：广东省广州市萝岗区科学城科翔路 11 号 J1 栋 3、4、5 楼及 J3 栋 3 楼 020-36625064

开户行及账号：中国建设银行广州南网中心支行 4400 1403 3040 5988 8168

若乙方未能按上述要求开具增值税专用发票，或实际开票税率与上述要求不符，甲方有权根据实际收取的发票类型及税率从合同总价中直接扣除相应金额

的合同款进行结算。甲方有权在任一批次的合同付款中直接扣减税款差额。若未支付合同款不足以弥补税款差额，乙方应将差额退还甲方。税款差额计算方式如下：

税款差额=《关于开具发票相关事项的承诺函》承诺税率对应的增值税进项税额-实际开具发票的进项税额（若计算得出的扣款小于0，则取0）

其中：增值税进项税额=∑开票金额÷（1+税率）×税率

第八条 研究开发成果的交付

乙方应按本合同约定向甲方交付最终的研究开发成果，交付方式如下：

一、交付内容、交付形式及交付数量：

（一）研究报告：《复合横担综合老化试验及影响分析报告》、《复合横担界面缺陷检测方法报告》、《气压泄露对复合横担内绝缘凝露特性的影响报告》、《双回路复合横担力学性能研究报告》；

（二）论文：发表（含录用）核心及以上论文3篇，其中第一完成单位南网科研院不少于1篇；

（三）专利：申请发明或实用新型专利不少于5项，专利所有权归甲独有。

二、交付地点：广州。

三、其他：无。

第九条 验收

乙方在提交研究开发成果时应同时提出书面的验收申请，甲方应按照本条约定进行验收。

一、甲方应当在接到乙方书面验收申请后30天内组织验收。

二、验收标准：

（一）按照本合同约定的原则要求，且通过甲方的项目验收（鉴定）标准。

（二）其他：无。

三、验收费用的承担：乙方承担。

四、验收后的处理：

（一）验收通过，甲方应出具验收合格的书面意见给乙方。

中止研究开发工作。

二、乙方应按双方约定的开发进度完成开发工作，每一个阶段的工作完成后应报甲方认可方可进行下一阶段的工作。未经甲方同意，乙方不得将本合同项目部分或全部研究开发工作转委托给第三方承担。

三、乙方应当保证其交付给甲方的研究开发成果不侵犯任何第三人的合法权益，如第三方对研究开发成果主张权利的，由此产生的一切法律后果由乙方承担。

四、乙方应妥善保管甲方提供的技术资料、样品、设备等；在合同履行过程中，如发现继续工作对材料、样品或设备等有损坏危险时，应立即中止工作，并及时通知甲方。

五、乙方应根据甲方要求，配合开展与本合同相关的交易金额及期末余额的对账工作。

六、其他：乙方应支持甲方开展税前加计扣除工作，按甲方要求提供经费使用明细及配套财务凭证。

七、其他： 无

第十四条 保密条款

甲乙双方保证对在履行本合同过程中所获悉的属于对方的商业秘密、技术秘密和其他经营管理信息、技术信息等予以保密。未经一方同意，另一方不得向任何第三方泄露。无论本合同是否生效、被撤销、变更、解除或终止，双方仍应执行本保密条款。

甲方如有需要，双方另行签订保密协议。

第十五条 合同的变更和解除

一、在本合同履行过程中，经甲乙双方协商一致，可以对本合同的条款进行变更，不能就变更达成一致意见的，应当按照原合同条款执行。

二、乙方发生以下情形之一的，甲方有权解除本合同：

（一）乙方丧失履约能力的。

（二）乙方明确表示不能完成本合同约定的研究开发工作的。

（三）乙方未按本合同的约定提交研究开发计划书超过 15 天的。

（四）乙方未按合同约定提交研究开发成果超过 7 天的。

并按照银行同期贷款利率向甲方支付利息外，还应按照研究开发费用总额的10%向甲方支付违约金，违约金不足以弥补甲方损失的，乙方应赔偿甲方未能弥补的损失。

(二) 乙方迟延交付研究开发成果的，每迟延一日，应按照研究开发费用总额的0.1%向甲方支付违约金，且违约金总额不超过研究开发费用总额的20%。

(三) 乙方指派的负责人或技术人员未实际参与本合同研究开发工作或者擅自更换的，乙方应向甲方支付研究开发费用总额10%的违约金。乙方拒不按甲方要求改正这一违约行为的，甲方有权解除合同。

(四) 乙方违反本合同约定的保密义务的，应向甲方支付研究开发费用总额20%的违约金，该违约金不足以弥补甲方损失的，乙方还须赔偿甲方未得到弥补的损失。

第十七条 通讯与联络

一、为方便开展工作，提高双方的工作效率，甲方安排唐力负责与乙方保持日常联系，乙方安排刘贺晨负责与甲方保持日常联系。如双方确有必要更换联系人员时，应以书面形式提前通知另一方。甲方工作人员的联系方式是18588871336；乙方工作人员的联系方式是15188935108。

二、双方履行合同的有关事项，按照上述约定通知到对方联系人的，视为完成通知送达。

三、双方的通讯地址或者联系方式如发生变动，应书面通知对方，因未及时通知而造成的损失由其自行承担。

第十八条 风险责任的承担

在履行本合同的过程中，确因在现有水平和条件下难以克服的技术困难，导致研究开发工作部分或全部失败，风险责任由甲乙双方平均分担。

本项目技术风险确认的方式为：组织召开专家会议审定。

第十九条 不可抗力

一、不可抗力事件是指合同双方在签署本合同时不能预见、不能避免并不能

(签字页)

甲方: 南方电网科学研究院有限责任公司

(盖章)

负责人: 饶宏

授权代表: 唐力

通讯地址: 广州市黄埔区科学城科翔路 11 号

邮 编: 510623

联系人: 唐力 电话: 18588871336 传真: _____

邮 箱: tangli@csg.cn

乙 方: 华北电力大学(保定)

(盖章)

法定代表人(负责人): 杨勇平

授权代表: 刘云鹏

通讯地址: 河北省保定市莲池区永华北大街 619 号

邮 编: 071003

联系人: 刘贺晨 电话: 15188935108 传真: 0312-7522252

邮 箱: lhcncepu@163.com

开户行: 中国银行河北省保定市高科技开发区支行

账号: 100148028076

税务登记证号: 12100000401889410E

组织机构代码证: 12100000401889410E

营业执照: 12100000401889410E

签约日期: 2017年12月22日

附件一：研究开发费用具体组成明细表

支出科目	报价依据（对照附录）	金额(万元)
一、研发费用		
1.人工费	按照高级研究人员 500 元/人/日、中级研究人员 300 元/人/日、初级研究人员 200 元/人/日的标准，其中高级、中级、初级人员投入的工作量分别为 100 人日、100 人日和 250 人日，总计 13 万元整	13
2.设备使用费		0
3.材料费	分别用于项目五个子任务的研究所需的测量仪器及相关耗材，共计约 42.05 万元	42.05
4.测试化验加工费	用于样品的微观特性测试（500 元/次*10=5000 元）以及相关的力学测试（3000 元/次*5 次=15000 元），共计 20000 元	2
5.燃料动力费		0
6.差旅费	项目开展期间调研、试验、样品测试等共计约出差 30 次，平均每人次 1000 元，共计约 150 人次，共计约 15 万元	15
7.会议费	预计组织两次会议，约为 200 元/人日，每次会议参会人数约为 10 人，天数为 3 天，共需约 200 元/人日*10 人*3 天*2 次会议=1.2 万元	1.2
8.国际合作与交流费		0
9.出版印刷/文献/信息传播/知识产权事务费	项目共申请五项专利，8000 元/项*5 项=4 万元；发表论文 3 篇，4000 元/篇*3 篇=1.2	6

	万元；印制各类报告等资料共需约 0.8 万元，共需约 6 万元	
10.劳务费	按照初级研究人员 200 元/人日标准，共需初级研究人员工作量为 500 人日，共需约 10 万元	10
11.专家咨询费	按照 200 元/人天标准，200 元/人天*5 天*5 人=1 万元	1
12.管理费	按照 15%计算，为 15.75 万元	15.75
合计：小写 1060000 元 大写： 壹佰零陆万 元整		

附件二： 研究开发计划书

一 研究开发工作内容。

(1) 多因素老化试验系统研究

结合复合横担的机械受力、周期性振动的特点，附加考虑昼夜温差和机械应力等对复合横担长期运行特性的影响情况，设计综合老化试验方案，定制 500kV 复合横担试品缩比模型（满足 DL/T376-2010 和 DL/T 1580 相应要求），确定老化因素和试验条件，进行多因素综合老化试验。

(2) 老化因素对复合横担材料性能影响试验研究

对复合横担材料进行综合老化试验，测试评估复合横担覆层硅橡胶材料、FRP 空心绝缘管老化特性。试验对比分析不同老化因素对复合横担的影响。

(3) 复合横担 FRP/聚氨酯界面缺陷检测方法

分析复合横担 FRP/聚氨酯界面缺陷严重程度与局部放电及异常发热关联特性。探索基于电、磁、声、热等方法相结合的复合绝缘横担内部缺陷监测方法，分析缺陷严重程度对监测结果准确性及灵敏度的影响。

(4) 气压泄漏对复合横担内绝缘凝露特性的影响

设计充气型绝缘横担缩比模型，调整充气型复合横担内部气压以模拟气压泄漏。将不同气压试品同时放置于人工气候室中进行凝露实验，凝露实验完成后通过内窥镜观测凝露结果，研究气压泄漏对充气型复合横担内绝缘凝露特性的影响特性。

(5) 复合横担力学特性仿真及实验研究

根据设计研制的 500kV 双回路复合横担塔，对复合横担直线塔有限元模型进行构件强度和整体变形的力学仿真计算。针对复合材料构件，开展强度和稳定性计算方法和实验研究，提出复合横担强度和稳定性计算方法和设计条件。通过实验和理论方法研究复合横担节点力学性能。

二 研究开发工作的人员安排。

序号	姓名	性别	年龄	职务	职称	文化程度	专业	工作年限	本项目角色	是否全职员工
1	刘云鹏	男	41	副院长	教授	博士	高电压与绝缘技术	13	负责人	是
2	安利强	男	43	副主任	教授	博士	机械工程	15	主研人	是
3	张重远	男	48	教研室主任	教授	博士	高电压与绝缘技术	20	主研人	是
4	王永强	男	42	教研室副主任	副教授	博士	高电压与绝缘技术	14	主研人	是
5	徐志钊	男	38	无	副教授	博士	高电压与绝缘技术	10	主研人	是
6	汪佛池	男	37	无	副教授	博士	高电压与绝缘技术	9	主研人	是
7	刘贺晨	男	28	无	讲师	博士	高电压与绝缘技术	1	主研人	是
8	谢军	男	29	无	讲师	博士	高电压与绝缘技术	2	主研人	是

三 时间进度安排

序号	时间段	内容
1	自合同签订生效 ~2018.1	收集科研、规划、运行资料，编制工作大纲。
2	2018.1~2018.3	制定完成综合老化试验和凝露试验方案。
3	2018.3~2018.10	完成对多因素老化试验系统的搭建，并开展老化特性的相关研究，同期开展双回路复合横担力学性能测试，完成《双回路复合横担塔力学性能研究报告》。
4	2018.10~2019.2	开展复合横担 FRP/聚氨酯界面缺陷检测方法研究，届时提交《复合横担多因素老化及力学特性研究中期报告》和《复合横担界面缺陷检测方法报告》，并申请专利 2 项，投稿论文 1 篇。
5	2019.2~2020.2	完成对气压泄漏对复合横担内绝缘凝露特性的影响的研究，完成《气压泄露对复合横担内绝缘凝露特性的影响报告》及《复合横担综合老化试验及影响分析报告》。
6	2020.2~2020.3	总结资料，准备验收。

序号	时间段	内容
7	2020.3~2020.4	完成项目研究内容，提交研究报告 4 份，发表或录用论文 3 篇（含录用），申请专利 5 项。

四 研究方法和技术路线。

1、多因素老化试验系统研究

根据 IEC62217-2004 推荐的 5000h 多因素老化试验，综合考虑多种老化因素对复合绝缘材料老化特性的影响。并结合复合横担实际的运行情况，附加考虑昼夜温差和机械应力等对复合横担长期运行特性的影响情况。

（1）试验试样

缩比模型的材料特性以及制作工艺与 500kV 复合横担相同或相近，以达到较好的试验效果，根据缩比模型制定合理的实验方案。同时为了对比分析不同因素对复合横担老化特性的影响，在进行综合老化试验的同时进行单因素老化试验。

（2）综合老化平台搭建

为了进行复核横担的综合老化特性研究，需要搭建一套可同时对实验过程中多种老化因素进行调节的试验系统，同时在试验过程中还需要对试样的应变情况、泄露电流、局部放电以及温度等参量进行测量。

（3）老化试验方案

参考 IEC62217-2004 附录相关内容，确定老化试验参数（如加压值、各老化因素老化时间，试验总周期数等），对复合横担材料进行综合老化试验。确定复合横担老化试验中承受电压、空气温度、湿度、机械应力等一系列老化因素和试验条件。

2、老化因素对复合横担材料性能影响试验研究

复合横担在机械应力、冷热交替、紫外老化等多种因素的作用下可能会导致复合横担的机械强度下降、硅橡胶覆层老化、芯棒脆断等情况，威胁复合横担的安全稳定运行。不同的老化因素对复合横担的影响不同，因此，需研究复合横担在机械应力、冷热交替、紫外光照射等因素下的老化特性，同时需研究多因素老化情况下复合横担的老化特性。

（1）不同老化因素对复合横担硅橡胶覆层影响研究

对复合横担硅橡胶覆层进行憎水性、硬度、FIRT、SEM 等理化特性测试，分析不同老化因素对硅橡胶材料理化性能的影响。同时，测试硅橡胶的拉伸强度、弹性模量等参数。

（2）不同老化因素对复合横担机械性能的影响

研究不同老化因素对复合横担长期机械性能的影响，对复合横担的机械性能进行评估；考察复合横担连接件、复合横担根部以及复合横担芯棒材料等长期机械性能进行评估。

（3）不同老化因素对复合横担硅橡胶与 FRP 芯棒界面特性影响研究

研究复合横担经过长期机械疲劳试验、冷热循环试验以及综合老化试验后复合横担界面老化情况；研究界面老化机理以及界面胶接性能检测方法，如水扩散试验、泄露电流、红外监测、超声探伤、局部放电检测等；研究界面缺陷复合横担在长期老化过程中缺陷的发展过程以及特征参量的变化规律。

1) 复合横担界面粘接性能评价方法

复合横担界面粘接不牢或存在微孔气隙等会引起复合横担内部场强畸变，在存在水分或者污秽的情况下会发生局部放电，长期将导致复合横担 FRP 棒芯劣化断裂。因此，需研究复合横担界面粘接性能评价方法以及复合横担界面缺陷的检测方法。

根据试验中泄露电流、局部放电、红外测温以及试验之后进行的水扩散试验、压剪试验、相控阵超声检测等方法，摸索一套准确、实用、便捷的复合横担界面状态评估方法。

2) 复合横担界面缺陷发展趋势

对于界面处已经出现微弱缺陷的复合横担，需要研究其在老化过程中的缺陷演化过程。在硅橡胶护套与 FRP 芯棒之间的位置，设置典型缺陷，与绝缘良好的试样同时进行综合老化试验，试验过程中对二者之间的局部放电、泄露电流、红外温度等参量进行对比分析，并纵向对比缺陷复合横担这些参量随老化时间的变化规律。定期利用超声检测方法检查缺陷发展情况。试验结束后观察缺陷大小及发展情况，并进行水扩散试验、超声检测试验等，分析缺陷随老化时间的变化规律，以及特性参量变化与缺陷发展之间的对应关系。

3、复合横担 FRP/聚氨酯界面缺陷检测方法

(1) 复合绝缘横担缺陷对电场分布影响仿真分析

仿真分析复合绝缘横担工况条件下电场分布特性，研究内部气隙、芯棒表面受潮、污秽侵入等缺陷情况对电场分布的影响规律，分析缺陷处场强畸变特性，确定复合绝缘横担内部放电易发部位。调研 500kV 双回路复合横担主要结构及安装形式，构建有限元仿真模型，仿真得到正常工作条件下复合绝缘横担电场分布规律。根据仿真分析结果，在复合绝缘横担不同位置（高场强区、低场强区）设置气隙、水分及污秽模型，仿真分析缺陷形状、缺陷位置、缺陷深度引起的场强畸变，温度畸变等，进而得到复合绝缘横担内部缺陷易发位置。

(2) 复合横担内部缺陷演化规律

设计复合绝缘横担缩比模型，搭建复合绝缘横担多应力实验平台。结合仿真结果实验研究复合绝缘横担内部缺陷作用下局放发展及异常发热规律，分析多应力及环境因素对局放发展及异常发热的影响特性。

对含内部缺陷绝缘横担试样在多因素老化试验系统中进行长时间加压实验，并进行局放测试及红外测试，分析内部放电下局放发展规律及异常发热规律，分析机械应力及环境因素对放电规律及异常发热规律的影响。

(3) 复合绝缘横担内部缺陷严重程度评估及监测方法

分析复合绝缘横担内部缺陷严重程度与局部放电及异常发热关联特性。探索基于电、声、热等方法相结合的复合绝缘横担内部缺陷监测方法，研究多应力及环境因素等对监测灵敏度的影响特性。

通过调节内部缺陷形状，内部缺陷分布方向、内部缺陷分布位置、内部缺陷分布深度等，对比分析内部缺陷严重程度与局放及异常发热的关联特性，并研究机械应力及环境因素对上述关联特性的影响。

实验过程中，采用局放分析、超声探伤、红外成像等电、声、热技术对复合绝缘横担进行测试。同时，采用 X 射线探伤或 CT 扫描的方式对内部缺陷及由于内部放电产生的放电通道、芯棒及硅橡胶交界面侵蚀进行检测，并与局放测试结果、超声探伤结果、红外成像结果相对比，最终探索基于电、声、热等现象实现复合绝缘横担内部缺陷定位、定性分析的可行性，实现复合绝缘横担内部缺陷的有效监测。同时，分析机械应力及运行环境对监测结果灵敏度的影

响。

(4) 复合横担缺陷放电对材料特性影响及机制

分析复合绝缘横担内部放电前后芯棒及硅橡胶电气、机械、理化特性变化规律，研究内部放电对芯棒与硅橡胶间粘结剂的破坏机制。

对含内部缺陷的绝缘横担模型长时间加压老化后，可以进行 X 光或者 CT 检测，对芯棒及硅橡胶由于放电导致的孔隙进行成像，探索放电作用下放电通道形成机制；对硅橡胶进行剥离操作，对放电前后硅橡胶及芯棒进行 FTIR、SEM 等理化特性测试，并对芯棒的机械性能进行测试。得到长时间放电前后复合绝缘横担芯棒及硅橡胶电气、机械、理化特性变化规律。对芯棒与硅橡胶交界面表明进行化学检测，通过微观形貌、官能团及化学元素含量分析粘结剂在放电作用下的劣化特性及粘结性能下降规律，对设计在放电作用下，粘结稳定性好的粘结剂提出指导意见。

4、气压泄漏对复合横担内绝缘凝露特性的影响

设计充气型绝缘横担缩比模型，调整充气型复合横担内部气压以模拟气压泄漏。将不同气压试品同时放置于人工气候室中进行凝露实验，凝露实验完成后通过内窥镜观测凝露结果，研究气压泄漏对充气型复合横担内绝缘凝露特性的影响特性。

(1) 充气型绝缘横担缩比模型设计

充气型绝缘横担缩比模型设计时，应满足 DL/T376-2010 和 DL/T 1580 相应要求，根据充气型绝缘横担实际比例尺寸，制作用于凝露特性试验的等比例缩小模型试样，结合对于复合横担相应的仿真分析，考虑实际运行中的相关因素，确定合理的缩小比。同时需要保证模型的材料特性以及制作工艺与实际运行的复合横担相同或相近，以达到较好的试验效果。

定做充气型复合横担缩比模型，对充气型复合横担进行如下说明，加压完毕并在人工气候室中进行凝露实验时，低压端金具处金属密封盖闭合。待凝露实验完毕，打开低压端金具密封盖，并由探测孔处插入高清内窥镜，通过高清内窥镜，对绝缘横担 FRP/气体界面情况进行探测。

(2) 内部气压值的选取

调整充气型复合横担内部气压以模拟气压泄漏。气压设置为

0.15MPa-0.10MPa。将不同气压试品同时放置于人工气候室中进行凝露实验，凝露实验完成后通过内窥镜观测凝露结果，研究气压泄漏对充气型复合横担内绝缘凝露特性的影响特性。同时，通过调整气候室环境条件，研究复合绝缘横担工作环境因素对上述特性的影响规律。

(3) 凝露对复合横担内绝缘电场分布影响

根据不同充气压力条件下凝露测试结果，搭建电场仿真模型，研究凝露对电场分布的影响规律。探寻气体泄漏导致复合绝缘横担内部凝露情况下，内部放电易发点。

(4) 凝露对复合横担内绝缘放电特性影响

对凝露后各试品进行长时间加压实验，并进行局放测试及红外测试，分析内部放电下局放发展规律及异常发热规律。分析凝露对复合横担内绝缘放电特性的影响。

5、复合横担力学特性仿真及实验研究

(1) 针对 500kV 双回路复合横担主要结构及安装形式进行调研，构建有限元仿真模型，研究复合横担塔各工况载荷条件，在对应工况条件下仿真得到复合横担塔整体受力和变形情况。根据整塔的仿真分析结果，选取复合绝缘横担构件模型，通过对力学场的仿真分析，根据理论分析对该复合材料构件的受力变形的稳定性、节点连接和变形问题进行研究，进而通过复合材料力学方法研究得到复合材料构件截面特性计算方法，以及适用于复合横担塔特征的复合材料梁单元模型。

针对目前复合横担构件常用节点型式，由于相关的规范没有针对复合材料构件的强度和稳定性计算规定，根据复合材料力学方法，研究节点特性对构件强度和稳定性的影响，提出复合材料构件强度计算方法和稳定性计算方法，提出修正系数的选取原则。

(2) 复合材料的力学特性实验研究

由于复合材料是由玻璃纤维及树脂通过一定工艺制造而成，针对设计研制的复合横担塔中采用的复合材料机械力学性能实验研究，确定建立复合横担塔所需的材料力学性能材料，同时为强度评价提供指标。

(3) 复合材料构件稳定性计算及实验研究

针对复合材料构件，开展稳定性计算方法和实验研究，提出复合横担强度和稳定性计算方法和设计条件。目前的规范没有针对复合材料构件的稳定性计算规定，根据理论和实验研究，提出复合材料构件稳定性计算方法。

为了解复合材料构件在荷载作用下的破坏模式、破坏机理以及失稳状态，通过对复合材料构件进行试验，揭示复合材料构件在荷载作用下的变性特点、破坏模式、破坏机理以及临界承载力等，为复合材料构件的设计提供试验依据。并在此基础上，开展理论计算方法研究，从理论上探讨了复合材料构件稳定承载力的计算公式，并计算复合材料构件的稳定系数。

（4）复合横担节点力学性能的理论方法及实验研究

不同于铁塔连接节点，复合横担节点连接工艺复杂，是复合横担塔关键技术问题。针对目前复合横担构件常用节点型式，采用实验和理论分析方法研究其力学特性。

在复合横担塔整体分析的基础上，研究复合横担节点的受力特征，通过建立复合材料横担节点的三维有限元模型，考虑不同材料的力学特性、连接形式、加工工艺等影响，采用理论分析方法，研究节点力学特性及其对构件强度及稳定性的影响。

通过实验方法，研究节点特性对构件强度和稳定性的影响，提出修正系数的选取原则。通过节点试验确定节点的极限承载力和失效模式，揭示特定几何参数下试件的破坏机理。选取复合横担塔关键节点，加工缩比试件和节点进行拉力试验。实验平台通过液压缸提供载荷，完成对节点的实验。利用拉线式位移计来测量节点受拉力载荷时的变化过程，并通过载荷-位移曲线来对节点的载荷变形过程进行理论分析。

五 研究开发工作可能遇到的主要技术难点及相应解决方案。

（1）多因素老化试验系统研究

- 1) 得到相应的复合横担老化影响因素。
- 2) 确定复合横担老化试验中承受电压、空气温度、湿度、机械应力等一系列老化因素相关参数和试验条件。
- 3) 设计综合老化试验方案，搭建相应的老化试验系统。

（2）老化因素对复合横担材料性能影响试验研究

- 1) 复合横担在结构复合绝缘子或复合支柱绝缘子类似，但其与复合绝缘子

较大的区别在于其机械受力情况的区别，同时复合横担的薄弱环节除了其机械强度随运行时间增加导致部分结构尤其管件连接点处出现机械疲劳外，更为主要的是其界面性能随老化时间（如冷热交替、机械振动、弯曲）的增加，导致其界面性能劣化，出现微孔或裂纹，同时当内部进入潮气或污秽时将导致局部放电产生，严重时可能导致外绝缘击穿以及绝缘 FRP 芯棒脆化断裂。因此该研究主要针对于复合横担长期老化下的界面特性的研究。

2) 由于无法使用组尺寸复合横担进行老化实验，因此试验用复合横担等比例缩小模型制作将是项目实施的难点之一；

3) 试验用参数，如机械载荷、振动频率、试验时间及多因素综合试验中各参数的选取及作用时间的确定均较难，需要详细论证考察；

4) 对于复合横担界面性能，目前尚没有一种简单可行且准确度较高的评价方法；同时，如何检测发现复合横担界面处微小缺陷也是技术难点之一。

(3) 复合横担 FRP/聚氨酯界面缺陷检测方法

1) 得到 500kV 双回路复合横担电场分布规律、内部放电发生原因及内部放电易发点。

2) 获得复合绝缘横担内部缺陷作用下，局部放电发展规律及异常发热规律，确定机械应力及环境因素对上述规律的影响特性。

3) 确定内部缺陷及内部缺陷发展程度与复合绝缘横担电、热、声等监测结果的关联特性，明确不同监测方法对不同类型缺陷监测有效性，得到环境因素及机械应力对监测结果灵敏度的影响因素，构建复合绝缘横担内部缺陷的监测体系及方法，实现复合绝缘横担有效监测。

4) 得到复合绝缘横担长时间内部放电作用下，芯棒及硅橡胶伞裙理化特性变化特性。确定内部放电对芯棒与硅橡胶交界面粘结剂的影响特性。

(4) 气压泄漏对复合横担内绝缘凝露特性的影响

1) 设计充气型绝缘横担缩比模型是试验的难点之一。

2) 调整充气型复合横担内部气压以模拟气压泄漏，需要确定合理的气压值。