

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.010

40.5 kV 空气绝缘开关柜穿墙套管电场优化与结构设计

王海燕, 朱志豪, 费翔, 朱彦卿, 袁端磊
(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467000)

摘要: 针对40.5 kV交流金属封闭开关柜内部具有高、低压屏蔽的典型穿墙套管运行过程中出现局放、沿面放电问题,利用Ansys Workbench软件进行电场计算和问题分析并提出两种结构优化方案。分析绝缘试验时穿墙套管初始放电主要发生在内穿铜排表面窄边圆角处原因,采用参数化建模优化方法并以高压、接地屏蔽罩长度和半径为变量,在一定范围内进行反复迭代综合考虑得到穿墙套管高、低压屏蔽罩优化方案并试验验证,在此基础上进一步设计高压罩全屏蔽方案,对比两方案参数并结合生产实际给出工程建议。仿真与试验结果表明:屏蔽罩优化方案将铜排表面、环氧外表面最大场强分别减小为4.5、2.6 kV/mm,高压全屏蔽型方案通过取消接地屏蔽附近伞群、适当降低环氧厚度,将穿墙套管整体最大场强降为2.37 kV/mm,为穿墙套管设计提供工程依据。

关键词: 40.5 kV 开关柜; 穿墙套管; 局部放电; 沿面放电; 电场仿真

Electric Field Optimization and Structure Design of Wall Bushing in 40.5 kV Air-insulated Switchgear

WANG Haiyan, ZHU Zhihao, FEI Xiang, ZHU Yanqing, YUAN Duanlei
(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467000, China)

Abstract: This paper is aimed at the problem that the typical wall bushings with high and low voltage shielding of 40.5 kV switchgear appear partial discharge and surface discharge under working conditions. Ansys Workbench and other software are used for electric field calculation and problem analysis. Two structural optimization schemes are proposed. The cause of the initial discharge at the narrow fillet of copper surface is analyzed in the insulation test. The parameterized modeling optimization method is adopted. The length and radius of the shield of high voltage and earthing is taken as variables, and the repeated iteration is carried out in a certain range. Taking into consideration the optimization scheme of high and low voltage shields for wall bushings, a design is verified by a test. And then a further design of fully shielded structure for HV shield is designed. The parameters of these two structures are compared, and engineering suggestions are given in combination with production practice. The simulation and test results show that shield optimization structure can reduce the maximum field strength of the surface of copper bar and the outer surface of epoxy to 4.5 kV/mm and 2.6 kV/mm respectively. The high voltage full shielding structure reduces the overall field strength of the through wall bushing to 2.37 kV/mm by eliminating the umbrella group near the ground shield and reducing the thickness of the epoxy properly. It provides the engineering basis for the design of the wall bushing.

Key words: 40.5 kV switchgear; wall bushing; partial discharge; surface discharge; electric field simulation

0 引言

日益增长的用电需求对电力系统设备的设计

与制造提出了更高要求^[1-4],交流金属封闭开关柜在配电网中承担着重要的配电和保护功能^[5-7],其绝缘、保护性能对系统安全运行意义重大。目前市场

收稿日期:2018-07-01; 修回日期:2018-08-30

基金项目:国家电网公司总部科技项目。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid.

常见的40.5 kV交流金属封闭开关柜穿墙套管,在运行过程中经常出现局放增大及沿面放电现象^[7-11],对系统安全运行造成隐患。

通过大量试验测试发现^[8-9],造成上述问题的原因有套管环氧树脂绝缘材料长期处于强电场作用下的老化因素,但更多的是由于套管结构设计引起的套管与母线排间气隙放电和绝缘材料表面沿面放电问题^[11-15]。该问题一般通过在穿墙套管内部增加高、低压屏蔽结构解决,但目前市场上很多该典型结构由于屏蔽的尺寸不合理,未能很好地避免上述现象^[14-17]。

文中针对市场上常见的内部具有高、低压屏蔽罩的40.5 kV交流金属封闭开关柜穿墙套管,运行过程中出现局放、沿面放电问题开展研究。利用Ansys Workbench等软件对现有穿墙套管进行三维建模和电场计算^[16-21],分析绝缘试验时穿墙套管初始放电主要发生在内穿铜排表面窄边圆角处的原因;采用参数化建模优化方法,以高压、接地屏蔽罩长度和半径为变量,在一定范围内进行反复迭代,综合考虑得到穿墙套管高、低压屏蔽罩优化方案;基于此进一步设计套管的高压罩全屏蔽方案,对比两方案参数并结合生产实际进行可行性对比,为穿墙套管设计提供工程依据。

1 典型穿墙套管建模与电场计算

1.1 模型构建

市场上常见的双屏蔽型穿墙套管结构图和二维剖面图见图1、2,套管尺寸为长450 mm,直径260 mm,主母线规格为100 mm×10 mm×2。

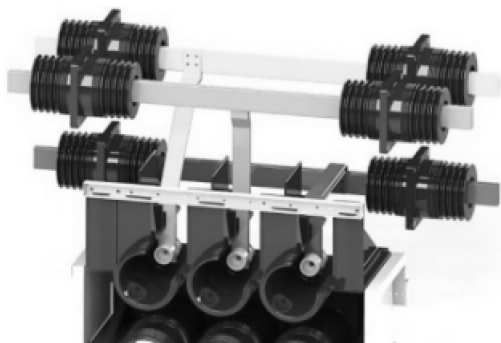


图1 开关柜穿墙套管安装图

Fig. 1 Switch cabinet wall bushing installation diagram

40.5 kV开关柜穿墙套管中绝缘介质主要包括空气气隙、环氧树脂绝缘材料等,上述介质相对介电常数分别设置为1.000 58、3.5,铜电阻率设为 $1.673 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 。开关柜正常运行或试验测试条件下,铜排处于高电位,安装法兰及嵌件处于零电

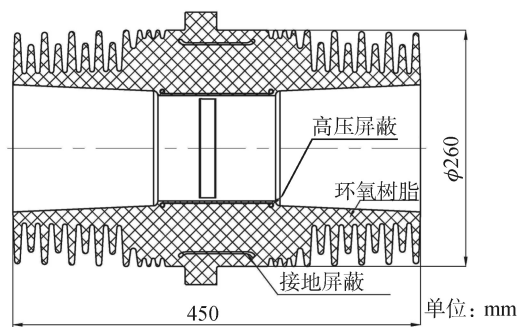


图2 开关柜穿墙套管结构

Fig. 2 Switch cabinet wall bushing structure

位,在铜排上施加185 kV雷电冲击电压,进行电场分布计算,电位分布见图3。

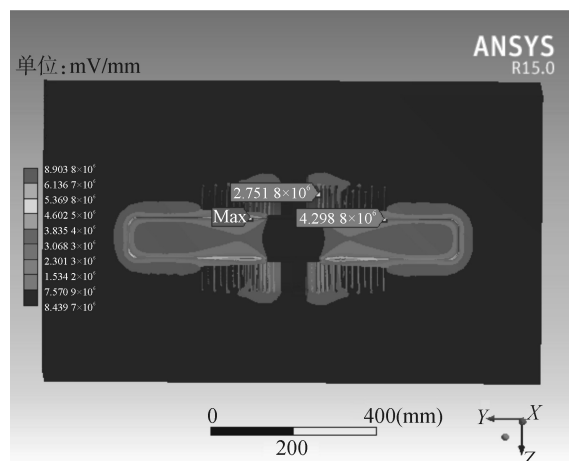


图3 穿墙套管电位分布

Fig. 3 Wall bushing electric potential distribution

1.2 仿真结果分析

由图3可知,穿墙套管空气气隙中最大场强在刚出高压屏蔽罩附近的铜排表面位置(图中max部位),最大场强6.9 kV/mm,套管端部的铜排表面场强约4.3 kV/mm,接地附近伞群最大场强2.75 kV/mm。环氧内部最大场强<10 kV/mm,远小于击穿场强20 kV/mm,文中对环氧树脂内部电场不再详细分析。

分析电场仿真结果,印证了进行绝缘试验时穿墙套管初始放电主要发生在内穿铜排表面窄边的圆角处的现象(此处为局放薄弱点)。同时,施加工频电压或雷电冲击电压时,铜排表面放电会导致整个电场畸变,由于环氧树脂内部远小于击穿临界值,击穿容易发生在伞群表面对柜体的爬电,套管设计时爬距和伞群表面电场分布也应重点关注。

因此,后续工作主要针对空气间隙电场分布和套管沿面电场分布问题开展。为了不增加成本,设计原则以不改变套管整体尺寸为前提,通过优化高压和接地屏蔽罩尺寸(长度、半径)、环氧树脂结构等,使铜排表面空气场强尽可能小的同时降低绝缘

件沿面场强。

2 穿墙套管结构优化与分析计算

2.1 屏蔽罩优化方案

优化方法采用参数化建模,将高压和接地屏蔽罩的长度和半径定义为变量,在一定范围内反复迭代,寻找场强降低趋势,最终综合考虑,找到最优方案。改变高压屏蔽长度、接地屏蔽长度、高压屏蔽半径时气隙的最大场强变化趋势见表1-3。

表1 改变高压屏蔽长度气隙最大场强变化

Table 1 The maximum field strength of air gap with the changing of high voltage shielding length

高压屏蔽长度/mm	高压屏蔽半径/mm	接地屏蔽半径/mm	接地屏蔽长度/mm	气隙最大场强/(kV·mm ⁻¹)
110	60	114	60	8.2
120	60	114	60	7.0
140	60	114	60	5.6
160	60	114	60	5.2
170	60	114	60	5.0
180	60	114	60	4.9

表2 改变接地屏蔽长度气隙最大场强变化

Table 2 The maximum field strength of air gap with the changing of ground shielding length

高压屏蔽长度/mm	高压屏蔽半径/mm	接地屏蔽半径/mm	接地屏蔽长度/mm	空气最大场强/(kV·mm ⁻¹)
160	60	114	70	5.2
160	60	114	60	5.0
160	60	114	40	4.7

表3 改变高压屏蔽半径空气最大场强变化

Table 3 The maximum field strength of air gap with the changing of high voltage shielding radius

高压屏蔽长度/mm	高压屏蔽半径/mm	接地屏蔽半径/mm	接地屏蔽长度/mm	空气最大场强/(kV·mm ⁻¹)
160	60	114	40	4.7
160	65	114	40	4.6
160	70	114	40	4.5

从表1看出,其他参数不变的前提下,增大高压屏蔽的长度,有利于降低铜排表面的最大场强,但当屏蔽长度>160 mm后,变化趋势变得不太明显,这是由于当屏蔽长度160 mm时,图3中场强最大值及邻近区域基本被屏蔽住,再向外延伸铜排表面会有一段较长的4~5 kV/mm的电场区域,除非铜排全屏蔽,否则电场减小效果不太明显。综合考虑经济性,高压屏蔽长度可设置为160 mm。

从表2看出,其他参数不变的前提下,降低接地屏蔽的长度,有利于减小空气最大场强,但接地屏

蔽过小会导致对柜体套管大孔边缘的屏蔽效果不好,特别是如开孔直径稍大时问题更为突出。综合考虑,接地屏蔽长度可设置为40 mm。

从表3看出,增大高压屏蔽半径有助于稍微减小最大空气场强,效果不太明显,但这可以增大套管的内径,有助于一定程度上降低用料成本,因此可设置高压屏蔽半径为70 mm。

除了修改上述屏蔽罩参数外,还进行了以下改动:①增大套管内腔直径变化过渡部位的圆角;②取消一个伞群;③适当减薄环氧厚度,增大拔模斜度,增大套管内部铜排与环氧间隙并节约材料。优化后的套管结构见图4,电场分布情况见图5。

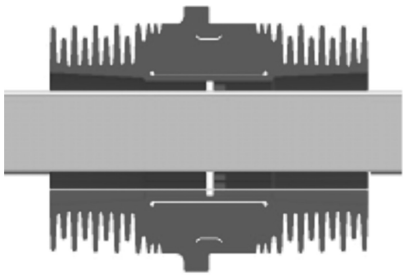


图4 优化后穿墙套管结构方案

Fig. 4 Optimized structure design for wall casing

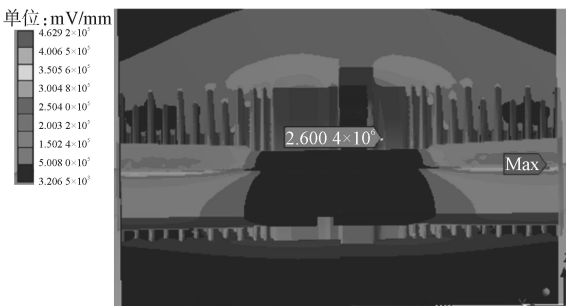


图5 优化后套管电场分布

Fig. 5 Optimized electric field distribution in wall bushing

由图5可知,铜排表面空气最大场强由原来的6.9 kV/mm减小为4.5 kV/mm,效果较为明显。外表面伞群最大场强由2.75 kV/mm减小为2.6 kV/mm,基本变化不大但总体<3 kV/mm。相比原方案,套管环氧树脂总重量降低了6.5%左右,试验测试加载45 kV电压时局放能控制在15 pC。

2.2 高压全屏蔽方案

上述方案中气隙最大场强出现在铜排窄边的圆角表面,可进一步考虑将铜排进行全屏蔽的设计方案,结构见图6。

该方案是在满足爬距的前提下,取消接地屏蔽附近的伞群,满足电场强度的前提下,适当降低环氧厚度。相比第一种设计方案,全屏蔽方案除加长高压屏蔽外,同样采用参数化建模方法对接地屏蔽

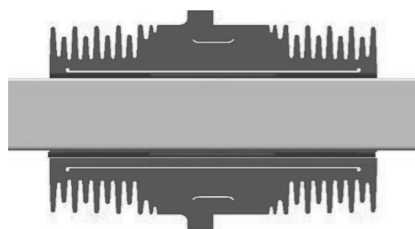


图6 穿墙套管全屏蔽方案

Fig. 6 Fully shielded design for wall bushing

尺寸进行优化,并去掉了接地屏蔽附近的大部分伞群,以降低环氧树脂外表面伞群的场强。此外,在满足电场前提下,适当降低环氧厚度可节约成本。进一步优化后的穿墙套管全屏蔽方案电场计算结果见图7。

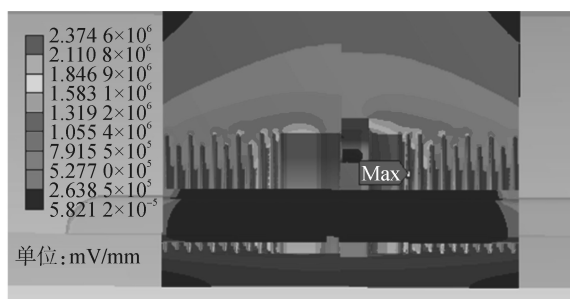


图7 穿墙套管全屏蔽方案电场分布

Fig. 7 Optimized electric field distribution in wall bushing for fully shielded structure

由图7可知,最大场强在外伞群表面,为2.37 kV/mm,套管内部被屏蔽,铜排表面电场忽略不计。该方案电场分布全面优于第一种方案,完全满足开关柜绝缘要求。经计算,该方案如果缩短屏蔽罩,则铜排未被屏蔽部位的表面电场与方案一相似,介于方案一和方案二的中间方案不合适。

屏蔽罩优化方案对目前市场上现有产品的空气气隙最大场强有一定程度降低,可满足绝缘试验要求,实际工程中如将母线排更换为80 mm×12.5 mm进一步增大空气气隙对绝缘将更为有利。为确保屏蔽效果,工艺安装过程应注意以下事项:①车间装配时铜排上连接高压屏蔽的螺钉和连接线位置必须在穿墙套管的高压屏蔽罩内部,且连接线不能过长,形状不能随意,可制定装配规范;②施工现场母线铜排装配时要尽量在穿墙套管内居中,不能严重偏向一侧;③铜排表面不能有毛刺,尖点。

高压全屏蔽方案电场分布全面优于第一种方案,完全满足开关柜绝缘要求,但高压屏蔽罩尺寸增大,加工和浇注工艺难度相对较高。绝缘件局放与设计、加工浇注工艺、试验条件关系密切,很大程度上取决于浇注过程缺陷控制,该方案能否满足国网“十八项反措”中绝缘件局放<3 pC的要求,应在

生产中进一步验证。

3 结论

文中针对目前市场上常见的40.5 kV开关柜墙套管局放增大、沿面放电问题,运用Ansys软件进行仿真结构优化和试验验证,得到了解决上述问题的工程方案:

1)屏蔽罩优化设计方案,通过合理增大内屏蔽直径,调整外屏蔽直径和长度,适当减薄环氧厚度,增大套管内部铜排与环氧间隙,将铜排表面、环氧外表面最大场强分别减小为4.5、2.6 kV/mm。该结构较为简单、浇注方便,可满足产品要求。

2)高压全屏蔽型结构设计方案,在满足爬距前提下,取消接地屏蔽附近的伞群,满足电场强度前提下,适当降低环氧厚度,优化后穿墙套管整体最大场强降为2.37 kV/mm,完全满足开关柜的绝缘要求,整体效果优于屏蔽罩优化设计方案。但该方案高压屏蔽罩尺寸较大,加工和浇注工艺难度相对较大,局放很大程度上取决于浇注过程缺陷控制。

参考文献:

- [1] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求:DL/T 593—2016[S]. 2016.
Common technical requirements for high voltage switchgear and control equipment standards: DL/T 593—2016[S]. 2016.
- [2] 潘长明,刘刚,熊炬,等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器,2011,44(7):90-93.
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. Analysis and preventive measures of insulation accidents in high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 44(7): 90-93.
- [3] 12 kV 固体绝缘金属封闭开关设备和控制设备:DL/T 1586—2016[S]. 2016.
12 kV solid insulated metal closed switchgear and control equipment: DL/T 1586—2016[S]. 2016.
- [4] 林莘,李鑫涛,李璐维. 环保型SF₆替代介质研究进展[J]. 高压电器,2016,52(12):1-7.
LIN Xin, LI Xintao, LI Luwei. Research progress on alternative medium for environmental protection SF₆[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 1-7.
- [5] 李刚,朱革兰. 配网开关柜状态检测与评价实施方式的探讨[J]. 高压电器,2013,49(8):133-138.
LI Gang, ZHU Gelan. Discussion on the mode of state detection and evaluation of distribution switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 133-138.
- [6] 程显,王海燕,闫广超,等. 低碳型35 kV GIS的气室电场强度计算及结构优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(5):67-71.

- CHENG Xian, WANG Haiyan, YAN Guangchao, et al. Electric field strength calculation and structural optimization of low-carbon 35 kV GIS[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science Edition), 2016, 37(5): 67-71.
- [7] 张 斌. 10 kV 开关柜局部放电检测技术及测试平台的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- ZHANG Bin. 10 kV switchgear partial discharge detection technology and test platform research[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [8] 刘正华, 王 斌, 杜海英. 基于 COMSOL Multiphysics 的静电纺丝电场分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(3): 44-47.
- LIU Zhenghua, WANG Jing, DU Haiying. Analysis of electric field of electrostatic spinning based on COMSOL Multiphysics[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science Edition), 2016, 37(3): 44-47.
- [9] 贾勇勇, 杨景刚, 高 山, 等. 高压开关柜内部电场仿真及其影响因素分析[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 154-160.
- JIA Yongyong, YANG Jinggang, GAO Shan, et al. Analysis of electric field simulation and its influencing factors in high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 154-160.
- [10] 王文峰, 张清杰, 蒋立齐. 40.5 kV 开关柜穿墙套管电场分析与优化设计[J]. 华电技术, 2011, 33(2): 20-21.
- WANG Wenfeng, ZHANG Qingjie, JIANG Liqi. Electric field analysis and optimization design of 40.5 kV switchgear wall bushing[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 2011, 33(2): 20-21.
- [11] 刘玉春, 郎福成, 谭东现, 等. 40.5 kV 穿墙套管事故分析及其结构优化[J]. 电瓷避雷器, 2015(6): 39-42.
- LIU Yuchun, LANG Fucheng, TAN Dongxian, et al. Accident analysis and structure optimization of 40.5 kV wall casing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(6): 39-42.
- [12] 岳文忠. 变电站 10 kV 穿墙套管击穿的分析[J]. 农村电工, 2010, 18(1): 32.
- YUE Wenzhong. Analysis of casing breakdown in 10 kV wall-breaking substation[J]. Rural Electrician, 2010, 18(1): 32.
- [13] 程 显, 韩书漠, 何 周, 等. 40.5 kV 环保型气体绝缘开关柜气室结构设计[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2772-2779.
- CHENG Xian, HAN Shumo, HE Zhou, et al. Structural design of a 40.5 kV environment-friendly gas-insulated switchgear cabinet[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2772-2779.
- [14] 韩筛根, 曹 彬, 黄 强, 等. 40.5 kV 穿墙套管电场分析及屏蔽优化[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 113-118.
- HAN Shaigen, CAO Bin, HUANG Qiang, et al. Electric field analysis and shielding optimization of 40.5 kV wall bushings[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 113-118.
- [15] 宁慧英. 高压开关柜中三维电场的计算与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
- NING Huiying. Calculation and analysis of three-dimensional electric field in high voltage switchgear[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- [16] 苏海博, 普美娜, 朱兆芳, 等. 基于 Ansys 仿真的开关柜局部放电研究[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 159-165.
- SU Haibo, PU Meina, ZHU Zhaofang, et al. Study on partial discharge of switchgear based on Ansys simulation[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 159-165.
- [17] 严 璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage and insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [18] 钱立骁, 陈慎言. 12~24 kV 氮气绝缘环网柜的研制[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3717-3724.
- QIAN Lixiao, CHEN Shenyan. Research and design of 12~24 kV nitrogen insulated ring main unit[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3717-3724.
- [19] 潘长明, 刘 刚, 熊 炬, 等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 90-93.
- PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [20] 黎 斌, 王日新, 王 君, 等. 对中压配电柜各种主绝缘的思考——兼评抽出式紧凑型空气绝缘环网柜的特点[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 7-13.
- LI Bin, WANG Rixin, WANG Jun, et al. Thoughts on various kinds of main insulation of medium voltage distribution cabinet - comment on the characteristics of withdrawable compact air-insulated RMU[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 7-13.
- [21] 兰 剑, 王承玉, 李庆余. 中国配电开关应关注的发展热点[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 217-220.
- LAN Jian, WANG Chengyu, LI Qingyu. Development focuses of distribution switchgears in China[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 217-220.
- 王海燕(1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事中压和配电网设备研发。