

电容分压器试验自动接线装置的研制

莫国平, 谢晓云, 龙玉萍, 杨枝林, 宋守龙

(桂林电力电容器有限责任公司, 广西 桂林 541004)

摘要:本文介绍了电容分压器在常规出厂试验过程中,存在频繁改接试验线路、手工装拆油杯等弊端,详细分析了电容分压器自动接线试验装置的基本原理、硬件结构和控制系统。采用带电换线装置、气动接线装置和标准电容器转接盒等研制的器具并通过程序的逻辑控制,在保证安全的前提下,能大幅度减少接线次数,提升试验的效率。

关键词:电容分压器; 试验; 自动接线; 安全; 效率

Development of an Automatic Wiring Device for Capacitive Divider Tests

MO Guoping, XIE Xiaoyun, LONG Yuping, YANG Zhilin, SONG Shoulong

(Guilin Power Capacitor Co., Ltd., Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: In this paper, such drawbacks as the frequent modification of the test circuit and manual installation and disassembly of the oil cup in the common delivery test of capacitive divider, and the basic principle, hardware structure and control system of the automatic wiring test device for the capacitive divider is analyzed in detail. The use of the equipment developed by such devices as a live-line changing devices, pneumatic wiring devices, and standard capacitor adapter transfer box and through the programmable logic control, can significantly reduce the number of wiring connections while ensuring safety, thereby enhancing the testing efficiency.

Keywords: capacitive voltage divider; test; automatic wiring; safety; efficiency

0 引言

电容分压器出厂试验项目主要有电容和介损初测、工频耐压试验、局部放电试验、电容和介损复测等^[1-7]。在两个试验项目切换之间需要进行以下工作:降低电压、分断电源、试验人员进入试验区改换接线、试验人员离开试验区、合上电源、升高电压。在整个试验过程中,试验人员需要频繁地进出试验区、分合试验电源和升降电压等操作。电容分压器由高压电容 C_1 和中压电容 C_2 组成^[8],中压端子通过中压套管引出,分别测量 C_1 、 C_2 的电容和介损时需要在中压端子上连接测试线,但进行工频耐压、局部放电测量时又必须拆除测试线并将中压套管浸入盛满绝缘油的油杯中^[9],在整个试验期间,除频繁地装拆油杯外,也需要不断改接试验线路。上述因素会导致试验过程耗时较长、人员劳动强度大、人工接线易出错等一系列不利因素^[10]。为解决上述问题,对所有接线进行梳理,理顺它们之间的

逻辑关系,研制了电容分压器试验自动接线装置替代全人工接线,从而缓解了出厂试验工序的产能瓶颈问题。

1 总体方案

电容分压器试验自动接线装置主要由带电换线装置、气动接线装置和标准电容器转接盒组成。带电换线装置能够在不中断高压试验电源的情况下当试验项目发生变化时,通过继电器切换试验接线,减少分合电源、升降电压以及试验人员出入试验区的频次。气动接线装置能够在分断高压试验电源的情况下,当对 C_1 和 C_2 分别进行试验或试验项目发生变化时,利用气动元件切换试验接线,同时也可取消试验中途的人工装拆油杯。标准电容器转接盒则在分断高压试验电源的情况下,通过继电器切换试验接线,自动选取测试 C_1 、 C_2 电容和介损时所对应的标准电容器。最后通过控制系统设计,利用可编程控制器进行带电换线装置、气动接

线装置和标准电容器转接盒的整体控制,对整个试验流程的试验项目的线路切换进行操作,实现试验接线的自动化作业。

2 硬件设计

2.1 带电换线装置

2.1.1 带电换线装置原理

按正常试验流程,电容分压器依次进行工频耐压试验、局部放电试验、电容和介损测量^[11-16],其相应的接线原理图见图1-3。

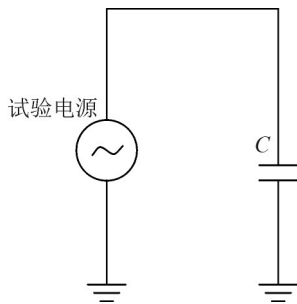


图1 工频耐压试验
Fig. 1 Power frequency withstand voltage test

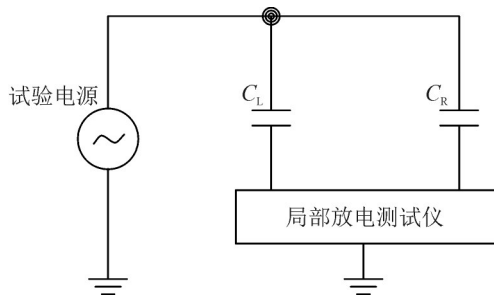


图2 局部放电试验
Fig. 2 Partial discharge test

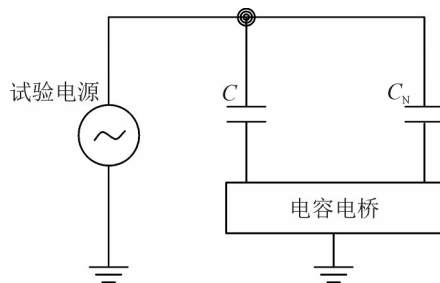


图3 电容和介损测量
Fig. 3 Capacitance and dielectric loss measurement

从图中可以看出,3项试验中电容分压器高压端子的连接方式是相同的,高压连接线不必切换,只要改变电容分压器低压端子的连接方式即可实现试验回路的切换。

在数十千伏甚至数百千伏的试验电压下,如果直接断开电容分压器低压端子与仪器或与地的连

接线,则在电容分压器电流被切断的瞬间,电容分压器低压端子上会出现高电压,该电压足以击穿低压端子周围的所有绝缘,危及试验仪器和人身安全^[17-18]。为了避免这种情况发生,切换开关可采用先合后断的方式“转移”电容分压器的电流^[19],而不直接切断电容分压器电流,防止低压端子出现高电压,再加上合适的保护措施,就可以实现试验回路的安全切换。

例如,当前状态为工频耐压试验时,电容分压器的低压端子通过第一组继电器的触点直接接地,电容分压器电流通过继电器触点直接入地。若要切换到局部放电试验,则通过另一组继电器的触点先将电容分压器的低压端子与局部放电测试仪的输入端连接,使电容分压器低压端子通过局部放电测试仪的测量阻抗接地,然后再断开直接接地的第一组继电器的触点,使直接接地的电容分压器电流转移到局部放电测试仪的测量阻抗上,通过测量阻抗接地,从而完成试验回路的转换。由于在切换过程中,电容分压器电流从未被切断或者说电容分压器低压端子与地之间始终保持为低阻抗,所以电容分压器低压端子上不会出现高电压。

2.1.2 带电换线装置的试验主回路

试验主回路带电换线的电气原理图如图4所示。

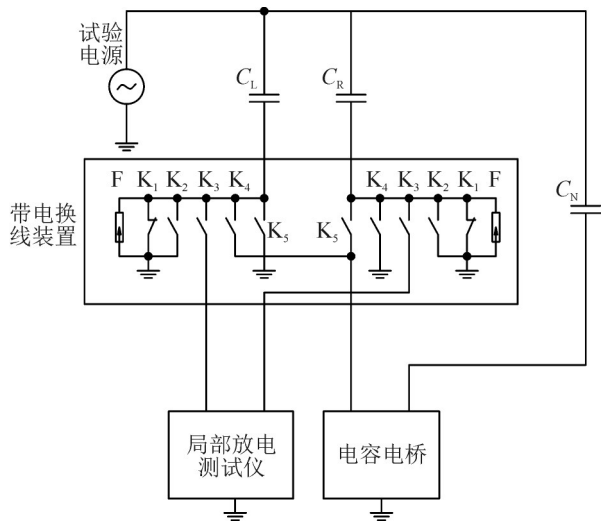


图4 带电换线装置电气原理图
Fig. 4 Electrical schematic diagram of live line changing device

图中, K_1 为控制回路断电保护继电器常闭触点。当控制回路断电时,该触点闭合,保证电容分压器低压端子与地连通。 K_2 为工频耐压试验控制继电器触点。工频耐压试验时,其常开触点闭合,使电容分压器低压端子直接接地。 K_3 为局部放电试验控制继电器触点。局部放电试验时,其常开触

点闭合,使电容分压器低压端子通过局部放电测试仪的测量阻抗接地。 K_4 、 K_5 为电容测量控制继电器触点,用于左右两侧电容分压器电容测量时的切换,使电容分压器低压端子通过电容电桥的测量阻抗接地。测量左侧电容器的电容时, K_4 常开触点闭合;测量右侧电容器的电容时, K_5 常开触点闭合。 F 为气体放电管,限制电容分压器低压端子的对地电压^[20]。当控制回路或继电器发生故障,造成电容分压器电流被切断,低压端子电压升高时,气体放电管击穿,为电容分压器电流提供通路,限制低压端子的电压,保护仪器设备及人身安全。

2.1.3 带电换线装置的工作方式

在稳定状态下,继电器 K_2 、 K_3 、 K_4 的线圈只有一个且必须有一个是处于通电状态的。任意两种试验回路之间切换时,继电器触点必须采用先合后断的控制方式,需等后一种试验控制继电器线圈通电 1 秒后,前一种试验控制继电器才能断电^[21]。从工频耐压试验切换到局部放电试验、再从局部放电试验切换到工频耐压试验时的控制时序如图 5 所示,图中继电器状态 1 为线圈通电状态,状态 0 为线圈断电状态。

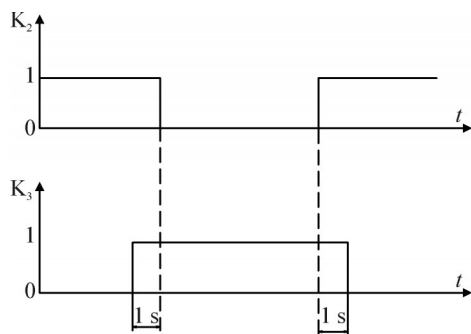


图5 项目试验控制时序图
Fig. 5 Test sequence control diagram for the project

2.2 气动接线装置

2.2.1 中压电容 C_2 测量原理

用常规方法测量中压电容 C_2 的试验回路如图 6 所示,高压试验电源及标准电容 C_N 都必须接在电容分压器的高压端 A。而在测量总电容 C 及高压电容 C_1 时,高压试验电源及标准电容 C_N 都必须接在分压器的高压端 A,若要将高压试验电源及标准电容 C_N 从高压端 A 切换到中压端 A_1 ,则用于切换的高压开关工作电压将达到数十千伏甚至数百千伏,这样的高压开关购置成本很高,占用空间大,用在高压端接线是不现实的。

优化的试验回路如图 7 所示,试验电压仍加在高压端 A 不切换, C_2 的测量电压通过 C_1 、 C_2 分压得

到。由于标准电容 C_N 必须接在中压端 A_1 ,因此需增加一个标准电容器专门用于测量 C_2 。这样试验回路中有两个标准电容, C_{N1} 用于总电容 C 和高压电容 C_1 测量, C_{N2} 用于中压电容 C_2 测量^[22]。 C_{N1} 、 C_{N2} 低压端通过标准电容器转接盒的继电器进行切换,如图 8 所示。测量过程中在进行 C_{N1} 、 C_{N2} 切换前要分断试验电源,切换后再合上试验电源。

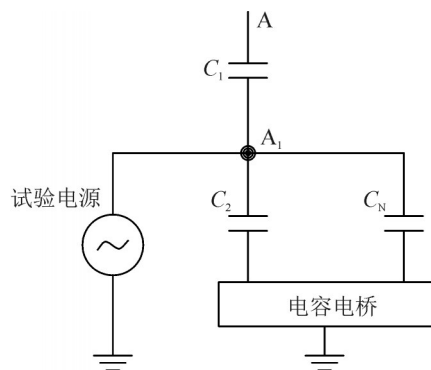


图6 常规试验回路
Fig. 6 Conventional test circuit

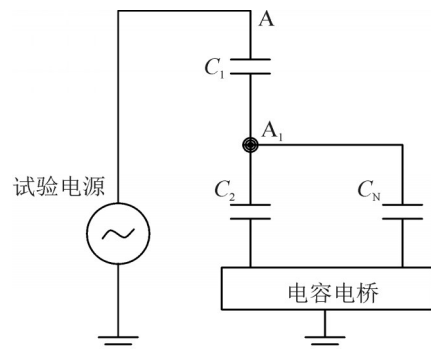


图7 优化试验回路
Fig. 7 Optimized test circuit

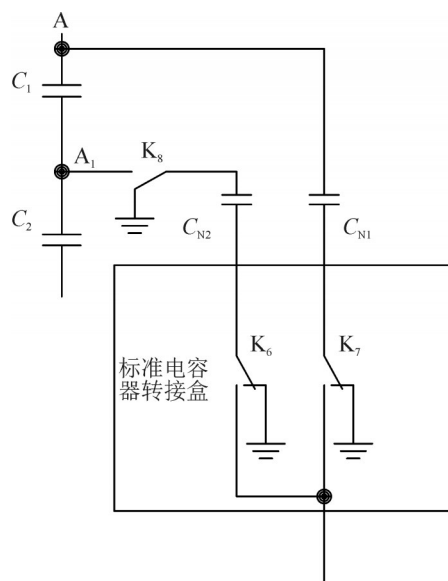


图8 标准电容器切换原理图
Fig. 8 Schematic diagram of a standard capacitor switching

2.2.2 气动接线装置的试验主回路

电容分压器需放置在试验平车上进行试验,要实现电容分压器的总电容 C 、高压电容 C_1 和中压电容 C_2 的工频耐压试验、局部放电测量、电容和介损测量时试验回路的切换,需要多个继电器开关组合对电容分压器中压端子、低压端子及各测量仪器进行连接。试验回路的电气原理图如图9所示。

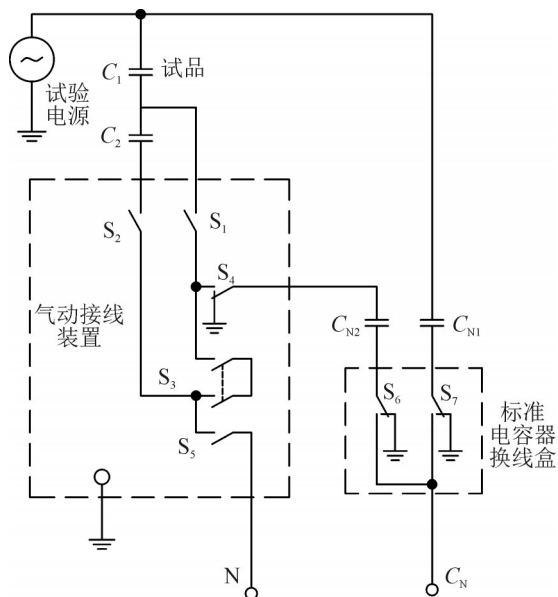


图9 气动接线装置电气原理图
Fig. 9 Electrical schematic diagram of pneumatic wiring device

图中, S_1 为中压端常开触点, 常开触点闭合时, 将中压端接入回路。 S_2 为低压端常开触点, 常开触点闭合时, 将低压端接入回路。 S_3 为 C_2 短接常开触点。测量电容分压器 C_1 项目时, 常开触点闭合, 同时 S_1 和 S_2 闭合, 实现对 C_2 的短接。 S_4 为标准电容器 C_{N2} 常开触点, 测量电容分压器 C_2 电容和介损时, 常开触点闭合, 接通 C_2 对应的标准电容器。 S_5 为 N 端子触点, 进行电容分压器的局部放电试验、电容和介损测量时, 常开触点闭合, 通过带电换线装置接入局部放电测试仪或电容电桥的输入端。

在对 C 和 C_1 进行电容和介损测量时, 将 C_{N1} 标准电容器与 C_1 高压端接通; 在进行 C_2 电容和介损测量以及 C 、 C_1 和 C_2 耐压试验时, C_{N1} 标准电容器低压端接地, 高压端保持接线不变以提高试验效率。因 C_{N1} 标准电容器额定电压远高于电容分压器额定电压, 故能够保证在长期试验中不受损坏。

2.2.3 气动接线装置机械部分

气动接线装置机械部分包括试验平车及气动开关操作平台。

试验平车用来承载电容分压器及开关部件, 主要由框架、支承板、中压端摇臂机构、低压端摇臂机构及接线组件等组成。支承板在平车上侧, 用于定位不同尺寸的电容分压器^[18]。试验平车内装有中、低压端摇臂机构各1套, 其摆臂分别作为连接中低压套管开关的动触头, 分别由气缸驱动与静触头接触。为减少人工接线, 简化开关结构, 中低压套管的连接开关设计采用套管的金属部分作为开关的静触头, 同时, 为减缓直接作用在中低压套管上的气缸推力, 摆臂机构增加了弹簧缓冲装置^[23-24]。另外, 为使中压套管的动触头适应不同高度的中压套管, 中压摇臂机构采用丝杆调节的方式实现高度方向的调节。接线组件设在平车外侧, 作为标准电容器及低压测试线开关的静触头。

由于电容分压器是放置在可移动的试验平车上, 且开关部件的大部分触头也在试验平车上, 为方便执行和控制, 开关的驱动方式采用了气缸驱动^[25]。气动接线装置机械结构及接线示意图见图10-11。

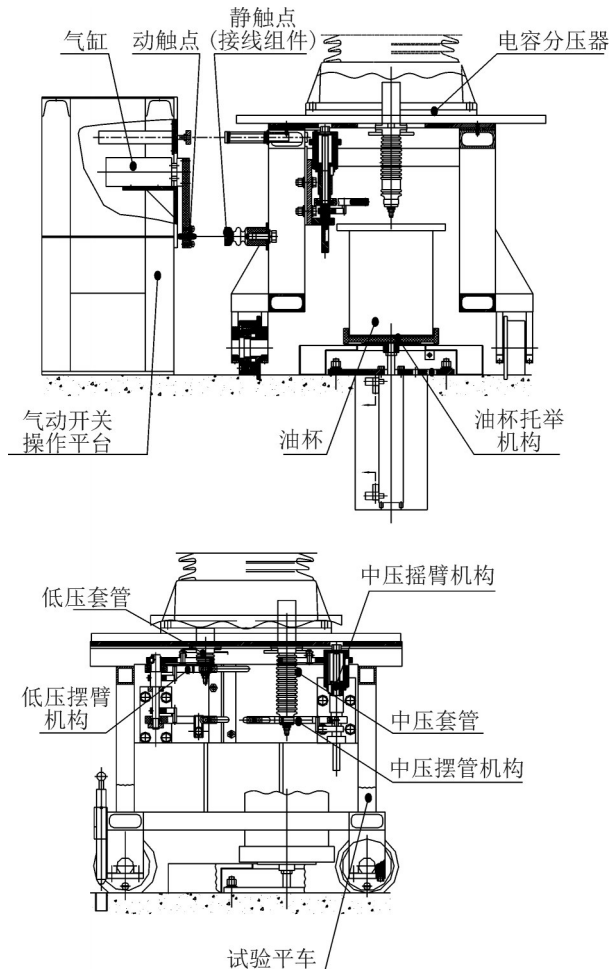


图10 气动接线装置机械结构图
Fig. 10 Mechanical structural diagram of pneumatic wiring device

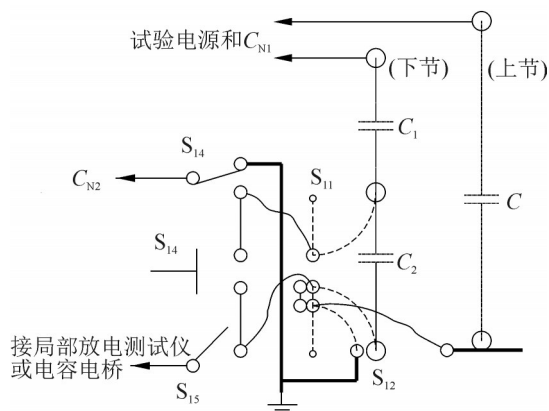


图11 气动接线装置接线示意图

Fig. 11 Wiring schematic diagram of pneumatic wiring device

在进行工频耐压试验及局部放电测量时,电容分压器中压端子与地之间的电压很高,为避免中压端发生绝缘击穿及电晕放电^[26-27],中压端子必须浸入绝缘油中。最初方案是将试验平车设计成油箱,各开关也放置在油箱中,试验时电容分压器放在油箱上,中压套管可浸入绝缘油中。但该方案存在活动部件的密封困难、开关维修及绝缘油更换不便、试验完成后套管滴油污染环境等问题,为此确定采用可升降油杯对中压套管进行绝缘的方案^[28]。油杯托举机构主要由气缸、油杯及油盘等组成,通过气缸伸缩可方便油杯升起或降低使中压套管浸入或脱离绝缘油。

气动开关操作平台用于安装控制气缸及动触头,主要由框架、气缸及动触点机构等组成,控制气缸驱动中压端摇臂机构及动触点机构动作,实现各开关分合。亦作为增高平台,方便人工连接顶部高压电源线。

2.3 电容分压器试验自动接线装置

整套自动接线装置主要由带电换线装置、气动接线装置和标准电容器转接盒组合而成,再由控制系统对整个试验流程中的线路切换进行操作和控制,确保在高电压带电状态下,满足上、下节电容分压器在进行工频耐压试验、局部放电测量、电容和介损测量的自动线路切换。为提升试验效率,设计时采用双工位试验,共配置两个试验平车^[29],可同时满足下节或上节的试验要求,整个试验回路的电气原理图见图12。

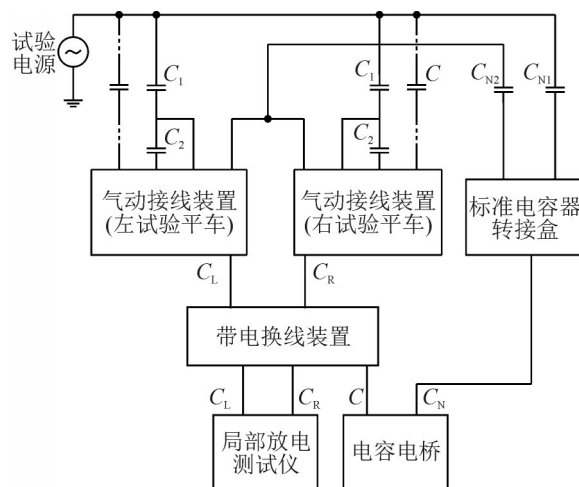


图12 自动接线装置电气原理图

Fig. 12 Electrical schematic diagram of automatic wiring device

3 控制系统设计

控制系统包括电气系统和气动系统两大部分。电气系统的原理方框图如图13所示,主要由控制器、左右气动接线装置、带电换线装置和 C_{N1} 、 C_{N2} 标准电容器转接盒驱动电路组成。控制器的核心采用了可编程序控制器,其具有外围电路简单、工作稳定可靠、抗干扰抗冲击能力强、功能升级简单方便等特点^[30]。

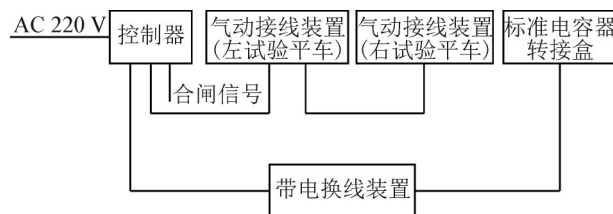


图13 电气系统的方框图

Fig. 13 Block diagram of electrical system

气动系统的原理图如图14所示,主要包括气源、气源调节装置、方向控制阀、气缸、调速接头及消声器组成。由方向控制阀、气缸、调速接头及消声器组成的两套相同气路^[31],分别安装在左右操作平台,每个气缸驱动一个开关。

根据电气系统和气动系统的电路图以及各开关动作逻辑关系,通过PLC编程,实现了对自动接线装置的控制。

4 实施效果

根据设计的技术方案,最终完成的电容分压器自动接线装置由2个试验平车、2套气动开关操作平台、2套油杯托举机构、1套标准电容器转接盒、

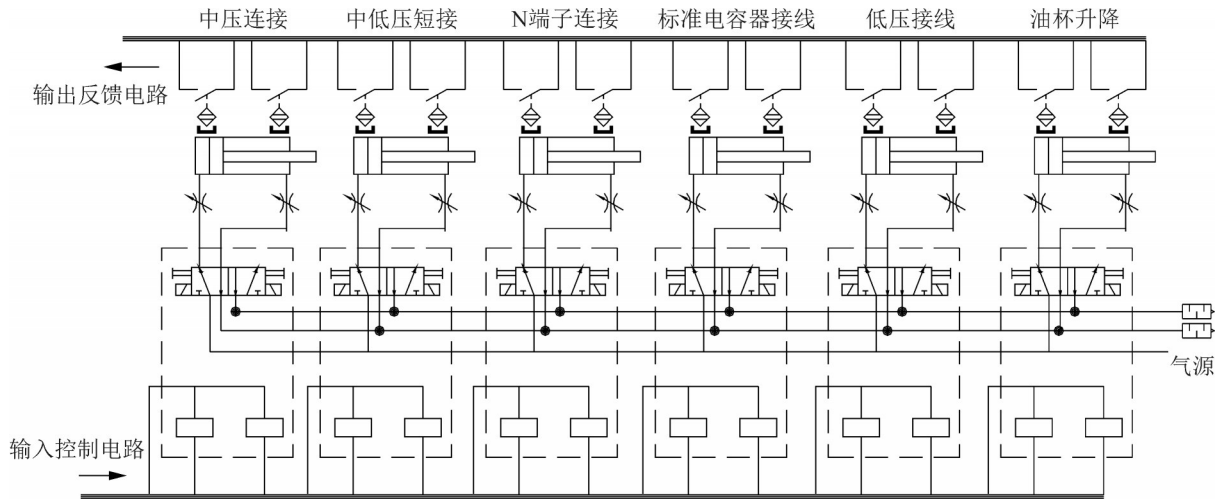


图14 气动系统的原理图
Fig. 14 Schematic diagram of pneumatic system

1套带电换线装置和1套控制器组成。在正常运行一段时间后,将使用自动接线装置后的电容分压器试验效率与全人工接线试验效率进行对比,数据如表1所示。数据表明,采用自动接线装置^[32],效率得到了大幅度提升。

表1 不同接线方式数据结果
Table 1 Comparative analysis of different wiring methods

项目	人工接线	调压器 升降压接线	试验时间
自动接线 装置接线/次	1	10	12.67 min (含吊装时间5 min)
纯人工接线/次	14	24	30.33 min (含吊装时间5 min)
效率提升/%	1 300	140	139

5 结语

电容分压器试验自动接线装置专用于电容式电压互感器的电容分压器、RI电容器等瓷套类电容器的出厂试验。可在不切断试验电源的状态下实现电容器不同试验项目线路的切换以及下节电容分压器 C_1 或 C_2 试验的选择,具有较为完善的控制策略和保护措施,使电容器试验的线路切换变得快捷、方便,可大幅缩短试验时间,提高试验效率,减轻试验人员的劳动强度,降低设备损耗,提高试验的安全性。

参考文献

[1] 刘水平. 互感器 电力电容器[M]. 北京:中国电力出版社, 2020.
[2] 互感器 第1部分:通用技术条件:GB/T 20840. 1—2010 [S]. 2010.
Instrument transformers—Part 1: General requirements: GB/T 20840. 1—2010 [S]. 2010.

[3] 互感器 第5部分:电容式电压互感器的补充技术要求 GB/T 20840. 5—2013 [S]. 2013.
Instrument transformers—Part 5: Additional technical requirements for capacitive voltage transformers: GB/T 20840.5—2013 [S]. 2013.
[4] 吴奇松,夏君宇,赵国庆,等.CVT电容分压器末端放电故障分析[J]. 变压器,2024,61(1):62-65.
WU Qisong, XIA Junyu, ZHAO Guoqing, et al. Analysis of discharge fault at end screen of CVT capacitor voltage divider[J]. Transformer, 2024, 61(1): 62-65.
[5] 赵彦林,周志新,何亮,等.一起电容式电压互感器二次电压异常故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1):114-120.
ZHAO Yanlin, ZHOU Zhixin, HE liang, et al. Analysis of an abnormal secondary voltage of capacitive voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):114-120.
[6] 张凯煜,沈云超,郭全军,等.一起500 kV电容式电压互感器电压异常事件的分析与处理[J]. 变压器,2023, 60(8):65-70.
ZHANG Kaiyu, SHEN Yunchao, GUO Qunjun, et al. Analysis and treatment of an abnormal voltage event of 500 kV capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2023, 60(8): 65-70.
[7] 陈璐,李光茂,张梦慧,等.一起110 kV电容式电压互感器异响原因分析[J]. 变压器,2023, 60(12):68-72.
CHEN Lu, LI Guangmao, ZHANG Menghui, et al. Cause analysis of abnormal noise of a 110 kV capacitor voltage transformer[J]. Transformer, 2023, 60(12):68-72.
[8] 肖耀荣,高祖绵. 互感器原理与设计基础[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,2003.
[9] 宋守龙,廖斌,顾风彪. 电容式电压互感器铁磁谐振试验测控装置[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(5): 54-60.

- SONG Shoulong, LIAO Bin, GU Fengbiao. Measurement and control device for ferro-resonance test of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 54-60.
- [10] 高电压试验技术 第2部分:测量系统:GB/T 16927. 2—2013[S]. 2013.
- High voltage test techniques—Part 2: Measuring systems: GB/T 16927. 2—2013 [S]. 2013.
- [11] 高电压试验技术 第1部分:一般定义及试验要求:GB/T 16927. 1—2011 [S]. 2012.
- High voltage test techniques — Part 1: General definitions and test requirements: GB/T 16927. 1—2011 [S]. 2012.
- [12] 杨硕亮,任春阳,赵含,等.天然酯绝缘油与电容式电压互感器的相容性研究[J]. 变压器, 2024, 61(7): 42-46.
- YANG Shuoliang, REN Chunyang, ZHAO Han, et al. Study on compatibility between natural ester insulating oil and capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2024, 61(7): 42-46.
- [13] 田浩, 杨敏, 陈小龙, 等. 500 kV 电容式电压互感器异常发热原因分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 106-113.
- TIAN Hao, YANG Min, CHEN Xiaolong, et al. Analysis on abnormal heating and preventive measures of 500 kV capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 106-113.
- [14] 陈于晴,黄青丹,宋浩永,等.油浸式电流互感器主绝缘快速暂态过电压分布的研究[J]. 变压器, 2023, 60(12): 27-33.
- CHEN Yuqing, HUANG Qingdan, SONG Haoyong, et al. Study of VFTO distribution in insulation system of IOCT[J]. Transformer, 2023, 60(12): 27-33.
- [15] 齐恒波.浅析少油型电容式套管末屏放电原因[J]. 变压器, 2024, 61(8): 55-57.
- QI Hengbo. Brief analysis of cause of discharge at end shield of low-oil capacitor bushing[J]. Transformer, 2024, 61(8): 55-57.
- [16] 张仁豫. 高电压试验技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1982.
- [17] 沈其工,方瑜,周泽存. 高电压技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2019.
- [18] 陈世元. 电器学[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社, 2019.
- [19] 吴翊. 高压开关设备试验技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [20] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2016.
- [21] 宋守龙. 电容分压器的电容及介损测量[J]. 电力电容器与无功补偿, 2002, 23(4): 35-42.
- SONG Shoulong. Measurement of capacitance and dielectric loss in capacitive voltage dividers[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2002, 23(4): 35-42.
- [22] 杨华勇,宋天虎. 机械设计手册[M]. 第5版. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [23] 郭天兴. 电力电容器技术及其应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2020.
- [24] 蔡茂林. 现代气动技术实用手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.
- [25] 王季梅. 电器电弧理论与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [26] 庞清乐,郭文,李希年. 供电技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2015.
- [27] 严璋. 绝缘油电气性能测试技术[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2014.
- [28] 李华. 棒式电容分压器试验接线优化研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2023.
- [29] 西门子有限公司. SIMATIC S7-200 可编程序控制器系统手册[Z], 2008.
- [30] 王岩,张井岗. 电气控制与PLC应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2018.
- [31] 刘银水. 机械设计手册(单行本)气压传动[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- [32] 宋守龙,李必春. 一种带电换线装置及运作办法: CN201610594262. 4[P]. 2022-07-16.

作者简介:

莫国平(1972—),男,高级工程师,主要从事电力电容器制造工艺的研究与设计工作。E-mail:grgymgp@163.com。

谢晓云(1979—),女,工程师,主要从事电力电容器制造工艺的研究与设计工作。

王玉萍(1986—),女,经济师,主要从事电力电容器技术研究管理工作。

杨枝林(1983—),男,高级工程师,主要从事电力电容器制造工艺的研究与设计工作。

宋守龙(1964—),男,高级工程师,主要从事高电压试验工作。