

导体和电气设备选型指南丛书

高压熔断器串 真空接触器 (F-C) 回路

中国工程建设标准化协会电气专委会
导体和电气设备选择分委员会

组编

王喆 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

导体和电气设备选型指南丛书

高压熔断器串

真空接触器 (F-C) 回路

中国工程建设标准化协会电气专委会
导体和电气设备选择分委员会

组编

王 喆 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《导体和电气设备选型指南丛书》是由中国工程建设标准化协会电气专委会、导体和电气设备选择分委员会组织编写的一套针对导体和电气设备选型的技术丛书，共 13 分册，本分册为《高压熔断器串真空接触器（F-C）回路》。

本书是关于高压熔断器串真空接触器（F-C）回路选择和应用的一本实用工程技术书。全书共分 9 章，分别为概述、真空接触器的选择、高压熔断器的选择、F-C 回路导体和设备的配合、F-C 回路的继电保护与控制、F-C 回路过电压保护装置的选择、F-C 回路馈线动力电缆的选择、F-C 回路开关柜的结构型式及布置安装以及 F-C 回路的适用范围及经济分析。

本书可供从事高压熔断器串真空接触器（F-C）回路设计、制造、安装、运行和试验等相关专业的技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

高压熔断器串真空接触器（F-C）回路 / 王喆主编；中国工程建设标准化协会电气专委会，导体和电气设备选择分委员会组编. —北京：中国电力出版社，2015.9

（导体和电气设备选型指南丛书）

ISBN 978-7-5123-8233-6

I. ①高… II. ①王… ②中… ③导… III. ①高压熔断器 ②真空接触器 IV. ①TM563 ②TM572

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 210410 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 9 月第一版 2015 年 9 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 7.5 印张 124 千字

印数 0001—2000 册 定价 28.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

导体和电气设备选型指南丛书

编 委 会

主 任 马 安

副 主 任 吴德仁 曹永振 李淑芳

执行主编 弋东方

编 委 弋东方 郎润华 张蜂蜜 王 鑫

彭开军 郝士杰 朱良镭

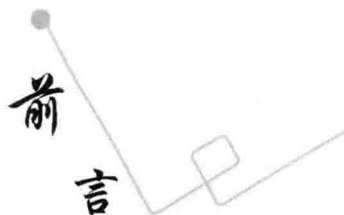
《高压熔断器串真空接触器 (F-C) 回路》

编 写 人 员

主 编 王 喆

编 写 魏显安 顾学宏 刘 尧 李岩山

牟忠显 陈永志



我国的电力行业随着经济快速增长而高速发展，到 2014 年年底，全国发电装机容量已突破 13.6 亿 kW，居世界第一。火、水、风、光、核等多样能源犹如百花争艳。国家电网的交流输电电压达到了 1000kV，直流输电电压达到了 800kV，智能电网的建设方兴未艾。电工准备制造业日新月异。自主创新，促进电力技术发展到了崭新的阶段。

为了顺应这样的大好形势，也为了总结、梳理、深化和推介导体和设备选型经验，提高设计水平和质量，中国工程建设标准化协会电气专委会导体和电气设备选择分委员会决定邀请国内院校、科研、设计、制造等单位的业内专家，联合编撰一套导体和电气设备选型指南丛书，供读者使用。

本套丛书将包括电动机、变压器、互感器、电抗器、开关设备、成套设备、电容补偿设备、变频及启动设备、中性点设备、过电压保护设备、绝缘设备、导体、电缆等 13 个分册。祈望这套丛书能够编撰成：① 教科书的延伸；② 规程规范的诠释；③ 设计人员的工具；④ 招投标的助手；⑤ 制造厂商的参谋。

本书为《高压熔断器串真空接触器回路（F-C 回路）》分册，全面介绍高压熔断器和真空接触器的技术特点、相关标准，结合火力发电厂的特点介绍了 F-C 回路设备和导体的选择方法和配置原则，并列举典型的选择和应用实例，供电气设计人员、运行人员参考使用，以达到合理、正确的应用和选择 F-C 回路的目的。

编撰这套丛书是中国工程建设标准化协会电气专委会导体和电气设备选择分委员会应尽的社会责任，在这里，要特别感谢标委会全体委员们的共同努力。由于编写时间仓促，书中难免有疏漏之处，衷心希望广大读者对本套丛书提出宝贵意见。

中国工程建设标准化协会电气专委会
导体和电气设备选择分委员会
2015 年 1 月 北京

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 F-C 回路的基本原理及回路配置	1
1.2 F-C 回路应用现状	4
1.3 F-C 回路选型设计	6
第 2 章 真空接触器的选择	8
2.1 真空接触器的技术特点	8
2.2 真空接触器的选择内容	11
第 3 章 高压熔断器的选择	13
3.1 适用于 F-C 回路的高压熔断器技术特性	13
3.2 选择高压熔断器时应考虑的主要因素	21
3.3 电动机回路高压熔断器的选择	23
3.4 变压器回路高压熔断器的选择	31
第 4 章 F-C 回路导体和设备的配合	37
4.1 F-C 回路设备的短路耐受能力配合	37
4.2 高压熔断器与真空接触器的保护配合	44
第 5 章 F-C 回路的继电保护与控制	46
5.1 F-C 回路的继电保护	46
5.2 F-C 回路的控制	57
第 6 章 F-C 回路过电压保护装置的选择	65
6.1 F-C 回路的过电压分析	65
6.2 高压电动机和低压变压器的绝缘特性	76
6.3 中性点接地方式及其对过电压保护的影响	79
6.4 限制过电压的保护措施及过电压保护装置的选择	81

第 7 章 F-C 回路馈线动力电缆的选择	88
7.1 电缆的热稳定条件及影响因素	88
7.2 F-C 回路电缆热稳定截面选择条件的确定	89
7.3 F-C 回路热稳定截面的计算	91
7.4 馈线电缆最小热稳定截面的计算	92
第 8 章 F-C 回路开关柜的结构型式及布置安装	98
8.1 F-C 回路开关柜的结构形式	98
8.2 F-C 回路开关柜的布置安装	101
第 9 章 F-C 回路的适用范围及经济分析	103
9.1 F-C 回路的经济性分析	103
9.2 F-C 回路的适用范围	107
参考文献	108

第1章

概述

1.1 F-C回路的基本原理及回路配置

高压熔断器串真空接触器(High Voltage Fuse and Vacuum Contactor Circuit)回路简称为F-C回路,是以高压限流熔断器和真空接触器为主要元件组合构成的开关装置,并安装在开关柜中。该装置应用于3~10kV电压等级的供电系统,作为电动机、电力变压器等用电设备的保护和操作电器。

在工矿企业的3~10kV供电系统中为用电负荷供电的开关设备一般采用真空断路器与F-C回路联合使用的方案,即采用真空断路器为大容量设备供电,采用F-C回路为小容量设备供电。真空断路器具有集操作和保护功能于一体的特点,在正常运行时作为操作设备接通和断开负荷回路,在故障情况下作为保护设备根据综合保护装置的指令开断各种故障电流。真空断路器优点是在开断短路电流后可重复使用,缺点是额定电流数值较大(一般不小于630A),造价较高,对额定功率较大的用电负荷比较适用,而3~10kV系统中绝大多数用电负荷的额定电流较小,不足真空断路器额定电流的1/3,断路器额定电流与实际通过的负荷电流不匹配,使用在容量较小的用电负荷上不经济。

当3~10kV供电系统中的用电负荷容量较小时,可以采用F-C回路取代真空断路器。用熔断器和接触器组合构成开关装置,从本质上来

看，就是把常规断路器身兼的两种功能分开，真空接触器作为保护和操作电器，除执行操作功能外，在回路故障电流小于某一设定值时断开故障回路；高压熔断器作为保护电器，当回路电流大于这一设定值时通过熔断器中熔体的熔断断开故障回路。

F-C 回路中高压熔断器与综合保护装置的保护曲线配合示例如图 1-1 所示，曲线图的横坐标是回路预期电流，纵坐标为时间。图中熔断器保护曲线是对应某种特定规格的熔断器，不同规格的高压限流熔断器有不同的保护曲线。真空接触器的动作受回路综合保护装置的控制，综合保护装置的保护曲线可根据用电负荷特性进行选择，并与高压熔断器的保护曲线在时间—电流坐标中相交。当回路发生故障时，如果回路故障电流小于该保护曲线交接点对应的电流，则由综合保护装置动作真空接触器断开回路实现保护，此时真空接触器先于高压熔断器断开回路，高压熔断器不动作。当回路的故障电流大于该保护交接点对应的电流时由高压熔断器熔断实现保护。

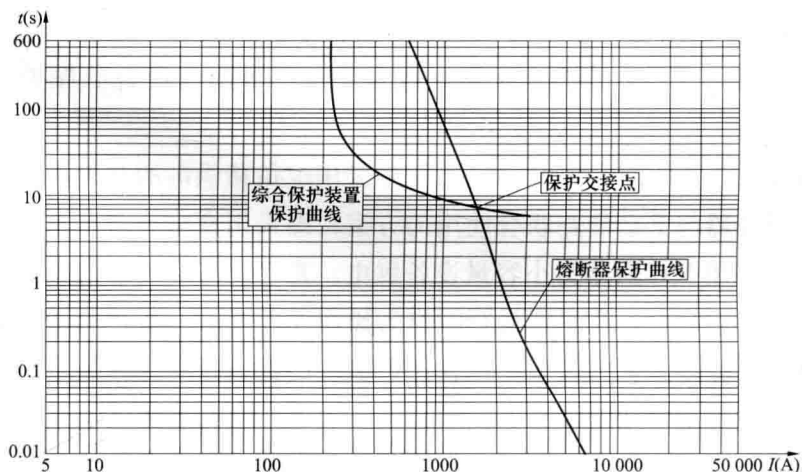


图 1-1 高压熔断器与综合保护装置保护曲线配合示例图

F-C 回路的典型一次接线图及设备配置如图 1-2 所示。图中虚线框内表示安装在开关柜内的部分。高压限流熔断器和真空接触器作为主要元件和开关设备安装在高压开关柜的手车内。为尽可能的增加熔断器的保护范

围, F-C 回路柜内按高压熔断器连接在母线和真空接触器之间的原则进行接线和布置。除图中设置的电流互感器、避雷器、接地开关等一次设备外, 开关柜上还安装有综合保护装置、继电器、转换开关、指示灯、按钮等二次设备。

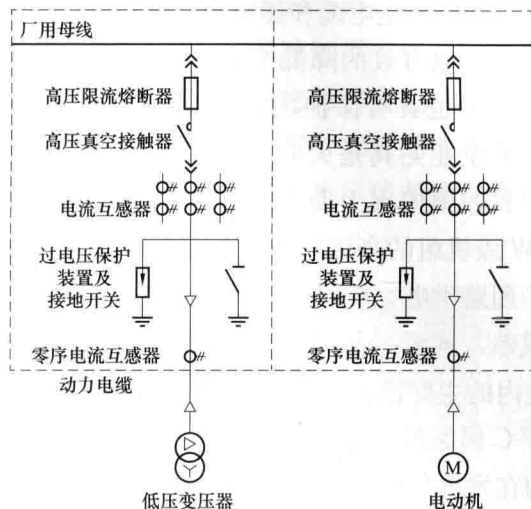


图 1-2 F-C 回路典型一次接线图及设备配置

F-C 回路中的高压熔断器选用高压限流熔断器, 这种熔断器能在规定的电流范围内且在它的动作期间和动作结束之前, 将电流限制到远低于预期电流峰值, 且具有开断电流越大、开断时间越短的特性, 当电流很大时, 能在电流达到峰值以前就将回路断开。F-C 回路的设备配置利用了这种限流作用, 当回路故障电流较大时, 由熔断器开断并限制故障电流的幅值, 从而使回路中的其他导体和设备因为这种限流作用的保护而可以按较低短路耐受能力选择, 降低造价。F-C 回路中真空接触器仅操作回路正常工作电流和较小的故障电流, 开断水平低、电流小, 因此操作时冲击小, 寿命长。

基于高压熔断器的限流作用和真空接触器适合频繁操作的特点, F-C 回路具有保护功能分配合理、短路冲击小、造价低廉、占地面积小等优点, 适合于 3~10kV 电压等级的中小型负荷或频繁操作负荷使用, 在火力发电厂中的应用比较广泛。

1.2 F-C回路应用现状

F-C回路不仅本身价格低廉,而且由于其限流作用和占地面积小等技术特点,可使与之相关的供电电缆和建筑设施投资降低,因此大量使用F-C回路代替真空断路器可以有效的降低工程造价。由于其具有比较明显的经济优势,同时在技术上也具有保护功能分配合理、适于频繁操作等优点,因此F-C回路在工矿企业尤其是火力发电厂中应用比较广泛,同时在核电站中也有应用。以目前国内火力发电厂的主力机型(600MW级燃煤机组)为例,2台600MW级机组的高压厂用电负荷总数在110台左右,其中半数以上可以采用F-C回路供电,应用F-C回路的经济效益比较显著。目前F-C回路的制造技术成熟,随着近年来我国科学技术的发展和制造水平的不断提升,F-C回路柜内的主要设备不但均可国产,且陆续有性能更好的新产品出现,也拓展了F-C回路的应用。

F-C回路最初在发电厂中应用时,受当时的制造水平限制,熔断器的开断水平为31.5~40kA,开断水平为50kA的产品稀少且价格昂贵。从21世纪初开始,我国陆续开工建设大量的大功率发电机组,为满足大机组高压厂用电系统对高开断水平开关设备的需求,开断电流水平为50kA的高压熔断器在市场上日益增多,价格逐渐降低,并随之在发电厂中开始大量应用。

真空接触器的额定电流最初一般为315、400A,开断水平为3.2kA或4kA。近年来随着真空灭弧室及电触头材料的改进,绝缘材料技术的发展,真空接触器的性能也有所改进,并向小型化、大容量、长寿命、免维护等方向发展,其短路电流开断水平已可高至6kA,使F-C回路的应用范围大大拓展。

传统的F-C回路开关柜采用的是高压熔断器与真空接触器分别安装的方式,真空接触器采用支架固定式结构,其灭弧室安装在开放式的DMC或SMC框架内,灭弧室动端通过绝缘拉杆与电磁机构联动,高压熔断器与真空接触器各自独立,熔断器通过导体与接触器连接。这种结构的开关装置电气主回路之间连接复杂、结构不合理、产品标准化程度低,批量生产或配套能力不够成熟的开关柜厂家很难保证产品的质量稳定。随着火力发电

厂厂用电系统对 F-C 回路的需求日益增加，特别是中置式开关柜在国内大量使用，出现了采用环氧树脂固封技术的模块化高压熔断器串真空接触器组合电器。这种模块化设备一般分接触器模块、熔断器模块、手车模块和开关柜面板模块等几个部分。高压熔断器和真空接触器均采用环氧树脂固封技术分别封闭在各自的模块内，不同规格参数的高压熔断器模块和真空接触器模块可根据需要进行组合，并通过手车模块和面板模块实现机械联锁、五防联锁及操作功能。各个模块之间的有机结合，使得组合电器在电气性能、绝缘性能、机械强度上均得到了有效的改善和提高，而且产品标准化程度高，便于工业化生产及应用。高压熔断器串真空接触器组合电器外形示例见图 1-3。

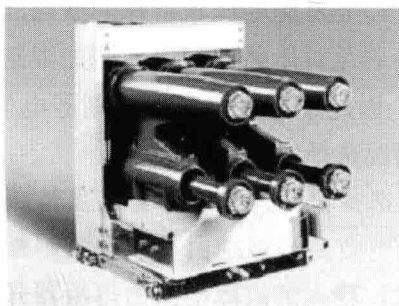


图 1-3 高压熔断器串真空接触器
组合电器外形图

作为一种需要根据不同用电负荷性质进行单独选型的开关设备，高压熔断器串真空接触器回路的选择设计比较复杂。在设计上，DL/T 5153《火力发电厂厂用电设计技术规程》明确规定可以采用 F-C 回路，但未给出具体的选择方法。目前主设备高压熔断器和真空接触器有选择标准，主要是针对产品本身制造和实验角度及单独设备的选择方法，也包括简单的高压熔断器和真空接触器配合要求，但缺乏符合发电厂负荷特点，用于指导发电厂 F-C 回路整体设计的国家或行业标准。这就造成一方面 F-C 回路由于其优秀的技术经济特性在发电厂建设中有较大的应用需求，另一方面由于 F-C 回路的选型复杂而对其应用造成一定的影响。

1.3 F-C回路选型设计

根据 F-C 回路的保护配置原则, F-C 回路的设备规格可按用电设备的负荷功率选择, 实现“量身定做”。

F-C 回路的选择设计首先要针对高压熔断器和真空接触器两种主要设备进行选择, 其中高压熔断器的选择比较复杂, 既要考虑用电负荷的特点, 也要考虑熔断器自身的电气特性。对于用电负荷, 电动机类负荷需要依据电动机的额定电流、起动电流进行选择, 同时还要考虑电动机的起动时间、起动频次的影响; 变压器类负荷除考虑变压器的满载电流、变压器低压侧电动机的自起动电流, 还要考虑变压器特殊的激磁涌流的影响。在熔断器自身电气特性方面, 为避免对熔断器的发展增加限制, 反映其电气特性的各种曲线没有标准化, 因此不同制造商的熔断器电气特性也会有所差异, 工程中需要结合订货情况选择。

其次, F-C 回路的选择设计还需要考虑高压熔断器和真空接触器之间的配合。F-C 回路对用电负荷的保护由高压限流熔断器和综合保护装置通过真空接触器共同实现, 较大的故障电流由熔断器开断, 工作电流和较小的故障电流由真空接触器开断, 除此之外, 还利用高压限流熔断器的限流作用保护 F-C 回路的其他导体和设备。除保护的配合外, 在两种主要设备的配合中, 高压限流熔断器的开断特性和限流能力影响真空接触器的选择, 真空接触器的短路电流开断和耐受能力对熔断器的选择有所限制并决定了 F-C 回路的供电负荷容量上限。

另外, 高压限流熔断器的开断特性和限流能力影响回路中其他导体与设备的选择, 尤其重要的是电缆的选择。F-C 回路中为用电负荷供电的动力电缆在熔断器的限流作用下可以选择较小截面, 从而节省了大量投资。在 F-C 回路中, 较大的故障电流由熔断器开断, 开断时间短; 较小的故障电流由真空接触器开断, 开断时间长。由于这种保护的分工和熔断器动作时间的不可控制性, 某些回路在小故障电流下开断时间较长, 甚至可能长至接近 30s。动力电缆截面积的选择除要求能满足输送回路额定电流外, 还要能够耐受回路的短时故障电流, 即选择热稳定截

面积。对于短时故障电流的耐受能力，国家标准中仅按绝热过程给出了故障时间不大于 5s 时的选择计算方法，因此 F-C 回路中的供电电缆需要采用其他计算方法结合 F-C 回路的保护特性和电缆的技术性能进行选择。

真空接触器的选择

F-C回路中真空接触器作为一种高压可操作设备,与熔断器配合使用,对高压电动机、电力变压器等设备进行远距离控制和操作,并兼做回路中较小故障电流的保护设备。鉴于真空接触器的选择相对简单,同时高压熔断器的选择需要考虑与真空接触器的配合,因此本书先对真空接触器的选择进行介绍。

2.1 真空接触器的技术特点

真空接触器是能承载、关合及开断正常电流和规定的过载电流的机械开关装置,真空接触器的主触头在高真空室内断开和闭合。真空接触器的原理和结构与真空断路器基本一致,也是利用真空管进行灭弧,主要由真空灭弧室、绝缘固定架、操动机构、锁扣机构等组成。当真空接触器分闸时,真空灭弧室中的动、静触头快速地开断,分闸过程中,高温触头之间产生的金属蒸气使电弧持续到电流第一次过零点。当电流过零点时,金属蒸气迅速凝结,使动静触头之间重新建立起很高的电介质强度,维持很高的瞬态恢复电压值,实现开断电流。与真空断路器相比,真空接触器的真空管具有低截断特性、低浪涌的特点,因此触头耐磨损、适于频繁操作,操作寿命远长于真空断路器,造价也较低。

真空接触器的操作机构与断路器略有差别,以弹簧机构为例,真空断

路器的操动机构主要分为储能单元、合闸单元和分闸单元，其中储能单元是为合闸操作做准备的。采用弹簧机构的高压真空接触器没有独立的储能单元，其合闸过程是靠合闸电磁铁通电，电磁铁吸引衔铁，使衔铁带动合闸驱动板来完成合闸，合闸完成后由合闸锁扣装置将接触器保持在合闸状态，同时合闸电磁铁动作过程中会将分闸弹簧压缩，分闸时脱扣线圈带电，驱动分闸电磁铁使合闸锁扣装置脱扣，由分闸弹簧驱动操作机构实现分闸。

真空接触器的弹簧操作机构有电保持型和机械保持型两类。电保持型操作机构如图 2-1 所示，控制回路中的合闸继电器与合闸保持继电器在合闸过程中会进行瞬时切换，合闸继电器失电并瞬时切换为合闸保持继电器带电，使合闸线圈始终保持带电。合闸线圈带电后，驱动合闸电磁铁带动绝缘翘板使接触器主触头闭合并保持在合闸状态，同时合闸电磁铁动作过程中将分闸弹簧压缩。分闸时，切断合闸保持继电器电源，合闸线圈失电，在分闸弹簧的作用下接触器主触头迅速分开。

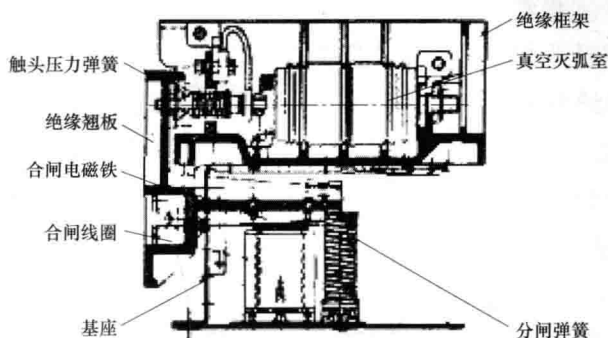


图 2-1 真空接触器电保持型操作机构示意图

机械保持型操作机构如图 2-2 所示，合闸线圈带电后驱动合闸电磁铁带动绝缘翘板使真空接触器主触头闭合，合闸完成后合闸锁扣装置将接触器保持在合闸状态。合闸电磁铁在动作过程中会将分闸弹簧压缩，分闸时脱扣线圈带电并驱动分闸电磁铁使合闸锁扣装置脱扣，然后由分闸弹簧驱动操作机构实现分闸。

除弹簧操作机构外，真空接触器也可以采用永磁型操作机构，操作机构如图 2-3 所示。接触器合闸时合闸线圈励磁，产生与永久磁铁的磁力

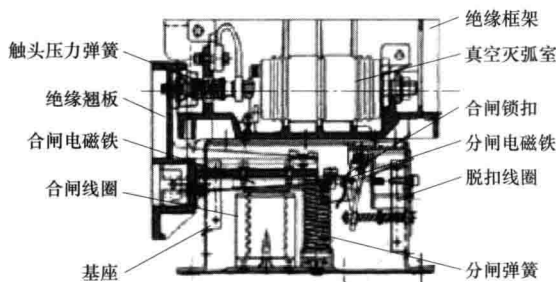


图 2-2 真空接触器机械保持操作型机构示意图

方向相同的电磁力，共同作用于衔铁带动拐臂使接触器主触头闭合。合闸完成后合闸线圈断电，机构的永磁力单独作用于衔铁使接触器保持在合闸位置。分闸时分闸线圈励磁，产生与永磁力方向相反的电磁力，通过削弱永磁铁对衔铁作用的方法与分闸弹簧共同作用实现分闸。

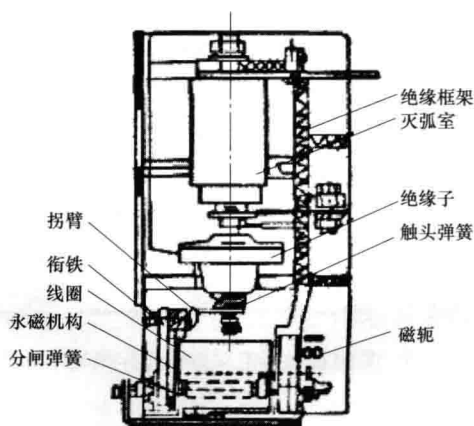


图 2-3 真空接触器永磁型操作机构示意图

高压真空接触器典型技术参数参见表 2-1。

表 2-1 高压真空接触器技术参数表

序号	项目名称	技术参数
1	额定电压 (kV)	3.6、7.2、12
2	最高工作电压 (kV)	3.6、7.2、12