

永磁机构与真空断路器

林 莘 著



机械工业出版社

前 言

国民经济的发展、科学技术的进步和人民生活水平的提高，都对电力系统供电质量提出了更高的要求。断路器作为电力系统保护和控制的终端设备，其可靠性和智能化水平对电力系统的稳定性和自动化程度将产生深远影响。

在配电和供电系统中，真空断路器的使用量大面广，操作频繁，可靠性和免维护性的要求更高。作为真空断路器的重要组成部分——操动机构的可靠性成为关键。多年来的不断努力和改进，使得弹簧操动机构和电磁操动机构的质量有了长足的进步。

近年来，一种用于中压真空断路器的永磁保持、电子控制的电磁操动机构（简称“永磁机构”）备受关注。它突破了传统操动机构的原理，在技术上有较大创新。有关其原理、结构特点、性能以及免维护真空断路器的开发研制成为制造业和运行部门的热点。由于其显著的技术特点和先进性，永磁机构真空断路器将有可能在今后中压开关设备领域内占有重要地位。

近几年来，众多研究单位在免维护永磁机构真空断路器的研制和开发方面开展了大量的工作。为了促进我国永磁机构真空断路器性能的进一步提高和有关设计理论的进一步完善，也为了推动我国具有丰富资源的稀土永磁在电器领域大量推广和应用，本书特将沈阳工业大学与西安森源配电自动化设备有限公司研究和开发的永磁机构真空断路器的科研成果进行整理和总结。

本书在撰写的过程中，李岩教授为一些内容进行了计算，安盛民、王胜辉博士等给予了大力支持，本书应用了研究生高会军、李利、吴翊、王海峰的一些研究内容，西安森源配电自动化设备有限公司提供了永磁机构真空断路器的研制内容。徐建源教授详细审阅了全书，对许多内容进行了计算和试验校核，并提出了宝贵的修改意见。

由于著者水平有限，肯定有错误和不当之处，希望读者指正。

著 者

2002年5月

目 录

前言

第 1 章 绪 论	1
1.1 电力系统对开关设备的可靠性要求及实现的途径	1
1.2 中压断路器操动技术的现状及发展	4
1.2.1 目前中压断路器操动技术的现状	5
1.2.2 目前操动机构存在的主要问题及永磁机构研制的意义	6
1.3 操动机构与真空断路器的配合	9
1.4 永磁机构技术国内外发展及现状	11
1.4.1 ABB 公司的永磁机构及真空断路器	12
1.4.2 Holec 公司新型永磁机构	14
1.4.3 Alsthom 公司的中压断路器用的非对称电磁操动机构	16
1.5 永磁机构在我国的发展及应用前景	18
第 2 章 永磁机构工作原理	19
2.1 永磁机构的结构及工作原理	19
2.1.1 双稳态永磁机构原理	20
2.1.2 单稳态永磁机构原理	23
2.2 永磁机构的磁路分析	26
2.2.1 磁路分析	26
2.2.2 永磁机构的始动安匝	29
2.3 永磁机构的特点	30
第 3 章 双稳态永磁机构静态磁场分布	32
3.1 电磁场计算方法	32
3.2 永磁机构磁场计算模型及电磁场方程	34
3.3 永磁体模型的建立	36
3.4 电磁吸力的数值计算	37
3.5 永磁机构的静态磁场	38
3.5.1 永磁体单独作用时机构静态磁场分布	38
3.5.2 静态保持力计算及与实验对比	39

3.5.3 双稳态永磁机构分闸过程的磁场变化	40
3.6 永磁体径向充磁和平行充磁	41
3.7 涡流的影响	44
第4章 永磁机构动态特性的计算与分析	47
4.1 引言	47
4.1.1 动态与静态	47
4.1.2 研究永磁机构动态特性的重要性	47
4.1.3 研究动态过程的方法	48
4.2 永磁机构动态分析的数学模型及求解	49
4.2.1 永磁机构动态特性计算的数学模型	49
4.2.2 永磁机构动态特性微分方程组的求解	51
4.2.3 求解电磁场逆问题的算法	52
4.3 永磁机构真空断路器动态特性计算及实验测试	54
4.3.1 质量的计算	57
4.3.2 反力分析	62
4.3.3 传动效率的分析	63
4.3.4 断路器动态特性测试的实验设计	63
4.3.5 计算结果及分析	64
第5章 单稳态永磁机构	71
5.1 单稳态永磁机构的结构及工作原理	71
5.1.1 单稳态永磁机构的结构	71
5.1.2 单稳态永磁机构的工作原理	71
5.1.3 磁路导向环的作用	73
5.2 单稳态永磁机构静态磁场	74
5.2.1 线圈不通电时机构中静态磁场的分布	74
5.2.2 机构静态保持力	75
5.3 单稳态永磁机构动态过程计算与分析	76
5.3.1 单稳态机构动态特性的计算结果	76
5.3.2 单稳态机构分闸过程的磁场变化	78
5.3.3 单稳态永磁机构与双稳态永磁机构的主要差别	80
5.4 短路环的作用及分析	80

第 6 章 永磁材料特性和永磁机构铁心结构特性	85
6.1 永磁材料特性	85
6.1.1 永磁材料磁性能的主要参数	85
6.1.2 钕铁硼永磁材料	92
6.1.3 永磁材料的选择和应用注意事项	93
6.2 不同结构形式的永磁机构电磁吸力特性	96
6.2.1 引言	96
6.2.2 四种不同结构形式永磁机构电磁吸力特性	97
6.3 永磁机构的材料饱和特性	102
第 7 章 永磁机构真空断路器同步操作技术	107
7.1 断路器同步操作的意义	107
7.2 同步关合技术的发展	108
7.3 空载变压器的同步关合分析	110
7.4 电容器的同步关合分析	113
7.5 空载线路的同步关合分析	116
7.6 同步关合的动作过程	118
7.7 永磁机构同步关合的影响因素	119
7.7.1 预击穿的影响	119
7.7.2 控制电压对合闸时间的影响	120
7.7.3 环境温度对合闸时间的影响	121
7.7.4 老化与磨损对合闸时间的影响	122
第 8 章 永磁机构的控制系统	123
8.1 引言	123
8.2 继电器控制方式	124
8.2.1 继电器控制功能	124
8.2.2 继电器控制的特点	124
8.3 电子控制方式	125
8.3.1 特点和功能	125
8.3.2 结构原理	125
8.3.3 分合闸线圈的晶闸管控制	126
8.3.4 电子控制的特点	127

8.4 微机控制方式	127
8.4.1 控制结构	127
8.4.2 控制实例	128
第9章 永磁机构智能化操作及其自动监测	131
9.1 智能化操作及其自动监测的设计思路	131
9.1.1 智能化操作单元的设计思路	131
9.1.2 自动监测单元的设计思路	132
9.2 智能化操作及其自动监测的工作原理	132
9.2.1 智能化操作单元的工作原理	132
9.2.2 自动监测单元的工作原理	134
9.3 永磁机构控制电源设计	136
9.3.1 提高电源效率的设计原则	136
9.3.2 开关分、合闸状态的检测	138
9.3.3 分、合闸线圈操作单元	139
9.4 控制电源的电磁兼容性	141
9.5 同步关合技术的实现方案	143
9.5.1 实现方案	143
9.5.2 合闸时间的计算	144
9.5.3 环境温度的测量	144
9.5.4 控制电压的测量	146
9.5.5 触头间电压波形的测量	146
9.5.6 合闸起动信号输出电路	149
9.5.7 合闸时间的测量	150
9.5.8 合闸位移的测量	151
9.5.9 测控系统软件设计	152
第10章 免维护真空断路器	154
10.1 小型化、高寿命真空灭弧室的开发	155
10.1.1 小型化结构	156
10.1.2 一次封排工艺	157
10.1.3 CuCr25 触头材料	158
10.2 固封极柱的开发	159

10.2.1	固封极柱的整体设计方案	159
10.2.2	自然对流通风道的设计	160
10.2.3	新型环氧树脂材料与自动压力凝胶 (APG) 制造工艺	160
10.3	MS1 型永磁机构	162
10.3.1	简单的结构设计	162
10.3.2	保障机构寿命的工艺	162
10.4	简单的连接部分	163
10.5	可靠的全电子化智能控制单元	163
10.5.1	提高控制单元可靠性的设计基础	164
10.5.2	提高控制单元可靠性设计的保障	167
10.5.3	电磁兼容性	168
10.6	VSm 型真空断路器型式试验和出厂试验	170
10.7	专用试验设备的开发	175
10.7.1	开关机械特性测试设备的现状与发展	175
10.7.2	设备的组成与工作原理	178
10.7.3	S-BT 诊断系统的测试方法	179
参考文献		181

第 1 章 绪 论

1.1 电力系统对开关设备的可靠性要求及实现的途径

随着国民经济的发展和人民物质文化生活水平的不断提高，人们对电力需求量愈来愈多，促使电力事业迅速发展。电网不断扩大，用户对供电质量和供电可靠性要求也越来越高。电力法的公布和贯彻执行，更要求电力供电部门提供安全、经济、可靠和高质量的电力。

20 世纪 90 年代以前，我国的配电网很薄弱，10kV 配电网大部分采用放射形供电，可靠性差，配电设备比较陈旧，大多是不可遥控的。配电网运行状态监测设备少，信息传输通道缺乏，因而信息搜集量少，这些导致事故处理自动化程度低，处理时间长，事故后恢复供电慢，一些地区发生电网事故，导致重要用户停电，除了某些人为的因素以外，电气设备水平低、电网结构薄弱、可靠性低，是其主要原因；自动化程度低、管理不善也是重要原因之一。这是因为长期以来配电网的建设未得到应有的重视，建设资金短缺，设备技术性能落后[以往我国发电和配电投资的比例约为 1:0.12，大大落后于先进国家的 1:(0.6~0.7) 的投资比例]，造成在配电网上投资欠账太多，其薄弱的程度大大超过输电网。

20 世纪 90 年代以来，为了加快我国电力工业的发展速度，借鉴于国外的经验，各电力公司竞相加大了配电网的投资力度，其主要目标是实现配电网自动化，以确保提供给用户的电能质量满足要求。目前，随着计算机及通信技术在我国的广泛应用，电力系统的控制保护技术也发生了重大变化，传统的模拟式信号测量、传输，发展为数字式遥测、光纤传输，现在通过计算机可以方便地进行监测、通信和数据存储，实现了电力设备的操作、运行和保护的智能化。微电子、微处理技术与开关设备相结合，能充分发挥微电子、微处理技术对大量信息存储、适时判断、快速反应等优点，使开关设备能适时根据电

网的参数变化动作，使一次设备的保护更加完善可靠，并减少维护工作量，且有利于实现遥信、遥测、遥控。以上这些技术都为我国配电自动化的迅速发展提供了良好条件。

我国城市建设的规模和经济的发展对配电网提出了较高的要求，配电网自动化发展呈现以下趋势：

(1) 一次配电设备选择应符合当前配电网形势要求，具有高度可靠性和优越的技术性能。尤其是对配电网开关的要求是不燃烧、高可靠和无油化。目前在中压开关领域主要以真空开关和 SF_6 开关为主，在 40.5kV 级，真空开关和 SF_6 开关平分秋色，而在 12kV 级，真空开关占绝对优势。开关设备的操动机构及内部结构适应于户外运行条件，做到不检修周期长，设备运行可靠，这样才能大大减轻运行人员的劳动强度和维护费用。

(2) 二次保护和控制设备应具有高可靠性、很强的抗干扰能力和电磁兼容性，适合户外高温和低温等较为严酷的运行环境。

为了适应电力系统的上述要求，电器设备除了一直向着大容量、智能化、组合化、小型化的方向发展外，一次设备的高可靠性仍然是电器设备最重要的根本问题和追求目标。断路器作为电力系统终端设备之一，起着控制、调节和保护作用，其可靠性和智能化的水平对电力系统的稳定和自动化程度将产生深远的影响。作为高压电器最重要的设备之一，断路器的可靠性一直受到用户和生产制造企业的关注。目前，中高压以上断路器都是有触点机械式开关，灭弧室本体和操动机构的可靠性就成为高可靠性的关键。为了提高可靠性，各大公司及研发制造单位都下了很大的力量，从产品结构、材料和生产工艺等各方面来保证可靠性的提高。

在配电和供电系统中，由于断路器的使用量大面广，操作频繁，可靠性和免维护的要求更高。因此可靠性的研究开发一直在不断进行着。

作为中压开关的主流产品，真空断路器提高可靠性并达到免维护的途径应从其所具有的基本功能和运行条件综合考虑，主要有以下几个方面，如图 1-1 所示。

1) 开断性能的高可靠。开断能力是断路器最重要的性能之一，

因此对灭弧室的开断性能做过大量的研究工作。对于真空断路器，经过改进真空灭弧室触头结构，从平板触头到横磁场触头到纵磁场触头，使得电弧在触头表面不再聚集而呈扩散形态，触头整个表面均匀受热，防止了局部过热，这样，触头表面烧损更小，大大提高了开断电流和触头寿命。研究开发新的触头材料，采用 CuCr 触头材料，改进触头制造工艺，进一步提高灭弧室性能。采用先进的一次封排工艺，除气彻底，灭弧室寿命长，提高了灭弧室的可靠性、稳定性和一致性。经过多年的不断研究和开发，目前，真空灭弧室的开断容量和开断能力不断提高。

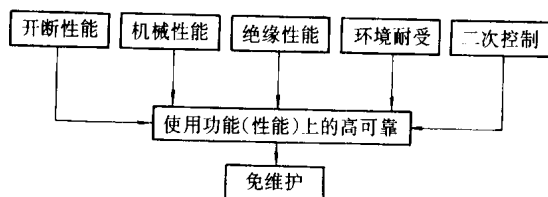


图 1-1 提高断路器可靠性的途径

2) 机械性能的高可靠。按结构，断路器分为操动机构和开关本体两部分。数十年的断路器发展历史表明，操动机构对断路器的发展有着极大的影响。断路器的动态性能与所采用的操动技术有很大关系。由于传统操动机构零部件数量多，传动关系复杂，虽经长期的研究改进，多年的运行经验表明，操动机构、电气控制和辅助回路的故障率仍占断路器故障的很大比重，从国际、国内的统计数字来看，断路器的故障中，机械故障占大多数。国际大电网会议组织的国际调查表明，机械故障高达总故障的 70.3%，如包括辅助电器和控制回路，则为 89.4%，成为断路器可靠性的关键问题。因此，在断路器向高电压、大容量、高可靠性发展的今天，为了满足电力系统对高可靠性的要求，在致力于提高传统操动机构性能、质量和可靠性的同时，也有必要突破传统意义上的机构动作原理，研制和发展新的断路器操动机构。

可靠性的高低和零部件数量的多少有直接关系，减少零部件数量将明显提高断路器的可靠性。因此，无论是改进提高传统操动机构的

性能和质量，还是研制新型操动机构，提高可靠性的理论依据首先应为简化机构结构，减少零部件数目。

3) 绝缘性能的高可靠。断路器的绝缘性能要考虑工作电压下长期运行和由于各种因素产生的过电压情况。由于电器设备小型化的要求，使得绝缘结构的设计在首先满足绝缘性能要求的前提下，采用优化电场结构、利用高性能的绝缘材料等，达到绝缘高可靠和小型化的目的。

4) 环境耐受能力的高可靠。断路器在周围环境各种条件作用下都应可靠工作，这些条件主要有海拔、环境温度、空气湿度、污秽等的影响。在高海拔条件下，由于大气压力低，空气稀薄，耐压水平降低，散热也差，允许通过的电流应该减小一些。温度过低会使各种润滑油的黏度增加，影响开关电器的分、合闸速度；温度过高，可能造成导电部分过热等。对此国家标准中都有相应的规定。另外，还要考虑湿度和污秽的影响。湿度很大，容易引起金属零件锈蚀，造成开关拒动；绝缘件表面凝露、受潮，绝缘性能下降。沿海地区和重工业集中地区，空气中污秽严重，容易导致绝缘表面的污闪事故。另外还有振动等影响因素。因此，断路器根据使用环境不同和用户使用要求，要能够满足环境方面的要求。

5) 二次控制部分的智能化和高可靠。为了满足配电网自动化的要求和开关电器智能化的发展，断路器的二次系统越来越多地采用电子设备和元件，电子控制系统的电磁兼容性能受到了极大的关注。为了保证二次控制部分的可靠性，控制单元的设计应完整正确，应对电子元器件进行优化选择和筛选，制作工艺精良，应采取有效的抗干扰措施，调试应严格细致等。最后在电磁兼容性能方面应按国家标准要求通过各项试验。

1.2 中压断路器操动技术的现状及发展

操动机构在断路器中占有重要地位。它不但要保证断路器长期的动作可靠性，而且要满足灭弧特性对操动机构的要求。断路器的分合闸所需时间或速度必须满足其开断和关合要求，以便通过快速切除

故障而不使故障扩大，保持电力系统的稳定，并可减轻设备、线路、绝缘等的损伤。为此，要求断路器具有良好的操作性能，以满足上述要求。另外，断路器多次分合可造成触头及操动机构可动部分的机械磨损，因而国家标准中规定要对断路器进行机械寿命试验，其目的是验证断路器在规定的机械特性及不更换零部件的条件下，能否承受规定的分、合闸空载操作次数。可以说机械寿命是断路器可靠性的重要指标之一。

1.2.1 目前中压断路器操动技术的现状

在断路器发展的不同时期，占主导地位的操动机构形式有所不同。最早在油断路器上，绝大多数利用直流电磁的能量进行操作，这种操动原理至今在中压范围内还广泛使用着。它直接利用电能，如通过直流螺管线圈或电动机将电能转换成机械能，储能装置系一只或一组弹簧，在合闸时吸收动力装置的一部分机械功并转化为弹簧的位能。分闸时，由弹簧释放位能实现断路器分闸的目的。以电能为操作动力的典型代表是直流电磁操动机构（简称为电磁机构），在我国已有很长时间的应用。它是由大容量蓄电池、20 世纪 50 年代发展起来的硅整流、电容器储能及 70 年代的镍镉电池作为操作能源，由电磁能转换为机械功操作断路器合闸与分闸动作。为了获得较大的操作力，需要较大的电磁铁和电源以及较大截面积的电缆，因此它主要适用于中小断路器上。

后来广泛应用的弹簧操动机构与电磁操动机构有所不同，它的合闸动力也是即备的。弹簧操动机构的关键部件为分闸弹簧和合闸弹簧。它将电动机的机械功在短时间内储存于合闸弹簧中，然后将合闸弹簧能量释放进行合闸。在合闸过程中，分闸弹簧储能，用作分闸动力。这种操动机构工作特性受外界影响的因素较少，维修的要点也容易明确，在中压断路器中已普遍采用。

目前有多种型号的断路器配用的是弹簧操动机构，其中主要有 ZN12 型、ZN28 型、ZN28A 型、3AH 型、NXAct 型、VD4 型等断路器。弹簧操动机构种类和结构较多，但主要分为独立模块式和一体式。采用 CT17、CT19 等弹簧操动机构装配的真空断路器由于机构

是独立模块式，易于生产配套。目前国内生产量较大，综合技术指标较先进的 ZN63A (VS1) 型弹簧操动机构真空断路器是一体化布置的，这种布置是使操动机构作为断路器的固有组成部分，无独立型号。采用这种布局，一方面减少了中间传动环节，使结构变得简单、紧凑，降低了能耗和噪声，同时也使断路器机械操作可靠性大为提高。这类断路器对机构的零部件质量要求较高，一经装配完成应做到免调试。VS1 型断路器操动机构结构图如图 1-2 所示。

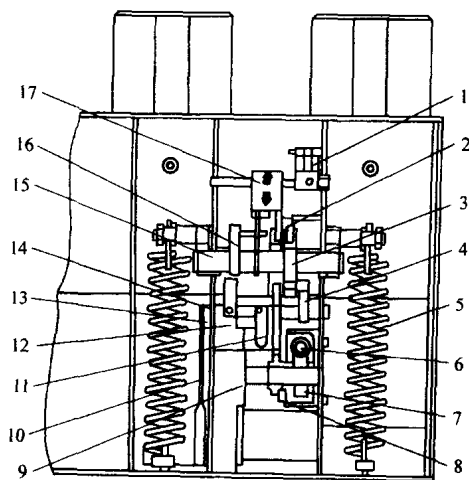


图 1-2 VS1 弹簧操动机构

- 1—储能到位切换用微动开关 2—储能传动链轮 3—储能传动轮
4—储能保持掣子 5—储能拉簧 6—手动储能蜗杆 7—手动储能传动蜗杆
8—电机传动链轮 9—储能电机 10—联锁传动弯板 11—传动链条 12—闭锁电磁铁
13—闭锁电磁铁闭锁铁心 14—储能保持轴 15—传动凸轮轴 16—凸轮 17—储能指示牌

弹簧操动机构在机构设计合理，工艺条件保证的情况下，机械寿命也能达到很高的次数。因此，弹簧操动机构具有很宽广的发展前景。

1.2.2 目前操动机构存在的主要问题及永磁机构研制的意义

目前用于中压断路器的操动机构主要有电磁式和弹簧式两种。

电磁操动机构在真空断路器发展初期得到了广泛应用，这是由于电磁操动机构较好地迎合了真空灭弧室的要求：一是开距小（8~25mm），二是在合闸位置需要大的操作力（2000~4000N/相）。然而电磁操动机构也存在不容忽视的缺点，磁路电感 L 在合闸过程中变化较大，产生反电动势 idL/dt ，从而抑制了合闸线圈动态电流的增长，而且这种抑制作用随着合闸速度的增加而增强。这样，当线圈的稳态电流已经较大时，若想用进一步提高线圈稳态电流的方法来抵消这种抑制作用，常受合闸电源容量的限制。因此，采用电磁操动机构来提高真空断路器的合闸速度是有限的。另外，直流电磁操动机构合闸时间较长，电源电压波动对合闸速度影响较大。因此传统电磁操动机构一般用于对速度要求较低的 12kV 等级以及分合闸速度要求不太高的 40.5kV 等级的真空断路器中。传统的电磁机构的最大缺点是操作电流大，使用不方便。

相比之下，弹簧操动机构采用手动或小功率交流电动机储能，其合闸功不受电源电压影响，相当恒定，既能够获得较高的合闸速度，又能实现快速自动重合闸操作，在一定程度上克服了电磁操动机构的缺点。然而弹簧操动机构也存在以下缺点：完全依靠机械传动，零部件总数多，一般弹簧操动机构有上百个零件，且传动机构较为复杂，故障率较高，运动部件多，制造工艺要求较高。另外，弹簧操动机构的结构复杂，滑动摩擦面多，而且多在关键部位。在长期运行过程中，这些零部件的磨损、锈蚀、以及润滑剂的流失、固化等都会导致操作失误。因此必须优化设计结构，合理设计零部件，选用适当的材料和表面处理工艺，选用长效应润滑剂。事实上，很多真空断路器所用的弹簧操动机构的可靠性已达到很高水平。

近年来，一种用于中压真空断路器的永磁保持、电子控制的电磁操动机构（简称“永磁机构”）备受关注，有关其原理、结构特点、性能以及免维护真空断路器的开发研制已成为电器制造企业和运行部门的热点。和传统的断路器操动机构相比，永磁机构采用了一种全新的工作原理和结构，工作时主要运动部件只有一个，无需机械脱、锁扣装置，故障源少，具有较高的可靠性。据 ABB 公司研制生产的 VM1 型配永磁机构的真空断路器机械寿命达到 10 万次，我国研制生产的

VS_m 型配永磁机构的真空断路器机械寿命为 6 万次，永磁机构的机械寿命为 10 万次。而采用传统的操动机构很难达到这一指标。正是由于永磁机构技术具有上述优点，国内外不少断路器生产厂家都把目光集中在永磁机构的研制开发上。

研制开发永磁机构的意义有：

1) 可实现机械上的高可靠和免维护。IEC 标准和国家标准对“设计成在其预期的使用期间，主回路中开断用的零件不需要维护，其它零件只需要很少维修”的一种断路器定义为“E2 级少维护断路器”，国际上也统称为“免维护断路器”。尽管实现免维护功能需要从产品整体设计、制造入手，全方位综合考虑，但毫无疑问首要解决的问题是提高机械可靠性，或者说机械上的高可靠是“免维护”的基础。由于永磁机构是通过将电磁机构与永久磁铁特殊结合，来实现传统断路器机构的全部功能，其结构上与传统机构的最大区别在于无须脱、锁扣装置即可实现机构终端位置的保持功能，零部件数目大大减少，因此必将大大提高断路器的机械可靠性。

2) 可实现操作性能上的智能化。断路器的智能化操作可以提高电力系统的稳定性，提高断路器的开断和关合性能，提高断路器的可靠性。因此，断路器实现智能化操作是开关电器追求的目标。永磁机构由于动作部件少，中间转换和连接机构也很少，大大减小了动作时间的分散性和不可控性，为断路器实现智能化操作提供了物质基础。通过采用电子或微机系统来对分合闸线圈进行控制，可以实现开关的智能操作和同步开断与关合。仅从提高机械可靠性的目的出发，永磁机构二次控制也可采用目前常规的电磁式继电保护方式。但为适应电力系统自动化发展的要求，特别是永磁机构简单可电控的特点，应用各种传感技术，采用电子式控制，开发具有自诊断功能的智能化开关是其最根本的发展方向。

由于永磁机构采用了全新的工作原理，由此也产生了一系列新的理论问题。尽管国外已有产品问世，但由于永磁机构技术是电工学、力学、计算方法、电力电子技术、微机技术、控制理论及新兴材料科学在断路器上的综合应用，这一领域内系统的理论还远未成熟，实质性的反映技术关键的理论研究成果还未见公开报道。因此应该结合永

磁机构的开发研究永磁机构技术的电磁机理和控制理论，解决支撑这一技术的理论问题，并在理论与实验研究相结合的基础上，为这一领域形成较完善的理论奠定基础。

1.3 操动机构与真空断路器的配合

多年来，真空断路器一直在努力追求着一种完美的操动机构：结构简单，寿命长，可靠性高，可以用小功率交流电源操作，出力特性与真空断路器的反力特性很好匹配，能给出不大的合闸速度和较高的分闸速度的操动机构。永磁机构已接近于这种操动机构了。永磁机构的机械寿命已超过了多数断路器用真空灭弧室的机械寿命，永磁机构的可靠性是理想的，永磁机构的结构非常简单，永磁机构可以用小功率交流电源操作。这些均很好地满足真空断路器的要求。

真空断路器的反力特性与油断路器和 SF_6 断路器有很大差异。真空断路器的触头行程很小，合闸过程中在触头接触前只需要很小的驱动力，一旦触头闭合，就需要很大的驱动力来压缩触头弹簧以获得足够的触头压力。因此真空断路器的反力特性在触头接触瞬间有一大幅度的正向突变。12 kV 真空断路器合闸终了时的触头反力常常超过 10kN。而真空断路器所要求的平均合闸速度并不大，因为合闸速度太高容易引起触头合闸弹跳，是不希望的，因此合闸速度一般为 0.6~0.8m/s。分闸时要求操动机构不给运动系统附加过多的运动惯量，以提高分闸初始加速度（刚分速度）。

传统的电磁操动机构的出力特性与真空断路器的反力特性很好匹配。在合闸过程中，随着动铁心的运动、空气隙减小、吸力增大，动静铁心吸合时可产生很大的吸力。在分闸时静铁心不参与分闸运动，操动机构基本上不增加运动系统的运动惯量，便于提高刚分速度。

弹簧操动机构是依靠弹簧贮存能量的释放使断路器合闸的。弹簧释能时总是一开始出力大，以后逐渐减小。这与真空断路器的反力特性正好相反。为了使其与真空断路器合闸时的反力特性匹配，通常要通过凸轮和连杆的转换。经过凸轮轮廓曲线的合理设计和连杆的适当配置，弹簧操动机构的出力完全能与真空断路器的反力特性很好地匹

配。在分闸时操动机构只有很少零部件参与分闸运动，操动机构使运动系统的运动惯量增加得不多，便于提高刚分速度。弹簧操动机构可以用小交流电源进行交流操作。机构寿命已能达 30000 次以上。正是弹簧操动机构的这些优点，它正在逐步取代电磁操动机构，成为真空断路器用的主流操动机构。

永磁机构的合闸特性在合闸的开始阶段与电磁操动机构一样，在合闸的最后阶段，由于永磁体的吸力，使吸合力上升得更快，因而永磁机构的合闸特性与真空断路器配合得比传统的电磁操动机构更好，图 1-3 给出真空断路器合闸时的反力特性和弹簧操动机构以及永磁机构提供的力特性示意图。在分闸特性方面因动铁心参与分闸运动，使分闸时运动系统的运动惯量明显增大，对提高刚分速度很不利。此外，永磁体的吸力在分闸过程中也起着阻碍分闸的作用，也对提高分闸速度不利。唯有在这方面，永磁机构不如电磁操动机构和弹簧操动机构。

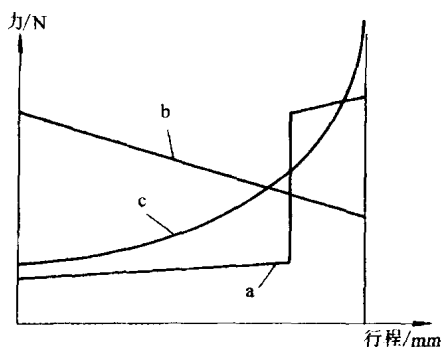


图 1-3 力-行程特性示意图

a—真空开关要求的特性 b—弹簧操动机构提供的特性 c—永磁机构提供的特性

由上述分析可以看出，永磁机构大部分性能都能与真空断路器很好配合，非常适用于真空断路器，因此它的应用前景是非常广阔的。

真空断路器配用永磁机构后，不仅可以进一步提高可靠性，满足免维护的要求。而且由于其零部件少、中间环节少、可控等特点，有可能拓宽应用领域，发展真空断路器的新品种，例如同步真空断路器。

早就有人提出同步开关（或称为选相操作）的设想。所谓同步开关就是主触头在电压零点时闭合、在电流零点时分离的断路器。断路器的同步关合可以大大减小甚至消除电容器组和变压器的合闸涌流，这可大大提高电力系统的稳定性，也有利于减小合闸过电压。同步开断则可大大提高断路器的开断能力。两者都有巨大的现实意义。