

航 空 电 器

《航空电器》编写组编

595043

国防工业出版社

第一章 航空电器概论

§ 1-1 航空电器的概念和分类

“电器”是一个非常广泛的概念，概括地讲，凡是用来自动或非自动地检查、控制、保护和调节电路和电机的设备，或者是利用电能来检查、控制、保护和调节非电过程及非机械的设备或器具都称之为电器。对于“航空电器”来说也是这样的，只不过是这些设备或器具用在各种飞机和飞行器上，并具有航空方面的某些特点：譬如说，它们的重量轻、尺寸小，在恶劣的环境条件下可以可靠地工作等等。由于电器的范围过于广泛，在本书里不得不限定它的范围。凡属于下述内容的一些设备或器具都称之为“航空电器”：

(1) 用来手动控制或自动控制电气物理量（如电流、电压等）和部分非电气物理量（如液体或气体的流量、机械轴的连接和分离等）的电气装置或器件（如机械开关、继电器、电磁阀门、电磁离合器和电磁制动器等）；

(2) 用来调节或放大某些电气物理量的装置或设备（如电压调节器、稳压器、各种磁放大器等）；

(3) 用来保护电气设备、电气机械和电气网路的装置或元件（如各种类型的熔断器、断路器、热自动保护开关等）；

(4) 用来进行能量变换的特殊装置（如喷气发动机用的点火电器）；

(5) 用来进行电气连接的装置（如插销等）。

航空电器分类的方法可以是多种多样的。譬如按电器的用途分类或者按电器的工作原理分，也还可以按电器结构的特点、工作电压（被控电压或控制电压）的种类或高低等来分类。这里，我们推荐按电器的工作原理来分类的方法，因为这样分类便于我们按其学科性质和体系对它进行研究。

按航空电器的工作原理进行分类时，可有如下几类：

(1) 电磁电器（这一类电器又可分成静止型的和非静止型的二种类型）；

(2) 晶体电器（又称固态电器）；

(3) 混合电器（也称组合电器）；

(4) 热敏电器；

(5) 机电式电器；

(6) 点火电器；

(7) 电气连接电器。

在§ 1-3里，我们将就上面所述各类航空电器作一些介绍，以便作为我们学习航空电器这门课程的导引。

§ 1-2 航空电器的工作条件及对航空电器的基本要求

一、航空电器的工作条件

航空电器的工作条件比地面电器的工作条件恶劣得多，这是因为航空电器在飞行器上

工作，而飞行器不仅要在地面上停留，而且必须能够在不同的高度、地区、季节和气象条件下飞行。随着高超音速飞行技术的发展，飞行器的飞行高度和飞行速度都有很大的提高，这就使得工作在飞行器上的电器的工作条件变得更坏（即气象环境和力学环境变得更坏）。所以航空电器必须具备在上述工作条件（即工作环境）下可靠地工作的性能，因为这些环境条件直接地或者间接地决定着航空电器的结构和性能，所以下面我们将概略地对其工作条件作一介绍：

1. 气象环境

气象环境或气象条件系指大气所包含的成分，大气压力、大气和环境温度、湿度四个方面。

a) 腐蚀：高空、低空、海平面上、大陆上大气所含的成分各不相同，在高空氧及水份下降，臭氧成分增加，湿热地带大气中含有霉菌，海平面上的大气含有盐雾，沙漠地区上有沙尘。电器在大气中工作时金属部分会被氧化。当飞行器在海洋上空飞行时，海洋的水蒸汽含盐分，这些盐雾会加速金属部分的氧化，造成化学腐蚀和变色，降低它的机械强度和电气连接的可靠性。霉菌可以使有机绝缘发霉变质降低绝缘性能。对于暴露于大气条件下的继电器触头，由于氧化及腐蚀作用将导致接触电阻的增加，降低触头的工作可靠性等。

b) 湿度：我国南方的大气湿度较高，黄霉雨季、相对湿度可达 98%。这样的湿度条件会使电器的抗电强度降低，绝缘电阻变小，也易于使电器的全局或部分氧化。

c) 大气压力：随着飞行高度的增加，大气压力越来越低，对电器的散热不利，继电器触头的断弧能力下降，电器间隙的击穿电压下降。

d) 温度范围：我国幅员辽阔，温差很大。航空电器的使用温度变化范围比较大。一般可以把它分为三级：

A 级 温度范围：-55~+85°C[●]

B 级 温度范围：-65~+125°C

C 级 温度范围：-65~+200°C

高温时，金属部分氧化加剧，有机绝缘材料易于老化。低温时，材料组织发生变化使其性能恶化（如绝缘材料开裂、弯曲和分层，橡胶制品硬化等）。高低温冲击会造成绝缘材料开裂，弯曲变形，冷空气会使零件受冰冻、结霜的侵袭。要求航空电器能够在上述温度范围和发生周期变化的温度范围内正常工作。

2. 力学环境

航空电器在使用中要经受强烈的振动、冲击、离心加速力的作用。航空电器应当能在这种力学环境下可靠地工作。

a) 振动：电器固定处由于飞机发动机等振动源和气动力学而产生的振动，其频率一般为 10~400 赫，振动加速度为 4~6 g。在宇航飞船和火箭等飞行器中，这个振动频率与加速度更高更大，其值可高达 2000~3000 赫，振动加速度可达 30 g。

b) 冲击：飞机在着陆、制动、射击和突然变速等情况下都会对电器产生冲击作用，

● 我国目前的航空电器产品多数规定为 -55~+60°C。

冲击的次数一般为 40~100 次/分, 冲击加速度为 4~50 g。在火箭等飞行器中, 这个加速度可达 100~300 g。

c.) 离心加速度: 飞机在作机动飞行和特技飞行时, 所产生的离心加速度可达 15 g (其他类型的飞行器这个加速度还要高)。

恶劣的力学环境给航空电器造成强烈的机械应力负荷, 可能会给电器带来非常严重的后果, 造成电器的损坏, 如元件破裂、紧固件松弛、零件变形。对电磁继电器, 它的触头和焊接部分可能松弛并导致接触电阻增加或者从机械上使触头分离等。

二、对航空电器的基本要求

根据航空电器在现代飞行器上所起的作用和它们的工作条件, 可以对它们提出一系列的要求。在这些要求当中最为重要的是产品的工作要可靠, 这是必须保证的。下面就一些最基本的要求加以讲述:

1. 工作可靠

这是对航空电器的一项最基本要求。除了保证航空电器能在前述的气象环境和力学环境下可靠地工作外, 还应当保证它们在事故状态下尽可能长地继续工作。这里所谓事故状态, 通常是指飞机上供电电压严重下降的一种状态, 此时电器应能保证继续工作。

2. 尺寸和重量小

现代飞行器上所使用的航空电器的数量极大 (例如一架大型运输机通用继电器就用了 200 多个, 断路器用了上千个), 减少每一个航空电器的重量都对飞行器有着直接的意义; 电器重量的增大会减少飞行器的航程和升限。为减少电器的重量, 在设计制造航空电器产品时, 常常为结构部件选用优质特种材料和提高其他材料的负荷。

一个飞行器的空间尺寸是有限的, 电器外廓尺寸的增大不仅占去了飞行器的有限空间, 有时会使飞行器个别部分尺寸增大, 以致引起飞行器结构的重量增加, 使飞行器气动性能变坏。减少电器外廓尺寸也是必行的基本要求之一。

3. 高强度

这里所指的强度是机械强度、抗电强度、耐热强度。

在航空电器的机械强度方面, 除了提出一般要求外, 还在抗振稳定性方面提出一些特殊的要求。在飞行器上经常产生不同频率和振幅的振动。由于振动而产生的方向不定的加速度、飞机特技飞行产生的单向加速度等都将作用到电器上, 有的零件和元件甚至要承受加速度为 50 g 的动负荷。要求航空电器必须能够在这些情况下可靠地工作。

在抗电强度、耐热强度方面也要提出相应的高强度要求, 以使电器产品不会因绝缘材料绝缘性能不够, 导电部分与金属部分的距离不够而形成电击穿, 或耐热材料耐热能力不够而形成热损坏。

4. 电器的工作不受飞行器在空间的位置和飞行状态的影响

飞行器在飞行时可以有各种不同的飞行状态, 装设在飞行器里的电器也就可以有不同的空间位置或处于不同的运动状态——加速、减速等。在这些情况下, 电器应具有独立的动作性能而不受它所处的空间位置、状态的影响。这种要求是确保具有运动部件 (如电磁继电器的触头) 的电器不产生误动作的必要条件。

5. 电器的工作不受周围气象环境的影响

温度、高度、湿度是影响电器产品寿命、工作能力(例如继电器触头的断流能力)……等的气象因素。排除或减少这些因素对电器产品的影响是提高产品寿命,增加工作可靠性,保证性能的必要措施。电器产品密封化大多数都是为了这样的目的——密封充气的产品可以不受飞行器飞行高度的影响。

6. 其他

除了前面五项要求外,对航空电器产品还可以提出下面几条附加的要求:

- a) 电器的设计生产应当考虑维修使用上的方便;
- b) 电器产品应标准化、系列化,以便于选用或更换;
- c) 电器产品在保证性能的条件力求成本低。

从前面所介绍的航空电器的工作条件和对航空电器的要求来看,要设计制造一个满足技术性能要求而工作又可靠的航空电器并不是一件简单的事。在设计上应当综合地考虑对电器的各种技术要求;在制造上应尽量采用新材料和先进的工艺,以保证先进的设计指标的实施;在产品的检验技术上也应当是先进的,以确保测试的准确和方法的正确。因此航空电器是一门综合性极大的课程。

§ 1-3 各类航空电器简介

一、电磁式电器

电磁式电器是利用电磁现象来进行工作的,它又可分为二类:一类是具有机械运动的(如作位移或转角运动),另一类为静止型的。前者是把输给它的电能通过磁场转换成机械能使可动衔铁或活动铁芯产生机械运动,并借助于这种机械运动来完成对电或非电物理量的控制,如电磁铁、电磁阀门、电磁离合器、电磁继电器和接触器、极化继电器、振动式调压器及炭片式调压器等都属于这一类。后一类电磁电器是利用电器中磁性材料的非线性特征将电气物理量进行放大或者稳定,如各种磁放大器和铁磁稳压器都属于这一类。下面只举例介绍飞机和飞行器中大量使用的电磁式电器,有关静止型的电磁电器的工作原理等将在本书的第九章里做专门的讲述。

1. 继电器与电磁继电器

继电器是自动和远距离操纵用的一种控制器件。当其输入参量(如光、热、声、电、磁等)达到规定值时,能对其输出参数(即被控制量)实现跳跃式地控制。这一特性可用如图 1-1 中的继电特性(输出量 Y 与输入量 X 间的关系)表示。继电器主要由感受输入量的控制部分(对电磁继电器来说是继电器的线圈,对光耦合的固态继电器来说是发光二极管电路……)和反应输出量的执行部分(对电磁继电器来说是触头系统,对固态继电器来说是固体开关……)组成。电磁继电器是各种类型继电器中的一种,它的结构原

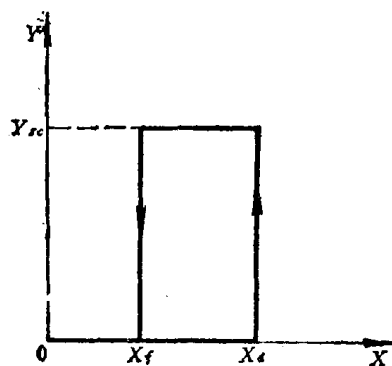


图1-1 继电器的继电特性

X_d —继电器动作时的输入值; X_r —继电器返回时的输入值;
 Y_{sc} —继电器的输出值。

理图见图 1-3。

2. 电磁继电器的结构原理图与动作原理

图 1-2 所示是两种类型电磁继电器（去掉密封外罩后）的照像图，其中（a）图是一个不能反应输入信号极性的直流电磁继电器，（b）图是一个能反应输入信号极性的磁保持继电器。由照片中可以看出它们都有一个可以运动的部件——衔铁，和用以产生磁场的电磁系统。图 1-3 中展示出某直流电磁继电器的详细原理结构，它由一个带有激磁线圈的铁芯和可动衔铁及触头系统（动触头和静触头、推杆等）组成。这种电磁继电器的动作原理是这样的：当继电器接受输入电信号后，受激的线圈便在继电器的磁路中产生磁通，处于磁场内的可动衔铁便受到电磁吸力，在其克服返回弹簧的反力时便作机械运动，进而利用带玻璃球的推杆推动触头使被控电路断开或者闭合。

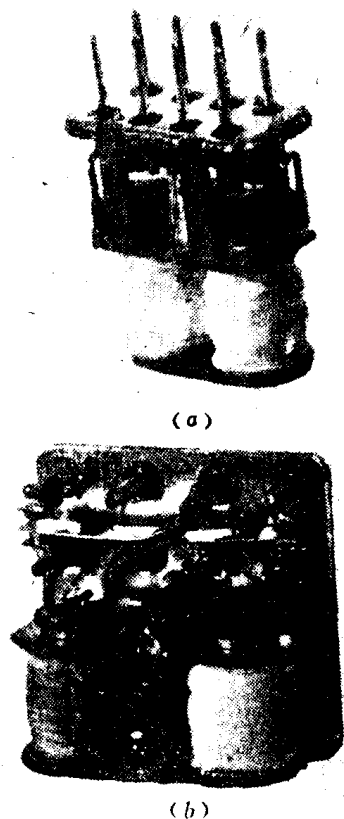


图 1-2 电磁继电器的照像图（去掉密封外罩后）

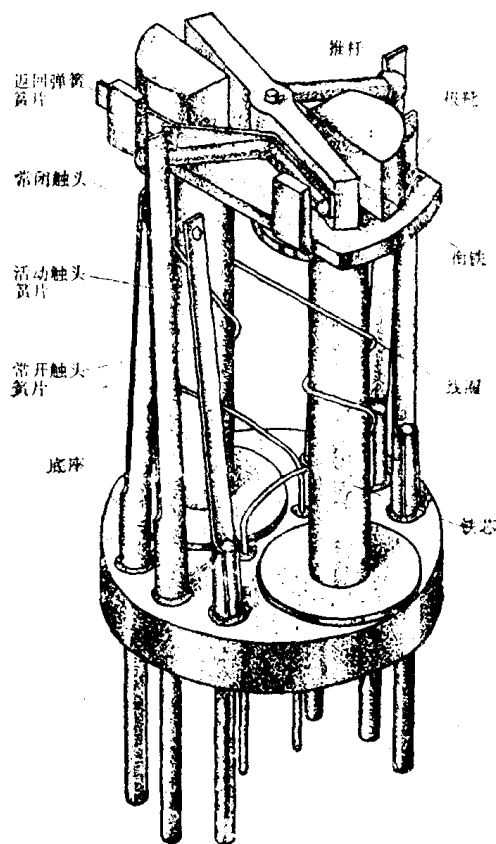


图 1-3 直流电磁继电器原理结构图（去掉密封外罩后）

这类继电器触头所能操作的电流可小到毫安级，大到数十安培。如果触头所操作的电流超过 25 安时，人们往往把这类电磁电器叫做“接触器”。为适应断开或转换大电流的需要，在结构上常常需要作某些变动，例如，将其磁系统作成吸入式^①，借此可以加大铁芯和动触头的运动距离，以确保能可靠地断开电弧。

3. 电磁电器在航空方面的应用

一架飞机的起落、自动驾驶、火炮控制、机内外照明与加温通常要用上几十种，数百只继电器，譬如一架性能较好的战斗轰炸机的电气自动控制系统就使用了 400 多个继电器。

① 参见本书第二章 § 2-4。

这个数字还未包括机载无线电电子设备、计算机和其他成套设备中使用的继电器。实际上，继电器在这些设备上的用量很大，例如某型接收机部分电路中仅极化继电器就用了十五个，干扰设备和天线转换器等部分的电源线路中用了五十多个继电器，飞机的雷达跟踪系统也用了六十多个继电器。也就是说在空间技术或航空等方面，电磁继电器或继电器已作为自动、遥控、遥测、通信、检测、保护等自动化装置中一种不可缺少的基本元件。

下面举二个例子说明继电器和接触器在飞机上应用的情况：

图 1-4 绘出了变频发电机自动接入网路和自动从网路切除的自动控制线路。线路中使用了一个继电器和一个双绕组三相接触器。图中所示的发电机 F 由航空发动机传动，而航空发动机的转速往往不是恒定的，因而发电机的频率也是变化的。飞机上的受电器对发电机的频率是有要求的，当频率在所允许的范围时，应当把发电机接入网路并向受电器供电。若发电机的频率在允许的频率范围之外时发电机应当自动地退出网路（从网路上断开）。图中的 LC 谐振回路，就是用来敏感发电机 F 的频率的。 LC 串联谐振电路的电流在谐振频率时达到最大，低于或高于谐振频率时，电路中的电流都小于谐振电流。当发电机的频率近于谐振频率（例如 $400 \pm 10\%$ 赫）时，经过整流后的 LC 回路电流足以使继电器 J 动作而带动其常开触头 J_1 （继电器没通电时，原先断开的一对触头叫做常开触头；反之，是一对常闭触头），使其闭合，使三相接触器的起动绕组 W_{qd} 接入电源。由于 W_{qd} 匝数少电阻小，所以通过 W_{qd} 的电流较大，并由此产生一个很大的电磁吸力使铁芯吸合。铁芯运动的结果把原先为闭合的辅助触头断开，使接触器的保持绕组 W_{bs} 和 W_{qd} 串联接入电源，由它们共同产生的磁势保持铁芯于闭合位置，使三相电路接通（双绕组电磁铁的作用原理详见第四章 § 4-4）。当电机频率低于（或高于）允许的频率范围时，由于整流后的电流低于维持触头闭合所需要的电流，继电器 J 释放开它的常开触头使三相接触器失去供电而断开它的三相触头，发电机即自动地从网路上退出。

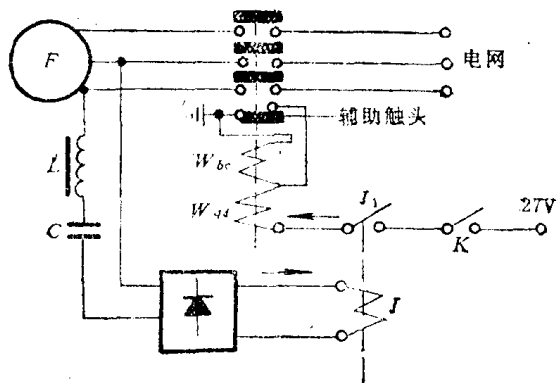


图1-4 变频发电机自动供电线路

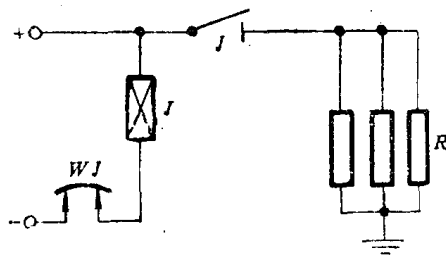


图1-5 薄膜电阻加温自控线路

下边再举一个在自动控制回路中仅仅只使用继电器的例子。图 1-5 是一个自动加温的自控线路。由于用于加温的电流不大，所以线路中只使用了继电器。图中所示的 WJ 是一个温度继电器，它是一个圆盘状的双金属片开关，盘上带触头。双金属片是由两片不同热膨胀系数的金属片叠压在一起的复合金属片。当盘的温度升高时，圆盘向热膨胀系数较小的那片弯曲，并带动盘沿上触头使之与静触头断开。温度下降时，双金属圆盘自动复位并接通那对触头使继电器 J 得到供电，并接通电阻薄膜加温电路。当温度超过一定值时温度

继电器 IVJ 又会动作并切断继电器 J 的电源, 因此达到自动调温的目的。

继电器和电磁继电器在航空方面的应用非常广泛, 真是不胜枚举, 这里不再一一介绍了。

4. 航空继电器、电磁继电器与接触器发展概况

从第一台继电器问世以来, 继电器的发展史已有一百多年了, 在这期间它经历了许许多多的演变 (包括改造与创新), 譬如为适应科技发展的需要, 人们制造了能反应各种非电物理量的非电信号继电器, 如光电继电器、热继电器、压力继电器等。在电磁继电器方面还发展了能反应电流方向的极化继电器、脉冲继电器; 能反应电流频率的频率继电器; 能反应微弱电流的高灵敏继电器等等。需要指出的是, 航空上大量使用的作为多路转换用的通用型电磁式开关继电器 (触头容量在 15 安以下) 在第二次世界大战后的三十多年里有了较大的发展, 这一发展从飞机上所用继电器的型式和数量上完全可以看出 (如表 1-1 所示), 也可以从性能改进上看出 (如表 1-2 所示)

表 1-1 运输机使用通用继电器的型式及数量统计表

年 代	机 种	继电器类型和数量
1946~1958	中型运输机	开启式、拍合式 (或吸入式), 约 45 个
1958~1965	大型运输机	密封式、平衡衔铁式, 约 90 个
1970	大型运输机	密封式、平衡力式, 约 200 个

从表 1-1 可以看出, 早期的中型运输机上使用的电磁继电器数量较少, 型式也较老; 到 1957 年以后, 为了适应高空和恶劣的气候和力学环境, 发展了平衡衔铁式磁系统 (这种结构原理的继电器见图 1-3, 其中衔铁的质量对转轴是对称的, 所以称为平衡衔铁), 并且将整个继电器用金属外壳密封起来, 壳内充以惰性气体, 以防止触头氧化和被污染, 并使触头的断弧能力不受大气压力的影响。这些改进大大地提高了继电器工作的可靠性, 也缩小了它的重量和体积。1966 年以后 (从表 1-1 来看是 1970 年), 又发展了抗振性能更好、消耗功率更小、体积和重量都更小的平衡力式电磁继电器, 在大型飞机中的使用数量也成倍地增多起来。

平衡力式电磁继电器的构造原理图如图 1-6 (a), 其常开和常闭触头取得平衡力的原理是这样的: 在图 1-6 (a) 的继电器磁路中加设一块永久磁铁。当继电器线圈断电时, 永久磁铁对可动衔铁产生吸力, 衔铁的运动是由永久磁铁所产生的吸力来操纵的。常闭触头的压力由这块永久磁铁来产生, 其值大小可以和继电器通电时, 由电磁铁所产生的吸力对常开触头所加的压力相同, 见图 1-6 (b)。继电器通电时, 见图 1-6 (c), 由于电流的磁效应对可动衔铁产生电磁吸力, 此时衔铁的运动由电磁力来操纵。在前述的两种情况下, 即由永久磁铁产生的吸力 (通过衔铁作用于常闭触头上) 和由电磁铁通电时产生的电磁吸力 (通过衔铁作用于常开触头上) 相近。这个“相近”也就是人们所说的“平衡力”。具有平衡力特点的电磁继电器, 它的常开和常闭触头的工作能力相同——通过电流的能力和断电能力, 抗冲击、振动力都强。

由表 1-2 可以看出, 平衡力式电磁继电器在电气性能和机械性能上都较早期的拍合式继电器有很大的改进。

除了前面所介绍的通用电磁继电器外, 航空电子设备用的继电器也有很大的发展。近年来国外航空用电磁继电器的发展和达到的水平主要表现在以下几个方面:

a) 能适应极其恶劣的使用环境。例如, 继电器能在 -65°C (特种的可达 -195°C) ~

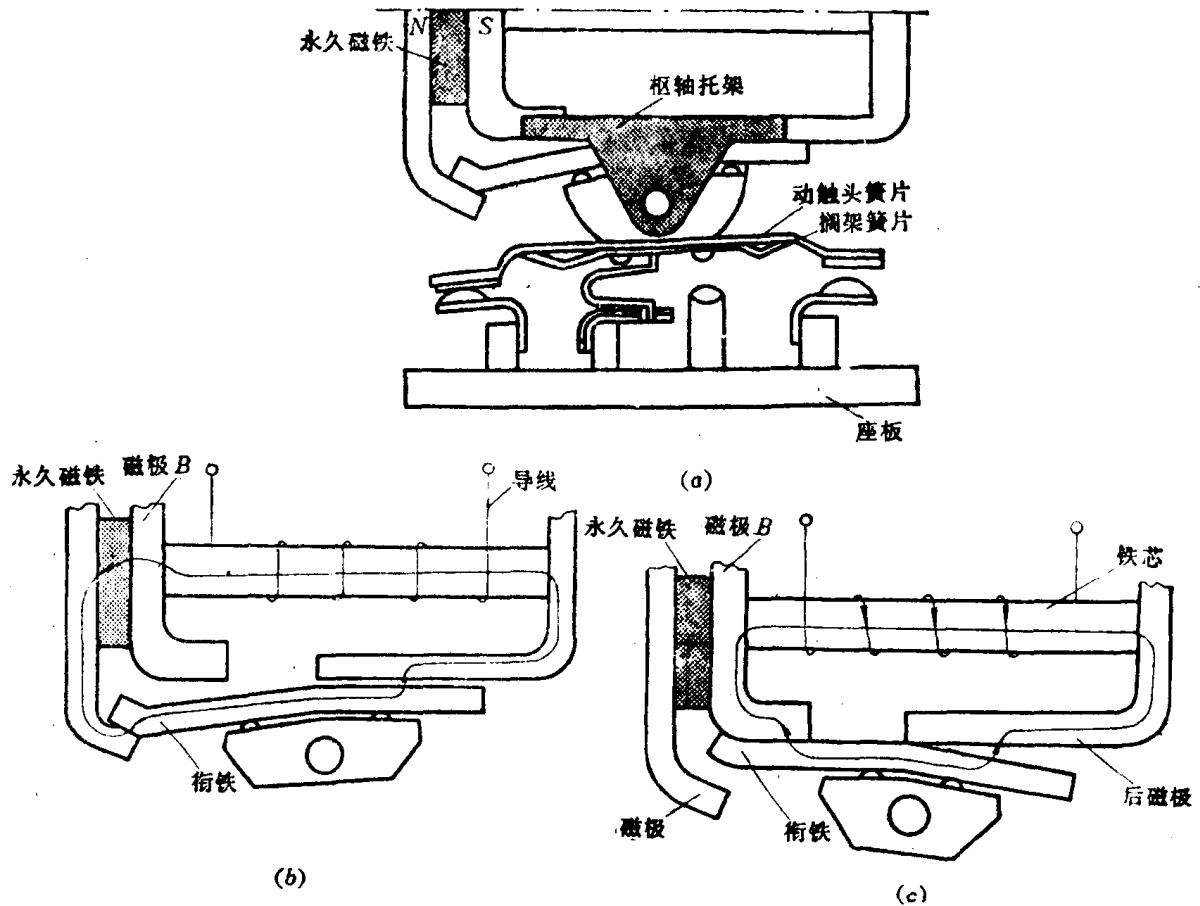


图1-6 平衡力式继电器

(a) 结构原理图, (b) 线圈断电时, 衔铁处于打开位置, (c) 线圈通电时, 衔铁吸合。

表1-2 拍合式、平衡衔铁式和平衡力式电磁继电器性能比较表

型式	性能	体积 (厘米 ³)	重量 (克)	线圈功率 (28伏直流) (瓦)	振 动	冲击 (g)	寿命 (次)	触头压力 (克)	设计特点
拍合式		164	258	9.4	10 g 500赫	25	5×10^4	35	1. 衔铁质量不平衡; 2. 常闭触头压力由弹簧提供; 3. 通电时衔铁的电磁吸力为一千几百克; 4. 断电时衔铁吸力为140克。
平衡衔铁式		65.5	204	7.8	10 g 1500赫	50	5×10^4	50	1. 衔铁质量平衡; 2. 常闭触头压力由弹簧提供; 3. 通电时衔铁的电磁吸力为一千几百克; 4. 断电时衔铁吸力为200克。
平衡力式		16.4	64	2.9	30 g 3000赫	100	10^5	100	1. 衔铁质量平衡, 吸合时稳定; 2. 常闭触头压力由永久磁铁提供; 3. 通电时衔铁吸力为一千几百克; 4. 断电时衔铁吸力为一千几百克。

+125°C (有的可达 200°C 甚至高达 500°C) 的环境温度范围内正常工作, 它的耐振频率达 5~3000 赫 (甚至达 5000 赫), 加速度达 30~50 g, 它的耐冲击一般为 100~150 g, 特殊的可 500 g; 离心加速度能达 400 g。

b) 进一步小型化和微型化。从晶体罩式 (即指外形尺寸为 20.5×10.5×24.6 毫米³) 继电器开始, 经 1/2, 至 1/7 晶体罩, 直至目前生产的 TO-5 型继电器, 其尺寸仅为 9.4 毫米见方, 高度仅为 5.72 毫米, 甚至还有更小的继电器 (9.53×6.53×2.54 毫米³, 重量仅为一克)。

应该指出, 随着集成电路的发展, 为了适应印刷线路板间隔距离缩小的需要, 正努力降低继电器的高度, 因此, 扁平形的通用继电器应运而生。目前, 国外已生产二组、四组或六组转换触点, 能开闭高达 5 安, 125/250 伏交流, 或 50 伏直流的负载, 而其高度一般均不超过 11 毫米。

c) 可靠性大大提高。国外近二十多年在继电器的可靠性技术方面进行了大量的研究工作, 并已在调查研究, 统计试验和可靠性物理研究 (失效模式及其机理) 等方面取得了重大的进展, 现正努力完善和加强可靠性保证工作, 研究和制订可靠性保证规范和建设相适应的生产线和试验检测方法。正是由于重视可靠性的研究, 美国某公司声称已研究成了每一万次动作的失效率不大于 0.001% 的可靠性等级的继电器。虽然如此, 直至目前, 可靠性的问题还不等于完全解决和结束。

此外, 由于采用了先进的密封工艺和检漏方法, 目前已能使密封继电器在高空 1×10^{-10} 托的真空条件下良好地工作, 其漏泄率已低于 1×10^{-8} 厘米³/秒。

所有以上这些进展的取得都是和结构上的精心设计, 新材料和新工艺方法的发展和应用, 以及科学的生产管理和检试方法分不开的。其中特别值得提出的是, 从六十年代后半期起, 国外开始采用电子计算机来辅助设计、分析和评价继电器的电磁系统和触头系统, 并使之最佳化, 并且采用计算机和微处理机来控制生产过程和测试程序, 对继电器工业的发展产生了极为深刻的影响。此外, 洁净技术 (洁净室) 的发展对提高继电器的可靠性也起了很大的作用。

接触器在机载电源系统中用作发电机连接和汇流条连接开关, 因而在飞机上使用的数量不如继电器多, 即使是在四通道的发电系统中, 大约也只有 10~12 个左右。这类接触器触头容量为数百安培, 其分断能力要求能达到数千安培。在结构上有吸入式、平衡衔铁式、平衡力式。通电动作后衔铁闭合状态的保持, 有的是靠电磁吸力锁定, 有的则依靠机械锁栓锁定。图 1-4 中的接触器的锁定是依靠两个串联线圈所产生的电磁吸力锁定。图 1-7 所示为一机械自锁型接触器。吸合线圈通电后, 接触器吸合并被机械锁栓锁定于闭合位置, 吸合线圈则依靠串联的辅助触头自行断电, 不再消耗电功率。接触器的脱扣

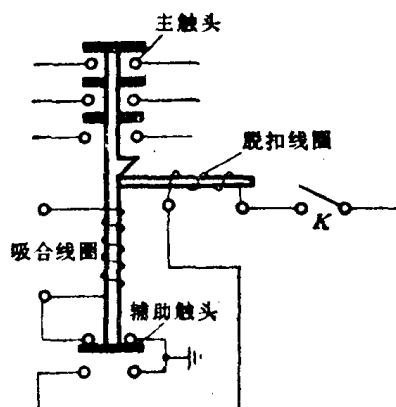


图1-7 机械自锁型接触器原理图

依靠另一脱扣线圈来完成。

接触器主要用于接通和断开电力线路，它不同于继电器主要是其触头负荷大，这就要求有较大的触头压力和触头断开距离，因此要求电磁铁具有较大的吸力和行程。所以，早期（五十年代）的航空接触器多数采用吸入式磁系统和具有双断点的桥式触头（详见第十章），直到最近苏、法等国的航空接触器仍然是吸入式并且是非密封的。当然，由于采用了双绕组和其他结构和材料上的一些改进，使其尺寸和重量都比以前的小和轻。但是，吸入式电磁铁的活动部分（可动铁芯）不容易做成平衡式的，因此，其耐振强度就受到限制；另外，采用双绕组虽然能缩小尺寸，加快动作，但是却使起动电流（和功率）增大很多，并且额外增加了一个辅助触头。因此，从六十年代开始，美国已经研制和生产了一些打破传统吸入式结构的新型密封接触器，即平衡衔铁式和平衡力式磁系统，并且也成功地解决了大电流接线柱和密封外壳的绝缘密封问题（如采用搪瓷密封，玻璃密封和陶瓷密封等）。由于采用了以上这些改进，并且也由于采用了新型的触头材料〔如添加微量元素的改良型内氧化 Ag-CdO（银-氧化镉）〕，使得新型接触器能在更恶劣的气象和力学环境中工作，寿命大大提高，线圈消耗的功率也大大减少（约为老型的1/3~1/4）。

5. 我国生产的典型产品型号和规格范围

我国在研制生产航空电磁继电器和接触器已有近三十年的历史了，研制的电磁继电器型号与品种相当的多，有开启型拍合式的，也有新近研制批生产的密封结构的平衡衔铁式电磁继电器。对于接触器来说，曾经生产过单绕组的接触器，也生产了双绕组的接触器。有供交流使用的三相接触器，也有供单相交流使用交流接触器。下边简要地介绍一下我国自行生产的电磁继电器和接触器。表 1-3，表 1-4 汇列了我国早期生产的一种开启型拍合式继电器的技术数据和使用条件。

表1-3 JKB 型电磁继电器技术数据

序号	参 数 名 称	产 品 代 号						
		JKB- 52 A	JKB- 53 A	JKB- 52 B	JKB- 53 B	JKC- 52 B	JKC- 53 B	JKC- 56 A
1	线圈额定电压(伏) 直流	27	27	27	27	27	27	27
2	额定电压下线圈电流(安)	0.165	0.17	0.167	0.171	0.31	0.41	0.425
3	触头电路额定电压(伏) 直流	27	27	27	27	27	27	27
	触头电路负载电流(安)							
	(1) 直流 $\tau \leq 0.015$ 秒	5	5	5	5	5	5	5
4	(2) 直流30伏阻性	0.05~8	0.05~8	0.05~8	0.05~8	0.05~8	0.05~8	0.05~8
	(3) 单相交流220(伏)900赫 $\cos\varphi \sim 0.5$	0.05~5	0.05~5	0.05~5	0.05~5	0.05~5	0.05~5	0.05~5
	(4) 三相交流70(伏)900赫 $\cos\varphi \geq 0.5$		0.05~5		0.05~5		0.05~5	
5	吸合电压(伏) $+20 \pm 5^\circ\text{C}$ 热态最大	18	18	18	18	12	12	12
6	释放电压(伏) $+20 \pm 5^\circ\text{C}$ 热态最大	5	5	7	7	4	4	3
7	寿命(次)	10^4	10^4	10^4	10^4	10^4	10^4	10^4
8	重量(克)	90	120	95	125	95	125	240

表1-4 JKB及JKC系列产品使用条件

序 号	使 用 条 件	产 品 代 号			
		JKB-52A 53A	JKB-52B 53B	JKC-52B 53B	JKC-56A
1	环境温度(℃) 注:每隔2小时工作5分钟允许温度(℃)	-60~+50 +130	-60~+90 +130	-60~+90 +130	-60~+50
2	相对湿度(%) +20±5℃	98	98	98	98
3	海拔高度(米) 注:每隔2小时工作5分钟允许高度(米)	25000	20000 25000	20000 25000	20000
4	固定处振动: 频 率(赫) 加 速 度(g)	10~200 1.75~3.5	10~200 1.75~3.5	10~200 1.75~3.5	10~200 1.75~3.5
5	冲击: 频 率(次/分) 加 速 度(g)	40~100 4	40~100 4	40~100 4	40~100 4
6	线加速度(g)	8	8	8	8
7	工作规范	长期工作制			
8	工作位置	任意的	任意的	任意的	任意的

表1-3中所列产品是给低速飞机配套使用的。继上述产品的生产后,我国又研制生产了适应新机种配套需要的密封继电器,它们已基本已构成了一个密封开关继电器系列,即JKM系列。在这一系列里,电磁继电器线圈的工作电压有10伏、12伏、18伏、27伏几种,被控的路数有1、2、4、6路的,被控电路触头工作电流最小为500毫安,上限为20安。其使用环境条件如下:环境温度一般为-55~+85℃(长期工作),而耐高温的产品为-55~+125℃或更高;使用高度为25000米;振动频率为10~3000赫,加速度为15或17g;冲击加速度为10g或50g;线加速度为15g或25g;一般寿命为 2×10^4 次,个别可达 35×10^4 次。由此可见,这个系列的产品性能上远较老系列产品为高。目前,我国正在研制性能更高的平衡力式继电器。

除以上系列外,我国还生产和研制了多种小型和超小型的密封继电器,能反应输入信号极性的极化继电器、磁保持继电器以及舌簧式继电器等。这些继电器广泛地应用于各种飞行器中。

我国目前生产的航空直流接触器有MZJ系列,其触头电流额定值由25安到600安,其主要性能数据及使用条件如表1-5及表1-6所示。

表1-5 MZJ系列接触器技术数据

序号	参 数 名 称	接 触 器 型 号					
		MZJ- 25A	MZJ- 50A	MZJ- 100A	MZJ- 200A	MZJ- 400A	MZJ- 600A
1	线圈电路额定电压(伏)	27	27	27	27	27	27
2	额定电压下线圈电流(安)(最大值)	0.17	0.4	0.45	0.5	0.6	0.65
3	+20℃±5℃冷态吸合下动作电流最大值(安)	—	—	5	5	5	5
4	触头电路额定电压(伏)	27	27	27	27	27	27
	直 流	—	—	—	—	—	—
	交 流	—	220	—	—	—	—
5	触头电路额定电流(安)	25	50	100	200	400	600
6	+20℃±5℃时热态下吸合电压最大值(伏)	18	20	20	20	20	20
7	+20℃±5℃时热态下释放电压最大值(伏)	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
8	寿 命						
	(1) 电阻性负载(工作次数)	15000	15000	15000	15000	15000	15000
	(2) 电感性负载(工作次数)	5000	5000	5000	5000	5000	5000
	(3) 交流负载 $\cos\varphi \geq 0.5$, 50~400赫(工作次数)	—	5000	—	—	—	—
9	重量(公斤)	0.12	0.2	0.32	0.5	1.0	1.65

表1-6 MZJ 系列接触使用条件

序号	使 用 条 件	接 触 器 型 号					
		MZJ-25 A	MZJ-50 A	MZJ-100 A	MZJ-200 A	MZJ-400 A	MZJ-600 A
1	环境温度 (°C)	-60~+50	-60~+50	-60~+50	-60~+50	-60~+50	-60~+50
2	环境介质相对湿度 +20°C±5°C时 (%)	98	98	98	98	98	93
3	海拔高度 (米)	25000	20000	25000	25000	25000	20000
4	固定处振动	频率 (赫)	10~200	10~200	10~200	10~200	10~200
		加速度 (g)	1.6~3.5	1.6~3.5	1.6~3.5	1.6~3.5	1.6~3.5
5	冲 击	频率 (次)	40~100	60~100	60~100	60~100	60~100
		加速度 (g)	4	4	4	4	4
6	离心加速度 (g)	8	8	8	8	8	8
7	工 作 规 范	长 期 工 作 制					
8	工 作 位 置	任 意 的					

除了表列的长期工作小型接触器 MZJ-25A、MZJ-50A、……、MZJ-600A 外, 还生产了小型短期工作的接触器 MZJ-25、MZJ-100、MZJ-200, MZJ-400B、MZJ-600B、供转换直流电路的 HZJ 型接触器、通断三相电路的 JLJ 型, 转换三相电路的 HJJ 型三相接触器。目前国内正在研制具有平衡衔铁结构和平衡力结构型的接触器。

由上述可见, 虽然我国在航空继电器和接触器的生产上已初具规模, 并且也开始研制新型产品, 但是, 目前无论从品种规格还是从性能指标上都还远不能满足主机发展的需要, 与国外的先进水平相比差距还比较大, 这就给我们提出了迫切的任务。

二、晶 体 电 器

电磁继电器由于它带有触头, 其工作的可靠性和使用寿命主要取决于触头工作的可靠性和触头的寿命, 同时这种电磁继电器对信号反应的速度也是比较慢的 (在毫秒级这一档上)。因此提高继电器工作的可靠性和反应信号的速度以及延长它们的使用寿命, 是改进继电器性能的必然要求和趋势。这个任务随着半导体技术, 特别是集成电路的发展而有了很大的进展——已制成各种固态继电器。与此同时, 可以完成各种职能的晶体电器也就被引进了电器这个行列里。

狭义地理解晶体电器时, 晶体电器仅仅包括工作于饱和截止两种极限状态作为开闭器件的开关晶体管。广义的晶体电器应当包括由固态元件组成的各种功能的电子装置, 例如接近开关, 晶体调压器, 可控硅开关等等。下面仅就固态继电器加以介绍。

1. 固态继电器的工作原理

固态继电器是一种能够象电磁继电器那样执行开断和闭合电路的功能, 而其输入输出间的绝缘程度也和电磁继电器相当的全固态 (即无运动部件) 的器件。开关三极管是一种控制端和功率端共地的三端器件; 近来发展了控制电路与功率电路 (即输出电路) 完全绝缘的固态器件, 如光耦合固态继电器。

一个典型的光耦合固态继电器方框图示于图 1-8。它的工作原理是这样的：输入信号使触发电路工作，光电二极管发光，经光敏晶体管接受而控制转换功能固体器件（如开关三极管、结和 MOS 场效应晶体管、三端双向可控硅开关、硅可控整流器）进行开关状态转换。

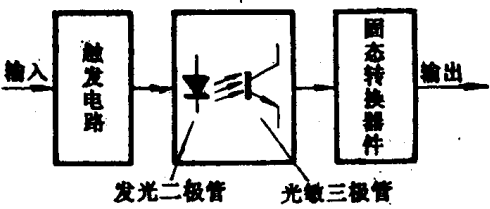


图1-8 光耦合隔离固态继电器的方框图

目前国内外研制了各种不同耦合隔离输入输出回路的方法，这些方法是：

- a) 振荡器-电容耦合隔离法；
- b) 振荡器-变压器耦合隔离法；
- c) 光电耦合隔离法；
- d) 压电耦合隔离法；
- e) 霍尔发生器耦合隔离法。

目前认为第三种耦合隔离法是比较先进和值得注意的一种方法。

2. 固态继电器与电磁继电器的比较

固态继电器是在电磁继电器进一步微型化和抗振性能进一步提高都达到了一定极限的情况下，随着半导体技术的发展而发展起来的。可以说是另成一支的继电器。

对于集成电路这样输出信号较小的场合，采用能直接由低电平信号控制的固态继电器是比较理想的，因为固态继电器具有灵敏度高（功率放大倍数大，可达 10^6 ）及小型化潜力大的优点。从当前的现状来看，性能大致相同的固态继电器与电磁继电器可以做到体积也差不多。但从发展情况来看，电磁继电器进一步小型化要碰到零件加工和装配校正的困难。

除了以上两点外，固态继电器还有一系列优点，如工作可靠，无触头火花和弹跳，耐强烈冲击和振动，寿命长。当然也存在一些尚待解决的问题，如输入输出间的绝缘问题；实现多路转换的问题；要求通断阻抗比大的问题；降低“触点”压降的问题；提高抗瞬变过电压能力的问题；提高使用温度的问题等等。表 1-7 中汇列了电磁继电器和固态继电器的性能比较。

表1-7 电磁继电器和固态继电器主要性能比较表

参 数		电 磁 继 电 器	固 态 继 电 器
输入和输出间绝缘 (500千兆欧最小)		可以达到	可以达到
触头工作频率		1~10赫	1~1000赫
最小触头电流		有的适用于干电路	10毫安
触头接触电阻	闭合时	10~100毫欧（使用后）	100毫欧（导通时）
	断开时	500兆欧	20兆欧
线圈电压（伏）		交流 6、12、24、48、115、230、220 直流 6、12、24、110	交流 3~140（工作电压） 直流 3~200（工作电压）

(续)

参 数		电 磁 继 电 器	固 态 继 电 器
动作时间	吸合(接通)	1~20毫秒	5微秒
	释放(断开)	2~20毫秒	100微秒~8.3毫秒
灵敏度(毫瓦)		达100	达6
环境温度性能		适用于高温, 不适用于低温	适用于有限高温, 适用于低温
实现多组触头的可能性		好	可达到
寿 命(次)		3×10^6 (最高)	无 限
体积重量		大, 重	小, 轻
电冲击/火花危害		有	无
射频干扰/电磁干扰		要用辅助元件抑制	(零压切换时)无
振动、冲击环境性能		易受震动、冲击影响, 可能出现不允许的触头闭合和断开	耐冲击, 不会出现不允许的“触头”闭合或断开
辐射环境性能		抗辐射性能好	易受辐射影响

3. 固态电器的发展概况

固态继电器发展初期是由分立元件组成, 现今已向集成电路技术发展, 目前采用较多的厚膜和薄膜混合电路。这是因为厚膜电路设计灵活, 可供选择的有源和无源元件的参数范围宽和精度高, 适用于要求大功率和高频的场合。固态继电器起初是一种控制端和功率端共地的三端专用器件, 随着使用要求的提高, 已逐步向四端器件发展。因此, 输入和输出之间的隔离耦合技术受到了很大的重视。目前, 变压器耦合方式仍然应用比较广泛。但由于光电技术的发展, 光耦合器件转换效率的不断提高, 采用光耦合的小型固态继电器日益增多, 为了更有效地实现输入和输出的绝缘, 国外正着手研制一种介质绝缘晶体管。

美国固态继电器的销售额, 在1976年到1978年这三年期间, 平均每年递增28.9%, 预计在1981年以前每年将递增10.13%。这几年, 美国固态继电器占整个继电器工业的比重也在逐年增加, 如1976年占3.4%, 1977年占4.2%, 1978年占4.5%, 预计1981年占5.76%。国外预计, 随着控制系统中微处理器的大量运用, 固态继电器将会有个适度的增长, 但毕竟固态继电器仍处在发展初期, 预计在固态技术取得新的重大突破之前, 仍将以电磁继电器为主, 固态继电器和电磁继电器将会同时并存, 互为补充, 相互促进, 结合发展。

三、混合电器(组合电器)

电磁继电器, 即使是灵敏型的也不能直接由集成电路的低电平逻辑电路来控制, 因此在其间需要加一级放大。固态继电器即使是大功率的, 它的闭合“触头”压降和功耗也都是可观的。总之, 根据各种事物都是一分为二的道理, 采取电磁、固态两种电器的长处, 以相互补充的方法构成了新的一类电器——混合式电器。

1. 混合电器的基本类型

概括地说混合电器有两种类型, 这就是说以它们的执行元件(电磁继电器的触头, 固

态电器的转换器件) 间相互关系, 是串接还是并接来划分。例如图 1-9(a) 就是一个串联型混合电器, 固态电器的执行元件 BG_2 就和电磁接触器的输入回路—接触器的控制线圈串接 (图中未画出接触器的触头部分)。图 1-9(b) 是一种并联型的混合电器, 固态电器的转换器件——可控硅和接触器的触头并接 (图中未示出各自的控制部分)。

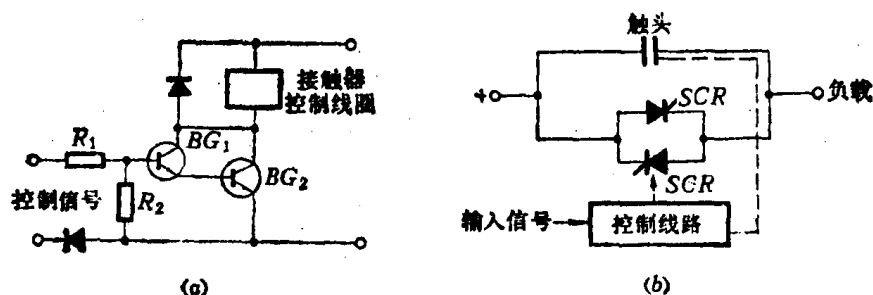


图1-9 混合电器的基本类型

(a) 串联型混合电器; (b) 并联型混合电器。

串联型混合电器最明显的优点是它的灵敏度比电磁电器高, 输出元件的触头压降小, 热过载能力强。并联型混合电器的优点在于固态开关先闭合, 可以免除电磁电器在触头间出现火花, 电路接通后大部分电流由电磁电器的触头承载因而降低了固态“触头”的压降。在电路分断时, 触头先断开, 固态“触头”后断开, 因而电路的分断也是无火花的。

应当指出, 混合电器在将固态和电磁电器的某些优点结合进去的同时, 也将两者的若干缺点带进去了。例如, 混合继电器既具有固态继电器易受温度和辐射影响的缺点, 同时又存在电磁继电器所固有的触头回跳、触头污染、动作速度慢等缺陷。因此, 这又限制了混合电器在某些要求高的场合下的应用。

2. 国产混合电器举例

我国研制的混合式延时继电器类型和规格很多, 下面仅举出一种航空用混合式延时继电器来说明一下它的组成和工作原理。

图 1-10 为 JSJ-8 型延时继电器的原理线路图, 它主要由一个阻容延时电路 (R_1 及 C_1), 一个单结晶体管 BT 及一个小型密封继电器 JKM-22B 所组成。这一线路的工作原理如下:

当 JSJ 接上电源后, 由 R_1 C_1 组成的阻容延时电路通过 JKM-22B 密封继电器的 J_1 ,

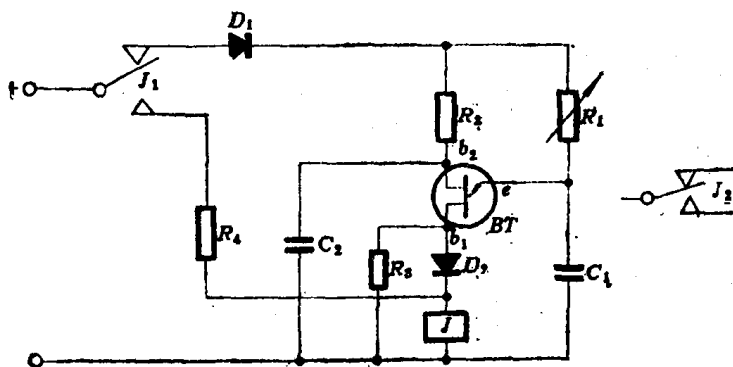


图1-10 JSJ-8型混合式延时继电器原理线路图

常闭触点和二极管 D_1 接到电源上。此后, 电容 C_1 即通过 R_1 开始充电, 电容 C_1 两端的电压 u_{c1} 随充电时间的增长按指数规律上升, 其升高的速度取决于该电路的时间常数 $\tau = R_1 C_1$, 所以调节 R_1 和 C_1 的值就可以调节 u_{c1} 升高的速度。当 u_{c1} 达到单结晶体管 BT 的峰点电压 V_p 时, 单结晶体管导通, eb_1 间电阻很小, 于是电容 C_1 对继电器线圈 J 放电。当 J 获得大于吸合电压 (在此大于 3.5 伏) 的电压时, 继电器即行动作, 起动自己的常开触点使之闭合 (即使图中的 J_1 触点转向下方的触点) 完成继电器的自锁, 与此同时操纵输出回路的触头 J_2 使之转换——即操纵被控回路。因此, 从 JSJ 接通电源开始到其转换被控回路的中间就有一段延迟时间。JSJ-8 的延时范围为从 0.1 秒到 120 秒。

当被控回路功率增大时, 执行电路的触头容量加大, 继电器激励线圈所需用的功率也势必加大, 这时由单结晶体管向继电器激励线圈直接提供大的电流已是无能为力了, 为此可在执行电磁继电器与单结晶体管之间加一级放大器。图 1-11 是一个具有可控硅的延时电路。

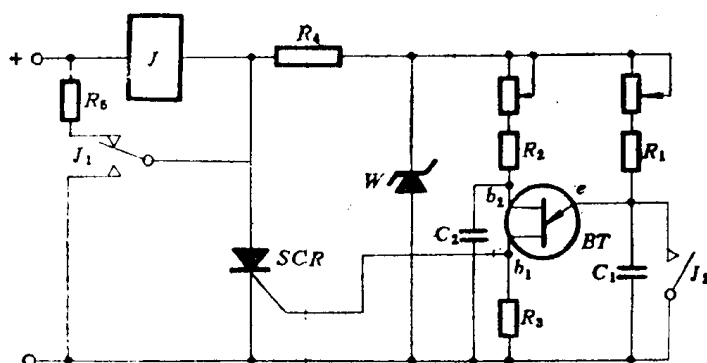


图1-11 带有可控硅的混合式延时继电器原理线路图

这种延时线路的延时触发部分和图 1-10 的延时触发线路完全相同。当单结晶体管 BT 导通后, R_3 上的电压升高, 当其值等于或大于可控硅 SCR 的触发电压时, SCR 导通, 继电器线圈可不经电阻 R_4 而直接与电源接通, 因而使 J 动作。继电器动作后, 一方面使被控制回路进行转换 (图中没有画出), 另一方面使第二对常开触点 J_1 和 J_2 闭合, J_1 使继电器 J 完成自锁, 并短接 SCR 使其截止, 而 J_2 则把电容 C 短路, 使 BT 截止并为下次工作做好准备。图中的稳压管 W 是防止由于电源电压的波动而引起延时精度改变, R_4 是稳压电阻。

混合式延时继电器的优点是延时范围很大, 调节方便, 但延时的准确度常受温度的影响, 为了减少这种影响, 在线路中需要采取温度补偿措施, 这是它的缺点。

3. 混合电器发展概况

混合电器的发展与固态器件及电磁电器的发展密切相关, 与使用元件的系统发展也有关系。

混合电器中固态部分最初都是由分立元件组成的, 而且晶体和电磁两部分是并装在一个整体中。随着晶体集成化以后, 晶体部分都组装于电磁电器的里面, 而晶体部分常常是多功能的部分组合在一起。如美国生产的一种 TO-5 型继电器, 外罩内就包含一个运算放大器、一个继电器激励器和一个保护电路。这种混合型继电器可用作延时器件和电平检测