

前 言

本书是原《航空电器》(国防工业出版社, 1981年出版)的修订版, 是在航空航天部教材委员会的统一规划下, 组织三个院校(北京航空航天大学、南京航空学院和西北工业大学)电气技术专业的有关教员联合编写和改编的。本书是电气技术专业的专业基础课教材。

根据航空部电气技术专业教学计划的要求, 本课程的主要任务是为电磁电器磁系统的分析、特性计算和设计提供必要的理论基础和基本计算方法, 并为该专业的本科学生打好牢固的磁路基础, 因此, 本书把重点放在这类电器所涉及的电磁基础方面, 如磁系统的特点和磁路计算、电磁铁的吸力特性和运动特性、线圈和其热计算等。

本书是在总结多年来教学经验和教学改革的基础上编写和改编的。在体系上, 将种类繁多的各类磁系统从原理上分为四个大类(即直流磁系统、交流磁系统、永磁磁系统和交直流同时磁化的磁系统), 并将其原理、结构特点、材料和设计计算有机地综合成一个完整的体系。在内容上, 力求成熟、实用, 并反映新的发展。在叙述方式上, 力求深入浅出, 并突出物理实质和各参数间的内在联系, 以利于自学。本书把起点放在已学过大学物理课的电磁部分和电工基础课的电路部分, 但对所用到的重要基本概念和定律仍作了扼要的复习。

书中编排了相当数量的习题和思考题, 其中有些习题是将正文中的某些概念、原理或公式推导移植改编而成, 使用时应注意和正文密切配合。

本书第一、三、四、五、六及七章由王宝龄改编, 第二及八章由曲民兴改编, 第九章由吴斌改编, 全书由王宝龄主编。

此修订版由韩西生主审。在改编过程中得到许多同志的热情鼓励, 提出了许多宝贵的修改意见, 谨此致谢。

由于水平所限, 不当和错误之处请读者批评指正。

主 编

1988. 9.

目 录

主要符号表	1
第一章 电磁电器概论	5
§ 1-1 电磁式电器	5
一、吸力电磁铁	5
二、电磁式继电器	6
三、接触器	13
四、固态继电器和混合式电器	15
五、电磁式离合器	19
六、炭片调节器	24
七、磁放大器	25
§ 1-2 本课程的目的和主要内容	27
第二章 直流磁路计算	30
§ 2-1 磁场	30
§ 2-2 磁路	37
§ 2-3 软磁材料	43
§ 2-4 几种典型直流磁系统及其磁通分布	49
§ 2-5 气隙磁导计算	53
§ 2-6 不计漏磁时简单磁路计算	78
§ 2-7 磁系统的磁通分布及漏磁系数	84
§ 2-8 考虑漏磁时简单磁路的计算	96
§ 2-9 复杂磁路计算	103
小结	105
习题与思考题	107
参考文献	112
第三章 电磁铁的静吸力特性	113
§ 3-1 磁场的能量	113
§ 3-2 电磁铁的能量转换和吸力计算公式	115
§ 3-3 麦克斯韦吸力公式	121
§ 3-4 典型电磁铁的静吸力特性	123
小结	132
习题与思考题	133
参考文献	135
第四章 电磁铁的运动特性和动作时间	136
§ 4-1 返回装置、触头系统及反力特性	136
§ 4-2 静吸力特性和反力特性的配合	142
§ 4-3 电磁铁的吸合过程和吸合时间	144
§ 4-4 减少吸合时间的方法	151

§ 4-5 电磁铁的释放过程和释放时间	158
§ 4-6 延缓释放时间的方法和计算	160
小结	166
习题与思考题	166
参考文献	167
第五章 永磁磁路和极化电磁机构	168
§ 5-1 永磁材料的主要特性	168
§ 5-2 永磁材料的种类和性能参数	172
§ 5-3 永磁磁路的计算方法	175
§ 5-4 极化电磁机构的作用原理、特点及基本类型	186
§ 5-5 极化电磁机构的特性分析	189
小结	193
习题与思考题	194
参考文献	195
第六章 线圈及其热计算	196
§ 6-1 线圈的作用和结构特点	196
§ 6-2 线圈的发热和允许温升	198
§ 6-3 线圈的散热	201
§ 6-4 线圈热计算	206
§ 6-5 线圈的设计方法	216
小结	221
习题与思考题	222
附录一 漆包线的品种、规格和性能特点	223
附录二 漆包线规格及参数表	224
参考文献	224
第七章 直流电磁铁设计	225
§ 7-1 电磁铁的磁效率、机械效率和重量经济性指标	225
§ 7-2 直流电磁铁的设计步骤	230
§ 7-3 双绕组电磁铁的设计特点	239
§ 7-4 灵敏磁系统的设计特点	244
§ 7-5 电磁铁设计中的相似法	248
小结	251
习题与思考题	252
参考文献	252
第八章 交流磁系统	253
§ 8-1 交流磁系统的特点	253
§ 8-2 交流磁系统的等值磁路图	256
§ 8-3 交流磁路计算	260
§ 8-4 交流电磁铁	264
小结	269
习题与思考题	270

参考文献	270
第九章 交直流同时磁化的磁路	271
§ 9-1 磁放大器运行的物理基础	271
§ 9-2 普通磁放大器	280
§ 9-3 反馈磁放大器	289
§ 9-4 自饱和磁放大器	292
§ 9-5 磁放大器特性的位移	303
§ 9-6 双向 (双拍) 磁放大器及其特性的调整	304
§ 9-7 三相磁放大器	307
小结	308
习题与思考题	308
参考文献	310

主要符号表

B	磁感应强度 (磁通密度)
B_d	永磁材料最大 (BH) 乘积点的磁感应强度
B_r	剩余磁感应强度
B_s	饱和磁感应强度
C	电容器、电容量、热容、常数
c	比热、常数、单位长度电容量
D	直径、电位移、二极管符号
d	直径
$\mathcal{E}$	电源电动势
E	电场强度、交流电势有效值
E_m	交流电势幅值
e	电势瞬时值
e_m	交流电势瞬时值
F	力
F_d	电磁吸力
F_r	反作用力
f	交流电频率、线圈填充系数
f_w	绕组填充系数
G	电导、重量、磁导
G_a	磁导
G_0	空气隙磁导
G_δ	漏磁导
$G_{\delta g}$	归化漏磁导
g	重力加速度、单位长度漏磁导
H	磁场强度
H_c	矫顽力
$H_{d.c}$	动态矫顽力
$H_{i.c}$	静态矫顽力
H_d	永磁材料最大 (BH) 乘积点的磁场强度
I	电流、交流电流有效值
I_e	额定电流
I_w	稳态电流
I_{ed}	电磁铁触动电流
I_{ex}	极限燃弧电流
I_{rl}	电磁铁释放电流

I_{zh}	电磁铁吸合电流
$I_{d.o}$	对应于磁放大器工作回路的动态矫顽电流
$I'_{d.o}$	对应于磁放大器控制回路的动态矫顽电流
$I'_{s.o}$	对应于磁放大器控制回路的静态矫顽电流
IW	磁势
IW_m	永久磁铁的等效磁势
i	电流瞬时值
J	电流密度
JY	电磁铁的结构因素
K	常数、开关的代号、磁放大器的放大系数
K_s	线圈的综合散热系数
K_{ob}	电磁铁的储备系数
K_{rh}	电磁铁的回程系数
K_{gl}	电磁铁的功率经济性指标
K_{kk}	时间继电器中调整延时的可靠系数
K_{id}	磁化曲线的凸度系数 (形状系数或满度系数)
K_{gl}	电磁铁的重量经济性指标
k	常数
L	电感、电感量、长度
l	长度
M	力矩、磁化强度
M_d	电磁力矩
M_r	反作用力矩
m	质量、常数
n	常数、数目、面积的外法线方向
P	压力、电功率
P_s	线圈总的热散发功率
p	气压、线圈功率过载系数
p_0	正常大气压力
Q	热量、面积、磁放大器品质因数、电量
q	反复短时工作制时的通电持续率
$\mathcal{R}$	磁阻
$\mathcal{R}_m$	永久磁铁的等效磁阻
R	电阻、半径
HRc	洛氏硬度
R_j	接触电阻
R_m	触头表面膜电阻
R_r	触头收缩电阻
r	半径、电阻

S	面积
SR	饱和电抗器
T	电时间常数、绝对温度
T_c	磁性材料的居里温度 (居里点)
T_r	热时间常数
t	时间
t_{xh}	电磁铁的固有吸合时间
t_{xf}	电磁铁的固有释放时间
t'_{cd}	电磁铁的吸合触动时间
t''_{cd}	电磁铁的释放触动时间
t'_{yd}	电磁铁的吸合运动时间
t''_{yd}	电磁铁的释放运动时间
$\mathcal{U}$	标量磁位、磁位差、磁压降
U	电压、电压降、电位、交流电压有效值
U_e	额定电压
U_m	交流电压幅值
U_p	交流电压平均值
U_{cd}	电磁铁的触动电压
U_{rh}	极限燃弧电压
U_{xf}	电磁铁的释放电压
U_{xh}	电磁铁的吸合电压
u	电压瞬时值
$u_{\sim}$	交流电压瞬时值
V	体积
v	速度
W	线圈匝数、能量、功
W_e	磁能
W_f	磁放大器反馈绕组
W_G	磁放大器工作绕组
W_K	磁放大器控制绕组
W_w	磁放大器位移绕组
W_{bo}	电磁铁的保持绕组
W_{nd}	电磁铁的拟定有效功
W_{qd}	电磁铁的起动绕组
W_{ys}	电磁铁的有效功
$\mathcal{X}$	磁抗
X	坐标轴、电抗
Y	坐标轴
$\mathcal{Z}$	复磁阻抗

Z	坐标轴、电阻抗
α	角度、转角、电阻温度系数
α_B	永磁材料的磁感应温度系数
α_r	磁放大器中的饱和角
β	角度、转角
γ	角度、转角、永磁材料的回复系数
Δ	触头间隙、厚度、衔铁运动行程
δ	磁系统中的空气隙
δ_s	电磁铁闭合位置时的工作气隙
δ_o	触头超行程
δ_K	电磁铁打开位置时的工作气隙
ε	介电常数、热辐射系数
η_i	电磁铁的磁效率
η_{jx}	电磁铁的机械效率
$(\eta_{jx})_{red}$	电磁铁的拟定机械效率
θ	角度、温度 (摄氏)
θ_0	环境温度
λ	导热系数, 线圈尺寸的长厚比
μ	磁导率
μ_0	真空磁导率
μ_d	微分磁导率
μ_i	起始磁导率
μ_m	最大磁导率
μ_r	相对磁导率
μ_{rec}	回复磁导率
ρ	电阻系数、电荷密度
ρ_o	磁阻系数
σ	漏磁系数
σ_h	磁滞损耗系数
σ_f	涡流损耗系数
τ	温升、极距
τ_{jx}	极限允许温升
Φ	磁通量
Φ_T	热流量
Φ_A	工作气隙磁通值
Φ_o	漏磁通
φ	永磁材料的磁感应衰减率、转角、角度、相位差角
ψ	磁链
ω	角频率

第一章 电磁电器概论

§ 1-1 电磁式电器

电磁式电器是利用电磁现象来进行工作的。它是电气系统及自动控制系统中用得最多也是最重要的一类元件。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，如吸力电磁铁、电磁阀门、电磁继电器和接触器、电磁离合器、振动式调压器及炭片调压器等都属于这一类；或者反过来，把输给它的机械能（或机械位移）通过磁场来控制电能，如电感式传感器等。后一类电磁电器是利用电器中磁性材料的非线性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；也可以对电量进行控制或对信号进行存储或逻辑运算，如磁性无触点元件、磁性存储器和磁性逻辑元件等都属于这一类。下面将举例介绍几种典型的电磁式电器（举例以航空用为主）。

一、吸力电磁铁

吸力电磁铁是一种利用电磁吸力作机械功从而将电能转变为机械能的电磁式电器。它广泛用在远距离操纵各类机械装置；开启或关闭各种气压或液压阀门；作为起重装置或制动装置等。此外，吸力电磁铁也是很多电磁电器的基本组成部件，例如：继电器、接触器、电磁离合器、电磁脱扣器、电磁振动器和炭片式调节器等。

图 1-1 所示为一种航空用吸入式直流电磁铁的纵剖面图，它由三个基本部件所组成：

1 ——绕有激磁绕组的线圈，激磁绕组是由电磁线（即漆包铜线）绕在绝缘材料制成的骨架上构成；2 ——导磁体的不动部分，导磁体由导磁材料（也称“软磁材料”）制成；3 ——导磁体的可动部分（称为“可动铁芯”或“衔铁”）。

可动铁芯与其他不动部分的导磁体由工作气隙 δ 及不可避免的非工作气隙 e 所分开。当绕组通电后，在工作气隙内产生磁场，该磁场与可动铁芯作用产生吸力，使铁芯向下移动（使工作气隙减小），衔铁通过拉杆 4 带动机构作机械功。

直流电磁铁的型式很多，但其基本组成部件都不外乎以上所列出的三个，其基本动作原

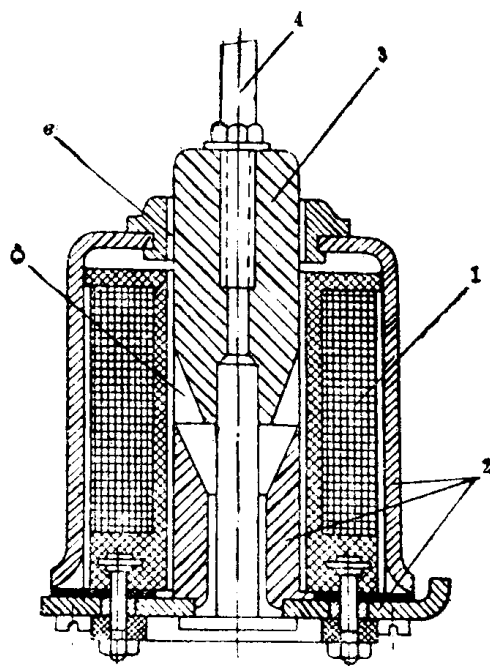


图1-1 航空电动惯性起动机的电磁铁

理也是相同的。

吸力电磁铁的种类繁多,若按其线圈通电方式及其特性来分,可分为下列三大类,即直流电磁铁、交流电磁铁及极化式电磁铁。

直流电磁铁中的工作磁通是由通有直流电流的绕组所产生,电磁铁衔铁的动作只取决于该磁通值的大小而与磁通的方向(或绕组电流的方向)无关。

交流电磁铁中的工作磁通是由通有交流电流的绕组所产生,因而磁通也周期性地改变其大小和方向,使其电磁吸力在零与最大值之间以两倍于磁通变化的频率而脉动变化,使衔铁振动产生很大的噪音。为了减小或消除噪音,必须采取特殊的方法,这样就会使其结构复杂,消耗功率增大,并使其尺寸及重量增大。

极化电磁铁中同时作用有二个互不相关的磁通:其一为极化磁通,通常由永久磁铁产生;其二为工作磁通,由工作绕组(有时称为控制绕组)所产生。极化电磁铁的动作不但与工作磁通值的大小有关并且与其方向有关,因此能反应工作绕组中控制电流的方向。

电磁铁的主要技术数据是:吸力、衔铁行程(即移动的距离)或转角、工作电压(或电流)、消耗功率、动作速度、工作时间(长时通电或短时通电)及寿命(动作次数)。

短时工作的电磁铁,线圈通电时间很短,因此可以设计得比长时通电小得多。为了缩小长时通电电磁铁的尺寸往往可以采用双绕组(即起动绕组和保持绕组)的方法。将双绕组电磁接入电源时,开始只有起动绕组通电,起动电流较大,产生一个较大的吸力使衔铁吸合,在衔铁行程接近终止以前,操作一个转换触点使保持绕组串联接入起动绕组以限制处于吸合位置时电磁铁的功率损耗。双绕组电磁铁的动作速度也较快。

二、电磁式继电器

继电器是自动和远距离操纵用的一种控制器件,它的作用是反应某一输入信号的变化,而用来操纵功率不太大的电路(一般小于 25 A ●),因而起了控制、保护和调节的作用。它是自动控制系统、电气系统、电力保护系统以及通讯系统中最基本的元件之一。

继电器的输入量通常是电量(如电压、电流、功率、频率等),也可以是非电量(如温度、压力、速度和光量等),但多半是反应电量的,而它的输出量(即被控制量)一般只有两个状态,即“通”和“断”。当其输入变量达到规定值时,其输出量即发生跳跃式变化,这种控制称为“继电控制”。

继电器的种类很多,而用得最多的是电磁式继电器。图 1-2 所示为该种继电器的原理图,而图 1-3 所示为一种用得较多的 JKB-56A 型航空直流电磁式继电器。

由图 1-2 及 1-3 可见,电磁式继电器主要由三个基本部件组成:其一为电磁铁,它由线圈、导磁体的不动部分(铁芯和铁轭)以及导磁体的可动部分(吸片或衔铁)所组成;其二为触头(也称“触点”)系统,它由固定不动的静触头和可以被吸片带动的活动触头所组成;其三为返回弹簧,它的作用是使吸片返回打开位置。

从动作原理来看,电磁式继电器实际上就是一个用电磁铁来操作的开关。当输入给继电器线圈的电流增大到一定数值,作用在吸片上的电磁吸力(或力矩)大于返回弹簧

● 指航空用直流继电器,电压为 27 V 。

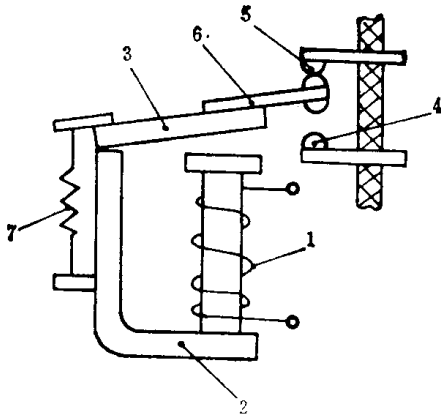


图1-2 电磁式继电器的原理图

1—线圈；2—导磁体；3—吸片（衔铁）；4—常开触头；5—常闭触头；
6—动触头簧片；7—返回弹簧。

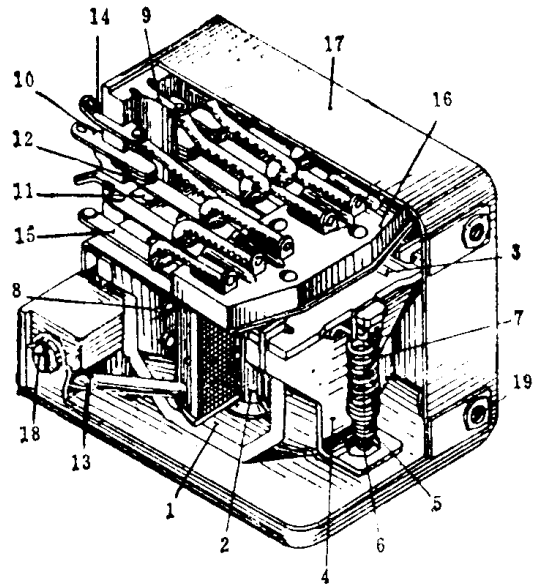


图1-3 JKB-56 A型航空直流电磁式继电器剖面图

1—铁轭；2—铁芯；3—吸片；4—角铁；
5—套筒螺母；6—螺钉；7—返回弹簧；
8—螺钉；9—绝缘座板；10—静触头导电片；11—常开触头；12—常闭触头；
13—线圈绕组接线片；14—动触头导电片；15—动触头簧片；16—接线板；17—外罩；18—固定外罩用螺钉；19—安装用套筒螺母。

对吸片的拉力（或力矩），吸片就从打开位置运动到闭合位置，并带动活动触头使它与上面的静触头分开，而使下面的一对动静触头闭合。在闭合位置时如果逐渐减小线圈电流到一定数值，当电磁吸力小于返回弹簧拉力时，吸片即返回到打开位置，使下面的一对触头断开，上面的一对触头闭合。如果在这些触头上接好电路，则可以进行接通或断开电路的开关作用。通常我们把线圈不通电时闭合的一对触头叫“常闭触头”（也称“动开触头”），而把线圈不通电时打开的一对触头叫“常开触头”（也称“动合触头”）。

如果我们把电磁继电器的线圈电流称为输入量 x ，而将常开触点所操作的回路电流称为输出量 y ，则继电器的输入输出特性将如图 1-4 所示。

继电器所用电磁铁的吸力和行程并不很大，所以通常采用拍合式磁系统，图 1-3 所示就是这种磁系统的一种型式，但也有采用吸入式的（用得不多）。除上述直流电磁式继电器外，常用的还有交流电磁式继电器（线圈通的是交流电），极化式继电器（能反应线圈电流的方向）和磁保持继电器（极化继电器的一种）等。

若按用途分则有反应电流变化的电流继电器，反应电压变化的电压继电器，反应功率变化的功率继电器以及反应频率变化的频率继电器等。还有一种用量最多的开关继电器（或称“中间继电器”），它主要用于接通、断开或转换电路以增大触点的控

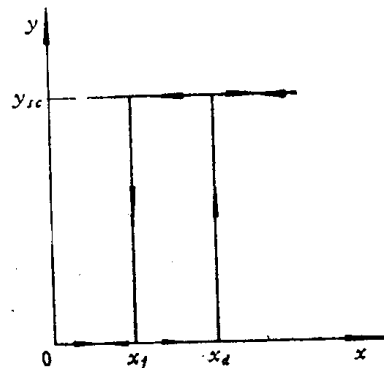


图1-4 继电器的继电特性

x_d —继电器动作时的输入值；
 x_f —继电器返回时的输入值；
 y_{jc} —继电器的输出值。

制容量或增多触点的数量,图 1-3 所示的继电器就属于这一类,它能同时转换六条电路。

不同用途的继电器就有不同的技术条件和技术要求,主要如下。

(1) 继电器的使用环境条件,包括极限环境温度、相对湿度、高度(或气压)、耐振动及耐冲击强度、恒加速度等。极限环境温度一般可分为如下几级:① $-10\sim+40^{\circ}\text{C}$;② $-40\sim+55^{\circ}\text{C}$;③ $-55\sim+85^{\circ}\text{C}$;④ $-65\sim+125^{\circ}\text{C}$ 及⑤ $-65\sim+200^{\circ}\text{C}$ 。相对湿度一般规定为 98%。高度一般可分为以下几级:①350mmHg(相当于海拔高度 5000m);②33mmHg(相当于海拔高度 20000m);③7.5mmHg(相当于海拔高度 31000m)。对于在汽车、坦克、飞机、导弹和人造卫星等上使用的继电器要经受强烈的振动、冲击和离心加速度。例如,由于飞机发动机等振动源和气动力而产生的振动,其频率一般为 10~400Hz,振动加速度为 4~6g(g 为重力加速度)。在宇航飞船和火箭等飞行器中,振动频率会更高,可达 2000~3000Hz,加速度会更大,可达 30g。飞机在着陆、制动、射击和突然变速等情况下都会对继电器产生冲击作用,冲击的次数一般为 40~100 次/分,冲击加速度为 4~50g。在火箭等飞行器中,这个加速度可达 100~300g。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 15g,其他类型的飞行器这个加速度还要高。恒加速度一般分为以下几级:10g, 25g, 50g, 100g。在海洋条件下使用的继电器还要注意大气中的盐分(盐雾)对金属零件特别是触点的氧化及腐蚀。此外在空间还存在有放射性辐射,继电器应具有耐放射性辐射的能力。

(2) 在规定的使用环境条件下和在规定的使用寿命(动作次数)内,要求继电器动作准确、性能稳定、工作可靠。在一个大型控制系统或通讯系统中,继电器的用量很大(如某型无人驾驶高空侦察机的自动控制系统中就使用了二十多种、二百多个继电器,一个容量为一万门的自动电话交换机约装有五万至七万个继电器,约有五十万对以上的触点参加工作),因此提高每个继电器的工作可靠度(可靠度是指在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率)对延长整个系统的平均无故障工作时间具有十分重要的意义。大量统计数字表明,对于有触点的继电器,其工作可靠性要比电阻或电容等电子元件的可靠性差。这是因为它既有运动部分,会产生疲劳折断或卡死等故障,又有电磁部分,会产生线圈断线、绝缘击穿、吸片被剩磁或其他原因粘住而不能释放等故障,尤其是触点部分,易受环境污染而发生接触不良,或因电流过大、触点闭合时的弹跳等原因而发生粘结等故障。因此,近年来对继电器的可靠性分析和试验,以及对提高继电器的可靠性做了大量的研究工作。

(3) 触点的断流容量,即继电器触头所能断开的电流 I 和电压 U 。这里的电流指的是触点断开以前通过触点的电流值,而电压指的是断开后触点两端的电压值。 I 乘以 U 即称为“断流容量”。显然,断流容量只表示触点的断流能力,而并不是输出或消耗的功率。

必须指出,触点的断流能力和负载的种类有很大关系。一般将负载分为电阻性负载、电感性负载、灯泡型负载(由于钨丝的冷态电阻比热态电阻小得多,因此在灯泡刚通电时会出现一个涌流,其值可达热态稳定电流的十倍以上)以及电动机型负载,在技术条件中应详细予以规定,如表 1-1 所示。

(4) 动作灵敏。通常用继电器的“灵敏度”来表示,灵敏度指的是继电器吸合所需要的最小功率,即 $I_{\text{吸}}^2 R$ (其中 $I_{\text{吸}}$ 为吸合电流, R 为线圈电阻)。我们希望提高继电器的灵敏度,也就是降低吸合功率,但是以后可以看到提高灵敏度会受到其他因素的制

约。极化式继电器的灵敏度可以做得比电磁式继电器高，有些高灵敏度继电器的吸合功率只有 $5 \sim 10 \mu W$ ，甚至更小。

(5) 动作时间。继电器的动作时间包括吸合时间 t_{xh} 及释放时间 t_{rl} 。吸合时间是指从线圈通电开始，到所有触头达到工作状态时所需的时间，而释放时间是指从线圈断电开始到所有触头恢复到通电前的状态所需的时间（以上时间均不包括触头的回跳时间）。绝大多数继电器要求快速动作，但也有一些特殊用途的继电器要求延时动作（如时间继电器）。

(6) 寿命。继电器的寿命指的是在规定的 使用环境条件下和规定的负载情况下所规定的动作次数。在这个规定的动作次数内，其失误次数应不超过规定的要求，其性能参数（如吸合电压、释放电压及触头的接触电阻等）的变化应不超过标准规定的最大值（或最小值）。

作为示例，在表 1-1 及表 1-2 中列出了我国早期生产的 JKB 及 JKC 系列航空直流

表 1-1 JKB 及 JKC 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 (V)，直流	27	27	27	27	27	27	27
2	额定电压下线圈电流 (A)	0.165	0.17	0.167	0.171	0.31	0.41	0.425
3	触头电路额定电压 (V)，直流	27	27	27	27	27	27	27
	触头电路负载电流 (A)							
	(1) 直流 $\tau \leq 0.015$ (S)	5	5	5	5	5	5	5
4	(2) 直流 30 V 感性	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 (V) 90 Hz $\cos \varphi \geq 0.5$	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 (V) 100 Hz $\cos \varphi \geq 0.5$		0.05~5		0.05~5		0.05~5	
5	吸合电压 (V) $+20 \pm 5^\circ \text{C}$ 热态最大	18	18	18	18	12	12	12
6	释放电压 (V) $+20 \pm 5^\circ \text{C}$ 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 (g)	90	120	95	125	95	125	240

表 1-2 JKB 及 JKC 系列产品使用条件

序号	使 用 条 件	产 品 代 号			
		JKB-52 A 53 A	JKB-52 B 53 B	JKC-52 B 53 B	JKC-56 A
1	环境温度 ($^\circ \text{C}$)	$-60 \sim +50$	$-60 \sim +90$	$-60 \sim +90$	$-60 \sim +50$
	每隔 2 小时工作 5 分钟的允许环境温度 ($^\circ \text{C}$)	+130	+130	+130	
2	相对湿度 (%) $+20 \pm 5^\circ \text{C}$	98	98	98	98
3	海拔高度 (m)	25000	20000	20000	20000
	每隔 2 小时工作 5 分钟的允许海拔高度 (m)		25000	25000	
4	固定处振动：频率 (Hz)	10~200	10~200	10~200	10~200
	加速度 (g)	1.75~3.5	1.75~3.5	1.75~3.5	1.75~3.5
5	冲击：频率 (次/分)	40~100	40~100	40~100	40~100
	加速度 (g)	4	4	4	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

电磁式继电器（其中一种已示于图 1-3）的技术数据和使用条件。

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。表 1-1 中所列产品是给低速飞机配套使用的，它的磁系统为拍合式。为了适应高空高速飞机和飞行器的强烈振动，国外在 1957 年以后发展了平衡衔铁式磁系统。这种继电器的原理结构如图 1-5 所示，其中衔铁的质量对转轴是对称的，所以称为“平衡衔铁”。平衡衔铁可以提高继电器的耐振和耐冲击的能力，如表 1-3 所示。

此外，为了适应恶劣的气候条件又发展了密封式继电器，即将整个继电器用金属外壳密封起来，壳内充以惰性气体。这样可以防止触点氧化和被污染，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，也减小了它的重量和体积。图 1-6 所示为去掉密封外罩后的两种密封继电器的照像图，其中 (a) 图是不能反应输入信号极性的直流电磁式继电器；(b) 图是一个能反应输入信号极性的磁保持继电器。

无论是拍合式继电器还是平衡衔铁式继电器，其常闭触头的触头压力都是由返

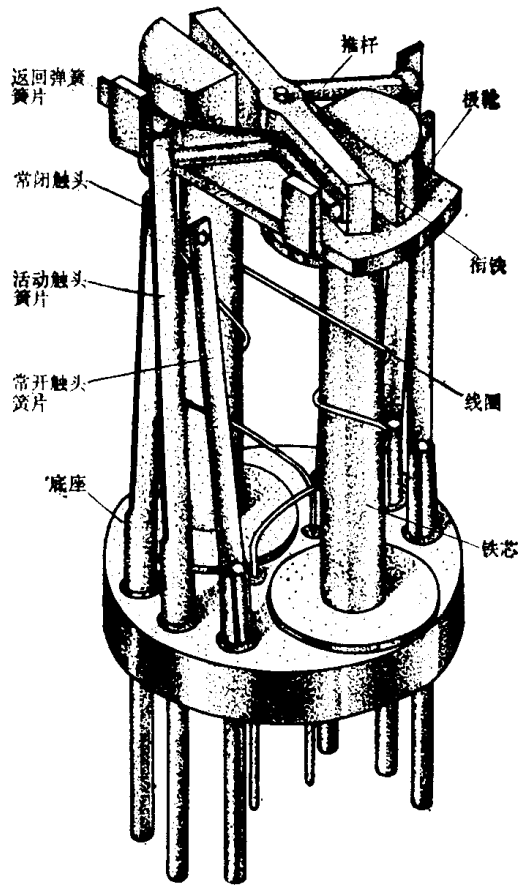


图1-5 平衡衔铁式电磁继电器原理结构图
(去掉密封外罩后)

表1-3 拍合式、平衡衔铁式和平衡力式电磁继电器性能比较表

性能 型式	体积 (cm ³)	重量 (g)	线圈功率 (28 V 直流) (W)	振动	冲击 (g)	寿命 (次)	触头 压力 (g)	设计特点
拍合式	164	258	9.4	10 g 500Hz	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大于10 N； ④ 断电时衔铁作用力约 1.4 N。
平衡衔 铁式	65.5	204	7.8	10 g 1500Hz	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大于10 N； ④ 断电时衔铁作用力约 2 N。
平衡力式	16.4	64	2.9	30 g 3000Hz	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 通电时衔铁吸力大于10 N； ④ 断电时衔铁作用力大于10 N。

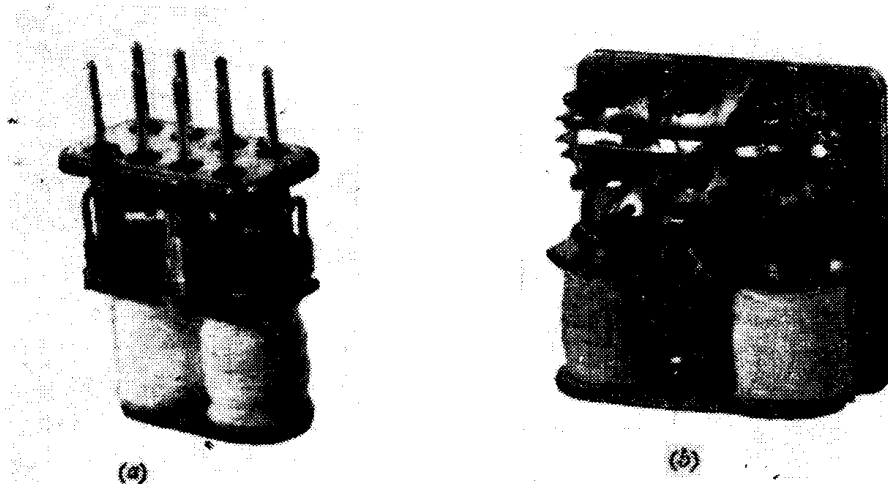


图1-6 密封继电器的照像图（去掉密封外罩后）

回弹簧提供的，一般要小于常开触头的压力，因为常开触头闭合后的触头压力是由电磁力提供的。所以在衔铁打开、常闭触头闭合时会产生较大的弹跳，其耐振和耐冲击性能也较差。为此，国外在 1966 年以后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，其结构原理示于图 1-7(a)。由图可见，在继电器的磁路中加设了一块永久磁铁。当线圈断电、衔铁打开至接近磁极 A 时，永久磁铁所产生的磁通使衔铁牢牢吸合于磁极 A，如图 1-7(b)。当线圈通电时，铁芯中由线圈激磁磁势所产生的磁通与永磁磁通方向相反，使磁极 A 的吸力减小而使磁极 B 中的吸力增大，使衔铁吸向磁极 B，如图 1-7(c) 所示。在上述的两种情况下，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）大小相近。这个“大小相近”也就是所说的“平衡力”。具有平衡力特点的电磁继电器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，抗振动、抗冲击能力都较强。由表 1-3 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比早期的拍合式继电器有很大的改进。

近年来电磁继电器的发展和达到的水平主要表现在以下几方面：

(1) 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 ）至 $+125^{\circ}\text{C}$ （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 $5 \sim 3000\text{Hz}$ （甚至达 5000Hz ），加速度达 $30 \sim 50g$ ；耐冲击一般为 $100 \sim 150g$ ，特殊的可达 $500g$ ；离心加速度能达 $400g$ 。

(2) 进一步小型化和微型化。从晶体罩式继电器（其外形尺寸为 $24.6 \times 20.5 \times 10.5\text{mm}^3$ ）缩小到 $1/2$ ，乃至 $1/7$ 晶体罩。特别是为了和集成电路配套使用，要求继电器有足够高的灵敏度以便能由集成电路直接控制，并且其尺寸要小到能置于集成电路标准封装之内。1962 年发展的 TO-5 型和 1967 年发展的 TO-87 型在尺寸方面已能满足要求（TO-5 为 $\phi 8.51 \times 6.7$ ，TO-87 为 $10.4 \times 6.98 \times 2.8$ ，尺寸单位为 mm），但大多数集成电路的输出还不能直接操作继电器工作，需要在它们之间加一级放大器。

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，扁平形的通用开关继电器应运而生。例如，已生产的二组、

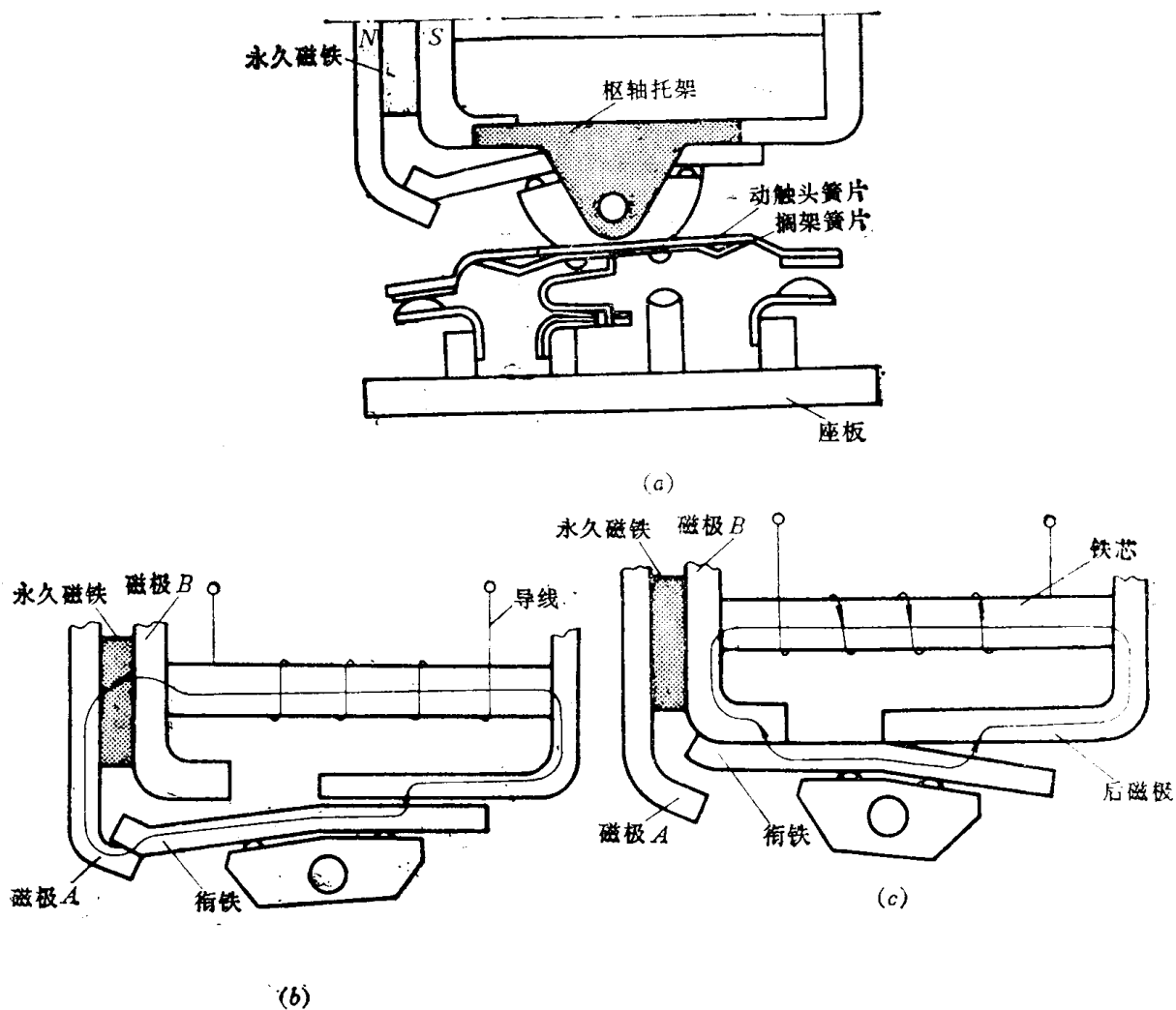


图1-7 平衡力式继电器

(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。

四组或六组转换触头，能开闭高达 5 A，125/250 V 交流，或 50 V 直流的负载，而其高度一般均不超过 11mm。

(3) 可靠性大大提高。国外近二十多年来在继电器的可靠性技术方面进行了大量的研究工作，并已在可靠性试验方法、计算和数据表达方法、失效模式及机理以及可靠性专用测试设备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应的生产线和试验检测方法。美国已制订了“有可靠性要求的电磁继电器总规范 MIL-R-39016B”。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，直至今日，可靠性的问题还不能认为已完全解决。

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 $133.3 \times 10^{-10} \text{ Pa}$ (即 10^{-10} mmHg) 的真空条件下良好地工作，其漏泄率已低于 $1 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$ 。

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 60 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。

我国航空继电器工厂继 JKB 及 JKC 系列航空直流电磁式继电器后已研制和生产了适应新机种配套需要的密封继电器系列,即 JKM 系列。在这一系列里,线圈的工作电压有 10V、12V、18V 及 27V 几种,被控制的路数有 1、2、4 及 6 路,被控电路触头工作电流最小为 500mA,上限为 20A。其使用环境条件如下:环境温度一般为 $-55\sim+85^{\circ}\text{C}$ (长期工作),而耐高温的产品为 $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$ 或更高;使用高度为 25000m;振动频率为 $10\sim 3000\text{Hz}$,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,其性能远较老系列产品为高。目前,我国在研制和生产性能更高的平衡力式继电器也已取得很大的进展。

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、极化继电器、磁保持继电器以及舌簧式继电器等,这里就不再一一介绍了。

三、接 触 器

接触器是用来远距离操纵(闭合、断开或转换)大功率(大于 25A)电路的一种电磁式开关电器。它不同于开关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(50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,其原理图如图 1-8 所示。直到最近苏、法等国和我国的航空接触器绝大部分仍然是吸入式并且是非密封的。对于长期工作制的航空接触器,为了缩小尺寸、减轻重量和加快速度,多采用双绕组电磁铁,如图 1-9 所示。

表 1-4 及表 1-5 为我国目前生产的 MZJ 系列航空直流接触器的主要性能数据及使用条件。

除表列的长期工作制接触器外,我国还生产了短期工作制的 MZJ 系列航空接触器、供转换直流电路用的 HZJ 系列接触器、通断三相交流电路的 JLJ 系列接触器、转换三相交流电路的 HJJ 系列接触器等。所有这些接触器都采用直流吸入式电磁铁作为驱动部件。但是,吸入式电磁铁的活动部分不容易做成平衡式的,因此,其耐振强度就要受到限制。另外,双绕组电磁铁的起动电流较大,并且还额外增加了一个辅助触头。因此,从 60 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,如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)。此外还生产了一种机械自锁型接触器,其原理图示于图 1-10。当吸合线圈通电后,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。按

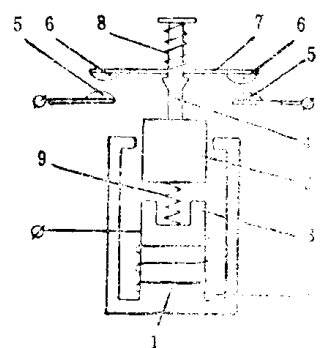


图1-8 单绕组航空接触器原理图

- 1—线圈; 2—可动铁芯;
- 3—不动铁芯; 4—拉杆;
- 5—静触头; 6—动触头;
- 7—动接触片; 8—触头弹簧; 9—返回弹簧。