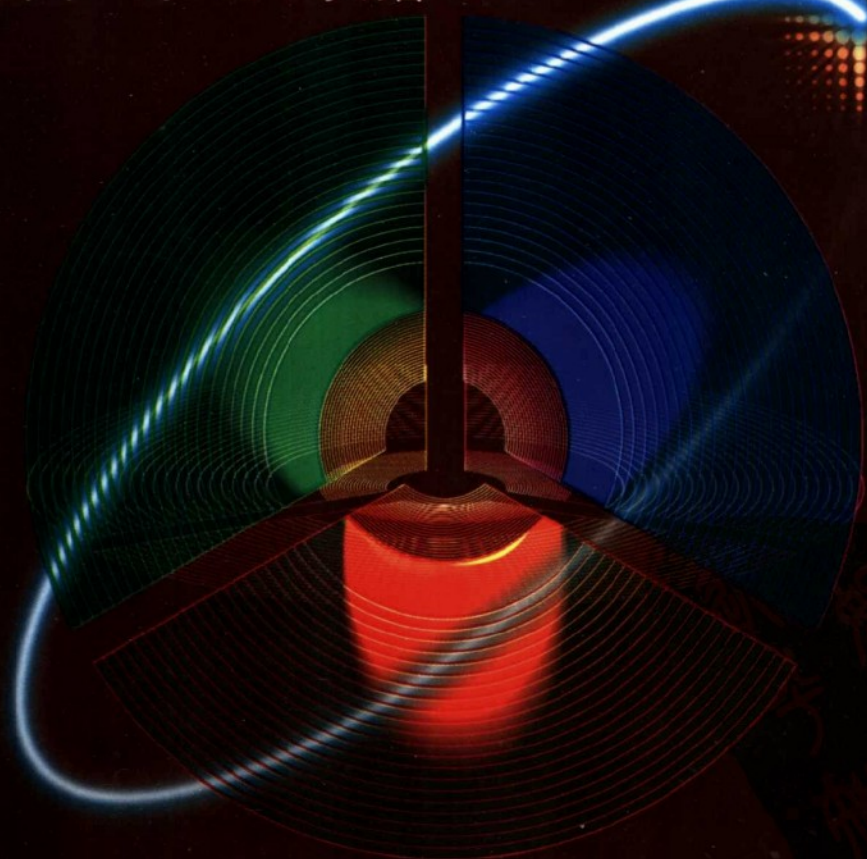


电机实用技术丛书

电动机的 起动 · 制动 和调速

第2版

周希章 周 全 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

● ISBN 7-111-01855-9/TM·255

封面设计·电脑制作：姚毅

ISBN 7-111-01855-9



9 787111 018551



定价：33.00 元

电机实用技术丛书

电动机的起动、制动和调速

(第2版)

周希章 等编著
周 全



机械工业出版社

资源分享网
PDG

再版前言

工厂中的各种生产机械均需电动机拖动，电动机的起动、制动和调速是一个带普遍性的问题。这次修订第2版，是在原书第1版的基础上，去掉陈旧的内容和资料，并根据近十余年来科学技术的发展，特别是电力电子技术、微电子技术、现代控制理论和近代交流调速技术的完善和发展，补充了电动机控制的许多新技术、新内容。和第1版相比，主要充实了以下几方面内容：

1. 简明扼要、全面系统地介绍了近代交流调速技术和控制系统。
2. 增加了同步电动机的起动和调速控制章节。
3. 充实了异步电动机的传统制动技术和阻容制动内容。

4. 和交流调速系统相比，直流调速系统控制方便，调速性能好，变流装置结构简单，长期以来在调速传动中占统治地位。目前虽然交流调速技术发展迅速，但直流调速在近一个时期不可能被淘汰，尤其在我国，高性能的交流调速定型产品尚少，直流调速理论根深蒂固，并在发展中不断充实，交流调速技术替代直流调速需要经历一个较长的历程。因此本书仍对直流调速系统作了较详细的论述。

书中的名词术语、电气图形符号和文字符号均采用新的国家标准。

在编写过程中，力求做到理论联系实际，正确指导如何运用理论解决实际问题；内容深入浅出，既突出了重点，又兼顾了全面，条理清晰，语言通俗易懂，便于读者自学。

全书共分六章，第一、五章由周全编写，第三章由赵柳、时雨编写，其余章节由周希章编写并负责全书统稿工作，参加本书编写的还有牟勇、王惠、赵晓华等。

由于编者学识水平有限，书中有不妥之处，恳切希望广大读者批评指正。

编者

1999年12月于北京

目 录

前言

第一章 三相异步电动机的起动	1
第一节 笼型异步电动机直接起动	1
一、起动情况分析	1
二、几种典型控制电路	3
三、起动故障分析判断	14
第二节 笼型异步电动机减压起动	14
一、星-三角减压起动	14
二、自耦减压起动	26
三、延边三角形起动	40
四、定子回路串联电抗、电阻减压起动	47
第三节 绕线转子异步电动机的起动	49
一、转子回路中串入起动变阻器起动	49
二、转子回路中串入频敏变阻器起动	60
第二章 三相异步电动机的制动	91
第一节 三相异步电动机的制动方式	91
一、异步电动机的机械制动	91
二、异步电动机的电气制动	94
第二节 三相异步电动机的制动控制电路	112
一、机械制动控制电路	112
二、反接制动控制电路	113
三、能耗制动控制电路	118
四、阻容制动控制电路实例	121
第三章 三相异步电动机的调速	123
第一节 调速的基本概念和主要指标	123
一、调速的基本概念	123

二、调速的主要性能指标	124
第二节 异步电动机变极调速	128
一、变极原理	128
二、变极的接线方式及其特性	130
三、变极电动机及其控制装置	135
四、变极调速的控制	139
第三节 异步电动机调压调速	144
一、概述	144
二、调压调速机械特性和功率损耗	147
三、调压调速闭环控制原理及其静特性	151
四、调压调速的应用	154
第四节 绕线转子异步电动机在转子回路中串电阻调速	162
一、调速特点	162
二、起动调节电阻的选择	162
三、控制电路分析	175
第五节 绕线转子异步电动机串级调速	190
一、串级调速基本原理、类型和特点	190
二、串级调速主电路	200
三、串级调速系统的能量指标	208
四、低同步串级调速系统的控制电路	216
第六节 绕线转子异步电动机晶闸管能耗制动调速	218
一、概述	218
二、他励能耗制动调速	219
三、自励能耗制动调速	225
第七节 绕线转子异步电动机涡流制动器调速	232
一、概述	232
二、涡流制动器开环调速系统	236
三、涡流制动器闭环调速系统	237
第八节 电磁调速电动机及其调速系统	247
一、调速原理和基本结构	247
二、工作特性	252
三、控制装置	257

四、主要技术资料	261
第九节 变频调速	266
一、变频调速的基础知识	266
二、变频器的典型电路	288
三、变频调速系统	317
四、变频器的选择	331
第四章 同步电动机的起动和调速	344
第一节 同步电动机的起动	344
一、概述	344
二、同步电动机的异步起动	345
三、同步电动机的其他起动方法	348
第二节 同步电动机的调速	350
一、概述	350
二、同步电动机的变频调速原理	355
三、无换向器电动机调速系统	364
第五章 直流电动机的起动和制动	386
第一节 直流他励电动机的起动	386
一、直流他励电动机的机械特性	386
二、直流他励电动机的起动方法	388
三、直流他励电动机的起动电阻计算	390
四、直流他励电动机的起动控制电路	399
五、直流他励电动机的反转	402
第二节 直流他励电动机的制动	402
一、直流他励电动机制动的目的和方法	402
二、直流他励电动机的能耗制动	403
三、直流他励电动机的回馈制动	407
四、直流他励电动机的反接制动	408
第三节 直流他励电动机起制动过渡过程分析	413
一、直流他励电动机在恒定负载下的过渡过程	413
二、直流他励电动机起动过渡过程	415
三、直流他励电动机能耗制动过渡过程	418
第四节 直流串励电动机的起动和制动	420

一、直流串励电动机的机械特性	420
二、直流串励电动机的起动	422
三、直流串励电动机的制动	427
四、直流串励电动机的控制电路	429
第六章 直流电动机的调速	432
第一节 直流电动机的基本调速方式	432
一、改变电枢电路串联电阻调速	432
二、改变电动机电枢供电电压调速	436
三、改变磁通调速	437
四、三种调速方式性能比较	440
第二节 直流发电机—电动机调速系统	440
一、系统的运行原理	441
二、调速系统的机械特性	443
三、调速系统的特点	444
四、控制电路介绍	444
第三节 用交磁电机扩大机控制的直流电动机调速系统	447
一、交磁电机扩大机的工作原理和特点	447
二、反馈的基本概念	450
三、交磁电机扩大机的调整	456
第四节 用交磁电机扩大机控制的直流发电机-电动机 调速系统	464
一、B2012A 型龙门刨床工作台主传动调速系统	464
二、混合截止电路	468
第五节 晶闸管-电动机系统	472
一、晶闸管-电动机系统的机械特性	472
二、可控整流电路	473
三、晶闸管变流装置用移相触发脉冲的几个问题	476
四、晶闸管的保护	479
五、单闭环控制的晶闸管直流调速系统	485
六、多环控制的晶闸管直流调速系统	510
七、可逆调速系统	527
参考文献	560

第一章 三相异步电动机的起动

第一节 笼型异步电动机直接起动

一、起动情况分析

为正确理解异步电动机的起动问题,先简单分析它的起动过程。电动机在起动的瞬间,因为转子转速 $n_2=0$,转差率 $s=1$ ($s=(n_1-n_2)/n_1$, n_1 为定子旋转磁场的同步转速),转子与旋转磁场之间的相对转速最大 ($n_1-n_2=n_1$),所以它在转子导体上产生的感应电动势和电流也最大,这时定子绕组中的电流 I_s ,可达到电动机额定电流 I_N 的 4~7 倍,即

$$\frac{I_s}{I_N}=4\sim7 \quad (1-1)$$

各种三相异步电动机的 I_s/I_N 值,可从电机产品样本中查到。

异步电动机起动时,过大的起动电流将产生不良影响,主要的有以下两方面:

1) 产生较大的线路压降,使电网电压波动过大,影响并联在电网的其他电动机的正常运行,故直接起动时,应考虑到造成的电网电压降。经常起动的电动机引起的电网压降不大于 10%;偶而起动的电动机不大于 15%;在保证生产机械所要求的起动转矩,又不影响其他用电设备正常运行时,电动机引起的电网压降,可允许 20%或更大。

2) 对那些惯性较大,起动时间较长或起动频繁的电动机来说,过大的起动电流,将使电动机绕组绝缘过热而老化,因此,大容量电动机的起动电流,必须加以限制,不能直接起动。在一般情况下,只有小容量电动机才采用额定电压下直接起动的方法。

电动机能否直接起动,目前国内一部分资料中,介绍过下述经验公式,如果

$$\frac{I_s}{I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{电源总容量(kVA)}}{4 \times \text{电动机容量(kW)}} \quad (1-2)$$

时,电动机可直接起动。这一经验公式只能作为参考,不能作为能否直接起动的根据。为清楚起见,举下例说明之。

有一台笼型异步电动机, $P_N=40\text{kW}$, $I_S/I_N=6.5$, 如果变压器容量为 560kVA , 可否直接起动?

因
$$\frac{I_S}{I_N}=6.5$$

$$\frac{3}{4} + \frac{\text{电源总容量(kVA)}}{4 \times \text{电动机容量(kW)}} = \frac{3}{4} + \frac{560}{4 \times 40} = \frac{3}{4} + \frac{14}{4} = 4 \frac{1}{4} = 4.25$$

$$6.5 > 4.25$$

故
$$\frac{I_S}{I_N} > \frac{3}{4} + \frac{\text{电源总容量(kVA)}}{4 \times \text{电动机容量(kW)}}$$

根据上述公式, 得出电动机不能直接起动的结论, 但在一些工厂中, 用 560kVA 变压器供电时, 40kW 电动机 (如 B215, B115 等刨床用电机组) 是采用直接起动的, 恰与公式得出的结论不符。问题在于起动时造成的起动电流冲击和电压降落, 是否影响其他设备的正常运行。按上述公式, 即使用 750kVA 变压器供电, 也认为是不能直接起动的, 因

$$\frac{3}{4} + \frac{750}{4 \times 40} = \frac{87}{16} \approx 5.4 < 6.5$$

故决定笼型异步电动机能否直接起动, 建议不要采用上述经验公式。一般按电源情况可允许直接起动的功率来考虑, 见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 按电源容量确定笼型异步电动机直接起动时的功率

电 源 情 况	允许直接起动的笼型电动机最大功率/kW
小容量发电厂	每 1kVA 发电机容量为 0.1~0.12kW
变 电 所	经常起动时, 不大于变压器容量的 20%
	偶而起动时, 不大于变压器容量的 30%
高压线路	不超过电动机连接线路上的短路容量的 3%
变压器-电动机组	电动机容量不大于变压器容量的 80%

表 1-2 6(10)/0.4kV 变压器允许直接起动笼型电动机的最大功率

变压器供电 的其他负荷 S_1 和功率 因数 $\cos\varphi$	起动时 允许电 压降 (%)	供电变压器容量 S_t/kVA													
		100	125	160	180	200	250	315	320	400	500	560	630	750	800
		起动笼型电动机最大功率 P_m/kW													
$S_1 = 0.5S_t$	10	22	30	30	40	40	50	75	75	90	110	115	135	155	180
$\cos\varphi = 0.7$	15	30	40	55	55	75	90	100	100	155	155	185	225	240	280
$S_1 = 0.6S_t$	10	17	22	30	30	40	55	75	75	90	110	115	135	135	185
$\cos\varphi = 0.8$	15	30	30	55	55	75	90	100	100	155	185	185	225	240	285

注：上表所列数据系指电动机与变压器低压母线直接相连时的情形。

二、几种典型控制电路

(一) 单向起动控制

图 1-1、图 1-2 分别为用熔断器、热继电器和断路器进行保护，控制笼型异步电动机的单向电路。现就图 1-1 的情况说明如下：

当按下起动按钮 SBT 时，3、5 两点接通，接触器 KM 线圈经 L_2 、1、3、5、4、2、 L_3 回路接上 380V 电压，有电流流过线圈，故接触器吸合，其常开主触头闭合，电动机接通 380V 电源而直接起动。它的常开辅助触头 KM 闭合，当松开 SBT 按钮时，回路就可通过这个触头使线圈 KM 继续通电。凡是接触器（或继电器）利用它自己的辅助触头来保持线圈吸

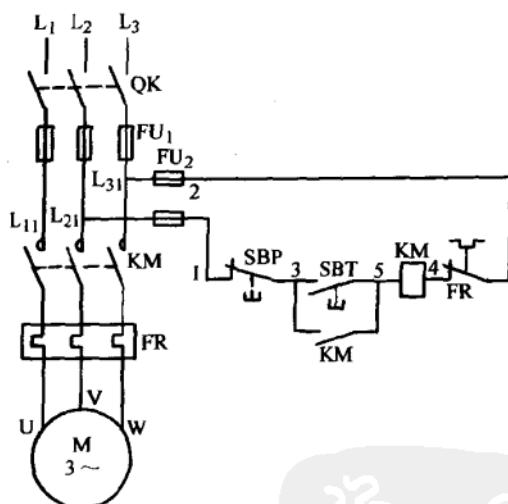


图 1-1 笼型异步电动机用熔断器、热继电器进行保护的单向起动控制电路

合的，我们称之为自锁，这个触头称为自锁触头，它起着自锁作用。如果要使电动机 M 停止运转，只需将停止按钮 SBP 按下，1、3 之间触头断开，接触器释放，其常开主触头打开，电动机 M 停止运转，同时，当 SBP 恢复到原来位置时，接触器 KM 不会动作。只有再操作起动按钮

时，电动机才能再起动。

上述电路，如将自锁触头去掉，则变成点动控制电路。

下面分别介绍控制电路中涉及到的熔断器、热继电器和断路器的选择方法。

1. 熔断器

熔断器是电动机和电气线路中一种最简单，使用最广泛的保护装置。将熔断器串接在被保护的电路中，当负载过大或有短路的时候，流过熔断器的电流增大而自动烧断，直接把电路断开，从而起了过载和短路的保护作用。

熔断器的主要特点是：

- 1) 构造简单，体积较小，安装维护方便，价格低廉，保护短路的可靠性高。
- 2) 熔体工作时间长时，性能易变化，动作特性受周围温度影响大。
- 3) 熔断器是不能自动重合的电器，当熔体熔断后，需要调换新的熔体，方能重新接通电路，而且要费时间，所以在自动控制电路内经常动作的地方，不适合用熔断器保护。
- 4) 用熔断器保护电动机时，有时只一相熔断，可能造成电动机两相运转而损坏电动机。

根据上述特点，熔断器适用于要求不高，容量较小的交直流电动机主电路和控制电路的保护。

用于 500V 以下电路中的熔断器为低压熔断器。选用熔断器时，主要是选择熔断器的结构型式、额定电压和额定电流等级，然后选择熔体的额定电流。

熔断器的额定电压应等于或大于被保护电路的工作电压。

低压熔断器的结构型式有瓷插式、无填料密封管式、有填料密封

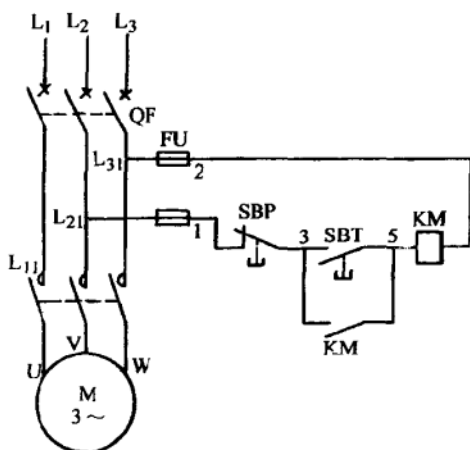


图 1-2 笼型异步电动机，用断路器进行保护的单向起动控制电路

管式、螺旋式、快速式、自复式等多种型式。

螺旋式熔断器，由于其体积小、维护简单、安全和调换方便，至今仍广泛作为照明及中小型电动机的保护用。目前国产的螺旋式熔断器常用的有 RL1 系列和 RLS 系列（螺旋式快速熔断器）。

RL1 系列螺旋式熔断器，适用于交流 50Hz 或 60Hz 额定电压至 500V，额定电流至 200A 的电路中。其技术数据见表 1-3。

表 1-3 RL1 系列熔断器技术数据表

熔断器额定电流 /A	熔体电流等级 /A	500V, $\cos\varphi \geq 0.3$ 时的 极限分断能力/A
15	2, 4, 6, 10, 15	2000
60	20, 25, 30, 35, 40, 50, 60	3500
100	60, 80, 100	20000
200	100, 125, 150, 200	50000

RLS 系列快速熔断器，用于交流 50Hz 或直流额定电流 3~100A，额定电压 500V 的电路中，作为整流管、晶闸管，或由该元件组成的成套装置的内部短路保护，或某些不允许过电流的过载保护。RLS 系列快速熔断器的技术数据见表 1-4。

表 1-4 RLS 系列快速熔断器技术数据表

型 号	额定电压 /V	熔断器额定 电流/A	熔体额定电流 /A	极限分断 电流/kA	$\cos\varphi$
RLS1	500	10	3, 5, 10	50	≤ 0.25
		50	15, 20, 25, 30, 40, 50		
		100	60, 80, 100		
RLS2	500	30	16, 20, 25, 30	50	0.1~0.2
		63	35, (45), 50, 63		
		100	(75), 85, (90), 100		

密封管式熔断器应用相当广泛。

无填料密封管式熔断器 RM10 系列是在 RM1、RM2、RM3 等老产品的基础上，统一设计的产品，具有结构简单，更换熔体方便等特点，其技术数据见表 1-5。

表 1-5 RM10 系列熔断器技术数据表

额 定 电 流/A		极限分断能力 /A
熔 断 管	装在管内之熔体	
15	6, 10, 15	1200
60	15, 20, 25, 35, 45, 60	3500
100	60, 80, 100	10000
200	100, 125, 160, 200	
350	200, 225, 260, 300, 350	
600	350, 430, 500, 600	
1000	600, 700, 850, 1000	12000

RT0 系列有填料密封管式熔断器、广泛使用于供电电路或断流能力要求较高的场合，如电厂用电、变电所的主回路及靠近电力变压器出线端的供电电路中，其技术数据见表 1-6。

表 1-6 RT0 系列熔断器技术数据表

额定电压 /V	熔断器额定 电流/A	熔体额定电流/A	极限分断能力	
			kA	cosφ
交流 380 660 直流 440	50	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50	50	0.1~0.2
	100	30, 40, 50, 60, 80, 100		
	200	80, 100, 120, 150, 200		
	400	150, 200, 250, 300, 350, 400		
	600	350, 400, 450, 500, 550, 600		
交流 380 直流 440	1000	700, 800, 900, 1000	50	0.1~0.2
交流 1140	200	30, 60, 80, 100, 120, 160, 200		

关于熔断器熔体电流的选择，应区分以下几种情况。

1) 电动机直接起动时，熔体电流可按下式选择：

$$I_{FN} = \frac{I_s}{K} \quad (1-3)$$

式中 I_{FN} ——熔断器熔体额定电流 (A)；

I_s ——电动机的起动电流 (A)，可从产品说明书中查出，如无资料可查，可按表 1-7 中数据考虑；

K ——系数，决定于电动机的起动情况和熔断器特性，见表 1-8。除按表 1-8 中的规定选择 K 值外，还可根据起动时间来确定 K 值大小，见表 1-9。

表 1-7 Y 系列电动机起动电流和额定电流关系表

型 号	极 数	功 率 /kW	起动电流/额定电流
Y 系列 (IP44)	2	0.55~160	7
	4	0.55~1.5	6.5
		2.2~160	7
	6	0.75~2.2	6
		3~132	6.5
	8	2.2~5.5	5.5
7.5~45		6	
55~110		6.5	
10	45~75	6.5	
Y 系列 (IP23)	2	15~250	7
	4	11~250	7
	6	7.5~160	6.5
	8	5.5~75	6
		90~132	6.5
	10	55~90	6.5

表 1-8 根据熔断器特性和电动机起动情况选择 K 值表

熔断器型号	熔体材料	熔体电流 /A	K	
			电动机轻载起动	电动机重载起动
RT0	铜	50 及以下	2.5	2
		60~200	3.5	3
		200 以上	4	3
RM10	锌	60 及以下	2.5	2
		80~200	3	2.5
		200 以上	3.5	3

(续)

熔断器型号	熔体材料	熔体电流 /A	K	
			电动机轻载起动	电动机重载起动
RM1	锌	10~350	2.5	2
RL1	铜、银	60及以下	2.5	2
		80~100	3	2.5
RC1A	铅、铜	10~200	3	2.5

表 1-9 按起动时间确定 K 值表

起动时间/s	K	起动时间/s	K
3 以下	4~2.8	8 以上	2~1.7
3~8	2.8~2	起动频繁	2~1.7

选择熔断器熔体电流时,应注意不能选得太小,如果选择过小,易造成某一相熔断而发生电动机单相运转。

2) 多台笼型异步电动机共用一组熔断器时,熔体额定电流 I_{IN} (A)

$$I_{IN} \geq K_1 [I_{sm} + I_{N(n-1)}] \quad (1-4)$$

式中 I_{sm} ——被保护电路中最大一台电动机(或同时起动的电动机组)的起动电流(A);

$I_{N(n-1)}$ ——被保护电路中,除最大一台电动机(或同时起动的电动机组)以外的其他电动机额定电流之和(A);

K_1 ——考虑负载情况的系数,一般情况取 $K_1=0.4$ 。

3) 控制电路的短路保护。在交流控制电路中,熔断器接在控制变压器的二次,熔体的额定电流 I_{IN} (A) 按下式选取

$$I_{IN} \geq \frac{S_N + 0.1S_S}{U_S} \quad (1-5)$$

式中 S_N ——控制变压器的额定容量(VA);

S_S ——电路中最大电路的吸引线圈起动容量,或几个电器的吸引线圈同时起动容量之和(VA);

U_S ——控制变压器二次电压(V)。

不用控制变压器时,控制电路的熔体额定电流 I_{IN} (A) 按下式选

取

$$I_{IN} \geq 0.4 [I_S + I_{N(n-1)}] \quad (1-6)$$

式中 I_S ——电路中最大电路(或几个电器同时起动)的吸引线圈起动电流 (A);

$I_{N(n-1)}$ ——电路中最大电器(或同时起动的几个电器)以外的其他电器吸引线圈的额定电流之和 (A)。

负载比较平稳的控制电路,如照明电路等,熔体额定电流 I_{IN} (A) 可按下式选取

$$I_{IN} > I_{IN} \quad (1-7)$$

式中 I_{IN} ——负载额定电流 (A)。

2. 断路器

断路器是一种既有开关作用,又能进行自动保护的电器。断路器的种类和结构型式很多,在外型上可分万能式 (DW 系列,原称框架式) 和塑料外壳式 (DZ 系列,原称装置式) 两类。根据脱扣器的种类,有电磁脱扣器、热脱扣器(这两种也统称过电流脱扣器)、欠电压(失压)脱扣器、分励脱扣器、半导体脱扣器(或集成电路脱扣器)以及漏电脱扣器。一般说来,保护电动机用的断路器多为塑料外壳式,常用的有 DZ5、DZ10、DZ20 系列。

使用断路器作电动机的短路保护有以下优点:

- 1) 与使用刀开关和熔断器相比,位置紧凑,安装方便,操作安全。
- 2) 普通熔断器在熔断后,需要更换新的熔体或熔断管,断路器采用脱扣器进行保护,可重复使用。

3) 在短路保护时,断路器是将电源的三相同时切断,因而可避免电动机单相运行。

4) 整定值受周围温度影响较小。

断路器的主要技术参数,可按以下条件选择:

1) 断路器额定电压和额定电流,应当不小于电路的正常工作电压和电路的实际工作电流。

2) 热脱扣器的整定电流,应当与所控制的电动机的额定电流或负载额定电流一致。

3) 电磁脱扣器的瞬时动作整定电流应当大于负载电路正常工作