



哈尔滨工业大学

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY



自动控制实践I-16

-小功率同步电动机与电气常识



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



例 题

例题：额定电压均是380V的三相异步电机，甲电机额定功率0.75kW，额定转速715转/分，额定功率下运行时，功率因数0.85，效率0.82；乙电机额定功率3.7kW，额定转速725转/分，750W下运行时，功率因数0.72，效率0.68。

问：1) 两台电机在额定转速时的转差率是多少？

2) 两台电机都在750W输出运行，各自线电流是多少？

3) 根据本题的数据，如何理解电机拖动中，既不要“小马拉大车”，也不要“大马拉小车”这句话？



目 录

1. 同步电机概述

2. 小功率同步电动机

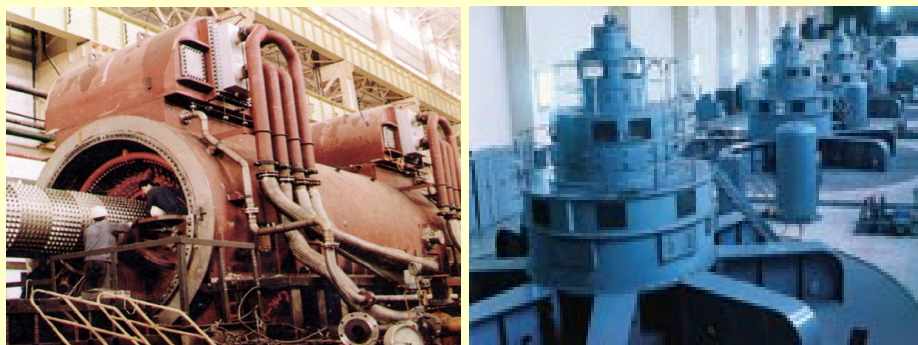
3. 电气常识

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 同步电机概述

同步电机是交流旋转电机的一种,因其转速恒等于磁场同步转速而得名。同步电机主要用作发电机,也可用作电动机和调相机。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 同步电机概述

同步电动机历来是以转速与电源频率保持严格同步著称。电源频率保持恒定，同步电动机转速就不变。

优点：

- (1) 转速与电压频率严格同步；
- (2) 功率因数可达到1.0，可以获得超前相角；

存在的问题：

- (1) 起动困难；
- (2) 重载时有振荡，甚至存在失步危险；



1. 同步电机概述

为解决起动问题，必须采取其它方法，常用方法有：

- ① 辅助电动机起动法；
- ② 异步起动法；
- ③ 变频起动法。

采用电力电子装置实现电压-频率协调控制，改变了同步电动机历来只能恒速运行不能调速的面貌。起动困难、重载时振荡或失步等问题也已不再是同步电动机广泛应用的障碍。



目 录

1. 同步电机概述

2. 小功率同步电动机

- 永磁同步电动机
- 磁阻同步电动机
- 磁滞电动机
- 电磁减速同步电动机

3. 电气常识

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

目前，功率从零点几瓦到数百瓦的各种同步电动机，在需要恒速运转的自动控制装置中得到了广泛的应用。例如它们用于自动和遥控装置，无线电通讯设备，同步联络系统，磁带录音和钟表工业等。



永磁式同步电动机



磁滞式同步电动机

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

在传真机、计时或记录装置中，或者在纺织等多机同步的应用领域，往往需要一种能在电源电压有所波动或负载转矩有所变化时仍可保持转速恒定不变的、紧凑简单的电动机。

转速与供电频率呈恒定关系的小功率同步电动机，根据转子结构的不同，主要分为永磁式、反应式、磁滞式、电磁减速式。是上述应用需求的很好选择。



2. 小功率同步电动机

小功率同步电动机的定子及绕组：

小功率同步电动机按定子绕组所接电源种类的不同可分为三相和单相同步电动机两大类。三相微型同步电动机的定子结构与普通三相交流电动机相同，工作时由三相对称电源供电。单相微型同步电动机按定子结构的不同可分为电容移相式和罩极式两种，工作时都由单相电源供电。



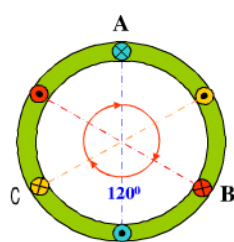
2. 小功率同步电动机

1. 定子的结构类型

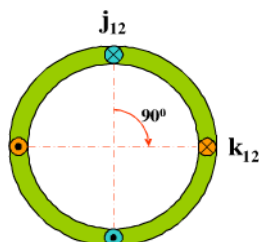
- ① 三相交流绕组；
- ② 两相交流绕组；
- ③ 单相罩极绕组；

作用：产生旋转磁场；

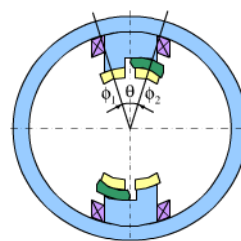
原理：各相绕组的磁场在空间和时间相位上的相位差，来合成旋转磁场；



三相定子绕组



两相定子绕组



单相罩极绕组

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

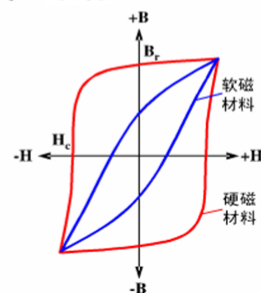
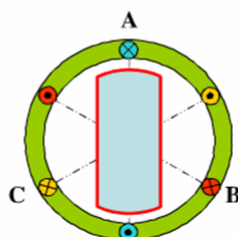
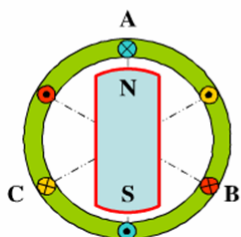
2. 转子的结构类型

作用：产生电磁力矩，使电机转动。

转速： $n=60f/p$ r/min

小功率同步电机：

- ① 永磁式—永磁；② 反应式—软磁；③ 磁滞式—半硬磁；

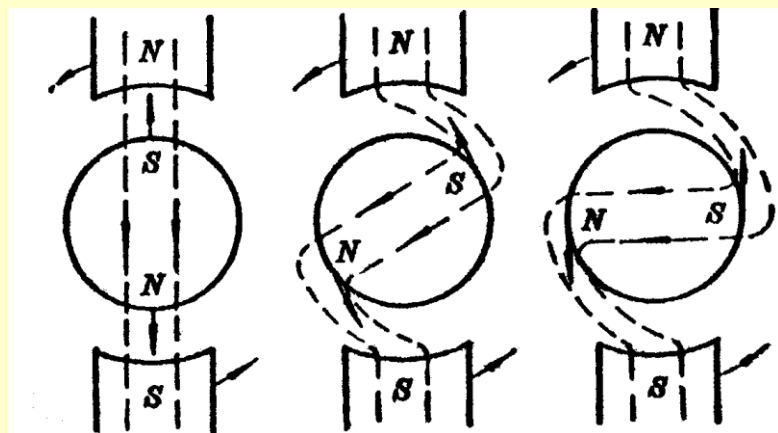


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

一、小功率永磁式同步电动机：



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

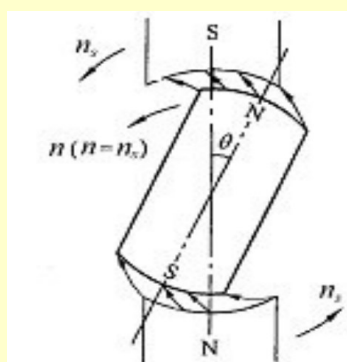


图 4-1 永磁式同步电动机的工作原理

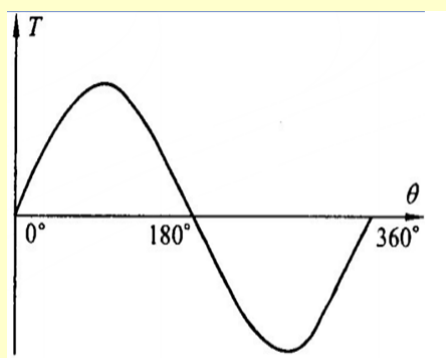


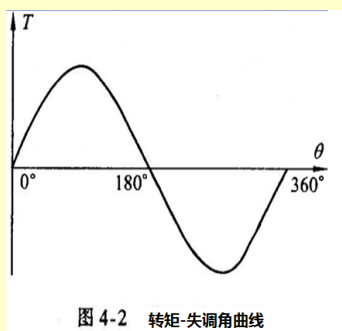
图 4-2 转矩-失调角曲线

$$\text{电磁转矩 } T = K F_s F_r \sin \theta$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



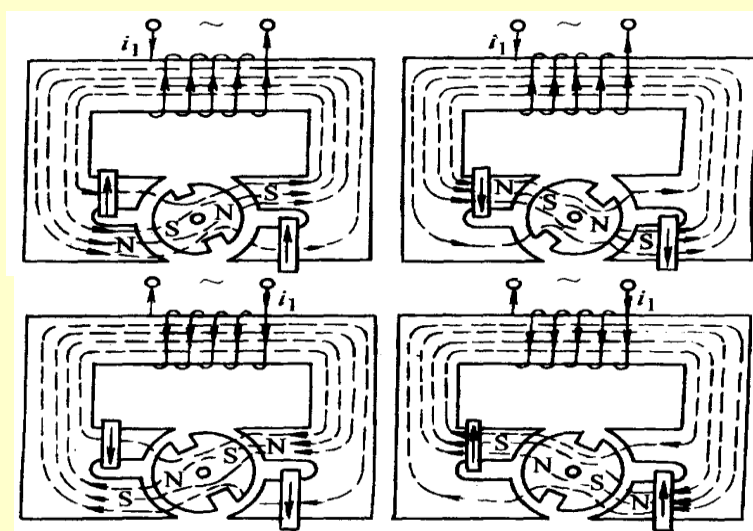
2. 小功率同步电动机



思考：某一永磁式同步电机，同步转速1500r/min。最大输出电磁转矩为1Nm,问当负载转矩为0.5Nm时，电机的转子转速？转子失调角？



2. 小功率同步电动机



2. 小功率同步电动机

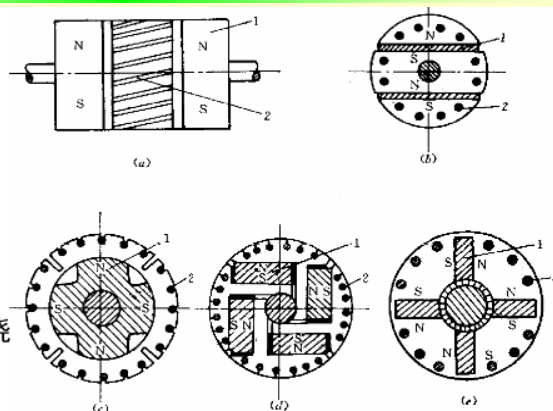
起动问题

1) 起动困难的原因

- ①转子的惯性;
- ②起动时的转差率;

2) 解决办法

- ①在转子上装起动鼠笼绕组, 异步起动;
- ②降频起动;



1—永久磁钢; 2—鼠笼式启动绕组
图 9-6 永磁式同步电动机转子结构

主要特点: 输出力矩大, 体积小, 耗电少, 结构简单, 可靠。



2. 小功率同步电动机

一、小功率永磁式同步电动机:

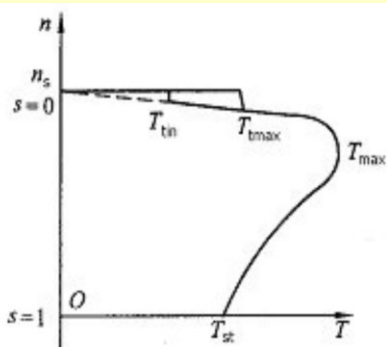


图 4-5 带起动绕组的同步电动机机械特性曲线



2. 小功率同步电动机

一、小功率永磁式同步电动机：

思考：

带有异步启动鼠笼的永磁同步电机，启动过程中，鼠笼绕组产生电磁力矩的同时，永磁体是否也产生转矩？到达同步转速后，鼠笼还产生力矩吗？

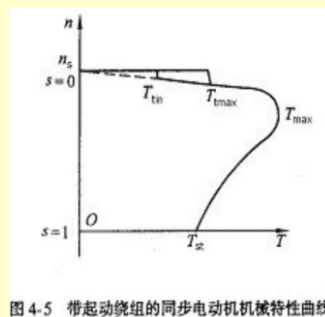


图 4-5 带起动绕组的同步电动机机械特性曲线



2. 小功率同步电动机

一、小功率永磁式同步电动机：

- * 转子可多对磁极，使电动机的转速较低，在自动化仪表中多有应用；
- * 功率因数：80%-95%，效率70%-90%，高于异步电机；
- 适合于kW级 - 纺织用多机的同步运行，也适合于10-100kW级长时间恒速传动应用；
- 不可长期运行于异步状态；
- 缺点：结构相对复杂，成本高、启动电流大(8-20倍额定电流)



2. 小功率同步电动机

一、小功率永磁式同步电动机：

SMR5040-1可逆永磁减速同步电机

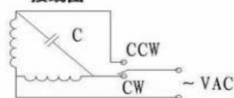
产品特点 产品由永磁同步电动机和减速器一体构成；电机为微型爪极式结构紧凑、双线圈绕制配以高性能磁体，效率高；减速器为小模数平面齿轮传动，独特的转轴布置设计，使用寿命长；整机转速稳定、噪音低，电气性能良，堵转不毁电机，双向转向控制方便

产品适用 电动阀门执行机构、医疗器械、精密机械传动、机器人、对时间要求的自动化传动机构及家电产品等

产品选用事项 客户应根据实际使用要求（电源、输出负载、工作制式等）进行选用，同时注明引出线长度等



接线图

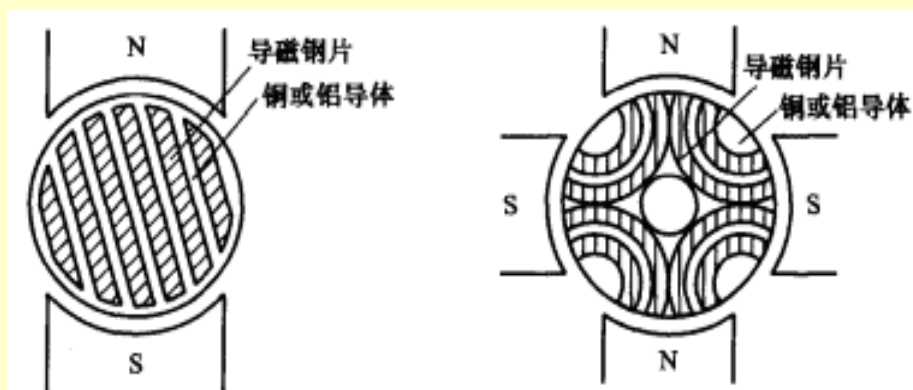


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

二、磁阻式/反应式微型同步电动机

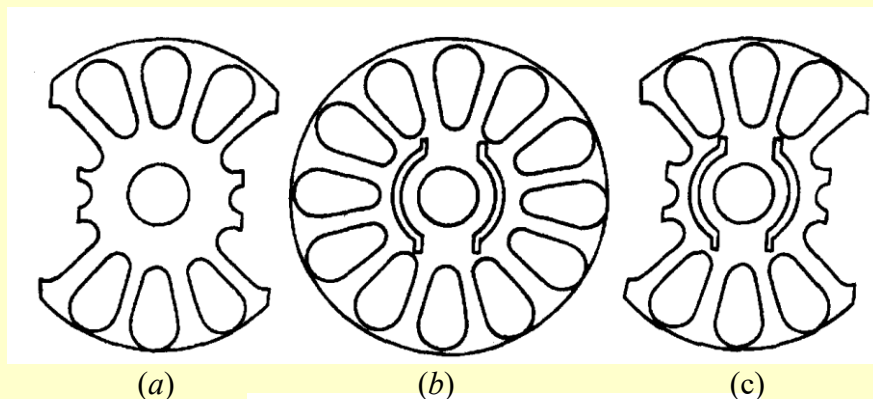


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

二、磁阻式/反应式微型同步电动机



冲片式磁阻式同步电动机的转子

(a) 外反应式; (b) 内反应式; (c) 内外反应式

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

起动问题

1) 起动困难的原因

- ① 转子的惯性;
- ② 起动时的转差率;

2) 解决办法

- ① 在转子上装起动鼠笼绕组, 异步起动;
- ② 降频起动;

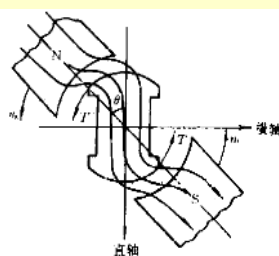
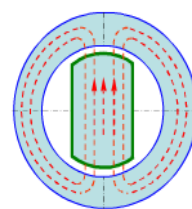
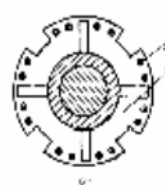
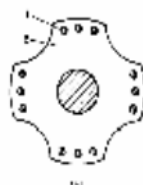
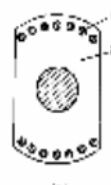


图 9-7 反应式同步电动机的工作原理



凸极转子

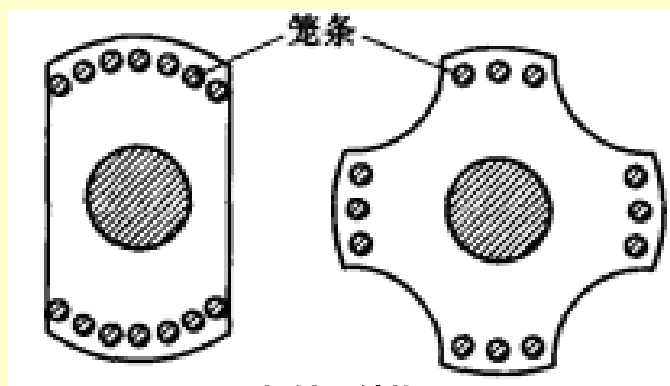


哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

二、磁阻式/反应式微型同步电动机



凸极转子结构



2. 小功率同步电动机

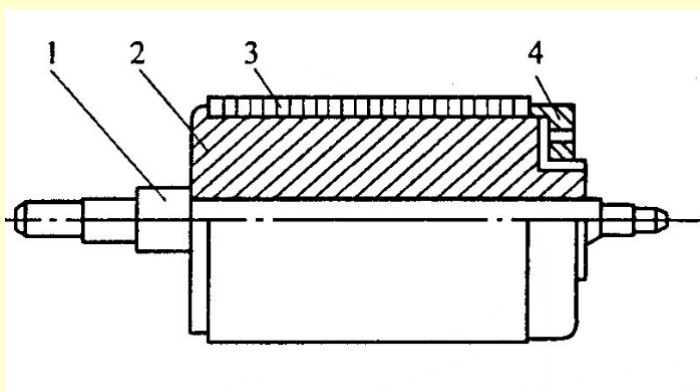
二、磁阻式/反应式微型同步电动机

- * 反应式同步电机一般功率因数50-60%，效率60-70%。
- * 反应式微型同步电动机结构简单，成本低廉，可以用于记录仪表、摄像机、录音机及复印机等设备中。
- 不可长时间处于失步下的异步工作状态；
- 开环变频调速易于永磁式；



2. 小功率同步电动机

三、磁滞式同步电动机



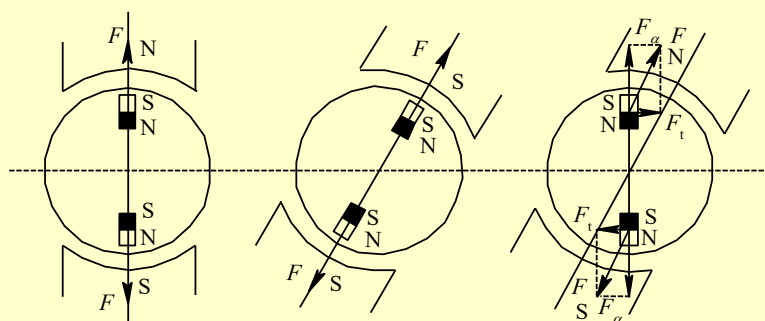
1.轴 2.衬套 3.磁滞材料套筒 4.螺帽

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

磁滞同步电动机凭借磁滞转矩而能自行起动，在起动过程中，磁滞角 θ 的大小仅仅取决于硬磁材料的磁化特性，而与旋转磁通势和转子转速无关，转子的硬磁材料在旋转磁化下，磁滞角 θ 是恒定的。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

基本原理

定子磁通 $\phi \rightarrow$ 转子磁化(N,S)

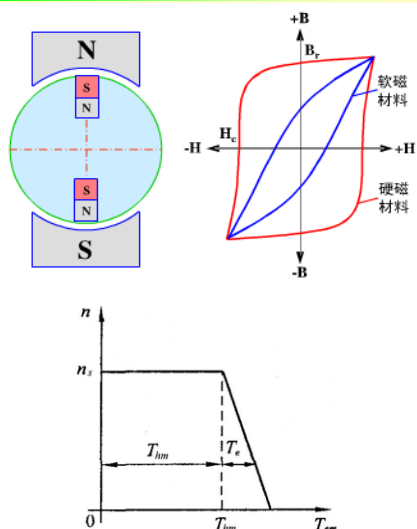
$\phi \times (N,S) \rightarrow T_C \rightarrow n$

1) 同步状态

在阻力小于最大同步力矩时，转子受磁滞力矩 T_C 的作用运转。

2) 异步状态

转子受磁滞力矩 T_C 和涡流力矩 T_B 的作用。 $T = T_C + T_B$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

主要特点

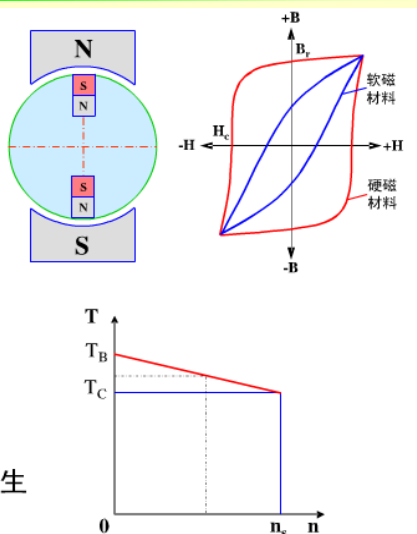
- ① 具有自起动能力；
- ② 结构简单、工作可靠、性能稳定
- ③ 转子为圆形结构，适合高速运转的控制设备。

主要缺点：

异步（低速）运行时，效率较低。

主要原因：

- a. 有涡流损耗；
- b. 转子被交变磁化，硬磁材料会产生很大的磁滞损耗；



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

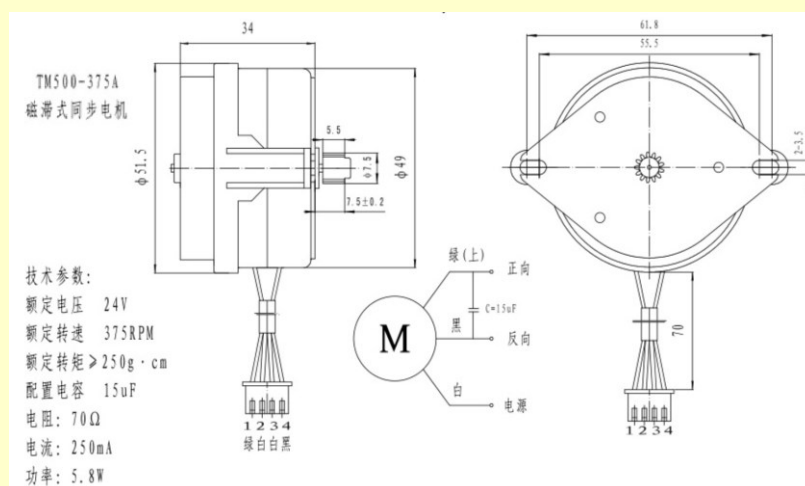
- 磁滞电动机突出优点: 具有天然的起动转矩, 不必另装起动绕组, 结构更为简单, 起动电流与额定电流较其它同步电动机小;
- 带惯量较大的负载加速到同步转速时, 虽然起动时间可能较长, 也不至烧坏电机绕组。
- 转子上因磁化而形成的磁极对数总是与定子旋转磁场的磁极对数相同, 所以定子上可装两个或多个不同极对数的绕组, 做成多速磁滞电动机。
- 缺点: 功率因数低 (30-50%) ; 阻尼弱, 易震荡: 成本高

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

三、磁滞式同步电动机



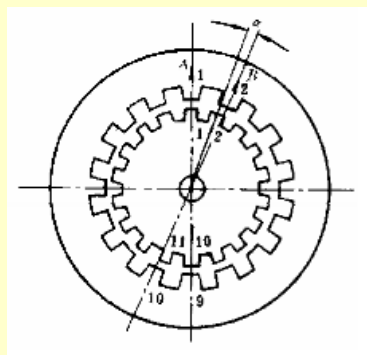
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

四、电磁减速同步电动机

结构特点：电动机的定子和转子由硅钢片叠装而成，定子槽中装有绕组以产生旋转磁场，转子槽中不嵌入绕组，定、转子上均有开口槽，且转子齿数大于定子齿数。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



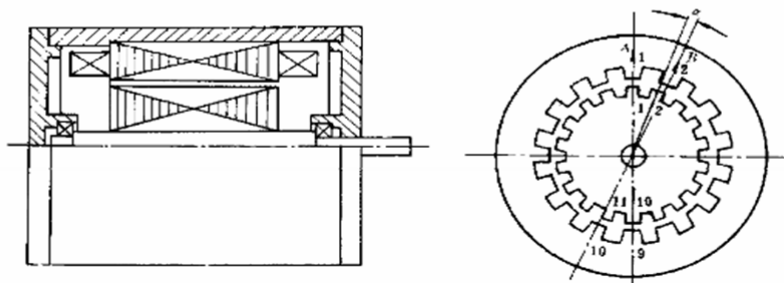
2. 小功率同步电动机

反应式电磁减速同步电动机

1) 结构特点

定、转子铁心都做成开口槽；

定子槽中放有两相或三相绕组，转子没有绕组；



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

反应式电磁减速同步电动机

2) 工作原理

假设条件

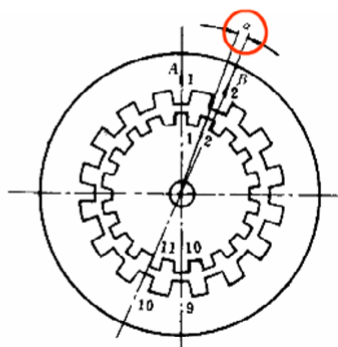
电机极对数: $p=1$;

定子齿数 $Z_S=16$, 转子齿数 $Z_R=18$;

定子的齿距角: $\theta_S=2\pi/Z_S$;

转子的齿距角: $\theta_R=2\pi/Z_R$;

两者的齿角差: $\alpha=\theta_S-\theta_R$;



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

反应式电磁减速同步电动机

2) 工作原理

①当磁极 ϕ 位于定子(1,9)齿轴线A:

在磁通 ϕ 反应力矩作用下:

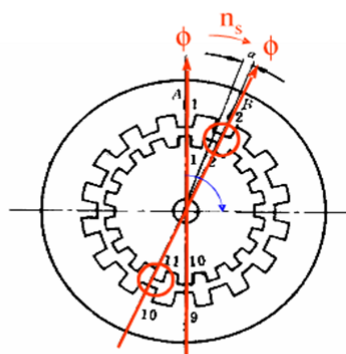
转子(1,10)齿与定子(1,9)齿对齐;

②当磁场 ϕ 转过齿距 θ_S 到B位置时:

在磁通 ϕ 反应力矩作用下:

转子(2,11)齿→定子(2,10)齿相对齐;

转子转过一个角度 $\alpha=\theta_S-\theta_R$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

反应式电磁减速同步电动机

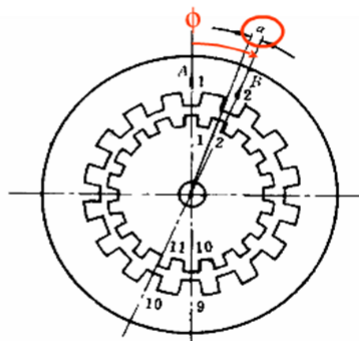
2) 工作原理

磁场 ϕ 转过一个定子齿距角时:

$$\theta_s = \frac{2\pi}{Z_s}$$

转子转过一个齿角差:

$$\alpha = \left(\frac{2\pi}{Z_s} - \frac{2\pi}{Z_R} \right) = 2\pi \left(\frac{1}{Z_s} - \frac{1}{Z_R} \right)$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

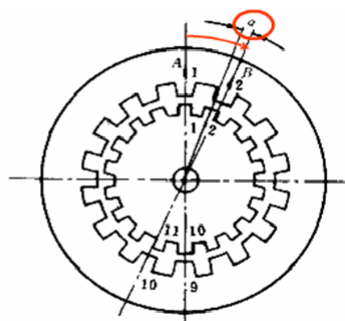
反应式电磁减速同步电动机

3) 电机的电磁减速比

$$k_R = \frac{n_s}{n} = \frac{\theta_s}{\alpha} = \frac{\frac{1}{Z_s} \cdot 2\pi}{\left(\frac{1}{Z_s} - \frac{1}{Z_R} \right) \cdot 2\pi} = \frac{Z_R}{Z_R - Z_s}$$

4) 电机的转子转速

$$n = \frac{n_s}{k_R} = \frac{60f(Z_R - Z_s)}{pZ_R}$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

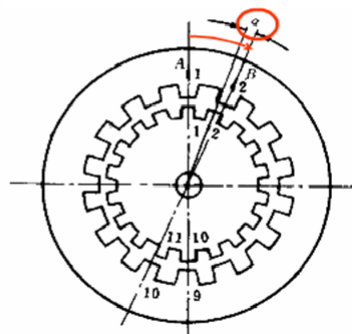
反应式电磁减速同步电动机

电磁减速比 $k_R = \frac{n_s}{n} = \frac{Z_R}{Z_R - Z_S}$

转子转速 $n = \frac{n_s}{k_R} = \frac{60f(Z_R - Z_S)}{pZ_R}$

5) 定、转子齿数的设计条件

$$Z_R - Z_S = 2p$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

反应式电磁减速同步电动机

$$Z_R - Z_S = 2p$$

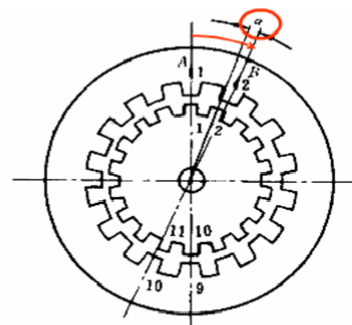
当 $p=1$ ，两极电机

转子转速 $n = \frac{n_s}{k_R} = \frac{120f}{Z_R}$

结论：

为了实现减速，必须使 $Z_R - Z_S = 2p$ ；

电源频率 f 一定时，电机转速随着转子齿数 Z_R 增多而减低。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 小功率同步电动机

电磁减速同步电动机无需启动绕组，结构简单，制造方便，成本低，转速较低，是一种常用的低速电动机。

永磁式电磁减速同步电动机是其发展方向。



2 电气控制常识

在大多数用电行业及人们的日常生活中，一般都使用低压设备，采用低压供电。低压一般是指在交流50Hz、额定电压1200V，直流额定电压1500V及以下的供电电压。

本节结合自动控制系统中，经常面对的线路、线缆、低压电器的应用，以及常用的设备运行和控制的线路进行简述，使学生掌握相关线缆、低压控制电器的基本应用概念。



目 录

1. 同步电机概述

2. 小功率同步电动机

3. 电气控制常识

-线路、线缆

-低压电器

-电控线路举例



2.1 线路、线缆

我国低压供电的电压等级：

类别	电网额定电压(V)	发电机/变压器输出额定电压(V)
低压供电	220/127	230
	380/220	400
	660/380	690



2.1 线路、线缆

不同电压允许输送的功率与距离规定

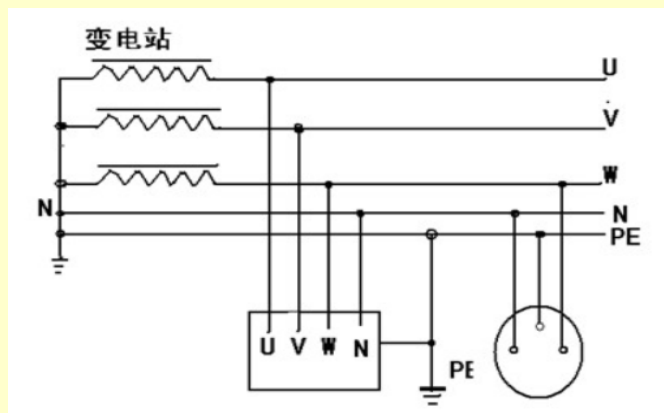
电网额定电压(V)	允许输送功率 (kW)	允许输送距离 (km)
220	<50	<0.15
380	<100	<0.60
3000	100-1000	1-3

不同的电压等级，对于接线端子间的距离也有相应规定。



2.1 线路、线缆

配电制式：试验室等教学、科研场所多采用TN-S配电制式，俗称三相五线制。



2.1 线路、线缆

漏电保护:

- 漏电保护原理: 根据各相电流之和等于零, 检测有无不平衡电流, 相应触发脱扣装置。
- 常见的漏电保护动作值: 6、10、20、30、50、75、100、200、300....(mA)
- 100A以下的漏电保护器是主要是电磁式的, 100-250A电磁式稍多于电子式的, 250A以上几乎都是电子式的。
- 漏电保护设置的原则: 1 分级 / 2 根据不同应用环境



2.1 线路、线缆

- 常用的电线、电缆的种类
按用途可分为裸导线、绝缘电线、耐热电线、屏蔽电线、电力电缆、控制电缆、通信电缆等。
- 在选择电缆的截面时, 需要考虑:
 - (1) 电缆的额定电压要大于供电系统的额定电压;
 - (2) 电缆持续容许电流应等于或大于供电最大持续电流;
 - (3) 电缆的压降;
 - (4) 对线路短路的保护。



2.1 线路、线缆

- 电缆常见型号含义：

R - 连接用软电缆（电线），软结构。

B - 平型（扁形）。

S - 双绞型。

A - 镀锡或镀银。

F - 耐高温

P - 编织屏蔽 P2 - 铜带屏蔽 P22 - 钢带铠装

V—聚氯乙烯绝缘或护套



2.1 线路、线缆

- 电缆常见的损坏/故障原因：

1) 机械损伤

2) 过负荷或者散热不利造成膨胀、龟裂

3) 受潮、浸水导致绝缘击穿，短路甚至可能导致爆炸。



2.2 低压电器

供电的输送、分配和保护，以及设备的运行和控制经常靠低压电器来实现的，低压电器的应用十分广泛，直接影响供电系统和控制系统的质量。

本节简单介绍控制系统领域中的常用低压电器。

- 断路器
- 电磁式接触器
- 电磁式继电器与固态继电器
- 熔断器
- 主令电器

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



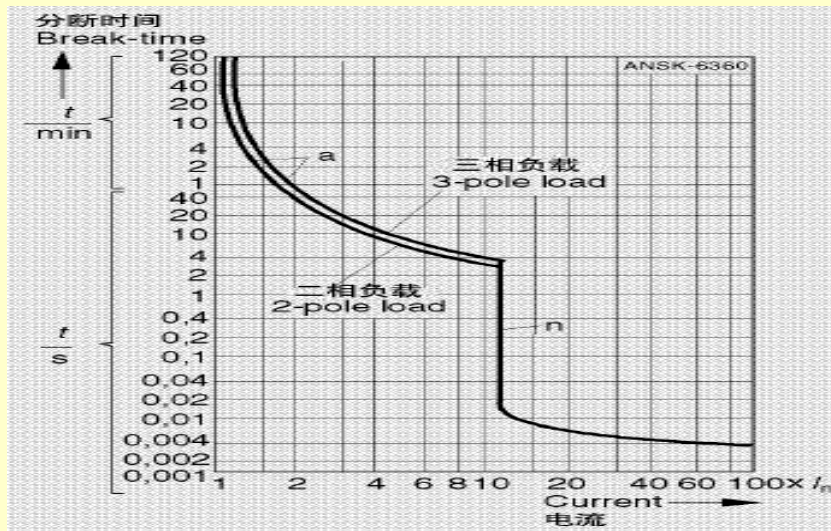
2.2 低压电器—断路器/空气开关



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 低压电器—断路器/空气开关



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 低压电器—电磁式电器

电磁式电器结构及工作原理

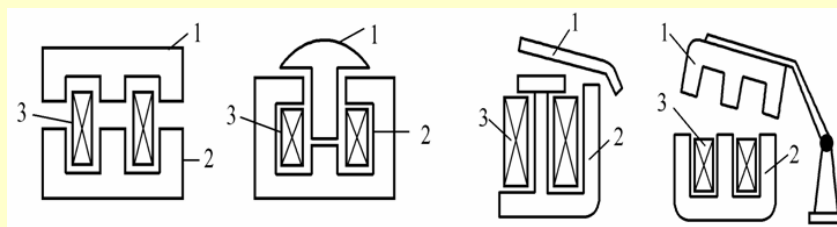
控制系统中的接触器和继电器就是两种最常用的电磁式电器。虽然电磁式电器的类型很多，但它的工作原理和构造基本相同。其结构大都是由两个主要部分组成，即感应部分(电磁机构)和执行部分(触头系统)。

电磁机构由线圈、铁心和衔铁组成，主要作用是通过电磁感应原理将电能转换成机械能，带动触头动作，完成接通或分断电路的功能。根据衔铁相对铁心的运动方式，电磁机构可分为直动式和拍合式两种。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 低压电器—电磁式电器

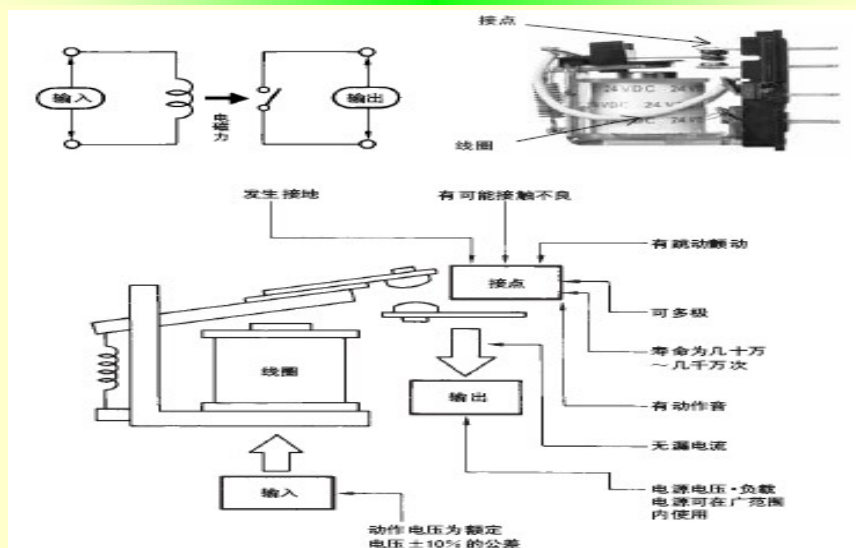


直动式电磁机构 拍合式电磁机构
1 - 衔铁; 2 - 铁心; 3 - 吸引线圈

电磁式电器分为直流和交流两类，都是利用电磁铁的原理而制成。通常，直流电磁铁的铁心是用整块钢材或工程纯铁制成，而交流电磁铁的铁心则是用硅钢片叠铆而成。



2.2 低压电器—电磁式电器



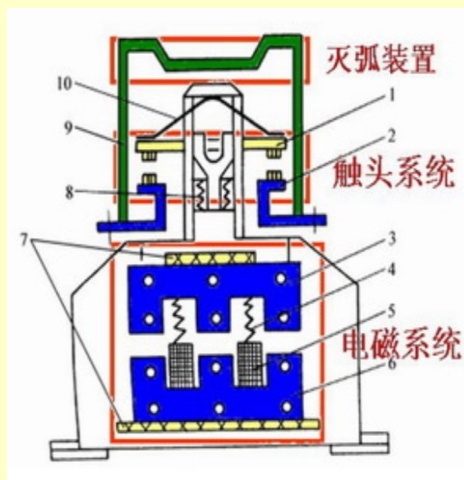
2.2 低压电器--接触器

接触器是一种用来自动接通或断开大电流电路的电器。它可以频繁地接通或分断交直流负载电路，可实现中远距离控制。

接触器分为交流接触器和直流接触器两大类。其主要控制对象是电动机，也可用于电热设备、电焊机、电容器组等其他设备。接触器具有控制容量大、过载能力强、寿命长、设备简单经济等特点，是自动控制电路中使用最广泛的电器元件之一。



2.2 低压电器—接触器



2.2 低压电器—接触器

接触器使用的注意事项：

- 1) 必须按使用的负荷情况(电压/电流/工作制式)选用；
- 2) 控制回路必须满足接触器参数要求；
- 3) 要注意接触器的安装要求，如无说明，一般要求垂直安装；
- 4) 控制回路经常要配装电压震荡抑止元件。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



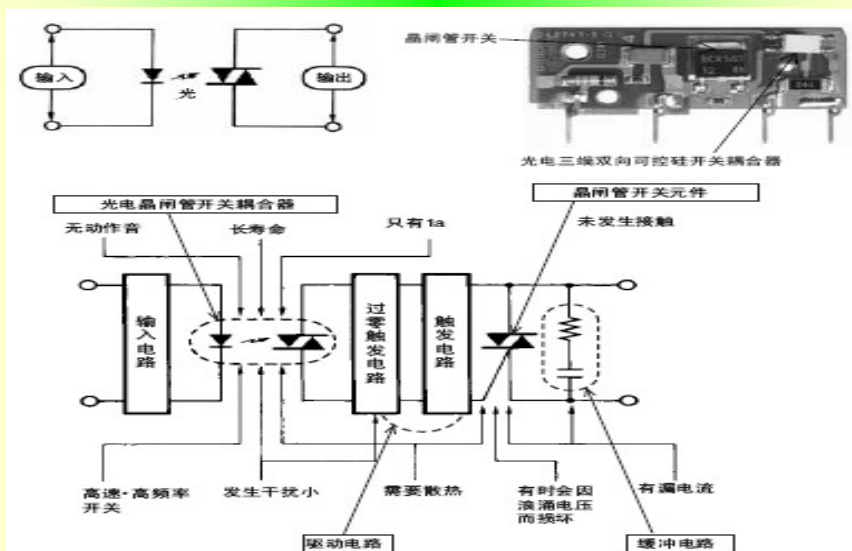
2.2 低压电器—电磁继电器



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 低压电器—固态继电器



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 低压电器—熔断器

熔断器是一种最简单有效而价廉的保护电器，是利用金属的溶化作用来切断电路的，通常串接在被保护的电路中，作为电路及用电设备的短路或严重过载的保护元件。

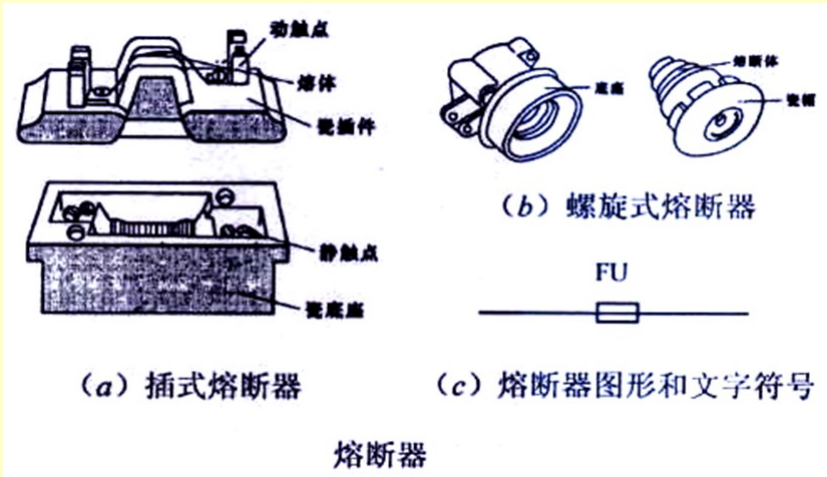
熔断器是由熔体和熔座组成，熔体（熔片或熔丝）用电阻率较高的易熔合金铅锡合金制成，也可用截面积甚小的良导体铜、银制成。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 低压电器—熔断器

熔断器的作用可用保护特性或安秒特性来表述



2.2 低压电器—熔断器

安秒特性是指熔化电流与熔化时间的关系

表 1-3 熔断器的熔化电流与熔化时间

熔断电流	$1.25I_N$	$1.6I_N$	$2I_N$	$2.5I_N$	$3I_N$	$4I_N$
熔断时间	∞	1h	40s	8s	4.5s	2.5s

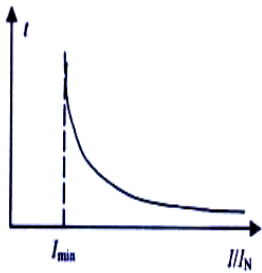


图 1-45 熔断器安秒特性



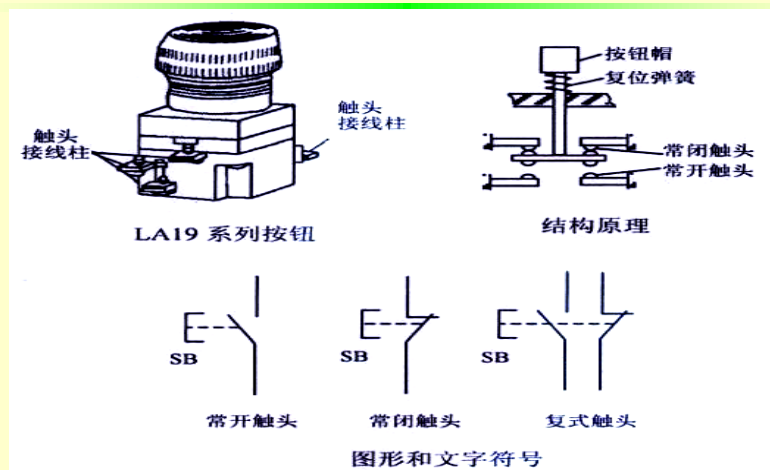
2.2 低压电器—主令开关



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.2 低压电器—主令开关

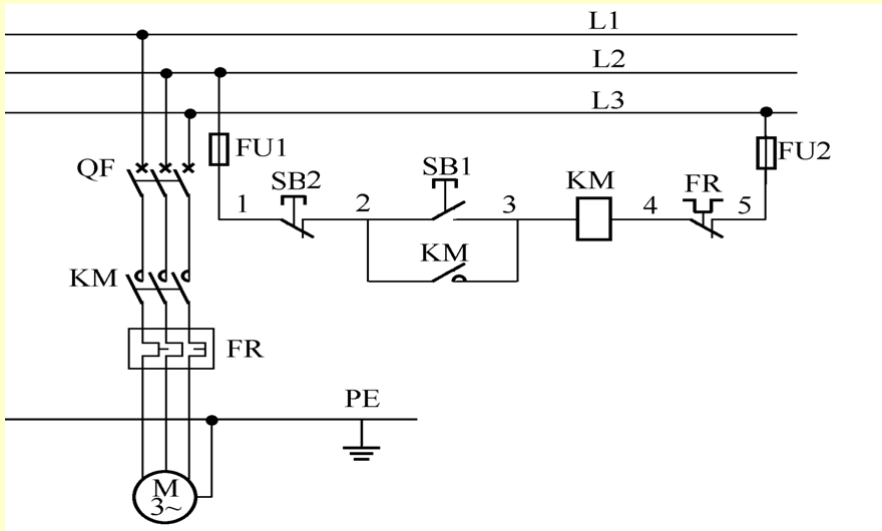


在外力作用下，首先断开常闭触头，然后再接通常开触头。复位时，常开触头先断开，常闭触头后闭合。

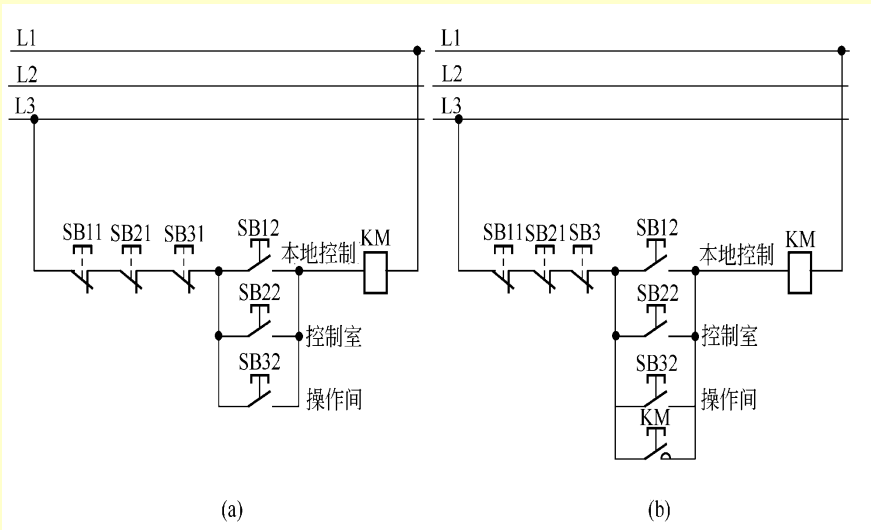
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



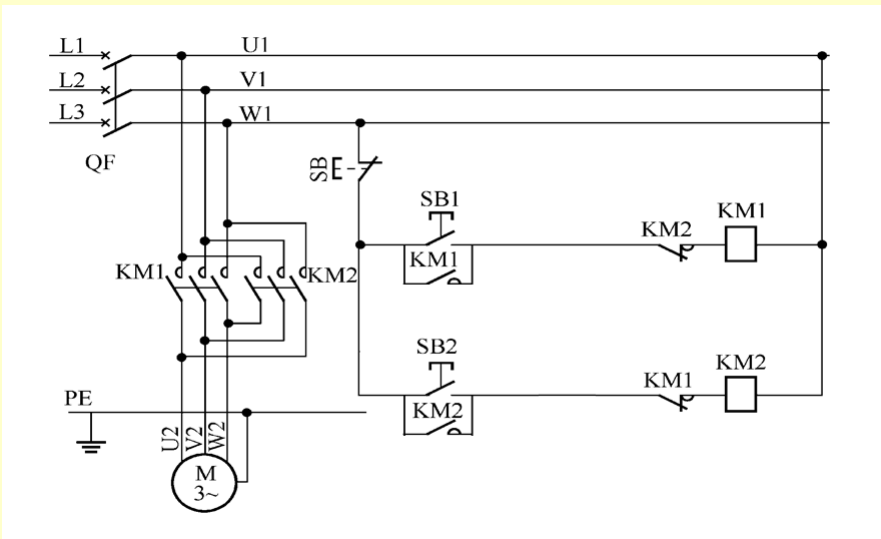
2.3 电控线路举例



2.3 电控线路举例



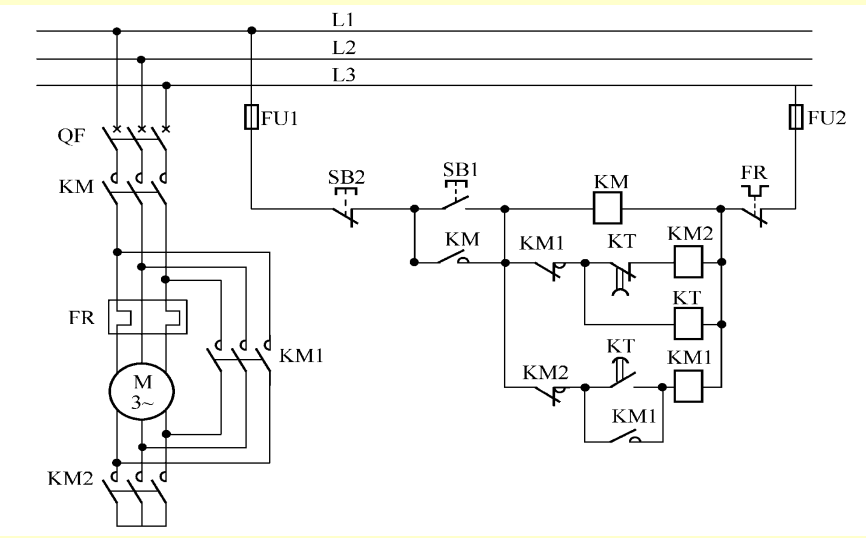
2.3 电控线路举例



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2.3 电控线路举例



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

