

目 录

学习单元一 新能源汽车的认知	/ 2
学习任务一 新能源的认知	/ 2
学习任务二 新能源汽车的认知	/ 4
学习单元二 动力电池的认知与使用	/ 7
学习任务一 动力电池的认知	/ 7
学习任务二 铅酸蓄电池的使用与检修	/ 10
学习任务三 锂离子电池的使用	/ 14
学习任务四 镍氢电池的使用	/ 17
学习任务五 燃料电池的使用	/ 19
学习任务六 超级电容器的使用	/ 22
学习单元三 驱动电机的认知与检修	/ 25
学习任务一 直流电机的原理认知与检修	/ 25
学习任务二 异步电动机的原理认知与检修	/ 30
学习单元四 纯电动汽车的认知与使用	/ 35
学习任务一 纯电动汽车的基础认知	/ 35
学习任务二 纯电动汽车的原理认知	/ 38
学习任务三 纯电动汽车驱动系统布置形式与关键技术的认知	/ 41
学习单元五 混合动力汽车的认知与使用	/ 46
学习任务一 混合动力汽车的基础认知	/ 46
学习任务二 混合动力汽车的结构原理认知	/ 48
学习任务三 混合动力汽车关键技术分析	/ 50

学习单元六 其他新能源汽车的认知	/ 53
学习任务一 气体燃料汽车的认知	/ 53
学习任务二 燃料电池电动汽车的认知	/ 55
学习任务三 生物燃料汽车的认知	/ 58

学习单元一 新能源汽车的认知	/ 62
学习任务一 新能源的认知	/ 62
学习任务二 新能源汽车的认知	/ 65

学习单元二 动力电池的认知与使用	/ 71
学习任务一 动力电池的认知	/ 71
学习任务二 铅酸蓄电池的使用与检修	/ 77
学习任务三 锂离子电池的使用	/ 85
学习任务四 镍氢电池的使用	/ 90
学习任务五 燃料电池的使用	/ 93
学习任务六 超级电容器的使用	/ 105
学习拓展一 磷酸铁锂电池的使用	/ 111
学习拓展二 飞轮电池的使用	/ 114

学习单元三 驱动电机的认知与检修	/ 117
学习任务一 直流电机的原理认知与检修	/ 117
学习任务二 异步电动机的原理认知与检修	/ 126
学习拓展一 永磁同步电动机的认知	/ 138
学习拓展二 开关磁阻电动机的认知	/ 143

学习单元四 纯电动汽车的认知与使用	/ 146
学习任务一 纯电动汽车的基础认知	/ 146
学习任务二 纯电动汽车的原理认知	/ 153
学习任务三 纯电动汽车驱动系统布置形式与关键技术的认知	/ 163
学习拓展 纯电动汽车车型介绍	/ 171

学习单元五 混合动力汽车的认知与使用	/ 185
学习任务一 混合动力汽车的基础认知	/ 185
学习任务二 混合动力汽车的结构原理认知	/ 194
学习任务三 混合动力汽车关键技术分析	/ 205
学习拓展 混合动力汽车车型介绍	/ 217
学习单元六 其他新能源汽车的认知	/ 223
学习任务一 气体燃料汽车的认知	/ 223
学习任务二 燃料电池电动汽车的认知	/ 229
学习任务三 生物燃料汽车的认知	/ 241
部分参考答案	/ 246
参考文献	/ 249

学习工作页

驱动电机的认知与检修

通过本单元的学习，应能准确讲述直流电机的结构和工作原理，能熟练地对直流电机进行检修，能准确描述异步电动机的工作原理和机械特性，能正确地对异步电动机进行检修。

本单元的学习任务可分为

- ★ 学习任务一 直流电机的原理认知与检修
- ★ 学习任务二 异步电动机的原理认知与检修

学习任务一 直流电机的原理认知与检修

25

【任务描述】

一辆 PASSAT B5 轿车出现时而能发动时而无法发动的故障，经进一步排查，排除线路问题，请对该轿车的启动机进行检修。

【学习目标】

1. 能准确讲述直流电机的结构组成和工作原理。
2. 能正确讲述交流电机的工作原理。
3. 能准确讲述无刷直流电机的结构组成与工作原理。
4. 能对直流电机进行检修。

▲ 建议学时：6

【学习准备】

一、知识内容

1. 直流电机的结构组成。（查阅“学习参考”的学习单元三学习任务一）
2. 直流电机的工作原理。（查阅“学习参考”的学习单元三学习任务一）
3. 直流电机的检修。（查阅“学习参考”的学习单元三学习任务一）

二、学习场境

一体化教室。

三、学习设备

多媒体教学系统、直流电机。

[计划与实施]

第一步，课堂上通过多媒体课件以及视频，学习直流电机的基本知识。

第二步，收集教师讲授过程中的关键词（ ），整理出所需的知识点和技能点，填入表 1-3-1 中。

表 1-3-1 知识点和技能点

知识点	1.
	2.
	3.
	4.
	5.
技能点	1.
	2.
	3.
	4.

第三步，在教师的引导下，掌握相关知识，并完成下列知识工作页的填写。

1. 直流电机由哪几部分组成？

2. 直流电机的工作原理是什么？

3. 在图 1-3-1 中标识出电枢的部件名称。

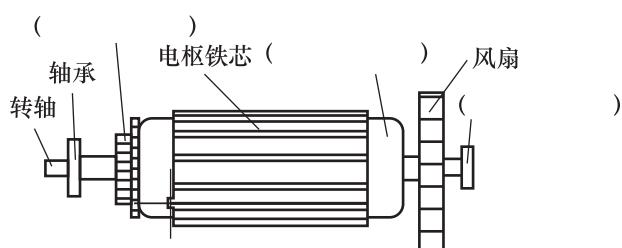


图 1-3-1 直流电机的电枢

4. 整理直流电机检修的工作步骤：

- (1) _____
- (2) _____
- (3) _____
- (4) _____
- (5) _____
- (6) _____
- (7) _____
- (8) _____
- (9) _____

第四步，在教师的引导下，学习相关技能，并完成下列技能工作页的填写。

1. 对直流电机进行解体，并填写表 1-3-2。

表 1-3-2 直流电机解体步骤及其要点

序号	解体步骤	解体要点
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

2. 对定子进行检查，并填写表 1-3-3。

表 1-3-3 定子检查

检查项目	技术要点	检查结果与处理措施
清扫吹灰	用 $2\sim3 \text{ kg/cm}^2$ 干燥的压缩空气将定子（转子）各部位灰尘吹净，然后将各部位油泥擦净	
检查定子外壳	①外壳油漆有无脱落； ②接地线有无断裂、松动现象； ③引线绝缘和瓷瓶是否完好； ④定子磁极与外壳连接螺丝是否紧固	

续表

检查项目	技术要点	检查结果与处理措施
检查磁极线圈	①线圈绝缘有无发胖、鼓泡、枯裂及过热变色等现象； ②磁极间连接绝缘及接头是否良好； ③用 1000 V 摆表测量磁极线圈绝缘电阻； ④测量线圈直流电阻与厂家数据或以前测得值比较其差别应不大于 2%	
检查磁极铁芯	①磁极铁芯是否清洁干净，无松动现象； ②磁极铁芯是否有锈斑、毛刺和过温现象	
定子（转子）喷漆	定子（转子）表面绝缘漆损坏脱落严重	

3. 对转子进行检查，并填写表 1-3-4。

表 1-3-4 转子检查

检查项目	检查结果
电枢铁芯	
电枢线圈	
电枢绑线	
风扇	

4. 对其他部位进行检查，并填写表 1-3-5。

表 1-3-5 其他部位检查

检查项目	检查结果
整流子	
刷架及刷握	
启动调整装置	

5. 进行电气试验，并填写表 1-3-6。

表 1-3-6 电气试验

检查项目	检查结果
耐压试验	

6. 进行组装，并填写表 1-3-7。

表 1-3-7 组装步骤及注意事项

组装步骤	注意事项
组装电机	
组装刷架，调整电刷	

7. 进行试运转及验收，并填写表 1-3-8。

表 1-3-8 试运转及验收

步骤	注意事项
试运转	
验收	

【评价与反馈】

一、选择题

1. 直流电机运行时静止不动的部分称为定子，定子的主要作用是产生（ ）。
A. 磁场
B. 电流
C. 电压
D. 温度
2. 直流电机的励磁方式是指对励磁绕组如何供电、产生励磁磁通势而建立主磁场的问题。根据励磁方式的不同，直流电机可分为哪几种类型？（ ）
A. 他励
B. 并励
C. 串励
D. 复励

29

二、技能考核

按照技术要求对一辆轿车的直流电机进行检查，并填写表 1-3-9。

表 1-3-9 学生实践记录表

班级		车型及年款	
姓名		车辆识别码	
学号		里程数	
实践项目		实践设备	电机型号
检测流程			

结果分析			
防范措施			
自我评价	良好 <input type="checkbox"/>	合格 <input type="checkbox"/>	不合格 <input type="checkbox"/>
教师评价	良好 <input type="checkbox"/>	合格 <input type="checkbox"/>	不合格 <input type="checkbox"/>

教师姓名：年 月 日

学习任务二 异步电动机的原理认知与检修

【任务描述】

查阅相关资料，掌握异步电动机的结构原理，并对其在通电后出现电动机不转，然后熔丝烧断的现象进行检修。

【学习目标】

1. 能准确讲述异步电动机的结构组成。
2. 能正确讲述异步电动机的工作原理。
3. 能准确讲述三相异步电动机的机械特性。
4. 能正确讲述三相异步电动机的调速原理。
5. 能对异步电动机进行检修。

▲ 建议学时：6

【学习准备】

一、知识内容

1. 异步电动机的结构组成。（查阅“学习参考”的学习单元三学习任务二）
2. 异步电动机的工作原理。（查阅“学习参考”的学习单元三学习任务二）
3. 异步电动机的机械特性。（查阅“学习参考”的学习单元三学习任务二）
4. 异步电动机的调速原理。（查阅“学习参考”的学习单元三学习任务二）

5. 异步电动机的检修。(查阅“学习参考”的学习单元三学习任务二)

二、学习场境

一体化教室。

三、学习设备

多媒体教学系统、异步电动机。

【计划与实施】

第一步，课堂上通过多媒体课件以及视频，学习异步电动机的基本知识。

第二步，收集教师讲授过程中的关键词（ ），整理出所需的知识点和技能点，填入表 1-3-10 中。

表 1-3-10 知识点和技能点

知识点	1.
	2.
	3.
	4.
	5.
技能点	1.
	2.
	3.
	4.

第三步，在教师的引导下，掌握相关知识，并完成下列知识工作页的填写。

1. 三相交流异步电动机由哪几部分组成？

2. 三相交流异步电动机的转动原理是什么？

3. 三相交流异步电动机的机械特性是什么？

第四步，在教师的引导下，学习相关技能，并完成下列技能工作页的填写。

1. 对异步电动机进行解体，并填写表 1-3-11。

表 1-3-11 异步电动机的解体步骤及其要点

序号	解体步骤	解体要点
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

2. 对定子进行检查，并填写表 1-3-12。

表 1-3-12 定子检查

检查项目	技术要点	检查结果与处理措施
清扫吹灰	用 2~3 kg/cm ² 干燥的压缩空气将定子（转子）各部位灰尘吹净，然后将各部位油泥擦净	
检查定子外壳	①外壳油漆有无脱落； ②接地线有无断裂、松动现象； ③引线绝缘和瓷瓶是否完好； ④定子磁极与外壳连接螺丝是否紧固	
检查磁极线圈	①线圈绝缘有无发胖、鼓泡、枯裂及过热变色等现象； ②磁极间连接绝缘及接头是否良好； ③用 1000 V 摆表测量磁极线圈绝缘电阻； ④测量线圈直流电阻与厂家数据或以前测得值比较其差别应不大于 2%	
检查磁极铁芯	①磁极铁芯是否清洁干净，无松动现象； ②磁极铁芯是否有锈斑、毛刺和过温现象	
定子（转子）喷漆	定子（转子）表面绝缘漆损坏脱落严重	

3. 对转子进行检查，并填写表 1-3-13。

表 1-3-13 转子检查

检查项目	检查结果
电枢铁芯	
电枢线圈	
电枢绑线	
检查风扇	

4. 进行电气试验，并填写表 1-3-14。

表 1-3-14 电气试验

检查项目	检查结果
耐压试验	

5. 进行组装，并填写表 1-3-15。

表 1-3-15 组装步骤及注意事项

33

组装步骤	注意事项
组装电机	
组装刷架，调整电刷	

6. 进行试运转及验收，并填写表 1-3-16。

表 1-3-16 试运转及验收

步骤	注意事项
试运转	
验收	

[评价与反馈]

一、选择题

1. 三相交流异步电动机运行时静止不动的部分称为定子，定子的主要作用是产生（ ）。

- A. 磁场
- B. 电流
- C. 电压
- D. 温度

2. 在三相交流异步电动机的选择上，如何进行转速选择？（ ）

技师 A 说：根据负载设备的最高机械转速和传动机构的变速比选择电动机的转速。

技师 B 说：根据负载设备的最低机械转速和传动机构的变速比选择电动机的转速。

请问谁说得对？（ ）

- A. 只有技师 A 说得对
- B. 只有技师 B 说得对
- C. 技师 A 和 B 说得都对
- D. 技师 A 和 B 说得都不对

二、技能考核

按照技术要求对一辆轿车的三相交流异步电动机进行检查，并填写表 1-3-17。

表 1-3-17 学生实践记录表

班级			车型及年款		
姓名			车辆识别码		
学号			里程数		
实践项目		实践设备		电机型号	
检测流程					
结果分析					
防范措施					
自我评价	良好 <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格 <input type="checkbox"/>				
教师评价	良好 <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格 <input type="checkbox"/> 教师姓名： 年 月 日				

学习参考

学习任务一 直流电机的原理认知与检修

直流电机是指能将直流电能转换成机械能（直流电动机）或将机械能转换成直流电能（直流发电机）的旋转电机。它是能实现直流电能和机械能互相转换的电机。当它作为电动机运行时是直流电动机，将电能转换为机械能；作为发电机运行时是直流发电机，将机械能转换为电能。直流电机的外形如图 2-3-1 所示。



图 2-3-1 直流电机的外形

一、直流电机的基本结构

由直流电动机和发电机工作原理示意图可以看到，直流电机的结构应由定子和转子两大部分组成。直流电机运行时静止不动的部分称为定子，定子的主要作用是产生磁场，由机座、主磁极、换向极、端盖、轴承和电刷装置等组成。运行时转动的部分称为转子，其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势，是直流电机进行能量转换的枢纽，所以通常又称为电枢，由转轴、电枢铁芯、电枢绕组、换向器和风扇等组成，如图 2-3-2 所示。

（一）定子部分

直流电机定子部分主要由主磁极、换向极、机座和电刷装置等组成。

1. 主磁极

主磁极又称主极，在一般大中型直流电机中，它是一种电磁铁。只有个别类型的

小型直流电机的主磁极才用永久磁铁，这种电机叫作永磁直流电机。主磁极的作用是能够在电枢表面外的气隙空间里产生一定形状分布的气隙磁场。

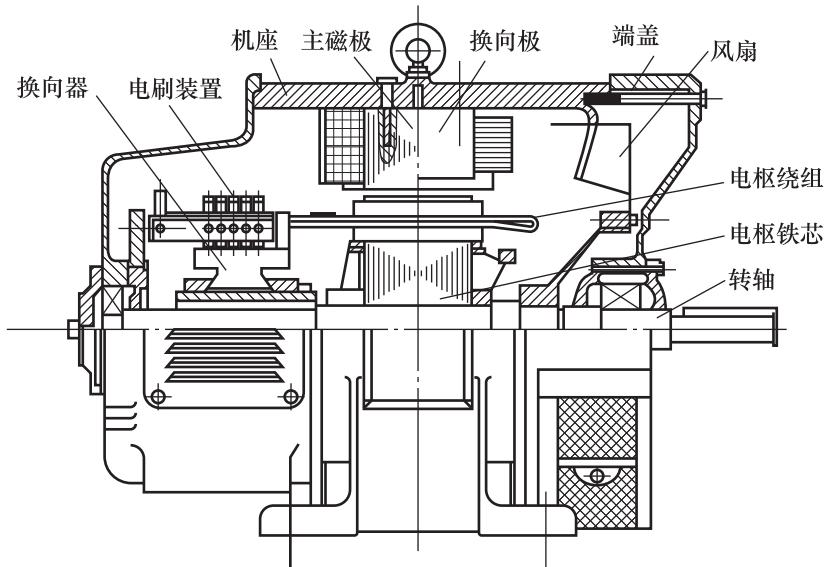


图 2-3-2 直流电机的基本结构

2. 换向极

容量在 1 kW 以上的直流电机，在相邻两主磁极之间要装上换向极。换向极又称附加极或间极，其作用是为了改善直流电机的换向。换向极的形状比主磁极简单，也是由铁芯和绕组构成。铁芯一般用整块钢或钢板加工而成。换向极绕组与电枢绕组串联。

3. 机座

一般直流电机都用整体机座。所谓整体机座，就是一个机座同时起两方面的作用，一方面起导磁的作用，一方面起机械支撑的作用。由于机座要起导磁的作用，所以它是主磁路的一部分，叫定子磁轭，一般多由导磁效果较好的铸钢制成，小型直流电机也有用厚钢板的。主磁极、换向极和端盖都固定在电机的机座上，所以机座又起机械支撑的作用。

4. 电刷装置

电刷装置是把直流电压、直流电流引入或引出的装置。电刷放在电刷盒里，用弹簧压紧在换向器上，电刷上有个铜丝辫，可以引出、引入电流。直流电机里，常常把若干个电刷盒装在同一个绝缘的刷杆上，在电路连接上，把同一个绝缘刷杆上的电刷盒并联起来，成为一组电刷。一般直流电机中，电刷组的数目可以用电刷杆数表示，电刷杆数与电机的主磁极数相等。各电刷杆在换向器外表面上沿圆周方向均匀分布，正常运行时，电刷杆相对于换向器表面有一个正确的位置，如果电刷杆的位置放得不合理，将直接影响电机的性能。电刷杆装在端盖或轴承内盖上，调整位置后，将它固定住。

(二) 转子部分

直流电机转子部分主要由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。图 2-3-3 为直流电机电枢装配示意图。

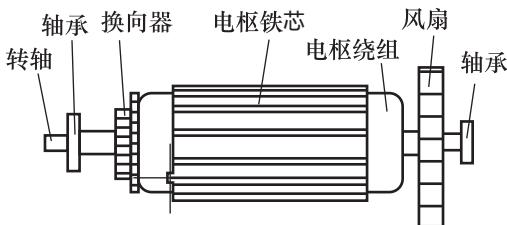


图 2-3-3 直流电机电枢装配示意图

1. 电枢铁芯

电枢铁芯的作用有两个，一个是作为主磁路的主要部分；另一个是嵌放电枢绕组。由于电枢铁芯和主磁场之间的相对运动，会在铁芯中引起涡流损耗和磁滞损耗（这两部分损耗合在一起称为铁芯损耗，简称铁耗），为了减少铁耗，通常用 0.5 mm 厚的涂有绝缘漆的硅钢片的冲片叠压而成，固定在转轴上。电枢铁芯沿圆周上有均匀分布的槽，里面可嵌入电枢绕组。

2. 电枢绕组

电枢绕组由许多按一定规律排列和连接的线圈组成，它是直流电机的主要电路部分，是通过电流和感应产生电动势以实现机电能量转换的关键性部件。线圈用包有绝缘的圆形和矩形截面导线绕制而成，线圈也称为元件，每个元件有两个出线端。电枢线圈嵌放在电枢铁芯的槽中，每个元件的两个出线端以一定规律与换向器的换向片相连，构成电枢绕组。

3. 换向器

换向器也是直流电机的重要部件。在直流发电机中，它的作用是将绕组内的交变电动势转换为电刷端上的直流电动势；在直流电动机中，它将电刷上所通过的直流电流转换为绕组内的交变电流。换向器安装在转轴上，主要由许多换向片组成，片与片之间用云母片绝缘，换向片数与元件数相等。

二、直流电机的基本工作原理

(一) 直流发电机的工作原理

直流发电机的工作原理就是把电枢线圈中感应的交变电动势，靠换向器配合电刷的换向作用，使之从电刷端引出时变为直流电动势。

图 2-3-4 是交流发电机的原理模型。图中 N、S 为一对固定的磁极（一般是电磁铁，也可以是永久磁铁），abcd 是装在可以转动的圆柱体表面上的一个线圈，把线圈的两端分别接到两个圆环（称为滑环）上（以后把这个可以转动的装有线圈的圆柱体称为电枢）。在滑环上分别放上两个固定不动的由石墨制成的电刷 A、B，通过电刷

A、B 把旋转着的电路与外部电路相连接。

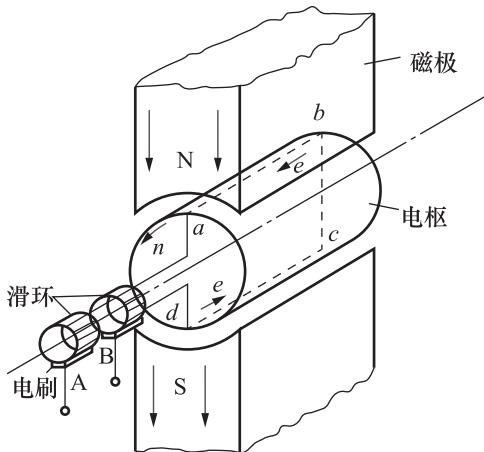


图 2-3-4 交流发电机的原理模型

当原动机拖动电枢以恒速 n 逆时针方向转动时, 根据电磁感应定律可知, 在线圈边(即导体) ab 和 cd 中有感应电动势产生。感应电动势 e 的大小用下式表示。

$$e = Blv \text{ (V)}$$

式中, B —— 导体所在处的磁密 (Wb/m^2);

l —— 导体 ab 或 cd 的长度 (m);

v —— 导体 ab 或 cd 与 B 的相对线速度 (m/s)。

感应电动势的方向按右手定则确定。在如图 2-3-4 所示瞬间, 导体 ab 、 cd 的感应电动势方向分别由 b 指向 a 和由 d 指向 c 。这时电刷 A 呈高电位, 电刷 B 呈低电位。当图 2-3-4 中电枢逆时针方向转过 180° 时, 导体 ab 与 cd 互换了位置, 用右手定则判断, 此时导体 ab 、 cd 中的感应电动势方向都与图 2-3-4 所示瞬间的相反。这时电刷 A 呈低电位, 电刷 B 呈高电位。如果电枢继续逆时针方向旋转 180° , 导体 ab 、 cd 又转到如图 2-3-4 所示位置, 则电刷 A 又呈高电位, 电刷 B 呈低电位。由此可见, 图 2-3-4 中电枢每转一周, 线圈 $abcd$ 中感应电动势方向交变一次, 因此线圈内的感应电动势是一种交变电动势, 这是最简单的交流发电机的原理。

如果想要得到直流电动势, 那么必须把上述线圈 $abcd$ 感应的电动势进行整流, 实现整流的装置称为换向器。

图 2-3-5 是直流发电机的原理模型, 它由两个铜质换向片代替图 2-3-4 中的两个滑环。换向片之间用绝缘材料隔开, 线圈 $abcd$ 出线端分别与两个换向片相连, 电刷 A、B 与换向片相接触并固定不动, 这就是最简单的换向器。有了换向器, 在电刷 A、B 之间感应电动势就和图 2-3-4 中电刷 A、B 间的电动势大不一样了。如图 2-3-5 所示的瞬间, 线圈 $abcd$ 中感应电动势的方向如图中所示, 这时电刷 A 呈正极性, 电刷 B 呈负极性。当线圈逆时针方向旋转 180° 时, 导体 cd 位于 N 极下, 导体 ab 位于 S 极下, 各导体中电动势都分别改变了方向。但是, 由于换向片随着线圈一同旋转, 本来与电刷 B 相接触的那个换向片, 现在却与电刷 A 接触了; 与电刷 A 相接触的换

向片与电刷 B 接触了，显然这时电刷 A 仍呈正极性，电刷 B 呈负极性。从图 2-3-5 中可以看出，和电刷 A 接触的导体永远位于 N 极下，同样，和电刷 B 接触的导体永远位于 S 极下。因此，电刷 A 始终有正极性，电刷 B 始终有负极性，所以电刷端能引出方向不变的但大小变化的脉振电动势。如果电枢上线圈数增多，并按照一定的规律把它们连接起来，可使脉振程度减小，就可获得直流电动势。这就是直流发电机的工作原理，同时也说明了直流发电机实质上是带有换向器的交流发电机。

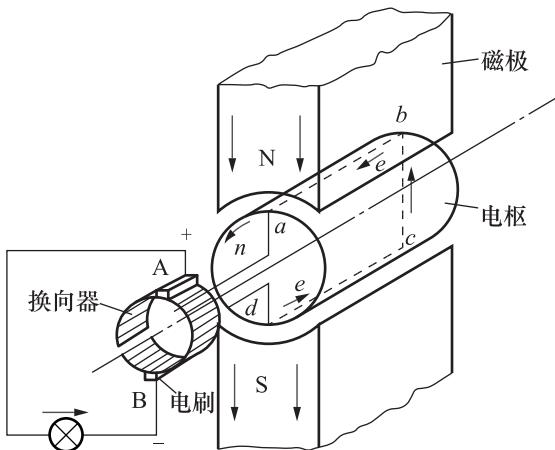


图 2-3-5 直流发电机的原理模型

121

(二) 直流电动机的工作原理

图 2-3-6 为直流电动机的原理模型，与图 2-3-5 不同的是线圈不被原动机拖动，电刷 A、B 接直流电源。于是在线圈 abcd 中有电流流过，电流的方向如图 2-3-6 所示。根据电磁力定律可知，载流导体 ab、cd 上受到的电磁力 f 为

$$f = Bl i \quad (\text{N})$$

式中， B ——导体所在处的气隙磁密 (Wb/m^2)；

l ——导体 ab 或 cd 的长度 (m)；

i ——导体中的电流 (A)。

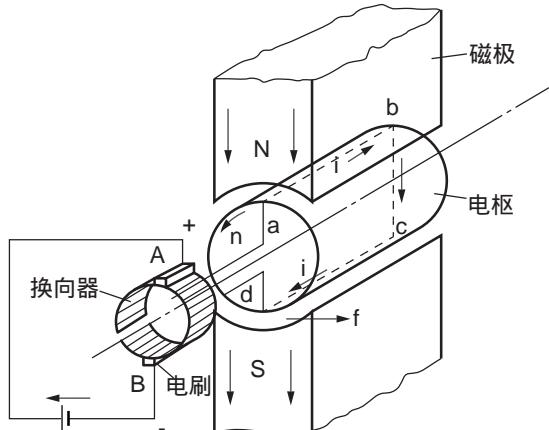


图 2-3-6 直流电动机的原理模型

导体受力的方向用左手定则确定，导体 ab 的受力方向是从右向左，导体 cd 的受力方向是从左向右，如图 2-3-6 所示。这一对电磁力形成了作用于电枢的一个力矩，这个力矩在旋转电机里称为电磁转矩，转矩的方向是逆时针方向，企图使电枢逆时针方向转动。如果此电磁转矩能够克服电枢上的阻转矩（如由摩擦引起的阻转矩以及其他负载转矩），电枢就能按逆时针方向旋转起来。当电枢转了 180° 后，导体 cd 转到 N 极下、导体 ab 转到 S 极下时，由于直流电源供给的电流方向不变，仍从电刷 A 流入，经导体 cd 、 ab 后，从电刷 B 流出。这时导体 cd 的受力方向变为从右向左，导体 ab 的受力方向变为从左向右，产生的电磁转矩的方向仍为逆时针方向。因此，电枢一经转动，由于换向器配合电刷对电流的换向作用，直流电流交替地由导体 ab 和 cd 流入，使线圈边只要处于 N 极下，其中通过电流的方向总是由电刷 A 流入的方向；而在 S 极下时，总是从电刷 B 流出的方向。这就保证了每个极下线圈边中的电流始终是一个方向，从而形成一种方向不变的转矩，使电动机能连续地旋转。这就是直流电动机的工作原理。

从上述基本电磁情况来看，一台直流电机原则上既可以作为发电机运行，也可以作为电动机运行，只是其输入、输出的条件不同而已。如用原动机拖动直流电机的电枢，将机械能从电机轴上输入，而电刷上不加直流电压，则从电刷端可以引出直流电动势作为直流电源，可输出电能，电机将机械能转换成电能而成为发电机；如在电刷上加直流电压，将电能输入电枢，则从电机轴上输出机械能，拖动生产机械旋转，将电能转换成机械能而成为电动机。这种同一台电机，既能作发电机又能作电动机运行的原理，在电机学理论中称为电机的可逆原理。

(三) 直流电机的励磁方式

直流电机的励磁方式是指对励磁绕组如何供电、产生励磁磁通势而建立主磁场的问题。根据励磁方式的不同，直流电机可分为下列几种类型。

1. 他励直流电机

励磁绕组与电枢绕组无连接关系，而由其他直流电源对励磁绕组供电的直流电机称为什么他励直流电机。永磁直流电机也可看作他励直流电机。

2. 并励直流电机

并励直流电机的励磁绕组与电枢绕组并联。对并励发电机来说，由电机本身发出来的端电压为励磁绕组供电；对并励电动机来说，励磁绕组与电枢绕组共用同一电源，从性能上讲与他励直流电动机相同。

3. 串励直流电机

串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联后，再接于直流电源。这种直流电机的励磁电流就是电枢电流。

4. 复励直流电机

复励直流电机有并励和串励两个励磁绕组。若串励绕组产生的磁通势与并励绕组产生的磁通势方向相同，则称为积复励；若两个磁通势方向相反，则称为差复励。

不同励磁方式的直流电机有着不同的特性。一般情况下直流电动机的主要励磁方式是并励式、串励式和复励式，直流发电机的主要励磁方式是他励式、并励式和复励式。

(四) 直流电机的换向

通过对直流电机电枢绕组的分析可知，当电枢旋转时，组成电枢绕组的每条支路里所含元件数目是不变的，但组成每条支路的元件都在依次循环地更换。一条支路中的某个元件在经过电刷后就成为另一条支路的元件，并且在电刷的两侧，元件中的电流方向是相反的，因此直流电机在工作时，绕组元件连续不断地从一条支路退出而进入相邻的支路。在元件从一条支路转入另一条支路这个过程中，元件中的电流就要改变方向，这就是所谓的直流电机的换向问题。

换向问题是换向器电机的一个专门问题，如果换向不良，将会在电刷与换向片之间产生有害的火花。当火花超过一定程度，就会烧坏电刷和换向器表面，使电机不能正常工作。此外，电刷下的火花也是一个电磁波的来源，对附近无线电通信有干扰。国家对电机换向时产生的火花等级及相应的允许运行状态有一定的规定。

产生火花的原因是多方面的，除电磁原因外，还有机械的原因，换向过程中还伴随有电化学、电热等因素，它们互相交织在一起，所以相当复杂，至今还没有完全掌握其各种现象的物理实质，而尚无完整的理论分析。

三、直流电机的检修

123

1. 电机解体

- (1) 大修前了解设备运行情况，并查看缺陷记录。
- (2) 拆开电机引线做好记录，用 1000 V 摆表分别测量电机和电缆的绝缘电阻，做好记录，松开地脚螺丝，移动电机时，注意保持电缆勿使其受损伤。
- (3) 有条件应测量定子和转子的空气间隙。
- (4) 拆下靠背轮，用拉马拆靠背轮时，需在拉马顶杆尖端与转轴中心孔处加活动顶头。
- (5) 拆开端盖应做好记录，拆开的各种零件应妥善保管。
- (6) 拆开刷架，拆下后先做好位置记号，然后测量刷握与整流子间隙和各组电刷间的距离，检查电刷情况。
- (7) 抽出转子，抽转子时应注意：
 - ①使用钢丝绳不要直接套在轴颈及轴身上，使用假轴时，轴身部分应用干净布等保护，防止轴颈和轴身部分受伤。
 - ②抽转子时应监视转子与定子的间隙，不得碰伤铁芯及线圈。
- (8) 转子抽出后，应稳妥放置，整流子部分用青壳纸或厚纸包起来前先用绳子绑好。

2. 定子检修

- (1) 清扫吹灰，用 2~3 kg/cm² 干燥的压缩空气将定子、转子各部件灰尘吹净，然后用 CCl₄ 和汽油将各部件油泥擦净。

(2) 检查定子外壳。①外壳油漆应无脱落。②接地带应完好，无断裂、松动现象。③引线绝缘和瓷瓶应完好，引线绝缘无老化、鼓泡现象，接线螺丝齐全，端盖应完好，无裂纹及破损。④定子磁极与外壳连接螺丝应坚固。

(3) 检查磁极线圈。①线圈绝缘应良好，无发胖、鼓泡、枯裂及过热变色等现象。②磁极间连接绝缘及接头良好，连接螺丝坚固。③用 1000 V 摆表测量磁极线圈绝缘电阻，应不低于 $0.5 \text{ M}\Omega$ 。④测量线圈直流电阻与厂家数据或以前测得值比较，其差别应不大于 2%。

(4) 检查磁极铁芯。①磁极铁芯应清洁干净，无松动现象。②磁极铁芯无锈斑、无毛刺和过温现象，如有锈斑可用砂布轻轻打磨，用布擦净，毛刺可用锉刀或刮刀修平，将铁芯表面残留铁屑清理干净后用绝缘漆涂刷，处理铁芯表面。

(5) 定子、转子喷漆，如果定子（转子）表面绝缘漆损坏，脱落严重时应按下列步骤进行喷漆。

①将原有起泡的漆膜清除，并将电机表面油垢清理干净，清理时应注意不得损伤绝缘层。

②喷 1321 灰绝缘漆一层，喷漆应均匀，漆膜不宜过厚。

③喷转子时整流子应包扎起来。

3. 转子检修

(1) 检查电枢铁芯

①铁芯应清洁干净，没有灰尘、油垢及电刷粉末。

②铁芯应坚固，无松动、变形。

③通风沟应清洁、畅通。

(2) 检查电枢线圈

①槽楔良好，无松动。

②线圈表面应光滑，无破裂、磨损及烧伤等现象。

③用 1000 V 摆表测量电枢线圈对铁芯和绑线的绝缘电阻，其值不应低于 $0.5 \text{ M}\Omega$ 。

(3) 检查电枢绑线

①绑线清洁，无松动。

②焊锡无熔化、开焊现象。

③绑线下所垫的绝缘材料应完好。

(4) 检查风扇

①风扇应清洁，无灰尘、油垢。

②风扇叶片应无破裂变形，并应牢固，进行检查时，除主要检查外，可用小锤轻轻敲打风叶，根据声音来判断风扇有无损坏。

4. 整流子检修

(1) 整流子表面应清洁、干净、无黑斑，若在运行中不冒火花应保护整流子表面的氧化膜（紫褐色）不受损伤。

(2) 整流子表面应为圆柱形，如表面不光滑可用玻璃砂纸打磨至光滑（但不能用金刚砂纸打磨），打磨完后应吹净碎屑。

(3) 整流子间云母沟深 $1\sim1.5$ mm，整流片与线圈焊接处无过热松动、脱焊等现象。

(4) 整流子的偏心值应不大于 0.05 mm (3000 r/min) 和 0.07 mm (1500 r/min)。

5. 刷架及刷握检修

(1) 检查刷架及刷握

①刷架应无破损、裂纹，刷握内表面光滑且无烧伤、变形，固定螺钉完好。

②刷架引线绝缘及接线鼻子应完好，连接螺丝紧固。

(2) 检查电刷：电刷磨石是否光滑有无夹砂和灼烧痕迹，并检查电刷与整流子接触情况，作为电刷调整时参考。

6. 启动调整装置检修

(1) 清扫磁场变阻器内各处灰尘、油垢。

(2) 检查磁场变阻器，磁场变阻器的电阻线应无断裂，各部分螺丝应紧固，滑动接点与固定接点的接触良好，调整装置转动灵活，无长涩现象。

(3) 测量磁场可变电阻器绝缘电阻和直流电阻，绝缘电阻应不低于 0.5 MΩ，直流电阻与铭牌数据或最初测量数值相比较其值不应超过 10% ，在不同静接点位置测量的直流电阻的变化应有规律性。

7. 电气试验

电机检修清理后，磁场绕组对机壳、电枢绕组对轴进行交流 1000 V耐压，时间为 60 s。

8. 组装

(1) 组装电机

①组装前应检查机内，不得遗留任何工具及其他物品。

②穿转子。

③按解体时做好的记号，上端盖各处螺丝。

④测量电枢与磁极之间的空气间隙，各点气隙与平均值的差别不应超过下列数值： 3 mm 以下的间隙为平均值的 $\pm 10\%$ ， 3 mm 及以上的间隙为平均值的 $\pm 5\%$ 。

(2) 组装刷架，调整电刷

①按原有记号装好刷架。

②调整刷握，刷握应达到下列要求。

a. 同一刷杆各刷握应排列整齐，其边缘形成直线，应与整流子表面云母沟平行。

b. 刷握至整流子表面的距离为 $2\sim4$ mm。

c. 沿整流子圆周各组电刷之间的距离应相等，其相互间差值对于小电机一般应不大于 $1.5\% \sim 2\%$ ，对于大电机应不大于 $0.5\% \sim 1\%$ ，测量各组电刷之间距离可用白纸将整流子表面包好，预装好电刷，然后用铅笔沿电刷同一侧面画线，最后拿下白

纸用其进行测量。

- d. 各组电刷应错开排列，使整流子均匀磨损。
- e. 刷架绝缘电阻应大于 $1\text{ M}\Omega$ 。

③安装电刷：安放电刷时应注意所使用的电刷牌号及尺寸与原有电刷须一致，装上电刷后应用玻璃砂纸磨出弧面，使其与整流子表面圆弧接触良好。

④电刷安装后应达到下列要求。

- a. 电刷在刷握内应有 $0.1\sim0.2\text{ mm}$ 间隙，电刷能上下活动自如。
- b. 各电刷压力应保持一致，其压差尽量不超过 10% 。
- c. 电刷与流子表面接触应在 90% 以上。

⑤调整电刷的中心位置。

(3) 接线

按原有记号将电机端子各出线连接好，接线时要求接触良好、螺丝紧固。

(4) 测量绝缘电阻

直流电机全部组装完后用 1000 V 摆表测量电阻及电缆绝缘电阻值。

9. 试运转及验收

(1) 试运转

①全部检修工作结束，应对电机本体进行一次全面检查。

②电机试运转应符合下列要求。

- a. 转动方向正确，转速正常。
- b. 直流电机的启动电流正常，直流发电机的电压正常、调整平稳。
- c. 转动部件无摩擦异响，电机振动不超过标准值。
- d. 轴承温度正常。滚动轴承不得超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，滑动轴承不得超过 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- e. 电刷良好，整流子火花不超过 1 级，电机试运转 $1\sim1.5\text{ h}$ 。

(2) 验收

①试运转正常，符合各项技术要求，做验收记录。

②工具材料整理完毕，现场清洁干净。

学习任务二 异步电动机的原理认知与检修

异步电动机在 1885 年由意大利物理学家和电气工程师费拉里斯发明。异步电动机又称感应电动机，是由气隙旋转磁场与转子绕组感应电流相互作用产生电磁转矩，从而实现机电能量转换为机械能量的一种交流电机。异步电动机按照转子结构分为两种形式：鼠笼式异步电动机和绕线式异步电动机。作为电动机运行的异步电机，因其转子绕组电流是感应产生的，又称为感应电动机。异步电动机是各类电动机中应用最广、需求量最大的一种。其组成如图 2-3-7 所示。

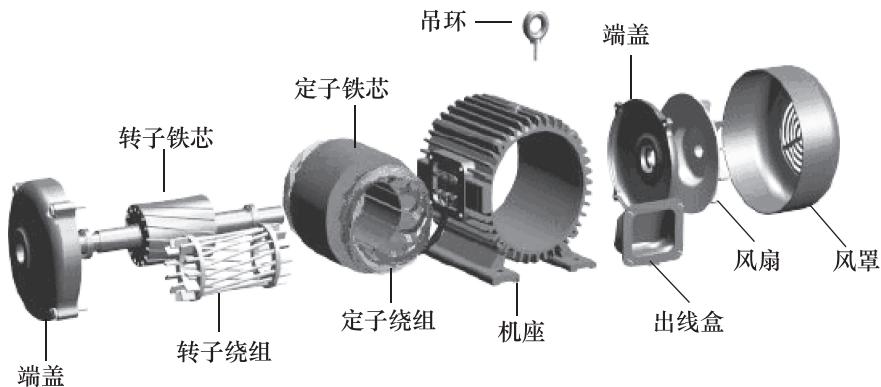


图 2-3-7 异步电动机的组成

一、三相异步电动机的结构

三相异步电动机的两个基本组成部分为定子（固定部分）和转子（旋转部分），此外还有端盖、风扇等附属部分，如图 2-3-8 所示。

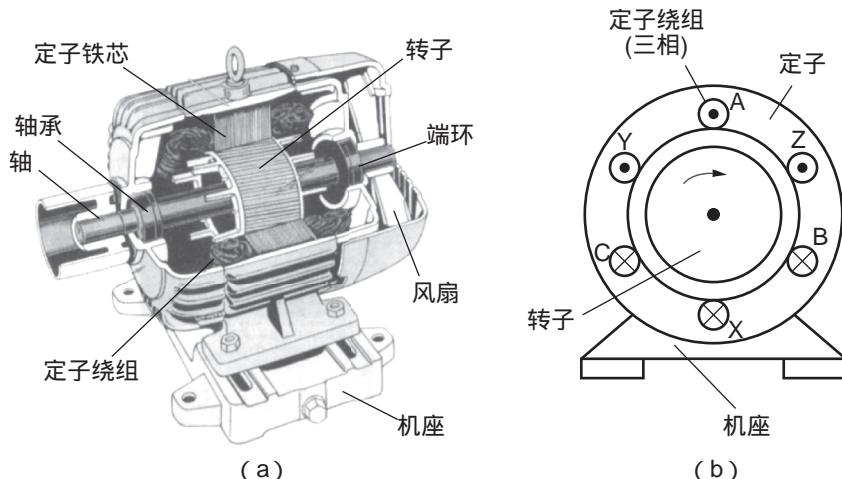


图 2-3-8 三相异步电动机的结构

1. 定子

三相异步电动机的定子由三部分组成，如图 2-3-9、表 2-3-1 所示。

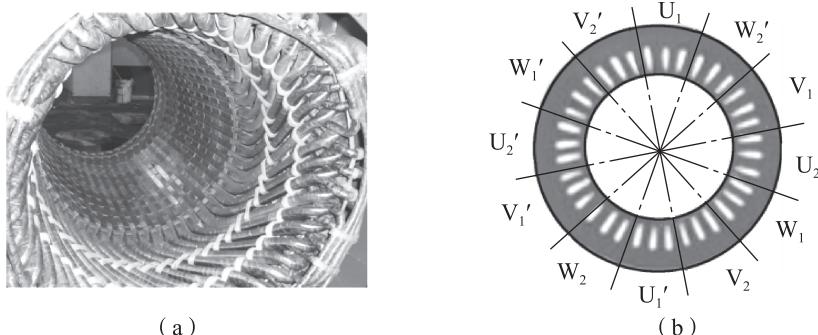


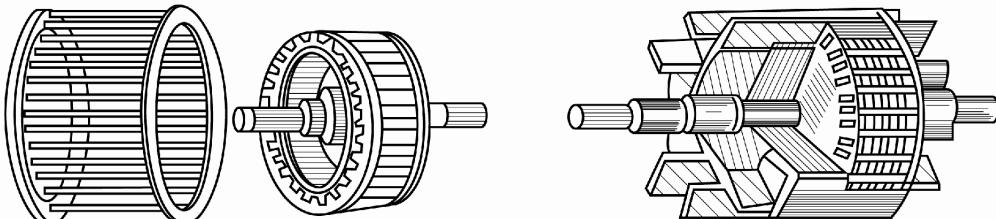
图 2-3-9 定子绕组和未装绕组的定子冲片

表 2-3-1 定子的组成

定子	定子铁芯	由厚度为 0.5 mm、相互绝缘的硅钢片叠成，硅钢片内圆上有均匀分布的槽，其作用是嵌放定子三相绕组 AX、BY、CZ
	定子绕组	三组用漆包线绕制好的，对称地嵌入定子铁芯槽内的相同的线圈。这三相绕组可接成星形或三角形
	机座	机座用铸铁或铸钢制成，其作用是固定铁芯和绕组

2. 转子

三相异步电动机的转子由三部分组成，如图 2-3-10、表 2-3-2 所示。



(a) 嵌放铜条的笼型转子

(b) 铸铝的笼型转子

图 2-3-10 转子

表 2-3-2 转子的组成

转子	转子铁芯	由厚度为 0.5 mm、相互绝缘的硅钢片叠成，硅钢片外圆上有均匀分布的槽，其作用是嵌放转子三相绕组
	转子绕组	转子绕组有两种形式： 鼠笼式——鼠笼式异步电动机； 绕线式——绕线式异步电动机
	转轴	转轴上加机械负载

鼠笼式电动机由于构造简单、价格低廉、工作可靠、使用方便，成为生产上应用最广泛的一种电动机。为了保证转子能够自由旋转，在定子与转子之间必须留有一定的空气隙，中、小型电动机的空气隙在 0.2~1.0 mm 之间。

二、三相异步电动机的转动原理

(一) 基本原理

为了说明三相异步电动机的工作原理，我们做如下演示实验，如图 2-3-11 所示。

1. 演示实验

在装有手柄的蹄形磁铁的两极间放置一个闭合导体，当转动手柄带动蹄形磁铁旋转时，将发现导体也跟着旋转；若改变磁铁的转向，则导体的转向也跟着改变。

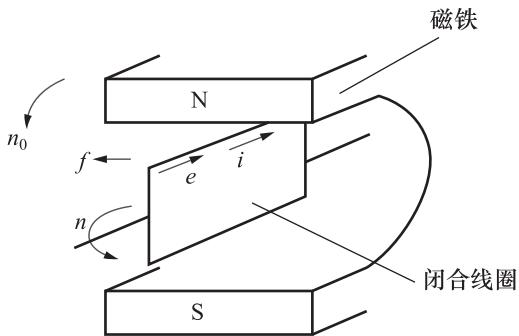


图 2-3-11 三相异步电动机的工作原理

2. 现象解释

当磁铁旋转时，磁铁与闭合的导体发生相对运动，鼠笼式导体切割磁力线而在其内部产生感应电动势和感应电流，感应电流又使导体受到一个电磁力的作用，于是导体就沿磁铁的旋转方向转动起来，这就是异步电动机的基本原理。

转子转动的方向与磁极旋转的方向相同。

3. 结论

欲使异步电动机旋转，必须有旋转的磁场和闭合的转子绕组。

三相异步电动机定子旋转的磁场在穿过转子时，因转子绕组相对定子磁场有相对运动，所以在转子绕组产生感应电势，就会产生感应电流；转子绕组的感应电流与定子磁场相互作用，使之产生电磁力矩；转子会跟随定子磁场转动，转子的转速为 n ，转子的转动状态如图 2-3-12 所示。

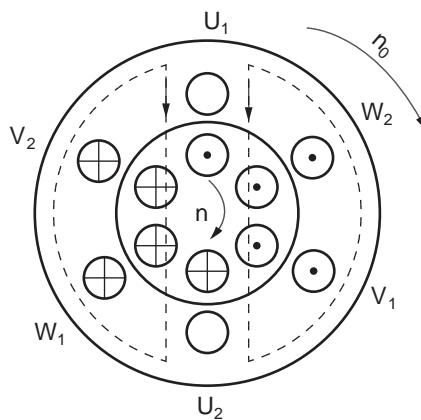


图 2-3-12 转子旋转示意图

三相异步电动机同步转速 n_0 与转子转速 n 之差 ($\Delta n = n_0 - n$) 称为转差；转差与同步转速的百分比称为转差率，用 s 表示，电动机在额定状态下 $s_N = (2\sim 6)\%$ 。

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\%$$

$$n = (1-s)n_0 = (1-s) \times \frac{f_1}{p}$$

由以上分析可知转子转速 n 与同步转速 n_0 相差很小，电动机工作在电动状态 $n \leq n_0$ ，电动机工作在发电制动状态 $n > n_0$ 。

改变转子转速 n 可以通过改变电源电压频率 f_1 ，或者改变定子磁极对数 p 实现。值得注意的是当 $s=0$ 时，电动机以同步转速运行，也就是说同步电动机转速为 $\frac{60f_1}{p}$ 。

(二) 三相异步电动机的极数与转速

1. 极数(磁极对数) p

三相异步电动机的极数就是旋转磁场的极数。旋转磁场的极数与三相绕组的安排有关。

当每相绕组只有一个线圈，绕组的始端之间相差 120° 空间角时，产生的旋转磁场具有一对极，即 $p=1$ 。

当每相绕组为两个线圈串联，绕组的始端之间相差 60° 空间角时，产生的旋转磁场具有两对极，即 $p=2$ 。

同理，如果要产生三对极，即 $p=3$ 的旋转磁场，则每相绕组必须有均匀安排在空间的串联的三个线圈，绕组的始端之间相差 $40^\circ(\frac{120^\circ}{p})$ 空间角。极数 p 与绕组的始端之间的空间角 θ 的关系为

$$\theta = \frac{120^\circ}{p}$$

2. 转速 n

三相异步电动机旋转磁场的转速 n_0 与电动机磁极对数 p 有关，它们的关系为

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (3-1)$$

由式(3-1)可知，旋转磁场的转速 n_0 决定于电流频率 f_1 和磁场的极数 p 。对某一异步电动机而言， f_1 和 p 通常是一定的，所以磁场转速 n_0 是一个常数。

在我国，工频 $f_1=50$ Hz，因此对应于不同极对数 p 的旋转磁场转速 n_0 如表 2-3-3 所示。

表 2-3-3

p	1	2	3	4	5	6
n_0	3000	1500	1000	750	600	500

3. 转差率 s

电动机转子转动方向与磁场旋转的方向相同，但转子的转速 n 不可能达到与旋转磁场的转速 n_0 相等，否则转子与旋转磁场之间就没有相对运动，因而磁力线就不切割转子导体，转子电动势、转子电流以及转矩也就都不存在，也就是说旋转磁场与转子之间存在转速差，因此我们把这种电动机称为异步电动机，又因为这种电动机的转动原理是建立在电磁感应基础上的，故又称为感应电动机。

旋转磁场的转速 n_0 常称为同步转速。

转差率 s ——用来表示转子转速 n 与磁场转速 n_0 相差的程度的物理量，即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0} \quad (3-2)$$

转差率是异步电动机的一个重要的物理量。

当旋转磁场以同步转速 n_0 开始旋转时，转子则因机械惯性尚未转动，转子的瞬间转速 $n=0$ ，这时转差率 $s=1$ 。转子转动起来之后， $n>0$ ， (n_0-n) 差值减小，电动机的转差率 $s<1$ 。如果转轴上的阻转矩加大，则转子转速 n 降低，即异步程度加大，才能产生足够的感应电动势和电流，产生足够的电磁转矩，这时的转差率 s 增大；反之， s 减小。异步电动机运行时，转速与同步转速一般很接近，转差率很小，在额定工作状态下为 $0.015\sim0.06$ 。

根据式 (3-2)，可以得到电动机的转速常用公式：

$$n = (1-s) n_0 \quad (3-3)$$

例 有一台三相异步电动机，其额定转速 $n=975$ r/min，电源频率 $f=50$ Hz，求电动机的极数和额定负载时的转差率 s 。

解：由于电动机的额定转速接近而略小于同步转速，所以同步转速对应于不同的极对数有一系列固定的数值。显然，与 975 r/min 最相近的同步转速 $n_0=1000$ r/min，与此相对应的磁极对数 $p=3$ 。因此，额定负载时的转差率为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% = \frac{1000 - 975}{1000} \times 100\% = 2.5\%$$

4. 相异步电动机的定子电路与转子电路

三相异步电动机中的电磁关系与变压器类似，定子绕组相当于变压器的原绕组，转子绕组（一般是短接的）相当于副绕组。给定子绕组接上三相电源电压，则定子中就有三相电流通过，此三相电流产生旋转磁场，其磁力线通过定子和转子铁芯而闭合，这个磁场在转子和定子的每相绕组中都要感应出电动势。

三、三相异步电动机的机械特性

电动机转矩与转速之间的关系称为机械特性，描绘转矩和转速的关系曲线称为机械特性曲线。

1. 三相笼型异步电动机的机械特性

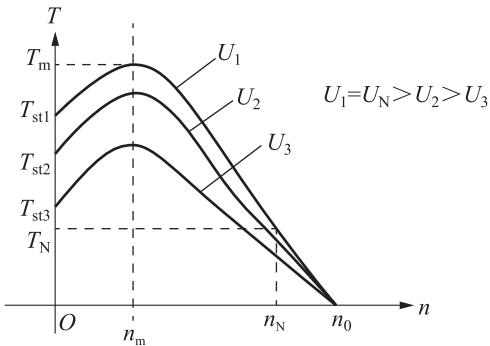
同一台笼型异步电动机定子绕组加不同电压可得到不同的机械特性曲线，如图2-3-13所示。

由图 2-3-13 可见 $U_1 > U_2 > U_3$ ，则启动力矩 $T_{st1} > T_{st2} > T_{st3}$ 。由图中还可以看出，在电动机负载力矩不变的状态下，改变定子绕组所加的电压可得到不同的电动机转速，也就是三相异步电动机可以通过调压调速，但其转速调整范围小，目前很少采用。

2. 三相绕线式异步电动机的机械特性

三相绕线式异步电动机具有调速性能较好、启动力矩较大、启动快等优点，主要

用于各种起重机。三相绕线式异步电动机在转子绕组中串入不同的电阻器，可以得到不同的机械特性曲线，如图 2-3-14 所示。



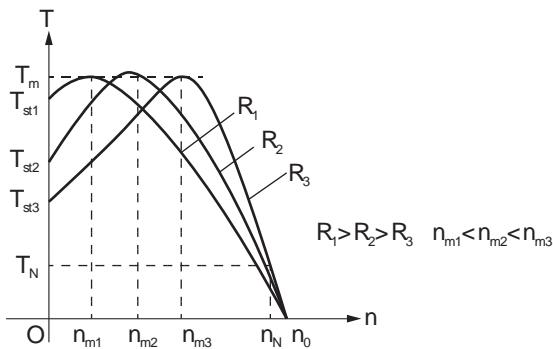
T_m —最大力矩 T_{st1} —对应 U_1 电压的启动力矩 T_{st2} —对应 U_2 电压的启动力矩

T_{st3} —对应 U_3 电压的启动力矩 T_N —对应 U_1 电压的额定力矩

n_m —临界转速 n_N —额定转速 n_0 —同步转速

图 2-3-13 同一台笼型异步电动机不同电压的机械特性曲线

绕线式三相异步电动机的转子串入不同电阻器时，其机械特性曲线就不同，在图 2-3-14 中 $R_3 = 0 \Omega$, $R_1 > R_2 > R_3$, R_1 、 R_2 、 R_3 所对应的临界转速 $n_{m1} < n_{m2} < n_{m3}$ 。由图 2-3-14 可知转子绕组串入适当电阻器可以得到比较合适的启动力矩，另外可以通过转子绕组串入不同电阻值的电阻器得到不同的转速；绕线式三相异步电动机可以采用改变定子绕组电压和改变转子绕组串入不同电阻器相结合的调速方法，使电动机的调速性能更好。



T_m —最大力矩 T_{st1} —对应 R_1 电阻的启动力矩 T_{st2} —对应 R_2 电阻的启动力矩

T_{st3} —对应 R_3 电阻的启动力矩 T_N —额定力矩

n_{m1} 、 n_{m2} 、 n_{m3} —临界转速 n_N —额定转速 n_0 —同步转速

图 2-3-14 三相绕线式异步电动机串入不同电阻器的机械特性曲线

3. 电磁转矩 T

电动机转子绕组中的感应电流与定子磁场互相作用产生电磁力 F ，因而产生电磁力矩 T 。电磁力矩 T 是主力矩，当 $T > T_e$ 时电动机加速运行；当 $T = T_e$ 时电动机稳定运行；当 $T < T_e$ 时电动机减速运行。

电磁力矩 T 为

$$T = k_T \Phi I_2 \cos\varphi_2 \quad (3-4)$$

式中, T ——电磁力矩 ($N \cdot m$);

k_T ——电动机结构系数;

Φ ——主磁通 (Wb);

I_2 ——转子电流有效值 (A);

$\cos\varphi_2$ ——转子电路功率因数。

4. 额定转矩 T_N

电动机在额定电压下, 带额定负载长期连续工作在额定功率 P_N 状态下, 其轴上输出转矩为额定转矩, 用 T_N 表示。

三相异步电动机额定转矩 T_N 为

$$T_N = \frac{9550 P_N}{n_N} \quad (N \cdot m) \quad (3-5)$$

式中, P_N ——异步电动机额定功率 (kW);

n_N ——异步电动机额定转速 (r/min)。

5. 最大转矩 T_m 和过载系数

三相异步电动机最大转矩 T_m 是指电动机在临界转速所对应的转矩。电动机的过载系数为最大转矩与额定转矩之比, 用 λ 表示。

$$\lambda = T_m / T_N \quad (3-6)$$

一般三相异步电动机过载系数为 $1.8 \sim 2.2$ 。

6. 启动转矩 T_{st} 和启动系数

启动转矩 T_{st} 是指电动机刚刚接通电源启动瞬间所对应的转矩。启动转矩 T_{st} 必须大于异步电动机的静态阻力矩才能使之正常启动。衡量电动机启动能力强弱的系数称为启动系数, 它由 T_{st}/T_N 求得; 三相异步电动机启动系数 T_{st}/T_N 为 $1.8 \sim 2.2$ 。

要特别注意, $T_{st} < T_L$ (电动机静态阻力矩) 时, 电动机无法启动, 会造成堵转现象, 电动机定子绕组电流很大, 可能造成定子绕组热击穿, 俗称烧电动机。

四、三相异步电动机的选用和维护

1. 三相异步电动机的铭牌

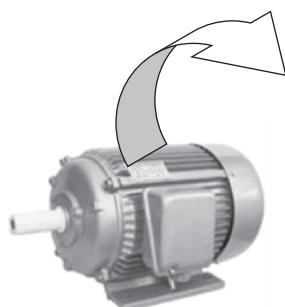
三相异步电动机的铭牌如图 2-3-15 所示。型号 Y—112M—4 是指国产 Y 系列异步电动机, 机座中心高度为 $112 mm$, 中机座 (M 表示中机座, L 表示长机座, S 表示短机座), 磁极数为 4 极, 如图 2-3-16 所示。

额定功率 $4.0 kW$ 是指电动机在额定状态下运行能输出的机械功率为 $4.0 kW$ 。

额定电压 $380 V$ 是指电动机额定绕组规定使用的线电压。

接法 Δ 是指电动机定子绕组应采用 Δ 接法。

额定电流 $8.8 A$ 是指电动机在输出额定功率时, 定子绕组所允许通过的线电流。



三相异步电动机			
型号Y—112M—4		编号	
4.0 kW		8.8 A	
380 V	1440 r/min		LW82dB
接法	防护等级IP44	50 Hz	45 kg
标准编号	工作制S1	B级绝缘	年月
电机厂			

图 2-3-15 三相异步电动机的铭牌

Y—112 M—4
三相异步电动机 Y ——— 磁极数
机座中心高度 112 ——— 机座长度代号

图 2-3-16 型号解释

额定转速 1440 r/min 是指电动机在额定负载下的转速。

134 绝缘等级按绝缘材料允许最高温度划分，目前主要有以下五个等级，如表 2-3-4 所示。

表 2-3-4 绝缘等级

绝缘等级	E	B	F	H	C
最高工作温度/℃	120	130	155	180	大于 180

Y 系列电动机采用 B 级绝缘，新型 Y2 系列电动机采用 F 级绝缘。

防护等级 IP44 中 IP 表示封闭型；IP 后两位数字，第一位表示防固体异物的等级，第二位表示防水等级。

工作制 S1 表示电动机的工作制式。

S1 表示连续工作制，即在额定状态下可连续工作。

S2 表示短时运行工作制，即在额定状态下持续运行时间不允许超过规定的时限。

S3 表示断续运行工作制，即电动机工作与停歇交替进行，时间都很短。

LW82dB 表示噪声等级为 82 分贝。

2. 三相异步电动机的选用原则

(1) 选择功率

根据负载设备所要求的工作制、工作条件、启动特性合理选择电动机的功率。

(2) 选择转速

根据负载设备的最高机械转速和传动机构的变速比选择电动机的转速。

(3) 综合选择

根据负载设备的特性、生产工艺、安装方式、使用环境、维护及价格等方面综合

考虑电动机的类型。

(4) 更换电动机时的选择

可用额定电压、额定功率接近的新型电动机替换旧型电动机，但对特殊情况下使用的电动机，不可降低防护等级。

五、三相异步电动机常见故障的原因及维修方法 (表 2-3-5)

表 2-3-5 三相异步电动机常见故障的原因及维修方法

故障现象	故障原因	维修方法
通电后电动机不能转动，但无异响，也无异味和冒烟	电源未通（至少两相未通）	检查电源回路开关、熔丝、接线盒处是否有断点，如有，予以修复
	熔丝熔断（至少两相熔断）	检查熔丝型号、熔断原因，更换新熔丝
	过流继电器调得过小	调节继电器整定值与电动机配合
	控制设备接线错误	改正接线
通电后电动机不转，然后熔丝烧断	缺一相电源或定子线圈一相接反	检查刀闸是否有一相未合好或电源回路有一相断线，消除接反故障
	定子绕组相间短路	查出短路点，予以修复
	定子绕组接地	消除接地
	定子绕组接线错误	查出误接，予以更正
	熔丝截面过小	更换熔丝
	电源线短路或接地	消除接地点
通电后电动机不转，有嗡嗡声	定子、转子绕组有断路（一相断线）或电源一相失电	查明断点，并予以修复
	绕组引出线始末端接错或绕组内部接反	检查绕组极性；判断绕组末端是否正确
	电源回路接点松动，接触电阻大	紧固松动的接线螺丝，用万用表判断各接头是否假接，并予以修复
	电动机负载过大或转子卡住	减载或查出并消除机械故障
	电源电压过低	检查是否把规定的△接法误接为Y；是否由于电源导线过细使压降过大，并予以纠正
	小型电动机装配太紧或轴承内油脂过硬	重新装配使之灵活；更换合格油脂
	轴承卡住	修复轴承

续表

故障现象	故障原因	维修方法
电动机启动困难，额定负载时，电动机转速低于额定转速较多	电源电压过低	测量电源电压，设法改善
	△接法电机误接为Y	纠正接法
	笼型转子开焊或断裂	检查开焊和断点，并予以修复
	定子、转子局部线圈错接、接反	查出误接处，予以改正
	修复电动机绕组时增加匝数过多	恢复正确匝数
	电动机过载	减载
电动机空载电流不平衡，三相相差大	重绕时，定子三相绕组匝数不相等	重新绕制定子绕组
	绕组首尾端接错	检查并纠正
	电源电压不平衡	测量电源电压，设法消除不平衡
	绕组存在匝间短路、线圈接反等故障	消除绕组故障
电动机空载，过负载时，电流表指针不稳、摆动	笼型转子导条开焊或断条	查出断条，予以修复或更换转子
	绕线型转子故障（一相断路）或电刷、集电环短路装置接触不良	检查绕线型转子回路，并予以修复
电动机空载电流平衡，但数值大	修复时，定子绕组匝数减少过多	重绕定子绕组，恢复正确匝数
	电源电压过高	设法恢复额定电压
	Y接电动机误接为△	改接为Y
	电动机装配中，转子装反，使定子铁芯未对齐，有效长度减短	重新装配
	气隙过大或不均匀	更换新转子或调整气隙
	大修拆除旧绕组时，使用热拆法不当，使铁芯烧损	检修铁芯或重新计算绕组，适当增加匝数
电动机运行时响声不正常，有异响	转子与定子绝缘纸或槽楔相擦	修剪绝缘纸，削低槽楔
	轴承磨损或油内有砂砾等异物	更换轴承或清洗轴承
	定子、转子铁芯松动	检修定子、转子铁芯
	轴承缺油	加油
	风道填塞或风扇擦风罩	清理风道，重新安装
	定子、转子铁芯相擦	消除擦痕，必要时车削转子
	电源电压过高或不平衡	检查并调整电源电压
	定子绕组错接或短路	消除定子绕组故障

续表

故障现象	故障原因	维修方法
运行中电动机振动较大	磨损轴承间隙过大	检修轴承，必要时更换
	气隙不均匀	调整气隙，使之均匀
	转子不平衡	校正转子动平衡
	转轴弯曲	校直转轴
	铁芯变形或松动	校正重叠铁芯
	联轴器（皮带轮）中心未校正	重新校正，使之符合规定
	风扇不平衡	检修风扇，校正平衡，纠正其几何形状
	机壳或基础强度不够	进行加固
	电动机地脚螺丝松动	紧固地脚螺丝
	笼型转子开焊断路；绕线转子断路；加定子绕组故障	修复转子绕组；修复定子绕组
轴承过热	滑脂过多或过少	按规定加润滑油（容积的1/3~2/3）
	油质不好，含有杂质	更换清洁的润滑油
	轴承与轴颈或端盖配合不当（过松或过紧）	过松可用黏结剂修复，过紧应车、磨轴颈或端盖内孔，使之适合
	轴承内孔偏心，与轴相擦	修理轴承盖，消除擦点
	电动机端盖或轴承盖未装平	重新装配
	电动机与负载间联轴器未校正，或皮带过紧	重新校正，调整皮带张力
	轴承间隙过大或过小	更换新轴承
	电动机轴弯曲	校正电动机轴或更换转子
电动机过热甚至冒烟	电源电压过高，使铁芯发热大大增加	降低电源电压（如调整供电变压器分接头），若是电机Y、△接法错误引起，则应改正接法
	电源电压过低，电动机又带额定负载运行，电流过大使绕组发热	提高电源电压或换粗供电导线
	修理拆除绕组时，采用热拆法不当，烧伤铁芯	检修铁芯，排除故障
	定子、转子铁芯相擦	消除擦点（调整气隙或锉、车转子）
	电动机过载或频繁启动	减载；按规定次数控制启动

续表

故障现象	故障原因	维修方法
电动机过热甚至冒烟	笼型转子断条	检查并消除转子绕组故障
	电动机缺相，两相运行	恢复三相运行
	重绕后定子绕组浸漆不充分	采用二次浸漆及真空浸漆工艺
	环境温度高，电动机表面污垢多，或通风道堵塞	清洗电动机，改善环境温度，采用降温措施
	电动机风扇故障，通风不良；定子绕组故障（相间、匝间短路；定子绕组内部连接错误）	检查并修复风扇，必要时更换；检修定子绕组，消除故障

学习拓展一 永磁同步电动机的认知

138

— 新能源汽车结构与检修

永磁同步电动机的运行原理与电励磁同步电动机相同，但它以永磁体提供的磁通替代后者的励磁绕组励磁，使电动机结构较为简单，降低了加工和装配费用，且省去了容易出问题的集电环和电刷，提高了电动机运行的可靠性；又因无须励磁电流，省去了励磁损耗，提高了电动机的效率和功率密度，因而是近年来研究得较多并在各个领域中得到越来越广泛应用的一种电动机。如图 2-3-17 所示。

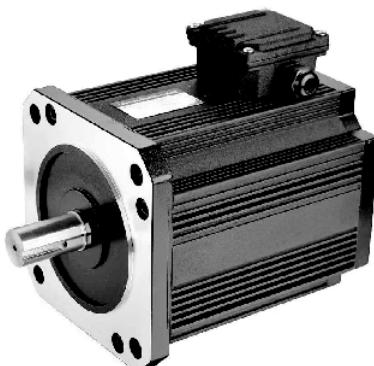


图 2-3-17 永磁同步电动机

一、永磁同步电动机的基本组成

1. 电动机

同感应电机和直流电机相似，永磁同步电动机也是由转子及定子两大部件所构成，三相交流绕组在定子上，永磁体在转子上。

(1) 定子

定子通常也称作电枢，它由定子三相绕组、定子铁芯、机座和端盖等零部件所构成。定子铁芯是由冲压后的硅钢片紧密叠装而成，如图 2-3-18 所示。

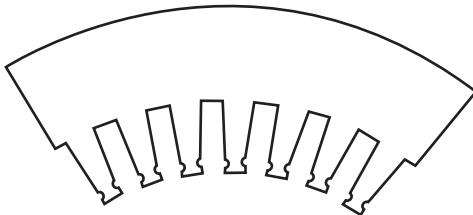


图 2-3-18 定子

(2) 转子

转子有两种形式的结构，依据定子、转子之间的气隙分布有隐极式和凸极式之分。图 2-3-19(a) 为凸极式，从图中可以看出转子有明显的凸出磁极，且气隙不均匀分布；图 2-3-19(b) 为隐极式，转子呈圆柱形，均匀分布气隙。

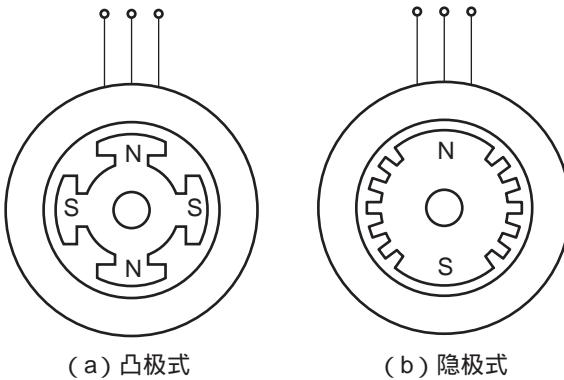


图 2-3-19 转子

电动机转子使用永磁铁励磁，目前常见的有铁氧体和稀土永磁材料。根据转子磁场几何形状的异同，磁场在空间上分布有方波（梯形波）和正弦波两种。因此反电动势也有两种，根据反电动势的不同分别采用 120° 的直流方波控制或正弦波控制。

2. 转子位置传感器

在永磁同步电动机中，通常转子位置传感器与电机轴连在一起，用来随时测定转子磁极的位置，为电子换向提供正确的信息。但也有例外，像洗衣机用的 DD 电机，往往将 HALL 安装到定子上，永磁体安装到转子上。定子、转子这里其实只是个相对的概念。

目前，PMSM 系统的位置传感器有很多种方式，像光电编码式、磁敏式、电磁式等，也有控制精度要求相对较高的场合，采用正弦或余弦旋转变压器等位置传感器的，但无论哪种测量方式本质都是用来测量转子位置信息，只是安装的体积、方便程度、成本及可靠性要求不同而已。

3. 逆变器

位置传感器将转子的位置信号电平反馈给控制芯片，控制芯片经过电流采样和数

学变换，并根据反馈的位置信息经过闭环运算，重新按新的 PWM 占空比输出，来触发功率器件（IGBT 或 MOSFET），实际上逆变器是自控的，由自身运行来保证电机的转速与电流输入频率同步，并避免振荡和失步的发生。

二、永磁同步电动机的工作原理

为方便理解我们先从无刷直流（BLDC）电机 120° 直流方波控制来讲解电机的基本工作原理，而 180° 控制原理则是在 120° 方波控制的基础上加入正弦变化控制。换言之，针对电机最优的控制，要看电机的反电动势是方波还是正弦波。方波或梯形波的按直流控制，正弦波的按正弦变化控制。

BLDC 电机的基本旋转需要依靠转子位置传感器检测的位置信息，然后经过电子换相电路来驱动控制同电枢绕组相连接的各个功率开关器件的关断或导通，从而起到控制绕组的通电状态，并在定子上产生一个连续的旋转磁场，以拖动转子跟着旋转。随着转子的不断旋转，传感器信号被不断地反馈给芯片，主芯片据此来改变电枢绕组的通电状态，使得在每磁极下的绕组中的电流方向相同。因此可以产生恒定转矩，并使 BLDC 电机连续旋转运行起来。

BLDC 电机三相绕组主回路有三相全控和三相半控两种。其中三相半控电路简单，一个功率开关驱动一相绕组，每个绕组只保持 1/3 的通电时间，而另外 2/3 的时间则保持断开状态，因此并没有被充分利用起来。所以我们通常采用三相全控电路，如图 2-3-20 所示。

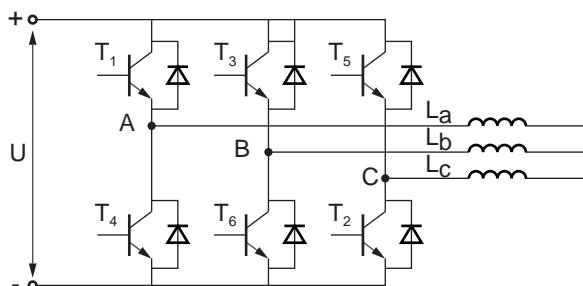


图 2-3-20 三相全控电路示意图

所谓的 120° 变频控制，其实是采取两两导通方式的控制策略。所谓两两导通方式是指每一时刻仅有两个功率管导通，每 1/6 周期开关管换相一次，而每次换相也即 PWM 调制一个功率管。下面给出一个典型的 IGBT 或 MOSFET 的连续通断开关顺序 $T_1 T_2 - T_2 T_3 - T_3 T_4 - T_4 T_5 - T_5 T_6 - T_6 T_1 - T_1 T_2$ ，按此调制通断即可产生连续的旋转电枢磁势，从而使电机运转。注意这里对 120° 变频来讲，每一步的 PWM 的占空比是固定不变的，从而产生直流方波。这种控制方式的特点是简单方便、容易掌握。而 180° 变频则不仅每 1/6 周期的 PWM 占空比不同，而且每一个 PWM 脉冲的占空比都在调整中，并在每个电周期内使电压按照正弦规律变化，对矢量变频来讲能使电流或磁通按照正弦规律周期变化。

空载时，同步电机气隙中仅有转子磁势存在；而带负载后，除转子磁势之外，还有定子三相电流产生的电枢磁动势。电枢磁动势的存在，会使气隙中磁场的位置和大小发生畸变，这种电枢磁动势影响主磁极磁场的现象称之为电枢反应。

电枢反应除了能使气隙磁场产生畸变之外，还会关系到机电能量转换，还有增磁或去磁作用，这对电机的运行性能会产生很大的影响。该反应的性质取决于主磁场与电枢磁动势在空间上的相对位置，分析表明该位置与负载电流 I_a 和激磁电动势 E_0 之间的相位差 Ψ 有关，下面将根据它们之间的相位关系分别进行分析。

1. I_a 与 E_0 同相位 ($\Psi=0^\circ$) 时的电枢反应

如图 2-3-21 所示， F_a 与 F_f 矢量相加后为气隙合成磁动势，另外，习惯上用 d (直轴) 来表示转子磁极轴线，用 q (交轴) 来表示 N、S 极之间的中线。这样因为交轴磁势的存在，会使合成磁势轴线的位置发生位移，并且幅值也发生一定的变化。

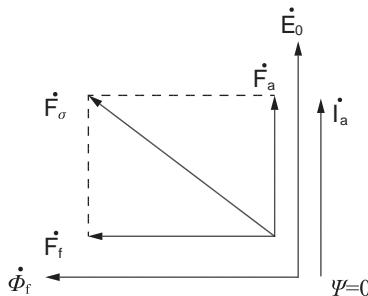


图 2-3-21 $\Psi=0^\circ$ 时的电枢反应

2. I_a 滞后 E_0 相位 ($\Psi=90^\circ$) 时的电枢反应

从图 2-3-22 中可以看出电枢磁动势的方向与气隙磁势的方向相反，电枢反应是具有去磁效果的。

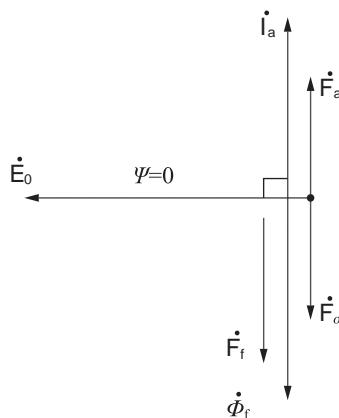


图 2-3-22 $\Psi=90^\circ$ 时的电枢反应

3. I_a 超前 E_0 相位 ($\Psi=-90^\circ$) 时的电枢反应

从图 2-3-23 中可以看出这时电枢反应是增磁作用的，也称为直轴增磁电枢磁动势。

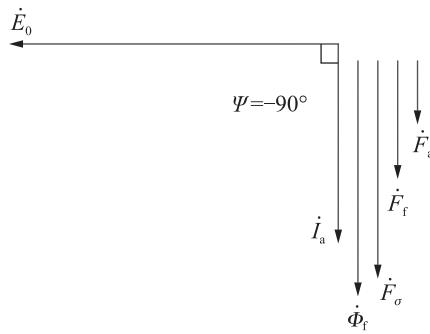


图 2-3-23 $\Psi = -90^\circ$ 时的电枢反应

4. 对于 Ψ 等于任意角度时的电枢反应

此时要分清电流是超前电动势还是滞后电动势。

(1) 电流滞后电动势: $0^\circ < \Psi < 90^\circ$

此时可利用叠加原理, 将 \dot{I}_a 分解成两个分量 \dot{I}_q 与 \dot{E}_0 以及滞后于 \dot{E}_0 90° 的分量 \dot{I}_d 。如图 2-3-24 的左图所示, 它们有如下数学关系:

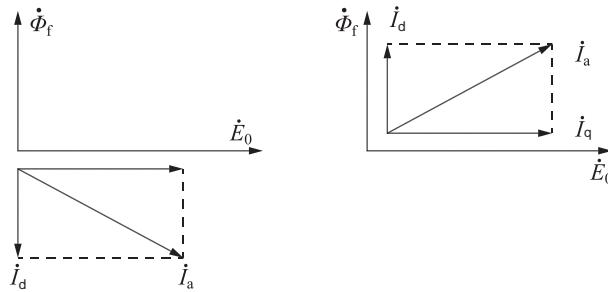


图 2-3-24 Ψ 等于任意角度时的电枢反应

$$\dot{I}_a = \dot{I}_d + \dot{I}_q \quad (3-7)$$

$$\left. \begin{array}{l} I_d = I_a \sin \Psi \\ I_q = I_a \cos \Psi \end{array} \right\} \quad (3-8)$$

I_q 与 \dot{E}_0 同相, 起交磁作用, I_d 与主磁势相反起去磁作用。也可以这样理解, 将电枢磁动势 F_a 按 Ψ 分解如下。

$$\left. \begin{array}{l} F_{ad} = F_a \sin \Psi \\ F_{aq} = F_a \cos \Psi \end{array} \right\} \quad (3-9)$$

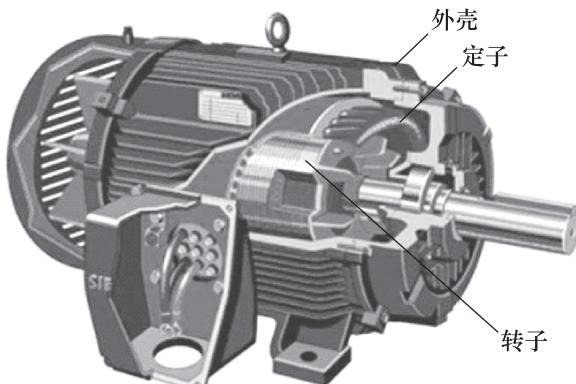
(2) 电流超前电动势: $-90^\circ < \Psi < 0^\circ$

从图 2-3-24 的右图上可以看出, 此时 I_q 仍然起交轴作用, 但 I_d 与主磁势方向相同起增磁作用。

综上分析有以下重要结论: 电枢磁动势除了产生交轴电枢反应外, 当 E_0 超前 I_a 时, 还会有一部分产生直轴去磁作用; 当 E_0 滞后 I_a 时, 就会产生直轴增磁作用。这个结论也是我们根据电机的结构来进行最大扭矩每安培控制的依据, 它直接关系到能耗的多少。

学习拓展二 开关磁阻电动机的认知

开关磁阻电动机调速系统是 20 世纪 80 年代中期发展起来的新型交流调速系统，它由开关磁阻电动机（SRM）、功率变换器、位置检测器及控制器所构成，其中开关磁阻电动机构成与永磁无刷直流电动机几乎一样，如图 2-3-25 所示。开关磁阻电动机调速系统以其电机结构简单可靠、系统效率高、高速运行区域宽等优良性能成为交流调速领域中的一支新军。



143

图 2-3-25 开关磁阻电动机构成

一、开关磁阻电动机的结构

典型的三相开关磁阻电动机的结构如图 2-3-26 所示。其定子和转子均为凸极结构，图中电机的定子有 6 个极 ($N_s=6$)，转子有 4 个极 ($N_r=4$)。定子极上套有集中线圈，两个空间位置相对的极上的线圈顺向串联构成一相绕组，图 2-3-26(a) 中只画出了 A 相绕组；转子由硅钢片叠压而成，转子上无绕组，该电机则称为三相 6/4 极开关磁阻电动机。在结构形式及工作原理上，开关磁阻电动机与大步距反应式步进电机并无差别；但在控制方式上步进电机应归属于他控式变频，而开关磁阻电动机则归属于自控式变频；在应用上步进电机都用作“控制电机”，而开关磁阻电动机则是拖动用电机，因此电机设计时所追求的目标不同而使电机的设计参数不同。

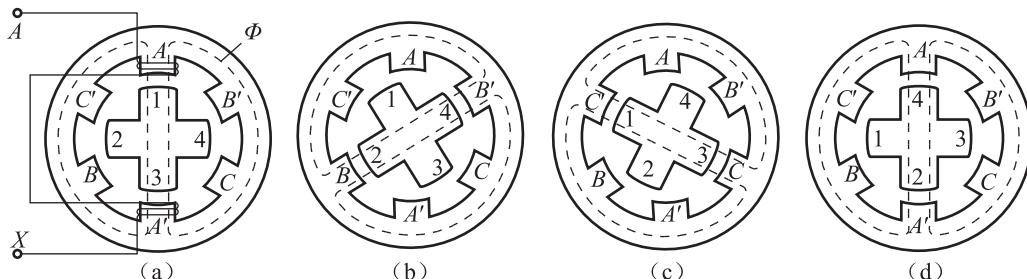


图 2-3-26 开关磁阻电动机的结构

二、开关磁阻电动机的工作原理

开关磁阻电动机的静转矩可以通过其磁场储能 W_m 或磁共能 W_m' 对转子位置角 θ 的偏导数求得，即

$$n = \frac{\partial W_m'}{\partial \theta} \Big|_{i=const} \quad (3-10)$$

在电机磁路不饱和，即假定磁路是线性的情况下，有

$$W_m = W_m' = \frac{1}{2} i \Psi = \frac{1}{2} i^2 L \quad (3-11)$$

从而静转矩为

$$T = \frac{\partial W_m'}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (3-12)$$

式中， i 、 Ψ 、 L 分别是通电相绕组的电流、磁链及电感。

上式反映出了磁阻性质转矩产生的原因，当电流恒定时，只有磁导 Λ ($L = N^2 \Lambda$, N 是绕组匝数) 随位置 θ 变化时才会产生转矩，且该转矩总是力图使 Λ (或 L) 趋向最大处，且可知 $\frac{\partial L}{\partial \theta} > 0$ 时，产生正向转矩； $\frac{\partial L}{\partial \theta} < 0$ 时，产生制动转矩。据此，即可由开关磁阻电动机的电感 L (或磁导 Λ) 随转子位置角 θ 而变化的曲线 $L = f(\theta)$ 得到矩角特性 $T = f(\theta)$ ，两条曲线如图 2-3-27(a)、(b) 所示。图 (a) 是 A 相绕组的磁导 $\Lambda_A(\theta)$ 或电感 $L_A(\theta)$ 曲线，其电感最小位置是定子极轴线对准转子槽轴线的位置，并定义此时刻 $\theta = 0^\circ$ ；其电感最大位置是定子极轴线与转子极轴线对齐的位置，此时刻 $\theta = 45^\circ$ 。从电感曲线可看到，电感变化的周期是 90° 机械角，是一个电周期，故电角度是机械角度的 N_r 倍，为免去不同转子极数电机分析时角度不同的麻烦，以下 θ 角均以电角度 (或电弧度) 表示。图 2-3-27 (b) 中，除 A 相的矩角特性 T_A 外，还同时用虚线画上了 B、C 相的矩角特性。

从矩角特性可知，在 $0 \sim \pi$ 区域内，电感上升，在 A 相绕组中通入电流 (正、负电流都可以)，就可以得到正转矩；在 $\pi \sim 2\pi$ 区域内，电感下降，故只要 A 相绕组有电流就会得到制动转矩。但在电感的最小值及最大值附近，电感不变或变化不大，所能得到的转矩为零或接近零。

类似于无刷直流电动机自控式变频的方式，用位置信息来控制各绕组的通断即可输出正向 (或反向) 的平均转矩。用位置检测器把 $0 \sim 2\pi$ 分成 6 个编码的区域①～⑥，如图 2-3-27 (c) 所示。为充分利用正转矩，采用 180° 导通方案，假设电流如图 2-3-27 (d) 所示，则可得到如图 2-3-27 (e) 所示的电机输出转矩波形。电动机将正向电动运行。从图 2-3-27 (d) 中可以看到，在位置码控制下，其导通顺序是 A—AB—B—BC—C—CA—A。

对正向运行的电机，得到制动转矩，转矩波形如图 2-3-27 (g) 所示；对静止的电机则得到与参考方向反向的转矩，使电机反向启动，进入反转电动运行。反转时， θ 角是反向运动的，所以从图 2-3-27 (f) 中可以看到实际的导通顺序是 A—AC—

$C-CB-B-BA-A$ 。

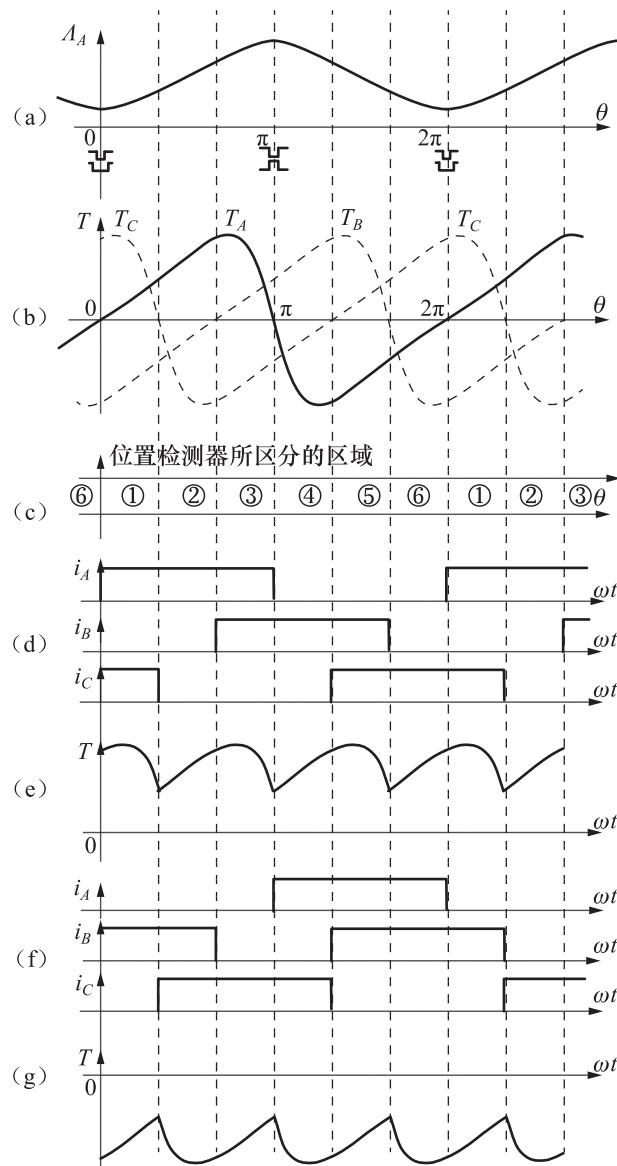


图 2-3-27 开关磁阻电动机的工作原理