

常用电机控制及调速技术

(第2版)

● 主 编 翟雄翔

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

常用电机控制及调速技术

(第2版)

主编 翟雄翔

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

常用电机控制及调速技术/翟雄翔主编. —2 版. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 8
ISBN 978-7-5682-4698-9

I. ①常… II. ①翟… III. ①电机-控制系统-高等学校-教材 ②电机-调速-高等学校-教材 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 206304 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17

字 数 / 400 千字

版 次 / 2017 年 8 月第 2 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 65.00 元

责任编辑 / 孟雯雯

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

丛书编审委员会

主任委员

夏成满 晏仲超

委 员

常松南	陶向东	徐 伟	王稼伟	刘维俭	曹振平
倪依纯	郭明康	朱学明	孟华锋	朱余清	赵太平
孙 杰	王 琳	陆晓东	缪朝东	杨永年	强晏红
赵 杰	吴晓进	曹 峰	刘爱武	何世伟	丁金荣

前 言

本书在第1版的基础上作了很多修改。首先是改变了编书结构，更强调实践性，以任务驱动；其次对第1版书中存在的问题做了修订；第三是将项目任务内容增加了，特别是增加了任务实施内容以增强动手能力；第四是部分任务增加了计算机仿真。应该说本次教材的编写，教材结构更趋科学；教材内容更趋完善；教材使用方法更趋系统；教材应用领域更趋合理。

第2版参编人员也有部分变动。项目1由王世敏编写；项目2和项目7由翟雄翔编写；项目3由翟原编写；项目4由张苏新编写；项目5由徐菊香编写；项目6由乔茹编写；项目8由朱晔、翟雄翔编写。

本书由翟雄翔主编，全书由翟雄翔统稿。

编 者

目 录

项目 1 三相交流异步电动机的常用控制技术	1
任务 1.1 三相异步电动机正反转控制电路的安装	2
任务 1.2 三相异步电动机降压启动控制电路的安装	15
任务 1.3 三相异步电动机制动控制电路的安装	28
项目 2 三相交流异步电动机的常用调速技术	47
任务 2.1 变极调速控制电路的安装与调试	48
任务 2.2 交流电动机变频调速控制电路的安装与调试	59
任务 2.3 交流电动机变 S 调速控制电路的安装与调试	79
项目 3 单相交流电动机的控制与调速技术	89
任务 3.1 单相异步电动机常用控制技术	91
任务 3.2 单相交流电动机的调速技术	101
任务 3.3 单相交流电动机的维护与检修技术	108
项目 4 直流电动机的控制与调速技术	117
任务 4.1 直流电动机常用控制电路的安装与调试	119
任务 4.2 直流电动机电枢串阻调速控制电路的安装调试	135
任务 4.3 直流电动机弱磁调速控制电路的安装与测试	142
任务 4.4 直流电动机降压调速控制电路的安调与故障检修	147
项目 5 伺服电动机的控制与调速技术	157
任务 5.1 直流伺服电动机控制与调速电路的安装及特性测试	158
任务 5.2 交流伺服电动机控制系统的安装	165
任务 5.3 伺服电动机应用实例	174
项目 6 步进电动机的控制与调速技术	187
任务 6.1 步进电动机的拆装	188
任务 6.2 步进电动机控制电路的安装与调试	196
任务 6.3 步进电动机应用实例	207
项目 7 滑差电动机的控制与调速技术	215
任务 7.1 滑差电动机控制线路的安装	219
任务 7.2 滑差电动机速度控制	228

任务 7.3	滑差电动机的维护与常见故障排除	230
任务 7.4	滑差电动机应用实例分析	235
项目 8	其他电机的控制与调速技术	239
任务 8.1	测速发电机控制技术	241
任务 8.2	自整角机控制技术	250
任务 8.3	直线电动机控制技术	257



项目 1

三相交流异步电动机的 常用控制技术

【知识目标】

1. 理解三相异步电动机工作特性及工作原理。
2. 了解三相异步电动机的启动、制动及工作原理。
3. 掌握三相异步电动机控制电路的安装方法。
4. 掌握三相异步电动机典型故障的检测、判断及排除方法。

【技能目标】

1. 能够正确安装和调试三相异步电动机常用控制电路。
2. 能够使用相关仪表对三相异步电动机进行测试。
3. 能够检修和排除三相异步电动机常用控制电路的典型故障。



任务导入

电动机是利用电磁感应原理把电能转换为机械能,输出机械转矩的动力机械。通常工业生产中应用较多的电动机是交流电动机,特别是三相异步电动机,它具有结构简单、坚固耐用、运行可靠、价格低廉、维护方便等优点,是目前机械设备的主要动力,广泛应用于各种生产设备的驱动中。

电动机的常用控制方式主要分为全压启动和降压启动两种。三相异步电动机的直接启动必须在电网或供电电压允许的情况下才能采用。全压启动主要包括点动控制、单向连续运转控制和正反转控制等。全压启动的优点是电气设备少、线路简单、维修量小。

在电动机启动电流过大、电源变压器容量不够、电动机功率较大的情况下,一般采用降压启动。鼠笼型异步电动机可以采用星形-三角形启动、定子绕组串电阻启动、自耦变压器启动等降压启动方法。绕线型异步电动机可以采用转子串电阻、转子串频敏变阻器的方法以减小启动电流。

所谓制动,就是给电动机一个与转动方向相反的转矩或通过限制其转速使其迅速停转。制动的方法一般有机电制动和电力制动。

本项目主要通过对三相异步电动机正反转控制、常用降压启动控制、常用制动控制等电路相关知识的学习、控制原理分析,完成控制电路电器元件的安装固定、电气控制线路的连接及故障排除,全面提高布线工艺及电气接线能力。

任务 1.1 三相异步电动机正反转控制电路的安装

1.1.1 任务目标

- (1) 熟练掌握三相异步电动机正反转控制电路的构成和工作原理。
- (2) 能够正确进行三相异步电动机正反转控制电路的安装和调试。
- (3) 学习、掌握并认真实施电气安装基本步骤及工艺规范。

1.1.2 任务内容

- (1) 学习三相异步电动机正反转控制的相关知识。
- (2) 认识倒顺开关控制、交流接触器控制三相异步电动机正反转控制电路图。
- (3) 设计三相异步电动机正反转控制的电气布置图。
- (4) 按照电气控制原理图完成三相异步电动机正反转控制线路的安装。
- (5) 完成三相异步电动机正反转控制线路故障的检测与排除。



1.1.3 必备知识

1.1.3.1 三相异步电动机的结构

三相异步电动机由两个基本部分组成：一个是固定不动的部分，称为定子；一个是旋转部分，称为转子。图1-1所示为三相异步电动机的外形和结构。

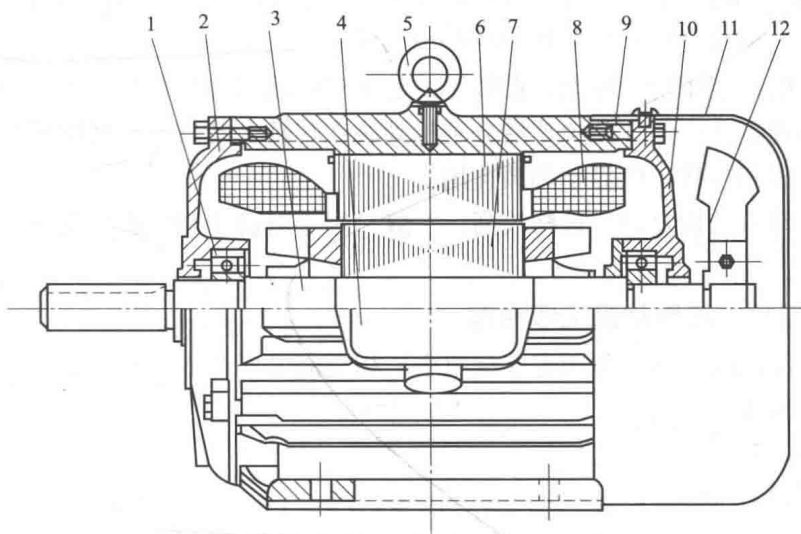


图1-1 三相异步电动机的外形和结构

1—轴承；2—前端盖；3—转轴；4—接线盒；5—吊攀；6—定子铁芯；7—转子铁芯；
8—定子绕组；9—机座；10—后端盖；11—风罩；12—风扇

1. 定子

定子由机座、定子铁芯、定子绕组和端盖等组成。机座通常用铸铁制成，机座内装有由0.5 mm厚的硅钢片叠制而成的定子铁芯，铁芯内圆周上分布着定子槽，槽内嵌放三相定子绕组，定子绕组与铁芯间有良好的绝缘。

定子绕组是定子的电路部分，小型电动机的定子绕组一般由漆包线绕制而成，共分三相，分布在定子铁芯槽内，构成对称的三相绕组。三相绕组共有六个出线端，将其引出接在置于电动机外壳上的接线盒中，三个绕组的首端分别用U1、V1、W1表示，其对应的尾端分别用U2、V2、W2表示。通过对接线盒上六个端头进行不同连接，可将三相定子绕组接成星形连接或三角形连接，如图1-2所示。

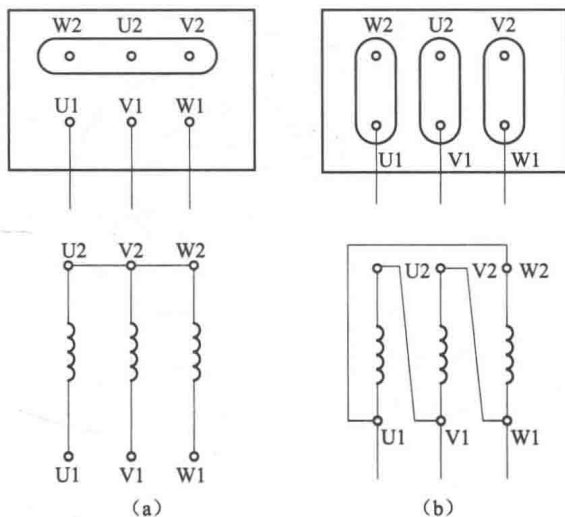


图1-2 三相定子绕组的接法

(a) 星形连接；(b) 三角形连接

2. 转子

转子由转子铁芯、转子绕组、转轴

和风扇等组成。转子铁芯为圆柱形,通常是利用定子铁芯冲片冲下的内圆硅钢片,将其外圆周冲成均匀分布的槽后叠成,并压装在转轴上。转子铁芯与定子铁芯之间有很小的空气隙,它们共同组成电动机的磁路。转子铁芯外圆周上均匀分布的槽是用来安放转子绕组的。

转子绕组有笼型和绕线转子型两种结构。笼型转子绕组是由嵌在转子铁芯槽内的铜条或铝条组成的,两端分别与两个短接的端环相连。如果去掉铁芯,转子绕组外形像一个鼠笼,故也称鼠笼型转子。目前中小型异步电动机大多在转子铁芯槽中采用浇注铝液,铸成鼠笼型绕组,并在端环上铸出许多叶片,作为冷却用的风扇。

绕线转子绕组与定子绕组相似,在转子铁芯槽中嵌放对称的三相绕组,作星形连接,将三个绕组的尾端连接在一起,三个首端分别接到装在转轴上的三个铜制圆环上,通过电刷与外电路的可变电阻相连接,供启动和调速用。

绕线转子电动机结构复杂,价格较高,一般只用于对启动和调速要求较高的场合,如起重机等设备。

1.1.3.2 三相异步电动机工作原理

三相异步电动机的旋转是利用定子绕组中三相交流电所产生的旋转磁场与转子绕组内的感应电流相互作用而产生的。

1. 旋转磁场

1) 旋转磁场的产生

图 1-3 所示为一个最简单的二极三相异步电动机定子绕组布置图。每相绕组由一个线圈组成,三个相同的绕组 U_1U_2 、 V_1V_2 、 W_1W_2 在定子铁芯槽内互成 120° 放置,其尾端 U_2 、 V_2 、 W_2 连成一点,作星形连接。当定子绕组的三个首端 U_1 、 V_1 、 W_1 分别与三相交流电源 L_1 、 L_2 、 L_3 接通时,在定子绕组中便有对称的三相交流电流 i_U 、 i_V 、 i_W 流过。若电源电压的相序为 $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3$, 电流参考方向或规定正方向如图 1-3 所示,即从 U_1 、 V_1 、 W_1 流入,从尾端 U_2 、 V_2 、 W_2 流出,则三相电流 i_U 、 i_V 、 i_W 波形如图 1-4 所示,它们在相位上互差 120° 电角度。

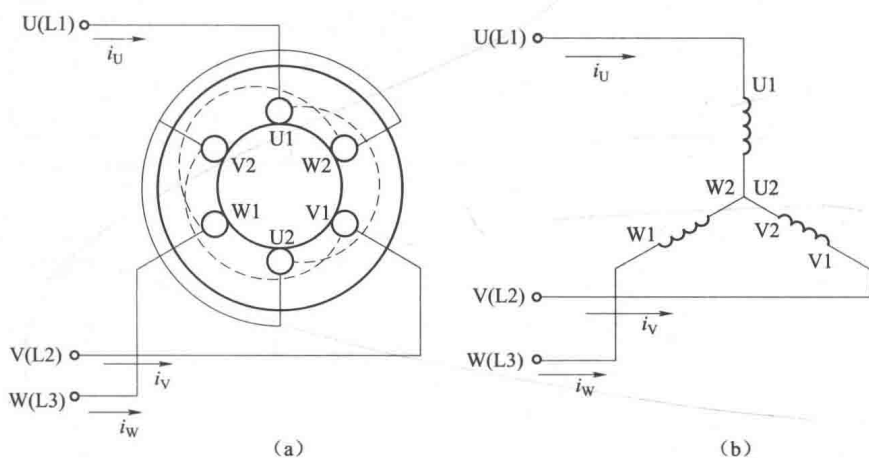


图 1-3 三相异步电动机三相定子绕组的布置

下面分析三相交流电流在铁芯内部空间产生的合成磁场。当 $\omega t = 0$ 时, i_U 为零, U_1U_2

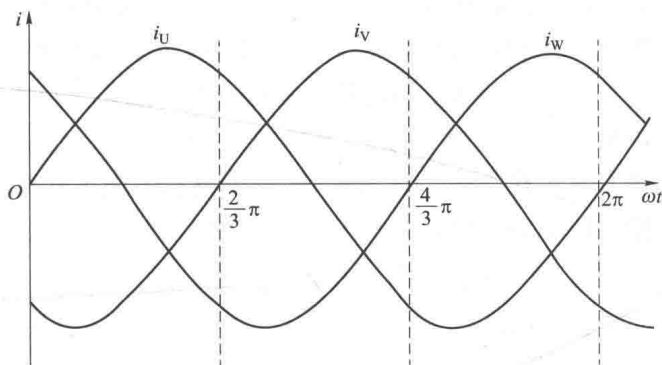


图 1-4 三相交流电流波形

绕组无电流； i_V 为负，电流的真实方向与参考方向相反，即从尾端 V2 流入，从首端 V1 流出； i_W 为正，电流真实方向与参考方向一致，即从首端 W1 流入，从尾端 W2 流出，如图 1-5 (a) 所示。将每相电流生产的磁感线相加，便得出三相电流共同产生的合成磁场，这个合成磁场此刻方向是自上而下，相当于一个 N 极在上、S 极在下的两极磁场。用同样的方法可画出 ωt 为 $\frac{2}{3}\pi$ 、 $\frac{4}{3}\pi$ 、 2π 时各相电流的流向及合成磁场的磁感线方向，如图 1-5 (b) ~ 图 1-5 (d) 所示，磁场沿 $U1 \rightarrow V1 \rightarrow W1$ 的方向依次旋转了 120° ，而 $\omega t = 2\pi$ 时的电流流向与 $\omega t = 0$ 时完全一样，合成磁场又回到了开始的位置，以后以此类推。若进一步分析其他瞬时的合成磁场可以发现，各瞬间的合成磁场的磁通大小和分布情况均相同，仅方向不同而已，但都向一个方向旋转。因此，每当正弦交流电变化一周时，合成磁场在空间正好旋转了一周。

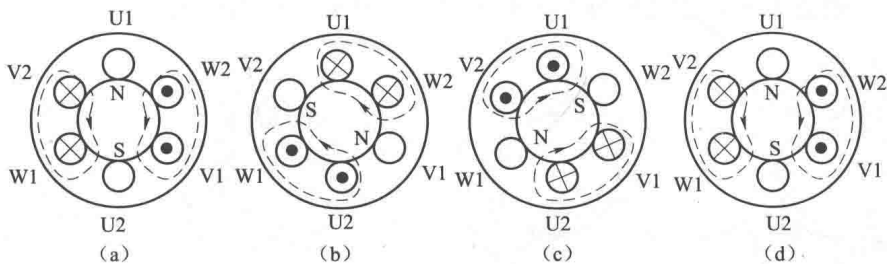


图 1-5 三相旋转磁场的产生

(a) $\omega t = 0$; (b) $\omega t = \frac{2}{3}\pi$; (c) $\omega t = \frac{4}{3}\pi$; (d) $\omega t = 2\pi$

因此，在定子铁芯中空间互差 120° 的三个线圈中分别通入相位互差 120° 的三相交流电时，所产生的合成磁场是一个旋转磁场，而且旋转磁场每秒的转数等于交流电每秒变化的周数（即频率 f ），因此旋转磁场每分钟的旋转速度 $n = 60f$ ，一般交流电的频率为 50 Hz，所以形成的旋转磁场是 3 000 r/min。

上述电动机定子绕组每相只有一个线圈，三相定子绕组共有三个线圈，分别置于定子铁芯的 6 个槽中。当通入三相对称电流时，产生的旋转磁场相当于一对 N、S 磁极在旋转，称为二极旋转磁场。普遍使用的电动机定子绕组产生的旋转磁场一般为四极旋转磁场，每相绕

组由两个线圈串联组成, 定子铁芯槽数为 12, 每个线圈在空间相隔 60° 。如图 1-6 所示, U 相由 $U1U2$ 与 $U1'U2'$ 串联, V 相由 $V1V2$ 与 $V1'V2'$ 串联, W 相由 $W1W2$ 与 $W1'W2'$ 串联组成, 三相定子绕组尾端 $U2'$ 、 $V2'$ 、 $W2'$ 相连形成星形连接, 首端 $U1$ 、 $V1$ 、 $W1$ 接三相电源, 此时同一相中两个线圈的首端 (如 $U1$ 与 $U1'$ 端) 在空间上相隔 180° , 而各相绕组的首端 (如 $U1$ 与 $V1$ 、 $V1$ 与 $W1$ 端) 在空间上只相隔 60° , 因此, 当通入三相交流电时, 可产生具有两对磁极的旋转磁场, 如图 1-6 所示。

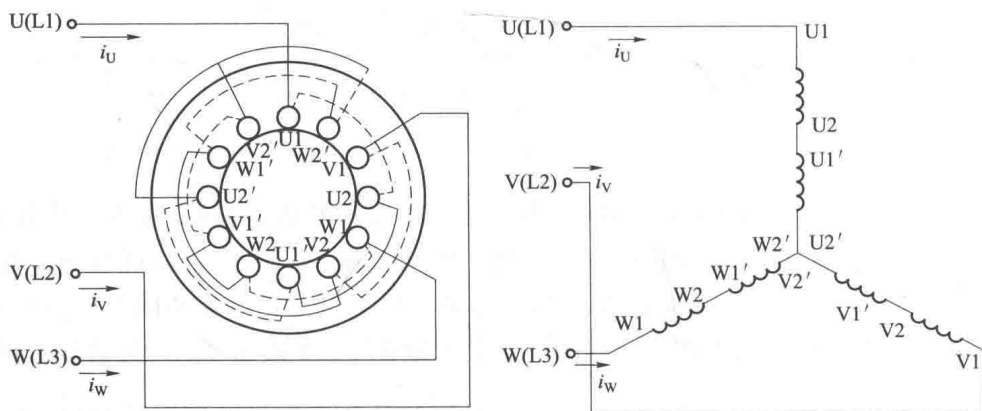


图 1-6 四级电动机定子绕组结构和接线图

当 $\omega t=0$ 时, i_U 为零, U 相绕组无电流; i_V 为负值, i_W 为正值, V 相与 W 相电流流向及合成磁场如图 1-7 (a) 所示。当 $\omega t=\frac{2}{3}\pi$ 、 $\frac{4}{3}\pi$ 及 2π 时, i_U 、 i_V 、 i_W 的流向及合成磁场情况如图 1-7 (b) ~ 图 1-7 (d) 所示。当正弦交流电变化一周时, 合成磁场在空间上只旋转了 180° 。由此可见, 旋转磁场的极对数越多, 其旋转磁场转速越低。

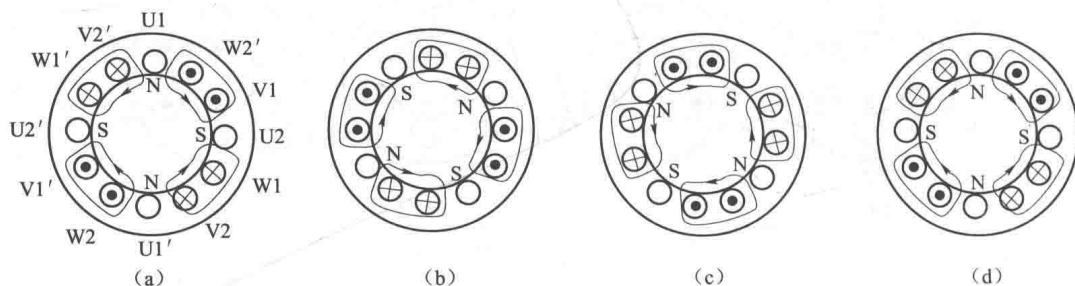


图 1-7 四级电动机旋转磁场

(a) $\omega t=0$; (b) $\omega t=\frac{2}{3}\pi$; (c) $\omega t=\frac{4}{3}\pi$; (d) $\omega t=2\pi$

2) 旋转磁场的转速

如上所述, 有一对磁极的旋转磁场中, 当电流变化一周时, 旋转磁场在空间正好转过一周。对 50 Hz 的工频交流电来说, 旋转磁场每秒将在空间旋转 50 周, 其转速 $n_1=60f_1=60\times 50=3\,000$ (r/min); 若旋转磁场有 2 对磁极, 则电流变化一周, 旋转磁场只转过 0.5 周, 显然转速慢了一半, 即 $n_1=60f_1/2=1\,500$ (r/min); 同理, 在三对磁极的情况下, 旋转磁场的

转速 $n_1 = 60f_1/3 = 1\,000$ (r/min)。以此类推, 当旋转磁场具有 p 对磁极时, 旋转磁场转速为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-1)$$

式中, n_1 ——旋转磁场转速 (r/min);

f_1 ——交流电源频率 (Hz);

p ——旋转磁场的极对数。

旋转磁场的转速 n_1 又称为同步转速。由式 (1-1) 可知, 它决定于电源频率 f_1 和旋转磁场的极对数 p 。当电源频率 $f_1 = 50$ Hz 时, 三相异步电动机同步转速 n_1 与磁极对数 p 的关系如表 1-1 所示。

表 1-1 $f_1 = 50$ Hz 时的旋转磁场转速

磁极对数 p	1	2	3	4	5
同步转速 $n_1/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3 000	1 500	1 000	750	600

3) 旋转磁场的旋转方向

旋转磁场在空间的旋转方向是由电流相序决定的。由图 1-5 和图 1-7 中各瞬间磁场变化可以看出, 当通入三相绕组中电流的相序为 $i_U \rightarrow i_V \rightarrow i_W$ 时, 旋转磁场在空间上是沿绕组始端 $U \rightarrow V \rightarrow W$ 方向旋转的, 即按顺时针方向旋转。如果把通入三相绕组的电流相序任意调换其中两相, 比如调换 V、W 两相, 此时通入三相绕组电流的相序为 $i_U \rightarrow i_W \rightarrow i_V$, 则旋转磁场按逆时针方向旋转。

2. 转子的转动

1) 转子转动的原理

当定子绕组接通三相电源后绕组中流过三相交流电流, 图 1-8 所示为某瞬间定子电流产生的磁场, 如果它以同步转速 n_1 按顺时针方向旋转, 则静止的转子与旋转磁场间就有了相对运动, 这相当于磁场静止而转子按逆时针方向旋转, 则转子导体切割磁感线, 在转子导体中产生感应电动势 E_2 , 其方向可用右手定则来确定, 转子上半部导体的感应电动势方向是出纸面的, 下半部导体的感应电动势方向是进入纸面的。由于转子导体是闭合的, 所以在转子感应电动势作用下, 产生转子电流 I_2 , 若忽略 $\dot{I}_2$ 与 $\dot{E}_2$ 之间的相位差, 则 I_2 的方向与转子感应电动势方向一致。通有转子电流 I_2 的转子导体处于定子磁场中, 根据左手定则, 便可确定转子导体受到的电磁力 F 的作用方向, 如图 1-8 所示。由于转子导体是圆周均匀分布的, 所以电磁力 F 对转轴形成电磁转矩 T 的方向与旋转磁场的旋转方向相同, 于是转子就顺着定子旋转磁场旋转方向转动起来了。

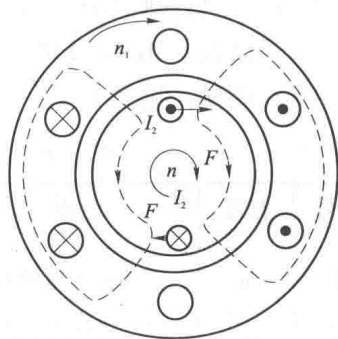


图 1-8 异步电动机转动原理

2) 转子的转速 n 、转差率 s 与转动方向

由以上分析可知, 异步电动机转子旋转方向与旋转磁场的旋转方向一致, 但转速 n 不可能与旋转磁场的转速 n_1 相等。因为产生电磁转矩需要转子中存在感应电动势和感应电流,

如果转子转速与旋转磁场转速相等,两者之间就没有相对运动,转子导体将不切割磁感线,则转子感应电动势、转子电流及电磁转矩都不存在了,转子减速,不可能继续以 n_1 转动。只是,转子转速 n 与旋转磁场转速 n_1 之间必须有差别,且 $n < n_1$ 。这就是“异步”电动机名称的由来。另外,又因为产生转子电流的感应电动势是由电磁感应产生的,所以异步电动机也称为“感应”电动机。

同步转速 n_1 与转子转速 n 之差称为转速差,转速差与旋转磁场的转速(同步转速)的比值称为转差率,用 s 表示,即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (1-2)$$

转差率是分析异步电动机运行情况的一个重要参数。如启动瞬间 $n=0$, $s=1$, 转差率最大;空载时 n 接近 n_1 , s 很小,一般在 0.005 以下;若 $n=n_1$, 则 $s=0$, 此时称为理想空载状态,这在实际运行中是不存在的。异步电动机工作时,转差率在 0~1 之间变化,当电动机在额定负载下工作时,其额定转差率 $s_N=0.01\sim0.07$ 。

异步电动机的转动方向总是与旋转磁场的转向一致。要改变三相异步电动机的旋转方向,只需把定子绕组与三相电源连接的三根导线中任意两根对调,改变旋转磁场的转向,即可实现电动机转向的改变。

1.1.4 任务实施

1.1.4.1 倒顺开关控制三相异步电动机正反转电路的安装

1. 任务实施准备

- (1) 工具:测试笔、螺钉旋具、斜口钳、尖嘴钳、剥线钳、电工刀等。
- (2) 仪表:MF47 万用表、5050 兆欧表。
- (3) 器材:见表 1-2。

表 1-2 倒顺开关控制三相异步电动机正反转电路安装器材

序号	符号	名称	型号	规格	数量
1	M	三相异步电动机	Y-132S-4	7.5 kW, 380 V, Δ 接法, 15.4 A, 1 440 r/min	1
2	QS	三相倒顺开关	HY23-133	380 V, 30 A	1
3	FU	熔断器	RL1-60/25	500 V, 60 A, 配熔体 25 A	3
4	XT	端子板	JX2-101	380 V, 10 A, 15 节	1
5		走线槽		18 mm $\times$ 25 mm	若干
6		控制板		500 mm $\times$ 400 mm $\times$ 20 mm	1

2. 倒顺开关控制三相异步电动机正反转控制电气原理图

图 1-9 所示为采用倒顺开关控制的三相异步电动机正反转控制电路,其主电路主要由电源开关 QS、熔断器 FU、倒顺开关和电动机 M 构成。

倒顺开关是组合开关的一种,也称可逆转换开关,是专为控制小容量三相异步电动机的

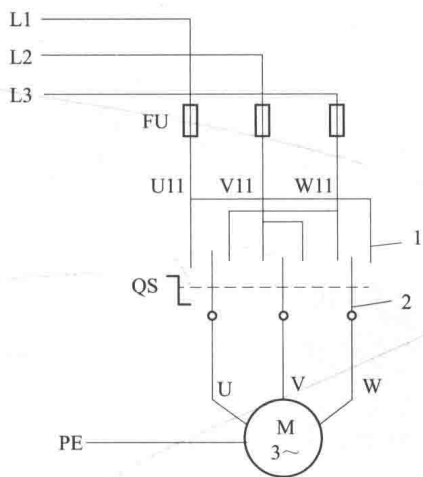


图 1-9 倒顺开关控制三相异步电动机正反转电气原理图
1—动触头；2—静触头

正反转而设计生产的。开关的手柄有“正转”“停”“反转”三个位置，手柄只能从“停”的位置左转 45°或右转 45°。

采用倒顺开关控制的三相异步电动机正反转控制电路的控制过程如表 1-3 所示。

表 1-3 采用倒顺开关控制正反转电路原理

手柄位置	QS 状态	电路状态	电动机状态
停	QS 的动、静触头不接触	电路不通	电动机不转
顺	QS 的动触头和左边的静触头相接触	电路按 L1 - U、L2 - V、L3 - W 接通	电动机正转
倒	QS 的动触头和右边的静触头相接触	电路按 L1 - W、L2 - V、L3 - U 接通	电动机反转

3. 任务实施内容与步骤

- 1) 电器元件安装固定
 - (1) 清点、检查器材元件。
 - (2) 设计三相异步电动机正反转控制线路电器元件布置图，如图 1-10 所示。
 - (3) 根据电气安装工艺规范安装固定电器元件。
- 2) 电气控制电路连接
 - (1) 设计三相异步电动机正反转控制线路电气接线图。
 - (2) 按电气安装工艺规范实施电路布线连接，图 1-11 所示为参考接线图。
- 3) 电气控制电路通电试验、调试排故
 - (1) 安装完毕的控制线路板，必须按要求进行认真检查，确保无误后才允许通电试车。特别注意认清倒顺开关的结构和接线方式后方可接线。

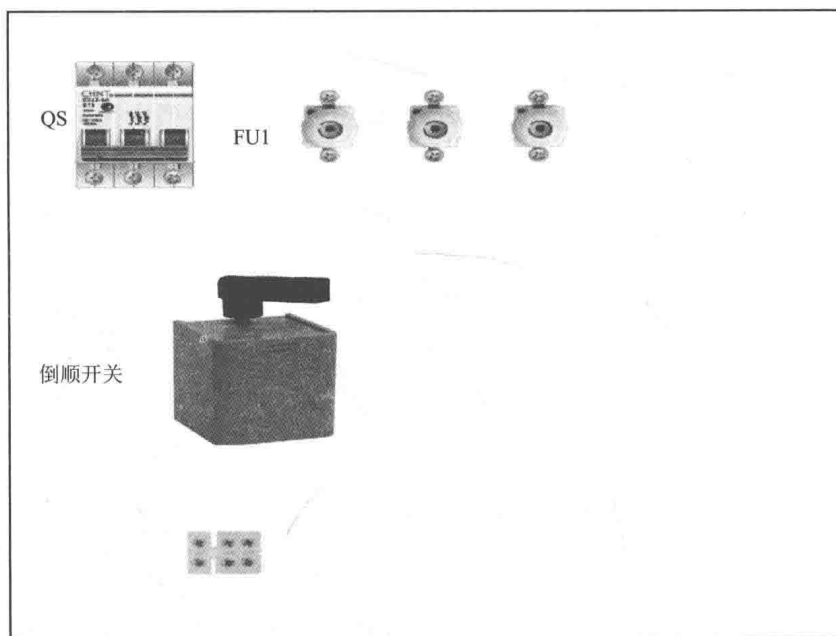


图 1-10 倒顺开关控制三相异步电动机正反转控制线路电器布置图

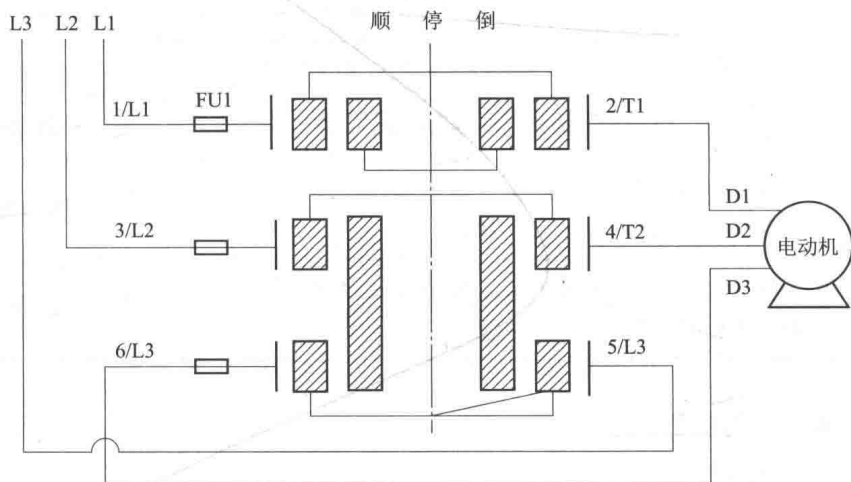


图 1-11 倒顺开关控制三相异步电动机正反转控制线路电气接线图

- (2) 经指导教师复查认可，且在场监护的情况下进行通电校验。
- (3) 如若在校验过程中出现故障，学生应独立进行调试和排故。
- (4) 断开电源，等电动机停转后，先拆除三相电源线，再拆除电动机接线，然后整理训练场地，恢复原状。

4. 安装评价

安装评价按照表 1-4 进行。