



高等职业技术教育机电类专业规划教材



变频器应用基础

石秋洁 主 编

张燕宾 副主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等职业技术教育机电类专业规划教材

变频器应用基础

主 编 石秋洁
副主编 张燕宾
参 编 杨翠明
主 审 冯垛生 林德杰



机械工业出版社

本教材主要讲解了变频器的基本结构、变频调速的基本原理,变频器的基本运行功能、参数预置和操作,变频器的安装、抗干扰处理,变频驱动系统的设计和典型应用实例。

本教材的特点是:本着原理定性讲,应用重点讲,操作现场讲的原则,从实用、实操的角度分析讲解,淡化理论,便于理解和接受。由于应用部分邀请了变频器应用专家编写,使该部分内容既新颖实用,又避免了理论计算。由于书后附有实验指导书,所以变频器的运行功能、参数预置和操作是结合实验来讲解的,故易于理解。附录中还介绍了简易实验台的制做方法。

本书为高职高专中职电气、机电类专业的教材,中职学校亦可选用。其中“*”的章节可以略讲。本课程各专业可做考查课或选修课,学时为50左右,也可作为短期培训班的教材及供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频器应用基础/石秋洁主编. —北京:机械工业出版社,2002.12(2011.1重印)

高等职业技术教育机电类专业规划教材

ISBN 978-7-111-11063-7

I. 变... II. 石... III. 变频器—高等学校:技术学校—教材 IV.

TN773

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第081786号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:于宁 贡克勤 版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京市朝阳区展望印刷厂印刷

2011年1月第1版第13次印刷

184mm×260mm·10.75印张·265千字

43001-47000册

标准书号:ISBN 978-7-111-11063-7

定价:19.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

序

职业教育指受教育者获得某种职业或生产劳动的职业道德、知识和技能的教育。机电行业的职业技术教育是培养在生产一线的技术、管理和运行人员，他们主要从事成熟的技术和管理规范的应用与运作。随着社会经济的发展和科学技术的进步，生产领域的技术含量在不断提高。用人单位要求生产一线的技术、管理和运行人员的知识与能力结构与之适应。行业发展的要求促使职业技术教育的高层次——高等职业教育蓬勃成长。

高职教育与高等工程专科、中专教育培养的人才属同一类型，都是技术型人才，毕业生将就业于技术含量不同的用人单位。高等职业教育的专业设置必须适应地区经济与行业的需求。高等职业教育是能力本位教育，应以职业分析入手，按岗位群职业能力来确定课程设置与各种活动。

机械工业出版社出版了大量的本科、高工专、中专教材，其中有相当一批教材符合高等职业教育的需求，具有很强的职业教育特色，在此基础上这次又推出了机械类、电气类、数控类三个高职专业的高职教材。

专门课程的开发应遵循适当综合化与适当实施化。综合化有利于破除原来各种课程的学科化倾向，删除与岗位群职业能力关系不大的内容，有利于删除一些陈旧的内容，增添与岗位群能力所需要的新技术、新知识、如微电子技术、计算机技术等。实施化是课程内容要按培养工艺实施与运行人员的职业能力来阐述，将必要的知识支撑点溶于能力培养的过程中，注重实践性教学，注重探索教学模式以达到满意的教学效果。

本教材倾注了众多编写人员的心血，他们为探索我国机电行业高职教育作出可贵的尝试。今后还要依靠广大教师在实践中不断改进，不断完善，为创建我国的职业技术教育体系而奋斗。

赵克松

前 言

《变频器应用基础》是原机械工业部高专教育电气工程类专业“九五”规划教材众所周知，交流调速主要是指变频调速。而以往的交流调速教材内容艰深，理论性强，教学上迫切需要以介绍变频器应用为主要内容的教材来补充现有的教材体系，本教材就是在这种情况下诞生的。它第一次构架了变频器应用的教学体系，也是该类教材的第一个版本。本书为高职高专的教材，亦可供中等职业技术学校选用。

本教材本着原理定性讲，应用重点讲，操作现场讲的原则，从实用、实操的角度分析讲解，从而淡化了理论推导，便于理解和接受。考虑到电机拖动和变频调速的基本原理在相关的专业基础课中已有介绍，只是相隔时间较长，学生们印象比较模糊，因此第一、二章介绍一些必备的基础知识，供不同的专业选讲。第三章~第五章介绍变频器的功能和操作。在学习第三章的过程中可结合实验指导书选做一些实验。第六、七章以介绍实用的设计方法为主，避开了理论计算问题。通过对风机、水泵等常见负载的变频调速系统的介绍，从组成特点、设计方法、接线形式及参数预置等多方面对系统进行说明，对了解、掌握变频调速系统有很大的帮助。

考虑到各校变频调速实验设备的缺乏，而商品实验设备尚未普及，在教材的附录中介绍了简易实验台的制做，以确保操作能够在实验台上讲解。

随着学分制改革的不断深入，多开新课、选修课已势在必行。《变频器应用基础》作为变频器应用方面的课程，可以在电气、机电等专业开出。

本书由广东省中山市中等专业学校石秋洁高级讲师任主编（编写第二、三、五章、实验指导书及部分附录），并对全书进行了统稿。湖北省宜昌市自动化研究所张燕宾高级工程师编写第四、六、七章及大部分附录。湖南省机械学校杨翠明讲师编写第一章。广东工业大学冯垛生、林德杰两位教授负责主审。参加审稿的还有湖南省机械学校的宋淑海、顺德工业学校的赖春芳等同志，他们对本书提出了许多宝贵意见。在该书的编写过程中，还得到了广东中山科成化纤有限公司的曾华春工程师、广东华捷钢管有限公司的张献忠工程师、广东中山新华合纤的冯翁田工程师、中山中专肖平副教授、杨慧科长的大力协助，在此一并表示衷心的感谢！

限于水平与经验，疏漏和错误在所难免，恳请广大读者将意见反馈给我们。联系电话：0760—8330769。

编者

目 录

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 序 | |
| 前言 | |
| 第一章 电动机与电力拖动系统 | 1 |
| 第一节 异步电动机的结构及等效电路 | 1 |
| 第二节 异步电动机的电力拖动 | 7 |
| 第三节 负载的类型与电动机的运行 | 11 |
| 第四节 电力拖动系统的组成 | 15 |
| 小结 | 17 |
| 习题 | 18 |
| 第二章 变频器的基本原理及变频调速的特点 | 19 |
| 第一节 变频器的的发展及应用 | 19 |
| 第二节 变频器的组成原理 | 22 |
| 第三节 变频与变压 | 27 |
| 第四节 变频后异步电动机的特性 | 31 |
| 小结 | 34 |
| 习题 | 35 |
| 第三章 变频器的功能及预置 | 36 |
| 第一节 变频器的控制模式 | 36 |
| 第二节 变频器的各种频率参数及预置 | 42 |
| 第三节 变频器的其他常见功能 | 48 |
| 第四节 变频器的保护功能 | 51 |
| 小结 | 54 |
| 习题 | 55 |
| 第四章 变频器的外接电路与操作 | 56 |
| 第一节 外接主电路与主要电器的选择 | 56 |
| 第二节 变频器的操作与运行 | 59 |
| 第三节 外接给定电路 | 60 |
| 第四节 外接控制电路 | 64 |
| 小结 | 73 |
| 习题 | 74 |
| 第五章 变频器的安装、调试及干扰的防范 | 76 |
| 第一节 变频器的安装及布线 | 76 |
| 第二节 变频器的功率因数和改善措施 | 79 |
| 第三节 变频器的抗干扰措施 | 82 |
| 第四节 变频调速系统的调试及常见故障 | 84 |
| 小结 | 86 |
| 习题 | 87 |
| *第六章 变频调速拖动系统的设计 | 88 |
| 第一节 设计变频调速拖动系统的基本要求 | 88 |
| 第二节 变频调速时电动机的有效转矩线 | 89 |
| 第三节 恒转矩负载变频调速系统的设计 | 94 |
| 第四节 恒功率负载变频调速系统的设计 | 98 |
| 第五节 二次方律负载变频调速系统的设计 | 102 |
| 小结 | 104 |
| 习题 | 105 |
| 第七章 变频调速的应用实例 | 106 |
| 第一节 风机和空气压缩机的变频调速 | 106 |
| 第二节 水泵的变频调速 | 111 |
| * 第三节 多单元同步的变频调速系统 | 120 |
| 第四节 起重机械的变频调速 | 122 |
| * 第五节 车床主轴的变频调速 | 126 |
| 第六节 龙门刨床的变频调速 | 131 |
| 小结 | 134 |
| 习题 | 135 |
| 实验指导书 | 137 |
| 实验一 变频器的面板操作及运行 | 141 |
| 实验二 变频器的外部运行、组合运行 | 143 |
| 实验三 变频器常用参数的功能验证 | 144 |
| 实验四 程序运行方式 | 146 |
| 实验五 多档转速的 PLC 控制 | 150 |
| 附录 | 153 |
| 附录 A 简易实验台的制作 | 153 |
| 附录 B 三菱 FR—A540 变频器简介 | 154 |
| 附录 C 森兰变频器简介 | 161 |
| 参考文献 | 166 |

第一章 电动机与电力拖动系统

变频器是交流电动机驱动器，它是将三相工频交流电转变成频率可调的三相交流电来驱动交流电动机（主要是异步电动机），从而使电动机调速的，如图 1-1 所示。因此，异步电动机及其所带负载的特性对变频器的正常工作有着极大的影响，也可以说异步电动机及拖动系统的相关知识是应用变频器的基础，而这部分内容在《电动机及拖动》中已有过详细的介绍，本章将从应用变频器的角度进行复习和拓展。

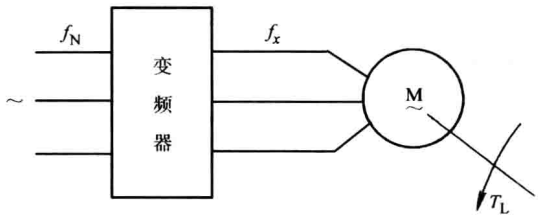


图 1-1 变频器与电动机的连接

第一节 异步电动机的结构及等效电路

一、异步电动机的结构

异步电动机由定子、转子及其他附件组成。

(一) 定子

由定子铁心和三相绕组构成，其中三相绕组在空间上互差 $2\pi/3$ 电角度，且均匀地安放在定子铁心的槽内。三相绕组按适当方式（Y 或 Δ ）连接后与三相电源相接，从电源吸收电功率。

(二) 转子

主要由转子铁心、转子绕组构成，是电动机输出机械能、带动负载旋转的部分。其中，转子绕组自行闭合，不与电源相接；转子的功率是由定子吸收的电功率经电磁感应而得来的。

根据转子绕组的形式不同，异步电动机又可以分为笼型和绕线转子两种，笼型转子结构见图 1-2。

由图知，笼型转子绕组由铜条或铝条构成，其端部用导体环连接成闭合回路。而绕线转

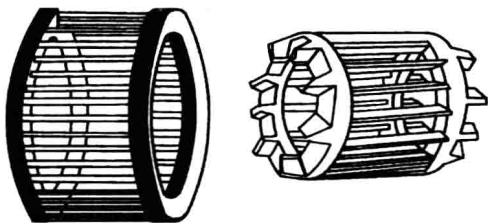


图 1-2 笼型转子绕组结构示意图

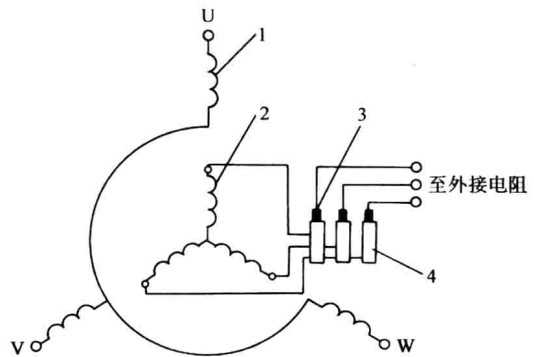


图 1-3 绕线转子异步电动机示意图

1—定子绕组 2—转子绕组 3—电刷 4—集电环

子绕组是将三相对称转子绕组接成 Y，三相绕组的端点分别与三个集电环相连，集电环再通过电刷和外接电阻连接闭合，用来改善三相异步电动机的起动性能和调速性能。

变频调速的对象绝大多数是笼型电动机，如果对于某些绕线转子电动机也要进行变频调速的话，可以将转子三相绕组短接，为避免电刷与集电环之间因接触不良而引起的故障，一般在集电环之前将它们短接，如图 1-3 所示。

二、异步电动机的型号、额定值

每台异步电动机在其机座上都有一块铭牌，铭牌上标有电动机的型号、额定值、工作制等，如表 1-1 所示。

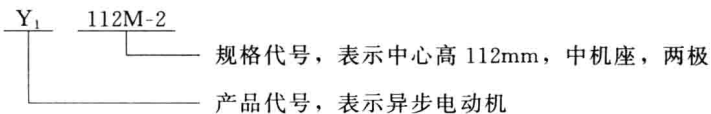
表 1-1 三相异步电动机的铭牌

| 三相异步电动机 | | | |
|------------|-----------|-------------|--------|
| 型号 Y112M-2 | | 编号×××× | |
| 4kW | | 8.2A | |
| 380v | 2890r/min | LW 79dB (A) | |
| 接法△ | 防护等级 IP44 | 50Hz | ××kg |
| ZBK2007-88 | 工作制 S1 | B 级绝缘 | ××年××月 |
| ××电动机厂 | | | |

1. 型号

由字母或数字组成，用来表示电动机的种类、规格和用途等。

如：普通笼型异步电动机：



变频调速专用电动机：为了适应变频驱动系统的需要，许多厂家还生产了不同型号、不同类型的变频调速专用电动机。如上海众华特种电机厂生产的 YVT315M1-4 就是其中的一种。

2. 额定值

额定值是指在保证电动机设计寿命的前提下，能够长期、安全、稳定运行时，电动机能承受的最大值。

电动机铭牌上的额定值主要包括：

额定电压 U_N ：指电动机在额定情况下运行时，外加于定子绕组上的线电压。

额定频率 f_N ：我国交流电源的频率是 50Hz，所以国产电动机的 f_N 均为 50Hz。

额定功率 P_N ：是指在额定电压、额定频率下运行时，电动机轴上能够长期、安全、稳定输出的最大机械功率。

额定电流 I_N ：是指在额定电压、额定频率下运行时，电动机定子绕组中能够长期、安全、连续通过的最大线电流。

额定转矩 T_N ：该值在电动机的名牌上没有数据，但却是一个非常重要的参数，它是指在额定电压、额定频率下运行时，电动机能够长期、安全、稳定输出的最大转矩。

三相异步电动机的额定功率与其他额定数据之间有如下关系：

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N \eta_N$$

式中 $\cos \varphi_N$ ——额定功率因数；

η_N ——额定效率。

电动机的额定值 P_N 、 T_N 表明了电动机带负载的能力，额定值越大允许电动机带的负载也越大。当所带负载小于额定值时，对电动机的运行影响不大，只是电动机的能力没有得到充分发挥，这就是欠载。如果电动机实际所带的负载超过额定值，电动机仍然可以运行，但由于超过了其正常的带负载能力，电动机的发热加剧，电动机允许运行的时间会大大缩短，还会影响到电动机的寿命，这就是过载。不管是过载还是欠载，都是电动机的一种运行状态，从充分发挥电动机的能力出发，电动机工作在其额定值附近是比较理想的。

3. 变频后有效输出值

当频率调节到 f_x 时，电动机的外加电压也会发生改变，此时的电动机已不是在额定情况下运行，也就不能再用额定功率 P_N 和额定转矩 T_N 等额定值来衡量电动机的带负载能力，我们将电动机在任意频率 f_x 下能够长期、安全、稳定输出的功率和转矩称做有效功率和有效转矩。在变频调速中，是用有效输出值这个概念来衡量电动机的带负载能力的。在 f_x 频率下，如果电动机实际所带的负载超过了有效输出值，电动机就处于过载的工作状态。

三、异步电动机的运行原理

(一) 异步电动机的旋转原理

1. 旋转磁场

在空间上互差 $2\pi/3$ 电角度的三相定子绕组 U_1-U_2 、 V_1-V_2 、 W_1-W_2 中通入在时间上互差 $2\pi/3$ 相位角的三相交变电流 i_u 、 i_v 、 i_w 后，它们合成的磁场是一个旋转磁场，如图 1-4 所示。

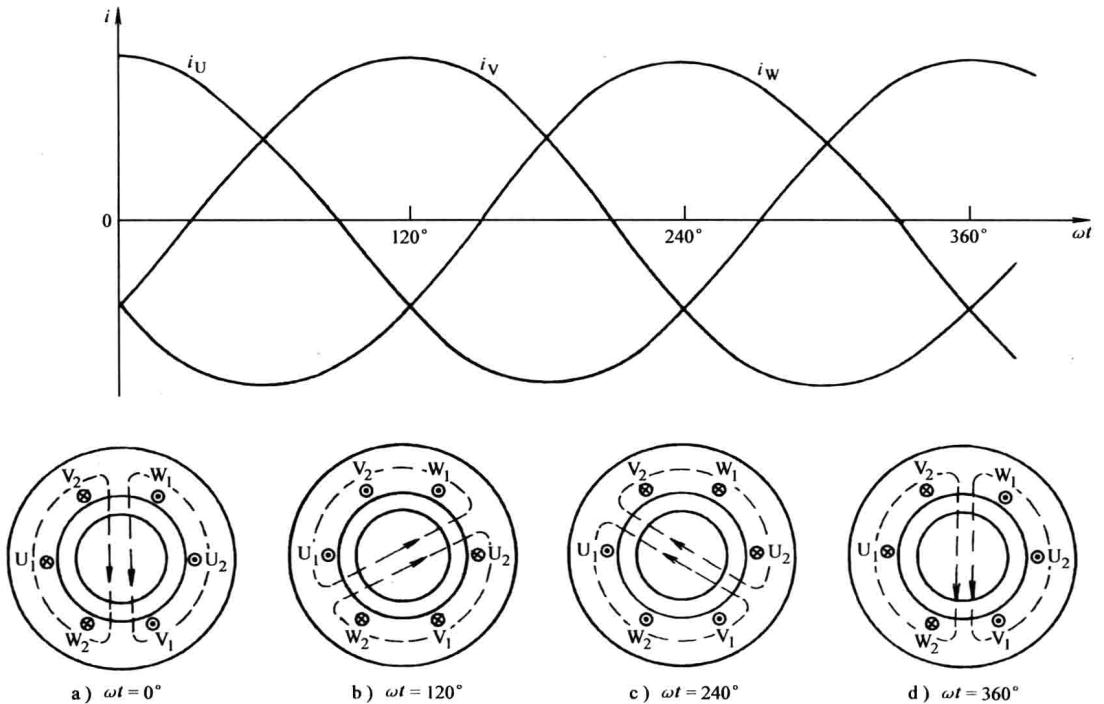


图 1-4 两极旋转磁场示意图

磁场旋转的转速（即同步转速） n_0 可用下式表示：

$$n_0 = \frac{60f_1}{p}$$

式中 f_1 ——电流的频率；

p ——旋转磁场的磁极对数。

如果频率调节成 f_x ，则同步转速 n_{0x} 也随之调节成：

$$n_{0x} = \frac{60f_x}{p} \quad (1-1)$$

这是变频调速的基本原理。

2. 异步电动机的旋转

在图 1-5 中，转子绕组切割旋转磁场，可以看作是磁场静止，转子绕组向反方向旋转切割磁力线，由右手定则可判断转子绕组中的电流方向。载流的转子绕组在磁场中受到电磁力的作用，形成电磁转矩 T ，根据左手定则可判断 T 的方向（见图 1-5）。在 T 的作用下转子“跟着”定子的旋转磁场旋转起来。

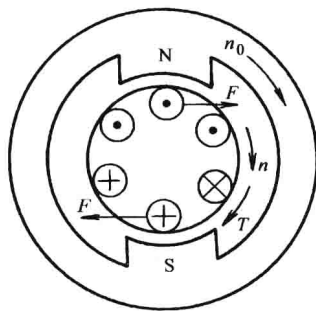


图 1-5 异步电动机工作原理图

3. 转差率

由于转子绕组和旋转磁场之间必须要有相对运动，转子绕组才能切割磁力线，才能有感应电流产生，进而产生电磁转矩。因此转子转速 n 与旋转磁场转速 n_0 之间一定存在着一个差值，我们把这个差值叫转差，用 Δn 表示，即

$$\Delta n = n_0 - n$$

转差 $n_0 - n$ 的存在是异步电动机运行的必要条件。如果频率调节成 f_x ，则转差 Δn_x 可用下式表示：

$$\Delta n_x = n_{0x} - n_x \quad (1-2)$$

式中 n_x ——频率为 f_x 时的转速。

转差 $n_0 - n$ 与同步转速 n_0 的比值称为转差率，用 s 表示，即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

转差率的大小同样也能反映转子转速和电动机的工作状态。由上式可知：

$$n = n_0(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s)$$

电动机在额定状态时，转子转速 n 通常与 n_0 相差不大，因此额定转差率一般都比较小，其范围 $s_N = 0.01 \sim 0.05$ 之间。

转差率 s 是异步电动机的一个基本参数，它对电动机的运行有着极大的影响，其值越大，转差也越大，转子绕组切割磁力线的速度也越大。转子绕组中的感应电动势 E_{2s} 、感应电流 I_{2s} 和频率 f_2 都会增加，转子产生的电磁转矩 T 也会增加。因此，转子绕组中的 E_{2s} 、 I_{2s} 及它们的频率 f_2 ，电磁转矩 T 的大小，在一定的范围内随 s 的增加而增大（转子回路的有些参数带有下标 s ，表示该参数的大小与转速有关）。

(二) 异步电动机的等效电路

1. 等效电路

异步电动机的转子能量是通过电磁感应而得到的。定子和转子之间在电路上没有任何联系，其电路可用图 1-6 来表示。

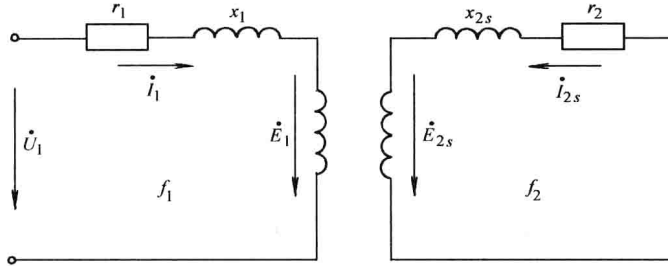


图 1-6 异步电动机的定、转子电路

图中 \dot{U}_1 ——定子的相电压；

\dot{I}_1 ——定子的相电流；

r_1 、 x_1 ——定子每相绕组的电阻和漏抗（漏磁感抗）；

\dot{E}_{2s} 、 \dot{I}_{2s} 、 x_{2s} ——分别为转子电路中产生的电动势、电流、漏抗；

\dot{E}_1 ——每相定子绕组的反电动势，它是定子绕组切割旋转磁场而产生的，其有效值可计算如下：

$$E_1 = 4.44f_1 k_{N1} N_1 \Phi_M \quad (1-3)$$

式中 k_{N1} ——与绕组结构有关有常数；

N_1 ——每相定子绕组的匝数。

由电动机的基础知识可知：转子回路的频率 $f_2 = sf_1$ ，与转差率成正比，所以转子回路中的各电量也都与转差率成正比。

为了方便定量分析定、转子之间的各种数量关系，应将定子、转子放在一个电路中。由于定子、转子回路的频率、绕组、匝数不同，故必须进行折算，折算后，异步电动机的等效电路如图 1-7 所示。

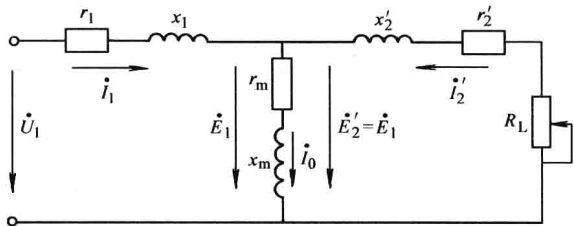


图 1-7 异步电动机折算后的等效电路

图中 r_m ——励磁电阻，是表征异步电动机铁心损耗的等效电阻；

x_m ——励磁电抗，是表征铁心磁化能力的一个参数；

I_0 ——励磁电流；

R_L' ——机械负载的等效电阻， $R_L' = \frac{1-s}{s} r_2'$ ，在 R_L' 上消耗的功率就相当于异步电动机输出的机械功率；

\dot{I}_2' 、 \dot{E}_2' 、 r_2' 、 X_2' 等参数——经过折算后的转子参数。

2. 平衡方程式

从图 1-7 中可以很方便地得到异步电动机在运行过程中的关系式：

(1) 定子侧的电动势平衡方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}(r_1 + jx_1) \quad (1-4)$$

由于 \dot{E}_1 和 $\dot{I}(r_1 + jx_1)$ 用来平衡电源电压 \dot{U}_1 ，而在额定频率下 $\dot{I}(r_1 + jx_1)$ 占的比例很小，可忽略，所以电压和电动势的有效值近似相等：

$$U_1 \approx E_1$$

(2) 转子电动势平衡方程

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 R'_l + \dot{I}'_2 r'_2 + j\dot{I}'_2 x'_2 \quad (1-5)$$

如果将上式乘以 \dot{I}'_2 ， $\dot{E}'_2 \dot{I}'_2$ 为通过气隙传送到转子上的电磁功率， $\dot{I}'_2{}^2 R'_l$ 为转子轴上输出的总机械功率， $\dot{I}'_2{}^2 r'_2$ 为转子铜耗，由于转子铜耗所占的比例很小，所以转子的功率绝大部分都转换成了机械功率。

(3) 电流方程

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 + \dot{I}_0 \quad (1-6)$$

上式表明：定子电流可以分成两部分，其中很小一部分 \dot{I}_0 用来建立主磁通 Φ_M ，而大部分用来平衡转子侧的感应电流，使转子能够得到足够的能量拖动负载。

四、异步电动机的功率及转矩

由异步电动机的等效电路可以清楚地看到，三相异步电动机的功率传递过程是：由定子向电源吸取电功率，经电磁感应传递到转子，称为电磁功率，该功率使转子产生电磁转矩，从而转换成机械功率，带动负载旋转。

1. 异步电动机的功率传递

异步电动机在功率传递的过程中，不可避免地会有功率损耗，可用图 1-8 来表示三相异步电动机的功率流程。

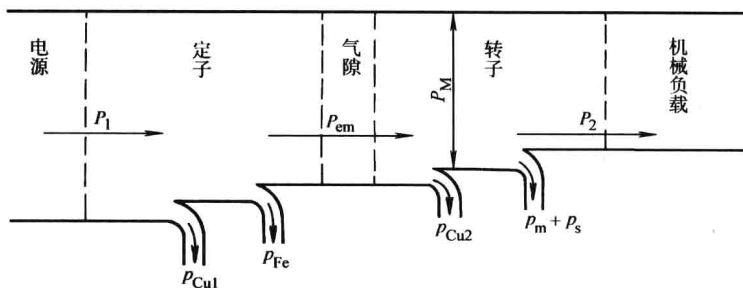


图 1-8 三相异步电动机功率流程图

- 图中 P_1 ——定子向电源吸取的电功率；
 P_{em} ——传递到转子的电磁功率；
 P_M ——电动机轴上的总机械功率；
 P_2 ——传递给负载的机械功率；
 p_{Cu1} 、 p_{Cu2} ——定子、转子铜损，是在定、转子绕组上的损耗；
 p_{Fe} ——铁损，是在铁心上的损耗；
 p_m 、 p_s ——机械损耗、附加损耗。

$$P_{em} = 3E'_2 I'_2 \cos\varphi_2 = 3I'^2_2 \frac{r'_2}{s} \quad (1-7)$$

由于损耗的存在,在功率传递的过程中,要不断地扣除各种损耗,则负载得到的机械功率 P_2 可用下式表示:

$$P_2 = P_M - (p_m + p_s) \quad (1-8)$$

由于不断地扣除损耗,负载得到的机械功率 P_2 比电动机向电源吸取电功率 P_1 要小。电动机的效率可用下式表示:

$$\eta = P_2/P_1$$

2. 异步电动机的转矩

(1) 转矩平衡方程式

将式 (1-8) 两边同除以机械角速度 Ω 后得到:

$$\frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_M}{\Omega} - \frac{p_m + p_s}{\Omega}$$

即

$$T_2 = T_M - T_0$$

式中 T ——电动机的电磁转矩 ($T = P_{em}/\Omega \approx P_M/\Omega$);

T_2 ——电动机的输出机械转矩,也等于负载的阻转矩,即: $T_2 = T_L$;

T_0 ——电动机的空载转矩。

T_L 和 T_0 均为制动转矩,它们与电磁转矩 T 方向相反,只有满足转矩平衡方程式后电动机才能以一定的转速稳定运转。本书为简便起见,认为 T_L 中包括 T_0 ,所以转矩平衡方程式可表示为

$$T \approx T_L$$

(2) 电磁转矩的表达式

1) 电磁转矩基本公式

$$T = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{9550P_M}{n} \quad (1-9)$$

式中 P_M 的单位为 kW; n 的单位为 r/min; T 的单位为 N·m。

2) 电磁转矩的物理表达式

$$T = C_T \Phi_M I_2' \cos \varphi_2 \quad (1-10)$$

式中 C_T ——转矩常数;

Φ_M ——主磁通。

3) 电磁转矩的参数表达式

$$T = \frac{3pU_1^2 r_2' s}{2\pi f_{1r} [(sr_1 + r_2')^2 + s^2(x_1 + x_2')^2]} \quad (1-11)$$

式中 p ——磁极对数;

U_1 ——电源的相电压;

f_{1r} ——电源频率。

第二节 异步电动机的电力拖动

一、异步电动机的机械特性

(一) 机械特性

机械特性是指电动机在运行时,其转速与电磁转矩之间的关系,即 $n=f(T)$,它可由式(1-11)所决定的 $T=f(s)$ 曲线变换而来。异步电动机工作在额定电压、额定频率下,由电动机本身固有的参数所决定的 $n=f(T)$ 曲线,叫做电动机的自然机械特性。其曲线如图1-9所示。

只要确定曲线上的几个特殊点,就能画出电动机的机械特性。

1. 理想空载点

图中的E点,在这点上,电动机以同步转速 n_0 运行($s=0$),其电磁转矩 $T=0$ 。

2. 起动点

图中的S点,在起动点上,电动机已接通电源,但尚未起动。对应这一点的转速 $n=0$ ($s=1$),电磁转矩称起动转矩 T_{st} ,起动时带负载的能力一般用起动倍数来表示,即 $K_{st}=T_{st}/T_N$ 。式中, T_N 为额定转矩。

3. 临界点

临界点K是一个非常重要的点,它是机械特性稳定运行区和非稳定运行区的分界点。电动机运行在K点时,电磁转矩为临界转矩 T_K ,它表示了电动机所能产生的最大转矩,此时的转差率叫临界转差率,用 s_K 表示。 T_K 、 s_K 根据式(1-11)用求极值的办法求出,即:由 $dT/ds=0$,可得

$$s_K = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \approx \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} \quad (1-12)$$

$$T_K = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]} \approx \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 (x_1 + x_2')} \quad (1-13)$$

电动机正常运行时,需要有一定的过载能力,一般用 β_m 表示,即

$$\beta_m = \frac{T_K}{T_N} \quad (1-14)$$

普通电动机的 $\beta_m=2.0\sim 2.2$ 之间,而对某些特殊用途电动机,其过载能力可以更高一些。

上述分析说明: T_K 的大小影响着电动机的过载能力, T_K 越小,为了保证过载能力不变,电动机所带的负载就越小。由 $n_K=n_0(1-s_K)$ 知: s_K 越小, n_K 越大,机械特性就越硬。因此在调速过程中, T_K 、 s_K 的变化规律常常是关注的重点。特别在研究变频后的机械特性时, T_K 、 s_K 就显得尤其重要。

(二) 电动机的稳定运行

1. 电动机稳定运行状态

当电动机稳定运行时: $T=T_L$ 。由于电动机的额定转矩是 T_N ,电动机轴上所带的最大负载转矩也只能在电动机的额定转矩 T_N 的附近变化,见图1-10中的A点。A点的转矩平衡方程可近似写成:

$$T = T_N$$

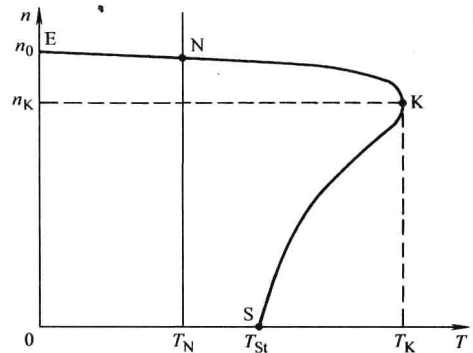


图 1-9 异步电动机机械特性

2. 电动机工作点的动态调整过程

由于负载波动使负载转矩增大为 T'_L 。此时电磁转矩 $T < T'_L$ ，电动机将减速。转速的下降又使电动机的电磁转矩增大，当 $T = T'_L$ 时，转速不再下降，电动机在 C 点稳定运行。

即： $T < T'_L \rightarrow n \downarrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow T = T'_L$

二、异步电动机的起动和制动

(一) 异步电动机的起动

电动机从静止状态一直加速到稳定转速的过程，叫做起动过程。电动机起动时起动电流很大，可以达到额定电流的 5~7 倍，而起动转矩 T_{st} 却并不很大，一般 $T_{st} = (1.8 \sim 2) T_N$ 。为了减小起动电流常用降低电压的方法来起动。

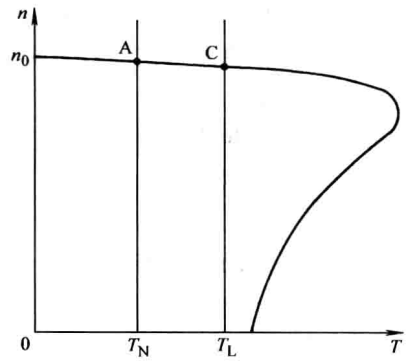


图 1-10 异步电动机的稳定运行

笼型异步电动机常见的减压起动方法有：自耦变压器减压起动、Y- Δ 起动、定子串电阻或串电抗减压起动等。

(二) 异步电动机的制动

电动机在工作过程中，如电磁转矩方向和转子的实际旋转方向相反，就称作制动状态。制动有再生制动、直流制动和反接制动，后两种常用在使电动机迅速停止的过程中。

1. 再生制动

再生制动就是因某种原因，转子转速 n 超过旋转磁场转速 n_0 ，此时旋转磁场切割转子绕组的方向与电动状态时相反，因而，转子电动势 E'_2 、转子电流 I'_2 、电磁转矩 T 均会反向。电磁转矩 T 就变成了制动转矩，见图 1-11 所示的 B 点。在此状态下，转子电流方向的改变必将导致定子电流方向的改变，这样，使电能传送的方向发生了改变、电动机此时不再消耗能量，而是将拖动系统的动能再生给了电网。

发生再生制动的实例有：起重机械在重物下降时，重物的重力加速度可能使电动机的转速超过同步转速；变频调速系统中，通过降低频率来减速时，在频率刚刚降低的瞬间，电动机的同步转速小于实际转速，如图 1-12 所示。

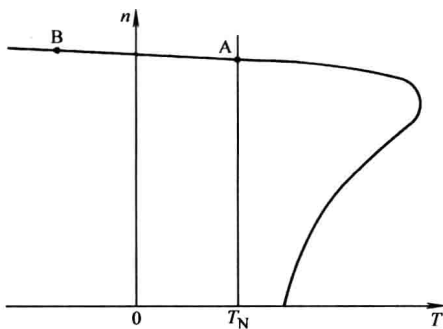


图 1-11 异步电动机的再生制动

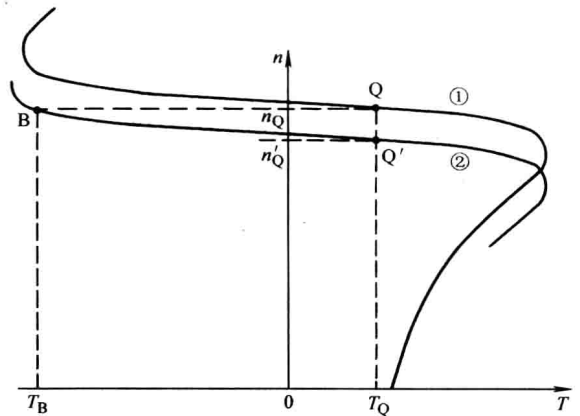


图 1-12 异步电动机变频调速时的再生制动

当原来电动机稳定运行于曲线①的 Q 点时, 频率突然下降, 则特性变为曲线②, 但因 n 不能突变, 工作点跳变至 B 点, 产生反向制动转矩 T , 电动机进入再生制动状态, 系统开始沿曲线②减速, 直到稳定运行于 Q' 点。

2. 直流制动

直流制动也叫能耗制动, 是在定子绕组中通入直流电流, 使电动机产生一个制动转矩。它与再生制动都可以使电动机减速, 只是前者将拖动系统的能量完全消耗掉了, 而后者将能量“再生”给了电网。直流制动常用来使电动机迅速停止。

三、异步电动机的调速

(一) 调速与速度变化

1. 调速

调速: 是在负载没有改变的情况下, 根据生产过程需要人为地强制性地改变拖动系统的转速。

如: 将电源频率从 50Hz 调至 40Hz, 电动机的工作点从 Q_1 移至 Q_2 。其转速也从 1460r/min 调至 1168r/min, 如图 1-13 所示。可见调速时转速的改变是从不同的机械特性上得到的。我们将调速时得到的机械特性簇称为调速特性。

2. 速度改变

速度改变是由于负载的变化而引起拖动系统的转速改变。如: 若原系统工作在 Q_1 点, 此时负载转矩由 T_1 减小到 T_2 引起系统加速, 最后稳定运行在 Q'_1 点上。可见速度改变时转速的变化是从同一根机械特性上得到的。

(二) 调速指标

电动机的调速性能常用下列指标衡量:

1. 调速范围

调速范围: 指电动机在额定负载时所能达到的最高转速 $n_{L,max}$ 与最低转速 $n_{L,min}$ 之比, 即:

$$\alpha_L = \frac{n_{L,max}}{n_{L,min}} \quad (1-15)$$

不同的生产机械对调速范围的要求不同, 如车床的调速范围 α_L 为 20~120, 钻床为 2~12, 铣床 20~30 等。一般变频器的最低工作频率可达到 0.5Hz, 即在额定频率 ($f_N=50\text{Hz}$) 以下, 调速范围为 $\alpha_L=50/0.5=100$ 。

2. 调速的平滑性

调速的平滑性是指相邻两级转速的接近程度。两档转速差越小, 调速的平滑性越好。在变频调速时, 若给定为模拟信号, 多数变频器输出频率的分辨率 (相邻两级频率) 为 0.05Hz, 以 4 极电动机为例, 则相邻两档的转速差为

$$\epsilon_n = \frac{60 \times 0.05}{2} \text{r/min} = 1.5 \text{r/min}$$

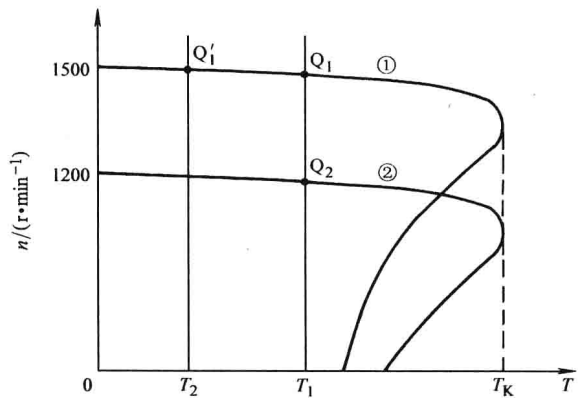


图 1-13 异步电动机变频调速

其平滑性是很高的。

3. 调速的经济性

调速的经济性主要从两个方面来衡量：

- 1) 调速设备的投资和运行维修费用。
- 2) 电动机调速时引起的能量损耗。

总的来说，以上两方面需考虑求得最佳的性能价格比。变频调速装置的价格一般较高，但其故障率较低，在很多的场合节能效果显著，因此和直流调速系统比较，变频调速系统的优势是很明显的。

4. 调速后工作特性

一种调速方案是否优良，调速后的工作特性能否满足负载的要求，也是一个很重要的方面。常通过下面两点来衡量：

(1) 静态特性

主要是指调速后机械特性的硬度。工程上常用静差度 δ 来表示：

$$\delta = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\%$$

(2) 动态特性

指过渡过程中的性能。如，加减速过程是否快捷、平稳。遇到冲击性负载时，系统的转速能否迅速恢复等。

对大多数的生产机械来说，希望调速的后的机械特性能硬一些，负载变动时，速度变化较小，工作比较稳定。但有的负载希望调速后的机械特性较软，如电梯，负载较重时，为安全起见，要求速度明显地慢下来。

第三节 负载的类型与电动机的运行

生产机械运行时常用转矩表示其负载的大小。在电力拖动系统中，存在着两个主要转矩，一个是生产机械的负载转矩 T_L ，一个是电动机的电磁转矩 T 。这两个转矩与转速之间的关系分别叫做负载的机械特性 $n=f(T_L)$ 和电动机的机械特性 $n=f(T)$ 。由于电动机和生产机械是紧密相连的，它们的机械特性必须适当配合，才能得到良好的工作状态。因此为了满足生产工艺过程的要求，正确选配电力拖动系统，除了研究电动机的机械特性外，还需要了解负载的机械特性。

一、负载的机械特性

生产机械的负载转矩 T_L ，大部分情况下与电动机的电磁转矩 T 方向相反。不同负载的机械特性是不一样的，可以将其归纳以下几种类型。

(一) 恒转矩负载

恒转矩负载是指那些负载转矩的大小，仅仅取决于负载的轻重，而和转速大小无关的负载。带式输送机是恒转矩负载的典型例子之一，其基本结构和工作情况如图 1-14a 所示。

见图 1-14a，负载阻转矩 T_L 的大小决定于：

$$T_L = Fr$$

式中 F ——皮带与滚筒间的摩擦阻力；