

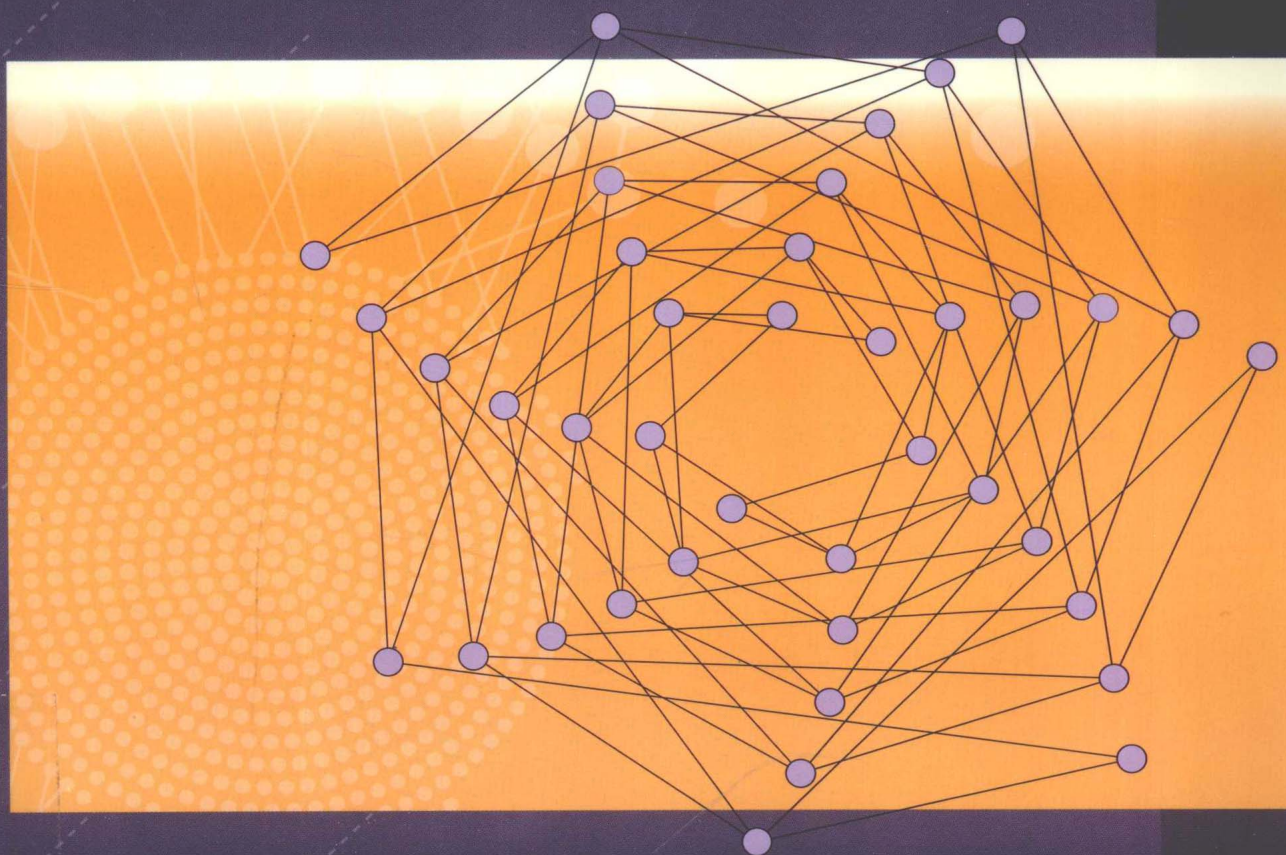


BIANPINQI
SHIYONG SHOUC

变频器实用手册

黎 冰 主编

黄海燕 何衍庆 副主编



BIANPINQI
SHIYONG SHOUC

变频器实用手册

黎 冰 主编

黄海燕 何衍庆 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

20 世纪 60 年代开始,随着电力电子技术、微电子技术及先进的控制理论和技术的发展,出现了变频技术,提出了磁场定向矢量控制、非线性控制、直接转矩控制等理论,并在实践中获得良好应用。

变频器问世以来,已经引起国内外电气传动界的重视,并成为当前具有发展潜力的高新技术产品。经过不断推广和改进,变频器已经有近百种产品,上千个系列得到应用,并取得了很好的节能效果。国家中长期科学和技术发展规划纲要提出我国要全面建设小康社会,构建资源节约型、环境友好型和谐社会,其中,明确“自主创新,重点跨越,支撑发展,引领未来”的指导方针,要达到单位国内生产总值能源消耗降低 20% 左右的目标,必须采取有效的节能措施和手段。变频调速技术是当今节约电能,改善工艺流程,提高产品质量和产量,改善环境的重要手段。因此,推广和应用变频调速技术,并在应用中不断完善有关技术是今后一段时间内的重要工作。

由于变频调速技术理论深,实践过程尚有不少应用问题。为此,特编写这本应用型的手册,以便读者能够从中了解和掌握变频器的选型、安装、参数设置、维护调试、故障分析和处理等内容,使变频调速技术的应用更完善。

本书共分 6 章。第 1 章介绍交流变频调速技术基础知识,包括交流异步电动机变压变频调速理论基础、变频器工作原理、变频调速系统基础等。第 2 章介绍变频调速系统的工程设计,包括变频器选型、变频调速系统主电路设计、控制电路设计、电磁兼容性设计、散热和冷却系统设计和闭环控制系统稳定性设计等内容。第 3 章是变频调速系统的参数设置和系统调试,介绍变频器参数和设置、系统调试条件和调试操作等。第 4 章介绍变频调速系统的通信,包括开放系统互连的参考模型、通信接口和通信协议、与 PLC 的通信和应用示例。第 5 章是变频调速系统的维护和检修,包括日常维护和保养、故障分析和处理等。第 6 章介绍变频调速系统的应用,包括风机、泵类设备的变频调速控制系统、变频调速控制系统在机械工业和流程工业的应用等。

本手册突出实用性和普及性,即较少介绍理论,较多说明应用,是理论基础与工程实践应用相结合的产物。为此,本手册提供大量应用示例及案例分析和处理,提供变频器参数设置、运行等方面的应用注意事项,为广大工作在生产第一线的技术人员提供实用的经验和方法。

本手册由黎冰任主编,黄海燕、何衍庆任副主编。本手册的编写工作得到华东理工大学信息科学与工程学院、网络学院等单位积极支持和帮助,钱锋、黄捷、刘百祥、侍洪波、王慧锋、顾幸生、应卫勇、孙自强、凌志浩等先生给予大力支持。常州新维致远科技有限公司无私提供变频器方面的技术资料,此外,蒋明华、洪光明、范秀兰等先生也提供了不少帮助,谨在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促和编者水平所限,手册中疏漏在所难免,恳请广大读者不吝指正。

编者

目 录

CONTENTS

第 1 章 概述 / 1

- 1.1 交流变频调速技术基础 / 1
 - 1.1.1 交流异步电动机变压变频调速理论基础 / 1
 - 1.1.2 变频器工作原理 / 12
- 1.2 变频调速系统基础 / 28
 - 1.2.1 恒压频比变频调速系统 / 28
 - 1.2.2 矢量控制变频调速系统 / 32
 - 1.2.3 直接转矩变频调速系统 / 36
 - 1.2.4 无速度传感器的矢量控制系统 / 40
- 1.3 存在问题及展望 / 42
 - 1.3.1 变频调速系统应用中存在的问题 / 42
 - 1.3.2 展望 / 48

第 2 章 变频调速系统的工程设计 / 55

- 2.1 变频器选型 / 55
 - 2.1.1 变频器分类 / 55
 - 2.1.2 变频器容量选择 / 61
- 2.2 变频调速系统的主电路设计 / 75
 - 2.2.1 输入输出电路的设计 / 75
 - 2.2.2 主电路的抗干扰设计 / 89
 - 2.2.3 制动电路设计 / 96
- 2.3 变频调速系统的控制电路设计 / 98
 - 2.3.1 变频器控制电路输入信号的连接 / 99
 - 2.3.2 变频器控制电路输出信号的连接 / 114
 - 2.3.3 典型变频器的外部接线图 / 119
- 2.4 电磁兼容性设计 / 121
 - 2.4.1 电磁兼容性 / 121
 - 2.4.2 电磁兼容性计划 / 127
 - 2.4.3 接地系统设计 / 132
 - 2.4.4 布线系统设计 / 140
- 2.5 散热和冷却系统设计 / 144
 - 2.5.1 热量传递和变频器散热 / 144
 - 2.5.2 散热和冷却系统设计 / 146
- 2.6 闭环控制系统的稳定性设计 / 150
 - 2.6.1 变频调速闭环控制系统的组成 / 150
 - 2.6.2 变频调速闭环控制系统的实现 / 157

目 录

2.6.3 变频调速闭环控制系统的稳定性	168
第3章 变频调速系统的参数设置和系统调试	171
3.1 变频调速系统的参数设置	171
3.1.1 变频器参数	171
3.1.2 变频器参数设置	187
3.2 变频调速系统的调试	247
3.2.1 调试条件	247
3.2.2 系统调试和操作	248
第4章 变频调速系统的通信	263
4.1 变频调速系统的通信网络	263
4.1.1 开放系统互连的参考模型	263
4.1.2 通信接口和通信协议	265
4.1.3 通信网络的抗干扰	275
4.2 与 PLC 的通信	279
4.2.1 通信网络的连接	280
4.2.2 应用示例	283
第5章 变频调速系统的维护和检修	312
5.1 日常维护和保养	312
5.1.1 变频调速系统的日常维护	312
5.1.2 变频器的正确使用	321
5.2 故障分析和处理	324
5.2.1 故障检测诊断技术	324
5.2.2 故障分析和处理	326
第6章 变频调速系统的应用	348
6.1 风机和泵类设备的变频调速系统	348
6.1.1 风机和泵类设备变频调速的重要性	348
6.1.2 风机类设备变频调速控制系统	357
6.1.3 泵类设备变频调速控制系统	364
6.2 变频调速系统在机械工业的应用	369
6.2.1 张力控制系统	369
6.2.2 位置控制系统	382
6.2.3 位能类负载的控制	390
6.3 变频调速系统在流程工业的应用	405

目 录

6.3.1 液位控制系统	/ 405
6.3.2 燃烧控制系统	/ 412

参考文献	/ 416
------------	-------

第 1 章

概述

电动机可分为直流电动机和交流电动机两类。由于直流电动机调速容易实现,调速性能好,因此,早期的生产机械调速多用直流电动机。但直流电动机具有固有缺点:需要直流电源;由于接触通电,因此,滑环和电刷需要经常更换,费时费工,提高了运行成本。因此,人们广泛研究交流调速技术,不仅出现了定子调速、变极调速、滑差调速、转子串电阻调速和串级调速等交流调速方式,也研制了滑差电动机、绕线式电动机、同步式交流电动机等交流电动机。由于其调速性能仍不够理想,20 世纪 60 年代开始,随电力电子技术、微电子技术及先进的控制理论和技术的发展,出现了变频技术,提出了磁场定向矢量控制、非线性控制、直接转矩控制等理论,并在实践中获得良好应用,促进了变频技术的发展,使变频器的调速范围、驱动能力、调速精度、动态响应、输出性能、功率因数、运行效率等性能都有极大提升,一些性能指标甚至超过直流调速系统。交流变频调速系统已经广泛地应用于电力、冶金、化工、造纸、医药、煤炭、纺织、船舶、机床等各行各业,并取得显著经济效益。

1.1 交流变频调速技术基础

1.1.1 交流异步电动机变压变频调速理论基础

交流电动机分异步电动机和同步电动机两大类。异步电动机具有结构简单、运行可靠、维护方便、价格便宜等特点,在工业过程中得到广泛应用。早期,异步电动机只能用于不变速的应用场合,20 世纪 60~70 年代,随电力电子技术的发展,采用电力电子变换器的交流调速系统才得以发展。异步电动机的变频调速技术获得飞速发展。目前,在电力拖动系统中已经有 90% 以上的电动机采用异步电动机,而三相异步电动机占总负荷的一半以上。因此,研究异步电动机的变频调速理论,用理论指导实际应用十分重要。为此,本节介绍交流异步电动机变压变频调速的理论。它们包括异步电动机运行原理、机械特性等内容。

(1) 异步电动机的结构

三相异步电动机由定子、转子和机座等组成,如图 1-1 所示。定子与转子之间有一个很小的气隙,它们构成能量传递的主要部分。机座除了固定和支撑定子铁芯外,还具有防护和散热等功能。

定子由定子铁芯、定子绕组等组成。它是异步电动机的不活动部件。定子铁芯一般相互绝缘,由导磁性能较好的厚度为 0.5mm 的薄硅钢片冲压成环形,并叠压而成。它被固定在机座内。定子铁芯硅钢片的内圆侧表面冲有间隔均匀的槽口,定子绕组嵌放在这些槽口内。定子绕组是定子的电路部分,它采用一定线径的漆包线绕制。定子的三相绕组在空间上相互间隔 120° ,每相绕组出线端的首端分别是 U_1 、 V_1 、 W_1 ,末端分别是 U_2 、 V_2 、 W_2 ,六个端子被分别引出到机座的接线盒。根据电动机的额定电压和供电电源电压的不同,定子绕组

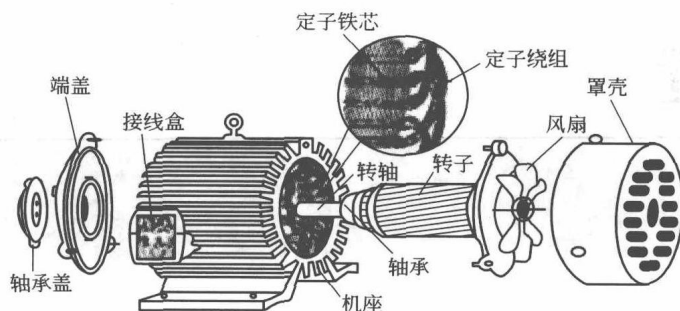


图 1-1 三相异步电动机结构示意图

可用铜排或经外部线路连接成三角形联结或星形联结。如图 1-2 所示。

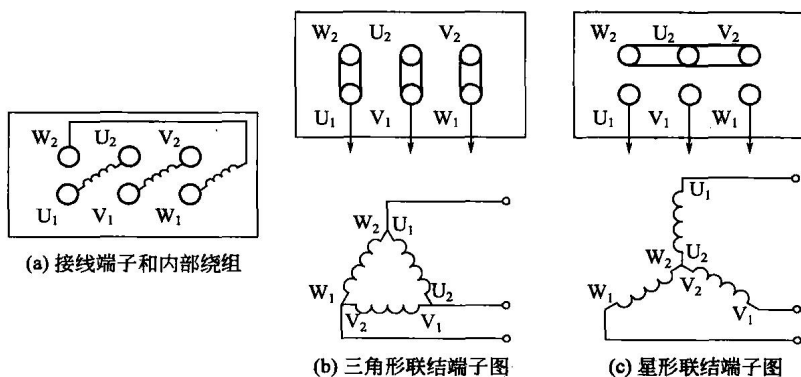


图 1-2 三相异步电动机接线端子的联结

如果电网的线电压等于电动机每组绕组的额定电压，则定子绕组应为三角形联结；如果电网额定电压等于电动机每组绕组额定电压的 $\sqrt{3}$ 倍，则定子绕组应为星形联结。目前国产的三相异步电动机，功率在 4kW 以下者一般采用星形联结，在 4kW 以上者采用三角形联结。

转子由转子铁芯、转子绕组、转轴和风扇等组成。转子铁芯一般也由圆形的厚度为 0.5mm 的薄硅钢片叠压而成。冲压片的外圆周有均匀分布的槽，槽内放置转子绕组。转子铁芯固定在转轴上，作为电动机转子磁路的一部分，它与定子铁芯、气隙组成完整的磁路。

按结构不同，异步电动机的转子绕组分为鼠笼型和绕线型，图 1-3 所示为笼型转子绕组的构造。

笼型转子的各相绕组由单根导条组成，导条可以用铜条或将熔化的铝液直接浇铸在转子铁芯槽内。导条两端用金属短路环短接。由于整个绕组外形如一个笼子，因此，称为笼型转子。

绕线型转子绕组与定子绕组类似，三相对称绕组连接成星形，再经三个集电滑环和电刷连接到外部电路。可通过在外部电路串附加电阻来增大转子回路电阻，提高和改善电动机启动特性和降低电动机的转速。随变频调速技术的普及，异步电动机启动和调速问题获得很好解决，因此，笼型异步电动机变频调速系统应用更广泛。

(2) 三相异步电动机的工作原理

① 定子旋转磁场。三相异步电动机的三相定子绕组对称放置在定子槽中，即三相绕组首端 U_1 、 V_1 、 W_1 （或末端 U_2 、 V_2 、 W_2 ）的空间位置互差 120° ，若三相绕组连接成星形，

末端 U_2 、 V_2 、 W_2 相连，首端 U_1 、 V_1 、 W_1 接到三相对称电源上，则在定子绕组中通过三相对称的电流 i_U 、 i_V 、 i_W （习惯规定电流参考方向由首端指向末端）。即：

$$\begin{aligned} i_U &= I_m \sin(\omega t) \\ i_V &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_W &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned}$$

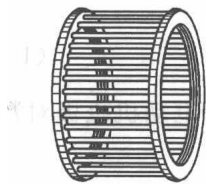


图 1-3 笼型转子绕组构造

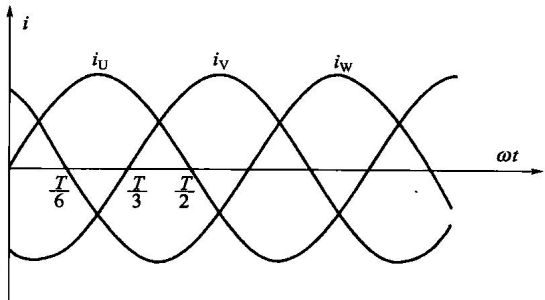


图 1-4 定子绕组中的电流波形

表 1-1 显示三相异步电动机定子中旋转磁场的形成。图 1-4 是定子绕组中电流的波形。

表 1-1 三相异步电动机定子旋转磁场的形成

	$t=0$	$t=T/6$	$t=T/3$	$t=T/2$
定子 旋转 磁场				
定子 电流				
说明	$i_U = 0$, U 相 (U_1 , U_2) 绕组内没有电流; V 相 (V_1 , V_2) 绕组内电流为负, 表示电流从 V_2 流向 V_1 ; W 相 (W_1 , W_2) 绕组内电流为正, 表示电流从 W_1 流向 W_2 ; 根据右手螺旋定则, 合成的磁场如上	$i_W = 0$, W 相绕组内没有电流; V 相 (V_1 , V_2) 绕组内电流仍为负, 表示电流从 V_2 流向 V_1 ; U 相 (U_1 , U_2) 绕组内电流为正, 表示电流从 U_1 流向 U_2 ; 同样, 根据右手螺旋定则, 合成的磁场如上	$i_V = 0$, V 相绕组内没有电流; W 相绕组内电流为负; U 相绕组内电流仍为正, 根据右手螺旋定则, 合成的磁场如上	$i_U = 0$, U 相绕组内没有电流; V 相绕组内电流为正; W 相绕组内电流为负, 根据右手螺旋定则, 合成的磁场如上。与 $t=0$ 时刻比较, 磁场旋转 180°

根据上述分析,可见电动机中磁场的旋转方向与绕组的电流顺序一致,即从 U_1 相 $\rightarrow V_1$ 相 $\rightarrow W_1$ 相。因此,如果将任意两根相线对换连接,就可以实现旋转磁场转向,使电动机反转。

② 旋转磁场的转速。旋转磁场的转速与磁极对数、定子电流的频率有关。一对磁极的旋转磁场,电流变化一周时,磁场在空间转过 360° (一转);两对磁极的旋转磁场,电流变化一周时,磁场在空间转过 180° ($1/2$ 转)。

磁极对数 n_p 大于 1 的电动机中,电流变化一个周期,磁场沿空间转过两个极矩,即 $1/n_p$ 转。

用下列公式描述旋转磁场转速与磁极对数、定子电流频率之间的关系:

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

式中, n_0 是同步转速, r/min ; f_1 是定子电流的供电频率, Hz ; n_p 是电动机磁极对数。这是变频调速的重要公式。

③ 异步电动机的工作原理。

a. 感应电动势。定子旋转磁场转动,转子导条被该旋转磁场的磁力线切割,产生感应电动势。根据右手定则,如果旋转磁场按逆时针方向旋转,则转子导条内产生如图 1-5 所示的感应电动势。电流流入端用 $\otimes$ 表示,电流流出端用 $\odot$ 表示。

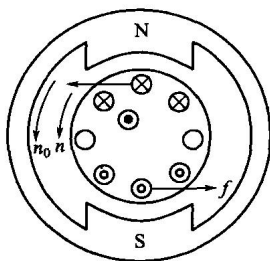


图 1-5 三相异步电动机工作原理

图中,转子上半部导条中的电动势方向是进入纸面,下半部导条中的电动势方向是离开纸面。转子回路是闭合的,因此,转子导条中的感应电动势产生感应电流。根据电磁力定律,用左手定则,可确定转子上所有导条受到的电磁力形成逆时针方向的电磁转矩,使转子以逆旋转磁场的方向旋转。当转子的实际转速 n 与旋转磁场的转速 n_0 相等时,相对转速为零,转子绕组不产生电动势,无感应电流流过,即不产生旋转转矩。当转子实际转速与

旋转磁场转速不相等时,转子绕组内产生感应电动势,并产生感应电流,提供电磁转矩,可实现拖动作用。

b. 转差率。异步电动机转子受到电磁转矩作用表明转子导条与定子旋转磁场之间存在相对运动,因此,异步电动机也称为感应电动机。异步电动机的转速与同步转速不同,可实现电力运行、发电运行和制动运行三种状态。

转差率 s 是同步转速 n_0 与电动机实际转速 n 的差值与同步转速 n_0 之比的百分数。可表示为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

在额定转速下三相异步电动机的转差率很低,约为 $1\% \sim 5\%$ 。启动时,电动机还未转动, $n=0$,转差率最大,为 100% ;当实际转速大于同步转速 ($n > n_0$) 时,转差率为负值;稳定运行时,实际转速接近同步转速,因此,转差率很小。采用变频调速可以在不改变转差率的情况下实现改变电动机转速的目的。

c. 异步电动机的调速。异步电动机的调速比直流电动机困难,其原因如下。

i. 定子回路从外部供电,电枢电路中的电流是定子旋转磁场经电磁感应产生,因此,两者不独立。

ii. 定子的旋转磁场与电枢的感应磁场不相互垂直，它们之间只有很小的角度，电枢的感应磁场依赖于定子旋转磁场，不能独立由外部控制。

根据式(1-1)，异步电动机有下列调速方案。

iii. 调频调速：改变三相交流电的频率，可调节同步转速，实现异步电动机的调速。如果能够平滑改变频率，就可实现异步电动机的无级调速。这是变频调速的理论依据。

iv. 改变磁极对数。

v. 改变转差率。

(3) 三相异步电动机的机械特性

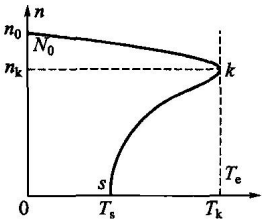
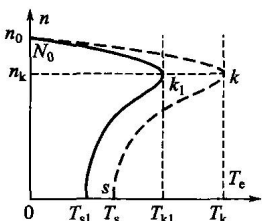
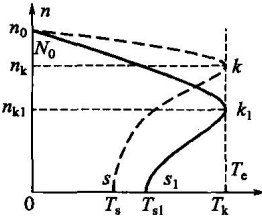
三相异步电动机的机械特性指异步电动机电磁转矩 T_e 与转速 n 的关系。由于转差率与转速有固定关系，因此，也有将异步电动机的电磁转矩 T_e 与转差率 s 的关系称为机械特性。异步电动机的不同调速方式，其实质是改变异步电动机的机械特性。

异步电动机的机械特性分固有机械特性和人为机械特性。

异步电动机在额定电压、额定频率下，定子按规定接线方式联结，转子回路不串接电阻、电容和电抗，而是自己短路，这种条件下异步电动机的机械特性称为固有机械特性。

人为机械特性是通过改变定子电压、定子回路串电抗或电阻、转子回路串电阻等方法，获得的异步电动机的机械特性。表 1-2 是异步电动机的机械特性。

表 1-2 异步电动机的机械特性

异步电动机机械特性	图形描述	特 点
固有机械特性		①理想空载点 N_0：该点的负载转矩为 0，异步电动机达到最大转速（同步转速）n_0 ②启动点 s：接通电源瞬间，异步电动机转速为 0，转矩为启动转矩 T_s，或称为堵转转矩 ③临界点 k：异步电动机机械特性的拐点 k，该点转矩最大，称为临界转矩 T_k。对应的转速称为临界转速 n_k，对应的转差率称为临界转差率 s_k ④理想空载点 N_0 处的转差率为 0
人为机械特性		①降压启动时异步电动机的机械特性。同步转速 n_0 不变 ②启动转矩 T_{s1} 较自然机械特性时的启动转矩 T_s 减小 ③临界转矩 T_{k1} 较自然机械特性时的临界转矩 T_k 减小 ④临界转速 n_{k1} 和临界转差率 s_{k1} 不变
人为机械特性		①改变转差率的机械特性变软，同步转速 n_0 不变 ②临界转矩 T_k 不变 ③临界转速 n_{k1} 较自然机械特性时的临界转速 n_k 减小 ④临界转差率 s_{k1} 较自然机械特性时的临界转差率 s_k 增大 ⑤启动转矩 T_{s1} 较自然机械特性时的启动转矩 T_s 增大

异步电动机机械特性	图形描述	特 点
人为机械特性 调频的机械特性		① 调频的机械特性变软, 同步转速 n_0 下降 ② 临界转矩 T_{k1} 较自然机械特性时的临界转矩 T_k 减小 ③ 临界转速 n_{k1} 较自然机械特性时的临界转速 n_k 减小 ④ 临界转差率 s_k 保持不变 ⑤ 启动转矩 T_{s1} 较自然机械特性时的启动转矩 T_s 减小
定子串电抗或电阻的机械特性		① 定子回路电抗或电阻增加, 同步转速 n_0 不变 ② 转差率 s_{k1} 较自然机械特性时的临界转差率 s_k 减小 ③ 启动转矩 T_{k1} 较自然机械特性时的临界转矩 T_k 减小 ④ 临界转速 n_{k1} 较自然机械特性时的临界转速 n_k 增大 ⑤ 适用于功率较小的笼型异步电动机轻载或空载时限制电流

根据异步电动机的固有机械特性, 在异步电动机运行时, 应注意下列几点。

① 异步电动机的电磁转矩。异步电动机的电磁转矩可表示为

$$T_e = C_m \Phi_m I_r \cos \varphi_r \quad (1-3)$$

式中, C_m 是电动机常数; Φ_m 是旋转磁场的磁通; I_r 是折算到定子侧的转子每相电流的有效值; φ_r 是转子的功率因数角。

② 异步电动机的额定转矩。异步电动机有最大转矩 T_k , 实际的负载转矩不能正好等于 T_k , 因出现扰动时, 如果转速稍有降低, 就会使拖动系统减速直到停止。因此, 实际应用时, 电动机的额定转矩 T_n 一般应为最大转矩的一半, 并用过载系数 λ_M 表示最大转矩与额定转矩之比。即

$$\lambda_M = \frac{T_k}{T_n} \quad (1-4)$$

③ 异步电动机的工作区域。一般转差率在 $0 \sim s_k$ 范围内, 即转速在 $n_0 \sim n_k$ 范围, 从机械特性看, 该区域内转差率与转矩近似成正比。当转差率大于临界转差率 s_k 时, 机械特性进入非线性段, 通常, 在该区段运行是不稳定的。

④ 异步电动机的启动转矩。当异步电动机的转速为 0 时对应的转矩称为异步电动机的启动转矩 T_s 。该点的转差率为 100%。由于电动机的启动电流很大, 约为额定电流的 4~7 倍, 当负载转矩 T_L 大于启动转矩 T_s 时, 电动机无法启动。因此, 异步电动机启动时应考虑启动电流大和启动转矩不足的问题。

(4) 负载的机械特性

三相异步电动机的工作点不仅与异步电动机的机械特性有关, 还与连接负载的机械特性有关。表 1-3 是生产机械的负载机械特性和功率特性。表 1-4 是生产机械的负载分类。

① 恒转矩负载。恒转矩负载分为摩擦性负载和位能性负载。摩擦类负载的启动转矩一般要求是额定转矩的 150% 左右, 制动转矩一般要求是额定转矩的 100% 左右。位能式负载一般要求是大的启动转矩和能量回馈功能, 能够快速实现正反转。

表 1-3 生产机械的负载机械特性和功率特性

负载机械特性	特点	机械特性	功率特性	示例
恒转矩负载	负载阻转矩 T_L 与转速 n 无关, 负载功率 P_L 与转速 n 成正比, 在任何转速下能保持转矩恒定的生产机械。分为摩擦类和位能类负载两类 例如, 皮带输送机, 静负载转矩为 $T_L = Fr$ F—滚轮与传送带之间摩擦力 r—滚轮半径			带输送机、搅拌机、吊车平移和提升机构、挤压机等重力型负载
恒功率负载	需求的阻转矩 T_L 与转速 n 大致成反比。因此, 负载功率 P_L 近似不变的生产机械 例如, 卷取机要求线速度 v 与张力 F 恒定。因此, 功率不变。即有 $P_L = Fv = \frac{T_L n}{9550} = \text{常数}$ 随被卷物直径增大, 负载转矩增大, 为使线速度和张力恒定, 转速 n 需与转矩 T_L 大小成反比			机床主轴电机、造纸机、各类薄膜卷取机、开卷机等机械
二次方转矩负载	负载阻转矩 T_L 与转速 n 的二次方成正比, 负载功率 P_L 与转速 n 的三次方成正比的生产机械 例如, 泵和风机, 随叶轮转动, 流体在一定速度范围内所产生阻力大致与转速平方成正比。即 $T_L = k_T n^2$ 负载所需功率与转速 n 的三次方成正比。即 $P_L = \frac{T_L n}{9550} = k_P n^3$			各类泵、风机等流体输送类机械
直线型负载	负载阻转矩 T_L 与转速 n 成正比, 负载功率 P_L 与转速 n 的二次方成正比的生产机械 例如, 碾压机的负载转矩为 $T_L = k_T n_L$ 负载功率为 $P_L = \frac{k_T n_L}{9550} n_L = k_P n_L^2$			轧钢机、碾压机械类机械

表 1-4 生产机械的负载分类

项 目		负载类型				负载转矩特性		
		摩擦性负载	重力负载	流体负载	惯性负载	恒转矩	恒功率	二次方转矩
金属加工机械	自动车床	●				●		
	转塔车床	●				●		
	车床	●				●		
	磨床	●				●		
	钻床	●				●		
	刨床	●				●		
	切片机、切割机	●				●		
	卷板机、拔丝机	●				●		
	机械化供应装置	●				●		
	离心铸造机				●	●		
	压榨机				●	●		
	加工中心					●		

续表

项 目		负载类型				负载转矩特性		
		摩擦性负载	重力负载	流体负载	惯性负载	恒转矩	恒功率	二次方转矩
流体 输送 机械	泵			●				●
	往复式柱塞泵			●		●		
	齿轮泵	●				●		
	鼓风机			●				●
	压缩机			●		●		
	罗茨风机			●		●		
电梯	电梯高低速、自动停车	●					●	
	电梯仓		●			●		
物料 输送 机械	起重机、升降机(升降)		●			●		
	起重机、升降机(平移)	●				●		
	运载机				●	●		
	泥浆输送机	●				●		
	自动仓库(上下)		●			●		
	自动仓库(输送)	●				●		
	门式提升机	●				●		
	传送带	●				●		
	进料机	●				●		
普通 加工 机械	离心分离机				●	●		
	商用清洗机				●	●		
	食品加工机械				●	●		
	吹风机			●		●		
	挤压机			●		●		
	木材加工机	●				●		

② 恒功率负载。通常，恒功率负载是在一定转速范围内具有该特性。即某转速以下作为恒转矩负载，高于该转速作为恒功率负载。该转速点称为基频。

③ 二次方转矩负载。泵和风机类负载通常为二次方负载。这类负载一般不容易过载，而它们的节能效果也十分明显。

④ 直线型负载。直线型负载的机械特性与二次方负载机械特性相似。

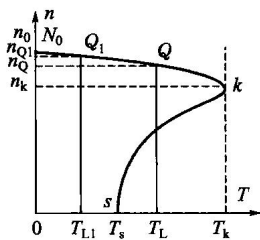
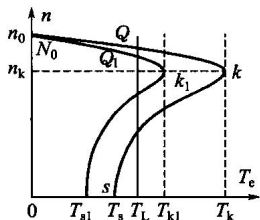
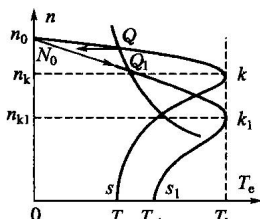
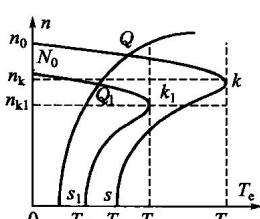
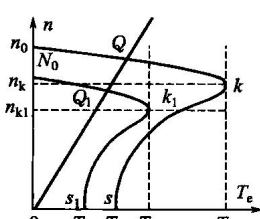
(5) 异步电动机拖动系统的工作点

异步电动机拖动系统的工作点是异步电动机的机械特性曲线与所拖动负载机械特性曲线的交点。表 1-5 显示不同负载在异步电动机不同人为机械特性下的运行状况分析。

拖动系统中，转速的变化具有下列规则：

- ① 电动机转矩大于负载阻转矩，转速升高；
- ② 电动机转矩小于负载阻转矩，转速减低；
- ③ 电动机转矩等于负载阻转矩，转速恒定不变。

表 1-5 异步电动机拖动系统的运行状况分析

运行状况	工作点	说 明
电动机拖动系统 工作点及负载变化 时工作点的转移 (恒转矩负载)		异步电动机的机械特性与恒转矩负载机械特性的交点是该电动机拖动系统的工作点 Q 当负载转矩 T_L 下降到 T_{L1} 时,由于电动机的转矩 T_M 大于负载转矩 T_{L1} ,使转速 n 上升,并使 T_M 下降,拖动系统的工作点从 Q 转移到 Q_1 ,使电动机的转矩 T_M 下降,到使其值与 T_{L1} 相等,系统才能在该工作点 Q_1 稳定运行。这时,电动机的转速为 n_{Q1} ,实现电动机调速
电动机拖动系统 工作点及定子降压 改变时工作点的转移 (恒转矩负载)		负载转矩 T_L 不变,由于定子电压降低,因此,电动机机械特性改变,拖动系统的工作点从 Q 转移到 Q_1 ,电动机转速下降,实现电动机的调速
电动机拖动系统 工作点及转差率改变 时工作点的转移 (恒功率负载)		异步电动机的机械特性与恒功率负载机械特性的交点是该电动机拖动系统的工作点 Q 加大转差率,电动机机械特性改变如图所示,恒功率负载的机械特性不变。拖动系统的工作点 Q 由于惯性仍在转速 n ,沿箭头所示到达电动机因转差率改变后的机械特性曲线上,并迅速转移到工作点 Q_1 。由于转差率加大,使电动机转矩增大,同时,电动机的转速降低
电动机拖动系统 工作点及频率改变 时工作点的转移 (二次方负载)		异步电动机的机械特性与二次方负载机械特性的交点是该电动机拖动系统的工作点 Q 频率改变时,电动机机械特性改变如图所示,拖动系统的工作点 Q 转移到工作点 Q_1 。使电动机转矩降低的同时,电动机的转速也降低
电动机拖动系统 工作点及频率改变 时工作点的转移 (直线型负载)		异步电动机的机械特性与直线型负载机械特性的交点是该电动机拖动系统的工作点 Q 频率改变时,电动机机械特性改变如图所示,拖动系统的工作点 Q 转移到工作点 Q_1 。使电动机转矩降低的同时,电动机的转速也降低

(6) 异步电动机的制动

① 异步电动机拖动反抗性恒转矩负载系统的制动。

a. 反抗性恒转矩负载系统的正向回馈制动。如图 1-6 所示, 假设反抗性恒转矩负载系统开始时正向运转, 工作点位于 Q 点。负载转矩为 T_L , 该工作点电动机转速为 n_1 。

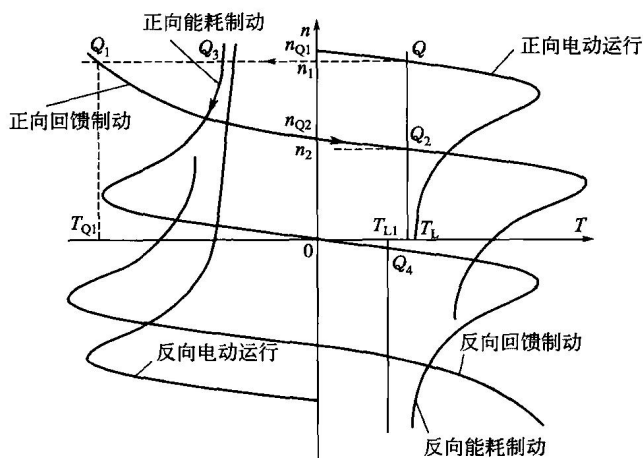


图 1-6 异步电动机拖动反抗性负载系统的回馈制动和能耗制动

当双速电动机改变磁极对数时, 从高速切换到低速, 该电动机同步转速 n_{Q1} 下降到 n_{Q2} , 但拖动系统实际转速仍为 n_1 , 高于同步转速 n_{Q2} , 这时, 电动机成为发电机, 将输入的机械能转换为电能, 回馈给电网, 处于发电机状态或再生状态。由于转子绕组中电流方向相反, 因此, 电磁转矩方向也相反, 成为制动转矩。拖动系统的工作点从 Q 跳到 Q_1 。制动转矩 T_{Q1} 使电动机减速, 沿正向回馈制动曲线减速, 直到穿过纵轴时, 完成正向回馈制动过程。其后, 电动机转速继续降低, 直到电磁转矩与负载转矩 T_L 相等的 Q_2 点。这时, 电动机已经完成从高速到低速的转换, 并在低速稳定运行。

可以看到, 正向回馈制动只能限制电动机的转速, 并不能使电动机制动停转。不考虑机械摩擦等损失, 应有 $T_{L1} = T_L$ 。但在拖动位能性负载和反向回馈制动时, 由于位能性负载的自重产生阻转矩, 因此, $T_{L1} < T_L$ 。

b. 反抗性恒转矩负载系统的能耗制动。如图 1-6 所示, 将直流电切换入正在运行的异步电动机定子绕组, 产生静止磁场, 使电动机同步转速突降到零, 电动机切割磁场产生制动转矩, 同样使电动机成为发电机, 该能量不能回馈电网, 转子动能消耗在转子电阻上, 称为能耗制动状态。电动机的工作点从 Q 突跳到 Q_3 。并沿正向能耗制动曲线, 制动转矩迫使电动机减速, 直到制动转矩为零, 电动机转速为零并停转。

正向能耗制动能够迅速将电动机制动并能使电动机制动停转。

c. 反抗性恒转矩负载系统的反向回馈制动。如图 1-6 所示, 当电动机反转时, 采用反向回馈制动。其原理与正向回馈制动相似, 它将制动的能量回馈到电网。

d. 反抗性恒转矩负载系统的反向能耗制动。如图 1-6 所示, 当电动机反转时, 采用反向能耗制动。其原理与正向能耗制动相似。

e. 反抗性恒转矩负载系统的反接制动。如图 1-7 所示, 当电动机反转时, 拖动系统的机械特性与正向运行时的机械特性呈现中心对称。将正向电动运行的电动机定子绕组的两相绕组的线端对调后接入电源, 使电动机的旋转磁场旋转方向反向, 因此, 电动机电磁转矩和转速都反向, 进入反接制动过程。机械特性曲线如图 1-7 所示。

绕线式电动机为限制反向时的过电流, 常在定子绕组串接限流电阻, 其机械特性是图中

的反接能耗制动特性。

当采用反接能耗制动时,为使电动机快速停车,应当转速接近零的工作点 Q_4 时立刻切断电源,否则当电动机拖动较小的反抗性恒转矩负载时,电动机机械特性会进入第三象限,由于转速为零时,电动机的电磁转矩大于负载转矩,因此,电动机将反向启动到 Q_3 ,并在反向电动状态稳定运行。

不考虑机械摩擦等损失,应有 $T_{L1} = T_L$ 。但在拖动位能性负载和反接制动时,由于位能性负载的自重产生阻转矩,因此, $T_{L1} < T_L$ 。此外,笼型异步电动机转子回路无法串接电阻,因此,不宜频繁反接制动。

② 异步电动机拖动位能性恒转矩负载系统的制动。

a. 位能性恒转矩负载系统的倒拉反转制动。如图 1-8 所示,假设位能性恒转矩负载系统开始时正向运转,工作点位于 Q_1 点。同步转速为 n_{Q1} ,负载转矩为 T_L ,该工作点电动机转速为 n_1 。

绕线式电动机定子绕组串接限流电阻,机械特性下移,恒转矩负载特性与电动机机械特性的交点为 Q_2 ,该工作点电动机转速为 n_2 。

当串接的限流电阻阻值增加到某一数值,电动机的电磁转矩在第一象限内小于负载转矩,使工作点不断下移,进入第四象限,电动机反转。这时,

电动机转子切割磁力线的方向不变,因此,电磁转矩对转子的转动起制动作用,当电磁转矩等于负载转矩(考虑摩擦转矩的影响,实际电磁转矩略小于负载转矩)时,电动机将稳定运行在工作点 Q_3 ,位能性恒转矩负载被平稳下放,这称为倒拉反转制动状态。下放重物的速度可通过改变限流电阻的大小实现。

同样,不考虑机械摩擦等损失,应有 $T_{L1} = T_L$ 。但在拖动位能性负载和反接能耗制动时,由于位能性负载的自重产生阻转矩,因此, $T_{L1} < T_L$ 。

b. 位能性恒转矩负载系统的正向能耗制动和反向能耗制动。如图 1-6 的正向能耗制动和反向能耗制动曲线所示,位能性恒转矩负载系统的正向能耗制动和反向能耗制动与反抗性恒转矩负载系统的正向能耗制动和反向能耗制动相似,即用直流电切换到正在运行的异步电动机定子绕组,使电动机转

速和制动转矩都降到零时,电动机被迅速制动,否则电动机会在负载转矩(重物)的作用下反向启动,进入第四象限,实现反向能耗制动运行。例如,起重机低速下放重物时,就运行在这种状态。

通过改变直流励磁电流的大小,改变转子回路串入的电阻都可对电动机进行制动

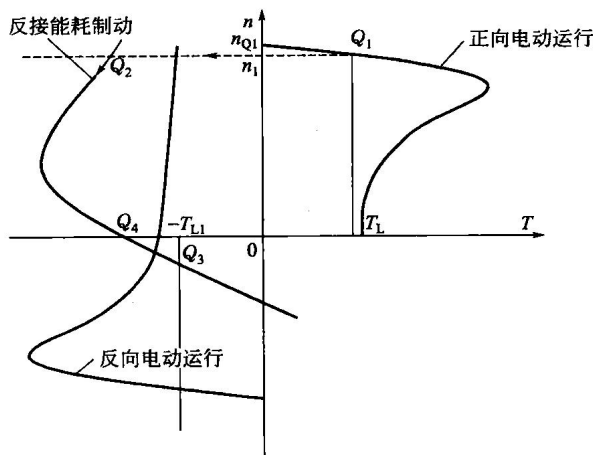


图 1-7 异步电动机拖动反抗性负载系统的反接制动

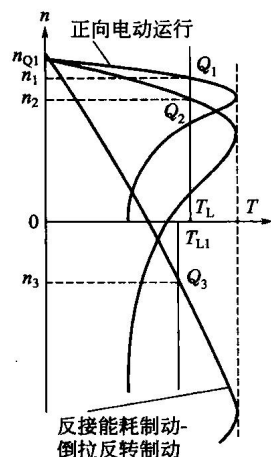


图 1-8 位能性恒转矩负载的反接能耗制动