

第1章 概 述

内容提要与学习要求

了解异步电动机调速概况。了解变频调速技术的发展过程。了解我国变频调速技术的发展状态。

1.1 调速传动概况

1. 调速传动的意义

众所周知,所有的生产机械、运输机械在传动时都需要调速。首先,机械在启动时,根据不同的要求需要不同的启动时间,这样就要求有不同的启动速度相配合;其次,机械在停止时,由于转动惯量的不等,自由停车时间也各不相同,为了达到人们所需求的停车时间,就必须在停车时采取一些调速措施,以满足对停车时间的要求;第三,机械在运行当中,根据不同的情况也要求进行调速,例如,风机、泵类机械为了节能,要根据负载轻重进行调速;机床加工,要根据工件精度的不同要求进行调速;运输机械为了提高生产率需要进行调速;电梯为了提高舒适度也需要进行调速;生产过程为了提高控制要求,必须进行闭环速度控制等。总之,所有机械传动都需要进行调速。

2. 调速传动的发展

调速传动在以蒸汽源为主时,只能采用蒸汽式机械调速传动。但因其效率低、单位输出功率的重量大,所以自内燃机(柴油机或汽油机)出现后,蒸汽式机械调速传动便被其代替。然而内燃机调速传动效率仍然较低,不过由于单位输出功率的重量小,机械体积小,所以在不便使用电源的地方(如汽车、船舶等),仍采用内燃机调速传动。

自从电出现以后,因其输送容易、使用方便、维修简单、效率高,所以电动调速传动得到迅速发展。一开始采用的是直流电动机调速传动,但由于直流电动机维修较难,且容量受限,所以交流电动机调速传动又得到了飞速的发展。然而在很长一段时期内交流电动机调速性能远不如直流电动机调速性能好,故直流电动机调速传动在调速性能要求很高的地方仍被采用。

最近十多年来,由于电力电子器件与微电子、单片机及PWM控制技术的迅猛发展,出现了交流电动机变频调速传动,其效率较高、操作方便,而且调速性能可以与直流电动机调速传动相媲美,所以交流变频调速传动是目前最好的调速传动方式。

3. 异步电动机调速概况

各行各业的生产都离不开电动机,而结构简单、价格便宜的异步电动机被广泛采用。对异步电动机调速控制技术又是交流电动机控制技术中的核心。回顾历史,异步电动机调速经

历了以下 3 个阶段。

(1) 继电器开环控制阶段。这个阶段经历了 50 年左右。自从有了交流电，用接触器控制电动机，并逐步采用了各种中间继电器、时间继电器实现了开环的自动控制，也就是运动控制的初级阶段。这种控制很难满足现代化生产高效低耗的要求。对应用最广的鼠笼式异步电动机，其启动电流大、启动转矩小，既冲击电网，又不能调速。当电动机容量较大时，启动设备体积大、噪声高、维修困难。绕线式异步电动机转子串电阻的方法，虽说解决了启动问题，也可实现简单调速，但缺点很多，不但调速性能差，而且容量及使用环境也受到了很大的限制。

(2) SCR 闭环控制阶段。该阶段经历了 20 年左右，自从晶闸管(SCR)出现后，使异步电动机调速控制向前迈进了一大步，对鼠笼式异步电动机来说，采用对晶闸管的移相控制，可以实现调压调速，但必须要闭环控制，才能得到较理想的调速性能。对绕线式异步电动机来说，可用晶闸管制成逆变器实现串级调速，加上闭环控制，不但提高调速性能，还能回收转差能量，曾经称为当时最好的调速方法。但由于绕线式异步电动机存在集电环电刷问题，所以也满足不了现代化生产的需要。

(3) 变频器控制的发展过程。该阶段只有 15 年左右的时间，并且在短短的十几年时间就经历了以下几个过程：第一个过程是交 - 交变频，它采用晶闸管直接变工频电流为可调的低于 $1/2$ 工频频率电流的电源。这种电源调速范围受到很大限制，这个过程很短，很快就进入了第二个过程，即交 - 直 - 交变频。这种变频方式主要采用了逆变器，逆变器的功率元件最初采用的是 SCR，控制技术为脉宽调制 (PWM)；而后逆变器的功率元件采用 BJT，控制技术也由模拟量控制发展为数字量控制；现在逆变器的功率元件已采用 IGBT，控制技术也发展为 32 位微机矢量控制，可以在 $150\mu\text{s}$ 内对巨大电流进行闭环控制，进入了真正的运动控制阶段。

4. 调速传动的主要指标

(1) 调速范围：最高转速与最低转速之比。

(2) 调速的平滑性：在调速范围内，以相邻两挡转速的差值为标志，差值越小调速越平滑。

(3) 调速的工作特性：调速的工作特性有两个方面，静态特性和动态特性。静态特性主要反应的是调速后机械特性的硬度。对于绝大多数负载来说，机械特性越硬，则负载变化时，速度变化越小，工作越稳定。所以希望机械特性越硬越好。动态特性即暂态过程中的特性，主要指标有两个方面：升速(包括启动)和降速(包括制动)过程是否快捷而平稳；当负载突然增、减或电压突然变化时，系统的转速能否迅速地恢复。

(4) 调速的经济性：主要从设备投资、调速后的运行效率和调速系统的故障率 3 个方面进行考虑。

1.2 变频调速技术的发展过程

变频技术是应交流电机无级调速的需要而诞生的。自 20 世纪 60 年代以来，电力电子器件从 SCR(晶闸管)、GTO(门极可关断晶闸管)、BJT(双极型功率晶体管)、MOSFET(金属氧化物场效应管)、SIT(静电感应晶体管)、SITH(静电感应晶闸管)、MGT(MOS 控制晶体管)、

MCT(MOS 控制晶闸管)发展到今天的 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)、HVIGBT(耐高压绝缘栅双极型晶闸管)等,器件的更新促使电力变换技术不断发展。自 20 世纪 70 年代开始,脉宽调制变压变频(PWM - VVVF)调速研究引起了人们的高度重视。20 世纪 80 年代,作为变频技术核心的 PWM 模式优化问题吸引着人们的浓厚兴趣,并得出诸多优化模式。20 世纪 80 年代后半期,美、日、德、英等发达国家的 VVVF 变频器已投入市场并广泛应用。

VVVF 变频器的控制相对简单,机械特性硬度也较好,能够满足一般传动的平滑调速要求,已在生产的各个领域得到广泛应用。但是,在低频时这种控制方式,由于输出电压较小,受定子电阻压降的影响比较显著,故造成输出最大转矩减小。另外,其机械特性终究没有直流电动机硬,动态转矩能力和静态调速性能都还不尽如人意,因此人们又研究出矢量控制变频调速技术。

矢量控制变频调速的做法是:将异步电动机在三相坐标系下的定子交流电流 i_a 、 i_b 、 i_c ,通过三相 - 二相变换,等效成两相静止坐标系下的交流电流 i_{a1} 、 i_{b1} ,再通过按转子磁场定向旋转变换,等效成同步旋转坐标系下的直流电流 I_m 、 I_u (I_m 相当于直流电动机的励磁电流; I_u 相当于与转矩成正比的电枢电流),然后模仿直流电动机的控制方法,求得直流电动机的控制量,经过相应的坐标反变换,实现对异步电动机的控制。

矢量控制方法的提出具有划时代的意义,然而在实际应用中,由于转子磁链难以准确观测,系统特性受电动机参数的影响较大,且在等效直流电动机控制过程中所用矢量旋转变换较复杂,使得实际的控制效果难以达到理想分析的结果。

1985 年,德国鲁尔大学的 DePenbrock 教授首次提出了直接转矩控制变频技术。该技术在很大程度上解决了上述矢量控制的不足,并以新颖的控制思想、简洁明了的系统结构、优良的动静态性能得到了迅速发展。目前,该技术已成功地应用在电力机车牵引的大功率交流传动上。

直接转矩控制的优点是它直接在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型、控制电动机的磁链和转矩。它不需要将交流电动机转化成等效直流电动机,因而省去了矢量旋转变换中的许多复杂计算;它不需要模仿直流电动机的控制,也不需要为解耦而简化交流电动机的数学模型。

VVVF 变频、矢量控制变频、直接转矩控制变频都是交-直-交变频中的一种。其共同缺点是输入功率因数低,谐波电流大,直流回路需要大的储能电容器,再生能量又不能反馈回电网,即不能进行四象限运行。为此,矩阵式交-交变频应运而生。由于矩阵式交-交变频省去了中间直流环节,从而省去了体积大、价格贵的电解电容器。它能实现功率因数为 1,具有输入电流为正弦、能四象限运行、系统的功率密度大等优点。该技术目前虽尚未成熟,但仍吸引着众多的学者深入研究。

1.3 我国变频调速技术的发展状况

近 10 年来,随着电力电子技术、计算机技术、自动控制技术的迅速发展,电气传动技术面临着一场历史革命,即交流调速技术取代直流调速技术、计算机数字控制技术取代模拟控制技术已成为发展趋势。电机交流变频调速技术是当今节电、改善工艺流程以提高产品质量和改善环境、推动技术进步的一种主要手段。变频调速以其优异的调速启动、制动性能,高

效率、高功率因数和节电效果,广泛地适用范围及其他许多优点而被国内外公认为最有发展前途的调速方式。

1.3.1 我国变频调速技术的发展概况

电气传动控制系统通常由电动机、控制装置和信息装置 3 部分组成。电气传动关系到合理地使用电动机以节约电能和控制机械的运转状态(位置、速度、加速度等),实现电能-机械能的转换,达到优质、高产、低耗的目的。电气传动分成不调速和调速两大类,调速又分交流调速和直流调速两种方式。不调速电动机直接由电网供电,但随着电力电子技术的发展这类原本不调速的机械越来越多地改用调速传动以节约电能(可节约 15%~20% 或更多)、改善产品质量、提高产量。在我国 60% 的发电量是通过电动机消耗的,因此调速传动是一个重要行业,一直得到国家重视,目前已形成一定规模。

交流调速中最活跃、发展最快的就是变频调速技术。变频调速是交流调速的基础和主干内容。上个世纪变压器的出现使改变电压变得很容易,从而造就了一个庞大的电力行业。长期以来,交流电的频率一直是固定的,变频调速技术的出现使频率变为可以利用的资源。

我国电气传动与变频调速技术的发展应用见表 1-1 所示。我国是一个发展中国家,许多产品的科研开发能力仍落后于发达国家。随着改革开放,经济高速发展,变频调速产品形成了一个巨大的市场,它既对国内企业,也对外国公司敞开。很多最先进的产品从发达国家进口,在我国运行良好,满足了国内生产和生活需要。国内许多合资公司生产当今国际上最先进的变频调速产品并进行应用软件的开发,为国内外重大工程项目提供一流的电气传动控制系统。在变频调速领域,我国虽然取得了很大成绩,但应看到由于国内自行开发、生产产品的能力弱,对国外公司的依赖性仍较强。近几年,我国市场上变频器安装容量的年增长率在 20% 左右,潜在市场空间大约为 1200 亿~1800 亿元。其中,低压变频器约占市场份额的六成左右,其余四成由中、高压变频器占据。目前国外品牌约占我国变频器市场 70% 份额。不过,本土品牌市场份额在扩大,已从 2005 年的 15% 提升至 2012 年的 30% 左右。

表 1-1 我国电气传动与变频调速技术的发展简史

技术特征	应用年代
带电机扩大机的发电机-电动机机组传动	20 世纪 50 年代初期~70 年代中期
汞弧整流器供电的直流调速传动	20 世纪 50 年代后期~60 年代后期
磁放大器励磁的发电机-电动机机组传动	20 世纪 60 年代初期~70 年代中期
晶闸管变流器励磁的发电机-电动机机组	20 世纪 60 年代后期~70 年代后期
晶闸管变流器供电的直流调速传动	20 世纪 70 年代初期~现在
饱和磁放大器供电的交流调速传动	20 世纪 60 年代初期~60 年代后期
静止串级调速交流调速传动	20 世纪 70 年代中期~现在
循环变流器供电的交流变频调速传动	20 世纪 80 年代后期~现在
电压或电流型 6 脉冲逆变器供电的交流变频调速传动	20 世纪 80 年代初期~现在
BJT(IGBT) PWM 逆变器供电的交流变频调速传动	20 世纪 90 年代初期~现在

1.3.2 目前国内主要的产品状况

1. 晶闸管交流器件和开关器件(BJT、IGBT、VDMOS)斩波器供电的直流调速设备

这类设备的市场很大,随着交流调速的发展,该设备虽在缩减,但由于我国旧设备改造任务多,以及它在几百至一千多千瓦范围内价格比交流调速低得多,所以在短期内市场不会缩减很多。自行开发的控制器多为模拟控制,近年来主要采用进口数字控制器配国产功率装置。

2. IGBT 或 BJT PWM 逆变器供电的交流变频调速设备

这类设备的市场很大,总容量占的比例不大,但台数多,增长快,应用范围从单机扩展到全生产线,从简单的 V/f 控制到高性能的矢量控制。目前,国内约有 50 家工厂和公司生产该类设备,其中合资企业占很大比重。

3. 负载换流式电流型晶闸管逆变器供电的交流变频调速设备

这类产品在抽水蓄能电站的机组启动,大容量风机、泵、压缩机和轧机传动方面有很大需求。国内只有少数科研单位有能力制造,目前容量最大做到 12MW。功率装置国内配套,自行开发的控制装置只有模拟的,数字装置需进口,能自行开发应用软件。

4. 交-交变频器供电的交流变频调速设备

这类产品在轧机和矿井卷扬传动方面有很大需求,台数不多,功率大,主要靠进口,国内只有少数科研单位有能力制造。目前最大容量做到 7000 ~ 8000kW。功率部分可国产,数字控制装置依赖进口,包括开发应用软件。

1.4 变频技术的发展方向

交流变频调速技术是强弱电混合、机电一体的综合性技术,既要处理巨大电能的转换(整流、逆变),又要处理信息的收集、变换和传输,因此它的共性技术必定分成功率和控制两大部分。前者要解决与高电压大电流有关的技术问题,后者要解决控制模块的硬、软件开发问题。其主要发展方向有如下几项。

1. 主电路逐步向集成化、高频化和高效率发展

(1) 集成化主要措施是把功率元件、保护元件、驱动元件、检测元件进行大规模的集成,变为一个 IPM 的智能电力模块,其体积小、可靠性高、价格低。

(2) 高频化主要是开发高性能的 IGBT 产品,提高其开关频率。目前开关频率已提高到 10 ~ 15kHz,基本上消除了电动机运行时的噪声。

(3) 提高效率的主要办法是减少开关元件的发热损耗,通过降低 IGBT 的集电极-射极间的饱和电压来实现,其次,用不可控二极管整流采取各种措施设法使功率因数增加到 1。现在又开发了一种新型的采用 PWM 控制方式的自换相变流器,成功地用做变频器中的网侧变流器,电路结构与逆变器完全相同,每个桥臂均由一个自关断器件和一个二极管并联组成。其特点是:直流输出电压连续可调,输入电流(网侧电流)波形基本为正弦,功率因数可

保持为 1，并且能量可以双向流动，其结构如图 1.1 所示。

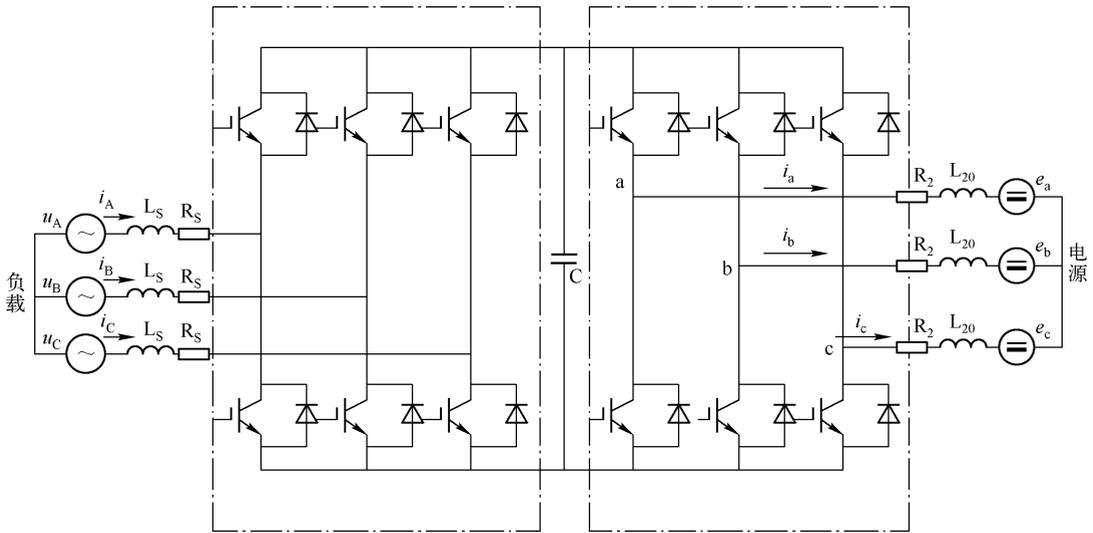


图 1.1 双 PWM 交-直-交变频器

2. 控制量由模拟量向数字量发展

由变频器供电的调速系统是一个快速系统，在使用数字控制时要求的采样频率较高，通常高于 1kHz，常需要完成复杂的操作控制、数学运算和逻辑判断，所以要求控制变频器的单片机具有较大的存储容量和较强的实时处理能力。前段时间，较为流行的方案是采用数片单片机来构成一个功能较强的全数字控制器。在实际使用时单片机的数量常根据具体任务而定。

全数字控制方式，使信息处理能力大幅度地增强。采用模拟控制方式无法实现的复杂控制在今天都已成为现实，使可靠性、可操作性、可维修性，即所谓的 RAS (Reliability, Availability, Serviceability) 功能得以充实。微机和大规模集成电路的引入，对于变频器的通用化起到了决定性的作用。全数字控制具有如下特点：

(1) 精度高。数字计算机的精度与字长有关，变频器中常使用 16 位乃至 32 位微机作为控制机，精度在不断提高。

(2) 稳定性好。由于控制信息为数字量，不会随时间发生漂移。与模拟控制不同，它一般不会随温度和环境条件发生变化。

(3) 可靠性高。微机采用大规模集成电路，系统中的硬件电路数量大为减少，相应的故障率也大大降低了。

(4) 灵活性好。系统中硬件向标准化、集成化方向发展，可以在尽可能少的硬件支持下，由软件去完成复杂的控制功能。适当地修改软件，就可以改变系统的功能或提高其性能。

(5) 存储容量大。存储容量大，存放时间几乎不受限制，这是模拟系统不能比拟的。利用这一特点可在存储器中存放大量的数据或表格，利用查表法可简化计算，提高运算速度。

(6) 逻辑运算能力强。容易实现自诊断、故障记录、故障寻找等功能,使变频装置可靠性、可使用性、可维修性大大提高。

3. 向多功能化和高性能化发展

多功能化和高性能化电力电子器件与控制技术的不断进步,使变频器向多功能化和高性能化发展。特别是随着微机的应用,以其简单的硬件结构和丰富的软件功能,为变频器多功能化和高性能化提供了可靠的保证。

人们总结了交流调速电气传动的大量实践经验,并不断融入软件功能,日益丰富的软件功能使通用变频器的适应性不断增强,仅举几例说明如下:转矩提升功能使低速下的转矩过载能力提高到 150%,使启动和低速运行性能得到很大的提高;转差补偿功能使异步电动机的机械特性 $n=f(T)$ 的硬度甚至大于工频电网供电时的硬度,额定转矩下的转速降比无补偿时减小 $1/3 \sim 2/3$,提高了稳态下的转速稳定度(应该指出,这是用简单的开环控制达到的指标,并不需要闭环控制);瞬时停电、短时过载情况下的平衡恢复功能防止了不必要的跳闸,保证了运行的连续性,这对某些不允许停车的生产工艺十分有意义;控制指令和控制参数的设定,可由触摸式面板实现,不但灵活方便,而且实现了模拟控制方式所无法实现的功能,比如多步转速设定、S 形加减速和自动加减速控制等;故障显示和记忆功能,使故障的分析和设备的维修变得既准确又快速;灵活的通信功能,方便了与可编程序控制器或上位计算机的接口,很容易实现闭环控制等,这里不再一一列举。可以这样说,通用变频器的多功能化和高性能化为用户提供了一种可能,即可以把原有生产机械的工艺水平“升级”,达到以往无法达到的境界,使其变成一种具有高度软件控制功能的新机种。

8 位 CPU、16 位 CPU 奠定了通用变频器全数字控制的基础。32 位数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)的应用将通用变频器的性能提高了一大步,实现了转矩控制,推出了“无跳闸”功能。目前,最新型变频器开始采用新的精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computer, RISC),将指令执行时间缩短到纳秒级。它是一种矢量(超标量)微处理器,其性能着重放在常用基本指令的执行效率上,舍弃了某些运算复杂且使用率不高的指令,省下它们所占用的硬件资源用于提高基本指令的运算速度,达到了以“每秒百万条指令”(Million Instruction Per Second, MIPS)为单位来衡量运算速度的程度。有文献报道,RISC 的运算速度可达 1000MIPs,即 10 亿次/秒,相当于巨型计算机的水平。指令计算时间为 1ns 量级,是一般微处理器所无法比拟的。有的变频器厂家声称,以 RISC 为核心的数字控制,可以支持无速度传感器矢量控制变频器的矢量控制算法、转速估计运算、PID 调节器的在线实时运算。

正是由于全数字控制技术的实现,并且运算速度不断提高,使得通用变频器的性能不断提高,功能不断增加。目前出现了一类“多控制方式”通用变频器,例如,安川公司的 VS616-G5 变频器就有:无 PG(速度传感器) V/f 控制;有 PG V/f 控制;无 PG 矢量控制;有 PG 矢量控制等 4 种控制方式。通过控制面板,可以设定(即选择)上述 4 种控制方式中的一种,以满足用户的需要。还有一种所谓的“工程型”高性能变频器,完善的软件功能和规范的通讯协议,使它对自身可实现灵活的“系统组态”,对上级控制系统可实现“现场总线控制”,它特别适合在现代计算机控制系统中作为传动执行机构。

4. 向大容量化和高压化发展

对一些大型生产机械的主传动,直流电动机在容量等级方面已接近极限值,采用直流调

速方案无论在设计和制造上都已十分困难。某些大容量高速传动,过去只能采用增速齿轮或是直接以汽轮机传动,噪声大、效率低、占地面积大。特大容量交流传动装置的发展,填补了这方面的空白。

例如,用于传动裂化气体压缩机的 21000kW、5900r/min 的交-直-交电流型无换向器电动机已于 1984 年投入运行。这是法国 AL STHOM 公司制造的,该公司提供的功率在 5000kW 以下的无换向器电动机,转速可达 10000r/min;功率在 75000kW 以下的,转速可达 4000r/min。日本也能提供类似设备。又如,德国西门子公司,1984 年生产的一台低速大容量交-交变频器,是 2×10920 kW 同步电动机交-交矢量控制系统,用于厚板轧钢机,其技术指标已优于直流传动。

大容量交流电动机通常是高电压的。为了适应高电压电动机,大容量交-直-交电压型 PWM 变频器大致有两种类型:直接高压型和高-低-高型,其中直接高压型发展较迅速。

5. 向小型化发展

小型化技术在通用变频器产品上已取得很大成绩。现进一步要在伺服控制型变频器上推进,具体的做法如下。

(1) 逆变器和伺服电路的小型化技术:实现小型化的关键是冷却技术,冷却风扇原来一直是用铝铸造,从冷却效率的观点来看,采用钎焊和压接较好。此外,部件的集成技术和高密度贴装技术对小型化有很大贡献,支架等部件的贴装技术和系统的 LSI 化是未来研究的重要课题。

(2) 电动机的微型化:伺服电动机达到无损耗并微型化是研究的重要课题。为使伺服电动机实现微型化需解决如下技术问题:采用稀土类永久磁铁;线圈下线工艺的改进;用高热传导树脂进行浇注的冷却技术。若解决了上述技术问题,电动机的体积将减小为原来的 $1/3$,从而实现微型化。

6. 向系统化发展

在实现了通用变频器的多功能和伺服型变频器的高速响应后,要求进一步考虑变频器与系统或网络的连接,例如,要求变频器和上位控制的可编程序控制器(PLC)通过串行通信连接的系统化课题。

一般通用变频器装备有带 RS-485 的标准通讯接口功能,此外还通过专用的开放总线方式运行。开放总线可适用于不同行业和地区,连接和使用非常简便。

由于伺服型变频器的信号高速响应能力强,故它与 PLC 可进行高速的串行通信。该总线由 25MHz、3V 系统进行驱动,故耐噪声能力强,非常有利于伺服系统的高速控制。

习 题 1

- 1.1 变频调速的主要技术指标是什么?
- 1.2 为什么变频器的逆变桥必须采用电力晶体管?
- 1.3 我国变频调速技术的发展概况如何?
- 1.4 简述变频调速技术的发展方向。