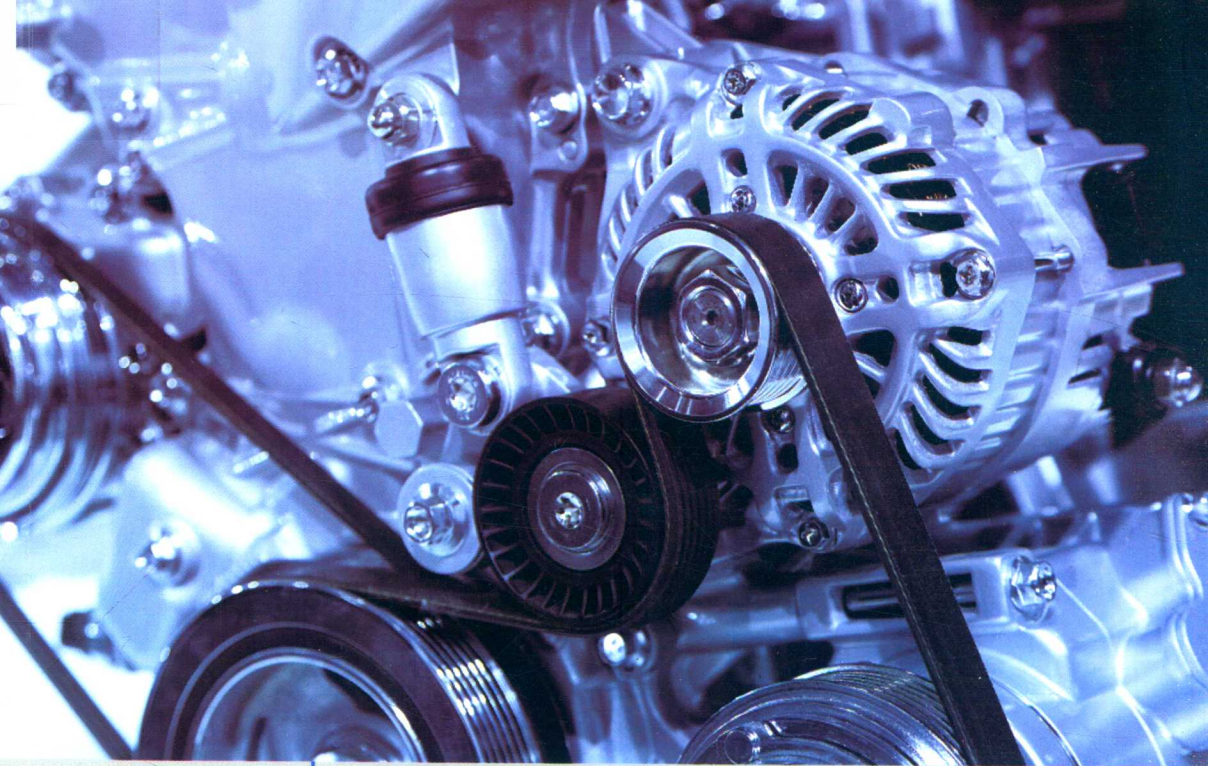


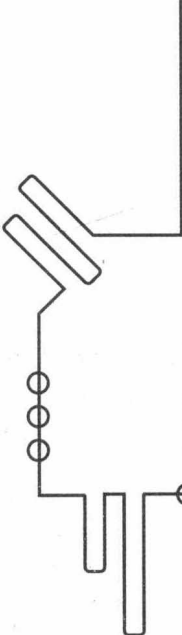


工业自动化中的 控制与驱动系统研究

董燕飞

著

 吉林大学 出版社



工业自动化中的 控制与驱动系统研究

董燕飞

著

图书在版编目 (CIP) 数据

工业自动化中的控制与驱动系统研究 / 董燕飞著. —
长春 : 吉林大学出版社, 2018.10
ISBN 978-7-5692-3543-2

I. ①工… II. ①董… III. ①工业自动化控制—控制系
统一研究 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 237608 号

书 名: 工业自动化中的控制与驱动系统研究

GONGYE ZIDONGHUA ZHONG DE KONGZHI YU QUDONG XITONG
YANJIU

作 者: 董燕飞 著

策划编辑: 邵宇彤

责任编辑: 邵宇彤

责任校对: 樊俊恒

装帧设计: 优盛文化

出版发行: 吉林大学出版社

社 址: 长春市人民大街 4059 号

邮政编码: 130021

发行电话: 0431-89580028/29/21

网 址: <http://www.jlup.com.cn>

电子邮箱: jdcbs@jlu.edu.cn

印 刷: 定州启航印刷有限公司

开 本: 710mm × 1000mm 1/16

印 张: 18.25

字 数: 310 千字

版 次: 2019 年 1 月第 1 版

印 次: 2019 年 1 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-5692-3543-2

定 价: 68.00 元

前 言

工业自动化就是通过控制工业生产中的各种参数来实现各种过程控制，在整个工业生产中，以充分利用动物以外的能源与各种资讯来达到尽量减少人力的操作进行生产工作的过程，而工业自动化就是使工业能进行自动生产的过程。在二战期间，多种军事应用上都运用有自动化控制与驱动系统，如精确制导和导弹控制、军事目标跟踪和导航系统等，这些又都反过来推动了伺服控制领域的发展。现在，工业自动化的概念更是融入到了整个社会生产体系中，在中国制造 2025 政策的推动下，我国的制造业发展必将迎来一个新的春天。在这个新的历史时期，笔者认为，对工业自动化中的控制系统和驱动系统进行一次梳理是十分必要和迫切的。

工业自动化的核心环节之一，是伺服控制系统。如今包括制造业、化工、石化、运输、军事和生物医学等方面，伺服控制的广泛定义仍然成立，但本着对当今产品和生产过程更加严格的要求，对伺服控制系统跟踪性能方面的期望已经显著提高。希望本次研究能够对我国制造业发展起到正面作用，也希望能够帮助到翻阅本书的读者朋友们。

目 录

第一章 绪 论 / 001

第一节 伺服控制系统的目标分析 / 001

第二节 伺服控制单元解构 / 003

第二章 自动化控制系统中的变频器与常用控制驱动装置 / 006

第一节 交 - 直 - 交电压型变频器的工作原理分析 / 006

第二节 交 - 直 - 交电流型变频器的工作原理分析 / 013

第三节 常用控制驱动装置解析 / 016

第三章 自动化控制系统数字通信协议分析 / 026

第一节 工业控制网络概述 / 026

第二节 现场总线技术 / 035

第三节 典型的现场总线技术分析 / 039

第四节 现场总线控制系统 / 043

第五节 工业以太网在电气控制系统中的应用 / 052

第四章 自动化控制系统中的常用编程方法研究 / 063

第一节 梯形图编程方法总览 / 063

第二节 梯形图编辑子系统的设计与实现 / 075

第五章 控制系统的伺服驱动器 / 088

第一节 开环控制与闭环控制 / 088

第二节 伺服控制器的挑战 / 089

第三节 伺服控制结构 / 096

第四节 伺服控制系统实现 / 109

第五节 IEC 61131-3 编程标准 / 113

第六章	自动化控制系统的设计思想和构成	/ 120
第一节	自动化控制系统设计的功能和要求	/ 120
第二节	自动化控制系统设计简例分析	/ 125
第三节	自动化控制系统中的抗干扰设计	/ 170
第七章	可编程控制器理论分析与实际应用	/ 197
第一节	概述	/ 197
第二节	FX _{2N} 系列 PLC 的指令系统及其编程方法	/ 204
第三节	两大指令及其应用分析	/ 217
第四节	在 PLC 系统中的特殊功能模块研究	/ 250
第八章	基于 PLC 的工业自动化控制系统案例综述	/ 255
第一节	主控 PC 程序设计	/ 255
第二节	界面 PC 程序设计	/ 266
第九章	运动控制的发展趋势展望	/ 270
第一节	背景	/ 270
第二节	超精密加工	/ 271
第三节	微制造、微组装与精密计量测试	/ 273
第四节	驱动技术	/ 275
	参考文献	/ 278

第一章 绪 论

第一节 伺服控制系统的目标分析

伺服控制系统的目标通常是一个被控信号用指定的速度和精度跟踪一个参考输入信号（有时也称为设定点），同时要保持系统的鲁棒性使被控信号一直沿预定轨迹变化，但有时也会有一些不可预期的扰动影响。

在运动控制应用领域，伺服控制涉及运动使能器（即执行器）的控制以实现执行器所连接负载期望的运动轨迹。无论是运动变量，如距离、位置、速度、加速度，还是运动诱导变量，如力和转矩等，扰动都会造成控制过程中出现负载变化和运动阻力，如摩擦力、弹力、齿槽力等。

伺服控制系统的参考信号输入到伺服控制系统，它可用于优化产品质量或过程性能。下面用两个例子来说明这一点。

比如，（注塑机）注塑成型机的冲头速度曲线会影响到其中塑料部件制造的精度和一致性。其优化填充横截面取决于多种因素，如特定的树脂的材料特性和冲头的几何形状，并且它通常采用计算机仿真软件设计生成整个系统的模型。冲头速度曲线采用期望曲线为参考信号，注塑机伺服控制系统迫使冲头速度以最小偏移量跟踪曲线。

注塑成型系统的最佳冲头速度曲线是一种非常典型的速度曲线，在填充初期横截面积增大，此后横截面保持恒定。冲头速度曲线可以分为五部分，曲线的第一部分用于填充浇道，速度快速增长后保持恒定；第二部分曲线速度迅速减小以消除栅极喷射；第三部分曲线对应填充腔的增大横截面积；第四部分是填充腔的恒定横截面部分；第五部分曲线速度减小，以消除冲洗和过度包装影响。上述所有目标都必须在很短的填充时间内完成。

在上述注塑成型机应用实例中操作参数是不连续的。由于各种原因也有许多连续运动的需求，会在下面的例子中给出。

有经验的飞行员能够让飞机非常平滑地起飞，使飞机上的乘客和乘务员的不适程度为最小。飞机沿着跑道的速度曲线决定了起飞的平滑性。图 1-1 所示为三种典型场景下飞机平滑起飞速度曲线。飞行员通过伺服控制系统来跟踪这条曲线。既可以是在真实飞机上，也可以通过飞行模拟器来培训飞行员。

伺服控制系统性能通过测量目标参考信号与跟踪性能指标来评估，通常基于均方根跟踪误差。对于点对点跟踪（如参考信号阶跃变化）可以使用传统性能指标，包括上升时间、超调量和稳态误差。这些指标和系统单位阶跃响应的关系，是一种典型二阶系统，阶跃响应的变化会导致输出超过设定值，振荡一段时间，逐渐下降到设定值的稳定区间。

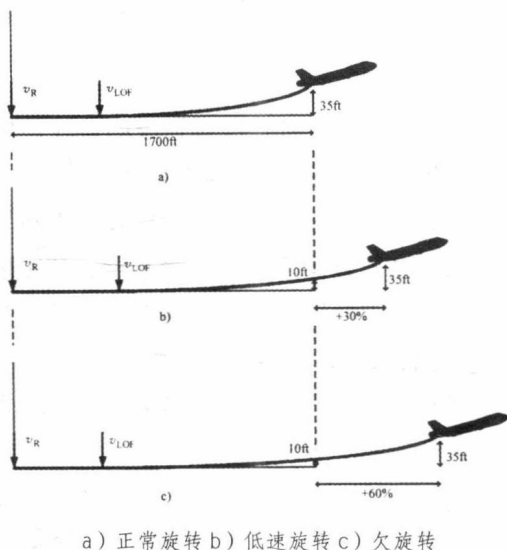


图 1-1 飞机平滑起飞速度曲线（包括转速 v_R ，脱离速度 v_{LOF} ）

镇定时间由输出保持在一定稳态振荡所需时间决定，即通常在稳态值的 $\pm 1\%$ 。还有几种方法可以确定上升时间，其中一种是跟踪参考值 $10\% \sim 90\%$ 的时间。

第二节 伺服控制单元解构

在本节中，将介绍用来训练飞行员的飞行模拟器。

飞行模拟器的设计要求能够模拟飞机在地面、空中的实际情况，尽可能地匹配有经验的飞行员在现实生活中可能遇到的各种情况。通过模拟器，学员甚至是专业的飞行员都可以感受到驾驶飞机时可能产生的风险。

基于实际飞机的运动学和动力学模型，飞行模拟器会根据飞行员命令和当前飞机参数以及可能发生的意外状况在多自由度运动平台产生不同的运动轨迹。这个复杂系统是可以借助伺服控制技术实现的典型系统。

飞行模拟器可以分解为几个同步工作的关键功能模块，参照飞行模拟器详细说明，后面的小节将简要阐述执行这些功能的伺服控制系统的各组成部分，这些组成部分的更多细节将在后续章节介绍。

一、测 量

在驾驶舱中，飞行员可以通过面板、仪表、报警阵列了解当前的飞行参数。这些设备基本上都显示一些比较重要的参数，如当前飞机航向、当前飞行曲线和风力条件等，它们也会显示飞机关键部件的运行状况，如机翼、副翼、机尾等，并且会在检测到故障时发出声音、显示报警信号，这些信息对飞行员知情后决策做出哪些纠正措施是非常有必要的。这种测量功能通过一组传感器和仪表电路实现，它们共同收集数据，并转换成一种适用于显示和控制的形式。

二、驱 动

作动器（执行器）的框架安装在座舱的正下方，根据飞行员的命令产生并传送整个平台适当的运动曲线，并且还产生传送一些不同天气条件和湍流的影响。驾驶舱是被这些执行器驱动的负载，执行器的能源方式可以是气压、液压或电磁力，分别对应气压、液压或电磁作动器。

作动器能够使驾驶舱产生多自由度的运动，使飞行员得到像在真实飞机中飞行的感觉。因此，每个作动器都需要被控制到一定的精度来建立比较好的整体效果，以使模拟器尽可能地接近真实情况。除此之外，该框架中各作动器之间的相互影响和耦合作用也必须进行适当的处理，高性能的控制系统必须要满足这些功能。

三、功率调制

功率调制无论是在形式还是能量水平上，都能起到匹配飞行员或控制命令信号和作动器最终执行信号的作用，其具体的调节方式也根据整个系统的设计变化很大，调制过程可以包括放大、转换或切换，这取决于整个系统的设计和所使用的作动器的类型与工作原理。

考虑到工作在不同数量级水平的不同组件，功率调制的作用就是使伺服控制系统的不同组件之间充分通信。假设飞行模拟器采用直流电动机作为驱动，则需要几百伏的电压。来自传感器的测量信号通常是毫伏量级的低能量形式，然后为了计算机处理，功率调制可能会涉及信号放大，把测量信号放大到几伏，再把计算机上处理或在仪表上现实的几伏电压测量信号放大到几百伏来驱动电动机。放大增益不仅针对电信号，也有气动和液压放大器。

对于不同类型的致动器，如气动、液压或者交流电动机及其他种类的调制都可能需要把控制信号转换成所需要操作这些执行器的信号形式。例如，交流电动机，由于工作需要可能也会需要相位匹配。除了放大，其他常见的调制包括电流 - 电压转换、电流 - 压力转换、信号切换和信号斩波等。

四、控制

伺服控制系统最核心的功能是控制，它有助于整合其他功能。本质上，它生成特定的运动指令，并发送给功率调制装置。

根据飞行模拟器的驾驶舱，飞行员可以通过控制面板显示的速度、飞行轨迹等目标飞行参数发出指示和命令。运动命令可以直接传送到功率调制装置，使飞行员直接控制执行器。当然，运动命令也可以作为自动控制系统的参考信号或设定点，在这种情况下，学员或飞行员只需要指定目标速度和飞行轨迹，自动控制系统就会操作基于反馈测量的执行器。上面所说的第一种情况称为开环控制，后者称为闭环控制。

除了执行飞行员有关起飞、着陆、转弯、回旋等相关的标准动作命令外，控制系统也需要对特殊状况做出充分反应，如逆风、湍流、暴风、暴雨、甚至模拟器部件故障等。从控制系统角度来看，这些扰动可能会破坏原定控制系统。因此，除了跟踪和执行命令，飞行模拟器控制系统在面对可能遇到的扰动时，必须保持其强大的鲁棒性。

五、系统集成

各部分组合在一起形成完整系统。图 1-2 所示为简单控制系统组件的集成图，然而在现实中，伺服控制系统可能采用更加复杂的结构。

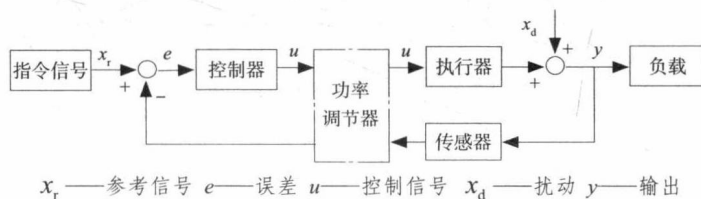


图 1-2 简单控制系统组件的集成图

为得到理想运动曲线，把参考信号或命令输入到系统中。这个命令可以由飞行员输入，当采用自动驾驶系统时，可以由更高级别的监督系统得到。该系统的当前输出即是受控运动参数，它可以由传感器测量并作为反馈信号，然后把这个反馈信号和参考信号做比较，得到的差值就是误差信号。基于该误差信号，控制器将输出必要的控制信号给执行器，通过功率调制，以便根据运动曲线驱动负载。

此外，图 1-2 还强调了干扰信号 x_d ，它表示外部信号渗入回路的效应，而且环境也会将系统暴露在各种不可预知条件下。如果干扰没有被充分补偿，可能会引起受控变量偏离参考信号。例如，由于顺风，飞机可以被加速，并超过所期望的飞行包线。这时可采用反馈控制器，减小控制力度使飞机回到正常轨迹。

伺服控制系统的四个主要功能将在后面的章节详细介绍。总的来说，集成这些功能的整个系统也通常称为伺服驱动。如果用液压来驱动执行器，则称为液压伺服驱动，如果用电动势来驱动执行器，则称为电动伺服驱动。但是要澄清的是，这并不是驱动的通用定义。对于一些厂家来说，驱动一词可能不包括执行功能，而在本书中则把整个完整的系统定义为驱动。

第二章 自动化控制系统中的变频器与常用控制驱动装置

交—直—交变频器为交—直—交变频调速系统提供变频电源。交—直—交变频器的基本电路包括整流电路和逆变电路，整流电路将工频交流电整流成直流电，逆变电路再将直流电逆变为频率可调的交流电。根据变频电源的性质可分为电压型变频器和电流型变频器。

第一节 交—直—交电压型变频器的工作原理分析

交—直—交电压型变频器的结构核心部分为逆变器。

一、电压型逆变器的基本电路

(一) 电路构成

交—直—交电压型逆变器的基本电路如图 2-1 所示。图中， C_d 为滤波电容， $S1 \sim S6$ 为具有单向导电性的功率半导体开关， $VD1 \sim VD6$ 为反馈二极管，电感 L_d 起限流作用， Z_U, Z_V, Z_W 为变频器的三相对称负载。

直流输出电压 U_d 具有电压源特性，且逆变器的交流输出电压被钳位为矩形波，与负载性质无关。交流输出电流的波形与相位则由负载功率因数决定。

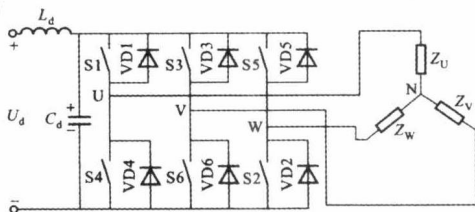


图 2-1 交—直—交电压型逆变器的基本电路

（二）功率开关导通规则及输出波形分析

六只功率开关每隔 60° 电角度触发导通一只，相邻两相的功率开关触发导通时间互差 120° ，一个周期共换相六次，对应六个不同的工作状态（又称六拍）。根据功率开关的导通持续时间不同，可以分为 180° 导通型和 120° 导通型两种工作方式。

现以 180° 导通型为例，说明逆变器的输出电压波形。当按 S1 ~ S6 的顺序导通时，每个工作状态下都有三只功率开关同时导通，其中每个桥壁上都有一只有导通，形成三相负载同时通电。导通规则如表 2-1 所示。

表2-1 功率开关导通规则

工作状态（拍）	每个工作状态下被导通的功率开关	
状态 1 ($0^\circ \sim 60^\circ$)	S1, S5	S6
状态 2 ($60^\circ \sim 120^\circ$)	S1, S2	S6
状态 3 ($120^\circ \sim 180^\circ$)	S1, S2, S3	
状态 4 ($180^\circ \sim 240^\circ$)	S2, S3, S4	
状态 5 ($240^\circ \sim 300^\circ$)	S3, S4, S5	
状态 6 ($300^\circ \sim 600^\circ$)	S4, S5	S6

设负载为星形联结的三相对称负载，即 $Z_U = Z_V = Z_W = Z$ 。假定逆变器的换相为瞬间完成，并忽略功率开关上的管压降。以状态 1 为例，此时功率开关 S1, S5, S6 导通，其等效电路如图 2-2 所示。由图 2-2 可求得负载相电压

$$u_{UN} = u_{WN} = U_d \frac{\frac{Z_U Z_W}{Z_U + Z_W}}{Z_V + \frac{Z_U Z_W}{Z_U + Z_W}} = \frac{1}{3} U_d$$

$$u_{VN} = -U_d \frac{Z_V}{Z_V + \frac{Z_U Z_W}{Z_U + Z_W}} = -\frac{2}{3} U_d$$

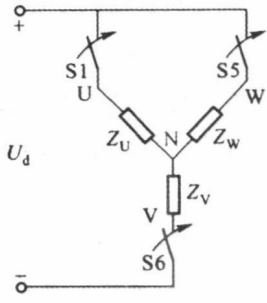


图 2-2 状态 1 等效电路

同理，可求得其他状态下的等效电路并计算出相应相电压瞬时值，如表 2-2 所示。

表2-2 其他状态下的相应相电压瞬时值

相电压	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5	状态 6
u_{UN}	$\frac{1}{3}U_d$	$\frac{2}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$
u_{VN}	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$\frac{2}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$
u_{WN}	$\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$\frac{2}{3}U_d$

负载线电压可按下式求得

$$\begin{aligned}u_{UV} &= u_{UN} - u_{VN} \\ u_{VW} &= u_{VN} - u_{WN} \\ u_{WU} &= u_{WN} - u_{UN}\end{aligned}$$

将上述各状态下对应的相电压、线电压画出，即可得到 180° 导通型的三相电压型逆变器的输出电压波形。逆变器输出为三相交流电压，各相之间互差 120°，三相对称，相电压为阶梯波，线电压为方波。输出电压的交变频率取决于逆变器开关元件的切换频率。选择适当的坐标原点，对输出电压波形进行谐波分析，可以展开成如下的傅立叶级数。

对相电压

$$u_{UN} = \frac{2U_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \dots \right)$$

对线电压

$$u_{UV} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \dots \right)$$

线电压基波有效值 U_1 ，与直流电压 U_d 的关系为

$$U_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d$$

上述傅立叶级数表明，输出线电压和相电压中都存在着 $6k \pm 1$ 次 ($k=1, 2, 3, \dots$) 谐波，特别是较大的 5 次和 7 次谐波，对负载电动机的运行十分不利。

二、电压型变频器及电压调节方式

(一) 电压型变频器

最简单的电压型变频器由可控整流器和电压型逆变器组成，用可控整流器调压，逆变器调频，如图 2-3 所示。图中，逆变电路使用的功率开关为晶闸管。由图可知，因中间直流电路并联着大电容 C_d 直流性无法改变。这就是说，从可控整流器到 C_d 之间的电流 I_d 的方向和直流电压 U_d 的极性不能改变。因此，功率只能从交流电网输送到直流电路，反之不行。这种变频器由于能量只能单方向传送，不能适应再生制动运行，应用场所受到限制。

为适应再生制动运行，可在图 2-3 电路的基础上，增加附加电路。一种方法是，在中间直流电路中设法将再生能量处理掉，即在电容 C_d 的两端并联一条由能耗电阻 R 与功率开关（可以是晶闸管或自关断器件）相串联的电路，如图 2-4 所示。

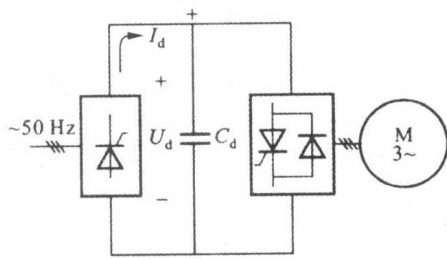


图 2-3 无再生制动功能的电压变频器

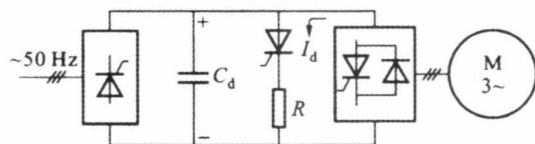


图 2-4 并联耗能电阻的电压型变频器

当再生电能经逆变器的续流二极管反馈到直流电路时，将使电容电压升高，触发导通与耗能电阻串联的功率开关，再生能量便消耗在电阻上。这种方法对小容量系统效果显著。

还有一种可用于大容量系统的方法，那就是在整流电路中设置如图 2-5 所示的再生反馈通路——反并联逆变桥。 U_d 的极性不变，但 I_d 可以通过反并联三相桥（工作在有源逆变状态）来改变方向，使交流电网接收到再生电能。

（二）电压调节方式

变频电源需要在变频的同时实现变压以适应变频调速的要求。对于前述输出矩形波的变频器而言，不仅可以在逆变器输出端利用变压器进行调压或移相调节电压，其在输入端调节电压还主要有以下两种方式。

其一，整流方式采用可控整流器。在图 2-3 中，如前所述通过对触发脉冲的相位控制直接得到可调直流电压。这种方案有电路简单的优点，也有电网侧功率因数低的缺点，这种情况在低电压时尤其明显。

其二，在图 2-6 中，采用不控整流器整流，将斩波器增加到直流环节来进行调压。电网侧的功率因数由于在此法中使用不可控整流器而得到明显改善。

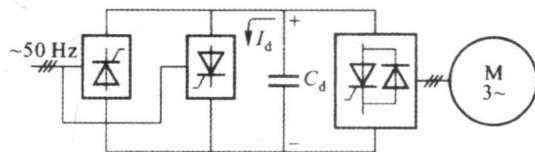


图 2-5 反并联逆变桥的电压型变频器

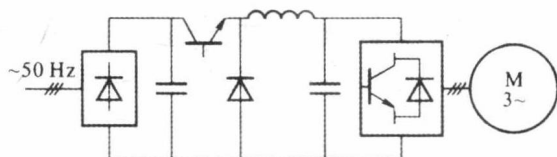


图 2-6 利用斩波器调压的变频器

上面介绍的是被称为脉幅调制（简称 PAM）的方法。两种方法均是经由调节逆变器输入端的直流电压来改变逆变器输出电压的幅值。逆变器本身此时只负责调节输出电压的交变频率，分两个环节分别完成调压和调频工作。

三、串联电感式电压型变频器

在表 2-1 中，按照逆变器的工作原理可得到功率开关的导通规律：电流逆变器中的电流从一只功率开关准确地转移到另一只功率开关中去的过程被称为换流。当图 2-7 中的功率开关采用具有自关断能力的全控型器件时，主电路原理图将完全和图 2-1 中的基本电路相同。如果采用不具备自关断的能力半控型器件——晶闸管，在用于异步电动机变频调速系统调节此类感性负载时就要用到专门的换流电路来强迫换流，也就是晶闸管受到换流电路的施加反压而关断。如图 2-7 给出的三相串联电感式变频器的主电路，逆变器的主电路随换流电路的不同而不同。

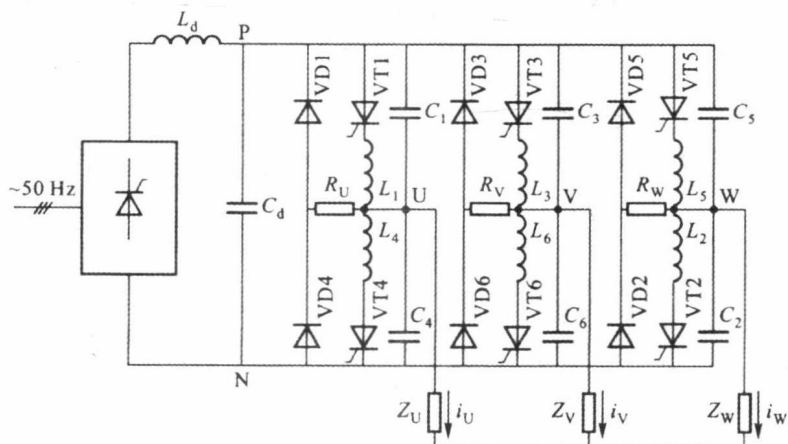


图 2-7 三相串联电感式变频器的主电路

如图 2-7 所示，通常组成中间滤波环节的 L_d 小而 C_d 很大，作为功率开关使用的晶闸管 VT1 ~ VT6 取代了图 2-7 中的 S1 ~ S6 部分。换流电感为 $L_1 \sim L_6$ ，其中若两个换流电感在同一桥臂上，则二者是紧密耦合的。又因其串联在两个主晶闸管之间而被称为串联电感式。换流电容为 $C_1 \sim C_6$ ，环流衰减电阻为 $R_U \sim R_W$ 。这个电路类型属于 180° 导电型，在同一桥臂的两个晶闸管之间完成互补换流。互补换流就是指通过触发一个晶闸管来关断同一桥臂上的另一个晶闸管。

假定认为换流过程中负载电流 i_L 保持不变，即换流时间远小于逆变周期，并将 L 、 C 当作理想元件，不考虑晶闸管的压降和触发导通时间。图 2-8 所示为各元件上电压、电流正方向，以 U 相为例，对从 VT1 换流到 VT4 的过程做细致分析。