

机电一体化技术手册

下 册

机电一体化技术手册编委会 编

工业学院图书馆
藏书章



机械工业出版社

目 录

第 6 篇 电力电子与电气传动技术

第 1 章 新一代电力电子器件及其应用.....6-3	2.2 有源逆变电路6-79
1.1 功率晶体管 (GTR) 及其模块.....6-4	2.2.1 有源逆变的概念6-79
1.1.1 GTR 的工作原理.....6-4	2.2.2 三相零式逆变电路6-79
1.1.2 GTR 的基本特性与主要参数.....6-4	2.2.3 三相桥式逆变电路6-81
1.1.3 GTR 驱动电路.....6-9	2.2.4 逆变状态的重叠角及电压降6-82
1.1.4 GTR 的并联连接技术6-16	2.2.5 逆变电路的外特性6-83
1.1.5 GTR 的保护技术6-16	2.2.6 逆变颠覆与最小 β 角的限制6-83
1.2 功率场效应晶体管 (MOSFET)6-20	2.2.7 逆变状态电动机的机械特性6-84
1.2.1 概述6-20	2.3 变流装置的运行指标6-85
1.2.2 MOSFET 的结构与特点.....6-20	2.3.1 效率、变流因数及损耗6-85
1.2.3 MOSFET 的定额与特性.....6-21	2.3.2 直流电压调整率6-86
1.2.4 驱动电路6-23	2.3.3 变流装置工作时的谐波、谐波危害及其对策6-88
1.2.5 MOSFET 的保护.....6-30	2.3.4 功率因数及其提高方法6-94
1.2.6 MOSFET 的并联.....6-32	第 3 章 变频技术6-99
1.3 绝缘门极晶体管 (IGBT).....6-34	3.1 变频器的分类、换流和控制方式6-99
1.3.1 IGBT 的基本结构与工作原理.....6-34	3.1.1 变频器的分类6-99
1.3.2 IGBT 的特性.....6-34	3.1.2 变频器的几种换流方法.....6-100
1.3.3 IGBT 的门极驱动电路.....6-37	3.1.3 变频器的控制方式.....6-100
1.3.4 IGBT 的保护技术.....6-39	3.2 交-交变频器6-101
1.3.5 IGBT 的并联技术.....6-43	3.2.1 交-交变频器的基本结构6-101
1.4 智能化功率集成电路6-44	3.2.2 交-交变频器的工作原理6-103
1.4.1 智能化功率集成电路的特点6-44	3.2.3 交-交变频器触发脉冲的控制方法.....6-103
1.4.2 单片功率集成电路的隔离技术6-45	3.3 交-直-交变频器.....6-106
1.4.3 智能的含义6-45	3.3.1 负载谐振式逆变器.....6-106
1.4.4 智能化功率集成电路的分类6-46	3.3.2 电压型变频器.....6-110
1.4.5 典型智能功率集成电路介绍6-46	3.3.3 电流型变频器.....6-114
第 2 章 晶闸管整流电路和逆变电路6-53	3.4 脉宽调制 (PWM) 型变频器6-117
2.1 可控整流电路6-53	3.4.1 PWM 的调制方法与 PWM 控制方式.....6-117
2.1.1 基本假设6-53	3.4.2 SPWM6-117
2.1.2 各种整流电路联结型式和选择6-53	3.4.3 准 SPWM6-118
2.1.3 单相可控整流电路6-53	3.4.4 用大规模集成电路 HEF4752 V 产生 SPWM 波及其在调速系统
2.1.4 三相可控整流电路6-58	
2.1.5 重叠角及换相电压降6-66	
2.1.6 可控整流电路的参数计算6-71	

中的应用·····	6-118	5.1.1 异步电动机调速的方法、特点···	6-178
3.4.5 功率MOSFET-SPWM逆变器···	6-121	5.1.2 串级调速系统·····	6-178
3.4.6 由单板微机产生和控制SPWM 波·····	6-121	5.1.3 变频调速系统·····	6-187
3.4.7 其他PWM调制方法·····	6-123	5.1.4 在电动机调速节能中各种调速 方法的比较·····	6-194
3.5 高频多谐振交流技术及其应用·····	6-125	5.1.5 交流电动机的矢量变换控制·····	6-199
3.5.1 谐振开关的电路结构·····	6-125	5.2 无换向器电动机及其调速系统·····	6-208
3.5.2 谐振开关技术的应用·····	6-125	5.2.1 无换向器电动机的基本工作 原理·····	6-209
第4章 直流调速系统·····	6-126	5.2.2 无换向器电动机的特性及调速 方法·····	6-214
4.1 直流电动机的调速方法与性能指标···	6-126	5.2.3 无换向器电动机调速系统的 构成和设计特点·····	6-217
4.1.1 直流电动机的调速性能与方法···	6-126	5.3 开关磁阻电机调速系统·····	6-219
4.1.2 调速系统的性能指标·····	6-127	5.3.1 基本结构和工作原理·····	6-219
4.1.3 直流调速系统的应用·····	6-128	5.3.2 主要参数和基本特性·····	6-220
4.2 晶闸管直流调速系统·····	6-128	5.3.3 设计和计算要点·····	6-222
4.2.1 晶闸管变频器-直流电动机 (U-M)开环调速系统的 机械特性·····	6-128	5.3.4 功率变换器·····	6-225
4.2.2 闭环调速系统的静特性·····	6-129	5.3.5 传感器·····	6-226
4.2.3 测速发电机·····	6-131	5.3.6 应用·····	6-227
4.2.4 有静差和无静差调速系统·····	6-131	第6章 电气伺服系统·····	6-229
4.2.5 闭环调速系统的动态特性·····	6-134	6.1 伺服电动机的种类、特点及选用 原则·····	6-230
4.2.6 单闭环调速系统的电流控制 ——电流截止负反馈·····	6-137	6.2 直流伺服系统及其应用·····	6-231
4.2.7 电动势负反馈和电枢电压负 反馈调速系统·····	6-141	6.2.1 永磁直流电动机伺服系统·····	6-231
4.2.8 有从属电流环的调速系统—— 转速、电流双闭环调速系统·····	6-144	6.2.2 其他几种直流伺服电动机伺服 系统·····	6-231
4.2.9 调速系统动态参数工程设计 方法·····	6-145	6.2.3 直流伺服电动机的常用计算 公式·····	6-231
4.2.10 多环调速系统·····	6-150	6.2.4 国内外生产厂生产的直流电动 机伺服系统的型号、系列及性 能·····	6-232
4.2.11 直流电动机速度的双域调节 系统·····	6-151	6.2.5 直流伺服系统的典型应用·····	6-235
4.2.12 可逆直流调速系统·····	6-152	6.3 交流伺服系统及其应用·····	6-237
4.3 晶体管直流脉宽调速系统·····	6-163	6.3.1 交流伺服系统·····	6-237
4.3.1 脉宽调制变换器·····	6-163	6.3.2 永磁交流伺服系统·····	6-237
4.3.2 脉宽调速系统的控制回路·····	6-168	6.3.3 永磁交流伺服系统中的传感器···	6-239
4.3.3 晶体管直流脉宽调速系统·····	6-172	6.3.4 永磁交流伺服电动机的性能 特点·····	6-239
4.4 数字式直流调速系统·····	6-173	6.3.5 异步型交流伺服系统·····	6-240
4.4.1 采用16位8098单片微处理机 的数字调速系统·····	6-174	6.3.6 国内外永磁交流伺服系统的 系列及性能·····	6-240
4.4.2 转速信号的数字检测·····	6-176	6.3.7 交流伺服系统的典型应用·····	6-243
第5章 交流调速系统·····	6-178		
5.1 异步电动机调速系统·····	6-178		

6.4 专用集成电路组成的电气伺服系统···6-243	6.6 直接驱动伺服系统·····6-274
6.4.1 小功率直流电动机的控制·····6-243	6.6.1 直接驱动伺服系统的构成·····6-274
6.4.2 采用L 292实现直流电动机的速度控制系统·····6-244	6.6.2 直接驱动系统的特殊问题·····6-274
6.4.3 采用L 290/L 291/L 292实现直流电动机的速度/位置控制系统·····6-245	6.6.3 直接驱动电动机及其功率放大器应具有的特性·····6-275
6.4.4 由LM628运动控制处理器构成的伺服系统·····6-251	6.6.4 直接驱动电动机的工作原理及特性比较·····6-276
6.5 步进电动机的驱动和控制·····6-252	6.6.5 变磁阻型直接驱动电动机及其伺服系统·····6-276
6.5.1 步进电动机的分类及主要技术指标·····6-253	6.6.6 变磁阻混合型直接驱动电动机及其伺服系统·····6-277
6.5.2 步进电动机的结构及特点·····6-254	6.6.7 交流永磁无刷直接驱动电动机及其伺服系统·····6-279
6.5.3 步进电动机的绕组及励磁方式···6-258	6.6.8 直接驱动系统中的位置传感器···6-280
6.5.4 步进电动机的驱动电源·····6-265	6.6.9 国外几种直接驱动系统产品简介·····6-281
6.5.5 环形分配器·····6-269	6.10 直接驱动系统在精密装配机器人中的应用·····6-285
6.5.6 步进电动机的微机控制·····6-271	参考文献·····6-286
6.5.7 步进电动机的闭环控制·····6-272	
6.5.8 步进电动机驱动系统在数控立式铣床中的应用·····6-272	

第7篇 机电一体化中的传动与执行装置

第1章 机电一体化机械系统分析·····7-3	2.1 机电一体化传动系统的特性·····7-27
1.1 机械传动系统分析·····7-3	2.1.1 转动惯量·····7-27
1.1.1 机电一体化机械系统的定义·····7-3	2.1.2 摩擦·····7-29
1.1.2 机电一体化对机械传动的要求·····7-3	2.1.3 阻尼·····7-30
1.1.3 机械传动元件的选用·····7-3	2.1.4 刚度·····7-30
1.1.4 齿轮传动系统中总传动比的确定及其分配·····7-4	2.1.5 谐振频率·····7-30
1.1.5 机械传动系统方案的选择·····7-7	2.1.6 间隙·····7-30
1.2 动力与执行元件的选用·····7-8	2.2 传动装置·····7-33
1.2.1 电动机的选用·····7-8	2.2.1 滚珠丝杠·····7-33
1.2.2 电动机调速方式概述·····7-11	2.2.2 滚珠花键·····7-41
1.2.3 交流变频调速器·····7-13	2.2.3 谐波齿轮减速器·····7-41
1.2.4 伺服执行元件·····7-17	2.3 导轨·····7-53
1.3 控制系统的选用·····7-24	2.3.1 滚动直线导轨·····7-53
1.3.1 单板和单片微机控制系统·····7-24	2.3.2 塑料导轨·····7-56
1.3.2 普通PC机组成的控制系统·····7-24	第3章 机电一体化系统的执行装置···7-68
1.3.3 STD总线微机控制系统·····7-24	3.1 机电一体化系统执行装置分析·····7-68
1.3.4 工业PC机·····7-25	3.1.1 执行装置的技术特点·····7-68
1.3.5 可编程序控制器·····7-26	3.1.2 对执行装置的技术要求·····7-68
1.3.6 几种控制装置的性能比较·····7-26	3.1.3 系统的品质·····7-70
第2章 机电一体化传动与导向装置···7-27	3.1.4 能量转换接口·····7-74
	3.2 常用执行装置·····7-75

3.2.1 电动执行装置	7-75	第5章 计算机外部设备中的精密	
3.2.2 微动装置	7-91	传动与控制	7-181
3.2.3 误差补偿装置	7-95	5.1 概述	7-181
3.2.4 定位装置	7-97	5.1.1 计算机外部设备的机电一体化	7-181
3.2.5 CNC机床动力卡盘与回转刀架	7-98	5.1.2 计算机外部设备的传动与控制	
第4章 液压伺服、比例、数字控制		系统分析	7-183
元件	7-102	5.2 几种常用外部设备的传动、控制	
4.1 电液伺服阀	7-102	系统	7-185
4.1.1 概述	7-102	5.2.1 打印机	7-185
4.1.2 电液伺服阀的组成	7-102	5.2.2 发光二极管(LED)印字机	7-186
4.1.3 电液伺服阀的类型	7-102	5.2.3 绘图机	7-187
4.1.4 电液伺服阀的技术性能指标		5.2.4 磁带机	7-190
和有关技术术语	7-105	5.2.5 硬磁盘机	7-190
4.1.5 国内外主要电液伺服阀产品	7-110	5.2.6 软磁盘机	7-191
4.2 电液比例阀	7-147	5.2.7 光盘机	7-192
4.2.1 概述	7-147	5.3 定位系统	7-194
4.2.2 电液比例阀的组成	7-148	5.3.1 概述	7-194
4.2.3 电液比例阀的技术性能指标		5.3.2 直接转动驱动定位	7-198
和有关的技术术语	7-149	5.3.3 直线运动直接驱动定位	7-199
4.2.4 国内外主要电液比例阀性能		5.3.4 刚性传动定位机构	7-200
参数比较	7-151	5.3.5 挠性传动定位机构	7-202
4.2.5 国产电液比例阀简介	7-151	5.4 跟踪系统	7-206
4.3 电液数字阀	7-172	5.4.1 气浮式跟踪系统	7-207
4.3.1 概述	7-172	5.4.2 单一执行机构的跟踪系统	7-210
4.3.2 数字式电液控制阀	7-172	5.4.3 双模式寻道跟踪机构	7-213
4.3.3 增量式数字控制阀的性能指标	7-174	5.4.4 双模式跟踪伺服系统	7-215
4.4 电液步进元件	7-176	5.5 光盘伺服系统	7-218
4.4.1 概述	7-176	5.5.1 三维空间的光束跟踪	7-218
4.4.2 电液步进马达	7-176	5.5.2 激光束跟踪伺服	7-221
4.4.3 电液步进缸	7-178	参考文献	7-228

第8篇 工业机器人

第1章 工业机器人及其分类	8-3	1.5.2 工业机器人特性表示	8-11
1.1 工业机器人的发展现状	8-3	1.5.3 工业机器人通用技术条件	8-12
1.1.1 工业机器人	8-3	第2章 工业机器人的机械系统	8-13
1.1.2 工业机器人技术的进展	8-3	2.1 工业机器人的运动学及力学分析	8-13
1.2 工业机器人的构成	8-3	2.1.1 各类坐标系及坐标变换	8-13
1.2.1 机器人的构成	8-3	2.1.2 工业机器人运动学	8-16
1.2.2 操作机的构成	8-3	2.1.3 工业机器人力学分析	8-17
1.3 工业机器人的分类	8-5	2.2 工业机器人操作机的机械结构	8-18
1.4 工业机器人主要特性参数	8-5	2.2.1 手臂	8-18
1.5 工业机器人的标准	8-6	2.2.2 手腕	8-21
1.5.1 工业机器人性能规范	8-6	2.3 工业机器人末端执行器	8-21

2.1.3 常用操作系统简介	9-87	3.4.2 交互型	9-150
2.2 数据库管理系统(DBMS)	9-88	3.4.3 自动型	9-150
2.2.1 CAD/CAM数据管理的特点 和要求	9-88	3.4.4 智能型	9-151
2.2.2 数据库管理系统类型介绍及 比较	9-89	3.5 应用软件开发技术	9-151
2.2.3 系统选择的原则	9-90	3.5.1 开发步骤	9-151
2.3 图形软件系统	9-90	3.5.2 开发技术与方法	9-152
2.3.1 图形模型	9-90	3.5.3 人-机界面处理	9-156
2.3.2 图形标准	9-95	3.5.4 软件测试与维护	9-158
2.3.3 图形软件简介	9-97	3.6 CAD与CAM的结合	9-160
2.4 网络通信	9-98	3.6.1 CAD与CAM之间的信息联系	9-160
2.4.1 基本方法和技术	9-98	3.6.2 CAD与CAM结合的必要性	9-160
2.4.2 网络操作系统(NOS)	9-99	3.6.3 CAD与CAM的一体化技术	9-160
2.4.3 网络的主要性能指标	9-100	3.7 工业设计	9-161
2.4.4 网络与CAD/CAM	9-101	附录 典型的结构有限元分析程序	9-163
2.4.5 几种网络介绍	9-101	第4章 CAPP技术	9-169
2.5 产品数据定义模型	9-103	4.1 成组技术	9-169
2.5.1 CIM环境下对产品数据定义模 型的要求	9-103	4.1.1 概述	9-169
2.5.2 初始图形交换规范(IGES)	9-104	4.1.2 零件分类编码系统	9-169
2.5.3 数据交换与传输标准(SET)	9-104	4.1.3 零件分类编码实例	9-169
2.5.4 产品数据定义接口(PDDI)	9-108	4.2 工艺过程设计的优化	9-176
2.5.5 产品数据交换规范(PDES)	9-109	4.2.1 概述	9-176
2.5.6 标准(STEP)	9-110	4.2.2 单工序工艺设计的优化	9-177
附录1 大型CAD系统分类表	9-110	4.2.3 多工序切削加工系统的优化	9-180
附录2 大型CAD系统软件概况	9-112	4.2.4 工艺方案最佳化	9-182
第3章 CAD技术	9-126	4.3 CAPP的功能、类型与基本原理	9-183
3.1 有限元分析	9-126	4.3.1 CAPP的基本概念、结构组成 及功能	9-184
3.1.1 功能和技术方法	9-126	4.3.2 CAPP的类型及基本工作原理	9-185
3.1.2 常用商品化软件包简介	9-129	4.4 广义CAPP系统	9-188
3.1.3 集成分析系统	9-131	4.4.1 概述	9-188
3.2 优化设计	9-132	4.4.2 广义CAPP的组成及其功能 简介	9-190
3.2.1 优化设计的数学模型	9-132	附录1 JLB1-1分类系统	9-194
3.2.2 常用优化方法	9-134	附录2 国外CAPP一览表	9-201
3.2.3 优化应用例——弹簧的优化 设计	9-136	第5章 自动编程	9-207
3.3 CAGD技术	9-138	5.1 原理与实现	9-207
3.3.1 曲线、曲面生成方法	9-138	5.1.1 概述	9-207
3.3.2 基本图形生成算法	9-146	5.1.2 前置处理	9-208
3.3.3 特征造型	9-147	5.1.3 后置处理	9-208
3.4 应用软件的类型	9-149	5.2 语言编程	9-209
3.4.1 检索型	9-150	5.2.1 自动编程语言介绍	9-209
		5.2.2 数控程序的构成和工作过程	9-217
		5.2.3 应用实例	9-218

5.3 图象编制程序.....9-219	6.5.1 基本概念.....9-241
5.3.1 原理及方法.....9-219	6.5.2 专家系统开发工具类型.....9-242
5.3.2 应用特点.....9-220	6.5.3 MPPEST-2 专家系统开发 工具.....9-242
5.3.3 应用实例.....9-220	附录 国外专家系统开发工具软件表9-244
5.4 实物编程.....9-221	第7章 FMS.....9-245
5.4.1 原理与方法.....9-221	7.1 FMS的结构与功能.....9-245
5.4.2 应用特点.....9-221	7.1.1 FMS技术概况9-245
5.4.3 应用实例.....9-222	7.1.2 物流与信息流.....9-249
5.5 自动编程的发展方向.....9-222	7.1.3 刀具流与刀具管理.....9-251
5.5.1 概述.....9-222	7.1.4 FMS的导入.....9-252
5.5.2 自动编程的发展.....9-225	7.2 FMS的规划和仿真.....9-255
第6章 CAD/CAM专家系统.....9-229	7.2.1 FMS规划原则与方法9-255
6.1 概述.....9-229	7.2.2 FMC的选择9-255
6.2 CAD/CAM专家系统的特点.....9-229	7.2.3 FMS仿真9-257
6.3 人工智能语言.....9-230	7.3 FMS监控9-258
6.4 CAD/CAM专家系统.....9-232	7.3.1 工件的识别.....9-258
6.4.1 CAD/CAM专家系统的基本 结构.....9-232	7.3.2 刀具的监控.....9-259
6.4.2 专家系统的开发方法及研制 步骤.....9-232	7.4 FMS评价9-262
6.4.3 CAD/CAM专家系统结构模式 的改进.....9-233	7.4.1 FMS评价矩阵9-262
6.4.4 知识的采集和提取.....9-233	7.4.2 FMS评价标准9-262
6.4.5 知识表示方法.....9-233	7.5 FMS与CAD/CAM的集成9-262
6.4.6 推理机制.....9-237	7.5.1 FMS与CAD/CAM的关系9-262
6.4.7 系统的开发设计技巧.....9-240	7.5.2 CIMS9-262
6.4.8 CAD/CAM专家系统的评价.....9-240	7.6 应用举例.....9-264
6.4.9 CAD/CAM专家系统的发展 动向.....9-241	7.6.1 SCAMP FMS9-264
6.5 专家系统开发工具.....9-241	7.6.2 Vought航空产品FMS9-265
	7.6.3 FANUC FMS9-265
	参考文献9-265
	英中名词对照.....1

第6篇 电力电子与电气传动技术

主 编 李鹤轩

副主编 陈 瑜

主 审 李佳特

编写人员

第1章 陈 瑜

第2章 葛延津

第3章 刘金文

第4章 李鹤轩 钱利民

第5章 金如麟 谭苒娃 周 鄂

蒋 全

第6章 徐殿国 冯 勇

第1章 新一代电力电子器件及其应用

进入80年代以来,由于机电一体化技术发展的需要,电力电子技术除了过去以电力半导体器件和电力变换为主又增加了运动控制的内容。因此,现在我们所谈的电力电子技术指的是电力半导体器件、电力变换和运动控制这三项内容。

本章重点介绍新一代电力半导体器件的原理及应用方面的问题。

1. 电力半导体器件发展的三个阶段

电力半导体器件的发展经历了三个发展阶段,即电力半导体器件的大容量化、低损耗化和智能化。

(1) 电力半导体器件的大容量化 电力半导体器件的大容量化与其适用频率有极密切的关系,例如电力变换装置的控制方式,在20年间有很大变化。从采用数十千赫频率的PAM控制功率器件方式变化到了以1kHz以上频率的正弦波PWM方式。对这个频率普通晶闸管是不适用的。所以,出现了功率晶体管以取代普通晶闸管,在容量与耐压能力方面已覆盖到1500V和1000A以下的领域。当功率晶体管一超过这个容量时,很明显它的 h_{FE} 降低而 $U_{CE(sat)}$ 增大。在这个容量以上的范围,可关断晶闸管(GTO)与普通晶闸管就成为主要的电力半导体器件了。在处理高频大功率时,绝缘门极晶体管(IGBT)正成为主流器件,目前正朝着以前被认为是GTO的领域里扩展。

(2) 电力半导体器件的低损耗化 电力半导体器件的低损耗化,首先是从基极驱动电路的低损耗化开始的。功率晶体管与同容量的GTO相比,关断增益高,可简化反偏电路和驱动电路,因此得到普遍推广。

MOSFET的驱动电路不但反向偏置简单,而且正向偏置电路也简单。因此,目前在低损耗化方面的工作,不是在驱动电路,而是转移到主回路上去。

MOSFET具有极优异的开关特性,在比较低耐压器件(300V以下)中,通态电阻也低。但是,因为它是单极性器件,电导调制不起作用。所以,在耐压高的器件中,通态电阻急剧增大。因此,

MOSFET不可能全面取代双极型晶体管。

IGBT是一种具有MOS栅极结构的双极型晶体管,它的性能吸取了MOS和双极型两种器件的优点,覆盖了功率MOSFET鞭及不到的应用领域,目前已投放市场,发展极其迅速,在容量方面已经赶上了双极型晶体管。

特别是在PWM控制的逆变器中,迫切需要低噪声化。这就必须将以前用的3kHz以下载波频率提高到15kHz以上才能降低音频噪声。IGBT就成为了主要器件。第一代的IGBT应用在低噪声逆变器上时,与以前3kHz的双极型功率晶体管逆变器相比,开关损耗变高,这就造成了冷却风扇的大型化和低效率化,成为普及IGBT的障碍。现在的IGBT已从第一代和第二代发展到了第三代,许多特性得到了改善,上述的障碍已被克服。

第三代IGBT用在低噪声逆变器中,为了得到与以往逆变器同等的低损耗化,它具备了高速开关性能,饱和压降与双极型功率晶体管的相当,约2V以下,几乎接近IGBT的理论极限。另外,为了达到与双极型功率晶体管同样的20 μ s以上的桥臂短路能力,在过电流保护电路上下了功夫。

(3) 电力半导体器件的智能化 截至目前,所述的功率器件,都是关于主回路上的功率器件。现在把功率器件、外围控制电路与保护电路都集成在一起的智能功率器件的开发与应用非常活跃,出现了许多新奇的器件。开发这种器件的主要背景是,在用户一方,要求缩短设计时间、简化组装工艺、装置的小型轻量化等,从器件开发方面,多年来电子工程师们梦想开发这种高功能的功率器件,现在在工艺上和技术上都已具备条件。

大功率器件的智能化有两种方法:其一为单片智能化;其二为混合模块化。前者以低耐压的MOSFET作为主器件,主要为汽车用发展起来的产品,最近以IGBT为主器件的高耐压功率IC也已开发出来,正在较小容量的电力变换装置或功率器件驱动电路等方面使用。混合智能功率模块是以双极型功率晶体管为主器件发展起来的,但IGBT型的也正在实用化。从1hp(约746W)驱动的家用电调逆

变器到工业用中大容量的逆变器正在扩大之中,智能功率器件的意义与日俱增。

1.1 功率晶体管(GTR)及其模块

1.1.1 GTR的工作原理

GTR指的是双极型功率晶体管,其基本结构如图6-1-1所示。载流子运动方向如图中箭头所示。双极型晶体管由NPN或PNP三层结构所制成,有集电极(C)、基极(B)和发射极(E)三个电极。靠电子与空穴两种载流子形成电流。所谓双极型晶体管指的是从基极注入少量空穴,集电极的N⁻层受电导调制作用,饱和电压降很低。双极型晶体管具有以小的基极电流控制大的集电极电流的能力。但由于少数载流子的存贮效应而使其工作频率比起单极型场效应晶体管(MOSFET)要低得多。

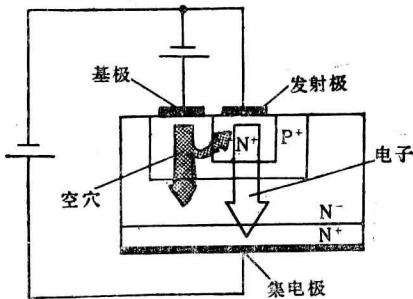


图6-1-1 双极型晶体管基本结构与载流子的运动


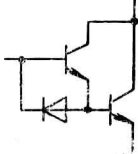
为了扩大晶体管容量和简化驱动电路,常常将晶体管作成模块结构形式。功率晶体管模块有两种形式:一种是把若干个晶体管芯片、续流二极管(FWD)芯片和内部电路组成一个单元,然后根据用途将一个或数个这样的单元封装在一个外壳内制成模块;另一种是用集成电路工艺将达林顿功率晶体管、续流二极管、加速二极管等集成在同一芯片上面作成模块,这类模块由于采用了大面积单片集成工艺制作,在小型轻量化和成本方面具有明显优势,是今后发展的方向。

在组成功率晶体管电路时,既采用达林顿形式也采用单管形式,各有其优缺点,根据使用者需要来选用。它们的性能比较参考表6-1-1。

单管形式的功率晶体管饱和压降低,开关特性好,其缺点是放大倍数 h_{FE} 低,需要大的基极驱动电流。达林顿功率晶体管放大倍数 h_{FE} 大,基极驱

动电流小。

表6-1-1 单管与达林顿功率晶体管比较表

项目/种类	单管形式	达林顿形式
图形符号	 ①	 ② (两级达林顿)
直流电流放大倍数 h_{FE}	低 (10左右)	高 (100左右)
集电极-发射极饱和压降 $U_{CE(S)}$	低 (0.4V左右)	高 (两级达林顿时 1.3V左右)
开关速度	快 (t_{on} : 1 μ s以下, t_{off} : 数微秒)	慢 (t_{on} : 数微秒, t_{off} : 10~20 μ s)

1.1.2 GTR的基本特性与主要参数

GTR在电力电子技术中主要作为功率开关使用,它常在大的集电极电流或承受高的集电极电压下工作,其特性与小信号晶体管的不同。

功率晶体管当作功率开关使用时,采用共发射极连接,基极输入的是脉冲电压。下面就其静态与动态特性的一些问题分述如下:

1. 静态特性

(1) 集电极-发射极间的电压 当输入端为负电压 $-U_b$ 时,晶体管处于反向偏置状态,其阻抗很高。此时晶体管处于截止或关断状态,集电极电流几乎等于零。当晶体管作为大功率开关使用时,在基极-发射极之间处于反向偏置下,集电极-发射极间的维持电压是一个重要的额定值电压,常用 $U_{CEX(SUS)}$ 符号表示。下角标X表示反向偏置,SUS表示维持或支撑之意。基极-发射极间施加反向偏置电压是晶体管在感性负载下工作时常采用的方法。因为此时不但可提高维持电压,而且在逆变器中使用时可缩短关断时间。

在 $U_{CE0(SUS)}$ 中的下标“0”表示基极-发射极间处于开路状态。

在设计电路时, $U_{CEX(SUS)}$ 额定值电压是一个重要参数。如果使用的是200V档的电源电压时,

则必须选用 $U_{CEX(SUS)} = 600\text{ V}$ 的晶体管；而当使用的是 400 V 档的电源电压时，必须选用 $U_{CEX(SUS)} = 1000\text{ V}$ 或以上的功率晶体管，而且还要在晶体管的集电极-发射极之间连接上浪涌电压吸收电路，以防止晶体管被击穿。

(2) 输出特性与直流电流放大倍数 集电极-发射极间的输出特性如图6·1-2所示。它具有恒流特性。不过，在使用大功率晶体管的过程中，因为主要是在通/断两种开关状态下工作，所以 U_{CE} 在该特性曲线左侧的饱和区内的压降 $U_{CE(S)}$ 变为重要参数。因为 $U_{CE(S)}$ 决定功率晶体管工作时的功耗，所以希望把它压得越低越好。如果给基极的电流足够充分，则 $U_{CE(S)}$ 可降低下来。因此，从功耗的角度看，还是过驱动的好。但是，另一方面，过驱动将引起关断时间拉长，而且也使安全工作区(SOA)变窄。鉴于使用过驱动弊大于利，所以不推荐这种方法。

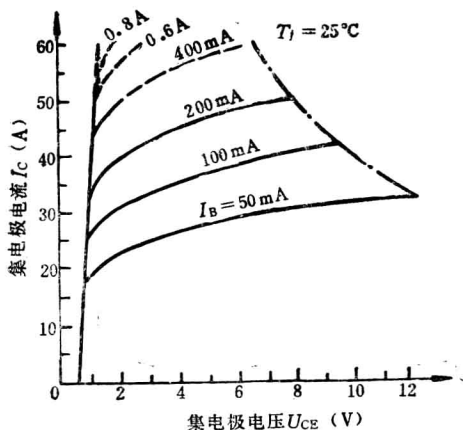


图6·1-2 输出特性 (EVK31-050)

功率晶体管的直流电流放大倍数与集电极电流以及结温的关系，如图6·1-3所示。在集电极电流大的区域内随电流增加和结温升高 h_{FE} 下降，而在应用过程中希望 h_{FE} 大些好。但是，与晶体管其他特性一起综合考虑时，通常把 h_{FE} 抑制在 $100\sim 300$ 之间。

(3) 饱和电压特性 图6·1-4表示在 I_B 为恒流下的 $U_{CE}-I_C$ 和 $U_{BE}-I_C$ 特性曲线。 U_{CE} 对 I_C 的依赖，在大电流情况下急剧上升。另外， U_{BE} 也随 I_C 的增加而变高。该 U_{BE} 是设计驱动电路时的一个重要参数。由于它也与 I_B 和 T_j 有依赖关系，所以在实

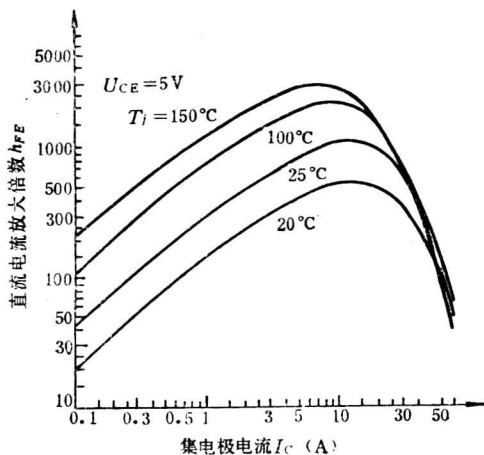


图6·1-3 直流电流放大倍数与集电极电流关系曲线

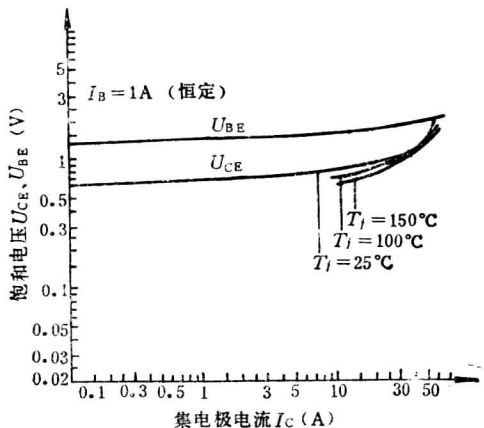


图6·1-4 $U_{CE}-I_C$ 与 $U_{BE}-I_C$ 特性曲线

际条件下的数据变得重要起来。详细讨论放在后面的驱动电路设计中。

2. 动态特性

(1) 开关时间 开关时间的定义如图6·1-5所示。功率晶体管开关时间当中存储时间 t_{stg} 最长。为了缩短这个时间，通常给基极施加反向偏置 I_{B2} 。因为逆变器电路可能控制的脉冲最小宽度和桥路上下臂防止短路所规定的时间是由该 t_{stg} 而定。所以，如何缩短这个时间，以便使双极型晶体管进行高速开关动作，这是一个重点。另外，开关时间由于与驱动信号 I_{B1} 和 I_{B2} 以及 T_j 等有直接关系，所以在使用时应该考虑最坏条件。

从图6·1-6所示特性可看出，随着 I_C 增加 t_{on} 和 t_{off} 也增加，而 t_{stg} 当达到某一值之后随 I_C 增加而减

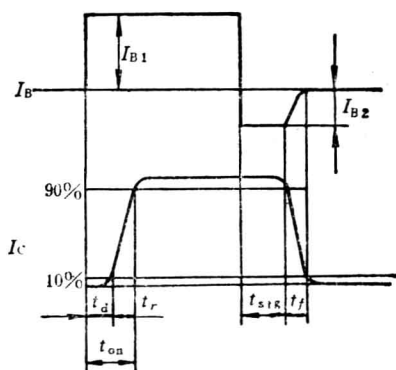


图6-1-5 晶体管的开关时间波形

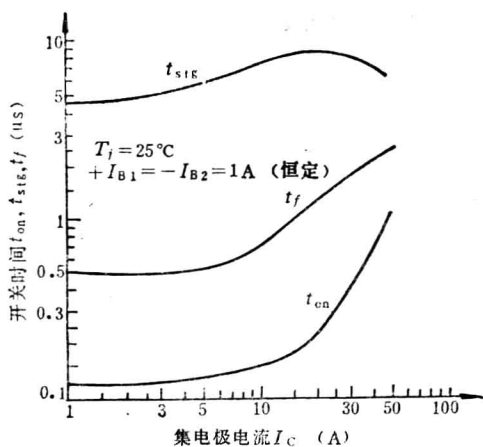


图6-1-6 开关时间与集电极电流的关系曲线

少。另外，如图6-1-7所示，如增加反向偏置电流 I_{B2} ， t_{stg} 与 t_f 减少。一般情况下， t_{stg} 减少，才能使晶体管的工作频率升高。

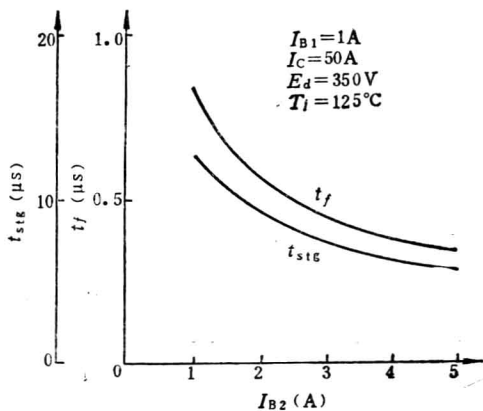


图6-1-7 功率晶体管的关断特性

(2) 功率晶体管的二次击穿与安全工作区
功率晶体管即使工作在最大耗损功率范围之内，仍有可能突然损坏。这种现象多由二次击穿所引起。二次击穿是影响大功率晶体管安全工作区和可靠性的一个重要因素。二次击穿现象是集电极-发射极间电压突然由高变低同时电流增加时出现的现象。

安全工作区简称SOA，是指晶体管在规定的电压电流范围内使用不损坏的区域，即所谓安全区。

1) 正向偏置SOA (FBSOA) 正向偏置SOA就是晶体管在正向偏置电压下工作时的安全工作区，它受四种因素限制：

- a. 集电极电流的额定值 (电流上限)；
- b. $U_{CEX(SUS)}$ 或 $U_{CEO(SUS)}$ (电压上限)；
- c. 由温度上限，即由结温的最高值所决定的容许功耗上限；
- d. 由晶体管二次击穿所决定的二次击穿曲线。

通常情况下，FBSOA如图6-1-8所示，脉冲宽度作为参考值。随着脉冲宽度 P_W 增加，安全区变窄。在逆变器电路中使用，晶体管SOA很少出现问题。

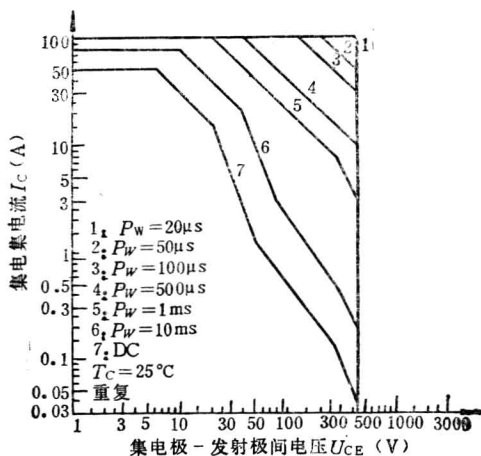


图6-1-8 正向偏置安全工作区域 (FBSOA) 特性

2) 反向偏置SOA (RBSOA) 反向偏置SOA就是给晶体管的基极施加反向偏置电压时的安全工作区。基极加反向偏置时晶体管的 U_{CE} 与 I_C 的关系曲线如图6-1-9所示。反向偏置SOA在宽脉冲作用下不存在依赖关系，但与 I_{B2} 的大小有关。当 I_{B2} 增大，安全区变窄。所以，为了提高开关速度而增加

I_{B2} 以缩短 t_{stg} 时,必须注意到这种情况。

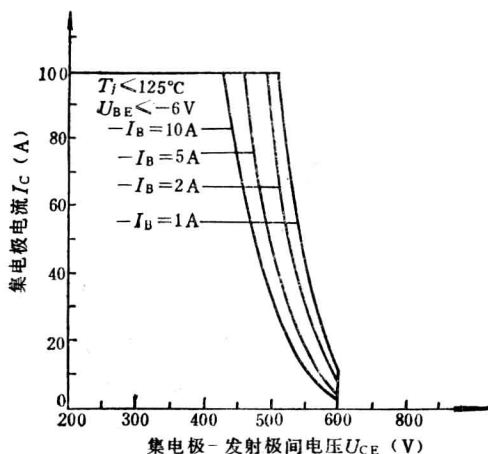


图6-1-9 反向偏置时的安全工作区(RBSOA)特性

3) 短路SOA 正向偏置SOA与反向偏置SOA都是晶体管正常工作下动作所表现的特性,而短路的SOA则是器件发生故障时表示晶体管的损坏极限。换句话说,如果有一短路SOA范围存在的话,则短路SOA也表示在短时间内晶体管耐极大电流通过的能力。例如,具有大的短路SOA的晶体管用在逆变器中时,即使负载发生短路也不会损坏晶体管,逆变器可进行停、再起动等动作。

4) du/dt 作用引起的集电极电流 众所周知,PN结有结电容,其容量大小由结面积所决定。如果给晶体管的集电极-发射极间突然加一急速变化的电压时,就会有一很小的电流通过,这好像将一个具有某种电压上升率 du/dt 的信号加到电容上一样,能产生 Cdu/dt 电流。该电流的作用在晶体管中宛如流过基极电流,经过放大后形成了集电极电流。这种现象就是晶体管的 du/dt 效应。

3. 主要参数

(1) 直流短路电流放大倍数 共发射极直流短路电流放大倍数 h_{FE} 定义为晶体管共发射极连接集电极负载为零时集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 之比,即

$$h_{FE} = I_C / I_B$$

h_{FE} 与 I_C 的关系如图6-1-3所示。当集电极电流 I_C 为某一值时, h_{FE} 达到最大,大于或小于这个 I_C 时, h_{FE} 就变小。 h_{FE} 还受结温 T_j 的影响,随 T_j 的降低而下降。另外, h_{FE} 还受 U_{CE} 的影响, U_{CE} 下降, h_{FE} 也下降。

(2) 饱和压降 饱和压降通常指集电极-发射极间的饱和电压 $U_{CE(s)}$ 。 $U_{CE(s)}$ 的大小随基极电流 I_B 变化而变化。当集电结刚好为正偏时,晶体管的工作状态就进入饱和,此时称作临界饱和。如果 I_B 进一步增大,超过临界状态所需要的 I_B 时,则集电结势垒电容进一步充电,集电结正偏加大,晶体管进入深饱和状态, $U_{CE(s)}$ 就会减小。在实际使用过程中调节 I_B 使晶体管达到一定的饱和深度。如果过于饱和,会使关断时间延长,影响开关速度。如何保证适中饱和深度,应在驱动电路设计时进行考虑。

(3) 集电极最大电流 I_{Cm} 集电极输出电流 I_C 应尽可能的大,以便提高输出功率。但是,集电极电流 I_C 要增大,必须相应地加大发射极注入电流。在这样的条件下会产生基区电导调制、基区扩展和发射极电流集中效应,给晶体管电参数带来不利的影响,性能变得不稳定。所以,要规定集电极最大工作电流作为晶体管的电流容量。通常对 h_{FE} 大于40的大功率晶体管,规定 I_{Cm} 为 h_{FE} 下降至20时的集电极电流。更为普遍的做法是,规定 I_{Cm} 为 h_{FE} 下降到出厂参数的一半时的集电极电流。在实际使用时,晶体管的输出电流往往只使用到 I_{Cm} 的一半或稍多一点。

(4) 集电极最大耗散功率 P_{Cm} 晶体管的功率容量是以集电极最大耗散功率为准的。晶体管的功率容量 P_{Cm} 规定为功率晶体管工作在最高工作温度下的耗散功率。一般情况下,在给出 P_{Cm} 参数的同时,总是给出管壳温度 T_c 。

(5) 晶体管的反向击穿电压 晶体管各极间所能承受的最大反向电压是由击穿电压 BU_{EBO} 、 BU_{CBO} 、 BU_{CEO} 所决定。这里脚码“O”代表开路的那个极,如 BU_{EBO} 指的是在集电极开路时E-B结的击穿电压。这三种电压间的关系是:

$$BU_{CBO} > BU_{CEO} > BU_{EBO}$$

BU_{EBO} 通常容易满足电路要求,因为它处于输入控制端。 BU_{CBO} 与 BU_{CEO} 的关系为

$$BU_{CEO} = BU_{CBO} / \sqrt{1 + h_{FE}}$$

对于NPN晶体管来说,从上式可知,要提高 BU_{CEO} 必须提高 BU_{CBO} 。当 BU_{CBO} 为一定值时, h_{FE} 越大, BU_{CEO} 就越低。一般在产品目录中 BU_{CEO} 作为晶体管的电压容量给出,但实际使用时的最高工作电压一般要比 BU_{CEO} 低。

(6) 晶体管最大额定值和电气特性 在产品

表6-1-2 MG150M2CK1型功率晶体管模块最大额定值 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

项 目	符 号	单 位	额 定 值	
集电极-基极间电压	U_{CBO}	V	1000	
集电极-发射极间电压	U_{CEX} U_{CEO}	V V	1000 1000	
集电极电流(直流)	I_C	A	150	
集电极电流(1ms)	I_C	A	300	
发射极-基极电压	U_{EBO}	V	7	
基极电流	I_B	A	3	
集电极损耗	P_C	W	800	
结温	T_j	$^\circ\text{C}$	150	
贮存温度	T_{stg}	$^\circ\text{C}$	-40~150	
绝缘耐压	U_{ISOL}	V	2500	
紧固力矩		N·cm	300	

表6-1-3 MG150M2CK1型功率晶体管模块电气特性

项 目	符 号	单 位	最 小	标 准	最 大	测 试 条 件
集电极截止电流	I_{CBO}	mA			4	$U_{CB} = 1000\text{V}$, $I_E = 0$
发射极截止电流	I_{EBO}	mA			400	$U_{EB} = 7\text{V}$, $I_C = 0$
集电极-发射极维持电压	$U_{CEX(SUS)}$	V	1000			$I_C = 1\text{A}$, $U_{BE} = -2\text{V}$
集电极-发射极维持电压	$U_{CBO(SUS)}$	V	880			$I_C = 1\text{A}$
直流电流放大倍数	h_{FE}		100			$U_{CE} = 5\text{V}$, $I_C = 5\text{A}$
集电极-发射极饱和压降	$U_{CE(S)}$	V			2.5	$I_C = 150\text{A}$, $I_B = 3\text{A}$
基极-发射极饱和压降	$U_{BE(S)}$	V			3.0	$I_C = 150\text{A}$, $I_B = 3\text{A}$
反向恢复时间	t_{rr}	μs			2.0	$-I_C = 150\text{A}$, $U_{CE} = 600\text{V}$, $U_{EB} = 3\text{V}$
开关时间	开通时间	t_{on}	μs		2.0	$I_C = 150\text{A}$, $U_{CE} = 600\text{V}$
	储存时间	t_{stg}	μs		15	$I_C = 150\text{A}$, $U_{CE} = 600\text{V}$
	下降时间	t_f	μs		5	$I_C = 150\text{A}$, $U_{CE} = 600\text{V}$
热阻	晶体管	$R_{th(j-c)}$	$^\circ\text{C/W}$		0.156	结-外壳
	二极管		$^\circ\text{C/W}$		0.65	