



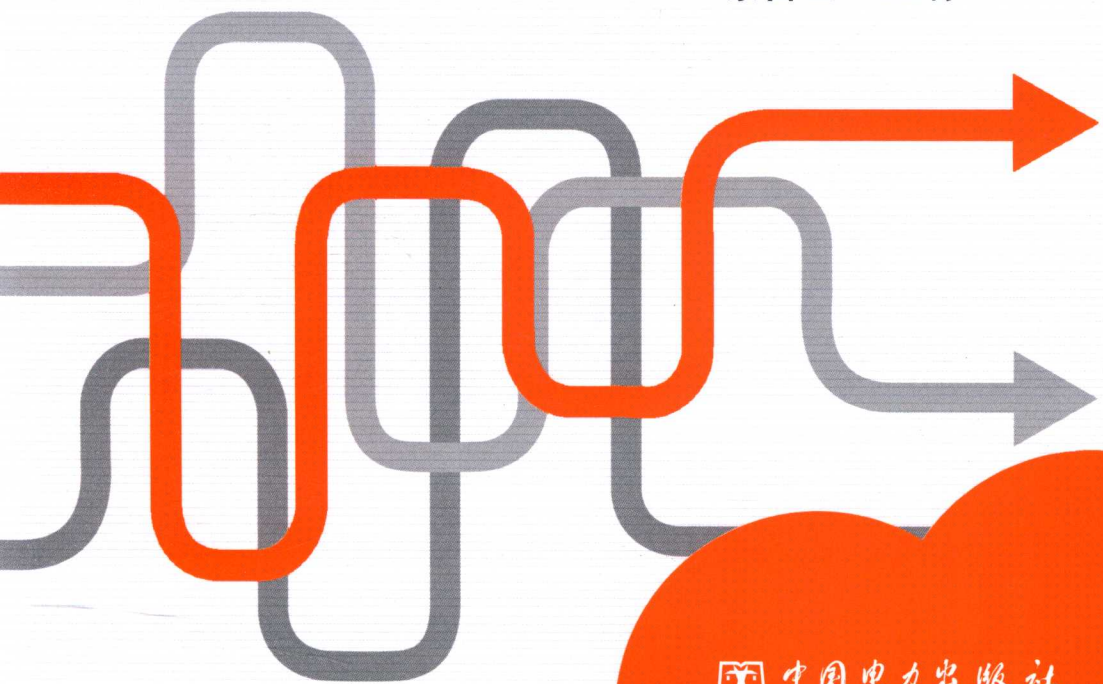
电工技能**自学成才**系列

双色版

变频技术

十日通

蔡杏山 主编

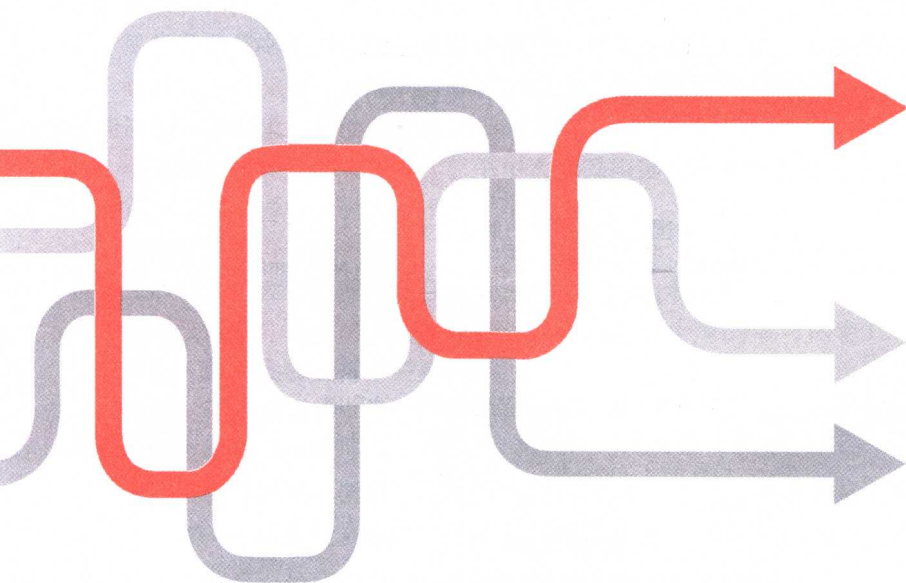


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电工技能**自学成才**系列

变频技术 十日通

蔡杏山 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书将变频技术分为十天的学习内容讲述,可帮助读者快速入门。本书内容包括变频器基本结构原理与电力电子器件,电力电子电路一,电力电子电路二,变频器的主电路分析与检修,变频器的电源、驱动电路分析与检修,变频器的其他电路分析与检修,变频器的使用,变频器的典型控制功能及应用电路,PLC与变频器的综合应用,变频器的选用、安装与维护。

本书语言通俗易懂、内容实用、图文并茂、章节篇幅合理,读者只要具有初中文化程度,就能通过阅读本书而快速掌握变频技术。本书可作为学习变频技术的自学图书,也适合用作职业院校电类专业的变频技术教材。

图书在版编目(CIP)数据

变频技术十日通/蔡杏山主编. —北京:中国电力出版社, 2015.7

(电工技能自学成才系列)

ISBN 978-7-5123-7589-5

I. ①变… II. ①蔡… III. ①变频技术 IV. ①TN77

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第077941号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年7月第一版 2015年7月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 17印张 348千字

印数0001—3000册 定价39.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前言

电工是一种热门工种，小到室内简单的照明线路安装，大到工厂大型复杂电气设备的安装检修，只要是用电场合，常常能见到电工人员的身影。正因为社会对电工人才需求量大，故很多人选择学习电工技能。学习电工技能主要有三种方式，分别是在社会上的职业培训机构学习、跟有经验的电工师傅学习和自学，不管哪种学习方式，都需要一本容易读懂且实用的学习图书。

为了让读者能够轻松、快速学好电工技能，我们推出了“电工技能自学成才系列”丛书，它们适合作自学图书，也适合作培训教材。本套丛书主要有以下特点：

◆ **基础起点低。**读者只需具有初中文化程度即可阅读本套丛书。

◆ **语言通俗易懂。**书中少用专业化的术语，遇到较难理解的内容用形象比喻说明，尽量避免复杂的理论分析和烦琐的公式推导，图书阅读起来感觉会十分顺畅。

◆ **内容解说详细。**考虑到自学时一般无人指导，因此在编写过程中对书中的知识技能进行详细解说，让读者能轻松理解所学内容。

◆ **采用图文并茂的表现方式。**书中大量采用读者喜欢的直观形象的图表方式表现内容，使阅读变得非常轻松，不易产生阅读疲劳。

◆ **内容安排符合认识规律。**本书按照循序渐进、由浅入深的原则来确定各章节内容的先后顺序，读者只需从前往后阅读图书，便会水到渠成。

◆ **章节篇幅分配合理。**每本书都分为十章（即十天的学习内容），各章内容篇幅力求相同，方便读者安排学习进度。

◆ **突出显示知识要点。**为了帮助读者掌握书中的知识要点，书中用阴影和文字加粗的方法突出显示知识要点，指示学习重点。

◆ **网络免费辅导。**读者在阅读时遇到难理解的问题，可登录易天电学网：www.eTV100.com，观看有关辅导材料或向老师提问进行学习，读者也可以在该网站了解本套丛书的新书信息。

《变频技术十日通》为本套丛书中的一种，本书内容包括变频器基本结构原理与电力电子元器件，电力电子电路一，电力电子电路二，变频器的主电路分析与检修，变频器的电源、驱动电路分析与检修，变频器的其他电路分析与检修，变频器的使

用，变频器的典型控制功能及应用电路，PLC 与变频器的综合应用，变频器的选用、安装与维护。

本书在编写过程中得到了许多教师的支持，其中蔡玉山、詹春华、黄勇、何慧、黄晓玲、蔡春霞、邓艳姣、刘凌云、刘海峰、刘元能、蔡理峰、邵永亮、朱球辉、何彬、蔡任英和邵永明等参与了资料的收集和部分章节的编写工作，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中的错误和疏漏在所难免，望广大读者和同仁予以批评指正。

编 者



目 录

前言

第1日	变频器基本结构原理与电力电子器件	1
一	三相异步电动机的调速方式与变频器的基本结构原理	1
(一)	三相异步电动机的变极调速与变频调速方式	1
(二)	变频器基本结构与原理	2
二	电力电子器件	3
(一)	单向晶闸管 (SCR) 的识别与检测	4
(二)	门极可关断晶闸管 (GTO) 的识别与检测	8
(三)	双向晶闸管 (BTT) 的识别与检测	9
(四)	电力场效应管 (MOSFET) 的识别与检测	12
(五)	绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 的识别与检测	17
(六)	其他类型的电力电子器件	19
(七)	电力电子器件的驱动电路	20
(八)	电力电子器件的保护电路	24
第2日	电力电子电路一	27
一	整流电路 (AC-DC 变换电路)	27
(一)	不可控整流电路	27
(二)	可控整流电路	32
二	斩波电路 (DC-DC 变换电路)	36
(一)	基本斩波电路	36
(二)	复合斩波电路	41
三	逆变电路 (DC-AC 变换电路)	44
(一)	逆变原理	45
(二)	电压型逆变电路	45
(三)	电流型逆变电路	50
(四)	复合型逆变电路	53

第3日 | 电力电子电路二 56

一 PWM 控制技术	56
(一) PWM 控制的基本原理	56
(二) SPWM 波的产生	57
(三) PWM 控制方式	60
(四) PWM 整流电路	65
二 交流调压电路	66
(一) 单向晶闸管交流调压电路	66
(二) 双向晶闸管交流调压电路	71
(三) 脉冲控制交流调压电路	74
(四) 三相交流调压电路	76
三 交-交变频电路 (AC-AC 变换电路)	77
(一) 单相交-交变频电路	77
(二) 三相交-交变频电路	79

第4日 | 变频器的主电路分析与检修 82

一 主电路的单元电路分析	82
(一) 整流电路	82
(二) 中间电路	83
(三) 逆变电路	87
二 主电路实例分析	89
(一) 典型主电路实例分析一	89
(二) 典型主电路实例分析二	90
三 主电路的检修	92
(一) 变频器电路的工作流程	93
(二) 主电路各单元电路的常见故障	94
(三) 不带电检修主电路	95
(四) 变频器无输出电压的检修	97
(五) 主电路大量元件损坏的检修	98

第5日 | 变频器的电源、驱动电路分析与检修 101

一 电源电路详解与检修	101
(一) 开关电源的特点与工作原理	101
(二) 电源电路的取电方式	104
(三) 自励式开关电源典型电路分析	105
(四) 自励式开关电源的检修	108

(五)	他励式开关电源典型电路分析	110
(六)	他励式开关电源的检修	115
二	驱动电路详解与检修	117
(一)	驱动电路与其他电路的连接	117
(二)	驱动电路的基本工作原理	118
(三)	四种典型的驱动电路实例分析	119
(四)	制动电路的驱动	129
(五)	检修驱动电路的注意事项及技巧	130
(六)	驱动电路的常见故障及原因	131
(七)	驱动电路的检修	131

第6日 | 变频器的其他电路分析与检修 138

一	检测电路详解与检修	138
(一)	电压检测电路及检修	138
(二)	电流检测电路及检修	143
(三)	温度检测电路	147
二	CPU 电路详解与检修	150
(一)	CPU 基本电路及检修	150
(二)	外部输入输出端子接口电路及检修	153
(三)	内部输入输出电路及检修	158

第7日 | 变频器的使用 163

一	外形与结构	163
(一)	外形与型号含义	163
(二)	结构	164
(三)	面板的拆卸	164
二	端子功能与接线	165
(一)	总接线图及端子功能说明	165
(二)	主回路接线	169
(三)	控制回路接线	172
(四)	PU 接口的连接	175
三	操作面板的使用	178
(一)	操作面板介绍	178
(二)	操作面板的使用	179
四	操作运行	183
(一)	外部操作运行	183
(二)	PU 操作运行	185

(三) 组合操作运行	186
五 常用控制功能与参数设置	187
(一) 操作模式选择功能与参数	187
(二) 频率相关功能与参数	187
(三) 启动、加减速控制功能与参数	190
(四) 点动控制功能与参数	192
(五) 转矩提升功能与参数	192
(六) 制动控制功能与参数	193
(七) 瞬时停电再启动功能与参数	194
(八) 控制方式功能与参数	194
(九) 电子过流保护功能与参数 (Pr. 9)	195
(十) 负载类型选择功能与参数	195
(十一) MRS 端子输入选择功能与参数	196
(十二) 禁止写入和逆转防止功能与参数	196
六 三菱 FR-700 系列变频器介绍	197
(一) 三菱 FR-700 系列变频器的特点说明	197
(二) 三菱 A700、F700、E700 和 D700 系列变频器比较	197
(三) 三菱 FR-A700 系列变频器的接线图及端子功能说明	201
(四) 三菱 FR-500 与 FR-700 系列变频器的比较	205

第8日 变频器的典型控制功能及应用电路 208

一 电动机正转控制功能及电路	208
(一) 开关控制式正转控制电路	208
(二) 继电器控制式正转控制电路	209
二 电动机正反转控制功能及电路	210
(一) 开关控制式正、反转控制电路	211
(二) 继电器控制式正、反转控制电路	212
三 工频与变频切换功能及电路	213
(一) 变频器跳闸保护电路	213
(二) 工频与变频的切换电路	214
四 多挡速控制功能及电路	217
(一) 多挡转速控制端子	217
(二) 多挡控制参数的设置	218
(三) 多挡转速控制电路	218
五 程序控制功能及应用	220
(一) 程序控制参数设置	220

(二) 程序运行控制端子	221
(三) 程序控制应用举例	221
六 PID 控制功能及应用	223
(一) PID 控制原理	223
(二) PID 控制参数设置	224
(三) PID 控制应用举例	225

第9日 | PLC与变频器的综合应用 228

一 变频器与 PLC 的连接方式	228
(一) 开关量连接	228
(二) 模拟量连接	228
(三) RS485 通信连接	229
二 PLC 与变频器连接实现电动机正反转控制	231
(一) 控制线路图	231
(二) 参数设置	232
(三) 编写程序	233
(四) 程序详解	233
三 PLC 与变频器连接实现多挡转速控制	234
(一) 控制线路图	234
(二) 参数设置	234
(三) 编写程序	236
(四) 程序详解	240

第10日 | 变频器的选用、安装与维护 242

一 变频器的种类	242
二 变频器的选用与容量计算	243
(一) 额定值	243
(二) 选用	244
(三) 容量计算	245
三 变频器外围设备的选用	248
(一) 主电路外围设备的接线	248
(二) 熔断器的选用	248
(三) 断路器的选用	249
(四) 交流接触器的选用	249
(五) 交流电抗器的选用	249
(六) 直流电抗器的选用	250
(七) 制动电阻	251

(八) 热继电器的选用	252
(九) 噪声滤波器	252
四 变频器的安装、调试与维护	253
(一) 安装与接线	253
(二) 调试	256
(三) 维护	258
(四) 常见故障及原因	259



变频器基本结构原理与电力电子元器件

一 三相异步电动机的调速方式与变频器的基本结构原理

(一) 三相异步电动机的变极调速与变频调速方式

当三相异步电动机定子绕组通入三相交流电后，定子绕组会产生旋转磁场，旋转磁场的转速 n_0 与交流电源的频率 f 和电动机的磁极对数 p 有如下关系

$$n_0 = 60f/p$$

电动机转子的旋转速度 n （即电动机的转速）略低于旋转磁场的旋转速度 n_0 。（又称同步转速），两者的转速差称为转差 s ，电动机的转速为

$$n = (1 - s)60f/p$$

由于转差 s 很小，一般为 $0.01 \sim 0.05$ ，为了计算方便，可认为电动机的转速近似为

$$n = 60f/p$$

从上面的近似公式可以看出，三相异步电动机的转速 n 与交流电源的频率 f 和电动机的磁极对数 p 有关，当交流电源的频率 f 发生改变时，电动机的转速会发生变化。通过改变交流电源的频率来调节电动机转速的方法称为变频调速；通过改变电动机的磁极对数 p 来调节电动机转速的方法称为变极调速。

变极调速只适用于笼型异步电动机（不适用于绕线型转子异步电动机），它是通过改变电动机定子绕组的连接方式来改变电动机的磁极对数，从而实现变极调速。适合变极调速的电动机称为多速电动机，常见的多速电动机有双速电动机、三速电动机和四速电动机等。

变频调速方式只适用于结构特殊的多速电动机调速，而且由一种速度转变为另一种速度时，速度变化较大，采用变频调速则可解决这些问题。如果对异步电动机进行变频调速，需要用到专门的电气设备-变频器。变频器先将工频（50Hz 或 60Hz）交流电源转换成频率可变的交流电源并提供给电动机，只要改变输出交流电源的频率就能改变电动机的转速。由于变频器输出电源的频率可连接变化，故电动机的转速也可

连续变化,从而实现电动机无级变速调节。图 1-1 列出了几种常见的变频器。



图 1-1 几种常见的变频器

(二) 变频器基本结构与原理

变频器的功能是将工频 (50Hz 或 60Hz) 交流电源转换成频率可变的交流电源供给电动机,通过改变交流电源的频率来对电动机进行调速控制。变频器种类很多,主要可分为两类:交-直-交型变频器和交-交型变频器。

1. 交-直-交型变频器的结构与原理

交-直-交型变频器利用电路先将工频电源转换成直流电源,再将直流电源转换成频率可变的交流电源,然后提供给电动机,通过调节输出电源的频率来改变电动机的转速。交-直-交型变频器的典型结构如图 1-2 所示。

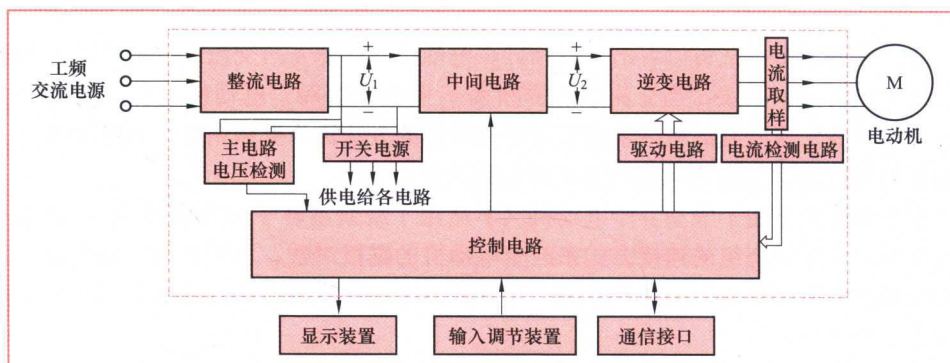


图 1-2 交-直-交型变频器的典型结构

下面对照图 1-2 所示框图说明交-直-交型变频器工作原理。

三相或单相工频交流电源经整流电路转换成脉动的直流电，直流电再经中间电路进行滤波平滑，然后送到逆变电路，与此同时，控制系统会产生驱动脉冲，经驱动电路放大后送到逆变电路，在驱动脉冲的控制下，逆变电路将直流电转换成频率可变的交流电并送给电动机，驱动电动机运转。改变逆变电路输出交流电的频率，电动机转速就会发生相应的变化。

整流电路、中间电路和逆变电路构成变频器的主电路，用来完成交-直-交的转换。由于主电路工作在高电压大电流状态，为了保护主电路，变频器通常设有主电路电压检测和输出电流检测电路，当主电路电压过高或过低时，电压检测电路则将该情况反映给控制电路，当变频器输出电流过大（如电动机负荷大）时，电流取样元件或电路会产生过流信号，经电流检测电路处理后也送到控制电路。当主电路出现电压不正常或输出电流过大时，控制电路通过检测电路获得该情况后，会根据设定的程序作出相应的控制，如让变频器主电路停止工作，并发出相应的报警指示。

控制电路是变频器的控制中心，当它接收到输入调节装置或通信接口送来的指令信号后，会发出相应的控制信号去控制主电路，使主电路按设定的要求工作，同时控制电路还会将有关的设置和机器状态信息送到显示装置，以显示有关信息，便于用户操作或了解变频器的工作情况。

变频器的显示装置一般采用显示屏和指示灯；输入调节装置主要包括按钮、开关和旋钮等；通信接口用来与其他设备（如可编程序控制器 PLC）进行通信，接收它们发送过来的信息，同时还将变频器有关信息反馈给这些设备。

2. 交-交型变频器的结构与原理

交-交型变频器利用电路直接将工频电源转换成频率可变的交流电源并提供给电动机，通过调节输出电源的频率来改变电动机的转速。交-交型变频器的结构如图 1-3 所示。从图中可以看出，交-交型变频器与交-直-交型变频器的主电路不同，它采用交-交变频电路直接将工频电源转换成频率可调的交流电源的方式进行变频调速。

交-交变频电路一般只能将输入交流电频率降低输出，而工频电源频率本来就低，所以交-交型变频器的调速范围很窄。另外这种变频器要采用大量的晶闸管等电力电子器件，导致装置体积大、成本高，故交-交型变频器使用远没有交-直-交型变频器广泛，因此本书主要介绍交-直-交型变频器。

二 电力电子器件

电力电子器件是指直接用在电能处理主电路中进行电能变换与控制的半导体器件。电力电子器件的特点主要有：①能承受的电压高，允许通过的电流大；②通常工作在开关状态；③功耗大、温度高，一般需要安装散热片；④所处理的电功率大，工作时需要驱动电路提供足够的控制信号。

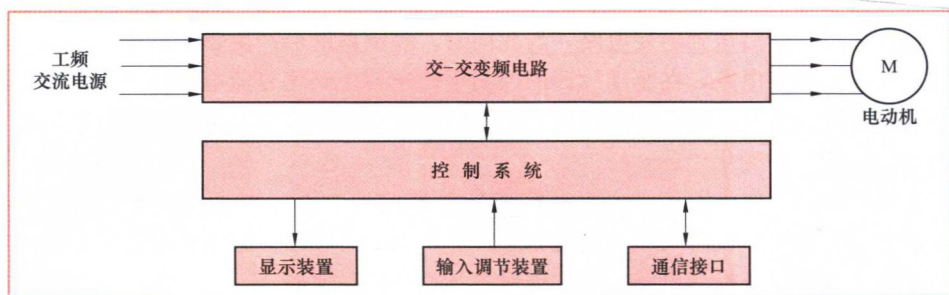


图 1-3 交-交型变频器的结构

(一) 单向晶闸管 (SCR) 的识别与检测

1. 外形与符号

单向晶闸管是晶体闸流管的简称，又称可控硅整流器 (Silicon Controlled Rectifier, SCR)，俗称可控硅。单向晶闸管有 3 个电极：阳极 (A)、阴极 (K) 和门极 (G)。图 1-4 (a) 为一些常见单向晶闸管的实物外形，图 1-4 (b) 为单向晶闸管的图形符号。



图 1-4 单向晶闸管
(a) 实物外形；(b) 图形符号

2. 结构与工作原理

(1) 结构。单向晶闸管的内部结构和等效图如图 1-5 所示。单向晶闸管有 3 个极：A 极 (阳极)、G 极 (门极) 和 K 极 (阴极)。单向晶闸管的内部结构如图 1-5 (a) 所示，它相当于 PNP 型三极管和 NPN 型三极管以图 1-5 (b) 所示的方式连接而成。

(2) 工作原理。下面以图 1-6 所示的电路来说明单向晶闸管的工作原理。

电源 E_2 通过 R_2 为单向晶闸管 A、K 极提供正向电压 U_{AK} ，电源 E_1 经电阻 R_1 和开关 S 为单向晶闸管 G、K 极提供正向电压 U_{GK} 。当开关 S 断开时，VT1 无 I_{bl} 电流而无法导通，VT2 也无法导通，单向晶闸管处于截止状态， I_2 电流为 0。

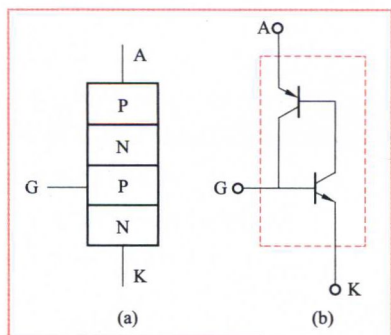


图 1-5 单向晶闸管的内部结构和等效图
(a) 内部结构; (b) 等效图

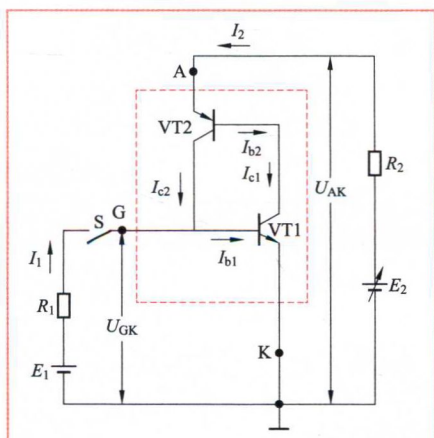


图 1-6 单向晶闸管的工作原理说明图

如果将开关S闭合, 电源 E_1 马上通过 R_1 、S 为 VT1 提供 I_{b1} 电流, VT1 导通, VT2 也导通 (VT2 的 I_{b2} 电流经过 VT1 的 c、e 极)。VT2 导通后, 它的 I_{c2} 电流与 E_1 提供的电流汇合形成更大的 I_{b1} 电流流经 VT1 的发射结, VT1 导通更深, I_{c1} 电流更大, VT2 的 I_{b2} 也增大 (VT2 的 I_{b2} 与 VT1 的 I_{c1} 相等), I_{c2} 增大, 这样会形成强烈的正反馈, 正反馈过程是



正反馈使 VT1、VT2 都进入饱和状态, I_{b2} 、 I_{c2} 都很大, I_{b2} 、 I_{c2} 都由 VT2 的发射极流入, 即单向晶闸管 A 极流入, I_{b2} 、 I_{c2} 电流在内部流经 VT1、VT2 后从 K 极输出。很大的电流从单向晶闸管 A 极流入, 然后从 K 极流出, 相当于单向晶闸管 A、K 极之间导通。

单向晶闸管导通后, 若断开开关 S, I_{b2} 、 I_{c2} 电流仍存在, 单向晶闸管继续导通。这时如果慢慢调低电源 E_2 的电压, 流入单向晶闸管 A 极的电流 (即图中的 I_2 电流) 也慢慢减小, 当电源电压调到很低时 (接近 0), 流入 A 极的电流接近 0, 单向晶闸管进入截止状态。

单向晶闸管有以下性质。

1) 无论 A、K 极之间加什么电压, 只要 G、K 极之间未加正向电压, 单向晶闸管就无法导通。

2) 只有 A、K 极之间加正向电压, 并且 G、K 极之间也加一定的正向电压, 单向晶闸管才能导通。

3) 单向晶闸管导通后, 即使撤掉 G、K 极之间的正向电压, 单向晶闸管仍继续



导通。要让导通的单向晶闸管截止,可采用两种方法:一是让流入单向晶闸管 A 极的电流减小到某一值 I_H (维持电流),单向晶闸管即截止;二是让 A、K 极之间的正向电压 U_{AK} 减小到 0 或为反向电压,单向晶闸管也能由导通转为截止。

单向晶闸管导通和关断(截止)条件见表 1-1。

表 1-1 单向晶闸管导通和关断(截止)条件

状态	条件	说明
从关断到导通	(1) 阳极电位高于阴极电位 (2) 门极有足够的正向电压和电流	两者缺一不可
维持导通	(1) 阳极电位高于阴极电位 (2) 阳极电流大于维持电流	两者缺一不可
从导通到关断	(1) 阳极电位低于或等于阴极电位 (2) 阳极电流小于维持电流	任一条件即可

3. 检测

(1) 极性检测。单向晶闸管的 G、K 极之间有一个 PN 结,它具有单向导电性(即正向电阻小、反向电阻大),而 A、K 极与 A、G 极之间的正反向电阻都接近无穷大。根据这个原则,可采用下面的方法来判别单向晶闸管的电极。

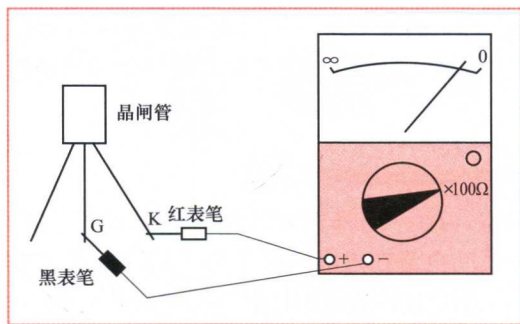


图 1-7 检测单向晶闸管的极性

万用表拨至 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ 挡,测量任意两个电极之间的阻值,当测量出现阻值小时,如图 1-7 所示,以这次测量为准,黑表笔接的电极为 G 极,红表笔接的电极为 K 极,剩下的一个电极为 A 极。

(2) 好坏检测。正常的单向晶闸管除了 G、K 极之间的正向电阻小、反向电阻大外,其他各极之间的正、反向电阻均接近无穷大。

在检测单向晶闸管时,将万用表拨至 $R \times 1k\Omega$ 挡,测量单向晶闸管任意两极之间的正、反向电阻。若出现两次或两次以上阻值小,说明单向晶闸管内部有短路;若 G、K 极之间的正、反向电阻均为无穷大,说明单向晶闸管 G、K 极之间开路;若测量时只出现一次阻值小,并不能确定单向晶闸管一定正常(如 G、K 极之间正常, A、G 极之间出现开路),在这种情况下,需要进一步测量单向晶闸管的触发能力。

(3) 触发能力检测。检测单向晶闸管的触发能力实际上就是检测 G 极控制 A、K 极之间导通的能力。单向晶闸管触发能力检测过程如图 1-8 所示。