

矽控整流器 應用手冊

鄭振東 鄭克盛 編譯

SCR

羅拔書局印行

T46

矽控整流器應用手冊

鄭振東 鄭克盛 編譯

羅拔書局印行

矽控整流器應用手冊

編譯者：鄭振東
出版兼：羅拔書局
發行

澳門大馬路 381 號二樓 F 座

印刷者：振興印刷公司
澳門龍崙街 152 號地下

H. K. \$32.00

譯 者 序

自從 1958 年美國奇異公司 (General Electric , 簡稱 GE) 首先開發矽控整流器 (Silicon-controlled rectifier , 簡稱 SCR) 的產品並開始生產應市以來, 在 SCR 的製造與應用技術上, GE 始終居於領先的地位。事實上 GE 已經成為 SCR 產品中最具聲譽、最富權威的一家公司。本書就是 GE 累積多年 SCR 實際應用經驗所彙集而成的結晶, 不但是一本有關 SCR 方面最權威、最實用與最完備的應用手冊, 而且也能為讀者提供關於 SCR 方面的寶貴豐富資料, 實在是一本不可多得, 相當有用的好書。

本書英文版係由法人執筆, 所用辭彙語句難免過於艱澀冗長, 不易理解。譯者特以簡明扼要、深入淺出、人人易懂的語句譯出, 目的就是希望 SCR 的應用與技術能夠藉助本書的發行而更能普及推廣, 希望對學術界與工業界會有一些貢獻, 我們也竭誠希望本書對學生、教師、技術員與工程師皆能有所幫助。

在型式上本書儘量保留原書的章節次序, 值得注意的是在附錄中增添了特別有用的“應用電路索引”與“英漢名詞對照索引”, 能幫助讀者迅速查出在 SCR 的各種設計與應用技術上所需的各項重要參考資料, 使用起來極為便捷。本書插圖皆經特別處理, 圖面清晰, 與英文版中的圖片大小一致, 使閱讀時有易於接受的清新感。

- (1) 本書是高工、工專、及大學電機與電子等科系「工業電子」、「工業控制」課程上的最佳教本。
- (2) 本書可供實際擔任「工業控制」之設計、操作、運用人員的自修學習之用。

II

- (3) 本書可作為補習班或工廠「在職訓練」的最佳教材。
- (4) 本書適合作為工廠新進人員的訓練教材。

本書如有疏漏之處，尚祈諸位先進不吝指正。

鄭振東

鄭克盛

諸 言

SCR手冊第15週年紀念版

自從GE於1958年開始生產第一個商用SCR以來，直到1972年GE手冊第5版的發行，已經有15年的歷史。雖然仍僅有十幾年的歷史，SCR已經在過去這十幾年內成長為有關靜態功率開關與控制方面最重要的半導體元件。

SCR的快速成長式的成功係伴隨GE SCR手冊的成長。在1958年發行第1本應用小冊以來，GE SCR手冊一直作週期性的修訂，維持基本的實用而非理論性的論題，供作設計工程師的電路選擇與應用的指導。本GE SCR手冊第5版係由一群工程師所寫的；這些工程師確實生活在固態功率轉換的尖端競爭場所。這些工程師經常接觸設備工程師，因此暴露於各種不同形式的問題與特殊功率半導體元件的應用決定。利用貢獻了成千的關於閘流體的成功的設計計劃，以及由前任的工程師所獲得的經驗與工作，這些作者因而獲得寫本書所需的洞察力與經驗。

SCR手冊的前一版已經被全部詳細的修訂過。大部分的新資料已經被加進來，反應近五年來所獲得的SCR應用資料的換新。這些改變並非另列新的章節，而是在每一章中加入額外的或新修訂過的資料，與那些目前仍正確的資料相混合在一起。對於曾經用過前幾版的讀者而言，書的版式仍維持原封不動，以便保持讀者所已經熟悉的特性。

在一方面增加軍用與工業用SCR的性能，另一方面轉變到新近製造技術用來大量生產消費性與輕工業用SCR，以上的雙重趨勢在本手冊的修訂中是很顯而易見的。在本手冊中，更詳細的資料包括SCR的參數與高性能SCR的應用消息。指示設計者如何達成最佳大量塑膠封裝SCR的利用

31A631/12

IV

資料，在本手冊中也有供應。仍然，全盤的、大量的努力一直用來保持本手冊在本質上的簡明與一般性。

我真誠希望你會發現本手冊是有用的與富於資料性。

序 論

我們並未因為情況有所變化而改變 SCR 手冊。我們已經在第 4 版中加進一些問題的解答，這些問題的解答是你們（設備設計師）在過去幾年來一直努力尋求的答案。我們確實將過去這幾年來有關元件與電路的創新資料加進來。最後我們仍繼續本着我們過去的傳統，儘量保持內容的清楚、扼要與簡明易懂。

如何學習 SCR？

如果你（讀者）已經熟悉 SCR，而在實際應用與設計中想要得到一些有利的指導時，本手冊是理想的，正適合你的需要。

如果你希望獲得更具理論分析性的閘流體資料時，不論是作為半導體或電路元件，我們建議你參考一本由 Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 所出版的“半導體控制整流器…… $p-n-p-n$ 元件的理論與應用”（Semiconductor Controlled Rectifiers……Principles and Applications of $p-n-p-n$ Devices）。

如果你已經聽過 SCR，並且想要開始學習 SCR 如何能夠幫助你時，我們建議你擁有一本 GE “電子實驗者電路手冊”（Electronics Experimenters' Circuit Manual）。本手冊說明將近 40 個精巧的電路與計劃，在教導基本電子方面很有用處，並能用來建造這些計劃，分別在汽車、家庭、工廠、露營用地等方面具有永久的價值。本書係由我們的應用工程師們為新入門的讀者所寫的；這些讀者在他們的本行中可能很精通，可是對 SCR 與其他半導體元件則是新入門的。

如果你確實急着想要明瞭一基本的閘流體電路如何能夠與你的設備負

載一起工作時，或如果你本身沒有足夠的設備由電子元件來裝組你自己的電路時，你可能希望利用由你附近的GE分銷商獲得幾種標準裝配零件之一來進行實驗。一典型的標準TRIAC可變電壓控制電路如下所示。此種電路在本書第7章中有進一步的說明。

SCR的簡短敘述

SCR是閘流體系列半導體元件中最早與最重要的元件。閘流體系列中較新的元件擁有與SCR相似的門鎖（再生）特性。這些較新的閘流體元件包括TRIAC，雙向二極體開關，矽控開關（SCS），矽質單向與雙向開關（SUS，SBS），以及光動元件像LASCR與LASCS。閘流體系列的最新元件為互補式SCR，程式型單接面電晶體（PUT），以及“非對稱式觸發器”

讓我們回到閘流系列的帶頭元件，也是本手冊的命名元件SCR。SCR為一種半導體……一種整流器……一種靜態門鎖開關……能夠在幾微秒內工作……並且為一種靈敏放大器。SCR並非是一種過度成長的電晶體，這是因為SCR具有遠較為大的功率處理能力，不論是電壓或電流，在連續與湧浪情況下，並能控制較多的每塊錢瓦特數。

作為矽半導體——SCR為緊湊、靜態、能夠被密封或填充、無聲工作、並且不會發生振動或震動效應的裝置。一個經適當設計與製造的SCR不會有固有的失效機構存在。當適當選擇並加入保護裝置後，即使是在惡劣的天氣下，SCR應當幾乎具有無限工作壽命。因此即使是在易於爆炸的與腐蝕性的環境下，也可以預期無數的幾十億次的工作。

作為整流器——SCR將僅在單方向導通電流。但是當負載需要直流電時，此種單向導通的特性有其優點存在，因為在此處SCR可同時供控制與整流之用——例如在調節式電池充電器的情形即是。

作為門鎖開關——SCR為通斷開關，不像真空管與電晶體在基本上為可變阻抗元件（雖然以上兩者也可用為通斷開關）。利用瞬間加入控制電流到SCR的閘極（短至1微秒的幾分之幾脈波）即可使SCR導通；而真

空管與電晶體（以及基本的繼電器）則需要一連續的導通信號才能維持導通狀態。總之，SCR 門鎖入導通狀態，供給一種在許多功能上很有用的固有記憶。SCR 可以在幾乎 1 微秒的時間內即被切入導通狀態，在 10 到 20 微秒內切入關斷狀態；並且此種切換速率的進一步改進仍在繼續進行中。

就像一開關或繼電器接點通常以其所能安全攜帶與中斷的最大電流以及所能工作的最大電壓為其額定值，SCR 係以峯值電壓與順向電流為其額定值。在編寫本書時，GE 公司已經能夠供給一完整系列的 SCR，其電流攜帶能力由 1/4 安培到 1600 安培有效值，而峯值電壓則高達 2600 伏特。更高的電壓與電流負載還可利用 SCR 的串聯與並聯連接有效的處理。

作為放大器——利用僅有幾微瓦特與幾微秒期間的控制信號即可使小型 GE SCR 門鎖入導通狀態。而這些 SCR 却能切換 100 瓦特以上的功率。所產生的控制功率增益超過一千萬倍以上，使得小型 SCR 成為可用最靈敏控制元件之一。如使用一低價 UJT 觸發電路來驅動大型 SCR，即可使高達幾十億倍的穩定切入導通控制功率增益完全成為可能。此種驚人的控制增益使得廉價的使用非常低位準信號（像由熱阻器、硫化鎘光敏電阻、以及其他換能器所產生的信號即是）的控制電路成為可能。

前面所提到過的有關 SCR 的優點的项目表內的大部分項目，仍然適用於閘流體系列中 SCR 以外的其他元件，此點讀者在看本書時即可明瞭。同時半導體元件的缺點與使用時所受到的限制，也會隨着時間的增加而變得較不重要。高壓與雙向型式的閘流體的新製成品可提高暫態與工作電壓障礙。高速閘流體允許在超音波頻率與嚴格動態情況下工作。較低的半導體價格允許使用較高電流額定值的閘流體，而不像以前一樣使用臨界電流設計閘流體與昂貴的過電流保護系統。

最好不過的，SCR 與閘流體不論是在任何一種形式的應用中……工業、軍用、太空、商業、消費者……目前的價格都比以前便宜。其中最好的指示現象即為新塑膠封裝閘流體在大量消費性應用中每一分錢都斤

斤計較的場合的發展速度有迅速增加的趨勢。

以下即為正忙着要被閘流體取代與改進的傳統形式的控制與元件：

閘流管	飽和電抗器
繼電器	接觸器
磁放大器	可變自耦變壓器
點火管	保險絲
增益測量器	定時器
變阻器	真空管
功率電晶體	恆溫器
馬達起動器	機械速率變換器
變壓器	離心開關
限制開關	點火點
定電壓變壓器	

歡迎令人興奮的閘流體系列的世界，不論是閘流體電路或閘流應用。請記住本手冊內所列出的資料係僅供電路選擇的一般指導之用。然而，我們多年來提供實際應用幫助的累積經驗已經指出，只要給予像在本手冊內的一些基本起始要點資料，你們這些電路設計者通常都能自行發展設計，而獲致最好的，經常是唯一能夠解決你們的特殊問題的電路選擇。

此處，我們試圖將使用閘流體的成功設計的指引路徑連在一起，用來防止我們以及其他的人曾經以困難的方式所學得的陷阱的發生。

目 錄

譯者序

緒 言

序 論

第 1 章 構造與基本工作理論..... 1

1.1 何謂閘流體?..... 1

1.2 閘流體的分類..... 1

1.3 雙電晶體式的 PNP 工作..... 1

1.4 反向阻遏閘流體 (SCR) 的關斷機構..... 6

1.5 SCR 工作的動態改進..... 7

1.6 反向阻遏三極或四極閘流體的電壓—電流特性..... 14

1.7 閘極關斷開關或閘極控制開關..... 16

1.8 閘流體作為遙遠基極電晶體..... 16

1.9 閘流體的構造..... 18

1.9.1 矽質小球的製造..... 18

1.9.2 矽質小球的封裝..... 21

1.10 閘流體與其他功率電晶體的比較..... 25

第 2 章 符號與術語..... 26

2.1 半導體圖形符號..... 26

2.2 SCR 術語..... 30

2.2.1	下註標	30
2.2.2	特性與額定值	31
2.2.3	字母符號表	37
2.2.4	常用字母符號	38

第3章 閘流體的額定值與特性 40

3.1	接合面溫度	40
3.2	功率消耗	41
3.3	熱阻	42
3.4	暫態熱阻抗	43
3.4.1	序論	43
3.4.2	暫態熱阻抗曲線	44
3.4.3	散熱片設計對於暫態熱阻抗曲線的效應	47
3.5	重複與非重複電流額定值	48
3.5.1	序論	48
3.5.2	平均電流額定(重複)	49
3.5.3	均方根值電流(重複)	50
3.5.4	任意電流波形與過載(重複)	51
3.5.5	湧浪電流與 I^2t 額定值(非重複)	51
3.6	基本負載電流額定方程	54
3.6.1	序論	54
3.6.2	不規則形狀功率脈波的處理——近似法	54
3.6.3	重複脈波突波式的電阻性焊接額定值	58
3.7	重複與非重複 di/dt 額定值	59
3.7.1	序論	60
3.7.2	工業標準 di/dt 額定(重複)	60
3.7.3	同時發生 di/dt 額定(重複)	61
3.7.4	工業標準 di/dt 額定(閘極觸發——非重複)	62

3.7.5	工業標準 di/dt 額定 ($V_{(BO)}$ 觸發——非重複)	62
3.7.6	導通電壓	63
3.8	高頻電流額定	63
3.8.1	高頻正弦波形電流額定	64
3.8.2	高頻矩形波形電流額定	67
3.9	電壓額定	67
3.9.1	反向電壓 V_{RRM} 與 V_{RSM}	69
3.9.2	峯值關斷狀態阻遏電壓 (V_{DRM})	70
3.9.3	峯值正陽極電壓 (PFV)	70
3.9.4	高頻電壓額定, 阻遏功率限制 SCR	71
3.10	關斷狀態電壓的上升率 (dv/dt)	72
3.10.1	靜態 dv/dt 能力	73
3.10.2	重新加入 dv/dt	75
3.10.3	TRIAC 的換向 dv/dt	75
3.11	閘極電流額定	77
3.12	維持電流與門鎖電流	77
3.13	反向恢復特性	78
第4章	閘極特性、額定與閘極觸發方法	80
4.1	觸發過程	80
4.2	SCR 閘極—陰極特性	82
4.2.1	觸發前的特性	82
4.2.2	在觸發點時的特性	84
4.2.3	觸發後的特性	84
4.3	閘極—陰極阻抗與偏壓的效應	86
4.3.1	閘極—陰極阻抗	86
4.3.2	閘極—陰極電容	87
4.3.3	閘極—陰極電感	88

4.3.4	閘極—陰極 LC 諧振電路	89
4.3.5	正閘極偏壓	89
4.3.6	負閘極偏壓	91
4.4	陽極電路對閘極電路的效應	95
4.5	直流閘極觸發規格	96
4.6	負載線	97
4.7	不觸發 SCR 的正閘極電壓	98
4.8	脈波觸發	99
4.9	陽極導通時期的特性	102
4.10	簡單電阻器與 RC 觸發電路	104
4.11	使用負脈波觸發 SCR	107
4.12	交流閘流管式相移觸發電路	108
4.13	飽和電抗器觸發電路	110
4.13.1	連續變化控制	110
4.13.2	開關電磁觸發電路	111
4.14	半導體觸發脈波產生器	113
4.14.1	基本弛張振盪標準	113
4.14.2	單接面電晶體	115
4.14.2.1	基本 UJT 脈波觸發電路	117
4.14.2.2	設計 UJT 觸發電路	119
4.14.3	程式型單接面電晶體 (PUT)	120
4.14.3.1	PUT 弛張振盪器與定時器電路設計	123
4.14.4	矽單向開關 (SUS)	127
4.14.5	矽雙向開關 (SBS)	128
4.14.6	雙向觸發二極體 (DIAC)	129
4.14.7	非對稱交流觸發開關 (ST4)	130
4.14.8	其他觸發元件	131
4.14.9	半導體觸發元件摘要	131

4.15 作為觸發元件的氬輝燈·····	131
4.15.1 氬燈觸發電路·····	133
4.16 脈波變壓器·····	134
4.17 同步方法·····	137
4.18 變流器用觸發電路·····	138
4.18.1 電晶體式的正反器·····	138
4.18.2 PUT 正反器觸發電路 ·····	139
4.19 脈波放大與整形·····	140

第 5 章 SCR 的動態特性····· 144

5.1 SCR 關斷時間 t_q ·····	144
5.1.1 SCR 關斷時間定義 ·····	145
5.1.2 關斷時間的典型變化·····	146
5.1.3 電路關斷時間 (t_c) ·····	146
5.1.4 回鹵二極體·····	149
5.2 關斷方法·····	149
5.2.1 電流中斷·····	149
5.2.2 強迫交換·····	150
5.3 強迫交換方法的分類·····	150
5.3.1 A類 利用負載的諧振所引起的自行切換·····	151
5.3.2 B類 利用 LC 電路的自行切換 ·····	151
5.3.3 C類 利用另一攜帶負載電流 SCR 的 C 或 LC 切換 ···	153
5.3.4 D類 利用輔助 SCR 的 C 或 LC 切換 ·····	153
5.3.5 E類 使用外加脈波源的切換·····	156
5.3.6 F類 交流線電源的切換·····	161
5.4 順向電壓的上升率 dv/dt ·····	162
5.4.1 重新加入 dv/dt ·····	163
5.5 導通狀態電流的上升率 di/dt ·····	163

5.5.1 解決 di/dt 問題	164
5.6 反向恢復特性	166
5.7 交換電路用電容	167
第6章 串聯與並聯工作	172
6.1 SCR的串聯工作	173
6.1.1 需要均等化網路	173
6.1.2 均等化網路設計	176
6.1.2.1 靜態的等化網路	176
6.1.2.2 動態均等化網路	179
6.1.2.3 其他電壓均等化安排	184
6.1.3 觸發串聯工作 SCR	184
6.1.3.1 經由脈波變壓器的同時觸發	186
6.1.3.2 利用光源的同時觸發	187
6.1.3.3 串聯SCR的附屬觸發	187
6.1.3.4 觸發脈波	190
6.2 SCR的並聯工作	190
6.2.1 SCR暫態導通特性	192
6.2.2 利用具有不匹配順向特性的SCR在不加入共用網路時的 直接並聯	194
6.2.3 使用具有匹配順向特性的SCR	201
6.2.4 外部強制電流共用	202
6.3 並聯連接SCR的觸發	206
第7章 TRIAC	208
7.1 說明	208
7.1.1 主要端點特性	208