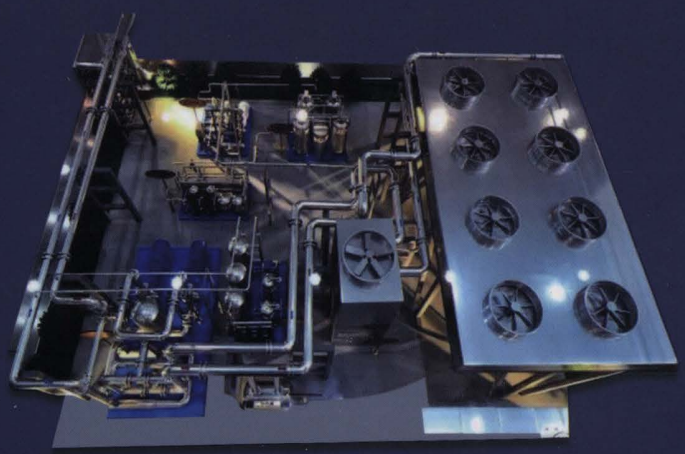
电气工程新技术丛书

电力电子装置热管理技术

DIANLI DIANZI ZHUANGZHI REGUANLI JISHU

吴文伟 文玉良 陆建峰 卢志敏 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电气工程新技术丛书

电力电子装置热管理技术

吴文伟　文玉良　陆建峰　卢志敏　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书以大功率电力电子设备的热设计为对象，以高压直流输电换流阀水冷却设备为案例，详细阐述了大功率电力电子装置的热管理技术。通过大量的工程设计和工程经验向读者全面阐述了工业化的大功率电力电子装置的热管理技术。全书共7章，详细介绍了电力电子器件的热特性、电力电子冷却的基本原理、电力电子设备用换热设计、HVDC换流阀冷却系统集成设计、电力电子设备换热仿真、冷却系统电气设计及冷却设备的运行维护。

本书由行业内一线工程师撰写，讲解循序渐进，通俗易懂，并给出大量实例，不仅适合电力电子行业的操作人员、电力电子设备热设计工程技术人员学习和参考，同时也可以作为电子、机械、热能等相关专业本科生、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子装置热管理技术/吴文伟等编著. —北京：机械工业出版社，2016.8
(电气工程新技术丛书)
ISBN 978-7-111-54603-0

Ⅰ.①电… Ⅱ.①吴… Ⅲ.①电力装置-电子设备-研究 Ⅳ.①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第195494号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑：汤 枫 责任编辑：汤 枫
责任印制： 责任校对：张艳霞
印刷厂印刷

印刷(装订)

2016年9月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·15.5印张·378千字
0001-4000册
标准书号：ISBN 978-7-111-54603-0
定价：45.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：(010)88361066	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：(010)68326294	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
(010)88379203	教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版	金 书 网：www.golden-book.com

前　言

能源和环境问题是当今世界面临的两大问题。能源结构在日新月异的发展。随着绿色能源时代的到来，以可再生能源、核能、天然气等代表的能源体系将替代以煤、石油等化石原料为主的能源体系。这些能源转换形式往往以电能的形式为人们所用，进而推动了科技的高速发展，而现代科技的飞速发展得益于电气工程设备运用。2014 年在巴黎召开的国际大电网会议（CIGRE）评出的 20 世纪影响人类十大工程技术中，电力工程排在第一。

电能作为人类能源消耗主流，其生产、传输及合理开发备受关注。能源的转换离不开电力电子技术，未来几乎所有的电能必须经过电力电子的变换方可使用。电力变换需要大量的电力电子装置，这些装置需要电力电子热管理技术。

国际上推动大功率电力电子技术和产业发展的是西门子、ABB 和阿尔斯通等少数国际大公司，并处于垄断地位。我国无论是在产业上、技术上跟国际水平都还有很大差距，有学者认为当前我国总体上与国际发达国家水平相差 10 年左右。但是，我国电力电子技术在某些领域的应用非常突出。我国从 2000 年来在直流输电方面取得了世界瞩目的成绩，中国西电集团、中国电力科学研究院、许继集团等获得了换流阀自主设计生产。这些成绩也得益于电力电子设备制造的长足发展，其中重要一环是电力电子装置的纯水冷却设备。

2000 年以前，我国的直流输电系统用纯水冷却设备基本都是从国外进口（如 ABB 和西门子等），随着近 10 年来行业技术的发展，直流输电工程换流阀用纯水冷设备也逐步实现了国产化，并逐步取代了进口产品的市场。2014 年我国国家电网中标巴西美丽山项目。采用的换流阀是西门子换流阀，而换流阀冷却系统则为广州高澜节能技术股份有限公司生产（以下简称高澜股份）。高澜股份是换流阀冷却装置国产化厂商的代表者之一，是国内最早的 HVDC 换流阀和 SVC 换流阀水冷系统的生产厂家。同时高澜股份还将以高压直流输电换流阀用纯水冷却装置为案例推广到其他大功率电力电子设备如变流器纯水冷却系统方面，目前已广泛应用于发电、输电、配电及用电各个环节电力电子装置的冷却。高澜股份将累积了多年的设计和维护经验分享给各设计和运行人员。

从目前来看，在我国有不少介绍电子设备的相关热设计的书籍，但是，专门介绍电力电子设备冷却的书籍甚少。因此一般电力电子工程师从电子设备、化工、热能工程相关专业的角度来面对电力电子热设计。

从国内电子设备相关的书籍来看，与电子设备热设计和冷却技术相关的书籍都有一些。早在 1989 年丁连芬等校译了美国军工可靠性热设计标准[1]，同年由谢德仁[2]主编东南大学出版的《电子设备热设计》从电子设备的热设计出发，认为其设计必需根据设备功能的要求和所处的环境条件来进行。考虑的主要因素包括设备的尺寸、质量、电子元器件的耗热量、温度控制范围、电路形式、结构组装特点、热环境和热耗散空间等。1992 年，国防工业出版社出版了［美］巴科恩《电子设备的热控制与分析》，到 2012 年该书进行了再版。1995 年徐维新[3]编著的《电子设备冷却技术》从电子设备可靠性进行热设计。根据我国军标和美国军标可靠性任务中将热管理和设计作为一个大类。而后邱成悌 2001 年[4]、2005

年[5]编修了《电子设备结构设计原理》，近年来，余建祖[6]（2008 年）、赵惇殳[7]（2009 年）、王健石[8]（2011 年）编撰了电子设备热设计相关书籍，而热设计和热管理的每项任务是为了满足电力电子系统的可靠性指标。因此，要求热设计工作必须在总体设计的初期阶段进行。热设计人员应从系统工程观点出发拟定一个合理、经济、可行的热设计方案，以满足电子设备温升控制的指标。

化工、热能工程相关专业大多从冷却单元和冷却系统角度的角度来考虑此类问题。另外由于计算机技术的迅猛发展，模拟仿真丰富了热设计的研究方式，市面上也出现了众多的商业软件和书籍。近年来大量的采用 ANSYS 进行结构热设计仿真模拟[9-11]，而 ANSYS Icepak、FloTHERM、FloEFD 等软件更是直接针对电子设备热设计进行模拟仿真。MATLAB 可以对系统进行静动态分析[12]，还可以运用 MATLAB/Simulink 和 AMESim 软件建立了冷却系统联合仿真[13]，其他关于液态系统热设计的软件如 Flowmaster、Pipeflow、TRNSYS 等一维系统设计软件，甚至电力设计软件只要建模正确均可以进行系统设计和元件的仿真模拟。文献［14］采用简化模型（Compact Thermal Model，CTM）和详细器件模型（Detailed Thermal Model，DTM）建立热电等效模拟，采用 PSpice 仿真模拟，此种方法可以计算上万个单元串并联的情况。

从国内文献检索来看，我国进行高热流密度电子设备的散热技术的研究较早[15]，但是，着重研究大功率电力电子冷却要到 2000 年，将封闭循环水冷却系统用于国产 ± 20Mvar STATCOM 中[16]。2000 年后，我国大量引入远距离高压直流输电技术、大功率无功补偿 SVC 技术，而其关键技术在其大功率换流阀器件，这种大功率电力电子设计热设计基本上属于其三大设计之一。后来，宗朝晖[17]、陈建业[14]、张小京[18]、冷明全[19]等人对电力电子的冷却技术进行补充，使得电力电子的冷却技术到电力电子冷却装置的理论和技术更加具体。

本书将前人的电力电子装置的冷却技术、热设计技术、运行维护等技术综合成热管理技术。本书分为 7 章。主要策划人为吴文伟（高澜股份的总经理，公司的创始人，高压大功率电力电子设备纯水冷却核心技术人员）。策划顾问为清华大学陈建业教授（作为高澜股份的技术顾问，是高压大功率电力电子设备纯水冷却行业的先行者）。主要撰写和审稿人员为文玉良、陆建峰、卢志敏，其他参与人员有冷明全、刘重强、吴健超、吴安兵、张彬等高澜股份一线工程师。

第 1 章介绍电力电子器件的热特性，主要执笔人为文玉良博士，高级工程师，高澜股份的节能研究院副院长，长期从事电力电子产品的冷却工作。

第 2 章为介绍了电力电子传热的基本理论，主要执笔人为中山大学陆建峰教授（高澜股份的技术顾问，研究领域主要为新能源传热和节能）。电力电子传热包括三种基本传热方式：热传导、对流和辐射；电力电子的封装包含了三种基本进行了理论分析。同时介绍了电力电子的几种冷却方式：风冷包括自然对流冷却和强迫对流；液冷和热管及其他半导体微通道等冷却方式。

第 3 章介绍电力电子设备半导体冷却方式的选择和选型，主要执笔人为文玉良。其中简单介绍风冷和热管散热器两个案例；其次以液冷系统为例，重点介绍直流输电换流阀纯水冷却装置用水冷系统的换热设计；再次介绍一般电力电子装置的纯水冷却装置用水冷系统及其案例；最后介绍其他电力电子设备的冷却系统及其案例。

第 4 章以高压直流输电换流阀冷却系统集成设计为例来介绍电力电子装置的换热设备集成设计的液冷有关技术。主要执笔人为卢志敏，高澜股份的副总工程师，长期从事换流阀冷却系统集成设计工作。参与人包括吴安兵、刘重强工程师。换流阀冷却系统主要包括主循环系统、副循环系统以及外冷却系统设备的相关设计和选型。

第 5 章介绍电力电子设备仿真的相关的软件和方法。主要执笔人为文玉良，参与人有刘重强。其中第一小节为概述，第二小节介绍采用元件设计仿真；第三小节涉及系统级仿真设计，重点介绍 Flowmater 和 Pipeflow 两个软件。最后一个小节介绍其他各种方针和模拟的思路。

第 6 章介绍电力电子装置冷却系统电气设计。主要执笔人为吴文伟，参与人有冷明全、吴健超、张彬等工程师。该章包括电力电子热能管理的电气控制有关知识体系，重点以换流阀冷却系统的控制为主阐述控制系统配置、换流阀冷却控制系统通信、系统保护和故障诊断等内容。

第 7 章介绍电力电子冷却设备的风冷设备和水冷设备的运行维护，重点在其设备的运动部件和易损部件。主要执笔人为卢志敏，参与人为刘重强。其中第一小节进行概述，第二小节介绍采用元件设计仿真。

本书涉及的内容均出自作者和相关的编写人员发表的学术论文中，在此表示感谢。还要感谢广东省战略新兴项目（2012A090100005）、国家电网智能电网研究院委托的换流阀高效节能智能化冷却设备技术研究项目、南方电网超高压输电公司委托的直流阀冷系统水质分析及离子交换树脂试验检测平台等项目给予的资助。

由于作者水平有限，本书编写过程中存在缺陷和不足，欢迎广大读者和专家学者批评指正。

作　者

目　录

前言

第 1 章　电力电子器件的热特性 …… *1*

1.1　电力电子冷却装置…… *1*

1.2　电力电子器件的损耗与发热…… *2*

1.2.1　IGBT 损耗计算…… *3*

1.2.2　晶闸管损耗计算 …… *7*

1.2.3　TCR 阀触发关断损耗 …… *8*

1.3　电力电子器件的失效机理与可靠性…… *9*

1.4　温度对器件性能的影响 …… *12*

1.4.1　半导体器件的最大工作温度 …… *13*

1.4.2　最大允许功耗与温度的关系 …… *14*

1.4.3　载流子寿命对器件性能的影响 …… *17*

第 2 章　电力电子冷却的基本原理…… *19*

2.1　电力电子传热的基本理论 …… *19*

2.1.1　电力电子器件的封装 …… *19*

2.1.2　热传导 …… *19*

2.1.3　对流 …… *20*

2.1.4　热辐射 …… *21*

2.2　风冷 …… *22*

2.2.1　风冷及其主要方式 …… *22*

2.2.2　空气自然对流冷却 …… *22*

2.2.3　强迫对流风冷 …… *25*

2.3　液冷 …… *27*

2.3.1　电力电子液冷及分类 …… *27*

2.3.2　水冷板散热器 …… *29*

2.3.3　水冷过程的计算关联式与计算模型 …… *31*

2.3.4　水冷散热的影响机制与强化方法 …… *34*

2.4　热管冷却 …… *35*

2.4.1　热管的工作原理与基本性质 …… *35*

2.4.2　热管传热性能分析与设计计算 …… *37*

2.4.3　环路热管 …… *37*

2.4.4　脉动热管 …… *38*

2.5　其他冷却方式 …… *40*

2.5.1　半导体冷却 …… *40*

2.5.2　微通道冷却 …… *42*

第 3 章　电力电子设备用换热设计…… *44*

3.1　电力电子设备半导体冷却方式的选择与选型 …… *44*

3.1.1　电力半导体器件热设计 …… *44*

3.1.2　电力半导体冷却方式选择 … *46*

3.1.3　电力半导体整体式水冷散热器设计 …… *50*

3.1.4　电力半导体的风冷散热器 … *56*

3.1.5　电力半导体的热管散热器 … *58*

3.1.6　电力半导体的传热介质 …… *60*

3.2　大功率电力电子装置液冷内冷系统设计计算 …… *62*

3.2.1　液冷系统的传热介质 …… *62*

3.2.2　纯水系统的内冷设计原理 … *66*

3.3　大功率变流器液冷系统外冷设计计算 …… *68*

3.3.1　外冷设计概述 …… *68*

3.3.2　管翅式空冷器 …… *69*

3.3.3　板翅式换热器 …… *75*

3.3.4　冷却塔 …… *78*

第 4 章　HVDC 换流阀冷却系统集成设计…… *84*

4.1　HVDC 换流阀冷却系统概述 … *84*

4.1.1　换流阀冷却系统的发展 …… *84*

4.1.2　换流阀冷却系统的原理 …… *85*

4.2　换流阀冷却系统基本结构 …… *86*

4.2.1 总体技术要求 …… 87
4.2.2 主要材质要求 …… 87
4.2.3 主循环设备 …… 87
4.2.4 去离子装置 …… 99
4.3 外循环冷却系统基本结构…… 106
4.3.1 外循环冷却系统空冷器设计要求 …… 106
4.3.2 外循环冷却系统的冷却塔选型 …… 110
4.3.3 外循环冷却系统的冷却塔要求 …… 111
4.4 冷却系统的结构设计…… 117
4.4.1 冷却系统主设备的结构设计 …… 118
4.4.2 冷却系统布置设计 …… 120
4.4.3 减振、噪声控制 …… 121
4.4.4 冷却系统对土建的要求 …… 122
4.5 若干性能参数的测量…… 123
4.5.1 流量类检测 …… 123
4.5.2 温度类检测 …… 125
4.5.3 压力类检测 …… 126
4.5.4 液位类仪表 …… 127
4.5.5 电导率仪 …… 128
第5章 电力电子设备换热仿真 …… 130
5.1 概述…… 130
5.2 电力电子热处理器件设计仿真…… 131
5.2.1 仿真软件 …… 131
5.2.2 电力半导体器件用散热器仿真…… 135
5.2.3 外循环冷却系统空气冷却器选型…… 139
5.3 液冷却系统仿真…… 141
5.3.1 水冷系统仿真概述 …… 141
5.3.2 水冷系统仿真软件介绍 … 142
5.3.3 直流输电换流阀冷却系统的系统仿真 …… 153
第6章 冷却系统电气设计 …… 160
6.1 交流电源配置要求…… 160
6.1.1 内冷回路 …… 160
6.1.2 外水冷回路 …… 161
6.1.3 外风冷回路 …… 162
6.1.4 外风冷+外水冷回路 …… 162
6.2 控制原理与方法…… 164
6.2.1 可编程序控制器的概念及工作原理 …… 164
6.2.2 电气控制系统的常见保护环节 …… 165
6.3 电磁兼容 …… 166
6.3.1 电磁兼容的相关理论 …… 166
6.3.2 提高电磁兼容性的研究与对策 …… 167
6.3.3 换流阀冷却系统电气控制与监测系统抗电磁干扰设计 …… 170
6.4 换流阀冷却控制系统配置…… 171
6.4.1 直流电源的配置要求 …… 171
6.4.2 主循环泵控制 …… 173
6.4.3 电加热器控制 …… 174
6.4.4 电动阀门控制 …… 174
6.4.5 补水系统 …… 175
6.4.6 氮气恒压控制 …… 176
6.4.7 外水冷系统控制要求 …… 176
6.4.8 外风冷系统风机控制要求 …… 177
6.4.9 外风冷+外水冷系统控制要求 …… 177
6.5 换流阀冷却控制系统通信…… 177
6.5.1 报警信号和事件记录 …… 177
6.5.2 一般要求 …… 178
6.5.3 直流项目硬触点上行和下行信号 …… 178
6.5.4 直流项目光调制信号通信 …… 179
6.6 换流阀冷却控制系统的保护…… 183
6.6.1 阀冷却系统温度保护技术要求 …… 183

6.6.2 阀冷却系统流量压力保护的技术要求 …… 184
6.6.3 阀冷却系统液位保护的技术要求 …… 185
6.6.4 阀冷却系统泄漏保护的技术要求 …… 186
6.6.5 电导率保护 …… 187
6.6.6 阀冷却与控制保护间的接口 …… 189
6.7 换流阀冷却控制系统的故障诊断 …… 190
6.7.1 仪表故障诊断 …… 190
6.7.2 模块故障诊断 …… 191
第7章 冷却设备的运行维护 …… 192
7.1 故障判定与运行维护的依据 …… 192
7.1.1 故障判定 …… 192
7.1.2 运行维护的依据 …… 199
7.2 换流阀冷却控制系统的维护 …… 199
7.2.1 维护项目及周期 …… 199
7.2.2 维护方案 …… 214
7.3 常规变流器冷却系统的维护 …… 231
7.3.1 注意事项 …… 231
7.3.2 巡检措施 …… 231
7.3.3 零部件的更换 …… 232
参考文献 …… 237

第 1 章　电力电子器件的热特性

本章主要介绍电力电子装置中的关键电力电子元器件的热特性。内容包括电力电子冷却装置的范围、电力电子器件的热特性、电力电子器件的失效机理与可靠性和温度对器件性能的影响。

1.1　电力电子冷却装置

电力电子技术是指使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术，是应用于电力领域的电子技术。电力电子器件的制造技术是电力电子的基础，由于目前所用的电力电子器件均由半导体制成，故也称为电力半导体器件[20]。电力变换的种类见表 1-1。电力电子器件主要用于电力变换，它的电力功率范围大，电压较高，而信息电子主要用于信息处理，电压较低，这是二者的主要区别。

表 1-1　电力变换的种类[20]

输出 \ 输入	交流（AC）	直流（DC）
直流（DC）	整流	直流斩波
交流（AC）	交流电力控制、变频、变相	逆变

电力电子发展得益于电子技术的发展和电能的需求增加。电子技术为电力提供的控制技术，同时随着电子技术的迅速发展，本身的冷却技术也迅速的发展，对电力电子设备的冷却提供了借鉴。电能的需求近年来急剧上升，从 2000 年到 2010 年的 10 年中，我国年用电量增加了 2 倍。

电力电子冷却装置是针对电力电子器件热设计技术而产生的一系列设备，主要功能为保障电力电子器件正常工作。其冷却对象为以电力电子器件为核心的相关各种发热元器件。近数十年来，电力电子技术得到了迅速的发展，作为高效便捷的电能变换工具，电力电子装置得到了越来越广泛的应用，成为影响国民经济正常运行的许多关键领域如电网、高铁、航空航天、船舶等的核心部件。但是随着器件功率密度的不断增大以及对装置性能紧凑性要求日益提高，电力电子装置的可靠性也已成为关注的焦点[6]。

德国联邦政府资助的风能研究项目的子项目科学测量与评估（WMEP）报告指出根据 1997～2005 年的统计，器件故障占风力发电系统故障率的 35%，远高于电网崩溃引起的 7% 和台风引起的 5% 的故障率，是风电系统主要的失效原因，而风电变流器中超过一半以上的故障可以归因于电力电子器件的失效[21]。其他类似的研究报告同样指出，变频调速系统故障的 38% 来自于电力电子器件的故障。因此电力电子器件是整个工业变流器领域最为脆弱的部件，也是影响变流器可靠性的最主要的因素。据航空电子设备统计：20% 的现场故

障来源于温度[3]。热失效即电力电子器件工作结温超过了其最大额定值而引起的烧毁失效，是器件在使用过程中常见的一种失效模式。据美国空军航空电子设备完整性程序的分析，温度所引起的失效占电子装置总失效率的55%（见图1-1）。因此，电子装置的可靠性和质量、封装完整性，以及热能管理是电力电子装置，特别是大功率电力电子装置面临的最大挑战。

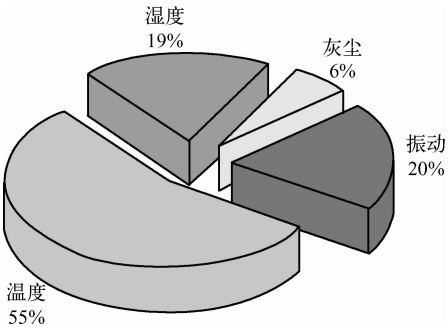


图1-1　电子装置失效的主要因素

（来源：U. S. Air Force Avionics Integrity Program，Reynell，M.，1990）

1.2　电力电子器件的损耗与发热

电力电子器件内部热量的来源主要是芯片内部的损耗由电能向热能的转化，此时所产生的热量需要通过有效的热流路径进行散发，不合理的结构设计或选择不合理的散热器会导致封装体内温度，特别是结温的不断上升，缩短器件寿命，直至最终导致器件的失效，如图1-2所示。

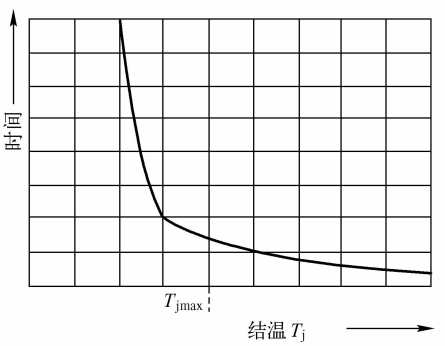


图1-2　硅半导体器件预期寿命与结温的关系[22]

电力电子器件工作于开关状态，在其开关过程中以及处于导通和关断状态都有功率损耗发生；包括处于静态下发生的通态功耗和断态功耗，以及动态功过程中产生的开通功耗和关断功耗。最为精确的方法应当是根据测试得到的各个阶段实际的电流和电压波形进行计算，但是相当复杂。为了提出一个简单可行，同时又具有足够精度的结果，目前已有大量文章进行了讨论，有兴趣的读者可以参考，下面分别对IGBT和晶闸管两者的损耗计算做一个简单的介绍。

1.2.1 IGBT 损耗计算

IGBT 模块内部通常包括 IGBT 芯片和反并联二极管芯片两种半导体硅芯片；而在实际应用中，在一个功率模块里往往将数个 IGBT 与二极管硅芯片集成在一起构成具备独立功能的电路，如单相或多相桥臂的换流电路 IGBT。因此其功耗是由上述几个部分组合而成。

（1）通态功耗的计算

单个周期 IGBT 单元的通态平均功耗 P_{SAT}可以计为

$$P_{SAT} = \frac{1}{T}\int_0^T i_c(t)\,U_{ce(sat)}(t)\,dt \tag{1-1}$$

式中，I_c 为集电极电流；$U_{ce(sat)}$为器件的饱和压降[23]。

根据集－射极电压饱和特性曲线（见图 1-3）得到的通态电阻 R_{ce}改写为

$$P_{SAT} = U_{ce(sat)} I_c = (R_{ce} I_c + U_{ce0}) I_c \tag{1-2}$$

式中，U_{ce0} 是 IGBT 的阈值电压，可以根据器件特性曲线得到。

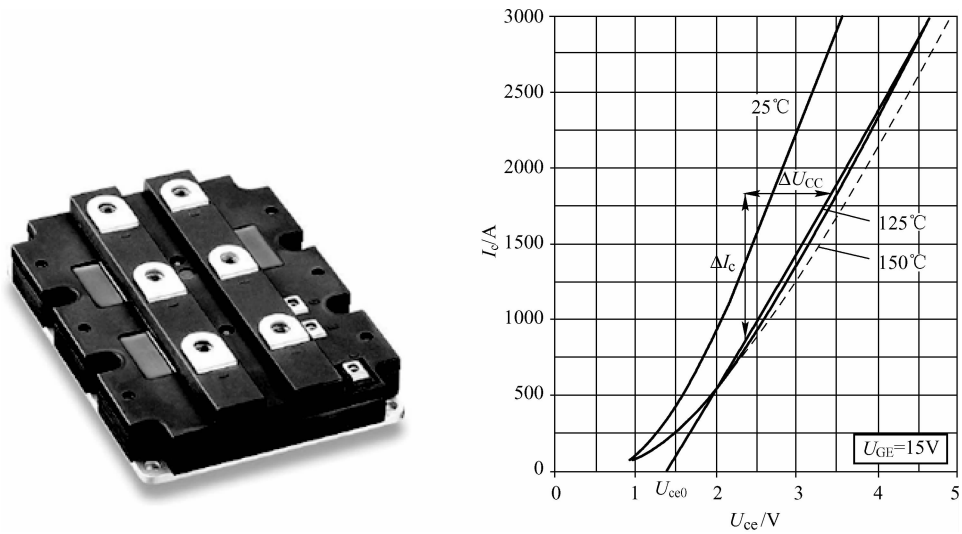


图 1-3　ABB 5SNA 1500E330300 的 $U_{ce(sat)}$ －I_c特性曲线[24]

同样，可以由二极管通态电阻 R_D，阈值电压 U_{Do}、流经电流 I_D 和结温得到二极管通态损耗

$$P_{Don} = (R_D I_D + U_{Do}) I_D \tag{1-3}$$

可知，开关器件的通态损耗主要由器件特性、通过的电流和结温所共同决定。

考虑到 IGBT 通常工作在 PWM（脉冲宽度调制）状态，在器件的占空比为 d 时，其近似通损耗可以简化为

$$P_{SAT} = U_{ce(sat)} I_c d = (R_{ce} I_c + U_{ce0}) I_c d \tag{1-4}$$

（2）开关损耗计算

IGBT 出现开关损耗的原因是因为在其开通和关断瞬间电流和电压存在重叠期。多年来大量文章对开关损耗进行了讨论，这里不再赘述。通过精确的计算，可以通过测量开关过程中 U_{ce}和 I_c 的波形，对其进行积分（积分时间分别是开通周期 T_{on}或关断周期 T_{off}）进行。IGBT 的工作过程如图 1-4 所示。

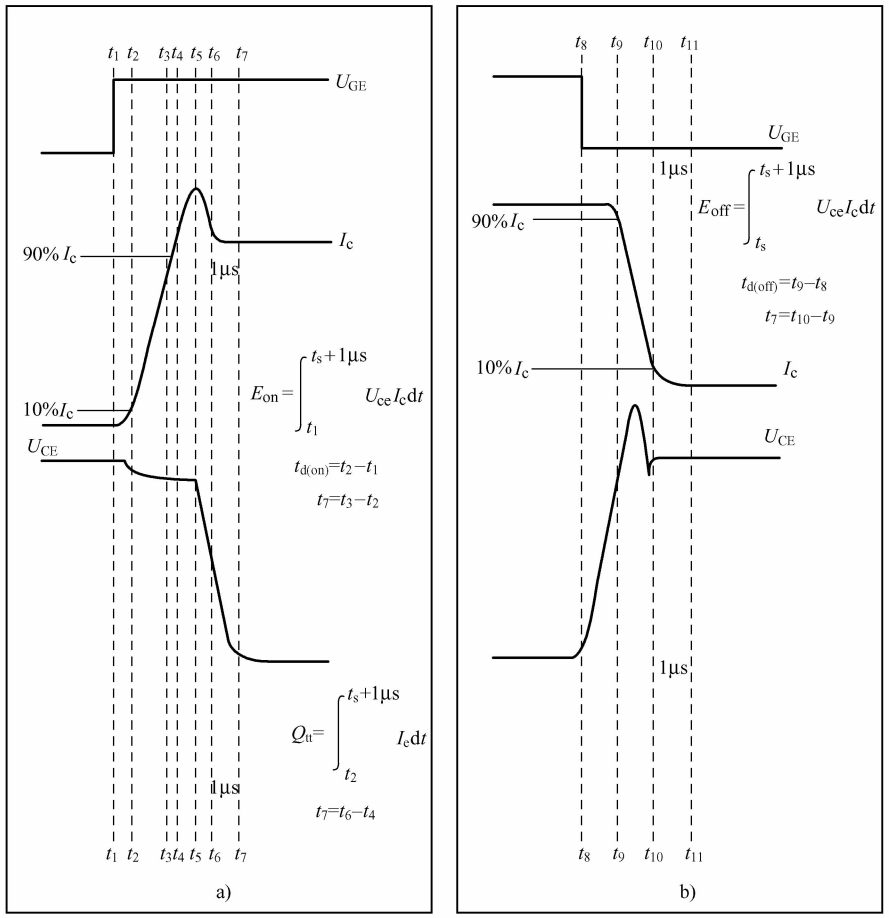


图 1-4　IGBT 的工作过程

a）开通过程　b）关断过程

（3）开通损耗和关断损耗

开通损耗为

$$P_{sw(on)} = \frac{1}{T_{on}}\int_0^{T_{on}} i_c(t)U_{ce(sat)}(t)\,dt \tag{1-5}$$

关断损耗为

$$P_{sw(off)} = \frac{1}{T_{off}}\int_0^{T_{off}} i_c(t)U_{ce(sat)}(t)\,dt \tag{1-6}$$

在一个周期中，IGBT 自身的开关损耗是开通与关断过程所损耗能量之和。而 IGBT 平均开关损耗可以将单位脉冲开关损耗与开关频率f_{pwm}相乘后得到，即

$$\overline{P}_{sw} = f_{pwm}(P_{sw(on)} + P_{sw(off)}) \tag{1-7}$$

实际上由于厂家在器件说明书中都会有如图 1-5 所示的损耗——集电极电流特性曲线，因此完全可以通过该曲线来对损耗进行估算。此时可通过实际工作电流查出每次开通和关断所消耗的能量E_{on}、E_{off}来计算 IGBT 的平均开关损耗：

$$\overline{P}_{sw} = f_{pwm}(E_{on} + E_{off}) \tag{1-8}$$

而 IGBT 自身的总损耗是通态损耗和开关损耗之和，即

$$\overline{P}_{\mathrm{IGBT}}=\overline{P}_{\mathrm{sat}}+\overline{P}_{\mathrm{sw}} \tag{1-9}$$

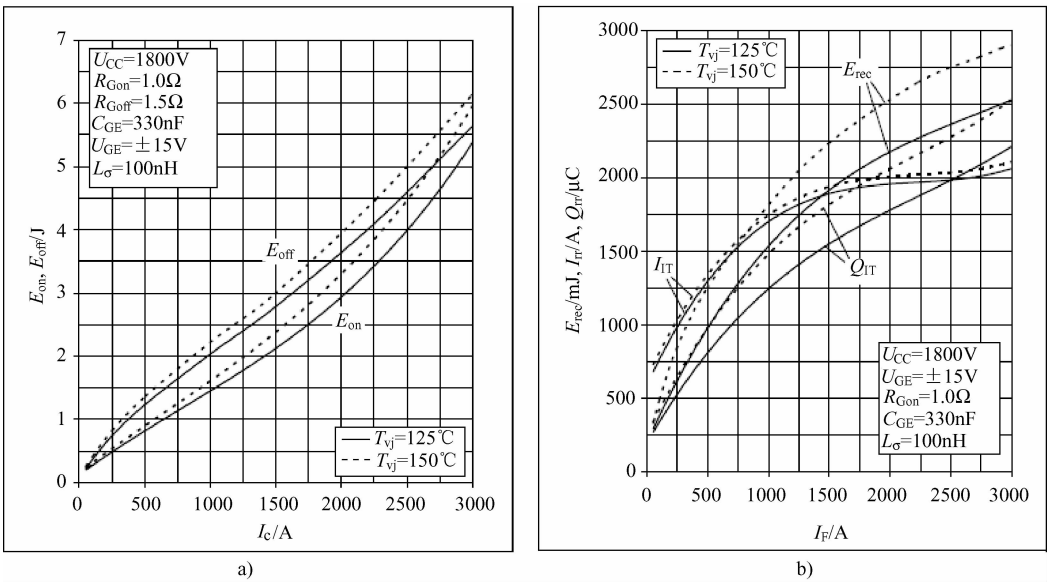


图 1-5　典型开关能量与各电流的关系

a）典型开关能量与集电极电流的关系　b）典型反向特性与正向电流的关系

注：ABB 5SNA 1500E330300，额定电压 3300 V，额定电流 1500 A

注意到实际工作点与数据表给出的测试条件存在的差异，在采用 PWM 状态下可以用线性化的方法加以近似，此时 IGBT 导通损耗和开关损耗分别可表示为

$$P_{\mathrm{SAT}}=\frac{1}{2}\left(U_{\mathrm{ce0}}\frac{I_{\mathrm{c}}}{\pi}+R_{\mathrm{ce}}\frac{I^2}{4}\right)+m\cos\varphi\left(U_{\mathrm{ce0}}\frac{I_{\mathrm{c}}}{8}+R_{\mathrm{ce}}\frac{I^2}{3\pi}\right) \tag{1-10}$$

$$P_{\mathrm{SW}}=\frac{1}{\pi}f_{\mathrm{SW}}(E_{\mathrm{on}}+E_{\mathrm{off}})\frac{I_{\mathrm{c}}}{I_{\mathrm{nom}}}\frac{U_{\mathrm{dc}}}{U_{\mathrm{cc}}} \tag{1-11}$$

式中，m 为输出电流的调制比；φ 为输出信号电压与电流之间的相位差。

对于与其并联的二极管，作为其固有特性的反向恢复，即在 IGBT 由正向导通转为反向阻断瞬间所出现的通过反向电流然后再恢复反向阻断的现象同样会消耗一定的能量 E_{rec}。在忽略其开通损耗的条件下，其关断损耗可以利用二极管反向恢复所消耗的能量 E_{rec}，表示为

$$\overline{P}_{\mathrm{Dsw}}=\frac{1}{\pi}f_{\mathrm{pwm}}\left[E_{\mathrm{rec}}I_{\mathrm{CN}}\left(0.45\frac{I_{\mathrm{c}}}{I_{\mathrm{CN}}}+0.55\right)\right]\frac{U_{\mathrm{dc}}}{U_{\mathrm{EN}}} \tag{1-12}$$

式中，I_{CN}、U_{EN}分别为额定电流与额定电压。

相应的二极管通态损耗可以写为

$$\overline{P}_{\mathrm{Don}}=\frac{1}{2}\left(U_{\mathrm{ce0}}\frac{I_{\mathrm{c}}}{\pi}+R_{\mathrm{ce}}\frac{I^2}{4}\right)-m\cos\varphi\left(U_{\mathrm{ce0}}\frac{I_{\mathrm{c}}}{8}+R_{\mathrm{ce}}\frac{I^2}{3\pi}\right) \tag{1-13}$$

综上所述，整个 IGBT 的损耗可以记为

$$\overline{P}_{\mathrm{I}}=\overline{P}_{\mathrm{SAT}}+\overline{P}_{\mathrm{sw}}+\overline{P}_{\mathrm{Don}}+\overline{P}_{\mathrm{Dsw}} \tag{1-14}$$

英飞凌在其网站给出了一个器件在输出电流为正弦时各部分损耗特性（见图 1-6），可以作为参考。

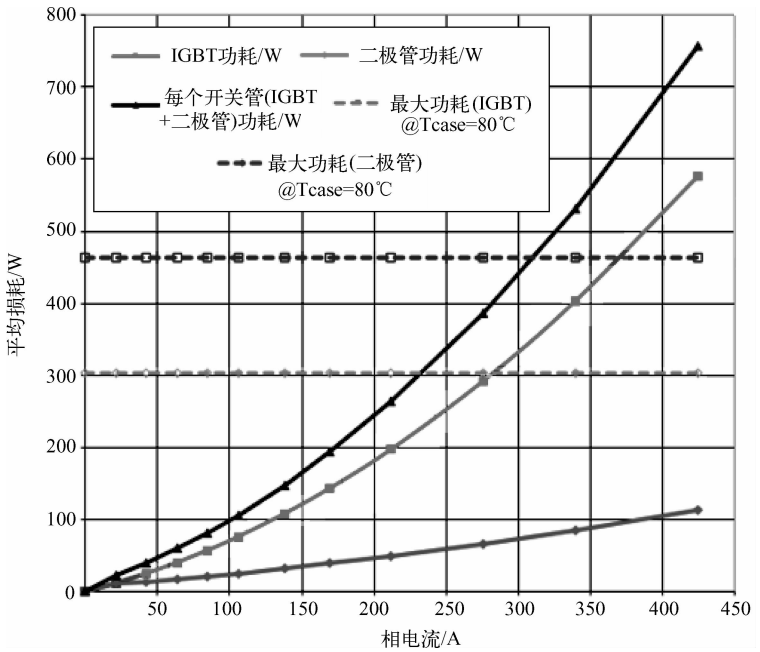


图 1-6　IGBT 功耗与相电流的关系

文献［25］对厦门柔性直流系统拟采用的 ABB HiPak 5SNA 1500E330305IGBT 模块损耗的进行了仿真计算，见表 1-2。计算结果表明，该模块在逆变工况时损耗高达 4648.4 W，其中 IGBT 损耗达到 3990.3 W，占换流器损耗的 85.84%，其中下臂单个 IGBT 的功耗就达 3370 W（注意占到整个模块功耗的 72.5%，相应的结温高达 128.4℃，对于结温限定为 150℃以下的器件，必须注意其散热问题）。而在整流工况时，二极管的损耗 2813.1 W 达整个损耗 3734.1 W 的 75.33%。其中下臂二极管的功耗占整个损耗的 63.74%。所以该模块下臂器件的冷却应当加以充分的关注，比如将下臂对应的器件安装在水冷板的进水侧。

表 1-2　损耗与结温[25]

开关器件	逆变状态		整流状态	
	损耗/W	结温/℃	损耗/W	结温/℃
T_1	620.3	80.85	835.4	84.6
D_1	594.5	90.80	433.1	85.2
T_2	3370.0	128.40	85.6	71.5
D_2	63.6	72.20	2380.0	153.3
总损耗	4648.4		3734.1	

文献［26］给出了另一个用于柔性直流系统，采用 5SNA1200E250100 器件构成的两电平换流器损耗的计算例，见表 1-3。可以看出 IGBT 总损耗占换流器损耗的近 80%，而由于开关频率较低所以 IGBT 开关损耗与通态损耗的值几乎相等，这与常规变流器有相当大的不同。

而在输送 75MW 有功功率时，阀体损耗高达 0.944MW，即 1.26%；而且上述损耗均将

变成热能，不可避免地导致阀体温度的上升，所以对运行可靠性的影响也是一个不可忽略的因素。由于两者计算的条件和对象不同，所以结果也有一定差异，但从不同侧面反映了IGBT模块工作时的特性，为系统设计提供了重要的参考。

表 1-3　额定状态下 IGBT 换流器损耗[26]

损 耗 构 成	损耗/MW	百分比（%）
IGBT 通态损耗	0. 3637	38. 25
二极管通态损耗	0. 03526	3. 734
IGBT 开关损耗	0. 3627	38. 41
二极管开关损耗	0. 1825	19. 32
总损耗	0. 9441	

1. 2. 2　晶闸管损耗计算

对于晶闸管而言，由于其开通时工作于强烈的正反馈状态，可以迅速实现完全导通，再加上工作于电网频率下，所以开通和扩散损耗均很小。而其关断由于发生在当工作电流小于维持电流时，以 ABB 5STP12K6500 晶闸管为例，该器件的平均通态电流达 1370A，维持电流在结温 25℃时为 125 mA，而结温升到 125℃时更降为 75 mA，再考虑到其导通时通态电压仅 2. 12 V，所以关断损耗同样很小。其工作过程中的主要损耗来源于完全导通时晶闸管通态压降引起的通态损耗。该损耗可以简单地用负荷电流乘以通态压降进行估算。但在实际中，工作电流并不是一个宽度为 120℃的理想矩形，再加上器件正向压降是电流的非线性函数，直流电流的脉动和换向重叠均影响到实际损耗。在 IEEE 推荐的高压直流（HVDC）晶闸管阀的损耗计算中，通态损耗 W_1 可以由下式给出：

$$W_1 = \frac{N\overline{U}_0 I}{3} + \frac{N\overline{R}_0}{3}(I^2 + \sum I_n^2)\left(\frac{2\pi - \mu}{2\pi}\right) \tag{1-15}$$

式中，I 为直流平均电流；N 为阀体中串联的晶闸管个数；$\overline{U}_0$ 为晶闸管通态平均电压值（与电流无关）；$\overline{R}_0$ 为正向导通电阻（5STP12K6500 为 0. 632mΩ）；I_n为直流侧各次谐波的有效值；μ 为换相角。

这里，由于 HVDC 系统一般采用 12 脉动桥，直流侧的谐波次数是 12 的整数倍，并且高次谐波衰减很快可以忽略，所以谐波含量有限，故采用谐波分量叠加的方式进行计算[27]。

而对于相控整流而言，由于谐波含量丰富，上述方法计算十分复杂，而 IEEE 在其 SVC 标准中，对相控晶闸管阀的损耗根据触发延迟角，实际就是谐波含量的不同给出如下计算公式[28]：

（1）晶闸管阀通态损耗为

$$P_{\text{cvalve}} = 3 \times 2 \times [n(U_{\text{TO}} I_{\text{TAV}} + r_{\text{T}} I_{\text{TRMS}}^2) + R_{\text{busbar}} I_{\text{TRMS}}^2] \tag{1-16}$$

式中，I_{TRMS}为晶闸管电流的有效值，且

$$I_{\text{TRMS}} = I_{\text{TCR}} \sqrt{\frac{(\pi - \alpha) \times [1 + 2\cos^2(\pi - \alpha)] - 1.5\sin[2(\pi - \alpha)]}{\pi}} \tag{1-17}$$

I_{TAV}为晶闸管的平均电流，且

$$I_{TAV}=I_{TCR}\frac{\sqrt{2}}{\pi}[\sin(\pi-\alpha)-(\pi-\alpha)\cos(\pi-\alpha)] \tag{1-18}$$

n 为阀体中串联的晶闸管数目；U_{TO} 为晶闸管的阈值电压；r_T 为晶闸管通态斜率电阻；R_{busbar} 为阀两端的直流电阻；I_{TAV} 为晶闸管平均电流；I_{TCR} 为晶闸管阀全导通时晶闸管控制电抗器（Thyristor Controlled Reactor，TCR）中基波电流的有效值；α 为 TCR 的控制角（$\pi/2\leqslant\alpha\leqslant\pi$）。

（2）晶闸管触发导通时的扩散损耗

对于 TCR 阀，假设每个触发脉冲触发时的触发损耗典型值为 0.2 J（因晶闸管而异有差别），则

$$P_{Tswon}=3\times2\times n\times0.2\times freq \tag{1-19}$$

晶闸管压降与工作电流的关系如图 1-7 所示。

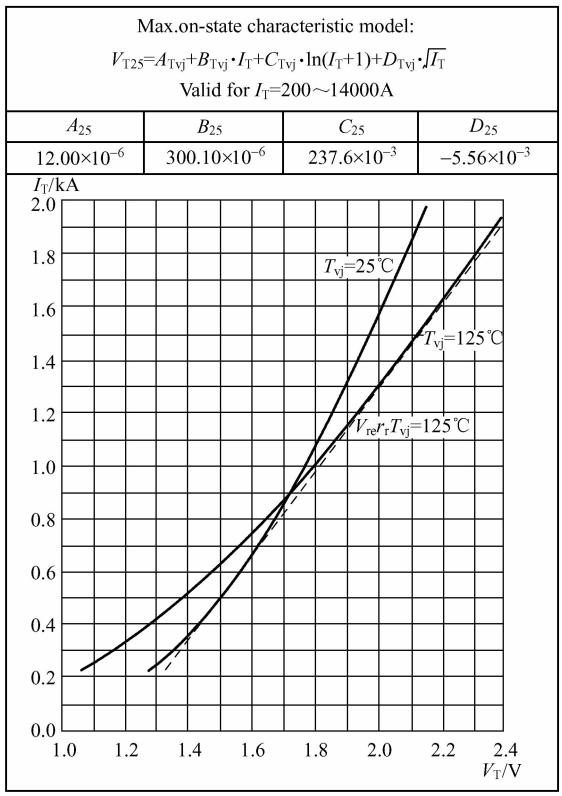


图 1-7　晶闸管压降与工作电流的关系

1.2.3　TCR 阀触发关断损耗

TCR 阀触发关断损耗为

$$P_{Tswoff}=3\times2\times Q_{rr}\times\sqrt{2}\times U_1\times\sin\alpha\times freq \tag{1-20}$$

式中，Q_{rr} 为晶闸管恢复电荷；U_1 为阀端基波电压有效值；$freq$ 为电网基波频率。

应当指出，根据式（1-20）计算损耗仍然是一件相当困难的事，所以实践中有许多简