



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

模拟电路设计 —— 鲁棒性设计、Sigma-Delta转换器、 射频识别技术

**Analog Circuit Design
Robust Design, Sigma Delta Converters, RFID**

[比利时] 赫尔曼·卡西耶 (Herman Casier)

[比利时] 米歇尔·斯泰亚特 (Michiel Steyaert) 主编

[荷兰] 阿瑟·范·罗蒙德 (Arthur H.M. van Roermund)

娄尧林 吴晨曦 沈 洋 译

非
外
借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

模拟电路设计—— 鲁棒性设计、Sigma-Delta 转换器、射频识别技术

[比利时] 赫尔曼·卡西耶 (Herman Casier)

[比利时] 米歇尔·斯泰亚特 (Michiel Steyaert)

主编

[荷兰] 阿瑟·范·罗蒙德 (Arthur H. M. van Roermund)

娄尧林 吴晨曦 沈 洋 译

机械工业出版社

Translation from English language edition:

Analog Circuit Design

by Herman Casier, Michiel Steyaert and Arthur H. M. van Roermund

Copyright © 2011 Springer Netherlands

Springer Netherlands is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

This title is published in China by China Machine Press with license from the Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-1409 号

图书在版编目（CIP）数据

模拟电路设计：鲁棒性设计、Sigma-Delta 转换器、射频识别技术/（比）赫尔曼·卡西耶等主编；娄尧林，吴晨曦，沈洋译. —北京：机械工业出版社，2017.9

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Analog Circuit Design: Robust Design, Sigma Delta Converters, RFID

ISBN 978-7-111-57517-7

I. ①模… II. ①赫… ②娄… ③吴… ④沈… III. ①模拟电路-电路设计 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 177895 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：赵玲丽 责任编辑：赵玲丽 责任校对：张 征

封面设计：马精明 责任印制：李 昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2017 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·19.25 印张·381 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-57517-7

定价：99.00 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 金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

本书收录了第19届高级模拟电路研讨会上18位演讲者的发言稿，每一个部分都讨论了有关模拟电路设计特定领域的最新主题与极富价值的设计理念。每一部分内容的发言稿都由本领域内的六位专家来陈述，并负责分享当前最新的技术资讯。本书主要内容包括鲁棒性设计、Sigma-Delta 转换器以及射频识别技术。

对于投身于模拟电路设计领域且希望跟踪本领域最新技术的研究人员而言，本书是一本不错的参考文献。本书所涵盖的内容也适用于高级电路设计课程。

译者序

模拟电路设计广泛应用于电力、交通、工业控制、信息技术、军事航空等领域，已成为电子技术类大中专学生的基本教学内容之一。本书并不是严格意义上的专业书籍，它是由赫尔曼·卡西耶（Herman Casier）、米歇尔·斯泰亚特（Michiel Steyaert）、阿瑟·范·罗蒙德（Arthur H. M. van Roermund）三位专家将第19届高级模拟电路研讨会上的论文进行统稿出版。各章节的作者均为来自模拟电路领域内的顶级专家和资深工程师，与读者一同分享模拟电路领域内当前最新的工艺、技术。

本书涵盖三大主题，分别为鲁棒性设计、Sigma-Delta 转换器以及射频识别技术。本书理论讲述深入浅出，内容精炼、信息量大、行文风格简练平实，围绕这三大主题向读者深入介绍了当前最新的研究成果。其中，第1部分深入讨论了在辐射以及传导性电磁兼容性的背景下，在纳米技术中以及高温高电压环境下的电路鲁棒性问题。第2部分则主要讨论了 Sigma-Delta 转换器的最新进展，不仅包括了连续时间拓扑技术中的采样数据，还涵盖了诸如对基于压控振荡器（VCO）与比较器的拓扑技术分析。第3部分有关射频识别技术的介绍是从历史、市场、应用、标准、隐私问题和规则等不同角度来进行的。

虽然我们生活在数字处理技术越来越普及的现实世界，但是在数字世界中，某些子系统的设计必须以对应的模拟系统为基础。为了提升人们对模拟电路设计发展热点的重视程度，本书的及时引进、翻译与出版相信能够为广大读者提供一个了解国外模拟电路设计发展的窗口。在此感谢原书作者精辟的论述，感谢机械工业出版社慧眼识书，同时感谢为本书的顺利成稿而付出辛勤工作的朋友们！本书在翻译过程中，图形符号均遵照原书，未按我国标准统一修订。由于模拟电路设计领域相关的理论、技术发展迅速，加之译者水平和时间有限，译文中的错误和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

译者

原 书 前 言

本书包含了在第 19 届高级模拟电路研讨会上各位演讲者的发言稿，该研讨会由来自格拉茨技术大学的沃尔夫冈·普里比尔组织发起，于 2010 年 3 月 23 日~25 日在格拉茨技术大学的大礼堂举行。

本书包括三个部分，共 18 篇论文。每个部分都涵盖了有关模拟电路设计时下热门的讨论。每一篇论文都由本领域内的专家来陈述，并分享当前最新的工艺技术水平。

第 19 届高级模拟电路研讨会的议题为：

- 1) 鲁棒性设计；
- 2) Sigma-Delta 转换器；
- 3) 射频识别技术 (RFID)。

研讨会的目的是将模拟电路设计领域的专家级设计人员汇聚在一起，共同研究、讨论本领域内新的技术可能性以及未来的发展。对于那些在模拟电路设计领域且想跟踪本领域最新技术的人员而言，本书是一本不错的参考文献。

我们真诚地期望本书能够为模拟电路设计领域带来有价值的贡献。

Herman Casier

贡 献 者

Massimo Abrate

地址：Centro Ricerche FIAT S. C. p. A. , Strada Torino 50, 10043 Orbassano, Torino, Italy

Nick A. J. M. van Aerle

地址：Polymer Vision, Eindhoven, The NetherlandsASML, Veldhoven, The Netherlands

A. Asenov, 格拉斯哥大学电子电气工程系

地址：Glasgow G12 0LT, UK

Raymond Barnett

地址：Texas Instruments, Texas, USA

Henri Barthel

地址：GS1 Global Office, Brussels, Belgium

Andrea Baschirotto

地址：Department of Physics “G. Occhialini”, University of Milano Bicocca, Milano, Italy

电邮：andrea.baschirotto@unimib.it

Monique J. Beenhakkers

地址：Polymer Vision, Eindhoven, The Netherlands

Treror C. Caldwell

地址：Analog Devices, University of Toronto, Toronto, Canada

B. Cheng

地址：Glasgow G12 0LT, UK

Wolfgang Clemens

地址：PolyIC GmbH & Co. KG, Tucherstraße 2, 90763 Fürth, Germany

Vittorio Colonna

地址：Marvell, Pavia, Italy

电邮：vcolonna@marvell.com

VI

Nicolas Cordero

地址: Tyndall National Institute, Lee Maltings, Prospect Row, Cork, Ireland

Koen Cornelissens

地址: ESAT-MICAS, K. U. Leuven, Kasteelpark Arenberg 10, 3001 Leuven, Belgium

Paolo Del Croce

地址: Infineon Technologies AG, Siemensstrasse 2, 9500 Villach, Austria

电邮: paolo.delcroce@infineon.com

Wim Dehaene

地址 1: IMEC, Leuven, Belgium

地址 2: Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium

Bernd Deutschmann

地址: Infineon Technologies AG, Am Campeon 1-12, 85579 Neubiberg, Germany

电邮: bernd.deutschmann@infineon.com

V. Dhanasekaran

地址: Electrical and Computer Engineering, Analog and Mixed-Signal Center, Texas A&M University, College Station, TX, USA

Federico Faccio

地址: PH dept. , CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland

Francois Furthner

地址: TNO Science and Industry, Eindhoven, The Netherlands

Harald Gall

地址: austriamicrosystems AG, Tobelbaderstrasse 30, 8141 Unterpremstaetten, Austria

M. Gambhir

地址: Electrical and Computer Engineering, Analog and Mixed-Signal Center, Texas A&M University, College Station, TX, USA

Gabriele Gandolfi

地址: Marvell, Pavia, Italy

电邮: gabriele@marvell.com

Gerwin H. Gelinck

地址: TNO Science and Industry, Eindhoven, The Netherlands

Georges Gielen

地址: IMEC, Leuven, Belgium;

Katholieke Hogeschool Limburg, Diepenbeek, Belgium

Jan Genoe

地址: ESAT-MICAS, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium

电邮: gielen@esat.kuleuven.be

Paul Heremans

地址: Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium IMEC, Leuven, Belgium

Günter Hofer

地址: Infineon Technologies Austria AG, Graz, Austria

Mamun Jamal

地址: Tyndall National Institute, Lee Maltings, Prospect Row, Cork, Ireland

Reiner John

地址: Infineon Technologies AG, Am Campeon 1-12, 85579 Neubiberg, Germany

Jürger Krumm

地址: PolyIC GmbH & Co. KG, Tucherstraße 2, 90763 Fürth, Germany

Jan Kubik

地址: Tyndall National Institute, Lee Maltings, Prospect Row, Cork, Ireland

Edgard Laes

地址: ON Semiconductor Belgium BVBA, Senneberg, J. Monnetlaan, 1804 Vilvoorde, Belgium

Kyehyung Lee

地址: Conexant Systems, Newport Beach, CA 92660, USA

Lanny L. Lewyn

地址: Lewyn Consulting Inc., Laguna Beach, CA, USA

电邮: lanny@pacbell.net

VIII

C. -Y. Lu

地址：Electrical and Computer Engineering, Analog and Mixed-Signal Center, Texas A&M University, College Station, TX, USA

Elie Maricau

地址：ESAT-MICAS, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium

Albert Missoni

地址：Infineon Technologies Austria AG, Graz, Austria;
Graz University of Technology Institute of Electronics, Graz, Austria

Kris Myny

地址：IMEC, Leuven, Belgium;
Katholieke Hogeschool Limburg, Diepenbeek, Belgium;
Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium

Marco Ottella

地址：Centro Ricerche FIAT S. C. p. A. , Strada Torino 50, 10043 Orbassano, Torino, Italy

M. Onabajo

地址：Electrical and Computer Engineering, Analog and Mixed-Signal Center, Texas A&M University, College Station, TX, USA

Michael H. Perrott

地址：SiTime Corporation, Sunnyvale, USA
电邮：mhperrott@ gmail. com

Wolfgang Pribyl

地址：Graz University of Technology Institute of Electronics, Graz, Austria

Bas van der Putten

地址：TNO Science and Industry, Eindhoven, The Netherlands

J. Silva-Martinez

地址：Electrical and Computer Engineering, Analog and Mixed-Signal Center, Texas A&M University, College Station, TX, USA

Kafil M. Razeed

地址：Tyndall National Institute, Lee Maltings, Prospect Row, Cork, Ireland

F. Silva-Rivas

地址: Electrical and Computer Engineering, Analog and Mixed-Signal Center, Texas A&M University, College Station, TX, USA

Steve Smout

地址: IMEC, Leuven, Belgium

Soeren Steudel

地址: IMEC, Leuven, Belgium

Michiel Steyaert

地址: Dept. Elektrotechniek, ESAT-MICAS, K. U. Leuven, Kardinaal Mercierlaan 94, B-3001 Heverlee, Belgium

电邮: michiel.steyaert@esat.kuleuven.ac.be

Gabor C. Temes

地址: Oregon State University, Corvallis, OR 97331, USA

Ashutosh K. Tripathi

地址: TNO Science and Industry, Eindhoven, The Netherlands

Mitsuo Usami

地址: Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., 1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji-shi, 185-8601 Tokyo, Japan

电邮: mitsuo.usami.fc@hitachi.com

Jan Vcelak

地址: Tyndall National Institute, Lee Maltings, Prospect Row, Cork, Ireland

Ovidiu Vermesan

地址: SINTEF, Forskningsvn. 1, P. O. Box 124 Blindern, 0314 Oslo, Norway

Peter Vicca

地址: IMEC, Leuven, Belgium

Pieter De Wit

地址: ESAT-MICAS, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium

目 录

译者序
原书前言
贡献者

第 1 部分 鲁棒性设计

第 1 章 纳米 CMOS 技术中模拟集成电路的可靠性建模与设计	3
Georges Gielen, Elie Maricaud 和 Pieter De Wit	
第 2 章 纳米 CMOS 技术中的统计变异性建模和模拟	14
A. Asenov 和 B. Cheng	
第 3 章 纳米尺度模拟 CMOS 的高级物理设计	27
Lanny L. Lewyn	
第 4 章 高温高压应用环境下的健壮性设计	41
Ovidiu Vermesan, Edgard Laes, Marco Ottella, Mamun Jamal, Jan Kubik, Kafil M. Razeed, Reiner John, Harald Gall, Massimo Abrate, Nicolas Cordero 和 Jan Vcelak	
第 5 章 CMOS 技术中的辐射效应与加固设计	54
Federico Faccio	
第 6 章 智能功率高位开关电磁兼容性设计	70
Paolo Del Croce 和 Bernd Deutschmann	

第 2 部分 Sigma-Delta 转换器

第 7 章 噪声耦合 Delta-Sigma 模-数转换器 (ADC)	82
Kyeheung Lee 和 Gabor C. Temes	
第 8 章 甚低过采样率 Sigma-Delta 转换器	103
Trevor C. Caldwell	

第 9 章 基于比较器的开关电容 Delta-Sigma A-D 转换器	121
--	-----

Koen Cornelissens 和 Michiel Steyaert

第 10 章 基于 VCO 的宽带连续时间 Sigma-Delta 数-模转换器	138
--	-----

Michael H. Perrott

第 11 章 宽带连续时间多比特 Delta-Sigma ADC	160
--	-----

J. Silva-Martinez, C. -Y. Lu, M. Onabajo, F. Silva-Rivas, V. Dhanasekaran 和
M. Gambhir

第 12 章 过采样数-模转换器 (DAC)	180
------------------------------	-----

Andrea Baschiroto, Vittorio Colonna 和 Gabriele Gandolfi

第 3 部分 射频识别技术

第 13 章 RFID——一项在工业应用中蓄势待发的技术	205
------------------------------------	-----

Henri Barthel

第 14 章 世界上最小的 RFID 芯片技术	220
-------------------------------	-----

Mitsuo Usami

第 15 章 RF 和 RFID 的低功耗模拟设计	229
---------------------------------	-----

Raymond Barnett

第 16 章 一种双频带综合射频识别标签	247
----------------------------	-----

Albert Missoni, Günter Hofer 和 Wolfgang Pribyl

第 17 章 印刷电子学——电路、产品和路线图的首次提出	264
------------------------------------	-----

Jürgen Krumm 和 Wolfgang Clemens

第 18 章 EPC 兼容有机 RFID 标签	275
-------------------------------	-----

Kris Myny, Soeren Steudel, Peter Vicca, Steve Smout, Monique J. Beenhakkers,
Nick A. J. M. van Aerle, François Furthner, Bas van der Putten,
Ashutosh K. Tripathi, Gerwin H. Gelinck, Jan Genoe, Wim Dehaene
和 Paul Heremans

第 1 部分 鲁棒性设计

在奥地利格拉茨举办的高级模拟电路研讨会（AACD）上，与会专家第一天就讨论了电路鲁棒性设计的最新进展。这个话题早在 2003 年的 AACD 项目中就被提到过，地点恰恰也在格拉茨。该项目主要关注三个议题：①模拟智能电源以及射频应用中的静电放电问题。②汽车应用领域中的电磁兼容性问题。③衬底耦合问题。而 2010 年的会议项目深入讨论了：①在高温高压环境下；②在纳米技术中；③在辐射以及传导性电磁兼容性的背景下的电路鲁棒性问题。

上面提到的前三个议题，主要解决的是纳米电路技术中鲁棒性设计问题中的三个不同方面。第一个议题着重利用分析工具和设计手段解决在纳米级 CMOS 模拟电路技术中出现的变异性和可靠性问题。通过一种工具来评估退化对于电路功能表现的影响，并识别发现不可靠的节点。这种方式也展示了数字技术如何协助模拟电路设计，并提升模拟电路对变异性和电路退化的抵抗力。

第二个议题则将重点放在纳米级 CMOS 电路的统计变异性上。该议题讨论了电子和粒子的不连续性、原子尺度的不均匀性和物质的粒度，描述了这些性质对晶体管参数以及在亚-45nm 技术中使用的 SRAM 单元（对变异性敏感）的预期影响。实验表面一个七参数的统计 BSIM 模型可以实现对物理模拟装置的特性进行精确拟合。

第三个议题则选择研究物理学因素的影响，例如其对亚-100nm CMOS 模拟设计的负面影响，并提出了削弱或者解决这一影响的具体方法。这些方法证明，在鲁棒性设计中既要求在电路设计层面中设置限制，又要求在物理学设计上对布局设计进行限制。以往的那种电路设计与物理学设计上无法弥合的差异必须用一种更为紧密的理论结合来取代。

第一段提到的后三个议题，则试图解决在不同的恶劣不利条件下的鲁棒性设计问题。第一个议题着重关注在电动和氢能源机动车辆电源系统中的高温高电压电力部件。而这个架构的便携性（涉及半导体、产品包装和材料技术）、对于自身的热-电模拟以及对可靠性的计算考量，是智能电源模块鲁棒性设计的三个最主要问题。

第二个议题则主要涉及现代深亚微米 CMOS 技术中设计辐射硬化和辐射影响问题。议题同时讨论了累积事件和单一事件的影响。依赖于 CMOS 具备辐射耐受性的天然属性，针对两种影响，本议题详细叙述了设计硬化技术。这些技术可以取代专门的辐射硬化技术，并成功地应用于对强辐射耐受性有要求的商用级尖端 CMOS 技术的鲁棒性设计当中。

最后一个议题则展示了标准化的直接功率注入测量工作台被应用于模拟环境的方法，并预测智能电源电路的电磁兼容免疫性强弱。基于引脚阻抗控制技术，该模拟环境可以用来优化高压智能电源开关的鲁棒性设计。实验的测量结果证明了这一方法的可靠性和准确性。

Herman Caiser

第 1 章 纳米 CMOS 技术中模拟集成电路的可靠性建模与设计

Georges Gielen, Elie Maricau 和 Pieter De Wit

1.1 引言

纳米 CMOS 技术不断地向更小尺度演进 (90nm、65nm、45nm 甚至更小)^[1], 为片上复杂系统 (SoC) 的设计注入了无尽动力, 比如在商用市场上电信和多媒体行业等领域的应用。这些集成系统越来越多地被设计为混合信号系统, 在一片芯片上承载高性能模拟或混合信号模块, 高灵敏度射频前端以及复杂的数字电路 (多核处理器、逻辑门、大型存储模块)。即使在研发异构系统级封装 (SiP) 时, 在数字电路的架构上依然会集成一些模拟模块。

而纳米 CMOS 技术的运用也为现实的电路设计 (无论模拟或数字) 带来了诸多前所未有的重要挑战。这些难题包括^[2]:

1) 受市场影响不断缩减的设计时间与设计质量间的矛盾。这个问题需要引入合理的电子设计自动化 (EDA) 方法和工具来提高设计者的设计效率 (比如使用模拟综合工具), 对于混合信号系统设计也基于同理。

2) 不断变化的技术细节及参数, 使之不再适配并产生相关问题。

3) 一些退化机制 (比如 NBTI 效应、热载子效应等) 的进一步激化, 以及受制于 EMC/EMI 规则造成的可靠性下降问题。

本章重点叙述如何利用分析工具以及相应设计手段来解决在模拟电路中出现的变异性和可靠性问题。在描述了退化现象后, 本章将提出一些工具对涉及的模拟电路进行详尽分析并找出可靠性问题之所在。另外本章对模拟电路动态重构相关的一些电路技术进行了描述, 这些技术可以让电路具备抵抗退化的性能。本章主要内容如下: 1.2 节简要叙述变异性和可靠性引起的电路性能退化。1.3 节概述了一个针对模拟电路的可靠性分析以及可靠性薄弱点侦测的方法, 此外, 还对变异性效应进行了详尽的延伸扩展。1.4 则呈现了动态电路的自适应技术, 使得电路具备抵抗退化的能力。这一概念用了一个使用设计范例来加以说明。最后 1.5 节进行总结。

1.2 变异性和可靠性引起的电路性能退化

模拟电路中出现的许多问题, 都来源于电路安装过程中的随机误差和系统误

差。这些误差代表了电路中的时不变可靠性问题。虽然随机误差在设计工程中无法预知，但这些误差可以在电路制造过程中得到充分补偿，经调试消除。另一方面时变退化则来源于晶体管随时间的退化，造成电路性能的不断变化，最终可能使得具备完善功能的电路完全丧失效力。同时，一些干扰源，诸如电磁干扰、衬底噪声耦合等，也会使健康电路完全失效，但是这种失效不是永久性的，所以本章暂不讨论这些失效因素。接下来我们将详细地描述变异性 and 可靠性带来的影响。

1.2.1 变异性 and 失谐

随机误差，通常也称为变异性，是物理过程中的随机性特征造成的，通常发生在集成电路的安装制造过程，比如线边缘粗糙度和随机掺杂波动。而模拟电路设备与理论模型的失谐是制约其性能精确性的重要因素。比如，理想晶体管间一阶阈值电压失谐值 ΔV_T 与动态范围 WL 之间的关系可记为^[3, 4]

$$\sigma^2(\Delta V_T) = \frac{A_{VT}^2}{WL} + S_{VT}^2 D^2 \tag{1.1}$$

这里 A_{VT} 和 S_{VT} 为过程依赖常数， D 为部件间距。不巧的是，由式 (1.1) 可知，失谐的程度与部件的面积呈负相关的关系，只能是将器件做大，随之而来的是相同运算能力下占用更大的片上体积和更高的能耗。

另外，如图 1.1 所示，Tuinhout 发现虽然一直以来人们都利用缩放技术来改善失谐，但是在栅氧化层厚度小于 10nm 时，这种方案似乎遇到了瓶颈，并意味着该方法无法进一步提高电路的性能。这将削弱缩放技术在模拟集成电路当中的应用优势。

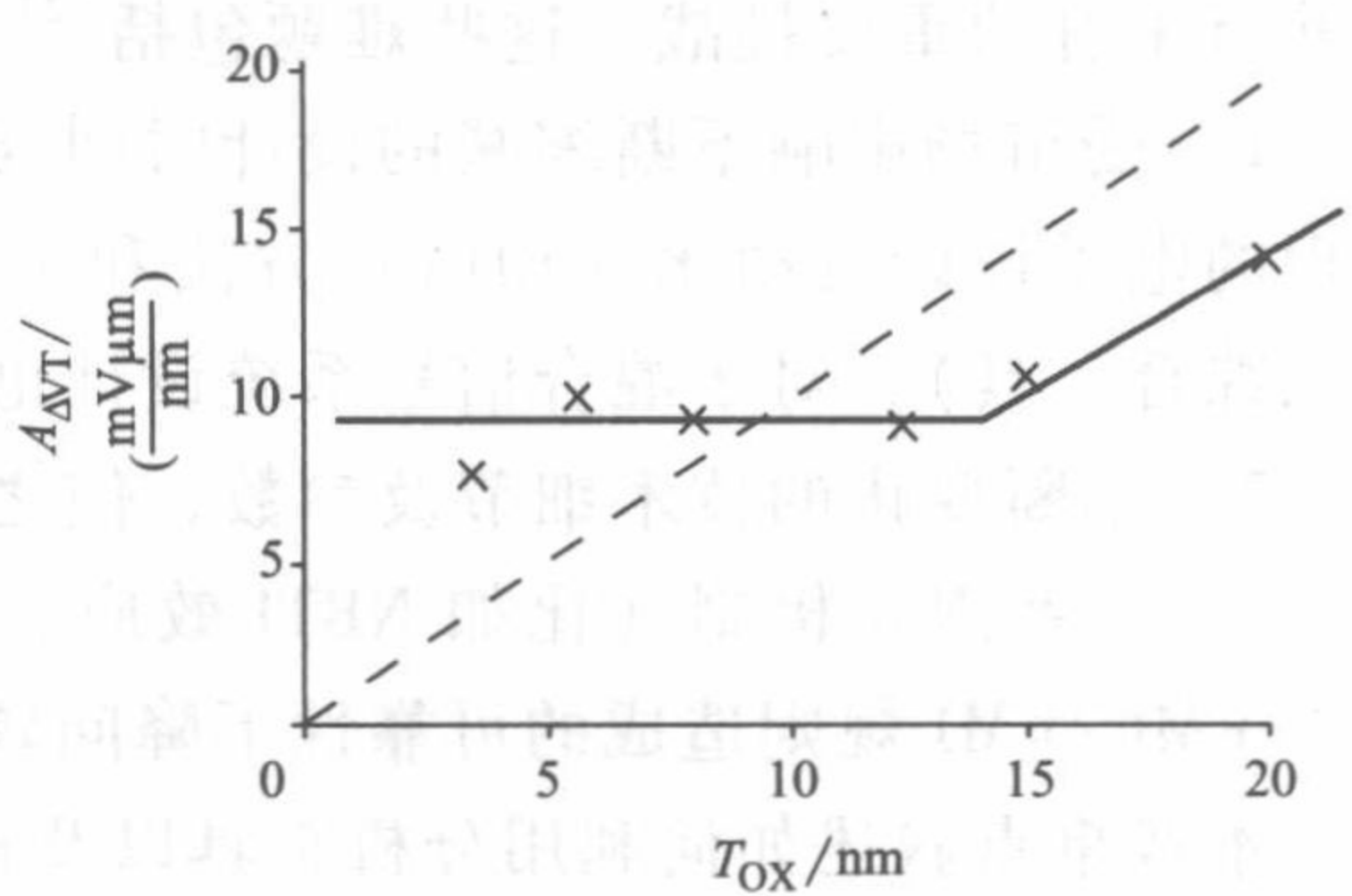


图 1.1 阈值电压失谐参数与栅氧化层函数关系的变化曲线 ($A_{\Delta VT}$ 为式 (1.1) 中描述阈值电压失谐的参数)，数据来自参考文献 [5]

1.2.2 时变退化

随着时间的变化，时变退化会改变晶体管的参数 (V_T , β , r_o 是关于时间的函数)，从而使健康的电路失去甚至彻底丧失正常功能^[6]。这类退化往往与器件的荷载有关，比如施加在晶体管上的电压与电流，或晶体管尺寸和温度。图 1.2 展现了这些情况在任意时间内对 MOS 器件 $I_{ds}-V_{ds}$ 关系的影响。一些最主要的退化机制会在下面进行更详尽的讨论。

1.2.2.1 时变介质击穿

在超大规模 MOSFET 中，强电场会穿过栅氧化层使得氧化层遭到破坏并导致介质击穿，比如氧化层绝缘性能的下降。介质击穿现象发生在一个非常局部的位置：额外的电流会穿过栅氧化层的一片小型区域。在氧化层发生击穿之前，通常会