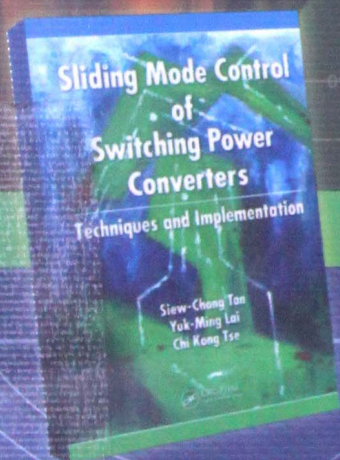




CRC Press
Taylor & Francis Group

电力电子变换器 的滑模控制 技术与实现

Sliding Mode Control of Switching Power Converters
Techniques and Implementation



Siew-Chong Tan
Yuk-Ming Lai 著
Chi Kong Tse

王晓刚 张杰 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电力电子变换器的滑模控制 技术与实现

- Siew – Chong Tan(陈秀聪)
Yuk – Ming Lai(黎沃铭) 著
Chi Kong Tse(谢智刚)
- 王晓刚 张杰 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书首先介绍了滑模控制的基本原理,并对滑模控制在电力电子变换器中的研究现状做了综述。随后的内容分为3部分:基于滞环调制的滑模控制、PWM滑模控制、带电流控制滑动流形的滑模控制等新型滑模控制。对于每种控制器,本书中均给出了详细的分析和设计过程,并用模拟电路实现,具有较强的实用价值。本书适合电气工程、电子工程和自动控制专业的研究生和学者阅读,还可以作为开关电源设计人员的参考书籍。

Siew-Chong Tan, Yuk-Ming Lai, Chi Kong Tse

Sliding Mode Control of Switching Power Converters Techniques and Implementation

ISBN:978-1-4398-3025-3

Copyright© 2012 by Taylor&Francis Group, LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved;

Publishing House of Electronics Industry is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究。本书中文简体翻译版授权由电子工业出版社独家出版并在限在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2012-3037

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子变换器的滑模控制技术与实现 / 陈秀聪, 黎沃铭, 谢智刚著; 王晓刚, 张杰译. —北京: 电子工业出版社, 2012. 8

书名原文: Sliding Mode Control of Switching Power Converters Techniques and Implementation

ISBN 978-7-121-17872-6

I. ①电… II. ①陈… ②黎… ③谢… ④王… ⑤张… III. ①电能-变换器 IV. ①TN712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 187237 号

责任编辑: 柴 燕 (chaiy@phei.com.cn)

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720 × 1000 1/16 印张: 14.5 字数: 300.7 千字

印 次: 2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 48.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

序

随着电源和电气/电子负载的特性变得越来越多样化、非线性和不可预测，为变换器提供必要功率处理功能的变换器控制将在性能优化和维持各种工作条件下所必需的鲁棒性方面扮演关键的角色。人们发现基于小信号线性技术的常规控制方法无法使这些系统获得所需的调节性能、动态响应和稳定性，并在研究能够满足电力电子变换器系统这种复杂要求的先进控制方法方面做了大量的研究。特别是滑模控制、模糊控制、自适应控制等现代控制理论已经应用于这类系统的控制中，它们的可行性也得到了研究。其中，滑模控制得到的研究最为广泛。研究表明，滑模控制对当前和未来电力电子变换器而言均是一种非常有前景的控制方法。

为了顺应这种发展趋势，并且利用滑模控制理论框架已经较为成熟的优点，现在对电力电子变换器的滑模控制器进行全面的介绍正是时候。本书对这种控制器进行了深入而全面的介绍，要点是如何实现实际的工程化设计，使其适合于电力电子变换器的控制。目前，相关知识的介绍是及时而必要的，特别由于电子工业具有使用可再生能源的趋势且负载的差异越来越大，只有使用非线性控制器才能足以满足要求。

作者在写作本书时考虑了如下目标。首先，作者旨在为一般读者提供滑模控制在电力电子变换器系统中应用原理和方法的全面介绍。此外，对于更高级的读者，作者将为他们系统论述构造滑模控制器的数学机理和设计原理，在此基础上，介绍设计这类控制器的新型实践性方法。本书的第三个目标是介绍基于模拟电路的滑模控制器实现方法和相关的设计准则。最后使读者从实际角度理解非线性控制，在此过程中使用工程师日常交流时经常使用的术语。

总而言之，《电力电子变换器的滑模控制技术与实现》这本书将为读者理解滑模控制原理、滑模控制在电力电子变换器中的应用和滑模控制器的实际实现提供指导。通过将理论与应用结合，并将数学概念、模型与它们的工业目标联系起来，本书对模拟电路设计、电力电子技术或控制工程背景的读者而言同样具有可读性。我们相信本书将引起电气和电子工程领域学生和专业人员的兴趣。与此同时，我们也相信我们提出的电力电子变换器滑模控制器的建模和实现方法将帮助电力电子和 IC 产业的专业人员设计出有效和高性能的电力电子变换器控制器。

本书是按照如下方式组织的。首先，第 1 章将讨论滑模控制的基本原理和理论，使读者熟悉滑模控制的主要术语和背景。第 2 章将对电力电子变换器及其控制方法进行综述，此外还简要讨论常用的控制技术以及当前电力电子变换器控制技术的研究进

展。第3章将着重介绍与滑模控制器在电力电子变换器中应用相关的重要概念、工作原理和特性，还将详细介绍电力电子变换器滑模控制器的最新研究成果和一般设计过程。

随后，第4章将介绍电力电子变换器滞环调制滑模控制器的实际设计过程。第5章将全面讨论传统滑模控制因工作条件偏移引起的开关频率变化问题，以及将自适应控制应用于滑模控制解决上述问题的有效性。第6章将介绍连续导电模式电力电子变换器定频滑模控制实现的实用技术。紧接着，第7章进一步研究用等效控制实现定频滑模控制器的方法，包括断续导电模式变换器系统模型和滑模控制律的推导。第8章将讨论扩展至脉冲宽度调制滑模控制器的设计和实际电路实现。

到此为止，本书的讨论集中于使用变换器输出电压作为控制变量，构造滑动流形的滑模控制器的设计与实现。第9章至第11章将滑模控制器的设计和实现扩展至具有非常规滑动流形的功率变换器，它们的滑动流形是由电流误差和电压误差用非线性方法构造的。第9章讨论基于电流误差和电压误差的滑模控制器的设计和实现。第10章讨论的重点是如何用减状态非线性滑动流形控制如Cuk变换器的高阶变换器。第11章讨论用于改善稳态调节能力的基于二重积分滑动面的非常规滑模控制器。

本书得以完成，作者必须真诚地感谢许多人和组织机构。首先感谢香港理工大学电子与信息工程系的所有朋友和同事，以及应用非线性系统研究小组的成员，感谢你们的友谊、支持和鼓励。特别感谢西班牙Tarragona Rovira i Virgili大学的Luis Martínez - Salamero教授，他不仅是一位伟大的朋友，还是我们部分研究工作的重要合作者。迄今为止，Luis是作者个人所知道的电力电子滑模控制领域最博学之人。作者还借此机会感谢Ashoka Bhat教授、Martin Chow博士、Adrian Ioinovici教授、Joe Liu博士、Franki Poon博士、Siu Chung Wong博士和Xinbo Ruan教授，他们都是电力电子各领域内的专家，作者有幸与他们共事，并且从他们身上学到了很多。作者还要感谢CRC出版社的职员，特别是Leong Li Ming女士和Amy Blalock女士，感谢她们为本书提供专业和热情的支持。如果没有香港研究资助局和香港理工大学研究委员会的财政支持，本书的研究工作将不可能完成。最后但同样重要的是，必须感谢作者的家人在作者整个学术研究过程中的支持和理解。

最后，很荣幸地将本书献给所有热情参与滑模控制和电力电子变换器控制工作的人们。

Siew - Chong Tan (陈秀聪)

Yuk - Ming Lai (黎沃铭)

Chi Kong Tse (谢智刚)

译者序

电力电子变换器的作用是完成各种电能变换，其应用越来越广泛。控制部分是整个系统的关键一环，在主电路拓扑相同的情况下，设计成功的控制器可以使变换器获得更理想的稳态和暂态性能。

目前，人们开始采用各种先进控制方法来满足功率变换系统的复杂要求。其中，滑模控制是20世纪50年代发展起来的一种非线性控制方法，其状态反馈控制率根据状态变量在状态空间中的当前位置以高频在一个连续结构和另一个连续结构之间切换，其目标是迫使被控系统的动态精确跟踪预先设定的期望动态。系统采用滑模控制后，可以保证在参数不确定的情况下获得稳定性和鲁棒性。另外，作为一种在设计选择中具有高度灵活性的控制方法，滑模控制相比于其他非线性控制方法更易于实现。因此，在多种先进控制方法中，滑模控制在电力电子变换器中得到了最为广泛的研究，其控制效果要优于模糊控制和自适应控制。

本书采用自上而下的方法讨论常规及新型滑模控制技术，内容涵盖从公式推导到用模拟电路实现的方方面面，具体内容和特点如下。

1. 全面综述了滑模控制的原理和方法。
2. 系统论述了滑模控制的数学机理和控制器的设计原理，随后介绍了新型滑模控制方法。
3. 论证了基于模拟电路的滑模控制器实现方法和设计规则。
4. 从实践角度为一般非线性控制的实现提供了指导，在写作时使用人们熟悉的工程性术语。

本书适合电气工程、电子工程和自动控制专业的研究生和学者阅读，还可以作为开关电源设计人员的参考书籍。

本书的翻译工作由广州大学副教授王晓刚博士完成，华南理工大学谢运祥教授审阅了本书并提出了宝贵的意见，在此表示感谢。广州大学的张杰、舒华、梁忠伟、张承云、肖忠、王建晖、黄高飞、蔡阳生、高星辉、林婷参与了本书的翻译。还要感谢电子工业出版社的柴燕编辑，她为本书的出版做了大量的工作。由于译者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

王晓刚
2012年6月

《电力电子变换器的滑模控制技术与实现》

读者调查表

尊敬的读者：

欢迎您参加读者调查活动,对我们的图书提出真诚的意见,您的建议将是我们创造精品的动力源泉。为方便大家,我们提供了两种填写调查表的方式:

1. 您可以登录 <http://yydz.phei.com.cn>,进入“读者调查表”栏目,下载并填好本调查表后反馈给我们。
2. 您可以填写下表后寄给我们(北京市海淀区万寿路173信箱电子技术分社 邮编:100036)。

姓名: _____ 性别: 男 女 年龄: _____ 职业: _____
电话: _____ 移动电话: _____
传真: _____ E-mail: _____
邮编: _____ 通信地址: _____

1. 影响您购买本书的因素(可多选):

- 封面、封底 价格 内容简介 前言和目录 正文内容
出版物名声 作者名声 书评广告 其他_____

2. 您对本书的满意度:

- | | | | | | |
|-------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 从技术角度 | <input type="checkbox"/> 很满意 | <input type="checkbox"/> 比较满意 | <input type="checkbox"/> 一般 | <input type="checkbox"/> 较不满意 | <input type="checkbox"/> 不满意 |
| 从文字角度 | <input type="checkbox"/> 很满意 | <input type="checkbox"/> 比较满意 | <input type="checkbox"/> 一般 | <input type="checkbox"/> 较不满意 | <input type="checkbox"/> 不满意 |
| 从版式角度 | <input type="checkbox"/> 很满意 | <input type="checkbox"/> 比较满意 | <input type="checkbox"/> 一般 | <input type="checkbox"/> 较不满意 | <input type="checkbox"/> 不满意 |
| 从封面角度 | <input type="checkbox"/> 很满意 | <input type="checkbox"/> 比较满意 | <input type="checkbox"/> 一般 | <input type="checkbox"/> 较不满意 | <input type="checkbox"/> 不满意 |

3. 您最喜欢书中的哪篇(或章、节)? 请说明理由。

4. 您最不喜欢书中的哪篇(或章、节)? 请说明理由。

5. 您希望本书在哪些方面进行改进?

6. 您感兴趣或希望增加的图书选题有:

邮寄地址: 北京市海淀区万寿路173信箱电子技术分社 柴燕 收 邮编: 100036
电 话: (010)88254448 E-mail: chaiy@phei.com.cn

目 录

第 1 章 滑模控制基础	(1)
1.1 简介	(1)
1.2 基本理论	(1)
1.3 滑模运动的性质	(3)
1.3.1 理想控制	(3)
1.3.2 实际限制因素和抖振	(3)
1.3.3 恒动态	(4)
1.3.4 准滑模控制	(4)
1.4 数学描述	(4)
1.4.1 到达条件	(5)
1.4.2 存在条件	(6)
1.4.3 稳定性条件	(6)
1.4.4 具有线性滑动流形的系统	(7)
1.4.5 具有非线性滑动流形的系统	(7)
1.5 等效控制	(9)
1.6 各种实现方法	(10)
1.6.1 继电器和正负号函数	(10)
1.6.2 滞环函数	(11)
1.6.3 等效控制函数	(11)
第 2 章 电力电子变换器及其控制综述	(13)
2.1 介绍	(13)
2.2 基本 DC - DC 变换器	(13)
2.3 DC - DC 变换器的工作模式	(14)
2.4 控制概述	(15)
2.5 影响控制性能的因素	(15)
2.5.1 开关频率	(15)
2.5.2 储能元件	(16)
2.5.3 控制增益	(16)

2.6	通用控制技术	(18)
2.6.1	滞环控制器	(18)
2.6.2	脉冲宽度调制控制器	(19)
2.6.3	设计方法	(20)
2.6.4	小信号模型和补偿存在的问题	(21)
2.7	各种新型控制方法	(21)
2.7.1	自适应控制	(21)
2.7.2	模糊逻辑控制	(22)
2.7.3	人工神经网络控制	(22)
2.7.4	单周控制	(22)
2.7.5	滑模控制	(23)
第3章	电力电子变换器的滑模控制	(24)
3.1	介绍	(24)
3.2	文献综述	(24)
3.2.1	早期文献	(24)
3.2.2	高阶变换器	(24)
3.2.3	并联变换器	(25)
3.2.4	理论性文献	(25)
3.2.5	应用性文献	(26)
3.2.6	定频滑模控制器	(27)
3.2.7	附注	(27)
3.3	滑模控制在 DC-DC 变换器中应用的特性	(28)
3.3.1	滑模控制实现的一般性原理	(29)
3.3.2	电力电子变换器的恒动态	(30)
3.3.3	电力电子变换器的准滑模控制	(30)
3.3.4	基于滞环调制的常规实现方法	(30)
3.4	电力电子变换器中的定频滑模控制器	(31)
3.4.1	基于脉冲宽度调制的滑模控制器	(32)
3.4.2	占空比控制	(32)
3.5	几条设计准则	(33)
3.6	模拟实现方法的实际问题	(35)
第4章	基于滞环调制的滑模控制器	(37)
4.1	介绍	(37)

4.2	理论推导	(37)
4.2.1	降压变换器的数学模型	(37)
4.2.2	理想滑模电压控制器的设计	(38)
4.2.3	实际滑模电压控制器的设计	(41)
4.3	标准设计过程	(46)
4.3.1	标准 SMVC 变换器模型	(46)
4.3.2	设计步骤	(46)
4.4	实验结果	(48)
4.4.1	设计方程的验证	(49)
4.4.2	稳态性能	(51)
4.4.3	负载变化	(52)
4.4.4	输入电压变化	(53)
4.4.5	α 变化	(54)
4.4.6	ESR 变化	(57)
4.5	进一步讨论	(58)
4.5.1	优点	(58)
4.5.2	缺点	(58)
4.5.3	可行的解决方法	(58)
第 5 章	基于滞环调制的自适应滑模控制器	(60)
5.1	介绍	(60)
5.2	常规滞环滑模控制器的分析	(60)
5.2.1	数学模型	(60)
5.2.2	存在的问题	(61)
5.2.3	可行的解决方法	(64)
5.3	自适应前馈控制策略	(64)
5.3.1	理论	(64)
5.3.2	实现方法	(66)
5.4	自适应反馈控制策略	(67)
5.4.1	理论	(67)
5.4.2	实现方法	(68)
5.5	实验结果与讨论	(68)
5.5.1	输入电压变化	(70)
5.5.2	负载变化	(74)
附注		(77)

第 6 章	连续导电模式电力电子变换器 PWM 滑模控制器的一般设计方法	····· (78)
6.1	介绍	····· (78)
6.2	研究背景	····· (78)
6.3	设计方法	····· (79)
6.3.1	系统建模	····· (79)
6.3.2	控制器设计	····· (82)
6.3.3	附注	····· (85)
6.4	仿真结果与讨论	····· (88)
6.4.1	降压变换器	····· (88)
6.4.2	升压变换器	····· (91)
6.4.3	升降压变换器	····· (94)
第 7 章	断续导电模式电力电子变换器 PWM 滑模控制器的一般设计方法	····· (99)
7.1	介绍	····· (99)
7.2	DCM 变换器的状态空间模型	····· (99)
7.3	设计方法	····· (101)
7.3.1	系统建模	····· (101)
7.3.2	控制器设计	····· (103)
7.4	仿真结果与讨论	····· (109)
7.4.1	降压变换器	····· (109)
7.4.2	升压变换器	····· (113)
7.4.3	升降压变换器	····· (117)
7.5	DCM 滑模控制的其他应用: 混合双工作模式控制器	····· (123)
7.5.1	背景知识	····· (123)
7.5.2	控制器结构	····· (124)
7.5.3	仿真结果与讨论	····· (125)
第 8 章	电力电子变换器 PWM 滑模控制器的设计和实现	····· (129)
8.1	介绍	····· (129)
8.2	降压变换器的 PWM 滑模电压控制器	····· (129)
8.2.1	数学模型	····· (129)
8.2.2	考虑设计参数后的存在条件	····· (130)
8.2.3	选择滑动系数	····· (131)
8.2.4	控制器的实现	····· (134)
8.2.5	结果与讨论	····· (138)

8.3	升压变换器的 PWM 滑模电压控制器	(147)
8.3.1	数学模型	(147)
8.3.2	控制器的实现	(147)
8.3.3	实验样机	(148)
8.3.4	实验结果与讨论	(150)
第 9 章	带电流控制滑动流形的滑模控制	(158)
9.1	介绍	(158)
9.2	升压型变换器使用电流模式控制的必要性	(158)
9.3	滑模电流控制器	(159)
9.3.1	产生合适的参考电流	(159)
9.3.2	滑动面	(160)
9.3.3	控制器/变换器系统的动态模型及其等效控制	(160)
9.3.4	控制器的结构	(161)
9.3.5	存在条件	(162)
9.3.6	稳定性条件	(163)
9.3.7	选择滑动系数的经验方法	(165)
9.3.8	附注	(166)
9.4	结果与讨论	(167)
9.4.1	调节性能	(167)
9.4.2	动态性能	(170)
第 10 章	高阶变换器带减状态滑动流形的滑模控制	(173)
10.1	介绍	(173)
10.2	Cuk 变换器的常规滑模控制器	(173)
10.2.1	Cuk 变换器的状态空间模型	(173)
10.2.2	全状态滑模控制器	(174)
10.2.3	减状态滑模控制器	(174)
10.3	定频减状态滑模电流控制器	(175)
10.3.1	滑动面	(175)
10.3.2	控制器/变换器系统的动态模型及其等效控制	(176)
10.3.3	控制器结构	(176)
10.3.4	存在条件	(178)
10.3.5	稳定性条件	(178)
10.3.6	选择滑动系数	(183)

10.3.7	补充说明	(183)
10.4	结果与讨论	(183)
10.4.1	稳态性能	(184)
10.4.2	动态性能	(185)
第 11 章	带二重积分滑动面的间接滑模控制	(188)
11.1	介绍	(188)
11.2	发现问题	(188)
11.2.1	滞环调制滑模控制器	(188)
11.2.2	间接滑模控制器	(190)
11.2.3	间接 ISM 控制变换器存在稳态误差的解析	(191)
11.3	可行的解决方法	(191)
11.4	二重积分滑动面在 PWM 型间接滑模控制器中的应用	(192)
11.4.1	二重积分滑模控制器	(192)
11.4.2	PWM 形式 DISM 控制器的结构	(194)
11.4.3	存在条件	(195)
11.4.4	稳定性条件	(198)
11.5	结果与讨论	(201)
11.5.1	PWM DISM 降压变换器仿真结果	(201)
11.5.2	PWM DISM 升压变换器的实验结果	(203)
参考文献	(209)

第 1 章 滑模控制基础

1.1 简介

最早介绍滑模 (sliding mode, SM) 控制概念的文献可追溯至 20 世纪 30 年代。早期形式的滑模控制在船舶定向控制和直流发电机控制中得到成功应用。实际上,滑模控制的理论和应用方法是由苏联工程师于 20 世纪 50 年代提出的,随后促使滑模控制得到广泛应用的理论框架报道于俄语文献 [21]、[101]、[102] 中。Itkis (1976 年) 和 Utkin (1977 年) 将这些文献翻译成英文^[21],使其在苏联之外传播。自此,滑模控制理论受到全世界控制理论学者和工程师的广泛关注。

简单来说,滑模控制是一种在变结构系统的控制^[21, 68, 85, 101, 102]中首先得到发展的非线性控制方法。从技术上说,它包含一个时变的不连续的状态反馈控制律,该控制律根据状态变量在状态空间中的当前位置以高频在一个连续结构和另一个连续结构之间切换,其目标是迫使被控系统的动态能够精确跟踪预先设定的期望动态。

系统采用滑模控制后,主要优点是可以保证系统在参数不确定情况下的稳定性和鲁棒性^[102]。此外,作为一种在设计选择中具有高度灵活性的控制方法,滑模控制相比于其他非线性控制方法更易于实现。这些特点使滑模控制非常适合在非线性系统中应用,尤其是电气驱动器、汽车控制、炉控制等工业应用场合^[21]。

本书关注一类特别的变结构工程系统,即电力电子变换器。本章的目标是介绍滑模控制的基本概念和数学背景知识,这对于理解后续章节的讨论是必要的。

1.2 基本理论

首先,考虑一个三维空间中的系统,设想空间中存在一个平面,平面中有一个 O 点,称为平衡点。该平衡点表示一个稳定的吸引子,任何与之接触的轨线都将停留于该点。人们也希望将被控系统的轨线推向平衡点。

接下来,考虑系统的被控轨线在空间中任意分布且远离平面的情况。在没有任何控制作用的情况下,轨线将按照系统的固有特性移动。然而当控制作用施加后,轨线将以“偏爱”的方式发生改变,轨线运动的方向取决于控制作用的类型。一连串的控制作用施加于系统后,或许可使系统在与初始状态无关的情况下,其被控轨线首先向平面移动,在到达平面后,沿着平面滑动并最终停留于 O 点。

这种控制被称为滑模控制。上述引导轨线移动的平面称为滑动面 (sliding plane 或 sliding surface), 或者更一般地, 称为滑动流形 (sliding manifold)。实施滑模控制所需的控制作用包含不同控制函数间的快速切换, 实现滑模控制的轨线所处的空间区域称为滑动模态 (sliding regime)。

在解释了上述术语后, 可以用更严格的方式对滑模控制做出定义。对于任意给定系统, 如果滑动模态存在且滑动流形 $\zeta = 0$ 具有稳定的平衡点 O , 当工作于滑动模式时, 位置任意的反馈跟踪轨线将被驱使至滑动流形。当轨线到达流形后, 将引发系统的控制作用, 两个或多个独立的控制函数 U_1 、 U_2 、……以无穷大的频率切换, 使系统轨线被精确地限制在滑动流形上并且有 $S = \zeta = 0$, 最后轨线将朝着期望平衡点 O 移动。

图 1.1 所示为滑模控制作用下系统轨线的图示。整个滑模运动可以分为两个阶段。在第一个阶段 (称为到达阶段), 若不考虑被控轨线 S 的初始位置, 滑模控制将强迫轨线向滑动流形移动 (参见图 1.1 (a))。通过符合所谓的到达条件 (hitting condition), 上述运动是合理的, 到达条件保证不论初始状态如何, 系统的被控轨线始终将朝着滑动流形移动^[21]。

当轨线到达滑动流形, 系统进入控制过程的第二个阶段 (称为滑动阶段), 也叫做滑模运动阶段。此时系统将受一连串以无穷大频率切换的控制函数的作用, 使轨线保持在滑动流形上, 同时朝着期望的平衡点 O 移动, 并最终固定于 O 点 (参见图 1.1 (b))。重要的是, 控制过程仅对轨线表现出的行为作出反应, 所以轨线将不受参数变化和外部扰动的影响。换句话说, 控制过程用滑动流形作为参考路径, 在参考路径上被控轨线将跟踪原点并最终收敛于原点, 达到稳态运行状态, 而无需考虑系统的参数和工作状态。上述过程的发生须满足存在条件 (existence condition), 这一条件确保滑动流形附近位置的轨线 (某一小距离范围内) 总是能够返回滑动流形。另外, 稳定性条件 (stability condition) 可保证处于滑模运行状态下系统的轨线停留在一个稳定的平衡点上^[21]。注意, 轨线沿着流形运动并停留于平衡点这一过程是严格强制执行的, 从而使滑模控制对系统不确定性和环境变化具备高度的鲁棒性。

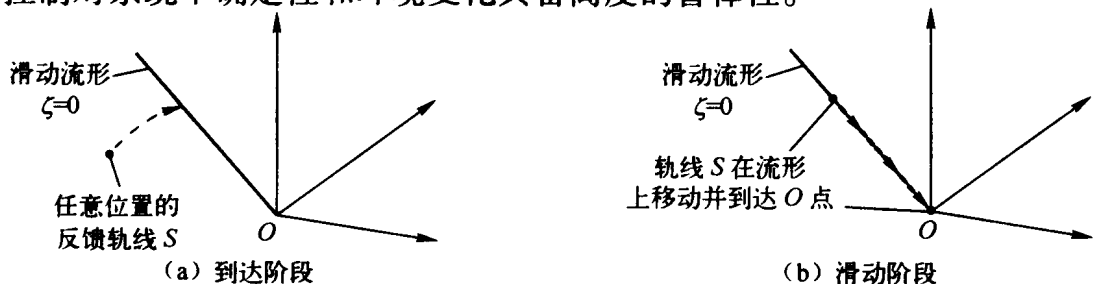


图 1.1 滑模控制过程的图示

(a) 到达阶段——轨线 S 向滑动流形移动, 与初始状态无关; (b) 滑动阶段——轨线 S 在滑动流形上移动并停留于原点 O

到达、存在和稳定性条件的详细推导过程将在本章后续部分进行介绍。此处再重申一次滑模控制的定义：滑模控制与任何控制形式一样，都是强加于系统的，滑模作用包括3个基本机制，即到达滑动面、停留于滑动面及收敛于稳定平衡点。

1.3 滑模运动的性质

1.3.1 理想控制

现在读者已经清楚滑模控制的基本原理是采用某一滑动流形（滑动面）作为参考路径，使被控系统的轨线朝向期望平衡点运动。凭借直觉，我们认为这种运动之合理性的唯一原因在于滑模控制具有固有的无穷大控制增益，迫使轨线沿着流形滑动运动。此外，这种理想的滑模控制只有在到达、存在、稳定3个基本条件，以及系统运行于无穷大切换频率的条件完全满足时才是在理论上可以实现的。于是，被控系统是理想的，任何外部扰动或系统不确定性都不会影响包括精确跟踪、零调节误差（无穷大直流增益）和极快动态响应的理想控制性能。从某种意义上说，滑模控制是一种对变结构系统的理想（最优）控制。

1.3.2 实际限制因素和抖振

到目前为止，本书关于滑模控制的讨论都是在这样的假设下进行的：即无穷大切换频率的可实现性，以及与控制相关的元器件的完美性。然而在实际应用中，以上假设是不切实际的。实际中由于延时、响应时间常数、死区的存在、滞后效应及元器件开关频率的饱和，元器件具有不完美性，滑模运动的实际性能轻微偏离预期的理想状态。另外，在控制过程中可能发生某种表现在轨线行为上的高频振荡。这种现象被称为抖振（chattering）^[102]。

图1.2所示为非理想情况下被控系统在滑动阶段的轨线变化过程。注意，开关的非理想性并不影响滑模运动的到达阶段，所以理想和非理想状态下的到达阶段均可用图1.1(a)表示。然而，对于非理想情况下的滑动阶段（参见图1.2(a)），轨线 S 并不精确地在滑动流形上移动，而是在邻近范围内高频振荡，同时收敛于 O 点。此外，与理想情况下轨线 S 到达 O 点后保持精确停留的状态不同，非理想情况下，轨线 S 将陷入在 O 点附近的周期振荡状态。结果，理想情况下被控系统稳态时在期望点 O 保持静止状态（即没有误差），而非理想情况下被控系统轻微偏离期望点振荡，导致稳态误差的存在。

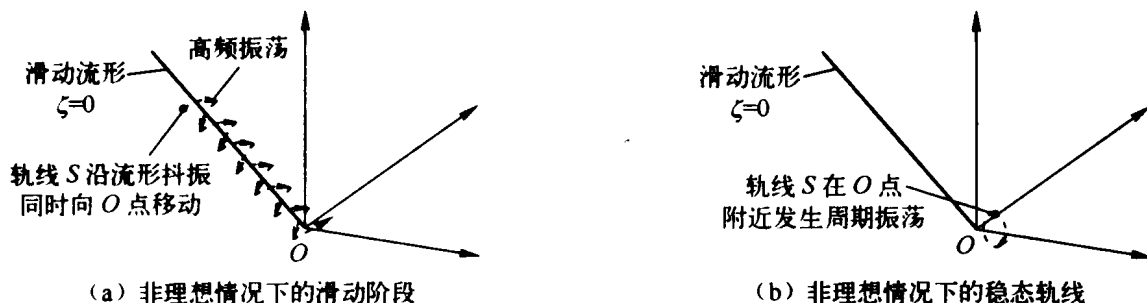


图 1.2 非理想状态下的滑模控制过程图示

(a) 滑动阶段——轨线 S 在滑动流形的邻近范围内抖振，但仍然向原点 O 收敛；

(b) 稳态——轨线 S 在原点 O 附近发生周期振荡

1.3.3 恒动态

滑模控制一个有趣的特征是滑模阶段的恒动态。如图 1.1 (b) 所示，当轨线到达流形且系统进入滑动阶段后，轨线被限制在滑动流形上移动，这意味着轨线的运动方程基本上为 $S = \zeta = 0$ 。当不考虑系统运行状态和参数变化时，上述过程确实会发生。所以，滑动运动系统的动态是恒定的，并且与系统的参数或扰动无关。

注意，上述特征仅适用于滑动阶段而不适用于到达阶段，在给定运行条件下，到达阶段具有一系列不同的动态特性。然而，由于完成滑动阶段所需的时间通常长于系统处于到达阶段的时间，于是在控制系统设计时仅需考虑滑动阶段的动态就足够了。因此，利用滑模控制使系统获得恒定动态行为是合理的。

1.3.4 准滑模控制

理论上，理想的滑模控制工作于无穷大切换频率下，因此轨线精确跟踪参考轨线^[102]。然而，系统以无穷大切换频率工作的要求对许多系统采用滑模控制器的可行性提出了挑战。原因在于，极高的切换速度可能会导致过量的开关损耗，还可能成为干扰系统工作的噪声源。因此，对于适用于实际系统的滑模控制而言，控制的切换频率必须限制在一定的合理范围内。然而，对滑模控制器切换频率的实际要求使控制成为准滑模 (quasi-sliding mode, QSM) 控制或伪滑模 (pseudo-sliding mode, PSM) 控制，即理想滑模控制的近似。这种近似的结果是系统鲁棒性的降低和调节特性的恶化。显然，随着切换频率的增加，QSM 与理想滑模控制器越来越接近。

1.4 数学描述

考虑以下方程所定义的非线性时变切换系统：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t)) + \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}(t)) \cdot u(t) \quad (1.1)$$

式中， $\mathbf{x}(t)$ 为 n 维空间 \mathbf{R}^n 中的状态变量向量； $\mathbf{g}(\cdot)$ 和 $\boldsymbol{\varphi}(\cdot)$ 为同一空间中的平滑向量