

 IEEE WILEY

数字控制技术目前已经成为科学研究和
工程应用的一个主流发展方向

电子科学与工程系列图书

高频开关变换器 的数字控制

Digital Control of High-Frequency
Switched-Mode Power Converters

[意] 卢卡·科拉迪尼 (Luca Corradini)

[美] 德拉甘·马克西莫维奇 (Dragan Maksimović)

[意] 保罗·马塔韦利 (Paolo Mattavelli)

[美] 里根·赞恩 (Regan Zane)

著

张卫平 毛鹏 张懋 译

围绕功率变换器展开分析、建模、设计和数字环路的实现，
既有系统级传递函数的推导，也有采用主流硬件描述语言VHDL或者
Verilog的实际设计实现



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电子科学与工程系列图书

高频开关变换器 的数字控制

**Digital Control of High – Frequency
Switched – Mode Power Converters**

[意] 卢卡·科拉迪尼 (Luca Corradini)

[美] 德拉甘·马克西莫维奇 (Dragan Maksimović)

[意] 保罗·马塔韦利 (Paolo Mattavelli)

著

[美] 里根·赞恩 (Regan Zane)

张卫平 毛鹏 张懋 译



机械工业出版社

本书全面地介绍了开关功率变换器的数字控制。第1章简介了开关变换器连续时间域经典的平均状态建模方法。第2章介绍了数字控制的基本结构。第3章介绍了开关变换器离散域直接建模的方法并得到 z 域的小信号动态模型。在此基础上,第4章介绍了如何直接设计数字补偿器。第5章介绍了模/数(A/D)转换器的幅度量化误差和数字脉冲宽度调制器(DPWM)。第6章介绍了数字补偿器的实现。最后,第7章介绍了整定技术。

本书可为从事电力电子或数字控制的相关研究和应用的工程技术人员提供参考,也可作为高等院校相关专业学生的研究生教材使用。

Copyright © 2015 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Digital Control of High-Frequency Switched-Mode Power Converters, ISBN 978-1-118-93510-1, by Luca Corradini, Dragan Maksimović, Paolo Mattavelli, Regan Zane, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由Wiley授权机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-7224 号。

图书在版编目(CIP)数据

高频开关变换器的数字控制/(意)卢卡·科拉迪尼(Luca Corradini)等著;张卫平,毛鹏,张懋译.—北京:机械工业出版社,2017.8

(电子科学与工程系列图书)

书名原文:Digital Control of High-Frequency Switched-Mode Power Converters

ISBN 978-7-111-57605-1

I. ①高… II. ①卢…②张…③毛…④张… III. ①变换器-数字控制 IV. ①TN624

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第185744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:刘星宁 责任编辑:刘星宁

责任校对:刘秀芝 封面设计:马精明

责任印制:李 昂

北京玥实印刷有限公司印刷

2018年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·16印张·327千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-57605-1

定价:89.00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

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

随着电力电子技术的飞速发展以及其在各领域的应用不断深入,系统的功能和结构日趋复杂化和多样化,系统的控制要求也随之提高。以往人们通常采用模拟电路对电力电子系统进行控制,而大型的模拟电路控制平台往往具有设计成本昂贵、硬件检测维护困难、抗干扰能力不强等诸多缺点。近年来,由于微处理器和数字信号处理技术飞速发展,数字控制技术开始越来越普遍应用于电力电子系统中。数字控制技术已经成为目前研究和工程应用的一个主流发展方向。

本书全面地介绍了开关功率变换器的数字控制。首先介绍了开关变换器连续时间域经典的平均状态建模方法。然后介绍了数字控制系统和模拟控制器的区别和联系,并从工程角度提出如何借用原有的连续时间域经典的模型设计数字控制器。接着从学术角度严谨地介绍了开关变换器离散域内建模,控制器离散域的设计,A/D的位数和DPWM分辨率的选择,控制器的实现。最后还介绍了在线整定技术。

本书对数字控制的基础和关键问题做了一一说明,概念和思路清晰。本书参考了大量的文献,对数字控制的优点,如在线频域特性测量技术和整定技术都做了相应说明,为工程实践者提供了解决思路,为研究者提供了研究思路。此外,本书既提供了大量的Matlab仿真结果又提供了丰富的基于FPGA实现的工程实例。对于入门和教学都有着重要的帮助。

最后感谢北方工业大学绿色电源实验室和机械工业出版社同仁的支持,在此谨致谢意。

限于译者的水平,本书可能存在一些翻译不当之处,欢迎读者提出宝贵的修改意见和建议。

北方工业大学 张卫平

原书前言

在连续时域分析、开关变换器的平均模型和模拟控制理论等框架内,人们已经建立电力电子学基础^[1~5]。然而,电力电子变换器的控制和管理功能逐步趋于数字化实现,使其基础研究领域延伸至离散时间建模域和数字控制技术。动态系统的数字控制的教科书和课程通常介绍了基础知识,但并未提供深入理解和涉及基于数字控制功率变换器的特殊知识。本书试图填补这一空白,将系统而严谨地介绍基于数字控制的高频开关变换器的基础知识。本书的目标是使读者能够理解、分析、建模、设计功率变换器的数字控制环。其内容涵盖了从系统级传递函数到采用主流硬件描述语言(HDL)如VHDL或者Verilog的实际设计。

本书可作为主修电力电子课程的电气工程研究生的教科书或者作为研究数字控制的功率变换器的工程师和研究人员的参考书。本书假定读者已经熟悉电力电子的基本规律以及连续时间域建模方法和控制技术。熟悉采样系统和离散时间系统的分析有助于理解本书,但这些知识点不是必需的。本书的开始部分会对这些重要的概念进行介绍,此外附录A也总结了离散时间系统的基础知识点。对于一些更加复杂的研究背景,读者可参考一些教科书,例如参考文献[7,8]。

本书结构如下:导论概述了数字控制的高频开关变换器,阐述了研究热点背后的动机,小结了当前关于该领域分析、建模、控制和实现的现状,总结了目前数字控制器的优点(友好的系统能量管理接口,控制功能可编程实现,动态响应和效率的提升,实用的自整定技术)。

第1章回顾了开关变换器连续时间域平均状态建模方法。许多专业图书都介绍了平均小信号建模方法,这部分内容并不是简单的重复,而是意在重点介绍平均小信号建模方法背后的建模方法和假设条件。了解平均建模方法的原理和约束条件有助于理解对数字控制的功率变换器建模时需要不同的建模方法。

第2章介绍了数字控制的变换器中的关键器件,这使得读者无须关注建模的细节就能快速了解模拟控制和数字控制的区别。本章结尾讨论了采用连续时间域平均模型设计数字环路的方法,在实际工程中常采用这种方法,但是这种方法是一种近似方法,仅考虑了采样影响和数字控制延迟。

第3章介绍离散域建模的方法,将数字控制的变换器视为一个数据采样系统,推导 z 域而不是 s 域下的小信号动态模型。此外,本章讨论了一些建模实例,以便建立离散时域建模的理论框架。本章进一步建立了连续时间建模与离散建模之间的变换关系。这个变换关系与拓扑结构无关。介绍了一个简单直接向离散化公式,

将变换器的平均小信号模型转化为精确的离散时间域模型。

第4章在第3章提出的离散时间域模型基础上分析了如何直接设计数字补偿器。有关文献介绍了很多设计方法,本书重点介绍了双线性变换法。这种方法的最大的优点是整个设计过程类似连续时间域的设计过程,数字控制的变换器以及数字补偿器都可假设为连续时间域系统,所以直接数字化的设计可利用模拟控制时频域下的设计指标。本章还提到电压模式、电流模式、多环控制的DC-DC变换器以及功率因数校正(PFC)整流器中标准的数字比例积分(PI)补偿器和比例积分微分(PID)补偿器的设计。

第5章介绍了模-数(A/D)转换器的幅度量化误差和数字脉宽调制(DPWM)。数字控制的DC-DC变换器是闭环系统,且存在直流工作点。本章开始部分阐述了该系统中的极限环振荡出现的原因。其次,为避免这种现象的发生,提出了无极限环振荡的条件并给出基本的设计指导建议。本章最后简要概述了DPWM和A/D的结构以及如何实现相关平衡。

第6章介绍了如何实现数字补偿器。首先要考虑补偿器系数的缩放和量化,确定环路幅值增益的误差和穿越频率处的相位误差。其次论述了如何在定点运算环境下实现控制规律,并且提出在控制结构中确定不同信号的字长的方法。考虑到本书重点在于数字控制在高频开关变换器中的应用,本章重点介绍了控制规律的实现过程,并附有VHDL或Verilog硬件语言例程。本书同样也关注在软件中、在微处理器上如何实现这些控制规律。

数字控制的优点在于可自整定,这既有潜力又有挑战。由于这个问题的重要性,故第7章总结了高频开关变换器的数字自整定技术。在简单讨论了数字自整定的基础后,详细提出了两种自整定技术:注入式和继电器式。

本书的目的旨在重点强调数字控制系统设计中的基本理论问题和实际应用技术之间的区别,以便消除离散建模或数字控制理论难以理解和实际应用十分困难的困惑。基于这一想法,本书在理论推导的同时给出了Matlab说明实例。在大多数情况下,几条Matlab命令就能直接完成系统级补偿器的设计,并将结果快速地转化为HDL代码和实施步骤。此外,设计案例贯穿于全书,并在Matlab环境中得到仿真验证。

目 录

译者序 原书前言

导论 1

第 1 章 DC-DC 变换器的连续平均建模 9

- 1.1 PWM 变换器 9
- 1.2 变换器的稳态 11
 - 1.2.1 升压变换器举例 12
 - 1.2.2 开关纹波估计 13
 - 1.2.3 基本变换器的电压转换比 14
- 1.3 变换器的动态和控制 15
 - 1.3.1 变换器的平均和线性化 16
 - 1.3.2 脉冲宽度调制器的建模 18
 - 1.3.3 系统环路增益 19
 - 1.3.4 基本变换器的平均小信号建模 20
- 1.4 状态空间平均法 21
 - 1.4.1 变换器的静态工作点 21
 - 1.4.2 平均小信号状态方程模型 22
 - 1.4.3 升压变换器举例 23
- 1.5 设计实例 24
 - 1.5.1 电压模式控制的同步降压变换器 25
 - 1.5.2 平均电流模式控制的升压变换器 32
- 1.6 占空比 $d[k]$ 和 $d(t)$ 36
- 1.7 要点总结 37

第 2 章 数字控制环路 38

- 2.1 实例学习：电压模式的数字

- 控制 38
- 2.2 A/D 转换 39
 - 2.2.1 抽样速率 39
 - 2.2.2 幅值量化 42
- 2.3 A/D 转换数字补偿器 43
- 2.4 数字 PWM (DPWM) 46
- 2.5 环路中的延迟 48
 - 2.5.1 控制延迟 48
 - 2.5.2 调制延迟 49
 - 2.5.3 整个环路延迟 51
- 2.6 数字控制设计中使用平均模型 52
 - 2.6.1 平均模型的局限性 52
 - 2.6.2 数字控制的变换器的平均模型 54
- 2.7 要点总结 57

第 3 章 离散时间建模 58

- 3.1 离散时间小信号建模 58
 - 3.1.1 入门实例：开关电感 60
 - 3.1.2 一般情况 63
 - 3.1.3 用于 PWM 的基本类型的离散时间模型 64
- 3.2 离散时间模型实例 66
 - 3.2.1 同步降压变换器 66
 - 3.2.2 升压变换器 72
- 3.3 时不变拓扑的离散时间建模 76
 - 3.3.1 离散时间建模的等价性 78
 - 3.3.2 与修正 Z 变换的关系 80
 - 3.3.3 $T_u(z)$ 的计算 80
 - 3.3.4 降压变换器实例 83

3.4 基本 Matlab 的变换器的离散时间建模	83
3.5 要点总结	87

第4章 数字控制

4.1 系统级补偿器的设计	88
4.1.1 采用双线性变换法直接设计	89
4.1.2 在 z 域和 p 域的数字 PID 补偿器	91
4.2 设计例题	94
4.2.1 电压控制模式时同步降压变换器的数字控制	94
4.2.2 电流控制模式时升压变换器的数字控制	100
4.2.3 多环控制模式时同步降压变换器的数字控制	102
4.2.4 升压功率因数校正器	105
4.3 变换器的其他传递函数	117
4.4 驱动器饱和与积分抗饱和措施	120
4.5 要点总结	124

第5章 幅值量化

5.1 系统量化	126
5.1.1 A/D 转换器	127
5.1.2 DPWM 量化	128
5.2 稳态时的解	129
5.3 无极限环的条件	131
5.3.1 DPWM 与 A/D 分辨率	132
5.3.2 积分增益	134
5.3.3 动态量化效应	136
5.4 DPWM 和 A/D 转换器实现技术	137
5.4.1 DPWM 硬件实现技术	137
5.4.2 通过 $\Sigma-\Delta$ 调制有效改进 DPWM 的分辨率	141
5.4.3 A/D 转换器	142
5.5 要点总结	143

第6章 补偿器的实现

6.1 PID 补偿器的实现	146
6.2 系数的缩放和量化	148
6.2.1 系数的缩放	149
6.2.2 系数的量化	151
6.3 电压控制模式实例: 系数量化	153
6.3.1 并联结构	154
6.3.2 直接结构	156
6.3.3 级联结构	157
6.4 定点控制器的实现	161
6.4.1 有效的动态范围和硬件的动态范围	162
6.4.2 信号的上限和 L^1 范数	163
6.5 电压控制模式实例: 定点实现	164
6.5.1 并联实现	166
6.5.2 直接实现	169
6.5.3 级联实现	171
6.5.4 线性系统和量化后的系统响应对比	174
6.6 控制器的 HDL 实现	175
6.6.1 VHDL 实例	175
6.6.2 Verilog 实例	178
6.7 要点总结	179

第7章 数字控制的自整定

7.1 自整定技术简介	180
7.2 可编程的 PID 结构	181
7.3 通过注入数字扰动信号实现自整定	184
7.3.1 工作原理	185
7.3.2 PD 自整定的实现	188
7.3.3 仿真实例	190
7.3.4 PD 自整定环路的小信号分析	192
7.4 基于继电器反馈的数字自整定	197
7.4.1 工作原理	198
7.4.2 数字式继电器反馈的实现	199
7.4.3 仿真实例	202

7.5 实现问题	203	B.1 截断操作和截断误差	214
7.6 要点总结	204	B.2 浮点和定点算术系统	215
附录	205	B.3 二进制补码 (B2C) 的定点 表示	216
附录 A 离散时间线性系统和 Z 变换 ...	205	B.4 信号表示	218
A.1 差分方程	205	B.5 B2C 数的操作以及 HDL 实例 ...	219
A.1.1 强迫响应	206	B.5.1 符号扩展	219
A.1.2 自由响应	207	B.5.2 对齐	220
A.1.3 脉冲响应和系统的模	208	B.5.3 符号取反	221
A.1.4 模的渐进特性	209	B.5.4 LSB 和 MSB 截断	222
A.1.5 更多实例	209	B.5.5 加法和减法	223
A.2 Z 变换	210	B.5.6 乘法	225
A.2.1 定义	210	B.5.7 溢出检测和饱和运算	225
A.2.2 性质	210	附录 C 规则采样脉冲宽度调制器的小信号 相位滞后	230
A.3 传递函数	212	C.1 后沿调制器	231
A.3.1 稳定性	212	C.2 前沿调制器	234
A.3.2 频率响应	212	C.3 对称调制器	234
A.4 状态空间表达式	213	参考文献	236
附录 B 定点算法和 HDL 编码	214		

导 论

电能变换与控制的应用领域十分广泛,从片上的亚毫瓦功率管理电路到数百千瓦乃至兆瓦电动机驱动和电力系统。电能变换与控制的目标是高效率,以及在特定环境下具有良好的静态和动态特性。实现其目标有赖于电力电子技术,即采用无源元件(电感和电容)和功率半导体器件(类似于开关)构成的开关变换器。在大功率应用场合,控制和监视任务通常非常复杂,但是功率半导体器件的开关频率也非常低,例如通常为几十千赫兹。相对于整个系统的成本和功率等级而言,控制器的成本以及功率损耗相当低。在这些应用中,数字控制实现复杂的控制、管理和监控任务具有技术和成本优势。所以,经过多年,基于广泛使用的微处理器或专用微处理器以及数字信号处理器(DSP)或可编程逻辑器件等数字控制方法和数字控制器在高功率等级的电力电子装置中应用广泛。

在随处可见的中低功率的开关电源中却极少使用数字管理或数字控制,包括分布式供电调节器、非隔离或隔离的直流变换器、单相功率因数校正(PFC)电源、单相逆变器、照明系统等。在这些应用场合,开关频率范围通常在几百千赫兹至几兆赫兹,需要更高的动态响应。控制器的成本及其功耗占有系统的重要份额。此外,在许多应用中,已有的模拟控制器能够满足需求,而且可以使用已成熟的模拟分析、建模和设计方法^[1-5]。然而,高频开关功率变换器中的数字控制已从概念验证发展到商业数字脉冲宽度调制(DPWM)控制芯片,并且在越来越多的应用中采用。

“数字电源”这一概念越来越多地渗透到高频电力电子应用中,其主要原因有:

- 1) 数字集成电路不断增强的处理能力以及成本的持续下降。
- 2) 系统集成的需求以及功率管理复杂性和监视功能的增加使得在开关功率变换器中需要数字界面和可编程^[9-11]。
- 3) 高性能的数字控制技术以及新颖的方法提高了性能或者是提供了全新的功能。这些都是使用传统模拟控制方法很难实现的^[12-14]。

“数字电源”这一概念包含以下几方面:

- 1) 数字电源管理,这涉及系统级控制和变换器的监控、分布,通常基于串行通信母线实现^[9-11]。功率管理包含开通、关断、系统的时序控制、调节变换器控

制环路的设定、修改控制环路的参数、监视和上传测量的状态和变量等^[15,16]。相对于开关周期而言,这些功能实现的时间较长。

2) 数字控制,这包含时域和频域内变换器的建模和控制技术,相对于开关周期而言,这些控制行为的实现时间和开关周期差不多。

3) 数字控制的实现,这可分为两类。

① 基于软件的控制器,其中控制算法以代码的形式在普通微控制器上或在特定的微控制器上抑或是在 DSP 上执行。参考文献 [17] 提供了一个实例:使用微控制器实现数字控制完成 PFC 功能。

② 基于硬件的控制器,基于自定义的集成电路或者现场可编程门阵列 (FPGA) 芯片实现数字控制^[18,19]。参考文献 [20-22] 提供实例:基于硬件实现数字控制。

本书系统而严谨地介绍了高频开关功率变换器的分析、建模和数字控制环路设计的基础知识。目的在于使得读者理解和分析功率变换器,并在此基础上完成建模,最后进行数字控制环路的设计和实现,即从系统级的传递函数到具体实现的详细技巧。本章的目的在于介绍本书关注的问题,激发读者学习本书其余章节涉及的理论和实际问题。此外,本章还介绍了一些先进的控制技术,包括改善动态响应的方法、系统辨识、数字控制环路的整定以及在线效率优化。

1. 数字控制的开关变换器

到目前为止,已经有很多 DPWM 结构和实现方法。许多标准的微控制器和 DSP 芯片具有多个高分辨率 PWM 和模/数 (A/D) 转换通道,这使得软件实现数字控制和管理功能成为可能。目前这些领域的发展非常迅速,基于软件的实现方法仍然比较适合低开关频率的开关变换器。但是当开关频率为几百千赫兹到兆赫兹时,采用特定的基于硬件实现方式的控制环路会更好些。图 1 介绍了数字控制器的

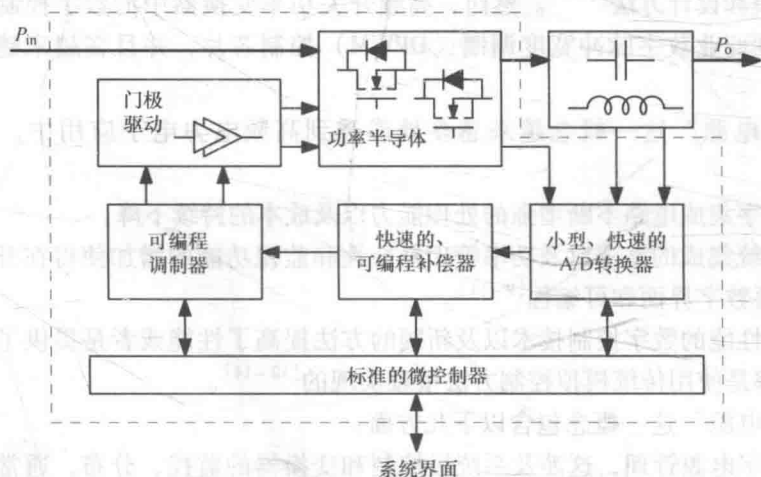


图1 高频开关功率变换器的数字控制器的结构^[13]

实现框图^[12,13]。控制环路为数字控制,使用专用可编程 A/D、DPWM 和补偿器以获得高性能的闭环动态特性,而微控制器完成编程、能量管理和系统界面。商业化的 DPWM 控制器是一个开关功率变换器专用可编程外围硬件和高水平管理与通信的软件实现的组合体。

图 1 中的控制器可以使用标准的数字超大规模集成电路 (VLSI) 设计流程设计、实现和测试。首先使用硬件描述语言 (VHDL 或 Verilog) 实现逻辑功能,然后在 FPGA 开发平台上进行原型和实验验证,最后产生相对小的、低门数、低功耗、低成本的集成电路实现模拟解决方案的动态特性。同时 DPWM 控制器提供了人机界面,具有灵活的可编程功能、能量管理功能,降低了无源元件的数量以及实现过程和温度的灵敏度,具备实现高级功能的潜力。

图 2 为基于硬件实现方式的数字控制同步降压 (Buck) 变换器的详细框图。A/D 转换器抽样输出电压 $v_o(t)$, 该电压与设定参考值 V_{ref} 相比较产生了数字电压误差信号 $e[k]$ 。由离散时间 PID 控制器根据误差信号产生了占空比命令 $u_x[k]$ 。在基本的控制器中,补偿器的增益 K_i 、 K_p 和 K_d 需要设计使之满足环路设计指标 (穿越频率、相位裕度,详见第 6 章)。完成补偿器的设计后,增益可用数字乘法器实现,如图 2 所示。因为仅需几个字节便足以表示误差信号 $e[k]$,整个补偿器也可采用查表实现^[21~24]。更为先进技术是图 2 所示的数字整定模块,即调整补偿器的增益,使其实际动态响应满足期望的指标。第 7 章介绍了整定技术。最后,DPWM 模块产生了互补的门极驱动信号 $c(t)$ 和 $c'(t)$,并具有一定的死区时间。算上各种

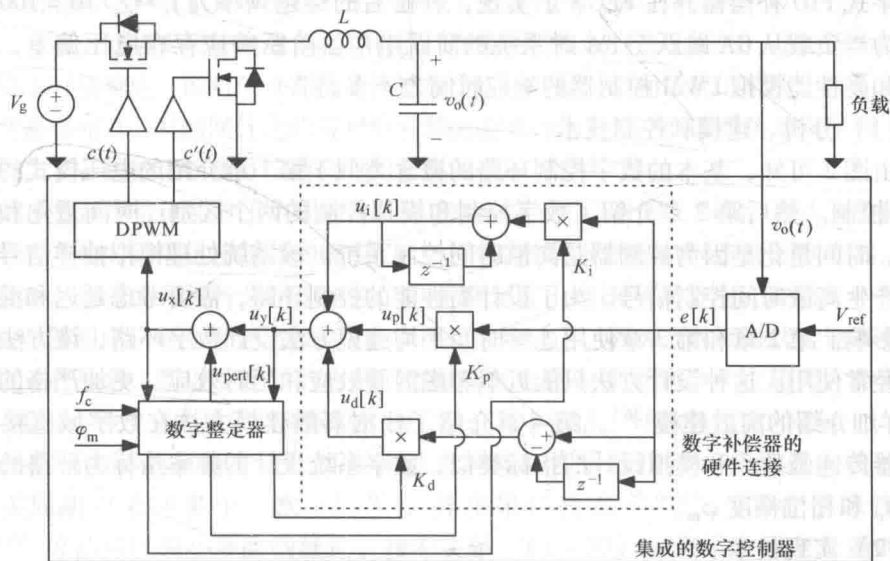


图 2 数字控制的负载点 (POL) 同步降压 DC-DC 变换器 (数字控制环路的分析、建模、设计和实现见第 1~6 章。加入的整定模块在第 7 章讨论)

增强功能,这样的控制器需要 10000 等效的逻辑门电路实现。如果采用 $0.35\mu\text{m}$ 的 CMOS 工艺,转换后的集成电路面积约为 $1/3\text{mm}^2$ 。此外,高密度的 CMOS 工艺电压等级高,适合用于功率电子,这使得高频开关功率变换器用的数字控制器的功耗和成本可接受。集成数字控制器的例子见参考文献 [21, 22, 24~33]。

观察一个实例。如图 2 所示(无数字整定器),参考文献 [34] 介绍了数字控制同步降压变换器的例子,输入 5V,输出 1.6V。滤波器的参数为: $L = 1.1\mu\text{H}$, $C = 250\mu\text{F}$, 开关频率为 500kHz。A/D 转换器是窗口式转换器^[26],使用阈值反相器量化方法^[35]。A/D 转换范围大约为 200mV,等效输出电压的量化步长为 3mV。使用混合计数器/环形振荡器 DWPM,时间量化间隔为 390ps,占空比的分辨率为 0.02%。采用 VHDL 代码编写

了数字式 PID 补偿器并在 FPGA 上实现,补偿后的穿越频率为 $f_c \approx f_s/10 = 100\text{kHz}$ 。图 3 为当负载从 0A 跳跃至 8A 时系统的阶跃响应。阶跃响应存在电压偏差,响应时间和高性能模拟 PWM 控制器的响应时间差不多。

(1) 分析、建模和控制技术

由图 2 可知,基本的数字控制环路的概念类似于第 1 章介绍的电压模式的模拟 PWM 控制。然后第 2 章介绍了数字控制和模拟控制的两个区别:时间量化和幅值量化。时间量化是因为控制器是离散时间控制系统。该系统处理模拟抽样信号,调整后产生离散时间控制信号。为了设计高性能的控制环路,需要考虑延迟和混叠带来的影响。第 2 章和第 3 章使用连续时间平均建模方法设计数字环路,该方法在实际中经常使用。这种设计方法只能近似考虑混叠效应和延时效应。更加严格的是第 3 章详细介绍的离散建模^[36]。第 4 章介绍了根据离散建模方法在数字域直接设计补偿器传递函数。和模拟设计的指标类似,数字系统设计的频率指标为环路的穿越频率 f_c 和相位裕度 φ_m 。

(2) 实现技术

在数字控制变换器中,调节的精度和准确度由 A/D 和 DPWM 的分辨率决定。第 5 章介绍幅值量化特性。这些非线性特性导致稳态时存在扰动,譬如极限环^[37,38]。第 5 章介绍如何设计避免产生极限环,同时也简单介绍了高分辨率 DPWM 和 A/D 的

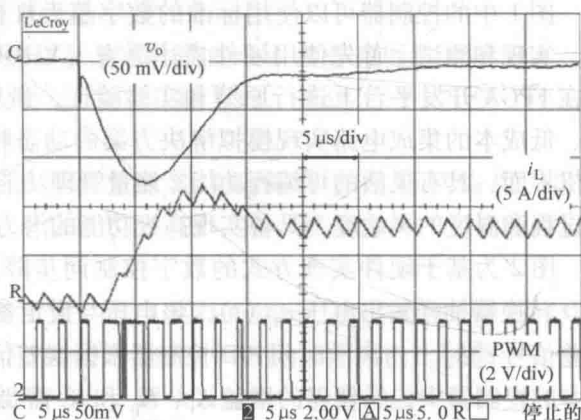


图 3 数字控制的负载点降压变换器采用传统 PID 补偿时 0~8A 负载阶跃响应^[34] (v_o , 50mV/div; i_L , 5A/div; 时间尺度, 5 μ s/div) (© 2009 IEEE)

实现方法。

第6章介绍了数字补偿器的实现。首先要对补偿器系数进行缩放和量化。系数量化后对穿越频率处的环路增益和相位误差要满足要求。第6章介绍了PID补偿器的结构,例如图2中的并联PID实现结构。第6章还介绍了定点实现控制规律的方法,并且提供了在不同结构中判定信号字长的方法。考虑到本书重点在于高频开关功率变换器,故着重介绍了基于硬件的控制规律实现方式,提供了VHDL或者Verilog代码。同时本书还关注了基于软件和微控制器上控制规律的实现。

本书的第1~6章围绕开关功率变换器介绍分析、建模、设计、电压环、电流环、多环数字反馈环。基于理论概念,系统研发了Matlab的分析程序,使得读者能够快速地完成离散建模和系统级,补偿器的设计,进而到达实现阶段。本书通过很多实际例程阐述其技术应用。

2. 采用数字控制时的系统和性能改善

系统控制提升了系统灵活性、可编程性、系统界面的集成性和能量管理功能。此外,由于数字控制器实现的控制策略更加复杂,在很多方面都具有相当多的优势。本节重点介绍数字控制领域的一些优势,譬如:提高系统的动态响应,嵌入频率测量,控制环路整定,在线效率优化等。

(1) 提高动态特性

标准的模拟或者数字控制器的设计方法来源于线性小信号模型和频域补偿器的设计。考虑到功率级的开关特性和大信号运行时状态变量的瞬态特性,采用开-关控制可以提高动态响应。很多文献研究了在模拟域和数字域开关曲面控制^[39]以及许多其他时域设计方法。数字实现特别适合能够增强动态特性的控制方法。例如:开关行为的序列使得最小时间响应,即对于外部扰动比如负载阶跃变化时时间最优的响应。例如:对于降压变换器而言,其时间优化响应对应着精确的开通与关断一次的开关动作序列。很多文献提出了各种数字控制方法适合时间最优的响应^[34,35,40-60]。

这些控制器被证明对于负载的阶跃变化的响应接近于极限。例如,图4为负载阶跃时参数独立的时间最优控制器的响应^[34],主电路为图3所示的同步降压变换器。当负载变化时,单一的开关行为迅速出现,迅速恢复输出电压至调节值。和图3中标准的PID补偿器相比,电压的变化和响应时间都大大降低了。因为当时间最优控制事件发生时控制动作饱和,所以变换器的内部状态量譬如电感电流可能会产生超调。参考文献[57]提出一种广义的数字时间最优控制方法,其中包括了对电感电流的限制。

还有很多其他控制方法也可改善动态响应。多采样技术(变换器的波形在一个开关周期内采样多于一次)^[61-63]、异步采样技术^[35,64,65]、混合信号控制技术^[66,67]等都可以减小环路的延迟。参考文献[68-70]介绍了含固定开通时间的多采样技术。此外,在DC-DC^[71,72]或者PFC电路^[73]中采用非线性控制方法提高动态响应。参考文献[74,75]介绍了在多相结构中提高动态性能的办法。如何改善更加复杂的控制器以及功率级改变时的动态响应是另一个研究热点。比如:参考文献

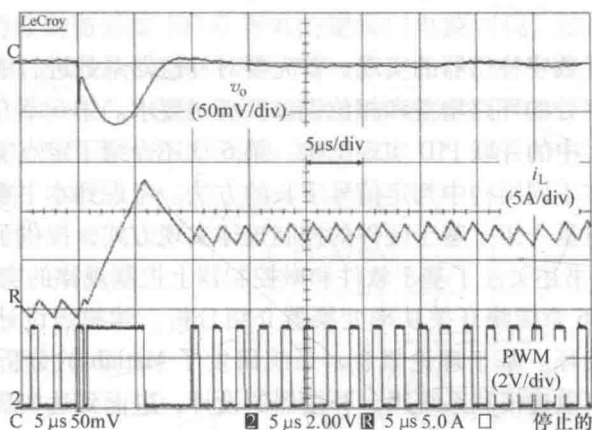


图4 数字控制的负载点降压变换器采用时间最优控制时0~8A负载阶跃响应^[34] (v_o : 50mV/div; i_L : 5A/div; 时间尺度: 5μs/div) (© 2009 IEEE)

[76] 中提出如何使用数字控制带辅助开关的功率级电路使之动态响应改善。参考文献[77]改善了这种方法并提出负载-控制器相互紧密作用的关系表达式。

(2) 嵌入式频率特性测量

使用网络分析仪测量控制器[⊖]的小信号频率特性,是基于传统频域设计控制器的一个重要实验验证环节^[1,78]。参考文献[79,80]提出可在数字控制器中加入类似的非参数频域系统辨识功能。为了简单总结这种方法,图5所示为含有附加系

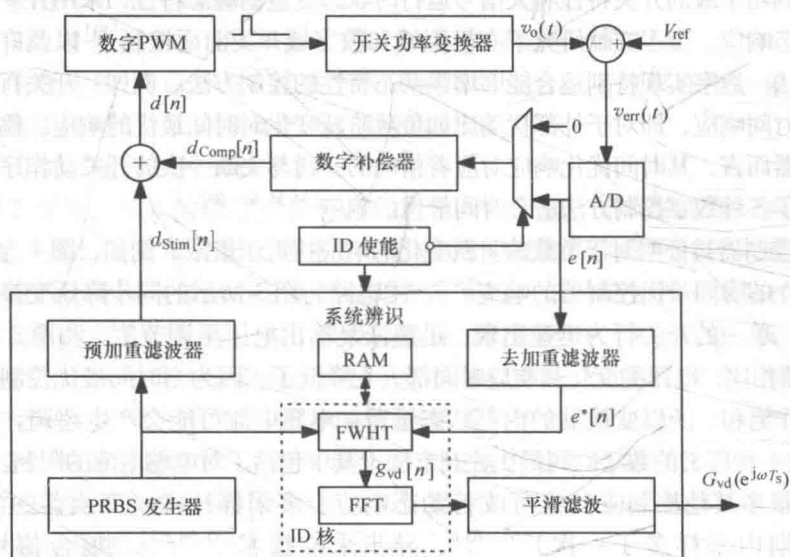


图5 含频率响应测量能力的数字控制的PWM变换器^[80] (© 2008 IEEE)

⊖ 应为变换器——译者注。

统辨识功能的数字控制框图。辨识过程包含考虑占空比命令加入伪随机二进制序列 (PRBS), 互关联扰动信号与待测量的输出响应获得系统的脉冲响应, 快速傅里叶变换 (FFT) 获得系统的频率特性。采用快速 Walsh-Hadamard 变换 (FWHT) 得到互相关。注意: 这种方法仍然要用到 DPWM 和 A/D 模块。为了减少开关和量化噪声, 系统辨识方法还包含优化扰动的幅值, 对注入信号和采样信号进行预加重和去加重处理, 使频域特性变得平滑。这种方法已经应用至多个变换器中^[80], 比如, 15V 转 30V 的升压 (Boost) DC-DC 变换器, 开关频率 f_s 为 195kHz。图 6 为辨识过程中的时域波形, 图 7 为辨识后的频率特性, 和离散时间建模得到的结果一致。

在线辨识频率特性可以应用于设计、故障诊断或自整定。然而, 应用成功与否有赖于频率特性的辨识精度、过程的自动化程度以及成本。即使用逻辑门的数目或系统复杂度、辨识过程所需要的时间以及对输出的影响程度。参考文献 [80] 研究结果表明, 在 DPWM 控制器中嵌入频率特性测量是可行的, 而且成本相对较低。辨识频率特性大约需要数百毫秒, 输出电压的扰动幅度也会保持在一个很小范围内。

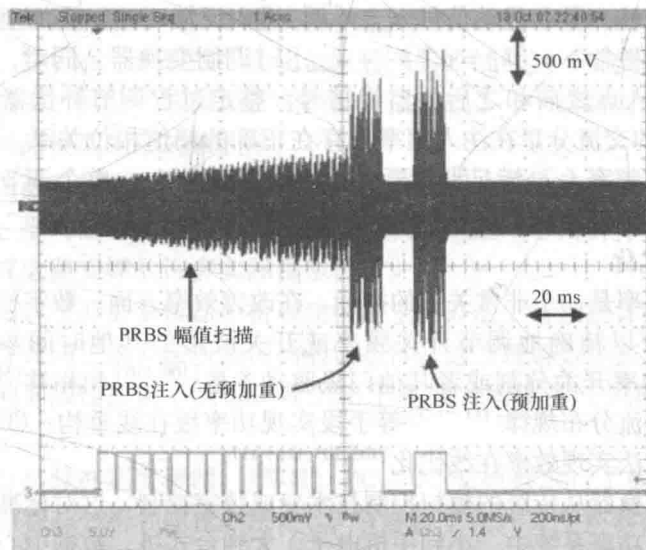


图 6 开关频率 195kHz, 15V 转 30V 的升压 DC-DC 变换器系统辨识过程中的输出电压^[80] (© 2008 IEEE)

(3) 整定

利用数字控制器的可编程特性可以自动改变控制器的参数从而整定实际系统的频率特性。理想的整定数字控制是即插即用的, 可以根据功率变换的关键特性以及负载调整控制器的参数, 使之达到设定的指标。这种能力有别于传统的设计流程。

数字整定控制算法具有很多优点, 该领域也是目前研究的热点问题。第 7 章概述了数字整定高频开关功率变换器的方法, 并给出了两种整定方法: 注入式方法和继电器式整定方法。

基于注入式自整定技术^[92,93,95,97], 图 2 给出了如何在数字控制器中嵌入自整

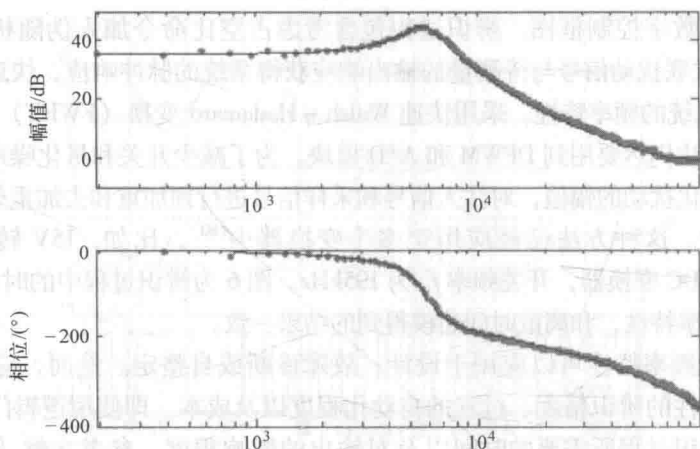


图7 通过图5和图6中系统辨识过程得到的控制端-输出端的幅值和相位响应^[80] (© 2008 IEEE)

定器。整定系统注入数字扰动信号 $u_{\text{pert}}[k]$ 进入反馈环路, 叠加至 PID 补偿器的输出 $u_y[k]$ 。控制命令 $u_x[k] = u_y[k] + u_{\text{pert}}[k]$ 调制变换器。同时, 信号 $u_y[k]$ 和 $u_x[k]$ 分别是注入点之前和之后的监视信号。整定过程调节补偿器的增益, 最终 $u_x[k]$ 和 $u_y[k]$ 的交流分量在注入频率处存在正确的幅值相位关系。这表明环路增益在期望的穿越频率 f_c 处满足设计要求且相位裕度为 φ_m 。整个调节过程需要的硬件适度, 在实际中很容易实现。

(4) 效率优化

变换器的效率是一个非常关键的指标。在改善效率方面, 数字控制器具有潜在的优势: ①它可以精确地调节开关频率或开关波形的其他时间参数^[27,102-107]; ②它能够通过功率开关分割或者其他门极驱动参数^[109,110]和相移^[58,111]或者控制多相结构中的电流分布规律^[111-113]等手段实现功率级在线重构; ③它也可以通过算法或预编程方法实现效率在线优化^[102,103,114-117]。

高频功率变换器从传统的模拟控制技术变成数字控制, 这对标准的设计产生了重要的影响。在功率系统中, 小到手机电子, 大到台式机, 数据中心以及通信设施中, 可编程性、监视功能、数字系统界面以及系统级能量管理变得无处不在。在这些系统中, 数字控制使得改善动态响应成为可能, 这也降低了无源滤波器的大小。同时数字系统也能使得变换器级或系统级的效率优化。随着能量成本的增加和对环境问题的关注, 在数据中心和计算机电源中, 人们使用了需要能量优化措施提高功率变换器的效率和功能质量。可以预测未来能效项目的技术指标将会对离网供电系统更加强调效率、功率因数和谐波失真等。此外, 在新能源领域中这也具有极大的影响。例如, 分布式集成变换器模块或者光伏发电系统中的微型逆变器采用数字控制可改善最大功率点的跟踪、错误检测和效率优化。在电动汽车领域具有同样的影响, 不仅仅在逆变器控制上采用数字控制, 在电池管理和充放电上都能看见数字控制的影子。