

数字电源技术 及其应用

■ 徐小涛 主编 吴延林 副主编

Digital power technology
and its applications

数字电源技术 及其应用

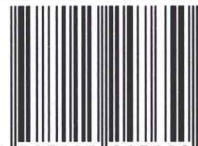
Digital power technology
and its applications

封面设计：董福彬

分类建议：通信技术
人民邮电出版社网址：www.ptpress.com.cn



ISBN 978-7-115-24765-0



ISBN 978-7-115-24765-0

定价：52.00 元

数字电源技术 及其应用

■ 徐小涛 主编 吴延林 副主编

Digital power technology
and its applications

人 民 邮 电 出 版 社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

数字电源技术及其应用 / 徐小涛主编. -- 北京 :
人民邮电出版社, 2011. 3
ISBN 978-7-115-24765-0

I. ①数… II. ①徐… III. ①电源—技术 IV.
①TM91

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第004707号

内 容 提 要

本书紧密跟踪数字电源技术的最新发展, 依据数字电源的相关技术体制, 深入浅出地介绍数字电源技术的基本原理; 依据数字电源技术的应用实践和发展趋势, 详细介绍了几种新兴的数字电源技术的发展概况和应用优势。

本书内容包括数字电源技术概述、数字电源管理、电源的数字化控制、数字化处理技术、数字电源设备设计、微电网技术、数字化电网以及智能电网技术等。

本书内容力求科学性、先进性、系统性和实用性, 可作为从事电源设计工作的工程技术人员、管理人员以及电力运营商和设备制造商的技术参考书或培训教材, 也可作为高等工科院校电力专业和相关专业的高年级本科生的教材或参考资料。

数字电源技术及其应用

◆ 主 编 徐小涛
副 主 编 吴延林
责任编辑 王建军
执行编辑 李 静

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19
字数: 466 千字

2011 年 3 月第 1 版
2011 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-24765-0

定价: 52.00 元

读者服务热线: (010)67119329 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

随着电力行业数字化技术的不断发展，基于数字信号处理的数字电源技术在国内外得到了越来越广泛的应用。

为了适应电源行业的发展需求，满足从事电源专业的组织、管理、科研、教学以及工程技术人员了解数字电源技术发展的需要，编写《数字电源技术及其应用》一书。

全书共分为8章。第1章主要介绍了数字电源技术的基本概念、技术特点、基本功能和发展历程，综述了数字电源技术的国内外应用现状和发展趋势。第2章主要介绍了电源数字管理总线技术的发展，详细介绍了几种典型的电源管理总线技术。第3章主要介绍了电源数字化控制策略、算法、关键技术及典型应用。第4章主要介绍数字电源设计过程中应用的典型数字化处理技术的结构功能、技术特点、开发方法和应用优势。第5章综述了数字系统设计的基本理论，并以工程实践为基础，介绍了几种关键数字电源设备的设计方法和步骤。第6章介绍了以数字电源技术为基础发展起来的微电网技术的组成结构、技术体制、应用优势和发展趋势等。第7章综述了数字化电网技术，介绍了数字化电网的体系结构、信息集成方式以及数字化变电站的发展。第8章综述了以数字电源技术为基础，在数字化电网基础上发展而来的智能电网技术，介绍了智能电网的标准体系、关键技术、发展现状及趋势。

本书由徐小涛主编，吴延林参与编写。本书得到了通信指挥学院毕进南教授的大力支持，装备管理运用教研室李建军主任、硕士研究生导师刘建中副教授、孙少兰副教授、熊华副教授、马同兵副教授、郎为民副主任、胡东华讲师、王逢东讲师、李健讲师、任保全讲师、朱元诚讲师、高泳洪讲师、项宏宇讲师、张昆讲师、王会涛讲师对本书提出了宝贵的编写建议。武汉实验外国语学校高俊文老师、军械士官学校田铖讲师完成了部分文档的处理，并更正了不少错误，在此向他们表示衷心的感谢。

在编写过程中，得到了华中科技大学、武汉理工大学、武汉科技大学、国家电网、德州仪器、意法半导体、飞思卡尔半导体、英飞凌、飞兆半导体、美信、恩智浦半导体等单位和企业的鼎力支持，他们为这本书的编写工作提供了大量宝贵的素材和详实的应用实例。

人民邮电出版社对本书的出版给予了大力的支持，在此一并表示感谢。

由于数字电源技术仍在不断发展之中，新的标准和应用不断涌现，加之作者水平有限，编写时间仓促，因而本书难免存在错漏之处，恳请各位专家和读者不吝指正。

作 者

2010年9月于武汉

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 数字电源概述	1
1.2 数字电源的基本原理	5
1.3 数字电源的控制与管理	6
1.4 数字电源的基本结构	9
1.5 数字电源的同步整流技术	11
1.6 数字电源的调制方式	14
第 2 章 数字电源管理总线技术	17
2.1 电源管理总线规范	17
2.2 SMBus 电源管理总线	18
2.3 PMBus 电源管理总线	20
2.4 CAN 电源管理总线	24
2.5 IPMI 智能平台管理接口	38
2.6 I ² C 总线在数字电源管理中的应用	45
2.7 USB 电源管理协议	52
2.8 SPI 串行总线技术	62
第 3 章 电源的数字化控制	65
3.1 概述	65
3.2 数字控制器的设计方法	65
3.3 电源数字控制策略及算法	67
3.4 电源数字化控制关键技术	79
3.5 数字电源的电流控制	86
3.6 开关电源的数字控制	88
3.7 逆变电源的数字控制	91
第 4 章 数字化处理技术	103
4.1 DSP	103
4.2 DSP 系统设计	106
4.3 DSP 在数字电源中的工程应用	112
4.4 MCU	122
4.5 可编程逻辑控制技术	134
4.6 可编程逻辑器件	138

4.7 CPLD/FPGA 的发展与应用	145
第 5 章 数字电源系统设计	156
5.1 数字系统设计的基本理论	156
5.2 数字电位器	158
5.3 数字锁相环	166
5.4 数控基准电压源	169
5.5 数字恒流电源	172
5.6 软开关技术	180
5.7 数字功率因数控制	186
5.8 数字电源的抗干扰设计	192
第 6 章 微电网技术	196
6.1 概述	196
6.2 微电网的发展现状及趋势	199
6.3 微电网关键技术及影响分析	205
6.4 微电源的控制策略	211
6.5 微电网的控制策略	213
6.6 微电网的逆变技术	220
6.7 微电网的系统优化	223
第 7 章 数字化电网技术	226
7.1 数字化电网技术概述	226
7.2 数字化电网关键技术	229
7.3 数字化电网的体系结构	230
7.4 数字化电网的信息处理流程	232
7.5 数字化电网的信息集成	234
7.6 数字化电网的信息模型构建	238
7.7 数字化变电站	243
第 8 章 智能电网技术	249
8.1 概述	249
8.2 智能电网的关键技术与功能	258
8.3 智能电网的信息通信架构	263
8.4 智能电网的信息通信技术	267
8.5 智能电网控制中心	276
8.6 智能变电站	282
8.7 智能电网调度	285
8.8 智能电网建设效益	289
8.9 智能电网规划	291
参考文献	297

第 1 章 概 述

1.1 数字电源概述

近年来，数字控制技术在电源中得到迅速的发展，各种在模拟电路中难以实现的现代控制方法开始应用于电源的控制中。数字信号处理器（DSP）的发展，使数字式的开关电源能达到较高的开关频率。相对模拟系统而言，数字系统在开关电源中具有设计周期短、灵活多变、易实现模块化管理、能够消除由离散元件引起的不稳定和电磁干扰等优点。因此，数字电源在高精度电源中的应用越来越广泛，成为现代电源技术发展的一个重要方向。

1.1.1 数字电源的定义和特点

1. 数字电源的定义

目前，数字电源有多种定义。

定义 1：通过数字接口控制的开关电源（它强调的是数字电源的“通信”功能）。

定义 2：具有数字控制功能的开关电源（它强调的是数字电源的“数控”功能）。

定义 3：具有数字监测功能的开关电源（它强调的是数字电源对温度等参数的“监测”功能）。

上述 3 种定义的共同特点是“模拟开关电源的改造升级”，所强调的是“电源控制”，其控制对象主要是开关电源的外特性。

定义 4：以数字信号处理器或微控制器（MCU）为核心，将数字电源驱动器、脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）控制器等作为控制对象，能实现控制、管理和监测功能的电源产品。它是通过设定开关电源的内部参数来改变其外在特性，并在“电源控制”的基础上增加了“电源管理”。所谓电源管理，是指将电源有效地分配给系统的不同组件，最大限度地降低损耗。数字电源的管理（如电源排序）必须全部采用数字技术。

与传统的模拟电源相比，数字电源的主要区别是控制与通信部分。在简单易用、参数变更要求不多的应用场合，模拟电源产品更具优势，因为其应用的针对性可以通过硬件固化来实现；而在可控因素较多、实时反应速度更快、需要多个模拟系统电源管理的、复杂的高性能系统应用中，数字电源则具有优势。

此外，在复杂的多系统业务中，相对模拟电源，数字电源是通过软件编程来实现多方面的应用，其具备的可扩展性与重复使用性使用户可以方便更改工作参数，优化电源系统。通过实时过电流保护与管理，它还可以减少外围器件的数量。

数字电源有用 DSP 控制的，还有用 MCU 控制的。相对来讲，DSP 控制的电源采用数字滤波方式，较 MCU 控制的电源更能满足复杂的电源需求，而且实时反应速度更快、电源稳

压性能更好。

2. 数字电源的特点

(1) 控制智能化

它是以数字信号处理器或微控制器为核心，将数字电源驱动器及 PWM 控制器作为控制对象而构成的智能化开关电源系统。传统的由微控制器控制的开关电源，一般只是控制电源的启动和关断，并非真正意义的数字电源。

(2) 数模组件组合优化

采用“整合数字电源”技术，实现了开关电源中模拟组件与数字组件的优化组合。例如，功率级所用的模拟组件 MOSFET 驱动器，可以很方便地与数字电源控制器相连并实现各种保护及偏置电源管理，而 PWM 控制器也属于数控模拟芯片。

(3) 集成度高

实现了电源系统单片集成化 (Power System on Chip)，将大量的分立式元器件整合到一个芯片或一组芯片中。

(4) 控制精度高

能充分发挥数字信号处理器及微控制器的优势，使所设计的数字电源达到高技术指标。例如，其脉宽调制分辨力可达 150ps (10~12s) 的水平，这是传统开关电源所望尘莫及的。数字电源还能实现多相位控制、非线性控制、负载均流以及故障预测等功能，为研制绿色节能型开关电源提供了便利条件。

(5) 模块化程度高

数字电源模块化程度高，各模块之间可以方便地实现有机融合，便于构成分布式数字电源系统，提高电源系统的可靠性。

1.1.2 数字电源的发展

1. 数字电源的发展

早在 1976 年，Trey Burns 在 Duke 大学实验室中用微机和一些分立元件搭出了一个升压型的 DC-DC 隔离电源，当时的开关频率限于微机的处理速度而只能达到 100Hz，这是世界上第一个公认的数字隔离 DC-DC。之后在 1985 年，Chris Henze 在明尼苏达大学做博士论文时做出了史上第一款非隔离负载点数字稳压器。

进入 20 世纪 90 年代后，美国德州仪器公司 (TI) 率先开发出了基于自有 DSP 的全数字控制 UPS 电源，这是全球第一款大规模商用的数字电源。与此同时，在 I²C 总线的基础上，许多通信厂家如当时的爱立信能源系统，也开始积极研发并制定可用于现场监控和管理能耗的标准协议。市场调查咨询公司 Darnell 率先于 2004 年 9 月组织并创立了全球第一个数字电源论坛，宣布数字电源在业界开始得到广泛认可，芯片和模块厂商开始达成共识，携手合作。

数字电源经过数十年的发展，现在已经进入了商用阶段。CMOS 技术的不断进步使得电源器件体积越来越小，价格越来越低，这些都为数字电源成为大规模商用产品奠定了基础。目前，越来越多的数字设备（如微处理器）对电源性能和功能的要求变得越来越高，除了对

电压和电流的控制以外,新的电源控制器还需要满足许多其他规范的要求,例如 VID (Voltage ID) 编程、线载调节、顺序上电、相位电流平衡以及监视与保护等,传统控制器中的脉宽调制功能现在只是整个电源控制系统所有功能中的一小部分。

数字电源芯片的集成度已经达到了较高的水平,适合复杂系统如服务器、通信设备等使用。芯片中集成数个同步控制器和自适应驱动器,有的集成了 MOSFET 或功率驱动模块、LDO、电荷泵及电源管理(包括热管理)功能。其他有特色的特性还包括可编程中断输出、看门狗等。先进的半导体制造工艺在数字电源芯片上也得以利用,其中数字电路应用 VLSI 工艺,模数混合电路应用高压 BICMOS 工艺。借鉴大功率芯片的成功设计,在数字电源芯片上采用先进的封装技术,使得芯片可在工业级的温度范围内可靠工作。

一直以模拟信号为主导的电源管理领域也开始引入数字化概念,许多公司都纷纷推出了各自的数字电源产品,如 Primarion(PX3539)、Silicon Laboratories(Si825x)、TI(Fusion Digital Power, UCD9K, UCD8K 及 UCD7K 系列辅助器件)、Potentia Semiconductor(PS-2606)、Zilker(ZL2x05)等;与他们怀有同样目的电源芯片供应商还包括 ADI、iwat、Linear、Maxim、IR、ONSEMI、Philippe 及 Volterra 等。

然而,在所有的控制功能全部使用数字技术实现之前,开关电源的数字控制器只能达到半数字化阶段,对于控制器中技术难度最高的功率开关控制部分,仍存在许多技术难点尚待解决,这已逐渐成为当今开关电源研究的热点。尤其在高频开关电源中,成本、能耗以及许多具体的技术困难限制了高频开关电源数字控制器的市场化进程,使得价格低廉的模拟控制器仍然主宰着消费电源市场。

目前,国内还没有电源厂家推出应用广泛的数字电源产品,国外比较活跃和领先的数字电源厂家有 Power-one、Artesyn (EMERSON)、Ericsson、TI、Primarion 和 ROAL,其中前三家是电源模块公司,后三家是半导体芯片公司,这些公司都从 2004 年开始陆续推出了商用的数字电源产品。

推动数字电源发展有几个原动力:一个是能源的成本和环境问题;另一个是标准化,性能指标,封装管脚和通信协议的标准化趋势,使数字电源能够灵活配置;第三,随着功率密度要求的不断上升、全工作范围的高效率要求以及实时的状态监控,数字电源的应用优势凸显,成为了主流的选择。

2. 数字电源的应用优势

2005 年,美国德州仪器公司(TI)率先推出数字电源产品,并提出了“融合数字电源”(Fusion Digital Power)的解决方案。最近, TI 公司又推出了第三代融合数字电源控制器 UCD9240 以及全新插入式模块,编程更加灵活,进一步提高了电源系统管理的智能化程度。

电源管理趋向高度整合与数字化设计,在手持式装置上,对于电源管理的机制更是不断进步。不同的功能通常都是通过相对应的组件来达成,然而这些组件需要不同的电压供应才能正常运作,而且要求电压质量稳定可靠、干净、高效能,这也是设计电源管理所面临的挑战。

电源系统单芯片的整合是整个系统应用,甚至是产业界的长期趋势。过去行动装置的电源系统是由许多零散的模拟零件所组成的,但是目前的产品已经看不到这样的设计。原先行动装置电源供应模块在功能方面的设计趋势,主要是整合并尽量缩小这些离散模拟电源零件的体积,之后则是把这些零件整合至一颗或少数几颗电源管理组件中。现在,这些电源零件

开始加入越来越多的功能和智能管理能力，在应用范围方面也逐渐普及到其他领域，并且进入各种不同类型的行动装置的设计之中。

数字电源还可通过远程诊断以确保持续的系统可靠性，实现故障管理、过电压（流）保护、自动冗余等功能。由于数字电源的集成度很高，系统的复杂性并不随功能的增加而增加，外围器件很少（数字电源的快速响应能力还可以降低对输出滤波电容的要求），减少了占板面积，简化了设计制造流程。同时，数字电源的自动诊断、调节的能力使调试和维护工作变得轻松。

数字电源管理芯片易于在多相以及同步信号下进行多相式并联应用，可扩展性与重复性优秀，轻松实现负载均流，减少 EMI，并简化滤波电路设计。数字控制的灵活性能把电源组合成串联或并联模型，形成虚拟电源，而且数字电源的智能化可保证在各种输入电压和负载点上都具有最优的功率转换效率。

相对模拟控制技术，数字技术的独特优势还包括在线可编程能力、更先进的控制算法、更好的效率优化、更高的操作精确度和可靠性、优秀的系统管理和互联功能。数字电源不存在模拟电源中常见的误差、老化（包括模拟器件的精度）、温度影响、漂移、补偿等问题，无须调谐、可靠性好，可以获得一致、稳定的控制参数。数字电源的运算特性使它更易于实现非线性控制（可改善电源的瞬态响应能力）和多环路控制等高级控制算法；更新固件即可实现新的拓扑结构和控制算法；更改电源参数也无须变更板卡上的元器件。

数字控制还能让硬件平台重复使用，通过设计不同固件即可满足各种最终系统的独特要求，从而加快产品上市，降低开发成本、元器件库存与风险。

3. 数字电源面临的问题

数字电源已经表现出相当多的优点，但仍有一些缺点需要克服。例如，模拟控制对信号状态的反应是瞬时的，而数字电源需要一个采样、量化和处理的过程来对负载的变化做出反馈，因此它对负载变化的响应速度目前还比不上模拟电源。数字电源的占板面积要大于模拟电源，精度和效率也比模拟电源稍差。虽然数字控制方法的优点在负载点（POL）系统中非常明显，但模拟电源在分辨率、带宽、与功率组件的电压兼容性、功耗、开关频率和成本（在简单应用中）等方面仍然占有优势。不过，如果考虑到数字电源解决方案具有的优点，使用模拟电路搭建功能相似的电路，成本并不一定就比数字电源低。

数字电源中包含的技术无疑是复杂的，但它的使用并不一定就复杂。不过它要求设计人员具有一定的程序设计能力，而目前的电源设计人员普遍擅长模拟设计，缺乏编程方面的训练。这对数字电源的推广也造成了一定的障碍。

数字电源中，A/D 转换器的速度和精度成反比。为了保证交换式电源有较高的稳压精度，A/D 转换器必须有比较高精度的取样，但高精度的取样频率需要更长的 A/D 转换时间，作为反馈回路的一部分，A/D 转换时间过长必然造成额外的相位延迟时间。除了和模拟控制一样存在相位延迟外，转换过程的延迟时间必然也会造成额外的等待循环，造成回路的实时反应能力变差。和模拟芯片用 RC 补偿进行 PI 调节的方法一样，在控制回路中用引入 PI 调节的方法以提高控制回路的实时反应能力，这种做法需要占用数字芯片较大的系统资源，因为数字控制和模拟控制不同，信号取样不是连续不断的，而是规则离散的，两次取样之间会有一段间隔时间，这段时间的值是无法取得的。为了达到精确的控制，每次取样之间的时间间隔

不能太长，即取样频率不能太低。作为数字芯片，每次 A/D 转换结束后，得到的结果都会被送到系统的中央处理器，然后由处理器对取样的值进行运算和 PI 调节。在取样频率比较高的时候，这种做法相当耗费系统运算资源，因此对数字芯片的效能要求也比较高。专门用于电源控制的数字芯片并不算多，虽然在要求比较高的场合一般都会用 DSP 芯片，其运算和取样速度快，功能强大，但价格比较昂贵，而且通用 DSP 芯片不是专门作为电源控制芯片使用的，一般的电源应用对其芯片资源的利用率不高。在某些状况之下，采用 DSP 芯片作为电源数字控制的核心是一种浪费。

成本显然是约束数字电源广泛应用的一个主要因素。由于数字实现方式的成本看似高于相似的模拟实现方式，而且人们对于数字电源产品的采用存在顾虑，所以，从用户的角度来说，只有当数字电源的成本等于或低于模拟电源（因为成本是中国市场考虑的第一市场因素），同时又能提供模拟电源做不到的许多先进功能的时候，数字电源才会被考虑。

人们对数字电源还有一个担心，就是它还不像模拟电源那样经过多年应用的考验，因而可靠性不高。但就像数字电路在概念上就优于模拟电路一样，可靠性是设计的问题，而不是数字化的问题。

综上所述，在简单易用、参数变更不多的应用场合，模拟电源产品更具优势，因为其应用的针对性可以通过硬件固化来实现；而在可控因素较多、需要更快实时反应速度、需要管理多个电源、复杂的高性能系统应用中，数字电源则具有优势。

1.2 数字电源的基本原理

数字电源的关键是电源管理、控制信号的数字化处理，其基本要求是：在保障稳定性的前提下，具有快速性、平稳性和准确性。下面以负载点变换器（POL）为例说明数字电源控制功能的实现原理和方法。

负载点变换器通常用于将直流输入电压（一般为 5~12V）调节成适用于负载要求的直流输出电压（0.7~3.3V）。例如，在典型的基于降压（Buck）开关变换器的电路中，Buck 变换器包含一个脉冲宽度调制主控制芯片，一对主功率开关和一个由储能电感和电容构成的低通滤波器。在脉冲宽度调制控制芯片中，一个电阻分压器对电源的输出电压进行采样，误差放大器将该输出电压与直流参考电压进行比较从而产生电压误差信号，误差信号是一个强度与所需的输出电压校正成正比的模拟信号。通过具有某种控制规律的误差补偿器（Compensator）进行放大后，其输出进入脉宽调制器，经过与载波（通常为锯齿波或三角波）比较之后产生脉冲波，从而控制功率开关（通常为 MOSFET）的导通与关断。由于 MOSFET 具有较大的输入门电容，因此驱动器电路有必要有效率地导通和关断它们。另有固定电阻电容网络作为补偿回路，以确保动态响应和稳定性之间的正常平衡。

电源的两个其他主要部分是输入和输出滤波器网络。这些部分由感应器、电容和电阻构成，可以提供数种功能。输入滤波器有助于保护电源不受电源电压瞬态的影响，在动态负载变化过程中提供一些能量存储，并附带滤波器网络以使电源满足其输入引起的发射规范。输出滤波器稳定输出电压以确保电源满足其纹波和噪声规范，此外还存储能量以帮助维护负载

电路的动态电流要求。重要的是，对于模拟或数字控制结构而言，输入和输出滤波器以及电源器件将基本上保持相同。

在典型的数字电源控制系统结构中，输出电压感应排列类似于模拟系统。但是，模/数转换器（ADC）代替了模拟系统的误差放大器，从而将感应到的模拟电压值转换成二进制数。除了输出电压之外，了解电源的输出电流和温度等其他模拟参数也非常有用。虽然独立的 ADC 可以感应每个参数，但是采用单个 ADC 并在它前面加设一个多路复用器往往是更加常用的方法。多路复用器（MUX）则将在要测量的模拟输入之间切换，并依次将每个输入发送至 ADC。

由于 MUX 和 ADC 的采样速率是固定的，因此 ADC 对每个参数都输出一系列数字，每个数字由已知的时间段分隔。这些值供给为系统提供处理能力的微控制器。卡上程序内存中存储着微控制器的控制算法，这些算法负责执行一系列有关 ADC 的输出值的计算。这些计算的结果包括误差信号、想要的驱动器级脉宽、各种驱动器输出的最佳延迟值以及回路补偿等参数。有了这些参数，数字脉宽调制器（DPWM）就可以通过驱动后控制外接的功率 MOSFET，而电源管理部分也可以通过一定的接口及协议与外界通信了。模拟系统的外部回路补偿元件此时变得不再是必需的。输出电压、输出电流和温度限制等参数的参考值在生产期间被保存在非易失性内存中，或者可以通过 PMBus 输入。在系统启动时，数据会由 EEPROM 下载到数据内存中，主芯片据此控制模块的工作状态。同时，可以通过一定的外部操作来重新读入 EEPROM 中的默认设置。

1.3 数字电源的控制与管理

使用“电源控制”术语来强调电源供应系统内部的控制功能，尤其是个体内部能量流的循环管理。这一定义包含了反馈回路和内部管理维持功能。功率控制功能在与电源供应的开关频率实时监控中起到作用。这种类型的控制功能可以由模拟或者数字技术实现，电源供应系统无论采用哪种方式，呈现给最终用户的表现是基本一致的。这就是说，数字电源的使用不要求最终用户做任何改变和新的设计。

相应地，“电源管理”是关于一个或多个电源供应系统之外的通信和控制，包括电源系统配置、单个电源供应系统的监控以及故障监测信息传送等。电源管理功能不是实时的，它们在一定的时间范围内起作用，要慢于电源供应系统的开关频率。目前，这些功能都趋于将模拟和数字技术结合。例如，电阻器通常用于调整输出电压，而给每个电源供应系统的电源排序则需要专线控制。数字电源管理意味着这些功能全部使用数字技术。此外，简化互连方式应用在某些类型的数据通信母线结构中，优于在每个电源供应系统之间使用多种定制的互连手段进行排序和纠错。

1.3.1 数字电源控制的应用优势

1. 电源模拟控制流程

在电源的模拟控制中，电源的输出电压由一个电阻分压器采样后送入误差放大器与直流

标准电压进行比较。误差放大器的输出是一个模拟信号，其幅度与电源输出电压所需要的校正大小成正比。这个信号反馈到脉宽调制芯片，产生一个相应脉宽的脉冲信号，用以控制功率半导体器件（一般为 MOS 管）的“导通时间”。因为 MOS 管的输入门电容较大，驱动电路便能有效地开关它们。一般使用一个固定的阻容网络来补偿控制回路，以确保电源动态响应和稳定度之间的合理平衡。

电源的另外两个主要部分就是输入输出滤波网络。它们通常由电感、电容和电阻组成并提供多种功能。输入滤波部分保护电源不受输入电压跳变的影响，在负载跳变时提供储能，同时和外部滤波电路一起使电源满足输入传导电磁兼容的要求。输出滤波部分使输出电压更平滑，以满足纹波噪声的指标，同时也帮助电源储能以满足负载的动态电流要求。

重要的是，无论是模拟或数字控制架构，输入和输出滤波电路以及功率器件在本质上会保留一致。

2. 电源数字控制流程

在电源的数字控制中，输出电压的遥测与模拟系统相似，但是数字控制系统中使用模数转换器替代了模拟控制系统中的误差放大器，将采样得到的电压信号转换为一个二进制数。除了输出电压，了解其他模拟参数也很重要，例如输出电流和电源的温度。当然使用多个分开的模数转换器能够测量各个参数，但是使用一个前置多路复用器的模数转换器将会更经济。复用器会在各个测得的模拟参数之间切换并将其按序（并一串）输入模数转换器。

多路复用器和模数转换器的采样速率是固定的，模数转换器为每一个参数输出一系列数字，每一系列数字是由一个已知的周期分开。这些数值提供给一个微处理器，为系统提供了工作流程。电路板上的程序存储器存储了微处理器的控制运算法，用于执行一系列基于模数转换器输出值的计算。这些计算的结果是一些参数，例如误差信号、驱动级所需的脉宽、针对各种驱动输出优化的延迟值以及环路补偿参数。模拟系统中外部环路不再需要补偿元件。在生产过程中，参数的比较参考值，例如输出电压、输出电流、温度限定值存储在非易失性存储器中，或者在系统启动时可以下载到数据存储器中。

3. 模拟控制和数字控制的比较

和模拟控制相比，数字控制在适应输入和负载条件变化方面更加灵活。通常，模拟的方法是为一个给定的控制参数配置一个折中的设置，然而数字控制系统能够在转换器工作环境作用下改变控制参数。例如，在同步的负载点（POL）降压型的稳压器里，死区时间保证了上端和下端的场效应晶体管永远不会同时工作。模拟控制系统为最恶劣的工作条件采用了固定的定时网络去设置死区时间。但是对于典型的工作环境，这个死区时间比需要的时间长，从而降低了转换器的效率。通过对比，一个数字控制环可以根据工作环境动态地改变死区时间，优化了 POL 整流器的效率。

1.3.2 数字电源管理的应用优势

便携式电子设备的发展，推动着数字电源技术和功率管理技术的发展。现代化的功率管

理半导体已经将功率开关与多个相关保护及控制电路集成在一起，来降低功率管理设备中的电路板占位面积，并实现了保护、控制与故障监控等功能的组合。同时，数字化电源管理集成电路不满足于仅有的电压、电流、温度等参数的检测，逐步发展为集成了数字化 PWM 控制、ADC 和通信功能，并正在向着成为完整的电源片上系统的方向不断发展。

新一代集成电路需要 3.3V、1.8V 甚至更低的电源电压，单个器件需要多路电压供电，而且电流的需求很大，电压也必须以正确的时序加到器件上。为这些器件供电的电压必须在电路板上（最好在距离这些器件很近的地方）产生，以使压降最小或电压稳定。高性能的 DC/DC 转换器适用于宽范围输入，既可作为隔离式电源，也可作为非隔离负载点转换器。因此，大多数板载电源系统已经采用 DC/DC 转换模块作为供电主体。但是，若缺少了电源管理电路，则无法构建一个完整、健全的电源系统。

电源管理的内容包括电源系统监控、定序和跟踪、监视和失效保护。电源管理器件在输入端处理共模抑制、启动限制、启动和关闭的控制，甚至功率因数校正等功能。配置在输出端的电源管理器件控制启动定序和输出电压调节，并为过欠压、过流情况提供相应的失效保护，所有相关功能电路均要求与主电路隔离。图 1-1 所示为在隔离型 AC/DC 变换器中电源管理器件的典型应用。

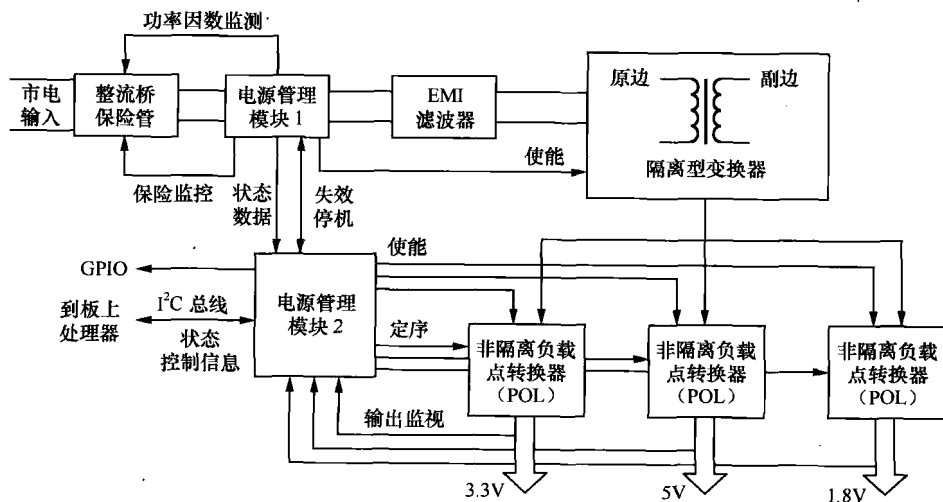


图 1-1 电源管理器件在隔离型 AC/DC 电源系统中的应用

专用的数字电源管理器件比通常采用的模拟电路或微控制器、可编程逻辑器件等方法在成本、开发周期和可靠性方面具有较大优势。新一代的数字电源管理器件内部集成了能够满足实时监控需求的快速 ADC，使它能比通用微控制器的片外 ADC 更快地反映失效。监测数据通过 I²C 或 PMBus 总线传输给电源主控制器，用以实现精准的调压设置、故障保护等功能。内部的时钟可实现故障记录。对于多路输出的电源系统，数字电源主控制器实时地通过总线接口从各输出端的管理器件内读出各路输出的监测数据，实现了电源系统的全面监视。一旦软件设计通过，相同的源文件和配置文件可以用于该设计的所有产品，性能在单元之间是一致的，而模拟电路则会因元件本身差异导致性能不一。

传统电源依靠模拟电路实现电源管理，通过放大器、比较器和 RC 时间延迟来设置各个参量的电源系统管理电路已经比不上数字化电源管理器件的优越性。随着设计的深入，元器

件不再随着参量的改变而改变，电路板也不再需要反复重新加工。采用专门的数字电源管理器件，允许通过配置软件来设置工作参量。设计期间的更改可以很容易地通过软件实现，不需作硬件的改变。配置软件只要求设计人员调节少数参量，当所有参数设置完毕后，可以通过 I²C 端口用编程下载线，下载到数字电源管理器件中。图 1-2 为典型的电源管理器件的内部功能单元结构。

除了专门的电源管理集成电路应用在电源系统的监控上以外，新一代集成电路也在自身的设计上增加了减小功耗和部分功率管理方面的功能，提供了与数字电源、数字化电源管理器件的通信接口，这已经在较高档的数字处理器上得到了体现。

通过数字处理器和 DC/DC 变换器、数字电源管理单元之间的通信，处理器可以根据自身当前的处理速度

和任务强度自动调节所需的电源电压。数字电源和功率管理单元内部包含若干寄存器，当处理器所需要的电压发生变化时，则通过总线接受新的数据来配置相关寄存器，或者在数字电源内部程序的查找表中找到相关设置值，此种方案在功耗要求严格的领域正成为主流应用。对于内部各部分供电分开的处理器，可将正处于待命或睡眠状态的功能单元完全断电，这将进一步减小功耗，但对于供电管理提出了更高的要求，不仅输出端口增加，对不同端口的设置和监测将显著增加数字电源管理单元内程序的复杂程度。处理器内部的硬件性能监视器则可以在特定时间内提供最低的供电电压。监视器的信息直接来源于处理器内部，所以监视系统的闭环完全处在处理器芯片内部，以实现功率管理的 SoC 设计。

电源管理是当今热门的电子技术，有关数字电源管理的控制协议、单片数字电源管理器和数字电源、分布电源拓扑等新产品和新解决方案层出不穷。电源管理的市场在快速增长，伴随着的是电源的数字化、小型化、集成化、高效化和智能化。可以预见的是，更高集成度和更多可编程性的电源管理半导体将会不断地应用在各种电源系统中，数字化的电源控制与管理必将融合到同一硅片上，集成了 PWM 控制和完善的智能化管理功能的数字电源控制管理芯片必将给工程应用带来极大的便利。

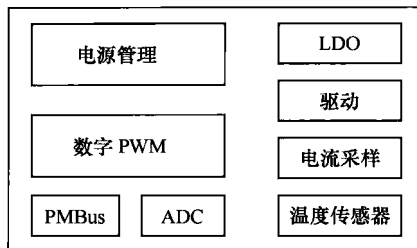


图 1-2 电源管理器件的内部功能单元结构

1.4 数字电源的基本结构

图 1-3 为数字控制的电源系统的典型结构。系统包括模拟部分、数字部分以及模拟数字的接口电路。模拟部分主要是各种拓扑的变换电路及负载电路；数字部分为微处理器芯片及其外设；接口电路包括从模拟部分到数字部分的采样网络及 A/D 转换器和从数字部分到模拟部分的 PWM（外围电路、相应的门极驱动电路及 D/A 转换器或 I/O 外围电路）。

数字电源可以完成对 PWM 控制环路的数字控制和数字电源管理与通信任务。系统可以使用一种或两种形式的数字电源。数字电源的关键数字器件有数字电源驱动器、数字电源 PWM 控制器和数字信号处理器等。

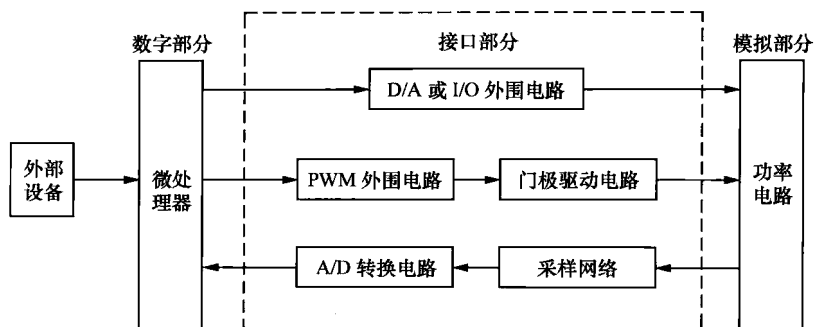


图 1-3 数字控制的电源系统的典型结构

1. 数字电源驱动器

目前，数字控制电源驱动器芯片中比较典型的应用有美国德州仪器公司（TI）的 UCD7100/7201 芯片。二者的区别：UCD7100 为单端输出，UCD7201 为双端输出。它们的额定输出电流均为 $\pm 4\text{A}$ ；可驱动 MOSFET 开关功率管；均可适配 UCD9110/9501 型数字控制器；主控制器可监控其输出电流，快速检测过流故障并迅速关断电源，检测周期仅为 25ns 。

现以 UCD7100 为例，该芯片主要包括 3.3V 电压调整器及基准电压源、触发器、施密特比较器、欠压关断电路、控制门、True Drive 驱动器等部分。“True Drive”（真驱动）为 TI 公司的专有技术，它是由并联双极性晶体管和 MOSFET 管组成上拉/下拉电路构成的混合输出级。其优点是驱动能力强，在低电压时也能正常输出，并能在极低输出阻抗下控制外部功率 MOSFET 的过压、欠压保护，功率 MOSFET 不需要接起保护作用的肖特基钳位二极管；UCD7100 能在几百 FIS 的时间内给 MOSFET 的栅极提供一个高峰值电流，快速开启驱动器；UCD7100 的高阻抗数字输入端（IN）能接收 3.3V 逻辑电平、最高开关频率达 2MHz 的信号；利用施密特比较器能将内部电路与外部噪音隔离；若控制器的 PWM 输出停在高电平上并发生过电流故障，电流检测电路就关断驱动器的输出，系统可进入重试模式；通过 DSP 或 MCU 内部的看门狗电路，能重新启动芯片。UCD7100 内部的 $3.3\text{V}/10\text{mA}$ 电压调整器可作为数字控制器的电源。

2. 数字电源 PWM 控制器

美国德州仪器公司（TI）的 UCD8220/8620 是受 DSP 或 MCU 数字控制的双端推挽式 PWM 控制器。二者区别是 UCD8220 可利用 48V 低压启动，UCD8620 内部增加了 110V 高压启动电路。UCD8220 的内部结构如图 1-4 所示。

该芯片主要包括 3.3V 电压调整器、基准电压源、脉宽调制器、驱动逻辑、推挽式驱动器、欠压关断电路、限流电路及电流检测电路。UCD8220/8620 可运行在峰值电流模式或电压模式，不仅能对极限电流进行编程，还可输出一个能受主控制器监控的极限电流数字标志。UCD8220/8620 的时序工作波形如图 1-5 所示。

3. 数字信号处理器

目前，专为数字电源系统配套的数字信号处理器有美国德州仪器公司（TI）的 UCD9501、