

# DC-DC变换器数字PID控制算法设计和修正

Digital PID Controller Design and Modification for DC-DC Converter

万慧 黄维玲 马新敏 吴政敏

Wan, Hui Huang, Weiling Ma, Xinmin Wu, Zhengmin

**摘要:**本文以 Buck(降压型)DC-DC变换器为例,提出了对数字 PWM 的 PID 控制器的两种修正方式:死区控制方式,平均数字滤波控制方式。数字控制器根据输出电压误差决定是否使用该修正方式计算下一个占空比。对系统的测试说明经过修正的 PID 控制 buck 型 DC-DC 变换器可以同时得到稳定精确的稳态响应和快速的瞬态响应。

**关键词:**数字 PID 控制;死区控制;平均数字滤波

**中图分类号:** TM46

**Abstract:** With a design example based on a buck DC-DC converter presented, the paper gives out two modifications to the digital PID controller for PWM: a dead zone and an averaging digital filter. The digital controller monitors the output voltage error to determine if a modification should be employed to calculate the next duty cycle. Experimental result from the system indicates that a stable and accurate steady-state response can be obtained while maintaining a good and quick transient response.

**Keywords:** digital PID controller; a dead zone; an averaging digital filter

## 1 引言

传统的 DC-DC 变换器控制是通过模拟技术实现。模拟控制系统工作在连续时间状态,且具有高带宽的特点。另外,模拟系统的电压分辨率在理论上是无穷大的。然而,模拟系统通常由不连续的硬件所组成,必须更换硬件才能改变控制增益或者算法。此外,先进的控制算法也需要经过数字过渡。因此,人们对于应用于控制 DC-DC 变换器的数字控制技术越来越感兴趣。其复杂控制依靠软件来完成,它比复杂的模拟系统更稳定可靠。数字处理器也较少受到老化、环境或参数变化的影响。此外,处理器能检测系统,运行自我诊断和测试程序,并向显示器或主机传递工作状态。

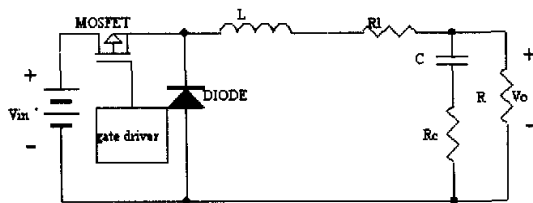


图1 buck 变换器主电路图

然而,DC-DC 变换器的稳态性能会因数字控制器中 ADC 的灵敏度和固有延迟而下降。控制器采样输出电压,利用 PID 算法计算新的占空比及更新占空比需要一定的时间,所以有一定的时间延迟。灵敏的 ADC 跟踪得到输出电压纹波,并作为输入送给控制器。因此,数字控制器事实上增加了输出电压稳态纹波。为了消除数字控制器引起的电压纹波,需要对 PID 算法

进行修正。

## 2 Buck 变换器电路

Buck 变换器设计如图 1 所示。

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \left( \frac{V_o}{D} \right) \left[ \frac{1 + sR_C C}{1 + s \left( R_C C + \left[ R // R_L \right] C \right) + \frac{L}{R + R_L} + s^2 LC \left( \frac{R + R_C}{R + R_L} \right)} \right] \quad (1)$$

本电路可以用如下函数描述:

变量 D 是占空比。电路参数分别为  $V_m = 20 \text{ V}$ ,  $V_o = 12 \text{ V}$ ,  $L = 150 \mu\text{H}$ ,  $C = 1000 \mu\text{F}$ ,  $R = 10 \Omega$ 。电容和电感的寄生电阻  $R_C$  和  $R_L$  分别为  $30 \text{ m}\Omega$  和  $10 \text{ m}\Omega$ 。MOSFET 的开关频率和数字控制器的采样频率均选为  $20 \text{ KHz}$ 。

原始的控制器的具有如下传递函数:

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

在函数中,  $K_p$  是比例增益,  $K_i$  是积分增益,  $K_d$  是微分增益。此控制器有一个极点和两个零点。PID 设计的优点是能加快瞬态响应。两个零点放置在大约  $260$  弧度/秒和  $2600$  弧度/秒的位置。如函数(3)所示。

$$G_C(s) = 5.6746 \times 10^{-1} + \frac{1.3413 \times 10^2}{s} + 1.9841 \times 10^{-4} s \quad (3)$$

PID 控制器是在连续时间范围内设计,并通过向后综合法(尤拉法则)转换成离散的。下面的差分方程可由离散时间传函得到:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{K_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (4)$$

在方程中,  $u(k)$  是由第  $k$  次采样计算得到的新占空比,  $e(k)$  是第  $k$  次采样误差。误差  $e(k) = \text{Ref} - \text{ADC}(k)$ , 这里  $\text{ADC}(k)$  是第  $k$  次采样的数字量,  $\text{Ref}$  是对应于理想输出电压的数字量。函数右边第二个表达式是误差总和,  $e(k) - e(k-1)$  是第  $k$  次采样误差和  $(k-1)$  采样误差之差。

函数(4)在 TMS320F240 评估板上实现,用于产生门信号驱动 buck 变换器的 MOSFET。输出电压有  $1 \text{ ms}$  的上升时间,且无超调。对占空比和稳态输出电压的观察显示占空比在  $22\%$  和  $85\%$  之间振荡。输出电压的纹波大小是  $250 \text{ mV}$ , 并有  $120 \text{ mV}$  的稳态误差。比较而言,开环变换器运行的纹波大小仅为  $80 \text{ mV}$ 。因此,这种稳态性能是较差的。根据研究有两种修正后的算法能够在保持快速瞬态响应的同时减少稳态纹波。

## 3 修正算法

### 3.1 死区控制

死区是如下描述的非线性函数:

$$p(k) = \begin{cases} e(k), & \text{when } |e(k)| > \varepsilon \\ 0, & \text{when } |e(k)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

变量  $p(k)$  是提供给 PID 控制器的值。如果  $\varepsilon$  太小,在(5)中定义的标准之间的转换将很频繁,导致在稳态时输出电压的振

电话: 010-62559461, 62545262 (Fax)

中国自控网: <http://www.itcontrol.cn>

邮局订阅号: 82-948 120 元/年 21 -

荡增加。另一方面,如果  $\varepsilon$  过大则系统响应会大大滞后。对于这个修正,可以选择设计 1 的增益算法来实现,根据  $\varepsilon$  确定是实际误差  $e(k)$  还是 0 用于计算下一个占空比。

### 3.2 平均数字滤波

对于平均数字滤波,把最后的 5 个误差值加在一起并用 5 除,见(6)。

$$e(k)_{avg} = \frac{e(k) + e(k-1) + e(k-2) + e(k-3) + e(k-4)}{5} \quad (6)$$

如果  $|e(k)| \leq \varepsilon$ , 由(6)计算出来的平均误差提供给 PID 控制器。如果  $|e(k)| > \varepsilon$ ,  $e(k)$  直接传递给 PID 控制器。我们可以用 PID 设计的增益算法结合  $e(k)$  或者  $e(k)_{avg}$  用来计算新的占空比。

### 3.3 $\varepsilon$ 的选择

所有这两种 PID 算法修正都依赖于可调参数  $\varepsilon$ 。此参数可通过降压变换器的试验决定。不同的  $\varepsilon$  降压变换器稳态性能的比较见表 1, 其中  $\varepsilon=100\text{mV}, 150\text{mV}, 200\text{mV}$ 。

表 1 不同  $\varepsilon$  对应的系统性能

$\varepsilon=200\text{mV}$	PWM 波形的占空比波动	纹波	稳态误差
死区	59%-60%	100mV	3mV
平均滤波	56.9%-62%	150mV	-10 mV
$\varepsilon=150\text{mV}$	PWM 波形的占空比波动	纹波	稳态误差
死区	58%-60%	60mV	7mV
平均滤波	56%-63%	175mV	20mV
$\varepsilon=100\text{mV}$	PWM 波形的占空比波动	纹波	稳态误差
死区	不稳定	纹波	纹波
平均滤波	56%-63%	175mV	20mV

对于死区控制方式,在  $\varepsilon=200\text{mV}$  时是最稳定的,且此时 PWM 信号占空比波动和稳态误差都最小。当  $\varepsilon=150\text{mV}$  时,纹波最小,占空比在大多数时间里都是稳定的,只是偶尔振荡。这可能是因为  $p(k)$  在两个值之间频繁变换的缘故。当  $\varepsilon$  为  $100\text{mV}$  时,系统变得不稳定。因此,死区控制选择最理想的值为  $200\text{mV}$ 。对于平均数字滤波控制方式,  $\varepsilon$  从  $200\text{mV}$  到  $100\text{mV}$  PWM 信号非常类似。然而,纹波和稳态误差在  $200\text{mV}$  时最小,因此平均数字滤波器也选择  $200\text{mV}$ 。基于表 1 的结论,对两种算法都选择  $\varepsilon$  为  $200\text{mV}$ 。

## 4 buck 变换器实验结果分析

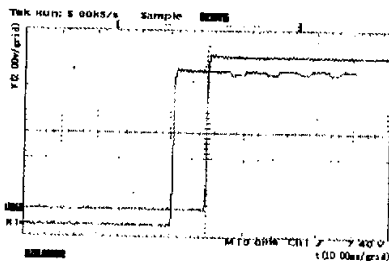


图 2 启动瞬态波形图

带有两个修正 PID 算法控制器的 Buck 变换器的性能可用启动瞬态状态,基准变化时的性能和稳态性能来衡量。图 2 显示了启动瞬态状态的变化。R1 是死区控制的波形, R2 是平均数字滤波的波形。对于所有两个算法修正稳定时间都大约为  $2\text{ms}$  且没有超调。因为死区控制认为所有低于  $200\text{mV}$  的误差均为零,因此输出电压在稳定后有少许振荡。在  $10\text{ms/div}$  时间范围内更详细的检测表明振荡在  $200\text{ms}$  之后消失。

软件中的输出电压基准每  $20\text{ms}$  都从  $10\text{V}$  变为  $14\text{V}$ 。相当于输出电压标称值 ( $12\text{V}$ )  $17\%$  的变化。这种基准的变化对于系统响应相当于一个扰动。带有死区控制的基准变化的瞬态响应如图 3 所示。

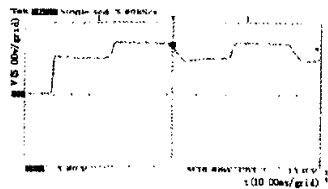


图 3 死区控制时基准电压变化对应的输出电压变化图

平均数字滤波算法会产生非常类似的响应,这里略过。在输出电压从  $0\text{V}$  升到  $10\text{V}$  或者从  $10\text{V}$  到  $14\text{V}$  时,几乎没有超调,稳定时间大约为  $2\text{ms}$ 。当输出电压从  $14\text{V}$  降到  $10\text{V}$  时,稳定时间都为大约  $12\text{ms}$ ,远大于电压上升的稳定时间。这是因为输出电容在输出电压降低时需要放电时间。当从  $14\text{V}$  降到  $10\text{V}$  时,死区控制和平均数字滤波器的超调都大约为  $10\%$ 。

开环的 Buck 变换器输出电压纹波如图 4 所示。纹波大小低于  $80\text{mV}$ 。闭环的 buck 变换器输出电压纹波使用不同算法修正的结果分别见图 5、6。

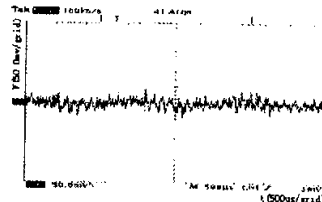


图 4 开环控制输出电压纹波

死区控制的纹波低于  $100\text{mV}$ , 而平均数字滤波控制方式的纹波低于  $150\text{mV}$ 。平均数字滤波器的纹波频率为  $1\text{kHz}$ , 死区控制的纹波是随机的。比较之下,平均数字滤波器的纹波较高。死区控制的纹波只比开环纹波高少许。

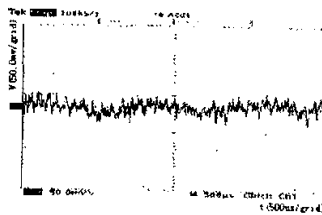


图 5 死区控制输出电压纹波

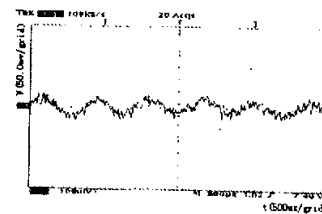


图 6 平均数字滤波控制输出电压纹波

## 5 小结

DC-DC 变换器数字控制器的稳态性能会因 ADC 的灵敏度和固有延迟所影响。变换器采样输出电压,计算新的占空比及更新占空比需要一定的时间,所以有一定的时间延迟。最小的延迟等于一个开关周期。一个灵敏的 ADC 可以跟踪输出电压纹波。因此,数字控制器事实上增加了输出电压稳态纹波。

提高降压变换器数字 PID 控制器的稳态性能的(见第 29 页)

其时域波形,以观察参数的趋势,掌握参数变化得真实情况,图形区还可以实现参数切换。

(3) 数据文件管理模块:以实验开始的时间来命名的数据库文件实时保存当次实验的数据(如 02-5-22-09.mdb 表示 2002 年 5 月 22 日 9 点开始的实验记录),供以后查询分析使用。

(4) 查询分析模块:报表系统可为每次实验记录的数据输出到屏幕或是打印机,可以打印当天当次实验记录,也可打印以往的记录。历史数据的回放程序可以以图形方式回放任一次记录的任何参数的时域波形,可以按记录或者按页查看,供分析查询。

(5) 信息处理模块:可对轧制力、上下辊扭矩、主缸压力等作频谱分析、功率谱、自相关和互相关分析。

(6) 通讯接口模块:通过 COM 口发送上位机的控制命令和接受下位机上传的数据。

### 2.2.2 监测系统上下位机通讯系统

上下位机通讯系统是采用串行通讯方式,下位单片机(Atmel89C51)是采用 RS-232 串行口连结 PC 机的 COM 口来进行信息交换的,Atmel89C51 单片机系统中,其中串行口的输入输出均是 TTL 电平,为了提高抗干扰能力,RS-232 标准采用负逻辑。标准规定-5~-15 为逻辑 1,+5~+15 为逻辑 0,称为 EIA 电平。要与 PC 进行通讯,需通过 MAX232 来进行电平转换。Atmel89C51 单片机发送数据是由 TXD 端送出,接收数据是由 RXD 端输入,有两个缓冲器 SBUF,一个作发送缓冲器,一个作接收缓冲器,是可编程的全双工通讯接口。上位机软件系统是采用 Visual Basic 6.0 开发的,对串行口的读写使用串行通信控件 MSCOMM.OCX,只需在设计时设置好串行口资源号、输入输出缓冲区大小、传输波特率、有无校验码、二进制/文本输入方式等属性就可进行通讯。系统在进行数据通讯之前先由上下位机发送握手信号确认通讯线路是畅通的,然后由上位机发出各种控制命令来控制下位机的数据采集和传送。上下位机通讯协议为传输波特率为 9600bps,1 位起始位,8 个数据位,1 位停止位,无校验。下位机上传的数据帧格式为:

前导字符	数据	校验和	结束字符
------	----	-----	------

由前导字符(00H)和结束字符(FFH)来表示一帧数据的开始和结束,通过校验和来确定进行差错控制与检测,下位机每发送一个数据就计算一次校验和,数据发送完再发送校验和。上位机每接收一个数据也同时累加校验和,接收完,把校验和的结果与上传的校验和进行比较,若相等则表明通讯没出错,否则就把数据帧去掉,继续接收下一帧数据。

### 2.2.3 监测系统下位机系统

下位机硬件系统是由 Atmel89C51CPU,数模转换芯片 AD574,多路开关 CD4051,通讯模块 MAX232 组成的单片机系统。Atmel89C51 是美国 Atmel 公司研制的高性能 CPU,具有 4K 闪存,128 字节的内存,工作晶振是 11.0592Mhz,2 个十六位定时器/计数器,5 个中断源,一个串行口。AD574 是美国 AD 公司研制的 12 位模数转换芯片,转换时间是 25 $\mu$ s,功耗是 725mw。单片机软件采用 Keil C 编写,Keil C 是一种高效的单片机关开发语言。下位机采集系统完成如下功能:软件流程图如图 2(略)可向作者索取。

(1) 单片机系统初始化:单片机上电复位,端口、串行口、定时器初始化。

(2) 数据采集与滤波:按查询方式采集,由 CD4051 的零通道开始并启动 AD574 实现 A/D 转换顺序采集各通道信号。

(3) 与上位机通讯:接受上位机的命令和向上位机传送所

采集到的数据等。

### 2.3 监测系统的抗干扰措施

本系统由于应用于工业现场,各种电磁干扰复杂,如不采用抗干扰措施,会导致整个系统失控,基于以上考虑,本系统采用如下的措施进行抗干扰设计:

(1) 整个系统屏蔽在控制柜内,控制柜为铁壳,有良好的接地,可以避免空间辐射的电磁波干扰。

(2) 电源部分采用电源滤波器,隔离变压器,用以控制电源系统中的高次谐波的干扰。

(3) 电脉冲量的输入采用光电隔离耦合器隔离。

(4) 单片机电路采用看门狗电路,以免程序乱飞。

(5) 采用软件中值滤波程序滤波,对一个采样连续采集 5 次,去掉最大值和最小值,然后求剩余 3 个值的平均值为最终采样值。

(6) 单片机串行口采用 EIA 电平。

## 3 结束语

以上介绍的快速铸轧监测系统,具有在线采集快速铸轧过程中的各类参数,具有是实时数字和图形两种显示方式,还可存储起来供以后查询分析使用。本系统已应用快速铸轧实验中,使用方便直观,采集的数据快速准确可靠,具有人工记录无法比拟的优越性。

### 参考文献:

- [1] 虞和济、寇惠. 轧钢机状态监测与故障诊断. 冶金工业出版社, 1991.
- 作者简介: 李晓谦, 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 研究方向, 快速铸轧工艺与设备, 机电设备状态监测与故障诊断等; 杨琛盛, 男, 1974 年出生, 硕士, 研究方向, 机电设备状态监测与计算机控制等, 电子邮件: yangcong1001@163.com
- (410083 湖南长沙中南大学机电工程学院) 李晓谦 杨琛盛
- (410083 Institution of Mechanical-Electrical Engineering, Central South University) Li, Xiaolian Yang, Chensheng
- 通讯地址:
- (410083 湖南省长沙市中南大学学生 3 舍 732#) 杨琛盛
- (收稿日期: 2002.11.25)

(按第 22 页)方法在本文中给出。一个方法是使用死区控制。当输出电压误差比事先预定的值小的时候,置零。如果误差比这个值大,则用此误差计算新的占空比。另一个方法是将最后五个输出电压误差平均后作为 PID 控制器的输入。这两种方法都通过降压变换器实现并测试通过。在输出电压误差小于 200mv 时都使用标准的 PID 算法。如果大于 200mv 则结合其中一种修正方法修正 PID 算法。本研究结果表明好的稳态性能可以在保持好的瞬态响应的同时得到。闭环控制的输出电压纹波与开环控制相当。

### 参考文献:


- [1] K. Ogata, Discrete-Time Control Systems. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [2] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1998, 66.
- 作者简介: 万慧, 女, 1979 年 12 月 11 日, 汉族, 2000 年本科毕业于华中科技大学自动控制系, 现在华中科技大学激光技术国家重点实验室攻读硕士学位。研究方向: 基于 DSP 的激光电源数字控制系统的设计与实现。电话: 027-87541741, E-mail: wh\_hust@etang.com.
- (430074 湖北武汉华中科技大学激光技术国家重点实验室) 万慧 黄雄玲 马新敏 吴政敏
- (HuaZhong University of Science and Technology, State Key Laboratory of Laser Technology 430074) Wan, Hui Huang, Welling Ma, Xinmin Wu, Zhengmin

(收稿日期: 2002.11.11)

电话: 010-62559461, 62545262 (Fax)

(稿件与图表请注明 200 例)

中国自控网: <http://www.itcontrol.cn>  
邮局订阅号: 82-946 120 元/年 29 -

作者: [万慧](#), [黄维玲](#), [马新敏](#), [吴政敏](#)  
作者单位: [430074, 湖北武汉华中科技大学激光技术国家重点实验室](#)  
刊名: [微计算机信息\(测控仪表自动化\)](#)   
英文刊名: [CONTROL & AUTOMATION](#)  
年, 卷(期): 2003, 19(5)  
被引用次数: 5次

## 参考文献(2条)

1. [陶永华](#) [新型PID控制及其应用](#) 1998
2. [K Ogata](#) [Discrete-Time Control Systems](#) 1987

## 引证文献(5条)

1. [张英平](#) [DC-DC变换器在信号灯中的应用](#)[期刊论文]-[科技广场](#) 2007(11)
2. [马宏伟](#), [刘凌](#), [李海宁](#) [一种新型矿灯用充电器的研制](#)[期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 2006(z3)
3. [王勇](#) [智能充电系统在200kVAUPS中的研究与设计](#)[学位论文]硕士 2005
4. [李军显](#), [韩忠军](#), [许惠丽](#) [工业配料电子秤抗冲击设计研究](#)[期刊论文]-[郑州航空工业管理学院学报\(社会科学版\)](#) 2004(4)
5. [赵射](#) [带指针指示的数字式显示记录仪](#)[学位论文]硕士 2004

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjsjxx200305012.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjsjxx200305012.aspx)