

# 一种非线性电子负载基准电流的产生方法

龙厚涛, 侯振义, 孙刚, 王伟

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要** 输入基准电流的产生是非线性电子负载设计的关键技术,若采用谐波叠加的方式,必须已知基准电流的谐波信息,而且无法实现对任意参数非线性负载的模拟。为了克服传统方式的缺陷,以桥式整流非线性负载电路为例,在分析其状态方程的基础上,提出依据整流电路参数,直接产生相应输入基准电流波形的方法。在硬件实现上,综合速度和资源因素,采用 CORDIC 和插值相结合的算法,减少了对时钟周期和硬件资源的消耗。通过 MATLAB 和 Quartus II 软件仿真,验证了该方法能够消耗较少的时钟周期和硬件资源,产生与理论电流波形相一致的非线性电子负载基准电流。

**关键词** 非线性电子负载;CORDIC 算法;插值算法;波形产生;FPGA

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.06.014

**中图分类号** TM74 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)06-0069-05

通信电源、开关电源、UPS 电源、蓄电池和燃料电池等各种电源产品在研发生产过程中或产品出厂前都需要进行负载试验,以检验其电气性能,特别是负载特性。目前,这类检测和试验一般都采用无源负载,但由于无源负载存在能耗大、发热量大、稳定性差、负载调节不便等缺点,因此节能、环保、设置容易、测试方便的能量回馈型电子负载成为电力电子领域的一个研究热点。

能量回馈型电子负载是一种新型节能电力电子装备,它应用现代电力电子技术和先进控制技术,模拟各种负载特性,并将能量回馈电源。当前能量回馈型电子负载能够很好的模拟各种线性负载特性,但在模拟非线性负载方面存在精度差、响应慢以及能量回馈效率低等问题,限制了其广泛应用。电子负载能否实现模拟非线性负载的功能,取决于能否将负载模拟部分设计成一个可以输出任意电流波形的电流源,因此,负载模拟部分输入基准电流的产生在电子负载的设计中起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。

## 1 非线性负载输入电流波形分析

要模拟非线性负载,首先必须知道非线性负载输入电流波形。目前,在各类电力电子设备中,整流性负载所占的比重最大。各种单相/三相、可控/不可控整流性负载是目前最典型、应用最广泛的非线性负载。单相不可控整流负载按二极管侧所接负载的不同,可以分为以下 3 种不同的电路:CR 负载电路、LR 负载电路和 LCR 负载电路。本文以 CR 负载电路为例对非线性负载的输入电流进行波形分析,电路如图 1 所示。

图 1 中, $u_{in}$  为待测交流电压源, $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$  组成不可控整流桥, $r$  为不可控整流桥内阻, $C$ 、 $R$  为整流桥负载。取整流电流  $i_2$  和

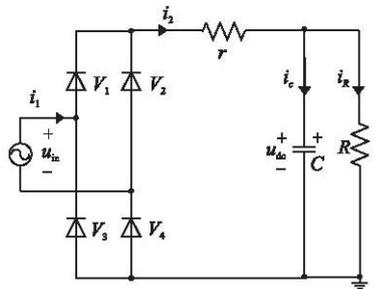


图 1 CR 负载的整流电路图  
Fig. 1 Rectifier with CR load

\* 收稿日期:2011-04-02

基金项目:陕西省工业攻关资助项目(2010K01-075)

作者简介:龙厚涛(1988-),男,山东滕州人,硕士生,主要从事电能处理与监控研究。

E-mail:longhoutao1102@126.com

电容电压  $u_{dc}$  为状态变量,当电路进入稳态后,系统的状态方程为:

$$\begin{cases} i_2 = \frac{|u_{in}| - u_{dc}}{r} \\ \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_2 - \frac{u_{dc}}{R} \right) \\ i_1 = \text{sign}(u_{in}) i_2 \end{cases}, |u_{in}| > u_{dc} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_2 = 0 \\ \frac{du_{dc}}{dt} = -\frac{u_{dc}}{RC} \\ i_1 = i_2 = 0 \end{cases}, |u_{in}| \leq u_{dc} \quad (2)$$

设在  $t_{off}$  时刻开关管关断,求解式(1)、(2)中的微分方程,得到输入电流  $i_1$ 、电容电压  $u_{dc}$  与整流电路负载参数  $R$ 、 $C$ 、 $r$  的关系为:

$$\begin{cases} u_{dc} = \frac{(R|u_{in}| - R|u_{in}|/e^{\frac{t}{RC}})}{(R+r - R/e^{\frac{t}{RC}})} \\ i_1 = \frac{\text{sign}(u_{in})(|u_{in}| - u_{dc})}{r} \end{cases}, |u_{in}| \geq u_{dc} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_{dc} = u_{dc(off)} e^{-\frac{(t-t_{off})}{RC}} \\ i_1 = 0 \end{cases}, |u_{in}| < u_{dc} \quad (4)$$

在开关管关断时刻,整流电路满足  $C \frac{du_{dc(off)}}{dt} = -\frac{u_{dc(off)}}{R}$ ;开关管关断后,电容  $C$  单独向负载电阻供电,直至开关管再次导通。设开关管导通角和关断角分别为  $\theta_{on}$  和  $\theta_{off}$ ,开关管关断后电容电压满足:

$$u_{dc(off)} e^{-\frac{(\pi + \theta_{on} - \theta_{off})}{\omega RC}} = u_{dc(on)} \quad (5)$$

又因开关管导通和关断时刻电容电压  $u_{dc}$  等于输入电压  $u_{in}$ ,故整流电路开关角和关断角满足<sup>[2]</sup>:

$$\begin{cases} \omega \cos \theta_{off} = -\frac{\sin \theta_{off}}{R} \\ \sin \theta_{off} e^{-\frac{-\pi + \theta_{on} - \theta_{off}}{\omega RC}} = \sin \theta_{on} \end{cases} \quad (6)$$

因此 CR 负载整流电路的输入电流表达式可以简化为:

$$i_1 = \begin{cases} \frac{\left( |u_{in}| - \frac{(R|u_{in}| e^{\frac{t}{RC}} - R|u_{in}|)}{(R+r) e^{\frac{t}{RC}} - R} \right)}{\text{sign}(u_{in}) r}, & t_{on} < \text{mod}(t, T/2) < t_{off} \\ 0, & \text{mod}(t, T/2) < t_{on} \text{ 或 } \text{mod}(t, T/2) > t_{off} \end{cases} \quad (7)$$

取负载参数  $R = 10 \Omega$ ,  $C = 3.3 \text{ mF}$ ,  $r = 0.005 \Omega$ ,利用式(1)、(2)中的状态方程,采用 MATLAB 软件中的 Simulink 模块建立 CR 负载整流电路的数学模型,经仿真得到整流电路输入电压、电流波形见图 2。

由图 2 可以看出,CR 负载整流电路的输入电流波形是周期性尖脉冲。取整流桥内阻  $r = 0.005 \Omega$ ,设置负载参数分别为  $R = 10 \Omega$ ,  $C = 3.3 \text{ mF}$  和  $R = 20 \Omega$ ,  $C = 3.3 \text{ mF}$ ,利用 MATLAB 软件对式(7)得到的输入电流波形进行傅里叶变换<sup>[3]</sup>,得到其输入电流谐波信息分别见表 1、表 2。

由表 1、表 2 可以看出,整流电路输入电流中含有较多的奇次谐波分量,谐波的幅值随着谐波次数的增加衰减较慢。而且针对不同的负载参数值,输入电流各次谐波的幅值和相位相差很大。

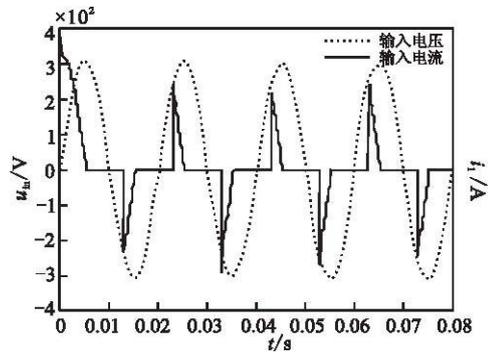


图 2 CR 负载整流电路输入电压、电流波形图  
Fig. 2 Voltage and current oscillogram of rectifier with CR load

表 1  $R = 10 \Omega$ ,  $C = 3.3 \text{ mF}$  时 CR 负载整流电路输入电流谐波信息

Tab.1 Harmonic of rectifier input current when  $R = 10 \Omega$ ,  $C = 3.3 \text{ mF}$

谐波次数	幅值/A	相位/(°)	谐波次数	幅值/A	相位/(°)
1	56.06	23.75	9	14.47	-115.57
3	47.47	-110.53	11	11.29	149.03
5	36.34	116.76	13	11.60	43.65
7	24.35	-7.31	15	10.41	-68.58

表 2  $R=20\ \Omega, C=3.3\ \text{mF}$  时 CR 负载整流电路输入电流谐波信息

Tab.2 Harmonic of rectifier input current when  $R=20\ \Omega, C=3.3\ \text{mF}$

谐波次数	幅值/A	相位/(°)	谐波次数	幅值/A	相位/(°)
1	30.23	19.72	9	14.23	166.78
3	26.28	-125.84	11	10.37	33.56
5	23.49	87.29	13	7.38	-87.21
7	19.36	-53.46	15	6.13	154.84

## 2 非线性电子负载输入基准电流波形产生

从上述分析可知,如果使用传统的谐波叠加方法产生基准电流,必须将不同参数下基准电流的谐波信息存储在 ROM 中,这样会进一步增加 ROM 资源的消耗。CORDIC 算法能仅通过简单的加法和移位操作计算出正弦、指数等复杂运算,避免过多的使用乘法器,节省了硬件资源<sup>[4]</sup>。而插值算法能够避免 CORDIC 算法因多次迭代而占用更多的逻辑单元和时钟周期。因此采用 CORDIC 算法和插值算法相结合的方法,通过式(7)中输入电流和整流电路负载参数的关系直接产生该参数下的输入电流波形。该方法的基本结构框图见图 3。

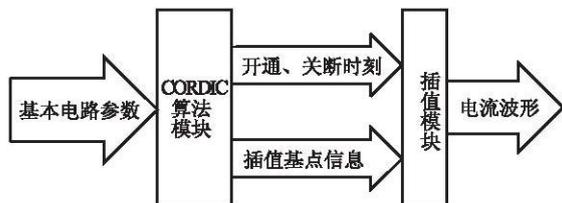


图 3 CORDIC 和插值算法相结合方法的结构图

Fig.3 Framework based on CORDIC and Newton interpolation algorithm

CORDIC 算法即坐标旋转数字计算方法,是 J. volderl 等人于 1959 年在美国航空控制系统的设计中提出来的<sup>[5]</sup>。1971 年, J. SWalther 引入参数  $m$ (表示工作模式:  $m=l$  为圆周系统,  $m=0$  为线性系统,  $m=-1$  为双曲系统), 将 3 种系统统一到一个 CORDIC 迭代方程中<sup>[6]</sup>, 提出了统一的 CORDIC 算法。

根据文献[5]、[7]可知 CORDIC 算法求解正弦和指数函数的迭代公式分别为:

$$\begin{cases} x_N = 1/K[x_0 \cos z_0 + y_0 \sin z_0] = \cos \theta \\ y_N = 1/K[y_0 \cos z_0 + x_0 \sin z_0] = \sin \theta \\ z_N = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_N = 1/K[x_0 \cosh z_0 + y_0 \sinh z_0] = e^0 \\ y_N = 1/K[y_0 \cosh z_0 + x_0 \sinh z_0] = e^0 \\ z_N = 0 \end{cases} \quad (9)$$

将  $z_0$  赋值为角度  $\theta$ , 根据式(8)、(9)迭代, 即可得到  $\sin \theta$  和  $e^0$  的值。取负载参数  $R=10\ \Omega, C=3.3\ \text{mF}, r=0.005\ \Omega$ , 根据式(6) - (9) 计算出该参数下的整流桥的导通角  $\theta_{on}$ 、关断角  $\theta_{off}$  及中间等间距 2 个节点的信息见表 3。(由于该参数下输入电流在  $[0, 0.01]$  区间内没有达到稳态(见图 2), 因此选用  $[0.01, 0.02]$  区间内的点作为插值基点。)

表 3  $R=10\ \Omega, C=3.3\ \text{mF}$  时 CR 负载输入电流部分节点信息

Tab.3 Node information of input current with CR load when  $R=10\ \Omega, C=3.3\ \text{mF}$

时间/s	$t_{on}$	$(t_{off} - t_{on})/3$	$(t_{off} - t_{on})2/3$	$t_{off}$
相位/(°)	52.313	66.694	81.133	95.515
幅值/A	0	115.87	71.37	0

表 3 中只求出了部分节点的信息, 欲求整个周期的输入电流波形, 就要用到插值模块。插值模块的主要功能是根据表 3 中的节点信息, 采用插值算法<sup>[8]</sup> 计算出输入电流在开关管导通区间的插值函数, 进而求出输入电流在整个周期内的电流波形信息。本文采用牛顿插值算法。

定义函数  $y=f(x)$  在区间  $[x_0, x_m]$  上的平均变化率  $\frac{f(x_m) - f(x_0)}{x_m - x_0}$  为函数  $f(x)$  关于点  $x_0, x_m$  的一阶均差, 记为  $f[x_0, x_m]$ 。通过各级均差的迭代可将  $f(x)$  的牛顿均差插值多项式表示为:

$$N_n(x) = f(x_0) + f[x_0, x_1](x - x_0) + f[x_0, x_1, x_2](x - x_0)(x - x_1) + \dots + f[x_0, x_1, \dots, x_n](x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1}) \quad (10)$$

根据表 3 中插值基点的相位和幅值信息, 采用式(10) 牛顿插值算法进行插值运算, 得到非线性负载输入电流半个周期内的插值表达式为:

$$i_1 = \begin{cases} 4.37E10t^3 - 6.46E8t^2 + 3.04E6t - 4.43E3 & , & t_{on} < t < t_{off} \\ 0 & , & t < t_{on} \text{ 或 } t > t_{off} \end{cases} \quad (11)$$

### 3 算法验证及性能分析

算法验证采用 MATLAB 仿真软件按照图 3 所示的结构框图进行,取输入电压  $u_m = 311\sin(100\pi t)$ ,负载参数  $R = 10 \Omega$ ,  $C = 3.3 \text{ mF}$ ,  $r = 0.005 \Omega$ ,三角函数和指数函数的求解使用式(8)、(9)所示的 CORDIC 算法,迭代 12 次。取  $[0.01, 0.02]$  区间内的导通时刻、关断时刻和中间等间距的 2 个点作为插值基点,插值计算根据式(11)进行。采用 MATLAB 仿真软件进行算法仿真,得到该参数下整流电路输入电流波形见图 4。

通过与图 2 所示的理论波形对比分析可得,进入稳态后,仿真波形与理论波形之间的相关系数为 0.96,其各自的导通角、关断角和幅值信息如表 4 所示,由表 4 可以看出该算法产生的输入电流波形与理论波形在导通角、关断角的误差小于 2%,幅值的误差小于 5%,可以认为仿真波形与理论波形一致。

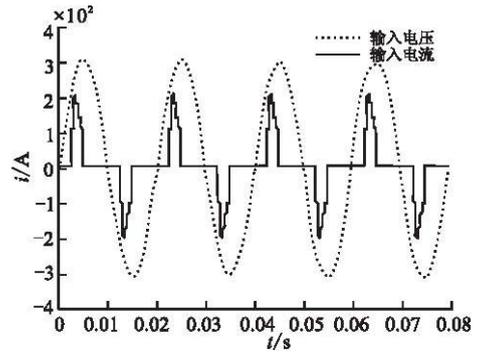


图 4 CR 负载整流电路输入电流仿真图

Fig. 4 Simulation figure of rectifier input current with

表 4 仿真波形与理论波形相似度比较

Tab. 4 Comparison of the simulate and theory waveform

波形	导通角/(°)	关断角/(°)	幅值/A
仿真波形	52.31	95.51	203.1
理论波形	52.92	95.94	213.0

为了检验引入插值算法,对减少硬件资源消耗的有效性,采用 Quartus II 软件混合编辑的方法对上述算法进行了仿真和性能分析。仿真中,对插值公式出现的小数运算,采用文献[9]中的方法进行规格化处理。加法器和乘法器等使用 Quartus II 软件自带的宏模块实现<sup>[10]</sup>。通过仿真得到采用 CORDIC 方法和采用 CORDIC、插值算法相结合的方法所占用的资源信息见表 5。

表 5 2 种方法硬件资源消耗表

Tab. 5 Consume of hardware resource with two different method

方法	逻辑单元	专用逻辑寄存器
CORDIC 方法	3 264	852
CORDIC 和插值方法	2 155	654

由表 5 可以看出,采用 CORDIC 和插值算法相结合的方法,比单独采用 CORDIC 方法消耗的逻辑单元和专用逻辑寄存器分别减少了 34% 和 23%,大大减少了硬件资源消耗。

### 4 结束语

本文以桥式整流非线性负载电路为例,在分析其非线性负载输入电流波形的基础上,提出依据整流电路参数,采用 CORDIC 算法和插值算法,直接产生非线性电子负载输入基准电流的方法。通过 MATLAB 软件仿真表明,该方法产生的输入电流波形与理论波形基本一致,验证了其正确性和可行性;采用 Quartus II 软件仿真证明,CORDIC 和插值相结合的方法比单独使用 CORDIC 方法较大地减少了硬件资源消耗。另外,该方法仅仅与模拟负载的电路参数有关,可方便地产生该类非线性负载的输入基准电流,从而实现模拟任意桥式整流电路负载特性的功能。

### 参考文献:

[1] In Wha Jeong, Mikhail Slepchenkov, Keyue Smedley. Regenerative AC electronic load with one - cycle control[C]//IEEE

- applied power electronics conference and exposition (APEC). Palm Springs, USA; IEEE press, 2010: 1166 – 1171.
- [2] 陈敏. 非线性负载条件下的逆变器特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.  
CHEN Min. Research on the DC/AC inverter supplies powering nonlinear loads[D]. Hangzhou: Zhejiang university, 2006. (in Chinese)
- [3] 熊杰锋, 王柏林, 孙艳. 电力系统间谐波和谐波分析的海宁窗插值算法[J]. 自动化仪表, 2010, 31(4): 25 – 33.  
XIONG Jiefeng, WANG Bolin, SUN Yan. Hanning windowed interpolation algorithm for inter harmonics and harmonics analysis of electric power system [J]. Process automation instrumentation, 2010, 31(4): 25 – 33. (in Chinese)
- [4] Tso – Bing Juang. Low latency angle recoding methods for the higher bit – width parallel CORDIC rotator implementations[J]. IEEE transactions on circuits and systems II: express briefs, 2008, 55(11): 1139 – 1143.
- [5] 骆艳卜, 张会生, 张斌, 等. 一种CORDIC算法的FPGA实现[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 305 – 307.  
LUO Yanbo, ZHANG Huisheng, ZHANG Bin, et al. FPGA implementation of a CORDIC algorithm[J]. Computer simulation, 2009, 26(9): 305 – 307. (in Chinese)
- [6] Gadgil Amruta, Parthe Yogita, Pathak Puja, et al. Low latency and high accuracy architectures of cordic algorithm for cosine calculation on fpga [C]//IEEE international conference electronics, circuits and systems. Malta: IEEE press, 2008: 478 – 481.
- [7] 牟胜梅, 杨晓东.  $e^0$  的CORDIC迭代初值选取策略及其硬件实现[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(6): 79 – 80.  
MU Shengmei, YANG Xiaodong. Policy of choosing initial values for CORDIC iteration and its effect on hardware implementation of exponential function[J]. Computer engineering and applications, 2007, 43(6): 79 – 80. (in Chinese)
- [8] 徐士良. 计算方法[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.  
XU Shiliang. Computational methods[M]. Beijing: People post and telecommunication press, 2009. (in Chinese)
- [9] 黄聚永, 袁慧梅, 吴向阳, 等. 基于查找表和Newton插值算法的正余弦函数的FPGA实现[J]. 继电器, 2007, 35(16): 33 – 36.  
HUANG Juyong, YUAN Huimei, WU Xiangyang, et al. Implementation of sin & cos function on FPGA based on look – up table and Newton algorithm of interpolation[J]. Relia, 2007, 35(16): 33 – 36. (in Chinese)
- [10] 周润景, 图雅, 张丽敏. 基于Quartus II的FPGA/CPLD数字系统设计实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
ZHOU Runjing, TU Ya, ZHANG Limin. Design examples of digital system based on Quartus II [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2008. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)

## A Method of Reference Current Waveform Production of Nonlinear Electronic Loads

LONG Hou – tao, HOU Zhen – yi, SUN Gang, WANG Wei

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The generation of the reference current waveform is the key technique of the design of the nonlinear electronic load. The harmonic information has to be known when the harmonic superposition method is adopted. By this method, the simulation of nonlinear load with arbitrary parameter can not be realized. In order to solve the limitation of the traditional method, by taking the rectification circuit for example, a method of generating the reference current waveform based on analyzing the equation of state of the circuit and the load parameter is presented. In the hardware realization, an algorithm combining the CORDIC with the interpolation is adopted for the speed and resource factors, thus reducing the consumption of clock period and hardware resource. The simulation done with MATLAB and Quartus II software shows that the use of this method can generate the nonlinear electronic load reference current waveform consistent with the theoretical current waveform by consuming less clock period and hardware resource.

**Key words:** nonlinear electronic loads; CORDIC algorithm; interpolation algorithm; waveform generation; FPGA