

降压式 DC-DC 变换器混沌控制的仿真研究

张金波¹, 李晗², 李威¹

(1 河海大学计算机及信息工程学院, 江苏 常州 213022)

2 河海大学国际工商学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 对 PWM 型降压式 DC-DC 变换器的混沌控制机理进行研究, 建立了 DC-DC 变换器的混沌控制法的 MATLAB 仿真模型, 仿真模型是在采样数据法仿真模型的基础上增加了离散时间反馈控制环节, 利用离散时间反馈控制法中的参考信号补偿控制, 达到控制混沌的目的, 通过控制前后的仿真结果比较可以看出, 在增加了混沌控制环节之后, 获得了满意的控制效果, 实现了对不稳定周期-1 轨道的稳定, 降低了输出电压的纹波幅值, 提高了输入电压的工作范围, 控制了变换器中的混沌。

关键词: 变换器; 采样数据模型; 参考信号补偿控制

中图分类号: TP17; TN712.1 **文献标识码:** A

Simulation of Chaos Control in PWM Buck DC-DC Converter

ZHANG Jinbo¹, LI Han², LI Wei¹

(1. College of Computer & Information Engineering of Hohai University, Changzhou Jiangsu 213022, China)

2. College of International Industry & Commerce, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098, China)

ABSTRACT: This paper studies the chaos control of PWM Buck DC-DC converters. Simulation models of chaos control of DC-DC converters are set up with MATLAB. A discrete-time reactive control tache is added to the sampled-data model. Using the compensatory control of reference signal, the goal of chaos control is achieved. Through the comparison of simulation results, the effect of control is satisfactory in the control tache on chaos—the unstable period-1 orbit is stabilized, the harmonic range of output voltage is reduced, the stable operating range of input voltage is extended, the chaos of converter is controlled.

KEYWORDS: Converter; Sampled-data model; Compensatory control of reference signal

1 引言

DC-DC 变换器的混沌控制作为非线性控制理论的新分支, 正成为一个很活跃的研究领域。它是建立在混沌动力学基础之上与传统的控制规则相区别的一类新的控制策略。一个混沌系统的行为是许多有序行为即周期行为的集合, 但每一个有序行为在正常条件下都不占主导地位。研究结果表明: 如果以适当的方法对系统中的某些参数进行微扰, 就能促使该系统的输出从一种周期状态向另一种周期状态转变。由于混沌系统能在许多不同周期轨道中迅速转换, 因此混沌控制对提高系统的瞬态响应是有利的, 并且在控制上具有一定的柔性。目前, 国外学者主要集中研究 DC-DC 变换器混沌机理并取得了共识, 而对混沌控制方法的研究仍处于

起步阶段。由此可见, 对功率变换器中混沌控制方法的研究是十分重要的, 它可能是提高功率变换器性能指标的新途径。如何通过混沌控制的方法避免混沌的发生, 并利用混沌自身的特性来改善 DC-DC 变换器的性能指标, 将是一个非常有意义的研究课题。

本文给出一种基于电压模式参考信号补偿的反馈控制, 给出应用结果的理论分析, 对控制前后结果进行比较, 以证明该方法在 DC-DC 变换器混沌控制中的作用。

2 理论基础

2.1 采样数据模型

图 1 是连续工作模式 PWM 型 DC-DC 变换器的采样数据法仿真模型, 其中 x 是状态向量, y 是反馈信号; u 是输入信号, v_s 是输入电压, v_r 是参考电压, v_o 是输出电压; $h(t)$ 是决定开关动作的斜坡信号, 周期为 T ; 时钟信号的频率等于开关频率 $1/T$ 。连续工作模式下的变换器经历 S_1 和 S_2 两个

工作阶段:当时钟脉冲到来时,变换器处于 S_1 工作阶段,当 $y(t) = h(t)$ 时,变换器切换至 S_2 工作阶段。

假设系统有两个状态变量,通常为电感电流和输出电压,将 $y(t) = h(t)$ 的时刻定义为 $nT + d_n$,当 $t \in [nT, nT + d_n]$,系统处于 S_1 工作阶段;当 $t \in [nT + d_n, (n+1)T]$,系统处于 S_2 工作阶段。因此系统可描述为:

$$S_1: \begin{cases} x = A_1 x + B_1 u \\ v_0 = E_1 x \end{cases} \quad t \in [nT, nT + d_n] \quad (1)$$

$$S_2: \begin{cases} x = A_2 x + B_2 u \\ v_0 = E_2 x \end{cases} \quad t \in [nT + d_n, (n+1)T] \quad (2)$$

且满足约束条件

$$y(nT + d_n) = h(nT + d_n)$$

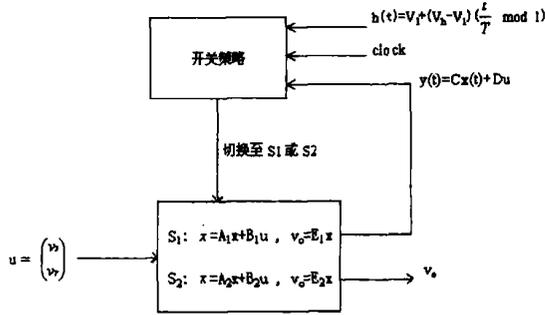


图 1 连续工作 PWM 型 DC-DC 变换器采样数据模型

为图 1 建立线性的采样数据动力学方程:

$$\hat{x}_{n+1} \approx \Phi \hat{x}_n + \Gamma_1 \hat{v}_{sn} + \Gamma_2 \hat{v}_{m} \quad (3)$$

$$\hat{v}_{m} = E \hat{x}_n \quad (4)$$

式中

$$\Gamma_1 = e^{A_1(T-d)} \left(\int_0^d e^{A_1 \sigma} d\sigma B_{11} - \right.$$

$$\left. \frac{x^0(d^-) - x^0(d^+)}{Cx^0(d^-) - h(d)} (C \int_0^d e^{A_1 \sigma} d\sigma B_{11} + D_1) \right) + \int_0^{T-d} e^{A_2 \sigma} d\sigma B_{21} \quad (5)$$

$$\Gamma_2 = e^{A_2(T-d)} \left(\int_0^d e^{A_2 \sigma} d\sigma B_{12} - \right.$$

$$\left. \frac{x^0(d^-) - x^0(d^+)}{Cx^0(d^-) - h(d)} (C \int_0^d e^{A_2 \sigma} d\sigma B_{12} + D_2) \right) + \int_0^{T-d} e^{A_2 \sigma} d\sigma B_{22} \quad (6)$$

2.2 参考信号补偿控制

选择 DC-DC 变换器中的参考信号作为控制变量,在控制方案中,变换器的状态通过采样器离散化,再送入离散时间控制器,由一定的控制规则,不断地修正参考信号,从而达到控制混沌的目的。本文仅仿真实现不稳定周期-1 轨道的稳定。

从图 2 中,可以看出,它是在图 1 连续工作 PWM 型 DC-DC 变换器采样数据模型的基础上建立起来的,增加了离散时间反馈控制环节。电压参考信号 v_r 在每一个时钟脉冲到来时被修正为 v_{rn} , 令:

$$\hat{v}_{rn} = -K \hat{x}_n \quad (7)$$

式中符号“ \approx ”表示微小扰动, $\hat{x}_n = x_n - x^0(0)$, K 是线性反馈增益矩阵。

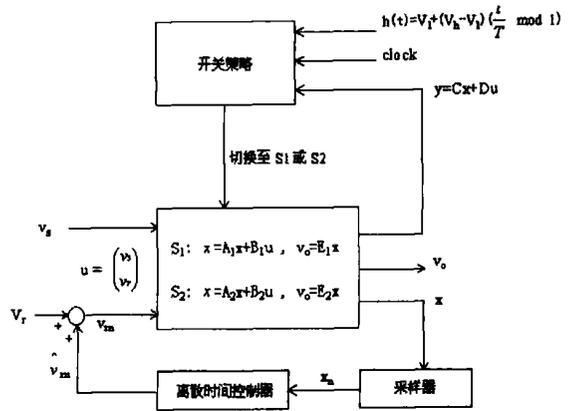


图 2 参考信号补偿控制方案的系统原理图

当频率足够高时,可以令 $\hat{v}_{sn} = 0$ 将式 (7) 代入线性化采样数据动力学方程 (3), 则有:

$$\hat{x}_{n+1} \approx (\Phi - \Gamma_2 K) \hat{x}_n \quad (8)$$

如果 (Φ, Γ_2) 是可稳定的,那么必定存在一个反馈增益矩阵 K ,使得 $\Phi - \Gamma_2 K$ 所有的特征值均位于单位圆内。因此,在式 (7) 描述的控制规则下,变换器的周期解 $x^0(t)$ 就可被稳定下来了。

同时,要在离散时间控制器中引入一个一维变量 w ,使得离散时间控制器的动力学方程为:

$$w_{n+1} = -K_1 x_n + (1 - K_2) w_n \quad (9)$$

$$\hat{v}_{rn} = -K_1 x_n - K_2 w_n \quad (10)$$

式中 w_n 是离散时间控制器的状态变量, K_1, K_2 是线性反馈增益。

由式 (3)、(9)、(10) 可得,新闭环系统的线性化动力学方程为

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{n+1} \\ \hat{w}_{n+1} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \Phi & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Gamma_2 \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} [K_1 \quad K_2] \begin{bmatrix} \hat{x}_n \\ \hat{w}_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

如果由式 (11) 描述的变换器是渐近稳定的,必须满足下列两个条件:

1) $(\Phi - \Gamma_2)$ 是可稳定的;

2) $\begin{bmatrix} \Phi - \mathbf{1} & \Gamma_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$ 是满秩的。

因此,可以通过计算变换器的线性化采样数据动力学方程 (2.5) 中的状态转移矩阵的特征值,求解出保证变换器周期-1 稳态输出的线性反馈增益 K_1, K_2 ; 然后,在式 (9)、(10) 描述的控制规则下实施控制,从而实现对不稳定周期-1 轨道的稳定控制。

3 基于 Buck 变换器的仿真实验

3.1 环面分岔的仿真实验

以电压控制型 Buck 变换器为例,利用采样数据模型对

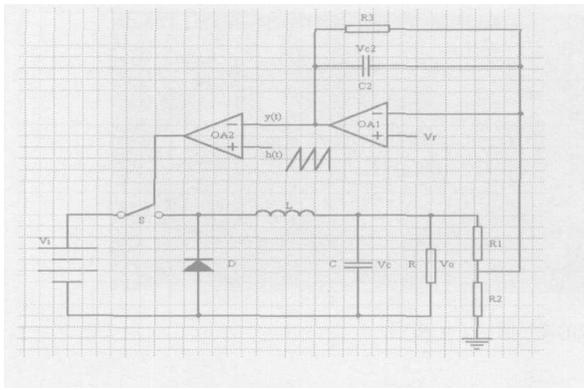


图 3 电压控制型 Buck 变换器原理图

环面分岔进行仿真, 图 3 是电压控制型 Buck 变换器的原理图。电路参数为 $f_s = 2.5\text{kHz}$, $L = 20\text{mH}$, $C = 47\mu\text{F}$, $R = 22\Omega$, $V_r = 5\text{V}$, $R_1 = R_2 = 20\text{k}\Omega$, $R_3 = 30\text{k}\Omega$, $C_2 = 1\mu\text{F}$, $V_1 = 3.8\text{V}$, $V_h = 8.2\text{V}$, $h(t) = 3.8 + 4.4 \lfloor (t/T) \bmod 1 \rfloor$ 。

令电路的状态变量为 $x = (i_L, v_C, v_{C2})^T$, 输入信号为 $u = (v_s, v_r)^T$, 针对图 1 有:

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_1 C_2} & -\frac{1}{R_3 C_2} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 0 \quad -1] \quad D = [0 \quad 1]$$

$$E_1 = E_2 = [0 \quad 1 \quad 0]$$

根据上述的这组系数公式, 使用 MATLAB 中的 Simulink 为图 3 建立了仿真图, 如图 4 所示, 以输入电压 V_s 作为分岔参数, 令 V_s 从 10V 增至 30V , 步长为 1V , 进行了仿真实验, 仿真结果如表 1 所示。

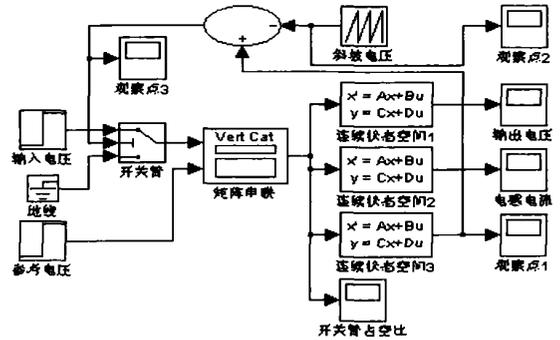


图 4 电压控制型 Buck 变换器采样数据仿真图

经过仿真, 观察到电压控制型 Buck 变换器采样数据模型的周期-1 稳态输出所对应的输入电压工作范围是 $14 \sim 20\text{V}$ 。图 5 和图 6 分别是 $V_s = 10\text{V}$ 和 $V_s = 30\text{V}$ 时输出电压和电感电流的波形图。从图中可以看出, 输出电压的纹波均在 5V 以上, 且电感电流的波形被一个较低的频率所调制, 变换器中发生了自激振荡。由此可知, 在实际应用中, 功率变换器的自激振荡等不稳定现象可以借助环面分岔的概念得到解释。

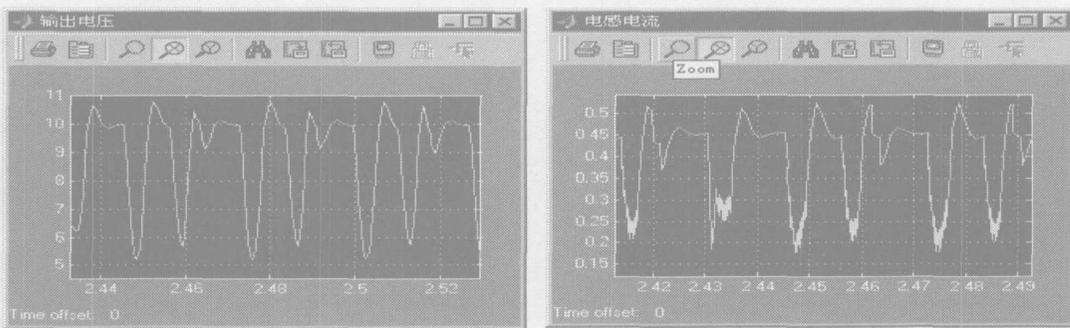


图 5 输出电压和电感电流的波形图 ($V_s = 10\text{V}$)

3.2 参考信号补偿控制的仿真实验

以图 3 和图 4 为基础, 在其中引入基于参考信号补偿控制的离散时间反馈控制环节。令式 (2.5) 中的状态转移矩阵的特征值为零, 解得 $K_1 = (-1.6622, -0.4655)$, $K_2 = 0.2403$ 。那么基于式 (2.3)、(2.4) 描述的离散时间控制规则,

使用 MATLAB 为其建立仿真图, 如图 7 所示, 现仍以输入电压 V_s 作为分岔参数, 令 V_s 从 10V 增至 30V , 步长为 1V , 进行仿真实验, 仿真结果如表 1 所示。

图 8 和图 9 分别是 $V_i = 10\text{V}$ 和 $V_i = 30\text{V}$ 时输出电压和电感电流的波形图。从图中可以看出, 输出电压的纹波幅值



图 6 输出电压和电感电流的波形图 ($V_s = 30V$)

表 1 参考信号补偿控制仿真结果

输入电压 V_s	控制前		控制后	
	V_o (幅值)	周期	V_o (幅值)	周期
10V	混沌波形		8.339~8.368V	周期-1
11V	混沌波形		8.553~8.593V	周期-1
12V	混沌波形		8.701~8.752V	周期-1
13V	混沌波形		8.831~8.891V	周期-1
14V	8.9~8.944V	周期-1	8.927~8.995V	周期-1
15V	9.005~9.046V	周期-1	9.01~9.086V	周期-1
16V	9.09~9.156V	周期-1	9.1~9.183V	周期-1
17V	9.173~9.245V	周期-1	9.18~9.27V	周期-1
18V	9.255~9.315V	周期-1	9.253~9.348V	周期-1
19V	9.322~9.392V	周期-1	9.283~9.383V	周期-1
20V	9.393~9.453V	周期-1	9.344~9.449V	周期-1
21V	混沌波形		9.398~9.508V	周期-1
22V	混沌波形		9.448~9.563V	周期-1
23V	9.562~9.623V	周期-1	9.495~9.613V	周期-1
24V	混沌波形		9.518~9.626V	周期-1
25V	8.8~10.2V	周期-4	9.543~9.669V	周期-1
26V	9.673~9.763V	周期-1	9.58~9.709V	周期-1
27V	8.9~10.48V	周期-4	9.614~9.746V	周期-1
28V	8.97~10.62V	周期-4	9.646~9.781V	周期-1
29V	9.03~10.75V	周期-4	9.676~9.814V	周期-1
30V	0.5~16.7V	周期-16	9.705~9.844V	周期-1

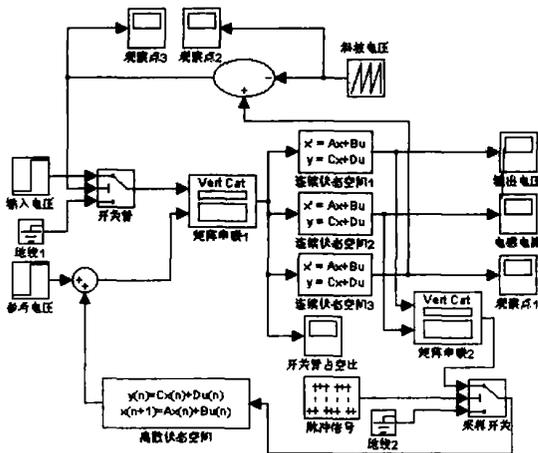


图 7 电压控制型 Buck 变换器参考信号补偿控制仿真图

从表 1 和图 5、图 6、图 8 和图 9 对比可以看出, 参考信号补偿控制后的输入电压 V_s 的工作范围已从控制前的 14V ~ 20V 扩大到 10V ~ 30V, 且控制后的输出纹波幅值最大不超过 140mV, 这也就解决了不稳定周期 - 1 轨道的稳定问题 (注: 图 5、图 6、图 8、图 9 横坐标单位为: s, 纵坐标单位为: V)。

4 结束语

本文基于电压控制型 Buck 变换器, 根据采样数据法为其建立了环面分岔和参考信号补偿控制的仿真模型, 并进行了仿真实验。实验获得了满意的控制效果——控制了变换器中的混沌, 稳定了周期 - 1 轨道, 降低了输出电压的纹波幅值, 提高了输入电压的工作范围。

电力电子技术是一门新兴学科, 新的电路与应用每天都在被创造。由于缺乏对非线性问题统一解决办法, 需要对每一个应用以及相关的非线性现象进行单独的研究。今后的

分别是 30mV 和 140mV, 且波形均稳定在周期 - 1 轨道。

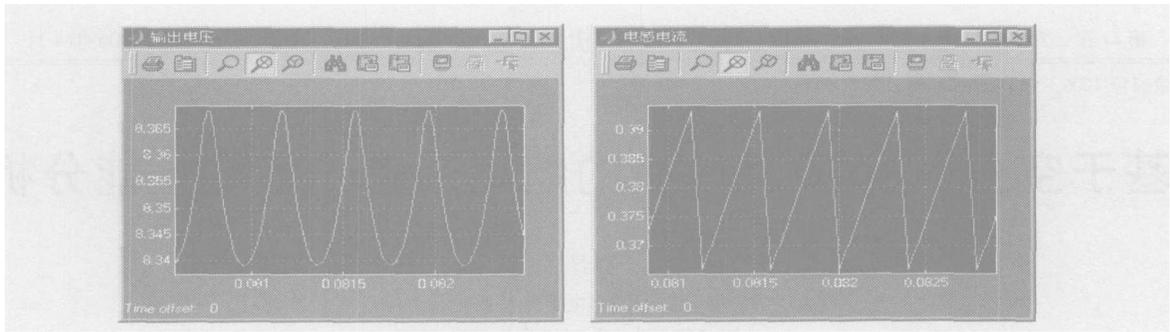


图 8 输出电压和电感电流的波形图 ($V_g = 10V$)

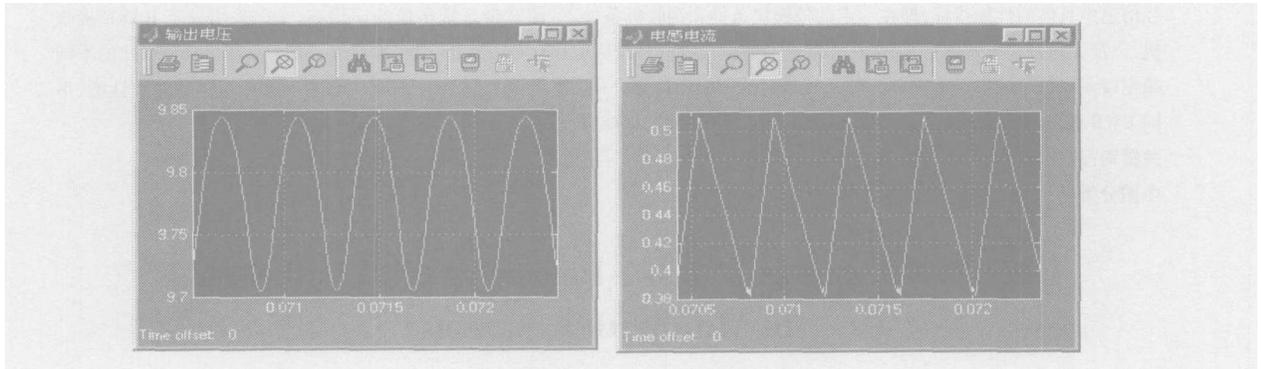


图 9 输出电压和电感电流的波形图 ($V_g = 30V$)

工作不可避免地朝着探索电力电子领域中非线性特征和相关理论的方向发展。例如,可以利用混沌的宽频特性来控制电磁干扰问题;在跟踪控制方法的应用中,用尽可能少的迭代次数来引导系统的相轨进入预计轨道;DC-DC变换器工作在周期运行模式下的稳定性问题;利用混沌功率谱特性提高电磁兼容性问题;利用混沌同步特性进行均流控制问题;利用混沌初值敏感性提高动态特性问题等。对DC-DC变换器混沌现象研究仅仅是一个开始,还有许多问题尚待解决,在短期内不可能全部解决。但是可以预计随着对DC-DC变换器混沌现象研究的进一步深入,DC-DC变换器运动本质将被认识得更加深刻,DC-DC变换器的运动特性将在此基础上进一步提高,由此产生一些全新的DC-DC变换器设计技术和应用技术,使工业届受益。

参考文献:

[1] 吴祥兴,陈忠. 混沌学导论[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1996

[2] 罗建军,杨琦. 精讲多练MATLAB[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002
 [3] 尹奕光. PWM型DC/DC变换器混沌机理的研究[D]. 南京:南京航空航天大学博士学位论文, 2000.
 [4] 张培强. MATLAB语言[M]. 合肥:中国科学技术出版社, 1995.
 [5] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社, 1998

[作者简介]



张金波 (1967-), 男(汉族), 黑龙江省双城市人, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 电力系统及其自动化专业。

李 晗 (1985 2-), 女(汉族), 福建霞浦县人, 本科, 国际贸易专业, 擅长计算机编程。

李 威 (1980-), 男(汉族), 河北省邯郸市人, 硕士研究生, 研究方向: 通信与信息系统。

(上接第 268页)

[作者简介]



贺越生 (1973-), 男(汉族), 浙江人, 国防科技大学硕士研究生, 主要研究方向是软件工程和虚拟现实技术。

卢晓军 (1977-), 男(汉族), 江苏人, 国防科技大学博士研究生, 主要研究方向是人体建模与仿真。

李 焱 (1973-), 男(汉族), 吉林人, 国防科技大学讲师, 主要研究方向是虚拟现实。