

单相逆变电源并联控制技术研究

徐顺刚^{1,2}, 许建平¹, 曹太强¹

(1. 西南交通大学电气工程学院 成都 610031; 2. 重庆师范大学物理学与信息技术学院 重庆 沙坪坝区 400047)

【摘要】在逆变电源并联系统中普遍采用外特性下垂控制技术,即依据有功功率和无功功率分别调节输出电压的相位和幅度。但是,对于电压电流双闭环反馈的单相逆变电源,输出有功功率和无功功率与输出电压相位和幅度均有耦合关系。针对这一问题,该文推导了单相逆变电源的等效输出阻抗,研究了有功功率和无功功率与输出电压相位和幅度间的定量关系;并在此基础上提出了一种外同步幅度下垂的并联控制策略,即逆变电源输出的相位通过外部总线来同步,而幅度则根据有功功率和无功功率的大小进行调节。建立了并联系统模型。实验结果表明了该方法的有效性。

关键词 下垂特性; 逆变电源; 均流; 并联

中图分类号 TM71

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.015

Study on Parallel Operation of Single Phase Inverter

XU Shun-gang^{1,2}, XU Jian-ping¹, and CAO Tai-qiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031;

2. College of Physics and Information Technology, Chongqing Normal University Shapingba Chongqing 400047)

Abstract The conventional droop-control strategy which is adopted generally for parallel inverter regulates the phase and the amplitude of the output voltage according to output active power and reactive power, respectively. However, active power and reactive power are related to both output amplitude and output phase for double closed-loop feedback voltage-source inverter. This paper deduces the equivalent output impedance of the inverter and discusses the quantitative relationship between active/reactive power and amplitude/phase of output voltage. Then a parallel control strategy based on synchronization bus and output amplitude regulated by the couple connection between the output active power and the reactive power is proposed and the model of parallel system is established. Experimental results show the effectiveness of the control strategy.

Key words droop characteristic; inverters; load-sharing; parallel operation

在逆变电源系统设计中,多台逆变电源并联运行是提高电源容量和增加系统可靠性的有效办法,逆变电源的N+X并联结构具有良好的冗余性、可扩展性和可靠性。目前,逆变电源的并联控制主要分为集中控制、主从控制、分散逻辑控制和无互连线独立控制4种方案^[1]。采用集中控制和主从控制时,由于各台逆变电源不能独立工作,降低了并联后系统的可靠性,因此在实际系统中较少采用。分散逻辑控制技术中,根据逆变电源之间信息交换的不同又可分为模拟量信息交换^[1-6]和数字量信息交换^[7-9]两种方式。在模拟量交换方式的并联逆变系统中,一般都采用瞬时值反馈控制,系统的暂态性能好。模拟量信息交换需要共享模拟信号,但模拟信号传输抗干扰能力较差,隔离电路复杂,并且精度不高,特别是当逆变电源模块间距离增加时,该方案实现

困难。在数字量信息交换的并联系统中,逆变电源间通过通信总线(如CAN总线)传输信息,具有抗干扰能力强和可靠性高等优点,但由于通信总线传输能力的限制,基于数字量信息交换的逆变电源只能采用有效值反馈控制,系统的暂态性能不佳。

无互连线独立控制^[10-14]依据逆变电源的外特性对输出电压的幅度和频率进行下垂控制,逆变电源间只通过功率总线进行连接,可靠性高。但是,传统的下垂控制算法认为输出阻抗为纯感性,从而对有功和无功与电压幅度和相位的关系进行解耦,通过使用无功功率对电压幅度下垂和使用有功功率对电压相位进行下垂来实现并联逆变器的均流。但逆变电源的输出阻抗通常并非纯感性,因此均流效果受线路阻抗影响明显,无功功率很难均分^[13-14]。文献^[15]提出了一种共享同步信号的外特性下垂并联

收稿日期: 2008-11-13; 修回日期: 2009-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(50677056); “十一五”国家科技支撑计划(2009BAG12A05)

作者简介: 徐顺刚(1975-), 男, 博士, 主要从事大功率开关变换器、电力电子与电力传动方面的研究。

控制方法, 各逆变器共享一个由定时器发出的同步信号, 再通过外特性下垂方案来调整各自实际输出电压的幅值和相位。该方法虽然能改善均流效果, 但并没有解决无功功率和有功功率与输出电压幅值和相位的耦合问题, 并且同步信号由专用的定时器发送, 降低了系统的可靠性。

本文提出了一种外同步幅度下垂控制策略, 各逆变电源间采用同步总线控制输出电压的相位, 通过对逆变器输出的有功功率和无功功率与电压幅度的耦合关系来进行幅度下垂。

1 双环控制单相逆变电源分析

在单相逆变电源控制电路中, 常采用如图1所示的电流内环、电压外环的双环反馈控制结构。电容电压外环采用比例积分控制, 跟踪参考电压信号, 确保输出电压稳定; 电感电流内环采用比例控制, 提高系统的动态响应能力^[16]。

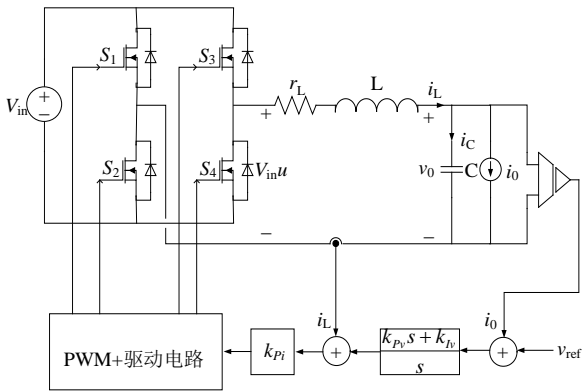


图1 双环控制单相逆变电源

在图1中, 单相逆变电源的功率部分由电压源、全桥逆变电路和LC滤波器组成, r_L 包含输出电感的绕线电阻、开关器件的导通电阻, 以及连接线路的电阻。对于图1所示逆变电源, 有:

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{in}u - v_0 - r_L i_L \tag{1}$$

$$C \frac{dv_0}{dt} = i_C = i_L - i_0 \tag{2}$$

式中 u 为控制变量, 根据开关器件 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 的状态变化, u 的取值为1、0、-1。

由式(1)和式(2)可得到该逆变电源的开环输出电压状态方程:

$$LC \frac{d^2 \langle v_0 \rangle}{dt^2} + r_L C \frac{d \langle v_0 \rangle}{dt} + \langle v_0 \rangle + L \frac{d \langle i_0 \rangle}{dt} + r_L \langle i_0 \rangle = \langle V_{in}u \rangle \tag{3}$$

式中 $\langle \rangle$ 表示在一个开关周期内取平均。对图1所

示的双环控制逆变电源, 反馈控制为:

$$\langle V_{in}u \rangle = \left(\frac{k_{Pv}s + k_{Iv}}{s} (v_{ref} - \langle v_0 \rangle) - (\langle i_0 \rangle - C s \langle v_0 \rangle) \right) k_{Pi} \tag{4}$$

由式(3)、式(4)可求得输出电压为:

$$v_0 = \frac{k_{Pv}k_{Pi}s + k_{Pi}k_{Iv}}{LCs^3 + (r_L C + k_{Pi}C)s^2 + (1 + k_{Pv}k_{Pi})s + k_{Pi}k_{Iv}} v_{ref} - \frac{Ls^2 + (r_L + k_{Pi})s}{LCs^3 + (r_L C + k_{Pi}C)s^2 + (1 + k_{Pv}k_{Pi})s + k_{Pi}k_{Iv}} i_0 \tag{5}$$

式中 s 为拉普拉斯算子。则输出电压由两部分组成, 即:

$$v_0 = G(s)v_{ref} - Z(s)i_0 \tag{6}$$

$$G(s) = \frac{k_{Pv}k_{Pi}s + k_{Pi}k_{Iv}}{LCs^3 + (r_L C + k_{Pi}C)s^2 + (1 + k_{Pv}k_{Pi})s + k_{Pi}k_{Iv}} \tag{7}$$

$$Z(s) = \frac{Ls^2 + (r_L + k_{Pi})s}{LCs^3 + (r_L C + k_{Pi}C)s^2 + (1 + k_{Pv}k_{Pi})s + k_{Pi}k_{Iv}} \tag{8}$$

式中 $G(s)$ 为双环控制单相逆变电源的电压增益; $Z(s)$ 为输出阻抗。

双环控制单相逆变电源的等效电路如图2所示。

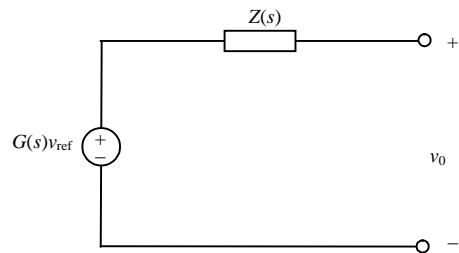


图2 逆变电源等效电路

从以上分析可知, 双环控制单相逆变电源的输出阻抗与逆变电源输出滤波电路的参数和反馈环路的控制参数密切相关。

2 双环控制单相逆变电源并联分析

通过前面的分析, 可得到两台单相逆变电源的并联等效电路, 如图3所示。

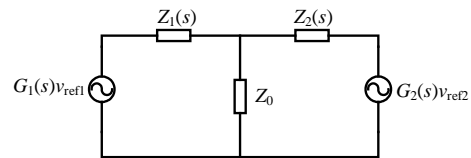


图3 并联逆变电源等效电路

图中, $G_1(s)$ 为逆变电源 I 的电压增益; $Z_1(s)$ 为逆变电源 I 的输出阻抗; v_{ref1} 为逆变电源 I 的参考信

号； $G_2(s)$ 为逆变电源II的电压增益； $Z_2(s)$ 为逆变电源II的输出阻抗； v_{ref2} 为逆变电源II的参考信号。

假设负载电压为 $E\angle 0$ ，考虑到逆变器的输出特性，可设：

$$\begin{cases} G_1(s)v_{ref1} = E_1\angle\delta_1 \\ G_2(s)v_{ref2} = E_2\angle\delta_2 \\ Z_1(s) = R_1 + jX_1 \\ Z_2(s) = R_2 + jX_2 \end{cases}$$

则得到如图4所示并联逆变电源等效电路图。

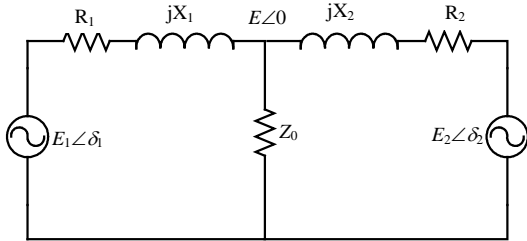


图4 并联逆变电源等效电路图

因此在并联系统中，第*i*台逆变电源输出的有功功率和无功功率为：

$$\begin{cases} P_i = \frac{E(R_i E_i \cos \delta_i - R_i E + X_i E_i \sin \delta_i)}{R_i^2 + X_i^2} \\ Q_i = \frac{E(X_i E_i \cos \delta_i - R_i E_i \sin \delta_i - X_i E)}{R_i^2 + X_i^2} \end{cases} \quad (9)$$

由于在并联逆变电源中输出电压的相位差很小， $\sin \delta_i \approx \delta_i$ ， $\cos \delta_i \approx 1$ ，从而可得：

$$\begin{cases} P_i = \frac{E(R_i E_i - R_i E + X_i E_i \delta_i)}{R_i^2 + X_i^2} \\ Q_i = \frac{E(X_i E_i - R_i E_i \delta_i - X_i E)}{R_i^2 + X_i^2} \end{cases} \quad (10)$$

在并联逆变电源系统的设计中，各逆变电源模块都会选取相同的参数，以尽量减小各逆变电源之间的差异。因此假定 $R_1 = R_2 = R$ ， $X_1 = X_2 = X$ ，由此可得：

$$\begin{cases} P_i = K_A R E_i + K_B X \delta_i - K_A R E \\ Q_i = K_A X E_i - K_B R \delta_i - K_A X E \end{cases} \quad (11)$$

式中 $K_A = \frac{E}{R^2 + X^2}$ ； $K_B = \frac{E_i E}{R^2 + X^2} \approx \frac{E^2}{R^2 + X^2}$ 。

从上述分析可知，并联系统中逆变电源输出的有功功率和无功功率都与输出电压的幅度和相位有关，输出电压幅度变化和相位变化对有功、无功的影响与逆变电源输出阻抗中阻性分量和感性分量的比例密切相关。当阻性分量大于感性分量时，有功功率主要由输出电压幅度决定，无功功率主要由输

出电压相位决定；反之，当感性分量大于阻性分量时，有功功率主要由输出电压相位决定，无功功率主要由输出电压幅度决定。

3 控制电路设计

在逆变电源并联运行过程中，各逆变单元的输出电压幅度、频率、相位必须严格一致，否则，会在逆变器之间产生很大的环流，影响逆变电源的正常工作，严重时将损坏逆变电源。本文通过使用外部的同步总线，以确保各逆变电源输出电压的频率和相位严格一致。

在逆变电源中同步电路采用CPLD实现，使用100 MHz有源晶振为CPLD提供时基信号，以确保同步信号有足够高的时间分辨率。CPLD产生的50 Hz方波信号 S_i 在隔离后连接到同步总线上，同时同步总线上的同步信号 S_o 隔离后被CPLD取回，CPLD提取 S_o 的频率和相位信息，送给正弦波发生电路产生与 S_o 同频同相的正弦波参考信号。当逆变电源单独运行时， S_o 就是该逆变模块送出的同步信号 S_i 本身；当多个逆变电源并联工作时， S_o 就是各个逆变模块送出的同步信号“相与”的结果。

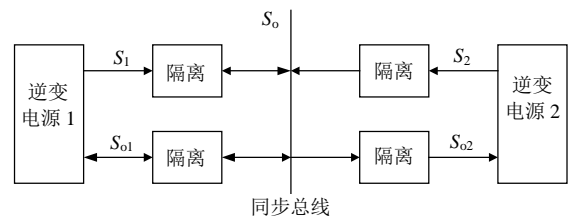


图5 同步控制硬件原理框图

在并联系统中各个逆变电源输出电压相位严格一致的情况下(即 $\delta_i = \delta$)，根据式(11)可得到下垂算法表达式为：

$$E_i = E_0 - K_m(RP + XQ) \quad (12)$$

式中 K_m 为下垂系数； E_0 为输出电压幅度给定。

图6为下垂控制的实现框图。逆变电源根据输出电压和输出电流计算出有功功率和无功功率，经过幅度下垂得到参考电压的幅度，并在同步信号的作用下得到参考信号，送入单相逆变电源反馈电路作为参考信号，调节逆变器的输出。

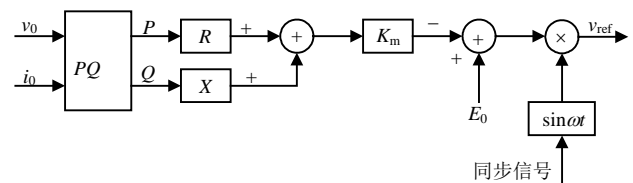


图6 下垂控制实现框图

图7为逆变电源的实现框图。由图7可知，并联的逆变电源之间除同步信号和功率线外，不再需要其他的连接线，系统具有极高的可靠性。

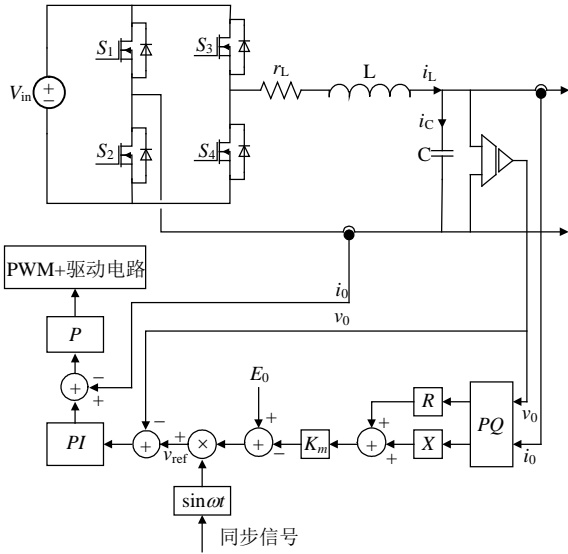
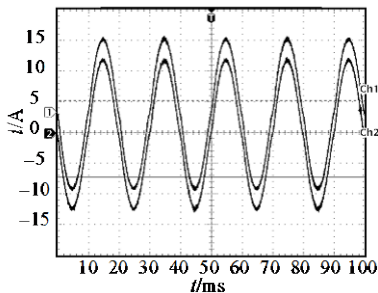


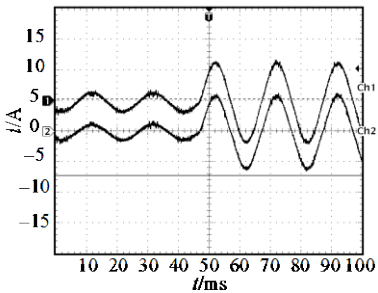
图7 逆变电源实现框图

4 实验结果

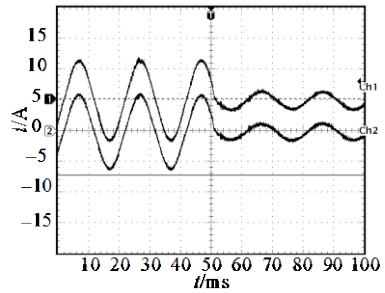
基于上述分析及设计，本文使用两台2kVA的逆变电源进行并联实验。逆变电源的输出滤波电感为500 μH ，输出滤波电容为10 μF ，输入直流母线电压为200 V，输出交流电压的额定值为110 V，逆变电源输出电压的频率为50 Hz。同步信号的产生和处理由CPLD实现，使用光耦6N137做同步总线的信号隔离，闭环控制和下垂算法都由TMS320F2812处理器完成。



a. 稳态时电流波形



b. 突加负载时电流波形



c. 突减负载时电流波形

图8 逆变器并联实验波形

逆变电源并联实验波形如图8所示，图8a为稳态阻性负载时两台逆变电源的输出电流波形，输出电流大小分别是8.51 A和8.43 A，图8b为突增负载时的输出电流波形，图8c为突减负载时的输出电流波形。从输出电流波形可以看到，并联系统中两个逆变电源的输出电流一致性非常好，负载功率被均匀地分配到了两个逆变电源中。在稳态时，两台逆变电源的环流非常小，在突增和突减负载时，也能很好地实现均流。

5 结论

基于传统的无互联线电压幅值相位下垂算法，本文提出了一种使用同步总线，采用电压幅度下垂算法的分散控制并联控制策略。实验结果表明，该方法具有良好负载特性和输出特性，在稳态、突增负载和突减负载时都能保持良好的均流性能。

参考文献

- [1] 何中一, 邢 岩, 付大丰. 模数混合分布式逆变器并联控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 113-117. HE Zhong-yi, XING Yan, FU Da-feng. Distributed hybrid current sharing control for inverters in parallel operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 113-117.
- [2] LEE C S, KIM S, KIM C B, et al. Parallel UPS with a instantaneous current sharing control[C]//IECON'98. Aachen, Germany: [s.n.], 1998.
- [3] CHEN J F, CHU C L. Combination voltage-controlled PWM inverter for UPS parallel operation[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1995, 10(5): 547-558.
- [4] SUN X, LEE Y S, XU D H. Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average current sharing scheme[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18(3): 844-856.
- [5] CHIANG S J, LIN C H, YEN C Y. Current limitation control technique for parallel operation of UPS inverters[C]//IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004.
- [6] 肖 岚, 刘爱忠, 方天治, 等. 使用平均电流控制的逆变器并联系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 77-82. XIAO Lan, LIU Ai-zhong, FANG Tian-zhi, et al. Multi

- inverter parallel system applying average current controlling method [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 77-82.
- [7] CHEN L L, XIAO L, GONG C Y. Circulating current's characteristics analysis and the control strategy of parallel system based on double close-loop controlled VSI[C]//IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004.
- [8] PEI Y Q, JIANG G B, YANG X. Auto-master-slave control technique of parallel inverters in distributed AC power systems and UPS[C]//IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004.
- [9] 于 玮, 徐德鸿, 周朝阳. 并联UPS系统均流控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 63-67.
YU Wei, XU De-hong, ZHOU Chao-yang. Control strategy of paralleled UPS system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 63-67.
- [10] 姜桂宾, 裴云庆, 杨 旭, 等. SPWM逆变电源的无互联信号线并联控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 94-98.
JIANG Gui-bin, PEI Yun-qing, YANG Xu, et al. Parallel operation of sinusoid wave inverters without control interconnections[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 94-98.
- [11] 余 蜜, 康 勇, 张 宇, 等. 基于环流阻抗的逆变器并联控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 42-46.
YU Mi, KANG Yong, ZHANG Yu, et al. Research on a novel current sharing scheme based on circulating impedance of multi-inverter parallel System[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 42-46.
- [12] ZHANG C J, CHEN G T, GUO Z G, et al. An alternating-master-slave parallel control respectfully yours, respectfully yours, research for single phase paralleled inverters based on CAN bus[C]//IPEMC'06. Xian: [s.n.], 2006.
- [13] TULADHAR A, JIN H, UNGER T, et al. Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance effect[J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 2000, 12(36): 131-137.
- [14] GUERRERO J M, DE VICUÑA L G, MATAS J, et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 9(19): 1205-1212.
- [15] 谢 孟, 蔡 昆, 胜晓松, 等. 400 Hz中频单相电压源逆变器的输出控制及其并联运行控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 78-82.
XIE meng, CAI kun, SHENG Xiao-song, et al. Output control and parallel operation control of 400 Hz single phase voltage source inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 78-82.
- [16] ZHANG Li, QIU Shui-sheng. Analysis and experimental study of proportional-integral sliding mode control for DC/DC converter[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2005, 13(2): 140-143.

编辑 税 红

(上接第337页)

- [4] ZHOU Zhao-rong, ZHANG Yi-de, FENG Gang, et al. Efficient feasibility examination for successive interference cancellation in DS-CDMA systems[C]//In IEEE GLOBECOM 2008. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2008.
- [5] LIANG B, HAAS Z J. Predictive distance-based mobility management for multidimensional PCS networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(5): 718-732.
- [6] ZHANG Yi-de, LI Le-min, LI Bo. Mobility influences on the capacity of wireless cellular networks[J]. ETRI Journal, 2006, 28(6): 799-802.
- [7] AKYILDIZ I F, LIN Y B, LAI W R, et al. A new random walk model for PCS networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(7): 1254-1260.
- [8] HEREDIA-URETA H, CRUZ-PÉREZ F A, ORTIGOZA-GUERRERO L. Capacity optimization in multiservice mobile wireless networks with multiple fractional channel reservation[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2003, 52(6): 1519-1539.
- [9] WU H L, LI L Z, LI B, et al. On handoff performance for an voice/data integrated cellular system, part II: data buffer case[C]//IEEE PIMRC'2002. Lisbon, Portugal: IEEE, 2002.
- [10] LI Li-zhong, LI Bin, LI Bo, et al. Performance analysis of bandwidth allocations for multi-services mobile wireless cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications and Networking, 2003, 2: 16-20.
- [11] XIE H, TABBANE S, GOODMAN D J. Dynamic location area management and performance analysis[C]//In Proceedings 43rd IEEE Vehicular Technology Conference. Secaucus, NJ: IEEE, 1993: 536-539.

编辑 漆 蓉