

# 逆变电源并联技术的现状与发展

## Present State and Future Development of Parallel Inverters Technology

浙江大学 电气工程学院 汪东 邓焰 何湘宁  
杭州奥能电源有限公司 胡炳孝

**摘要:** 分析了逆变电源并联的基本原理, 介绍了并联技术发展过程中出现的几种控制方案, 并针对各种并联方案的优缺点讨论了今后逆变电源的发展趋势。

**关键词:** 逆变器 并联 控制方案

**Abstract:** This paper analyses the theory of parallel inverters and introduces several control strategies arisen during the development of parallel inverters. Finally, the future development of parallel inverters technology is forecasted based on the discuss of the virtue and drawback of each control schemes.

**Key words:** Inverter Parallel Control strategy

### 1 引言

随着现代高科技的发展, 计算机和高精度仪器设备的大量使用, 用电设备对电网的要求也越来越高, 高次谐波的干扰、瞬间断电和高能浪涌都是不可接受的。因此, 现代用电设备对供电可靠性和供电质量提出了越来越高的要求。同时, 非线性负载设备的广泛应用, 向电网注入大量的谐波, 严重影响电网的质量。因此, 高性能的UPS(Uninterruptible Power Supply)越来越广泛的应用于银行、邮电通信、航空航天、证券、军事等重要部门。UPS的应用, 不仅改善了电网质量, 同时也提高了用电系统的可靠性。

然而供电容量和供电可靠性的提高, 单台UPS已经不能满足系统的要求。UPS电源并联技术是提高逆变电源运行的可靠性和扩大供电容量的重要技术手段。当前大容量的逆变电源的发展趋势是采用全控高频开关器件构成逆变电源模块单元再通过多个模块并联运行扩容。研究表明: 采用N+1冗余并联是一种很好的解决方案。实现冗余并联的主要优点如下:

- 可以方便的提高系统的容量

- 可以通过并联实现冗余, 提高可靠性
- 可以提高系统的可维护性
- 容易实现模块化和标准化

图1是两台并联逆变器的等效电路图。其中 $U_1$ 、 $U_2$ 为逆变桥的输出PWM波的基波分量;  $U_{o1}$ 、 $U_{o2}$ 为逆变电源的输出电压;  $r_{o1}$ 、 $r_{o2}$ 为表征电感内阻线路阻抗等逆变电源损耗因素的等效阻抗;  $r_1$ 、 $r_2$ 为并联线的线路阻抗;  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 为逆变电源的滤波电感和电容;  $Z$ 为2台逆变电源的公共负载, 可为感性容性或纯阻性。

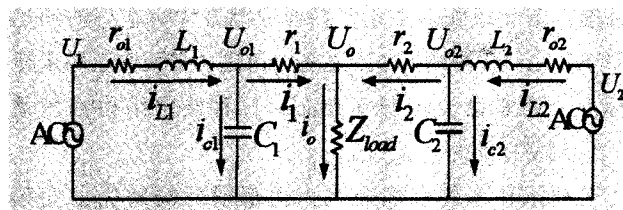


图1 并联逆变电源的等效电路

$$\text{当} \begin{cases} r_{o1} = r_{o2} = r_o \\ r_1 = r_2 = r \\ L_1 = L_2 = L \\ C_1 = C_2 = C \end{cases} \quad (1)$$

定义环流:

$$i_H = (i_1 - i_2) / 2 \quad (2)$$

由环流定义式(2) 可得出逆变电源并联运行系统环流S域表达式为:

$$i_H(s) = \frac{U_1(s) - U_2(s)}{2[r + r_0 + sL + rsc(r_0 + sL)]} \quad (3)$$

上式中, 若忽略r 和 r<sub>0</sub>, 则可以简化为

$$i_H(s) = \frac{U_1(s) - U_2(s)}{2Ls} \quad (4)$$

当U<sub>1</sub>与U<sub>2</sub>只存在幅值差异, 则此电压差与逆变输出电压同相位, 如图2(a)所示:

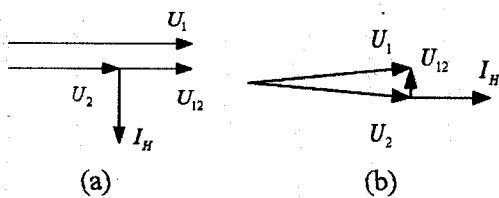


图2 并联逆变电源输出电压存在压差与相移时电压与电流的矢量图

由于电感电流滞后电压90°, 因此, 此时的环流主要是无功分量。当U<sub>1</sub>与U<sub>2</sub>只存在相位差异, 则此电压差比逆变输出电压超前90°, 如图2(b)所示, 环流电流与逆变电压同相位, 因此, 此时的环流主要是有功分量。

由于环流i<sub>H</sub>的存在使得各逆变电源的输出电流不仅包含有效负载电流分量, 还有环流分量。在不同状况下环流分量相对于各逆变电源呈现出不同的负载特性, 或为有功或为无功; 环流分量改变了各逆变电源的输出电流也相应改变了各逆变电源的输出功率, 使得各逆变电源所承担的负载不均衡。

从以上的分析可得出结论: 实现逆变电源的并联, 必须保证各逆变器输出电压的幅值、频率、相位的一致, 保证各个模块按预先设定比例均分有功和无功电流, 使输出环流等于0。

## 2 逆变电源并联技术的策略

目前所见文献中, 主要的并联方案总结如下:

### 2.1 集中控制并联方案 (Concentrated Control) [1]

集中控制并联方案是一种较早提出的方案, 在该方案中, 并联控制模块检测市电频率和相位, 同时给出同步信号给每个逆变器。当市电掉电时, 每个逆变器的锁相环电路保证输出电压的频率和相位的一致。并联

控制模块同时还检测负载电流, 除以参与并联逆变器的台数, 作为每台逆变器的电流参考指令。同时, 每台逆变器检测自身的输出电流, 与平均电流误差用以补偿参考电压指令, 消除环流。图3是集中控制并联方案的原理框图。

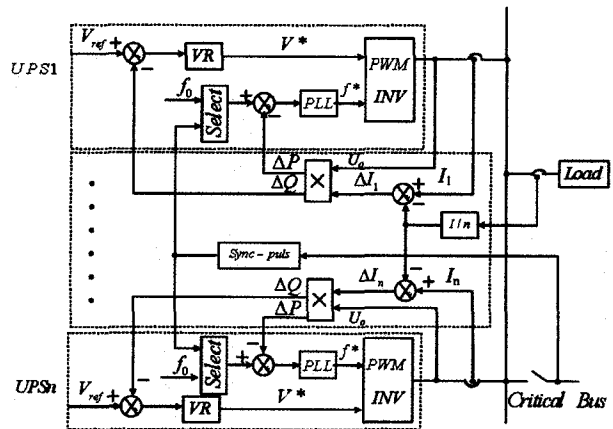


图3 集中控制系统原理框图

集中控制并联方案实现简单, 均流效果也较好, 但是并没有实现真正的冗余, 并联控制值器一旦故障, 则整个系统崩溃, 可靠性大大降低。

### 2.2 主从控制并联方案 (Master-Slave Control) [2]

主从控制并联方案是从集中控制并联方案衍生而来, 其主要改进之处在于可以通过模式选择开关、软件设定、硬件指定或工作状态进行主、从模块间的切换, 从而避免了集中控制模式中由于控制器发生故障导致系统崩溃的可能。

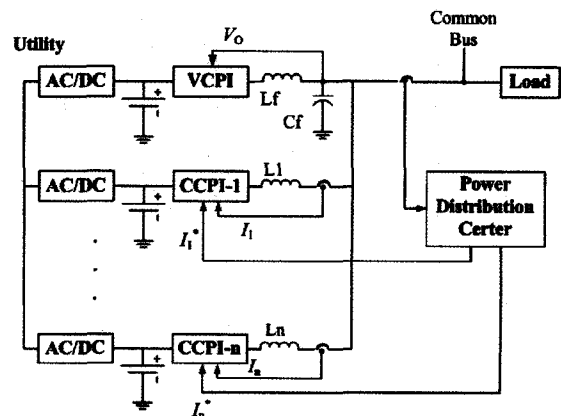


图4 主从控制系统原理框图

主从式并联系统, 由一个电压控制PWM逆变器(VCPI)单元、数个电流控制PWM逆变器(CCPI)单元和功率分配中心(PDC)单元组成并联系统。图4是功率分配中心控制并联方案的控制框图, 图5是该方案的等效电路图, 它包括:

(1) 一个VCPI, 主控单元, 其电压调节器保证系统

输出幅度、频率稳定的正弦电压；

(2) N 个 CCPI 从单元，设计其具有电流跟随器性质，分别跟随 PDC 单元分配的电流；

(3) PDC 单元检测负载电流，并平均分配给各 CCPI 单元，且是同步的。

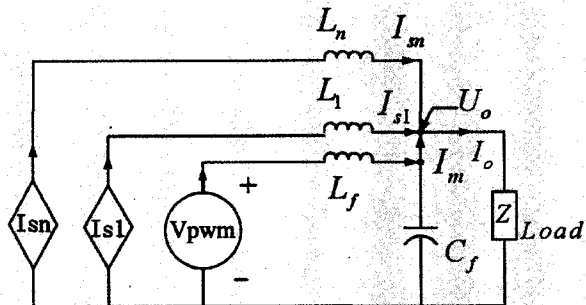


图5 主从控制并联系统等效电路

VCPI 单元通过锁相环(PLL)使其正弦输出电压与市电或自身产生的基准电压信号同步、而输出电流取决于负载性质。它与常规的逆变器或 UPS 无异。

主从控制并联方案不需要 PLL 电路，因为 CCPI 模块会自动的跟随 VCPI 模块的频率变化，自动实现锁相功能。主从控制并联方案的特点如下：

优点：

- (1) 控制简单，无需复杂的均流控制电路，实现相对比较容易；
- (2) 整个系统的稳定性和控制精度较好，动态性能良好，对线性负载和非线性负载都有较好的均流能力；
- (3) 可以方便的实现功率的控制和分配。

缺点：

- (1) 由于有主从模块之分，同时需要额外的控制器，整个系统中各个模块并不是地位均等，一旦控制器发生故障，则整个系统崩溃，并没有实现真正的冗余；
- (2) 主从模块进行切换时，由于基准正弦波幅值和相位的差异，容易产生很大的瞬时环流。主从模块切换是造成系统崩溃的重要因素。

### 2.3 分布式控制并联方案(Distributed Control)

分布式控制并联方案也称分散逻辑控制并联方案(Distributed Logic Control)。分布式并联控制是一种真正的冗余控制方法。其中任何一个模块的加入和退出都不会影响这个系统的运行。

在目前所见的文献中，分布式控制并联方案主要包括平均电流瞬时控制方案和有功无功控制方案。

#### ① 平均电流瞬时控制方案<sup>[3][4]</sup>

平均电流瞬时控制方案一般通过锁相环电路保证各个

模块基准电压的严格同步、通过求出各个模块输出电流的瞬时平均值进行电流的调节。因此该方案中一般需要控制互连线。图6 是平均电流瞬时值控制的原理框图。

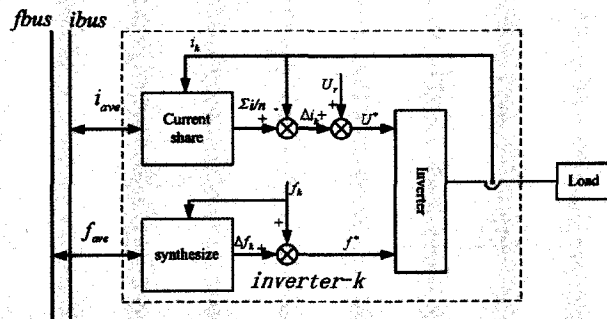


图6 平均电流瞬时控制原理框图

该控制方案的特点如下：

- (1) 采用两条并联控制线：输出电流平均线、基准方波频率 / 相位同步线；
- (2) 各个模块之间地位一致，可以实现真正的分布式冗余控制；
- (3) 采用瞬时值控制方式，动态响应快，均流特性好；
- (4) 模块间的模拟通信信号较多，因此容易受到干扰，同时容易导致 EMI 问题；
- (5) 各个模块基准电压的幅值和频率的偏差对系统控制精度和系统的稳定性影响较大。

#### ②. 有功无功控制方案<sup>[5]</sup>

有功无功控制方案则是通过检测本机的有功、无功信息，通过有功、无功并联线与其他模块通信，通过与其他模块有功、无功功率比较，对本模块的输出电压的频率、幅值进行调节，实现逆变器的并联，图7 是基于有功无功控制方案的原理框图。

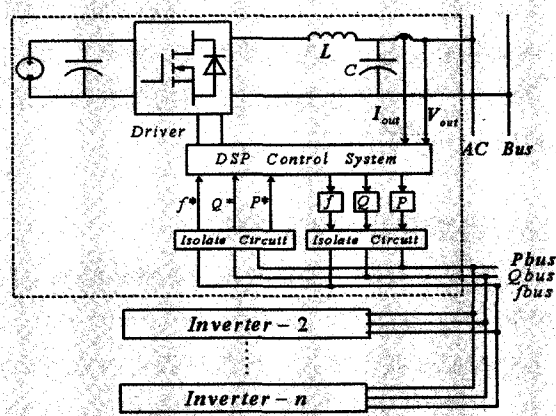


图7 有功无功控制原理框图

该方案的特点如下：

(1) 采用三条并联控制线:有功功率线,无功功率线,频率线。

(2) 各个模块之间地位一致,可以实现真正的分布式冗余控制。

(3) 并联控制线属于直流信号,抗干扰能力较强。

(4) 属于平均值控制方式,动态响应较差。

(5) 有功、无功的计算量大。

### 2.4 3C控制并联方案(Circular Chain Control)<sup>[6]</sup>

3C控制方法是采用跟踪的思想中,将第一台逆变器的输出电流反馈信号加到第二台逆变器的控制回路中,第二台的输出电流反馈信号加到第三台,依次连接,最后一台的输出电流反馈信号返回到第一台逆变器的控制回路,使并联系统在信号上形成一个环形结构,在功率输出方面形成并联关系。图8为两个模块并联控制框图。

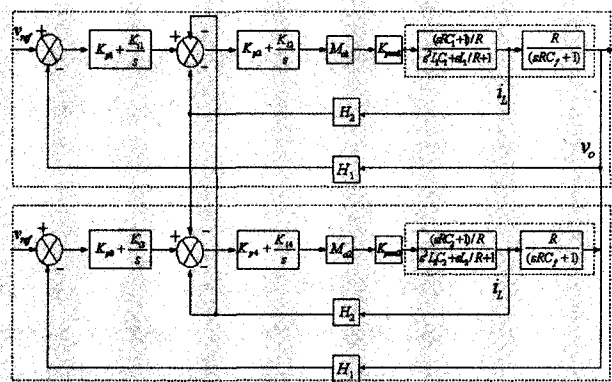


图8 3C控制2台并联系统框图

3C控制并联方案是分布式控制方法的改进。虽然其环形信号通路中每一模块仅接受上一模块的电流信号,但此信号中已包含其他模块的信息。因此,3C方案的互联线大大减少,既减小了干扰,又非常容易实现多台的并联。但是控制器的设计相当复杂,常规控制方案无法实现系统的可靠运行。为了保证系统的稳定性和动态性能,文献提出了  $H_\infty$  理论控制方法。

### 2.5 无线并联控制方案(Wireless independent Control)<sup>[7]</sup>

近年来,无互连线并联控制成为逆变器并联的研究热点。无线并联方案是从有功无功并联方案发展而来,借助电机并网中下垂特性的思想,通过预先设计的权值控制,使得逆变器的输出电压的频率和幅值分别随着输出有功功率和无功功率的增加而下降,从而使逆变器的输出电压和频率稳定在一个新的平衡点。图9是无线并联控制的原理框图。

基于下垂特性的无线并联方案的特点:

(1) 所有并联逆变器除了输出功率线外,没有别的电

气连接,实现了真正的无线并联。

(2) 基于下垂特性的无线并联方案是在输出电压频率、幅值与有功、无功均分的一个折中,因此输出特性软化。

(3) 由于有功、无功的计算一般在一个工频周期内计算得出,因此大大限制了动态响应。

(4) 系统参数对均流效果影响很大,使得参数的选择极为困难。

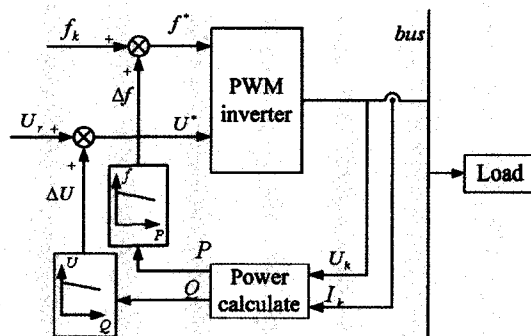


图9 无线并联方案结构框图

传统的基于下垂特性的无线并联方案是在输出电压调节和功率均分之间取折中,而且,有功功率变化还可能导致逆变器输出频率的漂移,因此,如何实现真正的无线并联,同时又克服无线并联内在的缺陷成为研究的核心所在。文献[8]提出了利用逆变器的输出交流功率线作为通信载体的电力线载波通信方式实现逆变器之间的信息交换。每台逆变器都将自身的有功和无功大小通过高频调制成高频数字信号耦合到功率输出母线上,这样,每台逆变器都能知道其他模块的输出功率,从而调节自身的输出电压和频率。

这种无线并联方案在一定程度上克服了传统无线并联的输出电压稳态误差大和瞬态响应慢的缺陷,但电力线载波通信方式受逆变器开关管高频干扰的可能性很大,因此,存在一定误差是在所难免的。

普通的电力线载波通信是将单台逆变器自身的信息通

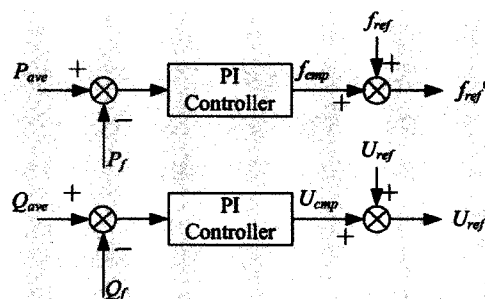


图10 有功调频和无功调压控制框图

过高频调制的方式耦合到输出电力线上,这使得滤波器参数的选择非常困难。文献[9]针对电力线载波通信的高频干扰产生的误码问题采取了新的通信策略。这种策略将单台逆变器的自身信息,包括并联模块的台数以及同步信号等,通过频率调制的方式转变成500Hz附近的抖频共模电流信号。各并联模块将功率输出端的共模输出电流与自身的共模给定信号比较,从而得到其他模块的信息。

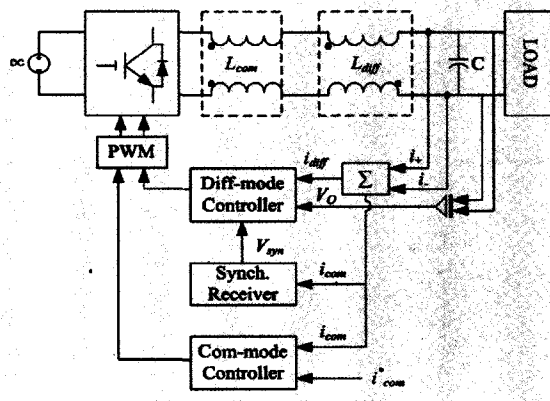


图11 共模电流并联方案中单台逆变器的同步机制

共模电流频率调制法将同步信号和逆变器其他信息调制成500Hz附近的模拟信号,从而避免了开关频率对输出信号的干扰,也避免了输出差模滤波器对信号的衰减。但是由于调制输出的信号为中频模拟信号,因而例如并联逆变器的台数等的信息对逆变器主电路输出阻抗参数的依赖性很大。例如,若逆变器输出共模阻抗不一致,将会使单台逆变器对并联模块的台数做出错误的估计,从而影响同步和均流精度。

### 3 逆变电源并联技术的发展趋势

从上一节对各种并联方案的分析可见,逆变电源并联技术的发展是从集中到分散,从有线到无线。目前世界上有许多国家的电源公司在UPS逆变器的并联冗余控制技术方面做了大量的工作,并有一系列产品投入了实用。目前,这些品牌的UPS系统并联控制技术的特点及发展表现在以下几个方面:

(1) 可并联的单元数增多,以多种途径实现高可靠并联运行。目前的最大并联单元数一般不超过10个,因而并联单元数的增多是今后的发展趋势,而并联系统控制方式呈现多样化;

(2) 可并联逆变电源实现模块化和标准化结构。模块化和标准化不仅是组成并联冗余系统以提高系统的可靠性和可维护性的要求,同时也是系统容量扩充和通用性的必

要前提;

(3) 数模混合与全数字化控制技术并存。传统的纯模拟控制方式已不能满足发展的需要,为提高系统的性能和完成并联的复杂算法和逻辑控制,UPS的控制必须单片机或DSP的参与;

(4) 实现无线并联的实用化,同时提高无线并联技术的可靠性、稳态精度和动态响应速度。无线并联技术能够使逆变器的并联运行不受地域的限制,降低故障的发生率,因此必然成为今后并联技术研究的重中之重。

### 4 结论

逆变电源可以为负载提供高质量的正弦交流电源,而逆变电源的并联运行不仅可以满足容量扩充的要求,同时可以组成并联冗余系统提高系统的可靠性和可维护性。本文在阐述逆变电源并联原理的基础上,介绍了并联技术发展史上出现的具有代表性的控制策略,讨论了各方案的优点和不足,并分析了今后并联技术的发展要求和发展方向。

### 参考文献

- [1] Jerry Thunes, Russel Kerkman et al. Current Regulator Instabilities on Parallel Voltage-source Inverters. IEEE Transaction on Industry Application, 1999, 35(1): 70-77
- [2] Chen J F, Chu C L. Combination voltage-controlled and current-controlled PWM inverters for UPS parallel operation. IEEE Transaction on Power Electronics, 1995, 10(5): 547-558
- [3] Xiao Sun, Yim-Shu Lee, Dehong Xu. Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average-current-sharing scheme. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 844-856
- [4] Lee C S, Kim S, Kim C B, et al. A novel instantaneous current sharing control for parallel connected UPS. IEEE INTELEC USA, 1998: 513-519
- [5] Takao Kawabata, Shigenori Higashino. Parallel Operation of Voltage Source Inverters. IEEE Transaction on Industry Application, 1988, 24(2): 281-287
- [6] Tsai-Fu Wu, Yu-Kai Chen, Yong-Heh Huang. 3C strategy for inverters in parallel operation achiev-

ing an equal current distribution. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000,47(2): 273 -281

[7]Tuladhar A, Jin H , Unger T, et al. Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections. IEEE APEC . USA 1997. vol. 1 : 94-100

[8]段善旭,陈坚,冯锋,陈君杰;基于电力线通信的并联UPS逆变器的均流控制; 电力系统自动化,2003,27(24):28-31

[9]A Novel Communication Strategy for Decen-

tralized Control of Paralleled Multi-Inverter Systems; Yeong Jia Cheng;Eng Kian Kenneth Sng; Power Electronics, IEEE Transactions on, Volume. 21, NO. 1, January 2006,page(s):148-156

### 作者简介

汪 东 男 博士研究生 主要研究方向为逆变器及其并联技术。

胡炳孝 男 工程师 目前主要从事直流变换器和逆变器的研究工作。

## 2007 国际电力电子技术及应用年会 暨第七届电力电子论坛

本届论坛主题：电机系统节能技术

### 邀 请 函

为推进“十一五”国家十大重点节能工程之一的电机系统节能工程的建设，北京电力电子学会、IEEE电力电子学会北京分会、中国电器工业协会电力电子分会和清华大学电力电子工程技术研究中心将于2007年10月联合主办“2007国际电力电子技术及应用年会暨第七届电力电子论坛”。论坛的主题是：电机系统及其应用的元器件的能效与节能技术的最新研究进展与发展趋势，以及相关标准与政策等方面展开深入和广泛的交流，并邀请相关政府官员、著名专家、学者作专题报告。本届论坛得到西门子公司的全力支持。现诚邀科研院所、大专院校、制造厂家和广大用户在内的业内外人士踊跃投稿并参加会议。在本论坛上发表的所有报告和发言都将在《电力电子》杂志上刊登发表。

### 联系方式：

周亚宁（北京电力电子学会）

电 话：010 83671666-6306

手 机：13311259018

传 真：010 63713235

电子邮件：zhouyaning@126.com

刘鹿生（《电力电子》编辑部）

电 话：010 62301233

电子邮件：liulusheng@126.com