

考虑尾流效应的风电场建模以及随机潮流计算

郑睿敏, 李建华, 李作红, 刘议华

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用变量变换法拟合了风速频率的三参数 Weibull 分布函数, 在风能分布的 Jensen 和 Lissaman 模型的基础上, 结合风速的频率分布模型与风力发电机组的单机稳态模型, 建立了大型并网运行风电场的综合模型. 该模型同时考虑了尾流效应和风电场地形因素对不同位置风机风速的影响, 得到了考虑以上因素时风电场的输出功率. 在此基础上, 应用蒙特卡罗法对风电场接入系统进行了随机潮流计算. 最后, 以 40 机的风电场为例建立了风电场模型, 将此模型引入到 IEEE14 系统中, 通过随机潮流计算得到系统节点电压的概率分布以及风电场输出功率的概率分布, 分析了风电场并网运行对系统各节点电压的影响, 从而为减小风电接入系统的电压波动提供参考.

关键词: 风电场; 尾流效应; 变量变换; 随机潮流

中图分类号: TM744; TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)12-1515-06

Modeling of Large-Scale Wind Farms in the Probabilistic Power Flow Analysis Considering Wake Effects

ZHENG Ruimin, LI Jianhua, LI Zuohong, Liu Yihua

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the Jensen model and Lissaman model and combined the frequency distribution model of wind speed and steady-state model of wind turbine generator, an integrated model for large wind farm is proposed which is connected directly to the distribution grid. Considering the energy loss caused by wake effect and impact of topographical factor on wind speed of wind turbine in different location, the output of whole wind farm can be evaluated via the model. Then, the model is applied in the IEEE 14-bus test feeder to analyze the impact of wind farm on nodal voltage of power system and give reference for reducing voltage fluctuation. Moreover, the variable transformation is adopted to estimate the parameters of three-parameter Weibull distribution function.

Keywords: wind farm; wake effect; variable transformation; probabilistic load flow analysis

20 世纪 70 年代以来, 能源日益枯竭, 环境不断恶化, 能源政策的调整给风力发电的发展带来了契机, 但风力发电不能提供连续稳定的电力, 风电场的并网运行对电网规划、电能质量及电网安全稳定等诸多方面带来影响^[1]. 因此, 为了更加充分地利用风力资源, 需要深入研究大规模风电场并网运行的技术问题.

为了研究风电场对接入系统的影响, 需要建立

适当的风机及风电场模型. 文献[2]利用风速的概率分布结合风电机的功率特性得到风电场出力的随机分布并进行潮流计算, 由于没有考虑尾流效应引起的风电场输出功率损失, 当风电场规模较大时可能带来较大的计算误差. 文献[3]针对配电网运用确定性潮流, 进行考虑分布式电源接入位置及其出力变化的电压分布计算. 为了考察上述随机变化对系统运行状况的影响, 这种确定性潮流计算方法计算量

大,而且也很难反映全面的情况。

本文以 Jensen 模型和 Lissaman 模型为基础,建立了考虑尾流效应和地形因素的大型风电场模型,能够较精确地得到位于不同位置的风机所能感受的风速,进而得到风电场输出功率。在此基础上,在标准 IEEE14 节点网络系统中加入风力发电场,对此系统进行基于蒙特卡罗的随机潮流计算,分析风电场对系统节点电压的影响。

1 风电场模型

1.1 风速模型

风的随机性很大,风速的频率分布是反映风的统计特性的一个重要形式。Weibull 分布函数被认为是目前最适合描述风速统计规律的概率密度函数^[4]。本文采用三参数 Weibull 分布作为随机风速模型

$$f(v) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} (v - \gamma)^{\alpha-1} \exp\left[-\frac{(v - \gamma)^\alpha}{\beta}\right] & v > \gamma \\ 0 & v \leq \gamma \end{cases} \quad (1)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\frac{(v - \gamma)^\alpha}{\beta}\right] \quad (2)$$

式中: v 为风速; γ 为位置参数,表示分布曲线的起始位置; $\alpha(>0)$ 为形状参数,表示曲线的形状; $\beta(>0)$ 为尺度参数,曲线随着 β 的增加变宽,反映风电场的平均风速。

使用三参数 Weibull 分布的困难在于如何对参数做出优良估计。通常可采用的方法有:最小二乘法、矩估计法、极大似然估计法等。为了得到有效性较高的估计值,最小二乘法和极大似然估计法需要很大的计算量,矩估计法需要反复求 Γ 函数,而且往往不能给出最有效的估计。

文献[5]借助变量变换,提出一种参数估计的新方法——变量变换法,可以给出有效性较高的参数估计,并且计算简便。

令 $b = \beta^{\frac{1}{\alpha}}$, 则式(1)、式(2)可改写为

$$f(v) = \begin{cases} \frac{\alpha}{b} \left(\frac{v - \gamma}{b}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{v - \gamma}{b}\right)^\alpha\right] & v > \gamma \\ 0 & v \leq \gamma \end{cases} \quad (3)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v - \gamma}{b}\right)^\alpha\right] \quad (4)$$

由于 $v > \gamma$ 和 $b > 0$, 可令

$$y = \ln \frac{v - \gamma}{b} \quad (5)$$

于是变量 y 的概率密度函数为

$$f(y) = \alpha e^{\alpha y} e^{-e^{\alpha y}} \quad 0 < y < \infty \quad (6)$$

数学上可以证明

$$E(y) = -\Gamma'(1)/\alpha \quad (7)$$

$$\text{var}(y) = (1/\alpha^2) \Gamma''(1) \quad (8)$$

$\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$ 称为 Γ 函数,由此计算得到

$$\Gamma'(1) = \int_0^{+\infty} e^{-x} \ln x dx = C \quad (9)$$

$$\Gamma''(1) = \int_0^{+\infty} e^{-x} (\ln x)^2 dx = \pi^2/6 \quad (10)$$

其中 $C=0.5772$, 称为尤拉常数。进一步得到

$$E(\ln(v - \gamma)) = \ln b - 0.5772/\alpha \quad (11)$$

$$\text{var}(\ln(v - \gamma)) = (1/\alpha^2)(\pi^2/6) \quad (12)$$

故 $a = (\pi^2/6 \text{var}(\ln(v - \gamma)))^{1/2}$ (13)

$$\beta = b^2 = \exp 2 \left(E(\ln(v - \gamma)) + \frac{0.5772}{a} \right) \quad (14)$$

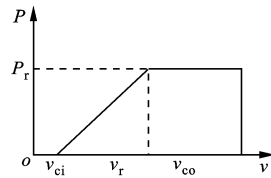
因此,通过调整 γ , 一般取 $\gamma < \min v$, 由上式解出 a 和 β , 作为 γ 、 a 和 β 各自的估计值,进而得到三参数 Weibull 分布函数。

1.2 风力发电机模型

目前风力发电所采用的发电机多是异步电机,除此以外还有双馈感应电机和同步感应电机。但是,就发电机出力和风速之间的关系而言,都基本遵从如图 1 所示的功率输出曲线。由图 1 可以得到风机输出有功功率 P 与风速 v 之间的关系为

$$P = f(v) \quad (15)$$

当得到了风电机风速之后,就可以通过风力发电机组的输出功率与风速之间的近似关系得到输出有功功率。与电网并联运行的风力发电系统大多采用



P_r 为风力发电机额定功率; v_{ci} 为切入风速;

v_r 为额定风速; v_{co} 为切出风速

图 1 风力发电机功率输出曲线

异步发电机,为建立旋转磁场实现异步工作,需要从电网中吸收无功功率。风力发电机可简化处理为 P - Q 节点,假定通过风电机组中电容器的自动投切,可使功率因数恒定不变,这样无功功率为

$$Q = P \tan \varphi \quad (16)$$

式中: φ 为功率因数角,对并网风电机而言, φ 一般

位于第4象限,故 $\tan\varphi$ 为负值.

1.3 风电场模型

研究大型并网风电场模型时,风电场是由大量的风电机组构成,因此风电场的数学模型是基于风电机组数学模型建立的,但又不能简单套用.

在风电场中,由于尾流的影响,坐落在下风向的风电机组的风速将低于坐落在上风向的风电机组的风速.确定尾流效应的物理因素主要有机组间的距离、风电机组的功率特性和推力特性以及风的湍流强度.受尾流影响的风的湍流强度是

$$\sigma/v = (\sigma_G + \sigma_0)/v_a \quad (17)$$

式中: σ_G 和 σ_0 分别是风电机组产生的湍流和自然湍流的均方差,通常情况下

$$\sigma_G = 0.08v_a \quad (18)$$

$$\sigma_0 = 0.12v_a \quad (19)$$

Jensen 模型较好地模拟了平坦地形的尾流情况^[6],模型如图2所示.设 X 是两个风电机组的距离,叶轮半径和尾流半径分别是 R 和 R_w ,自然风速、通过叶片的风速和受尾流影响的风速分别是 v_0 、 v_T 、 v_X .

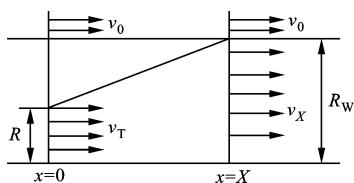


图2 Jensen 模型

根据动量理论有

$$\left. \begin{aligned} \rho\pi R_w^2 v_X &= \rho\pi R^2 v_T + \rho\pi(R_w^2 - R^2)v_0 \\ \frac{dR_w}{dt} &= k_w(\sigma_G + \sigma_0) \\ \frac{dR_w}{dx} &= \frac{dR_w}{dt} \frac{dt}{dx} = k_w(\sigma_G + \sigma_0)/v \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: ρ 为空气密度; k_w 是常数.令尾流下降系数 $k = k_w(\sigma_G + \sigma_0)/v$.

由于 v_0 、 v_T 和风电机组的推力系数 C_T 具有如下关系

$$v_T = v_0(1 - C_T)^{1/2} \quad (21)$$

$$v_X = v_0 \left[1 - (1 - (1 - C_T)^{1/2}) \left(\frac{R}{R + kX} \right)^2 \right] \quad (22)$$

其中 C_T 一般取 0.2.

风电场所处地形较复杂,部分风机安装在山上,由于风速会随高度变化而变化,导致风电场的风速分布不均.由 Lissaman 提出的针对各台风机的位置

高低不同建立的 Lissaman 模型^[6],较好地近似模拟有损耗的非均匀风速场,模型如图3所示.

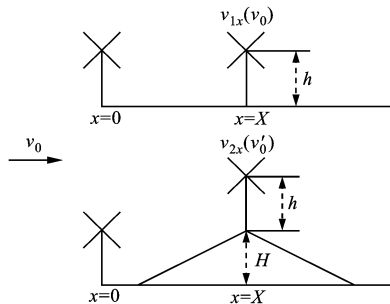


图3 Lissaman 模型

假设有两个相邻的场地,一个地形平坦(风机安装的海拔高度相同),另一个地形复杂(风机安装的海拔高度不同).两台相同型号的风电机组分别坐落在这两个场地的边缘,它们的风速相同 v_0 ,沿着风速方向的坐标位置都是 $x=0$.当在 $x=0$ 位置处没有风电机组时,平坦地形 X 处风速仍为 v_0 ,而位于海拔高度 H 处的风机的风速为

$$v'_0 = v_0 \left(\frac{h+H}{h} \right)^{\alpha_1} \quad (23)$$

式中: h 为风机的塔筒高度; α_1 为风速随高度变化系数,一般取 $\alpha_1 = 1/7$.由此得到风速随着高度增加而增大.

当在 $x=0$ 位置处安装风电机组后,受尾流影响, $x=X$ 位置处风速分别为

$$\left. \begin{aligned} v_{1x} &= v_0(1 - d_1) \\ v_{2x} &= v'_0(1 - d_2) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中: d_1 和 d_2 是对应的风速下降系数.由 Jensen 模型得

$$d_1 = 1 - (1 - (1 - C_T)^{1/2}) \left(\frac{R}{R + kX} \right)^2 \quad (25)$$

假设两种地形风电机组产生的损耗相同,则尾流中的压力相同,根据无损耗贝努利方程得到

$$d_2 = d_1(v_0/v'_0)^2 \quad (26)$$

综合利用 Jensen 模型和 Lissaman 模型,就能得到较为精确的风电场综合模型,得到位于不同位置的风机风速及功率输出.将整个风场中风力机输出功率相加,进而得到整个风电场的功率输出.

2 含风电场的随机潮流计算

风力发电的有功出力受自然天气条件的影响很大,当系统中含有大规模的风电场时,确定性的潮流计算无法反映全面的情况.随机潮流计算是解决上述问题的有效方法,它运用了概率统计方法处理系

统运行中的随机变化因素,可以更深刻地揭示系统运行状况,为系统安全运行提供更完整的信息。

在概率潮流计算的研究中,如何才能最有效和最精确地获得状态电压和支路潮流的概率密度函数或分布函数是一个重要的问题。本文采用蒙特卡罗模拟,通过对输入变量(风速)的概率分布随机重复抽样,得到对应的风电场输出有功和无功功率,然后采用确定性潮流计算得到状态电压值,最后根据重复抽样结果获得状态电压的概率描述。由于风能的随机性,采用蒙特卡罗方法较方便地重现含有风电场的实际系统运行情况。本文重在研究风电场受风速随机性影响,以及对所接入系统的影响,故此处不考虑负荷、发电机出力和线路故障的随机性影响。

根据文献[7],蒙特卡罗法的收敛判据由方差系数 λ 确定,通过对 λ 的计算来检验抽样次数是否达到精度要求,从而确定抽样次数。含风电场的电力系统潮流计算流程如图 4,各步骤简要说明如下。

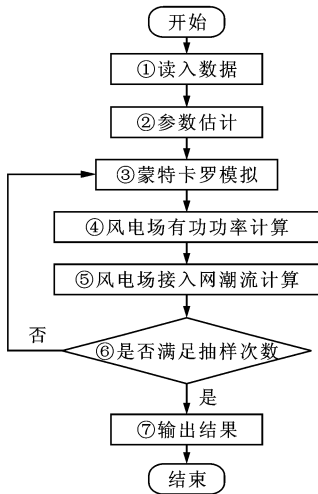


图 4 含风电场的随机潮流计算流程图

(1)读入数据。读入数据包括风电场平均风速历史数据,风机型号及特征参数,风电场风机分布特征数据,潮流计算的原始数据。

(2)参数估计。运用变量变换法进行参数估计,得到风电场风速分布函数。

(3)蒙特卡罗模拟。根据风速分布函数,采用线性同余法产生随机风速值。

(4)风电场有功功率计算。根据尾流效应和地形因素建立的风电场综合模型,得到风电场不同位置处风机风速值。进一步由风电机风速功率曲线得到每台风机的输出功率,将其叠加,最终得到整个风电场的有功功率输出。根据式(16)得到无功功率输出。

(5)风电场接入电力系统潮流计算。将并网运行

的风电场模拟成 P - Q 节点,用 Newton-Raphson 法进行潮流计算。

(6)检验是否满足抽样次数。如果小于抽样次数,返回步骤(3),否则输出计算结果。

(7)输出结果。结果包括风电场风速分布函数,风电场输出有功功率的概率分布,电网各节点电压概率分布。

3 算例分析

3.1 建立风速模型

以某风力发电厂为例,根据风力资源统计数据,采用变量变换法得到三参数 Weibull 分布的参数估计值 $\gamma=2.3,\alpha=1.39,\beta=9.81$,于是得到风电场风速分布函数

$$F(x)=1-\exp\left[-\frac{(x-2.3)^{1.39}}{9.81}\right]$$
 (27)

3.2 建立风电场模型

风机采用 Nordex 的 S70/1 500 kW,额定功率为 1.5 MW,额定电压为 0.69 kV,叶片直径为 70 m,塔筒高为 65 m,功率曲线如图 5 所示。

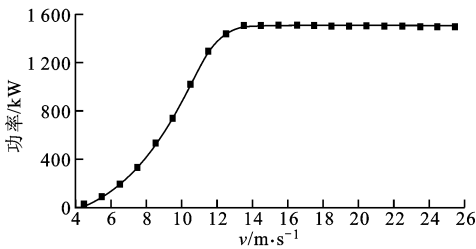


图 5 S70/1 500 kW 功率曲线

风电场的总装机容量为 240 MW,由 160 台风机组成,全部并联接入高压网。由于风电场的地形差异,其中 120 台风机分 20 行 6 列分布,与测风装置位于相同海拔高度,其余 40 台风机呈 20 行 2 列分布,位于海拔高度不同的山脉之上。在平行于风速的方向上,相邻两台风机之间的轴向距离为 10 倍的风机叶片直径,具体分布如图 6 所示(风由水平方向吹来,故位于同一列的风机可等效为一台风机)。

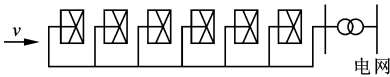


图 6 风电场分级分布图

对位于平坦地形和复杂地形的风机分别采用 Jensen 模型和 Lissaman 模型,得到每台风机处的风速值,得到每台风机发出的功率,进而得到整个风电场的有功功率输出。

3.3 风电场对系统节点电压的影响

通常情况下,风电场额定容量为 240 MW, $\cos\varphi=0.80$,即 Q/P 为 -0.75 . 将风电场视为 P - Q 节点,接入标准 IEEE30 节点网络系统进行潮流计算.

根据图 7 可知,当抽样次数为 5 000 次时,方差系数为 0.092 726,故采用蒙特卡罗法,对风速分布进行 5 000 次采样,进行潮流计算,分析风电场对接入系统的各点电压概率分布的影响.

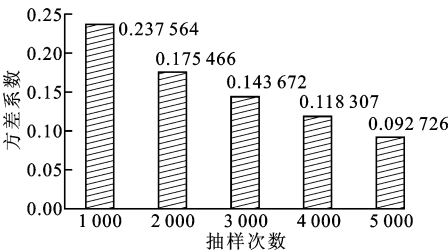


图 7 IEEE30 系统采用不同抽样次数对应的相对误差

为了更好地说明采用不同模型对计算风电场出力的影响,本文对比了下述 3 种不同的风场模型:

(1)不考虑尾流效应和地形影响,认为风电场中位于不同位置的风机感受到的风速相同,采用简化模型;

(2)考虑尾流效应,不考虑地形影响,采用 Jensen 模型;

(3)考虑尾流效应和地形影响,采用综合模型.

在 3 种不同情况下,模拟得到的风电场输出有功功率如表 1 所示. 限于篇幅,仅列出风电场采用综合模型时的有功功率概率分布,如图 8 所示.

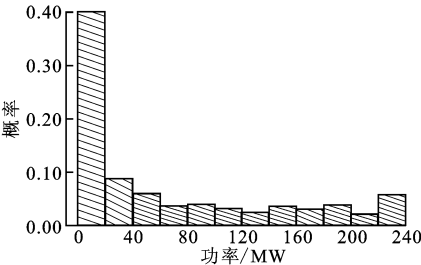


图 8 风电场输出有功功率的概率分布(综合模型)

表 1 采用不同模型风电场的输出功率

模型	风电场输出的有功功率/MW		
	最大值	95%概率	平均值
1	240	240	162.808 88
2	240	240	125.702 69
3	240	240	138.082 24

由表 1 可见,采用不同模型得到的风电场输出功率差异较大. 采用简化模型与采用综合模型求出的有功功率均值之差约为 24 MW,达到风电场额定功率的 10%,故在建立风电场模型时应充分考虑尾流效应和地形因素的影响.

由表 2 可见,风电场输出功率的概率分布不同于风速分布. 风电场总输出功率大于总装机容量 50%(120 MW)的概率约为 0.4,大于总装机容量 70%(160 MW)的概率约为 0.3,而等于总装机容量的概率不到 0.08.

将风电场经不同节点接入 IEEE14 系统,通过计算得到系统各节点电压的概率分布,发现当风电场从节点 9、节点 11 和节点 12 接入系统时,系统部分节点电压越限. 限于篇幅仅列出发生电压越限的系统节点电压的越限概率值.

表 2 风电场不同接入点随机潮流计算结果

接入点	电压越限(标么值<0.90)概率					
	节点 9	节点 10	节点 11	节点 12	节点 13	节点 14
9	0.234 0	0.216 4	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.205 6
11	0.172 0	0.218 2	0.254 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
12	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.226 8	0.186 8	0.000 0

由表 2 可以看出,电压波动最严重的是风电场接入系统的接入点,且通过不同的节点接入系统,系统各节点电压的质量差异也比较大.

3.4 无功补偿

为了改善系统内节点电压,现对风电场经节点 11 接入系统时无补偿、发电机机端并联 200 kV·A、风电场出口并联 32 MV·A 以及混合补偿(发电机机端并联 100 kV·A,风电场出口并联 16 MV·A)4 种情况进行随机潮流计算,结果如表 3 所示(未列出的节点均未发生电压越限).

表 3 不同无功补偿方式下的随机潮流计算结果

节点号	电压越限(标么值<0.90)概率			
	无补偿	机端补偿 200 kV·A	出口补偿 32 MV·A	混合补偿
9	0.172 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
10	0.218 2	0.169 4	0.137 0	0.105 2
11	0.254 0	0.209 2	0.193 8	0.173 4

经过比较发现,合理的无功补偿可以有效地改善风电场导致的系统电压质量,同等补偿容量下,混

合补偿优于风电场出口补偿和发电机机端补偿。

4 结束语

(1)综合模型考虑了尾流效应和复杂地形对运行的风电场造成的能量损失,能够较精确地模拟风电场不同位置风机的风速。尾流效应给风电场带来不可忽略的能量损失,且位于不同海拔高度的风机风速差异较大。

(2)本文方法采用了变量变换法,估计风速采用三参数 Weibull 分布函数,这种方法不仅可以给出有效性高的参数估计,而且计算简便。

(3)通过系统随机潮流计算,可以对风电场并网后系统各节点电压进行全面分析,从而为减小风电接入系统的电压波动提供参考。

参考文献:

[1] 王承煦,张源. 风力发电[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.

[2] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.

[3] 刘辉,别朝红,王锡凡,等. 风电场并网电压波动的随机潮流分析[C/CD]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会. 南京:海河大学,2006: 6387008.

[4] STEWART D A, ESSENWANGER O M. Frequency distribution of wind speed near the surface[J]. Journal of Applied Meteorology, 1978,17(11):1633-1642.

[5] 马开玉. 三参数 Weibull 分布参数估计的一种新方法[J]. 气象科学,1990,10(2):208-212.

MA Kaiyu. A new method to estimation parameters in three-parameters Weibull distribution[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 1990,10(2): 208-212.

[6] SANDERHOFF P. PARK: user's guider [M]. Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory, 1993.

[7] 别朝红,王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自动化,1997,21(6):68-75.

BIE Zhaohong, WANG Xifan. The application of Monte Carlo method to reliability evaluation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997,21(6):68-75.

(编辑 杜秀杰)

第七届中国纳米科技西安研讨会于 2008 年 9 月 19 日在 西安交通大学隆重召开

中国纳米科技西安研讨会(CNST-XS)是在西部地区每年召开一届的大型学术盛会。会议旨在交流我国纳米科技领域具有创新性的学术论文、科技成果、应用成果,以促进纳米科技的研究开发与推广应用,推动我国纳米科技的学科繁荣、技术创新与产业发展。

第七届中国纳米科技西安研讨会定于 2008 年 9 月 18~21 日在西安交通大学召开。会议由中国颗粒学会、中国微纳米技术学会、全国高科技健康产业工作委员会(生物纳米专委会)、西安纳米科技学会、陕西省电子学会纳米技术专业委员会、国际板喷工业协会联合主办。西安纳米科技学会牵头承办,西安交通大学、大连理工大学、西北工业大学、西安电子科技大学、西北大学、第四军医大学、西安理工大学、西安建筑科技大学、陕西科技大学、西安科技大学、西安工程大学、西北大学、西北农林科技大学、陕西师范大学、西安工业大学、太原理工大学、中北大学、西北有色金属研究院、西安陆通科技发展有限公司、浙江省纳米材料开发应用协会等单位协办。会议得到了陕西省科技厅、陕西省教育厅、西安市科技局、西安市科协等单位的支持,得到陕西班博纳米实业有限公司、西安量维生物纳米科技股份有限公司、西安康旺抗菌科技股份有限公司、陕西太和科技股份有限公司等企业的赞助。会议将邀请纳米科技各领域国内外著名科学家作特邀报告,大会组委会将努力把本届会议办成一次层次高、规模大、专业广、国际化的大型学术盛会。