A-PDF Split DEMO : Purchase from www.A-PDF.com to remove the watermark

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.04.020

考虑风电出力不确定性的储能容量机会约束规划配置*

李丽娜[1],杨　莉[1*],孙　成[2]
(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027; 2. 华东电力调度通信中心,上海 200002)

摘要:储能系统对风能等可再生能源实现可调度运行有着十分重要的作用。针对风电出力的不确定性问题,提出了一种基于机会约束规划的电池储能系统(BESS)容量配置方法。考虑风电利用率和储能装置荷电状态(SOC)约束,以储能成本最低为目标,采用模拟技术和遗传算法相结合的方法求解,得到了风电输出波动不超过某一区间的置信度与储能最佳配置成本间的关系。此外,在储能系统的控制策略中引入了放电惩罚因子,修正了储能装置的充放电功率,从而达到了延长使用寿命的效果。研究结果表明,BESS容量配置方法在电能质量和经济性间取得了适度的折中。

关键词:风电出力;不确定性;电池储能系统;机会约束规划
中图分类号:TM614;TM743　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-4551(2013)04-0468-04

Chance-constrained programming based energy storage system sizing model considering uncertainty of wind power

LI Li-na[1], YANG Li[1], SUN Cheng[2]
(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. East China Electric Power Dispatching and Communication Center, Shanghai 200002, China)

Abstract: Energy storage plays an important role in increasing the acceptable grid-connected capacity for wind power. Aiming at the uncertainty and intermittence of wind power, a chance-constrained programming based battery energy storage system(BESS) sizing model was proposed. The constraints of wind power utilization and state of charge (SOC) of BESS were considered, and the wind output fluctuation was subject to within a certain limit. Genetic algorithm was used to solve the optimization problem, and Monte-Carlo method was applied to deal with the chance-constrained question. Furthermore, a control strategy was proposed to command BESS to charge or discharge of concerning discharge penalty, so as to extend the life span. The results indicate that the configuration of BESS capacity gets a tradeoff between power quality and cost.

Key words: wind power output; uncertainty; battery energy storage system(BESS); chance constrained programming

0　引　言

随着全球气候变暖,节能减排已成为当前各国研究的热点,其中又以可再生能源的开发和利用为核心。风力发电作为可再生能源发电的重要部分得到了飞速的发展。“十一五”期间,我国风电并网装机容量以年均近100%的速度增长。截至2011年底,我国已建成多个连片开发、规模达到百万千瓦级的风电基地。内蒙古、甘肃、河北、辽宁、吉林、黑龙江、山东、新疆、江苏、宁夏是我国风电装机规模最大的10个省区,合计风电并网规模达39 840 000 kW,占全国总规模的88%[1]。

收稿日期:2012-11-29
基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2012AA050204)
作者简介:李丽娜(1987-),女,河北邯郸人,主要从事新能源调度优化方面的研究. E-mail:llnry@163.com
通信联系人:杨　莉,女,副教授,硕士生导师. E-mail:eeyangli@zju.edu.cn

风电受清洁能源政策保护,拥有优先调度权。然而,由于风电具有波动性和间歇性,虽然对于风电预测研究众多,但目前较成功的商业风电预测软件精度仅有15%左右[2]。近年来,随着风电开发规模的扩大,风电的不确定性影响到系统调度的安全性和经济性,风电的并网消纳面临诸多挑战,例如风电渗透率高的系统,有可能由于大量投入备用,导致运行成本明显增加等。因此,为风能等可再生能源配置合适容量的储能是实现风电可调度运行等问题的最有效途径。

目前,对于储能的容量配置方面的研究已取得一些成果。文献[3]以风电机组输出功率特性函数和风电场风速概率分布函数为基础,提出了一种计算大型风电系统长时间稳定输出所需储能容量的方法。文献[4]从电力系统稳定性出发,提出了一种考虑稳定域及状态轨迹收敛速度的最小储能容量配置方法。文献[5]基于离散傅里叶变换频谱分析结果确定储能补偿范围,提出了能够满足系统功率输出波动率、储能效率、荷电状态限制的储能容量确定方法。

风力发电机的输出功率具有不确定性,不可避免地会突然出现大幅度的功率波动,希望通过储能装置使风电输出完全可控,既不经济也不现实。机会约束规划的实质是在一定程度上考虑不确定因素,通过将传统优化中完全满足的约束条件软化为满足约束条件的概率高于某一置信水平。本研究将机会约束规划引入到储能装置优化配置问题上,使得容量配置更具实用性。

本研究构建"以储能成本最小为目标,以储能电池充放电限制条件为硬约束条件,以及风电吸纳水平和平稳输出为机会约束条件"的优化模型。该模型中引入切风量和放电惩罚,修正储能装置的充放电功率值,这是出于对储能容量配置的经济性考虑,在延长储能使用寿命的意义上也是必要的。最后,本研究采用模拟技术和遗传算法相结合的方法求解,并验证可行性。

1　基本介绍

1.1　风电和储能混合系统介绍

风电和储能混合系统输出可以作为微电网运行来跟踪负荷,也可以在并网运行时实现调度目标。调度目标由调度部门根据当地实际情况并综合考虑各机组经济效益的情况下确定,实现电网对风电场的调度。该混合系统功率平衡情况如图1所示。

近年来,各种新类型的储能电池相继开发成功,并在电力系统中得到应用。根据所使用的化学物质的不同,储能电池可以分为许多类,如铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池、镍镉电池、钠硫电池、液流电池等[6]。本研究所选取储能电池的价格性能参数如表1所示。

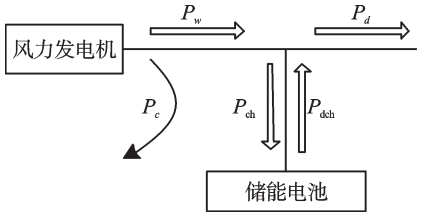

图1　风电和储能电池混合系统结构

P_w—风力发电机输出功率;P_{ch}—储能电池充电功率;P_{dch}-放电功率;P_c—切风损失的功率;P_d—混合系统输出目标值

表1　储能电池装置参数规格

储能类型	额定功率费用/($·(kW·h)$^{-1}$)	额定容量费用/($·kW^{-1})	使用寿命/年	荷电状态使用范围	循环次数/次	传输效率/(%)
储能电池	488	325	15~30	0.2~0.8	3 000	75~85

荷电状态反映的是储能设备的剩余容量占总容量的比值,荷电状态与储能设备充放电功率的关系为:

$$SOC_t=\frac{E^{\mathrm{ini}}+\sum_{r=1}^{t-1}\left(\eta_{\mathrm{ch}}P_{\mathrm{ch},r}-\frac{1}{\eta_{\mathrm{dch}}}P_{\mathrm{dch},r}\right)\cdot\Delta t}{\bar{E}} \tag{2}$$

式中:SOC_t,E^{ini}—储能设备的荷电状态和初始容量;η_{ch},η_{dis}—充放电效率;$P_{\mathrm{ch},r}$,$P_{\mathrm{dch},r}$—充、放电功率;$\bar{E}$—储能设备的额定容量。

1.2　储能运行策略

实际电力调度运行中,允许风机和储能混合系统输出在目标值的规定范围内波动,该范围可根据国家出台的风电场并网要求确定,实现风电并网的经济性和可靠性。文献[7]将联合系统输出目标设定为风电功率预测值,储能系统补偿风电功率预测误差,把预测误差限制在可接受范围内。文献[8]从系统经济效益出发优化该目标值,在混合系统收益扣除储能成本后,实现经济利润最大化。由于目标值的优化不是本研究的研究重点,本研究认为目标值给定。

当风电场功率输出值大于目标值时,储能用于储存多余的风能,当风电场功率输出值小于目标值时,储能释放能量补偿不足。设储能电池的充放电功率为$P_{b,t}$,其值由风电场出力和目标的差值决定,即:

$$P_{b,t}=P_{w,t}-P_d \tag{2}$$

此外,储能电池的充、放电功率受到额定功率和SOC的限制。本研究对储能装置的能量状态进行有效的管理,实时调整其能量状态,以确保其始终运行在安全范围内,避免储能设备枯竭或饱和,从而延长使用寿命。本研究通过设置4个临界值,将储能装置的能量状态划分为3个区间:非工作区间,正常工作区间,警戒工作区间如图2所示。警戒工作区间表征储能设备容易由该区间进入枯竭或饱和,研究者应尽量

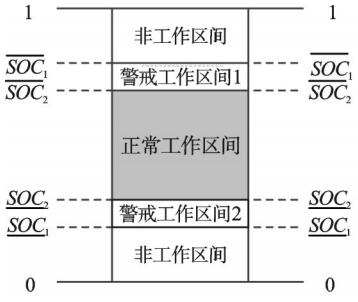

图2 储能装置的能量状态

$\overline{SOC_1}$，$\underline{SOC_1}$—储能装置正常工作时上下限；$\overline{SOC_2}$，$\underline{SOC_2}$—选取比正常限制分别偏小和偏大的值

避免储能设备长时间处于该能量区间。

当储能装置的荷电状态在正常工作区时，本研究根据风电出力与目标的差值确定充、放电功率；当储能装置的荷电状态在警戒工作区间1时，采取弃风措施，防止储能装置过冲；当储能装置的荷电状态在警戒工作区2时，设置放电惩罚，引导储能电池减少放电功率，从而减少储能装置在接近其限制附近时造成寿命折损。

放电惩罚遵循以下规律：当储能电池剩余容量较多时罚因子较小，而剩余能量较少时罚因子较大，且放电功率越大，罚因子就越大。实验中取得相应惩罚点，由下式拟合得到 $a_1 \sim a_5$ 各系数：

$$\begin{aligned}\sigma = {} & a_1 + a_2 \cdot (SOC_t - \underline{SOC_1}) + a_3 \cdot (-P_{b,t}) + \\ & a_4 \cdot (-P_{b,t}) \cdot (SOC_t - \underline{SOC_1}) + a_5 \cdot (SOC_t - \underline{SOC_1})^2\end{aligned} \tag{3}$$

本研究通过将所设计的放电罚因子计入目标函数中，使得储能电池在剩余能量较少时减少放电。

2 储能系统容量优化配置模型

2.1 机会约束规划简介

常用的确定性规划包括线性规划、非线性规划、多目标规划、目标规划、动态规划、多层规划等，但对于不确定规划问题，经典的优化理论通常是无法求解的。文献[9]运用机会约束规划配置风电场极限穿透功率，避免发生概率很低的违反约束条件情况对风电装机容量的限制。文献[10]运用机会约束解决了输电规划中的不确定因素，给规划人员提供了选择方案。文献[11]对水火电系统中的不确定因素的影响，提出了一种基于机会约束的短期优化调度不确定模型，以帮助调度人员确定火电机组组合及费用目标。

机会约束规划允许所做决策在一定程度上不满足约束条件，但该决策应使约束条件满足的概率不小于某一置信水平，从而使传统优化中刚性的约束条件保持一定程度的柔性，并使目标函数最优和满足约束条件间取得适度的折中。机会约束规划的常见形式为：

$$\begin{cases}\min\ f(x,\xi) \\ s.t \\ Pr\{g_j(x,\xi) \leqslant 0, j = 1,2...n\} \geqslant \alpha \\ G(x,\xi) \leqslant 0\end{cases} \tag{4}$$

式中：x —一个决策向量，ξ —一个随机向量，$f(x,\xi)$ —目标函数，$G(x,\xi) \leqslant 0$ —刚性约束条件，$g_j(x,\xi) \leqslant 0$ —机会约束函数，$Pr\{g_j(x,\xi) \leqslant 0\}$ —约束条件满足的概率，α —机会约束条件的置信水平。

2.2 基于机会约束规划的储能系统数学模型

在本研究的风机和储能模型中，储能装置的有功补偿作用是将风电出力与制定的目标值差额限制在某一指定区间范围内。采用机会约束规划有两个目的：①为了处理风电出力恶劣且储能设备工况不利于充放电时，通过小概率违反约束条件，避免100%满足约束条件造成的高额代价；②针对模型中引入切风量，考虑到风能是可再生能源，应最大限度吸纳风能，通过机会约束条件实现大概率保证风能利用率。

基于机会约束规划的储能系统数学模型如下：

$$\min C = C_p \cdot \bar{P} + C_e \cdot \bar{E} \tag{5}$$

$$\text{s.t.} \quad \Pr\{|\frac{P_d - (P_w(\xi) - P_c(\xi) - P_b)}{P_d}| \leqslant \varepsilon\} \geqslant \alpha \tag{6}$$

$$\Pr\{\beta \cdot \sum_{t=1}^{T} P_{w,t} - \sum_{t=1}^{T} (P_{b,t} + P_{d,t}) \leqslant 0\} \geqslant \chi \tag{7}$$

$$\underline{SOC_1} < SOC < \overline{SOC_1} \tag{8}$$

$$-\bar{P} < P_{b,t} < \bar{P} \tag{9}$$

式中：决策量 $\bar{P}$，$\bar{E}$ —储能电池额定功率和额定容量；C_p，C_e —储能电池额定功率单价和额定容量单价。

式(6)显示风电和储能混合系统出力波动限制在一定范围 ε 内的概率不小于 α，式(7)显示电网以不小于 χ 的概率保证对风能吸纳水平 β。其中，切风量 $P_c(\xi)$ 是随机变化的，由下式决定：

$$P_c(\xi) = \max\{0, P_w(\xi) - P_b - P_d\} \tag{10}$$

2.3 基于随机模拟的遗传算法

随机模拟，也称为Monte Carlo模拟，是一种实现随机(或确定)系统抽样试验的技术，其基础是从给定的概率分布中抽取随机变量。模拟风电波动性的场景由拉丁超立方采样(LHS)生成，并通过Cholesky分解，降低多独立的输入随机变量采样值之间的相关性。

本研究认为风电场出力符合多元联合正态分布 $N(\mu,\tau)$，对于每一个时段 t，μ 代表该时段的风电预测值，τ 代表预测误差。本研究的风电预测值和预测误差参考文献[12]，应用随机模拟技术，根据风电出力概率分布产生 N 个场景，每个场景的概率为 $1/N$。在 N 种场景下检验机会约束条件，机会函数成立的次数设为 N'，根据大数定律，若 $N'/N \geqslant \alpha$ 则表示机会约束成立。

本研究采用遗传算法求解式(5~9)所描述的机会约束储能规划模型,基本步骤如下:

(1) 初始化,输入遗传算法中染色体个数,以及交叉和变异概率。采用随机方法产生一组初始配置方案,作为遗传算法的初始种群。

(2) 利用随机模拟技术产生大量场景,依据储能电池的运行策略,确定每种场景下储能电池的充、放电功率值。

(3) 检验种群中的每个染色体是否满足机会约束条件,如满足则进入下一步,如都不满足则进行变异运算形成新一代染色体种群,跳转步骤(2)。

(4) 选取满足机会约束条件的染色体,计算其对应的目标函数值。

(5) 对种群中的染色体进行精英选择操作。

(6) 对种群中的染色体进行变异和交叉操作,得到新一代染色体。

(7) 重复步骤(2~6),达到给定的最大迭代次数。

(8) 以求解过程中所发现的最好的染色体作为储能电池最优配置方案。

需要特别指出的是,在上述寻优计算中,研究者可将放电惩罚的影响合并到目标函数中,通过最小化目标函数,修正储能电池充放电功率值,使荷电状态尽量维持在正常工作区,即以下式最小为寻优目标:

$$C = C_p \cdot \bar{P} + C_e \cdot \bar{E} + \sum_{t=1}^{T} \sigma \cdot \Delta t \tag{11}$$

3　仿真研究

本研究采用文献[12]的风电场输出预测数据,风机装机容量为10 MW,预测时间间隔为1 h。笔者在Matlab中编程进行仿真寻优运算,随机模拟场景数设置为1 000,仿真时间选取为24 h,储能设备参数设置如表1所示,SOC初值均选为0.5,设定 $\underline{SOC}_2$ 和 $\overline{SOC}_2$ 分别为0.3和0.7。联合系统输出波动范围 ε 设定为2%,风电吸纳水平选为85%,其置信概率为90%。

本研究对置信区间 $\alpha = 80\%\sim100\%$ 进行多次仿真运算,计算最优配置及成本,得到结果如图3所示。可以看出随着 α 不断增大,混合储能设备容量和成本不断增加,但在88%时出现明显拐点,所以可选取为最优置信水平。此时,储能电池的额定功率和额定容量分别为1 MW 和4.6 MW·h。在实际应用中,由于各地风况和控制策略的不同,最优置信水平也将有所不同。

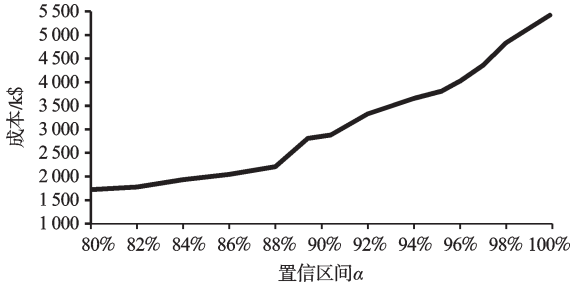

图3　不同置信区间下成本曲线变化

为了考察风机和储能系统联合出力相对于目标值的波动情况,本研究统计所有场景下的偏差量,得到柱状分布图如图4所示。偏差在零附近分布的概率最大,产生负偏差的情况下容易发生小概率违反事件,而正偏差基本不会发生概率违反事件,这是由于模型中引入切风量的缘故。

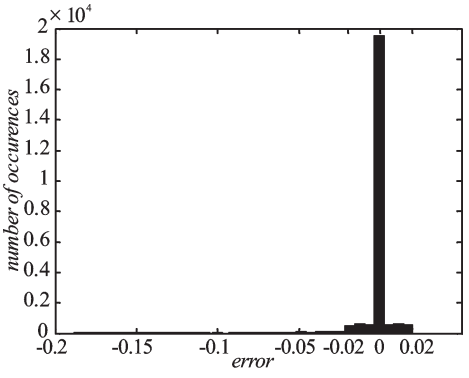

图4　偏差量柱状分布图

风电利用率计算如下:

$$\delta = 1 - \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{1\,000} P_{c,t}(\xi^j) / \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{1\,000} P_{w,t}(\xi^j) \tag{12}$$

上例中,按照式(12)计算得风电利用率高达91.7%,说明保证风电吸纳率的机会约束条件(7)很好地起到了作用。

5种典型场景下储能电池荷电状态变化情况如图5所示,观察图5可得:利用文中设计的控制策略,储能电池的 *SOC* 被有效控制于合理范围,避免了储能设备饱和或枯竭对储能设备寿命的影响。

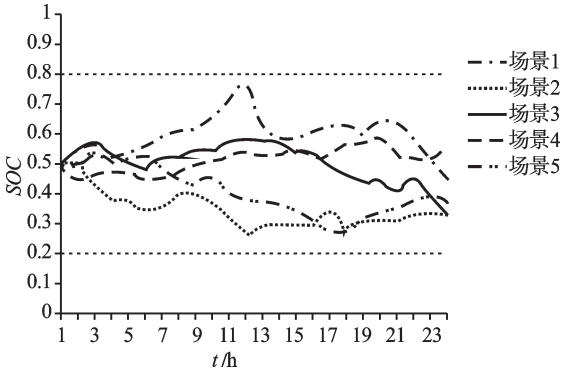

图5　5种场景下储能电池SOC变化情况

4　结束语

本研究将机会约束方法用于储能系统容量配置问题,建立了相应的机会约束模型,并利用了基于随

(下转第496页)

5 结束语

系统图在配网业务中至为重要,配网运行指挥调度、生产管理以及配网自动化、停电故障管理等都需要用到系统图。本研究使用独创的自动成图技术,应用于调度系统图的自动生成和日常增量更新功能,在杭州电力局试运行半年时间。运行结果表明,系统具有快速高效自动生成横平竖直正交化接线图的特点,且能在有限的空间内完成电源站室类和线路类设备的布局,同时,避免了线路设备间的交叉与重叠,极大提高了调度系统图的可读性和美观性。研究者利用自动成图软件可以大大减轻系统图维护工作量,降低系统运维成本。

该系统图自动成图软件同时可以广泛应用于电力、自来水、煤气和城市管线综合管理等领域,将在管线的自动生成、增量更新、信息展示等方面产生重大作用。

参考文献(References):

[1] 李志新. 10 kV配电运行管理分析[J]. 科技风,2010(20):13-15.

[2] 颜孟渊. 浅析如何构建一种应用于配网管理的信息系统[J]. 通信电源技术,2011,28(4):35-37.

[3] 石 岩. 浅谈10 kV配网自动化管理的应用[J]. 中国高新技术企业,2011(9):78-79.

[4] 董瑞杰. 浅谈供电企业配电网自动化应用技术[J]. China's Foreign Trade,2010(24):62-63.

[5] 郑瑞晨. 基于地理信息系统的配电网信息管理系统及其关键技术研究与实践[D]. 武汉:华中科技大学软件学院,2006:4-6.

[6] 张天兵,张增华. SmallWorld在电力通信资源管理系统中的应用[J]. 电力系统通信,2010,31(11):21-24.

[7] 周恒俊,郭创新. 面向智能配网的能量管理系统体系结构[J]. 高电压技术,2010,36(8):8-9.

[8] 宋仁平,吴玉新. 配网管理信息化业务模型构架探析[J]. 电力信息化,2010,8(10):91-93.

[9] 杨林蛟,张 鑫. 基于JGraph的图像处理编程平台的实现[J]. 机电工程,2011,28(8):23-25.

[10] 谢跟踪,陈 忠. 桌面地图信息系统的现状与发展[J]. 福建地理,2002,17(3):55-56.

[11] 曾忠平,李宗华,赵中元,等. 基于三维GIS的城市规划信息系统研究[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(5):21-23.

[编辑:李 辉]

(上接第471页)

机模拟的遗传算法完成寻优计算。与传统的规划方法相比,所提出的方法可以用于适当处理风力发电出力随机变化等不确定因素,在约束条件处理上更加灵活,从而将传统刚性约束柔化,得到的置信区间与储能成本关系曲线对实际容量配置更具有实用性。本研究考虑切风量和放电惩罚,设计了相应的控制策略,能够有效控制储能系统荷电状态变化范围,从而延长了使用寿命。

参考文献(References):

[1] 白建华. 新能源消纳及电力发展的关键问题[R]. 第十二届中国电机工程学会青年学术会议报告. 杭州:中国电机工程学会,2012.

[2] 马彦宏,王宁渤,刘福潮. 甘肃酒泉风电基地风电预测系统[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):88-90.

[3] 韩 涛,卢继平,乔 梁,等. 大型并网风电场储能容量的优化方案[J]. 电网技术,2010,1(1):169 -174.

[4] 吴云亮,孙元章,徐 箭,等. 基于饱和控制理论的储能装置容量配置方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(22):32-39.

[5] 王成山,于 波,肖 峻,等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.

[6] 贾宏新,张 宇,王育飞,等. 储能技术在风力发电系统中的应用[J]. 可再生能源,2009,27(6):10-15.

[7] BLUDSZUWEIT H,DOMINGUEZ-NAVARRO J A. A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty [J]. **IEEE Transactions on Power System**,2011,26(3):1651-1658.

[8] WANG X Y,VILATHGAMUWA D M,CHOI S S. Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm[J]. **IEEE Transactions on Power System**,2008,23(3):868-878.

[9] 雷亚洲,王伟胜,印勇华,等. 基于机会约束的风电穿透功率极限计算[J]. 中国电机工程学报,2002,22(5):32-35.

[10] 杨 宁,文福栓. 基于机会约束规划的输电系统的规划方案[J]. 电力系统自动化,2004,28(14):23-27.

[11] 朱建全,吴杰康. 水火电力系统短期优化调度的不确定性模型[J]. 电力系统自动化,2008,32(6):51-54.

[12] YUAN Yue,LI Qiang,WANG Wei-sheng. Optimal operation strategy of energy storage applied in wind power integration based on chance-constrained programming[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply,Nanjing:Hohai University,2009:1-6.

[编辑:李 辉]