

核事故源项反演技术及其研究现状

徐志新, 奚树人, 曲静原

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

[摘要] 在核事故情况下对源项特性的了解, 在很大程度上影响着辐射后果的评价以及应急措施的采取。介绍了目前国内外反演核事故源项所使用的各种方法及其理论背景, 其中着重介绍了国际当前流行的 Kalman 滤波方法及对这些方法的有关研究成果和应用; 论述了反演技术今后可能的发展方向。

[关键词] 源项; 反演; Kalman 滤波

[中图分类号] TL73

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)05-0016-05

Review on Source Inversion Technology in Analyzing Nuclear Accidents

XU Zhixin, XI Shuren, QU Jingyuan

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: In case of a nuclear accident, the knowledge of source characteristics is closely related to the accuracy in assessing the radiation consequences and the choice of emergency measures. In this paper, the inversion methods applied to obtain the source characteristics are introduced, especially the Kalman filter method, together with related achievements and applications. In the end, the possible direction of studies on source inversion methodology in a near future is discussed.

Key Words: source term; inversion; Kalman filter

CLC Number: TL73

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)05-0016-05

收稿日期: 2007-02-06

作者简介: 徐志新, 男, 北京海淀区清华大学核能与新能源技术研究院, 博士研究生, 主要从事核事故应急决策及数据同化工作;

E-mail: xzx02@mails.tsinghua.edu.cn

奚树人(通讯作者), 男, 北京海淀区清华大学核能与新能源技术研究院, 教授, 主要从事核安全研究工作;

E-mail: xsr-ine@mail.tsinghua.edu.cn

- S. [R]. Doe-HTGR-87-088. USA, 2003.
- [3] US DOE. A technology roadmap for Generation IV nuclear energy systems[R]. GIF-002-00, 2002.
- [4] UK DTI. Technology status report (TSR009): Supercritical steam cycles for power generation applications [R]. UK, 1999.
- [5] PAUL I A. Technology successfully deployed in developing countries, 2000 [E3/OL]. World Bank Group's Web-site. <http://www.worldbank.org/html/fpd/em/supercritical/supercritical.htm#link2>.
- [6] UK DTI. Best practice brochure (BPB010): Advanced power plant using high efficiency boiler/turbine [R]. UK, 2005.
- [7] OKAY, KOSHIZUKA S, OKANO Y, *et al*. Design concepts of light water cooled reactors operating at supercritical pressure for technological innovation[C]//Proc of the 10th Pacific Basin Nuclear Conference. Kobe, Japan, 1996.
- [8] OKAY. Review of high temperature water and steam cooled reactor concepts SCR-2000 [C]//Proc of the 1st International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactor Design and Technology. Tokyo, Japan, 2000.
- [9] DUFFEY R B, PIORO I L. Advanced high temperature concepts for pressure tube reactors, including co-generation and sustainability: HTR2006 [C]//Proc 3rd International Topical Meeting on HTR Technology, Johannesburg, South Africa, 2006.
- [10] SCHULENBERG T, WIDER H, FUTTERER M A. Electricity production in nuclear power plants - Rankine vs. brayton cycles: GLOBAL 2003[C].ANS/ENS International Winter Meeting. New Orleans, USA. 2003.
- [11] UPTON M. Anthracite PF firing goes supercritical[C]//China Power 2005. Beijing, 2005.
- [12] OKA Y, KOSHIZUKA S. Design concept of once-through cycle supercritical-pressure light water cooled reactors: SCR2000[C]//Proc SCR2000 Symposium, University of Tokyo, 2000.

(责任编辑 王士泉)

核事故应急情况下不确定性的一个重要来源就是源项的不确定性,对源项信息的了解程度直接影响到核事故辐射后果的评价以及应急措施的采取。源项,即释放物质的种类和数量,通常情况下是难以直接测量的,目前已有大量的研究工作致力于研究如何确定释放到大气中的放射性物质总量及其成分。估计事故源项的方法大致可以分为以下2类:一是根据电厂数据来确定事故源项;二是根据核设施周围的监测数据来估计事故源项。电厂数据,即电厂的运行状态(包括燃料状态、功率水平、运行时间等)以及厂内各相关仪表的显示数据。第2类中的监测数据,即在核电厂以及其他核设施周围的剂量监测站或剂量监测点在事故发生时以及事故发生后的测量数据。

对于第1类方法,目前有两种比较典型的技术:美国的RTM(Response Technical Manual,RTM)方法和法国的SESAME方法。RTM方法采用的是图表法,根据反应堆事故工况的研究分析成果,将可能的事故工况分为若干个类别,同时对各种事故类别与事故工况及其可能发生的放射性释放之间建立起相应的对应关系,并用图表的方式表示这些对应关系。在发生事故的情况下,根据电站的工况和监测数据,利用相关的图表,就能快速地对事故释放源项以及事故后果做出大致的估计。而SESAME方法采用的是法国开发的一套用于分析压水堆事故情况下释放源项的计算机程序,在获取相关输入数据的条件下,可以对事故释放源项进行系统的分析计算。SESAME可为后续的事故后果分析提供更为准确、现实的源项,因此它能减少事故后果评价的不确定性和保守性^[1]。

在欧共体开发的核事故应急决策支持系统——RODOS(Real-time Online Decision Support)中,开发了基于PC机的源项模块RODOS-STM,这个模块使用贝叶斯信念网络方法,根据电厂数据来预测可能的放射性释放源项及其发生的可能性。其预测结果虽然比较粗略,但可以对源项进行大致的判断,适用于在释放之前阶段对源项进行粗略估计的紧急需要。

1 核事故源项反演方法简介

根据核设施周围的监测数据来反推源项的方法称为源项反演(Inversion)。基本原理是将各个测量点的测量数据、坐标以及气象数据,如大气稳定度、风向、风速、温度、扩散参数(横向和纵向扩散参数)与大气扩散模型相结合,从而推导出源项。这是对第1类源项估计方法的重要补充和参考。目前核事故源项反演使用的方法可以分为以下4类:①最优插值法^[2-3](Optimum Interpolation, OI);②遗传算法^[4](Genetic Algorithm,

GA);③人工神经网络^[5](Artificial Neural Network, ANNs);④卡尔曼滤波^[6](Kalman Filter, KF)及由其发展得到的扩展卡尔曼滤波^[7](Extended Kalman Filter, EKF)和集合卡尔曼滤波^[8](Ensemble Kalman Filter, EnKF)。下面对这4类方法进行简要叙述。

1.1 最优插值法

最优插值法(OI)最早由Gandin在1963年提出,该方法以线性最小平方估计理论为基础,它的基本点是使 n 次观测值与理论计算值的绝对误差在平方和意义下最小。其优点是能够“自动”地处理精度不同的各种观测数据。Hyo-Joon Jeong^[9]使用了最小平方估计方法来估计在Yeoung-Kwang核电站进行的示踪气体实验中的点源释放率,即 SF_6 的释放率。它结合高斯烟羽模型和当时的气象数据,以及 n 个测量点 (x_i, y_i) 的 m 次测量结果。其反演过程可用下式表示

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & h_{m3} & \cdots & h_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

或者

$$Hx=Z \quad (2)$$

列向量 x, z 分别表示点源释放率和测量结果, H 代表状态转移矩阵。为了获得源项 x 的最佳估计 $\hat{x}$,通过将估计的测量误差 $\varepsilon^2(\hat{x})=|\hat{H}x-z|^2$ 进行最小化,从而获得最佳估计 $\hat{x}$ 。

1.2 遗传算法

遗传算法(GA)是组合最优化算法的一种,它是一种仿生算法,主要借用生物进化中的“适者生存”规律,利用某种编码技术作用与被称为染色体的二进制数串,从一个初始种群出发,不断重复执行选择、杂交和变异的过程,使得种群进化越来越接近某一目标,从而求得某一实际问题的最优解。

陈军明^[10]将遗传算法应用于多点源源强反演中,以美国环保局提供的每小时的气象资料和30个TSP源头的排放强度资料作为“源强实测值”,计算出50个接受器的浓度数据并以此作为“实测浓度”,并且由其中30个接受器的浓度数据反算出上述30个排放数据。结果表明,随着迭代次数的增加,反演的效果趋向良好。另外,反演的结果与选取的扩散模式有着很大的关系,模式的准确度越高,反演的效果就越好;反之,效果越差。

1.3 人工神经网络法

人工神经网络(ANNs)是对人脑若干基本特性的抽象和模拟,是由大量的、同时也是很简单的处理单元(或称神经元)广泛地互相连接而形成的复杂网络系

统,它反映了人脑功能的许多基本特性。神经网络通过对大量例子的学习,即所谓的“训练”,从而形成一个描述此过程的模型,并且将获得的知识保存在处理单元之间的联系中,即权重数据。ANNs 可以用来解决一系列的非线性回归和数据预报、非线性动态相关的问题。很多的研究表明,ANNs 方法在模拟复杂过程中是非常有效的。

Rege 和 Tock^[11]应用神经网络系统来估计有毒气体的点源释放率,其反演过程如图 1 所示。此方法的主要优点是不需要寻找适合各种数据的数学公式,并且人工神经网络方法可以从数据中排除噪声的干扰并提取出所需要的重要信息。实验结果表明,对释放率的预报估计值与真值的误差在测量值的 10%之内,最差的结果不超过 20%。另外,可以通过增大输入数据、提高输入数据精度来减少误差。

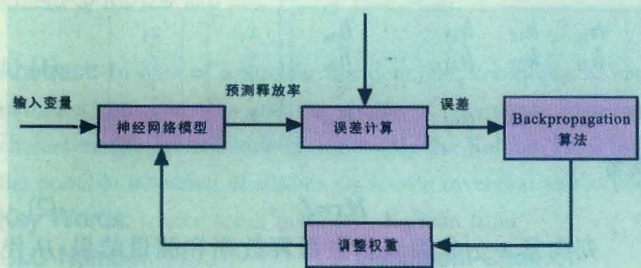


图 1 神经网络反演释放率示意图

Fig. 1 The procedure of source inversion with ANNs

1.4 卡尔曼滤波及扩展、集合卡尔曼滤波

卡尔曼滤波自 20 世纪 60 年代问世以来已经走向成熟和完善,并且又有了新的发展。根据 Maybeck^[12]的定义,KF 是一种最优递归资料处理算法,它综合利用一切可能的观测信息以及模式和观测信息的误差统计特征,对特定变量进行估计,使估计的统计误差达到最小。KF 作为一种最重要的最优估计理论,广泛地应用于各种领域^[13-14],如惯性导航、全球定位系统、目标跟踪、气象预报等。我国在应用 KF 方法反演核事故源项的研究方面基本上还是空白。

从欧共体研究开发的核事故应急决策支持系统 RODOS 开始,国外研究人员应用 KF 来进行核事故源项的反演。P.Astrup^[15],C.Rojas-Palma^[16]应用 KF 方法结合中尺度大气扩散模型 RIMPUFF (Riso Mesoscale Puff Model)来反演源项。Martin.Drew^[17]使用 EKF 方法在线实时估计核事故源项,包括释放物质总量、烟羽高度以及风向。Puehl^[18]等应用扩展卡尔曼对核事故烟羽阶段的源项进行了有效的反演,结果令人满意。

1.4.1 KF 的主要公式

KF 的主要公式如下

$$\varphi_n^f = A\varphi_{n-1}^a \quad (3)$$

$$\varphi_n^t = A\varphi_{n-1}^a + \nu_n \quad (4)$$

φ 代表模式状态向量;上标 f, a, t 分别表示“预报”、“分析”和“真实”,下标 n 表示“时刻”; ν_n 是模式误差(由于模式数学形式不完善、离散数值近似和边界值条件等引起); A 为状态转移矩阵。模式预报误差协方差矩阵 P_n^f 的传播方程为

$$P_n^f = AP_{n-1}^a A^T + Q_n \quad (5)$$

模式误差协方差矩阵

$$Q_n = E(\nu_n \nu_n^T) \quad (6)$$

E 表示求数学期望,上标 T 表示矩阵转置。引入观测数据向量 d_n ,

$$d_n = H_n \varphi_n^t + w_n \quad (7)$$

H_n 是观测转换矩阵; w_n 是观测误差。其协方差矩阵

$$R_n = E(w_n w_n^T), \quad (8)$$

引入观测数据后

$$\varphi_n^f = \varphi_n^f + K_n(d_n - H_n \varphi_n^f) \quad (9)$$

对新的模式预报误差协方差并对之最小化

$$K_n = P_n^T H_n^T (H_n P_n^T H_n^T + R_n)^{-1} \quad (10)$$

$$P_n^a = (I - K_n H_n) P_n^f \quad (11)$$

K_n 称为 Kalman 增益, I 为单位矩阵。只要给定了初值 φ_0^a 和 P_0^a ,以后不断引入观测数据,滤波过程就可以不断地进行下去。

1.4.2 卡尔曼滤波的拓展

很多大气扩散模式,如高斯模式以及 RIMPUFF 模式,都不是线性的,应用于 KF 情况将变得相当复杂,必须对其做线性化处理,以满足 KF 应用的条件,这使得 KF 在核事故源项反演的应用中有着一定的局限性。EKF 可以解决这个问题,它先对非线性模型进行线性化处理,然后滤波。对于非线性系统来说,公式(3)可以表示成

$$\varphi_{n+1} = f(\varphi_n), \quad (12)$$

误差协方差仍然是式(5),但是由于状态转移矩阵是 $f(\varphi)$ 的雅可比切线算子,因此在 EKF 中,统计误差是用一个线性化近似方程来表示的。另一方面,从背景误差协方差的演变来看,如果状态参量的维数为 n ,那么要得到背景误差协方差的演变,模式需要运行 $2n$ 次。当反演源项中 n 比较大的时候,计算开销是比较大的。集合卡尔曼滤波 (EnKF),则通过把 KF 和集合预报相结合,淡化了这个问题。EnKF 最早是由 Evensen 提出的,

因为概念简单、应用方便,不要求导来获得切线算子,计算开销也比其他同化方法少,故而在同化领域得到了广泛的应用。EnKF与KF的差别主要体现在误差统计的描述上,EnKF的集合协方差矩阵定义如下

$$P^i \approx P_e^i = (\overline{\varphi^i - \varphi^i})(\overline{\varphi^i - \varphi^i})^T \quad (13)$$

$$P^a \approx P_e^a = (\overline{\varphi^a - \varphi^a})(\overline{\varphi^a - \varphi^a})^T \quad (14)$$

式中的横线均代表集合平均值,因而EnKF中近似认为集合均值就是最优估计,并且整个集合围绕均值的发散状况就定义了集合的误差。

2 6种反演方法的特点比较

以上4类6种方法有着各自的特点和应用模型。表1是对上述6种方法的说明和比较。

表1 6种反演方法的特点比较
Table 1 Comparison between 6 inversion methods

方法	特点
最优插值	1) 应用简单,在同化领域广泛应用,是KF的简化版 2) 针对线性系统 3) 通常是单变量分析 4) 简单是优点,也是缺点,对复杂情况的处理不如人意
遗传算法	1) 可以简单地与其他扩散模式相结合,通用性强 2) 可以给出源强与浓度之间的直接的关系
人工神经网络	1) 需要大量的可靠训练数据 2) 不需要传统模型需要的一些定性数据,如扩散参数,大气稳定度等
卡尔曼滤波	1) 只能处理线性模型 2) 理论比较完美,但是难以实现,而且计算开销巨大 3) 显式发展了方差阵
扩展卡尔曼滤波	1) 是对卡尔曼的扩展,将非线性系统切线性化为线性系统 2) 切线性化后与原模式的偏离可能非常大
集合卡尔曼滤波	1) 计算花费比较大,但与扩展卡尔曼相比还是比较小的 2) 不要求发展线性和伴随模式,可以与非线性模式相结合

3 结语

利用监测数据来反演核事故源项是确定事故严重程度的重要方法和手段,是对使用电厂数据来确定源项方法的重要补充,能够有效地降低源项估计的不确定性。本文介绍的6种源项反演方法在核事故源项反演中都是初步应用,并且应用的模型大多是简单的近场大气扩散模型,即高斯烟羽模型。高斯模型结构简单,并且参数少,能够在很短的时间内得出计算结果。虽然扩展卡尔曼滤波(EKF)与更能描述实际大气运动的扩散模型RIMPUFF相结合,但也只是应用于最简单情况,即只考虑一个烟团释放情况下的计算。核事故源项反演的方法有待与更复杂、更符合实际的大气扩散模型相结

合,进行实时反演,从而使源项反演更准确。笔者认为,本文所述的源项反演的6种方法中,人工神经网络与集合卡尔曼方法虽然存在着这样那样的问题,但是仍具有很大的优势,将会有很广阔的发展应用空间。

参考文献 (References)

- [1] 冯君懿. SESAME源项分析程序在秦山二期的适用性研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
FENG Junyi. Application of SESAME to source term evaluation of Qinshan phase II NPP[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [2] 杨晓霞, 沈桐立, 徐文金, 等. 最优插值客观分析方法[J]. 南京气象学报, 1991, 14(4): 566-574.
YANG Xiaoxia, SHEN Tongli, XU Wenjin, et al. An objective analysis method of the optimum interpolation[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1991, 14(4): 566-574.
- [3] 马寨璞, 井爱芹. 动态最优插值方法及其同化研究[J]. 河北大学学报, 2001, 24(6): 574-580.
MA Zhaipu, JING Aiqin. Dynamic interpolation and its application in data assimilation[J]. Journal of Hebei University(Natural Science Edition), 2001, 24(6): 574-580.
- [4] 张文修, 梁怡, 等. 遗传算法的数学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
ZHANG Wenxiu, LIANG Yi, et al. The mathematics of genetic algorithm[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000.
- [5] ZURADA J M. Introduction to artificial neural systems[M]. New York: West Publishing Company, 1992.
- [6] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems [J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(Series D): 35-45.
- [7] 费剑锋, 韩月琪, 等. 扩展卡尔曼滤波数据同化实验-基于Lorenz(1960)系统的研究[J]. 气象科学, 2004, 24(4): 413-423.
FEI Jianfeng, HAN Yueqi, et al. Data assimilation test on the extended Kalman filter-the study based on Lorenz (1960) model [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2004, 24(4): 413-423.
- [8] EVENSEN G. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation[J]. Ocean Dynamics, 2003(53): 343-367.
- [9] JEONG H J, KIM E H, KYUNG-SUK, et al. Determination of the source rate released into the environment from a nuclear power plant [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2005, 113(3): 308-313.
- [10] 陈军明, 徐大海, 朱蓉. 遗传算法在点源扩散浓度反演排放源强中的应用[J]. 气象, 2002, 28(3): 12-16.

- CHEN Junming, XU Dahai, ZHU Rong. Application of genetic algorithms to point-source inversion[J]. Meteorological Monthly, 2002, 28(9): 12-16.
- [11] REGE M A, TOCK R W. A simple neural network for estimating emission rates of hydrogen sulfide and ammonia from single point sources [J]. J Air Waste Manage, 1996, 46: 953-962.
- [12] MAYBECK P S. Stochastic models [C]// Estimation and Control. Acamemy Press, 1982: 423.
- [13] 黄嘉佑, 谢庄. 卡尔曼滤波在天气预报中的应用 [J]. 气象, 1993, 19(4): 3-7.
- HUANG Jiayou, XIE Zhuang. Applications of Kalman filter in the weather forecast [J]. Meteorological Monthly, 1993, 19(4): 3-7.
- [14] KILPINEN J. The applications of Kalman filter in statistical interpretation of numerical weather forecasts [C]. Preprints 12th Conf Probability and Statistics Amer Meteor Soc, 1992: 11-16.
- [15] ASTRUP P, TURCANU C, *et al.* Data assimilation in the early phase: Kalman filtering Rimpuff[R]. RODOS (RA5)-TN (04)-01, 2004.
- [16] ROJAS-PALMA C, MADSEN H, GERING F, *et al.* Data assimilation in the decision support system RODOS[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2003, 104(1): 31-40.
- [17] DREW M. Data assimilation on atmospheric dispersion of radioactive materials [D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2004.
- [18] PUCH R, ASTROUP P. An extended Kalman filter methodology for the plume phase of a nuclear accident [R]. RODOS(RA5)-TN(01)-07, 2002.

(责任编辑 王芷)

·科技智力游戏·

轻松一刻——填空补白

本游戏供读者读刊闲暇之余自娱自乐,并获取一些小知识。读者可根据下面“横”行、“纵”列的文字提示,分别填上相应的文字。答案见下期。

纵:

1. 意大利文艺复兴时期乔万尼·薄伽丘的著名短篇小说集,又名《人曲》,和但丁的《神曲》齐名。

2. 一种远古动物的学名,由中国科学院古脊椎动物与古人类研究所孟津小组研究发现。它是已知世界上最早能飞行的哺乳动物,该发现使得飞行哺乳动物的历史提前了将近7000万年。

3. 一部优秀的语录体散文集,比较忠实地记述了孔子的言行,也比较集中地反映了孔子的思想。

4. 4字成语,出自清·吴敬梓《儒林外史》,形容说话、写文章浮夸、不切实际。

5. 中国古代最大的一部官修书,清朝乾隆年间完成,分经史子集4个书库。

6. 意大利文艺复兴时期艺术家米开朗基罗·博那罗蒂的人物雕像作品,创作于1501-1504年,现收藏于佛罗伦萨美术学院。

7. 地名,位于河北省东北部,建于该地的避暑山庄及其周围寺庙被联合国教科文组织批准为世界文化遗产。

8. 明代著名回族政治家,居官清廉,刚直不阿,深得民众的尊敬与爱戴;他与宋朝的包拯一样,是中国历史上清官的典范、正义的象征。

9. 明代抗倭名将、军事家,字元敏,号南塘、

孟渚,被视为民族英雄。

横:

一、人名,出自《山海经》。他为了解救苍生,追逐太阳9天9夜,最后累渴而死,死后身体变成大山,扔下的手杖变成五彩云霞般的桃林。

二、我国神话故事人物,传说中开天辟地的祖先。

三、4字成语,出自《山海经·北山经》;旧时比喻仇恨极深,立志报复;后比喻做事意志坚决,力量虽弱,长期坚持却能移山填海。

四、澳大利亚南部及塔斯马尼亚岛的特有动物,嘴和脚象鸭子,尾部象海狸,为现存最原始的哺乳动物,是形成高等哺乳动物的进化环节,在动物进化上有很大的科学研究价值。

五、指望、闻、问、切四种诊察疾病的基本方法,古称“诊法”。《黄帝内经》奠定了该方法的基础,《皇帝八十一难经》则明确指出了它的基本概念。

六、水库名,位于北京昌平县境内,因毛泽东等老一辈革命家参加建库劳动而闻名。

七、北京老字号企业店名,创建于1864年(清朝同治三年),该企业品牌的烤鸭驰名中外。

八、4字成语,出自唐·吕岩《微宗斋会》,一般意思为见地高超、范围广泛地谈论;作贬义可解释为大发议论,漫无边际地谈论。

九、4字典故成语,出自《西京杂记》卷二。原指西汉匡衡凿穿墙壁引邻舍烛光读书,后用来形容家贫而读书刻苦。

		2		4一		6		
	二				三			8
四								
					5五			
	1六					7		
					七			
八			3					9
						九		

上期答案

			轻		静		苏	丹	红
			歌		以				与
	路	曼	曼	其	修	远	兮		黑
	见		舞		身				
	不				俭		明		绝
长	平	之	战		以		镜	花	缘
恨					养		高		体
歌			火		德		愚		
			神	曲					墨
	祝	英	台				蝶	恋	花

(供稿 李建才 责任编辑 赵佳)