

CNIC-01255

CIRP-0020

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

秦山三期核电工程气象相关分析
与风洞模拟研究

EXPERIMENTAL STUDY OF METEOROLOGICAL
CORRELATION AND WIND TUNNEL SIMULATION
FOR QINSHAN NUCLEAR POWER PLANT (PHASE III)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01255 CIRP-0020: 秦山三期
核电工程气象相关分析与风洞模拟研究/胡二邦等著. —北
京: 原子能出版社, 1998. 6

ISBN 7-5022-1827-0

I. 中… II. 胡… III. 核技术-中国-研究报告 IV. TL-

2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 07568 号

秦山三期核电工程气象相关分析与风洞模拟研究

胡二邦等著

©原子能出版社, 1998

原子能出版社出版发行

责任编辑: 李曼莉

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1·印张 1·字数 28.5 千字

1998 年 6 月北京第一版·1998 年 6 月北京第一次印刷

定价: 5.00 元

胡二邦：研究员，中国辐射防护研究院环境科学所所长。中国环境评价学会常务副主任，中国大气环境学会副主任，中国环境评价学会环境风险专业委员会主任，国家环保局核环境专家技术委员会成员。享受政府特殊津贴，被授予部级“有突出贡献的中青年专家”称号。作为主持人完成的科研项目中，获国家级科技进步三等奖一项，部级二等奖三项，部级三等奖三项，在国内外杂志及学术会议上发表论文 60 余篇，1964 年毕业于清华大学工程物理系。



Hu Erbang: Professor, director of Environmental Science Institute, China Institute for Radiation Protection; executive deputy president of Chinese Association for Environment Assessment (CAEA); deputy president of Chinese Association for Atmospheric Environment (CAAE); director of Speciality Committee of Environment Risk, CAEA; Member of Specialist Committee for Nuclear Environment, NEPA. Enjoy special government allowance and being granted the Ministry-level Outstanding Young and Middle-aged Specialist, CNNC. Win some prizes for progress of science and technology of third class at national-level, second and third class at ministry-level respectively in these research projects which he took charge of. More than 60 papers were published in international or domestic journals and symposiums. Graduated from Department of Engineering Physics, Tsinghua University in 1964.

CNIC-01255

CIRP-0020

秦山三期核电工程气象相关分析 与风洞模拟研究

胡二邦 张茂栓 姚仁太 高占荣 温联中 闫江雨

(中国辐射防护研究院, 太原, 030006)

摘 要

为了提供秦山三期核电工程可行性阶段与设计阶段环境影响评价报告大气弥散基础数据,于1995年9、10月间及1997年2月在秦山一、二、三期厂址分别进行了为期20天和10天的低空风、温与地面风场的同步观测,并从实验和理论上探讨了如何应用相关实验结果和已建厂址的整年逐时气象数据估算待建厂址年均大气扩散因子的方法与模式。与此同时,应用PIV技术进行风洞相关模拟实验来弥补现场相关实验实测次数不足的缺陷。

**Experimental Study of Meteorological
Correlation and Wind Tunnel Simulation
for Qinshan Nuclear Power Plant (Phase III)**
(In Chinese)

HU Erbang ZHANG Maoshuan YAO Rentai
GAO Zhanrong WEN Lianzhong YAN Jiangyu
(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006)

ABSTRACT

The synchronous low altitude wind, temperature and surface wind field observation experiments were carried out at 3 sites (Phase I . II . III) for 20 days and 10 days respectively during Sep. and Oct. 1995 and in Feb. 1997 in order to provide basic data to EIR for feasibility study and design stages of Qinshan NPP (Phase III). An experimental and theoretical study on estimation of annual atmosphere diffusion factor is described for new site by using etical one full year of hourly meterological observation date for operated NPP based on meterological correlation experiment. The possibility of wind tunnel correlation simulation test by using PIV technology instend of synchronous field observation experiment was also studied.

引 言

秦山三期核电工程拟在秦山地区建造两座加拿大 CANDU6 (2×0.7 GW) 重水堆核电机组, 以缓解华东地区严重缺电局面。秦山三期厂址所在的螳螂山位于目前已在运行的秦山一期工程 (300 MW) 核岛厂房东南方向 900 m 处 (直线距离), 距即将动工的二期工程 (2×0.6 GW) 所在的杨柳山厂址约 3 km。

按照国家有关导则, 在核电厂选址阶段, 通常应建一百米高的气象塔, 进行至少一整年的逐时污染气象观测 (风、温及它们的廓线、稳定度及降水), 但秦山厂址在一期与二期选址期间已分别在各自厂址建立了一百米气象塔并各自进行了为期一年的逐时气象资料观测 (一期于 1985 年, 二期于 1991 年 10 月至 1992 年 10 月)^[1,2], 是否相邻的三期仍需建一个一百米铁塔。此外三期核电工程自立项至提交可行性阶段报告只有半年时间, 也不允许按常规办理。根据上述情况, 决定探索应用已建厂址气象铁塔 (例一期、二期铁塔) 的整年逐时气象资料来估算待建厂址 (三期) 正常运行工况下的年均大气扩散因子的方法。为此, 我们于 1995 年 9、10 月间在秦山三期、二期、一期三个厂址进行了为期 20 天的小球测风、低探与地面风场的同步观测, 并探索了一套估算年均扩散因子的相关估算模式, 满足了 1996 年上海核工业设计研究院编写三期工程可行性研究阶段环境影响评价报告之用。但由于 9、10 月份秦山地区主要是刮偏东风, 为了了解其他风向的相关特性, 我们于 1997 年 2 月 14 日至 2 月 24 日又补作了一次类似的野外相关同步观测。现场相关实验次数往往太少, 为了探索能否采用风洞模拟来弥补这一缺陷, 我们还进行了气象相关的风洞模拟实验。与上述两次相关观测同时作了平衡球试验测量厂址扩散参数, 作了风洞模拟试验探讨反应堆建筑群对流场及扩散参数的影响, 以及应用 PIV 技术测量局地流场和湍流特征。满足了上海核工院编制三期工程设计阶段环评报告的需要。

1 相关实验概况及其主要结果

1.1 观测点地形地貌特征

秦山核电厂位于浙江省海盐县东南, 其西部为方家山, 最高海拔为 82.9m, 南部则为秦山主体, 最高点标高为 171.9 m, 北面为杭州湾海滩。一期测点设在一期铁塔处, 离秦山核电厂直线距离仅几百米, 三期测点位于秦山东部边沿, 与秦山一期相距约 1 km, 二期测点位于秦山南, 与秦山中心相距约 2.5 km, 图 1 给出厂址地理位置及一、二、三各测点的位置示意图。

1.2 低空风、温相关实验及其主要结果

1.2.1 低空风、温相关实验概况

我们在秦山三期厂址和一期、二期厂址铁塔三处各设一个小球测风点进行双经纬仪小球 (20#) 低空风与低探同步观测实验 (见图 1)。首次观测自 1995 年 9 月 24 日至 10 月 15 日, 每日观测 8 次 (北京时间 1、4、7、10、13、16、19、22 时)。10 月 9 日至 15 日加密观测, 加密时间为北京时间 6、8、14、20 时。第二次补充观测自 1997 年 2 月 14 日至 2 月 24 日, 每天也是 8 次。首次观测期间, 一期、二期、三期厂址分别获取有效资料 164 份、160 份和 159 份。由于断电、重放、信号干扰、球皮炸裂等原因, 一、三期同步的资料共计 155 份, 二、三期同步资料获 145 份。补充观测期间, 一、二、三期分别各获资料 82、82、81 份,

由于天气条件变化等原因, 实际获取的一、三期与二、三期同步资料各为 79 份。

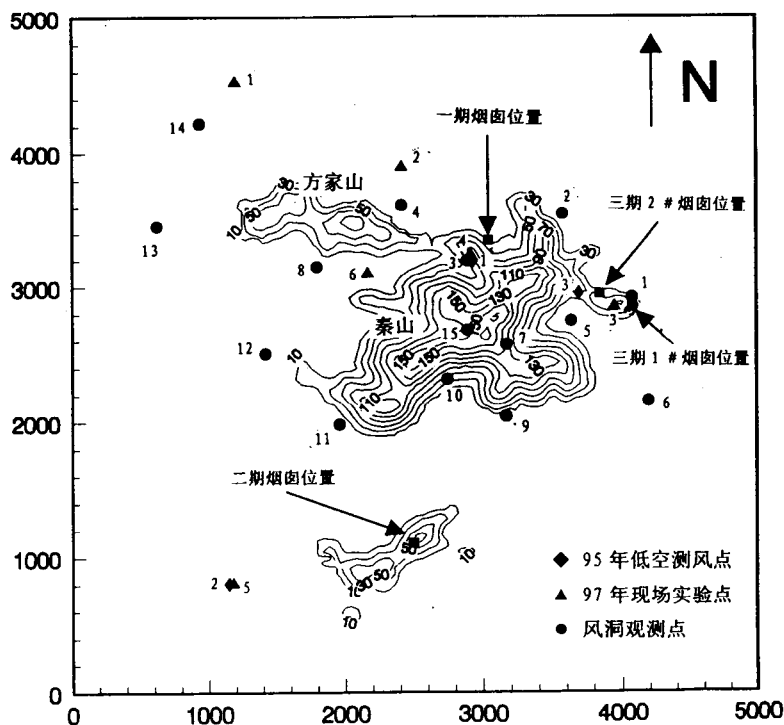


图 1 厂址地理位置、秦山核电一、二、三期烟囱位置
及现场观测站和风洞实验测点的分布/m

1.2.2 近地面层风向相关实验结果及初步分析

三期与一期(或二期)不同高度风向出现次数的相关矩阵, 若以二维数组 $d_{3,1}(i, j)$ 或 $d_{3,2}(i, j)$ 表示 ($i=1, 2, \dots, 16$, 代表三期厂址测点的 16 个风向, $j=1, 2, \dots, 16$, 代表一期或二期厂址测点的 16 个风向), 则三期与一期(或二期)厂址风向出现频率矩阵元 $F_{d,3,1}(i, j)$ (或 $F_{d,3,2}(i, j)$) 可由下式定义:

$$F_{d,3,1}(i, j) = \frac{d_{3,1}(i, j)}{\sum_{j=1}^{16} d_{3,1}(i, j)} \quad (1)$$

$$F_{d,3,2}(i, j) = \frac{d_{3,2}(i, j)}{\sum_{j=1}^{16} d_{3,2}(i, j)} \quad (2)$$

作为示例, 表 1 与表 2 分别给出两次实验获得的 75 m 高处(代表排放高度)三期与二期的 $d_{3,2}(i, j)$ 的实测值。

若以 $P'_{d,3,1}$ ($P'_{d,3,2}$)、 $P''_{d,3,1}$ ($P''_{d,3,2}$)、 $P_{d,3,1}$ ($P_{d,3,2}$) 分别表示三期与一期(或二期)某一高度处相同风向、相近风向(即风向相差 22.5°)和相关风向(风向相差不超过 22.5° , 即包括相同风向与相近风向)的频率, 则有

表 1 秦山三期厂址与二期铁塔处高度为 75 m 时风向
出现次数相关矩阵 $d_{3,2}(i, j)$ 实测值 (1995 年 9 月 24 日至 10 月 15 日)

次 数 二期 三期	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
N	7	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
NNE	0	5	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
NE	0	3	7	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ENE	0	0	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	1	25	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESE	0	0	0	0	6	9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
SE	0	0	0	0	0	10	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SSE	0	1	0	0	0	0	9	6	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0
SSW	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
SW	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
WSW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
WNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
NW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
NNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

表 2 秦山三期厂址与二期铁塔处高度为 75 m 时风向
出现次数相关矩阵 $d_{3,2}(i, j)$ 实测值 (1997 年 2 月 14 日至 24 日)

次 数 二期 三期	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
N	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NNE	1	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NE	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENE	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	1	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ESE	0	0	0	0	2	6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
SE	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SSE	0	0	0	0	0	1	2	3	2	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	1	1	0	3	0	0	0	0	0	0
SSW	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3	0	0	0	0	0
SW	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0
WSW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0
W	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
WNW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1
NNW	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7

$$P'_{d,3,1}(j) = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} F_{d,3,1}(i, j) \quad j = i \quad (3)$$

$$P''_{d,3,1} = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} F_{d,3,1}(i, j) \\ j = i + 1 (\text{但 } i = 16 \text{ 时}, j = 1); j = i - 1 (\text{但 } i = 1 \text{ 时}, j = 16) \quad (4)$$

$$P_{d,3,1}(j) = P'_{d,3,1}(j) + P''_{d,3,1}(j) \quad (5)$$

$P'_{d,3,2}(j)$ 、 $P''_{d,3,2}(j)$ 和 $P_{d,3,2}(j)$ 的表达式与式 (3)、(4)、(5) 类同。表 3 与表 4 分别给出二次实验获得的秦山三期与一期厂址、三期与二期厂址不同高度风向相关频率分布的实测结果。由表 3 与表 4 可见, 三期与二期厂址的风向相关略好于三期与一期厂址的风向相关。

表 3 三期与一期厂址和三期与二期厂址不同高度风向相关频率分布 (%)
(1995 年 9 月 24 日至 10 月 15 日)

高度/m	25	50	75	100	150	200	300	400
$P'_{d,3,1}$	29.0	39.4	51.9	59.7	61.2	68.9	60.4	67.6
$P''_{d,3,1}$	41.3	43.9	39.0	33.8	31.6	27.0	32.6	25.9
$P_{d,3,1}$	70.3	83.3	90.9	93.5	92.8	95.9	93.1	93.5
$P'_{d,3,2}$	32.4	46.9	52.4	55.2	64.8	64.1	63.5	69.3
$P''_{d,3,2}$	49.7	44.8	39.3	37.2	29.0	30.3	31.4	33.3
$P_{d,3,2}$	82.1	91.7	91.7	92.4	93.8	94.4	94.4	92.6

表 4 三期与一期厂址和三期与二期厂址不同高度风向相关频率分布 (%)
(1997 年 2 月 14 日至 24 日)

高度/m	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400
$P'_{d,3,1}$	49.7	53.8	58.2	46.8	49.4	59.5	48.1	43.0	48.7	45.6	48.1	44.9	50.0	63.2
$P''_{d,3,1}$	32.5	33.3	30.4	43.0	40.5	31.6	41.8	44.3	42.3	48.1	42.9	50.0	40.8	28.9
$P_{d,3,1}$	82.2	87.2	88.6	89.9	89.9	91.1	89.9	87.3	91.0	93.7	90.9	94.9	90.8	92.1
$P'_{d,3,2}$	44.3	38.0	39.2	49.4	50.6	58.2	58.2	59.5	62.0	57.0	57.0	51.9	62.3	56.4
$P''_{d,3,2}$	38.0	50.6	51.9	43.0	43.0	34.2	35.4	32.9	34.2	36.7	35.4	41.8	36.4	38.5
$P_{d,3,2}$	82.3	88.6	91.1	92.4	93.7	92.4	93.7	92.4	96.2	93.7	92.4	93.7	98.7	94.9

1.2.3 近地面层风速相关实验结果与分析

若把风速分成下列 6 个组别: $<0.5 \text{ m/s}$ 、 $0.5 \sim 1.9 \text{ m/s}$ 、 $2.0 \sim 2.9 \text{ m/s}$ 、 $3.0 \sim 4.9 \text{ m/s}$ 、 $5.0 \sim 5.9 \text{ m/s}$ 和 $\geq 6.0 \text{ m/s}$, 并以二维数组 $S_{3,1}(m, n)$ [或 $S_{3,2}(m, n)$] 表示 ($m=1, 2, \dots, 6$, 代表三期厂址测点的 6 个风速组组别, $n=1, 2, \dots, 6$, 代表一期或二期厂址测点的 6 个风速组组别), 则三期与一期 (或二期) 风速组别出现频率矩阵元 $F_{i,3,1}(m, n)$ [或 $F_{i,3,2}(m, n)$] 可由下式定义:

$$F_{i,3,1}(m, n) = \frac{S_{3,1}(m, n)}{\sum_{n=1}^6 S_{3,1}(m, n)} \quad (6)$$

$$F_{s,3,2}(m,n) = \frac{S_{3,2}(m,n)}{\sum_{n=1}^6 S_{3,2}(m,n)} \quad (7)$$

作为示例,表5与表6分别给出两次实验获得的75 m高处三期与二期的 $S_{3,2}(m,n)$ 的实测值。与风向相关一样,也可定义相同风速组别、相近组别(即风速相差一个组别)和相关风速组别(风速不超过一个组别,即包括相同风速组别和相近风速组别)。若以 $P'_{s,3,1}$ ($P'_{s,3,2}$)、 $P''_{s,3,1}$ ($P''_{s,3,2}$)、 $P_{s,3,1}$ ($P_{s,3,2}$)分别表示三期与一期(或二期)厂址相同、相近和相关风速组别出现频率,表7与表8分别给出两次实验获得的 $P'_{s,3,1}$ ($P'_{s,3,2}$)、 $P''_{s,3,1}$ ($P''_{s,3,2}$)、 $P_{s,3,1}$ ($P_{s,3,2}$)的实测值。由表7可见,100 m以下,三期与二期厂址的风速相关好于三期与一期厂址的风速相关。而表8表明,对于所有高度,三期与二期的风速相关均好于三期与一期的风速相关。

表5 秦山三期厂址与二期铁塔高度为75 m处测得的风速组别出现次数

相关矩阵 $S_{3,2}(m,n)$ 实测值(1995年9月24日至10月15日)

(m/s)

二期风速组		<0.5	0.5~1.9	2.0~2.9	3.0~4.9	5.0~5.9	≥6.0
三期 风 速 组	<0.5	0	0	1	0	0	0
	0.5~1.9	0	0	2	0	1	0
	2.0~2.9	0	4	3	2	1	0
	3.0~4.9	0	2	6	30	9	10
	5.0~5.9	0	0	1	7	4	10
	≥6.0	0	0	0	3	6	43

表6 秦山三期厂址与二期铁塔高度为75 m处测得的风速组别出现次数

相关矩阵 $S_{3,2}(m,n)$ 实测值(1997年2月14日至24日)

(m·s⁻¹)

二期风速组		<0.5	0.5~1.9	2.0~2.9	3.0~4.9	5.0~5.9	≥6.0
三期 风 速 组	<0.5	0	0	0	0	0	0
	0.5~1.9	0	7	3	4	1	0
	2.0~2.9	0	2	4	1	0	1
	3.0~4.9	0	1	5	8	1	5
	5.0~5.9	0	0	1	7	2	4
	≥6.0	0	0	1	7	2	12

表7 秦山三期与一期厂址、三期与二期厂址不同高度风速组别相关频率分布

(1995年9月24日至10月15日)

/%

高度/m	25	50	75	100	150	200	300	400
$P'_{s,3,1}$	31.0	40.6	51.3	61.0	61.8	64.2	68.8	69.8
$P''_{s,3,1}$	33.5	33.5	32.5	28.6	32.2	28.4	26.4	22.3
$P_{s,3,1}$	64.5	74.1	83.8	89.6	94.0	92.6	95.1	92.1
$P'_{s,3,2}$	53.1	53.1	55.2	64.1	64.8	64.3	67.2	62.2
$P''_{s,3,2}$	29.0	34.5	31.7	28.3	28.3	23.2	28.5	31.1
$P_{s,3,2}$	82.1	87.6	86.9	92.4	93.1	91.5	95.7	93.3

表 8 秦山三期与一期厂址、三期与二期厂址不同高度风速组别相关频率分布
(1997 年 2 月 14 日至 24 日)

/%

高度/m	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400
$P'_{s,3,1}$	24.1	35.4	39.2	39.2	45.6	40.5	34.2	40.5	32.9	33.3	30.3	26.7	37.0	43.8
$P''_{s,3,1}$	32.9	22.8	32.9	35.4	32.9	36.7	31.6	29.1	39.2	34.6	36.8	34.7	28.8	26.0
$P_{s,3,1}$	57.0	58.2	72.2	74.7	78.5	77.2	65.8	69.6	72.2	67.9	67.1	61.3	65.8	69.9
$P'_{s,3,2}$	27.8	41.8	41.8	44.3	54.4	60.8	59.5	53.2	45.6	41.8	43.0	55.7	46.2	48.7
$P''_{s,3,2}$	45.6	34.2	31.6	39.2	30.4	32.9	26.6	29.1	36.7	41.8	45.6	30.4	37.2	34.6
$P_{s,3,2}$	73.4	75.9	73.4	83.5	84.8	93.7	86.1	82.3	82.3	23.5	88.6	86.1	83.3	83.3

2 扩散参数与混合层的实验测定

2.1 平衡球试验测定大气扩散参数

1995 年 9 月 20 日至 10 月 15 日在秦山三期螳螂山厂址采用双经纬仪方法进行平衡球飞行试验。双经纬仪基线长度为 387 m, 其走向与正北夹角约为 60°。试验期间释放 153 只 20 号测风球, 飞行距离最远达 7.1 km。图 2 给出中性条件下平衡球平面轨迹。表 9 则给出平衡实验获得的该地区大气扩散参数测量值。

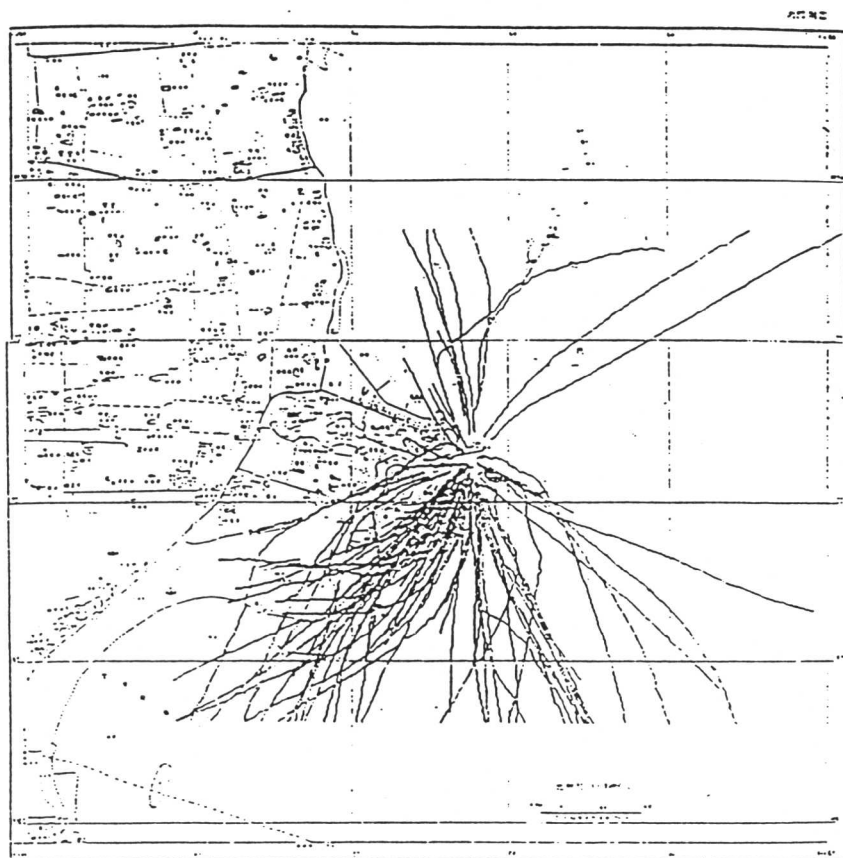


图 2 中性条件下平衡气球平面轨迹图 (1995 年 9 至 10 月)

表 9 平衡球试验获得的螳螂山地区大气扩散参数

$$\sigma_y = P_y x^{0.8}, \sigma_z = P_z x^{0.8}$$

稳定度	P_y	q_y	P_z	q_z
不稳定 (A、B、C)	0.475	0.848	0.376	0.809
中性 (D)	0.318	0.828	0.240	0.770
稳定 (E、F)	0.201	0.813	0.216	0.731

2.2 风洞模拟试验对扩散参数的修正

拟建三期工程包括 1 号、2 号两个反应堆组合体, 每组反应堆的安全壳高 46 m, 辅助建筑长 125 m, 宽 121 m, 两组反应堆组合体的间距为 36 m。风洞模拟试验的目的就是研究此建筑群对厂址流场和扩散特性的影响。

试验工作在中国辐射防护的环境风洞中完成。该风洞为开吹式, 风洞全长 24.5 m。试验段长 10 m, 宽 1.5 m, 高 1.1~1.4 m。

在试验段入口处有一个速度车, 通过调节速度车, 并辅以适当的地面粗糙元, 可在试验段产生所需的速度廓线和湍流分布。流场和浓度探测采用热线风速仪、标记物、乙烯示踪及烟流照像和摄像等四种方法。试验期间对两个反应堆组合体 (即 1 号与 2 号)、2 个典型高度 (75 m、90 m) 进行了 24 次乙烯示踪实验。共获得 240 个空中浓度分布剖面 and 24 条地面轴线浓度分布。对八个实验风向加权平均获得了中性天气下厂址近距离 (<1km) 的扩散参数。表 10 给出风洞实验结果修正后的厂址中性天气扩散参数值。

表 10 风洞实验修正后的厂址中性天气扩散参数实测值

距 离	P_y	q_y	P_z	q_z
≤1km	1.499	0.628	1.924	0.480
>1km	0.318	0.828	0.240	0.770

2.3 混合层的实验测量

在进行小球测风的同时, 进行了低探观测, 获得了厂址不同稳定度下的混合层高度数据:

对 A、B 类: $L=1273$ m, C 类: $L=1194$ m, D 类: $L=785$ m, E、F 类: $L=258$ m。

3 厂址地区局地风场的观测与模拟

3.1 概述

为了系统地了解厂址周围 5~6 km 范围内的流动特征和流场结构, 先后于 1995 年 9 月 24 日至 10 月 15 日和 1997 年 2 月 14 日至 25 日进行地面风观测。第一次观测, 在现场有 5 个测站的数据可利用, 第二次观测, 有 6 个测站的数据可利用。在这里我们采用客观诊断模式为基础建立三维风场。为了充分反映秦山山体对流场的影响, 模拟区网格的分辨率应尽可能高。结合实际计算中计算量的大小, 确定模拟区为以秦山山体为核心的 5 km×5 km 的范围, 水平网格距为 $\Delta x=\Delta y=125$ m, 垂直空间厚度为 2010 m。由于比较关注近地面层 (尤其是 100 m 以下高度层) 的风资料, 在具体计算过程中, 垂直方向网格采用疏密相结合的方法。采用密网格时, 垂直空间范围为 10~330 m, 网格距为 $\Delta z=20$ m; 采用疏网格时,

垂直空间范围为 10~2010 m, 网格距为 $\Delta z=125$ m。在计算中, 当采用某一垂直分层方法, 在模拟区内 xyz 方向的总网格数保持为 $40 \times 40 \times 16$ 。图 1 给出了模拟区地形分布及风洞实验测点和现场观测站的分布。图 3 则给出计算区域的三维地形。

3.2 模式性能的初步分析

在对插值风场进行调整过程中, 由于输出风场满足运动连续性条件的约束, 因而所得风场能较好地表现出起伏地形的动力扰动作用。气流在遇到山体障碍物时表现出水平绕流的趋势, 跨越山脊的气流风速增大, 而在回流区风速减小, 表现出位势流跨越障碍物时的流动特性。

初始风场是由地面风观测(一般为 10 m 高)或边界层观测资料插值获得的。然而在应用风场模式计算时, 需要解决的问题是如何利用最少的资料来获得尽可能接近实际的风场。为了说明这一问题, 我们分别利用现场实验数据和风洞实验数据进行了计算。

1995 年 9 月 24 日至 10 月 15 日的现场观测, 有 5 个测站资料, 表 11 给出了用 1、2、4、5 号测站资料和用全部 5 个测站资料计算风场的比较。结果表明, 由于测站数量较少, 不能充分反映地形的影响, 所以两个风场之间的差别较大, 尤其是在接近地面高度层。风速相差最大可达 1.8063 m/s, 风向相差最大可达 6 个方位。差别最大的多出现在山体回流区, 在 3 号测站周围两个风场之间的差别较大。可见, 由 4 个测点构造风场的精度较差。

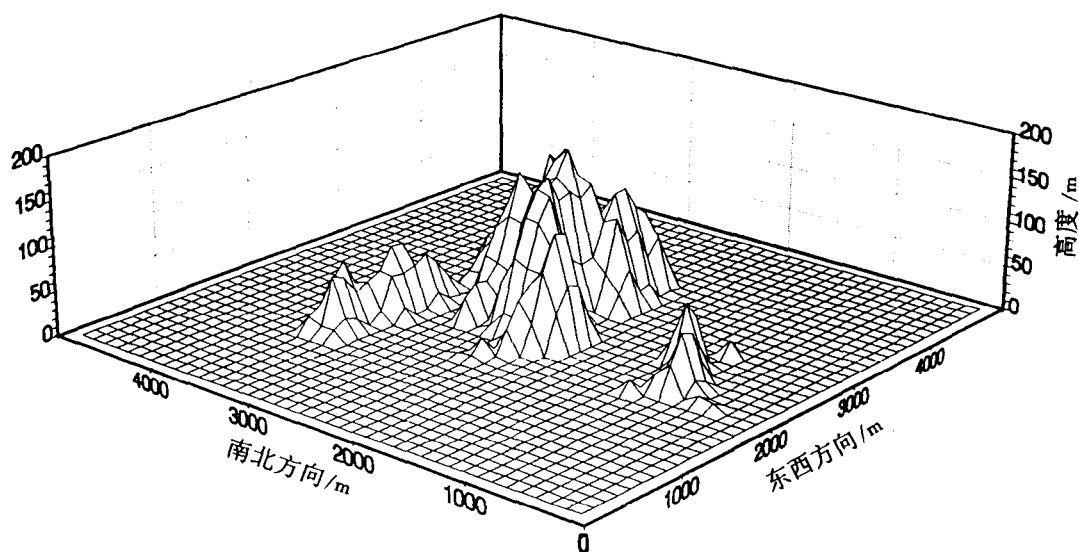


图 3 模式计算区域的三维地形

通过开展风洞模拟实验, 模拟厂址地区的流动, 用热线风速仪测量不同位置不同高度处的风速和风向, 从而可以弥补现场实验测点少的缺点。表 12 给出了用 2、3、5、8、9、11、14 号测点数据(其中有 4 个现场测点)和用全部测点(15 个)数据分别进行了风场计算, 然后将两个风场每个对应网格点的风速和风向进行比较的结果。

表 11 现场 4 个点数据和 5 个点数据计算风场的比较

	风速差分组 (m/s)	出现频率/%				
		H=10 m	H=30 m	H=50 m	H=70 m	H=90 m
风 速	0~0.3	60.09	71.66	96.68	100	93.49
	0.3~0.7	24.79	26.76	3.02	0	6.51
	0.7~1.0	6.51	1.38	0	0	0
	1.0~1.3	5.59	0.20	0	0	0
	1.3~1.7	2.83	0	0	0	0
	1.7~2.0	0.20	0	0	0	0
	2.0 以上	0	0	0	0	0
最大绝对误差/(m/s)		1.8063	1.1369	0.4854	0.2562	0.3916
最大相对误差/%		65.69	39.81	16.91	-9.10	-12.82
	风向差分级	出现频率/%				
		H=10 m	H=30 m	H=50 m	H=70 m	H=90 m
风 向	同一方位	53.12	60.42	86.26	85.14	84.42
	相差 1 个方位	45.46	39.12	13.74	14.86	15.58
	相差 2 个方位	0.79	0.46	0	0	0
	相差 3 个方位	0.26	0	0	0	0
	相差 4 个方位	0.13	0	0	0	0
	相差 5 个方位	0.07	0	0	0	0
	相差 6 个方位	0.07	0	0	0	0
最大绝对误差(方位)		6	2	1	1	1
最大相对误差/%		130.82	24.94	24.39	9.95	10.91

表 12 用有代表性点数据计算结果与全部数据计算结果的比较

高度/m	风速差在不同区间内出现频率/%			风速最大 绝对误差 m/s	风速最大 相对误差 %	风 向				
	0~0.3 m/s	0.3~0.7 m/s	0.7~1.0 m/s			同一 方位	差一个 方位	差两个 方位	差最大 方位	最大相对 误差/%
10	99.54	0.46	0	0.5260	18.77	97.44	2.56	0	1	14.01
30	99.74	0.26	0	0.3777	9.90	98.22	1.78	0	1	7.05
50	96.45	3.55	0	0.5020	11.89	99.67	0.33	0	1	5.73
70	97.76	2.24	0	0.5360	11.76	99.93	0.07	0	1	6.11
90	99.21	0.79	0	0.4344	8.67	100	0	0	0	3.64

由表可以看到,在比较关心的 100 m 高度以下,两者风速差在 0~0.3 m/s 占 90%以上,绝对误差小于 0.55 m/s,风向在同一方位占 97%以上。由此可见,这两个风场非常接近,两者反映的总体流动形式完全一致。

为了进一步验证模式的合理性和有效性,对特定位置的风向和风速进行了计算,并将计算结果与观测结果进行了比较。用现场 1、2、3、4、5 号测站数据(其中 3 号测站仅用了地面风观测自动站数据)构造出整个风场,估算 3 号测站不同高度处的风速和风向,然后将计算结果与 3 号测站探空观测结果进行比较。从误差的分布情况看(见表 13),风速相差在 0.7 m/s 以内的占 92.05%,相对误差在±20%以内占 88.64%;风向相差在 1 个方位以内的占 98.87%,其中风向在同一方位的占 76.14%,风向方位角相差在±20°以内的占 96.59%,相差在±10°以内的占 85.23%。

从上面计算和分析的结果来看,利用现场 5 个测风站(其中一、二期铁塔处采用探空

观测数据)估算三期厂址风资料的结果达到了一定的精度。若在此基础上再加2个测风站,就能达到非常好的精度。

表 13 计算风速和风向误差分布情况

风 速				风 向			
绝对误差分级 m/s	出现频率 %	相对误差分级 m/s	出现频率 %	风向方位差	出现频率 %	风向方位角差分级 (°)	出现频率 %
±0~0.3	40.91	±0~10	50.00	同 1 方位	76.14	±0~10	85.23
±0.3~0.7	51.14	±10~20	38.64	差 1 方位	22.73	±10~20	11.36
±0.7~1.0	7.95	±20~30	11.36	差 2 方位	1.14	±20~30	3.41
±1.0~1.3	0	±30~40	0	差 3 方位	0	±30~40	0

3.3 厂址地区边界层风场

用模式分别计算实验期间几个代表性时刻、厂址地区受山体影响的地面风场(高度为10 m),这些结果基本上反映了风速风向的时空变化。

厂址地区具有明显的季风气候特点,1995年9月至10月进行野外观测试验期间,当地是秋季,以偏东风为主导气流。根据现场观测实验及逐日风场的分析,实验期间该地区边界层风场总体上符合大气环境背景,以系统性气流为主,即以偏东风为主,偏东风出现频率为48.94%,1997年2月的野外观测试验,当地是冬季,盛行偏北风,但从现场为期10天试验结果和风场分析结果来看,偏北风频率为19.52%,偏东风频率为28.05%,仍然是最高。

在近表面受山体的影响较为显著,表现出的山前减速、过山加速以及山后减速的流型特点,甚至在某些风向山后有回流现象。另一方面,由于山体的存在,有明显的绕流存在,特别是在秦山与方家山之间更为明显。

4 气象相关风洞模拟实验

4.1 概述

为了弥补现场相关观测实验次数的不足,尝试利用风洞模拟装置进行秦山三期工程厂址位置不同高度的风向、风速与一、二期铁塔点的风向、风速的相关性模拟实验,对来流为年平均风速、16个风向下三个点10 m、30 m、50 m、70 m和100 m五个高度的水平流场和垂直流场进行探测,对每个截面的流场平均进行20次的连续测量,对于受地形影响较大的风向,增加测量次数,最多的达28次。

4.2 PIV 技术

PIV技术是近年来发展的一种先进的流体测量技术,广泛应用于复杂情况下的气体、液体以及两相流(如粒子的沉积和再悬浮等运动)的流动测量,它能对流体中某一截面的瞬时流动进行测量,给出整场的速度矢量图。图4给出了本项实验中所用的DANTEC FlowMap PIV系统的基本组成和系统测量框图。该套系统是通过以下四个步骤来实现对流场中介质速度的测量:

(1) 利用SPT发烟器在实验流体介质中撒播适量的强光散射粒子,且粒子具有良好的跟随性;

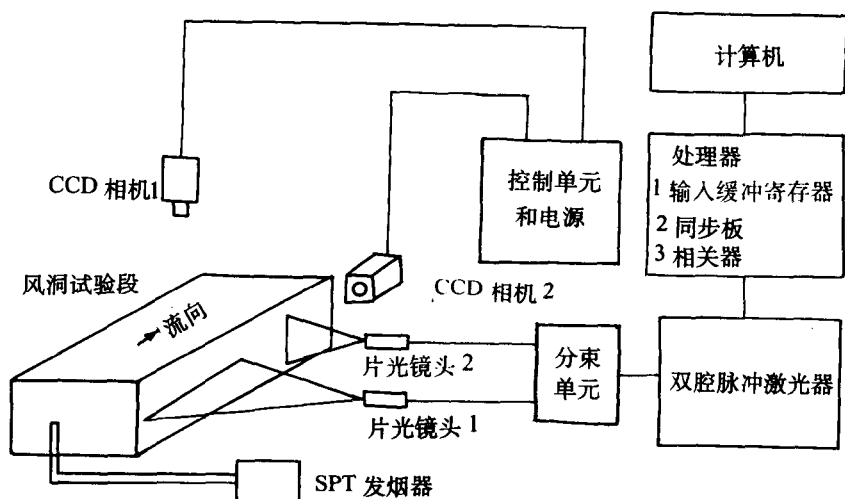


图4 PIV系统测量框图

(2) 以双腔脉冲 Nd: YAG 激光器作为光源, 用片光镜头将脉冲光束扩展成厚度为可调的片光, 并沿某一方向照射试验段流体;

(3) 用 CCD 照相机记录在脉冲激光源两次 (或多次) 闪烁下由流体中运动粒子散射形成的粒子图像;

(4) 将粒子图像分成若干个判读区, 用自相关方法确定一个判读区的粒子平均位移 d , 由下式确定判读区的平均速度 v :

$$d = M \times v \times t$$

其中, M 为比例因子, 定义为 CCD 相机成像图像的尺度与实测流场尺度之比; t 为激光脉冲时间间隔。然后分析相邻判读区, 直到覆盖整个粒子图像。

在处理器中采用输入缓存存储图像, 它能同时完成从 CCD 相机读图像、将图像存储到内存中、将存储图像分成若干个判读区以及将判读区数据送入相关器或将整个图像送入计算机中, 使该套 PIV 系统处理速度达每秒 6M 像素。CCD 相机的分辨率为 1024×1024 像素, 如果判读区大小为 64×64 像素, 判读区有 50% 交叠, 则处理这 32×32 矢量矩阵所需时间小于 200 ms。这样, 基本实现实时测量。

4.3 实验结果及初步分析

根据 PIV 对一、二、三期水平流场测量结果, 对三个点在同一高度层观测的风向和风速结果进行相关分析。

表 14 给出了关于不同高度 (m)、三期与一期或二期风向相关概率分布的风洞模拟实验结果以及与现场低空探空实验 (1995 年 9 月 24 日至 10 月 15 日及 1997 年 2 月 14 至 15 日) 观测结果的比较。

通过对不同高度层的结果比较, 三期与二期的出现相同风向频率和相关风向概率均大于三期与一期的结果, 表明三期与二期的风向相关程度好于三期与一期的。这也说明三期厂址与一期铁塔点均位于复杂地形上, 各自受局部地形的影响, 山体的扰动较大, 因而它们之间的相关性较差。而二期铁塔点则处于海滨较平坦的地形中, 距秦山山体也较远, 受

地形扰动较小, 因此三期与二期的风向相关性好于三期与一期的。由表可见, 风洞实验结果和现场实验结果所反映的变化规律完全一致。对于风向相同的概率, 风洞实验结果均高于现场实验结果, 且高度低时差别较大, 三期与二期的差别比三期与一期的差别大。主要原因是, 三期现场观测点与风洞观测点的位置不同, 现场观测点相对更靠近秦山山体, 当时螳螂山还未削平, 而风洞观测点位于螳螂山削平后的位置, 因此现场观测点受山体尾流或绕流的影响更为严重。但是, 从风向相关 (包括风向相同和风向相差一个方位) 的概率比较情况来看, 两者相差不大, 基本吻合。

表 14 不同高度层的风向相关概率 (%) 分布风洞实验与现场实验结果的比较

高度 m	三期与一期						三期与二期					
	相同风向		相差一个方位		相关风向		相同风向		相差一个方位		相关风向	
	风洞	现场 ⁺	风洞	现场	风洞	现场	风洞	现场	风洞	现场	风洞	现场
30 *	43.61	29.0/58.2	34.74	41.3/34.2	78.35	70.3/92.4	56.95	32.4/44.9	34.20	49.7/38.5	91.15	82.1/83.4
50	46.74	39.4/54.6	35.03	43.9/33.8	81.77	83.3/88.4	62.55	46.9/40.5	27.60	44.8/48.1	90.15	91.7/88.6
70 *	54.74	51.9/58.2	33.45	39.0/30.4	88.19	90.9/88.4	71.55	52.4/39.2	23.27	39.3/51.9	94.83	91.7/91.1
100	64.43	59.7/48.1	28.21	33.8/28.2	92.64	93.5/94.3	75.63	55.2/49.4	19.42	37.2/43.0	95.05	92.4/92.4

* 现场实验高度分别为 25 m、75 m

+ “/” 左边数据为 1995 年 9 月至 10 月的实验结果, 右边为 1997 年 2 月的实验结果

5 应用相关实验结果估算秦山三期核电工程年均大气扩散因子

5.1 年均大气扩散因子的计算公式

大气扩散因子定义为释放单位源强在下风向造成的地面空气中污染物的浓度。年均大气扩散因子代表了厂址的平均大气扩散特征, 由此可求得各类污染物的年均浓度。

考虑了干、湿沉积耗减修正及混合层影响的高架源排放时 i 风向的年均大气扩散因子 $(X/Q)_{i, \text{高}}$ 计算公式如下:

$$\begin{cases} (X/Q)_{i, \text{高}} = \frac{8}{\pi x} \sum_{j=1}^6 f_{D,j} f_{F,j} f_{W,j} \frac{1}{L_j} \sum_{k=1}^6 \frac{f_{i,j,k}}{u_{j,k}} & x \geq 2x_{L,j} \\ (X/Q)_{i, \text{高}} = \frac{2.032}{x} \sum_{j=1}^6 f_{D,j} f_{F,j} f_{W,j} \frac{1}{\sigma_{x,j}} \exp\left(-\frac{H_{e,j}^2}{2\sigma_{x,j}^2}\right) \sum_{k=1}^6 \frac{f_{i,j,k}}{u_{j,k}} & x \leq x_{L,j} \end{cases} \quad (8)$$

对于 $x_{L,j} < x < 2x_{L,j}$ 处的 (x/Q) 值, 则由上述两式计算结果线性内插得到。

式中, $f_{D,j}$ 、 $f_{F,j}$ 和 $f_{W,j}$ 分别为相应于 j 类稳定度时的干沉积耗减、放射性衰变与湿沉积耗减的修正因子, 分别由 (9)、(10)、(11) 式给出; L_j 为 j 类稳定度的混合层高度, m; $f_{i,j,k}$ 为出现 i 风向、 j 稳定度 k 风速组的联合频率; $x_{L,j}$ 为 j 类稳定度下烟羽上边缘到达混合层顶部的下风向距离, m; x 为下风向距离, m; Q 为释放源强, Bq/s; $\bar{u}_{j,k}$ 为 j 稳定度 k 风速组的平均风速, m/s; $\sigma_{x,j}$ 为 j 稳定度的垂直扩散参数, m; $H_{e,j}$ 为 j 稳定度的烟羽有效排放高度, m。

$$f_{D,j} = \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{V_d}{u_j} \int_0^x \exp\left(-\frac{H_{e,j}^2}{2\sigma_{x,j}^2}\right) \frac{dx'}{\sigma_{x,j}(x')}\right) \quad (9)$$

$$f_{F,j} = \exp\left(-\lambda_r \frac{x}{u_j}\right) \quad (10)$$