



CN9900356

CNIC-01267

SNERDI-0038

# 中国核科技报告

## CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

恰西玛核电站蒸汽发生器  
海运过程中的结构动力分析

DYNAMIC ANALYSIS OF CHASNUPP STEAM  
GENERATOR STRUCTURE DURING SHIPPING



中国核情报中心  
原子能出版社

30 - 12

China Nuclear Information Centre  
Atomic Energy Press



韩良弼：上海核工程研究设计院研究员级高级工程师。1963年研究生毕业于中国科学院力学研究所塑性力学专业。

Han Liangbi: Professor of Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute. Graduated from Institute of Mechanics, Academia Sinica, majoring in Plasticity as a postgraduate in 1963.

CNIC-01267

SNERDI-0038

# 恰西玛核电站蒸汽发生器 海运过程中的结构动力分析

韩良弼 徐金康 周美五 贺寅彪

(上海核工程研究设计院)

## 摘 要

描述了恰西玛核电站 (CHASNUPP) 蒸汽发生器海运过程中的结构动力学问题。包括蒸汽发生器的简化数学模型, 海浪引起的随机载荷加速度功率谱, 承受随机载荷的蒸汽发生器结构动力分析, 采用的计算机程序和计算结果。

# **Dynamic Analysis of CHASNUPP Steam Generator Structure during Shipping**

*(In Chinese )*

HAN Liangbi XU Jinkang ZHOU Meiwu HE Yinbiao  
(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute)

## **ABSTRACT**

The dynamic analysis of CHASNUPP steam generator during shipping is described, including the simplified mathematical model, acceleration power spectrum of ocean wave induced random vibration, the dynamic analysis of steam generator structure under random loading, the applied computer code and calculated results.

## 1 问题的提出

恰西玛核电站 (CHASNUPP) 主回路设置了两台蒸汽发生器, 由上海港海运至巴基斯坦卡拉奇港, 途经台湾海峡、南海及印度洋, 运输期间时值秋季, 该海域风浪很大, 波高可达 10 m。海浪对运输船, 进而对蒸汽发生器及其内件的影响是设计和运输上关心的问题。为此, 设计了蒸汽发生器运输托架用于海运和陆运, 并进行了蒸汽发生器的结构动力分析。分析中, 以运输托架和蒸汽发生器连接处的海浪加速度谱作为结构动力分析的原始数据<sup>[1]</sup>。

## 2 海浪加速度谱

海运过程中, 两台蒸汽发生器连同运输托架连接在海运托架上, 海运托架固定在船舶底舱面上。根据文献 [1] 的研究将两台蒸汽发生器捆装在运输船重心左右, 如图 1 所示。

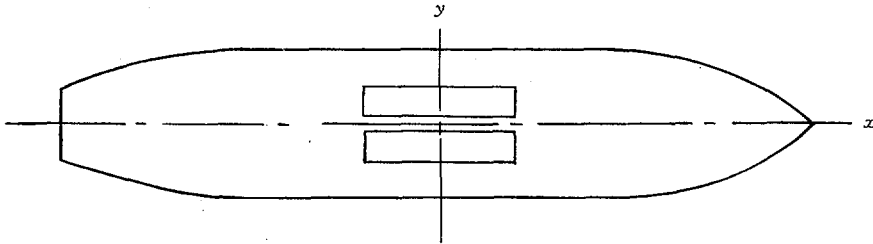


图 1 两台蒸汽发生器在运输船上的布置

船舶在波浪作用下的运动<sup>[2]</sup>如图 2 所示, 其坐标原点位于船舶重心处,  $X$  轴指向船首,  $Z$  轴垂直向上, 共六个自由度的运动为:

纵荡为由波浪引起沿船  $X$  轴的往复运动, 可由船后螺旋桨的推力所抵消。

横摇为由波浪引起绕  $X$  轴的转动。

横荡为由波浪引起沿  $Y$  轴的往复运动。

纵摇为由波浪引起绕  $Y$  轴的转动。

升沉为由波浪引起沿  $Z$  轴的往复运动。

摇首为由波浪引起的绕  $Z$  轴的转动, 由船后舵力所抵消。

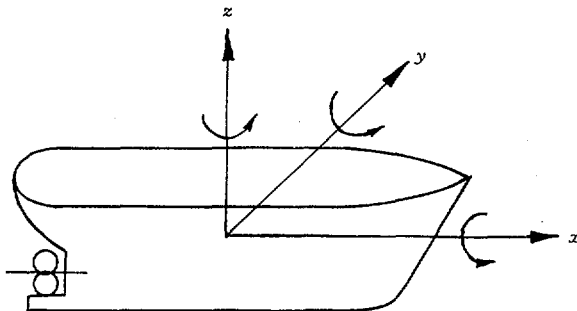


图 2 船舶运行的坐标系统

计算以 M. V. FAIRMAST 为母型船, 总长 110.0 m, 垂线长 97.9 m, 船宽 19.2 m, 型深 10.5 m, 设计吃水 7.28 m。

船舶的装载情况考虑了三种典型情况。

满载状态: 船舶排水量 9887.6 t, 其中包括两台蒸汽发生器, 全部油、水和满载时的其它货物。

半载状态: 船舶排水量 8294.0 t, 其中包括两台蒸汽发生器, 一半油、水和压载水及部分其它货物。

压载状态: 船舶排水量 6710.0 t, 其中包括两台蒸汽发生器, 一半油、水和压载水。

文献 [2] 综合横摇、横荡、纵摇、升沉四种运动形式以及满载、半载和压载三种装载状态; 取 100 次波动加速度的最大值为  $0.9 g$ , 对应的加速度功率谱密度如图 3 所示; 其作用平面为  $yz$  平面, 主频为  $0.125 \text{ Hz}$ , 按三周海运航程考虑承载次数为  $2.268 \times 10^5$  次。海浪加速度幅值表示成均方差  $\sigma$  的倍数时, 其分布如表 1 所示。

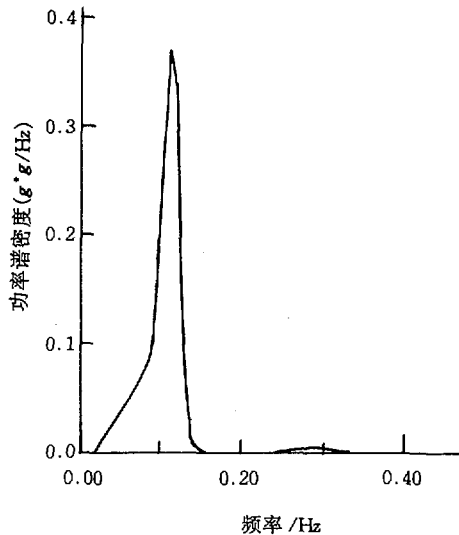


图 3 加速度功率谱密度

表 1 海浪引起的加速度

加速度幅值		发生概率	发生次数
平均幅值	$1.253\sigma$	0.5	$1.134 \times 10^5$
有义幅值	$2.002\sigma$	0.3333	$7.56 \times 10^4$
100 次波动最大幅值	$3.180\sigma$	0.01	$2.268 \times 10^3$
1000 次波动最大幅值	$3.855\sigma$	0.001	$2.268 \times 10^2$
10000 次波动最大幅值	$4.405\sigma$	0.0001	22.68

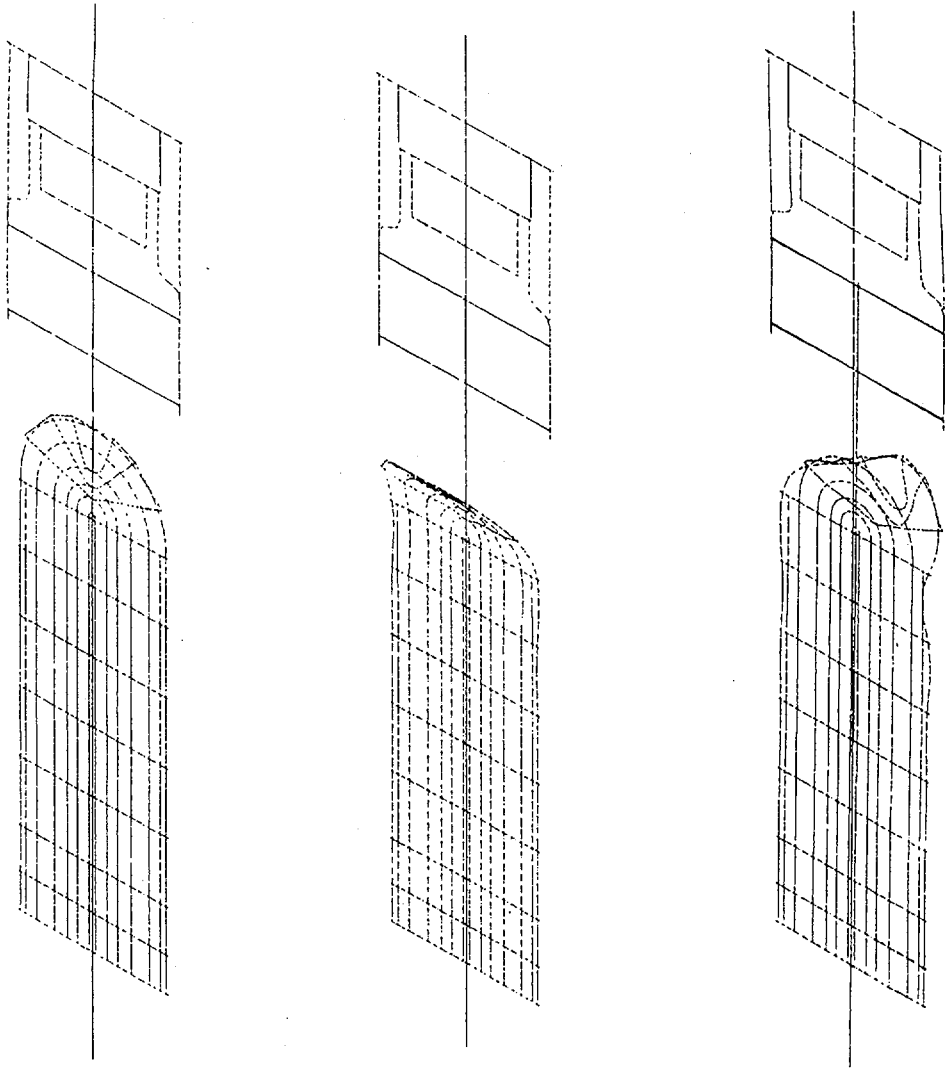


图 4 蒸汽发生器有限元节点图

图 5-a 蒸汽发生器第 1 振型

图 5-b 蒸汽发生器第 2 振型

### 3 结构动力分析

#### 3.1 数学模型

蒸汽发生器是一个复杂的结构件，由承压外壳、管束和内件等部件组成。部件间的刚度量级相差很大，其中管束中的传热管、抗振条、支承板、流量分配板和拉杆都是柔性部件，不同结构件的模拟和数值计算都有一定的难度，尤其是内件的结构动力分析，国内外的文献尚无报道。本文采用整体结构数学模型，模型中考虑了蒸汽发生器承压外壳、管板、管束套筒、传热管、支承板、流量分配板、拉杆、抗振条、汽水分离器、蒸汽干燥器及其疏水管等几乎所有部件。

除了传热管和抗振条，其余部件采用当量刚度和当量质量以保持其固有频率不变。为了模拟部件的连接和支承情况，采用自由度耦合的方式来实现，对焊接的部件采用公共节点。对部件间的间隙效应采用弹簧或约束方程来处理。为了保证管束计算值的可靠性，模

型中传热管数量取为 6 根、抗振条数量取为 3 根，但它们的几何尺寸和材料数据都与实物相同。对支承板、流量分配板、管板均先折算为当量实心板再折算为当量三维实心梁。承压外壳、管束套筒、汽水分离器、干燥器和疏水管采用三维当量管，传热管采用三维管单元，抗振条采用三维梁单元，干燥器采用三维当量梁。

模拟了抗振条和最大半径弯头传热管的连接情况。传热管直段与支承板和流量分配板在接触处保持水平位移相等。抗振条和传热管弯头在接触处保持平面外位移相等，支承板及其两侧的拉杆三者间的位移保持相同，疏水管及其支承的位移保持一定的相对关系，图 4 是蒸汽发生器及其内件的杆、梁、管数学模型。

表 2 和表 3 是部件材料及其几何尺寸的输入数据。

表 2 管单元部件输入数据

部件	外径 mm	壁厚 mm	弹性模量 N/mm <sup>2</sup>	泊桑比	密度 kg/mm <sup>3</sup>
传热管	22	1.2	$1.92 \times 10^5$	0.295	$7.95 \times 10^{-6}$
外壳 I	3536	192	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.642 \times 10^{-8}$
外壳 II	3308	164	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
外壳 III	3296	120	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
外壳 IV	3076	68	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
外壳 V	3152.9	90	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
外壳 VI	3601.9	90	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
外壳 VII	3974	87	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
外壳 VIII	1030	214.8	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
外壳 IX	1100	449.6	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
椭球封头	1100	449.6	$3.84 \times 10^2$	0.295	$2.071 \times 10^{-8}$
管束套筒 I	2840	10	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
管束套筒 II	3053	10	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
管束套筒 III	3266	10	$3.84 \times 10^2$	0.295	$1.59 \times 10^{-8}$
汽水分离器内筒	316	3	$3.84 \times 10^3$	0.295	$1.59 \times 10^{-7}$
汽水分离器外筒	394	3	$3.84 \times 10^3$	0.295	$1.59 \times 10^{-7}$
拉杆	16.4	8.2	$1.92 \times 10^5$	0.295	$7.95 \times 10^{-6}$
疏水管 I	76	3.5	$7.68 \times 10^3$	0.295	$3.18 \times 10^{-7}$
疏水管 II	38	4	$7.68 \times 10^2$	0.295	$3.18 \times 10^{-8}$
均汽孔板	500	250	$2.07 \times 10^7$	0.3	0

表 3 梁单元部件输入数据

部件	横截面 mm <sup>2</sup>	惯性矩 $J_y$ mm <sup>4</sup>	惯性矩 $J_z$ mm <sup>4</sup>	扭转惯性矩 mm <sup>4</sup>	弹性模量 N/mm <sup>2</sup>	泊桑比	密度 kg/mm <sup>3</sup>
管板	16 275	$1.303 \times 10^6$	$3.738 \times 10^6$	$3.751 \times 10^8$	$2.07 \times 10^5$	0.161	$7.95 \times 10^{-6}$
支承板	620	$4.965 \times 10^4$	$2.067 \times 10^4$	$7.032 \times 10^4$	$1.72 \times 10^5$	0.1628	$7.95 \times 10^{-6}$
抗振条	85	$7.083 \times 10^2$	$5.118 \times 10^2$	$1.22 \times 10^3$	$1.92 \times 10^5$	0.3	$7.95 \times 10^{-6}$
干燥器 上层	$6.438 \times 10^4$	$1.2475 \times 10^{10}$	$4.31189 \times 10^{10}$	$5.5594 \times 10^{10}$	$7.68 \times 10^2$	0.3	$3.18 \times 10^{-8}$
干燥器 下层	$5.438 \times 10^4$	$1.00396 \times 10^{10}$	$2.3465 \times 10^{10}$	$3.3504 \times 10^{10}$	$7.68 \times 10^2$	0.3	$3.18 \times 10^{-8}$



### 3.2 分析结果

分析采用 ANSYS 5.2<sup>[3]</sup>通用计算机程序的三维管、梁单元和约束方程,几何参数仅输入控制点的坐标,节点和单元由程序自动生成,生成的节点数为 1300。动力分析采用模态组合法,模态数分别取 6, 15, 56 和 105,按加速度和应力值的收敛情况最后确定模态数为 56 时的计算值已趋于收敛,其对应截止频率值为 32.879 Hz,阻尼比取值为 1%。蒸汽发生器的固有频率值和各模态的参与因子详见表 4,其部件各阶振型见图 5a 和 5b。

表 4 蒸汽发生器结构固有频率

阶数	固有频率值/Hz	参与因子	部 件
1	3.140 610 41	-0.458 43E-14	管束(面外)
2	6.718 483 36	0.199 47	管束(面内)、内筒
3	8.168 384 68	0.588 52E-06	流量分配板
4	8.211 821 24	0.461 14E-06	支承板 I
5	8.336 764 72	0.434 04E-06	支承板 II
6	8.574 780 84	-0.857 61E-07	支承板 V
7	8.734 108 80	-0.109 70E-06	支承板 IV
8	8.852 106 54	-0.132 89E-06	支承板 III
9	9.322 191 71	0.306 37	管束(面内)、内筒、拉杆、疏水管
10	9.344 722 02	0.243 94E-05	支承板 VI
11	9.577 580 26	-0.978 34E-15	管束(面外)
12	10.649 176 1	-0.153 97E-13	管束(面外)、内筒、拉杆、疏水管
13	13.821 870 7	0.875 37E-04	管束(面内)、抗振条
14	15.701 534 4	0.153 45	内筒、抗振条、拉杆、疏水管
15	18.353 439 8	-0.120 83E-14	管束(面外)、抗振条、内筒
16	22.405 062 8	0.277 81E-16	内筒、拉杆、疏水管
17	23.376 432 5	0.104 70	拉杆
18	23.395 941 8	0.402 19E-11	管束(面外)、拉杆、抗振条
19	23.426 886 9	0.688 48E-05	拉杆
20	23.431 868 9	0.652 88E-02	拉杆
21	23.433 446 8	0.555 77E-08	管束(面内)、抗振条、拉杆
22	23.502 474 9	-0.497 65E-14	抗振条、拉杆
23	23.539 721 5	-0.304 36E-13	拉杆
24	23.637 819 5	0.202 87E-01	抗振条、拉杆
25	23.826 199 7	0.865 93E-01	抗振条、拉杆
26	24.002 691 3	-0.295 63E-13	抗振条、拉杆
27	24.099 992 0	0.296 04E-08	抗振条、拉杆
28	24.102 658 5	0.179 74E-01	拉杆
29	24.121 650 8	-0.186 65E-10	拉杆
30	24.127 909 3	-0.829 29E-02	拉杆
31	24.133 539 6	0.183 99E-02	拉杆
32	24.133 546 6	0.644 25E-03	拉杆
33	24.138 531 1	0.485 58E-03	拉杆
34	24.161 866 2	0.188 14E-01	疏水管
35	24.560 100 3	0.321 57E-01	拉杆
36	24.602 048 4	-0.349 60E-11	拉杆
37	24.702 510 4	0.530 61E-13	拉杆
38	24.721 193 2	-0.246 20E-02	拉杆

阶数	固有频率值/Hz	参与因子	部 件
39	24.727 682 1	-0.243 40E-10	拉杆
40	24.730 264 4	0.188 99E-03	拉杆
41	24.743 137 3	0.247 95E-11	拉杆
42	24.782 696 9	0.175 32E-02	拉杆
43	24.783 771 1	-0.766 49E-09	拉杆
44	24.797 824 3	-0.288 73E-04	拉杆
45	24.970 660 0	0.163 53E-01	拉杆
46	25.592 401 8	-0.173 93E-15	拉杆
47	25.887 188 9	0.142 51E-01	拉杆
48	27.046 694 7	0.187 23E-04	拉杆
49	27.052 359 1	0.231 13E-14	拉杆
50	27.054 066 0	-0.163 74E-13	拉杆

分析时考虑船舶的总体加速度方向和传热管平面的夹角为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  两种极端情况。装运时蒸汽发生器传热管平面与运输船的 Z 轴夹角为  $45^\circ$ 。文献 [2] 中给出的最大总体加速度方向与水平面的夹角变化范围为  $43^\circ \sim 71^\circ$ ，故总体加速度与传热管平面夹角在  $7^\circ \sim 35^\circ$  之间变化，包括在上述极端情况以内。

表 5 和表 6 是蒸汽发生器在船舶总体加速度方向和管束平面夹角成  $0^\circ$  和  $90^\circ$  两种情况下误差为  $1\sigma$  时的结构响应。众所周知，结构响应的计算值可信度为 99.74% 时误差应为  $3\sigma$ ，此时应将表 5 和表 6 所给的最大应力强度值和结构加速度响应值乘以 3 倍，对应的传热管最大加速度为  $1.004 g$ ，抗振条的最大加速度为  $1.03 g$ ，传热管磨损与加速度有关，有待进一步分析。部件的疲劳应力远小于持久极限，故毋须考虑海运过程中的疲劳问题。

表 5 加载方向与传热管成水平时的部件响应值  
(误差为  $\sigma$ )

部件名称	单元号	最大应力强度 <sup>[4]</sup> MPa	节点号	加速度 ( $g$ ) 响应值
传热管	EL37	4.6851	N529	0.135 95
外壳	EL865	$2.2857 \times 10^{-3}$	N768	0.128 85
管束套筒	EL753	$1.7417 \times 10^{-2}$	N774	0.132 23
汽水分离器内筒	EL840	$3.2222 \times 10^{-2}$	N855	0.132 67
汽水分离器外筒	EL854	$1.4160 \times 10^{-2}$	N1232	0.132 73
拉杆	EL1159	1.4467	N1191	0.131 63
疏水管弯头	EL926	0.233 79	N1267	0.133 66
疏水管直段	EL937	2.3307	N1236	0.132 76
支承板或流量分配板	EL650	$6.8915 \times 10^{-3}$	N766	0.131 48
抗振条	EL778	7.6042	N553	0.138 49
管板	EL821	$9.1019 \times 10^{-3}$	N848	0.128 85
干燥器上层	EL991	$1.0967 \times 10^{-4}$	N926	0.128 85
干燥器下层	EL976	$2.1415 \times 10^{-9}$	N927	0.128 85

表 6 加载方向与传热管垂直时的响应值  
(误差为  $\sigma$ )

部件名称	单元号	最大应力强度 <sup>[4]</sup> MPa	节点号	加速度 ( $g$ ) 响应值
传热管	EL38	12.225	N252	0.334 66
外壳	EL865	$1.6767 \times 10^{-3}$	N768	0.128 86
管束套筒	EL753	$1.7735 \times 10^{-2}$	N774	0.135 39
汽水分离器内筒	EL840	$1.2796 \times 10^{-2}$	N855	0.145 06
汽水分离器外筒	EL854	$5.6322 \times 10^{-3}$	N1232	0.148 11
拉杆	EL1156	2.3529	N1191	0.133 23
疏水管弯头	EL926	0.115 06	N990	0.128 57
疏水管直段	EL1004	1.3141	N909	0.128 80
支承板或流量分配板	EL750	6.3864	N1048	0.133 64
抗振条	EL585	8.0413	N790	0.343 23
管板	EL1053	$8.6038 \times 10^{-5}$	N832	0.128 85
干燥器上层	EL925	$4.3227 \times 10^{-3}$	N904	0.128 80
干燥器下层	EL910	$6.4729 \times 10^{-1}$	N986	0.128 57

#### 4 结论和讨论

(1) 在海运过程中, 船舶运动加速度最大值为  $0.9 g$  时, 传热管最大加速度响应为  $1.004 g$ , 抗振条的最大加速度响应为  $1.03 g$ 。

(2) 海运对部件的疲劳寿命的影响不明显。在蒸汽发生器疲劳分析中可以忽略不计。

(3) 表 4 给出了蒸汽发生器部件的固有频率与对应的最大响应部件。由于公路运输路面加速度频带较宽、频率较高, 在  $3 \sim 33 \text{ Hz}$  频率成分的加速度激励下, 部件容易发生共振现象; 其对应的部件加速度和应力值要大于海运的情况, 应予以特别注意。由于车辆和路面情况未提供, 该项分析尚未进行。

#### 参考文献

- 1 顾敏童, 谭家华, 裘泳铭. PC 工程蒸汽发生器海运技术与计算报告. 上海交通大学船舶和海洋工程系, 1997 (7), (未发表)
- 2 冯铁城等. PC 工程蒸汽发生器海运技术与计算报告, 附件二“运输船航运中运动和加速度计算”. 上海交通大学船舶和海洋工程系, 1997, (7), (未发表)
- 3 ANSYS, Structural Analysis Guide 00646, Release 5.3, October 1996
- 4 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Appendix 1, 1989 Edition

### 图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01267 SNERDI-0038: 恰西玛  
核电站蒸汽发生器海运过程中的结构动力分析/韩良弼等  
著. —北京: 原子能出版社, 1998. 7

ISBN 7-5022-1851-3

I. 中… II. 韩… 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 16386 号

恰西玛核电站蒸汽发生器海运过程中的结构动力分析

韩良弼等著

©原子能出版社, 1998

原子能出版社出版发行

责任编辑: 孙凤春

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 1/16·印张 1/2·字数 13 千字

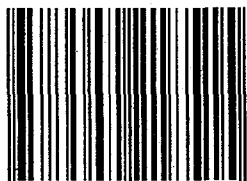
1998 年 7 月北京第一版·1998 年 7 月北京第一次印刷

定价: 5.00 元

# CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1851-3



9 787502 218515 >