

# 核动力装置蒸汽发生器 初步设计优化研究

施洪深 (上海海军标准规范研究所)

陈林根 曾庆长(海军工程学院)

〔摘要〕本文以蒸汽发生器总重量最小为目标函数,提出了一个核动力推进装置蒸汽发生器初步设计优化方法。给出了优化结果和灵敏度分析结果。计算表明该方法是有效的。

关键词 蒸汽发生器 设计优化 灵敏度分析

分类号 TL353

## 1 引言

蒸汽发生器是压水堆核动力推进装置中的主要设备之一,在其初步设计中引入最优化技术是十分必要也是切实可行的。本文以蒸汽发生器总重量最小为目标,考虑多种热力性能和几何结构约束条件,提出了一个初步设计优化方法,并给出了数值算例。

## 2 最优设计问题的表述

最优化问题由设计变量、目标函数和约束条件来表征。

蒸汽发生器设计中可供选为优化变量的参数及其组合有很多。本文选取下列参数作为设计变量:一回路水进、出口温差  $\delta t$ , 一回路水流量  $w_1$ , U型管内径  $d_i$ , U型管壁厚  $\delta d$ , 管距与外径之比  $t_1/d_0$ , 即:

$$\bar{X} = [\delta t, w_1, d_i, \delta d, t_1/d_0]^T$$

考虑到核动力推进装置的结构尺寸、重量受到严格限制,故本文选取蒸汽发生器的总重量 WSG 最小作为目标函数。

从热力性能、结构强度和计算模型适应性等方面考虑,引入下列十二类共二十一个约束条件:(1)一回路水进、出口温差  $\delta t$  在一定范围内;(2)一回路水流量  $w_1$  在一定范围内;(3)U型管内径  $d_i$  在一定范围内;(4)U型管壁厚  $\delta d$  在一定范围内;(5)管距/外径比  $t_1/d_0$  在一定范围内;(6)一回路水与二回路给水温差  $\delta t$  大于某一值;(7)管板的厚度  $t$  在一定范围内;(8)U型管根部的总拉应力  $\sigma_s$  在管材强度允许最大值范围内;(9)管束直径  $d_1$  应在一定范围内;(10)蒸汽发生器高度  $H_0$  应限制在一定范围内;(11)蒸汽发生器直径  $d_2$  应限制在一定范围内;(12)管板所承受的应力  $\sigma_s$  在最大值范围内。

收稿日期 1993 04 19 定稿 1993 09 26

本文联系人 陈林根 男 29 副教授 430033 武汉 海军工程学院 306 教研室

### 3 目标函数的求值

蒸汽发生器的热计算和结构尺寸计算按下列步骤计算:(1) 确定传热系数,包括计算一回路水对管壁的强迫对流传热系数  $\alpha_1$ 、管壁热阻、污垢热阻和二回路侧的沸腾传热系数  $\alpha_2$ ; (2) 确定蒸汽产量与传热面积; (3) 确定汽水分离器尺寸参数; (4) 确定 U 型管根数; (5) 确定传热管束结构尺寸; (6) 确定管板厚度; (7) 确定蒸发器总体尺寸; (8) 确定蒸发器总体积 VSG 和总重量 WSG。热计算和结构尺寸计算参阅文献<sup>[1,2]</sup>进行,其中的水和水蒸汽性质计算采用曲面拟合法进行<sup>[3]</sup>。

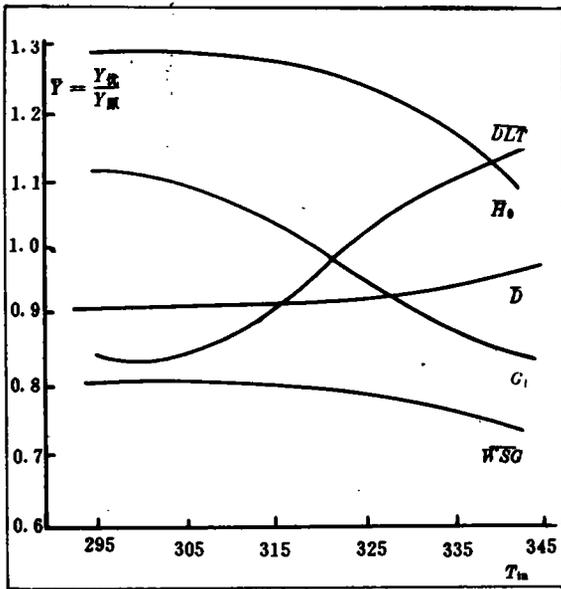


图 1  $f = WSG$  参数变化规律  
(VSG 为定值)

### 4 求解方法

本文所述问题为一个多变量的约束非线性规划决策问题。采用 SUMT—外点法将有约束问题化为无约束问题,再由 Sargent 改进的 Powell 方法借助于抛物线拟合一维搜索得最优解。

### 5 数值算例

以某一蒸汽发生器设计方案为例进行寻优计算。计算中的约束界限值见表 1。

表 1 数值算例的约束界限值

$2.3 \leq \delta t \leq 80.0$	$0.9 \leq w_1 \leq 5.5$	$0.0089 \leq d_1 \leq 0.025$
$0.001 < \delta d < 0.003$	$1.25 \leq b/d_0 \leq 2.0$	$\delta t \geq 10.0$
$0.09 \leq t \leq 0.15$	$\sigma_s \leq 11.5$	$0.4 \leq d_1 \leq 0.7$
$2.5 \leq H_0 \leq 6.0$	$0.5 \leq d_2 \leq 1.0$	$\sigma_s \leq 12.8$

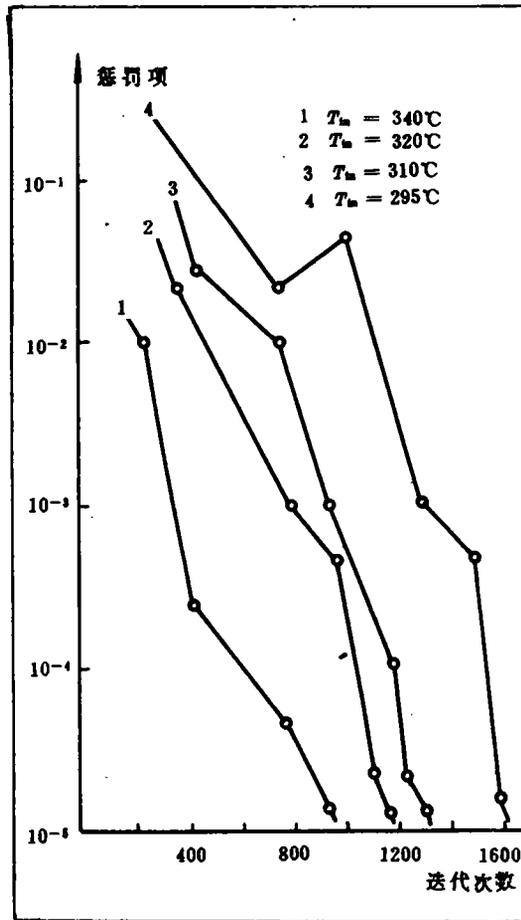


图 2 优化路线的发展  
( $f = WSG \cdot VSG = \text{const}$ )

在以重量为目标时,蒸汽发生器体积是否限为定值,对设计性能有很大影响,故分两种情形讨论。

5.1 蒸汽发生器体积限为定值,给定蒸发量,求总重量最小。

在完全相同的设计条件下,给定蒸发量  $D = 8.260$  吨/小时,体积  $VSG = 1.53$  米<sup>3</sup>时,不同的一回路水入口温度  $T_{in}$  时的优化结果见表 2。目标函数及其它中间参数随一回路水入口温度变化规律见图 1,图中纵座标为各参数对原始方案的相对值。用计算目标函数的次数对惩罚项的关系表示的优化路线见图 2。由于限定了体积,故约束条件比表 1 中

多了一个等式约束  $VSG = 1.53$ (为原设计方案值)。与原设计相同  $T_{in} = 295$  °C 条件下,最优方案总重量比原方案减少 19.45%,而一回路水流量  $G_1$  增加 14.9%,即体积不变条件下,需提高一回路水流量才能换取总重量的减少。另外,管束直径减少 8.6%,汽水分离器直径减少 8.3%,U 型管束高度增加 28.6%,换热面积减少 47.7%。设计计算目标函数次数为 1687 次,调用 Powell 算法最多为 17 次,在 IBM-286 微机上运行,占 CPU 时间 25 分钟。由图 2 可知,随着  $T_{in}$  降低,迭代目标函数次数增加。

表 2  $f = WSG$  各方案下最优点处参数值、目标值 ( $D = 8.260, VSG = 1.53$ )

方 案 名 称	符 号	单 位	原始方案 $T_{in} = 295$ °C	$T_{in} = 295$ °C	$T_{in} = 310$ °C	$T_{in} = 320$ °C	$T_{in} = 340$ °C
管束直径	$D_1$	m	0.5871	0.5365	0.5387	0.5391	0.5611
汽水分离器外径	$D_2$	m	0.6837	0.6269	0.6273	0.6278	0.6534
上筒体外径	$D_5$	m	0.7217	0.6617	0.6622	0.6627	0.6897
下筒体外径	$D_6$	m	0.6969	0.6390	0.6394	0.6399	0.6660
U 型管束高度	$H_3$	m	3.1031	3.9904	3.9883	3.9864	3.5924
管距 / 管外径	$t_j/d_0$		1.467	1.8671	1.87402	1.8752	1.9540
换热面积	$HSG$	m <sup>2</sup>	58.944	30.671	26.173	23.542	18.657
换热系数	$AKR$	w/m <sup>2</sup> t	2370.85	3154.76	3172.46	3198.95	3251.94
一回路水进、出口温差	$DLT$	°C	62.0	52.871	54.392	61.2726	69.890
对数平均温差	$DLB$	°C	34.343	52.746	54.418	59.929	79.104
总体积	$VSG$	m <sup>3</sup>	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
总流量	$G_1$	T/h	67.726	75.658	73.165	65.729	58.068
总重量	$WSG$	T	2.6789	2.1578	2.1436	2.1251	2.0163

5.2 给定蒸发量,无体积约束时,求总重量最小。

在完全相同的设计条件下优化结果与

原始方案的比较见表 3,目标函数值及其它中间参数随一回路水入口温度变化规律见图 3,且计算目标函数值的次数对惩罚项的关系

表示的优化路线见图 4。当  $T_m = 295\text{ }^\circ\text{C}$  时,与原始方案相比,总体积减少 30.9%,总重量减少 36.8%,一回路水流量增加 5.4%,换

热面积减少 18.6%,管束直径减少 24%。该设计在 IBM-286 微机运行,调用 Powell 算法最多为 9 次,累计计算目标函数为 1072

表 3  $f = WSG$  各方案下最优值处参数值、目标值 ( $D = 8.260, VSG$  无约束)

方 案 名 称	符 号	单 位	原始方案	$T_m = 295\text{ }^\circ\text{C}$	$T_m = 310\text{ }^\circ\text{C}$	$T_m = 320\text{ }^\circ\text{C}$	$T_m = 340\text{ }^\circ\text{C}$
			$T_m = 295\text{ }^\circ\text{C}$				
管束直径	$D_1$	m	0.5871	0.4452	0.4452	0.4060	0.4060
汽水分离器外径	$D_2$	m	0.6837	0.5184	0.5184	0.4727	0.4727
上筒体外径	$D_5$	m	0.7217	0.5472	0.5472	0.4990	0.4990
下筒体外径	$D_6$	m	0.6969	0.5284	0.5284	0.4819	0.4819
U型管束高度	$H_3$	m	3.1031	3.7911	2.541	2.9291	2.2094
换热面积	$HSG$	$\text{m}^2$	58.944	44.6769	29.3829	23.0564	17.1606
换热系数	$AKR$	$\text{w/m}^2\text{t}$	2370.853	2842.93	2956.12	3141.85	3202.94
一回路水进、出口温差	$DLT$	$^\circ\text{C}$	62.0	58.3672	57.9453	57.641	57.50
对数平均温差	$DLB$	$^\circ\text{C}$	34.3428	37.7859	55.2538	66.2525	87.3172
一回路水流速	$W_1$	m/s	1.705	2.9059	2.90373	4.3526	4.3266
总体积	$VSG$	$\text{m}^3$	1.53	1.071	0.7053	0.6449	0.5136
总流量	$G_1$	T/h	67.726	69.294	69.281	69.296	68.844
总重量	$WSG$	T	2.6789	1.6916	1.3353	1.1883	1.0289

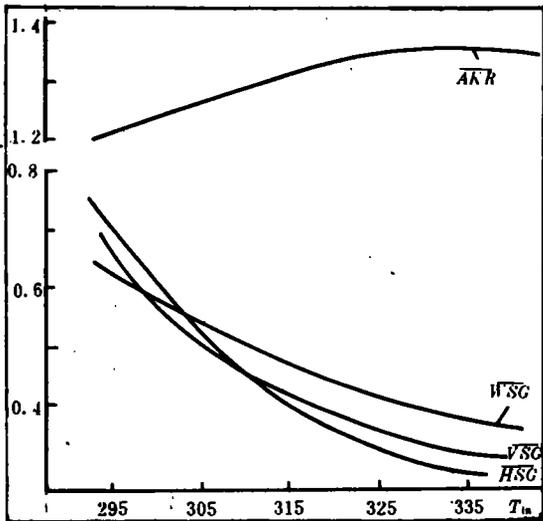


图 3  $f = WSG$  参数变化曲线 ( $VSG$  无约束)

次,占 CPU 时间为 12 分钟。可见,由于取消了等式约束,搜索次数减少,加快了寻优速度。

### 6 灵敏度分析

本文已  $VSG$  限为定值,  $WSG$  为目标的优化为例进行灵敏度分析。

#### 6.1 有无参数约束对最优结果的影响

在取消高度、直径约束及取消全部约束条件下分别进行了寻优计算,与全约束求解结果相比可知,此时所得  $\delta t, d_i, w_1, h, G_1$  等值是明显不符合物理意义的。

#### 6.2 U 型管内流速极限对最优结果的影响

在进行恒定体积的重量优化计算时, U 型管内流速始终为有效约束,可见其极限值

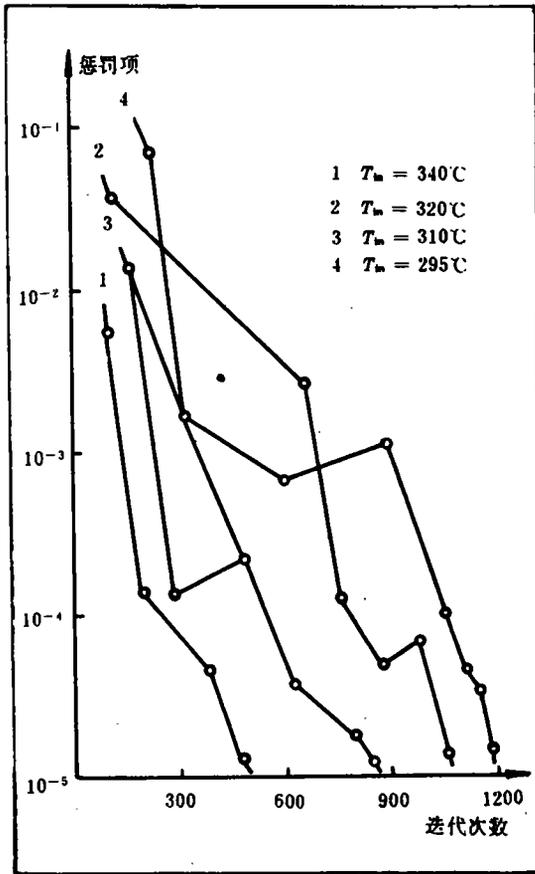


图4 优化路线的发展  
( $f = \text{WSG}, \text{VSG}$  无约束)

对计算结果有很大影响。本文将其最大极限值分别改变  $\pm 8.0\%$  进行寻优计算, 结果见图 5。

### 6.3 蒸发器高度极限值对最优结果的影响

蒸汽发生器高度是影响配置的重要因素, 在寻优计算中, 大多数情况下为有效约束。本文将其最大极限值分别改变  $\pm 10\%$  进行寻优计算, 结果见图 6。

### 6.4 设计变量偏离最优值对结果的影响

分别在  $\delta t, w_1, d_i, \delta d$  和  $t_i/d_0$  偏离最优值  $\pm 15\%$  的范围内进行常规计算, 以分析设计变量偏离最优值对蒸发器性能的影响, 计

算结果见图 7—图 11。

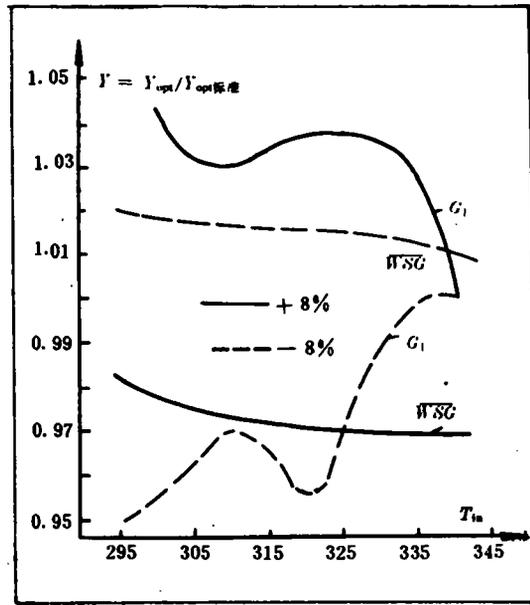


图5  $W_{1\max,limit}$  变动  $\pm 8\%$  时各参数与原优化结果比较

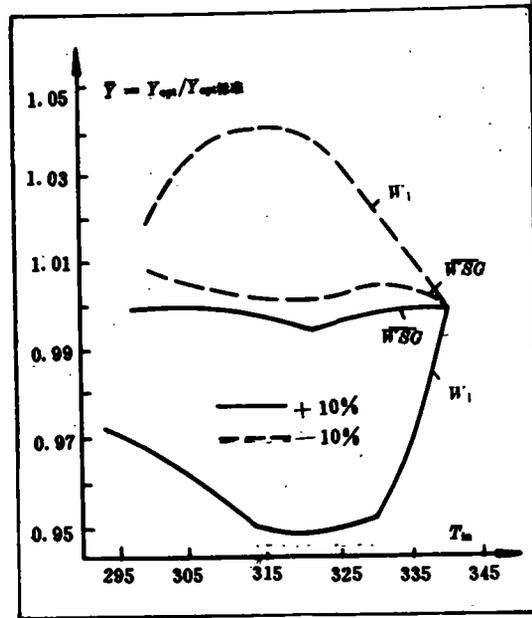


图6  $H_{0\max,limit}$  变动  $\pm 10\%$  时各参数与原优化结果比较

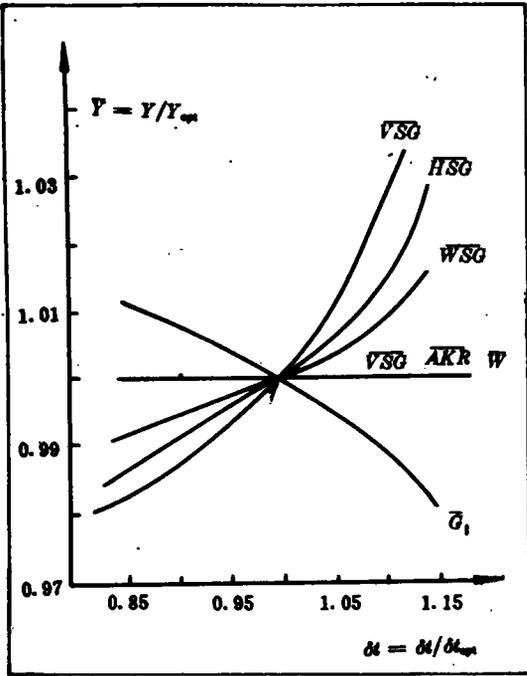


图 7  $\delta l$  偏离最优值对结果的影响

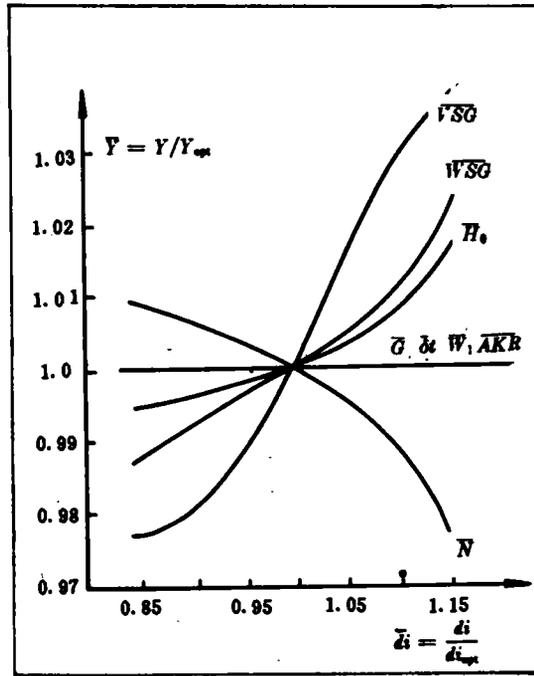


图 9  $d_i$  偏离最优值对结果的影响

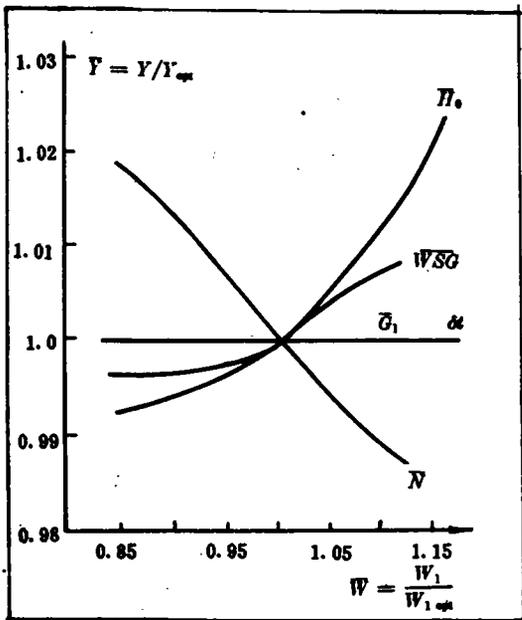


图 8  $w_1$  偏离最优值对结果的影响

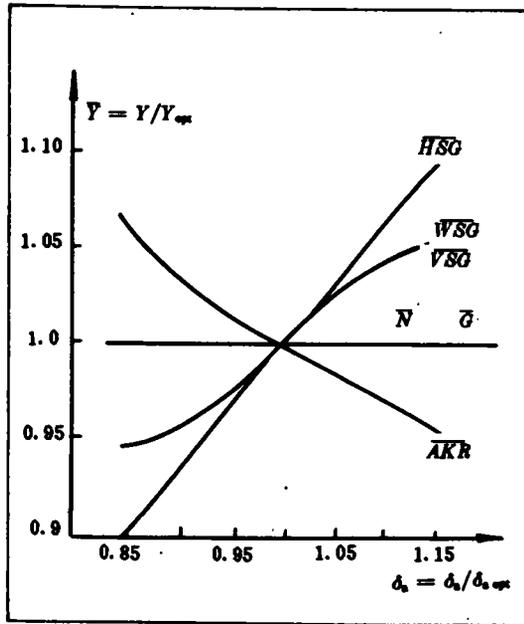


图 10  $\delta d$  偏离最优值对结果的影响

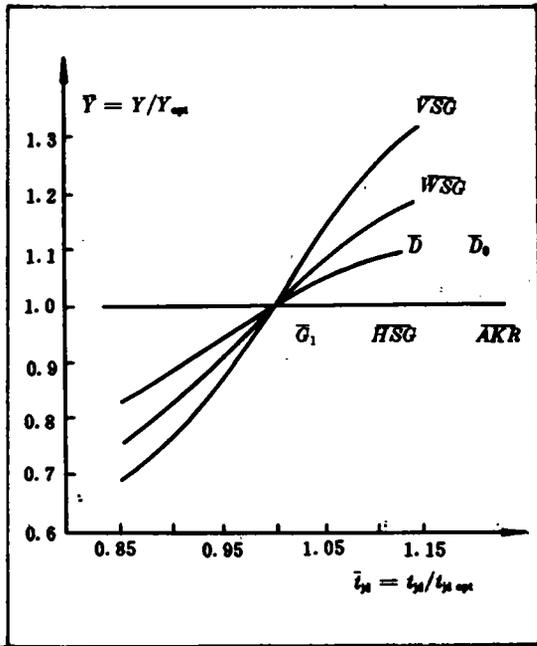


图 11  $t_1/d_0$  偏离最优值对结果的影响

### 7 结束语

本文提出了一个核动力推进装置、蒸汽发生器的初步优化设计方法。给出的数值算例说明了方法的有效性。灵敏度分析结果对参数的选择提供了更为全面的指导作用。对蒸发器而言,进一步引入多目标优化方法也是十分必要的<sup>(4)</sup>。

### 参 考 文 献

- 1 蒸汽发生器编写组. 蒸汽发生器. 北京, 原子能出版社, 1982
- 2 压水堆蒸汽发生器通用技术条件(征求意见稿)
- 3 吴善炎. 水和水蒸汽的状态方程式. 汽轮机技术, 1978, 22(1): 1-40
- 4 施洪深. 核动力装置蒸汽发生器初步设计多目标优化方法. 海军工程学院硕士论文, 1992

(编辑 渠源汤)

## 便携式动平衡仪

不平衡是旋转机械最常见的故障之一。据统计,工频振动大部分(70%以上)是由于转动部件失衡所引起的,而转子不平衡是产生工频振动的最常见根源,精确地平衡转子已成为人们日益关心的问题。美国恩泰克公司最新推出了一种便携式动平衡仪 1005PDM,非常适合于机器设备维修人员在生产现场进行机器动平衡。

该仪器外形小巧,结构坚固,灵敏度高,体积小,只相当于一本 16 开的杂志大小,重量为 1.7 kg,售价约为 6 万元。动平衡仪的内部操作程序可引导用户方便的完成现场动平衡的每一必要步骤。通过测量振动幅值、转速、相位,使用影响系数解算,对单、双面的动平衡可自动计算出最佳平衡结果。同时仪器还具有配重分解功能,对现场条件限制无法在转子的某一位置添加平衡配重时,可将已解算出的配重分解到其他任何适当的位置上,而不影响平衡的精度。

1005PDM 动平衡仪的标准配置包括速度传感器、光电传感器、高温电缆、电子天平、电池和充电器等。该仪器的主要技术参数:精度:±5%(振动幅值或相位,300~60 000 r/min),振动幅值测量范围:0.025~203.2 mm/s,电压:DC~12 V,充电时间:2 小时,连续工作时间:10~12 小时。

(四川化工总厂 汪家铭)

and rear arch can be considered as proper. Tests have shown that in such a case the a-shaped combustion flame will result. **Key words:** *combustion, grate firing furnace, furnace arch design*

**(285) Optimization Design of a Power Plant Thermodynamic System by Using "Process Energy Combination" Method**..... Zhang Yongde (*Northwestern Electric Power Design Institute*)

A so-called "Process Energy Combination" method is employed to improve the design of a thermodynamic system for a cogeneration power plant, which plays a significant role in enhancing energy-saving effects. **Key words:** *thermodynamic system, Process energy combination, heater*

**(290) A Study on the Optimization for Preliminary Design of a Nuclear Power Plant Steam Generator** ..... Shi Hongshen (*Shanghai Naval Standards and Specifications Design Institute*), Chen Lingen, Zong Qingchang (*Naval Engineering Academy*)

With the minimum total weight of a steam generator set as a target function the authors have proposed a method for optimizing the preliminary design of a nuclear propulsion plant steam generator. Given in the paper are the optimization and sensitivity analysis results. The computation results have substantiated the validity of the recommended method. **Key words:** *steam generator, design optimization, sensitivity analysis*

**(297) The Specific Features of Industrial Steam Turbines and Their Technical Retrofitting**..... Luo Yigen, Lan Ruji, Zhang Zhitong (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

The present paper briefly deals with the design features of mechanical — drive industrial steam turbines and the experience gained by the authors in recent years in the course of implementing the technical modification of steam turbines for some domestic petrochemical enterprises. Proceeding from the specific conditions existing in Chinese petrochemical works the authors have proposed some feasible measures and approaches for conducting energy-saving and power uprating-oriented modifications of industrial steam turbines. **Key words:** *industrial steam turbines, high efficiency, energy-saving, power uprating*

**(300) The Application of STD Bus Microcomputer-based Industrial Control Unit on a Grain Drying Production Line** ..... Yang Chengyi, Zhao Aijun (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

In connection with the design, commissioning tests and operational effectiveness of a microcomputer-based monitoring and control system installed on a grain drying production line of District NO. 8 Grain Depot in Harbin city the authors make some observations on the proper selection of microcomputer type and the method of interface design when such factors as serious dust-borne surroundings and electric appliance interference are to be taken into account. **Key words:** *grain drying, microcomputer-based control, STD industrial control unit*

**(304) An Exploratory Study on a Thermistor Nonlinearity Correction Method**..... Zhang Guodong (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

Three practical methods are proposed for correcting the nonlinearity of thermistors, namely: optimum parameter method, transformation function method and similarity function method. Theoretically, the above-cited methods are also suitable for the correction of nonlinear hardware