

# 多目标规划决策 (MODM) 与舰用蒸汽透平通流部设计

(海军工程学院) 陈林根 张迈俊

[提要] 本文首次将舰用蒸汽透平级和/或级组设计问题表述为一个三目标多变量有约束非线性规划决策问题, 叙述了各目标函数直和汽动力约束及机械约束的求值方法, 讨论了叶栅损失模型及通流部分热力计算方法的选择及其最优解, 最后以一单级蒸汽透平优化问题数值计算实例(给定速度系数)所作的分析证实了本文提出的模型的正确性及优化算法的收敛性。

关键词: 船用汽轮机 通流部分设计

## 一、引言

国内外已有不少文献讨论过透平通流部分的优化设计[1, 2, 3], 作者总结了各优化实例的特点, 详述了单目标优化与多目标决策方法的异同, 并从系统观点出发, 提出了应用多目标规划决策法(MODM)求解舰用蒸汽透平通流部分设计问题[2]。本文先描述问题的数学表述, 介绍有关计算程序, 并以一实例说明之。

## 二、最优化设计问题的数学表述

### 1. 优化变量

在轴流式多级蒸汽透平优化设计中, 取各级的下述量作为最优设计变量:

对每级:  $d_1, d_2, u_1, u_2, c_{1z}, c_{2z}, c_N, c_R$ 。即有

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ u_1 \\ u_2 \\ c_{1z} \\ c_{2z} \\ c_N \\ c_R \end{pmatrix} \quad \text{对每一级}$$

### 2. 目标函数

考虑到舰用蒸汽透平只在少数情况下才

以最大功率工作, 且因机舱对主机的尺寸、重量有严格的要求, 故取以下三项作为目标函数:

(1) 级或级组设计工况内效率, 最大(即内损失最小);

(2) 级或级组某一非设计工况内效率, 最大(即内损失最小);

(3) 级或级组所在段落内透平总重量(包括静、动叶, 叶轮和外缸套), 最小。

### 3. 目标函数的求值

目标函数的求值亦即进行蒸汽透平级或级组的设计工况和非设计工况的热力计算以及由结构尺寸求总重量。

在热力计算中, 水蒸汽的热力性质用曲面拟合公式计算[4], 其程序块为 *STEAM* 损失模型按两类选取:

第一, 速度系数  $\varphi$ :  $\varphi$  由机外给定输入, 此时, 各项外损失计算如下:

对冲动式结构(图1a)有,

(i) 隔板汽封损失系数[6]:

$$\xi = \frac{0.8\pi D_G \times D_{G1}}{F_1 Z_1} \times$$

$$\left( \frac{D_{P2}}{D_{P2} - L_2} \right) \varphi^2 \cos^2 \alpha_1$$

(ii) 轮盘摩擦鼓风损失[6]:

$$\Delta h_{m_s} = 3.6 \left( \frac{D_{P2}}{1000} \right)^2 \left( \frac{u_2}{100} \right)^3 \times$$

$$\times \frac{2}{3.6(V' + V_1)}$$

(iii) 湿汽损失系数:

$$\xi = 1 - (x_0 + x_1 + x'_1)/3$$

对反动式结构 (图1b) 有:

(i) 动叶顶部间隙漏汽损失系数[7]:

$$\xi = (2.755R_d^2 + 0.108R_d + 1.72) \times \frac{R_d}{L_2}$$

其中,  $R_d$  为顶部反动度;

(ii) 湿汽损失系数:

$$\xi = 1 - (x_0 + x_1 + x'_1)/3$$

第二, 根据[3], 选用包括透平实验, 适用于设计工况和非设计工况性能预测卡拉奇和考克斯关系[5]计算透平级或级组的轮周损失, (即文中的第一组损失), 将[5]的所有曲线进行曲面拟合, 然后得出速度损失系数  $\varphi_0 \psi$ , 此时内损失如下计算:

(i) 静叶漏汽损失系数:

$$\xi_s = \frac{0.8\pi D_G \times D}{F_1 Z_1} \times \left( \frac{D_{P2}}{D_{P2} - L_2} \right) \varphi^2 \cos^2 \alpha_1$$

其中,  $D$ —对冲动式结构,  $D = D_{G1}$

对反动式结构,  $D = D_{P1} - L_1$

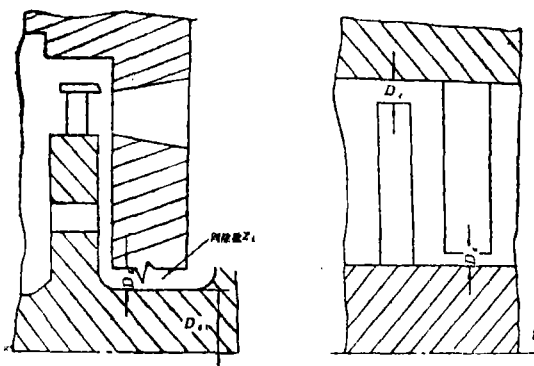


图1 蒸汽透平及其结构

a. 冲动式 b. 反动式

(ii) 动叶顶部漏汽损失系数同前;

(iii) 摩擦鼓风损失计算与第一类相同 (反动式不计)。

热力计算中所用的级的速度三角形及级的 I—S 图见图2和图3。

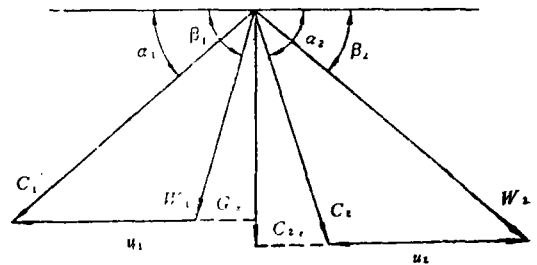


图2 任意透平级速度三角形

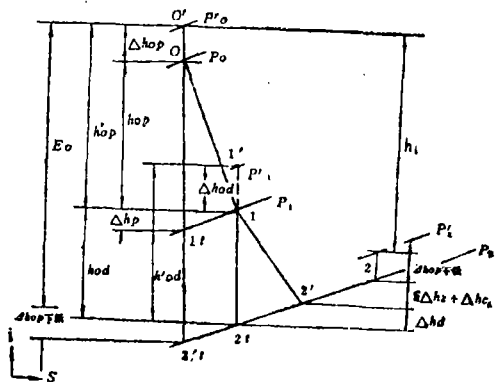


图3 级的 I—S 图

图4表示任意通道形式的通流部分

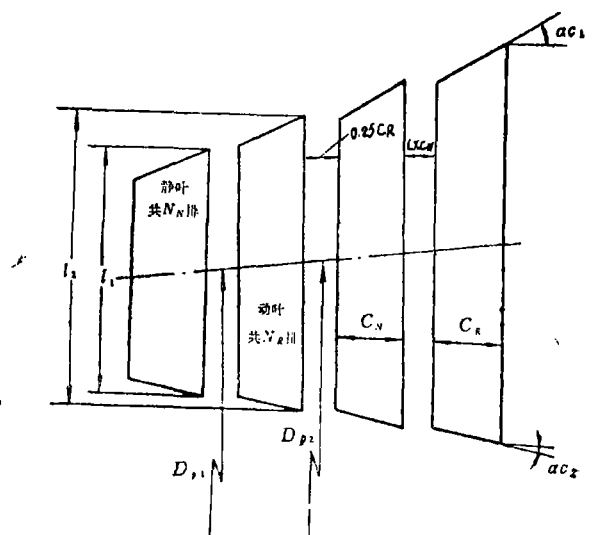


图4 透平通流部分几何尺寸

(1) 级组设计工况时内损失  $(1-\eta_{iD})$  求值。

计算时, 级组进口滞止压力  $(P_{OD})$ 、进口温度  $(T_{OD})$  或干度  $(X_{OD})$ 、级组蒸汽流量  $(G_D)$ 、级组背压  $(P_{BD})$ 、转速  $(N_D)$  是预定参数。分析开始时, 假定最优变量的数值已知 (任取一初值), 由于设计变量一旦由搜索得到, 各级速度三角形及级组焓熵图上的参数也就确定, 因而在设计工况下计算得的级组背压  $P'_{BD}$  与给定的值  $P_{BD}$  可能不一致, 这将作为优化设计的一等式约束来处理。

计算一个  $K_{iD}$  级的透平级组设计工况内效率  $\eta_{iD}$  的程序块为 *DESTA*。除热力初始参数外, 本程序块还需输入径向、轴向间隙、

(对冲动式结构) 隔板直径、齿封间隙数、中间级本级被下级的余速利用系数等结构和热力数据。程序块的输出为级的进出口面积、直径、叶高、速度三角形各值, 焓熵图上各点的压力、焓、温度、比容、级的轮周和内效率等结构和热力参数, 级组总参数如效率、理想焓降也给出。*DESTA* 程序块还完成各约束条件和级组重量的计算。

(2) 级组非设计工况时内损失  $(1-\eta_{iD})$  求值。

一般给定非设计工况下级组的进口参数  $(P_{OV}, i_{OV})$ 、转速  $(N_V)$  以及出口背压  $(P_{B1})$ , 另外, 通流部分尺寸由设计计算给出。

一般按以下两种方法进行计算:

a. 逆算法: 先假定流量  $G_V$  和级组出口焓  $i_{2BV}$ , 通过计算得到级组进口参数  $(P'_0, i'_0)$  并由费留盖尔公式修改流量, 从未级重算  $P'_0 = P_{OV}$ ; 修改  $L'_{2BV}$  从未级重算使  $i'_0 = i_{OV}$  [6]。本法可避开通流部分超音速级背压待定的迭代困难, 但较费时 (三级透平计算一次需 2 分半钟, 八级透平级组在 *Discovery 1600* 机上需运行 12 分钟)。级数很多时, 根本不宜用于优化计算 (因三级透平级组优化设计需计算目标函数一万多次)。

逆算法采用程序块 *VARST1*, 其迭代过程包括: 反动度迭代、余速损失迭代, 内损失总和迭代、动叶进口动能迭代、本级出口动能与下级进口动能迭代。另外, 若需要还可进行级组进口动压力、焓降迭代。本程序块的输出量为非设计工况下级的速度三角形各值、级的焓熵图上各点值以及级组总热力性能。

6. 顺算法: 先假定流量  $G_V$ , 通过逐级迭代得到出口压力  $P'_{bV}$ , 由费留盖尔公式修改流量重算使  $P'_{bV} = P_{B1}$  [8]。此法较省时 (三级透平约需 8 秒钟, 八级透平只需 17 秒), 但无法避免通流部分超音速背压迭代问题, 只适用于亚音速流。顺算法所用程序块为 *VARST2*, 本程序块只有静叶出口绝对速度  $C_1$  和动叶出口  $W_2$  的迭代。另外, 若需要进行压力、流量迭代。其输出量与逆算程序块相间。

优化计算时, 为加快运算速度, 宜先用顺算法, 若某一方案马赫数超限, 再转而调用逆算法进行。

(3) 级组总重量  $(W_T)$  求值

级组总重量为静叶、动叶和外壳重量之总和。假设三种材料比重相同, 各叶片按直叶片计算, 叶型面积按某型舰喷嘴和动叶叶型计算, 有  $A_N = 0.311451 C_N^2$ ,  $A_R = 0.211778 C_R^2$ , 中弧线长  $B_R = 1.1 C_R$ 。汽缸外套取平均厚度为 75 毫米, 其总长度计为静动叶弦长、级间轴向间隙与静动叶间轴向间隙之和。其中, 级间间隙为  $1.25 C_R$ , 动静叶间的间隙取为对应最佳效率的间隙  $L \times C_N$  (见图 4), 式中  $L$  由下式计算 [10]:

$$L = \frac{L_1}{C_N} \left[ (1-R) \frac{\sin^2 \alpha_1}{\sin^2 \beta_1} + R \right] \times \left( \frac{\pi C_R D_{P1}}{N_N \sin \alpha_1} \right)^{0.5} \times \frac{B_R^2 \sin \beta_2 \cdot N_R}{\pi C_R D_{P2}} \times \frac{\sin^{0.8}(\Delta \alpha / 2)}{\Delta \alpha^{2.8}} \times \left( 1 + \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_0} \right)^{-2}$$

叶片的重量计算根据透平结构特点加以区别 (见图 1)

对反动式: 每级对应的叶轮总宽度为本级进口到下级进口边;

对冲动式, 由于隔板间隙以及平衡孔等影响, 略去级间间隙长度。

### 三、设计约束及其求值

#### (1) 设计约束

在多级透平设计中, 从气动力学, 机械强度以及所取计算模型的适应性考虑, 对每级透平有下述要求:

①圆周速度限制在最大值范围内 (本文取为 400 米/秒);

②弦长/直径比 (展弦比) 在一定的限制范围内;

③静、动叶出气角在一定范围内;

④轴流速度在最大值范围内;

⑤径高比在符合一元流假定的范围内;

⑥喷嘴压比小于临界压比;

⑦动叶出口相对气流应为亚音速;

⑧透平通道内, 外扩张角在一定范围内;

⑨平均直径处以及根部反动度在一定限制值内;

⑩动叶弯应力和拉应力应在叶片材料强度允许的范围;

对整个级组, 由于设计计算方法的特点有

⑪级组出口压力与给定背压相等。

#### (2) 设计约束求值

所有的约束均在进行设计计算的过程中确定。

为了确定叶片根部的应力, 假定叶片为等截面, 由 [11] 的简化方法求解 [图 5]

蒸汽作用产生的力为:

$$F_u = G(C_{1u} - C_{2u}) / g N_R$$

$$F_z = \frac{G}{g \cdot N_R} (C_{1z} - C_{2z}) +$$

$$+ (P_1 - P_2) L_2 \frac{\pi D P_2}{N_R}$$

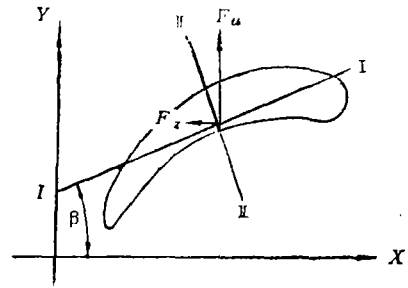


图 5 作用在叶片上的力

等截面叶片的根部最大弯应力为

$$\sigma_{\text{b}} = \frac{F_u \cdot L_2}{2W} \approx \frac{F_u \cdot L_2}{2W_{m_1}}$$

其中,  $W_{m_1}$  根据某型机高压级组叶型近似计算, 有  $W_{m_1} = 7.89309 C_R^3 \times 10^{-6}$  厘米<sup>3</sup>

等截面叶片离心力产生的根部拉应力为

$$\sigma_1 = \frac{\gamma^2}{2g} (R_{\text{顶}}^2 - R_{\text{根}}^2)$$

当  $\frac{D P_2}{L_2} < 7.5$  时, 采用变截面叶型, 取

变截面系数 1/3,

考虑到叶片振动应力的作用, 限制弯曲应力小于 350 公斤力/厘米<sup>2</sup>, 另外, 限定总拉应力小于  $\sigma_{0.2}/n$ , 其中安全系数  $n$  取为 2。

### 四、优化问题的叙述

现在多级透平设计问题表示为

$$\text{Min} \begin{cases} 1 - \eta_{1D} \\ 1 - \eta_{1r} \\ W_T \end{cases}$$

Subject to

对每级:

$$g_1 = 400 - u_1 \geq 0$$

$$\begin{aligned}
g_2 &= 400 - u_2 \geq 0 \\
g_3 &= C_N / D_{P1} - 0.01 \geq 0 \\
g_4 &= 0.10 - C_N / D_{P1} \geq 0 \\
g_5 &= C_R / C_{P2} - 0.01 \geq 0 \\
g_6 &= 0.1 - C_R / D_{P2} \geq 0 \\
g_7 &= \alpha_1 - 12.0 \geq 0 \\
g_8 &= 25^\circ - \alpha_1 \geq 0 \\
g_9 &= \alpha_2 - 5^\circ \geq 0 \\
g_{10} &= 180^\circ - \alpha_2 \geq 0 \\
g_{11} &= 400 - C_{1z} \geq 0 \\
g_{12} &= 400 - C_{2z} \geq 0 \\
g_{13} &= L_2 / D_{P2} - 0.01 \geq 0 \\
g_{14} &= 0.35 - L_2 / D_{P2} \geq 0 \\
g_{15} &= 0.35 - L_1 / D_{P1} \geq 0 \\
g_{16} &= \alpha_{c1} + 20^\circ \geq 0 \\
g_{17} &= 20^\circ - \alpha_{c1} \geq 0
\end{aligned}$$

若为等外径限制, 则  $g_{16}$ 、 $g_{17}$  变为  $\alpha_{c1}$

= 0

$$\begin{aligned}
g_{18} &= \alpha_{c2} + 20^\circ \geq 0 \\
g_{19} &= 20^\circ - \alpha_{c2} \geq 0
\end{aligned}$$

若为等内径限制, 则  $g_{18}$ 、 $g_{19}$  变为  $\alpha_{c2}$

= 0

若为等中径限制, 则为  $\alpha_{c2} = \alpha_{c1}$

$$\begin{aligned}
g_{20} &= 0.9 - M_{W1} \geq 0 \\
g_{21} &= 0.9 - M_{W2} \geq 0 \\
g_{22} &= P_1 - P_{cR} \geq 0 \\
g_{23} &= 0.9 - R \geq 0 \\
g_{24} &= R + 0.01 \geq 0 \\
g_{25} &= Rg + 0.02 \geq 0 \\
g_{26} &= [\sigma]_{0.2} - [\sigma_{总}]_{m,z} \geq 0 \\
g_{27} &= 350 - \sigma_{t,z} \geq 0
\end{aligned}$$

对级组

$$g_{28} = P_2(\text{末级}) - P_{BD}$$

显然, 这为一多目标多变量有约束非线性规划决策问题, 应利用多目标规划决策 (MODM) 方法来进行求解。

## 五、求解方法

### (1) 多目标规划决策

本文上节表述的问题可表述为标准形式

[2]:

$$\text{Min}_{x \in R} \bar{F}(X)$$

$$R = \{X | G(X) \geq 0\}$$

其中  $\bar{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$

$$\bar{F}(X) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T$$

$$G(x) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_p(x)]^T$$

$G(x) \geq 0$  表示,  $g_i(x) \geq 0, i=1, \dots, p$

此类问题得到选好解的方法很多[2]。

本文提出的目标函数不适用于求梯度, 故宜采用化多目标为单目标法求解。

(2) 化多目标为单目标的方法

本文分别采用理想点法 [12] 和加权和法, 由同一程序进行求解。

对  $m$  个分量分别求极小化得  $m$  个最优值,

$$f_i^* = \min_{x \in R} f_i(x), i=1, 2, \dots, m$$

由此点  $F(x)$  的理想点  $F^*(f_1^*, f_2^*, \dots, f_m^*)^T$ , 求解,  $\min_{x \in R} \|F(x) - F^*\|$  就可得接近于  $f^*$  的解, 这就是理想点法。本文取范数为  $\|\cdot\|_2$ 。

对  $m$  个分量加权后, 求解

$$\min_{x \in R} \sum_{i=1}^m W_i f_i(x), \text{ 即为加权和法。}$$

权系数的确定往往因人而异, 它依赖于决策者的主观认识, 可以根据过去积累的经验通过回归计算来确定, 或使用专家调查法, 对专家们的赋权值进行统计平均来加以估计。由于本文所提的是一个缺乏经验的多目标决策问题, 上述方法很难确定, 因此采用文献[13]所述的二项系数加权和法进行计算。

使用二项系数加权和法需对各目标进行排序, 根据船用蒸汽透平的特点, 本文三个目标按其重要性依次的排序为  $(1 - \eta_{iv}) >$

$$(1 - \eta_{id}) > W_T / 1000$$

(3) 单目标最优化

a) 化约束问题为无约束问题

多目标化为单目标问题后, 问题可表示为标准形式:

$$\begin{aligned} \min_{x \in R} f(x) \\ q_i(x) \geq 0, i=1, 2, \dots, P \\ h_j(x) = 0, j=1, 2, \dots, m-P \end{aligned}$$

本文用罚函数法求解此问题。罚函数法又有外点法和内点法之分, 由于存在等式约束, 因此, 利用外点法求解。

建立罚函数

$$p(x) = \sum_{i=1}^P \left( \frac{|q_i(x)| - q_i(x)}{2} \right)^2 + \sum_{j=1}^{m-P} h_j^2(x)$$

求  $\min(f(x) + M p(x))$

b) 响应因子  $M$  对第一个响应面取为  $M_1 = 1.0$ , 以后按如下关系增长:

$$m_{i+1} = \beta M_i \quad \beta = 1.5$$

c) 在一个响应面内的搜索

一个响应面的搜索法有很多, 由于本文的目标函数复杂, 因而采用不求导数的规划法, 如网络法和 *Powell* 法。因为网络法的计算量随变量数成指数关系增加, 故当量较多时, 计算耗时相当多, 因此本文采用 *Powell* 法[14] 求解。一维搜索子程序和 *Powell* 法求解子程序参照了文献[15], 并略作修改, 应用外点法求解的子程序为 *EXTRA*。另外, 各目标的加权系数可按照上述的二项系数加权和法自动产生, 亦可由机外输入, 以用于分析各单目标优化, 得到理想点值, 并进而采用理想点法求解。

## 六、单级透平优化问题数值

### 计算实例 (给定速度系数)

前述计算程序中需入的控制变量及其组合意义见表 1。

表 1 控制变量及其意义

<i>RCOT</i>	结构形式控制变量, 0.0, 冲动式, 0.5, 反动式
<i>FCOT</i>	速度系数控制变量, 0.0, 机外给定, 0.5, 按简化公式计算, 1.0, 按 <i>Craig</i> 曲面计算,
<i>DCOT</i>	通道形式控制变量, -2.0, 不控制, -1.0, 等内径, 0.0, 等中径, 1.0, 等外径

在上述不同控制变量下, 分别对全工况经济性、低工况经济性、重量三种单目标及同时考虑经济性与重量的多目标优化, 因此, 在进行决策分析时, 可组成  $4 \times 2 \times 3$

$\times 4$  种计算方案 (见表 2)。

本节介绍将该模型用于单级透平决策分析的结果。

表 2 决策分析用的各计算方案组

方 案	I <i>DCOT</i>	II <i>DCOT</i>	III <i>DCOT</i>	IV <i>DCOT</i>
	= -2.0	= -1.0	= 0.0	= 1.0
$1 - \eta_{iD}$	1	1	1	1
$1 - \eta_{iV}$	2	2	2	2
$W_F$	3	3	3	3
多目标	4	4	4	4

## 1. 原始数据

a. 原始计算方案热力和结构参数:

结构形式: 冲动式  $RCOT = 0.0$

设计变量:  $n = 8$

设计工况流量  $G_0 = 118$ 吨/小时

设计初压  $P_{OD} = 18.8$ 大气压

设计背压  $P_{BD} = 13.47$ 大气压

设计初温  $T_{OD} = 346$ ℃

设计转速  $N_D = 6870$ 转/分

设计工况喷嘴速度系数  $\varphi_D = 0.95$

设计工况动叶速度系数  $\psi_D = 0.925$

本级出口余速利用系数  $\mu = 1.0$

动叶顶部间隙  $D_d = 0.4$ 毫米

喷嘴根部间隙  $D_g = 0.4$ 毫米

隔板直径  $D_{s1} = 358.5$ 毫米

隔板齿封数  $z_1 = 4$

动叶齿封数  $z_2 = 1$

喷嘴个数  $n_N = 40$

动叶个数  $n_R = 180$

材料比重  $\rho = 7.75$ 吨/米<sup>3</sup>

b. 第一巡航速度下的热力参数

流量  $G_V = 26.2$ 吨/小时

初压  $P_{OV} = 3.56$ 大气压

初焓  $I_{OV} = 633.3$ 大卡/公斤

转速  $N_V = 4122$ 转/分

喷嘴速度系数  $\varphi_V = 0.95$

动叶速度系数  $\psi_V = 0.919$

## 2. 结果表述

表2所列的I、III组方案的设计变量最优值,各个目标值及该级原始方案性能见表3。第I方案最优点处和原始方案各中间参数的量值列于表4。

## 3. 结果分析

以方案I为例,可以得出以下结论:

(1) 与原始值相比,以设计工况内效率为目标的优化设计,其效率提高了1.35%,在最优点处流道扩张角和动叶根部反动度的约束成为有效约束。可以看到,优化点离原方案点变化不太大。在DISCONV ERY

1600机上运行,共调用Powell算法33次,累计计算目标函数3456次,占CPU时间为45分钟。

(2) 为了验证找到的最优点对应于局部最优还是整个设计空间的最优值,用几个不同的初始值进行了计算(见表5),结果表明,不同起始点所对应的最优点基本一致,因此可以肯定得到的最优点为绝对极值。

(3) 本实例为某级组的中间级,出口余速动能被下级利用,为观察余速利用与否对最优结果的影响,在初始参数不变条件下按 $\mu = 0$ 进行了优化计算(见表6),结果表明,余速损失导致 $\alpha_2$ 稍有减少,但出汽角仍偏离轴向较远。

(4) 对大多数方案,流道扩张角和根部反动度为有效约束。为此,取这两个中间变量的不同极值进行了计算(见表7)。

(5) 由表3中的I·1和I·2方案可见,由于此次计算中速度系数保持不变(尤其未考虑角度,即汽流冲角对 $\varphi$ 、 $\psi$ 的影响)因而两优化结果极其接近。

(6) 由表3 I·1和I·4方案比较可见,多目标优化比原始方案经济性好、重量轻,而与各单目标优化方案相比,则是一折中方案。

(7) 本设计为有约束优化问题。如果仅考虑背压平衡( $P_B = P_{BD}$ )约束,而不考虑其它的性能和结构约束时,所得到的圆周速度(达640米/秒)、应力、根部反动度等值均超出本计算模型的极限值,这足以证明有约束优化计算的必要性。

(8) 优化变量的初始值的选取对优化计算的收敛速度有很大影响。根据计算经验,建议首先以原始方案值作为初始值,对 $F =$ 惩罚项求极值,再将求得的变量值作为初始值输入进行各目标的优化计算。计算表明,该方法比直接用原始方案作初始值求优化可节省机时近一半。

(9) 要注意优化变量初始值之间的协调

性,以防止在求解速度三角形以及计算工质性质时失去物理真实性。

(10)要注意一维搜索的步长和优化变量之间的协调性。对公式化优化计算来讲,一般不存在此问题。但在以数值计算方法求解目标值时,此问题较突出。主要问题是一维搜索使变量增值过大或过小,在计算速度三角形和工质性质时:失去物理真实性。

(11)作者另对反动式结构所作的计算表明,与对冲动式结构计算所得变化规律基本上趋于一致。

(12)各表中给出的多目标规划决策结果是用二项系数线性的加权和法求解得到的。计算表明,采用理想点法(由同一程序块,仅控制变量有改变)进行决策分析同样有效。

(13)本实例仅在给定 $\varphi, \psi$ 下作了讨论。当按简化公式计算或按卡拉奇模型计算时,

与上述情况有些不同。这主要是 $\varphi, \psi$ 和叶片角度及弦长等参数联系起来,因而使各目标对设计变量的敏感程度发生了变化之故。此处不作过多介绍。

## 七、结 束 语

本文将舰用蒸汽透平级或级组设计问题表述为一个三目标多变量有约束非线性规划决策问题,对 $K_{s,r}$ 级的透平级组来讲,进一步的工作是在满足 $(27 \times K_{s,r} + 1)$ 个约束的前提下,在 $(8 \times K_{s,r})$ 维空间中搜索得到最优解。

本文只介绍了作者所提出的数学模型的简单应用,有关透平级组的多目标决策分析,最优焓降分配,焓降一定时综合考虑选定最优级数等问题,将在续篇中加以讨论。

表5 优化计算的收敛性证明 (I·1案)

起点 \ 项目		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$U_1$	$U_2$	$C_{1z}$	$C_{2z}$	$\eta_{iD}$	$\eta_{iV}$	$W_T$
第一点	初始值	12.76	140.90	247.80	248.00	89.45	78.83			
	最优值	12.85	137.34	251.76	248.38	87.82	77.57	0.8705	0.8248	294.7
第二点	初始值	12.87	137.24	247.72	249.80	87.89	75.35			
	最优值	12.86	137.13	252.88	249.80	87.20	75.00	0.8704	0.8260	295.1

注:  $C_N, C_R$ 相同,分别为58.00, 20.50

表6 余速利用与否对最优结果的影响 (I·1方案)

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$U_1$	$U_2$	$C_{1z}$	$C_{2z}$	$\eta_{iD}$	$\eta_{iV}$	$W_T$
$\mu = 1$	12.85	136.96	251.80	248.16	87.71	78.51	0.8710	0.8250	294.7
$\mu = 0$	12.81	135.08	251.77	248.34	86.46	76.65	0.8146	0.7971	298.4

注:  $C_N, C_R$ 相同,均为58.00, 20.50



表3 I组和III组各方案的最优设计变量、目标值和原始方案值

变量及目标值	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$u_1$ (米/秒)	$u_2$ (米/秒)	$C_{12}$ (米/秒)	$C_{22}$ (米/秒)	$C_N$ (mm)	$C_R$ (mm)	$\eta_{1D}$	$\eta_{1V}$	$W_T$ (kg)
原始方案	12.76	140.90	247.8	248.0	89.45	78.83	58.00	20.50	0.8575	0.8140	271.90
I、1方案	12.85	136.96	251.8	248.16	87.71	78.51	58.00	20.50	0.8710	0.8250	294.70
I、2方案	12.84	137.08	251.6	248.13	87.67	77.93	66.00	20.50	0.8661	0.8248	324.5
I、3方案	12.81	140.35	247.31	247.06	89.38	77.92	6.88	15.63	0.8598	0.8156	88.4
I、4方案	12.88	136.92	250.0	248.4	87.56	73.33	6.95	16.03	0.8627	0.8234	91.30
III、1方案	13.06	137.01	248.0	248.0	89.29	73.23	58.00	20.50	0.8617	0.8198	288.9
III、2方案	13.05	137.21	248.0	248.0	88.56	67.41	58.00	20.50	0.8596	0.8225	288.7
III、4方案	13.02	136.94	248.0	248.0	89.28	76.95	6.91	15.76	0.8559	0.8182	89.6

无  
通  
道  
限  
制

等  
中  
径

表4 I组方案在最优处中间参数的量值

工况	设计 工 况										第1巡航速工况	
	项目	$M_{12}$	最大 扩张角	平均直径处 $R_D$	根部 $R_G$	$\sigma_{总}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$D_{P1}$ (mm)	$D_{P2}$ (mm)	$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	平径直径 处 $R_T$	动叶冲角
原始方案	0.3186	6.7°	0.0228	-0.0766	1206	688.9	689.4	33.1	37.4	-0.1254	+6.370	1.32342
I.1方案	0.3403	19.99°	0.0719	-0.0184	1211	700.0	689.9	32.7	37.5	-0.0264	+9.89	1.32836
I.2方案	0.3402	19.67°	0.0713	-0.0207	1220	699.4	689.8	32.7	37.8	-0.0633	+9.84	1.32836
I.3方案	0.3212	10.06°	0.0282	-0.0703	1413	687.5	686.8	33.1	37.9	-0.1188	+9.67	1.32342
I.4方案	0.3463	19.99°	0.0791	-0.0156	1481	695.0	690.0	32.9	40.1	-0.0538	+9.80	1.34340

表 7 扩张角、根部反动度极限值变化对计算结果的影响 (I·1 方案)

	极限值	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$U_1$	$U_2$	$C_{1z}$	$C_{2z}$	$C_N$	$C_R$	最大 扩张角	$R_D$	$R_s$	$D_{P1}$	$D_{P2}$	$L_1$	$L_2$
扩张角	25°	12.88	136.98	252.73	248.15	87.15	75.69	58.00	20.50	25.00°	0.0794	-0.0116	702.6	689.8	32.5	38.9
	20°*	12.85	136.96	251.8	248.16	87.71	78.51	58.00	20.50	19.99°	0.0719	-0.0184	700.0	689.9	32.7	37.5
	15°	12.84	136.82	250.27	248.22	87.64	77.60	58.00	20.50	14.62°	0.0717	-0.0107	695.7	690.0	32.9	37.9
根部反动度	0.00	12.89	136.57	253.23	250.24	96.97	74.49	58.00	20.50	19.99°	0.093	0.0035	704.0	695.7	32.6	39.2
	-0.02*	12.85	136.96	251.80	248.16	87.71	78.51	58.00	20.50	19.99°	0.0719	-0.0184	700.0	689.9	32.7	37.5
Rg	-0.05	12.86	138.93	251.63	248.19	88.63	77.63	58.00	20.50	20.00°	0.0545	-0.038	699.5	690.0	32.5	37.9

注：“\*”为标准极限值，见文献[1]

## 参 考 文 献

- [1] 张俊迈, 陈林根, 《轴流透平机械通流部分优化设计译文集》, 海军工程学院, 1985年8月
- [2] 陈林根, 《多目标决策理论与舰用汽轮机最优造型、设计应用导论》, 海军工程学院, 1985年4月。
- [3] 陈林根, 《透平机械设计的新方向之一, 通流部分最优化设计》海军工程学院, 1985年8月。
- [4] 陈林根, 《汽轮机热计算用水蒸汽性质FORTRAN语言通用计算程序库》, 海军工程学院研究生学报, 1985年第1期
- [5] H. R. M. Cralg, H. I. A. Cox, "performance Estimation of Axial Flow Turbines", Proceedings Instn Mech Eng, 1970~1971.
- [6] 西安热工研究所汽机室, 西安交大计算数学教研室, 涡轮机教研室《电子数字计算机在汽轮机热力计算中的应用》。
- [7] R. M. Jenkins "A Comprehensive Method For preliminary Design Optimization of Axial Gas Turbine stages", AIAA-82-1264, AIAA/SAE/ASME, 18 th Joint propulsion Conference, June, 1982.

- [8] R. P. Kroon, H. J. Tobiasz, "off-Design performance of Multistage Turbines", ASME Paper No70-PWR-2.
- [9] 某型机热力设计计算说明书,
- [10] A. C. Ласкин "Метод определения оптимального осевого зазора в турбинной ступени".
- [11] 机械工程手册, 电机工程手册编辑委员会, 《机械工程手册, 第72篇, 汽轮机(试用本)》, 机械工业出版社, 1978.
- [12] М. Б. Салуквадзе, "Задачи векторной оптимизации в теории управления". Мелнкерсба. 1975.
- [13] 程明煦, 《处理多目标决策问题的二项系数加权法和法》, 系统工程理论与应用, 1983年第4期。
- [14] M. J. D. powell "A method For Minimizing a Sum of squares of Non-Linear Functions without Calculating Derivatives". The Computer Journal. Vol7, No4, Jan, 1965年.
- [15] 刘德贵, 费景高, 于泳江, 李广元, 《FORTRAN算法汇编第2册》, 国防工业出版社, 1982年。
- [16] 某型舰用机组热力设计计算说明书。
- [17] 徐宜贵, 《透平级的最优化设计》, 海军工程学院, 1984年12月

(上接37页)

叶片的通过频率激发和部分弧的谐波已大为减少。在转子动力学方面, 通过转子的动力学分析和最优化轴承设计使对不平衡的敏感性有所降低。为了把悬臂情况降到最低限度, 轴承的位置应适当选择。复合高转速区段应作为一个系统在高速和高温下进行平衡。关于高频宽频带噪音源, 除前述在蒸汽流路设计和制造上作改进外, 还使用了带有低噪声调整元件的磨擦节流阀。减少舷外结构噪音虽然从总体上来说和推进装置的隔音防振技术的发展和机架系统的布置有关, 但减少汽轮机产生的噪音源仍是目前设计方法的直接目标。

## 未 来 前 景

舰用推进蒸汽轮机是一项成熟的技术,

高度的可靠性和比较长的使用寿命已反映了这项产品的成熟性。但是蒸汽轮机的技术仍有生机勃勃可供发展的领域。未来预计还可在提高效率, 改进制造技术和使用新材料上取得进展。降低二次流损失就是一个例子。这方面的进步也将使汽轮机的功率密度得以提高并降低其结构噪音。采用先进的汽轮机设计思想, 循环和隔音系统能导致更大的效益。

«郑定泰摘自“Marine Engineering/Log, Oct 1985”余永清校»

# JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

No.5 1986

## CONTENTS

### GAS TURBINES

1. Dual working fluid parallel-compound cycle engine (Chen's cycle) (II)  
.....*Wen Xueyou* (1)  
Abstract  
Dual working fluid parallel-compound cycle engine is a relatively new type of thermal engine which is characterized by a high efficiency and enhanced specific power. This paper gives a general review of this cycle, covering such aspects as cycle principle, features and analysis, comparison between cycles, and their application examples.
2. A test rig for U.S. naval (land-based) gas turbines  
..... *Wu Yanjie* (9)
3. Multifuel gas turbine propulsion for naval ships; gas turbine cycles implementing a rotating gasifier  
..... (15)
4. Nomogram estimates gas turbine exit temperature  
..... (21)

### STEAM TURBINES

5. Multiple objective programming decision and the design of naval steam turbine<sup>e</sup> flow path  
..... *Chen Lingeng, Zhang Maijun* (22)

#### Abstract

In this paper, the design of naval steam turbine stage and/or stages has for the first time been represented as a three objective multi-variable non-linear programming decision problem with certain constraints. A description is given of the functional values of various objectives and the method of evaluating aerodynamic and mechanical constraints. Cascade loss models have been discussed along with the selection of their flow path thermodynamic calculation method and an optimal solution. In conclusion, an analysis of the numerical calculation of a single stage steam turbine optimization problem (with a given speed factor) has demonstrated the correctness of the model

proposed by the author and the convergence of the optimal calculation method.

6. Developing steam turbine propulsion technology ..... (33)

#### UTILIZATION OF SOLAR AND WIND ENERGY

7. Solar energy wind turbine generator .....*Xin Li,Wei Limin,* (38)

##### Abstract

This paper describes an electric generator based on the combination of a vertical shaft fan and solar energy hot air turbine. It discusses the possibility of solving electricity supply problems in wind and solar energy deficient regions by use of new energy sources and studies the low wind speed starting problem of wind generators. A brief account is also given of the over-speed control and night time and cloudy day operation. In addition, some formulas derived by the author as well as a few explanatory drawings and tables are provided.

8. wind power schemes..... (43)

#### MEASURING AND TESTING TECHNIQUES

9. Some problems concerning the testing of oil-well pumps ..... *Ma Shaolu* (47)

##### Abstract

Based on the idea of oil-well pump energy conversion and balance, this paper focuses on the analysis and discussion of the power factor problem of oil-well pumps concerning which there exists at present a relatively great divergence of opinion. The author has presented a method for testing and determining oil-well pump power factors as well as some measured results.