

船用蒸汽透平级组多目标 规划决策(MODM)分析*

陈林根 张俊迈

(海军工程学院)

[提要] 本文在以前将多目标规划决策方法用于透平级通流部分的优化设计中获得成功的基础上提出了一个适用于透平级组通流部分设计的简化模型, 该模型基本符合实际情况。用此模型计算了一个三级级组的实例, 讨论了焓降分配对性能的影响, 并分析了级数对效率的影响。优化的效果是显著的。

主题词 汽轮机 设计方法 通流部分设计

一、引言

文献[1]中, 作者从系统的观点出发, 提出了将多目标决策(MDOM)方法应用于船用蒸汽透平的最优选型和通流部分的最优设计, 指出其中的多目标规划决策(MODM)方法适用于通流部分的最优设计; 建议在通流部分优化设计的基础上用多属性决策(MADM)方法解决最优选型问题。文献[2]中, 将蒸汽透平级和/或级组的通流部分设计表示为设计工况下和某一非设计工况下的气动损失及该级和/或级组所在段落的重量之和极小化的多目标有约束多变量非线性规划决策问题, 叙述了各目标函数值和气动约束及机械约束的求值; 讨论了叶栅损失模型及通流部分热力计算(包括设计工况和非设计工况计算)方法选择问题; 提出了决策分析用通流部分复杂模型, 全部计算由水蒸汽性质计算程序块, 通流部分热力设计计算与重量及约束条件求值程序块, 逆算法计算非设计工况程序块及项算法计算非设计工况程序块和多目标决策分析程序块连接运行完成。文献[2]给出了以此复杂模型计算蒸汽透平级的实例。本文将在以上工作的基础上讨论此复杂模型的简化及其在多级透平级组中的应用。

二、模型的简化

文献[2]所提出的模型为:

对各级取变量

$$\vec{X}_i = [\alpha_1, \alpha_2, u_1, u_2, C_{1z}, C_{2z}, C_N, C_R]^T i, \\ i = 1, 2, \dots, K_i$$

* 此文在中国工程热物理学会热机气动热力学学术分会1986年年会(峨眉)上宣读, 论文编号86-2-054。

本文收到日期: 1986年10月20日

整体决策变量为

$$\vec{X} = [\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_{K_{i,t}}]^t, K_{i,t} \text{—级组总级数}$$

求整个级组的

$$\text{Min} \begin{cases} 1 - \eta_{i,D}(\vec{X}) \\ 1 - \eta_{i,V}(\vec{X}) \\ WT(\vec{X}) \end{cases}$$

且满足气动、机械等十一类约束条件。

由计算分析[2]我们看到:

- 1) 在多变量多目标决策分析时, 计算时间按级数的指数关系增长;
- 2) 由于实例是结合某现有机组的级和级组的改型设计, 因此速度系数给定或只是简单地按公式计算, 由此引起:

a. 效率目标与弦长 C_N 、 C_R 无关;

b. 按非设计工况效率与设计工况效率分别作优化时所得结果差别不大;

- 3) 由于弦长作为变量, 重量优化搜索中变量与目标之间的关系出现了相当大的差异, 导致某些存在强有效约束的变量(如圆周速度, 即直径)不能有效地搜索, 且弦长变化时还不能有效地计及特殊工况(如倒车)的机械应力的约束。

为了进行透平级组的快速决策分析, 在基本保持物理真实性的前提下, 我们将上述复杂模型作一些简化。简化后的模型为:

对各级取变量

$$\vec{X}_i = [\alpha_1, \alpha_2, u, C_z]^t, i = 1, 2, \dots, K_{i,t}$$

整体决策变量为

$$\vec{X} = [\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_{K_{i,t}}]^t$$

求整个级组的

$$\text{Min} \begin{cases} 1 - \eta_{i,D}(\vec{X}) \\ WT(\vec{X}) \end{cases}$$

且满足以下十三类约束条件:

- 1) 圆周速度限制在最大值范围内;
- 2) 弦长/直径比在一定的范围内;
- 3) 静、动叶出气角在一定范围内;
- 4) 轴向汽流速度 C_z 在最大值范围内;
- 5) 径高比在符合一元流假定的范围内;
- 6) 喷嘴压比在小于临界压比范围内;
- 7) 动叶进出口相对汽流速度为亚音速;
- 8) 透平通道内、外扩张角在附面层不发生脱离的范围内;

- 9) 平均直径处及动叶根部反动度在叶根流动状态不发生恶化的限制范围内;
- 10) 动叶根部弯曲应力在不致使振动应力导致叶片破坏的限制范围内;
- 11) 动叶根部总拉应力在叶片机械强度允许的范围;

对整个级组, 由于设计计算方法的特点, 有:

- 12) 级组出口压力与给定值相符;

根据应用于不同实例的一系列特别要求, 有:

- 13) 通道形式符合规定的特殊条件 (如等中径、等内径、等外径等)。

简化后的级速度三角形及通流部分形状分别见图 1, 图 2。

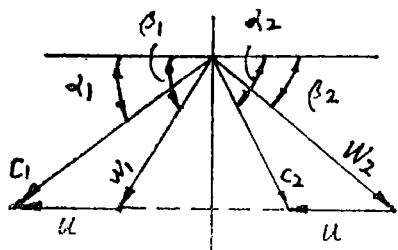


图 1 级速度三角形

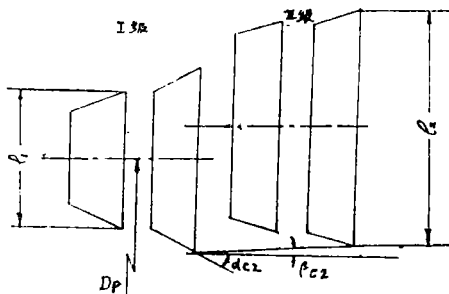


图 2 通流部分几何尺寸

本文仍采用理想点法和线性加权和法按二项系数法取加权系数, 将多目标化为单目标, 然后用 *SUMT* 外点法处理为无约束优化问题, 再用 *Sargent—Powell* 方法借助于抛物线拟合一维搜索得最优解。

模型简化以后, 决策分析中计算目标函数的次数明显地减少, 计算机时更是大量地节省了。在相同的条件下求设计工况效率单目标优化, 单级时计算函数的次数由 2 300 减少到 376 次, 两级时计算目标函数的次数由 3 200 次减少到 828 次。

三、三級透平級組决策分析实例

上述的简化模型实为一个二目标有约束 ($23 \times K_{s,i} + 1$ 个) 多变量 ($4 \times K_{s,i}$ 个) 非线性规划决策问题。本文应用此模型以某型机高压全速级组 (共三级, 均为冲动式) [3] 为例进行分析, 主要计算结果见表 1。

计算表明, 反动度、应力及各种不同目标求解时效率、重量等指标的变化规律与单级基本相同 [2]。以设计工况效率为目标时, 级组设计工况总效率提高比原始方案提高 1.4%, 非设计工况 (此处引用某机第 I 巡航速) 下的总效率比原方案提高 0.75%, 重量比原方案增加 1.9%。进行多目标决策分析的结果, 按最高性能值计算, 级组设计工况总效率比原始方案提高 1.31%, 重量比原始方案减少 2.4%, 非设计工况下的总效率比原始方案提高 0.82%, 且多目标决策分析所得设计工况效率居于原始数据和单目标优化所得方案中间。

从结果可以看出, 级组效率提高的主要原因是末级效率的提高。末级焓降所占比例最大, 且优化后与原始方案相比效率增加最多的方案达 2.57%, 是各级中效率提高最多

的(前两级的最大增值分别为0.43%和0.42%)。求优以后,各级的焓降分配比例也有变化。三级的焓降比例为:原始方案,1.00/0.95/1.33;等中径 $f=1-\eta_{iDT}$ 单目标优化方案,1.00/0.93/1.30;等中径多目标分析方案,1.00/0.80/1.18;等内径多目标分析方案,1.00/0.87/1.27。可以看到,由于在一定程度上减少了效率较低的末级上的焓降,级组的设计工况效率有了提高。当然,考虑到非设计工况下的性能要求,末级的焓

表1 透平级组决策分析结果

方案	项目 目标	级数	α_1	α_2	u (米/秒)	C_z (米/秒)	E_0 (KJ/Kg)	η_{iDs}	η_{irs}	η_{iDT}	η_{iVT}	WT (kg)
原始方案		I	12.76	140.90	247.80	89.45	82.51	0.857 5	0.814 0			
		II	13.50	141.36	251.60	92.91	78.63	0.863 5	0.854 0	0.8592	0.8160	888.2
		III	14.06	130.46	256.00	113.45	109.35	0.789 0	0.789 2			
等中径	$f=1-\eta_{iDT}$	I	12.43	132.94	254.57	84.11	85.98	0.858 5	0.822 0			
		II	13.16	138.10	254.57	88.85	80.97	0.867 7	0.860 6	0.8732	0.8235	905.1
		III	14.12	108.16	254.57	100.98	111.94	0.814 4	0.798 6			
等中径	$f=\sum W_i f_i$	I	12.82	112.32	248.35	84.51	93.17	0.857 0	0.819 8			
		II	14.31	132.26	248.35	89.99	74.70	0.864 3	0.854 5	0.8711	0.8215	866.1
		III	14.27	105.51	248.35	101.24	109.77	0.813 9	0.796 2			
等内径	$f=\sum W_i f_i$	I	12.03	119.20	247.78	77.64	88.28	0.861 8	0.825 5			
		II	13.37	139.96	248.73	91.59	76.79	0.863 2	0.856 2	0.8723	0.8242	873.6
		III	14.08	106.54	252.63	101.09	112.48	0.814 7	0.799 6			

降也不能分配太小。本计算实例所取的全速级组实际上是一中间级组,其排出口并不是背压基本不变的冷凝器。在工况变化时其背压随流量成正比变化。因而各级焓降的分配变化,特别是级组末级焓降的减少并不会对非设计工况性能有太大的影响。在第 I 巡航速时,上述对应的各方案级间焓降比例分别为:1.00/0.90/1.09;1.00/0.89/1.08;1.00/0.78/0.95;1.00/0.80/1.02。可见在低工况级组末级的焓降比例有所下降,但不太剧烈。

从结果可知,末级效率提高的主要原因是存在余速损失的该级排汽汽流角度逼近轴向。

在获得最优方案时,流通扩张角及汽流角 α_1 成有效约束。

以计算目标函数次数对惩罚项关系表示的优化图线见图 3。计算分析中,计算目标函数次数最多的为等内径多目标分析方案,达 4 807 次才使惩罚项满足收敛要求,计算过

程占DISCOVERY—1600机CPU时间达150分钟。

优化计算表明，按简化的模型得到的结果，不仅得到了较好的效率、重量指标，而且所得到的通道形状也合理。本算例的三级透平级组原始方案及三个优化方案的速度三角形和通流部分尺寸见图4。

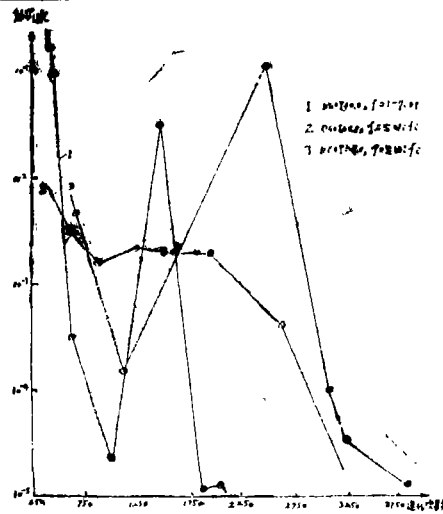
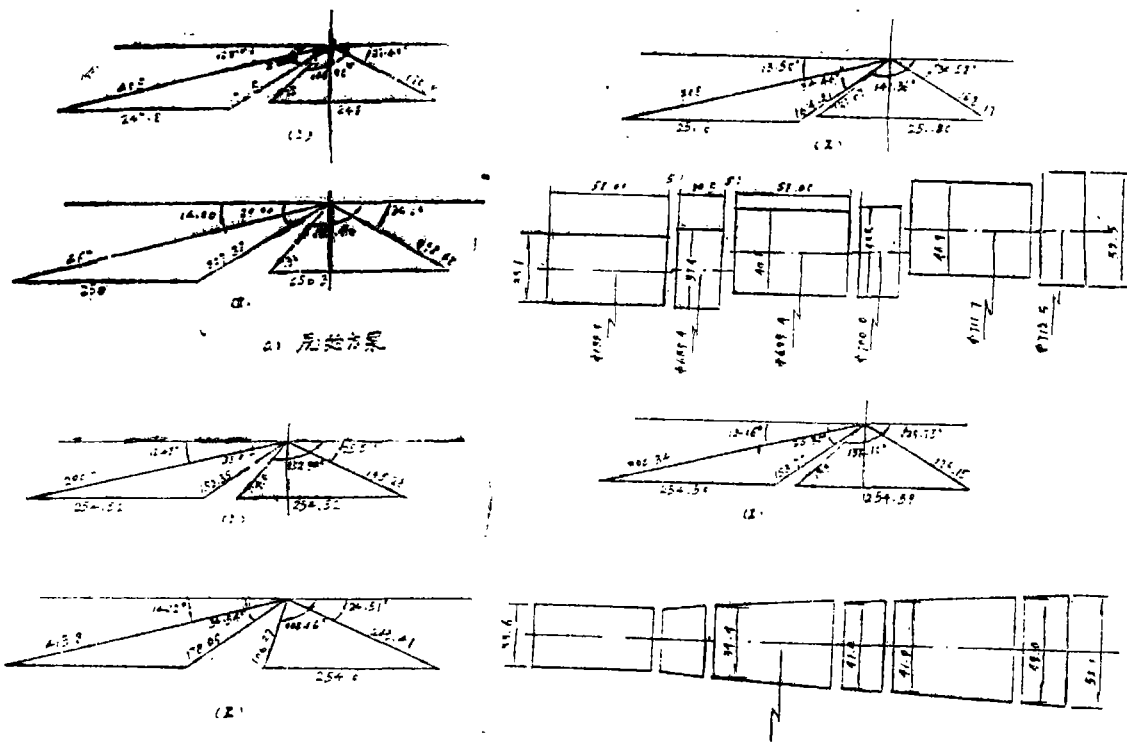


图3 优化路线的发展



b) 等中径, $f = 1 - LD$ 方案

图4 (1)

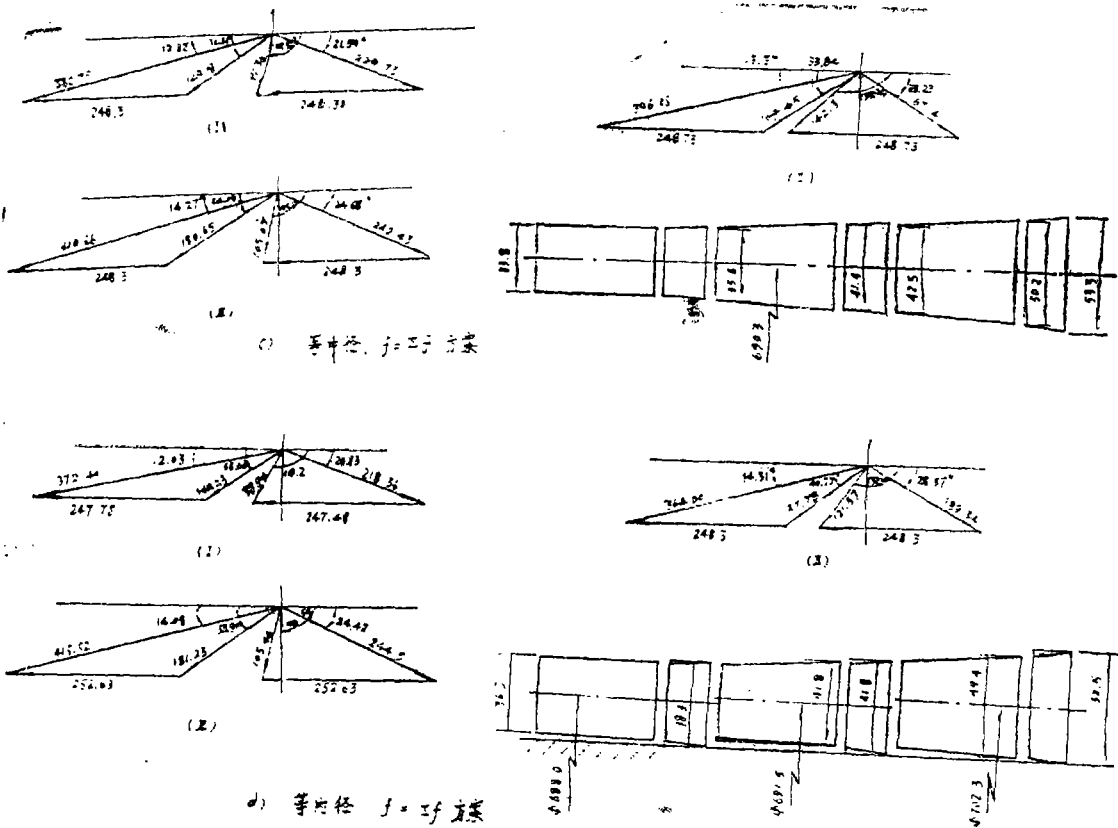


图 4 (2) 各方案级速度三角形及级组通道形状

四、级数对效率的影响

本文还在速度系数给定的条件下,以简化模型为工具,计算分析等中径方案在总焓降一定时级数对设计工况效率的影响。各比较方案均按设计工况效率为目标进行单目标优化得到。以某型机高压全速级组的前两级焓降作为算例,主要计算结果见表 2。

计算结果表明,至少在所考虑的较少的级数范围内,随着级数增加,效率将提高。

表2 级数对效率的影响(等中径方案)

项 目		α_1	α_2	u (米/秒)	C_z (米/秒)	η_{IDT}	η_{IVT}
I 级		15.09	79.76	285.67	125.84	0.836 8	0.881 6
II 级	I	12.44	135.67	248.00	84.14	0.881 6	0.831 9
	II	13.56	135.49	248.00	92.58		
3 级	I	12.08	132.94	180.40	63.44	0.892 5	0.849 1
	II	12.00	136.44	180.40	67.02		
	III	12.38	108.00	180.40	76.17		

五、结 论

本文是作者前一时期的继续,作为实现透平级和级组的最优设计的一个环节,本文所提出的模型比较成功地实现了透平级组的快速决策分析。它对各种结构形式(冲动式,反动式)和不同的通道形状(不限制、等内径、等中径、等外径)以不同的单目标和多目标求解都是有效的,优化效果是显著的。

本算法不仅可以通过控制变量实现各单目标优化分析及多目标决策分析,而且可通过控制速度系统(给定;或按简单公式计算;或按Craig—Cox关系计算,详见[2]),结构形式及通道形状的选择,从而可适用于现有机组级和级组的改进论证计算;机组中个别级或级组的新重设计;以及新型机组的设计计算。因而具有普遍适用性。

在透平级组的优化设计中引入重量目标是第一次。实践证明,将先进的教学工具多目标规划决策方法移植到透平级和级组的设计中来是十分必要的,工作是成功的。

参 考 文 献

- [1] 陈林根“多目标决策理论与舰用汽轮机最优选型、设计应用导论”,造船工程学会透平锅炉学组1985年年会论文,《汽轮机技术》1986年第5期
- [2] 陈林根,张俊迈“多目标规划决策(MODM)与舰用蒸汽透平通流部分设计”,《热能动力工程》,1986年第5期
- [3] 某型舰主机热力计算说明书

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

No.2 1987

CONTENTS

GAS TURBINES

1. Experimental study of A_{40} profile tandem cascades
..... Hui Zhaosen, Liu Zhaoming, Zhao Fengsheng, JiGuiming (1)
Synopsis
In this paper the curves of tandem cascade aerodynamic parameters versus incidences have been given on the basis of the results of A_{40} profile tandem cascade tests. The effect of the slot convergence on flow conditions has been discussed with a more detailed explanation of the slot flow mechanism. All this has provided a reliable basis for relevant engineering designs.
2. Identified Soviet gas turbine powered naval ships
.....Translated by Tan Zhenxiang (4)
3. Some observations concerning the use of prototype stages in nonmilitary axial compressor design
..... Wu Yanjie (6)

STEAM TURBINES

4. Analysis of multi-objective decision-making (MODM) for marine steam turbine stage groups.....Chen Lingen, Zhang Junmai (10)
Synopsis
On the basis of our previous successful application of MODM procedures to turbine stage flow path optimization design, this paper puts forward a simplified model for turbine stage group flow path design. The model has been found to be basically in conformity with the actual conditions.
A calculation example of three-stage group by use of this model has been given with a discussion of the effect of enthalpy drop distribution on turbine performance and an analysis of the effect of the number of stages on efficiency. The optimization effect was found to be remarkable.

BOILERS

5. Sawdust-fired fluidized-bed boilers
.....Wang Ruoqing, Sun Xiudi, Meng Fanzhang, Ren Abao (17)