

大功率蒸汽透平末级的 优化设计

Л. А. 舒本柯-舒宾
[苏] А. А. 塔列林 著
Ю. П. 安季普采夫



机械工业出版社

大功率蒸汽透平末级的优化设计

Л. А. 舒本柯-舒宾

[苏] А. А. 塔列林 著

Ю. П. 安季普采夫

吴宝仁 译

姚福生 校



机械工业出版社

本书把大功率蒸汽透平末级的优化设计系统分成两个子系统：气动热力学过程的优化（最优扭曲规律）和最优动叶片的设计。阐述了它们的数学模型及最优解的搜索方法，同时分析了轴向间隙中气动热力学参数的最优分布、初始数据和几何参数大范围变化的经济叶型及各种实用结构的最优动叶片设计等实例。

本书是苏联乌克兰科学院机械制造问题研究所多年来研究工作的系统总结，其方法较实用。它适合于从事蒸汽透平设计、制造和研究部门的广大工程技术人员、科学工作者、研究生和高年级大学生参考使用。

Оптимальное проектирование последней ступени мощных паровых турбин

Л. А. Шубенко-Шубин, А. А. Гарелин, Ю. П. Антипцев

Киев «Наукова-думка», 1980

* *

大功率蒸汽透平末级的优化设计

[苏] Л. А. 舒本柯-舒宾, А. А. 塔列林 著

Ю. П. 安季普采夫

吴宝仁 译 姚福生 校

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 · 印张 $6\frac{5}{8}$ · 字数 140 千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数 001—949 · 定价 1.60 元

*

统一书号: 15033·6448

译 者 的 话

大功率蒸汽透平末级长叶片在高转速下运行，要求既安全可靠，又要效率高。它的设计要涉及到空气动力学、强度、振动、工艺、结构等各种常常互相矛盾的要求，问题复杂。随着电子计算机和最优化计算方法的迅速发展，叶片的优化设计必将逐步取代传统经验式的试凑法设计。

本书是从工程观点论述蒸汽透平末级优化设计问题的专著，它是苏联乌克兰科学院机械制造问题研究所多年来研究成果系统的总结。按子结构理论，它将末级优化设计系统分成不同等级的相互联系的子系统进行研究；把求解的数学模型归化为优选参数的问题，即函数的条件极值问题。全书选择的算例具有代表性和实用性。

姚福生同志对译稿进行了认真的校核，在此表示深切地感谢。

由于译者水平有限，译文中难免有错误和不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

序 言

苏联动力事业发展的特征是：发展速度超过其他部门，且电能容量和产量每年都在高水平增长，其中以有机燃料和核燃料的热电站生产的电能占优势，约为全国生产总电量的85%。

1975~1980年国民经济发展计划规定，当6700~7000万kW新装机容量投入运行时，电能年产量将进一步增长到13400~13800亿kW·h。这样宏大的建设规模可降低电站建设投资、提高电站经济性指标，这对国民经济具有重大的意义。正如热力动力发展的经验和分析表明的那样，增大热力透平机组单机容量是达到这种效果最重要的方法之一。

对于动力蒸汽透平来说，顺利解决这个任务的关键在于能够建立经济可靠的末级。因为末级的尺寸和结构特点不仅决定了一台机组能达到的容量，而且也决定了它的经济性指标及总结构(汽缸数、级数等)。由于机器及其零件的基本特性和质量主要在其设计阶段形成，可见，有效而可靠的末级设计是建立大功率透平机组全过程的中心问题之一，而且也是最困难、最复杂问题中的一个。特别麻烦的是它要着手解决综合各种相互矛盾的因素(气动热力学、结构工艺、静强度和动强度等)，所有这些矛盾基本上是出现在动叶片上。当转速和离心力负荷很大时，动叶片中要产生最复杂的气流状态。因此，各个新的长动叶片级的建立，一般标志着透平制造业发展的新阶段，表示动力机组达到新的、更完善的技术经济指标。

现有使用的大功率透平末级的设计技术还远离理想的要

求。

在现代科学技术和广泛有效地使用快速计算技术条件下,大功率透平机组末级设计的组织、编制及计算必将得到根本的改造,使设计过程能达到这样的自动化水平:设计者的任务基本上只是作出某些判断,设计过程的其他环节都由电子计算机完成。

设计是同时处理数字信息和几何信息的过程。

传统设计的数字信息处理,包括用数学模型来分析(计算)机器或其零件在初步综合设计(以图纸形式)中发生的过程和问题。由于设计分析要做到格式化,因此用电子计算机能使计算工作完善化,这不仅使计算速度加快,而且使执行的数学模型更加完善。

综合设计的过程几乎没有实现格式化,而以专用语言(用分散的数字形式构成几何形状的信息)来描述几何物体的方法在某种程度上格式化了。

人、机对话状态下,物理现象的数学模型和结构形状的数学模型可以联立求解机器设计总系统中的计算和结构设计问题。在这个系统中,用多重循环分析法逐步修改设计,综合得出某种意义上最优(或次优)的设计。实际上,这个系统比通常实际工作中设计者做到的要快许多倍,并且得到多得多的信息。可供讨论的设计方案也不是二、三个,而是一组方案。用模拟运行条件的数学模型算出这些方案的特性,从中采用根据充分的解。

建立这种较完善的设计方法是普遍适用的,各工程部门的执行情况也表明这种方法是卓有成效的。但在制订个别复杂机器零件的设计计算方案方面,还需要付出巨大的努力。此外,该系统的有效性显然极大地取决于对话状态下设计的

人、机联系的运算水平。因此，必须添置象绘图仪、显示器、音调录象机等专用工程设备，探讨人、机对话的语言和程序。在工厂、研究所的现有装备条件下，用计算机和外部设备来改进设计技术（只用电子计算机设计）是合理的、有效的、可行的。

这些途径揭示，可以研究出用普通的数学工具来描述结构几何形状的方法。这样，所有的设计过程（包括结构的几何信息处理）在原则上都可以由建立的数学模型并对它进行研究加以实现，不仅初步设计过程，而且施工设计[⊙]过程都能格式化，这种方法可以获得严谨的机械零件设计规程，可以编制求出这些综合设计问题的算法和程序。在这个设计体系的许多问题中，使用普通的数学规划法搜索最优解。

本书用上述方法叙述了透平机械叶片装置，并探讨了最复杂、最重要的大功率透平装置末级的模型、设计算法和程序等综合问题。它仅针对透平制造业中使用电子计算机的一般水平，并不采用特殊的辅助技术。当有图表自动绘图仪时，上述设计过程可以用自动绘图仪的软件或者专用程序自动完成绘制叶片的加工图。另外探讨的模型和算法也能包括透平机械自动设计的综合系统，透平效率用模拟模型在与电子计算机对话状态下达到的那样大。

本专著叙述了大功率蒸汽透平机组末级的设计理论、方法和计算，能以最短期限合成出在给定条件下的一组末级动叶片结构，这些动叶片实际上具有最优经济性，并满足结构、工艺和其他条件提出的要求。借助于几乎全自动的设计过程，设计者从这组叶片中可以选出级的动叶片的所有尺

⊙ 施工设计是指对实现结构得出足以绘制加工图信息的一切有关问题的详细研究。

寸。

由于设计过程的高度自动化，使工作时间只是原来的几十分之一，且使重要级特性保证达到最优值的解的搜索格式化，因此可以说，本法不仅可以求解设计过程的优化问题，而且可以求解最优特性级的设计问题。如果把设计工作理解为设计者做的全部的设计计算，并得出加工图所必需的所有资料，则上述情况令人深信：作者选用的本专著书名与其内容是符合的。

第一章和第二章讨论了热力透平机组末级最优设计系统的基本概念。

根据系统的处理方法，把末级设计的全过程分成两个基本的子系统，它们的数学模型及计算在级的热力学特性优化问题（第三章到第五章）和最优特性动叶片的设计问题（第六章和第七章）中叙述。

用传统方法可以解决比较简单的隔板（导向装置）设计问题，因此本书不予讨论。

在本书材料的叙述方面，作者力求遵循传统设计的逻辑（也可能是算法），这样处理将有利于工程实践中更有效地实施本书提出的方法。

撰写本书各章的作者：序言、第一章和第二章是Л. А. 舒本柯-舒宾，第三章、第四章和第五章是Ю. П. 安季普采夫，第六章和第七章是А. А. 塔列林。本书按Ю. С. 伏罗比耶夫探讨的方法计算动叶片结构的振动特性。В. П. 克雷圣柯，Л. Ф. 斯魏特洛夫和И. Г. 德罗伽琴柯完成程序编制及计算工作。

基本符号

r, φ, z	圆柱坐标系的坐标轴
c, c_r, c_u, c_z	圆柱坐标系中绝对速度及其分量
w	相对速度
w_r, w_u, w_z	圆柱坐标系中相对速度分量
w_R	级的动叶片热降对应的速度
ν	子午面流线的切线与z轴的夹角
α, β	c和w与旋转方向u之间的夹角
n	转子的旋转频率
ω	旋转角速度
$u = \omega r$	转子旋转的圆周速度
r_n, r_m	根部和顶部截面的半径
L, l	叶片长度和到计算截面的距离
R_m	子午面流线的曲率半径
z	导向装置和动轮的叶片数
N	级功率
$D_{c_t} = r_n + r_s$	叶片环的平均直径
G	工质通过级的质量流量
v	比容
$\rho = \frac{1}{v}$	质量密度
i	焓
p	压力
T	绝对温度
η	蒸汽的湿度
x	蒸汽的干度
R	级反动度
c_p, c_v	定压比热和定容比热

k_β	叶栅通道的几何收敛度
k	绝热指数
M	马赫数
$a = \sqrt{k \frac{p}{\rho}}$	当地音速
h_p	级的分配热降
$e = \frac{\rho_2}{\rho_1}$	质量密度比
ξ	叶栅流动的损失系数
φ, ψ	导叶和动叶的速度系数
φ_p, ψ_p	导叶和动叶的流量系数
η_u	级的积分轮周效率
H	级的积分余速能量损失
B	叶型宽度
δ	边缘厚度
b	叶弦
t	栅距
α_B	叶型安装角
Θ	结构角
δ_{np}	叶型的最大厚度
σ_p	拉应力
σ_u	弯应力
F	叶片的横截面积
f	叶片振动频率
C_s	叶片离心力
W	叶型抗弯模数

目 录

译者的话

序言

基本符号

第一章 热力透平末级优化设计的问题	1
§1 在热力透平设计系统中末级的地位	1
§2 末级工作的品质准则	3
§3 末级设计系统的结构零件	7
第二章 建立末级数学模型的基本问题	13
§1 级间隙中气流特性优化问题的提法	13
§2 动叶片最优设计任务书和约束的形成	19
§3 动叶片最优设计系统的一般结构	25
§4 轴向间隙及其型线的选择问题	28
第三章 热力气动力学过程的数学模型和优化 方法	33
§1 问题的现状	33
§2 基本假定和气流方程组	35
§3 初始数据和品质准则	40
§4 优化参数和约束	42
§5 综合问题和解析问题的解法	44
第四章 级运动学特性优化的解析法	46
§1 按级的积分轮周效率品质准则的优化	46
§2 按级的积分余速能量损失品质准则的优化	59
§3 在积分余速能量损失极小条件下级的积分轮周 效率极大	66
§4 考虑约束的某些特点	69
§5 叶片装置主要扭曲规律的研究	79

第五章 用模拟方法在电子计算机上进行级参数的 优化.....	95
§1 级的热力气动力学过程的模拟模型	96
§2 用扫描法研究及整理结果的方法	100
§3 用随机搜索法进行级经济性的优化	110
第六章 透平机械叶型叶栅的设计.....	113
§1 基本假定、初始数据、参数、约束	113
§2 最简单的双参数叶型.....	119
§3 给定背弧出气边型线的叶型	126
§4 提高强度特性的叶型	136
§5 叶型叶栅的优化	140
§6 考虑动叶片实际结构特点的叶型叶栅设计	146
第七章 叶片工作部分的设计	154
§1 基本原理、初始数据、约束	154
§2 动叶片造型的解析法	162
§3 构成叶面的数值法	173
§4 动叶片结构的优化	182
§5 研究的结果	188
参考文献	197

第一章 热力透平末级优化设计的问题

设计透平末级时，设计者需要解决的问题相当多，但其中的许多问题没有超出普通透平级的一般设计范围，这当然用已经熟练掌握的一般方法求解。因此讨论最优设计问题时，必须尽最大努力确定末级泛函的品质指标，这是设计中的重大难题。

应该注意到，求解“一般”问题的已知方法并不能使透平级设计者完全满意，因为这些方法对问题没有作出更深刻和详细的研究。机器的运行实践证实了末级许多零件的结构解是合理的；使用它们能得到满意的结果，因此可以放心地把这些结构解用于要设计的透平中去。

§1 在热力透平设计系统中末级的地位

众所周知，设计目的归结为按取用的品质准则，从可能满足课题要求的大量方案中选出最好的设计方案。在数学表述法中可以这样表示这个总目标：在描述系统结构的独立参数组 X 和依赖于它们的特性组 $Y(X)$ 中间，找出使品质向量函数 Ω 达到极值的 $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 。这时， Ω 还取决于外加参数组 A ，而以方程或不等式形式的一组约束 G 加到独立参数 X 和特性上，这些约束描述物理过程、以及结构、工艺、经济性和其他要求。因此，

$$\left. \begin{aligned} \Omega(X, Y, A) &= \min \Omega(\bar{X}, \bar{Y}, A); \\ G_* &\leq G(X, Y, A) \leq G^*; \\ X_* &\leq X \leq X^*; \end{aligned} \right\} \quad (I.1)$$

$$Y_* \leq Y \leq Y^*;$$

$$A(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_s).$$

这个表述法表明，一般情况下这种设计是非线性数学规划问题。但所指的如果是最一般的设计问题（例如整台透平装置），那么实际上不可能把它表成（I.1）的形式。准确地说，在这些情形里，系统中贯穿着各种物理问题的千百个参数，它们对多成分的品质向量函数 Ω 具有不同的影响力，具有千百个约束。

根据系统方法，用子结构把这个直接表述的设计问题分解成彼此处于等级结构关系的一系列问题，以此来克服求解的复杂性。

各等级设计问题的数学模型也可以表示为（I.1）式的形式，因为实际上它们也是具有最优性质（按尺寸、结构、状态等）的一些对象（过程、状态、结构等）的综合。当然，按其成分和尺寸来看，它们都极其简单，可用现阶段已有的计算方法对它们成功地进行计算，因而从多方面得出，能用完全相同的形式构成各等级水平的模型。

应该强调，因为在一般透平机械的设计实践中，综合问题还没有被格式化（很少除外），对这些问题必须探讨新的数学模型、对应的算法和程序。

在机器设计的一般等级结构中，每级（或级组）也可用某种水平的数学模型表示。当然，末级设计问题占据特殊的位置。

一方面，它可在大型低压级组设计的一列子系统中研究。在这种情况下，末级工作条件必须服从上一级水平子系统、即低压级组子系统的需要（根据一般系统理论的中心优势原理）。在这方面看来，必须研究对机组功率不是最大的末

级, 因这些级的尺寸没有到达极限, 而且还有满足更高分级水平子系统关系的自由度。

另一方面, 对最大功率的透平机组来说, 末级尺寸和结构的特点决定了机器的外形及其主要的结构参数 (汽缸数, 级数, 冷凝器的合理真空度等)。因此, 大功率热力透平机组末级的设计是以最高分级水平的子系统加以研究, 而且认为它与其他子系统的联系是单向的。就是说, 可以把末级的设计当作孤立系统研究的处理方法正是本书实行的方法。

不过, 对 (I.1) 式中的数学模型在这种情况下还是相当复杂的, 但原则上是可行的; 在高级计算机上它要耗费相当多时间才能得出解答。如果是得出最优特性动叶片加工图作图的全部数据, 则需将末级设计系统至少进一步分解成两部分。

图1表示分解成两个子系统A和B的结构示意图, 其中第一个是高一级水平的子系统, 它得出了间隙中最优的热力气动过程特性初始数据, 第二个子系统是最优特性动叶片的设计。这样形成的子系统, 使从子系统A到子系统B的联系要比从B到A的反联系强烈得多。其中每个子系统同样地分解成较低等级水平的子系统, 对它们作出格式化的描述, 就可以建立动叶片最优结构设计的系统。

§2 末级工作的品质准则

无论在透平机组设计的总系统中, 还是在各个分级水平的子系统中, 品质泛函通常是多种成分的。这些成分就是经济性、可靠性、耐久性、工艺性以及定量上或定性上表示系统的其他要求。

为使优化问题极大简化, 容易求解, 应用某种一般方法对这些指示符逐个评价它的重要性, 从而把品质向量函数简

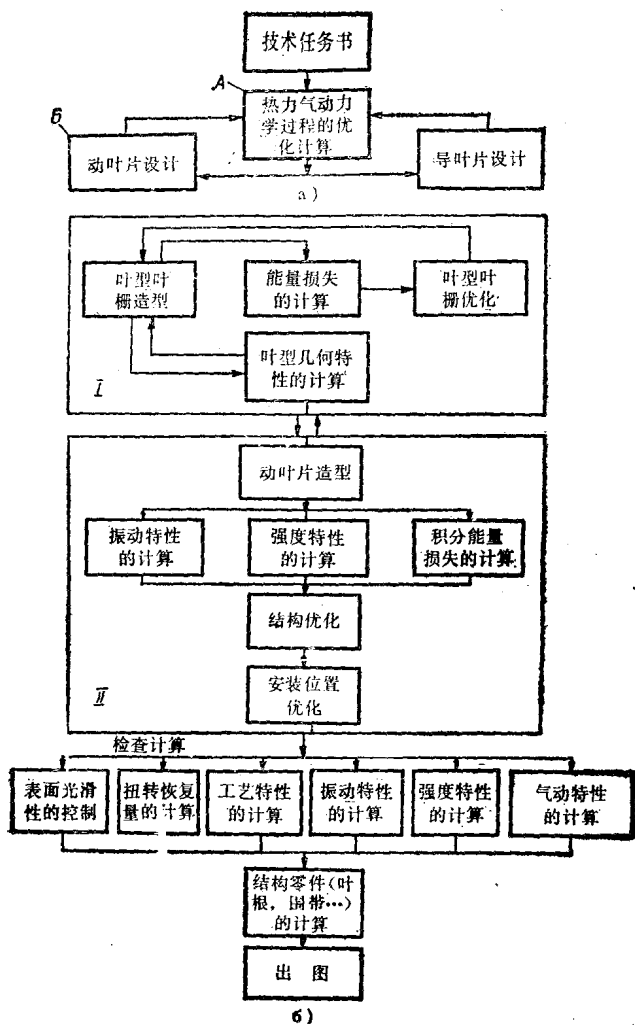


图 1

a) 末级设计过程的结构示意图

b) 动叶片设计过程的结构示意图

化为单成分的函数，这是十分重要的。

借助于象按设计者观点对准则进行分级排队或者把向量函数化成标量准则的整体品质准则设计等方法，则一般判定理论能得出实现该评价的一些方法。使用这些方法必然需要进行鉴别，因为这些方法不是对所有场合都是合理的。

对多级水平子系统来说，可从向量品质函数的许多成分中分出主要的——占主导地位的成分。这样，在最高等级水平的子系统中可把《蒸汽透平装置热力系统图》作为目标函数，一般认为这样进行计算的时间消耗最少。这个准则可作为“整体”准则，在《级组——通流部分——热力系统图》综合子系统中它用于设计的开始阶段以及设计的最后阶段，经详细分析后，最后评价透平装置中采用的全部技术和结构解总体的经济效益。但在制订通流部分结构阶段，确定它的所有尺寸和热力气动过程的特性时，对大型基本负荷透平机组来说，把通流部分的能量转换效率作为目标函数是合理的。

可以说，对那些大功率机器耗热量的实际减少即使不多，但可使显著提高的透平造价在短期内得到补偿。在有疑问的情况中，详细分析带评价《折算损耗》的《通流部分——热力系统图》综合子系统，可以完全弄清这个问题。因此对于《末级》孤立子系统来说，自然把其中的能量转换效率作为品质准则。

这样，把积分效率值作为末级基本的品质函数，且必须求出它的极值。叶片叶栅全部的能量损失（包括通道的端部区域和径向间隙）按全苏热工研究所的方法，即以半径函数的损失系数加以确定；在有些理论研究中，则把损失系数当作常数处理。

全苏热工研究所的方法基于物理概念、实验研究和实物