

汽轮齿轮机组分层设计最优化方法研究*

陈林根 张俊迈 胡德明

(海军工程学院)

〔提要〕 本文在研究汽轮齿轮机组设计中各个环节优化设计的基础上,提出了汽轮齿轮机组分层设计最优化方法。其中主要环节包括:汽轮机—冷凝器—齿轮装置整体初步设计多目标优化;汽轮机本体初步设计效率优化;冷凝器初步设计总重量优化;齿轮减速器初步设计重量优化;一般压力级和级组多目标优化;复速级效率优化。所述方法在某型机组概念设计中得到应用。

主题词 汽轮机组 分层设计 最优化

一、引言

舰用汽轮齿轮机组由汽轮机、冷凝器和齿轮减速器三大部件组成,构成一个系统,并作为舰艇推进系统的核心部分。它的最优设计可在推进装置这个大系统中合并考虑,也可以作为一个单独系统来考虑,并且还和其子系统—各部件的最优设计密切相关。因此,汽轮齿轮机组的最优化设计是一个多层次的复杂系统最优化问题。对此,首先要明确所研究的系统,然后建立该系统的数学模型,包括分析系统的结构,确定系统的独立变量与相变量,找出各种约束条件,选定最优化的目标函数,列出各种约束条件与目标函数的表达式或算法,最后用最优化方法求解^[1,2]。

本文的主要思想是把汽轮齿轮机组的优化设计问题分解成若干个弱相关的层次,并

分别用不同方法求解,再有机地把它们统一起来,形成一个统一的汽轮齿轮机组优化计算方法^[3]。

设计的第一层次是机组的预先估算,即在外部已知参数下,确定系统内部结点上的参数,为各部件的初步设计及其优化提供依据。第二层次为各部件的初步设计,即确定汽轮机、冷凝器和齿轮减速器的主要结构参数,估算部件主要性能。第三层次属于部件的详细计算,即得出所要求的各部尺寸,给出所能达到的性能指标。本文提出的方法将有助于进一步实现汽轮齿轮机组的自动化设计。

二、机组整体初步设计多目标优化

汽轮齿轮机组的整体初步设计是第一层次的任务。由蒸汽或核动力推进装置设计确

* 本文第一稿在鄂皖苏三省电机工程学会汽轮机专业联合年会(1987,黄山)宣读

收稿日期:1989-11-22

定蒸汽初参数和传递给推进器轴的功率和转速后，汽轮机出口压力（冷凝器真空）的选定对主机功率、循环水泵耗功和冷凝器的热负荷及尺寸重量有影响；高低压缸转子转速的选定对主机效率和尺寸重量及减速器尺寸重量有影响；高低压缸之间的功率分配的确定影响机组的总效率、各缸中的级数和尺寸重量。整体优化设计是在给定的装置设计条件下获得经济性好、尺寸重量小的初步方案，为各大部件的初步设计优化提供设计原始数据。研究结果简述如下：

1. 优化变量和目标函数

优化变量：冷凝器喉部压力，高、低压缸之间功率比，高压转子转速，低压转子转速。

目标函数：(1) 机组的设计工况有效效率；(2) 机组的非设计工况有效效率；(3) 汽轮齿轮机组总重量。

2. 主要约束条件

- (1) 高低压缸功率比在一定范围内；
- (2) 冷凝器真空在一定范围内；
- (3) 高、低压汽轮机转子转速在临界转速区域以外；
- (4) 高、低压缸末级动叶总拉应力在叶片材料机械强度允许的范围内；
- (5) 机组总体尺寸符合机舱尺寸要求和装拆便利要求。

三、汽轮机初步设计效率优化

本环节属于设计的第二层次。舰用汽轮机为提高其低速经济性，通常采用内旁通、外旁通、带巡航汽轮机主机和串并联机组（含单列和双列级作调节级）等措施，它们在经济性、可靠性、结构工艺可行性、尺寸重量等方面各有其特点。在初步设计阶段，对其经济性的评价是十分重要的。五种型式的汽轮机以机组设计工况效率为目标的初步优化设计研究结果简述如下：

1. 优化变量和主要约束条件

优化变量：高、低压缸之间的功率比，

低压缸末级的径高比，低压缸出口速度与临界速度之比，调节级焓降与临界焓降之比，调节级的速度比，部分进汽度。

主要约束条件：(1) 六个优化变量在一定的范围内；(2) 各缸末级动叶总应力在叶片材料强度允许的范围内；(3) 机组额定非设计工况效率在一定值以上；(4) 机组重量——功率比值在一定范围内。

2. 计算模型

采用模型（级组）法进行热计算。各种型式的汽轮机均是由速度级、冲动级（级组）和反动级（级组）的不同组合构成的，因此按目前国内现有的各种模型级和级组性能资料拟合计算各型级和级组性能。计算有效效率时所考虑的各项内、外损失按常规值选取。

四、冷凝器初步设计重量优化

舰船冷凝器常用双通道单流程回热式，其管束分为左右两片。冷凝器初步设计是在给定的热负荷（取决于前述的整体计算和汽轮机初步计算）、冷却水流量及其进口温度和温升等条件下，计算出传递规定的热量所需要的冷凝器表面积，并估算出其尺寸、重量。在热负荷及海水温度一定的条件下，提高选用水速，可减小传热面积，但将得到细长型冷凝器；采用较小的冷却水温升，则冷却水需要量增大，使冷凝器长度减小而横向尺寸增大。冷凝器的初步设计优化，是在一定的长宽高尺寸范围内解决冷却水需要量和冷凝器尺寸、重量的矛盾。不同冷却水进口温度下，铜管和钛管冷凝器以带水总重为目标的最优方案研究简述如下：

1. 优化变量和主要约束条件

优化变量：冷却水温升，冷却水流速。

主要约束条件：(1) 优化变量在一定

范围内(考虑管材特性和冷凝器低工况运行需要);(2)冷凝器轮廓尺寸符合主机、减速器和冷凝器在机舱的布置要求;(3)冷却水流量在一定范围内(自流循环和船体结构尺寸及性能有关)。

2. 计算方法

传热计算按常用方法进行。重量按算出的管板直径、管长等参数逐件计算叠加而得到。

五、齿轮减速器初步设计重量优化

舰船汽轮齿轮机组常用功率分支传动两级齿轮减速器,其初步设计是在给定高低压缸转子转速和推进器转速条件下,合理选择参数,保证减速器能可靠地工作,且使其尺寸重量小,加工制造方便。在不同的负荷系数和小齿轮变形总量条件下,减速器的初步优化设计研究简述如下:

1. 优化变量和目标函数

优化变量:高低压缸的两级传动比之比 i_{H21} 和 i_{L21} , 两级轮齿螺旋角 β_{H1} ($=\beta_{L1}$) 和 β_{H2} ($=\beta_{L2}$)。

目标函数:高低压各两级减速器共十一个齿轮及减速箱壳体的总重量或十一个齿轮的总体积(两者等价)。

2. 主要约束条件

(1) 两级传动比及其之比在一定范围内;(2) 两级螺旋角在一定范围内;(3) 长宽高尺寸符合布置和装拆便利要求;(4) 第二级大齿轮直径符合高低压两缸中心距要求和两级小齿轮合理布置要求;(5) 齿数圆整后总传动比与给定值误差小于一定值;(6) 轮齿的弯曲应力和接触应力及小齿轮变形总量小于给定值;(7) 高低压第二级对应的小齿轮尺寸相同以减少加工成本;(8) 齿轮分度圆处圆周速度小于一定值。

3. 计算方法

按满足指定的负荷系数和变形总量要求,解析计算得出第一级和第二级小齿轮的节圆直径和齿宽,再按选定的齿轮模数计算齿数并取整。由选定的两级传动比分配方案,计算出两级大齿轮节径,计算齿数取整后修正大齿轮直径。

六、一般压力级和级组的多目标优化

第三层次的工作是汽轮机中各级和机组按速度三角形法的详细优化设计。对一般压力级和级组的多目标优化研究结果简述如下:

1. 优化变量和目标函数

分别对级和级组提出了两套数学模型。

对级,有复杂模型:

$$\vec{X} = [\alpha_1, \alpha_2, u_1, u_2, c_{1z}, c_{2z}, C_N, C_R]^T$$

求

$$\text{Min}[1 - \eta_{iSD}(\vec{X}), 1 - \eta_{iSV}(\vec{X}),$$

$$W_T(\vec{X})]^T$$

对级组,有简化模型:

$$\vec{x}_i = [\alpha_1, \alpha_2, u, c_z]^T,$$

$$i = 1, 2, \dots, k_{st},$$

$$\vec{X} = [\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_i, \dots, \vec{x}_{k_{st}}]^T$$

求

$$\text{Min}[1 - \eta_{iSD}(\vec{X}), W_T(\vec{X})]^T$$

其中, α 为静、动叶出口汽流绝对速度方向角; u 为转子平均半径处圆周速度; c_z 为出口汽流轴向分速; C_N 、 C_R 分别为喷嘴、动叶弦长; η_i 为内效率; W_T 为动、静叶及所在段落汽缸、转子重量之和; k_{st} 为级组总级数; 角标“1, 2, s, st, D, V”分别表示动叶进、出口截面, 级, 级组, 设计工况, 非设计工况。

2. 主要约束条件

(1) 弦长/直径比在一定范围内；(2) 圆周速度在一定范围内；(3) 静、动叶出汽角在一定范围内；(4) 轴向汽流分速在一定范围内；(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) 动叶进出口相对汽流为亚音速；(8) 汽轮机通道内外扩张角在附面层不发生脱落的范围内；(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) 动叶弯曲应力在不致因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内；(12) 级组出口压力必须与给定值相等；(13) 通道形状符合等中径、等内径、等外径等特殊条件。

3. 计算方法

在给定的初终条件下用设计工况计算程序和顺算法及逆算法计算非设计工况性能的计算程序求解目标函数和约束值。计算中速度系数按照三种方法计算：由机外给定；由简单公式计算；由包括燃气、蒸汽涡轮实验，适用于各工况性能预测的 Craig-Cox 关系^[4]计算。级的其它损失由通用公式计算。

七、双列速度级的效率优化

双列速度级不同于一般压力级，其效率优化是第三层次一项重要内容。本环节是在给定的设计参数及约束条件下，求解设计工况内效率最大所对应的几何和气动参数。研究结果简述如下：

1. 优化变量和目标函数

优化变量为

$$\vec{X} = [\alpha_1, \alpha_1', \beta_2, \beta_2', u, u', e, \rho_b, \rho_n, \rho_b']^T$$

其中， α_1 为动叶绝对进汽角； β_2 为动叶相对出汽角； e 为部分进汽度； ρ_b 为动叶反动度；

ρ_n 为导叶反动度；上标“'”表示第二列动叶。

目标函数：设计工况内效率。用常用设计模型计入轮周损失和其它内损失。

2. 主要约束条件

(1) 圆周速度、弦长/直径比及各列叶片出汽角在一定范围内；(2) 径高比在符合一元流假定范围内；(3) 喷嘴焓降与临界焓降之比在一定范围内；(4) 导叶及各列导叶出口汽流为亚音速；(5) 流道内外扩张角在一定范围内；(6) 各叶片排反动度及其之和在一定范围内；(7) 部分进汽度在一定范围内；(8) 动叶弯曲应力和总拉应力在叶片材料强度允许的范围内。

八、结 束 语

本文提出了一个汽轮齿轮机组分层设计最优化计算方法，提供了有关的主要环节的研究结果。各环节采用如下解法：用加权理想点法按照二项系数法取加权系数，化多目标为单目标，然后用 SUMT 外点法处理为无约束问题，再用 Sarpent-Powell 法借助于抛物线拟合一维搜索得最优解。有关的通常计算程序及介绍参见文献 [5-8]。将上述各环节的工作结合涡轮级优化设计方法的各个环节工作^[9]，就可逐步实现汽轮齿轮机组的计算机辅助设计^[10]。本文提出的方法中的几个主要环节在某型机组的初步设计论证中得到了应用，并通过了鉴定。有关的应用结果表明了所述方法的有效性^[11-13]。

参 考 文 献

[1] 陈林根，张俊迈。多目标决策理论与舰用汽轮机最优选型、设计应用导论。汽轮机技术，1986 28(5):58-70

[2] 陈林根，张俊迈。轴流式透平机械通流部分优化设计的现状和发展。动力工程，1989,9(4):10

〔3〕 陈林根. 在舰船装备初步设计论证中使用分层设计最优化等方法. 海军装备, 1988(8):4

〔4〕 Craig H R M, Cox H J A. Performance Estimation of Axial Flow Turbines. Proceedings of Institute Mechanical Engineering. 1970~1971, 140-150

〔5〕 张俊迈. 舰船汽轮机优化设计与工况分析. 武汉: 海军工程学院出版, 1988, 336页

〔6〕 胡德明. 汽轮机热力计算与强度计算程序汇编. 武汉: 海军工程学院出版, 1988, 120页

〔7〕 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, 1986(1):40-44

〔8〕 张俊迈, 胡德明, 陈林根. 舰船汽轮机组

初步设计与通流部分设计及最优化程序库. 汽轮机技术, 1987, 29(4):19-23

〔9〕 邹滋祥. 轴流透平级优化设计方法理论研究. 机械工程学报, 1984, 20(1):83-95

〔10〕 陈林根, 张俊迈. 透平机械 CAD/CAM 应用技术. 热能动力工程, 1988, 3(1):44-50

〔11〕 陈林根, 张俊迈. 舰用蒸汽透平级和级组的多目标规划决策分析. 机械工程学报, 1988, 24(1):69-77

〔12〕 胡德明, 陈林根. 舰用功率分半传动两级齿轮减速器初步设计的优化方法. 舰船科学技术, 1988(2):30-40

〔13〕 张俊迈, 陈林根. 舰用汽轮机装置主机经济性研究. 舰船科学技术, 1988(3):36-39

Theoretical Research of a Level to Level Optimum Design Method for the Steam Turbine Geared Unit

Chen Lingen, Zhang Junmai, Hu Deming

(Naval Academy of Engineering, Wuhan)

Abstract

A level to level optimum design method for steam turbine geared units is presented. This method is based on a theoretical research of an optimum design method for each design part of a steam turbine geared unit. The main design parts of a steam turbine geared unit include a preliminary design multi-objective optimization of the turbine, condenser and gearbox as a whole, a preliminary design efficiency optimization of the steam turbine proper, a preliminary design total weight optimization of the condenser, a preliminary design weight optimization of the gearbox, a multi-objective optimization of the pressure stage and stage group, and an efficiency optimization of the curtis turbine stage. The method presented has been applied to the conceptual design of a type of marine steam turbine geared units.

Key words: steam turbine geared unit, level to level design method, optimum design