



国防科技图书出版基金

压气机/风扇叶片 自动优化设计

Automatic Design Optimization of
Compressor/Fan Blades

□ 周正贵 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

压气机/风扇叶片自动 优化设计

Automatic Design Optimization of
Compressor/Fan Blades

周正贵 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

压气机/风扇叶片自动优化设计 / 周正贵著. —北京:国防工业出版社, 2013. 12

ISBN 978 - 7 - 118 - 09254 - 7

I. ①压... II. ①周... III. ①航空发动机 - 叶片 - 最优设计
IV. ①V232.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 030745 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限公司

新华书店经售



*

开本 710 × 1000 1/16 印张 12¼ 字数 230 千字

2013 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 62.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	陆军	芮筱亭
	李言荣	李德仁	李德毅	杨伟
	肖志力	吴宏鑫	张文栋	张信威
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

目前,工程实际中航空发动机压气机/风扇叶片设计广泛采用正问题和反问题设计方法,长期应用实践为两种设计方法积累了丰富的设计经验。自动优化设计方法具有较少依赖设计人员经验、可实现多目标优化、多变量耦合优化等突出优点,一直受到广泛关注,近年来,随着计算机技术和流场数值计算技术的快速发展,在航空发动机压气机/风扇叶片气动设计中展现出较强的工程实用性,并已逐步走向工程应用。该方法与传统的正问题、反问题叶片设计方法形成互补,可进一步充实高性能压气机/风扇叶片气动设计体系。

本书结合国内外最新研究成果,全面系统介绍压气机/风扇叶片自动优化设计理论与应用,并通过优化实例进一步加深对相关理论与方法阐述和验证。书中融合作者自身多年来研究成果、研究体会,以及形成的具体实施方法,主要体现在以下几方面。①目前叶片优化设计中较多采用响应面插值方法减少流场计算次数缩短优化时间,但对于多设计变量、大寻优空间优化采用响应面插值精度不高会较大程度影响寻优效果。针对这种不足,书中提出利用遗传算法的并行特质实现局域网多台计算机或服务器多 CPU 并行优化,直接采用 CFD 方法进行所有个体流场计算,同时流场计算采用黏性体积力方法以有效缩短流场计算耗时。②为避免采用流场计算分区造成并行效率随计算分区数快速下降,提出以数据量较少的目标函数和设计变量作为传输参数实现高效率并行。③为达到优化过程生成个体的可控性、合理性,提出采用基于修改量的参数化方法,通过遗传算法中设计变量范围给定限制修改量幅值,并提出基于修改量的多层参数化方法以提高遗传算法寻优效率。④本书还提出采用兼顾非设计点性能的目标函数设置方法,在不大幅增加寻优耗时的前提下实现全工况性能优化。

由于作者学识水平有限,文中难免有不足之处,恳请读者批评指正,也非常欢迎对书中内容持不同观点的读者与作者讨论、交流。

借此机会,感谢中航工业发动机控股公司程荣辉副总经理对本书撰写的鼓励和支持;感谢中航工业商用发动机有限责任公司丁建国研究员等多位航空发动机设计专家对本书提出的宝贵修改意见;感谢国防工业出版社肖姝编辑在出版基金申请过程以及后期文稿修改中给予的帮助。

编者

2013. 10

目 录

第 1 章 压气机/风扇气动设计方法	1
1.1 初始设计	1
1.2 通流设计	2
1.3 二维叶型设计	2
1.4 三维叶片设计方法	4
1.5 高级负荷二维叶型和三维叶片设计	5
1.5.1 叶栅通道内激波组织	6
1.5.2 任意回转面叶型设计	7
1.6 自动优化设计方法特点及其关键技术	7
1.7 压气机叶片自动优化方法研究现状	9
1.7.1 二维叶型优化设计	9
1.7.2 离心压气机工作轮优化设计	11
1.7.3 轴流压气机三维叶片积叠线优化设计	11
1.7.4 压气机/风扇三维叶片优化设计	11
第 2 章 数值最优化方法	13
2.1 单纯形法	13
2.2 遗传算法及并行运行	16
2.2.1 基本遗传算法	16
2.2.2 基本遗传算的改进	19
2.2.3 遗传算法的并行运行	23
2.2.4 混合遗传算法	26
2.3 梯度法	29
2.3.1 梯度法原理	29
2.3.2 梯度计算	31

第3章 压气机/风扇流场数值计算	38
3.1 流场计算网格生成方法	38
3.2 S1 流面网格生成方法	41
3.2.1 S1 流面网格生成的代数方法	41
3.2.2 S1 流面网格生成的椭圆型方程方法	43
3.2.3 壁面处网格正交性对计算精度影响分析	48
3.3 流场数值计算控制方程	51
3.3.1 张量形式的基本方程	52
3.3.2 直角坐标系下的基本方程	53
3.3.3 柱坐标系下的基本方程	54
3.3.4 任意曲线坐标系下的基本方程	56
3.3.5 积分形式基本方程	58
3.4 NS 方程离散求解	58
3.4.1 控制方程差分离散	59
3.4.2 人工黏性	60
3.4.3 控制方程的时间离散	62
3.4.4 流场计算加速技术	62
3.5 黏性体积分力方法叶片通道流场计算	64
3.5.1 控制方程及其离散	64
3.5.2 黏性体积分力计算	66
3.5.3 计算网格和壁面处黏性剪切应力经验关系研究	68
3.6 多排叶片流场计算动静叶排交界面处理	77
3.6.1 混合面方法	77
3.6.2 转子冻结方法	80
3.6.3 非定常方法	81
3.6.4 转静子交界面不同处理方法计算结果比较	82
第4章 叶片参数化及目标函数设置方法	88
4.1 二维叶型参数化方法	88
4.1.1 直接参数化方法	88
4.1.2 基于修改量参数化方法	91
4.2 三维叶片的参数化方法	93

4.3	多层参数化方法	94
4.3.1	Bezier 曲线曲面递推算法	94
4.3.2	修改量的多层参数化	96
4.3.3	多层参数化方法在遗传算法寻优中的应用	96
4.4	目标函数设定	100
第5章	二维叶型优化设计	103
5.1	S1 流面流动特点	103
5.2	S1 流面流场计算分析	104
5.2.1	流面厚度对叶栅性能的影响	107
5.2.2	回转半径对叶栅性能的影响	108
5.2.3	转动对叶栅性能的影响	109
5.2.4	出/进口厚度比对叶栅性能的影响	110
5.3	压气机叶片通道内流动回转面二维特性研究	111
5.4	二维叶型优化设计	117
5.4.1	二维叶型优化设计软件简介	117
5.4.2	平面叶栅叶型优化设计	123
5.4.3	S1 流面叶型优化设计	126
5.4.4	优化叶型实际应用	132
第6章	三维叶片优化设计	137
6.1	压气机/风扇叶片通道内三维流动分析	137
6.1.1	通道涡的形成	137
6.1.2	角区分离	139
6.1.3	叶尖间隙流	141
6.1.4	叶片积叠线弯掠	145
6.2	三维叶片优化设计软件简介	149
6.3	三维叶片积叠线优化设计	151
6.4	三维叶片积叠线与型面组合优化	156
6.5	离心压气机工作轮三维叶片优化	163
6.6	大涵道比风扇叶片优化设计	166
6.7	吸附式压气机叶片优化设计	169
	参考文献	179

Contents

Chapter 1 The Aerodynamic Design Method of Compressor/Fan	1
1.1 Initial Design	1
1.2 Through Flow Design	2
1.3 2D Blade Profile Design	2
1.4 3D Blade Design	4
1.5 Design of Blades in High Stage Load Environment	5
1.5.1 Arrangement of Shock Waves in Cascade Passages	6
1.5.2 Design of the 2D Blade Profiles in S1 surface	7
1.6 Characteristics and Key Techniques of the Blade Automatic Design	7
1.7 Current Situation of the Method of Blade Automatic Design	9
1.7.1 Optimization Design of 2D Blade Profiles	9
1.7.2 Optimization Design of Centrifugal Impellers	11
1.7.3 Optimization Design of Stacking Lines of Axial Turbomachinery	11
1.7.4 Optimization Design of 3D Blades of Compressor/fan	11
Chapter 2 Numerical Optimization Methods	13
2.1 The Simplex Method	13
2.2 The Genetic Algorithm and Its Parallel Procedure	16
2.2.1 The Basic Genetic Algorithm	16
2.2.2 Improvement of the Basic Genetic Algorithm	19
2.2.3 Parallel Procedure of the Genetic Algorithm	23
2.2.4 The Hybrid Genetic Algorithm	26
2.3 The Gradient Method	29
2.3.1 Principle of the Gradient Method	29
2.3.2 Calculation of the Gradient	31

Chapter 3	Numerical Calculation of Flow Fields in Compressor/Fan Passages	38
3.1	The Grid Generation Methods for Flow Field Simulation	38
3.2	The Grid Generation Methods in S1 Surfaces	41
3.2.1	Algebraic Method of The Grid Generation	41
3.2.2	Elliptical Method of The Generation Grid	43
3.2.3	Influence of The Grid Orthogonality in Walls to Calculation Accuracy	48
3.3	The Governing Equations of Flow Field Simulation	51
3.3.1	The Fundamental Equations in Tensor Form	52
3.3.2	The Fundamental Equations in Cartesian Coordinates	53
3.3.3	The Fundamental Equations in Cylindrical Coordinate System	54
3.3.4	The Fundamental Equations in Arbitrary Curvilinear Coordinate System	56
3.3.5	The Fundamental Equations in Integral Form	58
3.4	Discrete Solution of The Navier – Stokes Equations	58
3.4.1	The Difference Discrete Method of The Governing Equations	59
3.4.2	The Artificial Viscosity	60
3.4.3	The Discrete Method of Time Terms	62
3.4.4	Acceleration Techniques of Flow Field Simulation	62
3.5	The Viscous Volume Force Method for Flow Field Simulation	64
3.5.1	The Governing Equations and Its Discrete Method	64
3.5.2	Calculation Method of the Viscous Volume Forces	66
3.5.3	Investigation of the Grid and Viscous Shear Stress	68
3.6	The Boundary Resolve at the Interface of Blade Rows	77
3.6.1	The Mixing Plane Method	77
3.6.2	The Rotor Freezing Method	80
3.6.3	The Unsteady Method	81
3.6.4	Compare of Calculation Results with Different Boundary Resolve Methods	82

Chapter 4	The Blade Parameterization and Objective Function Construction Method	88
4.1	The Parameterization Method of 2D Blade Profiles	88
4.1.1	The Direct Parameterization Method	88
4.1.2	The Parameterization Method Based on the Modifying Values	91
4.2	The Parameterization Method of 3D Blades	93
4.3	The Multi Level Parameterization Method	94
4.3.1	The Recursive Algorithm of Bezier Curves and Surfaces	94
4.3.2	The Multi Level Parameterization of Blade Modifying Value	96
4.3.3	Application of the Multi Level Parameterization Method in the Genetic Algorithm	96
4.4	Objective Function Construction	100
Chapter 5	Optimization Design of 2D Blade Profiles	103
5.1	Flow Characteristics in the S1 Surfaces	103
5.2	Calculation and analysis of the Flow in S1 Surfaces	104
5.2.1	Influence of Stream Surface Thickness to The Cascade Performance	107
5.2.2	Influence of the Surface Radius of Curvature to the Cascade Performance	108
5.2.3	Influence of the Rotational Speed of the Cascade to the Cascade Performance	109
5.2.4	Influence of Stream Surface Thickness Ratio of Outlet to Inlet to the Cascade Performance	110
5.3	Analysis of 2D Characteristics of Revolution Surface of the Flow in Compressor Passages	111
5.4	Optimization Design of 2D Blade Profiles	117
5.4.1	Introduction of the Software of Optimization Design of 2D Blade Profiles	117
5.4.2	Optimization Design of Blade Profiles in the Plane Cascades	123
5.4.3	Optimization Design of Blade Profiles in the Cascades of S1 Surface	126

5.4.4	The Actual Application of the Optimal Blade Profiles	132
Chapter 6	Optimization Design of 3D Blades	137
6.1	Analysis of 3D Flow in the Compressor/Fan Passages	137
6.1.1	The Formation of Passage Vortex	137
6.1.2	The Conner Separation	139
6.1.3	The Tip Clearance Flow	141
6.1.4	Blade Stacking Line Sweep and Bend	145
6.2	Introduction of the Software of Optimization Design of 3D Blades	149
6.3	Optimization Design of Blade Stacking Lines	151
6.4	Optimization Design of Blade Stacking Lines Coupled Blade Profiles ...	156
6.5	Optimization Design of a Centrifugal Impeller	163
6.6	Optimization Design of a High Bypass Ratio Fan	166
6.7	Optimization Design of a Aspirated Compressor Rotor	169
References	179

第1章 压气机/风扇气动设计方法

压气机/风扇是航空发动机重要组成部件,作用是为流经发动机的气体加功、增压,完成气体热力循环中的压缩过程。轴流压气机和风扇虽然几何尺寸、流量有较大差别,但它们的工作原理相同、结构相似,都是由若干级组成,每一级由转子和静子构成,转子用于对气体加功增压,静子主要用于改变气流方向,同时兼有增压作用;转子静子叶片的增压由S1流面通道扩张和激波两种途径实现。其主要技术指标有设计点压比、流量、效率及稳定裕度。气动设计是根据压气机/风扇技术指标,进行子午面流道、叶片型面、型面积叠线设计,然后通过流场数值计算和试验方法检验设计结果,再进行强度校核、结构设计和加工工艺设计。压气机/风扇气动性能完全取决于气动设计,但气动设计要受结构、强度、加工工艺的制约。

轴流压气机/风扇气动设计方法相同,可分为4个步骤:初始设计、通流设计、二维叶型设计和三维叶片设计^[1-3],如图1.1所示。初始设计采用平均半径(Mean Line)速度三角形以及经验关系确定主要几何和性能参数。通流设计采用S2流面流场计算确定叶片扭向和各排叶片匹配。二维叶型设计通过S1流面叶型设计实现给定的各排叶片进出口速度三角形沿径向分布。三维叶片设计进一步从三维流动角度对叶片改进。

在以上各设计步骤中,计算方法及其精度对设计结果有直接影响。计算方法精度主要取决于4个设计步骤中涉及到的经验关系式和经验参数的选取,如初始设计中的不稳定边界确定、初始设计和通流设计中损失模型、二维叶型设计和三维叶片设计中二维与三维流场数值计算中的网格结构、紊流模型等。

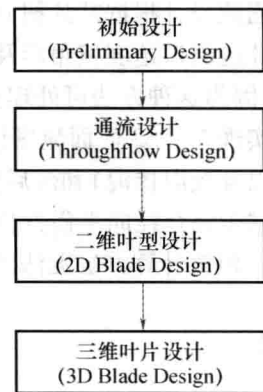


图 1.1 轴流压气机/风扇气动设计步骤

1.1 初始设计

初始设计阶段,根据流量、压比、效率、稳定裕度等参数,采用平均半径速度三角形以及经验关系,确定压气机级数、级压比、效率,子午面流道、各排叶片数等,进

一步可估算重量。只有保证初始设计阶段确定的参数合理性、先进性,才能使后续研究有一可靠的起点。

初始设计计算速度快,但在初始设计阶段所采用的平均半径处流动计算方法精度很大程度取决于经验关系,依赖前期工作积累。特别是对于不稳定边界,由于流动的非定常、三维分离特性,目前采用计算机仿真方法很难准确预测。因此,初始设计方案确定需要多借鉴以前设计,新的方案应具有继承性,使新型压气机设计能借力于前期研究基础;同时,由于新方案的先进性,在此阶段也可借助于二维、三维流动计算分析充实和改进经验关系。

在初始叶片设计阶段,重要的是,要发展较准确的平均半径流动计算方法,特别是不稳定边界预测方法。小转速下前面级大正攻角失速,后面级呈负攻角,在此阶段失速边界确定方法完全是经验的。目前一种方法是利用准确的级特性,确定稳定准则;还有根据相似压气机特性,通过叶片攻角、载荷和扩散度极限确定。

1.2 通流设计

通流设计根据叶片扭向设计规律,采用 S2 流面流场计算方法,分析并确定各排叶片进出口速度三角形及各排叶片匹配关系。S2 流面流场计算广泛采用流线曲率法,因为这种方法可处理具有亚声和超声混合流动区域,并且计算方法简单易于编程实现^[4]。S2 流面流场计算精度主要取决于损失(环壁、叶片表面附面层、叶尖间隙以及径向掺混)和落后角模型计算精度。由于通流设计过程中 S2 流面流场计算是基于完全径向平衡方程的一维流计算方法,因而计算速度快(特别是对于多排叶片),但该计算方法无法考虑流动三维性。

1.3 二维叶型设计

根据通流设计计算所得叶片排进出口速度三角形沿径向分布,进行 S1 流面(任意回转面)叶型设计,进一步将叶型沿径向积叠构成三维叶片。将 S1 流面通过简化处理成平面,对应的流动即成为平面叶栅流动。

二维叶型设计有正问题设计方法、反问题设计方法和自动优化设计方法。

1. 正问题设计方法(分析设计方法)

首先选定初始叶型,通过流场计算得到对应的叶栅流场,对流场结构分析,进一步修改叶型型面。叶型修改目标:消除流动分离区、消除或减弱激波,减小流动损失,达到给定的气流转角或压比。采用这种设计方法,叶型的修改很大程度依赖于设计人员经验。对于二维叶型设计,还可采用标准系列叶型,如低速 C4 叶型, NACA 系列叶型,高亚声速双圆弧叶型,超声速多圆弧叶型,楔形进口段、圆弧形出

口段叶型,预压缩 S 形叶型等。

2. 反问题设计方法

给出叶片表面压力分布或速度分布,通过反问题迭代计算得到叶片型面坐标。但有时给定的叶片表面压力或速度分布得到的叶型不一定合理,如出现负厚度;也有可能经过正问题方法验算设计点和非设计点性能不能令人满意。这时要重新给定叶片表面压力或速度分布进行再设计。对于三维叶片设计,采用反问题方法要给出叶片吸力面和压力面沿叶高多个型面压力分布,特别是上下环壁区压力分布要考虑流动的三维性影响,控制参数多、参数分布规律难以把握,并且过于依赖设计人员经验。

控制扩散叶型(Controlled Diffusion Airfoil, CDA)是对高亚声叶栅流动通过叶型几何的控制获得理想的叶型表面马赫数分布,减小流动损失。控制扩散叶型主要设计原则如下。

(1) 气流从叶片前缘开始保持连续加速,直到附面层转折点为止。因为附面层在加速流动时为顺压梯度,这样可抑制层流附面层分离。

(2) 叶背最高马赫数限制在 1.3 以下。在来流高亚声条件下,叶背存在局部超声区,产生局部激波。激波损失大小取决于波前马赫数,并且激波与附面层相互作用能引起附面层分离。如果波前马赫数小于 1.3,则不会发生附面层流动分离。

(3) 控制叶背从最高马赫数点到后缘这一段减速区内的气流的扩散度,达到不产生激波、不发生流动分离,并且使表面摩擦损失最小。

(4) 叶盆表面气流速度接近于不变。图 1.2 表明了这种叶型表面马赫数分布特点。控制扩散叶型设计由于预先给定叶型表面马赫数分布,寻找对应叶型,因而可归为反问题设计方法。

3. 自动优化设计方法

自动优化设计方法是将数值优化技术与正问题流场计算相结合,在由设计参数构成的向量空间中,采用优化控制理论求出整个可行区的目标函数极值点。其实质是由数学过程替代设计人员经验,控制叶片设计修改方向,因此,该方法也可说是一种正问题设计方法。由于二维叶型和三维叶片自动优化设计方法及其特点的相似性,将在 1.6 节中合在一起进行陈述。

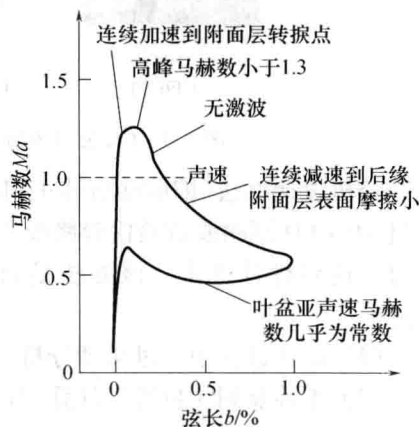


图 1.2 控制扩散叶型表面等熵马赫数分布特点