

李 磊 李元生 敖良波 李立州 著
于 明 温志勋 岳珠峰

船用大功率柴油机涡轮增压器 多学科设计优化



NLIC 2970692663



科学出版社

船用大功率柴油机涡轮增压器 多学科设计优化

李 磊 李元生 敖良波 李立州 著
于 明 温志勋 岳珠峰



NLIC 2970692663

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是针对船舶动力装置涡轮增压器多学科设计优化研究的一本专著,它是科技部 863 项目“航空发动机涡轮寿命与可靠性综合设计及验证技术”、国防科工局科研项目以及型号项目研究成果的整理和汇集,是多学科设计优化理论研究和工程实践相结合的成果,研究内容涵盖了多学科设计优化理论体系的各个方面。

全书包括 11 章,内容包括:涡轮增压器多学科设计优化概述;涡轮增压器几何参数化造型设计;多学科设计优化解耦与重构机制;多学科可行方法及并行优化方法在涡轮增压器设计中的应用;效率与精度的权衡策略;多学科不确定性建模方法;多目标优化方法;多学科集成设计环境等。

本书可供高等院校叶轮机械设计、多学科设计优化等专业的高年级本科生、研究生和教师使用,也可供相关专业的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

船用大功率柴油机涡轮增压器多学科设计优化/李磊等著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-030627-2

I. 船… II. 李… III. 机械-优化设计-多学科 IV. U664.121

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 048994 号

责任编辑:余 丁 / 责任校对:林青梅

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 4 月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 1—1 500 字数: 275 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

多学科设计优化是近年来发展起来的解决多场耦合复杂系统的方法论,由于可以有效地提高设计精度、缩短设计周期而被广泛应用在航空、航天、车船等工业领域。涡轮增压器结构复杂,包含了压气机、涡轮、转子三个核心系统,是一个典型的叶轮机械产品,涉及热力学、流体力学、传热学、结构强度、材料、制造工艺学等学科领域,部件、学科间耦合、相互影响强烈,使得涡轮增压器的研制成为一项复杂的系统工程。

对于船用大功率柴油机涡轮增压器这种多场耦合、可靠性要求高的产品,以往依靠串行设计方法设计,将增压器割裂成几个部件和学科,以部件和学科为单位展开确定性设计,以满足设计指标和设计要求。传统的设计方法没有考虑产品在加工过程和实际工况中存在的不确定性因素,以及部件、学科间的耦合影响,一旦设计不能满足所有部件和学科要求,重复设计和验证将耗费大量的时间和成本。随着对性能、经济性和可靠性要求的不断提高,需要寻求一种能集相关学科于一体,综合考虑部件、学科之间的耦合影响,提高产品综合性能和可靠性的技术。

在这方面,目前出现的多学科设计优化技术具有无可比拟的优势。多学科设计优化是近几十年发展起来的用于解决设计中多个学科耦合问题的优化设计方法,它借助现代计算机技术,集成各种相关学科的资源,充分探索理解各学科(子系统)的相互作用,以一定的优化算法搜索系统整体最佳方案,从而极大地提高设计速度和设计质量。由于多学科设计优化技术勾勒出了富有吸引力的美好前景,西方尤其是美国投入了大规模的人力物力进行研究,并且在飞行器、发动机设计上取得了丰硕的成果,已经成为复杂系统设计一项必不可少的手段。

研究多学科设计优化理论,并应用于相关产品的设计,可以有效提高我国船舶动力装置的设计能力,提升我国船用发动机的质量和性能,进而提升我国船舶工业的整体实力和技术水平。本书是课题组近年来在多学科设计优化领域探索和实践的成果,是以涡轮增压器为研究对象的关于多学科设计优化方法的一本专著,汇集了课题组承接的科技部 863 项目“航空发动机涡轮寿命与可靠性综合设计及验证技术”、国防科工局科研项目以及部分型号项目的研究成果,是对多学科优化理论研究和实践工作经验的系统化和理论化总结。本书的主要特点是系统地研究了多学科设计优化的理论体系,围绕求解耦与重构方法、效率与精度权衡策略、不确定建模技术、多学科集成设计环境、多目标策略等方面进行了探索,并结合涡轮增压器的特点,给出了实施部件和整机多学科设计优化的方案。由于各个系统具有不

同的特点,因此读者可以通过本书的理论方法和具体应用实例,在实践中结合自身的工作融会贯通。

本书的研究得到了科技部 863 项目“航空发动机涡轮寿命与可靠性综合设计及验证技术”、国防科工局科研项目、博士后自然科学基金(20100471634)、西北工业大学基础研究基金(JC20100231)、国家自然科学基金(50905142)及型号项目的资助。本书的有关工作得到了国防科工局邱国新巡视员、赵乌恩主管,以及中国船舶重工集团公司杨子龙处长和重庆江增机械有限公司徐文江总设计师、刘红丹工程师的大力支持,在此一并向他们表示感谢。

本书从理论技术和实施手段等方面对多学科设计优化理论及其在船用涡轮增压器上的实施方法进行了阐述和说明,可作为叶轮机械设计、飞行器设计以及其他复杂系统设计专业高年级本科生和研究生的参考资料,也可供相关专业的研究人员和工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中难免出现不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2011 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 涡轮增压器多学科设计优化概述	1
1.1 船用涡轮增压器	1
1.1.1 压气机的工作原理及结构形式	3
1.1.2 涡轮的工作原理及结构形式	4
1.1.3 船用涡轮增压器的转子系统	5
1.2 多学科设计优化理论体系	7
1.2.1 解耦与重构方法	8
1.2.2 效率与精度权衡策略	9
1.2.3 多目标优化方法	10
1.2.4 多学科不确定性建模方法	10
1.2.5 多学科集成设计环境	11
1.2.6 数值仿真模型的校核	11
1.3 本书的主要工作	11
参考文献	12
第 2 章 涡轮增压器几何参数化造型设计	16
2.1 径流式叶型中弧线设计方法	17
2.1.1 子午面型线设计	17
2.1.2 $z-\theta$ 流面型线设计	18
2.1.3 Bezier 曲线	18
2.1.4 径流式叶型的生成	20
2.2 径流式叶型非均匀有理 B 样条设计方法	22
2.3 轴流式叶型设计	23
2.3.1 平面叶栅型线设计理论	23
2.3.2 五次多项式方法	24
2.3.3 叶型造型实例	25
2.4 叶身积叠成型	28
2.5 涡轮增压器核心部件造型设计	30
2.6 小结	32
参考文献	32

第3章 涡轮增压器学科分析理论	33
3.1 流场分析理论	33
3.1.1 雷诺平均下的 N-S 方程	34
3.1.2 湍流模型	34
3.1.3 交界面的数值处理	36
3.1.4 涡轮增压器流场特性分析	37
3.2 传热分析理论	39
3.2.1 传热分析的基本理论	39
3.2.2 对流换热的数值计算方法	40
3.2.3 涡轮增压器对流换热分析	42
3.3 结构分析理论	43
3.3.1 结构计算的基本理论	43
3.3.2 涡轮增压器结构相关学科分析	43
3.4 转子动力学分析方法	47
3.4.1 临界转速计算方法	47
3.4.2 转子系统不平衡响应计算方法	56
3.5 滑动轴承动力系数求解方法	59
3.5.1 滑动轴承的雷诺方程	59
3.5.2 油膜刚度和阻尼系数	60
3.5.3 油膜刚度和阻尼系数的计算	61
3.5.4 算例分析	65
3.6 小结	66
参考文献	66
第4章 多学科解耦-重构方法与耦合信息传递	68
4.1 多学科设计优化解耦与重构方法	68
4.1.1 耦合系统分析	68
4.1.2 系统重构方法	69
4.2 参数空间插值传递方法	71
4.2.1 参数空间插值方法	71
4.2.2 插值函数	73
4.2.3 算例	75
4.3 动网格技术	81
4.3.1 网格重生成方法	82
4.3.2 网格变形技术	82
4.4 小结	86

参考文献	87
第 5 章 涡轮增压器多学科可行优化设计	89
5.1 多学科可行方法	89
5.2 离心式压气机多学科可行优化设计	90
5.2.1 离心式压气机多学科分析	91
5.2.2 优化设计	91
5.3 涡轮多学科可行优化设计	95
5.3.1 涡轮多学科分析	96
5.3.2 优化设计	97
5.4 涡轮增压器整机多学科优化设计	100
5.5 小结	103
参考文献	104
第 6 章 效率与精度的权衡策略	105
6.1 试验设计与分析	106
6.1.1 试验设计方法	107
6.1.2 主次因素分析	109
6.2 近似技术	116
6.2.1 近似技术概述	116
6.2.2 基于近似方法的离心压气机气动优化	117
6.2.3 基于近似方法的涡轮多学科设计优化	122
6.3 变复杂度设计方法	128
6.3.1 变复杂度设计方法概述	128
6.3.2 离心式压气机耦合松弛多学科优化设计	131
6.4 小结	134
参考文献	135
第 7 章 多学科并行优化设计方法	136
7.1 协同优化方法	137
7.2 并行子空间优化方法	138
7.3 并行优化系统的应用	139
7.3.1 协同优化设计	140
7.3.2 并行子空间优化设计	143
7.4 基于近似模型的协同优化方法	144
7.5 优化方法的比较	147
7.6 小结	148
参考文献	149

第 8 章 多目标优化方法	150
8.1 多目标优化问题的特点	150
8.1.1 多目标优化问题的数学描述	151
8.1.2 Pareto 解集的定义	151
8.2 基于偏好的多目标优化方法	153
8.2.1 线性加权法	154
8.2.2 改进的线性加权法	155
8.2.3 极大-极小法	156
8.2.4 理想点法	157
8.2.5 ϵ -约束法	157
8.3 非偏好的多目标优化方法	159
8.3.1 多目标遗传算法	160
8.3.2 多目标粒子群优化算法	167
8.4 基于多目标遗传算法的优化设计	168
8.4.1 多目标优化算例	168
8.4.2 基于多目标遗传算法的压气机优化设计	170
8.5 小结	172
参考文献.....	172
第 9 章 多学科不确定性建模及优化设计	174
9.1 可靠性分析理论	175
9.1.1 可靠性分析基本概念	175
9.1.2 可靠性分析方法	176
9.2 增压器涡轮不确定性分析	179
9.3 基于可靠性的多学科设计优化	182
9.3.1 基于可靠性的优化设计方法	182
9.3.2 基于可靠性的多学科设计优化方法	186
9.3.3 基于近似技术的多学科综合可靠性优化设计	190
9.4 小结	191
参考文献.....	191
第 10 章 多学科集成设计优化环境	193
10.1 多学科集成设计环境的功能分析.....	193
10.1.1 多个学科的集成环境	194
10.1.2 变量设定、数据管理、历程可视化	195
10.1.3 优化算法库	195
10.1.4 试验设计、近似技术	195

10.1.5 质量工程	195
10.2 软件框架及介绍	195
10.2.1 软件总体框架	195
10.2.2 软件介绍	199
10.3 算例分析	204
10.3.1 算例 1:工字梁减重优化	204
10.3.2 算例 2:增压器涡轮多学科设计优化	206
10.4 小结	208
参考文献	208
第 11 章 数值仿真模型的校核	209
11.1 建模与仿真的 VV&A 技术	210
11.1.1 建模与仿真的 VV&A 技术	210
11.1.2 复杂系统数值仿真 VV&A 的解决思路	212
11.2 基于优化方法的模型校核	213
11.3 方法验证和结果分析	214
11.4 小结	218
参考文献	218

第1章 涡轮增压器多学科设计优化概述

增压技术由于在节能,提高内燃机动力性、经济性,降低废气排放和噪声等方面具有无可比拟的优点而被众多内燃机所采用。采用废气涡轮增压已经成为提高船用柴油机功率、减小单位马力体积和降低单位马力重量的最有效措施之一。伴随着产业的升级以及船用大功率柴油机的使用,船用涡轮增压器正向超高增压、高效率、大流量、高可靠性、长寿命、低噪声、制造简单、高生产率、低成本的趋势发展^[1~3]。涡轮增压器构造复杂,工作环境恶劣,是故障的多发部件,主要由压气机、涡轮和转子系统组成,其设计涉及气动、传热、结构、振动、噪声等学科领域,部件间、学科间耦合、相互影响强烈,因此涡轮增压器的设计是一个典型的多学科综合、复杂的系统工程。

对于大功率船用柴油机涡轮增压器这种多场耦合、可靠性要求高的产品,以往依靠串行设计方法设计,将增压器割裂成几个部件和学科,以部件和学科为单位展开确定性设计,以满足设计要求和设计指标。传统的设计方法,没有考虑部件、学科间的耦合影响,以及在产品加工过程和实际工况中存在的不确定性因素,一旦设计不能满足所有部件和学科要求,重复设计和验证将耗费大量的时间和成本。随着对性能、经济性和可靠性要求的不断提高,需要寻求一种能集相关学科于一体,综合考虑部件、学科之间的耦合影响,提高产品综合性能和可靠性的技术。

在这方面,目前出现的多学科设计优化(multidisciplinary design optimization, MDO)技术具有无可比拟的优势^[4~9]。多学科设计优化是近几十年来发展起来用于解决设计中多个学科耦合问题的优化设计方法,它借助现代计算机技术,集成各种相关学科的资源,充分探索理解各学科(子系统)的相互作用,以一定的优化算法搜索系统整体最佳方案,从而极大地提高设计速度 and 设计质量。因此研究多学科设计优化方法并应用在涡轮增压器等相关产品上,可以有效提升复杂系统的设计能力,缩小与国际水平的差距。

1.1 船用涡轮增压器

增压技术通过压缩空气来增加内燃机的进气量以提高整机的热机效率,根据增压驱动能量的不同,可以分为机械增压、废气涡轮增压和复合式增压三种形式,

现代船舶柴油机上更多采用废气涡轮增压。涡轮增压器主要由压气机、涡轮和转子三个系统构成,利用涡轮将内燃机排放废气的内能转换为机械能;压气机利用涡轮输出的机械功,把输送到内燃机的空气的压力提高,以达到增压的目的;而转子系统保证了增压器运行的稳定性。图 1.1 给出了涡轮增压器的工作原理图。图 1.2 给出了轴流式涡轮增压器的典型结构,图 1.3 给出了混流式涡轮增压器的典型结构。

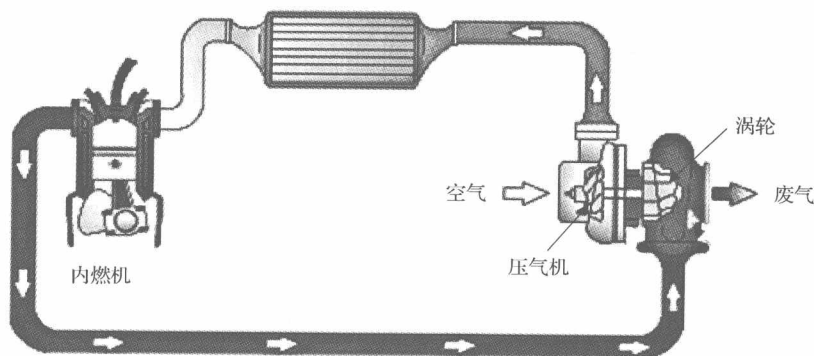


图 1.1 涡轮增压器的工作原理图

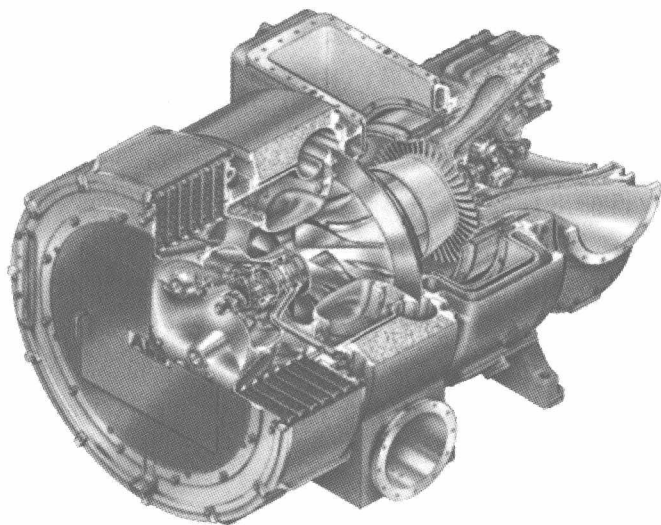


图 1.2 ABB 产 VTR 系列轴流式涡轮增压器

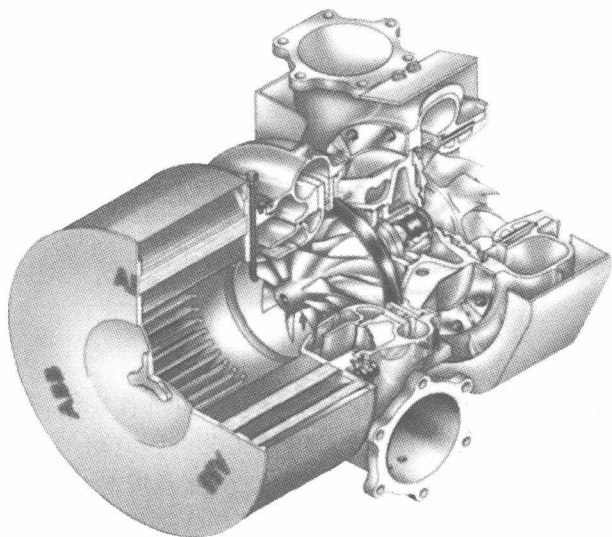


图 1.3 ABB 产 TPS 混流式涡轮增压器

1.1.1 压气机的工作原理及结构形式

压气机存在着轴流式、离心式两种形式。轴流式压气机通常采用多级设置,可以减小迎风面积、增大流量、提高压比,因而适用于大流量、大功率涡轮增压器中;相比于轴流式压气机,离心式压气机具有单级压比高、工艺性能好以及体积小的优点,在小流量情况下具有较高的效率的特点,在涡轮增压器得到了广泛的应用^[10,11]。离心式压气机通常由离心叶轮、扩压器和蜗壳组成;扩压器又可分为无叶扩压器和有叶扩压器两种形式,如图 1.4 和图 1.5 所示。

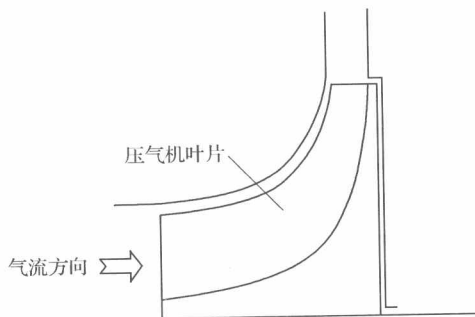


图 1.4 无叶扩压器示意图

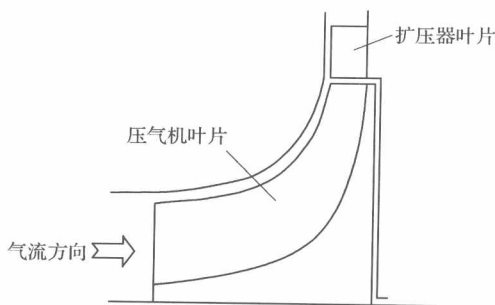


图 1.5 有叶扩压器示意图

当空气进入工作轮叶片组成的流道后,在叶轮叶片作用下,会跟着叶轮作高速旋转。由于受旋转离心力的作用,以及在叶轮里的扩压流动,气体通过叶轮后的压力、温度,特别是气流速度得到了较大的提高。气流从叶轮流出口时,它具有较高的流动速度。通常在叶轮后面设置扩压器以实现叶轮流出口气流动能的充分利用。由于扩压器通流面积逐渐扩大,气流流经扩压器时,其具有的动能大部分转化为压能,气流的速度降低,压力和温度升高。

无叶扩压器通常是由两个平行壁面构成的环形通道,其结构简单、造价低,对变工况的适应性强,性能曲线平坦,稳定工作范围大;另外,在叶轮出口马赫数较大时,效率降低不明显,可使叶轮外缘处的压力场分布较为均匀,减弱不均匀引起的周期性动应力,这对避免叶轮外缘疲劳破坏是有利的。其缺点是气流角变化不大,使其流程长、摩擦损失较大,因此,要求叶轮出气角不能太小;与叶片扩压器相比,在设计工况下其效率要低一些。此外,它主要靠增加直径达到扩压,因此必须增大机器的尺寸。叶片扩压器的优点是扩压度大而尺寸小;另外,在设计工况下的损失比无叶扩压器小,又流程短,因此效率高。但由于叶片的存在,变工况时产生冲击和分离损失,使效率下降较多;在攻角增大到一定值后,易发生强烈分离,导致压机发生旋转脱离和喘振,出现不稳定现象。

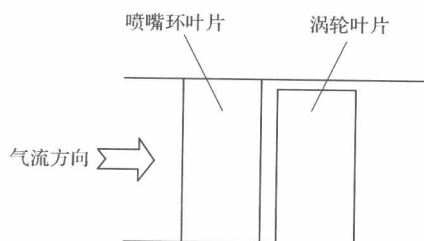


图 1.6 轴流式涡轮示意图

1.1.2 涡轮的工作原理及结构形式

涡轮同样也分为轴流式和径流式两种形式,如图 1.6 和图 1.7 所示。径流式涡轮具有效率高、易于制造及结构结实、可靠等特点;与径流式涡轮相比轴流式涡轮具有流量大、功率大等特点,因而多被应用在大功率内燃机上。根据涡轮的不同,可以将涡轮增压器分为轴流式涡轮增

压器、径流式涡轮增压器和混流式涡轮增压器。

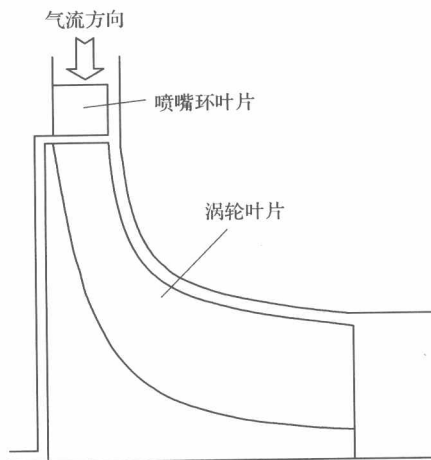


图 1.7 径流式涡轮示意图

当柴油机的废气进入涡轮静叶组成的收敛流道后,气体在这样的收敛形流道中进行膨胀,压力和温度下降、速度提高。同时,气流在静叶中拐弯加速,气流方向由正变斜。涡轮动叶同样具有收敛形的流道,当气流流经动叶时,气体继续膨胀,压力和温度继续下降,速度进一步提高。由于涡轮叶片叶背表面气流速度要大于叶盆表面的气流速度,因此,动叶叶盆表面上所受的气流压力比叶背表面上要大得多。叶片上所受的压差就形成了巨大的推动力,这个力的方向由叶盆指向叶背,推动工作轮旋转做功。

1.1.3 船用涡轮增压器的转子系统

转子系统是由转子和轴承共同组成,轴承起到了支承的作用,轴承及轴承的布置形式对涡轮增压器的工作性能有很大的影响。涡轮增压器中广泛采用内支承和外支承两种支承形式,如图 1.8 和图 1.9 所示。外支承转子的特点是稳定性好,两个工作轮之间的空间位置较多,便于进行气体密封;轴承受高温气体影响较小,并可采用单独的润滑系统,布置在转子两端;转子轴颈较小,降低了轴颈表面的切线速度,增加了轴承工作的可靠性,延长了轴承寿命。但是采用这种支撑方式的涡轮增压器结构复杂,重量和尺寸较大;压气机不能轴向进气,使进口空气流场较难组织;清洗涡轮增压器工作轮较难。采用内支撑方式的涡轮增压器结构相对简单,重量和尺寸较小;轴承不妨碍气体流路;清洗工作轮比较容易。但两个工作轮之间的空间较小,较难安排密封装置;支承轴颈较粗,使其表面切线速度较大,不利于轴承的寿命;一个轴承靠近涡轮,受热较大,影响轴承的工作。

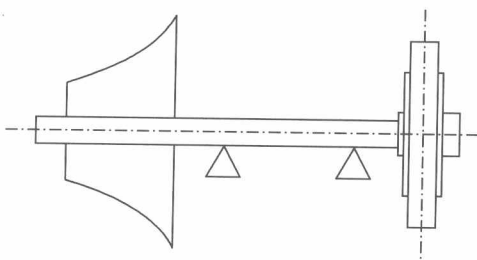


图 1.8 内支承

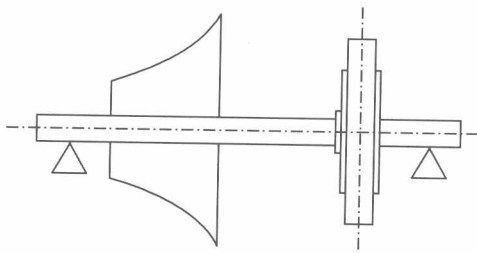


图 1.9 外支承

目前,涡轮增压器上采用的轴承包括了滚动轴承和滑动轴承,如图 1.10 和图 1.11所示。外支承布置的涡轮增压器转子通常采用滚动轴承支承,其机械摩擦阻力损失小,有良好的启动和加速性能;由于一般采用独立的自行循环的润滑系统,可保持涡轮增压器的清洁;更换轴承比较方便,不需要拆卸涡轮增压器。但其构造复杂,价格较高且寿命较短。相较于滚动轴承,滑动轴承结构简单,造价低廉,轴承寿命长,能和柴油机共用润滑系统。但机械摩擦损失较大,消耗的润滑油量较多。

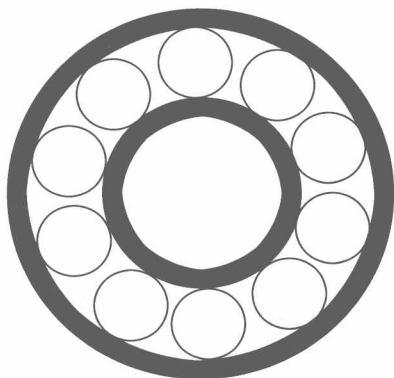


图 1.10 滚动轴承

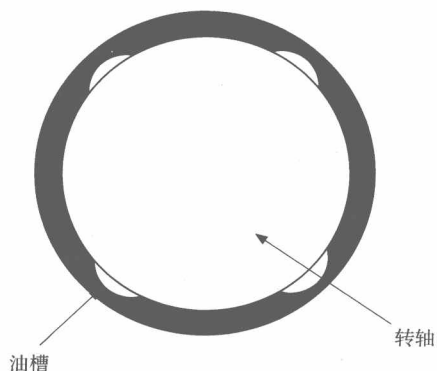


图 1.11 滑动轴承

1.2 多学科设计优化理论体系

多学科设计优化最早由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)高级研究员、现任美国航空航天学会(American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA)多学科设计优化技术委员会主席 Sobieszczanski-Sobieski 提出^[12],是一种充分探索子系统相互作用的复杂系统设计方法论,它通过探索和利用系统中相互作用的协同机制,利用多目标策略和计算机辅助技术来设计复杂系统及子系统,可以有效缩短设计周期,获取系统整体最优性能。多学科设计优化与传统设计方法相比具有如下优势:

① 考虑学科间耦合设计,更加贴切问题的实质,高保真。

② 多学科综合优化设计,采用多目标机制平衡学科间影响,探索整体最优解,避免串行重复设计导致的人力、物力、财力浪费。

③ 协同/并行设计,缩短设计周期。

由于多学科设计优化技术勾勒出了富有吸引力的美好前景,西方尤其是美国投入了大规模的人力物力进行研究。美国航空航天协会在1991年成立多学科设计优化技术委员会(MDO Technical Committee, MDO-TC),主旨是为多学科设计优化的发展、应用提供一个集中讨论的平台,除定期召开多学科设计优化会议外, AIAA 杂志 *Aerospace America* 特设多学科设计优化专栏,每年总结讨论一年中多学科设计优化在工业界、学术界所取得的成果。

作为创始人的 NASA,在1994年成立了多学科设计优化分部(MDO Branch),开展以包括高速民航客机(high-speed civil transport, HSCT)在内的飞行器多学科设计优化,包括解耦与重构技术^[13]、耦合信息传递技术^[14,15],多学科集成设计优化环境^[16]等多学科设计优化所涉及的各方面内容的研究,呈现了一大批的成果。桑迪亚国家实验室重点开展了不确定性分析方法^[17]和近似模型的应用^[18]研究,开发了多学科设计优化软件包 DAKOTA 软件^[19,20],该软件包包含不确定性、试验设计、并行优化设计和敏度分析的功能。

此外,美国各院校也纷纷成立多学科设计优化研究机构,开展多学科设计优化基础理论的研究。弗吉尼亚州立大学率先联合成立了先进飞行器的多学科分析与设计中心,该中心即被 NASA 选为五个培养多学科分析与设计研究人员的大学人才基地之一,并且得到了专项基金资助。Stanford^[21,22]大学针对飞行器开展的多学科设计优化的系列研究,形成了飞行器初步设计和三维结构设计的多学科设计优化方法^[23]等,并应用于 BWB 飞行器。佐治亚理工大学在飞行器多学科并行设计优化和近似方法方面做出了突出的贡献。

多学科设计优化技术在工程应用同样也产生了不少的成果。Lockheed Mar-