



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

严成忠 编著

开式转子发动机

OPEN ROTOR ENGINE

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

开式转子发动机

严成忠 编著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书对开式转子发动机的原理、分类及特性,总体性能和结构设计,与常规涡扇发动机不同的关键部件及子系统的设计,在飞机上的安装,地面试验,飞行试验,以及相关的测试技术等内容进行了系统、全面的介绍。本书以第一代开式转子发动机验证机的具体性能和结构为实例,并尽量补充国外最新研究进展情况,来具体阐述开式转子发动机的总体和部件设计特点,具有较强的工程实用性。

本书适用于对常规涡桨、涡扇发动机具有一定基础知识并从事航空发动机研制、应用和管理的技术人员,也可作为航空院校相关专业教师、研究生及高年级本科生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

开式转子发动机 / 严成忠编著. -- 北京:航空工业出版社, 2016. 1

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0945 - 6

I. ①开... II. ①严... III. ①转子-发动机-研究
IV. ①TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 309146 号

开式转子发动机

Kaishi Zhuanzi Fadongji

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

北京世汉凌云有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016 年 1 月第 1 版

2016 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 31.75

字数: 815 千字

印数: 1—2000

定价: 188.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展作出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

前 言

当代商用干线飞机的动力几乎清一色来源于涡扇发动机。在过去的 20 多年里，常规涡扇发动机一直不停地逐步提高总增压比、涡轮前温度、涵道比及部件效率，同时又不断地改进材料和结构（如复合材料风扇叶片、齿轮驱动风扇等），促使其单位燃油消耗率、噪声和 NO_x 排放量逐年降低，满足了商用飞机的使用需求。但是，常规涡扇发动机不能对单位燃油消耗率实现阶跃式改善，面对未来更加苛刻的节油减碳要求，似乎难以适应。然而，以可变桨距、双排对转桨扇为特征的开式转子发动机，由于可采用超大涵道比提高推进效率，与当代大涵道比涡扇发动机相比，能使单位燃油消耗率阶跃式地降低 25% ~ 30%。其在节油减碳方面的巨大潜力非常令人鼓舞，引起了世界航空发动机和飞机行业的高度关注与重视。美国、西欧等航空强国，纷纷投入巨资和人力，针对开式转子发动机的关键技术及其在飞机上的安装一体化等开展广泛研究和试验验证。近期，伴随着计算流体力学（Computer Fluid Dynamics, CFD）、计算气动声学（Computer Aerodynamic Acoustics, CAA）和风洞试验技术的进步，原来预计可能成为阻止开式转子发动机进入商用的最大挑战——噪声问题，也已取得突破。

当然，开式转子发动机在成为商业可行的产品投入航线使用之前，还有安装、成本、适航取证等一系列问题需要解决，但从其巨大的节油减碳潜力来看，可以认为，开式转子发动机最有希望成为未来的绿色航空动力，且首先可应用于新一代单通道干线客机上。

美国通用电气公司（GE 公司）决定与法国斯奈克玛公司（SNECMA 公司）合作，为下一代窄体干线客机研究牵拉式和推进式两种开式转子发动机的方案。GE 公司和美国国家航空航天局（NASA）合作，进行新一代开式转子发动机性能与声学特性的试验验证工作。

在欧盟，英国罗尔斯-罗伊斯公司（罗罗公司）和法国 SNECMA 公司及有关大学联合实施了革新的发动机结构系统验证计划（DREAM）和“清洁天空”（CLEANSKY）预先研究计划中可持续的绿色发动机计划（SAGE），研究开式转子发动机的方案和技术，验证其降低油耗的巨大潜力和满足国际民航组织未来更加严格的噪声规定的的能力。

最近，波音、空客两家飞机公司已开展开式转子发动机在新一代窄体干线飞机上应用的可行性研究。波音公司开始与英国罗罗公司、瑞士拉格公司（RUAG 公司）和德国 Deharde Maschinenbau 公司合作，研究在未来民用飞机上采用能高效节油的开式转子推进技术的发展潜力，并计划在 RUAG 公司的低速风洞进行采用开式转子发动机的模型飞机试验。空客公司正在与 SNECMA 公司一起研究采用开式转子发动机的飞机适航取证要求，且在欧盟新飞机概念研究（NACRE）预先研究计划下，对包括采用开式转子发动机的新飞机结构模型 A3 × × 进行了风洞试验。

目前，在国内外的参考文献中公开发表了很多有关开式转子发动机关键技术的理论和

试验研究的论文和报告等资料。但是，缺乏一本对开式转子发动机热力学原理、总体性能和结构设计、关键部件与系统设计、飞机上的安装一体化，以及地面试验与飞行试验等内容进行全面、系统、综合介绍的书。从事这一研究的同事们由于身边没有这样一本参考书也深感不便。为了填补这一空白，作者开始着手广泛搜集和积累有关资料，加以翻译、学习、消化、分类、归纳和总结，并结合自身工作的收获，较系统地编写了这本书，希望能为促进开式转子发动机技术在国内的研究和发展起到铺路石子的作用。

全书共分为 11 章。第 1 章阐明了在经济和环保的双重压力下，促使开式转子发动机的发展出现了新机遇，同时亦面临重大挑战。第 2 章通过与常规涡桨、涡扇发动机相比的方式，介绍开式转子发动机在工作原理和热力学性能等方面的特点。第 3 章按 4 种方式对开式转子发动机进行分类。第 4、第 5 章分别讲述开式转子发动机的总体性能和总体结构的基本设计概念。第 6~第 8 章分别介绍了开式转子发动机最有特色的 3 个关键部件（对转桨扇、对转双输出轴减速齿轮箱、对转多级动力涡轮）的基础设计知识。第 9 章简要介绍了开式转子发动机 3 个重要系统的设计特点。第 10 章重点讲述了开式转子发动机在飞机上的安装一体化设计。第 11 章介绍了开式转子发动机零部件、整机的地面试验和飞行试验，以及相关的测试技术。为使本书有较强的工程实用性，在编写过程中，除文字叙述和理论分析外，还将大量的计算公式和图表曲线相结合，并以第一代开式转子发动机验证机的具体性能和结构为实例，尽量补充能搜集到的国外最新研究进展情况，来阐述开式转子发动机的总体和部件的设计特点。对于开式转子发动机中燃气发生器的高、低压压气机，燃烧室，高、低压涡轮等部件，以及其他子系统，由于和常规涡桨、涡扇发动机基本相同，在本书不再赘述。

参加本书编写工作的有：严成忠负责编写前言，第 1、第 2、第 4 章，第 9 章的 9.1.1 及 9.2 和 9.3 节；孙立业负责第 5、第 10 章初稿的编写；王咏梅负责第 6 章初稿的编写；刘红霞负责第 7、第 11 章、第 9 章 9.1.2 节初稿的编写；杨东丹负责第 3 章初稿的编写。全书的终稿编写统一由严成忠完成。此外，梁春华为本书提供了部分参考资料，在此一并感谢。

本书涉及专业面广，由于作者知识水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，诚请各位专家和读者批评、指正。

符号表

拉丁字母符号

A	面积; 环形流通截面面积
B	涵道比
C	速度
C_F	推力系数, $C_F = 2F_S/C_0$
C_P	螺旋桨功率系数, $C_P = \frac{P_{pr}}{\rho n^3 D^5}$
C_T	螺旋桨推力系数, $C_T = \frac{F_{pr}}{\rho n^2 D^4}$
c_p	比定压热容
D	直径
\bar{d}	轮毂比
daN	10 牛
e	空气和燃气的气体常数 R 与绝热指数 k 的差别系数
F	推力; 拉力
F_{NZ}	喷气产生的推力
F_{pf}	桨扇产生的推力 (或拉力)
F_{pr}	螺旋桨产生的拉力 (或推力)
F_{rvs}	反推 (拉) 力
F_S	单位推力
f	油气比
H	高度; 焓
H_f	燃油最低热值
Δh	焓的变化量
I	转子的质量惯性矩
i	入射角
i_{red}	减速器传动比, $i_{red} = n_{T,pl}/n_{pf}$
IGV	进口导向叶片 (角度)
J	进距比 (前进比), $J = \frac{V}{nD}$; 热功当量
K_R	行星齿轮和太阳齿轮节圆半径比的函数, $K_R = 1 + 2R_{plan}/R_{sun}$
k	气体绝热指数

L	功
$L_{T, pf}$	带动桨扇的涡轮功
M	扭矩
m	质量流量
m_a	空气的质量流量
m_g	燃气的质量流量
m_f	燃油的质量流量
N	节径数
N_1	低压转子转速, r/min
N_2	高压转子转速, r/min
n	转速 (或多变指数)
n_1	低压转子转速, r/min
n_2	高压转子转速, r/min
n_{pf1}	前排桨扇转速, r/s
n_{pf2}	后排桨扇转速, r/s
n_{pf2i}	后排桨扇对应于纯轴向进气的虚拟转速, r/s
OGV	出口导向叶片
P	功率
p	压力
P_e	有效功率
$P_{S,e}$	单位有效功率
P_{eq}	当量功率
$P_{S,eq}$	单位当量功率
P_p	总的推进功率
P_{pf}	桨扇功率
$P_{T, pf}$	桨扇涡轮的功率
P_{red}	减速器传递的功率
PQA	修正功率系数
PQAJ3	桨扇载荷参数 ($PQAJ3 = PQA/J^3$)
PR	前、后排桨扇的功率比, $PR = P_{pf1}/P_{pf2}$
Q	热量
R	气体常数; 半径; 比值
RPM1	对转涡轮第一转子转速, r/min
RPM2	对转涡轮第二转子转速, r/min
rms	均方根值
S	熵
S_a	应力因子
sfc	单位燃油消耗率
SHP	轴马力, shp

T	温度
TQA	修正推力系数
t	时间
V	速度
$V_{S\perp}$	后排桨扇进口（前排桨扇出口）滑流的轴向分速
V_{TAS}	飞行真实空速
W_u	涡轮扭速，即相对速度切向分量
X	后排桨扇进口（前排桨扇出口）滑流绝对速度的切向分速
$Y_{T,pf}^*$	桨扇涡轮负荷参数， $Y_{T,pf}^* = \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{\sum_i u_i^2}}{C_{ad}^*}$
Z	叶片排数目
$Z_{T,R}$	对转涡轮转子叶片的排数

希腊字母符号

α_{PLA}	功率操纵杆或油门杆的角度
β	地面静止时的喷气推力当量功率经验系数
β_1	前排桨叶安装角
β_2	后排桨叶安装角
$\beta_{0.75R}$	叶展方向 75% 半径截面的桨叶角度
β_{pf}	桨叶安装角
β_{1D2}	对应于 D_2 位置处的前排桨扇安装角
ε	加权因子
η	效率
η_o	总效率
η_t	热效率
η_p	推进效率
η_{pr}	螺旋桨效率
η_{pf}	桨扇效率
$\eta_{pf,ft}$	桨扇飞行效率
η_m	机械效率
η_{HPC}	高压压气机效率
η_{THP}	高压涡轮效率
η_{LPC}	低压压气机效率
η_{TLP}	低压涡轮效率
$\eta_{T,pf}$	桨扇涡轮效率
θ	减速器比因子；加温比， $\theta = T_4/T_0$
π	压比

π_{pf}^*	桨扇增压比
$\pi_{C\Sigma}^*$	压气机总增压比
π_{LPC}^*	低压压气机增压比
π_{HPC}^*	高压压气机增压比
$\pi_{T,HP}^*$	高压涡轮膨胀比
$\pi_{T,LP}^*$	低压涡轮膨胀比
π_{Tpf}^*	桨扇涡轮的膨胀比
π_{NZ}^*	喷管膨胀比
ρ	密度
φ_2	后排桨扇相对进气角
ψ_{NZ}	喷管速度系数
ω	角速度
$\dot{\omega}$	角加速度
Π^*	喷流混合噪声功率

下标

a	空气; 环形
abs	绝对
ad	绝热
av	平均
C	压气机; 换算
cal	计算
cool	冷却用
cl	爬升
cr	巡航
des	设计
e	有效; 螺旋桨远方下游气流
ef	有效
eq	当量
ex	出口
ext	(功率) 提取
F	前排
f	燃油
flt	飞行
fr	自由
g	燃气
H	热

HP	高压
i	虚拟
id	理想
in	进口
j	喷气流
L	左
lum	集总
LP	低压
m	机械
max	最大
min	最小
net	净
o	总
opt	最佳
out	出口
ax	轴向
p	推进的；螺旋桨的；膨胀
pf	桨扇
plant	行星轮
pr	螺旋桨
PT	动力涡轮
R	转动；参考；后排
ring	环形轴
red	减速箱
rel	相对
rvs	反向
S	单位；滑流
s	叶展方向
sun	太阳轮
T	涡轮
t	总参数；热
NZ	喷管
⊥	轴向
Σ	总

缩写

ADP (aerodynamic design point): 气动力设计点

AGBT (advanced gearbox technology): 先进的齿轮箱技术

AGMA (american gear manufacturer's association): 美国齿轮制造商协会

APET (advanced prop - fan engine technology): 先进的桨扇发动机技术

CAEP (committee on aviation environmental protection): 航空环境保护委员会

CMC (ceramic matrix composite): 陶瓷基复合材料

DOE (design of experiments): 实验的设计

DREAM (validation of radical engine architecture systems): “梦想” ——革新的发动机结构系统验证计划

EI NO_x (nitrogen oxides emissions index): 氧化氮排放指数

ISA (international standard atmosphere): 国际标准大气

LVDT (linear variable differential transducer): 线性变量微分变换器

MPS (the model propulsion simulator): 供风洞试验用的推进式对转开式转子发动机缩尺模型推进系统试验件

NPSS (numerical propulsion system simulation): 美国推进系统数字仿真软件

PLA (power lever angle): 动力操纵杆 (油门杆) 角度

PROOSIS (propulsion object oriented simulation software): 西欧推进系统性能仿真软件

RRV (right rear mount vertical): 右后安装节垂直方向

SAGE (sustainable and green engine): 可持续的绿色发动机计划

SAGE1: 以罗罗公司为主的对转开式转子发动机研究计划

SAGE2: 以 SNECMA 公司为主的对转开式转子发动机研究计划

TEBC (thermal and environmental barrier coating): 热障防腐涂层

TOC (top of climb): 最高爬升

TRL (technology readiness level): 技术成熟度

UDF (unducted fan): 无涵道风扇

1A (first axial vibratory mode): 第一阶轴向振动模态

1F (first flexural vibrational mode): 第一阶弯曲振动模态

2F (second flexural mode): 第二阶弯曲振动模态

2S (two - stripe vibratory mode): 第二阶条形振动模态 (又称第二阶弦弯振动模态)

2T (second torsional mode): 第二阶扭转振动模态

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 开式转子发动机的节能潜力已经试验验证	(1)
1.2 原油价格上涨对民用航空发动机的影响	(2)
1.3 全球气候变暖对民用航空发动机的影响	(3)
1.4 开式转子发动机发展的新机遇	(3)
1.5 开式转子发动机面临的重大挑战	(5)
1.5.1 噪声	(6)
1.5.2 叶片包容性适航取证要求	(7)
1.5.3 与飞机机体的一体化	(7)
1.5.4 可达性和维修性	(8)
第 2 章 开式转子与涡桨、涡扇发动机的热力学分析比较	(9)
2.1 工作原理比较	(9)
2.2 热力循环及热效率的比较	(10)
2.3 推进效率比较	(13)
2.3.1 提高推进效率的措施	(13)
2.3.2 低速飞行时涡桨发动机的推进效率高	(14)
2.3.3 涡扇发动机提高推进效率的限制因素	(14)
2.3.4 开式转子发动机能达到较高的推进效率	(15)
2.3.5 理想推进效率及安装推进效率的比较	(16)
2.4 开式转子与涡扇发动机的性能对比分析	(17)
2.4.1 假设 2020 年开始投入航线的对比分析	(18)
2.4.2 假设 2030 年开始投入航线的对比分析	(19)
2.5 飞行速度比较	(20)
第 3 章 开式转子发动机的分类	(24)
3.1 按桨扇排数分类	(24)
3.1.1 单排旋转开式转子发动机	(24)
3.1.2 双排对转开式转子发动机	(24)
3.1.3 带整流叶片的单排旋转开式转子发动机	(25)
3.2 按桨扇位置分类	(26)
3.2.1 牵拉式开式转子发动机	(27)

3.2.2	推进式开式转子发动机	(27)
3.3	按桨扇驱动方式分类	(29)
3.3.1	齿轮传动类开式转子发动机	(29)
3.3.2	直接驱动类开式转子发动机	(30)
3.4	按有无涵道分类	(30)
第 4 章	开式转子发动机的热力学性能设计	(32)
4.1	开式转子发动机主要构件简介	(32)
4.1.1	燃气发生器 (核心机)	(32)
4.1.2	推进器 (或称桨扇)	(32)
4.1.3	桨扇涡轮及传动装置	(33)
4.2	基本性能参数	(35)
4.2.1	桨扇涡轮的轴功率 $P_{T,PF}$	(35)
4.2.2	桨扇功率 P_{pf}	(35)
4.2.3	桨扇的推进功率 $P_{pf,p}$	(36)
4.2.4	桨扇的推力 F_{pf}	(36)
4.2.5	喷气推力 F_{NZ}	(36)
4.2.6	总的推力 F 和总的推进功率 P_p	(36)
4.2.7	当量功率 P_{eq}	(36)
4.2.8	单位当量功率 $P_{S,eq}$	(37)
4.2.9	单位桨扇功率 $P_{S,pf}$	(37)
4.2.10	单位推力 F_s	(37)
4.2.11	有效功率 P_e	(37)
4.2.12	有效耗油率 $(sfc)_e$	(37)
4.2.13	当量耗油率 $(sfc)_{eq}$	(37)
4.2.14	开式转子发动机的热效率 η_t	(38)
4.2.15	推进效率 η_p	(38)
4.2.16	总效率 η_0	(38)
4.3	自由能的最佳分配	(38)
4.4	工作过程参数选择	(40)
4.5	直接驱动和齿轮驱动开式转子发动机的参数对比	(43)
4.5.1	对转涡轮参数的估算	(45)
4.5.2	桨扇参数的评估	(46)
4.5.3	单位燃油消耗率的比较	(47)
4.6	控制规律的选取	(48)
4.6.1	开式转子发动机控制的特点	(48)
4.6.2	发动机的控制规律	(49)
4.6.3	限制性控制规律	(50)
4.6.4	桨叶角度的控制规律	(50)

4.6.5	反推力控制规律	(52)
4.7	开式转子发动机的性能计算	(53)
4.7.1	设计点选取	(53)
4.7.2	气体热力学性质求解模型	(54)
4.7.3	部件特性	(54)
4.7.4	发动机设计点的热力学性能计算	(67)
4.7.5	非设计点稳态性能计算	(74)
4.7.6	非设计点瞬态性能计算	(77)
4.8	发动机工作特性	(79)
4.8.1	节流特性	(79)
4.8.2	高度—速度特性	(82)
4.8.3	气候特性	(86)
4.8.4	反推力工作特性	(87)
第5章	开式转子发动机的总体结构设计	(90)
5.1	总体结构布局	(90)
5.1.1	转子数目和压缩系统类型	(90)
5.1.2	牵拉式或推进式	(91)
5.1.3	齿轮驱动或无齿轮驱动	(97)
5.1.4	对转或单转	(97)
5.1.5	翼吊或尾吊	(98)
5.2	总体结构设计	(98)
5.2.1	牵拉式齿轮驱动开式转子发动机	(99)
5.2.2	推进式齿轮驱动开式转子发动机	(103)
5.2.3	推进式直接驱动开式转子发动机	(107)
5.3	燃气发生器	(115)
5.4	总体结构设计的几个具体技术问题	(117)
5.4.1	转子轴向力	(117)
5.4.2	径向间隙设计	(119)
5.4.3	重量	(122)
第6章	关键部件技术之一——对转桨扇	(126)
6.1	对转桨扇的气动设计	(126)
6.1.1	风扇前流路及外形的选择	(126)
6.1.2	气动设计过程	(128)
6.1.3	利用缩尺模型试验进行全尺寸设计验证	(129)
6.1.4	性能特性图	(129)
6.1.5	SR-3 设计对比	(130)
6.1.6	三维数值模拟分析最新进展	(132)

6.2 桨叶的结构与制造	(145)
6.2.1 桨叶结构设计	(145)
6.2.2 变桨距装置	(153)
6.2.3 防冰系统	(158)
6.2.4 桨叶的制造	(159)
6.3 桨叶的强度分析	(163)
6.3.1 有限元模型	(163)
6.3.2 稳态分析	(164)
6.3.3 振动分析	(169)
6.3.4 鸟撞	(175)
6.4 气动弹性稳定性分析	(176)
6.4.1 桨叶颤振的基本特征	(176)
6.4.2 桨叶颤振分析和预测方法	(177)
6.4.3 桨叶气动弹性设计程序	(180)
6.4.4 飞行包线内稳定性评估	(183)
6.5 桨扇声学设计	(185)
6.5.1 气动声学主流理论方法发展历程	(185)
6.5.2 传统涡扇发动机声学设计方法	(188)
6.5.3 桨扇声学设计的最新进展	(194)
6.5.4 小结	(206)
第7章 关键部件技术之二——对转双输出轴减速齿轮箱	(208)
7.1 设计要求	(208)
7.1.1 原则性的设计目标	(208)
7.1.2 具体设计要求	(209)
7.2 结构研究	(214)
7.3 部件技术选择	(216)
7.3.1 齿轮类型选择	(216)
7.3.2 轴承类型选择	(219)
7.3.3 齿轮和行星轴承材料选择	(221)
7.4 艾利逊公司齿轮箱详细设计	(222)
7.4.1 齿轮装置	(222)
7.4.2 行星架	(229)
7.4.3 轴系和花键	(231)
7.4.4 轴承	(235)
7.4.5 齿轮箱壳体	(246)
7.4.6 润滑系统	(248)
7.4.7 密封	(254)