

# 航空发动机 强度设计试验手册

(试用本)

第二篇 第四章

轴的强度、刚度与疲劳试验

第三机械工业部第六研究院

# 航空发动机强度设计、试验手册

第二篇 第四章

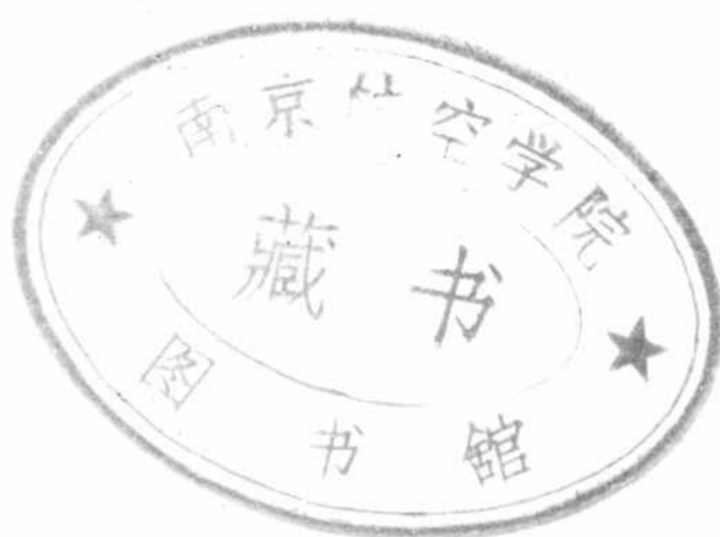
## 轴的强度、刚度与疲劳试验



\*30064336\*

主 编 刘敦惠 唐正宇

主 审 高连生 王通北



第三机械工业部第六研究院

495827

# 出 版 说 明

为加强航空发动机强度专业的设计和基础科研工作，总结建国以来航空发动机强度专业的工作成果，我们组织编写了“航空发动机强度设计、试验手册”（试用本），并在今后的试用过程中，不断地加以修正、充实和提高，进而为编制我国航空发动机强度规范打下基础。

本手册分设计和试验两篇。设计篇有六章，主要介绍发动机总体结构强度和叶片、盘、轴、机匣等主要零、部件的常规强度计算方法和有限元素法，并给出了相应的计算程序。试验篇六章介绍了主要零、部件的强度试验方法、试验设备、测试技术及误差分析等内容。书中也收集了国外航空发动机强度设计计算与试验等方面的有关资料。由于手册涉及专业内容较多，故采取分章出版。每章为一分册。

本手册主要供从事航空发动机结构设计、强度计算和强度试验的人员使用；也可供教学及有关专业人员参考。

直接参加本手册编写工作的有六〇六、六〇八、六二一、六二四、六三〇所，一二〇、三三一、四一〇、四二〇、四三〇厂，〇一一基地二所，南航、北航、西工大；三院三十一所；七院七〇三所、七〇一所和上海长征机械厂。三〇一所和六二八所为本手册提供了有关资料。

本手册由于是初次编写，时间仓促，水平有限，错误和不妥之处在所难免，诚恳地希望同志们提出批评和指正。

第三机械工业部

第六研究院

## 内 容 摘 要

本章介绍了主轴的静强度、刚度及疲劳强度试验的目的、原理及方法；重点叙述了主轴的疲劳强度试验，阐述了由飞行载荷谱转化为试验载荷谱和根据试验结果确定使用寿命的基本原理及方法；并对疲劳寿命试验、疲劳对比试验的步骤及数据处理作了较详细的描述；还介绍了主轴疲劳强度试验器的设计与典型结构。

# 常用符号说明

## 一、基本符号

$a_k$	冲击值
$E$	弹性模量
$f$	材料条纹值
$f_x$	疲劳强度的散度系数
$G$	剪切模量
$h$	深度
$H_B$	布氏硬度
$K$	单侧容限系数
$K_{su}$	强度极限的散度系数
$m$	指数
$M_B$	陀螺力矩
$M_K$	扭矩
$M_u$	弯矩
$M_{u0}$	压气机组件引起的弯矩
$M_{uT}$	涡轮组件引起的弯矩
$N$	在指定的应力水平下, 试件疲劳破坏前所经受的应力循环数
$n$	按标准循环表示的累积疲劳损伤
$N_P$	具有存活率 $P$ 的疲劳寿命
$P$	轴向力; 破坏率
$P_{cc}$	压气机组件横向力
$P_{cT}$	涡轮组件横向力
$R$	应力比
$R_{ii}$	内轴支反力
$S$	循环应力; 子样方差的平方根
$S_a$	应力半幅
$S_m$	平均应力
$S_x$	$X$ 次循环寿命的疲劳分散度系数
$S_{st}$	标准循环的峰值应力
$\bar{X}$	子样对数循环寿命的平均值
$X_p$	具有存活率 $P$ 的对数疲劳寿命
$Y$	在室温下受载荷后主轴的变形

$\alpha_x$	X次循环寿命的有效应力集中系数
$\alpha_{\sigma\theta}$	拉压与弯曲有效应力集中系数
$\alpha_{\tau\theta}$	扭转有效应力集中系数
$\delta_5$ (%)	延伸率
$\gamma$	剪应变; 可信度
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	第一、二、三主应变
$\theta$	等倾角
$\theta'$	俯仰角速度
$\theta''$	俯仰角加速度
$\lambda$	缺口敏感系数
$\mu$	母体平均值; 泊松比
$\nu$	泊松比; 自由度
$\sigma$	正应力; 母体方差的平方根
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	第一、二、三主应力
$\sigma_b$	抗拉强度极限
$\sigma_E$	当量应力
$\sigma_h$	高循环应力
$\sigma_l$	低循环应力
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$	活动直角坐标中轴表面上任一点的三个应力分量
$\sigma_{-1,3}$	$10^3$ 次循环的零平均应力弯曲疲劳强度
$\sigma_{-1,6}$	$10^6$ 次循环的零平均应力弯曲疲劳强度
$\sigma_{-1}; \tau_{-1}$	材料 $10^7$ 次循环零平均应力弯曲疲劳强度和扭转疲劳强度
$\tau$	剪应力
$\tau_{-1,3}$	$10^3$ 次循环的零平均应力扭转疲劳强度
$\tau_{-1,6}$	$10^6$ 次循环的零平均应力扭转疲劳强度
$\tau_{e1T}$	已试轴的当量稳态应力
$\tau_y$	最坏试件 X剪应力分量
$\tau_x$	最好试件 X剪应力分量
$\phi'$	横滚角速度
$\phi''$	横滚角加速度
$\psi$	偏航角速度
$\psi''$	偏航角加速度
$\psi\%$	收缩率

**二、下角注符号**

h	高
l	低
max	最大

min	最小
r	径向
S	主轴的
Z	轴向
$\theta$	切向（周向、环向）
$\Sigma$	总和的

# 序 言

近十年来,我国航空发动机的使用实践,为主轴构件的强度设计和试验技术提供了宝贵的课题。这些课题涉及到轴类零件结构完整性的成套技术。轴的使用载荷谱和标准循环试验载荷谱的制定,有限元素法和三向光弹法用作轴的应力分析,拉、扭、弯综合加载疲劳试验器的建立,主轴疲劳试验校核和使用寿命的给定,以及轴件最佳结构强度设计方案的选择、使用寿命的估算方法和几种主要轴材料P—S—N曲线的验制等,有如一株株禾苗在祖国航空科技园地破土而出,并已通过某型发动机涡轮轴的强度改进得到试验、试飞的实践检验。与国外相应技术比较,虽仍有差距,但终属自己的实践所得,合乎我情,易为我用,便于我改,具有明显的独特性、现实性和再造性。需要不断总结经验以求发展提高。事实表明,积极学习国外先进技术并与自己的具体实践相结合,创造出具有我国特色的和现代水平的科学技术,这一历史任务一定要完成,也一定能够完成。本章就是力求本着这种精神对十年来主轴结构完整性研究中的有关试验技术,特别是疲劳强度试验方面的技术成果进行初步总结,并参考国外某些有关文献而编写的。

按本章的编写任务,是以避开轴系临界转速,即无共振发生为前提来介绍主轴的静强度、刚度和疲劳试验。重点讨论主轴的疲劳强度试验,也涉及到与试验有关的一些计算。

主轴是航空发动机传递扭矩的高速旋转零件,它的断裂可能造成机毁人亡的严重后果,所以主轴的强度试验研究对发动机结构完整性具有特别重要的意义。

主轴强度试验是目前新机设计定型必不可少的试验验证环节,也应当作为批生产主轴质量管理中分析质量反馈信息的重要手段。

为避免同其它章节重复,在光弹应力分析、电测、探伤检查、误差分析等通用技术方面,本章只谈与主轴强度有关的特殊内容;一般内容本章不再赘述。

本章由刘敦惠、唐正宇、何容林等编写,经高连生、王通北主审。此外,方祖英、张开方、马良基、陈欣如、暴明秀及新都机械厂轴强度室有关同志对本手册编辑给过许多具体帮助。还有沈炳炎、徐建春、刘晓峰等在审稿中提出了不少宝贵意见,特此表示感谢。

《航空发动机强度设计、试验手册》(试用本)

第二篇第四章编写小组 一九八二年四月



# 目 录

常用符号说明	( V )
序 言	( VIII )
第一节 概述	( 1 )
第二节 主轴的静力强度与刚度试验	( 5 )
一、应力分布试验	( 5 )
(一) 试验目的	( 5 )
(二) 试验方法	( 5 )
(三) 电测法	( 5 )
(四) 光测法	( 10 )
二、刚度试验	( 18 )
(一) 试验目的	( 18 )
(二) 对试验件的要求	( 18 )
(三) 试验载荷和试验温度	( 18 )
三、屈服强度试验	( 19 )
(一) 试验目的	( 19 )
(二) 试验载荷	( 19 )
(三) 加载速度和保载时间	( 20 )
(四) 试验成功的标准	( 20 )
四、极限强度试验	( 20 )
(一) 试验目的	( 20 )
(二) 试验载荷	( 20 )
(三) 加载速度和保载时间	( 21 )
(四) 试验成功的标准	( 21 )
五、蠕变试验	( 21 )
(一) 试验目的	( 21 )
(二) 对试件的要求	( 21 )
(三) 试验载荷和试验温度	( 21 )
(四) 加载速度和保载时间	( 21 )
(五) 试验成功的标准	( 21 )
第三节 基本概念及原始资料	( 22 )
一、基本概念	( 22 )
(一) 工作包线与机动飞行包线	( 22 )

(二) 主轴的飞行剖面	( 22 )
(三) 主轴的使用载荷谱	( 22 )
(四) 主轴的应力剖面	( 22 )
(五) S—N 曲线	( 22 )
(六) 古德曼 ( Goodman ) 图	( 24 )
(七) 低循环疲劳	( 25 )
(八) 累积疲劳损伤	( 25 )
(九) 等效应力公式	( 25 )
(十) 高循环折合成低循环的方法	( 25 )
(十一) 复合应力作用下主轴的当量应力计算公式	( 27 )
(十二) 分解应力剖面成单个的应力循环	( 28 )
(十三) 标准应力循环 ( 也称参考循环 )	( 29 )
(十四) 预定安全循环寿命 ( 也称批准循环寿命 )	( 29 )
(十五) 飞行换算比	( 29 )
(十六) 使用循环寿命	( 30 )
(十七) 使用小时寿命	( 30 )
二、原始资料	( 30 )
(一) 主轴结构设计图	( 30 )
(二) 确定主轴飞行载荷谱的原始资料	( 30 )
(三) 主轴材料的机械性能	( 34 )
(四) 影响疲劳寿命的表面状态系数	( 34 )
(五) 主轴 $10^6$ 次循环的应力集中系数	( 34 )
<b>第四节 主轴试验载荷谱的确定方法</b>	( 35 )
一、疲劳鉴定中的主轴使用载荷谱	( 35 )
(一) 主轴上的使用载荷	( 35 )
(二) 目标使用寿命及低循环与高循环之比	( 38 )
(三) 主轴的使用载荷谱	( 39 )
二、主轴使用载荷谱简化成主轴试验载荷谱	( 40 )
(一) 使用载荷谱简化成试验载荷谱的原则	( 40 )
(二) 标准循环载荷谱的确定方法	( 40 )
(三) 主轴疲劳试验中的系数	( 41 )
(四) 主轴疲劳试验载荷谱	( 44 )
(五) 飞行载荷谱简化成试验载荷谱的实例	( 45 )
(六) 国外主轴疲劳试验的应力试验大纲	( 53 )
<b>第五节 主轴的疲劳强度试验</b>	( 56 )
一、试验目的	( 56 )
二、试验原理与实施	( 56 )

(一) 试验原理	( 56 )
(二) 试验的实施	( 57 )
三、主轴的疲劳寿命试验	( 59 )
(一) 准备试验件	( 59 )
(二) 内力分布测量	( 59 )
(三) 载荷的标定与检测	( 63 )
(四) 试验程序	( 66 )
(五) 误差分析与数据处理	( 68 )
(六) 国外机械试验大纲实例	( 72 )
四、主轴的疲劳对比试验	( 76 )
(一) 主轴疲劳寿命对比试验载荷谱之特点	( 76 )
(二) 试验方法	( 77 )
(三) 试验误差分析	( 78 )
(四) 对比试验结果的检验	( 78 )
(五) 绘P—N图	( 84 )
(六) 例题	( 86 )
五、利用原试验结果估算安全寿命的方法	( 92 )
(一) 利用轴原有试验结果估计另一类同材料和热处理制度轴的安全寿命方法	( 92 )
(二) 轴的标准应力循环载荷改变, 利用原有试验结果估算批准循环寿命的方法	( 92 )
(三) 例题	( 97 )
<b>第六节 主轴使用寿命的确定方法</b>	( 99 )
一、方法简述	( 99 )
二、求飞行任务谱换算比	( 99 )
(一) 计算飞行任务谱的小时损伤换算比	( 99 )
(二) 批生产机种的不同寿命轴的剩余寿命试验求小时损伤换算比	( 105 )
三、预定安全寿命的使用与验证试验, 求主轴的使用寿命	( 105 )
<b>第七节 主轴疲劳寿命试验器</b>	( 108 )
一、主轴疲劳寿命试验器的设计原理	( 108 )
(一) 试验器模拟条件的确定方法	( 108 )
(二) 试验器载荷谱的特点	( 109 )
(三) 对试验器的基本要求	( 110 )
二、几种典型的轴试验器介绍	( 110 )
(一) 扭矩、弯矩、轴向拉力综合加载轴试验器	( 110 )
(二) 扭矩、振扭、弯矩、轴向拉力综合加载轴试验器	( 112 )
(三) 卧式扭转、振扭和轴向拉力综合加载轴试验器	( 115 )

(四)立式纯扭矩主轴疲劳试验器·····	( 118 )
三、试验器的边界条件模拟·····	( 118 )
四、试验器的载荷谱模拟·····	( 119 )
(一)国内几种轴试验器的载荷参数·····	( 119 )
(二)载荷波形、频率和误差·····	( 123 )
(三)关于旋转变矩的模拟·····	( 123 )
(四)关于扭矩的模拟·····	( 129 )
(五)关于轴向力的模拟·····	( 129 )
(六)循环的控制方法·····	( 130 )
(七)标定与检测系统·····	( 134 )
五、试验间布局及要求·····	( 134 )
附录 I  主轴材料的机械性能·····	( 137 )
附录 II  影响疲劳寿命的表面状态系数·····	( 145 )
附录 III  主轴 $10^6$ 次循环的应力集中系数和缺口敏感系数·····	( 147 )
附录 IV  几种几何形状和载荷条件下的主轴应力强度因子K的公式·····	( 156 )
附录 V  设计分析中的主轴使用寿命评估·····	( 163 )
附录 VI  国外航空发动机轴试验器特征参数汇总·····	( 177 )
参考文献·····	( 178 )

# 第一节 概 述

主轴在涡轮发动机上主要起传递功率和联结各转动部件的作用，它通过轴承直接或间接地支承在发动机壳体上。

发动机主轴包括涡轮轴和压气机轴，在双转子发动机上可分为高压涡轮轴，低压涡轮轴，高压压气机轴和低压压气机轴。见图 1—1

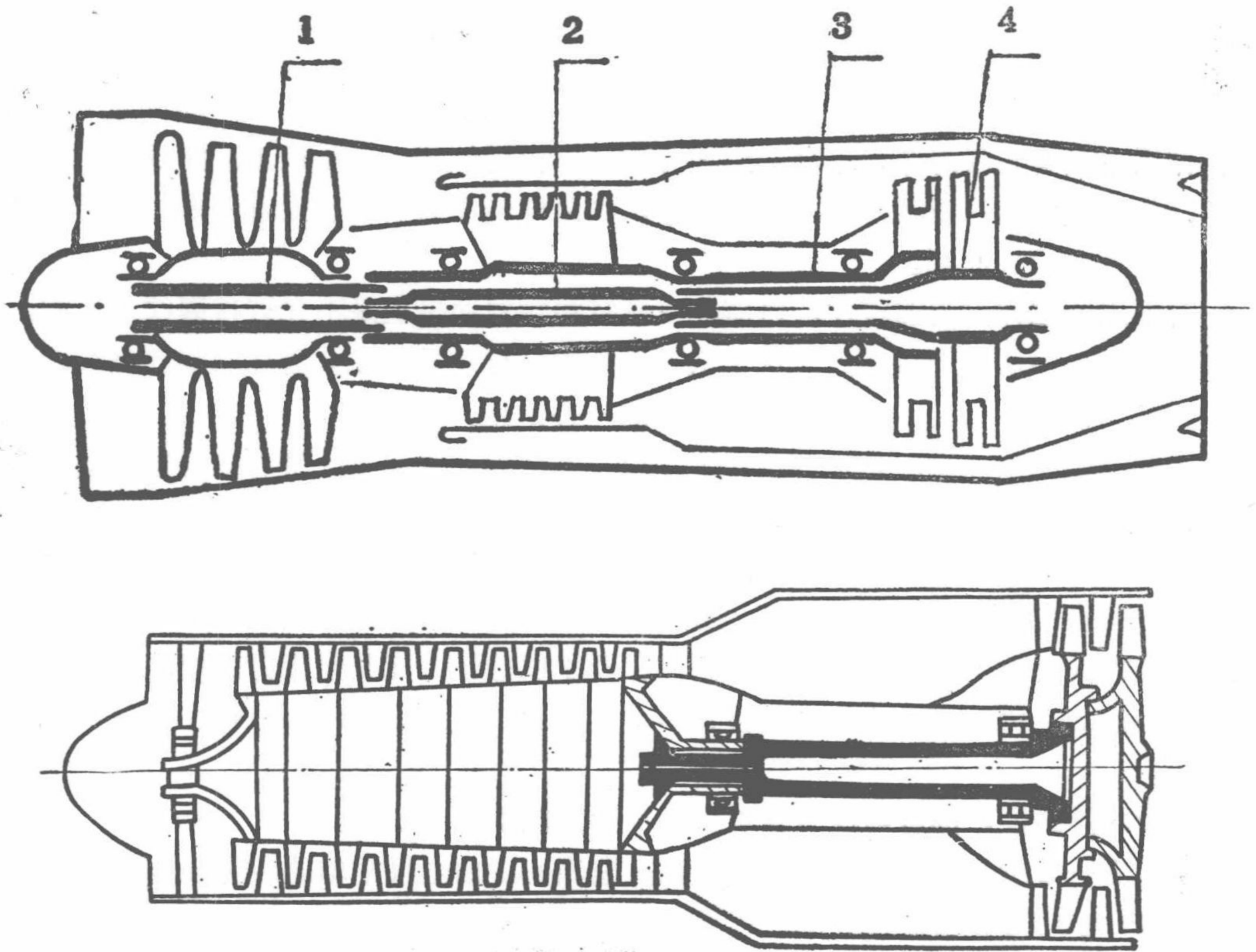


图 1—1 发动机典型轴系

- |           |          |
|-----------|----------|
| 1—低压压气机轴； | 2—传动轴；   |
| 3—高压涡轮轴；  | 4—低压涡轮轴。 |

在飞行中，轴上承受着较大的扭矩、弯矩、轴向力、陀螺力矩、离心力及振动等负荷，在发动机高温区工作的轴还受有热负荷，这些载荷以高循环或低循环的方式施加在轴上。

由于结构上的需要，轴上往往具有台阶、孔、槽、花键等几何形状，在这些部位，由于应力集中，出现很高的局部应力，以致可能产生疲劳裂纹。

根据主轴在涡轮发动机上的作用，它的断裂，一般都会造成极其严重的后果，因此属于航空涡轮发动机重要强度构件。

在一般的试车台架上对发动机长期试车，主轴上不仅难以出现在飞行使用中经常出现的扭矩，更不会出现由于机动飞行引起的陀螺力矩和弯矩。因此对主轴疲劳寿命试验考核一般在试验器上进行。

主轴强度的可靠性与合理性建立在理论计算与试验结果的统一上。因为试验是主要部件和主要载荷的模拟试验，它始终脱离不开理论的指导。但理论计算（包括所选用的系数）也要通过试验进行验证。

从故障情况可以看出，主轴绝大多数破坏均属于疲劳断裂。因此，在交变载荷下的疲劳试验是主轴试验的重点。

早期的疲劳强度校核是无限寿命设计原则，通过了疲劳强度校核，则认为主轴在外载荷作用下具有无限寿命，不会产生疲劳破坏。但近期来，为了追求航空发动机推重比指标，势必减轻轴的重量，提高应力水平，仅保证轴在需要的有限寿命内安全可靠，即采取安全寿命设计原则。

对于主轴这样重要的零件，目前，在航空涡轮发动机上是不允许带裂纹工作的，一旦发现裂纹，即认为寿命终止。对于从初始裂纹到导致零件完全破坏的临界裂纹的循环数，只作为确定检修周期，考虑破损安全的一种依据。

主轴结构完整性试验是发动机转子结构完整性的重要部分，所以需要对手轴进行静强度（主要指屈服和极限强度）、刚度和疲劳强度的校核。屈服强度校核是为限制主轴在所有正常工作状态的永久变形不大于规定值，以保证发动机正常工作。极限强度校核为保证主轴在应急受力情况具有抵抗整体破坏的能力。刚度校核是校核轴的变形是否在发动机结构允许的范围内。这些均需通过试验予以验证。尤其是疲劳强度理论计算目前都是经验性的，因此主要靠材料试验、构件试验和使用经验来保证主轴在飞行中的疲劳强度。

主轴的静强度、刚度与疲劳强度试验框图如图 1—2 所示。

如图 1—2 所示的主轴强度试验框图，它表明了由全尺寸轴的疲劳强度试验确定主轴的总飞行小时寿命的流程和工作内容。略述如下：

- 1、由典型飞行剖面计算或实测获得飞行载荷谱。
- 2、借助于应力分析确定考核截面，将飞行载荷谱转换为考核截面的应力谱。从而确定标准应力循环，再得到对应于标准应力循环的标准循环载荷。可利用 S—N 曲线对主轴进行寿命估算。
- 3、将标准循环载荷乘以恰当的系数得到试验载荷谱。
- 4、在主轴疲劳试验器上进行疲劳寿命试验。
- 5、数据处理得到主轴的预定安全标准循环寿命。
- 6、由飞行剖面统计和计算损伤数求飞行换算比。对于批生产机种，可取不同寿命

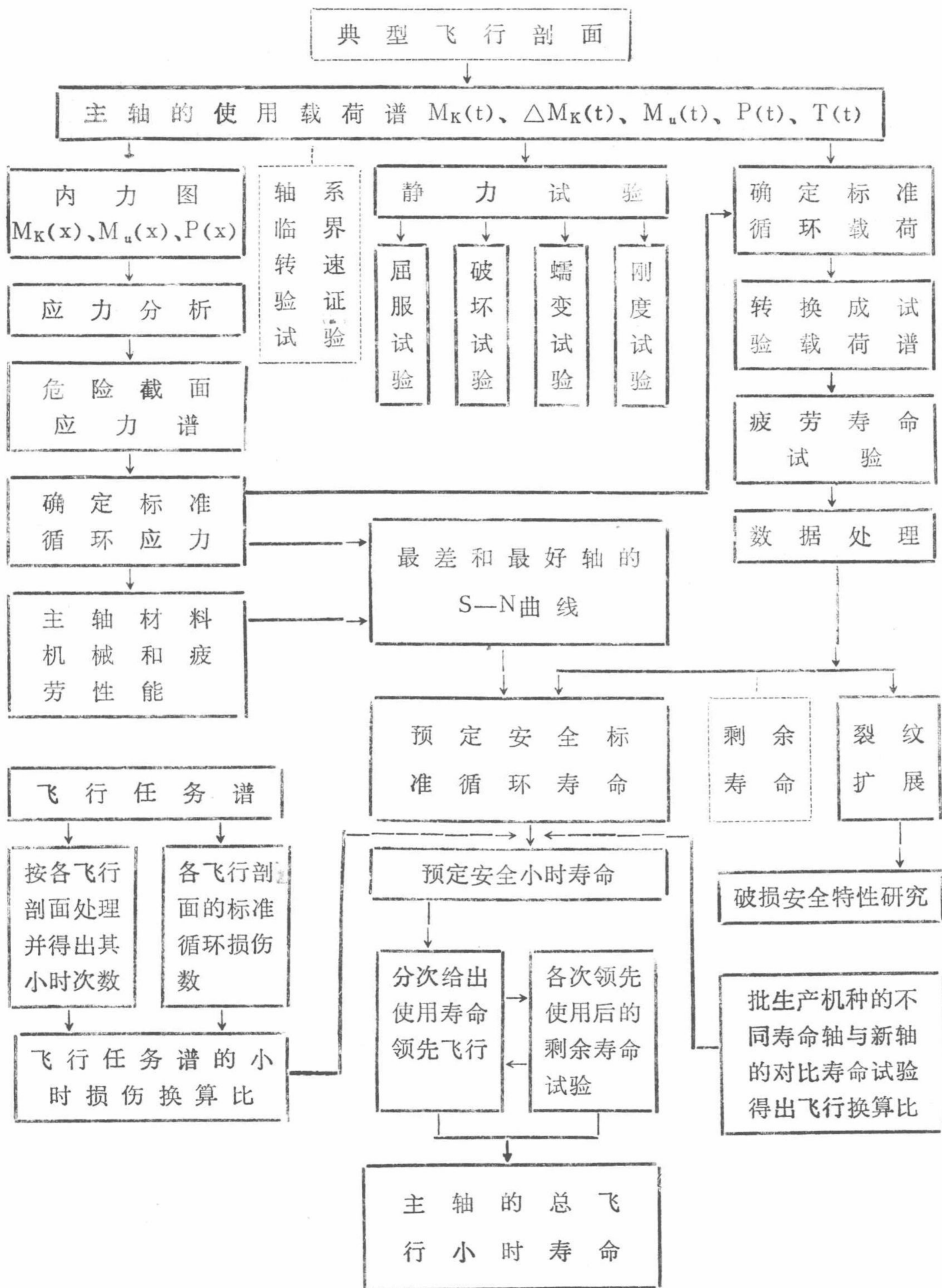


图 1—2 主轴强度工作框图

轴的对比寿命试验得飞行换算比。

7、将预定安全标准循环寿命除以飞行换算比得预定安全小时寿命。

8、取 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ 的预定安全小时寿命作为初始使用寿命，经实际飞行完毕后返回作剩余寿命试验，确定第二次使用寿命。几次如此试用和试验，逐渐逼近经使用验证的预定安全小时寿命。



## 第二节 主轴的静力强度与刚度试验

发动机的主轴是高速旋转部件，疲劳断裂是主要破坏形式，因此静力试验主要是观测应力分布，验证应力计算，为疲劳试验打下应力分析的基础。对于具有相同材料性能的主轴，屈服强度和极限强度同总体应力分布有关，疲劳寿命主要决定于局部应力。由于发动机主轴一般承受了复合应力，并具有一些较复杂的几何形状，因此目前在理论上和实践中均无把握以应力分布试验来代替屈服强度试验、极限强度试验和疲劳寿命试验。所以还应当作包括屈服强度、极限强度、蠕变和刚度的静力强度验证试验。

### 一、应力分布试验

#### (一) 试验目的

- 1、寻找主轴的强度薄弱环节：通过应力分布试验测出轴的应力分布与变形曲线，结合载荷谱的分析，可找出薄弱环节，以利于改进设计、工艺等。
- 2、确定危险点的应力谱：由载荷谱和应力分布图，确定危险点的应力谱，从而选定标准应力循环；根据标准应力循环可作轴的寿命估算和轴的疲劳寿命试验。
- 3、验证理论计算：通过对应力精确测量，验证理论计算与实验是否相符。

#### (二) 试验方法

应力分布试验一般采用电测法和光测法两种。电测法较适用于大件总体应力分布测量，可以在构件上直接测得应变量。光测法一般用模型实验，对局部应力分布测量较精确。

脆性漆法测量应力分布偶而也用，其精度较低，但方便迅速。以下只介绍主轴的电测法和光测法。

#### (三) 电测法

##### 1、电测应力分布的基本原理：

金属材料在弹性范围内受载变形时，不受外力作用的自由表面部分可当作平面应力问题考虑，按平面应力问题的广义虎克定律，可以得到应力与应变的关系式。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E(\epsilon_x + \mu \epsilon_y)}{1 - \mu^2} \\ \sigma_y &= \frac{E(\epsilon_y + \mu \epsilon_x)}{1 - \mu^2} \\ \tau_{xy} &= G\gamma_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$