

航空发动机 强度设计、试验手册

(试用本)

第二篇 第三章

轮盘的强度试验

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 第三章

轮盘的强度试验

(试用本)

主 编 刘 湘 生

主 审 王 铎 宋 兆 泓



第三机械工业部第六研究院

397842

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）。并望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 提 要

航空发动机零件强度试验手册

本章主要从结构完整性与损伤容限概念出发，对发动机的重要承载零件——轮盘，提出了为保证其具有足够的强度储备、安全寿命与较高经济性所需要进行的试验检验措施。书中综合了国内外有关的规范、要求与试验技术，介绍了轮盘的超转、超温与破裂试验，轮盘的实验应力分析，轮盘的低循环疲劳试验，基于断裂力学思想的轮盘剩余寿命估算、试验及其防破裂设计，轮盘的振动试验等内容。并着重介绍了各类试验所依据的原理、方法、所需设备、各项参数的测量与处理等有关技术知识。此外，书中也收集了一些国家的航空发动机轮盘强度与寿命试验规范和条例，以供使用参改。

(本册用)

主 编 王 崇 德

副 编 王 崇 德 王 崇 德

本书常用符号

A —— 振幅	毫米	fg —— 轮系振动频率	赫芝
A —— 加速度	毫米/秒 ²	fr —— 固有频率	赫芝
Ac —— 叶片出口面积	厘米 ²	frh —— 前行波频率	赫芝
[Ai] —— 振型矩阵		frl —— 后行波频率	赫芝
{Ai} —— [Ai]中的第 i 列向量		fs —— 轮系振动静频率	赫芝
Api —— 第 P 个座标处第 i 阶振型系数		g —— 重力加速度	米/秒 ²
Asi —— 第 S 个座标处第 i 阶振型系数		gi —— 结构阻尼系数	
a —— 椭圆半短轴长度	毫米	h —— 厚度	厘米
ac —— 临界裂纹尺寸	毫米	h _{lr} —— 轮缘厚度	厘米
a ₀ —— 初始裂纹尺寸	毫米	hm —— 模型盘厚度	厘米
B —— 宽度	毫米	hz —— 计算盘厚度	厘米
B —— 厚度	毫米	I —— 截面惯性矩	厘米 ⁴
B —— 速度系数		I —— 电流强度	
B _s = Δf —— 半功率点带宽		I(ω) —— 机械阻抗的虚频特性	
b —— 叶片弦长	毫米	J ₀ (x) —— 零阶贝赛尔函数	
C —— 椭圆半长轴长度	毫米	J —— 转动惯量	公斤·厘米·秒 ²
C _{xp} —— 阻尼系数		J —— J 积分	
C _y —— 升力系数		J _I —— I 型裂纹 J 积分	
D —— 直径	毫米	J _{Ic} —— 断裂韧性	公斤/毫米
[D] —— 阻尼矩阵		j —— 单位虚数	
db —— 分贝		K —— 系数	
E —— 弹性模量	公斤/厘米 ²	K —— 应变片灵敏度	
E _g —— 工作温度时弹性模量	公斤/厘米 ²	K —— 激振力的谐波数	
e —— 热电势	毫伏	K _c —— 材料的平面应力断裂	
e _c —— 测量电势	毫伏	韧性	公斤/毫米 ^{3/2}
e _h —— 环境温度的热电势	毫伏	K _{Ic} —— 材料的平面应变断裂	
e _w —— 温差电势	毫伏	韧性	公斤/毫米 ^{3/2}
F _c —— 阻尼力	公斤	K _I —— 应力强度因子	公斤/毫米 ^{3/2}
F _k —— 弹簧力	公斤	K _{Isc} —— 应力腐蚀界限应力强度因子	
F _m —— 质量力	公斤	ΔK —— 裂纹尖端应力强度因子的变化	
F ₀ —— 力幅	公斤	幅度	公斤/毫米 ^{3/2}
{F(t)} —— 激振力列阵		[K] —— 刚度矩阵	
Δf' —— 频率分辨率		L ₂ —— 叶片出气边高度	米
f —— 摩擦系数		M —— 自由表面影响系数	
f —— 频率	赫芝	M —— 孔内表面影响修正系数	
f _B —— 行波频率	赫芝		

M —— 机械导纳
 M_A —— 加速度导纳
 M_r —— 速度导纳
 $[M]$ —— 质量矩阵
 M_{sp} —— 机械传递导纳
 $M_{sp}^{(R)}$ —— 机械导纳的实频特性
 $M_{sp}^{(I)}$ —— 机械导纳的虚频特性
 $|M_{sp}|$ —— 机械导纳的模
 M_x —— 位移导纳
 m —— 轮系振动节径数
 m —— 质量 公斤·秒²/厘米
 N —— 线圈的匝数
 N —— 功率 千瓦
 N_c —— 最坏试件的循环寿命
 N_g —— 鼓风消耗功率 千瓦
 N_h —— 最好试件的循环寿命
 N_i —— 对应于 S 的循环寿命
 N_j —— 加速消耗功率 千瓦
 N_m —— 摩擦功率 千瓦
 N_p —— 裂纹扩展寿命
 N_z —— 总寿命
 n —— 转速 转/分
 n_b —— 破裂转速 转/分
 n_B —— 轮系振动的行波转速 转/秒
 n_c —— 轮系振动的临界转速 转/秒
 n_j —— 局部强度储备
 n_r —— 轮系振动的共振转速 转/秒
 n_{rh} —— 上共振转速 转/秒
 n_{rl} —— 下共振转速 转/秒
 n_z —— 总体强度储备
 P —— 载荷 公斤
 P —— 压力 公斤/厘米²
 q_i —— 广义座标
 R —— 平均值的或然误差
 R —— 半径 毫米

R —— 气体常数 米/度(°k)
 R —— 电阻 欧姆
 R_a —— 光电阻的暗电阻 欧姆
 R_f —— 负载电阻 欧姆
 R_y —— 轮缘半径 毫米
 R_m —— 光电阻的明电阻 欧姆
 R_z —— 轮盘中心孔半径 毫米
 $R(\omega)$ —— 机械阻抗的实频特性
 S —— 跨度 毫米
 S —— 脉动循环的最大应力
 S —— 平均值的标准误差
 S_i —— 第 i 个循环的最大应力 公斤/厘米²
 T —— 温度 度
 t —— 时间 分
 V —— 速度 米/秒
 V_j —— 节园速度 米/秒
 V_0 —— 速度幅
 V_r —— 诱导速度 米/秒
 V_z —— 园周速度 米/秒
 W —— 重量 公斤
 W —— 高度 毫米
 W —— 功率 千瓦
 W_0 —— 基准功率 千瓦
 X —— 位移 毫米
 $\dot{X}(v)$ —— 速度 毫米/秒
 $\ddot{X}(A)$ —— 加速度 毫米/秒²
 $\{X\}$ —— 位移响应列阵
 y —— 结构系数
 Z —— 机械阻抗
 Z_A —— 加速度阻抗
 Z_0 —— 机械阻抗幅值
 Z_r —— 速度阻抗
 Z_x —— 位移阻抗
 Z_{12} —— 传递阻抗
 da/dN —— 裂纹扩展速率 毫米/每循环

α —— 线膨胀系数 1/°C
 α —— 形状因子
 β —— 电阻温度系数 1/°C
 γ —— 比重 公斤/厘米³
 ϵ —— 部份进气度
 ϵ —— 应变
 ϵ_{cp} —— 平均角加速度 1/秒²
 ζ —— 修正系数
 η —— 寿命系数
 η —— 阻尼系数比
 θ —— 角度
 λ —— 应变测量值的极限误差
 λ —— 应力比
 λ_{ϵ} —— 应变平均值的极限误差
 μ —— 泊桑比
 μ —— 空气粘性动力系数 公斤·秒/米²
 ρ —— 密度 公斤·秒²/厘米⁴
 ρ —— 电阻率 毫米²欧姆/米
 σ —— 应变测量值的标准误差
 σ —— 应力 公斤/厘米²
 σ_{ϵ} —— 应变平均值的标准误差
 σ —— 脉动循环的最大应力 公斤/厘米²
 σ_b —— 强度极限 公斤/厘米²
 σ_c —— 断裂应力 公斤/厘米²

σ_{dl} —— 当量应力 公斤/厘米²
 σ_{imax} —— 第 i 个单循环的最大应力 公斤/厘米²
 σ_{imin} —— 第 i 个单循环的最小应力 公斤/厘米²
 σ_r —— 试验器循环的工作应力 公斤/厘米²
 σ_r —— 轮盘径向应力 公斤/厘米²
 $\hat{\sigma}_r$ —— 轮盘径向应力的标准误差
 σ_{rb} —— 轮缘周边的径向应力 公斤/厘米²
 σ_T —— 持久极限 公斤/厘米²
 σ_s —— 屈服极限 公斤/厘米²
 $\sigma_{a/T}$ —— 蠕变极限 公斤/厘米²
 σ_t —— 轮盘周向应力 公斤/厘米²
 σ_{ϵ} —— 应变测量的综合标准误差
 $\hat{\sigma}_t$ —— 周向应力的标准误差
 $\sigma_{0.1}(\sigma_{0.2})$ —— 条件屈服极限 公斤/厘米²
 ϕ —— 磁通
 ϕ —— 相位差
 x —— 载荷系数
 ω —— 角速度 1/秒
 ω —— 园频率 1/秒

目 录

序 言	1
第一节 轮盘的超转、超温与破裂试验	3
概述	3
一 试验目的与要求	3
1 试验目的	3
2 试验要求	3
二 试验方法与工作程序	7
1 试验任务的提出	7
2 试验方案的确定	7
3 设备、仪器仪表的准备	13
4 试验件准备	13
5 试验实施	15
6 试验件检验	17
7 试验记录与试验报告	18
三 试验装置	18
1 对试验装置的基本要求	18
2 试验器的组成与型式	20
3 国内轮盘旋转试验器简介	29
四 主要参数的测量	31
1 转速	31
2 温度	37
3 轮盘变形与破裂的监测	43
附录 I 具有中心孔的轮盘总体强度储备的算例	54
附录 II 轮盘超速予应力处理技术	55
附录 III 某些国家规范对发动机轮盘强度试验的要求	60
附录 IV 某些发动机轮盘强度储备一览表	61
第二节 轮盘的实验应力分析	63
概述	63
一 电阻应变片测量法	64
1 试验原因	64
2 轮盘应变测试系统各个环节的选定	66

3	轮盘旋转应变测量中的几个技术问题	77
4	数据处理与误差分析	84
二	脆漆涂层法	92
1	配漆原料	93
2	漆料的配制	93
3	喷涂漆层的技术	94
4	脆漆级数的选择	95
5	漆料级数的确定	95
6	裂纹的观察和记录方法	96
7	脆漆涂层法的应用实例与评估	96
第三节	轮盘的低循环疲劳试验	98
一	概 述	98
一	几个概念及其在本节的应用	99
1	交变应力的基本形式	99
2	S—N 曲线	100
3	等效疲劳损伤(古德曼)图	104
4	迈纳原理	107
二	轮盘低循环疲劳寿命预计的原理和步骤	107
三	飞行使用循环的转换	109
1	轮盘的载荷谱与飞行应力剖面	109
2	飞行应力剖面转换成一定温度下的应力剖面	109
3	应力剖面分解成单个应力循环	111
4	将各次循环转换成脉动循环	111
5	将各“次脉动循环”折算成标准应力循环	112
6	用标准应力循环表示一次飞行的疲劳损伤	113
7	应用举例	114
8	轮盘设计中的低循环疲劳寿命估算	115
四	轮盘低循环疲劳试验的原理和方法	116
1	试验件选择	117
2	试验条件的确定	117
3	试验装置——对循环旋转试验器的要求	120
4	试验实施	120
5	试验实例	121
五	轮盘寿命的确定	123
1	根据循环旋转试验结果,确定批准循环寿命(P-1)	124
2	初始使用寿命(S1)	124

185	3 延长使用寿命	125
281	4 飞行小时寿命	125
28	六 预计轮盘寿命的其他试验方法	127
281	1 多路径向加载循环疲劳试验	127
281	2 发动机试车	130
481	附录 国外轮盘低循环疲劳试验规范摘录	136
60	第四节 轮盘剩余寿命估算、试验及其防破裂设计	142
20	概述	142
300	一 断裂力学的基本概念	143
300	1 裂纹尖端应力强度因子 K_I	143
300	2 线弹性断裂力学中的平面问题	146
300	3 裂纹尖端屈服区域的形状和尺寸	146
300	4 屈服区域的修正	148
310	5 断裂判据和盘材的断裂韧性	149
310	6 温度对 K_{Ic} 的影响	150
310	7 应力腐蚀临界应力强度因子 K_{Isc}	150
310	8 关于弹塑性断裂力学中常用的两种方法	151
310	二 裂纹扩展速率与确定轮盘寿命的损伤容限法	153
310	1 循环载荷作用下的裂纹扩展规律	153
310	2 影响裂纹扩展速率的因素	155
310	3 应力腐蚀与疲劳载荷的交互作用	157
310	4 确定轮盘剩余寿命的损伤容限法	158
310	三 用损伤容限法确定轮盘剩余寿命的一般步骤	160
310	1 实验确定盘材的断裂韧性与裂纹扩展速率	160
310	2 确定轮盘载荷	161
310	3 轮盘的断裂分析	161
310	4 分析估算轮盘的剩余寿命	164
310	5 分析各种因素对轮盘裂纹扩展寿命的影响	167
310	四 轮盘裂纹的亚临界扩展与防破裂设计	171
310	1 静载荷(单一载荷)情况	171
310	2 循环载荷情况	173
310	五 轮盘剩余寿命分析估算实例	174
310	1 近内孔有埋藏缺陷的涡轮盘剩余寿命的分析估算	174
310	2 激压气机盘不同部位产生初始裂纹后的剩余寿命估算	178
310	六 轮盘剩余寿命试验	181
310	1 试验目的	181

2	试验方案	181
3	试验件准备	182
4	试验实施	182
5	试验结果分析整理	183
附录 I	旋转构件常用的应力强度因子公式	183
附录 II	盘材断裂韧性 K_{Ic} 与裂纹扩展速率 $d\alpha/dN$ 的测定	194
第五节	轮盘的振动试验	205
概述		205
一	基本原理与要求	206
1	轮盘振动的形式	206
2	激振源	209
3	影响轮系振动频率的主要因素	209
4	轮盘的行波现象	211
5	驻波——临界转速	213
6	行波——共振转速	213
7	转速——频率相干图	213
8	调频原则和安全率	215
9	轮系振动事故的分析及处理	216
二	轮系静频试验	217
1	试验目的	217
2	试验内容	217
3	试验方法	217
4	试验程序	223
5	实例	223
三	轮系咱态振动应力分析试验	227
1	试验目的	227
2	试验方法	227
3	试验程序	228
4	实例	228
四	轮系动频试验	229
1	试验目的	229
2	试验内容	229
3	试验方法	230
五	研究轮系振动特性的其他方法	234
1	自动频率扫描试验方法	234
2	全息振动分析法	238

3	轮盘振动分析的机械阻抗法	.....	244
附录 I	关于分贝的使用	.....	263
附录 II	频率、加速度、速度、位移的关系图	.....	267
附录 III	各类压电晶体加速度计一览表	.....	267
参考文献	.....	.....	271
毫米	频率响应函数	f_1	秒
毫米	频率响应函数	f_2	秒
毫米	重力加速度	g	米/秒 ²
毫米	结构阻尼比	ξ_i	无量纲
毫米	厚度	h	米
毫米	厚度	h_1	米
毫米	厚度	h_m	米
毫米	厚度	h_z	米
毫米	截面面积	I	米 ⁴
毫米	截面面积	I	米 ⁴
毫米	截面面积	$I(\omega)$	米 ⁴
毫米	截面面积	$I_0(x)$	米 ⁴
毫米	转动惯量	J	米 ²
毫米	转动惯量	J	米 ²
毫米	转动惯量	J_1	米 ²
毫米	转动惯量	J_c	米 ²
毫米	转动惯量	i	米 ²
毫米	转动惯量	K	米 ²
毫米	转动惯量	K	米 ²
毫米	转动惯量	K	米 ²
毫米	转动惯量	K_c	米 ²
毫米	转动惯量	K_c	米 ²
毫米	转动惯量	K_c	米 ²
毫米	转动惯量	K_l	米 ²
毫米	转动惯量	K_{lcc}	米 ²
毫米	转动惯量	ΔK	米 ²
毫米	转动惯量	$[K]$	米 ²
毫米	转动惯量	L_s	米
毫米	转动惯量	M	米
毫米	转动惯量	M	米

序 言

风扇、压气机和涡轮轮盘等是发动机的主要受力部件，其使用寿命应经主管当局审核批准后才允许投入使用〔1〕。这是由于轮盘的结构复杂、尺寸较大、转速高、负荷大、工作条件恶劣、一旦损坏，非包容率极高。据统计，美国民用燃气涡轮发动机1962~1972年十一年间，共发生转子非包容破裂故障239起，平均每月达1.81起。下表是转子各部位非包容故障所占的比例〔2〕。

年 代	轮 盘	轮 缘	叶 片
1971	100%	66.7%	17%
1972	100%	100%	19.8%

由表可见，所有轮盘和绝大多数轮缘的破裂是属于非包容性的。这些破裂碎片打穿机匣后，便可能切断油路或控制缆索，穿透油箱与座舱，构成对飞机和乘员的严重威胁。我国民航与人民空军由于此类事故而造成严重损失的事例也是不少的。而要将轮盘碎块包容下来，就要加厚机匣等防护层的尺寸，选用较好的材料，这就相当于将发动机增重30~40%〔3〕。而发动机每增重1公斤，将使飞机增重10~15公斤，显然是得不偿失的。因此，人们就着重从分析轮盘破裂的原因入手，设法从结构、工艺、材料、飞机操作技术等多方面采取积极措施，极力减小轮盘与转子故障的发生。并设计出工作安全可靠而重量最轻的轮盘来。

一个最佳的轮盘设计定型必须满足下列要求：

- 1) 恰到好处的强度储备。以使其在发动机偶然超转或超温下不致破裂，而又不显得过份笨重；
- 2) 在整个寿命期间的尺寸稳定性，即持久强度及抗蠕变性能好。以使其在使用和翻修过程中能够顺利工作与组装而不降低转子气动性能；
- 3) 合乎要求的动态特性。以使轮盘在发动机整个工作转速范围不致因受到过大的高循环振动疲劳应力而过早损坏；
- 4) 具有足够长的低循环疲劳寿命。这是决定轮盘寿命极限的关键因素。

无论是为了检验轮盘设计的合理性，还是分析排除使用中的故障，都必须进行大量的试验。世界各主要飞机生产国的航空发动机规范或适航性条例中，均对轮盘的强度、振动与寿命试验提出了具体要求，并相应地建立了大批试验装置。通过试验器试验与整机试验，为轮盘设计工作与发动机安全运行提供了较充分的依据。

本章即围绕对轮盘设计的基本要求，着重就轮盘定型时所必须进行的超转、超温、破裂、低循环疲劳、振动等试验项目所依据的原理、方法、所需设备、各项参数的测量与处理等有

关内容作一介绍。另外，随着断裂力学的深入发展，已有可能对进一步提高轮盘使用寿命的问题进行探讨，为了推进此项工作，本章特辟专节加以讨论。

此外，对于轮盘强度与寿命安全准则，也尽力将国内外某些发动机设计资料及规范、条例中有关要求汇集提出，以供读者参考。

本章所涉及的各项试验的原理、方法与测试技术，系作者根据自身实践及收集国内外有关资料综合整理而成。需要说明的是，由于缺乏类似的参考文献，也缺乏系统的测试技术资料参考，为方便使用，有必要维持本书的系统与完整，这样就不免导致内容较为庞杂。这只有待手册全书合编出版时再作调整了。

本章由七〇三所、一二〇厂、六二四所、六〇六所合编。

主 编：刘 湘 生

主 审：王 铎 宋 兆 泓

参加编写的人员尚有：孙国维 黄云龙 白宗魁 高景海 丁正 曹振林 何联彪 田德义

此外，李永熹 孙常秋 沈丙炎 邱玉展 郑捷简等同志也为本书提供了不少素材，并为本书编审作了许多工作。

第一节 輪盤的超轉、超溫与破裂試驗

概 述

本节所述内容主要出于对发动机转子结构完整性方面的考虑。所提出的考核项目为轮盘的静强度检验。这方面的试验国内已有所开展，积累了一定的经验。但以往由于缺乏统一的规范，无章可循，各行其事，给航空事业造成了一定的损失。遵照部指示精神：强度手册中如已具备拟定规范条件者，应按规范撰写。本节即在汇集各单位一些实践经验的基础之上，参照一些国家发动机规范的相应内容，提出了一些建议和要求，供试用参考。相信经过一段时间的实践检验以后，将会得到修改、充实、完善，最终制订出符合我国国情的轮盘强度试验规范出来。

本节主要围绕轮盘超转、超温与破裂试验的要求。提出了试验方案，实施办法，所需设备与各项试验参数的测量方法。同时还收集了一些发动机的轮盘强度储备数据，一些国家发动机规范中对轮盘（转子）结构强度与完整性的考核要求，供设计和试验人员参考。

另外，基于断裂力学设计思想的轮盘超速予应力处理技术，在国外燃气轮机行业已作为一种新兴的工艺检验与增强处理手段而得到广泛应用，而且应用范围还在迅速扩大。航空发动机轮盘是否能采用呢？目前诸说不一，为促进这方面研究工作，本节附录中Ⅱ也对此项技术作了介绍。

一、試驗目的与要求

1. 試驗目的

在发动机上或模拟发动机工作条件下，对各类轮盘进行超转、超温与破裂等试验考核，以暴露材质缺陷，判明轮盘结构设计的合理性，确定其强度储备。

2. 試驗要求

1) 轮盘的强度储备 导致轮盘瞬态破裂的主要因素是由于过大的径向应力及过大的切向应力。对于风扇轮盘还应考虑其承受外来物撞击的能力。根据国内正在服役或研制的若干个机种的轮盘强度储备系数的统计，并参考国外有关规范的要求（参见附录Ⅲ、Ⅳ），建议对我国航空燃气涡轮发动机各类轮盘的强度储备系数取值如下（表1—1）。

表 1—1 各类轮盘的强度储备系数〔4〕

轮 盘 类 型	风 扇	压 气 机	涡 轮
局 部 储 备 n_j	≥ 1.5	≥ 1.35	≥ 1.35
总 体 储 备 n_z	≥ 1.4	≥ 1.25	≥ 1.25

表 1—1 中, n_j 也叫局部安全系数。为发动机最大工作状态下, 轮盘材料相应的极限应力与盘上最大当量应力 σ_{dLmax} 之比。 σ_{dLmax} 系由积分法或逐次迭代法等常规计算方法求出。

常温时 (如风扇、低压压气机轮盘), 对脆性材料轮盘:

$$n_j = \frac{\sigma_b}{\sigma_{dLmax}} \quad (1-1)$$

式中: σ_b —— 盘材的拉伸强度极限, 公斤/厘米²。

对韧性材料的轮盘:

$$n_j = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{dLmax}} \quad (1-2)$$

式中: $\sigma_{0.2}$ —— 盘材拉伸曲线中对应残余变形为 0.2% 时的屈服极限, 公斤/厘米²。

高温时 (如高压压气机及涡轮轮盘):

$$n_j = \frac{\sigma_T}{\sigma_{dLmax}} \quad (1-3)$$

式中: σ_T —— 盘材在工作温度与给定寿命下的持久极限, 公斤/厘米²。

如果某些涡轮盘要求以许用变形来限制其承载能力时, 则有:

$$n_j = \frac{\sigma_{a/\tau}}{\sigma_{dLmax}} \quad (1-4)$$

$\sigma_{a/\tau}$ —— 盘材在工作温度与给定寿命下的蠕变极限, 公斤/厘米²。

注脚 a —— 轮盘产生的永久变形量, 毫米;

注脚 τ —— 轮盘产生永久变形量 a 所需的时间, 小时。

一般在应用 (1—4) 式时, 要求 $n_j \geq 1$ 即可。

当轮盘为弹塑性状态时, (1—1) ~ (1—4) 式不再适用。然而, 无论对弹性轮盘还是弹塑性轮盘, 均应满足总安全系数 n_z 的要求。 n_z 表示轮盘的破裂转速 n_{ph} 与最大工作转速 n_{max} 之比。对于一般型式轮盘:

$$n_z = \frac{n_{ph}}{n_{max}} = \sqrt{\frac{\int_{R_z}^{R_{Ly}} \sigma_r h dR}{\sigma_{rb} h_{Ly} R_{Ly} + \rho I \omega^2}} \quad (1-5)$$

式中： σ_{rb} ——当转速为 n_{max} 时，轮缘周边的径向应力，公斤/厘米²；

$$\omega = \frac{\pi n_{max}}{60} \text{——角速度，1/秒；}$$

R_z ——轮盘中心孔半径，厘米；

R_{Ly} ——轮盘轮缘半径，厘米；

h_{Ly} ——轮盘轮缘厚度，厘米；

ρ ——轮盘材料密度，秒²·公斤/厘米⁴；

$$I = \int_{R_z}^{R_{Ly}} R^2 h dR \text{——半个轮盘横截面面积对旋转轴线的惯性矩，厘米⁴。}$$

公式(1-5)是基于轮盘径截面上各点应力均达到盘材的持久极限(对常温下工作的轮盘则为屈服极限)值时轮盘方发生破裂这一假设而导出的。实际上，由于盘材物理性能上的差异、各向不同性以及因轮盘结构因素所造成的沿盘身分佈的应力梯度等原因，其实际破裂转速约比按(1-5)式计算之值低10%左右。公式(1-5)的计算步骤与算例见附录I。

当轮盘以允许变形量来限制其承载能力时，应将(1-5)式中的 σ_r 改为 σ_a/τ 。此时的 n_z 称为轮盘达到允许的最大变形值时的总安全系数。

以上方法，是以往常用的确定轮盘强度储备的方法。下面根据国外资料介绍，推荐另一种方法，即限制盘上不同部位的应力值与盘材的条件屈服强度($\sigma_{0.1}$)和极限拉伸强度(σ_b)的比值，从而确定其屈服和破坏强度储备^[5]。表1-2所列为英国SpeyMK202军用发动机轮盘强度储备数据。依据轮盘不同部位的结构与受力状况，提出不同的强度储备要求。显然，按这样的要求设计轮盘是比较合理的。

2) 试验要求 要求定型的各类轮盘，应经受下列静强度试验考核：

(1) 超转 各类超转试验，均要求试验转速不小于轮盘最大工作转速的115%。试验环境与发动机最大工况相同，试验持续时间不少于5分钟。试验后，测量轮盘尺寸应在允许的尺寸范围之内，无损坏迹象，并可继续装机使用。

(2) 破裂 此试验系在试验器上进行，试验转速为最大工作转速的125%。对无包容结构之风扇盘，试验转速为工作转速的141%。轮盘内孔温度应为最大设计温度，持续时间不少于20秒。试验后，轮盘应无损坏迹象。

(3) 超温 本试验主要用于涡轮盘。在轮盘最大工作转速下，将其工作温度提高到比最高工作温度高42°C，持续试验5分钟。试验后，检查轮盘尺寸伸长不应超过允许值，无损坏迹象，并可继续装配使用。