

航空发动机 强度设计、试验手册

(试用本)

第一篇 第三章

盘和盘鼓的强度计算



第三机械工业部第六研究院



30336667

航空发动机强度设计、试验手册

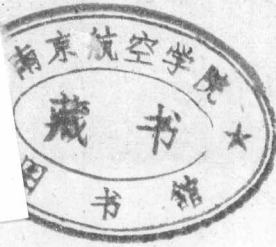
第一篇 第三章

盘和盘鼓的强度计算

(试用本)

主编 高德平 许棠

主审 欧阳鬯 付志方 郑健泉



第三机械工业部第六研究院

410041

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。

常用符号表

一、基本符号:

A	面积、截面积
C	系数
D	抗弯刚度
D	直径
d	直径
E	弹性模数
E'	假想的弹性模数
F	力
G	重量流量
G	剪切弹性模数
G'	剪切塑性模数
g	重力加速度
h	轮盘厚度
J	惯性矩
K	系数
K _p	总安全系数
L	长度、距离
M	力矩、弯矩
m	质量
m	指数、加权因子
m	半径比
N _u	努塞数
n	转速
n	安全系数
n	法向
n	数目
P	载荷
P _r	普朗特数
P'	附加载荷
Q	剪力
q	比热流量
q	比例系数

荷重亦称	P
荷重亦称	R
谷半	R
荷重亦称	R
谷半	T
圆头圆角	s
圆盖	T
系圆盖, 圆盖	T
圆盖亦称	T
圆盖亦称	u
圆盖	V
圆盖	V
圆盖亦称	v
圆盖亦称	W
圆盖亦称	W
圆盖亦称	X
圆盖亦称	X, Y, Z
圆盖亦称	x, y, z
圆盖亦称	x, 0, z
圆盖亦称	0, q
圆盖亦称	o
圆盖亦称	o
圆盖	Y
圆盖	Y
量在变圆四个三角中斜坐角	Y, Y, Y
量在变圆四个三角中斜坐封	Y, Y, Y
圆盖亦称	Δ
圆盖亦称	Δ
圆盖	δ
圆盖	δ
圆盖 (系数)	δ
圆盖	ε
量在变圆五个三角中斜坐角	ε, ε, ε
量在变圆五个三角中斜坐封	ε, ε, ε
圆盖亦称	ε, ε, ε
圆盖亦称	ε
圆盖	θ
圆盖亦称	θ

表 号 符 用 常

q	分布载荷		
R	外载荷		
R	半径		
Re	雷诺数		
r	半径		
s	线段长度		
T	温度		温度本基
t	温度、温度差	温度差	A
T _f	流体温度	流体温度	C
u	节点的第一个自由度的位移或径向位移	节点的位移	D
V	速度	速度	D
V	体积	体积	b
v	节点的第二个自由度的位移或切向位移	节点的位移	E
W	壳的挠度	壳的挠度	E
W	轴向速度	轴向速度	F
Z	叶片数目	叶片数目	G
X、Y、Z	直角坐标轴	直角坐标轴	G
x、y、z	直角坐标距离	直角坐标距离	G
r、θ、z	柱坐标	柱坐标	g
ρ、θ	极坐标	极坐标	h
α	线膨胀系数	线膨胀系数	I
α	放热系数	放热系数	K
γ	重度	重度	K
γ	切应变	切应变	L
γ _{xy} , γ _{yz} , γ _{zx}	直角坐标中的三个切应变分量	切应变分量	M
γ _{zr} , γ _{rθ} , γ _{θz}	柱坐标中的三个切应变分量	切应变分量	m
Δ	间隙或紧度	间隙或紧度	m
Δ	元素面积	元素面积	m
δ	位移	位移	n
δ	紧度	紧度	n
δ	(鼓环)厚度	(鼓环)厚度	n
ε	应变	应变	n
ε _x , ε _y , ε _z	直角坐标中的三个正应变分量	正应变分量	n
ε _r , ε _θ , ε _z	柱坐标中的三个正应变分量	正应变分量	n
ε ₁ , ε ₂ , ε ₃	主应变	主应变	q
$\bar{\epsilon}$	等效应变	等效应变	q
Δ $\bar{\epsilon}$	等效应变的增量	等效应变的增量	Q
θ	角度	角度	P
θ	相邻两圆环的厚度比	相邻两圆环的厚度比	P

λ	柔度	向谷	r
λ	导热系数	量热	T
λ	比例系数	(向斜, 向间) 向世	1
μ	泊桑比	向斜	s
μ'	假想的泊桑比	(向斜, 向间) 向世	0
ρ	密度	向 (向) 量	2
σ	应力、正应力	量斜并世不斜斜世	5
σ_r, σ_t	径向、切向应力	态向, 向	b
$\sigma_{0.2}$	条件屈服极限	量产 (1b)	1b
σ_s	屈服极限	量	8
σ_b	强度极限	量斜	1
σ_T	持久极限	向	1
$\sigma_{a/T}$	蠕变极限	量斜	1
$[\sigma]$	许用正应力	向	10
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	直角坐标中的三个正应力分量	量	9
$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$	柱坐标中的三个正应力分量	量斜	1b
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力	量斜	1
$\bar{\sigma}$	等效应力	向	10
$\Delta\bar{\sigma}$	等效应力的增量	向斜	1
σ_0	初应力	向	1
τ	剪应力	量斜, 向	1
$[\tau]$	许用剪应力	量斜, 向	1
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	直角坐标中的三个剪应力分量	量斜	1
$\tau_{r\theta}, \tau_{r\phi}, \tau_{\theta z}$	柱坐标中的三个剪应力分量	量斜	1
τ	时间	量斜	1
ω	角速度	量斜	1
ν	动粘性系数	量斜, 向	1
二、下角注符号:			
1. 惯用下角注符号:			
o	自由	量斜	1
o	不变量	量斜	1
D	偏量	量斜	1
d	残余	量斜	1
e	弹性	量斜	1
k	叶片根部	量斜	1
max	最大	量斜	1
min	最小	量斜	1
n	法向	量斜	1
p	塑性	量斜	1

r	径向	徑向	r
T	温度	溫度	T
t	切向 (周向、环向)	切向 (周向、環向)	t
z	轴向	軸向	z
θ	切向 (周向、环向)	切向 (周向、環向)	θ
Σ	总 (和) 的	總 (和) 的	Σ
2. 汉语拼音下角注符号:			
d	动、动态	動、動態	d
dI (dL)	当量	相當量	dI (dL)
g	鼓	鼓	g
jx	极限	極限	jx
Lx	离心	離心	Lx
Ly	轮缘	輪緣	Ly
ne	内	內	ne
p	盘	盤	p
ph	破坏	破壞	ph
pj	平均	平均	pj
wa	外	外	wa
xd	相对	相對	xd
y	叶片	葉片	y
z	中心、中心孔边	中心、中心孔邊	z
三、其它符号:			
[]	矩阵	矩陣	[]
{ }	列阵, 列向量	列陣, 列向量	{ }
[] ^T , { } ^T	转置矩阵	轉置矩陣	[] ^T , { } ^T
[] ⁻¹	逆矩阵	逆矩陣	[] ⁻¹
[B]	几何矩阵、形变位移矩阵	幾何矩陣、形變位移矩陣	[B]
[D]	弹性矩阵	彈性矩陣	[D]
[D _e]	弹性矩阵	彈性矩陣	[D _e]
[D _{ep}]	弹塑性矩阵	彈塑性矩陣	[D _{ep}]
[F]	塑性矩阵	塑性矩陣	[F]
[I]	单位阵	單位陣	[I]
[K]	结构刚度矩阵	結構剛度矩陣	[K]
[K] ^e	元素刚度矩阵	元素剛度矩陣	[K] ^e
{Q}	结构载荷向量	結構載荷向量	{Q}
{Q} ^e	元素载荷向量	元素載荷向量	{Q} ^e
{R}	结构载荷向量	結構載荷向量	{R}
{R} ^e	元素载荷向量	元素載荷向量	{R} ^e
{ δ }	结构节点位移向量	結構節點位移向量	{ δ }

$\{\delta\}^e$	元素节点位移向量
$\{\varepsilon\}$	应变总量
$\{\varepsilon_0\}$	由于变温引起的自由应变总量
$[\mu_D]$	应力偏量与正应力之间的联系矩阵
$\{\sigma\}$	应力总量

序 言

本章的基本内容包括航空发动机轮盘和盘鼓强度计算的一般算法和有限元法两部分。

一般算法是根据弹性力学的基本方程式出发，将实际的发动机轮盘的结构及载荷条件进行某些简化，建立计算模型，从而进行强度计算的工程方法。这类方法，比较简便，但精确度较低，适用于估算或精度要求不高的初步计算。用有限元法能够计算发动机轮盘强度的各种复杂情况且能获得较高的精度。随着近代电子计算机技术的发展。这种方法在发动机结构的强度计算中已经占主要地位。因此本章以较多的篇幅介绍有限元法在轮盘强度计算中的应用。

根据发动机轮盘结构特点和工作条件的差异。本章分别讨论了一般旋转轮盘、带鼓环的压气机盘、离心叶轮、涡轮盘以及弹塑性盘等轮盘的强度计算问题，并用 ALGOL-60 语言编制了计算程序，介绍了算例。

由于目前发动机轮盘强度的理论分析和试验研究工作正在开展，国内试验研究、设计和使用方面的经验尚不足，因此本章仅涉及轮盘静强度计算方面的内容，没有编入轮盘的动强度计算、轮盘的断裂和疲劳寿命计算等方面的内容。此外，文中尚无法提供合理而又较成熟的轮盘强度校核的规范性数据，这里仅列举了一些不完整的统计数据，以供参考，这方面的工作，有待于今后在实践中进一步探索和发展。有关轮盘强度试验方面的内容，在第二篇试验部分中另作专门介绍。

本章由南京航空学院二〇二教研室高德平、许棠同志主编。其中，第一节总论由四三〇厂韦龙庚、张桂兴同志编写；第二节一般算法概述、等厚度盘由南京航空学院范引鹤、高德平同志编写，变厚度盘由四一〇厂姚华兴同志编写，带鼓盘由〇一一基地第二设计所汪有前同志编写；第三节有限元法概述、涡轮盘的温度场和应力场计算由南京航空学院许棠同志编写，一般盘的计算由三三一厂王水荣同志编写，带紧度的压气机盘鼓的应力计算由三三一厂吴阳冬同志（现已调湖南株洲基础大学）编写，离心叶轮的应力计算由南京航空学院李明达同志编写，带偏心孔的等厚盘应力计算由南京航空学院支钟和同志编写，第二节和第三节的弹塑性盘的应力计算由上海长征机械厂孙金文同志编写。

本章在编写过程中得到了有关单位许多同志的指导、帮助和支持。特别是复旦大学数学系欧阳邕、陈德初、吴新炳、冯景艳等老师，为本章有限元法计算的部分内容做了大量工作，并提供了有关程序。〇一一基地第二设计所肖钧祥，上海长征机械厂胡复初、姚善莲等同志为本章第二节一般算法的部分程序设计做了不少工作。三七〇厂陈剑虹、杜福明同志在本章修订过程中，做了不少技术校对工作。这里我们对他们表示衷心的感谢。

本章拟供从事航空发动机设计和从事航空发动机轮盘强度工作的技术人员作为设计或校核计算时提示、备查、参考之用，也可供从事燃气轮机、汽轮机和其他旋转机械工作的工程技术人员，以及上述有关专业的院校师生作参考之用。

本章编写时，仅是以三机部内少数单位的工作为基础的，所附程序都是结合具体问题而编写的，通用性不强。鉴于条件限制，编写小组未能对这些程序进一步校核，各程序均由

编写人员自行负责认真校对。由于水平有限、经验不足、时间仓促，不足之处恳切希望读者提出宝贵意见，批评指正，以便进一步修改，逐步完善。

《航空发动机强度设计、试验手册》（试用本）

第一篇第三章编写小组

一九八〇年七月

、衣略两指元翔首麻志震有建一前震有到... (The following text is highly distorted and illegible due to poor scan quality, appearing as a mirror image of the reverse side of the page. It contains repetitive characters and fragments of text that do not form coherent sentences.)

目 录

序 言

第一节 总论	(1)
一、盘和盘鼓的类型	(1)
二、轮盘的受力分析	(2)
三、盘和盘鼓的计算方法	(3)
四、盘的强度校核和盘的破坏形式	(4)
第二节 轮盘强度的一般算法	(8)
一、概述	(8)
二、等厚度盘应力计算的基本公式及特点	(11)
三、变厚度盘的应力计算	(13)
四、带鼓盘的应力计算	(34)
五、弹塑性盘的应力计算	(48)
第三节 轮盘强度的有限元算法	(61)
一、概述	(61)
二、一般轮盘的应力计算	(74)
三、带紧度的压气机盘鼓的应力计算	(86)
四、离心叶轮的应力计算	(96)
五、涡轮盘的温度场和应力场计算	(108)
六、弹塑性盘的应力计算	(125)
七、带偏心孔的等厚盘应力计算	(139)
附录 I、轮盘的破坏转速	(147)
附录 II、等厚盘应力计算系数表	(148)
附录 III、平面图形三角形网格的自动划分	(158)
附录 IV、弹塑性矩阵[F]的推导	(163)
附录 V、源程序	(165)
1. 等厚园环法应力计算源程序	(165)
2. 积分法应力计算源程序	(167)
3. 带鼓盘应力计算源程序	(170)
4. 弹塑性盘应力计算源程序	(177)
5. 一般轮盘的自动划分网格与应力计算源程序(有限元法)	(183)
6. 带紧度的压气机盘鼓应力计算源程序(有限元法)	(199)
7. 离心叶轮应力计算源程序(有限元法)	(205)
8. 涡轮盘温度场和应力场计算源程序(有限元法)	(212)

9. 弹塑性盘应力计算源程序 (有限元法) (222)

10. 带偏心孔的等厚盘应力计算源程序 (有限元法) (236)

参考资料 (243)

目 录

		页 数
(1)	..... 总 序	一
(1)	..... 弹性圆盘应力	二
(2)	..... 弹性圆盘应力	三
(3)	..... 弹性圆盘应力	四
(4)	..... 弹性圆盘应力	五
(5)	..... 弹性圆盘应力	六
(6)	..... 弹性圆盘应力	七
(7)	..... 弹性圆盘应力	八
(8)	..... 弹性圆盘应力	九
(9)	..... 弹性圆盘应力	十
(10)	..... 弹性圆盘应力	十一
(11)	..... 弹性圆盘应力	十二
(12)	..... 弹性圆盘应力	十三
(13)	..... 弹性圆盘应力	十四
(14)	..... 弹性圆盘应力	十五
(15)	..... 弹性圆盘应力	十六
(16)	..... 弹性圆盘应力	十七
(17)	..... 弹性圆盘应力	十八
(18)	..... 弹性圆盘应力	十九
(19)	..... 弹性圆盘应力	二十
(20)	..... 弹性圆盘应力	二十一
(21)	..... 弹性圆盘应力	二十二
(22)	..... 弹性圆盘应力	二十三
(23)	..... 弹性圆盘应力	二十四
(24)	..... 弹性圆盘应力	二十五
(25)	..... 弹性圆盘应力	二十六
(26)	..... 弹性圆盘应力	二十七
(27)	..... 弹性圆盘应力	二十八
(28)	..... 弹性圆盘应力	二十九
(29)	..... 弹性圆盘应力	三十
(30)	..... 弹性圆盘应力	三十一
(31)	..... 弹性圆盘应力	三十二
(32)	..... 弹性圆盘应力	三十三
(33)	..... 弹性圆盘应力	三十四
(34)	..... 弹性圆盘应力	三十五
(35)	..... 弹性圆盘应力	三十六
(36)	..... 弹性圆盘应力	三十七
(37)	..... 弹性圆盘应力	三十八
(38)	..... 弹性圆盘应力	三十九
(39)	..... 弹性圆盘应力	四十
(40)	..... 弹性圆盘应力	四十一
(41)	..... 弹性圆盘应力	四十二
(42)	..... 弹性圆盘应力	四十三
(43)	..... 弹性圆盘应力	四十四
(44)	..... 弹性圆盘应力	四十五
(45)	..... 弹性圆盘应力	四十六
(46)	..... 弹性圆盘应力	四十七
(47)	..... 弹性圆盘应力	四十八
(48)	..... 弹性圆盘应力	四十九
(49)	..... 弹性圆盘应力	五十
(50)	..... 弹性圆盘应力	五十一
(51)	..... 弹性圆盘应力	五十二
(52)	..... 弹性圆盘应力	五十三
(53)	..... 弹性圆盘应力	五十四
(54)	..... 弹性圆盘应力	五十五
(55)	..... 弹性圆盘应力	五十六
(56)	..... 弹性圆盘应力	五十七
(57)	..... 弹性圆盘应力	五十八
(58)	..... 弹性圆盘应力	五十九
(59)	..... 弹性圆盘应力	六十
(60)	..... 弹性圆盘应力	六十一
(61)	..... 弹性圆盘应力	六十二
(62)	..... 弹性圆盘应力	六十三
(63)	..... 弹性圆盘应力	六十四
(64)	..... 弹性圆盘应力	六十五
(65)	..... 弹性圆盘应力	六十六
(66)	..... 弹性圆盘应力	六十七
(67)	..... 弹性圆盘应力	六十八
(68)	..... 弹性圆盘应力	六十九
(69)	..... 弹性圆盘应力	七十
(70)	..... 弹性圆盘应力	七十一
(71)	..... 弹性圆盘应力	七十二
(72)	..... 弹性圆盘应力	七十三
(73)	..... 弹性圆盘应力	七十四
(74)	..... 弹性圆盘应力	七十五
(75)	..... 弹性圆盘应力	七十六
(76)	..... 弹性圆盘应力	七十七
(77)	..... 弹性圆盘应力	七十八
(78)	..... 弹性圆盘应力	七十九
(79)	..... 弹性圆盘应力	八十
(80)	..... 弹性圆盘应力	八十一
(81)	..... 弹性圆盘应力	八十二
(82)	..... 弹性圆盘应力	八十三
(83)	..... 弹性圆盘应力	八十四
(84)	..... 弹性圆盘应力	八十五
(85)	..... 弹性圆盘应力	八十六
(86)	..... 弹性圆盘应力	八十七
(87)	..... 弹性圆盘应力	八十八
(88)	..... 弹性圆盘应力	八十九
(89)	..... 弹性圆盘应力	九十
(90)	..... 弹性圆盘应力	九十一
(91)	..... 弹性圆盘应力	九十二
(92)	..... 弹性圆盘应力	九十三
(93)	..... 弹性圆盘应力	九十四
(94)	..... 弹性圆盘应力	九十五
(95)	..... 弹性圆盘应力	九十六
(96)	..... 弹性圆盘应力	九十七
(97)	..... 弹性圆盘应力	九十八
(98)	..... 弹性圆盘应力	九十九
(99)	..... 弹性圆盘应力	一百

第一节 总 论

轮盘是发动机转子中的重要零件，它的主要功用是完成叶片和轴之间的功率传输。由于轮盘的转速高，另外涡轮盘和高增压比的后几级压气机盘的轮缘和轮心间温差很大，工作条件非常恶劣，又处在载荷循环下，因此，轮盘工作可靠与否直接影响发动机的安全和寿命。在发动机的强度计算中，必需对轮盘的强度并尽可能对寿命进行计算，以便正确考核轮盘工作时的可靠程度和确定轮盘的工作寿命。我们这一章所讨论的问题是轮盘强度的校核验算。

一、盘和盘鼓的类型

目前我国航空发动机上使用的盘和盘鼓的类型大致有以下几种：

1. 盘的类型

- 1) 按盘的几何形状可分为：
等厚盘和变厚盘；空心盘和实心盘；对称盘和不对称盘等。
- 2) 按盘的工作部位可分为：
压气机盘和涡轮盘等。
- 3) 其他结构上特殊的盘如：
发夹型盘*；离心叶轮等。

上述轮盘的分类是按各种单一情况来区分的，但是一个盘可以同属于上述几个类型，如压气机空心变厚度发夹型盘等。

2. 盘鼓的类型

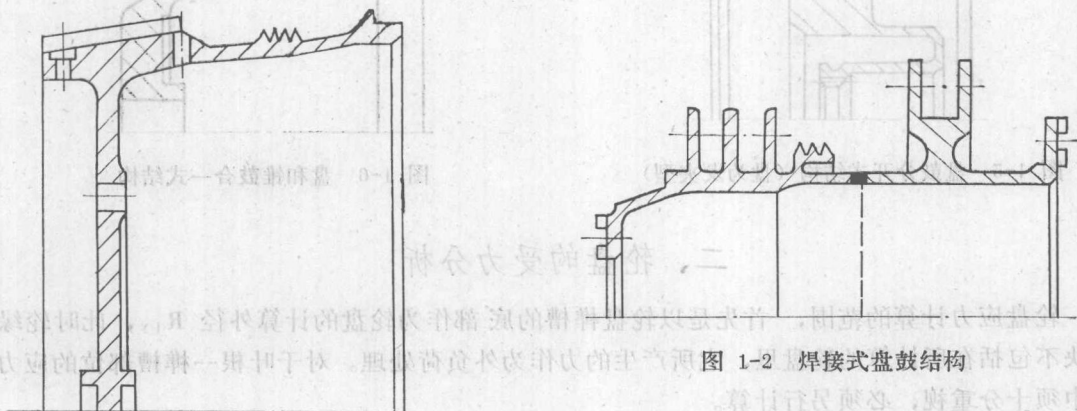


图 1-1 整体式盘鼓结构

图 1-2 焊接式盘鼓结构

* 见图 1-5 盘内孔边缘有一如发夹型的结构，其上有一圈内花键，靠它和轴上的外花键定心传扭，工作时由于温度和离心力的影响，盘要向外伸长。为了不破坏盘在轴上的定心，故做一发夹结构，使变形不传至花键齿。

- 1) 盘鼓合一式：有整体式（图 1-1）和焊接式（图 1-2）两种。
- 2) 盘轴合一式：有整体式（图 1-3）和焊接式（图 1-4）两种。
- 3) 盘鼓分开式（图 1-5）。
- 4) 盘和锥鼓合一式（图 1-6）。

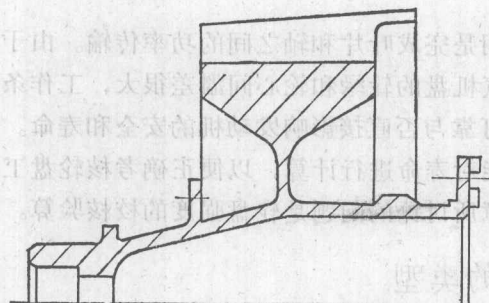


图 1-3 整体式盘轴结构

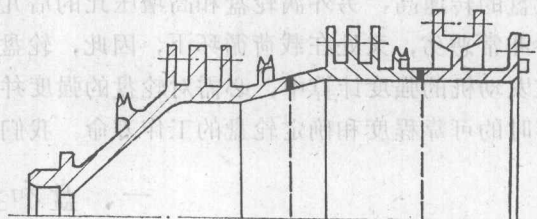


图 1-4 焊接式盘轴结构

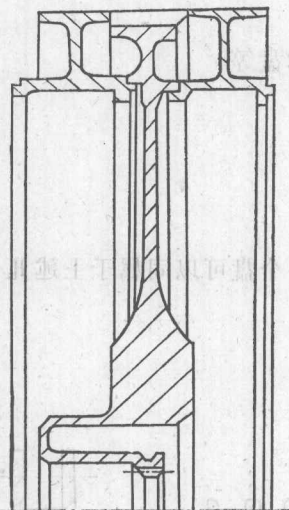


图 1-5 盘鼓分开式结构（盘为发夹型）

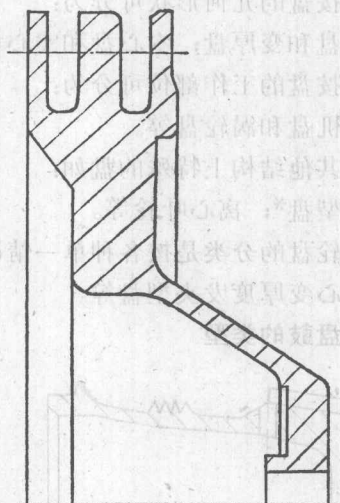


图 1-6 盘和锥鼓合一式结构

二、轮盘的受力分析

轮盘应力计算的范围，首先是以轮盘榫槽的底部作为轮盘的计算外径 R_{1y} ，此时轮缘凸块不包括在所计算的轮盘里，它所产生的力作为外负荷处理。对于叶根--榫槽部位的应力集中须十分重视，必须另行计算。

压气机盘和涡轮盘在工作时受到不同来源和性质的载荷作用，主要有以下几种：

1. 离心力

轮盘在旋转时，受到自身质量的离心力和装在轮盘上的叶片等零件质量的离心力作用，产生很大的离心拉伸应力。

现代发动机的工作转速很高，因此产生的离心力很大。据统计，在发动机涡轮盘轮缘计算

半径处，由于叶片和轮缘凸块的离心力作用所产生的径向应力 σ_{rly} 大多在 1000-1500 公斤/厘米² 范围内。

轮缘计算半径处的径向应力计算公式为：

$$\sigma_{rly} = \frac{P_{Ly}}{A} = \frac{Z(C_p + C_v)}{A} \quad (1-1)$$

Z 叶片数

C_p 一个轮缘凸块的离心力

C_v 一个叶片的离心力

A 在轮缘处轮盘的承力面积

2. 热应力

对于涡轮盘来说，由于轮缘和轮心的温差较大，尤其在起动和停车时，温差更大，所以轮盘上作用着相当大的热负荷。这样，就引起拉伸应力和压缩应力。

对于压气机轮盘来说，一般工作温度都不太高，温度沿径向变化较小，可以不考虑热应力的影响。但是，随着压气机增压比的不断提高，对于末几级盘由于温差变大，故仍要考虑热应力的影响。

3. 剪应力

轮盘在传递扭矩时将产生剪应力。

4. 弯曲应力

由于轮盘前后两侧的气体压力和温度不同，作用在叶片上的气体轴向力，飞机作曲线飞行时产生的陀螺力矩以及其他原因，如径向载荷不对称、轮盘形状不对称等，都可能使轮盘中产生弯曲应力。

5. 振动应力

叶片和轮盘振动时，在轮盘中将产生振动应力。

6. 装配应力

当盘和轴装配带有紧度时，盘内孔受到压应力。

在上述各种负荷中，离心力和热应力在轮盘应力中占主要成分。

剪应力、弯曲应力和振动应力在一般情况下可不计算。

同样的发动机装于不同用途的飞机上，上述各种负荷的大小不相同，如歼击机在机动飞行中，陀螺力矩所引起的弯曲应力就可能较大，应该予以考虑。但是在运输机中，此项就可以忽略不计。

发动机的结构不同，上述各项负荷在盘内产生的应力也有变化。弯曲应力仅在薄盘中可能较大。在较厚的盘和有鼓环的盘轴式或盘鼓式混合转子中均很小。

因此，在进行轮盘的应力分析时，必需注意对具体情况作具体分析。

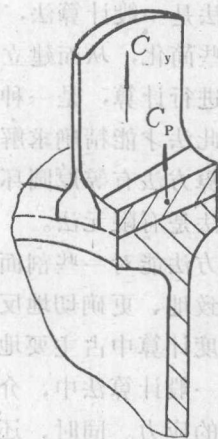


图 1-7 计算轮缘径向应力 σ_{rly} 用图

三、盘和盘鼓的计算方法

盘和盘鼓的强度计算就其计算目的而言可以分为三种：

第一种方法是校核计算：即在给定了轮盘的剖面形状、材料、载荷和温度分布的条件下，求其应力沿半径的分布情况。这时轮盘的安全系数用材料的强度参数（屈服极限或强度极限）与其最大当量应力之比来确定。

第二种方法是型面设计：即在预先给定的应力及它分布规律的条件下，求出轮盘的剖面形状。再进一步就是给出总体尺寸和载荷条件，按最轻量化设计轮盘剖面。

第三种方法是承力性能计算：即在已知轮盘的剖面形状、材料、载荷和温度分布的条件下，求出轮盘的破坏转速，并用此破坏转速与轮盘的最大工作转速相比，求得轮盘总安全系数。

就其具体的应力计算的方法而言，又可分为两种方法：

第一种方法是一般计算法，又叫解析法。它是利用弹性力学的基本原理，将实际的轮盘和载荷进行某些简化，从而建立计算模型，进行强度计算。这种计算方法比较简单，能较快地对盘的强度进行计算，是一种最基本的计算方法。但只有当轮盘的剖面形状很简单时（如等厚盘），用此法才能精确求解。对于任意变厚度或剖面形状复杂的盘或盘鼓则很难精确求解。常用的计算方法有等厚圆环法和积分法，详见本章第二节变厚度盘的应力计算部分。

第二种方法是有限元法。

这种计算方法能对一些剖面形状十分复杂的轮盘进行求解，计算结果具有较高的精确度，并能更细致地、更确切地反映应力的分布情况。随着电子计算技术的不断发展，这种计算方法已在强度计算中占主要地位。

在本章的一般计算法中，介绍了用等厚圆环法（二次计算法）和积分法计算变厚度盘和对称的带鼓盘的应力。同时，还介绍了弹塑性盘的一种近似解法。

在本章的有限元计算中，介绍了剖面形状复杂的变厚度盘；带紧度的压气机盘鼓的应力计算；介绍了离心叶轮和带偏心孔的等厚度盘应力计算；介绍了涡轮盘温度场和热应力的计算及弹塑性盘的应力计算。这几种形式的盘和盘鼓用一般计算法难以获得较精确的解，但是用有限元法就能获得较精确的解，从而能更好地满足工程上的需要。在实际发动机中，剖面形状很简单的盘和盘鼓是很少的。所以掌握轮盘强度的有限元计算法在发动机设计中具有十分重要的意义。关于叶根—榫槽部位的弹塑性应力集中计算，可参见资料〔30〕。

四、盘的强度校核和盘的破坏形式

1. 强度校核

轮盘工作是否安全可靠，一般必须进行轮盘的强度校核、变形计算和低循环疲劳寿命估算。并和相应的轮盘试验结合起来来确定其在寿命期内的可靠性。对于强度校核一般取最大转速状态作为计算状态，超温超转状态作为参考计算状态。

目前常用的强度校核方法有三种：

1) 比较法。把计算出来的轮盘最大当量应力与目前使用的盘的当量应力进行比较。

对于一般计算法来说，由于假设轮盘是平面应力状态。根据第四强度理论，计算当量应力的公式为：

$$\sigma_{d1} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_t^2} - \sigma_r \sigma_t \quad (1-2)$$

对于有限元算法来说，由于是按三向受力状态计算的，根据第四强度理论，计算当量应力的公式为：

$$\sigma_{d1} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1-3)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力

其安全条件为： $\sigma_{d1} \leq [\sigma]$ 或 $\sigma_{d1} \leq$ 目前已经使用的盘的当量应力。在轮盘计算中，确定许用应力 $[\sigma]$ 是比较困难的。由于轮盘工作条件复杂，有些负荷（如振动、惯性力矩等）难以计算，而且在复杂受力状态下不可能通过简单的拉伸试验定出材料的许用应力。目前，一般是采用“经过考验”的相同材料轮盘用同样的方法计算其当量应力作为比较的标准。对于中心有孔的轮盘，由于孔边应力较大，设计时允许孔边的局部应力超过屈服极限而进入塑性区，使应力重新分布，因此应力水平可适当提高。

目前使用的航空发动机轮盘的当量应力参考数据见表 1-1。

表 1-1 航空发动机轮盘当量应力参考数据表* (kg/cm²)

轮盘形式 \ 材 料	铝 合 金	钛 合 金	合 金 钢
温度 °C	100~200	500 以下	400~500
实心盘	1500~2000	2500~3500	4500~6000
空心盘	2000~2500	4000~5000	7000~9000**

2) 局部安全系数法。这种方法是将轮盘材料的极限应力与盘中最大当量应力 σ_{d1max} 进行比较***。

一般对压气机而言，由于温度不高，极限应力取材料的强度极限 σ_b 或屈服极限 σ_s 。

局部安全系数为：

$$n_b = \frac{\sigma_b}{\sigma_{d1max}} \quad \text{或} \quad n_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_{d1max}} \quad (1-4)$$

对涡轮而言，由于温度较高，极限应力应取材料在工作温度及给定寿命下的持久极限 σ_T 或材料的蠕变极限 $\sigma_{a/T}$ 。

局部安全系数为：

$$n_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{d1max}} \quad \text{或} \quad n_{a/T} = \frac{\sigma_{a/T}}{\sigma_{d1max}} \quad (1-5)$$

局部安全系数 n_b (或 n_T) 的参考数值见表 1-2。

航空发动机轮盘常用材料物理性能和机械性能数据见表 1-3。

* 此表系根据目前国内使用的发动机轮盘应力水平的不完全统计归纳而来。

** 按弹性状态计算的应力值，所以偏高。

*** 由于发动机轮盘材料绝大部分是塑性材料，故此处取用按第四强度理论计算的最大当量应力 σ_{d1max} 。但在国外，也有用盘中径向应力或切向应力中的最大值来进行比较。