

# 航空发动机 强度设计、试验手册

(试用本)

第一篇 第四章

轴类零件的强度计算



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

第一篇

第四章

## 轴类零件的强度计算

主 编 熊昌炳

主 审 吕文林 赵经文

第三机械工业部第六研究院

## 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。

# 符 号 表

## 一、基本符号

A	面积, 截面积
D	轴的外径
$D_p$	花键套齿的节圆直径
d	轴的内径
$d_s(d_0)$	疲劳试棒直径
$d_1$	孔直径或槽宽
E	材料弹性模量
F	力
$F_{1i}$	转子气流进口环形面积
$F_{2i}$	转子气流出口环形面积
G	材料剪切模量, 转子重量
$G_B$	气体流量
$G_{br}$	转子不平衡度
g	重力加速度
h	花键套齿齿高
J	转子极惯性矩
K	飞机过载系数, 疲劳安全系数
$K_b$	破坏安全系数
$K_{0.2}$	屈服安全系数
L	长度
M	力矩, 弯矩
$M_T$	轴的扭矩
$M_g$	陀螺力矩
$M_n$	惯性弯矩
N	循环次数
$N_T$	轴传递的功率
n	轴的转速
P	载荷
$P_a$	轴向载荷
$P_r$	径向载荷
$P_o$	周向载荷
$P_H$	质量不平衡力
$P_i$	惯性力

$P_{1i}$	转子气流进口静压	转子进口静压	$\{K\}$
$P_{2i}$	转子气流出口静压	量向静压点静压	$\{\delta\}$
$\Delta P$	内外表面压差	量总压差	$\{0\}$
$R$	飞机机动飞行半径, 轴的外半径	量总变距	$\{e\}$
$r$	轴的内半径		
$T$	温度		
$u$	径向位移		
$v$	轴向位移, 速度, 体积		
$w$	周向位移, 抗弯截面系数		
$\alpha$	材料线膨胀系数		
$\gamma$	重度, 剪应变		
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	三个剪应变分量		
$\Delta$	三角形面积		
$\delta$	位移		
$\epsilon$	应变		
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	三个正应变分量		
$\theta$	角度		
$\mu$	泊桑比		
$\rho$	材料密度		
$\sigma$	正应力		
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	三个正应力分量		
$\sigma_b$	拉伸极限应力		
$\sigma_{0.2}$	屈服极限应力		
$\sigma_{-1}$	对称循环弯曲疲劳极限		
$\sigma_c, \bar{\sigma}$	当量应力		
$\tau$	剪应力		
$\tau_b$	剪切极限强度		
$\tau_{-1}$	对称循环的扭转疲劳极限		
$\tau_c$	当量剪切应力		
$\Omega$	飞机机动飞行角速度		
$\omega$	发动机转子角速度		

## 二、其他符号

$[ \ ]$	矩阵
$\{ \ }$	列阵, 列向量
$[ \ ]^T, \{ \ }^T$	$T$ 为矩阵转置符号
$[I]$	单位矩阵
$[B]$	应变位移矩阵
$[D]$	弹性矩阵
$\{F\}$	结构载荷向量

[K]	结构刚度矩阵	矩阵口张流户平拜	P
{δ}	结构节点位移向量	矩阵口出流户平拜	P
{σ}	应力总量	差丑面表代内	PA
{ε}	应变总量	登半代前解, 登半行代流拜拜	R
		登半内前解	r
		奥盖	T
		登半向登	u
		拜拜, 奥盖, 登半向解	v
		登半面解拜拜, 登半向解	w
		登半洲流拜拜拜	x
		变向奥, 奥盖	y
		量代变向奥三个 x <sub>1</sub> , x <sub>2</sub> , x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> , x <sub>2</sub> , x <sub>3</sub>
		拜面流奥三	Δ
		奥盖	δ
		变向	s
		量代变向五个三 x <sub>1</sub> , x <sub>2</sub> , x <sub>3</sub> , x <sub>4</sub> , x <sub>5</sub>	x <sub>1</sub> , x <sub>2</sub> , x <sub>3</sub> , x <sub>4</sub> , x <sub>5</sub>
		奥盖	θ
		出奥盖	μ
		奥盖拜拜	ρ
		代奥五	σ
		量代代奥五个三 x <sub>1</sub> , x <sub>2</sub> , x <sub>3</sub> , x <sub>4</sub> , x <sub>5</sub>	x <sub>1</sub> , x <sub>2</sub> , x <sub>3</sub> , x <sub>4</sub> , x <sub>5</sub>
		代奥拜拜拜拜	ρ
		代奥拜拜拜拜	ρ
		拜拜奥奥曲奥拜拜拜拜	ρ
		代奥奥奥	ρ
		代奥奥	τ
		奥奥拜拜拜拜	τ
		拜拜奥奥拜拜拜拜拜拜	τ
		代奥奥奥奥奥	τ
		奥奥奥奥奥奥奥奥	Ω
		奥奥奥奥奥奥奥奥	ω
		号拜奥奥, 二	
		拜奥 [ ]	
		量向奥, 拜奥 { }	
		号拜奥奥奥奥奥奥奥 T { } [ ]	
		拜奥奥奥 [ ]	
		拜奥奥奥奥奥 [B]	
		拜奥奥奥 [D]	
		量向奥奥奥奥 {F}	

## 序 言

本章的基本内容包括航空发动机主轴强度计算的一般算法（常规法）和有限元素法两部分。

一般计算方法是以材料力学的基本方程出发，结合发动机主轴上的受载荷情况和支承情况，进行某些简化来建立计算模型，从而对某些危险截面进行应力的计算和校核；这种方法比较简单，精度也较低，只适用于初步的简单估算。有限元素法是以弹性力学的基本方程出发，能对轴类零件作较精确的应力分析，尤其对某些局部位置，例如凸台、凹槽或轴颈的喇叭形等处，能获得准确的应力分布结果。

在方法的处理上，我们尽量从发动机实际工作情况出发，把轴上所承受的各种载荷（拉伸、弯曲、扭转、横向载荷、离心载荷等），分解成轴对称载荷，对称载荷（对某一对称面）和反对称载荷等各种不同性质的类型，根据这许多不同性质分别作出应力分析的结果，再利用在弹性范围内的应力叠加原理，进行各种必要的强度校核。而轴的主要结构部分其几何形状都是轴对称性质的，只有局部位置处的孔或缺槽破坏了结构的轴对称性质。对于这些局部位置，应该另按三维应力进行分析。我们对轴的局部应力集中的位置，作了光弹性的拉伸、弯曲和扭转的试验，并与计算数据进行了对比，其结果发现两者的数据十分吻合，完全能满足工程上的精度要求。

考虑到本手册是针对从事航空发动机强度计算工作者而编写的，他们都具有一定的力学和数学基础，所以，无论是常规方法或是有限元素法，对各种计算公式都未作推证而只引用其结论。但是，为了照顾初次去掌握本方法的读者，我们还是对计算公式作了比较系统的简要说明，逻辑性比较清楚，使用者只要循序渐进，就能很好的掌握它。

对一般工程技术人员来说，学习的目的主要是解决实际问题，为此，我们对程序设计及其使用方法，介绍得比较详细。并且根据我国电子计算机种类繁多的特点，分别编制了三种语言的程序，所有这些程序，都经过多次实践考核，提供使用应该是可靠的。

本章的计算方法和程序，可供从事航空发动机工作的技术人员和其他工程技术人员使用。也可供大专院校发动机设计专业的师生作为参考。

本章编写时，虽以某些单位的实际计算与实验为基础，也有一定的试验证明和使用经验，但这只是最基本的，因为主轴的受载情况复杂，形状各异，不能光靠计算来彻底的解决它的复杂情况。同时，也由于我们的水平有限，经验不足，存在的错误和缺点，在所难免，恳切希望读者提出批评指正。

编者于一九八〇年八月

# 目 录

( VI )	符号表	1
( 81 )	序 言	2
( 91 )	第一节 轴的受力分析和静应力估算	( 1 )
( 91 )	一、轴的受力分析	( 1 )
( 92 )	(一) 扭转载荷	( 1 )
( 92 )	(二) 轴向载荷	( 3 )
( 92 )	(三) 弯曲载荷	( 4 )
( 93 )	1. 轴上全部零件质量引起的弯矩	( 4 )
( 93 )	2. 转子不平衡度引起的弯矩	( 4 )
( 93 )	3. 惯性载荷引起的弯矩	( 4 )
( 93 )	4. 合成弯矩	( 4 )
( 93 )	5. 陀螺力矩引起的弯矩	( 5 )
( 93 )	6. 承力机匣挠曲引起的弯矩	( 8 )
( 93 )	7. 气动迎角力偶引起的弯矩	( 8 )
( 93 )	8. 叶片折断载荷引起的弯矩	( 8 )
( 93 )	(四) 轴对称的径向载荷	( 8 )
( 93 )	1. 轴本身质量的离心载荷	( 8 )
( 93 )	2. 套齿载荷的径向分量	( 9 )
( 93 )	3. 盘的离心载荷	( 9 )
( 93 )	(五) 剪切载荷	( 9 )
( 93 )	(六) 其它载荷	( 10 )
( 93 )	二、套齿的应力计算	( 10 )
( 93 )	三、轴的静应力估算	( 11 )
( 93 )	(一) 载荷的计算	( 11 )
( 93 )	(二) 截面几何参数的计算	( 11 )
( 93 )	(三) 静应力估算	( 12 )
( 93 )	1. 扭转剪应力计算公式	( 12 )
( 93 )	2. 轴向正应力计算公式	( 12 )
( 93 )	3. 弯曲应力计算公式	( 12 )
( 93 )	第二节 轴的有限元应力分析	( 14 )
( 93 )	一、三角形环元素	( 15 )
( 93 )	(一) 轴对称载荷	( 15 )
( 93 )	1. 位移	( 15 )
( 93 )	2. 应变	( 16 )
( 93 )	3. 应力—应变关系	( 16 )



4. 元素刚度矩阵	( 17 )
5. 应力	( 18 )
(二) 非轴对称载荷	( 19 )
1. 对称载荷	( 19 )
2. 反对称载荷	( 22 )
(三) 等效节点圆力的演化	( 23 )
( I ) 1. 集中载荷演化而成的等效节点圆力	( 23 )
( I ) 2. 分布载荷演化而成的等效节点圆力	( 25 )
( I ) 3. 分布体积力演化而成的等效节点圆力	( 27 )
( 8 ) 4. 温度引起的等效节点圆力	( 28 )
( 1二、八节点曲边四边形等参环元素	( 28 )
( 1 (一) 轴对称载荷	( 31 )
( 1 ) 1. 位移	( 31 )
( 1 ) 2. 应变	( 31 )
( 1 ) 3. 应力	( 32 )
( 8 ) 4. 元素刚度矩阵	( 32 )
( 8 ) 5. 载荷	( 33 )
( 8 (二) 非轴对称载荷	( 34 )
( 8 ) 1. 对称载荷	( 34 )
( 8 ) 2. 反对称载荷	( 37 )
( 8 (三) 轴对称稳定温度场的元素刚度矩阵及右端向量	( 38 )
( 8 (三、主应力和当量应力	( 39 )
( 8 (一) 主应力值	( 39 )
( 8 (二) 主应力的方向余弦	( 40 )
( 01 (三) 当量应力	( 42 )
( 0四、数值积分	( 43 )
<b>第三节 线性代数方程组的解法和边界条件的处理</b>	( 46 )
( I一、线性代数方程组的解法	( 46 )
( II (一) 块追赶法	( 46 )
( SI ) 1. 公式推导	( 46 )
( SI ) 2. 求解过程	( 47 )
( SI (二) 分块解法	( 47 )
( SI ) 1. 概述	( 47 )
( SI ) 2. $LDL^T$ 分解方法	( 48 )
( 0二、边界条件的处理	( 50 )
( 01 (一) 边界约束	( 50 )
( 01 ) 1. 置换方程组	( 50 )
( 01 ) 2. 嵌入新的方程式	( 51 )
( 01 (二) 过盈配合问题	( 52 )

<b>第四节 强度安全准则</b> .....	( 55 )
( 77 ) 一、概述.....	( 55 )
( 87 ) 二、按常规应力分析计算的强度校核.....	( 55 )
( 87 ) (一) 疲劳强度校核.....	( 55 )
( 87 ) 1. 疲劳载荷.....	( 55 )
( 88 ) 2. 疲劳强度校核的计算方法.....	( 56 )
( 18 ) (二) 屈服、破坏强度校核.....	( 61 )
( 18 ) 1. 屈服强度校核.....	( 61 )
( 18 ) 2. 破坏强度校核.....	( 61 )
( 18 ) (三) 蠕变强度校核.....	( 61 )
( 18 ) 三、按有限元法应力分析结果进行强度校核.....	( 62 )
( 88 ) (一) 疲劳强度校核方法.....	( 62 )
( 88 ) 1. 应该考虑的载荷和温度.....	( 62 )
( 88 ) 2. 计算点的选择及其应力表达式.....	( 62 )
( 88 ) 3. 求各应力分量的当量稳态应力.....	( 63 )
( 88 ) 4. 用歪形能理论求当量稳态应力.....	( 65 )
( 88 ) 5. 确定疲劳安全系数.....	( 66 )
( 88 ) (二) 屈服校核.....	( 66 )
( 88 ) (三) 蠕变校核.....	( 66 )
( 88 ) 四、程序使用说明.....	( 66 )
( 88 ) (一) 主轴屈服、疲劳强度计算程序.....	( 66 )
( 88 ) 1. 主要标识符说明.....	( 66 )
( 88 ) 2. 原始数据输入顺序.....	( 67 )
( 88 ) 3. 计算结果输出.....	( 67 )
( 88 ) 4. 源程序 (附录 V, VI).....	( 68 )
( 101 ) (二) 主轴疲劳强度计算程序.....	( 68 )
( 101 ) 1. 主要标识符说明.....	( 68 )
( 101 ) 2. 原始数据输入顺序.....	( 69 )
( 101 ) 3. 计算结果输出顺序.....	( 69 )
( 103 ) 4. 例题.....	( 70 )
<b>第五节 程序设计</b> .....	( 73 )
( 101 ) 一、结构网格自动划分简介.....	( 73 )
( 101 ) (一) 结构子块的划分.....	( 73 )
( 101 ) (二) 子块内网格的划分.....	( 73 )
( 111 ) 1. 子块内元素数目变化的处理.....	( 73 )
( 111 ) 2. 子块边界形成线类型.....	( 74 )
( 111 ) (三) 子块分割的计算.....	( 74 )
( 111 ) 1. 正常子块的分割计算.....	( 74 )
( 111 ) 2. 递增、递减子块分割计算的处理.....	( 76 )

( 88 )	3. 边界形成线为圆弧时的处理	( 76 )
( 88 )	4. 三角形元素的确定	( 77 )
( 88 )	(四) 子块间的联结计算	( 78 )
( 88 )	(五) 四边形等参元素网格自动分割	( 79 )
( 88 )	1. 形成数组LF (6, K)	( 79 )
( 88 )	2. 节点序号的生成	( 80 )
( 88 )	3. 节点坐标的生成	( 81 )
( 88 )	4. 特殊站的处理	( 81 )
( 88 )	二、程序设计	( 81 )
( 88 )	(一) FORTRAN-IV语言程序使用说明	( 81 )
( 88 )	1. 程序功能	( 81 )
( 88 )	2. 主程序框图	( 82 )
( 88 )	3. 标识符说明	( 83 )
( 88 )	4. 子程序功能说明	( 85 )
( 88 )	5. 输入输出数据	( 85 )
( 88 )	6. 使用本程序注意事项	( 86 )
( 88 )	7. 输入数据举例	( 87 )
( 88 )	(二) BCY语言程序 (三角形元素) 使用说明	( 92 )
( 88 )	1. 功能	( 92 )
( 88 )	2. 标识符	( 92 )
( 88 )	3. 过程说明	( 95 )
( 88 )	4. 刚度及载荷阵的分块标识符图解说明	( 96 )
( 88 )	5. 网格的形成	( 96 )
( 88 )	6. 主程序框图	( 97 )
( 88 )	7. 计算实例	( 99 )
( 88 )	(三) 八节点曲边四边形等参元程序使用说明	( 101 )
( 88 )	1. 功能	( 101 )
( 88 )	2. 元素类型	( 101 )
( 88 )	3. 主程序的流程框图	( 101 )
( 87 )	4. 主要标识符说明	( 102 )
( 87 )	5. 子程序 (或过程) 说明	( 103 )
( 87 )	6. 输入数据	( 104 )
( 87 )	7. 输出数据	( 106 )
( 87 )	8. 例题	( 106 )
( 87 )	9. 使用时的一些限制	( 115 )
( 87 )	三、考核实例	( 115 )
( 87 )	(一) 三角环元素的 FORTRAN-IV 程序的考核	( 115 )
( 87 )	1. 空心厚壁直圆筒	( 115 )
( 87 )	2. 空心等厚圆盘	( 116 )

(二) 八节点曲边四边形等参元的程序考核.....	(118)
<b>附录 I</b> 三角形环元素程序 (FORTRAN-IV) .....	(121)
<b>附录 II</b> 八节点等参环元素程序 (FORTRAN-IV) .....	(142)
<b>附录 III</b> 三角形环元素程序 (BCY) .....	(179)
<b>附录 IV</b> 八节点等参环元素程序 (ALGOL-60).....	(190)
<b>附录 V</b> 主轴屈服、疲劳强度计算程序 (FORTRAN-IV).....	(206)
<b>附录 VI</b> 主轴屈服、疲劳强度计算程序 (ALGOL-60).....	(216)
<b>参考资料</b> .....	(219)

登直圖平前內查對井	D
登內前辭	b
登直對知裝裝 (, b)	b
廣謝與登直井	b
量對對轉轉林	E
代	F
感面級和口裝裝于于辭	F
感面級和口出裝裝于于辭	F
量重于辭, 量對因費轉林	G
量裝于	G
寬調平不于辭	G
寬版代重	g
高齒齒查對井	d
或對對對于辭	L
環系全安裝裝, 環系難裝裝	K
環系全安裝裝	K
環系全安裝裝	K
寬計	J
或裝, 或代	M
或對前辭	M
或代難對	M
或對對對	M
幾大和前	N
率代前裝裝辭	N
或對前辭	n
荷難	P
荷難向辭	P
荷難向登	P
荷難向圓	P
代調平不量類	P
代對對	P

# 第一节 轴的受力和静应力估算

航空发动机在工作过程中，轴类零件承受着非常复杂的载荷。在轴的应力计算和强度校核时，应详尽地分析轴在各种有效载荷作用下的受力状况。做到既要保证轴在要求的寿命期内的“完整性”，又要兼顾在非常情况下的某一定时间内轴应能承受住全部的主要载荷。

实践证明，引起轴的疲劳应力的载荷是非常重要的，要特别地重视。同时对引起轴的屈服应力，破坏应力及（长时间或短时间的）蠕变应力的载荷也应给以重视。

本节的主要内容包括轴上承受的各种主要载荷及性质，载荷产生的原因，载荷在轴上引起的应力状况，载荷的计算方法；套齿的应力计算和轴的静应力计算。

静强度的校核和疲劳应力的计算和校核方法可见本章第四节。

## 一、轴的受力分析

航空发动机的主轴，主要承受着扭转载荷、轴向载荷、弯曲载荷、轴对称的径向载荷、剪切载荷和其它一些载荷。

### (一) 扭转载荷

扭转载荷是轴承受的主要载荷，它是由流经叶片通道的气流切向动量矩变化产生的。主轴上的扭转载荷在轴上引起剪应力。

扭转疲劳载荷在通常情况下是轴的危险载荷，其详细内容将在第四节中讨论，而本节则着重讨论常规方法的静强度计算。

扭矩可根据所掌握的数据及不同的情况分别使用下述三个公式进行计算：

$$1. \quad M_T = 716.2 \frac{N_T}{n} \quad (1-1)$$

式中  $N_T$  —— 轴传递的功率。（马力）

$n$  —— 轴的转速。（转/分）

$M_T$  —— 轴的扭矩。（公斤·米）

$$2. \quad M_T = \frac{G_B}{g} (R_2 V_{2w} - R_1 V_{1w}) \quad (1-2)$$

式中  $G_B$  —— 气流流量。（公斤/秒）

$g$  —— 重力加速度。（9.81米/秒<sup>2</sup>）

$R_2$  —— 转子出口通道平均半径。（米）

$R_1$  —— 转子进口通道平均半径。（米）

$V_{2w}$  —— 转子叶片出口气流在半径  $R_2$  处的切向分速度。（米/秒）

$V_{1w}$  —— 转子叶片进口气流在半径  $R_1$  处的切向分速度。（米/秒）

$$3. \quad M_T = \frac{1}{\omega} C_p J G_B \Delta T^* \quad (1-3)$$

式中  $\omega$  —— 轴的角速度。(弧度/秒)  
 $C_p$  —— 气流的定压比热。(卡/公斤·°C)  
 $J$  —— 热功当量。(公斤·米/卡)  
 $\Delta T^*$  —— 单级绝对温升。(°C)

式(1-2)和(1-3)为单级扭矩计算公式,轴的扭矩为各级扭矩之和。

因为扭矩是流量、温升和转速的函数,所以通常我们计算最大扭矩值后再去推算其它状态的扭矩值。

扭矩的脉动值应当实测,当不可实测时也可依经验选取。详见第四节。

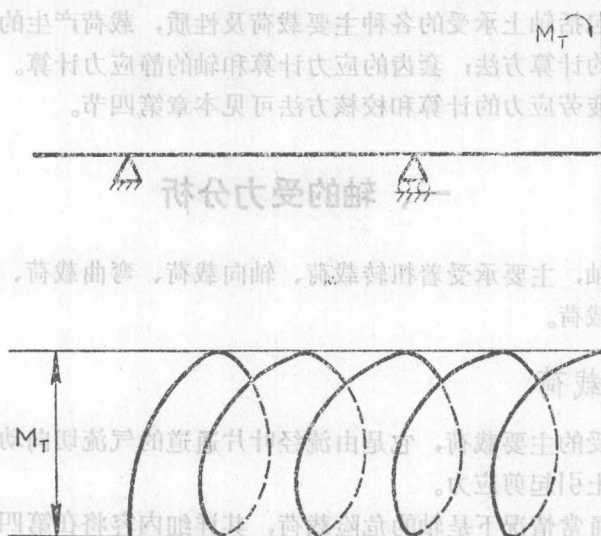


图 1-1 扭矩简图

当轴上开有径向孔时,需考虑轴的横截面面积减少而使承载能力的降低。为求得正确的应力值,可采用将扭矩值按比例放大的方法。按式(1-4)计算:

$$M'_T = M_T \left( \frac{\pi \frac{(D+d)}{2}}{\pi \frac{(D+d)}{2} - n d_h} \right) \quad (1-4)$$

式中  $M'_T$  —— 放大后的扭矩。(公斤·米)  
 $M_T$  —— 实际计算的扭矩。(公斤·米)  
 $D$  —— 开孔处轴的外径。(厘米)  
 $d$  —— 开孔处轴的内径。(厘米)  
 $n$  —— 开孔的数目。(同一截面处)  
 $d_h$  —— 开孔的直径。(厘米)

## (二) 轴向载荷

转子的全部轴向载荷均作用于轴上。轴向载荷是由各级转子叶片前后的静压差、流经各级转子叶片通道的气流动压在轴向的分量以及转子表面各腔的气流轴向静压差产生的。

而轴向载荷在轴上引起正应力。一般情况下轴向载荷引起的正应力比扭转载荷引起的剪应力要小得多。轴向载荷对联轴器附近和局部有应力集中的位置影响较大。

当确定作用在轴上的轴向载荷 (P) 以反气流方向为正时, 那么轴向载荷的计算公式应为:

$$P = \sum_{i=1}^n (P_{1i}F_{1i} - P_{2i}F_{2i} + \frac{G_B}{g} V_{1ai} - \frac{G_B}{g} V_{2ai}) + \sum_{j=1}^m P_j F_j \quad (1-5)$$

- 式中
- $P_{1i}$  —— 第  $i$  级转子叶片进口静压。(公斤/厘米<sup>2</sup>)
  - $P_{2i}$  —— 第  $i$  级转子叶片出口静压。(公斤/厘米<sup>2</sup>)
  - $F_{1i}$  —— 第  $i$  级转子叶片进口处环形通道面积。(厘米<sup>2</sup>)
  - $F_{2i}$  —— 第  $i$  级转子叶片出口处环形通道面积。(厘米<sup>2</sup>)
  - $n$  —— 转子的级数。
  - $G_B$  —— 气体流量。(公斤/秒)
  - $V_{1ai}$  —— 第  $i$  级转子叶片进口平均半径处气流轴向分速度。(米/秒)
  - $V_{2ai}$  —— 第  $i$  级转子叶片出口平均半径处气流轴向分速度。(米/秒)
  - $P_j$  —— 转子表面第  $j$  个腔的静压。(公斤/厘米<sup>2</sup>)
  - $F_j$  —— 对应于  $P_j$  所作用的转子表面第  $j$  个腔的表面在垂直轴线平面上的投影面积。(厘米<sup>2</sup>)
  - $m$  —— 转子表面压力腔的数目。
  - $P$  —— 轴向力。(公斤)

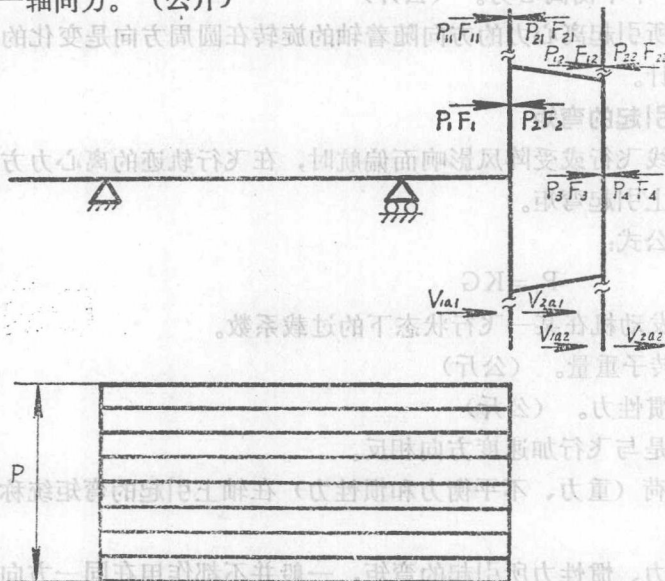


图 1-2 轴向载荷简图

当轴上的应力计算截面开有径向孔时，轴向力亦应按比例放大，公式与式(1-4)类同。

### (三) 弯曲载荷

轴上的弯曲载荷是由转子本身的重力、转子的不平衡力、惯性力、陀螺力矩等产生的，而且在不同的飞行状态时变化很大，因此计算时不仅要注意各种状态的选取，还要注意弯曲载荷的方向及合成。

弯曲载荷在轴上引起弯曲应力。

#### 1. 轴上全部零件质量引起的弯矩

转子全部零件质量在重心处的重力在轴上产生弯矩，重力计算公式：

$$P_c = mg \quad (1-6)$$

式中：m——转子质量。(公斤·秒<sup>2</sup>/米)

g——重力加速度。(9.81米/秒<sup>2</sup>)

P<sub>c</sub>——重力。(公斤)

计算中用转子的重量代替重力。

#### 2. 转子不平衡度引起的弯矩

由于转子本身质量分布是不均匀的，转子的重心往往不在旋转轴线上，因此当转子旋转时产生不平衡力，并在轴上产生弯曲载荷。不平衡力计算公式：

$$P_H = \frac{G_{br} \omega^2 \cdot 10^{-5}}{g} \quad (1-7)$$

式中：G<sub>br</sub>——转子不平衡度。(克·厘米)

ω——转子角速度。(弧度/秒)

g——重力加速度。(9.81米/秒<sup>2</sup>)

P<sub>H</sub>——不平衡离心力。(公斤)

由转子不平衡所引起离心力的方向随着轴的旋转在圆周方向是变化的，它的值一般是较小的，可以略而不计。

#### 3. 惯性载荷引起的弯矩

飞机着陆、曲线飞行或受阵风影响而偏航时，在飞行轨迹的离心力方向产生惯性载荷。这种惯性载荷在轴上引起弯矩。

惯性力的计算公式：

$$P_j = KG \quad (1-8)$$

式中：K——发动机在某一飞行状态下的过载系数。

G——转子重量。(公斤)

P<sub>j</sub>——惯性力。(公斤)

惯性力的方向是与飞行加速度方向相反。

由上述三种载荷(重力、不平衡力和惯性力)在轴上引起的弯矩统称为惯性弯矩。

#### 4. 合成弯矩

重力、不平衡力、惯性力所引起的弯矩，一般并不都作用在同一方向上，只有在某些特定情况下，三者才作用于同一方向，这时它的惯性弯矩最大。



a. 转子重心在两支点外时（悬臂情况），在支点上的弯矩大小为：

$$M_u = (P_G + P_H + P_j)(L_2 - L_1) \quad (1-9)$$

当  $L_x < L_1$  时，任意截面上的弯矩为：

$$M_x = M_u \frac{L_x}{L_1} \quad (1-10)$$

当  $L_1 \leq L_x \leq L_2$  时，

$$M_x = M_u \frac{L_2 - L_x}{L_2 - L_1} \quad (1-11)$$

转子支承简图和弯矩图见图 1-3。

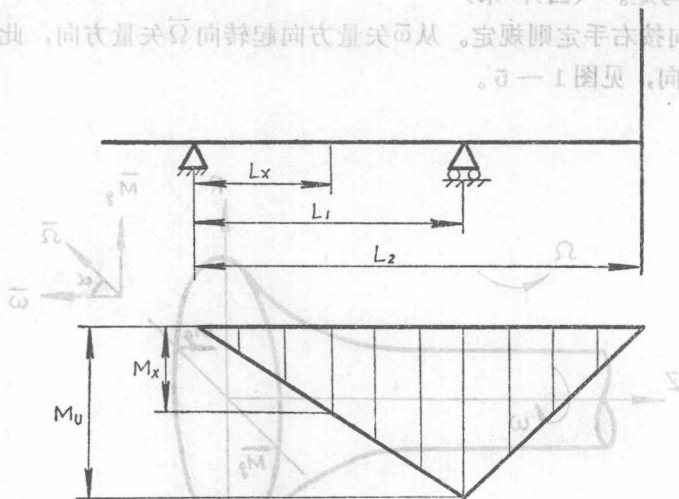


图 1-3

b. 转子重心在两支点内（简支情况）

在转子重心处的弯矩为：

$$M_u = (P_G + P_H + P_j) \frac{L_1 (L_2 - L_1)}{L_2} \quad (1-12)$$

当  $L_x < L_1$  时，任意截面上的弯矩为：

$$M_x = M_u \frac{L_x}{L_1} \quad (1-13)$$

当  $L_1 \leq L_x \leq L_2$  时，

$$M_x = M_u \frac{L_2 - L_x}{L_2 - L_1} \quad (1-14)$$

转子支承简图和弯矩图见图 1-4。

### 5. 陀螺力矩引起的弯矩

高速旋转的转子（角速度  $\omega$ ）在机动飞行（角速度  $\Omega$ ）时产生陀螺效应。陀螺  $M_u$  效应在轴上引起弯矩。

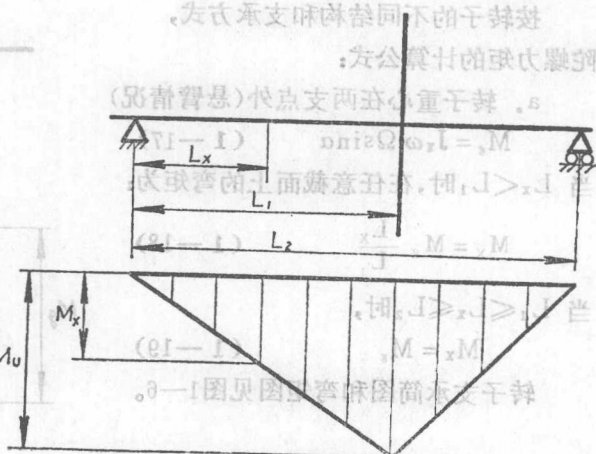


图 1-4