

航空发动机 强度设计试验手册

(试用本)

第二篇 第二章

叶片强度试验



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 第二章

叶片强度试验

(试用本)

主 编 李 宽



30064287



第三机械工业部第六研究院

0534871

出版说明

要 录 容 内

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。试验篇也有六章介绍了主要零、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。

出 版 内 容 提 要

本章是《航空发动机强度设计、试验手册》(试用本)试验篇的第二章。主要介绍叶片静频、振型、应力分布和振动衰减率的测定试验;叶片动测试验;颤振试验;叶片振动疲劳试验;涡轮叶片的热疲劳试验和气冷叶片的冷却效果试验的试验原理、方法、试验设备、参数测量以及数据处理方面的有关基本技术。文中介绍的有关参数值、系数值和关系曲线,由于受条件所限未经一一验证,仅供读者使用时参考。

本章可供从事叶片强度研究和试验的技术人员及有关专业的师生参考。

符 号 表

A	——振幅, 面积, 材料常数
a	——半振幅, 裂纹长度, 材料常数
B	——磁场强度, 磁通密度, 波幅
b	——韦伯曲线形状参数(韦伯曲线斜率)
C	——电容, 弹性系数, 顺性系数, 阻尼, 弦长, 构件的材料和几何形状的综合常数, 修正系数, 常数
C_L	——载荷型式对疲劳强度的修正系数
C_s	——付里叶系数
C_p	——定压比热, 压力系数
C_s	——构件尺寸效应对疲劳强度的修正系数
D	——直径, 当量直径, 电位移, 气流阻力, 拉伸延伸率
d	——距离, 压电应变系数, 应力增量, 特征尺寸
E	——电场强度, 弹性模量, 杨氏模量
e	——压电应力系数, 偏心距
F	——激振力, 面积
F_s	——激振力的力幅
f	——频率
f_s	——旋涡频率
\bar{f}	——频率比
$f(x)$	——概率密度函数
G	——质量流量
G_{BHP}	——折合流量
g	——压电电压系数, 重力加速度
H	——导纳, 跨点, 传递函数
h	——压电刚度系数, 厚度, 叶片振动的垂直位移, 换热系数
h_{gc}	——对流冷却的换热系数
h_{gf}	——气膜冷却的换热系数
h_{gt}	——发散冷却的换热系数
I	——电流
$ISI(t)$	——瞬时应力绝对值
i	——气流攻角, 增速比, 排列序号
J	——涡流密度
j	——应力水平分级数, 排列序号
K	——刚性, 机电偶合系数, 灵敏度系数, 修正系数, 构造系数, 失速团数目, 比热比, 常数, 应力集中系数, 比值, 应力强度因子

K_f	——疲劳强度减弱因子	
K_{f_s}	——剪切疲劳强度减弱因子	
K_G	——冷气与燃气的流量比	
K_R	——剩余疲劳强度系数	
K_s	——表面光洁度对疲劳强度的修正系数	A
K_T	——燃气与冷气的温度比	B
K_t	——理论应力集中系数	B
K_{T_s}	——理论剪切应力集中系数	B
ΔK	——应力强度因子幅	C
ΔK_E	——弹性应力强度因子范围	C
ΔK_{t_h}	——应力强度因子幅门槛值	C
L	——电感, 长度, 气流升力, 叶片弧长, 裂纹长度	C
L_C	——临界裂纹长度	C
M	——质量, 马赫数, 力矩	C
M_{W1}	——进口相对马赫数	D
M_Ω	——兆欧	b
m	——质量, 材料常数, 指数, 公尺	B
N	——循环数, 谱线数, 转速, 疲劳寿命, 寿命参数, 北极	e
N_s	——韦伯分布的特征寿命参数	f
N_f	——构件断裂时的总疲劳寿命	F
N_H	——发动机额定转速	f
N_i	——疲劳裂纹形成寿命	f
N_0	——韦伯分布的最小寿命参数	f
N_p	——疲劳裂纹扩展寿命, 对应于存活率P的疲劳寿命	(x) f
N_u	——努赛尔数	D
n	——转速, 波数, 系数, 材料常数, 指数, 总试验次数, 子样容量, 阻尼比, 循环次数, 非线性系数	g
P	——夹紧力, 阻力, 压力, 概率(存活率)	H
P_m	——电极化	d
P_r	——普朗特数	d
p	——自振频率, 激振力密度, 峰值循环数	d
Q	——机械品质因数	d
q	——热流密度, 缺口敏感系数, 指数	J
q_s	——缺口剪切灵敏度指标	(1) J2
R	——机械损耗, 电阻, 气体常数	L
R_e	——雷诺数	L
R_F	——储备系数	L
R_{F_s}	——交变应力下的储备系数	L
R_g	——应变片电阻	L

R_0	——镇定电阻
$R_x(\tau)$	——自相关函数
r	——缺口半径
S	——应变, 柔度系数, 标准差, 弦向位移, 应力, 周长, 南极, 斯特罗哈数
S_a	——对应指定寿命的标准试件疲劳强度
S_a'	——对应指定寿命的经修正的构件疲劳强度
S_e	——对称循环加载下的疲劳极限
S_p	——单调加载的屈服强度
S_u	——极限拉伸强度
S_w	——工作强度
S^2	——子样方差
T	——应力, 周期, 寿命, 温度, 时间历程
t	——时间, 温度, t 分布(统计分布), 寿命
t_r	——常规蠕变破坏寿命
Δt	——时间增量
U	——电压, 速度
u	——气流圆周速度
V	——电压, 速度
$V(t)$	——压力脉动信号时间历程
\bar{V}	——折合速度
W	——气流相对速度, 功
W_1	——叶片进口的气流相对速度
X_p	——对应存活率 P 的对数疲劳寿命
$\bar{X}(t)$	——激振力
\bar{X}	——子样平均值
x	——位移, 单个试样的寿命
y	——静变形, 峰值
Z	——阻抗, 孔数
$da/dN (\Delta a/\Delta N)$	——裂纹增长速率
n/\sqrt{T}	——发动机折合转速
α	——旋转速率, 攻角, 叶片振动的扭角, 显著度, 常数
α_a	——失速区转速
β	——攻角
β_1	——相对气流攻角
β_{1f}	——折合攻角
β_1	——最小损失加基准损失下的相对气流攻角
γ	——应变, 置信度, 比重

δ	——阻尼, 壁厚	
δ_A	——气动阻尼	
δ_M	——机械阻尼	
δ_Σ	——叶片振动的总阻尼	
ϵ	——介电常数, 应变, 阻尼比, 孔板系数	
ϵ_f	——热循环平均温度下静拉断延伸率	
$\mu\epsilon$	——微应变	
$\Delta\epsilon$	——应变范围	
$\Delta\epsilon_m$	——总应变范围	
$\Delta\epsilon_p$	——塑性应变范围	
η	——相对冷却效果	
$\bar{\eta}$	——平均相对冷却效果	
θ	——相角, 角度, 相对冷却效果	
$\bar{\theta}$	——平均相对冷却效果	
λ	——频率比, 衰减系数, 频率参数, 折合频率, 导热系数	
μ	——均值, 质量比, 粘性系数	
μ_p	——标准正态偏差系数	
$\hat{\mu}$	——母体平均值(无偏)估计量	
ν	——频率, 自由度	
ξ	——频率比	
π_K	——增压比	
ρ	——电阻率, 密度	
σ	——应力, 标准差	
σ_1	——低循环拉伸应力	
σ_2	——高循环拉伸应力	
σ_A	——振动应力	
σ_{A1}	——正应力的交变分量	
σ_b	——极限拉伸强度	
$\bar{\sigma}_f$	——平均疲劳强度	
σ_{f1}	——新叶片的疲劳强度	
σ_{f2}, σ_R	——叶片材料的剩余疲劳强度	
σ_m	——正应力的平均(静态)分量	
σ_s	——代替循环应力的等效静应力	
$\sigma_{s.s}$	——稳态振动应力	
$\hat{\sigma}$	——母体标准差(无偏)估计量	
$\Delta\sigma$	——应力范围	
σ^2	——方差	
τ	——剪切强度	

- ϕ — 每个循环的损伤
- ψ — 断面收缩率
- ψ^2 — 均方值
- ω — 圆频率
- $\bar{\omega}$ — 频率比
- Ω — 频率

序 言

在现代航空发动机的生产、研制和使用中，叶片裂断故障十分突出。由于叶片造型复杂，工作条件又很恶劣，如：大的载荷波动、高的温度和温度梯度、氧化、腐蚀、外物撞击、频繁的起动停车以及叶片表面不连续性造成的应力集中等，对转子叶片来说，还承受很大的离心载荷。于是，叶片经常会发生各种裂断故障。据统计，国产发动机中因叶片故障返厂检修的台数占全部检修总台数的35%左右，国外资料也有类似的报导。如1975年，美国对民航燃气轮发动机转子故障进行的统计^[1]，也说明了这一点。叶片裂断故障有时会给飞机和发动机造成严重事故。因此，叶片的使用可靠性是一个很重要的问题。随着发动机朝着高性能、轻重量、长寿命的方向发展，这一问题就显得更为突出。

通过对叶片故障的分析研究表明，产生裂断的主要原因是振动和热应力，使叶片产生振动疲劳和热疲劳，进而导致叶片的裂断失效。为此，国内外科技人员在疲劳失效问题方面进行了大量的研究和探索，对疲劳机理有了一定程度的了解，也找到了一些预测疲劳失效的准则和估算方法。由于影响叶片疲劳的因素非常复杂，且难以预估它们的影响程度。所以，不能对疲劳失效做出准确的预测，只能从概率统计的观点进行预估，这已为实验数据的分散性所证实。

为了了解和析叶片的裂断原因，有效地排除和解决叶片裂断故障，必须从叶片的研究、设计、选材和工艺等方面进行大量的工作。其中，叶片强度试验是重要的一环。通过试验，可以验证故障分析的正确性；叶片设计的合理性和排故措施的有效性。因此，叶片强度试验亦是确定叶片工作安全可靠性的基础。这方面，我部做了很多工作，取得了一定的成果，但是和世界先进水平相比还有一定的差距，我们还需要在这方面作更进一步的学习和研究，充实完善试验设备，不断提高试验技术，为四个现代化作出更大贡献。

本章根据我部具体情况和工作经验，对一些叶片强度试验的基本要求和试验的原理和设备、参数测量和数据处理等方面的知识作了简要叙述，对疲劳机理和典型断口也作了初步介绍，供读者使用时参考。

叶片强度试验涉及的范围很广，本章只是对较常用的试验作一简介，所述内容多是在编者自身实践的基础上，结合国内外有关资料综合整理而成。由于我们缺乏编写经验，知识水平有限，文中难免有不妥和错误之处，望读者批评指正。

本章由410厂、430厂、606所、621所和南京航空学院共同负责编写。在编写过程中，得到部内外有关单位领导和同志们的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

主 编：韩登义、李 宽

主 审：宋兆泓

编写人员：

第 一 节：伊立言、陈国瑞、黄金凯

第 二 节：许锷俊

第三节：杨士杰、黄金凯

第四节：涂柏林、李宽、毛圣宝

第五节：张致君

第六节：吴世申

《航空发动机强度设计、
试验手册》(试用本)第
二篇第二章编写小组
一九八四、六

这组手册是由... 航空发动机强度设计... 试验手册... 编写小组... 一九八四、六

这组手册是由... 航空发动机强度设计... 试验手册... 编写小组... 一九八四、六

这组手册是由... 航空发动机强度设计... 试验手册... 编写小组... 一九八四、六

编写组：涂柏林、李宽、毛圣宝、张致君、吴世申、杨士杰、黄金凯

目 录

符号表	
序言	
第一节 叶片静频、振型、阻尼和振动应力(相对值)的测定	(1)
(一、试验目的	(1)
(二、试验方法概要	(1)
(三、叶片静频测定	(3)
1. 利用电磁振动台测静频	(3)
2. 利用喇叭激振测量叶片静频	(9)
3. 利用压电晶体片测叶片静频	(9)
4. 涡流激振器测频法	(18)
(四、叶片振型和阻尼测定	(22)
(五、锤击法测定频率、振型和阻尼	(27)
(六、振动应力(相对值)测定	(38)
第二节 叶片动测试验	(50)
(一、叶片动测的目的和意义	(50)
(二、制定叶片动测计划的基本原则	(52)
(三、叶片动测的基本方法	(56)
1. 电阻应变片测量法	(56)
2. 无线电遥测法	(67)
3. 调频栅法	(69)
4. 单点探头的脉冲位置制法	(72)
(四、应变片粘贴和发动机上引线的基本原则	(77)
(五、动态应变测试系统的标定	(78)
(六、叶片动测信号分析	(86)
1. 基本分类和分析处理方法	(86)
2. 常见叶片振动信号及分析	(87)
3. 叶片振动类型及故障识别	(97)
第三节 叶片失速颤振试验	(108)
(一、概述	(108)
(二、叶片失速颤振	(109)
(三、叶片失速颤振试验方法	(112)
1. 评定叶片失速颤振稳定性的临界条件	(113)
2. 叶片失速颤振试验方法的主要类型	(115)
3. 叶片失速颤振试验中测试工作的特点	(123)

第四节	叶片振动疲劳试验	(130)
一、	概 述	(130)
二、	疲劳断裂机理简介及影响高循环疲劳性能的主要因素	(130)
1.	疲劳裂纹的萌生与扩展	(130)
2.	疲劳极限	(134)
3.	高循环疲劳主要影响因素	(135)
4.	振动与低循环载荷复合作用下的疲劳行为 (简称复合疲劳)	(141)
三、	叶片疲劳断裂特征	(144)
四、	叶片疲劳试验	(152)
1.	试验目的与用途	(152)
2.	试验的设备与仪器	(152)
3.	试验叶片与试样	(155)
4.	动应力的测量与标定	(155)
5.	试验方法和数据处理	(155)
6.	断裂形貌特征观察	(166)
7.	试验结果的处理	(166)
五、	实 例	(169)
六、	增幅疲劳试验	(183)
七、	随机疲劳试验	(188)
1.	场随机载荷再现技术	(189)
2.	程控台阶载荷模拟技术	(189)
3.	随机载荷模拟技术	(194)
八、	桦齿疲劳	(201)
第五节	涡轮叶片的热疲劳试验	(205)
	概 述	(205)
一、	涡轮叶片的热疲劳及其受力分析	(206)
二、	寿命预测研究的一般讨论	(210)
三、	涡轮叶片热疲劳的损伤特征	(211)
四、	热疲劳损伤的影响因素及改进措施	(215)
五、	涡轮叶片的热疲劳试验技术	(217)
第六节	气冷涡轮叶片冷却效果试验	(227)
	概 述	(227)
一、	冷却效果试验方法	(227)
二、	试验设备和测试技术	(234)
三、	试验过程和数据处理	(240)
附录 I	发散冷却与全气膜冷却模化公式的推导	(246)
附录 II	换算试验以 η 值作为换算参数带来的误差分析	(249)
附表 I	t 分布数值表	(252)
附表 II	F 分布数值表	(253)
参考文献		(254)

第一节 叶片静频、振型、阻尼和 振动应力（相对值）的测定

在航空燃气涡轮发动机的生产、研制和使用中，叶片振动问题十分突出。为预计叶片振动特性，找寻振动原因，排除叶片振动故障，必须测定叶片振动特性参数。叶片振动特性参数通常是指：叶片的静频、振型、阻尼和振动应力（相对值）等。

静频——叶片在非旋转状态下的自振频率。

振型——各自振频率所对应的振动形态。

压气机和涡轮工作叶片在发动机实际工作状态下，由于叶片和盘的连接刚性（包括叶片榫头固装条件、轮盘振动对叶片的影响）以及离心力、温度和气体力等因素的影响，致使叶片的自振频率（动频）与非旋转状态下的自振频率（静频）是不相同的，有时甚至相差甚多，生产或排故中我们只能进行有限数量叶片的动频测定来确定静、动频之间的关系，而后通过控制静频来反映对叶片动频的要求。所以叶片静频测定是振动特性参数测定的基础。

一、试验目的

测定叶片静频、振型、阻尼和振动应力（相对值）的目的见表1-1。

表1-1 静频试验类型及其目的

试验种类	试验目的
静频及振型测定	<ol style="list-style-type: none">1. 叶片型面加工和静频值合格性的综合检验。以保证批生产的发动机叶片在工作范围内不产生危险共振（目前有些生产厂已将静频测定列为检验工序）。2. 分析预估叶片可能产生振动的性质，为采取排故措施（如采取调频、控制叶片频率分散度、不等频设计等）或安全监视提供依据。3. 为叶片的动测试验和疲劳试验提供依据。4. 评价理论计算的准确性并最终确定叶片的各阶静频。
阻尼和振动应力（相对值）测定	<ol style="list-style-type: none">1. 绘制叶片振动应力分布曲线，判断叶片的最大振动应力位置，为台架试车时进行叶片动应力测量提供依据。2. 为研究叶片疲劳、查清叶片故障原因作准备。3. 评价阻尼衰减对叶片的减振效果。

二、试验方法概要

测量叶片静频的方法有自振法和共振法，但广泛采用的是共振法。共振法也用于测振型

和振动应力。

叶片在可调频率的简谐外力（即激振力）作用下，产生强迫振动，当激振力频率等于叶片的固有频率时，振幅将急剧增大，此时叶片进入共振状态。在共振状态下测得的叶片振动频率，就是叶片的静频值。在共振时可同时测取叶片的振型或振动应力。

测量叶片静频的整个试验系统如图1-1，

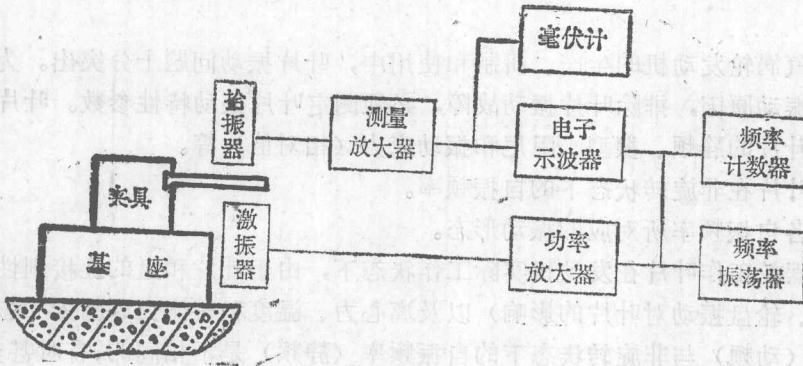


图1-1 叶片静频测试系统图

其组成如下：

1. 固持系统

主要由安装叶片的夹具和基座组成。

夹具对叶片榫头的夹持要符合叶片的工作状态，一般取固持状态，夹紧力应由试验确定。夹持叶片的夹紧力 p 和所测静频值 f 的关系曲线见图1-2。夹紧力至少应选取曲线转为平坦时所对应的 p 值。

基座有刚性基座和柔性基座两种，图1-1所示的基座属于刚性基座，它的固有频率高于叶片的静频值。图1-3所示的基座属于柔性基座，系统的固有频率低于叶片的静频值。选用何种型式的基座按具体情况而定，但为保持测试精度，应使夹具和基座的自振频率远离叶片静频值，且不等于叶片静频值的整数倍。

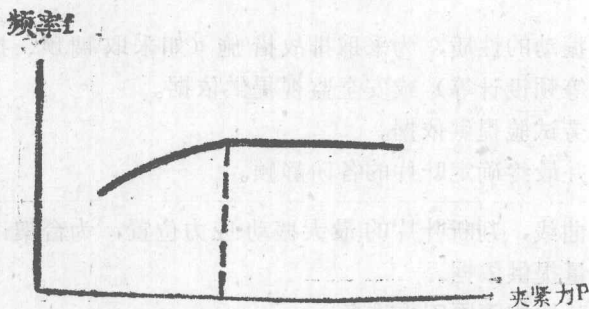


图1-2 频率与夹紧力的关系曲线

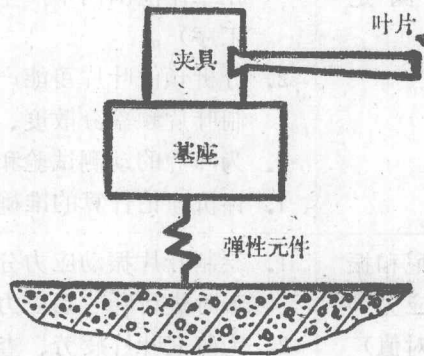


图1-3 柔性基座

2. 激振系统

通常由振荡器（音频信号发生器）、功率放大器和激振器组成。它的功用是为叶片提供激振力（一般是简谐的），以激励叶片使之发生强迫振动。

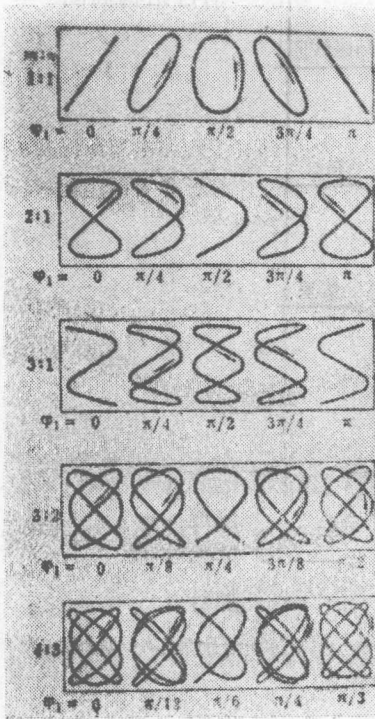
激振系统应有足够的能量。激振力的力幅和频率应能任意连续地调节（或频率自动扫描），且调定后，力幅和频率应能保持稳定。

激振器分接触式和非接触式。接触式激振器通过机械方式（如顶杆）把激振力传给叶片。这种方式对叶片具有附加质量和附加刚度作用，影响叶片频静测试精度。非接触式激振器不改变叶片固有特性，测试精度较高。目前非接触式激振器常用的有喇叭和电涡流激振器等。

3. 测试系统

通常由拾振器、放大器、示波器、频率计、应变仪和毫伏表等组成。通过这些测量仪器可准确判断叶片是否共振，并显示记录静频值和振动应力值。

表1-2 李沙育图



如果被测叶片的静频值为 f_0 ，激振力的频率为 f ，保持力幅不变，改变激振力频率 f ，当 $f = f_0$ 时，叶片出现共振，这时叶片振幅最大，共振声亦较强。当 $f = \frac{1}{n} f_0$ 时（ n 为整数）叶片也会出现对应于频率为 f_0 振型的共振，这时叶片处于谐共振，一般可以从示波器上用李沙育图形来判别，即将激振讯号接到示波器 x 轴的输入端，将叶片振动讯号经拾振器、放大器后接到示波器 y 轴的输入端，则：

$$n = \frac{f_y}{f_x} = \frac{f_0}{f} \quad (1-1)$$

式中当 $n = 1$ 时（即 $f_0 = f$ 时），叶片就处于共振状态；当 n 为其它整数时，则叶片处于谐共振状态，其对应关系和相位关系如表1-2所示。

拾振器有很多种，国内常用的有电磁式、电容式、涡流式和电阻应变片式等。测试精度亦以非接触式的为高。

三、叶片静频测定

1. 利用电磁振动台测静频

1) 结构及工作原理

电磁振动台是一种成套设备，一般由振动台体和操纵控制台两大部分组成。

振动台体由底座、磁缸和台面等部分组成（见图1-4）。一般可在水平与垂直的 90° 范围内进行工作。

控制台一般包括音频讯号发生器、放大器、励磁及消磁电源、位移加速度测量仪、冷却设备等部分。其方框图如图1-5所示。

振动台的工作是以电磁感应原理为基础的。当励磁线圈通以直流电时，在磁缸工作气隙

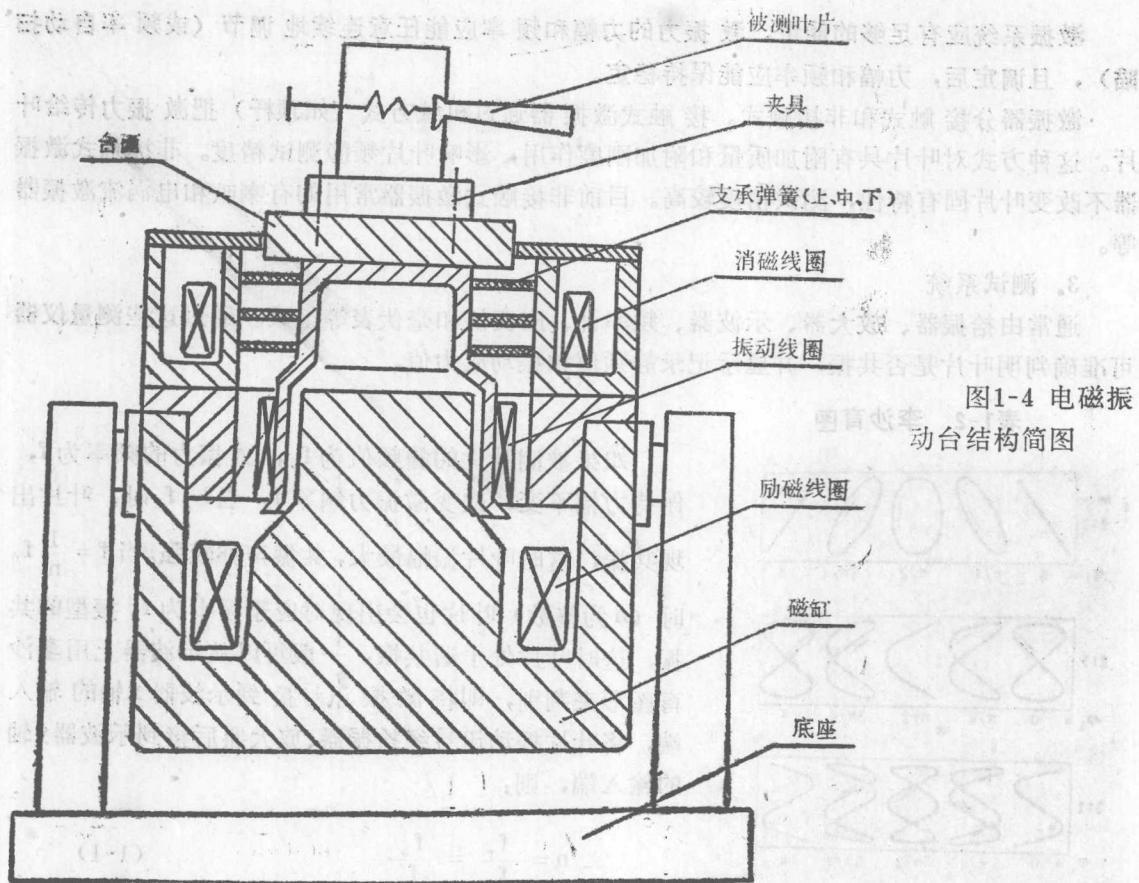


图1-4 电磁振动台结构简图

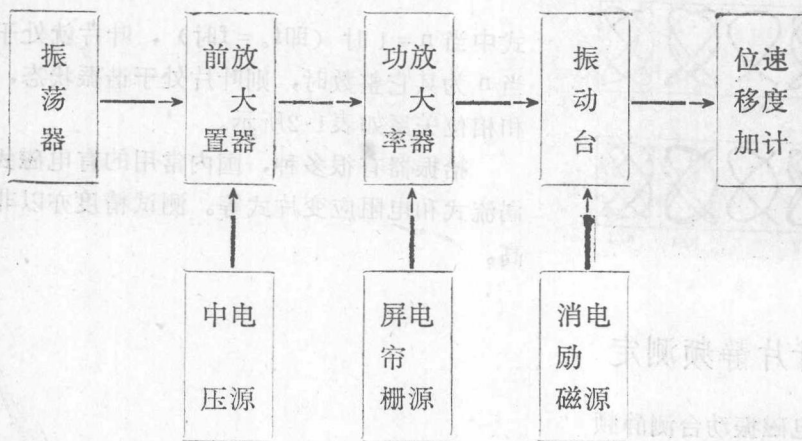


图1-5 控制台方框图

中形成恒定磁场(见图1-4),台面与振动线圈刚性相接,动圈置于磁缸工作间隙中,当动圈通入交流电时,载导体(动圈)在恒定磁场的作用下产生交变的往复运动,从而带动工作台面、夹具及试件等一起运动,这是一种将电能转变为机械能的激振设备。

2) 测振特性

振动台属于接触激振器,用它激振叶片测定自振频率时,叶片通过夹具固定在振动台上