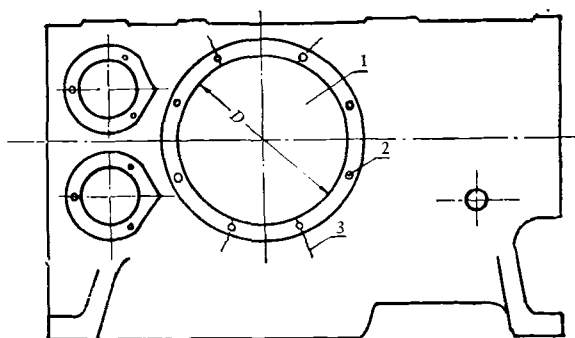


# 农业机械的断裂和振动与力学 基本原理的应用

清华大学工程力学系农机  
强度与振动毕业实践小组

无产阶级文化大革命以来，我国农业机械化有了很大的发展。为贯彻毛主席关于“**农业的根本出路在于机械化**”的教导，实现在1980年全国基本实现农业机械化的宏伟目标，农机战线的广大职工和贫下中农，以阶级斗争为纲奋发图强，大干快上，各种拖拉机、柴油机、植物保护机械等源源运往农业生产第一线。各地组织了星罗棋布的农机修造网，农业学大寨的群众运动，促进了农业机械化的发展。在农机的制造、维修、运行中，也提出了许多机械强度与振动的问题，需要我们去解决。在开门办学过程中，我们和工厂的工人师傅、技术人员一起，应用了力学的基本原理，分析和解决了几种农业机械和典型部件的断裂和振动的问题。现将有关的内容作一简单的介绍。



(a) 单缸柴油发动机的缸体

1——主轴承孔； 2——螺纹孔； 3——常见裂缝

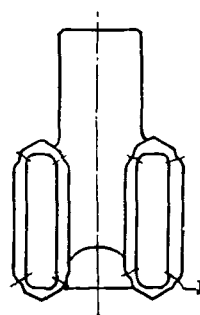
## 一、几种典型农机部件的 断裂和振动问题

农业机械中，柴油发动机是常用的动力机械。图1(a)表示单缸柴油发动机的缸体简图。缸体在安装成柴油机出厂使用过程中，常常发现在图1所标注的部位发生断裂。为解决这一断裂问题，必须寻找是什么原因导致缸体的断裂，用什么措施可能防止和解决缸体断裂。

图1(b)表示手扶拖拉机的变速箱箱体。由薄壁铸件制成的变速箱箱体，在铸造完毕，毛坯开始机加工时，发现微裂纹，使部份毛坯报废，裂纹常常发生在图1(b)标志的部位。因此必须寻找铸造发裂的原因，提出防止发裂的措施。

图2表示常用的植物保护机械——机动喷雾器。它以单缸汽油机为动力带动风扇叶轮，利用气流实现喷洒农药，机器轻巧简便，可用人背负。但如果设计不合理，则在人背上产生过大的振动，影响操作人员健康。因此必须寻找振动的原因，并实现减振。

农业机械的强度与振动的问题很多，从以上几个例子，已经说明，物理学的一个古老的分支——力学应该努力为实现农业机械化服务。



(b) 手扶拖拉机的变速箱箱体

1——铸造发裂部位

图 1

## 二、应用力学的基本原理解决 农机典型部件的断裂问题

### 1. 断裂原因的分析

图1(a、b)所示的柴油机缸体(以下简称缸体)和变速箱箱体(以下简称箱体)为什么发生断裂或产生微裂纹?对于这个问题,在运行、维修、组装第一线的工人

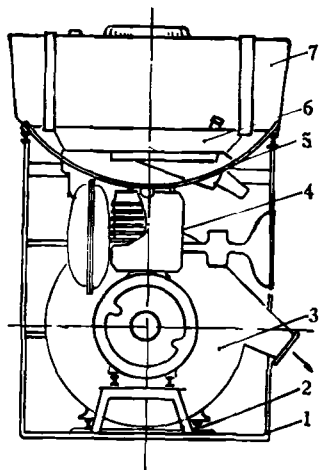


图2 机动喷雾器

- 1——下机架, 2——减振垫; 3——风机;  
4——汽油机; 5——上机架; 6——油箱;  
7——药箱

师傅、技术人员有丰富的实践经验,他们最清楚。在调查研究的基础上,对断裂或发裂原因进行了分析。我们把基本思路表示在图3,现对图3作些说明:

对于缸体,箱体的失效的表现,即是缸体断裂和箱体发裂。部位已如图1(a)、(b)所示。

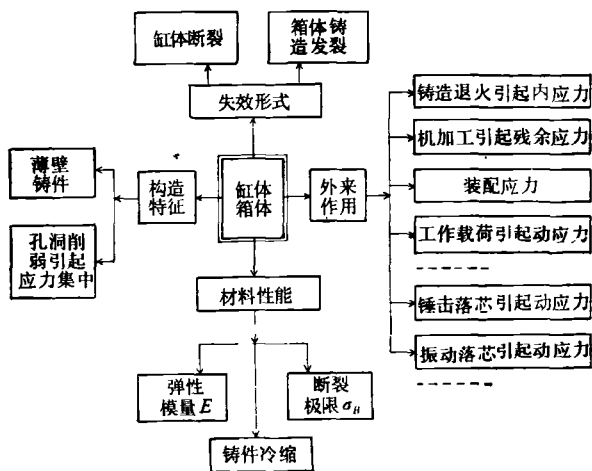


图3

缸体与箱体的断裂,从外因分析,它们承受如图3所示的外来作用(具体内容将在下面逐项介绍);从内部原因来看,即从材料的物理性能和机械性能以及构件的构造特征来看,着重分析了以下两个问题:表征材料的物理性能与机械性能的抗力指标,和结构的特征——薄壁铸件。并且在图1(a)所示的缸体上,有被主轴承孔和螺纹孔(共八个)所削弱引起的应力集中,以及在图1(b)所示的变速箱体上,有最终传动壳体安装齿轮口部四个圆角处引起的应力集中。

从受力和抗力两个方面,从外来作用、材料抗力、构造特征三个因素,列举了可能引起断裂的原因,于是通过各种力学试验手段定量地进行关于断裂原因的分析。力图找出主要的原因,针对主要原因,提出相应的措施。

## 2. 材料的抗力指标

缸体、箱体部件,是铸铁件,根据设计,要求其名义拉伸断裂极限的应力  $\sigma_B \geq 20$  公斤/毫米<sup>2</sup>。应力的概念说的是结构构件内某点处已知面积上的内力集度。根据我国的标准,取直径为  $D$  的圆形试棒,在材料试验机上作拉伸试验,测得拉伸断裂时的拉力为  $P$  (公斤),则名义断裂极限  $\sigma_B$  为:

$$\sigma_B = \frac{4P}{\pi D^2} \text{ (公斤/毫米}^2\text{)}.$$

进行了与缸体相同浇注工艺的试件的拉断试验,测得  $\sigma_B \geq 20$  公斤/毫米<sup>2</sup>,满足设计要求。说明材料的抗力指标已经达到。必须指出的是,对材料的抗力指标在生产中必须坚持经常检验,并保证该指标稳定。

## 3. 构件应力的量测——电阻应变测量技术

为了分析断裂的原因,应用电阻应变测量的方法,测量构件在外来作用下的应力值。其基本原理是将电阻应变片(一种将物体表面的应变量转化为电阻值变化的传感器)粘贴在构件表面,然后接入测量仪器形成如图4所示的电桥。如以粘贴在构件上的电阻应变片作为电桥电阻之一,比如  $R_a$ , 温度补偿应变片为  $R_b$  (用于补偿因构件的温度改变所引起的应变片电阻值变化),并在试验前将电桥预调平衡,使图4中电流计的电流为零。当构件在外来作用下发生变形,引起电阻应变片电阻值的变化,经图4所示的电阻应变仪线路测量出粘贴应变片处的应变变化值  $\epsilon$ 。对于单向应力状态,可由

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

计算出应力值。式中  $E$  为材料的弹性模量,根据试验测定的结果,对不同的  $\epsilon$  值,我们取

$$E = (0.5-1.1) \times 10^4 \text{ 公斤/毫米}^2.$$

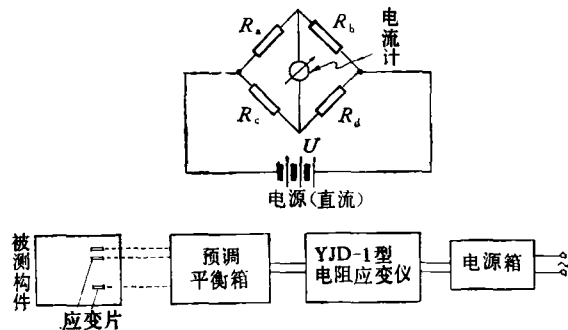


图4 电阻应变测量线路和方框图

应用电阻应变仪的电测法，作为对农机构件受力的“听诊器”。下面就说明如何应用它来测量农机构件(箱体、缸体)的受力情况，从而找出断裂原因。

#### 4. 缸体、箱体内应力的测量

我们应用电阻应变仪，跟踪测量缸体、箱体的生产流水线的全过程。首先遇到测量缸体、箱体由于铸造工艺残存在内部的残余应力，亦称内应力。铸件冷凝过程中，产生结晶；但是铸件各处在冷凝过程中温度不同，先冷却的部份收缩凝固了，冷却较慢的部份仍处于液态。当这一部份冷却时，就要对先冷的部份产生拉力，因而当铸件完全冷却后，内部已经有内应力产生，通常也称残余应力。

又如，当铸件采用加热保温的消除内应力措施时，如果没有合理地控制温度，或炉子温差过大，则铸造内应力没有得到良好的消除，反而会引起二次残余应力。

因此必须测量铸造残余应力的大小。利用电测全释放法测量了残余应力。全释放法的基本原理是将存在有残余应力构件表面上有关测点，粘贴电阻应变片，作为初始状态，取零读数，然后将构件锯开，使残余应力得到释放，释放之后，读取应变变化值  $\epsilon$ ，则可知  $\sigma = E\epsilon$ 。原先存在于结构内的残余应力  $\sigma$ ，为  $\sigma = -\sigma$ ，即与所测的应变(应力  $\sigma$ ) 值大小相等，方向相反，即  $\sigma = -E\epsilon$ 。从多次实验测量结果说明，单缸柴油机缸体的易断部位，经消除内应力处理后，其残余应力

$$\sigma_{\text{残}} \approx 0.3-1 \text{ 公斤/毫米}^2。$$

手扶拖拉机变速箱体在最终传动壳体安装齿轮口部四圆角处， $\sigma_{\text{残}}$  大多数为 2 公斤/毫米<sup>2</sup> 以下。个别的达到 4—5 公斤/毫米<sup>2</sup>。

#### 5. 缸体和箱体的动应力测量

缸体在组装完毕进行运行时，受到汽缸内燃油爆炸压力  $P_c$  和运动部件在高速往复运动和旋转运动引起的惯性力  $P_i$  的作用。这两者是缸体设计时的主要载荷。按图 5 所示的测试线路，仍然用电测法测量工作动应力  $\sigma_{\text{动}}^{\text{机}}$ 。

同理，对箱体，在铸造过程中，有时用锤击落芯，或用气动振动落芯机落芯。用图 5 所示的线路，可测量

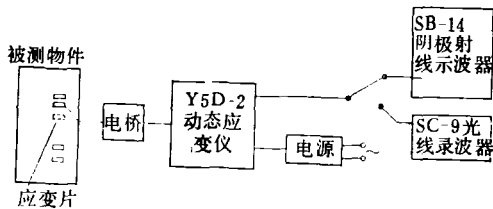


图5 缸体和箱体的动应力测量线路方框图

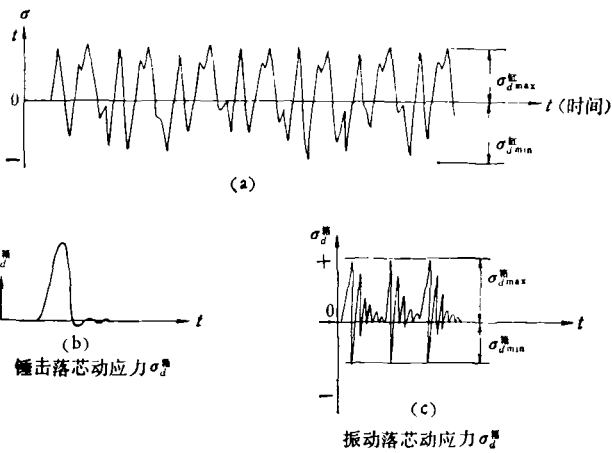


图6 缸体和箱体的动应力测量结果

机械动应力  $\sigma_{\text{动}}^{\text{机}}$ 。

$\sigma_{\text{动}}^{\text{机}}$  和  $\sigma_{\text{动}}^{\text{振}}$  的应力测量结果示意如图 6(a)、(b)、(c)。测量结果说明： $\sigma_{\text{动}}^{\text{机}} \approx 1.7$  公斤/毫米<sup>2</sup>； $\sigma_{\text{动}}^{\text{振}}$  为 8—10.5 公斤/毫米<sup>2</sup> (当锤击落芯时) 和 -4 至 +6 公斤/毫米<sup>2</sup> (当气动振动落芯时)。

#### 6. 应力集中与装配应力

在分析缸体的结构构造特征时，发现缸体或箱体都是厚度为 5—6 毫米左右的薄壁铸铁件，而且如图 1(a)、(b) 所示，有孔洞(如主轴承孔)和螺纹孔所削弱的薄弱部位。

固体力学指出，在零件形状(刚度)突然变化的地方，或在外载荷突然变化的地方会出现应力集中现象，在这些突变(或称畸变)的局部区域，应力急剧增高，并出现峰值；离开该区域，应力渐趋平缓；在该区域内，应力变化剧烈。在应力集中区，常因应力高峰使脆性材料所制的零部件发生静载断裂，而受动载的时候，则可能发生疲劳裂纹。

举一个简单的例子，如图 7 所示具有小圆孔的板条，承受均匀拉伸，应力集中系数  $\alpha_r = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_0} \approx 3$ 。

同一个结构构件，在不同的外载荷作用下，应力集中的情况也不同，也即应力集中系数不同。根据应力集中的基本原理，分析缸体应力集中最严重的地方是：主轴承孔与螺纹孔之间的狭窄地带。而且，缸体的断

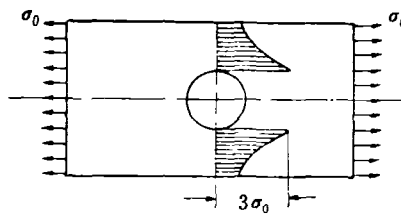


图7 具有小圆孔的板条承受均匀拉伸时的应力集中

口分析证明该处是裂纹的起源处。该处由于有八个螺钉传递曲轴传来的全部动载荷,而安装螺钉时,由于螺钉在螺纹孔处的集中力作用,使得在该应力集中区引起很高的局部应力峰值,所以它是由于装紧螺钉的集中力和大小孔洞削引起的应力集中问题。

在该区域用电测法测量表明:在安装八个螺钉时,由安装引起螺钉的拉力而引起的应力集中是很严重的,最大值 $\sigma_c$ 达到11公斤/毫米<sup>2</sup>,在多次试验中,曾达到12公斤/毫米<sup>2</sup>。而这一安装应力,在设计时是不曾考虑的。

根据应力集中的局部性,欲改善孔附近由于安装螺钉引起应力集中状况,关键是增大螺纹孔边缘至主轴承孔的距离,以减少应力集中影响,提高承载能力。我们采取缩小主轴承孔孔径 $D$ 的措施。实验证明:将孔径缩小4毫米之后,安装应力最大值 $\sigma_c$ 由原来的11—12公斤/毫米<sup>2</sup>减少到7公斤/毫米<sup>2</sup>,减小了约40%。

### 7. 关于缸体和箱体断裂原因的分析

图8表示了缸体生产流水线全过程中各部份的应力比较。由图可知:铸造、机加工引起的残余应力 $\sigma_r \approx 0.3—1$ 公斤/毫米<sup>2</sup>;安装引起的装配应力 $\sigma_c$  (计及应力集中),在改进前为11—12公斤/毫米<sup>2</sup>;机器运行引起工作动应力 $\sigma_d \sim 1.7$ 公斤/毫米<sup>2</sup>。所以,安装应力 $\sigma_c$ 是主要的,因为一般零件本身的抗力比名义断裂极限 $\sigma_B$ 低,安装应力过大,导致的铸件塑性变形严重,所以,它是缸体断裂的主要原因。

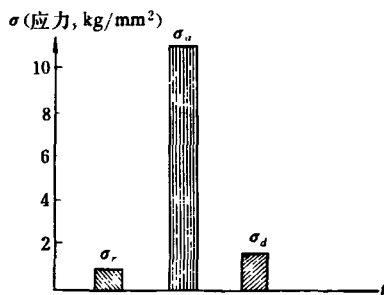


图8 缸体生产流水线全过程中各部分应力比较

变速箱体测量的结果说明: $\sigma_r$ 大多数小于2公斤/毫米<sup>2</sup>,个别的达到4—5公斤/毫米<sup>2</sup>。而机械作用引起的动应力:

锤击时, $\sigma_d \approx 8 \sim 10.5$ 公斤/毫米<sup>2</sup>;

气动落芯机作用时, $\sigma_d \approx -4—+6$ 公斤/毫米<sup>2</sup>。负号表示压应力,正号表示拉应力。所以,与铸造残余应力相比较,机械作用(如锤击、振动、摔碰)引起薄壁铸件的机械动应力较大;特别当铸件未完全冷却,仍有较高的温度,此时材料的抗力较低,则机械动应力则可促使在铸造工艺过程中形成微裂纹。

于是,缸体断裂和箱体铸造发裂的主要原因已经找到。有关的工厂已经或正在采取措施,解决上述断裂问题。从分析铸件断裂的原因来看,一般地说,若铸件较薄,由于铸件散热较快,所以铸造内应力不是主要的,而对于较厚的铸件,则必须注意残余应力 $\sigma_r$ 。薄壁铸件,由于各种机械载荷的作用,应力集中常常是导致断裂的主要原因。因此对这些载荷必须合理地设计和控制,使薄壁铸件的重量轻、体积小等先进性与结构的安全可靠性统一起来。这是必要的,也是可能的。

## 三、应用振动的基本原理 于农机减振

图2所示的机动喷雾器,是喷洒农药用的一种机器。它的动力是单缸汽油机。因为机器用人背负,所以要求测量其振动的大小,寻找主要的振源,采取减振措施。这一机器的振动与减振的问题,有其典型性,所以本文作一简要介绍。

### 1. 关于机械振动的基本知识

振动学是物理学的一个分支,它是日常生活与工程实践中经常遇到的现象。例如钟表摆的摆动,柴油机、电机运行时机器基础的振动等等。物体的振动有一定的规律。例如,汽车在路面行驶时,人们在车子里感到振动。振动与两方面的因素有关:路面不平,冲击车轮,并通过板簧架传给车身引起振动;发动机运动把惯性力传给车身引起振动。对汽车车身的由来作用力称为干扰力,是引起振动的振源,即振动的外因。另一方面,不同的车在同一路面、同一车速下振动的大小却不一样。例如,空车时颠得厉害,满载时车子就平稳一些;支承板的弹簧硬,振动就厉害,弹簧软振动就小一些。这就说明振动大小与车子的质量 $m$ 和弹簧刚度系数 $C$ 有关,这是决定振动大小的内部原因。如果把每秒振动次数称为频率,单位为次/秒,则一定的机械振动系统都有其固有的振动特性,我们把它称为固有频率。对于一个自由度的机械振动系统,固有频率

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C/m}$$

式中 $m$ 为系统质量, $C$ 为弹簧刚度系数(即使弹簧产生单位位移所需的力,单位是公斤/厘米)。如果在物体上作用一个随时间而变化的干扰力,则会引起物体的强迫振动。如果作用的干扰力的频率等于振动物体的固有频率,就会出现共振现象。此时,振动物体的振动幅度(振幅)剧烈增大。

要避免机器出现共振而影响使用,有三条途径:一是消除振源或减少干扰力的幅值;二是调整振动物体的固有频率 $f$ (可通过改变质量 $m$ 和弹簧刚度 $C$ 实现),使其远离干扰力的频率;其三是设置振动阻尼,吸

收振动的能量。

## 2. 机动喷雾器的振动分析

通过调查研究和振动测量，我们把喷雾器的振动分析简单画在图9上。

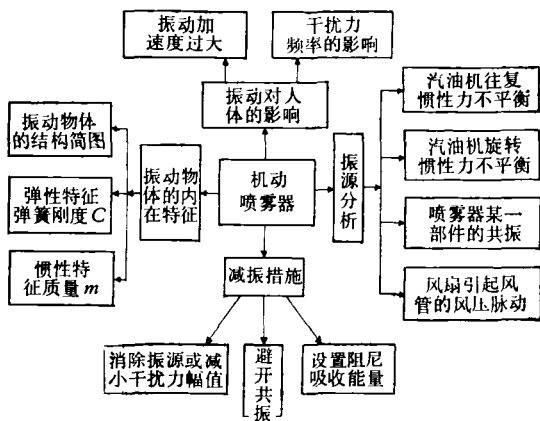
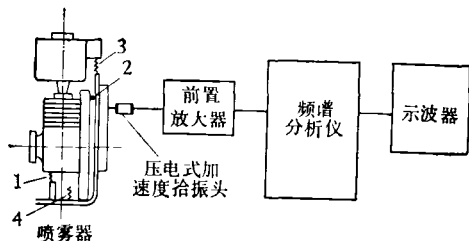


图9 机动喷雾器的振动分析

为了分析喷雾器的振源和实现减振，必须对喷雾器在用人背负的情况下，对各种工况进行振动测量。为考察振动对人体的影响，主要测量对人体作用的振动加速度（单位  $1g = 980$  厘米/秒<sup>2</sup>）和频率。测量线路如图10所示。利用压电晶体作为拾振传感器，把振动加速度转换为电讯号，通过频谱分析仪（一种分析振动各个谐波分量的仪器）测得振动的加速度、频率和组成。



1, 2, 3, 4, 喷雾机减振垫编号  
图10 机动喷雾器的振动测量线路

通过背负式机动喷雾机的振动测量，说明在正常工况下，背垫处的振动加速度的频率与汽油机转速的

倍数相当，说明汽油机的运动是喷雾器的主要振源，而风管的风压脉动引起的管壁的振动频率却较高。由汽油机活塞及曲柄连杆系统的质量平衡的分析计算，了解到不平衡的往复惯性力达到几十公斤的数量级，不平衡的旋转惯性力矩约几十克·厘米的数量级。所以，汽油机的往复惯性力是主要的振源。而由于喷雾器所用的单缸汽油机没有往复惯性力的平衡装置，因而用消除振源或减少干扰力的幅值来实现减振是不可能的。

利用图11所示的激振与测振线路对喷雾器各部件进行了固有频率的测量，实验结果排除了该喷雾器振动过大是由于部件共振的因素。

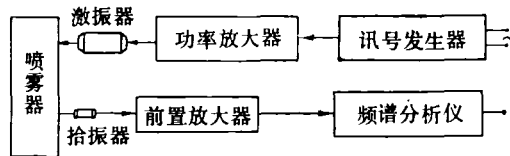


图11 激振与测振线路

通过实验了解到，喷雾器的振动，主要是汽油机往复惯性力的不平衡。

要实现减振，在不能改变干扰力的大小和频率的条件下，要减少该干扰力引起的强迫振动的幅值；二是改变喷雾器上原来设置的橡皮减振弹簧的个数和弹簧刚度。

通过实验测量了橡皮弹簧的刚度，也即振动物体的弹性特征。每个减振弹簧的刚度系数值如下：

抗压刚度系数  $C_p = 91.0$  公斤/厘米；

抗剪刚度系数  $C_s = 12.1$  公斤/厘米。

我们改变弹簧的位置、个数（例如分别松开如图11所示的①、②号减振垫），以改变干扰力传递路径，则人背负的背垫上最大的振动加速度由  $1.4g$  下降到约  $1g$ ，其他背架各点的振动也下降了约 25—35%。这说明改变干扰力传递路径，使往复惯性力的作用点尽量靠近人的背部。条件许可时，还可改变橡皮减振弹簧的刚度数值。这些措施对于减轻振动都是有效的。

农业机械的动力机，大量地采用内燃机，如汽油机、柴油机等，对它们的振源进行分析并采取合理的减振措施，对于提高机器性能、延长使用寿命和改善工作环境，都有现实的意义。