高等实验工程力学

电测法，拉伸试验

MTS材料试验机

落锤试验机

结构屈曲

课程安排

第1周：上课（周一、周四，教室）

第2周：上课（周一，教室）

MTS演示（待定，实验中心1楼）

第3周：MTS实验（待定，实验中心1楼）

第4周：落锤实验（周一，力1楼121）

实验内容

设备：材料试验机（MTS810），落锤试验机

内容：结构稳定性（薄壁管的屈曲 — 静态/冲击）

教材和参考资料：

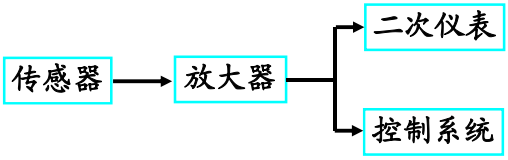
- 材料试验机v2.pdf
- Sample Procedure.pdf
- Model 793.00 System Software.PDF
- Model 793.10 MultiPurpose TestWare.PDF

  pp. 35-66 Creating a Sample Procedure
- ISO 6892-1-2009 金属材料室温拉伸试验方法.pdf
- 电测法和MTS_new.pdf

http://staff.ustc.edu.cn/~zjzheng/MTS.htm

电测法和数据处理

一、电测系统的构成



- 传感器：被测量 → 电信号
- 放大器：对电信号进行处理以满足二次仪表/控制系统对输入信号的要求
- 二次仪表：显示、记录、运算（示波器，计算机，显示仪表，记录仪）
- 控制系统（调节器 → 功率放大 → 执行机构）（模拟/数字）

二、常用传感器

1．分类：性质、材料/用途

物理

- 压电（石英、陶瓷、PVDF）（力，加速度）
- 电阻（锰铜、康铜）（温度、应变、压力）
- 电磁感应（位移、速度）
- 热电偶（温度）
- 光电转换（红外热像、多普勒、光强）（温度、速度、位移、位置）

化学、生物

2．主要指标

- 测量范围
- 准确度（线性、信噪比、稳定性）
- 灵敏度（输出/输入）
- 分辨率（响应时间、空间）
- 输出特性（信号幅值、频带、噪音，内阻抗）

三、放大器

1．分类：

- 交流放大器（电容耦合）
- 直流放大器（直接耦合/交直变换）（稳定性/温度漂移）

2．主要指标

- 放大倍数（＋分辨率）
- 频率响应
- 输入/输出阻抗
- 精度（线性、漂移、噪声、信噪比）

四、二次仪表

1．分类：

- 数字式
- 模拟式

2．主要指标

- 分辨率
- 频率响应
- 采样速率

五、电测系统的一般考虑

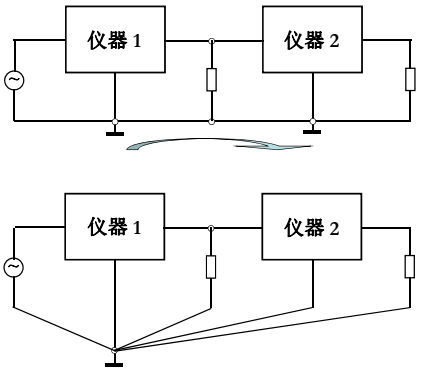
- 要求：保证信号在放大、传输中不失真，信噪比不降低

所得信息是否反映了真实的物理现象?

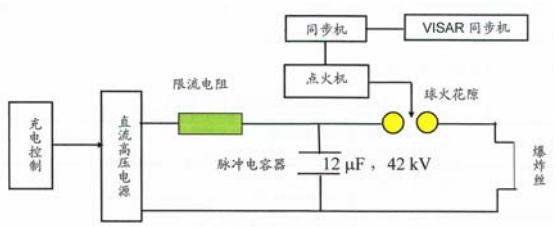
- 阻抗匹配问题
- 频率响应，采样速率
- 抗干扰

  电磁感应 → 电磁屏蔽

  杂散电流（工频）→ 接地、直流电源



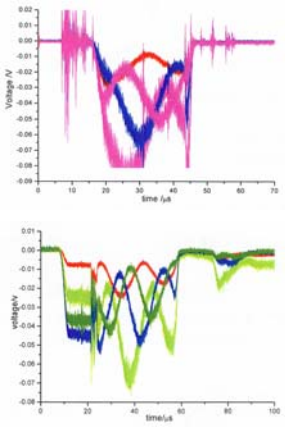
例：爆炸丝实验起爆和测试系统
（用于膨胀环实验）



受干扰的VISAR测试信号

抗干扰措施：隔离
同步机－线圈－VISAR同步机
点火机－空气隙－球隙开关

无干扰的VISAR测试信号

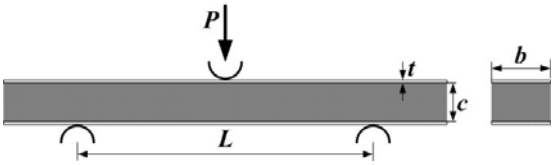


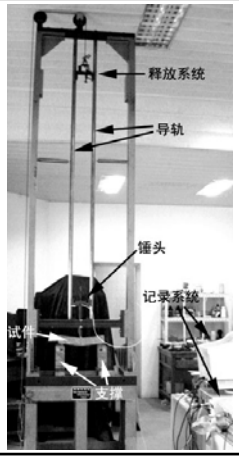
落锤试验机

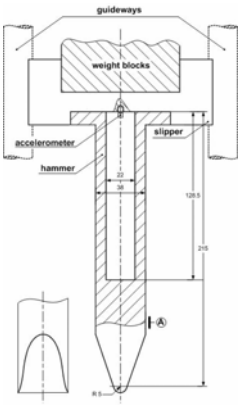
- 结构简单，主要作为结构冲击试验的加载装置
- 力学量测量难度大，常需要昂贵设备
- 信号采集、处理比较困难
- 有商业产品，但大能量装置多自行研制
- 基本组成：机架、锤头(配重)、导轨、砧子、夹持机构、提升和释放机构、测量和数据采集系统
- 试验中主要测试量：冲击速度及其变化、载荷历史、加载点和其它位置的位移历史、全场/局部应变、试件变形

- 速度测量
  - 从落高计算
  - 由加速度传感器积分
  - 横向多普勒速度计
  - 高速摄影机
- 载荷测量
  - 由加速度传感器换算
  - 载荷传感器
- 应变测量
  - 应变片
  - 高速摄影+数字图像相关（DIC）技术

落锤试验信号处理的一个例子

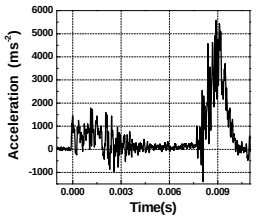


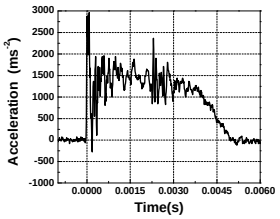




19

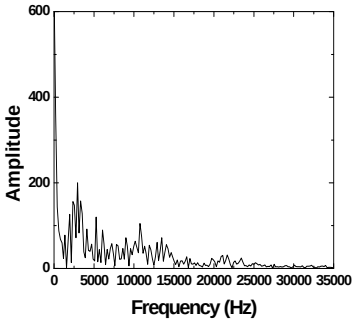
加速度计记录的典型信号





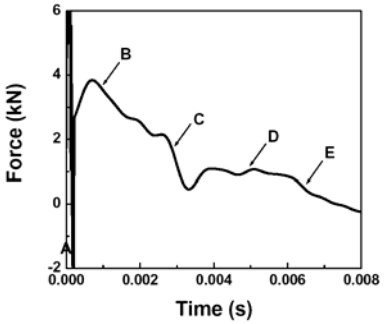
20

冲击加速度信号频谱图



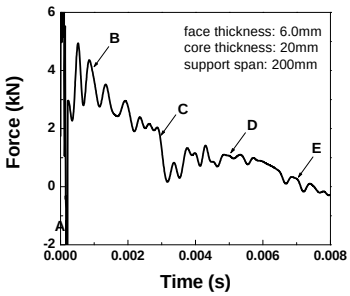
21

0~2000Hz



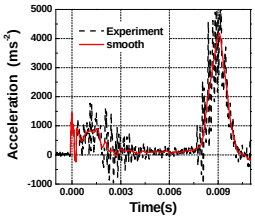
22

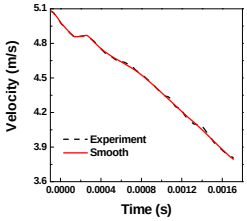
0~5000Hz



23

原始曲线与光滑后曲线比较





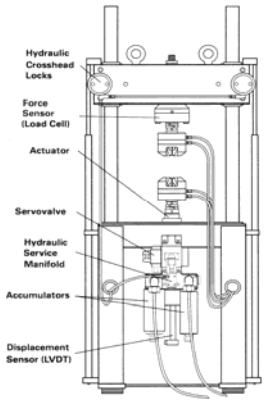
24

MTS材料试验机

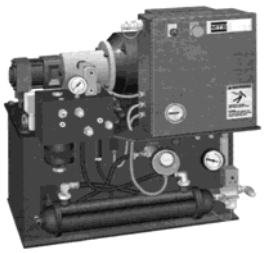
一、MTS810材料试验系统的硬件结构

26

27



加载系统(背面)



高压油泵

28

主要硬件

- 加载系统:
  - 机架、作动器、伺服阀、夹具、储油器
- 液压源:
  - 油泵、油箱、输油管、冷却装置
- 传感器:
  - 载荷、位移、应变、温度
- 加载控制板

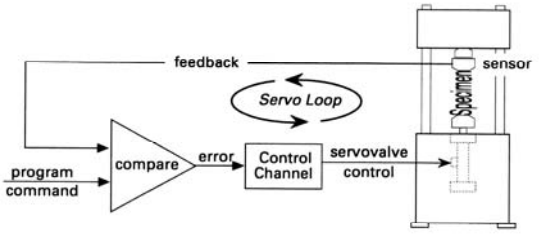
29

- 数字控制器:
  - 数字处理器（CPUs）
  - 液压动力单元和液压控制板
  - 伺服阀控制和驱动模块
  - 调节器（直流/交流）
  - 输入/输出转换器
  - 串行传输和控制器（远程控制用）
- 计算机
- 环境箱

30

二、数字式电液伺服材料试验机的控制原理

31

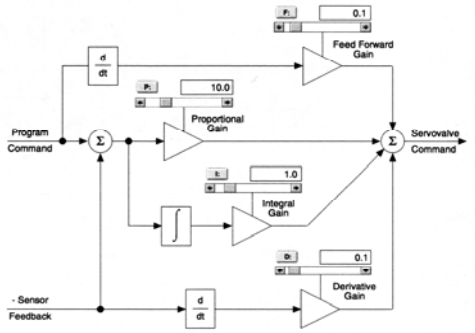


Closed-Loop Control

This is the basic closed-loop as used in TestStar.

材料试验机闭环控制基本原理

32

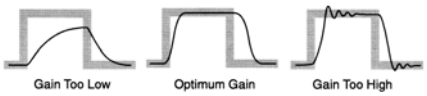


MTS810材料试验机采用的PIDF控制模式

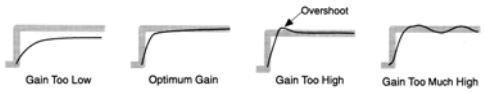
比例 (Propotional)　积分 (Integral)

微分 (Derivative)　前馈 (Feed Forward)

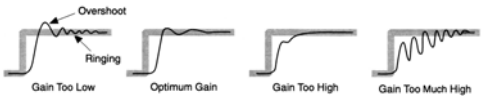
33



方波命令时比例控制下的系统响应

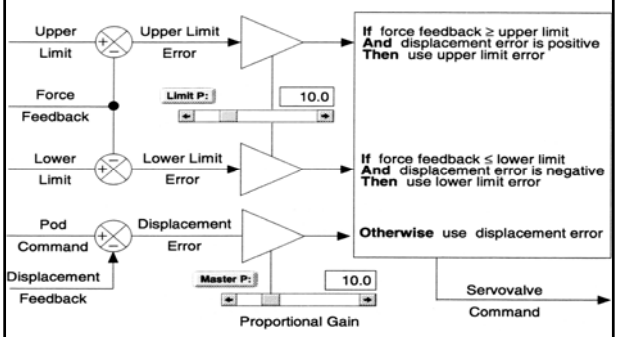


积分增益对系统响应的影响



微分增益对系统响应的影响

34



MTS810材料试验机采用的CLC控制模式

(用于试件安装)

35

补偿器 (Compensator)

- 用于周期载荷

1. 峰值/谷值补偿器 (Peak/Valley Compensator, PVC) 用于补偿幅度和平均值的误差
2. 幅度和相位控制补偿器 (Amplitude and Phase Control Compensator, APC) 用于补偿相位和幅度的误差 (仅能用于正弦波)

36

三、MTS810材料试验系统的软件

37

基本软件：

Station Builder — 设定硬件资源配置
→ Station Configuration Files (.cfg)

Station Manager — 管理具体试验，运行应用程序
（用户界面）

应用程序：

BasicTastWare （BTW)

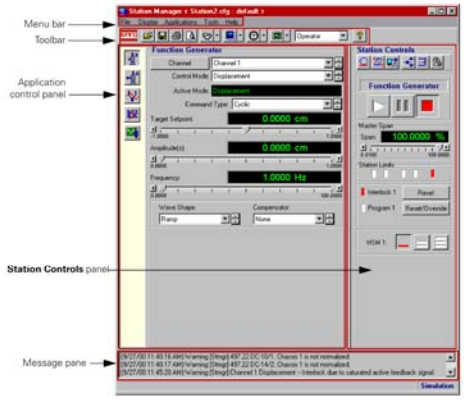
MultiPurpose TestWare (MPT)

38

1. Station Manager

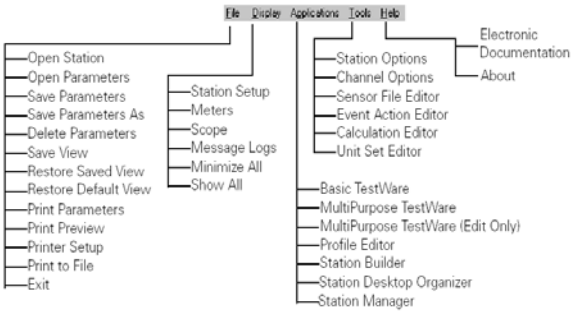
- 设定试验站参数
  - cfg File 的参数设定
- 进行基本操作
  - 系统标定和调节
  - 设定极限和误差探测器、信号补偿和稳定性
  - 控制液压系统
  - 应用内置函数发生器建立简单的试验程序
  - 管理BTW和MPT试验程序
  - 用内置Scope和Meter监视信号

39



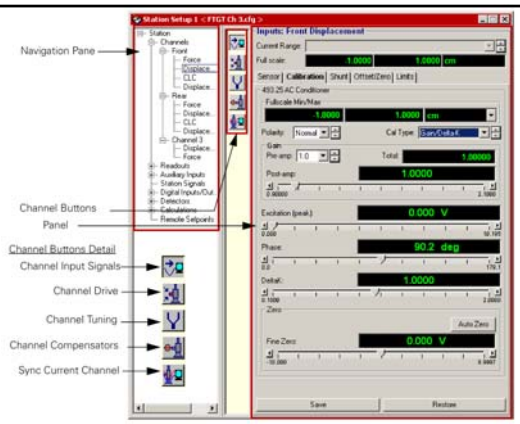
Station Manager 的主窗口

40



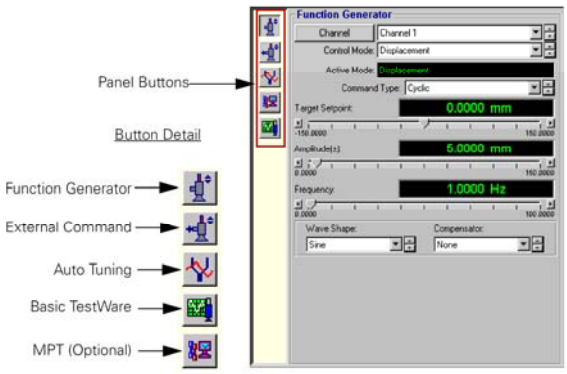
Station Manager 的菜单

41

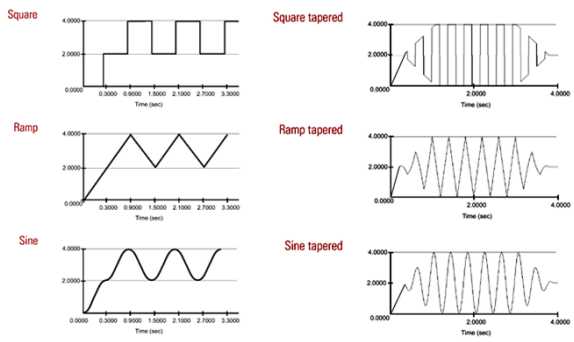


Station Setup 窗口

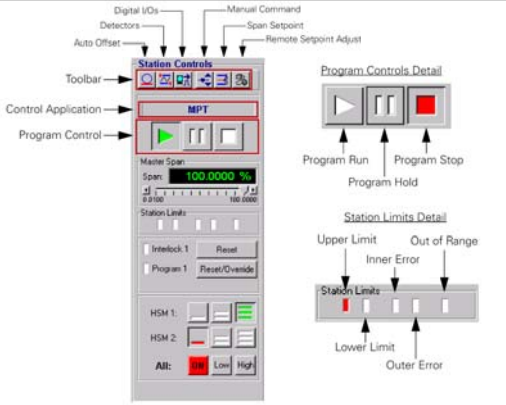
42



应用控制板按钮和函数发生器窗口



函数发生器可以产生的波形



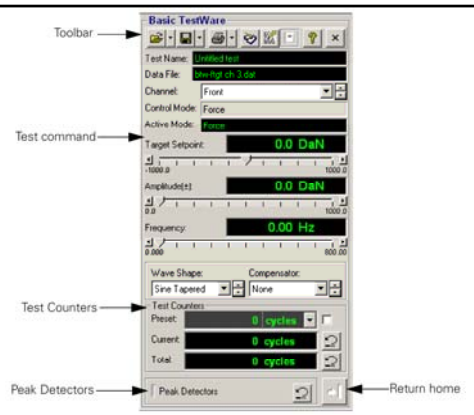
试验站控制板

2. Basic TastWare (BTW)

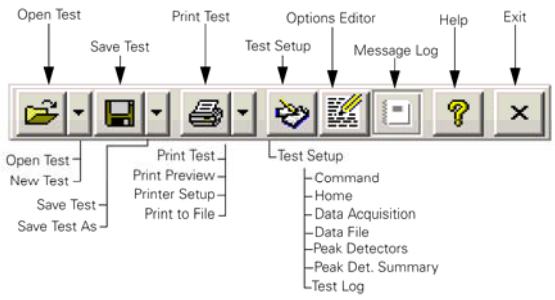
用于完成简单的试验程序

- 定义基本的试验命令 (Cyclic，Monotonic)
- 设置数据获取 (Timed, Peak/Valley, Running Max/Min, Level Crossing)
- 设置峰值监测
- 设置系统复位 (Return Home) 按钮
- 设置试验计数器 (Cycle, Segment)

试验设置文件：C:\tsiim\btw*.tst



Basic TestWare 的主窗口



Basic TestWare 的工具条

3. MultiPurpose TastWare (MPT)

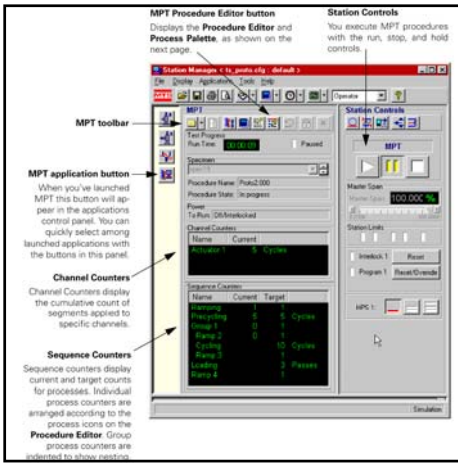
供用户编辑和运行各种材料试验程序 (Procedure)

默认程序模板 (default.000)

具体试验程序 (*.000) （不同试验参数）

同一类试验（基本任务序列和结构相同）的文件存于同一个目录中

由一个（一批）特定试验产生的一系列数据文件保存在一个称为 “MPT试件” 的文件目录下



MultiPurpose TastWare 的控制板

试验程序结构

- 过程 (Process)

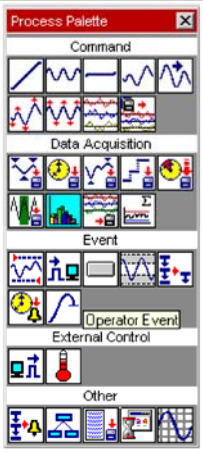
基本要素:

过程类型，名称，参数，开始/中断条件

- 组过程 (Group Process)

循环次数

- 整个程序的终止条件



过程调色板 (Process Palette)

命令过程

数据获取过程

事件过程

外部控制过程

其它过程

命令过程

- 片段命令 (Segment Command)
- 循环命令 (Cyclic Command)
- 保持命令 (Dwell Command)
- 仿形命令 (Profile Command)
- 外部命令 (External Command)

在同一时刻，必须而且只能有一个命令过程运行

数据获取过程

- 峰值/谷值获取 (Peak/Valley Acquisition)
- 定时获取 (Timed Acquisition)
- 最大/最小值获取 (Max/Min Acquisition)
- 水平跨越获取 (Level Crossing Acquisition)
- 高速定时获取 (High Speed Timed Acquisition)
- 循环获取 (Cyclic Acquisition)
- 疲劳获取 (Fatigue Acquisition)
- 输入历史获取 (Time History Imput Acquisition)
- 趋势获取 (Trend Acquisition)

事件过程

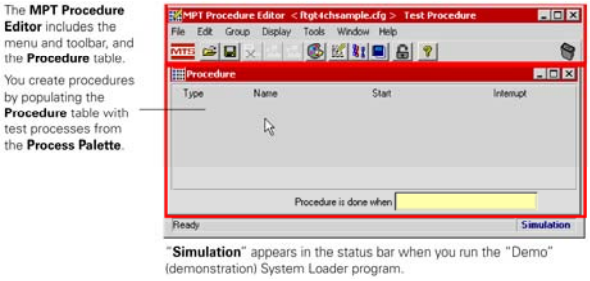
- 数据极限探测 (Data Limit Detector)
- 数字输入探测 (Digital Input Detector)
- 操作员事件 (Operator Event)
- 峰值/谷值变化探测 (Peak/Valley Change Detector)
- 程序事件 (Program Event)
- 周期时间事件 (Periodic Time Event)
- 破坏探测 (Failure Detector)

外部控制过程

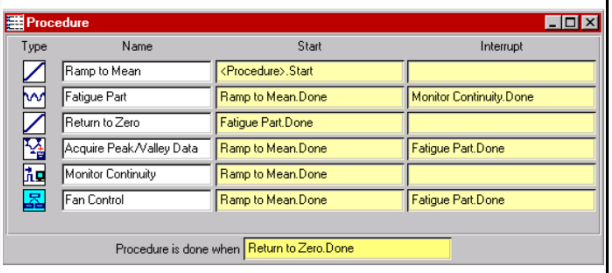
- 数字量输出 (Digital Output)
- 温度控制 (Temperature Control)

其它过程

- 程序控制 (Program Control)
- 组 (Group)
- 操作员信息 (Operator Information)
- 启动应用程序 (Start Application)
- 数据显示 (Data Display)
- 温度数据获取 (Temperature Data Acquisition)



MPT程序编辑器 (MPT Procedure Editor)

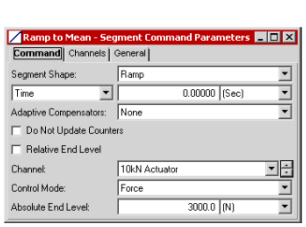


Procedure

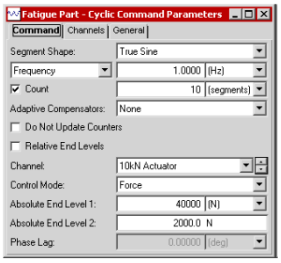
Type	Name	Start	Interrupt
	Ramp to Mean	<Procedure>.Start	
	Fatigue Part	Ramp to Mean.Done	Monitor Continuity.Done
	Return to Zero	Fatigue Part.Done	
	Acquire Peak/Valley Data	Ramp to Mean.Done	Fatigue Part.Done
	Monitor Continuity	Ramp to Mean.Done	
	Fan Control	Ramp to Mean.Done	Fatigue Part.Done

Procedure is done when Return to Zero.Done

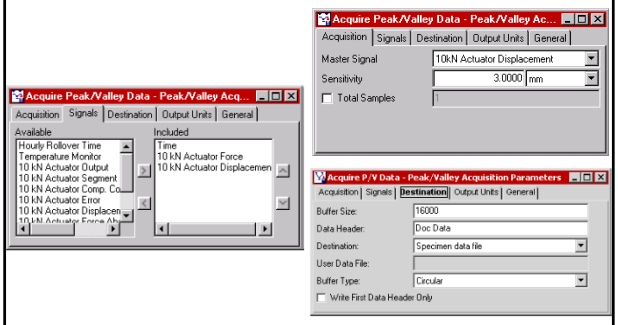
例：疲劳试验程序



片段命令参数



循环命令参数



峰值/谷值获取参数

MPT试件和MPT试件编辑器

MPT应用程序产生的数据文件

- Specimen.dat (试验数据文件)
- Specimen.log (试验记录文件)
- Specimen.mpp (记录最后一次运行的程序设置的试验恢复文件)
- Specimen.mps (记录被中断的试验的状态的试验恢复文件)
- Specimen.prm (试验程序名文件)
- Specimen.lck (防止其它试验站访问的临时控制文件)

准静态单轴拉伸试验

国际标准（金属材料）

ISO 6892 金属材料拉伸试验:

ISO 6892-1-2009，金属材料室温拉伸试验方法

ISO 6892-2-2011，金属材料高温拉伸试验方法

ISO 6892-3-2013，金属材料低温拉伸试验方法

ISO 6892-4，液氦中金属材料拉伸试验方法（待出）

国家标准GB/T228

主要内容

- 术语、定义、符号
- 试验条件
- 测量方法
- 测量报告

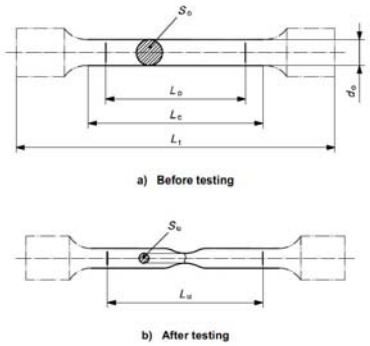
（结果：强度1MPa，屈服应变0.1%，应变0.5%，断面收缩率1%）

- 测量不确定性
- 试样

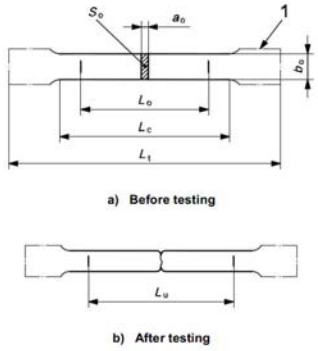
试样

- 形状（杆、板、管...）
- 尺寸及公差（加工/非加工）
- 原始标距 $5\sqrt{4S_0/\pi} \approx 5.65\sqrt{S_0}$

  不小于15mm，可采用5mm的倍数但差别不能大于10%
- 平行长度
- 夹持端
- ...



67



68

试验条件

- 力值零点调整
- 试样夹持
- 试验速率

方法A：应变速率控制

a) 引伸计反馈

b) 横梁位移控制（由平行长度估算）（修正）

测屈服强度：$2.5\times10^{-4}s^{-1}$

此后测拉伸强度：$2.0\times10^{-3}s^{-1}$或$6.7\times10^{-3}s^{-1}$

方法B：应力速率控制（规定略）

69

测量不确定度

- 测量误差和误差传递
- 影响结果不确定度的参数

  力、伸长、标距、初始截面积、最小截面积

- 材料和试验程序的影响

  温度和应变率

  试样形状和加工

  夹持方法和同轴度

  试验机刚度和控制模式

  人为和软件失误

  引伸计安装

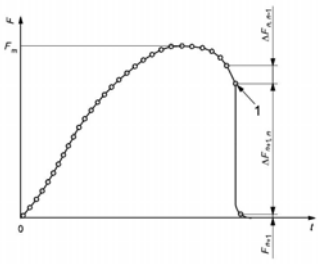
70

计算机控制

数据采样最小速率：$\dfrac{\text{应变率}\times\text{弹性模量}}{\text{屈服强度}\times\text{力测量精度}}$

断裂判据：

（5倍/0.02）



71

工程应力应变到真应力应变

- 颈缩前：公式转换
- 颈缩后：

  1. 外推，取决于所用硬化律
  2. 基于有限元的逆方法
  3. 数字图像相关技术（DIC）
  4. 工程方法

72

工程方法

- 均匀变形阶段（颈缩前）：

$$\sigma = s(1+e), \quad \varepsilon = \ln(1+e)$$

- 破坏点：

$$e_0 = (A_0 - A_f)/A_f, \quad \varepsilon_f = \ln(A_0/A_f)$$

$$\sigma_f = P_f / A_f$$

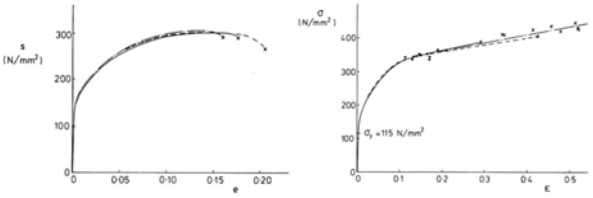
- 应力三轴性修正（Bridgman）

参考文献：

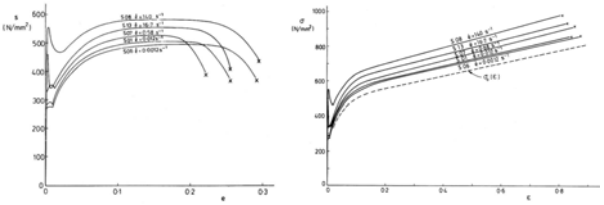
Bridgman PW. Studies in large plastic flow and fracture with special emphasis on the effects of hydrostatic pressure. 1952, Harvard University Press, USA.

Coppieters S, Kuwabara T. Identification of post-necking hardening phenomena in ductile sheet metal. *Experimental Mechanics*, **54** 8 (2014), 1355-1371.

例：铝合金

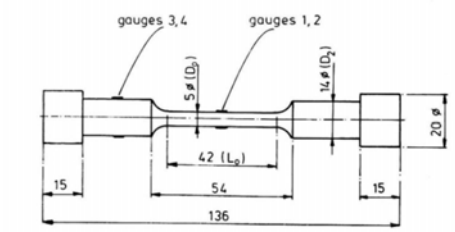


例：软钢



中应变率试验

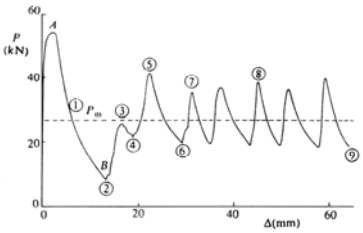
- 空行程，预加速
- 关键是应力和应变测量



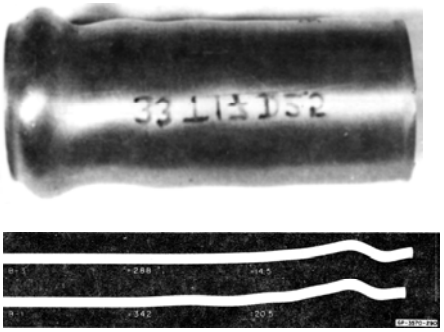
学习要求

- 认真阅读讲义和相关说明书
- 第3周课前提交薄壁管准静态压缩试验的程序
- 通过实际调试修改所编程序，MTS实验课后提交报告
- 落锤实验课后对所采集的数据进行处理，提交数据处理结果和选择滤波频率的依据

结构屈曲

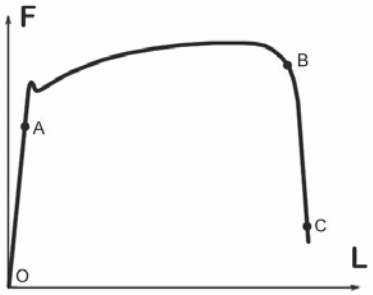


79

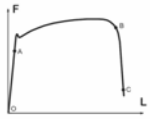


80

例：单轴拉伸试验程序



81



Procedure: Tensile Test

Process Type	Name	Parameters	Start	Interrupt	Remark
Data Display	Scope	Master Signal: time Δt = 0.1sec X: Displacement, 0-10 mm Y1: Force, 0-75 kN	Test Start		
Timed Acquisition	Record-1	Buffer Size: 1024 Continuous Δt =1 sec Record: Time, Displacement, Force, Force Commend	Test Start	Load-1	
Segment Command	Load-1	Ramp Force Control F = 50 kN 0.05 kN/sect	Test Start		O-A
Timed Acquisition	Record-2	Buffer Size 1024 Continuous Δt = 0.5 sec Record: Time, Displacement, Force, Displacement Commend	Load-1		
Operator Event	Change	Button 1: Change Rate	Load-1		
Segment Command	Load-2	Ramp Displacement Control ΔL = 20 mm 0.005mm/sec	Load-1	Change	A-B
Failure Detector	End	Signal: Force 25% Maximum	Load-1		
Segment Command	Load-3	Ramp Displacement Control ΔL = 5 mm 0.001 mm/sec	Load-2	End	B-C
Procedure Done		Load-3, End			

82

END

83