

轴向疲劳试验机动负荷检定装置和方法

六二一所 瞿林楠

三〇四所 焦献瑞

一、概 况

随着航空工业的发展,测定材料疲劳性能用的疲劳试验机的数量和品种不断增加,质量也有较大的提高。但是目前国内计量系统对其动态力的校正尚未建立一套有效的手段和方法,这在一定程度上影响了试验机研制和生产中的统一性、使用中的正确性和疲劳性能测试结果的可比性。从六十年代起,苏、美、德、英等国先后建立了动态力的校正装置和方法。国际标准化组织(ISO)也在起草这方面的标准。

目前应用中的疲劳试验机大致有以下三种形式:①液压脉动疲劳试验机;②机械式和电磁式的共振型疲劳试验机;③电液伺服疲劳试验机。第一种疲劳试验机只能产生脉动载荷。这种试验机大部分是进口的,其中有新一些的,也有年代较早而目前还在大量使用中的。第二、三种试验机除能产生脉动载荷以外,还能产生交变载荷,其数量正在日益增多,应用也日益广泛。针对以上情况,我们将这项工作分成两步:首先解决单向脉动载荷的校正,其次解决交变载荷的校正。本文主要介绍第一部分。

二、误差来源

液压脉动疲劳试验机动负荷误差的来源包括动力误差;液压脉冲器非余弦性引起的误差;动静转换机构特点引起的误差;指示表本身的误差。

1. 动力误差

这项误差包括惯性力误差和相位误差两项。我们知道试验机以脉动加载进行疲劳试验

时,它的主体部分是机械振动系统,可以用我们所熟悉的机械振动理论加以解释。它的特点是在主机频幅特性设计时应用了共振曲线中

$\frac{\omega}{\omega_n} \approx 0$ 那一段的特性,如图1中A部分;

动载荷最大值和最小值的指示系统假定是在

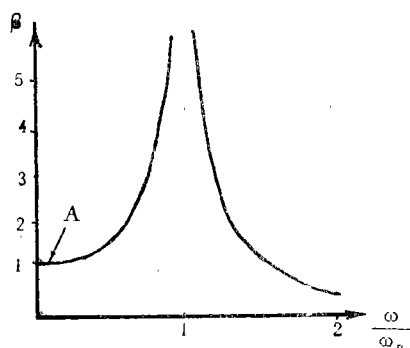


图 1 共振曲线

β = 振幅放大因子

ω = 工作时脉动频率

ω_n = 振动系统固有频率

$\frac{\omega}{\omega_n} = 0$ 的情况下设计的。然而在实际作脉动疲劳试验时 $\frac{\omega}{\omega_n}$ 的值永远不会等于零,图1 A部分也不是完全平坦的。这样就产生了惯性力和相位差所引起的动力误差。

这个误差的大小可用下式来估计:

$$P = \frac{P_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2 \frac{c\omega}{c_c \omega_n}\right)^2}} \cos(\omega t - \alpha) \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = \arctg \frac{2 \frac{c\omega}{c_c \omega_n}}{\frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \dots\dots\dots (2)$$

(1)和(2)式在振动理论中是有阻尼强迫振动系统的频幅特性和相频特性的公式。就我们讨论的问题来说

式中 P ——作疲劳试验的试件上实际受的载荷;

P_0 ——脉冲器给出的脉动载荷最大幅值;

C ——振动系统的阻尼系数;

C_c ——($= 2m\omega_n$)临界阻尼系数;

$\omega t - \alpha$ ——脉冲器给出的脉动载荷的相位与试件上实际承受的脉动载荷的相位差。

假设当 $\frac{\omega}{\omega_n} = 0.2$ 、 $\frac{C}{C_c} = 0.2$, 求最大振幅时的误差, 则用公式(1)和(2)计算可知振幅误差 δ 振幅和相位误差 δ 相位:

$$\delta \text{ 相位} = -3.7\%$$

$$\delta \text{ 振幅} = -0.3\%$$

$$\text{动力误差 } \delta_{\text{动}} = \delta \text{ 振幅} + \delta \text{ 相位} = -4.0\%$$

相位差所引起的误差主要是由于动载荷测量系统中动静态转换机构在任何情况下都与脉冲器同相位, 而当 $\frac{\omega}{\omega_n} \rightarrow 0$ 时它与试件实际承受的脉动载荷存在着相位差。

由上看出, 动力误差是根据牛顿力学定律推导出来的, 它是与试验机液压系统无关的一个量, 它的大小随着 $\frac{\omega}{\omega_n}$ 的大小而改变, 当

$$\frac{\omega}{\omega_n} = 0.15 \quad \delta_{\text{动}} = -1.8\%$$

$$\frac{\omega}{\omega_n} = 0.1 \quad \delta_{\text{动}} = -0.8\%$$

动力误差属于系统误差, 可以用修正的办法来解决。目前一般修正时考虑到 δ 相位在一定范围内的量很小, 因此往往将其忽略, 而只修正 δ 振幅。同时 δ 振幅实际上就是振动系统参振质量在脉动时的惯性力所引起的误差, 所以一般又叫惯性力误差。

2. 脉冲器的非余弦性引起的误差

液压脉动疲劳试验机的脉冲器一般都采用曲柄摇摆机构, 这个机构要保证脉冲活塞的上

下运动, 又要使这个运动的幅度得到调节, 致使这个机构不能保证提供一个完全符合余弦(或正弦)的运动轨迹。因此就产生了两个问题, 首先是使轴式动静态转换机构产生 1° 左右的机械相位差, 其次使脉冲器在最高点和最低点时所获得的加速度不相等, 致使脉动载荷在最大值和最小值时惯性力的误差也不相等。这两项所带来误差的大小随着曲柄长度 l 对连杆长度 L 比值的大小而变化, 一般设计时当 $\frac{l}{L} < 0.2$ 时均可忽略。

3. 轴式动静态转换机构特点引起的误差

机构的作用是使脉动载荷的最大值和最小值实现静指示。机构除了在工作油缸中出现最大和最小值时与相应的指示表导通瞬间外, 应起到封锁最大值指示表和最小值指示表的作用。封锁作用的好坏直接影响到指示值的正确与稳定, 所以轴一旦磨损会影响精度。轴在装配时要以脉冲活塞的位置按设计要求正确地加以协调, 否则将会出现极大的指示误差。

4. 指示表本身带来的误差

此项误差来源与静态是一样的。但是用压力表作指示的试验机因压力表精度较低, 其最小分度值又较大, 所以在小载荷将有较大的指示误差。

根据钢的典型疲劳曲线分析, 影响脉动疲劳测试结果的主要因素是最大载荷, 而最小载荷的影响较小, 经计算, 当峰值允许 $\pm 3\%$ 的误差时, 谷值(即最小值)的等效误差可在 $30 \sim 40\%$ 之间, 所以试验机的动负荷校正主要是对最大载荷来讲的。

三、惯性力误差的修正公式

关于如何处理惯性力误差, 国外一般有二种办法: 一种是修正; 另一种是限制使用范围(包括试件刚度及使用频率的范围)而不予修正。根据我国的情况, 提议采用修正的办法, 这样有两个好处: 首先是可扩大试验机的使用范围——试样刚度范围及使用频率的范围; 其次提高工作效率, 可在尽可能高的频率下作试

验，以缩短试验时间。

根据振动理论，在忽略阻尼和相位引起的误差的情况下惯性力的计算可按式下进行：

$$F = \frac{G}{g} \cdot \frac{S}{2} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

式中F——试验机主机参振质量在振动下产生的惯性力（公斤力）；

G——参振重量(公斤)，包括框架、活塞、夹具等；

g——重力加速度9.81米/秒²；

S—— $\frac{P_{max}-P_{min}}{K}$ 脉动全冲程(米)；

P_{max}——最大载荷（公斤力）；

P_{min}——最小载荷（公斤力）；

K——包括试件在内的系统刚度（公斤力/米）用百分表实际测定；

n——脉动频率（次/分）。

当算得F以后按下式进行修正：

$$P_{maxo} = P_{max} - F \dots\dots\dots (4)$$

$$P_{mino} = P_{min} + F \dots\dots\dots (5)$$

式中P_{maxo}——试验机最大载荷指示值；

P_{max}——实际最大试验载荷，即试验条件给定的最大值；

P_{mino}——试验机最小载荷指示值；

P_{min}——实际最小试验载荷，即试验条件给定的最小值。

惯性力误差的修正量不宜过大，为了可靠起见，一般规定不大于7%（轴式动静态转换机构）和不大于10%（阀式转换机构），因为过大时阻尼及相位的影响将不容忽视。如果已经超过上述规定，则应降低试验频率。

惯性力误差修正示意图见图2。

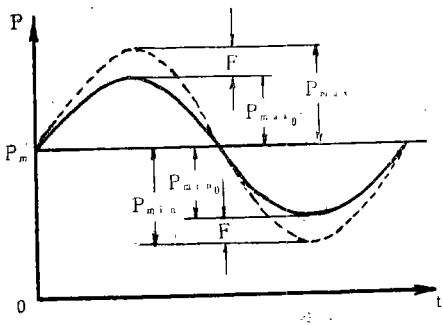


图2 惯性力误差修正示意图

四、脉动载荷校正装置

JDG光学测力计是用来校正试验机脉动载荷峰值（最大值）和谷值（最小值）的标准计量仪器。它适用于4~40赫芝稳幅的正弦波或其它波形的脉动载荷的校正。其型号和校正范围如下：

型号	校正范围
JDG-10	2000~10000公斤
JDG-25	5000~25000公斤
JDG-50	10000~50000公斤

测力计静态精度和稳定性在满负荷30%以上为±1%，在30%以下为±1.5%。其结构示意图见图3。

1. 工作原理

为适应动态测量的特点，采用了不接触式的光学测量装置，当载荷相对作用在外套筒1的顶部和支座6的底部时，内套筒5产生拉伸

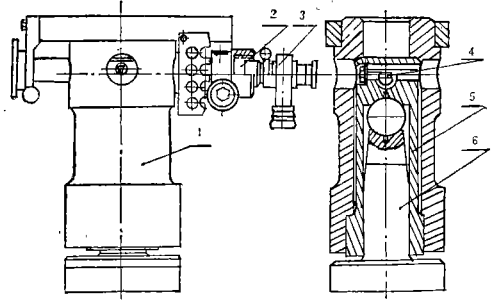
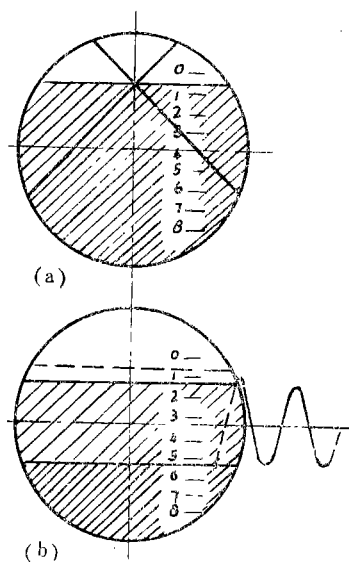


图3 JDG光学测力计结构图

- 1—外套筒；2—显微镜筒；3—测微目镜；
- 4—刀子；5—内套筒（弹性体）；6—支座。

变形,同时外套筒也产生微量的压缩变形,这个变形由刀子4的位移在300倍测量显微镜视野中反映出来,利用弹性应力应变的线性对应关系,测量出刀子4的位移,就可换算成相对应的载荷。

图4是测微目镜中的视野。空载或静载时在视野中有暗区和亮区两部分。当日镜中的交叉点对准暗区和亮区的分界线时,即可在目镜鼓轮上读出起始零点的数值或相对应某一载荷的变形量,如图4a所示。当脉动载荷作用测力计时,目镜视野中就形成了一个半光亮的光带,它区别于亮区和暗区,测量这个光带的宽度就可知脉动载荷的双振幅值,对照测力计的标准数据,即可得知脉动载荷最大值和最小值。



(a)静载荷视图 (b)循环载荷视图
图4 目镜视野

2. 设计与制造

光学部分是由一个放大约20倍视场为0.4毫米的物镜和一个放大约15倍测量范围为8毫米的目镜组成的,总放大倍数约为300倍的测量显微镜。目镜鼓轮分度值为0.01毫米,一般能估计到0.005毫米,当刀子位移0.001毫米时,通过物镜后放大成0.02毫米,再经过目镜放大15倍后进行测量,这就有利于提高测量精度,一般目镜有效测量范围大约6毫米,因此这就

决定了刀子位移不应大于0.3毫米。

机械结构:测力计可分为机械变形和测量两部分,显微镜固定在外套筒的顶部,而视场对准固定的内套筒顶部的刀刃上。由于测力计弹性变形主要是在内套筒和外套筒的中间部分,因此测力计在脉动载荷作用下测量显微镜可做到相对静止不动。内套筒是测力计的主要弹性元件,变形的80~90%是由它提供的,因此内套筒设计时应力水平的选取要合适。我们选用的是40Cr钢,热处理后 R_{c45} 左右, σ_s 约100公斤/毫米²。为适应动态测量,尽量缩小其弹性滞后回线的宽度取应力水平为 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{2} \sigma_s$,实际选为27公斤/毫米²,根据虎克定律,相对应变为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{27}{2 \times 10^4} = 13.5 \times 10^{-4}$$

以10吨测力计为例,设内套筒绝对变形 $\Delta L = 0.14$ 毫米,则内套筒工作部分长度应为

$$L = \frac{\Delta L}{\varepsilon} = \frac{0.14}{13.5 \times 10^{-4}} = 104 \text{ 毫米, 实际选}$$

$$L = 107 \text{ 毫米。断面积取 } S = \frac{P}{\sigma} = \frac{10000}{27} = 370 \text{ 毫米}^2 \text{。设内径 } d \text{ 为 } 45 \text{ 毫米, 则外径}$$

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{4S}{\pi}} \approx 50 \text{ 毫米。设外套筒受}$$

压缩产生0.02毫米应变,取工作应力为6公斤/毫米²,则同上计算 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$

$$= 3 \times 10^{-4} \text{。工作部分长度为 } L = \frac{0.2}{3 \times 10^{-4}}$$

≈ 66 毫米。内外套筒总的绝对变形量 $\Delta L = 0.14 + 0.02 = 0.16$ 毫米,不超过0.3毫米,实际测量结果 ΔL 达到0.19毫米,这是因为还有一部分参与微量变形部分没有计算在内的缘故。

根据这次试验的结果,物镜选用25倍,总放大375倍左右也可以用。目前实测结果为:

10吨测力计的弹性变形约0.2毫米;

25吨测力计的弹性变形约0.22毫米;

50吨测力计的弹性变形约0.3毫米;

光学测力计的加工按一般机加工原则进行,内套筒应按三等标准测力计弹性体加工要求。

3. 测力计的检定

目前, 国内外均没有标准的动载荷装置, 因此采用静标定动使用的办法。根据有关理论认为, 这种办法不会给动态测量带来值得注意

的误差。标定前测力计必须经过20000次以上额定载荷下循环加载的稳定化处理。然后按三级测力计定度的办法, 在二等标准测力计上定度, 结果见表1。

表1

JDG-10N002				JDG-25N001				JDG-50N002			
载荷 公斤	极限标准 误差 %	稳定性 %	直线性 %	载荷 公斤	极限标准 误差 %	稳定性 %	直线性 %	载荷 公斤	极限标准 误差 %	稳定性 %	直线性 %
2000	±0.45	1.0		5000	±0.9	0.6		10000	±0.35	0.2	
4000	±0.3	0.3	0.15	10000	±0.3	0.4		15000	±0.81	0.1	
6000	±0.15	0.6		15000	±0.21	0.6	0.3	20000	±0.66	0.2	
8000	±0.3	0.34		20000	±0.09	0.5		25000	±0.33	0.16	0.82
10000	±0.07	0.2		25000	±0.18	0.5		30000	±0.27	0.12	
								35000	±0.1	0.04	
								40000	±0.2	0.4	
								45000	±0.27	0.2	
								50000	±0.3	0.05	

注: 1. 载荷的检定用二等标准测力计, 精度±0.1%。

2. 极限标准误差: 取均方根误差的3倍, 可信度99.7%。

3. 直线性: 是按额定载荷下总变形计算的。

4. 稳定性: 是相隔一年并经过使用多次的数据。

5. 标定时用物镜号819112, 目镜号842442。

从标定结果看, 测力计的精度不大于0.9%, 长期稳定性不大于1%, 直线性在1%以内, 考虑到长期稳定性的变化和动测量时的观察误差及留有余地, 现在将光学测力计JDG精度定为±1% (满负荷30%以上) 和±1.5% (30%以下)。这个精度比有关国家的规定提高了0.5%。

4. 装置的应用及情况

根据本装置编制了“单向液压脉动疲劳试验检定规程”, 经三、四、五、六机部主管部门同意在国家未颁布正式规程以前可参照试行。规程规定, 试验机动态力的精度为±3%, 详见三机部三〇四所颁发的“部分材料试验机检定规程”第六节。

根据规程用JDG光学测力计对ZDM-100、

ZD-20、ZD-40等液压脉动疲劳试验机动载荷进行多次校正, 都得到了比较好的结果。

为了研究试验机惯性力误差及验证我们提议的惯性力误差的修正公式, 设计了一根刚度可变的梁, 并且用JDG测力计在ZD-20试验机上进行了实验, 装置如图5所示, 实验数据见表2。表中实测是用JDG-10测力计测出的试验机实际动载荷误差, 计算项是用公式(3)计算所得的惯性力误差。

从表2数据看出, 载荷为最大值时, 实测与计算间的偏差, 除个别点大于1%外, 绝大部分都在1%以内。载荷为最小值时, 除有个别疑点外, 其余的趋势均一致。如果用计算所得的惯性力误差对试验载荷进行修正, 可以得到满意的结果。

表 2

频率, 次/分		500		1000		1300	
载荷, 公斤		实测	计算	实测	计算	实测	计算
P_{max}	10000	+0.6	+0.66	+2.9	+2.5	+3.7	+4.4
P_{min}	4000	-0.6	-1.6	-3.4	-6.4	-9.6	-8.9
P_{max}	8000	+0.7	+0.54	+2.6	+2.2	+3.1	+3.7
P_{min}	4000	-0.9	-1.1	-2.5	-4.3	-7.1	-7.3
P_{max}	5000	+1.1	+0.9	+4.5	+3.4	+6.1	+5.9
P_{min}	1000						
P_{max}	2000	+1.5	+0.8	+4.6	+3.2	+6.2	+5.5
P_{min}	500						

试验条件: 系统 弹性常数 $K=4878$ 公斤/毫米,
参振重量389公斤。

五、存在问题

JDG光学测力计具有结构简单、可靠、精度稳定、携带方便等特点, 同时也还存在一些缺点, 如操作比较费眼, 容易产生读数误差; 而且只能测单向脉动载荷; 频率范围也比较

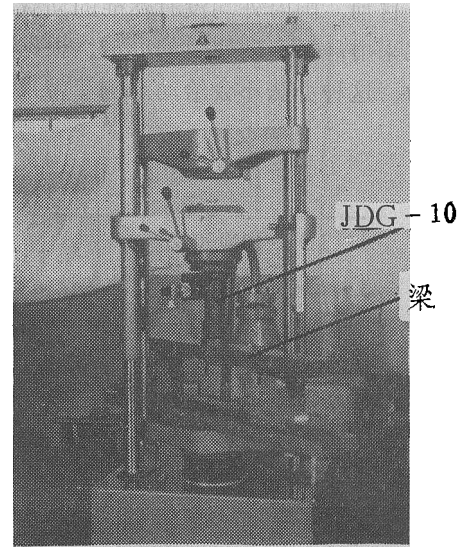


图 5 用 JDG-10 测力计在 ZD-20 试验机上作动负荷误差校正的装置

窄。目前正在进行电测法装置的研究, 不久即可实现双向交变载荷的校正。

会议动态

航空纺织材料应用技术 发展规划会

一九七九年十一月二日至八日在南京召开了航空纺织材料应用技术发展规划会。有三机部、纺织部的主管部门以及化工部、七机部、国防科委、海军航空兵等所属39个单位54名代表参加了会议。

这次会议的主要内容是沟通情况, 交流技术, 讨论规划。会上, 三机部纺织材料研究室、五一三厂、五二〇厂、五一〇厂、五〇八所、五〇七所、上海纺织工学院、无锡纺织研究所、上海合成纤维研究所、上海化纤九厂等单位的代表分别作了技术报告, 介绍了国内外航空纺织材料现状与发展, 进行了学术交流、技术交底, 加深了相互了解。

代表们认为, 在党的领导下, 纺织部门及有关单位在航空纺织材料的研制与生产方面取得了不少新的成果, 对一些高性能纤维的研制也正在取得可喜的进展, 大大有利于我国航空、航天事业的发展。

代表们还对发展规划逐项进行了认真讨论, 提出修改和补充意见。讨论中也认为, 今后应在基础理论、测试技术与设备, 以及进一步摸清应用规律等方面切实加强工作, 以便更好地为实现四个现代化服务。

(本刊讯)

× × × ×

(上接第34页)

结 果

根据以上三方面试验分析, 可以确认故障接点上的缺陷是由 ZrO_2 夹杂物造成的。而且故障接点就是图11所示夹杂物缺陷冲孔的那个冲点。