



中华人民共和国国家标准

GB/T 25851.2—2023/ISO 11662-2:2014

流动式起重机 起重机性能的试验测定 第2部分：静载荷作用下的结构能力

Mobile cranes—Experimental determination of crane performance—
Part 2: Structural competence under static loading

(ISO 11662-2:2014, IDT)

2023-11-27 发布

2024-06-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	3
5 限制	4
6 加载方法	4
6.1 起吊载荷	4
6.2 侧载(SL)	5
6.3 挠度标准	5
7 设备、仪器及材料	7
8 试验前准备	7
9 试验程序和记录	7
9.1 最终试验准备	7
9.2 零应力状态	7
9.3 空载应力状态	8
9.4 负载应力	8
9.5 超载试验工况	8
10 应力评估	8
10.1 I类——均匀应力区	9
10.2 II类——应力集中区	9
10.3 III类——压杆屈曲区	9
10.4 IV类——板的局部屈曲区	9
附录 A (规范性) 材料强度	11
附录 B (规范性) 压杆屈曲应力	14
附录 C (规范性) 试验工况和强度安全系数	20
附录 D (资料性) 报告格式	31
附录 E (资料性) 典型起重机示例	33
参考文献	37

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 25851《流动式起重机 起重机性能的试验测定》的第2部分。GB/T 25851 已经发布了以下部分：

- 第1部分：倾翻载荷和幅度；
- 第2部分：静载荷作用下的结构能力。

本文件等同采用 ISO 11662-2:2014《流动式起重机 起重机性能的试验测定 第2部分：静载荷作用下的结构能力》。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国起重机械标准化技术委员会(SAC/TC 227)归口。

本文件起草单位：徐州重型机械有限公司。

本文件主要起草人：单增海、丁宏刚、胡海鹏、黄清、李长青、张艳、秦小虎、曹永、朱天罡、朱守法、李雪峰、侯政良。

引 言

GB/T 25851 旨在规定对流动式起重机的额定起重量图表进行验证所采用的测试方法,拟由两个部分构成。

- 第 1 部分:倾翻载荷和幅度。目的在于规定当载荷作用在吊钩滑轮组上时,测定流动式起重机最大平衡能力的试验方法。
- 第 2 部分:静载荷作用下的结构能力。目的在于规定测定流动式起重机在静载条件下产生的应力的试验方法。

对流动式起重机进行的设计计算基于一个理想的模型。在该模型中,所有的构件和部件完全平直且制造精确。对于受拉构件和受弯构件,起重机实物与理想模型之间的差异通常不明显。但是,对于受压构件,需要考虑直线度和制造的偏差。

当使用应变计对流动式起重机进行非破坏性试验时,确定的应力本质上包括了直线度和制造精度偏差的影响。

本试验方法旨在描述起重机整个承载结构中各单元所承受的近似最大负载工况(见附录 D)。在某些情况下可能通过分析指示出更严峻的负载工况。在这些情况下,更严峻的工况能添加到指定的试验工况或代替指定的试验工况。此外,该试验方法将应力区域划分为四大类:Ⅰ类(均匀应力区)、Ⅱ类(应力集中区)、Ⅲ类(压杆屈曲区)和Ⅳ类(板的局部屈曲区)(见第 10 章),并定义了每一类型的限制。试验结果能用于关联臂架系统计算给出的Ⅲ类应力区域的臂架系统计算结果。整个结构中,Ⅰ类应力区域的试验结果能用于检查任何可用的计算。用该试验方法对很少有计算可用的Ⅱ类应力区域进行评估。Ⅳ类应力区域可能出现不成比例的高应力读数,此时能通过计算方法复查以便更好地深入了解。

如果同一分析程序显示其应力水平小于或等于原始应用中的应力水平,且支撑结构的刚性与原始支架相同,则按本文件方法评定的臂架系统能直接在另一台机器上使用,无需通过此处指定的方法重新进行试验。支撑结构的刚度由施加试验载荷时臂架根部轴线斜率的变化决定。

流动式起重机 起重机性能的试验测定

第 2 部分：静载荷作用下的结构能力

1 范围

本文件适用于使用下列部件的流动式起重机：

- a) 钢丝绳、主臂或主臂及固定副臂(见附录 E 中图 E.3)；
- b) 钢丝绳、主臂、变幅副臂及固定副臂(见图 E.1 和图 E.2)；
- c) 伸缩臂或伸缩臂及副臂(见图 E.4)。

流动式起重机制造商能使用本文件来验证图 E.1~图 E.4 所示的流动式起重机的设计。

本文件描述了流动式起重机通过使用电阻应变计,在规定的静载条件下测定起重机结构中产生的应力的试验程序。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

ISO 9373 起重机和相关设备 试验中参数的测量精度要求(Crans and related equipment—Accuracy requirements for measuring parameters during testing)

注：GB/T 21457—2008 起重机和相关设备 试验中参数的测量精度要求(ISO 9373:1989, IDT)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

应变 strain

材料在任何给定点相对于通过该点的特定平面的相对伸长或压缩,表示为每单位长度的长度变化量(m/m)。

3.2

应力 stress

S

由应变产生的单位面积内力。

注 1：单位为帕斯卡(Pa)或牛顿每平方米(N/m²)。

注 2：为简单起见,本文件将使用兆帕(MPa)。

3.3

屈服点应力 stress at the yield point

屈服强度

S_y

应变不成比例增加而应力没有相应增加时的应力。

注：在本文件中,屈服点视为所用材料的相应标准规定的最小 0.2% 偏移拉伸屈服点或屈服强度。

3.4

临界屈曲应力 critical buckling stress

S_{cr}

在压杆构件中产生初始屈曲状态的平均应力(按附录 C)。

3.5

初始参考试验状态 initial reference test condition

磨合后建立的起重机零应力结构状态:

- a) 将结构支撑起来,使重力影响最小化;
- b) 起重机结构件处于未装配状态或用任何其他方法建立零应力状态。该状态下,获得每个应变计的初始参考读数 N_1 。

3.6

空载应力状态 dead load stress condition

起重机在试验场地完成装配,处于准备在规定幅度起升规定载荷的结构状态。

注 1: 该状态下,获得应变计的第二个读数 N_2 。

注 2: 吊钩、滑轮、索具等被认为是起吊载荷的一部分,但在读取此读数时,这些部件可由起重机支撑。为获取空载载荷,吊钩位于“初始”位置——吊挂在起重机上,且未起吊试验载荷。将载荷放回地面后,重复该位置(见 9.4.4)。

3.7

空载应力 dead load stress

S_1

按照第 10 章的定义,通过 3.6 和 3.5 中获取的各应变计读数之差($N_2 - N_1$)计算得出的应力。

3.8

负载应力状态 working load stress condition

起重机在试验场地完成装配,处于支撑额定载荷的规定结构状态。

注: 该状态下,获得应变计的第三个读数 N_3 。

3.9

负载应力 working load stress

S_2

按照第 10 章的定义,通过 3.8 和 3.5 中获取的各应变计读数之差($N_3 - N_1$)计算得出的应力。

3.10

复合应力 resultant stress

S_r

由空载应力(S_1)或负载应力(S_2)导致的结构中产生的应力,取绝对值较大者。

3.11

平均杆压应力 column average stress

S_{ra}

压杆中的直接压缩应力或由截面上几个应变计计算得到的平均应力(见附录 B)。

3.12

最大杆压应力 column maximum stress

S_{rm}

根据截面上的几个应变计确定的由屈曲平面计算得出的压杆中最大压缩应力(见附录 B)。

3.13

加载 loadings

在规定条件下施加指定大小的重量和/或力。

3.14

载荷幅度 load radius

起重机在水平地面上安装时,起重机转台的回转中心线到起升线或滑轮组垂直轴线之间的水平距离。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

E	弹性模量
K	压杆有效长度系数
L	压杆无支撑长度
L_b	主臂长度
L_j	副臂长度
L_1	副臂沿 x 轴任意投影长度
L_2	副臂撑杆沿 y 轴的投影长度
n	强度安全系数
n_1	I类区域强度安全系数,屈服强度与复合应力或当量应力之比
n_2	II类区域强度安全系数,屈服强度与复合应力或当量应力之比
n_3	III类区域强度安全系数,由相互作用关系导出
N_1	初始参考试验工况下的应变读数
N_2	空载应力工况下的应变读数
N_3	负载应力工况下的应变读数
r	回转半径
RL	制造商规定的额定载荷
“R”	垂直于臂架支撑根部中心线(CL)的平面
RR	制造商规定的额定幅度
S	应力
S_1	空载应力
S_2	负载应力
S_{ra}	平均杆压应力
S_{cr}	临界屈曲应力
SL	侧载,即 $0.02 \times RL$
%SL	侧载百分比,表示为额定载荷百分比或 $\%RL = \text{额定载荷百分比}$
SLL	左侧侧载
SLR	右侧侧载
S_{rm}	最大杆压应力
S_p	比例极限
S_r	复合应力
S_{RC}	最大压缩残余应力
S_y	屈服点应力
S'	当量单向应力
t	载荷中心到各箱形臂节前支撑垫板中心的水平距离
σ_0	拉伸屈服应力

σ_x	最大主应力
σ_y	最小主应力
Z'	桁架臂端斜率(平面外)
Z_b	相对于平面“R”的桁架式主臂头部的侧向挠度
Z_j	相对于平面“R”的副臂头部的侧向挠度
Z_1	主臂头部向下距主臂头部 L_1 处桁架式主臂的侧向挠度
Z_2	副臂撑杆头部的侧向挠度
α	缺陷系数
β	与副臂中心线(CL)之间的副臂安装角
ϵ	应变
ϵ_a	应变花轴“a”处记录的应变
ϵ_b	应变花轴“b”处记录的应变
ϵ_c	应变花轴“c”处记录的应变
ϵ_d	应变花轴“d”处记录的应变
ϵ_x	最大主应变
ϵ_y	最小主应变
μ	应变单位, 10^6
θ	副臂臂头绕 x 轴旋转角度(rad)
π	$\text{Pi}=3.141\ 6$
τ_0	剪切屈服应力
ν	泊松比
X	屈曲应力比($= S_{cr}/S_y$)
$\bar{\lambda}_0$	初始相对长细比
$\bar{\lambda}$	相对长细比($=\lambda/\lambda_c$)
λ	长细比($=KL/r$)
λ_c	参考长细比($=\pi\sqrt{E/S_y}$)
S_k	许用屈曲应力
S_{ci}	欧拉屈曲应力
S_{ck}	耶格屈曲应力

5 限制

5.1 本方法适用于不同于动力传输机构的承载结构,仅限于静载工况下的应力测量和超载工况后的总体观察。

5.2 应由具备结构分析和应变测量仪器使用能力的人员来进行试验。

6 加载方法

6.1 起吊载荷

指定的载荷在指定的幅度上吊挂,并在地面上方一定高度处保持静止。吊钩、滑轮、索具等的质量应包括在规定的起吊载荷内。

6.2 侧载(SL)

当试验要求侧向加载时,移动起吊载荷的力宜为水平方向,并垂直于回转平面(上车结构回转中心线与未偏转的臂架中心线构成的平面)。侧载应施加在各个水平方向上。通过施加侧载来模拟与起重机操作相关的各种影响,可包括会遇到的 9 m/s 的风载荷。

6.2.1 桁架臂

对于桁架臂,在表 C.2 中列出的工况下施加的侧载应在各个水平方向上按额定载荷的 2%(0.02 RL) 施加。

6.2.2 主臂

对于主臂,在表 C.1 中列出的工况下,在载荷连接点的各个方向上施加的侧载百分比最小为该方向上额定载荷的 2%(0.02 RL)。

6.2.3 伸缩臂

对于伸缩臂,在表 C.3 中列出的工况下施加的侧载应在各个水平方向上按额定载荷的 3% (0.03 RL) 施加,且臂架位于起重机后端上方。

6.3 挠度标准

桁架结构(即桁架臂和副臂的组合)或伸缩臂的挠度有时受整个臂架结构以及单个构件的弹性稳定性影响。平面外弹性不稳定的初始表现为主臂和/或副臂端部挠度(侧向)过大,因为吊挂额定载荷时臂架是侧面加载的,因此规定了下列侧向挠度限制。

6.3.1 桁架臂

表 C.2 中的额定载荷和侧载的侧向挠度执行要求如下。首先,主副臂组合的挠度应小于或等于总组合长度的 2%。此外,每个独立主臂或副臂构件的挠度应小于或等于该构件长度的 2%。为了满足这些要求,宜注意单个构件的挠度不包括与之相连的构件的挠度、转角或斜率。

对于安装在主臂上的单个副臂,其关系见公式(1)(见图 1):

$$Z_j \leq 0.02L_j + Z_b + Z'(L_j \cos\beta) + \theta(L_j \sin\beta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

计算数值如下:

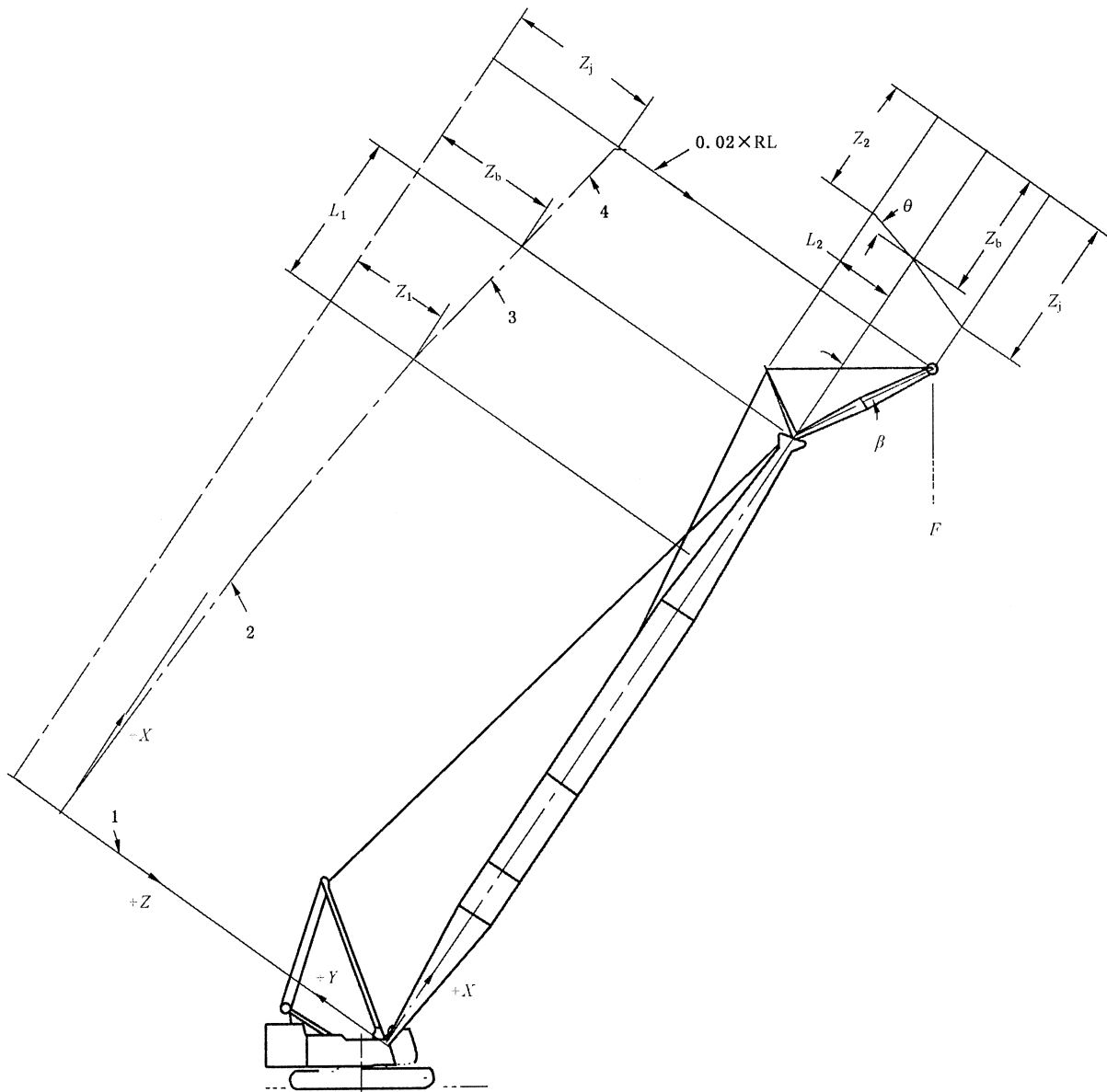
斜率见公式(2):

$$Z' = (Z_b - Z_1)/L_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

转角见公式(3):

$$\theta = (Z_b - Z_2)/L_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

若 Z' 和 θ 不能通过计算得出,则可删除公式(1)中的后两项。



标引说明：

- 1——臂架支撑根部中心线；
- 2——主臂中心线；
- 3——斜率 Z' ；
- 4——副臂中心线；
- F ——额定载荷(RL)。

图 1 带有副臂的桁架式起重臂架挠度测量的术语

6.3.2 伸缩臂

对于起重机伸缩臂结构,未建立端部挠度限制。当系统稳定时,应测量并记录主臂、变幅副臂和固定副臂的挠度。

6.3.3 主臂

对于起重机主臂结构,未建立端部挠度限制。当系统稳定时,应测量并记录伸缩臂和副臂的挠度。

7 设备、仪器及材料

- 7.1 为无障碍地完成试验要求提供足够大的混凝土或其他坚固的支承面。在履带上进行试验时,起重机水平度应位于 0.25% 坡度范围内。
- 7.2 测量臂架根部轴线水平度的装置,精度为 0.1% (按 ISO 9373)。
- 7.3 确定载荷幅度的装置,精度为 $\pm 1\%$,不超过 150 mm。
- 7.4 施加起吊载荷横向位移的装置和测量此位移力大小的装置,所测力的精度为 $\pm 3\%$ 。
- 7.5 温度补偿应变计、胶合剂、防水剂和其他必要的仪器安装设备。
- 7.6 应变记录系统。使用可公开购买、高质量、可靠性强的仪器来进行试验。记录系统的精度应确定为 $500 \mu\text{m}/\text{m} \sim 3\,000 \mu\text{m}/\text{m}$ 应变范围内读数的 $\pm 2\%$ (以适当的增量确定)。校准能通过电气分流器或预先校准的应变条来完成。
- 7.7 试验砝码和已知质量的起升装置,精度在 $\pm 1\%$ 范围内。
- 7.8 测量主臂和副臂侧向挠度的装置,精度在 50 mm 范围内。

8 试验前准备

- 8.1 应对每一结构进行充分的分析,以确定高应力区。应变计的位置和方向应根据分析,必要时使用其他的试验技术来确定。
- 8.2 对起重机进行详细检查,以确保承载部件的所有机械调整 and 状态符合制造商的建议。检查起重机的安装是否符合试验规范。
- 8.3 对于之前从未使用过的起重机,宜在每个预期的试验加载处或附近进行磨合,以消除在制造过程中可能产生的残余应力,并最大限度地减少试验过程中出现“应变计零点漂移”的可能性。
- 8.4 磨合结束后,对起重机进行全面检查,通过油漆裂缝、氧化层脱落或其他变形迹象来确定高应力区域。
- 8.5 在预先分析确定的点(见 8.1)和根据 8.4 进行的检查而选择的任何区域内贴上应变片。选择具有实践经验的人员,能够确保所有应变计类型正确、方向正确并且贴片牢固,以便正确地测量应变。
- 8.6 通过参考证明材料(如有)、适用标准或附录 B 确定每个应变片位置处起重机结构材料的最小屈服强度和弹性模量,适用时,确定材料的临界屈曲应力(按附录 B)。

9 试验程序和记录

9.1 最终试验准备

- 9.1.1 将起重机置于试验场地上,锁定行驶制动器和插销。在空载状态下,通过使用垫板或垂直支腿将起重机调平到 0.25% 的坡度内。对起重机施加负载后,不应重新调平。

注:若在支腿上进行试验,则将起重机支起至所有轮胎或履带都不承重的位置,除非制造商提供的额定载荷图表示有其他要求。

- 9.1.2 连接应变检测系统,调试仪器仪表,并清除一切故障。

9.2 零应力状态

如果将组装后的起重机作为试验的初始状态获取数据、将未组装的零部件作为试验的初始状态获取数据,重新组装起重机后做好机械性能调试。

9.3 空载应力状态

9.3.1 将上车结构回转至相对于底盘的规定位置。锁上回转制动器或插销。

9.3.2 设置臂架角度和长度以达到规定的幅度。

9.3.3 读取空载应力状态下应变计上的所有读数(见 3.6)。计算每个应变计上的空载应力(S_1)(见 3.7),并记录在试验数据表上(见附录 D)。

注:每次改变位置、状态或配置以适应规定的试验和操作时,都会产生一个新的空载应力状态。因此,每个新状态需重复步骤 9.3.1~9.3.3。

9.4 负载应力

9.4.1 准备试验载荷,该载荷与吊钩、滑轮、索具等质量之和在规定载荷的±1%范围内。

9.4.2 按照试验规范要求,吊挂试验载荷(见 6.1)并施加侧载(见 6.2)。

9.4.3 读取负载应力工况所需应变计上的读数。计算每个所需应变计上的负载应力(S_2),并记录试验数据。测量并记录由起吊载荷和侧载引起的端部挠度。

9.4.4 释放侧载并下降起吊载荷,使起重机恢复到空载状态。将应变计上的读数与 9.3 中获取的读数进行比较。如果任何应变计的偏差超过±0.03 S_y/E ,查明原因并纠正,然后重复所有步骤直到获得一致的读数。

注:由于温度的变化以及作用在较长主臂和副臂上的风载荷会影响应变计读数,试验宜在尽可能有利的大气环境下进行。将起重机放置在侧载应力不会因风载荷减少的位置。

根据 3.10 计算并记录空载和负载组合的复合应力(S_r)。

全面检查起重机是否存在试验过程中可能产生塑性变形或其他损坏的任何迹象。

9.5 超载试验工况

9.5.1 重复 9.1.1 的步骤(如适用)。

9.5.2 将起重机(上车结构、臂架)置于规定的试验位置。

9.5.3 设置臂架角度和长度以达到规定的幅度,并记录Ⅳ类区域应变计上的空载读数。

9.5.4 准备试验载荷(见 9.4.1)。

9.5.5 吊挂规定的试验载荷并调整臂架角度(如需要)以获得额定载荷幅度。

9.5.6 观察结构的性能,并注意任何可能失效的迹象。

9.5.7 放下起吊载荷,将起重机恢复到空载应力状态。记录Ⅳ类区域应变计上的空载读数。

所有适用的超载试验完成后,适当时宜使用直尺或其他参考对起重机结构进行全面检查,以确定是否出现屈曲、永久性变形、单元偏离等迹象。氧化层脱落或油漆龟裂也能表明应力超过屈服点应力。将臂架结构拆卸至必要的状态,以确保能检查所有臂架单元、伸缩油缸或单元、起升机构、悬挂系统和其他承载单元。

记录试验设备、所试验起重机、试验结果和观察结果的所有相关数据。表格形式见附录 D。

10 应力评估

就本试验方法而言,应力与测量出的应变有关,单向应力公式见公式(4):

$$S = E \cdot \epsilon \text{ (在比例范围内)} \dots\dots\dots (4)$$

注:对于二向应力下起重机结构的某些区域来说,简单的单向应力公式可能不够准确,在这种情况下宜进行特殊考虑(见附录 A)。

根据相应的适用标准评估起重机结构不同部位应力的可接受性。这些应力区域分为以下几类(最

小强度安全系数见表 1 或 10.1~10.4)。

表 1 最小强度安全系数

载荷类型	I 类 (均匀应力区)	II 类 (应力集中区)	III 类(压杆屈曲区) ^a			IV 类 (板的局部屈曲区)
			曲线 A、B、C、D	曲线 a、b、c	其他	
X(安装载荷)	$n_1 \geq 1.3$	$n_2 \geq 1.0$	$n_3 \geq 1.4$	$n_3 \geq 1.2$	$n_3 \geq 1.3^b$ 和 2.2 ^c	空载时应变计应回到 $\pm 0.03S_y/E$
Y(额定载荷)	$n_1 \geq 1.5$	$n_2 \geq 1.1$	$n_3 \geq 1.6$	$n_3 \geq 1.3$	$n_3 \geq 1.5^a$ 和 2.5 ^b	空载时应变计应回到 $\pm 0.03S_y/E$
Z(超载)	仅观察	仅观察	仅观察	仅观察	仅观察	空载时应变计应回到 $\pm 0.03S_y/E$
^a 按附录 B。 ^b 临界屈曲应力 S_{cr} 由耶格方程计算。 ^c 临界屈曲应力 S_{cr} 由欧拉方程计算。						

10.1 I 类——均匀应力区

应力接近均匀分布的大面积区域,该区应力达到屈服点应力时,会引起结构件的永久变形。强度安全系数:

- $n_1 = S_y/S_r$ 或 S_y/S' (S' 按附录 A 进行计算);
- 对于额定载荷, $n_1 \geq 1.50$;
- 对于安装载荷, $n_1 \geq 1.30$ 。

10.2 II 类——应力集中区

超出屈服点应力的小面积高应力区,周围是较大面积的低应力区时,将不会产生结构件整体的永久性变形,例如锐角、孔眼或焊缝等断面剧变处。强度安全系数:

- $n_2 = S_y/S_r$ 或 S_y/S' (S' 按附录 A 进行计算);
- 对于额定载荷, $n_2 \geq 1.10$;
- 对于安装载荷, $n_2 \geq 1.00$ 。

10.3 III 类——压杆屈曲区

在某些平均应力值小于屈服点应力时可能发生破坏的区域。例如无任何支撑的单个受压件,包括但不限于需要看作压杆的主臂、撑杆、副臂弦杆等桁架结构。

强度安全系数按附录 B。

如果从表 1 中选择曲线 A、B、C 或 D:

- 对于额定载荷, $n_3 \geq 1.60$;
- 对于安装载荷, $n_3 \geq 1.40$ 。

对于桁架结构,该要求适用于节点间的腹杆或弦杆。

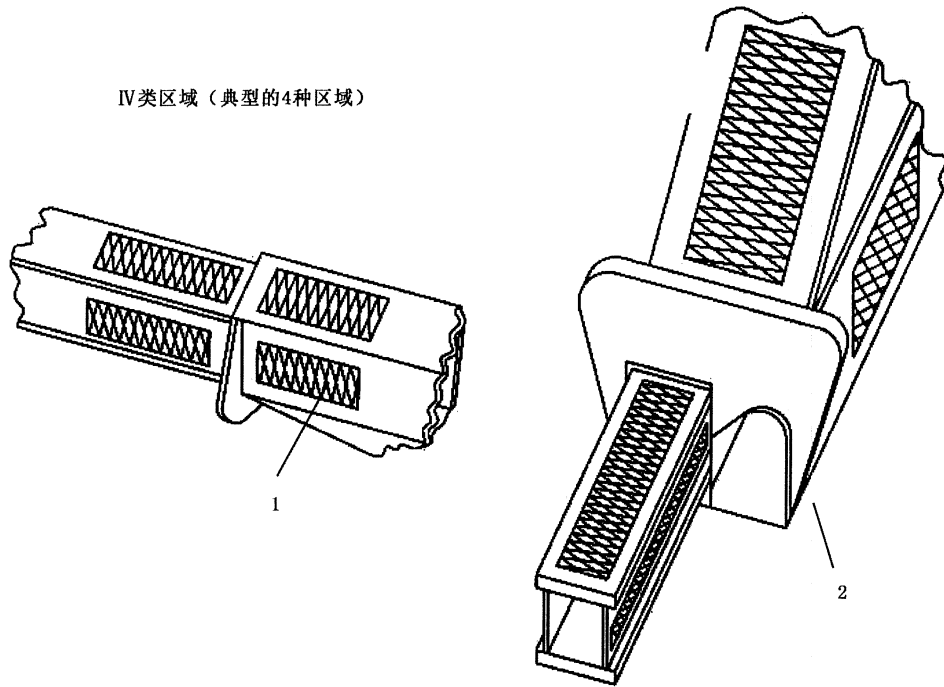
不适用于评估整个桁架受压件。

10.4 IV 类——板的局部屈曲区

当板直接承受平面内的压缩、弯曲和/或剪切时,可能在整体变得不稳定之前发生局部屈曲。局部

屈曲与起皱(初始屈曲)有关,其允许构件将载荷重新分配至刚性更强的区域。

当载荷进一步增大时,IV类区域的应力(见图 2)不一定随之成比例增加,但会存在相当占比的后屈曲应力。因此要求IV类区域的应变计读数在所有试验工况(包括超载工况)后都回到空载时的读数。



标引序号说明:

1——伸缩臂;

2——支腿箱和水平支腿。

图示为IV类区域典型的4种面。

图 2 板的局部屈曲区

附录 A
(规范性)
材料强度

A.1 二向应力场

在二向应力场中,如果将 $S = E \cdot \epsilon$ (见第 10 章)给出的单向应力与拉伸屈服点进行比较来确定强度安全系数,则可以存在一些误差。当考虑破坏理论是否适用于被测材料时就会出现这个问题。

A.2 脆性材料

使用 $S = E\epsilon_x$ (当在最大主应变方向测量 ϵ_x 时)假设最大应变破坏理论适用。这是普遍认可的脆性材料破坏理论,并且给出的结果对这类材料是有效的。

A.3 塑性材料

畸变能破坏理论通常被认为是塑性材料受二向应力影响的性能指标。该理论假设二向应力作用下的畸变能等于纯拉伸屈服应力作用下的畸变能时,发生屈服破坏。确定产生与实际二向应力畸变能相同的当量单向应力 (S'),与屈服点应力 (S_y) 进行比较,以确定抗破坏的强度安全系数。当量单向应力如公式 (A.1) 所示:

$$S' = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2} \dots\dots\dots (A.1)$$

主应力通过公式 (A.2) 和公式 (A.3) 由应变计读数求得:

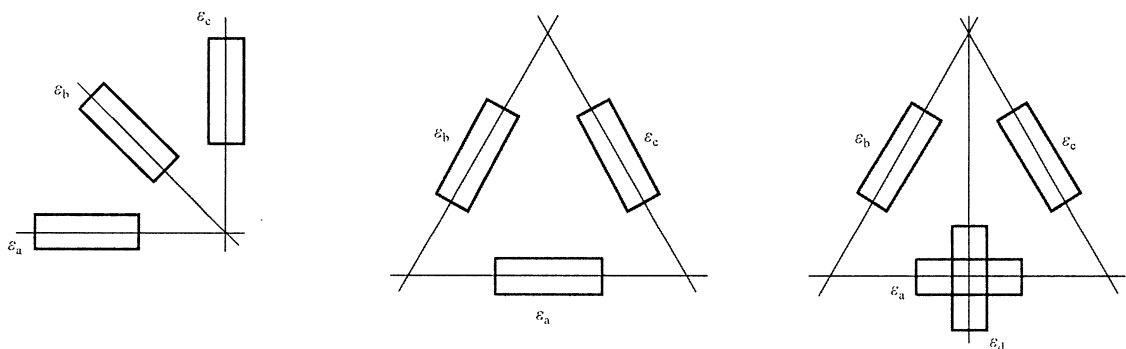
$$\sigma_x = E(\epsilon_x + \nu\epsilon_y) / (1 - \nu^2) \dots\dots\dots (A.2)$$

$$\sigma_y = E(\epsilon_y + \nu\epsilon_x) / (1 - \nu^2) \dots\dots\dots (A.3)$$

主应变是通过莫尔圆上的应变花读数或其他方法获得。当量应力 S' 也能通过公式 (A.4) 由主应变计算求得:

$$S' = \frac{E \sqrt{(1-\nu)^2 (\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_x + \nu\epsilon_y)(\epsilon_y + \nu\epsilon_x)}}{(1-\nu^2)} \dots\dots\dots (A.4)$$

当使用 3 个~4 个应变花时 (见图 A.1), 根据各应变片读数可直接使用相应公式计算当量应力。直角应变花见图 A.1。



a) 直角/三轴 45° b) 三角形/三轴 60° c) T-三角形/四轴 60°/90°

图 A.1 直角、三角形和 T-三角形应变花

A.4 塑性材料近似法

在大多数塑性材料的二向应力场中,假设当量单向应力 $S' = E\epsilon_x$ 的精度在 10% 以内。影响精度的主要因素有:

- a) 最小主应力与最大主应力之比, σ_y/σ_x ;
- b) 剪切强度与抗拉强度之比, τ_0/σ_0 。

—— σ_0 为拉伸屈服应力;

—— σ_x 为最大主应力;

—— σ_y 为最小主应力。

图 A.2 显示了泊松比 $\nu=0.285$ 时,这两个比值的精度变化。图 A.2 中显示,当状态接近二向拉伸或压缩时,误差可能为 25%~30%,当状态接近纯剪切时,误差可能为 0%~30%,这取决于 τ_0/σ_0 的比值。

图 A.2 中的实曲线基于与 $S = E\epsilon_x$ 相比的畸变能破坏理论。虽然大多数情况下畸变能理论是正确的,但仅当 $\tau_0/\sigma_0=0.577$ 时,才用扭转屈服试验(纯剪切)来验证。材料 τ_0/σ_0 不等于 0.577 时,虚曲线(不对应任何破坏理论,仅对应拉伸和扭转屈服试验)给出了可能存在的误差。如果用应变计和 $S = E\epsilon_x$ 替换应变花和更为复杂的计算方程,则应用其他方法来确定主应变方向,例如油漆裂缝或(更好是)脆性涂料。

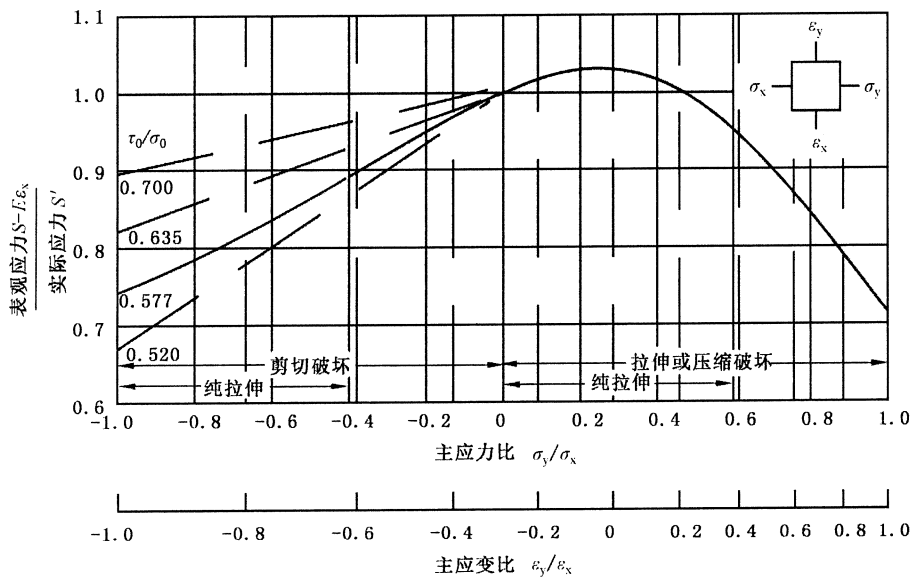


图 A.2 表观应力与实际应力之比对二向应力比

表 A.1 列出了用实测应变来计算应力的推荐值。

表 A.1 材料的弹性特性

材料	弹性模量(E) ^a (杨氏模量: 10^3 MPa)	刚性模量(G) (剪切模量: 10^3 MPa)	泊松比
钢材			
碳素及合金结构钢	206.7	79.2	0.285
铸钢	206.7	77.2	0.265
不锈钢	137.8/192.9	—	0.305
铝, 结构	72.3	27.6	0.333
镁, 结构	44.8	—	—
钛, 结构	89.6/110.2	—	—

^a 弹性模量通常被引用为一个范围,列出的数字是保守范围内的最高值。一些材料的弹性模量随化学性质、热处理或应力水平的不同而变化很大。在这种情况下列出范围,并针对每种情况的特定条件选择适当的数值。

附 录 B
(规范性)
压杆屈曲应力

B.1 通则

在推导实际设计中所应用的屈曲曲线或数据表时,应考虑构件中存在的一些不可避免的缺陷,例如材料的不均匀性、与假定几何形状的偏差(初始弯曲)、由于车间和装配工作中不可避免的缺陷而意外产生的轴向载荷偏心度。这些缺陷的每一种变化范围都很大,并在每种情况下都以特定的方式与其他缺陷结合在一起。为了弥补实际遇到的所有不确定性,宜使用适当的安全系数或载荷系数。

结构中每个受压构件都应作为独立的工况,按照其特定的加载与端部约束条件进行设计。

B.2 与残余应力相关的临界屈曲曲线

各类压杆屈曲曲线如图 B.2 所示。曲线 A、B、C 和 D 与残余应力有关,并与许用应力法一起使用。从图 B.2 中得到的临界屈曲强度应使用一个安全系数。表 B.1 列出了四种材料类型(A、B、C 和 D)中每一种的屈服强度 S_y 、比例极限 S_p 和残余应力 S_{RC} 。

这些曲线的形状由 3 个参数确定:弹性模量 E 、比例极限 S_p 和材料屈服强度 S_y 。轴向加载构件可能发生弹性或非弹性屈曲,取决于应力水平。当应力水平低于比例极限 S_p 时,轴向加载构件发生弹性屈曲。当应力水平高于比例极限 S_p 时,轴向加载构件发生非弹性屈曲。对于非弹性屈曲,相对屈曲应力(屈曲应力与屈服强度之比)是残余应力与屈服强度之比的函数,如公式(B.5)所示。

残余应力直接包含在屈曲公式中,见公式(B.1)~公式(B.4)。该公式中不包含不平直度等不确定因素。屈曲曲线实际上适用于“特别平直的材料”。因此,应将强度安全系数 1.6(见表 1)用于临界屈曲曲线。该强度安全系数克服了这些影响构件屈曲强度的不确定因素。

压杆弹性屈曲的适用公式($S_{cr} \leq S_p$):

$$S_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \dots\dots\dots (B.1)$$

或

$$X = \frac{1}{\lambda^2} \dots\dots\dots (B.2)$$

压杆非弹性屈曲的适用公式($S_{cr} \geq S_p$):

$$S_{cr} = S_y - \frac{S_p(S_y - S_p)}{\pi^2 E} (KL/r)^2 \dots\dots\dots (B.3)$$

$$S_p = S_y - S_{RC} \dots\dots\dots (B.4)$$

或

$$X = 1 - \left(1 - \frac{S_{RC}}{S_y}\right) \frac{S_{RC}}{S_y} \lambda^2 \dots\dots\dots (B.5)$$

如表 B.1 所示,假设 $S_{RC} = 103 \text{ MPa}$ 能代替下列钢材的特定残余应力数据:

- a) 轧制条件下的热加工型材;
- b) 经过应力消除热处理的调质型材;
- c) 经过应力消除热处理的冷拔型材;
- d) 经过应力消除热处理的装配焊接型材。

其他材料,假设 $S_{RC} = 0.5 \times S_y$ 能代替特定的残余应力数据。

表 B.1 残余应力假设

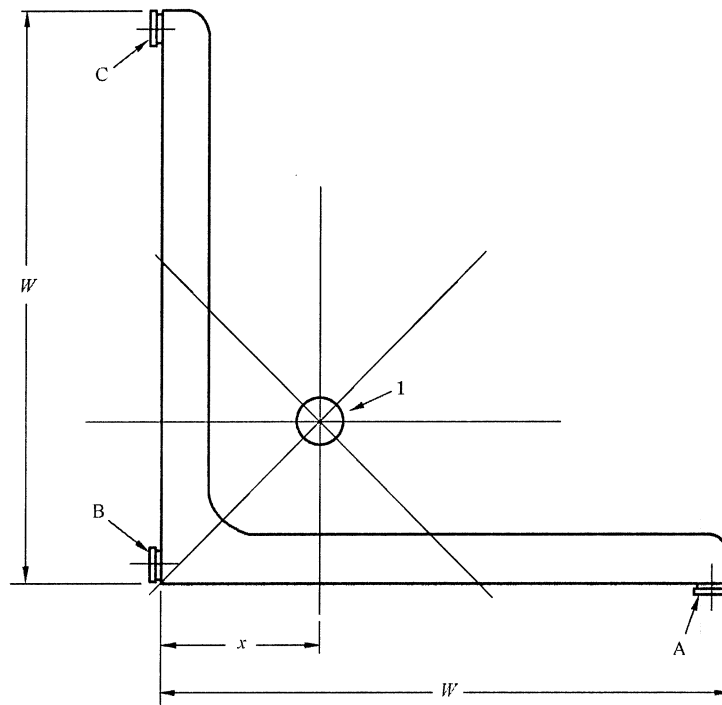
残余应力假设	曲线 ^a	S_y 屈服强度 MPa	S_p 比例极限 MPa
$S_{RC} = 103 \text{ MPa}$ (低残余应力)	A	690	586
	B	483	379
	C	345	241
	D	248	145
$S_{RC} = 0.5 S_y$ (高残余应力)	D	690	345
	D	483	241
	D	345	172
	D	248	124

^a 临界屈曲曲线见图 B.2。可能使用列表外的其他钢材,只要能证明其适用于预期的应用。

端部约束系数 K 能取如下的值。

- a) 弦杆, $K = 1.00$ 。
- b) 腹杆端部全截面(没有压扁)与管状弦杆连接, $K = 0.75$ 。
- c) 腹杆端部全截面(没有压扁)与角钢或 T 型弦杆连接, $K = 0.90$ 。
- d) 腹杆端部压扁后与弦杆连接, $K = 1.00$ 。

受压构件进行试验时,应变计宜位于中跨或预计的屈曲点处。当应变计放在合理的最大屈曲应力点时,观测到的最大读数能用于 S_m 代替应力平面的计算。当应变计位置相对于质心不对称时,试验值的平均值不能用于 S_m 。在这种情况下,应对试验值进行加权,以使 S_m 代表质心处的应力平面值。图 B.1 展示了对等边角钢截面试验值加权的方法。相对于质心不对称的受压构件(例如结构角)在不同平面中具有不同的回转半径值(r)。为了评估从该区域应变计中获得的数据, S_{cr} 的确定一定要基于所选区域中出现的 KL/r 的最大值。对于桁架弦杆,无论腹杆是交错放置还是同轴放置,都使用 KL/r 的最大值。



$$S_{ra} = \frac{x}{W}(S_a) + \frac{W-2x}{W}(S_b) + \frac{x}{W}(S_c)$$

标引说明:

- 1 —— 质心;
- A、B、C —— 应变仪。

注: 尽可能地将应变仪 A、B 和 C 放在角落处。

图 B.1 平均应力加权试验数据

B.3 与缺陷系数相关的临界屈曲曲线

临界屈曲应力能通过图 B.2 所示的屈曲曲线 a、b 和 c 获得。这 3 条屈曲曲线是对各种横截面的压杆进行试验的结果。

对于不同横截面的构件,宜从表 B.2 中选择合适的屈曲曲线。对于表 B.2 中没有涉及的横截面,能使用曲线 c。

公式(B.6)和公式(B.7)能用于代替曲线 a、b 和 c,并具有符合要求的精确度。

$$X = \frac{1}{B + (B^2 - \bar{\lambda}^2)^{0.5}} \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

$$B = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] \dots\dots\dots (B.7)$$

公式(B.7)中的系数 α 是引入的缺陷系数,用于说明初始不平直度、载荷偏心度和残余应力等缺陷。

λ_0 为相对长细比,低于该长细比时,不会因应变硬化效应而发生失稳。

对应适当的屈曲曲线的缺陷系数 α 和 λ_0 应如下获取:

- 曲线 a: $\alpha = 0.21, \lambda_0 = 0.2$;
- 曲线 b: $\alpha = 0.34, \lambda_0 = 0.2$;
- 曲线 c: $\alpha = 0.49, \lambda_0 = 0.2$ 。

其他的缺陷系数 α 和 λ_0 值能根据 ISO 10721-1 用于公式(B.7)。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/478115113035006032>