

钢 结 构 的 变 形 与 矫 正

张家旭 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1990年·北京

钢结构的变形与矫正

张家旭 编著

中国铁道出版社

1990年·北京

内 容 简 介

这是一本介绍钢结构变形基本知识及矫正技术的书。该书是在收集国内外有关资料和现场实践经验及矫形科研成果的基础上写成的。书中以桥梁、桥式和门式起重机、石油钻井平台、钢屋架等大型钢结构为例，从理论和实践相结合出发，系统地介绍了变形机理、变形类型、防止变形的措施、矫形设备、矫形技术及热矫形残余应力对承载能力的影响。

本书可做为从事钢结构设计、制造、使用及维修工作的工程技术人员和工人的参考用书，也可做为有关专业人员的学习教材。

钢结构的变形与矫正

张家旭 编著

*

中国铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

责任编辑 刘启山 封面设计 王毓平

中国铁道出版社发行 各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092mm 1/16 印张：6.5 字数：157千

1990年10月 第1版 第1次印刷

印数：1—2500册

ISBN 7-113-00835-6/TU·190 定价：3.25元

目 录

第一章 绪 论

第一节 变形概述.....	1
第二节 变形对结构的影响.....	3

第二章 对变形的要求

第一节 钢桥对变形的要求.....	5
一、钢材矫正的质量标准.....	5
二、杆件组装和矫正质量标准.....	5
三、成品外形质量标准.....	5
第二节 钢结构对变形的要求.....	10

第三章 常见的变形及其产生的原因

第一节 原材料的变形.....	16
第二节 冷加工和组装变形.....	16
一、剪冲引起的变形.....	16
二、刨削加工引起的变形.....	17
三、组装引起的变形.....	19
第三节 热过程与变形的关系.....	20
一、均匀受热与变形的关系.....	21
二、不均匀受热与变形的关系.....	23
第四节 热过程引起的变形类型.....	24
一、热过程引起的纵向变形.....	24
二、热过程引起的横向变形.....	29
三、热过程引起的弯曲变形.....	31
四、热过程引起的角变形.....	35
五、热过程引起的折皱变形和凹凸变形.....	37
六、热过程引起的扭曲变形和畸变变形.....	37
第五节 运装和使用过程中的变形.....	38

第四章 防止和减少变形的措施

第一节 控制变形的的设计措施.....	41
一、选择合理的结构形式.....	41
二、设计合理的焊缝.....	42
三、考虑基础对结构的影响.....	43
第二节 控制变形的焊接工艺措施.....	44

一、焊前准备工作	44
二、减少焊接线能量	44
三、选择合理的焊接顺序	44
四、预热法	47
五、刚性固定法	48
六、散热法	49
第三节 制造和使用过程中控制变形的措施	50
一、零件加工	50
二、反变形法	53
三、装焊顺序	57
四、组装	58
五、运装和使用	58
六、焊接变形在钢桥钢结构中的运用	59
第五章 变形的矫正	
第一节 机械矫正	61
一、机械矫正分类和矫正精度	61
二、板材的矫平	61
三、型材、管材及构件的矫正	66
第二节 手工矫正	67
一、凹凸变形	68
二、角变形	68
三、折皱变形	68
四、扭曲变形	68
五、弯曲变形	69
第三节 热加工矫正	69
一、热矫正用的气体	69
二、热矫正用的设备及工具	71
三、热矫正的火焰和温度控制	79
四、热矫正的方法	83
五、热矫正的步骤	88
六、热矫正变形的实例	90
第四节 对变形构件的其他处理方法	94
第五节 热矫正残余应力对钢结构承载能力的影响	94
参考文献	97

第一章 绪 论

钢结构是由钢板和型钢等钢材，用焊、铆、螺栓或胶等联接而成的结构。它的突出优点是承载能力大，架设便捷，所以被广泛用于大跨度结构、受动力荷载的结构、高耸结构、可拆卸结构及其它构筑物。

钢结构在充分满足功能要求的条件下必须做到安全可靠，经济合理，技术先进和造型尽量美观。

世界先进国家普遍应用近似概率极限状态法（即一次二阶矩法）设计钢结构，我国也在开始应用此法，它一般地规定有两种极限状态。第一种是结构或构件的承载能力极限状态达到此极限状态时，结构或构件达到了最大承载能力而发生破坏，或达到了不适于继续承受荷载的巨大变形。第二种极限状态是变形极限状态，也叫正常使用极限状态，达到此极限状态时，结构或构件虽仍保持承载能力，但在正常荷载作用下产生的变形使结构或构件已不能满足正常使用的要求，或不能满足耐久性的要求。

可见，钢结构的变形问题直接影响着它的功能。而由于各种原因，钢结构在加工制造、运输吊装和运营使用等过程中，因受外力或热过程的作用会产生各种形式的变形，这些变形对进一步加工制造的进行和正常使用都有直接影响和危害。随着焊接结构的广泛应用，变形问题越来越引起了人们的关注。如何防止或减少钢结构的变形以及对变形怎样进行有效的矫正，已经成为一个重要课题被提出来了。本书将以钢桥等大型钢结构为例阐述这方面的有关知识。

第一节 变形概述

在外力的作用下，固体改变形状，这是固体基本性质之一。固体有抵抗改变其质点间相互位置的能力。当外力作用停止时，固体能消除由外力所引起的变形，这一特性称之为弹性。当外力作用停止时，固体一般具有较大的永久变形的这一特性称之为塑性。弹性和塑性的性质的划分是有条件的，譬如：在同样的受力情况下，金属在正常温度可以是弹性的，但在高温（例如在赤热时是极明显的）下就是塑性的。

在外力作用除去后，能完全消失的变形称为弹性变形。消失不掉的变形则称为永久变形，残余变形或塑性变形。

对钢结构的变形进行矫正，就是使构件或整体结构产生塑性变形以消除原有塑性变形的影响，或使结构产生符合所要求的形状、尺寸的变化。在本书以后章节中所提到的结构变形一般均为塑性变形。

结构变形的形式是多种多样的，但就其实质来讲，可分为四种基本形式：

1. 拉压变形（图 1—1）；
2. 剪切变形（图 1—2）；
3. 扭转变形（图 1—3）；
4. 弯曲变形（图 1—4）。

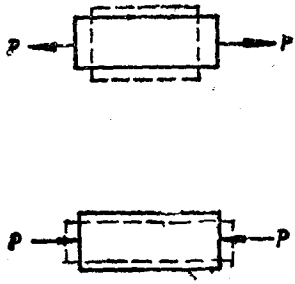


图 1-1 拉压变形

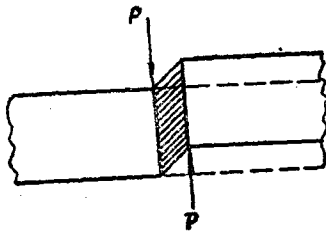


图 1-2 剪切变形

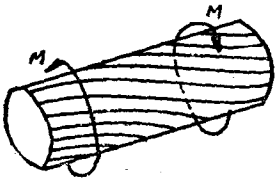


图 1-3 扭转变形

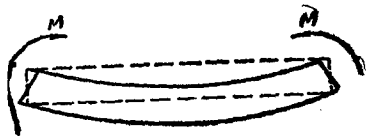


图 1-4 弯曲变形

对于钢桥钢结构的变形又常常概括为两大类型：结构的总体变形和局部变形。而这两种变形在同一结构中往往又是同时存在的。

总体变形就是整个结构的尺寸或形状发生变化。它包括以下的变形：整个结构的长度缩短和宽度变窄（见图 1-5）；结构发生向上向下或向两旁的弯曲（见图 1-6）；结构断面发生相对平移错位而畸变（见图 1-7）；结构断面发生相对扭转而翘曲（见图 1-8）。

局部变形是在结构的局部区域出现的形状变化。它包括以下的变形：凹凸变形（见图

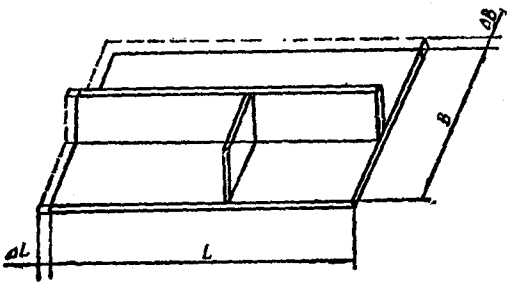


图 1-5 收缩变形

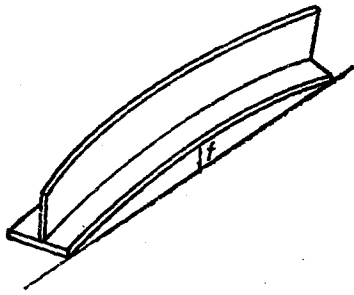


图 1-6 弯曲变形

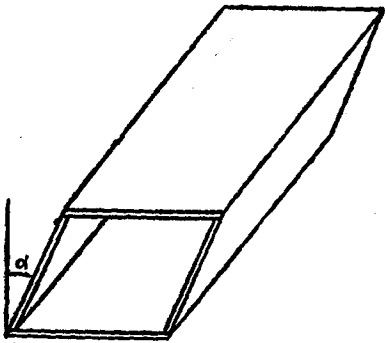


图 1-7 畸变变形

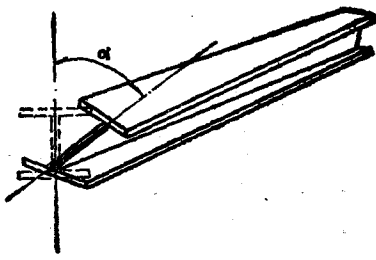


图 1-8 扭曲变形

1—9)；角变形(见图1—10)；折皱变形或称波浪形变形(见图1—11)。

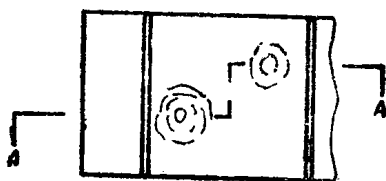


图1—9 凹凸变形

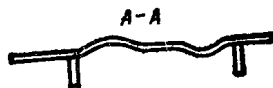


图1—10 角变形

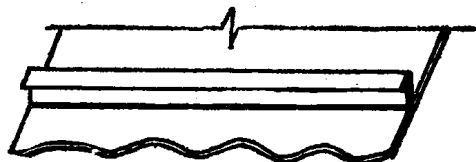


图1—11 折皱变形

结构单纯发生某一种形式的变形是很少的，往往同时发生由几种基本形式组合而成的复杂变形。例如，一个结构同时产生扭曲变形和弯曲变形，或同时产生收缩变形、角变形和折皱变形等，在一般情况下，我们可以把复杂变形分解为几种简单的基本变形，再根据具体情况选择适当的矫正方法和矫正顺序。

第二节 变形对结构的影响

人们对一座钢桥或一个钢结构所要求的，首先是适用和安全，其次是经济与美观。制造的构件必须合乎设计要求，一般来说应该是平整顺直、端端正正的，如果表面凹凸不平，构件弯曲扭斜，那么，立刻会给人以不安全的心理感觉，这样的结构不可能保证长期安全使用，在外形上也不会是美观的。

构件之间已广泛采用高强度螺栓连接，靠高强度螺栓的拉力将构件与拼接板压紧，借拼接板与构件接触面的摩擦力传递构件之间的内力。如果构件拼接部位发生凹凸变形、角变形或折皱变形，构件与拼接板就不能密贴，这将直接影响力的传递，变形量较大时则很难拼接甚至不能拼接。构件整体如果产生畸变变形或扭曲变形，拼接部位也一定产生相应的变形，例如箱形构件发生畸变变形时，原来的方形断面将变成平行四边形，发生扭曲变形时，则各断面发生转动，被拼接的两个构件的断面不一致就很难拼接，甚至因此而使整个构件报废。构件因焊接或其他热过程引起的收缩变形会使构件上已有螺栓孔的距离缩短，如果事先没有预留收缩量或预留量不合适，会造成整个结构组装不上。收缩变形引起的构件高度缩短和宽度变窄不仅给拼接带来困难，而且影响了外形尺寸，而有些外形尺寸的要求十分严格，所以对于收缩变形应给予充分注意，事先应采取必要的技术措施。料件加工产生的变形将给组装和焊接造成困难。

变形构件通常都会产生较大的残余应力。对于承受静力荷载的拉杆，残余应力对其承载能力并不影响，但残余应力会降低构件的刚度，同时也就降低了由稳定决定的压杆的承载力。残余应力对构件的疲劳强度常会产生不利影响，还可能引起钢结构的脆断。所以说，从

安全和经济角度来看,变形是很不利的因素。

构件变形引起的初始挠曲对结构的稳定也有较大影响。如工字梁,它的竖向抗弯刚度比其侧向大许多倍。当作用在梁上的竖向荷载小于某一数值时,梁处于稳定状态,当作用荷载超过某一数值时,则梁的受压部分(上翼缘和局部腹板)将朝侧向弯出,使整个梁在侧向发生较大的弯曲和扭转(见图1—12),于是梁因丧失总体稳定而失去继续承载的能力。倘若工字型钢梁的初始变形(未承受荷载时的变形)很小或基本没有变形,则梁所能承受的荷载就大;倘若梁的上翼缘或腹板的上部有较大的初始凹凸变形,或者梁的整体有向侧向较大的初始弯曲变形(旁弯),那么,梁所能承受的荷载将大大减小。另外,倘若梁的翼缘和腹板上部凹凸变形较大,则可能在局部更早地出现翘曲而丧失局部稳定,随后,梁即很快发生扭转而丧失总体稳定,使梁破坏。

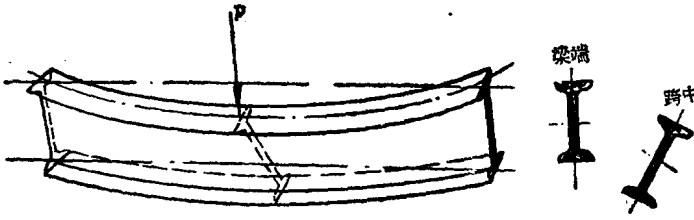


图1—12 丧失稳定的工字梁

变形对受压杆件的影响更为明显,在设计压杆时所取的容许临界应力是与压杆的初始变形有关的,不允许压杆有超出规定的变形值。

变形可使受力状态发生改变,进而导致结构的破坏。图1—13为厚度不同的两块钢板,搭接接头上的角焊缝引起薄板的弯曲,而厚板则基本保持平直,在荷载 P 的作用下,焊缝1所承受的力远大于焊缝2,使焊缝1超载,造成焊接接头的破坏,从而使整个构件破坏。

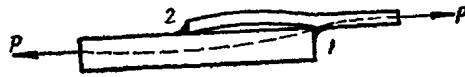


图1—13 变形对受力状态的影响

钢结构受到温度和自然条件改变时也会发生变形,若无相应措施将会造成严重后果。西北某铁路钢桥,为 $3 \times 64\text{m}$ 连续桁梁与跨度 64m 简支桁梁,因温度变化引起伸长,彼此顶撞,进而使支座螺栓剪断,幸亏发现及时,采取了紧急措施,将钢桥端部截去一段,增加了伸缩间隙,才避免一场重大事故。

构件的变形直接影响着结构的正常使用。例如,桥式、门式起重机的钢结构变形会引起车轮啃道、滑坡、打滑、电机烧损甚至掉道;桥梁变形会使车辆左右摇摆上下颠簸甚至倾覆;钢结构的变形会使其承载能力降低。

热过程引起的某些变形是很难矫正甚至无法矫正的,若非采取特殊措施,构件就不能使用。我国在一九八二年建成的汉江斜腿刚构薄壁箱形铁路钢梁桥在制造过程中就曾遇到斜腿法兰焊接变形这一疑难问题。

总之,变形对结构的影响和危害很大,所以在制造、吊装运输和运营使用过程中,都必须尽量避免和控制变形的发生,对已经发生的变形要采取适当方法予以有效的矫正。

第二章 对变形的要求

第一节 钢桥对变形的要求

钢桥不仅要承受很重的荷载，而且高速运行的车辆往往还会给钢桥较大的振动力、冲击力、摇摆力及制动力等，所以对钢桥的要求是严格的。《铁路钢桥制造规则》对板梁桥和桁梁桥的杆件外形尺寸公差作出了明确规定，还对钢材的矫正、杆件的组装和矫正等都提出了具体要求。在我国近几年发展起来的薄壁箱形钢梁桥，在制造时根据具体情况也都制定了比较严格的技术要求标准。

一、钢材矫正的质量标准

1. 钢板不平度，每米范围内不得超过1mm。
2. 钢板马刀形弯曲（见图2—1），长度为8m及8m以下钢板不得超过3mm；8m以上的不得超过4mm。

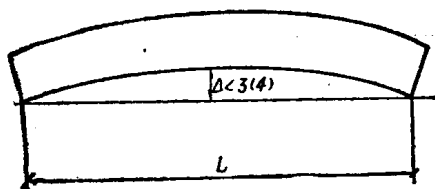


图 2—1 钢板的马刀形弯曲

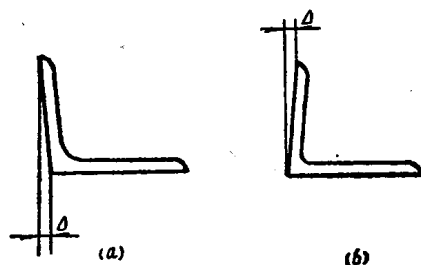


图 2—2 角钢的不垂直度

3. 型钢不直度，每米范围内不得超过0.5mm，并且不允许有锐弯。
4. 角钢不垂直度，采用无孔拼装卡具拼装的角钢不得超过 $^{+0.75}_{-0}$ mm（见图2—2(a)）；采用角式样板卡紧钻孔的角钢不得超过 $^{+0}_{-0.5}$ mm（见图2—2(b)）。
5. 角肢不平度，在联接部位不得超过0.3mm。
6. 工字钢、槽钢腹板有补强板时，工地孔范围内其不平度不得超过0.3mm，其余部分不得超过0.5mm。

二、杆件组装和矫正质量标准

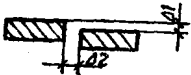
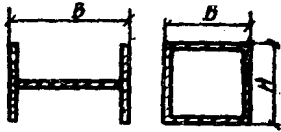
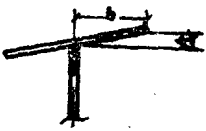
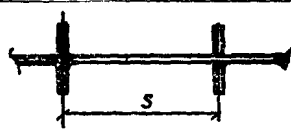
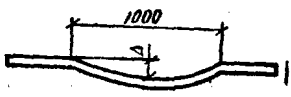
杆件组装质量标准见表2—1；杆件矫正质量标准见表2—2。

三、成品外形质量标准

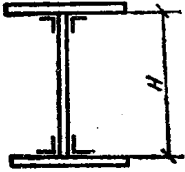
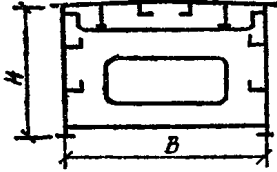
板梁、桁梁杆件及箱形梁外形公差分别见表2—3、表2—4和表2—5。

杆件组装公差 (mm)

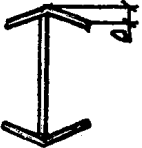
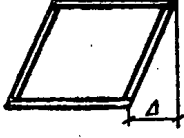
表 2—1

项 次	简 图	说 明	公 差				
1		两板对接高低差及间隙	$\Delta_1 < 0.5$ $\Delta_2 < 1$				
2		杆件的宽度和高度	<table><tr><td>B</td><td>$+1$ -0</td></tr><tr><td>H</td><td>有水平拼接板时 ± 1</td></tr></table>	B	$+1$ -0	H	有水平拼接板时 ± 1
B	$+1$ -0						
H	有水平拼接板时 ± 1						
3		竖板中线与水平板中线的偏移	$\Delta \leq 1$				
4		两竖板中线偏移	$\Delta \leq 2$				
5		拼装缝隙	$\Delta < 0.3$				
6		盖板的倾斜	$\Delta < 0.5$ $(< \frac{b}{400})$				
7		板梁、纵横梁及箱形梁加劲肋间距S (有横向连接关系者)	± 1				
8	同 上	无横向连接关系者	± 3				
9		纵横梁腹板局部不平度	$\Delta < 1$				
10	磨 光 顶 紧	缝隙	< 0.2				
11	板 层 密 贴	铆接杆件、拼接板等用 0.3 塞尺 (千分顶) 探入深度	< 20				
12		铆接断层盖板纵向相互错位	$\Delta < 1$				

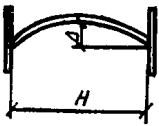
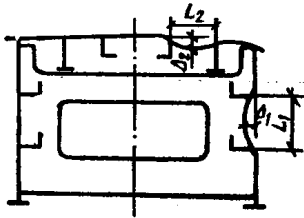
续上表

项 次	简 图	说 明	公 差	
13		铆接板梁高度 H	± 2	
14		箱形梁分层高 H 、宽 B 及横断面对角线 C	H	$\begin{matrix} +1 \\ -0 \end{matrix}$
			B	$\begin{matrix} +1 \\ -0 \end{matrix}$
			C	<1.5

杆件矫正公差 (mm) 表 2—2

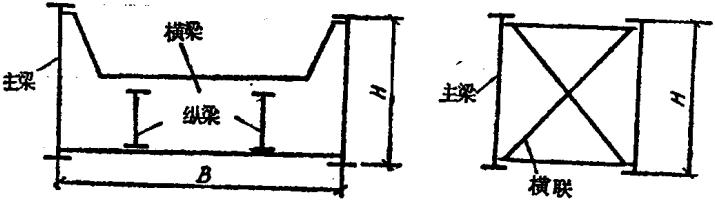
项 次	变 形 类 别	检 查 部 位	公 差
1		工地孔部分	$\Delta \leq 0.5$
		其余部分	$\Delta \leq 2$
2		工地孔部分	$\Delta \leq 0.5$
		其余部分	$\Delta \leq 2$
3		工地孔部分	$\Delta \leq 1$
		其余部分	$\Delta \leq 3$
4		工型、箱形杆件扭曲	≤ 3
5		工地孔部分	$\Delta \leq 0.7$
		其余部分	$\Delta \leq 1.5$
6		工地孔范围内	$\Delta \leq 0.3$
		其余部分	$\Delta \leq 1$

续上表

项 次	变 形 类 别	检 查 部 位	公 差
7		板梁腹板, 纵横梁腹板的平度	$\Delta < \frac{H}{500}$ 且 ≤ 5
8		箱形梁盖、腹板平度	$\Delta_1 < \frac{l_1}{500}$ $\Delta_2 \leq \frac{l_2}{500}$
9		纵梁、横梁上拱	$\Delta \leq 2$ 不许下弯
10		工型、箱形杆件全长内弯曲, 纵梁、横梁旁弯	$\Delta \leq 8$

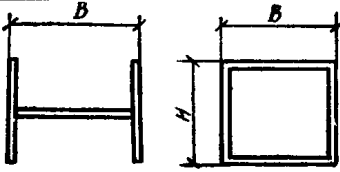
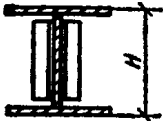
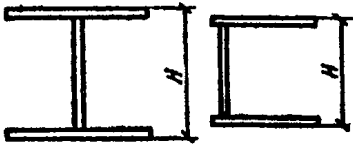
板梁外形尺寸公差 (mm)

表 2—3

板梁桥断面示意图				
		下承式板梁桥		
		上承式板梁桥		
项 次	名 称	说 明	公 差	附 注
1	梁高 H		± 2	$H > 2^m$ 时 ± 4
2	跨度 L	支座中心至中心	± 8	
3	全长 L_0	全桥长度	± 15	
4	主梁中心距 B	两片主梁中心之间的距离	± 8	
5	每片主梁旁弯 f	每片主梁中线与其两端中心连线在平面内的偏差	$< \frac{L}{2000}, > 8$	下承板梁纵梁旁弯 ≤ 2 , 横梁旁弯 ≤ 3 ,
6	拱度	每片主梁中线与其两端中心连线在立面内的偏差	上拱度 < 8 , 不许下弯	预设拱度时按设计尺寸 +10 -8
7	横联斜方		± 2.5	
8	腹板不平度	焊接时	$< \frac{H}{350}$ 且 ≤ 8	有纵向加劲肋时, H 为加劲肋间距离

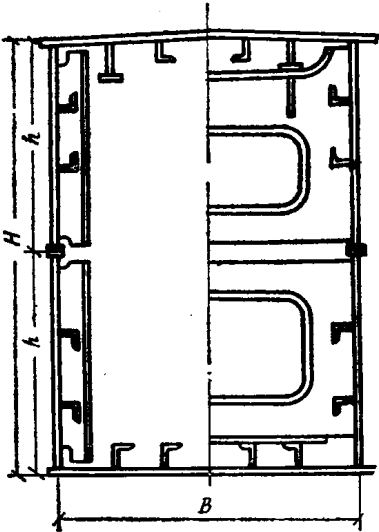
桁梁杆件外形尺寸公差 (mm)

表 2—4

项 次	名 称	简 图	公 差	
			宽(B)高(H)	长 度
1	主桁杆件		± 1	± 5
2	纵梁、横梁		± 1	连接角背至背 ± 1
3	联结系		± 1	± 5
4	隔板		-1 -2	± 5

箱形梁外形尺寸公差 (mm)

表 2—5

简 图	项次	类 别	说 明	公 差
	1	梁高	h 分层高	± 1
			H 全梁高	± 2
	2	腹板中心距 B	两片腹板中心之间距离	± 1
	3	梁宽 B_1	上下盖板宽	± 2
	4	长度	每段梁体轮廓长	$+3$ -5
	5	对角线	横断面两对角线之差	≤ 8
	6	竖向弯曲	上下拱度矢高	< 8
	7	旁弯	腹板中线与其两端中心连线在平面内的偏差	≤ 8
	8	扭曲	每层梁扭曲翘起的高度	≤ 3
	1	梁高 H	$H \leq 2000$	± 2
			$H > 2000$	± 4
	2	跨度 L	L 以米计	
	3	全长		± 15
	4	腹板中心距		± 3
	5	盖板宽		± 4

续上表

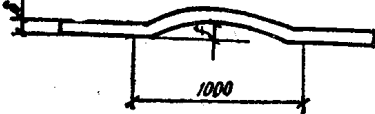
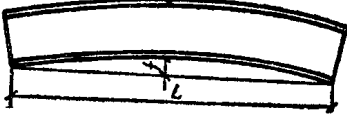
简图	项次	类别	说明	公差
	6	断面对角线差		< 4
	7	旁弯	L 以米计	
	8	拱度	$L < 4000$	$+1.0$ -5
	9	支点高低差		≤ 5
	10	盖腹板平面度	H 为加劲肋间距	$< \frac{H}{250}$ 且 < 8
	11	扭曲		每米不大于 1 且每段 ≤ 10

公路钢桥以前制造的数量较少，没有单独的制造技术规则，对变形的要求，都是参照铁路钢桥规则执行。一九八〇年十月开始执行的交通部颁发的《公路桥涵施工技术规范》增加了有关公路钢桥的内容，其中关于对变形控制的要求部分，如钢材矫正的质量标准，杆件组装的质量标准，杆件矫正质量标准及成品外形质量标准都与铁路钢桥的完全相同。

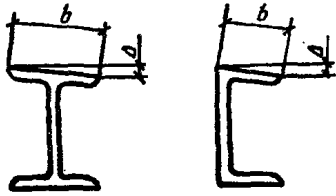
第二节 钢结构对变形的要求

用来制造钢结构的钢材，要经过矫正方可进行加工，其矫正的质量标准如表 2—6 中的规定。杆件组装质量标准见表 2—7。杆件矫正及成品外形质量标准见表 2—8，此标准也包括在表 2—7 中未列入的一些钢结构组装质量标准。

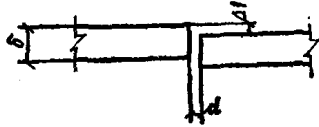
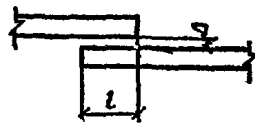
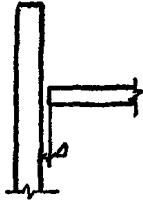
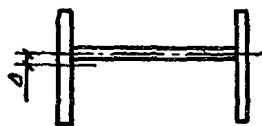
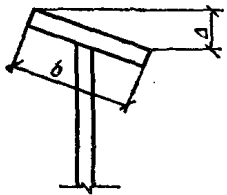
钢材矫正公差 (mm) 表 2—6

项次	类别	简图	公差
1	钢板扁钢局部挠曲矢高 f		在 1m 范围内 $\delta \geq 14$ 时 $f \leq 1$ ， $\delta < 14$ 时 $f \leq 1.5$
2	角钢、槽钢、工字钢的挠曲 f		$f \leq \frac{L}{1000}$ 但不大于 5
3	角钢肢的不垂直度 Δ		$\Delta \leq \frac{b}{100}$ 但双肢铆接联结时，角度 $> 90^\circ$

续上表

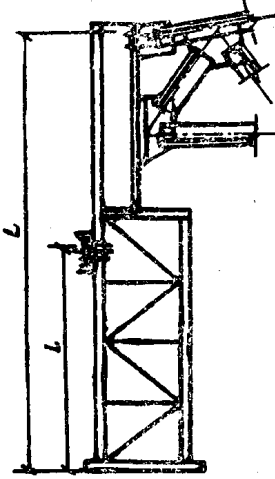
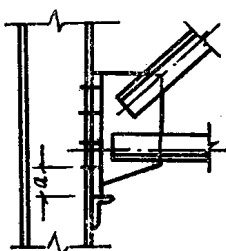
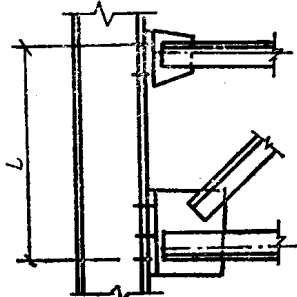
项次	类别	简图	公差
4	槽钢、工字钢的翼缘倾斜度 Δ		$\Delta < \frac{b}{80}$
5	弯曲加工另件局部不平度 Δ	用实长样板或弦长不小于1.5m的样板检查	$\Delta \leq 2$

杆件组装公差 (mm) 表 2-7

项次	类 别	简 图	公 差	
1	两板对接高低差 Δ_1 及间隙 δ 的偏差 Δ_2		Δ_1	$4 < \delta \leq 7$ 1
				$7 < \delta < 20$ 2
				$\delta \geq 20$ $\frac{\delta}{10}, > 8$
			Δ_2	± 1
2	两板搭接时的缝隙 Δ 和长度 l 的偏差 Δl		Δ	≤ 1
			Δl	± 5
3	拼装缝隙 Δ		$\Delta \leq 1$	
4	腹板中线与翼缘中心偏移 Δ		$\Delta \leq 8$	
5	翼缘倾斜度 Δ		$\Delta \leq \frac{b}{100}$	
6	板层密贴	铆接件用0.3塞尺探入深度	≤ 20	

结构制造允许偏差 (mm)

表 2—8

结构的种类	项次	偏差类别	示意图	允许偏差值	
一、柱和墙架柱	1	由柱脚底板的底面到柱与桁架、横梁、纵梁或其他构件相连接的安装孔的距离 L 的偏差		$L \leq 10\text{m}$	± 10
				$L > 10\text{m}$	± 15
	2	由柱脚底板的底面到支承吊车的牛腿支承面的距离 L 的偏差		$L \leq 10\text{m}$	± 5
				$L > 10\text{m}$	± 10
	3	由受力支托的支承面到第一个安装孔的距离 a 的偏差		± 1	
	4	柱上连接每一构件的有关安装孔任两组间距离 L 的偏差		± 2	