

变电构架 节点设计



曹志民 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是在河南省电力公司 2010 年度科研课题——“1000kV 构架结构选型及节点研究”相关成果的基础上编写而成的。全书内容共分 7 章。第 1 章对连接节点设计研究的目的和意义进行了综述,对本书的主要内容作了介绍;第 2、3 章进行了节点板受弯承载力试验研究及有限元分析;第 4、5 章进行了 I 型、T 型、槽型、U 型连接节点承载力试验研究及有限元分析;第 6 章进行了 I 型、T 型、槽型、U 型连接节点轴心受压构件计算长度系数有限元分析;第 7 章给出了相关建议及结论。

本书可供输变电构架工程设计人员及研究人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

变电构架节点设计/曹志民主编. —北京:中国电力出版社, 2013.1

ISBN 978-7-5123-3891-3

I. ①变… II. ①曹… III. ①变电架构—节点—设计
IV. ①TM642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 315327 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.75 印张 225 千字

印数 0001—3000 册 定价 39.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

国务院制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020)》把“超大规模输配电和电网安全保障”列为“重点领域及其优先主题”之一,重点研究开发大容量、远距离直流输电技术和特高压交流输电技术与装备,间歇式电源并网及输配技术,电能质量监测与控制技术,大规模互联电网的安全保障技术,西电东输工程中的重大关键技术,电网调度自动化技术,高效配电和供电管理信息技术和系统。

在我国,特高压是指交流 1000kV 及以上和直流 ± 800 kV 及以上的电压等级,特高压输电技术具有远距离、大容量、低损耗、节约土地占用和经济性等特点。根据已有工程可知,无论是在形式上还是构造上,1000kV 变电构架弦、腹杆的连接节点相对于较低电压等级的构架节点都有较大的不同。《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)及相关节点设计手册中关于节点的计算有很多方面在 1000kV 变电构架的典型节点中不再适用,甚至对此类空间节点的构造也没有规定。

随着经济的发展,社会对用电的要求也越来越高,建设特高压电网已经成为我国电力发展的必然趋势。因而,如何设计 1000kV 变电构架中的节点便成了一个急需解决的重要问题。为使连接节点具有足够的强度和刚度,设计时应根据连接节点的位置及所受荷载,合理地确定节点的形式和构造。通常情况下,节点板质量占整个 1000kV 变电构架总质量的 20%~25%,实际中通过对连接节点进行深入的试验研究和系统分析,总结其规律,并将试验结果和数值计算结果与相关的计算公式进行对比,推荐相应计算公式用于指导节点的设计。

本书是在河南省电力公司 2010 年度科研课题——“1000kV 构架结构选型及节点研究”相关成果的基础上,由河南省电力勘测设计院曹志民等编写而成的。全书共分 7 章,主要介绍了变电构架连接节点设计研究的目的和意义、节点板受弯承载力试验研究及有限元分析、连接节点承载力试验研究及有限元分析、连接节点轴心受压构件计算长度系数有限元分析,以及相关建议及结论。

本书第 1、7 章由曹志民教授级高工编写,第 2、3 章由彭奕亮高工及

杨俊芬副教授编写，第 4、5 章由杨光博士及李洪波高工编写，第 6 章由韩选民工程师及魏霞冰工程师编写。杨光博士进行了全书文字校核和修改工作。全书由曹志民主编，彭奕亮统稿。

感谢河南省电力勘测设计院土建室李金胜主任、李国田主任在本书编写过程中给予的各种支持和指导。本书参考并应用了一些公开发表的文献和资料，谨向这些作者表示深深的谢意。

限于编者水平，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2012 年 12 月

目 录

前言

❶ 连接节点设计研究概述	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 研究内容	1
❷ 节点板受弯承载力试验研究	3
2.1 试验设计	3
2.2 材性试验	14
2.3 节点板受弯承载力试验现象及试验结果	16
2.4 试验结果分析	36
2.5 本章小结	56
❸ 节点板受弯承载力有限元分析	57
3.1 有限元模型的建立	57
3.2 有限元模型的验证	59
3.3 主管轴压比对节点板受弯承载力的影响	68
3.4 主管径厚比对节点板受弯承载力的影响	73
3.5 加劲环板宽厚比对节点板受弯承载力的影响	77
3.6 本章小结	86
❹ I型、T型、槽型、U型连接节点承载力试验研究	87
4.1 试验设计	89
4.2 材性试验	93
4.3 连接节点承载力试验现象及试验结果	94
4.4 试验结果分析	109
4.5 本章小结	126

⑤	I 型、T 型、槽型、U 型连接节点承载力有限元分析	128
5.1	有限元模型的建立	128
5.2	有限元模型的验证	135
5.3	有限元模型的设计	144
5.4	连接节点形式对节点承载力的影响	150
5.5	螺栓预拉力变化对节点承载力的影响	154
5.6	节点板特征受压区高厚比对节点承载力的影响	157
5.7	插板厚度对节点承载力的影响	160
5.8	T 型插板节点加劲肋高厚比对节点承载力的影响	163
5.9	槽型插板节点加劲肋高厚比对节点承载力的影响	164
5.10	改进的 U 槽型连接节点承载力分析	165
5.11	本章小结	167
⑥	I 型、T 型、槽型、U 型连接节点轴心受压构件计算长度系数 有限元分析	168
6.1	计算长度系数的意义及计算方法	168
6.2	有限元模型的建立	169
6.3	有限元标准模型	169
6.4	有限元模型的参数变化设计	173
6.5	计算结果分析	175
6.6	本章小结	183
⑦	设计建议及结论	184
7.1	节点板受弯承载力计算方法对比	184
7.2	设计建议	194
7.3	技术经济分析	195
7.4	本章小结	197

连接节点设计研究概述

根据已有工程可知,无论是在形式上还是构造上,1000kV 变电构架弦、腹杆的连接节点相对于较低电压等级的构架节点均有较大的不同。《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)及相关节点设计手册中关于节点的计算有很多方面在 1000kV 变电构架的典型节点中不再适用,甚至对此类空间节点的构造也没有规定。在实际设计中,为了满足这种节点的强度和刚度,往往是凭经验通过加厚节点板、加设较密的加劲肋板等方式来实现,这在一定程度上造成了钢材的浪费。

1.1 研究目的和意义

随着经济的发展,社会对用电的要求也越来越高,在这种形势下,特高压势必会在输变电工程中得到快速的发展。因而,如何设计 1000kV 变电构架中的节点便成了一个急需解决的重要问题。为使连接节点具有足够的强度和刚度,设计时应根据连接节点的位置及所受荷载,合理地确定节点的形式和构造。

通常情况下,节点板质量占整个 1000kV 变电构架总质量的 20%~25%,实际中通过对连接节点进行深入的试验研究和系统分析,总结其规律,并将试验结果和数值计算结果与相关的计算公式进行对比,推荐相应计算公式用于指导节点的设计。

1.2 研究内容

本研究从以下两个方向展开:一是对变电构架中节点板受弯承载力进行试

验研究和数值分析，以期得到影响节点板受弯承载力的因素；二是对 I 型、T 型、槽型、U 型四种不同形式的插板连接节点（以下简称“插板连接节点”）的承载力进行试验研究和数值分析，以期得到影响节点承载力的因素及节点的端部约束情况等。

研究内容主要包含以下五个部分。

1.2.1 节点板受弯承载力试验研究

本部分共设计 9 个试件来进行足尺模型试验，研究了节点板厚度和加劲环形式对节点板受弯承载力的影响，并分析了不同受力状态下主管管壁上的应变变化情况。

1.2.2 节点板受弯承载力有限元分析

本部分采用 ANSYS 有限元分析软件，首先根据节点板受弯承载力的试验结果对有限元模型进行验证，其次对影响节点板受弯承载力的主要因素进行了变参数分析，研究了主管轴压比、主管径厚比、加劲环板的宽厚比等因素对节点受弯承载力的影响。

1.2.3 连接节点承载力试验研究

本部分共设计 16 个插板连接节点进行足尺模型试验，通过对试件施加轴向压力，得出各试件的极限承载力，并分析了节点形式、螺栓预拉力大小和节点板特征受压区高厚比对节点承载力的影响。

1.2.4 连接节点承载力有限元分析

本部分采用 ABAQUS 有限元分析软件，首先根据插板连接节点承载力的试验结果对有限元模型进行验证，其次分析了连接节点形式、螺栓预拉力、节点板特征受压区高厚比、插板厚度、加劲肋高厚比等因素对插板连接节点承载力的影响，最后对插板连接节点的形式进行了改进。

1.2.5 连接节点轴心受压构件计算长度系数有限元分析

本部分采用 ABAQUS 有限元分析软件，对 I 型、T 型、槽型、U 型连接节点的轴心受压构件计算长度系数进行分析，主要分析了连接节点形式、螺栓预拉力、节点板特征受压区高厚比、插板厚度、加劲肋高厚比等对插板连接节点轴心受压构件计算长度系数的影响。

节点板受弯承载力试验研究

本报告中的节点板受弯承载力是指节点板与主管相交处局部变形达到规范限值时，主管管壁的弯矩值。

本节共设计 9 个试件来进行足尺模型试验，研究了节点板厚度和加劲环形式的不同对节点板受弯承载力的影响，并分析了不同受力状态下主管管壁上的应变分布变化。

2.1 试验设计

2.1.1 试件设计

参照晋东南变电站 1000kV 构架管—板节点，共制作 9 个标准试件，主管规格为 $\phi 480 \times 12$ ，节点板长度（与主管相焊接部位的长度）为 400mm。各构件之间均采用焊接连接，材质均为 Q345B。其中，1/4 加劲环管—板节点试件见图 2-1，其等效受力模型见图 2-2，试件规格见表 2-1。

结合实验室的加载条件，绘制试件加工图。

表 2-1 管—板节点试件规格

节点板受弯 试件编号	加劲环形式	加劲环- $t_s \times R$ (mm)	主节点板厚度 t (mm)	次节点板尺寸 (厚 $\times$ 宽 $\times$ 长, mm)
1	1/2	1/2 环- 5×60	20	12 $\times$ 200 $\times$ 400 (2 个)
2		1/2 环- 5×60	25	12 $\times$ 200 $\times$ 400 (2 个)
3		1/2 环- 5×60	28	12 $\times$ 200 $\times$ 400 (2 个)
4	1/4	1/4 环- 5×60	20	12 $\times$ 200 $\times$ 400 (1 个)

续表

节点板受弯 试件编号	加劲环形式	加劲环- $t_r \times R$ (mm)	主节点板厚度 t (mm)	次节点板尺寸 (厚 $\times$ 宽 $\times$ 长, mm)
5	1/4	1/4 环-5 $\times$ 60	25	12 $\times$ 200 $\times$ 400 (1 个)
6		1/4 环-5 $\times$ 60	28	12 $\times$ 200 $\times$ 400 (1 个)
7	无	无	20	无
8		无	25	无
9		无	28	无

注 t_r 为加劲环厚度, R 为加劲环宽度。

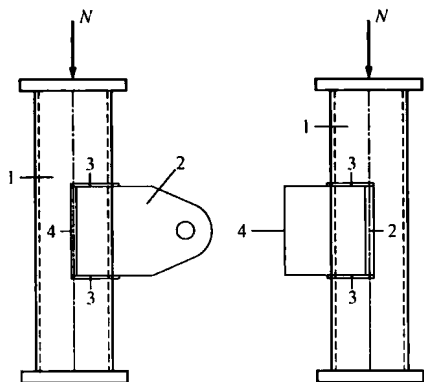


图 2-1 1/4 加劲环管—板节点试件示意

1—主管; 2—节点板; 3—加劲环板; 4—次节点板

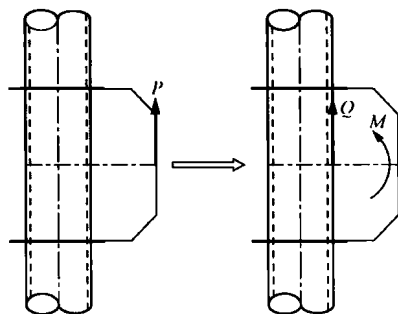


图 2-2 节点板等效受力模型

2.1.2 试验方案

对 9 个试件分别加载至破坏, 取得相关的试验数据。对比试件 1、4、7, 试件 2、5、8, 试件 3、6、9 三组数据来获得加劲环形式对受弯承载力的影响; 对比试件 1、2、3, 试件 4、5、6, 试件 7、8、9 三组数据来获得节点板厚度对受弯承载力的影响, 并分析试件在不同受力状态阶段的管上应力分布规律。

节点板受弯承载力试验方案流程见图 2-3。

2.1.3 试验装置

试件柱脚与钢底座刚性连接, 试验装置布置见图 2-4。

主管轴压力通过液压千斤顶施加于加载头上, 千斤顶与加载头的连接见图 2-5。为了保证竖向荷载能在试验过程中保持作用在加载头的中心, 在千斤顶的上方设置了滚轮装置。两个千斤顶的量程均为 100t, 并联于同一套稳压装置的

油路中，以保证两个千斤顶上施加的荷载大小相同。

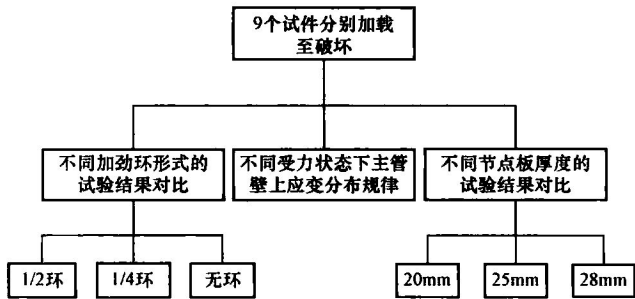


图 2-3 节点板受弯承载力试验方案流程

节点板处向上的竖向力是通过千斤顶施加荷载于连接在节点板上的加载头上的，此千斤顶量程为 50t，见图 2-6。

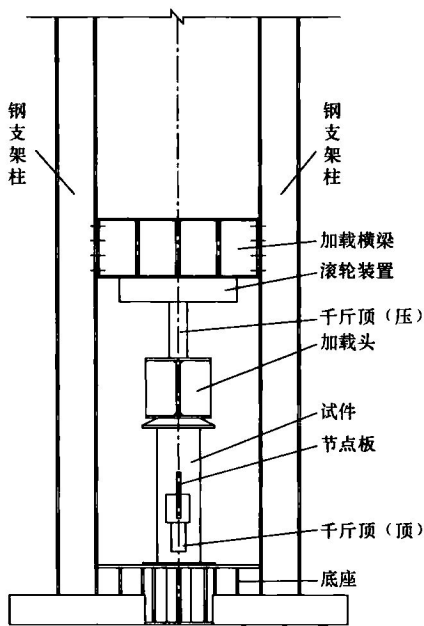


图 2-4 试验装置布置

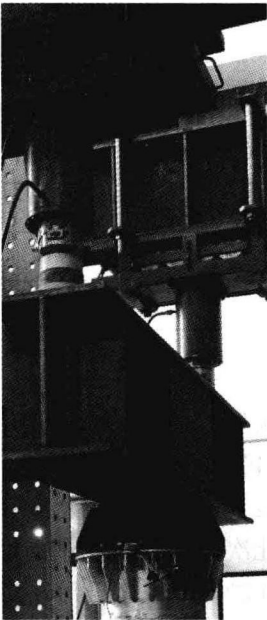


图 2-5 千斤顶与加载头的连接

2.1.4 加载制度

2.1.4.1 预加载

在每个试件正式加载之前，要进行预加载。预加载的目的在于：

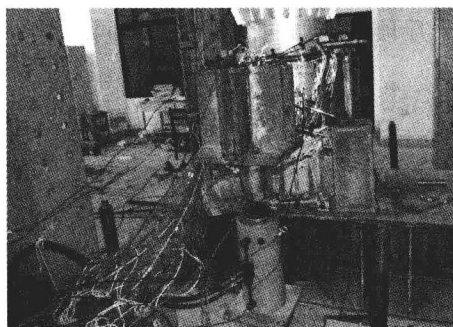


图 2-6 千斤顶与节点板的连接

(1) 使试件各部分接触良好, 进入正常工作状态, 荷载与变形关系趋于稳定。

(2) 检验全部试验装置的可靠性。

(3) 检验全部观测仪表工作正常与否。

单独施加的主管最大轴力为 $N=1800\text{kN}$ 。千斤顶施加轴向压力所采用的预加载方案见表 2-2。

表 2-2

千斤顶施加轴向压力所采用的预加载方案

加 载 控 制			卸 载 控 制		
加载步	荷载大小 (kN)	停歇控制	卸载步	荷载大小 (kN)	停歇控制
1	0		1	900 (50%)	
2	900 (50%)	停歇 2min	2	0	停歇 2min

预加载完成后, 应进行以下工作:

(1) 检查各部分的连接情况 (位移计的支座等)。

(2) 检查各仪器设备的工作状况 (位移计是否正常读数等)。

此次加载采用杠杆放大式稳压试验装置, 系统放大倍数为 147; 采用千斤顶施加轴向荷载, 千斤顶的总量程为 200t。

2.1.4.2 正式加载

(1) 单独施加主管轴力到 $N=1800\text{kN}$, 停歇 10min, 观察稳压装置杠杆是否下降。试验过程中要保持这个高度不变。

(2) 逐步施加节点板处的集中荷载, 直至试件破坏, 利用传感器来控制荷载的大小, 加载步骤见表 2-3。

表 2-3

节点板集中荷载加载步

加载步	荷载大小 (kN)	加载步	荷载大小 (kN)
1	50	22	390
2	80	23	400
3	100	24	410
4	120	25	420
5	140	26	430
6	160	27	440
7	180	28	450
8	200	29	460
9	220	30	470
10	240	31	480
11	260	32	490
12	280	33	500
13	300	34	510
14	310	35	520
15	320	36	530
16	330	37	540
17	340	38	550
18	350	39	560
19	360	40	570
20	370	加至破坏	
21	380		

2.1.5 观测方案

2.1.5.1 荷载观测

(1) 主管轴向荷载采用杠杆放大式稳压装置(见图 2-7)加载,单独施加主管轴力到 $N=1800\text{kN}$,停歇 10min,观察稳压装置的杠杆是否下降。试验过程中要保持这个高度不变。

(2) 节点板处的集中荷载,利用传感器(见图 2-8)来控制荷载的大小,由数据采集人员实时监测。

2.1.5.2 位移观测

试验中采用位移计记录试件各测点位置的位移,位移计布置见图 2-9~图 2-11(1/2 环、1/4 环、无环)。其中,位移计 1 和 2 分别检测节点板与主

管交汇处上、下两点的位移，位移计 3 检测节点板在加载过程中是否扭转，位移计 4 和 5 分别检测试件顶部和底部的位移，位移计 6~9 分别检测相应侧次节点板与主管交汇处上下点的位移。



图 2-7 杠杆放大式稳压装置



图 2-8 传感器

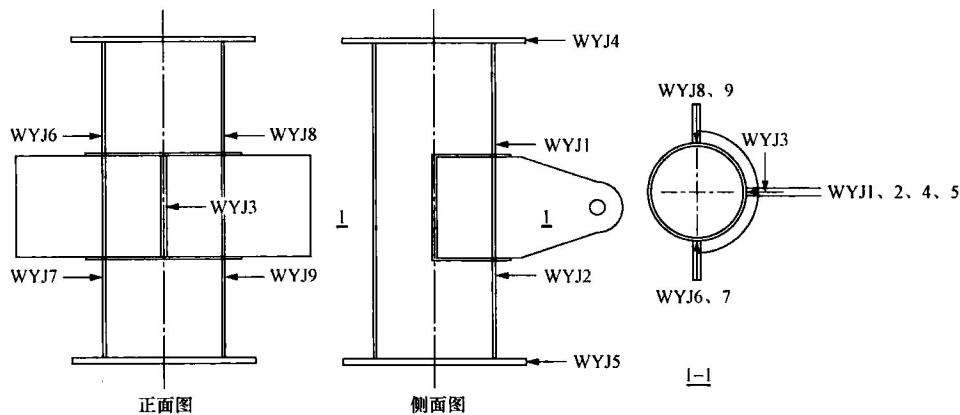


图 2-9 节点板受弯试件（1/2 环）位移计布置图

2.1.5.3 应力观测

采用电阻应变片对主管、加劲环板和节点板的应变发展情况进行量测，1/2 加劲环试件、1/4 加劲环试件和无环试件的应变片布置见图 2-12~图 2-14（图中数字为应变片编号）。其中，主管和加劲环板上间隔 30°布置一

个应变花，对称分布在节点两侧各 90° 的范围内；节点板上布置应变片。

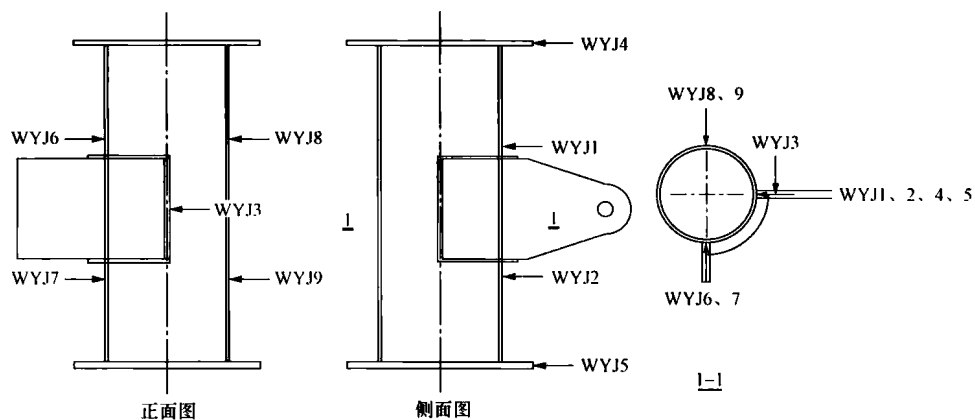


图 2-10 节点板受弯试件 (1/4 环) 位移计布置图

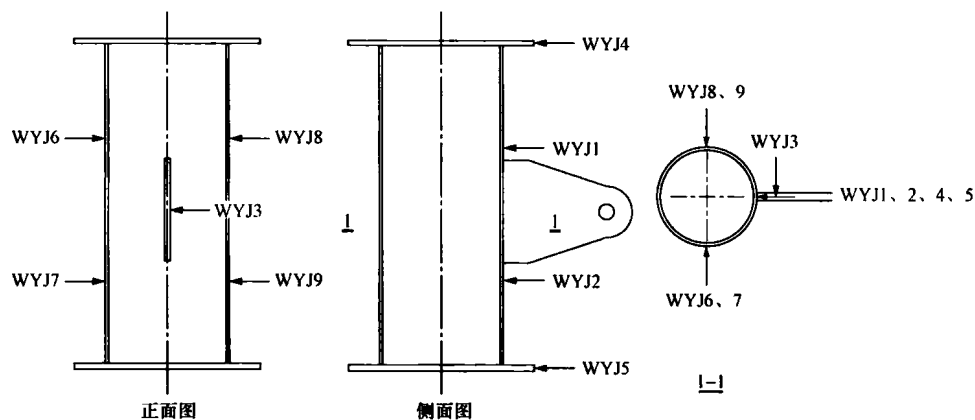


图 2-11 节点板受弯试件 (无环) 位移计布置图

2.1.6 节点极限承载力的判断准则

节点极限承载力判断准则可以分为极限荷载准则和极限变形准则两类。

- (1) 极限荷载准则：节点破坏、断裂。
- (2) 极限变形准则：变形过大。

目前国际上公认的准则为极限变形准则。此准则认为，使主管管壁产生过度的局部变形时，管节点的承载力为其最大承载力。

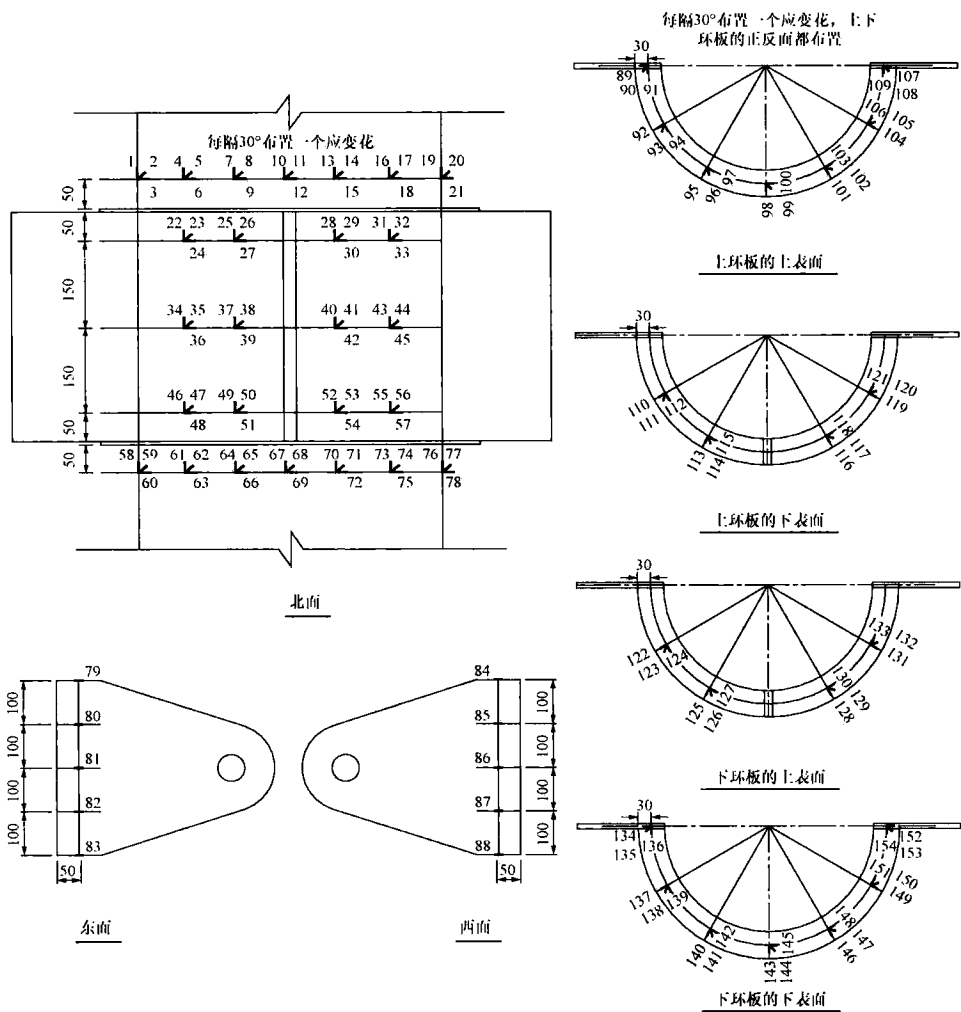


图 2-12 试件 (1/2 环) 应变片布置图

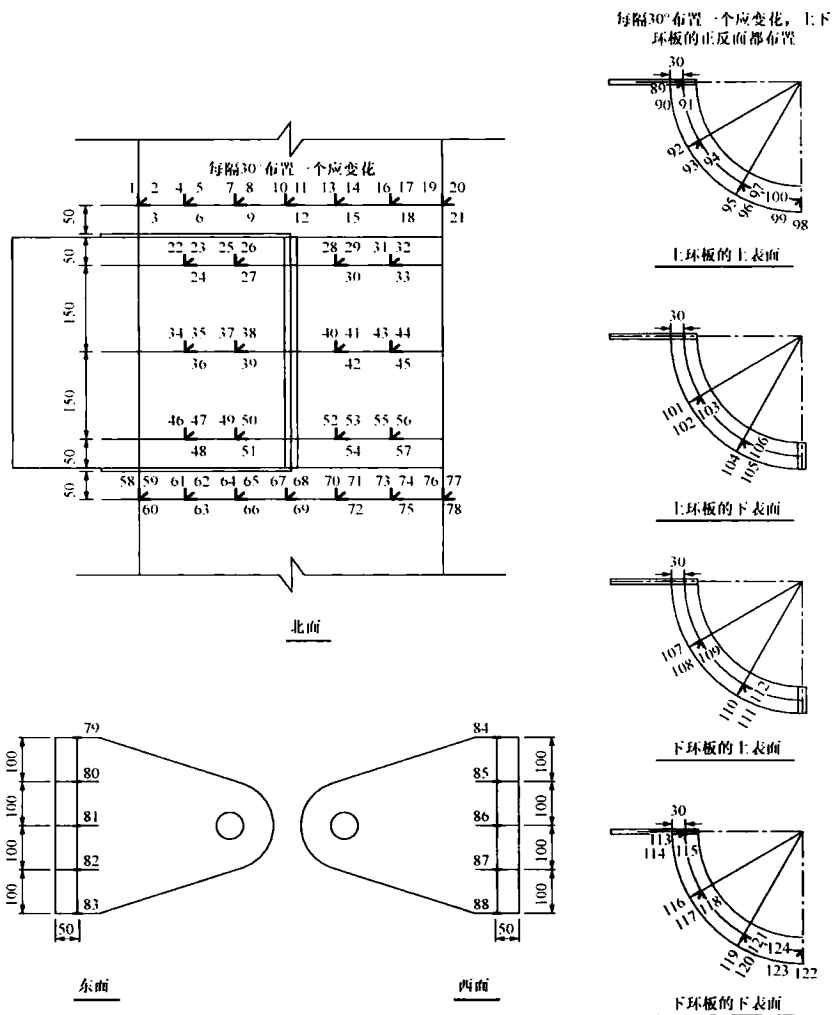


图 2-13 试件 (1/4 环) 应变片布置图