



T/CECS ×××—202x

中国工程建设标准化协会标准

大跨度钢结构监测技术规程

Technical specification for long-span steel structural monitoring

(征求意见稿)

出版社

中国工程建设标准化协会标准

大跨度钢结构监测技术规程

Technical specification for long-span steel structural monitoring

(征求意见稿)

T/CECS ×××—202x

主编单位：浙江大学

批准部门：中国工程建设标准化协会

施行日期：202x年××月××日

出版社

202x 杭 州

前 言

根据中国工程建设标准化协会(建标协字[2019]012 号)的要求,标准编制组经广泛调查研究,认真总结工程实践经验,参考有关国内外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,制订本标准。

本标准共分 10 章和 1 个附录,主要技术内容包括:总则、术语与符号、基本规定、网格结构、索杆结构、开合屋盖结构、监测设备、数据采集与分析、预警与评估以及监测系统施工、安装与验收。

本标准由中国工程建设标准化协会建筑产业化分会归口管理,由浙江大学负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送标准主编单位浙江大学(地址:浙江省杭州市西湖区余杭塘路 866 号浙江大学安中大楼 A 座,邮政编码:310058),以便今后修订时参考。

主编单位:

参编单位:

主要起草人:

主要审查人:

目次

1	总 则	1
2	术语与符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	4
3	基本规定	5
3.1	一般规定	5
3.2	监测等级	8
3.3	监测系统	11
3.4	测点布置	12
4	网格结构	14
4.1	网架结构	14
4.2	网壳结构	17
4.3	桁架结构	21
5	索杆结构	25
5.1	索网结构	25
5.2	索桁结构	27
5.3	张弦结构	29
5.4	索穹顶结构	33
6	开合屋盖结构	35
7	监测设备	37
7.1	一般规定	37

7.2	位移监测	39
7.3	内力监测	40
7.4	振动监测	43
7.5	环境及环境作用监测	45
8	数据采集与分析	50
8.1	一般规定	50
8.2	数据采集	51
8.3	数据处理	52
8.4	数据分析	55
9	预警与评估	57
9.1	一般规定	57
9.2	预警	59
9.3	评估	62
10	监测系统施工、安装与验收	67
10.1	一般规定	67
10.2	监测系统施工	68
10.3	监测施工制图	69
10.4	监测系统安装	72
10.5	监测系统验收	74
附录 A	典型大跨度钢结构监测部位及测点布置参考	76
	本规程用词说明	93
	引用标准名录	94

附：条文说明	95
--------------	----

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols.....	2
2.1	Terms.....	2
2.2	Symbols.....	4
3	Basic Requirements.....	5
3.1	General Requirements.....	5
3.2	Monitoring Level	8
3.3	Monitoring System.....	11
3.4	Arrangement for Monitoring Points.....	12
4	Grid Structure	14
4.1	Space Truss Structure.....	14
4.2	Latticed Shell Structure.....	17
4.3	Truss Structure	21
5	Cable-strut tensile Structure.....	25
5.1	Cable-net Structure.....	25
5.2	Cable-truss Structure.....	27
5.3	String Structure	29
5.4	Cable-dome Structure.....	33
6	Retractable Roof Structure	35
7	Monitoring Equipment	37
7.1	General Requirements	37

7.2	Displacement Monitoring.....	39	
7.3	Internal Force Monitoring.....	40	
7.4	Vibration Monitoring.....	43	
7.5	Environment and Environmental Action Monitoring.....	45	
8	Data Collection and Analysis.....	50	
8.1	General Requirements.....	50	
8.2	Data Collection.....	51	
8.3	Data Processing.....	52	
8.4	Data Analysis.....	55	
9	Early Warning and Evaluation.....	57	
9.1	General Requirements.....	57	
9.2	Early Warning.....	59	
9.3	Evaluation.....	62	
10	Construction, Installation and Acceptance of Monitoring System.....	67	
10.1	General Requirements.....	67	
10.2	Construction of Monitoring System.....	68	
10.3	Construction Drawing of Monitoring.....	69	
10.4	Installation of Monitoring System.....	72	
10.5	Acceptance of Monitoring System.....	74	
Appendix A References of Monitoring Positions and Point			
Arrangements for Common Long-span Steel Structures.....			76
Explanation of Wording in This Specification.....			93

List of Quoted Standards.....	94
Addition: Explanation of Provisions	95

1 总 则

1.0.1 为提高大跨度钢结构在工程建设与服役过程中的监测技术与分析评估水平，做到技术先进、数据可靠、经济合理，保障生命财产安全，依据有关法律、法规，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于网格结构、索杆结构以及开合屋盖结构等大跨度钢结构在施工、运营与改造过程中的监测，其他具有类似体系的大跨度钢结构可参照执行。

[条文说明] 1.0.2 本规程充分考虑现有相关规范的条文规定，将需要监测的大跨度钢结构分为网格结构、索杆结构以及开合屋盖结构。其中，网格结构包括网架结构、网壳结构与桁架结构，索杆结构包括索网结构、索桁结构、张弦结构与索穹顶结构。

1.0.3 大跨度钢结构工程的监测除应符合本规程外，尚应遵循国家现行有关规范的规定。

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 大跨度钢结构 long-span steel structure

一般指跨度大于或等于 60m 的钢结构。

2.1.2 结构健康监测 structural health monitoring

利用传感技术获取结构荷载与响应的关键信息,通过现场测量数据分析和挖掘获得结构性能表征,进而评估当前结构健康状态与服役能力的一般过程。

2.1.3 施工监测 construction monitoring

施工阶段进行的结构健康监测。

2.1.4 运营监测 post construction monitoring

运营阶段进行的结构健康监测。

2.1.5 监测方案 monitoring scheme

指导施工监测 / 运营监测的重要技术文件。

2.1.6 结构健康监测系统 structural health monitoring system

为实现一定的结构健康监测目的,对监测硬件、软件、网络的系统集成。

2.1.7 监测等级 monitoring level

根据被监测对象的重要性与复杂性,对监测工作进行划分的等级。

2.1.8 监测项目 monitoring item

包括位移监测、内力监测、振动监测、环境及环境作用监测。

2.1.9 监测频率 monitoring frequency

单位时间内对被监测对象进行数据采集的次数。

2.1.10 预警阈值 early warning threshold

为保证结构安全、周边环境安全或满足规定要求，对表征监测对象可能发生危险或存在安全隐患的监测量所设定的警戒值。

2.1.11 监测设备 monitoring equipment

监测系统中，传感器、采集仪等硬件的统称。

2.1.12 传感器 sensor

能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。

2.1.13 测点 measurement point

被监测对象中构件、节点或环境中布置的测量点。

2.1.14 构件监测率 member monitoring ratio

对于应力应变监测，被监测对象中某类构件被监测数与该类构件总数的比值。

2.1.15 总监测率 total monitoring ratio

对于应力应变监测，被监测对象中各类构件被监测总数与构件总数的比值。

2.2 符号

f_n —— n 阶自振频率

l —— 结构跨度或长度

P —— 压力或推力

P_T —— 索力

ε —— 应变

σ —— 应力

θ —— 倾角或转角

a —— 加速度

μ —— 位移

W_s —— 风速

W_p —— 风压

T —— 温度

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 大跨度钢结构监测按照阶段不同可分为施工监测与运营监测，且施工监测与运营监测宜协同考虑。

[条文说明] 3.1.1 施工监测与运营监测的监测要求一般不同，当大跨度钢结构需要分别进行施工监测和运营监测时，应统筹进行两个阶段的监测。

3.1.2 对需要监测的大跨度钢结构，设计阶段应明确提出监测要求，监测前应制定监测方案。

3.1.3 大跨度钢结构监测方案的制定应依据有关单位的监测要求与设计资料，结合现场及周边环境条件等因素综合确定。

[条文说明] 3.1.3 监测方案一般由监测单位制定，应同时参考建设单位的监测要求、设计单位在设计阶段提出的监测要求与其提供的设计资料等具体制定。

3.1.4 监测方案宜包括工程概况、监测目的、结构计算分析、监测项目、测点布置、监测设备、监测周期、数据采集与分析方法、预警与评估方法、监测系统施工与安装等内容。

[条文说明] 3.1.4 监测方案中的结构计算分析可由监测单位进行，也可由有关单位的设计资料提供。

3.1.5 监测项目与测点布置应根据监测要求、结构体系以及结构计算分析综合确定。监测项目宜包括位移监测、内力监测、振动监测、环境及环境作用监测，且应符合下列规定：

- 1 位移监测包括结构变形（竖向和水平）与支座位移监测。
- 2 内力监测包括应力应变监测与索力监测。
- 3 振动监测的监测项目与测点布置应结合结构振动与模态特性确定。

4 环境及环境作用监测包括温湿度监测、风监测、地震作用监测、雨量监测以及雪荷载监测。

- 1) 温度监测可包括大气温度与结构温度；
- 2) 风监测可包括风速、风向与风压；
- 3) 地震作用监测可包括地震动与地震响应加速度，也可按照监测要求选择动位移等其他参数；
- 4) 雨量监测可包括降水量监测与屋面天沟、雨水斗水位监测；
- 5) 雪荷载监测可包括积雪重量与积雪厚度。

[条文说明] 3.1.5 本规程根据大跨度钢结构的监测特点，结合现有相关规范的条文规定，规定监测项目包括位移监测、内力监测、振动监测、环境及环境作用监测，其中环境及环境作用监测包括但不限于温湿度监测、风监测、地震作用监测、雨量监测以及雪荷载监测。风荷载会引起结构风致响应，风致响应物理量包括应变、加速度、位移等，应根据监测要求、结构体系等进行选择。

3.1.6 监测方式与监测周期应符合下列规定：

- 1** 施工期间的监测宜采用自动化采集设备进行监测，监测周期应涵盖施工工艺阶段，满足施工要求。
- 2** 运营期间的监测宜为长期实时监测，监测周期应根据监测要求与工程特点等因素确定，且不宜少于 1 年。

3.1.7 应对大跨度钢结构施工过程中卸载、张拉、滑移、吊装等特殊施工工艺进行监测。

3.1.8 对甲类抗震设防类别的大跨度钢结构、结构形体特殊或结构形式复杂的大跨度钢结构、曾发生严重事故或存在明显安全隐患的在役大跨度钢结构，应对其监测方案进行专门论证。

3.1.9 应对监测项目各参数设定监测预警阈值，预警阈值应满足工程设计及被监测对象的控制要求。

3.1.10 监测周期内，宜对被监测对象进行定期的安全评估。

[条文说明] 3.1.10 结构的安全评估包括结构构件评估和结构整体评估，大跨度钢结构的安全评估宜符合 9.3 节相关规定。

3.1.11 监测周期内，应对监测系统进行定期检查和系统维护。

3.2 监测等级

3.2.1 监测单位在制定监测方案前应先判定监测等级。

[条文说明] 3.2.1 监测等级一般由监测单位确定，也可由建设单位、设计单位根据其监测要求进行确定。

3.2.2 大跨度钢结构的监测等级应根据建筑安全等级、结构体系以及跨度综合确定，施工阶段和运营阶段的监测等级应按表 3.2.1 判定。

1 A 类：应进行监测，宜结合专家经验对监测方案进行研判，监测部位及测点布置应满足相关要求。

2 B 类：应进行监测，监测部位及测点布置应满足相关要求。

3 C 类：宜进行监测，监测部位及测点布置宜满足相关要求。

4 D 类：可进行监测。

表 3.2.1 钢结构监测等级划分

结构体系		网架结构、双层网壳结构以及桁架结构			
		L≤60	60<L≤120	120<L≤180	L>180
安全等级	跨度 L(m)				
	一级	D	C	B	A
	二级	D	C (D)	B (C)	B
	三级	D	D	C	B
结构体系		单层网壳结构			
		L≤60	60<L≤120	L>120	-
安全等级	跨度 L(m)				
	一级	C	B	A	-
	二级	D	B (C)	A	-
	三级	-	-	-	-
结构体系		预应力网格结构、索网结构、索桁结构、张弦结构以及索穹顶结构			
		L≤60	60<L≤120	120<L≤180	L>180
安全等级	跨度 L(m)				
	一级	C (D)	C	B	A
	二级	D	C	B (C)	A
	三级	-	-	-	-
结构体系		开合屋盖结构			
		L≤60	60<L≤120	120<L≤180	L>180
安全等级	跨度 L(m)				
	一级	B (C)	B	A	A
	二级	C	-	-	-
	三级	-	-	-	-

注：表中“B (C)”表示施工阶段的监测等级为 B，运营阶段的监测等级为 C。

[条文说明] 3.2.2 本规程的监测等级适用于网格结构、预应力网格结构、索网结构、索桁结构、张弦结构、索穹顶结构、开合屋盖结构等结构体系，未提及的结构体系可结合专家经验、参考跨度区间确定其监测等级。表 3.2.1 中开合屋盖结构的跨度指活动屋盖跨度。单层网壳结构、预应力网格结构、索网结构、索桁结构、张弦结构以及索穹顶结构的安全等级一般为二级及以上，因而表中未设置的上述结构为安全等级为三级的情形；开合屋盖结构的安全等级一般为二级，且《开合屋盖结构技术标准》JGJ/T 442-2019 第 3.3.1 条规定当活动屋盖跨度大于 60m 或悬挑长度大于 20m 时，整体结构的安全等级应为一级，因而表中未设置开合屋盖结构安全等级为三级的情形。

3.2.3 大跨度钢结构的构件按重要性应分为 I 类构件、II 类构件、III 类构件。

1 I 类构件：结构中的核心受力构件，当该类构件发生损伤时，对结构的最大位移、最大应力等安全评价指标产生严重影响的构件，或者对环境荷载最为敏感的构件。

2 II 类构件：结构中的主要受力构件，当该类构件发生损伤时，对结构的最大位移、最大应力等安全评价指标产生较大影响的构件，或者对环境荷载较为敏感的构件。

3 III 类构件：结构中的次要受力构件或联系构件。

[条文说明] 3.2.3 对环境荷载敏感的构件定义为在某类环境荷载单独作用下，随着该类环境荷载变化，应力产生明显改变的构件。

3.3 监测系统

3.3.1 应结合工程特点与现场条件,综合考虑施工阶段与运营阶段的监测要求、荷载特征变化以及环境条件改变的影响建立监测系统,且应遵循“技术可靠、方案可行、经济合理、便于维护”的基本原则。

3.3.2 监测系统宜具有完整的传感、调理、采集、传输、存储、数据处理及控制、预警及状态评估功能。

[条文说明] 3.3.2 监测系统宜包括传感器子系统、数据采集子系统、数据传输子系统、数据存储子系统、数据处理子系统、数据分析子系统、结构状态识别及健康评估子系统。

3.3.3 监测系统的数据采样频率应满足监测要求。

3.3.4 监测系统的数据传输应稳定可靠,且应尽量减少现场布线。

[条文说明] 3.3.4 大跨度钢结构监测系统的数据传输宜采取无线方式。

3.3.5 监测系统宜根据建设单位的监测要求形成相应的可视化监测软件。

3.3.6 监测结果可与结构计算分析结果进行适时对比,当监测数据异常时,应及时对被监测对象与监测系统进行核查,当监测值超过预警阈值时,应及时报警。

3.4 测点布置

3.4.1 测点布置应满足预警和评估要求，遵循“代表性、实用性、经济性”的选择原则。

3.4.2 测点布置应符合下列规定：

1 测点布置应反映被监测对象的实际状态及变化趋势，且宜布置在监测参数值绝对量或变化量最大的位置。

2 测点的位置、数量应根据结构类型、监测等级、设计要求、施工过程、结构计算分析以及经济指标综合确定。

3 施工阶段的测点布置应结合实际施工荷载工况确定，施工过程中出现明显内力重分布或短期超过结构安全预警阈值的部位应布置相应测点。

4 测点位置的选择宜便于安装、维护与更换。

5 测点数量宜设置冗余量，重要参数与重要部位宜增加测点。

3.4.3 位移监测点应布置在变形特征点和极值点处，测点数量应满足表征结构变形形态和结构计算分析的需要。

3.4.4 应力应变监测点布置应以构件主要变形特征为依据，并宜采取对称布置措施消除环境与次要因素干扰的影响；构件局部应力应变状态监测点宜沿主应力方向或构件几何坐标方向布置测点。

[条文说明] 3.4.4 本条文应力应变监测指的是除动应变、索力以外的应力应变监测。

3.4.5 索力监测点应具有代表性，且宜均匀分布；单根拉索的不同位置宜有对比性测点，可监测同一根钢索不同位置的索力变化；承重索、稳定索以及辅助索等均可布设测点；在满足经济指标的前提下，宜对50%以上的预应力拉索布置索力监测点。

[条文说明] 3.4.5 本条所规定的“宜对 50%以上的预应力拉索布置索力监测点”主要针对包括拉索预应力网架、拉索预应力网壳以及拉索预应力桁架的预应力网格结构。

3.4.6 振动监测点布置应根据需要截取的模态阶数确定，宜布置在需识别的振型关键点上，测点数量应满足所截取的最高阶模态特征曲线拟合要求。

3.4.7 环境及环境作用监测点布置应符合下列规定：

1 温度监测点应布置在温度梯度变化较大位置，宜对称、均匀布置，应反映结构竖向与水平向温度场变化规律；宜与应力应变监测点协同布置；结构迎光面与背光面应分别布设测点。

2 湿度传感器宜布置在结构内湿度变化大、对结构耐久性影响大的部位。

3 风速、风向监测点应布置在工程结构绕流影响区域之外，且宜具备监测自由场风速、风向功能。

4 风压监测点宜根据风洞试验数据和结构计算分析结果确定，在无风洞试验数据情况下，可根据风荷载分布特征、结构计算分析、数值模拟结果布设测点。

[条文说明] 3.4.7 对于温度监测，相对独立空间应设 1~3 个点；当结构面积、跨度较大时，宜增加测点；对于构件应力、变形受温度影响大的区域，宜增加测点；当监测整个结构的温度场分布或不同部位结构温度与大气温度对应关系时，测点宜覆盖整个结构区域。对于风监测，结构中绕流风影响区域宜采用计算流体力学数值模拟或风洞试验的方法确定。

3.4.8 测点布置方案宜结合本规程相关条文规定与专家经验综合确定。

4 网格结构

4.1 网架结构

I 一般规定

4.1.1 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行施工监测的网架结构外，尚应符合下列规定：

1 悬挑长度大于 30m 的网架结构应进行施工监测。

2 受施工方法或顺序影响，施工期间结构受力状态与一次成型整体结构的受力状态存在显著差异的网架结构应进行施工监测。

[条文说明] 4.1.1 悬挑网架结构的形式一般包括斜拉悬挑网架、外挂悬挑网架等，应对施工过程中的拼装、焊接、卸载等工艺进行位移监测，保证安全与稳定性。

4.1.2 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定进行运营监测的网架结构外，尚应符合下列规定：

1 悬挑长度大于 30m 的网架结构宜进行运营监测。

2 运营期间有明显的荷载条件改变或结构改造的网架结构应进行运营监测。

II 监测项目

4.1.3 网架结构监测项目应根据工程特点按表 4.1.1 进行选择。

表 4.1.1 网架结构监测项目

项目 结构	位移监测			内力监测		振动监测	环境及环境作用监测						
	结构变形		支座位移	应力应变	索力		温度	湿度	风速风向	风压	地震作用	雨量	雪荷载
	竖向	水平											
网架结构	■	○	○	■	—	○	■	○	○	○	○	○	○
预应力网架结构	■	▲	○	■	■	▲	■	○	○	○	○	○	○
临时支撑	■	○	—	■	—	○	—	—	○	○	—	—	—

注：■应监测，▲宜监测，○可监测，—不涉及该监测项。

III 测点布置

4.1.4 平板网架的构件重要性参考：

- 1 支承方式采用周边支承形式的矩形平板网架：
 - 1) I类构件：短跨方向跨中区域弦杆；
 - 2) II类构件：支座区域腹杆，短跨方向四分点区域弦杆。
- 2 支承方式采用周边支承形式的圆形平板网架：
 - 1) I类构件：内环区域弦杆；
 - 2) II类构件：支座区域腹杆，中环、外环区域弦杆；

[条文说明] 4.1.4 本规程中圆形平板网架内环区域指网架圆心至 1/3 半径范围内区域（投影平面），中环区域指网架 1/3 半径至 2/3 半径范围内区域，外环区域指网架 2/3 半径至边缘范围内区域。本条文中的构件重要性可供常规形式的平板型网架结构参考。

4.1.5 网架结构测点的位置、数量应根据监测等级、设计要求、施工过程以及结构计算分析结果综合确定，且应符合下列规定：

- 1 位移监测除应符合第 3.4.3 条规定外，尚应符合下列规定：

1) A 类监测对象的位移测点布置应由设计单位确定；当设计无要求时，宜结合专家经验确定；

2) 矩形平板网架应沿跨度方向均匀布设测点，且应包括跨中点和跨度方向四分点；沿跨度方向跨中、跨间、支座测点间距不宜大于 30m；当支承方式采用周边支承形式的矩形平板网架长宽比大于 2.0 时，宜沿长度方向增设跨向测点；

3) 圆形平板网架应在圆心、内环区域、中环区域沿环向均匀布设测点，宜在外环区域沿环向均匀布设测点；圆形平板网架径向测点间距不宜大于 30m。

2 应力应变监测部位及测点布置可参考附录第 A.0.1 条执行，且应符合下列规定：

1) A 类监测对象：I 类构件监测率不宜低于 **0.2%**，且 I 类构件监测总数不宜少于 **50** 个；总监测率不宜低于 **0.1%**，且构件监测总数不宜少于 **60** 个；

2) B 类监测对象：I 类构件监测率不宜低于 **0.1%**，且 I 类构件监测总数不宜少于 **30** 个；总监测率不宜低于 **0.05%**，且构件监测总数不宜少于 **40** 个；

3) C 类监测对象：总监测率不宜低于 **0.02%**，且构件监测总数不宜少于 **20** 个；

4) D 类监测对象：根据具体对象制定，不作要求；

5) 矩形平板网架应在两个主轴方向上布设测点；当矩形平板网架的长宽比大于 1.5 时，可仅在短跨方向上布设测点；

6) 圆形平板网架应在不少于三个主轴方向上布设测点。

3 预应力网架结构的索力监测应符合第 3.4.5 条规定。

[条文说明] 4.1.5 本规程附录 A 中列出的测点布置方案适用于对应结构类型的常规形式。矩形平板网架的长宽比为长度与跨度之比。

4.2 网壳结构

I 一般规定

4.2.1 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行施工监测的网壳结构外，尚应符合下列规定：

1 悬挑长度大于 30m 的网壳结构应进行施工监测。

2 受施工方法或顺序影响，施工期间结构受力状态与一次成型整体结构的受力状态存在显著差异的网壳结构应进行施工监测。

[条文说明] 4.2.1 悬挑网壳结构的形式一般包括斜拉悬挑网壳、外挂悬挑网壳等，应对施工过程中的拼装、焊接、卸载等工艺进行位移监测，保证安全与稳定性。

4.2.2 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定进行运营监测的网壳结构外，尚应符合下列规定：

1 悬挑长度大于 30m 的网壳结构宜进行运营监测。

2 运营期间有明显的荷载条件改变或结构改造的网壳结构应进行运营监测。

II 监测项目

4.2.3 网壳结构监测项目应根据工程特点按表 4.2.1 进行选择。

表 4.2.1 网壳结构监测项目

项目 结构	位移监测			内力监测		振动监测	环境及环境作用监测						
	结构变形		支座位移	应力应变	索力		温度	湿度	风速风向	风压	地震作用	雨量	雪荷载
	竖向	水平											
网壳结构	■	○	■	■	—	▲	■	○	○	○	○	○	○
预应力网壳结构	■	▲	■	■	■	▲	■	○	○	○	○	○	○
临时支撑	■	○	—	■	—	○	—	—	○	○	—	—	—

注：■应监测，▲宜监测，○可监测，—不涉及该监测项。

III 测点布置

4.2.4 球面网壳的构件重要性参考：

1 双层球面网壳：

- 1) I类构件：内环区域环向弦杆，反弯点区域径向弦杆，中环、外环区域径向弦杆；
- 2) II类构件：内环区域径向弦杆，支座区域腹杆。

2 单层球面网壳：

- 1) I类构件：内环区域径向弦杆，反弯点区域径向弦杆；
- 2) II类构件：中环、外环区域径向弦杆，支座区域斜杆；
- 3) III类构件：内环区域环向弦杆。

[条文说明] 4.2.4 本规程中球面网壳内环区域指网架圆心至 1/3 半径范围内区域（投影平面），中环区域指网架 1/3 半径至 2/3 半径范围内区域，外环区域指网架 2/3 半径至边缘范围内区域。网壳结构的曲面形式多种多样，本规程中仅列出圆柱面、球面两种典型几何曲面的构件重要性参考及测点布置参考。

4.2.5 柱面网壳的构件重要性参考：

1 双层柱面网壳：

-
- 1) I类构件：反弯点区域跨向弦杆，支座区域跨向弦杆；
 - 2) II类构件：支座区域腹杆；
 - 3) III类构件：跨中区域跨向弦杆。

2 单层柱面网壳：

- 1) I类构件：反弯点区域横向弦杆；
- 2) II类构件：支座区域斜杆；
- 3) III类构件：跨中区域斜杆。

4.2.6 网壳结构测点的位置、数量应根据监测等级、设计要求、施工过程以及结构计算分析结果综合确定，且应符合下列规定：

1 位移监测除应符合第 3.4.3 条规定外，尚应符合下列规定：

1) A类监测对象的位移测点布置应由设计单位确定；当设计无要求时，宜结合专家经验确定；

2) 球面网壳应在圆心、内环区域、中环区域沿环向均匀布设测点，宜在外环区域沿环向均匀布设测点；球面网壳径向测点间距（投影平面）不宜大于 30m；

3) 柱面网壳应沿跨度方向均匀布设测点，且应包括跨中区域和反弯点区域；沿跨度方向跨中、跨间、支座测点间距（投影平面）不宜大于 30m；

4) 当网壳矢跨比大于 1/3，应适当增加测点。

2 应力应变监测部位及测点布置可参考附录第 A.0.2 条执行，且应符合下列规定：

1) A类监测对象：I类构件监测率不宜低于 **0.2%**，且 I类构件监测总数不宜少于 **25** 个；总监测率不宜低于 **0.1%**，且构件监测总数不宜少于 **30** 个；

2) B类监测对象：I类构件监测率不宜低于**0.1%**，且I类构件监测总数不宜少于**15**个；总监测率不宜低于**0.05%**，且构件监测总数不宜少于**20**个；

3) C类监测对象：总监测率不宜低于**0.02%**，且构件监测总数不宜少于**10**个；

4) D类监测对象：根据具体对象制定，不作要求。

3 预应力网壳结构的索力监测应符合第3.4.5条规定。

4.3 桁架结构

I 一般规定

4.3.1 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行施工监测的桁架结构外，尚应符合下列规定：

1 悬挑长度大于 30m 的桁架结构应进行施工监测。

2 受施工方法或顺序影响，施工期间结构受力状态与一次成形整体结构的受力状态存在显著差异的桁架结构应进行施工监测。

[条文说明] 4.3.1 悬挑桁架结构的形式一般包括斜拉悬挑桁架、外挂悬挑桁架、斜撑悬挑桁架等。应对支座、悬挑根部进行内力监测。

4.3.2 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定进行运营监测的桁架结构外，尚应符合下列规定：

1 悬挑长度大于 30m 的桁架结构宜进行运营监测。

2 运营期间有明显的荷载条件改变或结构改造的桁架结构应进行运营监测。

II 监测项目

4.3.3 桁架结构监测项目应根据工程特点按表 4.3.1 进行选择。

表 4.3.1 桁架结构监测项目

项目 结构	位移监测			内力监测		振动监测	环境及环境作用监测						
	结构变形		支座位移	应力应变	索力		温度	湿度	风速风向	风压	地震作用	雨量	雪荷载
	竖向	水平											
平板桁架结构	■	○	○	■	—	▲	■	○	○	○	○	○	○
曲面桁架结构	■	○	■	■	—	▲	■	○	○	○	○	○	○
预应力桁架结构	■	▲	■	■	■	▲	■	○	○	○	○	○	○
临时支撑	■	○	—	■	—	○	—	—	○	○	—	—	—

注：■应监测，▲宜监测，○可监测，—不涉及该监测项。

III 测点布置

4.3.4 桁架结构的构件重要性参考：

1 平行式桁架、拱形桁架、倒三角截面管桁结构等常规单榀桁架：

- 1) I类构件：跨中区域弦杆；
- 2) II类构件：支座区域弦杆、腹杆；
- 3) III类构件：跨度方向四分点区域弦杆。

2 以桁架为主要支承骨架的组合结构体系或空间异形结构体系：

- 1) I类构件：主桁架弦杆；
- 2) II类构件：环桁架 / 次桁架弦杆，支座弦杆；
- 3) III类构件：主桁架腹杆。

4.3.5 桁架结构测点的位置、数量应根据监测等级、设计要求、施工过程以及结构计算分析结果综合确定，且应符合下列规定：

1 位移监测除应符合第 3.4.3 条规定外，尚应符合下列规定：

1) A 类监测对象的位移测点布置应由设计单位确定；当设计无要求时，宜结合专家经验确定；

2) 常规单榀桁架应在跨中区域、跨度方向四分点区域布设测点；沿跨度方向跨中、跨间、支座测点间距不宜大于 15m；

3) 对于以桁架为主要支承骨架的组合结构体系或空间异形结构体系，沿跨度方向跨中、跨间、支座测点间距不宜大于 30m。

2 常规单榀桁架应力应变监测应符合下列规定：

1) A 类监测对象：I 类构件监测率不宜低于 **1%**，且 I 类构件监测总数不宜少于 **10** 个；总监测率不宜低于 **0.5%**，且构件监测总数不宜少于 **15** 个；

2) B 类监测对象：I 类构件监测率不宜低于 **0.5%**，且 I 类构件监测总数不宜少于 **5** 个；总监测率不宜低于 **0.2%**，且构件监测总数不宜少于 **10** 个；

3) C 类监测对象：总监测率不宜低于 **0.1%**，且构件监测总数不宜少于 **5** 个；

4) D 类监测对象：根据具体对象制定，不作要求。

3 对于以桁架为主要支承骨架的组合结构体系或空间异形结构体系，应力应变监测应符合下列规定：

1) A 类监测对象：I 类构件监测率不宜低于 **0.3%**，且 I 类构件监测总数不宜少于 **25** 个；总监测率不宜低于 **0.15%**，且构件监测总数不宜少于 **30** 个；

2) B 类监测对象：I 类构件监测率不宜低于 **0.15%**，且 I 类构件监测总数不宜少于 **15** 个；总监测率不宜低于 **0.08%**，且构件监测总数不宜少于 **20** 个；

3) C类监测对象：总监测率不宜低于**0.04%**，且构件监测总数不宜少于**10**个；

4) D类监测对象：根据具体对象制定，不作要求。

4 预应力桁架结构的索力监测应符合第3.4.5条规定。

5 悬挑桁架结构除应符合上述规定外，尚应符合下列规定：

1) 施工期间应对悬挑结构支座、悬挑根部及斜拉索进行内力监测，应对悬挑远端进行位移监测；

2) 运营期间宜对悬挑结构支座、悬挑根部及斜拉索进行内力监测，应对悬挑远端进行位移监测，应对悬挑部位进行温度监测。

[条文说明] 4.3.5 常规单榀桁架一般指华伦式桁架、普腊式桁架、芬克式桁架、拱形桁架等。悬挑桁架结构施工时，分段吊装高空拼装就位，桁架底部各分段对接位置采取搭设临时支架或设置斜拉索以确保施工荷载有效传递，从而保障施工过程中的结构主体安全和施工安全。大跨度悬挑结构在卸载时，悬挑结构支座与悬挑根部为最大的受力部位，因此施工期间应重点监测悬挑结构支座与悬挑根部的应变，或斜拉索处应变。

5 索杆结构

5.1 索网结构

I 一般规定

5.1.1 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行施工监测的索网结构外，结构张拉施工方案复杂、分多步张拉到位、结构受力状态受张拉顺序影响明显的索网结构应进行施工监测。

5.1.2 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行运营监测的索网结构外，运营期间有明显的荷载条件改变、张力改变或结构改造的索网结构应进行运营监测。

II 监测项目

5.1.3 索网结构监测项目应根据工程特点按表 5.1.1 进行选择。

表 5.1.1 索网结构监测项目

项目 结构	位移监测			内力监测		振动监测	环境及环境作用监测						
	结构变形		支座位移	应力应变	索力		温度	湿度	风速风向	风压	地震作用	雨量	雪荷载
	竖向	水平											
索网结构	■	▲	▲	■	■	▲	■	○	▲	○	○	○	○
临时支撑	■	○	—	■	—	○	—	—	○	○	—	—	—

注：■应监测，▲宜监测，○可监测，—不涉及该监测项。

III 测点布置

5.1.4 索网结构的构件重要性参考：

1 I类构件：悬索系统中的承重索、稳定索，支承系统中的连接节点。

2 II类构件：支承系统中的桁架弦杆、立柱、横梁等构件。

5.1.5 索网结构测点的位置、数量应根据监测等级、设计要求、施工过程以及结构计算分析结果综合确定，且应符合下列规定：

1 位移监测除应符合第 3.4.3 条规定外，尚应符合下列规定：

1) A类监测对象的位移测点布置应由设计单位确定；当设计无要求时，宜结合专家经验确定；

2) 施工期间索网结构的位移监测部位应能反映其位形变化，位移测点沿跨度方向间距不宜大于 30m；索网结构位移监测应包括支承系统。

2 索力监测除应符合第 3.4.5 条规定外，尚应符合下列规定：

1) A类监测对象可对每根拉索（包括承重索、稳定索）进行索力监测，且监测率不宜低于 **30%**；

2) B类监测对象索力监测率不宜低于 **20%**；

3) C类监测对象索力监测率不宜低于 **10%**；

4) D类监测对象：根据具体对象制定，不作要求。

3 支承系统的监测部位及测点布置应根据其结构体系确定。

5.2 索桁结构

I 一般规定

5.2.1 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行施工监测的索桁结构外，结构张拉施工方案复杂、分多步张拉到位、结构受力状态受张拉顺序影响明显的索桁结构应进行施工监测。

5.2.2 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行运营监测的索桁结构外，运营期间有明显的荷载条件改变、张力改变或结构改造的索桁结构应进行运营监测。

II 监测项目

5.2.3 索桁结构监测项目应根据工程特点按表 5.2.1 进行选择。

表 5.2.1 索桁结构监测项目

项目 结构	位移监测			内力监测		振动监测	环境及环境作用监测						
	结构变形		支座位移	应力应变	索力		温度	湿度	风速风向	风压	地震作用	雨量	雪荷载
	竖向	水平											
索桁结构	■	▲	▲	■	■	▲	■	○	▲	○	○	○	○
临时支撑	■	○	—	■	—	○	—	—	○	○	—	—	—

注：■应监测，▲宜监测，○可监测，—不涉及该监测项。

III 测点布置

5.2.4 索桁结构的构件重要性参考：

- 1 I类构件：承重索，稳定索，中部拉环。
- 2 II类构件：承重索与稳定索之间的联系杆件，支承构件。

5.2.5 索桁结构测点的位置、数量应根据监测等级、设计要求、施工过程以及结构计算分析结果综合确定，且应符合下列规定：

1 位移监测除应符合第 3.4.3 条规定外，尚应符合下列规定：

1) A 类监测对象的位移测点布置应由设计单位确定；当设计无要求时，宜结合专家经验确定；

2) 施工期间索桁结构的位移监测部位应能反映其位形变化，位移测点沿跨度方向间距不宜大于 30m；索桁结构位移监测应包括支承构件。

2 索力监测除应符合第 3.4.5 条规定外，尚应符合下列规定：

1) A 类监测对象可对每根拉索（包括承重索、稳定索）进行索力监测，且监测率不宜低于 **30%**；

2) B 类监测对象索力监测率不宜低于 **20%**；

3) C 类监测对象索力监测率不宜低于 **10%**；

4) D 类监测对象：根据具体对象制定，不作要求。

3 联系杆件的应力应变监测应符合下列规定：

1) A 类监测对象中杆件监测数量不宜低于拉索数量的 **20%**；

2) B 类监测对象中杆件监测率不宜低于拉索数量的 **10%**；

3) C 类监测对象中杆件监测率不宜低于拉索数量的 **5%**。

4 支承构件的监测部位及测点布置应根据其结构体系确定。

5.3 张弦结构

I 一般规定

5.3.1 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行施工监测的张弦结构外，结构张拉施工方案复杂、分多步张拉到位、结构受力状态受张拉顺序影响明显的张弦结构应进行施工监测。

[条文说明] 5.3.1 根据张弦梁结构的加工、施工及受力特点，可将其结构形态定义为零状态、初始态和荷载态三种，其中零状态是拉索张拉前、构件加工与放样的状态，初始态是拉索张拉完毕后、结构安装就位的状态，荷载态是外荷载作用在初始态结构上发生变形后的平衡状态。对于跨度较大的张弦梁结构，在下弦拉索的张拉阶段，即结构由零状态变化到初始态的过程中，结构会出现较大的变形，因此张弦梁结构宜进行施工监测。

5.3.2 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行运营监测的张弦结构外，运营期间有明显的荷载条件改变、张力改变或结构改造的张弦结构应进行运营监测。

II 监测项目

5.3.3 张弦结构监测项目应根据工程特点按表 5.3.1 进行选择。

表 5.3.1 张弦结构监测项目

项目 结构	位移监测			内力监测		振动监测	环境及环境作用监测						
	结构变形		支座位移	应力应变	索力		温度	湿度	风速风向	风压	地震作用	雨量	雪荷载
	竖向	水平											
张弦梁结构	■	▲	▲	■	■	▲	■	○	▲	○	○	○	○
弦支穹顶结构	■	○	▲	■	■	▲	■	○	▲	○	○	○	○
临时支撑	■	○	—	■	—	○	—	—	○	○	—	—	—

注：■应监测，▲宜监测，○可监测，—不涉及该监测项。

III 测点布置

5.3.4 张弦结构的构件重要性参考：

1 直梁型张弦梁结构：

- 1) I类构件：跨中、端部上弦梁单元；
- 2) II类构件：跨度方向四分点上弦梁单元，端部拉索单元；
- 3) III类构件：跨度方向四分点撑杆单元。

2 拱形张弦梁结构：

- 1) I类构件：跨中、端部上弦梁单元；
- 2) II类构件：跨度方向四分点上弦梁单元，端部拉索单元；
- 3) III类构件：跨度方向四分点撑杆单元。

3 人字拱形张弦梁结构：

- 1) I类构件：跨中、端部上弦梁单元；
- 2) II类构件：端部拉索单元；
- 3) III类构件：跨中撑杆单元，跨度方向四分点上弦梁单元。

4 双向式张弦梁结构：

- 1) I类构件：双向中间榫跨中、端部上弦梁单元；
- 2) II类构件：双向中间榫端部拉索单元；
- 3) III类构件：双向中间榫跨中撑杆单元、四分点上弦梁单元、四分点撑杆单元。

5 多向式张弦梁结构：

- 1) I类构件：外部各榫张弦梁交接处上弦梁单元；
- 2) II类构件：外部各榫张弦梁端部拉索单元；
- 3) III类构件：中心撑杆单元，外部各榫张弦梁端部上弦梁单元、跨中上弦梁单元。

6 辐射式张弦梁结构：

-
- 1) I类构件：各榀张弦梁端部上弦梁单元；
 - 2) II类构件：各榀张弦梁端部拉索单元；
 - 2) III类构件：刚性中央环处上弦梁单元。

7 弦支穹顶结构：

- 1) I类构件：环索，索撑节点；
- 2) II类构件：径向索或径向拉杆；
- 3) III类构件：撑杆。

[条文说明] 5.3.4 弦支穹顶结构中上部网壳的构件重要性宜按照第4.2.4条确定。

5.3.5 张弦结构测点的位置、数量应根据监测等级、设计要求、施工过程以及结构计算分析结果综合确定，且应符合下列规定：

1 位移监测除应符合第3.4.3条规定外，尚应符合下列规定：

- 1) A类监测对象的位移测点布置应由设计单位确定；当设计无要求时，宜结合专家经验确定；
- 2) 张弦梁结构位移测点沿跨度方向间距不宜大于15m；
- 3) 弦支穹顶上部网壳的位移监测宜按照第4.2.6条确定。

2 张弦梁结构的应力应变监测部位及测点布置可参考附录第A.0.3条执行，且应符合下列规定：

- 1) A类监测对象：总监测率不宜低于**20%**，且构件监测总数不宜少于**20**个；
- 2) B类监测对象：总监测率不宜低于**10%**，且构件监测总数不宜少于**10**个；
- 3) C类监测对象：总监测率不宜低于**5%**，且构件监测总数不宜少于**5**个；
- 4) D类监测对象：根据具体对象制定，不作要求。

3 弦支穹顶结构的索力监测应符合下列规定：

1) A 类监测对象可对每根拉索进行索力监测，且监测率不宜低于 **30%**；

2) B 类监测对象索力监测率不宜低于 **20%**；

3) C 类监测对象索力监测率不宜低于 **10%**；

4) D 类监测对象：根据具体对象制定，不作要求。

4 弦支穹顶上部网壳的应力应变监测宜按照第 4.2.6 条确定。

[条文说明] 5.3.5 本规程规定张弦结构的上弦梁单元与拉索单元以撑杆节点划分，因此在计算张弦梁结构的构件监测率时，索、梁构件数应按照撑杆截断 / 划分的索单元、梁单元数统计。

5.4 索穹顶结构

I 一般规定

5.4.1 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行施工监测的索穹顶结构外，结构张拉施工方案复杂、分多步张拉到位、结构受力状态受张拉顺序影响明显的索穹顶结构应进行施工监测。

[条文说明] 5.4.1 索穹顶结构施工过程一般分多个步骤张拉环索、斜索，直至中心环、撑杆等构件达到设计位置为止，施工过程、分级张拉成形、高空张拉等对索穹顶结构有较大影响，索穹顶结构宜进行施工监测。

5.4.2 除设计文件要求、监测要求或第 3.2.2 条规定应进行运营监测的索穹顶结构外，运营期间有明显的荷载条件改变、张力改变或结构改造的索穹顶结构应进行运营监测。

II 监测项目

5.4.3 索穹顶结构监测项目应根据工程特点按表 5.4.1 进行选择。

表 5.4.1 索穹顶结构监测项目

项目 结构	位移监测			内力监测		振动监测	环境及环境作用监测						结构几何线形监测		
	结构变形		支座位移	应力应变	索力		温度	湿度	风速风向	风压	地震作用	雨量		雪荷载	
	竖向	水平													
索穹顶结构	■	▲	▲	■	■	▲	■	○	▲	○	○	○	○	○	▲
临时支撑	■	○	—	■	—	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—

注：■应监测，▲宜监测，○可监测，—不涉及该监测项。

III 测点布置

5.4.4 索穹顶结构的构件重要性参考：

- 1 I类构件：径向脊索，径向斜索，环索；
- 2 II类构件：内外环梁；
- 3 III类构件：压杆。

5.4.5 索穹顶结构测点的位置、数量应根据监测等级、设计要求、施工过程以及结构计算分析结果综合确定，且应符合下列规定：

1 位移监测除应符合第 3.4.3 条规定外，尚应符合下列规定：

- 1) A类监测对象的位移测点布置应由设计单位确定；当设计无要求时，宜结合专家经验确定；
- 2) 施工期间索穹顶结构的位移监测部位应能反映其位形变化，位移测点沿跨度方向间距不宜大于 30m；索穹顶结构位移监测应包括支承构件。

2 索力监测除应符合第 3.4.5 条规定外，尚应符合下列规定：

- 1) A类监测对象可对每根拉索进行索力监测，且监测率不宜低于 **30%**；
- 2) B类监测对象索力监测率不宜低于 **20%**；
- 3) C类监测对象索力监测率不宜低于 **10%**；
- 4) D类监测对象：根据具体对象制定，不作要求。

3 支承构件的监测部位及测点布置应根据其结构体系确定。

6 开合屋盖结构

I 一般规定

6.0.1 开合屋盖结构宜进行施工监测与运营监测。施工阶段的监测方案尚应根据安装流程、屋盖安装技术、机械传动设备定位技术以及屋盖就位技术等综合确定。

6.0.2 在条件允许的情形下，宜对开合屋盖的基本状态、活动屋盖运行状态以及非基本状态进行监测。

[条文说明] 6.0.2 开合屋盖结构的基本状态为活动屋盖处于常驻位置的状态，一般根据建筑使用功能确定；非基本状态为除基本状态、运行状态等之外的状态。

II 监测项目

6.0.3 开合屋盖结构监测项目应根据工程特点按表 6.0.1 进行选择。

表 6.0.1 开合屋盖结构监测项目

项目 结构	位移监测			内力监测		振动监测	环境及环境作用监测						
	结构变形		支座位移	应力应变	索力		温度	湿度	风速风向	风压	地震作用	雨量	雪荷载
	竖向	水平											
开合屋盖结构	■	▲	▲	■	■	▲	■	○	▲	▲	○	▲	▲
临时支撑	■	○	—	■	—	○	—	—	○	○	—	—	—

注：■应监测，▲宜监测，○可监测，—不涉及该监测项。

III 测点布置

6.0.4 开合屋盖结构测点的位置、数量应根据监测等级、设计要求、施工过程、结构计算分析结果以及活动屋盖启与闭运动的方式综合确定，且应符合下列规定：

1 位移监测除应符合第 3.4.3 条规定外，尚应符合下列规定：

1) A 类监测对象的位移测点布置应由设计单位确定；当设计无要求时，宜结合专家经验确定；

2) 位移测点沿跨度方向间距不宜大于 30m。

2 应力应变监测部位及测点布置可参考附录第 A.0.4 条执行，且应符合下列规定：

1) 活动屋盖与固定屋盖均宜布设测点；

2) 应在活动屋盖运行过程中监测参数变化量最大的位置布设测点；

3) 宜在台车、导轨、转轴、驱动系统、缓冲位置以及悬挑位置布设测点。

[条文说明] 6.0.4 开合屋盖结构根据活动屋盖单元开启与闭合运动的方式，可分为平行移动式、绕枢轴转动式、折叠移动式等基本方式及其组合。开合屋盖结构的驱动系统、轨道等应参考设计要求与国家现行有关规范进行监测。屋盖吊装过程应对临时支撑进行卸载过程监测，监测项目应包括应力应变与结构变形。

7 监测设备

7.1 一般规定

7.1.1 监测设备应包括传感器、数据采集模块、数据传输模块、数据存储模块等。

7.1.2 监测设备应结合监测要求、工程特点以及现场条件等因素综合确定,应满足对结构状态进行监控、预警与评估的要求,具有稳定性、耐久性、兼容性和可扩展性。

7.1.3 监测设备的稳定性、使用寿命应与监测周期相匹配;监测设备使用前宜对照使用场景进行针对性校准,确保设备的有效性;监测设备应安装牢固,安装工艺与设备耐久性应符合监测期内的使用要求;监测设备安装完成后应及时进行现场标识、绘制布置图并存档备查。

7.1.4 传感器宜结合监测要求、工程特点等因素综合选择,传感器的类型、量程、精度、分辨力、采样频率宜结合结构计算分析结果综合确定,并应满足数据分析评估的要求。

[条文说明] 7.1.4 传感器类型或测量方式可参照表 7.1.1 选择。

表 7.1.1 传感器类型或测量方式

监测项目	传感器类型或测量方式
位移	位移计、百分表、千分表、倾斜传感器、静力水准仪、全站仪、激光测距仪、三维激光扫描仪、DIC 测量系统、GNSS
应变	电阻式、振弦式、光纤式、磁感应式应变传感器
索力	油压压力表、压力传感器、磁通量传感器、应变传感器、振动传感器
振动	力平衡式加速度传感器、电动式速度传感器、压电式加速度传感器、压阻式加速度传感器、电容式加速度传感器
温度、湿度	温度、湿度传感器
风速、风向	机械式、超声式风速风向传感器
风压	表压式、差压式、绝压式风压传感器
地震作用	强震仪
雨量	翻斗式雨量传感器、称重式雨量传感器、雷达式雨量传感器、光学式雨量传感器、超声波液位传感器

7.1.5 采集设备的数据传输可采用有线和无线两种方式，应综合考虑监测要求、工程特点等因素，且应符合下列规定：

1 对监测部位集中的结构，数据传输可采用有线方式，传感器采集信号应不受导线长度的影响。

2 对存在监测部位分散、施工环境复杂、场地布线困难等情形的结构，数据传输宜采用无线方式。

3 采集设备宜安装在容易更换的位置。

4 采用无线采集方式的设备宜降低设备功耗，延长使用时间。

7.2 位移监测

7.2.1 位移监测设备可结合监测要求、工程特点等进行选择，包括机械式测试仪器、电测仪器、光学仪器以及 GNSS 等。当各测点位移有较高的同步性要求时，宜选用三维激光扫描仪、DIC 测量系统，且应考虑多种方法组合使用以相互验证。

[条文说明] 7.2.1 机械式测试仪器包括百分表、千分表等；电测仪器包括倾斜传感器、静力水准仪等；光学仪器包括全站仪、激光测距仪、三维激光扫描仪、DIC (digital image correlation) 测量系统等；GNSS (Global Navigation Satellite System) 指全球导航卫星系统，包括如美国的全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、俄罗斯的格洛纳斯 (GLONASS)、欧洲的伽利略卫星导航系统 (Galileo Satellite Navigation System, GSNS)、中国的北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 等；DIC 指数字图像相关法，通过跟踪物体表面散斑图案的变形过程，计算散斑域的灰度值的变化，从而得到被测物表面的变形和应变数据。

位移监测方法还包括基于雷达的技术 (合成孔径雷达干涉技术，激光多普勒仪、雷达扫描仪等)；此外，还有间接测量方法，即通过监测应变、速度、加速度等参数，进行处理并最终转换为位移。

7.2.2 位移监测设备应符合下列规定：

- 1 位移监测设备的量程不应小于测点位移预估值或允许值的 1.5~3 倍。
- 2 当采用机械式测试仪器时，精度不宜大于测点位移预估值的 1/10。
- 3 结构不同部位、不同类型的位移监测频次宜一致。

7.3 内力监测

I 应力应变监测

7.3.1 应力应变监测设备可选用电阻式应变传感器、振弦式应变传感器、光纤应变传感器以及磁感应式应变传感器等。

7.3.2 当进行长期应力应变监测时，不宜选用电阻式应变传感器；当进行动应变监测时，不宜选用振弦式应变传感器。

7.3.3 应变传感器应符合下列规定：

1 应变传感器的量程应与监测部位可能出现的应变范围相匹配，且不应小于预估值的 1.5~3 倍。

2 应变传感器的精度不宜大于 0.5%F.S。

3 应变传感器的分辨力不宜大于 $1\mu\varepsilon$ 。

4 应变传感器应考虑温度补偿。

5 应变传感器的安装位置和监测部位各方向距离偏差不宜大于 30mm，角度偏差不宜大于 2° 。

6 不同类型的应变传感器的导线宜分别集中引出与保护，并对导线进行编号；当引线不方便时，宜采用无线应变传感器。

7.3.4 各类应变传感器的使用要求：

1 电阻式应变传感器应进行屏蔽绝缘保护，应变值应进行导线电阻修正。

2 振弦式应变传感器应与匹配的频率仪配套校准，频率仪的分辨率不宜大于 0.5Hz。

3 光纤应变传感器的解调系统各项指标应符合被监测对象对待测参数的规定。

4 当采用位移传感器进行间接测量时，位移测量的分辨力和标距的比值应满足应变测量分辨力的要求，其标距误差应为 $\pm 1.0\%$ ，最小分度值不宜大于被测总应变的 1.0% 。

II 索力监测

7.3.5 索力监测方法可选用压力表测量法、压力传感器测定法、振动频率法、磁通量法以及表面应变测定法等。

[条文说明] 7.3.5 压力表测量法根据千斤顶张拉油缸中的液压推算千斤顶的张拉力，将千斤顶的张拉力等同于索力。压力传感器测定法通过在张拉过程中对拉索锚固端或张拉端安装压力传感器测量锚头的压力，根据索力与锚头压力之间的关系推算索力。振动测量法通过加速度传感器获取环境激励下的振动信号，通过频谱分析测出拉索自振频率，再根据索力与自振频率之间的关系推算索力。磁通量法利用放置在索中的小型电磁传感器测定磁通量变化，根据索力、温度与磁通量之间的关系推算索力。表面应变测定法将振弦应变传感器通过刚性夹具安装在被测索表面，根据索体表面应变与整体应变之间的关系推算索力。

7.3.6 当采用压力表测量法时，监测精度不宜大于 $5.0\%F.S$ ；当采用压力传感器测定法监测索力时，压力传感器精度不宜大于 $3.0\%F.S$ 。

7.3.7 当采用振动频率法监测索力时，拉索自振频率可通过加速度传感器、激光测振仪等设备测量得到，传感器频响范围应覆盖被测拉索第5阶特征频率的2倍以上，测试时应解除减震装置和其他附属装置；采用实测频率推算索力时，宜将拉索及拉索两端弹性支承结构整体建模共同分析。

[条文说明] 7.3.7 激光测振仪的原理是基于光学干涉和多普勒频移效应，其核心是一台高精度激光干涉仪和一台信号处理器。高精度激光干涉仪内的激光器发出的偏振光（假设频率 F_0 ）由分光棱镜分出两路，一路测量光，一路参考光。参考光通过声光调制器具有一定频移（ F ），测量光被聚焦到被测物体表面，物体振动引起测量光的频移（ $f = 2v/\lambda$ ）。系统收集反射光并与参考光汇聚在传感器上，

这样两束光在传感器表面产生干涉，干涉信号的频率为 $F_0 + F + f$ ，携带了被测物体的振动信息，信号处理器将多普勒频移信号转换为物体振动的速度和位移信号。《城市桥梁检测与评定技术规范》CJJ/T 233-2015 第 4.8.1 条表明影响索力测量精度的主要因素包括抗弯刚度、边界约束条件、斜度、垂度、索的初应力以及拉索类型等：①不计抗弯刚度时求得的索力比计入抗弯刚度时偏大，但对细长拉索一般不会超过 3%；②拉索两端处理为铰接或固定时，对索力的影响相差不超过 5%；③当拉索初应力或拉伸变形相对较小时，应计入垂度的影响，且宜采用较高阶的特征频率计算索力；④拉索自重和斜度对索力计算结果的影响非常小。

7.3.8 当采用磁通量法监测索力时，磁通量传感器使用前应和被测拉索一起进行标定，材料、截面尺寸、生产工艺不同的拉索应分别进行标定，且传感器标定宜考虑温度因素。当磁通量传感器穿过拉索安装完成后，应进行可靠固定，防止在吊装或施工过程中滑动错位。

7.3.9 当采用表面应变测定法监测索力时，拉索表面应变和整体应变间的相关系数应进行标定。拉索表面应变可通过应变传感器和转换装置测量得到，转换装置应在索张拉之前安装，且应确保在索力监测过程中转换装置与索体之间不发生相对滑移。

7.4 振动监测

7.4.1 振动监测设备可选用力平衡式加速度传感器、电动式速度传感器、ICP 压电式加速度传感器、压阻式加速度传感器以及电容式加速度传感器等。

[条文说明] 7.4.1 力平衡式加速度传感器是通过反馈力与输入力之间的伺服平衡来测量输入力的一类低频传感器。电动式速度传感器基于电磁感应原理，将运动速度转换为线圈中的感应电势输出，常用于测量振动速度，辅以微分电路、积分电路可测量出振动加速度。ICP (integrated circuits piezoelectric) 压电式加速度传感器采用现代集成电路技术将传统的电荷放大器置于传感器中，所有高阻抗电路都密封在传感器内，并以低阻抗电压方式输出，输出电压幅值与加速度成正比。压阻式加速度传感器的敏感芯体由半导体材料制成电阻测量电桥，从而实现测量加速度信号，受到压力作用时，一对桥臂电阻变大，另一对桥臂电阻变小，电桥失去平衡，输出一个与压力成正比的电压。电容式加速度传感器基于电容原理的极距变化，其中一个电极是固定的，另一变化电极是弹性膜片，弹性膜片在外力作用下发生位移，使电容量发生变化。

7.4.2 进行振动监测前，宜估算结构的振动幅值与所关注的振动频率范围。

7.4.3 振动监测设备应符合下列规定：

- 1 振动监测设备宜具有良好的低频特性。
- 2 加速度传感器的量程不应低于被监测对象振动幅值的 1.2 倍。
- 3 加速度传感器的采样频率不应低于被监测对象所关注的最高频率的 3 倍。
- 4 振动监测设备应安装在结构振动敏感处；当进行结构动力特性测试时，振动监测设备应避免安装在被监测对象的模态节点区域。
- 5 振动监测设备应安装牢固，避免传感器和监测部位之间发生相对振动，且设备质量不宜过大，影响被监测对象的频谱特性。

6 当要求利用振动数据进行模态分析时，应确保各传感器数据采集的同步性。

7 部分振动监测设备宜低频持续监测，当振动幅度超过阈值时，应及时通知其他振动监测设备进行数据采集。

8 振动监测设备的采集时长应满足结构数据分析的需要，应根据监测参数选择合适的滤波器和窗函数对数据进行处理。

[条文说明] 7.4.3 模态节点指模态振型值为零的位置。

7.5 环境及环境作用监测

I 温湿度监测

7.5.1 温度传感器宜选用监测范围大、精度高、线性化且稳定性好的传感器；湿度传感器宜选用响应时间短、温度系数小、稳定性好且湿度滞后量小的传感器。

7.5.2 温湿度传感器应符合下列规定：

1 大气温度监测范围应覆盖 $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ ；结构温度监测范围上限宜超出大气温度年极大值 30°C 以上，下限宜低于大气温度年极小值 20°C 以上。

2 大气温度监测精度不宜大于 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ ，分辨力不宜大于 0.1°C ；结构温度监测精度不宜大于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，分辨力不宜大于 0.1°C 。

3 湿度监测范围宜为 $12\% \text{RH}\sim 99\% \text{RH}$ ，且精度不宜大于 $\pm 2\% \text{RH}$ 。

4 对于封闭结构，温度传感器宜均匀布置，监测结构温度场变化情况，并绘制结构温度分布等值线图。

5 用于大气环境监测的温湿度传感器应直接置于大气中以获得有代表性的温湿度值，可安装在结构表面或环境气象检测箱内，若安装在结构表面还应设置防晒、防水构造，减少日照或雨水对监测结果的影响。

6 当温湿度监测为长期监测时，监测参数应包括日平均温湿度、日最高温湿度以及日最低温湿度。

7 结构温度的监测频次宜与位移监测、应力应变监测的频次保持一致，且每日不宜少于两次。

II 风监测

7.5.3 风速、风向监测设备可选用机械式风速风向传感器、超声波式风速风向传感器等。

[条文说明] 7.5.3 机械式风速风向传感器包括三杯式风速传感器、螺旋桨式风向传感器等，其原理是利用转动部件的速度和角度判断风速和风向。超声波式风速风向传感器的原理是利用超声波在空气中传播速度受空气流动的影响来测量风速。风致响应监测设备可按照第 7.4 条确定。

7.5.4 风压监测设备可选用差压式风压传感器、表压式风压传感器以及绝压式风压传感器等。

[条文说明] 7.5.4 风压传感器一般采用压力传感器，一般分为差压式、表压式、绝压式三个类型，原理是利用其硅膜片一侧与被测系统相连接形成高压腔，另一侧为低压腔，当膜片两边存在压力差而发生形变时，膜片各点产生应力，从而使扩散电阻的阻值发生变化，电桥失去平衡，输出相应的电压，通过电压大小反映膜片所受的压力差值，其中，若低压腔为一个标准大气压，则为表压式传感器，若低压腔为真空，则为绝压式传感器。相对大气压力（ 10^5Pa ），结构工程领域的风压（ 10^3Pa ）属于微压级别，对绝压传感器精度要求相对较高；部分表压传感器的标准大气压来自传感器内部未受风影响的环境大气压，对于大跨度钢结构，其表面和周边一定范围内会形成一层静压场，如果传感器和采集装置全部置于其中，会导致表压传感器测量的脉动风压值偏小，因此在选取表压传感器时，应注意其参考大气压的测量构造，确保参考大气压不受静压场的影响；若有条件将差压传感器的参考压力端接入室内或不受建筑静压场影响的参考点位，差压式传感器是精度最高，准确性最好的传感器。

7.5.5 风速、风向传感器应符合下列规定：

- 1 风速传感器的量程应大于设计风速，精度不宜大于 0.1m/s 。
- 2 风向传感器的精度不宜大于 3° 。
- 3 机械式风速传感器的采样频率不应小于 1Hz ，超声波式风速风向传感器的采样频率不应小于 10Hz 。

4 风速、风向的监测参数应包括脉动风速、平均风速等，应绘制风玫瑰图。

5 当进行风速、风向监测时，应保证各传感器的测量同步性，对于同类监测设备，各测点的测量时间差宜控制在 200ms 以内；对于不同类监测设备，测量起始时间差宜控制在 500ms 以内。

6 环境风速宜采用实时持续监测，宜根据风速测量值来控制风压的采集。

[条文说明] 7.5.5 结构风致响应的采集可根据风速测量值控制。

7.5.6 风压传感器应符合下列规定：

- 1 风压传感器的量程应满足结构设计风场的要求。
- 2 风压传感器的精度不宜大于 $\pm 0.4\%F.S$ ，且不宜低于 10Pa。
- 3 风压传感器的非线性度应在 $\pm 0.1\%F.S$ 范围内。
- 4 风压传感器的采样频率不应小于 5Hz。
- 5 风压传感器的安装应避免影响结构外立面。

6 风压监测参数应包括平均风压、最大瞬时风压等，宜绘制监测结构表面的风压分布图。

7 当进行风压监测时，应保证各传感器的测量同步性，各测点的测量时间差宜控制在 200ms 以内。

III 地震作用监测

7.5.7 地震作用监测设备可选用强震仪。

[条文说明] 7.5.7 地震作用监测包括地震动与地震响应加速度，地震响应加速度监测设备可按照第 7.4 条确定。

7.5.8 强震仪应符合下列规定：

1 强震仪宜安置在被测区域内的地表处，且能有效隔离人车环境的影响。

2 强震仪应能有效捕捉地震信号，并及时进行数据采集，且宜符合 DB/T 10 相关规定。

IV 雨量监测

7.5.9 降水量监测设备可选用翻斗式雨量传感器、称重式雨量传感器、雷达式雨量传感器以及光学式雨量传感器等。

[条文说明] 7.5.9 翻斗式雨量传感器的原理是利用积水量达到一定高度时，翻斗失去平衡翻到，将降雨量转换为以开关量（翻斗翻到次数）形式表示的数字信息量输出。称重式雨量传感器基于单点测压原理，通过内置载荷元件对重量变化的快速响应测量降水量。雷达式雨量传感器的原理是利用多普勒雷达波技术测量降雨速度、降雨强度。光学式雨量传感器一般基于光学原理建立光信号与雨量的关系。

7.5.10 屋面天沟、雨水斗水位监测设备可选用超声波液位传感器等。

[条文说明] 7.5.10 超声波液位传感器的原理是利用超声波进行测距，通过测量超声波脉冲发射和返回的传输时间来测量水位的变化情况

7.5.11 雨量监测设备应符合下列规定：

1 雨量传感器的量程应根据当地的气候和气象条件确定，测量分辨力不宜低于 0.5mm，采样频率宜根据所监测参数随时间变化特性确定。

2 应根据结构形式确定水位监测部位，水位传感器应安装在固定基座或夹具上。

V 雪荷载监测

7.5.12 雪荷载监测设备可选用表压测量传感器、厚度测量传感器等。

7.5.13 雪荷载设备应符合下列规定：

1 雪荷载监测设备的量程和精度应根据当地的气候和气象条件确定，采样频率宜根据所监测参数随时间变化特性确定。

2 雪荷载监测设备应根据结构形式布置在降雪易积聚位置。

8 数据采集与分析

8.1 一般规定

8.1.1 数据采集与传输应确保获得高精度、不失真数据。

[条文说明] 8.1.1 数据采集与传输宜包含数据采集制度的确定，数据采集制度应根据监测参数类型、感知方法、传感器数量和分布确定，且应包括数据采集方式、触发机制和采样频率的确定等。

8.1.2 数据采集与传输的软硬件应满足传感器监测要求。

[条文说明] 8.1.2 监测期间数据采集与传输的软硬件应根据传感器输出信号类型、范围、兼容性、精度和分辨力等要求进行确定。

8.1.3 数据处理应能纠正或剔除异常数据，提高数据质量。

[条文说明] 8.1.3 数据处理应具备正确处理粗差、系统误差、偶然误差的功能，应能正确判断异常数据系由结构状态变化引起还是监测系统自身异常引起，且能剔除由监测系统自身引起的异常数据。对结构振动数据，还可采用数字滤波、去噪、截取等方法提高数据质量。

8.1.4 数据管理应具有标准化读写接口，应考虑数据的结构化、安全性、共享性以及使用便携性。

[条文说明] 8.1.4 数据管理应遵循“独立性、模块化、一致性、可扩展性、标准化和可移植性”的原则，应提供对各类信息的访问接口，并宜支持异构数据库间互操作，实现在不同系统或模块之间传递信息，实现网络环境下信息的交互和共享。安全性应考虑监控系统机房的温湿度、电力供应以及电磁干扰等，符合设备正常运转条件，应配备不间断电源、空调和防雷防电磁干扰设备，以及保证软硬件系统的安全，特别是软件系统的信息安全。数据共享指系统所有用户可访问数据库中的数据，多用户共建共用，共享数据服务，有利于维护数据的一致性。

8.2 数据采集

8.2.1 应根据大跨度钢结构的规模、测点位置与数量、监测设备类型，合理设计数据采集方式。测点及监测设备较多、监测部位距离较远或相对分散的结构宜采用分布式、或总体分布式与局部集中式的混合方式进行数据采集；测点及监测设备较少且监测部位集中的结构，宜采用集中式进行数据采集。

[条文说明] 8.2.1 数据采集方式的选择与大跨度钢结构规模、测点位置、监测设备类型、传感器数量和分布密切相关，监测设备空间分布较分散时，应考虑分布式的数据采集方式，同时保证设备间的连接可靠、稳定。

8.2.2 定时采样中，对于环境监测数据和应力应变等关键数据，施工阶段每日采集次数不应少于三次，运营阶段每日不应少于两次；对于内力变化较大的重要施工阶段（吊装、卸载等阶段）应适当增加采集次数，必要时制定针对性监测方案。

[条文说明] 8.2.2 运营阶段结构处于稳定状态下，从节约能耗的角度，一般为白天与夜晚各采集一次。

8.2.3 数据采集可采用定时采集模式、触发采集模式、以及两者混合的采集模式：

1 位移、内力、振动以及温度宜采用定时采集模式，采集时间应根据施工情况和运营使用情况确定。

2 地震作用宜采用触发采集模式。

3 风速、风压宜采用定时采集结合触发采集的混合采集模式。

[条文说明] 8.2.3 数据采集方案应根据监测参数类型、监测要求以及系统数据采集、传输、处理和管理能力确定，可选择定时采集、触发采集、混合采集等采集方案。风速、风压宜采用定时采集结合触发采集的混合采集模式，没有超过阈值时可采用定时采集，超过阈值时宜采用触发采集。

8.3 数据处理

8.3.1 监测数据应进行偶然误差与系统误差处理。

[条文说明] 8.3.1 监测数据分析前应进行数据处理、检查、评判来消除误差，以保证数据的精确性。误差包括偶然误差与系统误差。对采样频率较低的结构静态数据，可在每次采集时进行多次采样，取其平均值降低偶然误差影响；对采样频率较高的结构振动数据，可采用数字滤波降噪等方法降低偶然误差影响。系统误差可采用修正仪器或添加补偿等方法消除，如对传感器进行事先标定；对温度造成的应变采集误差可增加温度补偿片等。

8.3.2 对采集到的异常数据点，可通过拉伊达准则（ 3σ 准则）判定，当某个数据 x_b 符合下述条件：

$$|x_b - \mu| > 3\sigma$$

其中：

μ ——近期监测数据分布均值；

σ ——近期监测数据分布标准差；

则认为该数据为异常数据。

[条文说明] 8.3.2 监测数据的分布均值和标准差可采用移动窗的策略选取一段近期监测数据进行直接统计，也可通过贝叶斯推断方法进行实时估计。当常规监测过程中位移、内力发生明显变化、个别测点数据变化明显大于其他测点、监测值接近或达到预警阈值异常时，可通过拉伊达准则（ 3σ 准则）判定异常数据。当识别到异常数据后，宜补充采集一段附加数据，并结合监测部位附近其他测点的数据变化，判断异常数据系由结构状态变化引起还是监测系统自身异常引起。当数据异常判断为监测系统故障或缺陷原因时，应对异常测点传感器及监测子系统进行排查，并及时进行维护或完善。

8.3.3 当温度造成的位移、内力变化较明显时，应对温度造成的趋势项进行分离，并采用去除趋势项后的监测数据进行异常数据的判定。

[条文说明] 8.3.3 温度变化会引起测点内力的大幅度波动，在异常数据判定中，若忽略这部分趋势项的影响，易造成误警，因而应最大限度对温度造成的趋势项

进行去除。对温度引起的趋势项，当温度可观测时，可采用回归分析方法拟合应力应变与温度间的回归关系，并利用拟合得到的回归参数分离温度造成的趋势项；当温度不可观测时，可对多测点数据进行主成分分析，得到温度造成的主要分量，并据此进行各测点趋势项的分离。

8.3.4 数据缺失的处理应根据数据类型而定：

- 1 对于湿度、雨量等无需连续采集的数据，可忽略缺失值。
- 2 对于应力应变、温度等连续采集的数据，当数据缺失期间荷载变化较小时，可采用平均值或线性插值方法进行修复；当数据缺失期间结构荷载变化较多，且后期评估对修复数据精度要求较高时，可基于不同数据之间的相关性，采用多元线性回归、K 最近邻法、神经网络、概率主成分分析等方法进行数据修复。
- 3 对于加速度、风速、风压等具有稀疏特性的动态监测数据，可采用压缩传感方法进行缺失数据修复。

[条文说明] 8.3.4 ①多元线性回归法：通过建立数据缺失的测点与附近若干测点数据间的线性回归关系，利用后者对前者进行缺失数据修复。

②K 最近邻法：在特征空间中寻找 K 个最相似的样本，根据这 K 个样本的分类情况或者属性值评估未知数据的分类或属性值。对于监测数据修复，可将每一次采样得到的各测点数据看作多维坐标，在所有监测序列中选取与数据缺失点欧拉距离最近的 K 个样本，将这 K 个样本对应数据缺失点的值的平均作为缺失数据的修复结果。

③神经网络：在缺失数据修复前，首先利用多测点的完整数据训练神经网络模型，以表征各测点数据间的非线性关系，再基于训练好的网络，采用数据完整的测点对数据缺失的测点进行修复。

④概率主成分分析：主成分分析的一种概率形式，能够在完整数据较少时，利用最大期望算法找到各组数据间的隐式关系，进而对缺失数据进行修复，无需对完整数据进行训练。

⑤压缩传感：在信号满足稀疏性或可压缩性的条件下，直接对信号进行压缩采样，通过复杂度较高的重构算法来重构原始信号。

8.3.5 对于加速度等含噪信号,应进行滤波降噪、去直流、去趋势项、截取等处理。

[条文说明] 8.3.5 滤波降噪可采用 FFT 带通滤波、小波降噪等方法。截取信号应选用合适的窗函数,以减少对信号精度的影响。针对含噪信号,应对噪声进行来源检查,并应采取有效措施进行处理:应先排除仪器内部等因素造成的干扰,对存在的干扰信号进行时频分析,确定其特征参数;最后可根据具体情况,通过滤波降噪、去直流、去趋势项、截取等信号处理方法,提高信号的信噪比。

8.4 数据分析

8.4.1 数据分析宜包括图表分析、统计分析、对比分析和其他特殊分析：

- 1 图表分析包括各监测参数时程曲线图、加速度频谱图等。
- 2 统计分析包括最大值、最小值、平均值、均方根值、累计值等统计值。
- 3 特殊分析包括风参数分析、模态分析等。

[条文说明] 8.4.1 不同监测数据的分析方法一般不同，可参考表 8.4.1。

表 8.4.1 不同监测数据常用分析方法

监测项目	分析方法
位移	统计分析位移绝对最大值和累计位移，绘制位移变化曲线。
应力、应变	统计分析应力应变最大值、最小值、应力增量应力幅最大值等，绘制关键构件应力、应变的时程曲线。
索力	统计分析索力最大值、最小值、平均值等。
振动	统计分析加速度峰值、最大均方根值，绘制测点加速度时程曲线，频域分析（模态特征、频谱特征、频响特征等），时频域分析（小波变换等）。
温度、湿度	统计分析最高温度、最低温度等特征值，绘制构件断面最大温度梯度、结构整体温度分布图等。
风速、风向	统计分析日最大风速、平均风速，绘制风玫瑰图。
风压	统计分析风压最大值、平均值，绘制结构表面风压分布云图。
地震作用	准确识别出地震的发生，统计分析地震中加速度峰值、速度峰值、持续时间等。
雨量	统计本次降雨量、天降雨量、周降雨量、月降雨量、年降雨量。
雪荷载	统计分析积雪最大厚度和每日增值等，并绘制历史厚度增长曲线。

8.4.2 当采用多测点同步监测应力应变时，可利用主成分分析获取应力随外荷载的变化模式，进行环境作用分离、缺失数据插补、异常数据识别等分析。

[条文说明] 8.4.2 在进行主成分分析前应对各测点数据做归一化处理，然后采用一段时间的多测点数据构造样本协方差矩阵，并进行特征值分析，相应的特征向量为主成分向量，对应的特征值可反映该主成分所占的比重，特征值占比较大的前几阶主成分可表征应力应变数据在外荷载作用下的主要变化模式，数据在主成分上的投影可反映主要外荷载的大小。主成分分析为线性特征提取方法，对非

线性特征较明显的结构，可采用非线性主成分分析、局部主成分分析、混合概率主成分分析等非线性特征提取方法进行分析。

8.4.3 对于索力时程数据分析，应对监测索力与张拉成形索力、设计容许索力、破断索力进行对比分析，可根据索张力指标的变化对结构进行损伤识别。

8.4.4 对基于加速度数据的模态分析，应包括结构的自振频率、振型、阻尼比等参数，且应考虑温度对自振频率的影响、风速对阻尼比的影响、振动幅值对自振频率和阻尼比的影响。

8.4.5 对于施工阶段的监测数据分析，应结合施工方案及结构受力状态变化，对比分析监测数据结果与结构计算分析结果。

9 预警与评估

9.1 一般规定

9.1.1 应对监测项目各参数建立明确的预警指标，预警系统宜具备监测数据处理分析与结构状态分级预警功能。

[条文说明] 9.1.1 应根据工程特点、材料、结构计算分析最大值以及外界环境影响等因素建立明确、简洁、易懂的分级预警指标，本规程设黄色和红色两级。

9.1.2 预警系统宜具备预警信息通信功能，能将各种预警信息以电子邮件或短信等形式通知相关人员。

[条文说明] 9.1.2 预警系统应服务于业主单位或日常管理与运营维护部门，实现安全状态的实时预警，自动处理预警信息，并根据需要将各种预警信息及时通知相关人员和相关单位采取措施，并向上级部门和有关单位及时报送。当预警涉及的安全隐患已经消除或突发事件不满足相应级别预警启动标准时，应及时降级转化或撤销安全预警。预警通知方式应明显且多样化，可包括指示灯、喇叭、网络、可变情报板、短信、路侧广播等。

9.1.3 施工阶段应结合设计要求、施工过程等进行阶段性评估，并根据监测要求给出监测报告。运营阶段应定期将监测数据与设计要求、相关规范要求等进行对比，进行结构安全常规评估，并根据监测要求给出监测报告；当遭受台风、地震、雪灾、洪水等特殊事件，应进行结构安全特殊评估。

[条文说明] 9.1.3 评估系统应充分利用结构的监测数据，并结合结构日常、定期巡视情况和历史数据综合分析，实现对结构状态的定期常规评估。结构评估应准确反映结构的当前性能水平，及时提出相应的结构养护和管理建议。当发生特殊事件后，应进行的结构安全特殊评估，宜包括突发事件对结构的损伤程度评估、后期正常使用荷载作用下的安全性与使用性等评估，必要时组织专家研判。

9.1.4 监测报告应包括监测方案、监测周期内的监测结果、监测结论等。

[条文说明] 9.1.4 监测结果宜包括典型测点各参数结果、预警情况及评估结果、监测期间异常情况的处理记录等。

9.2 预警

9.2.1 预警阈值的设置可根据设计值、规范限定值、监测数据值、专家经验等确定，并定期对其进行检验、补充、修正和优化。

1 当监测数据为绝对值时，可设定预警阈值为设计值或规范限定值乘以折减系数，折减系数可根据测点所在构件重要性、结构所处阶段以及预警等级进行设定。

2 当监测数据为相对值时，可设定预警阈值为 $\mu \pm \beta\sigma$ ，其中， μ 为近期监测数据的分布均值， σ 为结构近期监测数据的分布标准差，指标 β 可根据测点所在构件重要性、结构所处阶段以及预警等级进行设定。

[条文说明] 9.2.1 施工阶段的预警阈值应结合施工过程设计值、规范限定值以及材料强度允许值等确定，可对监测项目各参数设置相应的限值要求和不同危急程度的预警值；运营阶段的预警阈值应根据结构性能，结合设计值、规范限定值、材料强度允许值、长期数据积累等，提出与结构安全性、适用性和耐久性相应的限值要求和不同危急程度的预警值。不同阶段预警阈值的设置宜符合 9.2 节相关规定。

对监测数据进行处理也可以得到预警阈值，但应通过从服役起至少一年且结构未见异常的连续监测数据得到。由于大跨度钢结构属于一种典型的时变结构，在其长期服役过程中，其性能具有明显的时变特征。因此，随着结构运营年限的增加，预警阈值应根据环境变化、危险种类、结构状态、认知深入而不断补充、修正和优化，使其更加合理。

监测数据的分布均值和标准差可采用移动窗策略选取近期一段时间内的监测数据进行直接统计，也可通过贝叶斯推断方法进行实时估计。当监测数据中环境作用引起的趋势项较明显时，应以去除趋势项后的数据为对象，设定相应的预警阈值并进行预警判断。

9.2.2 安全预警宜设黄色和红色两级。当某监测参数出现黄色预警时，管养单位应加强关注，并进行跟踪观察；当某监测参数出现红色预警

时，管养单位应连续密切关注，应查明报警原因，采取适当检查、应急措施，并应及时进行结构安全评估。

9.2.3 环境监测参数预警阈值设定应符合下列规定：

1 当最高温度、最低温度、最大温差超过设计值时，应进行黄色预警；当最高温度、最低温度、最大温差超过 1.2 倍设计值时，应进行红色预警。

2 当构件内、外最大湿度值超过设计值时，宜进行黄色预警。

3 当最大平均风速大于 0.8 倍设计风速时，宜进行黄色预警；当最大平均风速大于设计风速时，应进行红色预警。

4 当最大降雨量超过设计值时，宜进行黄色预警。

5 当水平地震加速度峰值大于多遇地震动峰值加速度时，宜进行黄色预警；当水平地震加速度峰值大于罕遇地震动峰值加速度时，应进行红色预警。

[条文说明] 9.2.3 对于一般钢材来说，常温下的临界湿度在 60%~70%之间，相对湿度超过临界湿度时，钢的腐蚀速率显著增加。

9.2.4 施工阶段结构监测预警阈值应符合下列规定：

1 当位移或变形大于 0.8 倍设计值或 0.8 倍规范限定值时，应进行黄色预警；当位移或变形大于设计值或规范限定值时，应进行红色预警。

2 当应力监测值大于 0.9 倍设计值或 0.9 倍规范限定值时，应进行黄色预警；当应力监测值大于设计值或规范限定值时，应进行红色预警。

9.2.5 运营阶段结构监测预警阈值应符合下列规定：

1 当位移或变形大于 0.8 倍设计值或 0.8 倍规范限定值时，应进行黄色预警；当位移或变形大于设计值或规范限定值时，应进行红色

预警；当相对位移或变形超出 $\mu \pm 3.5\sigma$ 范围时，应进行黄色预警；当相对位移或变形超出 $\mu \pm 4.5\sigma$ 范围外时，应进行红色预警。

2 当应力监测值大于 0.9 倍设计值或 0.9 倍规范限定值时，应进行黄色预警；当应力监测值大于设计值或规范限定值时，应进行红色预警。

3 当索力监测值与设计值正负偏差大于 10%时，应进行黄色预警；当索力监测值与设计值正负偏差大于 15%时，应进行红色预警。

4 当一个月内发现 10 次及以上黄色预警时，应进行红色预警。

[条文说明] 9.2.5 相对位移或变形超出 $\mu \pm 3.5\sigma$ 范围的概率约为 0.0465%，相对位移或变形超出 $\mu \pm 4.5\sigma$ 范围的概率约为 $6.79 \times 10^{-4}\%$ 。

9.3 评估

9.3.1 除实时预警外，监测过程中应定期开展对大跨度钢结构的安全评估，包括结构构件评估和结构整体评估。

[条文说明] 9.3.1 本条所述结构整体，包括地基基础、下部承重结构、围护结构系统，以及屋盖系统、柱子系统等所构成的统一整体；结构构件是指各类承重结构或结构构件。

9.3.2 结构构件评估指标可按以下方式计算：

1 轴向受力构件强度指标：

$$I_{cs,ba} = \left| \frac{A_n f}{A \gamma_0 \gamma_R \sigma} \right|$$

压弯或拉弯构件强度指标：

$$I_{cs,be} = \left| \frac{f}{\gamma_0 \gamma_R \sigma_{be}} \right|$$

索构件强度指标：

$$I_{cs,tc} = \left| \frac{[F]}{\gamma_0 \gamma_R F_{max}} \right|$$

其中：

σ ——测得的构件内应力；

f ——构件材料设计强度；

A_n ——构件净截面面积；

A ——构件毛截面面积；

σ_{be} ——由测得的截面四向应力计算的折合应力；

$[F]$ ——索的极限抗拉力标准值；

F_{max} ——实测索拉力最大值；

γ_0 ——结构重要性系数；

γ_R ——结构构件抗力分项系数，轴向受力构件取 1.15，受弯构件取 1.11，索构件取 2.0。

2 轴向受力构件稳定性指标:

$$I_{cb,ba} = \left| \frac{\varphi f}{\gamma_0 \gamma_R \sigma} \right|$$

压弯或拉弯构件稳定性指标:

$$I_{cb,be} = \left| \frac{f}{\gamma_0 \gamma_R \sigma_{be}} \right|$$

其中:

σ ——测得的构件内应力;

f ——构件材料设计强度;

φ ——构件稳定系数;

σ_{be} ——由测得的截面四向应力计算的折合应力;

γ_0 ——结构重要性系数;

γ_R ——结构构件抗力分项系数, 轴向受力构件取 1.15, 受弯构件取 1.11。

9.3.3 结构整体评估指标可按以下方式计算:

1 结构整体刚度指标:

$$I_{ss} = \left| \frac{[\Delta]}{\gamma_0 \Delta_{max}} \right|$$

其中:

$[\Delta]$ ——《空间网格结构技术规程》JGJ 7-2010 规定的结构容许挠度值;

Δ_{max} ——结构实测的最大挠度值;

γ_0 ——结构重要性系数。

2 结构整体稳定性指标:

$$I_{sb} = \left| \frac{q_{cr,s}}{\gamma_0 K (q_G + q_Q)} \right|$$

其中:

$q_{cr,s}$ ——根据结构修正数值模型计算得到的稳定极限承载力；

q_G ——永久荷载标准值；

q_Q ——活荷载标准值。

K ——规范规定的安全系数，当按弹性全过程分析时取 4.2。

3 结构动力特性指标：

$$I_{sd} = \left| \frac{[\Delta]_d}{\gamma_0 \Delta_{dmax}} \right|$$

其中：

$[\Delta]_d$ ——《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 规定的动力组合荷载作用下结构的容许挠度值；

Δ_{dmax} ——根据结构动力修正模型计算得到的动力组合荷载作用下的最大挠度值；

γ_0 ——结构重要性系数。

9.3.4 结构评估指标等级宜按表 9.3.1 判定。

表 9.3.1 结构评估指标等级划分

评估指标	$I_{cs,ba} / I_{cs,be} / I_{cs,tc}、I_{cb,ba} / I_{cb,be}、I_{ss}、I_{sb}、I_{sd}$			
分级	甲级	乙级	丙级	丁级
分级标准	≥ 1.00	$< 1.00, \geq 0.95$	$< 0.95, \geq 0.90$	< 0.90

1 甲级：符合现行规范规定的相应性能要求，不必采取措施。

2 乙级：略低于现行规范规定的相应性能要求，仍能满足下限水平要求，可不采取措施。

3 丙级：不符合现行规范规定的相应性能要求，应采取措施。

4 丁级：严重不符合现行规范规定的相应性能要求，必须及时采取措施。

[条文说明] 9.3.4 对已有大跨度钢结构构件进行评估时，除应考虑材料性能和结构构件的实际情况外，尚应充分考虑缺陷、损伤、腐蚀、施工偏差和过大变形等因素的影响。

9.3.5 基于钢构件使用性的安全评估应符合下列规定：

1 钢构件的使用性等级应按变形、偏差等项目进行评定，并取其中最低等级作为构件的使用性等级。

2 钢构件的变形应包括荷载作用下梁、板等受弯构件的挠度；钢构件的偏差应包括施工过程中存在的偏差和使用过程中出现的永久性变形；钢构件的变形和偏差宜按下列规定评定等级：

1) 甲级：满足国家现行相关设计规范和设计要求，不必采取措施；

2) 乙级：能基本满足国家现行相关设计规范和设计要求，尚不明显影响正常使用，可不采取措施；

3) 丙级：不符合国家现行相关设计规范和设计要求，对正常使用有明显影响，应采取措施；

4) 丁级：严重不符合国家现行相关设计规范和设计要求，危害结构安全，使结构无法正常使用，必须及时采取措施。

[条文说明] 9.3.5 本条所指的构件变形是荷载作用下钢构件的弹性变形，一般为梁、板等受弯构件的挠度或局部变形。在国家现行相关设计标准中，包括《钢结构设计标准》GB 50017、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018、《空间网格结构技术规程》JGJ 7、《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 等，规定有详细的变形控制项目、容许值和计算方法。构件变形项目评为甲级的，应满足这些设计标准的要求(即标准容许值)；如果工艺上对构件变形有特别设计要求，还应满足设计要求。

钢构件的偏差具体所指项目可参见国家现行相关施工验收标准和产品标准，并按这些标准确定是否满足要求，满足要求的使用等级评为甲级。现行施工验收标准包括《钢结构工程施工质量验收标准》GB 50205、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018、《空间网格结构技术规程》JGJ 7、《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB 51022 等，产品标准包括《热轧型钢》GB / T 706、《热轧 H 型钢和部分 T 型钢》GB / T 11263、《冷弯型钢通用技术要求》GB / T 6725、《结构用冷弯空心型钢》GB / T 6728、《通用冷弯开口型钢》GB / T 6723、《热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差》GB / T 709、《建筑用压型钢板》GB / T 12755、

《无缝钢管尺寸、外形、重量及允许偏差》GB / T 17395、《直缝电焊钢管》GB / T 13793 等。

使用过程中出现的永久性变形在性质上与施工过程中的某些偏差相同,可按构件偏差项目评定使用性等级。需要注意的是,偏差较大有可能导致承载能力的降低,此时应按承载能力评级。

9.3.6 宜结合各项指标、采用层次分析法对结构进行综合评估分析。

[条文说明] 9.3.6 基于层次分析法对结构进行评估的基本思想:将结构安全性指标按由整体到局部的原则分解为不同层次的详细指标,然后利用求解判断矩阵特征向量的办法,求得每一层次各元素对上一层次某元素的优先权重,最后利用加权和方法递阶归并各详细指标的贡献,最终求得结构安全性指标。也可采用专家评议法、德尔菲法、影响图法、蒙特卡洛法、神经网络法、模糊理论等其他综合评估方法对结构进行综合评估分析。

10 监测系统施工、安装与验收

10.1 一般规定

10.1.1 监测系统施工与安装应依据监测系统设计文件，开展传感器安装、数据采集设备安装、数据传输设备安装、监控中心配置以及软硬件系统联调的工作。

[条文说明] 10.1.1 监测中心一般指用于安放监测系统相关的服务器、工作站、存储介质、显示装置等设备的集中场所。

10.1.2 监测系统性能验收应由监测系统施工单位组织，根据合同约定内容对监测系统试运行状况进行检验，并形成相应的验收资料。

10.1.3 监测系统竣工验收应由监测系统建设单位组织，根据合同约定内容对监测系统施工完成的内容和质量进行检验，并形成相应的验收资料。

10.2 监测系统施工

10.2.1 监测系统施工的准备工作的应符合下列规定：

1 监测系统设计人员应向监测系统建设单位与监测系统施工单位的相关人员进行设计交底。

2 监测系统施工人员应对监测系统设计文件进行检查，若发现问题应及时申请办理设计变更手续。

3 监测系统施工单位应建立技术和安全交底制度，应对施工人员进行交底。

4 监测系统施工方案应包括监测施工制图。

10.2.2 监测系统施工应符合下列规定：

1 对于施工监测，监测系统施工应服从工程施工现场的统一管理。

2 对于施工监测，监测系统施工应与其他相关工种的施工顺序和进度计划协调一致；当与其他工种穿插施工时，应做好监测设备、线缆以及标识的保护工作。

3 对于运营监测，监测系统施工不应影响结构及附属设施的正常运行。

4 对于运营监测，监测系统的施工不应降低结构的安全性、适用性以及耐久性。

5 监测系统使用的传感器、原材料、安全防护用品、机械设备以及生产工具等应为合格产品，且在使用有效期内。

6 监测系统施工过程中的安全技术、劳动保护、防火措施以及环境保护应符合国家现行有关法律法规和有关标准的规定。

7 监测系统中自主研发的软件应经安全性、可靠性、可恢复性以及兼容性等测试合格后方可部署。

10.3 监测施工制图

10.3.1 同一个监测工程采用的图纸幅面规格应一致；所用的线型、字体、图形符号、文字符号以及制图方式等应一致。

10.3.2 当同一类型或同一系统的监测施工图的数量超过 2 时，应进行编号，且应符合下列规定：

1 监测施工图图样的图名和标题栏内的图名应能准确表达图样、图纸构成的内容，做到简练、明确。

2 编号宜选用 1、2、3……数字顺序进行排列。

3 监测施工图应按图纸目录、设计说明、测点平面图、线路路由平面图、各类监测设备对应监测部位及测点布置的监测详图等编排。

[条文说明] 10.3.2 监测详图指各类监测设备对应监测部位及测点布置详图。

10.3.3 监测施工图中测点平面图、监测详图的制图比例，宜与工程设计的主导专业一致，采用的比例宜符合表 10.3.1 的规定，并应优先采用常用比例。

表 10.3.1 测点平面图和监测详图的制图比例

序号	图名	常用比例	可用比例
1	测点平面图	1:50、1:100、1:150、1:200、1:500	1:1000
2	监测详图	10:1、5:1、2:1、1:1、1:2、1:5、1:10、1:20	4:1、1:25、1:50

10.3.4 图样的图线宽度 (b) 应根据图纸的类型、比例和复杂程度，按现行国家标准《房屋建筑制图统一标准》GB/T-50001 的规定选用，并宜为 0.5mm、0.7mm、1.0mm。

10.3.5 图样及说明中所需书写的文字、数字以及符号等，均应笔画清晰、字体端正、排列整齐、避免重叠；标点符号应清晰正确；且应符合下列规定：

1 字高大于 10mm 的文字宜采用 TrueType 字体。

2 汉字宜采用 TrueType 字体中的宋体字型，采用矢量字体时应为长仿宋体字型，汉字高度不宜小于 5mm，说明中的汉字高度不宜小于 3.5mm。

3 拉丁字母、阿拉伯数字以及罗马数字宜采用 TrueType 字体中的 Roman 字型，字母和数字的高度不宜小于 2.5mm。

10.3.6 监测测点图样宜采用表 10.3.2 中的图形符号及标注方法，且绘制应符合如下规定：

- 1 图形符号可根据图纸比例放大或缩小。
- 2 图纸中应包括测点图样和带编号的文字标注。

表 10.3.2 常用监测测点的图形符号及标注

序号	监测项目	监测测点图例	监测测点标注	监测测点编号
1	位移		D	D-001
2	应变		S	S-001
3	索力		C	C-001
4	振动		A	A-001
5	温度		T	T-001
6	风速、风向		WS	WS-001
7	风压		WP	WP-001
8	地震作用		E	E-001
9	雪荷载		SP	SP-001
10	雨量		RF	RF-001
11	湿度		H	H-001

注：监测测点编号宜综合测点标注和测点数字编码进行编制，数字编码位数的选择宜根据具体情况确定。当现有符号和标注不满足设计要求时，可按图形符号生产原则产生新的图形符号。

10.3.7 监测布线图样宜采用表 10.3.3 中的图形符号及标注方法。

表 10.3.3 常用监测布线的图形符号及标注

序号	布线类型	布线线型图例	布线标注
1	电缆	----	EC
2	光缆	——	OC

注：当现有符号和标注不满足设计要求时，可按图形符号生产原则产生新的图形符号。

10.3.8 图样中的线缆敷设方式宜采用表 10.3.4 的文字符号。

表 10.3.4 线缆敷设方式标注的文字符号

序号	名称	文字符号
1	穿普通碳素钢电线套管敷设	MT
2	穿硬塑料导管敷设	PC
3	穿阻燃半硬塑料导管敷设	FPC
4	穿塑料波纹电线管敷设	KPC
5	电缆托盘敷设	CT
6	电缆梯架敷设	CL
7	金属槽盒敷设	MR
8	塑料槽盒敷设	PR
9	直埋敷设	DB
10	电缆沟敷设	TC

10.4 监测系统安装

10.4.1 传感器子系统的安装应符合下列规定：

1 安装前应进行施工现场勘查，应结合监测系统设计文件、监测要求、现场条件、传感器说明书以及施工可行性等综合考虑，选择合适的传感器安装方式。

2 传感器安装工作宜按照安装部位处理、传感器定位、传感器固定、保护装置安装、安装部位恢复的顺序依次进行。

3 传感器及引出线缆应满足设计技术指标要求，安装前应核查产品的说明书、合格证，并测试传感器的工作性能。

4 现场施工不应降低结构的安全性、适用性以及耐久性，且不得对传感器的外观与使用性能造成影响。

5 安装传感器使用的基座、支架、夹具和保护装置应具有足够的强度、刚度和耐久性。

6 传感器安装应牢固，不应出现滑动和旋转。

7 对于增量式测量测点，应在结构受外力作用前安装传感器，安装完成后应测定初始值。

8 对于关键构件、重要部位的测点，传感器的安装宜留有余量，提高测点鲁棒性，便于数据的相互校核。

10.4.2 数据采集子系统的安装应符合下列规定：

1 安装前应进行施工现场勘查，应结合监测系统设计文件、监测要求、现场条件以及传感器安装等综合考虑，选择合适的安装方法。

2 数据采集子系统的设备与线缆应满足设计技术指标要求，安装前应检查产品的说明书、合格证和工作性能。

3 数据采集子系统自身结构的强度、稳固性以及质量应满足监测系统设计要求。

4 数据采集子系统的安装与调试过程应有详细记录，验收后应建立安装和调试文档。

10.4.3 数据传输子系统的安装应符合下列规定：

1 线缆敷设宜包括支架、桥架和线缆三部分的安装，支架和桥架应进行防腐处理。

2 线缆敷设应满足监测系统设计要求，并按最短路径原则集中安装和敷设，且敷设线路不应影响结构的正常使用和维修。

3 线缆应具有一定的冗余度，安装过程中应避免发生破损，各部分连接应牢固可靠。

4 数据传输设备安装包括机柜安装和终端设备安装，应在线缆敷设完成后进行。

5 应建立包括线缆和设备类型、型号、编号以及接口的安装信息文档，并在两端、拐弯处、交叉处装设统一、清晰的标签，线缆和设备的保护装置应可靠有效。

6 数据传输子系统安装完成后，工作性能应正常，数据传输应稳定可靠。

10.5 监测系统验收

10.5.1 监测系统验收应包括监测系统性能验收和监测系统竣工验收。监测系统性能验收应包括传感器子系统验收、数据采集子系统验收以及数据传输子系统验收等。

10.5.2 监测系统性能验收应符合下列规定：

- 1 监测系统性能验收宜在监测系统试运行结束后进行，试运行的时长应符合监测系统设计文件的规定，当无相关规定时不得少于 3 个月。
- 2 软件功能应符合监测系统设计文件的规定。
- 3 监测系统的无故障工作时间不应少于 95% 监测要求使用时间。
- 4 监测数据缺失率不宜大于 5%。
- 5 监测系统性能验收资料宜包括监测系统试运行报告、软件使用手册、监测系统测试与调试过程记录等。

10.5.3 监测系统竣工验收应符合下列规定：

- 1 监测系统竣工验收宜在性能验收完成后 3 个月内进行。
- 2 监测系统竣工验收资料宜包括监测系统设计文件与设计变更记录，材料、设备与软件的进场验收报告，性能验收资料，施工和试运行期间异常事件发生和处理记录等。

10.5.4 传感器子系统验收应符合下列规定：

- 1 各类传感器的验收宜在施工完成后 7 日内进行。
- 2 各类传感器的抽检率不应小于 30% 且不少于 1 个，抽检合格率应为 100%。
- 3 传感器的类型、型号和数量应符合监测系统设计文件的规定。

4 传感器的外观应无明显破损、变形、划痕、剥落和锈蚀现象，传感器的表面或附近应设有对应完整的信息标识。

5 传感器的安装位置和保护装置应符合安装要求。

10.5.5 数据采集子系统验收应符合下列规定：

1 数据采集设备的布置应整齐合理。

2 数据采集设备的功能应正常。

10.5.6 数据传输子系统验收应符合下列规定：

1 各类数据传输设备宜在施工完成后 7 日内进行。

2 有线传输设备应进行连通性检测。

3 线缆和数据传输设备的外观应无明显破损、变形、划痕、剥落和锈蚀现象，且线缆两端、拐弯处、交叉处应设有对应完整的信息标识。

4 线缆和数据传输设备的功能应正常，数据传输应稳定可靠且响应延迟时间应满足监测要求。

5 线缆和数据传输设备的抽检合格率应为 100%。

附录 A 典型大跨度钢结构监测部位及测点布置参考

A.0.1 对于常规形式网架结构的应力应变监测，其具体监测部位及测点布置可综合监测方案成本，参考表 A.0.1 中三类测点布置参考图执行。对于两个跨度方向的弦杆，测点宜间隔布置；对于支座区域的腹杆，测点宜间隔布置。

[条文说明] A.0.1 表中三类测点布置参考图与第 4.1.4 条构件重要性呼应，系通过建立数值模型计算所得：参考图①主要关注 I 类构件，即核心受力构件，图中通过 RGB(60,60,60)色号区域表示其所监测部位；参考图②适当增设 II 类构件的监测，RGB(120,120,120)色号区域表示参考图②相较于参考图①增加的监测部位；参考图③补充增设部分各类构件的监测，RGB(180,180,180)色号区域表示参考图③相较于参考图②增加的监测部位。拉索预应力网架结构的应力应变监测也可参照表 A.0.1 执行。

A.0.2 对于常规形式网壳结构的应力应变监测，其具体监测部位及测点位置可综合监测方案成本，参考表 A.0.2 中三类测点布置参考图执行。对于球壳的径向弦杆，测点宜间隔布置；对于柱壳的纵向弦杆、横向弦杆，测点宜间隔布置。

[条文说明] A.0.2 表中三类测点布置参考图与第 4.2.4、4.2.5 条构件重要性呼应，系通过建立数值模型计算所得，参考图表达方式同条文说明第 A.0.1 条。拉索预应力网壳结构的应力应变监测也可参照表 A.0.2 执行。

A.0.3 对于常规形式张弦梁结构的应力应变监测，其具体监测部位及测点位置可综合监测方案成本，参考表 A.0.3 中三类测点布置参考图执行。

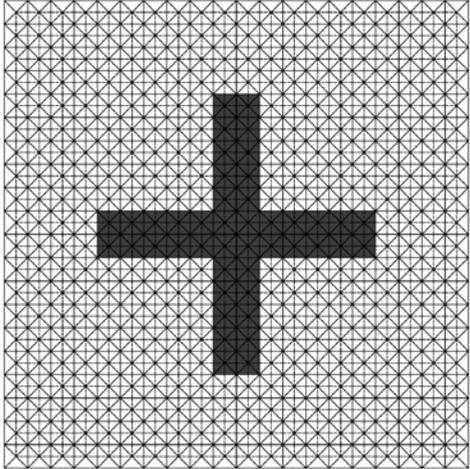
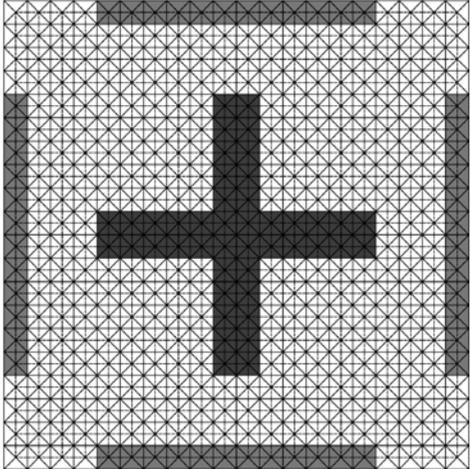
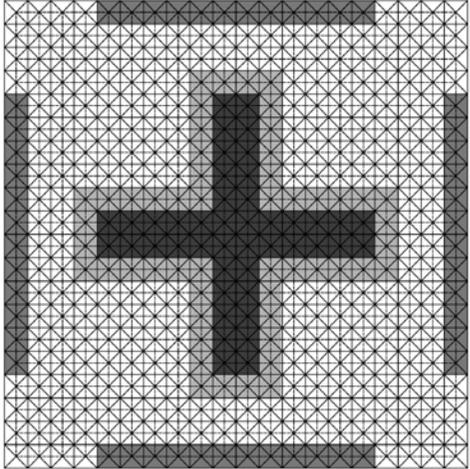
[条文说明] A.0.3 表中三类测点布置参考图与第 5.3.4 条构件重要性呼应，系通过建立数值模型计算所得：参考图①主要关注 I 类构件，图中通过 RGB(60,60,60)

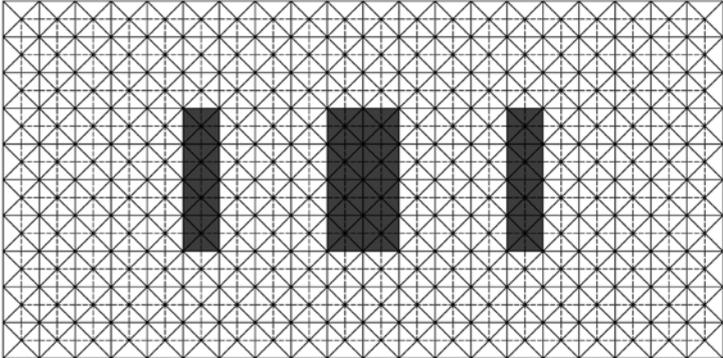
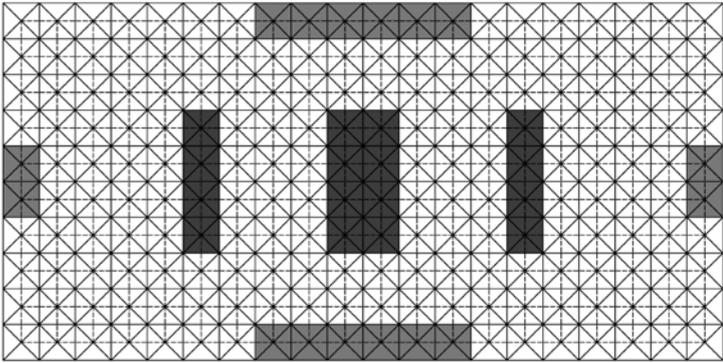
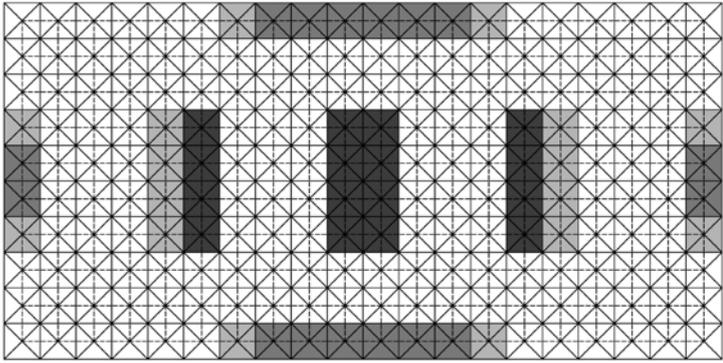
色号实心圆表示其测点布置；参考图②适当增设 II 类构件的监测，RGB(120,120,120)色号区域表示参考图②相较于参考图①增加的测点布置；参考图③补充增设部分各类构件的监测，RGB(180,180,180)色号区域表示参考图③相较于参考图②增加的测点布置。

A.0.4 对于平行移动式、绕枢轴转动式、折叠移动式三种典型开合屋盖结构的应力应变监测，其具体监测部位及测点布置可综合监测方案成本，参考表 A.0.4 中三类测点布置参考图执行。

[条文说明] A.0.4 表中三类测点布置方案系通过建立数值模型计算所得：参考图①主要关注台车、导轨、转轴、驱动系统、缓冲位置构件；参考图②适当增设跨中、悬挑位置构件的监测；参考图③补充增设上述位置附近、间隔位置构件的监测；方案图表达方式同条文说明第 A.0.3 条。

表 A.0.1 网架结构参考监测部位及测点布置

类型	支承方式	长宽比	测点布置参考图①	测点布置参考图②	测点布置参考图③
平板矩形	周边支承	1:1			

类型	平板矩形
支承方式	周边支承
长宽比	2:1
测点布置参考图①	
测点布置参考图②	
测点布置参考图③	

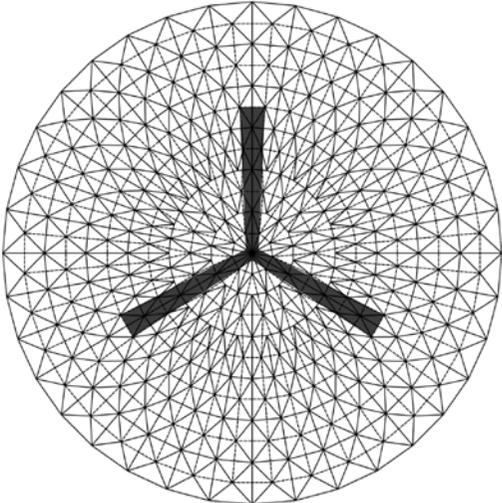
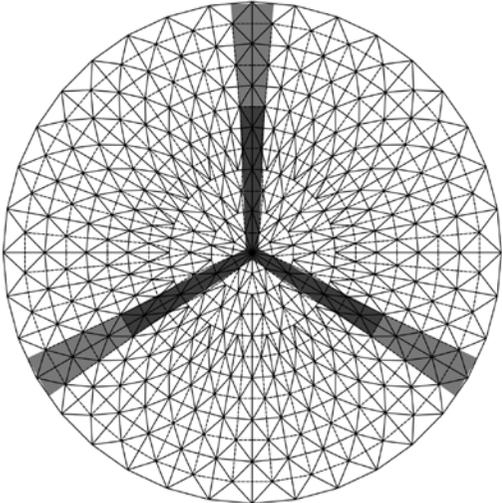
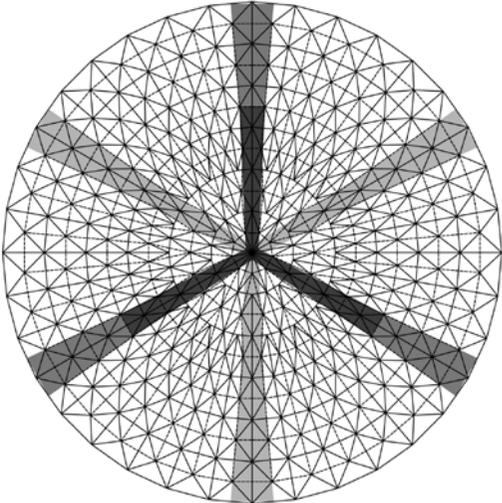
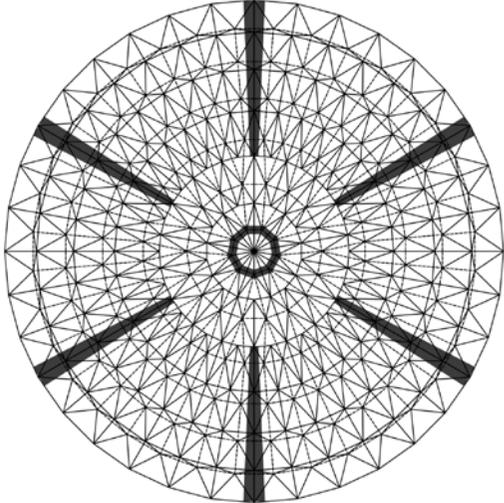
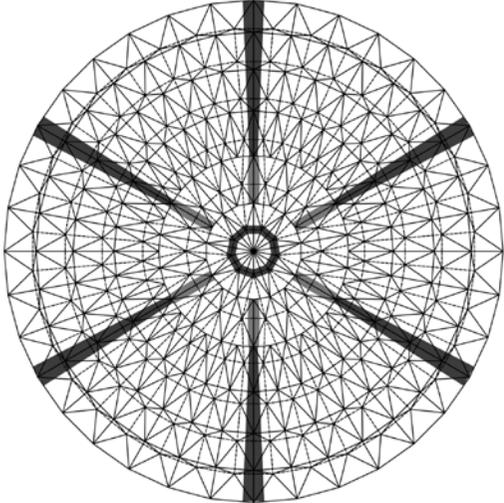
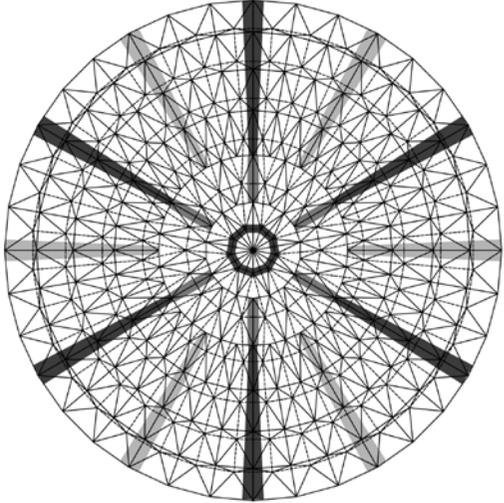
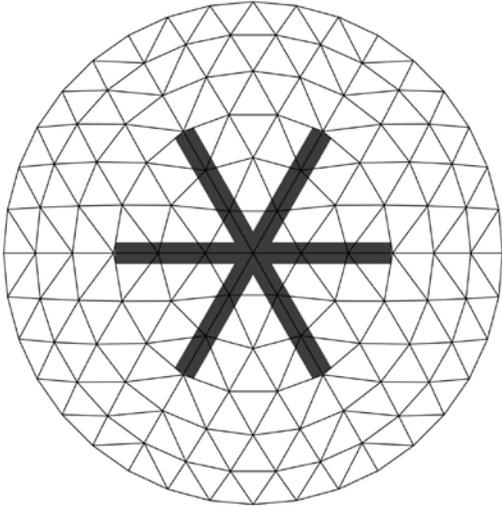
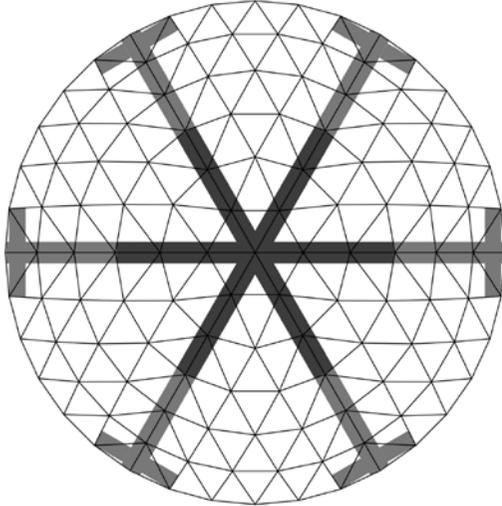
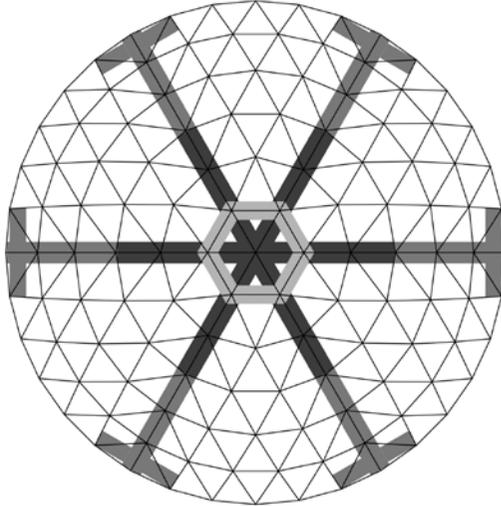
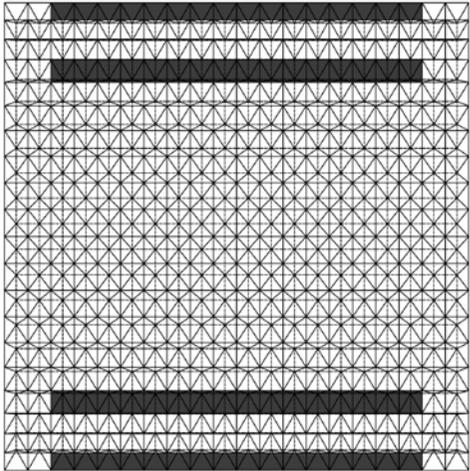
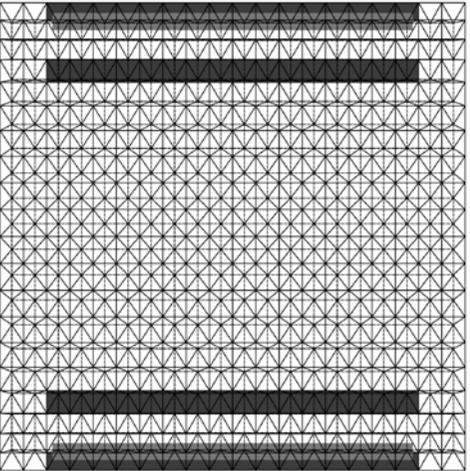
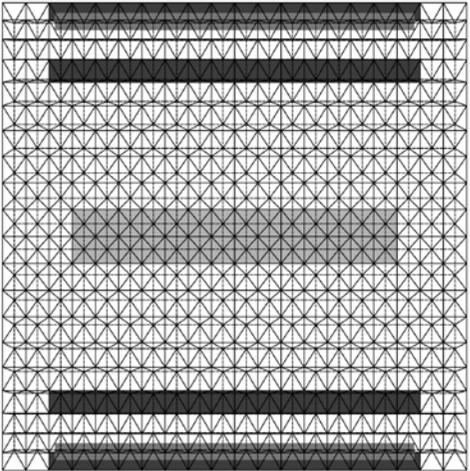
类型	支承方式	测点布置参考图①	测点布置参考图②	测点布置参考图③
平板圆形	周边支承			

表 A.0.2 网壳结构参考监测部位及测点布置

类型	支承方式	矢跨比	测点布置参考图①	测点布置参考图②	测点布置参考图③
双层球面网壳	周边支承	1:4			

类型	支承方式	矢跨比	测点布置参考图①	测点布置参考图②	测点布置参考图③
单层球面网壳	周边支承	1:4			

类型	支承方式	矢跨比	测点布置参考图①	测点布置参考图②	测点布置参考图③
双层柱面网壳	两边支承	1:4			

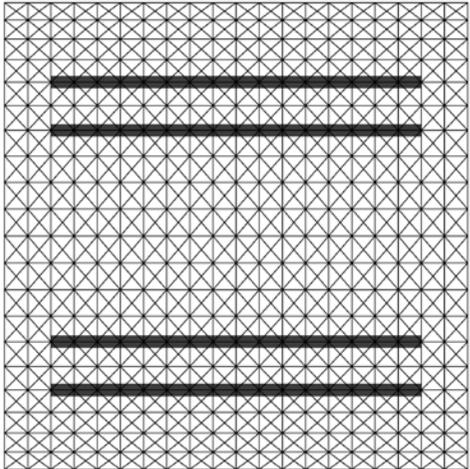
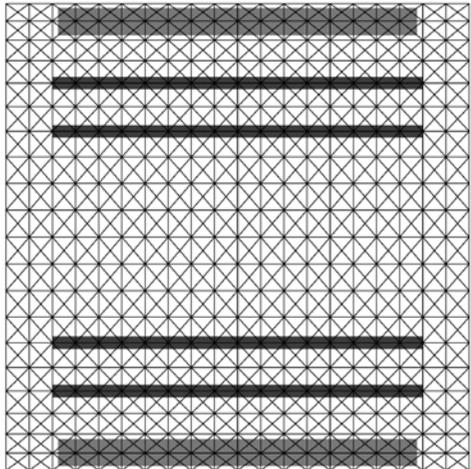
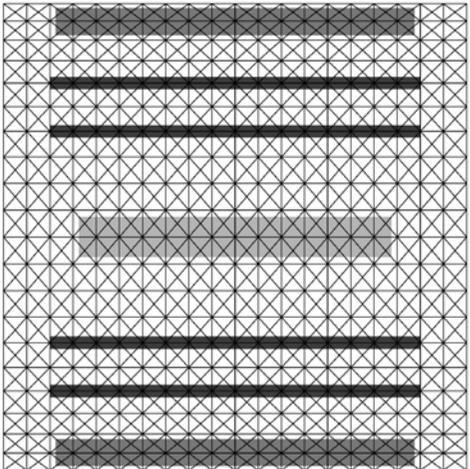
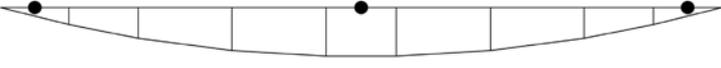
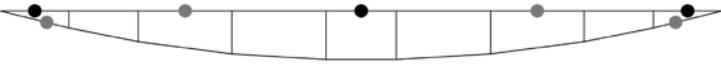
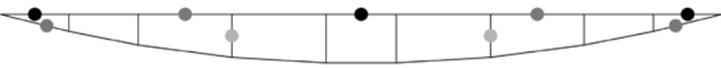
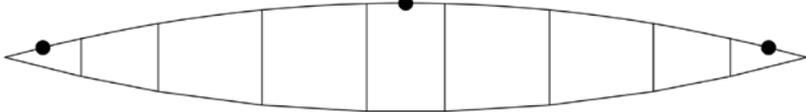
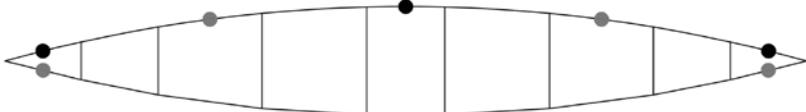
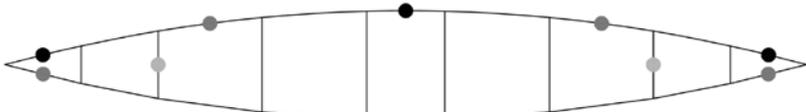
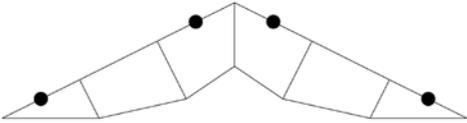
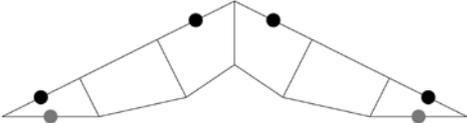
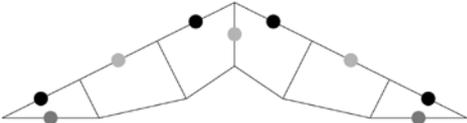
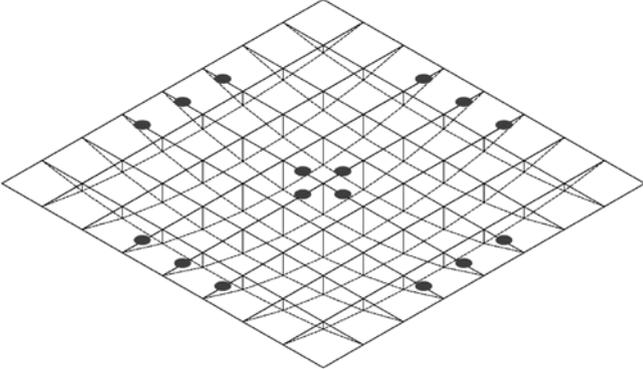
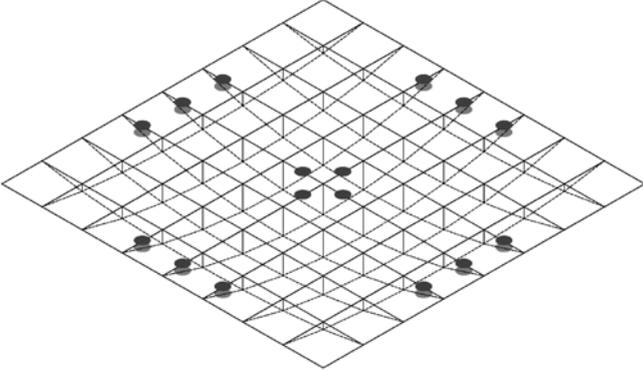
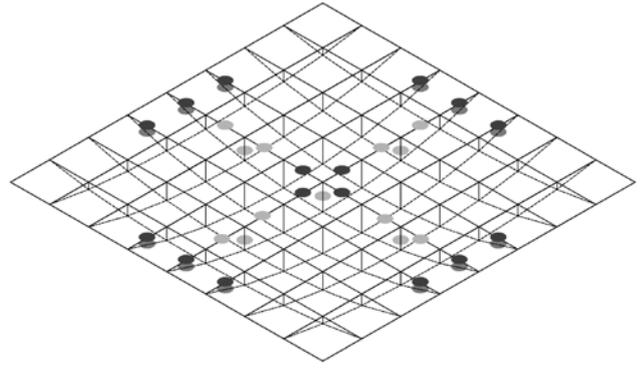
类型	支承方式	矢跨比	测点布置参考图①	测点布置参考图②	测点布置参考图③
单层柱面网壳	两边支承	1:4			

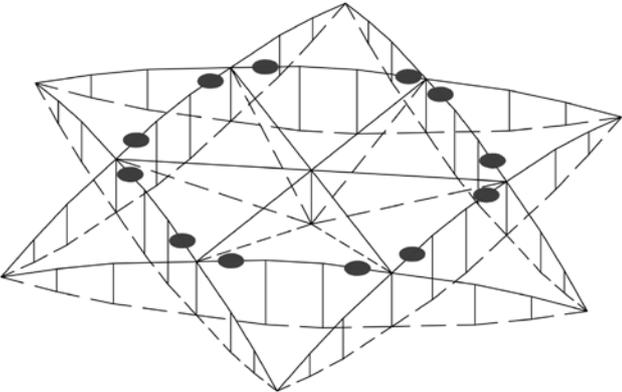
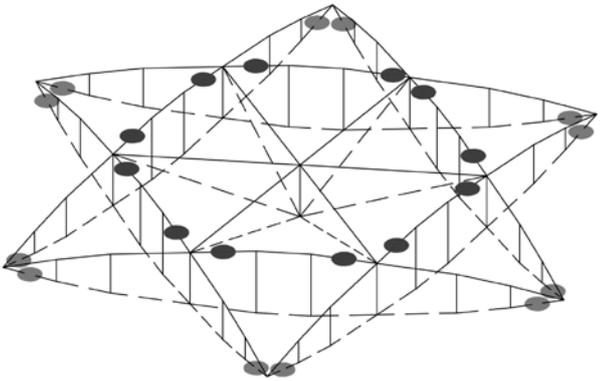
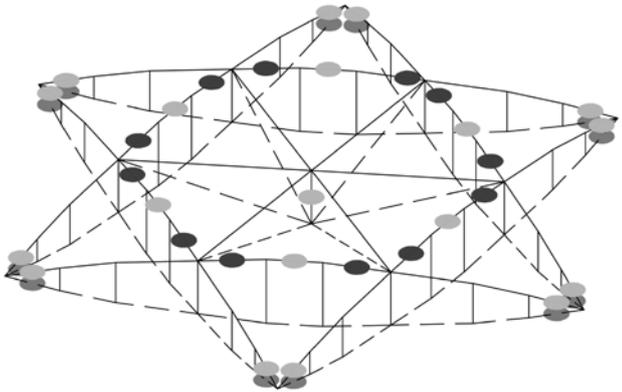
表 A.0.3 张弦梁结构参考监测部位及测点布置

类型		直梁型
支承方式		两端支承
测点布置参考图①		
测点布置参考图②		
测点布置参考图③		

类型		拱形
支承方式		两端支承
测点布置参考图①		
测点布置参考图②		
测点布置参考图③		

类型	人字拱形
支承方式	两端支承
测点布置参考图①	
测点布置参考图②	
测点布置参考图③	

类型	双向式
支承方式	周边支承
测点布置参考图①	
测点布置参考图②	
测点布置参考图③	

类型	多向式
支承方式	周边支承
测点布置参考图①	
测点布置参考图②	
测点布置参考图③	

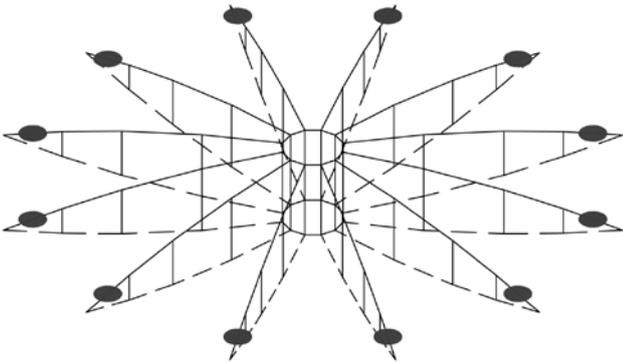
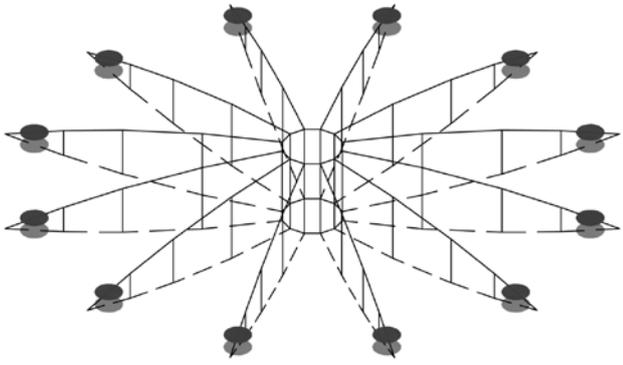
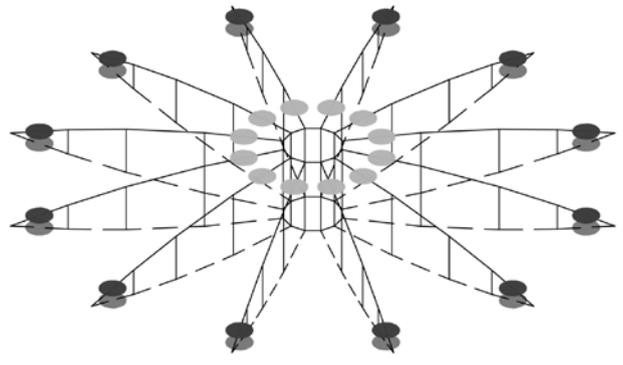
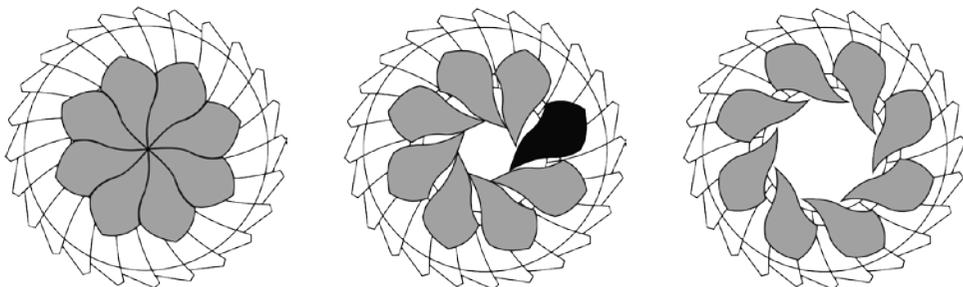
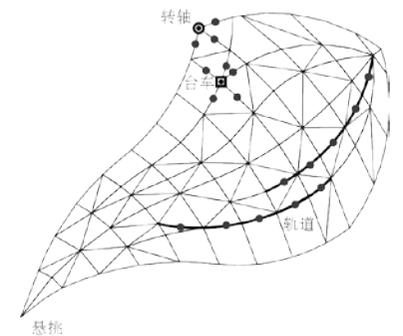
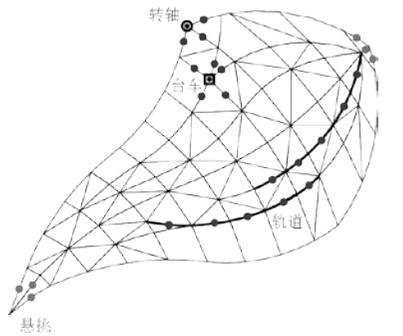
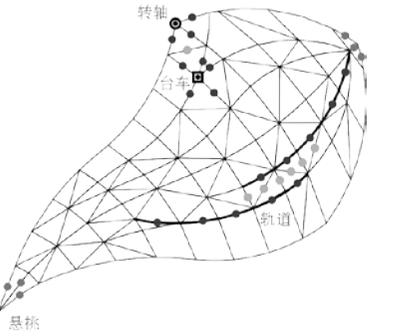
类型	辐射式
支承方式	周边支承
测点布置参考图①	
测点布置参考图②	
测点布置参考图③	

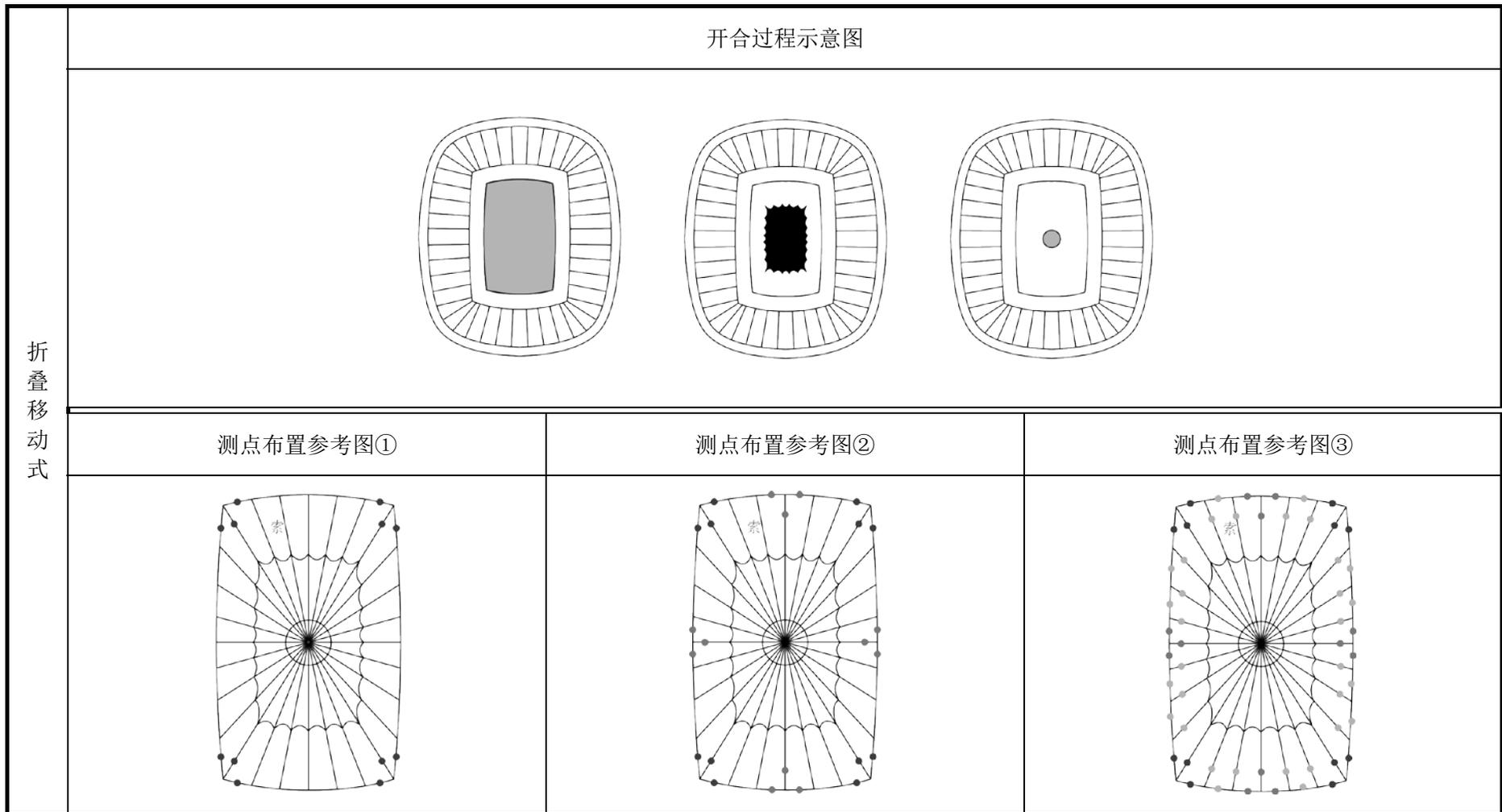
表 A.0.4 开合屋盖结构参考监测部位及测点布置

平行移动式	开合过程示意图		
测点布置参考图①	测点布置参考图②	测点布置参考图③	

注：两侧活动屋盖均可平行移动，选取开合过程中 RGB(0,0,0)色号区域标明测点布置方案图。

绕枢轴转动式	开合过程示意图		
			
	测点布置参考图①	测点布置参考图②	测点布置参考图③
			

注：每片活动屋盖可绕枢轴转动，选取开合过程中 RGB(0,0,0)色号区域标明测点布置方案图。



注：拉索向中心收拢可驱动膜材折叠移动，选取开合过程中 RGB(0,0,0)色号区域标明测点布置方案图。

本规程用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做：正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑与桥梁结构监测技术规范》 GB 50982
- 2 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 3 《钢结构通用规范》 GB 55006
- 4 《建筑结构可靠性设计统一标准》 GB 50068
- 5 《空间网格结构技术规程》 JGJ 7
- 6 《预应力钢结构技术规程》 CECS 212
- 7 《索结构技术规程》 JGJ 257
- 8 《开合屋盖结构技术标准》 JGJ/T 442
- 9 《钢结构现场检测技术标准》 GB/T 50621
- 10 《钢结构工程施工质量验收标准》 GB 50205
- 11 《公路桥梁结构安全监测系统技术规程》 JT/T 1037
- 12 《大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标准》 T/CECS 529
- 13 《房屋建筑制图统一标准》 GB/T 50001
- 14 《结构健康监测系统施工及验收标准》 T/CECS 765

附：条文说明