

# JTG

中华人民共和国行业推荐性标准

JTG/T XXXX—202x

## 公路斜拉桥拉索更换技术规范

Technical Specification for Cable Replacement of Highway Cable-stayed  
Bridge

(征求意见稿)

202x—xx—xx 发布

202x—xx—xx 实施

中华人民共和国交通运输部发布

中华人民共和国行业推荐性标准

# 公路斜拉桥拉索更换技术规范

Technical Specification for Cable Replacement of Highway Cable-stayed  
Bridge

JTG/T XXXX—202X

主编单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司

重庆万桥交通科技发展有限公司

批准部门：中华人民共和国交通运输部

实施日期：202x年xx月xx日

人民交通出版社

## 前 言

根据交通运输部交公路函[2019]427号文《交通运输部关于下达2019年度公路工程行业标准制修订项目计划的通知》的要求，由招商局重庆交通科研设计院有限公司和重庆万桥交通科技发展有限公司主持《公路斜拉桥拉索更换技术规范》的制订工作。

编制组在全面总结公路斜拉桥换索工作经验、广泛征求全国相关单位和专家意见的基础上，针对公路斜拉桥换索技术中的“拉索更换设计”、“拉索更换施工”、“施工控制与质量检验”等方面的内容，作出了具体的规定。

本规范包括7章，7章的具体内容为：1总则、2术语、3基本要求、4一般规定、5拉索更换设计、6拉索更换施工、7施工控制与质量检验。

本规范由 负责第一章， 负责第二章， 负责第三章， 负责第四章， 负责第五章， 负责第六章， 负责第七章。

请各有关单位在执行中，将发现的问题和意见，函告招商局重庆交通科研设计院有限公司（地址：重庆市南岸区学府大道33号，邮编：400067），以便修订时参考。

**主 编 单 位：**招商局重庆交通科研设计院有限公司

重庆万桥交通科技发展有限公司

**参 编 单 位：**

主 编：耿波

主要参编人员：

主 审：张劲泉

参与审查人员：

参 加 人 员：

征求意见稿

## 目次

1	总则.....	1
2	术语.....	4
3	基本规定.....	5
3.1	一般规定.....	5
3.2	斜拉索更换时机及换索工作流程.....	6
4	拉索更换设计.....	8
4.1	一般规定.....	8
4.2	换索前的准备工作.....	10
4.3	拉索更换设计内容.....	10
4.4	换索设计计算.....	13
5	拉索更换施工.....	16
5.1	一般规定.....	16
5.2	施工准备.....	17
5.3	旧索拆除.....	19
5.4	新索安装.....	21
6	施工监控与质量检验.....	24
6.1	一般规定.....	24
6.2	施工监控原则及技术指标.....	25
6.3	施工监控计算与分析.....	26
6.4	施工控制测试与测量.....	28
6.5	换索工程质量检验.....	30

# 1 总则

**1.0.1** 为规范和指导公路斜拉桥拉索更换设计与施工，保证工程质量，满足安全适用、技术可靠、经久耐用、经济合理、环境保护的要求，制订本规范。

**1.0.2** 本规范适用于主跨 400 米以下的公路斜拉桥拉索更换的设计与施工。

## 条文说明

斜拉索作为斜拉桥重要受力构件，其自身安全性和耐久性对桥梁的整体承载性能和寿命有很大影响，是斜拉桥管养工作的重点。由于早期斜拉桥施工技术不成熟、索体材料性能不足、设计荷载较低、营运阶段管养不力，斜拉索护套及钢丝产生结构老化、腐蚀、疲劳等病害或人为原因导致斜拉索受损甚至断裂，致使斜拉桥承载能力下降、使用寿命降低，因此对斜拉桥拉索进行更换是确保其使用性能并延长斜拉桥的使用寿命的最重要途径。

据不完全统计，目前国内已经换索的斜拉桥约 40 座，见表 1.0.2，主要有以下特点：（1）已换索斜拉桥大部分主跨在 400 米以下，且以 2000 年以前建成的桥梁居多；（2）斜拉索使用年限较短，平均约为 15 年，最短为 7 年，最长为 23 年；（3）大部分斜拉桥换索原因是由于斜拉索使用性能下降，如钢丝严重锈蚀、断丝、护套严重破损、锚具严重锈蚀等，甚至出现拉索断裂的情况，小部分是出于人为事故，如火烧、撞击等原因导致拉索严重损伤，甚至断裂。

根据目前积累的经验，将本规范适用范围暂定为主跨 400 米以下的公路斜拉桥。20 世纪 90 年代以来建成的斜拉桥数量较多，跨度大（主跨超过 400 米），其斜拉索已经超过或接近设计使用年限 20 年，因此斜拉桥换索工程数量将会逐渐增多。

表 1.0.2 国内斜拉桥换索情况不完全统计表

序号	桥名	地点	主跨跨径(m)	建成年份	换索年份	备注
1	上海新五桥	上海	54	1975	1991	护套开裂，钢丝严重锈蚀
2	广西红水河铁路桥	广西	96	1980	1997	护套开裂，钢丝锈蚀

3	上海松江泖港桥	上海	200	1982	1994	
4	济南黄河公路大桥	山东	2×220	1982	1995	护套开裂、钢丝严重锈蚀
5	浙江章镇桥	浙江	72	1983	2006	拉索防护体系失效，拉索锈蚀严重
6	上海恒丰北立交桥	上海	74.65	1987	2003	钢丝严重锈蚀
7	陕西新龙桥	陕西	88.8	1987	2007	两根拉索断裂
8	南海西樵大桥	广东	125	1987	2007	护套开裂，钢丝锈蚀
9	天津永和桥	天津	260	1987	2006	钢丝严重锈蚀
10	三原新龙桥	陕西	88.8	1987	2006	两根拉索断裂
11	广东九江大桥	广东	160	1988	1998 (换索 11 根) 2000 (换索 87 根) 2008 (换索 60 根)	护套损伤，钢丝严重锈蚀
12	广州海印桥	广东	175	1988	1995	拉索断裂
13	蚌埠淮河公路大桥	安徽	230	1989	2005	PE 护套管破损严重，钢丝锈蚀
14	嘉陵江石门大桥	重庆	230	1989	2005 (36 根) 2008 (180 根)	护套破损严重，钢丝锈蚀和断丝
15	四川犍为岷江桥	四川	240	1990	2000	护套开裂，钢丝锈蚀和断丝
16	长沙银盆岭大桥	湖南	210	1990	2012	钢丝锈蚀，断丝现象严重
17	昆明皎平渡大桥	云南	220	1991	2008	护套严重老化，部分锚具损坏
18	浙江宁波甬江大桥	浙江	105	1992	2009	拉索及套管老化
19	富密渠首大桥	黑龙江	125	1992	2002	拉索锈蚀严重
20	广西柳州柳江四桥	广西	120	1994	2006	钢绞线锈蚀严重
21	保山三达地怒江大桥	云南	145	1994	2003	部分锚具严重锈蚀，钢丝墩头严重移位、断裂
22	郧县汉江大桥	湖北	414	1994	2016	索力异常，护套破损严重，钢丝锈蚀
23	东莞南阁大桥	广东	108	1994	2010	钢丝严重锈蚀
24	广西南宁白沙大桥	广西	122.5	1995	2006	护套严重老化、开裂，钢丝锈蚀
25	衡山湘江公路大桥	湖南	90	1995	2012	钢丝锈蚀
26	铜陵长江公路大桥	安徽	432	1995	2016 (换索 4 根)	护套破损，锚头锈蚀。试验性换索，平行钢丝斜拉索换成钢绞线斜拉索
27	上虞人民大桥	浙江	125	1996	2012	钢丝锈蚀，承载力不足
28	南昌新八一大桥	江西	168	1997	2009	锚头区域松动
29	涪陵长江大桥	重庆	330	1997	2012	拉索锈蚀严重

30	李家沱长江大桥	重庆	444	1997	2013 (换索 2 根) 2017 (换索 194 根)	护套老化破损, 钢丝锈蚀, 先试验性换索, 再全桥换索
31	金婺大桥	江西	125	1997	2000 2005	两次换索、调索, 并在 2018 年拆除
32	澧河斜拉桥	河南	90	1997	2015	锚头严重锈蚀
33	青州闽江大桥	福建	605	2000	2000 (换索 1 根)	钢绞线斜拉索, 船撞主梁致使部分斜拉索受损
34	珠海淇澳大桥	广东	320	2001	2008	护套开裂, 钢丝及锚具锈蚀
35	万安大桥	重庆	140	2001	2018	钢丝锈蚀
36	沙溪庙嘉陵江大桥	重庆	180	2002	2013 (换索 5 根)	车辆着火, 拉索被烧
37	忠州长江大桥	重庆	460	2008	2014 (换索 1 根)	车辆着火, 拉索被烧
38	赤石特大桥	湖南	3×380	2016	2015 (换索 9 根)	钢绞线斜拉索, 施工火灾事故造成拉索断裂

**1.0.3** 公路斜拉桥拉索更换宜积极、稳妥推广应用新材料、新技术、新工艺和新设备。

**1.0.4** 公路斜拉桥换索设计与施工除应符合本规范的规定外, 尚应符合国家和行业现行有关标准、规范的规定。

#### 条文说明

与本规范相关的国家和行业现行标准主要包括: 《斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件》(GB/T 18365)、《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22)、《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01)、《公路桥梁加固施工技术规范》(JTG/T J23)、《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650)、《公路技术状况评定标准》(JTG H20)、《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21) 等。

## 2 术语

### 2.0.1 斜拉索更换 stay cable replacement

以恢复斜拉桥使用功能或对更换斜拉索进行试验检测为目的，对斜拉桥全部或部分斜拉索进行更换。

### 2.0.2 试验性换索 experimental cable replacement

当斜拉索出现钢丝严重锈蚀、护套严重破损、锚头严重锈蚀等情况时，通过无损检测无法判断斜拉索的技术状况，可选择典型病害斜拉索或技术状态最差的斜拉索进行更换，并开展试验检测评估，为斜拉索的后续管养提供依据。

### 2.0.2 周期性换索 periodic cable replacement

斜拉索使用过程中或达到设计使用年限后经检测评估，其使用性能已不能满足要求，需要通过更换拉索以达到消除斜拉索安全隐患、改善斜拉桥工作状态、延长斜拉桥使用寿命的目的，可采取部分更换或全部更换的方式。

### 2.0.3 应急性换索 emergency cable replacement

斜拉桥经历地震、风灾、车辆撞击、火灾等突发事件或其他异常情况后，经特殊检查、判别鉴定不满足斜拉桥正常使用要求的斜拉索，通过换索恢复斜拉桥的使用性能。

## 3 基本规定

### 3.1 一般规定

**3.1.1** 公路斜拉桥拉索的更换应在对其技术状况、承载能力进行检测、评定的基础上，根据检测评定结果制订拉索更换方案，并进行社会、经济、技术比较。

#### 条文说明

对换索斜拉桥实际承载能力和损伤状态的准确把握是做好换索设计和施工的前提，因此需要根据检测、检算及荷载试验等资料对其进行详细、客观的评估，使换索设计和施工能够做到有的放矢、安全有效。既有斜拉索体系包括平行钢丝斜拉索和钢绞线斜拉索，斜拉索的技术状况、承载能力按照现行国家及行业标准进行检测、评定。

**3.1.2** 斜拉桥新索可采用平行钢丝和钢绞线斜拉索，并宜与原斜拉索结构型式和规格相同，新索的锚固型式、锚固构造等应考虑与斜拉桥原锚固系统的匹配。

#### 条文说明

随着新材料、新技术、新工艺的应用，更换时采用的新索往往与原索的材料性能、结构构造差异很大，因此新索的结构型式、锚固构造等往往与旧索具有一定的差异。目前国内绝大多数换索斜拉桥的新索采用与原斜拉索相同的拉索结构型式、规格和锚固形式，当利用原有拉索的孔道和锚垫板进行新索的穿索和张拉锚固时，需要充分考虑构造要求，避免现场无法穿索、张拉和锚固的情况。

由于斜拉索标准变化、需要通过改变新索的结构形式以达到与原锚固系统的匹配要求、考虑到换索施工的可行性、安全性和再次换索的难易程度等因素，换索设计时也可以改变新拉索的结构型式，如张掖西洞倒虹吸斜拉管桥受到钢锚箱孔径和锚固空间限制，在换索过程中将原平行钢丝墩头锚拉索变更为钢绞线整束挤压拉索，铜陵长江公路大桥考虑到换索过程中斜拉索运输、架设、安装能力等因素及日后换索的方便性，将平行钢丝斜拉索换成钢绞线斜拉索。

**3.1.3** 拉索更换前应对张拉端和锚固端的施工条件进行核实，必要时可进行局部改造。

#### 条文说明

早期施工的斜拉桥，索导管内可能灌有水泥浆，或由于更换拉索增设测量设备，在对斜拉桥张拉端和锚固端的施工条件进行调查核实的基础上，如果不符合新索的安装和张拉要求，那么就需要对锚固区结构进行局部改造。

**3.1.4** 拉索更换用材料的品种、规格及使用性能应符合《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）及国家、行业相关标准的规定。

#### 条文说明

现行《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01—2020）第 3.3 节中对斜拉索用高强度钢丝性能、抗拉强度设计值及钢丝防护镀层或涂层的性能，斜拉索用钢绞线应采用高强度低松弛预应力钢绞线的性能、抗拉强度设计值及钢绞线防护镀层或涂层的性能，对斜拉索用锚具材料性能及斜拉索外防护材料性能等均有详细的规定。

**3.1.5** 拉索更换用材料性能应不低于原设计对既有构件材料性能的要求，不降低斜拉索的安全系数。

#### 条文说明

更换后拉索的材料性能需要满足换索结构的安全性能，其材料性能指标包括斜拉索规格、材料强度等不低于原设计对斜拉索的要求，也就是在斜拉索更换后其安全系数不能降低。

**3.1.6** 拉索更换宜选择对既有交通影响较小的方案。

**3.1.7** 拉索更换工程应尽可能不损伤原结构，避免不必要的拆除及更换，防止换索过程中造成新的结构损伤或病害。

### 3.2 斜拉索更换时机及换索工作流程

**3.2.1** 公路斜拉桥拉索出现下列情况之一时，即可对斜拉索进行更换：

1 拉索钢丝严重锈蚀或出现断丝，拉索护套或锚具严重损伤且无法修复，经评估无法满足桥梁的使用性能；

- 2 荷载增加或其他因素导致索力超出安全限值，且通过调索无法解决；
- 3 拉索使用年限超过设计使用寿命，经评估后需要进行更换；
- 4 重大突发事件造成斜拉索严重损伤的，如桥面火灾、车撞、地震等。
- 5 拉索存在其他严重损伤且无法修复，经评估后需要进行更换。

3.2.2 公路斜拉桥拉索更换分为试验性换索、周期性换索和应急性换索。

3.2.3 斜拉桥除拉索以外的构件如需修复和加固，应同步进行加固设计，并在换索施工前完成索塔、主梁及基础等构件的缺陷修复和加固施工。

### 条文说明

斜拉桥在多年运营后，除拉索外，其他构件也存在大量的病害。除拉索外其他构件的病害和缺陷进行同步加固设计并在拉索更换施工前完成相应的施工工作，避免病害严重的斜拉桥在未加固的情况下进行换索施工出现安全隐患或事故。

3.2.4 斜拉桥拉索更换工程主要工作流程如下所示。

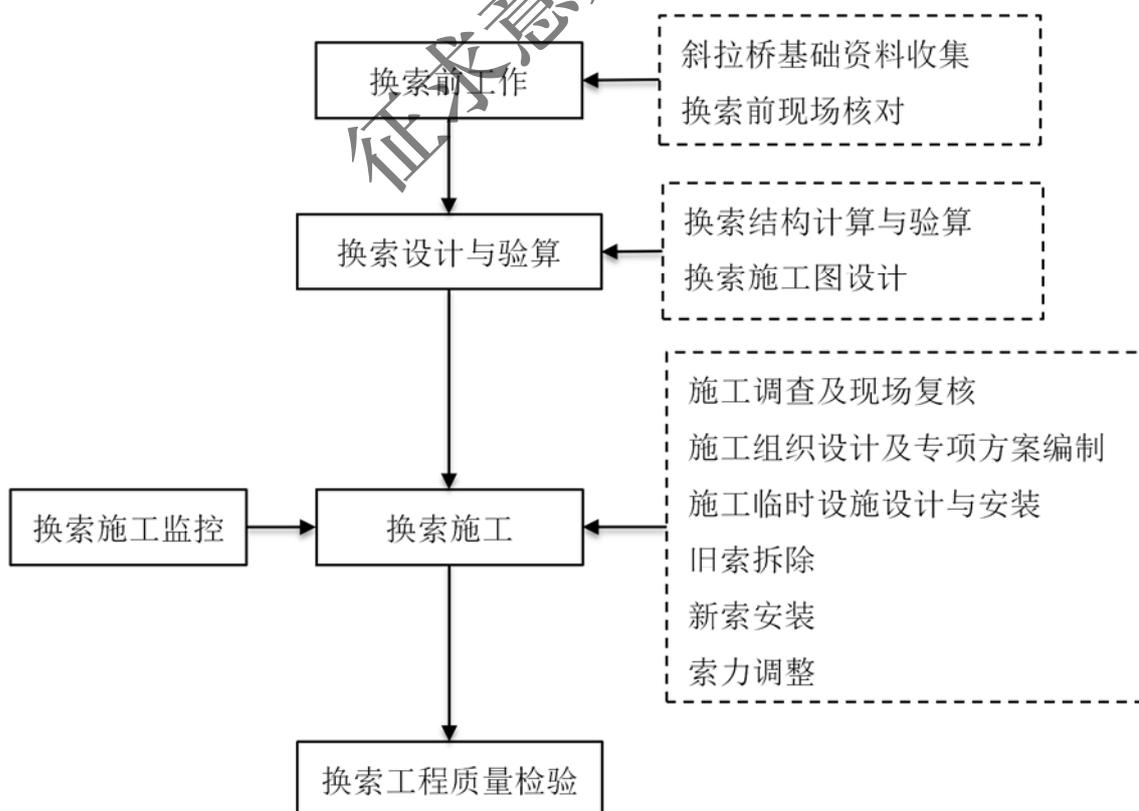


图 3.2.4 换索工程工作流程

## 4 拉索更换设计

### 4.1 一般规定

**4.1.1** 拉索更换设计的目标为：消除斜拉索隐患，改善斜拉桥工作状态，延长斜拉桥使用寿命。

#### 条文说明

斜拉桥换索的首要目的是更换存在病害和隐患的斜拉索，从而达到改善桥梁工作状态和延长桥梁整体使用寿命的目的。

**4.1.2** 拉索更换宜在中断交通下进行，或在缺索状态下中断交通的间歇开放交通下进行。当确需在不中断交通情况下进行斜拉索更换的，施工时应对桥上交通实行三限（限载、限量、限速），实际交通通行方案应根据结构验算确定。

#### 条文说明

随着经济的发展，位于交通要道的斜拉桥往往需要在换索施工过程中进行交通保通，因此必须在换索设计和施工中考虑活载的作用，特别是缺索的状态下的结构验算尤为重要。斜拉桥的换索阶段计算应根据可能出现的车道或车队荷载进行整体验算，采用车辆荷载在实际通行区域的不利位置进行局部验算。不中断交通情况下进行拉索更换时，需要根据结构验算结果确定允许通行的交通荷载，尤其缺索状态下允许通行的交通荷载。

当桥梁技术状况等级为3类时（需要中修）或4类时（需要大修），结构损伤已较大，在不中断交通情况下换索有较大的风险。当为5类时，桥梁本身已经为危桥，不能再实施斜拉索更换。当结构在缺索状态不能满足不中断交通更换斜拉索的、以及桥梁技术状况评定等级为3级或4级时，就需要采取综合加固方式并封闭交通进行斜拉索更换。

2003年九江大桥换索，国内首次提出不中断交通换索的概念，但在换索期间仍采用限制交通量，并在索力和标高测试时，短暂封闭全桥交通，每封闭一次测量3~4个测点。

西樵大桥 2008 年换索施工过程中，新索张拉在夜间温度变化较小的零点至凌晨 6:00 间进行，为确保换索过程中的结构安全，除测量原索力和新索张拉以及测量桥面和索塔位移等重要工序需全部封闭交通外，其它时间限制双向两车道，并禁止货车通过。

李家沱长江大桥在 2013 年进行了两根斜拉索的试验性换索，2017 年对剩余的 194 根斜拉索全部进行了更换，为不中断交通情况下的换索施工，其换索原则是先换下游侧拉索，然后转场，再换上游侧拉索。

德国莱茵河斜拉桥 Rheinbrücke Flehe 为稀索体系斜拉桥，2009 年采用不中断交通条件下进行换索，单根拉索的拆除和车辆荷载对斜拉桥结构影响相对较小。

**4.1.3** 拉索更换设计时，应根据桥梁建设年代的设计荷载、材料性能进行相应计算和验算。

#### 条文说明

我国桥梁设计采用的荷载规范不断更新，不同时期设计的桥梁可能采用了不同的荷载规范，换索设计验算宜维持原设计荷载。对缺乏设计及竣工资料的大桥或技术复杂桥梁，可以考虑采用荷载试验的方法来确定其实际承载力，以此作为换索设计的依据。

**4.1.4** 拉索更换设计应结合桥梁维修加固或改造设计，提出合理的施工工序要求，确保换索实施过程及换索完成后的桥梁结构均处于安全状态。

#### 条文说明

斜拉索是斜拉桥主要受力构件，换索工程对结构内力影响很大，换索设计影响因素众多，换索设计必须保证施工及换索运营的结构安全。

**4.1.5** 拉索更换设计应能合理指导施工，以及重视运营养护的便利性，并提出相应的技术要求。

#### 条文说明

斜拉索系统是斜拉桥的重要承力构件，且数量较多，在运营过程中，由于环境、交通以及结构本身的缺陷等因素，斜拉索系统结构会产生一定的损伤和病害。合理的运营养护措施对于确保斜拉索的使用性能、保障桥梁安全运营、延长桥梁使用寿命具有重要意义。针对斜拉索的具体特点和关键构造，换索设计时需要在设计文件中提出斜拉索在施工、管理和养护中的相应技术要求。

## 4.2 拉索更换前的准备工作

**4.2.1** 拉索更换前应进行斜拉桥基础资料收集，并能满足换索设计和施工的要求，主要内容可包括：

- 1 斜拉桥勘察设计资料，包括设计图纸及计算书、设计变更等资料；
- 2 斜拉桥施工、施工监控及竣工验收资料，包括施工记录、材料试验报告、监理资料、施工监控报告、竣工验收报告等资料；
- 3 试验检测、维修加固资料，包括桥梁检查与检测报告、荷载试验报告、历次桥梁维修加固设计图纸与施工记录、历次特别事件记载等资料；
- 4 桥梁运营荷载资料，包括交通量、交通组成、车重、轴重等资料；
- 5 其他资料，包括气象条件等。

### 条文说明

斜拉桥建设和运营期间的相关资料对换索设计和施工至关重要，早期建造的斜拉桥基础资料存在一定程度的缺失，会对换索设计和施工造成一定的影响，因此对换索斜拉桥的基础资料收集和调查内容做出详细的规定，并且保证在部分资料缺失的情况能够通过其他相关资料进行补充和支撑，确保换索设计和施工具有充足的依据。

**4.2.2** 拉索更换前应对原桥梁竣工图和设计图以及检测评估报告进行现场核对，必要时可提出补充检测要求。

### 条文说明

换索前的现场核对是为换索设计与施工需要进行的有针对性的检查，在原桥梁竣工图和设计图以及检测评估报告的基础上，掌握拉索更换设计和施工所需要的第一手资料，通常包括以下内容：斜拉索索力、斜拉索病害情况、主梁和索塔线形、墩台沉降值、斜拉索锚固构造、支座、阻尼器等构件的状态、斜拉桥维修加固历史、换索施工条件等。

## 4.3 拉索更换设计内容

**4.3.1** 拉索更换设计工作应包括以下主要内容：

- 1 换索后的结构目标状态确定；
- 2 更换拉索的位置、数量和换索顺序确定；
- 3 新拉索系统结构及锚固区改造设计；

- 4 新拉索系统耐久性设计；
- 5 换索过程中旧索卸除、新索安装方案设计；
- 6 换索过程所需的临时措施或永久加固方案设计；
- 7 换索过程交通组织设计；
- 8 换索设计对施工监控的要求；
- 9 换索后斜拉索的管养要求。

### 条文说明

结合斜拉桥的换索设计和施工经验，斜拉桥换索设计的一般流程为：

1. 收集资料（设计施工资料、养护资料、历年检查资料、换索前专项评估资料等）；
2. 换索前、中、后结构验算；
3. 斜拉索选型设计（索体构造、束数、索力）；
4. 斜拉索锚固端、张拉端、将军帽、防水措施等构造设计；
5. 换索顺序设计；
6. 主梁加固设计（如需要）；
7. 换索辅助措施设计（如需要）；
8. 换索施工方案；
9. 施工交通组织设计。

新索结构设计包括索体选型、锚固构造设计等，并与原设计具有相同或更大的安全系数，同时采用最新的拉索防护体系，增强其耐久性。设计还需要考虑施工期的安全性，可按照结构构造及索体实际病害等实际情况选择适宜的临时辅助措施，常采用扁担梁、临时拉索、临时支撑等多种方式。考虑到施工可行性，必要时还需要提出拉索卸除、安装、张拉所需的特殊施工设备。在施工期间，除受力最直接的主梁外，相邻索体索力也会发生变化，索塔的内力也会发生变化，需要将这些不安全因素纳入设计考虑。除拉索体系外，还要依据检测评定报告和计算分析，对换索过程中的隐患部位进行加固后再进行换索施工。所维修的桥梁一般已经投入运营多年，大部分位于交通枢纽节点位置，索体更换施工期间对周边交通影响很大，必要时进行交通组织专项设计。

**4.3.2** 拉索更换后斜拉桥的目标状态，应考虑桥梁建设期和运营期各个阶段的应力叠加效应，以桥梁的原设计状态、竣工状态到现有状态的发展历程为依据合理确定，确保换索实施过程及换索完成后的桥梁结构均处于安全状态。

**4.3.3** 拉索更换设计原则上应保持换索后的拉索索力和桥面线形与换索前一致，确需通过换索同步调整桥梁内力或桥面线形的，可通过专项论证进行确定。

#### 条文说明

由于斜拉桥在长期运营过程中，混凝土的收缩徐变、预应力钢绞线和钢丝的应力松弛、桥梁振动引起的构件疲劳开裂等因素，以及由于地震、风、人为因素等导致结构的几何物理特性、边界条件等参数随时间不断发生变化，进而引起桥梁结构的几何形状及内力状态会发生变化，这种变化最直接的表现是斜拉索索力与桥梁线形（高程）的变化，因此运营多年的斜拉索索力发生变化后，均不同程度存在索力分布不合理的现象，可能致使结构受力性能越来越差。

换索工程的合理成桥状态与新建桥梁不同，一般无法同时实现线形与内力的最优。索力更换施工前须对桥梁实际索力和线形进行检测，如发现梁体线形合理、且无其他明显缺陷，在拉索更换后桥梁结构内力及线形与换索前状态不宜差别过大，避免单纯追求内力与线形的优化使某些部位发生对结构不利的扰动。对于主梁线形存在明显缺陷的斜拉桥，在计算分析并充分论证后可通过索力调整在一定程度上改善桥梁结构线形及受力状态。

通常对于刚度较大的预应力混凝土梁斜拉桥，由于混凝土的收缩徐变和预应力长期损失大部分已经发生，结构内力和线形已经达到基本稳定状态，不宜通过较大索力调整来改变结构现状线形。对于钢主梁斜拉桥，可在换索过程中对斜拉索索力进行适当调整，改善斜拉桥的受力状态。对于叠合梁和混合梁斜拉桥，需要综合考虑索力调整对混凝土结构和钢结构的影响，确定最优调索方案。

**4.3.4** 拉索更换顺序、新索张拉力应考虑斜拉索的病害严重程度、施工便利性且尽量减小对交通的影响，根据施工过程结构分析确定。

**4.3.5** 新索结构设计应采用可靠耐久的拉索防护和减振体系。

#### 条文说明

新索结构设计宜采用最新的拉索防护和减振体系，增强其耐久性。通过调研发现，由于主梁索导管上端防水罩容易发生开裂而导致雨水流入到索导管，造成索导管内钢丝和下锚头锈蚀，因此防水罩的使用性能很大程度上决定了斜拉索的使用寿命。为确保斜拉索的使用寿命，有必要采用可靠耐久的防水罩，目前防水主要有铸铁防水罩、橡胶防水罩、不锈钢防水罩和 HDPE 防水罩，前三种防水罩都存在不同程度的防水罩与拉索护套结合面开裂的问题，其耐久性需要通过使用过程中的定期检修来加以保障。HDPE 防

水罩是采用与拉索护套同种材料制作，并与护套焊接成为一体，增强防水罩与拉索护套之间的结合性能，能够显著提高防水罩的使用性能，实现在拉索寿命周期内免维护。

**4.3.6** 拉索更换设计宜考虑桥梁全寿命周期内再次换索的便利性。

#### 条文说明

斜拉索属于可更换构件，更换周期一般在 20 年左右，目前大多数斜拉桥的拉索处于第一个更换周期。若干年后斜拉桥势必会面临新的拉索更换节点，同时桥梁技术状况的下降会使得换索面临更大的挑战，因此当前新索的更换应充分考虑后期再次更换的需求，提前进行长远考虑，如对换索条件进行永久性改造、考虑可单根更换的钢绞线斜拉索方案等。

**4.3.7** 拉索更换设计应提出换索施工过程中的交通组织要求。

**4.3.8** 拉索更换设计应对斜拉索锚固区及影响结构换索安全的病害进行处治设计。

#### 条文说明

斜拉桥换索前，应对斜拉索锚固区的混凝土病害、钢结构病害等进行处治，使其满足拉索锚固区的受力要求和结构耐久性要求。同时还需要校核、调整索导管的偏心角，使其满足斜拉索及内置减振器的安装要求。对于偏心角较小的，可采用锤击整形等方法局部调整；对于偏心角较大的，可采用切割并重新焊接索导管的方法整体调整。

**4.3.9** 拉索更换设计可采用临时加固措施，保证结构换索施工过程中的结构安全。

#### 条文说明

根据既有斜拉桥换索经验，为了克服换索过程中混凝土主梁下缘应力变化较大的不利因素，采取了先黏贴钢板加固再实施换索的方案是成功的，因此建议采取先加固后换索的方案，或结合其他诸如临时索等方法提高换索过程中的结构安全性。

## 4.4 换索设计计算

**4.4.1** 斜拉桥应进行结构的静力分析、稳定分析和动力分析，换索施工阶段和换索后成桥状态下结构的强度、刚度和稳定性应满足要求。

**4.4.2** 斜拉索验算应按照《公路斜拉桥设计规范》（JTG 3365-01）的相关要求进行。

**4.4.3** 拉索更换计算应包括下列内容：

- 1 桥梁原设计状态及既有状态的复核计算；
- 2 换索后斜拉桥成桥状态验算；
- 3 换索过程施工阶段验算；
- 4 锚固区局部验算。

#### 条文说明

1 斜拉桥施工时一般采用悬臂节段拼装的方式，结构经过多次体系转换形成，斜拉桥在运营若干年后，其结构状态可能已经与新建成桥时的状态有了较大的差别，因此如何模拟换索前的结构状态是计算分析的关键之一。换索结构计算模型应采用合理的分析模型，尽可能准确地反应现有桥梁的结构状态，应根据桥梁竣工图纸和检测评定结果建立能够反映既有桥梁状态的计算模型并进行验算。桥梁现阶段模型的建立应按原设计进行施工阶段分析得到，不可采用一次张拉到位的计算模型。

2 在斜拉桥既有状态模型的基础上，通过换索施工过程阶段计算确定换索工艺和流程，并确定换索后设计成桥状态。

3 换索施工阶段验算中，如斜拉桥存在技术状况较差的拉索或设计的施工方案中存在缺索运营状态，应予以高度关注，确保换索工程中的结构安全。

**4.4.4** 拉索更换施工阶段的验算应考虑附加作用的影响，包括桥面临时荷载、交通荷载、温度、风等的影响。

#### 条文说明

斜拉桥跨径一般较大，为柔性结构，换索施工过程中容易受到风致振动、突然卸索等因素的影响，尤其是不中断交通换索时，斜拉索卸除后，桥梁处于缺索运营的状态，此时必须考虑车辆荷载对结构安全的影响。同时，换索过程中温度对主梁应力、线形的影响也不能忽略。

**4.4.5** 斜拉桥结构分析应选择合理的平面、空间或三维实体计算模型。对于大索距、缺索状态下局部扭曲效应明显的宜采用空间板壳或实体模型计算。

#### 条文说明

对于大索距、缺索状态下空间局部扭曲效应明显的斜拉桥，主梁应力的变化用杆系模型进行计算有非常大的误差，给换索过程带来非常大的隐患，此时采用空间板壳或实体模型进行计算是合适的。

**4.4.6** 拉索更换计算应考虑结构损伤、材料劣化、新旧材料的结合性能及材料差异。材料、几何等参数的取值，应采用桥梁现状的检测结果。

征求意见稿

## 5 拉索更换施工

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 拉索更换施工前应熟悉设计文件，对结构设计尺寸和关键施工参数进行核对，且应由设计单位进行设计交底。

**5.1.2** 拉索更换施工应严格执行设计和施工监控规定的程序和工艺要求。

#### 条文说明

拉索更换施工程序和施工工艺直接影响换索过程主梁线形和结构应力变化，特别是在斜拉索拆卸和安装过程中桥面线形和结构应力变化最明显。换索过程中主梁线形、结构应力是否在允许的安全限值范围之内，需严格执行相关施工程序和工艺要求，确保换索工程安全。

**5.1.3** 拉索更换施工前应按照设计要求完成索塔、主梁、下部结构的病害与缺陷修复。

#### 条文说明

索塔、主梁、下部结构的病害与缺陷直接影响桥梁结构安全，需要先于拉索更换进行修复。

**5.1.4** 拉索更换施工关键工序宜选在环境因素变化较小、交通量少或交通中断的时间段进行。

#### 条文说明

在进行换索施工关键工序工作时，需要对桥上交通实行限制或临时中断交通，以不影响换索期间的结构安全、测试和测量精确度为准。换索施工关键工序包括卸索前索力现场测试、拉索张拉、索力调整、桥面线形测量等。

**5.1.5** 拉索更换期间严格控制换索区内的临时荷载，严禁将多余的机具、设备、材料、杂物等堆放在换索区域内。

#### 条文说明

桥上临时荷载对桥面线形及索力、索塔变位均产生直接影响，多余施工荷载的随意堆放，致使所监测的桥梁索力、应力和变形数据失真，施工监控计算分析所得出的数据将无法指导施工，所以在施工中必须严格控制。

**5.1.6** 拉索更换施工应符合国家和行业在安全生产、劳动保护及环境保护方面的有关规定。

## 5.2 施工准备

**5.2.1** 拉索更换施工前应复核以下内容：

- 1 桥梁线形及拉索索力与设计值的偏差；
- 2 拉索和锚固区域的实际构造及病害情况；
- 3 锚固区附近以及其他构件的损坏情况；
- 4 新索与锚固构造的匹配情况；
- 5 新旧索工具锚口的匹配情况；
- 6 换索施工条件。

#### 条文说明

斜拉桥换索前的结构体系受力状态和斜拉索、索塔及主梁的损坏程度是制定换索施工工艺和施工方法的前提和依据，施工前应对既有结构状态和施工条件进行详细复核。同时早期斜拉索的锚具体系与目前成品索锚具在技术规格上存在较大差异，要注意检查新旧索工具锚口是否匹配。

**5.2.2** 应在对工程进行施工调查及现场核对后，根据设计要求、合同条件及现场情况等，编制拉索更换实施性施工组织设计。

**5.2.3** 拉索更换实施性施工组织设计应包括以下内容：编制说明、工程概况、施工准备、施工组织机构、拉索更换施工方法、交通组织方案、进度计划、质量管理和质量保证体系、安全生产、环境保护、职业健康等。

**5.2.4** 拉索更换施工塔顶吊装装置应根据塔顶构造、单根斜拉索重量、斜拉索挂设方式进行制作安装，塔顶吊装装置应进行专项设计和验算，明确质量和安全的验收标准，并应编制安装、使用、维护和拆除的作业方案。

**5.2.5** 拉索更换采用的梁底及塔端作业平台应根据结构尺寸、张拉空间需求、荷载需求、安装方法等进行设计制作，并应进行专项设计和验算，明确质量和安全的验收标准，编制安装、使用、维护和拆除的作业方案。

#### 条文说明

拉索的安装和张拉属于高处作业，因此需要采用专门设计制作的施工平台及其他辅助设施进行操作，保证施工安全，特别是保证施工操作人员的安全。

**5.2.6** 拉索更换施工前应根据实际情况在桥面关键区域设置安全防护设施。

**5.2.7** 应根据工程施工的需要，配备足够的机械设备和生产工具，且应在施工前进行调试或测试。

#### 条文说明

斜拉索更换施工过程中用到的机械设备主要包括千斤顶、油泵、卷扬机等，生产工具主要包括张拉杆、变径螺母、索夹、连接器等，在施工前需要对机械设备进行调试，对生产工具进行测试。

**5.2.8** 拉索更换施工用的千斤顶、油泵、卷扬机等机具及测力设备应按相关要求进行检查或检测，其工作性能应满足施工要求。

#### 条文说明

斜拉索更换施工用的千斤顶和油泵要进行配套校验，其工作性能要大于最大拉索所需要的张拉力，同时还要考虑到施工时超张拉的需求，且在任何情况下均能满足施工安全的要求。使用的机具还要考虑到桥梁结构的尺寸，确保机具有足够的操作空间。

**5.2.9** 对技术复杂或危险性较大的分部分项工程，应根据结构特点和受力特性，制订安全可靠、技术可行、经济合理的专项施工方案。

#### 条文说明

依据 2018 年 3 月 8 日住房和城乡建设部令第 37 号发布的《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》，对技术复杂或危险性较大的分部分项工程，应制订安全可靠、技术可行、经济合理的专项施工方案。斜拉桥换索施工技术复杂、安全风险大，因此应制订相应的专项施工方案。

#### 5.2.10 拉索更换专项施工方案应包括施工技术方案的和安全技术方案。

##### 条文说明

斜拉桥换索施工专项施工方案包括桥塔区安全防护、塔顶起重设施安拆、交通导行与管制措施、旧索拆除、新索安装与张拉等内容。换索是在既有桥梁上进行旧索拆除、新索安装、张拉等一系列工序，旧索在拆除过程中，技术难度高，安全风险大，尤其是在不中断交通情况下进行换索施工，斜拉桥处于缺索运营状态，需制订详细的施工方案，确保结构安全，新索的安装和张拉也与新建桥梁拉索安装的施工方案存在一定的差异。

#### 5.2.11 应根据拉索更换施工方案及实际交通运行情况编制交通组织专项方案。

##### 条文说明

根据调研，斜拉桥拉索的更换施工周期根据拉索长度和数量的不同少则十几天多则几个月，且大多数斜拉桥处于重要交通要道，在安全换索的基本原则下，需要对桥梁交通采用中断、部分中断、不中断交通等的交通组织方式。特别是对于换索关键工序，需根据工序工艺及要求，对桥面交通进行桥上车辆载重、车速、流量等进行特定的限制。

### 5.3 旧索拆除

#### 5.3.1 旧索的拆除顺序及单次拆除的数量应严格按照设计和施工监控的要求执行。

##### 条文说明

旧索拆除通常采用由长索到短索或短索到长索的顺序进行，且一次对称拆除若干根拉索，同时安装并张拉完成后，再进行下一组拉索的拆除和安装。为了确保换索过程中的结构安全，旧索的拆除顺序及单次拆除的数量需要严格按照要求执行，尤其是需要注意不同施工阶段的拉索拆除数量可能会有差异。

5.3.2 斜旧索拆除前，应对锚具及锚固区域等进行处置，并拆除斜拉索保护罩、防雨罩、减振器、阻尼器等附属装置。

### 条文说明

部分斜拉桥使用年代久远或使用过程中养护不到位，斜拉索锚杯、螺母及锚垫板可能存在不同程度锈蚀病害，锚杯内部有积水，因此在斜拉索拆除前，需要对锚箱、锚头、锚杯等进行处置，清除积水，除锈后用松动剂或者其它措施处置使得螺母可以拧动。

斜拉索下锚头拆卸，需要采取措施防止锚头突然脱落发生安全事故。下锚头拆卸完成后及新索安装前，需在预埋管管口上方临时搭设防雨棚，防止雨水流入锚管内。

#### 5.3.3 旧索拆除应按照如下步骤进行：

- 1 准备工作；
- 2 测定索力；
- 3 张拉端放张；
- 4 张拉端退锚；
- 5 锚固端退锚；
- 6 斜拉索下放至桥面并转运；
- 7 锚固区域清理及修复。

### 条文说明

拉索索力在拉索放张前采用千斤顶进行测定，测定方法为：将拉索张拉至旧索连接装置刚好处于脱离状态，持荷稳定 3-5 分钟，记录此时的索力值并回位，重复上述动作两次，将三次索力平均值作为实测索力。

#### 5.3.4 平行钢丝斜拉索拆除应符合下列要求：

- 1 拉索放张时应使用专用换索设备和工具；
- 2 多根拉索同时拆除时，宜对称分级同步放张；
- 3 放张应以实测索力和位移进行双控；
- 4 放张过程应采用索力平稳转换的保障措施；
- 5 斜拉索下放至桥面后应及时移出桥面。

### 条文说明

1 拉索放张时应根据拉索的长度、重量、牵引力、锚头的种类等不同情况采用合适的设备和工艺，并使用换索专用设备。

2 根据设计和监控要求，需要同时拆除多根拉索时，应分为一次或多次成对放张，单次放张的拉索应按双塔反对称、单塔双向对称、横桥向对称的原则确定，以保证主梁、索塔纵横桥向受力平衡。

3 斜拉索放张时索力的突然变化会对主梁造成较大的冲击力，可能会引起结构的安全事故。索力放张时按照设计和监控要求进行逐级放张，并严格控制索力。

4 旧索张拉端锚环拆除过程中，可以采用安装临时托换装置的方式来完成旧索索力的平稳转换。如果锚环无法拆除时，可以采用直接对拉索切割的方式进行拆除，但是切割过程中必须采用安全可靠的装置将拉索索力平稳转换到剩余拉索上。

5 拆除的拉索重量较大，若堆放在桥面上，对结构的安全及张拉力的控制会造成不利的影响。

### 5.3.5 钢绞线拉索拆除应根据锚头类型，采取不同的放张方法，并符合下列要求：

- 1 钢绞线为无黏结时，放张过程为安装时钢绞线安装张拉的逆过程；
- 2 锚具固结的钢绞线斜拉索应整体放张，并符合第 5.3.4 条的要求。

#### 条文说明

早期建成钢绞线斜拉桥中，为防止钢绞线在锚具内滑动或脱出，在钢绞线张拉完毕后在锚具内灌注环氧砂浆、水泥浆等，导致钢绞线在锚具内固结形成一个整体，无法对单根钢绞线进行放张，因此这种情况下需要对钢绞线斜拉索进行整体放张。另外，如采用钢绞线整束挤压拉索的拆除，放张方式和要求与平行钢丝斜拉索相同。

## 5.4 新索安装

### 5.4.1 斜拉索进场后应进行质量验收，并满足设计和相关规范要求。

### 5.4.2 平行钢丝斜拉索安装应按照如下步骤进行：

- 1 准备工作；
- 2 斜拉索运至桥面并展索；
- 3 张拉端锚头牵引挂设；
- 4 锚固端牵引压锚；
- 5 张拉端锚头张拉；
- 6 索力调整；
- 7 附属装置安装及锚具防腐。

### 5.4.3 钢绞线斜拉索安装应按照如下步骤进行：

- 1 准备工作；

- 2 钢绞线运至桥面并下料；
- 3 单根钢绞线穿索、张拉及锚固，直至全部钢绞线替换完毕；
- 4 索力调整；
- 5 附属装置安装及锚具防腐。

#### 条文说明

对于采用单根抽换方式对斜拉索进行更换的，钢绞线穿索宜与旧钢绞线放张同步进行，旧钢绞线在拉出的过程中，将新钢绞线与旧钢绞线串联，旧钢绞线完全拉出后，新钢绞线即穿索到位，并按要求进行单根钢绞线的张拉和锚固。重复上述过程，直至全部钢绞线替换完毕，并按设计和监控要求对拉索索力进行调整。

对于采用整体放张方式对钢绞线斜拉索进行拆除，或平行钢丝斜拉索替换为钢绞线斜拉索的换索工程，钢绞线斜拉索的安装则与新建桥梁中钢绞线斜拉索的安装步骤相同，在单根钢绞线穿索前，还需进行锚具及护套管的安装。

**5.4.4** 斜拉索安装前应对塔、梁端的索导管和锚垫板进行全面检查清理，并按设计要求进行修复。

#### 条文说明

受斜拉索拆除或者自身病害的影响，塔、梁端的索导管会出现管壁粗糙、毛刺、且存在焊渣的现象。这些问题将会损伤新索索体，因此斜拉索安装前，根据索导管病害情况，进行相应的处理，确保导管内壁光滑。

目前斜拉索主要有平行钢丝和钢绞线两种体系，因两种拉索体系的安装施工方法是不尽相同的，故在施工前需要按设计要求制订相应的施工方案和工艺措施。拉索预埋导管的位置发生较大偏差时，会导致拉索索体与导管之间产生摩擦，这将直接影响到拉索的受力状况和耐久性，因此在拉索安装施工前，需要对预埋导管的位置进行一次全面检查复测，如有问题需及时处理，安装后发现问题再进行处理是非常困难的。

**5.4.5** 斜拉索的安装和张拉施工应严格按施工方案执行，并满足设计和监控要求及《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）的规定。

#### 条文说明

斜拉桥换索施工中斜拉索的安装和张拉需要满足《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650—2020）第 20.4.5 条-第 20.4.7 条关于平行钢丝斜拉索和钢绞线斜拉索安装和张拉的相关要求。

**5.4.6** 拉索在运输、展索、挂索、牵引及压锚过程中应采取措施防止索体损伤。

#### 条文说明

施工过程中防止索体损伤措施主要有：拉索展索时，在拉索索体、锚头及张拉杆下方分别加垫托索小车、锚头小车和张拉杆小车，小车上的型钢要求打磨光滑无毛刺，并应设置合理托索小车间距；在拉索与放索机、托索小车、夹具和索导管等直接接触部位加垫橡胶皮，其他有可能接触的部位也加垫橡胶皮，防止拉索表面压伤、碰伤或挤伤；拉索挂设时选用专用索夹装置，索夹装置内侧加垫橡胶皮，安装要尽量保持水平，确保斜拉索两侧受力均匀，不出现局部应力集中而破坏斜拉索 PE 护套；梁端牵引时，加大梁端牵引夹具的长度，增加夹具同斜拉索的接触面积，减小斜拉索单位面积的受力；拉索进入梁端索导管时采用手拉葫芦或汽车吊调整角度，避免拉索表面接触索导管口。

**5.4.7** 拉索更换过程中应根据设计要求对已更换完成的斜拉索采取临时减振措施，待索力调整完成后换成永久性减振装置。

#### 条文说明

由于斜拉索换索施工周期较长，已安装的斜拉索若不安装临时减振装置，在施工期间极易造成斜拉索空中碰撞损伤、斜拉索与索道管碰撞损伤等伤害。因此斜拉索更换施工过程中应对已安装的斜拉索安装临时减振装置，全桥斜拉索安装完成后安装永久减振装置。

**5.4.8** 拉索安装施工期间，应及时将索塔内张拉工作面处的油污和各种杂物清理干净，并应有可靠的防火措施。

**5.4.9** 单根拉索张拉完成后，应及时在拉索索导管处采取有效防水措施，拉索锚具的外露部分应予以防护。

## 6 施工监控与质量检验

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 公路斜拉桥换索施工过程中应进行施工监控。

#### 条文说明

斜拉桥换索施工技术复杂、风险高，因此需对换索过程进行施工控制，以确保换索施工安全。

**6.1.2** 拉索更换施工监控计算的目的是校核设计参数，提供施工各阶段理想状态线形及内力数据，对比分析施工各阶段的实测值与理论值，对结构参数进行识别与调整，对成桥状态进行预测、反馈，提供必要的控制数据。

**6.1.3** 拉索更换施工监控宜按资料收集、监控方案编制、设计符合性计算、施工模拟计算、现场施工监测、施工跟踪计算、数据分析、反馈控制及提交监控成果的流程进行。

#### 条文说明

资料收集是桥梁施工监控前期工作，资料的完整性与准确性关系到后续具体工作的质量。

**6.1.4** 拉索更换施工监控实施前应依据换索工程设计文件和施工组织设计编制监控方案。

**6.1.5** 不中断交通情况下的换索施工监控方案中应提供桥面单车重量和车辆荷载总量的限制指标。

**6.1.6** 拉索更换施工过程中宜提交各阶段的施工指令、预警控制指令、阶段工作报告，施工完成后应提交施工监控工作成果。

### 条文说明

施工监控工作成果包括施工监控计算报告、施工监控总报告及施工过程中提交的相关监测数据与反馈控制文件等。

## 6.2 施工监控原则及技术指标

**6.2.1** 拉索更换施工监控应通过结构模拟计算、监测及测量等手段，保证结构在施工过程中始终处于安全可控范围内，结构主要受力构件不出现新的损伤，结构附属构件工作正常，换索完成后线形、内力和拉索索力应符合设计要求。

### 条文说明

换索施工监控与新建桥梁的最大区别在于，其是基于既有桥梁状态，通过对施工过程的控制，达到设计目标成桥状态。斜拉桥换索工程需要考虑到结构的既有受力状态和材料退化情况，以设计要求的成桥状态为控制目标，保证施工过程中不对造成新的损伤，保障结构的安全并根据施工过程进行适时调整，最终达到设计成桥状态。

**6.2.2** 拉索更换施工监控应以施工图设计和施工组织设计文件内容为基础，以换索后的设计成桥状态为目标，根据施工过程中实测数据为依据，对施工控制参数进行调整，形成换索施工控制文件。

### 条文说明

根据施工图设计和施工方案内容建立斜拉桥换索施工监控计算模型，根据施工各阶段拉索索力、桥面线形、桥塔偏位等实测数据为依据，不断对施工过程中的计算参数进行调整，最终达到设计成桥状态目标。

**6.2.3** 拉索更换施工过程中应以拉索索力和主梁线形控制为主，应跟踪、模拟斜拉桥换索的实际施工过程，根据计算结果及时修正相关参数，通过调整索力使实测结果和理论分析趋于一致。

### 条文说明

换索过程中主梁线形和拉索索力的控制目标应视主梁刚度来选择。对塔、梁、墩刚性连接的斜拉桥，主梁刚度一般较大，换索时拉索索力的变化对主梁变形影响较小，应以索力控制为主，兼顾线形控制；对飘浮体系的斜拉桥，换索时索力的变化对主梁线形的影响较明显，应以线形控制为主，兼顾索力控制。

### 6.2.4 拉索更换施工过程中控制精度应达到以下要求：

#### 1 索力

- 1) 换索施工完毕后的实测索力与理论索力差值宜控制在 $\pm 5\%$ 以内；
- 2) 钢绞线斜拉索索内各钢绞线拉力差值控制标准宜为 $-2\% \sim 8\%$ 。

#### 2 几何参数

1) 主梁实测变形与理论计算的误差控制在 $\pm L/10000\text{mm}$ （当 $L \leq 200\text{m}$ 时，取 $\pm 20\text{mm}$ ）以内；

2) 桥塔实测偏位与理论计算的误差控制在 $\pm H/5000$ 且不大于 $\pm 30\text{mm}$ 。

其中， $L$ 为斜拉桥主跨跨度， $H$ 为索塔在承台或基础以上高度。

**6.2.5** 拉索更换施工过程中，应全过程跟踪监测主梁和桥塔关键部位变形、混凝土裂缝变化、拉索索力，并与监控计算值进行比较，如有异常，应立即停止施工，待查明原因并处理后方可继续施工。

#### 条文说明

换索施工过程中的施工控制信息化及信息反馈应服从《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T J23—2008）第 8.2.9 条和第 8.2.12 条规定。

## 6.3 施工监控计算与分析

**6.3.1** 拉索更换施工控制计算应包括换索前结构状态复核、换索后斜拉桥设计目标状态复核、斜拉索下料长度计算、施工过程计算和参数敏感性分析。

#### 条文说明

斜拉桥换索实施前需要对全桥进行结构状态验算，计算模型所需要材料参数和几何尺寸参数采用桥梁实际检测参数，尽量准确反映桥梁的真实状态，判断桥梁结构薄弱环节和可能存在的风险。换索施工过程模拟是按换索工况模拟斜拉索旧索拆卸和新索安装过程，并且考虑交通荷载、施工临时荷载和环境温度变化的影响，验算结构在每一施工时的结构强度、刚度和稳定性，确保换索施工的安全。参数敏感性分析主要分析斜拉索索力张拉误差、环境温度变化、交通荷载和临时荷载的变化等对结构线形以及索力张拉目标值的影响，为具体换索施工中误差分析提供理论依据。

**6.3.2** 拉索更换施工监控计算宜包括以下内容：

- 1 施工临时荷载、交通荷载、环境因素对桥梁结构的内力、变形、支座约束状态的影响分析；
- 2 拉索更换全过程的模拟分析及各施工工况的结构强度、刚度与稳定性分析；
- 3 每根旧索卸载、新索张拉施工过程中的桥面标高、桥塔塔顶偏位、主梁关键截面内力、索塔关键截面内力等物理量的变化量；
- 4 各换索工况新索安装及张拉过程的监控计算分析；
- 5 换索后的成桥状态分析及索力调整分析。

### 条文说明

斜拉桥施工过程中，桥上临时荷载、车辆及人群荷载、环境等因素对结构的安全有较大影响，为确保施工过程中结构的安全，需要对这些影响因素进行分析。同时新索在张拉时，要考虑到桥上临时荷载、车辆及人群荷载对张拉力的影响，确保新索张拉力能够达到目标值。

#### 6.3.3 拉索更换施工监控计算模型的基本要求：

- 1 应依据设计文件、检测资料，并考虑模型修正，建立与实际状态相适应的计算模型；
- 2 换索监控的计算模型可采用杆系有限元，并考虑结构几何非线性及材料性能退化的影响；
- 3 主梁的局部扭曲效应、锚固区的分析宜采用板壳或实体单元模型；
- 4 施工监控计算应根据前几根索更换施工时的实测数据进行参数识别和误差分析，对计算模型进行修正，利用修正后的模型对后续施工过程进行调整。
- 5 换索过程中应根据监控测试数据，对计算模型进行参数修正。

#### 6.3.4 拉索更换施工过程中斜拉桥几何状态控制计算结果应包括：

- 1 斜拉索下料长度；
- 2 换索施工过程中各阶段主梁线形、塔顶偏位；
- 3 换索完成后的主梁线形、塔顶偏位。

#### 6.3.5 拉索更换施工过程中斜拉桥内力状态的控制计算结果应包括：

- 1 换索施工各阶段主梁、索塔控制截面应力与斜拉索索力；
- 2 换索施工各阶段的支座反力；
- 3 换索完成后斜拉索索力调整量；

- 4 换索完成后主梁、索塔控制截面应力与斜拉索索力。

## 6.4 施工控制测试与测量

**6.4.1** 拉索更换施工监测的参数应包括几何状态参数和内力状态参数两类，几何状态参数包括主梁线形及索塔偏位，内力状态参数包括主梁、索塔等构件控制截面的应力变化以及斜拉索索力。

### 条文说明

本条所列的几何和内力状态参数只是斜拉桥换索施工监测的基本要求，在具体实施中，可以根据实际监控需要，增加其他需要的几何和内力状态监测参数。

**6.4.2** 拉索更换施工过程斜拉索索力测试工作要求包括：

- 1 斜拉索索力测试可采用频率法，有条件时宜采用其他方法检验；
- 2 旧索卸索前、卸索后及新索张拉后，宜分别监测更换拉索相邻前后各 2~3 根斜拉索索力；
- 3 对受力最不利或损伤严重斜拉索的索力进行施工全过程监测；
- 4 全桥索力调整前后应对全桥斜拉索索力进行测试；
- 5 换索施工完毕后应对全桥斜拉索索力进行测试。

### 条文说明

拉索拆除过程中，被拆除拉索的索力将由相邻拉索来承担，通常只对被拆除索附近的 2~3 对斜拉索有较大影响，其索力增幅在 10%~20%左右，对其余斜拉索索力的影响很小，在新索安装并张拉至设计索力后，其邻近索的索力基本恢复值初始值，因此在换索过程中可以仅对被更换拉索附近的拉索进行索力测量，以确保结构安全。

**6.4.3** 拉索更换施工过程主梁线形测试工作要求包括：

- 1 主梁测点宜布置在斜拉索梁端锚固点附近，每个梁端锚固点附近布置 1 个测点；
- 2 旧索卸索前、卸索后及新索张拉后，宜分别测量所更换斜拉索锚固点附近测点及该测点相邻前后至少各 3 个测点的高程；
- 3 全桥索力调整前后应对全桥线形测点进行测试；
- 4 换索施工完毕后应对全桥线形测点进行测试。

**6.4.4** 拉索更换施工过程塔顶偏位测试工作要求包括：

- 1 桥塔偏位测点宜布置在索塔塔顶，每个索塔塔柱顶布置 1 个测点；
- 2 旧索卸索前、卸索后及新索张拉后，应分别测量与所更换斜拉索相连的索塔塔柱顶偏位；
- 3 全桥索力调整前后应对全桥索塔塔顶偏位进行测试；
- 4 换索施工完毕后应对全桥索塔塔顶偏位进行测试。

**6.4.5** 拉索更换施工过程中可对主梁和索塔关键部位应力变化进行监测，监测频率可参考 6.4.3 条。

#### 条文说明

由于斜拉索换索仅仅会造成结构局部受力的较大变化，一般情况下可不对结构应力进行监测。当将主梁线形调整作为换索工程的目标之一时，需要对主梁进行应力监测，以验证调整后结构内力的变化是否符合设计意图。主梁参考监测部位主要有主梁的各个支点、1/4 跨、跨中、3/4 跨等关键断面，必要时可对斜拉索主梁锚固区附近结构的应力进行监测。索塔的内力监测部位主要为索塔或桥墩底部，必要时可对斜拉索索塔锚固区附近结构的应力进行监测。

**6.4.6** 拉索更换施工全过程中，所有测试工作均应同步记录环境温度、湿度、风速和天气情况。

**6.4.7** 拉索更换施工过程中结构状态监测应选择在结构温度趋于稳定、交通量小的时段内进行，必要时可临时中断交通。

#### 条文说明

主梁、斜拉索索力、主塔偏位等对温度场变化比较敏感，一般选择温度场比较稳定的时段（如晚上 10 点至次日凌晨日出前）进行。如果无法满足条件，则需考虑温度的影响。不中断交通情况下对结构状态监测数据会出现一定的偏差，因此要尽量降低交通荷载对测量结果的影响。

**6.4.8** 施工监测所用测试设备及传感器的精度应满足桥梁施工监控的需要。

## 6.5 换索工程质量检验

**6.5.1** 斜拉桥新换斜拉索及附件的质量检验应符合《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）及其他现行国家及行业标准的要求。

**6.5.2** 斜拉桥拉索更换工程的验收应符合《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）、《公路斜拉桥设计规范》（JTG/T 3365-01）、《公路桥梁加固施工技术规范》（JTG/T J23）和《公路工程质量检验评定标准》（JTG F80/1）的要求。

### 条文说明

《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650）与《公路斜拉桥设计规范》（JTG 3365-01）对拉索索力控制均有相关规定，主要包括：

- 1) 斜拉索索力实测值与设计值的偏差为 $\pm 5\%$ 之内，超过时需要进行调整；
- 2) 对于钢绞线拉索，单根张拉后各钢绞线索力的离散误差不宜超过 $\pm 2\%$ ；整体张拉完成后，各钢绞线索力的离散误差不宜超过 $\pm 1\%$ 。

**6.5.3** 斜拉桥拉索更换施工完成后，宜进行桥梁荷载试验。