

交通运输行业标准

《公路悬索桥吊索》

(征求意见稿)

编制说明

《公路悬索桥吊索》标准起草组

2017年7月25日

目 录

1 工作简况.....	1
2 标准编制原则和标准主要内容.....	2
3 预期的经济效果、社会效果及环境效果分析.....	9
4. 采用国际标准和国外先进标准的程度.....	10
5、与现行法律法规和强制性国家标准的关系.....	11
6、重大分歧的处理经过.....	11
7、其它需要说明的问题.....	11

1 工作简况

1.1 任务来源

自交通行业标准 JT/T449-2001《公路悬索桥吊索》颁布以来，在国内外重大桥梁工程，特别是大跨径公路悬索桥工程中得到了广泛应用，得到了设计单位、施工单位以及缆索制造厂家的认可和采用。由于金属冶炼技术的快速发展及桥梁缆索材料的不断进步，目前在国际上强度为 1860MPa 的缆索用钢丝已经得到了应用。同时随着对钢丝表面耐腐蚀镀层的深入研究，性能更好的防腐镀层——锌铝合金镀层已经被开发出来，成功运用于实桥，这使得悬索桥吊索的使用寿命上了一个台阶。因此标准中很多技术内容已不能满足目前悬索桥吊索对于高强度、耐久性、抗疲劳等性能要求，需要对原标准进行修订，适应国家建设发展的趋势。

2015 年，交通运输部下达交科技发【2015】114 号文件，将 JT/T449-2001《公路悬索桥吊索》修订工作列入交通运输标准化计划制修订项目，计划编号 JT 2015-175。

标准起草单位：中交公路规划设计院有限公司、江苏法尔胜缆索有限公司、巨力索具股份有限公司等。

标准归口单位：全国交通工程设施（公路）标准化技术委员会。

1.2 主要工作过程

2015 年修编工作立项后，编制工作承担单位通过广泛收集、分析国内外相关的标准、文件资料；深入我国桥梁现场调查研究；对国内外相关技术进行了充分的研究。2015 年 11 月 3 日编制完成工作大纲，明确修编主要工作内容、工作分工和时间计划，并组织开展工作，2016 年 11 月编制完成送审稿。

1.3 标准主要起草人及其所做的工作

人员安排	姓名	工作单位	分工
1. 项目负责人， 主要起草人	林道锦	中交公规院	1、总体组织协调、总体技术负责 2、主要问题调研，及调研成果总结整理 3、编写条文，主持完成征求意见稿
2. 主要起草人	赵军	江苏法尔胜	1、前期的调研，平行钢丝吊索各项性能的试验

			2、相关标准条款的修订
3. 主要起草人	张虹	巨力索具	1、前期调研 2、钢拉杆、钢丝绳各项性能的试验标准修订
4. 主要起草人	薛花娟	江苏法尔胜	1、前期的调研，平行钢丝吊索各项性能的试验 2、相关标准条款的修订
5. 主要起草人	杜学国	巨力索具	1、前期调研 2、钢拉杆、钢丝绳各项性能的试验标准修订
6. 主要起草人	郝海龙	中交公规院	1、负责修订内容的提出 2、编写条文
7. 主要起草人	刘箐霖	中交公规院	1、负责修订内容的提出 2、编写条文
8. 主要起草人	卢靖宇	江苏法尔胜	1、前期的调研，平行钢丝吊索各项性能的试验 2、相关标准条款的修订
9. 主要起草人	禹洪楷	巨力索具	1、前期调研 2、钢拉杆、钢丝绳各项性能的试验标准修订
10. 主要起草人	耿鹏智	中交公规院	1、负责修订内容的提出 2、编写条文
11. 主要起草人	周祝兵	江苏法尔胜	1、前期的调研，平行钢丝吊索各项性能的试验 2、相关标准条款的修订
12. 主要起草人	崔海静	巨力索具	1、前期调研 2、钢拉杆、钢丝绳各项性能的试验标准修订
13. 主要起草人	强强	江苏法尔胜	1、前期的调研，平行钢丝吊索各项性能的试验 2、相关标准条款的修订
14. 主要起草人	苑军锋	巨力索具	1、前期调研 2、钢拉杆、钢丝绳各项性能的试验标准修订

2 标准编制原则和标准主要内容

2.1 本次标准修订的主要原则

(1) 规范性原则。

本标准严格按照《中华人民共和国交通运输部交通行业标准编制的有关规定》要求进行编写。

(2) 科学性原则。

本标准中所有内容具有科学依据，数据来源科学准确。

(3) 通用性能原则。

本标准尽可能规定悬索桥吊索的通用性能，最大限度的适用于对钢丝强度、耐久性、抗疲劳等性能有更高要求的大跨度悬索桥吊索的设计、制作和安装。

(4) 发展性原则。

标准编制时要有发展眼光，以适用于国家建设的发展要求，促进大桥缆索经济性、可靠性和耐久性的提高，对吊索的使用寿命起到一定推动作用。

(5) 可验证原则。

本标准中用数值的形式给出的具体指标能够通过一项或几项试验进行测试。

2.2 主要修订内容

本标准主要修订内容如下：

1) 完善了平行钢丝束吊索和钢丝绳吊索的锚具结构

原有的标准中对平行钢丝吊索锚具结构图无对密封防水要求。

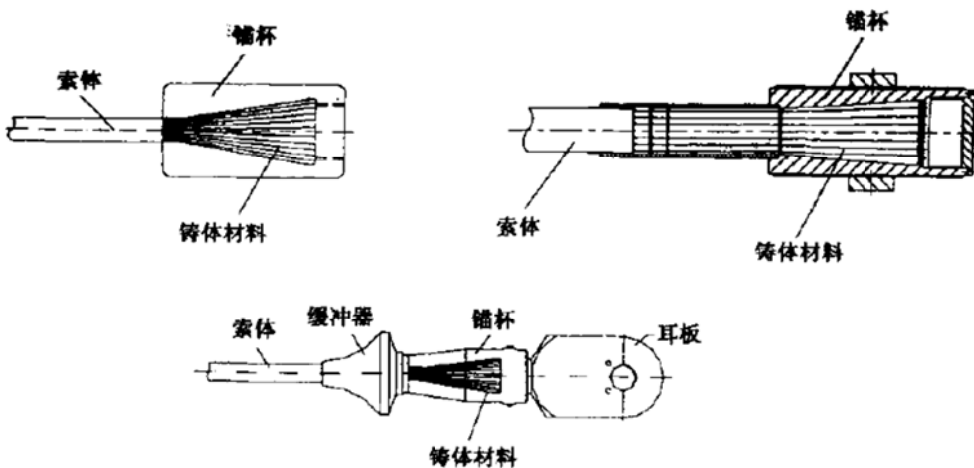
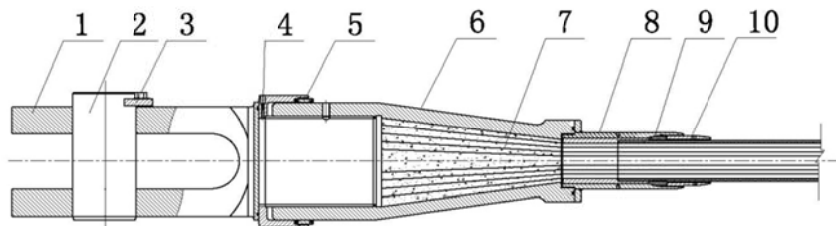


图 1 原有的吊索锚头结构

通过以往工程的实践可知，由于吊索锚具结构没有防水要求，导致水分等有害物质进入吊索索体梁段的锚头区域，给吊索的使用带来安全隐患。本标准在完善了吊索锚具结构，增加了吊索锚头的密封防水措施和构造。

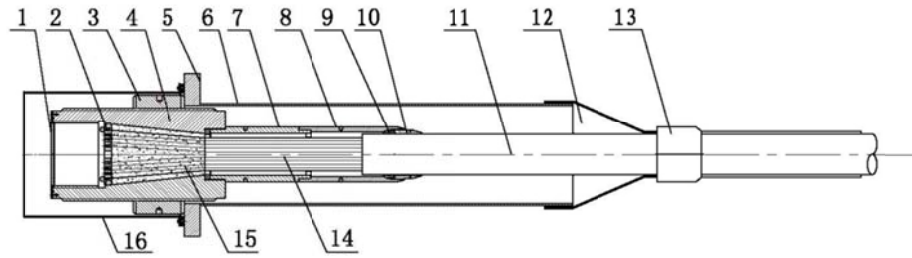


说明：

- | | |
|-------|--------|
| 1—叉耳； | 6—锚杯； |
| 2—销轴； | 7—填料； |
| 3—挡板； | 8—连接筒； |

4—防水盖； 9—密封胶圈；
5—压环； 10—密封压环；

a)



说明:

1—盖板； 9—密封胶圈；
2—分丝板； 10—密封压环；
3—锚圈； 11—索体；
4—锚杯； 12—吊索防护罩；
5—锚垫板； 13—吊索密封罩；
6—预埋管； 14—密封填料；
7—连接筒 a； 15—冷铸锚固填料；
8—连接筒 b； 16—锚具保护罩。

b)

图 2 平行钢丝束地吊索锚具结构示意图

其中 a) 中的耐久型吊索密封结构初次应用于润扬长江悬索桥吊索，其防水结构经过了疲劳试验过程中的水密性试验验证可有效防水。在润扬大桥使用多年后，经过养护管理单位的检查，吊索锚头积水的问题得到了有效解决。目前，该平行钢丝吊索锚头密封结构已经应用于武汉阳逻大桥、南京长江四桥、泰州长江大桥、马鞍山长江大桥、宜昌至喜大桥等一大批大型悬索桥吊索中。

其中 b) 中的耐久型吊索密封结构参照热挤聚乙烯斜拉索的防水构造，也经过了疲劳后的静态水密性试验验证和动态水密性试验验证。目前，该平行钢丝吊索锚头密封结构已经应用于江东大桥等一大批大型悬索桥吊索中。

2) 完善平行钢丝束吊索用镀层钢丝的种类、强度级别、锌铝镀层钢丝的技术要求

原有的吊索标准中，钢丝采用高强度镀锌钢丝，且钢丝符合 GB/T17101 的要求。按照以上要求，钢丝镀层为热镀锌，钢丝强度为 1670MPa 到 1770MPa，其扭转要求也较低。

随着经济的进一步快速发展，跨海跨江桥梁的不断建设，对于悬索桥吊索的使用寿命要求进一步提高。尤其是空气中的氯离子，能加速溶解镀锌层上的保护膜，而使氯离子直接与锌反应，形成可溶性的锌盐，使钢丝镀锌层寿命大大缩短。

锌铝合金镀层，具有比纯锌镀层更高的耐腐蚀性能，其防腐机理如下：（1）铝的化学性能十分活泼，热镀后钢丝表面会形成一层致密的氧化铝，在腐蚀环境下就容易钝化形成保护层。在腐蚀介质中，表层富锌相作为阳极先被腐蚀，其铝含量会不断升高而使得氧化铝含量不断增加，使得镀层阻隔外界有害物质的能力更强。同时铝的加入也抑制了防腐性能较弱的、组织疏松的锌铁合金过渡层的生成，有利于提高镀层整体的防腐能力。（2）锌-铝合金镀层发生破坏并露铁点，镀层作为铁-锌铝电池的阳极被溶解，钢基体受到保护。锌-铝合金的腐蚀电位略低于纯锌层，为-0.87 左右，但其腐蚀电流仅是热镀纯锌的 1/5，在牺牲阳极的保护中，同样数量的锌-铝合金镀层的消耗时间是热镀锌层的 5 倍，能提供更长的牺牲防护时间，从而获得更好的耐久性。经试验验证，锌铝合金钢丝的耐腐蚀寿命至少为镀锌钢丝的 2 倍以上。该锌铝合金镀层钢丝技术已经成熟，且经过试验验证，已经应用于宜昌至喜大桥主缆、吊索、斜拉索，港珠澳大桥斜拉索等。



图3 锌铝合金镀层钢丝与镀锌钢丝

另一方面，随着大跨径悬索桥的规划建设，对吊索构件和可靠性和安全性提出了更高的要求。采用缺陷更少、组织更加均匀稳定高强度高韧性钢丝是一个趋势。钢丝的抗扭转试验要求将试件两端夹固，钳口间距为 100d，试件的一端可沿试件轴线方向移动，另一端以小于每分钟 60 转的速度转动，直至试件扭断。钢丝的扭转性能是钢丝韧性和塑性综合性能的表现，扭转试验是检验钢丝在固定或交变方向扭转时的塑性变形能力，可以显示出金属形变的不均匀性、表面缺陷及内部缺陷。扭转试验一般是在沿轴向施加不大于试样 2% 的公称破断力的负荷下进行，丝一般采用单向固定扭转试验。扭转变形是一个不均匀的形变，从弹性

力学理论来分析圆柱形刚体，当试样承受扭矩进行扭转时，扭转变形在弹性范围内，试样横截面上的切应力和切应变从试样中心至表面呈线性关系。当表层产生塑性变形后，切应变的分布仍然保持线性关系，但切应力则因塑性变形而有所降低，不再呈线性分布。性能优异、组织均匀的高强度钢丝试验中完全由于扭转剪切而发生破坏，破坏后的端面是平齐的端面，且断裂口能看出明显的同心圆纹路，抗扭转次数也较高。如果盘条热处理不到位，金相组织不良，钢丝拉拔变形不均匀，钢丝表面及内部有微观缺陷，都会导致钢丝在扭转式发生分层开裂，扭转次数下降。扭转试验不仅可以发现钢丝表面缺陷，而且可以看见肉眼看不见的钢丝内部缺陷，以及较大的夹杂、缩孔和不良的淬火组织。将一些扭转试验次数较低的钢丝进行金相合金组织分析研究，发现钢丝来的裂纹萌生处发现明显的显微空洞。随着桥梁跨度的不断增大，对钢丝的强度要求越来越高。随着缆索材料强度的提高，缆索的截面尺寸越来越小，因而表面及内部缺陷对钢丝的危害及影响更大。而作为检验钢丝表面及内部缺陷的扭转试验指标显得更加重要。国际专家认为虽然平行钢丝缆索中钢丝并不扭曲，因为方便易行，常以扭转试验测试钢丝韧性和表面是否有缺陷。因此，在钢丝抗拉强度等指标已达到相关标准和使用要求的同时，桥梁缆索用钢丝的扭转指标首先被国外发达国家提出，继而我国桥梁缆索材料所采用。

2003 年出版发布的 ISO 7800 : 2003 METALLIC MATERIALS 陷，以及较大的夹 SIMPLE TORSION TEST 规定了 0.1mm 至 10mm 的钢丝的扭转试验的方法。我国的 GB/T239 也规定了钢丝的扭转试验方法。欧盟规范 Euro code 3 法。欧盟规范 STLIC MATERIALS 陷，以及较大的夹杂、缩孔和不良的淬火组织。将一些扭转试验次数较低的钢丝进行金相合金组织分析研究，发现钢丝来的裂纹萌生处发现明中规定了桥梁缆索用钢丝应符合 BS EN 10264-3:2012 Steel wire and wire products 不良的淬火组织。将一些扭转试验次数较低的钢丝进行金相合金组 Round and shaped non alloyed steel wire for high duty applications 的要求，在该规范中明确了钢丝需进行扭转试验，扭转次数和直径相关。日本 HBS G3508 明确了钢丝《本州四国连络桥平行钢丝索用镀锌钢丝》标准中提出扭转指标为 ≥ 14 次(标距为 100 倍钢丝直径)，继而在世界其他国家如挪威、土耳其、韩国的工程中被采用。

综上所述,斜拉索用高强度钢丝扭转性能是衡量钢丝在扭转状态下承受塑性变形能力和评价钢丝是否有内部和表面缺陷的一个重要方法。扭转性能作为高强度冷拔钢丝所必须具备的重要的机械性能指标,用以表征钢丝的原材料状况和制作过程控制情况。吊索用钢丝的使用寿命与扭转性能有着密切的关系。因此,在评价钢丝的综合力学性能时,必须考虑其扭转性能。

因此,本标准增加了锌铝合金镀层,拓宽了设计单位和用户的选择,对于耐久性要求较高的平行钢丝吊索,可采用锌铝合金镀层钢丝。同时将钢丝的强度级别由 1670MPa、1770MPa2 级别提高到 1670MPa、1770MPa、1860MPa,已适应更多的悬索桥吊索的设计。增加了吊索钢丝的扭转指标,提高了吊索使用的可靠性、安全性和耐久性。完善钢丝绳吊索的技术要求。

3) 增加刚性吊索的技术要求

本标准中增加了钢拉杆吊杆。钢拉杆吊杆主要应用于悬索桥边跨及中跨长度较短的位置,由于长度较短平行钢丝束吊索或钢丝绳吊索的工艺限制,此位置吊索通常设计为钢拉杆吊杆。

钢拉杆吊杆两端的锚具尺寸可与其他结构吊索保持一致,以保证连接没有问题。由于平行钢丝束吊索或钢丝绳吊索的抗拉强度较大,钢拉杆吊杆的抗拉强度较低,在承受相同的载荷下,钢拉杆吊杆的截面积则较大,即钢拉杆吊杆直径大。在一些桥梁中为了最大程度保证全桥吊索外观一直的要求,将钢拉杆吊杆的等级已经做到了 835 级。同时,钢拉杆吊杆具有更高的抗腐蚀要求。

4) 增加平行钢丝束吊索的水密性试验方法

热挤聚乙烯吊索索在锚头制作时,需剥掉一定长度的 PE 护套,此剥离部位是水分及其他有害物质可能进入索体的通道。旧标准锚具与索体的连接部位既没有相应的设计要求,也没有检验标准。导致水分从该部位进入索体,造成拉索锈蚀失效。因此,本标准中,对热挤聚乙烯平行钢丝吊索采用密封结构和密封填充材料对锚头进行防水密封处。但吊索锚头密封系统的可靠性非常重要,尤其是在车辆荷载及斜拉索振动的情况下,其密封系统的有效性将受到严峻的考验。

过去几十年内,全世界修建了几百余座悬索桥,其中由于锈蚀的影响,使得

部分早期修建的悬索桥结构损坏非常严重。尽管桥梁设计者采用了这种或那种防腐办法，但许多防护方法是不成功的。特别是热挤聚乙烯吊索，一些悬索桥的热挤聚乙烯吊索还在正常使用年限，外面护套层并未出现破损，但其内部钢丝发生锈蚀，这种隐性的危害使得桥梁安全存在严重的隐患。

这种隐患从细节上分析是一个热挤聚乙烯吊索密封体系问题，因为热挤聚乙烯吊索使用不能达到设计寿命，客观讲是与组成的所有构件的耐久性有关，但随着材料科学的发展，对构件的耐久性将最终会得到解决。在材料问题解决的同时，热挤聚乙烯吊索细部构造将起到决定性的作用。热挤聚乙烯吊索在锚头制作过程中，需要剥掉一定长度的 PE 防护层，该位置位于金属套筒与钢丝绳、金属套筒与 PE 护套的过渡部位，此部分如果处理不好，是水分以及其他有害物质可能进入索体的一个通道。

热挤聚乙烯吊索的防腐材料可靠性基本可通过相关的加速试验得到验证（如聚乙烯等有机材料可通过紫外线人工加速老化试验进行验证，其他防腐层可通过盐雾试验进行验证），但热挤聚乙烯吊索锚头的密封结构却没有科学的方法进行相关验证。本标准提出了吊索锚头的水密性试验的概念。该试验是在一定条件下，将热挤聚乙烯吊索锚头浸于水中一段时间后，解剖锚头索体，检验热挤聚乙烯吊索锚头部位的进水情况，具体参考规范如下：2001 年美国后张预应力协会（POST-TENSIONING INSTITUTE）出版《斜拉索设计、试验及安装建议》（《RECOMMENDATIONS for STAY CABLE DESIGN, TESTING AND INSTALLATION》）中首次规定斜拉索锚头组件采取与实桥等比例模型进行水密性试验。该试验试验要求如下：

热挤聚乙烯吊索首先进行应力上限 $0.35 \sigma_b$ ，应力幅 150MPa，200 万次应力循环的疲劳试验，断丝率小于 5%；

热挤聚乙烯吊索完成疲劳试验后，将锚固区浸泡在不小于 1 米深的红色溶液容器内，进行长达 96 小时的试验。试验后进行解剖检查。

本规范在增加了平行钢丝束吊索的水密性试验方法，目的是在模拟吊索锚头在积水的极端情况下，检验吊索锚头密封结构的有效性和可靠性。

5) 增加高密度聚乙烯护套等防护密封材料的技术要求

目前平行钢丝吊索索体通长连续热挤高密度聚乙烯，紧密包裹钢丝束，可完全隔绝外界水分及其他有害物质，防止钢丝锈蚀。但是，普通的聚乙烯材料在阳光、紫外线水分的联合作用下容易发生气候老化，从而产生微裂纹导致护套开裂，进而水分会进入索体。聚乙烯的寿命通过人工气候老化和耐环境应力开裂试验来验证。

本标准增加了聚乙烯护套材料的要求可更好的保证吊索的使用寿命。

3 预期的经济效果、社会效果及环境效果分析

悬索桥吊索是连接主缆和加劲梁，并将加劲梁的荷载传递到主缆的重要构件。当前，随着国家高速路网的进一步完善，许多跨江跨河的悬索桥进入了规划和建设阶段。新时代下悬索桥吊索的强度、抗疲劳性能、耐久性要求较高，传统的公路悬索桥吊索标准不能满足当前悬索桥的建设需求。另一方面，由于金属冶炼技术的快速发展及桥梁缆索材料的不断进步，强度为 1860MPa 的锌铝合金镀层钢丝耐久型吊索产品已经被成功开发并得到了初步应用。但目前还没有以上吊索产品的验收标准和规范，此状况制约了高强度、耐久型吊索产品的推广应用。

结合目前吊索行业的技术发展水平，制定相应的吊索产品技术规范，确保悬索桥的建设质量和安全性能，推动大跨径悬索桥建造技术进步。制定本标准能够规范悬索桥吊索的各项指标要求，引领桥梁吊索的上下游产业链协同进步，为我国桥梁建设“走出去”起到积极的促进作用。

该标准的提出符合《标准联通“一带一路”行动计划（2015-2017）》中“聚焦沿线国家共同的重点关切，在电力、铁路、海洋、航空航天等基础设施领域。”，同时符合《中国制造 2025》中先进轨道交通装备以及新材料的任务和重点。

标准创新性：（1）完善了平行钢丝束吊索和钢丝绳吊索的锚具结构。本标准在完善了吊索锚具结构，增加了吊索锚头的密封防水措施和构造。（2）完善平行钢丝束吊索用镀层钢丝的种类、强度级别、锌铝镀层钢丝的技术要求，本标准增加了锌铝合金镀层钢丝，拓宽了设计单位和用户的选择，对于耐久性要求较高的平行钢丝吊索，可采用锌铝合金镀层钢丝。同时将钢丝的强度级别由

1670MPa、1770MPa2 级别提高到 1670MPa、1770MPa、1860MPa，已适应更多的悬索桥吊索的设计。增加了吊索钢丝的扭转指标，提高了吊索使用的可靠性、安全性和耐久性。完善钢丝绳吊索的技术要求。（3）增加刚性吊索的技术要求，由于平行钢丝束吊索或钢丝绳吊索的抗拉强度较大，刚性吊索的抗拉强度较低，在承受相同的载荷下，刚性吊索的截面积则较大，即刚性吊索直径大。在一些桥梁中为了最大程度保证全桥吊索外观一直的要求，将钢拉杆吊杆的等级已经做到了 835 级。同时，钢拉杆吊杆具有更高的抗腐蚀要求。（4）增加平行钢丝束吊索的水密性试验方法，模拟吊索锚头在积水的极端情况下，检验吊索锚头密封结构的有效性和可靠性。（5）增加高密度聚乙烯护套等防护密封材料的技术要求，本标准则增加了聚乙烯护套材料的要求可更好的保证吊索的使用寿命。

标准先进性：本标准借鉴了日本 HBS G3508—1989《本州四国连络桥平行钢丝索用镀锌钢丝》标准中扭转指标，锌铝合金镀层钢丝扭转指标 ≥ 14 次。本标准首次将钢丝的强度级别由 1670MPa、1770MPa2 级别提高到 1670MPa、1770MPa、1860MPa，提高了强度等级。

适用性：本标准规定了公路悬索桥吊索的结构形式、型号、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和储存。

本标准适用于公路悬索桥用平行钢丝束吊索、钢丝绳吊索和钢性吊索产品。

可靠性：本标准产品悬索桥吊索已实现了产业化，实现多座实桥应用，如润扬长江大桥、武汉阳逻大桥、南京长江四桥、泰州长江大桥、马鞍山长江大桥、宜昌至喜大桥、江东大桥、虎门二桥等一大批大型悬索桥吊索中，应用范围广泛，各项技术指标经过多次第三方试验检验及鉴定，质量稳定可靠，技术指标具有可靠性稳定性。

经济性：本标准规定规定的各项技术指标要求具有国产化的特性，可适应多数国产产品，对促进产品的国产化，取代进口有突出的作用，具有巨大的经济效益。

4. 采用国际标准和国外先进标准的程度

目前，国际上没有针对悬索桥吊索的专项标准。因此本标准的编制结合近年来斜拉桥的特点以及客户的要求，部分参照了国际上最新的斜拉索及预应力缆索

的标准。由于锌铝合金镀层钢丝的优越的综合性能，国际桥梁标准规范中，都已经明确建议采用耐久性要求更好的锌铝合金镀层钢丝作为桥梁缆索材料。英国规范 BS /EN1993-1-11-2006(E)《第 1-11 部分：受力构件的结构设计》(Part1-11: Design of structures with tension components)中规定了对于耐久性要求更高的桥梁缆索，建议采用 Zn95Al5 锌-铝合金镀层钢丝，并指出在同等条件下，Zn95Al5 锌-铝合金镀层钢丝的寿命是热镀锌钢丝的 3 倍以上。另外法国预应力协会出版的《Recommendations on cable stays》标准、美国后张预应力协会出版的美国《Recommendations for stay cable design, testing and installation》规范及 2005 年国际结构混凝土协会出版的《Acceptance of stay cable systems using prestressing steels》规范中都涉及到了相关的热挤聚乙烯拉索的要求。以上三个建议规范的钢丝强度均在 1670MPa，且对于热挤聚乙烯用钢丝拉索，部分技术指标偏低，不适用现行的悬索桥吊索。

而本标准在借鉴以上先进指标和方法的基础上，根据国内外的工程技术要求。提高了吊索的强度和耐久性要求，并提出了相关的试验方法，综合水平可达到国际先进水平。

5、与现行法律法规和强制性国家标准的关系

本标准不违反现行法律法规和强制性国家标准，为生产厂家和用户的推荐性产品技术标准。

6、重大分歧的处理经过

无

7、其它需要说明的问题

无