

# 拱桥吊杆诸论与破损安全技术

## ——响水沟大桥吊杆设计阐述

汤国栋<sup>1</sup> 毛穗丰<sup>2</sup> 廖光明<sup>1</sup> 龙薇<sup>2</sup> 刘恩德<sup>1</sup>

(1 四川大学建筑及环境学院 成都 610065 2 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院 成都 610072)

**摘要:**吊杆钢索骤断毁桥,研究十分热烈,产生了诸如“短吊杆”论、“双吊杆”论、“锈蚀致断”论以及“多吊杆”技术,……等等,众论纷纭,并在工程设计与事故诊断中应用。小小吊杆,危及全桥,问题在于:现行的桥梁吊杆设计,承认其存在失效的可能(概率);“三年一检测”,“疑断拆换”、“换则全(或成批地)换”等技术,显然不能根本排除钢索骤断的危险。失效分析(所谓材料诊断学)认为,拱桥吊杆为多因素的共同乃至耦合的作用;非单一、表象的论断所能概括。在简要分析、论述和断索实例考查后,认为:上述诸论,存在瑕疵,未必成立,或者根本不能成立。进而,介绍了响水沟大桥,基于“钢索破损安全技术”的吊杆设计,以阐明其技术要点及应用,探索解决问题的途径。

**关键词:**拱桥 吊杆 钢索 破损安全 双吊杆 短吊杆 响水沟 断丝 信号控制

近年,在我国,拱桥吊杆一而再、再而三地骤断毁桥,安全堪忧:问题迄今没有根本解决。

对此,十余年来,议论热烈,“嘈嘈切切错杂弹,大珠小珠落玉盘”,提出了诸如“双吊杆”论、“短吊杆”论、“锈蚀致断”论,乃至“多吊杆”技术(图3)……等等,众论纷纭;并在工程设计和事故诊断中应用。

在吊杆的安全维护中,拆换不可避免,因此,议论的中心之一,是如何“有利于拆换”。

经计算分析、简要论述和断索实例考查后,认为:上述诸论,未必成立,有的根本不能成立。因此,桥梁钢索骤断的危险,迄今没有排除。

基于“钢索破损安全技术”,响水沟大桥的吊杆设计及阐述,探讨了排除桥梁钢索骤断危险和安全拆换的途径。

### 1 短吊杆问题

在拱式桥梁中,邻近拱脚的第一根吊杆(最短吊杆),常被称为“短吊杆”N1,依序称次短吊杆N2,以及N3,……。

通常认为:吊杆愈短受力愈艰巨,因此最短吊杆N1必定先断,似成定论。是这样的吗?

断索的事实及分析表明:“短吊杆未必先断”,“先断”不是理论的必然,也无事实

依据。

#### 1.1 短吊杆未必先断

兹举一例。

2011年4月12日,新疆孔雀河大桥,吊杆骤断,桥道局部垮塌。其唯一破断的为次短吊杆N2,而非最短吊杆N1;且在次短吊杆N2的骤断冲击下、最短吊杆N1左右两跨桥道板塌落的振荡下,此最短吊杆N1既未先断、也未后断、始终未断,见图1。



图1 新疆孔雀河大桥 最短吊杆始终未断

#### 1.2 短吊杆的受力未必最大

吊杆的设计内力,为钢索失效评估的主要依据。考查拱桥短吊杆N1的索力,有以下认识。

(1)短吊杆的索力不是最大,响水沟大桥等的设计计算表明:最短吊杆N1的内力及其组合,不一定是最大,可能为最小:

内力组合I,吊杆的恒载、活载及温降(-25℃)内力组合:最短吊杆N1与次短吊杆N2

的内力，几近相等，相差 $\geq 0.1\%$ （图2）。

内力组合Ⅱ，在恒载、活载及温升（30℃）的内力组合Ⅱ中，最短吊杆N1为最小，次短吊杆N2为最大，二者相差 $\approx 13\%$ （图2）。

恒载及活载的内力组合，对于最短吊杆N1和次短吊杆N2的恒载及活载内力及其组合，几近相等，二者相差 $\geq 5\%$ 。

注意到，桥梁的安装温度、温变设计峰值，均为名义值。桥梁一经建成，则温变几乎一直不同大小地存在着，因此温变不可不计，只不过取峰值考虑，为偏大的极端状况罢了。

（2）温变时短吊杆可能减载，图3左半拱为温升索力增量，右半拱为温降索力增量。可以看出，当温度变化：无论温升或温降时，最短吊杆N1的索力增量均为负，减载；次短吊杆N2为正，加载。温升时的内力变幅大、温降时的内力变幅较小：本例中最短吊杆N1的温升减载为温降减载

的7倍以上。

（3）温变规律的评估，上述规律，非解析结论。然而，在笔者见过（含院校、设计、科研院所）的计算资料中，可以看出：

其一，桥道体系，无论桥道纵向连续或简支，在内力组合Ⅱ时，最短吊杆N1都是小于次短吊杆N2的，甚至为所有吊杆中内力最小者；尚未见到，最短吊杆大于次短吊杆，甚至高出许多的实例；在内力组合Ⅰ中，二者内力也仅是相近（图2左）而已。

其二，发生机制，注意到拱肋温变胀缩的竖向位移分量与钢索的温变的线性伸缩相比，为高一阶的增量、拱肋材料与吊杆材料的线胀系数差异等，上述吊杆温变内力的产生机制，就不难理解了。

### 1.3 桥道温变伸缩引起的短吊杆弯曲

桥道温变伸缩，引起短（端）吊杆弯曲

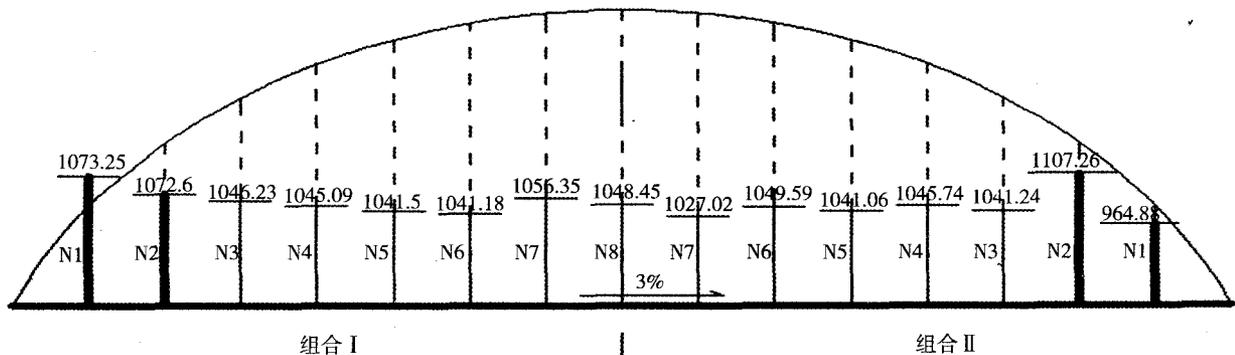


图2 响水沟大桥吊杆组合索力

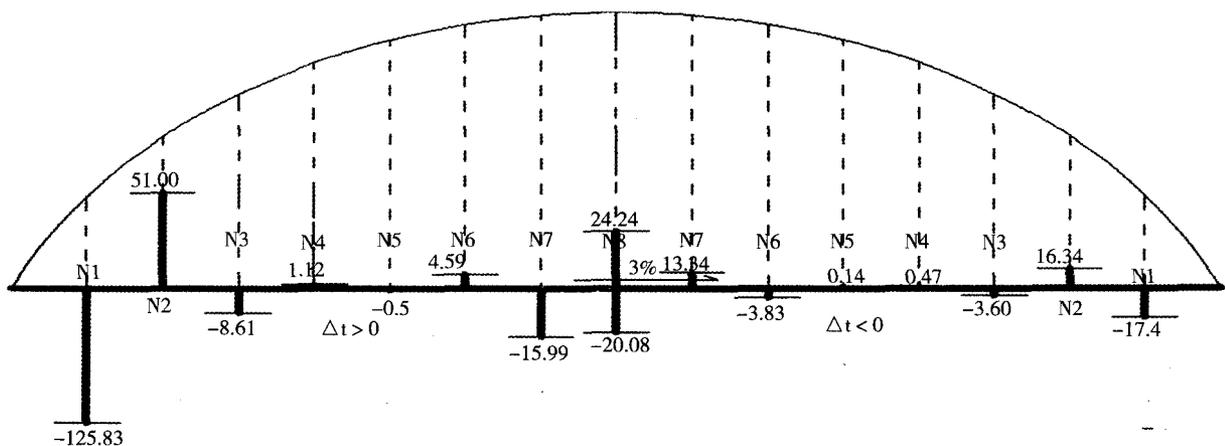


图3 温升及温降的索力增量分布图

疲劳,被认为是导致短吊杆N1先行破断的又一原因。

响水沟大桥,桥道温变所引起的短吊杆内力及应力如表1。

Palmgren-miner理论认为,影响疲劳断裂的主要参量,为应力幅和循环频率。

(1) 桥道温变伸缩的频率极低,桥跨结构,一年内达峰值的温变循环频率,仅数月一次,甚至一年一次而已;然而,活载的循环频率为每日成千上万,乃至数万次,二者为数量级( $\approx 10^4$ )之差。

(2) 桥道温变伸缩引起的吊杆弯曲。桥道温变所致的吊杆弯曲具有以下特点:

其一,作用方式,桥道日温差大多远小于设计的温差峰值 $\Delta t$ ;端吊杆的温变弯曲为一日一次的无冲击、缓慢渐变的、阶梯状小变幅行为;而

活载作用,则为瞬时脉动的冲击循环。

其二,行为性质,吊杆的主要承载,为全截面均匀的拉-拉循环;而温变引起的为吊杆弯曲循环,一日一小变,数月乃至一年一大变。二者在作用性质上,是不相同的<sup>[3、4、8]</sup>,亦即疲劳与静强度分析是不一样的,而材料的疲劳强度较静强度低50%左右。

简言之,桥道温差所致的端吊杆弯曲,不应成为端吊杆破断的主要原因。孔雀河大桥(图1)最短吊杆始终未断的事实,明确地不支持桥道温变导致其弯曲破断的认识。

(3) 短吊杆有时可能受压,在拱桥的交叉双吊杆中,最短吊杆,在某些工况下,可能受压。参见:小西一郎,钢桥(中译本)第四分册P.90;对此,笔者及国内文献亦曾有过相同的结论。

表1 响水沟大桥温变索力比较表

索号	温变 $\Delta t$	计及桥道温变伸缩之吊杆钢索内力及应力				说明
		组合索力N kN	索力增量 $\Delta Nt$ kN	温变弯矩 $\Delta Mt$ kN.M	组合应力 $\Sigma \sigma$ MPa	
N1	温升 30℃	964.82	-125.83	0.66	333.6/-41	1. 索力N为恒载、活载及温变内力之组合。 2. 需注意:当升温时,N1和N2吊杆分别为减载和加载,参见图2。 3. 吊杆N2较N1的组合内力大或相近。
N2		1107.26	51.00	0.35	292.4/137	
N3		1041.24	-8.61	0.24		
N1	温降 -25℃	1073.25	-17.40	0.28	512.2/-96	
N2		1072.26	16.34	0.14	318.9/96	
N3		699.61	-3.60	0.22		

#### 1.4 腐蚀不是桥梁钢索破断的唯一因素

认为,桥梁钢索,主要为“锈蚀”破断;只要防住了锈蚀,钢索就不会骤断,……云云。是这样的吗?

图4为孔雀河大桥吊杆钢索破断的断头,明白地显示:钢索的钢丝,由外及里<sup>[1]</sup>,破断形式完全不同:

(1) 外圈钢丝,主要为载荷与介质的共同或耦合作用下,钢丝材料的腐蚀疲劳、应力腐蚀等所致的低应力脆断<sup>[3]</sup>;断口整齐,几乎沿横截面发生;断口陈旧,显系最先破断。

(2) 内部钢丝,钢索中心部份的钢丝,虽然也存在腐蚀和锈蚀,但程度较外层明显减弱;主要为载荷及其扰动下的疲劳破断,有的钢丝甚

至为瞬时强度的破断:断裂沿斜截面发生,与Mises准则的破断特征相吻合<sup>[1、3、6]</sup>,并非仅因锈蚀而致断。

钢索的介质腐蚀防得了吗?环境介质的腐蚀,一般能“防”得了?已经防住了吗?在1.2.2所述的工况中,即使是介质的潮雾,也将导致腐蚀疲劳或应力腐蚀的。

作用的随机性与意外断裂,综上所述,拱桥吊杆的破断,并非仅与其长、短有关——短吊杆未必先断;也非仅为腐蚀及温变弯曲所致。

固然,由于问题的随机性,作用的多样性及耦合性,桥梁吊杆乃至其它构件,在服役过程中存在理论预测以外的损伤或作用,因此,也不排除个别意外的、非规律性的断裂,未必仅与其长短相关。



图4 钢索断头

## 2 多吊杆技术

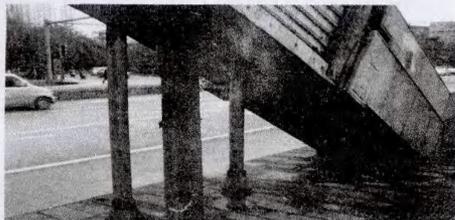
小小吊杆，成本不高（仅为全桥总造价的10%左右），含“金”量不小，危及全桥。仅表象地、孤立地“嘈嘈切切错杂弹”，对其复杂的破断机制，未必“昭昭”，技术目标自然就是盲目的了。

面对断索毁桥，无奈之下，产生了“多吊杆”技术，如图5。即在一根吊杆的基础上，设置不受力或少受力的多吊杆：将一个吊点的支承钢索，由1根增加为2根、3根乃至5~6根。仅在一座城市里，就非只一例。

勿需多加议论，提及它，仅为说明问题的现状。相信未来是会有所前进的。



a 实例1



b 实例2

图5 多吊杆技术

## 3 双吊杆问题

“双吊杆”是近年产生的又一技术，如图6、图7所示。据称，其意图在于：当一根吊杆破断时，另一吊杆将“有利于拆换”。

为便于讨论，在双吊杆中，取先断者称F，后断者称S，如图6b)和图7b)。

### 3.1 平行双吊杆

平行双吊杆，如图6，具有以下特征。

(1) 二者应力相等材料相同因此剩余寿命相同，基于Saint Venant原理和浅近的分析可知：位于同一点（附近）的二平行吊杆，无论其截面面积是否相同，载荷应力均是相等的。

对于图6a)所示的平行双吊杆，由于二者所处介质环境相同、钢索材料一样；基于钢索破断为腐蚀疲劳、应力腐蚀、氢脆以及瞬时强度失效所致，即二者的作用相同、抗力相同，则在任何时刻的剩余强度相同，理当同时破断！

(2) 先断者将促成未断者迅即破断，在图6b)和图7b)中，当其中一根吊杆F破断时，其所承载荷，在计及冲击因数(1.63~1.86)后，转加至未断吊杆S上，则S的作用（应力）骤然剧增；当S钢索的材料与已断吊杆F相同时，S能不迅即破断？

由于二者破断过程很短，非目视所能觉察，而被感觉为“同时”破断。

### 3.2 交叉双吊杆

交叉双吊杆，如图7所示。

此前的拱桥，桥道结构纵向常为简支，当取吊杆下端节点分析时，则属静定问题。若二吊杆关于竖向呈对称布置 ( $\theta_1 = \theta_2$  及  $A_S = A_F$ )，则二者应力相等，加之环境相同、材料相同、抗力一样。因此，仍将“同时”破断。

### 3.3 实验考查

笔者类似的疲劳实验证实：当钢索材料相同、作用应力相近、循环规律一致、环境介质相同时，无论平行或是交叉的钢索，均将“同时”破断。

结论是：现行的双吊杆，将同时破断，其“有利于拆换”的论断，缺乏依据，似为误导；据此进行钢索的拆换作业，将是危险的。

### 3.4 双吊杆实现安全拆换的途径

换一个角度讨论：基于以上分析，容易看出：双吊杆实现“便于拆换”的可能性，其实是存在的，只须需具备以下条件。

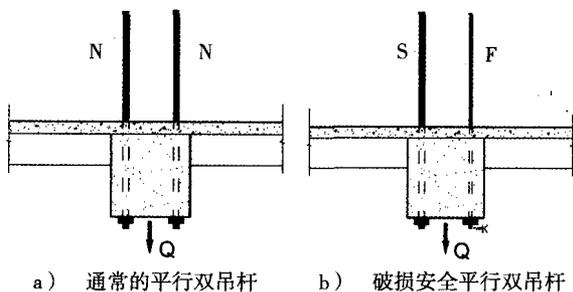


图6 平行双吊杆

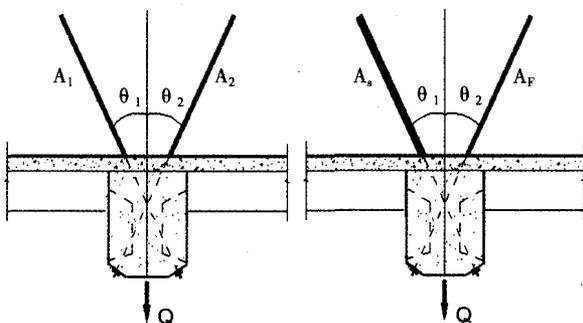


图7 交叉双吊杆

(1) 双吊杆须先后破断, 在图6 b) 和图7 b) 的双吊杆中, 当其中一根吊杆 (F) 破断之后, 若经破断分析和设计, 确定地保证 (非主观意断!) 另一吊杆钢索 (S) 肯定不断。

(2) 双吊杆须具有剩余寿命差, 在F破断后, S除了具有单独、安全承受此双吊杆的全部载荷的能力外, 还需确定地保证: S能够提供安全拆换 (譬如3~6个月) 的时间。

换言之, 在设计上需使S与F间, 具有一定的剩余“寿命差”。

这正是《桥梁钢索破断安全技术》项目研究的工作内容之一。

(3) 技术准则, “寿命差”的实现, 可以采用以下准则。

准则I: 以应力差实现寿命差, 在图2b) 和图3b) 的双吊杆中, 当S与F的材料相同, 即其破断强度 (疲劳强度)、物理参数均相同时, 若使二者承受的作用 (应力) 不相同, 则二者的破断寿命不同, 将可以实现先后破断。

此即“以应力差实现寿命差”准则。其间的相关参数, 是经研究、实验和实践确定的。

2006年建成的西藏拉萨柳梧大桥, 其吊杆的原有钢索, 即是应用这一准则设计的。

准则II: 以强度差实现寿命差, 仍在上述 (图6b和图7b) 的双吊杆中, 当S与F的作用应力相等时, 但取二者的钢丝材料破断强度不同: 一部份 (F) 破断强度较低, 另一部份 (S) 的破断强度较高, 即二者具有破断强度差, 将可实现寿命差, 而先后破断。此即“以强度差实现寿命差”准则。

先断者 (F) 警示, 立即拆换该钢索: 排除骤断毁桥的危险。这就是“破断安全钢索”, 简称FSCM。

它将可以作为一种产品, 系列研发。

桥梁破断安全钢索 (FSCM) 以及配套的钢索断丝信号控制系统 (称FSADS) 即为《桥梁钢索破断安全技术》的二大内容。

以下将介绍此项技术在响水沟大桥吊杆钢索设计中的应用。

#### 4 吊杆破断安全技术

将以响水沟大桥实例, 阐明《桥梁钢索破断安全技术》的要点及其在拱桥中的应用。

响水沟大桥为四川省S211公路, 长河坝水电站枢纽区内, 以服役电站建设为主的桥梁。主跨为中承式钢管混凝土平行双肋桁架拱。净跨径133m。

大桥设计载荷, 为汽-40级; 验算载荷, 特-220级; 设计车辆时速, 为30km/h。

原设计为沿横梁的轴线布置的平行双吊杆, 。钢索的型号, 分别为: 外侧PES7-73 和内侧PES7-61的平行钢丝成品索, 冷铸镦头锚; 钢丝的标准强度为1670 MPa。

现应用《桥梁钢索破断安全技术》<sup>[10]</sup>对其吊杆系统进行设计优化。主要包括:

①改双吊杆为单吊杆;

②吊杆按破断安全钢索 (FSCM) 设计, 实现断丝预警、排除钢索骤断毁桥的危险;

③设置吊杆《断丝信号控制系统》(FSADS) 进行钢索损伤的自动实时监控。

破断安全钢索FSCM, 其理论源于断裂力学, 设计方法借鉴飞机结构。关于此, 早在80年前, 国外桥梁专著中<sup>[6]</sup>, 即已萌芽了这一思想: 设计者在同一吊点的交叉双吊杆中, 分别采用了不同数量的配筋, 以追求先后破断。

#### 4.1 FSCM钢索的构造

根据吊杆的承载规律,在进行了材料、强度及剩余寿命设计及分析后(过程从略),响水沟大桥取定了NI和N II二种类型的钢索,其截面构造如图8之示意,钢索的截面方案为:

N I型:  $[109 \phi 7] = 24 \phi 7 [F, 1670] + 85 \phi 7 [S, 1960]$ ;

N II型:  $[91 \phi 7] = 21 \phi 7 [F, 1670] + 70 \phi 7 [S, 1960]$ 。

N I型FSCM钢索,全截面由109根 $\phi 7$ 钢丝组成,其中24根 $\phi 7$ (F)的钢丝标准强度为1670MPa;85根 $\phi 7$ (S)钢丝的标准强度为1960MPa;

N II型FSCM钢索,全截面由91根 $\phi 7$ 钢丝组成,其中:21根 $\phi 7$ (F)钢丝的标准强度为1670MPa;70根 $\phi 7$ (S)钢丝的标准强度为1960MPa。

FSCM的锚固、防护以及制造、检验等,均与现行成品钢索相同。

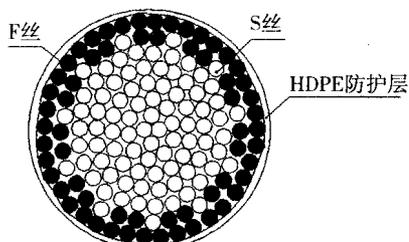


图8 截面示意

#### 4.2 以单吊杆取代双吊杆

响水沟大桥,原设计为双吊杆,现改用FSCM单吊杆,其意义在于:

钢索安装工作量减少,与双吊杆相比,单吊杆的挂索、锚固安装、调索工作量各减少50%左右。

调索便易,更主要的还在于,单吊杆调索操作的难度上:本桥桥道梁为纵向简支,取为单吊杆布置后,横梁亦为二点简支,索力调整勿需大量反复、几可一次到位;而原设计的双吊杆,横梁为一梁4吊点。调一点,则其余三点的索力、位移均将变化。当以桥面标高控制调索时,则索力、标高难以协调两全。

#### 4.3 FSCM的布置

如前所述,拱桥的短吊杆和次短吊杆较其它吊杆,受力及服役条件的差异颇大。因此,本桥

的吊杆,采用了前述NI和N II两种不同型号钢索布置:在拱脚附近的NI~N4号吊杆,采用NI型;跨中部份N5~N9号吊杆,采用N II型,如图9所示。

#### 4.4 FSCM的用材与造价

FSCM与原设计的双吊杆的材料及造价比较,如表2。

(1) FSCM的用材,破断强度分别为1670MPa和1960MPa的高强钢丝,均为目前市场供货的;F与S的用钢总量,与通常(一种材料)钢索相等,较原设计的双吊杆,分别节省材料(NI)24%和(N II)43%。

(2) FSCM的造价,由于钢索材料用量及配件等均与通常拉索相同,制造工艺一样。响水沟桥的FSCM单价与通常钢索几乎相等;因吊杆“双改单”后,钢索项目的造价,较原设计降低30%以上。

#### 4.5 FSCM的设计分析

通常的拱桥吊杆,经结构整体计算,获得拉索的设计内力后,按规范JTG/T D65-01-2007进行安全校核;而FSCM则基于破损安全设计尚需根据其服役工况,分别进行计算校核。

(1) FSCM单索的设计工况。FSCM吊杆设计,其分析工况包括:

运营服役工况,与通常钢索一样,FSCM需进行服役状态下的安全校核。所不同者,在于FSCM钢索内钢丝F与S将具有不同的安全系数,但均需满足规范JTG/T D65-01-2007的要求。

F破断瞬时工况,F破断瞬时,偏安全地按F丝瞬时全部破断考虑,将其承载计入冲击后,转由S承担;进行瞬时的安全性校核,其安全系数可按临时受载考虑。

F破断之后工况,F丝破断、退出工作后,S单独承载、等待拆换和拆换期间的分析与校核。

(2) FSCM的安全性,响水沟桥N I型和N II型FSCM的设计分析成果,如表3和表4。

① N I和N II各工况下的安全系数,均已满足规范要求。

②大桥先期主要服务于电站建设,其载荷较公路载荷大得多,服役条件、载荷管控,未必都能到位,以故其安全系数,适当偏大。

(3) 具有FSCM的桥跨结构分析,对于具有

FSCM的钢索的桥跨结构,除按规范及惯例进行单索设计分析外,理应按(1)相应的工况进行桥跨结构的分析。

此项分析实例表明:其结果与通常钢索的桥跨内力,差异仅(1~3)%而已。因此,当无特别需要时,此项计算从略。

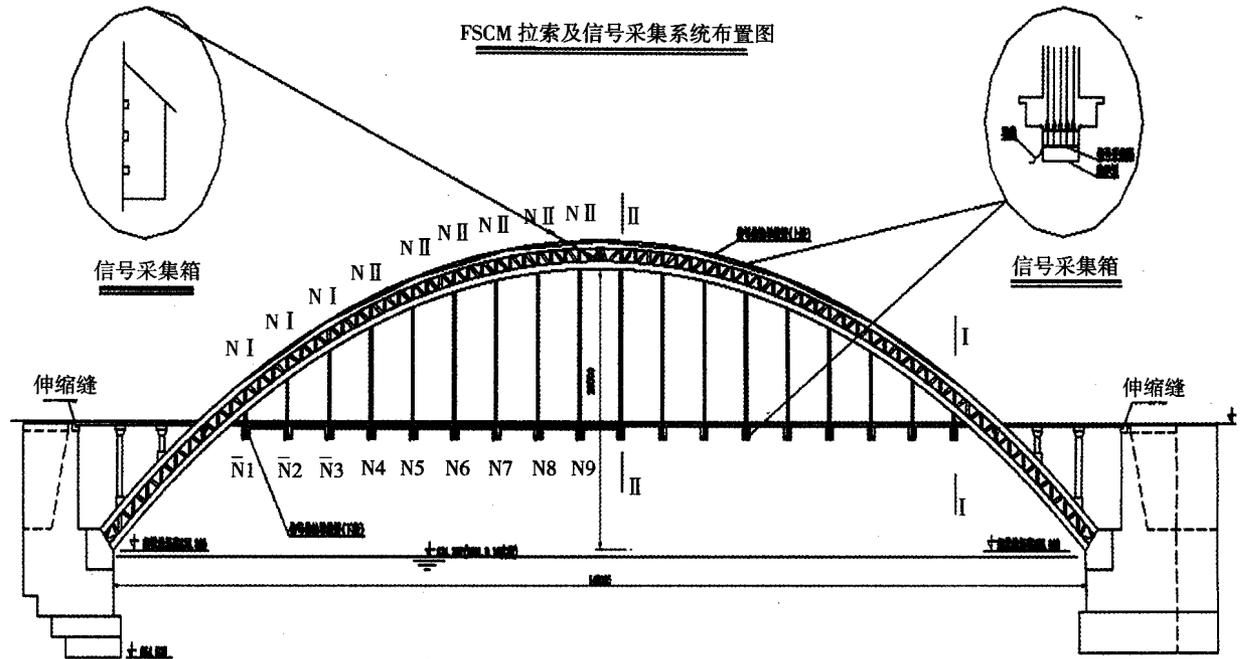


图9 响水沟大桥吊杆及信号控制系统布置

表2 响水沟大桥单-双吊杆用材比较

方案	截面丝数	钢材比较	省材比例	锚具
拱脚段吊杆[N I]	109 $\phi$ 7	[A]/[N I]=1.24	省24%	
跨中段吊杆[N II]	97 $\phi$ 7	[A]/[N II]=1.43	省43%	冷铸锚
原设计双吊杆[A]	[73 $\phi$ 7+61 $\phi$ 7]=134 $\phi$ 7		----	

表3 响水沟大桥N I型钢索各工况的安全性分析

序号	钢索名称	钢索类型	截面规格	截面面积	钢丝强度	设计内力	钢索各工况安全系数		
							服役	F断时	F断后
1	FSCM/N I	S丝	85 $\phi$ 7	3271	1950		7.39	5.06	5.76
2		F丝	24 $\phi$ 7	924		1107.26	6.33	0	0
3	通常设计	平行丝	109 $\phi$ 7	4195	1670		6.33		
4	原设计	内侧	73 $\phi$ 7	2809		631.31	7.40		
5		外侧	61 $\phi$ 7	2348	475.95	8.23			

表4 响水沟大桥N II型钢索各工况安全性分析

序号	钢索名称	钢索类型	截面规格	截面面积	钢丝强度	设计内力	钢索各工况安全系数		
							服役	F断时	F断后
1	FSCM/N II	S丝	70 $\phi$ 7	2694	1950		6.17	4.14	4.74
2		F丝	21 $\phi$ 7	808		1107.26	5.28	0	0
3	通常设计	平行丝	91 $\phi$ 7	3502	1670		5.28		
4	原设计	内侧	73 $\phi$ 7	2809		631.31	7.40		
5		外侧	61 $\phi$ 7	2348	475.95	8.23			

## 5 钢索断丝信号控制

吊杆钢丝的破断信号采集与传输,采用图9所示的断丝信号控制系统,简称FSADS。

### 5.1 断丝信号控制系统的技术要点

基于电磁耦合理论及数字信号技术,研发的《拉索断丝信号检索控制系统》,系统示意如图10,其要点如下。

①拉索的断丝信号,自索端采集,如图10。

②信号经(图10之B)数字化后,无线(网络)发送。

③断丝信号在桥梁管理中心(图10之D)接收、显示;

④可以随时检(监)视拉索的断丝状况、定量显示;亦可由管理者的手机接收。

### 5.2 断丝信号系统的应用与维护

FSADS与通常的检测技术完全不同:直接检测断丝;不用传感器,不通过载荷行为的检测、诊断,作非确定性的剩余寿命“预测”。

主要器件均设于拉索端头和桥梁外表:可检、可换,不存在操作或维护困难;断丝信号自动、实时检索、网络传输,开机即可查询,不需要现场操作。

### 5.3 断丝信号系统的成本

FSADS的新建成本,相当于现行拉索1~3次检测的费用。

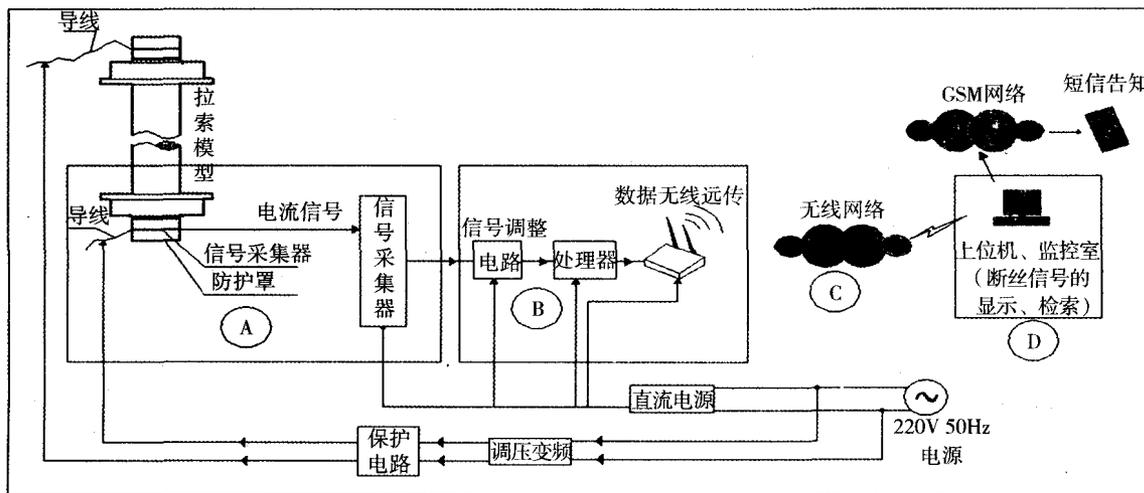


图10 钢索断丝信号检索控制系统的组成示意

## 6 FSCM吊杆的管养

FSCM钢索的管养:服役管理、养护及FSADS的应用监控等。

### 6.1 日常维护与监控

FSCM的日常服役管养,只需一般的目测、寻视。

FSADS系统的监控,为钢索断丝信号实时采集、无线传输与定量显示。

### 6.2 钢索拆换

根据F的断丝信号,FSCM将“随(F)断随换、断一换一”;拆换勿需按规范的“改建工程要求”:省略检测、评估、拆换设计、施工、监理、监控等繁冗过程。

勿需现行的“三年一检测”、“十年(或二十年)一拆换”;摒弃“疑断拆换、换则(成批或)全换。”的作法。

### 参考文献

- [1] 汤国栋等. 论桥梁钢索失效的力学机制及断索肇因[J]. 桥梁工程与技术(特刊), 博鳌: 2011
- [2] 汤国栋等. 桥梁吊杆及拉索的健康诊断[J]. 公路, 2002(9): 36-41.
- [3] 庄东汉. 失效分析[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2009
- [4] 周传月. MSC.Fatigue疲劳分析应用与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [5] 汤国栋等. 破损安全桥梁拉索及其系统研究[J]. 四川大学学报(工程科学版) 2007, 6(39): 14-20.
- [6] H. N. 波利万诺夫. 钢筋混凝土桥梁(中译本下)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1956.
- [7] 杨王玥等. 材料力学行为[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009
- [8] 汤国栋. 桥梁结构的鲁棒性-震害损毁桥梁修复讨论[C]. 桥梁检测、评定、加固与防震减灾技术论坛, 成都: 2010
- [9] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.1
- [10] AASHTO. 美国公路桥梁设计规范(中译本)[M]. 北京: 人民交通出版, 1998
- [11] 王竹等. 南澳岛跨海大桥斜拉索的破损安全技术应用[J]. 桥梁工程与技术(特刊), 博鳌: 2011