

分体式摆轴散索鞍构造与计算分析

刘雷轩, 王学敏, 陈建宇

(贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 散索鞍是悬索桥中支承主缆的重要构件, 能够满足主缆转向和散索的功能要求, 因此鞍槽内部具有能使索股平弯和竖弯变化的复杂构造。为了便于运输和现场安装时起吊以及减少门架等措施费用, 文中给出了鞍头为铸钢件、鞍体为钢板的分体式结构, 鞍头和鞍体采用螺栓连接。文中所述分体式摆轴散索鞍的相关构造关键技术大大减轻了运输和吊装难度, 可为安装、运输条件不好的山区悬索桥等设计提供参考。文中介绍了分体式摆轴散索鞍构造并结合相关规范, 提供了此种散索鞍在主缆作用下的鞍槽内抗滑移系数、鞍槽侧壁由主缆分散开产生的侧向力及其产生总弯矩、鞍槽底部由竖向半径产生向心压力计算算例及计算结果, 为类似分体式构造散索鞍计算提供参考。

关键词: 悬索桥; 分体式散索鞍; 应力

中图分类号: U443

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0039-03

索鞍是为悬索桥主缆系提供支撑, 使其线形平顺改变主缆方向的永久性受力构件, 其中的散索鞍是设置在锚碇前端散索鞍支墩上, 将主缆索股在竖直方向和水平方向散开并引入各个锚固点的重要构件^[1]。而散索鞍有一些特殊的特点:

(1) 散索鞍鞍槽具有使边跨方向主缆转向为锚跨方向的作用。(2) 将来自边跨主缆并将其索股分散并引入锚固位置的作用。(3) 散索鞍为铸焊结构, 本身结构复杂, 由于需要分散主缆, 因此其鞍槽内由竖弯半径和平弯半径控制其尺寸^[2]。(4) 针对分体式散索鞍, 由鞍头和鞍体上下两部分构成一个整体, 并用螺栓相连。超大跨径悬索桥的发展进程中, 为了满足悬索桥的稳定性和散索鞍的受力情况, 散索鞍的结构愈加复杂、尺寸愈加庞大, 这也为散索鞍的制作、运输、吊装、安装带来了很多的挑战。

一、工程背景

该桥为 1,100m 双塔单跨钢桁梁悬索桥, 垂跨比 1/10, 孔跨布置: 3×30m 现浇连续箱梁+主跨 1,100m 钢桁梁+2×30mT 梁。本桥地处形式复杂, 地势总体西北高东南低, 属浅切低山溶蚀、侵蚀地貌类型, 高差相差较大, 且两岸的岸坡都呈现上部坡度大, 下部坡度缓的地势。一侧桥区距乡村便道约 200m, 另一侧桥区距乡村道路约 600m, 交通条件较差, 结合地形及地质条件, 本桥采用分体式散索鞍, 其中一侧锚碇采用重力式锚, 另一侧采用隧道锚。散索鞍作为永久构件为了满足悬索桥的稳定性和散索鞍的受力情况, 因其结构复杂、尺寸庞大, 为散索鞍的吊装、运输带来了困难。针对以上困难, 文中结合本桥实际工程设计, 简要阐述此项目采用的分体式散索鞍的创新设计及散索鞍在主缆作用下鞍槽内抗滑计算、强度计算, 为类似条件的悬索桥设计提供一定参考。

二、分体式摆轴散索鞍创新设计

分体式散索鞍为摆轴式散索鞍, 由鞍头、鞍体、底板、

底座、上下承板、销、拉杆等组成如图 2 所示。

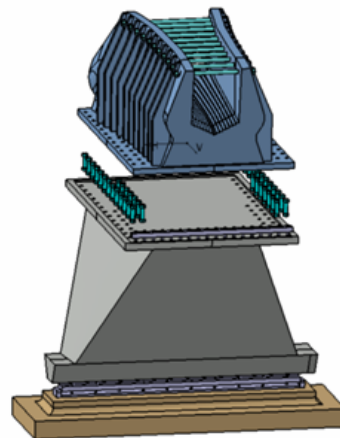


图1 分体式散索鞍 3D 模型

文中所述分体式摆轴散索鞍采用铸焊结合的结构形式, 鞍头采用铸钢铸造, 材料采用 ZG270-480H, 鞍体采用钢板焊接成, 材料采用 Q345R^[3]。鞍体与鞍头的接触面预留卡位, 通过挡块和鞍头并采用高强螺栓连接形成一个完整的散索鞍。这样的分体式散索鞍构造较整体式构造大大降低了运输和吊装的难度和风险, 在国内某桥中也首次采用。

三、分体式摆轴散索鞍结构分析计算

1. 散索鞍设计计算参数

- (1) 主缆钢丝: 直径 $\phi = 5.3\text{mm}$, 标准抗拉强度 $\sigma_b \geq 1,860\text{MPa}$ 。
- (2) 主缆: $173 \times 91 \times \phi 5.3\text{mm}$, 缆径: $D = 0.7435\text{m}$ (孔隙率 20%)
- (3) 成桥状态主缆散索点 IP 点与前锚面中心连线与水平线夹角为 36.200° , 边坡侧切线角为 27.097° 。
- (4) 基本组合下 (极限状态法) 单根主缆最大拉力: 开阳端边跨 $F_{ct} = 312,666\text{KN}$, 开阳端锚跨 $F_{ct} = 310,905\text{KN}$ 。

收稿日期: 2022-03-19

作者简介: 刘雷轩 (1998-), 男, 贵州大学土木工程学院。

2. 在荷载作用下散索鞍鞍槽主缆抗滑安全系数计算

根据《公路悬索桥设计规范》^[5]，鞍槽内主缆抗滑安全系数 K 应满足下式并满足 $K \geq 2$ 。

$$K = \frac{\mu \times \alpha_s}{\ln\left(\frac{F_{ct}}{F_{cl}}\right)} \quad (1)$$

注： F_{ct} ：主缆紧边拉力； F_{cl} 主缆松边拉力； α_s ：主缆在鞍槽上的圆弧包角（rad）； μ ：主缆与槽底或隔板间的摩擦系数，宜取 0.15。

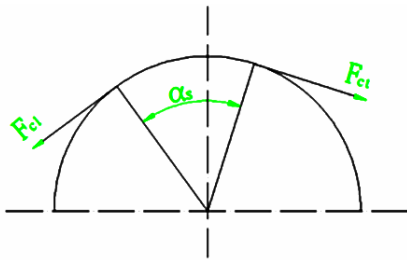


图 2 主缆抗滑验算图示

根据欧拉公式： $F_{ct} = F_{cl} \times e^{\mu \times \alpha_s}$ ， $\mu \times \alpha_s = \ln\left(\frac{F_{ct}}{F_{cl}}\right)$ 或者

$\frac{\mu \times \alpha_s}{\ln\left(\frac{F_{ct}}{F_{cl}}\right)} = 1$ 。此时为临界状，即主缆在鞍槽中没有任何滑动状态^[4]。

文中所述散索鞍，由散索鞍 IP 点位和 TP 点位以及 AutoCAD 作图，计算得出包角 0.401rad，再根据 midas 有限元软件进行悬索桥总体结构计算得出计算所需的相关参数并带入主缆抗滑安全系数计算公式，得出结论：鞍槽内主缆抗滑安全系数 $K=10.66 > 2$ ，主缆抗滑安全系数 K 满足规范要求。

3. 散索鞍鞍头强度计算

依据《公路悬索桥设计规范》^[5]悬索桥主缆对散索鞍鞍槽作用力如下所述。

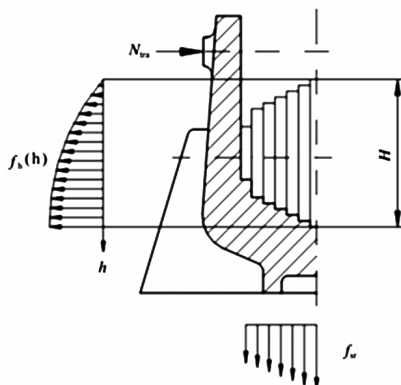


图 3 鞍体受力转化图示

(1) 各列索股的向心压力 f_{sr} 可按下式计算。

$$f_{sr} = \frac{F_c \times n}{n_s \times r_v} \quad (2)$$

(2) 最高索股顶至计算高度 h 处的侧向压力 $f_h(h)$ 可按下式计算。

$$f_h(h) = \frac{f_v b (1 - e^{-\frac{2\mu h}{3b}})}{2\mu} \quad (3)$$

注： F_c ：单根主缆的拉力设计值，取散索鞍两端主缆拉力中较大值（N）； n ：该列索股根数； n_s ：单根主缆中索股总数； r_v ：鞍槽底部竖向圆弧半径（mm）； μ ：摩擦系数，宜取 0.15； f_v ：中央列索股单位体积竖向力（N/mm³）； $f_v = \frac{F_c n_{sc}}{r_v n_s b H}$ ，其中 n_{sc} ：中央列索股股数； H ：中央列索股总高度（mm）。

(3) 鞍槽总的侧向力 f_{HS} （计入主缆索股平弯产生的附加侧向力）可按下式计算。

$$f_{HS} = f_H + \frac{F_c (1 - \frac{n_{sc}}{n_s})}{2r_h} \quad (4)$$

其中， f_H 为高度 H 范围内的总侧向力。

$$f_H = \frac{f_v b H}{2\mu} - \frac{3f_v b^2 (1 - e^{-\frac{2\mu H}{3b}})}{4\mu^2} \quad (5)$$

由侧向压力产生的总弯矩：

$$M_{fHS} = S \frac{f_v b H}{2\mu} + \frac{9f_v b^3 (1 - e^{-\frac{2\mu H}{3b}})}{8\mu^3} \quad (6)$$

其中 $S = \frac{H}{2} - \frac{3b}{2\mu}$ （mm）。文中所述的散索鞍计算结果如下：

表 1 鞍槽强度主要计算结果（按最危险情况计算）

项目	计算结果	单位
中央索股向心压力 f_v	3388721.1	N
鞍槽总的侧向压力 f_{HS}	17640.6	N
总弯矩 M_{HS}	342216.7×10^6	N·mm
弯曲正应力	4.9	N/mm
侧壁剪应力	98	N/mm
组合应力	99.5	N/mm

经过计算散索鞍鞍槽侧壁最危险的部位为根部区其组合应力为 99.5MPa，小于钢材设计容许应力 $0.9 \times 270 / 170 = 143\text{MPa}$ ^[6]，满足规范要求。

鞍头底部总竖向力最大值计算如下： $F=310,905,000 \times \sin(36.2^\circ) + 312,666,000 \times \sin(27.097^\circ) = 326,041,085.1\text{N}$ （下转第 43 页）

机。然后开始运行仿真。可以看到，当烟雾浓度和温度两项检测指标都没有超过设定值时，红色二极管不亮，蜂鸣器不会响。

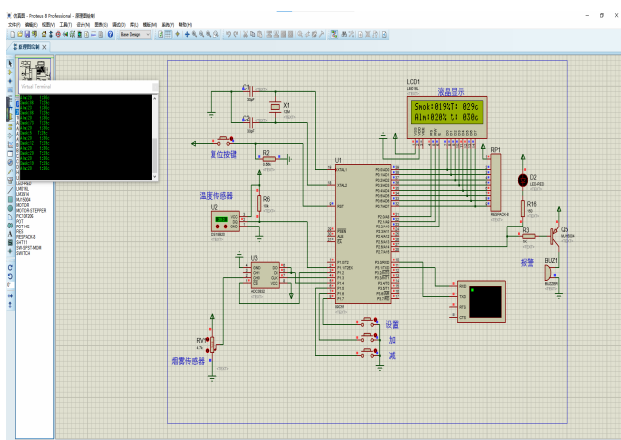


图 1 数据未超限仿真图

接下来让温度达到设定值，但是烟雾浓度没有达到可以看到红色二极管亮蜂鸣器也响。

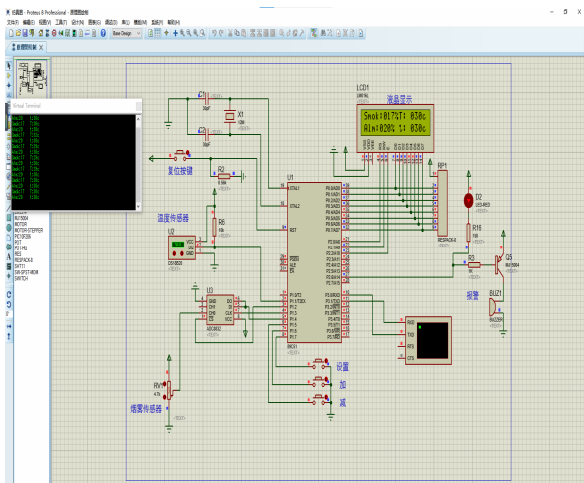


图 2 温度超限仿真图

接下来让烟雾浓度达到设定值但是温度没有达到，可以看到红色二极管亮蜂鸣器也响。

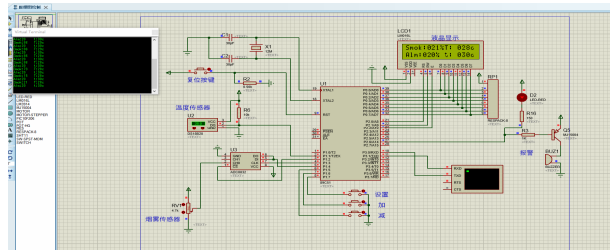


图 3 烟雾浓度超限仿真图

接下来让烟雾浓度和温度同时超出限定值，可以看到，仿真中蜂鸣器和二极管两者也都报警。

结束语

该系统采用单片机、数字电子、传感器等技术，以 STC89C51 单片机为核心，实现了对室内温度、烟气浓度的实时测量、显示、报警等功能，满足了消防安全工作的需要。对各模块的硬件构成和电路设计作了较详细的阐述。通过 C 语言编写程序，实现了系统的软件开发。

本次设计的工作主要分为总体方案设计、硬件设计、仿真。在总体方案设计中，首先确定了本设计基本工作逻辑，即通过烟雾和温度检测确定采集数据然后交由单片机分析，然后实现报警，在确定各个元件时进行了分析比对，最后选出了 STC89C51 单片机，MQ-2 烟雾传感器，DS18B20 温度传感器，LCD1602 显示器等基本元件。编程也是一样，再 keil 编程软件中先编写好部分的程序后再将所有程序进行逻辑连接，最后完成了整个程序。

参考文献

- [1] 韩倩倩. 基于 LoRa 的文物建筑无线火灾报警系统研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 25 (7): 18-22.
- [2] 白旭涛, 吕海荣. 基于计算机的火灾报警监控系统的研究. 物理学杂志; 会议系列, 2021, 1744 (2).
- [3] 李珊, 成薇. 基于物联网的简易智能家居系统[J]. 电子制作, 2020, (14): 34-35.
- [4] 刘力, 余傲然, 边玉亮. 便携式火灾预警系统研发和应用[J]. 电子测试, 2020, (8): 12-14.
- [5] 蔡改贫, 邓涛, 倪俊. 基于手机客户端的智能家居火灾报警系统设计[J]. 消防科学与技术, 2020, 39 (3): 377-380.

(上接第 40 页)

鞍头纵横肋板截面面积计算: $A=3,803,900\text{mm}^2$;

鞍头纵横肋板压应力 σ 计算: $\sigma=326,041,085.1/3,803,900=85.71\text{MPa}$ 。小于钢材设计容许应力 143MPa , 因此鞍头纵横肋强度满足规范要求。

四、结语

分体式摆轴散索鞍为施工场地交通、地质条件差的特大悬索桥施工提供了多一种选择，而分体式散索鞍采用铸、焊结合的设计，复杂的细部构造导致一些受力分析有一定的难度。文中结合规范给出的散索鞍计算公式，并针对分体式摆轴散索鞍进行理论计算，为类似结构计算提供示例，对以后的类似工程提供一定的参考。

参考文献

- [1] 孟凡超. 悬索桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 刘人铭. 公路悬索桥散索鞍设计验算实用方法研究[J]. 交通科技, 2021.
- [3] 刘昌华, 苏兰, 陈龙等. 分体式散索鞍加工技术研究[J]. 大型铸锻件, 2021.
- [4] 卢元刚. 自锚式悬索桥主索鞍座构造设计及计算分析[J]. 工程与建设, 2021.
- [5] 中华人民共和国交通运输部. 公路悬索桥设计规范: JTG / TD65-05-2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [6] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.