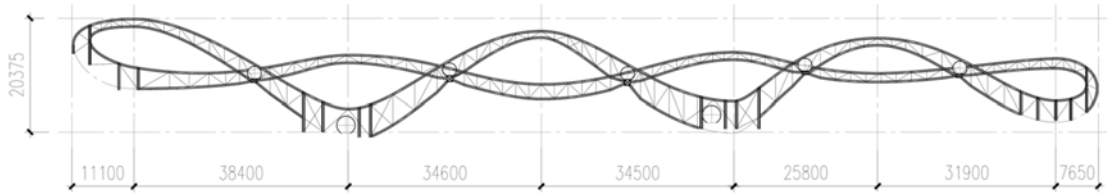


直接分析法(NIDA)可以让“她”更性感

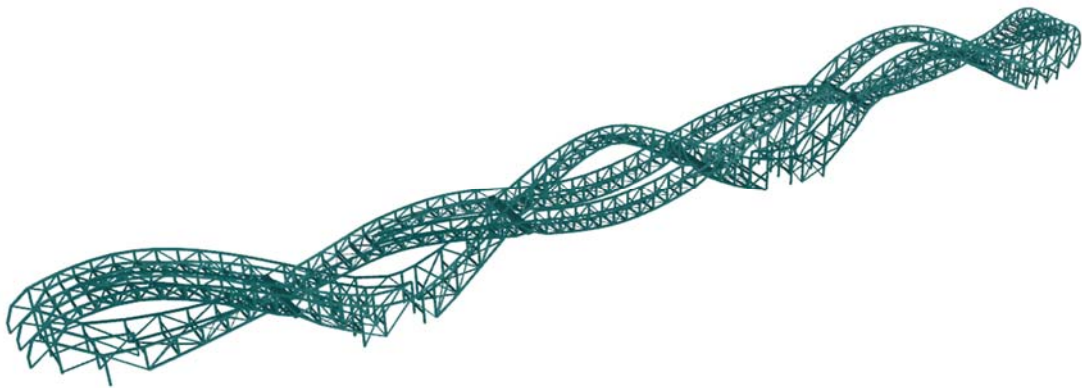
(原创于 DS 工作室)

本工作室之前发表的名为“为了这份性感，曾不遗余力”的原创文章引起了众多结构工程师密切专注，并对“中国结桥”的设计产生了浓厚的兴趣。

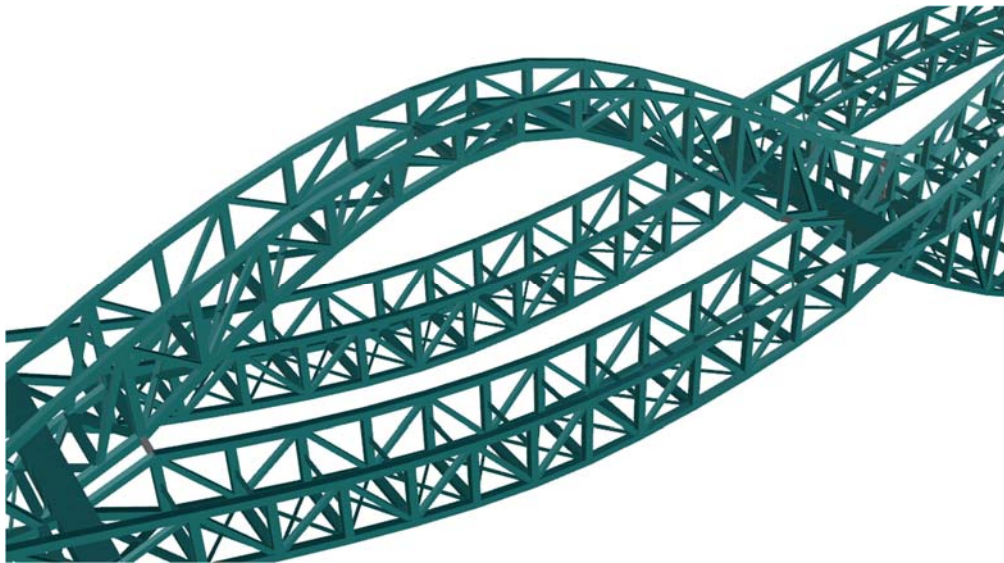
本文将与大家分享直接分析法应用于本工程的计算结果



这座桥的结构设计涉及诸多关键技术，其中最不起眼的桥梁栏杆便是其中一项。其核心设计难点便是栏杆的面外稳定问题

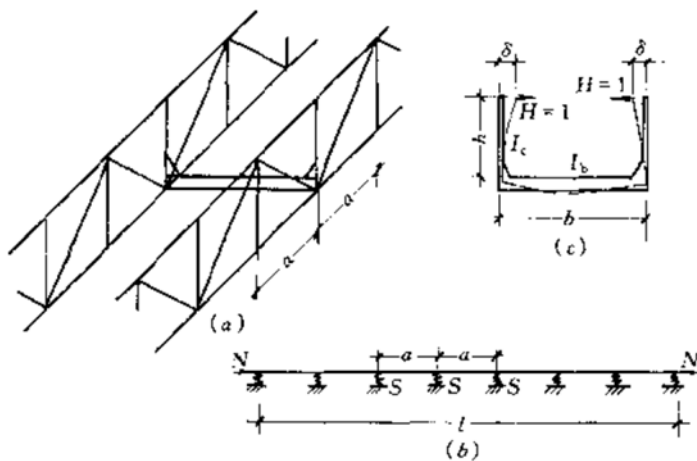


与普通桥梁栏杆不同，本桥的栏杆是结构主受力杆件，其设计合理性事关该桥梁的整体安全性。如上图所示，本桥梁的结构是由若干飘带状桁架组成，栏杆便是桁架的上弦杆。



桁架上弦杆受压是所有结构工程师所熟知的常识, 受压杆的面外稳定也是工程师们所担心的问题。在本桥中, 作为受压杆的栏杆恰恰没有任何面外支撑体系。因此, 在结构设计中, 栏杆的面外稳定是设计难点之一。

陈绍蕃教授的著作《钢结构稳定设计指南》中提到一种此类问题的近似计算方法, 该方法也在桥梁领域普遍使用。



$$l_0 = \pi \sqrt[4]{\frac{EI_y a}{4S}}$$

$$S = \frac{E}{h^3/3I_v + h^2b/2I_b}$$

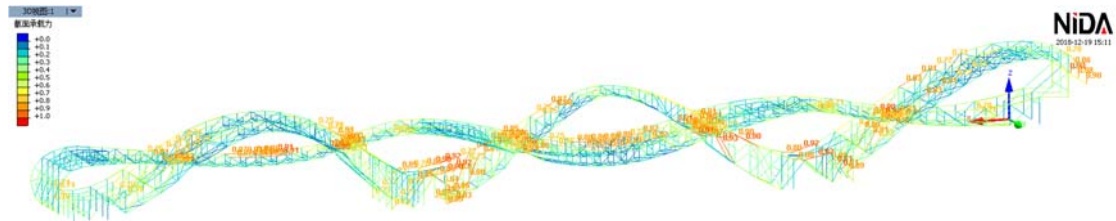
该简化方法的核心思想是将由桥梁横梁和栏杆竖杆组成的 C 型截面的面内刚度考虑为栏杆的面外约束刚度, 而栏杆的计算长度取决于横梁和竖杆的刚度。

然而, 正如在陈老先生在其著作中提到的, 该方法过于保守, 其原因如下:

- (1) 弦杆内力是变化的, N 由中部向两端减小。如果截面惯性矩保持常量或改变不大, 则 N 的临界值将提高。
- (2) 当弦杆在非弹性范围屈曲时, 它的刚度比弹性值下降, 此时槽形框架因受力不大而处于弹性范围, 所提供的约束作用相对提高, 也使 N_{CR} 提高

(上述文字引自《钢结构稳定设计指南》(作者: 陈绍蕃))

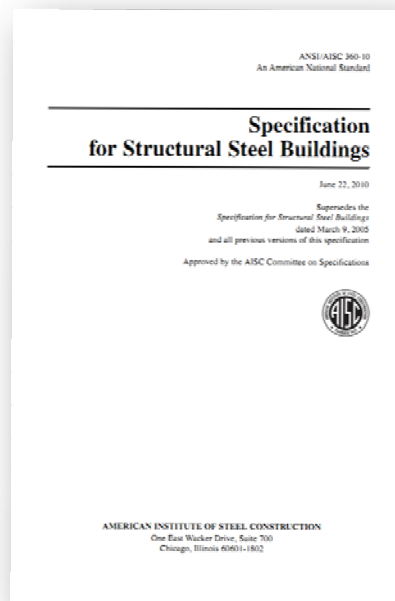
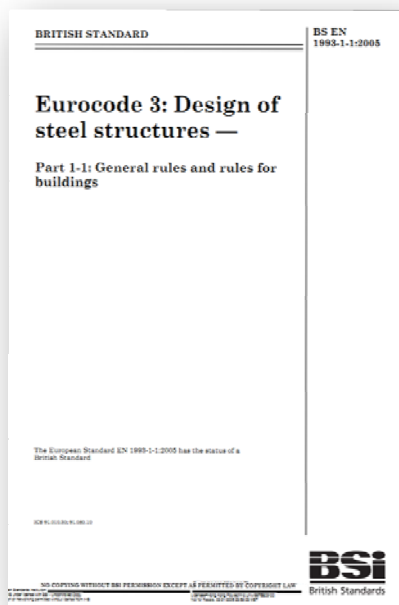
下图是基于上述近似方法进行一阶线性计算和设计后的杆件应力比。从中我们可以看到栏杆杆件的应力比已经超过 0.8, 拱桁架相交处的部分杆件接近 1.0。因此, 采用一阶设计方法基本没有进一步优化的空间。



作为钢结构设计领域的一项黑科技——直接分析法, 正在被越来越多的工程师认知和接受。下面我们来看看当“性感”遇上“黑科技”后将会发生什么。

在以往的一个多世纪内, 结构工程师迫于计算工具局限性只能通过“计算长度系数”考虑边界刚度对杆件稳定性的影响, 并通过“稳定系数”考虑受压杆件的强度折减。对于简单的结构体系, 这套传统稳定近似计算方法是完全可以胜任的。然后, 随着建筑形态的复杂化和多样化, 准确估算计算长度系数已越来越成为一种奢望。另一方面, 各种各样的几何非线性问题出现在工程领域, 如张弦结构、索膜等柔性结构等, 一阶计算已不再适用于高级设计的需求。

直接分析法的横空出世, 使被逼入绝境的结构设计领域看到了曙光。早在十多年前, 直接分析法已出现在美国规范、欧洲规范、香港规范等, 并且以主要推荐设计方法出现。

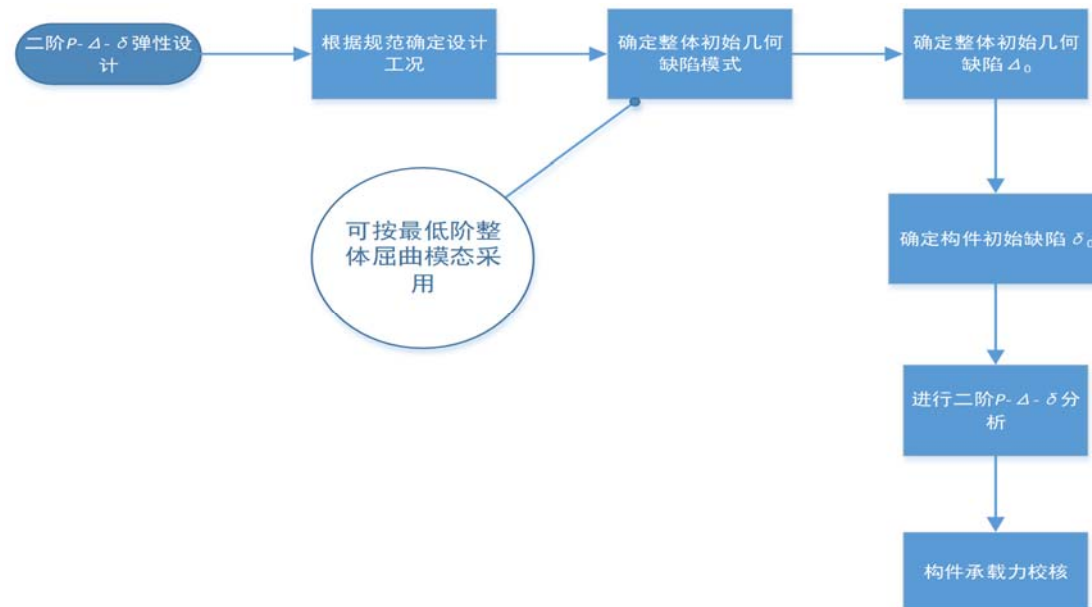


随着我国新版《钢结构设计标准》(GB50017-2017) 的发布, 直接分析法开始被广大结构工程师们青睐。

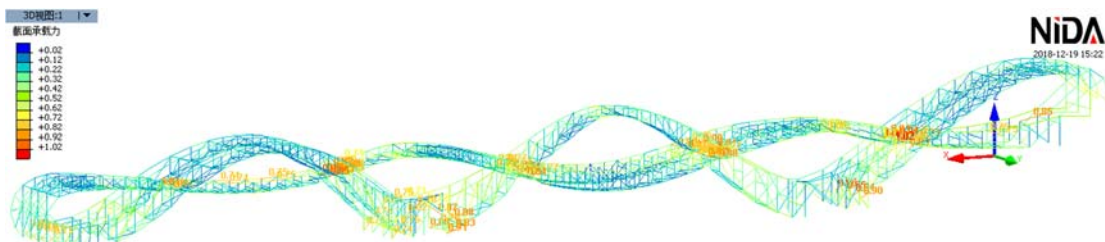
直接分析法的本质理念是: 让结构计算回归真实的力学状态。换言之, 使用直接分析法的最

终目的是在计算过程中避免或尽量减少采用假定和假设。在钢结构稳定计算方面，采用直接分析法将摒弃计算长度系数和稳定系数的概念，而是直接通过考虑构件和结构缺陷，并计算在结构受力过程中缺陷对结构刚度的影响，实现对钢结构失稳问题的真实分析。

仅考虑第一个塑性铰的直接分析法的基本设计步骤可用下述流程图表述：



将直接分析法应用于本工程中，可得到所有杆件的应力比，如下图：

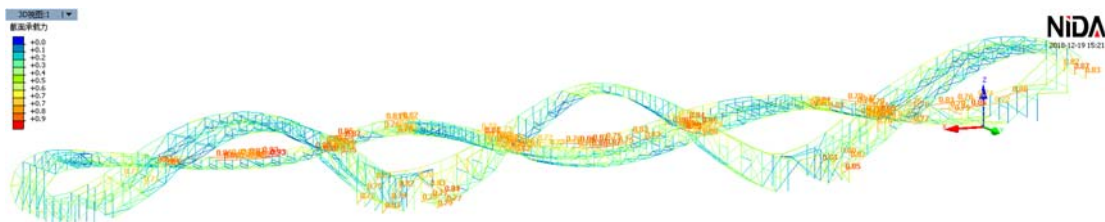


从这个图所表示的计算结果看，大部分栏杆和竖杆的承载力有富裕，意味着原来估算的计算长度过大（验证了陈老对上述简化方法的评论）。

基于直接分析法的计算结果，对该结构进行优化。主要优化思路如下：

- 1， 加强容易发生失稳区域的杆件；
- 2， 减小不易发生失稳区域的杆件

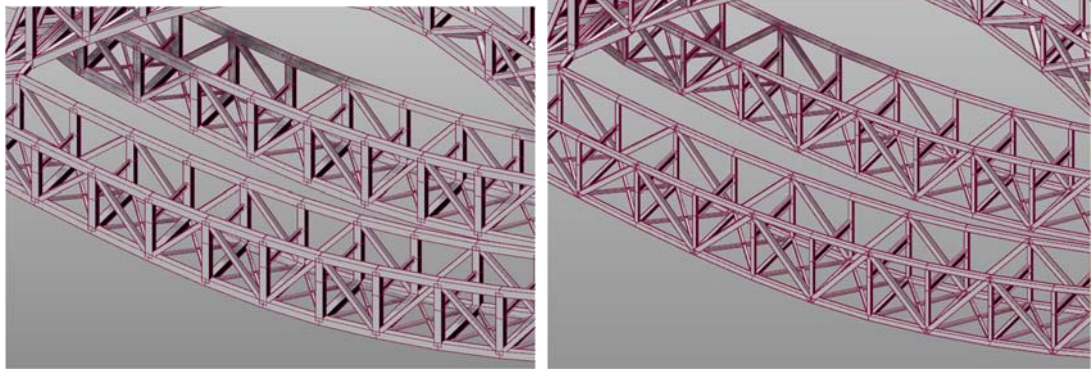
优化后，结构的计算结果如下图：



对比优化前后的杆件应力状态，应力集中处的最大应力比有所下降，栏杆和竖杆截面减小显著，其应力比有明显上升，但基本在 0.9 以下，仍处于安全范围。总体而言，优化后杆件的应力分布更加均匀、合理。

从经济性上看，结构用钢量优化了 18%。

另外，由于栏杆和竖杆截面的减小，使桥梁更加美观。如下图：



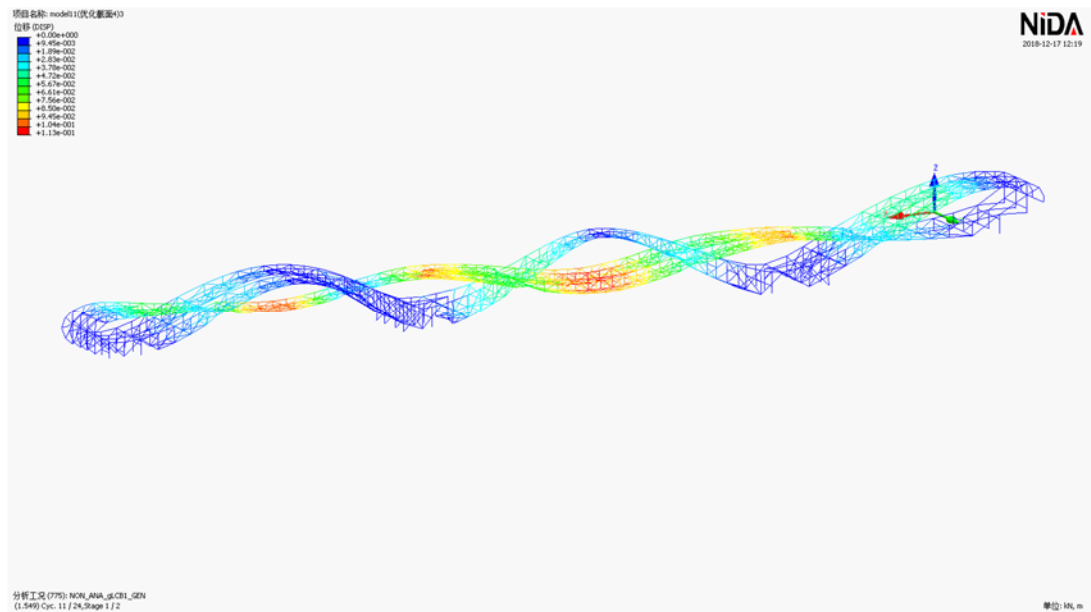
优化前

优化后

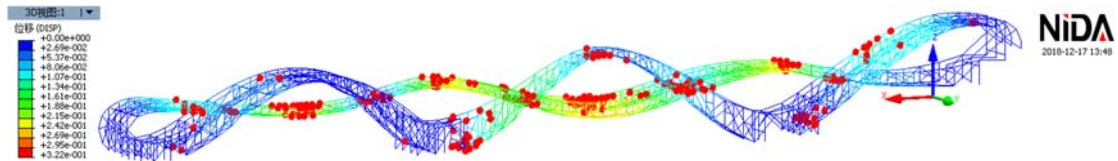
可见直接分析法的应用可使造型性感的“中国结”桥更加“苗条”，大幅提高该建筑的整体美观。

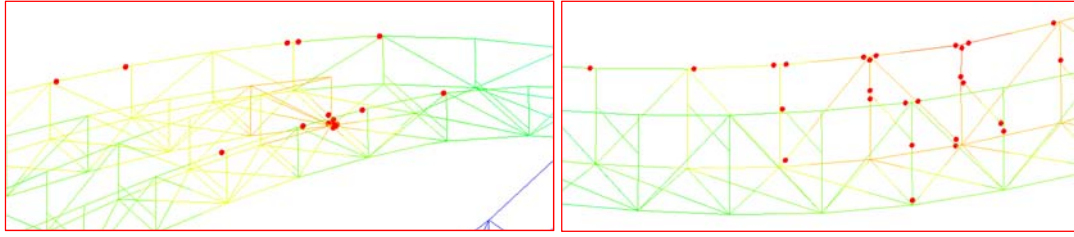
虽然直接分析法的结果也是通过应力或应力比来体现，但其意义与一阶计算结果的应力比有所不同。由于其非线性的本质特征，直接分析法应力比（应力比与 1.0 的差距）不能说明结构的安全冗余度，但我们可以通过弹塑性极限承载力分析进一步了解结构在超过设计荷载时的状态。

下图所示动画为该桥在以（1.35 恒荷载+0.98 活荷载）为基本荷载条件下进行极限承载力分析的塑性铰发展过程：



从整个过程看，桥梁栏杆未发生几何失稳，而是先发生材料屈服。下图所示是当荷载系数为 2.7 时对应的塑性铰分布情况。





结合直接分析法和弹塑性极限承载力分析的结果，我们有理由相信“瘦身”后的“中国结”是足够安全的。

优秀的建筑作品被誉为“凝固的交响乐”，为了能给这个世界留下更多优美的“交响乐”，我们结构工程师需要利用我们的知识将更多出色的建筑作品成为现实，而直接分析法必然成为我们手中又一把利器。

敬请关注 DS 工作室

