

# 索托结构计算中的关键问题及计算实例

徐国彬 崔玲 郑云

**摘要** 索托结构的计算方法与其它结构大不相同,即有几何非线性又有状态非线性,属于高度非线性问题。计算时有其特有性质,文中详细介绍状态非线性的计算特点,参数的取法,以及随机风荷载的时域分析法。

**关键词** 索托结构 接触元 状态非线性 线性时不变系统 时域 频域

## 一、概述

索托结构是目前用于大跨度结构的一种全新结构形式。百年来用于大跨结构主要有两种形式,即悬索结构和斜拉结构。对悬索结构来说,最大跨度首推日本明石海峡大桥,主跨 1991m, 1998 年建成。其次是丹麦大贝尔特东大桥,主跨 1624m, 1998 年落成;第三是英国 Humber 桥,主跨 1410m, 1981 年建成;第四是中国江阴大桥,主跨 1385m, 1999 年建成。至于斜拉结构首推日本多多罗大桥,主跨 890m, 1999 年建成;其次是法国诺曼底大桥,主跨 856m, 1995 年建成;第三位属中国杨浦大桥,主跨 602m, 1993 年建成;第四位是中国徐浦大桥,主跨 590m, 1997 年建成。数百年来,悬索结构与斜拉结构一直是跨结构中的佼佼者,斜拉桥的经济跨度为 600m—800m,跨度达 1000m 以上者,首选结构形式为悬索结构。但由于其各自存在的问题,如悬索桥的侧向刚度和扭转刚度小,易受风害,且大缆的内力很大,锚碇费用极高。而斜拉结构的索,愈到跨中索的效率愈低,故索与桥面夹角不得小于 23 度,索锚头用量大,塔高必须高于四分之一跨度。为此我国自行开发一种全新的索结构形式,因具有一系列的优点,跨度可进一步做大,造价可降低,其受力与斜拉桥完全不同。节点构造不同(详见参考资料[1]),分析计算时出现一些与斜拉和悬索结构不同的新问题。

## 二、索托结构计算时出现的新问题

### (一)索托结构的受力特点:

恒荷载相对较大,尤其对于建筑结构,恒载约占 80—90%,而与索连接的加劲结构的重量应大部分由索承受。由于恒载在全部荷载中的比重大,索中的力大,借助恒载使其在活载下的变形很小,对活载而言刚度提高了。

(二)随着索托结构跨度的增大,下部的加劲结构(梁、网架、网壳、桁架等)的高度不宜跟着增大,使这些结构承受竖向活荷载的能力由全跨转变成局部,对承受活荷载的能力已无大影响。一般结构物的主要受力构件随跨度的增大而迅速增大。而索托结构中的加劲构件(梁、桁架、网架、网壳等)则不同,因为它们不再是主要承重构件,其高度及截面积不需因跨度增加而增大。

1. 计算中的新技术——接触元的应用(高度非线性问题),计算中的接触问题是属于状态非线性问题。它是高度非线性行为,为了更有效的计算,理解问题的本质及合理建模是非常重要的。接触问题存在两大难点:

(1)接触面或合或分,随荷载、材料、边界条件而变化。

(2)大多数接触问题都伴随着摩擦,摩擦类型有数种,而且都是非线性的,摩擦使问题的收敛性变得复杂而困难。在索托结构中,接触属于刚性和柔性体的接触,其中一个面为刚体(与它接触的变形体相比,刚度大得多),即接触的两个物体刚度

相差很大。为了给接触问题建模,可以认为有限元模型通过指定的接触单元来识别可能的接触匹配,接触单元是覆盖在分析模型接触面之上的一层单元。采用的计算软件支持刚体——柔性体的面——面接触单元,刚性面为“目标”面,柔性体的表面为“接触”面,程序通过一个共享的实常数号来识别“接触对”。面面接触有如下优点:

①支持低阶和高阶单元。

②支持有大滑移和有摩擦的大变形,协调刚度矩阵计算,单元提供不对称刚度阵的选项。

③提供更好的接触结果,如法向正压力和摩擦应力。

④允许有网格离散引起的表面不连续。

⑤需要较少的接触单元,节约机时和空间。

⑥允许多种建模控制,如绑定接触;渐变初始穿透目标面自动移到初始接触;平移接触和支持死活单元。

2. 具体作法按以下步骤进行:

(1)建模及划分网格:设置单元类型,实常数,材料特性。

(2)识别接触对,通过索与结构某局部的接触,通过目标单元和接触单元来定义接触对,并用共享的实常数号将它们联系起来。每个接触对有不同的实常数号。

(3)指定接触面(柔性面)和目标面(刚性面)接触单元被约束住,不能穿透目标面,而目标单元可以穿透接触面。如果一个面网格细,另一个粗,则粗网格所在面应为目标面,刚度不同时较硬的面应作为目标面。如果一个面上的基础单元是高阶单元,另一个面是低阶单元,应将高阶单元的面作为接触单元。

(4)定义性目标面

建模和网格划分应注意:

刚性目标面的网格应能描绘出目标面的形状,太粗的网格划分会导致不收敛的结果。应使尖角光滑化,曲率突变的部位,网格应划的更细。应注意不能使用镜面对称性映射圆、圆柱、圆锥或球面到平面另一侧,因为每个实常数不能同时赋给多个单元。

检验目标面的接触方向,对2-D接触问题,当沿着目标线从第一个节点移向第2个节点,变形体的接触单元必须位于目标面右侧。对3-D

接触问题,目标三角形单元号应使刚性面的外法线方向指向接触面,外法线通过右手原则来定义。

(5)定义柔性体的接触面

程序通过组成变形体表面的接触单元来定义接触表面,接触单元与下面的基本变形体单元有同样的几何特性,下面的变形体单元可能是实体单元、壳单元、梁单元等,接触面可能位于壳或梁单元任何一边。与目标面单元一样,必须定义接触面的单元类型,然后选择正确的实常数号,最后生成接触单元。

(6)设置实常数和单元关键字

程序使用9个实常数和数个单元关键字来控制面——面接触元的接触行为。9个实常数中两个(R1和R2)用来定义目标面单元的几何形状。余下7个用来控制接触行为(如接触刚度因子,最大穿透范围,初始靠近因子,Pinball区域,初始穿透范围、最大接触摩擦、接触面偏移值、接触发生时的刚度因子等。)关键字,对于大多数接触问题,选用缺省值即可,而在某些情况需改变缺省值来控制接触行为。

(7)控制刚性目标行为

为控制整个目标面的运动,都是通过“Pilot”节点给定的位移来定义的。下列情况都需使用“Pilot”节点

①目标面上作用着给定外力

②目标面发生旋转

③目标面和其它单元相连(如结构质量单元)

“Pilot”节点的厚度代表着整个刚性面的运动,可以在Pilot节点上给定边界条件(位移、初速度),集中荷载、转动等,为了考虑刚体的重量,在“Pilot”节点上定义一个质量单元。当使用Pilot节点时,还应注意其局限性,此处不再赘述。

(8)给变形体单元加必要的边界条件

(9)定义求解和荷载步选项

接触问题的收敛性随问题的不同而有差异,可按下列原则:时间步长必须足够小,以描述适当接触。如时间步长太大,则接触力的光滑传递会被破坏,设置精确时间步长的可依赖的方法是打开自动时间步长。

(10)求解:

求解过程与一般非线性求解迭代过程相同。

(11)检查结果

首先关心的是收敛与否,如不收敛,先检查其原因。其次再查看位移、应变、应力、支反力和接触信息(接触压力、滑移等)。可以用等值图来显示应力、应变或接触信息。也可以用动画(Animation)显示接触结果随时间的变化。

### 三、风振问题

柔性结构,包括索结构、膜结构和索—膜结构以及它们复合而成的杂交结构。对它们来说风的动力作用是致命的,不可忽视。但鉴于风动力荷载的复杂性、随机性、不确定性,加上结构的柔性、非线性,使结构响应长期以来一直未能得到确定的数学解。美国1883年建成的布鲁克林桥、1937年建成的金门大桥,均采用刚(桁架)柔(悬索)结合的结构形式。金门大桥风动力响应较差,但还没达到引起当时工程界重视的程度。1939年建成的布朗克斯—华特斯顿桥主跨701m,梁宽22.56m,宽跨比1:31.1,加劲梁高3.35m(下承钢板梁),其风振响应已引起人们注意。1940年美国华盛顿州西雅图附近的塔斜马桥,主跨853.4m,梁宽11.89m,宽跨比1:72,加劲结构采用高度为2.44m的下承式钢板梁。建成通车不到半年,在19m/s(相当于8级)风速的持久作用下,梁体发生反对称扭转振动,而缆索发生反对称竖向振动,导致桥梁产生大振幅下的断裂破坏。此后美国、日本、英国等做了大量研究,如控制其抗扭频率应高于竖向频率的2倍,加设导流板、风阻等,并给出了一些工程实用处理办法,虽然已长达60年,但风振理论目前仍不能给出验算公式供设计使用,仍处于“头痛医头,脚痛医脚”的方法。为确保设计时做到心中有数,一般均不惜大量财力,通过风洞试验取得所需数据。由于这些谨慎的措施,使1940年塔斜马桥的悲剧没再重演。然而理论研究的突破,也是科技工作者责无旁贷的任务。笔者认为解决此问题的途径:

1. 目前传统和一般的做法是采用国际上得到普遍认可的Davenport谱,作为分析的风激励源,在频域上进行分析。频域分析带来许多方便,如激励和响应关系是乘积关系,即

$$y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega)$$

式中  $Y(\omega)$  为响应谱  
 $X(\omega)$  为激励谱

$H(\omega)$  为系统动力特性,称为复频响应函数,有时亦称为传递函数,它是脉冲响应函数的Fourier变换。准确的说,是脉冲响应函数的Laplace变换,才能称为传递函数(Transporm function)。但无论是Fourier transform还是Laplace transform均为线性变换,对线性时不变系统才能适用。故此种方法对柔性体系或刚—柔杂交体系均不适用,只能在时域直接进行数值积分,在理论上才是合理的。

2. 时域分析可解决非线性系统的动力响应问题,然而时域中激励响应关系是卷积关系,即

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int x(t) \cdot h(t-\tau) dt$$

式中  $y(t)$  是系统的时域响应,  $x(t)$  是激励时程曲线,  $h(t)$  是系统时域动力特性,称为脉冲响应函数。实际上就是结构动力学中的Duharmil's积分公式。为此需要进行工程所在地的风时程记录。在多次采样的基础上取其均值或包络值进行响应分析。

然而此种分析方法是非线性系统的时域动力分析,所需机时和空间都很大。而且时间步长和非线性迭代步长均影响它的收敛性。但只要有快速运算和大容量计算机,问题总能解决。

3. 从理论上来说,此问题应归结为“混沌”问题。但从工程实用角度看,问题总得有个“结果”可循。无论是随机问题还是模糊问题,传统的思维方法都是要找出它的“确定”解,如统计规律、均值、均方差、方差、协方差、高阶原点矩、中心矩和相关矩等。对模糊的问题则用隶属度将不确定问题转为确定问题。思路都是一个:即不确定性问题转变为确定问题,寻找“工程”出路。而混沌理论的出现概括了一个跨学科非线性问题的普遍问题,还其非确定性的实质。在非确定道路上解决问题,这不失为一种新的思维方法。国内外的理论工作者都正在研究。但因难度高,理论深,其结果尚难预料。(详见“空间结构中的混沌问题”一文)

### 四、工程实例

香港设计的昂船洲大桥,主跨为1000米的索托结构,塔高140米(由桥面起算)。加劲梁为四室箱梁,边跨各300米。业主原标书为1000米斜拉桥。建成之后为斜拉桥跨度之首。当前世界上斜拉桥最大跨度为890米。索托结构较斜拉结构具

有许多优点,跨度越大越明显。首先塔高大大降低,由300米降至140米,减少了高空作业。锚头用量减少一半,梁根部的压力减小,施工简化。跨中挠度可减至 $1/750L$ ,增加了抗风刚度,提高了抗风能力。计算中采用了接触单元,为此解决了一系列问题。

表一是对塔高和挠度进行优化:

193.5m 塔高方案地锚大缆索力:单元号=217 节点=163 228 索内力=2227 吨

轴向应力=346.91N/mm<sup>2</sup> 单元号=218 节点=161 228 索内力=2220 吨

轴向应力=345.82N/mm<sup>2</sup> 单元号=219 节点=159 228 索内力=2213 号

轴向应力=344.74N/mm<sup>2</sup> 单元号=220 节点=157 228 索内力=2206 吨

轴向应力=343.69N/mm<sup>2</sup> 单元号=221 节点=155 228 索内力=2200 吨

轴向应力=342.66N/mm<sup>2</sup> 计11066 吨 垂直分力3742 吨,水平分力10402 吨。

塔高减少100m,每个主塔混凝土体积减少6400m<sup>3</sup>,重量减少16000 吨,两个主塔共减少32000 吨。

由于塔高降低100m,索用量减少18348m,水平索较斜拉桥增加28200m

鞍山体育馆工程中(86×128m<sup>2</sup>)解决了计算、设计、构造、施工一系列工程实际问题。使索托结构迈出了可喜的工程实践第一步。证明其理论构思计算方法构造处理施工措施都是可行的。详见参考资料[2]

## 五、结论

1. 索托结构是一种我国自行开发的建筑结构新形式。优于其它大跨结构形式。

2. 索托结构的力学分析与其它结构不同,要考虑接触问题。计算中有其独特要点,应加以注意。

3. 构造措施应得当,力图与力学计算模型相符。

## 参考文献

- [1]徐国彬 崔玲等空间结构2000.3 第6卷,第1期  
[2]刘建华、徐国彬 北方交通大学硕士论文,1999.3

表一:塔总高193.5m(桥面系以下为73.5m)  
自重荷载作用下结构内力值(单位:N,cm)

单元号	位置	QX	QY	QZ	MOMZ	MOMY
1	跨中	-.19104E+08	.28170	-.26401E-09	-.60317E+09	-.10478E-04
66	主塔处主梁	-.21589E+08	-.18190E+08	-.38722E-09	.44385E+11	-.27425E-04
67	主塔处主梁	-.22317E+08	.10145E+08	.69848E-08	.56797E+11	-.38501E-04
185	主塔分岔处	-.51274E+09	.40739E-09	.15274E+07	-.10125E-05	-.10474E+11
186	主塔分岔处	-.51378E+09	.40739E-09	.15274E+07	-.10441E-05	-.10327E+11
188	主塔底部	-.34248E+09	.12331E+07	.13238E+07	.24870E+10	.34543E+10
190	主塔底部	-.34248E+09	-.12331E+07	.13238E+07	-.24870E+10	.34543E+10
195	(梁塔横梁处)	.12374E+09	.44253E+077	-.4E+06	.83468E+10	.97111E+08
196	(梁塔横梁)	.12374E+09	-.17298E+08	.36474E+06	-.11603E+11	-.57005E+09
198	(边跨支座处)	.31249E+09	.62415E+07	.98997E-09	-.79054E+10	.42146E-04

优化后认为塔高取120米最合适