

悬索桥的非线性地震响应计算

宁晓骏, 李睿, 李新乐

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 对悬索桥的几种计算理论作了简要的介绍并进行了比较, 针对悬索桥的非线性问题作了单独的分析. 在使用有限元对悬索桥进行空间分析时, 考虑悬索桥不同结构部件的不同结构性能而提出采用不同的单元来模拟. 另外对求解悬索桥的非线性方程的数值方法作了简要的介绍, 最后分析了悬索桥地震响应中地震激励模型的选取方法.

关键词: 悬索桥; 有限元; 地震响应; 非线性

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

文章编号: 1007-855X(2001)02-025-05

1 悬索桥地震响应的一般计算方法

悬索桥主要由大缆、主塔、锚锭、吊杆和桥面系构成. 它的主要受力构件为大缆、主塔、锚锭, 加劲梁的作用主要是为了构成桥面, 在受力方面处于从属地位. 加劲梁上的荷载经吊杆传至大缆, 再由大缆直接传至主塔、锚锭上, 其加劲梁不承受轴力, 因此这是悬索桥最适合于大跨度桥梁的主要原因.

最早进行地震反应分析的悬索桥是美国的San Francisco-Oakland Bridge, 当时把输入的地震激励假定为正弦波, 其幅值为0.1g, 周期为1.5s以下, 持时无限延续.

本四联络线上有11座悬索桥, 均按本四联络桥公司所制定的《抗震设计标准》进行地震动力响应分析计算. 它采取了以下两种方法:

1) 采取多质点模型, 以本四地震谱输入进行反应谱分析, 以反应谱分析的结果为依据进行悬索桥抗震设计;

2) 输入给定的地震波, 进行时间历程响应分析, 根据计算检验反应谱法的结果.

目前, 对于大跨度桥梁的抗震设计的主要过程如图1所示.

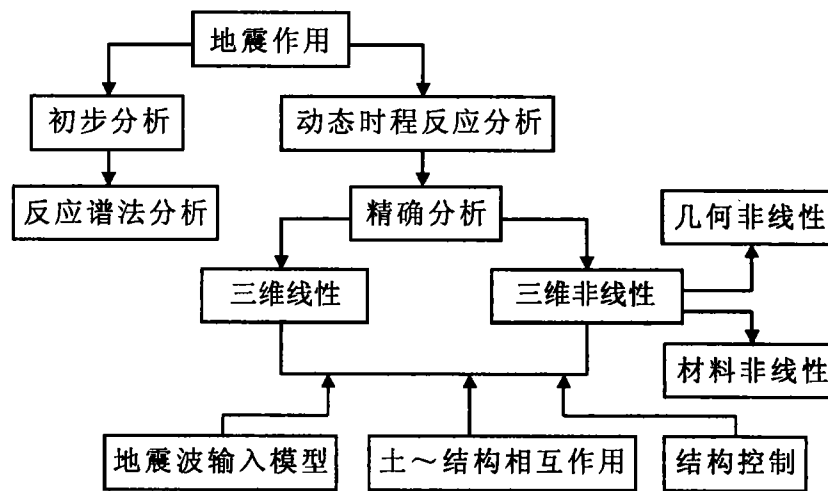


图1 大跨度桥梁地震反应研究的主要内容

2 悬索桥的结构计算理论和比较

在对悬索桥的分析和研究上, 前后大致出现了三种理论.

2.1 弹性理论

这种理论始于19世纪初. 1823年Navier对缆索进行了计算研究, 1858年Rankine提出“Rankine理论”, 这是悬索桥结构分析的第一个理论, 但是它分析所得的大缆和加劲梁变形不协调. 于1880年左右, 美国学者将其完善为弹性分析理论. 其计算假定为:

收稿日期: 2000-10-27;

第一作者简介: 宁晓骏(1971.5~), 男, 工学博士, 副教授; 主要研究方向: 桥梁工程.

- 1) 恒载沿跨度均匀分布, 恒载作用下大缆的几何形状为二次抛物线.
- 2) 活载作用下, 大缆和吊索长度保持不变, 大缆的几何形状仍为二次抛物线.
- 3) 在全跨内加劲梁为等截面, 抗弯刚度 EI 沿跨度不变化.
- 4) 恒载内力全由大缆承担, 加劲梁只受温度和活载的影响.
- 5) 所有材料符合虎克定律.

在这个理论下, 悬索桥为大缆和加劲梁的组合, 具有线弹性性质, 叠加原理适用, 可按照传统结构力学的方法进行分析, 绘制影响线, 进行最不利加载计算结构内力.

2.2 挠度理论

1888年奥地利Melan教授提出了有加劲梁的挠度理论, 并于1906年进行了改进. 1909年Moisseff应用这个理论建成了Manhattan桥. 该理论的假定为:

- 1) 恒载沿跨度均匀分布, 完全由大缆承受. 恒载下大缆为抛物线, 加劲梁处于无应力状态, 活载作用下大缆要变形, 活载由大缆和加劲梁共同承担.
- 2) 吊杆是垂直稠密的, 无延伸, 不计吊杆变形.
- 3) 不计梁的弯曲变形对几何非线性的影响.
- 4) 大缆和梁只计竖向位移, 不计水平位移, 不计塔顶的水平位移.
- 5) 所有材料符合虎克定律.

这个理论考虑了活载作用下的大缆变形, 并且恒载所产生水平轴力对这种变形具有抵抗力. 亦即它考虑了部分非线性, 即大缆挠度对几何非线性的影响, 因而比弹性理论相对精确得多. 在这个理论下, 不能再利用影响线的概念进行计算, 叠加原理不再适用. 此理论使悬索桥的跨度一下子提高到1 000 m以上, 具有重大意义.

2.3 有限位移理论^[6]

这个理论始于20世纪60年代. Brotton是最早将非线性有限元应用于悬索桥结构进行分析的. 在推导切线刚度矩阵时, 他考虑大缆轴力和大位移二次效应的影响. 非线性方程取其增量形式, 在求解非线性方程组时利用Newton~Raphson迭代法求解. 稍后Saafan发表了更一般的非线性有限位移理论, 他考虑了悬索桥所有受力构件的非线性, 计入大位移和初始轴力、初始剪力、初始弯矩对切线刚度矩阵的影响.

随着计算机的迅速发展, 这个理论已经用于结构设计, 并且成为目前悬索桥分析理论中最严密、最精确、最完善的理论. 它适用于任意形状的大跨度悬索桥.

2.4 三种计算理论比较

弹性理论过分强调加劲梁刚度的作用, 认为加劲梁是重要的承重构件, 没有考虑大缆初始恒载对悬索桥刚度的有益影响, 也没有考虑非线性大位移的影响. 虽然弹性理论的计算结果偏于安全, 但却大大浪费了材料.

国内外许多学者对这三种理论分别进行了计算和比较, 得到的结论为: 对于小跨度大刚度加劲梁悬索桥, 三种理论计算结果相差不大, 其非线性效应并不显著; 随着跨度的增大或其加劲梁刚度特别小, 即其非线性效应加剧, 挠度理论的误差值有所增加, 而弹性理论的误差则更大.

因而这三种理论各有其适用的范围:

- 1) 弹性理论适用于刚度较大的小跨度悬索桥.
- 2) 挠度理论适用于非线性效应不是太显著的大跨度悬索桥.
- 3) 有限位移理论适用于空间任意形状的悬索桥.

3 悬索桥的非线性问题

与其它桥型相比, 悬索桥是一种柔性悬挂结构, 非线性影响特别显著. 按线性计算的结果将比实际非线性计算出来的结果要大, 并且随着跨度的增加, 这种差值将逐渐增大. 尽管按线性偏于安全, 却严重浪费了材料. 所以考虑悬索桥的非线性影响, 至少从经济上是非常必要的.

3.1 结构大位移引起的非线性效应

在空间外荷载作用下,组成结构的各个构件会发生变形.悬索桥作为一种柔性索承重结构,其结构刚度较小,这种变化会更加显著.亦即描述结构的各几何坐标在荷载增量下发生的改变是不可忽略不计的.结构的平衡是根据变形后的几何位置建立的.结构的刚度是几何位置的函数,它随位移的改变而改变.这种改变与结构内力相互适应,从而导致荷载与位移的非线性关系,同时内力与外荷载的线性关系也不复存在.如果仍按线弹性小变形理论进行分析,必将引起较大的误差,不能反映结构的实际受力.

处理这种大位移所引起的非线性是建立非线性分析模型,采用拖动坐标系,将初始荷载以增量的形式加载.对每一增量过程,根据结构前一过程末的几何形状,求出结构的内力和位移,再对结构的几何位置进行修正,计算新位置的刚度矩阵.详细的计算方法可见文献^[2].

3.2 大缆初始内力引起的非线性效应

悬索桥成桥后的大缆和加劲梁线型必将是受恒载变形后的平衡状态,因而具有一定的初应力,这种初应力对结构的刚度有很大的影响,其值越大,则活载加到结构上后,结构变形的能力就越小.即初应力对后续活载下的变形具有抵抗力;在承受活载时,加劲梁和大缆中由活载产生的内力对刚度也有影响.

为了得到外力作用下大跨度悬索桥的平衡状态,应将结构的初内力、引起初内力的荷载(或其它因素)及新增加的荷载(或其它因素)一起考虑,算出新的变形状态下的平衡,以求得结构真正的变形和内力.

3.3 缆索垂度引起的非线性效应

当缆索两端受到拉力后,其两端要发生相对运动,但缆索并非保持直杆,而是由于自身的重力作用,中间部分要下垂,其变形值比直杆大,这种变形包括以下三部分的综合:

1) 缆索的弹性变形

如果在弹性范围内,这部分变形是线性的,缆索受力后发生的弹性变形与缆索材料的弹性模量有关.

2) 缆索的垂度变化

这部分变形是非线性的,是缆索几何形状变化的结果.与缆索自身的重力和长度以及索内所受的张力有关,不受材料应力控制.索内所受拉力越大,缆索的垂度就越小,其抗拉刚度就越大.索内所受拉力或压力为0,则抗拉刚度为0.缆索的垂度与索内的拉力是非线性关系.

3) 悬索内各股钢丝在荷载下要作相对运动

这种相对运动使悬索各钢丝的横截面重新排列,这种变化所引起的伸长称为构造伸长.它在一定的张力下是永久持续的,可以在缆索的预制过程中加以消除,非永久性的那部分可以通过折减有效弹性模量来考虑.

以上三种变形综合,使缆索内力与变形关系是非线性的,考虑这种非线性的方法是假想一个弹性模量来对悬索的弹性模量来进行修正.目前一般采用 Ernst 公式修正^[2].

4 悬索桥的空间离散^[1]

用有限元方法对悬索桥进行空间分析时,计算模型的建立是非常重要的.如果建立的模型所用的单元数和节点数太多,则前后处理工作很繁重.

扁平箱形加劲梁通常被简化为“鱼刺梁”模型或等效为一平板,桁架加劲梁一般等效为一薄壁箱梁,然后简化为“鱼刺梁”模型.

一般可将悬索桥离散为以下三种单元:

1) 空间杆单元

用于模拟主缆.采用两节点杆单元,每个节点有3个平移自由度,共有6个自由度.

2) 空间梁单元

用于模拟加劲梁和桥塔.采用两节点梁单元,每个节点有3个平移自由度和3个转动自由度,共12个自由度.

3) 空间杆面单元(索膜单元)

由两根拉杆和一个虚拟刚片构成,用于模拟吊杆.杆面单元有3个节点,上面2个节点(每个节点3个自由度)与代表主缆的杆单元相连,下面1个节点(有6个自由度)与代表加劲梁的梁单元相连.

5 悬索桥的非线性方程的数值解法

对于悬索桥的非线性方程,没有解析法可以用,主要采用增量法、迭代法或增量迭代混合法.这些方法对非线性动力方程和非线性静力方程都适用.

5.1 增量法

该法是将等效总荷载分成许多相等或不等的荷载等级,以增量的形式逐级加载.每个荷载增量过程使用荷载增量区间起点的等效结构刚度计算出结点的位移,并利用位移进一步计算杆端力,然后利用本增量过程计算出的结点位移和杆端力计算下一增量过程的等效结构刚度.这样,在每一个荷载增量后结构的几何形状都进行了调整,将非线性问题转化为分阶段性的瞬态问题.

等效总荷载与结点位移的非线性曲线关系用许多短线段所代替.如果荷载增量取得足够小,就可以保证很好的计算精度.但是,取多大的荷载增量才能得到满意的精度是无法预知的,而且这种方法的误差总是积累的,所以无法判断其解的精确程度^[1].

5.2 迭代法

迭代法是将整个等效总荷载一次全部作用到结构上,取结构变形前的等效结构刚度计算出的线性解作为第一次近似解,用求出的位移修正结构的几何形态得到变形后的结构.用此时的单元刚度求出杆端力,由于结构变形前后的等效结构刚度不同,产生了结点不平衡荷载,将这些不平衡荷载作为结点荷载施加到各个结点上,以保持结点平衡.这样计算出结构在不平衡荷载下的位移量,再修正结构的几何形态,计算杆端力,如此反复迭代,直到不平衡荷载小于允许值为止.

迭代法是随着迭代次数的增多逐渐趋于精确解,其精度可以用不平衡荷载来控制,因而容易进行.迭代次数越多,方程的数值解精度就越高.

5.3 混合法

混合法就是同时采用增量法和迭代法,它综合了增量法和迭代法的优点,大大加快了收敛速度,对于大跨度悬索桥这种非线性较强的结构是很适合的.

等效荷载以增量的形式加载,在每个荷载增量区间内再进行迭代,使每一步都达到就是精度,最后逐渐趋于精确解.每一增量过程的最后迭代的不平衡荷载(误差)可以叠加到下一步的增量中,如此可以控制误差积累.

6 悬索桥地震响应分析中的地震激励模型^[4,5]

通常在大跨度悬索桥抗震设计中,多采用反应谱.在研究地震响应时,激励模型大都采用历史地震动记录、地震动功率谱密度和反应谱或功率谱经数值模拟得到的人工地震动时间历程.

由于地震动对结构有选择性破坏,含有丰富低频成分的地震动对悬索桥是不利的,而实桥的场地是确定的,所以选择的地震记录的频谱结构非常重要,它不仅应含有对悬索桥不利的低频成分,而且应与桥位场地相近的场地上获得的地震记录.用这样的地震记录进行分析对实桥才是有意义的.

由于不同的激励模型在设计过程中有不同的作用,因此反应谱、功率谱和地震记录都有重要的实用价值,关键是根据实际情况正确选择模型的参数,此时应特别注意强震柔性场地这一组合.文献[3]指出,对于大跨度悬索桥,较好的选择是采用地震危险性分析提供的地震动功率谱或由其生成的人工地震波.

参考文献:

- [1] 张强.大跨度悬索桥非一致地震激励响应分析及振动控制研究:[博士学位论文][D].成都:西南交通大学土木系,1998.
- [2] 唐茂林.大跨度悬索桥非线性地震反应分析:[硕士学位论文][D].成都:西南交通大学土木系,1998.
- [3] 李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社,1992.75~90.
- [4] 陈仁福.大跨悬索桥理论[M].成都:西南交通大学出版社,1994.35~40.

- [5] 周述华. 大跨度悬索桥空间非线性抖振响应仿真分析:[博士学位论文][D]. 成都:西南交通大学土木系, 1993.
 [6] 潘家英, 程庆国. 大跨度悬索桥有限位移分析[J]. 土木工程学报, 1994, (4):5~9.

Research of Seismic Response of Suspension Bridge

NING Xiao-jun, LI Rui, LI Xin-le

(The Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: Several calculating methods of suspension bridge are analyzed and compared in this thesis. Nonlinear factor is studied particularly. When using FEM to analyze suspension bridge, different elements are considered to simulate different structure. Numerical mathematical method and how to select seismic wave is also introduced.

Key words: suspension bridge; finite elements method; seismic response; nonlinearity

~~~~~  
 (上接第 21 页)

## Electrolytic Refining of Copper with Copper Sulfide as Anode

ZHOU Xian-jin

(Chengdu Electrometallurgical Factory, Sichuan Copper and Nickel Company Ltd., Chengdu 610061, China)

**Abstract:** The traditional technology for electrolytic refining copper was using crude copper (>99%Cu) as anode. This paper introduces a new flowsheet for refining copper. The raw material is secondary copper concentrate, which is produced from the grinding-floating process with high-nickel matte by Chengdu Electrometallurgical Factory. The anode is cast, then it is used to produce copper by electrolysis directly. The new technology is put into industrial practice successfully.

**Key words:** copper concentrate; cast; copper sulfide anode; electrolysis

~~~~~  
 (上接第 24 页)

- [4] 吴年强, 李志章, 机械合金化的机制[J]. 材料导报, V11, 1997, 12(6):22~23.
 [5] 杨均友, 张国俊, 李星国, 崔昆. 机械合金化研究的新进展[J]. 功能材料, 1995, 26(15):477~480.
 [6] 洛阳铜加工厂中心实验室金相组编. 铜及铜合金金相图谱[M]. 北京:冶金工业出版社, 1983. 13~15.
 [7] 王成国, 齐保森, 等. Cu-C-Ti 系和 Cu-CuO-Al 系合金粉末的机械合金化[J]. 粉末冶金技术, 1999, 17(3):182~185.

A Study on Cu-Pb Self-lubricate Materials by Mechanical Alloying

LIU Yu-hong, SHI Qing-nan

(The Faculty of Materials and Metallurgical Engineering,
 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In this paper, the mechanic is studied that the Cu-Pb alloy powders of mutual non-dissolvment system are made by mechanical alloying in a high-energy ball mill. The structure and form of mechanical-alloyed powders and the distribution of Pb are examined and analyzed by X-ray diffraction and EPMA. The results showed that the solid-solutioned Cu-Pb powders had a fine and well-distributed structure. This provides an important basis for the next pressing and sintering process.

Key words: mechanical alloying; self-lubricate materials; Cu-Pb alloying; solid-solution