

建筑物移位工程位移控制临界值分析

郑东强, 阎祥安

(天津大学 机械学院, 天津 300072)

摘要: 采用基于区间分析的结构非概率可靠性模型, 用超长方体集合定量建筑物移位(顶升平移)工程中结构所处的动态位移边界条件, 提出了建筑物能承受的最大安全不同步度概念, 并给出其分析的方法和步骤; 定量了工程的可靠度, 满足了液压同步控制系统安全控制的位移临界值的需要。

关键词: 建筑物移位; 区间分析; 非概率可靠性

中图分类号: TU746.4

文献标识码: A

Analysis of critical displacement in building moving project

ZHENG Dong-qiang, YAN Xiang-an

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the interval analysis of displacement boundary conditions, using hyper-rectangle set to the boundary conditions of a building in moving project. The conception of asynchronous gap of supporting points in moving direction was proposed. By using the optimal technique, the approach of computing the maximum safe asynchronous gap was presented, and the reliability of engineering was given. The results of analyses met the requirements of critical position control of hydraulic synchrony control system.

Key words: building moving; interval analysis; non-probabilistic reliability

随着我国城市建设和改造进程的不断深入, 建筑物整体移位技术得到了广泛的应用^[1]. 将具有保留价值的建筑物根据需要进行整体移位能带来巨大的经济、社会和环境效益. 在各种移位技术中, 多支点顶升平移是经常采用的方式之一. 如图1所示, 以顶升液压缸将已经和基础(或地基, 取决于切割位置)分离的建筑物进行顶升, 以平推液压缸(或其他牵引设备)推(或拉)动该建筑物, 沿已铺设好的轨道进行整体移位. 该方法具有适用面广、方便灵活和可控性强等优点, 能实现建筑物任意位置和姿态的调整需要; 并能通过提高控制系统的自适应控制能力和精度, 实现在相同条件下较之其它移位方法对结构产生更小的附加应力和冲击.

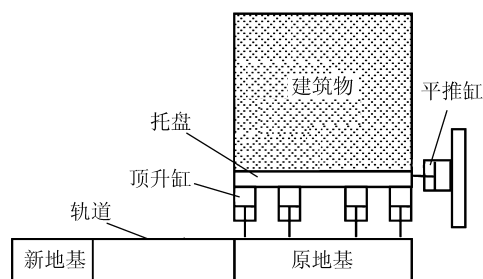


图1 多支点顶升平移工程

Fig. 1 Building lifting and moving with multi-points supporting

建筑物整体移位是一项新兴工程技术, 本身具有一定风险性. 其结构设计和施工设计还没有正式的规范可循, 也缺乏相应的试验研究和理论分析成果可参照, 基本上是施工单位凭经验操作. 现有不少关于建筑物整体移位的文献, 但都仅限于工程施工技术方面^[2~6]. 移位同步控制系统因缺乏必要的基本控制参数及其临界值而无法实现智能化自动移位.

本文针对多支点顶升平移方式, 采用区间非概率集合模型, 用超长方体集合定量结构所处的位移边界条件, 对将进行移位的建筑物结构进行工程可靠性分析, 得到建筑物结构所能承受的最大安全不同步度, 为液压同步控制系统提供基础控制参数, 并约束其行为. 最后结合控制精度得到工程可靠度, 为安全经济地将建筑物移位到位提供依据.

1 移位工程区间非概率模型

自从 20 世纪 90 年代提出基于凸集模型的非概率可靠性方法^[7~9]后, 基于非概率模型的结构可靠性分析得到了越来越多的认可. 非概率模型以集合的形式确定结构所能承受的各不确定参数的不确定程度, 特别适用于分析处于动态边界条件的移位工程中的建筑物结构. 非概率集合模型具有输入信息少, 无需参数的概率分布, 并可对参数的鲁棒灵敏度进行分析等优点, 因此更具有实用价值.

1.1 移位建筑物的边界条件

建筑物被切割分离后, 其底部约束由 6 自由度完全约束变为竖直 (或水平) 方向单向约束, 就静力有限元分析而言是约束不足的, 必须按最小影响原则补充不足的约束. 在顶升和平移过程中, 由于支点所处地面的沉降、液压系统的工作特性以及各支点间的耦合作用, 各支点的相对位置和反力不断变化, 支点实际是以一种交替前进的方式运动的. 因此结构处于反复加载和卸载过程中. 所谓同步只是一定范围内的同步.

(1) 结构分析支点运动方向不同步度 进行结构分析时, 对顶升平移中支点运动方向不同步度 δ^d 定义如下: 各相同运动方向的支点在该运动方向上的最大距离差 $\max(\Delta d)$ 为支点不同步度. 通常分为顶升不同步度 δ^v 和平移不同步度 δ^h . 结构某方向最大安全不同步度 δ_s^d 就是在保证结构安全的条件下所允许的支点最大不同步度.

(2) 支点不同步度分析的区间向量 在分析结构最大安全不同步度 δ_s 时, 采用的是理想化的单坐标轴不同步度, 即认为结构只发生位置 (x, y, z) 变化的平动, 没有姿态 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 的改变, 用一个坐标轴的最大位置差作为不同步度的度量. 顶升分析时采用的不同步度区间向量为

$$Z \in Z^I = [\underline{Z}, \bar{Z}] = [(Z_c - \delta^v/2), (Z_c + \delta^v/2)] = \{Z : \underline{Z} \leq Z \leq \bar{Z}, \underline{Z}, Z, \bar{Z} \in R^n\},$$

式中, Z^I 为支点高度向量所在区间; $\bar{Z}$, $\underline{Z}$ 分别为支点高度向量上、下界; Z_c 为支点平均高度, $Z_c = (\bar{Z} - \underline{Z})/2$; δ^v 为支

点不同步度, $\delta^v = \bar{Z} - \underline{Z}$; n 为支点数, 为全体实数集合.

支点绝对高度不影响分析结果; 各参量关系如图 2 所示.

Fig. 2 Interval variables of lifting points

(3) 移位过程支点不同步度的计算 实际移位时发生轻微整体倾斜是常见的, 因此各支点位置坐标 (p_x^i, p_y^i, p_z^i) 已知时, 不能简单地采用某坐标轴的最大差值作为该方向的不同步度, 应以包含所有该运动方向支点且距离最小的 2 个平行平面间的距离 d 作为该状态的支点不同步度 δ . 具体求法如图 3 所示.

1.2 区间有限元控制方程的边界组合求解法

有限元法中加入位移边界条件区间向量, 最终形成区间静力有限元控制方程^[10], 即

$$K(Z)u = F(Z),$$

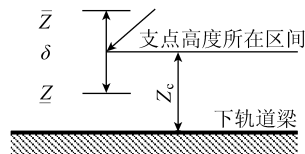


图 2 顶升支点区间变量

式中, $Z \in Z^I = \{Z_1^I, Z_2^I, \dots, Z_n^I\}$; K 为结构总体刚度矩阵; F 为节点力列向量。

区间方程组的求解有多种求解方法^[10~12], 因本文需要确定每组解的位移边界条件的合理性, 故只能采用组合法。根据结构分析的经验, 结构最大效应必定出现在区间参数的上、下界的组合中, 即支点位移边界条件向量张成的超长方体 C_v (仅一个运动方向为超立方体) 的顶点 p_i^v 上, $i=1, 2, \dots, 2^n$ 。

1.3 抗力区间场的离散

考虑结构反力为区间场变量, 在有限元求解过程中必须将其离散。本文采用局部统一法, 即同一单元内取同一区间。

1.4 位移边界条件合理性校验

因实际支点给予结构的只是单向约束, 支点不允许出现即脱离的情况, 即 $N_i \geq 0$ 。所以必须通过校验每个边界组合求解后对应的支点反力是否合理以保证该组合的现实存在性。

1.5 结构允许最大安全不同步度的求解

在区间有线元方程组的全边界组合法中, 如果 n 较大, 计算量将非常大。本文根据在指定的不同步度 δ 内, 最不利情形通常出现在离较近的支点产生较大偏差的结构分析经验, 采用逐点边界组合法得到最敏感支点的最大安全不同步度作为该运动方向的最大安全不同步度 δ_s^d , 虽然得到的最大效应仍然小于该不同步度下对应的理论最大效应, 但是对于工程实际来说多数情况是距离较远的支点间出现最大不同步度。因此该分析方法是可靠的, 并可排除大多数组合, 大大减少了求解次数。具体求解步骤如图4所示。计算某移位方向上最大安全不同步度的实质是优化问题。数学模型为

$$\text{Find } \underline{e}, N, \max \delta, \text{ s. t. } \begin{cases} \underline{N}(Z, c) \geq 0, \\ \bar{N}(Z, c) \leq N^v, \\ \underline{g}(Z, r, c) \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$Z^I = [(Z_c - \delta/2), (Z_c + \delta/2)], r^I = [\underline{r}, \bar{r}],$$

式中, δ 为不同步度; Z 为位移边界条件区间向量, $Z \in Z^I = [\underline{Z}, \bar{Z}]$; r 为抗力区间向量, $r \in r^I = [\underline{r}, \bar{r}]$; c 为固定参量; e 为结构效应区间向量, $e \in e^I = [\underline{e}, \bar{e}]$; $\bar{N}$, $\underline{N}$ 分别为支点反力向量上、下界向量; N^v 为

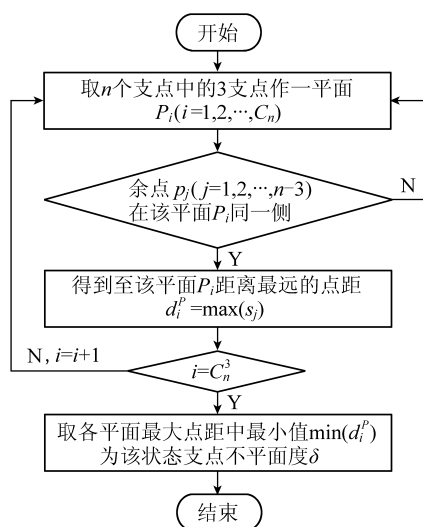


图3 建筑物迁移过程中的不同步度计算
Fig. 3 Computation of asynchronous gap of supporting points during building and moving

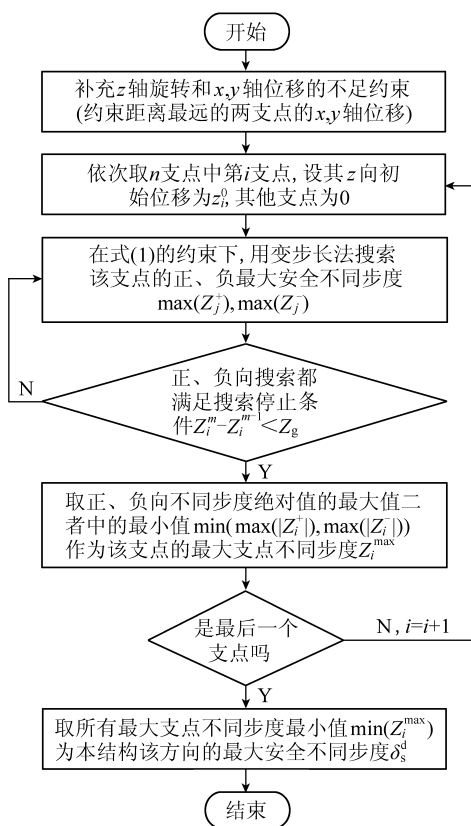


图4 迁移方向最大安全不同步度求解
Fig. 4 Maximum safe asynchronous gap of supporting points of moving direction

支点最大承载力向量; $\underline{g}$ 为功能函数下界, 可根据不同标准选取。

1.6 工程可靠度定量

文献 [13] 从功能函数出发, 在标准化区间变量的扩展空间中, 按无穷范数 $\|\cdot\|_{\infty}$ 度量的从坐标原点到失效面的最短距离为结构的可靠度。但该定义在区间参数比较多的情况下存在搜索计算量大的问题。本文根据工程特点, 采用结构各移位方向所能允许的最大安全不同步度 δ_s^{di} 和工程能达到的该方向不同步度 δ_E^{di} 的比值 η_i 的最小值, 作为工程的可靠度 η^E , 即

$$\eta^E = \min(\delta_s^{di} / \delta_E^{di}).$$

当 $\eta^E \geq 1$ 时, 工程安全; $\eta^E < 1$ 时, 工程不安全; η^E 越大, 工程可靠性越高。

2 算 例

结合本文区间非概率有限元理论, 开发了建筑物顶升移位计算机辅助设计系统 ECADS。功能函数采用适用于混凝土结构的最大线应变伸长理论, 以结构拉应变效应上界 $\bar{\varepsilon}$ 小于材料抗拉应变下界 $\underline{\varepsilon}^y$, 即 $\bar{\varepsilon} - \underline{\varepsilon}^y > 0$ 。采用钢筋混凝土结构整体式模型, 钢筋的刚度贡献通过刚度等效原则提高材料的弹性模量来实现。基本假定: 弹性、小变形, 弹性楼板。以空间梁单元模拟梁和柱; 以壳单元模拟楼板, 其它非承重墙及设备作为荷载加入结构中。

以如图 5 所示某 7 层框架结构办公大楼为例, 层高 3.6 m, 立柱截面 500 mm × 550 mm, A、D 纵梁截面为 300 mm × 500 mm, B、C 纵梁截面尺寸为 250 mm × 500 mm, 横梁 AB、CD 截面为 250 mm × 550 mm, BC 截面为 250 mm × 400 mm, 楼板厚度为 200 mm。钢筋混凝土等级为 C30。

钢筋混凝土梁、柱及楼板密度取为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 墙体密度 $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 0.2。采用密度折算处理, 梁、柱密度取为 $2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 楼板密度为 36 kg/m^3 。C30 混凝土弹性模量为 30 GN/m^2 , 考虑钢筋分布, 采用刚度等效处理后, 混凝土弹性模量调整为 33.4 GN/m^2 。混凝土抗拉应变下界 $\underline{\varepsilon} = 0.001$ 。在每根柱下设置顶升支点, 共 40 个。建立框架结构的有限元计算模型, 如图 6 所示。

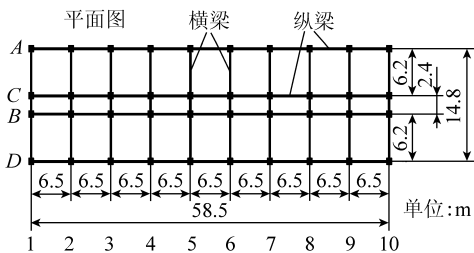


图 5 待顶升办公楼结构

Fig. 5 Plan view of building structure to be lifted

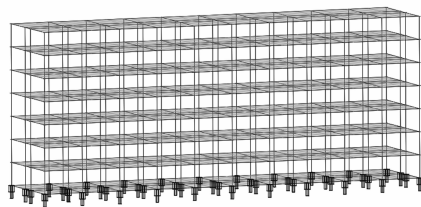


图 6 待顶升建筑物有限元模型

Fig. 6 Finite element model of building to be lifted

经计算建筑物总重 7 674.94 t, 顶升最大安全不平面度为 4.01 mm (C_1 点负向), 因结构的对称性, 取其 1/4 支点的计算结果见表 1。液压同步控制系统的控制精度为 1 mm, 则工程可靠性 $\eta^E = \min(\delta_s^{di} / \delta_E^{di}) = 4.01/2 = 2.005 > 1.3$ (安全系数取 1.3), 故工程可靠。

由以上计算结果可知, 由于 B、C 纵轴比较接近, 因此容易产生支点脱离现象, 从而降低了最大安全不同步度。但是如果支点间距过长也会使得结构附加内力过大, 故支点布置因根据质量分布情况, 予以综合考虑。

3 结 语

(1) 建筑物移位工程中主要的被控参数——各支点的相对位移在移位过程中是一个动态变化的参数。

表 1 各支点最大安全不同步度

Table 1 Maximum safe asynchronous gap of supporting points

支点位置	正向位移/m	负向位移/m	支点位置	正向位移/m	负向位移/m
D_1	0.021 72	-0.011 50	C_1	0.005 22	-0.004 01
D_2	0.020 12	-0.011 40	C_2	0.006 83	-0.004 52
D_3	0.025 51	-0.011 37	C_3	0.006 84	-0.004 53
D_4	0.025 27	-0.011 32	C_4	0.006 88	-0.004 57
D_5	0.025 26	-0.011 33	C_5	0.006 87	-0.004 57
D_6	0.025 01	-0.011 28	C_6	0.006 71	-0.004 57

如何确定该参数的许用范围是工程分析的主要任务。

(2) 区间非概率模型分析适用于建筑物移位(顶升平移)工程中特殊的位移边界条件,也适用于对支点力进行类似分析。

(3) 结构许用最大安全不同步度的求解实质是在各项约束下的最优化问题。

(4) 建筑物移位工程是一项复杂的多学科交叉工程,移位过程基本属于准静止状态,但不排除因偶然事件产生的振动和冲击,所以更加完善的分析还应该包括动力学分析以及反复加载的疲劳性分析等。这些工作都有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 李爱群,吴二军.我国建筑物整体平移技术及工程应用进展[J].江苏建筑,2003(So):48~53.
- [2] 尹天军,朱启华,郑华奇.北京英国使馆旧址整体平移工程设计与实施[J].建筑技术,2005,36(6):412~415.
- [3] 徐向东,张鑫,贾留东.多层砖混办公楼纵向平移施工技术[J].建筑技术,1999,30(6):404~405.
- [4] 卫龙武,吴二军,李爱群,等.江南大酒店整体平移工程的关键技术[J].建筑结构,2001,31(2):6~8.
- [5] 郑华奇,蓝戊己.刘长胜故居整体平移工程的设计与施工[J].建筑技术,2003,34(6):414~416.
- [6] 刘富勤.整体平移技术在城区改造中的应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2005.
- [7] Elishakoff I. Essay on uncertainties in elastic and viscous elastic structures: from A M Freudenthal's criticisms to modern convex modeling[J]. Computer & Structures, 1995, 56(6): 871~895.
- [8] Ben-Haim Y. A non-probabilistic concept of reliability[J]. Structural Safety, 1994, 14(4): 228~245.
- [9] 邱志平.非概率集合理论凸方法及其应用[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [10] 郭书祥,吕震宙.线性区间有限元静力控制方程的组合解法[J].计算力学学报,2003,20(1):34~38.
- [11] Rao S S, Berke L. Analysis of uncertain structural system using interval analysis[J]. AMA Journal, 1997, 3(4): 727~735.
- [12] 郭书祥,吕震宙.区间有限元静力控制方程的迭代解法[J].西北工业大学学报,2002,20(1):20~23.
- [13] 郭书祥,吕震宙.基于区间分析的结构非概率可靠性模型[J].计算力学学报,2001,18(1):56~60.