

# 不稳定空间展开 折叠桁架结构稳定过程分析

陈务军<sup>1</sup>, 董石麟<sup>1</sup>, 付功义<sup>1</sup>, 周 岱<sup>1</sup>, 关富玲<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学空间结构研究中心, 上海 200030; 2. 浙江大学土木系, 杭州 310027)

**摘 要:** 本文以理想桁架节点笛卡尔坐标为未知量, 全面建立了复杂不稳定空间展开折叠桁架结构的几何约束方程, 并推导出相应的几何约束 Jacobi 矩阵, 建立了线性稳定过程分析的理论与方法, 阐明了稳定过程的力学机理, 明确提出稳定目标函数, 且分析了稳定状态的力学特点, 并考虑了几何约束二阶项对稳定过程解的影响。最后, 数值算例验证了该方法、程序的正确性与适用性。

**关键词:** 不稳定结构; 稳定过程分析; 几何约束方程。

中图法分类号: TU311.2, TU323.4 文献表示码: A

## 1 引言

不稳定结构体系指在载荷作用下产生非弹性变形的几何位移, 其本质为: 体系存在线性或有限刚体位移模态。线性刚体位移模态包括低阶无穷小机构和二阶无穷小机构位移模态, 主要存在于可张拉预应力体系施加预张力过程。有限刚体位移是结构体系产生运动、改变几何外形的必要条件, 如索网、张力膜等的成形过程分析, 空间展开结构的展开折叠稳定过程, 该过程能量最速变化。张力结构体系的成形和空间展开结构的展开折叠经历巨大的位移变化和体系转换, 采用传统的非线性有限元难以实现<sup>[1-2]</sup>。

空间展开折叠桁架结构是一种重要的不稳定结构, 其特点为: ① 在地面为折叠状态, 在空间为展开状态; ② 体系由折叠到展开过程或逆过程是一个不稳定的体系转化过程。本文将建立不稳定空间展开折叠桁架结构稳定过程分析的理论与方法。

## 2 几何约束方程及其约束 Jacobi 矩阵

基本假设: ① 杆单元为理想直杆, 节点具有三个相对转动自由度; ② 杆长保持不变; ③ 稳态移动变化; ④ 忽略摩擦力、结构初始缺陷等。

几何约束方程决定系统的刚体位移模态和稳定过程解。几何约束按构造分三类: ① 杆长刚体几何约束; ② 节点附加几何约束, 如滑枕、套筒等; ③ 边界约束。

收稿日期: 1999-04-06; 修订日期: 1999-09-16

基金项目: 863 高技术项目(863-2-4-1-12)

作者简介: 陈务军(1969), 男, 重庆市人, 博士后

的  $x$  值为 0.0, 6 的  $y$  值为 0.0, 7 的  $y$  值为 1.0。表明结构对称移动, 杆件 2-3、6-7 折叠后仍竖直, 数值正确。

由表 1 数据计算折叠后各杆件的长度: 1-2、4-3、2-6、3-7、2-3、6-7 约为 1.0, 1-5、5-6 约为  $\sqrt{2}$ , 与初始长度 1.0 和  $\sqrt{2}$  相差非常小, 表明算法与程序正确。

表 1 结构折叠稳定过程位形变化比较

项次	1-4x	2-3-5x	3y	5y	6-7x	6y	7y
①	0.0000	0.604998	1.798422	1.278491	1.20995	0.0000	1.0000
②	-0.000136	0.605886	1.798667	1.278745	1.208029	-0.001012	0.999063
③	0.0000	0.943815	1.330512	1.053193	1.887629	0.0000	1.0000
④	-0.000001	0.943816	1.330513	1.053195	1.887624	-0.000004	0.999996

注: ①  $I_{\text{term}}=0$ ,  $N_{\text{step}}=500$ ,  $\mathbf{a}_0=2.0\text{e-}4$ ,  $\mathbf{D}t=1.0$ ; ②  $I_{\text{term}}=1$ ,  $N_{\text{step}}=500$ ,  $\mathbf{a}_0=2.0\text{e-}4$ ,  $\mathbf{D}t=1.0$ ; ③  $I_{\text{term}}=0$ ,  $N_{\text{step}}=5000$ ,  $\mathbf{a}_0=2.0\text{e-}4$ ,  $\mathbf{D}t=0.01$ ; ④  $I_{\text{term}}=1$ ,  $N_{\text{step}}=5000$ ,  $\mathbf{a}_0=2.0\text{e-}4$ ,  $\mathbf{D}t=0.01$ ;  $I_{\text{term}}=0$  表示不考虑高阶项;  $I_{\text{term}}=1$  表示考虑高阶项。

## 7 结论

1、本文以理想桁架节点笛卡尔坐标为未知量, 系统地建立了复杂空间展开桁架结构的几何约束方程及其几何约束 Jacobi 矩阵;

2、建立了适宜复杂空间可展开折叠桁架结构展开折叠稳定过程分析的理论与方法; 阐明了展开折叠稳定过程分析的力学机理, 明确提出普遍性的展开目标函数和稳定条件概念, 并分析了稳定状态的力学特点。

3、本文推导出考虑几何约束二阶项影响的展开折叠不稳定结构的稳定分析解。通过算例表明, 本文建立的理论与方法适宜复杂展开折叠不稳定结构体系的稳定过程分析, 选取合理的广义增量, 采用线性稳定分析可获得较理想的结果。

### 参考文献:

- [1] 陈务军. 空间展开桁架结构设计原理与展开动力学分析理论研究[D]. 浙江大学, 1998.
- [2] 陈务军, 关富玲, 等. 索杆可展开结构体系分析[J]. 空间结构, 1997, 3(4): 43-48.
- [3] Y Hangai. Analysis for shape-finding of unstable link structures in the unstable state, Theoretical analysis of structures in the unstable state and shape analysis of unstable structures [A]. Univ. of Tokyo, 1991.9.
- [4] R P Singh, P W Linkins. Singular value decomposition for constrained dynamically systems[J], Journal of Applied Mechanics, 1985, 52(3): 943-948.

(下转 015 页)