

组合网架的竖向地震响应分析

罗尧治 陈向阳 董石麟

(浙江大学) (浙江省交通设计院) (浙江大学)

摘 要 选用板元、梁元和杆元的组合有限元模型对组合网架进行动力分析,研究了组合网架的自振特性,并利用振型分解反应谱法和时程分析法,分析了竖向地震作用下,组合网架的内力系数的大小和分布规律。在此基础上,提出了估计组合网架自振频率和竖向地震内力的简化方法,给出了简洁的竖向地震作用系数表,对组合网架的工程设计,具有重要的参考价值。

关键词 组合网架 反应谱法 时程分析法 地震响应 地震内力系数

1 引 言

组合网架是一种钢网架和钢筋混凝土结构组合的新型空间结构,以钢筋混凝土平板代替普通钢网架的上弦杆,是一种杆系、梁系和板系共同作用的空间结构体系。组合网架可使结构的承重功能和维护功能合二为一,可充分发挥钢材和混凝土两种不同材料的强度优势,结构整体刚度较大,并降低了结构的工程造价。

近十多年来,国内对组合网架的理论分析、设计计算、试验研究和工程实践均进行了大量研究,并已建造了数十幢实际组合网架工程。浙江大学的董石麟院士在实践中,提出了等代空间桁架分析法和拟夹层板分析法,为组合网架的发展作出了不可磨灭的贡献^[1]。但国内外对组合网架的动力特性,尚缺乏系统深入的研究,组合网架在竖向地震作用下,内力系数的数值和分布规律如何,成为工程中亟需解决的问题。本文首先比较了各种组合网架的计算模型,并选用板元、梁元和杆元的组合有限元模型进行动力分析,即将腹杆和下弦杆件简化理想铰接,加劲肋看作理想刚接的梁。通过分析比较,得到了组合网架地震内力的分布规律,得出了一些对工程设计有意义的结论。

2 组合网架的计算模型比较

组合网架的计算分析可以采用多种有限元分析模型,本节以一 $25 \times 20\text{m}$,厚 2.0m ,网格数为 10×8 的正交正放四角锥组合网架为例,对不同有限元模型得到的静力特性和自振特性,进行了详细的分析和比较。网架为周边竖向和切向支承。

模型一是等代空间桁架法,即将上弦层根据能量等代原理等代为普通杆件,等代杆件截面根据文献[1]得到。模型二的上弦杆件仅考虑组合网架的加劲肋,并将加劲肋看作理想铰接,而把上弦板作为安全储备;模型三则认为加劲肋为理想刚接;模型四为板系、梁系和杆系组合结构,假设加劲肋之间理想刚接;模型五在模型四的基础上,引入主从自由度约束,考虑上弦板节点偏心的影响,偏心距离为 5cm 。结构的上弦板自重和面层合计 4.0kN/m^2 ,活载为 3.5kN/m^2 。不同计算模型的分析结果如表1所示。比较计算结果可知,等代空间桁架法对组合网架的静力分析具有较高的精度,误差一般小于 5% ,完全可以应用于工程设计。仅考虑加劲肋作用,设计虽然简单但误差较大。上弦板节点偏心对结构受力影响较小,且偏于安全,因而设计组合网架时可以不考虑节点偏

表1 不同模型的分析结果

	模型一	模型二	模型三	模型四	模型五	普通网架
最大位移 (cm)	2.8565	3.4917	3.3286	2.9710	2.8623	5.1204
下弦跨中杆件内力 (kN)	577.2	562.5	561.1	579.8	566.8	699.4

心。组合网架的刚度明显比普通网架高,跨中挠度约为普通钢网架的 60% 。

利用不同的计算模型计算了结构的自振特性,结

构的质量矩阵,考虑结构恒载和 50% 的活载,并和相同设计条件的普通网架作了比较。表2是不同计算模型的前十阶自振频率,表中右上角带*的表示水平振型。结果表明,上弦板节点偏心对结构自振特性影

来稿日期:2000-06-09

响很小, 等代空间桁架法得到结构自振频率具有较高精度, 但结构的动力特性还和振型相关, 可能会产生一定误差, 因而本文采用板系、梁系和杆系的组合模

型对组合网架进行自振特性和竖向地震响应分析, 该模型和组合网架的真实受力情况基本吻合。

表 2 网架的前十阶自振频率 (Hz)

振 型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
模 型 一	4.549	7.511	9.962	11.003	11.703	13.859	15.476	15.685	15.886	17.221
模 型 四	4.648	7.918	10.391	11.520	12.207	14.457	15.969	16.296	16.485	17.899
模 型 五	4.671	7.932	10.403	11.533	12.219	14.469	15.983	16.308	16.496	17.910
普通网架	2.631	3.328	3.539*	5.342*	5.488	6.825*	7.822*	8.146	8.540	9.139

3 组合网架的自振频率和振型

本文选用 11 个不同跨度、不同支承形式和不同类型的组合网架进行计算分析, 网架的跨度和网格尺寸如表 3 所示, 除网架 9 为四点支承外, 其余为周边竖向和切向支承。网架 10 和 11 分别为正交正放桁架和正交斜放四角锥网架, 其余为正交正放四角锥网架。所选用的网架均根据等代空间桁架法并借助 MSTCAD 软件进行设计, 杆件配置已经过静力优化。表 3 是十一种组合网架的前十阶自振频率, 从分析结果可以得到组合网架自由振动的主要规律:

1. 频谱相当密集。常用组合网架的基频大于 2.0Hz, 和相同设计条件的普通网架相比, 组合网架具有较高的刚度。基频主要和跨度及厚度相关, 跨度越大, 基频越低。厚度越大, 频率越高。组合网架的低阶振型以竖向振型为主, 前八阶振型一般不会出现水平振型。不同网架的竖向振型曲面基本相似。

2. 组合网架的网格布置形式对基频影响不大, 正放四角锥的刚度比斜放四角锥略弱, 而比两向正交

正放桁架略强。

3. 支承形式对结构基频有一定影响, 边界约束越强, 基频越高。四点支承的网架的基频约为周边支承网架的一半。

在动力学的参数中, 最关心的是结构的基频。为了避免编程计算, 可以按照能量法来确定基频的近似值^[5]。在静力分析时, 已经得到在竖向荷载作用下各节点的竖向位移, 可以利用求得的竖向位移曲面作为第一振型的近似来求得基频。

$$f_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k G_j d_j}{\sum_{j=1}^k G_j d_j^2}} \quad (1)$$

式中 f_1 表示基频, k 为节点数, G_j 第 j 节点重力荷载代表值 (N), d_j 重力荷载下第 j 节点的位移 (m)。根据式 (1) 计算了上述组合网架的近似基频, 并和有限元分析结果作了比较, 如表 4 所示, 两者的误差大约为 5%, 可见, 按式 (1) 计算基频, 工作量小, 但具有足够的数值精度。

表 3 网架的自振频率

网 架 尺 寸 网 格 高 度 编 号 (m) (m) (m)	自 振 频 率 (Hz)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 48×48 3.0×3.0 2.5	2.043	4.201	5.502	6.627	6.985	7.487	9.117	9.794	0.794	9.888
2 36×36 3.0×3.0 2.5	2.817	5.610	5.624	7.108	8.710	8.935	9.541	9.566	11.66	12.03
3 36×24 3.0×3.0 2.5	3.717	5.443	8.167	8.375	8.869	10.56	11.06	12.70	12.86	12.98
4 36×24 3.0×3.0 2.0	3.174	4.738	7.283	7.572	7.945	9.480	10.04	11.50	11.85	11.92
5 36×24 3.0×3.0 3.0	4.146	5.974	8.752	8.842	9.465	11.25	11.65	13.38	13.42	13.56
6 36×24 3.0×2.0 2.5	3.566	6.025	7.827	8.794	9.597	11.36	12.11	12.45	13.36	14.27
7 25×20 2.5×2.5 2.0	4.649	7.918	10.39	11.52	12.21	14.46	15.97	16.30	16.49	17.90
8 20×15 2.5×2.5 1.6	6.146	9.960	13.21	14.60	14.67	17.69	19.12	19.63	20.03	21.03
9 20×15 2.5×2.5 2.0	3.455	4.899	6.104	8.486	9.257	9.888	11.53	13.37	13.63	14.37
10 36×24 3.0×3.0 2.5	3.609	4.981	6.723	6.994	7.431	8.670	10.02	10.26	10.34	10.48
11 36×24 3.0×3.0 2.5	3.735	5.126	7.008	7.334	7.796	8.859	9.023	10.46	10.83	11.16

表 4 组合网架的基频

网 架	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
精 确 值 (Hz)	2.043	2.817	3.717	3.174	4.298	3.566	4.649	6.146	3.455	3.566	3.735
近 似 值 (Hz)	2.163	2.930	3.844	3.275	4.416	3.736	4.918	6.437	3.509	3.819	3.864
误 差 (%)	5.87	4.01	3.42	3.12	2.75	4.77	5.79	4.73	1.56	7.09	3.45

4 组合网架的竖向地震响应分析

根据有限元分析理论编制了组合网架的计算分析软件，程序的时程分析模块采用直接积分法，可以选择采用 Wilson-θ 法和 Newmark 法积分格式，假设结构阻尼与刚度和质量的关系如下式所示

[C] = α[M] + β[K] (2)

程序中，α 和 β 可以直接输入，若输入各阶振型阻尼比，α 和 β 按下式计算

α = 2ω_iω_j(ξ_jω_i - ξ_iω_j)/(ω_i² - ω_j²)
β = 2(ξ_iω_i - ξ_jω_j)/(ω_i² - ω_j²)

其中 ξ_i、ξ_j 和 ω_i、ω_j 分别为第 i、j 振型的阻尼比和圆频率，程序仅取第一、二阶振型参与计算。振型分解反应谱法只需输入设防烈度、场地类型和远近震信息，程序自动计算地震影响系数最大值，其后处理能给出结构的内力图和内力系数图。

为了更好的表述地震内力分布规律，可以引入竖向地震内力影响系数，其值定义为杆件地震力和静内力的比值，但由于许多腹杆和长向下弦杆件的静内力很小，按构造要求配置杆件，因而地震内力系数值虽大，但不会影响结构安全，特别是对于静载下的零杆，内力系数趋于无穷大而失去意义。如此定义的内力系数，难以清晰的反映地震作用对结构的影响，因此本文对杆件地震内力系数作如下定义

μ_i = F_{gi} / max{F_{ji}, γA_iσ} (3)

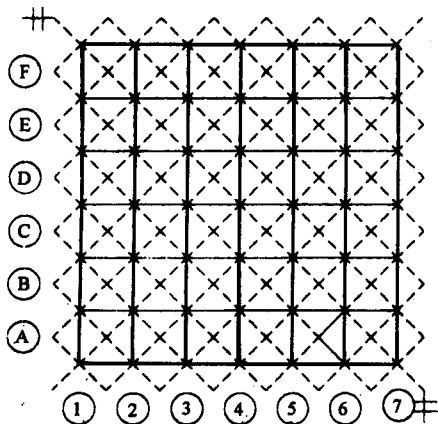


图 1 杆件编号示意图

式中 F_g、F_j 分别为杆件地震内力和静内力，σ、A 分别为材料允许应力和杆件面积，γ 为过滤系数，本文取 0.3，如式 (3) 定义的地震内力系数能有效地滤去地震内力不大但和静内力的比值很大的杆件，更能体现地震作用对结构的影响，对结构设计更具有参考价值。

采用振型分解反应谱法和时程分析法分别计算了建造于 II 类场地上，设计烈度为 8 度近震时的组合网架的地震内力，时程分析法选用 El Centro (NS) 波作为输入波，地震波的幅值按照建筑结构抗震设计规范^[3]作了调整。

通过分析比较可以发现，组合网架杆件的竖向地震内力系数基本分布规律是跨中大，边缘小。腹杆内力系数分布较复杂，但数值大小相差不是很悬殊，且多数杆件主要是按构造配置，内力较小，因而本文主要分析下弦杆件，特别是短跨的下弦杆件的地震内力系数分布规律。对所研究的组合网架下弦杆件由边缘向跨中进行编号，如图 1 所示，同一排杆件的内力系数顺次连接形成一条折线，就可以得到网架短跨或长跨杆件的内力系数图。每条折线清楚地表现了内力系数沿平行杆件方向的变化，而同一水平坐标对应的不同折线的值则体现了内力系数沿垂直杆件方向的变化规律。图 2~4 是三种网架下弦短跨杆件的内力系数图，可见，除最外侧的杆件外，地震内力系数基本满足跨中大，边缘小的分布规律，同一排杆件跨中和边缘的地震内力系数相差不大，且不是呈直线变化，靠近跨中的杆件内力系数变化较缓慢，边缘的内力系数

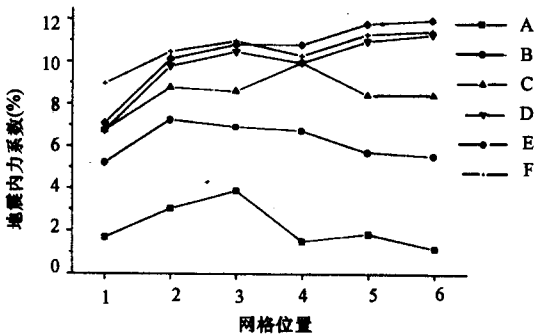


图 2 内力系数曲线 (36×36)

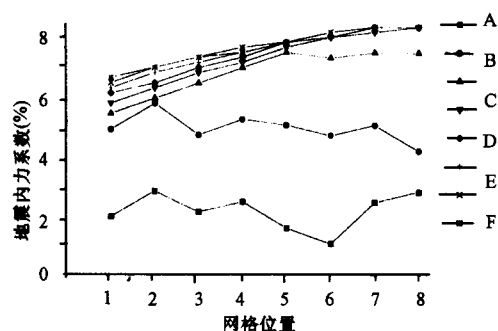


图3 内力系数曲线 (48×48)

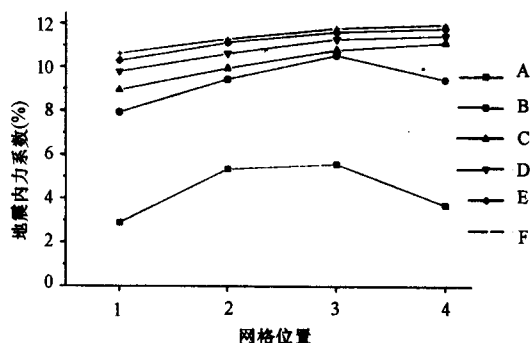


图4 内力系数曲线 (36×24)

变化较快。

4.1 最大地震内力系数和内力系数分布规律

下弦杆件中地震内力系数的最大值称为结构的最大地震内力系数,表5是不同计算方法得到的不同网架的地震内力系数最大值。因为组合网架的阻尼比尚缺乏可靠的实测数据,因而利用时程分析法分别计算了阻尼比为0.02和0.05的两种情况。计算分析表明,阻尼比0.02时的最大内力系数比阻尼比为0.05时大5%~10%。当结构的基频较大时,振型分解反

应谱法得到的结果和时程分析基本相近,介于两种不同阻尼比的结果之间;结构基频较小时,时程分析法得到的结果明显较大。由于各个天然的地震记录受具体的场地条件、震级和远近震条件的影响,波动总是很大的。当结构的自振周期处于该谱的低峰时,结构的影响会偏小;若结构自振频率恰好处于该谱的高峰时,结果会偏大。而标准反应谱是在统计了大量地震记录的反应谱的基础上获得的,未来地震在它附近的可能性较大,因此采用反应谱分析得到的结果较合理。

表5 不同组合网架的最大地震内力系数 (%)

网架编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
振型分解反应谱法	8.10	10.3	11.5	11.0	12.0	11.8	11.1	10.5	10.3	11.5	10.8
普通网架	7.08	8.77	11.6	10.8	12.1	11.8	12.1	12.1	13.5	11.8	9.32
时程分析											
$\xi=0.05$	12.1	8.77	11.1	9.78	11.8	10.1	8.60	8.43	8.77	10.8	10.1
$\xi=0.02$	14.7	10.1	13.0	12.0	12.8	11.3	9.78	9.78	9.45	12.0	12.0

组合网架的最大内力系数随基频的增大而变大。不同的场地类型和远、近震情况的改变,会对地震内力有一定影响,因而借助标准反应谱,来估计组合网架的最大地震内力系数是合适的。组合网架的最大地震内力系数,可如下式估计

$$\mu_{\max} = \lambda_g \alpha(f_1) \quad (4)$$

式中 α 为基频 f_1 对应的标准反应谱竖向地震影响系数,以重力加速度 g 为单位, λ_g 为考虑高阶振型和估计振型误差影响而引入的放大系数,建议取1.2。利用上式得到的最大内力系数是偏安全的。由图2-4可知,同一排的杆件和所在位置,难以近似为直线,按照圆锥形分布得到的地震内力会产生较大误差,因而建议内力系数分布用下式估计:

$$\mu_i = \mu_{\max} \alpha \left(\frac{a_i}{a} \right) \beta \left(\frac{b_i}{b} \right) \quad (5)$$

式中 μ_i 是杆件地震内力系数, α 和 β 按图5取用, a 和 b 如图6所示, a_i 为平行杆件方向的距离, b_i 为

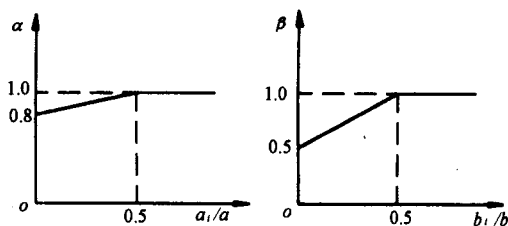


图5 内力分布系数

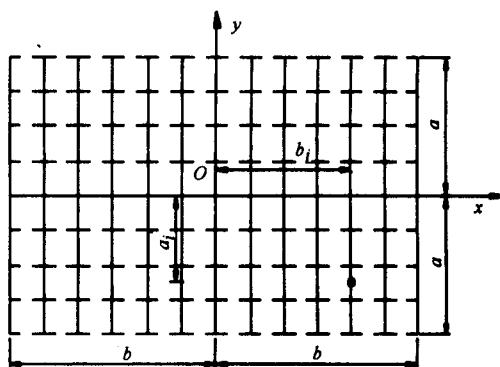


图6 形状参数

垂直杆件方向的距离,即假设地震内力系数如图7分布。通过对数十个组合网架的分析,式(5)基本符合内力系数的分布规律,边缘附近部分杆件的内力系数可能偏不安全,但这些均是静内力很小的杆件。

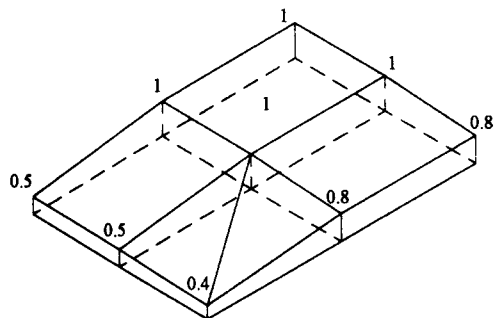


图7 内力系数分布形状

采用振型分解反应谱,计算折叠网架的地震反应时,可以取前十二阶振型参与组合。为了研究振型截断和振型组合方法的影响,引入均方根误差来估计截断误差:

$$E_{n1,n2} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{Y_j^{n1} - Y_j^{n2}}{Y_j^{n2}} \right)^2}{n}} \quad (6)$$

式中 $n1, n2$ 为所选用的振型数, n 为结构构件数, Y_j^{n1} 为第 j 构件取 $n1$ 阶振型参与组合得到的构件内力。计算 $36 \times 36\text{m}$ 组合网架的截断均方根误差得到 $E_{30,12} = 0.0062$, $E_{30,8} = 0.061221$, $E_{30,4} = 0.061220$, 可见,竖向地震内力主要由前四阶振型贡献,取前十二阶振型参与组合,已经具备足够的数值精度。利用

不同的振型组合方法,得到的数值结果的均方根误差很小,在工程设计时,可以不考虑频率密集的影响,而直接应用规范推荐的振型组合方法。

为了便于工程应用,组合网架杆件的竖向地震内力可采用如下公式近似计算:

$$F_g = \pm \psi_v F_j \quad (7)$$

式中 ψ_v 为竖向地震作用系数,可根据设计烈度和场地类型如表6选取。

表6 竖向地震作用系数

设防烈度	场 地 类 型		
	I	II	III, IV
7	0.05	0.06	0.07
8	0.10	0.12	0.13
9	0.20	0.24	0.26

4.2 组合网架上弦板的地震内力

在静载作用下,上弦板同时承受平面应力和弯曲应力,平面应力跨中较大,弯曲应力则在四个角点附近较大,因而静载作用下的 Tresca 应力在跨中和四角点较大,而四周中点内力最小。上弦板的地震内力系数定义为地震作用下的 Tresca 应力和静内力的比值。上弦板地震内力系数相差很小,除边界中点因静内力很小而内力系数略大外,其它差别均在 15% 以内,且最大值和下弦杆件内力系数的最大值基本相近,如表7所示。由于跨中的静内力和地震内力系数均最大,因而必须根据跨中设计上弦板,为安全起见,建议上弦板的最大地震内力系数,按下弦最大内力系数的 1.1 倍选取。

表7 上弦板的最大地震内力系数 (%)

网架编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
内力系数	9.109	11.13	11.30	10.97	12.82	11.81	12.25	11.51	11.32	13.33	11.81

参 考 文 献

- 董石麟,严慧,马克俭,苗春芳.组合网架结构与空腹网架结构.杭州:浙江大学出版社,1992
- JGJ-91 网架结构设计与施工规程.北京:中国建筑工程出版社,1992

- GBJ11-89 建筑结构抗震设计规范.北京:中国建筑工程出版社,1990
- 张毅刚,蓝调恩.网架结构在竖向地震作用下的实用分析方法.建筑结构学报,1995(5):2~15
- 网架结构设计与施工规程编制组.网架结构设计与施工规程应用指南.北京:中国建筑工程出版社,1992

VERTICAL SEISMIC BEHAVIOR FOR COMPOSITE SPACE TRUSS

Luo Yaozhi

(Zhejiang University)

Chen Xiangyang

(Zhejiang design institute of communication)

Dong Shilin

(Zhejiang University)

Abstract

Composite space truss is a new useful space truss, which upper layer is made of concrete plate. Free vibration characteristics of composite space truss is investigated and vertical seismic behavior is computed in this paper by using response spectrum method and time history method. The magnitude and distribution of vertical seismic force coefficient is introduced. Some conclusion will be benefit for engineers to design composite space truss.

Key words: composite space truss, response spectrum method, time history method, vertical seismic behavior, seismic force coefficient

罗尧治 博士, 副教授。从事空间结构的科研、教学和工程设计工作。主要研究方向有网架、网壳结构、索杆张力结构、膜结构等的分析、应用和结构 CAD 技术的开发。主要研究成果“空间网格结构分析设计软件 MSTCAD”, 获得国家教委科技进步一等奖和国家级科技进步三等奖。曾被评为浙江省高校优秀青年教师和浙江省青年科技奖。通讯地址: 310013 浙江杭州市玉泉浙江大学建筑工程学院

董石麟 教授, 中国工程院院士, 中国土木工程学会空间结构委员会副主任委员, 中国钢结构协会空间结构协会副理事长, 中国体育建筑专业委员会委员, 浙江省土木建筑学会结构学术委员会副主任、《空间结构》主编、《力学学报》、《工程力学》、《浙江建筑》杂志编委。曾获国家教委科技进步一、二等奖, 国家科技进步三等奖。

陈向阳 工学博士, 主要从事空间结构和桥梁结构设计及结构抗震分析。

国际壳及空间结构学会 (IASS) 简介

薄壳及空间结构的设计、分析与施工技术正在不断发展, 产生了不断增长的信息源泉, 这对于建筑师、工程师与建设者都具有实际意义。由 E. 托罗哈在 1959 年创建的 IASS, 其目的是通过对那些诸如格构、张拉、膜以及壳体的轻型结构体系感兴趣的人们互相交流, 因而取得更大的进步。

为了以上目的, IASS 开展以下活动:

- 每年组织国际学术讨论会, 其议题对工程师、建筑师与建设者都会感兴趣, 而会员可以享受优惠。
- 主持一些会员们都可参加的技术学组的活动, 学组出版发展概况报告及对设计及施工的建议。
- 支持各学组组织的每年一个或更多的学术研讨会。
- 出版国际刊物——IASS 学报, 每年三期。

会费合理, 个人会员会费 2000 年为 75 欧元, 学生会员可折减, 大型机构按团体会员交费。

详情可直接与 IASS 秘书处联系。地址: CEDEX, Alfonso XII 3, 28014 Madrid, Spain. 电话: 0034-1-3357409, 传真: 0034-1-3357422, 电子邮件: iass@cedex.es

国内也可通过空间结构协会联系, 地址: [100025] 北京朝外十里堡甘露园 1 号, 电话: 010-85775564, 传真: 010-85778646