

系留气球压差与球体应力变化关系研究

何泽青^{1,2}, 顾逸东², 王生², 张向强²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

2. 中国科学院光电研究院, 北京 100080)

摘要:针对系留气球球体压差变化和球体应力变化之间的关系进行研究。对球体受力情况进行简化,采用微元受力分析的方法进行应力分析,得出球体应力的理论解。采用有限元软件对无附加结构的球体进行应力分析并同球体应力的理论解进行对比,验证了有限元软件计算结果的可靠性。利用有限元方法在不同压差情况下对球体应力进行分析,确定了其高应力区域的范围和数值。需要指出的是采用膜单元比采用通常的薄壳单元进行应力分析更贴近实际情况。上述结果为球体气囊的结构设计、强度设计提供依据。

关键词:系留气球;有限元分析;膜单元

中图分类号:V273 **文献标识码:**A

Research on the Relation between the Change of Membrane Stress Arises and the Change of Interior Differential Pressure of Tethered Aerostats

HE Ze-qing^{1,2}, GU Yi-dong², WANG Sheng², ZHANG Xiang-qiang²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Opto-electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: The relation between the change of membrane stress arises and the change of interior differential pressure of tethered aerostats is studied in this paper. Firstly, the forcing state of tethered aerostat is simplified, the stress of the balloon is calculated by analyzing the tiny element, and then the theoretical result of the balloon is gained. Secondly, finite element software is used to analyze the stress of the balloon without any other adjunctive structure, the comparison between the result above and theoretical result proves that the result of the finite element software is reliable. Thirdly, the aerostat is analyzed under different pressure; the maximal value and the area of the stress on balloon were confirmed. Finally, In order to approach to the reality, membrane element is used to replace shell element in this calculation. The result could provide a reference for designing the structure and the intensity.

KEYWORDS: Tethered aerostats; Finite element analysis; Membrane element

1 引言

系留气球是一种利用球内充入气体(一般为氦气等密度远小于空气的气体)所产生的浮力来克服其自身重量的浮空器。它利用自身的净浮力及系留缆绳可实现较长时间定点滞空,具有连续滞空时间长、生存能力强、研制与使用成本低、维护方便、适于搭载各种载荷系统等特点,在通讯、遥测、情报、侦察、监视和预警等领域均有着广泛的应用前景。早在18世纪,法国军队就将系留气球用于战区观察了。如今系留气球以其特有的优点成为卫星、预警机不可替代的装备

平台。

然而,一个通常容易被忽视的问题是:防风罩的压力值如何确定,副气囊与防风罩的压差值的理想范围如何确定。从实际经验来看,这些容易被忽视的参数如果设置不当,会引起相当严重的后果。以上问题的分析和解决有赖于细致精确的力学分析。对于系留气球这样一个复杂的柔性薄膜结构,解析法是无法得到准确答案的,而有限元方法则具有这方面的优越性,它可以方便地处理各种复杂的几何形状、复杂的边界情况以及各种复杂的载荷作用下的响应等问题。因此,建立球体的合理的数学模型,采用有限元方法进行应力和变形分析是结构设计中必不可少的环节,所得到的结果将是球体结构和强度设计的重要依据。

2 球体内压的确定

系留气球长时间工作于多变的外界环境中,其承载的情况是十分复杂的。球体除了承受由于内压引起的分布载荷外,还要承受由于气流作用产生的动载,以及系索、有效载荷产生的集中载荷;与此同时,气球的材料强度受到了严格地限制,因此要求合理地对球体进行设计,对球体的内部压力有严格明确的控制,以便于充分发挥材料的性能并能使气球能在恶劣的自然环境下保持良好的气动外形,从而能够保证工作的正常进行。图1为系留气球结构简图。

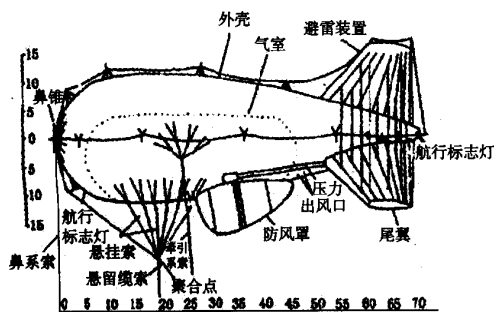


图1 系留气球结构简图

一般情况系留气球内部气压可视为常压,变化范围严格限制。通常球体的内外压差上下限主要由以下两个因素来决定:

1) 内外压差下限:为了保持球体的刚度和外形,以便承担集中载荷和对抗风载等外界载荷,气压太小不能承受整体弯矩,球体上部可能会出现褶皱或塌落失稳。因此囊体的内外压差必须大于某个阈值,该阈值就是气囊内外压差的下限,即外形和刚度保持要求决定了内外压差下限;

2) 内外压差上限:在球体的工作范围内,球膜所承受的力必须不能超过球膜的最大承受强度,避免囊体受力过大而破裂,即气囊材料的强度和安全性决定了气囊内外压差上限。

同时,还应考虑昼夜温差变化带来的影响,以确保球体有足够的强度余量维持正常工作的进行。

3 球体蒙皮张力的理论分析

3.1 球体应力与曲率半径的关系

为了分析方便起见,对气球囊体所受的压力进行简化,等效为囊体外部压力为零,囊体内部压力为球体内外压差,该压差记为 P 。蒙皮的受力状况如图2所示。

图中符号的意义是:

- P 是球体内外的气压压差;
- F_x 、 F_{-x} 和 F_z 、 F_{-z} 是沿蒙皮切向的,大致沿 X 、 Z 方向上的蒙皮内的张力;

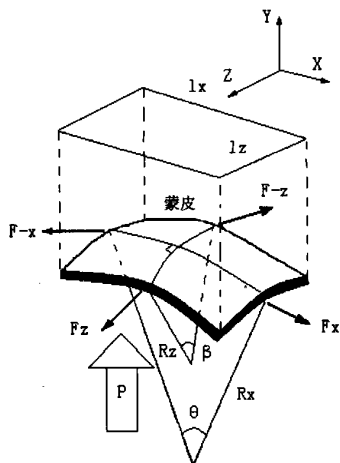


图2 蒙皮受力简图

- R_x 和 R_z 是蒙皮曲面在 X 、 Z 方向上的曲率半径;
 - θ 、 β 是该矩形蒙皮在 X 、 Z 两个方向的张角;
 - F_{xx} 是 F_x 在 X 方向上的投影;
 - F_{yy} 是 F_x 在 Y 方向上的投影;
 - l_x 和 l_z 是蒙皮曲面在 XZ 平面内投影的矩形的边长;
- 需要指出的是该小块矩形蒙皮是足够小的,可以进行合理的数学近似。

图3是图2在 XY 平面内的视图,图2在 YZ 平面内的视图与在 XY 平面内的视图基本一致,故没有画出。

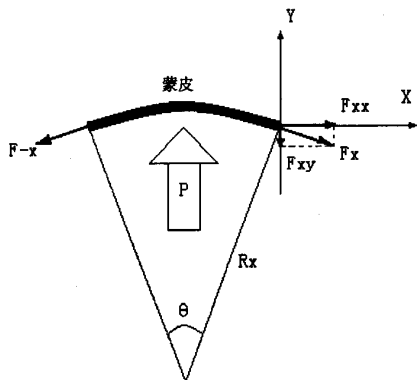


图3 蒙皮在XY平面受力简图

在 Y 方向上蒙皮受到的力有球体内外压差 P 形成的压力,和张力 F_x 、 F_{-x} 在 Y 方向上的投影,这些力的大小分别为:

- 气囊内压 P 形成的压力: $P \times l_x \times l_z \cong P \times R_x \times \theta \times R_z \times \beta$
- F_x 在 Y 方向的投影:

$$F_x \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cong F_x \times \frac{\theta}{2};$$

● F_{-x} 在 Y 方向的投影:

$$F_{-x} \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cong F_{-x} \times \frac{\theta}{2};$$

F_x, F_{-x} 在 Y 方向上的投影为(文中没有画出,但是受力分析与图 3 完全一致):

● F_x 在 Y 方向的投影:

$$F_x \times \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cong F_x \times \frac{\beta}{2};$$

● F_{-x} 在 Y 方向的投影:

$$F_{-x} \times \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cong F_{-x} \times \frac{\beta}{2};$$

考虑到分析对象是足够小的蒙皮,即 θ 和 β 足够小的假设,以上公式使用了弧度和正弦相等的近似。

在 Y 方向受力是平衡的,据此可以得出如下结论:

$$P \times R_x \times \theta \times R_x \times \beta = F_x \times \frac{\theta}{2} + F_{-x} \times \frac{\theta}{2} + F_x \times \frac{\beta}{2} + F_{-x} \times \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

在 X 方向上蒙皮受到的力是 F_x, F_{-x} 在 X 方向上的投影,在 Z 方向上蒙皮受到的力是 F_x, F_{-x} 在 Z 方向上的投影。根据 X, Z 方向上的受力平衡条件,可以得到 F_x 与 F_{-x}, F_x 与 F_{-x} 是大小相等的力的结论。将此结论代入式(1),得到:

$$P \times R_x \times \theta \times R_x \times \beta = F_x \times \theta + F_x \times \beta \quad (2)$$

设 σ_x 是 X 方向上的球体内应力,则有

$$F_x = \sigma_x \times R_x \times \beta \times t \quad (3)$$

同理可以得到

$$F_x = \sigma_x \times R_x \times \theta \times t \quad (4)$$

其中, t 为蒙皮厚度。

将式(3)和式(4)代入式(2),得到:

$$P \times R_x \times \theta \times R_x \times \beta = \sigma_x \times R_x \times \beta \times t \times \theta + \sigma_x \times R_x \times \theta \times t \times \beta$$

整理后得到:

$$P = \frac{\sigma_x \times t}{R_x} + \frac{\sigma_x \times t}{R_x} \quad (5)$$

式(5)说明了在蒙皮曲面上两个互相垂直方向上的应力、曲率半径和内压的关系。

3.2 纵向应力求解

取出如图 4 所示的部分,截面为垂直于 X 轴的平面,因为球体蒙皮为柔性材料,应力均为面内应力。

对该部分进行受力平衡分析。蒙皮受到的应力都是在面内,因此纵向面内应力 σ_x 应该垂直于蒙皮法线 n , X 方向力平衡方程:

$$\sigma_x \cos \alpha \times 2\pi r_{(x)} t = \pi r_{(x)}^2 P \quad (6)$$

得

$$\sigma_x = \frac{\pi r_{(x)}^2 P}{2\pi r_{(x)} t \cos \alpha} = \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} \frac{P r_{(x)}}{2t} \quad (7)$$

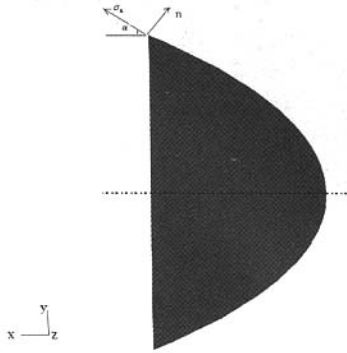


图 4 球体截面图

设 XY 面内的轮廓椭圆方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (8)$$

有:

$$\tan^2 \alpha = y^2 = \frac{b^2(b^2 - y^2)}{a^2 y^2} \quad (9)$$

而 $r_{(x)}$ 即 y , 得 X 方向的面内应力为:

$$\sigma_x = \sqrt{1 + \frac{b^2(b^2 - y^2)}{a^2 y^2}} \frac{P y}{2t} \quad (10)$$

3.3 环向应力求解

将上面纵向应力的式(10)代入式(5),即可求得环向应力的大小:

$$\sigma_x = \left(\frac{P}{t} - \frac{\sigma_x}{R_x} \right) R_x = \left(\frac{P}{t} - \frac{\sqrt{1 + \frac{b^2(b^2 - y^2)}{a^2 y^2}} \frac{P y}{2t}}{R_x} \right) R_x \quad (11)$$

其中, R_x 和 R_y 是曲面在 Z 方向和 X 方向的曲率半径:

$$R_x = y$$

$$R_y = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{3/2}} = \frac{[b^4 + (a^2 - b^2)y^2]^{3/2}}{ab^4}$$

将上式代入式(11)则得到

$$\sigma_x = \left(\frac{P}{t} - \frac{\sigma_x}{R_x} \right) R_x = \frac{P y}{2t} \left(2 - \frac{b^4}{(a^2 - b^2)y^2 + b^4} \right) \quad (12)$$

在上面的式子中各符号的意义为:

P - 球体内外压差;

y - 球体横截面的半径;

t - 球体蒙皮的厚度;

a - 球体母线的长半轴长度;

b - 球体母线的短半轴长度;

通过上面的推导,式(5)得出了球体内压、蒙皮应力和曲率半径之间的关系,式(10)和式(12)得出了球体应力的准确的数学解。

4 球体结构分析的 CAD/CAE 软件

现在系留气球对重量和安全性的要求更高,一方面要选择高性能的结构材料,另一方面要提高结构分析的精度和可靠性。现代大型分析软件功能已经十分强大,基本可以解决各种复杂结构的整体分析。

4.1 球体结构分析软件

系留气球球体结构相对复杂,包括球体与尾翼的连接、尾翼与内部隔膜的连接、球体与副气囊的连接等等,因此借助于 CATIA 软件强大的曲面操作功能对球体进行建模,之后把模型导入 HYPERMESH 软件系统中,以便于转换为适当的分析软件格式,同时借助其强劲的网格划分功能对球体进行有限元网格划分。

从力学模型的观点来看,系留气球属于典型的薄膜结构,在载荷作用下发生的变形远远大于球膜厚度,属于几何非线性,即大变形问题。因此,从理论上讲应采用非线性膜单元作为力学模型来进行分析。

ABAQUS 被认为是功能最强的有限元软件之一,特别是在非线性分析领域,可以处理各种复杂的力学系统和模拟高度非线性问题,并且能够提供成熟的膜单元算法。鉴于以上优点,采用该软件作为球体结构的有限元分析软件。

4.2 有限元结果与理论值的比较

按以下参数创建球体模型对软件进行验证并进行有限元计算:

$$P = 500\text{pa}; a = 0.2\text{mm}; b = 40\text{m}; c = 10\text{m};$$

对于蒙皮参数,取:

$$\text{弹性模量 } E = 14\text{Gpa}; \text{泊松比 } \mu = 0.3$$

在软件中采用三角形膜单元和四边形膜单元混合,对模型进行划分,并进行计算,运行结果为图 5。

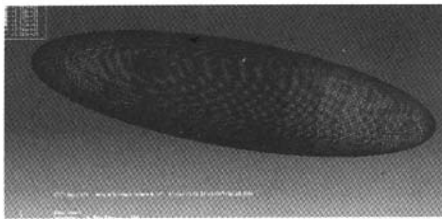


图 5 有限元计算结果

从软件和理论公式分别进行计算,其结果如表 1 所示。

表 1 球体应力理论解与有限元解

半径 y (m)	径向应力 σ_r (Mpa)		环向应力 σ_θ (Mpa)	
	理论值	计算值	理论值	计算值
0.5	5.305	5.3157	1.0793	5.465
1	5.5853	5.6054	2.3551	5.9363
2	6.5881	6.5806	5.7292	8.0105

半径 y (m)	径向应力 σ_r (Mpa)		环向应力 σ_θ (Mpa)	
	理论值	计算值	理论值	计算值
3	7.9842	7.9747	9.8404	11.378
4	9.6037	9.5974	14.216	15.251
5	11.351	11.34	18.64	19.121
6	13.176	13.212	23.047	23.499
7	15.05	15.062	27.42	27.871
8	16.957	16.935	31.761	32.013
9	18.887	18.851	36.074	36.088
10	20.833	20.896	40.365	40.472

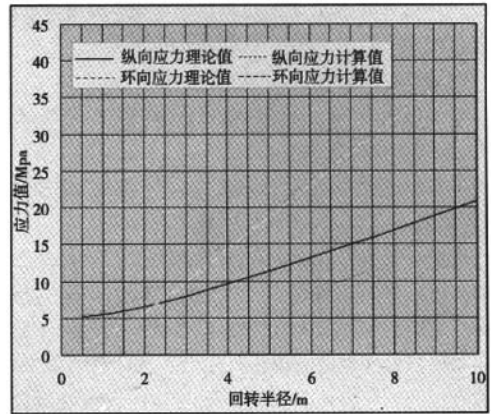


图 6 径向、环向应力有限元解与理论解的比较

从图 6 中可以看出,对于径向应力,理论解与有限元解吻合的非常好;对于环向应力,在球体的端部,有限元解和理论解有些差别,随着回转半径的增加,二者逐渐靠近,在球体远端部的区域吻合情况良好。理论解与整体有限元解取得了较好的一致性,从理论上验证了整体有限元分析的正确性。

5 球体结构有限元建模与分析

在实际工作中,副气囊不允许充满,其与主气囊的隔膜经常处于松弛状态,因此在分析过程中不对其进行考虑,而只考虑由于主气囊和防风罩的压差引起的应力的变化。

5.1 建立模型,创建材料属性和约束条件

图 7 是经过前处理软件 HYPERMESH 进行网格划分后的模型。

球体坐标原点位于头部中心处,纵轴为 X 轴,并与其他两个坐标轴构成右手系,球体的几何外形和载荷均为对称的。

球体材料采用线性各向同性的材料,材料的杨氏模量为 14000MPa,泊松比为 0.34,球膜厚度为 $2 \times 10^{-4}\text{m}$ 。约束条件为:球体顶部端点约束全部六个方向的自由度,尾部端点解

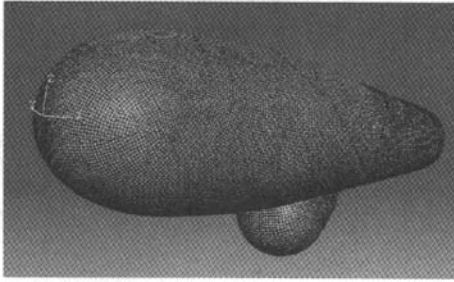


图7 气球整体坐标和网格划分

除 X 方向的约束,只约束其余五个方向的自由度。主气囊施加压力为 640pa,防风罩的压力从 0 到 640pa 递增,目的是观察球体应力随压差的变化而产生的变化。

5.2 球体应力与压差的关系曲线

以球体内压为 640pa、防风罩内压为 540pa 为例,查看球体应力,如图 8 和图 9 所示。

图中蓝色区域为低应力区,随着云图的颜色逐渐由蓝转红,球体应力逐渐增大,红色为区域为球体的高应力区。从球体计算结果的应力云图来看,球体头部和尾部依然为应力较低的区域,这与实际状况也是比较吻合的,而作为传统意义上高应力区的球体最大直径处,其最大应力相对于防风罩和球体的连接处来说则显得相对较低。从计算结果来看,球体最大直径处的应力值只有防风罩与球体连接处最大应力的 30% 甚至更小,因此仍然按照球体最大直径处的应力大小来判断球体的强度余量和安全性将不再可靠。

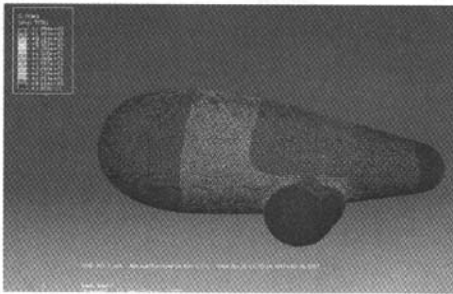


图8 球体应力计算结果

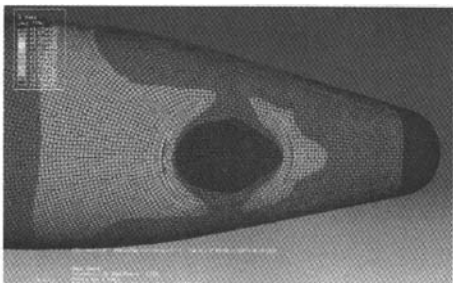


图9 球体高应力区

从图 8 和图 9 可以看出,球体两端和防风罩远离连接区域为低应力区。按传统经验和薄壁圆筒公式的计算结果来分析,球体最大直径处应为应力较高的区域,但从实际的分析结果来看,最大应力集中于防风罩和球体连接的前端和后端的一个较小的狭长区域。

表 2 为防风罩的不同内压对应的防风罩与球体连接处的前部和后部的最大应力值,图 10 为球体的最大应力与防风罩内部压差的关系曲线。从计算结果来看,球体位于防风罩内部的球体蒙皮应力值极小,蒙皮呈现松弛状态,防风罩远离连接区域的大部分面积应力值也较低,而防风罩边缘,尤其是前后两端的应力值则较大,随着逐渐远离连接区域,防风罩的应力值迅速降低。而对于防风罩与球体连接处的前后端的狭长区域,其应力值随着防风罩内部压力的增大(即防风罩与球体压差的减小)而迅速增大。

表 2 防风罩内压对应的最大应力

内压 (pa)	前部最大应力(Mpa)		后部最大应力(Mpa)	
	纵向	环向	纵向	环向
0	11.192	20.73	8.245	16.72
100	14.883	42.72	12.54	38.08
200	18.559	65.96	17.57	62.38
300	21.978	86.18	23.98	82.05
400	27.24	97.92	28.64	99.66
500	34.189	124.2	36.72	119.8
550	36.182	126.8	37.75	123.6
600	39.03	128.1	41.13	130.3

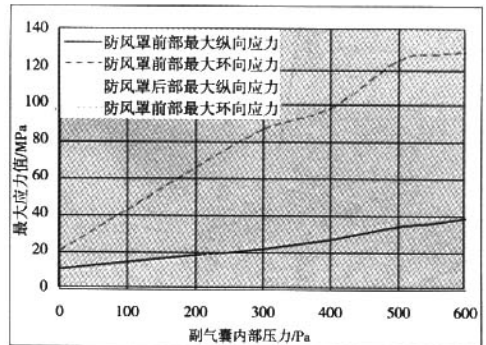


图 10 球体最大应力与防风罩内压的关系曲线

6 结论

传统设计分析中采用的薄壁圆筒近似公式在现代球体设计分析中具有很大局限性,有限元方法克服了这一不足,并且其计算结果更为有效。本文通过对椭球体膜结构的有限元分析结果与理论解比较,证明了两者的 consistency,通过对无附加结构的球体系统的分析修正了传统经验公式对球体应力估计所产生的较大的偏差, (下转第 117 页)

目结合具体应用开发能够适应多种类型的动态重组需求的仿真支撑环境。

参考文献:

- [1] F Darema. Dynamic Data Driven Applications Systems; A New Paradigm for Application Simulations and Measurements [C]. ICCS'04, LNCS 3038, 2004, Springer - Verlag Berlin Heidelberg 2004. 662 - 669.
- [2] Chun Fan. DDSOS: A Dynamic Distributed Service - Oriented Modeling and Simulation Framework [D]. PhD dissertation, 2006.
- [3] Levent Yilmaz, Andresa Tolk. Wilsey. Engineering Abinitio Dynamic Interoperability and Composability via Agent - Mediated Introspective Simulation [C]. Proceeding of the 2006 Winter Simulation Conference; 1075 - 1082.
- [4] Dhananjai Madhava Rao, A Philip. Wilsey. Dynamic Component Substitution in Web - based Simulation [C]. Proceeding of the 2000 Winter Simulation Conference; 1840 - 1848.
- [5] H L Vangheluwe. DEVS as a common denominator for multi - formalism hybrid systems modeling [J]. IEEE International Symposium on Computer - Aided Control System Design, 2000. 129 - 134.
- [6] B P Zeigler, H Praehofer, T G Kim. Theory of Modeling and Simulation [M]. Academic Press Ltd., London, UK, 2000.
- [7] F J Barros. Dynamic Structure Discrete Event System Specification; Formalism, Abstract Simulators and Applications [J].

- Transactions of the Society for Computer Simulation. 1997, 13: 35 - 46.
- [8] A M Uhrmacher. Dynamic Structures in Modeling and Simulation: A Reflective Approach [J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, April 2001, 11(2): 206 - 232.
- [9] B C Simith. Procedural reflection in programming languages [D]. Cambridge, Mass: MIT, 1982.
- [10] Hui Shang, Gabriel Wainer. A simulation Algorithm for Dynamic Structure DEVS Modeling [C]. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference; 815 - 822.
- [11] F Vardanega and C Maziero. A generic rollback manager for optimistic HLA simulations [C]. In Proceedings of the 4th IEEE International Workshop on Distributed Simulation and Real - Time Applications, San Francisco, California, 2001. 79 - 85.
- [12] Fabio Kon. Automatic Configuration of Component - based distributed systems [D]. PhD dissertation, University of Illinois at Urbana - Champaign, 2000.

[作者简介]



宋莉莉(1980 -),女(汉族),湖南常德人,博士研究生,研究方向为基于 SOA 的仿真技术,组合仿真技术。

李群(1971 -),男(汉族),山东泰安人,博士,副教授,研究方向为系统建模与仿真评估。

王维平(1962 -),男(满族),内蒙巴盟人,博士,教授,博士生导师,研究方向为系统建模与仿真、组合建模技术等。

(上接第 100 页)

明确了球体的真实高应力区域的位置,计算出了球体最大应力的数值范围,得出了球体的最大应力随压差变化的规律曲线。同时,球体本身还有许多附加结构,比如载荷吊架、尾翼、头锥等,这些附加结构会对球体的应力分布产生很大影响。考虑到这些附加结构的作用时,很难得到理论解,而用传统经验近似公式误差大,采用有限元整体分析进行数值模拟则是一个较好的方法。

如何设定球体内外压差、如何设计球体结构形式,才能减小由于压差影响造成的应力集中,做到既保证球体系统的安全性,又能使球体保持足够的刚度,维持较好的几何外形,最大限度的发挥其承载能力和抵御外界风载的能力,将是今后研究的重要课题。

参考文献:

- [1] G A Khoury. Airship Technology [M]. Cambridge University Press, 1999. 211 - 235.
- [2] Nobuyuki Yajima. A new design concept of natural shape balloon for high pressure durability [J]. AIAA - 99 - 3880. 221 - 230.
- [3] M Baker, J Rösler, C Siemens. A finite element model of high

speed metal cutting with adiabatic shearing [J]. Computers and Structures, 2002, 80: 495 - 513.

- [4] Elastic - plastic K - frame structure [M]. In: ABAQUS Example Problems Manual, HKS Inc, 1998.
- [5] 陈务军. 膜结构工程设计 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [6] 杨桂通. 弹性力学 [M]. 北京:高等教育出版社,1998.

[作者简介]



何泽阳(1981 -),男(汉族),河北人,硕士研究生,研究方向:系留气球结构和稳定性分析。

顾逸东(1946 -),男(汉族),上海人,博士生导师,中国科学院院士,中国载人航天工程应用系统总指挥、总设计师。

王生(1964 -),男(汉族),河北人,硕士生导师,研究员,主要研究方向为飞行器总体设计、结构与机构分析设计和试验研究。

张向强(1973 -),男(回族),山东人,助理研究员,博士,主要研究方向为系留气球气动与稳定性的分析研究。