

双向受拉的超压气球局部球形优化设计

张泰华^{1,2*}, 蹇航^{1,3}, 张冬辉¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 2. 齐鲁空天信息研究院, 山东 济南 250100;
3. 中国科学院大学 航空宇航学院, 北京 100049)

摘要:针对临近空间串联气球系统中的超压气球处于特殊的边界和载荷条件这一问题,提出了一种基于“自然形”球形方程组,对双向受拉条件下的正球形超压气球的两极进行局部形状优化的方法。通过平滑拼接数值解母线段和圆弧母线段,得到了两极有一定夹角的上下对称的超压气球的完整母线。使用有限元方法分析了局部球形优化前后超压气球的应力分布情况,验证了该局部球形优化方法的有效性。在此基础上,对影响局部球形优化效果的关键因素进行了分析,包括数值解母线段弧长、周向应力输入条件、局部球形、母线圆弧段的半径,为局部球形优化时关键参数的选择提供了重要参考。

关键词:超压气球;双向受拉;局部球形优化;“自然形”球形方程组;敏感性分析

中图分类号:V214.4 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)02-089-09



论
文
拓
展

Local shape optimization design of super-pressure balloon under bidirectional tension

ZHANG Taihua^{1,2*}, QIAN Hang^{1,3}, ZHANG Donghui¹

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. Qilu Aerospace Information Research Institute, Jinan 250100, China;
3. School of Aerospace and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to solve the problem that the super-pressure balloon in the near space tandem balloon system being subjected to special boundary and load conditions, a method for optimizing the local shape of the two poles of spherical super-pressure balloons under bidirectional tension based on the natural shape equations was proposed. Through the smooth connection of the numerical solution generatrix segment and the arc generatrix segment, the complete generatrix of super-pressure balloon with a certain angle at two poles was obtained, which was symmetrical up and down. The stress distributions of the super-pressure balloons before and after the local shape optimization were analyzed by the finite element method, and the effectiveness of the local balloon shape optimization method was verified. On this basis, the key factors affecting the effectiveness of local balloon shape optimization were analyzed, including the arc length of the numerical solution generatrix segment, circumferential stress input condition, local shape, and the radius of the arc generatrix segment, providing an important reference for the selection of key parameters in the local shape optimization of spherical super-pressure balloon.

Keywords: super-pressure balloon; bidirectional tension; local balloon shape optimization; natural shape equations; sensitivity analysis

高空气球是一种无动力临近空间浮空器,具有使用效费比高、结构简单、易于灵活实施等优点。除了作为科学研究和技术验证的主要平台,具备区域驻留能力的高空气球有望为高分辨率对地观测、预警探测、通信中继等应用需求提供有效的技术途径。结合平流层飞艇利用能源和动力系统对抗风场从而实现区域驻留所面临的问题,利

用准零风层风场条件的新型临近空间浮空器理论上只需要较小的能源和动力代价即可实现区域驻留,近年来受到了越来越多的关注^[1-7]。

美国于20世纪70年代开发的“天锚”气球系统通过合理的飞行参数设计有望实现长时区域驻留。该系统包含一个大型零压气球用于提供主要浮力和一个超压气球用于调节高度,其总重比

收稿日期:2022-12-26

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB3207305-2)

*第一作者:张泰华(1982—),男,甘肃会宁人,正高级工程师,博士,硕士生导师,E-mail:zhangth@aircas.ac.cn

引用格式:张泰华,蹇航,张冬辉.双向受拉的超压气球局部球形优化设计[J].国防科技大学学报,2025,47(2):89-97.

Citation:ZHANG T H, QIAN H, ZHANG D H. Local shape optimization design of super-pressure balloon under bidirectional tension[J].

Journal of National University of Defense technology, 2025, 47(2): 89-97.

相同体积的大型超压气球系统减少将近一半^[8]。因此,串联气球系统中的超压气球可以选择结构简单的传统正球形,依赖面密度较大的高强度球膜材料来承受较高的内外压差。考虑到实际发放过程的可操作性和气球上升过程中未展开的部分球膜的可控性^[9],系统采用零压气球-超压气球-吊舱的整体布局,超压气球顶部法兰与零压气球连接,底部法兰与降落伞连接,借助法兰将两极的集中力传递到球体上,超压气球整体处于双向受拉条件,如图 1 所示。NASA 的超长航时气球(ultra long duration balloon, ULDB)项目最初使用的就是用高强度球膜材料制造的正球形超压气球,但突出的底部挂载问题阻碍了这种气球的进一步发展^[10],如何挂载也是双向受拉的正球形超压气球亟待解决的一个问题。

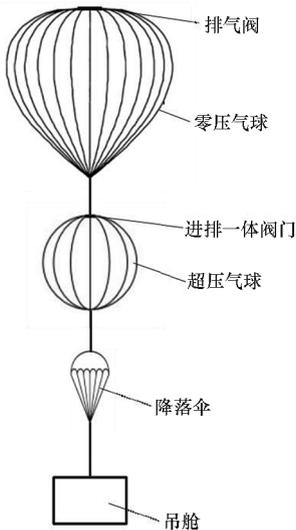


图 1 串联气球系统示意图

Fig. 1 Diagram of the tandem balloon system

国内外关于高空气球形状设计的研究主要集中在大型零压气球和“南瓜形”超压气球领域,针对正球形超压气球的研究很少。气球外形的第一个理论性成果是 Upson 提出的“自然形”气球,现今的高空气球球形大多直接采用“自然形”或以“自然形”为基础进行设计^[11]。在此之前出现过的气球形状均为简单几何体或其组合,如圆柱体、四面体、球顶锥底等^[12]。20 世纪 60 年代,Smalley^[13]在“自然形”气球的基础上对轴对称球形的多个相关问题进行了拓展研究,包括周向应力不为 0 的平顶超压气球。Baginski 与 Winker^[14]讨论了基于“自然形”球形方程组,球膜密度、周向应力、压差等参数的不同取值对应的几种气球模型。李雨航^[15]通过假设气球下半部分球膜周向应力为 0,上半部分从最大截面半径处

到球顶周向应力从 0 单调增加,球顶处周向应力与径向应力相等,得到了“混合形”气球的归一化数值结果。Rand 等^[9]在基于“自然形”球形方程组求解超压气球的球形时,将假设的径向应力作为已知量,周向应力作为待求解的量,得到了具备挂载能力的包含锥形底的气球理论模型。Baginski 等^[16]分析了椭球形顶、锥形底的大型零压气球的球形设计问题。

当球膜强度足够保证耐压性时,理想的正球形超压气球具有其固有的优势,包括最大的体积表面积比、均匀的球膜应力分布等,因此为了适应具体的载荷条件,优化挂载点附近的局部球形有利于保留正球形的部分优势。在以往的研究中,“自然形”零压气球近似锥形的球底通常可以适应底部的挂载条件。然而,对于周向应力不为零的超压气球而言,圆锥与正球形的切点位置存在周向应力不连续的问题,可能会导致球膜过早破坏^[9]。此外,超压气球自由随风飘飞,理论上其飞行速度与所在风场的风速完全一致,在设计球形时不需要考虑气动的问题^[17]。在此基础上,本文提出一种基于“自然形”球形方程组对正球形超压气球的两极进行局部球形优化的方法,得到能够较好地适应双向受拉条件的超压气球球形,采用有限元方法对比球形优化前后的应力分布情况,并分析影响局部球形优化效果的因素。

1 球形数值求解方法

“自然形”球形方程组如式(1)所示。其中: σ_m 为球膜径向应力; σ_c 为球膜周向应力; r 为垂直于回转轴的截面圆半径; θ 为气球母线上任意一点处母线切线与回转轴的夹角; s 为球膜弧长; $w = \rho g$, ρ 为球膜面密度; P 为球内外气体压差; z 为截面圆与球底的距离; V 为气球体积。

$$\begin{cases} r\sigma_m \frac{d\theta}{ds} - \sigma_c \cos\theta + r w \sin\theta + Pr = 0 \\ \frac{d(r\sigma_m)}{ds} - r w \cos\theta - \sigma_c \sin\theta = 0 \\ \frac{dr}{ds} = \sin\theta \\ \frac{dz}{ds} = \cos\theta \\ \frac{dV}{ds} = \pi r^2 \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

假设球底处母线切线与回转轴的夹角为 θ_0 , 载荷重量为 L , 则 $r\sigma_m$ 的初值可由式(2)求得。

$$2\pi r\sigma_m \cos\theta_0 = L \quad (2)$$

只考虑单层均匀球膜时,对于完全膨胀状态

的设计球形, w 、 P 、 L 为定值, 当沿气球母线的周向应力分布已知时, 可以求得特定载荷条件下的气球母线形状和考虑变形时沿气球母线的经向应力分布。方程组(1)是一个一阶非线性隐式常微分方程组, 求解球形即求该微分方程组边值问题的数值解, 运用一般打靶法将其转换为初值问题, 通过不断改变初值进行求解, 使求解终点的边界条件满足, 气球球形由 θ_0 和母线总长度 l_s 决定^[18]。

气球球膜的厚度 t 一般为几十 μm , 用最大横截面直径 D 代表的气球整体尺寸一般在几 m 到几十 m 范围内, $\frac{t}{D} < 10^{-5}$, 符合薄膜无矩理论的适用范围^[17]。根据回转壳体无力矩理论, 式(3)成立。

$$\frac{\sigma_m}{R_1} + \frac{\sigma_c}{R_2} = P + w \sin\theta \quad (3)$$

式中: 气球母线上任意点的第一曲率半径 $R_1 = -\frac{[1 + (dr/dz)^2]^{3/2}}{d^2r/dz^2}$, 第二曲率半径 $R_2 = \frac{r}{\cos\theta}$ 。

高空气球通常使用的球膜材料的抗弯刚度非常小, 而且当存在一定的超压量时, 压差引起的球膜应力远大于球膜自重和底部挂载引起的球膜应力^[17], 结合双向受拉的载荷条件, 超压气球球膜上任意位置均满足 $R_1 > 0$ 和 $\sigma_m > 0$ 。将这两个条件代入式(3)中可得, $\frac{\sigma_c}{R_2} < P + w \sin\theta$ 恒成立, 即

$$\sigma_c < (P + w \sin\theta) \frac{r}{\cos\theta} \text{ 恒成立。}$$

将“自然形”球形方程组中的 $\frac{dr}{ds} = \sin\theta$ 、 $\frac{dz}{ds} = \cos\theta$ 代入 $R_1 = -\frac{[1 + (dr/dz)^2]^{3/2}}{d^2r/dz^2}$ 可得 $R_1 = -\frac{ds}{d\theta}$, 则沿气球母线从球底到球顶 θ 单调递减, 考虑到球膜自重的影响, 在球底处 $\cos\theta$ 取得最小值 $\cos\theta_0$ 。因此, 超压气球的周向应力满足式(4)。

$$\sigma_c < (P + w \sin\theta) \frac{r}{\cos\theta_0} \quad (4)$$

基于上述讨论, 可选的一个周向应力输入条件为

$$\sigma_c = \frac{Pr}{n \cos\theta_0} (n > 1)。$$

超压气球作为串联气球系统的一部分, 其体积是一个重要的系统设计参数, 所以局部球形优化后的超压气球应该与优化前的正球形超压气球保持相同的体积, 从而不影响串联气球系统的整体设计。使用数值方法计算超压气球球形的流程图如图2所示。

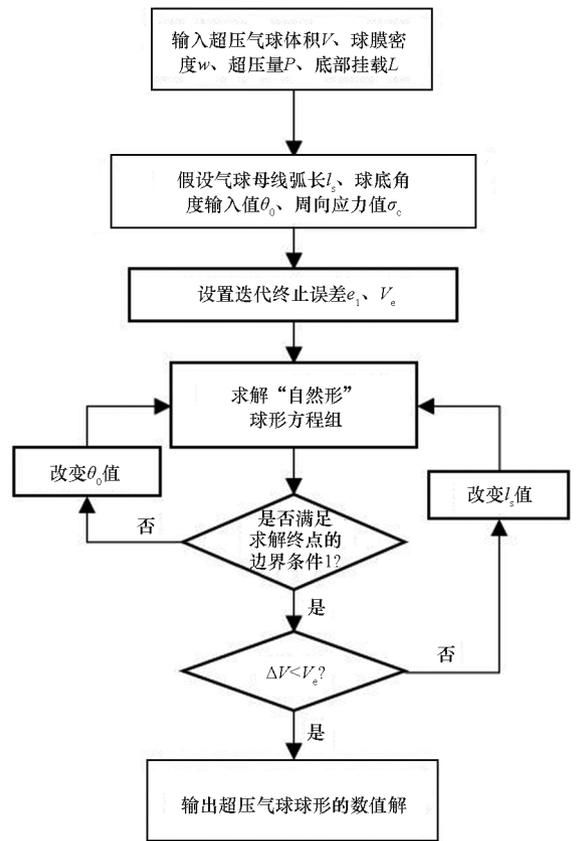


图2 数值求解超压气球球形的流程图

Fig. 2 Flow chart for numerically solving the shape of super-pressure balloon

2 考虑加载条件的局部球形优化

2.1 数值解的边界条件

当图2中“求解终点的边界条件1”为 $s = l_s$ 时, $r = 0$, 则求解结果为考虑双向受拉条件和球膜自重的封闭超压气球整体的母线形状。当周向应力为 $\sigma_c = \frac{Pr}{2 \cos\theta_0}$ 时, 不同球膜面密度和载荷条件对应的数值解超压气球的母线形状如图3所示, 球底和球顶夹角的具体数值见表1, 其中1~8号气球的球膜面密度为 $0.052 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 9~10号气球的球膜面密度为 $0.150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, θ_1 为球顶角度, 图3中气球母线编号与表1一致。

从图3可以看出, 由不同的球膜面密度、压差、挂载输入条件数值求解得到的封闭超压气球的完整母线形状有明显的差别。球膜面密度一定, 且压差较小时, 挂载量对球形的影响更明显, 挂载量越大, 整体球形越细长, 两端越尖; 球膜面密度一定, 且压差较大时, 挂载量越大, 整体球形越扁圆, 两端仍然越尖。相比压差和挂载量的影响, 球膜面密度对整体球形的影响较小。此外, 由表1可得, 不同的输入条件求解得到的完整超压

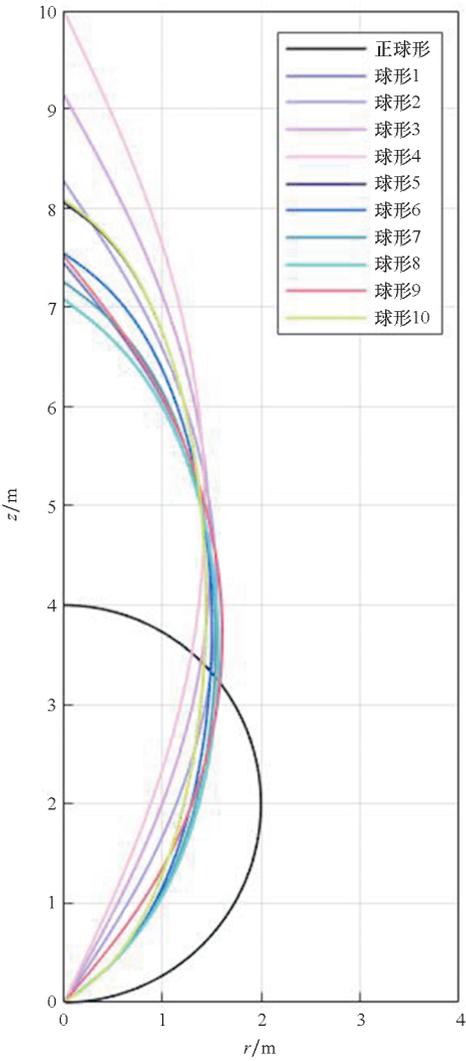


图 3 不同输入条件对应的数值解完整球形母线

Fig. 3 Complete balloon generatrix numerical solutions corresponding to different input conditions

表 1 不同输入条件对应的数值解完整球形的两极角度

Tab. 1 Pole angles of the complete balloon generatrix numerical solutions corresponding to different input conditions

球形编号	P/Pa	L/N	$\theta_0/^\circ$	$\theta_1/^\circ$	$(1 - \theta_1/\theta_0)/\%$
1	100	20	40.759	-40.144	1.509
2	100	30	34.312	-33.947	1.064
3	100	40	29.487	-29.240	0.838
4	100	50	25.855	-25.674	0.700
5	1 000	20	57.048	-56.234	1.427
6	1 000	30	55.934	-55.403	0.949
7	1 000	40	54.874	-54.484	0.711
8	1 000	50	53.851	-53.545	0.568
9	100	20	40.744	-39.024	4.221
10	1 000	20	57.049	-54.776	3.984

气球球形球底和球顶的夹角差均小于 5%，由球膜自重导致的上半球和下半球的不对称性很小，可以忽略不计。因此，对双向受拉的正球形超压气球的两极进行局部球形优化时，可以近似认为整体球形上下对称，仅数值求解球底附近的球形。

此外，分析式(3)可得，沿气球母线曲率半径的突变，会导致球膜应力分布的不连续性，进而影响超压气球的耐压性。因此，需要尽可能使数值求解得到的气球局部母线与圆弧段母线平滑拼接，即在局部球形数值解的终点 $s = l_s$ 处，截面圆半径 r 和夹角 θ 满足 $r = R\cos\theta$ ， R 为圆弧段母线的半径，即局部球形优化前正球形超压气球的半径。相应地，在数值求解局部球形时，图 2 中“求解终点的边界条件 1”为 $r = R\cos\theta$ 。

2.2 局部球形优化数值算例

某串联气球系统中超压气球的设计参数如表 2 所示。

表 2 超压气球设计参数

Tab. 2 Design parameters of super-pressure balloon

设计参数	数值
正球形半径/m	2
正球形体积/m ³	33.510
球膜面密度/(kg·m ⁻²)	0.052
超压量/Pa	1 000
球底挂载/N	50

将 $\sigma_c = \frac{Pr}{2\cos\theta_0}$ 作为周向应力输入条件，假设

数值解母线段弧长为 0.5 m 时，得到的数值解母线段与半径 2 m 的圆弧母线段拼接组成的上下对称的完整球形母线如图 4 所示。相比正球形超压气球，局部球形优化后的超压气球球顶和球底有一定的夹角，理论上能够更好地适应双向受拉条件。

在推导“自然形”球形方程组时，假设条件包括球膜材料是不可延展的，而实际的球膜材料具有一定的延展性，气球在载荷作用下的形状将与设计形状有一定的差距，有限元方法能较好地处理任意形状和载荷条件的气球的几何非线性问题^[19]。因此，本文所涉及的应力分析均采用有限元应力仿真结果。为了验证数值求解局部球形得到的超压气球相比正球形超压气球是否能更好地适应双向受拉条件，将上述拼接气球模型导入有限元仿真软件 Abaqus，球膜材料基本参数如表 3

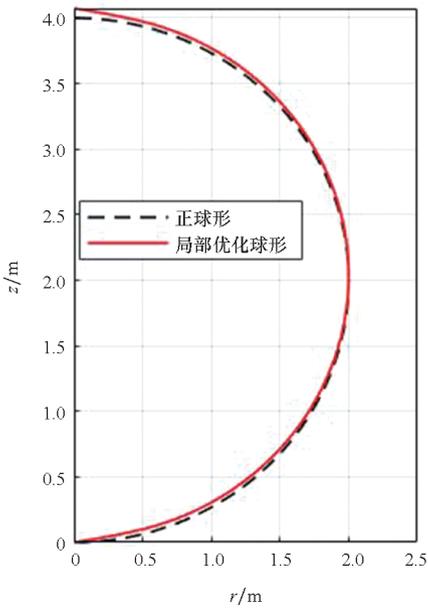


图 4 局部球形优化后的气球母线

Fig. 4 Balloon generatrix after local shape optimization

所示,其他条件与数值求解时超压气球的设计参数保持一致,选择膜单元 M3D4R,采用扫掠算法生成结构网格^[18]。

表 3 有限元仿真的球膜材料参数

Tab. 3 Parameters of membrane materials involved in finite element simulation

材料参数	数值
弹性模量/MPa	1 085
泊松比	0.4
厚度/mm	0.048
密度/(kg · m ⁻³)	1 083.3

由于气球两极截面圆半径趋于 0,球膜经向应力在两极趋于无穷大。为了更明显地对比相同载荷条件下,不同超压气球球形的应力分布情况,参考实际应用中超压气球两极采用的刚性法兰挂载结构,在有限元应力仿真分析时,取法兰直径为 20 cm,用刚性体进行模拟,球顶和球底的载荷和边界条件施加在法兰上。本文所进行的有限元应力分析均采用相同的设置。考虑球膜自重时,超压气球局部球形优化前后的应力分布情况如图 5 所示,图中拼接球形的经向应力曲线在挂载点附近存在一个小的波动,可能与刚性体设置导致的应力集中和数值解球形有关。

分析图 5 可得,正球形超压气球的经向应力在球顶和球底附近急剧增加,是影响气球安全性

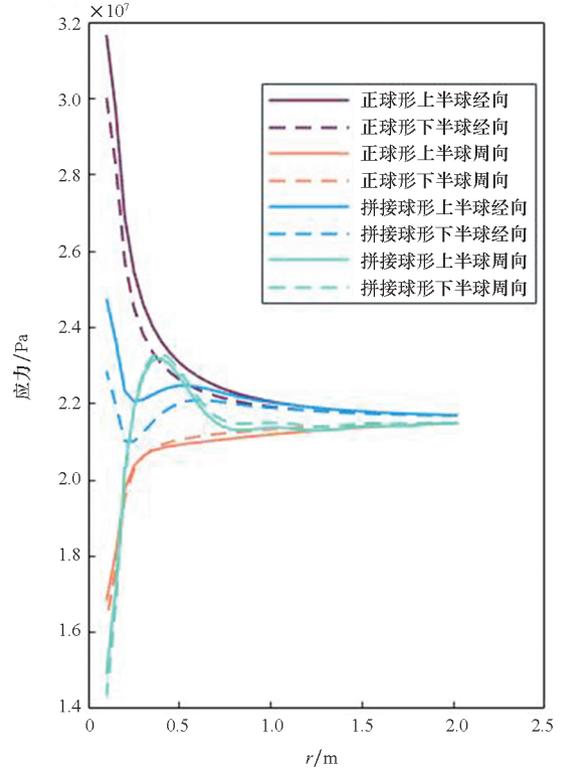


图 5 球形局部优化前后的应力分布

Fig. 5 Stress distributions before and after local balloon shape optimization

的主要因素,在局部球形优化时需要重点考虑。在球膜自重的作用下,上下形状对称的气球上半球的经向应力略大于下半球,由此可以说明双向受拉的超压气球球形上下对称的假设是合理的,且上半球的应力分布可以代表气球整体。相比正球形超压气球,球形母线由“自然形”球形方程组得到的数值解两极与正球形超压气球的中间圆弧段母线平滑拼接得到的超压气球在球底和球顶附近的经向应力均显著减小,虽然以数值解母线段球膜的周向应力增大为代价,但沿气球母线的周向应力最大值和经向应力最大值均远小于正球形超压气球的经向应力最大值。因此,通过数值求解“自然形”球形方程组对正球形超压气球的形状进行优化得到的超压气球更适于双向受拉条件,能够一定程度地缓解挂载区域附近因变形引起的球膜强度问题,上述局部球形优化工作是有效的。

3 影响局部球形优化效果的关键因素

3.1 数值解母线段弧长的影响

在进行局部球形数值求解时,当周向应力输入为 $\sigma_c = \frac{Pr}{2\cos\theta_0}$,圆弧母线段半径为 2 m 时,不同数值解母线段弧长对应的拼接之后的超压气

球母线形状如图 6 所示,受气球体积不变这一条件的限制,数值解部分母线弧长最长为 0.935 m。在相同的载荷和边界条件下,各个球形的超压气球上半球的应力分布情况如图 7 所示。从图 6 和图 7 可以看出,数值解母线弧长对拼接后的整体球形存在明显的影响,随着数值解母线弧长增加,超压气球两极形状更尖,上半球的最大经向应力值减小,最大周向应力值增加,应力分布不连续问题更加突出,但气球整体的最大应力值仍远小于正球形超压气球。因此,从改善超压气球两极应力分布的角度出发,数值解母线弧长应该选较小的值,在实际工程应用中还应该参考球顶和球底安装法兰的尺寸来选择数值解母线段弧长。

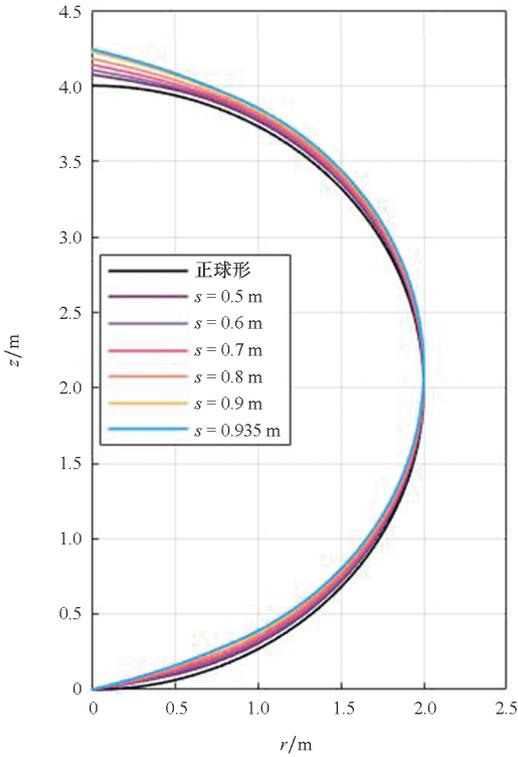


图 6 不同数值解母线段弧长对应的气球母线形状
Fig. 6 Balloon generatrix shapes corresponding to different arc lengths of numerical segment

3.2 周向应力输入条件的影响

上述算例中,数值求解局部球形时输入的周向应力为 $\sigma_c = \frac{Pr}{n \cos \theta_0}$ ($n > 1$),当数值解母线段弧长为 0.52 m 和 0.7 m 时, n 值对数值解母线段与半径 2 m 的圆弧段拼接形成的超压气球的两极夹角的影响如图 8 所示,对球膜应力最大值的影响如图 9 所示。

从图 8、图 9 中可以看出,周向应力输入条件

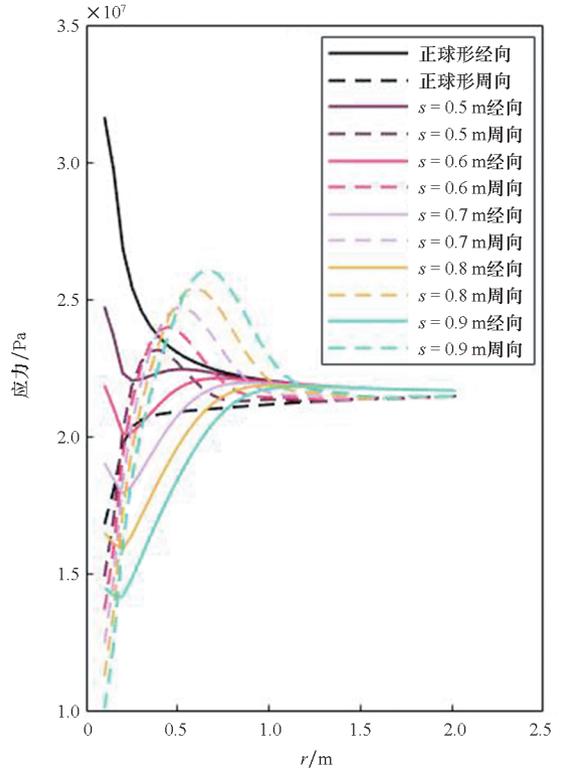


图 7 不同数值解母线段弧长对应球形上半球应力分布
Fig. 7 Stress distributions in the upper hemisphere of balloons corresponding to different arc lengths of numerical segment

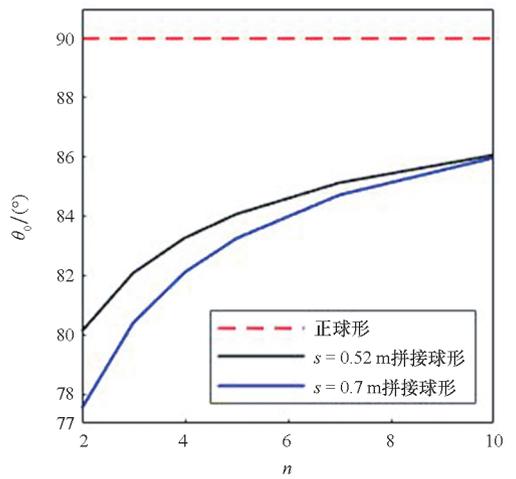


图 8 周向应力输入对两极夹角的影响
Fig. 8 Effect of circumferential stress input on pole angle

$\sigma_c = \frac{Pr}{n \cos \theta_0}$ ($n > 1$) 中 n 值越大,拼接得到的超压气球母线的球底夹角越大,球底越平,球膜的最大经向应力值越大,最大周向应力值越小,最大周向应力值与最大经向应力值的相对大小关系不确定。因此,为了使双向受拉条件下超压气球的应力分布情况更优,即最大应力值更小,周向应力输入条件 $\sigma_c = \frac{Pr}{n \cos \theta_0}$ ($n > 1$) 应该选择较小的 n 值。

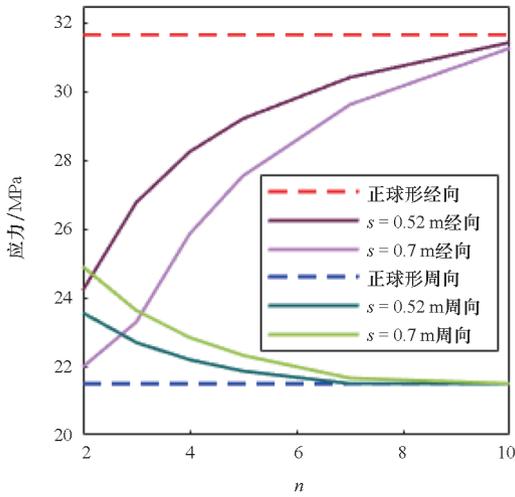


图9 周向应力输入对应力最大值的影响
Fig. 9 Effect of circumferential stress input on stress maximum

3.3 超压气球两极形状的影响

图10和图11展示了当正球形超压气球两极采用锥形和数值解母线旋成时,载荷条件和体积相同的双向受拉超压气球的母线形状和不同球形球顶附近的应力分布。

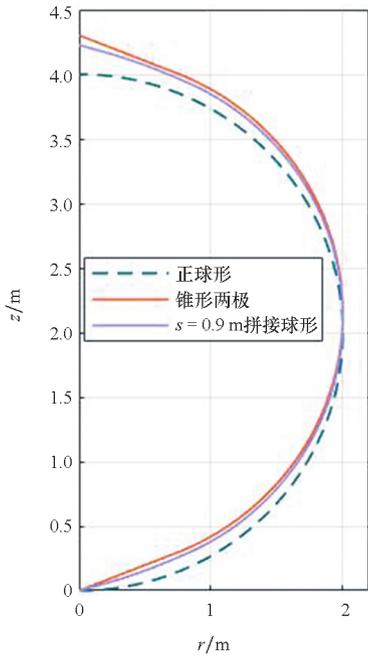


图10 不同两极形状对应的气球母线
Fig. 10 Balloon generatrix shapes corresponding to different polar shapes

从图10、图11中可以看出,当超压气球采用锥形两极来提供挂载点时,在锥形和球形的过渡位置附近周向应力大幅增加,超压气球整体的周向应力最大值明显大于数值解母线段弧长0.9 m对应的拼接超压气球。从超压气球球顶附近的应

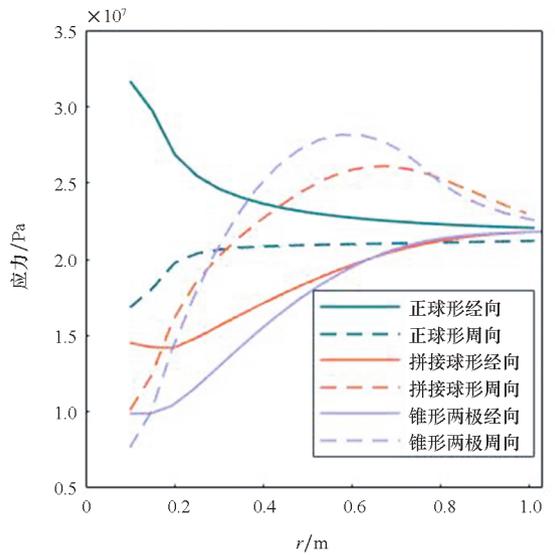


图11 不同球形球顶附近的应力分布
Fig. 11 Stress distributions near the top of super-pressure balloons of different shapes

力分布情况来看,当采用数值求解局部球形的方法来提供挂载点时,球顶附近的周向应力增幅较小,球膜上的应力分布更加均匀,且相比正球形超压气球,采用数值方法优化局部球形后得到的超压气球整体应力最大值显著减小,在双向受拉条件下的应力分布更优。

3.4 圆弧段母线半径的影响

上述为适应双向受拉条件的局部球形优化工作均是在半径2 m的正球形超压气球的基础上进行的,气球中间部分保持不变。由此可以推测,当中间部分球体的半径在适当的范围内减小时,气球局部数值解的终点沿正球形气球母线向中部靠近,仍然可以保持拼接后的气球体积不变。当采用数值方法优化局部球形时的周向应力输入条件为 $\sigma_c = \frac{Pr}{2\cos\theta_0}$ 时,不同圆弧段母线半径对应的球形如图12所示,气球上半球的应力分布如图13和图14所示。

从图12可以看出,当数值解母线段与圆弧母线段拼接后的气球体积与半径2 m的正球形超压气球相同时,圆弧半径对整体球形有明显的影响,随着圆弧半径减小,圆弧母线段越短,气球两极的夹角的绝对值越小,气球整体越高。

分析图13和图14可得,对于不同的圆弧半径,采用该局部球形优化方法得到的拼接球形整体的经向应力分布情况均明显改善,相比正球形超压气球,最大经向应力值显著减小。随着圆弧半径减小,周向应力的不连续性问题更加突出,周

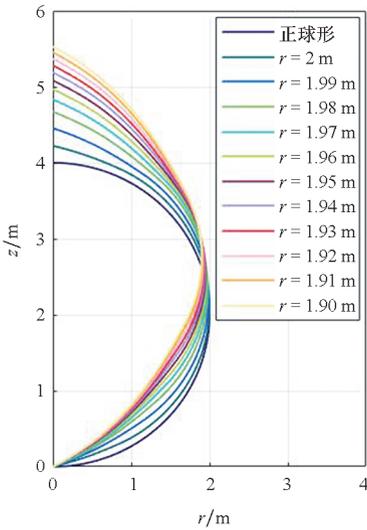


图 12 不同圆弧半径对应的气球母线形状

Fig. 12 Shapes of balloon generatrix corresponding to different arc radii

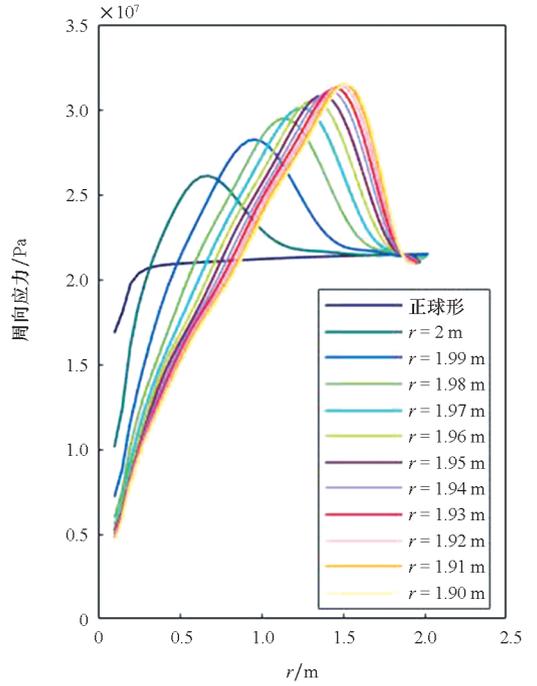


图 14 不同圆弧半径对应球形上半球的周向应力分布

Fig. 14 Circumferential stress distributions in the upper hemisphere of balloons corresponding to different arc radii

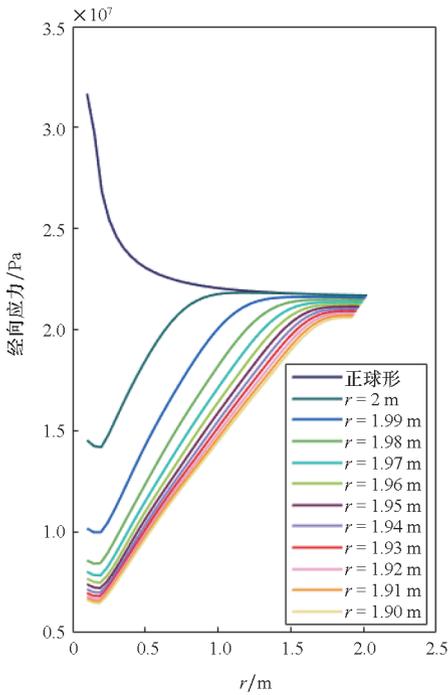


图 13 不同圆弧半径对应球形上半球的经向应力分布

Fig. 13 Meridional stress distributions in the upper hemisphere of balloons corresponding to different arc radii

向应力最大值增大,甚至可能大于正球形超压气球的最大应力值。因此,从改善双向受拉条件下正球形超压气球应力分布的角度来看,母线中间圆弧段的半径取原始正球形的半径更加合理。

4 结论

本文提出了一种基于“自然形”球形方程组,采用数值方法对双向受拉的正球形超压气球挂载点附近球形进行局部优化的方法,得到了母线由

两极数值解与中间的圆弧相切拼接而成的上下对称的超压气球。有限元应力分析结果表明,拼接超压气球在双向受拉条件下的应力分布更优。随后分析了数值解母线段弧长、周向应力输入条件、超压气球两极形状、母线圆弧段半径对局部球形优化效果的影响,结果表明当超压气球的中部仍然为球形时,数值解两极比锥形两极的超压气球应力分布更优,且采用数值方法对正球形超压气球挂载点附近的形状进行优化时,数值解母线段弧长、周向应力输入和气球中部圆弧段半径的选择对应力分布优化效果有明显的影 响,该结果对局部球形优化时关键参数的选择提供了重要参考。

参考文献 (References)

[1] 邓小龙,李魁,于春锐,等. 准零风层新型临近空间浮空器区域驻留性能[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 5-12.
DENG X L, LI K, YU C R, et al. Station-keeping performance of novel near-space aerostat in quasi-zero wind layer [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(1): 5-12. (in Chinese)

[2] 杨晓伟. 风场中平流层飞艇轨迹智能控制方法[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
YANG X W. Intelligent trajectory control methods for stratospheric airships in wind field [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020. (in Chinese)

- [3] 李智斌, 黄宛宁, 张钊, 等. 2020年临近空间科技热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 54-68.
LI Z B, HUANG W N, ZHANG Z, et al. Summary of the hot spots of near space science and technology in 2020 [J]. Science & Technology Review, 2021, 39(1): 54-68. (in Chinese)
- [4] JIANG Y, LV (LYU) M Y, LI J. Station-keeping control design of double balloon system based on horizontal region constraints [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 100: 105792.
- [5] JIANG Y, LV (LYU) M Y, QU Z P, et al. Performance evaluation for scientific balloon station-keeping strategies considering energy management strategy [J]. Renewable Energy, 2020, 156: 290-302.
- [6] SHERIF S, HE W L. New design simulation for a high-altitude dual-balloon system to extend lifetime and improve floating performance [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(5): 1109-1118.
- [7] 林康, 马云鹏, 郑泽伟, 等. 基于副气囊的平流层浮空器高度控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(5): 762-770.
LIN K, MA Y P, ZHENG Z W, et al. Height control of stratospheric aerostat based on secondary airbag [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(5): 762-770. (in Chinese)
- [8] YAJIMA N. Survey of balloon design problems and prospects for large super-pressure balloons in the next century [J]. Advances in Space Research, 2002, 30(5): 1183-1192.
- [9] RAND J L, CRENSHAW J R. Superpressure balloon design [J]. Advances in Space Research, 1996, 17(9): 5-13.
- [10] SMITH M S, RAINWATER E L. Optimum designs for superpressure balloons [J]. Advances in Space Research, 2004, 33(10): 1688-1693.
- [11] 周江华, 金伟城, 李智斌. 高空气球外形计算及通用算法设计[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(4): 17-23.
ZHOU J H, JIN W C, LI Z B. High-altitude balloon shape calculation and general algorithm design [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(4): 17-23. (in Chinese)
- [12] YAJIMA N, IZUTSU N, IMAMURA T. Scientific ballooning: technology and applications of exploration balloons floating in the stratosphere and the atmospheres of other planets [M]. New York: Springer New York, 2009.
- [13] SMALLEY J H. Determination of the shape of a free balloon. balloons with superpressure, subpressure and circumferential stress: and capped balloons [R]. Bedford, Massachusetts: Air Force Cambridge Research Laboratories, Office of Aerospace Research, United States Air Force, 1964.
- [14] BAGINSKI F, WINKER J. The natural shape balloon and related models [J]. Advances in Space Research, 2004, 33(10): 1617-1622.
- [15] 李雨航. 非零周向应力零压式气球球形的确定与应力分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 1986.
LI Y H. Determination of shape and stress analysis of non-zero circumferential stress zero pressure balloon [D]. Beijing: The Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 1986. (in Chinese)
- [16] BAGINSKI F, CHEN Q, WALDMAN I. Designing the shape of a large scientific balloon [J]. Applied Mathematical Modelling, 2001, 25(11): 953-966.
- [17] 祝裕辰. 超压气球球体设计方法研究与仿真[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
ZHU R C. Study and simulation of the design method of super-pressure balloon [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [18] 杨燕初, 张航悦, 赵荣. 零压式高空气球球形设计与参数敏感性分析[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 58-64.
YANG Y C, ZHANG H Y, ZHAO R. Shape design of zero pressure high altitude balloon and sensitivity analysis of key parameters [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(1): 58-64. (in Chinese)
- [19] 卜亚楼, 杨燕初, 蔡榕, 等. 基于弧长法的南瓜型超压气球非线性后屈曲分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(22): 9864-9873.
BU Y L, YANG Y C, CAI R, et al. Nonlinear post-buckling analysis of pumpkin-shaped super pressure balloon based on arc length method [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(22): 9864-9873. (in Chinese)