

文章编号:1674-8190(2014)04-529-05

剩余浮力对系留气球静平衡特性的影响分析

罗战虎

(中国特种飞行器研究所 第七研究室,荆门 448035)

摘要: 在进行系留气球总体方案设计时,剩余浮力的选择直接影响到系留气球气囊和副气囊体积等参数的设计,剩余浮力选择不当将造成研制成本的增加或静平衡特性指标无法实现。因此,对同一系留气球不同剩余浮力,及两种不同体积的系留气球在相同剩余浮力时的静平衡特性进行计算与对比分析。结果表明:对同一体积的系留气球,剩余浮力对系留气球俯仰角、高度损失和水平漂移量影响较大,且剩余浮力越大,其俯仰角、高度损失和水平漂移量越小;随着系留气球体积的增大,剩余浮力对系留气球高度损失和水平漂移量的影响将逐渐减小。

关键词: 剩余浮力;系留气球;静平衡

中图分类号: V273

文献标识码: A

Impact Analysis of Residual Buoyancy for Tethered Balloon Static Equilibrium

Luo Zhanhu

(The Seventh Research Room, China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

Abstract: During tethered balloon preliminary design, the choosing of the residual buoyancy directly affect the parameter design of envelop and ballonnet such as volume. Inappropriate choosing will leading to project cost increasing or cannot achieve equilibrium characteristic. Therefore, the equilibrium characteristic of the same tethered balloon with different residual buoyancy, and two tethered balloon with different volume at the equal residual buoyancy are analyzed and calculated. Results show that the same volume of tethered balloon, residual buoyancy is of greater impact for the pitch angle, height loss and horizontal drift, and the larger the residual buoyancy, the smaller its pitch angle, height loss and horizontal drift. Along with a tethered balloon volume increasing, the impact of the residual buoyancy for height loss and horizontal drift will gradually decrease.

Key words: residual buoyancy; tethered balloon; static equilibrium

0 引言

系留气球是一种利用球体内充入的氦气所产生的浮力来克服其自身重量的浮空飞行器,它依靠系留缆绳实现在空中长时间定点滞空。系留气球系统包括系留气球、系留缆绳组件、锚泊设施及地面综合保障设施等。系留气球具有连续滞空时间长、生存能力强、研制与使用成本低、使用维护方便、适于搭载各种载荷系统等特点,可广泛应用于远距离监视、环境监测、通信中继、突发事件指挥

等^[1-3]。S. Badesha 等^[4]、A. G. Debroa^[5]分析了阻力、下沉气流、系留缆绳长度和大气环境等参数对高空系留气球设计的影响,指出风场是最重要的设计因素;赵攀峰等^[6]研究了系留气球在定常风场中解除系留过程的姿态、高度、水平漂移距离、系留缆绳张力、拉出速度、系留缆绳长度和弯曲程度等参数的瞬态变化情况;D. A. Grant 等^[7]、史献林等^[8]研究了系留气球在定常风场中升空过程运动轨迹变化情况;而 J. J. Vorachek 等^[9]、张向强等^[10]和贾重任^[11]则通过仿真计算分析了系留气球定点系留过程中的动稳定性。上述研究表明了系留气球在不同状态下的稳定性均较好。杨雯等^[12]研究了高海拔地区环境对系留气球的剩余浮力(系留气球的总浮力与总重量之差)、主副气囊的内外压差以

收稿日期:2014-05-14; 修回日期:2014-08-05

通信作者:罗战虎, lzhyaa605@163.com

及平台系统其他因素的影响。以上均从外界环境对系留气球的影响进行了介绍,而关于剩余浮力等系留气球本体特性参数对系留气球的影响目前还没有公开发表的研究成果。通常情况下,搭载于系留气球上的任务设备对系留气球定点系留过程中的静平衡特性(高度损失、水平漂移量)均有明确的要求。而在进行系留气球总体方案设计时,在系留气球空重一定的情况下,剩余浮力的大小将直接影响系留气球气囊和副气囊体积大小,若设计的剩余浮力过大,将造成系留气球气囊体积增大,从而造成系留气球研制成本^[13]和使用维护成本的大幅增加;若设计的剩余浮力过小,则无法满足任务设备的相关指标要求。

本文首先简介系留气球静平衡特性的计算方法,并通过两种不同体积的系留气球在不同剩余浮力系数下系留气球静平衡特性的计算与分析,研究剩余浮力对系留气球静平衡特性的影响规律,以期对系留气球总体方案的初步设计提供参考依据。

1 系留气球静平衡特性计算方法

为了便于进行系留气球静平衡特性的理论分析,本文在推导系留气球的静平衡计算模型时,作了以下基本假设:①地面是静止不动的平面,重力不随高度变化;②系留气球是刚性体;③缆绳重量放在缆绳张力中考虑;④风速始终保持水平方向且风速不随高度变化。

1.1 球体纵向静平衡方程

系留气球受力分析如图1所示^[11]。

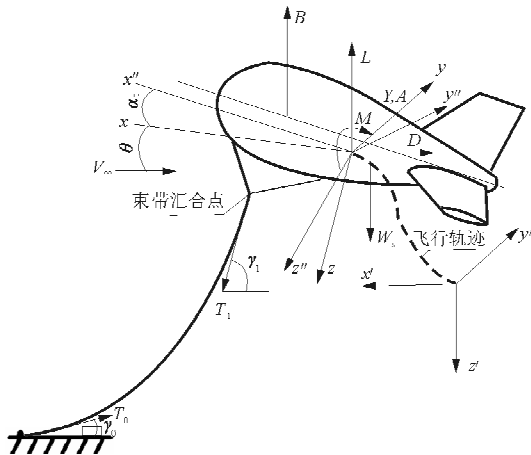


图1 系留气球受力分析

Fig. 1 Schematic of tethered balloon stress analysis

通过对系留气球进行受力分析,可得系留气球

纵向静平衡方程^[11]为

$$\frac{\rho v_{\infty}^2 S}{2} C_D - T_1 \cos \gamma_1 = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\rho v_{\infty}^2 S}{2} C_L + B - W_s - T_1 \sin \gamma_1 = 0 \tag{2}$$

$$-\frac{\rho v_{\infty}^2 S \bar{c}}{2} C_M + h_{k_1} T_1 \sin \gamma_1 - h_{k_2} T_1 \cos \gamma_1 - M_{s_2} = 0 \tag{3}$$

式中: ρ 为大气密度; v_{∞} 为风速; S 为参考面积; \bar{c} 为参考长度; T_1 为缆绳上端拉力; γ_1 为缆绳上端角; B 为系留气球浮力; W_s 为系留气球结构重量; h_{k_1} 和 h_{k_2} 分别为系留缆绳铰链点到系留气球重心的水平距离和垂直距离; M_{s_2} 为由重量和浮力在垂向产生的合力矩。

将方程(1)和方程(2)代入方程(3),消除缆绳张力(T_1)和 γ_1 ,便得出以下平衡方程:

$$h_{k_1} \left(\frac{\rho v_{\infty}^2 S}{2} C_L + B - W_s \right) - h_{k_2} \left(\frac{\rho v_{\infty}^2 S}{2} C_D \right) - \frac{\rho v_{\infty}^2 S \bar{c}}{2} C_M - M_{s_2} = 0 \tag{4}$$

由于空气动力系数 C_L 、 C_D 和 C_M 是平衡攻角(α_t)的已知函数,方程(4)可用牛顿迭代法求解以获得不同风速下的 α_t 。进而通过方程联立求解方程(1)~方程(3),可得 T_1 和 γ_1 。

1.2 缆绳静平衡方程

缆绳坐标系和作用于缆绳上的力如图2所示^[11]。

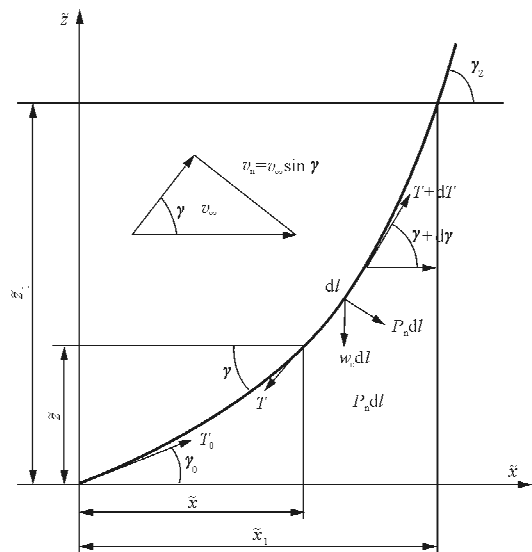


图2 缆绳坐标系和作用于缆绳上的力

Fig. 2 Cable coordinate system and the forces acting on the cable

作用于 dl 长度的缆绳单元上的力有张力 (T)、缆绳重量 ($w_c dl$) 和垂直于缆绳的缆绳阻力 ($P_n dl$)。沿着缆绳的阻力在本分析中没有考虑。每单位长度的法向阻力 (P_n) 取决于垂直于缆绳的风速分量 (v_n)、缆绳阻力系数 (C_{DC}) 和缆绳直径 (d_c)，用表达式可表示为

$$P_n = C_{DC} d_c \frac{1}{2} \rho v_n^2 \quad (5)$$

若只保留一阶无穷小项，缆绳单元上的阻力可表示为

$$P_n dl = n dl \sin^2 \gamma \quad (6)$$

式中： $n = C_{DC} d_c \frac{1}{2} \rho v_\infty^2$ 。

$P_n dl$ 为垂直于风的缆绳单位长度阻力， x 和 z 向力求和并只保留一阶项，那么可得出

$$P_n dl \sin \gamma - T dy \sin \gamma + dT \cos \gamma = 0 \quad (7)$$

$$-w_c dl - P_n dl \cos \gamma + T dy \cos \gamma + dT \sin \gamma = 0 \quad (8)$$

组合方程(5)~方程(9)，得出

$$dT = w_c dl \sin \gamma \quad (9)$$

$$T dy = (n \sin^2 \gamma + w_c \cos \gamma) dl \quad (10)$$

方程(9)和方程(10)相除可得

$$\frac{dT}{T} = \frac{2 \bar{p} \sin \gamma}{\sin^2 \gamma + 2 \bar{p} \cos \gamma} dy \quad (11)$$

式中： $\bar{p} = \frac{w_c}{2n}$ 。

若将 $f = \cos \gamma$ 和因式分解代入方程(11)，则可得

$$\frac{dT}{T} = -\frac{\bar{p}}{\bar{q}} \left(\frac{df}{\bar{q} + \bar{p} - f} + \frac{df}{\bar{q} - \bar{p} + f} \right) \quad (12)$$

式中： $\bar{q} = \sqrt{1 + (\bar{p})^2}$ 。

因此，缆绳长度(l)可表示为

$$T = \frac{T_1 \tau}{\tau_1} \quad (13)$$

式中： $\tau(\gamma) = \left(\frac{\bar{q} + \bar{p} - \cos \gamma}{\bar{q} - \bar{p} + \cos \gamma} \right)^{\bar{p}/\bar{q}}$ 。

假设缆绳长度(l)、单位长度阻力(n)、单位长度重量(w_c)、上端张力(T_1)和上端角(γ_1)是已知的。缆绳上端的坐标 x_1 和 z_1 、下端张力(T_0)和下端角(γ_0)计算方法如下：

将方程(12)~方程(13)代入方程(10)，可得出

$$dl = \frac{T_1}{n \tau_1} \frac{\tau}{\sin^2 \gamma + 2 \bar{p} \cos \gamma} dy \quad (14)$$

因此，缆绳长度(l)可表示为

$$l = \frac{T_1}{n \tau_1} (\bar{\lambda}_1 - \bar{\lambda}_0) \quad (15)$$

式中： $\bar{\lambda}(\gamma) = \int_0^\gamma \frac{\tau(\gamma)}{\sin^2 \gamma + 2 \bar{p} \cos \gamma} dy$ 。

$\bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda}(\gamma_0)$ ，并且 $\bar{\lambda}_1 = \bar{\lambda}(\gamma_1)$ 。角 γ_0 是未知数，但可以通过求解方程(15)得出

$$\bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda}_1 - \frac{n \tau_1 l}{T_1} = \int_0^{\gamma_0} \frac{\tau(\gamma)}{\sin^2 \gamma + 2 \bar{p} \cos \gamma} dy \quad (16)$$

对于未知的积分限 γ_0 ，可用牛顿迭代法求解该方程。在 γ_0 为已知数时，使用方程(13)和方程(15)，便得出

$$T_0 = T_1 \frac{\tau_0}{\tau_1} \quad (17)$$

式中： $\tau_0 = \tau(\gamma_0)$ 。

从图 2 可以看出， $dx = dl \cos \gamma$ 。将方程(14)代入此表达式，可得

$$dx = \frac{T_1}{n \tau_1} d\sigma \quad (18)$$

式中： $d\sigma = \frac{\tau \cos \gamma}{\sin^2 \gamma + 2 \bar{p} \cos \gamma} dy$ 。

对式(18)数值积分，可得

$$\bar{x}_1 = \frac{T_1}{n \tau_1} \int_{\gamma_0}^{\gamma_1} d\sigma \quad (19)$$

最后，由图 2 和方程(9)可得

$$dz = dl \sin \gamma = \frac{dT}{w_c} \quad (20)$$

对式(20)数值积分，可得

$$\bar{z}_1 = \frac{T_1 - T_0}{w_c} \quad (21)$$

至此，可解出衡量系留气球静平衡特性的主要指标参数水平漂移量 \bar{x}_1 和高度 \bar{z}_1 。

2 剩余浮力对静平衡特性的影响分析

两种系留气球型号及计算状态如表 1 所示，下文计算和分析其在不同剩余浮力状态下的静平衡特性。

表 1 型号及计算状态

Table 1 Models and computing status

型号	体积/m ³	结构重量/kg	升空海拔高度/m	剩余浮力/%
A	3 200	1 300	2 100	18.1, 14.6, 11.0,
B	6 000	2 361	2 100	7.2, 2.9, 0

2.1 剩余浮力对同一体积系留气球的影响

针对系留气球 A 在不同剩余浮力时的静平衡特性进行计算,不同剩余浮力时的俯仰角相对于剩余浮力最大(剩余浮力系数为18.1%)时的差值随风速变化曲线如图 3 所示。

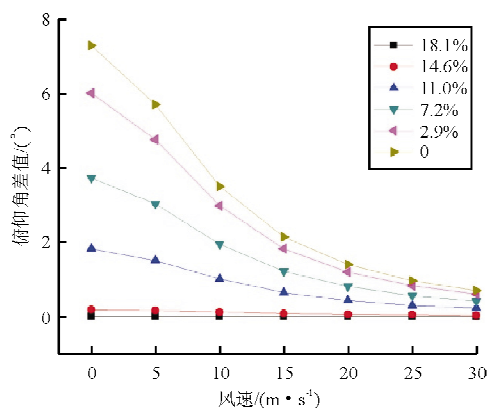


图 3 型号 A 在不同剩余浮力下的俯仰角差值随风速变化
Fig. 3 Pitch angle with different residual buoyancy under different wind speed of the model A

从图 3 可以看出:剩余浮力小于 14.6%、风速小于 20 m/s 时,系留气球俯仰角受剩余浮力的影响较大,且剩余浮力越大,其俯仰角越小,原因是此时系留气球自身重量和浮力引起的俯仰力矩起主导作用,而由风速引起的气动力矩作用较小;风速大于 20 m/s 时,不同剩余浮力下的俯仰角差值较小,这是由于随着风速的增加,气动力矩开始起主导作用,且系留气球在此时几乎已达到力矩平衡。

不同剩余浮力时的高度损失和水平漂移量相对于剩余浮力最大(剩余浮力系数为18.1%)时的差值随风速变化曲线如图 4~图 5 所示。

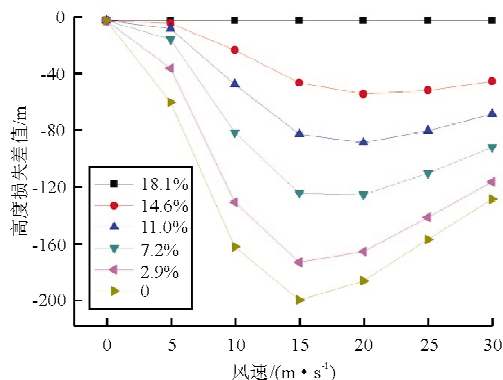


图 4 型号 A 在不同剩余浮力下的高度损失差值随风速变化
Fig. 4 Height loss with different residual buoyancy under different wind speed of the model A

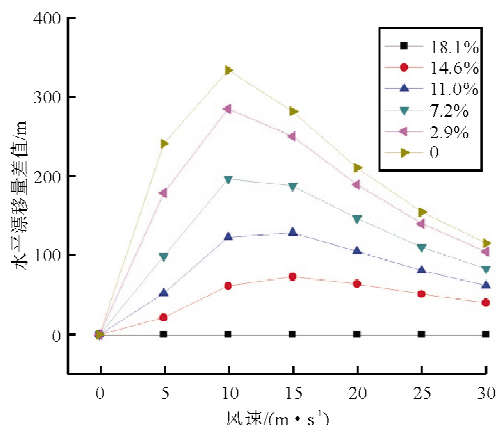


图 5 型号 A 在不同剩余浮力下的水平漂移量差值随风速变化

Fig. 5 Drift with different residual buoyancy under different wind speed of the model A

从图 4~图 5 可以看出,剩余浮力越小,其高度损失和水平漂移量越大,由此可知剩余浮力在系留气球高度损失和水平漂移量的变化中起主要作用;在风速大于 15 m/s 时,不同剩余浮力下的高度损失差值和水平漂移量差值逐渐减小,原因是在风速 15 m/s 左右气动力与剩余浮力大小几乎一致,而在风速大于 15 m/s 时,气动力不断增加以致逐渐大于剩余浮力。

由以上分析可知,对同一体积的系留气球,剩余浮力对静平衡特性的影响特点如下:①剩余浮力对俯仰角的影响较大,但随着风速增大,由于气动力矩的增加,剩余浮力对俯仰角的影响将逐渐减小;②剩余浮力对系留气球高度损失和水平漂移量影响也较大,且剩余浮力越大,其高度损失和水平漂移量越小,在风速为 10~20 m/s 时的影响最明显。

多数情况下,系留气球在作战过程中遇到的空中风速处于 10~20 m/s 之间,因此如果任务设备对系留气球的高度损失和水平漂移量有较高的指标要求,则可适当提高系留气球的剩余浮力以提高其静平衡特性,但同时考虑到系留缆绳载荷限制,一般建议剩余浮力取 10%~15% 较为合适。

2.2 剩余浮力对两种不同体积系留气球的影响

针对气动布局相似、体积不同的两种系留气球(型号 A 和型号 B)在剩余浮力相同时的静平衡特

性进行计算。两种体积的系留气球在相同剩余浮力下的俯仰角、高度损失和水平漂移量对比曲线如图 6~图 8 所示。

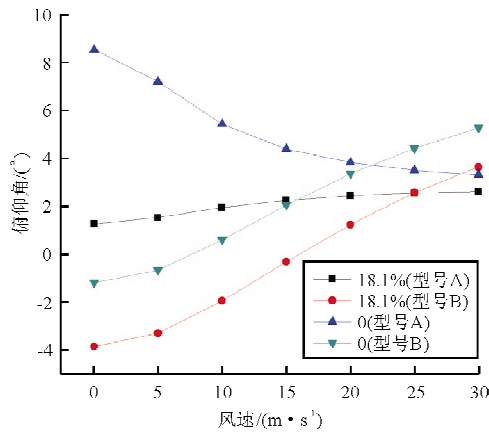


图 6 两种体积的系留气球在相同剩余浮力下的俯仰角对比
Fig. 6 Pitch angle comparison of two tethered balloon with different volume at the equal residual buoyancy

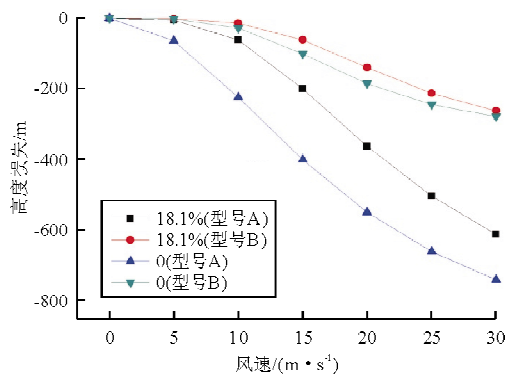


图 7 两种体积的系留气球在相同剩余浮力下的高度损失对比
Fig. 7 Height loss comparison of two tethered balloon with different volume at the equal residual buoyancy

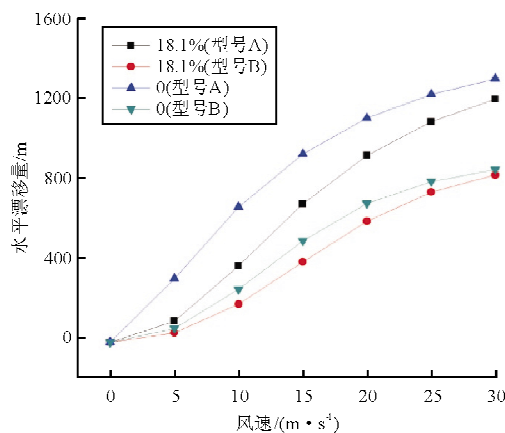


图 8 两种体积的系留气球在相同剩余浮力下的水平漂移量对比

Fig. 8 Drift comparison of two tethered balloon with different volume at the equal residual buoyancy

从图 6~图 8 可以看出,系留气球体积较大时,其高度损失和水平漂移量受剩余浮力的影响较小,其主要影响因素为风速;而体积较小时,系留气球受剩余浮力和风速的影响均较大,在进行方案设计时,剩余浮力的设计将对系留气球静平衡特性起决定作用。

3 结 论

(1) 对同一体积的系留气球,剩余浮力对系留气球俯仰角、高度损失和水平漂移量影响较大,且剩余浮力越大,其俯仰角、高度损失和水平漂移量越小。

(2) 随着系留气球体积的增大,剩余浮力对系留气球高度损失和水平漂移量的影响将逐渐减小。

(3) 在进行总体方案设计时,较小体积的系留气球其剩余浮力取值需要重点考虑。而对于较大体积的系留气球,考虑充氦量等因素,其剩余浮力的设计取值可适当降低以提高经济性。

参考文献

[1] 潘峰, 王林强, 袁飞. 美国系留气球载预警系统的发展现状及趋势分析[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(5): 32-35.
Pan Feng, Wang Linqiang, Yuan Fei. Analysis on developing status and trend of American tethered balloon-borne early warning system[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2010, 33(5): 32-35. (in Chinese)

[2] John A Krausman, The 38MTM aerostat; a new system for surveillance[C]. AIAA-2005-7443, 2005.

[3] Clark Richard D. Boundary layer research using the Millersville University tethered balloon facility [C]. AIAA-99-3916, 1999.

[4] Badesha S, Euler A, Schroeder L. Very high altitude tethered balloon parametric sensitivity study [C]. AIAA-96-0579, 1996.

[5] Debroa A G. Analysis of high tethered aerostat flight dynamics[C]. AIAA-96-0578, 1996.

[6] 赵攀峰, 王永林, 薛松海. 系留气球系统三拉索收放状态建模与仿真[J]. 航空工程进展, 2011, 2(3): 255-259.
Zhao Panfeng, Wang Yonglin, Xue Songhai. Modeling and simulation of the launch and recovery state of three guy cables of the tethered aerostat system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(3): 255-259. (in Chinese)

[7] Grant D A, Rand J L. Dynamic analysis of an ascending high altitude tethered balloon system[R]. AIAA-96-0578, 1996.

- Reinforced Plastics and Composites, 1993, 12(10): 1043-1057.
- [2] Seng C Tan. A progressive failure model for composite laminates containing openings[J]. Journal of Composite Materials, 1991(25): 556-577.
- [3] Camanho P P, Matthews F L. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33(24): 2248-2280.
- [4] Wagner W, Balzani C. Simulation of delamination in stringer stiffened fiber-reinforced composite shells[J]. Computers and Structures, 2008, 86(9): 930-939.
- [5] Turon A, Camanho P P, Costa J, et al. A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38: 1072-1089.
- [6] 张璐. 含分层缺陷复合材料层合板分层扩展行为与数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Zhang Lu. Numerical analysis and experimental study on propagation behavior of laminated composite plates with embedded delamination[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] Abaqus analysis user's manual[M]. version 6. 8. USA: ABAQUS, Inc., 2008.
- [8] Alfano G. On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(6): 723-730.
- [9] Turon A, Davila C G, Camanho P P, et al. An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74(10): 1665-1682.
- [10] Jose Sancho, Antonio Miravete. Design of composite structures including delamination studies[J]. Composite Structures, 2006, 76(4): 283-290.
- [11] 王丹勇. 层合板接头损伤失效与疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
Wang Danyong. Research on prediction of damage failure and fatigue life for composite bolted joints[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [12] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
Zhao Qusen. Advanced composite manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:

郭子昂(1988—),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构连接设计与分析。

万小朋(1962—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞机结构设计与分析、复合材料结构设计与分析、复合材料结构损伤诊断技术等。

李波(1986—),男,博士研究生。主要研究方向:复合材料飞机结构设计与分析。

(编辑:马文静)

(上接第 533 页)

- [8] 史献林,余莉,施红. 系留气球升空过程的动态模拟[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 609-613.
Shi Xianlin, Yu Li, Shi Hong. Dynamic simulation of ascending tethered balloon[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 609-613. (in Chinese)
- [9] Vorachek J J, Burbick W, Doyle G R. Investigation of dynamic behavior of tethered balloon systems[C]. AFCRI-72-0113, 1972.
- [10] 张向强,顾逸东,姜鲁华. 系留气球时域响应分析[J]. 北京: 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1015-1018.
Zhang Xiangqiang, Gu Yidong, Jiang Luhua. Time-domain response analysis of a tethered aerostat[J]. Beijing: Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(9), 1015-1018. (in Chinese)
- [11] 贾重任. 系留气球纵向稳定性分析[J]. 飞机设计, 2006(9): 20-24.
Jia Zhongren. Analysis of longitudinal stability for tethered aerostat[J]. Aircraft Design, 2006(9): 20-24. (in Chinese)
- [12] 杨雯,高秉亚,刘兴兵. 高海拔地区环境特性对系留气球系统的影响[J]. 现代雷达, 2010, 32(1): 7-9.
Yang Wen, Gao Bingya, Liu Xingbing. Effect of environment of high altitude region on tethered aerostat system[J]. Modern Radar, 2010, 32(1): 7-9. (in Chinese)
- [13] Wilcox Brian H, Schneider Evan G, Vaughan David A, et al. Low-cost propellant launch to LEO from a tethered balloon-economic and thermal analysis[C]. Aerospace Conference, 2010 IEEE.

作者简介:

罗战虎(1982—),男,工程师。主要研究方向:浮空器及水面飞行器总体气动设计、飞行力学。

(编辑:赵毓梅)