

# 近地面系留气球—缆绳复杂系统动力学建模方法\*

胡小金<sup>1</sup> 舒欣<sup>1</sup> 赖贞华<sup>1</sup> 唐茂<sup>2</sup> 潘勇军<sup>2†</sup>

(1. 中国特种飞行器研究所, 荆门 448035)

(2. 重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

**摘要** 为探究系留气球在近地面工作时缆绳系统以及整体动力学响应特性,提出了一种系留气球—缆绳复杂系统动力学建模方法.通过将系留缆绳离散为若干圆柱型刚体,并以轴套力进行连接,描述系留缆绳的柔性多体特性,对系留气球系统在稳态风环境、风廓线环境以及阵风环境下进行了系统动力学建模与仿真.开展了系留气球系统结构以及环境参数对系留气球运动姿态的影响量化分析.研究表明,600 米高度的系留气球在相同外部载荷下,系留缆绳分段数为 320 段时,系统的运动响应特性较为理想.

**关键词** 系留气球, 系留缆绳, 动力学建模, 柔性多体系统, 轴套力

**中图分类号**:TH131

**文献标志码**:A

## Dynamics Modeling of a Near-ground Tethered Balloon Cable System\*

Hu Xiaojin<sup>1</sup> Shu Xin<sup>1</sup> Lai Zhenhua<sup>1</sup> Tang Mao<sup>2</sup> Pan Yongjun<sup>2†</sup>

(1. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

(2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing 400044, China)

**Abstract** It is difficult to perform dynamics modeling of tethered balloon system due to the flexibility of the cables and the complexity of the gust forces. In this work, we propose a novel modeling method for near-ground tethered balloon system to analyze its dynamic responses while considering complicated boundary conditions. The proposed dynamics model can describe the characteristics of the flexible cable when it suffers large translations and bending. A three-dimensional dynamics model to deal with the coupling of the tethered balloon system and flexible cables is developed based on the multibody dynamics theory. The dynamic responses of the tethered balloon system under complicated operating conditions are investigated. Finally, how the critical parameters affect the dynamic responses of the tethered balloon system is explored in details. The results indicate that the proposed dynamics modeling method of the tethered balloon system is effective. The motion responses of the system are the most stable when a 600 meter high tethered balloon has 320 segments of tethered cables under the same external loads.

**Key words** tethered balloon, tethered cable, dynamics modeling, flexible multibody system, bushing force

### 引言

系留气球是一种新型的浮空平台,在灾后无线

通信救援、科学观察以及气候观测方面应用广泛<sup>[1-3]</sup>.相比较于传统飞行装置,系留气球具有驻空时间长,耗能少以及成本低等优势<sup>[4,5]</sup>.近年来美

2023-09-08 收到第 1 稿,2023-10-02 收到修改稿.

\* 国家自然科学基金资助项目(12072050), National Natural Science Foundation of China (12072050).

† 通信作者 E-mail:yongjun.pan@cqu.edu.cn

国、日本、韩国、中国等国家都对系留气球开展了大量研究<sup>[4,6]</sup>。高空系留气球载荷能力强,但随风自由飘飞,应用受限于高空风场和航管<sup>[2,7]</sup>。

平流层无雨雪天气,大气垂直运动微弱,是长航时飞行器的理想飞行环境,但同时平流层大气密度低,大气压强小,飞行器面临的挑战严峻<sup>[8]</sup>。对流层空气流速变化大,且天气环境更加恶劣,因此,分析系留气球及其缆绳系统在对流层中的运动响应有助于了解系留气球受载的姿态变化情况,对于提高系留气球稳定性、延长航行时间十分重要。作为将系留气球锚泊于地面的关键性部件,系留缆绳对系留气球姿态变化的运动响应不可忽略。且系留气球的缆绳较长,跨度风场范围大,受力复杂,水平风阻积分效果明显<sup>[6]</sup>,因此,系留缆绳的运动响应将会直接影响系留气球的运动姿态。

系留气球系统的设计是一项交织多门学科的复杂工程问题,近年来由于计算机技术的发展,多体系统动力学方法、有限元方法、计算流体力学方法等被广泛应用于机械工程、航空航天以及船舶领域<sup>[9-12]</sup>。其中多体系统动力学方法对于分析复杂多体系统的运动响应特性具有独特优势,因此,多体系统动力学方法为评估系留气球在不同环境下的响应提供了一种有效的解决方案。

本文基于多体系统动力学理论,将系留缆绳离散为多段有质量的刚体。不同与传统的球铰连接方式,我们采用轴套力模型连接各刚体,研究系留缆绳多刚体系统与系留气球浮空平台耦合运动响应问题。建立平均风廓线以及离散阵风模型,作为外载荷施加到系留气球—缆绳系统,开展动力学仿真分析及运动响应评估,并初步验证所建立的动力学模型的有效性;同时深入分析了系留缆绳离散段数对系统运动响应的影响。

全文组织结构如下,在第一节中,阐述并建立了系留缆绳的离散多刚体系统模型,并推导了系统动力学方程和轴套力计算公式。在第二节中,引入了系留气球的线性化气动力公式,确定了系留气球系统工作的风廓线和阵风环境,建立了系留气球—缆绳的复杂动力学模型。第三节系统性地分析了不同工作环境下系留气球—缆绳系统的运动响应,包括气球以及缆绳的姿态角和各方向的位移变化情况。第四节总结了系留气球—缆绳系统动力学仿真结果,并对影响系留气球运动的部分因素进行了探讨。

## 1 系留缆绳多体系统动力学建模

### 1.1 缆绳系统建模方法

系留缆绳作为绳索系统的一种,其动力学建模的研究已经开展了多年。不同类型的绳索系统建模方法从效率与精度上存在一定差异。Shabana总结了其中的浮动坐标系法、对流坐标系法、有限线段法和大旋转矢量法等,但仅限于建立2D的缆绳动力学模型<sup>[13-15]</sup>。Xu对绳索系统的建模方法进行了分析与比较,缆绳系统动力学建模方式已经从二维平面拓展到三维空间<sup>[16]</sup>。

离散多刚体—铰链模型是目前应用非常广泛的缆绳系统动力学模型。多刚体—铰链模型会使得绳索系统轴向拉伸力集中于系留缆绳底部固定点,在绳索变形较小的情况下是十分有效的,但是当绳索弯曲程度明显增大时会导致模型的求解时间大幅增长,甚至无法收敛。综合考虑模型的计算效率与收敛性,本文提出了一种离散多刚体—轴套力耦合建模方法。

轴套力模型起源于汽车悬架领域的研究,作为球铰副的等效形式,在其三个平移运动方向和三个转动方向均设置为弹簧模型<sup>[17-19]</sup>,如图1所示。值得注意的是,这种建模方式虽能够一定程度上体现绳索6自由度上运动学和动力学相关特性,但是并没有将绳索的变形特性考虑在内。有限元法是另一种能够很好地体现其变形特性的方法,但是在位移—大旋转情况下因网格畸变而产生的精度和收敛性问题阻碍了其在系留缆绳领域的应用。本文侧重于多体系统运动响应特性的研究,因此缆绳自身的变形特性可以忽略。

### 1.2 缆绳系统模型参数

缆绳材料为高强度凯夫拉纤维,密度为 $1.45 \text{ g/cm}^3$ ,弹性模量为 $110 \text{ GPa}$ ,泊松比为 $0.27$ ,与气球部分相连接的缆绳直径为 $16 \text{ mm}$ ,与地面系留缆绳直径为 $20 \text{ mm}$ ,缆绳总长度为 $620 \text{ m}$ 。在本文中,主要讨论近地面系留气球的运动响应特性,故升空高度最大限制在 $600 \text{ m}$ 。

每根缆绳离散段数并不是相同的,几何建模输入参数为缆绳两端的位置、方向、凯夫拉纤维的材料特性(如弹性模量、泊松比、密度等)。全局坐标系

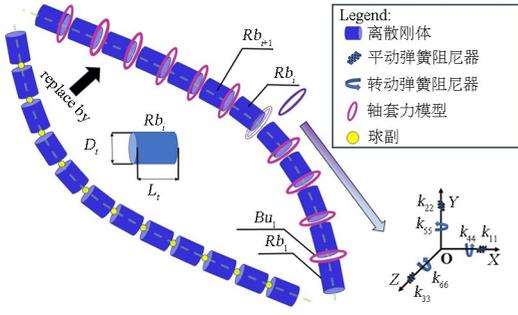


图1 缆绳系统模型图

Fig. 1 Cable system model diagram

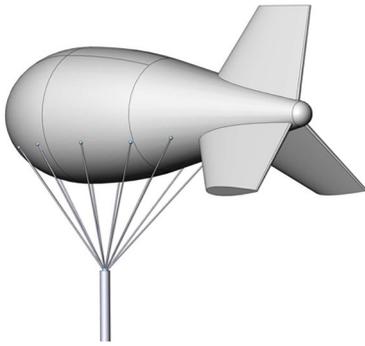


图2 系留气球—缆绳系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the tethered balloon—cable system

设定为:  $X$  正方向为系留气球纵向对称面内指向尾翼方向,  $Y$  正方向为气球上升方向,  $Z$  方向为气球偏航方向, 利用程序化语言在 Adams View 中建立相关几何模型, 如图 2 所示.

缆绳建模的基本假设为: ①离散化绳段均视为刚体, 不考虑变形情况. ②缆绳分段后呈类链状, 离散刚体之间采用柔性连接, 故系统整体为由柔性连接组成的多刚体系统, 如图 1 所示. 缆绳上端与气球连接处需添加球铰副, 保证气球与绳段工作过程中不分离. 绳索系统的漏斗部分 12 根缆绳尾端以球铰副与地面系留缆绳相连接, 如图 2 所示. 缆绳与地面采用球铰副连接.

### 1.3 缆绳系统动力学方程

图 1 所展示的缆绳系统被切分为数段,  $Rb_i$  表示第  $i$  段刚体, 每段刚体的直径与长度分别为  $D_i$ ,  $L_i$ ,  $Bu_i$  表示第  $i$  个轴套力模型,  $k_{11}$  到  $k_{66}$  表示轴套力模型中刚度系数矩阵主对角线上的值. 根据拉格朗日动力学方程, 图 1 左侧的球铰副—缆绳系统的动力学方程可以写为:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{X}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{X}} + \Phi_x^T = \mathbf{F} \quad (1)$$

$$L = T - V \quad (2)$$

其中,  $L$  为拉格朗日量,  $\mathbf{X}$  为缆绳系统的广义坐标矩阵,  $\Phi$  为约束方程的雅可比矩阵,  $\mathbf{F}$  为广义力矩阵,  $T$  为系统动能,  $V$  为系统广义势能.

将球铰副替换为轴套力模型之后, 球铰副约束将会以广义力的形式添加到方程右边, 简化方程 (1) 后可得:

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}) \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{x}) \dot{\mathbf{x}} = \sum_{i=0}^n \mathbf{K}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i+1}) + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{x}}_i - \dot{\mathbf{x}}_{i+1}) + \mathbf{F}_{\text{pre}} + \mathbf{F}_{\text{ex}} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{x}$  表示缆绳系统整体的广义坐标矩阵,  $\mathbf{x}_i$  表示第  $i$  个离散刚体的广义坐标矩阵,  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{C}$  分别为轴套力模型中的刚度系数矩阵和阻尼系数矩阵,  $\mathbf{F}_{\text{pre}}$  为上一个迭代步轴套力,  $\mathbf{F}_{\text{ex}}$  为外部力, 相应的  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{F}_{\text{pre}}$  计算公式如下:

$$\mathbf{F}_{\text{pre}} = \mathbf{K}(\mathbf{x}_{i-1} - \mathbf{x}_i) + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{x}}_{i-1} - \dot{\mathbf{x}}_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & k_{66} \end{pmatrix}$$

$$k_{11} = ES/L_i$$

$$k_{22} = k_{33} = ES/2(1 + \mu)L_i$$

$$k_{44} = E\pi D_i^4/128(1 + \mu)L_i$$

$$k_{55} = k_{66} = E\pi D_i^4/64L_i \quad (5)$$

对于阻尼系数矩阵, 按照工程经验选取为 1~10 之间, 同时, 在方程 (3) 中利用  $Bu_i$  表示第  $i$  个离散刚体所受到的轴套力, 则动力学方程简化为:

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}) \ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{x}) \dot{\mathbf{x}} = \sum_{i=0}^n \mathbf{B}u_i + \mathbf{F}_{\text{ex}} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{B}u_0 = 0$ , 图 3 展示了轴套力在缆绳系统中的作用, 当外部力作用在缆绳的某一段离散刚体  $Rb_i$  上时, 刚体发生相应的位移  $\Delta\epsilon$  与偏转角度  $\eta$ , 而位移与角度的变化会引起刚体之间的轴套力变化, 从而对  $Rb_i$  产生相反方向的力. 同样地, 第  $i$  个刚体

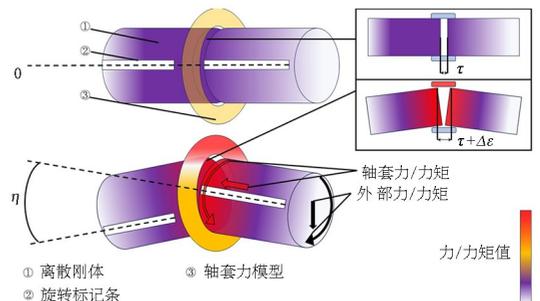


图3 轴套力作用效果图

Fig. 3 Effect diagram of bushing force

受到的轴套力会传递给第  $i+1$  个刚体  $Rb_{i+1}$ , 由此体现了缆绳系统中力传递的连续性. 图 3 中  $\tau$  表示两离散刚体间的初始距离.

## 2 系留气球动力学及风廓线建模

### 2.1 系留气球动力学建模

在研究系留气球的基本飞行动力学性能时, 通常对动力学方程做如下基本假设: ① 气球为刚体, 认为压力调节系统可以保证其在任何情况下体积形状不变, ② 地面坐标系近似为绝对惯性系, ③ 气球质量、质心保持不变, ④ 仅考虑刚体运动, 忽略气动弹性影响, ⑤ 气球体积中心与重心重合. 地球大气密度随高度变化, 但在求解气球动力学问题时通常认为气球周围大气密度近似均匀. 作用在气球上的力和力矩公式如下:

$$F = F_G + F_B + F_A + F_I + F_T \quad (7)$$

$$M_R = M_{RG} + M_{RB} + M_{RA} + M_{RI} + M_{RT} \quad (8)$$

其中  $F_G$  和  $M_{RG}$  为作用在气球上的重力和重力矩;  $F_B$  和  $M_{RB}$  为作用在气球上的空气浮力和浮力矩;  $F_A$  和  $M_{RA}$  为作用在气球上的气动力和气动力矩;  $F_I$  和  $M_{RI}$  为作用在气球上的附加惯性力和附加惯性矩;  $F_T$  和  $M_{RT}$  为缆绳作用在气球上的张力和张力矩.

气动力、附加惯性力与雷诺数、空气密度、温度、流体粘度相关. 将空气动力学的细节整合到本文的建模中无疑是一项巨大的挑战, 故本文根据有限实验数据, 以及相关国家标准对气动力、附加惯性力等进行拟合计算. 对于气动力, 考虑作用在气球上气动升力、气动阻力、俯仰力矩; 对于附加惯性性, 考虑沿三个轴平动附加惯性和转动附加惯性.

对于升力、阻力、俯仰力矩气动力系数等, 以某型号系留气球系数与气球攻角实验数据为例, 经多项式拟合得到以下计算公式:

$$C_D = 0.0004328\theta^2 - 0.000417\theta + 0.03134 \quad (9)$$

$$C_L = -0.0002555\theta^2 + 0.03812\theta + 0.01988 \quad (10)$$

$$C_{ma} = (2.023e-07)\theta^2 - 0.00619\theta + 0.02149 \quad (11)$$

其中,  $C_D$ 、 $C_L$  和  $C_{ma}$  分别为气动升力系数、气动阻力系数以及气动俯仰力矩系数,  $\theta$  为系留气球俯仰角.

对于附加惯性系数, 根据不同长细比椭球的附加质量系数进行设置<sup>[20]</sup>,  $X$  轴平移附加惯性系数为 0.0465,  $Y/Z$  轴平移附加惯性系数为 0.9148,  $Y/Z$  轴转动附加惯性系数为 0.7560.

### 2.2 风廓线建模

系留气球的工作环境设定在近地面离地 600 m 的对流层, 而风速是一个随高度变化的量, 目前已有研究通过将风速与表层摩擦速度归一化来研究陆地表面的风廓线<sup>[21,22]</sup>, 其风速计算公式如下:

$$U(h) = (u_* / K_a) \cdot \ln [h \cdot g / (A_c \cdot Z_0)] \quad (12)$$

其中,  $U(h)$  表示高度为  $h$  处的风速,  $g$  为重力加速度,  $A_c$  为 Charnock 常数, 一般取 0.014;  $u_*$  为地表摩擦速度, 本文考虑为 0.4186 m/s,  $K_a$  为冯·卡尔曼常数, 一般取 0.4, 由方程 10 可以确定出高度为 600 m 的风廓线模型.

## 3 系留气球动力学仿真分析

### 3.1 稳态风下系留气球仿真分析

评估系留气球的运动响应特性是检验系留气球抗风特性中不可或缺的一个环节. 根据公式 10, 气球部分的风速设定为 15 m/s. 在这种情况下对系留气球系统进行运动响应评估, 评估的主要参数为气球的俯仰角、侧倾角、偏航角以及气球沿三个轴向的位移, 离散刚体的转角和位移. 尽管许多参数都能描述系留气球运动响应, 但上述参数的变化最为明显且具有代表性.

考虑气球受恒定  $X$  正向 15 m/s 风作用时系

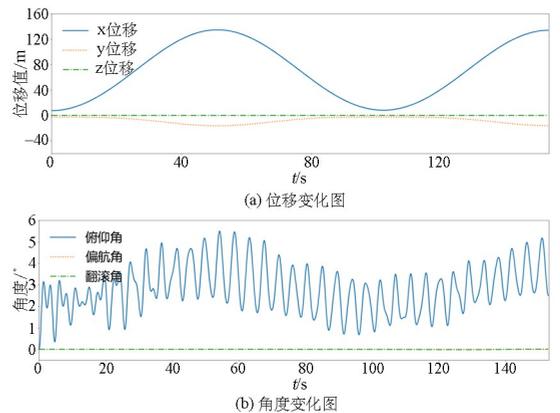


图4 气球位移与角度变化图

Fig. 4 Balloon displacement and angle change

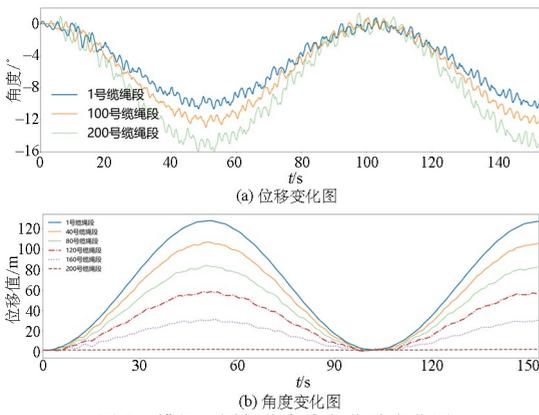


图5 缆绳不同部位角度与位移变化图

Fig. 5 Variations in angle and displacement across different sections of the cable

统的整体动态响应,图4展示了系留气球在该工况下的运动状态变化.由图4(b)可知,系留气球俯仰角在 $2.75^\circ$ 水平线上呈周期性振荡变化,偏航角与侧倾角在 $0^\circ$ 波动.图5展示了靠近气球端、缆绳中部以及近地面端离散刚体沿 $X$ 轴位移和沿 $Z$ 轴转角.缆绳越接近气球,位移变化越大,角度变化越小;且缆绳系统整体弯曲小,近似于弹性支撑梁结构.

### 3.2 风廓线条件下系留气球仿真分析

参照第2节设置并开展风廓线条件下系留气球仿真分析.图6展示了气球耦合了风廓线模型时的位移、姿态角曲线.与稳态风工况相比,气球整体 $X$ 、 $Y$ 方向位移在更大.图7展示了不同部位离散刚体沿 $X$ 方向位移变化情况.

系统受风的影响大略呈现三个阶段,即:气球下降阶段、回升阶段与震荡阶段.在气球下降阶段,与气球仅受稳态风影响不同,将缆绳所受风载荷引入到系统整体载荷之中后,缆绳中部由于风的作用会产生沿风速方向较大位移,与此同时气球由于受缆绳拉力增大而开始下降,直至缆绳中部位移变化趋缓,气球进入下一阶段.气球回升阶段,当缆绳中部受风位移变化趋缓,气球所受缆绳拉力小于浮力,系统会由于浮力的作用整体向上缓慢升高,上升过程中缆绳对气球的拉力逐渐增大,直至下一阶段.气球震荡阶段,缆绳拉力与气球浮力处于动态平衡阶段,主要表现为气球竖直方向位移在一定范围内呈现出波动趋势,仅从二维平面考虑,则系统将会逐渐到达稳态阶段;但若将侧倾与偏航考虑在内,气球在震荡阶段会由于缆绳与气球相连接的漏斗式拉索作用使气球发生侧倾与偏航,故震荡阶段的运动是不稳定的.通常综合考虑气球的俯仰角、

偏航角、侧倾角来描述气球姿态,当其中任一姿态角过大,气球则因姿态异常而失效.

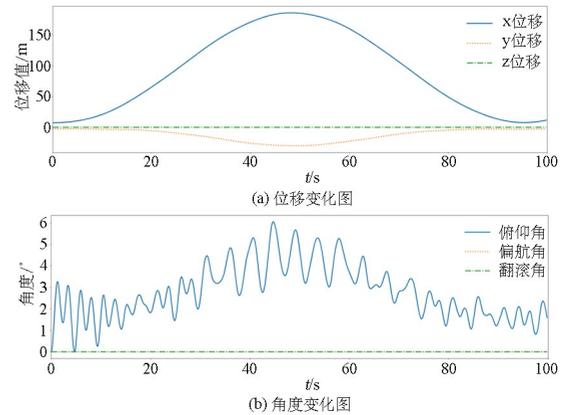


图6 系留气球位移与角度变化图

Fig. 6 Displacement and angle variation of the tethered balloon

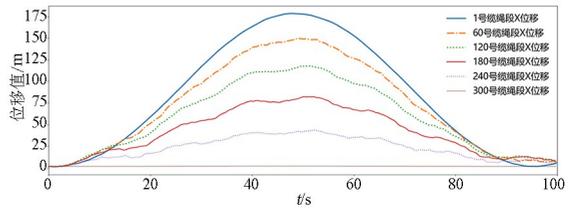


图7 不同部位缆绳位移图

Fig. 7 Displacement of the cable at different positions

### 3.3 阵风条件下系留气球仿真分析

将阵风模型简单设置为大小为 $10\text{ m/s}$ ,持续时间为1分钟的恒定阵风,将其附加到风廓线模型上.图8展示了阵风条件下系留气球的位移和角度变化情况,同时在图8中将阵风模型与风廓线模型仿真结果进行了对比.图9描述了缆绳中部离散绳段的轴套力变化情况.

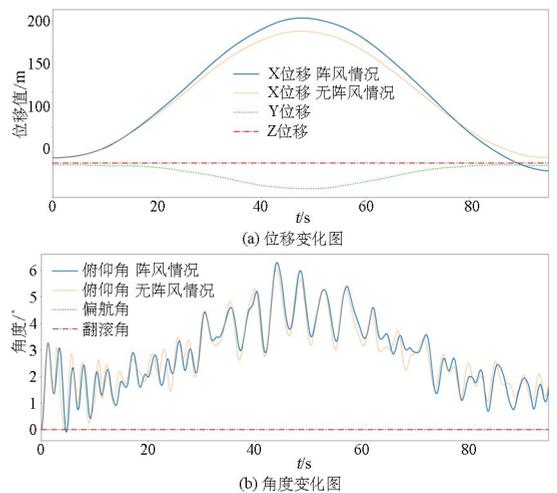


图8 系留气球位移与角度变化图

Fig. 8 Comparison of balloon response values under conditions with and without gusts

对比阵风条件与风廓线条件下仿真分析结果可知,不考虑涡流、空气粘度以及空气密度的情况下,空气流速作为影响系留气球系统动态响应的主要因素,阵风将会在下落过程中增大气球的俯仰运动,且离散刚体之间位移更大,容易发生绳索断裂现象。

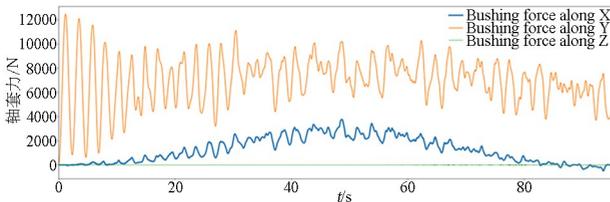


图9 绳段轴套力变化图

Fig. 9 The change in bushing force of the rope segment

表1 系留气球主要参数变化

Table 1 The range of the main response values of the system under different conditions

参数	稳态风	风廓线	复合阵风
俯仰角/ $^{\circ}$	(0, 5.5)	(0, 6.04)	(0, 6.59)
气球 X 方向最大位移/m	134.4	177.9	196.4
气球 Y 方向最大位移/m	18.3	29.9	36.1
Y 轴轴套力/N	(0, 9849.7)	(0, 12450.5)	(0, 13660.7)
X 轴轴套力矩/N·m	(-18.3, 12.7)	(-44.97, 43.94)	(-26.5, 27.1)

影响。在稳态风和风廓线结果的比较中,沿 Y 轴的轴套力和沿 X 轴的轴套力矩也有明显增加,这说明系留缆绳段在风廓线作用下产生了更大了轴向拉伸力,且缆绳整体沿 X 轴的摆动效应更加明显,系留缆绳发生断裂的概率将会增大。因此在系留气球及其缆绳设计阶段,需采用更大的安全系数来保证系留气球航行工作的稳定性。

对比风廓线环境与复合阵风环境,系留气球的位移值增加了 18.5m,俯仰角增大了  $0.55^{\circ}$ ,在原有增加的基础上再次扩大了 10%,但是沿 Y 向的轴套力和沿 X 向的轴套力矩均减小。可能的原因是在阵风作用下,缆绳沿阵风方向的力大于其它方向,故缆绳优先沿着 X 方向移到,同时缆绳段间的轴套力模型会带动相邻的缆绳段移动,绳索的摆动现象因此减弱。

上述三个模型之间的对比表明,风速是影响系留气球姿态变化的主要因素,且作用在系留缆绳上的载荷不容忽视,故在系留气球动力学建模以及后续应用时,需考虑缆绳所受载荷的影响。

#### 4.2 缆绳分段数对运动姿态的影响

为了研究系留缆绳分段数对系留气球运动姿

## 4 结果分析与探讨

### 4.1 仿真结果分析

上文分析了系留气球在稳态风环境、风廓线环境以及阵风与风廓线复合环境下的运动响应。在本节中将系留气球运动响应的主要参数变化整理到表 1 中。

对比稳态风环境与风廓线环境,系留气球沿风方向的位移增加了 43.5m,即缆绳载荷对于系留气球 X 方向位移运动的影响超过了 30%,同时系留气球的俯仰角变化超过 10%。这意味着系留气球的设计必须着重考虑缆绳所受的载荷对系统整体的

态的影响,本文设置了系留缆绳的分段数分别为 220 段、320 段以及 420 段。在相同的外部载荷下对系留气球的运动响应进行仿真分析。

表2 不同分段数下系留气球主要参数

Table 2 The main response values of the balloon under different segment numbers

参数	220 段		320 段		420 段	
	最大值	均值	最大值	均值	最大值	均值
X 位移/m	178.37	79.32	177.97	80.58	179.02	83.15
Y 位移/m	27.33	9.10	27.35	9.31	27.76	9.71
俯仰角/ $^{\circ}$	5.81	2.72	6.04	2.73	6.02	2.76

表 2 展示了不同分段数下系留气球的 X 与 Y 方向位移最大值和平均值及俯仰角的最大值和平均值。我们也将仿真过程中系留气球位移与俯仰角的时间序列数据以小提琴图的方式展现在图 10 中,以探究仿真过程中气球姿态数据的具体姿态情况。

分析表 2 可知,模型的分段数并不会明显影响系留气球的位移情况,这也侧面验证了模型的有效性以及模型外载荷设置的准确性。对比不同分段数下气球的俯仰角可以发现,缆绳分段数对系留气

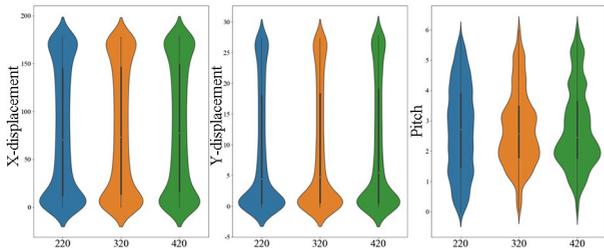


图 10 气球在不同分段数下的姿态数据分布(小提琴图)  
Fig. 10 Violin plot of the balloon's posture data distribution under different segment numbers

球的俯仰角有一定的影响,仅从表中最大值和平均值的比较不能够准确说明这种趋势,结合图 10 中不同分段数下气球俯仰角的数据分布情况,缆绳不同分段数对气球俯仰运动影响更加清晰.

图 10 中时间数据集表明,当分段数为 220 段时,系留气球俯仰角的最大值与平均值较小,但是停留在较大俯仰角的时刻更多,这意味着缆绳分段数为 220 的系留气球在同样的外载荷情况下回到 0 俯仰角的时间更长,即系统的自调节能力较差.当分段数为 320 段和 420 段时,数据分布的小提琴图形状相似,但在俯仰角  $4^\circ$  与  $6^\circ$  时,分段数为 420 段的模型数据分布多于分段数为 320 段的模型.一种合理的解释为,缆绳模型的分段数越多,缆绳模型的柔性体特性越明显,在相同的外载荷条件下绳索的弯曲程度越大,所以系留气球受到绳索传递的弯矩越大,俯仰角也相应地变大.

结合图 10 和表 2 进行分析,系留缆绳的分段数影响了系留气球系统物理特性,当分段数过多时,模型的柔性体特征更为明显,同样的外部载荷情况下变形更大,表 2 中,缆绳分段数为 420 段的气球位移最大值以及平均值都大于其余两种情况.

## 5 结束语

以近地面系留式浮空平台缆绳及气球为研究对象,分别在稳态风,风廓线及复合阵风环境下开展了系留气球的运动响应分析,得到结论如下:

(1)系留缆绳受到的载荷会明显影响系留气球的位移与姿态角.其中对位移的影响超过 30%,对俯仰姿态角的影响接近 10%.系留气球系统的设计不能忽视系留缆绳所受到的载荷.

(2)风速是影响系留气球运动响应的主要因素,在设计系留气球缆绳系统时,需按照大于实际测量风速的值来设定系留气球缆绳的安全系数,确保系留气球能够长时间稳定地工作.

(3)缆绳切分为轴套力连接的离散刚体的数量影响了系留气球系统的物理特性.离散刚体和轴套力数量过多时,系统整体呈现的柔性体特性较强,相同条件下缆绳响应变化更大;离散刚体和轴套力数量过少时,系统整体呈现的刚性体特性使得系留气球面对时变风廓线模型时姿态调节性能较低.在本文中,高度为 600m 的系留气球其缆绳分段数为 320 段时,系留气球在时变风廓线模型下自调节性能更好,相比较于将缆绳切分为 220 段和 420 段用轴套力连接的离散刚体模型,切分段数为 320 段时系留气球俯仰角数据点在  $4^\circ \sim 6^\circ$  之间更少,表明缆绳的刚体特性和柔性体特性更加适中,且系留气球能够恢复到较小俯仰角的能力更强.

通过对系留气球运动响应的分析,得到了一些具有参考意义的结果,但所建立的动力学模型仍然具有一定的局限性,比如本文对气球的偏航以及侧倾方向的气动力特性并未涉及,建立完整的系留气球三维动力学模型需要更多的风洞试验数据支持.

## 参考文献

- [1] ALSAMHI S H, ANSARI M S, MA O, et al. Tethered balloon technology in design solutions for rescue and relief team emergency communication services [J]. Disaster Medicine and Public Health Preparedness, 2019, 13(2): 203-210.
- [2] 李卓. 高度可控的应用系留气球应急通信控制系统设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.  
LI Z. Design of highly controllable emergency communication control system for tethered balloon applications [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [3] ALSAMHI S H, ALMALKI F A, MA O, et al. Performance optimization of tethered balloon technology for public safety and emergency communications [J]. Telecommunication Systems, 2020, 75(2): 235-244.
- [4] 张冬辉, 张泰华, 崔燕香, 等. 平流层系留气球气动参数敏感性分析[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 125083.  
ZHANG D H, ZHANG T H, CUI Y X, et al. Sensitivity analysis of aerodynamic parameters of stratospheric tethered balloon [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 125083. (in Chinese)
- [5] ZHANG D H, LUO H B, CUI Y X, et al. Tan-

- dem, long-duration, ultra-high-altitude tethered balloon and its system characteristics [J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(10): 2446–2465.
- [6] CHEN Y, HUANG R, HE L P, et al. Dynamical modelling and control of space tethers: a review of space tether research [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 77(4): 1077–1099.
- [7] 杨希祥, 朱炳杰, 邓小龙, 等. Stratobus 平流层飞艇项目研究进展与仿真分析[J]. *航空学报*, 2021, 42(9): 224579.
- YANG X X, ZHU B J, DENG X L, et al. Development status and simulation analysis of stratospheric airship Stratobus [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(9): 224579. (in Chinese)
- [8] ALSAMHI S H, SAMAR ANSARI M, RAJPUT N S. Disaster coverage predication for the emerging tethered balloon technology: capability for preparedness, detection, mitigation, and response [J]. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 2018, 12(2): 222–231.
- [9] 朱玉平. 系留浮空平台力学分析及载荷系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZHU Y P. Mechanical analysis and load system design of tethered floating platform [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [10] CHANDRASEKAR A, RUSSELL PHILBRICK C, DODDRIDGE B, et al. A comparison study of RAMS simulations with aircraft, wind profiler, lidar, tethered balloon and RASS data over Philadelphia during a 1999 summer episode [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(35): 4973–4984.
- [11] SUDHEESH P G, MOZAFFARI M, MAGARINI M, et al. Sum-rate analysis for high altitude platform (HAP) drones with tethered balloon relay [J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(6): 1240–1243.
- [12] YODER C D, AGRAWAL S, MOTES A G, et al. Aerodynamic tethered sails for scientific balloon trajectory control: small-scale experimental demonstration [J]. *Journal of Aircraft*, 2021, 58(5): 1010–1021.
- [13] 谭百贺. 机动式系留气球飞行过程模拟[J]. *科技视界*, 2020(24): 41–43.
- [14] WANG Z C, HUANG M, HAN W, et al. Optical sensing in Tibet Plateau wildlife observation based on tethered balloon [J]. *Optik*, 2021, 243: 167425.
- [15] SHABANA A A. Flexible multibody dynamics: review of past and recent developments [J]. *Multibody System Dynamics*, 1997, 1(2): 189–222.
- [16] XU B, DONG P P, ZHANG J H, et al. A three dimensional approach to model steel wire ropes used in high energy absorber apparatus [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(25/26): 4280–4293.
- [17] TANG L, SHANGGUAN W B, DAI L. A calculation method of joint forces for a suspension considering nonlinear elasticity of bushings [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*, 2012, 226(4): 281–297.
- [18] WANG X L, DAI L, SHANGGUAN W B. Calculation of joint forces of a multi-link suspension for strength and fatigue analysis of bushings and control arms [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2014, 66(3): 217.
- [19] WANG J Y, FU Y Z, WANG H T, et al. Nonlinear vibration analysis of hydro-pneumatic suspension system under stochastic excitation [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2022, 36(10): 51–57.
- [20] 陈利. 系留气球系统概述[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2021, 52–59.
- [21] 刘永前, 马晓梅, 高小力, 等. 基于中性等效风速的海上风廓线建模方法研究[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(6): 97–105.
- LIU Y Q, MA X M, GAO X L, et al. Study on wind profile modeling of offshore based on neutral equivalent wind speed [J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2021, 48(6): 97–105. (in Chinese)
- [22] 余杰青, 姚雪峰, 李旺, 等. 西南高原地区大气边界层风廓线特征规律分析研究 [C]// 2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷). 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司, 2020: 9.