

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.02.004

无伞精确空投模式下飘带试验研究

兰文昌, 王中阳, 王申奥

(航空工业航宇救生装备有限公司航空防护救生技术航空科技重点实验室, 襄阳 441003)

摘要: 针对海上救援时典型海况下小物质精确空投需求, 根据空气动力学理论, 设计了一种基于无伞精确空投模式的飘带物品包。为满足更高的投放质量要求, 设计了一种具有鼓风兜的飘带, 提高了无伞空投物品包的投放质量。通过产品设计、伞塔投放试验、摄影测量等手段验证了物品包的落速, 计算了飘带的阻力系数, 研究了鼓风兜的阻力特征, 实现了小物质低成本、轻量化、通用化的精确空投。

关键词: 海上救援; 小物质空投; 无伞空投; 飘带; 鼓风兜

中图分类号: V24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)02-0188-06

Experimental Study on Ribbons in Parachuteless Precise Airdrop Mode

LAN Wenchang, WANG Zhongyang, WANG Shenao

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Life-Support Technology, AVIC Aerospace-Life-Support Industries Ltd., Xiangyang 441003, China)

Abstract: According to the requirement of accurate airdrop of small matter under typical sea conditions during maritime rescue, a kind of ribbon airdrop bag based on parachuteless accurate airdrop mode is designed by using the aerodynamics theory. In order to meet the requirements of higher delivery quality, a kind of ribbon with air pocket is designed to improve the delivery quality of parachuteless airdrop package. Through product design, flag-dropping test of tower, image measurement and other means, the falling speed of the airdrop bag is verified, the resistance coefficients of the ribbon are calculated, and the resistance characteristics of the air pocket are analyzed. Therefore, the accurate airdrop of small matter with low cost, light weight and universality is realized.

Key words: sea rescue; airdrop of small matter; parachuteless airdrop; ribbon; air pocket

随着中国自行设计研制的大型水陆两栖飞机成功实现水上首飞起降, 国内开展了大型水陆两栖飞机海上救援、森林灭火、海洋巡察等多项特征任务研究。海上救援^[1]任务研究包括水陆两栖飞机及配套救援装备在海上救援作业时的应用模式研究、海上救援低成本精确空投技术研究、海上着水救援起降安全性及流程技术研究等。基于无伞精确空投模式的飘带研究也属于海上救援低成本精确空投技术的研究内容之一。

水陆两栖飞机载重量大, 携带救援物资方便,

但抗浪水平不高于 2 m, 通常在 3 级海况以下开展施救。在 3 级以上海况时, 空投救援物资以支持遇险人员开展自救互救是一项有力的救援手段。为防止空投物包装在空投过程中破损, 根据现有空投需求、相关救生物资产品实物以及空投过程中空投物空投过载和冲击与质量的关系, 空投救援物资的质量一般不大于 50 kg^[2]。空投的救援物资包括饮用水、食品、药品、救生船和各类救生物品包, 而用于自救互救的技术范围主要是止血、包扎、固定等简单的急救措施, 此时空投物资主要是应急食品、

收稿日期: 2020-12-15; **修订日期:** 2021-02-20

通信作者: 兰文昌, 男, 高级工程师, E-mail: 14875432@qq.com。

引用格式: 兰文昌, 王中阳, 王申奥. 无伞精确空投模式下飘带试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 188-193. LAN Wenchang, WANG Zhongyang, WANG Shenao. Experimental study on ribbons in parachuteless precise airdrop mode[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(2): 188-193.

急救药品和耗材等小物质,为遇险人员自救互救提供物质条件,进而稳定其生命体征和心理素质,最终提高生还率、低伤死率和伤残率^[3]。

飘带是一种空投物资的减速装置,相对降落伞,具有受风力影响较小、空投物资振动角度较小、包装简单、空投快捷等优点,是小物质精确空投的有效措施。文献[4]中对织物飘带的拖动特性进行了深入研究。文献[5-6]中进行了飘带稳定器实验,以改善火箭弹的空气动力特性。基于飘带的优良特性,美军设计了SPARK轻型急救包,为待救人员提供自救互救的救援物资。它采用橘红色长飘带减速着陆,质量为2.72 kg,包装体积为330 mm×254 mm×114 mm,如图1所示。



图1 SPARK 轻型急救包

Fig.1 SPARK light first-aid bag

国内也有使用飘带作为子母弹中子弹减速装置的研究^[7-9]。飘带在气流作用下打开,稳定子弹的飞行姿态,使弹轴与地面的夹角基本保持垂直。但采用飘带作为减速装置空投物资的成熟产品较少。本文利用空气动力学理论,设计了一款基于无伞精确空投模式的空投物品包,研究了飘带的空气动力学特性,以满足水陆两栖飞机在典型海况下空投救援物资的需求。

1 分析与实施

1.1 空投物品清单

依据国家突发事件应对法和突发公共事件医疗卫生救援应急预案中的原则与方法,按照不同海难类型,依托海难飞机救援食品药品品的遴选原则,配备侧重点不同的救援食品、药品和耗材。为满足采购需要,选择货架成品,根据相关救生系统对飞行人员救生物品及个人防护装具配备要求,对空投物品作了选择,按两人24 h配置的救生物品具体内容如表1所示。

1.2 空投物品包

空投物品包主要由物品包和飘带组成,如图2所示。其中物品包用来包装救生物品、浮板和飘带,投放时飘带在空中展开,为物品包提供阻力,保证可接受的下落速度。

飘带通常成“Z”型折叠放置在物品包中。在投放物品包时,飘带末端的挂点和保险绳受物品包重力牵引,将飘带从物品包中拉出。飘带拉直后,

表1 空投物品清单

Table 1 List of airdrop goods

序号	物品名称	数量	外形尺寸/(mm×mm×mm)	质量/g	备注
1	救生口粮	2	170×84×20	280	食品
2	救生饮用水	1	250×200×9	220	食品
3	驱鲨剂	1	145×75×20	190	药品
4	闪光标位器	1	87×Φ28	80	联络
5	空勤急救盒	1	143×105×25	200	药品

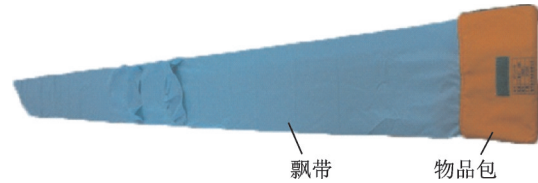


图2 空投物品包的结构

Fig.2 Structure of airdrop bag

保险绳受力过大而断裂。展开的飘带表面受到空气的摩擦,在空中剧烈颤动,产生阻力。飘带产生的阻力减小了物品包的下落速度和摆动角度,最终降落到预定地点。

在典型海况下,依托水陆两栖飞机投放小质量救援物资,供遇险人员自救互救,降低伤死率和伤残率。参照美国SPARK轻型急救包的性能要求,拟定的空投物品包的主要技术指标为:系统质量≤3 kg、包装体积≤330 mm×220 mm×80 mm、空投机速150~220 km/h、空投高度100~300 m、下落速度≤18 m/s。

1.3 结构设计

1.3.1 物品包结构设计

物品包分为外层和内层。外层通过勾带绒带粘合,用于收纳飘带;内层通过拉链拉合,内层分置多个口袋,用于存放救援物资,口袋下方设置夹层,内部放置浮板,为救援物资提供缓冲,并保证物品包入水后浮起,方便打捞和使用。物品包内部结构如图3所示。

按表1统计的无伞空投物品包飘带空投物品的质量为1.47 kg;浮板选用PEP材料,密度为20 kg/m³,质量为0.03 kg;物品包主部材料采用锦



图3 物品包内部结构

Fig.3 Internal structure of airdrop bag

丝帆绸,估算的物品包质量为0.37 kg;飘带采用锦
丝帆绸、涤丝绸等,估算其最大质量为0.65 kg。综
上,空投物品包总质量为2.52 kg。

为保证物品质量在包内均匀布局,按照救援物
资的体积和质量设置救援物资布局,物品需要的空
间尺寸为330 mm×220 mm×30 mm;浮板的体积
为330 mm×220 mm×20 mm。综上,物品包体积
为330 mm×220 mm×50 mm。依据密度公式,计
算空投物品包的密度为694.21 kg/m³,小于海水的
密度1 025 kg/m³,物品包可以在海水中浮起。

1.3.2 飘带设计

文献[4]中讨论飘带阻力时指出,飘带表面
的摩擦力只占飘带阻力很小一部分,飘带阻力很大
部分来源于飘带颤振。决定飘带阻力大小的因素为
飘带的长宽比和飘带单位面积织物的质量。

飘带阻力系数(Drag coefficient) C 是飘带阻力
的关键参数,国内已有针对此内容的初步研究^[10]。
依据文献[11]中对长宽比(L/W)在4~75范围内的
飘带的研究,飘带的阻力系数 C 与飘带的长宽比符
合线性增加函数,如图4所示。经曲线拟合得到

$$C=0.4012 \times (L/W)^{-0.639} \quad (1)$$

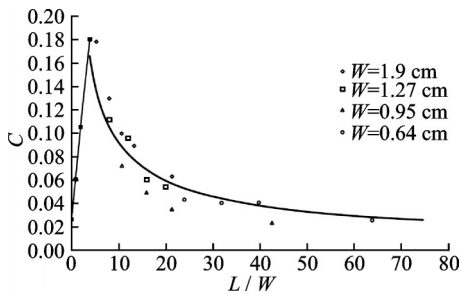


图4 飘带阻力系数与长宽比曲线

Fig.4 Ribbon resistance coefficient versus length-width ratio

根据降落伞技术导论^[12],飘带在空气中产生的
阻力为

$$Q=\frac{1}{2}\rho v^2 CA \quad (2)$$

式中: Q 为物体产生的空气阻力,N; ρ 为空气密度,
kg/m³; v 为物体的速度,m/s; A 为物体的面积,m²。

在文献[11]中规定的长宽比4~75范围内,设
计了长条形织物飘带,长为 L ,宽为 W ,尾端设有切
角 θ 。文中空投小物质的质量由1.5 kg提高到
3.5 kg,使物品包携带的物品可供更多人、更长时间
使用。为增大飘带阻力,在飘带上设置了展开半径
为 R 的半圆形鼓风机,在鼓风机上标记了7处打褶
点,用于鼓风机在飘带的缝制。鼓风机从飘带端头
 K 处起正反面交替分布。飘带的结构如图5所示^[13],

鼓风机裁片如图6所示。本文选取 K 值为 $0.33L$,切
角 θ 为 30° ,鼓风机裁片半径 R 为230 mm。

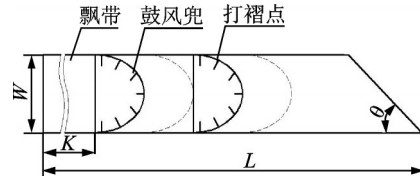


图5 飘带的结构^[13]

Fig.5 Structure of ribbon^[13]

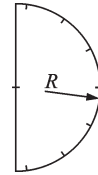


图6 鼓风机裁片

Fig.6 Cut-parts of air pocket

为研究Hoerner提出飘带单位面积织物的重
量对飘带阻力大小的影响,试验中飘带采用了
44190 晶格绸和520 锦丝帆绸两种材料制作,这两
种材料的主要机械性能见表2。

表2 飘带材料的机械性能

Table 2 Mechanical properties of ribbon materials				
材料	单位面积质量/ (g·m ⁻²)	经向断裂 强力/N	纬向断裂 强力/N	组织
44190 晶格绸	65	450	350	平纹
520 锦丝 帆绸	300	2 750	2 160	平纹

文中设计了4种飘带(表3)以研究其特性,其
外形如图7~9所示,物品包外形如图10~11
所示。

表3 飘带的主要特征

Table 3 Key features of ribbon			
飘带	材料	宽×长/ (m×m)	鼓风机 数量
1	44190 晶格绸	0.33×6.6	0
2	520 锦丝帆绸	0.33×6.6	0
3	44190 晶格绸	0.30×5.4	4
4	520 锦丝帆绸	0.33×6.6	10

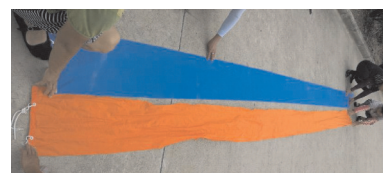


图7 飘带1(蓝色)和飘带2(橘色)

Fig.7 Ribbon 1 (Blue) and Ribbon 2 (Orange)



图 8 飘带 3
Fig.8 Ribbon 3



图 9 飘带 4
Fig.9 Ribbon 4



图 10 空投物品包(飘带 3)
Fig.10 Airdrop bag(Ribbon 3)



图 11 空投物品包(飘带 4)
Fig.11 Airdrop bag(Ribbon 4)

2 试验方法

文中采用伞塔静态投放方法研究飘带的着陆速度。在物品包内放置的配重物品为铅块和石子。试验员站在高度为 120 m 的塔顶,将飘带和下端的物品包自由展开,试验员拉紧飘带顶端,在收到投放命令后,松开飘带顶端,飘带在空中自由飘落。试验过程中记录了当时当地气压和风速,用普通摄像机记录飘带的下落过程,图 12 为试验现场图。



图 12 伞塔投放试验
Fig.12 Flag-dropping test of tower

按式(1~2)初步计算出 4 种飘带在距离地面最小 23 m 处达到稳定下降状态,因此试验中通过高速摄像机(250 帧)判读飘带在着陆点上空 15 m 内的平均落速可行。运用摄影测量学^[14-16],应用 Funimate Video Editor 软件按以下两步骤判读飘带在着陆点上空 15 m 内的平均落速。

2.1 像平面坐标系

像平面坐标系 oxy 以影像几何中心 o 为原点, x, y 轴分别平行于影像画幅边缘线,如图 13 所示。像空间坐标系用于描述像点、投影中心的空间位置,其原点为图像投影中心 S , z 轴正向为摄影方向的反方向,与 oS 重合。通过点 S 作平行于像片上 x, y 轴的轴线即为像空间坐标系的 X, Y 轴,与 Z 轴组成像空间直角坐标系 $S-XYZ$ 。在此坐标系中,每一个像点的 Z 坐标都等于摄影主距,当没有特别要求时,一般以摄影焦距 f 表示,但符号为负。

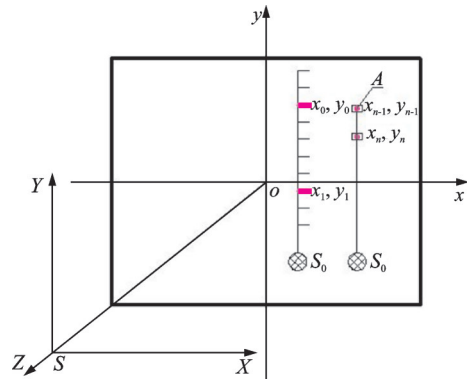


图 13 像平面坐标系和像空间坐标系
Fig.13 Image plane coordinate system and image space coordinate system

2.2 平均落速计算

假定摄像机拍摄频率为 $1/t$,在物体落点处竖立标尺,标尺上垂直方向的参考间距 L_0 为 1 m,标尺在像平面坐标系中,参考间距 L_0 垂直方向的像素点距为 $y_1 - y_0$;计算机在物体上标记参考点 A 。物体在像空间坐标系中,参考点 A 前后帧的空间位置分别为 (X_{n-1}, Y_{n-1}) 和 (X_n, Y_n) 。物体在像空间坐标系中,参考点 A 前后帧垂直方向的像素点距为 $(y_n - y_{n-1})$ 。通过计算机数值解算,可求出 $(y_1 - y_0, y_n - y_{n-1})$ 。物体第 n 帧在空间中的实际下落距离 L_n 满足

$$L_n = (y_n - y_{n-1}) / (y_1 - y_0) \quad (3)$$

因此,物体第 n 帧的落速为 $V_n = L_n / t$ 。依此,求出着陆点上空 15 m 内所有典型帧的落速,取平均值为飘带单次试验的平均落速。

3 结果分析讨论

3.1 伞塔投放试验结果

伞塔投放时,在伞塔顶对每种飘带投放 2 次,

取2次落速的平均值。表4给出了空投物品包投放试验结果。

表4 空投物品包投放试验结果

Table 4 Flag-dropping test results of airdrop bag

飘带	空投物品包 质量/kg	配重质量/ kg	落速/ (m·s ⁻¹)	落点直径 Φ/m
1	0.15	3.5	32.15	1.0
2	0.65	3.5	27.05	1.0
3	0.55	1.5	14.90	3.5
4	1.05	3.5	16.10	3.0

文中使用的飘带选取了不同的材质,飘带的制作相对于降落伞更为简单方便。研究过程中开展了样件试制和空投试验验证,无论是空投1.5 kg的物资还是3.5 kg的物资,其着陆速度均满足不大于18 m/s的指标要求,落点范围小,圆满完成了应用无伞空投物品包低成本、轻量化空投小物质救援物品的任务,达到了预定效果。

3.2 飘带阻力特性

根据伞塔投放试验结果,按式(2)推算飘带的阻力特性CA试验值,计算结果如表5所示。计算时认为飘带产生的空气阻力Q与系统重量mg相等,即物品包匀速着陆,物品包产生的阻力忽略不计。

表5 飘带阻力特性试验结果

Table 5 Test results of ribbon resistance characteristics

飘带	系统质量 m / kg	CA试验 值/m ²	飘带面积 A/m ²	C试验值
1	3.65	0.057	2.084	0.027
2	4.15	0.091	2.084	0.044
3	2.05	0.148	1.526	
4	4.55	0.281	2.084	

由于飘带3和飘带4配备鼓风机,不能用飘带面积计算飘带的阻力系数试验值。根据表5,若忽略鼓风机对飘带自身阻力特征的影响,可用飘带2的阻力特征(CA)₂试验值与飘带4的阻力特征(CA)₄试验值,简单推算单个鼓风机的阻力特征为

$$CA = ((CA)_4 - (CA)_2) / 10 \quad (4)$$

根据式(4)计算的单个鼓风机阻力特征CA为0.019 m²。

观察无鼓风机的飘带空投物品包的下落过程可以看出:在下落初期,飘带剧烈颤振,在物品包端不断产生波峰,同一时刻飘带上可存在多个波幅较小的波峰,波峰快速向飘带的末端移动,随着飘带的剪尾小幅摆动后依次消失。在空投物品包下落后期,飘带的颤振平缓,每间隔一定的时间,飘带上产生一个波幅较大的波峰,波峰缓慢向飘带末端移动,并随着飘带剪尾大幅摆动后消失。图14给出

了下落后期典型波峰在飘带上“产生—移动—消失”的过程,波峰从产生到消失经历了约25 ms。下落初期空投物品包受重力作用,加速向下运动,速度越来越快,此时飘带颤振剧烈;下落后期空投物品包在飘带产生的阻力作用下,速度越来越小并趋于稳定,此时飘带颤振柔和。空投物品包的速度与飘带的颤振密切相关,可以认为飘带的颤振越剧烈,产生的阻力越大,这也印证了Hoerner提出的飘带阻力主要来源于飘带的颤振。

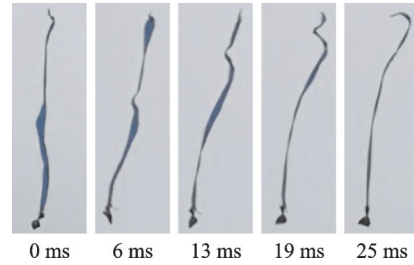


图14 无鼓风机飘带下落后期实况图

Fig.14 Actual pictures of later falling stage of ribbon without air pocket

观察有鼓风机的飘带空投物品包的下落过程可知,飘带波峰只在鼓风机与飘带的末端产生,充气饱满的鼓风机是飘带阻力的主要来源。图15给出配备鼓风机的飘带下落后期典型波峰“产生—移动—消失”的过程,波峰从产生到消失经历了约32 ms。

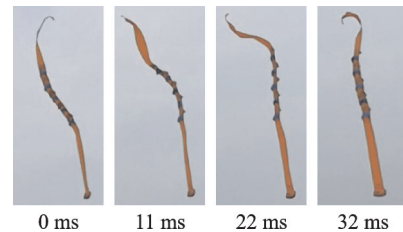


图15 有鼓风机飘带飘带下落后期实况图

Fig.15 Actual pictures of later falling stage of ribbon with air pocket

文中设计的飘带长宽比为18~20,均在文献[11]研究的4~75范围内^[11]。在理论设计阶段,运用了文献[11]给出的阻力系数函数,计算了飘带稳定下降时距地面的最低高度,为高速摄像机判读飘带在着陆点上空的平均落速提供了依据。特别是飘带2的阻力系数理论值为0.059,试验值为0.044,两者相差不大。试验说明采用文献[11]中给出的阻力系数函数初步判定稳降高度可行,其基于飘带长宽比的阻力系数函数具有较强的工程指导意义。

文献[4]中指出飘带单位面积织物的重量是决定飘带阻力大小的因素之一。文中根据式(2)计算了飘带1和飘带2的阻力系数试验值分别为0.027和0.044,说明飘带单位面积织物的重量越

大,提供的阻力越大,这是对Hoerner理论^[4]的有益拓展。

文献^[11]在拟合基于飘带长宽比的阻力系数函数时,采用了多种长宽比的飘带,但均是由一种锦丝材料制成^[11]。而本文中飘带采用了44190晶格绸和520锦丝帆绸两种材料,其中44190晶格绸(65 g/m²)为单位面积织物质量较轻的涤丝绸,远小于520锦丝帆绸(300 g/m²)。这是造成飘带1的阻力系数试验值(0.027)与计算值(0.059)偏差较大的原因。

本文在飘带上设置的鼓风机兜可有效减小物品包着陆速度并增加投放质量。通过对试验结果分析,计算出单个鼓风机兜的阻力特征为0.019 m²,对后续飘带鼓风机兜设计有一定的参考价值。

文中设计的飘带遵循了以下几项原则:飘带的尾端有切角,飘带的材料结构均为平纹,飘带的长度大于物品包高度10倍以上,飘带的首个鼓风机兜与物品包的距离是飘带长度的1/3等。这几项原则的原理机制将是作者未来的研究方向。

4 结 论

本文通过空投物品包的设计、制作、伞塔投放、高速摄像机记录和Funimate Video Editor判读等,得到了不同配重的物品包的落速,并研究了飘带的气动特性。结果表明:

(1) 飘带的阻力主要来源于飘带颤振,空投系统加速运动时,飘带颤振频率快、振幅小;匀速运动时,飘带的颤振频率慢、振幅大。

(2) 飘带的阻力系数与飘带的长宽比相关,飘带单位面积织物的重量越大,飘带的阻力系数越接近文献^[11]中给出的飘带阻力系数 $C^{[11]}$ 。

(3) 飘带上设置鼓风机兜可有效增大飘带阻力。通过伞塔投放试验结果计算的单个鼓风机兜阻力特性为后续飘带鼓风机兜设计提供了参考。

致谢:感谢航空工业航空救生装备有限公司技术中心王璐研究员、试验部张卫生高工、试验部洪森高工、二分厂郭俊琴技师在本文研究过程中提供的指导和帮助!

参考文献:

- [1] 万曲.大型水陆两栖飞机搜索救援技术研究[M].湖北:航空救生装备有限公司,2017.
- [2] 陈潇.小物质典型海况下精确空投技术[M].湖北:航空救生装备有限公司,2017.
- [3] 刘剑飞.大型水陆两栖飞机典型海难情况下空投救援食品及药品选项清单[M].北京:中国人民解放军海

军总医院,2018.

- [4] HOERNER S F. Fluid-dynamic drag[M]. [S.l.]: [s.n.], 1965.
- [5] DAHLKE C W. Aerodynamic and flight dynamics of ribbon stabilized M42 grenade: T-79-84 [R]. Redstone Arsenal, AL: US Aviation and Missile Command, 1979.
- [6] DAHLKE C W. Aerodynamic and flight dynamics of ribbon stabilized M42 grenades [C]//Proceedings of AIAA 17th Aerospace Sciences Meeting. New Orleans, LA: AIAA, 1979.
- [7] 刘琨.子弹子抛撒散布动力学分析[D].南京:南京理工大学,2007.
- [8] 马强.子弹引信MEMS安全系统设计与仿真[D].西安:西安电子科技大学,2012.
MA Qiang. Design and simulation of MEMS bullet fuze safety system [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [9] 张珂.子弹抛撒技术研究[D].南京:南京理工大学,2013.
- [10] 唐良锐.柔性飘带气动特性初探[J].气动实验与测量控制,1996,10(1):9-13.
TANG Liangrui. The first investigation on the aerodynamic characteristics of flexible ribbon[J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1996, 10(1):9-13.
- [11] AUMAN L M, DAHLKE C W. Drag characteristics of ribbons: AIAA-2001-2011 [R]. [S.l.]: AIAA, 2011.
- [12] 降落伞技术导论编写组.降落伞技术导论[M].北京:国防工业出版社,1977.
- [13] 兰文昌,王璐.空投物资减速飘带:CN201811294408.9[P].2019-03-15.
LAN Wenchang, WANG Lu. Airdrop supplies deceleration ribbon: CN201811294408.9[P].2019-03-15.
- [14] 金为铕.摄影测量学[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社,1996.
- [15] 高春鹏,马坤昌,刘清波,等.基于图像处理技术的降落伞充气时间测试方法[J].航空精密制造技术,2014,50(3):24-26.
GAO Chunpeng, MA Kunchang, LIU Qingbo, et al. Based on image processing technology parachute system aeration time judgement method[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014, 50(3):24-26.
- [16] 赵敏,张宇帆,张琪.全息编码靶标及图像逆投影校正匹配[J].光学学报,2020,40(6):0612001.
ZHAO Min, ZHANG Yufan, ZHANG Qi. Holographic coding target and image backprojection correction matching[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6):0612001.

(编辑:孙静)