

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.01.024

假人空投试验六分量天平研究

杨浩^{1,2} 姚裕¹ 李冬强¹

(1. 中兴通讯南京研究所, 南京, 210012; 2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要: 依据救生伞假人空投试验中六分量应变天平的工作条件与载荷特点, 确定了天平的设计载荷并完成了结构设计。针对实际应用中天平各种极限载荷情况, 计算了天平各弹性元件的安全系数。对天平应力场进行了有限元分析, 获取了天平整体应力分布状况。进一步对传统计算结果进行了验证, 为天平结构设计提供了理论依据。

关键词: 空投试验; 六分量天平; 安全系数; 有限元分析

中图分类号: V215.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)01-0167-06

Six-Component Force Balance in Dummy Airdrop Test

Yang Hao^{1,2}, Yao Yu², Li Dongqiang²

(1. Nanjing Research Institute of ZTE Corporation, Nanjing, 210012, China;

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In accordance with the working environment and loading features of the balance displayed in the airdrop test, the design load and the balance structure are defined. Safety factor of the spring is calculated in the every extreme overloading condition specific to the practical use of the balance. Stress field of the balance is deduced through finite element analysis, and the stress distribution of the whole balance is obtained. The results are tested further, which offer theoretic support for the final structure size of the balance.

Key words: airdrop test; six-component balance; safety factor; finite element analysis

航空救生装备不仅要满足现代飞机日益提高的战术性能和防护救生要求, 而且还必须符合人体的生理耐限^[1]。因此, 救生伞类产品的研制, 需要进行大量假人空投试验来确定救生系统的制动性能^[2-3]。而假人在空投过程中的飞行姿态影响真实的开伞过载, 为了准确掌握假人在空投试验中的过载, 本文研制一套与空投试验相匹配的动态测力系统, 通过对伞绳连接处力与力矩的测量, 来了解假人在任意姿态下救生伞的开伞力情况。

国内相关机构曾采用长方形截面柱体作为单分量力传感器, 测量救生伞张开瞬间产生的拉力^[4], 但无法掌握开伞力的全力信息。六分量应变天平作为直接感应和测量作用在模型上力和力矩的高精度测量装置^[5-7], 在试验中的作用显而易见。然而, 与常规货运精确空投过程中对姿态要求不同^[8-9] (即与常规天平不同), 由于假人飞行姿态的不确定性, 及假人安装空间的限制, 该六分量天平可能在严重超载的情况下工作, 天平在校准以及实际

基金项目: 科技支撑计划——工业部分(BE2013010-2)资助项目; 国家自然科学基金(51375230)资助项目。

收稿日期: 2014-07-02; **修订日期:** 2014-08-22

通信作者: 姚裕, 男, 副研究员, E-mail: YY503@126.com。

工作过程中有断裂的危险。国内在救生系统大迎角大侧滑角天平研制过程中,仅校核了天平在设计载荷情况下的结构强度^[10]。本文通过分析假人各种极限姿态下的载荷特点、假人安装空间、伞绳连接位置等,首次将六分量天平应用于假人空投试验,对天平进行了结构设计,并校核其强度。同时结合有限元分析,准确掌握危险截面及弹性元件在各种极限载荷下的应力分布,为天平的研制提供理论依据。

1 天平载荷情况分析

如图1所示,救生伞的两根伞绳通过连接架分别与安装于假人左右肩的天平前锥连接,天平后锥固结于假人背板。根据以往空投试验结果,开伞瞬间最大载荷约为25 kN,故单根伞绳最大瞬间载荷取15 kN。而假人下落过程中,由于假人质心不在其几何中心,受气动力及重力的影响,其轴向、侧向载荷不可能达到此最大值,同时考虑天平在假人腔内的安装空间,最终确定天平3个方向力的极限载荷为: $F_x=10\text{ kN}$, $F_y=15\text{ kN}$, $F_z=10\text{ kN}$ 。

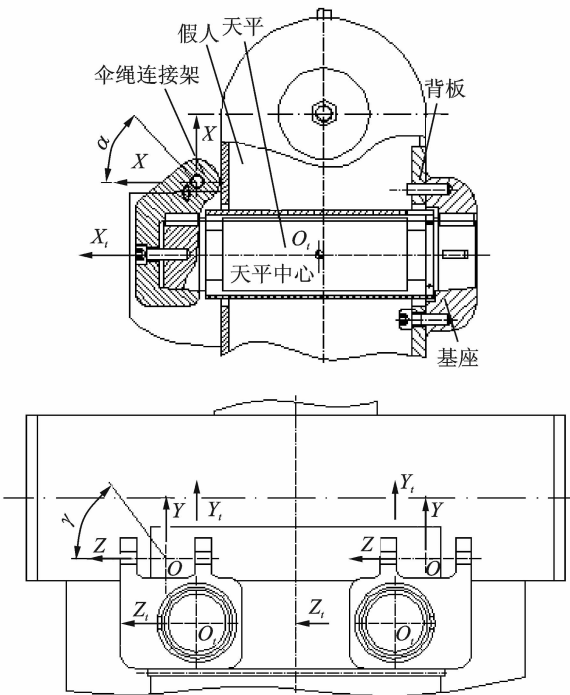


图1 天平连接示意图

Fig. 1 Chart of balance connection

如图1所示,伞绳对假人的载荷实际作用点为 O ,天平中心为 O_i ,当3个方向的力作用时,考虑到天平在假人腔内的安装位置、伞绳对天平的力作用点等

因素的影响,确定该六分量天平的设计载荷为: $F_x=5\ 000\text{ N}$, $F_y=7\ 500\text{ N}$, $F_z=5\ 000\text{ N}$, $M_x=430\text{ N}\cdot\text{m}$, $M_y=525\text{ N}\cdot\text{m}$, $M_z=860\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

2 天平结构设计

考虑天平在工作过程中,其前锥通过连接架与伞绳连接、后锥与假人背板连接,前锥、后锥的锥度均取1:5;根据假人实际工作要求,天平系统安装后假人质心与其脚底距离应为身体总长的45%~47%,同时兼顾假人腔体尺寸(厚度130 mm)、天平与假人的连接尺寸以及天平刚度、强度等综合因素,最终确定天平的外径为 $\varnothing 55\text{ mm}$,总长为213 mm。

类似传统的杆式六分量应变天平,将易受干扰的阻力测量元件独立设计布置在天平设计中心,关于天平对称面对称;将用于测量模型的升力、侧向力、俯仰力矩、偏航力矩4个分量的组合单元,即矩形截面梁对称布置在天平前后,尽量减小对阻力元件的干扰^[11]。此4个分量利用梁的“S”弯变形,梁在相应载荷作用下产生的应变输出按式(1)计算

$$\epsilon_i = \frac{6F_i L_i}{Eb_i h_i^2} \quad (1)$$

式中: F_i 为分量载荷(广义载荷); L_i 为各分量对应载荷下的力臂; b_i 为各分量相应梁的宽度; h_i 为各分量相应梁的厚度; E 为材料弹性模量。

为了有较大的应变输出,滚转力矩的测量由天平模型端矩形截面梁两侧的勾头梁完成,计算公式为

$$\epsilon = \frac{M_x}{G\beta HB^3 l / \rho L + 2\rho Ebb} \quad (2)$$

式中: M_x 为滚转力矩; G 为剪切弹性模量; H 为矩形截面梁高度; B 为矩形截面梁宽度; l 为勾头长度; ρ 为勾头中心与矩形梁中心的径向距离; L 为矩形截面梁长度; E 为材料弹性模量; b 为勾头宽度; h 为勾头厚度。

确定天平结构尺寸时,应使各分量有相近的灵敏度,并综合考虑结构与强度等因素。天平实物如图2所示。

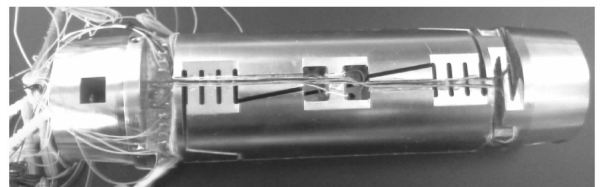


图2 天平实物图

Fig. 2 Picture of balance

3 安全系数计算

根据规定,救生伞打开瞬间冲击允许值应低于 $25g^{[12]}$ (g 为重力加速度),否则会危害飞行员人身安全,然而空投试验时,最大过载有时大于此值。研究人员分析发现,假人在救生伞张开瞬间的飞行姿态是导致上述情况的主要原因。在以下 3 种极限姿态下,假人将承受极限载荷,即:(1)假人身体与伞绳平行,此时法向力为极限载荷;(2)假人身体与伞绳垂直,且侧卧,此时侧向力为极限载荷;(3)假人身体与伞绳垂直,且仰卧,此时轴向力为极限载荷。本文将分别对上述情况进行天平强度校核,并与设计载荷情况进行比较。

3.1 设计载荷情况

如图 3 所示,综合考虑阻力元件设计结果与加工难度,取 $l_1 = l_2 = 14 \text{ mm}$, $b_1 = b_2 = 12 \text{ mm}$, $h_1 = 6 \text{ mm}$, $h_2 = 4.5 \text{ mm}$,测量片数目 $n_1 = 2$,支撑片数目 $n_2 = 12$,3 个方向力臂长度分别为 L_{M_x} , L_{M_y} , L_{M_z} 。由于测量片位于天平中心,俯仰力矩与偏航力矩对其影响忽略不计,因此对于测量片,有

$$F_{cy} = \frac{h_1}{n_1 h_1 + n_2 h_2} F_y + \frac{2h_1}{(n_1 h_1 + n_2 h_2) L_{M_x}} M_x \quad (3)$$

$$F_{cz} = \frac{h_1}{n_1 h_1 + n_2 h_2} F_z \quad (4)$$

$$F_{cx} = \frac{h_1^3}{n_1 h_1^3 + n_2 h_2^3} F_x \quad (5)$$

$$\sigma_a = \frac{F_{cy}}{b_1 h_1} + \frac{F_{cz}}{h_1 b_1^2} + \frac{F_{cx}}{b_1 h_1^2} \quad (6)$$

天平材料为 17-4PH,屈服极限 $\sigma_s = 1\ 400 \text{ MPa}$,所以安全系数 $n_1 = 11.98$ 。同理,对于支撑片 $n_2 = 9.57$ 。

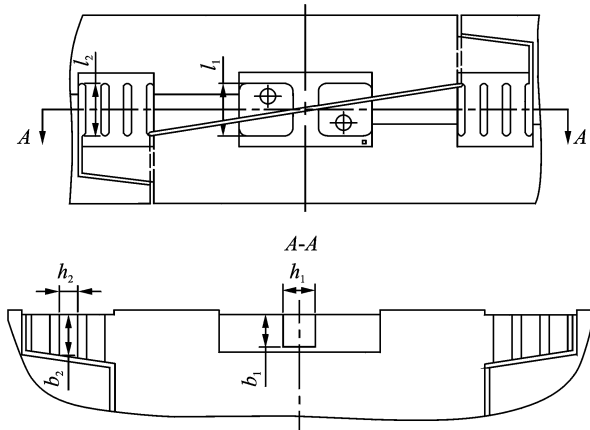


图 3 轴向力元件设计变量图

Fig. 3 Chart of variable for axial force component

如图 4 所示,对于组合测量元件,即矩形截面梁,取 $B = 31 \text{ mm}$, $H = 45 \text{ mm}$,天平中心直矩形截面梁端部距离 $L = 75 \text{ mm}$ 。由于受两侧勾头梁影响,矩形截面梁此时承受的滚转力矩为 $M_{x2} = 406 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。各分量载荷在矩形截面梁端部产生的应力为

$$\sigma_i = \frac{6F_i L}{B^{2.1} H^{1.2}} \quad i = y, z, M_y, M_z \quad (7)$$

$$\sigma_x = \frac{F_x}{BH} \quad (8)$$

$$\tau_{M_x} = \frac{M_{x2}}{\alpha HB^2} \quad (9)$$

所以

$$\sigma = \sigma_y + \sigma_{M_z} + \sigma_z + \sigma_{M_y} + \sigma_x \quad (10)$$

$$\tau = \tau_{M_x} \quad (11)$$

根据第四强度理论,有

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (12)$$

安全系数 $n_3 = 5.23$ 。

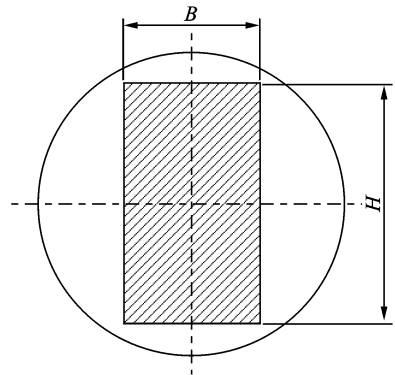


图 4 组合元件设计变量图

Fig. 4 Chart of variable for four-component

3.2 法向力最大情况

救生伞打开瞬间,如果伞绳牵引方向与假人平行,天平将承受最大法向力。此时 $F_y = 15\ 000 \text{ N}$,将力作用点移至天平中心,产生滚转力矩与俯仰力矩, $M_x = 360 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_z = 1\ 215 \text{ N} \cdot \text{m}$,其余分量为零。

根据式(3~6),对于天平轴向力元件,测量片和支撑片安全系数分别为 $n_1 = 38.31$, $n_2 = 24.33$ 。根据式(7~12),天平矩形截面梁安全系数为 $n_3 = 6.19$ 。

3.3 侧向力最大情况

救生伞打开瞬间,如果伞绳牵引方向与假人侧面平行,天平将承受最大侧向力。此时 $F_z = 10\ 000 \text{ N}$,将力作用点移至天平几何中心,产生滚

转力矩与偏航力矩, $M_x = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_z = 810 \text{ N} \cdot \text{m}$, 其余分量为零。

根据式(3~6), 对于天平轴向力元件, 测量片和支撑片安全系数分别为 $n_1 = 21.53$, $n_2 = 12.39$ 。根据式(7~12), 天平矩形截面梁安全系数 $n_3 = 6.21$ 。

3.4 轴向力最大情况

救生伞打开瞬间, 如果伞绳牵引方向与假人正面平行, 天平将承受最大轴向力。此时取 $F_x = 10\,000 \text{ N}$, 将力作用点移至天平几何中心, 产生俯仰力矩与偏航力矩, $M_y = 240 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_z = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$, 其余分量为零。

根据式(3~6), 对于天平轴向力元件, 测量片和支撑片安全系数分别为 $n_1 = 10.59$, $n_2 = 11.48$ 。根据式(7~12), 天平矩形截面梁安全系数 $n_3 = 16.19$ 。

3.5 勾头梁强度校核

勾头梁布置于矩形截面梁两侧, 如图5所示, 其刚度远小于矩形截面梁, 因此除滚转力矩以外的其他5个分量对勾头梁影响可忽略不计。经过计算, 横向力最大时, 经坐标变换后产生的滚转力矩最大。其设计参数为: $l = 19 \text{ mm}$, $b = 4.6 \text{ mm}$, $h = 2.4 \text{ mm}$, $\rho = 22 \text{ mm}$ 。此时, 滚转力矩载荷 $M_x = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$, 每个勾头梁所承受载荷为 $M_{x1} = 47.9 \text{ N} \cdot \text{m}$, 根据第一强度理论

$$\sigma_a = \frac{M_{x1}}{abh} \quad (13)$$

安全系数 $n = 7.25$ 。

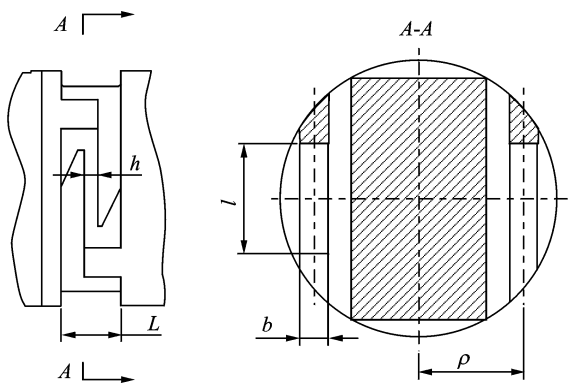


图5 勾头梁设计变量图

Fig. 5 Chart of variable for small beam

4 天平的有限元分析

传统校核计算方法有一定局限性, 虽然获取了

各弹性元件的安全系数, 但天平整体应力分布及危险截面应力梯度变化仍然未知。引入有限元分析, 可获取天平在任意载荷状态下最大应力值及其所在部位, 为强度校核提供更有力的理论保障。

应用 Abaqus 软件对天平进行应力分析, 天平参数模型如图6所示。

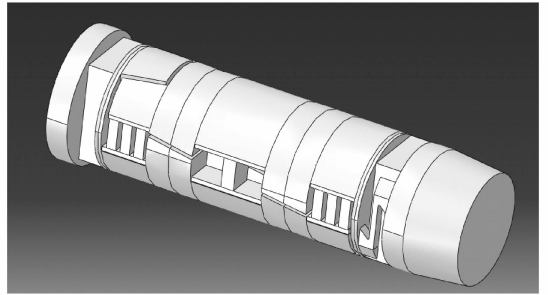


图6 导入天平模型

Fig. 6 Imported balance model

采用二次缩减积分方法进行模型的单元网格化分。天平工作后端与假人背部固定, 前端通过伞绳连接架与伞绳相连, 因此分别设置轴向旋转自由度约束和全自由度固定约束于天平首尾两端, 使天平成超静定梁方式固定。另外, 六个自由度载荷都要通过伞绳连接架传递到天平, 利用多点约束添加虚拟刚体的方法来模拟载荷传递。天平材料为沉淀硬化不锈钢 17-4PH 时效处理, 确定弹性模量为 $E = 2.07 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。创建4个工况(1个3分量载荷工况和3个单分量载荷工况), 对设计载荷、法向力载荷超载、横向力载荷超载、轴向力载荷超载4种天平工作情况进行强度校核。

根据第四强度理论, 设计载荷作用于天平时, 冯米斯应力结果云图如图7(a)所示, 出现了多个应力集中截面, 其中应力最大点位于天平主体框边缘, 应力值为 304.5 MPa , 安全系数为 4.60 。同样, 图7(b~d)分别为法向力超载、横向力超载、轴向力超载情况下天平应力云图。最大应力值分别为 $289.9, 267.3, 103.4 \text{ MPa}$, 安全系数分别为 $4.83, 5.24, 13.54$ 。

传统计算方法与有限元方法得出的安全系数对比结果如表1所示, 可以看出, 由于条件假设以及模型简化等原因, 两种方法得出的结果有所不同, 但均在安全范围之内, 符合设计要求。

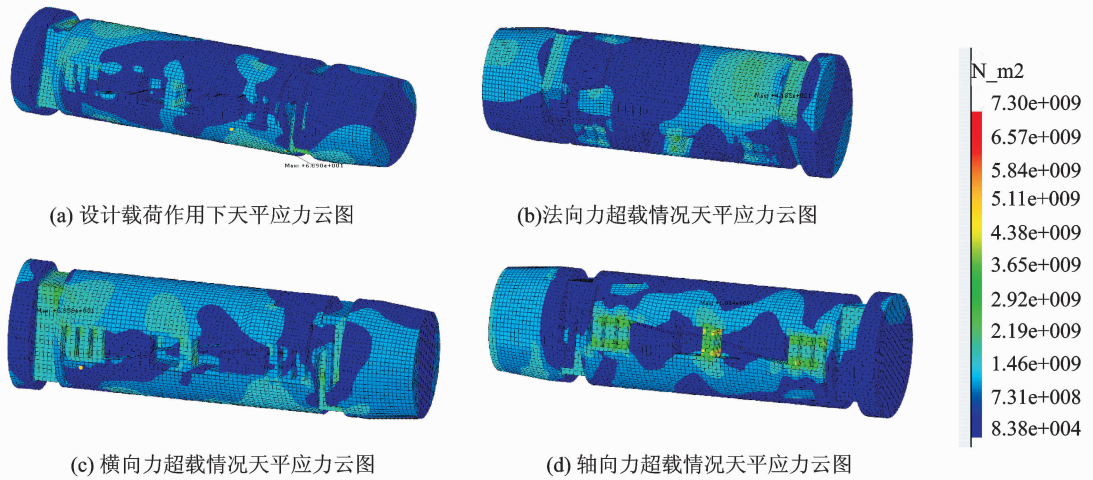


图 7 天平应力云图

Fig. 7 Stress contours of balance

表 1 安全系数对比

Tab. 1 Comparison of safety factor

方法	部件	正常载荷	法向力最大	横向力最大	轴向力最大
计算方法	测量片	11.98	38.31	21.53	10.59
	支撑片	9.57	24.33	12.39	11.48
	矩形截面梁	5.23	6.19	6.21	16.19
	勾头梁			7.25	
有限元方法	天平整体	4.60	4.83	5.24	13.54

4 结束语

本文在充分考虑了天平与假人连接方式、天平假人系统的重量与重心、天平在假人空投试验中各种超载工作情况后,对天平进行了结构设计、强度校核,通过传统材料力学方法及有限元方法掌握了天平元件在 4 种工作情况下的安全系数与应力分布,确保天平在假人空投试验中安全、可靠。

参考文献:

- [1] 李锐. 航空救生装备的发展[J]. 航空科学技术, 1995(1):20-23.
Li Rui. The development of aviation lifesaving equipment[J]. Aerospace Science and Technology, 1995(1):20-23.
- [2] Kelly K, Pena B. Wind study and GPS dropsonde applicability to airdrop testing[J]. AIAA Paper, 2001-2022, 2001.
- [3] Hattis P D, Appleby B D, Fill T J, et al. Precision guided airdrop system flight test results[C]//14th

AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference. RESTON, USA: Sage Publications, 1997:3-5.

- [4] 艾文涛. 18 kN 肩带力传感器的设计[C]//中国航空学会人体工程、航医、救生专业委员会第六届学术年会. 襄樊: 中航第一集团公司五二〇厂, 2003:304-309.
Ai Wentao. The design of 18 kN shoulder straps of the force sensor[C]//The Sixth Conference of Chinese Aviation Society of Human Engineering, Aerospace Medicine, Rescue. Xiangfan, China: Aviation Industry Corporation of China, 2003:304-309.
- [5] 姚裕, 吴洪涛, 张召明. 并联风洞天平应用研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(1):84-87.
Yao Yu, Wu Hongtao, Zhang Zhaoming. Application of parallel Wind tunnel balance[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(1):84-87.
- [6] 姚裕, 吴洪涛, 张召明, 等. 基于并联机构的六分量并联天平及其力雅可比矩阵研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 23(7):768-770.

- Yao Yu, Wu Hongtao, Zhang Zhaoming, et al. Six axes parallel balance based on parallel mechanism and analysis of its force Jacobian matrix[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 23(7):768-770.
- [7] 姚裕, 张召明. 整体式盒式应变天平有限元设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1):58-61.
Yao Yu, Zhang Zhaoming. Finite element design on an integrated box balance[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(1):58-61.
- [8] Wang Y, Yang C, Ke P. Airbag cushion process simulation for cargo airdrop system[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(14):3176-3179.
- [9] Wright R, Benney R, McHugh J. Precision airdrop system[J]. AIAA Paper, 2005-164, 2005.
- [10] 陈德华, 李晓华, 彭云. 弹射救生系统大迎角大侧滑角天平设计研究[J]. 实验流体力学, 2005, 19(1):66-70.
- Chen Dehua, Li Xiaohua, Peng Yun. Development of the balance for crew escape system at large angles of attack and sideslip angles[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2005, 19(1):66-70.
- [11] 贺德馨. 风洞天平[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.
He Dexin. Wind tunnel balance[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001.
- [12] 国防科工委. 人体脊柱对开伞冲击力的耐受强度[S]. GJB232-87. 北京:国防科工委军标出版发行部, 1987:1-4.
- State Commission of Science and Technology for National. The spine of the human body to withstand strength parachute opening shock force[S]. GJB232-87. Beijing: State Commission of Science and Technology for National, 1987:1-4.