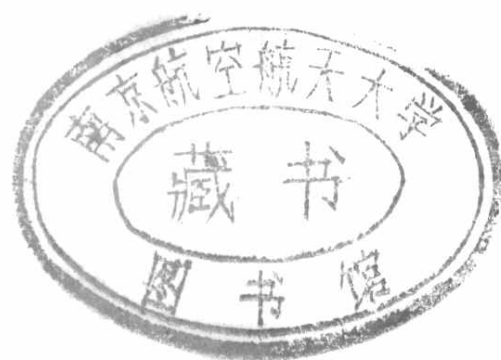


航空宇航学院

第五分册



航空宇航学院

014 系

015 系

010 院办

航空宇航学院2007年学术论文清单（014）

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	朱春玲 李宇钦 张泉	教授 硕士 研高	014 外单位 外单位	基于旋转多圆柱的冰风洞水滴参数分析方法	航空动力学报	2007. 22. 02
2	方贤德 王伟志 李小建	教授 博士 硕士	014 外校 014	平流层飞艇热仿真初步探讨	航天返回与遥感	2007. 28. 02
3	方贤德	教授	014	降落伞缩距软着陆技术的研究及其进展	航天返回与遥感	2007. 28. 01
4	方贤德	教授	014	直膨式太阳能辅助热泵空调热水器的研究	制冷空调工程技术	2007. 02
5	刘卫华 林丽 朱高涛	教授 硕士 硕士	014 014 014	迷宫密封机理的研究现状及其进展	流体机械	2007. 35. 02
6	熊贤鹏 刘卫华 昂海松	博士 教授 教授	014 014 011	Simulation of Microstructure and Rheogical Properties of Surfactant solution	南京航空航天大学学报	2007. 24. 03
7	熊贤鹏 林丽 刘卫华 昂海松	博士 硕士 教授 教授	014 014 014 011	电子设备吊舱环境控制系统的研究	测控技术	2007. 26. 10
8	熊贤鹏 刘卫华 昂海松	博士 教授 教授	014 014 011	教练机座舱气流组织和热舒适性	应用科学学报	2007. 25. 06
9	熊贤鹏 刘卫华 昂海松	博士 教授 教授	014 014 011	竖直上升通道内微气泡湍流流动的数值模拟	南京航空航天大学学报	2007. 39. 01
10	林丽 刘卫华	硕士 教授	014 014	齿形夹角对迷宫密封性能影响的数值研究	润滑与密封	2007. 32. 03
11	林丽 刘卫华	硕士 教授	014 014	基于FLUENT的迷宫密封机理研究	中国机械工程	2007. 18. 18
12	姚秋萍 马良军 宋保银	博士 硕士 教授	014 014 014	水平管内动载气水两相流流动特性初探	中国工程热物理学会多相流学术会议	2007
13	赵枚 宋保银	硕士 教授	014 014	动载对气液两相流动特性影响实验研究	江苏省暖通空调制冷2007年学术年会	2007
14	余莉 明晓	副教授 教授	014 0121	Study on transient aerodynamic characteristics of parachute opening process	Acta Mechanica Sinica	2007. 23. 06
15	余莉 滕海山 明晓	副教授 高工 教授	014 外单位 0121	利用七孔探针对降落伞流场的试验测量研究	中国空间科学技术	2007. 27. 05
16	余莉 张鑫华 李水生	副教授 工程师 高工	014 外单位 外单位	降落伞伞衣载荷的性能试验	北京航空航天大学学报	2007. 33. 10
17	余莉 明晓	副教授 教授	014 011	降落伞的流场特性研究	空气动力学学报	2007. 25. 03
18	余莉 史献林 明晓	副教授 硕士 教授	014 014 0121	降落伞充气过程的数值模拟	航空学报	2007. 28. 01
19	赵晓军 余莉	硕士 副教授	014 014	热管的电子设备冷却技术	世界科技研究与发展	2007. 29. 06
20	元伟伟 蒋彦龙	硕士 副教授	014 014	风力发电冷却技术	世界科技研究与发展	2007. 29. 02
21	曹业玲 蒋彦龙 宋保银	014 014 014	讲师 副教授 教授	内融冰盘管动态蓄冰特性数值模拟与实验研究	南京航空航天大学学报	2007. 39. 06
22	曹业玲 夏文庆 蒋彦龙	014 014 014	讲师 副教授 副教授	三热力系统耦合性能研究	世界科技研究与发展	2007. 29. 05
23	曹业玲 张国强 姜正良	014 外单位 外单位	讲师 高工 副教授	组合式空调机组设计计算绘图一体化软件	暖通空调	2007. 37. 11
24	曹业玲 张建忠	讲师 高工	014 外校	蓄冰盘管冰层厚度测量及关外蓄冰性能实验	南京航空航天大学学报	2007. 39. 01

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
25	余刚 余奇	副教授 讲师	014 外校	Feasibility of sequential removal of NO and SO2 using non-thermal plasma and adsorbent simultaneously	Internation Conference on Power Engineering-2007	2007
26	余刚 顾宁 蒋彦龙 曾克思	副教授 讲师 副教授 硕士	014 外单位 014 014	电晕耦合无声放电结构电极配置数值模拟	南京航空航天大学学报	2007. 39. 06
27	李凤志	讲师	014	a computational analysis for effects of fiber hygroscopicity on heat and moisture transfer in textiles with pcm microcapsules	modelling and simulation in materials science and engineering	2007. 15. 03

航空宇航学院2007年学术论文清单（015）						
序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	余红发	教授	015	菱镁材料及其制品耐久性研究与分析	中国菱镁行业协会2007年年会 特邀主报告	2007. 10. 18-21
2	余红发 刘俊龙 张云升 孙伟 李美丹	教授 教授 副教授 教授	015 外单位 外校 外校 外校	高性能混凝土微观结构及其高耐久性形成机理	南京航空航天大学学报	2007. 39. 02
3	余红发 麻海燕 燕坤 杨礼明	教授 讲师 硕士 博士	015 015 015 015	大掺量矿物掺和料混凝土在多因素作用下的耐久性	2007年 第一届海峡两岸混凝土 技术研讨会论文	2007. 11. 30-12. 1
4	余红发 孙伟	教授 教授	015 外校	混凝土氯离子扩散理论模型	东南大学学报	2006. 36. 增2
5	余红发 孙伟 张云升 王甲春 陈树东	教授 教授 副教授 副教授	015 外校 外校 015 外校	在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法的研究 II——损伤初速度和损伤加速度及其对混凝土冻融寿 命的影响	《硅酸盐学报》创刊五十周 年暨中国硅酸盐学会2007年学 术年会	2007. 8. 22-24
6	余红发 孙伟 何庆勇	教授 教授	015 外校 外单位	盐湖地区混凝土的耐久性研究III——盐湖卤水类型对 混凝土耐久性的影响	混凝土	2007. 00. 02
7	余红发 孙伟 金祖权 刘建忠	教授 教授	015 外校 外校 外校	土木工程结构混凝土寿命预测的损伤演化方程	东南大学学报	2006. 36. 增2
8	余红发 孙伟 刘连新 翁智财 陈浩宇 李美丹	教授 教授 教授	015 外校 外校 外校 外校 外校	在盐湖卤水环境中混凝土应力腐蚀行为	哈尔滨工业大学学报	2007. 39. 12
9	余红发 孙伟 张云升 王甲春 陈树东	教授 教授 副教授 副教授	015 外校 外校 外校 015 外校	在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法的研究I ——损伤演化方程与损伤失效模式	《硅酸盐学报》创刊五十周 年暨中国硅酸盐学会2007年学 术年会 分组主报告	2007. 8. 22-24
0	余红发 孙伟 张云升 缪昌文 金祖权 刘建忠	教授 教授 副教授 教授 讲师 工程师	015 外校 外校 外单位 外校 外校 外单位	在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法的研究 III——基于损伤演化方程的寿命预测方法及其在重大 土木工程中的应用	《硅酸盐学报》创刊五十周 年暨中国硅酸盐学会2007年学 术年会	2007. 8. 22-24
	余红发 翁智财 孙伟 陈浩宇 张金花	教授 教授	015 外单位 外校 外单位 外单位	矿渣掺量对混凝土氯离子结合能力的影响	硅酸盐学报	2007. 35. 06
	樊友煌 余红发 张云清	工程师 教授 博士	外单位 015 015	干湿循环对混凝土在高浓度卤水中氯离子扩散行为的 影响	盐湖研究	2007. 15. 01
	张云升 孙伟 金祖权 余红发 贾艳涛	副教授 教授 教授 讲师	外校 外校 外校 015 外校	In situ observing the hydration process of K- PSS geopolymetric cement with environment scanning electron microscopy	Materials Letter	2007. 61. 07

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
14	王甲春 余红发 阎培渝	博士后 教授 教授	015 015 外单位	混凝土结构早龄期开裂的预测	东南大学学报	2006. 36. 增2
15	王甲春 余红发 阎培渝	博士后 教授 教授	015 015 外单位	混凝土结构早龄期内应力的计算	建筑结构学报	2006. 27. 增
16	王甲春 阎培渝 余红发	博士后 教授 教授	015 外校 015	Apparent Activation Energy of Concrete in Early Age Determined by Adiabatic Test	Journal of Wuhan University of Technology- Materials Science	2007. 22. 03
17	王甲春 阎培渝 余红发	博士后 教授 教授	015 外校 015	混凝土结构早龄期开裂的分析与预测	沈阳建筑大学学报	2007. 23. 01
18	王甲春 阎培渝 余红发	博士后 教授 教授	015 外校 015	混凝土结构早龄期开裂的概率分析	第15届全国结构工程学术会议论文集（第Ⅱ册）	2006. 10. 14-17
19	郝娟 余红发 周鹏 曹文涛 白康 韩丽娟	硕士 教授 硕士 硕士 硕士 硕士	015 015 015 015 015 015	膨胀剂和纤维及其复合对大掺量矿物掺合料混凝土干燥收缩的影响	华中科技大学学报	2007. 24. 04
20	张建业 余红发 黄东升 燕坤 张伟 李美丹	硕士 教授 教授 硕士 硕士 硕士	015 015 015 015 015 外校	大掺量矿物掺合料砼基本力学性能的试验研究	公路与汽运	2007. 00. 03
21	吴瑾 吴文操	教授	015 015	Study on wireless sensors for the corrosion monitoring of reinforcement in concrete structures	Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Structure, Material and Environment	2007
22	吴瑾 吴文操	教授	015 015	混凝土结构中钢筋腐蚀智能监测技术	腐蚀科学与防护技术	2007. 19. 02
23	杨立 吴瑾	教授 教授	015 015	Package of Fiber Bragg Grating Sensor in Civil Engineering	Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Structure, Material and Environment	2007
24	杨杰 李爱群 缪长青	讲师	015 外校 外校	润扬悬索桥动力特性的特征提取与重构	南京航空航天大学学报	2007. 39. 03
25	高培伟 卢小琳	副教授 讲师	015 06	Effects of fly ash on the properties of environmentally friendly dam concrete	Fule	2007. 86. 7-8
26	高培伟	副教授	015	Morphology of mgo hydration products under different curing conditions	Chinese journal of inorganic chemistry	2007. 23. 06
27	高培伟 卢小琳	副教授 讲师	015 06	novel repair materials and techniques for airport pavement	International conference on transportation engineering 2007	2007
28	高培伟 卢小琳	副教授 讲师	015 06	粉煤灰对掺新型镁质类膨胀剂的大体积混凝土力学性能的影响	水力发电学报	2007. 26. 03
29	高培伟	副教授	015	Mgo膨胀剂水化活性的研究	2007年中国硅酸盐学会2007年学术年会	2007
30	陈卫峰 高培伟	硕士 副教授	015 015	新型硅藻土改性剂对沥青混合料路用性能的影响	材料科学与工程学报	2007. 25. 04
31	石南南 高培伟	硕士 副教授	015 015	电磁吸波材料的吸波机理、特性及其建筑上应用	功能材料	2007
32	闫亚楠 高培伟	硕士 副教授	015 015	大体积混凝土收缩抑制技术的研究	工业建筑	2007. 37. 411
33	林晖 高培伟	硕士 副教授	015 015	混凝土早期开裂试验方法评述	工业建筑	2007. 37. 411
34	金少春 高培伟	硕士 副教授	015 015	新型低噪音水泥混凝土路面研究与探讨	华东公路	2007. 166. 04
35	李小燕 高培伟	硕士 副教授	015 015	掺聚乙烯醇纤维混凝土凝缩值的测定及抑制凝缩机理探讨	第十届全国水泥和混凝土化学及应用技术会议	2007. 11. 23-26

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
36	李小燕 高培伟	硕士 副教授	015 015	聚丙烯醇纤维对机场道面混凝土性能的影响	广东公路交通	2007. 00. 01
37	赵春润 赵新铭	硕士 副教授	015 015	CM三维复合地基研究现状及分析	隧道建设	2007. 27. 05
38	赵新铭 欧日强	副教授 硕士	015 015	混凝土结构加固的主要方法与亟待解决的问题	港工技术	2007. 00. 02
39	赵新铭	副教授	015	基于CG法刚架结构位移参数的动态Bayes随机估计	南京航空航天大学学报	2007. 39. 01
40	赵新铭	副教授	015	基于Mindlin理论的Winkler地基参数动态Bayes识别	工程力学	2007. 24. 10
41	赵新铭 欧日强 吴瑾	副教授 硕士 教授	015 015 015	预应力碳纤维布加固混凝土梁的抗弯承载力计算	河海大学学报	2007. 35. 06
42	吴强 艾军 陈少林 董欣	讲师 教授 副教授 硕士	015 015 015 015	板柱—剪力墙结构抗震的弹塑性时程分析及失效模拟	振动与冲击	2007. 26. 11
43	王喆	讲师	015	Stochastic dynamic analysis of inelastic structures using force analogy method	Journal of Engineering Mechanics, ASCE	2007. 133. 04
44	王喆	讲师	015	浅谈新加坡大学研究生教育	南京航空航天大学学报（社科版）	2006. 08. 01
45	王菲华 季天剑	硕士 讲师	015 015	小城市道路交通安全分析及控制对策	第七届全国交通运输领域青年学术会议上交流	2007
46	程晔 龚维明 戴国亮 季杰	讲师 教授 副教授 工程师	015 外校 外校 外校	超长大直径钻孔灌注桩桩端承载力研究	南京航空航天大学学报	2007. 39. 03
47	高俊启 吴瑾 赵新铭 李俊 杨立 耿犖	讲师 教授 副教授 讲师 硕士 硕士	015 015 015 015 015 015	Corrosion monitoring in concrete structure using fiber optic sensor	Proceedings of international conference on health monitoring of structure, material and environment	2007
48	高俊启 施斌 张巍 朱虹	讲师 教授 副教授 副教授	015 015 015 015	Monitoring the stress of the post-tensioning cable using fiber optic distributed strain sensor	Measurement	2006. 39. 05
49	高俊启 张巍 施斌	讲师 副教授 教授	015 015 015	涂覆和护套对分布式光纤应变检测的影响研究	工程力学	2007. 24. 08
50	唐敢 尹凌峰 赵惠麒	讲师 副教授 教授	015 外校 外校	结构非线性分叉失稳的扰动策略研究	南京航空航天大学学报	2007. 39. 06
51	唐敢 赵新铭	讲师 副教授	015 015	房屋建筑学课程设计改革探讨	高等建筑教育	2007. 16. 03
52	李俊 吴瑾 高俊启	讲师 教授 讲师	015 015 015	Corrosion Monitoring of Concrete Structures by Optical Fiber Grating Sensing	Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Structure, Material and Environment	2007. 01
53	李俊	讲师	015	高层建筑桩筏基础中筏板内力分析	工业建筑（增刊）	2007. 37. 11
54	李俊 吴瑾 高俊启	讲师 教授 讲师	015 015 015	直接监测钢筋腐蚀的新型光栅传感器	传感器与微系统	2007. 12
55	毛利军 陈少林	副教授 副教授	015 015	Modal parameter identification of damaged buildings based on assumed modes method	International Conference on Health Monitoring of Structure Material and Environment	2007. 10. 16-18
56	毛利军 陈少林	副教授 副教授	015 015	基于多目标优化的病态逆问题求解	华东交通大学学报	2007. 24. 05
57	毛利军 陈少林	副教授 副教授	015 015	基于假设模态法的结构模态识别	第九届全国振动理论及应用学术会议	2007. 10. 17-19

航空宇航学院2007年学术论文清单（0100）

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	陈修文 阮佳琪	讲师 助教	0100 外单位	标本兼治——促进毕业生就业	现代学术研究杂志	2007. 04. 08
2	陈修文 张林	讲师 助教	0100 外单位	大学生失信行为的诊断与救治	南京航空航天大学学报(社会科学版)	2007. 09. 02
3	任盈盈 袁智强 张辉	助教 工程师 副教授	0100 05 10	基于职务说明书的高校学生干部管理	南京航空航天大学学报(社会科学版)	2007. 09. 04
4	任盈盈 袁智强	助教 工程师	0100 05	大学生品牌实然性研究	中国高新技术企业	2007. 9

平流层飞艇热仿真初步探讨

方贤德¹, 王伟志², 李小建¹

(1 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016)

(2 中国空间技术研究院, 北京 100076)

摘 要 结合平流层的环境条件和平流层飞艇的特点, 文章详细分析了影响飞艇热平衡的基本热源和换热途径, 建立了平流层飞艇的传热数学模型, 给出了飞艇内表面冷热部分相互之间的辐射换热模型, 在此基础上, 对于某概念飞艇进行了仿真分析, 得出了蒙皮热点、蒙皮冷点以及艇内气体的温度, 为进一步开展平流层飞艇的热分析奠定基础。

关键词 平流层 飞艇 热力学仿真 温度平衡

A Study of Thermal Simulation of Stratospheric Airships

Fang Xiande¹ Wang Weizhi² Li Xiaojian¹

(1 College of Aerospace Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

(2 Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076)

Abstract This paper analyzes heat sources and heat exchange patterns that affect thermal balance and thermal performance of airships flying in stratospheric environment. Heat transfer models used for stratospheric airships are built, including those of solar radiation and long-wave transfer as well as convective heat transfer. Based on the mathematical models, thermal simulation program is developed. Simulation of a concept stratospheric airship is carried out, and the temperatures of the cold spot, hot spot and inside air are calculated.

Key Words Stratospheric Airships Thermal simulation Thermal balance

1 引言

平流层飞艇是一种能够执行多种任务的低成本共用平台。主要特点有: 覆盖区域大、留空时间长、可机动定点且连续工作、灵活机动、易于部署、战场生存能力强、成本低、可重复使用, 在情报侦察、预警探测、通信中继、战场监测及森林火警、大气污染监测、导航定位、空中交通管制等众多领域有着广泛的应用, 因此, 世界许多发达国家, 例如美国、欧洲、日本、韩国等, 正在加紧研究开发工作, 使平流层飞艇的研究进入了快速发展时期。中国对平流层飞艇重

要性的认识也迅速提高, 很多单位和布盟正在积极开展相关的研究工作。但是, 平流层飞艇的研制涉及到众多高、新技术的领域, 诸多关键技术有待攻关、分析方法有待建立和完善。

众所周知, 目前的飞艇还都是应用于对流层的, 其浮力决定于囊体内的气体温度与环境空气温度的差值。而在平流层, 压力为 5.53kPa, 接近地面的 1/18, 密度为 0.0889kg/m³, 接近为海平面密度的 1/14, 温度很低, 而紫外线辐射强度很大, 对于平流层飞艇来说, 由于强烈的太阳辐射和极低的对流换热使得飞艇存在“过热”和“过冷”。因此, 对于一个巨大的非刚性结构体, 要保证其长期可靠性、稳定性和可控性, 对其进行热分析十分必要。这一基础研究将直接影响到飞艇的结构设计、飞行预测和飞行控制, 是

收稿日期: 2007 - 02 - 27

平流层飞艇研制中待攻克的关键技术之一。

文章根据文献[1]、[3]的研究,建立了飞艇的传热数学模型,包括热平衡方程、直接太阳辐射、天空散射辐射、地面反射辐射、与天空的长波辐射换热,与地面的长波辐射换热,与大气和艇内气体的对流换热,以及飞艇内表面冷热部分相互之间的辐射换热等。在此基础上,对于某概念飞艇,进行传热计算,得出了蒙皮热点、蒙皮冷点以及艇内气体的温度。

2 基本热源、换热途径和热平衡方程

影响飞艇热平衡的基本热源和换热途径有:

- 飞艇蒙皮吸收的直接太阳辐射 Q_{DN} ;
- 飞艇蒙皮吸收的天空散射辐射 Q_d ;
- 飞艇蒙皮吸收的地面反射辐射 Q_g ;

·飞艇蒙皮与大气的长波辐射换热 $Q_{IRa \rightarrow s}$;

·飞艇蒙皮与地面的长波辐射换热 $Q_{IRa \rightarrow g}$;

·飞艇蒙皮与外界大气的对流换热 Q_{co} ;

·飞艇蒙皮与艇内气体的对流换热 Q_{ci} ;

·飞艇蒙皮内表面冷热部分相互之间的辐射换热 Q_r 。

假定太阳相对于飞艇的高度角(以下简称为太阳高度角)大于零。以一假想水平面将飞艇蒙皮从中线切开,分成上下两部分,如图1所示,忽略蒙皮和艇内气体热容量的影响时,飞艇上蒙皮的热平衡方程为:

$$Q_{DN} + Q_d - Q_{IRa \rightarrow s} - Q_{co} - Q_{ci1} - Q_{r1 \rightarrow 2} = 0 \quad (1)$$

飞艇下蒙皮的热平衡方程为:

$$Q_g + Q_d + Q_{ci2} + Q_{r1 \rightarrow 2} - Q_{IRa \rightarrow g} - Q_{co} = 0 \quad (2)$$

艇内气体的热平衡方程为:

$$Q_{ci1} = Q_{ci2} \quad (3)$$

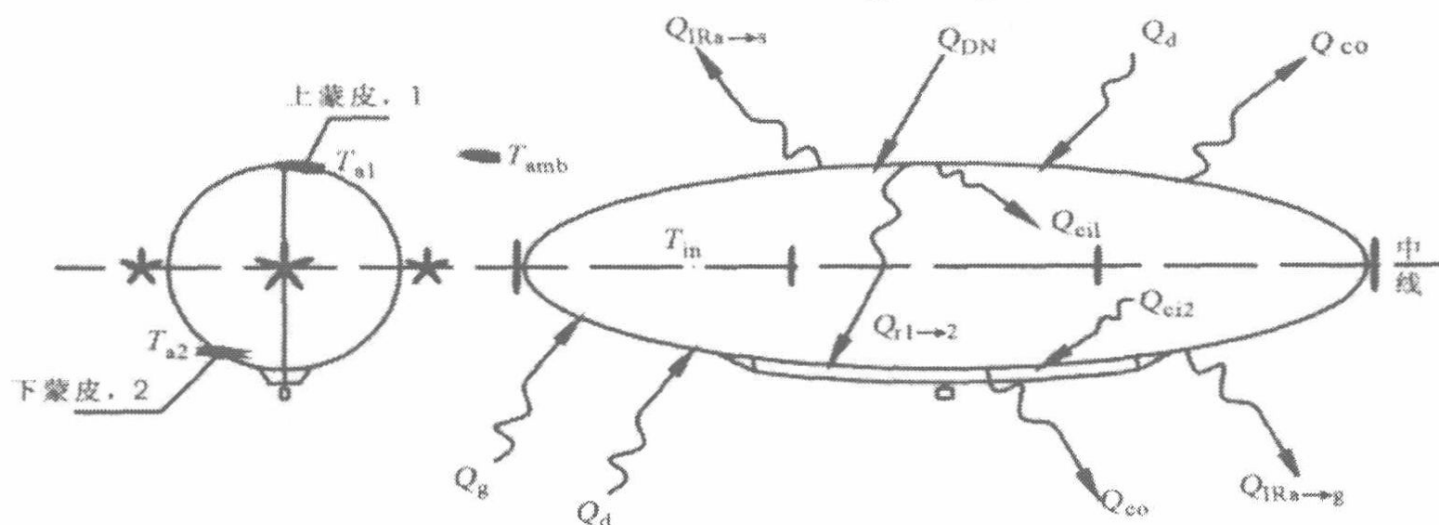


图1 热平衡示意图

穿越大气层时被吸收去的能量越少。 τ_{atm} 是 m (大气质量) 的函数,

$$m = f(P_o, P_a, C_m, H) \quad (5)$$

式中 P_a ——飞艇周围的大气压力,

P_o ——地球标准水平表面上的大气压力,

C_m ——大气质量修正系数,用于考虑大气含烟雾产生的影响;

H ——太阳高度角。

水平面上的太阳直射辐射强度 I_{Dh} 可用下式计算:

$$I_{Dh} = I_{DN} \sin H \quad (6)$$

3.2 天空散射辐射强度

天空散射辐射是太阳射线经过大气层时,由于大气中某些成分(对于地球大气层,主要是水蒸气和尘埃等)的作用,光线向各个方向反射和折射,形成一个由整个天穹所照射的散乱光。多云天气,天空散射辐射增多,而太阳直射辐射则相应减少。

对于天空散射辐射强度的估算是困难的。对于晴

3 辐射换热数学模型

3.1 太阳直射辐射强度

在垂直于阳光射线的黑体表面上,单位面积单位时间内获得的太阳直射辐射能量称为太阳直射辐射强度。在日地平均距离的条件下,地球大气层上边界处垂直于阳光射线的单位黑体面积在单位时间内获得的太阳辐射能量,称为太阳常数,用 I_0 表示, $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ 。另一方面,太阳辐射与日地距离有关,因此在远日点和在近日点的太阳辐射强度与太阳常数有一定差异。

高度为 z 的飞艇表面的太阳直射辐射强度,记为 I_{DN} ,

$$I_{DN} = \tau_{atm} I_0 \quad (4)$$

式中 τ_{atm} 称为大气透明系数,是衡量大气透明程度的标志。 τ_{atm} 值越接近 1,表明大气越清澈,阳光

天,水平面上的天空散射辐射强度 I_{dh} 可用下式计算:

$$I_{dh} = \frac{I_0 \sin H}{2} \cdot \frac{m(1 - \tau_{atm})}{m - 1.41 \tau_{atm}} \quad (7)$$

对于任一倾角为 θ 的平面,可近似认为其所受到的天空散射辐射强度 $I_{d\theta}$ 为:

$$I_{d\theta} = I_{dh} \cos^2 \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

3.3 地面反射辐射强度

太阳射线到达地球表面后,其中一部分被地球表面所反射。一般情况下,可认为地球表面是纯粹的散射面,于是各个方向的反射构成了由中短波组成的另一种太阳散射辐射,称为地面反射辐射。晴天,空中水平面接受到的地面反射辐射 I_{gh} 为^[3]:

$$I_{gh} = \rho_g (I_{Dh} + I_{dh}) \quad (9)$$

任一倾角为 θ 的平面受到的地面反射辐射 $I_{g\theta}$ 为

$$I_{g\theta} = \rho_g (I_{Dh} + I_{dh}) (1 - \cos^2 \frac{\theta}{2}) \quad (10)$$

式中 ρ_g 为地面平均反射系数。草地和城市一般可取 $\rho_g = 0.2$,有雪时可取 $\rho_g = 0.7$ 。

3.4 遮云系数 CF

以上飞艇蒙皮表面接收到的辐射强度的计算公式是对晴天而言的。云层衰减辐射能,对于上述各种辐射能到达飞艇表面有很大影响,这种影响可用遮云系数加以考虑。遮云系数 CF 定义为天空被云层全部遮挡的比例。

平流层飞艇在云层之上,只有飞艇下蒙皮接收到的辐射强度需要考虑云层衰减作用。考虑云层作用时,对于地面反射辐射的计算没有很好的计算方法。这里提出的考虑云层作用时的地面反射辐射的估算公式为

$$I'_g = (1 - CF) I_g \quad (11)$$

3.5 飞艇表面的辐射换热

必须指出,物体表面对太阳辐射的光学反应与对长波辐射的光学反应通常是显著不同的。例如,对太阳辐射的吸收率与对长波辐射的吸收率可能差别较大。有的飞艇外表面对长波辐射的吸收率约 0.8,但对太阳辐射的吸收率为 0.3 左右。飞艇蒙皮一般是不透明的。假设飞艇蒙皮是灰体,即其对长波辐射的吸收率等于其发射率。

飞艇表面吸收的太阳直射辐射 Q_{DN} 可用下式计算:

$$Q_{DN} = \alpha A_N I_{DN} \quad (12)$$

式中 α ——飞艇蒙皮对太阳辐射的有效吸收率;

A_N ——吸热面在太阳射线方向的投影面积。

飞艇蒙皮吸收的天空散射辐射 Q_d 可用下式计算:

$$Q_d = \alpha A_a I_d \quad (13)$$

式中 A_a ——蒙皮面积。

飞艇下蒙皮吸收的地面反射辐射 Q_g 可用下式计算:

$$Q_g = \alpha A_a I_g \quad (14)$$

飞艇上蒙皮与大气的长波辐射换热 $Q_{IRa \rightarrow s}$ 可用下式计算:

$$Q_{IRa \rightarrow s} = \varepsilon A_a \sigma (T_a^4 - T_s^4) \quad (15)$$

式中 ε ——飞艇蒙皮的发射率;

σ ——斯忒藩 - 玻耳兹曼常量, $5.678 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

T_a ——飞艇蒙皮表面温度;

T_s 称为天空有效温度。

飞艇下蒙皮与地面的长波辐射换热为 $Q_{IRa \rightarrow g}$ 可用下式计算:

$$Q_{IRa \rightarrow g} = \varepsilon_a A_a \sigma (T_a^4 - \tau_{atmIR} T_g^4) \quad (16)$$

式中 T_g 为地球表面温度。

$$\tau_{atmIR} = f(P_a, P_o) \quad (17)$$

计算飞艇蒙皮内表面之间辐射换热时,为简便起见,其上下蒙皮各看作一个辐射面(分别用 1、2 表示),其温度分别用辐射平均温度表示。这样,飞艇上下蒙皮内表面之间的辐射换热 $Q_{r1 \rightarrow 2}$ 可用下式计算:

$$Q_{r1 \rightarrow 2} = \frac{\varepsilon_i A_1 \sigma (T_{a1}^4 - T_{a2}^4)}{2 - A_1/A_2} \quad (18)$$

式中 ε_i 为蒙皮内表面的发射率,假设内表面各部分发射率相等。

4 对流换热数学模型

飞艇的对流换热包括飞艇外表面对流换热和飞艇内表面对流换热。飞艇外表面对流换热指飞艇外表面与周围大气的对流换热。飞艇内表面对流换热指飞艇内表面与艇内气体的对流换热。

4.1 对流换热的一般公式

对流换热量 Q_c 的一般计算式为:

$$Q_c = Ah\Delta T \quad (19)$$

式中 A ——对流换热面积;

ΔT ——物体表面温度与周围气体温度之差;

h ——对流换热系数,可表示为

$$h = Nu \frac{\lambda}{L} \quad (20)$$

式中 Nu ——努塞尔数;
 λ ——气体导热系数;
 L ——当量尺寸,用于计算 Nu 、雷诺数 Re 和格拉晓夫数 Gr 。 Re 和 Gr 分别定义如下:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (21)$$

$$Gr = \frac{g_n \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (22)$$

式中 V ——气体流速;
 ν ——气体的运动粘度;
 g_n ——重力加速度, $g_n = 9.8 \text{ m/s}^2$;
 ρ ——气体密度;
 β —— $1/T$, 其中 T 为定性温度;
 ΔT ——物体表面温度与周围气体温度之差的绝对值。

式(21) - (23)中的定性温度可采用壁面温度与周围流体温度的平均值。运动粘度 ν 表示为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (23)$$

式中 μ ——气体的动力粘度;
 ρ ——气体密度。

4.2 空气和氮气的物性公式

空气的动力粘度 μ_{air} 、导热系数 λ_{air} 以及普朗特数 Pr_{air} 可分别用下列公式计算^[4] (式中,温度单位为 K):

$$\mu_{\text{air}} = \frac{1.458 \times 10^{-6} T_{\text{air}}^{1.5}}{T_{\text{air}} + 110.4} \quad \text{N} \cdot \text{s/m}^2 \quad (24)$$

$$\lambda_{\text{air}} = 0.0241 \left[\frac{T_{\text{air}}}{273.15} \right]^{0.9} \quad \text{W/(m} \cdot \text{K)} \quad (25)$$

$$Pr_{\text{air}} = 0.804 - 3.25 \times 10^{-4} T_{\text{air}} \quad (26)$$

氮气的动力粘度 μ_{He} 、导热系数 λ_{He} 以及普朗特数 Pr_{He} 可分别用下列公式计算^[4] (式中,温度单位为 K):

$$\mu_{\text{He}} = 1.895 \times 10^{-5} \left[\frac{T_{\text{He}}}{273.15} \right]^{0.674} \quad \text{N} \cdot \text{s/m}^2 \quad (27)$$

$$\lambda_{\text{He}} = 0.144 \left[\frac{T_{\text{He}}}{273.15} \right]^{0.7} \quad \text{W/(m} \cdot \text{K)} \quad (28)$$

$$Pr_{\text{He}} = 0.729 - 1.6 \times 10^{-4} T_{\text{He}} \quad (29)$$

4.3 飞艇内表面对流换热的努塞尔数

对于飞艇内表面的自然对流,可以用下面计算式^[5]:

$$Nu = 0.15 Ra^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra \leq 10^{11}) \quad (30)$$

式中 Ra 称为瑞利数,定义为:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (31)$$

5 艇内气体平均温度 T_{in}

根据艇内气体的热平衡方程(3),参照图1,可得

$$A_1 h_1 (T_1 - T_{\text{in}}) = A_2 h_2 (T_{\text{in}} - T_2) \quad (32)$$

由式(20)和(31),可得 $h_1 = h_2$ 。如果 $A_1 = A_2$,则有

$$T_{\text{in}} = (T_{a1} + T_{a2}) / 2 \quad (33)$$

6 平流层飞艇热平衡计算

6.1 概念艇参数条件

概念艇的主要参数如下:

运行高度:运行高度 > 20km,最大 22km;

外型尺寸:长 220m,最大直径 60m 的椭圆球体;

飞艇体积:400000 m^3 ;

总质量:约 32000kg。

6.2 计算结果

计算采用的基本假设如下(部分参数参考 NASA 等相关分析资料选取):

20 km 处环境温度 = - 56 $^{\circ}\text{C}$;

飞艇表面发射率 = 0.8,对太阳辐射的吸收率 = 0.33;

外表面对流换热的风速 = 24 m/s (风速 = 20 m/s ,飞艇速度 = 160 km/h ,顺风);

遮云系数 $CF=0.3$,大气质量修正系数 = 0.95。

计算结果如表 1 所示。

表 1 飞艇热平衡计算结果

时间	白天	夜间
上蒙皮	13.6	- 52.2
下蒙皮	4.5	- 47.4
艇内气体	9.0	- 49.8

7 讨论

文章从传热学的基本原理入手,建立了飞艇的传热数学模型,包括热平衡方程,直接太阳辐射,天空散射辐射,地面反射辐射,与天空的长波辐射换热,与地面的长波辐射换热,与大气和艇内气体的对流换热,以及飞艇内表面冷热部分相互之间的辐射换热等。所建立的传热数学模型不但适用于平流层

飞艇,对于低空飞艇也能适用。因此文章内容是平流层飞艇热力分析研究的重要技术积累。

利用所建数学模型,对于某飞艇的设计条件,进行了热初步仿真计算,得出了蒙皮热点、蒙皮冷点以及艇内气体的温度。对于飞艇热力设计具有较好的工程参考价值。

对于低空飞艇,需要较准确的遮云系数和大气质量修正系数数据,这是一个比较复杂的问题。云天的辐射计算也有待进一步研究。

飞艇部分蒙皮可能是柔性薄壳。柔性薄壳结构在内外压力的作用下会发生相应的变形。所以,各种换热方式的综合效果,可能导致飞艇容积的变大或缩小,影响飞艇工作的稳定性和结构应力。因此,有必要对飞艇蒙皮进行结构动力学计算分析。

参考文献

- [1] 王伟志,方贤德,苏向辉.平流层飞艇热力学特性初步分析[C].中国空间技术研究院近空间领域文集(一)北京:中国空间技术研究院 2006.

- [2] 方贤德.高空气球飘飞特性的数学建模研究[C].浮空器发展与应用学术交流会论文集,2005.
- [3] 方贤德,李小建.平流层飞艇热平衡[D].NH-39,2006.
- [4] Kreith F. Kreider J. Principles of Solar Engineering[M]. Chap. 3. Hemisphere Publishing Corp. 1978.
- [5] Morris A. Scientific Ballooning Handbook[M]. NCAR TN/1A-99, National Center for Atmospheric Research, Boulder CO. 1975.

作者简介:方贤德,男,1954年生。教授,博士生导师。南京航空航天大学学士,清华大学硕士,中国科学技术大学博士。现工作于南京航空航天大学航空宇航学院人机环境工程系,先后在美国和加拿大做访问学者、访问教授多年。长期从事飞行器环境控制与生命保障方面(安全救生)、空投回收、空调制冷以及传热学和流体力学的应用研究。

王伟志,男,1973年生。博士,高级工程师。北京空间机电研究所从事回收专业研究工作。

李小建,男,1984年生。南京航空航天大学航空宇航学院人机环境工程专业研究生。

降落伞缩距软着陆技术的研究及其进展

方贤德

(南京航空航天大学航空宇航学院人机与环境工程系, 南京 210016)

摘 要 降落伞缩距软着陆技术是过去十多年中,美国在研的一种先进的缓冲减速技术。该技术通过在货物即将触地之前强力收缩货物吊带,产生较高拉力,使货物(回收物,空投物)和降落伞间距缩短,随之使货物减速,实现软着陆。经过近十多年研究,出现了几种典型的缩距器设计,包括活塞-滑轮缩距器,马达-绞盘缩距器,以及气动肌缩距器。目前的研究集中在空投应用方面,空投质量从验证概念时的几十千克,逐步发展到 9100kg,并实现了快速装卸。作为气动减速的一种先进技术,降落伞缩距软着陆技术对于航天器回收与着陆系统的研究有着借鉴和参考价值,并具有潜在的应用可能。文章对降落伞缩距软着陆技术的研究发展概况以及几种典型设计进行了介绍。

关键词 降落伞 缩距 软着陆 空投 回收

Research and Development of Parachute Retraction Soft Landing Technology

Fang Xiande

(College of Aerospace, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract The parachute retraction soft landing technology is an advanced aerodynamic decelerating technology studied in the United States in the past decade. The parachute retractor placed between the payload and parachute confluence point is activated to pull the parachute and payload together prior to ground impact, decreasing the payload impact velocity, thus realizing soft landing. There are several typical retractors developed, including piston-pulley retractors, air motor-winch retractors, and pneumatic muscle actuator retractors. The past studies have been focused on their applications in airdrop systems. The payload have been increased from tens kilograms at the very beginning to 9,100 kg with rapid rigging/derigging now. As an advanced aerodynamic decelerating technology, the parachute retraction soft landing technology has potential value in spacecraft recovery systems. This paper provides a review and the state-of-the-art developments of the parachute retraction soft landing technology.

Key Words Parachute retraction Soft landing Airdrop Spacecraft recovery

1 前言

近十多年来,美国一直在研究新的空投技术,以改进其在全球快速部署武器装备和物资供应的能力。在大力研究精确空投技术的同时,他们不断改

进常规空投技术。在常规空投技术中,美国目前广泛使用纸质蜂窝材料缓冲减速。考虑到储藏、操作和处理花费,使用纸质蜂窝材料作为空投缓冲减速设备,成本昂贵。更重要的是,常规的蜂窝材料和包装方法需要较长时间卸载空投货物,这将延迟货物在空投域的可用性,增加作战人员在战场上的危险。

降落伞缩距软着陆和空气囊减速技术是过去十

收稿日期:2006-11-14

多年中,美国在研的用于替代蜂窝材料系统的两个先进技术。美国的 W&A 公司(Warrick & Associates, Inc.)在 1996 至 2000 年期间一直参与美国那提克士兵中心的空气囊空投系统研究项目^[1]。但是,该公司认为,降落伞缩距软着陆空投系统更具有优势^[2]。与纸质蜂窝和空气囊系统相比,降落伞缩距软着陆空投系统的突出优点是在不使用缓冲物的情况下,避免了高下落速度。

降落伞缩距软着陆技术概念的含意是,在货物下降到离地很近时,快速缩短降落伞与货物之间的吊绳,以缩短二者之间的间距,从而降低货物下降速度,实现软着陆。经过近十多年研究,出现了几种典型的缩距器设计,包括活塞-滑轮缩距器,马达-绞盘缩距器,以及气动肌缩距器。目前的研究集中在空投应用方面,空投质量从验证概念时的几十千克,逐步发展到 9100kg,并实现了快速装卸。

作为气动减速的一种先进技术,降落伞缩距软着陆技术对于航天器回收与着陆系统的研究有着借鉴和参考价值,并具有潜在的应用可能。

文章对降落伞缩距软着陆技术的研究发展概况以及几种典型设计进行介绍。主要内容包括降落伞缩距软着陆技术概念的提出与验证,活塞-滑轮缩距软着陆技术的发展,重装空投快速装卸马达-绞盘缩距软着陆系统,以及气动肌缩距软着陆系统。

2 降落伞缩距软着陆技术概念的提出与验证

降落伞缩距软着陆概念最早出现在 20 世纪 50 年代。1956 年,德克萨斯大学首先提出了这一概念,作为减少易碎货物着地前速度的一种方法^[3]。其设想是在降落伞和载荷之间设置一个可以突然缩短二者间距的装置。德克萨斯大学的理论研究表明,在货物着地之前,突然使降落伞和货物靠近,可以显著降低货物下落速度。研究者当时还用模拟计算机模拟了这一概念。尽管模拟结果令人鼓舞,但是这一研究没有继续进行下去。

进入 20 世纪 90 年代,德克萨斯大学的设想重新引起注意,并于 1994 年构成实物进行了试验。Lanza 等人研制了一个基于气动活塞-滑轮组的小型“缩距器”,以下称为活塞-滑轮缩距器,其结构原理如图 1 所示^[3]。它有两个滑轮模块,一个模块与气缸底连接,另一个模块与活塞连接。当活塞运动

时,这两个滑轮模块间距拉大,吊绳缩回,从而使空投物和降落伞靠近。吊绳的缩回量取决于活塞的行程和滑轮的个数。

这个小型活塞-滑轮缩距器允许用小降落伞进行试验。1994 年 4 月进行了第一次试验。降落伞为直径 4.3m 的平面圆形伞,滑轮组能拉进 5.8m 的绳索,载荷质量范围为 28.4~41.8kg。滑轮效能比为 10:1。也就是说,如果吊绳缩回 10m,活塞需要运动 1m。当吊绳缩回时,需要作功克服绳内张力。绳内向上的张力使悬挂物减速,向下的张力使降落伞加速。需要的功由储气罐中压缩气体进入气缸,推动活塞运动获得。试验验证了德克萨斯大学的降落伞缩距软着陆概念。

试验是在一个曾经用作小型飞船机库的建筑内进行的。试验时,先把空投系统悬挂在机库的顶棚(离地约 53m),然后放下。在伞衣充气完全打开时,通过遥控器打开控制阀,使压缩气体进入气缸。试验系统装有数据采集仪采集所需的试验数据,并用两台摄像机同时拍摄空投过程。

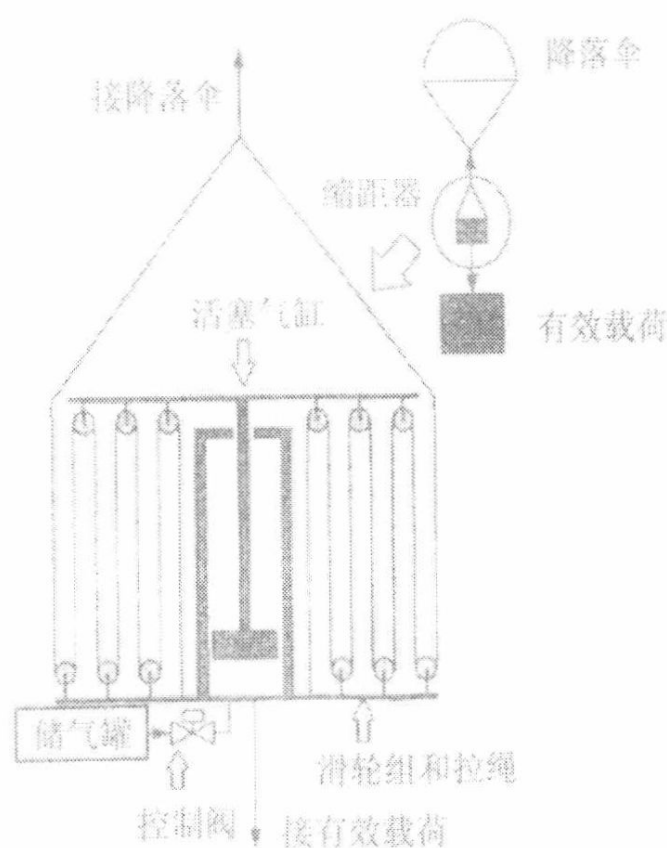


图 1 活塞-滑轮缩距器原理图

第一个试验成功之后,该缩距器的设计获得了美国专利^[4]。继后的试验载荷质量逐步增加。在 1995 年和 1996 年期间,空投质量逐渐增加至 90.8kg,用单伞或双伞、三伞伞簇,均能成功软着陆。

研究者同时开发出了缩距空投系统计算机仿真软件,用于预测系统空投性能。它可以预测系统完成缩距过程所需的时间,也可以预测启动缩距器时

应有的系统离地高度。该软件被用于支持后继空投试验和研制更大载荷的空投系统。

3 活塞 - 滑轮缩距软着陆技术的发展

3.1 454kg 级的活塞 - 滑轮缩距软着陆系统

降落伞缩距软着陆技术概念验证成功后,美国那提克士兵中心确定了用 3 个 T-10 降落伞空投 454kg 重物的研究计划^[5]。该计划沿用活塞 - 滑轮缩距器的思路。上述软件在 1/4 缩比模型和全尺寸模型系统研制中,用于确定系统各组件的尺寸和承载要求。1/4 缩比模型用单个 T-10 伞。

单伞缩比模型进行的飞行空投试验和吊车抛投试验表明,系统具有足够的减速缓冲能力。全尺寸模型试验则侧重于研究伞簇系统的性能。综合考量制造系统所需的部件数量和系统连接的简化需要,采用了双气缸设计(图 2)。如果采用单气缸,不但可使系统使用部件数量最少,而且使系统连接最为简单。但是,单气缸设计需要比双气缸设计高得多的气动压力和组件承载能力。这样以来,将失去使用现成的商业成品件的可行性,导致设计制造复杂化。图 2 是 454kg 级活塞 - 滑轮缩距软着陆系统的气动连接原理图。图 3 是 454kg 级活塞 - 滑轮缩距软着陆系统一侧气缸滑轮的侧面图。

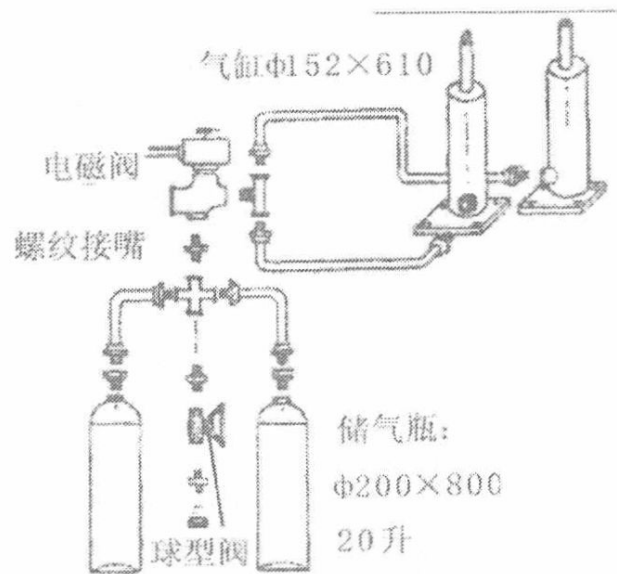


图 2 气动连接原理图

454kg 空投系统的演示试验于 1998 年 5 月进行。两个装有测试设备的试验是用 UH-60 黑鹰直升机盘旋在 229m 的高空进行的。空投物下降至在树头高时,缩距动作启动。在这两个试验中,载荷着地速度成功地降至接近于零。

通过原理样机的空投以及吊车抛放试验数据与软件仿真预测结果进行对比,对数学模型及仿真软

件进行改进,不断提高仿真准确度。这种仿真 - 试验 - 仿真的方法是系统研制中的一个重要手段。它减少了试验范围和复杂性,加速了研制进度。

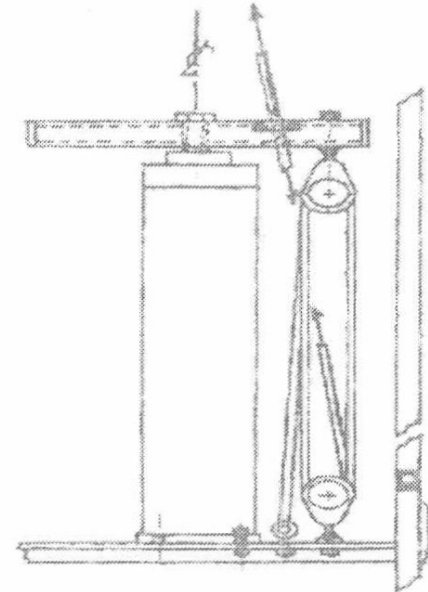


图 3 气缸滑轮装配简图

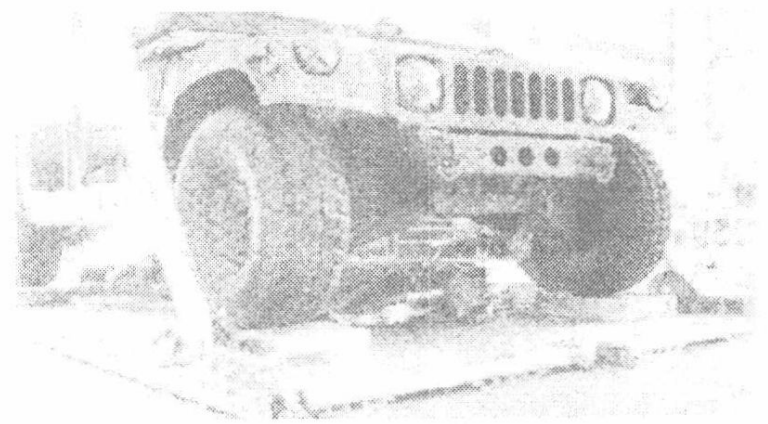


图 4 缩距器在货架平台上的位置

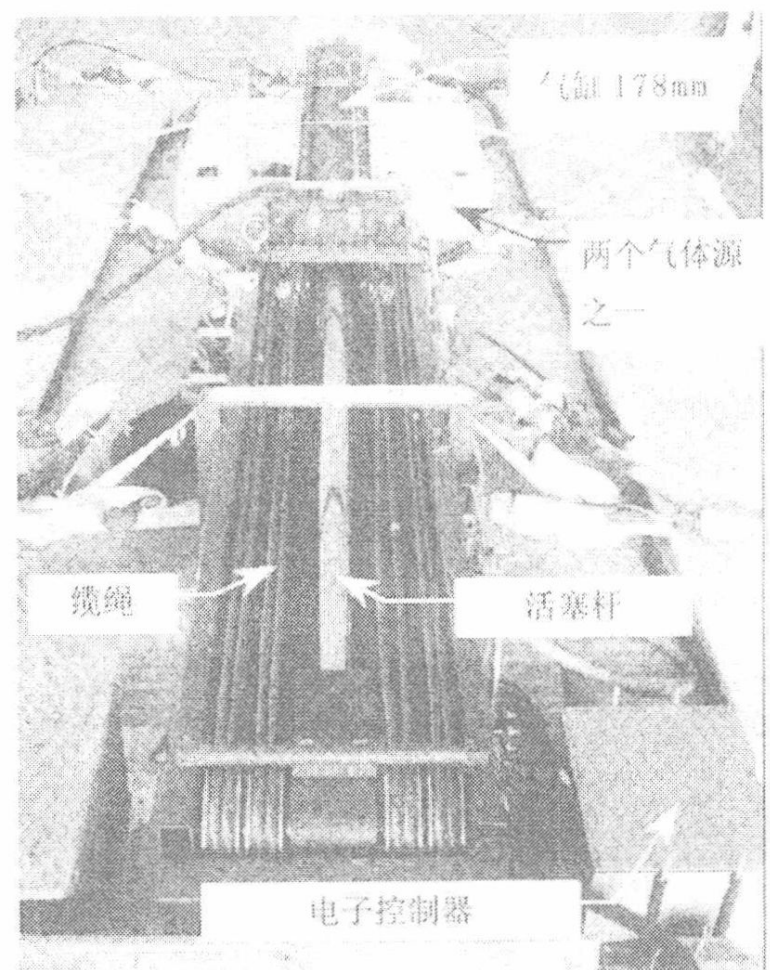


图 5 缩距器,缩距后的情况