

大面积连续压向载荷模拟施加技术研究



王海*, 杜峰, 杜星, 何月洲

中国飞机强度研究所 全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要:飞机结构强度试验中大面积连续压向载荷为主要载荷形式。目前国内外成熟的载荷施加方法主要采用有限个离散的节点集中力进行模拟,且通常将压向载荷尽可能地转换为拉向载荷施加,以避免考虑试验时结构局部强度、变形适应性及试验装置压向稳定性等问题。为了更加真实地模拟压向分布载荷,针对结构强度试验中大面积连续复杂压向载荷施加问题,本文提出了一种多层级耦合传载弹性体结构加载技术,设计了试验专用加载装置,并成功应用于型号试验。各项试验加载过程平稳、可靠,试验数据与理论计算结果吻合良好。

关键词:复杂分布压力; 聚氨酯; 弹性体耦合传载; 连续载荷施加; 结构强度试验

中图分类号: V216.1

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.08.003

水上飞机除承受传统陆基飞机的气动载荷、地面载荷、惯性载荷和发动机载荷等外,还会受到水动力载荷^[1,2],载荷形式多样,载荷工况复杂。在飞机结构强度试验中,通常将飞机所受到的真实载荷经过几轮演算等效,简化后形成直接用于结构强度试验设计的载荷输入,如有限元节点载荷、集中载荷、分布载荷等^[1-5]。目前国内外比较成熟的试验加载方法主要有胶布带、拉压垫、木模、吸盘、卡板、气囊、固定接头等^[6-11],其中大部分加载方法是通过设计一套专用杠杆系统将分布载荷或大的集中载荷离散成有限个小集中载荷。且当考虑结构局部强度、变形适应性及试验装置压向稳定性等试验设计和工程实施问题时,通常将压向载荷尽可能地转换为拉向载荷施加^[2-3]。

然而,飞机载荷经演算等效后不能反映飞机结构的真实受载情况。尤其是飞机翼面等部位实际工况所承受的载荷主要表现为大面积连续复杂分布压向载荷,如各类翼面结构所受到的升力。在飞机结构表面较为理想地模拟大面积连续分布压向载荷,上述现有的加载方法均不能适用。气囊加载方法可以实现压向连续均布加载,但气囊需要制作封闭金属容器来限制气囊在载荷工作面外的张力^[8],复杂结构表面和结构变形不利于气囊加载装置的安装和密

封,高载时容易发生严重漏气、爆炸、跟随性差等风险,导致试验风险不可控。

为了满足压向载荷的大面积连续施加要求,更加真实地模拟飞机结构承受的大面积连续压向载荷的分布特征和连续性,本文提出了一种载荷模拟施加技术,并研发了新的试验装置成功应用于型号试验。

1 大面积连续压向载荷模拟施加技术

结合以往试验经验,提出弹性体耦合传载与叠加模型,研发了一种多层级连续弹性体结构加载装置,通过合理设计弹性加载垫和刚性离散块的材料属性、总体结构尺寸等主要参数,充分发挥弹性介质对各离散点集中力的耦合传载作用和对结构变形的适应性能,实现大面积连续压向载荷的模拟施加。多层级耦合传载弹性体结构加载技术使用连续弹性体材料覆盖加载区域,通过刚度设计解决各离散点对集中载荷的分布能力和变形自适应能力,增强各离散点间的传载耦合作用,使得刚性离散块与弹性加载垫刚柔耦合作用将多点离散载荷耦合成作用区域内连续分布载荷^[12-13]。

试验时通过杠杆系统将作动器集中载荷施加到弹性加

收稿日期: 2020-03-25; 退修日期: 2020-06-11; 录用日期: 2020-07-10

*通信作者: Tel.: 029-81665369 E-mail: wh050025@163.com

引用格式: Wang Hai, Du Feng, Du Xing, et al. Research on large area continuous compression load simulation technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(08): 16-21. 王海, 杜峰, 杜星, 等. 大面积连续压向载荷模拟施加技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(08): 16-21.

载垫表面的刚性离散块,经过连续弹性体传递到结构表面。杠杆系统和刚性离散块保证了载荷分布规律的正确性,保证了作用面的接触面压力分布特性,其加载形式如图1所示。无论结构曲面凸凹情况,只要曲面与弹性体贴合不产生相对滑动,就能耦合传递连续分布压力载荷。

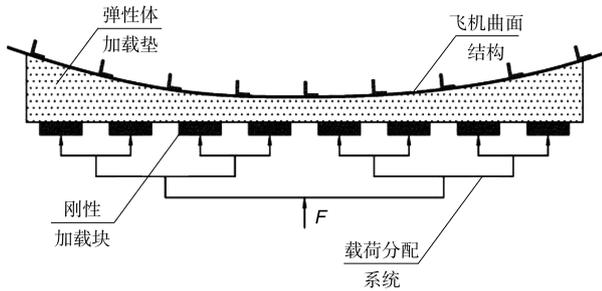


图1 曲面结构加载示意图

Fig.1 Diagram of curved surface loading method

2 多层级耦合传载弹性体结构设计

分布压力载荷连续加载的关键在于利用刚性离散块与弹性加载垫对多点集中力的耦合传递作用。本节着重探讨采用弹性体多层耦合传载结构加载垫实现加载时的接触面载荷分布情况。在诸多影响因素中,刚性离散块的规格及布置、弹性加载垫材料属性(E, σ)及厚度 H 等关键参数是影响耦合传载的主要关键因素。本文根据某型飞机实际的加载需要,建立如图2所示的计算模型,选取 $L=900\text{mm}$ 的典型承力结构段进行多点耦合连续传载技术研究,分析加载垫传力特性和加载接触面载荷分布特征,用于指导弹性体多层结构载荷加载系统的结构设计。

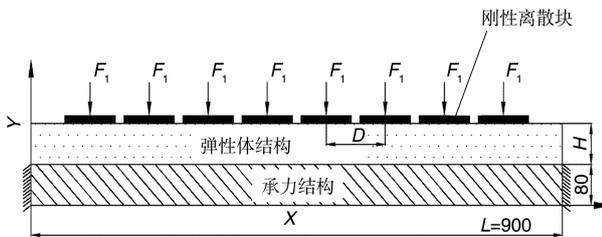


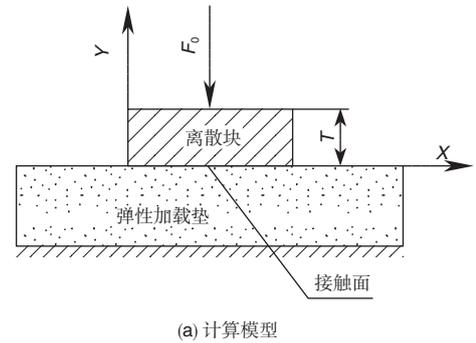
图2 多层级耦合传载弹性体结构加载系统仿真分析模型(单位:mm)

Fig.2 Simulation analysis model of multi-level coupling load transfer elastic structure(Unit:mm)

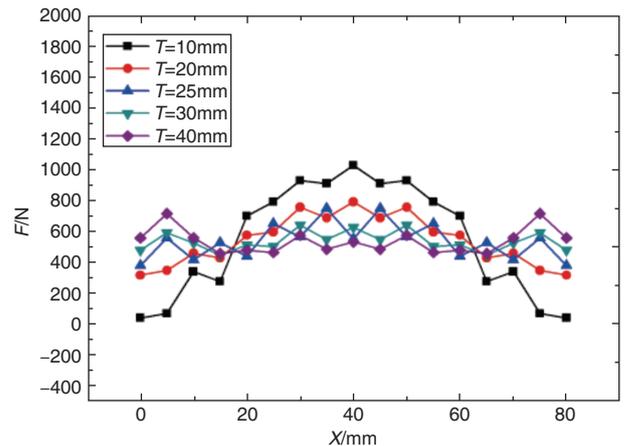
2.1 刚性离散块规格设计

借鉴参考文献[9]中拉压垫尺寸,设计刚性离散块底面为 $120\text{mm} \times 80\text{mm}$,在载荷均布、接触面积及加载垫材料属性不变的情况下,离散块厚度是影响接触面耦合均布传载效果的关键因素。计算模型如图3(a)所示,对比不同厚度

下离散块与加载垫接触面压力分布曲线(见图3(b)),厚度 T 从 10mm 增加到 40mm ,离散块与加载垫接触面压力均布性逐渐增强,但 30mm 以后变化幅度较小,考虑加载设备重量和经济性,可选用 $T=20\sim 30\text{mm}$ 的硬铝块制作离散块。



(a) 计算模型



(b) 表面接触力分布

图3 离散块厚度对加载垫接触面力分布影响

Fig.3 Influence of thickness of discrete blocks on the structure contact surface forces

2.2 离散块数量 N 和间距 D 的影响

确定刚性离散块尺寸后,多个离散块与弹性加载垫构成多点耦合连续加载系统,在一定的加载区域内,控制其他变量不变,对比不同离散点数量 N 和间距 D 对施加到承力结构表面压力分布的影响(见图4),结果表明布置的离散点越多,施加到承力结构表面的载荷均布性越好。当离散点个数达到8以后,均布效果变化不大,同时为了便于杠杆连接,可选择 $N=8$,此时刚性离散块间距 $D=100\text{mm}$,相邻离散块间隙为 20mm 。

2.3 弹性加载垫材料属性(E, σ)的影响

选用木材($E=1.3\text{GPa}, \sigma=0.38$)、硫化橡胶($E=60\text{MPa}, \sigma=0.47$)及聚氨酯($E=170\text{MPa}, \sigma=0.43$,肖氏硬度85A)三种材料设计弹性加载垫,对比了不同弹性材料属性对承力结构表面力的影响,如图5所示。加载过程中承力结构发生

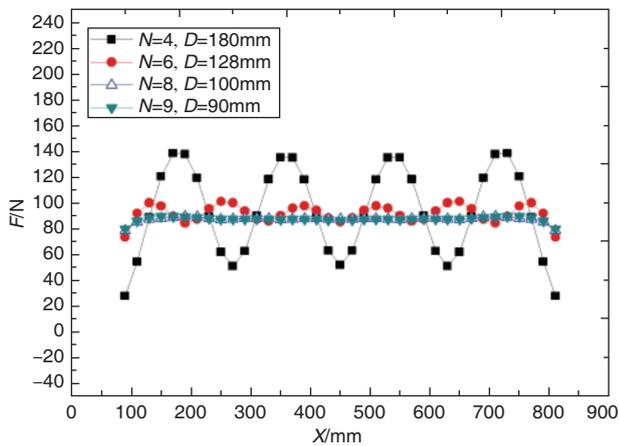


图4 离散块数量与间距对承力结构表面力影响

Fig.4 Influence of the number and spacing of discrete blocks on the structure surface forces

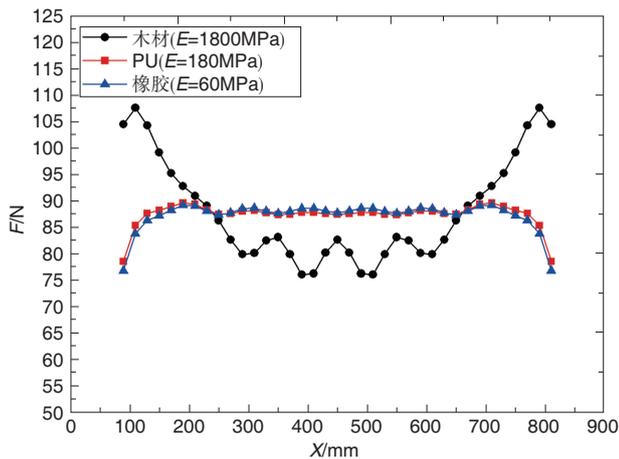


图5 加载垫材料属性的影响

Fig.5 Influence of material property of loading pad

局部变形,相比于聚氨酯、橡胶等弹性较好的材料,木材的局部变形协调能力较差,木块与结构局部变形不协调时,载荷会传递到承力结构两端变形较小、刚度较大的约束区,从而造成两端载荷大、中间载荷小的不均匀分布现象。对比结果表明,聚氨酯与橡胶材料都具有较好的传载多点耦合均布加载效果。但考虑到聚氨酯原材料可定制,承载能力更强,且比硫化橡胶机械加工性能更好,以聚氨酯材料制作弹性加载垫。

本文优先选用聚氨酯材料^[14]制作弹性加载点,以便针对机体载荷施加部位的复杂曲面及特殊结构细节进行数控机床加修形。

2.4 弹性加载垫厚度 H 的影响

弹性加载垫厚度 H 对耦合传载性能有明显影响,前述

计算模型均定义 $H=100\text{mm}$ 。加载垫厚度 H 对承力结构表面的影响如图6所示,聚氨酯加载垫厚度从 $H=25\text{mm}$ 提高到 $H=50\text{mm}$,接触面载荷均布性提高明显,厚度超过 50mm 后,均布加载效果变化不大,可以根据实际需求设计载荷集中区域加载垫厚度超过 50mm 。

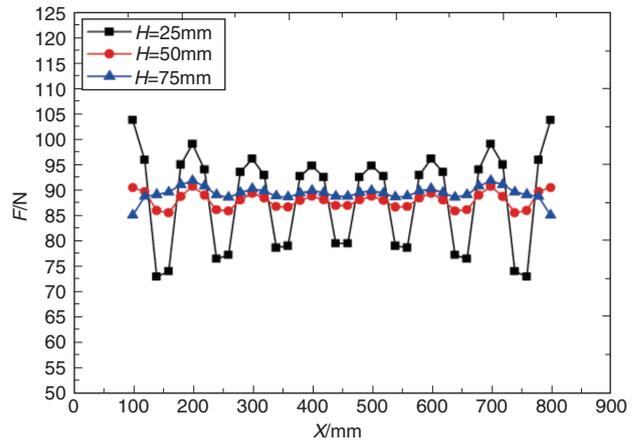


图6 弹性体加载垫厚度的影响

Fig.6 Influence of thickness of loading pad

根据上述4项分析结果,综合考虑工程实用性、实施成本等因素,已知单个加载区域的载荷分布情况,可设计结构合理的多层级耦合传载弹性体结构加载系统,并基于复杂机构自由度分配技术设计一套轻质的专用杠杆系统^[15],保证每个离散块上的集中力符合载荷总体分布,实现区域内大面积连续压向载荷施加。特别说明的是,为了解决压载稳定性和变形适应性问题,必须尽可能降低杠杆系统的总体高度,以及释放杠杆连接部位多余自由度。结构各参数确定后,通过算例计算得到承力结构接触面压力分布曲线分布情况,如图7、图8所示。

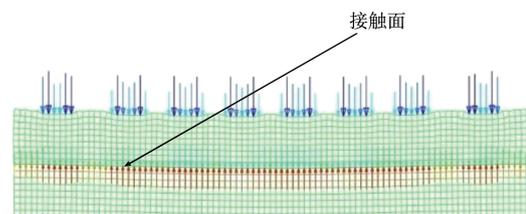


图7 接触面压力分布示意图

Fig.7 Representation of contact surface forces distribution

3 试验验证

研究成果已应用某型水上飞机全机着水情况静强度试验,该试验需要在机身V形船体结构施加大面积连续压向载荷模拟着水载荷,水载荷按线性分布函数给出。试验现场照片如图9所示。由于飞机着水时的过载导致水载荷量

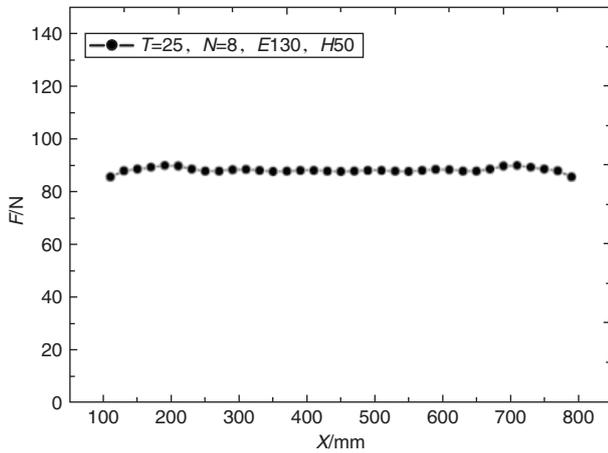


图8 接触面压力分布曲线

Fig.8 Distribution curve of contact surface forces

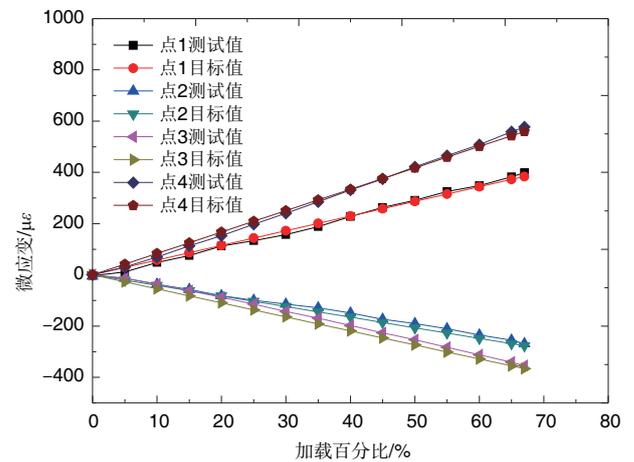


图10 各测试点应变测试值与目标值对比

Fig.10 Comparison between test and target strains

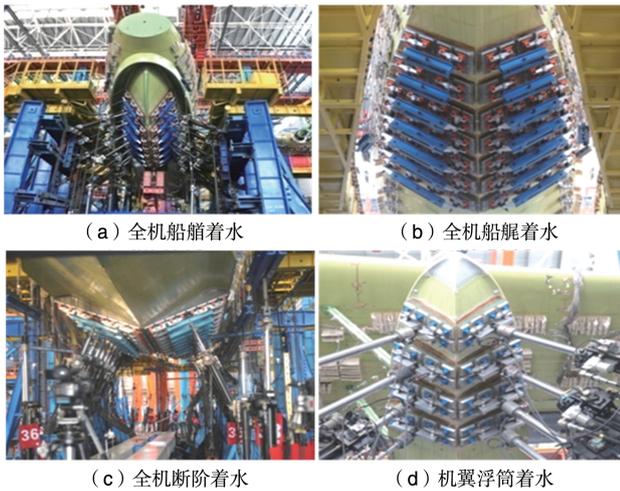


图9 强度验证试验照片

Fig.9 Photo of strength verification test

级很大,水载荷作用面积很大,给加载装置的设计和试验实施带来了工程实践方面的难题。

试验前在加载区域内部关键部位粘贴了应变片,试验过程中载荷以5%为一级逐级加载到限制载荷,同步采集各测量点应变数据,并与理论计算结果进行对比,对比结果如图10所示,各部位测量点应变测量值与理论计算目标值基本吻合,应变—载荷曲线线性良好,证明本文模拟加载方法能够将着水载荷按试验要求施加到船体结构上,加载误差满足试验要求。试验后对加载区域目视检查未发现有害残余变形或破坏,证明了本文模拟加载方法的安全性和可靠性。

4 结论

针对飞机结构强度试验中大面积连续复杂压向载荷施

加难题,提出了一种多层次耦合传载连续弹性体结构加载技术,并研制了专用加载装置,成功应用于水上飞机机身V形船底结构着水载荷的连续施加。通过分析,得到以下结论:

(1)多层次耦合传载弹性体结构加载技术实现了试验中离散点集中力向连续分布压力载荷的转变,更加真实地模拟了飞机结构实际受到的压向分布载荷,试验时不用考虑结构局部承载能力。

(2)多层次耦合传载弹性体加载垫设计需要考虑很多因素,仅针对工程实践中的几项主要因素进行了分析;后续仍需继续研究聚氨酯不同硬度和不同弹性体对分布压力连续加载耦合效应的影响。

(3)基于复杂机构自由度分配技术的多级杠杆系统提高了试验装置的稳定性,且不限结构变形。

AST

参考文献

- [1] Campbell J C, Vignjevic R. Simulating structural response to water impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49: 1-10.
- [2] Qiu Liangjun, Song Wenbin. Efficient decoupled hydrodynamic and aerodynamic analysis of amphibious aircraft water takeoff process[J]. Journal of Aircraft, 2013, 50(5): 1369-1379.
- [3] 王正平, 韩鸿源. 飞机结构试验载荷演算方法研究[J]. 西北工业大学学报, 1999, 17(4): 11-15.
Wang Zhengping, Han Hongyuan. A method for load calculation in aircraft structure test[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1999, 17(4): 11-15. (in Chinese)

- [4] 孟敏,吴波,唐宁.飞机载荷校准试验方案优化设计研究[J].航空科学技术,2020,31(1):39-43.
Meng Min, Wu Bo, Tang Ning. Research on optimization design of aircraft load calibration test scheme[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(1): 39-43. (in Chinese)
- [5] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 中国民用航空规章 第25部运输类飞机适航标准:[S].北京:中国民用航空局,2011.
Civil Aviation Administration of China. CCAR-25-R4 China civil aviation regulations part 25 Airworthiness standards of transport category aircraft[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011. (in Chinese)
- [6] 孙侠生.民用飞机结构强度刚度设计与验证指南[M].北京:航空工业出版社,2012.
Sun Xiasheng. Guidelines for strength and stiffness design and verification of civil aircraft structures[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2012.(in Chinese)
- [7] 邵骞,董登科,马利娜,等.飞机结构强度试验商载施加技术研究[J].航空科学技术,2018,29(7):36-40.
Shao Qian, Dong Dengke, Ma Lina, et al. Research on payload loading technology of aircraft structural strength test[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(7): 36-40. (in Chinese)
- [8] 李志蕊,贾天娇,汪文君.真空吸盘技术在机翼载荷校准试验中的应用研究[J].航空科学技术,2019,30(4):26-30.
Li Zhirui, Jia Tianjiao, Wang Wenjun. Study on application of vacuum suction technology in wing load calibration test[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(4): 26-30. (in Chinese)
- [9] 卓轶,吕媛波,张文东.飞机结构强度试验中拉压垫加载技术研究[J].科学技术与工程,2016,16(2):244-248.
Zhuo Yi, Lyu Yuanbo, Zhang Wendong. The research of tension/compression pad load technique in structure strength test[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(2): 244-248.(in Chinese)
- [10] 邵骞,马利娜.结构强度试验中真空吸盘技术研究与应用[J].科学技术与工程,2014,14(10):275-279.
Shao Qian, Ma Lina. The research and application of vacuum pad technique in structure strength test[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(10): 275-279.(in Chinese)
- [11] 陈帅,杨智春,李斌.结构强度试验中均布载荷的气囊加载系统设计方法[J].工程力学,2012,29(6):146-150.
Chen Shuai, Yang Zhichun, Li Bin. Design method of uniform loading system using airbags in structural test[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 146-150. (in Chinese)
- [12] 王海,尚红星.基于弹性体传载介质的水载荷施加技术研究[J].工程与试验,2019,59(2):55-57.
Wang Hai, Shang Hongxing. Research on water load loading method based on elastomeric force-transmitting medium in structural strength test[J]. Engineering and Test, 2019, 59(2): 55-57. (in Chinese)
- [13] 尚红星,王海,何月洲,等.水陆两栖飞机结构强度试验中的水载荷模拟方法[J].科学技术与工程,2019,19(14):371-376.
Shang Hongxing, Wang Hai, He Yuezhou, et al. Simulation method of water load in structural strength test of amphibious aircraft[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(14): 371-376. (in Chinese)
- [14] 薛启超,邹广平,何建,等.聚氨酯弹性体隔板夹层结构的等效参数计算[J].复合材料学报,2017,34(3):564-572.
Xue Qichao, Zou Guangping, He Jian, et al. Equivalent parameters calculation for sandwich plate with polyurethane elastomer core reinforced by crossing walls[J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2017, 34(3): 564-572.(in Chinese)
- [15] 刘金玉,李军,戴舜.飞机结构静力试验中杠杆系统的载荷配重[J].实验科学与技术,2012,10(4):30-32.
Liu Jinyu, Li Jun, Dai Shun. Balance weight of lever system in structural static test of aircraft wing[J]. Experiment Science and Technology, 2012, 10(4): 30-32.(in Chinese)

(责任编辑 陈东晓)

作者简介

王海(1987-)男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度试验技术。

Tel: 029-81665369

E-mail: wh050025@163.com

杜峰(1980-)男,学士,高级工程师。主要研究方向:飞机结构强度试验技术。

Tel: 029-81665338

E-mail: 59642972@qq.com

杜星(1986-)男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机结构强度试验技术。

Tel: 029-81665373

E-mail: 717995915@qq.com

何月洲(1980-)男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞

机结构强度试验技术。

Tel: 029-81665354

E-mail: heyuezhou2018@163.com

Research on Large Area Continuous Compression Load Simulation Technology

Wang Hai*, Du Feng, Du Xing, He Yuezhou

Aviation Technology Key Laboratory of Full Scale Aircraft Structure Static and Fatigue Test, Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China

Abstract: It is a kind of main load form of large area continuous compression load in aircraft structure static and fatigue test. At present, the mature loading methods at home and abroad are mainly simulated by a limited number of discrete node concentrated forces, and compression loads are usually converted into tension loads as much as possible, which could avoid considering the local strength of the structure, the adaptability of deformation and the compressive stability of the test device. In order to simulate the distribution characteristics of large area continuous compression load more truly, this paper proposes a multi-level coupling load transfer loading scheme, and a special loading device is designed, which has been successfully applied to the structure strength test of an aircraft. The loading process of tests is stable and reliable, and the test data are in good agreement with theoretical calculation results.

Key Words: complex distributed pressure; polyurethane; elastic coupled load transmission; continuous loading; structure strength test

Received: 2020-03-25; **Revised:** 2020-06-11; **Accepted:** 2020-07-10

*Corresponding author. Tel. : 029-81665369 **E-mail:** wh050025@163.com