

文章编号:1674-8190(2017)01-105-04

民用飞机载荷校准试验关键技术浅析

金秀芬¹, 余建虎², 于秀伟¹

(1. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(2. 中国航空工业集团公司 中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 民用飞机载荷校准试验是飞机载荷验证试飞的关键工作之一, 飞行载荷验证的有效性很大程度上取决于校准试验的可靠性。为了提高校准试验的质量, 对民用飞机校准试验中的关键技术进行研究和总结, 阐述民用飞机载荷校准试验中测载站位的选取、应变法测量典型方案、校准载荷的确定、载荷方程的建立、试验报告的编制等内容, 提出合理化意见和建议, 可为我国民用飞机载荷试飞的开展提供一定的技术指导和帮助。

关键词: 飞行载荷; 应变计电桥; 载荷校准; 载荷方程; 民用飞机

中图分类号: V217⁺.32

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.01.016

Initial Analysis on the Key Technologies of Civil Aircraft Load Calibration Test

Jin Xiufen¹, Yu Jianhu², Yu Xiuwei¹

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 201210, China)

(2. Chinese Flight Test Establishment, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: The load calibration test of civil aircraft is one of the crucial works of the loads verification flight test. The validity of flight test mainly depends on the reliability of calibration test. In order to improve the quality of calibration test, the key technologies of civil aircraft load calibration test is researched and summarized, including the selection of loads station, the typical layout of strain gauge, the determination of the magnitude of calibration loads, principle of load equations establishment, test report preparation and so on. The corresponding practical comments and proposal are raised. The research results can be used to provide some technical guidance for civil aircraft flight load test.

Key words: flight loads; strain gauge bridge; load calibration; load equation; civil aircraft

0 引言

民用飞机结构设计所用飞行载荷是不同研制阶段通过理论分析得到的, 其采用的气动数据取自缩比模型风洞试验和 CFD 分析结果, 在数据处理上进行了一定的假设和估算, 也有计算软件和人为因素等引起的误差, 以上都会降低预测载荷的精准

度。CCAR 25.301(b)条款明确规定, 除非表明确定受载情况的方法可靠, 否则用以确定载荷大小和分布的方法必须用飞行载荷测量来证实^[1]。因此, 民用飞机在适航审定过程中, 必须通过飞行载荷试飞实测来检验飞行载荷计算方法的准确性。

飞行载荷实测主要是对机翼、尾翼等主要承力部件进行载荷测量, 所采用的方法主要有压力测量法和应变法测量^[2], 由于前者操作复杂, 一般多采用后者。虽然也有其他较新的测量方法出现^[3-4], 但这些技术多处于研究阶段, 目前我国的飞行载荷实测仍以应变法测量为主。

收稿日期: 2016-08-17; 修回日期: 2016-11-21

通信作者: 金秀芬, qqtang_2002@163.com

载荷校准试验是应变法测量飞行载荷的一项必要工作,其结果决定了飞行载荷试飞验证的可靠性和准确性。国外,波音公司、空客公司随着机型系列化发展,在飞行载荷测量方面积累了大量的适航验证经验;俄罗斯航空工业在载荷试飞上也有着较为成熟的测载技术。国内,经过多年的发展,军用飞机测载技术实力相对较强,但民用飞机型号的飞行载荷测量研究仍处于技术积累阶段。

本文通过总结某支线飞机载荷适航审定试飞过程中积累的宝贵经验,对载荷校准试验中的关键技术进行归纳分析,并给出相应的意见和建议,可为我国民用新型号飞机载荷试飞提供借鉴和帮助。

1 应变法测量和载荷校准试验

应变法测量是民用飞机飞行载荷试飞实测中的一种常用手段,基本原理是在结构的主要传力部位加装应变计电桥,通过载荷地面校准试验建立应变计电桥输出与外载荷之间的定量关系,即载荷方程。飞行实测中通过载荷方程及实际的应变输出即可计算得到飞行载荷。

载荷校准试验是在机体结构满足线性叠加原理的假设下进行的^[5],主要包括在被测剖面的合适位置加装应变计、施加校准载荷对应变计进行校准、建立载荷方程等多项工作。试验中通过对部件施加剪力,获得相应的弯矩和扭矩。试验可分为单点载荷工况和多点载荷工况,用于载荷方程的建立和校验。

2 载荷校准试验关键技术探讨

载荷校准试验涉及到应变计改装、试验实施、数据分析等多个环节,试验周期至少需要半年。特别是测载站位的选取和应变计改装,一旦方案确定,必须在部件完成组装前进行实施。若到后期才发现改装方案的不合理性,届时已无法重新进行架内改装,勉强在机体外表面进行补充改装,无论从后期维护还是测载精度上,都将大幅增加载荷试飞的难度。为了使所有工作能够一次做好,减少不必要的返工,本文对载荷校准试验中需要重点关注的关键技术进行总结提炼,并给出合理化的建议和方案。

2.1 测载站位的选取

机翼、平尾和垂尾上通常选取数个测载站位布置应变计电桥用以测量弯矩、剪力和扭矩,机翼、平尾一般以一侧为主,另一侧用于辅助验证。一般半翼展在12~13 m以内的飞机,一侧机翼上至少布置4~5个测载站位,13 m以上的布置6个以上测载站位。首先,在选取测载站位位置时,根部应布置测量剖面以获取部件总载荷^[6];其次,应尽量选择载荷传递均匀的部位,尤其要避免附近有起落架、襟翼等集中力较强的地方,以免给飞行载荷测量带来困难及误差;最后,最外侧的测载站位原则上不能超过75%半翼展,其主要原因是校准可用加载点过少会导致统计样本不足,给测量带来很大的误差,并且对于带翼梢小翼的机翼,小翼上的载荷同样会传递到翼尖部位,这极有可能成为最外侧测载站位测量误差的主要来源。

对于T尾布局飞机,为了得到平尾总载荷,左、右平尾根部需布置测载站位,但是由于左、右根部载荷会相互传递和影响,且中央盒段无法测量,因此通常还需要在平尾螺杆作动器上改装应变计,用以辅助测量平尾总扭矩。另外,出于尾翼抖振载荷的监控需要,必须在平尾中央翼后梁中间粘贴扭矩电桥、在垂尾根部后梁的缘条上增加弯矩电桥以测量非对称载荷引起的平尾滚转力矩。垂尾测载站位与机翼类似,但应尽量避免方向舵作动器的连接区域。

通常运输机机身气动载荷比较小,而且还有压差载荷的影响,实测难度大。波音公司也曾做过努力,但最终未取得实际成果。从适航验证角度来看,目前对机身载荷实测未作要求,申请人可视情况选取部分测载站位开展研发试验。

2.2 应变法测量典型方案

对于简单双梁结构机翼、尾翼来说,用于应变法测量的典型方案是:在前、后梁缘条上布置仅对弯矩敏感的应变计并组成测弯电桥,在前、后梁腹板中间布置仅对剪力敏感的应变计并组成测剪电桥,在前后梁之间靠梁附近的蒙皮上布置对扭矩较为敏感的扭矩应变计电桥^[7],各应变计粘贴和组桥

位置如图 1~图 2 所示。

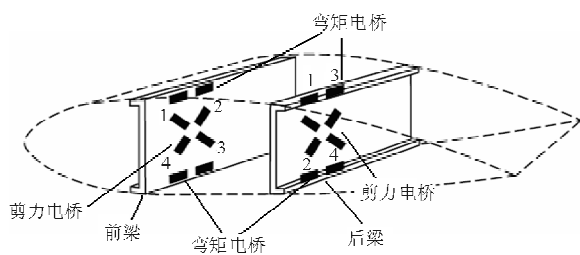


图 1 弯矩剪力电桥形式图

Fig. 1 Bending moment and shear bridge layouts

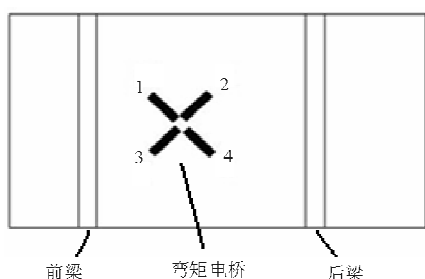


图 2 蒙皮扭矩电桥形式

Fig. 2 Torque bridge layouts on the skin

2.3 校准载荷的确定

飞行载荷实测是为了验证载荷分析方法的正确性,从飞行安全角度而言,通常不必超过限制载荷的 80%^[8]。由于 NACA 1178 推荐的方法前提是基于线性假设原理,在校准载荷的大小选择时应综合考虑数据可靠、试验机安全以及经济等因素,通常来说,对于简单结构翼面,一般加载到 30%~40%限制载荷即可满足测量需要^[9]。据了解,波音公司运输机校准载荷一般只加载到 20%的限制载荷,再利用线性外推进行数据处理。

加载点的位置选取应选择结构上较强的部位,对于双梁结构,通常每个测载站位至少需要 6 个加载点,加载点分布应能够涵盖测量剖面以外的气动压心变化范围,各加载点载荷大小要根据限制载荷的弯剪扭包线来确定。为了保证试验和试飞安全,必须对每个加载工况进行载荷校验和有限元分析^[10],既能保证所测站位弯矩、剪力和扭矩都不超过限制载荷,还能满足加载点的局部强度限制,从而最终得出每个加载点的允许校准载荷。

2.4 载荷方程的建立原则

校准试验完成后,优选应变计电桥、建立载荷

方程是一项复杂而艰巨的任务。对于某一载荷,从数学理论上讲,可以有多种电桥组合来得到载荷方程^[11]。如何高效地筛选出最优的载荷方程,一直是载荷试飞工程师研究的课题。

一般来说,载荷方程中的电桥越多,回归分析中的复相关系数越大,但这样会纳入无响应电桥和多余电桥,并不是理想做法。在建立载荷方程时,首先应对电桥的物理特性进行分析,筛选出仅对某向载荷敏感的电桥,剔除无关电桥;然后通过数学方法优选出高置信度的方程,再通过多个不同样本的组合加载工况对每个方程的可靠性进行检验,选择信号稳定的方程^[12];最后通过检飞,进行再次优化及验证。

为了提高载荷方程的处理效率,下面分别从弯矩、剪力和扭矩方程,说明载荷方程的选取原则。

(1) 弯矩载荷方程一般由 1~2 个电桥组成,少数情况下可以由 3 个电桥组成。首选前、后梁上的弯矩电桥,再叠加一个剪力电桥进行修正。

(2) 对于剪力载荷方程,最佳组合是选取前、后梁上的剪力电桥,再叠加一个弯矩电桥进行修正。

(3) 扭矩载荷方程难度最大,通常由扭矩电桥和前、后梁上的剪力电桥组成。

综上所述,相比平尾和垂尾,机翼具有较大的展弦比,更符合悬臂梁力学特性,因此机翼载荷方程更为简化,可以采用较少的电桥达到预期的精度。

2.5 试验报告的编制

校准试验报告作为飞行载荷试飞前提交适航当局审查的重要文件,也是后续载荷试飞中实测载荷的根本来源。试验报告的内容、版式、数据、表述等各方面都要符合型号合格审定程序的要求^[13],尤为关键的是,必须准确给出各测载站位弯矩、剪力和扭矩的载荷方程、校验情况以及方程误差,这也是适航当局在试飞审查中的主要关注点之一。

3 建议

通过对民用飞机载荷校准试验中关键技术的探讨,提出如下建议:

(1) 测载站位的布置,除能得到总载荷外,还应能得到载荷分布规律,且应尽可能避开起落架和小翼的影响,最外测载站位原则上不应超过 75% 半翼展。

(2) 对于双梁结构翼面,每个测载站位至少要保证有 6 个可用加载点,校准载荷一般达到 40% 限制载荷即可满足测载要求。

(3) 载荷方程应尽可能简化,避免引入过多的电桥数量。

4 结束语

本文基于前期积累的试验经验,对民用飞机载荷校准试验关键技术进行了总结提炼,可为民用飞机载荷试飞合格审定提供技术支持。由于我国现有的民用飞机载荷校准试验数据库有限,本文尚未对具有复杂翼面结构、不同平尾布局的大型民用飞机载荷校准试验进行规律研究。研制大型民用飞机已被列入我国中长期发展规划,有待在今后的型号研制工作中不断完善。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 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 Airworthiness standards; transport category airplanes[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [2] 赵燕,高尚,张多源. 应变电桥选择方法在飞行载荷测量中的应用[J]. 现代机械, 2012(2): 37-39.
Zhao Yan, Gao Shang, Zhang Duoyuan. Application of MT method for strain gage selection in flight loads measurements[J]. Modern Machinery, 2012(2): 37-39. (in Chinese)
- [3] Guo H, Xiao G, Mrad N, et al. Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms[J]. Sensors, 2011, 11(4): 3687-3705.
- [4] Development of a practical optical fibre system for health monitoring composite structures [C]. AIAA-2006-2116, 2006.
- [5] 杨全伟,舒成辉,赵华. 飞机机翼载荷校准试验的有限元仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23): 6569-6571.
Yang Quanwei, Shu Chenghui, Zhao Hua. Technology of FEM simulation in aircraft wing loads calibration test[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(23): 6569-6571. (in Chinese)
- [6] 侯乔乔,杨东涛,高战朋. 基于应变测量的飞行载荷测试方法研究[C]. 江西:江西省航空学会,2013.
Hou Qiaoqiao, Yang Dongtao, Gao Zhanpeng. Research of flight loads test method based on strain measurement[C]. Jiangxi: Jiangxi Aviation Society, 2013. (in Chinese)
- [7] Skopinski T H, Aiken W S, Huston W B. Calibration of strain-gage installations in aircraft structures for the measurement of flight loads[R]. NACA-TR-1178, 1954.
- [8] FAA. Draft AC (J) 25. 301 flight loads validation [S]. Hoofddrop, 2002.
- [9] 钟海,张鹏程. 大展弦比机翼载荷校准技术研究[J]. 科技传播, 2013(3): 10-11.
Zhong Hai, Zhang Pengcheng. The research of high aspect ratio wing load calibration technology[J]. Public Communication of Science & Technology, 2013(3): 10-11. (in Chinese)
- [10] 阎楚良,张书明,卓宁生,等. 飞机机翼结构载荷测量试验力学模型与数据处理[J]. 航空学报, 2000, 21(6): 56-60.
Yan Chuliang, Zhang Shuming, Zhuo Ningsheng, et al. Mechanical model and data processing of load measurement test for the airplane's wing structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(6): 56-60. (in Chinese)
- [11] Sigurd A. Nelson II. Strain gage selection in loads equations using a genetic algorithm [R]. NASA-CR-4597, 1994.
- [12] 胡昌荣. 飞机飞行载荷测量载荷方程的优选[J]. 航空学报, 1994, 15(1): 102-105.
Hu Changrong. The optimization of load equation during aircraft flight load measurement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(1): 102-105. (in Chinese)
- [13] 王兆东. 民机飞行载荷的试飞验证[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(2): 16-20.
Wang Zhaodong. The test flight demonstration of civil airplane flight load[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2011(2): 16-20. (in Chinese)

作者简介:

金秀芬(1979—),女,高级工程师。主要研究方向:地面载荷、起落架强度。

余建虎(1975—),男,高级工程师。主要研究方向:飞行载荷测量。

于秀伟(1983—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:地面载荷、起落架强度。

(编辑:赵毓梅)