

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.04.043

试验设计在飞机载荷谱飞行实测中的应用

李飞*, 周占廷, 谢帅

中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 飞机载荷谱飞行实测对确定飞机实际使用寿命、改进飞机结构设计有着非常重要的作用。本文通过试飞方案设计和飞机重心法向过载概率分布确定两部分工作, 证明了将试验设计应用到受多重因素影响的飞机载荷谱飞行实测中的合理性、可行性和必要性, 最终在同时保证安全性和经济性的前提下实现了优化试飞架次的目标, 为未来的新机试飞提供了一条新的方法和途径。

关键词: 试验设计; 飞机载荷谱; 均匀设计法; 拉丁超立方设计法; 核密度估计

中图分类号: V215.5+1 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 04-0043-04

试验设计 (Design of Experiment, DOE) 的实质是以较小的试验规模 (试验次数)、较短的试验周期及较低的试验成本, 获得理想的试验结果和正确的结论。近年来, 国内外关于将试验设计如何应用到试飞中的研究还停留在初级阶段: Leslie L. Bordelon 等^[1] 通过简要回顾试验设计的发展历程, 指出将试验设计应用到试飞中的可行性与必要性, 同时系统总结出试验设计的基本步骤; George Kailiwai^[2] 详细介绍了美国空军试飞中心利用试验设计安排试飞的具体步骤; Major Aaron. Tucker 等^[3] 介绍了常见试验设计方法的基本原理, 并通过试飞说明了各方法的优缺点; Lt Col Aaron A. Tucker^[4]、Dan A. Roth^[5]、Tonja Rogers^[6] 等提出通过试验设计能显著提高试飞的安全和效率。

随着航空工业的发展和飞行任务要求的提高, 飞机的使用条件和承受环境越来越复杂。以往基于历史经验的试飞方法总是试图以“确定性门槛值”覆盖各种随机性因素的影响。这样虽然大体上是偏于安全的, 但是无法定量地考核各种分散性因素的影响, 也无法使飞机的安全性和经济性在合理的约束下趋于最优。因此, 在试飞之前, 综合考虑各种因素的影响, 利用“合适的”试验设计方法科学、合理、高效地设计试飞方案, 不仅可以充分有效地利用试飞资源, 而

且一定程度上可以缩短试飞周期, 提高试飞效率, 降低试飞风险。

飞机载荷谱飞行实测是通过经测试改装和载荷校准的飞机在使用部队按照部队日常训练方法, 由不同年龄、不同技术状态的飞行员按照飞行训练大纲要求进行训练飞行, 同时记录飞机在使用过程中的所有飞行参数和载荷数据, 经数据处理后编制成谱, 即可反映同类飞机的实际使用情况, 以达到验证设计数据, 改善并优化设计方案, 确定结构使用寿命的目的。本文将试验设计应用到受多重随机性因素 (高度、速度、迎角、侧滑角、飞行员、起飞燃油量、任务、构形、机场、季节、温度等) 影响的飞机载荷谱飞行实测中进行深入研究, 希望通过安排尽可能少的试飞架次反映飞机在实际使用过程中的受载情况。

1 试验设计理论

试验设计的基本原理是通过科学、合理、高效地改变系统或过程的输入变量, 研究其相应输出响应的变化, 从而掌握各个输入因素的重要性以及对试验指标的影响规律, 并如何达到最优的目的, 其基本步骤可以概括为 4 个阶段 12 个步骤, 如图 1 所示。

收稿日期: 2017-02-06; 退修日期: 2017-02-13; 录用日期: 2017-02-27

* 通讯作者. Tel.: 15029274295 E-mail: cfte_lifei@163.com

引用格式: Li Fei, ZHOU Zhanting, XIE Shuai. The application for design of experiment in aircraft load spectrum flight measurement [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (04): 43-46. 李飞, 周占廷, 谢帅. 试验设计在飞机载荷谱飞行实测中的应用 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (04): 43-46.

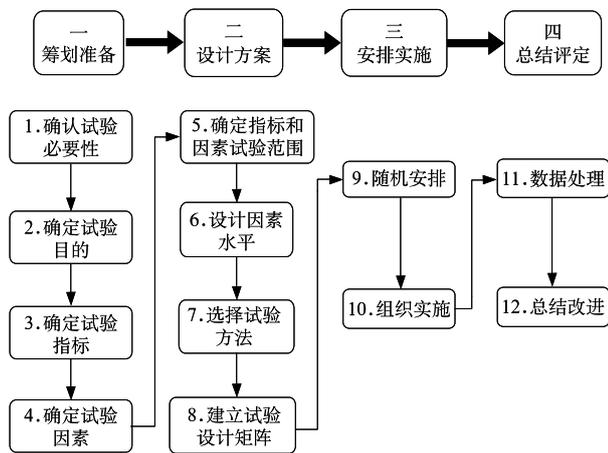


图 1 试验设计的基本步骤
Fig. 1 The basic steps of DOE

试验设计的方法众多,既有非常成熟的传统试验设计方法,又有较新的均匀设计法 (Uniform Design, UD) 和拉丁超立方设计法 (Latin Hypercube Design, LHD),各试验设计方法都有其各自的优缺点和适用范围。这里仅对均匀设计法和拉丁超立方设计法进行介绍:

(1) 均匀设计的基本思想是利用均匀表 $V_n(m^k)$ (V 表示均匀设计, n 表示试验次数, m 表示每个因素有 m 个水平, k 表示最多安排 k 个因素) 安排试验,使得试验点在试验空间中具有良好的“均匀分散性”,然后利用回归分析法进行数据分析。(2) 拉丁超立方设计是一种受约束且具有样本记忆功能的均匀抽样试验法,其基本思想是:根据各输入因素的概率分布函数和定义域范围,采取等概率分层抽样产生各因素的随机数样本。具体实现过程可以描述为:首先,确定模拟次数 N ;然后,根据模拟次数将变量的概率分布函数等分成 N 个互不重叠的子区间;最后,在每个子区间内分别进行独立的等概率抽样。

关于“合适的”试验设计方法的选择,从效果可信性、技术可行性和经济可行性 3 个原则进行考虑:

(1) 传统试验设计方法不仅存在抽样方式堆积点问题(试验水平组合没有布满整个空间,所得试验模型也将不能代表整个参数变化区域),而且由于反复抽样导致抽样次数庞大,所需安排试验次数多,工作量大。(2) 均匀设计不仅抽样次数少、效率高且“充满空间”,尤其对于多因素、多水平、各因素水平数目相等的试验具有很大的优势。(3) 拉丁超立方设计:首先,是“充满空间”的设计,能够保证试验水平组合相对均匀地填满整个试验区间;其次,不严格依赖于现成的表格,试验设计更加灵活自由;最后,多维分层抽样

的特点可以最大程度适用于多因素、多水平、各因素水平数目不相等的试验设计。

因此,选定“合适的”均匀设计法和拉丁超立方设计法进行试飞方案设计。

2 试飞方案设计

2.1 飞机结构模型

过载作为飞机结构设计中最重要原始参数之一,其大小反映了飞机结构的实际受载情况。在实际飞行中飞行员输入一个机动动作,飞行状态会发生变化,相应地,飞机结构也会出现不同的输出响应。如果把飞机机体作为一个系统,那么驾驶员所施加的机动动作就是这个系统的“输入”,飞机结构所承受过载就是该系统的“输出”。

对于单个飞行起落而言,以飞机重心法向过载作为试验指标(输出),相关飞行参数为试验因素(输入),飞机机体这个结构模型就可以抽象表示为无因次形式:

$$n_z = f(H_p, V_c, \alpha, \beta) \quad (1)$$

式中: n_z 为飞机重心法向过载; H_p 为气压高度; V_c 表示飞行表速; α 为飞机迎角; β 为飞机侧滑角。

2.2 试飞状态点矩阵建立

式(1)结构模型中含有 4 个不同的试验因素,将每个因素各划分 10 个试验水平,因此,可选取均匀表 u_{10} (10^4) 来建立试飞状态点矩阵,具体如表 1 所示。

表 1 试飞状态点矩阵
Table 1 The flight test state matrix

状态号	试验因素			
	H_p/m	$V_c/(km/h)$	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$
1	500.0	400.0	15.0	8.0
2	800.0	700.0	8.0	6.0
3	1000.0	1200.0	-5.0	4.0
4	1500.0	300.0	17.0	2.0
5	2000.0	600.0	10.0	0.0
6	3000.0	1000.0	0.0	-2.0
7	5000.0	200.0	20.0	-4.0
8	8000.0	500.0	12.0	-6.0
9	10000.0	800.0	5.0	-8.0
10	12000.0	1400.0	25.0	10.0

2.3 试飞架次安排

对于不同飞行起落而言,飞机的实际受载情况与飞行员 P 驾驶习惯、起飞燃油量 W 设置、飞行任务 X 及飞机构形 I 等因素息息相关,考虑到人力、时间、物力等多种条件的限制,飞行起落数有限。因此,不得不用典型任务来反映飞机

结构的实际使用情况。假定共计 20 种飞行任务,每种飞行任务各执行 1 次,利用拉丁超立方体设计法安排飞行架次,具体如下表 2 所示。

表 2 试飞架次安排
Table 2 The arrangement of flight test schedule

架次号	飞行员 P	起飞燃油量 M/kg	飞行任务 X	飞机构形 Γ
1	E	6750.0	X_{13} (对抗空战 3)	Γ_2
2	C	8000.0	X_{19} (战术课题 2)	Γ_1
3	J	6000.0	X_{18} (战术课题 1)	Γ_1
4	A	6500.0	X_{20} (协同课题)	Γ_1
5	D	7000.0	X_2 (仪表 1)	Γ_3
6	B	6000.0	X_{17} (攻击)	Γ_3
7	F	7500.0	X_{11} (对抗空战 1)	Γ_3
8	I	5500.0	X_{16} (对地攻击 1)	Γ_4
9	G	7000.0	X_8 (综合飞行 2)	Γ_2
10	H	5000.0	X_9 (基本特技)	Γ_3
11	B	6250.0	X_{10} (战斗特技)	Γ_4
12	C	6750.0	X_1 (大航程)	Γ_1
13	H	7750.0	X_6 (编队机动)	Γ_4
14	F	5500.0	X_{12} (对抗空战 2)	Γ_2
15	A	5000.0	X_5 (单机机动)	Γ_2
16	I	7500.0	X_4 (编队)	Γ_1
17	D	7750.0	X_{14} (协同作战)	Γ_3
18	E	6250.0	X_7 (综合飞行 1)	Γ_4
19	J	6500.0	X_3 (仪表 2)	Γ_2
20	G	8000.0	X_{15} (对地攻击 1)	Γ_4

表 2 中: $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J$ 分别表示 10 个不同年龄、不同技术状态的飞行员; X_1, X_2, \dots, X_{20} 分别表示 20 种不同飞行任务; Γ_1 表示既无外挂,也无副油箱构形; Γ_2 表示有外挂,无副油箱构形; Γ_3 表示无外挂,有副油箱构形; Γ_4 表示既有外挂,又有副油箱构形。综合表 1 和表 2 即可组成所设计试飞方案。如 1 号架次的试飞计划是飞机带外挂无副油箱,起飞燃油量为 6750kg,飞行员 E 执行对抗空战 3 任务,飞行动作作为表 1 中各试飞状态点。

3 飞机重心法向过载概率分布确定

通常,科学研究和工程实践中用来确定概率分布函数^[7,8](Probability Distribution Function, PDF)的基本流程,如图 2 所示。

针对上节所建试飞方案,从某型飞机机体载荷谱实测的 100 个飞行架次试飞数据中选取“匹配的”20 个试飞架次,飞机重心法向过载 n_z 的时间历程曲线(典型架次)、频率直方图和概率分布曲线,分别如图 3~ 图 5 所示。

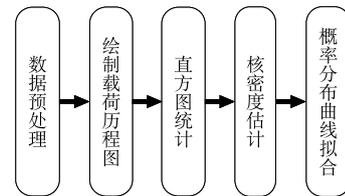


图 2 确定概率分布的基本流程
Fig. 2 The basic flow of determining PDF

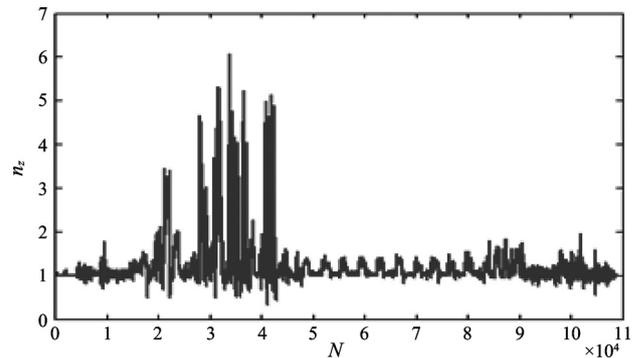


图 3 n_z 时间历程曲线
Fig. 3 The time history curve of n_z

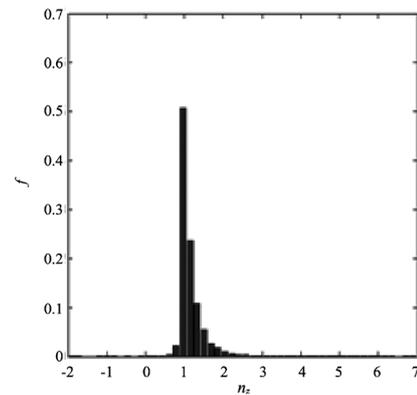


图 4 n_z 频率直方图
Fig. 4 The frequency histogram of n_z

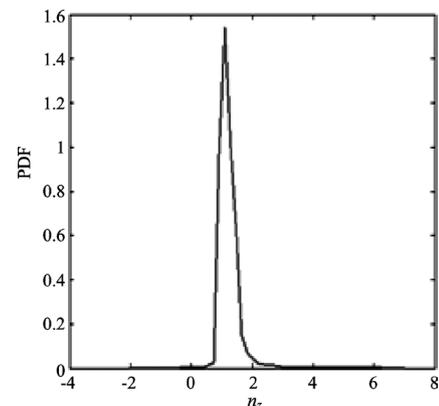


图 5 n_z 概率分布曲线
Fig. 5 The frequency histogram and probability distribution curve of n_z

4 结论

通过以上研究,本文取得了以下研究成果和结论:

(1) 系统地总结了试验设计实施的基本步骤,同时证明了将试验设计应用到飞机载荷谱飞行实测中的合理性、可行性和必要性,为未来的新机试飞提供了一条新的途径和方法。

(2) 利用均匀设计法和拉丁超立方设计法设计试飞方案,选取匹配试飞数据之后确定出飞机重心法向过载概率分布,最终通过安排尽可能少(20个)的试飞架次反映了飞机在实际使用过程中的受载情况,一定程度上缩短了试飞周期,提高了试飞效率,降低了试飞风险。

(3) 利用核密度估计法确定得到概率分布曲线之后,可以计算任意点 n_z 值出现的概率,同时还可以预测没有实测到的 n_z 值及其出现概率,这对解决飞机载荷谱小子样飞行实测方法的数据缺失问题将是非常重要的。

AST

参考文献

- [1] Leslie L B. Design of experiments applied to flight test [D]. US Air Force SES Retired NATO Lecture Series SCI-176 Mission Systems Engineering, 2006.
- [2] George K. The United States Air Force flight test center experiments in experimental design [J]. Edwards Air Force Base, 2005.
- [3] Lt Col Aaron A. Tucker. Safety, efficacy and efficiency: design of experiments in flight test [D]. United States Air Force.
- [4] Tucker M A, Gregory T H, Cihan H D. Application of design of experiments to flight test: a case study [D]. American Institute of Aeronautics, 2011.
- [5] Roth D A, Kitto W, Taylor M. Improving air force flight test center developmental test and evaluation through increased use of statistical methods [D]. AIAA, 2010.
- [6] Rogers T, Kraus P, Sims J L. Test optimization utilizing design of experiments [R]. 2012.
- [7] 蒋祖国, 田丁栓, 周占廷. 飞机结构载荷 / 环境谱 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
JIANG Zuguo, TIAN Dingshuan, ZHOU Zhanting. Aircraft structure / load spectrum [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese)
- [8] 汤阿妮. 基于核密度估计算法的飞机载荷谱统计技术 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37 (6): 654-657.
TANG A' ni. Technique of aircraft loads spectrum statistics based on kernel density estimation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37 (6): 654-657. (in Chinese)

作者简介

李飞(1988—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机飞行载荷验证与结构强度计算。

Tel: 15029274295 E-mail: cfte_lifei@163.com

Application for Design of Experiment in Aircraft Load Spectrum Flight Measurement

LI Fei*, ZHOU Zhanting, XIE Shuai

China Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: The flight measurement of aircraft load spectrum plays an important role in determining the actual service life of aircraft and improving the design of aircraft structure. In this paper, through two parts work: designing the flight test program and determining the Probability Distribution Function (PPF) curve of n_z , proved that it is reasonable, feasible and necessary to apply Design of Experiment (DOE) in aircraft load spectrum flight test measurement affected by many factors. Ultimately, realized the goal of optimizing the number of flight test while guaranteeing safety and economics.

Key Words: design of experiment; aircraft load spectrum; uniform design; latin hypercube design; kernel density estimation

Received: 2017-02-06; Revised: 2017-02-13; Accepted: 2017-02-27

*Corresponding author. Tel. :15029274295 E-mail: cfte_lifei@163.com