基于 ISIGHT 软件的地面台架试车条件下涡扇发动机 部件特性辨识方法

唐 兰,王 军,韩文俊,任 东 (中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:为获得地面台架试车条件下涡扇发动机部件特性,基于 ISIGHT 软件搭建了部件特性辨识平台,提出了 1 种工程上通用的辨识方法。通过试验设计对可调参数进行了敏感性分析,获得地面台架试车条件下需辨识的主要部件特征参数,并结合优化算法获得精度高的辨识结果。对该辨识方法进行了验证,并基于某发动机地面台架试车数据,进行了实例应用。结果表明:验证结果中的辨识误差在 0.22%以下,在实例应用中,个别参数辨识误差在 4%以下,其余均在 2.5%以下,满足精度要求,验证了该辨识方法的正确 性,为涡扇发动机部件特性辨识提供了 1 种高效的方法。

关键词:台架试车;部件特性;辨识;ISIGHT软件;涡扇发动机

中图分类号:V231 文献标识码:A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.05.006

Identification Method of Component Characteristic for Turbofan Engine Under the Condition of Ground Bench Test Based on ISIGHT Software

TANG Lan, WANG Jun, HAN Wen-jun, REN Dong

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to obtain the characteristics of turbofan engine components under the condition of ground bench test, the identification platform of component characteristics was built based on SIGHT software and a general identification method in engineering was proposed. The sensitivity analysis of the adjustable parameters was carried out through the test design. The identified characteristic parameters of the main components were obtained under the conditions of the ground bench, and the identification results with high accuracy were obtained by combining the optimization algorithm. The identification method was verified and an example was applied based on data of the engine ground bench test. The results show that the identification error in the verification results is less than 0.22%. In the application of examples, the identification errors of individual parameters are less than 4%, and the rest are less than 2.5%, which meets the accuracy requirements, and verifies the correctness of the identification method. It provides an efficient method for the identification of turbofan engine components.

Key words: ground bench test; component characteristic; identification; ISIGHT software; turbofan engine

0 引言

在发动机研制过程中,地面台架试车是考核发动 机是否达到设计指标的重要手段。由于发动机加工、 装配等存在误差,地面台架试验结果与设计指标存在 较大偏差,需要对风扇、压气机、涡轮等部件进行详细 分析,获得各部件在整机条件下的实际特性,从而指导后续优化改进工作,使发动机性能达到设计指标^[1-2]。此外,获得发动机使用过程中各部件的性能变化对整机性能衰减研究及发动机气路故障诊断研究均具有重要意义^[3-5]。但受测试能力、成本及发动机本身结构

收稿日期:2019-06-18 基金项目:国防重点科研项目资助 作者简介:唐兰(1988),女,硕士,工程师,主要从事航空发动机总体性能设计工作;E-mail:tang_lan@foxmail.com。

引用格式: 唐兰,王军, 韩文俊,等. 基于 ISIGHT 软件的地面台架试车条件下涡扇发动机部件特性辨识方法[J].航空发动机,2020,46(5):28-33. TANG Lan, WANG Jun, HAN Wenjun, et al. Identification method of component characteristic for turbofan engine under the condition of ground bench test based on ISIGHT software[J].Aeroengine,2020,46(5):28-33. 的限制,在地面台架整机试车过程中无法获得各部件 的全部期望的测量值,因此,基于现有的试验测量数 据辨识出部件特性参数具有重要意义。常用方法是利 用系统辨识(System Identification, SI)的思路建立发动 机辨识模型获得部件特性16-7。发动机辨识模型分为参 数估计法和部件特性法。参数估计法是非基于发动机 气动热力模型的辨识方法[8-10],而是基于大量的试验 数据并结合不同的数学算法辨识出发动机模型[11-13], 从而评估发动机整机性能:部件特性法基于发动机气 动热力模型,可辨识出整机条件下发动机的部件特 性。白磊等四采用变分加权最小二乘法对发动机试验 数据进行模型辨识分析,修正发动机部件特性,获得 各部件的实际特征信息;王军等15利用条件数分析了 部件特性参数之间的相关性,构造了工程上可解的辨 识问题,并采用最小二乘法完成设计状态的部件特性 辨识。上述方法主要针对发动机设计状态的部件特性 辨识,对非设计状态下的辨识较少,此外尚未在国外 文献中发现发动机部件特性辨识方法相关内容,为 此,有必要开展不同发动机状态下的部件特性辨识方 法研究。

本文在发动机气动热力模型辨识研究的基础上, 开展地面台架试车条件下涡扇发动机部件特性辨识 方法研究,将部件特性辨识问题转化为典型的优化问 题,基于多学科优化软件 ISIGHT 搭建了工程上可用 的部件特性辨识平台,利用该辨识平台成功辨识出地 面台架试车条件下不同发动机状态下的部件特性。

1 基于 ISIGHT 软件的部件特性辨识方法

1.1 部件特性辨识问题构造

利用发动机性能计算模型将部件特征参数(如总 压恢复系数、部件效率等)作为可调变量,将地面台架 试车中测得的参数(如转速、部件截面压力、温度、燃 油流量、推力等)作为辨识目标。辨识过程就是通过调 整发动机模型中的可调变量,使得仿真的发动机性能 参数与试验测量的参数匹配,从而获得整机条件下的 部件特性的过程。为了避免参数匹配过程中的盲目性, 本文将部件特性辨识问题转化为典型的优化问题。

设计变量即为各部件可调特性参数,理论上包括风 扇特性系数、压气机特性系数、高压涡轮特性系数、低压 涡轮特性系数、引气系数和总压恢复系数,根据文献[15] 的研究结果及工程经验选取的设计变量见表 1。辨识目 标为工程上可以试验测得的整机参数,见表2。

表 1 设计变量					
参数	物理意义	参数	物理意义		
W_{1X}	风扇流量系数	$\eta_{ ext{htX}}$	高压涡轮效率系数		
$\pi_{ m fX}$	风扇压比系数	$\eta_{ m ttX}$	低压涡轮效率系数		
$oldsymbol{\eta}_{ ext{fX}}$	风扇效率系数	$\pi_{\scriptscriptstyle{ ext{whX}}}$	外涵总压恢复系数		
W _{25x}	压气机流量系数	y_{q9}	压气机级后引气系数		
$\pi_{ ext{cx}}$	压气机压比系数	A 8	喷口喉道面积		
$\eta_{ m ex}$	压气机效率系数				

表 2 常规测量参数

			•
参数	测量项目	参数	测量项目
T_0	环境温度	P ₁₆	外涵出口气流总压
P_0	环境压力	T_{13}/T_{23}	风扇后气流总温
n_1	低压转子转速	T_3	压气机后气流总温
n_2	高压转子转速	T_6	涡轮后排气总温
P_{13} / P_{23}	风扇后气流总压	W_1	风扇进口流量
P_3	压气机后气流总压	F	发动机推力
P_6	涡轮后排气总压	$W_{ m f}$	主燃油流量

为更好地进行优化,将调整参数后发动机模型计 算参数与试验测量参数的相对误差作为辨识精度的 标准,定义目标函数为

$$E = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} w_i \cdot |\frac{y_{\text{test}} - y_{\text{Model}i}}{y_{\text{test}i}}| \times 100 \tag{1}$$

式中:m 为试验测得的整机参数;w_i为各测量参数的 权重,该权重根据工程上试验测量精度给定(测量精 度高的测量参数权重相对较大,测量精度较低的测量 参数权重相对较小);y_{test}为试验测量值;y_{Model}为发动 机模型计算值。

综上所述,将在地面台架试车条件下涡扇发动机 部件特性辨识问题转化为在不同的发动机状态下的 优化问题。

1.2 部件特性辨识平台搭建

为了更快、更好地实现工程上的应用,基于成熟的商业软件 ISIGHT¹¹⁶搭建在整机条件下涡扇发动机 部件特性辨识平台,如图 1 所示。该平台集成了发动 机总体性能计算程序和数据辅助处理程序。利用 ISIGHT 软件的试验设计模块,可快速地对部件可调 参数进行敏感性分析,得到对部件特性辨识误差产生 影响的主导因素,为后续优化设计选取设计变量提供 依据^[17-18]。利用 ISIGHT 软件的优化设计模块在当前 成熟的优化算法中寻找最适合的优化算法,获得辨识 误差最小的部件特性辨识结果。



1.3 试验设计

试验设计的方法是在设计空间内综合协调各设 计因子水平,使设计点在设计空间满足统计意义上的 最优分布。ISIGHT软件提供了多种试验设计方法,其 中最优拉丁超立方设计使所有的试验点尽量均匀地 分布在设计空间,具有非常好的空间填充性和均衡 性,可获得非线性程度更高的响应,因此,应用最优拉 丁超立方设计算法将表1中11个设计变量作为试验 因素,各因素的取值范围为±5%,试验次数为500 次,得到不同参数组合下的误差E。反映所有因素对 E的影响规律的 Pareto 和主效应分别如图 2、3 所示。 样本点拟合后的模型中所有变量对每个响应的影响 程度的百分比如图2所示,图中虚线红色的条形表示 正效应,实线蓝色条形则表示负效应。图中只列出影 响较大的前 15 项, W_{1x} 和 A_8 对 E 影响最大,其中 W_{1x} 影响为正效应, A_8 影响为负效应,其次为 η_{ex} 、 η_{fx} 、 η_{hx} 、 η_{ttx} 、 W_{25X} 。从图 3 中可见,误差 E 随着 W_{1X} 的增大而增 大。综合考虑,想要获得更小的误差,则需选择较小的 W_{1x} 值,这与图 2 中 W_{1x} 对 E 的影响为正效一致,其 他参数的影响分析类似。





通过试验设计的方法对优化变量进行初步的探 索,对优化变量的敏感度进行分析,得到影响辨识误 差的关键部件特性因素及各因素水平对辨识误差的 影响趋势,但试验设计方法无法自动探索最优的设计 点,需要在试验设计的基础上进行优化。

1.4 优化设计

1.4.1 优化数学模型

根据试验设计结果可知,对 *E* 影响最大的是风 扇流量系数 *W*₁x,根据文献[15]中的研究结论,该系数 可根据发动机进口流量测量值给定。因此,在进行优 化设计前,通过地面台架试车过程中发动机进口流量 测量值直接给定 *W*₁x,在后续优化过程中不作为变 量。此外,4 大部件的效率系数、喷口面积及压气机流 量系数是发动机匹配的重要参数,结合上述试验设计 结果,最终选定 η_ex、η_Ix、η_μx、*A*₈、*W*_{25x} 6 个参数作为 优化变量。

在地面台架试车条件下涡扇发动机的部件特性 辨识的优化数学模型如下:

输入条件: T_0 、 P_0 、 n_1 ;

优化变量: η_{IX} 、 η_{eX} 、 η_{hX} 、 η_{uX} 、 A_8 、 W_{25X} ;

优化目标:E最小。

1.4.2 优化算法确定

采用 ISIGHT 软件中的优化算法对上述数学模型进行优化,ISIGHT 软件中提供了梯度优化算法、直接搜索方法和全局探索法 3 类。以在某一状态下发动机地面台架试车为例,采用 ISIGHT 软件中不同优化算法(根据试验测量精度给定的试验测量参数权重见表 3,优化算法的参数配置均采用 ISIGHT 默认值)对上述数学模型进行优化,优化结果及完成优化所需步

骤(代表优化时长)见表 4。从表中可见,采用不同的 优化算法得到的 E 值比较接近,E 值最小的是 Pointer 优化算法,该算法是 1 种全局优化算法,但耗时较长, 优化步骤为 7797 步。而 DS 算法优化结果与 Pointer 算法的仅差 0.16,但优化步骤仅为 Pointer 算法的 1% 左右,优化效率大幅提高。在综合考虑优化结果和优 化效率后,本文采用 DS 优化算法。

表 3 各测量参数的权重

序号	符号	权重	序号	符号	权重
1	n_2	20	7	T ₂₃	10
2	P_{13}	25	8	T_3	10
3	P_3	25	9	T_6	15
4	P_6	20	10	W_1	5
5	P_{16}	10	11	F	10
6	<i>T</i> ₁₃	10	12	$W_{ m f}$	10

表 4 不同优化算法的优化结果对比

优化算法	优化结果 E	优化步骤	优化算法	优化结果 E	优化步骤
Multi-island GA	10.38	1000	MMFD	8.27	46
DS	6.99	75	MOST	8.99	190
Evol	8.30	100	Particle Swarm	7.55	500
Hooke-Jeeves	8.28	100	NLPQL	9.29	18
LSGRG	9.00	66	Pointer	6.83	7797
MISQP	9.29	14	Stress Ratio	9.44	21

DS 优化算法是求解多维空间非线性优化问题的 优化搜索方法,应用了单纯形(Simplex)的概念,并通 过改变单纯形顶点位置以及尺寸,持续在设计空间中 移动。通过反射、反射并扩张、收缩和多维收缩4个变 换方法计算目标函数最小值。

1.4.3 优化算法配置给定

DS 算法有 2 个配置参数,分别是 Simplex 起始尺 寸(Initial Simplex Size)和优化迭代的最大次数 (Maximun Iterations)。起始尺寸表示最初开始寻优时 单纯形在设计空间中所具备的尺寸(0 < 起始尺寸≤ 1),当起始尺寸较大时,得到最优解的可能性也较大。 优化迭代的最大次数是整型,选值越大,优化步骤越 多。为获得辨识精度更高的配置参数,将设计点的高 压压气机的效率给定为 0.98 进行计算,将该计算值 作为目标参数(未考虑试验测量精度的影响,在优化 过程中各项参数的权重系数均为1),获得不同参数 配置下的优化结果 *E* 和优化步骤,如图 4 所示,部件 特性辨识结果相对误差如图 5 所示。从图中可见,综 合权衡辨识精度和优化速度,选取起始尺寸为 0.3,迭 代的最大次数为 60。



2 部件特性辨识方法验证

在地面台架试车条件下涡扇发动机部件特性辨 识的步骤如下:

(1)输入地面台架试车参数 T_0 、 P_0 、 n_1 ;

(2)根据试验发动机进口流量测量值给定风扇流 量系数 W_{IX};

(3)给定优化变量($\eta_{IX},\eta_{eX},\eta_{hX},\eta_{uX},A_8,W_{25X}$)取值

范围;

(4)给定试验测量参数(n₂、P₁₃、P₃、P₆、P₁₆、T₁₃、T₂₃、
 T₃、T₆、W₁、F、W₆)权重;

(5)利用搭建的部件特性辨识平台进行辨识,获 得辨识结果。

为验证所采用的部件特性辨识方法的正确性,将 设计点的高压压气机效率给定为 0.98 进行部件特性 辨识,获得辨识结果与实际值对比如图 6 所示。图中 数据以设计点参数进行无量纲化,下文同。从图中可 见,高压压气机效率为 0.978,与实际值 0.980 基本一 致,各参数的辨识相对误差均在 0.22%以下,验证了 所采用的部件特性辨识方法的正确性。



3 台架试车条件下部件辨识结果及分析

针对带加力小涵道比涡扇发动机在地面台架试 车不同状态下的部件特性进行了辨识,辨识相对误差 如图 7 所示。



从图中可见,除了 P₁₆相对误差较大外(4%以下),其余参数的相对误差均在 2.5%以下,辨识精度 满足工程要求。辨识精度一方面取决于辨识方法本身 (根据验证结果可知,辨识方法本身误差较小,在 0.22%以下),另一方面取决于试验数据测量的准确 度。在试验过程中 P₁₆只有 1 个测点,试验结果与真实 结果存在较大误差,所以辨识误差相对较大。

部件特性辨识结果见表 5。采用本文的部件特性 辨识方法可辨识出在地面台架试车不同转速下的部 件特性,反馈整机条件下各部件的实际特性信息,可 为各部件分析及完善设计提供参考和依据。

表5 7	在地面台架试车条件下部件特性辨识结果
------	--------------------

参数 -	n_1					
	0.864	0.911	0.932	0.972	0.995	
Ε	11.71	9.38	9.30	7.79	7.93	
$\eta_{ ext{f}}$	1.043	1.036	1.030	1.028	1.018	
$oldsymbol{\eta}_{ ext{c}}$	1.018	0.999	1.008	1.010	1.041	
$\eta_{ ext{ heta}}$	0.994	1.003	1.007	1.002	0.983	
$\eta_{^{\mathrm{tt}}}$	0.998	1.026	1.014	1.007	1.006	
A_8	0.932	0.942	0.934	0.952	0.953	
W_{25}	0.917	0.939	0.964	0.983	1.000	

4 结论

本文基于多学科优化软件 ISIGHT 搭建了工程 上可用的部件特性辨识平台,可实现可调参数的敏感 性分析,获得在地面台架试车条件下需辨识的主要发 动机部件特征参数,同时实现精度满足要求的发动机 地面台架试车条件下的部件特性评估。得到如下结论:

(1)利用现有成熟商业软件的优势搭建的部件特 性辨识平台效率高、精度满足要求,具有较大的工程 应用价值;

(2)在地面台架试车条件下涡扇发动机需辨识的
 部件特征参数主要有6个,分别为η_{ix}、η_{ex}、η_{htx}、η_{ux}、
 A₈、W_{25x};

(3)对某涡扇发动机在地面台架试车不同状态下 的部件特性进行辨识,结果表明在保证工程上辨识结 果合理的基础上,个别参数辨识误差小于4%,其余 参数辨识误差在2.5%以下,满足工程要求,该误差绝 大部分取决于试验测量数据的精度,根据验证结果, 该平台的辨识误差小于0.22%;

(4)本方法具有广泛的通用性,可应用于不同条件下发动机的部件特性辨识,后续可考虑进行基于飞行试验数据的部件特性辨识及发动机性能衰减过程中的部件特性辨识研究。

参考文献:

- Simon D L, Litt J S.Automated power assessment for helicopter turboshaft engine[R].NASA-TM-2008-215270.
- [2] Ghiocel D, Altmann J.Critical modeling issues for prediction of turbine performance degradation: use of a stochastic-neuro-fuzzy inference system[R].AIAA-2001-1452.
- [3] Blinstrub J,Li Y G,Newby M,et al.Application of gas path analysis to compressor diagnosis of an industrial gas turbine using field data[R]. ASME 2014–GT–25330.
- [4] Verbist M L, Visser W P J, van Buijtenen J P. Experience with gas path analysis for on-wing turbofan condition monitoring [J].Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136 (1): 0112041-0112048.
- [5] 黄开明, Guang L Y,张伟,等.某型涡轴发动机性能衰减与部件退 化评估[J].航空动力学报,2015, 30(11):2673-2679.
 HUANG Kaiming, Guang L Y,ZHANG Wei, et al.Performance degradation and components deterioration degree estimation for a turboshaft engine [J].Journal of Aerospace Power,2015,30 (11): 2673-2679.(in Chinese)
- [6] Jaw L C, Mattingly J D.Aircraft engine controls: design, system analysis and health monitoring[M].Reston, USA: AIAA, 2009:45–60.
- [7] Ljung L.System identification; theory for the user [M]. 2nd. London: Prentice Hall PTR, 2002;8–10.
- [8] 潘鹏飞,马明明,许艳芝.基于飞行试验数据的双转子航空发动机加 减速瞬态模型辨识[J],航空发动机, 2016,42(3):78-81.
 PAN Pengfei,MA Mingming,XU Yanzhi. Throttling-transient model identification of twin spool aeroengine based on flight test data [J]. Aeroengine,2016,42(3):78-81. (in Chinese)
- [9] 丁凯峰,樊思齐.基于 RBF 网络的航空发动机辨识模型[J].航空动力 学报,2000,15(2):205-208.

DING Kaifeng, FAN Siqi. An identification model of aeroengine based on the RBF network [J].Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2): 205-208. (in Chinese)

[10] 蔡开龙,谢寿生,吴勇.基于 T-S 模糊模型的航空发动机模型辨识 [J].推进技术,2007,28(2):194-198.

CAI Kailong, XIE Shousheng, WU Yong. Identification of aero engines model based on T–S fuzy model [J].Journal of Propulsion technology, 2007,28(2):194–198. (in Chinese)

[11] 姜涛,李应红.基于动态 RBF 网络的发动机起动过程模型辨识[J].
 航空动力学报,2002,17(3):381-384.
 JIANG Tao,LI Yinghong.A dynamic identification model of

aeroengine starting process based on the RBF network [J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3): 381-384. (in Chinese)

[12] 张东方,李应红,尉询楷.计算涡扇发动机风车起动特性的辨识模型 [J].航空动力学报,2007,22(8):1320-1324.

ZHANG Dongfang, LI Yinghong, WEI Xunkai. Research on identification model of turbofan windmilling starting characteristics based on parsimonious genetic programming [J].Journal of Aerospace Power,2007,22(8):1320–1324. (in Chinese)

[13] 徐亮,黄金泉.适用于全包线的航空发动机 BP 网络模型的动态辨识[J].南京航空航天大学学报.2001, 33(4):334-337.

XU Liang, HUANG Jinquan.Dynamic identification with neural networks for aircraft engines in the full envelope[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33 (4): 334–337. (in Chinese)

[14] 白磊,陈思兵,江和甫.基于模型辨识的发动机部件特性修正研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2009, 22(3):37-39.

BAI Lei, CHEN Sibing, JIANG Hefu. Investigation on correction methods of aeroengine components characteristics based on model identification [J].Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(3): 37–39. (in Chinese)

[15] 王军,隋岩峰.整机条件下涡扇发动机部件特征参数辨识[J].航空动 力学报,2013,28(3):666-672.

WANG Jun, SUI Yanfeng.Identification of component characteristic parameter for whole turbofan engine [J].Journal of Aerospace Power, 2013,28(3):666-672. (in Chinese)

[16] 赖宇阳,姜欣.ISIGHT 参数优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航 空航天大学出版社,2012:3-5.

LAI Yuyang, JIANG Xin. Parametric theory and examples explanation of ISIGHT[M].Beijing: Beihang University Press, 2012:3-5.(in Chinese)

[17] 孙维,牛飞,王晓宇,等. 基于 ISIGHT 平台的密封壳体结构优化设计[J].机械强度,2016,38(2):414-418.

SUN Wei,NIU Fei,WANG Xiaoyu,et al. Optimization design of sealed-module structure based on ISIGHT platform [J]. Journal of Mechanical Strength,2016,38(2):414-418. (in Chinese)

[18] 向有志,张堃元,王磊,等.壁面压升可控的高超轴对称进气道优化 设计[J].航空动力学报,2011, 26(10):2193-2199.

XIANG Youzhi,ZHANG Kunyuan,WANG Lei,et al.Optimazation design of hypersonic axisymmetric inlet with controllable law of wall pressure rise [J].Journal of Aerospace Power, 2011,26(10):2193– 2199. (in Chinese)

(编辑:刘 静)