

利用性能参数回归分析的航空发动机 MTBF 预计

杨 阳¹, 李中生², 王 艺¹, 万里勇¹, 刘慧娟¹, 张昕宇³

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 空军装备部驻沈阳地区第二军事代表室, 沈阳 110043;
3. 航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110034)

摘要: 航空发动机可靠性指标平均故障间隔时间(MTBF)的预计方法有多种, 在发动机立项阶段数据缺乏的情况下建议优先选用统计回归法进行发动机可靠性指标 MTBF 的预测。为了在发动机预先研究阶段能够预计发动机的可靠性水平, 利用系数修正的方法对国外的预计回归公式进行修正, 可以得到 1 个新的回归预计公式, 但该公式存在飞机参数不明确时无法进行应用的缺点, 因此, 基于仅利用发动机性能参数进行多元线性统计回归分析得到了新的预计公式, 结果表明: 新的预计发动机 MTBF 的回归公式可以在配装飞机不明确的情况下, 仅利用发动机本身的性能参数即可大概估算出发动机的 MTBF 水平, 预计效率高, 可以为发动机立项论证时可靠性指标 MTBF 提供参考依据。综合来看, 该方法可以实现立项阶段根据飞机参数、发动机性能参数进行发动机可靠性指标 MTBF 的快速预计, 有一定的参考价值。

关键词: 平均故障间隔时间; 可靠性预计; 回归分析; 性能参数; 航空发动机

中图分类号: V328.5

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.01.004

Prediction of Aeroengine MTBF Using Regression Analysis of Performance Parameters

YANG Yang¹, LI Zhong-sheng², WANG Yi¹, WAN Li-yong¹, LIU Hui-juan¹, ZHANG Xin-yu³

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; 2. Second Military Representative Office of Air Force Equipment Department Stationed in Shenyang Area, Shenyang 110043, China; 3. AVIC Shenyang Aircraft Corporation (Group) Ltd., Shenyang 110034, China)

Abstract: There are many methods to predict the Mean Time Between Failures (MTBF) of the aeroengine reliability index. In the case of lacking data during the engine project demonstration, it is recommended to give priority to the statistical regression method to predict the overall reliability index MTBF. To predict the reliability level of the engine in the preresearch stage, by introducing correction coefficients to modify the regression prediction formula from abroad, a new regression prediction formula could be obtained. However, this formula has a disadvantage that it cannot be applied if the aircraft parameters are not clear. Therefore, a new prediction formula was obtained based on the multiple linear statistical regression analysis using only the engine performance parameters. The results show that the new regression formula can preliminarily estimate the whole engine MTBF level by using engine performance parameters only without the need of knowing aircraft parameters, and the prediction efficiency is high, which can provide a reference for the reliability index MTBF of the engine to support the demonstration for project approval. In summary, this method can realize the rapid prediction of the reliability index MTBF of the whole engine according to the aircraft parameters and engine performance parameters during the demonstration for project approval.

Key words: Mean Time Between Failures (MTBF); reliability prediction; regression analysis; performance parameters; aeroengine

0 引言

在新型航空发动机立项阶段一般会预计其整机可靠性水平, 给出 1 个平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failures, MTBF) 约定值, 用于指导后续的设计

工作^[1]。可靠性预计是推测系统可靠性水平的过程, 在设计阶段通过可靠性预计提出设计能够达到的可靠性水平。可靠性指标的技术可行性分析过程主要是对指标的预计过程, 相关的一些分析和预计方法主要有统计线性回归法、相似产品法、图估法、数学模

收稿日期: 2019-04-04 基金项目: 面向飞机作战能力的发动机综合论证系统研究(6141B090101)资助

作者简介: 杨阳(1989), 男, 本科, 工程师, 从事六性与适航工作; E-mail: 1024373164@qq.com。

引用格式: 杨阳, 李中生, 王艺, 等. 利用性能参数回归分析的航空发动机 MTBF 预计[J]. 航空发动机, 2023, 49(1): 34-40. YANG Yang, LI Zhongsheng, WANG Yi, et al. Prediction of aeroengine MTBF using regression analysis of performance parameters[J]. Aeroengine, 2023, 49(1): 34-40.

型法、蒙特卡洛法等^[2-3]。

统计线性回归方法是在统计大量相似飞机、发动机的性能、设计及其他有关参数与可靠性关系的基础上进行回归分析,给出相应的回归公式^[4]。在方案论证阶段,可以快速预计新机的整机 MTBF。在论证之初数据缺乏的情况下,应优先采用统计回归分析方法,根据不同阶段的发动机结构和性能参数计算评价其可靠性水平。在各型号发动机研制过程中,应不断积累数据完善航空发动机用回归分析模型。统计线性回归分析在航空发动机领域应用广泛,国内学者做了很多研究工作。耿宏等^[5]采用多元线性回归分析,建立了某机型巡航段燃油流量模型并进行了验证;杜紫岩等^[6]利用逐步回归分析法对直升机需用功率影响最大的变量进行选取,拟合出需用功率预测模型;宋云雪等^[7]在对发动机性能参数相关性研究基础上,结合多元线性回归预测模型,提出了一种能够考虑发动机众多因素对因变量影响的发动机性能预测模型;张群岩等^[8]基于多元线性回归分析,对影响发动机振动的试验条件进行了研究;谭巍等^[9]利用发动机模型进行发动机测量参数对部件性能参数的敏感度分析,建立性能参数多元线性回归模型,开展了发动机性能衰退研究;国外学者中,如 Bratel 等^[10]采用回归分析模型对高度和马赫数统计分析,提出了一种推力-油耗模型;Baklacioglu 等^[11]使用多元回归模型,分析得出飞机爬升段高度、表速与油耗的表达式。以上国内外研究说明了多元线性回归分析方法在航空发动机研究领域有着很好的应用。

国外在利用飞机、发动机有关参数进行可靠性预计方面有相关的回归公式^[4],经研究该公式不适用国内发动机,预测误差较大。本文进一步完善得到了改进的回归公式,但该公式依然存在一定缺点,适用场景有限。最终,根据航空发动机性能参数较多的特点,收集统计了大量国内外发动机的性能参数与 MTBF 的关系,在此基础上进行回归分析,得出了新的回归公式,经验证,预测快速,误差较小,在发动机论证阶段,能根据初步确定的性能参数快速预计整机 MTBF 值。

1 统计回归法介绍

统计回归法^[12-13]是广泛应用的预测技术,其中最常用的就是回归预测,即利用参数回归分析模型预计

参数值。这种方法是一种粗略的早期预计技术,不需要较多具体的信息,在研制早期有一定的应用价值。可靠性参数与多种设计特征有关,这种关系往往难以直接推导出简单的函数式。因此,通过回归分析建立回归模型是一种有意义的方法。

回归分析研究的主要内容是确定多个自变量之间的相互关系和相关程度,建立回归模型,检验变量之间的相关程度或回归模型的显著性,应用回归模型进行估计和预测。

首先,建立多元线性回归模型

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \dots + \beta_p \cdot x_{pi} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: ε_i 为随机变量,是影响可靠性的其它因素。

多元线性回归模型的基本假设包括:

(1)随机误差项 ε_i 具有零均值和同方差

$$E(\varepsilon_i) = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$D(\varepsilon_i) = \sigma^2, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

(2)随机误差在不同样本点之间相互独立,不存在序列相关关系,即

$$\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

(3) $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ 相应服从正态分布,即

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (5)$$

(4)自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 是确定性变量,且它们之间不相关;

(5)因变量 y_i 与自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 之间存在显著的线性相关关系,即模型是线性的。

由上述假设可知

$$y_i \sim N(\beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \dots + \beta_{pi} \cdot x_{pi}, \sigma^2) \quad (6)$$

其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{p1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{pn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

即

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (8)$$

2 国外方法应用介绍

美国沃特公司及美国海军航空兵指挥部将此方法用于所研制的武器系统(包括飞机、发动机及武器、电气等分系统)可靠性预计。对美国海军所使用的各种用途的 32 架固定翼及 11 架旋转翼飞机进行了统计、分析及数据回归,最后得到了利用飞机、发动机等

设计及性能参数和统计系数预计整机可靠性的回归公式^[4],其中对涡扇发动机,其回归公式为

$$H_{MFHBF} = -27.07110 + 0.8033799X_{14} + 8.29340X_{38} + 29.39066X_{48} + 0.20384X_{59} \quad (9)$$

式中: H_{MFHBF} 为平均故障间隔飞行小时。

式(9)中其他有关参数含义见表1。

假设要设计一种战斗机用涡扇发动机,预计此发动机的 H_{MFHBF} 。将表1示例数据代入式(9),可算出 $H_{MFHBF}=88.48$ 。即新设计的涡扇发动机的平均故障间隔飞行小时预计为88.48 h。

表1 示例所需参数

名称	符号	单位	示例数据	验证数据
机翼面积	X_{14}	m ²	27.87	62
最小作战任务时间	X_{38}	h	2	1.5
单位燃油消耗率	X_{48}	kg/(daN·h)	2.55	0.694
推重比	X_{59}		8	8

国外的可靠性预计回归公式是基于国外飞机/发动机的设计特点(材料、工艺、加工、装配等)得到的,而且是20世纪80~90年代得到的结果,彼时在役装备只有第2、3代飞机。中国体制与美国体制不同,飞机/发动机的设计理念、特点、代际也不同,因此是否适用于中国目前设计的发动机需要验证。下面以某飞机配装的某发动机为例进行验证。

将表1验证数据代入式(9),计算出 $H_{MFHBF}=57.2$ 。即通过公式验证的该发动机的平均故障间隔飞行小时预计为57.2 h。考虑到运行比(发动机总工作时数与总飞行时数之比,本文根据某型号大量的使用数据

统计结果,设为1.33),则通过公式得到的平均故障间隔时间仅为76.3 h,该发动机的设计目标值是成熟期目标值为150 h,回归公式得到的结果与目标值相去甚远。

3 基于统计的指标预计法

第2章已证实国外给出的预计公式不适用中国发动机现状。

利用现有的数据统计分析进行论证阶段可靠性指标预计有2种思路:利用现有的国外统计数据进行回归公式的修正,使之能够接近现有的发动机指标水平;利用更广泛的发动机性能参数进行多元线性回归分析,得到适用自身现状的新公式。本文在第2种思想的基础上进行深入研究,得到合理的符合预期的拟合公式。

3.1 国外回归公式修正

根据国外给出的回归公式,需要收集的参数主要有机翼面积、最小作战任务时间、单位燃油消耗率、推重比。收集了国际上主流的第3代飞机与部分第4代飞机配装的发动机参数^[14],见表2(不同文献给出的飞机/发动机参数数值不同,本文中取可信用度较高的数值)。

从表2中可见,根据国外现有公式预计的国外发动机 H_{MFHBF} 值偏低。因此,该公式需要修正,修正的主要思想是将国外预计公式乘以一系列系数,使之能够符合预期。

表2 国际上主流的第3代飞机与部分第4代飞机配装的发动机参数

飞机型号	发动机型号	机翼面积 X_{14}/m^2	最小作战任务 时间(预估) X_{38}/h	单位燃油消耗率 $X_{48}/(kg/(daN \cdot h))$	推重比 X_{59}	平均故障间 隔飞行小时 H_{MFHBF}/h	平均故障 间隔时间 H_{MTBF}/h	修正的平均 故障间隔时间 $H_{MTBF_{cor}}/h$
幻影2000	M53-P2	41	1.5	0.907	6.56	46.3	61.7	154
阵风	M88-2E4	45.7	3	0.898	9	62.8	83.7	209
EF-2000台风	EJ200	50	3	0.78	10	62.9	83.9	210
F-2	F110-GE-129	34.84	1.5	0.7	7.28	35.4	47.2	118
米格-29	RD-33	34.84	1.5	0.77	7.8	37.6	50.1	125
苏-27	AL-31F	62	1.5	0.795	8.17	60.2	80.3	201
JAS-39	RM12(F404-GE-404改型)	25.1	1.5	0.76	7.24	29.3	39.1	98
F-15“鹰”	F100-PW-220E	56.5	5	0.7	7.2	81.8	109.1	273
F-15E“攻击鹰”	F100-PW-229	56	1.5	0.66	7.9	51.4	68.5	171
FA-18E/F“超级大黄蜂”	F414-GE-400	46.45	2	0.7	9	49.2	65.7	164
F-22“猛禽”	F119-PW-110	78	1.5	0.62	11	68.5	91.3	228
F-35“闪电 II”	F135-PW-100/400/600	62.1	1.5	0.8	11.7	61.2	81.5	204

$$H_{MTBF_{cor}} = K_1 \cdot K_2 \cdot T_{MFHBF} \quad (10)$$

式(10)中: $H_{MTBF_{cor}}$ 为 H_{MFHBF} 修正值,区别于式(9); K_1 为运行比,暂定为1.33; K_2 为修正系数,暂定为2.5。则式(10)改为

$$H_{MTBF_{cor}} = 3.3333T_{MFHBF} = -90.23 + 2.678X_{14} + 27.645X_{38} + 97.968X_{48} + 0.679X_{59} \quad (11)$$

则得到修正的平均故障间隔时间(表2最右列)。

从表中可见,通过验证修正后的预计公式,RD-33发动机的 H_{MTBF} 预计为125 h,与中国某发动机 H_{MTBF} 规定值相差4%;AL-31F发动机的 H_{MTBF} 预计值为201 h,与该发动机在2016~2017年度近2年外场实际使用评价结果相差2%左右。以上2种能收集到MTBF指标值的发动机验证结果说明修正后的预计公式具有一定的使用价值。

3.2 基于性能参数的多元线性回归

国外公式修正法需要提前知道所配装飞机的参数(如机翼面积),但是一般对预先研究的发动机而言,虽然无法预知其所配装飞机的参数,但是在论证阶段,无论配装飞机的参数如何,其发动机性能参数大体可以确定。一般在设计之初就对发动机性能有基本要求,然后才开展设计。因此,性能参数决定了新型发动机的主要特征,基于性能参数的回归方程,从性能参数入手研究其可靠性指标的规律是一种有效途径。选取海平面标准大气条件且不考虑进气道损失、无飞机引气和功率提取、地面静止的发动机中间状态的性能参数^[15],见表3。

表3 发动机中间状态的性能参数

参数	单位	参数	单位
高度	km	耗油率	kg/(daN·h)
马赫数		总增压比	
低压转子转速	r/min	总空气流量	kg/s
高压转子转速	r/min	涵道比	
推力	daN	推重比/质量	-/kg
涡轮前温度	K		

3.2.1 参数选择

根据表3中发动机主要性能参数,参考国内外发动机基本性能参数数据,选择推力、涡轮前温度、耗油率、总增压比、总空气流量、涵道比、质量共7个参数参与模型计算,见表4。由于能收集到的 H_{MTBF} 数据有限,只选取了小涵道比(0~1)军用发动机的数据,中

涵道比(1~4)、大涵道比(>4)发动机数据极少而且与小涵道比数据存在明显差异,为使得结果差异性不明显,不计入统计,也即本文所得到的结果仅适用于军用小涵道比发动机。同时,以发动机型号规范规定的 H_{MTBF} 指标值和实际值取较高者参与模型计算。

3.2.2 初次回归分析

采用EXCEL计算软件进行多元线性回归计算^[16],置信度取95%,同时得到回归统计参数、方差分析数据和回归参数,见表5~7。

从表5、6中可见,判定系数Multiple R=0.95,表明性能参数与可靠性的相关性占95%;回归模型的线性关系是显著的(Significance F=0.00025< α , α 取0.05,下同)。各回归系数的实际意义为不同性能参数对可靠性的影响程度,但是7个回归系数是不完全显著的(有3个参数的P-value> α)^[17]。从整体来看,整个回归方程的初次拟合虽然符合预期,但仍有改进空间,需要进行修正后二次拟合。

初次拟合出的公式不理想的原因如下。

(1)数据样本量雷同、混乱。样本量仅有18个,而且中国派生衍生型发动机很多,性能数据大同小异,且可靠性指标相同。目前一直缺少国外发动机数据,能收集到的不同文献上 H_{MTBF} 也不尽相同,造成数据混乱。只有在样本量足够多且数据明确的基础上,才能够拟合出较准确的回归方程。需要说明的是, H_{MTBF} 数据掌握不多,其中既有指标值,又有实际水平值,为尽可能多地增加样本量,取最高值计入了回归计算,但对最终结果可能会有一定影响。

(2)拟合参数选择不准确。限于选择所有型号发动机同时具有的参数信息,而能收集到 H_{MTBF} 数据的发动机本身就少,因此在此基础上只能选取目前能收集到的性能数据。如国外某发动机的性能数据只能收集到表4中的7项,像高低压转速、推重比等性能参数无法参与模型计算。而且,即使是参与计算的7个参数的相关性也不完全满足,比如这7个回归系数是不完全显著的,根据表7中的结果,主要受推力、涡轮前温度、质量这3个参数的影响。

3.2.3 修正后再次回归分析

根据分析出的原因,删除不完全显著的3个参数后进行再次拟合,得到修正的回归统计参数、方差分析数据和回归参数,见表8~10。

表4 国内外发动机性能参数与MTBF统计

序号	推力 X_1/daN	涡轮前温度 X_2/K	耗油率 $X_3/(\text{kg}/(\text{daN}\cdot\text{h}))$	总增压比 X_4	总空气流量 $X_5/(\text{kg}/\text{s})$	涵道比 X_6	质量 X_7/kg	H_{MTBF} Y/h
FDJ-1	6000	1477	0.74	26	77	0.4	900	210
FDJ-2	4900	1316	0.76	25	64.4	0.34	995.6	250
FDJ-3	12260	1371	0.7	30.4	122.4	0.87	1731	175
FDJ-4	6000	1673	0.8	27	72	0.3	880	300
...
FDJ-16	5445	1167	0.685	20	92.7	0.625	1842	138.4
FDJ-17	6526	1672	0.7	25	103.4	0.6	1409	140
FDJ-18	12040	1427	0.689	30.4	117.5	0.87	1996	175

表5 回归统计参数

参数	数值	含义
Multiple R	0.950196819	相关系数/判定系数
R Square	0.902873995	测定系数
Adjusted R Square	0.834885792	校正测定系数
标准误差	24.54840558	标准误差
观测值	18	样本量

表6 方差分析数据

	df	SS	MS	F	Significance F
回归分析	7	56019.37	8002.77	13.28	0.000246409
残差	10	6026.24	602.62		
总计	17	62045.61			

表7 回归参数

	Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
Intercept	-545.0514	207.7006	-2.6242	0.0254	-1007.8371	-82.2657	-1007.8371	-82.2657
推力	0.0072	0.0055	1.3224	0.2155	-0.0049	0.0194	-0.0049	0.0194
涡轮前温度	0.0348	0.0576	0.6043	0.5591	-0.0935	0.1632	-0.0935	0.1632
耗油率	996.8191	300.3406	3.3190	0.0078	327.6186	1666.0196	327.6186	1666.0196
总增压比	5.4579	2.3948	2.2791	0.0459	0.1220	10.7939	0.1220	10.7939
总空气流量	-3.9098	0.9755	-4.0079	0.0025	-6.0833	-1.7362	-6.0833	-1.7362
涵道比	188.0804	61.6450	3.0510	0.0122	50.7268	325.4341	50.7268	325.4341
重量	0.0178	0.0460	0.3862	0.7075	-0.0848	0.1204	-0.0848	0.1204

表8 回归统计参数(修正)

参数	数值	含义
Multiple R	0.940573736	相关系数/判定系数
R Square	0.884678953	测定系数
Adjusted R Square	0.849195554	校正测定系数
标准误差	23.46054734	标准误差
观测值	18	样本量

表9 方差分析数据(修正)

	df	SS	MS	F	Significance F
回归分析	4	54890.44	13722.61	24.93	5.39E-06
残差	13	7155.16	550.40		
总计	17	62045.61			

表10 回归参数(修正)

	Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
Intercept	-663.7602	137.8669	-4.8145	0.0003	-961.6035	-365.9170	-961.6035	-365.9170
耗油率	1184.0055	173.1482	6.8381	1.1916E-05	809.9417	1558.0694	809.9417	1558.0694
总增压比	6.2974	1.5390	4.0920	0.0013	2.9727	9.6222	2.9727	9.6222
总空气流量	-3.1598	0.4025	-7.8510	2.7457E-06	-4.0293	-2.2903	-4.0293	-2.2903
涵道比	217.8489	51.2543	4.2504	0.0009	107.1207	328.5771	107.1207	328.5771

从表8、9中可见,回归模型的线性关系是显著的(Significance $F=5.39183\text{E}-06<\alpha$);判定系数 Multiple $R=0.94$,表明性能参数与可靠性的相关性占94%。4个回归系数是完全显著的(所有 $P\text{-value}<\alpha$)。从整体

来看,二次拟合后的回归方程符合预期。

3.2.4 拟合结果

根据拟合结果,得到预估整机 MTBF 与性能参数的多元线性回归方程为

$$Y = -663.7 + 1184X_3 + 6.2974X_4 - 3.1598X_5 + 217.8489X_6 \quad (12)$$

式中:各参数的含义与单位见表 4。

在实际应用中,可按照整机 MTBF 预计流程(如图 1 所示)采用本方法开展整机 MTBF 预计工作。

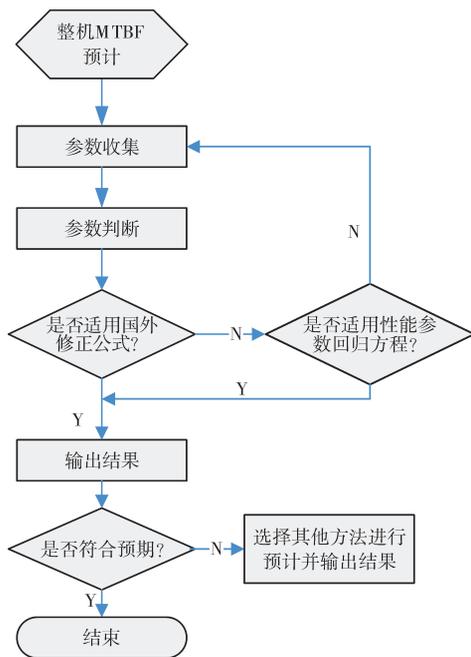


图 1 整机 MTBF 预计流程

假设要研发新型发动机,按照整机 MTBF 预计流程预计发动机中间状态设计点性能参数,预计结果见表 11。

表 11 MTBF 预计应用示例

参数	耗油率	总增压比	总空气流量	涵道比	MTBF 拟合数值
	0.862	30.2	129.7	0.253	192.3
单位	kg/(daN·h)	-	kg/s	-	h

从表中可见,该发动机整机 MTBF 预计为 192.3 h,根据表 8 中标准误差为 23.46 h,若取误差上限,该发动机整机 MTBF 约为 215.76 h。

4 结束语

应用统计数据进行回归分析是一种重要的可靠性预计理念。国外已经应用此方法开展过相关应用,但是回归公式与中国现有发动机拟合结果误差极大。根据修正后国外回归公式可以满足要求,但不适用于

配套飞机不明确的情况。基于发动机性能参数的多元线性回归分析得到的预计方程也满足要求,适用于论证阶段发动机性能参数确定的情况。但发动机的 H_{MTBF} 指标除了与飞机参数、发动机参数等密切相关外,发动机的材料、工艺、装配等诸多因素也是重要影响因素,仅从性能指标与要求的角度预测 H_{MTBF} 显然不够。通过积累更多的数据,区分国内外的情况,纳入更多的影响因素,会有更好的效果。综合来看,采用统计回归的方法拟合不同参数影响的思想有一定利用价值,影响 H_{MTBF} 的因素有许多,这些因素都可以用统计学来加以研究。

参考文献:

- [1] 龚庆祥. 型号可靠性工程手册[M]. 北京:国防工业出版社,2007:94-105.
GONG Qingxiang. Model reliability engineering manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007:94-105. (in Chinese)
- [2] 《飞机设计手册》总编委会. 可靠性、维修性设计[M]. 北京:航空工业出版社,1990:80-85.
Chief Editor of the Aircraft Design Handbook. Reliability, maintainability design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1999: 67-69. (in Chinese)
- [3] 《航空发动机设计手册》总编委会. 可靠性及维修性[M]. 北京:航空工业出版社,2000:67-69.
Chief Editor of the Aero Engine Design Handbook .Reliability and maintainability[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 67-69. (in Chinese)
- [4] 孔瑞莲. 航空发动机可靠性工程[M]. 北京:航空工业出版社,1995:114-124.
KONG Ruilian. Aeroengine reliability engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1995:114-124. (in Chinese)
- [5] 耿宏, 揭俊. 基于 QAR 数据的飞机巡航段燃油流量回归模型[J]. 航空发动机, 2008, 34(4):5.
GENG Hong, JIE Jun. Regression model of aircraft cruise fuel flow based on QAR data [J].Aeroengine, 2008, 34 (4): 5. (in Chinese)
- [6] 杜紫岩, 彭晔榕, 宋劼, 等. 基于需用功率预测的直升机/发动机综合控制方法[J]. 航空发动机, 2022, 48(5):6.
DU Ziyan, PENG Yerong, SONG Jie, et al Helicopter/engine integrated control method based on required power prediction [J]. Aero-engine, 2022, 48 (5): 6 (in Chinese)
- [7] 宋云雪, 张科星, 史永胜. 基于多元线性回归的发动机性能参数预测[J]. 航空动力学报, 2009, 24(2):427-431.
SONG Yunxue, ZHANG Kexing, SHI Yongsheng. Research on aero-engine performance parameters forecast based on multiple linear regression forecasting method[J].Journal of Aerospace Power, 2009, 24 (2):427-431. (in Chinese)

- [8] 张群岩, 史建邦, 符尧. 基于多元线性回归方法的试验条件对发动机振动的影响分析[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(4): 114-117.
ZHANG Qunyan, SHI Jianbang, FU Rao. Influence analysis of testing conditions on engine vibration base on MLR[J]. Mechanical Research and Application, 2016, 29(4): 114-117. (in Chinese)
- [9] 谭巍, 李本威, 李冬, 等. 基于性能参数残差序列分析的发动机性能衰退研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(2): 166-170.
TAN Wei, LI Benwei, LI Dong, et al. Research on engine performance decline based on performance parameter residual sequence analysis [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(2): 166-170. (in Chinese)
- [10] Bartel M, Young T M. Simplified thrust and fuel consumption models for modern two-shaft turbofan engines[J]. Journal of Aircraft, 2015, 45(4): 1450-1456.
- [11] Baklacioglu T. Fuel flow-rate modelling of transport aircraft for the climb flight using genetic algorithms[J]. Aeronautical Journal - New Series, 2015, 119(1212): 173-183.
- [12] 查先进. 信息分析与预测[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015: 193-201.
ZHA Xianjin. Information analysis and forecasting[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2015: 193-201. (in Chinese)
- [13] 司守奎. 数学建模算法与程序[M]. 烟台: 海军航空工程学院, 2007: 144-157.
SI Shoukui. Mathematical modeling algorithms and procedures[M]. Yantai: Naval Aeronautical Engineering College, 2007: 144-157. (in Chinese)
- [14] 《顶级飞机手册》编写组. 顶级战斗机图典[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014: 4-146.
Top Aircraft Manual Writing Group. Top fighters illustrated[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014: 4-146. (in Chinese)
- [15] 赵明, 邓明, 刘长福. 航空发动机结构分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2016: 14-15.
ZHAO Ming, DENG Ming, LIU Changfu. Aeroengine structural analysis[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2016: 14-15. (in Chinese)
- [16] 华文科技. 新编 Excel 公式、函数与图表应用大全[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 111-112.
Huawen Tech Co, Ltd. New edition of Excel formulas, functions and charts[M]. Beijing: China Machine Press, 2016: 111-112. (in Chinese)
- [17] 齐亚欣, 张新歧. 统计回归分析在电装产品可靠性评价中的应用[J]. 质量与可靠性, 2005(4): 44-47.
QI Yaxin, ZHANG Xinqi. Application of statistical regression analysis in reliability evaluation of denso products[J]. Quality and Reliability, 2005(4): 44-47. (in Chinese)

(编辑: 刘 亮)