

文章编号: 1674-8190(2023)03-138-08

六西格玛在军用飞机发动机总装质量控制中的应用

杨二豪¹, 刘玉松¹, 黄吉传²

(1. 中国航空工业集团有限公司 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

(2. 空军装备部驻成都地区第一军事代表室, 成都 610092)

摘要: 国内某军用飞机主机厂C发动机装机后存在间隙尺寸超差、装机一次合格率低的问题,为了解决该问题,引入六西格玛质量管理模式的DMAIC方法对发动机装机流程进行研究。运用多元回归分析、机理分析等确定影响间隙尺寸的关键因子及其影响程度,采用线性拟合得出关键因子最优参数范围,并制定详细的控制计划。通过对控制图进行分析,发现改善后的间隙尺寸处于工序稳定状态,发动机装机一次合格率由改善前的65.2%提升至95%,表明基于六西格玛DMAIC方法的质量控制对减小生产流程变异,提高生产效率具有积极作用。

关键词: 六西格玛; 发动机总装; DMAIC; 质量控制

中图分类号: V271.4; V263.2; V268.7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.03.14

Six Sigma in quality control of military aircraft engine assembly

YANG Erhao¹, LIU Yusong¹, HUANG Jichuan²

(1. Chengdu Aircraft Industrial(Group)Co., Ltd., Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Chengdu 610092, China)

(2. The First Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Chengdu, Chengdu 610092, China)

Abstract: In order to solve the problem of low first time yield rate of engine clearance size in aircraft assembly plant C Six Sigma DMAIC (define, measure, analyze, improve and control) method was introduced to analyze the engine installation process. Multiple regression analysis and other methods were used to determine the key factors affecting the clearance size and their influence degree, and the optimal parameter range was obtained by linear fitting, and a detailed control plan was made. The analysis results of the control chart show that the improved clearance size is in a stable state of the process, and the first time yield rate of engine installation has increased from 65.2% before the improvement to 95%. Conclusion: quality control based on Six Sigma DMAIC method has a positive effect on reducing production process variation and improving production efficiency.

Key words: Six Sigma; engine assembly; DMAIC; quality control

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-09-18

基金项目: 国防科工局基础科研项目(JCKY2019205A004)

通信作者: 刘玉松, liuys007@avic.com

引用格式: 杨二豪, 刘玉松, 黄吉传. 六西格玛在军用飞机发动机总装质量控制中的应用[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 138-145.

YANG Erhao, LIU Yusong, HUANG Jichuan. Six Sigma in quality control of military aircraft engine assembly[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 138-145. (in Chinese)

0 引言

六西格玛(Six Sigma)起源于20世纪80年代,是一套系统的、集成的方法论,旨在改进或设计业务流程,减少产品波动,提高产品质量^[1],其发展至今已在民用航空领域得到了广泛应用^[2-4],典型的如波音公司在737、747等多个机型上获得了很好的质量改进,空客公司的P8改进方案和罗罗公司的“英国精益航空发展计划”形成了两家公司的核心竞争力^[5]。六西格玛在实际应用中有一套系统的定义、分析、解决问题的方法,即DMAIC,具体含义为定义(Define)、测量(Measure)、分析(Analyze)、改善(Improve)、控制(Control)^[6]。

对于六西格玛的应用,国内外已有一些研究,例如,潘毅^[7]利用DMAIC对C919客机新材料制造工艺进行研究,完成了工艺参数优化设计及实验验证;甄永强^[8]利用DMAIC识别出影响某大型客机ACC210站位生产周期的关键因素并制定了控制方案,使制造周期缩短了18.7%;V. Aprianto等^[9]利用DMAIC找出波音737-800飞机货舱侧墙组件损坏的原因,提出了基于最大RPN(Risk Priority Number)的货物侧壁撕裂部件修复流程。目前已公开的六西格玛研究资料基本都聚焦于民用航空领域的应用,鲜见有关军用航空领域的研究。然而,军用飞机的特殊性意味着其制造过程更为复杂,对一次做对、过程保证和风险管控的要求更高,尤其是军用飞机总装作为产品制造链的关键环节^[10],直接决定企业的生产效率和水平,因此,有必要在军用飞机总装环节引入六西格玛DMAIC方法,使之成为军用飞机总装质量管理服务,进而提高质量管理水平。

军用飞机总装是复杂的系统工程,一般要经过产品安装、系统集成、功能分级试验等过程^[11],其中发动机作为军用飞机动力系统的核心,具有结构精密复杂、体积重量大、安装间隙小且安装轨迹复杂等特点,其装机质量对军用飞机性能有很大的影响^[12]。由于军用飞机小批量、多状态的生产模式,总装过程主要以手工作业为主,自动化程度较低,加之发动机装机工序复杂、安装精度要求高,现有的工艺流程难以保证其装机一次合格率(First Time Yield,简称FTY),导致装机过程耗时长、质量风险高。

本文针对国内某军用飞机主机厂C发动机装

机后出现间隙尺寸超差的问题,通过采用六西格玛DMAIC方法,找出影响间隙尺寸的关键X,并实施改进,从而降低间隙尺寸超差的百万机会缺陷数(Defect Per Million Opportunity,简称DPMO),提高发动机装机FTY,以期达到缩短发动机总装周期、降低生产成本、提高产品质量的目的。

1 六西格玛DMAIC方法应用

1.1 定义阶段(D阶段)

定义阶段的任务是分辨出需要改善的流程,并将用户的需求转变为项目的关键质量特性(Critical to Quality,简称CTQ)。国内某军用飞机主机厂C主要承担某型军用飞机的总装集成任务,依据设计要求,发动机装机后需要进行间隙测量,长期以来由于缺乏有效的控制措施导致间隙经常性超差,而超差处置过程需要拆卸发动机,反复拆装增加了生产成本和质量风险,严重影响交付周期。统计上一年度生产数据发现,整个军用飞机总装周期内发动机拆装频次高达3.5次/架,装机FTY仅为65.2%,引起用户不满。现定义影响发动机装机FTY的缺陷类型,并将缺陷统计数据绘制成Pareto图,如图1所示。

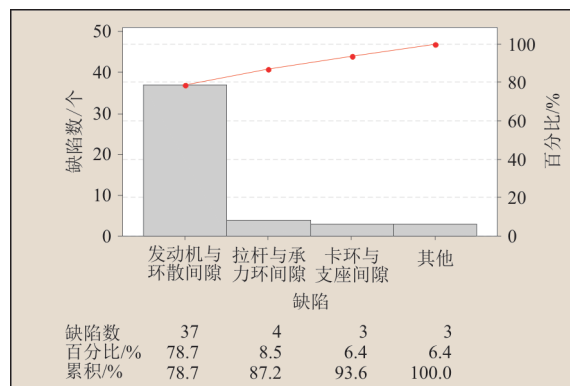


图1 缺陷类型 Pareto图

Fig. 1 Pareto chart of defects

从图1可以看出:发动机与环形散热器(以下简称“环散”)相邻端面之间的间隙(以下简称“端面间隙”)是影响发动机装机FTY最显著的缺陷类型,因此端面间隙尺寸是项目的CTQ,在六西格玛中通常用Y表示。另外,定义阶段需要确定项目目标:端面间隙尺寸的DPMO由改善前的347 826降低至34 782,改善90%,DPMO计算方法如公式(1)所示。

$$P_{\text{DPMO}} = \frac{\text{样本缺陷总数}}{\text{产品数} \times \text{每单位产品缺陷机会}} \times 1\,000\,000 \quad (1)$$

1.2 测量阶段(M阶段)

六西格玛理论认为任何组织活动都可视为一个流程,这个流程存在输入和输出,分别用 X_s 、 Y 表示,六西格玛DMAIC就是研究 Y 和 X_s 之间关系的方法。测量阶段的任务是识别影响 Y 的所有潜在 X_s ,制定数据收集计划并评估测量系统的精确性。六西格玛中 Y 和 X_s 的关系如图2所示,图中, Y 为流程输出, $X_1, X_2, \dots, X_6$ 为影响流程输出的输入因素 X_s ,包括人、机、料、法、环、测等。流程中有许多输入因素 X_s 会影响输出 Y ,但仅有关键的少数 X_s 对 Y 起主要作用,当分析输出 Y 和输入 X_s 时,首先

通过流程分析识别所有潜在 X_s ,然后通过因果图等综合所有相关 X_s 并进行区分,进而制定数据收集计划。

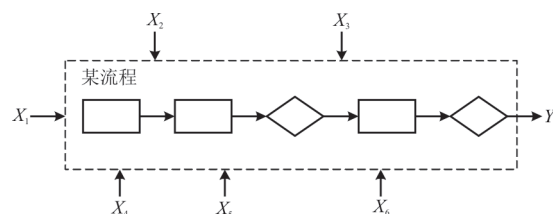


图2 Y 与 X_s 的关系

Fig. 2 Relationship between Y and X_s

发动机总装装机流程如图3所示,通过流程分析识别出影响端面间隙 Y 的5个潜在 X_s ,用 $X_1 \sim X_5$ 表示。测量阶段的数据收集对象包含流程中 Y 和 X_s 的数据,因此, Y, X_1, X_2, X_4 需要制定数据收集计划,包括收集数据的原则和方法,而 X_3, X_5 属于成品制造误差,相关数据由供应商提供。

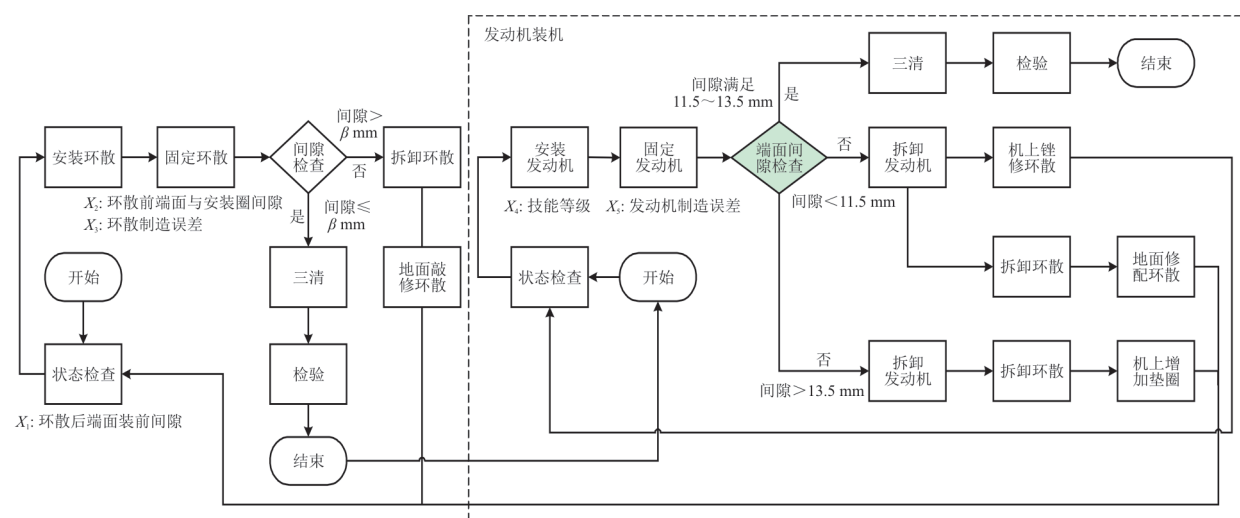


图3 发动机装机流程(示意)

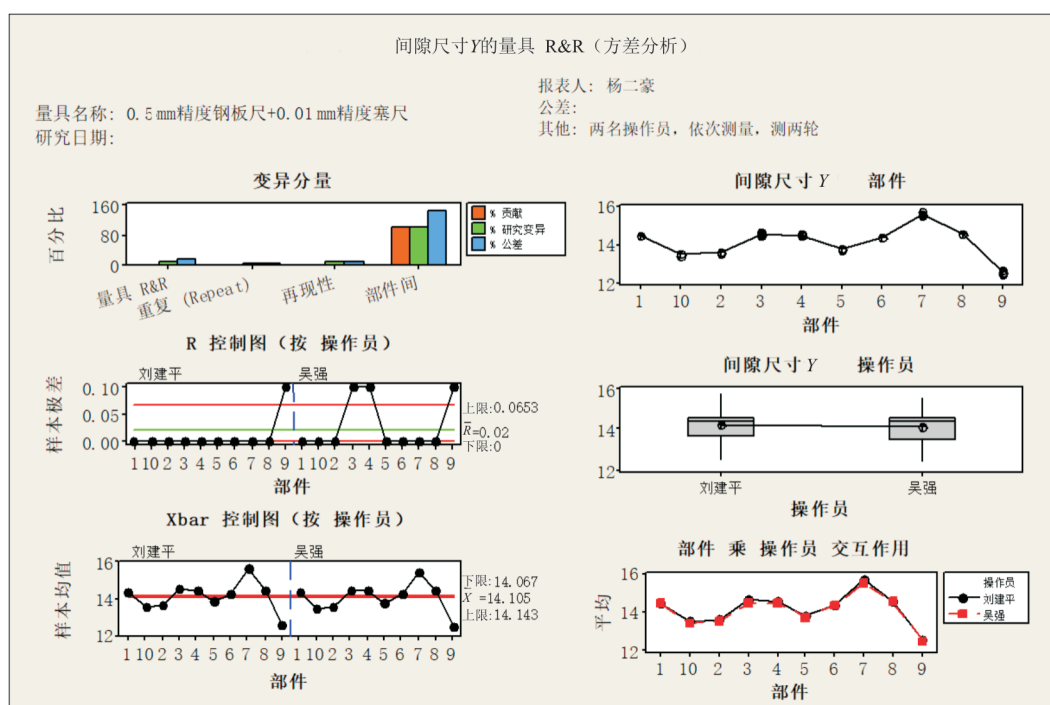
Fig. 3 Schematic diagram of engine installation process

六西格玛是基于数据的决策方法,改进流程所需的全部信息都包含在数据中,同时强调测量的可靠性是进行质量改进的先导^[13],因此,需要通过测量系统分析(Measurement Systems Analysis, 简称MSA)对收集到的数据进行可靠性判定。以端面间隙 Y 的测量系统分析为例,由于 Y 为连续型数据,方差分析能比较全面地反映整个测量系统的状态^[14],故选择方差分析法,如图4所示。从图4(a)可以看出:研究变异 $\%SV=9.06<10\%$ 且

可区分类别数 $=15 \geq 4$,表示测量系统可接受,满足能力判别准则要求,数据可靠性高。

来源	标准差 (SD)	研究变异 (5.15 * SD)	%研究变异 (%SV)	%公差 (SV/Toler)
合计量具 R&R	0.075829	0.39052	9.06	13.02
重复性	0.031623	0.16286	3.78	5.43
再现性	0.068920	0.35494	8.23	11.83
操作员	0.054518	0.28077	6.51	9.36
操作员*组件	0.042164	0.21714	5.04	7.24
部件间	0.833883	4.29450	99.59	143.15
合计变异	0.837324	4.31222	100.00	143.74

(a) 测量系统数值分析



(b) 测量系统图形分析

图4 Y的测量系统分析(M阶段)

Fig. 4 Measurement system analysis of Y (phase M)

1.3 分析阶段(A阶段)

分析阶段的任务是确定影响Y的关键 X_s 及其影响程度。对端面间隙Y的形成过程进行机理分析,如图5所示,理论线为环散后端面理论数模位置、偏移线为环散后端面实际装机位置,分别与发动机前端面形成间隙理论值Y和实际值 Y^* 。

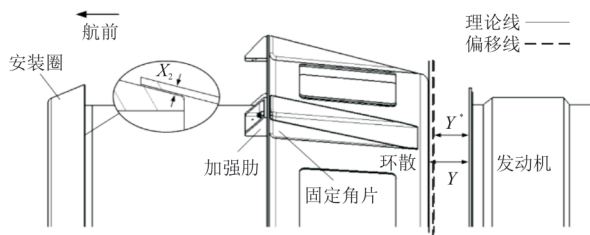


图5 发动机装机状态(示意)

Fig. 5 Schematic diagram of engine installation status

按照设计要求,发动机达到装机状态时,加强肋应与固定角片贴合,环散后端面处于理论线位置,环散前端面与安装圈形成间隙 X_2 ,且 $X_2 > 0$ 。由于受环散制造精度及材料等影响(环散为焊接钣金件,外形公差较大),装机过程可能存在加强肋尚未与固定角片贴合时,环散前端面先接触到安装圈,使得环散无法继续往航前方向推进,装机

状态表现为 $X_2 \approx 0$,此时环散后端面处于偏移线位置,导致 $Y^* < Y$;同样由于环散制造误差可能导致 $Y^* > Y$ 。因此,发动机装机后存在两种超差状态,其一是偏移线靠近航后,则 $Y^* < Y$;其二是偏移线靠近航前,实际装机间隙 $Y^* > Y$ 。处置超差需要反复拆装发动机,直至装机后间隙满足理论值要求,返工过程造成了很大的资源和时间浪费。

针对上述问题,本文提出通过设计专用检测工装并实施地面模拟检测的方法避免超差。定义环散后端面装前间隙 X_1 ,如图6所示,在环散装机前用工装与环散形成的间隙 X_1 模拟机上发动机与环散形成的间隙Y,利用统计分析建立 X_1 和Y的数据相关性,同理,利用工装测量 X_2 并建立 X_2 和Y的数据相关性,通过控制 X_1 、 X_2 进而控制Y。

在判定 X_1 、 X_2 对端面间隙Y的影响程度时,采用统计学中假设检验的P值法,P值表征某一事件发生的概率,P值小于0.05表示有统计学上的显著差异^[15];同时,用回归分析法评定各影响因子对结果的贡献率(R-Sq),R-Sq越接近100%,则影响因子对结果波动的贡献率越大。当P值小于0.05且R-Sq值较大时,表明找到了关键 X_s 。需要注意的是,分析工具的选择与数据类型相关,比如 X_1 、

X_2 、 Y 是连续型数据且涉及多个 X_s ,可采用多元回归分析,分析结果如图7所示。

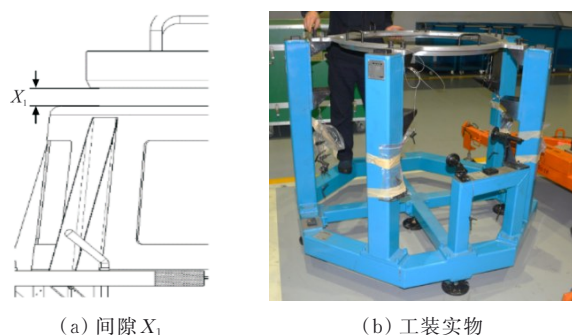


图6 专用检测工装

Fig. 6 Special inspection equipment

回归分析: 间隙Y与 间隙 X_1 , 间隙 X_2					
回归方程为					
间隙 $Y = 11.2 + 0.979$ 间隙 $X_1 + 2.96$ 间隙 X_2					
自变量	系数	系数标准误差	T	P	
常量	11.1638	0.2005	55.67	0.000	
间隙 X_1	0.9791	0.1663	5.89	0.000	
间隙 X_2	2.9601	0.6547	4.52	0.000	
$S = 0.440364$ $R-Sq = 84.7\%$ $R-Sq$ (调整) = 83.6%					
方差分析					
来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	2	29.071	14.536	74.96	0.000
残差误差	27	5.236	0.194		
合计	29	34.307			
来源	自由度	Seq SS			
间隙 X_1	1	25.106			
间隙 X_2	1	3.965			

图7 Y 与 X_1 、 X_2 的多元回归分析

Fig. 7 Multiple regression analysis of Y and X_1 and X_2

从图7可以看出: $P=0 < 0.05$,说明 X_1 、 X_2 对 Y 有统计上的显著影响。 X_s 的贡献率通过公式(2)计算,得 X_1 、 X_2 的贡献率分别为73.18%和11.56%,两者之和为84.74%,说明 X_1 、 X_2 是影响端面间隙 Y 的关键 X_s 。

$$X_s \text{ 的贡献率} = \frac{X_s \text{ 的顺序误差平方和}}{\text{合计误差平方和}} \times 100\% \quad (2)$$

对于离散型和连续型数据的组合,如 X_4 和 Y ,可采用双样本T检验,分析结果如图8所示。

双样本 T 检验和置信区间: 刘建平, 吴强				
刘建平与吴强的双样本 T				
	N	均值	标准差	均值标准误差
刘建平	12	12.558	0.399	0.12
吴强	12	12.583	0.356	0.10
差值 = μ (刘建平) - μ (吴强)				
差值估计值: -0.025				
差值的 95% 置信区间: (-0.345, 0.295)				
差值 = 0 (与 $\neq$) 的 T 检验: T 值 = -0.16 P 值 = 0.873				
自由度 = 22				
两者都使用合并标准差 = 0.3781				

图8 Y 与 X_4 的双样本T检验

Fig. 8 Two-sample T test for Y and X_4

从图8可以看出: $P=0.873 > 0.05$,说明 X_4 对 Y 的均值不存在统计上的显著差异,即 X_4 不是关键 X_s 。

1.4 改善阶段(I 阶段)

改善阶段的任务是确定关键 X_s 的最优参数,改善流程使缺陷或变异降至最低。在以往的生产过程中,工程技术人员通常采用调查询问的方式确定造成流程异常的关键 X_s ,如果涉及参数优化,则根据经验确定参数的取值范围。而六西格玛基于统计学原理,提供了一系列辅助科学决策的分析工具。其中,拟合线图可以显示一个连续预测变量(X_s)和一个响应(Y)之间的关系。在分析阶段已确定出 X_1 、 X_2 为影响 Y 的关键 X_s ,并提出了地面模拟检测的改进方法,在改善阶段可通过拟合线图分析得出 X_1 、 X_2 的最优参数范围,如图9~图10所示。

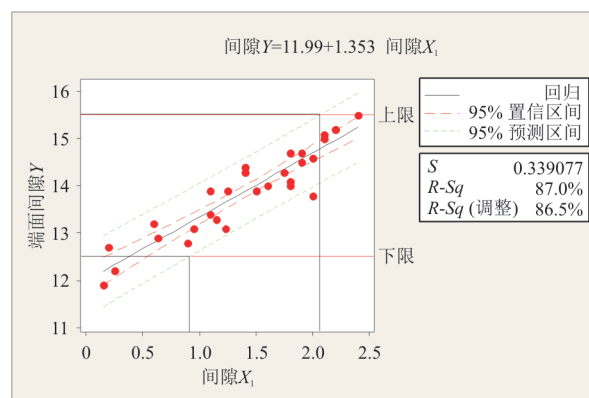


图9 Y 与 X_1 的线性拟合

Fig. 9 Linear fitting of Y to X_1

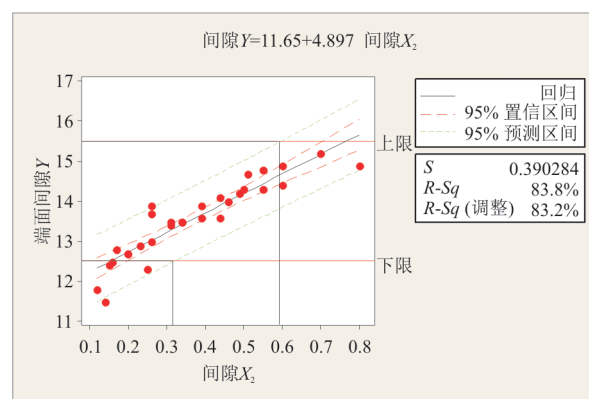


图10 Y 与 X_2 的线性拟合

Fig. 10 Linear fitting of Y to X_2

从图 9~图 10 可以看出: X_1 控制在 1~2 mm、 X_2 控制在 0.3~0.6 mm,能保证端面间隙 Y 在设计允许的上限和下限之间。

结合分析阶段的机理分析制定流程改善措

施,如表 1 所示,相应的控制方式包括设计专用工装、更改工艺流程、新编装配大纲(Assembly Order,简称 AO)、完善标准作业规程(Standard Operating Procedure,简称 SOP)、协调供应商控制等。

表 1 流程改善方式
Table 1 Process improvement methods

关键 X_i	流程改善方式
X_1	改善前:环散经外观检查后直接装机 改善后:环散装机前,按照新编 AO 要求,将环散固定在专用检测工装上,用塞尺测量环散后端面装前间隙 X_1 ,必要时进行修配,直至间隙控制在 1~2 mm
X_2	改善前:环散经外观检查后直接装机 改善后:环散装机前,要求供应商在生产现场,用专用检测工装配合塞尺测量环散前端面装前间隙 X_2 ,必要时进行修配,直至间隙控制在 0.3~0.6 mm

1.5 控制阶段(C 阶段)

控制阶段的任务是制定控制计划,以保证所实施的改善能够持续进行。在六西格玛改进中,良好的过程控制效力是过程能长期得到落实及受控的关键。控制阶段主要使用的工具有控制计划^[16]、FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)、防错设计、SPC(Statistical Process Control)图等。根据表 1 流程改善方式制定控制计划,如表 2 所示,表中,过程能力(Process Capability,简称 PC)

是指一个过程能稳定生产出合格产品的能力^[17]。本文过程能力指 Z 值,用 Z 值表示六西格玛水平, Z 值越高说明缺陷率越低,当 $Z=6$ 时,即六西格玛水平。过程能力分为长期能力(Long Term,简称 Z_L)和短期能力(Short Term,简称 Z_{st})。通常六西格玛项目结束时的 DPMO 与 IC(Improve-Control)阶段 Z_L 中预期整体能力的合计 PPM(Parts Per Million)相同。

表 2 流程控制计划
Table 2 Process control plan

特性	过程能力 (IC 阶段)	测量手段	MSA 分析结果 (IC 阶段)	监控手段	监控 频率	信号	异常 应对 措施	负责人
Y	1.99	钢板尺+塞尺	最具的重复性和再现为 12.73%,可区分度为 12	AO 实测记录表	每件	$>13.5\text{ mm}$ 或 $<11.5\text{ mm}$	返工	操作者
X_1	2.03	塞尺	最具的重复性和再现为 19.10%,可区分度为 20	AO 实测记录表	每件	$>2\text{ mm}$ 或 $<1\text{ mm}$	返工	操作者
X_2	1.88	塞尺	最具的重复性和再现为 26.18%,可区分度为 8	工艺参数记录表	每件	$>0.6\text{ mm}$ 或 $<0.3\text{ mm}$	拒收	供应商

选取 IC 阶段 252 个样本进行端面间隙 Y 的 Z_L 分析,如图 11 所示,该图反映了所选样本变量的分布特点;PPM 表示百万故障率,比如 PPM 为 3.4,表示总缺陷概率为百分之 3.4,即 100 万个机会中有 3.4 个缺陷。可以看出:预期整体性能的合计 PPM

为 23 159.09,即 DPMO 约为 23 159。定义阶段的项目改善目标是端面间隙 Y 的 DPMO 从 347 825 降低到 34 782,改善 90%,实际降低到 23 159,改善 93.3%,达到项目预期,此时,发动机装机 FTY 为 95%。

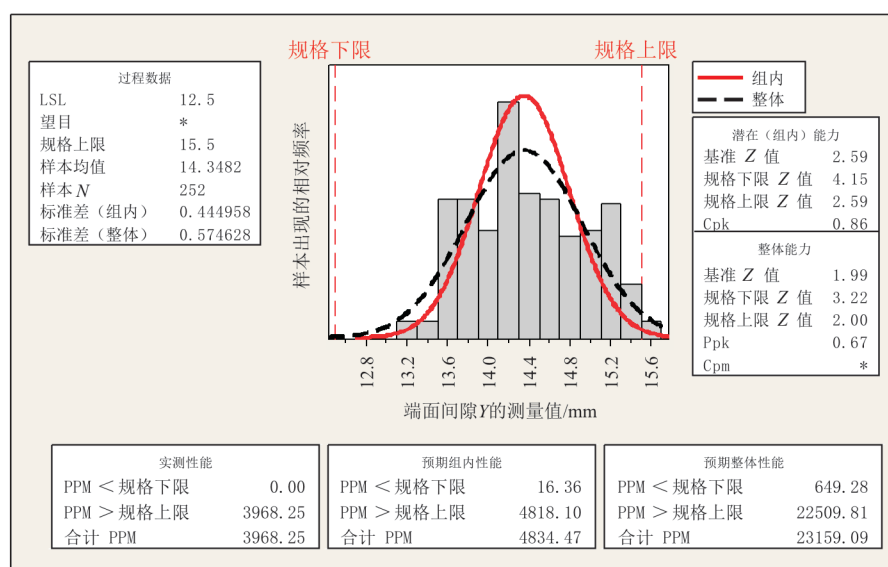


图 11 Y 的过程能力分析(IC 阶段)

Fig. 11 Process capability analysis of Y (phase IC)

利用移动极差控制图对改善后的端面间隙 Y 进行实时监测,如图 12 所示。

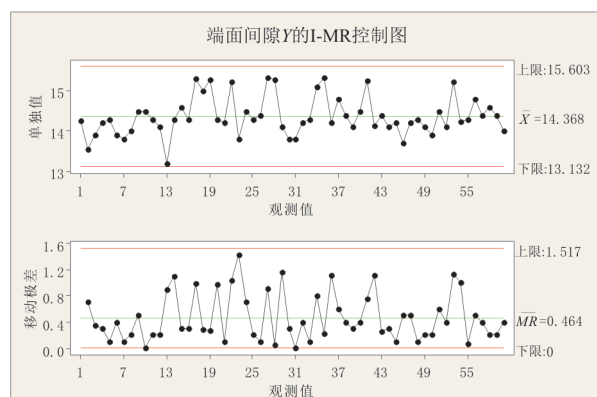


图 12 Y 的移动极差控制图

Fig. 12 I-MR control chart of Y

根据 SPC 图的判异准则进行分析,可以看出图 12 中各点随机排列且位于界内,没有测量点处于异常状态,即改善后的生产过程处于工序稳定状态。

综上,通过对国内主机厂 C 军用飞机发动机总装装机过程实施六西格玛 DMAIC 改进过程,实现了基于数据决策的产品质量控制,用科学的统计分析取代传统的经验判定,准确识别出影响发动机装机 FTY 的关键 X,并制定控制计划以改进现有流程,经过持续的跟踪监测,产品质量明显提升,保质保量地完成了交付任务,用户满意度

提高。

2 结 论

1) 本文在军用飞机发动机总装环节引入六西格玛 DMAIC 方法,找到了影响发动机装机间隙 FTY 的关键原因并加以改善和控制,验证了 DMAIC 方法的可行性和有效性。

2) 六西格玛是一种基于数据的决策方法,不局限于军用飞机发动机总装质量控制,更重要的是提供了一种分析方法和操作步骤,有助于快速地找到问题根因,提高解决问题的效率。本文的研究可为六西格玛在军用飞机装配生产上的应用提供借鉴。

参考文献

- [1] 采峰, 马召, 孟菡, 等. 美国典型军工企业六西格玛设计应用及其启示[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(1): 141-153. CAI Feng, MA Zhao, MENG Chang, et al. Application of DFSS in typical military enterprise of the USA and its enlightenments [J]. Industrial Engineering & Management, 2015, 20(1): 141-153. (in Chinese)
- [2] ISMAIL M S, HUSSAIN M I, MUHAMMAD N, et al. Development of PaDLeSS approach for part disposal reduction in aircraft composite manufacturing [J]. International Journal for Innovation Education and Research, 2017, 5 (12): 1-17.
- [3] THOMAS A J, JONES R M, DAVIES A, et al. Reducing turn-round variability through the application of Six Sigma in aerospace MRO facilities[J]. Manufacturing Technol-

- ogy Management, 2015, 26(3): 314-332.
- [4] 孙俊刚. 六西格玛在通用航空维修中的应用研究——以发动机抖动故障分析为例[J]. 内燃机与配件, 2019(16): 214-215.
- SUN Jungang. Application research of Six Sigma in general aviation maintenance: taking engine shake failure as an example[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(16): 214-215. (in Chinese)
- [5] 潘新. 航空零部件制造过程的质量控制与改进研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- PAN Xin. Quality control and improvement of manufacturing process for aviation parts[D]. Shanghai: Donghua University, 2014. (in Chinese)
- [6] 陈学林. 大型航空结构件高效数控加工专业化单元构建[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- CHEN Xuelin. High-efficiency numerical control machining specialization unit construction of large aviation structural parts[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [7] 潘毅. 基于六西格玛的民机制造工艺稳健化设计与优化技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- PAN Yi. Study on robust design and optimization technology of civil aircraft manufacturing process based on Six Sigma [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [8] 甄永强. 基于价值流的飞机制造业平尾移动生产线构建项目[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- ZHEN Yongqiang. Study on aircraft horizontal stabilizer assembly moving line establishment project based value stream mapping [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016. (in Chinese)
- [9] APRIANTO V, RIMAWAN E, GUNANTI P, et al. Damage analyzing of Cargo Sidewall Boeing 737-800 in Cargo restoration process using DMAIC method at aircraft maintenance and repair company[J]. International Journal of Innovative Science and Research Technology, 2020, 5(8): 1357-1364.
- [10] 杨国荣, 来云峰, 解安生, 等. 新舟飞机智能化精益生产线构建技术研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(12): 24-30.
- YANG Guorong, LAI Yunfeng, XIE Ansheng, et al. Research on construction technology of intelligent lean production line of MA aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(12): 24-30. (in Chinese)
- [11] 裴书梅, 杨根军, 陈军. 飞机总装脉动生产线智能制造技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2016(16): 41-47.
- CHANG Shumei, YANG Genjun, CHEN Jun. Research and application of intelligent manufacturing technology for aircraft final assembly pulsation production line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(16): 41-47. (in Chinese)
- [12] 杨二豪, 刘玉松, 黄吉传, 等. 一种适用于军用飞机总装的产品质量先期策划流程研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 151-159.
- YANG Erhao, LIU Yusong, HUANG Jichuan, et al. Research on a advanced product quality planning process suitable for the military aircraft final assembly[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 151-159. (in Chinese)
- [13] 姚智骞. 航空复合材料结构件返修计划与工段系统设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- YAO Zhiqian. System design on repair plan and station of aviation composite structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [14] 王宇乾, 樊树海, 潘密密, 等. 基于 Minitab 的六西格玛管理在节能灯装配中的应用[J]. 工业工程与管理, 2011, 16(3): 131-137.
- WANG Yuqian, FAN Shuhai, PAN Mimi, et al. The application of Six Sigma management based on minitab in the manufacture of energy-saving lamp[J]. Industrial Engineering & Management, 2011, 16(3): 131-137. (in Chinese)
- [15] 周佳, 曾谷维. 航空制造数控铣削效率测评及管控研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(14): 82-101.
- ZHOU Jia, ZENG Guwei. Research on numerical control milling efficiency evaluation and control of aeronautical manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(14): 82-101. (in Chinese)
- [16] 马召, 采峰, 孟菖. 以六西格玛设计作为航空装备设计质量控制方法[J]. 环球飞行, 2017(7): 70-73.
- MA Zhao, CAI Feng, MENG Chang. Six Sigma design as a quality control method for aeronautical equipment design [J]. World Flight, 2017(7): 70-73. (in Chinese)
- [17] ANDREA S, LUBICA S. Improvement of production process capability—a case study of two furniture companies[J]. Engineering Management in Production and Services, 2021, 13(3): 37-49.

作者简介:

杨二豪(1992—),男,硕士,工程师。主要研究方向:质量工程技术。

刘玉松(1987—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:数字化测量技术。

黄吉传(1980—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:系统工程。

(编辑:马文静)