

航空制造数控铣削效率测评及管控研究

周 佳, 曾谷维

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂, 成都 610091)

[摘要] 针对离散型航空制造企业数控铣削加工效率的提升, 通过利用六西格玛的工具和方法, 融合国际设备综合效率(Overall Equipment Effectiveness, OEE)核心思想, 基于VERICUT仿真软件, 统计分析了某航空企业的铝合金零件程序样本, 找出了低效程序的部分共性问题, 通过引入效率基线的概念, 尝试控制程序材料去除率(Material Removal Rate, MRR)、面成型率(Surface Machining Rate, SMR)、空刀率等关键指标, 提出了一种数控铣削效率的测评方法以及程序管控思路, 能有效从工艺源头控制程序效率, 防止低效的程序流入生产现场导致大量的时间浪费, 从而提高数字化生产型企业的交付速率, 提升企业核心竞争力。

关键词: 航空制造; 数控加工; 铣削效率; 效率基线; 程序管控

Research on Numerical Control Milling Efficiency Evaluation and Control of Aeronautical Manufacturing

ZHOU Jia, ZENG Guwei

(CNC Machining Factory, AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

[ABSTRACT] Aiming at improving CNC milling efficiency of discrete aeronautical manufacturing enterprises by using Six Sigma tools and methods and integrating the core idea of international overall equipment efficiency (OEE), and the sample of aluminum alloy parts produced in an aviation enterprise is statistically analyzed based on VERICUT simulation software. Besides, several common problems of inefficient programs are identified. By introducing the concept of efficiency baseline, the project finds a considerable way to control the key factors such as material removal rate (MRR), surface machining rate (SMR), empty knife rate, etc. Finally, a numerical control milling efficiency evaluation method and program control ideas are proposed, which can be used to control the efficiency of the program effectively by preventing the inefficient programs from flowing into the production line, and a lot of time waste, and labor cost can be reduced. As a consequence, the delivery rate of the digital production enterprise can be improved dramatically, and the core competitiveness of the company will be enhanced.

Keywords: Aeronautical manufacturing; CNC machining; Milling efficiency; Efficiency baseline; Program control

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.14.082

随着经济全球化发展趋势, 国内外航空制造企业都期望持续获得良好的经济效益。然而, 许多企业看似良好运作的生产车间实际上并没有以最好的状态运转, 设备和操作人员的价值存在很大的改善空间, 这无形中为企业带来了巨大的损失。短时期内主导生产能力的软硬件客观条件是有限的, 因此, 如何在有限的条件下最大化地整合利用各方资源, 充分挖掘车间生产效率显得尤为重要, 甚至将成为企业是否赢利的决定性因素^[1-8]。

工艺作为输出源头, 低效的数控程序流入生产现场将导致大量的时间浪费, 如不严格加以控制, 将增加工

时成本、能源消耗, 耽误产品准时交付, 引起客户不满甚至退单, 长此以往, 必然造成企业生存危机。本文以某航空制造企业铝合金数控程序为研究对象, 将从程序效率表象简要分析并探索数控铣削效率的测评方法及管控机制的构建思路。

1 现状分析

对于制造业特别是流水线型企业, 国际制造业提出了设备综合效率(Overall Equipment Effectiveness, OEE)的概念, 是一个独立的国际通用测量工具, 是生

产系统效率的多维度量标准,是精益生产下 TPM 管理模式下的工具之一,通过 OEE 关键指标分析可以多角度立体地审视生产过程效能利用情况,进而分析效率损失,找出生产率的瓶颈,提高产能利用率。

OEE 由可用率(Availability Time)、表现性(Performance)、质量指数(Quality)组成:

$$\text{设备综合效率(OEE)} = \text{时间开动率} \times \text{性能开动率} \times \text{合格率} \quad (1)$$

国内 OEE 测评管控模式起步较晚,大部分制造业企业仍停留在产品质量管控阶段,对效率关注较少,缺乏可量化的评价方法和管控模式,零件加工周期普遍偏长和存在制品积压现象。

2 效率基线

2.1 基线引入

效率基线反映零件加工的快慢,以粗加工材料去除率(MRR)的大小以及精加工表面及形成的快慢(SMR)来衡量,结合 OEE 计算公式,性能开动率得到如下转化:

$$\text{性能开动率} = \frac{\text{实际速度}}{\text{设计速度}} = \frac{\text{实际切削速度}}{\text{切削效率基线}} \quad (2)$$

其中,实际速度表示零件铣削的速度,由 MRR、SMR 计算所得。设计速度表示基于机床性能、刀具性能、材料性能等应该达到的合理速度,由机床硬件性能及铣削经验参数库计算所得。为了更好地描述设计速度,此处提出切削效率基线的概念。

2.2 基线定义

效率基线是“减材加工”模式下程序切削速率的

阶梯性判定标准,衡量一个程序的效率主要有粗加工 MRR 和精加工 SMR 2 个指标评价,如图 1 所示。

基线的制定需结合刀具、切削参数、机床、零件特征、毛坯材料等因素进行综合考虑,简化表达式为:

$$\eta(\text{总效率得分}) = K_1 \times \frac{\text{MRR实际}}{\text{MRR基线}} + K_2 \times \frac{\text{SMR实际}}{\text{SMR基线}} \quad (3)$$

其中, K_1 、 K_2 是修正系数,取决于粗加工与精加工时间占比。本文统计样本均值为 0.7,即 $K_1=41\%$, $K_2=59\%$ 。

2.3 基线计算

效率基线非恒定不变,随着工艺技术以及机床性能的提升,基线也不断提高,反映出当前状态下的较高或极限水平,利用公式及当前机床切削参数库计算可以得出。以低速或亚高速的主轴机床切削参数库为例,如表 1 所示。

$$\text{MRR} = \text{AP} \times \text{AE} \times F \quad (4)$$

$$\text{SMR: 腹板} = \text{AE} \times F; \text{侧壁} = \text{AP} \times F; \text{转角} = \text{AP} \times F; \text{行切面} = S/T \quad (5)$$

式中, AP 为切深; AE 为切宽(常为 50% 刀具直径); F 为进给速度; S 为面积; T 为时间,计算得表 2 的数据。

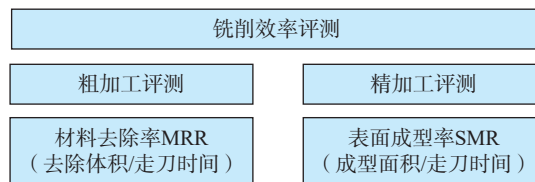


图1 效率基线定义

Fig.1 Definition of efficiency baseline

表1 某机床切削参数库示例

Table 1 Example of machine tool cutting parameter library

刀具图号	直径/mm	加工特征	加工方式	转速/($r \cdot \min^{-1}$)	进给/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	齿数/个	切宽/mm	切深/mm
1	25	槽腔	粗铣槽	14000	5000	2	15	2
2	16	槽腔	粗铣槽	14000	5000	2	10	2
3	25	槽腔	精铣槽壁	9500	3000	2	1	5

表2 机床MRR及SMR数据

Table 2 Date of MRR and SMR of machine tool

刀具半径/mm	铝合金粗加工		铝合金精加工				
	MAX MRR/ ($\text{cm}^3 \cdot \min^{-1}$)	AVG MRR/ ($\text{cm}^3 \cdot \min^{-1}$)	刀具半径/ mm	侧壁SMR/ ($\text{cm}^2 \cdot \min^{-1}$)	腹板SMR/ ($\text{cm}^2 \cdot \min^{-1}$)	转角SMR/ ($\text{cm}^2 \cdot \min^{-1}$)	行切SMR/ ($\text{cm}^2 \cdot \min^{-1}$)
25	157.5	148.5	25	150.0	537.5	25.0	13.1
20	126.0	111.4	20	143.8	397.5	21.8	12.5
16	105.0	81.7	16	95.0	312.5	21.3	13.3
12	73.5	45.8	12	95.0	188.4	18.0	10.6
AVG	115.5	96.8	AVG	120.9	359.0	21.5	12.4

考虑到零件几何特征的多样性,为确定各机床 SMR 基线,需进行零件特征权重分析:

$$\text{某直径刀具 SMR} = P_1 \times \text{侧壁 SMR} + P_2 \times \text{腹板 SMR} + P_3 \times \text{转角 SMR} + P_4 \times \text{行切 SMR} \quad (6)$$

$$\text{某型号机床 SMR} = Q_1 \times \text{SMR (刀具 1)} + Q_2 \times \text{SMR (刀具 2)} \cdots Q_n \times \text{SMR (刀具 n)} \quad (7)$$

其中, $P_1 \sim P_4$ 为侧壁、腹板、转角、行切面特征面积占比, $Q_1 \sim Q_n$ 为刀具使用时间占比,由以上公式计算并局部修正得出铝合金在各机床的理论效率基线,如图 2 所示。

3 基于 VT 的数据统计

VERICUT (简称 VT) 仿真软件应用广泛,能通过二次开发自动提取去除体积、加工时间、空刀率等信息,用于程序综合分析。

3.1 VT 仿真模板创建

VT 中手动建立仿真模板,如表 3 所示。

3.2 VT 铣削效率计算

粗、精加工时间的提取需借助 VT 变量并编写时间记录的子程序,同时在 CATIA 编程时对粗、精加工分别以“insert”插入特定字符的形式在前置写入标识符,并在后置输出的 G 代码中表达,实现对粗、精加工的开始及结束位置的标识。当 VT 读取 G 代码仿真时,利用该字符统计程序粗加工及精加工时间,从而计算 MRR、SMR,并输出结果。

3.3 VT 效率数据库构建

汇总各零件程序效率数据,如表 4 所示。通过表 4 可以准确把握各数控程序效率的得分情况,视需要可划分阶梯型判定等级,如优、良、及格、待改进等。周期性统计待改进清单可作为工艺优化的清单,当零件优化后都达到合格线,或者有高效的新机床、新技术介入时,就可以重新定义更高的基线。不断筛选最低效程序作为工艺优化的参考清单,从而实现程序效率的迭代。

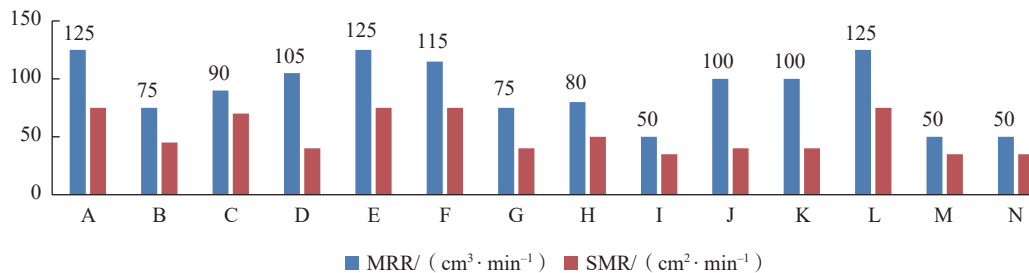


图2 各机床MRR及SMR基线

Fig.2 Efficiency baseline of MRR and SMR of different machine tools

表3 NC程序仿真报告模板

Table 3 NC program simulation report template

类型	参数									
程序切削参数统计	程序名称	刀具名称	刀具直径 / mm	最大转速 / (r·min⁻¹)	最大进给 / (mm·min⁻¹)	最大切宽 / mm	最大切深 / mm	去除体积 / cm³	走刀时间 / min	空刀率 / %
	N2501A	D20R3L100	20	8000	3000	10	5	2500	30	20
仿真数据分析	机床型号	控制系统	毛坯体 / cm³	粗加工 MRR / (cm³·min⁻¹)	精加工 SMR / (cm²·min⁻¹)	总去除体积 / cm³	粗加工时间 / min	精加工时间 / min	总切削时间 / min	
	DMC125U2	Simenz	200000	53	20	134653	100	90	120	

表4 程序效率库样表

Table 4 Sample table of program efficiency

图号	材料	结构类型	毛坯尺寸 / cm³	机床	MRR基准 / (cm³·min⁻¹)	SMR基准 / (cm²·min⁻¹)	实际MRR / (cm³·min⁻¹)	实际SMR / (cm²·min⁻¹)	MRR评价 / %	SMR评价 / %	效率评分 / %	效率判定
A	铝	框	13020	X1	100.0	40.0	71.0	16.0	71	40	53	优
C	铝	梁	20496	X3	90.0	70.0	44.6	19.3	50	28	37	及格

4 基于 Minitab 的数据分析

利用 Minitab 对程序样本进行数据分析,找到程序效率差异的关键控制点(KPI)。

4.1 总体效率分析

如图 3 所示,程序效率平均得分 27 (百分制),最高 95.7,最低仅 1.2,均值低,波动大,由图 4 可知,低效程序主要为角盒角片、接头梁、板类零件。

由图 5 计算过程能力:

$$Z_{\text{shift}}=Z_{\text{ST}}-Z_{\text{LT}}=1.98-0.51=1.4 \quad (8)$$

进而绘制图 6,由图 6 可知,只有通过技术手段提高程序轨迹参数,以管理手段控制程序下发才能实现程序提效。

4.2 MRR与SMR对比分析

(1) MRR 平均值 $32\text{cm}^3/\text{min}$,最大值 $116\text{cm}^3/\text{min}$,最小值 $8\text{cm}^3/\text{min}$,百分制平均得分 34。

(2) SMR 平均值 $10\text{cm}^2/\text{min}$,最大值 $62\text{cm}^2/\text{min}$,最小值 $1.4\text{cm}^2/\text{min}$,百分制平均得分 22。

MRR 波动明显大于 SMR, MRR 需要重点控制波动,约束刀具选用及参数设置。

SMR 均值偏低,但波动相对较小,需要从宏观层面改变现有加工方式才能总体提高。

4.3 空刀率分析

样本平均空刀率为 26%,即 26% 的走刀不参与切除。无效刀具轨迹造成时间浪费,高效的程序空刀率可以控制在 10% 以下,对于离散型制造企业,不同特征的产品在加工时由于工艺方案和走刀策略不同,程序效率也有区别。为探究结构对空刀率影响,进行了

单因子方差分析,如图 7 所示。图 7 (b) 中数据显示 $P=0.074<0.05$,结构类型对空刀率有影响,但影响较小,仅为 2.69%。

4.4 切削时间与毛坯体积的回归分析

通过对总切削时间与毛坯体积的回归分析,尝试建立映射关系,若回归方程存在,则可以利用毛坯材料大小预估加工时间,对于企业工时定额、生产排程有一定的参考价值。图 8 (a) 中 $P<0.05$,回归方程成立,贡献率 $>50\%$ 。回归方程为:

$$\text{总切削时间 } T(\text{min})=98.6+0.0189 \times \text{毛坯尺寸} \quad (9)$$

4.5 不同机床型号的效率分析

取每个机床上零件效率得分均值作为该机床上的零件效率得分,综合车间所有机床,绘制图 9。可见,总效率得分相对较低的机床有: B、C、D、F、H、J,对所有机床效率进行宏观把控,找到短板机床。

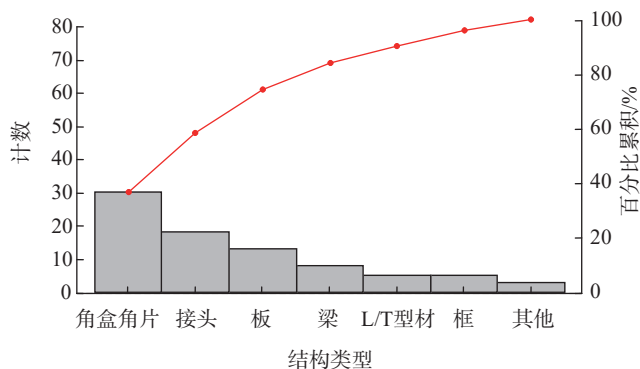
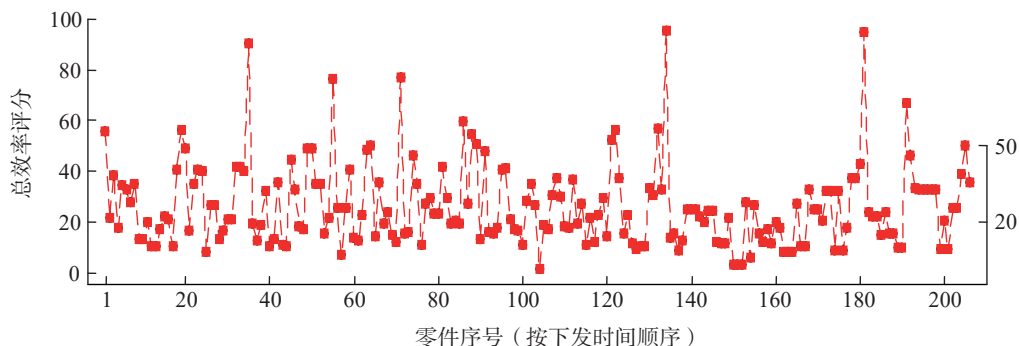


图4 低效程序柏拉图

Fig.4 Plato of inefficient procedures



关于中位数的游程:	83
期望游程个数:	104.0
关于中位数的游程最大长度:	9
检验聚类性的近似p值:	0.002
混合的近似p值:	0.998

向上或向下的游程个数:	123
期望游程个数:	137.0
向上或向下的游程最大长度:	8
检验趋势性的近似p值:	0.010
检验振动性的近似p值:	0.990

图3 程序总效率运行图

Fig.3 Overall running chart of program

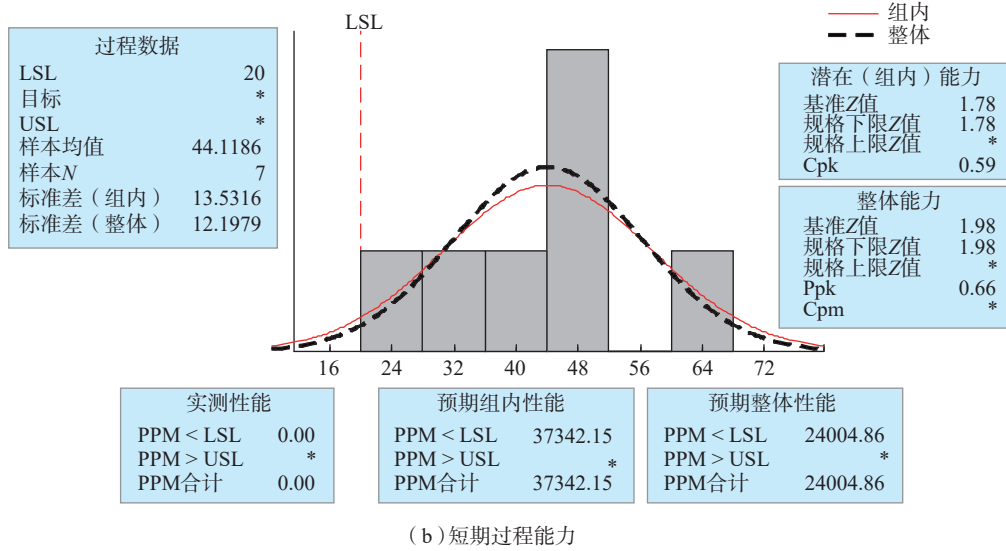
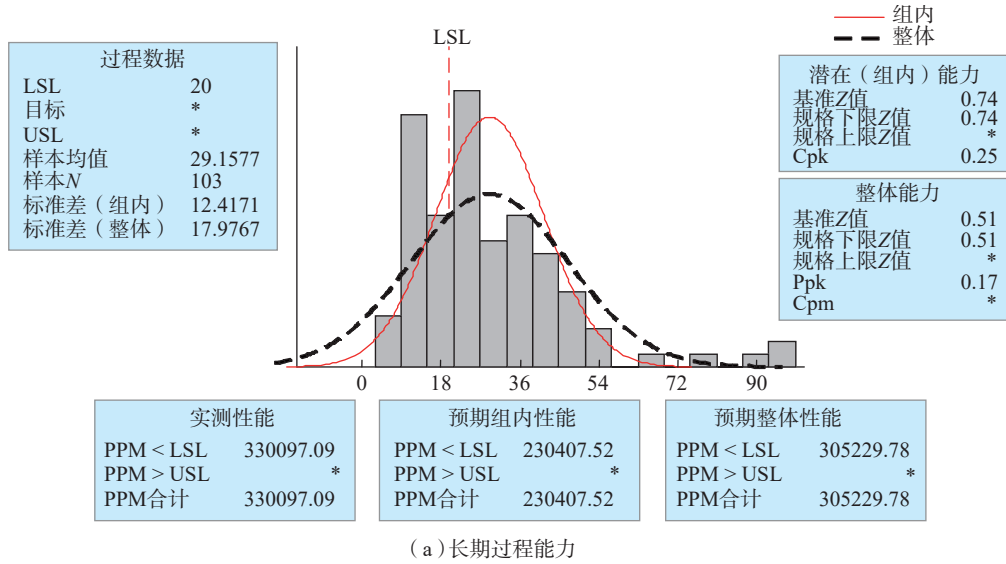


图5 长短期过程能力

Fig.5 Current capability and potential capability

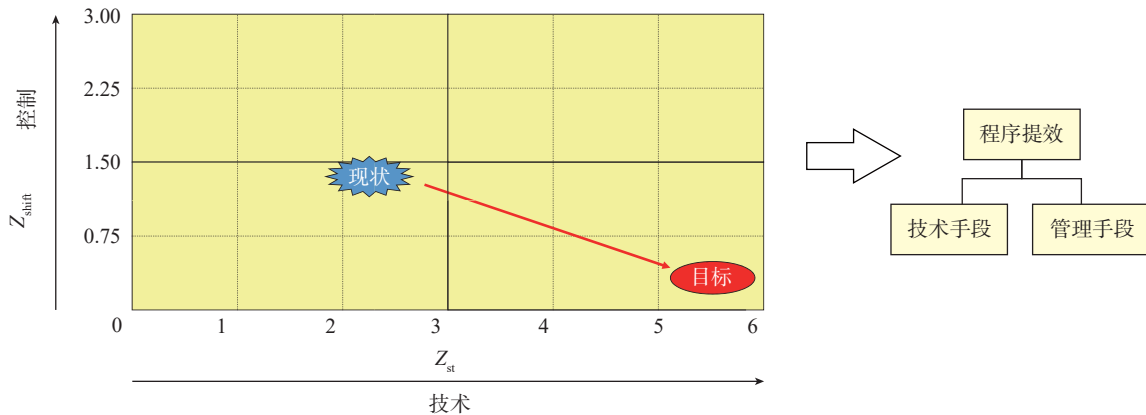
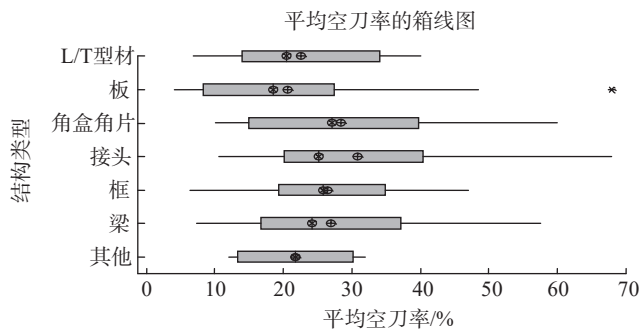
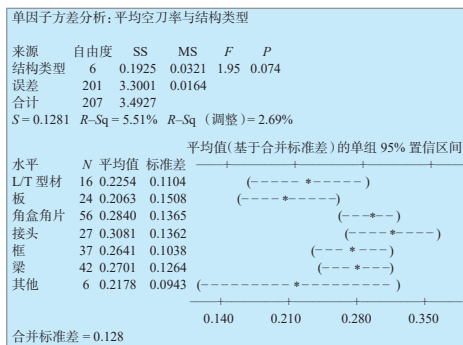


Fig.6 Process capability analysis

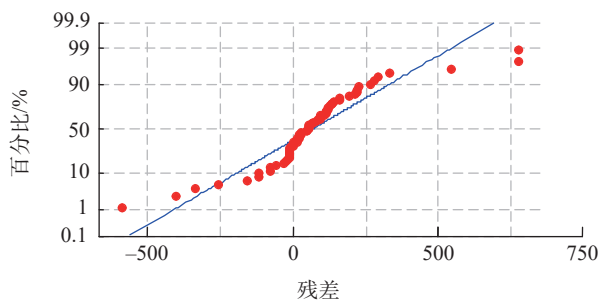


(a) 平均空刀率的箱线图

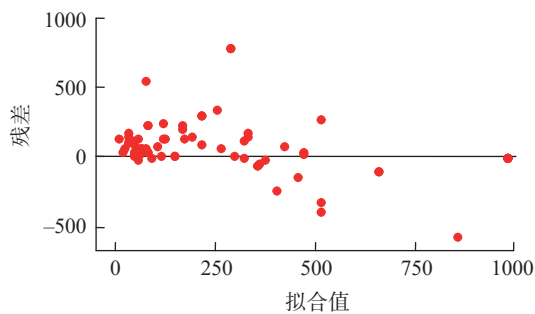


(b) 结构类型对平均空刀率的影响

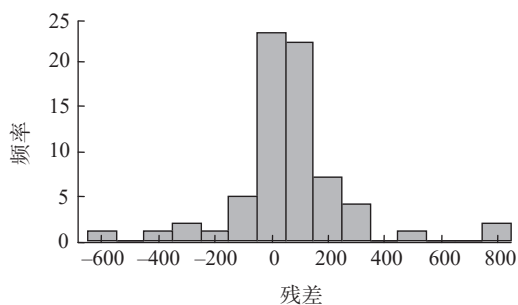
图7 单因子方差分析
Fig.7 One-way ANOVA



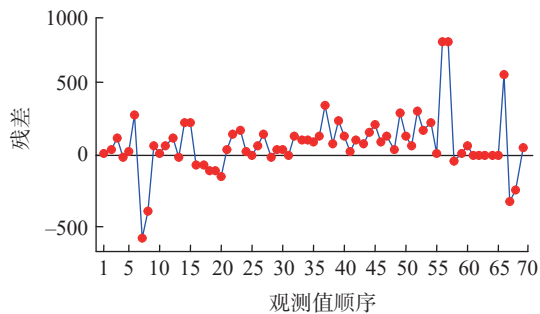
(a) 正态概率图



(b) 拟合值



(c) 直方图



(d) 顺序

图8 总切削时间残差分析
Fig.8 Residual analysis of total cutting time

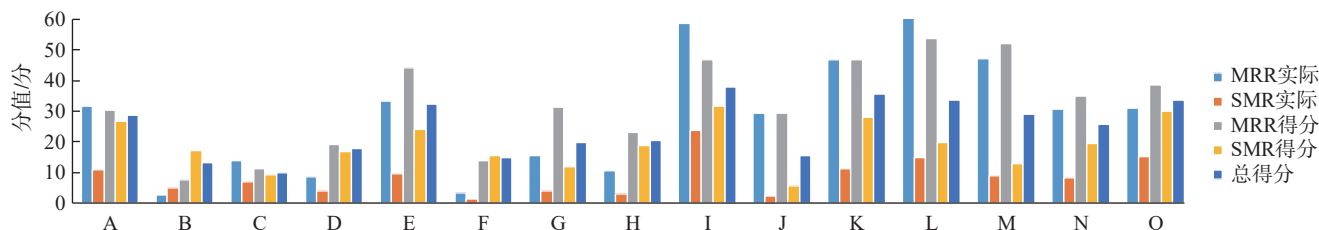


图9 各机床效率测评
Fig.9 Efficiency evaluation of different machines

4.6 不同零件类型的效率分析

零件结构类型多样,为探索零件结构类型对效率的影响,作出单因子方差分析,分析数据如图 10 所示。

从图 10 的数据中, $P=0.000<0.05$,表明框梁类零件与其他结构零件的效率得分有显著差异。但结构类型对零件效率的影响只解释了 21.22%,所以还存在其他因素影响零件效率的高低。

5 程序效率管控

5.1 关键因素确定

通过群策群力绘制鱼刺图如图 11 所示,从人、机、料、测、法、环 6 个方面找出关键影响因子,比对现有

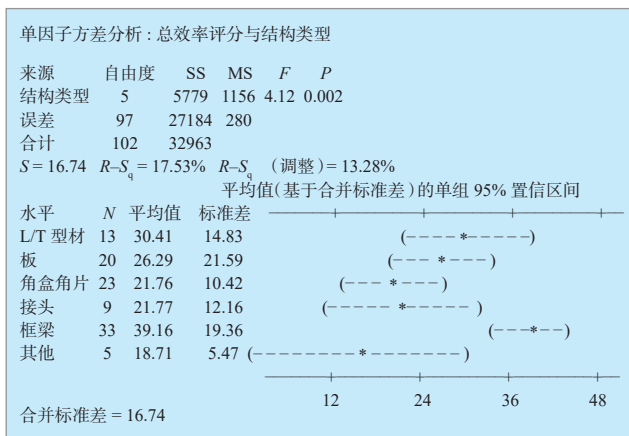


图10 方差分析
Fig.10 Variance analysis

程序下发流程,引入效率基线要求作为控制点,约束程序效率。

由计算公式可得,效率得分与切宽、切深、进给速度、空刀率等息息相关,为进一步探究各因子对程序效率的影响作出贡献度计算。

由图 12 可得实际 MRR 与其相关参数的多元回归方程,从而找到影响最大的因子,即“关键因子”,注意到,图 12 的残差图中出现不等变差现象,且不服从正态分布,将 SMR 对数转换后重算贡献度,如图 13 所示。可见,重算后残差符合正态分布,且分布随机,说明无其他关键 X,贡献度 87.61% 数据可靠。效率得分与切宽、切深、进给速度、空刀率、零件体积、表面积、粗加工与精加工时间占比有关。如图 14 所示,在程序编制阶段增加了前端控制,在程序下发前增加了末端控制,并形成反馈,共同约束程序的效率。

5.2 校审机制构建

前端控制:编制编程规范,固化切削参数,规范特征轨迹编制,尽可能消除人员经验误差。

末端控制:编制校审规范,增设基线审核环节,驳回低效程序直至改进合格,构建 PDCA 改进循环。

5.3 试点项目实施

开展某产品六西格玛改进活动,得 DM (测量定义)、A (分析)、IC (控制改进) 阶段的时间序列,如图 15 所示。采用“双样本 T”及“等方差”分析法比较改进前后的均值和方差,如图 16 所示,数据表明改

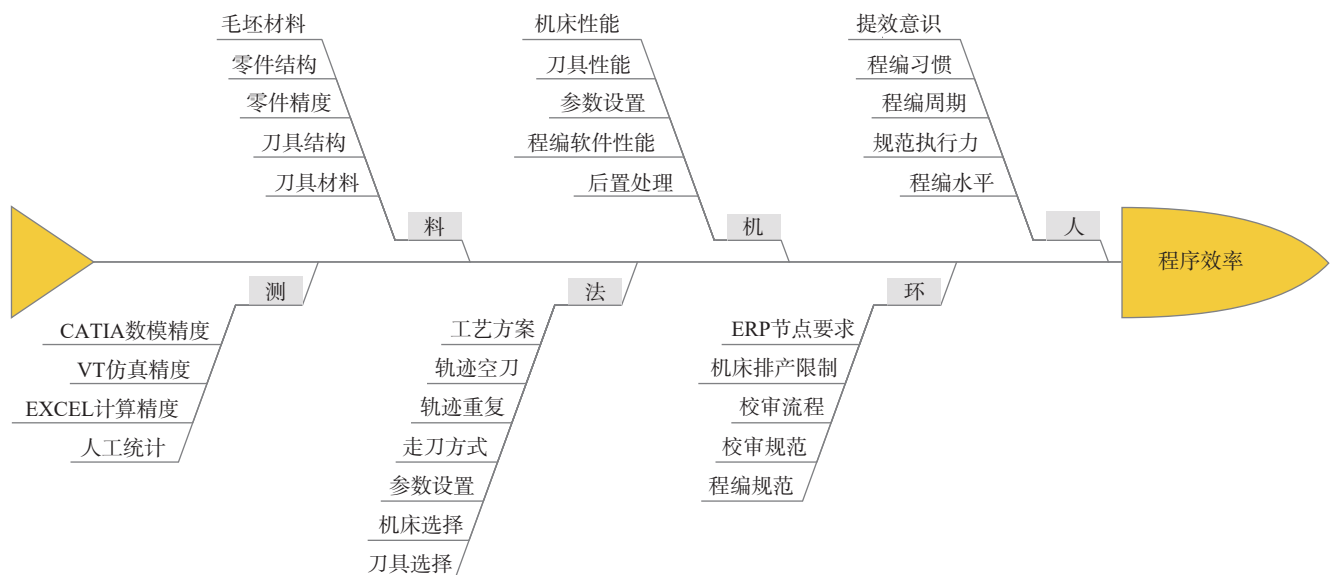


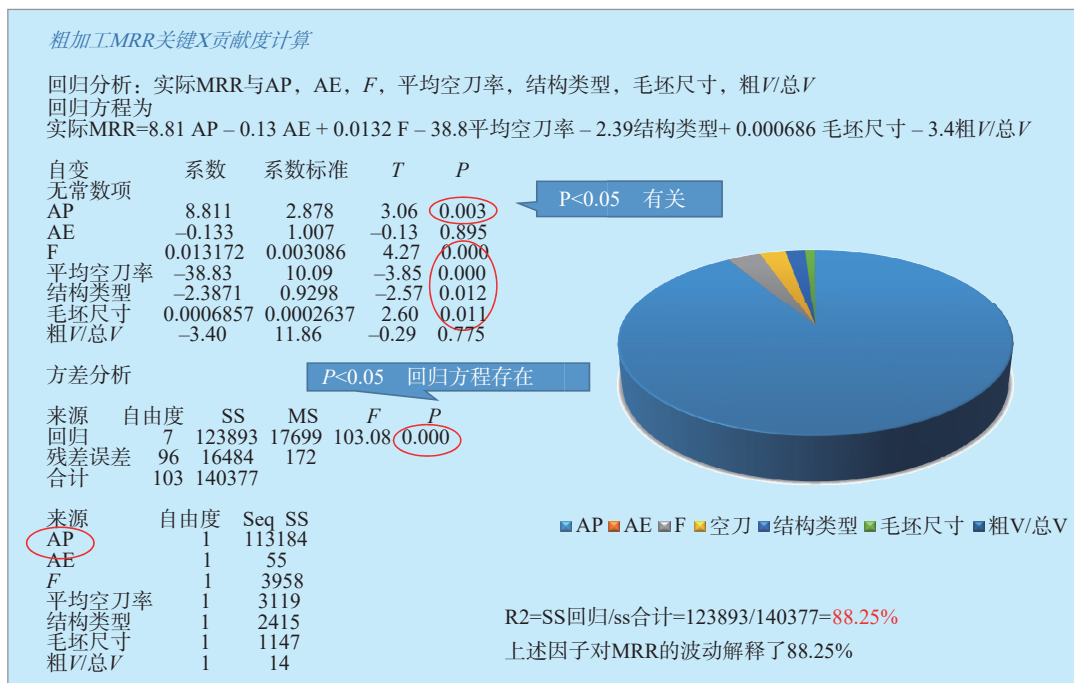
图11 程序效率鱼刺图
Fig.11 Cause-and-effect diagram of program efficiency

进后均值提高,波动变小,改进有效。由此可见,实现效率基线的评价及管控模式改进能够有效提高数控加工效率。

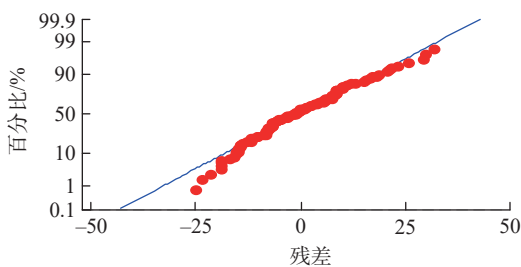
6 结论

以效率基线为标尺的程序数控铣削效率测评办

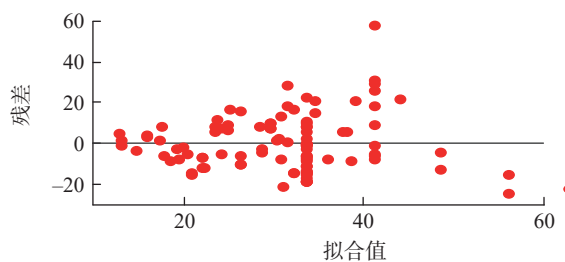
法,重点在于严格控制 MRR、SMR、空刀率等程序的 KPI,并以过程能力分析作为未来阶段的基线目标,以分类统计的方法去找寻不同薄弱零件特征轨迹、薄弱机床,进而开展有针对性的持续改进活动,以基线达标与否作为零件下发的红绿灯,构建效率数据库,配合看板管理实现程序的综合管控,同时还可将每月



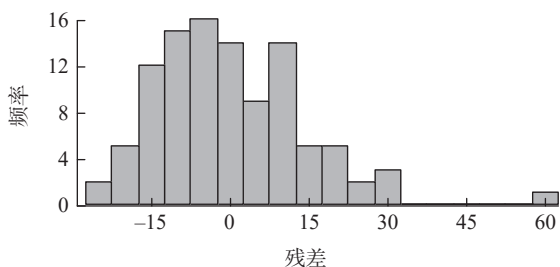
(a) 粗加工 MMR 回归分析



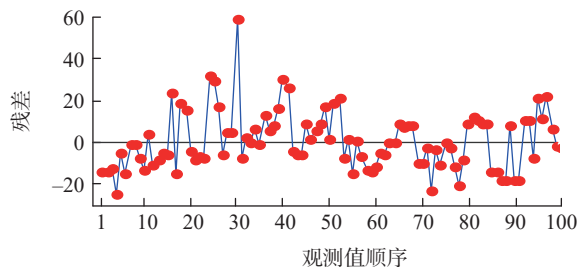
(b) 正态概率图



(c) 拟合值



(d) 直方图



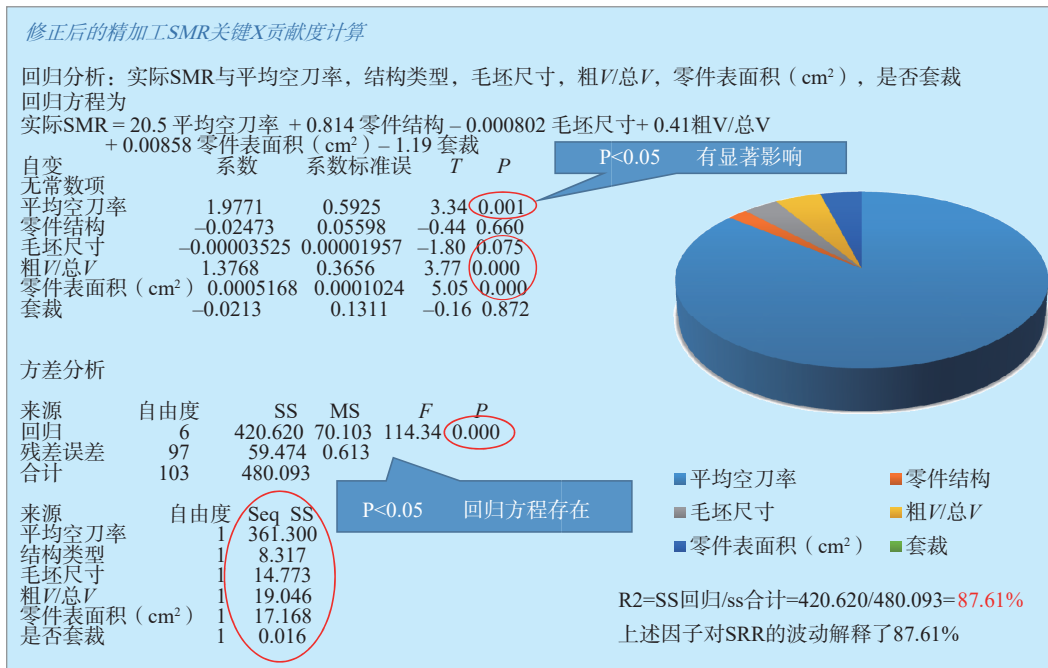
(e) 顺序

图12 粗加工关键X贡献度计算及残差分析

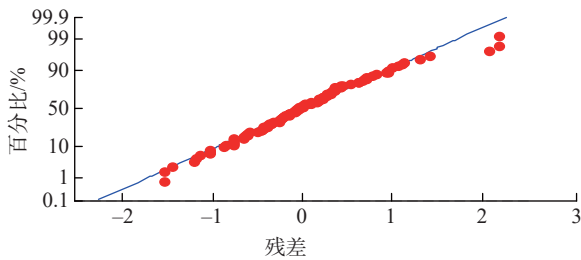
Fig.12 Calibration of critical X contribution and residual analysis of roughing

新发 NC 效率统计数据库整合到月度 OEE 数据库。由此,形成 TPM 模式下的车间级 OEE 的评估报告,让每一位员工都能了解并积极投入到生产效率动态

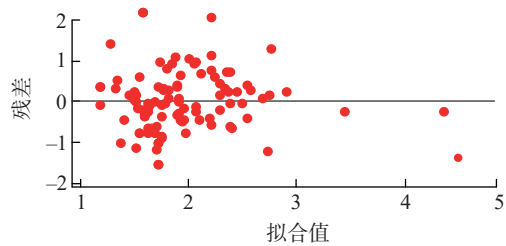
监控中,实现全员参与的精益生产模式,保障企业高效产出,从而加快迈入现代化智能生产、高效生产新时代。



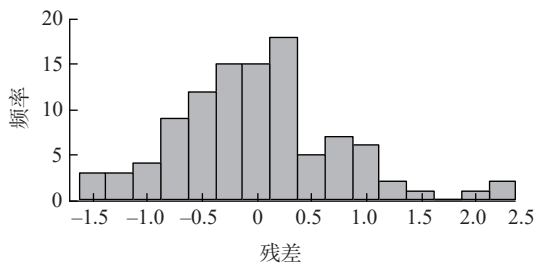
(a) 重算后的粗加工 MMR 回归分析



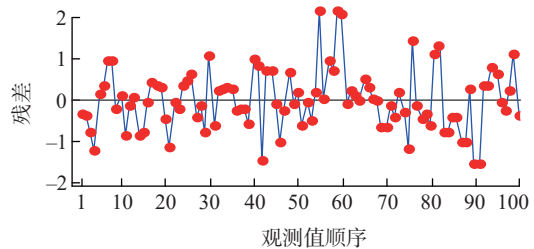
(b) 正态概率图



(c) 拟合值



(d) 直方图



(e) 顺序

图13 重算后的精加工关键X贡献度计算及残差分析

Fig.13 Calibration of critical X contribution and residual analysis of finishing after recalculation

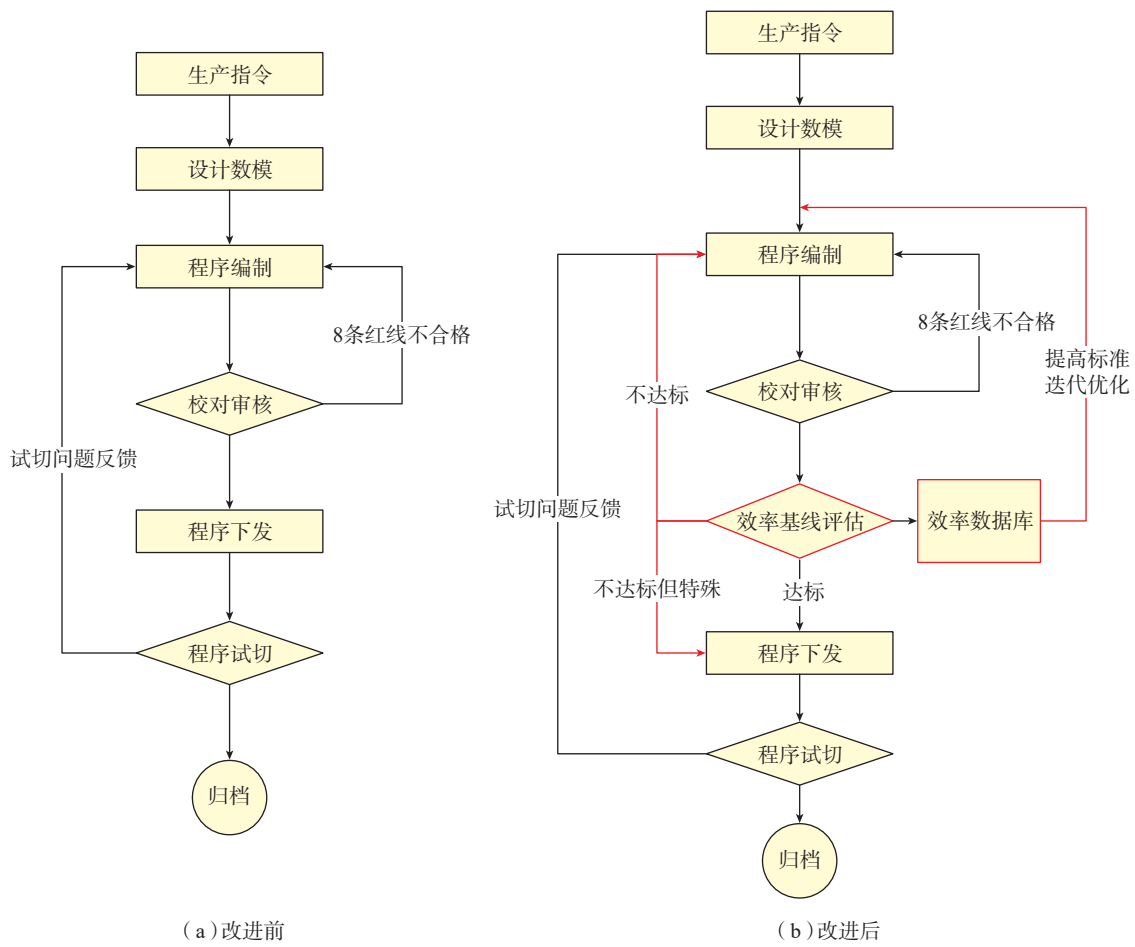


图14 改进前后对比

Fig.14 Comparison before and after improvement

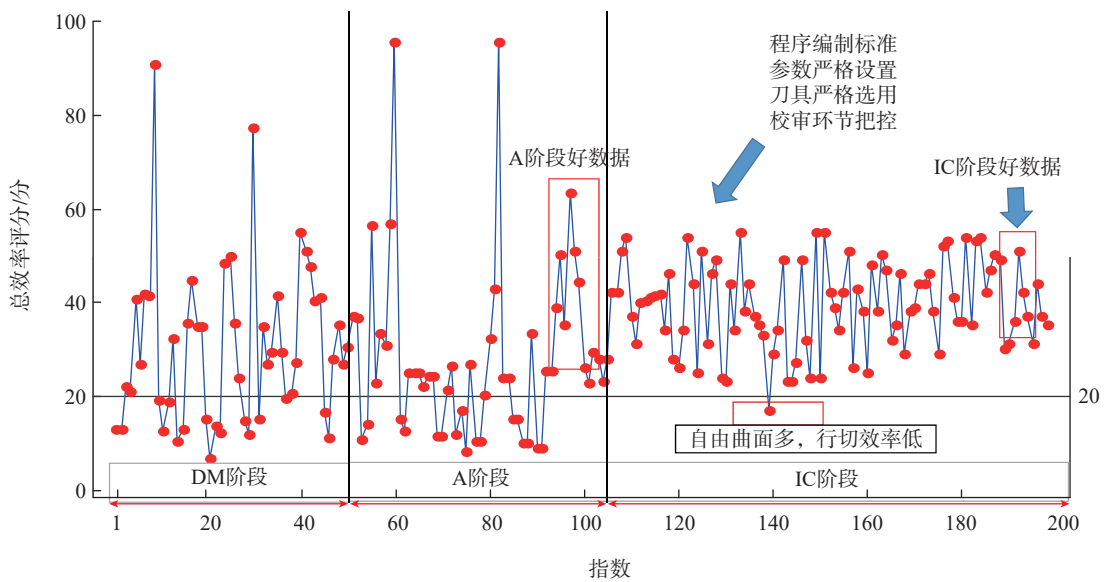
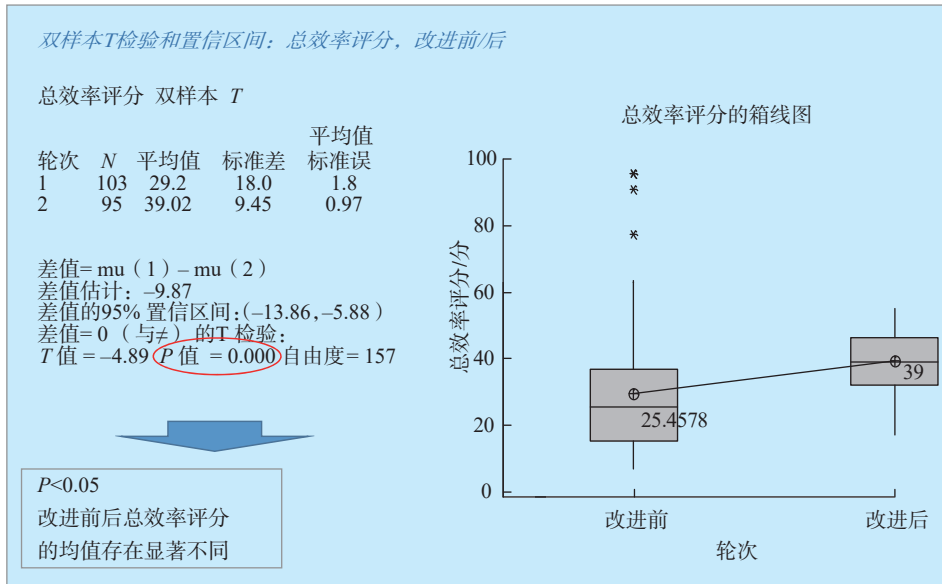
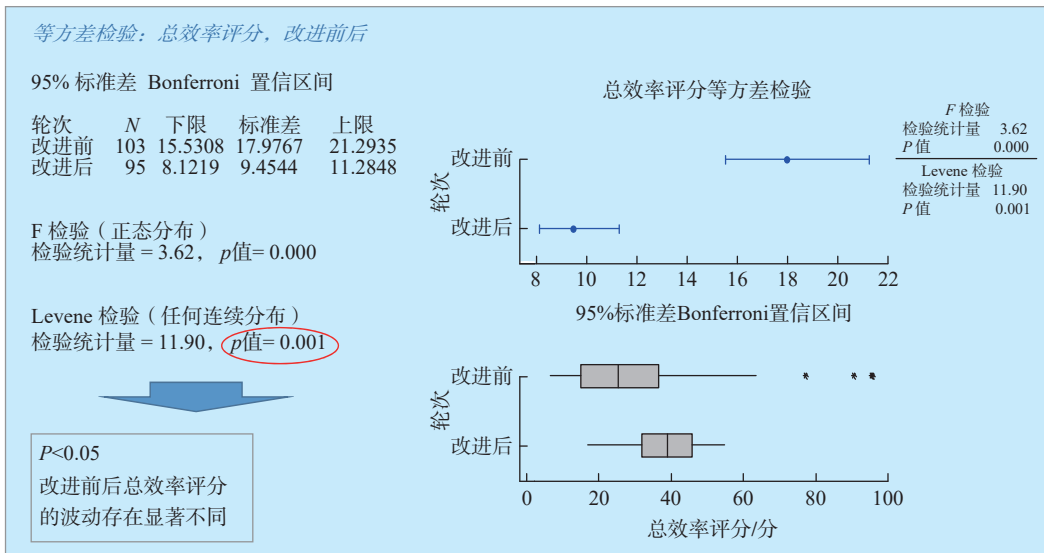


图15 各阶段效率评分

Fig.15 Scores of different statistics efficiency



(a) “双样本 T” 检验



(b) “等方差” 检验

图16 “双样本T”和“等方差”检验
 Fig.16 Double samples and equal variance test

参考文献

[1] 巫少龙, 吴国献, 张元祥. 基于 OEE 的企业设备效率分析与改善[J]. 机械制造, 2010, 48(3): 75-77.

WU Shaolong, WU Guoxian, ZHANG Yuanxiang. Enterprise efficiency analysis and improvement based on OEE[J]. Mechanical Manufacturing, 2010, 48(3): 75-77.

[2] 沈静超. 设备综合效率 OEE 的计算方法及实际运用[J]. 装备制造技术, 2013(9): 151-152, 165.

SHEN Jingchao. The calculation method of overall equipment efficiency and its application[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013(9): 151-152, 165.

[3] 杨胜群. VERICUT 数控加工仿真技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

YANG Shengqun. CNC machining simulation technology of VERICUT[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.

[4] 李琴, 刘海东, 曾富洪. 精益六西格玛方法在产品生产过程 (下转第 101 页)

SHAN Jidong, CAO Zengyi, WANG Zhaoyang. Smart factory construction research of aeroengine manufacturing enterprises[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(15): 70–77.

[20] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603–1611.

TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyberphysical fusion in digital twin shopfloor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603–1611.

[21] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753–768.

ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753–768.

[22] 陶剑, 戴永长, 魏冉. 基于数字线索和数字孪生的生产生命周期研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(21): 26–31.

TAO Jian, DAI Yongchang, WEI Ran. Study on production lifecycle based on digital thread and digital twin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(21): 26–31.

[23] 于勇, 胡德雨, 戴晟, 等. 数字孪生在工艺设计中的应用探讨[J]. 航空制造技术, 2018, 61(18): 26–33.

YU Yong, HU Deyu, DAI Sheng, et al. Study on application of digital twin in process planning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(18): 26–33.

[24] 刘小龙, 田锡天, 张振明, 等. 产品生命周期过程中的BOM演进与系统集成[J]. 制造业自动化, 2009, 31(10): 27–31.

LIU Xiaolong, TIAN Xitian, ZHANG Zhenming, et al. BOM evolution and system integration in PLM[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(10): 27–31.

[25] 张永弟, 杨光, 岳彦芳. 基于BOM的CAD/CAPP/MES集成研究[J]. 机械设计与制造, 2011(3): 78–79.

ZHANG Yongdi, YANG Guang, YUE Yanfang. Study on integration of CAD/CAPP/MES based on BOM[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(3): 78–79.

[26] 屈力刚, 苑俊超, 魏佩振. 基于MBD的三维装配BOM重构技术[J]. 航空制造技术, 2014, 57(9): 26–29.

QU Ligang, YUAN Junchao, WEI Peizhen. 3D assembly BOM reconstruction technique based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(9): 26–29.

[27] 李沛田, 靳长勇. 基于BOM的船体生产设计数据管理技术研究[J]. 船舶与海洋工程, 2016, 32(4): 72–77.

LI Peitian, JIN Changyong. Research of hull production design data management technology based on BOM[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 32(4): 72–77.

[28] 支超有, 唐长红. 现代飞机系统虚拟试验验证技术发展研究[J]. 航空科学技术, 2010, 21(6): 25–28.

ZHI Chaoyou, TANG Changhong. Research on virtual test technology for modern aircraft system[J]. Aeronautical Science and Technology, 2010, 21(6): 25–28.

[29] 苟仲秋, 闫鑫, 张柏楠, 等. 载人航天器地面试验验证体系研究[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(6): 528–534.

GOU Zhongqiu, YAN Xin, ZHANG Bainan, et al. The ground test validation system for manned spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(6): 528–534.

[30] 胡小秋. 自动武器变批量生产模式及其若干关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

HU Xiaoqiu. Research on scalable batch manufacturing mode and the key technologies for automatic weapon[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.

通讯作者: 于成龙, 博士后、高级工程师, 主要从事先进制造技术研究、规划及应用, E-mail: yuchengl@163.com。

(责编 古京)

(上接第92页)

中的改进研究[J]. 现代制造工程, 2015(10): 42–46.

LI Qin, LIU Haidong, ZENG Fuhong. Study on improvement of lean Six Sigma method in product manufacturing process[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(10): 42–46.

[5] 杜成立, 李亮. 基于表面成形率的数控加工效率评价方法[J]. 工具技术, 2018, 52(10): 91–94.

DU Chengli, LI Liang. Evaluation method of NC machining efficiency based on surface forming rate[J]. Tool Engineering, 2018, 52(10): 91–94.

[6] FAM S F, LAU B P, ISMAIL N. Lean manufacturing and overall equipment efficiency in paper manufacturing and paper products Industry[C]//International Conference on Design and Concurrent Engineering, IDECON 2016, ID146. Langkawi, 2016.

[7] MUÑOZ-VILLAMIZAR A, SANTOS J, MONTOYA-TORRES J R, et al. Using OEE to evaluate the effectiveness of urban freight transportation systems: a case study[J]. International Journal of Production Economics, 2018, 197: 232–242.

[8] FAM S F, LOH S L, HASLINDA M, et al. Overall equipment efficiency (OEE) enhancement in manufacture of electronic components & boards industry through total productive maintenance practices[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 150(3): 37–41.

通讯作者: 周佳, 工程师, 研究方向为飞机结构件数控机械加工, E-mail: 654388239@163.com。

(责编 古京)