

应用六西格玛改进方法提高激光三维零件切割精度

Improve Position Precision of Laser Cutting of 3D Components by Using DMAIC

中航工业发展研究中心 赵兵
中航工业精益六西格玛研究所
中航工业北京航空制造工程研究所 段爱琴

[摘要] 激光切割是一种既可用于不锈钢、钛合金、铝合金等金属材料的切割,也可用于非金属材料的切割方法。在采用二维半设备进行空间三维零件的切割时,由于不能完全进行法向切割,只能斜切,切割精度得不到保证。工作中可采用平面工位划线,转动工位对线法向切割的方法,来满足空间三维零件切割的形位精度要求。但在实际应用时,发现对线切割时轮廓精度波动性很大,影响合格率。项目组采用六西格玛改进方法对其影响过程进行了深入研究,并有效地解决了该问题。

关键词: 激光切割 切割精度 六西格玛

[ABSTRACT] Laser cutting, as a cutting method, can be applied in cutting metallic material, such stainless steel, titanium alloy, aluminum alloy, etc. Also it can be applied in cutting non-metallic material. When cutting 3D components using 2D and half equipment, position precision cannot be guaranteed, in that cutting can only be applied by beveling and not by normal cutting. At work, the cutting can be applied by, that first plane marking and then normal cutting through rotating station, to satisfy the precision requirement. But in actual work, the contour cutting precision variation is very large, and yield is very low. By using six sigma methodology, the process's cause and effect is investigated, and the problem is solved.

Keywords: Laser cutting Position precision Six sigma

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.15.132

激光切割是自1990年左右在我国开始引进并逐渐成熟应用的一种激光加工技术,迄今为止,在激光加工领域,仍占据主要市场份额。激光切割工艺的原理是利用经聚焦的高功率密度激光束(聚焦光束直径一般为0.1~0.2mm)照射工件,照射点材料温度急剧上升,到达沸点后,材料开始汽化,并形成孔洞。随着光束与工件的相对移动,最终使材料形成切缝,切缝处熔渣被一定压力的辅助气体吹除。因而其主要优势是:非接触加工,切边无机械应力,切割速度快,热影响小,工件变形小,

光束无惯性,可实现高速切割,并可在任意地方开始切割或停止切割。一般而言,切割零件的尺寸精度主要取决于切割设备的数控工作台的机械精度和控制精度,以及零件的特征,采用高精度的切割装置与控制技术,零件的尺寸精度可达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 。激光切割既可用于碳钢、不锈钢、钛合金、铝合金等金属材料的切割,同时也可用于非金属材料的切割,既可用于平板零件的切割,也可用于空间三维零件的切割。

目前,可以用于空间三维零件切割的设备有2类:二维(X、Y)编程,Z轴随动设备;五轴联动的设备。由于各种条件的限制,目前在我国的实际应用中,广泛采用二维半设备进行空间三维零件的切割。

采用二维半设备进行空间三维零件的切割存在1个重要限制,即由于不能完全进行法向切割,只能斜切,因而带来严重的切割精度问题。斜切对精度影响可按公式(1)计算,从公式(1)可以发现这种精度影响:当工件与切割垂直方向的角度越大,影响就越大,切口斜度越大;同时材料厚度越厚,其影响也越大。如果材料厚度为2mm,倾斜角为 45° ,正背面尺寸差 d_{f-b} 为2mm,这种误差是激光精密切割难以接受的误差,即使后续采用打磨的手段,也很难保证精度。

$d_{f-b} = \delta \tan \alpha$, d_{f-b} 为正背面尺寸差, δ 为材料厚度, α 为斜角(见图1)。

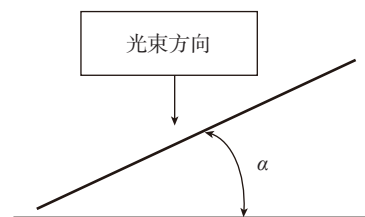


图1 斜切示意图

Fig.1 General view for beveling

为了解决该问题,本项目组采用平面工位划线,转动工位对线法向切割的方法来满足空间三维零件切割的形位精度要求(切割流程如图2所示)。但在实际应用时,发现对线切割时轮廓精度波动很大,不能保证其合格率。本项目组采用六西格玛改进方法对其过程

进行了研究,并有效地解决了该问题。

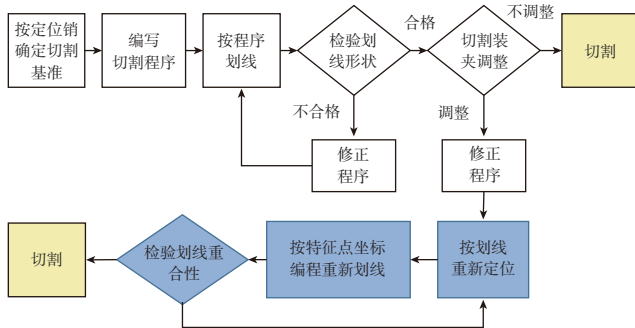


图2 三维零件的实际切割流程

Fig.2 Actual cutting process flow for 3D components

1 研究方法及试验过程

1.1 六西格玛改进方法介绍

六西格玛是一套系统的、集成的业务改进方法体系,是旨在持续改进企业业务流程,实现客户满意的管理方法。它可以实现无缺陷的过程设计(Design for Six Sigma, DFSS),并对现有过程进行过程界定(Define)、测量(Measure)、分析(Analyze)、改进(Improve)、控制(Control),简称DMAIC流程,消除过程缺陷和无价值作业,从而提高质量和服务、降低成本、缩短运转周期,达到客户完全满意,增强企业竞争力。

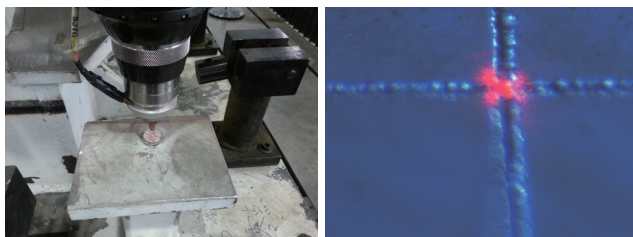
1.2 试验过程

本项目的研究采用在激光切割数控机床装夹1个试验件,在试验件给定位置使用低功率激光划线。然后不移动试验件位置,利用机床自带的He-Ne指示光对已划好的线进行实际测量,记录实际测量的坐标值,并与原给定坐标值进行对比,通过对二者差值的记录和处理,研究其实际能达到的精度,并寻求改进方法。图3为激光头及重新定位对点示意图。

本项目对于缺陷的定义为:划线后每点重新定位精度超过 $\pm 0.065\text{mm}$;

测量方法:在激光切割数控机床上测量特征点重新定位坐标与理论坐标的最大差值;

合格率要求: DPMO < 50000。



(a)激光头 (b)重新定位对点示意图

图3 激光头及重新定位对点示意图

Fig.3 Photos for laser head and repositioning

2 研究结果及分析

2.1 现有方法重新定位精度实现能力测量和评估

首先对目前采用的方法满足重新定位精度需求的能力进行分析。本项目采用目前现有方法、技术和人员设计了一组试验,精确评估其对重新定位精度的满足程度。采用时间序列图分析实际测量的108组试验结果(如图4所示)。时间序列图是一种用于评估一段时间内数据中的模式和行为的工具。时间序列图根据X轴上均匀的时间间隔在Y轴上显示观测值。从图中可以发现:重新定位精度Y值波动比较大,最大误差可达到0.6mm和-0.4mm。这样的重新定位误差难以满足零件整体的精度要求。重新定位精度应该不超过 $\pm 0.065\text{mm}$,才能满足零件整体精度要求。

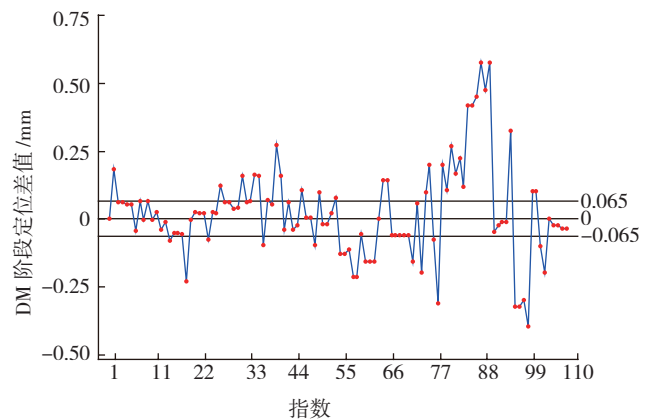


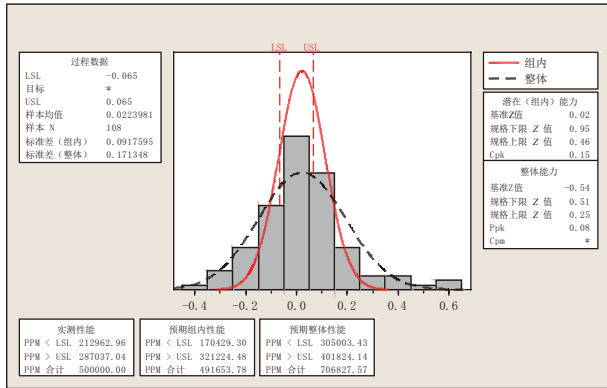
图4 现有方法重新定位精度的时间序列图

Fig.4 Time series graph using current method

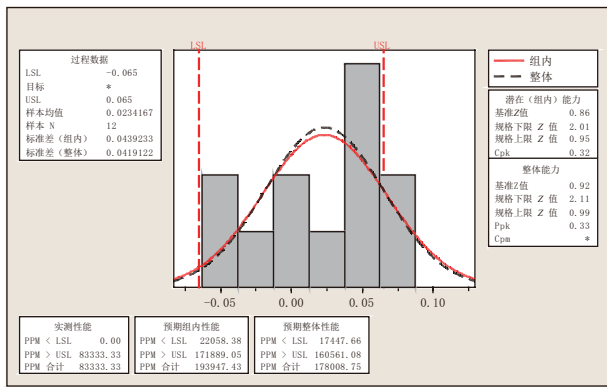
为了更精确地分析现有方法在满足重新定位精度需求上的能力,采用质量工具中的能力分析工具,对以上收集到的数据进行能力分析(如图5)。结果表明,长期能力Z值仅为-0.54,也就是其每百万的缺陷率达到695000;长期能力是指过程在较长的时期内所表现出的过程输出波动的大小,过程不仅受到随机因素的影响,而且受到其他因素的影响。但是从其短期能力来看(短期能力是指过程仅受到随机因素的影响时,过程输出波动的大小,它是过程的固有能力),Z值为0.92,即在目前技术下,如果有很好的控制,每百万的缺陷率可达到171056,这一数值距离本项目每百万的缺陷率50000这样的目标有比较大的差距,因而必须通过改善技术和控制来综合解决提高重新定位精度这一难题。

2.2 影响重新定位精度的原因分析

首先利用因果图(或鱼刺图)工具分析影响重新定位精度的可能原因。因果图是一种揭示过程输出缺陷或问题与其潜在原因之间关系的图表,也是表达和分析其因果关系的重要工具和文档。分析结果表明(如图6



(a) 长期能力 $Z_{L1} = -0.54$ DPMO=695000



(b) 短期能力 $Z_{S1} = 0.92$ DPMO=171056

图 5 现有方法重新定位精度的长期和短期能力评估

Fig.5 Process capability analysis using current method

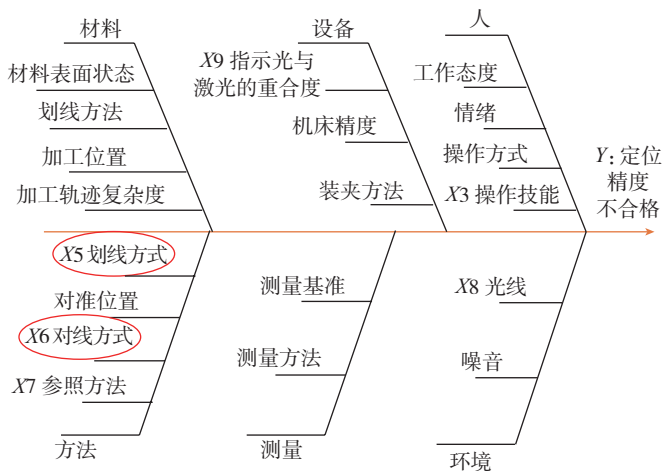


图 6 用因果图工具分析影响重新定位精度不合格的主要可能因素

Fig.6 Cause and effect graph of possible main factors for repositioning precision

所示): 从材料、设备、人员、方法、测量、环境等 6 个方面考量,可能影响到重新定位精度不合格的主要参数有: 操作人员的操作技能、划线方式、对线方式、参照方法、光线以及指示光与激光的重合度等。

因果图的结果只是给出了各个可能的影响因素,下面利用假设检验这种数学方法详细分析各个可能因素

对于重新定位精度的影响。

(1) 利用单因子方差分析各个因素(X)对重新定位精度(Y)均值的影响

首先利用单因子方差分析各个因素(X)对重新定位精度(Y)均值的影响。单因子方差分析是一种比较多个总体的均值的一种假设检验方法。单因子方差分析如下所示:

结果表明,所有目前假定的因素(操作者(X3)、划线方式(X5)等)对重新定位精度(Y)的均值影响都不显著($P < 0.05$),贡献率仅分别为 2.2% 和 3.12%。

单因子方差分析: 定位差值与操作者

来源	自由度	SS	MS	F	P
操作者编号	3	0.1553	0.0518	1.80	0.151
误差	104	2.9863	0.0287		
合计	107	3.1415			

$S = 0.1695$ $R-Sq = 4.94\%$ $R-Sq$ (调整) = 2.20%

单因子方差分析: 定位差值与划线方式

来源	自由度	SS	MS	F	P
划线方式	2	0.1548	0.0774	2.72	0.070
误差	105	2.9867	0.0284		
合计	107	3.1415			

$S = 0.1687$ $R-Sq = 4.93\%$ $R-Sq$ (调整) = 3.12%

(2) 利用等方差分析各个因素(X)对重新定位精度(Y)标准差的影响

在正态分布中,表征参量一个是均值,另一个是其标准差。标准差表征了过程的波动性。虽然以上单因子方差分析结果表明,目前的主要因素对均值影响不显著,但是等方差分析可以知道其对波动性的影响是否显著。图 7 为操作者(X3)、划线方式(X5)的等方差分析结果。结果表明,操作者(X3)、划线方式(X5)对于重新定位精度(Y)标准差具有显著影响($P < 0.05$)。而其他因素如光线以及指示光与激光的重合度等对其影响不显著。

2.3 提高重新定位精度的改善措施

上述研究表明,操作者(X3)、划线方式(X5)对于重新定位精度(Y)标准差具有显著影响。对比现有方法可知,操作者(X3)用人眼直接对点,由于操作者判断标准、观测位置、以及精神集中程度等诸多不确定性因素的影响,很难减少这种波动性,必须采用受操作者自身因素影响小的技术措施来改善波动。将对线方法由人眼直接对点,改进为 CCD 摄像头对点,人根据屏幕上的图像进行调整(如图 8 所示)。

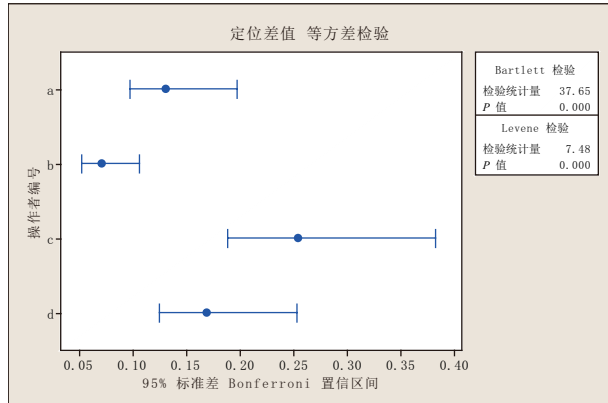
而对于划线方式(X5)对重新定位精度(Y)标准差

的影响,解决方法是使用其波动最小的方法,即采用十字线的方法。

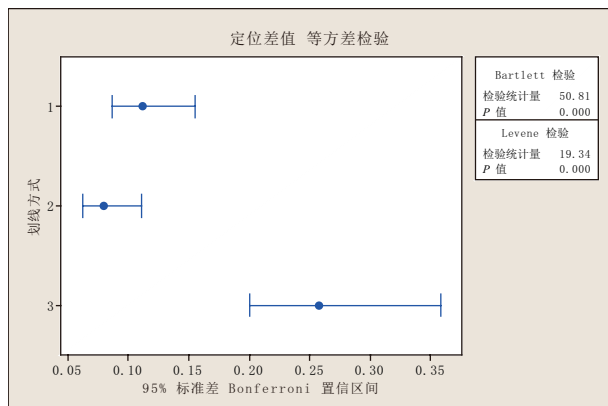
采用这两种改善方法之后,重新设计一组试验,从数据上分析改善措施的有效性。表1为改善前后标准差的变化情况。

2.4 改善后重新定位精度的评估及控制措施

首先通过时间序列图来直观分析改进后的效果。



(a) 操作者



(b) 划线方式

图7 操作者 (X_3)、划线方式 (X_5) 的等方差分析结果
Fig.7 Equal variation test for operator (X_3) and marking method (X_5)

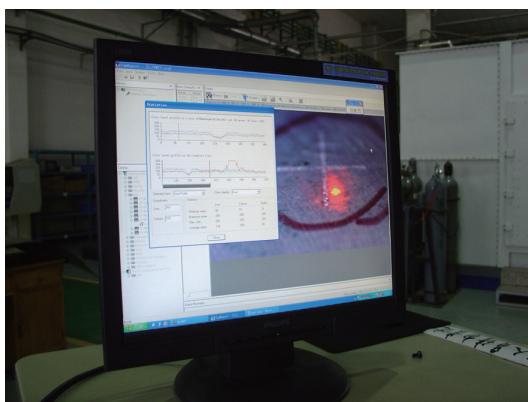


图8 CCD图像对点方法

Fig.8 CCD image pointing method

表1 改善前后重新定位精度 (Y) 标准差的变化情况

改善的关键 X	改善前方法	改善后方法	标准差	改善情况 /%
改善前			0.171348	
改善对线方式 X_6 后	人眼	CCD 图像	0.056696	66.9
改善划线方式 X_5	直线	十字	0.038511	77.5

图9结果表明,在进一步优化参数后,所有的定位差值都在规格线之内。该图也清楚表明,改进措施对重新定位精度的波动性产生很大影响。进一步利用能力分析评估改进后的满足重新定位精度需求上的能力,结果表明(图10 改善后重新定位精度的长期能力评估),其长期能力的 Z 值达到 1.8,也就是其 DPMO 达到 35930,达到了课题的目标,表明改进方法的有效性。

为了在实际应用中更加快捷、方便地应用 CCD 系统,本项目设计和制造了一套快速插拔的安装装置,并且购置安装了直接屏幕显示的 CCD 系统(如图11所示)。

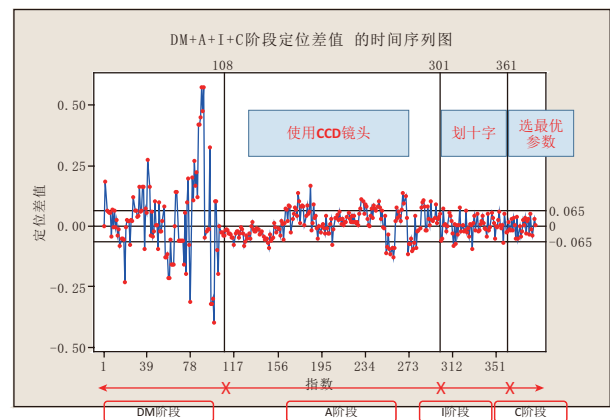
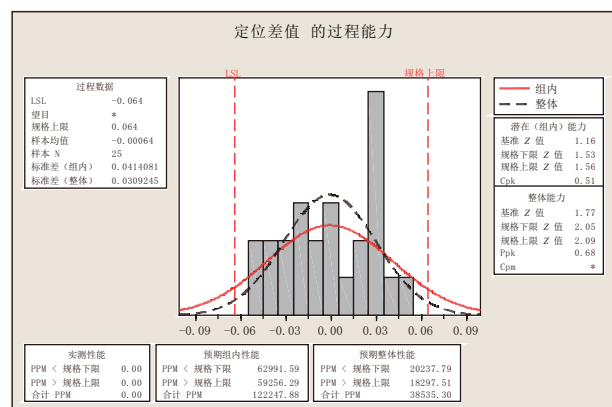


图9 改善后重新定位精度的时间序列图

Fig.9 Time series plot for improved repositioning precision



$$Z_{\text{bench}} = 1.8 \quad \text{DPMO} = 35930$$

图10 改善后重新定位精度的长期能力评估

Fig.10 Long-term capability for improved repositioning precision
(下转第 138 页)

表1 浸泡介质选择试验结果

浸泡介质	浸泡时间	气密试验结果			备注
		常温	低温	高温	
某种中间油	18h	合格	合格	合格	两组胶圈
某种中间油	20h	合格	合格	合格	两组胶圈,胶圈偏大,不利安装
某种乙基硅油	5d	合格	不合格	合格	两组胶圈,一组118、119低温同时漏气
		合格	合格	合格	
某种乙基硅油	7d	合格	合格	合格	两组胶圈
		合格	合格	合格	
某种乙基硅油	10d	不合格	合格	合格	两组胶圈,一组118、119常温同时漏气;另一组119常温漏气

因此,不再进行该种浸泡介质试验工作。

4.2 工艺参数确定

对某种中间油浸泡胶圈试验,加大样本投入量,以确定浸泡工艺参数。具体要求为:

- (1)准备 118 胶圈 24 个,119 胶圈 12 个;
- (2)测量胶圈浸泡前的尺寸;
- (3)胶圈在某种中间油中的浸泡,在温度 20℃ 条件下,浸泡 18h;
- (4)测量胶圈浸泡后尺寸并按从小到大编号;
- (5)取两件作动筒,分别安装 119 (3)、118 (3) 和 118 (4) 尺寸组合以及 119 (10)、118 (21) 和 118 (22) 尺寸组合胶圈,进行气密试验,合格后转入寿命试验。
- (6)胶圈状态观察要求:对其余胶圈每 10 天测量尺寸一次并记录,共测 6 次;
- (7)试验测试要求:6 次测量后,分别挑选尺寸最大 118 胶圈、119 胶圈各两件,进行拉断伸长率测试。

试验结果:进行寿命考核的两个作动筒已通过全部寿命试验;胶圈浸泡后 60 天尺寸变化状态见图 4,胶

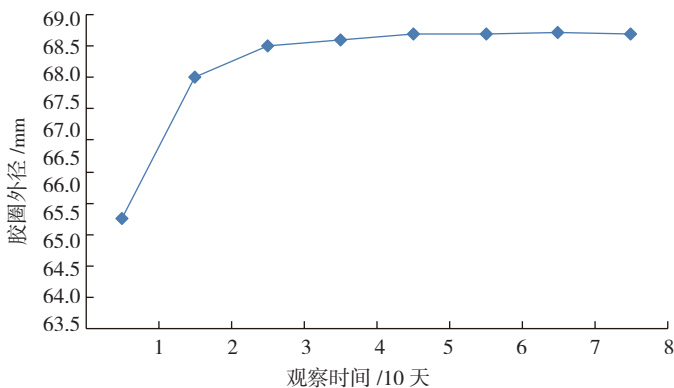


图4 118胶圈浸泡后外径尺寸变化状态

Fig.4 Outside diameter size of 118 rubber apron after soaking

圈尺寸可以达到稳定值,不再继续溶胀;浸泡后胶圈拉断伸长率平均 183.5%,大于材料规范要求的 160%。通过以上试验确定的工艺参数为:浸泡介质,某种中间油;浸泡温度,20℃;浸泡时间,18h;浸泡后 118 胶圈外径为 67.3~67.8mm,安装后压缩率 ϵ 为 3%~5%,119 胶圈内径为 35.4~35.9mm,安装后压缩率 ϵ 为 4%~5.5%。

5 结论

通过分析胶料和浸泡介质的不同对“Ω”形胶圈密封效果的影响,在对胶圈工作过程、胶圈尺寸、胶圈硬度的研究基础上,对“Ω”形胶圈密封机理进行了分析、验证。通过试验、分析得出了此类胶料的“Ω”形胶圈最适合的浸泡介质,确立了工艺参数,为“Ω”形胶圈密封结构的推广应用积累了宝贵经验。

参考文献

- [1] 杜福海,狄繁,张守辉.异形胶圈密封失效分析.飞机设计,2012(4):56-58.
- [2] 吕百龄.实用橡胶手册.北京:化学工业出版社,2010.
- [3] 付平,常德功.密封设计手册.北京:化学工业出版社,2009.

(责编 古京)

(上接第 135 页)



(a)快速插拔的安装装置 (b)直接屏幕显示的 CCD 系统

图11 快速插拔的安装装置和直接屏幕显示的 CCD 系统

Fig.11 Quick pulling installation device and CCD system for direct screen display

3 结论

本项目研究表明:

(1)六西格玛改进方法和工具是一种现有流程和技术改进的有效手段,可以高效率地发现问题,解决问题。

(2)解决采用二维半设备进行空间三维零件的切割时,由于斜切产生的切割精度问题,其措施之一是:采用平面工位划线,转动工位对线法向切割的方法,来满足空间三维零件切割的形位精度要求。对于由此产生的重新定位精度问题,通过采用合适的 CCD 摄像头,以及采用合适的划线方法,最终精度可控制在 $\pm 0.065\text{mm}$,合格率可控制在 96% 以上。

(责编 古京)