

面向装夹成功率的“一面两销”夹具精度设计

汤丽媛*, 徐旭松, 孙志英

江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2023年4月3日; 录用日期: 2023年6月1日; 发布日期: 2023年6月8日

摘要

为提高床头箱盖零件在机床上的加工效率、保证加工精度, 在设计“一面两销”定位的专用夹具时, 须在保证工件与夹具之间装夹成功率的前提下, 优化定位元件(定位特征)的精度设计。考虑了定位销/孔的几何公差与公差原则, 采用MATLAB蒙特卡洛模型模拟定位销/孔的实际加工尺寸与间隙分布情况。利用定位销/孔装夹成功率数学模型进行公差分析并进行优化设计。与传统的夹具精度设计方法相比, 该方法能在保证零件与夹具定位精度的前提下, 提高夹具与被装夹工件间的装夹成功率, 从而提高工件加工效率。

关键词

一面两销, 蒙特卡洛模型, 装夹成功率, 尺寸优化, 定位精度

Precision Design of “One Side with Two Pins” Fixture for Probability of Assembly Success

Liyuan Tang*, Xusong Xu, Zhiying Sun

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: Apr. 3rd, 2023; accepted: Jun. 1st, 2023; published: Jun. 8th, 2023

Abstract

In order to improve the machining efficiency of the headstock cover parts on the machine tool and ensure the machining accuracy, the accuracy design of positioning elements (positioning features) must be optimized on the premise of ensuring the probability of assembly success between the

*通讯作者。

workpiece and the fixture, when designing the special fixture for “one side with two pins”. MATLAB Monte Carlo model is used to simulate the actual machining dimension and clearance distribution of the locating pin/hole, the geometric tolerance and tolerance principle of the locating pin/hole are taken into consideration as well. The tolerance analysis and optimization design are carried out by using the mathematical model of probability of assembly success of the locating pin/hole. Compared with the traditional fixture precision design method, this method can improve the probability of assembly success between the fixture and the workpiece to be clamped under the premise of ensuring the positioning accuracy of parts and fixtures, thus improving the machining efficiency of workpieces.

Keywords

One Side with Two Pins, Monte Carlo Model, Probability of Assembly Success, Optimization of Dimension, Positioning Accuracy

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为提高机床批量加工零件时的生产效率，车间常用夹具快速找正并固定工件在机床上的加工位置。零件的生产过程中不可避免有人工、变形、装配偏差等各类加工误差，其中夹具系统造成的误差约占6%~10%，故夹具设计质量的高低决定了机床能否提高生产效率、控制成本、操作方便以平稳地生产工件[1]。下面就夹具设计的几个重要方面展开论述：在确定夹具有关尺寸、配合及夹具技术条件方面，张新义[2]、张俊俊等[3]采用概率论以及可靠性技术等方法建立了夹具定位销精度设计的概率法，该法能有效解决装配方便和加工精度之间的矛盾。沈为清等[4]引用刚体动力学分析方法，推导出了一类敏感度指标用于评价“一面两销”夹具定位销布局设计的鲁棒性。CALABRESE M 等[5]根据工件的局部刚度特性，对夹具-工件系统进行拓扑优化，该方法改变了优化问题的拓扑设计变量和优化约束，提供了夹具精度优化设计的新方法。VUKELIC D 等[6]基于接触界面的预处理并将夹紧元件压入工件中，以达到提高工件与加工夹具之间夹紧力的目的。YACOB F 等[7]为了降低数学复杂性，提出了双四元数来表示和转换虚拟零件和夹具；在确定夹具的结构方案方面，徐旭松等[8]讨论了销/孔定位精度分析方法，通过优化定位结构的方式提高了一面两孔夹具的定位精度。吴盘龙等[9]用多齿瓣圆柱销代替了传统的定位销结构，消除了销/孔之间的配合间隙，该方法实现了定位基准相对统一。QI R 等[10]设计了一种可变多点多自由度配套夹具，提高了生产效益。NUGRAHA A D 等[11]在 Abaqus/CAE 中利用有限元方法，该法确定了夹具的几何形状和尺寸对加工结果的影响并对夹具进行结构优化设计。XIE W 等[12]开发了基于持续优化方法的增强蚁群算法(ACA)，以优化多工位装配过程中 2D 刚性零件的夹具布局。VINOSH M 等[13]重点研究了夹具位置对钣金件尺寸质量的影响，该法使用混合优化技术，通过有限元分析方法确定最佳装夹位置，以实现最小变形。PARK J W 等[14]提出了一种基于可变形引脚阵列的零件夹具系统，该系统可用来固定零件，并自适应地支撑不同形状的零件；在研究夹具定位误差分析方法方面，李双成等[15]提出应用尺寸链原理解决“一面两销”定位夹具的定位误差分析与计算，该方法弥补了几何解析法计算空间定位误差的不足。宁龙等[16]基于吴玉光提出的机构学模型，提出了基于 ADAMS 软件的夹具定位误差分析方法，通过等价机构建模，应用统计学分析夹具定位误差的概率结果。刘亚雄等[17]以运动学原理为基

基础,分析了基于零点定位系统的夹具精度,建立了夹具定位误差的分析模型。此外,齐振超等[18]、郑伟[19]、韩变枝等[20]分别为工程实际中的具体案例设计专用夹具,并运用 MATLAB、ADAMS 等软件对夹具的定位误差进行分析。

在对夹具定位设计的研究中,学者们对于如何有效减小小夹具定位误差已经有了相对成熟的研究,但若一味提高夹具定位精度而忽视夹具与工件之间的装夹成功率往往会得不偿失,反而会降低工件加工效率。除此以外,若仅对夹具进行尺寸公差设计,忽略几何公差和公差原则,会导致夹具精度得不到有效控制,从而降低定位精度、产生加工误差。因此,在对夹具进行精度设计时,须充分考虑夹具与被装夹零件的装夹成功率及其定位精度,并合理运用尺寸公差和几何公差来保证夹具本身的精度。

2. 装夹成功率的计算模型

工件采用“一面两销”定位时,工件能否成功装夹到夹具上主要取决于定位元件(定位销/孔)能否装配成功。张新义[2]建立了定位销/孔装配成功率数学模型,文中引用该模型分析床头箱盖夹具设计方案的装夹成功率,具体推导过程不再赘述。

一般情况下,定位销/孔尺寸与间隙均符合正态分布规律,故销/孔尺寸与间隙分布的概率密度函数为:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} \exp\left(-\frac{(\delta - \mu_D)^2}{2\sigma_\delta^2}\right) \quad (1)$$

式中: δ 为销/孔尺寸与间隙,是符合正态分布的随机变量; μ_D 为销/孔尺寸与间隙的平均值; σ_δ 为销/孔尺寸与间隙的标准偏差。

销/孔中心的偏离距离 S 为偏态分布,即可视为销/孔中心与位置度圆心的连线在以位置度圆心为原点、销/孔几何公差带为直径建立的坐标系内的矢量分布情况,即角度的均匀分布与偏心距正态分布的综合结果,其概率密度函数 $f(S)$ 为:

$$f(S) = \frac{S}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2)$$

式中: σ_s 为偏心距离 S 的标准偏差。若孔心落在位置度圆内(即定位孔几何公差带 ϕ_H 内)的置信度为 H , 则有: $\int_0^{\phi_H} f(r) dr = \int_0^{\phi_H} \frac{r}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_0^2}\right) dr = H$, 根据 3σ 原则取 $H = 99.73\%$, 代入原式可得

$\frac{\phi_H^2}{\sigma_0^2} = -\ln(1-H) = 47.32$, 即 $\frac{\phi_H}{\sigma_0} = 6.88$, 故销/孔中心偏离距离 S 的标准偏差 σ_s 为:

$$\sigma_s = \frac{\sqrt{\phi_H^2 + \phi_P^2}}{6.88} \quad (3)$$

式中: ϕ_H 为定位孔的几何公差; ϕ_P 为定位销的几何公差。

由式(3),定位孔在相关公差原则下,主、副定位销/孔装配偏心距离 S 的标准偏差 σ_{s_1} 、 σ_{s_2} 为:

$$\sigma_{s_1} = \frac{\sqrt{\phi_H'^2 + \phi_P^2}}{6.88} = \frac{\sqrt{(\phi_H + \delta_1 - D_1 + T_1)^2 + \phi_P^2}}{6.88} \quad (4)$$

$$\sigma_{s_2} = \frac{\sqrt{\phi_H'^2 + \phi_M'^2 + \phi_P^2}}{6.88} = \frac{\sqrt{(\phi_H + \delta_1 - D_1 + T_1)^2 + (\phi_M + \delta_2 - D_2 + T_2)^2 + \phi_P^2}}{6.88} \quad (5)$$

式中: δ_1 、 δ_2 为主、副定位孔的实际加工尺寸; D_1 、 D_2 为主、副定位孔公称直径尺寸; T_1 、 T_2 为主、

副定位孔最大、小设计尺寸与公称直径的差值； $\delta_1 - D_1 + T_1$ 、 $\delta_2 - D_2 + T_2$ 为主、副定位孔实际加工尺寸对公差补偿值； ϕ_H 、 ϕ_M 、 ϕ_P 为主、副定位孔/销的几何公差。

将工件安装到夹具上时，先对正主定位销/孔，主定位销/孔的装夹成功概率为：

$$P_{XE} = \int_{D_1-T_1}^{D_1+T_1} P_X(2c > S | c > 0, S > 0) f(\delta) d\delta$$

$$= \int_{D_1-T_1}^{D_1+T_1} \left[\phi\left(\frac{\mu_c}{\sigma_c}\right) - A\phi\left(\frac{\mu_c}{\sigma_c} \frac{\sigma_{S_1}}{\sqrt{\sigma_{S_1}^2 + 4\sigma_c^2}}\right) \right] f(\delta) d\delta \quad (6)$$

式中： μ_c 、 σ_c 为主定位销/孔间隙的均值与标准偏差； $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ ； $P_X = \int_0^\infty \left[\int_0^{2c} f(S) dS \right] f(c) dc$ ；

$$A = \frac{\sigma_{S_1}}{\sqrt{\sigma_{S_1}^2 + 4\sigma_c^2}} \exp\left(-\frac{\mu_c^2}{2\sigma_c^2}\right) \exp\left[\frac{\sigma_{S_1}^2 \mu_c^2}{2\sigma_c^2 (\sigma_{S_1}^2 + 4\sigma_c^2)}\right]$$

对于副定位销/孔：当两销/孔间隙之和大于副定位销/孔的实际偏心距离 S 时装夹成功，副定位销/孔的装夹成功率为：

$$P_{XUE} = \int_{D_1-T_1}^{D_1+T_1} \int_{D_1'-T_1'}^{D_1'+T_1'} P_E(c + c' > S_1 | c > 0, c' > 0, S_1 > 0) f(\delta) f(\delta_2) d\delta d\delta_2$$

$$= \int_{D_1-T_1}^{D_1+T_1} \int_{D_1'-T_1'}^{D_1'+T_1'} \left[\phi\left(\frac{\mu_c}{\sigma_c}\right) \phi\left(\frac{\mu_{c'}}{\sigma_{c'}}\right) - \frac{B}{\sqrt{2\pi}\sigma_{c'}} A_1 \right] f(\delta) f(\delta_2) d\delta d\delta_2 \quad (7)$$

式中： $\mu_{c'}$ 、 $\sigma_{c'}$ 为副销/孔间隙的均值与标准偏差； $B = \frac{\sigma_{S_2}}{\sqrt{\sigma_{S_2}^2 + \sigma_{c'}^2}} \exp\left(-\frac{\mu_{c'}^2}{2\sigma_{c'}^2}\right)$ ；

$$A_1 = \int_0^\infty \exp\left(-\frac{c'^2}{2\sigma_{S_2}^2}\right) \exp\left[\frac{(\mu_{c'}\sigma_{S_2}^2 - c'\sigma_{c'}^2)^2}{2\sigma_{S_2}^2\sigma_{c'}^2(\sigma_{S_2}^2 + \sigma_{c'}^2)}\right] \times \phi\left[\frac{\sqrt{\sigma_{S_2}^2 + \sigma_{c'}^2}(\mu_{c'}\sigma_{S_2}^2 - c'\sigma_{c'}^2)}{\sigma_{S_2}\sigma_{c'}(\sigma_{S_2}^2 + \sigma_{c'}^2)}\right] \exp\left[-\frac{(c' - \mu_{c'})^2}{2\sigma_{c'}^2}\right] dc$$

综上，夹具与被装夹工件之间的装夹成功率 P 为：

$$P = P_{XE} \cdot P_{XUE} \quad (8)$$

3. 夹具定位销初始精度设计与装夹成功率分析

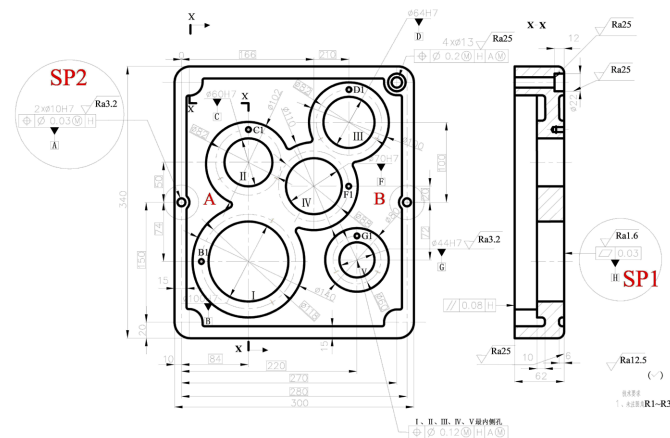


Figure 1. Schematic diagram of bedside box cover parts
图 1. 床头箱盖零件简图

图 1 为床头箱盖的零件简图[21], 需设计专用夹具装夹: 夹具采用“一面两销”定位方式, 需设计夹具体上定位面和定位销的尺寸与公差。零件以图中大平面 H 作为第一定位基准(标注有 SP1 技术规范); 以孔 A (主定位孔)的中心线为第二定位基准、孔 B (副定位孔)的中心线为第三定位基准(标注有 SP2 技术规范), 下面先对夹具定位销进行初始精度设计与装夹成功率分析。

3.1. 定位销初始精度设计

如图 1 所示, 两定位孔尺寸为 $\phi 10H7\left(\begin{smallmatrix} +0.015 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$ mm, 实际设计中[22]主定位(圆)销直径尺寸 d_1 的上限值为定位孔直径尺寸 D_1 的下限值, 考虑优先配合需求, 主定位(圆)销尺寸设计为 $\phi 10h6\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.009 \end{smallmatrix}\right)$ mm。副定位销选用菱形销结构, 菱形销的结构尺寸按照标准选用宽度 b 为 4 mm。常规设计中, 通常会代入两销/孔中心距公差计算副定位销/孔最小间隙, 再对菱形销进行精度设计。案例中两孔中心距为理论正确尺寸, 且以几何公差控制两孔轴线位置, 显然不适用传统设计方法。张新义[2]给出了考虑销/孔几何公差时, 菱形销与定位孔最小配合间隙 c_2 的计算方法:

$$c_2 = \frac{b}{D_2}(2\phi_H + 2\phi_p - c_1) \tag{9}$$

式中: D_2 为副定位孔公称直径尺寸; c_1 为主定位销/孔最小配合间隙; ϕ_p 、 ϕ_H 为定位销、孔几何公差。

主定位销/孔最小配合间隙 c_1 为 0 mm, 两销/孔几何公差均为 0.030 mm, 将各参数代入式(9)可得菱形销与定位孔最小配合间隙 c_2 为 0.048 mm, 菱形销/孔的配合也为 H7/h6, 菱形销尺寸设计为 $\phi 10\left(\begin{smallmatrix} -0.048 \\ -0.057 \end{smallmatrix}\right)$ mm, 如图 2 所示为床头箱盖夹具初始设计简图。

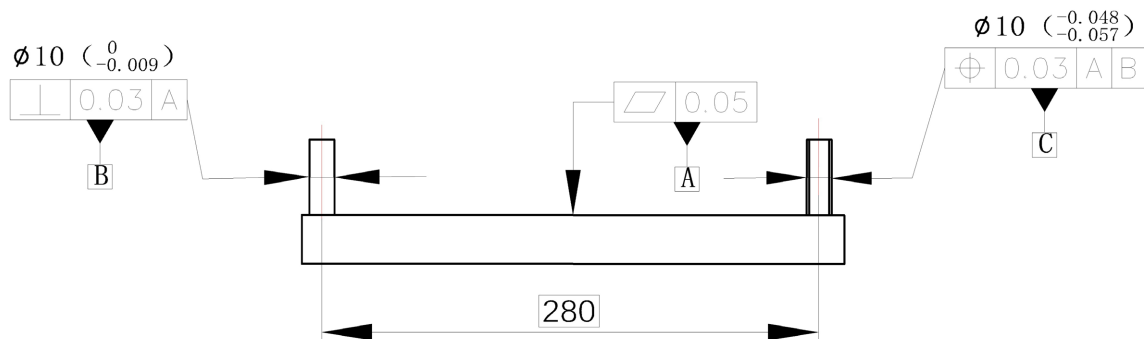


Figure 2. Initial design diagram for fixture positioning of headbox cover
图 2. 床头箱盖夹具定位初始设计简图

3.2. 蒙特卡洛模型模拟与 MATLAB 求解

研究表明, 批量生产时定位销/孔加工尺寸与间隙均符合正态分布规律[23], 蒙特卡罗模型是一种可以按照分布类型随机取样的仿真模型。两定位孔直径分布范围均为 $\phi 10$ mm~ $\phi 10.015$ mm, 圆销为 $\phi 9.991$ mm~ $\phi 10$ mm, 菱形销为 $\phi 9.943$ mm~ $\phi 9.952$ mm。在 MATLAB 中调用 normrnd() 函数生成销/孔尺寸范围内的随机数, 为提高模拟精度, 模拟次数为 5000 次。可将模拟圆孔尺寸的代函数与两销尺寸的代函数相减表征定位销/孔间隙的分布情况。定位销/孔的尺寸分布模拟程序可表示为: $R = \text{normrnd}(10.0075, 0.0025, 50000, 1)$; $A = \text{normrnd}(9.9955, 0.0015, 50000, 1)$; $B = \text{normrnd}(9.9475, 0.0015, 50000, 1)$ 运行程序并整理定位销/孔尺寸与间隙模拟情况如表 1 所示, 图 3 所示为定位销/孔尺寸与间隙分布模拟结果的频率分布直方图及其正态分布拟合曲线。

Table 1. Pin/hole size and gap simulation
表 1. 销/孔尺寸与间隙模拟

项目	平均值	标准偏差	最小值	中间值	最大值
圆孔	10.00755	0.00249	9.99814	10.00756	10.01645
圆柱销	9.99547	0.00148	9.98992	9.99549	10.00058
菱形销	9.94749	0.00155	9.94189	9.94748	9.95278
主定位销/孔间隙	0.01208	0.00290	0.00111	0.01207	0.02486
副定位销/孔间隙	0.06006	0.00291	0.05068	0.06001	0.07005

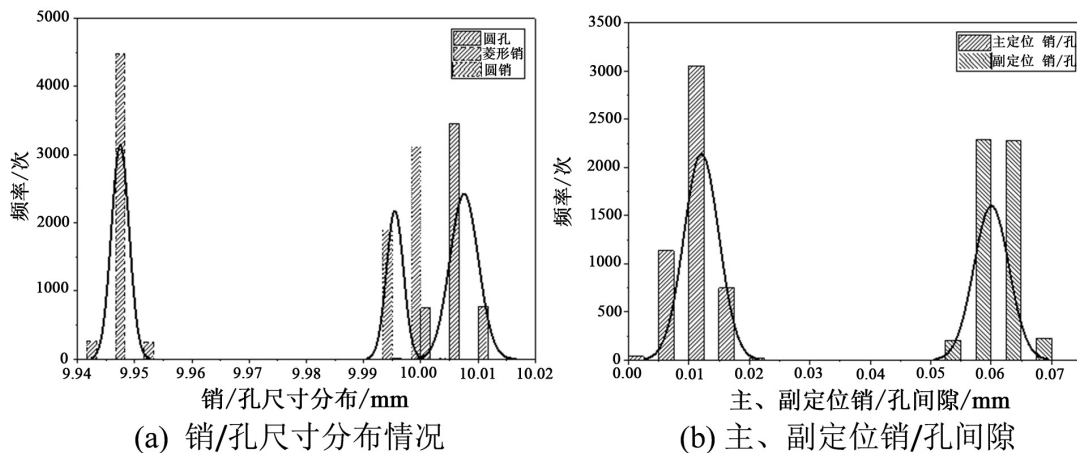


Figure 3. Locating pin/hole size and gap distribution
图 3. 定位销/孔尺寸与间隙分布情况

将表 1 主定位销/孔尺寸模拟数据代入式(1)~(8)中,销/孔间隙数值较小且公式较为复杂,在 MATLAB 中调用 `integral()` 函数求解式(6)~(7)积分结果。解得主定位销/孔装夹成功率为 96.83%,副定位销/孔装夹成功率(运算程序与主定位销/孔装夹成功率运算程序调用函数一致,此处不再赘述)为 98.04%,故床头箱盖夹具初始定位设计方案的装夹成功率 P 为 94.93%。

4. 面向装夹成功率的定位销精度优化设计

4.1. 定位销尺寸优化设计方案

工件批量生产时,若不能顺利安装到机床上,常常直接削减定位销尺寸或钻大工件孔径以确保夹具与被装夹工件之间的装夹成功率,但却会导致工件与夹具之间较大的定位误差,显然是不合理的。主要原因是定位特征的几何误差未得到有效控制。因此,在零件设计及夹具设计时,应采用尺寸公差、几何公差来综合控制尺寸误差和几何误差的综合作用的结果,从而能保证销/孔装配的一次成功率:当孔/槽的最大实体实效边界等于销/轴的最大实体实效边界时,定位销/孔 100%装夹成功。床头箱盖定位孔的最大实体实效尺寸 $D_{MMVB} = D_{MMC} - \text{几何公差}$,即 $\phi 9.97$ mm。当定位销的设计尺寸小于 $\phi 9.97$ mm 时,销/孔 100%装夹成功,为避免销/孔定位误差过大,定位销公称直径设计范围为 $\phi 9.97$ mm~ $\phi 10$ mm,几何公差的取值范围为 0.025 mm~0.030 mm,定位销精度设计的其它参数设计步骤与初始方案一致。夹具定位销精度优化设计方案整理如表 2 所示。

Table 2. Optimization design scheme for positioning pin accuracy
表 2. 定位销精度优化设计方案

组别	几何公差	圆销直径	菱形销直径
A1	0.025	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} -0.044 \\ -0.053 \end{pmatrix}$
A2	0.025	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} -0.044 \\ -0.053 \end{pmatrix}$
A3	0.025	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} -0.044 \\ -0.053 \end{pmatrix}$
A4	0.025	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} -0.044 \\ -0.053 \end{pmatrix}$
B1	0.026	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} -0.045 \\ -0.054 \end{pmatrix}$
B2	0.026	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} -0.045 \\ -0.054 \end{pmatrix}$
B3	0.026	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} -0.045 \\ -0.054 \end{pmatrix}$
B4	0.026	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} -0.045 \\ -0.054 \end{pmatrix}$
C1	0.027	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} -0.046 \\ -0.055 \end{pmatrix}$
C2	0.027	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} -0.046 \\ -0.055 \end{pmatrix}$
C3	0.027	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} -0.046 \\ -0.055 \end{pmatrix}$
C4	0.027	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} -0.046 \\ -0.055 \end{pmatrix}$
D1	0.028	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} -0.046 \\ -0.055 \end{pmatrix}$
D2	0.028	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} -0.046 \\ -0.055 \end{pmatrix}$
D3	0.028	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} -0.046 \\ -0.055 \end{pmatrix}$
D4	0.028	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} -0.046 \\ -0.055 \end{pmatrix}$
E1	0.029	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} -0.047 \\ -0.056 \end{pmatrix}$
E2	0.029	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} -0.047 \\ -0.056 \end{pmatrix}$
E3	0.029	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} -0.047 \\ -0.056 \end{pmatrix}$
E4	0.029	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} -0.047 \\ -0.056 \end{pmatrix}$
F1	0.030	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 10.0 \begin{pmatrix} -0.048 \\ -0.057 \end{pmatrix}$
F2	0.030	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.99 \begin{pmatrix} -0.048 \\ -0.057 \end{pmatrix}$
F3	0.030	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.98 \begin{pmatrix} -0.048 \\ -0.057 \end{pmatrix}$
F4	0.030	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} 0 \\ -0.009 \end{pmatrix}$	$\phi 9.97 \begin{pmatrix} -0.048 \\ -0.057 \end{pmatrix}$

4.2. 蒙特卡洛模型模拟与装夹成功率求解

采用蒙特卡洛模型模拟销/孔尺寸与间隙分布情况，在 MATLAB 中输入模拟次数为 5000 次(具体分析步骤与初始方案(3.1、3.2 节)一致，此处不再赘述)得到主、副定位销/孔间隙分布模拟情况，见表 3 和表 4。

Table 3. Simulation of the clearance distribution of the master positioning pin/hole
表 3. 主定位销/孔间隙分布模拟

组别	均值	标准偏差	最小值	中间值	最大值
A1.....F1	0.01208	0.00290	0.00111	0.01207	0.02486
A2.....F2	0.02206	0.00290	0.01287	0.02204	0.03369
A3.....F3	0.03205	0.00290	0.02127	0.03202	0.04258
A4.....F4	0.04207	0.00292	0.03154	0.04208	0.05201

Table 4. Simulation of clearance distribution of secondary alignment pin/hole
表 4. 副定位销/孔间隙分布模拟

组别	平均值	标准偏差	最小值	中间值	最大值
A1	0.05605	0.00289	0.04545	0.05599	0.06648
A2	0.06605	0.00286	0.05513	0.066	0.07623
A3	0.07605	0.00291	0.06623	0.07602	0.08633
A4	0.08607	0.00293	0.07593	0.08603	0.09667
B1	0.05706	0.00293	0.04670	0.05701	0.06814
B2	0.06704	0.00289	0.05654	0.06699	0.07786
B3	0.07708	0.00292	0.06657	0.07708	0.08803
B4	0.08706	0.00289	0.07754	0.08705	0.09785
C1	0.05805	0.0029	0.04769	0.05805	0.06873
C2	0.06803	0.00291	0.05788	0.06804	0.07921
C3	0.07805	0.0029	0.06816	0.07803	0.08811
C4	0.08807	0.00291	0.07849	0.08808	0.09955
D1	0.05804	0.00289	0.04728	0.05804	0.06774
D2	0.06804	0.00289	0.0576	0.06802	0.07964
D3	0.07802	0.00294	0.06629	0.07796	0.08838
D4	0.08803	0.00291	0.07705	0.08804	0.09957
E1	0.05903	0.00292	0.04876	0.05902	0.07136
E2	0.06906	0.00289	0.05902	0.06909	0.07992
E3	0.07907	0.00289	0.06790	0.07906	0.08921
E4	0.08906	0.00289	0.07900	0.08907	0.09882
F1	0.06006	0.00291	0.05068	0.06001	0.07005
F2	0.07005	0.00293	0.05890	0.07000	0.08183
F3	0.08006	0.00287	0.0697	0.08007	0.09075
F4	0.09008	0.00291	0.07974	0.09006	0.10054

将表 3、4 中的模拟结果代入 MATLAB 计算程序，计算出的各方案装夹成功率如表 5 所示。

Table 5. Success rate of main and auxiliary pins/holes and final assembly

表 5. 主、副销/孔与总装夹成功率

组别	主定位销/孔	副定位销/孔	总装夹成功率
A1	97.39	98.09	95.53
A2	99.03	97.22	96.28
A3	99.03	98.72	97.76
A4	98.98	99.3	98.29
B1	97.29	97.99	95.33
B2	99.03	98.09	97.14
B3	99.03	97.68	96.73
B4	98.98	96.7	95.71
C1	97.19	98.07	95.31
C2	99.03	98.04	97.09
C3	99.03	98.07	97.12
C4	98.98	98.33	97.33
D1	97.08	98.09	95.23
D2	99.03	98.09	97.14
D3	99.03	99.66	98.69
D4	98.98	98.67	97.66
E1	96.96	98.02	95.04
E2	99.03	98.09	97.14
E3	99.03	97.09	96.15
E4	98.98	97.04	96.05
F1	96.83	98.04	94.93
F2	99.03	97.99	97.04
F3	99.03	96.79	95.85
F4	98.98	97.99	96.99

4.3. 方案分析与讨论

分析定位销公称直径对装夹成功率的影响时，保持定位销几何公差不变，即讨论 A、B、C、D、E、F 六组数据的变化趋势；分析几何公差对装夹成功率的影响时，保持定位销公称直径不变，即讨论 A1、B1、C1、D1、E1、F1 (A2、B2、C2……) 四组数据的变化趋势。由表 5 可知：当定位销几何公差不变，公称尺寸减小时，总装夹成功率呈起伏上升趋势；当定位销公称尺寸不变，几何公差减小时，总装夹成功率呈稳定上升趋势；当定位销设计方案为 D3 即定位销几何公差为 0.028 mm、公称直径为 $\phi 9.98$ mm 时，工件在夹具上的装夹成功率最大，为 98.69%，较定位销初始精度设计方案 F1 提升了 3.76%。

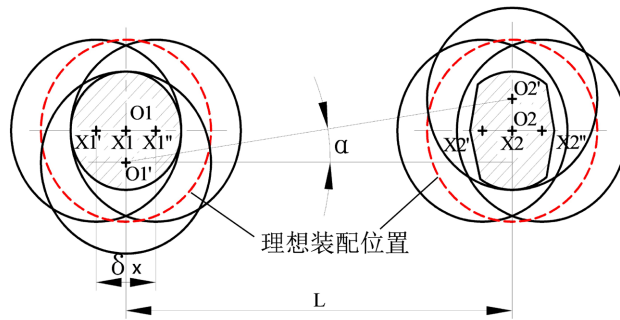


Figure 4. Schematic diagram of workpiece positioning error
图 4. 工件定位误差示意图

对夹具定位销进行精度优化设计时，不仅需要保证夹具与工件之间具有较高的装夹成功率，还须确保工件有较小的定位误差。如图 4 所示，工件以“一面两销”方式装夹到夹具上时，相对理想装夹位置有平移和转动两种位置变化，分析工件定位误差时需从这两个方面进行考虑。何聪惠[24]给出了计算工件定位误差时的常用公式：

- 1) 因平移引起的两定位销连心线 X1~X2 方向的定位误差 δ_x ：

$$\delta_x = \delta_{\text{主孔}} + \delta_{\text{主min}} + \delta_{\text{圆销}} \tag{10}$$

- 2) 因工件转动引起的垂直于两销连线方向的转角误差 $\arctan \alpha$ ：

$$\arctan \alpha = \frac{(\delta_{\text{主孔}} + \delta_{\text{主min}} + \delta_{\text{圆销}}) + (\delta_{\text{副孔}} + \delta_{\text{副min}} + \delta_{\text{菱形销}})}{2L} \tag{11}$$

式中： $\delta_{\text{主孔}}$ 、 $\delta_{\text{副孔}}$ 为工件两定位孔几何公差； $\delta_{\text{圆销}}$ 、 $\delta_{\text{菱形销}}$ 为夹具两定位销几何公差； $\delta_{\text{主min}}$ 、 $\delta_{\text{副min}}$ 为主、副定位销/孔最小间隙； L 为两销/孔中心距。

计算 $\delta_{\text{主min}}$ 、 $\delta_{\text{副min}}$ 时代入表 3、4 间隙模拟值的最小值，由式(10)、(11)可得工件定位误差如表 6 所示。

Table 6. Workpiece positioning error
表 6. 工件定位误差

组别	两销连线方向定位误差	垂直两销连线方向转角误差
A1	0.05611	0.00028
A2	0.06787	0.00032
A3	0.07627	0.00035
A4	0.08654	0.00039
B1	0.05711	0.00029
B2	0.06887	0.00032
B3	0.07727	0.00036
B4	0.08754	0.00039
C1	0.05811	0.00029
C2	0.06987	0.00033
C3	0.07827	0.00036
C4	0.08854	0.00040

Continued

D1	0.05911	0.00029
D2	0.07087	0.00033
D3	0.07927	0.00036
D4	0.08954	0.00040
E1	0.06011	0.00030
E2	0.07187	0.00034
E3	0.08027	0.00037
E4	0.09054	0.00041
F1	0.06111	0.00031
F2	0.07287	0.00034
F3	0.08127	0.00038
F4	0.09154	0.00041

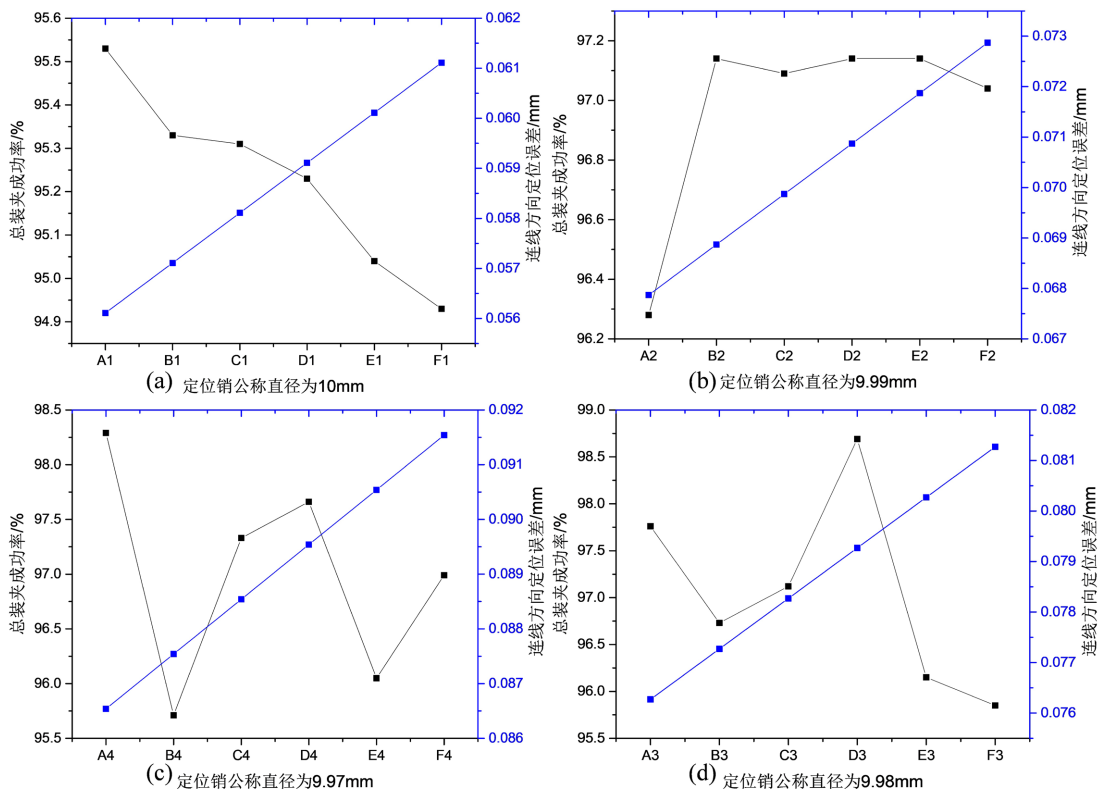


Figure 5. Clamping situation under different geometric tolerances
图 5. 不同几何公差下的装夹情况

如图 5 所示为不同几何公差、相同公称直径情况下的夹具装夹成功率与定位误差的情况，显然销/孔间隙越大，工件 - 夹具定位误差越大，总装夹成功率越低。比较发现 A1、A2 和 F1 方案相对较好，综合权衡装夹成功率和定位精度，选择方案 A2 作为夹具定位销最佳精度设计方案。该方案与 A1 相比两销连线方向定位误差增加了 0.01176 mm，转角误差增加了 0.00004，总装夹成功率提高了 0.75%；与方案 F1 相比总装夹成功率增加 1.35%，两销连线方向定位误差增加 0.00676 mm，转角定位误差增加 0.00001，在

可接受范围内, 与初始方案相比, 较为合理。故床头箱盖夹具改进后公差设计方案为: 圆销尺寸为 $\phi 9.99^{0}_{-0.009}$ mm, 菱形销尺寸为 $\phi 9.99^{0}_{-0.053}$ mm, 两销几何公差均为 0.025 mm, 其图样标注如图 6 所示。

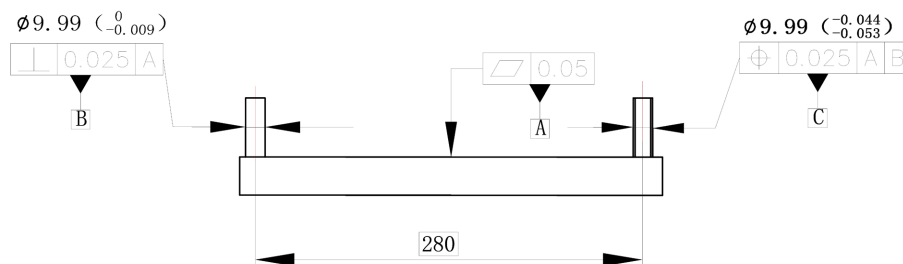


Figure 6. Schematic diagram of improved design for fixture positioning of bedside box cover
图 6. 床头箱盖夹具定位改进设计图

5. 结语

1) 在保证工件加工精度的前提下, 通过对比不同定位销尺寸设计方案中工件与夹具之间的装夹成功率, 选定最佳定位销尺寸与几何公差设计方案, 优化方案较原始方案装夹成功率提升了 1.35%, 给夹具精度设计方法提供了新思路。

2) 模拟定位销/孔实际尺寸时忽略了很多实际加工时的不利因素, 工件模拟尺寸相比较实际加工尺寸误差较小, 实际生产中工件与夹具之间的装夹成功率与文中分析结果相比较小。除此以外, 装夹成功率数学模型只分析了定位销/孔尺寸与几何公差对装夹成功率的影响, 分析结果具有一定的局限性, 后续可从温度、变形、材料等方面入手, 分析其对工件与夹具之间装夹成功率的影响。

基金项目

江苏省(校)研究生实践创新计划项目(XSJCX21_42); 江苏高校“青蓝工程”资助。

参考文献

- [1] 常同立, 佟志忠. 机械制造工艺学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [2] 张新义, 金属学. 机械精度设计的理论概率法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [3] 张俊俊, 王基生. 一面两孔定位精度的概率设计[J]. 西南工学院学报, 1996(3): 46-49.
- [4] 沈为清, 张磊. 一面两销夹具布局的鲁棒性研究[J]. 机械设计与制造, 2021, 366(8): 256-258, 264.
- [5] Calabrese, M., Primo, T. and Del Prete, A. (2017) Optimization of Machining Fixture for Aeronautical Thin-Walled Components. *Procedia CIRP*, **60**, 32-37. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.008>
- [6] Vukelic, D., Tadic, B., Bogdanovic, B. and Todorovic, P. (2019) Using Pre-Processing and Indenting of Contact Interface to Improve Fixture Clamping Efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **104**, 179-194. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03845-5>
- [7] Yacob, F. and Semere, D. (2021) Part Quality Prediction in Multistage Machining Processes with Fixtures Based on Locating Surfaces Using Dual Quaternions. *Procedia CIRP*, **104**, 1825-1830. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.308>
- [8] 徐旭松, 吴德辉. 销/孔定位结构公差设计中的功能边界分析法[J]. 机械设计与制造, 2018(10): 225-228, 232.
- [9] 吴盘龙, 胡东方. 一面两销无间隙定位方法的研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(11): 1747-1752.
- [10] Qi, R., Mao, X., Zhang, K. and Xia, R.B. (2021) Accurate Clamping Method of Multipoint Flexible Fixture for Large Complex Surface. *Mathematical Problems in Engineering*, **2021**, Article ID: 5568801. <https://doi.org/10.1155/2021/5568801>

- [11] Nugraha, A.D., Ahmad, K.I. and Kariem, M.A. (2022) Design of Split-Hopkinson Pressure Bar Specimen Fixture to Accommodate Punch and Double-Notch Shear Testing. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, **54**, 1-18. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.4.8>
- [12] Xie, W., Deng, Z., Ding, B. and Kuang, H. (2015) Fixture Layout Optimization in Multi-Station Assembly Processes Using Augmented Ant Colony Algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, **37**, 277-289. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.08.005>
- [13] Vinosh, M., Raj, T.N. and Prasath, M. (2021) Optimization of Sheet Metal Resistance Spot Welding Process Fixture Design. *Materials Today: Proceedings*, **45**, 1696-1700. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.567>
- [14] Park, J.W., Park, J., Kim, H., Kim, N. and Kim, D.Y. (2021) Assembly Part Positioning on Transformable Pin Array Fixture by Active Pin Maximization and Joining Point Alignment. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **19**, 1047-1057. <https://doi.org/10.1109/TASE.2021.3050403>
- [15] 李双成, 陈兴媚. 尺寸链法解算零件定位误差研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(2): 84-91.
- [16] 宁龙, 吴玉光. 基于 ADAMS 的夹具定位误差分析方法[J]. 制造业自动化, 2012, 34(1): 86-89, 93.
- [17] 刘亚雄, 梁庆华, 罗磊. 基于蒙特卡洛模拟的夹具定位误差分析与预测[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(3): 104-109, 113.
- [18] 齐振超, 张开富, 李原, 等. 大型壁板自动钻铆定位误差分析与优化[J]. 航空学报, 2015, 36(10): 3439-3449.
- [19] 郑伟, 孙见君, 马晨波, 等. 汽车轮毂柔性加工夹具的定位误差分析[J]. 机械设计, 2021, 38(3): 46-52.
- [20] 韩变枝, 王栋. 叉架零件加工夹具定位误差 CAE 分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(4): 50-53.
- [21] 王帆, 曾昭僊. 中外机械图样简化应用图册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [22] 闵小琪, 陶松桥. 机械制造工艺[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [23] 亓四华. 制造质量零废品控制理论与技术的研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2001.
- [24] 何聪惠. 关于“一面两销”定位与误差计算的探讨[J]. 福建农学院学报, 1982(1): 51-62.