

# 基于线激光多目立体视觉的船舶曲板成形 在位检测与自动调形系统开发

赵顺顺<sup>1</sup>, 郭志飞<sup>2</sup>, 李品<sup>1</sup>, 王霄<sup>1</sup>, 刘会霞<sup>1</sup>, 朱元超<sup>1</sup>

<sup>1</sup>江苏大学; <sup>2</sup>河北机电职业技术学院

**摘要:** 为实现数控三维弯板机渐进成形船舶曲板的快速、精确在位检测与自动调形, 研制了适用于数控三维弯板机加工现场的基于线激光多目立体视觉技术的在位检测与自动调形系统。设计了检测系统方案与结构参数, 研究了系统标定、线激光三维重建、点云配准、船板成形偏差与板材回弹量计算等关键技术, 开发了基于 Windows 平台的在位检测与自动调形软件系统。结果表明, 该系统测量误差小于  $\pm 1\text{mm}$ , 单次测量时间小于 30s, 视场大于弯板机加工区域  $2750\text{mm} \times 2750\text{mm}$ , 满足数控三维弯板机加工过程中船板在位检测与自动调形需求。

**关键词:** 三维弯板机; 船舶曲板; 在位检测; 多目; 立体视觉

**中图分类号:** TG806; TH161.21

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2020.06.018

## Development of Onsite Detection and Automatic Shape Adjustment System for Formed Hull Plates Based on Line Laser Multi-camer Stereovision

Zhao Shunshun, Guo Zhifei, Li Pin, Wang Xiao, Liu Huixia, Zhu Yuanchao

**Abstract:** In order to realize the fast and accurate onsite detection and automatic shape adjustment of hull plate formed by 3D ship hull plate bending machine, an onsite detection and automatic shape adjustment system based on line laser multi-camer stereovision technology is developed, which is suitable for 3D ship hull plate bending machine. The detection system scheme and structural parameters is designed. System calibration, line laser 3D reconstruction, point cloud registration, ship plate forming deviation and plate springback calculation, and other key technologies are researched. The system test results show that the measurement error of the system is less than  $\pm 1\text{mm}$ , the single measurement time is less than 30s, and the field of view is larger than the machining area of the bending machine  $2750\text{mm} \times 2750\text{mm}$ . It satisfies the requirements of onsite detection and automatic shape adjustment of ship plate in the machining process.

**Keywords:** 3D ship hull plate bending machine; hull plate; onsite detection; multi-camer; stereovision

## 1 引言

数控三维弯板机是加工船舶曲板的自动化加工设备, 加工速度快、精度高, 解决了板材边缘起皱、压痕等问题, 在船厂得到广泛应用<sup>[1]</sup>。对于较复杂的船板, 弯板机需经过多次“下模调型 - 上模加压 - 成形测量”步骤才能保证板材成形精度。弯板机以理论曲面为目标进行首次调形, 后续调形则以理论曲面为基础再加入板材回弹量进行补偿。因此在数控三维弯板机加工过程中, 船板成形精度检测与板材回弹量计算尤为重要。

目前, 国内大部分船厂主要依靠经验丰富的工人使用样板样箱检测成形曲板, 并依靠经验手动进行后续调形, 存在检测精度差、生产效率低以及对工人经验要求高等缺点, 影响船舶建造的质量和速度。因此, 亟需一种检测精度高、检测速度快且自动化程

度高的检测方法来代替传统样板样箱检测法, 并在此基础上实现弯板机自动调形功能。

三维视觉测量技术具有非接触、效率高等优点, 广泛应用于工业测量领域<sup>[2]</sup>, 但由于船舶曲板尺寸大、曲率小、批量小以及加工现场环境复杂等原因, 需要针对船舶曲板成形在位测量现场进行进一步研究。国内外高校和研究所对船舶曲板检测技术做了大量研究, 韩国庆南大学 Heo E. C. 等<sup>[3]</sup>利用多条结构光对船舶曲板进行测量, 理论上该方法测量效率较高, 但测量范围小, 只能测量小尺寸船舶曲板; 意大利比萨大学 Alessandro Paoli<sup>[4]</sup>采用在机械臂末端安装基于面结构光的主动双目立体视觉传感器的多视角检测系统, 该系统与全站仪集成后可完成对整个船体表面的测量, 但成本昂贵, 对位移机构精度要求高; 上海船舶工艺研究所甄希金等<sup>[5]</sup>采用基于线激光的主动双目立体视觉技术开发了船板测量系统, 其线激光器在电机的带动下可在一定角度内摆动, 但该系统测量范围较小, 难以适应尺寸较大的船

板;上海交通大学王振兴等<sup>[6,7]</sup>通过向被测船舶曲板表面投射圆斑作为测量特征,采用基于圆斑点阵的面阵结构光双目立体视觉技术对船舶曲板进行测量,该系统测量速度快,但测量范围较小,且由于船厂现场环境复杂,精确检测船板表面上的投影圆斑困难,使系统稳定性不高。

本文以数控三维弯板机加工现场为背景,研制了基于线激光多目立体视觉技术的船舶曲板检测系统。采用4个相机从不同视角对船板表面进行拍摄,有效地解决了传统双目视觉测量范围小的问题。以线激光作为主动光源,消除了加工现场环境光照的影响。通过对系统标定、线激光三维重建、点云配准、船板成形偏差计算与板材回弹量计算等技术的研究,开发了基于线激光多目立体视觉技术的船舶曲板检测系统,并应用于实际加工现场,实现了三维数控弯板机板材加工过程中快速、精确的在位检测以及自动调形等功能。

## 2 检测系统方案

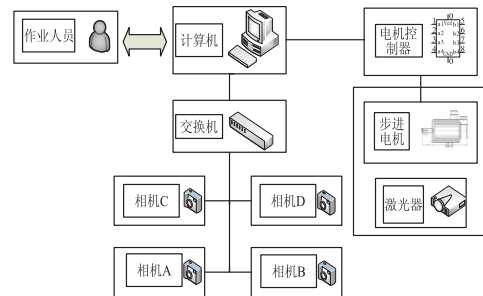
### 2.1 硬件组成及检测原理

船板检测系统由上位机、交换机、电机控制器、步进电机、激光器和4个工业相机等组成,其中波长650nm的线激光器作为主动光源,计算机通过电机控制器控制步进电机带动激光器沿导轨横向运动,使激光覆盖整个三位弯板机加工区域。将4个工业相机安装在固定的支架上,相机按照图示位置分别编号为A、B、C、D,其中A、B两个相机为一组双目立体视觉系统,C、D两个相机为一组双目立体视觉系统。系统方案设计如图1所示,图1a为总体框架图,图1b为整体方案示意图。

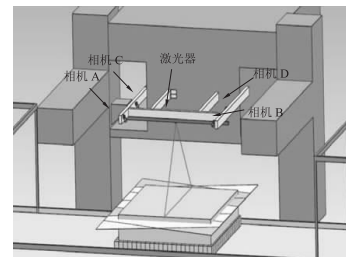
检测时,激光器初始位置位于导轨的最左端或最右端,并投射射线激光至被测船板表面形成光刀,激光器在步进电机的带动下沿导轨横向运动,实现光刀对待测船板的扫描。扫描过程中,4个相机每隔一段时间拍摄一组光刀图像,通过千兆网存储于计算机内存中,经光条预处理算法获得单像素激光光条,再通过立体校正、立体匹配与三维重构算法获得两组船板的三维点云数据,利用标定参数对两组点云进行拼接。

结合系统标定参数,将相机坐标系的三维点云数据转换到数控三维弯板机坐标系,统一测量点云与理论点云的坐标系,为点云配准算法(ICP)提供初始解。通过点云配准、点云偏差与板材回弹量计算算法得到测量点云的偏差色斑图和板材回弹量。

根据测量点云偏差色斑图判断成形是否达到要求,若达到,则加工下一块船板,否则检测系统根据得到的板材回弹量自动生成弯板机加工调形文件进行下一轮压制。系统测量原理流程见图2。



(a) 总体框架



(b) 整体方案

图1 系统方案设计

### 2.2 结构参数设计

系统设计指标:测量系统视场范围应大于弯板机加工区域 $2750\text{mm} \times 2750\text{mm}$ ,相机到弯板机作业平台距离平均为 $2100\text{mm}$ ,系统测量误差小于 $\pm 1\text{mm}$ 。根据数控三维弯板机现场工作空间,双目系统基线距离为 $2000 \sim 3000\text{mm}$ ,两组双目系统之间的距离为 $1000 \sim 1500\text{mm}$ 。

测量系统由2组结构参数完全相同的双目立体视觉系统组合而成,因此只需考虑其中一组双目相机结构参数。文献[8]对双目立体视觉测量系统基线距与测量精度的关系进行了理论研究,其中:当基线距 $B$ 与被测物体距离 $D$ 之比 $k < 0.5$ 时,测量误差变化较大,应进一步优化结构设计。当 $k$ 为 $0.8 \sim 2.2$ 时,测量误差变化较小,系统参数较为合理。考虑到数控三维弯板机的工作空间,根据以上规则,将基线距 $T$ 设为 $2688\text{mm}$ ,此时 $k = 1.28$ 。相机摆放的内倾角度 $\alpha$ 为

$$\alpha = \arctan(2D/T) \quad (1)$$

式中, $D$ 为被测物体距离; $T$ 为基线距。

通过计算可得相机光轴与基线间的夹角 $\alpha = 57.4^\circ$ 。根据数控三维弯板机现场加工空间设定两组双目相机间的距离为 $1200\text{mm}$ 。设计后的结构参数为:两组双目子系统基线距 $2688\text{mm}$ ,相机光轴与基线的夹角 $57.4^\circ$ ,两组双目子系统之间的距离 $1200\text{mm}$ 。

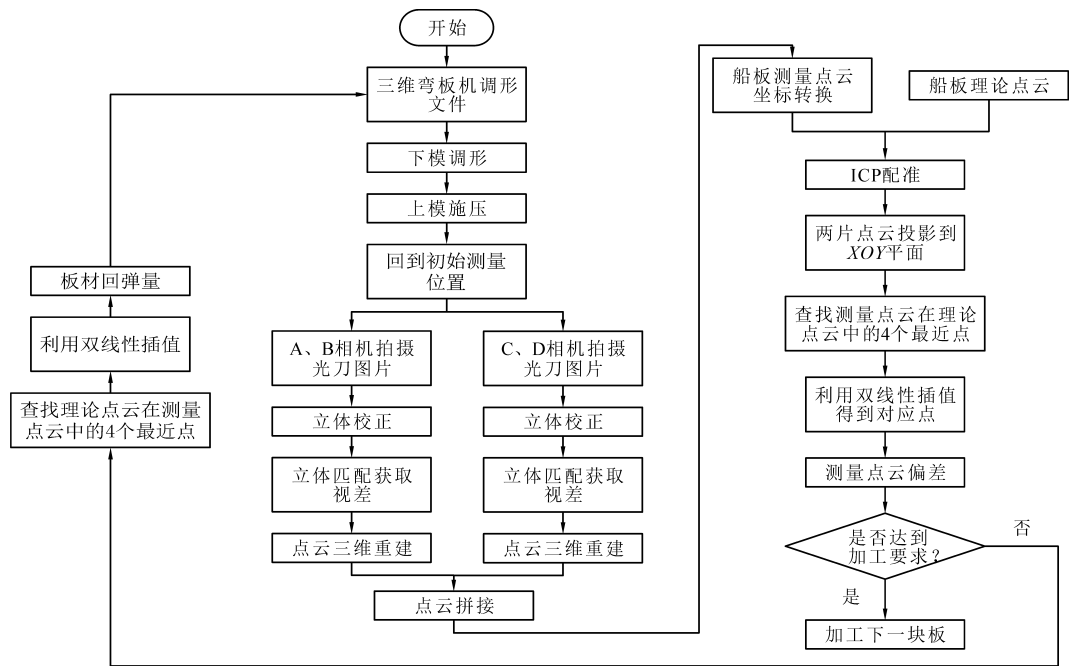


图2 系统测量原理

### 3 检测系统标定与坐标系转换

#### 3.1 系统标定

传统双目立体视觉系统的标定包括相机内参标定和外参标定<sup>[9]</sup>,线激光三维重建算法利用得到的标定参数将二维光刀图像转换为三维点云数据。多目立体视觉测量系统将测量空间划分为两个局部空间,即相机 A、B 和相机 C、D 分别为独立的双目立体视觉子系统,每个双目子系统的测量结果在各自局部相机坐标系表达,因此需标定两个双目子系统的位姿关系。

采用基于二维圆斑靶标的张正友标定法<sup>[10]</sup>对测量系统进行标定。假设靶标平面位于世界坐标系  $Z=0$  的平面上,通过线性模型求出相机参数的优化解,再根据最大似然法对相机参数进行非线性优化,得到相机带有畸变系数的内、外部参数。

#### 3.2 测量点云坐标系转换

通过数控三维弯板机理论数据接口得到理论船板点云数据,理论点云坐标系原点即为数控三位弯板机左下角(压头高度为 0 时)的压头中心点。由于理论点云与测量点云未在同一坐标系,两点云间位姿差异较大,因此需要将理论点云与测量点云坐标系进行统一,即求取测量点云坐标系与理论点云坐标系之间的刚体位姿变换关系,为后续点云配准算法提供较好初始条件。

采用三点标定法<sup>[11]</sup>进行标定,通过确定空间内

任意不共线的三点分别在测量点云坐标系和理论点云坐标系的坐标,求出两坐标系间的位姿转换关系。

### 4 检测系统算法

#### 4.1 线激光三维重建

采用线激光作为主动光源,利用双目立体视觉视差原理对船板表面进行三维重建。由于激光光刀存在一定厚度,测量系统的 4 个相机在同一时刻从不同视角采集得到光刀图像后,需对光刀图像做细化处理。采用极值法结合灰度重心法提取光刀中心线,利用灰度极值点附近所有点的光强信息,鲁棒性好<sup>[12]</sup>。得到单像素激光光条后,利用系统标定结果对图像进行立体校正,根据视差原理即可求出光刀的三维坐标信息。具体步骤如下:

①光条预处理。采用阈值分割算法提取光刀条纹,在图像宽度方向找到灰度值最大的坐标点  $Y_{\max}$ ,以该点为中心,对该点周围的  $2k+1$  个图像点加权求取灰度重心位置,得到的位置点即为光刀中心,有

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=Y_{\max}-k}^{Y_{\max}+k} i g_i}{\sum_{i=Y_{\max}-k}^{Y_{\max}+k} g_i} \quad (2)$$

式中,  $g_i$  为灰度值;  $\bar{y}$  为光条中心位置;  $k=5$ 。

②立体校正。Bouguet 算法是常用的立体校正方法<sup>[13]</sup>,利用相机的内、外参数以及畸变系统对图像进行立体校正,在矫正图像畸变的同时使双目系统左右两幅图像校正成共面且行对齐的方向,便于后续的立体匹配与三维重建。

③立体匹配与三维重构。激光光刀的立体匹配,即寻找同一激光光刀在不同视角下图像中像素点之间的对应关系。经上述两步骤处理后,左图像中激光光刀线上任意一点的匹配点即为右图像中同一行的光刀中心点,找到匹配点后,通过视差原理即可求出该点的空间坐标。

④结合系统标定结果。将两双目子系统得到的点云转换到同一坐标系,整合得到船板三维测量点云数据。

#### 4.2 点云配准算法

点云配准是以理论点云和测量点云作空间上的最优优化贴合为目的,进而求出测量点云的偏差值与成型板材的回弹量。采用经典的迭代最近点(ICP)算法<sup>[14]</sup>对两片点云进行精配准,该算法基于最小二乘法原理通过迭代配准两片点云,每次迭代过程中该算法以最近点作为匹配点,计算一组刚体变换位姿变换参数(平移向量与旋转矩阵),使下式获得最小值

$$f(R, t) = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_q} w_{i,j} \|p_i - (R_{q_j} + t)\|^2 \quad (3)$$

式中, $N_q$ 和 $N_p$ 分别表示点云 $Q$ 和 $P$ 的总点数; $w_{i,j}$ 表示对应匹配点对的权重系数。确定对应匹配点后即可求出两点云之间的刚体变换参数。

#### 4.3 船板成形偏差与板材回弹量计算

曲板成形过程中,数控三维弯板机通过上下模具的压头采用对压方式使得船舶曲板表面上的点不断接近理论曲面上的点,因此可通过计算测量点云与理论点云在 $Z$ 轴方向上的深度差来评价测量点云与理论模型的偏差和船板回弹量,该评价标准简化了点云之间偏差计算的过程。

由于船板测量点云与理论点云在空间采样间隔和采样位置并不一致,致使两片点云之间沿 $Z$ 轴方向并非一一对应。为解决该问题,采用基于 $XOY$ 平面投影插值的方法<sup>[6]</sup>求出两片点云之间的对应点对,该方法实际上属于点到面法则,与传统点到面法则相比,该方法不需要求解投影切平面的代数方程和法向量,计算过程简洁。

基于 $XOY$ 平面投影插值法计算测量点与理论点云中对应点的过程可分为以下三步:将配准后的两片点云分别投影到 $XOY$ 平面;在 $XOY$ 平面上寻找测量投影点周围4个紧邻的理论投影点;找出上述4个理论投影点所对应的三维理论点,通过双线性插值得到与上述测量点具有相同投影的三维理论点,该点即为测量点在理论点云中的对应点。找到测量点及其对应的理论点后,便可直接通过两点的

$Z$ 坐标值计算得到两点之间的深度差。

通过以上过程可求出测量点云中每个点到理论点云对应点的深度差,该值即为测量点云与理论数据的偏差值。反之,当给定理论点云中的一个点时也可求得测量点云 $Z$ 轴方向上的对应点,通过对比两点之间 $Z$ 轴的深度差,便可得到板材回弹量。将计算得到的板材回弹量作为补偿生成新的弯板机加工调形文件,实现弯板机自动调形功能。

### 5 测量精度测定与现场应用验证

检测软件在 Windows 平台下基于 C++、C# 开发语言,使用 DevExpress 控件实现软件界面设计与开发,并利用 OpenCV、Halcon 等视觉开发库、Point Cloud Library 点云处理库等实现软件功能。

#### 5.1 测量精度测定

为验证检测系统的测量精度,测量系统对图 3 所示的标准块进行测量,由图 3a 可知,该标准块上表面理论高度差为 50mm。利用测量系统得到如图 3d 所示的标准块上表面的点云,将点云导入到 CATIA 三维设计软件中,将得到的点云拟合成两条直线,测量两条直线间的间距。得到数据见表 1。将表中实际高度差与测量高度差进行对比,误差均小于  $\pm 1$ mm。

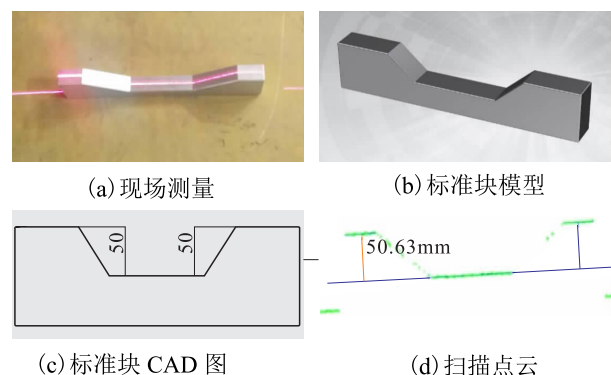


图 3 标准块精度测定

表 1 实际距离与测量结果对比 (mm)

实验序号	实际距离	测量距离	误差
1	50	50.63	+0.63
2	50	49.86	-0.14
3	50	49.20	-0.80
4	50	49.34	-0.64
5	50	50.79	+0.79
6	50	49.76	-0.24

#### 5.2 现场应用验证

开发的船舶曲板成形在位检测系统已成功应用于我国某船厂数控三维弯板机加工车间。图 4a 为测量系统应用现场,对图 4b 所示的船舶曲板进行了

现场应用验证,该船板较长,数控三维弯板机需要分6次对其加工,此处只取其中一次测量进行说明。

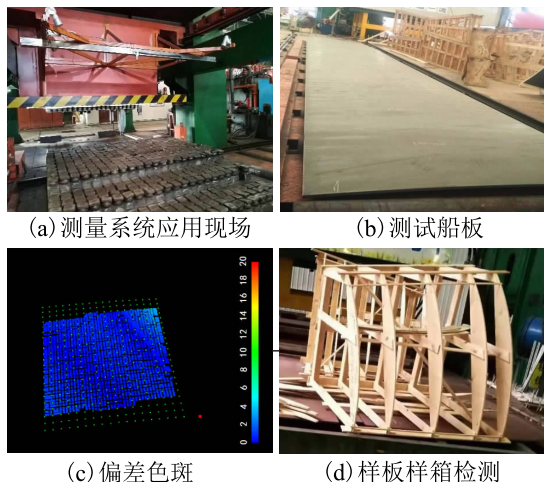


图4 现场应用验证

检测系统扫描船板得到该船板的测量点云,将理论点云与测量点云进行配准,计算船板成型偏差,得到如图4c所示的偏差色斑图。由色斑图可以看出,该船板除左上角偏差约为6mm之外,其余大部分区域的偏差均在2mm以下。用如图4d所示的样板样箱对该曲板进行手工对样检测,得到的偏差值与检测系统偏差色斑图结果一致。根据文献[1]可知,板材允许的偏差极限值为5mm,因此需再次调型加工。根据计算得到的板材回弹量自动生成新的调型文件,并导入数控三维弯板机即可对板材进行再次加工。经验证,从相机开始拍摄到输出偏差色斑图共计约25s,检测系统视场大于弯板机工作区域(2750mm×2750mm)。

## 6 结语

对数控三维弯板机加工现场需求,开发了基于线激光多目立体视觉技术的在位检测系统。结果表明,该系统测量误差小于±1mm,单次测量时间约25s,视场大于2750mm×2750mm,满足现场检测需求,实现了对船舶曲板快速、精确的检测与自动调型功能。与传统基于样板样箱手工对样检测法相比具有检测效率高、误差小、操作简便、受人为因素影响小等优点。

## 参考文献

[1] 张亚运. 船舶三维数控弯板机的曲面配准方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2016.

- [2] 袁萍,王呈方,胡勇,等. 大型船舶三维数控弯板机的研制[J]. 中国造船,2014,55(2):122-131.
- [3] Heo E C, Kwon M C, Kim B C. Large free form measurement using slit beam[C]. International Conference on Control, Automation and Systems, 2008:1224-1227.
- [4] Alessandro Paoli, Armando V Razonale. Large yacht hull measurement by integrating optical scanning with mechanical tracking-based methodologies[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2012, 28(5):592-601.
- [5] 甄希金,赵晶,刘祯祺,等. 船体曲板成型在线检测技术与系统应用介绍[J]. 造船技术,2013(4):53-56.
- [6] 王振兴. 船舶曲板成形双目立体视觉在位检测技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [7] Zhenxing Wang, Zhuoqi Wu, Xijin Zhen, et al. An onsite inspection sensor for the formation of hull plates based on active binocular stereovision[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(2):279-292.
- [8] 刘琼,秦现生,应申舜,等. 双目视觉测量系统结构参数设计及精度分析[J]. 中国机械工程, 2008(22):2728-2732.
- [9] 汪首坤,赵金枝,姜明,等. 基于圆形阵列标定板的张氏相机标定法[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(8):859-863.
- [10] 张天. 基于多目视觉的管路数字化测量方法研究[D]. 北京:北京理工大学,2014.
- [11] 王唯,唐志华. 靶道空间三点法标定与误差分析[J]. 兵工学报, 2016, 37(2):317-324.
- [12] 吴江. 结构光三维扫描测量技术的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
- [13] 王浩,张凤生,刘延杰. 接触线双目视觉测量系统标定及立体校正方法研究[J]. 制造业自动化, 2019, 41(3):97-101.
- [14] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(3):239-256.
- 第一作者:赵顺顺,硕士研究生,江苏大学机械工程学院,212013 江苏省镇江市
- First Author: Zhao Shunshun, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China
- 通信作者:郭志飞,讲师,河北机电职业技术学院机械工程系,054002 河北省邢台市
- Corresponding Author: Guo Zhifei, Lecturer, School of Mechanical Engineering, Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai, Hebei 054002, China