

学号：14071900462

湖南理工学院  
毕 业 设 计

题目：发动机曲轴数控加工仿真研究

作 者：方聪聪 届别：2011 届  
系 别：机械工程学院 专业：机械设计制造及其自动化  
指导教师：谭 华 职称：讲 师  
完成时间：2011 年 5 月 11 日

2011 年 5 月 11 日

## 摘 要

发动机曲轴是发动机中最重要的部件之一，它承受复杂、交变的冲击载荷，是发动机设计的重点和难点。正因为曲轴在发动机动力输出中的重要性及受力的复杂性，曲轴的加工质量的好坏直接影响整个发动机的寿命及性能的好坏。

随着科学技术的进步，数控加工技术得到了更广泛的应用。数控车床、数控内铣床、数控车拉床等先进设备对主轴颈、连杆轴颈进行数控车削、内铣削、车-拉削加工，以有效减少曲轴加工的变形量。曲轴精加工将广泛采用 CNC 控制的曲轴磨床对其轴颈进行精磨加工。此种磨床将配备砂轮自动平衡装置、中心架自动跟踪装置、自动测量、自动补偿装置、砂轮自动修整、恒线速度等功能要求，以保证磨削质量的稳定。

本文以 Pro / E 中的 NC 模块与 VERICUT 软件为基础，结合其各自特点，通过对某发动机曲轴的数控模拟加工的研究，提出一种零件建模、仿真加工的快捷方法，可大大加快建模编程速度、仿真验证加工工艺，提高生产效率。

**关键词：**发动机曲轴；VERICUT；Pro/E；数控加工；仿真

## ABSTRACT

The crankshaft is one of the most important parts of engine, because it bear the complex, the impact of alternating load, thus the engine design is important and difficult. Because of the crankshaft in the engine power output in the importance and complexity of the force, the crankshaft machining quality directly affects the entire life of the engine and performance is good or bad.

With the development of science and technology, NC technology is more widely used. CNC lathes, the milling machine, CNC lathe spindle broaching machine and other advanced equipment to the neck, connecting rod journal for CNC turning, milling inside the car - pull-cut processing, in order to effectively reduce the deformation of the crankshaft machining. Finishing will be widely used crankshaft crankshaft grinder CNC control for fine grinding of its journal. Such grinding machines will be equipped with automatic grinding wheel balancing equipment, the center rack automatic tracking devices, automatic measurement, automatic compensation device, automatic wheel dressing, constant speed and other functions required to ensure the stability of the grinding quality.

In this paper, Pro / E in NC modules and VERICUT software, combined with their respective characteristics, the engine crankshaft through a process of NC simulation presents a part modeling, simulation processing, quick way to greatly speed up the modeling programming speed, simulation process, improve production efficiency.

**Keywords:** NC;Pro / NC; VERICUT; machine; Simulation

## 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	II
1. 绪论 .....	1
1.1 课题的提出依据和意义 .....	1
1.2 课题选题的目的 .....	1
1.3 曲轴的加工工艺发展 .....	2
2. 软件的介绍 .....	4
2.1 Pro/ENGINEER 及 Pro/NC 模块简介 .....	4
2.2 VERICUT 简介 .....	5
3. 基于 PRO/E 的发动机曲轴的建模 .....	6
3.1 发动机曲轴的选择 .....	6
3.2 发动机曲轴 PRO/E 三维建模 .....	6
4. 曲轴的加工工艺分析 .....	9
4.1 曲轴的毛坯及其热处理 .....	9
4.2 曲轴毛坯的制造方法 .....	9
4.3 曲轴毛坯的热处理 .....	10
4.4 曲轴的技术要求 .....	10
4.4.1 尺寸精度和形状精度的要求 .....	10
4.4.2 位置精度要求 .....	11
4.4.3 表面粗糙度要求 .....	12
4.4.4 其他方面的要求 .....	12
4.5 曲轴数控加工工艺制定 .....	12
4.5.1 加工工艺规程 .....	12
4.5.2 机车曲轴加工工艺规程的制定 .....	13
5. 基于 Pro/NC 及 VERICUT 的曲轴数控加工仿真 .....	15
5.1 计算机辅助数控编程的步骤 .....	15
5.2 Pro/NC 模块的加工流程 .....	16
5.3 曲轴的数控加工仿真过程 .....	18
5.4 Vericut 的刀位轨迹仿真 .....	24

6. 结论与展望 .....	26
6.1 结论 .....	26
6.2 展望 .....	26
参考文献 .....	27
致 谢 .....	29
附录 英文原文及翻译 .....	30

## 1. 绪论

### 1.1 课题的提出依据和意义

在科技日新月异的今天，机械化与自动化进入了人们生产生活的各方各面，而各种机械设备都是以发动机提供源动力。特别是在近几年，汽车行业的发展给人们的出行带来了极大的便利，而这其中，发动机起着举足轻重的作用。

曲轴是发动机的核心部件之一。作为发动机的源动力输出部件，它承受着复杂的交变载荷，如工作过程中受到周期性不断变化的气体力、往复运动质量惯性力、旋转与离心惯性力。不断承受着扭转和横向、纵向振动，承受拉、压、弯曲应力。因此曲轴必须具有足够的强度、刚性、韧性和耐磨性和高的加工精度。其加工精度将直接影响曲轴乃至发动机的寿命。

目前国内曲轴生产线多数由普通机床和专用机床组成，生产效率和自动化程度相对较低。粗加工设备多采用多刀车床车削曲轴主轴颈及拐颈，工序的质量稳定性差，容易产生较大的内应力，难以达到合理的加工余量。一般精加工采用 MQ8260 等曲轴磨床粗磨-半精磨-精磨-抛光，通常靠手工操作，加工质量不稳定。

数控加工设备的引入使得曲轴加工精度及效率大幅度提升，而传统的制造加工过程，一般都是通过在数控机床上对 NC 代码进行空运行或是采用较软、较便宜的材料进行样件试切操作，以检验数控代码的正确性与合理性。这将会占用大量的机床实际加工时间，降低机床的效率。采用先进的仿真技术可以利用计算机图像模拟加工过程，并观察刀具运动及刀具对加工部位工件材料的切除过程。这样可以从本质上提高检验的效率，节省劳动力，节约生产资源。

### 1.2 课题选题的目的

本文预计达到以下目的：

1. 对发动机曲轴进行结构及加工工艺分析，并建立PRO/E三维模型。
2. 使用 Pro/E NC 模块和 VERICUT 软件完成整个加工过程及加工过程的仿真，生成数控程序代码，分析仿真结果。
3. 认识使用软件建模及仿真加工，对产品制造产生的优势。

### 1.3 曲轴的加工工艺发展

20世纪70年代以前,发动机曲轴粗加工采用的加工方式是多刀车床车削曲轴主轴颈和连杆轴颈。采用这种方式加工精度较低、柔性很差、工序质量稳定性低,且容易产生较大的内部应力,难以达到合理的加工余量。在粗加工后一般需要进行去应力回火处理,释放应力。因此粗加工需要给后续精加工工序留较大的加工余量,以去除弯曲变形量。曲轴精加工采用的是普通磨削工艺,一般采用MQ8260曲轴磨床粗磨-半精磨-精磨-抛光。通常靠手工操作,加工质量不稳定,废品率较高。

20世纪70年代到80年代左右,曲轴粗加工采用CNC车削、CNC外铣加工,加工状况有所改善。精加工仍以普通磨床磨削工艺为主。

20世纪80年中期又出现了CNC内铣工艺,CNC内铣加工性能指标要高于CNC外铣加工,尤其是对于锻钢曲轴,内铣更有利于断屑。精加工工艺多采用半自动曲轴磨床,头架和尾座同步传动,加工精度有一定的提高。

1985年到1990年左右开发出了曲轴车拉、车一车拉工艺,该工艺具有精度高、效率高等优点,特别适合于平衡块侧面不需要加工且轴颈有沉割槽(包括轴向沉割槽)的曲轴,加工后曲轴可直接进行精磨,省去粗磨工序。曲轴精加工已少量采用数控磨床磨削工艺,尺寸的一致性得到改善。

20世纪90年代中期又开发出CNC高速外铣,它对平衡块侧面需要加工的曲轴,比CNC车削、CNC内铣、车一车拉的生产效率还要高。另外,CNC车一车拉工艺加工连杆轴颈要二道工序,CNC高速外铣只要一道工序就能完成,具有以下优点:切削速度高(可高达350m/min)、切削时间较短、工序循环时间较短、切削力较小、工件温升较低、刀具寿命高、换刀次数少、加工精度更高、柔性更好。所以CNC高速外铣将是曲轴主轴颈和连杆轴颈粗加工的发展方向。精加工使用数控磨床,采用静压主轴、静压导轨、静压进给丝杠(砂轮头架)和线性光栅闭环控制等控制装置,使各尺寸公差及形位公差得到可靠的保证,精加工还广泛使用数控砂带抛光机进行超精加工,经超精加工后的曲轴轴颈表面粗糙度至少提高一级精度。

20世纪90年代开发的CBN高速磨削。英国LANDIS公司生产的曲轴磨床,磨削速度高达120m/s,用扒皮法一次装夹从毛坯到精磨完毕,耗时仅几分钟的时间。这将会出现以磨代替其它粗加工工艺的新局面。

进入21世纪以后,复合加工工艺已进入曲轴制造业中。复合机床应具有工序集成功

能，多种加工集成功能。奥地利WFL公司生产的卧式车铣复合加工中心能在曲轴硬化前“一次装夹，全部加工”，加工后的曲轴可直接转入精加工工序；曲轴精加工方面，也出现了工序集成的CBN数控磨床，即一次装夹磨削全部曲轴主轴颈和连杆轴颈（摆动跟踪磨削）。

由以上演变可以看出，曲轴的加工工艺正向着高速、高效、复合化方向发展。目前较为流行的粗加工工艺是主轴颈采用车—车拉工艺和高速外铣，连杆颈采用高速随动外铣，全部采用干式切削；精加工采用数控磨床加工，具有自动进给、自动修正砂轮、尺寸和圆度自动补偿、自动分度和两端电子同步驱动等功能。主轴颈和连杆颈可一次装夹全部磨削完毕；超精加工采用数控砂带抛光机，带尺寸控制装置。

## 2. 软件的介绍

### 2.1 Pro/ENGINEER 及 Pro/NC 模块简介

Pro/Engineer 操作软件是美国参数技术公司(PTC)旗下的 CAD/CAM/CAE 一体化的三维软件。Pro/Engineer 软件以参数化著称,是参数化技术的最早应用者,在目前的三维造型软件领域中占有着重要地位,Pro/Engineer 作为当今世界机械 CAD/CAE/CAM 领域的新标准而得到业界的认可和推广。是现今主流的 CAD/CAM/CAE 软件之一,特别是在国内产品设计领域占据重要位置。

Pro/E 第一个提出了参数化设计的概念,并且采用了单一数据库来解决特征的相关性问题。另外,它采用模块化方式,用户可以根据自身的需要进行选择,而不必安装所有模块。Pro/E 的基于特征方式,能够将设计至生产全过程集成到一起,实现并行工程设计。它不但可以应用于工作站,而且也可以应用到单机上。

Pro/E 采用了模块方式,可以分别进行草图绘制、零件制作、装配设计、钣金设计、加工处理等,保证用户可以按照自己的需要进行选择使用。其主要特点如下:

#### 1. 参数化设计

相对于产品而言,我们可以把它看成几何模型,而无论多么复杂的几何模型,都可以分解成有限数量的构成特征,而每一种构成特征,都可以用有限的参数完全约束,这就是参数化的基本概念。

#### 2. 基于特征建模

Pro/E 是基于特征的实体模型化系统,工程设计人员采用具有智能特性的基于特征的功能去生成模型,如腔、壳、倒角及圆角,您可以随意勾画草图,轻易改变模型。这一功能特性给工程设计者提供了在设计上从未有过的简易和灵活。

#### 3. 单一数据库(全相关)

Pro/Engineer 是建立在统一基层上的数据库上,不像一些传统的 CAD/CAM 系统建立在多个数据库上。所谓单一数据库,就是工程中的资料全部来自一个库,使得每一个独立用户在为产品造型而工作,不管他是哪一个部门的。换言之,在整个设计过程的任何一处发生改动,亦可以前后反应在整个设计过程的相关环节上。例如,一旦工程详图有改变,NC(数控)工具路径也会自动更新;组装工程图如有任何变动,也完全同样反应在整个三维模型上。这种独特的数据结构与工程设计的完整的结合,使得一件产品的设计结合起来。这一优点,使得设计更优化,成品质量更高,产品能更好地推向市场,

价格也更便宜。

Pro/ENGINEER 是一个全方位的三维产品开发综合软件，作为集成化的 CAD/CAM/CAE 系统，在产品加工制造的环节上，同样提供了强大的加工制造模块—Pro/NC 模块。

Pro/NC 模块能生成驱动数控机床加工 Pro/ENGINEER 零件所必需的数据和信息，能够生成数控加工的全过程。Pro/ENGINEER 系统的全相关统一数据库能将设计模型的变化体现到加工信息中，利用它所提供的工具能够使用户按照合理的工序将设计模型处理成 ASC II 码刀位数据文件，这些文件经过后处理变成数控加工数据。Pro/NC 模块生成的数控加工文件包括：刀位数据文件、刀具清单、操作报告、中间模型、机床控制文件等。

用户可以对所生成的刀具轨迹进行检查，如不符合要求，可以对 NC 数控工序进行修改；如果刀具轨迹符合要求，则可以进行后置处理，以便生成数控加工代码，为数控机床提供加工数据。

Pro/NC 模块的应用范围很广，包括数控车床、数控铣床、数控线切割、加工中心等自动编程方法。

## 2.2 VERICUT 简介

VERICUT 软件是由美国 CGTECH 公司开发的专用数控加工仿真软件，运行于 Windows 或 UNIX 平台下，能够真实地模拟在加工过程中刀具的切削、加工零件、夹具、工作台及机床各轴的运动情况，VERICUT 软件不仅能够对 NC 程序进行仿真、验证、分析及优化，而且能够对机床进行仿真。

通过 VERICUT 软件模拟机床加工的过程，能真实反映加工过程中遇到的各种问题，包括加工编程的刀具运动轨迹、工件过切情况和刀、夹具运动干涉等的错误，甚至可以代替实际加工过程中试切的工作，并且提供了对刀位轨迹和加工工艺优化处理的功能，可以大大提高零件的加工效率和机床的利用率。

VERICUT 软件采用了先进的三维显示及虚拟现实技术，对数控加工过程的模拟达到了极其逼真的程度，并且机床的运行过程和虚拟的工厂环境也能被模拟出来，以检测加工过程中可能存在的问题，为用户挽回不必要的损失。

VERICUT 软件作为机床控制模拟系统的佼佼者，为 CAD/CAM 产品市场和用户提供了最佳的数控机床加工仿真工具。VERICUT 软件目前已被世界许多国家的著名学校、研究机构和企业使用，并且众多的 CAD/CAM 软件，如 CATIA、UG、EdgeCAM、Pro/ENGINEER、MasterCAM 等，都集成或外挂了 VERICUT 模块。

### 3. 基于 PRO/E 的发动机曲轴的建模

#### 3.1 发动机曲轴的选择

下面以某发动机曲轴为研究对象，该曲轴为四缸发动机曲轴，根据发动机气缸的数目，曲轴一般分为单缸，双缸，四缸和六缸曲轴，四缸发动机曲轴有五个主颈和四个连颈，四个连颈互成 180 度分布，该曲轴总长 560mm，其中主颈长 30mm，连颈长 30mm，曲轴图如图 1：

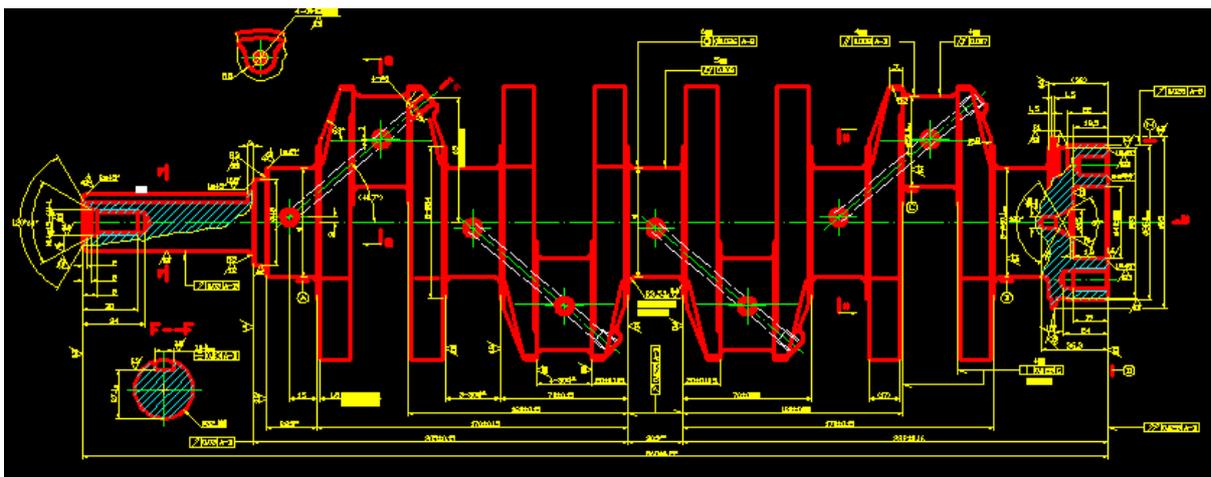


图 1 发动机曲轴图

#### 3.2 发动机曲轴 PRO/E 三维建模

曲轴三维实体造型的关键问题及解决方法：

在实体造型的时候从曲轴的动力输出端开始：首先输出带有倒角及键槽的以拉伸特征为基本特征的动力输出端轴，并进行倒角、退刀槽等操作，动力输出端见图 2。

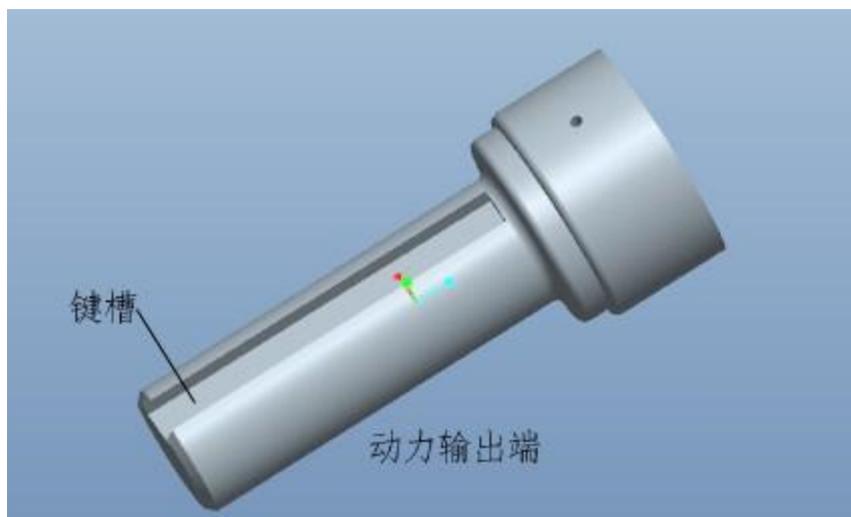


图 2 动力输出端图形

拉伸出第一拐的连杆颈，在连杆颈上再拉伸出另一侧的曲拐臂，然后拉伸出第一曲拐的主轴颈，这样第一个曲拐就完成了基本特征的造型。见图 3。

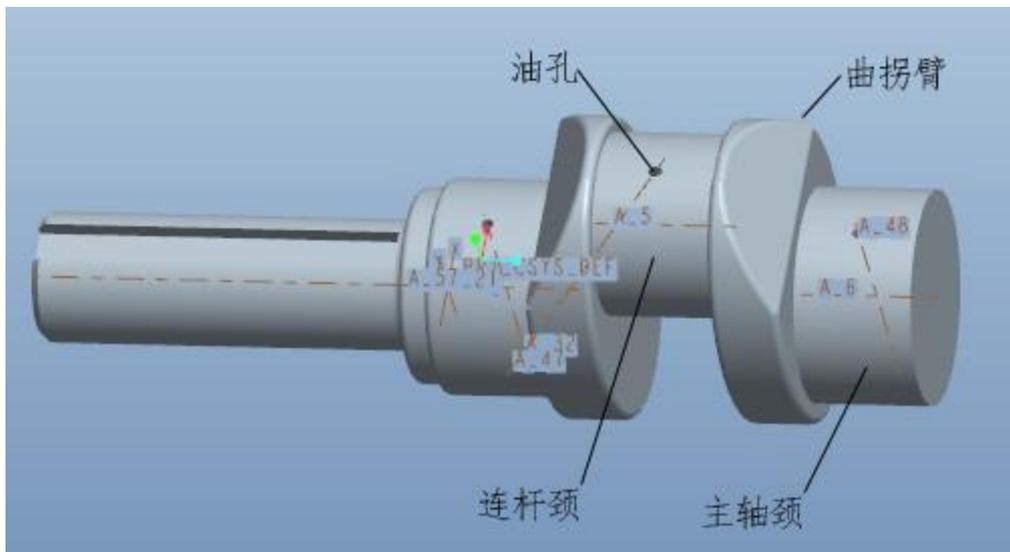


图 3 曲轴第一曲拐图

然后复制、平移、旋转操作，完成第二曲拐，如图 4。

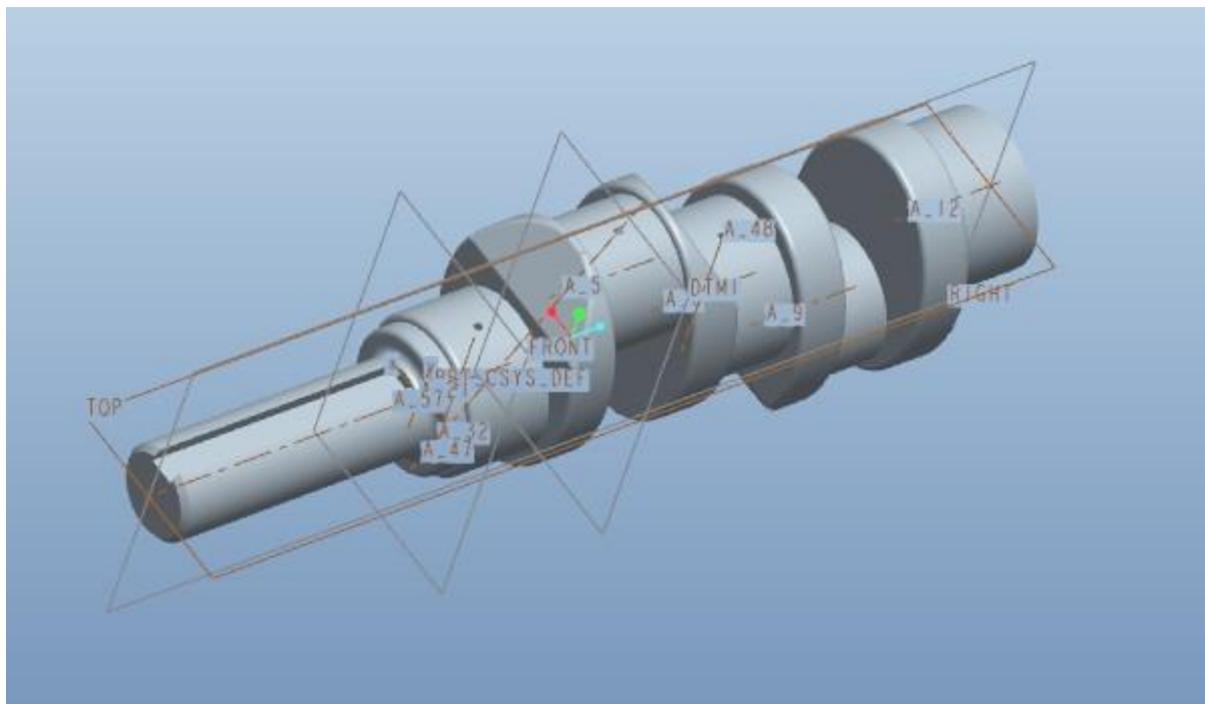


图 4 完成第二曲拐后的 PRO/E 建模图

在第三个主轴颈中心建立一个参考平面，然后镜像前两个曲拐得到最终的曲轴 PRO/E 建模图（图 5）。

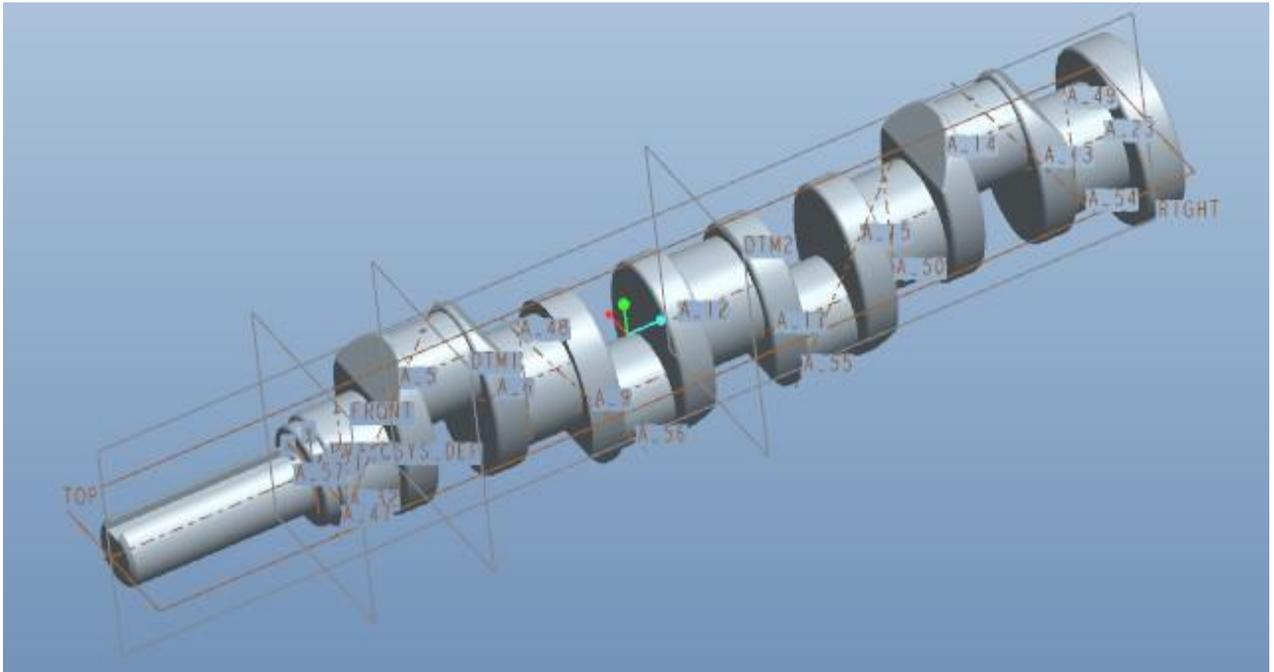


图 5 曲轴的 PRO/E 建模图

拐臂上去除部分材料的原因：曲轴的曲拐为了更好的利用材料，可将曲柄上离轴线最远的不受力的部分切掉，从而减少了旋转部分不平衡质量，同时也降低了曲轴的质量。曲拐臂要切掉一部分离轴线远的材料，在Pro / E环境下，是利用旋转命令切除材料的。根据曲轴尺寸的要求，在旋转命令的草绘环境下，草绘一个倒三角形，定义离主轴轴线的距离和旋转直径及旋转中心，旋转去除材料就可以得到更合理的曲轴结构。

油孔的作用：为连杆和曲轴颈提供润滑。

## 4. 曲轴的加工工艺分析

### 4.1 曲轴的毛坯及其热处理

曲轴材料的选者原则是在保证曲轴安全、可靠、稳定的基础下，在保证具有足够的强度的前提下，尽可能采用一般材料。除考虑机械性能、疲劳强度外，还要考虑耐磨性、抗冲击韧性，以及制造加工的工艺性、设备能力和热处理性能等等。曲轴主要采用材料有优质碳素钢、合金钢、球墨铸铁等。

现代大量生产的小型柴油机，其曲轴材料一般采用球墨铸铁和优质碳素钢，例如 QT700. 2 球墨铸铁和 35, 40, 45 钢等。

大型低速柴油机曲轴，多采用半组合式制造，这时主轴颈常用 35, 40 钢；连杆及曲柄臂则采用 ZG35, ZG45, ZGMnV 铸钢。

中、高速柴油机整体式曲轴，采用 35, 40, 45, 40Cr, 35CrMoA 钢为多，也可以采用球墨铸铁 QT700-2。对于高速强载大功率柴油机曲轴则多采用合金钢，如 35CrMoA, 18CrNiWA 等。

### 4.2 曲轴毛坯的制造方法

曲轴毛坯的制造方法有锻造和铸造两种，常取决于所选用的材料、生产批量和工厂的具体情况。当选用钢材时，常用锻造方法制造毛坯：小型曲轴、生产批量大时采用模锻；中型大型整体曲轴采用自由锻或者墩锻；大型半组合曲轴，其来连杆用铸钢件。当选用球墨铸铁时，则用铸造方法获得曲轴毛坯。

曲轴毛坯的两种制造方法各有其优点和缺点：利用锻造方法制造出的曲轴毛坯可以获得较合理的结构形状，如椭圆形曲柄臂、桶形空心轴颈和卸荷槽等从而使应力均匀分布。锻钢曲轴虽然可以得到有利的纤维组织，并且能按要求获得较佳的截面模量和紧密细晶金粒组织，质量稳定，但是它的成本较高；利用铸造方法制造出的曲轴毛坯的切削加工性能好，并有较好的减震性和耐磨性，且生产成本低。球铁的铸造性能好，适用与采用精密铸造，使机械加工余量减少，可简化机械加工工艺过程，提高生产力并降低成本，铸造曲轴平均比锻钢曲轴节省 50% 的成本。

近十年来广泛采用特殊制造法制造曲轴毛坯，较成功的是墩锻弯曲法，既 RR 锻造法和 TR 锻造法。此法最大优点是能使锻件纤维沿曲轴的形状连续分布，扭曲少，材料利用率高，机械加工工时省，成本低。

### 4.3 曲轴毛坯的热处理

锻钢曲轴毛坯一般在锻成后预先作正火或者退火处理,以消除锻造应力,改善坯件材料组织的均匀性,并有利于机械加工及为最终热处理做好准备。

对于性能要求不高的碳素钢曲轴既可通过锻件的正火或者退火作为最终热处理,在机械加工中不再进行热处理。大型或者中型碳素钢曲轴,在加工过程中进行的中间热处理(650℃回火),知识作为大量金属切削后消除应力之用,不改变金相组织,正火后曲轴的硬度一般为170~241HB。

对于性能要求高的碳钢或者合金钢曲轴,除了毛坯作预先正火处理或者退火处理外,在机械加工过程中,常常还要进行调质处理作为最终的热处理。调质可以提高曲轴的疲劳强度、韧性和耐磨性,但往往引起淬火不均匀而造成曲轴的变形。热处理变形可以通过校直的方法来消除。调质后的硬度,碳钢为207~269HB,合金钢的硬度为240~352HB。

对球墨铸铁曲轴一般采用正火处理,正火后硬度为240~320HB。精加工前应进行退火处理,硬度为220~290HB。对铸钢曲柄应进行两次正火和回火处理,或者高温扩散退火、正火及回火处理,粗加工后应进行退火处理。

对工件表面要求硬化处理的合金钢曲轴,轴颈表面可采用表面淬火或者氮化处理,硬度达50HRC以上,淬硬深度>2~3mm,氮化层深度>0.3mm。必须注意,各轴颈圆角处不应淬硬。

对工件表面要求淬硬的轴颈,推荐用高频表面淬火,淬硬深度为2.5~4mm

### 4.4 曲轴的技术要求

#### 4.4.1 尺寸精度和形状精度的要求

由于曲轴是旋转体零件,各主轴颈和连杆颈与轴瓦要在高单位面积压力和高速滑动摩擦条件下工作,为了减少磨损,对各轴颈的尺寸和形状精度均有较高的要求。通常:

主轴颈和连杆颈的直径尺寸:低速度柴油机按IT7级公差加工;中速柴油机按IT6级公差加工;高速柴油机按IT6或者更高一级的公差加工。

各轴径长度尺寸和曲柄臂厚度:均按IT9级公差加工。

曲柄半径的偏差:每100mm长不超过±0.15mm。

凸缘外圆直径:(与飞轮或联轴节连接)按IT7级公差加工。

其余自由尺寸均按IT14级公差加工。

轴径的形状公差(圆度和圆柱度)要求,根据不同情况而定。通常,低速柴油机的形状公差约为尺寸精度 IT9 级公差的四分之一;中、高速柴油机则为 IT7 级公差的四分之一。其具体数值不得超过表 1 的规定。曲轴的轴径过渡圆弧须用样板检验,样板与过渡圆弧之间的间隙不得超过 0.2mm。

表 1 曲轴各轴颈圆度和圆柱度公差(单位: mm)

	~75	75~100	100~150	150~250	250~350	350~500	500~600
主轴颈	0.005	0.0075	0.01	0.013	0.015	0.02	0.025
曲柄销	0.005	0.01	0.0125	0.015	0.02	0.025	0.03

#### 4. 4. 2位置精度要求

为使活塞连杆运动部件运行正常,减少曲轴的附加应力。避免轴颈与轴瓦产生不均匀磨损,柴油机正时准确、运动平衡和工作可靠,对曲轴位置公差提出下列几方面的要求。

主轴颈对曲轴轴线的径向圆跳动量,一般高速柴油机为 0.01~0.04mm;中、大型柴油机为 0.04~0.08mm。主轴颈对曲轴轴线的径向圆跳动公差,在每个主轴颈两端(即首、尾两端),每转动 45 度用千分表测量一次。其值不得超过表 2 的决定。

表 2 主轴径向圆跳动公差值(单位: mm)

曲柄数目	轴颈支承数目	主轴径向圆跳动公差值						
		~75	75~100	100~150	150~250	250~350	350~500	500~600
3	1	0.015	0.02	0.025	0.03	0.03	0.04	
4	2~3	0.02	0.025	0.030	0.04	0.05	0.07	
5~8	3~4	0.025	0.03	0.035	0.05	0.06		0.08
9~12	5~6		0.04	0.055	0.065	0.075	0.085	

连杆颈轴线与主轴颈线的平行度误差,在每100mm长度上不大于0.01mm;对于手工修刮的曲柄销,每100mm长度上不大于0.015mm。曲柄各曲柄间的夹角误差应不大于 $\pm 15'$ 。曲轴凸缘端面应与曲轴轴线垂直,其端面圆跳动公差,对凸缘直径在300mm以下的应不大于0.03mm,对凸缘直径在300mm以下的应不大于0.05mm。曲轴凸缘外圆对曲轴轴线的径向圆跳动误差,不得超过表3的规定要求。

表 3 凸缘外圆对曲轴轴线的径向圆跳动公差值(单位: mm)

曲轴凸圆直径	~100	100~250	250~500	> 500
径向圆跳动公差	0.02	0.03	0.04	0.05

曲轴的臂距差,在表1轴颈支承情况下,及测量点在 $(R+d)/2$ ( $R$ 为曲柄直径, $d$ 为主轴直径)位置上所测得的数值。每米活塞行程不大于0.075mm;当活塞行程小于400mm时,可放松为每米活塞行程不大于0.1mm,但总数值不得超过0.03mm。

#### 4. 4. 3表面粗糙度要求

主轴颈和连杆颈:其表面粗糙度为:低速柴油机应小于 $Ra=0.8\mu m$ ;中速柴油机应小于 $Ra=0.4\mu m$ ;高速柴油机应为 $Ra=0.2\sim 0.1\mu m$ 。

油孔孔口和轴颈过度圆弧表面粗糙度 $Ra < 0.8\mu m$ ,曲轴凸缘外圆和端面的粗糙度 $Ra < 1.6$ 。曲柄臂侧面的粗糙度应为 $Ra=12.5\sim 3.2\mu m$ 曲轴减轻孔(钢曲轴)的粗糙度应为 $Ra=6.3\sim 1.6\mu m$ 。必须指出,如果曲轴材料是合金钢,因它对应力集中非常敏感,故粗糙度度值要求须相应减少一级。即使是非配合表面,其粗糙度也应 $Ra < 0.8\mu m$ 。

#### 4. 4. 4其他方面的要求

曲轴所有的加工表面不允许有裂纹、麻点、凹陷、毛刺和碰伤,等缺陷;非加工表面不允许有氧化皮、分层、裂纹、折叠及过烧等缺陷。对高速柴油机的曲轴,其动平衡精度应不超过0.005N.m。

### 4. 5 曲轴数控加工工艺制定

#### 4. 5. 1加工工艺规程

工艺规程是规定产品或者零部件制造工艺过程和操作方法等的工艺文件。工艺规程中包括各个工序的排列顺序,加工尺寸、公差及技术要求,工艺装备及工艺措施,切削用量及工时定额、工人等级等。工艺规程是指导生产的主要技术文件,是生产组织和生产管理工作的依据,也是新建、扩建或者改建机械制造工厂的主要技术资料。正确的工艺规程基于实践和具体生产条件制定。零件的机械加工工艺规程是每个机械制造厂或者加工车间必不可少的技术文件。按照工艺规程进行生产,就能确保产品质量,提高生产率,降低成本和安全生产。

工艺规程的设计步骤有以下几方面:

1. 研究和分析零件的工作图。首先明确零件在产品中的作用、地位和工作条件,并找出其主要的技术要求和规定它的依据,然后对零件图进行工艺审查。审查的内容有:零

件图上的视图是否完整和正确；零件图上所标注的技术要求、尺寸、粗糙度和公差是否齐全、合理；零件的结构是否便于加工、便于装配和便于提高生产率；零件材料是否立足于国内、资源丰富且容易加工。对于以上内容，如果在审查过程中认为不合理或者是错误及遗漏，可以提出修改意见。

2. 确定毛坯的种类。若毛坯的种类不同，即使是同一个零件，其加工工艺过程也不相同，因此在制定工艺规程时必须正确地选择毛坯的种类和了解毛坯的制造情况。毛坯种类的确定是与零件的结构形状、尺寸大小、材料的机械性能和零件的生产类型直接相关的，另外还与毛坯车间的具体生产条件有关。

3. 拟订零件加工的工艺路线。内容包括：定位基准面的选择；各表面的加工方法；加工阶段的划分；各表面的加工顺序；工序集中或者分散的程度；热处理及检验工序的安排；其他辅助工序(如清洗、去毛刺、去磁、倒角等)的安排。

4. 拟订各工序的机床设备、工艺装备(刀、夹具、量具等)和辅助工具。

5. 确定各工序的加工余量、工序尺寸和公差。

6. 确定各工序的切削用量及工时定额。

7. 技术经济分析。

8. 填写工艺文件。

#### 4. 5. 2机车曲轴加工工艺规程的制定

在曲轴外表面数控加工中一般遵循以下四个方面的原则：

1. 先粗后精。即按照粗一半精一精的原则进行，直到加工到符合零件的精度要求为止。
2. 先近后远。即按照加工部位相对于换刀点由近到远逐步进行加工，以减少刀具的空行程时间。
3. 刀具集中。即用同一把刀具加工完成所有相应的部位，然后再换另一把刀具加工其他相应的部位，以减少空行程和换刀时间。
4. 基面先行。即应先加工定位的部位，以保证加工精度。

本次设计的对象为机车曲轴的机械加工采用的是 CNC 数控外铣车床进行加工。统一用主轴颈进行定位，在连杆颈加工的时候夹具采用连杆颈加工专用的偏心夹具。

根据机车曲轴的各部位公差以及表面粗糙度，最后确定机车曲轴主要加工部位的工艺路线如下：

1. 主轴颈、连杆颈：粗车一半精车一再半精车一精车一粗磨一精磨；
2. 自由端：粗车一精半精车一精车锥面；
3. 法兰端：粗车一精车；
4. R243：粗车一精车；
5. 锥面：粗车一半精车一精车一粗磨；
6. 平衡块结合面：粗铣一半精铣一精铣；
7. 主轴颈、连杆颈、斜油孔、中心孔：钻削加工；
8. 平衡块结合面孔：钻一扩一攻。

由于该曲轴毛坯是采用铸造方法制造出来的，并且在粗加工的时候，加工余量较大，所以在粗加工以后要进行调质热处理，以释放残余应力，提高曲轴的综合力学性能，并有利于以下的加工工序；在粗加工、半精加工以及再半精加工之后分别进行三次次喷丸处理，进行表面强化，提高零件机械强度以及耐磨性、抗疲劳和耐腐蚀性；在第一次半精加工之后对零件进行时效处理；在对零件进行磨削加工之前对零件进行氮化处理，使曲轴具有优异的耐磨性、耐疲劳性、耐蚀性及耐高温性；在零件所有的机械加工工序都完成之后对零件进行两次动平衡检查。

在各个工序之间不单单要进行热处理，还有的工序在加工之前需要在划线平台上进行划线处理，例如在粗加工之前，和在孔加工之前。粗加工的时候，由于加工余量比较大，定位误差比较大，且毛坯的铸造精度有限，为保证加工精度，要进行划线处理。在某些孔进行加工之前（例如：法兰盘上孔），由于这些孔在零件上互相之间有角度和距离的限制，为了保证加工时的精度以及达到零件图上个孔的位置要求，需要进行划线处理。

具体加工工序以及所采用设备详情请见加工工序卡片以及工序过程卡片。本章只是提取了有代表性的连杆颈的粗车至精车工序进行了切削用量等方面的数据计算，主轴颈和曲拐臂加工情况类似。所以《加工工序卡片》中只包含了这四道工序的内容。

## 5. 基于 Pro/NC 及 VERICUT 的曲轴数控加工仿真

### 5.1 计算机辅助数控编程的步骤

目前，国内外计算机辅助制造（CAM）软件的种类很多，其软件功能、面向用户的接口方式有所不同，所以编程的具体过程及编程中所使用的指令也不尽相同，但从总体上讲，编程的基本原理及基本步骤大致上是一致的，归纳起来可分为以下五大步骤。

#### 1. 几何造型

几何造型就是利用计算机辅助设计（CAD）软件的图形绘制、编辑修改、曲线曲面造型等功能等功能将零件的几何图形准确地绘制在计算机屏幕上，与此同时，在计算机内自动形成零件的图形数据文件。

几何造型的过程相当于在 APT 语言编程中，用几何定义语句定义零件的几何图形的过程，其不同点在于它不是用语言而是用计算机绘图的方法将零件的图形数据输送到计算机中。

图形数据文件是下一步刀位轨迹计算的依据。自动编程过程中，软件将根据加工要求自动提取这些数据，进行分析判断和必要的数学处理，以形成加工的刀位轨迹数据。

#### 2. 加工工艺分析

零件图和加工工艺分析是数控编程的基础。计算机辅助数控编程和手工编程、APT 语言编程一样也首先要进行这项工作。

目前，由于计算机辅助工艺设计（CAPP）技术水平的限制，零件加工工艺分析仍需人工进行。夹位置、工件坐标系、刀具类型和尺寸、加工路线及加工工艺参数等数据之后才能进行编程。因此，编程前期的主要任务有：核准零件的几何尺寸、公差、及精度要求；确定零件相对机床坐标系的装夹位置以及被加工部位所处的坐标平面；选择刀具并确定零件刀具的相关参数；确定工件坐标系、编程零点、找正基准面及对刀点；确定加工路线；选择合理的工艺参数。

#### 3. 刀位轨迹的生成

计算机辅助数控编程中刀位轨迹的生成是面向屏幕上的图形交互进行的。其基本过程是：首先在刀位轨迹生成菜单中选择所需的菜单项，然后根据屏幕的提示，用鼠标指针选取相应的图形目标，指定相应的坐标点，输入所需的各种参数；软件将图形文件中提取编程所需要的信息，进行分析判断，计算出节点数据，并将其转

换为刀位数据，指定的刀位文件中或直接进行后置处理生成数控加工程序；同时在屏幕上显示出刀位轨迹图形。

刀位轨迹的生成大致可分为点位加工刀位轨迹的生成、平面轮廓加工刀位轨迹的生成、槽腔加工刀位轨迹、槽腔加工刀位轨迹的生成和曲面加工刀位轨迹的生成 4 种。

#### 4. 后置处理

由于各种数控机床使用的控制系统不同，所用数控指令的代码及格式也有所不同，为了生成符合特定数控机床要求的数控加工程序，就需要进行后置处理。计算机辅助制造（CAM）软件通常设置一个后置处理配置文件。在进行后置处理前，编程人员需对该文件进行手工编辑或在通用后置处理程序的支持下，按文件规定的格式定义数控加工程序所使用的代码、程序格式、圆整化方式等内容。CAM 软件在执行后置处理命令时将自动按后置处理配置文件定义的内容，输出所需要的数控加工程序。

#### 5. 程序输出

在 CAD/CAM 集成软件系统或专用后置处理程序中完成数控加工程序的生成后，需将数控加工程序传输到数控机床。早期的数控系统多采用穿孔纸带进行转换和输入，目前已广泛采用 RS-232 串行通信方式或 DNC 网络通信方式进行程序输入。

### 5.2 Pro/NC 模块的加工流程

使用 Pro/NC 模块设计加工程序的流程与实际加工的逻辑相似，其加工流程图如图 6

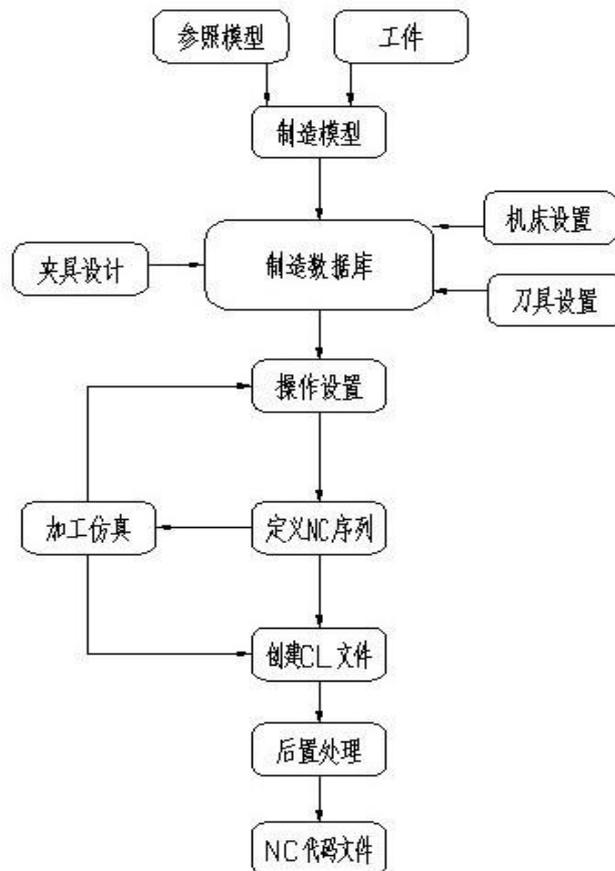


图 6 Pro/NC 模块加工流程图

### 1. 建立制造模型

制造模型一般由一个参照模型和一个工件装配组成。

制造模型中可以包含工件，也可以不包含，包含工件的目的与优点是可以计算加工的范围、模拟材料的加工切削情况和查询加工材料切削量等。

### 2. 建立制造数据库

制造数据库包括机床设置、刀具设置、夹具设置等项目。

其中有些项目可以在加工过程中需要定义时再进行设置。

### 3. 定义操作

操作实际上是一系列 NC 序列的集合。

操作设置一般包括操作名称、定义机床、定义 CL 输出坐标系、操作注释、设置操作参数、定义起始点和返回点等。

### 4. 定义 NC 序列

通过定义 NC 序列的类型、切削参数和制造参数等由系统自动生成刀具轨迹。

## 5. 校验及生成 NC 代码文件

通过仿真操作可以对生成的刀具轨迹进行检查，如果不符合要求，则应对 NC 序列及时进行修改；如果刀具轨迹符合要求，则可以通过后置处理，生成 NC 代码文件，驱动数控机床进行加工。

### 5.3 曲轴的数控加工仿真过程

曲轴的数控加工仿真需要建立在曲轴加工工艺分析的基础之上，同时根据具体的工作环境和加工要求决定。合理的安排工序也可以提高加工效率，减少刀具的损耗及资源的浪费。下面对曲轴加工简化，以一个曲拐的加工为例，对其进行加工仿真研究。

#### 1. 参照模型和工件模型的建立

如图所示，建立参照模型（见图 7）：

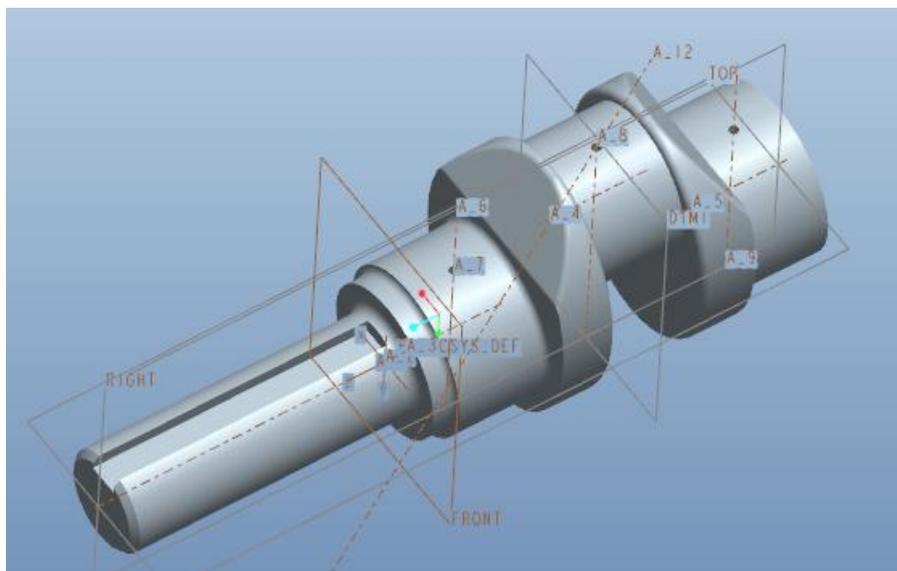


图 7 参照模型

由于上章讨论曲轴加工工艺，一般以铸造毛坯和锻造毛坯为主，故毛坯模型如图 8 所示：

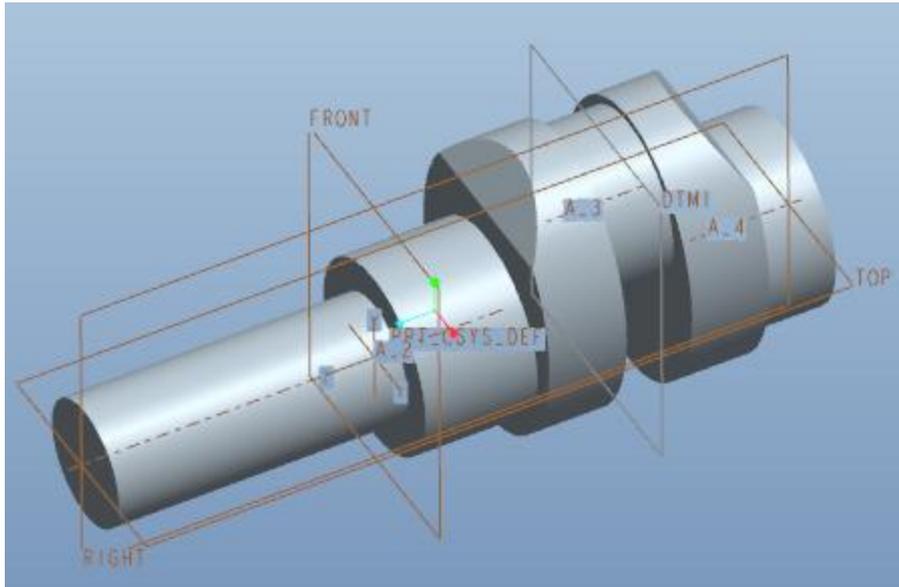


图 8 工件

## 2. 建立制造模型

在 Pro/E 中选择新建制造文件，及 NC 组件命令，选择毫米模版复选框，依次选择插入->参照模型->装配，调入参照模型文件，采用组件坐标系与工件坐标系约束（图 9），选择同一模型复选框。

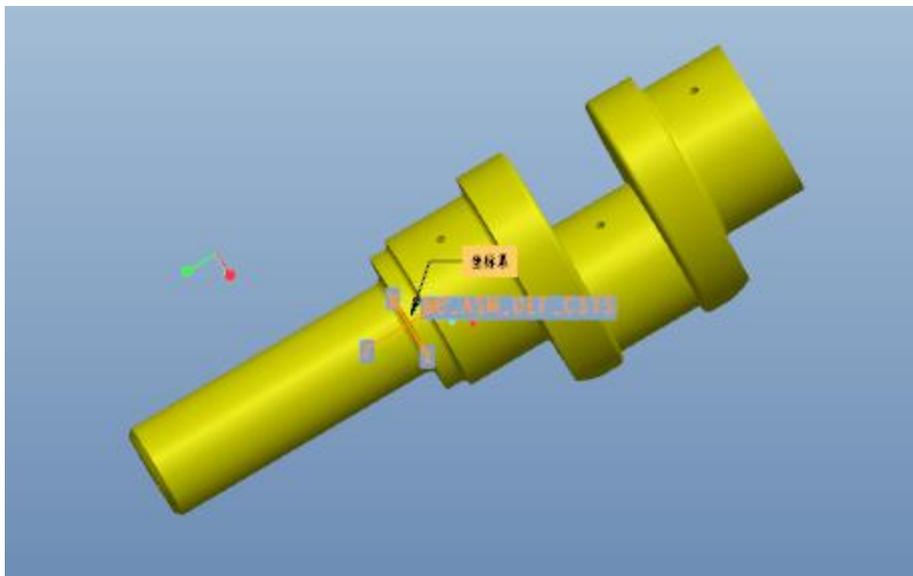


图 9 坐标系约束后

然后选择插入->工件->装配，调入工件文件，然后进行约束处理，得到如下图所示的制造模型文件，见图 10。

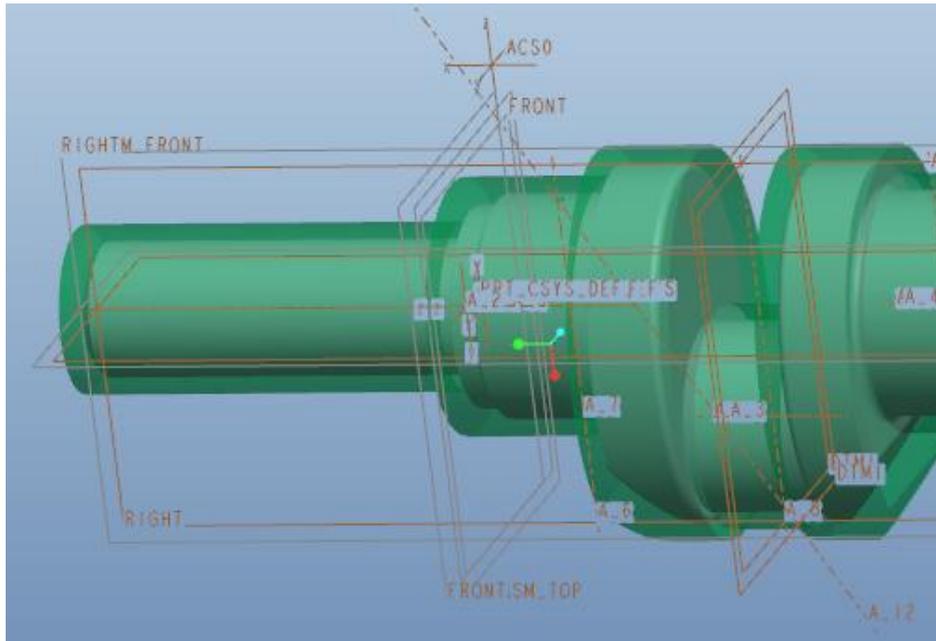


图 10 制造模型

工件坐标及组件坐标如图所示，根据轴类零件的特点，工件坐标设置为轴线中心，同时以曲轴轴线方向为 Z 轴，径向为 X 轴，同时可判断出 Y 轴方向。由于加工曲轴连轴颈时，刀具方向为径向，而 Pro/NC 默认 Z 轴方向为刀具方向，则需建立一个以径向方向为 Z 轴的坐标系。下面以铣削连杆轴颈及钻油孔为例，进行加工仿真。

### 3. 建立制造数据库

依次点击步骤→操作→，进行机床及刀具参数，由于加工面为圆柱曲面，机床设置为五轴，然后进行刀具设置，见图 11。

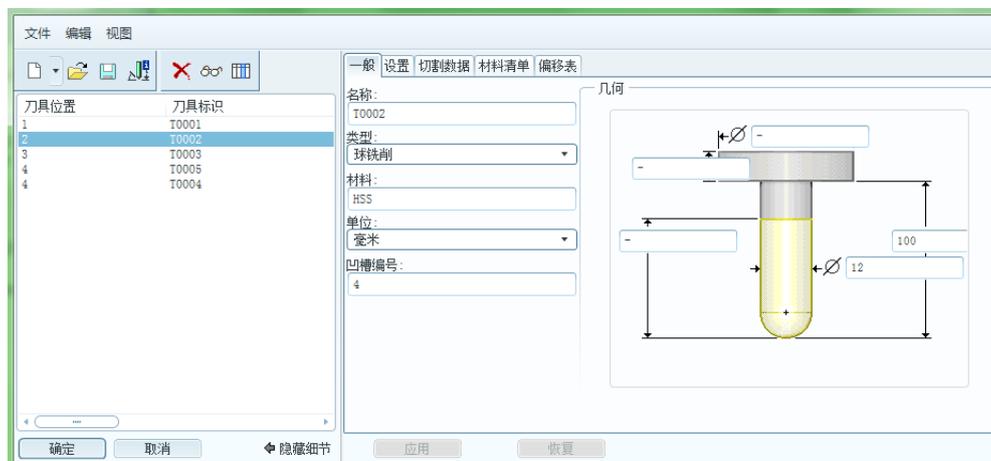


图 11 刀具设置

#### 4. 定义操作及定义 NC 序列

隐藏工件，点击步骤->曲面铣削->5 轴->增加坐标系选择->选择球铣削刀具，然后设置加工参数，见图 12。

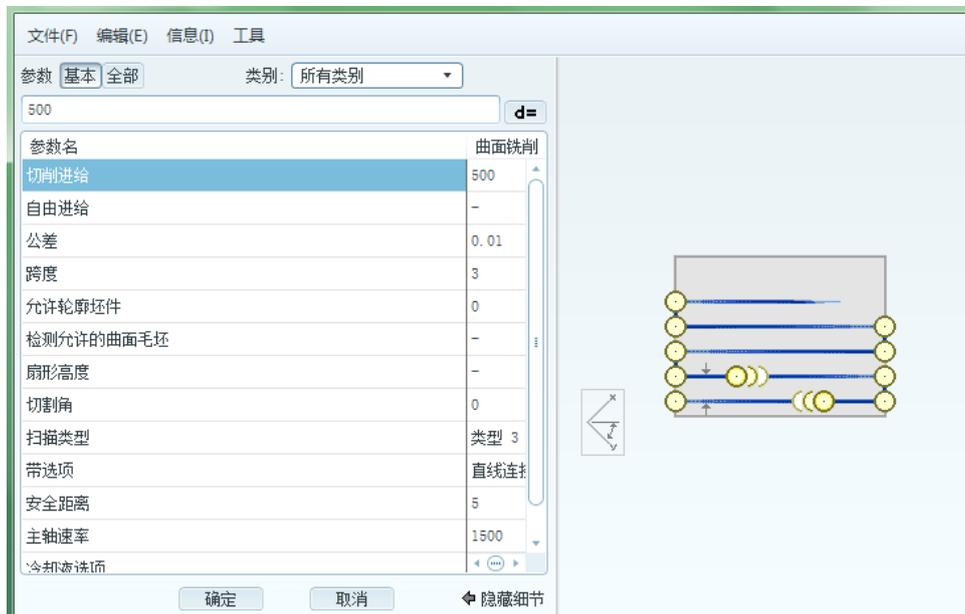


图 12 参数设置

然后选择坐标系为所放置的参考坐标系。点击, 采用复制与粘贴的方式建立连杆颈的铣削曲面（图 13）。

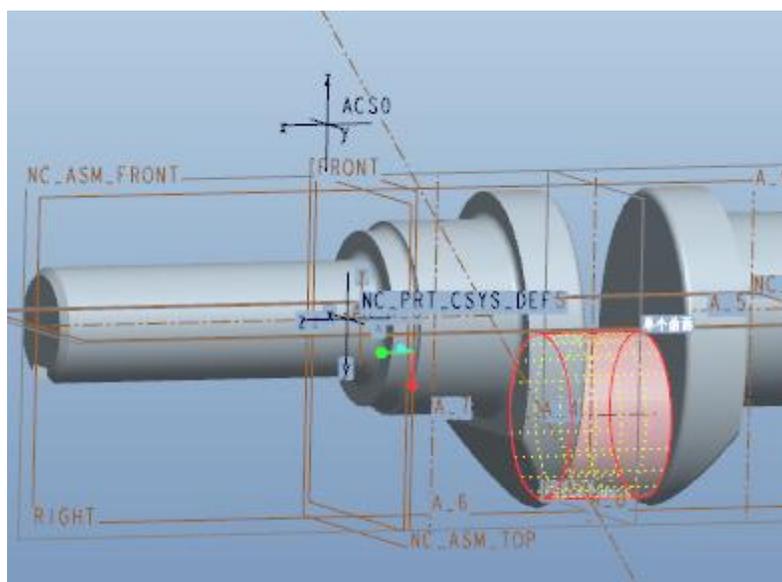


图 13 铣削曲面选择

由于走刀方向为轴线方向，且刀具在加工时容易碰到拐臂，故选择自曲面等值线走刀方式。依次选择播放路径->屏幕演示，生成刀位轨迹，如图 14 所示：

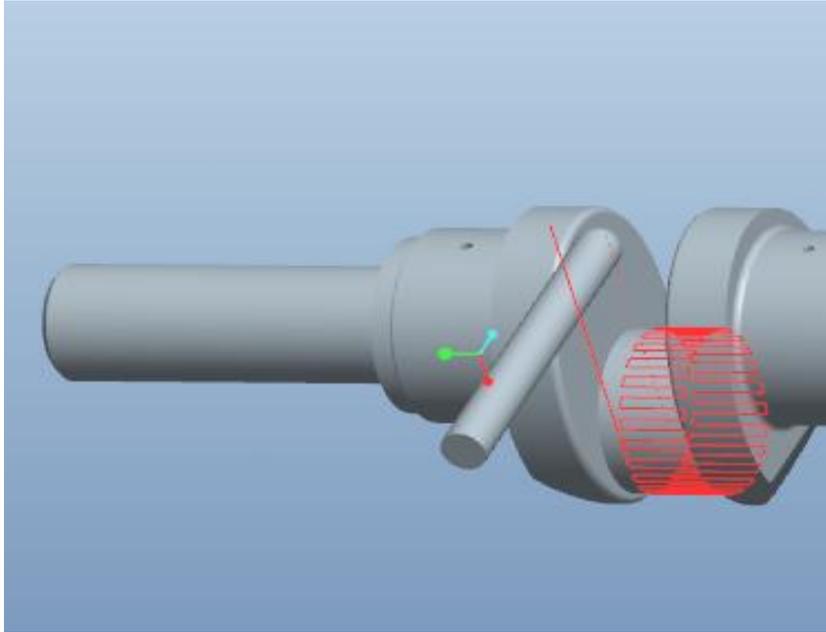


图 14 连杆轴颈刀具轨迹

#### 5. 校验及生成 NC 代码文件

在配置文件中将 `nccheck_type` 中的值更改为 `nccheck`, 然后选择 NC 检查->运行, 然后保存 nc 检查文件为 `first`。运行后所产生的加工图形见图 15。

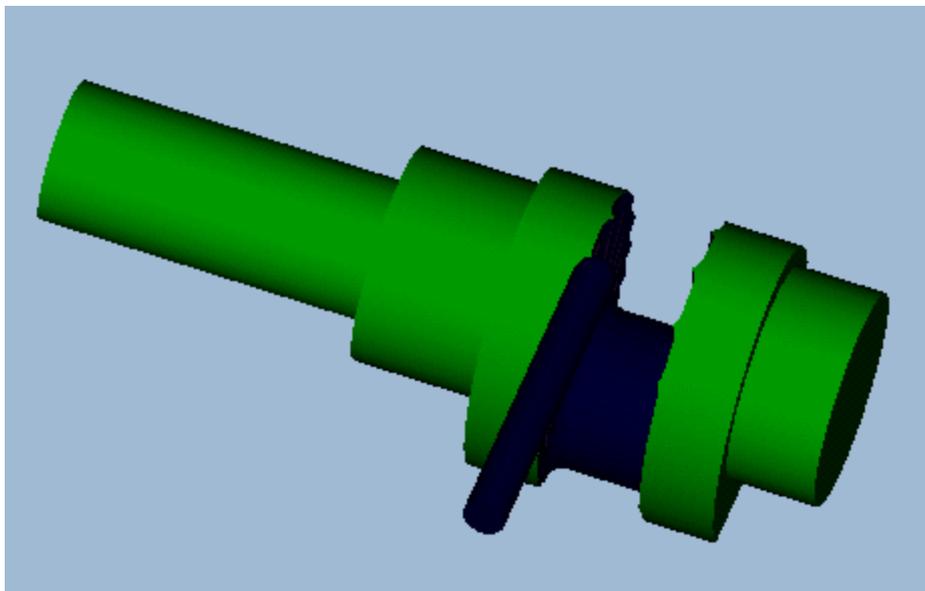


图 15 连杆轴颈铣削 NC 检测

首先创建钻孔组, 然后选择步骤->钻孔->深, 选择 5 轴, 然后依次对刀具, 参数, 坐标系, 退刀曲面, 孔进行设置, 刀位轨迹演示如图 16。

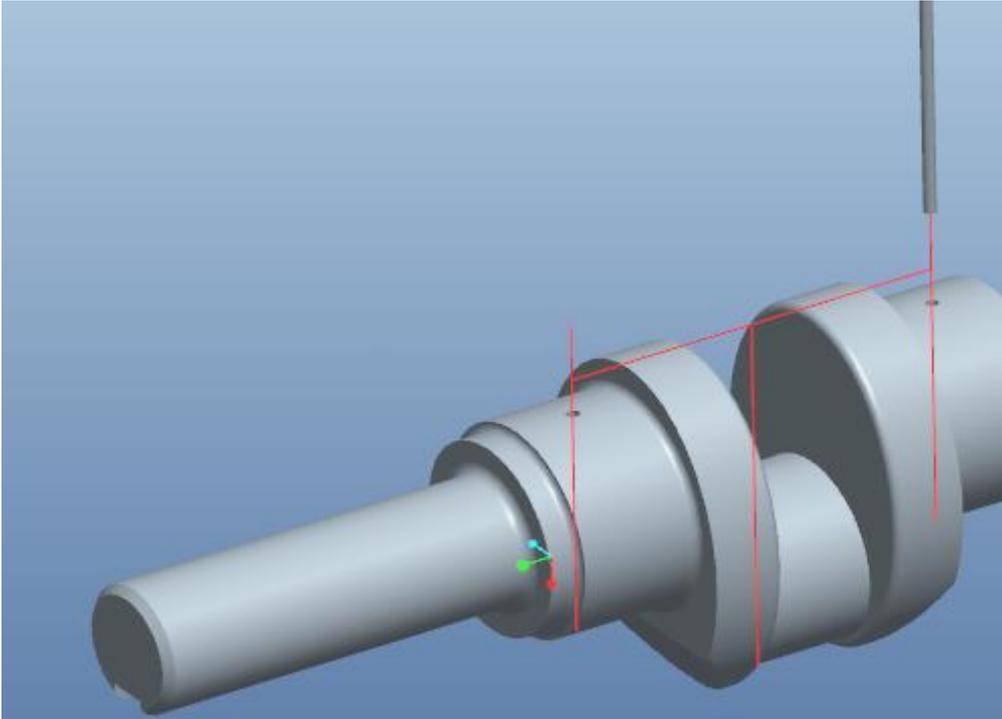


图 16 油孔加工的刀具轨迹

然后选择 NC 检查，选择恢复，打开上面保存的 first.nck 文件，设置分辨率，运行所得的演示图形如图 17：

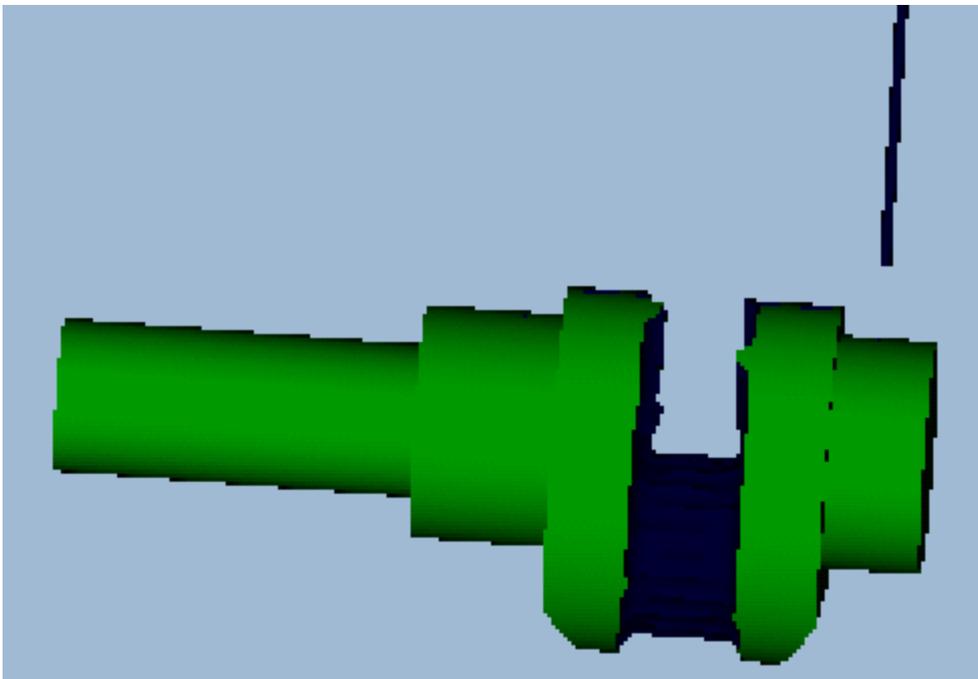


图 17 油孔钻削的 NC 检查

依次点击工具->LC 数据->后处理，然后选择曲面铣削及钻孔所产生的 LC 文件，分别产生它们的 G 代码文件（图 18）。

<pre>(Date:05/13/11 Time:21:28:15) G98G80G90G49G17 ( / JIAGONG1) T2M6 S2000M3 GOX-27.5Y-50. G43Z-80.005H2 Y28. G1X-22.5F500. Z-62.995 X-22.595Y28.16Z-62.987 X-22.665Y28.463Z-62.973 X-22.68Y28.855Z-62.955 X-22.63Y29.435Z-62.928 X-22.521Y30.063Z-62.899 X-22.308Y30.937Z-62.857 Z-80.143</pre>	<pre>% (Date:05/13/11 Time:21:29:17) G98G80G90G49G17 ( / JIAGONG1) T4M6 S600M3 GOX0.Y-50. G43Z-25.5H4 G83X0.Y-30.5Z-87.401R-20.5Q200.F50. G80 GOY-35.5 Z-71.5 G83X0.Y1.5Z-125.401R-66.5Q200.F50. G80 GOY-35.5 Z-71.5 G83X0.Y-30.5Z-179.401R-112.5Q200.F50.</pre>
---	--

图 18 连杆轴颈铣削的 G 代码文件（左）及油孔钻削的 G 代码文件（右）

#### 5.4 Vericut 的刀位轨迹仿真

打开 Pro/E 配置文件，将 nccheck\_type 值更改为 vericut，点击播放路径->NC 检查，运行批处理，打开 vericut 模块，则 vericut 仿真如图 19：

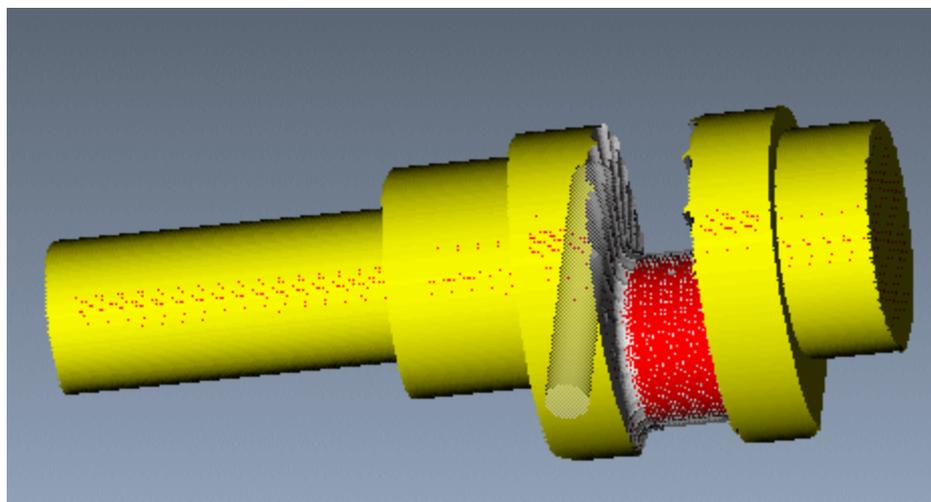
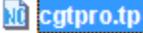


图 19 连杆轴颈铣削的 vericut 仿真

保存该模型文件为 first.vct，在项目树中，选择数控程序，右击  ->另存为 first.tp。然后选择完成曲面铣削序列，依次选择孔加工->播放路径->NC 检查，vericut 模块启动，删除默认模型，进行加工仿真，再次打开孔加工的 vericut 模块界面，在项目树中添加 first.tp 文件，进行仿真，点击播放，则 vericut 完成连杆颈及

油孔两个工序的加工如图 20 所示：

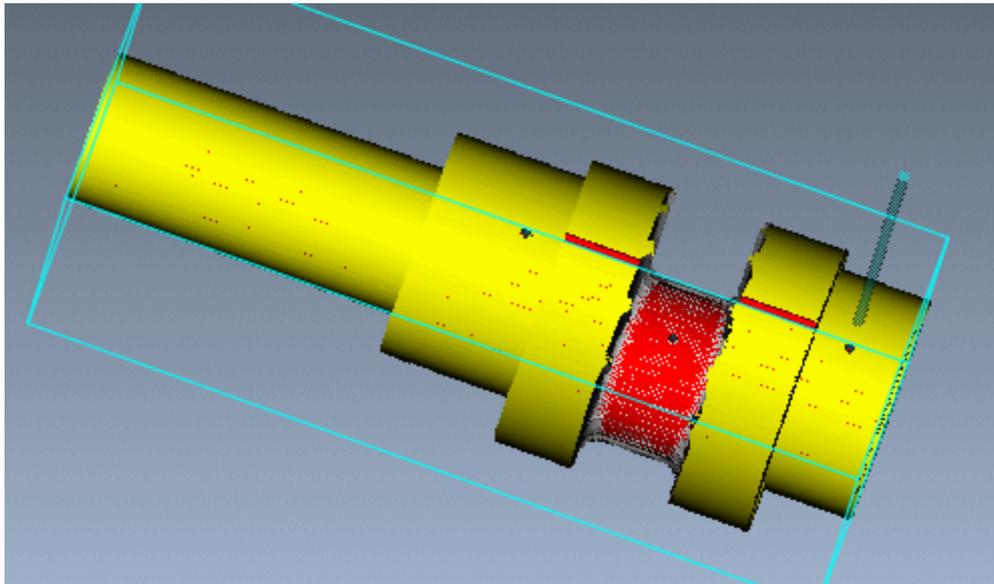


图 20 油孔钻削的 vericut 仿真

由上图可知钻削刀具与毛坯发生碰撞，进入 Pro/NC 更改安全距离参数之后，再次进行 vericut 仿真如图 21：

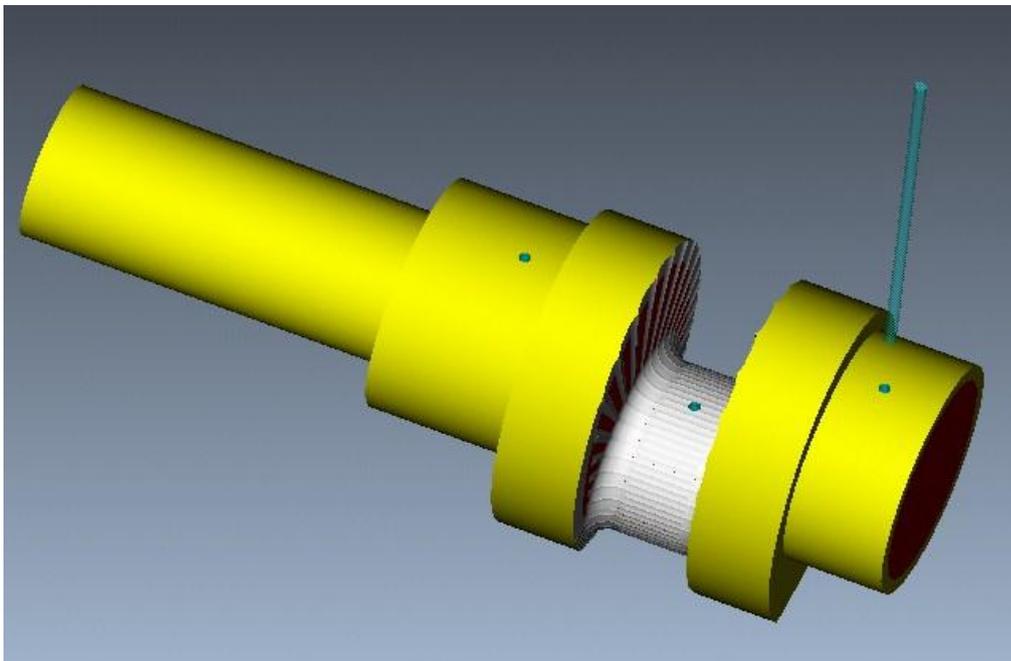


图 21 修改后油孔钻削的 vericut 仿真

通过 vericut 的仿真，我们可以能够在图 19 其中发现在和检查程序中的错误，并及时定位程序发生错误的位置。

## 6. 结论与展望

### 6.1 结论

通过对发动机曲轴这一复杂的零件进行数控加工仿真，使用 Pro/NC 产生了数控加工程序，并进入 Vericut 进行仿真检验，我们可以发现 CAD/CAM 为提高生产效率及产品质量带来的强大动力。首先，曲轴是发动机中的核心零件，要求较高的加工工艺才能保证其性能及使用寿命，其次，曲轴是比较复杂的零件，加工难度较大，若采用传统的加工方法，很难达到要求。数控机床是很好的选择，数控机床具有以下特点：

- (1) 加工精度高，具有稳定的加工质量；
- (2) 可进行多坐标的联动，能加工形状复杂的零件；
- (3) 加工零件改变时，一般只需要更改数控程序，可节省生产准备时间； 数控折弯机机床本身的精度高、刚性大,可选择有利的加工用量，生产率高（一般为普通机床的 3~5 倍）；
- (4) 机床自动化程度高，可以减轻劳动强度；
- (5) 对操作人员的素质要求较高，对维修人员的技术要求更高。

采用五轴联动机床仿真，减少了加工时的装夹次数，在实际加工过程中大大减轻了劳动力，也解决了主轴颈与连杆颈不在同一轴线上而难以加工的问题。

### 6.2 展望

虽然条件所限，输出的数控程序没有得到实际检验，但通过研究得出使用该软件可以使产品的设计、修改、制造时间大大减少，这样可大大缩短产品投放市场的时间，提高产品品质，节约人力资源和资金，减少原材料损耗，提高企业的竞争力，并给社会带来更大的效益，因而也必将取代传统的设计方法而成为时代潮流。

## 参考文献

- [1]白晶, 刘斌, 张云杰 Pro/ENGINEER数控加工与VERICUT综合应用教程[M].清华大学出版社; 第1版 2009.
- [2] 杨旭升.基于Pro/E的曲轴数控加工应用研究[期刊论文]- 2008年12月.
- [3]葛正浩,杨芙莲.Pro/ENGINEER Wildfire 4.0机构运动学与动力学仿真及分析[M]化学工业出版社; 2009.
- [4]林清安.完全精通Pro/ENGINEER野火4.0中文版零件设计基础入门[M].电子工业出版社; 第1版 2009.
- [5]朱晓春.数控技术[M].机械工业出版社; 2009.
- [6]上海市电气自动化研究所编著.机床的数字控制与计算机应用[M].北京: 机械工业出版社, 1982.
- [7]Vericut数控加工仿真技术[M].北京: 清华大学出版社; 第1版 2010.
- [8]张宇, 许虹, 王庆明 发动机曲轴的数控加工过程仿真[期刊论文]-电气技术与自动化 2002(2).
- [9]张惠林, 轩继花, 姜士湖.基于VERICUT的五轴联动数控加工仿真[J]现代制造工程, 2006 (7): 125-127.
- [10]余斌, 刘荣忠.基于OpenGL的数控加工仿真系统研究[J].四川大学学报, 2001,33 (5): 16-19.
- [11]李军峰.五坐标数控机床加工仿真[D].北京: 北京航空航天大学, 2002.
- [12]王霄, 刘会霞, 杨润党, 等.虚拟数控加工过程物理仿真模型的建立[J].计算机仿真, 2003,20 (4): 88-91.
- [13]乔永梅, 等.数控仿真技术的回顾与评述[J].计算机辅助设计与图形学学报, 1995,7(4):311-315.
- [14]孙江宏.Pro/Engineer虚拟设计与装配[M].北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [15]陈波, 赵福令.基于VERICUT的数控加工过程仿真技术[J].机械设计与制造, 2006.
- [16][美]David J.Kruglinski,Scot Wingi, George Shipherd,希望图书创作室 译.Visual C++6.0技术内幕(第五版) [M].北京希望电子出版社.2001.1.
- [17]Luttervelt C V. present simulation and future trends in modeling of machining operations progress[J].Annals of the CIRP.1998.4 (2) 537-624.

[18]Usui E. Progress of predictive theories in metal cutting[J].JSME International Journal.1988:363-369.

[19] Dariusz Plinta, PhD. B.Eng. identifying and improving of production constraints in the manufacturing line.2007.7

## 致 谢

本文的研究工作是在指导老师谭华老师的指导下完成的。

从论文的选题、软件的学习、理论研究直到最后论文的撰写，都得到了谭华老师的精心指导和帮助。导师渊博的学识、严谨求实、富于创新的治学态度和忘我的工作精神给本人留下了深刻的印象，将使本人终生受益。她严格要求自己的学生、督促本人认真对待研究，在论文中凝结了老师的心血和汗水。

在此谨向谭老师表示衷心的感谢和崇高的敬意。

## 附录 英文原文及翻译

# IDENTIFYING AND IMPROVING OF PRODUCTION CONSTRAINTS IN THE MANUFACTURING LINE

Dariusz Plinta, PhD. B.Eng.

University of Bielsko-Biała, Department of Industrial Engineering

2 Willowa Street, 43-309 Bielsko-Biała, Poland

dplinta@ath.bielsko.pl

**Abstract:** The paper presents practical application of the modeling and simulation method in identifying and improving of production processes according to principles and stages of the theory of constraints. The particular stages of the mentioned theory are illustrated by the practical example of analysis of the crankshafts' manufacturing line. By means of simulation it is possible to check different variants of possible ways of workplaces improvements and to choose the best for realization.

**Key words:** crankshaft, modeling and simulation, theory of constraints

## 1. INTRODUCTION

Several stages of development of the computer simulation method can be determined. They are connected with development of programming languages and development of data processing techniques. This development caused that the method of modeling and computer simulation has been wider used. Presently many simulation systems are available on the market from the simplest created on the basis of mathematical models, to the most complex, with environment for creating animation, 3D graphics, virtual reality and the possibility for integration with the company data bases. Simulation systems such as ARENA offer a comprehensive set of advanced solutions designed to analyse processes realized in production enterprises [3, 4, 6]. The range of applications covers the whole manufacturing process, from designing and planning to assembly of final products. Typical scenarios include:

- documenting, visualizing, and demonstrating the dynamics of a process with animation,
- predicting system performance based on key metrics such as costs, throughput, cycle times, and utilizations,
- identifying process bottlenecks such as queue build ups and over-utilization of resources,

- planning staff, equipment, or material requirements.

With simulation software, we can:

- model our processes to define, document, and communicate,
- simulate the future performance of our system to understand complex relationships and identify opportunities for improvement,
- visualize our operations with dynamic animation graphics,
- analyze how our system will perform in its “as-is” configuration and under a myriad of possible “to-be” alternatives so that we can confidently choose the best way to run our business. In next chapters, there is presented the analyse of manufacturing line according to the theory of constraints, application process which illustrate how we can model, simulate, visualize, and analyze manufacturing processes with simulation software.

## **2. THEORY OF CONSTRAINTS (TOC)**

### **2.1. Modeling and simulation in theory of constraints**

The Theory of Constraints (TOC) is a philosophy of management, which directs main attention on a bottle-neck of production system, that is the part which decides about efficiency of the whole system. Improvement of the bottle-neck gives the largest progress in the process of company development [1, 2, 7].

A large majority of people from high and medium management try to increase the efficiency only in chosen fragments of the production process, especially in their own departments. They do not look at the whole production system. The basis of such approach often is an assumption, that if every unit of the system is improved, then the efficiency of the whole enterprise will increase too. Such assumption does not take into account connections between particular departments and particular production processes. The improvement of particular sections very often does not lead to improvement of company efficiency. The optimum of the system is not a sum of local optimums. The improvement of efficiency in one part of the organization does not guarantee the improvement of the whole.

According to the theory of constraints all systems have “the weak link”, which is the constraint and which determines the efficiency of the whole organization. Strengthening of other links, beyond the weakest, will not strengthen the chain of processes.

The modeling and simulation method is a perfect tool which enables to find this weak link. It is often this workplace, which is maximally loaded and before which comes into being the largest queue of pieces waiting on processing. The bottleneck of a production system is possible to find

by analyzing of information included in the report from simulation, and also by observation of animation from computer simulation.

With help of simulation it is possible to realize next activities leading to the system improvement and connected with the Theory of Constraints – checking possibilities of the bottleneck from the point of view of maximum utilization, checking possibilities for his strengthening, adaptation of the supply and manufacturing schedule to the possibilities of the bottleneck [5].

## 2.2. Process of changes in the theory of constraints

Production process is the chain of activities, which are realized on mutually related resources and only several units (constraints) in this system have influence on the achieved result. Understanding this dependence makes it possible to find solution even for very complicated problems. Improvement of the production system should be realized in a cyclic way in the 5 following stages [1, 2, 7]:

1. identifying the constraint (bottleneck) of the system,
2. maximum exploitation of the present possibilities of the bottleneck,
3. subordination of all to the maximum utilization (exploitation) of the bottleneck,
4. elevation of the bottleneck possibility (throughput),
5. return to stage 1.

On every stage, it is possible to use simulation, for example to identify the system limitation, to check the present bottleneck possibilities and to plan properly uncritical tasks practically. In next chapter of this paper, there is presented an example of the realized project according to above-mentioned stages.

## 3. EXAMPLE OF THE PRODUCTIONLINE IMPROVEMENT

### 3.1.Characterization of the analyzed production system and the aim of research

The main goal of the conducted analysis was to increase volume of production in the crankshafts' manufacturing line. The analyzed line works in 3-shift system and 6 days per week, what excludes possibilities for increasing efficiency by introduction of additional shift or extra hours.

The aim of research was the analyze of tools exchange and material flow between the store and workplaces in the crankshafts manufacturing line and also looking for new solutions permitting improvement of the analyzed production system. The domain of study covers the flow of material between workplaces taking into account breaks caused by setup of working units. Different models in the ARENA system were prepared, whose aim was the imitation of the real system functioning and checking the proposed improvements. First variant of the simulation model encloses all operations realized in the analyzed production line. The goal of this simulation was to find a bottleneck, it means this workplace, which should be improved first. Next variants include activities realized in the bottleneck in detail defined. Different ways for setup realization were defined – different number of workers, different range and way of work organization. Presentation of the achieved results was prepared on the basis on reports from simulation. The most essential parameters of the analyzed systems were separated and by changes of their values the best solution was looked for. This activity is a typical example of realization of the fourth step in TOC – elevation of the bottleneck possibility.

### 3.2. Identifying the constraint

After modeling of the crankshaft manufacturing line (fig.1) and simulation of weekly production, in reports we found information about duty of workplaces, about size of queues before workplaces and the achieved volume of production. It made possible to identify the bottle-neck. This simulation was conducted in ARENA software packet.

The bottleneck of the analyzed production system is the machining centre for 14th operation characterized by the largest duty and the largest time and number of waiting pieces in the queue – fig.2. This operation has the longest operation time and also the longest setup time.

### 3.3. Maximum exploitation of the present possibilities of turning machines

To enlarge the efficiency of machining centre some organizational changes were proposed. The creation of conditions for continuous production in this workplace was the effect of these changes. In the bottleneck always will work at least one operator. The machining centre will be supported additionally by the operator from neighbouring workplaces.

The above mentioned changes were introduced into the second simulation model. From the conducted simulation the following conclusions were drawn:

- duty of all workplaces of the analyzed production line grew – average by about 2%. The bottleneck was loaded almost by 100%;
- the volume of production grew similarly - from 18200 to 18600 pieces per week (by about

2%).

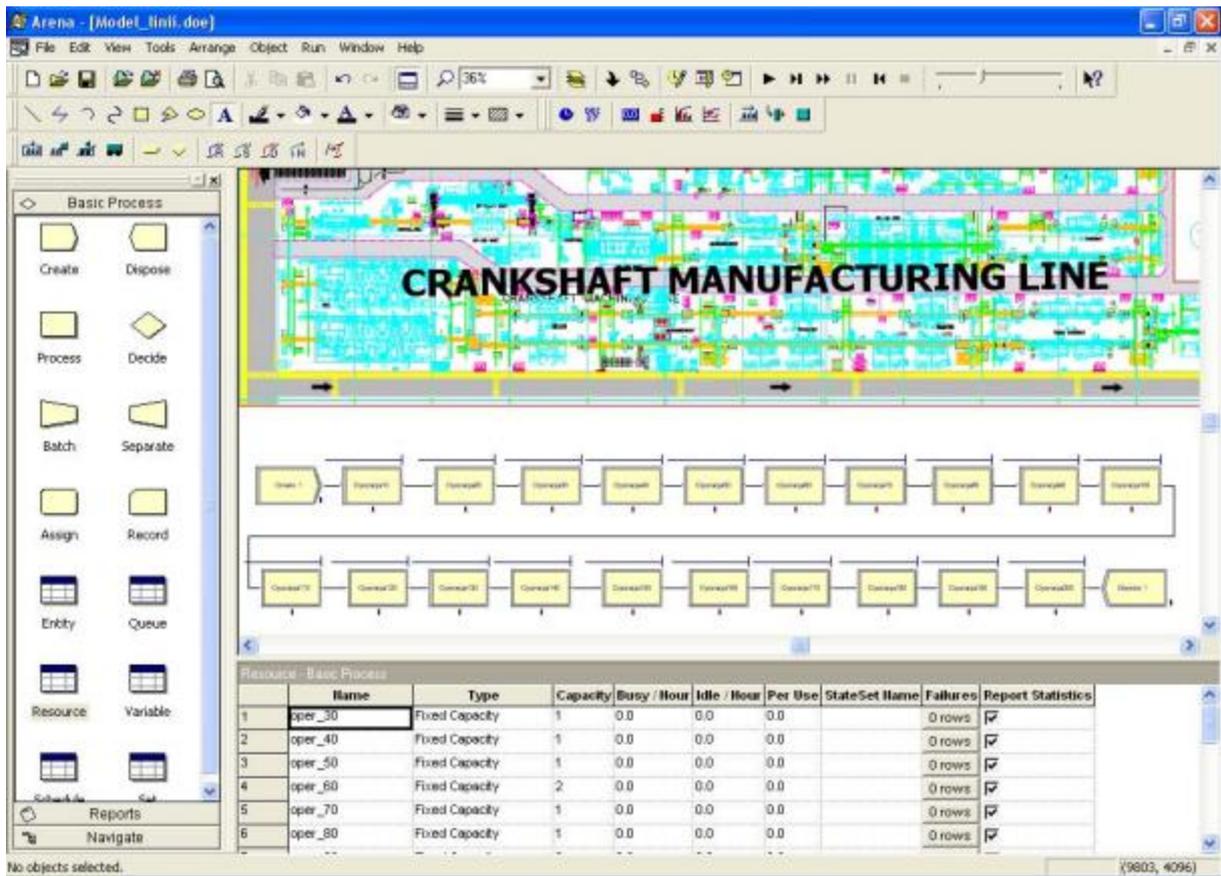


Fig.1. Simulation model of the crankshaft manufacturing line (Arena software)

### 3.4. Subordination of all to exploitation of the bottleneck

This principle was realized by the proper scheduling of production orders. In the first simulation the size of batches of material was established on the level of 20000 parts per week. As it turned out from simulation, we are not able to process such quantity of material. In effect, this guided to enlarging queues before machining centre (bottleneck). On the basis of results from the simulation, there was established that 18600 pieces will be the suitable size of weekly batch of production. With such level of production the average weekly size of the queue before bottle-neck will be constant.

Replications: 1      Time Units: Hours

**Queue**

**Time**

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Process 14Q.Queue	8.3518	(Correlated)	0.00	17.4297
Process 10R.Queue	0.5428	(Insufficient)	0.4232	0.9061
Process 11R_1.Queue	0.6434	(Insufficient)	0.5212	1.0084
Process 11R_2.Queue	0.3289	(Insufficient)	0.00523676	0.7882
Process 13L.Queue	0.1243	(Insufficient)	0.1025	0.1655
Process 13R.Queue	0.3860	(Insufficient)	0.06180565	0.8451
Process 14R.Queue	0.8390	(Insufficient)	0.7746	1.0691
Process 16L.Queue	0.1927	(Insufficient)	0.1884	0.1974
Process 16R_1.Queue	0.8891	(Insufficient)	0.8267	1.1167
Process 16R_2.Queue	1.0234	(Insufficient)	0.9616	1.2510
Process 4L_1.Queue	0.00549558	(Insufficient)	0.00511336	0.00586370
Process 4L_2.Queue	0.05493961	(Insufficient)	0.05319113	0.05869136
Process 4R.Queue	0.2032	(Insufficient)	0.1361	0.3424
Process 5L.Queue	0.07152477	(Insufficient)	0.04990562	0.1131
Process 5R.Queue	0.3458	(Insufficient)	0.2777	0.4862
Process 7R.Queue	0.4751	(Insufficient)	0.4230	0.6223
Process 8R.Queue	0.6187	(Insufficient)	0.5672	0.7631

Fig.2. Part of simulation report

### 3.5.Elevation of the bottleneck throughput

The efficiency of the machining centre should be enlarged by purchase of a new machine. This solution was rejected due to too large costs of investment. The next proposed solution was the modernization, which makes it possible to achieve shorter setup time.

Some organization changes connected with tool exchange were proposed, whose aim was to shorten the time of machine standstill during setup.

In the analyzed workplace there are 15 machining units, which are prepared for working in different cycles – exchange of tools after different quantity of worked parts. The setup of any working unit requires stopping of whole line and it often causes standstills. It was the main reason to establish the same cycle for all units (to minimize quantity of standstills).

With regard on large differentiation of tools and their costs, simultaneous setup of all units is not possible. Several solutions were proposed, which are modelled and checked by computer simulation - fig.3.

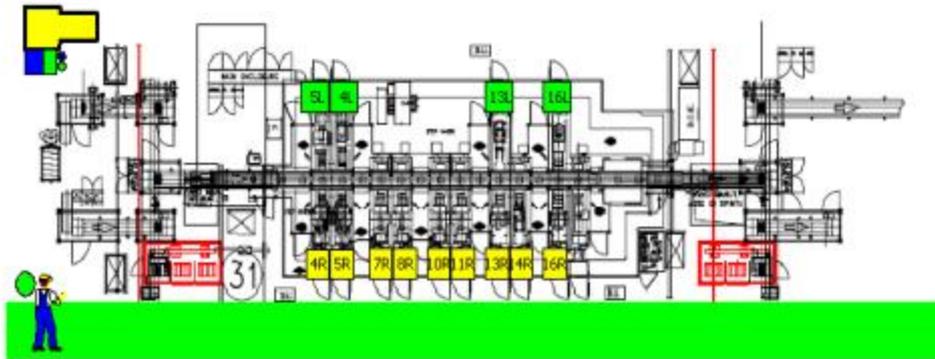


Fig.3. Simulation model of the exchange of tools in machining centre

The most important variants are:

V1 - present state (one worker sets up all production units in machining centre),

V2 - second worker's employment (one worker sets up from left side, and second from right side),

V3 - engagement of two workers (both workers set up units from left and right side in dependence on need),

V4 - new schedule for setup (the change of setup cycles and grouping tools for minimize quantity of standstills).

Results from simulation were used to compare the proposed variants. The best variant from the point of view of production volume was variant number 3 - fig.4. The achieved results can be the basis for planning of tool services.

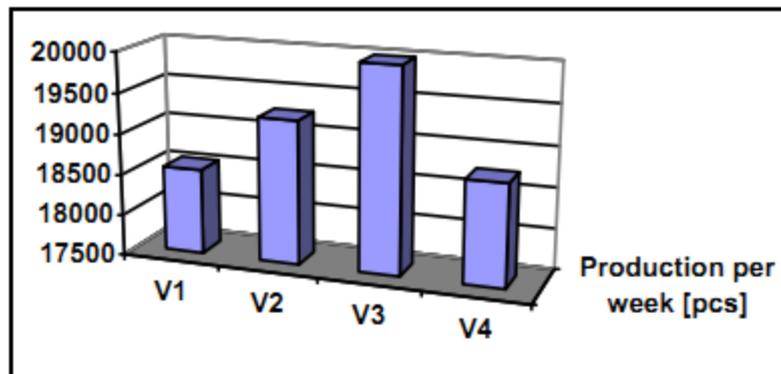


Fig.4. Example of results from simulation

The achieved volume of production carries out almost 20 000 pieces per week. The duty of workplaces was increased on the average by about 6%. The duty of the analyzed machining centre carries out 98%, what means that we should return to the beginning of the analysis, which is to improving a new constraint of the analyzed production system.

## 4. CONCLUSIONS

If it turns out that another workplace after improvement (realization of changes in the production system) will be the bottleneck, we should go back to the stage 1. In the last stage of the presented analysis it turned out, that the other machine became the bottleneck and this workplace should be strengthened in the next step of improvements. Thanks to the simulation, after any change we see its influence on the constraint and also on the other elements of the analyzed system.

In the described analysis, there were presented only chosen examples of simulation variants. In practice, there are more variants. They are more detailed and they take into account more aspects of the analyzed production systems.

Next conclusion is that the modeling permits to represent the real system and to find these elements, which are essential from the point of the analyzed problem (the setup of machine units). Besides, there exists the possibility for unrestricted interference into the system without the risk of causing irreversible losses. Therefore, this method gives us a huge possibilities connected with searching for solutions improving the work of logistic systems in enterprises.

## 5. REFERENCES

- [1] Goldratt E. M.: Critical chain. Gower 1997.
- [2] Goldratt E. M., Cox J.: The Goal. Gower 1997.
- [3] Gregor M., Halušková M., Hromada J., Košturiak J., Matuszek J.: Simulation of Manufacturing System. Politechnika Łódzka Filia w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 1998.
- [4] Matuszek J., Košturiak J., Gregor M., Chal J., Krišták J.: Lean Company. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2003.
- [5] Plinta D., Matuszek P.: Constrains management in production systems with utilization the computer simulation. AUTOMATION 2005 - konferencja naukowo-techniczna automatyzacja – nowości i perspektywy, PIAP, Warszawa 2005.
- [6] Training materials for ARENA software.
- [7] [www.eligoldratt.com](http://www.eligoldratt.com)

## 确定和改善生产线上的产量限制

Dariusz Plinta, 博士学位, 工程学士。

的别尔斯克-比亚瓦大学工业工程

2 Willowa Street, 43-309 Bielsko-Biała, 波兰

[dplinta@ath.bielsko.pl](mailto:dplinta@ath.bielsko.pl)

摘要：本文论述了根据设计及约束理论阶段的原则，建模与仿真方法在确定和提高产量过程中的实际应用。对上述理论的特定阶段通过在曲轴的生产线的分析实例得到说明。通过仿真手段是有可能检查工作场所的改善可能的方式的不同方案，并实现最佳的选择。

关键词：曲轴，建模与仿真，约束理论

### 1. 简介

计算机模拟的方法在开发的几个阶段才能确定。它们是与编程语言和数据处理技术的发展相关的。这种发展使得建模和计算机仿真方法得到广泛应用。目前许多模拟系统，可在市场上从数学模型的基础上创造了最简单到最复杂的环境，用于创建动画，三维图形，虚拟现实和与该公司数据库整合的可能性。如 Arena 模拟系统提供了设计，分析生产企业实现流程一整套先进的解决案。该系统的应用范围涵盖了整个生产过程，从设计，规划到最终产品的装配。典型的方案包括：

- 记录，可视化，并展示了与动画过程的动态过程，
- 在关键指标指数的基础上预测系统性能，如成本，产量，周期时间 和利用率，
- 确定过程中的瓶颈，如队列建立 UPS 和过度利用资源，
- 规划人员，设备或材料的要求。

通过模拟软件，我们可以：

- 我们的流程模型用来定义，记录和沟通工作过程，
- 我们的系统模拟未来表现的理解和复杂的关系及确定改进的机会，
- 可视化动态图形对我们的工作过程进行动态显示，
- 我们的系统将分析如何履行其“原样”配置并根据可能的无数“要被”替代品，使我们可以自信地选择最佳的方式来运行我们的业务。在接下来的章节，将提出有分析根据生产线的约束，应用过程，说明我们如何可以模拟，仿真，可视化和分析模拟软件制造过程理论。

## 2. 约束理论（TOC）

### 2.1. 建模与仿真中的约束理论

对约束理论（TOC）的管理理念，这对指导瓶颈的生产体系，这是部分细节决定对整个系统的效率的主要关注的问题。是公司发展过程中最大的进步。

对增加高，中管理人员的大多数尝试只选择了生产部分，尤其是在自己的部门的效率。他们不看整个生产系统。这种方法往往是基于一个假设，如果对每一个系统单元进行了改进，那么整个企业的效率也将增加。这些假设没有考虑到具体部门，特别是与生产过程的帐户连接。改善特定部分，往往不会导致公司效率的提高。该系统的最优不是局部最优的总和。效率于一体的组织的一部分的改善并不能保证整个改善。

根据限制理论的所有系统有“薄弱环节”，这约束和决定了整个组织的效率。加强各个环节，超越最弱的部分，不会加强进程链。

建模与仿真方法是一种完美的工具，它能够找到这个薄弱环节。它往往是这个工作，这是最大限度地载入并在它面前，形成了对加工件最大等待队列来。一个生产系统的瓶颈有可能找到通过信息分析，包括在从模拟报告，并通过来自观察计算机模拟动画来分析。

通过模拟方法的帮助是有可能实现对未来活动领导制度的完善，并与约束理论连接 - 检查从利用的角度来看，最大的瓶颈的可能性是检查和加强供应和生产适应的可能性附表瓶颈的可能性。

### 2.2. 过程中的约束理论的变化

生产过程的活动的，这是在双方相关资源，只有几个单位在本系统（约束）对所取得的结果的影响实现链。理解这种依赖使人们有可能找到非常复杂的问题的解决方案。甚至，生产系统的改进应该是一个循环的方式实现以下阶段：

- 1.识别系统的约束（瓶颈），
- 2.最大的瓶颈开发的可能性，
- 3.所有服从最大限度地利用的瓶颈（剥削），
- 4.瓶颈的可能性升高（吞吐量），
- 5.回到第一阶段。

在每一个阶段，有可能使用的模拟方法，例如，识别系统的限制，目前存在的瓶颈，切实妥善检查计划的可能性和不加评判的任务。在本文的下一个章节，根据上述阶段介绍了一个例子即实现的项目。

### 3. 生产线改善的例子

#### 3.1. 生产系统的分析和研究鉴定的目的

说明所进行分析的主要目标是增加曲轴的制造线的生产量。对 3 更制线厂分析，每周 6 天，不包括额外增加额外的时间转移或引进效率的可能性。

该研究的目的是物质流分析和曲轴生产线的工作场所交流的工具，也为所分析的生产许可制度的完善寻求新的解决方案。该研究领域涵盖了材料之间将通过工作单位设置等因素引起的休息场所采取流动。在竞技场系统制备了不同的模式，其目的是对真实系统的运作和检查建议的改善措施的模仿。首先包括了仿真模型的变体分析的生产线在实现所有操作。这个模拟的目的是要找到一个瓶颈，这意味着这个场所需要再一次进行修改。下一步变种包括在详细规定的瓶颈中实现的活动。为实现不同的方法设置的定义 - 不同数量的工人，不同范围和工作组织方式。所取得的成果介绍了编写的报告的基础上，从模拟所分析的系统中最重要参数进行了分离和及寻找最佳的实现方法。这个活动是实现第四步，在 TOC 的典型例子 - 瓶颈的可能性升高。

#### 3.2. 识别和确定约束

建模后的曲轴生产线（图 1）和每周的生产模拟在报告中，我们发现有关的工作场所有关责任大小的队列前工作场所和生产取得了体积。这成为可能，以确定瓶颈。这种模拟软件在竞技场进行了分组。

所分析的生产系统的瓶颈是操作加工中心 14 日由最大的责任和最大的时间和在队列中等待件数的特点 - 图 2。此操作具有操作时间最长，安装时间也是最长。

#### 3.3. 切削加工机床的目前最大切削量的可能性

为了扩大加工中心的效率提出了一些系统的改进方案。对在这一工作场所连续生产创造条件是这些变化的影响。工作的瓶颈始终将至少有一个操作员。该加工中心将支持额外工作场所的经营者来自邻国。

上述变化被引入第二仿真模型。从进行模拟，得出以下结论：

- 对生产线的所有工作场所分析税增长 - 平均约 2%。该加载瓶颈几乎 100%；
- 生产量增长 - 从 18200 至 18600 件，每星期（约 2%）。

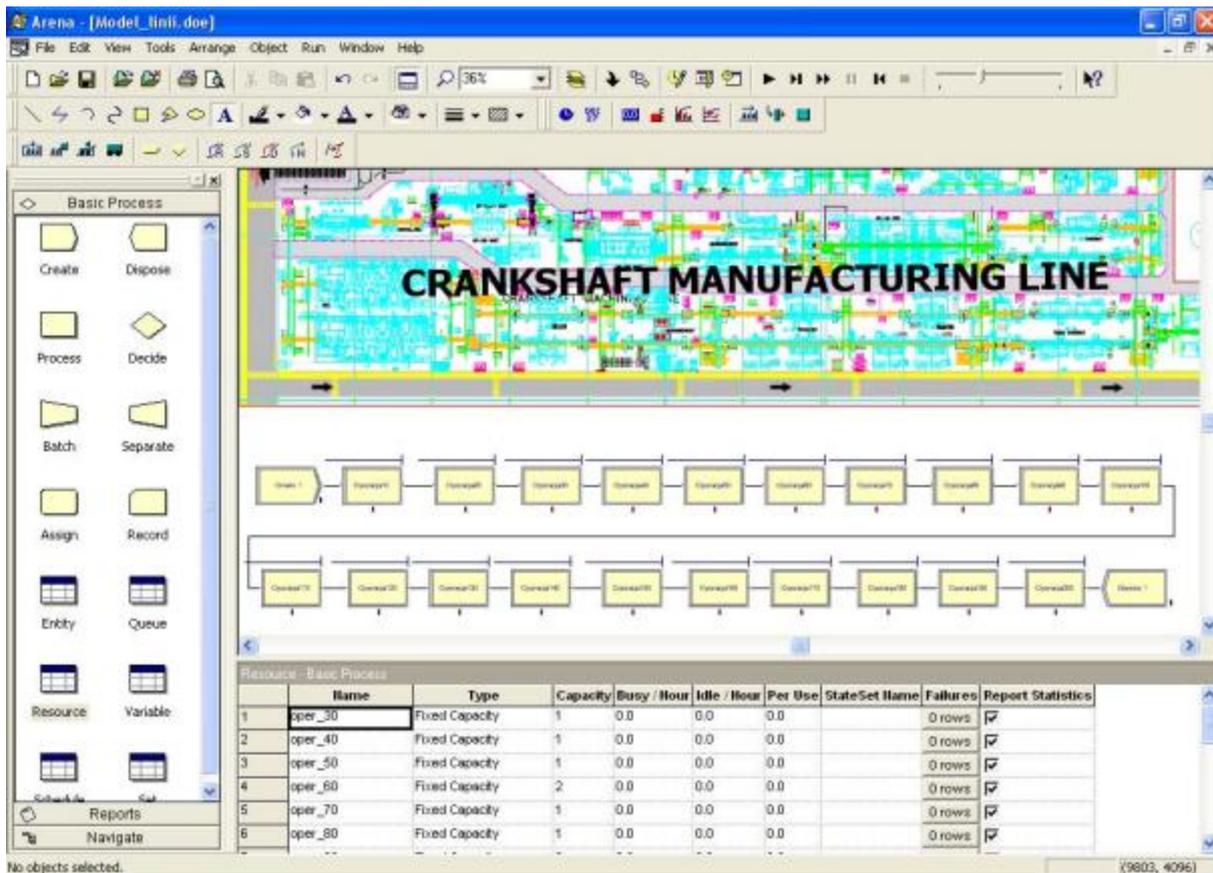


图 1. 仿真模型的曲轴生产线（竞技场软件）

### 3. 4. 一切服从开发的瓶颈

这一原则实现了由生产订单妥善安排生产。在第一个模拟的批次大小的材料中，建立了每周的 20000 件的水平。由于它会由模拟出来，我们无法处理如此大量的材料。实际上，这之前，引导到扩大加工中心（瓶颈）队列。在从模拟结果的基础上，确定有 18600 件将每周的生产批量大小合适。随着生产水平的平均等前瓶颈每周队列大小是恒定的。

Replications: 1      Time Units: Hours

**Queue**

**Time**

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Process 14Q.Queue	8.3518	(Correlated)	0.00	17.4297
Process 10R.Queue	0.5428	(Insufficient)	0.4232	0.9061
Process 11R_1.Queue	0.6434	(Insufficient)	0.5212	1.0084
Process 11R_2.Queue	0.3289	(Insufficient)	0.00523676	0.7882
Process 13L.Queue	0.1243	(Insufficient)	0.1025	0.1655
Process 13R.Queue	0.3860	(Insufficient)	0.06180565	0.8451
Process 14R.Queue	0.8390	(Insufficient)	0.7746	1.0691
Process 16L.Queue	0.1927	(Insufficient)	0.1884	0.1974
Process 16R_1.Queue	0.8891	(Insufficient)	0.8267	1.1167
Process 16R_2.Queue	1.0234	(Insufficient)	0.9616	1.2510
Process 4L_1.Queue	0.00549558	(Insufficient)	0.00511336	0.00586370
Process 4L_2.Queue	0.05493961	(Insufficient)	0.05319113	0.05869136
Process 4R.Queue	0.2032	(Insufficient)	0.1361	0.3424
Process 5L.Queue	0.07152477	(Insufficient)	0.04990562	0.1131
Process 5R.Queue	0.3458	(Insufficient)	0.2777	0.4862
Process 7R.Queue	0.4751	(Insufficient)	0.4230	0.6223
Process 8R.Queue	0.6187	(Insufficient)	0.5672	0.7631

图 2. 部分仿真报告

### 3.5. 瓶颈吞吐量的空间

该加工中心的效率应该是购买新机后的扩大。这个解决方案被否决，由于投资过大的成本。在下一个拟议的解决办法是现代化，这使得它可以实现更短的安装时间。

一些组织的交流与联系的工具，提出了改变，其目的是缩短了机器在安装过程中停顿的时间。在分析了工作场所有 15 个加工单位，这是工作在不同周期准备 - 工具的交流后，工作地区的不同数量。对任何一个工作单位设置要求全行停止，而且经常造成停机。这是主要原因为各单位建立了同一周期（以减少停机数量）。同时把各单位的设置加大分化的工具和成本是不可能的。由此提出了几种解决方案，这是通过计算机建模和仿真检查 - 图 3

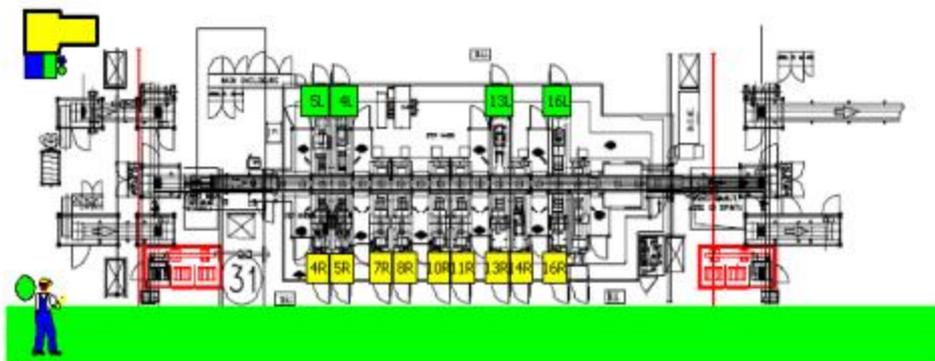


图 3. 仿真模型的交流工具，加工中心

最重要的变量是：V1 - 目前的状态（一组工人在生产加工中心的所有单位），

V2 - 由两名工人参与作业（一名工人从左侧设置，另一名从右侧设置）

V3 - 两名工人参与（包括工人设立左方，右上需要依赖方单位），

V4 - 对于安装程序（安装程序的周期变化和减少停机数量分组工具）的新时间表。

从模拟结果用于比较建议的变种。从生产量的观点最好的变种数 3 - 图 4。所取得的成果可作为规划的基础服务的工具。

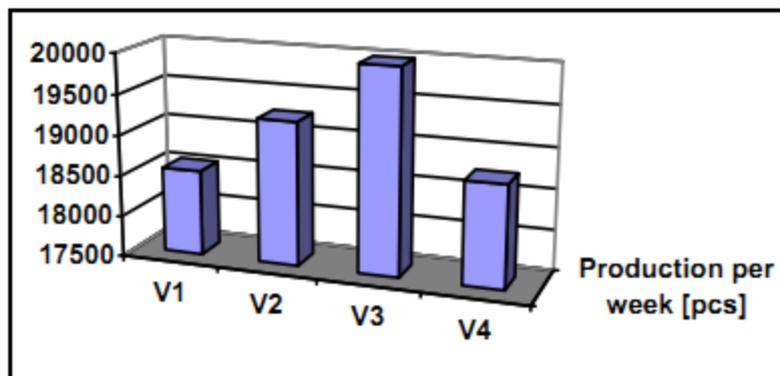


图 4. 模拟的结果

由于生产量达到每周近 20 万件。对工作场所的职责是增加平均约 6%。所分析的加工中心完成了 98% 的任务，那么意味着我们应该回到分析，这是提高了生产系统的分析，新的约束开始。

## 4. 结论

事实证明，改进后的另一个工作场所（在生产系统的变化实现）将成为瓶颈，我们应该回到第一阶段。在它原来提出的分析中，即另一台机器变成了瓶颈，这应在工作场所改善下一步加强最后阶段。在模拟下，我们看到的任何改变也对系统的其他要素分析其对约束的影响。

据所描述的分析，提出了有模拟的变种只选择的例子。在实践中，有更多的变种。他们更详细，他们考虑更多的方面是分析了生产系统的需要。

接下来的结论是，该建模代表真正许可证制度，并发现这些元素，它是分析的问题中（机器的单位设置）至关重要的一点。此外，存在进入系统无限制干扰造成不可逆转的损失风险的可能性。因此，这种方法使我们与改善企业物流系统连接的工作，寻求解决办法的可能性很大。