

南通职业大学

毕业设计（论文）

类 型： ☒ 毕业设计说明书 ☐ 毕业论文

题 目： 一种沟槽凸轮的反求设计

学生姓名： 倪佳敏

指导教师： 周小青、季照平、陈广健

专 业： 机械制造与自动化

时 间： 2018 年 5 月 10 日

摘 要

某型铁链焊接机的沟槽凸轮是进口易磨损部件，需经常更换，急需通过反求设计实现部件的自主制造，以提高使用寿命、降低生产成本。

基于 3D 激光扫描仪得到的点云数据，反求沟槽凸轮的特征和尺寸数据。利用最小二乘法、拉格朗日差值法等数值分析方法，重点对凸轮沟槽推程段曲面投影曲线函数进行了拟合。借助 Matlab 工程计算软件对拟合函数进行了优化选择。

将沟槽曲面投影曲线拟合函数转换成极坐标函数，以此分析凸轮从动件的加速度变化规律。根据加速度变化规律和由此产生的冲击对凸轮磨损的影响，改进凸轮推程段曲面投影曲线拟合函数，利用 3D 软件对凸轮机构的运动进行了仿真，达到减少冲击、降低磨损、提升沟槽凸轮使用寿命的目的。

基于反求数据，重构沟槽凸轮 2D、3D CAD 模型，以此制定沟槽凸轮加工工艺规程和工序。利用 CAM 软件实现数控自动编程，加工出沟槽凸轮反求设计的试制件。

沟槽凸轮反求设计试制件在企业设备上进行了实际应用，根据企业使用情况和磨损情况检测，使用效果良好，达到了反求设计的最初目的。

关键词：沟槽凸轮，反求设计，拟合函数，数控加工

Abstract

A slotted cam in a certain type of iron chains welding-machine is a kind of imported and easy wearing part. It often needs to be replaced. In order to increase service life and reduce cost, the company wants to manufacture the cam by reverse designing.

Through point cloud data by 3D laser scanner scanning, the geometric features and dimension data about slotted cam are reversely sought. Least square method and Lagrange interpolation method are applied to fit the functions of projection curve on cam groove. By means of Matlab software, the fitting functions are optimized.

The fitting functions are transformed into polar coordinate functions, which can analyze acceleration rules of follower in slotted cam. Based on acceleration rules and their effects on cam wearing, the fitting functions about projection curve of cam upward section are improved. These jobs can reduce cam wearing and increase service life of slotted cam.

The 2D and 3D CAD model are reconstructed by reversing data. Base on this data, machining processes are formulated. CAM software is applied in automatic program to machine trial part of reverse designing slotted cam.

Trial part of reverse designing slotted cam is operated on iron chains welding-machine. According to operating service condition and comparing of wearing condition between prototype cam and reverse designing cam, the main target of reverse design are reached.

Keywords: slotted cam; reverse design; fitting function; NC machining

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 反求设计概念与意义.....	1
1.2 沟槽凸轮特点.....	1
1.3 课题来源和问题.....	2
1.4 课题的研究思路	3
第二章 凸轮基本特征数据的反求.....	5
2.1 运动角度和反求要求	5
2.2 3D 激光扫描仪简介及功能.....	6
2.3 凸轮基本形状和尺寸反求	7
2.4 沟槽曲面深度和宽度反求	8
2.5 凸轮 A 面曲面投影线的反求.....	8
2.5.1 凸轮 A 面推程段曲面	8
2.5.2 凸轮 A 面远停程段曲面	14
2.5.3 凸轮 A 面回程段曲面	14
2.5.4 凸轮 A 面近停程段曲面.....	15
2.6 凸轮 B 面曲面投影线的反求.....	15
2.6.1 凸轮 B 面推程段曲面	15
2.6.2 凸轮 B 面远停程段曲面	19
2.6.3 凸轮 B 面回程段曲面	19
2.6.4 凸轮 B 面近停程段曲面	19

第三章 从动件运动规律分析与改进	20
3.1 从动件运动规律与凸轮磨损分析	20
3.2 凸轮 A 面从动件运动规律与改进	21
3.3 凸轮 B 面从动件运动规律与拟合函数.....	24
3.4 沟槽凸轮机构的运动仿真	26
第四章 凸轮的试制与应用	28
4.1 沟槽凸轮的 CAD 模型重构	28
4.2 沟槽凸轮的工艺规程与工序设计	28
4.3 沟槽凸轮试件的数控加工	36
4.4 沟槽凸轮试件的应用情况	38
第五章 总结.....	40
致谢	42
参考文献.....	43

第一章 绪论

1.1 反求设计概念与意义

反求设计(Inverse Design / Reverse Design)，也称反向设计、逆向工程设计，是指对产品实物样件表面进行数字化处理(数据采集、数据处理)，并利用可实现逆向三维造型设计的软件来重新构造实物的 CAD 模型(曲面模型重构)，并进一步用 CAD/CAE / CAM 系统实现分析、再设计、数控编程、数控加工的过程。

反求设计经常采用的仪器设备是三坐标测量仪、坐标扫描仪、激光扫描仪或 3D 数字仪等。通过测取实物表面的形状、尺寸数据，将实体的物理模型转化为数字数据，再将这些数据交由数字处理系统，利用计算机辅助技术，通过对数据的编辑、处理、修补，就能方便地在计算机中建立三维实体的 CAD 几何模型，并允许对所获得的 CAD 几何模型进行适当的修改。在获得 CAD 模型的基础上，通过对数据进行刀具轨迹编辑，自动生成 NC 轨迹，交由 NC 机床进行数控机械加工。若生成的是 STL 文件，则可将信号输入快速自动成型机，进行原型制造。

在反求设计中应用计算机辅助技术，可以大大减少人工劳动，有效缩短设计、制造周期。尤其是将自动测量、重构 CAD 模型、自动成型、数控加工结合起来，用于三维实体造型的设计与反求，更是能够体现现代设计、加工技术的优越性。

1.2 沟槽凸轮特点

凸轮机构是由凸轮、从动件和机架三个构件组成的高副机构。凸轮是凸轮机构的关键构件，通过其具有的曲面或曲槽结构，利用摆动或回转，使从动件提供预先设定的运动。在机电控制装置、计算机自动控制系统实现广泛应用的今天，凸轮机构因其结构简单、紧凑、设计方便，在自动机床、轻工机械、工程机械和机电一体化产品中仍得到广泛应用。

沟槽凸轮是利用凸轮面上的凹槽形状使从动件与凸轮始终保持接触的一种凸轮类型。按照凸轮形状来分，沟槽凸轮可以分为盘形沟槽凸轮、圆柱沟槽凸轮等类型（图 1.1）。



图 1.1 沟槽凸轮类型

由于沟槽凸轮采用形封闭型方式维持从动件与凸轮的接触，与力封闭型凸轮机构相比，具有以下特点：

- 1、利用沟槽的强制约束迫使从动件完成推程和回程运动，无需专门的复位装置，因而结构简约，工作可靠。
- 2、从动件尖顶处往往安装一个滚子，滚子与凸轮之间的滑动摩擦变为滚动摩擦，从动件耐磨损，可以承受较大载荷。
- 3、利用形封闭方式确保从动件的运动精度，尤其适用于中高速、重载场合。

1.3 课题来源和问题

南通地区某铁链厂某型铁链焊接机利用盘形沟槽凸轮机构同时提供的工件装卸、工件焊接两路控制运动，其从动件工作在中低速状态下。该盘形凸轮需要提供的两路控制运动为：

- 1、运动一（工件装卸运动）：“工件进给（推程运动）”→“工件静止（远停程休止）”→“逐渐松开工件动作（回程运动）”→“工件卸下动作（近停程休止）”。
- 2、运动二（工件焊接运动）：“逐渐接近动作（推程运动）”→“焊接动作（远停程休止）”→“焊接冷却动作（回程运动）”→“等待下一工件焊接动作（近停程休止）”。

作为铁链焊接机运动控制的核心部件，由于该铁链厂由于生产任务繁重，盘形沟槽凸轮磨损严重，需经常更换。据统计，该凸轮的更换频率为7个月左右。因该型铁链焊接机为进口设备，且同机型较多。如从原有国外公司进口该凸轮配件，需要较大更换成本。为此，工厂提出委托国内厂商制造该型沟槽凸轮，以降低设备维修成本。因此，本课题需为企业解决如下问题：

- 1、沟槽凸轮上各几何特征的尺寸和精度，尤其是沟槽曲面的投影曲线函数，为沟槽凸轮三维造型和数控加工奠定基础。
- 2、通过改进凸轮沟槽曲面投影曲线，降低凸轮磨损，提高凸轮使用寿命，从而降低设备维护成本。
- 3、重构凸轮 CAD 模型，通过数控加工试制凸轮，验证反求设计效果。

1.4 课题的研究思路

课题研究思路按照以下六步（图 1.2 所示）进行：

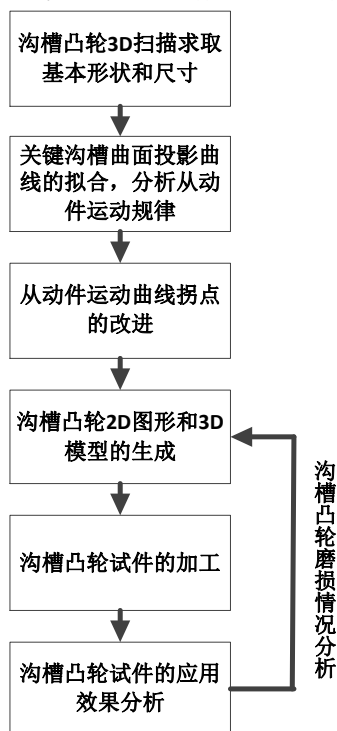


图 1.2 课题研究思路

STEP1：利用 3D 激光扫描仪获取磨损沟槽凸轮点云数据。通过相关模块功能获取沟槽凸轮结构上的基本形状、尺寸。数据主要包括沟槽几何形状组成和各圆柱面、键槽、沟槽深度等尺寸数据，并确定相应加工精度。

STEP2：基于点云数据模型，通过多种数值拟合方法获取沟槽曲面投影曲线数学模型，求出最优方法。根据沟槽曲面投影曲面分析从动件运动规律。

STEP3：从减轻沟槽磨损要求出发，运用数学方法改进从动件运动曲线拐点。

STEP4：根据反求数据和沟槽曲面投影曲线数学模型，生成沟槽凸轮 2D 图形和 3D 模型。

STEP5: 利用沟槽凸轮 3D 模型，规划沟槽凸轮加工工艺规程，编制加工工序卡，利用数控加工试制沟槽凸轮。

STEP6: 对沟槽凸轮试制件进行实际应用，分析沟槽凸轮应用效果和磨损情况。

第二章 凸轮基本特征数据的反求

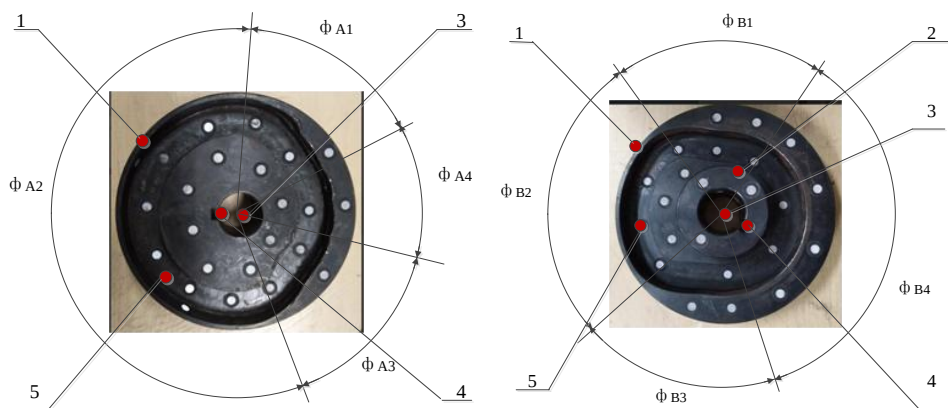
2.1 运动角度和反求要求

如图 2.1 所示，沟槽凸轮分为 A、B 两面，加工有用以完成铁链生产设备的两路运动控制。如 1.2 节所述，A 面沟槽用于控制工件装卸运动（运动一），B 面沟槽用于控制工件焊接运动（运动二）。凸轮基本运动角度为：

A 面： φ_{A1} -推程运动角 49.5° ； φ_{A2} -远停程运动角 184° ； φ_{A3} -回程运动角 49.5° ； φ_{A4} -近停程运动角 77° 。

B 面： φ_{B1} -推程运动角 57° ； φ_{B2} -远停程运动角 66° ； φ_{B3} -回程运动角 57° ； φ_{B4} -近停程运动角 180° 。

凸轮上白色的圆圈是 3D 扫描仪能够识别的贴点，也是获得点云数据的关键。再用扫描仪扫描凸轮正反两面连接处的时候至少要有四个点同时被扫到，这样才能联系起来。修补破损凸轮就是在扫描完成的基础上利用 Vxmodel 中的修补工具加以修补，使其更加接近实体凸轮。在修补的时候尽量使得凸轮正反两面平滑的连接。



(1) 凸轮 A 面 (2) 凸轮 B 面
1-凸轮外圆柱面 2-凸轮止推圆柱面 3-凸轮轴孔 4-键槽 5-凸轮沟槽
 φ_{A1} 、 φ_{B1} -凸轮推程运动角 φ_{A2} 、 φ_{B2} -凸轮远停程运动角
 φ_{A3} 、 φ_{B3} -凸轮回程运动角 φ_{A4} 、 φ_{B4} -凸轮近停程运动角

图 2.1 沟槽凸轮的基本结构

根据三维重建的要求，利用 3D 扫描仪器反求沟槽凸轮形状和尺寸的工作由两部分组成：

1、凸轮基本形状和尺寸的反求

具体反求的部分包括凸轮外圆柱面直径尺寸，凸轮轴心孔直径，凸轮键槽尺寸，凸轮整体厚度尺寸，沟槽的深度尺寸，沟槽凸轮各运动阶段中沟槽曲线所对应的角度。

2、凸轮上沟槽部分对应曲面投影线的反求

主要包括推程阶段、远停程阶段、回程阶段、近停程阶段的所对应的沟槽曲面投影曲线函数。

2.2 3D 激光扫描仪简介及功能

逆向工程中，首先要通过获取工件的轮廓尺寸数据为三维重建建立基础。工件的轮廓尺寸数据形成工件几何表面的点云（point cloud），这些点可以把物体的形状表示出来，点云越密集创建的模型就越精确，这个过程称为三维重建。目前常用的方法有手工测量、三坐标机测量和 3D 扫描等方法。随着工件结构的复杂程度和工件尺寸精度的提高，以及对数据处理的快速性要求，3D 扫描愈来愈成为常用的逆向工程数据获取方法。

3D 扫描仪(3D scanner) 是一种分析成像的仪器，通过分析扫描实物的形状和特征并模型的方式投影到计算机上的一种仪器。其扫描成像得到的数据经常被用来进行三维建模。



图 2.2 Handyscan300 扫描仪

本课题使用加拿大 Creaform 公司的 Handyscan300 型手持式激光 3D 扫描仪（如图 2.2 所示），其功能模块主要分为扫描（scan）、修补（VXmodel）和检测（inspect）三个部分。该扫描仪扫描精度可达 0.01mm，其精度完全满足采集沟槽凸轮尺寸数据的要求。

2.3 凸轮基本形状和尺寸反求

利用 Handyscan300 型 3D 扫描仪的 Scan 模块功能获取凸轮的轮廓点云数据（如图 2.3 所示），利用 VXmodel 模块修补点云数据和测量形状尺寸（如图 2.4 所示）。

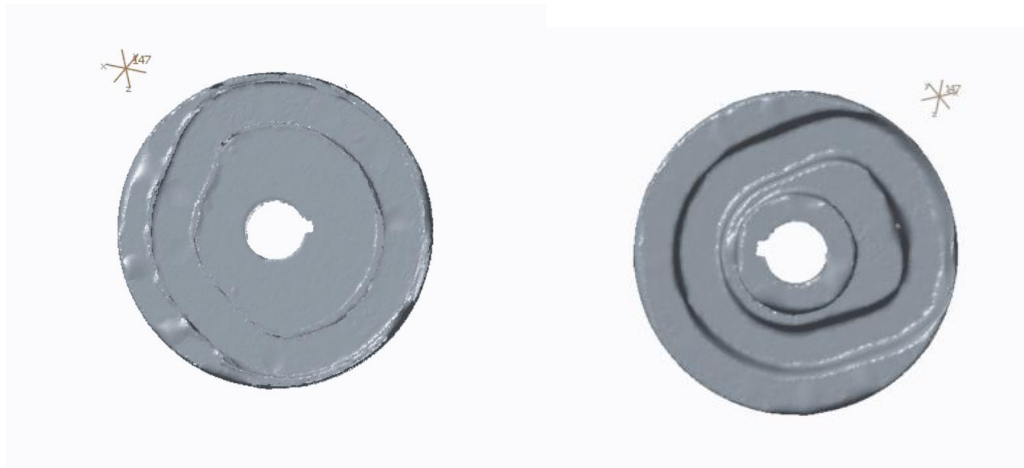


图 2.3 沟槽凸轮轮廓的点云数据

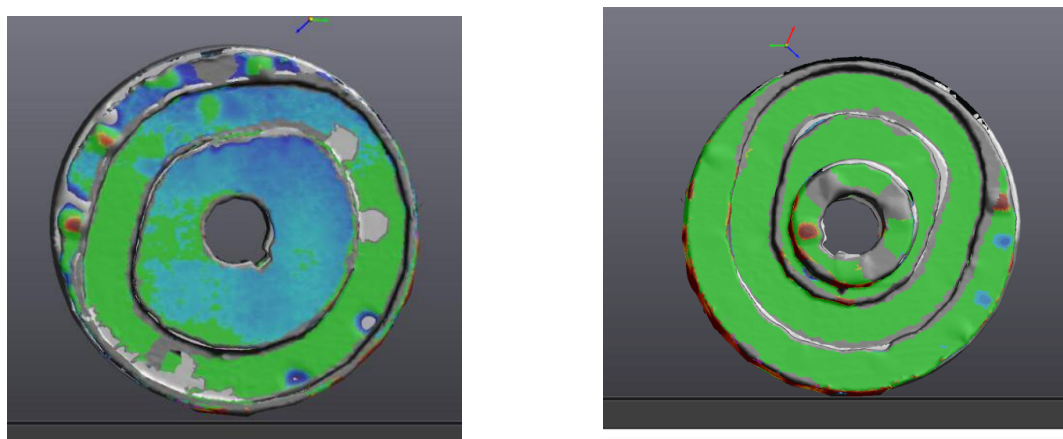


图 2.4 凸轮点云数据修补与形状尺寸测量

1、凸轮外圆柱面

根据点云数据（如图 2.3），利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮外圆柱面（如图 2.1）的直径尺寸为 159.382mm，圆整得到基本尺寸为 160mm。

该部分凸轮厚度尺寸测量值为 30.01mm，经圆整基本尺寸为 30mm。

2、凸轮止推圆柱面

根据点云数据（如图 2.3），利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮止推圆柱面（如图 2.1）的直径尺寸为 60.02mm，圆整得到基本尺寸为 60mm。

该部分凸轮厚度尺寸测量值为 19.03mm，经圆整基本尺寸为 20mm。

3、凸轮轴孔

根据点云数据（如图 2.3），利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮轴孔（如图 2.1）的直径尺寸为 30.02mm，圆整得到基本尺寸为 30mm，查手册可得设计尺寸为 $\phi 30_0^{+0.021}$ 。

4、键槽

根据点云数据（如图 2.3），利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮键槽（如图 2.1）的宽度尺寸为 7.97mm，圆整得到基本尺寸为 8mm，查手册可得设计尺寸为 8 ± 0.018 mm。

5、螺纹孔

在凸轮键槽内部，加工有 M8 螺纹孔 2 个（手工测量），利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的与 B 端面之间的位置尺寸（距离凸轮 A 面端面）为 10mm，两者之间的夹角为 80° 。

2.4 沟槽曲面深度和宽度反求

由于该沟槽凸轮采用同一尺寸滚子从动件实现对铁链制造设备运动的控制，故 A、B 两面沟槽宽度、深度一致。根据点云数据（如图 2.3），利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到：

凸轮 A 面：沟槽深度为 13.01mm，圆整得到基本尺寸为 13mm。沟槽宽度为 22.01mm，圆整得到基本尺寸为 22mm，查手册得到设计尺寸为 $22_0^{+0.021}$ mm。

凸轮 B 面：沟槽深度为 13.02mm，圆整得到基本尺寸为 13mm。沟槽宽度为 22.01mm，圆整得到基本尺寸为 22mm，查手册得到设计尺寸为 $22_0^{+0.021}$ mm。

2.5 凸轮 A 面曲面投影线的反求

凸轮 A 面的沟槽曲面由内、外两侧的曲面组成。从图 2.1 可知，其内侧曲面磨损较为严重。又由于内曲面是由外侧曲面平移一段距离得到，故在反求曲面投影线时，可先反求外侧曲面投影线，内侧曲面投影线可由外侧曲面投影线平移一段距离（即沟槽宽度）得到。

2.5.1 凸轮 A 面推程段曲面

1、推程运动角

如图 2.3 所示，凸轮 A 面推程段为一不规则曲线，由两部分组成：第一部分为远停程段和推程段通过一圆弧相切连接，测得圆弧半径 32mm；第二部分为近停程段到圆弧段之间的一段曲面，此段曲面利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮推程段对应的运动角为 26.43°，圆整为 26.5°。又测得圆弧段所占运动角为 23.6°。圆弧段和曲面段运动角之和为 50.03°，与已知条件 49.5°相近，基本相符。

2、推程段曲面投影线的拟合

由于推程段曲面投影为一不规则曲线，可采用拟合的方法得出该段曲线的函数。根据文献[2]，较高精度的曲线函数可采用最小二乘法拟合和拉格朗日插值法拟合方法求取。

1) 最小二乘法拟合

设拟合函数为：

$$\varphi^*(x) = a_0\varphi_0(x) + a_1\varphi_1(x) + a_n\varphi_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k\varphi_k(x)$$

由最小二乘原则使：

$$S = \min(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n [a_0\varphi_0(x_i) + a_1\varphi_1(x_i) + a_n\varphi_n(x_i) - y_i]^2$$

对 S 求偏导，使 $\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0$ 得：

$$\sum_{i=1}^n \varphi_k(x_i) [a_0\varphi_0(x_i) + a_1\varphi_1(x_i) + a_n\varphi_n(x_i) - y_i] = 0 \quad (k=0, 1, 2, \dots, n)$$

若对于任意函数 $h(x)$ ， $g(x)$ 引入记号：

$$(h, g) = \sum_{i=1}^m h(x_i)g(x_i)$$

即：

$$a_0(\varphi_k, \varphi_0) + a_1(\varphi_k, \varphi_1) + \dots + a_n(\varphi_k, \varphi_n) = (\varphi_k, f)$$

当 $\varphi_0(x)$ ， $\varphi_1(x)$ ， $\dots$ ； $\varphi_n(x)$ 线性无关时，方程组有唯一的解。 $\varphi_0(x)=1$ ，

$\varphi_1(x)=x$ ， $\dots$ ； $\varphi_n(x)=x^n$ ，相应的法方程组为：

$$\begin{pmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^n \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} & \cdots & \sum_{i=1}^m x_i^{2n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n y_i \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

根据 2-1 式，最小二乘法二阶拟合函数法方程组为：

$$\begin{cases} ma_0 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^2 = \sum_{i=1}^m y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^m x_i + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^3 = \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^m x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^4 = \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i \end{cases} \quad (2-2)$$

解出 a_0 , a_1 , a_2 , 即得二阶曲线拟合函数 $y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$ 。

如图 2.5 所示，在凸轮 A 面推程段曲面投影外侧曲线上取若干点（根据文献[2]，取点个数在 5 个以上时，对拟合函数精度的影响非常轻微。为了计算方便，取 6 个点），其坐标值为 x_i 、 y_i （以凸轮轴心为坐标系原点，见表 2.1），其中 6 号点为推程段曲面投影曲线起点位置，1 号点为推程段投影曲线终点位置。

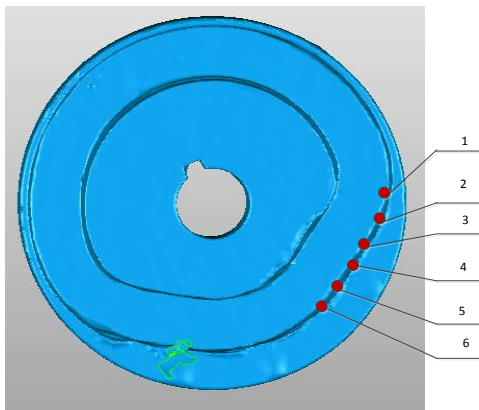


图 2.5 A 面推程段取点

表 2.1 A 面推程段所取点坐标值

i	1	2	3	4	5	6
x_i	20.266	24.633	30.235	36.633	43.633	48.323
y_i	81.336	81.846	82.296	83.571	85.553	89.608

将上述各点坐标值代入式 2-2 计算得： $m=6$, $\sum_{i=1}^6 x_i = 203.732$, $\sum_{i=1}^6 x_i^2 = 7512.578$, $\sum_{i=1}^6 x_i^3 = 295980.333$, $\sum_{i=1}^6 x_i^4 = 12250803.536$, $\sum_{i=1}^6 y_i = 504.21$, $\sum_{i=1}^6 x_i y_i = 17277.205$, $\sum_{i=1}^6 x_i^2 y_i = 642573.979$ 。

法方程组为：

$$\begin{cases} 6a_0 + 203.732a_1 + 7512.578a_2 = 504.21 \\ 203.732a_0 + 7512.578a_1 + 295880.333a_2 = 17277.205 \\ 7512.578a_0 + 295980.333a_1 + 12250803.536a_2 = 642573.979 \end{cases}$$

解得： $a_2 = 0.0128$ $a_1 = -0.6152$ $a_0 = 88.8931$ 。故 A 面推程段曲面投影最小二乘法二阶曲线拟合函数为：

$$y = 0.0128x^2 - 0.6152x + 88.8931。$$

考虑 A 面推程段曲面投影曲线曲率较大，应进一步求解三阶拟合函数。与求解二阶拟合函数步骤相同，设最小二乘法三阶曲线拟合函数为：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

仍取表 2.1 中的 6 点，可得： $\sum_{i=1}^6 x_i^5 = 525372769.812063$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i^3 y_i = 29547327.0639973$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i^6 = 23106839309.8016$ 。代入法方程组，则：

$$\begin{cases} 6a_0 + 203.732a_1 + 7512.578a_2 + 295980.333a_3 = 504.21 \\ 203.732a_0 + 7512.578a_1 + 295980.333a_2 + 12250803.536a_3 = 17277.205 \\ 295980.333a_0 + 12250803.536a_1 + 525372769.812063a_2 + 23106839309.8016a_3 = 29547327.0639973 \end{cases}$$

解得： $a_0 = 0.0008$ ， $a_1 = -0.066$ ， $a_2 = 1.958$ ， $a_3 = 62.2903$ 。故 A 面推程段曲面投影最小二乘法三阶曲线拟合函数为：

$$y = 0.0008x^3 - 0.066x^2 + 1.958x + 62.2903$$

2) 拉格朗日插值法

根据文献[2]可知，在不影响曲线精度的情况下，可采用二次多项式插值法拟合曲线的函数。

取三个互异节点 x_1 、 x_2 、 x_3 则对应的值为 $f(x_1)$ 、 $f(x_2)$ 、 $f(x_3)$ ，构造多项式为 $P_2(x) = ax^2 + bx + c$ 以此来近似代替 $f(x)$ 。使满足二次插值条件 $P_2(x_i) = f(x_i)$ ($i = 0, 1, 2$)。 $p_2(x)$ 的参数直接由插值条件决定，并满足下面方程组：

$$\begin{cases} ax_0^2 + bx_0 + c = y_0 \\ ax_1^2 + bx_1 + c = y_1 \\ ax_2^2 + bx_2 + c = y_2 \end{cases}$$

要求二次多项式即构造条件满足 $L_0(x_0) = 1$ ， $L_0(x_1) = 0$ ， $L_0(x_2) = 0$ ，因此 x_1 、 x_2 是 $L_0(x)$ 的两个零点，因此设 $L_0(x) = m(x - x_1)(x - x_2)$ 。又因 $L_0(x_0) = 1$ ，确定系数 $m = \frac{1}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)}$ ，从而导出： $L_0(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)}$ 。相应地，让 $L_1(x_0) = 0$ ， $L_1(x_1) = 1$ ， $L_1(x_2) = 0$ 。 $L_1(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)}$ 。让 $L_2(x_0) = 0$ ，

$L_2(x_1)=0$ ， $L_2(x_2)=1$ 。即 $L_2(x)=\frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)}$ 。式中的项 $L_0(x)$ 、 $L_1(x)$

和 $L_2(x)$ 称为基于点 x_0 、 x_1 、 x_2 的拉格朗日系数多项式（二次插值基函数）。

令：

$$P_2(x) = \sum_{k=0}^2 y_k L_{1,k}(x) = \sum_{k=0}^2 y_k \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^n \left(\frac{x-x_i}{x_k-x_i} \right)$$

由 n 次差值的多向性可知， $P_2(x)$ 就是所求的二次插值。上式称为 2 次多项式拉格朗日插值法。矩阵形式：

$$P_2 = \begin{pmatrix} y_0 & y_1 & y_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} & -\frac{x_1+x_2}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} & \frac{x_1x_2}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} \\ \frac{1}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} & -\frac{x_0+x_2}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} & \frac{x_0x_2}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} \\ \frac{1}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} & -\frac{x_0-x_1}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} & \frac{x_0x_1}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^2 \\ x \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

将图 2.5 中各点的坐标值（见表 2.1）代入式 2-3 可得：

$$P = \begin{pmatrix} 81.846 & 83.571 & 89.608 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{228} & -\frac{36.633+43.633}{228} & \frac{36.633*43.633}{228} \\ \frac{1}{-84} & -\frac{24.633+43.633}{-84} & \frac{24.633*43.633}{-84} \\ \frac{1}{133} & -\frac{24.633+36.633}{133} & \frac{24.633*36.633}{133} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^2 \\ x \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2-4)$$

计算得拉格朗日插值法二阶拟合函数为：

$$g(x) = 0.0073x^2 - 0.30573x + 84.9253$$

3) 筛选误差最小的 A 面推程段曲面投影曲线

a、最小二乘法与拉格朗日插值法的误差比较

利用 MATLAB 分别求出最小二乘法二阶多项式曲线（如图 2.6 所示）和拉格朗日差值二阶多项式曲线的图形（如图 2.7 所示）。

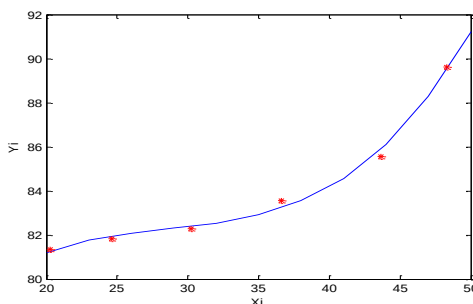


图 2.6 A 面推程段曲面投影最小二乘法二次多项式拟合曲线

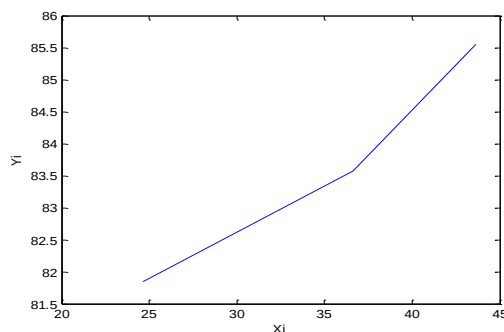


图 2.7 A 面推程段曲面投影拉格朗日插值法二次多项式拟合曲线

根据图形中的曲线，相对与原始各点的坐标值比较，两种方法产生曲线的实际点坐标对比如表 2.2 所示。很显然，最小二乘法拟合曲线误差更小，更接近于实际情况。所以，凸轮 A 面推程段外侧曲线的拟合曲线函数为：

$$y = 0.0128x^2 - 0.6152x + 88.8931$$

表 2.2 两种二阶曲线拟合函数误差对比

A 面 (x_i, y_i)				
Vxelements 坐标值	最小二乘法		拉格朗日插值法	
	坐标值	误差值	坐标值	误差值
(21.436,81.431)	(21.436,81.587)	(0,0.156)	(21.436,81.726)	(0,0.295)
(23.553,81.493)	(23.553,81.504)	(0,0.011)	(23.553,81.774)	(0,0.281)
(26.491,81.912)	(26.491,81.579)	(0,-0.333)	(26.491,89.990)	(0,8.078)
(34.633,82.337)	(34.633,82.940)	(0,0.567)	(34.633,83.099)	(0,0.762)
(37.421,83.692)	(37.421,83.796)	(0,0.284)	(37.421,83.707)	(0,0.015)
(45.127,86.963)	(45.127,87.197)	(0,0.234)	(45.127,85.997)	(0,-0.966)

由表 2.2 两种方法的二阶多项式拟合函数与实际坐标值的误差偏移值可以看到，最小二乘法的误差值要小于拉格朗日插值法的误差值。也就是说利用最小二乘法拟合的曲线形状更接近于凸轮的曲面形状。因此，在 A 面推程段曲面投影曲线拟合时，应选用最小二乘法。

b、最小二乘法二阶、三阶拟合函数的误差比较

MATLAB 中最小二乘法二阶、三阶拟合曲线的图形对比如图 2.7 所示。其中，绿线表示最小二乘法二阶拟合函数 $y = 0.0128x^2 - 0.6152x + 88.8931$ ，红线表示最小二乘法三阶拟合函数 $y = 0.0008x^3 - 0.066x^2 + 1.958x + 62.2903$ 。由图 2.7 可以看出，三阶拟合曲线更与所选拟合点更靠近。

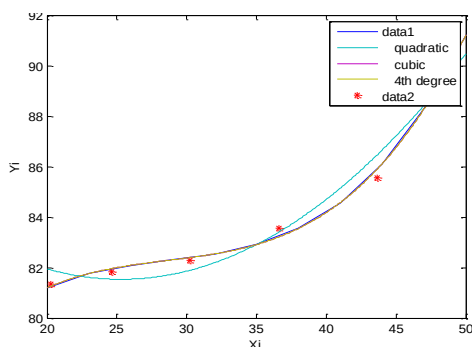


图 2.7 A 面最小二乘法二阶、三阶拟合曲线对比

c、A 面推程段曲面投影曲线拟合函数的确定

由上文的误差比较可知，最小二乘法三阶拟合曲线最接近于曲面投影曲线的形状，故 A 面推程段曲面投影曲线形状的拟合函数为：

$$y = 0.0008x^3 - 0.066x^2 + 1.958x + 62.2903$$

内侧曲线则在设计时将外侧曲线沿凸轮径向向内平移 22mm 即可。

2.5.2 凸轮 A 面远停程段曲面

1、远停程段运动角

如图 2.3 所示，凸轮 A 面远停程段为一圆弧曲线。利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮推程段的运动角为 183.9°，和已知条件 184°基本相符。

2、远停程段形状和尺寸

由 VXmodel 模块反求可知，此段形状为一圆弧。外侧圆弧直径由 VXmodel 模块（如图 2.4）求得为 152.02mm，故基本尺寸为 $\Phi 152\text{mm}$ 。内侧曲面投影将外侧投影沿凸轮径向向内平移 22mm 即可。

2.5.3 凸轮 A 面回程段曲面

1、回程段运动角

根据沟槽凸轮的运动要求，A 面回程运动段的运动角与推程阶段运动角相同，故其角度确定为 49.5°。

2、回程段曲线

根据沟槽凸轮的运动要求，A 面回程运动段的曲面形状与推程阶段曲面形状相对称。故其外侧曲面投影曲线的方程为：

$$y = -0.0008x^3 - 0.066x^2 - 1.958x + 62.2903$$

内侧曲面投影将外侧投影沿凸轮径向向内平移 22mm 即可。

2.5.4 凸轮 A 面近停程段曲面

1、近停程段运动角

如图 2.3 所示，凸轮 A 面近停程段外侧曲面投影为一圆弧曲线。利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮推程段的运动角为 76.89° ，和已知条件 77° 基本相符。

2、近停程段形状和尺寸

由 VXmodel 模块反求可知，此段形状为一圆弧。外侧圆弧直径由 VXmodel 模块（如图 2.4）求得为 127.96mm，故基本尺寸为 $\Phi 128\text{mm}$ 。内侧曲面投影将外侧投影沿凸轮径向向内平移 22mm 即可。

由于该凸轮为对心凸轮，此段圆弧直径也是 A 面凸轮沟槽外侧曲面投影曲线的基圆直径。

2.6 凸轮 B 面曲面投影线的反求

与凸轮 A 面相类似，凸轮 B 面的沟槽曲面也由内、外两侧的曲面组成。在反求曲面投影线时，也可先反求外侧曲面投影线，内侧曲面投影线可由外侧曲面投影线平移一段距离（即沟槽宽度）得到。

2.6.1 凸轮 B 面推程段曲面

1、推程运动角

如图 2.3 所示，凸轮 B 面推程段为一不规则曲线，由两部分组成：第一部分为远停程段和推程段通过一圆弧相切连接，测得圆弧半径 34mm；第二部分为近停程段到圆弧段之间的一段曲面，此段曲面利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮推程段对应的运动角为 31.76° ，圆整为 32° 。又测得圆弧段所占运动角为 25.1° 。圆弧段和曲面段运动角之和为 56.86° ，与已知条件 57° 相近，基本相符。

2、推程段曲面投影线的拟合

与 2.5 节相同，B 面沟槽曲面投影也用相同的最小二乘法和拉格朗日插值法进行拟合，最后通过比较精度来确定曲面投影的函数。

1) 最小二乘法拟合

与 2.6.1 节方法相同，在 B 面推程曲面投影外侧曲线上取若干点（如图 2.8 所示），其中 6 号点为起始点，1 号点为重点位置。

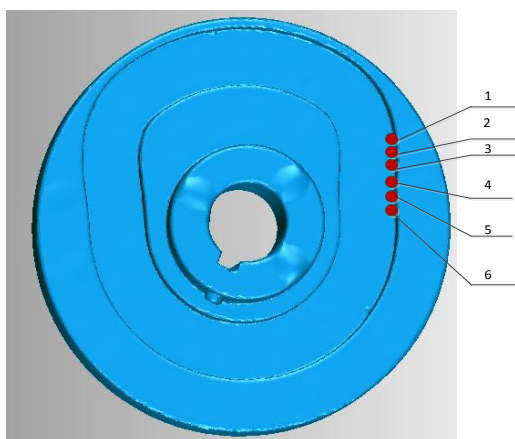


图 2.6 B 面推程段取点

表 2.3 B 面推程段所取点坐标值

i	1	2	3	4	5	6
x_i	28.834	32.485	37.016	42.639	47.188	52.094
y_i	108.589	107.344	105.905	104.344	102.811	101.366

将上述各点坐标代入式 2-2，经计算得： $m=6$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i = 240.256$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i^2 = 100015.436$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i^3 = 432939.002$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i^4 = 19310520.248$ ， $\sum_{i=1}^6 y_i = 630.359$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i y_i = 25119.434$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i^2 y_i = 1042389.387$ ，法方程组为：

$$\begin{cases} 6a_0 + 240.256a_1 + 10015.436a_2 = 630.359 \\ 240.256a_0 + 10015.436a_1 + 432939.002a_2 = 25119.434 \\ 10015.436a_0 + 432939.002a_1 + 19310520.248a_2 = 1042389.387 \end{cases}$$

解得： $a_2 = -0.0004$ ， $a_1 = -0.3433$ ， $a_0 = 118.0869$ 。最小二乘法二阶拟合曲线函数为：

$$y = -0.0004x^2 - 0.3433x + 118.0869$$

类似的，由已知点坐标值可得： $\sum_{i=1}^6 x_i^5 = 884162234.897$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i^3 y_i = 44876280.794$ ， $\sum_{i=1}^6 x_i^6 = 41358320634.742$ 。最小二乘法三阶拟合函数的法方程组为：

$$\begin{cases} 6a_0 + 240.256a_1 + 10015.436a_2 + 432939.002a_3 = 630.359 \\ 240.256a_0 + 10015.436a_1 + 432939.002a_2 + 19310520.248a_3 = 25119.434 \\ 10015.436a_0 + 432939.002a_1 + 19310520.248a_2 + 884162234.897a_3 = 1042389.387 \\ 32939.002a_0 + 19310520.248a_1 + 884162234.897a_2 + 41358320634.742a_3 = 44876280.794 \end{cases}$$

解得： $a_0 = -0.0001$ ， $a_1 = 0.0120$ ， $a_2 = -0.8018$ ， $a_3 = 124.0035$ 。

最小二乘法三阶拟合曲线函数为：

$$y = -0.0001x^3 + 0.012x^2 - 0.8018x + 124.0035$$

2) 拉格朗日插值法拟合

将图 2.6 中各点的坐标值（见表 2.3）代入式 2-3 可得：

$$P = \begin{pmatrix} 107.344 & 104.344 & 102.811 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{149.294} & -\frac{42.639 + 47.188}{149.294} & \frac{42.639 * 47.188}{149.294} \\ \frac{1}{-46.191} & -\frac{32.485 + 47.188}{-46.191} & \frac{32.485 * 47.188}{-46.191} \\ \frac{1}{66.884} & -\frac{32.485 - 42.639}{66.884} & \frac{32.485 * 42.639}{66.884} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^2 \\ x \\ 1 \end{pmatrix}$$

计算可得拉格朗日插值法二阶拟合函数为：

$$y = -0.0028x^2 - 0.0832x + 113.0277$$

3) 筛选误差最小的 B 面推程曲面投影曲线

考虑 B 面推程段曲面投影曲线曲率较小，应首先考虑最小二乘法二阶、三阶拟合曲线的精度，然后与拉格朗日插值拟合函数的精度进行比较，最后确定该曲面投影曲线的拟合函数。

a、最小二乘法二阶、三阶拟合函数的误差比较

由 MATLAB 得出最小二乘法二阶、三阶曲线对比如图 2.9 所示。由于此段曲线曲率较小，二阶、三阶曲线两者与实际曲线误差基本一致，都十分接近所取的拟合点。

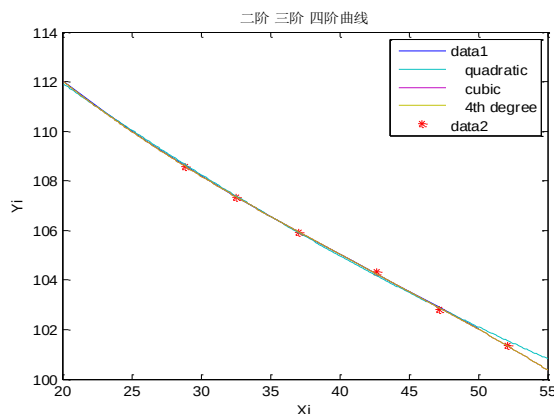


图 2.9 B 面推程段曲面投影最小二乘法二阶、三阶拟合曲线

因两者误差区别不大，从数字化制造的方便性出发，选择相对简单的二阶拟合曲线作为拟合函数比较对象，即：

$$y = -0.0004x^2 - 0.3433x + 118.0869$$

b、拉格朗日插值法拟合函数与最小二乘法拟合函数的误差比较

在拉格朗日拟合曲线和最小二乘法二阶拟合曲线分别取相应的点与 Vxelements 中的是几点坐标值的比较如表 2.4 所示。

表 2.4 两种曲线误差对比

B 面 (x_i, y_i)				
Vxelements 坐标值	最小二乘法		拉格朗日插值法	
	坐标值	误差值	坐标值	误差值
(29.533,108.761)	(29.533,108.297)	(0,-0.464)	(29.533,108.128)	(0,-0.633)
(32.869,107.490)	(32.869,107.235)	(0,-0.255)	(32.869,107.268)	(0,-0.222)
(36.837,106.141)	(36.837,105.984)	(0,-0.157)	(36.837,106.163)	(0,-0.023)
(39.737,105.403)	(39.737,105.077)	(0,-0.326)	(39.737,105.300)	(0,-0.103)
(43.395,104.138)	(43.395,103.943)	(0,-0.195)	(43.395,104.144)	(0,0.006)
(48.692,102.336)	(48.692,102.319)	(0,-0.017)	(48.692,102.338)	(0,0.002)

由表 2.4 的误差比较可知，拉格朗日插值法拟合函数除第一点外，其它点与实际点的坐标误差值均比最小二乘法二阶拟合函数的误差值要小。

c、B 面推程段曲面投影曲线拟合函数的确定

由上文的误差比较可知，拉格朗日插值法拟合曲线最接近于曲面投影曲线的形状，故 B 面推程段曲面投影曲线形状的拟合函数选择为：

$$y = -0.0028x^2 - 0.0832x + 113.0277$$

内侧曲线则在设计时将外侧曲线沿凸轮径向向内平移 22mm 即可。

2.6.2 凸轮 B 面远停程段曲面

1、远停程段运动角

如图 2.3 所示，凸轮 B 面远停程段为一圆弧曲线。利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮推程段的运动角为 66.34° ，接近已知运动角，和已知条件 66° 相符。

2、远停程段形状和尺寸

由 VXmodel 模块反求可知，此段形状为一圆弧。外侧圆弧直径由 VXmodel 模块（如图 2.4）求得为 152.31mm ，故基本尺寸为 $\Phi 152\text{mm}$ 。内侧曲面投影将外侧投影沿凸轮径向向内平移 22mm 即可。

2.6.3 凸轮 B 面回程段曲面

1、回程段运动角

根据沟槽凸轮的运动要求，B 面回程运动段的运动角与推程阶段运动角相同，故其角度为 57° 。

2、回程段曲线

根据沟槽凸轮的运动要求，B 面回程运动段的曲面形状与推程阶段曲面形状相对称。故其外侧曲面投影曲线的方程为：

$$g(x) = -0.0028x^2 + 0.0832x + 113.0277$$

内侧曲面投影将外侧投影沿凸轮径向向内平移 22mm 即可。

2.6.4 凸轮 B 面近停程段曲面

1、近停程段运动角

如图 2.3 所示，凸轮 B 面近停程段外侧曲面投影为一圆弧曲线。利用 VXmodel 模块（如图 2.4）测量得到的凸轮推程段的运动角为 179.2° ，接近已知运动角，和已知条件 180° 相符。

2、近停程段形状和尺寸

由 VXmodel 模块反求可知，此段形状为一圆弧。外侧圆弧直径由 VXmodel 模块（如图 2.4）求得为 119.39mm ，故基本尺寸为 $\Phi 120\text{mm}$ 。内侧曲面投影将外侧投影沿凸轮径向向内平移 22mm 即可。

由于该凸轮为对心凸轮，此段圆弧直径也是 B 面凸轮沟槽外侧曲面投影曲线的基圆直径。

第三章 从动件运动规律分析与改进

3.1 从动件运动规律与凸轮磨损分析

在凸轮正向设计中，必须先根据凸轮机构的工作要求，设定从动件的运动规律。从动件的运动规律由升程运动规律（凸轮转角与从动件升程之间的关系）、速度运动规律（凸轮转角与从动件运动速度之间的关系）和加速度运动规律（凸轮转角与从动件加速度之间的关系）三个部分组成。从动件常用的运动规律有等速运动规律、等加速等减速运动规律、多项式运动规律、三角函数运动规律等等，在此基础上设计凸轮曲线。设定从动件运动规律的根本目的是力求在凸轮机构运动过程中**尽量减少从动件对凸轮的冲击**，即**降低从动件相对于凸轮的加速度**，从而降低凸轮的磨损、提高机构工作的可靠性。因此，在从动件运动规律的三个组成部分中，**加速度运动规律的设定和分析处于关键地位**。

在实际设计和制造时，凸轮曲面投影曲线形状是根据从动件运动规律得到的一系列离散点连接而成的，在实际工作时从动件运动规律不可能完全按照理论规律运行，在**连接点之间仍然存在较大的加速度变化**，从动件对凸轮的冲击不可避免。

在凸轮反求设计中，是根据已有拟合曲面而成的形状反求从动件运动规律，其运动规律只能接近于原有的运动规律。因此，在反求设计中，要根据实际情况适当调整拟合函数，在**不违反从动件升程运动规律的前提下，尽量减少从动件加速度和加速度的突变**，减少冲击，降低磨损，提高凸轮使用寿命。

从第二章分析可知，该型沟槽凸轮两面的从动件整体运动规律如下：

1、凸轮 A 面

远停程段、近停程段曲面投影为曲线圆弧型，从动件在此两阶段的处于静止状态，从动件升程 h 为 0，速度 v 为 0，加速度 a 为 0。

推程段、回程段曲面投影曲线为非圆曲线，从动件运动规律需要根据拟合函数分析，并结合磨损情况加以改进。

2、凸轮 B 面

与 A 面相类似，远停程段、近停程段曲面投影为曲线圆弧型，从动件在此两阶段的处于静止状态，从动件升程 h 为 0，速度 v 为 0，加速度 a 为 0。

该面推程段、回程段曲面投影曲线亦为非圆曲线，从动件运动规律需要根据拟合函数分析，并结合磨损情况加以改进。

3、凸轮磨损情况

如图 3.1 所示，由于凸轮 A 面控制工件的装卸运动。在推程段，由于凸轮从动件夹持工件，载荷由最小增至较大，载荷较大且变化剧烈，冲击很强，故推程段磨损严重。对于与推程段相对称的回程段，由于工件装夹由紧变松，载荷相对较轻，加速度变化不够剧烈，冲击较弱，该段凸轮的磨损要比推程段小得多。其它如远停程段和近停程段，由于从动件加速度没有变化，无冲击，此两段曲面磨损非常轻微。根据磨损情况，需要在分析从动件运动规律时，根据 2.5.1 节的曲面投影曲线拟合函数加以改进，减少冲击，降低凸轮磨损，提高寿命。

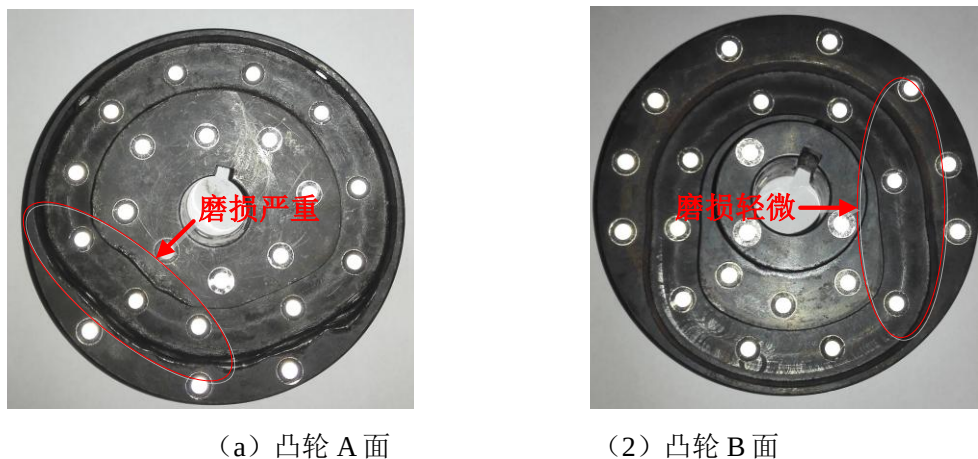


图 3.1 凸轮磨损情况

凸轮 B 面因控制工件的焊接运动，焊枪几乎不接触工件，施加在从动件上的载荷很小，变化也很小，因而凸轮整体上磨损轻微。因此，B 面从动件运动规律只要根据 2.6.1 节的曲面投影曲线分析其冲击力即可。

3.2 凸轮 A 面从动件运动规律与改进

令 $x=\rho\cos\varphi$ ， $y=\rho\sin\varphi$ ，拟合函数由直角坐标系转换为极坐标系函数，以此便于分析从动件运动规律。其中 ρ 为凸轮向径， φ 为凸轮转角。由于该型沟槽凸轮为对心凸轮，故 ρ 可看成为从动件的升程， φ 可看成凸轮投影曲线相对于轴心的转角和圆心角。根据极坐标系定义，对时间求导的意义为： $\rho'=v$ ， v 为从动件的速度； $\rho''=a$ ， a 为从动件的加速度； $\varphi'=\omega$ ， ω 为凸轮的角速度；且有 $\rho\omega=\dot{\varphi}$ 。

1、最小二乘法三阶拟合函数的推程段运动规律分析

由 2.5.1 节可知，凸轮 A 面推程段曲面投影曲线最佳拟合函数为最小二乘法三阶多项式拟合函数，其形式为：

$$y = 0.0008x^3 - 0.066x^2 + 1.958x + 62.2903$$

其一阶导数为：

$$y' = 0.0024x^2 - 0.132x + 1.958$$

其二阶导数为：

$$y'' = 0.048x - 0.132 \quad (3-1)$$

将曲面投影曲线函数各阶导数转换为极坐标函数， y 的极坐标形式对时间求一阶、二阶导数可得：

$$y' = (\rho \cos \varphi)' = v \cos \varphi - \varphi \sin \varphi$$

$$y'' = (v \cos \varphi - \varphi \sin \varphi)' = a \cos \varphi - \omega \sin \varphi - \varphi \omega \cos \varphi \quad (3-2)$$

式（3-2）代入式（3-1）可得从动件的加速度为：

$$a = (0.048 \frac{\varphi}{\omega} + \omega) \tan \varphi + \varphi \omega - \frac{0.132}{\cos \varphi}$$

其中，由于凸轮是匀速转动， ω 为一常数。

由 2.5.1 节可知，凸轮 A 面推程段非圆弧曲面对应转角 $\varphi = 26.5^\circ$ 。如图 3.2 所示，不妨设 $\omega=1$ ， φ 值以 1° 为间隔，利用 EXCEL 图表功能观察和分析从动件加速度 a 随 φ 变化的情况。由 2.5.1 节分析可知，最小二乘法三阶拟合函数与凸轮曲面投影曲线最为接近，图 3.2 的情况可以较为真实得反映凸轮的运动和冲击情况。

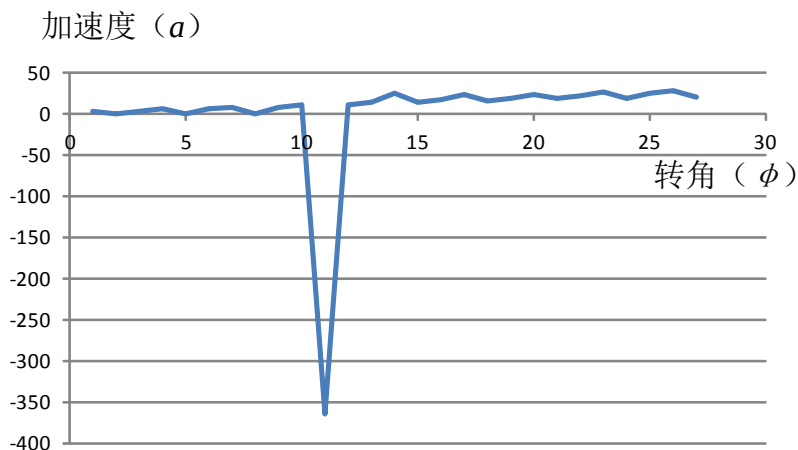


图 3.2 A 面三阶拟合函数下的从动件加速度变化

由图 3.2 可知：

（1）因推程段与近停程段结合处的加速度变化较小，引起冲击很小，引起的磨损很少。如图 3.1（a），这与现有凸轮的磨损情况相符。

（2）从动件推程过程中加速度逐渐加大，且周期性出现加速度突然增加很大的情况，必然引起较大冲击。另外，A 面负责工件的装卸运动，工作载荷较大，必将使冲击进一步增大。这两种情况必将是该段凸轮沟槽曲面产生剧烈的磨损。如图 3.1（a），这也与现有凸轮推程段的磨损情况相符。

（3）推程段与远停程段结合处的加速度 a 由一定值变为 0，也存在一定柔性冲击，但比推程过程中的冲击小得多，也会引起一定磨损。如图 3.1（a），这也与现有凸轮的磨损情况相符。

（4）回程段曲面投影曲线与推程段完全对称，加速度变化规律也与推程段完全对称，但由于处于工件卸载运动中，工作载荷要比推程中的载荷小得多，因而从动件加速度变化引起的冲击也要小得多，此段沟槽曲面的磨损也将很小。如图 3.1（a），这也与现有凸轮回程段的磨损情况的情况相符。

综上所述，如用最小二乘法三阶拟合函数重构推程段曲面投影曲线，虽其形成的曲面形状最与现有凸轮曲面形状接近，但无法降低从动件对凸轮的冲击，磨损情况无法改善。

2、A 面沟槽曲面推程段投影曲线的改进

投影曲线的改进既要降低从动件在推程阶段对凸轮曲面的冲击、从而有效改善该段曲面的磨损，又要兼顾拟合曲线与现有凸轮相近。为此，根据 2.5.1 节的分析，因最小二乘法二阶拟合函数曲率变化较小，引起的冲击必然降低。A 面推程段曲面投影拟合曲线可改用最小二乘法二阶拟合函数。

由 2.5.1 节可知，最小二乘法二阶拟合函数为：

$$y = 0.0128x^2 - 0.6152x + 88.8931$$

其一阶导数为：

$$y' = 0.0256x - 0.6152$$

其二阶导数为：

$$y'' = 0.0256 \quad (3-3)$$

与前文相同，将二阶导数转换为极坐标形式，将（3-2）式代入（3-3）式，可得到二阶拟合曲线下从动件在推程段加速度 a 随转角 φ 的变化规律：

$$a = \frac{0.0256}{\cos \varphi} + \omega \tan \varphi + \varphi \omega$$

同样地，如图 3.3 所示，不妨仍设 $\omega=1$ ， φ 值以 1° 为间隔，利用 EXCEL 图表功能观察和分析从动件加速度 a 随 φ 变化的情况，并同时与最小二乘法三阶拟合函数的变化情况相比较。

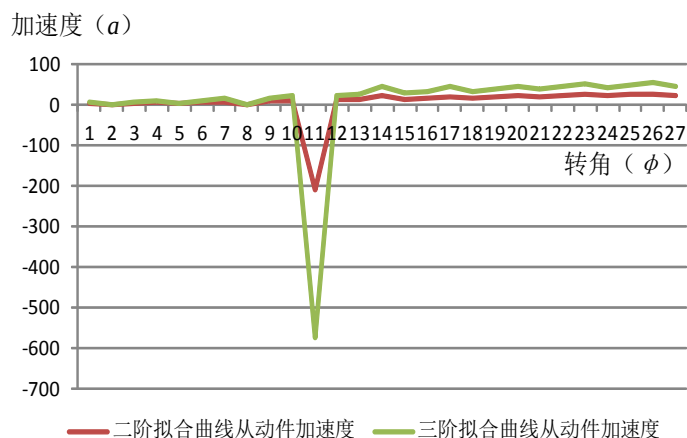


图 3.3 A 面二阶拟合曲线与三阶拟合曲线从动件加速度对比

从图 3.3 可以看出：

(1) 二阶拟合曲线在整个推程段大大降低了从动件的加速度，引起的冲击必然极大减少，凸轮推程段磨损必将大大降低。

(2) 推程过程中的加速度突变降低了近 2.5 倍，必将明显改善冲击情况。在同等工作载荷下，突变处引起的磨损也极大地降低。

(3) 二阶拟合曲线在与近停程段和远停程段的柔性冲击进一步降低，也有利于凸轮磨损情况的改善。

3、A 面推程和回程沟槽曲面投影曲线的改进拟合函数

根据上文的分析，在兼顾降低凸轮磨损要求和尽量接近原有凸轮沟槽曲面形状的要求下，A 面推程段的曲面投影曲线拟合函数确定为：

$$y = 0.0128x^2 - 0.6152x + 88.8931$$

A 面回程段曲面与推程段对称，故其拟合函数为推程段的镜像函数，为：

$$y = 0.0128x^2 + 0.6152x + 88.8931$$

3.3 凸轮 B 面从动件运动规律与拟合函数

1、B 面推程段曲面投影曲线拟合函数的运动规律分析

由 2.6.1 节的分析可知，凸轮 B 面升程段曲面投影曲线的拟合函数为：

$$y = -0.0028x^2 - 0.0832x + 113.0277$$

其一阶导数为：

$$y' = -0.0056x - 0.0832$$

其二阶导数为：

$$y'' = -0.0056 \quad (3-4)$$

将式（3-2）代入式（3-4），得凸轮 B 面推程段加速度 a 随转角 φ 的变化规律为：

$$a = \frac{-0.0056}{\cos \varphi} + \omega \tan \varphi + \varphi \omega$$

不妨仍设 $\omega=1$ ， φ 值以 1° 为间隔，利用 EXCEL 图表功能观察和分析从动件加速度 a 随 φ 变化的情况，如图 3.4 所示。

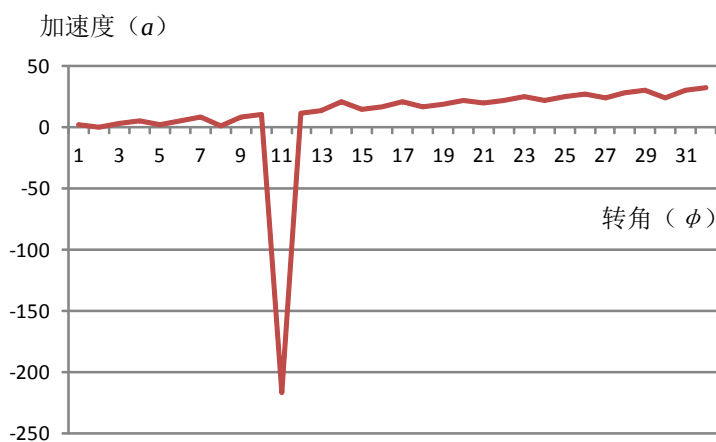


图 3.4 B 面二阶拟合函数下的从动件加速度变化

由图 3.4 可以看出，B 面推程段曲面投影曲线拟合函数产生的加速度情况与 A 面推程段二级拟合函数相类似：在整个推程段加速度呈逐渐加大趋势，其间也有加速度突变情况，但加速度的大小要小于 A 面的情况。由于 B 面承担的是工件焊接运动的控制，从动件工作载荷和摩擦载荷极小，冲击因而很小，加速度的突变不会过多加重从动件对凸轮的冲击，因此 2.6.1 节中的拟合函数是合适的。

2、B 面推程段和回程段曲面投影曲线拟合函数的确定

根据上文分析，凸轮 B 面推程段和回程段利用拉格朗日插值法拟合曲面投影曲线既满足凸轮升程运动的要求，也满足加速度运动规律。B 面推程段的曲面投影曲线拟合函数为：

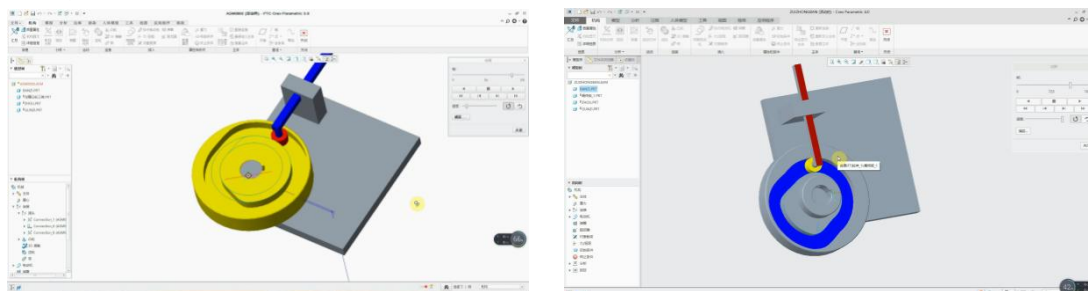
$$y = -0.0028x^2 - 0.0832x + 113.0277$$

B 面回程段的曲面投影曲线拟合函数为：

$$y = -0.0028x^2 + 0.0832x + 113.0277$$

3.4 沟槽凸轮机构的运动仿真

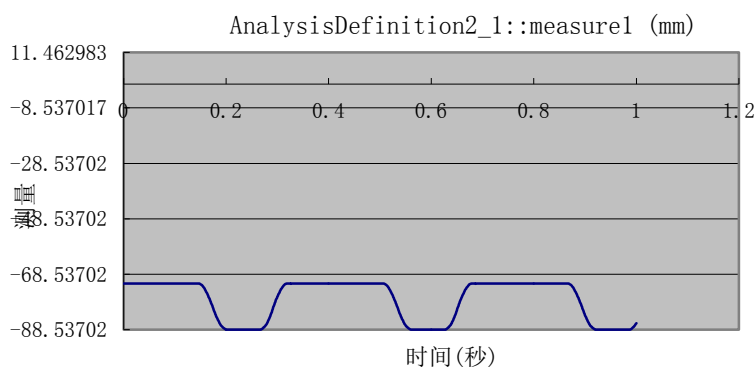
在完成了沟槽凸轮各部分特征数据的反求之后，可以利用 3D CAD 软件进行 3D CAD 模型重构，并进行机构运动仿真。本次毕业设计采用 PTC Creo Parametric 4.0 软件进行建模和运动仿真（如图 3.5 所示），验证凸轮反求设计的正确性。



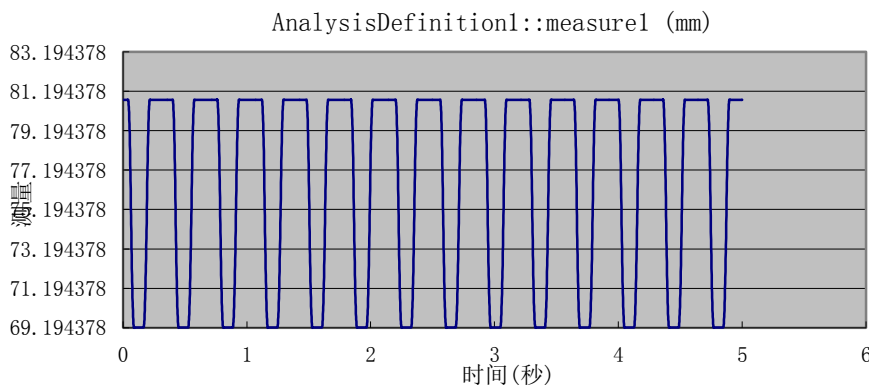
(a) 凸轮 A 面的运动仿真 (b) 凸轮 B 面的运动仿真

图 3.5 沟槽凸轮的运动仿真

通过运动仿真，得出沟槽凸轮升程运动规律，如图 3.6 所示。



(a) 凸轮 A 面的升程运动规律



(b) 凸轮 B 面的升程运动规律

图 3.6 沟槽凸轮的升程运动规律

图 3.6 的升程运动规律表明，沟槽凸轮 A 面、B 面在推程段、远停程段、回程段、近停程段的升程呈“上升→停止→下降→停止”循环，**各段升程与原有凸轮升程运动规律和行程距离相符**，反求设计的精确很高。

第四章 凸轮的试制与应用

4.1 沟槽凸轮 CAD 模型重构

根据第二章、第三章对沟槽凸轮数据反求和曲面投影曲线拟合，该型沟槽凸轮 2D CAD（AUTOCAD 软件）模型如图 4.1 所示（详见附件“沟槽凸轮 2D 图形”），3D CAD（PTC Creo Parametric 4.0 软件）模型（详见附件“沟槽凸轮 3D 模型”）如图 4.2 所示。

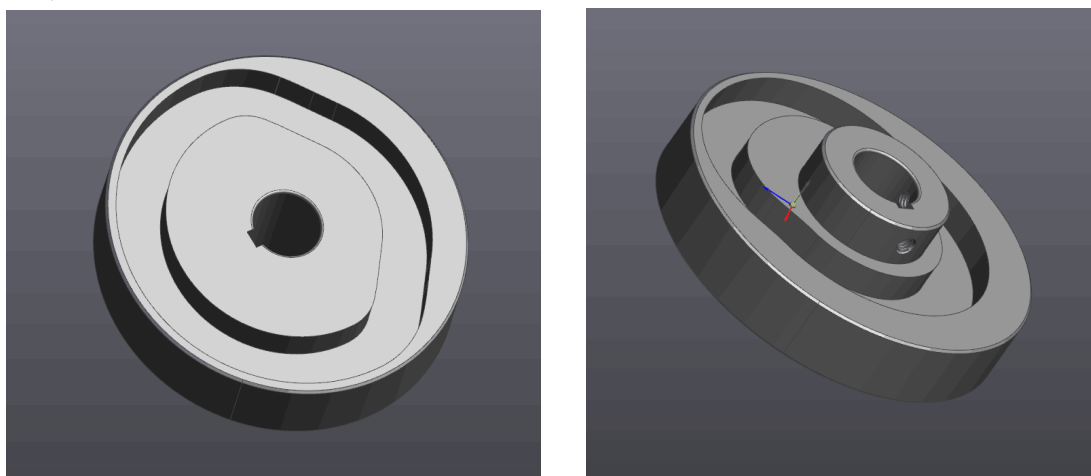


图 4.2 沟槽凸轮 3D CAD 模型

4.2 沟槽凸轮的工艺规程与工序设计

1、凸轮工艺结构分析

凸轮主要有平面、孔、槽、螺纹等组成，其中一些基准平面，孔的尺寸精度及形位精度要求较高。

根据沟槽凸轮图纸对凸轮加工面和孔的分析如下：

- （1）凸轮的上平面与底平面之间的高度 50 ± 0.05 其粗糙度要求 Ra6.3。
- （2）凸轮的外圆和内孔与下平面有垂直度要求，其粗糙度要求为 Ra6.3。
- （3）凸轮的外圆和沟槽轮廓与中心孔有同轴度要求，其粗糙度要求为 Ra6.3。

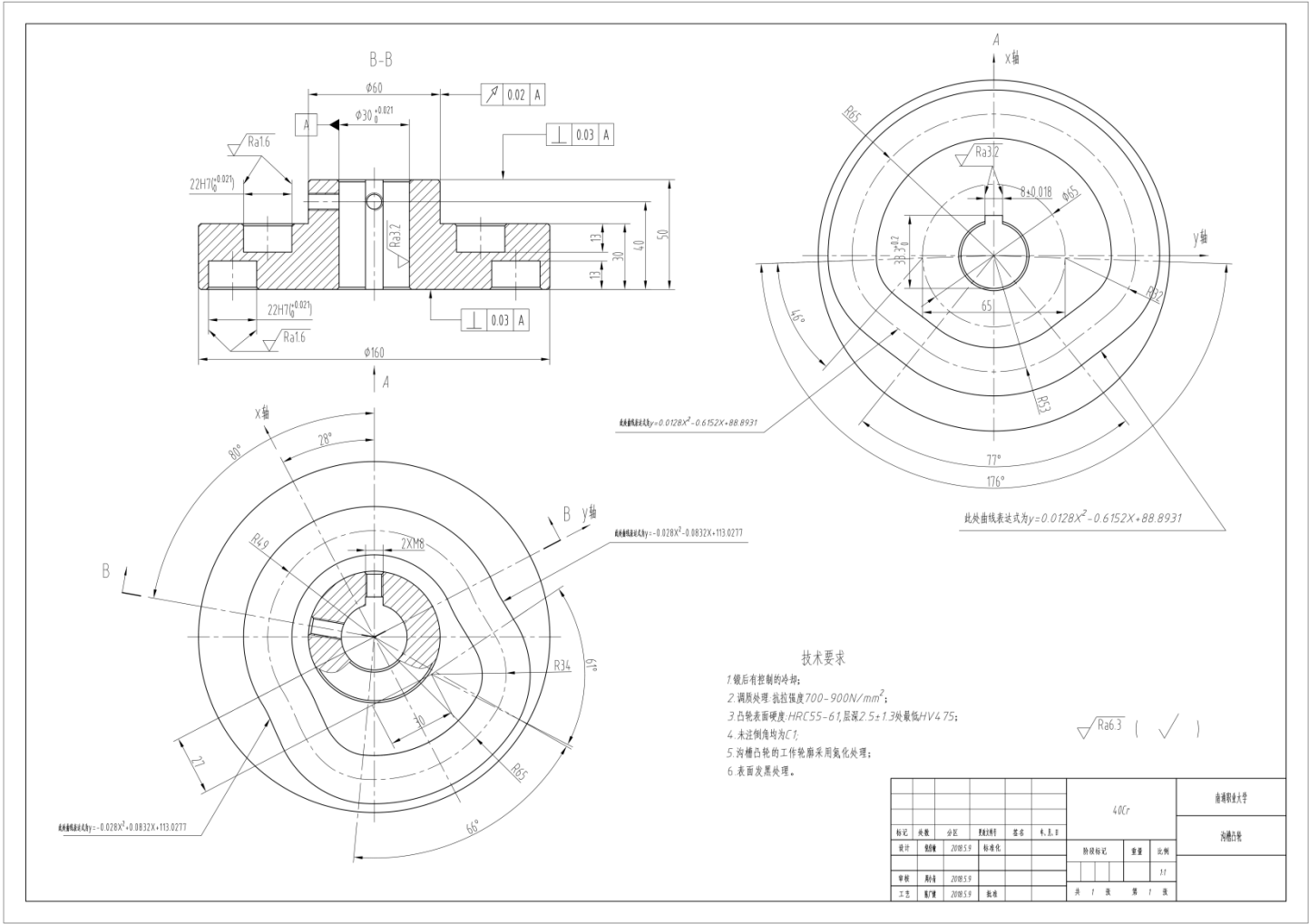


图 4.1 沟槽凸轮 2D CAD 图形

（4）凸轮中心孔尺寸 $\varnothing 30\text{mm}$ 且孔精度要求较高，适合采用镗孔加工的方式进行加工，其粗糙度要求为 $Ra3.2$ 。

（5） 8mm 的键槽需要用拉床进行切削加工。

（6） $2 \times M8$ 的螺纹孔先加工底孔，再进行攻螺纹。

凸轮沟槽工作时受周期性的冲击载荷。凸轮与从动件之间的接触应力很大，相对滑动速度也很高，因此凸轮工作表面的磨损比较严重。针对这种情况，凸轮沟槽表面除应该有的较高的尺寸精度、较小的表面粗糙度和足够的刚度外，还应有较高的耐磨性和良好的润滑。根据材料特性，所以选择合金钢 40Cr。

2、加工工艺路线和基准分析

（1）加工路线

凸轮的加工应该按照先面后孔的加工原则，先加工外圆、上下端面，然后再以加工过的端面和外圆作为加工基准平面，进行 $\varnothing 30\text{mm}$ 孔的加工，再以端面 and 中心孔为定位基准进行键槽以及螺纹孔的加工，最后以键槽、中心孔以及端面作为定位基准，加工两侧的凸轮沟槽。

沟槽凸轮外圆及中心孔因轮廓比较简单，所以采用手工编程。将程序输入到 CK6141 FANUC-0iTD 数控车床，来完成加工。

凸轮沟槽由于是一些非圆曲线构成的，通过手工编程很难实现，所以采用 CAXA 制造工程师进行三维造型、后置处理生成程序、导入到 XK713 FANUC-0iMC 数控加工中心来完成加工。

（2）基准选择

沟槽凸轮外圆及中心孔选用车削加工来完成，定位基准选择毛坯外圆及端面。

凸轮沟槽加工过程中对凸轮 A 面、B 面沟槽的相对位置精度要求较高。加工凸轮沟槽时，应选择凸轮的中心孔及键槽作为加工精基准，以很好地保证沟槽的相对位置精度。

3、工艺规程的制订

因为中小批量生产，所以使用 CK6141 FANUC-0iTD 数控车床和 XK713 FANUC-0iMC 数控加工中心作为主要加工设备。工艺规程的制订遵循提高生产率、保证加工精度、降低生产成本的原则，沟槽凸轮加工工艺规程如表 4.1 所示。

表 4.1 沟槽凸轮机械加工工艺规程

工序号	工序名称	工序内容	定位基准	设备
10	备料			
20	热处理	退火		
30	粗车	夹 A 端面侧外圆，车外圆至 $\Phi 162 \times 55\text{mm}$ ，B 端面车平。粗车阶梯轴台阶至 $\Phi 62\text{mm}$	外圆、B 端面	CK6141
40	精车	夹 A 端面侧外圆，车外圆至 $\Phi 160 \times 55\text{mm}$ ，精车阶梯轴台阶 $\Phi 60\text{mm}$	外圆、B 端面	CK6141
50	钻	钻中心定位孔	外圆、B 端面	CK6141
60	钻	钻孔，孔深至 55mm	外圆、B 端面	CK6141
70	镗	镗孔至 $\Phi 30\text{mm}$ ，并按图纸控制好镗孔精度	外圆、B 端面	CK6141
80	车	调头，夹 B 端面侧外圆，杠杆千分表找正外圆，A 端面车平，保证总长 50mm	外圆、B 端面	CK6141
90	拉	拉键槽，保证键槽与外圆平行度	外圆、B 端面	X53K
100	钻	钻定位孔	外圆、B 端面	XK713
110	钻	钻孔，孔深至 20mm	外圆、B 端面	XK713
120	攻	攻丝 $2 \times M8$	外圆、B 端面	XK713
130	粗铣	夹芯棒，螺母锁紧凸轮，保证芯棒的垂直度，粗铣 A 侧面沟槽，留精加工余量 0.5mm	A 端面，中心孔，键槽	XK713
140	精铣	精铣沟槽至精度要求	A 端面，中心孔，键槽	XK713
150	粗铣	夹芯棒，凸轮调头并螺母锁紧，保证芯棒的垂直度，粗铣 B 侧面沟槽，留精加工余量 0.5mm	B 端面，中心孔，键槽	XK713
160	精铣	精铣沟槽至精度要求	B 端面，中心孔，键槽	XK713
170	渗氮处理			

4、工序设计

（1）刀具的选择

沟槽凸轮加工时所需要的刀具均为标准刀具，如镗刀、90°外圆车刀、A3中心钻、Φ16键槽铣刀等，具体刀具清单见表4.2。

表 4.3 沟槽凸轮加工刀具卡片

序号	刀具号	刀具规格名称	数量	加工表面	备注
1	T01	YT5 90°外圆车刀	1	粗车外圆及端面	自动
2	T02	YT5 93°菱形车刀	1	精车外圆及端面	自动
3	T03	YT5 内孔镗刀	1	中心孔	
4	T04	Φ8 键槽铣刀	1	凸轮沟槽精加工	自动
5	T05	A3 中心钻	1	定位孔	手动
6	T06	Φ7.2 麻花钻	1	钻 Φ7.2 孔	自动
7	T07	Φ28 麻花钻	1	凸轮中心孔扩孔	手动
8	T08	Φ16 键槽铣刀	1	凸轮沟槽粗加工	自动
9	T09	M8 丝锥	1	M8 螺纹孔攻丝	自动
10	T10	8mm 键槽拉刀	1	凸轮键槽	自动

（2）沟槽凸轮切削参数

工序 30： 粗车外圆及端面

粗车切削深度 $a_p=2.2\text{mm}$ ；

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z=0.18\text{mm}/r$ 。

车削速度可以参考文献[7]可选择 $v=85\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出转速： $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{85.5}{0.18} = 475r/\text{min}$ ，切削基本时间： $T_j=2.58\text{min}$ 。

工序 40： 精车外圆及端面

精车切削深度 $a_p=0.5\text{mm}$ 。

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z=0.1\text{mm}/r$ 。

车削速度的选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=60\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出转速 $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{60}{0.1} = 600r/\text{min}$ ，切削基本时间： $T_j=0.476\text{min}$ 。

工序 50： 钻定位孔

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z=0.18\text{mm}/r$ 。

钻的速度选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=216\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出转速： $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{216}{0.18} = 800r/\text{min}$ ，切削基本时间： $T_j=0.128\text{min}$ 。

工序 60： 钻孔

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.18\text{mm}/r$ 。

钻削速度的选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=54\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出转速： $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{54}{0.18} = 300r/\text{min}$ ，切削基本时间： $T_j = 2.352\text{min}$ 。

工序 70：镗孔

镗孔切削深度 $a_p = 0.5\text{mm}$ 。

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.18\text{mm}/r$ 。

镗削速度的选择可以参考文献[7]表 1.11，可选择 $v=85.5\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出转速 $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{85.5}{0.18} = 475r/\text{min}$ ，切削基本时间： $T_j = 1.02\text{min}$ 。

工序 80：车端面

粗车切削深度 $a_p = 2.2\text{mm}$ 。

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.18\text{mm}/r$ 。

车削速度的选择可以参考文献[7]可选择 $v=85\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出转速 $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{85.5}{0.18} = 475r/\text{min}$ ，切削基本时间： $T_j = 0.225\text{min}$ 。

工序 90：拉键槽

拉削深度 $a_p = 0.8\text{mm}$ 。

拉削速度的选择可以参考文献[7]表 1.32，选择 $v=120\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出切削基本时间： $T_j = 1.952\text{min}$ 。

工序 100：钻定位孔

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.18\text{mm}/r$ 。

钻削速度的选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=216\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出转速： $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{216}{0.18} = 800r/\text{min}$ ，切削基本时间： $T_j = 0.128\text{min}$ 。

工序 110：钻孔

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.18\text{mm}/r$ 。

钻削速度的选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=54\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出转速 $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{54}{0.18} = 300r/\text{min}$ ，切削基本时间： $T_j = 3.45\text{min}$ 。

工序 120：攻丝

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.75\text{mm}/r$ 。

攻丝速度的选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=75\text{mm}/\text{min}$ 。

计算出转速 $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{75}{0.75} = 100r/min$ ，切削基本时间： $T_j = 2.16min$ 。

工序 130：粗铣 A 沟槽

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.4mm/r$ 。

铣削速度的选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=480mm/min$ 。

计算出转速 $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{480}{0.4} = 120r/min$ ，切削基本时间： $T_j = 45.24min$ 。

工序 140：精铣 A 面沟槽

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.52mm/r$ 。

铣削速度的选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=1800mm/min$ 。

计算出转速： $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{1800}{0.52} = 3500r/min$ ，切削基本时间： $T_j = 12.06min$ 。

工序 150：粗铣 B 面沟槽

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.4mm/r$ 。

铣削速度的选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=480mm/min$ 。

计算出转速 $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{480}{0.4} = 1200r/min$ ，，切削基本时间： $T_j = 39.81min$ 。

工序 160：精铣 B 面的槽

进给量 f 的选择可以根据文献[7]表 3.4，确定 $f_z = 0.52mm/r$ 。

铣削速度的选择可以参考文献[7]表 1.11 可选择 $v=1800mm/min$ 。

计算出转速 $n_s = \frac{v}{f_z} = \frac{1800}{0.52} = 3500r/min$ ，切削基本时间： $T_j = 9.176min$ 。

（3）沟槽加工的定位芯轴

由于凸轮的轮廓比较简单且有中心通孔和键槽，所以设计了芯轴工装。芯轴的零件图见图 4.3 所示。

（4）其它工序

a、检验

凸轮加工完成后对凸轮的一些重要尺寸进行检验，如形位公差，尺寸精度，平行度要求，垂直度要求等。如果检验不合格，则为废品，所以检验非常重要。如果不能逐件检查，那也必须进行抽检。凸轮的几个重要尺寸，如 $30_0^{+0.021}$ 、 $33.3_0^{+0.2}$ 等尺寸就必须进行抽检。

b、清洗

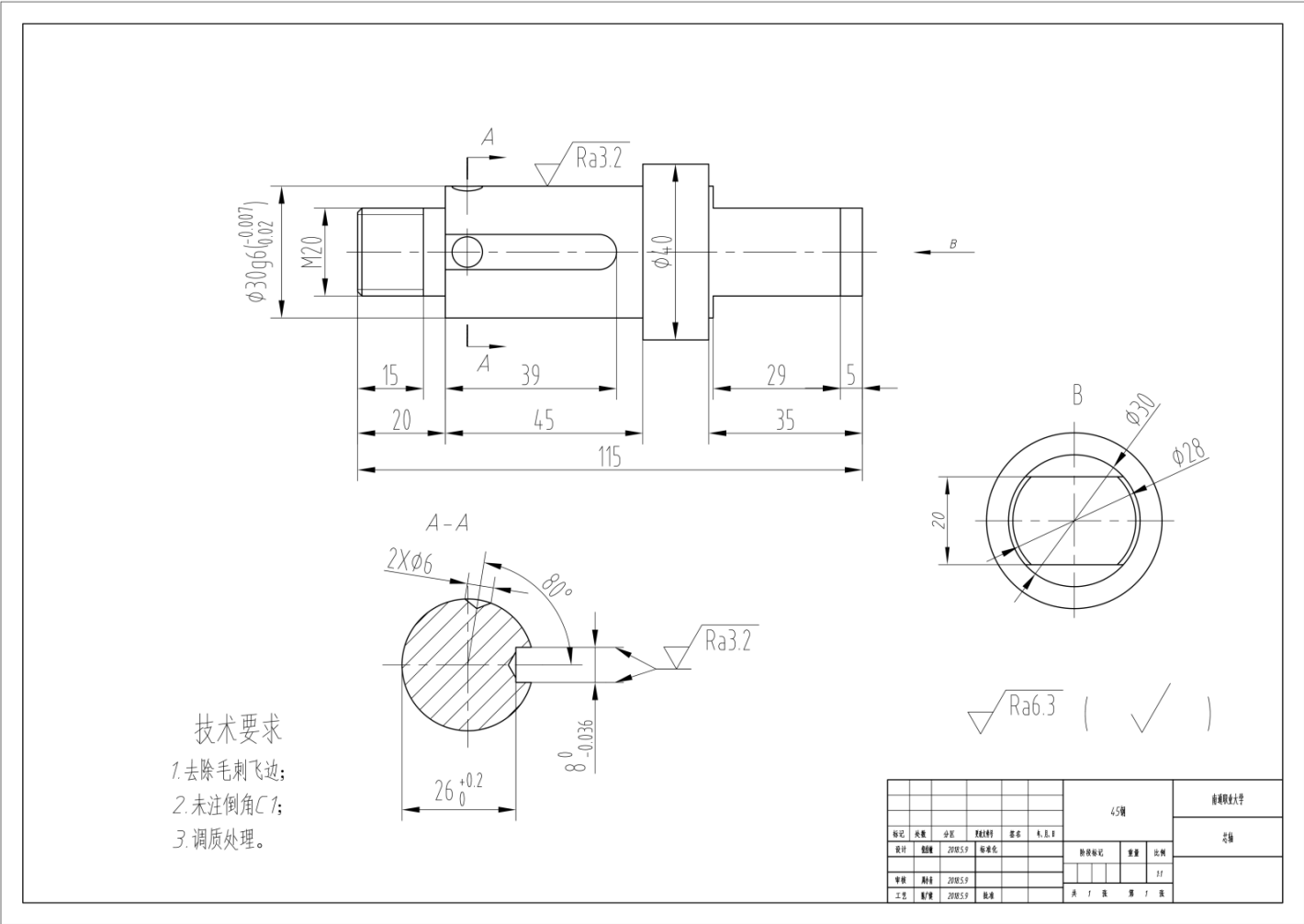


图 4.3 沟槽凸轮加工的定位芯轴零件图

对检验合格的凸轮应在入库前进行清洗，清洗工序主要是去除工件表面的切屑和在加工工程中产生的不必要的污渍。清洗也可以安排在装配前进行，可以防止零件表面的二次受损。

4.3 沟槽凸轮试件的数控加工

1、程序编制

由于凸轮沟槽外轮廓比较简单，这一部分程序编制不作过多阐述。沟槽凸轮中的沟槽轮廓由于是由一些非圆曲线构成的，所以通过手工程序编制难以实现。因此沟槽部分轮廓程序的编制采用国产 CAXA 制造工程师软件来实现，该 CAM 软件可以实现三轴及多轴联动的曲面加工。

自动编程实现过程如下（以凸轮 B 面沟槽粗加工为例）：

（1）设置加工边界，包括零件边界和毛坯轮廓边界，使用参照模型的方式来进行设置比较简单，可以自动获取零件 X、Y 和 Z 方向边界，然后根据加工毛坯余量的实际情况，进行一定的偏置即可。

（2）选择加工方式，包括粗加工和精加工方式。粗加工时，可以选择行切，或者环切的方式，根据轮廓特征，我们选择由外向内的环切方式逐层去除余量。

（3）刀具选择，根据先前拟定的加工工艺参数，选用 $\Phi 16$ 键槽铣刀进行开粗加工，选用 $\Phi 8$ 键槽铣刀进行沟槽轮廓精加工。

（4）设置加工参数，根据先前拟定的加工工艺，对软件中的轮廓精度、加工余量、层高、主轴转速、切削行距等参数进行设置。

（5）按照 CAM 软件中平面轮廓粗加工的要求，拾取毛坯边界、零件边界和岛屿边界，生成加工轨迹，如图 4.4 所示；

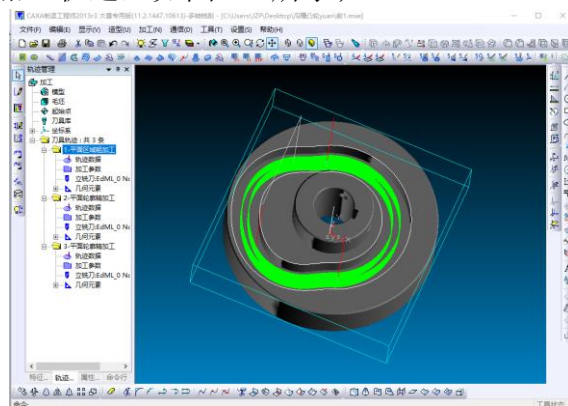


图 4.4 凸轮 B 面沟槽粗加工轨迹生成

(6) 实体轨迹仿真，如图 4.5 所示。如仿真过程正确，通过后置处理生成程序代码，如图 4.6 所示，并通过 RS232 串行通信数据线导入到 XK713 加工中心，以用于实际加工。

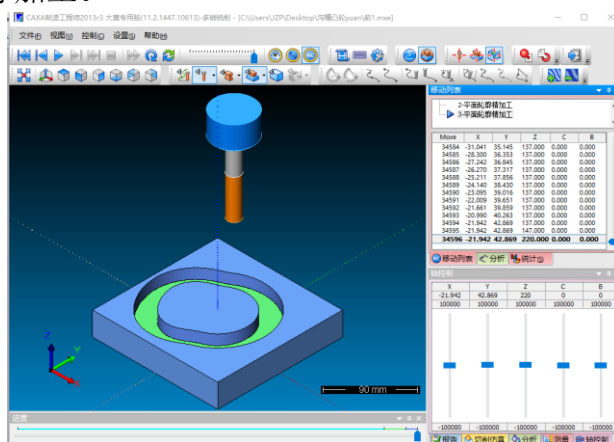


图 4.5 凸轮 B 面沟槽粗加工仿真结果

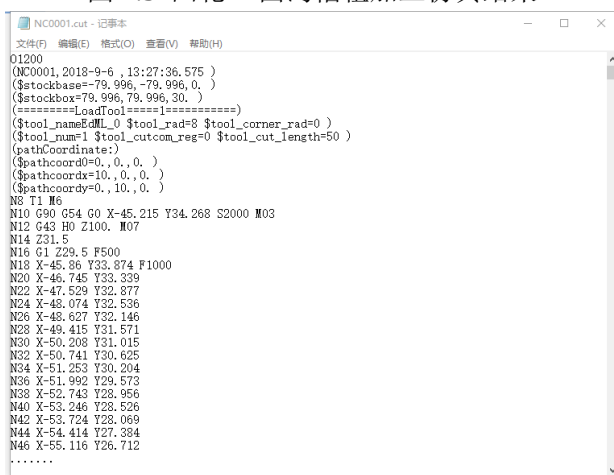


图 4.6 凸轮 B 面沟槽粗加工部分程序代码

2、凸轮沟槽加工精度控制

虽然前期通过 3D 激光扫描仪采集数据时精度要求很高，冗余量也足够。但是如果加工精度参数设置不合理，即使按后置处理生成的程序代码进行加工也是难以保证凸轮沟槽的加工精度。如果把加工精度设置的很高，生成的程序代码就会很多，导致加工效率降低。所以在最终生成程序代码前，需要对数据采集精度、粗加工程序和精加工程序的加工精度参数进行匹配。

为了保证沟槽凸轮的最终加工精度，在进行扫描数据采集时，通常会设置较高的采集精度，如最大增量为 0.1，点的密度为 2 等，本次凸轮沟槽在扫描时，在圆周 360°范围内，每 1°内采集 20 个左右的扫描点，确保凸轮沟槽的特征信息完整。在加工过程中考虑到数据系统及 CAM 软件的数据处理速度，粗加工时轮廓精度参数设置为 0.01（与凸轮的沟槽设计精度保持一致），使得生成的程序

代码大为缩短，同时提高了粗加工的效率。B 面沟槽的粗加工程序量在 29400 行左右；精加工时轮廓精度参数设置为 0.001（高于凸轮沟槽的设计精度要求），使得凸轮沟槽的轮廓信息能最大可能的保留下来，进而提高凸轮沟槽的加工精度，B 面沟槽的精加工程序量在 52500 行左右，明显比粗加工增加很多。图 4.7 为 B 面沟槽粗加工参数设置和精加工参数设置界面。3D 扫描精度：轮廓粗加工精度：轮廓精加工精度=0.1:0.01:0.001。

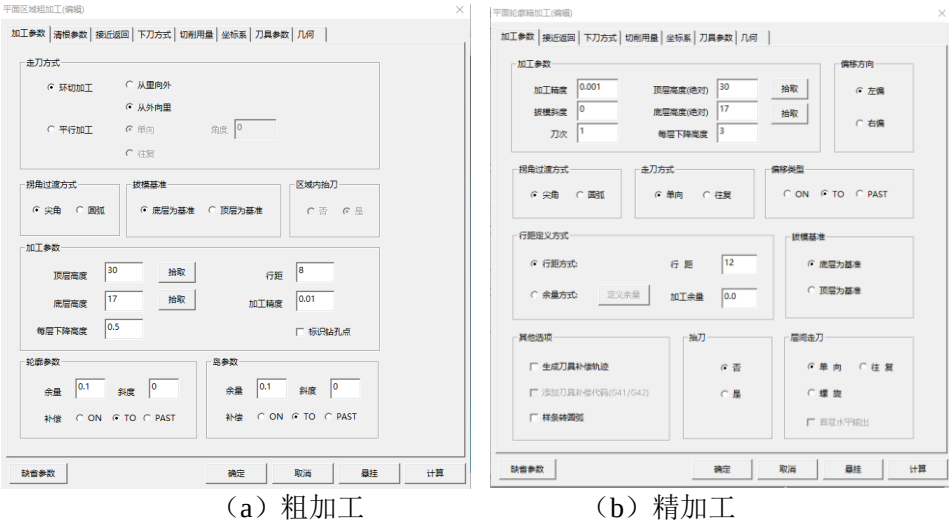


图 4.7 B 面沟槽粗加工和精加工参数设置

3、沟槽凸轮的在机加工

在完成程序编制和精度设置后，分别在 CK6141 FANUC-0iTD 数控车床和 XK713 FANUC-0iMC 数控加工中心上完成沟槽凸轮反求件的轴孔、各外圆柱面、断面和沟槽的加工，如图 4.7 所示。

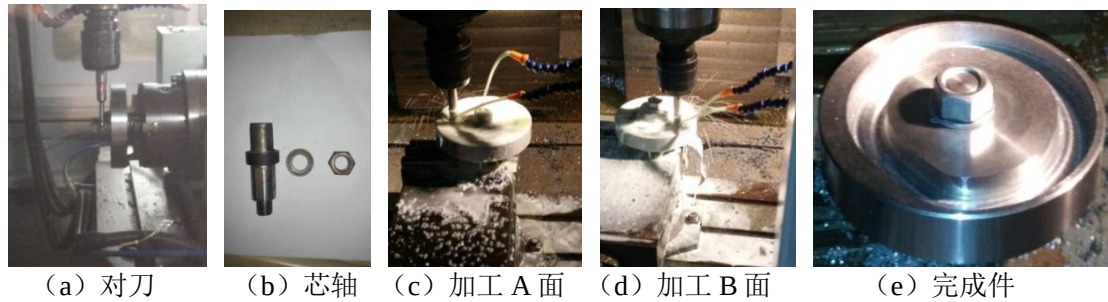


图 4.7 沟槽凸轮反求设计试制件的加工

4.4 沟槽凸轮试件的应用情况

沟槽凸轮试件制造完成后，经过热处理和后期处理等相关工序，安装在相应型号的铁链焊接机上进行试运行，试件运行强度和环境与其它同型号机型相同。试件装机连续运行 5 天（工作时间约 37 小时）后，从设备上拆下检测磨损

情况。试件磨损情况利用 Handyscan300 型手持式激光 3D 扫描仪的 Inspect 模块来进行。已用试件通过 3D 激光扫描后形成 3D 模型，输入 Inspect 模块与凸轮反求件 3D CAD 模型进行精度检测（如图 4.8 所示）。

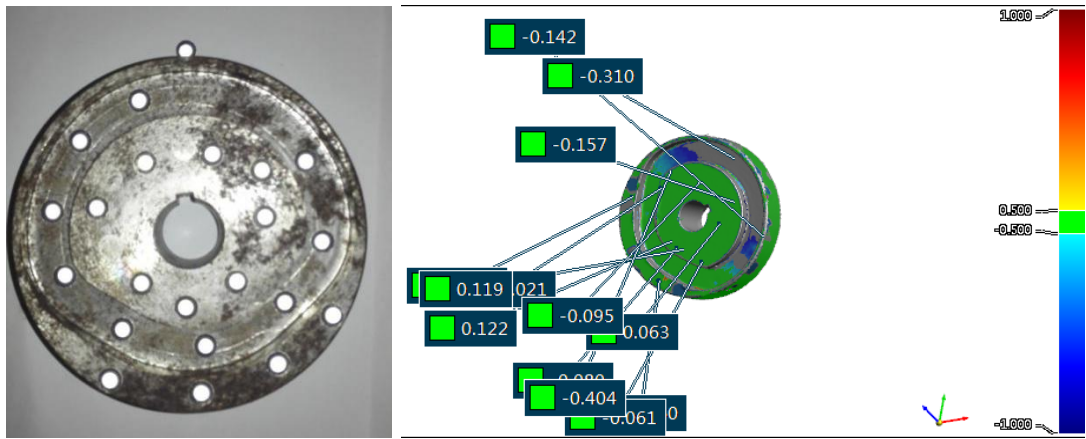


图 4.8 反求设计试件的磨损情况检测

根据 Inspect 模块精度检测的情况，将原型凸轮和反求凸轮磨损情况对比如表 4.4 所示。

表 4.4 原型凸轮与反求凸轮的磨损情况对比（mm）

区间 凸轮类型	推程段 最大磨损量		远停程段 最大磨损量		回程段 最大磨损量		近停程段 最大磨损量	
	A 面	B 面	A 面	B 面	A 面	B 面	A 面	B 面
原型凸轮 (厂家提供数据)	0.841	0.196	0.148	0.101	0.243	0.113	0.112	0.096
反求凸轮	0.310	0.184	0.157	0.093	0.196	0.136	0.108	0.102

根据凸轮试件使用情况和磨损情况对比，沟槽凸轮反求设计的基本情况为：

（1）反求设计的沟槽凸轮在从动件运动规律上与原型凸轮基本相同，操作人员未感觉到明显区别，产品也未发现不良生产质量。

（2）反求凸轮沟槽在推程段磨损量上有较大的下降，证明了反求设计中拟合函数设置和选用的正确性，可以利用这种方法进一步优化设计，进一步提高沟槽凸轮的抗磨性。

第五章 总结

经过近八个月努力，毕业设计进入尾声。沟槽凸轮的反求设计、制造与应用初步完成。本次毕业设计，主要做了一下几个方面的工作：

- （1）利用 3D 激光扫描仪获取了原型沟槽凸轮的点云数据。
- （2）根据点云数据，反求了原型沟槽凸轮的基本形状、尺寸、角度等。
- （3）根据点云数据，运用多种数学方法，借助工程计算软件，获得凸轮推程段、回程段沟槽曲面投影曲线的拟合函数，并选择了与投影曲线最接近的拟合函数。
- （4）根据拟合函数，分析了沟槽从动件的运动规律和磨损情况。综合运用 EXCEL 绘图功能分析拟合函数的加速度分布情况，对凸轮推程段沟槽投影拟合函数进行了改进，利用 PTC Creo Parametric 4.0 软件进行了机构运动仿真。
- （5）利用 2D、3D CAD 软件，重构了沟槽凸轮的 2D、3D CAD 模型。
- （6）制订了凸轮加工的工艺规程，并设置了加工工序。
- （7）利用 CAXA 软件的 CAM 功能进行凸轮数控加工的辅助编程。
- （8）利用数控车、加工中心，完成了沟槽凸轮试件的加工。
- （9）将沟槽凸轮试件装机试用，分析了反求设计的效果。
- （10）将该凸轮设计申报了实用新型专利，获得受理（图 5.1）。



图 5.1 凸轮设计实用新型专利受理通知书

这次毕业设计工作主要特色体现在以下几个方面：

（1）综合利用最小二乘法、拉格朗日插值法等数学方法，得到凸轮沟槽曲面投影曲线的拟合函数，应用 Matlab 工程计算软件比较各类拟合函数的精度，使拟合函数更接近于凸轮曲面投影的实际情况，大大提高了拟合函数的精确性。

（2）利用直角坐标系转极坐标系的方法，获取凸轮从动件的加速度变化函数，解决了凸轮反求过程中从动件运动规律分析困难的问题。

（3）利用 EXCEL 图形生成功能，详细比较不同拟合函数下从动件加速度变化情况，为改进沟槽凸轮曲面形状奠定了定量分析基础。

虽然通过自身的努力，在老师的指导下，毕业设计得以顺利完成，但还存在进一步提升的地方。比如虽然对数学兴趣浓厚，参加过江苏省数学建模大赛，但数学基础能力仍需进一步提升，工程计算软件的使用需要更加熟练，同时应考虑进行多段函数拟合，进一步提高曲线拟合精度等等。本次毕业设计收获较大，通过企业实际项目的实施，综合应用专业知识的能力得到巨大的提升，数学能力、软件应用能力、数控机床操作能力有了较大提高，资料查阅能力也有长足的进步，为我进入本科段学习打下了坚实的基础。

致谢

本毕业设计是在周小青老师、季照平老师、陈广健老师的悉心指导下完成的。周小青老师在前期沟槽凸轮的 3D 扫描仪数据采集、数据分析、函数拟合、函数精度分析、工程计算软件使用等方面给予了耐心指导，季照平老师在后期沟槽凸轮试制及精度分析方面给与了极大的帮助，陈广健老师则在沟槽凸轮试件加工的工艺规划、工序制订等方面给予了很多有效建议。衷心感谢老师们在毕业设计期间给与的指导与关怀。周小青等老师严谨治学态度、渊博的学识、独特的人格魅力，给我留下深刻印象，同时这些也将成为我受益终生的宝贵财富。

同时，我还要感谢顶岗实习企业王一鸣高级工程师，机械工程学院丁海萍老师、孙尧老师等，他们在学习、工作中所给予的多方面帮助，老师们扎实的学科知识，做学问时严谨的科学态度都给我留下了极为深刻的印象，在此一并表示感谢！

最后衷心感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

参考文献

- [1]胡家秀. 机械设计基础[M].北京：机械工业出版社，2001.5
- [2]王兵团，张作泉，赵平福.数值分析简明教程[M].北京：清华大学出版社，2012.8
- [3]成大先.机械设计手册(第5版第3卷第1部份)[M].北京：化学工业出版社，2001
- [4]李业农.机械设计基础[M].北京：高等教育出版社，2010.9
- [5]王跃进.机械原理[M].北京：北京大学出版社，2009.9
- [6]王慧. 机械设计课程设计(第三版)[M].北京：北京大学出版社，2011
- [7]马敏莉，陈广健等.机械制造工艺编制及实施.北京：清华大学出版社，2016.6
- [8] 杨可桢，程光蕴，李仲生.机械设计基础(第五版)[M].北京：高等教育出版社，2006
- [9]詹友刚. Pro/E 高级应用教程[M].北京：机械工业出版社，2006.1
- [10]郑继明，朱伟，刘勇，方长杰. 数值分析[M].北京：清华大学出版社，2016.12
- [11]中国纺织大学机械系手册编写组.机械设计与制造简明手册[M].上海：同济大学出版社，1997
- [12]李腾训，卢杰.计算机辅助设计(AutoCAD2009 教程)[M].北京：清华大学出版社，2009
- [13]徐茂功，桂定一.公差配合与技术测量(第三版)[M].北京：机械工业出版社，2008
- [14]张妙杭.非标准设备设计手册(第二册)[M].北京：国防工业出版社，1984
- [15]曹金汤.凸轮机构设计[M].北京：机械工业出版社，1985
- [16]朱熙然，陶琳.工程力学(第二版)[M].上海：上海交通大学出版社，2005
- [17]陈秀宁.机械设计课程设计(第三版)[M].杭州：浙江大学出版社，2007
- [18]徐文胜.计算机机械制图[M].北京：化学工业出版社，2008