
汽车凸轮轴加工工艺分析

内容摘要

凸轮轴作为汽车发动机配气机构中的关键部件，其性能直接影响着发动机整体性能。因此凸轮轴的加工工艺有特殊要求，合理的加工工艺对于降低加工成本、减少生产环节以及合理布置凸轮轴生产线具有很大的现实意义。

本文针对凸轮轴的加工特点，结合工厂的实际，从前期规划开始，对凸轮轴的加工工艺进行了深入的分析、研究。建立了用数控无靠模方法。对凸轮廓形进行计算和推倒，对凸轮轮廓的加工进行了探讨并提出适用于发动机凸轮轴的加工方法。

关键词：发动机；凸轮轴；工艺分析

目 录

一、引言.....	3
(一) 汽车发动机行业的发展状况.....	3
(二) 凸轮轴的性能要求.....	3
(三) 本文研究内容.....	5
二、凸轮轴生产线前期规划.....	5
(一) 产品规格.....	5
(二) 工艺设计原则及凸轮轴加工工艺分析.....	6
(三) 小结.....	7
三、凸轮轴生产线工艺分析.....	7
(一) 生产线布置.....	错误! 未定义书签。
(二) 工艺设计.....	7
(三) 工艺分析.....	9
(四) 工艺特点.....	10
(五) 工艺难点.....	13
四、凸轮廓形理论计算及加工控制参数	14
(一) 凸轮轴凸轮的廓形要求.....	14
(二) 包络线理论.....	16
(三) 凸轮廓形坐标.....	17
五、总结	
参考文献	
致谢.....	

汽车凸轮轴加工工艺设计

学生姓名：孟德宏

指导老师：郭小凯

一、引言

（一）汽车发动机行业的发展状况

现代汽车发动机行业的发展十分迅速，这种趋势要求各发动机厂家不仅要具有大批量生产的能力，同时也要具有小批量、多品种的生产技术。所以，在汽车发动机厂家现在已经普及了互换性、自动化生产，做到了流水线式生产线布置及工艺安排，实现了按节拍生产。辅助时间包括上料、输送、检验时间，而机加工时间则是指从夹具定位、夹紧到机加工完成，夹具松开并推出工件这段时间。

除按节拍生产以外，我国的发动机生产厂家多数采用流水线布置。生产线分为半自动生产线与全自动生产线两种形式。半自动生产线与全自动生产线的区别在于前者靠人工在工序间输送工件，而后者则实现了无人操作、输送、加工及检验全部实现自动化。全自动生产线虽然自动化程度高，质量稳定、可靠，但是投资巨大，成本太高，而我们国家人力资源丰富，人工价格偏低，所以大部分发动机生产厂家采用半自动生产线与局部全自动化生产线相结合的方式布置生产线，在保证生产节拍和产品质量的前提下，尽可能的降低产品的成本。

此外，在各种发动机的零部件的设计及生产上均采用了一些先进的形式及工艺。例如多气缸多气门的设计，从直列三缸到V型双列十二缸，从二气门到四气门、五气门。多气门的布置可以增加充气效率，便于阻止缸内气流压力。顶置式凸轮轴设计，精密加工，柔性生产，在线自动测量及自动补偿等等，这些都为机加工生产及工艺安排增加了难度，向技术人员提出了更高的要求。

人们对发动机的性能要求概括为以下几点：(1)高的动力性能。(2)高的燃料经济性。(3)高的工作可靠性和足够的使用寿命。(4)结构紧凑，外形小，重量轻。(5)高的环境性能，低排放，低消耗，低污染。尤其是最后一点，在近些年中得到很大的关注。由于发动机性能指标的不断提高，其加工精度、难度也不断增加，所以在发动机行业中，数控机床，精密加工机床，加工中心，自动生产线，成组技术等先进设备及技术都得到了广泛的普及。

（二）凸轮轴的性能要求

在汽车发动机的各个零件及机构中，配气机构是非常重要的，配气机构必须根据发动机气缸内所发生的工作过程，保证正确地打开和关闭气门。而凸轮轴是配气机构中最重要、

最关键的零件，它决定着气门的升程曲线和气门开关时刻，从而直接影响发动机的进排气量，影响发动机的动力性、经济性和排放。

发动机行业现在都采用气门顶置式配气机构，其主要原因是由于顶置式配气机构的发动机能选用较高的压缩比。其气门可以设计的比较大，混合气进入和废气排出的必经路程又比较短，因而顶置气门式发动机的容积效率比较高。另外，顶置气门式发动机燃烧室的S/V比值较小（S/V比值是燃烧室的表面积S和燃烧室的容积V之比），这样，不仅废气中未燃碳氢化合物的含量较少，而且发动机的热效率也较高，这在排放标准日益提高的今天是非常重要的。

在顶置气门式配气机构中，除通常采用挺杆、推杆和摇臂控制气门的形式外，还有采用顶置凸轮轴（SOHC）的。在顶置凸轮轴的发动机中，凸轮轴置于气缸盖上，凸轮直接作用于摇臂或者挺杆来控制气门。除单顶置凸轮轴外，还有双顶置凸轮轴（DOHC）的，其中一根凸轮轴操纵进气门，另一根控制排气门。

这种单顶置凸轮轴发动机，由于没有推杆和挺杆，因而减小了配气机构的惯性力，减少了气门产生颤动的倾向，同时也减少了系统的变形量。而且这种单顶置凸轮轴发动机还有一个优点，由于运动质量小，凸轮轮廓可以设计的比较陡一些，可以使气门能够更快的打开和关闭，保持更多的时间停留在全开的位置上，改善发动机的换气，提高容积的效率，这样可提高发动机的性能，特别是高速下的性能。

由于发动机的发展趋势为多气缸多气门设计，而每一个气门的进气与排气都必须由凸轮轴上的凸轮外形控制。所以凸轮轴的发展趋势是一个凸轮轴上排列着越来越多的凸轮，如果是三缸以下的发动机，不论是两气门还是四气门，排气凸轮与进气凸轮还可以排在一根凸轮轴上。如果是四缸以上，则必须配备两根凸轮轴，其中一根凸轮轴控制进气门，另一根控制排气门。

凸轮轴是内燃机配气系统中关键的零件之一，整个配气机构是由凸轮轴驱动的，凸轮的设计对整个配气系统的性能起着决定性的作用。凸轮轴刚性差、易变形；精度高，加工难度大；因此，对于凸轮轴的设计、加工、选材、加工工艺等都提出了许多要求。其主要的技术要求如表 1.1 表述。

表 1.1 凸轮轴的技术要求

主要项目	一般性要求
支撑轴承	IT5~IT6
尺寸 (mm)	
表面粗糙度 (μm)	$R_z 0.4$
圆柱度 (mm)	5 级精度
凸轮轴表面粗糙度 (mm)	$R_z 0.4$
中间轴颈相对于两端轴颈的跳动 (mm)	0.06
相邻两轴颈的径向跳动 (mm)	0.02
凸轮轴对称中心平面对正时齿轮键槽中心平面 或定位销轴线的角度偏差 ($'$)	$\pm 30'$

(三) 本文研究内容

随着汽车行业的不断发展，再加上配件的需求，使得凸轮轴的需求量一直高居不下。建立一条集先进性与经济性为一体的凸轮轴生产线是非常必要的。面对国外汽车行业的冲击，我们国产汽车业应该加紧研究、建立符合中国国情的，我们自己的基础制造业，提高质量、降低成本，这样才能保住我们国产汽车的市场。

凸轮轴在发动机中的重要地位决定了国内发动机生产厂家都建有自己的凸轮轴生产线，这样可以在保证整机质量的前提下，尽可能的降低成本，提高竞争力。

本文主要围绕汽车凸轮轴生产线的工艺分析，从前期准备、工艺设计、理论计算、生产实践、和产品检测这几个方面，阐述了凸轮轴加工的一整套设计思路和方法，对发动机制造业中的零部件加工具有重要的参考作用。

二、凸轮轴生产前期规划

(一) 产品规格

2.1.1 零件的结构特点

凸轮轴生产线承每台发动机凸轮轴的机加工，每台发动机上使用一根凸轮轴。

材料：(FCA-3) 铜铬钼合金铸铁，各主轴颈及端面的硬度 HB180~240，凸轮 HRC48。

2.1.2 凸轮轴简图

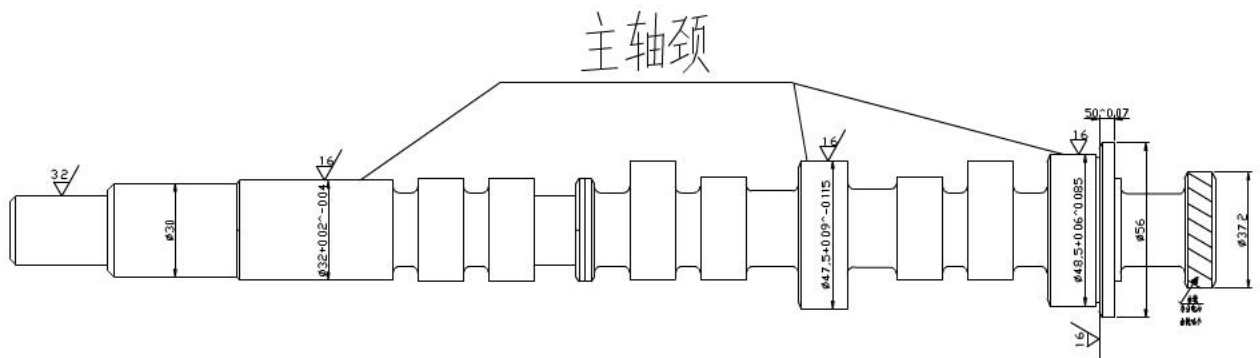


图 1

2.1.3 发动机凸轮轴主要加工内容和精度要求

(1) 支承轴径

前轴径前端 $\phi 32_{-0.045}^{-0.015}$ ，后端 $\phi 32_{-0.04}^{-0.02}$ ，表面粗糙度 Rz3.2

中间轴径 $\phi 47.5_{-0.115}^{-0.09}$ ，表面粗糙度 Rz3.2

后轴径 $\phi 48.5_{-0.085}^{-0.06}$ ，表面粗糙度 Rz3.2

(2) 凸轮

6个凸轮基圆尺寸为 $\phi 16.7_{-0.05}^{+0.05}$ ，表面粗糙度 Rz3.2。

各凸轮基圆相对与前后轴颈的基准轴线的径向跳动允差 0.03mm

各凸轮基圆相对与前后轴颈的基准轴线的平行度允差 0.01mm

各凸轮对称中心线相对于键槽的相对位置偏差（相位角） $\pm 20'$ （见图1）

凸轮型线误差作用段 $\pm 0.05\text{mm}$

凸轮型线误差作用段 $\pm 0.02\text{mm}$

一缸凸轮轴对键槽位置 $112^\circ 32' \pm 20'$

(3) 斜齿轮

齿数：13，螺旋角： 53° （右） $\pm 1' 46''$ 公法线长度：38.611~38.806

齿形误差 ≤ 0.025 ；齿向误差 ≤ 0.017 ；齿槽对键槽的角度 $20^\circ \pm 2^\circ$

(4) 键槽

宽 $4_{-0.05}$ ，深 $3.5_{+0.2}$ ，对称度 0.025

2.2 工艺设计原则及凸轮轴加工工艺分析

- (1) 保证工艺具有合理的先进性，在保证节拍的基础上，吸收先进技术提高产品的竞争力。
- (2) 对于关键设备和技术，优先考虑国内外可靠厂家的先进设备。
- (3) 保证先进性与经济性相结合，在保证产品质量的前提下，降低成本
- (4) 充分考虑各生产缓解的安全性和操作的方便性。
- (5) 在投资允许的情况下，尽量考虑柔性生产。

由于凸轮轴具有细长且形状复杂的结构特点，技术要求又高，尤其是凸轮的加工，因此其加工工艺性较差。在凸轮轴的加工过程中，有两个主要因素影响其加工精度。其一是易变形性，其二是加工难度大。

2.2.1 易变形特性

从细长轴的角度来说，突出的问题就是工件本身的刚度低，切削加工时会产生较大的受力变形，其表面残余应力也会引起变形。尤其是在加工凸轮和齿轮时，这种变形会更为

显著。

凸轮轴在加工过程中的变形，不仅影响到后续工序加工中的余量分配是否均匀，而且变形过大会导致后序加工无法进行，甚至造成中途报废。凸轮轴加工后的变形，将直接影响到装配后凸轮轴的使用性能^[2]。

因此，在安排其工艺过程时，必须针对工件易变形这一特点采取必要的措施。不仅要各主要表面的粗精加工工序分开，以使粗加工时产生的变形在精加工中得到修整，半精加工中产生的变形在精加工中得到修正，还必须在加工过程中增设辅助支承以采取分段加工等措施，这是保证凸轮轴加工精度所必须解决的问题。

2.2.2 加工难度大

从形状复杂的角度来说，突出的问题凸轮、齿轮这些复杂表面的加工。对于这些表面，不仅有尺寸精度要求，还有形状、位置精度要求，如采用普通的加工设备和一般表面常规加工方法，显然是根本无法保证其加工质量和精度的。

例如对于凸轮的加工，从满足使用要求的角度来说，既要求其相位角准确又要求凸轮曲线升程满足气门开启和关闭时升降过程的运动规律，但注意到凸轮曲线上的各点相对其回转中心的半径是变化的，当选用一般的靠模机床加工时，由于加工半径的变化，势必引起切削速度和切削力的变化，加之工件旋转时的惯性力和靠模弹簧张力的瞬间变化，将会使加工后的凸轮曲线产生形状误差，即曲线的升程误差，从而直接影响凸轮轴的使用性能。

2.3 小结

综上所述，虽然各种方案都各有优点，但其技术的不成熟或者成本问题，都成为在国内实施的困难。考虑到成本及大批量生产，选择成熟技术和成熟的设备，使工艺方案符合经济性与合理性原则。

三、 凸轮轴工艺分析

3.1 工艺设计

3.1.1 定位基准的选择

对于一般的轴类零件来说，其轴线即为它的设计基准。发动机凸轮轴遵循这一设计基准，由于凸轮轴各表面的加工难以在一次装夹中完成，因此，减小工件在多次装夹中的定位误差，就成为保证凸轮轴加工精度的关键。本文采用两项尖孔作为轴类零件的定位基准，这不仅避免了工件在多次装夹中因定位基准的转换而引起的定位误差，也可作为后续工序的定位基准，即符合“基准统一”原则。

这种方法不仅使工件的装夹方便、可靠。简化了工艺规程的制定工作，使各工序所使

用的夹具结构相同或相近，从而减少了设计、制造夹具的时间和费用，而且有可能在一次装夹中加工出更多表面。这对于大量生产来说，不仅便于采用高效专用机床和设备以提高生产效率，而且也使得所加工的各表面之间具有较高的相互位置精度。

3.1.2 加工阶段的划分与工序顺序的安排

（一）加工阶段的划分

由于凸轮轴的加工精度较高，整个加工不可能在一个工序内全地完成。为了利于逐步地达到加工要求，所以把整个工艺过程划分为三个阶段，以完成各个不同加工阶段的目的和任务。

发动机凸轮轴的加工的三个阶段：

- （1）粗加工阶段包括车各支承轴颈、齿轮外圆轴颈和粗磨凸轮。该阶段要求机床刚性好，切削用量选择尽可能大，以便以提高生产率切除大部分加工余量。
- （2）半精加工是精车各支承轴颈和精磨齿轮外圆轴颈。该阶段主要为支承轴颈齿轮的加工做准备。
- （3）精加工包括精磨各支承轴颈、止推面和凸轮以及斜齿轮加工。该阶段加工余量和切削量小，加工精度高。

工艺编排：首先以 $\phi 32$ 和 $\phi 48.5$ 的毛坯面为定位基准，然后以大端外圆的端面作轴向定位，具体每序的定位基准和夹紧位置，见表3-1发动机凸轮轴生产工艺简介。

（二）工序顺序的安排

加工顺序的安排与零件的质量要求有关，工序安排是否合理，对于凸轮轴加工质量、生产率和经济性都有很大影响。对于各支承轴颈是按粗车——精车——精磨加工的，对于凸轮是按粗磨——精磨加工的，对于斜齿轮是按粗车——精车——精磨——滚齿加工的。各表面的加工顺序按从粗到精、且主要表面与次要表面的加工工序相互交叉进行，从整体上说，符合“先粗后精”的加工原则。

3.1.3 凸轮形面的加工

在凸轮轴的加工中，最重要同时难度最大的是凸轮形面的加工。该形面的加工方法目前主要有车削和磨削两种。

凸轮形面的粗加工目前国内主要是凸轮轴车床车削加工，也有采用铣削加工和磨削加工的。如采用双靠模凸轮轴磨床，机床有两套靠模，当砂轮直径在一定范围内时，使用第一个靠模来工作。当砂轮磨损到一定程度时，靠模自动转换，使用第二个靠模来工作^[4]。该磨床通过对砂轮直径的控制来提高凸轮外形的精度，不仅提高了凸轮形面的加工精度，

发动机凸轮轴毛坯采用精铸的方法制造，毛坯精度较高，切削量小，故采用磨削的加工工艺，简化了凸轮形面的加工。凸轮形面的加工采用磨削的方法，在凸轮磨床上完成粗磨及精磨的加工。工件安装在两顶尖之间并以键槽做轴向定位，在支承轴颈处安装辅助支承保证凸轮形面的加工精度。发动机凸轮轴形面的加工所采用的凸轮轴磨床是立方氮化硼磨床，该磨床能迅速地变换磨削的凸轮形状，超过一般仿珩磨的生产率。机床具有较大的刚度，能承受大的工作负也使砂轮的利用更经济、合理。荷。由于立方氮化硼（CBN）砂轮的使用寿命高，因此，砂轮的直径变化所造成的凸轮形状误差显著减小，也大大提高了凸轮形面的磨削精度。

3.2 工艺分析

表 3.1 发动机凸轮轴生产工艺简介

工序号	工序内容	定位基准	夹紧位置	备注
10	铣端面，打中心孔	ϕ 52.5 外圆 V_2 （成活尺寸 ϕ 48.5） ϕ 36 外圆 V_2 （成活尺寸 ϕ 32）	ϕ 52.5 外圆 ϕ 36 外圆	专机
20	粗车主轴颈	ϕ 52.5 端面 V_1 ϕ 37.5 外圆 V_1 （成活尺寸 ϕ 37.2） 两端中心孔 V_4	ϕ 37.5 外圆	半自动液压仿形车床
30	车削主轴颈并切槽	ϕ 37.5 外圆 V_1 两端中心孔 V_4	ϕ 37.5 外圆	半自动液压仿形车床
40	两端螺孔钻、扩、攻丝、修中心孔	ϕ 48.9 外圆 V_2 （成活尺寸 ϕ 48.5） ϕ 32.4 外圆 V_2 （成活尺寸 ϕ 32） ϕ 52.5 端面 V_1	ϕ 48.9 外圆 ϕ 32.4 外圆	专机
50	大端外圆磨削	两端中心孔 V_1 ϕ 37.5 外圆 V_1	ϕ 37.5 外圆	半自动端面外圆磨床
60	前轴颈磨削	两端中心孔 V_4	ϕ 37.5 外	CNC 磨床

		$\phi 37.5$ 外圆 V_1	圆	
70	中间轴颈、后轴颈及推力部端面磨削	两端中心孔 V_4 $\phi 32$ 外圆 V_1	$\phi 32$ 外圆	CNC 磨床
		$\phi 48.5$ 外圆 V_2		
80	铣键槽	$\phi 32$ 外圆 V_2 $\phi 30$ 端面 V_1 角向 $90^\circ V_1$ 两端中心孔 V_4	$\phi 48.5$ 外圆 $\phi 32$ 外圆	专机
90	粗磨凸轮（靠磨）	键 V_1 卡盘 V_1 $\phi 30$ 端面 V_1	$\phi 22$ 外圆	凸轮磨床
100	精磨凸轮（无靠磨）	两端中心孔 V_2 键 V_1 $\phi 30$ 端面 V_3	$\phi 22$ 外圆	凸轮磨床
120	滚齿	两端中心孔 V_2 键 V_1	$\phi 22$ 外圆	
130	清洗	$\phi 30$ 与 1IN 之间非加工面 V_2 $\phi 31$ 与 3EX 之间非加工面 V_2	无夹紧	

3.3 工艺特点

发动机凸轮轴工艺特点：

- (1) 毛坯硬度高 （冷激区 HRC45 非冷激区 HB229~302）
- (2) 生产节拍 1.75 分钟
- (3) 轮轴数控车床用于支撑轴颈的粗加工
- (4) 凸轮部分在铸造时冷激，不需加工后淬火

- (5) 凸轮采用粗、精磨加工，以磨代车，凸轮轮廓直接磨削
- (6) 凸轮精加工采用全数控无靠模磨削
- (7) 加工中主要定位基准中心孔采用打孔后修磨，保证加工质量

工艺先进性分析：

1) 磨削密集型工艺—外圆、轴颈、端面及凸轮均采用磨削方法^[5]

凸轮的外圆、轴颈、端面及凸轮的粗精加工均采用磨削方法。凸轮传统的粗加工方法是采用靠模车床及液压仿形凸轮铣床，大量生产的凸轮轴毛坯均采用精锻或精铸成形，其毛坯精度高，加工余量小，采用以磨代车的新工艺，极大的简化了凸轮形面的加工。同时，高速磨削及金刚石滚轮连续修整工艺，保证了其生产效率及产品的质量。

2) 凸轮采用数控无靠模磨削

长期以来，凸轮轴磨床采用靠模，滚轮摆动仿形机构，典型的设备如日平—兰迪斯 SCAM—R 型凸轮磨床。靠模凸轮机构摆动工作台凸轮轴磨床，在磨削中存在着一系列的加工缺陷，而采用数控凸轮磨削的新工艺，取消了靠模，完全靠 CNC 控制获得精密的凸轮轮廓，同时工件无级变速旋转，并采用 CBN 砂轮加工凸轮轴，从根本上解决了传统凸轮磨床的缺陷，不仅摆脱了靠模精度对凸轮精度的影响，而且砂轮的磨损不影响加工精度。同时，由于这种工艺具有较好的柔性，为以后的产品改进、更新以及多品种的凸轮轴共线生产提供了保证。

3) 凸轮轴支撑轴颈的磨削

凸轮轴支撑轴颈的加工尺寸与精度如图 2 所示。采用数控多砂轮磨削，可以高效率地磨削凸轮轴支撑轴颈，加工出的轴颈具有较高的圆柱度和较小的径向跳动。同时数控磨削可以运用在线检测技术，对零件的加工部位尺寸进行监控，并把对砂轮的自动修整数据反馈给数控系统，来控制砂轮的补偿，确保加工部位的尺寸。

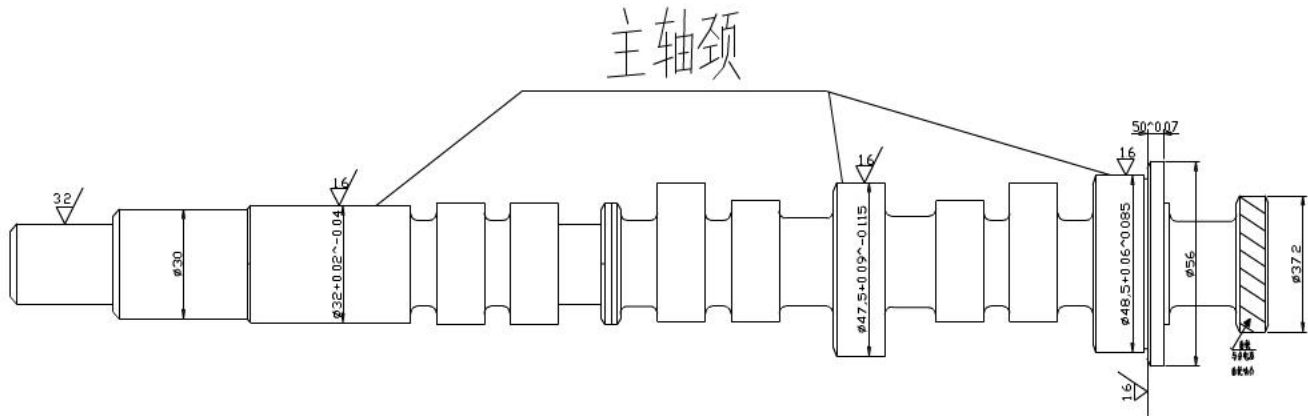


图 2 凸轮轴的支撑轴颈

4) 采用立方氮化硼（CBN）砂轮磨削

由于采用了无靠模数控凸轮磨床，所以整个凸轮轮廓（包括基圆、缓冲段、作用段）的磨削均由 X 轴即砂轮架和 C 轴即主轴的相对旋转运动完成，其动作为同步动作，所以凸轮磨削过程中砂轮于工件接触表面不同且不均匀，缓冲段及作用段接触面积大于基圆，由此造成加工余量不均匀，缓冲段和作用段加工余量大于基圆，故产生法向切削力的变化。另一特点为砂轮磨削过程中接触点（磨削点）与工件及砂轮二者中心线不在一条直线上，而是在上下移动，故易产生升程误差，也可能在缓冲段及作用段表面产生横纹。这一特点要求砂轮直径较小。

根据以上特点决定，选用陶瓷结合剂的立方氮化硼（CBN）砂轮磨削凸轮。砂轮转速为 5700 转/分，属于高速磨削，生产率高，耐用度高。CBN 砂轮有较好的热导性，工件磨削的温度低，可减少磨削时的烧伤、裂纹和热损现象，与普通的砂轮相比，具有砂轮使用寿命长，更换砂轮和修整砂轮时间短，能提高工件的疲劳强度和耐磨强性等优点。

由于使用了 CBN 砂轮，砂轮直径有单晶刚玉的 ϕ 600mm 减少到现在的 ϕ 250mm，且使用寿命长，CBN 砂轮的 CBN 层厚度为 3mm，每 100 件修磨一次，每次修磨量为 0.01mm，一片砂轮的修磨次数为 300 次，可计算得出一片砂轮的理論加工工件数为 $300 \times 100 = 30000$ 件。且工件的粗糙度及凸轮升程均能很好的满足工艺要求。

5) 毛坯材料为冷激合金铸铁

凸轮轴是气门机构的驱动元件，它的凸轮不仅要有合理的形状，而且要求表面耐磨，能在长期使用中基本保持设计给出的合理形状。所以对凸轮轴的材料要求比较高。尤其凸轮表面与摇臂之间是一对运动的摩擦表面，凸轮轴的材料必须保证其工作可靠性和耐久性。

最后决定采用冷激合金铸铁，即在凸轮轴铸模的凸轮尖端处放一块加速铁水冷却的铁块，使凸轮尖端迅速冷却，形成桃尖硬化层，其主要金属基体为莱氏体，可以提高其硬度，并达到工艺要求：凸轮 140° 以内 HRC35 以上， 30° 以内 HRC48 以上，如图 3 所示。这样凸轮外形完全用磨削加工。

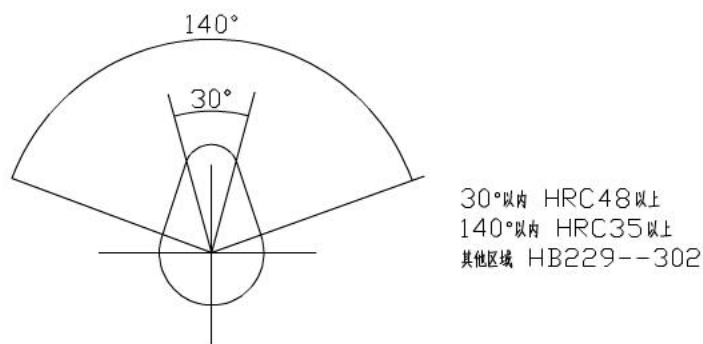


图 3 凸轮外形硬度分布图

铸铁凸轮存在摩擦系数仅为 0.15~0.20，而强度很低的石墨，在摩擦过程中会脱落于接触处成为润滑剂，且石墨脱落后留下的孔穴又会成为绝好的储油槽，使临界油膜容易保持住。铸铁的导热性大且不留加工余量，而凸轮工作表面只留 1.5mm 左右的磨削余量。

因为凸轮轴转速低，载荷轻，润滑又良好，而铸铁本身也是一种良好的轴承材料，所以不用衬套，把凸轮轴直接装入缸盖凸轮轴孔中。采用冷激铸铁，工艺简单且成本低，激冷用外冷铁可由我单位生产，反复使用近百次后可作为返回料入炉，所以生产工序简单，并可以大幅度提高耐磨性。

3.4 工艺难点

3.6.1 主轴颈粗糙度的保证

凸轮轴生产的难点是主轴颈的粗糙度达不到图纸的要求，图纸要求为 Rz3.2，实际加工情况为 $Rz \leq 5.2$ ，这就给验证带来了很多麻烦。

根据实际情况，首先通过改变机床的切削用量，把机床规定好的切削用量彻底改变，一组一组的数据进行试验，最终结果还是不好。最后在保证砂轮不变的情况下，改变金刚石修整器的修磨速度 F，修整量 μ ，来提高工件的粗糙度。通过反复试验，得出几组比较好的数据。

$\mu = 0.08$	F30	$Rz = 2.66Z \sim 3.79Z$
$\mu = 0.04$	F15	$Rz = 2.50Z \sim 3.50Z$
$\mu = 0.06$	F30	$Rz = 2.60Z \sim 3.66Z$
$\mu = 0.04$	F35	$Rz = 2.00Z \sim 3.20Z$

通过比较，决定选用 $\mu = 0.04$ ，F30 这组数据，磨 5 个工件修整一次，粗糙度 $< 3.2Z$ 。

3.6.2 轴颈夹痕

1) 轴颈夹痕：凸轮轴线 120 序凸轮磨削时用键槽定位， $\varphi 22$ 外圆夹紧。三爪长期使用造成 $\varphi 22$ 外圆上由三个光亮带，粗糙度合格。

该凸轮磨床在设备验收时即有光亮带夹痕存在，据了解目前凸轮桃子磨削工艺大多采用键槽角向定位三爪夹紧工件小端外圆，中心架支撑轴径向表面来完成磨削过程，此方案势必要产生夹痕。该工艺丰田汽发，一汽大众均采用，新产品 1SZ 凸轮轴从外观看也采用此加工工艺加工的。此工艺方案可继续使用。

2) 彻底消除夹痕工艺的进一步探讨：采用倒序加工的方法，先磨桃子，后磨小端外圆。

a) 使用这种方法，涉及变动的部分：凸轮磨改三爪、中心架。键槽铣床改定位块、量验具工艺尺寸链重新计算，改所有工艺文件。

b) 引发的质量问题：由于凸轮磨床的中心架支撑轴颈是精车表面，对凸轮磨削精度和升程曲线会造成很大的影响。由于磨小端外圆与铣键槽定位基准不统一，会对键槽对称度造成很大的影响。

c) 抛光小端外圆，需要增加投入。该方案没有必要。

3) 结论：轻微夹痕对发动机性能无影响，没必要增加投入。装工件时键槽尽量放在夹具的驱动键槽位置，以免驱动键槽转动时，划伤加工表面。

四、凸轮廓形理论计算及加工控制参数

4.1 凸轮轴凸轮的廓形要求

气门运动的加速度和减速度都是凸轮轮廓的函数。发动机的凸轮轴凸轮轮廓如图 4 所示，主要包括进气段 C（开启弧）、排气段 E（关闭弧）、缓冲段 B、缓冲段 C、基圆 A、顶弧 D。

发动机凸轮轴的凸轮廓形是以凸轮与 $\phi 10$ 滚珠对滚时二者中心距离 y_1 ， y_2 表示的，如图 5，图纸给出表列函数 $y_1 = f_1(\varphi)$ ， $y_2 = f_2(\varphi)$ 表 4—1 为凸轮轴升程表。

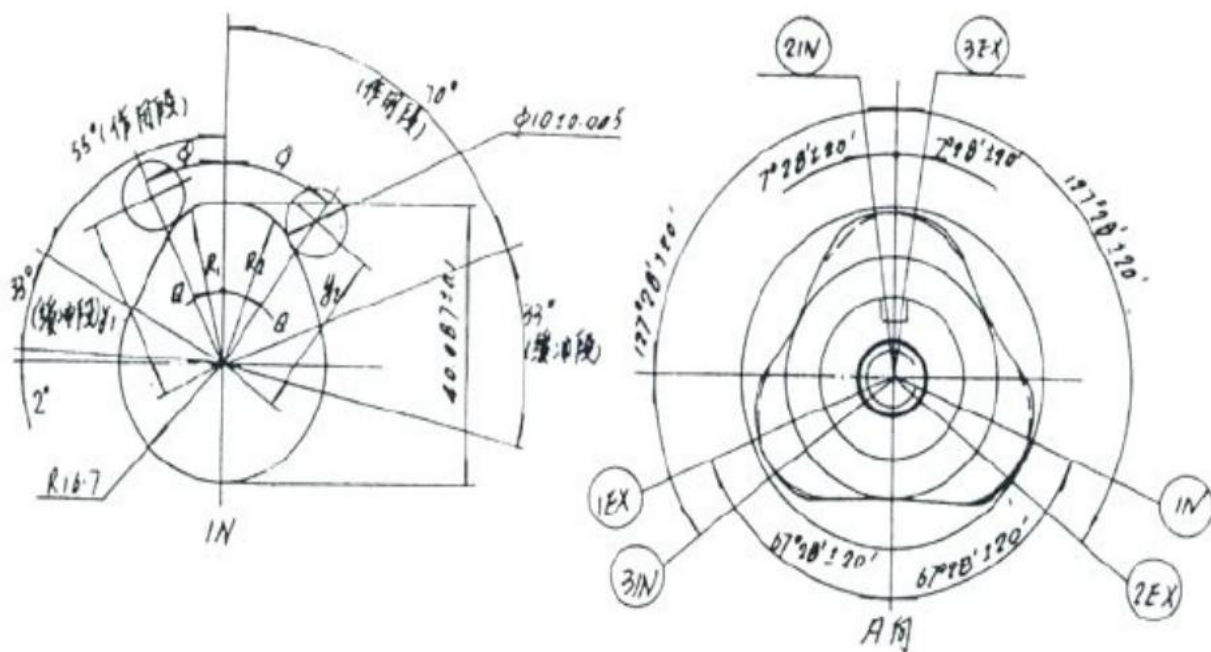


图 4 凸轮轮廓图

4.1.1 凸轮升程数据

- 1) 从动件半径 (mm)：设定从动件半径，用来轮廓计算和测定。
- 2) 凸轮基圆直径 (mm)：设定凸轮基圆直径，可以用此数据微调凸轮尺寸，因为没有凸轮的长径尺寸。
- 3) 角度升程值 (mm/deg)：以凸轮顶点转 180 为 0，只输入有增量的两个角度之间 (90~

270) 的增量数据, 每隔 1 进行设定 (机内密化系统), 最后制成升程表^[7]。

表 4-1 凸轮轴凸轮升程表

φ			φ			φ		
0	28.387	28.387	41	22.580	24.302	82	21.722	21.865
1	28.384	28.384	42	22.497	24.149	83	21.715	21.855
2	28.375	28.375	43	22.422	24.000	84	21.710	21.846
3	28.359	28.261	44	22.353	23.855	85	21.706	21.837
4	28.337	28.341	45	22.292	23.714	86	21.703	21.827
5	28.307	28.315	46	22.237	23.578	87	21.701	21.818
6	28.271	28.285	47	22.188	23.447	88	21.808	21.808
7	28.226	28.249	48	22.145	23.322	89	21.799	21.799
8	28.173	28.208	49	22.108	23.202	90	21.789	21.789
9	28.112	28.162	50	22.077	23.087	91	21.780	21.780
10	28.040	28.111	51	22.049	22.979	92	21.771	21.771
11	27.958	28.054	52	22.027	22.876	93	21.761	21.761
12	27.864	27.993	53	22.007	22.779	94	21.752	21.752
13	27.757	27.927	54	21.992	22.689	95	21.742	21.742
14	27.634	27.856	55	21.979	22.604	96	21.733	21.733
15	27.492	27.780	56	21.968	22.525	97	21.725	21.725
16	27.327	27.699	57	21.958	22.453	98	21.718	21.718
17	27.133	27.613	58	21.949	22.386	99	21.713	21.713
18	26.907	27.522	59	21.939	22.325	100	21.708	21.708
19	26.657	27.426	60	21.930	22.270	101	21.704	21.704
20	26.395	27.326	61	21.920	22.220	102	21.702	21.702
21	26.129	27.220	62	21.911	22.175	103	21.700	21.700
22	25.865	27.109	63	21.901	22.136			
23	25.606	26.993	64	21.891	22.102			
24	25.355	26.872	65	21.882	22.072			
25	25.113	26.746	66	21.872	22.046			
26	24.881	26.616	67	21.863	22.025			
27	24.659	26.480	68	21.853	22.006			
28	24.447	26.340	69	21.843	21.991			
29	24.245	26.196	70	21.834	21.979			
30	24.054	26.048	71	21.824	21.968			
31	23.873	25.896	72	21.825	21.959			
32	23.702	25.741	73	21.8058	21.949			
33	23.542	25.583	74	21.795	21.940			
34	23.390	25.423	75	21.786	21.930			
35	23.248	25.262	76	21.776	21.921			
36	23.115	25.100	77	21.766	21.912			
37	22.992	24.938	78	21.757	21.902			
38	22.876	24.776	79	21.747	21.893			

39	22.770	24.616	80	21.738	21.884
40	22.671	24.458	81	21.729	21.874

由于在升程段廓形圆形滚珠与廓形的切点 D1, D2 都不在滚珠与凸轮的连心线上, 而磨床砂轮必须磨出 D1, D2 点来, 它的半径又远远大于滚珠半径, 所以必须通过计算得出凸轮廓形 (D1, D2) 坐标, 再换算成砂轮中心的坐标, 作为磨床砂轮横向进给的依据。

4.2 包络线理论

设想凸轮不转, 滚柱回绕凸轮旋转, 则滚柱外形形成一个圆的曲线族, 凸轮廓形实际是它的内包络线。以 H 表示滚柱与凸轮轴心距, 则 $H=f(\varphi)$, 以 f_R 为滚柱半径, 则圆的一般方程为:

$$(X - H \cos \varphi)^2 + (Y - H \sin \varphi)^2 = R_r^2$$

因为 H 也是 φ 的函数, 此式可写成隐函数形式 $f(x, y, \varphi) = 0$, 这里 φ 为参变量, 改变 φ 值可得不同的方程式, 如图 6。

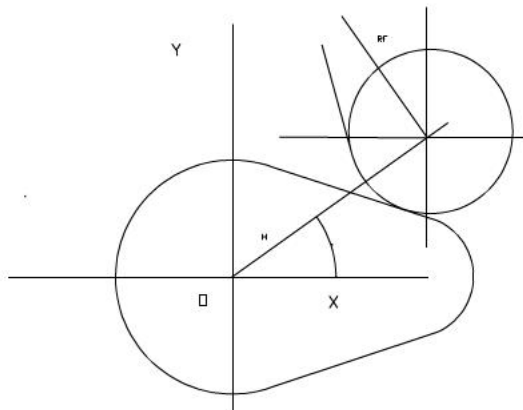


图 6 凸轮廓形图

曲线族中的各点斜率, 据微分学, 可写成:

$$\frac{d_y}{d_x} = - \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)}{\left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)}$$

还可以进一步写作:
$$\frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{d_x}{d_\varphi} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{d_y}{d_\varphi} = 0 \quad (4.1)$$

包络线既与曲线族相切, 其上各点应与曲线族上各切点斜率相等, 故也应满足公式 (4.1)。

曲线族方程 $f(x, y, \varphi) = 0$ 的全微分为:

$$df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial \varphi} d\varphi = 0$$

即：

$$\frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial \varphi} d\varphi = 0 \quad (4.2)$$

包络线上各点既是曲线族里的点，其斜率又应满足公式(4.1)，将(4.1)、(4.2)式联立，可得：

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi} = 0 \quad (4.3)$$

即包络线方程，解此式得出以 φ 表示得 x 、 y 值，即包络线上的各点坐标^[8]。

4.3 凸轮廓形坐标

滚柱曲线族方程的隐函数形式

$$(X - H \cos \varphi)^2 + (Y - H \sin \varphi)^2 - R_r^2 = 0$$

将此式对 φ 微分后使

$$\frac{\partial f}{\partial \varphi} = 0$$

解出 x 、 y 值为

$$x = H \cos \varphi \pm \frac{R_f}{\sqrt{1 + \left(\frac{H \sin \varphi - \frac{d_H}{d_\varphi} \cdot \cos \varphi}{H \cos \varphi + \frac{d_H}{d_\varphi} \cdot \sin \varphi} \right)^2}} \quad (4.4)$$

$$y = \frac{x \cdot \left(H \cdot \sin \varphi - \frac{d_H}{d_\varphi} \cdot \cos \varphi \right) + H \cdot \frac{d_H}{d_\varphi}}{H \cdot \cos \varphi + \frac{d_H}{d_\varphi} \cdot \sin \varphi} \quad (4.5)$$

由于求曲线族的内包络线，故式(4.4)中正负号应取负号。

计算中微分 $\frac{d_H}{d_\varphi}$ 以差分代替，即表列函数中若 H_n 对应于 φ_n ，则取

$$\frac{d_H}{d_\varphi} = \frac{H_{n+1} - H_{n-1}}{\varphi_{n+1} - \varphi_{n-1}}$$

表 4.2 为 C 语言编程计算凸轮轴 y_1 、 y_2 两面的坐标值为 X_D 、 Y_D

表 4-2 凸轮轴 y_1 、 y_2 两面的坐标值 X_D 、 Y_D

ϕ	X_n	Y_n	ϕ	X_n	Y_n	ϕ	X_n	Y_n	ϕ	X_n	Y_n
1	23.382	0.348	52	10.702	13.255	1	23.382	0.348	52	12.055	13.457
2	23.367	0.690	53	10.420	13.450	2	23.366	0.700	53	11.694	13.616
3	23.341	1.031	54	10.137	13.642	3	23.341	1.051	54	11.339	13.772
4	23.305	1.367	55	9.868	13.821	4	23.306	1.397	55	10.991	13.922
5	23.258	1.700	56	9.603	13.992	5	23.259	1.751	56	10.632	14.076
6	23.203	2.027	57	9.341	14.156	6	23.023	2.103	57	10.280	14.226
7	23.138	2.342	58	9.088	14.309	7	23.138	2.449	58	9.933	14.518
8	23.061	2.660	59	8.831	14.457	8	23.063	2.797	59	9.582	14.661
9	22.977	2.959	60	8.573	14.601	9	22.978	3.142	60	9.237	14.661
10	22.885	3.246	61	8.312	14.740	10	22.884	3.480	61	8.898	14.799
11	22.783	3.525	62	8.050	14.875	11	22.780	3.819	62	8.553	14.937
12	22.676	3.785	63	7.790	15.001	12	22.665	4.159	63	8.209	15.075
13	22.565	4.024	64	7.517	15.128	13	22.543	4.490	64	7.876	15.205
14	22.455	4.411	65	7.248	15.249	14	22.412	4.818	65	7.549	15.331
15	22.350	4.234	66	6.977	15.364	15	22.273	5.141	66	7.215	15.457
16	22.311	4.477	67	6.704	15.475	16	22.124	5.459	67	6.894	15.576
17	22.151	4.651	68	6.435	15.578	17	21.968	5.772	68	6.577	15.689
18	21.987	4.848	69	6.153	15.681	18	21.803	6.080	69	6.254	15.802
19	21.847	4.973	70	5.875	15.778	19	21.627	6.386	70	5.949	15.906
20	21.577	5.208	71	5.596	15.868	20	21.446	6.683	71	5.648	16.003
21	21.258	5.469	72	5.315	15.955	21	21.260	6.969	72	5.359	16.092
22	20.909	5.745	73	5.039	16.034	22	21.064	7.252	73	5.074	16.174
23	20.541	6.027	74	4.750	16.111	23	20.806	7.530	74	4.789	16.251
24	20.162	6.313	75	4.466	16.183	24	20.650	7.800	75	4.502	16.323
25	19.779	6.599	76	4.186	16.248	25	20.429	8.064	76	4.208	16.391

26	19.396	6.883	77	3.894	16.310	26	20.205	8.324	77	3.926	16.452
27	19.015	7.162	78	3.607	16.366	27	19.975	8.572	78	3.636	16.508
28	18.638	7.438	79	3.319	16.417	28	19.732	8.820	79	3.339	16.562

表 4-3 凸轮的 H_c 、 ϕ_c 值

Y_1				Y_2			
ϕ_c	H_c	ϕ_c	H_c	ϕ_c	H_c	ϕ_c	H_c
1.561	148.382	54.642	141.999	1.561	148.382	63.823	142.299
3.169	148.368	55.205	141.988	3.076	148.369	64.134	142.270
4.778	148.342	55.765	141.980	4.591	148.348	63.823	142.239
6.435	148.305	56.514	141.970	6.154	148.316	64.134	142.205
8.092	148.256	57.326	141.961	7.624	148.278	64.888	142.184
9.798	148.194	58.200	141.952	9.095	65.159	148.234	142.162
11.599	148.114	59.201	141.943	10.615	148.180	65.476	142.138
13.356	148.021	60.202	141.933	12.089	148.119	65.844	142.120
15.256	147.905	61.202	141.924	13.565	148.052	66.141	142.101
17.251	147.764	62.603	141.914	15.090	147.974	66.491	142.081
19.296	147.598	63.203	141.905	16.571	147.891	66.894	142.066
21.484	147.395	64.267	141.895	18.007	147.804	67.229	142.053
23.857	147.146	65.205	141.885	19.492	147.706	67.557	142.038
26.504	146.829	66.205	141.876	20.980	147.602	68.512	142.023
29.460	146.425	67.206	141.866	22.472	147.490	68.953	142.011
33.699	145.746	68.206	141.857	23.966	147.370	69.517	142.000
26.587	145.199	69.271	141.847	25.464	147.243	70.142	141.988
39.238	144.683	70.208	141.837	26.966	147.109	70.703	141.980
42.699	143.930	71.208	141.828	28.425	146.972	71.451	141.971
44.568	143.502	72.209	141.818	29.935	146.824	72.263	141.962
45.900	143.195	73.209	141.809	31.497	146.662	73.200	141.953
46.880	142.970	74.274	141.799	33.016	146.498	74.201	141.943
47.610	142.805	75.211	141.789	34.540	146.326	75.202	141.934
48.158	142.685	76.211	141.780	36.069	146.146	76.202	141.924
48.596	142.592	77.276	141.770	37.557	145.965	77.139	141.916
48.959	142.517	78.213	141.760	39.096	145.772	78.203	141.906
49.288	142.452	79.213	141.751	40.642	145.570	79.204	141.896
49.582	142.396	80.214	141.741	42.100	145.375	80.141	141.888
49.795	142.356	81.151	1141.73	43.563	145.173	81.205	141.878
49.795	142.326	82.023	141.725	45.033	144.966	82.206	141.868

五、总结

汽车发动机制造业目前竞争激烈，建立符合中国国情和工厂实际的零部件加工生产线，制定合适的加工工艺，并选用可靠经济的设备，对降低产品成本，保证产品质量，提高竞争力有很大的现实意义。

凸轮轴作为汽车发动机的关键部件之一，其性能与质量直接影响发动机整机性能。本文针对夏利汽车凸轮轴的加工特点，结合工厂实际，在建立一条集先进性与经济性统一的凸轮轴生产线的过程中，从前期规划开始，对凸轮轴的加工工艺、设备和检测进行了深入研究。在本篇论文里，根据产品要求，制定合理的凸轮轴生产线节拍、平面布置和工艺路线。主要解决了以下问题：

1. 根据凸轮轴加工特点，优化选择了加工设备。
2. 详细分析了凸轮轴的加工特点和加工难点，优化设计了合理的加工工艺，保证了加工质量。
3. 利用包络线理论，对凸轮轮廓的加工原理进行计算及推导，并计算出相应的砂轮中心坐标及设备主轴转速配置，为生产加工，提供控制参数。
4. 提出了关于凸轮升程测量的新方法：测量数据定位法及其数据评价。并使之应用于凸轮轴的测量中，保证了产品的质量。

作者在实际生产中结合理论知识总结出本论文，所以，论文中的知识与结论对凸轮轴的实际生产有非常重要的参考价值。

参考文献

- [1]杨昂岳. 梁术. 汽车发动机主要零部件技术水平及发展动向[J];汽车工业研究;1994年06期;46-51.
- [2]韦于. 凸轮轴实测数据光顺处理[J]. 广西:微车情报网, 1999.
- [3]W·H·克劳斯汽车发动机设计[M] 北京:人民交通出版社, 1986, 123~15.
- [4]吉林工业大学内燃机教研室内燃机理论与设计下册[M] 北京. 机械工业出版社 1980, 209~258.
- [5]刘永福. 凸轮评定公差标准问题探讨[M]. 北京精密制造与自动化. 2002, 15~17.
- [6]赵新. 多参数在线检测设备的温度补偿机理[M]. 天津. 天内科技. 2002, 21~25.
- [7]哈尔滨工业大学机械制造教研室机械制造工艺理论基础[M]. 北京. 机械工业出版社. 1993, 44~511.
- [8]王先逵. 机械制造工艺学[M]. 北京清华大学. 1995, 5~86.
- [9]谢存嬉等. 机电一体化生产系统设计[M]. 北京. 机械出版社. 1999.
- [10]吴天林等. 机械加工系统自动化[M]. 北京兵器工业出版社. 1999.
- [11]何七荣, 潘展, 徐琳;凸轮轴型面简易数控磨削技术[J];新技术新工艺;2004年12期;40.

致谢

三年的读书生活在这个季节即将划上一个句号，而于我的人生却只是一个逗号，我将面对又一次征程的开始。三年的求学生涯在师长、亲友的大力支持下，走得辛苦却也收获满囊，在论文即将付梓之际，思绪万千，心情久久不能平静。伟人、名人为我所崇拜，可是我更急切地要把我的敬意和赞美献给一位平凡的人，我的老师。我不是您最出色的学生，而您却是最尊敬的老师。您治学严谨，学识渊博，思想深邃，视野雄阔，为我营造了一种良好的精神氛围。授人以鱼不如授人以渔，置身其间，耳濡目染，潜移默化，使我不仅接受了全新的思想观念，树立了宏伟的学术目标，领会了基本的思考方式，从论文题目的选定到论文写作的指导，经由您悉心的点拨，再经思考后的领悟，常常让我有“山重水复疑无路，柳暗花明又一村”。

感谢我的爸爸妈妈，焉得谖草，言树之背，养育之恩，无以回报，你们永远健康快乐是我最大的心愿。在论文即将完成之际，我的心情无法平静，从开始进入课题到论文的顺利完成，有多少可敬的师长、同学、朋友给了我无言的帮助，在这里请接受我诚挚谢意！

另外，感谢学校给予我这样一次机会，能够独立地完成一个课题，并在这个过程中，给予我们各种方便，使我们在即将离校的最后一段时间里，能够更多学习一些实践应用知识，增强了我们实践操作和动手应用能力，提高了独立思考的能力。再一次对我的母校表示感谢。

