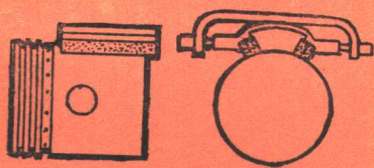


金属零件的精加工技术

青工自学读物

JINSHU LINGJIAN DE
JINGJIAGONG JISHU



仇启源 编著

青工自学读物

金属零件的精加工技术

仇启源 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书针对当前金切工的实际情况,以通俗易懂、生动活泼的文字,介绍了有关金属零件加工精度的基本知识和精加工技术方法。全书内容分金属零件的加工精度(宏观几何精度)、已加工表面质量、常用切削刀具的精加工、精密磨削、精密冷压光加工和特种精密加工方法等六个部分,不仅可以使读者获得精加工的知识和技术方法,也可开阔视野。

封面设计 周养安

青工自学读物

金属零件的精加工技术

仇启源 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

总发行所上海发行所发行 无锡县人民印刷厂印刷

开本787×1092 1/32 印张5.75 字数124,000

1983年3月第1版 1983年3月第1次印刷

印数 1—21,200

统一书号: 15119·2220 定价: (科三)0.48元

前 言

当前机械制造工业的工人队伍,青年的比重很大,予以普及提高产品质量方面的科技知识,具有十分重要的意义。目前机械产品的质量水平,还不能适应国民经济发展的需要,不论是工农业生产,或是军工装备、外贸出口等,都深受其影响。正在推进的“四化”建设,特别是尖端技术,对机械产品的质量要求更高了,提高机械产品质量已是当务之急。可以期待,青年工人一经掌握了有关的知识和技能后,定将成为机械工业创优夺高产的一支朝气蓬勃的有生力量。

本书企图以通俗的语言,介绍以提高金属零件质量为中心的精加工方法。书中除了对加工精度和表面质量的一些概念,作较系统的介绍外,还就各种精加工方法,介绍它们的历史沿革、国内外最新成就、存在的问题以及发展方向等。希望读者通过本书而能对本岗位工作或提高产品质量有所帮助。

零件的精加工方法的内容十分广泛,牵涉到许多边缘性学科,已突破了传统的机械加工方法。笔者才疏学浅,难免有错误和不当之处,敬希读者批评指正。

本书主要是针对青年工人的情况来撰写的,对于一些迫切想了解这方面情况的干部也可作为参考。

仇启源于北京工业学院

1981年6月

目 录

第一章 零件加工的宏观几何精度	1
一、瓦特的烦恼	1
二、向 0.01 微米进军	2
三、我们有可能达到理想的加工精度吗?	4
(一) 加工方法上的误差	5
(二) 机床、设备本身不精确	6
(三) 刀具和夹具不精确	6
(四) 刀具磨损的影响	7
(五) 机床-零件-刀具弹性变形的影响	8
(六) 刀具和零件受热后变形所引起的误差	8
(七) 零件材料中的内应力所引起的误差	9
(八) 与零件尺寸范围有关的误差	10
(九) 测量方法和测量仪器的误差	10
(十) 其它各种误差	11
四、零件的互换性、公差和配合	12
(一) 什么是零件的互换性?	12
(二) 公差与配合	14
五、不圆的圆、不方的方、不平的平面和点、线、面位置的 安排	21
六、要讲究经济效果——谈谈经济精度	27
第二章 表面质量——微观几何精度的研究	30
一、洞察已切削金属表层的“秋毫”	31
(一) 从刨平板谈起	32

(二) 表面光洁度的分级和评定	37
(三) 发生在已切削表面层的变化	41
二、表面质量对零件使用性能的影响	43
(一) 新汽车为什么要“跑合”?	43
(二) 飞机上的零件为什么又光又亮?	45
(三) 火车轮轴是怎样压进去的?	49
(四) 海轮上的零件为什么也要光滑些?	49
(五) 怎样提高表面质量?	50
第三章 用切削刀具的精加工	51
第一节 精密车削	52
一、精密车削究竟精在哪里?	52
(一) 对精密车床的要求	52
(二) 对精密车刀的要求	53
二、让新型精车刀大放光彩	54
(一) 新型刀具材料——新型精车刀的基础	54
(二) 从车刀的几何角度上挖潜力——一种花钱少， 见效快的方法	64
(三) 在车刀结构中找到窍门——机夹车刀大有可为	78
(四) 精车时切削液如何选用?	85
(五) 为什么将车刀绝缘了就能减少刀具磨损?	93
(六) 振动对精密切削究竟是有利还是有害?	97
第二节 精密孔加工	100
一、从枪管孔加工谈起——怎样的孔难加工?	100
二、高精度的孔最后还得靠手铰吗?	103
(一) 用挤压加工精孔的新型刀具——精密刚性镗铰刀	104
(二) 电镀金刚石铰刀	107
第三节 精密铣削	108
一、在近代工业中大献身手的高速精密铣削	109
二、精密铣削能代替磨削吗?	114

第四节 精密拉削	114
一、一种高生产率的精加工方法——拉削	114
二、硬质合金机夹不重磨拉刀	117
第四章 金属零件的精密磨削	120
一、源远流长的磨削加工方法	120
二、说长道短话磨削	122
(一) 磨削的速度和厚度	123
(二) 磨削的表面质量	123
(三) 磨削的功率消耗和径向磨削力	124
三、初露头角的新型磨料——人造金刚石和立方氮化硼	124
(一) 人造金刚石磨轮	126
(二) 立方氮化硼磨轮	129
四、超精密磨削和镜面磨削	130
五、高速磨削	131
六、砂带磨削	133
七、提高零件加工精度和表面光洁度的捷径——珩磨、 超精研磨和研磨	136
(一) 珩磨	136
(二) 超精研磨	137
(三) 研磨	139
八、液体抛光——山间溪水磨光岩石的启示	141
九、弹性发射加工——能达到原子级精度的光整加工方法	143
第五章 金属零件的精密冷压光加工	144
一、冷压光加工为什么能得到高质量的表面?	144
二、冷压光加工的效果与压光元件材料、压光工艺参数	147
(一) 压光力、压光盈量	148
(二) 进给量	149
(三) 行程次数	150
(四) 压光速度	150

(五) 工件的原始条件	150
第六章 金属零件的特种精密加工	153
一、“以柔克刚”的工艺方法——特种精密加工	153
二、电火花加工	154
(一) 电火花加工的基本原理	155
(二) 影响加工精度和表面质量的因素	157
(三) 电火花加工的工艺特点及其应用	159
三、电化学加工	159
(一) 电化学加工的基本原理	160
(二) 电化学加工的生产率和加工精度	161
(三) 电化学加工的特点及其应用	163
四、超声波加工	164
(一) 超声波加工的基本原理	164
(二) 超声波加工的生产率、精度和表面质量	166
(三) 超声波加工的特点及其应用	167
五、激光加工	169
(一) 激光加工的基本原理	169
(二) 激光加工的特点及其应用	174

第一章 零件加工的宏观几何精度

一、瓦特的烦恼

蒸汽机曾在人类历史上发挥了很大的作用，它开创了产业革命新的一页。但你可知道，蒸汽机从 1698 年赛维利取得专利的第一个锥型装置起，经瓦特全面改进后，一直到 1782 年才开始实际应用，经过了 80 多年漫长岁月。瓦特很早就将蒸汽机设计得比较完善了，然而完善的设计，并不等于就是产品，还必须要用相应的生产工艺去实现。但是在 1770 年前，金属零件的切削加工，工艺上还是手持车刀在操作。瓦特是杰出的英国发明家，他搜索枯肠，怎么也无法使工人手持车刀加工直径达半米多的金属汽缸，能达到具有使活塞在汽缸中运动时不至于将大部分蒸汽漏掉的精度要求。瓦特为此而苦恼。直到 1776 年第一台镗杆机的出现，才使金属切削加工技术发生了根本变化。尽管在这台镗杆机上，整整花了 27.5 个工作日，才将 650 毫米直径的灰铸铁汽缸加工到 1 毫米左右的精度。这样的精度，如果以现代的标准来衡量，超差竟达毫米计值，那是不可原谅的废品！但是，请莫对笔者喷有烦言，在当时来说，正是由于这样一个飞跃，蒸汽机才得以从理想设计跨进了大规模实际应用的领域。蒸汽机作为一种动力机械替代人力、畜力进入了工业，从而推动了整个社会生产力的发展。为了要更多、更好、更快地制造各式各样的蒸汽机，就相应地出现了拥有大量机床、具有精确的测量技术以及许许多多熟练

技工的机械制造业。因有了机械制造业的雄厚基础，所以以后出现的千百个发明家，再也不会象 1770 年的瓦特那样苦恼了，他们所设计的许多新型机器，很快就能从理想变为现实。例如：汽车从 1868 年开始研制，到 1895 年出产品，只花了 27 年；而飞机从 1897 年开始研制，到 1911 年出产品，只花了 14 年的时间。目前，一项新的发明创造，从开始研制到出产品的时间，只不过 4~5 年。从发明到出产品时间的大大缩短，不仅说明了整个工业技术的进步，也说明了机械制造业已能迅速地以新工艺、新技术和新设备加工出高精度的零件，以满足新发明所提出的要求。没有强大的机械制造业做基础，任何新发明，都将是一纸空文，都将只是理想而永远成不了现实。

二、向 0.01 微米进军

1776 年，将直径 650 毫米的汽缸，加工到 1 毫米左右的精度，从历史的观点来看，这是划时代的重大成就。它的意义，不仅是金属零件加工技术取得长足的进步，而且也是蒸汽机得以工业应用的关键。就是这 1 毫米左右的精度，才开创了蒸汽机在工业中广泛应用的新纪元。此后，技术进步的历程大大缩短了，人类在不到 100 年的时间里，到 1850 年，已经将加工精度提高到 0.01 毫米（一根头发直径的 $1/5 \sim 1/7$ ）。20 世纪初，由于发明了能测量 0.001 毫米（mm）的千分尺而逐渐将加工精度向微米（ μm ）级过渡。当时，在机械工业中，将达到微米级精度的加工，称之为精密加工。本世纪五十年代末以来，美国为了发展宇宙航行、计算机、激光技术以及自动控制系统等尖端科学技术，首先综合利用了近代的先进技术和工艺方法，在十几年的时间里，使机械加工的精度提高了 1~2 个数量级

——即由五十年代末的微米级(10^{-6} 米)提高到了目前的10纳米(nm)级(即0.01微米或 10^{-9} 米),从而进入了超精密加工的新时代。

加工精度必然会随着科学技术的日益发展而获得不断提高。不论它是什么机器或零部件,从自行车到宇宙飞船,从普通手表到最精密的天文钟,从电子管到超大规模集成电路,它们的使用性能,没有一项不和加工精度有关。如在宇宙飞船导航用的陀螺仪中,直径30毫米的球形转子,它精度标准之一的不圆度,要求不能超过0.12微米;精密坐标镗床主轴用的滚锥轴承内圈的径向跳动量,不得大于0.5微米等。如果这些精密零件,加工不到足够的精度,不但其性能达不到原设计的要求,而且即使勉强凑成了一架机器或一台仪器,其中某些精度不高的零件,也会给使用者带来很大的困难和不堪设想的后果。遨游太空的飞船,可能会因为这些误差偏离预定轨道而到不了所要去的行星;而航行于一望无际大洋中的海轮,也可能因此偏离航线而触礁沉没。在日常生活中,当你的自行车坏了,假使坏的是飞轮,买到的一只又假定是出厂时错检或漏检品,它中央的螺孔精度不高,孔径是负的超差,那么,甚至连装到后轮上去都困难,更不要说正常使用了。正因为零件的加工精度如此重要,所以对任何零件的生产,都规定有一定的精度要求。由成千上万个零件所组成的一架架机器的精度,也是取决于加工这些零件时分别所能达到的精度。评价一项产品质量最主要的两方面指标,一个是使用精度,另一个是使用寿命,而它们都和零件制造时的原始精度有着密切的关系。

究竟什么是加工精度? 某一零件的加工精度,就是指该零件经过加工以后的尺寸、几何形状以及各表面相互位置等

参数的实际值,与设计规定的数值相近似(或相符合)的程度。它们之间的不相符合程度,则称为加工误差。加工精度在数值上通过加工误差的大小来表示,两者的概念是相关联的,即加工精度愈高,加工误差愈小;反之,加工精度愈低,加工误差就愈大。一般所谓保证加工精度,就是指限制加工误差;提高加工精度,就是指减少加工误差。

综上所述,零件的加工精度,主要指的是零件的宏观几何精度,它包括这样三方面内容:零件各部分的尺寸精度;各表面的几何形状精度(不直度、椭圆度、不柱度等)以及各表面间相互位置精度(不同轴度、不垂直度、不平行度等)。

三、我们有可能达到理想的加工精度吗?

加工精度的提高有没有限制?也就是说,加工精度能否提高到完全符合已加工工件的规定尺寸,加工误差为零呢?举例说,在目前的切削加工水平下,如果要求车出一个直径尺寸正好为30毫米的圆柱来。这是不可能的事!为什么呢?因为在车削过程中,会由于种种因素影响而产生加工误差,我们只能认真采取一系列措施,尽可能减少加工误差,得到高精度的零件,但是加工误差不会消除到等于零。在零件制造过程中,只有仔细而认真地分析加工误差产生的原因,并作出了各种努力以后,才有可能将加工误差减至最小。

在研究加工误差产生的原因时,首先要了解在近代机械制造业中,一般通过两种方法来获得零件的尺寸精度:在产量较低(单件、小批量生产)时,用试切法——即通过操作工人在机床上试切削一段,接着进行测量并调整刀具的位置,至符合规定尺寸后,就可以按该尺寸,切削出零件上各相应的表面。另一种,在大批量生产时,则要依靠预先调整好的机床

和刀具的尺寸，而获得零件的加工精度。前一种方法所达到的加工精度，在很大程度上取决于工人本身的技术水平。而后一种方法所能达到的加工精度，不仅取决于所调整机床的精度，而且还取决于在整个加工过程中，各种因素的稳定性。我们分析误差产生的因素，主要是针对后一种方法来讨论的。

在切削加工中，不可避免的加工误差，主要是由于以下十方面原因所引起的，即：

- (1) 加工方法上的误差；
- (2) 机床、设备本身不精确；
- (3) 刀具和夹具不精确；
- (4) 刀具磨损的影响；
- (5) 机床-零件-刀具的弹性变形；
- (6) 刀具和零件受热后变形所引起的误差；
- (7) 零件材料中的内应力所引起的误差；
- (8) 与零件尺寸范围有关的误差；
- (9) 测量仪器和测量方法上的误差；
- (10) 其它各种误差。

(一) 加工方法上的误差

产生这种误差的主要原因是，由于采用了近似的表面形成方法或形状是近似的、但又不太准确的刀具所造成的。例如：在一台缺少英制挂轮的车床上，车制英制螺纹；或者用一把模数盘铣刀来铣齿轮。在生产中，所以允许用各种近似的加工方法来制造零件，是因为采用了近似方法以后，可简化机床或刀具的结构，从而提高生产率和降低制造成本。当然，只有在这种加工方法产生的加工误差，是在所要求的精度范围内时，才允许采用它。

(二) 机床、设备本身不精确

若是机床、设备本身不精确,在这些机床上加工零件,则对零件的加工精度有很大影响。所以对金属切削机床的精度,必须有一定的要求。如一般普通车床主轴的径向跳动量在 $0.01\sim 0.03$ 毫米之间,那末由机床所引起的误差,一般也都在此范围内。但是新机床在使用了一段时间后,还会发生磨损(如有的旧车床,主轴的径向跳动量可达 0.1 毫米以上)。因此,为了保证零件的加工精度,不但要规定制造新机床的精度标准,而且还要规定旧机床经过维修以后的精度标准。不使用那些超出精度标准范围的机床,是保证零件加工精度的重要一环。

(三) 刀具和夹具不精确

金属切削刀具有尺寸刀具和非尺寸刀具之分。如果采用属于尺寸刀具之列的钻头或铰刀来加工零件时,它们的本身制造精度,必然直接影响被加工零件的精度。但是,即使非尺寸刀具(如外圆车刀或端铣刀等),它们的制造精度,也会对所加工零件的精度起着间接影响,因此,必须重视刀具的制造精度。

在零件加工中,夹具的精确性首先影响零件在机床上相对位置的精确性(也就是基准尺寸),所以要特别注意基准定位件的制造精度和耐磨性,其次才是对零件尺寸精度的影响。例如用钻模在零件上钻孔时,钻套的制造精度和各个孔之间的相对距离,将影响零件的加工误差。又如,夹具在使用过程中磨损后,往往会造成一大批零件的报废。

(四) 刀具磨损的影响

在切削过程中,刀具由于受到强烈摩擦和高温、高压等因素的影响,它的磨损是必然的。虽可采取选用耐磨性和热硬

性好的刀具材料、选择刀具的合理几何参数和适当的切削用量、浇注优良的切削液等措施,来提高刀具的耐用度,但想要完全回避刀具磨损是不可能的。已如上面的讨论,不论尺寸刀具或非尺寸刀具,如果它们制造精度差的话,都会直接或间接地降低零件的加工精度。道理相似,刀具磨损后,便丧失了原有精度,若是继续使用,那么也要降低零件的加工精度。而且,还因为磨损刀具的切削力增大,对工艺系统,如零件-刀具-夹具-机床的弹性变形随之增大,造成加工误差和降低光洁度。

既然刀具磨损是不可回避的,又要保证规定的加工精度,是不是可以经常不断地换刀来解决矛盾呢?没有这样做的必要。因为不必要的换刀影响生产效率,而且刀具材料也得不到经济合理地利用。所以,一般以保证规定的零件加工精度和表面质量为前提,制订刀具磨损限度,到了限度则必须换刀。

为了掌握刀具磨损情况,保证零件的加工精度,在单件小批量生产时,是依靠技术工人的熟练,不断地仔细观察刀具的磨损程度和随时测量零件尺寸来达到目的。在大批量生产中,就必须依靠机床本身来掌握刀具的磨损情况,以保证不致因为使用超过磨钝标准的刀具而使大批零件报废。在现代化的自动机床或自动线上,一般都应设有刀具磨损的自动补偿机构,即由包括自动检测、控制和补偿装置组成的“尺寸控制系统”来严格控制加工误差,保证零件的加工精度。它的原理是自动检测装置随时监察由于刀具磨损等原因引起的加工零件的尺寸变化,发出信号给自动控制装置,操纵自动补偿装置使刀具产生以微米为单位的微量径向位移,补偿刀具的磨损量,从而保证零件加工精度。如果是没有自动补偿

刀具磨损的自动机床或自动线，解决刀具磨损问题的最简单办法，就是确定合理的刀具磨损限度的时间，然后以此为准，定时换刀，以使刀具永远在规定的刀具磨损限度以内进行加工，也能保证零件的加工精度。

(五) 机床-零件-刀具弹性变形的影响

在零件的切削过程中，必然会产生切削力，当这些力作用在机床-零件-刀具这样一个弹性系统时，就会产生弹性变形而造成加工误差。在分析切削加工中，由于弹性变形而引起的加工误差时，特别要强调的是由机床-零件-刀具所组成的一个弹性系统的变形，而不是单一的刀具或机床的变形。因为，当在这弹性系统中，某一环节的弹性变形特别大时，加工误差往往都集中在它的上面。如当机床、夹具的刚性很好（刚性好则弹性变形小），而刀具的刚性不太好时，则主要的加工误差是由于刀具的弹性变形所引起的。例如小直径深内孔镗刀，由于零件加工尺寸的限制，决定了刀具的形体细长，所以它的刚性必然不足；因此，小孔的加工误差主要是由于刀具弹性变形所引起的。而有些刀具的刚性很好（如端铣刀），但如果机床、夹具等由于设计和制造等原因而刚性很差时，则加工误差将主要是由于机床、夹具的弹性变形所引起。

(六) 刀具和零件受热后变形所引起的误差

在零件的切削过程中，由于刀具与切屑的接触面之间强烈摩擦和零件的塑性变形，或者说由于切削功转变为切削热，导致刀具和零件上温度的升高。根据金属材料“热胀冷缩”这一物理现象，也一定会使零件的尺寸、形状发生变化。以普通中碳钢为例，它的线膨胀系数为 12×10^{-6} 毫米/毫米·度（在 $20^{\circ} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内）。也就是说，每一米长的零件，当温度升高 1°C 时的线膨胀数值为 0.012 毫米。据有关文献介绍，当切

削速度 1.3 米/秒、切削宽度 5.8 毫米、切削厚度 0.35 毫米、前角 9° 时,工件(滚珠钢)温度达 200°C ,硬质合金刀具前刀面温度高达 850°C 多,由此可以推断其线膨胀数值将是不小的。所以,如果不考虑切削热这个因素,而在零件的加工、测量和使用时均处在不相同的温度条件下,则势必造成很大的误差。

在近代机械制造业中,解决精密加工时由于温度所引起的误差,主要采取在恒温条件下进行切削加工(如在 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 的恒温条件下用坐标镗床镗孔)。对于一般的切削加工,则往往采用浇注足够的、充分的冷却液(也称冷却润滑液或切削液)来解决之;在磨削时,由于其温度很高,浇注冷却液显得更为重要。

(七) 零件材料中的内应力所引起的误差

在加工铸铁件、铸钢件以及未经退火处理的锻件时,由于不均匀的塑性变形、线性收缩以及热处理等各方面的原因,使零件产生了内应力。零件中这种内应力的平衡状态,在机床上经过粗加工后,受到了破坏,会引起零件很大的变形,影响加工精度。在粗加工以后,如果不采取有效措施来消除零件中的内应力,就立刻去精加工,就会由于零件中的内应力所产生的变形,超过了原来留给零件精加工的余量,将会造成废品。

在机械制造业中,消除零件内应力的方法,早期采用的是自然时效;即将粗加工后的铸锻件,在露天放置几年,等到内应力自行消除后再进行精加工。后来,为了减少毛坯件的积存和减少堆放毛坯占用的生产面积,改用了“人工时效”;就是将粗加工后的零件放到时效炉中慢慢加热,然后再慢慢降温,用人工方法消除内应力。人工时效时间一般只要几天即可。