

关玉祥 编著

机械加工误差与控制

机械工业出版社

74.61
569

机械加工误差与控制

关玉祥 编著



机械工业出版社

DV05/18
(京)新登字054号

本书系统介绍了机械加工误差的计算与控制,包括加工误差的尺寸链计算,加工误差的统计分析计算,加工误差的分析计算,加工误差的总和计算,加工误差的补偿与控制,以及保证零件加工质量的工艺规程设计基本原理。书中还给出了有生产实用价值的数值、曲线、公式和实例。

本书供从事机械加工的技术人员使用,也可供工科大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械加工误差与控制/关玉祥编著. —北京:机械工业出版社, 1994. 5

ISBN 7-111-03939-6

I. 机…

I. 关…

Ⅰ. ①金属切削误差控制技术 ②误差控制技术-金属切削

Ⅳ. TG801

出版人 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:贺麓鑫 版式设计:胡金瑛 责任校对:肖新民

封面设计:郭景云 责任印制:王国光

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994年5月第1版·1994年5月第1次印刷

787mm×1092mm^{1/32}·11印张·240千字

0 001—4 000册

定价:13.00元

前 言

机器制造业的工艺工程师在工作实践中，经常要大量地处理如何在保证零件加工质量和机器装配质量的前提下提高生产效率与降低加工成本的问题。为此，作者在多年从事教学与科研的基础上，收集有关资料写成本书。书中系统地介绍了机械加工误差的计算，加工误差的总和，加工误差的补偿与控制，以及保证零件加工质量的工艺规程设计的基本原理等。

随着我国科学技术与工艺技术的不断发展，在机械加工中普遍使用计算机与控制技术是即将实现的事情。工艺技术与计算机技术、控制技术的结合必然使机械加工更加精密，进入到微米级、超微米级的水平。因而要求工艺人员除了要掌握计算机、工程控制技术外，还要更深入地掌握机械加工误差的出现规律、误差补偿与控制方面的知识。希望本书对读者在这方面有所裨益。

全书共六章，分为三个部分：

第一部分为保证加工质量的工艺规程设计的基本原理和与工艺有关的几个统计数学理论问题，包括第一章和第四章的内容；

第二部分为机械加工误差的计算（加工误差的尺寸链计算，加工误差的统计分析计算，加工误差的分析计算，加工误差的总和计算），包括第二章、第三章、第五章、第一章与第四章部分内容。

第三部分为机械加工误差的补偿与控制，包括第六章内容。

本书经胡永生教授审阅，提出了许多宝贵意见，太原机车车辆厂对本书的出版给予了支持，在此表示深切的谢意。

限于作者水平，书中难免有错误与疏漏之处，请读者指正。

目 录

第一章 工艺过程设计的基本原理	1
一、工艺设计的目的与任务	1
二、设计工艺过程的阶段	4
三、设计工艺过程的战略	22
四、加工误差的分类与总和	28
1. 加工误差的分类	28
2. 加工误差的总和	31
五、研究机械加工误差的方法	34
1. 统计分析法	35
2. 分析计算法	37
第二章 尺寸链计算与工艺过程尺寸分析	39
一、尺寸链的基本概念	39
1. 尺寸链的定义与组成	39
2. 尺寸链的分类	44
3. 尺寸链的计算方法	49
二、利用极值法计算尺寸链	49
1. 正面任务	49
2. 反面任务	57
三、利用概率法计算尺寸链	63
1. 正面任务	63
2. 反面任务	70
四、工艺尺寸链的计算	74
1. 工艺尺寸链的计算任务	75
2. 极限尺寸精度的储备和亏空	76

3. 封闭环超出规定值概率的确定	78
4. 计算的公称尺寸圆整	84
5. 工艺尺寸链的算法	85
五、图表法和工艺过程尺寸分析	92
1. 图表法	92
2. 工艺过程尺寸分析	103
第三章 加工误差的分析计算法	108
一、工艺系统刚度	108
1. 刚度的基本概念	108
2. 接触刚度	112
3. 机床静刚度及其实验方法	114
二、在静止状态下工艺系统的误差	120
1. 毛坯误差	120
2. 机床几何误差	123
3. 夹具几何误差	126
4. 刀具几何误差	128
三、方法误差	130
1. 加工原理误差	130
2. 基准位移误差	132
3. 基准不符误差	137
4. 夹紧方法误差	139
5. 机床调整误差	141
四、加工过程中产生的误差	146
1. 切削力变形误差	146
2. 热变形误差	161
3. 刀具磨损误差	182
4. 内应力误差	189
第四章 加工误差统计分析法的理论	200
一、随机变量的分布规律	200
1. 等概率分布规律	200

2. 正态分布规律	201
3. 辛浦生分布规律	205
4. 偏心分布规律	206
二、抽样方法	208
1. 抽样方法的基本任务	208
2. 抽样平均值和方差的性质	209
3. 根据子样计算的总体平均值的精度和可靠性	210
4. 根据子样计算的总体方差的精度和可靠性	213
三、统计数据的处理与实验分布特征的确定	218
四、假设的统计检验	221
1. 虚假设和假设检验准则	222
2. 子样分布正态性假设的检验	223
3. 子样随机性假设的检验	227
4. 子样平均值相等假设的检验	230
5. 子样方差相等假设的检验	233
第五章 加工误差统计分析法的应用	236
一、工艺过程精度的统计分析	236
1. 实际尺寸分布	236
2. 工艺过程统计分析的任务	239
3. 利用大子样的统计分析	244
4. 利用分布量规的统计分析	250
5. 利用小子样的统计分析	251
6. 利用精度图的统计分析	261
7. 根据精度图评价工艺过程的精度和可靠性	270
二、机床调整的统计分析	273
1. 利用通用量具的机床调整	273
2. 利用分布量规的机床调整	276
三、工艺过程精度的统计检验	277
1. 统计检验的形式	277
2. 利用精度图的预防性检验	278

3. 利用分布量规的预防性检验	285
第六章 机械加工误差的补偿与控制	287
一、计算机控制机床几何误差	287
1. 机床几何误差的表示方法	288
2. 机床几何误差的补偿	290
3. 机床几何误差的测定	291
4. 实验方法与实验结果	292
二、工艺系统弹性位移误差的控制	295
1. 工艺系统和工艺因素	295
2. 修正静调整尺寸控制工艺系统弹性位移	299
3. 修正动调整尺寸控制工艺系统弹性位移	302
4. 控制工艺系统弹性位移提高加工精度	306
5. 控制工艺系统弹性位移提高生产率	308
三、空间尺寸链的计算方法与空间尺寸误差的控制	309
1. 刚体空间位置和空间位置误差的矢量表示	309
2. 刚体空间位置变换矩阵	310
3. 刚体空间位置误差变换矩阵	314
4. 刚体空间尺寸链变换矩阵	316
5. 刚体空间位置误差的控制	317
附录	323
参考文献	342

第一章 工艺过程设计的基本原理

一、工艺设计的目的与任务

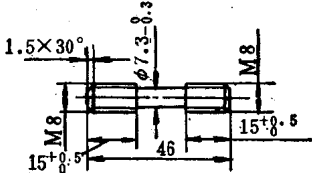
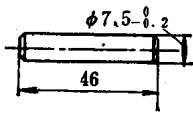
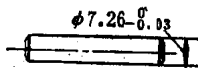
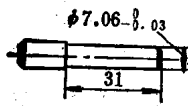
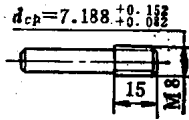
工艺过程设计工作包括设计与计算两方面：工艺过程设计和夹具、刀具、量具、辅具的设计；在设计过程中要进行定位精度、加工余量、工序尺寸、工序公差、切削用量、工时定额、机床负荷、材料消耗定额的计算。总的任务是根据最优化的准则建立优化的工艺过程，以达到优质、高产、低消耗的基本目的。

任何一个工艺过程方案均不可能是绝对最优化的方案，只能是相对的优化，总存在需要完善的地方。有经验的设计是依靠完善工艺过程，创造性地解决所研究的方案。确定一个完善的工艺过程并不容易，不仅取决于零件的结构和生产规模，还取决于设计人员的个人能力和熟练程度。

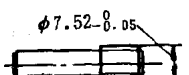
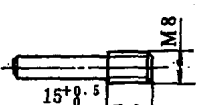
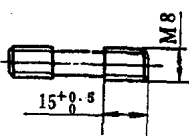
上面所说的情况可用图表说明。表1-1是加工紧固螺栓的工艺过程方案。螺栓的最终工艺是轧制螺纹。轧制后螺纹部分直径加大，因此轧制前的直径尺寸原则上应等于螺纹的中径。方案Ⅰ是用横向进给无心磨削，工序30有四台无心磨床。方案Ⅱ是用纵向进给无心磨削，即贯穿无心磨削。方案Ⅰ尽管装有自动化上料装置，但与方案Ⅱ比较，生产效率仍较低。方案Ⅰ用了一台自动机，五台无心磨床，一台螺纹轧制机床，共五个工序。这个方案的工序30加工尺寸 $\phi 7.06_{-0.03}^{+0.03}$ 常出现废品，成品率不高。方案Ⅱ有六个工序，这个方案取

消了横向进给无心磨削工序，采用纵向进给无心磨削工序，其工艺过程是：自动车、无心磨削，零件一端预轧制螺纹深度较小的螺纹，用无心磨削加工已轧制螺纹的峰顶轮廓，最后轧制零件螺栓两端的螺纹。该方案所采用的机床从七台减为五台，零件加工工时从12min减为0.7min，工艺过程的可靠性增加，准备调整简单。

表1-1 加工紧固螺栓的工艺过程方案

工序序号	方 案 I	方 案 II
10	自 动 车 削 (倒棱) 	
20	纵 向 进 给 无 心 磨 削 	纵 向 进 给 无 心 磨 削 
30	横 向 进 给 无 心 磨 削 	预 轧 制 螺 纹 

(续)

工序序号	方 案 I	方 案 II
40	轧 制 螺 纹 	纵向进给无心磨削 
50	轧 制 螺 纹 	轧 制 螺 纹 
60		轧 制 螺 纹 

从这个例子可以看出，加工螺栓的方案 II 无论从经济上还是从可靠性上，均比方案 I 合理。因而设计工艺过程时总体任务即创造最优的工艺过程。但拟定的工艺过程经常是局部的最优而不是总体的最优。应当指出，在某些文献中常把这样的任务看作为目标优化的折衷任务。

解决这些任务时必须考虑下列要求：

- (1) 加工质量在比较长的时间内稳定；
- (2) 加工生产率最高；
- (3) 加工费用最低。

此外，工艺过程还应符合零件加工消耗的材料最少，加工过程中零件的运输路线最短等要求。

上述要求有的是相互矛盾的。在实际的工艺过程设计中主要满足哪些要求，则取决于生产规模、生产条件等因素。通常比较重要的要求是工艺过程的可靠性和经济性。

为此必须实现工艺过程可靠性水平的预测。这种预测要在由工艺过程确定的设备、夹具、刀具、量具条件下进行，一项新产品要求拟定几百个甚至上千个工艺过程。因此，在实验验证基础上的预测实际上是不可能的。

在工艺过程设计阶段利用计算方法预测工艺过程可靠性水平是比较实际的方法。但预测也不是经常可以得到满意的结果，特别是制造那些没有先例、没有任何具体统计资料的零件。这种情况最常见的是热处理工序，如加工大型多缸曲轴，粗加工之后主轴轴颈和连杆轴颈需要淬火，可能产生很大的淬火变形。在工艺过程设计时无法预估曲轴尺寸和形状的变化。因此计算的预测不可能充分可信，必须执行某种实验工作。

二、设计工艺过程的阶段

中等复杂零件的工艺设计和计算工作可分为七个基本阶段。各阶段的内容和执行的方法有所区别，各阶段的工作量差别也很大。工艺过程设计的每个阶段的内容，主要取决于生产类型是大量的，成批的还是单件生产。对于大批量的生产，所有设计和计算工作均要求比较细致。对于单件生产则可以简单些，但复杂零件的工艺也是相当复杂的，如同对于成批大量生产时一样，要拟定得比较仔细。单件生产必须在使用通用设备和通用工艺装备条件下保证所加工零件质量的可靠性。工艺过程设计阶段内容的区别主要还取决于所制定的零件加工工艺过程是利用已有的机床设备，还是需要制造

专用的机床设备。

为方便地表明工艺过程设计阶段可以利用工艺过程设计阶段框图。该图说明了执行工艺过程设计的次序和各阶段的相互联系（图1-1）。

阶段I是准备和研究原始资料。比较复杂的是涉及零件工作图的准备。零件的工作图应该有详尽的零件几何形状、加工精度、材料性质和表面质量的要求等信息。中等复杂零件的零件图（如箱体、阶梯轴、复杂的齿轮）具有比较大的信息量，有几十个上百个要求的参数，因此研究零件图时所有的特点均要求花精力给予特别的注意。在设计工艺过程时要多次查看零件图，以便检验哪些要求达到了，还有哪些要求未达到。与此同时还必须考虑毛坯的轮廓外形以及毛坯的特点，即考虑毛坯的结构因素。

具体说需要准备的原始资料有零件图，必要的装配图；零件的生产纲领和生产批量；工厂的生产条件，如设备的规格、功能、精度等级，刀、夹、量具规格及使用情况，工人的技术水平，专用设备和工装的制造能力；毛坯生产和供应条件等。

对原始资料的研究最主要的是对零件图分析研究、零件结构工艺性的分析和毛坯生产情况的研究。

分析研究零件图的方法可先把组成零件的表面分解成各基本表面（外圆表面、内圆表面、平面、齿面、螺纹表面等），并把各基本表面编号。然后按表面序号逐一说明每个基本表面所要求的尺寸精度、形状精度、位置精度、表面粗糙度以及加工的技术要求，毛坯的技术要求，采用的工步名称和需要的工步数目，最后用简短的形式说明保证零件图技术要求所采取的工艺措施。

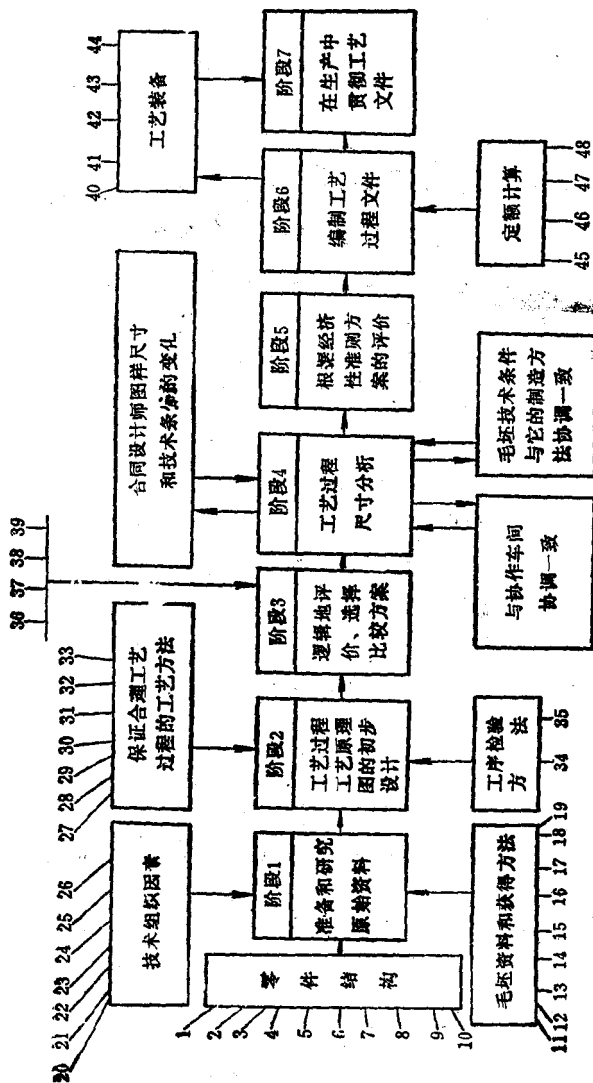


图1-1 工艺过程设计阶段框图

1—机器或部件图样 2—轮廓尺寸和质量 3—零件结构形状 4—尺寸公差 5—空间允许偏差 6—表面粗糙度 7—零件材料和硬度 8—表面化学处理 9—镀层(化学的、电的) 10—表面层质量(应力等) 11—获得毛坯的方法 12—毛坯结构形状符合程度 13—浇口冒口情况 14—铸件、锻件斜度和圆角半径 15—表面剥落层厚度 16—毛坯尺寸公差 17—允许的空间偏差 18—毛坯硬度 19—表面层质量(硬度、白口层等) 20—产品生产纲领 21—生产批量 22—订购专用设备的可能性 23—订购专用工艺装备、刀具的可能性 24—装备维修能力 25—技术协作的可能性 26—其它简要素 27—工序的合理次序 28—表面加工的优化数量 29—热处理工序合理顺序 30—各种表面加工的协调 31—操作循环次数 32—工序划分的根据 33—工序公差和技术条件制定的根据 34—组织方法 35—检验工具的合理类型 36—可靠的实际实现的可能性 37—多机管理设备的方便布置 38—类似工序的经验 39—生产准备周期 40—专用设备的订购 41—专用工装的订购 42—专用刀具的订购 43—专用测量工具的订购 44—标准刀具、工具、材料的订购 45—一切削用量与时间定额 46—材料消耗定额 47—设备负荷 48—工艺过程的标准检查

所采取的工艺措施一般要求已在生产中经过考验证明是可行的。在工艺措施考虑之后即可确定定位方法，选择在一次安装情况下能加工的表面以及选择能保证图样技术要求（同轴度，平行度等）的专用刀具和专用夹具形式。这些技术措施是由零件图技术要求，经常还有毛坯技术要求和生产组织因素所决定的。在拟定了工艺计划和进行了工艺过程尺寸分析之后才能最后确定各表面所需要的实际工步数目。

阶段 1 准备原始资料至此全部结束。

阶段 2 是工艺过程工艺原理图的初步设计，拟定某个工艺路线或某几个工艺路线，並画出工序草图。该图不是为了用于工序卡片，而是为了评价整个工艺过程。在设计零件工艺原理图时可以选用各种加工方法、机床和刀具。不管是加工零件的总加工路线方面，还是个别的加工工序，均可形成几个方案。设计工艺过程时要用到尺寸、形位公差、表面粗糙度等基本精度和表面特征，另外一些特征也要利用，如基本特征的各种变形形态或上述若干误差的综合评价，如假想线（或点）之间的距离精度，轴线的坐标精度，轴线的同轴度，螺纹的平均中径，齿轮的运动精度等。

任何零件除了精度特征之外，还应满足与用途相应而提出的要求，如零件强度、表面硬度、表面层质量、耐磨性能、零件寿命、抗腐蚀性能、零件残余应力、疲劳强度等。零件愈重要，形状愈复杂，使用速度愈高，精度愈高，对零件提出的要求也就愈高。

制造机器零件时可利用下列加工形式：a) 铸、锻、模锻、焊接等方法进行毛坯生产；b) 弯曲、校直、焊接、切割；c) 车、铣、磨等切削加工；d) 挤压、辗平等无切屑加工；e) 电镀加工（镀铜、镀镍、镀铬、氧化等）；f) 化