

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 仪 器 制 造 技 术

主 编 曲兴华

副主编 贾维溥

参 编 (排名不分前后)

王 平 王喆垚

胡鹏浩 赵伯雷

郭敬滨 贾果欣

主 审 陆伯印



机 械 工 业 出 版 社

现代仪器科学技术是机械、光学、电学、计算机以及控制技术的综合，其制造过程涉及的内容广泛、加工方法多样化。本书介绍了一些常用仪器加工方法和基本制造原理及相关技术。包括：工艺过程基本概念与组成、加工精度与制造质量监控技术、常用仪器仪表材料特性和选材方法、精密机械制造、特种加工、仪器仪表元器件的成形工艺及特殊工艺、制造自动化、装配与调整、微电子机械系统（MEMS）制造技术等内容。

本书为测控技术与仪器专业及相近专业的制造技术类教材，也可以作为仪器制造工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目（CIP）数据

仪器制造技术/曲兴华主编. —北京：机械工业出版社，2005.1

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-111-15754-0

I. 仪... II. 曲... III. 仪器—机械制造工艺—高等学校—教材  
IV. TH7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 126553 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：王小东

责任编辑：王小东 苏颖杰 版式设计：张世琴 责任校对：张 媛

封面设计：鞠 杨 责任印制：李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/16·22.75 印张·562 千字

定价：33.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

仪器仪表是现代科学技术的“五官”，是人类自身能力的延伸；仪器仪表是信息技术不可或缺的重要组成部分，对信息进行采集和处理；仪器仪表是信息技术的源头，在国民经济和科技发展具有重要作用。由于仪器仪表需要综合运用多种技术，自身要求很高的科技含量，具有应用的多样性，因此仪器仪表技术集中体现了当代最新、最高科学技术水平。

现代仪器科学技术是光（光学）、机（精密机械）、电（电子技术）、算（计算机）、控（自动控制）技术的综合，其制造过程涉及的内容广泛、加工方法多样化。制造时不仅采用精密/超精密机械制造、电子电路制造、光学元件制造、特种工艺、专用元器件加工、装配工艺等加工方法，还要应用制造精度理论、在线质量监控技术、误差补偿技术等辅助加工手段，也与常用仪器仪表材料特性密切相关。新的仪器制造发展方向是高精度、微型化、模块化、智能化，因此还增加了制造自动化技术和微光机电系统加工技术等。仪器制造技术的学习就是从这些方面了解和掌握相应的工艺方法与技术。

本书为测控技术与仪器专业及类似专业的制造技术类教材，是培养高素质综合性人才不可或缺的技术基础课程教学用书。编写过程中更加充分地考虑了仪器仪表类及相关专业教学、科研的特色，将先进的仪器制造技术和方法、独特的仪器工艺原理介绍给学生。本书的特色是：将普遍工艺原理与特色加工技术相结合；将理论介绍与实际应用相结合；将近年来科学技术发展所涉及的制造新工艺、新技术纳入书中。本书也可以作为仪器制造工程技术人员的参考书。

本书共分为9章，其中：

第1章 工艺过程基本概念与组成。介绍仪器加工技术概述、工艺过程的基本概念和术语、基准、夹具设计原理等。

第2章 加工精度分析与制造质量监控技术。介绍影响加工精度的因素、加工误差的分析方法、在线质量测控技术和表面质量等。

第3章 常用的仪器仪表材料特性和选材方法。介绍材料学基础知识、金属材料、高分子材料、无机非金属材料、复合材料与其他新材料等在仪器仪表中的应用。

第4章 精密机械制造技术。介绍机加工工艺路线的拟定，精密磨削、精密车削加工、光整加工方法及精密仪器零件的加工等。

第5章 特种加工。介绍电化学加工、电火花加工、激光加工、超声波加工、喷射加工、高能粒子束加工方法等。

第6章 仪器仪表常用元器件加工。介绍金属元器件的精密成形工艺、非金属元器件的精密成形工艺、仪器仪表元器件的连接成形工艺、刻划技术、光学零件的加工工艺、电子组装技术、表面覆盖与装饰等。

第7章 制造自动化技术。介绍制造自动化技术概论、数控加工技术、柔性制造系统、计算机集成制造系统、快速原型制造技术等。

第8章 装配与调整。介绍装配生产形式与组织形式、结构工艺性、尺寸链、装配方法

和精度等。

第 9 章 微光机电系统加工方法。介绍微小尺寸设计与加工特点、集成电路制造技术基础、硅微加工技术、LIGA 加工技术、键合、微系统的封装等。

本教材的编写吸收了作者在教学、科研工作中的诸多心得体会，同时大量参考了其他相关的教材、著作、论文和研究成果，在此向有关作者表示感谢。还要特别感谢中国科学院上海微系统研究所杨恒博士和荷兰 Delft 科技大学荷兰材料研究所宋桂明博士对第 9 章审阅过程中提出的建议与意见。

本书是由来自天津大学、清华大学、合肥工业大学、天津科技大学的作者共同完成的。其中天津大学曲兴华教授编写了第 1 章和第 8 章；合肥工业大学胡鹏浩博士编写了第 2 章；天津大学贾果欣讲师编写了第 3 章；天津大学郭敬滨副教授编写了第 4 章；天津大学赵伯雷副教授编写了第 5 章；清华大学贾维溥副教授编写了第 6 章；天津科技大学王平教授编写了第 7 章；清华大学王喆垚博士编写了第 9 章。全书由曲兴华教授和贾维溥副教授负责统稿；由天津大学陆伯印教授主审。河北工业大学的张思祥教授在制订大纲和部分章节审稿中也提出了很多重要的建议和意见。本书在编写过程中还得到了天津大学精密仪器与光电子工程学院的吴小津工程师、李金荣工程师的大力协助，书中的很多图、表是由她们绘制的，在此向他们的认真工作和无私奉献致以深深的敬意。

虽然我们尽力做好编写工作，但也难免有错误和遗漏之处，欢迎广大读者随时提出意见，给予帮助，以便这本教材能不断地得到充实提高。

# 目 录

## 前言

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 工艺过程基本概念与组成 .....   | 1  |
| 1.1 仪器的生产过程 .....         | 1  |
| 1.1.1 仪器生产过程的主要研究内容 ..... | 1  |
| 1.1.2 仪器的开发过程 .....       | 2  |
| 1.1.3 生产的组织形式 .....       | 3  |
| 1.2 工艺过程设计的基本概念 .....     | 5  |
| 1.2.1 机械加工工艺过程的组成 .....   | 5  |
| 1.2.2 生产类型 .....          | 6  |
| 1.2.3 加工工艺规程 .....        | 6  |
| 1.2.4 机械加工余量和工序尺寸 .....   | 8  |
| 1.2.5 时间定额与技术经济分析 .....   | 9  |
| 1.3 基准 .....              | 12 |
| 1.3.1 基准及分类 .....         | 12 |
| 1.3.2 定位的基准选择 .....       | 12 |
| 1.4 夹具设计原理 .....          | 14 |
| 1.4.1 夹具的组成 .....         | 14 |
| 1.4.2 定位原理与自由度分析 .....    | 15 |
| 1.4.3 定位方法与定位元件设计 .....   | 19 |
| 1.4.4 夹紧方法与夹紧元件 .....     | 29 |
| 1.4.5 典型夹具举例 .....        | 34 |
| 习题与思考题 .....              | 39 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 2 章 加工精度分析与制造质量监控技术 ..... | 41 |
| 2.1 基本概念 .....              | 41 |
| 2.1.1 精度的基本含义 .....         | 41 |
| 2.1.2 获得规定加工精度的方法 .....     | 41 |
| 2.2 影响机械加工精度的工艺因素 .....     | 42 |
| 2.2.1 方法误差 .....            | 42 |
| 2.2.2 机床误差 .....            | 43 |
| 2.2.3 夹具误差和磨损 .....         | 45 |
| 2.2.4 刀具误差和磨损 .....         | 46 |
| 2.2.5 工艺系统的受力变形 .....       | 46 |
| 2.2.6 工艺系统的受热变形 .....       | 50 |
| 2.2.7 工件安装、调整和测量的误差 ...     | 53 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 2.2.8 工件内应力引起的变形 .....     | 53 |
| 2.3 加工误差分析和加工质量监控 .....    | 55 |
| 2.3.1 加工误差的性质 .....        | 55 |
| 2.3.2 加工误差的统计分析 .....      | 56 |
| 2.3.3 在线质量控制和质量趋势预报 ...    | 64 |
| 2.4 机械加工的表面质量 .....        | 66 |
| 2.4.1 机械加工表面质量的意义 .....    | 66 |
| 2.4.2 表面质量对仪器使用性能的影响 ..... | 67 |
| 2.4.3 影响表面质量的工艺因素 .....    | 68 |
| 2.4.4 切削加工过程的振动 .....      | 70 |
| 习题与思考题 .....               | 73 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第 3 章 常用的仪器仪表材料特性和选材方法 ..... | 74  |
| 3.1 概述 .....                 | 74  |
| 3.1.1 仪器仪表选材的重要性 .....       | 74  |
| 3.1.2 仪器仪表材料的分类 .....        | 74  |
| 3.2 材料学基础知识 .....            | 75  |
| 3.2.1 固态原子的结合键 .....         | 75  |
| 3.2.2 晶体与显微组织 .....          | 75  |
| 3.2.3 材料的力学、物理及化学性能 ...      | 78  |
| 3.3 金属材料 .....               | 79  |
| 3.3.1 铁碳合金 .....             | 79  |
| 3.3.2 合金钢 .....              | 87  |
| 3.3.3 非铁金属及粉末冶金材料 .....      | 89  |
| 3.4 高分子材料 .....              | 93  |
| 3.4.1 概述 .....               | 93  |
| 3.4.2 塑料 .....               | 94  |
| 3.4.3 合成橡胶 .....             | 96  |
| 3.4.4 胶粘剂 .....              | 97  |
| 3.4.5 润滑材料 .....             | 98  |
| 3.5 无机非金属材料 .....            | 100 |
| 3.5.1 陶瓷 .....               | 100 |
| 3.5.2 玻璃 .....               | 101 |

|                            |     |                                       |     |
|----------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 3.5.3 光学晶体 .....           | 103 | 5.1.1 电火花成形加工 .....                   | 149 |
| 3.6 复合材料 .....             | 103 | 5.1.2 其他电火花加工 .....                   | 156 |
| 3.6.1 概述 .....             | 103 | 5.1.3 电火花线切割加工 .....                  | 157 |
| 3.6.2 常用复合材料 .....         | 104 | 5.2 电化学加工 .....                       | 160 |
| 3.7 纳米材料 .....             | 105 | 5.2.1 电解加工 .....                      | 160 |
| 3.8 仪器仪表材料的选用 .....        | 106 | 5.2.2 电解磨削 .....                      | 164 |
| 3.8.1 仪器设计与选材的关系 .....     | 106 | 5.2.3 电铸加工 .....                      | 166 |
| 3.8.2 选材的一般原则 .....        | 107 | 5.3 激光加工 .....                        | 168 |
| 3.8.3 选材的典型实例分析 .....      | 107 | 5.3.1 激光加工方法 .....                    | 168 |
| 习题与思考题 .....               | 108 | 5.3.2 影响激光加工的主要因素 .....               | 168 |
|                            |     | 5.3.3 激光加工的特点及应用 .....                | 169 |
| <b>第4章 精密机械制造技术</b> .....  | 110 | 5.4 超声波加工 .....                       | 171 |
| 4.1 概述 .....               | 110 | 5.4.1 工作原理 .....                      | 171 |
| 4.1.1 精密加工和超精密加工的概念 .....  | 110 | 5.4.2 超声加工设备 .....                    | 172 |
| 4.1.2 精密加工对设备及环境的要求 .....  | 110 | 5.4.3 影响超声加工的工艺因素 .....               | 172 |
| 4.2 工艺路线的拟定 .....          | 111 | 5.4.4 超声加工的特点 .....                   | 173 |
| 4.2.1 加工方法的选择 .....        | 111 | 5.4.5 超声加工的应用 .....                   | 173 |
| 4.2.2 零件各表面加工顺序的安排 .....   | 116 | 5.5 高能粒子束加工 .....                     | 174 |
| 4.2.3 典型表面加工路线的选择 .....    | 118 | 5.5.1 电子束加工 .....                     | 175 |
| 4.3 精密磨削和超精密磨削 .....       | 123 | 5.5.2 离子束加工 .....                     | 177 |
| 4.3.1 精密和超精密磨料磨具(砂轮) ..... | 123 | 5.6 其他特种加工 .....                      | 178 |
| 4.3.2 精密磨削 .....           | 126 | 5.6.1 等离子弧加工 .....                    | 178 |
| 4.3.3 超精密磨削 .....          | 129 | 5.6.2 喷射加工 .....                      | 179 |
| 4.4 超精密车削加工 .....          | 130 | 5.6.3 磨料流加工 .....                     | 181 |
| 4.4.1 金刚石刀具和超精密切削的机理 ..... | 131 | 习题与思考题 .....                          | 181 |
| 4.4.2 影响金刚石超精密切削的因素 .....  | 131 |                                       |     |
| 4.5 光整加工 .....             | 133 | <b>第6章 仪器仪表元器件的成形(型)工艺及特殊工艺</b> ..... | 183 |
| 4.5.1 研磨 .....             | 133 | 6.1 金属元器件的精密成形工艺 .....                | 183 |
| 4.5.2 超精研 .....            | 136 | 6.1.1 精密铸造 .....                      | 183 |
| 4.5.3 珩磨 .....             | 138 | 6.1.2 精密锻造 .....                      | 186 |
| 4.6 精密零件的加工 .....          | 140 | 6.1.3 精密冲压 .....                      | 189 |
| 4.6.1 精密平板与90°角尺的加工 .....  | 140 | 6.1.4 弹性元件的精密成形 .....                 | 194 |
| 4.6.2 精密螺纹的加工 .....        | 142 | 6.2 仪器仪表非金属元器件的精密成形工艺 .....           | 201 |
| 4.6.3 导轨加工 .....           | 147 | 6.2.1 塑料零件的精密成形 .....                 | 201 |
| 习题与思考题 .....               | 148 | 6.2.2 陶瓷零件的精密成形与精密加工 .....            | 206 |
|                            |     | 6.3 仪器仪表元器件的连接成形 .....                | 209 |
| <b>第5章 特种加工</b> .....      | 149 | 6.3.1 焊接成形技术 .....                    | 210 |
| 5.1 电火花加工 .....            | 149 | 6.3.2 胶接成形技术 .....                    | 212 |
|                            |     | 6.4 刻划技术 .....                        | 214 |
|                            |     | 6.4.1 机械刻划 .....                      | 215 |

|                                |     |                                   |     |
|--------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 6.4.2 机械-化学法与机械-物理法刻划 .....    | 216 | 7.4.3 CIMS 的现状与发展趋势 .....         | 263 |
| 6.4.3 照相复制法刻划 .....            | 216 | 7.4.4 CIMS 的生产管理模式 .....          | 263 |
| 6.4.4 激光刻划 .....               | 217 | 7.5 快速原型制造技术 (RPM) .....          | 266 |
| 6.5 光学零件的加工工艺 .....            | 218 | 7.5.1 快速原型制造技术的基本概念 .....         | 266 |
| 6.5.1 光学零件的基本加工工艺 .....        | 219 | 7.5.2 快速原型制造系统 .....              | 267 |
| 6.5.2 光学零件的现代制造技术 .....        | 222 | 7.5.3 快速原型制造的软件系统 .....           | 269 |
| 6.5.3 光学零件的镀膜工艺 .....          | 223 | 7.5.4 快速原型制造技术的应用 .....           | 269 |
| 6.6 电子组装技术 .....               | 226 | 习题与思考题 .....                      | 270 |
| 6.6.1 印制电路板 .....              | 226 | <b>第 8 章 装配与调整</b> .....          | 272 |
| 6.6.2 电子组装技术 .....             | 227 | 8.1 装配的生产与组织形式 .....              | 272 |
| 6.6.3 计算机辅助印制电路板设计 .....       | 232 | 8.1.1 装配工艺规程 .....                | 272 |
| 6.7 表面覆盖与装饰 .....              | 233 | 8.1.2 一般装配工作 .....                | 274 |
| 6.7.1 电镀与化学镀 .....             | 233 | 8.1.3 装配的组织形式 .....               | 275 |
| 6.7.2 化学与电化学转化膜 .....          | 234 | 8.2 结构工艺性 .....                   | 277 |
| 6.7.3 涂装技术 .....               | 235 | 8.2.1 结构工艺性指标 .....               | 277 |
| 6.7.4 气相沉积技术 .....             | 237 | 8.2.2 零件结构工艺性分析 .....             | 278 |
| 习题与思考题 .....                   | 238 | 8.2.3 仪器的结构工艺性分析 .....            | 280 |
| <b>第 7 章 制造自动化技术</b> .....     | 239 | 8.3 尺寸链 .....                     | 282 |
| 7.1 制造自动化技术概论 .....            | 239 | 8.3.1 尺寸链的组成 .....                | 282 |
| 7.1.1 制造自动化技术基本概念 .....        | 239 | 8.3.2 尺寸链的计算方法 .....              | 284 |
| 7.1.2 制造自动化技术发展现状 .....        | 240 | 8.3.3 尺寸链的应用 .....                | 288 |
| 7.1.3 制造自动化技术结构体系 .....        | 240 | 8.4 装配方法 .....                    | 291 |
| 7.1.4 制造自动化中的关键技术 .....        | 241 | 8.4.1 装配精度 .....                  | 291 |
| 7.1.5 计算机辅助工艺规程设计 (CAPP) ..... | 242 | 8.4.2 互换装配法 .....                 | 292 |
| 7.2 数控加工技术 .....               | 244 | 8.4.3 分组装配法 .....                 | 294 |
| 7.2.1 数控机床的组成与分类 .....         | 244 | 8.4.4 修配装配法 .....                 | 296 |
| 7.2.2 计算机数字控制 (CNC) 装置 .....   | 247 | 8.4.5 调整装配法 .....                 | 297 |
| 7.2.3 数控机床的位置检测装置 .....        | 249 | 习题与思考题 .....                      | 301 |
| 7.2.4 数控加工程序编制 .....           | 250 | <b>第 9 章 微电子机械系统 (MEMS)</b> ..... |     |
| 7.2.5 数控加工编程实例分析 .....         | 252 | 制造技术 .....                        | 304 |
| 7.3 柔性制造系统 (FMS) .....         | 253 | 9.1 概述 .....                      | 304 |
| 7.3.1 柔性制造系统的基本概念 .....        | 253 | 9.1.1 MEMS 的概念 .....              | 304 |
| 7.3.2 柔性制造系统的基本结构 .....        | 255 | 9.1.2 MEMS 的特点 .....              | 305 |
| 7.3.3 柔性制造系统的物流系统 .....        | 257 | 9.1.3 MEMS 的产生与发展 .....           | 305 |
| 7.3.4 柔性制造系统的信息流 .....         | 258 | 9.1.4 MEMS 的材料、设计与制造 .....        | 306 |
| 7.3.5 柔性制造技术的实例分析 .....        | 258 | 9.2 集成电路工艺基础 .....                | 310 |
| 7.4 计算机集成制造系统 (CIMS) .....     | 260 | 9.2.1 超净间技术 .....                 | 310 |
| 7.4.1 CIMS 的基本概念及组成 .....      | 260 | 9.2.2 集成电路制造的基本过程 .....           | 311 |
| 7.4.2 CIMS 的体系结构 .....         | 261 | 9.2.3 光刻技术 .....                  | 311 |

|       |                     |     |                                    |                    |     |
|-------|---------------------|-----|------------------------------------|--------------------|-----|
| 9.2.4 | 薄膜淀积 .....          | 314 | 9.5.2                              | LIGA 技术 .....      | 341 |
| 9.2.5 | 离子注入 .....          | 318 | 9.5.3                              | 电沉积 .....          | 342 |
| 9.2.6 | 刻蚀 .....            | 319 | 9.5.4                              | 软光刻 .....          | 342 |
| 9.2.7 | 化学机械抛光 .....        | 320 | 9.5.5                              | 微模铸技术 .....        | 344 |
| 9.3   | 体微加工技术 .....        | 321 | 9.5.6                              | 微立体光刻与微电火花加工 ..... | 344 |
| 9.3.1 | 湿法刻蚀 .....          | 321 | 9.5.7                              | MEMS 封装技术 .....    | 344 |
| 9.3.2 | 干法深刻蚀 .....         | 326 | 习题与思考题 .....                       | 348                |     |
| 9.4   | 表面微加工基础 .....       | 332 | 附录 .....                           | 349                |     |
| 9.4.1 | 表面微加工过程 .....       | 332 | 附表 1 JB/T3208—1999 准备功能 G 代码 ...   | 349                |     |
| 9.4.2 | 结构层与牺牲层 .....       | 333 | 附表 2 JB/T3208—1999 辅助功能 M 代码 ..... | 350                |     |
| 9.4.3 | 粘连 .....            | 334 | .....                              | 350                |     |
| 9.4.4 | 薄膜内应力 .....         | 335 | 参考文献 .....                         | 351                |     |
| 9.4.5 | 表面工艺的 IC 兼容性及应用 ... | 336 |                                    |                    |     |
| 9.5   | 其他 MEMS 加工技术 .....  | 339 |                                    |                    |     |
| 9.5.1 | 键合 .....            | 339 |                                    |                    |     |

# 第 1 章 工艺过程基本概念与组成

## 1.1 仪器的生产过程

### 1.1.1 仪器生产过程的主要研究内容

仪器的生产过程从广义上可划分为新产品构思与实验、产品设计、产品制造、产品销售和售后服务四个阶段。

新产品构思是科技人员根据具体的使用需要和现有科学技术的水平和制造能力，对新型仪器的开发进行规划。构思阶段要充分考虑仪器中现代科技成果的应用，要具有可行性及独立自主的知识产权，要考虑产品定型后的市场前景，即仪器应具备先进性、新颖性和实用性三性。

产品设计是将成熟的构思落实到具体可实现的技术和方法上。仪器设计人员一方面要理解产品的构思，另一方面要了解实际的仪器制造技术和方法，使设计的产品易于实现。

产品的制造过程，也是狭义的仪器生产过程，它是形成最终仪器的主要工作，目的是获取具有一定几何特性和物理、化学性能的产品。制造中要根据市场的需要，决定仪器生产的批量。制造活动包括了：原材料运输、保管和准备，毛坯制造，零件制造，部件和成品装配，产品质量检查及运行试验，表面装饰和包装等。同时也涉及了制造过程的规划、调度与控制等。

主要的仪器制造工艺方法有：①材料成形，如铸造、锻压、焊接、注塑、冲压、冷锻加工等；②机械加工，如车、铣、刨、磨加工等；③特种加工，如电化学、化学、电火花、激光、超声波、射流、高能粒子束加工等；④表面加工，如光整、电镀、镀膜、转换膜、涂装、表面改性加工等；⑤仪器常用元器件加工，如弹性元件、陶瓷元件、光学元件、塑料零件加工等；⑥仪器常用工艺，如钎焊、粘接、刻划、MEMS 工艺、电子装联加工等。热处理工艺，如退火、淬火、正火、发黑、表面处理等，则是使零件获得一定的力学性能（强度、硬度）、物理、化学（耐磨、耐蚀）等特性的工艺方法。还有计算机辅助工艺技术。

产品销售与售后服务：销售是指把生产出的仪器通过市场卖到用户手中，为企业赢取合理的利润；售后服务是帮助用户使用好仪器，并根据具体应用环境进一步开发仪器的功能。这个过程可以通过意见反馈获取产品改型的重要信息，而且越来越多的企业认识到良好的服务会给企业带来良好的信誉，是企业的无形资产，会促进产品的销售和企业的进一步发展。

从制造质量控制和成本的角度考察仪器生产过程，是一种由后向前不断反馈的过程，其中设计阶段要贯穿整个过程，制造阶段要贯穿使用阶段，如图 1-1 所示。而在每一个部分产生误差所带来的经济损失差别很大，误差消灭在构思阶段只会带来 0.1% 的损失，误差消灭

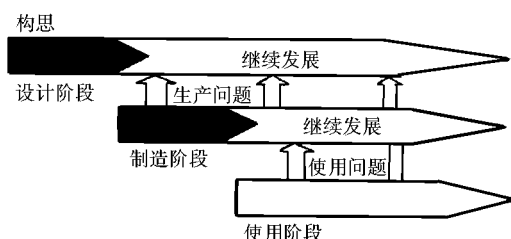


图 1-1 仪器制造过程质量与成本概念

在设计阶段会带来 1% 的损失，误差消灭在制造阶段会带来 10% 的损失，一旦到了使用者手中才发现问题就将带来 100% 的损失。因此，在仪器制造过程中应当做到认真构思、仔细设计、精心加工、搞好服务，千方百计提高产品质量，减少顾客的损失。这也正是学习仪器制造技术的根本目的。

### 1.1.2 仪器的开发过程

#### 1. 仪器开发的必要性

任何产品都有一定的寿命周期。随着科技的发展和消费的个性化趋势，产品的市场寿命越来越短，产品的开发也越来越重要。为满足工农业生产和科学技术的更高需求，要求制造业尽可能地不断开发出新的仪器；开放的市场中，企业为了赢得竞争，为了获取较高的利润，势必也需要不断推出适销的新产品。产品寿命周期一般可以分为介绍期、成长期、成熟期和衰退期，分别对应产品在市场上影响力和利润从低向高然后回落的发展过程。对于一个企业，应有足够的新产品储备，并不失时机地推向市场，形成具有竞争力的产品，以保持利润的稳定增长。除此之外，更应该很好地经营管理处于成长期和成熟期的产品，对产品不断地进行改进，延长其寿命周期。

#### 2. 仪器开发的内容

新仪器可分为：原创性仪器、更新换代仪器、性能改进仪器、移植仪器四类。

原创性仪器指应用新原理、新结构、新技术和新材料制造的前所未有的产品，往往是科技史上的重大突破，如第一台示波器、第一架光学显微镜、第一部计算机等。更新换代仪器是在原来产品的基础上，不断提高其使用性能，如美国 Intel 公司的计算机 CPU 从 8086 发展到 286、386、486、586 等。性能改进仪器主要是对老产品的精度和使用的不便进行改进，提高实用性，如万能工具显微镜通过光栅读数系统的改进提高了精度，增加了自动计数功能，使用更加方便。移植仪器是通过对其他领域或其他厂家产品的学习，经过允许进行仿造，或仿造未进行知识产权保护的部分。但这只是一种短期的行为，从企业长远发展的需要，必须要开发具有自主知识产权的新仪器，才能在市场上处于长久不败之地。

新仪器开发应具有整体概念，要涉及仪器的三个方面：核心部分、形式部分及延伸部分。仪器的核心部分是其使用价值，如“三坐标测量机”是用于进行空间三维尺寸测量的；形式部分指仪器的品质、包装、品牌、款式等内容，如三坐标测量机针对不同的使用要求和测量对象，需要不同的结构形式和尺寸，如龙门式、悬臂式等；仪器延伸部分主要指的是服务，如运送安装、质量承诺、售后服务保证。

新仪器的开发决策取决于市场的需要，因此，在开发前要进行充分、详细的市场调研。开发调研包括科技调研、市场调研、竞争环境调研、企业内部调研等几个方面，分别从不同角度了解待开发仪器的先进性、经济性、实用性、可行性等几个重要方面。在调研的基础上，进行立项决策，决策的主要内容是经济和风险分析。

#### 3. 仪器开发的途径

(1) 独立开发 依靠本企业独立进行新仪器开发的全部工作。独立开发对开发不太复杂的产品或开发仿制、改进型产品比较适合。一些技术、经济实力雄厚的企业，往往采用这种方式。

(2) 合作开发 由企业和高校或科研机构合作进行技术开发。由于新仪器开发可能涉及

到较广泛的学科领域,需要各种检测、实验设备,需要各类人才进行创新研究,因此,需要多方面合作。应当提倡这种“产、学、研”结合的开发方式。

(3) 技术引进 通过购买专利,引进国外技术等方式进行开发。这样可以使企业产品迅速赶上世界先进水平,进入国际市场。但对项目的引进应符合国情,进行充分市场分析,充分掌握国内外技术发展,以避免风险和损失。

#### 4. 仪器开发的实施

仪器开发实施主要由概念设计、方案设计、工艺设计、样机试制与评审、新产品定型与鉴定、试销、生产准备、批量生产等组成。

概念设计在仪器构思时就基本形成了,它以开发任务书的形式进行了较明确的规定。一般包括产品基本特征、技术原理、主要结构形式、主要功能、市场定位、技术规格、主要参数、目标成本及与国内外类似产品的比较等。

方案设计主要确定实现概念设计的总体方案,包括:信号测量采集、信息传输、机械结构、电气控制、外形方案等等。工艺设计阶段落实具体结构,以零件图、装配图、电路图、光路图、测量和控制软件框图等形式体现出来。详细设计后要组织设计、工艺、生产管理、销售等部门人员进行设计评审,评审后进行修改,然后完成各类零件和样机的制造。

样机经测试后,连同设计资料一起进行新产品鉴定。由于产品制造总是存在误差,单个样机的质量并不能代表批量生产的质量。单机的制造方法与批量生产也不一致。因此,还应根据批量的需要安排小批量试制,或直接组织批量生产并制备必要的工夹量具。

仪器开发的传统方法是采用查手册与计算相结合进行的。由于计算机在制造中的广泛应用,计算机辅助设计(CAD)、辅助制造技术(CAM)已得到越来越普遍的应用。如精密机械设计有 AutoCAD 方法、电路设计有 Protel 方法、光学设计有计算机辅助光学设计软件等。基于计算机辅助制造技术可以大大加速产品的开发过程,通过计算机模拟产品的运行和使用,可在设计阶段及早发现问题,减少试制—运行测试—改进设计的多次反复过程,也节约了开发费用。

### 1.1.3 生产的组织形式

#### 1. 制造活动的定义

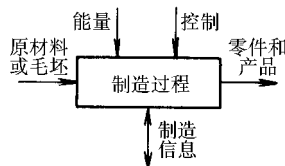
生产是将各种生产要素的输入转变为产品输出的过程。生产要素包括四个方面:

- 1) 生产对象:指完成生产活动所使用的原材料和辅助材料。
- 2) 生产劳动:包含每个劳动者用于进行生产活动的体力和智力劳动。
- 3) 生产资料:借助于生产劳动把生产对象转变成产品的手段。
- 4) 生产信息:为有效地进行生产过程所用到的知识。

仪器的制造活动是一个系统的工程,要完成的主要任务有:

- 1) 将原材料或毛坯(元件)转变成一定尺寸和形状的零件和产品。
- 2) 达到加工质量的要求,包括几何参数、力学、物理、化学性能的要求。

图 1-2 为制造活动过程的基本概念。其中能量的输入可以是



电、热、机械、化学能或光量等,提供加工动力。制造信息是一

图 1-2 制造活动过程

种双向的交互式传递过程，输入信息可能是订单要求、零件图、装配图、工艺文件、或直接采用 CAD、CAM 软件代码等等；输出的信息可能是产品尺寸、形状或加工质量、设备状态、加工环境等等。控制分为开环控制与闭环控制两类。开环控制按预先给出的控制方案，进行制造控制，达到控制目标时停止；闭环控制则要在控制过程中不断分析制造信息，求出与理想目标的误差，动态地修改控制参数，达到控制目标时停止。

## 2. 生产的组织方式

仪器的制造过程实际上包括了零件、部件、整机的制造和装配过程。因此，企业组织生产可以有多种模式。

- 1) 生产全部零部件、组装机器。
- 2) 生产一部分关键的零部件，其余的由其他企业供应。
- 3) 完全不生产零部件，自己只负责设计、装配和销售。

第一种模式的企业，必须拥有加工所有零件、完成所有工序的设备、技术人员和全套加工能力。但会因为大而全或小而全，而导致投资大，而且一旦市场发生变化，会影响资源的利用率并产生设备的积压浪费。

第二种模式具有场地占用少、固定设备投入少等优点，较适宜市场变化快的产品生产。但核心技术往往难于自己把握。许多复杂的产品，在大批量生产中多采用第二种模式，如示波器生产厂家多采用其他企业的阴极射线管（示波器主要部件）。

对第二种和第三种模式，零部件供应的质量是重要的。需要有保证质量的一套检测手段，采取对供应零件进行全检或抽检的方法控制质量，并且有意识地形成一定的竞争机制，如同时向多个供应商定货，既保证了供货时间和质量，又降低了原材料成本。

现在国外也在兴起一种新的制造模式——敏捷制造企业，它是指为了快速响应市场而由跨地区已具有不同个性的企业所形成的、灵活的、可重构的合作联合体这种“插件兼容”式的企业，其实质是在网络信息技术支持下，在全球范围内实现生产。这种生产组织方式把传统的全面而集中式管理的企业分散在各个松散耦合、协同合作的制造单元合作伙伴中，作为一种灵活的、动态的合作机制。敏捷制造企业的成员通过合作关系可以共享专家知识、软件工具和产品数据，同时形成敏捷制造企业的物质流和信息流。这更显示出知识在现代制造业的突出作用和地位。实质上，敏捷制造是将制造业由资金密集型向知识密集型过渡的模式。

## 3. 生产与工艺系统

生产与工艺系统是由若干部分组成的有机整体。如机床、刀具和工件构成的一个工艺系统用来改变工件形状和尺寸，通过信息流、物质流和能量流联系起来。

一个生产系统往往由如下子系统构成：

- 1) 决策管理子系统：用来制定经营目标、方针和生产经营计划。
- 2) 设计技术子系统：用来进行产品的开发和研制，对生产进行技术上的组织和管理，规划和实施企业的技术改造。
- 3) 生产计划子系统：用来合理运用各种生产要素，科学地组织制造过程，按照品种、质量、数量、期限等要求生产适销对路的物美价廉的产品。
- 4) 物资供应子系统：用来保证经济地供应企业生产活动所必需的各种资料（原材料、外购件、标准件等）并做好库存保管工作。
- 5) 产品销售子系统：用来进行市场调查、制定销售计划、组织销售管理和用户服务。

6) 人事教育子系统：用来进行人力的组织和调配、职工的培训、使用和管理。

7) 成本财务子系统：用来进行生产费用预算、产品成本计划、核算、分析和控制以及企业利润的计划、核算。

8) 制造过程及辅助生产子系统：负责动力、能源的供应和设备的维修及工具的制造。

## 1.2 工艺过程设计的基本概念

工艺过程设计是指把产品的设计信息转化为制造信息的过程设计。工艺过程设计涉及产品、制造过程模型等一系列活动。完整的工艺过程设计可分为以下步骤：

- 1) 进行零件的描述，建立零件的信息模型。
- 2) 设计加工工艺方法和路线，选择机床或其他设备。
- 3) 确定加工基准，选用或设计夹具。
- 4) 确定工序等加工工艺过程。
- 5) 设计加工余量和工序尺寸参数。
- 6) 计算工时和制造成本。
- 7) 设计检验方法，选择或设计检验量具。
- 8) 生成工艺卡片等。

### 1.2.1 机械加工工艺过程的组成

加工工艺过程，是指在加工车间直接改变生产对象的形状、尺寸、相对位置及其物理、化学性质等，使其成为成品的过程。

零件的机械加工工艺过程由一系列工序组成，毛坯依次通过这些工序而制成合格的零件。对于批量生产，每一个工序又可分为若干个安装、工位、工步、进给及动作。

(1) 工序 一个或一组工人在一个工作地对一个或同时对几个工件所连续完成的那一部分工艺过程称为一个工序。工序是工艺过程的基本单元。

如图 1-3 所示，一种轴在成批生产时的六个工序如下：

1) 在中心孔钻床上钻两端中心孔 1、3。

2) 在一台车床上粗车 A、B、C 各段及各肩端面。

3) 在另一台车床上精车 A、B、C 各段及各肩端面。

4) 在铣床上铣 2、4 两槽。

5) 在外圆磨床上磨外圆。

6) 去毛刺。

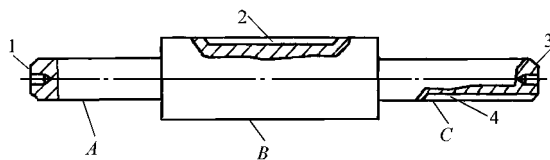


图 1-3 轴加工工艺过程

1、3—中心孔 2、4—键槽

以工序 2) 为例，当夹住工件 A 部分，粗车 B、C 及各肩端面后，调头夹住 C 完成 A 及各肩端面的加工，因为是连续完成的，则整个过程为一个工序。如果一批工件的加工顺序安排为：每个工件车完 B、C 外圆及端面后卸下，一批工件加工完，再对这批工件的 A 段外圆及端面进行加工，这样，一个工件前后两次加工不是连续完成的，则被认为是两个工序。

(2) 安装 在某一工序中，有时需要对零件进行多次装夹加工，每装夹一次所完成的那

一部分工艺过程称为一次安装。上述工序 2) 就是两次安装。

(3) 工位 在某一工序中, 工件在机床所占的每一个位置上所完成的那一部分工艺过程称为一个工位。上述工序 4) 便是用转位工作台, 在一次安装中完成两个工位, 即铣完键槽 2 后, 转台转  $180^\circ$  铣槽 4, 这样可以缩短辅助时间。

(4) 工步 一道工序 (一次安装或一个工位) 中, 可能需要加工若干个表面, 也可能虽只加工一个表面, 但却要用若干把不同刀具, 或虽然只用一把刀具, 但却要用若干种不同切削用量作若干次加工。在加工表面、切削刀具和切削用量 (转速和进给量) 都不变的情况下完成的那一部分工艺过程, 即称为一个工步。

(5) 进给 有些工步, 由于余量较大或其他原因, 需用同一刀具在同一切削用量 (转速及进给量) 下, 对同一表面进行多次切削, 这样, 刀具对工件的每一次切削就称为一次进给。

(6) 动作 工艺过程的最小单位。动作是工人或机器本身的一个行动单元。例如在一次进给中可有开车、接近、送进、停车、退刀等各种动作。

### 1.2.2 生产类型

产品用途的不同, 决定了其市场需求量也是不同的, 于是形成了不同的生产规模类型, 即大批量、中小批量、单件生产等, 对应的生产组织方式及相应的工艺过程也大不相同。对此应根据不同生产类型的工艺特点和要求制订工艺规程, 以取得最大的经济效益。一般来讲, 仪器的生产批量较小, 但也有批量之分, 如示波器、游标卡尺的批量较大, 三坐标测量机批量较小, 一些专用的仪器多是单件生产等。

大批量生产往往是由自动生产线、专用生产线来完成的, 一个零件往往分成了许多工序, 在流水线上协调完成加工任务。单件、小批生产往往采用多工序集中在一起, 由通用设备、靠人的技术或技艺来完成。数控机床、加工中心和其他计算机辅助制造技术的应用使得大批量和小批量的生产界线趋于模糊, 使单件小批生产也能接近大批生产的效率及成本。

对生产类型的估计, 要根据年产量计算产品的生产纲领  $N$  (件/年), 即

$$N = Qn(1 + \alpha + \beta) \quad (1-1)$$

式中  $Q$ ——产品的年生产量 (台/年);

$n$ ——每台产品中该零件的数量 (件/台);

$\alpha$ ——备品率;

$\beta$ ——平均废品率。

零件的生产纲领确定后, 还要根据车间的具体情况, 分批生产。每批投产的数量即为批量, 它是一次投入或产出的同一产品的数量。

### 1.2.3 加工工艺规程

#### 1. 工艺规程的内容

在实际生产中, 一个零件从毛坯 (元件) 加工到成品所采取的工艺过程, 用一定的文件形式规定下来, 称为工艺规程。工艺规程是指导生产的依据, 是组织生产、做好生产技术准备的主要技术文件。

在新产品生产中, 首先要制订零件的各种工艺规程, 以便了解零件加工要经过的车间,

使用哪些设备，需多少工人和多大生产面积，应购买或自制哪些工艺装备（机床，刀具，量具，夹具等），关键工艺技术难题的研究等。各企业所使用的加工工艺规程的具体格式不完全一样，但基本内容是类似的。如在机械生产中，企业需要根据生产批量决定制订哪些工艺规程。机械加工综合工艺过程卡，用于单件小批生产，供生产管理和调度使用，每道工序应如何加工，则由操作者自己决定。大批量生产则要求有完整和详细的工序卡片，甚至是分得更细的操作卡、调整卡和检验卡等。各种工艺卡片正式形成工艺文件后就成为车间及全厂生产的法规，要严格执行，修改前，要进行审批。一种机械加工综合工艺过程卡片如图 1-4 所示。

| 工<br>厂<br>名 | 机械加工<br>工艺过程<br>卡片 |        | 产品名称及型号  |                     |                  | 零件名称           |                          | 零件图号                |                      |        |      |                  |                 |          |  |  |
|-------------|--------------------|--------|----------|---------------------|------------------|----------------|--------------------------|---------------------|----------------------|--------|------|------------------|-----------------|----------|--|--|
|             |                    |        | 材料       | 名称                  | 毛坯               | 种类             | 零件重量                     | 毛重                  |                      | 第    页 |      |                  |                 |          |  |  |
|             |                    |        |          | 牌号                  |                  | 尺寸             |                          | /kg                 |                      |        | 净重   | 共    页           |                 |          |  |  |
|             |                    |        |          | 性能                  |                  |                |                          | 每台件数                |                      |        | 每批件数 |                  |                 |          |  |  |
| 工<br>序      | 安<br>装             | 工<br>步 | 工序<br>内容 | 同时<br>加工<br>零件<br>数 | 切    削    用    量 |                |                          | 设备<br>名称<br>及<br>编号 | 工 艺 装 备 名 称<br>及 编 号 |        |      | 技<br>术<br>等<br>级 | 工 时 定 额<br>/min |          |  |  |
|             |                    |        |          |                     | 背吃刀量<br>/mm      | 切削速度<br>/m/min | 进给量<br>(mm/r 或<br>mm/行程) |                     | 夹具                   | 刀具     | 量具   |                  | 单件              | 准备<br>终结 |  |  |
|             |                    |        |          |                     |                  |                |                          |                     |                      |        |      |                  |                 |          |  |  |
| 更改<br>内容    |                    |        |          |                     |                  |                |                          |                     |                      |        |      |                  |                 |          |  |  |
| 编制          |                    |        |          |                     | 校    对           |                |                          |                     | 审    核               |        |      |                  | 会    签          |          |  |  |

图 1-4 机械加工综合工艺过程卡片

2. 制订工艺规程的原则

制订加工工艺规程应遵循如下原则：

- 1) 工艺规程应满足生产纲领的要求，要与生产类型相适应。
- 2) 工艺规程应保证零件的加工质量，达到图样上所提出的各项技术要求。
- 3) 在保证加工质量的基础上，应使工艺过程具有较高的生产率和较好的经济性。
- 4) 工艺规程要尽量减轻工人的劳动强度，保证安全生产，创造良好的文明劳动条件。

最佳的工艺过程，并不一定是加工精度最高的，也不一定是生产率最高的，而是能够符合技术要求和相应生产率的最经济的工艺过程。

3. 制订工艺规程的步骤

- 1) 研究产品图样，进行工艺分析。
- 2) 计算零件生产纲领，明确生产类型。
- 3) 确定毛坯（元件）种类，设计毛坯图（选择元件）。
- 4) 拟定工艺路线。
- 5) 确定机械加工余量，计算工序尺寸及公差，并绘制工序草图。
- 6) 研究企业现有的设备条件，选择各工序所用设备、工艺装备、工艺参数和工时定额。

7) 研究产品验收的质量标准, 制定产品检验方法。

8) 填写有关工艺文件。

## 1.2.4 机械加工余量和工序尺寸

### 1. 机械加工余量

机械加工余量是工件加工前后尺寸之差。平面加工的工序余量分单面和双面; 外圆和内孔加工余量为对称双边, 如图 1-5 所示。

图 1-5a 平面的外表面加工余量:  $Z_b = a - b$

图 1-5b 平面的内表面加工余量:  $Z_b = b - a$

图 1-5c 轴加工余量:  $2Z_b = d_a - d_b$

图 1-5d 孔加工余量:  $2Z_b = d_b - d_a$

式中  $Z_b$ 、 $2Z_b$ ——本工序的加工余量;

$a$ 、 $d_a$ ——前工序的工序尺寸;

$b$ 、 $d_b$ ——本工序的工序尺寸。

加工余量的大小, 应留得合适。过大的余量将浪费材料, 浪费工时, 增加机床和刀具的磨损, 降低生产率; 过小的余量不能修正上道工序的误差和加工后的痕迹, 影响加工质量, 造成废品。为了合理确定加工余量, 应清楚影响余量的各项因素:

1) 前一工序的公差  $T_a$ 。

2) 前一工序所遗留的表面粗糙度  $R_{za}$  和表面缺陷度  $I_a$ , 如图 1-6 所示。

3) 前一工序各表面间相互位置的空间偏差  $\rho_a$ , 如图 1-7 所示。

4) 本工序的装夹误差  $\epsilon_b$ 。

确定工序余量的方法如下:

1) 分析算法。用于大批量生产中, 在某些重要工序上应用。

2) 经验估计法。工艺人员凭经验, 采用类比法确定工序余量。一般应选得偏大一些。多用于单件小批生产。

### 2. 工序尺寸

机械加工中, 计算工序尺寸和标注工序公差是制订工艺规程的主要工作之一。工序尺寸是指零件在加工过程中各工序所应保证的尺寸, 要根据已确定的加工余量及定位基准的转换情况进行计算, 其公差按各种加工方法的经济精度选定, 可以归纳为三种情况:

1) 当定位基准、工序基准、测量基准与设计基准重合时, 在加工过程中, 使用同一基准对某一表面进行多次加工, 达到尺寸要求的情况, 只需考虑各工序的加工余量。

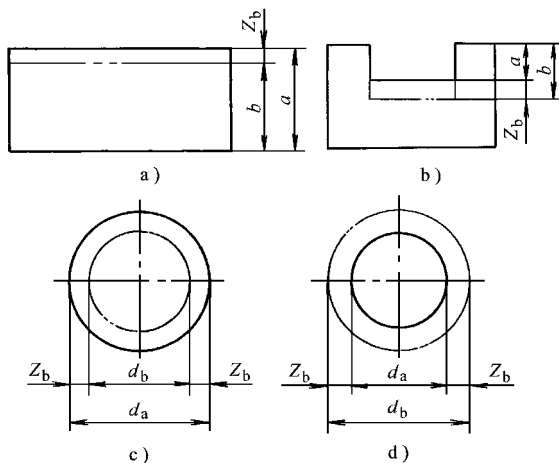


图 1-5 典型表面加工余量

a) 平面的外表面加工余量 b) 平面的内表面加工余量  
c) 轴加工余量 d) 孔加工余量

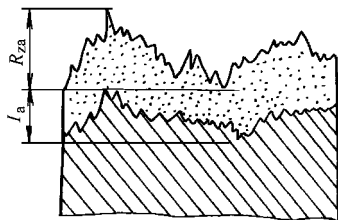


图 1-6 前一工序加工表面

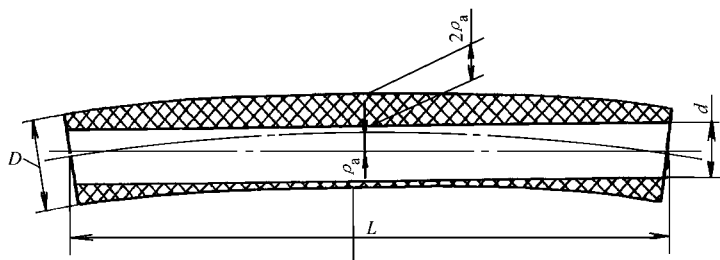


图 1-7 前一工序空间误差

2) 当定位基准、测量基准、工序基准与设计基准不重合时, 经尺寸换算后所得的工序尺寸。

3) 尚需继续加工的表面, 它的工序尺寸实际上是指基准不重合及保证加工余量所进行的尺寸换算。

第一种情况, 只需根据工序间余量和工序尺寸之间的关系确定, 先按工序计算加工余量, 再按工序确定其经济精度和表面粗糙度, 就可以确定各工序间尺寸及公差。后两种情况需要应用尺寸链原理进行计算。

## 1.2.5 时间定额与技术经济分析

### 1. 时间定额

完成某一工序所规定的时间, 称为“时间定额”。它是安排生产计划、计算产品成本的重要依据。时间定额是用单件生产时间来计算的。按零件的年生产纲领可以确定完成一个工序所要求的单件时间  $t_p$ 。应采取相应的工艺措施, 使它与按照工艺规程确定的工序单件时间  $t_d$  相等, 即  $t_p = t_d$ , 以保证工艺过程按需要的生产率进行。

零件的年生产纲领按式 (1-1) 计算。零件的年生产纲领所要求的单位时间  $t_p$  按下式计算

$$t_p = 60t\eta/N$$

式中  $t$ ——年基本工时 (h/年);

$\eta$ ——设备负荷率 (一般取 0.75~0.85);

$N$ ——工作班制。

(1) 工序单件时间的确定 零件加工的工序单件时间  $t_d$ , 包括下列部分:

1) 基本时间  $t_j$ : 是直接改变工件的尺寸和形状、物理和化学性能所需的时间。

2) 辅助时间  $t_i$ : 它是每道工序中用于辅助动作所需的时间, 其中包括: 装卸工件, 开、停设备, 试加工和测量工件等所用的时间。

3) 工作地服务时间  $t_w$ : 它包括更换工艺装备, 设备小调整; 工作班开始时分配工具, 了解工艺文件; 工作班结束时, 收拾工具, 清除和保养工作现场等所消耗的时间。

4) 休息和自然需要时间  $t_x$ : 是在工作班内允许的必要休息和生理上自然需要的时间。

上述四部分时间的总和即为工序单件时间:

$$t_d = t_j + t_i + t_w + t_x$$

5) 准备结束时间  $t_z$ : 对成批生产来说, 在加工一批工件的开始和终结时, 需要准备结