

第 3 章

制 造 工 程

3.1 引言

制造工程可被定义为对产品生产流程的设计。虽然对生产流程设计应包含什么内容存在很大的意见分歧,但几乎所有的人都赞同上述定义。生产或制造工程包括与生产过程有关的一切问题。具体包括如下职能:

- (1) 评估产品的易制造性。
- (2) 选择工艺并设定工艺参数,比如切削工具的材料、尺寸、形状、切削速度和切削深度等。
- (3) 设计工艺装备(如夹具和固定器具)以保持和控制工件在生产过程中的位置。
- (4) 估算零件的生产成本。
- (5) 保证零件的生产质量。

制造工程的技术革新速度越来越快且有增长的趋势,能够跟上技术的发展已经非常困难。将来,不断追求进步的制造工程师仅仅在学习新技术方面就可能要花费他们 15%~25% 的时间。计算机化、综合控制、生产自动化和生产活动的协同化可能是变化最快的领域。但值得注意的是,尽管新技术不断出现,基本的原理却仍然适用。比如,即便最复杂的由计算机控制的加工中心仍要根据基本的金属切削原理来完成它的功能。所以对制造工程师而言,理解并掌握制造工程的基本理论是十分重要的。

本章将对制造工程的一些主要领域进行探讨。既然大多数工业工程技术都已应用于金属加工工业,那我们就把注意力集中到这一特定的行业吧! 读者应该知道,工业工程技术能够用于任何一种系统的运营,如制造业、服务业以及政府活动。在美国,足有 60% 的劳动力在服务行业和政府部门工作,但限于本章篇幅,不能在这些方面进行详细的讨论。

3.2 产品设计—生产工艺设计的相互作用

产品设计要求设计者对零部件完成特定功能的能力进行研发和评价。零部件的特性,诸如尺寸、形状、强度、可靠性和安全操作范围等,经常运用物理学、材料力学和摩擦学等知识来评价,并且经常使用计算机分析技术。制造工程要估计零部件的生产成本,并运用成本、性能方面的知识和有限几种可利用的加工方法,还要用到切削工具、机床、工人的熟练水平以及零件与正在生产的其他零部件的相似性等方面的详细知识,来生产特定形状的零部件。遗憾的是,很少有工业工程师受过产品设计方面的训练,而受过制造工程方面训练的产品设计师也很少,这就使他们之间的交流变得格外重要。

在每一生产操作中,由于各种原因,由某个工序生产的零部件尺寸将不可避免地出现一些波动,这些原因包括工具磨损、操作错误和原材料的变化等。在不危及零部件的使用功能和可靠性的前提下零部件尺寸的变化范围,即可以接受的产品尺寸的变化范围,我们称之为产品的公差。零部件设计者最关心的是产品的性能,总是希望公差尽可能小,以保证零部件能够安全运行。而制造工程师最关心的是生产成本,总是希望所要求的公差尽可能大,因为这样他们在制造零部件时可以有更多的可供选择的工艺方案,有更多的可供选择的工艺方案往往可以使生产成本降低。有时,产品设计工程师将产品公差设计得非常小,这是因为他们没有认识到加工超高精度零件的费用太大,或者没有考虑到机器无法对特殊零件进行加工。而(依据设计图纸)制造工程师却常常以为这些超高精度零件或特殊零件是必要的(而实际上不必要),并依此来设计它们的制造工艺和规程。这就会给产品的生产增加不必要的成本开支。

理想的情况是,制造工程师从一开始就与产品设计师一起工作,以保证产品的可生产性。如果不能进行这样的早期合作,制造工程师就应将一些高成本的作业通知设计工程师。通过掌握这方面的信息,设计工程师就会常常避免某些成本极高的作业。这种合作应当尽可能早地出现于产品的设计过程中。

在此合作阶段,员工的参与也是非常重要的。没有人能比实际操作者更了解工作的细节,所以一个企业要想保持竞争力就必须鼓励员工反馈信息。事实上(将来就会看到),将员工技能运用在某些类型的参与式管理中可能是当今最令人振奋的趋势。

在规划和实施自动化系统的过程中,无论怎样强调车间工人参与的价值都不过分。没有人能比实际操作者更了解他的工作^①。

^① Frank Curtin, "Automating Existing Facilities: GE Modernizes Dishwasher, Transportation Equipment Plants," *Industrial Engineering*, Sept. 1983, pp. 32-38.

3.3 工艺学

工艺学研究对产品制造的实际工艺进行设计。在设计用于制造产品的工艺时,应遵循以下6个步骤:定义产品的结构和规格、评估各零件的制造能力、列出可用于生产零件的各种不同工艺、对各种工艺的成本进行估计、确定作业的操作顺序以及将该工艺形成文档。

3.3.1 定义产品的结构和规格

产品的结构通常用层级图表示,该图表展示了组成产品的所有部件、组件、零件和原材料。如图3.1所示是一种产品的结构图,该产品由部件(S_i)组成,每个部件又由各自的组件(SS_j)、零件(C_k)和原材料(R_l)构成。

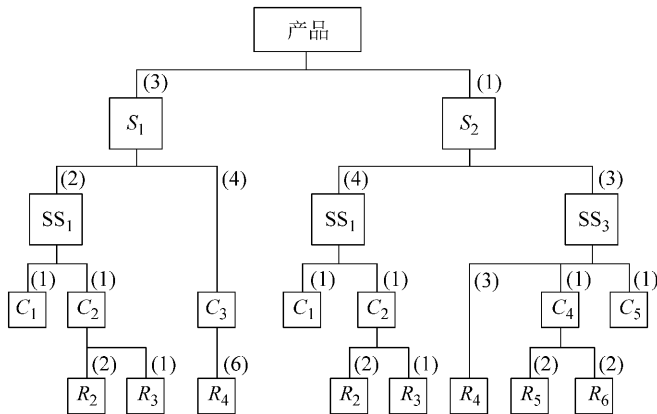


图 3.1 产品结构示例

这种图清楚地定义了“什么组成什么”以及各零部件在5个层次中的位置。产品越复杂,其产品结构的分层就越多。图3.1中的水平线表示需要设计一个零部件的装配工序。例如,连接部件1和2的水平线表示需要设计一道工序,将二者装配起来。注意,组件、零件或原材料能够“组成”部件。产品结构的层级表示在装配时,水平线仅仅位于组成某一零部件的最高层元素(部件、零件、原材料)之上。图3.1也表明外购的零件已生产或装配好,这样外购件下就没有需要加工的原材料。产品结构树中的垂直线表示较低一级的零部件可以通过某些操作转换或加工为较高一级的零部件。在工业应用中,产品结构的每一零部件都用惟一的数字加以标识,该数字标明了该零部件所在的层次。这种编码方法在排定各零部件的生产日程时是很有帮助的,我们将在第7章对该问题进行讨论。

组成某一更高层次的零部件所需的较低层次的零部件个数也能够从产品结构图中反

映出来。如图 3.1 所示,生产一个单位的产品需要 3 个部件 1,而生产每个部件 1 又需要 2 个组件 1。这意味着生产一单位产品需要 6 个单位的组件 1。当我们对产品的销售量进行预测时,需要确定各零部件的需求量,这时候这些数据就可以派上用场了。

物料清单也能够显示上述信息。一张物料清单的内容包括:所有零部件的数量和名称、各种零部件的来源(外购或自制)、产成品的数量和名称。通常情况下,只有那些直接组成产品的零部件才会在物料清单上显示出来。举例来说,如果生产中用到一个部件,这个部件的数量和名称就会在清单上显示出来,并且还会为这个部件单独编制一个物料清单。图 3.2 是一个物料清单的例子。在该图中,如果搁板(物料编号 3)是一个由基板、胡桃木板面和装饰性木线组成的部件,那么该货架的物料清单就会包括这 3 个零部件。

这些表单(工艺卡、加工路线单、物料清单)的编制及其在后续生产控制中的运用,都显示出计算机的巨大作用。许多实时计算机控制系统编制加工路线单并同步跟踪产品在车间内的整个流程。最近的研究甚至证实了将计算机应用于以下领域的可能性:从产品设计到工艺流程设计,再到形状、形态的辨识和“人工智能”。在人工智能方面,计算机能够不断地从过去的经历中总结经验,直到它真正有能力设计生产工艺。制造工程师应该认真关注这一发展趋势。

一旦组成产品的所有零部件都已在产品结构树或物料清单中列举完毕,还必须生成与各零部件相对应的说明书。这些说明书应详细说明各零部件所需的原料、各零部件的长度、宽度、高度、直径、原材料、表面粗糙度和公差,从而保证各零部件能够实现预定的功能。通过这种方法就能够对各零部件的易制造性进行评估,并能够对各零部件的生产工艺进行设计。

3.3.2 评估零部件的易制造性

零部件的易制造性是指在公差范围内生产该零部件的相对难易程度。通常,公差越小,零部件的加工费用就越昂贵(见图 3.3)。零件的标准化有利于提高零件的易制造性。比如,在一个零件上钻一个标准型号的孔要比钻一个非标准型号的孔成本低得多。同样地,只要可能,零件的选材也应该使用普通规格的。只有当普通材料不能满足零件的某些特殊性能时,才有必要使用特殊材料。每一产品中,每种零部件的各种特性都必须经过审核,以确定该零部件的功能能否通过多种可供选择的工艺方案来实现,其中某些工艺方案的成本可能会比较低。

3.3.3 确定能够用于加工零件的可选工艺

通过检查各零部件的详细说明和各种工艺的加工能力,可以列出一份候选工艺的名单,在列举这张名单时,必须考虑到以下因素:

- (1) 材料和工艺的兼容性。

物料清单			
产品描述：书架、金属、3 层搁板 物料编号：1			
零 件		需求量	来源
物料编号	描述		
3	搁板	3	制造
4	支柱	4	制造
5	垫圈	8	购买
6	螺钉	12	购买

物料清单			
产品描述：书架、金属、6 层搁板 物料编号：2			
零 件		需求量	来源
物料编号	描述		
3	搁板	6	制造
4	支柱	6	制造
5	垫圈	8	购买
6	螺钉	24	购买
7	连接器	4	购买

物料清单			
产品描述：搁板 物料编号：3			
零 件		需求量	来源
物料编号	描述		
8	金属板	3 ft ²	购买

物料清单			
产品描述：支柱 物料编号：4			
零 件		需求量	来源
物料编号	描述		
8	金属板	2 ft ²	购买

图 3.2 物料清单

[经许可，引自 Lawrence E. Doyle et al.，*Manufacturing Processes and Materials for Engineers*，2nd ed.（Englewood Cliffs，N.J.：Prentice Hall，1969）。]

- (2) 某工艺满足期望公差的能力。
- (3) 能否通过零件设计(或再设计)使生产变得更容易。

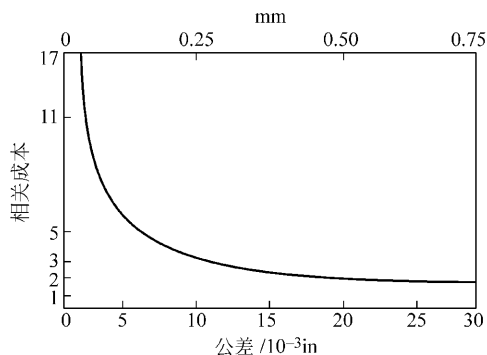


图 3.3 成本和公差的关系

[经许可, 引自 Serope Kalpakjian, *Manufacturing Engineering and Technology*, © 1989, by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.]

(4) 获取该工艺的可能性。

(5) 使用该工艺制造零件所需使用的工具等。

利用如图 3.4~图 3.6 中所示的表格, 可以帮助制造工程师迅速地制定一份较完整的可选工艺名单。

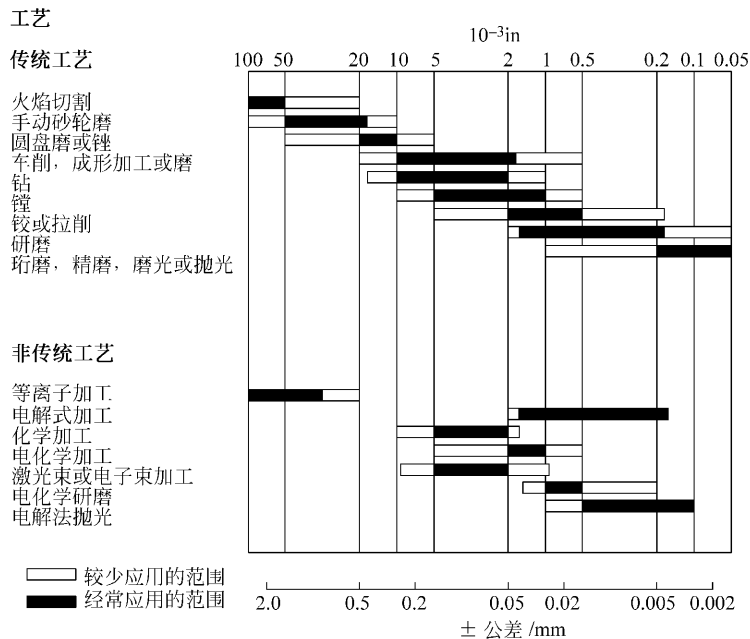


图 3.4 各种工艺产生的公差

[经许可, 引自 Serope Kalpakjian, *Manufacturing Engineering and Technology*, © 1989, by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.]

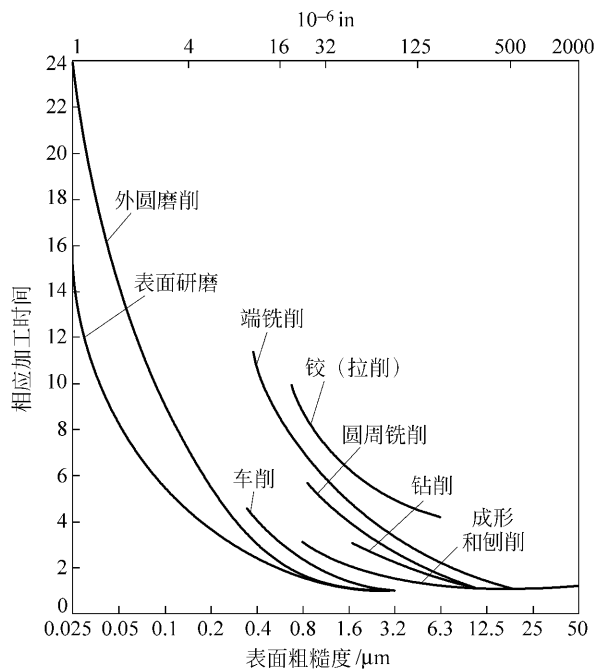


图 3.5 各种表面处理方法对应的加工时间

[经许可, 引自 Serope Kalpakjian, *Manufacturing Engineering and Technology*, © 1989, by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.]

工 艺	废料/%
机加工	10~60
热模锻	20~25
板材的成形加工	10~25
冷热锻	15
金属模具铸造	10
粉末冶金	5

图 3.6 各种工艺产生的废料数量

[经许可, 引自 Serope Kalpakjian, *Manufacturing Engineering and Technology*, © 1989, by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.]

3.3.4 各种工艺的成本估算

要对各种工艺的成本进行估算, 必须首先确定两种成本: 固定成本和变动成本。固

定成本是指那些与生产的产品数量无关的固定不变的成本。例如,机器的采购成本、设备的安装成本、工艺装备的设计和制造成本、机器占用空间的成本。变动成本是指那些随生产产品的数量变化而发生相应(也就是按比例)变化的成本。例如,生产中机器操作工的时间成本、设备的运行成本(例如,电、天然气、其他燃料),制造过程中由于切削工具的钝化或其他损耗而产生的成本,以及生产产品所耗费的原材料成本。

固定成本估算数据的获得可以通过以下途径:向设备的卖主和使用者请教,从公司的会计部门获得成本数据。变动成本率(也就是美元/h)的估算数据也可以通过类似的途径获得。用公式表示如下:

$$\text{总成本} = \text{固定成本} + \text{单位产品的变动成本} \times \text{产品数量}$$

上述关系也可用图 3.7 表示。

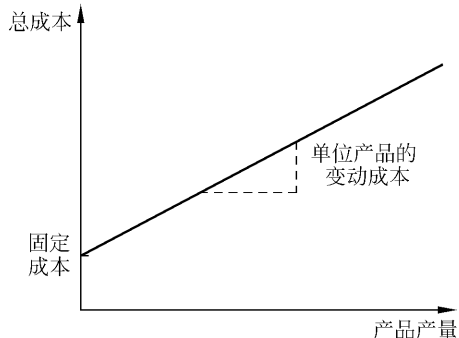


图 3.7 将总成本看作产品数量的函数

如果存在许多可供选择的工艺,就可以把它们成本列在同一张表上,进而确定在某一产量范围内生产成本较低的工艺。例如,有 3 种可供选择的工艺,各自的成本如下:

	工艺 A	工艺 B	工艺 C
固定成本/美元	0	2000	8000
单位成本/(美元/件)	10	8	5

如果画出它们的成本线,如图 3.8 所示,我们会发现如果产量在 1000 个单位以下,应采用 A 工艺。如果产量超过 2000 个单位,则应该采用 C 工艺。产品需求在 1000~2000 之间时,应该选用 B 工艺。产品需求量 1000 是选择工艺 A 与工艺 B 的分界平衡点,并且在该产量下两种工艺的总生产成本相等。产量低于该点时,使用 A 工艺的生产总成本相对较低,产量高于该点时,使用 B 工艺的生产总成本相对较低。同样地,2000 也是选择工艺 B 与工艺 C 的分界平衡点。

我们也可以通过下面两个总成本方程式确定分界平衡点:

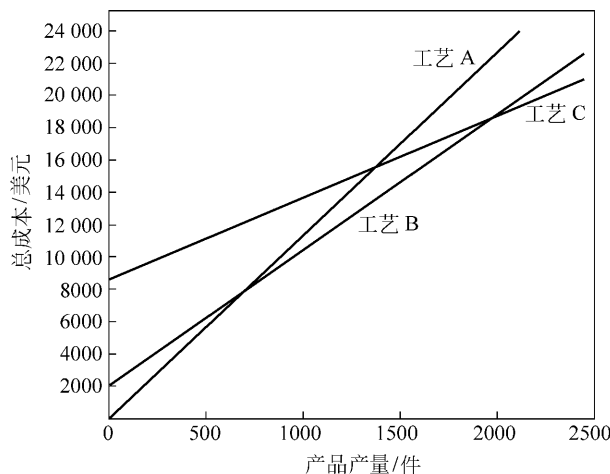


图 3.8 3 种工艺的总成本——产量图

$$\text{总成本}_A = 0 + 10X$$

$$\text{总成本}_B = 2000 + 8X$$

在这里 X 为产量。由于在分界平衡点处,两种工艺的总成本是相等的,所以我们将两式联立解出 X ,即为分界平衡点。

$$0 + 10X = 2000 + 8X$$

$$2X = 2000$$

$$X = 1000$$

使用类似的方法可以求出工艺 B 和工艺 C 的分界平衡点为 2000。

单位变动成本反映了使用某种工艺生产单位产品所花费的时间以及在此过程中所产生的成本^②。一道金属切削工序的变动成本包括 4 部分:人工成本(操作员)、机器成本(在进行切削时)、工具成本、安装切削工具时劳动力和机器的等待成本、工件装卸时劳动力和机器的等待成本。可以将上述成本表示如下:

$$\text{变动成本} = T_c r_{l,m} + r_t \frac{T_c}{T} + T_{dt} r_{l,m} \frac{T_c}{T} + r_{l,m} T_{dw} + r_{l,m} T_a$$

这里, T_c 为单位产品的切削时间, min;

T 为工具寿命(也就是工具在钝化前的使用时间), min;

$r_{l,m}$ 为机器的运转成本,包括人工成本,美元/min;

T_{dt} 为安装切削工具的时间(更换工具导致的停产时间), min;

② Vidosic, Joseph P., *Metal Machining and Forming Technology* (New York: Ronald Press, 1964), p. 329.

r_t 为切削工具成本,美元;

T_{dw} 为装/卸一个工件的时间(更换工件导致的停产时间),min;

T_a 为将加工工具调整或定位到各工件上的时间,min。

此成本的大小取决于为这道工序选择的工艺参数。早在 20 世纪初,工业工程之父——弗雷德里克·W. 泰勒(Frederick W. Taylor)就已经开始致力于定义切削速度与工具使用寿命之间关系的研究^③。

他指出,加工零件所需的时间可以通过计算将零件加工到要求尺寸所需的切削长度来确定。举例来说,如果一个单向的切削刀具以 20 ft/min 的速度,在一个 36 in 长的工件上加工一个较浅的沟槽,需要 9 s 的时间。如果零件需要 20 个槽,则需要 3 min 的加工时间。如果想要缩短加工时间,可以通过提高切削速度的办法。但是这种方法的问题是随着切削速度的提高,刀具的磨损和钝化速度也会随之加快。为了确定最佳的切削速度,我们需要了解刀具切削速度和使用寿命之间的关系。著名的泰勒工具寿命公式描述了这一关系:

$$C = VT^n$$

这里, C 为切削工具使用 1 min 就会发生钝化的切削速度,ft/min;

V 为按一定工艺进行加工时的切削速度,ft/min;

T 为当工具以切削速度 V 进行加工时的期望寿命,min;

n 为一个常量,其值取决于将要切削的材料和切削工具的材质。

如果我们将某一个工件所需的切削长度定义为 L , $T_c = L/V$, 并重新整理泰勒公式中的各项,则泰勒工具寿命公式变为

$$T = \left(\frac{C}{V} \right)^{1/n}$$

将这两个变量代入变动成本公式后,得

$$\text{单位成本} = \frac{L}{V} r_{l,m} + r_t \frac{L}{V} \left(\frac{C}{V} \right)^{-1/n} + T_{dt} r_{l,m} \frac{L}{V} \left(\frac{C}{V} \right)^{-1/n} + r_{l,m} T_{dw} + r_{l,m} T_a$$

由于该等式中只有一个变量 V , 所以可以求出 V 的表达式,再令其一阶导数等于 0, 即可解出 V :

$$V = C \left(\frac{n}{1-n} \right)^n \left(\frac{r_{l,m}}{r_{l,m} T_{dt} + r_t} \right)^n$$

这就是最佳的切削速度,即使各工件切削成本最小的切削速度,也是使机器生产成本最小的切削速度。

例如,要用高速钢刀具对一个长 2 ft、直径为 3 in 的 1020 号钢件进行加工。假定

^③ Taylor. F. W. "On the Art of Cutting Metal," *Transactions of ASME*, 28 (1906), p. 31.