

机械制造工艺 过程的优化

В. В. 杜申斯基

〔苏〕 Е. С. 普浩弗斯基 著

С. Г. 拉德钦科



16

机械工业出版社

译 者 的 话

为了保证国民经济效益逐年稳步地增加，必须不断地提高劳动生产率，而同时又降低产品的生产成本。工艺过程的优化是达此目的的手段之一。然而，目前我国把现代数学分析的方法应用于机械加工工艺过程、工序的优化、切削刀具几何参数的优化等还不够普遍。为了加速我国的科学技术进步的速度，特翻译了本书。

本书较系统地介绍了工艺过程优化的数学分析方法和应用实例，可供机械制造厂工程技术人员及有关工艺研究人员和高等工科院校师生参考。

本书第1、3~12章由王承义译，臧占文翻译第2章，张敏同志为本书做了细致认真地校订，在此特致诚恳的谢意。

由于我们水平所限，错误和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

译者

前 言

在第十个五年计划期间，摆在工业面前的主要任务之一是：通过加快科学技术发展的速度，经常改善工艺过程，旨在降低产品成本的同时，不断地提高劳动生产率，从而提高苏联国民经济的效益。所有这些，不仅要求在理论上，而且在工艺系统实验方面都要进行深入地研究。然而，这个系统通常又是那么复杂，甚至为了揭示每个研究因素对所研究的函数的影响，都要消耗大量的物力和时间。

除此之外，工艺过程分析的传统方法，是以所有工艺因素连续的许多量（последовательный перебор）和典型的回归分析为基础的。这种方法有一系列的原则性的缺点。因此，它不能用来作为获得数学模型的工具，对工艺过程进行控制和预测。利用上述方法，可产生具有随机性而且并不总是优化的很多可以采纳的解。

目前，在很多部门中，越来越广泛地寻求采用可以得到描述过程和目标的新数学模型。这种模型具有足够的精度，而且控制可靠。

在机械制造工艺中，运用现代的数学分析方法和机械加工工艺过程的优化，切削刀具几何角度的优化以及复杂的自动化系统的优化等等应用还不够广泛。

本书出版的目的是，在于使数学的分析方法系统化。这种数学分析方法，对机械制造工艺过程优化较为合适。同时，为了能够正确地运用上述方法以及便于利用电子计算机完成

计算，因此书中对数学工具也作了扼要地论述。在制订新的工艺过程和对象以及为了进一步完善已实现的工艺过程的优化时，均可采用上述工艺资料。

目 录

前言

第一篇 质量分析与优化的数学方法和工艺过程的描述

第一章 机械加工过程的质量分析是数学描述和优化

的目标 1

根据参数的复杂程度划分工艺过程参数的基本类型 1

机床—夹具—刀具—工件系统参数变化的概率特性 4

机械加工工艺过程是表征质量参数随机变化的估计 (评定) 过程 8

当对机器产生的现象不完全了解时, 工艺过程的数学描述和优化 11

在研究试验统计法时关于结果的再现问题 13

第二章 对优化参数、被研究因素和研究目标的要求 17

优化参数的选择 17

研究因素的选择 20

研究目标的特性 25

第三章 分散分析 27

分散分析的基本概念 27

关于一个、二个和三个因素的分散分析 28

第四章 回归分析 40

回归分析的基本原理 40

回归方程式的统计分析 46

第五章 一阶规划 52

完全因素的实验 52

选择因素的实验 56

完全因素和选择因素实验的回归分析	60
梯度法	62
第六章 因素选择的正式方法	69
秩相关法	69
随机平衡法	73
第七章 二阶规划	83
拟定二阶规划时关于优化的标准	83
二阶规划的数学模型及其建立	84
正交规划	86
旋转规划	89
性质与 D 优化规划相似的规划	95
在拟定二阶规划时的回归分析	102
二阶多项式所代表的优化范围的研究	107

第二篇 机器制造工艺中实验研究规划方法的应用

第八章 工艺过程的初步研究	117
在研究切削螺纹过程中产生振动时, 臆断信息的形式	117
用随机平衡法选出有意义的因素和交互作用的效应	123
第九章 机械加工工艺过程的描述和优化	132
端铣时铣削用量和被加工材料的机械性能对切削力 的影响	132
加工塑性材料时, 切削用量对被加工表面粗糙度的影响	139
第十章 切削刀具几何参数的优化	149
端铣刀刀齿几何参数的优化	149
第十一章 耐用度依附关系的获得	157
第十二章 测量仪器的度量特性分析	166
附表	170
参考文献	182

第一篇 质量分析与优化 的数学方法和工 艺过程的描述

第一章 机械加工过程的 质量分析是数学描述 和优化的目标

根据参数的复杂程度划分工艺过程参数的基本类型

金属切削机械加工工艺过程的特点是，有一部分参数为独立参数（自变量），而另一部分参数为相关参数（函数）。研究这些参数的主要任务在于：获得加工条件（自变量）与产品质量参数或与工艺过程本身（刀具的耐用度，生产率等），并且对复杂工艺系统的性质要给出某些概念；对工艺过程或产品质量参数进行优化。

上述任务，是用建立数学模型的方法来解决的，即确定工艺过程参数的类型，并建立独立参数与相关参数之间的关系。根据参数的复杂程度，可将参数划分为必然（确定）参数、或然（概率）参数和适应参数。

数值已知并保持不变的那些参数，称为必然参数。在解决具体问题时，如果碰到含有参数真值在内的不确定的间断参数，而且其间断的大小与参数自身的数值相比，小到可以忽略的程度，那么这样的参数，也可以认为是必然参数。

金属切削刀具的齿数和丝锥铲背的齿数等都是独立的必然（确定）参数。如果忽略掉很小的（与刀具本身的角度和直径相比）制造误差，也可将刀具前角、后角的大小和铰刀、拉刀的直径视为必然（确定）参数。

必然（确定）参数的数值变化，是完全确定的，而且是单值进行的。从逻辑的观点来看，描述确定目标或过程的必然（确定）参数，它们彼此之间是等价的。因此，如果研究者们缺少有关的信息，那么，无论是进行数学描述也好，或者是进行优化也好，这都是不可能的。必然（确定）参数，在金属切削加工工艺过程的自变量或函数中较为少见。

在对具有必然（确定）参数的目标和过程进行数学描述时，可以利用代数、微分和积分的方程式或方程式组来进行。研究刀具切削部分的几何形状时，通常是从制造刀具时的尺寸和形状的实际分散值中抽象出来，利用解析几何、微分几何、三角学、高等代数等数学工具进行分析。

必然参数属于最简单的一种类型，因此可视为或然（概率）参数的特例。所谓或然（概率）参数，是指具有已知确定分布规律的大量单值随机量。硬质合金刀片的弯曲强度极限、机床（同一种型号）的静刚度和动力质量指标、毛坯的强度和硬度、磨粒在工具表面上的分布、磨粒的形状和大小、零件加工后的实际尺寸、切削刀具的耐用度、光整加工（磨料的、电物理的和其它加工方法等）后的表面粗糙度、同一类型尺寸零件表面的形状和相互位置精度等，均可作为或然（概率）参数的实例。

或然（概率）参数的绝大多数数值彼此之间是相互独立随机地变化，而且可用分布规律（简称分布律）加以描述。分布律的参数（数字特征）是确定值。因此，大多数或然

(概率) 参数其变化的随机特性服从某种确定的规律性。

通常是根据对或然 (概率) 参数的观测结果来确定分布律的参数。至于分布律的类型, 如果有可能的话, 要么由理论确定, 要么提出假设的类型, 然后按确定的相应的规则加以检验。

在或然 (概率) 参数的构成中, 既包括分布律的参数, 也包括它们之间的随机关系。工艺过程中的许多独立参数和相关参数都属于或然 (概率) 参数。

描述或然 (概率) 参数的理论基础, 是概率论和一些边缘的数学分支, 如数理统计学、随机过程理论、离散分析和实验规划理论等。利用这些数学工具, 可以描述和优化比或然 (概率) 参数还复杂得多的参数。

对有关参数的数值大小或分布规律, 以及分布规律的特征信息均不十分了解或完全缺乏时, 可将这些参数视为适应参数。在显著水平时, 属于同一总集合里的任一特性的假设, 如果其统计检验被拒绝, 那么, 这样的随机变化的同名参数就是适应参数。缺乏适应参数信息的基本原因在于: 研究适应参数的困难性、差异度的显著性、参数实际值测量的复杂性, 以及在实际生产条件下的使用*与随后的保管*等均有一定的关系。在采用砂型浇铸时, 毛坯的余量、硬度和强度变化, 手工刃磨后硬质合金焊接刀具 (车刀、钻头) 的耐用度变化, 系统 (机床—夹具—刀具—工件) 内部的重要变化, 及周围条件的变化等, 均可作为适应参数的实例。

适应参数, 相对或然 (概率) 参数和必然 (确定) 参数而言, 是最常用的。有关适应参数的信息, 可从观测目标函数与过程函数的结果中获得, 或者通过专门的试验获得。相

* 指机床、夹具及刀具的使用与保管。——译者

关的适应参数，是工艺过程进行的条件发生重要变化的结果。

随机规划是解决优化问题的数学工具。在实验规划理论中，所应用的是适应优化法。在实际的生产条件下，对于诸如随机干扰的显著水平、具有临时的波动、附加到独立参数上的重要限制，这些特点需要采用不同类型的改进规划来解决〔如鲍克斯（Borck）的改进规划法，旋转的和随机的改进规划法等〕。当结果的再现性不好时，连续单一法（单一规划）对解决优化问题具有很大的可能性。可以采用电子计算机使寻求最佳点的过程自动化。

机床—夹具—刀具—工件系统 参数变化的概率特性

研究系统（机床—夹具—刀具—工件）参数属于哪一种类型时，应分析一批零件是怎样随加工时间而变化的。因为参数的大多数（接触表面的质量，弹簧夹头在夹座中的位置；夹紧机构零件的位置等等）影响工作效率，且具有随机性，所以描述机床夹紧机构的函数时，不能应用分析确定参数的方法来完成。可见，这种机构的某些参数（例如径向退让的大小，与轴向力的大小有关），应该是列为概率参数。研究机床和夹具各种机构的工作证明：它们这些影响零件制造质量的参数，在一定程度上接近于概率参数。

上述表明，由于随机因素的影响，使弹性系统、切削过程和摩擦等三方面参数值都在某一定的范围内变化。外界对系统的影响也属于确定的随机因素。在一个系统中，参数值的组合，以及随机因素对组合结果的影响特征，也都服从统计规律〔28〕。

研究证明,对同一型号(1 K 62)的各个机床静刚度和动态质量指标、固有振动频率及其衰减量、自激振动的振幅等均可在很大的范围内变化〔4〕。作者认为,按测量结果获得的经验分布可以很好地与理论分布相符合。系统(机床—夹具—刀具—工件)刚度的变化影响切削时的许用速度,可见,也影响加工生产率〔27〕。

毛坯在单件或成批的加工过程中,以及机床在全部使用的年限内,零件、部件和整个机床的参数都是在变化的,这些都是被加工零件质量指标数值分散的原因,并且有可能造成故障(如出现废品,机床停车,被加工零件从部件或整个机床的系统中甩出去等等)。根据机床参数变化的速度,整个过程可以分为快速进行,慢速进行,以及具有中等速度的进行〔50〕。

快速进行过程(变化的周期—以秒为单位),如加工精度、位移、运动规律的保持情况、不平衡等,都是产生随机分散的原因。

如果参数的变化周期是以分钟或小时为单位,那么,这样的参数就称为具有中等速度进行变化的参数。如机床零件和部件的温度变形、切削刀具的磨损、周围环境湿度的变化等等,都是这种参数的实例。通过研究表明,这种变化具有随机函数的特征,并且在每个瞬间的变化可通过确定形式的分布曲线加以描述。

参数值变化的慢速进行过程,发生在机床的周期性检验或修理之后,机器的磨损,机床箱体零件的挠曲,季节性温度的改变等都是这种类型的基本过程。正如上述过程的类型那样,它们引起机床参数值的随机分布。所以应以随机函数来描述。由于慢速进行过程,加工精度和效率等均会发生变

化。

这样一来，工作过程中，在指定的瞬间内，机床参数的实际值，是上述所有三种过程类型共同作用的随机函数。

研究刀具切削部分材料的机械性能表明，不同牌号的硬质合金，其弯曲强度极限（最重要的指标之一）都是非常不稳定的。对不同的工厂来说，评定强度极限稳定性特性的变差（вариація）系数变化的范围为0.2~0.13。

通过很多企业和实验室对刀具耐用度的实验表明，不同类型的切削刀具[24]，在所有的实验中，耐用度是与理论分布律相符合的随机变量。根据结构参数，制造工艺以及工具制造厂的情况不同，不同类型刀具耐用度变差系数的变化范围从0.09到0.97。以六个工具厂钻头的相对耐用度为例（以一个工具制造厂的钻头最大耐用度为单位），当耐用度变差系数的变化范围由0.15变到0.56时，其相对耐用度的变化范围为1~0.4。

通过对切削刀具磨损的研究，令人信服地表明：具体切削刀具的磨损，是其工作时间的线性随机函数。因此，可用线性随机过程的统计方法来描述刀具的磨损。一把刀对另一把刀，一次刃磨对另一次刃磨，都会使切削刀具的工作不相同、不稳定，有关这方面的情况，已在其它研究[15]中论及，这里不再赘述。切削刀具的耐用度是随机变量，刀具的磨损过程可用随机过程的数学模型来描述。

由于刀具的强度和耐用度的变化具有随机特征，因此，切削刀具连续工作的时间，只能以已知的确定概率估计。硬质合金刀具的故障，除磨损之外，还可能出现切削部分的小崩刃及大崩刃和刀片整个碎裂等。利用2000多把焊接车刀和250把各种型号可转位不重磨刀片进行实验表明，由磨损使其停

止工作的占 34.40%，出现刀片碎裂和小崩刃的占 35.6%，大崩刃的占 30%〔46〕。

不同冶炼方法所获得的同一种牌号的合金材料，以及用同一种冶炼方法所获得的不同铸件，其可加工性也都是各不相同的。特别是铸件和锻件之间有很大的区别。研究表明，在较好的场合下，可加工性指标的分散是 15~20%。但对不同的合金进行比较时，此分散高达 400%；甚至可达 2000~5000%〔12〕。一批毛坯强度和硬度值的实际分散，通常可以按着正态分布规律加以描述。根据对 C45* 钢制成的模锻零件的可加工性的研究，得出质量分析方面的结论〔22〕。尽管工具钢的冶炼方法有了改进，但刀具耐用度的变化仍是很大的。这种状况，显然不能满足加工的要求，因为刀具后表面的磨损，决定了测量精度和被加工零件表面的粗糙度。

磨削加工是金属机械加工的常见形式之一，尤其机械加工的最后一道工序，常采用磨削加工。砂轮圆形工作表面的轮廓，磨粒在粘结剂中的分布，工作过程中磨粒的钝化，圆弧、形状，尺寸及自砺性（Самозатачивание），磨粒切削刃的钝化半径，磨粒的尖角和其它参数等都是随机参数，而同类参数的总和以统计规律来描述〔8〕。对磨削加工的其它类型—研磨、珩磨、磨条加工（超精加工——译者注）等也同样规定其参数的描述都用统计规律。

这样一来，机床—夹具—刀具—工件系统，在单个毛坯和一批毛坯加工时间内，以及系统整个工作期间，其性能都会发生变化。描述系统特性的参数，是随时间而随机变化的。参数的这些变化，可借助于确定的和不确定的随机过程的数学模型来描述。在个别场合下，当按统计法检验概率型的数

* 钢牌号采用的标记与 ΦПГ 标准一致。——译者

学模型与实际过程符合（适应）程度时，概率型可能被拒绝。参数的这类变化属于适应型参数。

机械加工工艺过程是表征质量参数随机变化的估计（评定）过程

机床—夹具—刀具—工件系统的很多因素都影响产品和工艺过程的指标，如：精度、表面粗糙度、切削刀具的耐用度、制造成本和生产率。在固定不变的正常加工条件下，机床—夹具—刀具—工件系统参数实际值的分散，是工件和工艺过程质量指标变化的原因。

如果系统因素的数量较多，而且它们的变化相对名义值来讲都比较小（没有主导的因素），那么相关变量值的分散服从高斯分布律（正态分布）。因素分布的固有规律可能是任意的，而其偏离名义值（误差）的大小，既可能是正的也可能是负的。技术中各种过程的许多参数，其中包括技术测量、规定了工艺过程的零件加工，都可以用高斯分布律来描述。

但是不应认为金属加工时，参数分布规律全部符合高斯分布律（高斯律万能）。根据所得确定参数的特征曲线的具体条件，可以建立参数值分布的理论规律[7.52]。非随机独立因素的数量、大小以及多数的分散参数，都随时间和大量独立的或弱相关的随机因素而变化，这些随机因素对非随机独立因素函数的同时作用，将导致参数值的分布不遵从高斯分布律。

非高斯分布律，可借助于非随机因素的数值变化与分布特征函数 $a(t)$ 和 $b(t)$ 来描述。具有线性函数、幂函数和周期（正弦）函数的 $a(t)$ 和 $b(t)$ 的非高斯分布律，

在应用方面是最重要的分布。在工件加工时，切削刀具存在着磨损、温度变形、刀具切削刃的钝化，切削力的变化等个别作用或共同作用的情况下，均可借助于上述分布予以描述。

对于一批零件中的某些零件来说，其几何形状相对名义值的偏差和表面间的相互位置误差用列烈伊 (Релей) 分布律描述。这个规律用来描述两个名义上同轴的回转表面的径向圆跳动、所形成的圆柱表面的锥度、壁厚差、两个平面的平行度、两个平面或轴线对平面的垂直度等，其中，仅按随机分布量的绝对值考虑。

工艺过程，除了保证使机器零件加工时能得到高的精度参数之外，还应保证使之获得高的表面质量。不管加工方法如何—刀具、磨料、电物理方法等—实际表面的各种参数只能用概率法（或然率法）描述〔8〕。实际表面的微观不平度，是由确定分量和随机分量的组合而形成的〔9〕。确定分量取决于刀具切削刃的截形和进给量的大小；随机分量取决于切削加工时产生的物理过程，微观几何形状的不均匀性和刀具切削刃的缺陷，机床—夹具—刀具—工件系统的刚度不足等。在用刀具、磨削、研磨、电火花以及超声波等方法进行光整加工时，则以微观不平度的不均匀系数 γ 〔9〕定量表示的随机分量，与确定分量相比，占优势，并且 γ 在 $0.7 \sim 0.95$ 这个范围内变化（完备的随机微观不平度是 $\gamma = 1$ ）。在塑性小的金属切削加工或振动抛光时，可获得规律性的 $\gamma = 0.1 \dots 0.3$ 的微观不平度轮廓和细的表面粗糙度。

研究表明，机器和部件的如下一些使用特性：如耐磨程度、接触刚度、配合强度、气密性、锁紧强度等取决于联接零件的微观不平度的几何参数（平均高度和最大高度，微观

粗糙度的波距, 支承面的面积, 微观粗糙度顶点的圆角半径等)。因为微观不平度几何参数数值分布的统计特性, 对各种同一类型的产品来说, 象随机量一样, 其使用性能也是变化的。例如振动抛光的方法, 可在零件表面上形成有规律性的微观不平度, 使很多使用性能得到极大改善。

各种材料, 其中包括高强度、高硬度材料, 广泛采用磨削加工, 特别是最后一道工序进行磨削, 可使零件获得高精度、高生产率的性能指标, 因而, 也能保证实际表面的统计特性。

由于独立参数的随机变化, 使金属机械加工过程中相关参数的数值一切削刀具的耐用度、切削力、转动力矩以及经济指标等也都是服从于一定的分布规律的。

例如, 根据由 P 18 高速钢制成的高速切削外表面拉刀耐用度的研究结果, 提出切削过程的相互关系可视为随机函数, 并引用随机函数的数学工具对它们进行描述。这种对所研究的相互关系估计的方法, 使切削过程特殊的规律性揭示得更为准确, 并依此获得具有必需的可可靠性的资料〔45〕。

在金属机械加工的具体条件下, 根据耐用度变化机理的分析, 确定切削刀具耐用度分布的理论规律, 在机械加工发展的现阶段还是相当困难的〔24〕。另一种处理方法, 是根据研究所得到的经验分布, 选择分布律, 并且应按统计规则检验其二者相符合的程度。实际上, 耐用度总是占有统计资料的有限范围, 因此, 第二种方法与按照所获得的经验分布选择理论分布的不确定性有关: 对于一个试验分布的理论描述, 可以提出几个较好的与之相符合的理论分布。

可用正态分布、指数分布、韦布—格涅坚科 (Вейбула-Гнеденко)*分布、加马 (Гамма) 分布、对数正态分布, 伯

* 人名音译系根据王梓坤《概率论基础及其应用》一书。——校者

塔 (Берштейна) 分布等作为描述切削刀具耐用度分布规律的理论模型〔24, 37〕。

从数学观点来看, 唯一正确的是研究产品或工件的初始、中间和最后特性的数量特征的集合, 如一系列的连续多次测量过程和许多有节奏的随机过程, 这些过程与一个基本参数 t (在所研究的过程阶段, 制造一批工件时, 过程所进行的时间) 及辅助参数 S_i (例如空间坐标) 有关。

当对机器产生的现象不完全了解 时, 工艺过程的数学描述和优化

在分析机床—夹具—刀具—工件系统和金属切削机械加工工艺过程时, 允许建立对数学 (公式的) 描述和优化所必须的基本特性。系统因素的大多数在不同程度上影响工艺过程的质量指标和生产率。因素之间的相互作用 (或称交互作用), 也就是说工艺过程参数不仅取决于因素本身的大小, 而且还与其它一些因素的大小有关。大多数的质量指标与生产率之间是相互联系着的。在指定的阶段中, 机械加工工艺过程中伴随的现象的机理, 在很大程度上是不清楚的。质量指标和因素的实际大小都是随机量。

可以引伸推断: 金属加工过程属于比较复杂的不稳定的随机过程, 有关加工过程中所伴随现象的机理的信息不完全了解。

И. И. 阿尔托鲍列沃斯基 (И. И. Артоболевский)

院士*认为: 工艺过程的数学描述与优化, 按更广泛的提法, 称为工艺过程的算法化理论, 它所要解决的问题是跨

* И. И. 阿尔托鲍列沃斯基 (И. И. Артоболевский) 《这是祖国的需要》——真理报1971年3月19日。