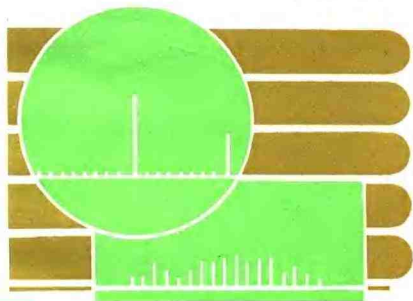


端面铣削的动态分析 及减振机理

王满元 编著



40.13

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了端面铣削的动态特性及其减振机理，并提出了不等齿距端铣刀的设计要点。

全书共包括6个部分：概述；端铣动态铣削力模型；铣削力的波形分析；动态铣削力的频谱分析；不等齿距端铣刀的研究现状；不等齿距端铣刀的优化设计。

本书可作为工科院校机械类专业高年级学生、研究生、教师以及有关的工程技术人员参考使用。

端面铣削的动态分析 及减振机理

王满元 编著

哈尔滨工业大学出版社出版发行
黑龙江大学印刷厂印刷

印刷开本787×1092 1/32 印张4.2 字数95 000

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数 1—1 000册

ISBN 7—5603—0089—8/TG·6 定价1.70元

前 言

端面铣削加工具有较高的金属切除率,目前它已经成为一种应用最广泛的高效率平面加工方法。由于处在高速、断续切削条件下,端面铣削时所产生的冲击和振动是影响刀具寿命、加工质量、生产率和机床正常工作的主要因素之一,因此,有必要对端面铣削过程进行较全面的动态分析并探讨其减振机理。

本书系统地讨论了在断续切削条件下端铣动态铣削力模型,并对典型的铣削方式进行了动态铣削力的时域和频域分析。在此基础上,提出了通过改变铣刀结构来改善铣削动态性能的可能性及途径。最后,对新出现的不等齿距端铣刀的实质做了较深入的分析,并介绍了国外的研究现状,提出了不等齿距端铣刀的设计要点。

本书以理论分析及实验为基础,同时吸取了国外的研究成果,反映了当前关于端面铣削动态性能研究的基本状况,可供从事刀具设计和应用及科研部门的有关专业人员参考,并可作为工科院校有关专业研究生及教师的教学参考书。

本书是在哈尔滨工业大学袁哲俊教授提议和支持下编著的,并由薄化川副教授进行了全面和认真地审改。哈尔滨科技大学的陆滨参加了第5部分的编写工作,并同周继成、盛海燕承担了实验和优化设计程序的编制和运算。哈尔滨汽轮机厂的顾祖魁、朱照光和王会宝等同志在实验中给予了大力协助。在此特向以上各位同志表示诚挚的谢意。

由于水平有限,书中难免有不当之处,恳切希望读者批评指正。

作 者

1988年2月 于哈尔滨

目 录

1. 概 述	(1)
1.1. 铣削过程的动态特性	(1)
1.2. 提高铣刀动态性能的途径	(3)
2. 端铣动态铣削力模型	(8)
2.1. 单齿铣削力模型	(8)
2.2. 多齿铣削力模型	(13)
3. 铣削力的波形分析	(16)
3.1. 典型铣削方式的铣削力波形	(16)
3.1.1. 典型铣削方式	(17)
3.1.2. 进给方向角的关系式	(18)
3.1.3. 全铣削的铣削力波形	(19)
3.2. 固定坐标系中的铣削力波形	(21)
3.2.1. 全铣削的铣削力波形	(22)
3.2.2. 激励轨迹图	(24)
3.3. 多齿端铣刀的铣削力波形	(28)
3.4. 单齿铣削实验	(31)
3.4.1. 待定常数的确定	(32)
3.4.2. 实验方案及结果	(33)
4. 动态铣削力的频谱分析	(34)
4.1. 频谱分析基础	(34)

4.1.1.	周期信号的频谱分析——傅里叶级数···	(34)
4.1.2.	周期矩形脉冲信号的频谱·····	(41)
4.1.3.	非周期信号的频谱分析 ——傅里叶变换·····	(47)
4.1.4.	狄拉克函数与卷积·····	(53)
4.1.5.	预备知识·····	(58)
4.1.6.	周期函数的傅里叶变换分析·····	(64)
4.2.	多齿铣削时的铣削力谱·····	(69)
4.2.1.	基本波形的频谱函数·····	(72)
4.2.2.	单齿铣削力的幅值谱图特征·····	(76)
4.2.3.	激励比·····	(84)
4.3.	不等齿距的端铣刀铣削力谱分析·····	(88)
4.4.	实践中影响端铣动态特性的因素·····	(93)
5.	不等齿距端铣刀的研究现状·····	(95)
5.1.	抑制颤振的不等齿距端铣刀·····	(95)
5.2.	抑制受迫振动的不等齿距端铣刀·····	(106)
6.	不等齿距端铣刀的优化设计·····	(111)
6.1.	设计依据·····	(111)
6.2.	通用型不等齿距端铣刀的设计要点·····	(114)
6.2.1.	优化设计方法·····	(115)
6.2.2.	目标函数·····	(116)
6.2.3.	约束条件与算法·····	(122)
6.3.	生产实践效果·····	(122)
参考文献	·····	(124)

1. 概 述

铣削加工是采用多齿刀具进行断续切削的一种加工方法。铣刀的每个刀齿在切削时，其切削厚度和主切削力的幅值和方向都在连续发生变化，这是铣削加工中的共同特征。

铣削加工中的端面铣削，由于它具有较高的金属切除率，已经成为一种应用最广泛的高效率平面加工方法。目前几乎所有的端铣刀都不需重磨，刀片紧固结构可靠，更换刀片方便，且具有较大的容屑槽。端铣刀所用的刀片向耐热和抗冲击方向发展，除已出现具有微细均匀微粒组织的各种新牌号硬质合金外，为适应高速、高精度的加工要求，也开发了不同镀层的刀片材料；对于要求精度特别高的铣削加工，正在扩大应用金属陶瓷材料。由于刀片材料的改进，现在国外使用的最高铣削速度已经达到 $600\sim 800\text{m}/\text{min}$ 。此外，端面铣削精度也在不断提高，最高接近于磨削。

向高速度、高精度方向发展的端面铣削，加之采用硬脆性刀具材料，对加工时的减振性能提出了更高的要求，因此，有必要对端面铣削的动态特性及其减振机理进行深入的探讨，以助于改善铣削加工，并为铣床的设计提供依据。

1.1. 铣削过程的动态特性

铣削过程的动态特性主要指的是，在不同铣削条件下对

铣削力的变化规律进行完整的描述。这里所讨论的铣削力是指刀具与机械结构相互作用的铣削力，而不是以一个刀刃为对象来讨论刀刃的受力情况。根据研究问题的目的和产生的原因不同，可以从两个角度对交变的切削力进行讨论。一种是在没有振动的状态下，由于切除金属量的周期变化而造成的切削力变动，它是每个切削刃在从切入到切出一次切削循环中产生的。另一种是由于刀具切削刃在振动状态下完成切削加工而引起的切削力交变分量。

后者是在产生振动位移的同时，由进行切削的刀刃产生的交变切削力。它是由包含再生效应的瞬时切削量变动所引起的切削力变动分量，和由内调制波所产生的切削力交变分量所组成。这种交变切削力可以产生于连续或断续的切削条件下，是属于研究自激振动问题时所讨论的内容。本书将不涉及这种交变切削力，因为许多专著已就这方面的有关内容进行过较详尽的论述。

前者是在断续切削中，由切削条件自然产生的一种特有变动切削力。它的切削力波形属于周期性函数，如果将其分解为各个频率的分量，可以认为它是由一个按特定的基本频率变动的正弦波形的切削力分量，和许多个按基本频率的整数倍而变动的正弦波形的切削力分量叠加而成。在本书中所讨论的正是这种在断续切削条件下所特有的动态切削力，并着重研究它在时域及频域中的特性。

铣削力的时域分析包括：在不同铣削方式（顺铣、逆铣、对称铣削等）下，铣削力在刀具的回转坐标系统及固定的直角坐标系统中，各分力随时间的变化规律。铣削力的时域分析在生产中具有一定的实用价值。例如：

(a) 选择合理的加工参数和加工方式；

- (b) 用于设计和评价刀具；
- (c) 设计工卡具时进行力学分析；
- (d) 开发铣削的计算机仿真系统，用更经济的手段进行铣削过程的研究工作。

动态铣削力的频域分析在过去很少涉及，但在将来的铣削加工研究工作中，会得到更广泛的应用。例如：

- (a) 探讨在断续切削条件下，机床的动态特性、刀具的磨损和破损规律、受迫振动与加工质量的关系等；
- (b) 开发减振刀具或其它新型刀具；
- (c) 根据所获得的频域信息，分析对铣削过程产生影响的各种干扰因素。

1.2. 提高铣刀动态性能的途径

铣削加工具有典型的断续切削特征，它直接影响机床——刀具——工件整个系统的工作状态。例如当采用端铣刀进行对称铣削时，刀齿在切入工件的瞬间切削负荷突然由零增加到某个数值而产生强烈的冲击；在切削行程中，切向与径向铣削分力的幅值和方向在不断变化；切出时刀齿的负荷又骤然降为零。随后刀齿以不同于切削时的温度和负荷状态下空转，且空转的时间一般较长。若刀具直径为160mm，加工宽度为120mm时，切削时间仅占一转的27%。如果刀具为传统的等齿距端铣刀时，在切削过程中对机械结构而言，将产生以刀齿啮合频域（切入频率）为基频的一系列切削力正弦分量。若基频或者其高次谐波频率中任何一个频率处于机械结构的共振范围内，可发生显著的振动和噪声。在重切削时，若切削规范与机械系统的动态性能间处在某一特定的

匹配条件下，也可能产生颤振。因此，在铣削过程中所出现的有关机械结构动态特性、刀具的寿命、加工质量及减振与降噪等问题，一直是机械加工领域的研究课题。

产生在断续切削过程中的上述现象，虽然是切削过程和机械结构相互作用的结果，但切削过程却是其中积极和主动的因素。为了改善铣削加工的动态特性，自40年代起某些学者即致力于探讨加工过程的振动机理并开展提高机械结构动态特性的有关研究工作，但对刀具的动态性能则涉及较少。长期以来，某些刀具虽几经改进，但也是从提高其切削性能、寿命及加工质量入手。

直到60年代，国外提出采用不等齿距端铣刀的设计，以期从切削机理上改善铣削过程的动态特性。直到现在，虽然研究不等齿距端铣刀的基本目的都是为了减少切削过程中所产生的振动与噪声，但是不同时期人们所追求的具体目标并不一致。前期着重从避免产生颤振出发，近期则以减小受迫振动为主。从结构上看，多数是在原有等齿距端铣刀的基础上，改变了刀齿的分布规律，即由等齿距变为不等齿距。最近在苏联正开展阶梯铣削不等齿距端铣刀的研究工作，即铣刀除采用不等分的齿距外，各刀齿的径向位置和轴向高度也不相同。具体说就是，位于最大回转半径处的刀齿，其轴向尺寸最小，其余的刀齿所在的径向位置依次向回转中心靠近，其相应的轴向尺寸也随之加长。在铣削过程中，各刀齿切深的总和等于总切深。它适用于大余量的粗加工，但结构复杂。

为了改善加工过程的动态特性，其它类型的铣刀在结构上也有不同程度的变化。某些研究人员已就几种新型立铣刀的性能进行了较全面的分析对比。所采用的对比指标为：抗

颤振和抗受迫振动性能；切削时的功率消耗；刀具的磨损与寿命；表面加工质量；修磨的难易程度等。可以将其结构的改进措施归纳为以下四种类型：

(a) 采用不等齿距的结构；

(b) 采用不同螺旋角的两组螺旋刀齿交错排列(图1.1 a))，

(c) 在一般具有相同螺旋角刀齿的立铣刀基础上，沿刀齿将前刀面浅浅修磨成波形面，此曲面与原有后刀面形成正弦曲线形刀刃，且相邻刀齿的正弦曲线刀刃之间存在一定的相位差(图1.1b))，

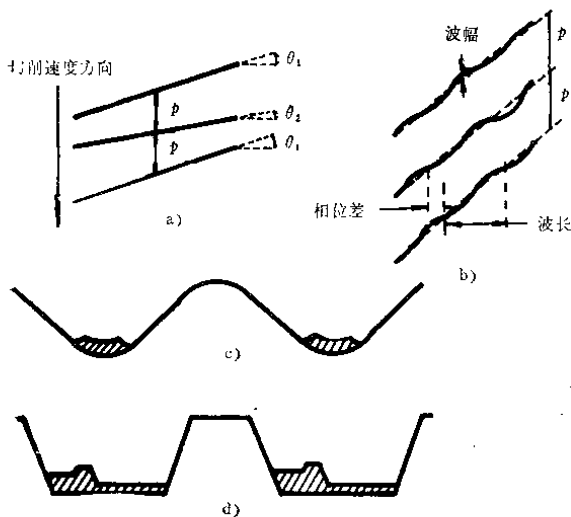


图 1.1

(d) 刀具为等齿距结构，但沿刀刃方向将刀齿制成较深的型面，工作时整个刀刃不全部参加切削，仅靠顶端工作。型面可分为正弦状（图1.1c）或梯形（图1.1d），后者又称为玉米铣刀，它们主要用于粗加工。

根据已经出现的各种新型铣刀在结构上的演变过程，可以得到这样一个结论：改善铣刀加工动态性能的主要途径，是使铣刀的刀齿具有不同的切削条件。

不等齿距端铣刀、不等齿距立铣刀和具有不同螺旋角的螺旋刀齿立铣刀等，在结构上都属于不等齿距类型的铣刀。在刀具转速和工件进给速度基本保持恒定的条件下，由于各刀齿的齿距不等（或者至少有几组不等齿距），各刀齿在切削时具有不同的每齿进给量，即切削层的参数不相同，且每个刀齿进入切削状态的时间间隔也不相等。

具有波形刃或型面刃的铣刀，虽然它们的齿距相等，但切削时在刀具回转轴的某一个端剖面内观察，各刀齿具有不同的切削厚度，而且沿着切深的方向上，各刀齿的切削图形也不相同。可以说，这类铣刀的各个刀齿在同一瞬间具有不同的切削层参数。

由以上分析中可以看出，所谓“铣刀的刀齿具有不同的切削条件”，具体说就是各刀齿的切削层参量不相同，或者进入切削状态的时间间隔不相等。对于不等齿距类铣刀，则上述两个条件兼而有之。除此之外，所讨论的个别铣刀中，例如阶梯铣刀或带型面刃的铣刀，在工作时还具有节剥法切削的特点。

根据再生颤振的理论可知，在铣刀工作时，如果刀齿具有不同的切削条件，可以减弱颤振现象；此外，由于改变了传统铣刀加工时铣削力对机床的激励频率，也可达到降低受

迫振动的目的。有关这方面的问题，将在以后的内容中详细地讨论。

提高铣削加工的动态特性，不仅可以通过改变刀具结构这一种方式，也可以靠改变机床运动参数来达到。最近某些研究人员提出“变速切削”的概念，并经过实践的验证已经取得了明显的效果。研究的结论认为，通过经常改变切削速度，以破坏工件的同一切削部位在前后两次切削速度相等的条件，则再生效应就能相反地抑制颤振作用。同时指出，变速切削法在车削、铣削、钻孔、镗削等粗加工中会有较高的实用价值。实际上，变速切削不仅可以抑制颤振，也是减小受迫振动的有效措施。因为采用等齿距端铣刀进行变速切削，可以使各刀齿进入切削状态的时间间隔不相等，同时各刀齿的切削层参数不相同。

2. 端铣动态铣削力模型

端铣加工是采用回转多齿刀具的一种加工方法。在切削过程中，除各刀齿相继进入切削状态外，其中每个刀齿的切削厚度，也从某个数值开始发生连续变化，同时其切向、径向切削分力都在不断改变着方向。当采用不同铣削方式（对称铣削、顺铣或逆铣）时，其切入和切出条件各异，在时域中其切削力波形也各具特点。若选用不等齿距端铣刀进行切削，即使在恒定的进给速度下，各刀齿的每齿实际进给量也不尽相同，这将给切削力带来更为复杂的影响。由此可见，为了深入探讨与研究铣削过程和改进刀具及加工设备，必须首先建立起合乎实际的动态铣削力模型。

实践证明，多齿端铣刀的切削力波动曲线，可以通过将单齿动态铣削力叠加而获得。因此，建立一个便于工程应用，且适应切削条件变化的单齿铣削力模型是解决问题的第一步。模型主要应当建立在可靠的切削理论上，其次根据端铣的工作特征完善模型，最后通过适当的辅助实验，确定模型中在一定加工条件下的几个待定常数。

2.1. 单齿铣削力的模型

图2.1为具有单齿端铣刀加工时的原理图。图中 d_0 为铣刀直径； φ 为刀尖切削点的进给方向角，它是切削过程的主

要变量； φ_0 为切入角； φ_1 为切出角；则接触角 φ_0 为

$$\varphi_s = \varphi_1 - \varphi_0 \quad (2.1)$$

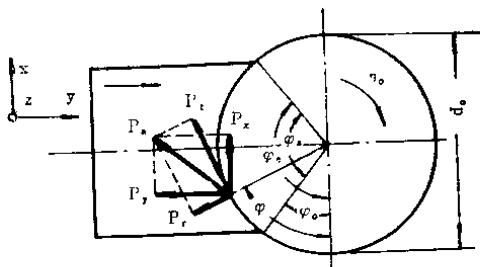


图 2.1

端铣的切削截面如图 2.2 所示。其中切削宽度及切削厚度 a_w 、 a_c 分别为

$$a_w = a_p / \sin \kappa_r \quad (\text{mm}) \quad (2.2)$$

$$a_c = s_s \cdot \sin \kappa_r \quad (\text{mm}) \quad (2.3)$$

其中： a_p ——切深 (mm)； s_s ——切削进给量 (mm)； κ_r ——铣刀主偏角 (deg)。

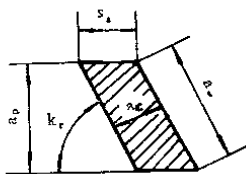


图 2.2

在忽略摆线运动的条件下，计算 s_s 比较准确的公式为

$$s_s = a_f \cdot \sin \varphi + (a_f^2 / d_0) \cos \varphi$$

其中 a_f ——每齿进给量 (mm/z)。上式中右面的第二项，

在通常的切削参数条件下甚小，可以忽略， s_s 可用下式求得

$$s_s \approx a_t \cdot \sin \varphi \quad (2.4)$$

将 (2.4) 式代入 (2.3) 式中，则切削厚度为

$$a_c = a_t \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa_r \quad (2.5)$$

端铣中切向切削分力 P_t 是主切削力。设刃倾角 λ 为零度时，参照车削中主切削力计算公式，选用如下一种最切合实际的表达方式

$$P_t = c \cdot a_w \cdot a_c' \quad (\text{N}) \quad (2.6)$$

式中的 c 、 λ 为系数与指数，与具体切削条件（主要是被加工材料性质）有关，可通过辅助实验确定。

将 (2.2)、(2.5) 两式代入 (2.6) 式中，则得出

$$P_t = c \cdot \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \cdot (a_t \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi)^\lambda \quad (2.7)$$

径向切削分力 P_r 和轴向切削分力 P_z 是切削推力 P_d 的两个分力，它们之间的关系如图 2.3 所示。

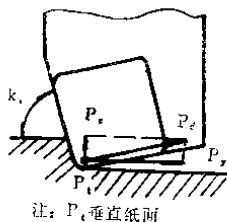


图 2.3

切削推力与切向铣分力之间可用比值 η 联系起来，即

$$\eta = P_d / P_t \quad P_d = \eta \cdot P_t \quad (2.8)$$

比值 η 与具体切削条件有关, 随刀具切削角度、刀具锋利程度、进给量不同而改变, η 值一般在 0.3—1 之间。

此时, 径向切削分力 P_r 与轴向切削分力 P_t 分别为

$$P_r = P_d \cdot \sin \kappa_r = \eta \cdot \sin \kappa_r \cdot P_t \quad (\text{N}) \quad (2.9)$$

$$P_t = P_d \cdot \cos \kappa_r = \eta \cdot \cos \kappa_r \cdot P_t \quad (\text{N}) \quad (2.10)$$

如设

$$\eta' = \eta \cdot \sin \kappa_r \quad (2.11)$$

则 (2.9) 及 (2.10) 两式可改写为

$$P_r = \eta' \cdot P_t = \eta' \cdot c \cdot \frac{a_p}{\sin \kappa_r} (a_f \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi)^{1/2} \quad (2.12)$$

$$P_t = \eta' \cdot \text{ctg} \kappa_r \cdot P_t = \eta' \cdot \text{ctg} \kappa_r \cdot c \cdot \frac{a_p}{\sin \kappa_r} (a_f \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi)^{1/2} \quad (2.13)$$

最终可将式 (2.7) (2.12)、(2.13) 式综合为下式

$$\begin{Bmatrix} P_r \\ P_t \\ P_x \end{Bmatrix} = c \cdot \frac{a_p}{\sin \kappa_r} (a_f \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi)^{1/2} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ \eta' \\ \eta' \cdot \text{ctg} \kappa_r \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

考虑到切削力的测试和机床的动态特性测试都是沿切削的进给方向、进给的法向和轴向方向进行的, 可以通过如下的矩阵关系式, 将 P_r 、 P_t 转换到固定直角坐标系中 (直角坐标系参看图 2.1, z 坐标轴方向垂直纸面), 即

$$\begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_r \\ P_t \\ P_x \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

若将测试结果换算成回转坐标系中的切向及径向分力时，可通过如下的矩阵关系式：

$$\begin{Bmatrix} P_r \\ P_t \\ P_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & -\cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

最终， P_x 与 P_y 两分力可写成

$$P_x = c \cdot \frac{a_p}{\sin\kappa_r} (a_f \cdot \sin\eta_r \cdot \sin\varphi)^\lambda (\sin\varphi - \eta' \cdot \cos\varphi) \quad (2.17)$$

$$P_y = -c \cdot \frac{a_p}{\sin\kappa_r} (a_f \cdot \sin\kappa_r \cdot \sin\varphi)^\lambda (\cos\varphi + \eta' \cdot \sin\varphi) \quad (2.18)$$

从以上两式及式 (2.13) 可知，在既定的切削条件，可以通过实验确定 c 、 η' (或 η) 及 λ ，此时 P_x 、 P_y 及 P_z 均为 φ 的函数。

在以上所讨论的铣削力模型中，均设刃倾角 $\lambda_s = 0^\circ$ 。当 $\lambda_s \neq 0$ 时，铣削合力的方向将改变，在某些分力中应当考虑到刃倾角的影响，单齿铣削分力呈如下形式：

$$P_t' = \cos\lambda_s \cdot P_t \quad (2.19)$$

$$P_r' = \eta \cdot \sin\kappa_r \cdot P_t \quad (2.20)$$

$$P_s' = (\eta \cdot \cos\kappa_r - \sin\lambda_s) \cdot P_t \quad (2.21)$$

事实上，当刃倾角在 $\pm 15^\circ$ 范围内时，主偏角对铣削力的影响远比刃倾角大得多。通过计算可知，当刃倾角变化 1° 时，可影响铣削分力平均为 1.7% 左右。当刃倾角的数值较大时，应采用式 (2.19) ~ 式 (2.21) 进行铣削分析；当刃倾角较小时，可不予以考虑。为了简化问题，在以后的分析中均不引入刃倾角。