




薄壁构件 切削工艺动力学 理论与方法

张卫红 万敏 著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



张卫红 万敏 著

薄壁构件切削工艺动力学 理论与方法

薄壁构件广泛应用于重大装备中,其高性能切削制造技术是实现结构轻量化、高效高质加工、保证力学性能与功能的核心工艺。然而,在薄壁构件切削过程中,切削力极易导致颤振发生,从而降低加工效率和精度,这已成为机械制造领域长期以来的技术瓶颈。作者领导的研究团队一直致力于上述瓶颈的突破,本书从工艺力学与切削原理角度出发,结合作者在航空航天薄壁构件加工颤振研究的实践经验,详细介绍了近20年作者围绕薄壁构件切削工艺中的动力学问题取得的系统性研究成果,主要包含了刀轴系统动态特性建模方法、铣削过程中薄壁构件动刚度演变规律及瞬时动力学参数预测理论、过程阻尼机理、颤振预报和抑制理论与方法等内容。

本书基本涵盖了薄壁构件切削加工动力学问题从基础理论到抑振应用研究的各个方面,能够为从事数控加工车间生产的一线工程技术人员和工艺研发人员,以及从事先进制造领域的科研人员提供很好的理论学习借鉴参考,也可以作为制造学科研究生培养的专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

薄壁构件切削工艺动力学理论与方法 / 张卫红, 万敏著. — 北京: 机械工业出版社, 2019.8

ISBN 978-7-111-63470-6

I. ①薄… II. ①张… ②万… III. ①薄壁结构-结构构件-金属切削-生产工艺-动力学 IV. ①TU330.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第177986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: 李万宇 责任编辑: 李万宇 王彦青

责任校对: 陈越 封面设计: 马精明

责任印制: 孙炜

北京联兴盛业印刷股份有限公司印刷

2019年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11印张·3插页·184千字

标准书号: ISBN 978-7-111-63470-6

定价: 79.00元

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

前言

PREFACE

薄壁构件广泛应用于航空航天设备等重大装备中,其切削工艺理论与方法是实现结构轻量化、高效高质加工、保证力学性能与功能的核心基础。在《〈中国制造 2025〉重点领域技术创新绿皮书》中,“大型轻量化整体及高强金属结构制造技术”被列为航空航天装备领域共性关键技术之一。然而,薄壁构件在切削力作用下极易发生颤振,从而降低加工效率和精度,长期以来构成了机械制造领域的技术瓶颈。近 20 余年,作者围绕薄壁构件切削工艺中的动力学问题开展了系统深入的研究工作,以期阐明颤振形成机理,建立颤振抑制理论与方法,解决该类构件加工颤振的难题。

颤振本质上是切削力作用下刀具与构件变形交互耦合引起切屑厚度动态再生导致切削失稳的现象。特别是在大尺寸薄壁构件切削过程中,因刀具长悬伸和轴向大切深而极易发生颤振现象。因此,深刻阐明切削颤振形成机理是本书的重点内容,需要解决以下关键难题:

1) 刀具-刀柄-主轴系统动力学建模。大尺寸薄壁构件切削工艺具有材料去除率高、刀具使用数量多的特点,同时刀具-刀柄-主轴系统动力学参数随着大行程跨度的推移变化显著。传统模态锤击试验测试方法虽然有效,但十分有限,不适用于频繁换刀的加工现场,亟待发展刀具-刀柄-主轴系统动力学参数的建模与预测方法。

2) 铣削过程中构件动刚度演变规律及瞬时动力学参数预测。大尺寸薄壁构件初始动刚度分布随位置变化剧烈,材料去除又会进一步引起动刚度演变,使得计算规模急剧上升,甚至无法求解。因此,需发展针对薄壁构件瞬时动力学参数的有效预测方法,构建材料去除引起的动刚度演变分析模型。

3) 过程阻尼的建模与预测。对于钛合金、高强度钢等难加工材料构成的薄壁构件,往往需要在较低转速下切削成形。然而,低转速下振动频率与切削速率之比的增大会导致稳定切削域的增加,即过程阻尼现象突显。传统理论主要针对车削过程的过程阻尼,如何建立铣削加工中过程阻尼数学模型,是准确揭示包括钛合金在

内的难加工材料薄壁构件铣削颤振机理必须解决的关键问题。

在此基础上,进一步开展了薄壁构件切削的颤振抑制理论与方法研究。通过添加局部配重和施加预拉应力等方法,实现了切削系统的刚度及固有频率等关键动力学参数的调控,取得了良好的抑振增效效果,研究成果在相关航空航天企业进行了推广应用。

全书分为6章,对上述问题进行了详尽论述。第1章介绍了国内外相关研究进展,并简述了薄壁构件铣削加工过程的动力学建模方法;第2章和第3章分别对刀具-刀柄-主轴系统以及构件动力学参数的获取方法进行了详细阐述;第4章详细推导了铣削加工的过程阻尼计算公式;第5章和第6章分别介绍了通过添加局部配重和施加预拉应力提高薄壁件铣削稳定性的方法。

在本书完成之际,作者衷心感谢各位同仁的支持和帮助。本书撰写历时3年,其中包含了作者指导的研究生杨昀、马颖超、冯佳、党学斌、高挺岐等合作完成的研究工作和他们在文字整理过程中付出的辛勤劳动,在此深表感谢。

同时,感谢国家自然科学基金项目(10925212、11272261、51005182和51675440)、长江学者奖励计划、国家重点研发计划(2017YFB1102800)等项目的支持!

限于作者水平,疏忽纰漏在所难免,敬请读者指正。

张卫红 万敏

目录

CATALOG

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 薄壁构件切削加工的主要问题	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 铣削过程切削力建模	4
1.2.2 铣削过程颤振稳定性分析	6
1.2.3 刀具动力学参数预测	8
1.2.4 构件动力学参数预测	10
1.2.5 过程阻尼机理研究	14
1.2.6 颤振稳定性改善方法研究	15
1.3 薄壁构件铣削过程的动力学模型	16
1.3.1 物理空间的动力学方程	16
1.3.2 模态空间的动力学方程	19
1.4 本书主要内容概括	21
第 2 章 刀具-刀柄-主轴系统动力学参数的预测方法	23
2.1 引言	23
2.2 旋转刀具的统一几何模型	23
2.3 刀具-刀柄-主轴系统的双连接界面等效的动力学建模	25
2.3.1 刀具动力学方程	25
2.3.2 夹头子结构动力学方程	31
2.3.3 双连接界面动力学方程	32
2.3.4 主轴-刀柄子结构动力学方程	34
2.3.5 子结构组装原则	34
2.3.6 刀具动力学参数的计算	38
2.4 主轴-刀柄子结构导纳矩阵的计算	39

2.5	刀具刀尖扭转导纳和轴向导纳的测量	41
2.5.1	扭转导纳的测量	41
2.5.2	轴向导纳的测量	42
2.5.3	测量结果的修正	43
2.6	试验验证	45
2.6.1	主轴-刀柄子结构导纳矩阵的获取	45
2.6.2	刀具-刀柄连接界面参数的识别	45
2.6.3	刀尖导纳测量值与预测值的比较	47
2.7	本章小结	50
第 3 章	考虑材料去除效应的薄壁构件瞬时动力学参数预测方法	51
3.1	引言	51
3.2	构件瞬时动力学参数的基本预测方法	51
3.2.1	初始构件动力学建模与模态分析	51
3.2.2	切削过程中构件动力学模型的动力修改策略	53
3.2.3	切削过程中构件动力学参数的预测流程	55
3.2.4	试验验证	56
3.3	构件瞬时动力学参数的自由度和模态缩减高效预测方法	60
3.3.1	构件自由度缩减方法	60
3.3.2	构件模态缩减方法	62
3.3.3	试验验证	65
3.4	构件瞬时动力学参数的分解缩减高效预测方法	67
3.4.1	切削后构件模型的缩减	68
3.4.2	待去除材料模型的缩减与更新	69
3.4.3	切削后构件和待去除材料的子结构耦合方法	72
3.4.4	切削过程中构件瞬时动力学参数的预测流程	74
3.4.5	试验验证	75
3.5	本章小结	82
第 4 章	铣削加工的过程阻尼建模方法	85
4.1	引言	85
4.2	基于犁切效应的铣削加工过程阻尼模型	85
4.2.1	侵入体积和犁切力的计算	85
4.2.2	过程阻尼和犁切力系数的标定	88

4.2.3	试验验证	96
4.3	基于切削速度方向变化的过程阻尼模型	100
4.3.1	切削速度方向变化引起的过程阻尼	100
4.3.2	考虑过程阻尼的薄壁构件铣削加工的动力学建模	109
4.3.3	试验验证	110
4.4	本章小结	116
第 5 章	基于添加局部配重的薄壁构件铣削稳定性改善方法	119
5.1	引言	119
5.2	局部配重对构件瞬时动力学参数的影响与修正	119
5.2.1	含局部配重的构件瞬时动力学参数预测	119
5.2.2	稳定切削域的优化	124
5.3	试验验证	125
5.4	本章小结	130
第 6 章	基于预拉应力的薄壁构件铣削稳定性改善方法	131
6.1	引言	131
6.2	预拉应力的计算与理论推导	132
6.2.1	长条状薄壁构件的铣削稳定性模型	132
6.2.2	构件固有频率对频响函数的影响	134
6.2.3	构件固有频率对极限轴向切深的影响	137
6.2.4	临界预拉应力的计算	139
6.3	试验验证	141
6.3.1	预拉应力施加装置的设计	141
6.3.2	刀具和薄壁构件模态参数的获取	142
6.3.3	颤振验证试验	147
6.4	本章小结	149
	参考文献	151

1.1 薄壁构件切削加工的主要问题

为了最大限度地减轻结构重量,同时满足结构强度和使用性能要求,航空航天飞行器结构大量使用薄壁构件,如飞机大梁、长桁、整体壁板以及发动机整体叶盘和叶片等(见图 1-1a 和 b)。通常这些构件的设计尺寸、位置精度及表面质量要求高,品种规格多,但批量小,大多采用切削加工制造。此类构件同时具有空间尺寸大(某些零件尺寸可达数十米)、结构形式复杂(如具有各种形式的下陷、槽腔、加强筋及凸缘等结构或带有变斜角、空间复杂曲面等)、壁薄刚度弱(某些构件厚度仅有 1~2mm)、难加工材料多(如钛合金和高温合金)、材料去除率高(某些构件可达 90%)等特点,其切削加工工艺性差,在切削力作用下极易发生切削颤振和加工变形,严重影响加工效率、加工精度和表面质量,加速刀具的磨损和破损,甚至导致零件报废(见图 1-1c 和 d)。因此,薄壁构件的切削加工一直是国际上公认的制造难题,迫切需要发展切削工艺先进理论与方法,建立高效、高性能切削加工制造技术,这对于提升我国高端装备制造能力具有重要的现实意义与工程应用价值。

为了抑制加工颤振和变形,传统做法是降低切削用量。这将使得机床、刀具的性能难以充分发挥,极大地降低了加工效率,从而拖延产品的制造周期。随着计算机仿真技术的快速发展,切削加工过程的工艺力学建模与数值仿真正成为替代传统经验性或试错性等制造模式的有效手段。通过对切削力和振动等关键物理量进行合理建模,量化预测和分析切削过程中刀具和构件的振动、变形等物理现象,进而实现切削加工过程优化、达到高效高精度加工的目的,最终推动切削加工技术向科学可控与智能化方向发展,大幅提升航空航天制造技术水平。

本书在国家自然科学基金(10925212、11272261、51005182 和 51675440)等项目的资助下,结合航空航天制造企业的实际需求,系统开展了薄壁类构件的铣削加

工动力学研究。采用理论分析与试验测试相结合的途径,重点研究了铣削过程中刀具与构件间的动态耦合作用机制和颤振稳定性的建模方法,包括过程阻尼的影响机制以及大尺寸构件的稳定性分析等关键难题,为质量控制和工艺参数优化提供了理论方法和关键技术。

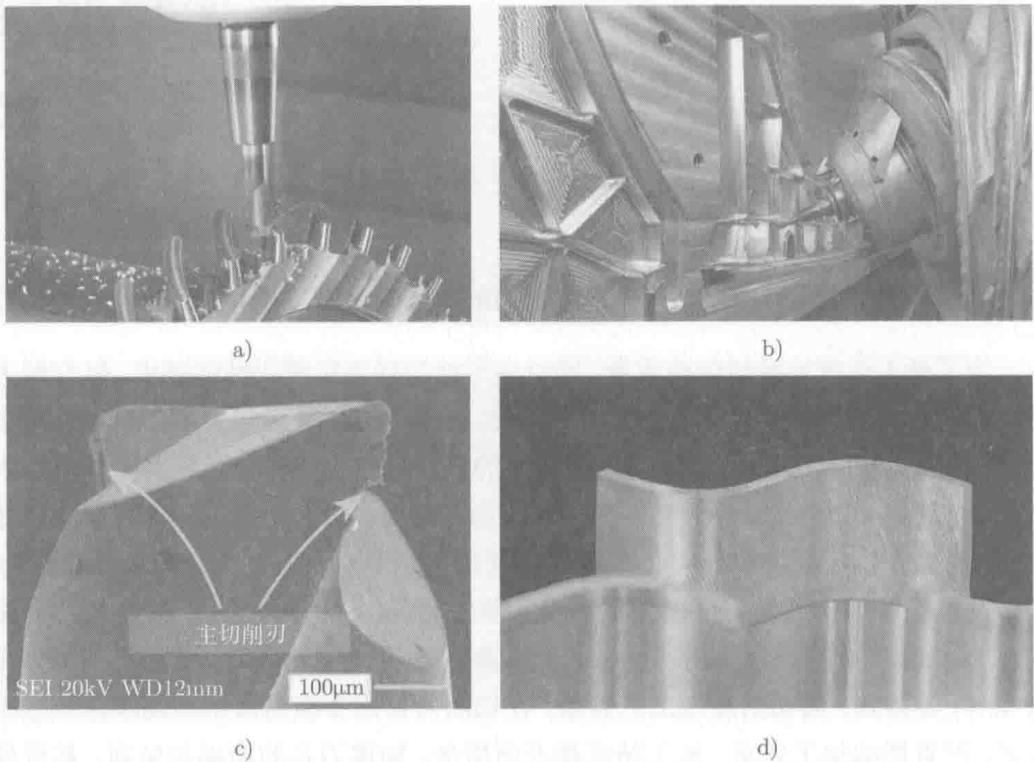


图 1-1 航空航天薄壁构件切削加工及颤振引起的不良影响

- a) 航空发动机叶盘切削加工 [1] b) 机翼整体壁板切削加工 [2] c) 刀具磨损 [3]
d) 颤振引起加工表面质量低

切削工艺是机床-刀具-构件系统的动态耦合作用过程,建立工艺力学模型是探索其相互作用机理的理论基础 [4],既包括刀具与构件的静态和动态特性建模,也包括切削过程的静力学和动力学分析。就薄壁构件切削过程而言,刀具常处于大悬伸状态,构件壁厚又较小,故刀具与构件的动刚度都较低,在切削力作用下刀具与构件均发生较大的振动。当刀刃切入频率或主轴转动频率达到某个状态时,会引起铣削系统的自激振动,即颤振。因此,对薄壁构件切削过程进行动力学分析时,要同时考虑刀具和构件的振动。图 1-2 所示为薄壁构件铣削过程动力学建模及稳定性预测中涉及的几个关键研究内容,核心是如何准确建立铣削系统的动力学方程。

可分解出以下几个关键问题:

(1) **刀具-刀柄-主轴系统动力学建模** 对刀具-刀柄-主轴系统进行动力学建模, 获得铣削系统中刀具部分的动力学参数, 即图 1-2 中动力学方程的刀具质量 M_T 、阻尼 C_T 和刚度 K_T 。

(2) **薄壁构件动力学参数预测** 准确获取铣削系统中薄壁构件的时变动力学参数, 即图 1-2 中动力学方程的构件质量 M_W 、阻尼 C_W 和刚度 K_W 。

(3) **铣削过程静力学建模** 铣削过程中刀具与构件间的铣削力建模, 主要包括切屑厚度 (见图 1-2 动力学方程中的 h_s) 的分析计算和切削力系数 (见图 1-2 运动控制方程中的 K) 的标定。

(4) **铣削过程动力学建模** 铣削过程中刀具与构件振动的准确建模, 即建立图 1-2 中刀具与构件的动力学方程, 并集成以上各关键参数。

(5) **铣削过程阻尼分析** 揭示薄壁构件铣削过程阻尼的形成机制, 并构建考虑过程阻尼的稳定性预测方法。

(6) **铣削颤振抑制** 基于稳定性分析, 提出添加局部配重和施加预拉应力的铣削颤振抑制方法。

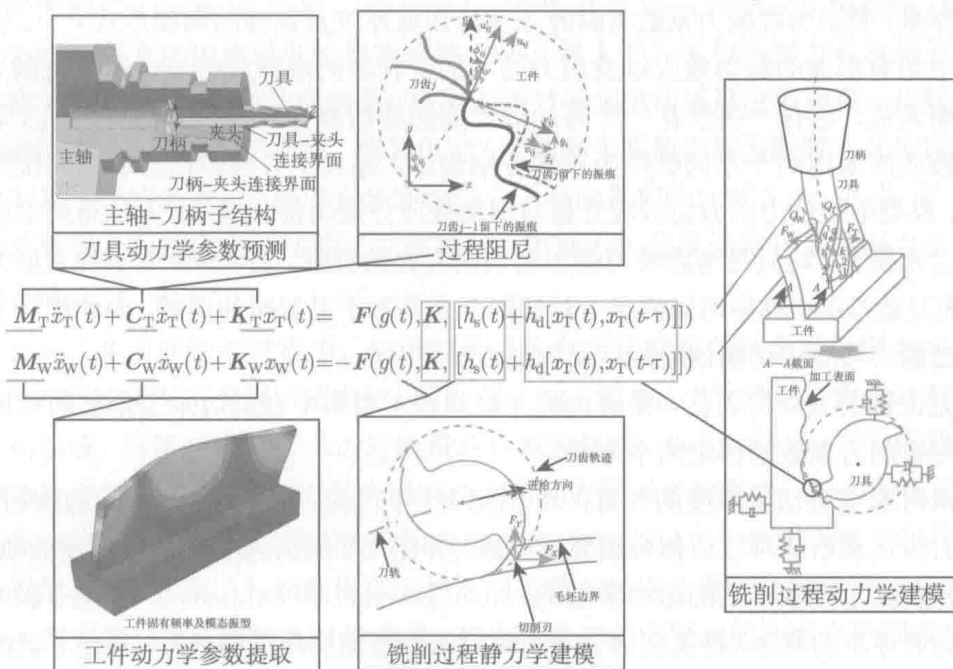


图 1-2 薄壁构件铣削稳定性预测中的关键问题

铣削过程静力学建模是薄壁构件铣削稳定性分析的基础。只有建立准确的静

力学模型,方可进行铣削动力学研究。同时,刀具与构件的动力学参数也是薄壁构件铣削动力学分析必不可少的系统特性参数,需提前准确获知。铣削过程静力学和动力学建模研究的根本目的在于精确分析铣削过程中刀具与构件间的相互作用规律,为合理确立和优化工艺参数、提高制造精度与加工效率提供理论依据。下面将围绕以上关键问题概述当前的研究现状与发展趋势。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 铣削过程切削力建模

铣削过程静力学分析主要是进行铣削力建模,工艺过程中许多不希望出现的现象(如颤振、表面粗糙度过大、刀具磨损和破损等)都与铣削力直接相关,可以说铣削力是影响构件尺寸精度、表面质量、颤振、刀具磨损/断裂、材料可加工性等加工信息的最基本物理量。国内外研究人员针对铣削力建模开展了大量研究工作,希望通过铣削力的准确预测达到合理选择切削用量及刀具几何参数的目的,提高加工效率、降低生产成本。切削力模型主要有三种表达形式:聚缩切削力模型、二元切削力模型以及三元切削力模型。聚缩切削力模型将铣削力分量(切向、径向及轴向分量)表示为铣削力系数与瞬时未变形切屑厚度及切深的乘积形式^[5-7]。铣削过程中切屑形成的剪切效应以及后刀面与加工表面的摩擦效应通过单一铣削力系数聚缩表征。也有一些学者^[8,9]将切屑形成的剪切效应以及后刀面与已加工表面的摩擦效应采用两个不同铣削力系数分别表示,建立了分离刃口力的二元铣削力模型,模型中铣削力由剪切效应分量与犁切效应分量两部分组成。无论是聚缩模型还是二元模型,均只是考虑铣刀侧刃对切削合力的贡献。近年来,本书作者研究发现,铣刀底刃在小轴向切深情况下对切削合力具有不可忽略的贡献,由此建立了同时考虑侧刃与底刃切削效应的三元切削力模型^[10]。

无论铣削力如何表征,需解决的关键问题主要集中在瞬时未变形切屑厚度的计算与铣削力系数的标定两个方面。

瞬时未变形切屑厚度的计算:20世纪40年代初,Martellotti^[11]指出次摆线式的刀齿运动轨迹可以近似为圆弧形轨迹,并建立了瞬时未变形切屑厚度的概念,该工作奠定了铣削工艺的运动学基础。Koenigsberger和Sabberwal^[12]基于瞬时未变形切屑厚度的概念,将铣削力表示为瞬时未变形切屑厚度的函数,奠定了铣削力建模研究的基础。随后,众多研究人员对瞬时未变形切屑厚度的准确计算进行了研究。Budak^[13]研究了薄壁构件铣削过程中让刀变形对切屑厚度的影响。Rao和Rao^[14]给出了曲面周铣中瞬时未变形切屑厚度的迭代计算表达式。Yang等人^[15]

提出了曲面周铣中未变形切屑厚度的高效解析计算方法。Kline 等人^[5]研究了刀具偏心对铣削力的影响,并建立了考虑刀具偏心的三轴铣削力模型。万敏^[16]详细推导了考虑偏心的瞬时未变形切屑厚度的通用计算公式,提高了铣削力建模精度。由于五轴铣削中刀具偏心对切屑厚度的影响更为复杂,众多学者为此开展了大量研究工作^[17-21],比如,Sun 和 Guo^[20]以及 Zhang 等人^[21]提出了精确计算未变形切屑厚度的迭代算法;Zhu 等人^[17]提出使用刀刃微元移动方法可使未变形切屑厚度计算更为简便。

铣削力系数的标定:铣削力系数一般表示为常值和瞬时值两种形式,其标定方法主要围绕这两种表现形式展开。Kline 等人^[5]、Budak 等人^[8]和 Gradisek 等人^[9]将铣削力系数表示为常值,并用实测铣削力的平均值实现了标定;Larue 和 Anselmetti^[6]则用实测刀具变形标定了铣削力系数;为了消除切削参数对铣削力系数的影响,Altintas 和 Spence^[7]将铣削力系数表示为平均未变形切屑厚度的指数函数。需要指出,当实际的切削参数与标定试验的切削参数相差较大时,以上标定方法对应的铣削力预测值与测量值吻合度欠佳^[22]。为此,很多学者提出了瞬时铣削力系数的概念^[23-26]。其中,Ko 等人^[23]将铣削力系数表示为瞬时未变形切屑厚度的韦伯尔(Weibull)函数,Wan 等人^[25,26]和 Azeem 等人^[24]将铣削力系数表示为瞬时未变形切屑厚度的指数函数。Wan 等人^[27]将与铣削力系数相关的材料参数(剪应力、剪切角及摩擦角)表示为瞬时未变形切屑厚度的函数,并基于铣削试验实现了材料参数的标定。倪其民^[28]将铣削力系数表达为瞬时未变形切屑厚度和刀具半径的函数,并使用积分理论建立了对应系数的标定方法。张臣^[29]将铣削力系数表示为轴向位置角的三次多项式,也基于积分理论建立了铣削力系数的标定方法。

此外,在曲面铣削过程中,由于刀具进给方向及曲面曲率会对铣削力产生影响,该方面的研究也受到广泛关注^[14,30-32]。Rao 和 Rao^[14]考虑了曲率对单齿进给量的影响,并推导建立了单齿进给量的计算表达式。Desai 和 Rao^[30]研究了刀轨参数化方向、曲面曲率和刀具半径对切削力和表面误差的影响。Lotfi 等人^[31]指出刀具进给方向的变化对铣削力有很大的影响。Wei 等人^[32]采用两种不同的插值方法近似刀轨,确定了与切削横截面相关的等效单齿进给量。蒲金鹏^[33]将曲面曲率引入到刀具切削过程的几何描述中,建立了考虑曲率影响的铣削力预测模型。

随着智能建模技术的发展,基于神经网络的铣削力模型也引起了国内外学者的关注^[34-38]。Szecsi^[34]基于前馈三层神经网络结构和误差反向传播训练算法建立了切削力预测模型。Ratchev 等人^[35]将遗传算法和神经网络技术结合,建立了铣

削力的预测模型。张臣等人^[36]将BP神经网络理论应用于球头铣刀铣削力建模的研究。这类技术以进给速度、切深等工艺参数为输入,以铣削力测量值为输出,通过网络训练建立了铣削力预测模型。虽然在足够多的隐含层和隐含节点的支持下,网络可以逼近任意的非线性关系,但是该类模型需要大量铣削力试验训练样本,缺乏适用性强的隐含层节点数选择依据。

1.2.2 铣削过程颤振稳定性分析

颤振是铣削过程中常见的物理现象,当铣削系统处于不稳定振动状态时,颤振(自激振动)即发生,导致构件尺寸超差、构件表面粗糙度变大、刀具磨损加剧,极端情况还会损坏机床。因此,抑制铣削颤振是保证铣削加工效率与精度的前提。

按照颤振诱发机理分类^[39],切削颤振分为再生颤振、模态耦合颤振、力-热颤振和摩擦颤振。而在铣削加工过程中,切屑再生机理是引发铣削系统颤振的主要因素^[40],因此研究人员对再生颤振的研究最为深入。切削过程中,正在参与切削的刀齿总是完全或部分地切削前面刀齿切削过的表面。倘若已加工表面上残留有振纹,那么某一刀齿再次切削到这些有振纹的表面时切屑厚度就会发生变化,进而引起切削力的波动,激励刀具和构件相对振动,并再次残留下振纹。如此重复循环,使开始较少的振纹扩散到整个加工表面,形成再生颤振。

自从 Taylor 在 1907 年发现颤振现象以来,许多研究学者如 Tobias 和 Fishwick^[41]、Minis 和 Yanushevsky^[42]、Altintas 和 Budak^[43]、Innsperger 和 Stepan^[44] 等对切削颤振形成机理开展了深入研究。首先是针对直角切削开展分析,所涉及的动力学建模基本思想是其他切削工艺稳定性研究的基础。20 世纪 60 年代,Smith 和 Tobias^[45] 以及 Tlustý 和 Polacek^[46] 分别对直角切削过程的颤振稳定性解析建模进行了开创性的研究,详细分析了切削颤振的主要诱因——切屑再生效应。瞬时切屑厚度不仅与刀具当前的振动变形有关,而且还与之前第一或之前第若干刀参与切削时的刀具振动变形有关。

不同于直角切削,铣削工艺具有多齿分布、刀刃螺旋、切削力周期变化等特点,导致其动力学建模及稳定性预测比直角切削更为复杂和困难。Minis 和 Yanushevsky^[42] 基于 Floquet 理论提出了在频域内预测铣削稳定性的方法,而 Tlustý 和 Ismail^[47] 则在时域内对铣削过程进行了动力学建模,并考虑了刀齿跳离构件的非线性因素。Shi 和 Tobias^[48] 建立了考虑铣削力相对于切屑厚度非线性变化的非线性动力学模型。Budak 和 Altintas^[49,50] 研究了薄壁构件动力学参数沿刀轴方向的变化对铣削稳定性的影响,建立了薄壁构件铣削的多点接触动力学模型。

为了表征切削系统的稳定性,Tobias 和 Fishwick^[41] 建立了稳定性叶瓣图的概

念。即根据切削系统的动力学参数分析判别稳定性,建立切深和主轴转速的极限对应关系。分析判别稳定性的方法主要有三类:基于微分方程初值问题的时域仿真方法、基于微分方程的频域稳定性分析方法以及基于微分方程的时域稳定性分析方法。

(1) 基于微分方程初值问题的时域仿真方法 该方法通过对铣削过程的动力学方程赋初值,进行若干个周期的时域仿真,再分析若干个周期后系统的位移、加速度或力是否呈放大现象,以判定铣削过程是否稳定。Tlusty 和 Ismail^[47]提出了一种时域仿真方法,预测了在轴向切深和主轴转速两个维度下的铣削稳定性叶瓣图。Smith 和 Tlusty^[51]提出以仿真切削力的最大与最小幅值之差 (Peak-to-Peak) 作为颤振判据。Minis 和 Yanushevsky^[42,52]推导了二自由度铣削过程的周期性微分表达式,并使用 Nyquist 稳定性判据构建了稳定性叶瓣图。Campomanes 和 Altintas^[53]提出了一种改进的时域计算方法,以动态切屑厚度与静态切屑厚度之比作为颤振发生的判据。李忠群和刘强^[54]提出了基于 Runge-Kutta 积分法的铣削稳定性时域分析方法。上述各方法虽然可以考虑铣削过程中的各种非线性因素,但并非直接分析铣削系统的稳定性,因而计算效率较低,难以广泛应用。

(2) 基于微分方程的频域稳定性分析方法 该方法将铣削系统的动力学方程变换到频域中分析稳定性。Altintas 和 Budak^[43]通过选取过程中动态铣削力矩阵的傅里叶变换后的零阶项,提出了在频域中解析计算铣削稳定边界即极限轴向切深的单频率法。该方法在扫描预期的主轴转速范围时,对应的极限轴向切深由解析计算式直接确定,具有极高的计算效率。但是该方法只是截取了动态切削力矩阵的傅里叶级数的零阶项,对于因小径向切深特征而高度断续的铣削过程的稳定性难以准确预测。Budak 和 Altintas^[49]及 Merdol 和 Altintas^[55]进一步拓展了单频率法^[43],通过考虑动态切削力矩阵的傅里叶级数的高阶项,提出了多频率法,解决了单频率法不能预测铣削系统倍周期分岔的问题。

需要指出,多频率法在计算过程中需要迭代搜索颤振频率,不能给出极限轴向切深的解析表达式,计算效率相对较低。随后,Altintas 的研究团队将该类方法推广到球头刀铣削^[56]、不等距齿铣削^[57]和变螺旋角铣削^[58]等复杂铣削过程。Budak 等人^[59]将该类方法推广到五轴球头刀铣削过程。李忠群等研究了圆角铣削颤振稳定域计算方法^[60]。梁睿君等人^[61]应用单频率法分析了薄壁构件铣削过程的稳定性。以上现状表明,单频率方法计算效率很高,但不适用于小径向切深情况和切削刃几何形状复杂的刀具,而多频率法正好相反。

(3) 基于微分方程的时域稳定性分析方法 该方法在时域内对铣削系统进行离

散,然后直接分析动力学方程的稳定性。Bayly 等人^[62]基于单自由度铣削模型,提出了铣削稳定性的时域有限元分析法,并将其扩展到两自由度铣削模型^[63]。时域有限元分析法以假设切入时间区段上的位移模式为前提,通过加权残值法获取一个刀齿切削周期上的系统状态传递矩阵,最后根据 Floquet 理论判断该传递矩阵特征值的谱半径是否小于 1 来判断铣削稳定性。Mann 等人将该方法推广到考虑刀具跳离构件的情况^[64]以及考虑大轴向切深和铣刀螺旋角影响的情况^[65],预测出大轴向切深和小径向切深情况下稳定性叶瓣图中的倍周期分岔现象。Sims 等人^[66]应用时域有限元分析法判断变齿距和变螺旋角刀具铣削稳定性,结合模糊数学提出了考虑加工过程不确定性的模糊稳定性分析方法^[67]。张小明^[68]结合区间代数提出了铣削过程稳定边界的下界快速计算算法。Innsperger 和 Stepan^[44,69]提出了半离散方法,通过对时滞微分动力学方程中的时滞项进行离散,同时对每个时间段上的时滞项进行零阶近似,对周期系数项做零阶近似处理,将时滞微分动力学方程转化成常微分方程。在此基础上,构造出一个刀齿切削周期上的系统状态传递矩阵,最后依据 Floquet 理论判断铣削过程的稳定性。Innsperger 和 Stepan 随后又提出了一阶半离散法^[70],通过对离散后的时滞项一阶近似,改进了原半离散法的收敛性。Zatarain 等人^[71]使用半离散法分析了铣刀螺旋角对稳定叶瓣图的影响。Wan 等人^[72]提出了统一的半离散法,分析了刀具偏心与不等距齿引起的多时滞效应对铣削过程稳定性的影响。Ding 等人^[73]提出了全离散法,较半离散法具有更高的计算效率。李中伟等人^[74]提出了基于 Magnus-Gaussian 截断的改进半离散法。宋清华等人^[75]分析了小径向切深下进给量对铣削稳定性的影响。目前,半离散方法及其改进方法因准确且相对高效的特点,成为最常用的铣削稳定性判定方法。Eksioglu 等人^[76]考虑了刀具与构件在刀具-构件接触区域的振动,并提出了一种基于辛普森格式的多点接触稳定性预测通用模型。

1.2.3 刀具动力学参数预测

刀具动力学参数对于准确预测铣削过程稳定性至关重要。一般情况下,通过模态锤击试验测量刀具刃部的位移-力频响函数,即导纳(receptance),然后使用导纳或对导纳进行模态分析提取系统的质量、刚度和阻尼。但模态锤击试验测量存在两个问题:一方面,刀具刃部导纳与刀具、刀柄及主轴的组合状态密切相关,一旦刀具、刀柄的尺寸或材料发生变化,就需要重新进行锤击模态试验测量;另一方面,对于微纳切削加工中常用的小尺寸刀具,由于测量刃部导纳的过程需要非常昂贵的专用设备,不切实际。为此,发展通用的刀具-刀柄-主轴系统动力学参数计算方法是一种重要途径。基本思路总结如下(见图 1-3)。

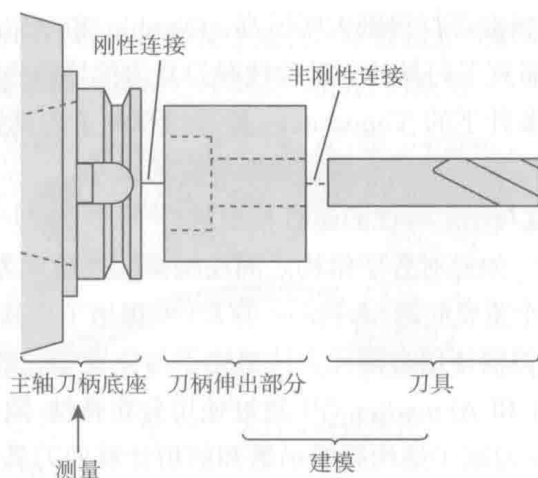


图 1-3 刀具-刀柄-主轴系统动力学建模思路 [77]

第 1 步: 将刀具-刀柄-主轴系统分为多个子结构。

第 2 步: 测量不易理论建模的子结构 (如主轴刀柄底座) 的动力学参数。

第 3 步: 计算易于建模分析的子结构 (如刀具和刀柄) 的动力学参数。

第 4 步: 建立组装准则, 耦合第 2 步与第 3 步的结果。

这类方法的关键在于如何划分子结构 (第 1 步) 以及如何建立子结构的理论模型 (第 3 步)。

Schmitz 等人 [78] 较早引入了该方法, 他们将刀具-刀柄-主轴系统分为主轴-刀柄子结构和刀具悬伸部分子结构, 并提出导纳耦合子结构分析方法, 将理论建模得到的刀具悬伸部分子结构的动力学参数与实测主轴-刀柄子结构的动力学参数耦合, 实现整个系统的动力学参数预测。随后出现了更多的研究工作, 一部分将刀具-刀柄-主轴系统分为两个子结构 [79-83], 另一部分则将其分为三个子结构 [77, 84-89]。

事实上, 划分子结构的关键是要易于理论分析和准确建模。现有研究主要从三方面考虑:

(1) 弯曲振动中转动响应的影响 [79, 82, 87] Park 等人 [79] 指出除了平动响应 [78], 转动响应也对刀具刃部导纳有很大影响, 并理论推导了刀具刃部沿 X 和 Y 轴平动和转动响应的导纳计算公式。Albertelli 等人 [82] 利用有限差分方法确定了主轴-刀柄子结构的平动和转动导纳。

(2) 刀具和刀柄剪切变形效应的影响 [83-85, 89] 一些学者使用 Timoshenko 梁理论研究了剪切变形对刀具刃部导纳的影响, 发现考虑剪切变形的影响, 刀具刃