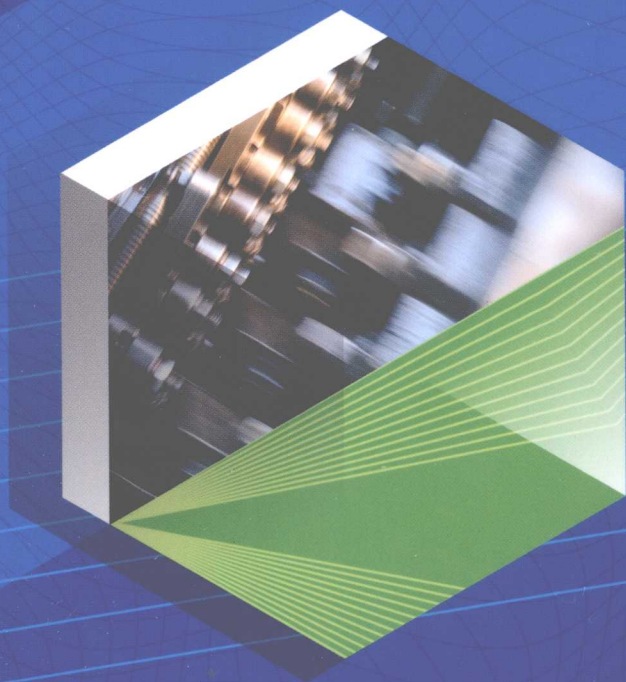


高速加工与 数控编程

何 庆 著

<http://www.phei.com.cn>



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

高速加工与数控编程

何 庆 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书阐述了高速加工机理及国内外在此方面的研究,详细介绍了高速加工的关键技术,进行了高速铣削有限元分析,优化了高速铣刀的几何参数,研究了高速加工的策略与数控技术,分析了 STEP-NC 新型数控模型及其与高速加工的关系,最后给出了 STEP-NC-HSM 系统开发实例。

本书可供数控加工、高速铣削方面的工程技术人员参考使用,也可作为大专院校、科研院所的选修教材及科技人员阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

高速加工与数控编程 / 何庆著. —北京: 电子工业出版社, 2009.9

ISBN 978-7-121-09395-1

I. 高… II. 何… III. 数控机床—程序设计 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 135217 号

策划编辑: 李 洁 (lijie@phei.com.cn)

责任编辑: 王凌燕

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 10.5 字数: 201.6 千字

印 次: 2009 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

本书是作者近年来在研究高速加工和 STEP-NC 技术的基础上,结合科研成果,有选择地吸收国内外的最新研究,经整合而成的著作。

高速加工是当前机械工业先进制造技术方面研究和应用的热点之一。在军工、模具、发动机等方面有良好的应用前景。大型机械制造企业和高等院所等都在积极引进国内外高速加工设备,开展高速加工在薄壁件、复杂曲面和大型壳体方面的制造研究和应用。由于高速加工的机理不同于普通的机械加工和一般的数控加工,在某些方面有独特的优势,其机理目前尚未得到满意的解释,国内开展此方面的研究时间也不长,急需这方面的理论和技术指导。

本书从系统的观点出发,将当前的研究热点——高速加工(HSM),作为一个大系统来展开,而不是过于细节地描述某个方面,本书较全面地论述了高速加工的关键技术,以及如何从绿色制造的系统出发来选择高速加工设备,对高速数控加工的新技术进行了全面论述。此外,本书在 ANSYS 的基础上,对高速铣削有限元进行了分析计算,对高速铣刀几何参数的优化选择有积极的借鉴作用。

由于高速加工其主轴转速、进给速度和加速度都很快,这就使得高速加工编程策略与普通数控编程有所不同,本书探讨了将新的国际标准 STEP-NC 引入到高速加工中。

STEP-NC 是国际标准化组织开发的新型数据接口(ISO 14649),将产品数据转换标准 STEP 扩展至 CNC 领域,重新定义了 CAD/CAM 与 CNC 之间的接口,要求 CNC 直接使用符合 STEP 标准(ISO 10303)的三维产品数据模型,加上工艺信息、刀具信息,直接产生数控程序,驱动机床进行数控加工。STEP-NC 不再使用 ISO 6983 所定义的 G、M 格式,不是直接对刀具中心轨迹进行编程,而采用 STEP-NC 数控程序接口,根据零件的制造特征(如平面、孔、曲面、型腔等)进行程序规划和加工。

本书分析了 STEP-NC 与高速加工的关系,系统地探讨了 STEP-NC 的结构和特点,并针对符合 ISO 14649 的 STEP-NC 程序的生成,以及高速加工的编程策略进行了系统论述。由于 STEP-NC 是新的国际标准,将代替现行数控方面使用的 G、M 代码,目前市场上这方面的专业书籍不多,本书对此进行了积极探讨,以期起到抛砖引玉的作用。

本课题研究先后得到了两个科研基金项目支持：安徽省教育厅自然科学研究项目“高速切削及其 CNC 自动编程技术的研究”（2003KJ101）、江苏省高校自然科学研究项目：基于高速加工的 STEP-NC 系统研究（05KJB460027）。

感谢博士生导师桂贵生教授对我的教诲和理论指导，使我对该研究领域有了更加深刻的理解和认识，对课题的进展和本书的成文有很大的推动作用。

本书在撰写过程中，得到了王乾廷博士后、杜世昌博士、仓公林博士，许良元硕士、彭丹丹硕士、吕堃硕士等多位学友的技术支持和帮助。尤其是王乾廷博士后对本书稿进行了通读和修订；我的研究生王雅讲师和朱涛工程师也对本书的出版付出了劳动和技术协作；电子工业出版社也给予了大力支持，在此向他们表示衷心的感谢。

本书参考了国内外大量的技术文献资料，由于时间仓促，有些文献和资料的作者和单位未能一一列出，在此一并向他们表示衷心感谢。

高速加工的相关理论，以及 STEP-NC 数控技术正处在不断探索和发展中，由于作者知识水平和研究试验背景有限，书中难免存在缺点和错误，恳请专家、学者和工程技术人员不吝赐教，给予批评指正。

何 庆

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 HSM 概述	(1)
1.1.1 HSM 的基本概念	(1)
1.1.2 HSM 的技术范畴	(4)
1.1.3 HSM 的国内外研究现状	(6)
1.2 高速切削机理	(7)
1.2.1 有关 HSC 机理的三种学说	(7)
1.2.2 切屑形成机理分析	(8)
1.2.3 高速切削方程式	(10)
1.2.4 切削热的产生和传递	(11)
1.3 HSM 研究热点	(17)
1.3.1 HSM 的刀具单元	(17)
1.3.2 高速电主轴	(17)
1.3.3 高速加工机体及硬件	(18)
1.3.4 高速 CNC 系统	(19)
1.3.5 高速加工的冷却技术	(20)
1.4 新型数据接口标准——STEP-NC	(20)
1.4.1 STEP-NC 研究热点	(22)
1.4.2 STEP-NC 的特点	(22)
1.5 STEP-NC 与 HSM 的关系	(24)
1.6 研究意义与展望	(26)
1.6.1 研究意义	(26)
1.6.2 HSM 技术展望	(27)
第 2 章 HSM 系统技术	(29)
2.1 HSM 加工的系统性特点	(29)
2.1.1 技术上的协调性	(29)

2.1.2	高速单元的组合性	(31)
2.1.3	管理上的一致性	(33)
2.2	高速加工的刀具系统	(35)
2.2.1	HSM 的刀具材料	(35)
2.2.2	HSM 刀具几何参数	(36)
2.2.3	HSM 刀柄类型	(37)
2.2.4	HSM 离心力	(40)
2.3	HSM 刀具的可靠性	(41)
2.3.1	刀具系统可靠度设计	(41)
2.3.2	刀具磨损量及其参数估计	(43)
2.4	HSM 的安全性	(47)
2.5	高速铣刀种类与选用	(48)
2.5.1	HSM 铣刀的种类	(48)
2.5.2	HSM 刀具的选择	(49)
2.5.3	加工薄壁件的特殊刀具	(50)
2.6	HSM 机床选配性分析	(50)
2.6.1	典型机床	(50)
2.6.2	HSM 部件	(51)
2.6.3	HSM 机床可靠性与维修性	(54)
2.6.4	绿色化原则	(55)
2.6.5	人机工程学分析	(55)
2.6.6	协调性原则	(55)
2.6.7	HSM 机床实例分析	(55)
2.7	HSM 机床新发展	(57)
2.7.1	卧式五坐标高速铣床	(57)
2.7.2	立式五坐标高速铣床	(58)
第 3 章	高速铣削有限元分析	(59)
3.1	高速铣削建模	(59)
3.2	有限元法分析及网格划分	(65)
3.2.1	有限元法求解分析	(65)
3.2.2	铣刀简化模型	(68)
3.2.3	网格划分	(69)
3.3	边界条件和加载	(70)
3.4	高速铣刀有限元分析	(72)

3.4.1	高速铣刀前角分析	(72)
3.4.2	高速铣削螺旋角分析	(76)
3.4.3	高速铣刀刀齿数分析	(80)
3.4.4	高速铣刀长径比分析	(83)
第 4 章	HSM 策略与数控技术	(91)
4.1	HSM 刀具路径研究	(91)
4.1.1	HSM 刀具路径模式	(91)
4.1.2	加、减速控制策略	(96)
4.1.3	加、减速程序处理	(100)
4.2	HSM 对数控系统的要求	(101)
4.2.1	高速加工对 CAD/CAM 系统的要求	(101)
4.2.2	HSM 对 CNC 的要求	(102)
4.2.3	适用于 HSM 的 CAM 软件分析	(103)
4.3	HSM 工艺策略	(106)
4.3.1	高速铣削用量	(106)
4.3.2	高速加工工艺制订策略	(109)
4.3.3	HSM 刀具路径优化	(109)
4.4	HSM 编程策略	(110)
4.4.1	HSM 数控编程基本策略	(111)
4.4.2	基于制造特征的编程策略	(112)
第 5 章	STEP-NC 新型数控模型	(114)
5.1	STEP 类标准	(114)
5.1.1	STEP 标准	(114)
5.1.2	ISO 14649 标准	(114)
5.1.3	STEP-NC 研究现状	(117)
5.2	STEP-NC 结构	(119)
5.2.1	STEP-NC 程序结构	(119)
5.2.2	头部段	(120)
5.2.3	数据段	(121)
5.3	EXPRESS 语言	(121)
5.3.1	EXPRESS 语言结构和特点	(122)
5.3.2	约束规则	(126)
5.4	STEP AP214	(129)
5.5	STEP AP238	(131)

5.6	基于制造特征的数控加工	(133)
5.6.1	特征建模	(133)
5.6.2	STEP-NC 的重要实体	(134)
5.6.3	STEP-NC 的刀路规则可基本适合 HSM 要求	(139)
第 6 章	STEP-NC-HSM 系统开发	(142)
6.1	STEP-NC-HSM 总体方案	(142)
6.1.1	设计思想	(142)
6.1.2	STEP-NC-HSM 体系结构	(143)
6.2	数据流程	(144)
6.2.1	STEP 数据导入	(144)
6.2.2	STEP 特征识别	(146)
6.3	刀具定义与管理	(148)
6.4	STEP-NC-HSM 工步规划	(149)
6.5	STEP-NC 代码生成	(152)
参考文献		(156)

1.1 HSM 概述

1.1.1 HSM 的基本概念

高速加工 (High Speed Machining, HSM) 也称高速切削 (High Speed Cutting, HSC)。国内外文献对 HSM 的描述主要有以下几种:

(1) 国际生产工程科学院 (CIRP) 切削委员会在 1978 年提出, 线速度在 $500\sim 7000\text{m/min}$ 的切削加工为高速切削加工。

(2) 德国 Darmstadt 工业大学生产工程与机床研究所 (PTW) 提出, 以高于普通切削速度 $5\sim 10$ 倍的切削加工为高速加工。

(3) 对铣削加工, 从刀具夹持装置达到平衡要求时的速度来定义高速加工, ISO 1940 标准提出, 主轴转速超过 8000r/min 为高速加工。

(4) 从主轴设计的角度, 以沿用多年的主轴转速特征值 DN 值来定义高速加工, DN 值在 $(5\sim 15)\times 10^5\text{mm}\cdot\text{r/min}$ 时为高速加工。

(5) 从主轴和刀具的动力学角度来进行定义, 它取决于刀具振动的主模式频率, 在 ANSI/ASME 标准中用来进行切削性能测试时选择转速范围。

一般认为, 高速加工是指采用比常规切削速度和进给速度高得多 (一般要大于 $5\sim 10$ 倍) 的速度, 来进行高效加工的先进制造技术。HSM 一般采用高的主轴转速 n 、高的进给速度 v_f , 较小的切削深度 a_p , 其切削速度伴随着刀具材料的超硬耐磨性的发展而不断提高, 现阶段一般把主轴转速在 $10000\sim 20000\text{r/min}$ 、进给速度在 $30\sim 100\text{m/min}$ 范围的切削, 划归为高速加工, 图 1-1 表示为不同材料的切削速度与切削温度 HSM 曲线图。超过此速度范围, 即为超高速切削 (Ultra High Speed Cutting, UHSC)。

HSM 与普通数控加工在切削参数、刀具、机床等方面, 是有一定的区别, 如表 1-1 所示。

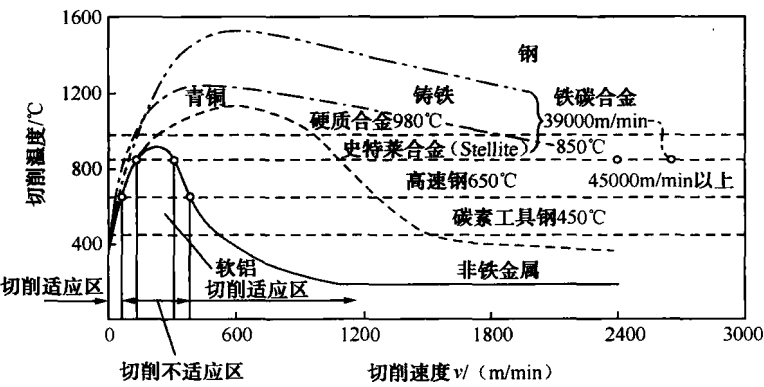


图 1-1 不同材料的切削速度与切削温度 HSM 曲线图

表 1-1 HSM 与普通数控加工的区别

比较因素	普通数控加工	HSM
n	一般不超过 6000r/min	约 10000r/min 以上
v_f	因不同工况而异，一般不超过 10m/min	30~100m/min
加工余量	$\leq R$ (R 为刀具半径)	$(0.1 \sim 0.2) R$
$F_{\text{切削力}}$	大	小
运动传递形式	轴、齿轮传动链	电主轴零传动
刀具材料	普通刀具材料	超硬刀具材料
加工表面质量	一般	较好 (R_a 可达 $0.4\mu\text{m}$)
加工时间	长	短
机床购置	普通机床 (国产的多)	高速切削机床 (进口的多)
机床价格	较低	较高
环境友好性	差 (有噪声、油污、烟尘等污染)	好 (可实现清洁生产)
NC 程序段	粗、半精、精加工和清根程序段等	粗、精加工程序段

1. HSM 的特点

1) 减少机加工时间，获得高的加工效率

高速加工采用高的切削速度和进给速度，使单位时间内金属切除量 Z_w ($Z_w = v \cdot f \cdot a_p$) 增大，生产效率得到提高。高速铣削一般只需进行粗、精加工，半精和清根加工则可省略，工艺方案可简化，机加工设备种类也有所减少。此外，高速

加工后的表面粗糙度已接近磨削加工的程度,因此可以用 HSM 来部分代替磨削。以某模具零件的加工为例,传统加工方法和高速加工的工艺路线如图 1-2 所示。

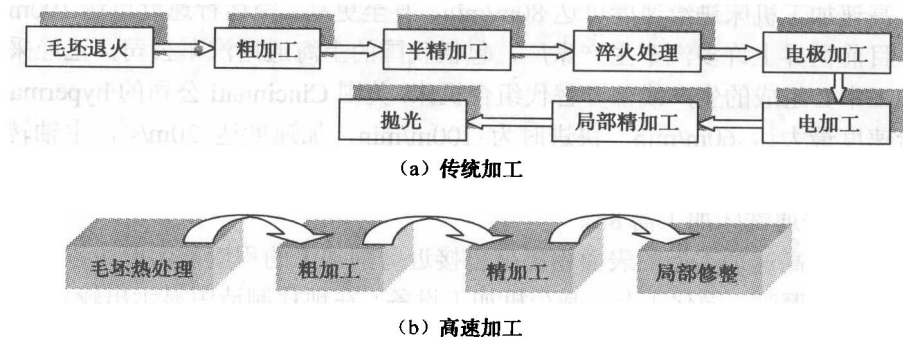


图 1-2 模具传统加工与 HSM 工序路线图

2) 获得高的加工精度和表面质量

(1) HSM 时由于 a_p 小, 对同样的切削层, 表现为切削力下降, 工件变形减小。

(2) 由于切削速度高, 对工件切削作用时间短, 大量的切削热来不及传导, 就随切屑排出, 切削温度下降; 工件的热变形小, 仅受一次热冲击, 工件表面损伤轻, 使得表面粗糙度降低, 可保持良好的表面机械性能, 呈压应力状态。

(3) HSM 时与主轴转速有关的激振频率远远高于工艺系统的固有频率, 对切削加工的不利因素如振动等被削弱。

3) 有利于薄壁件加工

在常规切削条件下, 由于切削力大, 工件易变形, 尤其是薄壁件变形更大。而 HSM 时, 随着切削速度的提高, 切削剪切区温度升高, 工件材料软化, 材料屈服强度降低, 使得单位切削力下降, 如图 1-3 所示, 利用这一特性可加工薄壁件, 且加工时间短, 工件变形小, 易保证加工质量。在航空工业上, 特别是铝的薄壁件加工目前已经可以切出厚度为 0.1mm 的成形曲面。

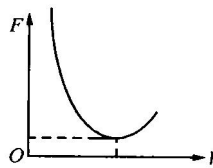


图 1-3 F - V 曲线

4) 属于环境友好型加工方式

在一些精密加工中, 如模具制造中, 型面加工多采用电加工, 由于电加工会产生一些有害的气体和烟雾, 生产效率也不高, 这同目前低能耗、与环境相协调的“绿色制造”的发展方向不相一致, 用高速铣削来代替特种加工是模具制造业的一个发展方向。HSM 可以获得较好的表面质量 (R_a 可达 $0.4\mu\text{m}$), 这不仅可省去电火花加工后的磨削、抛光等工序, 而且在工件表面上可形成压应力, 提高模具的寿命。

2. HSM 的应用

高速加工机床进给速度可达 80m/min ，甚至更高，空运行速度可达 100m/min 左右。目前世界上许多汽车生产厂家，包括我国的上海通用汽车公司，已经采用以高速加工中心组成的生产线部分替代组合机床。美国 Cincinnati 公司的 hypermach 机床进给速度最大达 60m/min ，快进时为 100m/min ，加速度达 20m/s^2 ，主轴转速已达 60000r/min 。加工一薄壁飞机零件，只用 30min ，而同样的零件在一般数控铣床加工需 3h ，在普通铣床加工需 8h 。

此外，高速加工后的表面粗糙度已接近磨削加工的程度，因此可以用高速切削来部分代替磨削，简化工艺，减少机加工设备，在现代制造中显示出较大的优越性。

1) 难加工材料的高速切削

难加工材料（如钛合金、高温合金、不锈钢及高强度合金钢等）在宇航和国防等领域的应用越来越广，但它们的切削加工性差，普通加工只能采用低速切削，制造和应用都受到限制；采用高速切削后，切削热大部分被切屑带走，工件温升不高，制造难度下降。

2) 重切削

大型或重型零件在切削加工时，普遍存在的问题是：切削深度大，切削力大，切削时间长，生产效率低。而在高速加工时，由于机床和刀具的性能都较好，且切削力下降。这对提高大型工矿设备的制造效率，有着重要的意义。以新日本工机（SNK）生产大型轧辊为例，采用高速加工后生产效率比普通加工提高了 5 倍。

3) 精密机械制造

在精密机械或光学仪器的制造中，尺寸精度、加工稳定性等往往要求较高。采用高速加工时激振频率很高，工作平稳，易获得较高的尺寸精度。日本研制的转速为 55000r/min 的超精密铣床，在微细加工方面，它的生产率和相对精度均超过了光刻技术。

此外，HSM 在干式切削、石墨电极的高速加工等方面都有着良好的应用前景。

1.1.2 HSM 的技术范畴

高速加工涉及的技术领域很宽，如图 1-4 所示。

(1) 高速切削机理研究。对高速切削过程中的各种物理现象以及被加工材料（尤其是难加工材料）的切削加工性进行研究。

(2) 高速机床的结构、性能研究。

① 高速主轴单元。对高速电主轴的结构、材料、支撑轴承的开发与研究；主轴

系统动态特性和热态性能研究；主轴端部与刀具连接技术研究、系统的润滑与冷却技术研究。

② 高速进给单元。研究加、减速控制技术、直线电动机及精密伺服系统；导轨、精密滚珠丝杠副及大导程丝杠副的研制、系统惯量与伺服电动机参数匹配关系的研究。

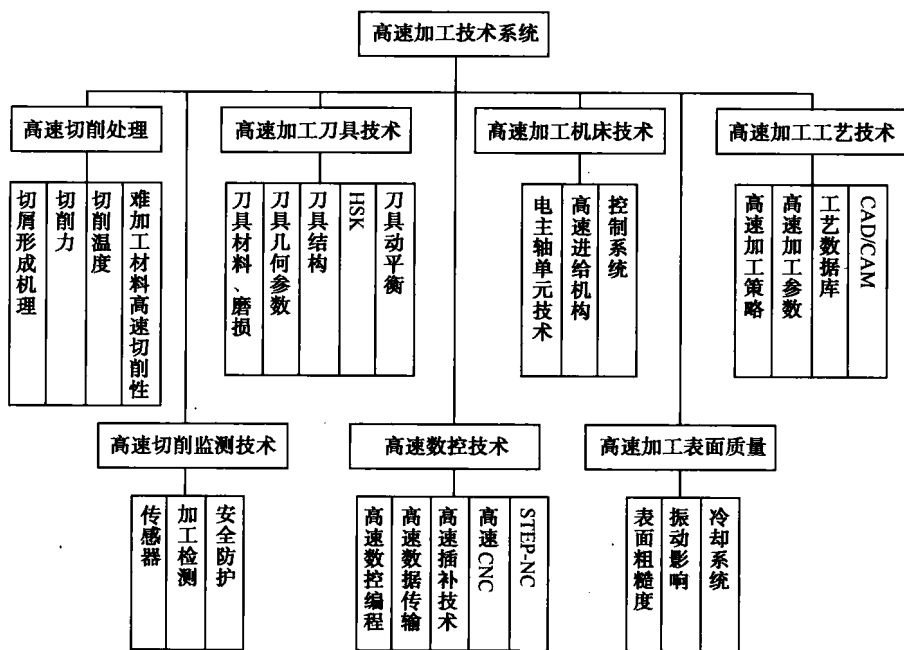


图 1-4 高速加工技术系统

(3) 高速加工刀具技术研究。研究适合高速加工的刀具材料、刀具的几何参数与结构、刀具与工件材料的匹配性；刀具磨损、HSK（Hole Short Kegel）刀柄等。

(4) 高速加工工艺技术研究。研究高速加工策略，加工参数的选择及优化，高速加工知识库及工艺数据库，CAD/CAM。

(5) 高速数控技术研究。研究刀具路径规划、高速插补技术、NC 编程、新型 CNC 系统、数据高速大容量传输技术、接口技术等。

(6) 高速加工检测技术研究。研究高速加工机床主轴单元、进给单元及其辅助单元的监测技术；对刀具的磨损、破损等进行在线监测研究。

(7) 高速加工表面质量。

1.1.3 HSM 的国内外研究现状

高速加工的理论最早是由德国的 Salomon 博士于 1931 年提出的。1981 年德国 Darmstadt 工业大学研制了高速主轴系统,随后德国发起了由 18 家企业和大学联合开发为期 4 年的高速加工研究。Darmstadt 工业大学的 H.Schulz 教授在高速切削机理和工艺方面进行了卓有成效的研究,促进了高速加工技术的应用。

20 世纪 90 年代,发达的工业国家相继投入到 HSM 的研究与开发中,1993 年直线电动机的研制成功拉开了高速进给的序幕,标志着 HSM 技术已从理论研究走向工业应用,HSM 已成为现代数控技术的重要发展方向之一。

1996 年芝加哥 IMTS'96(国际制造技术展览会)技术主题就是机床的“高速化”。1998 年芝加哥 IMTS'98 又增加了高速切削的刀具、刀夹系统等专题,CIRP 年会近年来一直把 HSM 理论与技术作为其主要内容之一进行研究。

国际上近年来在 HSM 方面开展的主要研究项目有:

(1) H.Schulz 教授领导开展的德国科学技术部资助项目,主要内容是对高速铣削机床及其主轴、刀具、HSM 工艺、效率与应用的研究。

(2) Komanduri 博士领导的美国先进加工研究计划 AMRP。

(3) 意大利 Levi 等人对 HSM 经济性的研究。

(4) 日本鸣泷则彦等在端面铣削方面进行的高速切削应用研究。

国内的 HSM 研究起步较晚,国内著名的北京国际机床展览会(CIMT'2001——CIMT'2007),HSM 机床是热点之一。目前国内 HSM 的研究多数集中在高校和研究所,还处于实验室研究阶段,有一部分也已进入了实际应用(如上海通用汽车有限公司高速铣削发动机箱盖、成都飞机制造公司加工起落架等)。近年来,我国对高速切削资助的研究集中在下列院所。

(1) 北京理工大学“高速切削机理研究与刀具研制”。

(2) 东北大学“高速切削技术的研究”。

(3) 广东工业大学“快速进给系统的研究”。

(4) 同济大学的“高速主轴系统的研究”、“水泥床身的研究”。

(5) 沈阳冶金建筑学院“全陶瓷轴承及磁悬浮轴承的研究”等。

在新型高速数控系统与技术方面,尤其是新的数控数据接口 STEP-NC 的研究较少。

国内主要机床生产厂家在引进、合作、吸收国外 HSM 先进技术的基础上,也设计开发了一些国产的 HSM 机床,国内 HSM 机床部分性能参数如表 1-2 所示。

表 1-2 国内 HSM 机床部分性能参数

机床生产厂家	机 床 型 号	$n_{\max}/(r/min)$	$v_f/(m/min)$	快进速度 (m/min)
沈阳机床股份有限公司 (与意大利合作)	DIGIT165 立式加工中心	40000	30	30
大连机床集团公司	DHSC500 卧式加工中心	18000	62	62
北京机床研究所 (与德国合作)	KT-1400VB 立式加工中心	15000	48	48
北京第一机床厂	HRA500 卧式加工中心	12000	45	45
北京机电研究院	VMC1250 立式加工中心	10000	48	48

机械科学研究院在 2000 年“机械制造业产品与技术发展预测”中阐述,在“十五”期间,高速加工到 2005 年基本上实现工业应用,在下列关键技术和研究工作上有所突破:

- (1) 高速切削、磨削机理研究。
- (2) 高速主轴单元制造技术研究。
- (3) 高速进给单元制造技术研究。
- (4) 高速加工的刀具、磨具及材料研究。
- (5) 高速加工测试技术研究。

1.2 高速切削机理

切削机理主要包括切削加工过程中发生的一些物理现象,如切屑的形成过程、切削力与切削温度的产生和分布规律、刀具磨损等。目前主要研究手段有理论分析、物理试验和计算机仿真。

1.2.1 有关 HSC 机理的三种学说

高速切削机理目前有三种学说,分述如下。

(1) 学说之一: Dr. Salomon 理论。如图 1-5 所示,在常规切削速度范围内(A 区),切削温度随切削速度的增加而升高。当切削速度增大到某一数值 v_e 之后,切削速度再增加,切削温度反而降低。 v_e 值与工件材料有关。对每种工件材料,存在一个速度区(B 区),在这个区域内,由于切削温度太高,任何刀具都无法承受,切削加工不可能进行,这个区称为“死谷”(Dead Vally),如果能超过这个“死谷”进入高速区(C 区),则切削速度再增加,切削温度可能反而下降,则有可能用现有的刀

具进行高速切削，大幅度地减少切削加工时间，提高生产率。

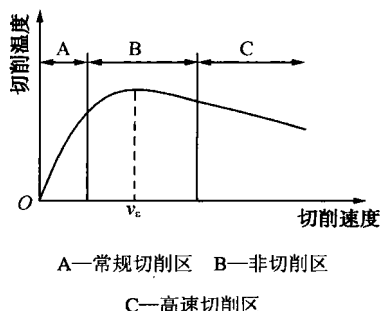


图 1-5 高速切削概念示意图

Dr. Salomon 还认为，“如果在低速切削区中某一切削速度 v_1 下会产生某一切削温度 θ ，那么把切削速度提高到高速切削区中的某个值 v_2 ，还会出现同样的切削温度 θ ”，这份德国专利 (No.523594) 标志着高速加工技术的诞生。

然而后来的学者和高速切削试验结果对 Salomon 假设提出了置疑。

(2) 学说之二。在高速切削铸铁、钢及难加工材料时，即使在很高的切削速度范围内也不存在上述的“死谷”，刀具耐用度总是随切削速度的增加而降低。然而有趣的是，在用硬质合金刀具高速铣削钢材时，尽管随切削速度 v 提高，切削温度随之升高，刀具磨损随之加剧，且 $T-v$ 规律仍遵循 Taylor 方程 $v=A/T^m$ 。但在高速区，Taylor 方程中的 m 值要大于较低速度区的 m 值，这意味着在高速区刀具耐用度 T 随 v 提高而下降的速率变缓。这一结论对高速切削加工技术的实际应用有重要意义。

(3) 学说之三。切削试验表明，与常规切削相比，高速加工切削力可降低 30% 左右，刀具耐用度可提高 70% 左右。美国于 20 世纪 70 年代前后用爆炸射击法实现的 1200m/s 的高速切削试验表明：在高速切削条件下切屑的形成过程和普通切削时不同，随着 v 的提高，塑性材料的切屑形态将从带状、片状到碎屑不断演变，单位切削力初期呈上升趋势，随后急剧下降，但还没有成熟的高速切削理论解释这些试验结果。

1.2.2 切屑形成机理分析

HSM 中切屑的形成过程，如图 1-6 所示。在图 1-6 (a) 的切削层前端区域，被切削的材料发生连续塑性变形，经过切削变形，刀刃前方的金属结构发生了变化，由于摩擦、切削作用和切屑内部的分离作用，在刀面和刀刃侧面产生了切削热。热量传导给刀具和工件、并通过切屑散发出去。当加工效率高时，一般生成热量的 70%~80% 会传给切屑并带走。

切削速度提高以后的切屑形成过程如图 1-6 (b) 所示。切削速度提高，将使摩擦、压力增加，从而使切屑以及刀具与工件的接触面间的温度升高。此时，接触面区域的温度就会升高到工件材料的熔点温度，切屑和切削面间接触区的高温会对切削区域起到回火的效果，这就降低了工件材料变形的阻力，相应就会引起切屑流动