

主 编 张伯霖
副主编 杨庆东 陈长年

高速切削技术及应用

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



● ISBN 7-111-10668-7/TG·1210

封面设计 / 电脑制作 : 姚毅

ISBN 7-111-10668-7



9 787111 106685 >

定价: 28.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号

联系电话: (010) 68326294

邮政编码: 100037

网址: <http://www.cmpbook.com>

E-mail: online@cmpbook.com

高速切削技术及应用

主 编 张伯霖
副主编 杨庆东 陈长年
主 审 刘又午

机 械 工 业 出 版 社

本书系统阐述了高速切削技术的基本理论、优点及应用技术;从实用出发,对不同类型高速机床的结构特点、高速电主轴系统、高速进给系统、高速数控系统、高速刀具系统和高速加工工艺等方面的关键技术做了比较全面的分析;介绍了高速数控机床及其关键元部件具有国际先进水平的一些著名产品,高速切削技术在国内外汽车、飞机、模具、轻工和信息等产业部门的应用实例;最后对开发新型高速机床及选购高速加工设备提出了一些意见与建议。

本书融理论性、信息性和实用性于一身,可供从事机械制造的技术人员、各级领导干部使用,供机床行业有关设计、制造和管理等方面的技术人员开发新产品时参考,也可供大专院校、科研院所的教师、研究生和科技人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高速切削技术及应用/张伯霖主编. —北京:机械工业出版社, 2002.8
ISBN 7-111-10668-7

I. 高… II. 张… III. 金属切削 IV. TG501

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 054189 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:杨民强 曾红 版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟

封面设计:姚毅 责任印制:闰焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·9.625 印张·372 千字

0 001—3 000 册

定价:28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

新华书店
PDG

人类社会进步的里程划方
不在于“生产什么”，而在于“用什么
生产工具和什么生产方式方法”。

近年来出现的“高速加工、高速切削”
就是一种生产工具和生产方式上的进步。

因此，从理论上进一步认识它和
实践中广泛验证，具有现实性和
前瞻性意义。

贺《高速切削技术及应用》一书出版。

梁训章。

原机械工业部机床工具局局长
原中国机床工具工业协会总干事长

我国是机床消费大国。采用先进制造技术及装备提升制造业，是中国机床工业的重要使命。

高速切削技术近年在世界范围内蓬勃发展。总结应用中的经验与问题，为用户提高应用技术水平和设备选型提供咨询服务，对发展经济具有重要意义。

祝贺《高速切削技术及应用》一书出版。

中国机床工具工业协会总干事长

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '于成连' (Yu Chenglin). The signature is written in a cursive, flowing style.

前 言

高速切削 (High Speed Cutting) 和高速加工 (High Speed Machining) 分别简称 HSC 和 HSM, 是近十年来迅速崛起的一项先进制造技术。由于高速切削技术使汽车、模具、飞机、轻工和信息等行业的生产率和制造质量显著提高, 加工工艺及装备更新换代, 因此如同数控技术一样, 高速切削和高速加工已成为 20 世纪机械制造业一场影响深远的技术革命。目前, 适应 HSC 要求的高速加工中心和其他高速数控机床在发达国家已呈普及趋势, 我国近来也在加快发展。同时, 它也是我国许多产业部门的进口热点。据初步统计, 最近几年这些进口高速机床的价值高达数亿美元。但目前理论研究大大滞后于市场要求, 造成有些高速机床选型不够科学, 设备安装后不会使用, 不能充分发挥其高速效能。发达国家各大汽车、飞机等公司及有关高等院校经常举办技术研讨会, 有些还设有高速切削研究与试验机构, 出版了很多专著。本书是我国高速切削技术方面的第一本专著。

本书系统阐述了高速切削的基本理论和应用技术, 包括高速切削机理产生的历史背景、高速切削机理、优点及系统的应用研究成果; 从实用出发, 对不同类型高速机床的结构特点、高速电主轴系统、高速进给系统、高速数控系统、高速刀具及其与机床的接口技术、高速加工工艺等关键技术做了比较全面的分析; 介绍了各类高速机床及其关键元部件具有国际先进水平的一些著名产品, 高速切削技术在国内外汽车、飞机、模具、轻工和信息等产业部门的应用实例; 最后对我国开发高速机床及选购高速加工设备提出了一些意见和建议。

本书由张伯霖、杨庆东、陈长年、周延佑、周凯、李佳特、黄祖尧、王科社等人合著。赵炳祯、李中行、赖建康和李雷等人协助了部分工作。全书由张伯霖任主编, 杨庆东、陈长年任副主编, 刘又午任主审, 于思

远、杜君文参与了审稿工作。陈长年为本书的编写提供了大量的资料和信息。作者们结合自己的研究成果和实践经验,参阅了国内外最新文献和专著,进行了广泛的用户和制造商调查,力求理论上具有前瞻性,信息量新鲜详实,并尽可能照顾到实用上的方便性。由于时间紧迫,加上作者水平有限,又是多人合写,因此在全书系统性和前后连贯性等方面还存在不少问题,有待进一步改进。望读者提出宝贵意见,供再版时修改和补充。

在本书编写过程中,作者们参阅和引用了国内外大量学术文献、技术资料、产品样本和试验报告等。有些正式出版的文献已在书后的参考文献中列出,供读者进一步研究高速加工技术时参考;在此还要特别感谢美国 Ingersoll 公司、Cincinnati 公司、Kennametal 公司,德国 DMG 公司,日本 Mazak 公司,瑞士 Mikron 公司和意大利 FPT 公司、JOBS 公司等。由于篇幅有限,有些未能一一列出文献和资料的作者和单位,在此一并表示衷心的感谢。

编 者

目 录

前言

第 1 章 高速切削概述	1
1.1 制造技术的发展和高速切削技术	1
1.2 高速切削技术的兴起和发展	4
1.3 高速切削的速度范围	8
1.4 高速切削的优点	11
1.5 高速切削的关键技术	12
1.6 高速切削技术的发展和展望	17
第 2 章 高速切削基础理论研究	20
2.1 高速切削基础理论研究的历史回顾	20
2.2 萨洛蒙高速切削假设和实验	23
2.3 从假设到现实——高速切削理论的早期研究	25
2.4 高速切削机理的研究和发展	26
第 3 章 高速切削机床和加工中心	32
3.1 高速加工对机床的特殊要求及零传动理论的提出	33
3.2 高速加工中心	35
3.3 其他高速切削机床	55
第 4 章 高速主轴系统和电主轴	61
4.1 概述	61
4.2 电主轴的基本参数与结构布局	63
4.3 电主轴的轴承	66
4.4 电主轴的电动机及其驱动模块	76
4.5 电主轴的性能参数	78
4.6 电主轴的支持技术和装置	83
4.7 电主轴的选用	86
4.8 国内外电主轴生产概况	88
第 5 章 高速机床的进给系统	94
5.1 概述	94
5.2 高速滚珠丝杠副传动系统	96
5.3 直线电动机进给驱动系统	98

5.4	基于并联机构的高速进给系统	104
5.5	高速进给系统设计和选用中的若干问题	105
5.6	国内外高速进给产品及应用简介	118
第6章	高速加工的工艺技术	122
6.1	各种材料的高速切削技术	122
6.2	高速硬质材料切削技术	129
6.3	高速钻、铰、攻螺纹和敏捷加工	137
6.4	高速干切削技术	140
第7章	高速切削刀具	150
7.1	高速切削对刀具的要求	150
7.2	高速切削刀具	153
7.3	高速刀具夹头及刀具装夹技术	168
7.4	高速切削刀具的其他技术	173
第8章	高速刀具与机床的接口技术	181
8.1	对高速刀具与机床主轴连接的基本要求和主要方法	181
8.2	HSK 刀柄的发展历史、结构和工作原理	185
8.3	HSK 刀柄的主要类型及其特点	188
8.4	KM 刀柄	191
8.5	其他高速刀柄	193
8.6	几种典型刀柄结构和性能的对比	198
8.7	刀具系统的不平衡现象及其计算方法	200
8.8	刀具系统的平衡方法	205
第9章	高速加工机床的控制系统	209
9.1	数控系统的组成和加工误差的产生	209
9.2	高速加工对数控系统的要求	213
9.3	高速加工的控制技术	214
9.4	典型的数控系统	224
9.5	高速加工的编程方法	232
9.6	高速数控系统的可靠性	236
9.7	远程诊断	237
9.8	高速机床数控系统的选用原则	238
第10章	高速切削的应用	239
10.1	我国高速切削应用实践中急待解决的若干问题	239
10.2	高速加工在汽车制造中的应用	241
10.3	高速切削在航空和航天工业中的应用	252

10.4	高速切削模具	259
10.5	高速切削技术在其他加工领域的应用	271
第 11 章	高速机床在我国的研究开发及选购	274
11.1	我国高速机床的发展现状	274
11.2	近年来我国高速切削机床的市场预测	278
11.3	“十五”期间我国高速切削机床的发展研究	280
11.4	选购进口高速切削机床应注意的事项	283
11.5	新世纪高速切削技术发展展望	285
参考文献		293

第 1 章 高速切削概述

1.1 制造技术的发展和高速切削技术

1.1.1 制造业和制造技术的发展

制造业是将制造资源通过制造过程转化为可供人们使用与利用的工业品与消费品的行业，它创造的财富占人类社会财富的 60%~80%，是国民经济的支柱产业。制造技术水平和设备制造能力的高低，是一个国家科技水平和综合国力的重要标志。

当前，全球经济正处于一个根本性的变革时期，人类社会正在由工业经济时代步入知识经济时代。在以高科技产业为主要支柱、以智力资源为主要依托的知识经济条件下，制造业正在发生革命性的变化，制造技术正在发生质的飞跃。世界上越来越多的人认识到制造业和制造技术发展的重要性。没有先进的制造业，无论哪一个产业都将失去存在和发展的条件，世界各国经济发展的历史也证明了这一点。20 世纪 70~80 年代，依靠制造业的迅速发展，日本的经济出现了举世瞩目的腾飞；瑞士经济以制造业为主体，人均产值高达 4 万多美元，居世界第一。美国经济发展的历史教训则是一个反面的典型：在 20 世纪 70~80 年代，受“第三次浪潮”的负面影响，制造业在美国曾经一度被忽视，甚至把制造业看成是“夕阳工业”，不重视继续投资及用高新技术来改造传统产业，以至使美国的汽车、钢铁、电子等支柱产业不但失去了大部分的国际市场，而且还丢掉了国内市场的很大份额，造成严重的经济衰退，引起美国国内朝野各界的强烈不满，纷纷要求政府调整经济政策，大力发展先进制造技术。美国制造工程师学会于 1993 年撰文呼吁全社会“重新发现制造业”，并用最简单的数字告诉美国人民：美国 1992 年的国民经济总产值和经济活动一大半是来源于制造业！其后，在美国克林顿总统时期，由于大力推动信息产业与传统产业相结合，重振了制造业的雄风，使美国经济连续八年保持高增长率，夺回了失去的国内外市场。

另一个反面的例子是东南亚经济危机。长期以来，东南亚许多国家只注意发展旅游、股票和房地产等产业，忽视制造业的发展，这种无根基的国民经济，是一种典型的“泡沫经济”，以至在发生经济危机时，整个国家的经济生活受到巨大的冲击，国民经济几乎滑到崩溃的边缘。而新加坡由于制造业基础较好，东南亚的经济危机对他们的冲击就小得多。

在信息技术飞速发展的今天,制造业仍然是国民经济的支柱。应该认识到,信息技术是手段,制造技术才是创造财富的基础。高技术、产业化,一点也离不开制造业。

在刚刚过去的 20 世纪,各国人民的生活发生了巨大的变化,出现了一大批改变人们物质生活和精神生活的机电产品,如汽车、磁悬浮列车、喷气式飞机、电冰箱、电影机、电视机、计算机、数控机床、机器人、人造卫星、航天飞机和宇宙飞船等等,这些无一不和制造业紧密相连。20 世纪是高科技的世纪,我们今天所具有的高生活水准,离不开先进的制造技术,而且在很大程度上要归功于先进制造技术的发展。

制造技术的发展速度是由社会、政治、经济等多方面的因素决定的。纵观近两百年制造业发展历程,影响其发展速度最主要的因素是技术的推动和市场的牵引。人类科学随着人类社会的不断进步,人类的需求不断增长并不断产生变化,市场的这种需求,也就从另一个方面刺激制造业的发展,促进制造技术的不断进步。

在制造技术中,伴随着信息技术的发展,一方面是发展了以数控机床为基础的加工自动化技术;另一方面,在加工工艺和加工方法上也发展了许多新工艺、新技术,比较典型的有高速加工技术、精密和超精密加工技术、高能束加工技术(激光、水射流、离子和电子等)以及虚拟制造技术等等。上述先进制造技术的发展,大幅度地提高了劳动生产率,改善了产品质量,降低了生产成本,为社会创造巨大的物质财富。

随着商品经济的发展,市场竞争越来越激烈,企业为了生存和发展,为了抢占更大的市场份额,要求加快产品的更新换代速度,减少新产品开发周期,这也是企业追求的一个目标,是制造技术领域要不断解决的新课题。

1.1.2 高速切削和提高生产率

在以前的几十年里,在机械加工技术的研究和发展上,主要精力集中在减少加工过程的辅助时间方面。众所周知,在数控机床出现以前,机械零件加工过程所花的时间,超过 70% 是辅助时间——用于零件的上下料、测量、换刀和调整机床等。以数控机床为基础的柔性制造自动化技术的发展与应用,大大降低了零件加工的辅助时间,极大地提高了生产率。因此可以说,以数控机床为基础的加工自动化技术,是现代制造技术中最为辉煌的成就之一。数控技术的发明和推广应用,是现代制造技术发展史上一块具有革命性意义的里程碑。随着数控机床的普及应用,机械加工的自动化程度大大提高。加工中心是数控机床进一步发展的产物,加工中心、柔性制造单元(FMC)和柔性制造系统(FMS)的应用,解决了自动换刀、自动装卸工件等问题,在更大的程度上提高了整个零件加工的自动化

水平。计算机集成制造系统 (CIMS) 和自动化工厂 (AF) 更使制造自动化技术达到空前的高峰。加工自动化技术在提高生产率的同时, 也大大提高了产品质量, 使企业获得显著效益。图 1-1 所示为三十年来零件加工切削时间和辅助时间的变化情况。

从提高生产率的角度看, 机床和生产过程自动化的实质, 归根到底, 是以加快空程动作的速度和提高零件生产过程的连续性, 从而缩短辅助工时为目的的一种技术手段。但是辅助动作速度的提高是有一定限度的。例如目前加工中心自动换刀时间已缩短到小于 1s, 快速空程速度一般已提高到 30~60m/min, 再提高空程速

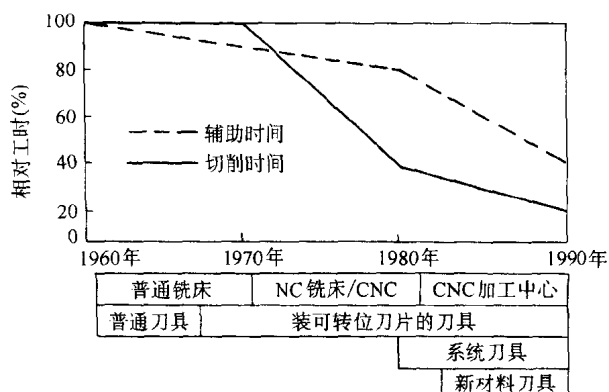


图 1-1 三十年来切削时间的变化

度不但技术上有困难, 经济上不合算, 而且对提高机床的生产率意义也不大。

由于加工零件的辅助时间大幅度降低, 在机械零件加工的总工时中, 切削所占的时间比例就变得越来越来。因此, 要想进一步提高机床的生产率, 除了优化生产工艺外, 只能从减少切削时间上做文章。也就是说, 矛盾的主要方面已经转向切削工时方面。只有大幅度地降低切削工时, 才有可能在提高机床生产率方面出现又一次新的飞跃。降低切削工时就意味着要提高切削速度, 包括提高主轴转速和进给速度。这就是近十几年来高速切削技术得以迅速发展的历史背景。

由图 1-1 可见, 1960~1980 年, 由于数控机床和加工中心的大力发展, 零件加工的辅助工时迅速下降; 而 20 世纪 70 年代以来, 由于高速切削技术的逐渐推广应用, 零件加工中的切削工时开始呈现较大幅度的下降。

在机械制造业中, 用提高加工速度的方法来提高生产率是人们一直向往的目标。但是, 为什么到近十年来才被突出地提出来呢? 这是因为在提高切削速度这个问题上, 长期以来遇到了很大的理论障碍和技术障碍。根据我们以往对切削机理的认识, 随着切削速度的提高, 切削热增加, 刀具的磨损加剧。因此, 切削刀具的承受能力, 使切削速度的提高受到限制。另一方面, 随着切削速度的提高, 机床的发热、振动以及动平衡等问题都是要研究解决的技术难题。没有性能优良的高速机床, 提高切削速度也只是一句空话。

解决高速切削面临的问题, 关键要依靠高速切削机理研究的突破。也就是说, 首先要从切削机理上解决高速切削成为现实的可能性的问题, 然后要确定不同材料高速切削的速度范围。

随着上述一系列理论问题和应用问题的突破,高速切削已经从希望逐渐变成了现实。随着研究工作的深入,近十多年来,高速切削技术有了很大的发展,目前正在迅速地普及和推广应用。高速切削技术已成为当今先进制造技术的一个重要的发展方向。

1.2 高速切削技术的兴起和发展

高速切削是指在比常规切削速度高出很多的速度下进行的切削加工,因此,有时也称为超高速切削(Ultra-High Speed Machining)。

高速切削的起源可追溯到20世纪20年代末期。德国的切削物理学家萨洛蒙(Carl Salomon)博士于1929年进行了超高速模拟实验。1931年4月发表了著名的超高速切削理论,提出了高速切削假设。萨洛蒙指出:在常规的切削速度范围内,切削温度随着切削速度的增大而提高。对于每一种工件材料,存在一个速度范围,在这个速度范围内,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。但是,当切削速度再增大,超过这个速度范围以后,切削温度反而降低。同时,切削力也会大幅度下降。按照他的假设,在具有一定速度的高速区进行切削加工,会有比较低的切削温度和比较小的切削力,不仅有可能用现有的刀具进行超高速切削,从而大幅度地减少切削时间,成倍地提高机床的生产率,而且还将给切削过程带来一系列的优良特性。

美国于1960年前后开始进行超高速切削试验。试验采用了将刀具装在加农炮里,从滑台上射向工件;或将工件当作子弹射向固定的刀具。试验指出,在超高速切削的条件下,切屑的形成过程和普通切削不同。随着切削速度的提高,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,尔后急剧下降。这些现象说明,在超高速切削条件下,材料的切削机理将发生变化,切削过程变得比常规切速下容易和轻松。

在证实和应用萨洛蒙理论方面,美国科技界和工业界做了许多领先的工作。1977年美国在一台带有高频电主轴的加工中心上进行超高速切削试验,其主轴转速可在1800~18000r/min范围内无级变速,工作台的最大进给速度为7.6m/min。试验结果表明,与传统的铣削相比,其材料切除率增加了2~3倍,主切削力减小了70%,而加工的表面质量明显提高。

受萨洛蒙理论的启发,美国空军和Lockheed飞机公司首先研究了用于轻合金材料的超高速铣削。1979年美国防卫高技术研究总署(DARPA)发起了一项“先进加工研究计划”(Advanced Machining Research Program),研究切削速度比塑性波还要快的超高速切削,为快速切除金属材料提供科学依据。经过四年的努力,获得了丰硕的成果。研究指出:随着切削速度的提高,切削力下降,加工表

面质量提高。刀具磨损主要取决于刀具材料的导热性，并确定铝合金的最佳切削速度范围是 1500~4500m/min。

在德国，超高速切削得到了国家研究技术部的鼎力支持。1984 年该部拨款 1160 万马克，组织了以 Darmstadt 工业大学的生产工程与机床研究所 (PTW) 为首的、有 41 家公司参加的两项联合研究计划，全面而系统地研究了超高速切削机床、刀具、控制系统以及相关的工艺技术，分别对各种工件材料（钢、铸铁、特殊合金、铝合金、铝镁铸造合金、铜合金和纤维增强塑料等）的超高速切削性能进行了深入的研究与试验，取得了国际公认的高水平研究成果，并在德国工厂广泛应用，获得了好的经济效益。

日本于 20 世纪 60 年代就着手超高速切削机理的研究。日本学者发现，在超高速切削时，切削热的绝大部分被切屑迅速带走，工件基本保持冷态，其切屑要比常规切屑热得多。日本工业界善于吸取各国的研究成果并及时应用到新产品开发中去，尤其在超高速切削机床的研究和开发方面后来居上，现已跃居世界领先地位。进入 20 世纪 90 年代以来，以松浦、牧野、马扎克和新泻铁工等公司为代表的一批机床制造厂，陆续向市场推出不少超高速加工中心和数控铣床，日本厂商现已成为世界上超高速机床的主要提供者。

法国、瑞士、英国、前苏联、意大利和澳大利亚等国在超高速切削方面也做了不少工作。表 1-1 列出近年来国际市场出现的高速加工中心部分著名品牌。

表 1-1 高速加工中心

制造厂家 (国别)	机床名称 和型号	主轴最高转速 /(r/min)	最大进给速度 /(m/min)	主轴驱动功率 /kW
Cincinnati Milacron (美)	HyperMach 五轴加工中心	60 000	60~100	80
Ingersoll (美)	HVM800 型 卧式加工中心	20 000	76.2	45
Mikron (瑞士)	VCP710 型 加工中心	42 000	30	14
Ex-cell-O 公司 (德)	XHC241 型 卧式加工中心	24 000	120	40
Roders (德)	RFM 1000 型 加工中心	42 000	30	30
Mazak (日)	SMM-2500UHS 型加工中心	50 000	50	45
Nigata (日)	VZ40 型 加工中心	50 000	20	18.5
Makino (日)	A55-A128 型 加工中心	40 000	50	22

高速切削技术的发展和运用,受到学术界和工业界极大重视。1995 和 1996 年的国际生产工程研究学会(CIRP)学术年会均以“超高速切削”为主题。1997 年以来,每两年在欧洲也举行高速加工的专题学术讨论会,广泛交流高速加工技术领域的研究和运用成果,探讨存在的问题及其解决办法。日本尖端技术研究学会把超高速切削列为五大现代制造技术之一。

近年来,在高速切削机床的单元技术方面的研究也取得了很大的成功。由于高强度、高熔点刀具材料和超高速电主轴的研制成功,用于高速进给的直线电动机伺服驱动系统的运用以及高速机床的其他配套技术的日益完善,为高速切削技术的普及运用创造了良好的条件。现在,高速切削技术已经进入工业运用阶段。

1994 年,德国汉诺威欧洲国际机床博览会(EMO-94)开始展出为数不多的高速数控机床,但却引起了国际机床界的广泛注意,世界各大机床厂纷纷把开发高速数控机床作为其主要方向。事隔三年,1997 年的德国汉诺威欧洲国际机床博览会(EMO-97)上,展出高速、超高速电主轴功能部件的厂商就有 36 家,滚珠丝杠副有 23 家厂商,直线导轨副有 33 家厂商。高速数控机床逐渐成为主流产品,大有独领机床市场风骚之势。

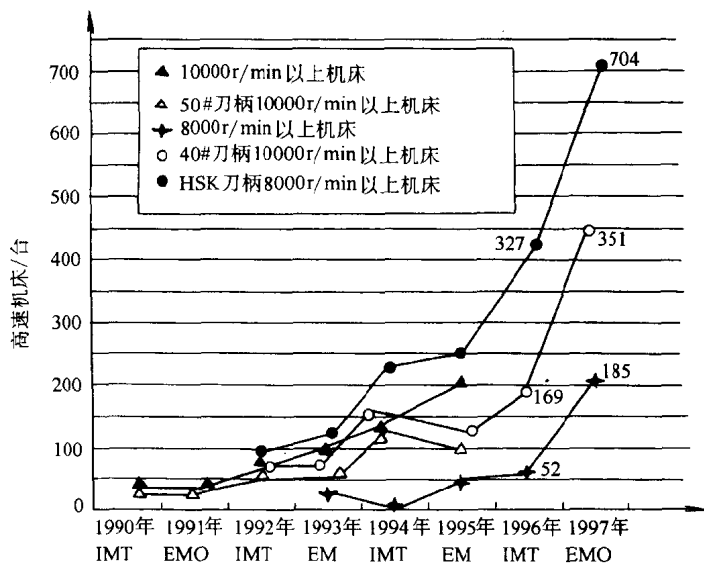


图 1-2 七次国际机床展览会高速机床的调查统计情况

美国肯纳金属公司(Kennametal)考察和统计了1990~1997年期间国际机床展览会的情况,包括两年一度在美国芝加哥举行的国际制造技术博览会(IMTS)和欧洲国际机床博览会(EMO),分析了七次展览会上高速机床的展出情况(见图1-2)。由图可见,1990年以前,还很少看到高速机床,1990年和1991年是高速机床的起点,1992年大幅度增长,1993年和1994年连续增长并逐渐形成趋势。1995年