

WMEM

世界制造技术与装备市场

World Manufacturing Engineering & Market

No.1 2022
2022年2月
February 2022

主管: 中国机械工业联合会
主办: 中国机床工具工业协会
地址: 北京市西城区莲花池东路102号
天莲大厦16层
邮政编码: 100055
电话: (010) 63345259
电子邮箱: wmem@cmtba.org.cn

出版: 中国机床工具工业协会
《组合机床与自动化加工技术》杂志社

主任: 毛子锋
副主任: 王黎明 郭长城 王旭

编委:
于成廷 吴柏林 张志刚 李忠波 何敏佳 张世顺
蔚飞 严鉴铂 黄正华 刘德永 陈焱 张波
冷志斌 陈虎 汪爱清 王焕卫 芦华 吴强
唐毅 陈吉红 杜琢玉 王本善 赵延军 王社权
姜华 商宏谟 安丰收 邓家科 穆东辉 于建华

特邀编委(各分会秘书长26人):
吴俊勇 邹春生 刘春时 房小艳 周慧 胡春美
陈瑞雷 李升 王珏 卢智良 刘庆乐 查国兵
陈鹏 崔瑞奇 边海燕 王兴麟 何培彦 张新龙
肖明 叶永生 武平 陈远东 孙兆达 李鸿基
王丽娜 陈长江

总编辑: 李华翔
责任编辑: 梅峰
国际标准代号: ISSN 1015-4809
国内统一刊号: CN 11-5137/TH
国内发行: 北京报刊发行局
订阅处: 全国各地邮局
邮发代号: 80-121

广告代理: 台湾总代理-宗久实业有限公司
地址: 台湾省台中市南屯区文心路一段540号11F-B
电话: +886 4 23251784
传真: +886 4 23252967
电子邮箱: Jessie@acw.com.tw
广告负责人: 吴佩青(Jessie)

承印: 北京久佳印刷有限责任公司

零售价: 中国内地RMB10.-
中国香港HK\$70.-
其他地区US\$10.-



《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》(理工C辑)、《中文科技期刊数据库(全文版)》全文收录期刊、万方数据-数字化期刊群之中国核心期刊数据库引文期刊。

目录 CONTENTS

2022年第1期(总第178期)

WMEM世界制造技术与装备市场

新年寄语 New Year's Greetings

- 12 保持战略定力, 奋发有为开创改革发展新格局 李忠波
Maintain strategic determination and strive to create a new pattern of reform and development.
- 13 夯实基础, 协同创新, 推进行业高质量发展 机床协会
Lay a solid foundation, cooperate in innovation, and promote the high-quality development of the industry.

资讯 News

- 15 2021年中国机床工具行业要闻回顾 机床协会
Review of key news of China's machine tool industry in 2021.

特别报道 Special Report

- 17 中国机床工具工业协会召开第九次会员代表大会选举产生第九届理事会
Report on the 9th Congress of CMTBA

本刊专访 Interview

- 20 产学研合作正在路上
——访北京工业大学机电学院范晋伟教授 李华翔 黄绍娟
Interview with Professor Fan Jinwei, School of Mechanical and Electrical Engineering, BJUT

专题综述 Topical Review

- 22 滚动功能部件成套评测方法与装备及性能提升关键技术 欧屹
A complete set of evaluation methods & equipments for rolling functional components and key technologies for performance improvement
- 28 齿轮精密制造关键工艺、机床及数控系统 韩江等
Key processes, machine tools and numerical control systems for precision gear manufacturing

产业政策 Industrial Policy

- 32 《“十四五”智能制造发展规划》政策解读
Policy Interpretation of the "14th Five-Year Plan for Intelligent Manufacturing Development"

产销市场 Production & Market

- 36 2022年机床工具行业走势研判 机床协会
Research and Judgment of Machine Tool Industry Trends in 2022

齿轮精密制造关键工艺、机床及数控系统

合肥工业大学现代集成制造与数控装备研究所 韩江 田晓青 夏链 李光辉 蒋泓

【摘要】介绍了圆柱齿轮数控加工主要工艺方法、装备及特点。阐述了齿轮精加工两种主要加工技术——磨齿和强力珩齿，重点介绍合肥工业大学现代集成制造与数控装备（CIMS）研究所在该领域主要研究工作进展。针对齿轮机床数控系统关键技术及发展，着重介绍了CIMS研究所的主要研究工作和取得的成果。展望了齿轮数控机床未来发展。

齿轮是机械系统的关键基础零部件之一，在汽车、工程机械、机器人、航空航天、能源装备、国防等领域发挥着重要的作用。齿轮被广泛应用于各类机器，在不同构件之间实现动力的传递，齿轮的加工质量直接影响其实际工作状况，包括传动精度、振动噪声、疲劳寿命等。因此，对齿轮的加工效率和精度的要求也越来越高。齿轮数控机床是实现齿轮高速高精加工的重要工艺手段和装备，对提高齿轮加工质量和效率具有十分重要的作用，而高性能的齿轮机床数控系统是实现高速高精度齿轮加工的核心。本文主要针对圆柱齿轮的加工开展介绍。

一、齿轮制造工艺与装备

通常的齿轮加工工艺流程中，齿坯经过滚、插、车、剃等加工，以及热处理后为了消除存留的齿形误差而进行的以磨齿、强力珩齿为主的精加工。图1为齿轮加工主要工艺流程图。

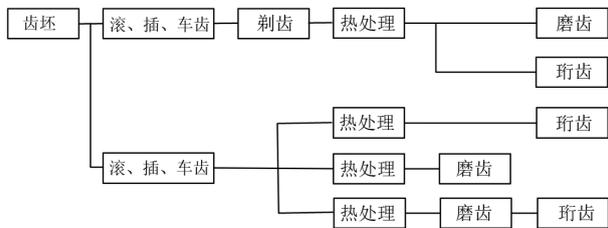


图1 齿轮加工工艺

滚齿是齿轮加工中生产率较高、应用最广的加工方法之一，滚齿工艺既能够加工圆柱齿轮，也可加工蜗轮及其他类型齿轮，且可以获得较高运动精度，但相对表面粗糙度较差。插齿加工齿形精度和粗糙度较好，但齿轮运动精度较差，插齿主要适用于齿轮的内齿加工以及一些受结构干涉的外齿加工。车齿主要利用齿轮型刀具与工件之间进行强制啮合，按空间展成法切制齿轮齿面，具有材料去除率高、成形精度好等优点，近期应用和发展较快。三种加工方法如图2、图3和图4所示。上述数控加工机床国外著名厂家有：美国的格里森（Gleason）公司、德国的利勃海尔（Liebherr）公司、日本的三菱重工公司等；国内著名厂家有：重庆机床（集团）公司、秦川机床股份公司、南京二机齿轮机床公司、天津第一机床总厂公司等。



图2 滚齿加工



图3 插齿加工



图4 车齿加工

磨齿是利用砂轮对齿轮的轮齿进行磨削加工的方法，是齿形加工中精度最高的一种方法，如图5所示，适用于精加工淬火后硬度较高的齿轮，其加工精度高、技术要求高、价格昂贵，应用广泛。国际上著名厂家如瑞士莱斯豪尔（Reishauer）公司和Oerlilion-Maag公司、德国卡帕（Kapp-Niles）集团等。国内著名厂家有：秦川机床股份公司、重庆机床（集团）公司、南京二机齿轮机床公司等。近些年来，在国家科技重大专项（高档数控机床与基础制造装备）的支持下，国产数控磨齿机取得了长足发展，但高档磨齿机的技术水平与国际著名厂家差距依然较大，高档数控磨齿机市场被国际著名厂家占据较大份额，国内每年进口大量高档磨齿机。

强力珩齿是通过珩磨轮与被珩齿轮做啮合运动，利用其齿面间的相对滑动速度和压力来进行珩削的一种齿面精加工方法，其独有的人字交错齿面纹理使其传动噪声小，被越来越多的应用到齿轮精加工当中，如图6所示。国外著名企业包括：美国格里森（Gleason）、瑞士法斯勒（Fassler）（已被美国格里森兼并）、德国的普拉威马（Praewema）等。国内目前还没有市场应用的内啮合强力珩齿机床产品，市场被国外著名厂家垄断。



图5 磨齿加工

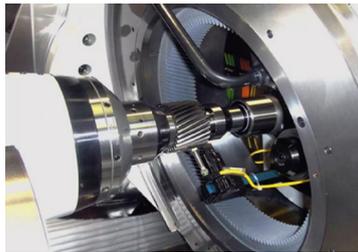


图6 珩齿加工

在国家重大科技专项（高档数控机床与基础制造装备）支持下，南京二机齿轮机床公司与合肥工业大学CIMS研究所产学研合作，成功研制开发了Y4830CNC型数控内齿珩轮强力珩齿机（如图7所示），项目通过了国家验收，目前该机床正处于试切加工调试阶段，不久将推向市场。Y4830CNC型机床的自主研发成功是一次重大突破，填补了我国在相关技术方面的空白。



图7 Y4830CNC型数控内齿珩轮强力珩齿机

从上可以看出，作为机床领域的高档数控磨齿机、数控强力珩齿机基本被国外著名企业所垄断，急需国家给予高度重视和支持，国内厂家任重道远。

二、磨齿加工工艺关键技术

磨齿是当今齿轮精加工的主要工艺，它可以可靠有效地加工硬齿面齿轮，修正热处理产生的变形和粗加工的各项误差，提高加工精度。面向齿轮的磨削工艺按切削运动原理分为展成磨削和成形磨削两大类。由加工过程的连续性和非连续性特征，可以对磨齿工艺进行更加细致的分类，例如碟形砂轮磨削、蜗杆砂轮磨削、珩磨、成形砂轮磨削和环面蜗杆砂轮磨削。

成形磨齿的磨削过程是将工件的一个或多个齿侧面磨削完成后，再对未磨削齿侧面进行精加工。由于砂轮与齿轮工件之间线接触的特性，其在加工过程中可以实现高材料去除率，成形砂轮磨齿机常用于加工内齿和大规模外齿圆柱齿轮。蜗杆砂轮磨齿机属于连续展成磨削，其磨削过程可以看作一个螺旋角很大的齿轮与工件相啮合，由于蜗杆砂轮沿工件轴向的进给运动是必要的，因此工件的任一齿侧面在磨削结束前都未完全磨削，其具有加工精度高、表面粗糙度好及加工经济高效等优势，被广泛应用于齿轮的精加工当中。蜗杆砂轮磨削带齿向修形的斜齿轮时，会出现齿面扭曲，降低齿面精度和齿轮的传动性能，因此需要补偿齿面扭曲，传统方法通过修整砂轮实现扭曲补偿。合肥工业大学CIMS研究所研究了基于柔性电子齿轮箱的齿面扭曲补偿技术，如图8所示，通过补偿电子齿轮箱主从动轴附加运动量，实现补偿齿面扭曲的补偿。由于齿面接触应力的影响而产生的弹性变形、加工误差和装配误差以及齿轮刚性周期变化的影响，齿轮工作时的实际啮合点会偏离理论啮合点，从而产生振动和噪声，对齿面进行修形是降低齿轮传动时振动和噪声的有效办法，还可以改善齿面啮合状态，提高齿轮副传动系统的传动性能。通常蜗杆砂轮磨齿机加工修形齿轮采用的思路是，建立齿轮型金刚轮/齿条型金刚轮-砂轮-工件的数学模型，根据齿面共轭理论可由双参数形式曲面上的点计算各轴转角和移动距离，蜗杆砂轮必须沿工件轴线全行程移动才能完成工件所有齿面的磨削，而工件某一齿面上的转动轴和移动轴位置并不是随时间连续变化的，因此我们提出一种考虑接触迹线的蜗杆砂轮磨削齿面修形方法，采用标准金刚轮和标准蜗杆砂轮对工件修形，最终利用高阶修正技术实现目标齿面修形。

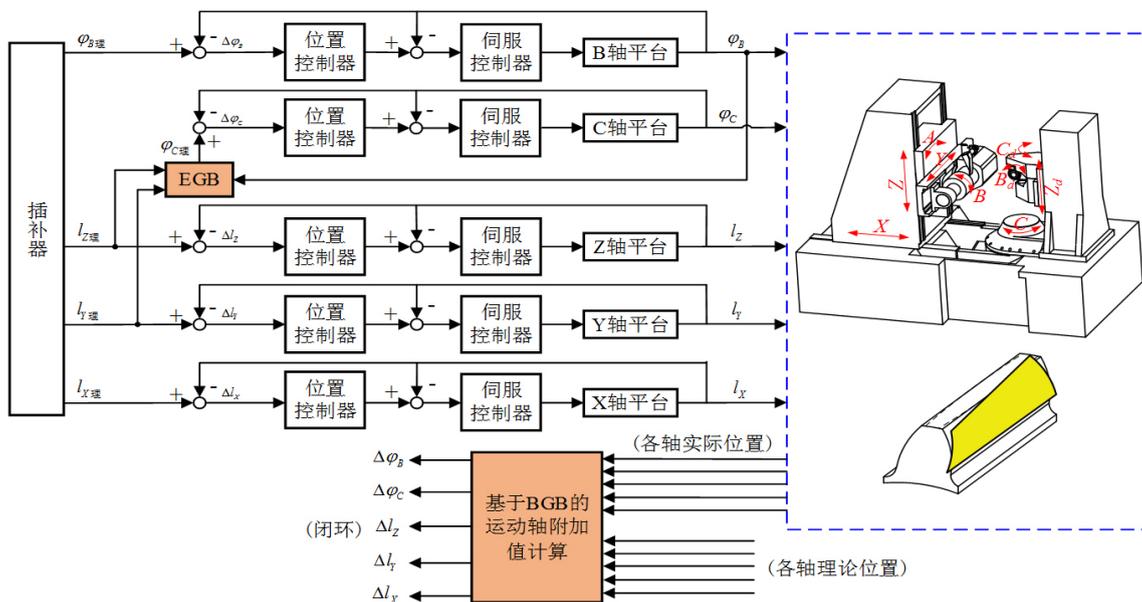


图8 基于柔性电子齿轮箱的齿面扭曲补偿技术

在国家金属切削机床标准化总会（SAC/TC22）领导下，合肥工业大学CIMS研究所，会同重庆机床（集团）公司、秦川机床股份公司、通用技术集团机床工程研究院等，提出国际标准ISO/PWI 5701《磨齿机精度检验》的提案申请和草案拟定研究，团队分别在ISO TC39/SC2的第86次-90次国际会议上做新国际标准提案的技术及阶段进展汇报，目前已通过PWI阶段投票。

三、强力珩齿加工工艺关键技术

强力珩齿是由珩磨轮表面磨粒对工件齿面的压力和相对滑动而对材料余量进行去除的一种齿轮精加工方式。内啮合强力珩齿珩削精度相对较高，在珩削过程中珩磨轮速度低，同时拥有较强的误差修正能力和较高的珩削精度。与磨齿相比，珩齿在保证齿形精度的同时，具有更高的经济性，而且能使被加工齿轮具有低噪音的光滑表面。尤其是新能源汽车动力传动齿轮高速低噪声要求，采用内啮合强力珩齿工艺具有独有的优势，因而得到广泛的推广应用。但目前国内对内啮合强力珩齿工艺加工技术掌握基本

是空白，与国外差距很大。

在国家自然科学基金和国家重大科技专项等项目支持下，合肥工业大学CIMS研究所开展了数控内齿珩轮强力珩齿机理和基于电子齿轮箱的内啮合强力珩齿柔性修形与精度控制技术研究。基于空间曲面共轭啮合理论，建立了内齿珩磨轮齿面和工件齿面的瞬时接触线和工件齿面珩削纹路的三维可视化模型；提出了一种变轴交角修整珩磨轮的工艺策略，在珩磨轮每次修整时，轴交角作为珩磨轮径向修正量的函数不断的变化，该工艺可以保证齿型形状、接触状况、受力状态几乎保持不变，同时大幅提高珩磨轮可修整次数。通过对内齿珩轮强力珩齿啮合磨削运动学和力学特性的分析，根据粗糙度与齿面波纹高度的关系分别建立沿齿形和齿向方向的工件齿面粗糙度模型，分析了轴交角的变化对粗糙度所造成的影响。通过对数控内齿珩轮强力珩齿工艺中各项主要的珩齿工艺参数输入因素和各项主要的齿面轮廓误差的分析，建立各项齿面轮廓误差的预测模型，对内齿珩轮强力珩齿工艺参数进行优化选择。以珩磨轮与工件间轴交角与中心距为控制参数，提出一种对珩削工件齿面纹理的分布情况及纹理变化趋势的控制方法，如图9所示。

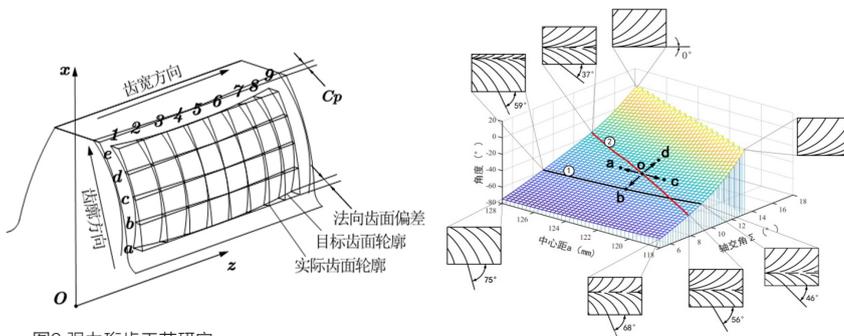
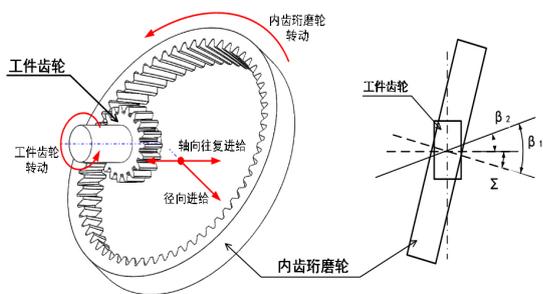


图9 强力珩齿工艺研究

四、齿轮加工机床数控系统

数控系统是高档齿轮加工机床的核心，由于齿轮数控加工工艺复杂、精度及稳定性要求高、独有的电子齿轮箱多轴高精度控制等技术难点，国外高档齿轮机床数控系统如西门子840D数控系统处于产品与技术垄断地位，我国市场批量化自主知识产权高档齿轮机床数控系统基本是空白。

合肥工业大学CIMS研究所从上个世纪80年代后期开始，在国内较早地开展了齿轮数控系统的研制和开发工作，提出了全功能的齿轮机床数控系统结构，基于软件插补的方式实现齿轮加工过程中工件回转、径向、轴向、切向运动多轴对刀具主轴的跟踪运动控制，实现了电子齿轮箱功能，成功研制了STAR系列齿轮加工机床数控系统，实现了流量计用非圆齿轮铣齿、插齿和滚齿机配套加工，取得了显著经济社会效益。特别是在国家重大科技专项（高档数控机床与基础制造装备）支持下，合肥工业大学CIMS研究所与广州数控设备有限公司产学研紧密合作，成功研发了自主知识产权的第一代齿轮机床（滚齿、铣齿、插齿）专用数控系统GSK25iG并实现产业化推广应用，填补国内空白；与重庆机床（集团）公司生产的YK5132B 数控插齿机（见图11）、浙江佳雪机床有限公司生产的YGS3610(B)CNC六轴数控滚齿机（见图12）等配套，并完成批量加工和检测，验证了所研发数控系统具有较高的功能性能指标、精度和可靠性，达到了日本FANUC 31i数控系统水平。系统开展了齿轮机床数控系统关键技术研究，提出和发明了柔性电子齿轮箱，并获批国家发明专利和美国发明专利，研发齿轮数控机床加工综合误差在线估测和补偿技术。



图11 YK5132B数控插齿机



图12 YGS3610(B)CNC数控滚齿机



图10 YS3118CNC5数控滚齿机

五、结束语

我国在齿轮精密制造关键工艺技术、高端齿轮加工机床及数控系统方面已取得很大的进展和成绩，但对标国际先进水平，我们仍有很大的差距。随着新能源汽车动力传动、航空航天、高铁传动、机器人等领域高速、高精度、低噪声、长寿命齿轮的广泛应用的更高需求，热处理前车齿工艺应用快速发展，热处理后强力珩齿应用将越来越多，磨齿与强力珩齿的协同工艺应用将很普遍，对高档齿轮机床及数控系统的智能化等提出更高要求。新一代智能齿轮数控机床及数控系统必将是信息技术、智能技术与制造控制技术的深度融合，朝着高速、高效、高精度及智能化、复合化、绿色化等方向不断发展。□