

中国好设计 丛书

“中国好设计”丛书编委会 主编

中国好设计

CHINA GOOD DESIGN

制造装备创新设计案例研究

谭建荣 张树有 徐敬华 编著



 中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

“中国好设计”丛书得到中国工程院重大咨询项目

“创新设计发展战略研究”支持

中国好设计



中国好设计 丛书

“中国好设计”丛书编委会 主编

制造装备创新设计案例研究



谭建荣 张树有 徐敬华 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

中国好设计：制造装备创新设计案例研究 / 谭建荣，
张树有，徐敬华编著. — 北京：中国科学技术出版社，
2016.1

(中国好设计)

ISBN 978-7-5046-6865-3

I. ①中… II. ①谭… ②张… ③徐… III. ①机械制
造—工艺装备—设计—案例 IV. ① TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 005824 号

策划编辑	吕建华 赵 晖 高立波
责任编辑	高立波
封面设计	天津大学工业设计创新中心
版式设计	中文天地
责任校对	杨京华
责任印制	张建农

出 版	中国科学技术出版社
发 行	中国科学技术出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62103130
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	150千字
印 张	9
版 次	2016 年9月第1版
印 次	2016 年9月第1次印刷
印 刷	北京市凯鑫彩色印刷有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-6865-3 / TH·63
定 价	56.00元

(凡购买本社图书，如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责调换)

总序

自 2013 年 8 月中国工程院重大咨询项目“创新设计发展战略研究”启动以来，项目组开展了广泛深入的调查研究。在近 20 位院士、100 多位专家共同努力下，咨询项目取得了积极进展，研究成果已引起政府的高度重视和企业与社会的广泛关注。“提高创新设计能力”已经被作为提高我国制造业创新能力的重要举措列入《中国制造 2025》。

当前，我国经济已经进入由要素驱动向创新驱动转变，由注重增长速度向注重发展质量和效益转变的新常态。“十三五”是我国实施创新驱动发展战略，推动产业转型升级，打造经济升级版的关键时期。我国虽已成为全球第一制造大国，但企业设计创新能力依然薄弱，缺少自主创新的基础核心技术和重大系统集成创新，严重制约着我国制造业转型升级、由大变强。

项目组研究认为，大力发展以绿色低碳、网络智能、超常融合、共创分享为特征的创新设计，将全面提升中国制造和经济发展的国际竞争力和可持续发展能力，提升中国制造在全球价值链的分工地位，将有力推动中国制造向中国创造转变、中国速度向中国质量转变、中国产品向中国品牌转变。政产学研、媒用金等社会各个方面，都要充分认知、不断深化、高度重视创新设计的价值和时代特征，

共同努力提升创新设计能力、培育创新设计文化、培养凝聚创新设计人才。

好的设计可以为企业赢得竞争优势，创造经济、社会、生态、文化和品牌价值，创造新的市场、新的业态，改变产业与市场格局。“中国好设计”丛书作为“创新设计发展战略研究”项目的成果之一，旨在通过选编具有“创新设计”趋势和特征的典型案例，展示创新设计在产品创意设计、工艺技术创新、管理服务创新以及经营业态创新等方面的价值实现，为政府、行业和企业提供启迪和示范，为促进政产学研、媒用金协力推动提升创新设计能力，促进创新驱动发展，实现产业转型升级，推进大众创业、万众创新发挥积极作用。希望越来越多的专家学者和业界人士致力于创新设计的研究探索，致力于在更广泛的领域中实践、支持和投身创新设计，共同谱写中国设计、中国创造的新篇章！是为序。



2015年7月28日

前言

装备制造业为国民经济和国防建设提供生产技术装备，是制造业的核心组成部分，是国民经济发展特别是工业发展的基础。建立起强大的装备制造业，是提高国家竞争力的重要保证。装备制造业既是制造业的基础，也是制造业的创新先锋。

“十三五”是我国实现由制造大国向创造强国跨越的关键时期，加快转变经济发展方式，加快建设创新型国家，这是近年来国家明确提出的战略方针。推动中国制造向中国创造转变、中国速度向中国质量转变、中国产品向中国品牌转变，对建设创新型国家意义重大，同时对制造装备创新设计提出了更高要求。

《制造装备创新设计案例研究》是中国工程院重大咨询项目“创新设计发展战略研究”的子课题“制造装备创新设计战略研究”（编号：2013-ZD-15-6）的成果汇编。在项目组长路甬祥院士、课题组长谭建荣院士和张树有教授的策划下，将课题部分成果汇编，以飨读者。

本书以数控机床、空气分离装备、注塑装备、3D 打印装备、铸造成型装备等为研究对象，每一类制造装备按创新设计案例、特征分析和创新设计小结的思路编排，尽可能考虑行业覆盖范围、技术代表性、创新要素、商业模式

等，体现我国实施创新驱动对促进装备制造业发展的作用。

本书面向工业领域的装备制造业，其作用旨在提供制造装备创新设计思路，改进创新设计方法，寻找创新设计路径，提取创新设计特征，实现创新设计应用，提升创新设计价值。

本书由谭建荣、张树有、徐敬华编著。本书第1章创新设计案例研究由谭建荣、张树有、洪军提供；第2章创新设计案例研究由谭建荣、徐敬华、周智勇提供；第3章创新设计案例研究由张树有、徐敬华提供；第4章创新设计案例研究由傅建中、贺永、冯涛提供；第5章创新设计案例研究由单忠德、张彦敏提供；第6章创新设计案例研究由顾新建、徐敬华提供。浙江大学机械工程学院设计与产品创新研究中心李瑞森、刘晓健、伊国栋、高彦哲、涂剑锋、何词等参与了编著工作。国家高端制造装备协同创新中心对本书编著工作给予了大力支持。编著过程中得到了中国机械工程学会副理事长、秘书长张彦敏研究员的指导与帮助，在此表示衷心的感谢！

制造装备创新设计案例不胜枚举，特别是近几年国家对创新设计的重视，相信未来我国制造装备创新设计优秀案例将会不断涌现。由于时间紧、精力与水平有限，我们编著的案例集只能是冰山一角，不当之处敬请读者批评指正。

编者

2015 年秋

目录

CONTENTS

第一章	高档数控机床创新设计	001
	引 言	
	1.1 T GK 系列数控卧式坐标镗床案例	004
	1.2 YK 系列数控磨齿机案例	015
	1.3 结语	025
第二章	空气分离装备创新设计	027
	引 言	
	2.1 8 万等级空气分离成套装备案例	031
	2.2 变负荷的空分装备案例	039
	2.3 结语	045
第三章	注塑装备创新设计	047
	引 言	
	3.1 电磁力合模注塑装备案例	050
	3.2 机器视觉集成注塑装备案例	057
	3.3 结语	064
第四章	增材制造装备创新设计	066
	引 言	
	4.1 快速砂型精密制造案例	070
	4.2 含微流道的生物器官 3D 打印案例	075
	4.3 结语	088

第五章	铸造成型与复合加工装备创新设计	090
	引 言	
5.1	无模铸造成型装备案例	093
5.2	叶斗复合加工制造案例	107
5.3	结语	111
第六章	制造装备服务模式创新设计	113
	引 言	
6.1	基础制造装备云服务模式创新设计案例	115
6.2	制造装备在线监测诊断创新设计案例	125
6.3	结语	133

CHAPTER ONE | 第一章

高档数控机床创新设计

- 1.1 T GK 系列数控卧式坐标镗床案例
- 1.2 YK 系列数控磨齿机案例
- 1.3 结语

引言

机床是一类用于加工零件的装备，金属切削机床在机械制造行业中使用最广、数量最多，是制造业的主要加工装备。

数控机床是在机床基本功能的基础上加入数控单元，利用数控单元控制机床进行零件的加工，因而加工精度高，加工质量稳定，生产率高。在数控机床领域，数控（Numerical Control，NC）是指利用数字化的信息、控制信号对机床各运动部件进行控制，从而控制机床加工零件的轮廓轨迹，实现精确自动化的加工。

数控机床按照功能与加工方式的不同，可以分为以下两类：

（1）普通数控机床

普通数控机床是在传统机床的基础上加入数控单元形成的加工装备。这类数控机床，除了采用数控系统外，其结构和功能基本类似于传统机床。这类数控机床的分类参照传统机床，分为数控车床、数控镗床、数控铣床、数控磨床等。

（2）加工中心

加工中心是在普通机床的基础上，充分发挥数字控制的特点和优势开发的一类机床。其主要特点是具有自动换刀装置，能在一台机床上进行零件的多工序、多工艺的加工。加工中心包括镗铣加工中心、车削中心、钻削中心、

磨削中心、车铣复合加工中心等。

在现代机床发展中，数控机床已逐渐不再局限于原有的结构分类体系，而是面向零件加工特征和客户需求不断变化，衍生出多方面功能和性能特点。表 1.1 列举出了高速、高精、重载、复合、磨削、曲面六大类数控机床的性能与功能特点。

表 1.1	高速、高精、重载、复合、磨削、曲面数控机床性能与特点
机床类别举例	图 例
高速类机床：零件加工效率远高于普通机床的数控机床，包括高速主轴（转速 8000 ~ 60000rpm）和高速进给（高于 5 ~ 10 倍普通切削速度）	 HDBS 系列高速卧式加工中心
高精类机床：具有较高的零件加工精度，定位精度达到 0.005mm、0.003mm、0.001mm，能实现微米级甚至亚微米级以上精度的零件加工	 TGK 系列高精度数控卧式坐标镗床
重载类机床：能加工大型、重型零部件（电站大型压力容器、大飞机重型结构件毛坯等）的数控机床	 BVTM 系列立式铣车复合机床
复合类机床：能进行多种工序、多种加工方式的数控机床	 VDL 系列立式加工中心
磨削类机床：包括各类磨床及磨削中心	 B2-K 系列高精度复合磨削中心
曲面类机床：能加工叶轮叶片、齿轮齿形等复杂空间曲面的数控机床	 YK 系列数控锥面砂轮磨齿机

1.1

TGK 系列数控卧式坐标镗床案例

案例主要技术参数

TGK 系列高精度数控卧式坐标镗床是我国自主研发的高精密数控机床。机床采用高刚度整体式床身，方便安装；具有三点支撑的优越稳定性；采用“箱中箱”式重型高刚性龙门封闭框架、直结式中央出水机械主轴、直驱式回转工作台、双驱直线进给系统等。机床具有粗加工过程中的高刚度和高可靠性、精加工时的高精度和高速运动时移动质量小而轻的高动态性能等突出优点，能实现高速及良好的运动特性和稳定的高精度加工质量，满足了机床高速、高精、高效、高可靠性的切削性能要求，是集现代机、电、光、液、气和信息控制技术为一体的高科技产品。TGK 系列机床外观如图 1.1 所示，其主要技术参数如表 1.2 所示。

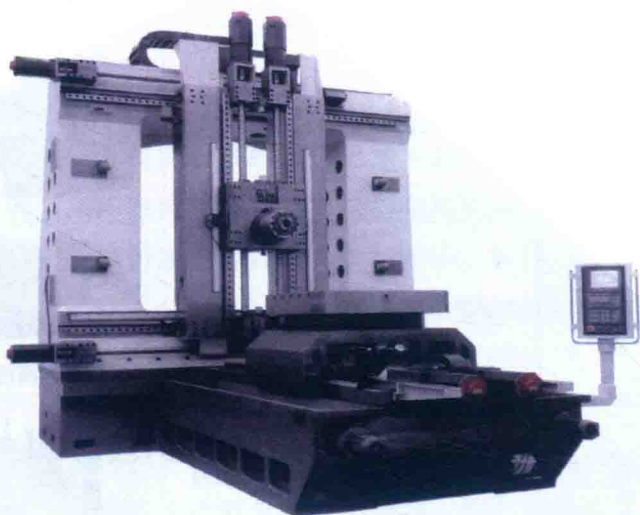


图 1.1 TGK 系列高精度数控卧式坐标镗床

表 1.2

TGK 系列某机床主要技术参数

主参数名称		参数值	主参数名称		参数值
工作台	工作台尺寸	1000mm × 1000mm	主轴	主轴直径	110mm
	工作台 T 型槽	6mm × 22mm		主轴锥孔	ISO50#
	工作台最大承重	2500kg		主轴转速	10~6000r/min
	工件最大回转直径	φ 1400mm		主电机功率	22kW
	工件最大高度	1300mm		主轴最大扭矩	560Nm
定位精度	XYZ 坐标	0.003mm	加工范围	主轴最大轴向抗力	5000N
	B 坐标	3"		滑板横向行程 (X)	1200mm
重复定位精度	XYZ 坐标	0.0015mm		主轴箱垂直行程 (Y)	1100mm
	B 坐标	1.5"		工作台滑座纵向行程 (Z)	1100mm
	B (4 × 90°)	1"		工作台回转 (B)	360° 连续任意分度
	XYZ 轴直线度	0.003mm	快移速度	XYZ 坐标	48m/min
	主轴端部径向跳动	0.001mm		B 坐标	5r/min

注：1°（度）=60′（角分）=3600″（角秒）
获得机床工作台回转精度重复定位精度的测量方式，测量位置为角度每转 90°，测量整个周期 360°。

TGK 系列高精度卧式坐标镗床适用于箱体类、盘类、板件及模具类等复杂零件的精密加工，可进行铣削斜面、框型平面、三维曲面等加工，特别适用于尺寸、形状和位置精度要求高的孔系加工，完成镗、钻、铰、攻丝等工序，还可以作为精密刻线样板、高精度划线样板、孔距及长度测量样板等，广泛用于发动机缸体缸盖、变速箱体、阀体、模具等复杂零件的精密加工。TGK 系列高精度卧式坐标镗床通过选配 AC 头后可实现五轴联动控制加工，适用于风机叶片、模具复杂型面、航空航天铝钛合金、医疗器械领域特殊材料等的加工，是军工、航空、航天、船舶、交通、能源、刀具模具、汽车及机器制造业精密零件加工的理想设备。

TGK 系列高精度数控卧式坐标镗床的创新设计特征主要是通过结构改进设计和支承大件减重优化等途径实现机床精度、刚度、稳定性等方面的性能提升。

(1) 数控机床部件改进与精度提升设计

TGK 系列高精度数控卧式坐标镗床由床身、立柱龙门、滑板、工作台、主轴系统、进给系统、液压系统、润滑系统、冷却系统、排屑装置、安全防护装置、数控系统等部件组成。

主轴系统采用中央出水直结式机械主轴结构，直驱动主轴系统通过柔性联轴节单元实现主轴驱动电机与主轴同轴相连，实现低转速区域的中切削以及高转速区域的低发热高精度旋转，能进行高硬度钢高速高精度加工，也适用于产生反向推力的螺旋插补的稳定高精度加工。在实现 10~6000r/min 的全转速区域的高精度主轴回转的同时，能够得到高品质的加工面精度。

直线进给坐标采用伺服电机直驱的双丝杠传动、双光栅尺反馈、高精度滚动直线导轨，直线坐标快移速度达到 48m/min，实现了高速、高精度的机床坐标定位，排除了滚动导轨产生的细微振动，进一步提升了机床高速高精度特性，满足高效率、高精度、高品质的加工需求，可靠性高。

工作台回转进给采用力矩电机传动，直接驱动旋转部件运动，没有中间传动环节，回转传动过程零背隙且没有磨损，配合高精度编码器，实现高精度的工作台回转坐标定位。工作台采用轴向径向转台轴承作为回转支撑导轨，轴承刚性夹紧构造实现高精度和高刚性，实现中切削到高精度平面铣削及镗孔加工。

在以上多重创新设计基础上，TGK 系列高精度数控卧式坐标镗床还进行进一步的细节优化设计。例如，高精度数控卧式坐标镗床原构型采用滑板与主轴箱侧挂的方式，使得滑板、主轴箱、立柱三

者所组成的结构，其整体重心在立柱偏向工件一侧，且其形心与重心位置距离较远（机床构型与原立柱结构如图 1.2 所示）。在机床的实际运行过程中，在切削力的作用下，由于整体重心在立柱偏向工件一侧，且其形心与重心位置距离较远，会产生倾覆力矩，导致龙门立柱结构变形，出现勾头的现象，影响机床的加工精度。

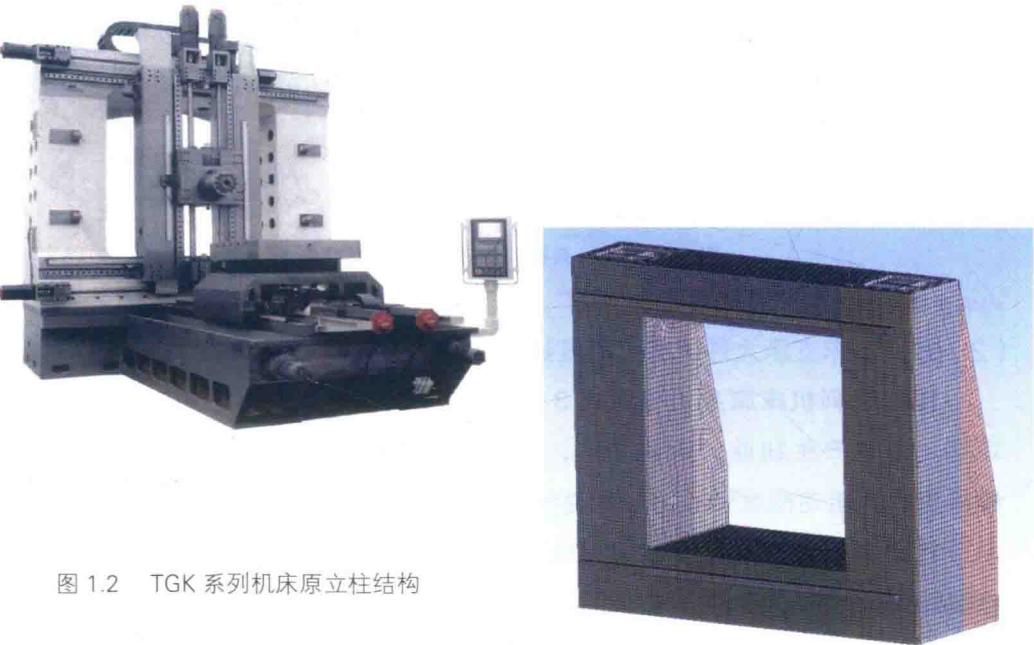


图 1.2 TKG 系列机床原立柱结构

为提高立柱整体刚度，改善机床加工精度与运行稳定性，TKG 还对机床原有布局构型进行改进，立柱与滑板、主轴箱布局构型改进后的结构如图 1.3 所示。由于采用更加紧凑的箱中箱结构，使得主轴箱滑板的重心位置与龙门立柱重心位置更加靠近，立柱构型前端面内凹，可使立柱的重心与形心在 Y 与 Z 方向的位置偏距减少，滑板、主轴箱、立柱三者的整体重心位置也会向 Z 方向偏移。通过进一步的仿真分析与优化，调整滑板结构并内嵌主轴箱，可使得滑板主轴箱结构的重心位置更靠近立柱重心，减少倾覆力矩，增强结构的稳定性。由于主轴向 Z 方向偏移，机床在保持 Z 向行程不变的情况下，可以缩短床身在 Z 方向的长度，使机床更加紧凑。

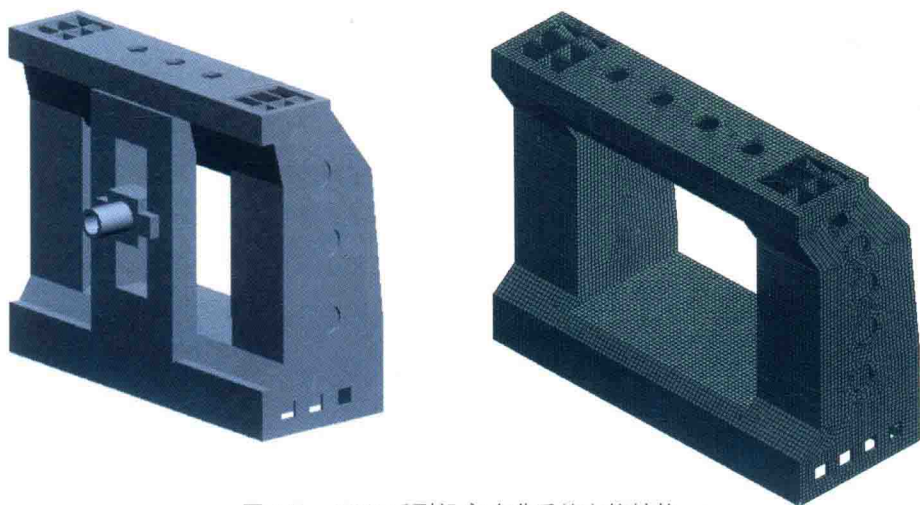


图 1.3 TKG 系列机床改进后的立柱结构

（2）数控机床支承大件减重与刚度强化设计

TKG 系列机床床身为整体式 3 点支撑的封闭箱型铸件结构，热容积全体均等，不易产生扭曲、弯曲变形，维持了机床的整体刚度和稳定的高精度，确保机床的运动精度和强力切削性能。

TKG 系列机床立柱龙门采用优质铸铁的超大重型筋板龙门静态左右对称框架结构，具有高刚性，与传统动立柱相比，移动件质量减轻约 1/3，移动件的重心始终保持在导轨内，可保持移动物体的重心平衡，保证了优良的热稳定性，实现稳定的高精度加工。机床滑板采用整体门式结构，纵横布筋，具有较高的抗弯及抗扭刚度，保证了机床主轴箱在 Y 坐标方向上具有较高的运动精度和稳定性。

在 TKG 系列机床结构刚性强化设计基础上，通过对 TKG 系列机床的支承大件进行减重优化设计，可以降低机床用材量，提高机床动静态特性，实现机床性能的进一步提升。TKG 系列机床采用固定床身与固定立柱结构，床身和立柱作为基础支承大件，有较大的拓扑优化空间。支承件拓扑优化过程主要分为支承件约束载荷求解、结合面约束建模、物理模型构建、概念构型设计、结构方案设计、性能分析评价等过程，如表 1.3 所示。