



2023“科创中国”高端装备制造产学研融合会议 昆明 2023.08.25

# 高端数控机床的创新发展

刘强

# Outline

数控机床发展历程及技术演进

数控机床及数控加工技术的新挑战

数控机床的技术创新

展望

# Outline

数控机床发展历程及技术演进

数控机床及数控加工面临的新挑战

数控机床的技术创新

展望

# 从历史看未来：数控——创造新技术，开启了数字化制造新时代！

Numerical Control Making a New Technology [J. Francis Reintjes, 1991]

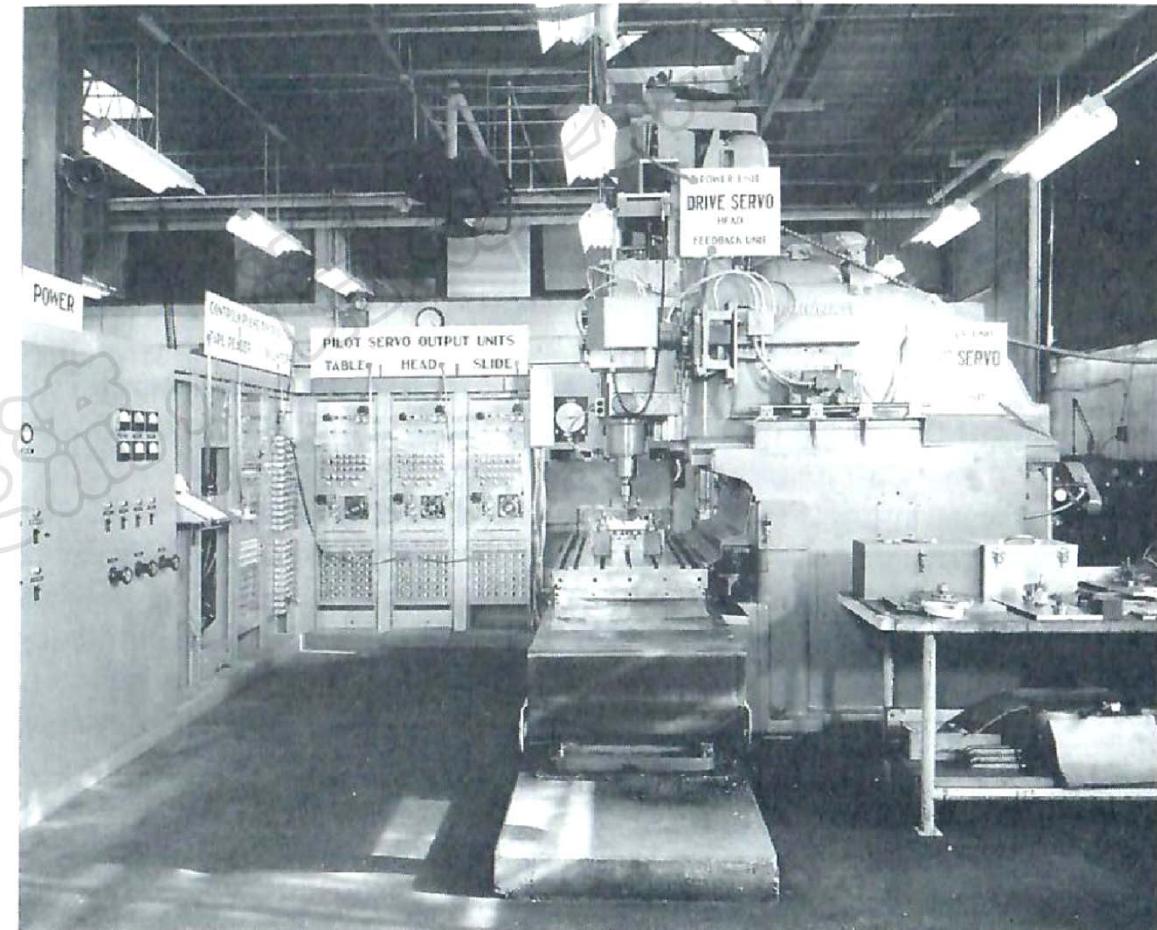
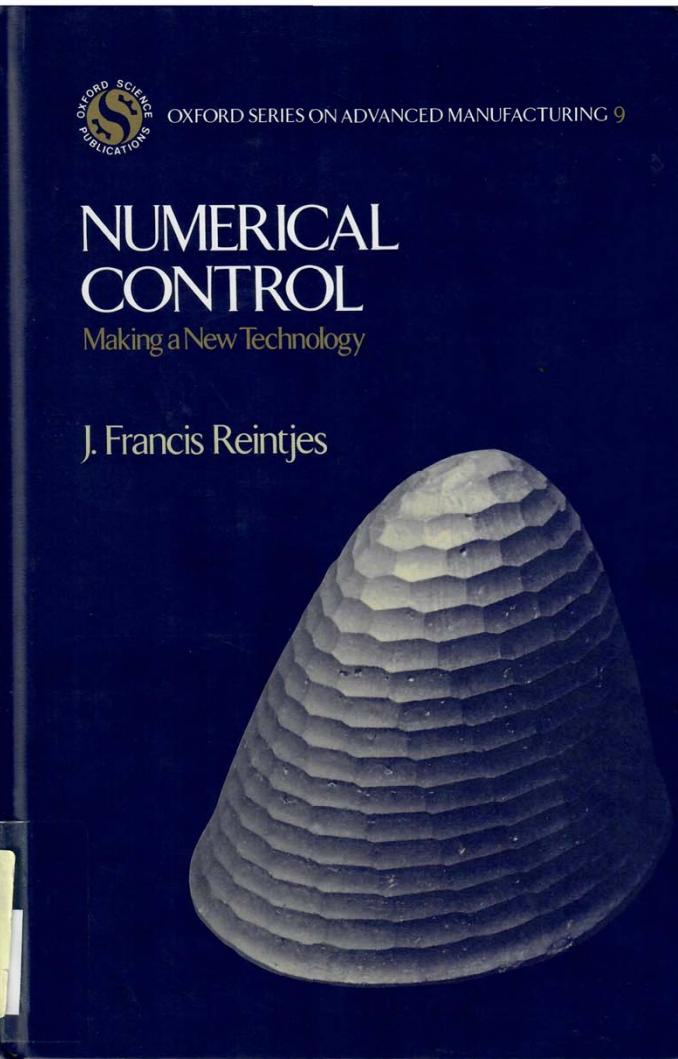


FIG. 2.2. The MIT numerically controlled milling machine.

## 从历史看未来：70年前MIT的制造技术创新——用20年研发了NC/APT/CAD

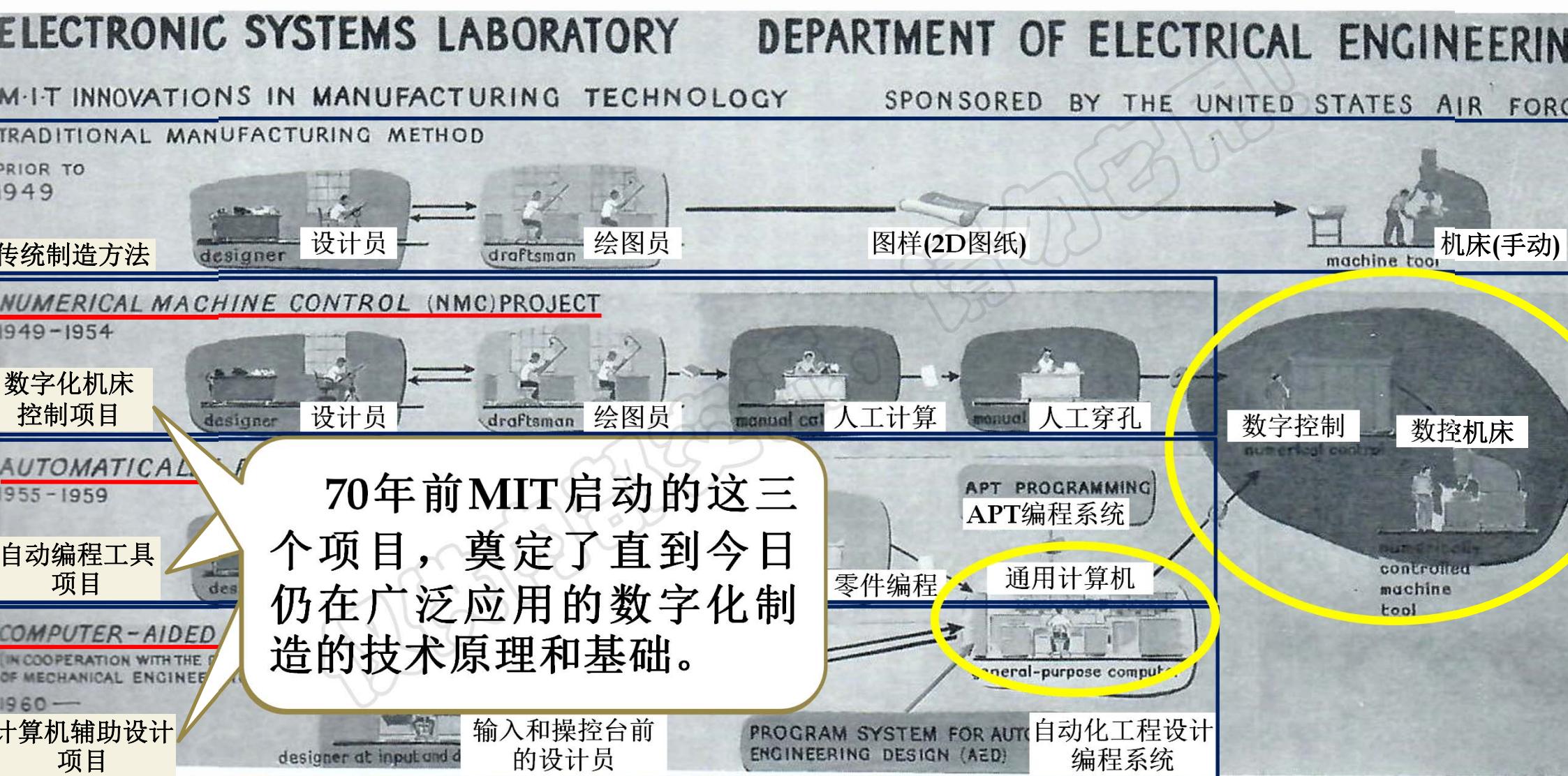
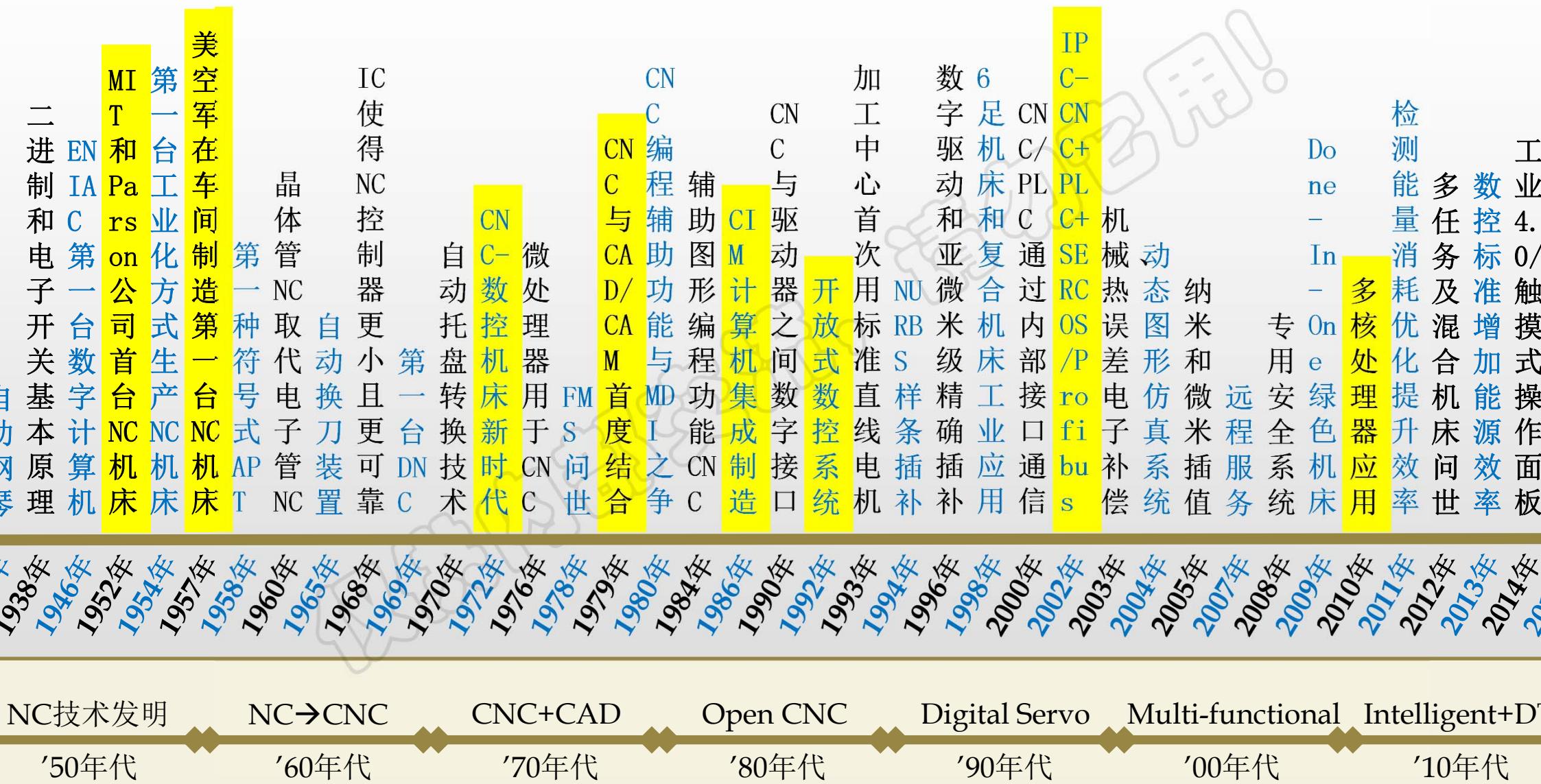
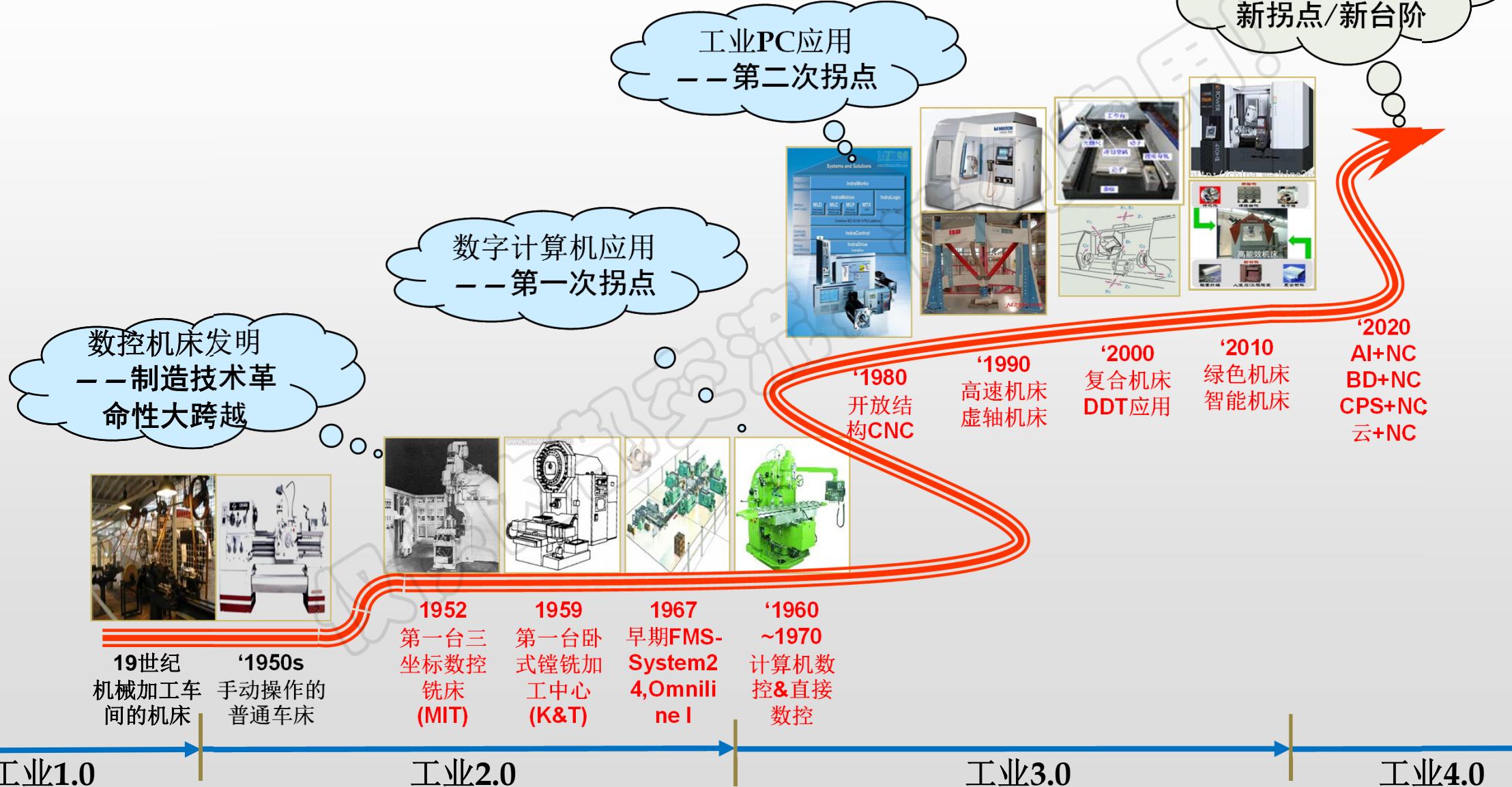


FIG. 1.1. Pictorial representations of the various stages of the MIT numerical control project.

# 数控技术发展历程中具有重要影响的里程碑



# 经过~70年发展，机床技术和产业已经成熟！ 未来去向何方？



# 数控机床主机结构的演进(车削、铣削、结构布局)

车削  
Turning



2轴平床身



2轴斜床身



4轴双刀架



多主轴多刀架



车铣复合

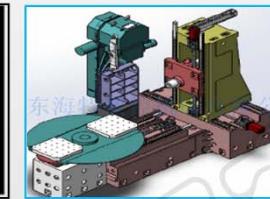
铣削  
Milling



2½轴/3轴



3轴+刀库



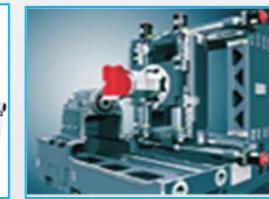
带交换工作台



4轴联动



5轴联动

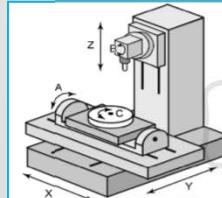
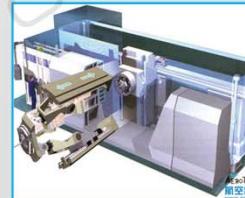
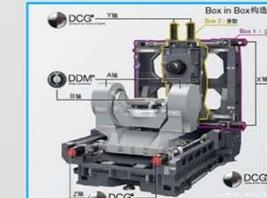
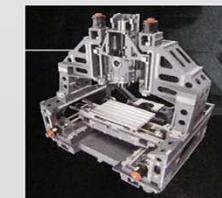
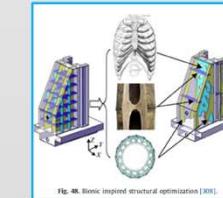


铣车复合



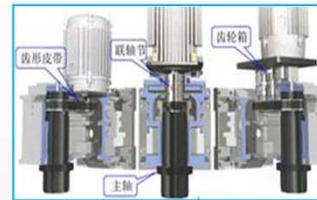
增减材混合

结构布局  
Structure

坐标叠加的  
经典结构组合/模块化  
结构并联/混联  
结构箱中箱/直驱/  
重心驱动热平衡/全  
对称结构仿生/拓扑  
优化多机/多功能  
融合

# 主轴和伺服驱动的演进

主轴  
indle



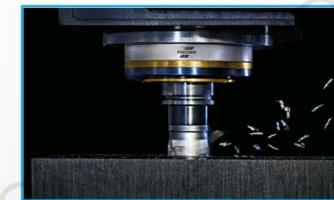
机械式主轴



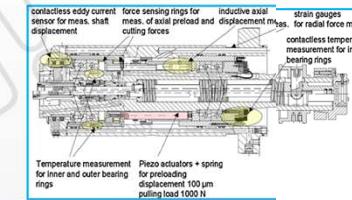
电主轴



高速电主轴



大扭矩高速电主轴



智能式主轴

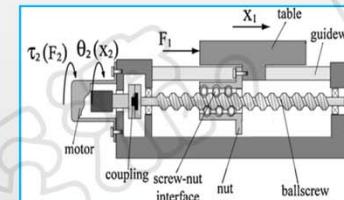
伺服驱动  
eed Drive



步进电机



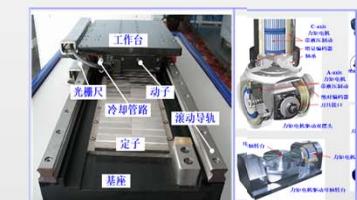
电液伺服



直流伺服+模拟控制

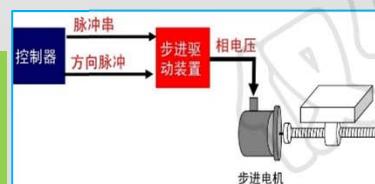


交流伺服+数字总线

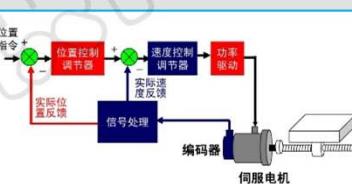


直线/力矩电机直驱

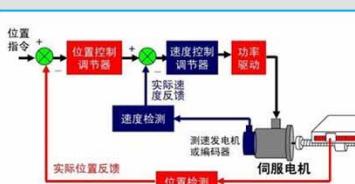
控制方式  
ntrol Sys.



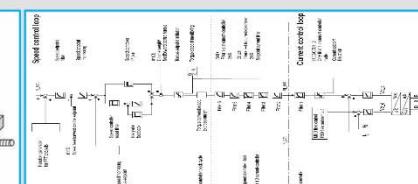
开环控制



半闭环控制



闭环控制



前馈+滤波+闭环控制



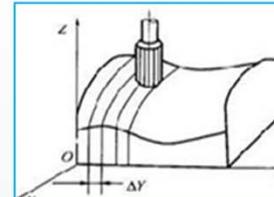
智能伺服控制

# 多轴联动和插补技术

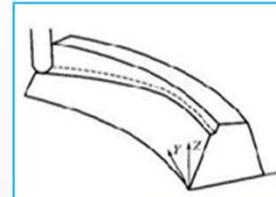
## 多轴联动 轨迹插补 技术



2轴联动插补



2½轴联动插补



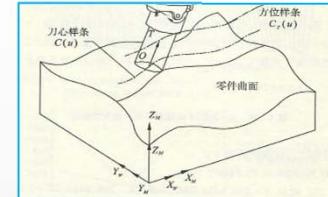
3轴联动插补



5轴联动插补



样条插补



自由曲面直接插补

点位控制  
平面直线  
平面圆弧

点位控制  
平面直线  
平面圆弧  
空间曲线  
空间曲面

点位控制  
平面直线  
平面圆弧  
空间曲线  
空间曲面  
螺旋曲线  
抛物曲线

点位控制  
平面直线  
平面圆弧  
空间曲线  
空间曲面  
螺旋曲线  
抛物曲线  
复杂曲线  
复杂曲面

点位控制  
平面直线  
平面圆弧  
空间曲线  
空间曲面  
螺旋曲线  
抛物曲线  
复杂曲线  
复杂曲面  
B-样条  
NURBS

点位控制  
平面直线  
平面圆弧  
空间曲线  
空间曲面  
螺旋曲线  
抛物曲线  
复杂曲线  
复杂曲面  
B-样条  
NURBS  
T-样条  
自由曲面SDI

# Outline

数控机床发展历程及技术演进

数控机床及数控加工面临的新挑战

数控机床技术创新

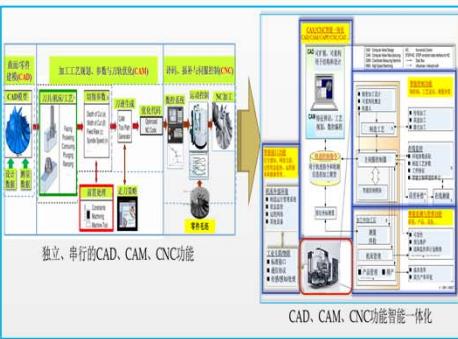
展望

# 未来数控机床发展的10大新需求和挑战

## 机械结构直驱化



## 2. CAX/CNC一体化



### 3. 功能定义软件化



#### 4. 现场信息物联化



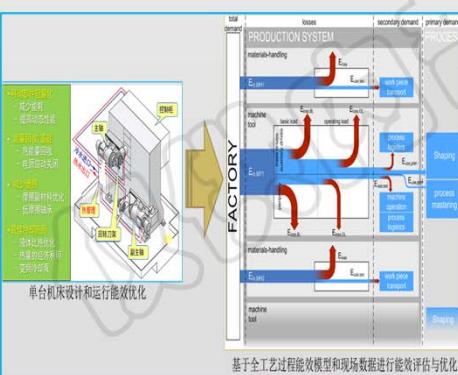
## 5. 操作值守无/少人



## 多机单元协同化



## 7. 能效管控最优化



## 8. 实体-赛博孪生化



## 9. 能量应用多样化



## 10.参数调补适应性



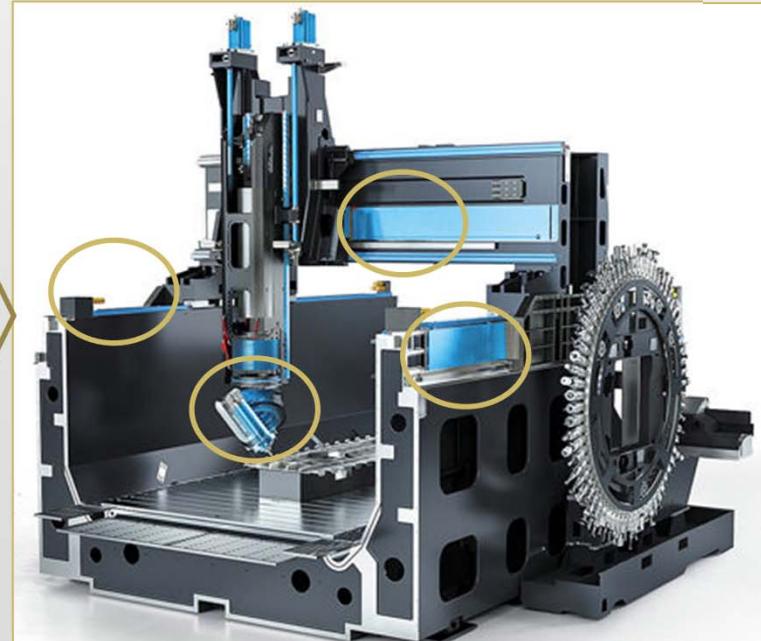
# 未来机床(1)——机床结构直驱化



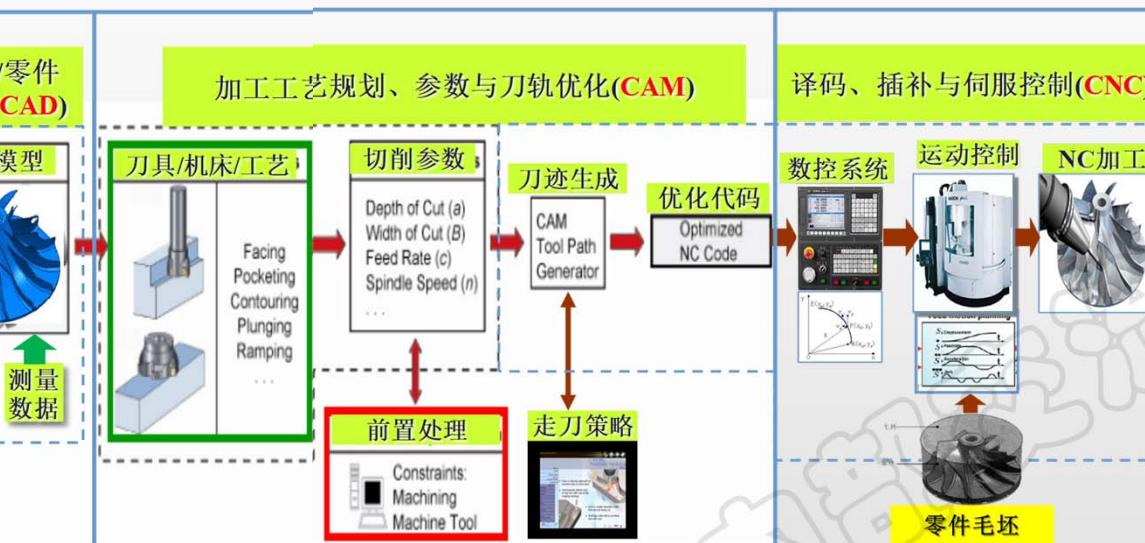
电动化使汽车机械结构简化



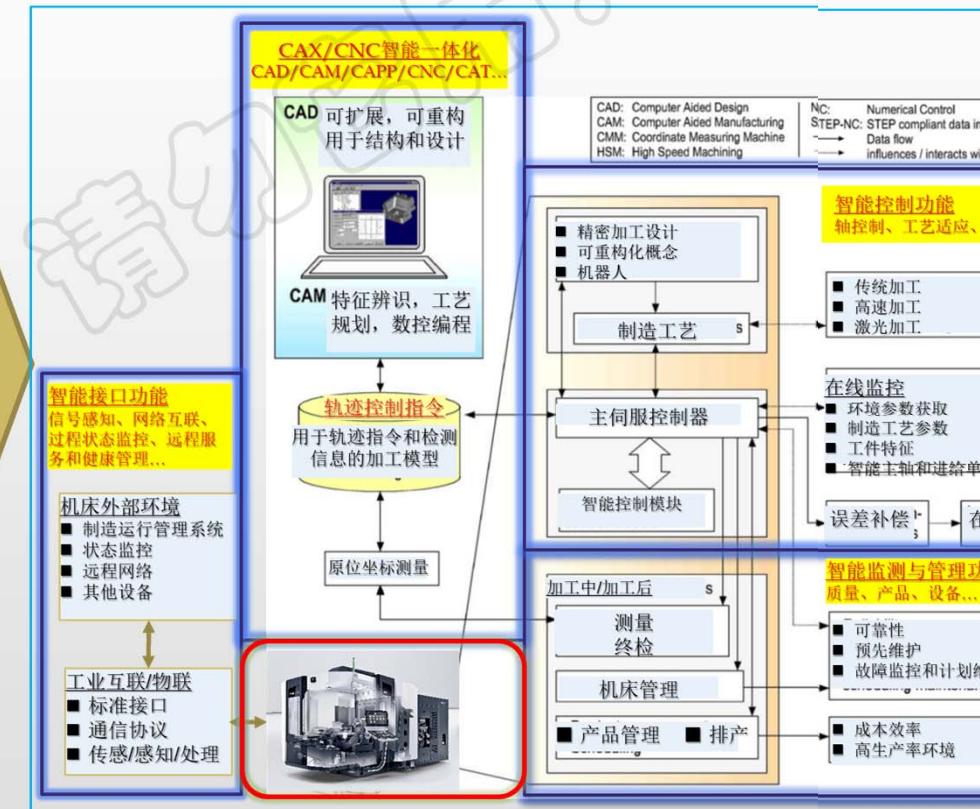
- ✓ 直接驱动使机床机械结构最简化
- ✓ 等环控制使多轴伺服联动最简化



# 未来机床(2)——CAD/CAM/CNC一体化



独立、串行的CAD、CAM、CNC功能



CAD、CAM、CNC功能智能一体化

# 未来机床(3)——功能定义软件化(软件定义机器)



NOKIA-移动的电话



传统汽车-乘用运输工具



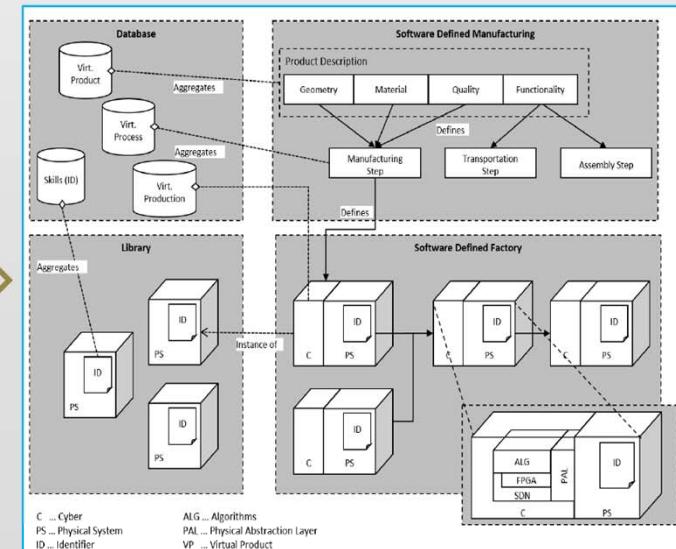
APPLE iPhone-移动的网络平台



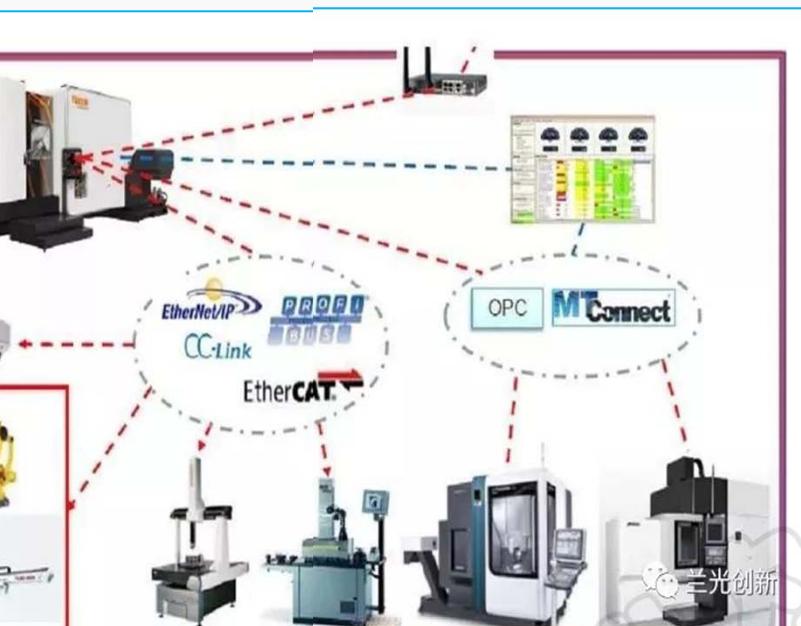
特斯拉汽车-移动的办公平台



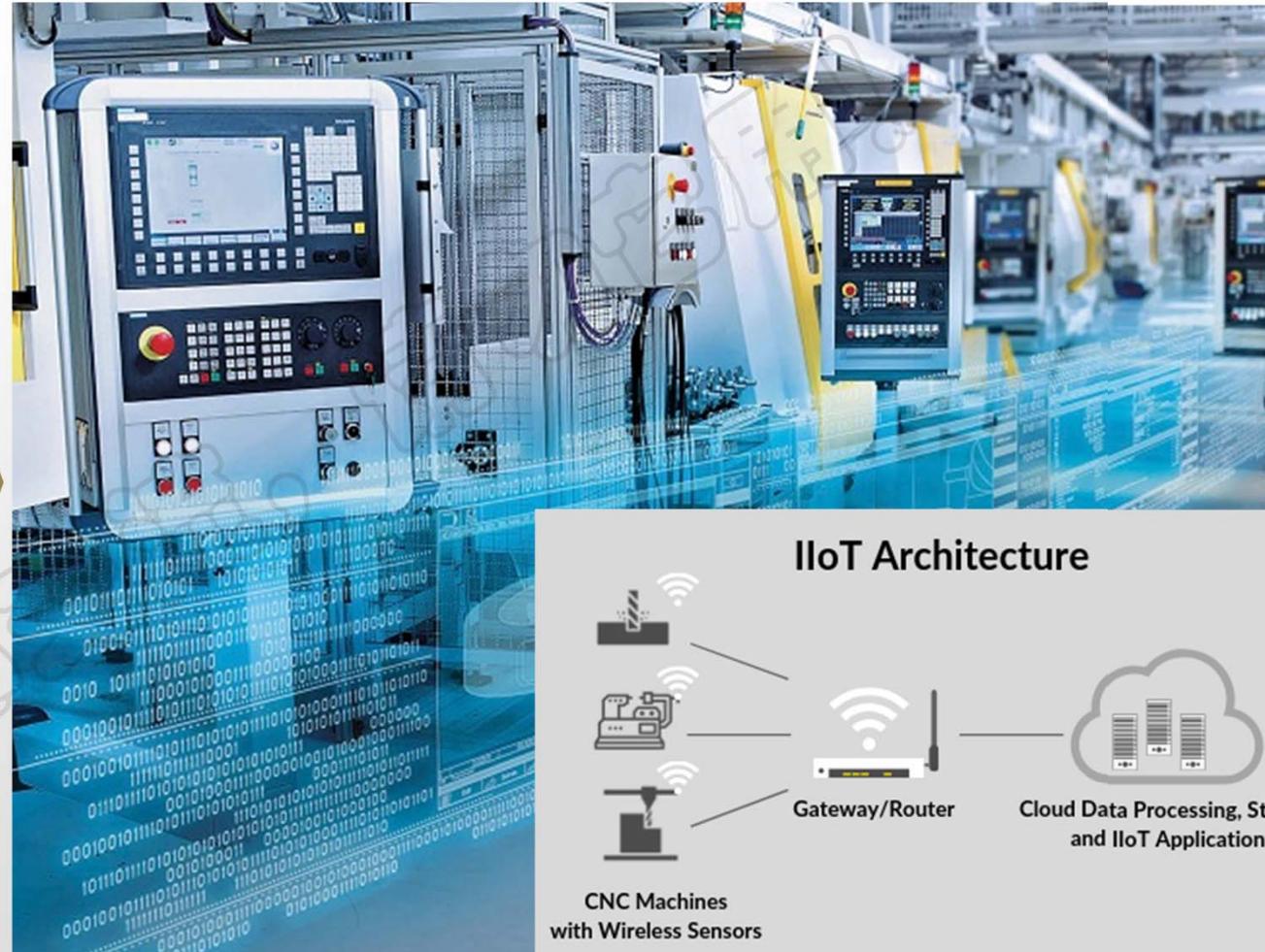
在简单可靠的结构、硬件平台基础上，由软件定义和实现数控加工全工艺链的功能。



# 未来机床(4)——现场信息物联化



面向现场控制和通信的工业网络



面向现场“控制+通信+物联”的工业互联(物联)网络

# 未来机床(5)——操作值守无人(少人)化



每台机床+现场操作人员

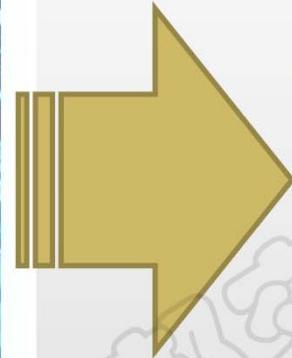


无/少现场操作人员

# 未来机床(6)——多机单元协同化

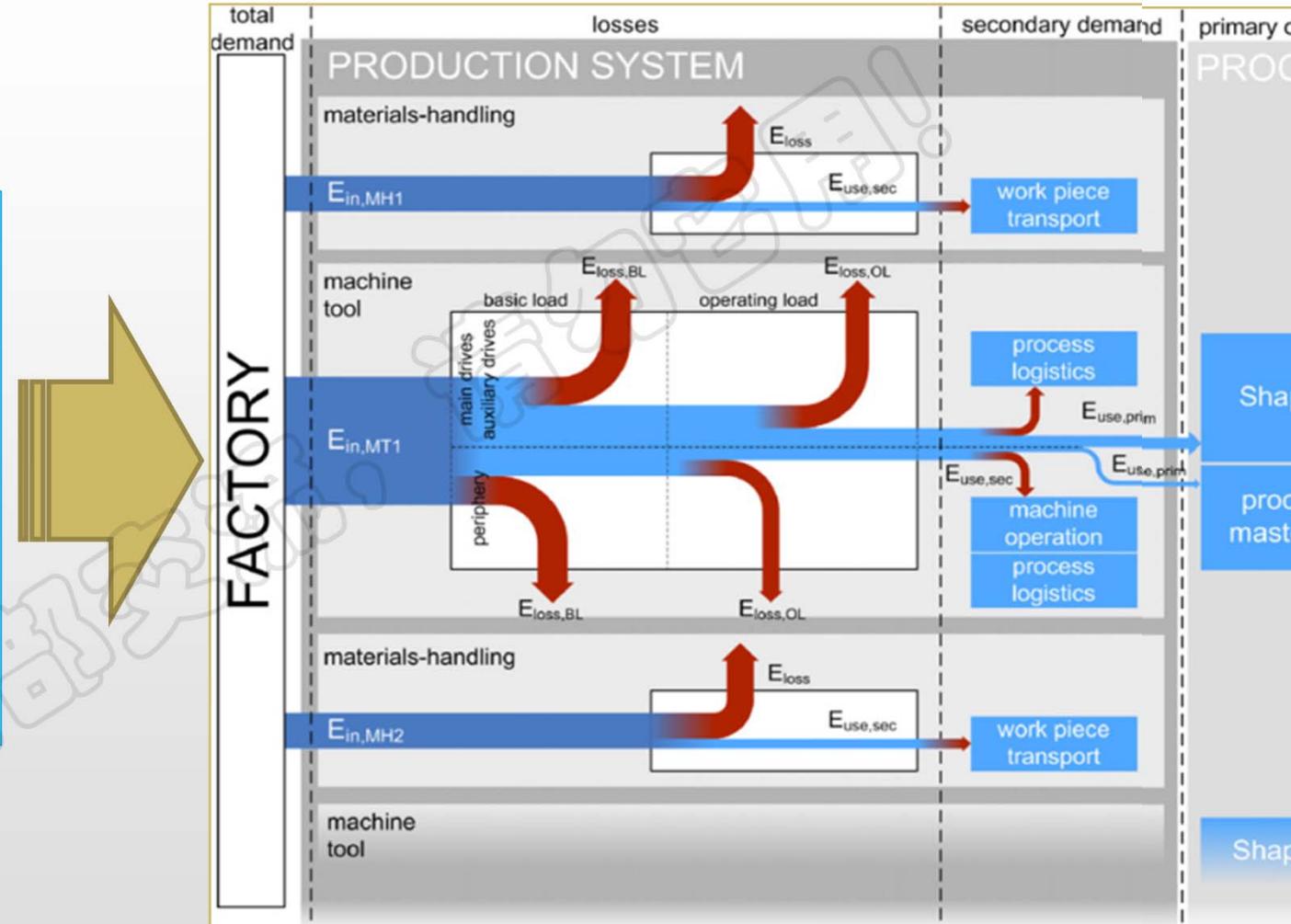
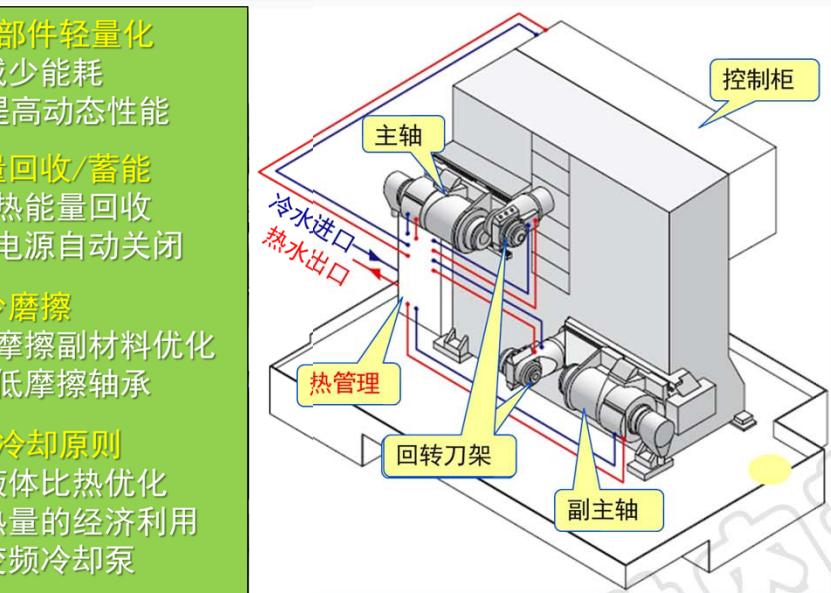


单台机床工作



“机床+机器人+AGV+中央刀库”构成加工单元协同工作

# 未来机床(7)——能效管控最优化



基于全工艺过程能效模型和现场数据进行能效评估与优化

# 未来机床(8)——“实体-赛博”孪生化

## 机床数字孪生概念



# 未来机床(9)——能量应用混合化



切削(减材)加工



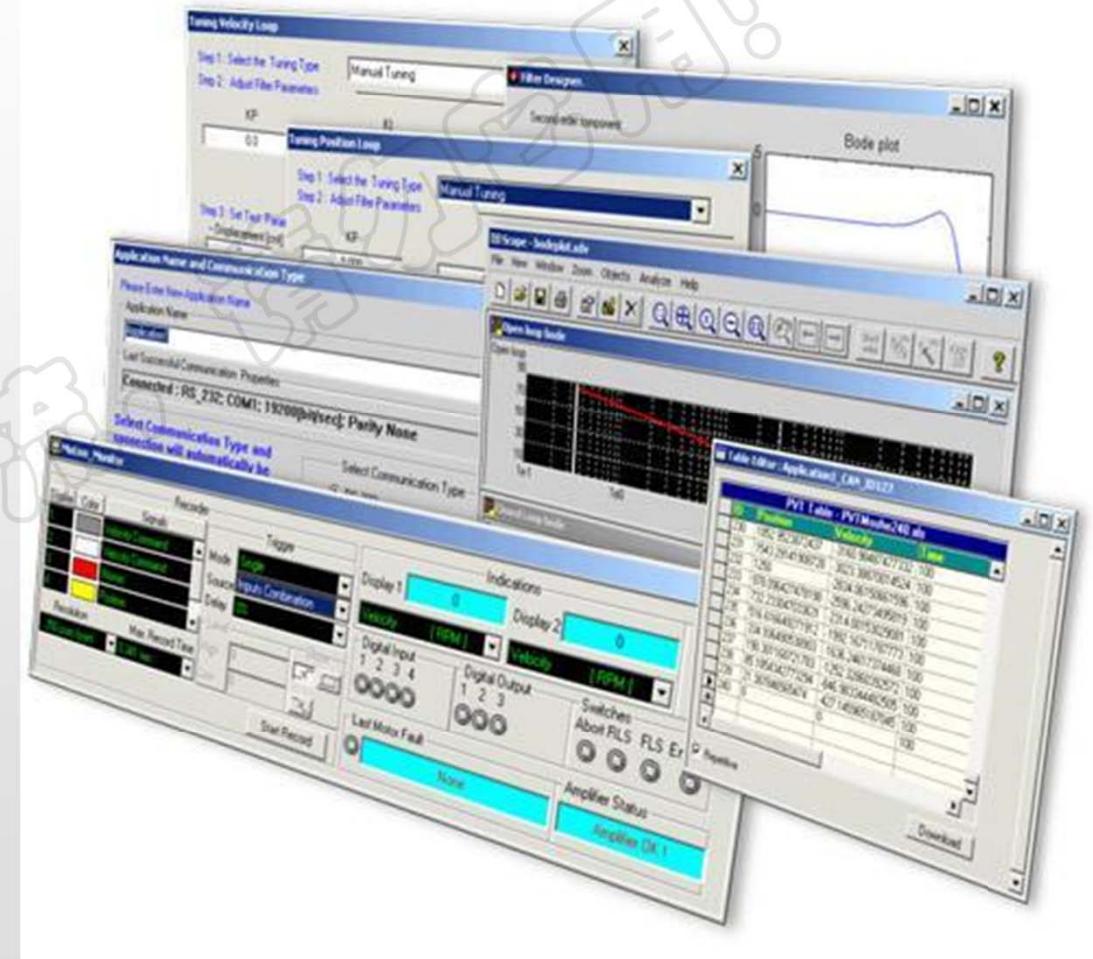
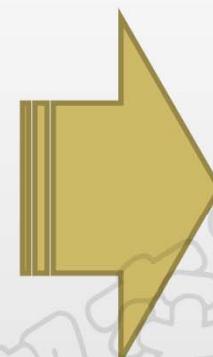
增材加工 + 切削(减材)加工



# 未来机床(10)——参数调补适应化



人工调试



自动测试分析、辨识参数和状态，进行匹配和动态补偿

# Outline

数控机床发展历程及技术演进

数控机床及数控加工面临的新挑战

数控机床技术创新

展望

# 1) 数控机床设计原理和方法创新

## 数控切削加工工艺及其应用

数控切削加工工艺

数控机床及加工工艺动态系统

数控加工典型应用及其需求

## 数控机床基本要求和功能需求

数控机床基本要求

数控机床控制功能

数控系统基本功能

网络通信功能

智能化功能

## 数控机床的正向设计原理与方法

从工艺需求到设计要求的映射

数控机床设计的基本原理

基于虚拟机床技术的正向设计方法

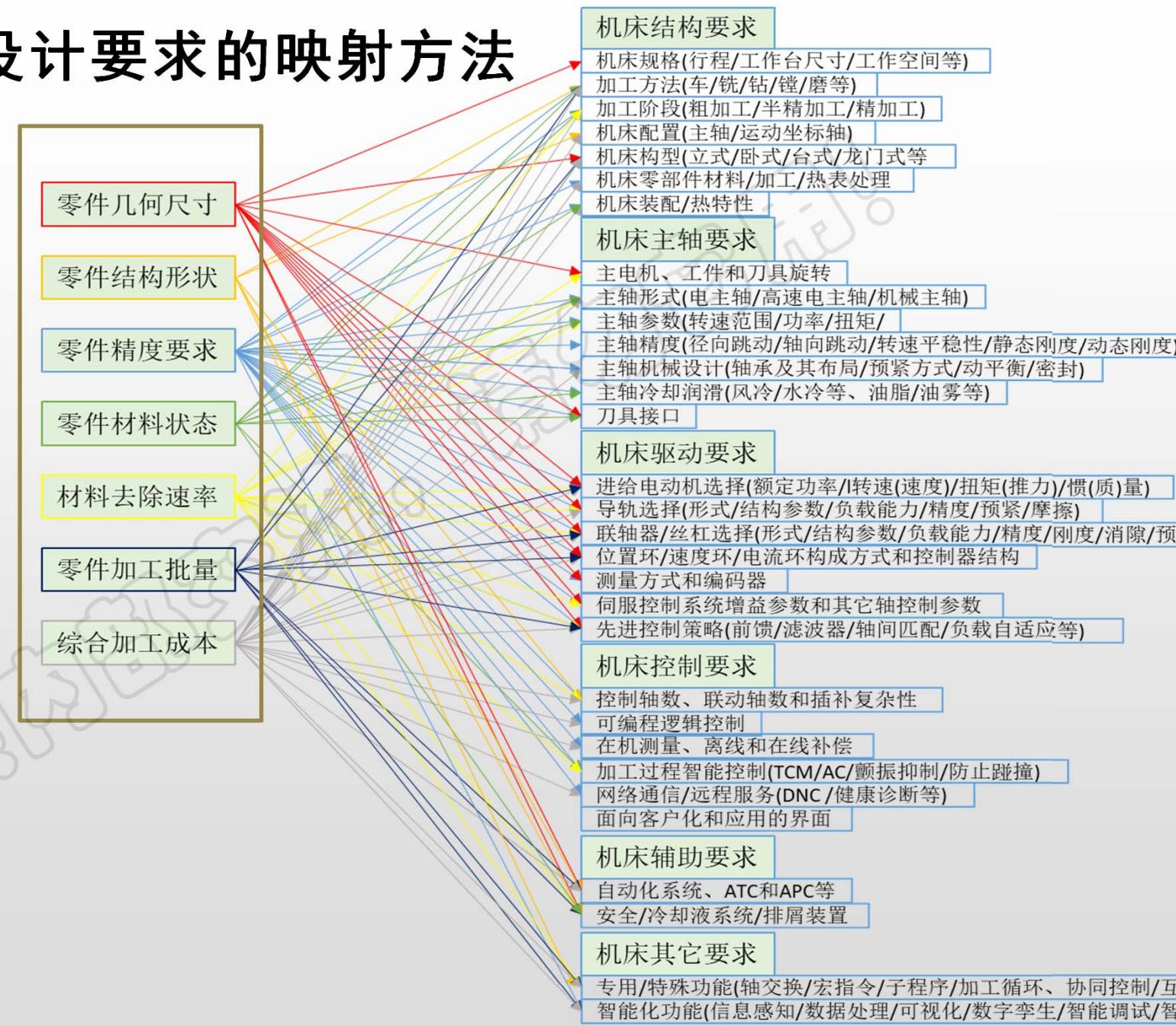
设计新理

精度设计

刚度设计

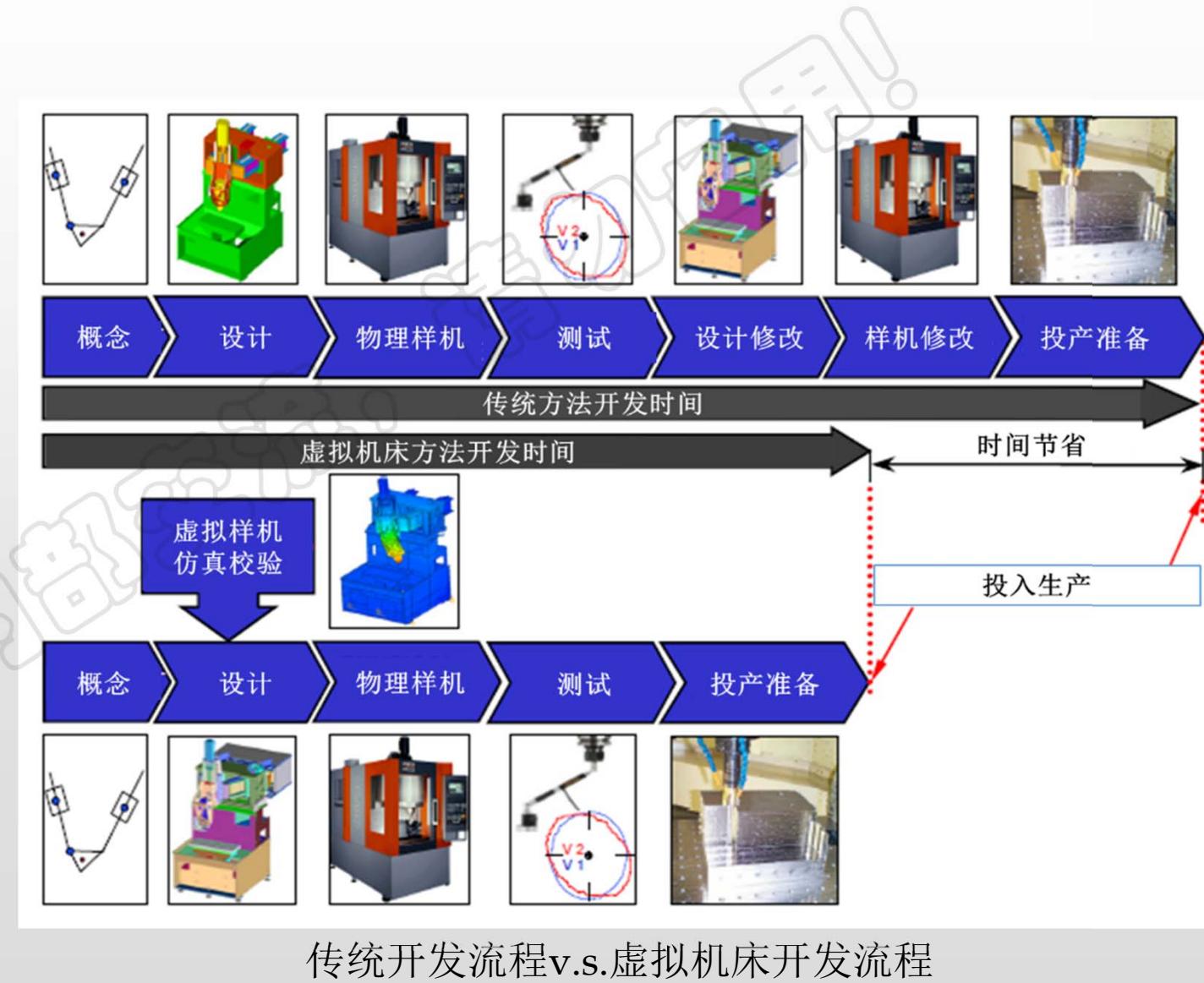
# ● 零件工艺需求到设计要求的映射方法

根据零件加工工艺需求，可以映射到数控机床的结构、主轴、驱动、控制和辅助等方面设计要求。



## ● 基于虚拟机床技术的正向设计方法

- 虚拟机床（Virtual Machine Tool）采用虚拟样机技术以减少传统设计过程中物理样机制造和测试改进过程的成本和时间。
- 虚拟机床样机不仅仅是通常的“几何样机”模型，而是包括了几何学、运动学和动力学特性的“物理样机”，能对数控机床结构、静态/动态特性仿真分析，方便地进行设计方案及零部件的调整、修改和改进，采用仿真方式迭代，直到获得要求的结果。



# ● 机床与加工过程数字孪生( $M^2DT$ )将成为创新工具

数控加工工艺技术链与数控机床生命周期



# 我们提出的M<sup>2</sup>DT概念——Machine tool and Machining process Digital Twin

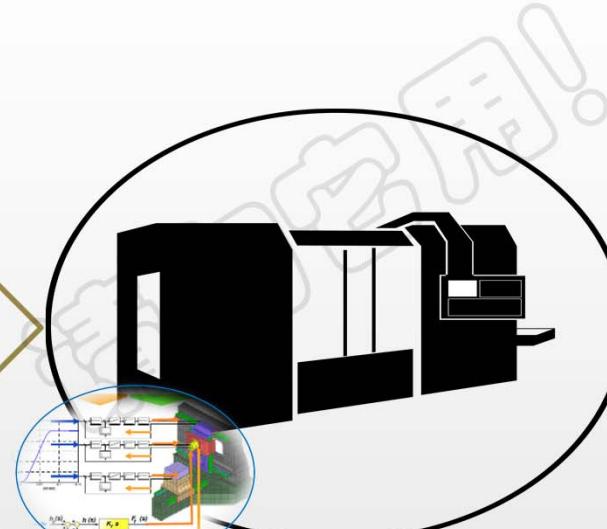
运行  
参数  
状态  
感知  
采集



实体数控机床  
Physical MT

通信接口和  
实时数据驱动

通用互联接口  
Connection



赛博数控机床  
Cyber MT

模型  
算法  
仿真  
优化  
可视

## 机床和加工过程数字孪生(M<sup>2</sup>DT)

——物理空间的数控机床与加工过程在赛博空间的全息数字化映射，该映射是通过标准规范的通信互联接口交互的现场数据驱动的。

## 2) 数控机床结构设计创新

### 数控机床结构设计新趋势

功能复合化

进给直驱化

结构轻量化

能效最优化

### 数控机床结构配置

结构配置的目标和任务

结构配置的基本要求

结构配置方案的评价

### 数控机床结构设计新技术

新材料应用技术

重心驱动技术

热平衡技术

可重构模块化技术

# • 数控机床结构设计新趋势

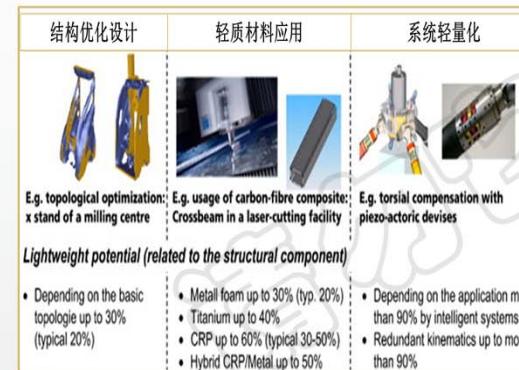
## 功能复合化



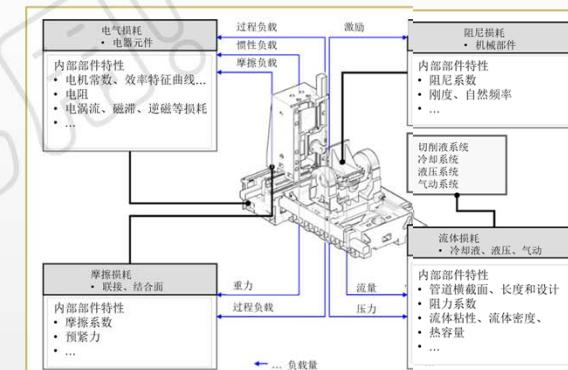
## 进给直驱化



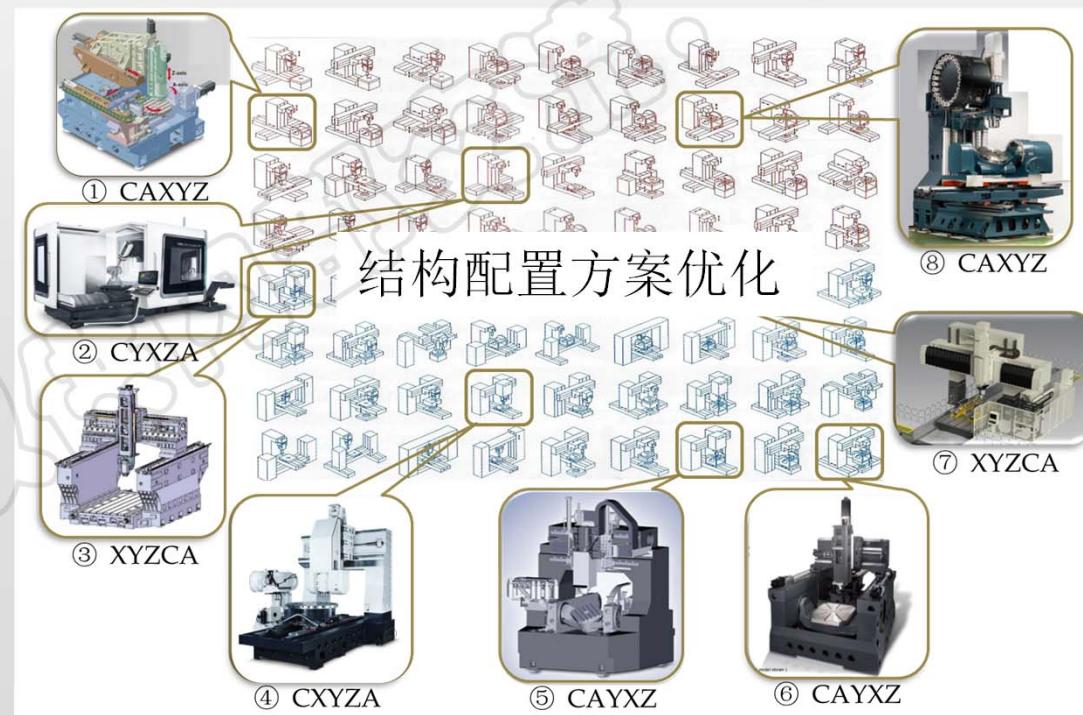
## 结构轻量化



## 能效最优化



## 结构配置方案优化



# ● 数控机床结构设计中的新技术

- ✓ 力闭环原则
- ✓ 轻量化原则
- ✓ 短悬臂原则
- ✓ 对称性原则
- ✓ 近路程原则

## 基本原则指导设计技术

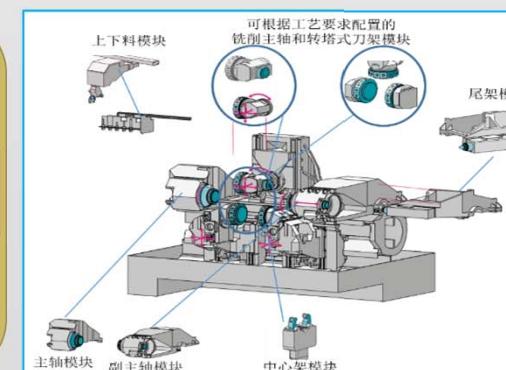
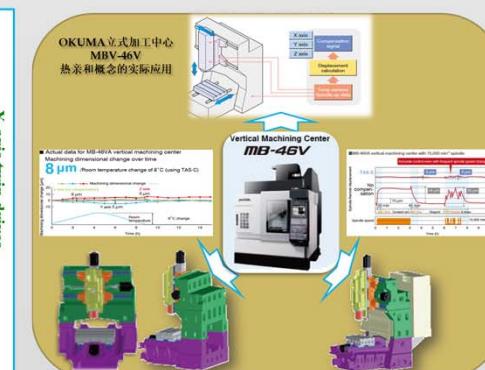
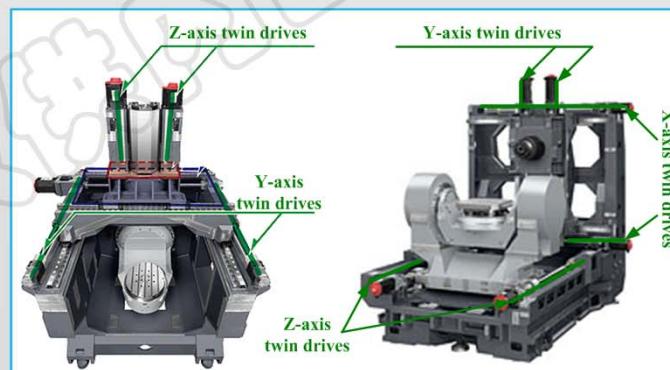
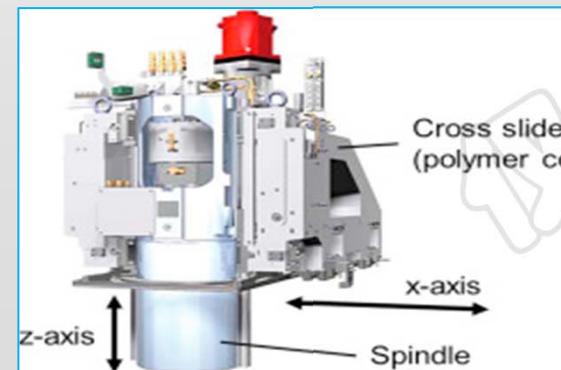
- ✓ 重心驱动(DCG)技术
- ✓ 箱中箱(BIB)技术
- ✓ 直接驱动技术(DDT)
- ✓ 全对称结构设计
- ✓ 热平衡设计与补偿技术
- ✓ 其他新结构和材料技术
- .....

## 新材料应用技术

## 重心驱动技术

## 热平衡技术

## 可重构模块化技术



聚合物混凝土横向滑轨

DCG/BIB设计

热亲和概念及实现

模块化设计技术

### 3) 数控机床控制技术创新——智能化

#### 智能化加工

- ✓ 虚拟机床技术
- ✓ 自动上下料机构
- ✓ **3D防碰撞**
- ✓ 工艺参数智能化修改与选择
- ✓ 加工过程自学习/自适应控制

#### 智能化感知、监控及维护

- ✓ 振动检测及抑制
- ✓ 刀具监测和管理
- ✓ 故障自诊断自修复和故障回放
- ✓ 智能化维护系统

#### 智能机床的功能



- ✓ 自动识别负载
- ✓ 在线辨识参数
- ✓ 自整定伺服参数
- ✓ 速度/加速度优化控制

#### 智能化驱动

- ✓ 零件加工质量预测
- ✓ 智能化热误差补偿
- ✓ 智能化几何误差补偿系统

#### 智能化误差补偿

- ✓ 语音提示操作辅助系统
- ✓ 远程访问与监控

#### 智能化人机接口与网络

操作智能化

加工智能化

维护智能化

管理智能化

# 高端数控机床和数控系统的智能化发展

- ❖ MAZAK(日本) -- Intelligent Machine(2006), 不断扩展智能加工功能模块。
- ❖ DMG Mori(德国+日本) -- CELOS(2013), 智能化功能APP27项。
- ❖ OKUMA(日本) -- 机床智能化: 向AI进发。
- ❖ SIEMENS (德国) -- 2019年SINUMERIK ONE, 工业级数字原生数控系统。
- ❖ HAIDENHAN(德国) -- 2021年新一代TNC7, Enter A New Level。
- ❖ HNC华中数控(中国) -- 2022年, 智能数控机床(iMT)、华中9型和智能数控系统(iNC)。

DMG Mori: CELOS



MAZAK: Intelligent Machine



HAIDENHAN: TNC7



OKUMA: 智能化AI机床诊断



HNC: 新一代



# Outline

数控机床发展历程及技术演进

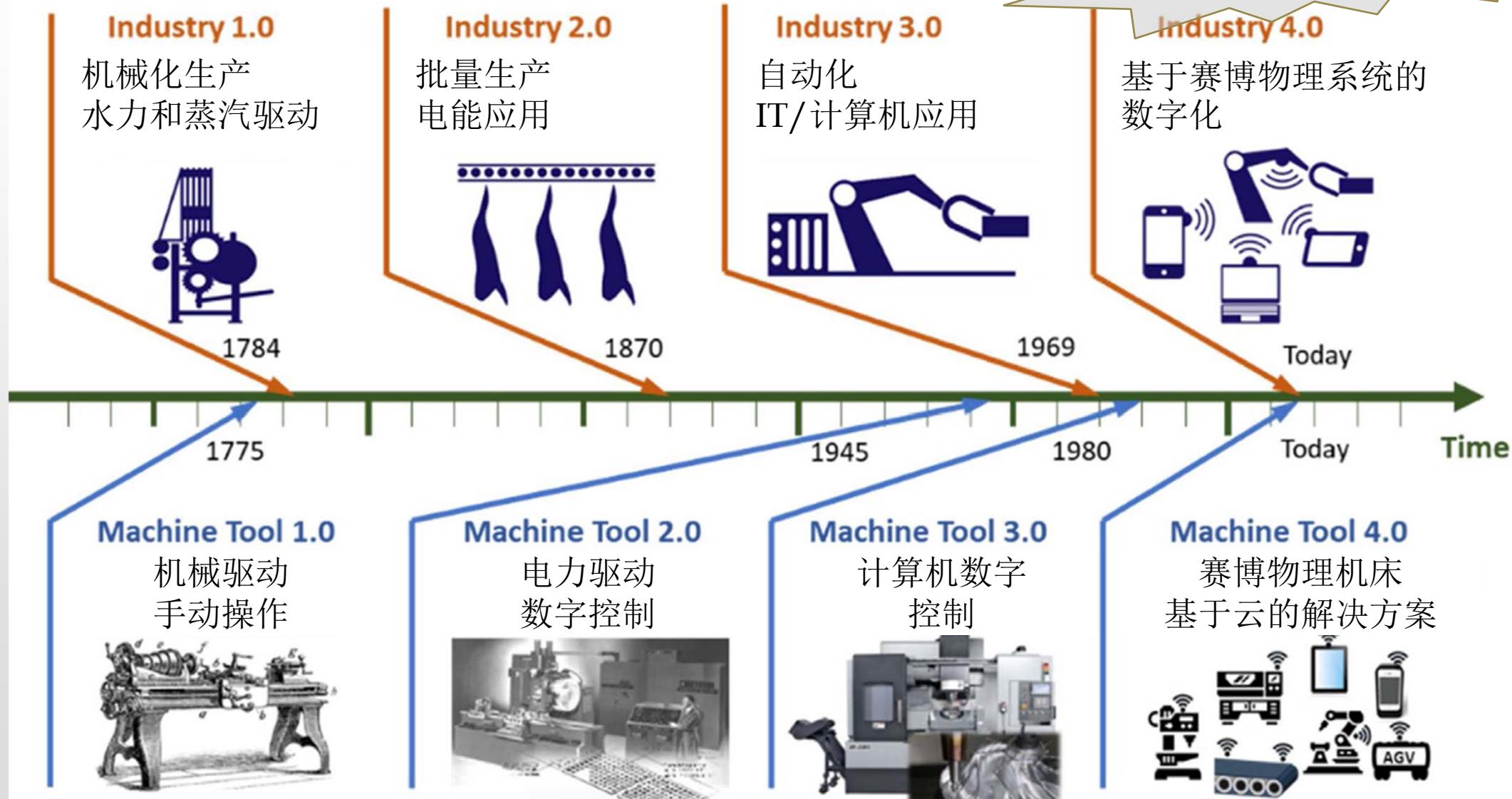
数控机床及数控加工面临的新挑战

数控机床的技术创新

展望

# 工业化和机床的进化史

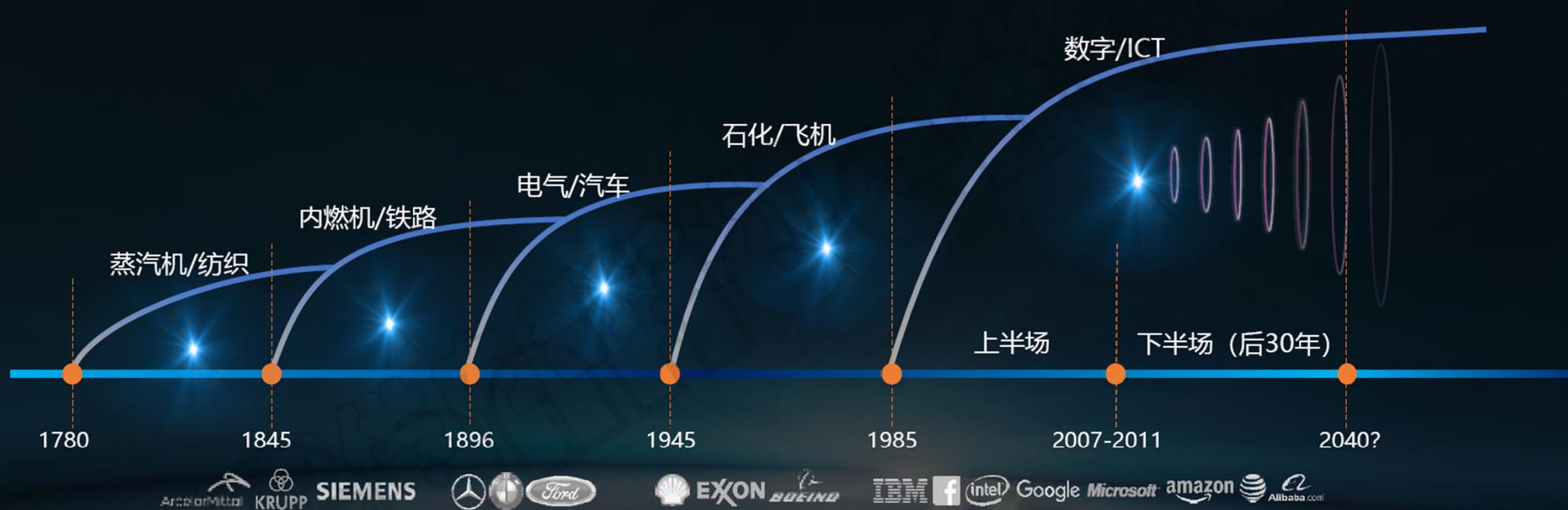
Evolutionary history of industrialization and machine tools



Source: C. Liu et al. / Journal of Manufacturing Systems 48 (2018) 13-24

借用一张华为的PPT：每个产业(技术)周期是50~60年

## 全行业进入信息化产业周期的下半场



- 每个产业周期约50~60年，前30年是技术发明，后30年是加速应用
- 当前，我们进入信息化数字化产业周期的下半场，AI等新技术将会得到加速应用

# 历史的启示：一项新技术从发明到广泛接受需要约20~30年



**【涡喷发动机】**20世纪20~30年代初英、德分别独立发明，过20年后才实际应用于军机和民机[米格15(1948年), Boeing707(1959年)]。

~20年



**【电子计算机】**1946年第一台电子数字计算机ENIAC发明，1971年Intel第一个微处理器4004，1978年IBM PC出现，随后普及应用。

~32年



**【互联网】**始于1969年ARPA网研究项目(美)，22年后Internet开始进入广泛应用(1991年)

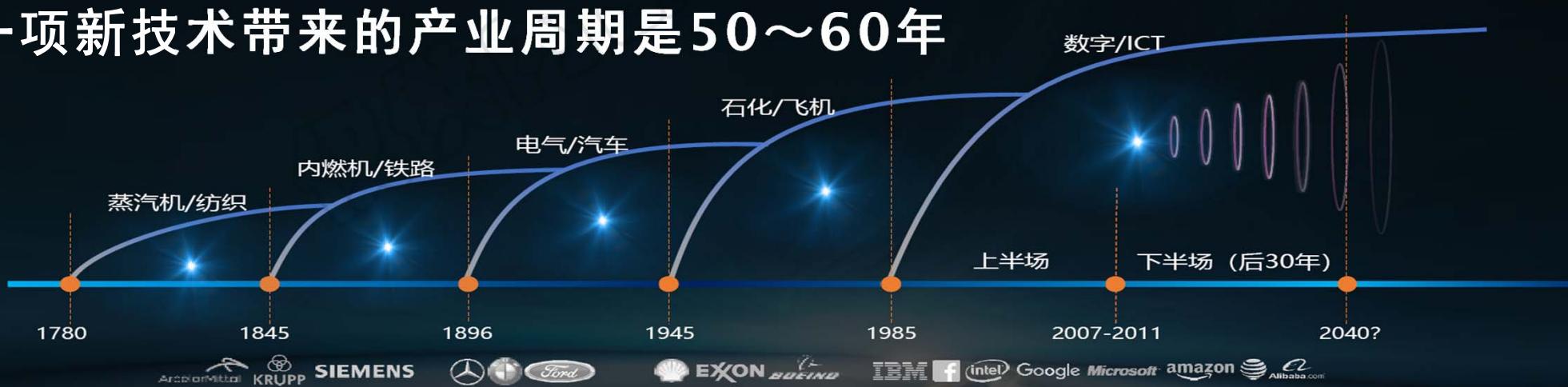
~22年



**【数控机床】**1952年MIT(美)发明，60年代末开始实际应用，80年代初先进工业国家实现机床数控化。

~30年

## 一项新技术带来的产业周期是50~60年



# “高端”的集中体现——“高、精、尖、专、智”

高

—高居众者之上



术构成上的高端  
术指标上的高端  
术经济上的高端  
产业链的核心部位

精

精——精于细微之间



➤ 产品质量精益求精  
➤ 设计结构细巧精湛  
➤ 制造精度精微至优  
➤ 工艺稳定耐久可靠

尖

尖——尖端突破引领



➤ 技术创新突破引领  
➤ 位居产业金字塔尖  
➤ 突破国外行业垄断  
➤ 服务国家尖端产业

专

专——术有专技贵独



➤ 术有专攻领域独有  
➤ 核心技术迭代传承  
➤ 深入融合用户工艺  
➤ 专技人才顶天立地

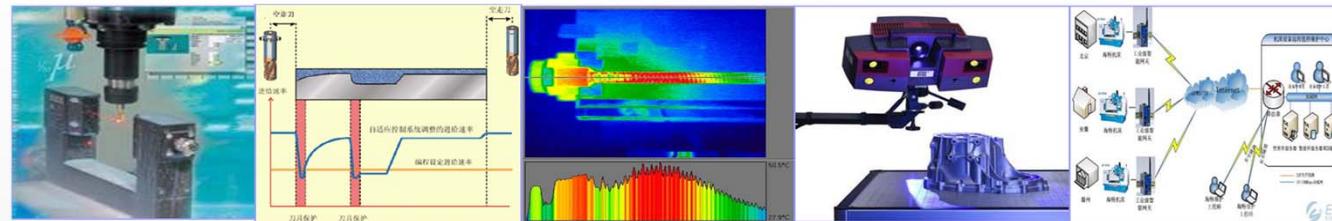
智

智——智慧赋能

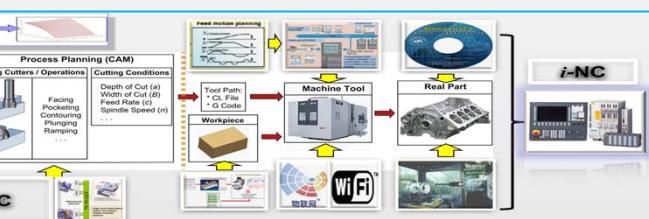


➤ 设计制造集成  
➤ 工业物联平台  
➤ 动态感知数据  
➤ AMT/ICT/A

# 高端数控机床未来发展趋势——从技术进步的角度



智能化



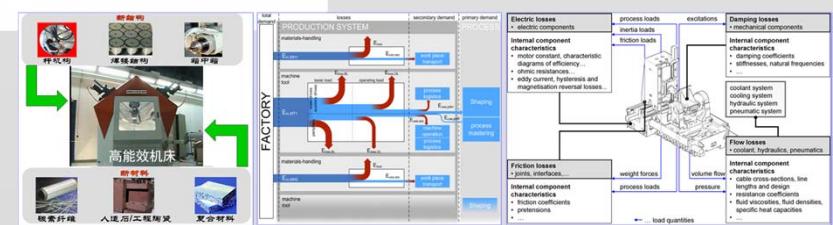
多功能

定制化

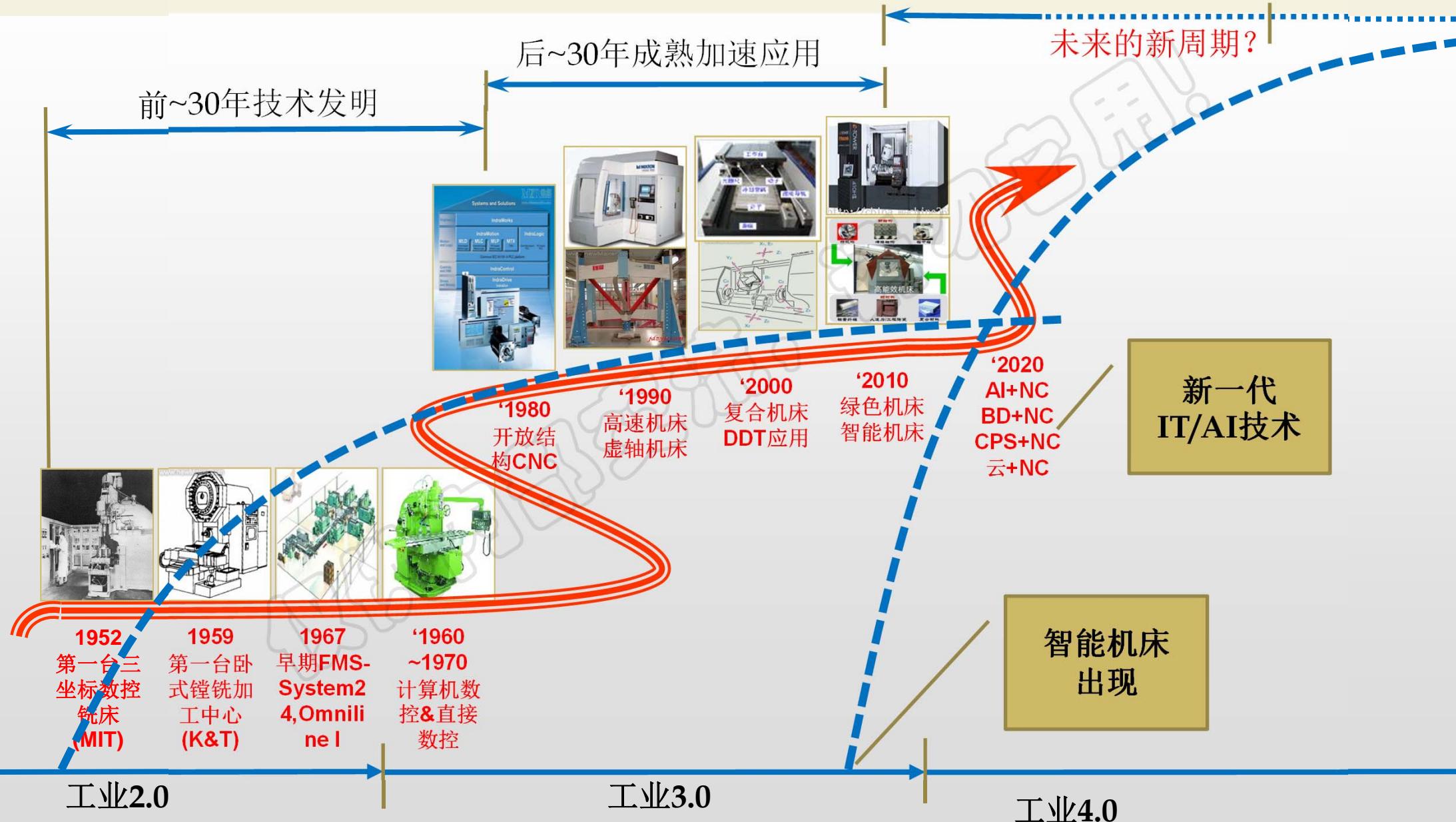


高性能

绿色化



# 历史的启示：机床的新周期已开启，未来将去向何方？



# 数控机床未来创新发展的主要方向——智能化

# 高性能

## 多功能

## 智能化

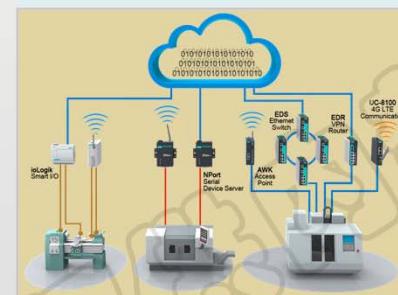
## 定制化

## 绿色化

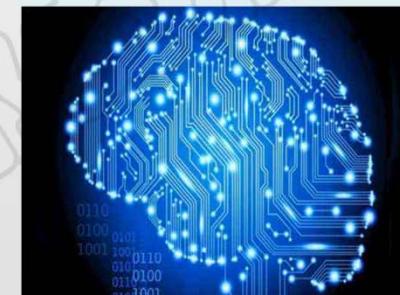
# 感知



## 互联



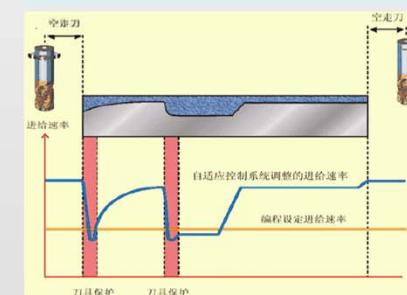
## 学习



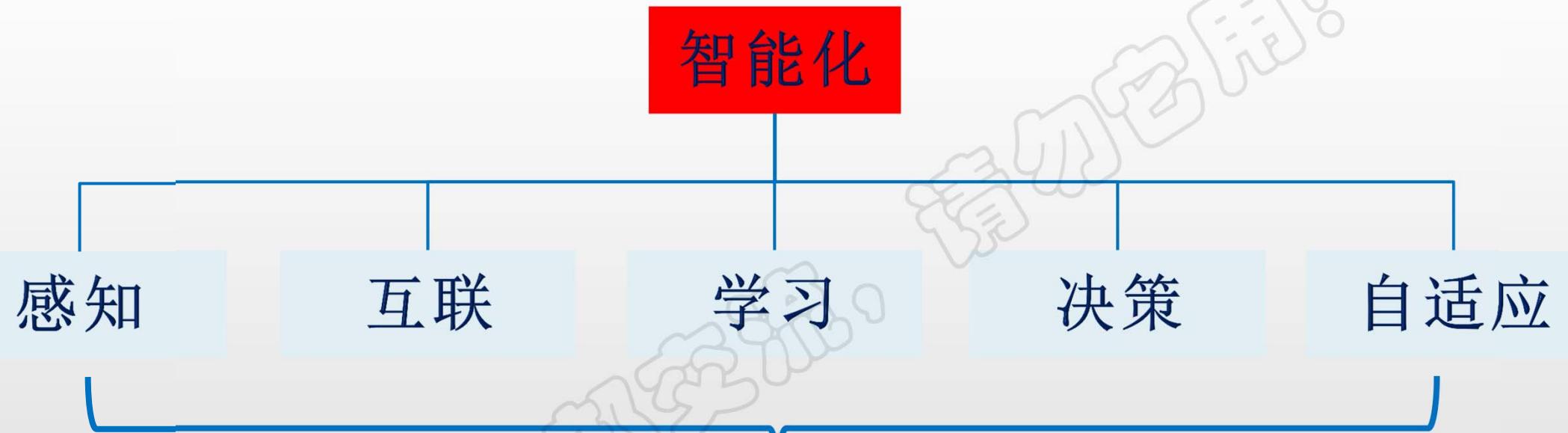
## 决策



## 自适应



# 个人观点：智能控制机床需解决关键技术问题的本质？



已解决几何定义和运动控制等“确定性”问题！



如何进一步解决机床和加工过程中的“非确定性”问题？

“机床-刀具-工件”工艺系统 + “机械、力学、电磁、液气、控制、热”耦合作用  
+ 变形、误差、扰动、性能退化等

# 个人观点：数控机床智能化发展的三部曲

## 非智能化数控机床



**特点：**根据需要加入独立的智能化功能模块  
**实例：**MAZAK Intelligent Machine

## 第一代 嵌入智能化功能模块的数控机床



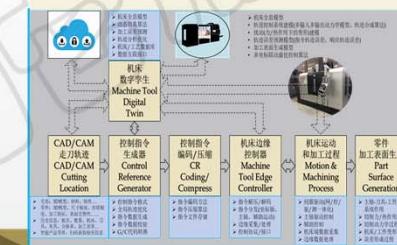
## 第二代 智能化系统与数控机床一体集成



**特点：**  
✓ 丰富的智能化功能模块组合  
✓ 集成的系统平台

**实例：**  
✓ CELOS  
✓ Sinumerik ONE

## 第三代 全新原理和结构体系的智控机床



- 特点：**
- ✓ 智能轨迹规划
  - ✓ 直接轨迹控制
  - ✓ 实时数据感知和驱动自适应调控
  - ✓ 机床数字孪生/CPS
  - ✓ 支持多工艺过程、多能量控制
  - ✓ 物联支持
- 实例：**
- ✓ 期待探索创造

敬请批评指正！

*Thank  
You!*



# 【高性能数控机床关键技术系列讲座】

讲述

数控加工工艺链及其特点

数控机床发展历程

数控机床及数控加工技术新挑战

数控机床关键技术演进及趋势

数控切削加工工艺及其应用

数控机床基本要求和功能需求

数控机床的正向设计方法

数控机床结构设计新趋势

数控机床结构配置

数控机床结构设计中的新技术

典型数控机床结构分析

讲  
述  
件加工  
的数控机  
设计原理和  
云讲  
述  
机床结构  
设计第4讲  
进给驱动伺服  
控制系统

进给驱动伺服控制系统概述

进给驱动功能部件

进给系统机电耦合动力学分析

进给系统控制性能的优化

主轴结构设计

主轴性能分析

主轴工况感知及智能化

主轴动力学特性与颤振分析

智能机床架构研究

智能机床功能模块及实现

机床与加工过程数字孪生研究

第6讲  
智能机床关键  
技术研究

未来智控机床探讨与展望