



中航工业北京航空精密机械研究所

AVIC BEIJING PRECISION ENGINEERING INSTITUTE FOR AIRCRAFT INDUSTRY

精密超精密加工技术 在航空制造中的应用

精密制造技术航空科技重点实验室

杨 辉



目录

1

精密超精密加工技术的发展历史

2

精密超精密加工技术在航空中应用

3

精密超精密加工技术在其他领域作用

4

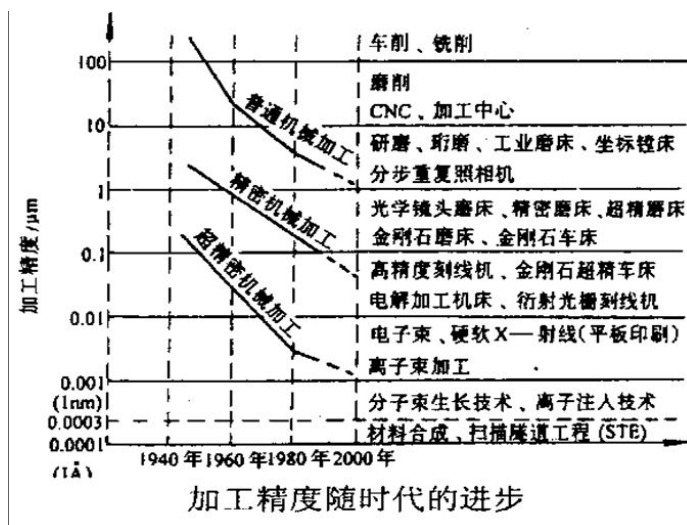
精密超精密加工技术的发展趋势

5

结束语

一、精密超精密加工技术的发展历史

	尺寸精度	表面粗糙度	加工技术
微米级	1~10 μm	Ra 0.4~0.04 μm	精密加工
亚微米级	1~0.01 μm	Ra 0.04~0.005 μm	超精密加工
纳米级	< 0.01 μm	Ra < 0.005 μm	纳米加工



包括：设备、工艺、刀具、检测、装配、环境控制等



一、精密超精密加工技术的发展历史

- 20世纪60年代初** **美国宇航、航天**
 —— 航空航天大国
西欧制造业
 —— 德国瑞士精密机械闻名于世
- 20世纪70年代** **日本高新技术产业**
 —— 光学电子产品世界领先
- 20世纪90年代** **美国将其列为国防和国家关键技术**
- 2000年开始** **西欧实施纳米技术行动计划**
 美国实施纳米制造技术研究

一、精密超精密加工技术的发展历史

传统超精密加工技术——非确定性

- 加工设备精度要求不高
- 加工去除量很小且不确定，需反复加工和测量工序迭代完成加工
- 适合玻璃、陶瓷等硬脆材料及简单形状零件加工
- 制造成本高、周期长，可达到高的加工精度（面形精度可达波长 λ 的几十分之一）

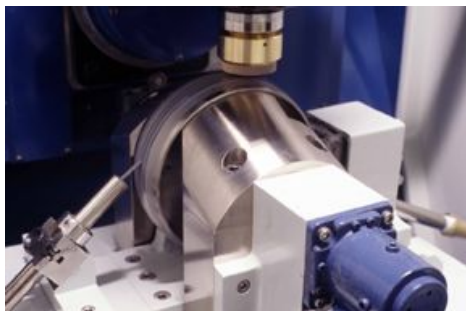


一、精密超精密加工技术的发展历史

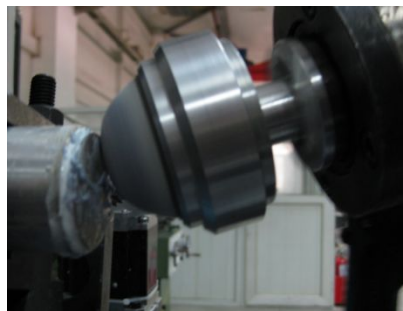
随着现代计算机控制技术的发展，通过对传统的非确定性非球面光学零件制造技术加以改进，如在加工过程中对研抛工具形状、工件支撑状态、以及加工参数等进行实时自适应控制，从而提高了加工效率——（**准**）**确定性加工**。



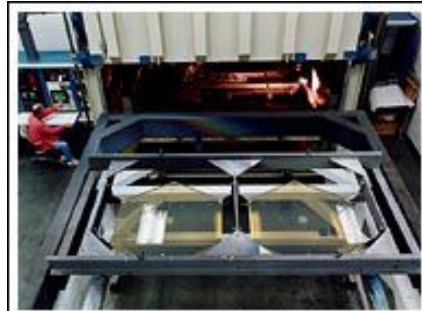
小磨头抛光



磁流变抛光



进动气囊抛光

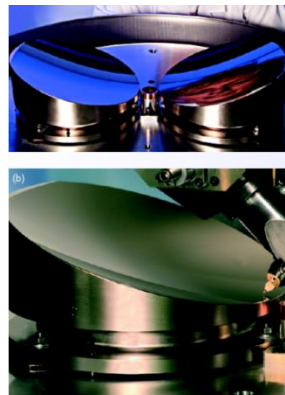
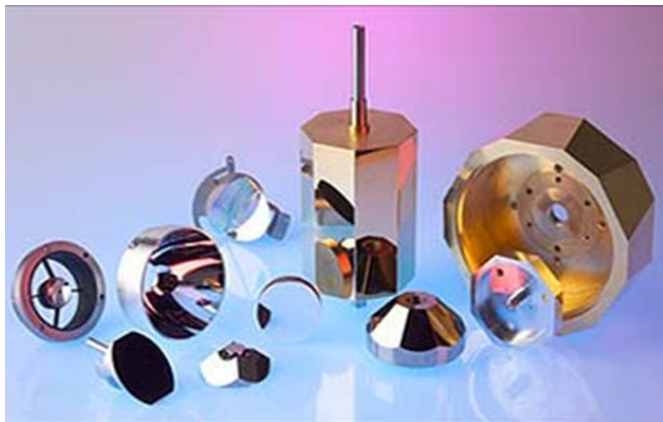


离子束抛光

一、精密超精密加工技术的发展历史

确定性超精密加工技术

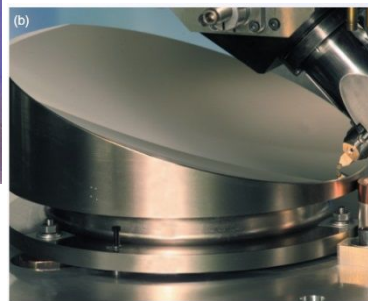
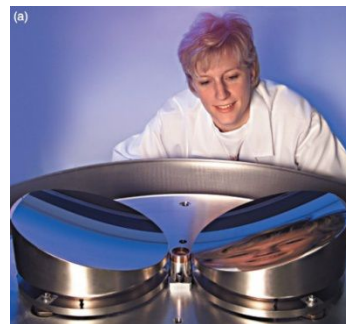
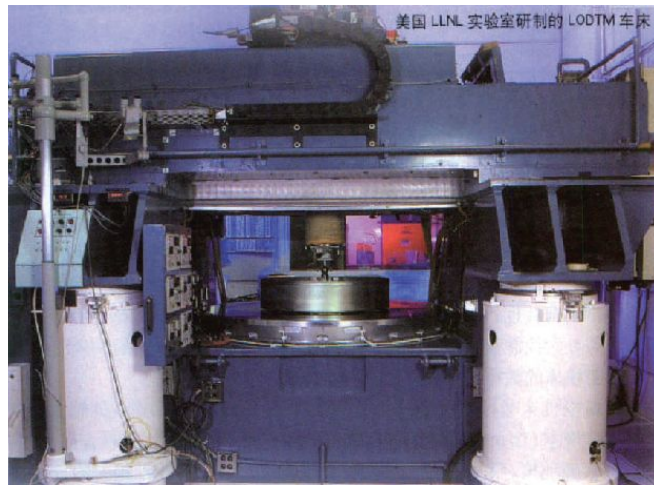
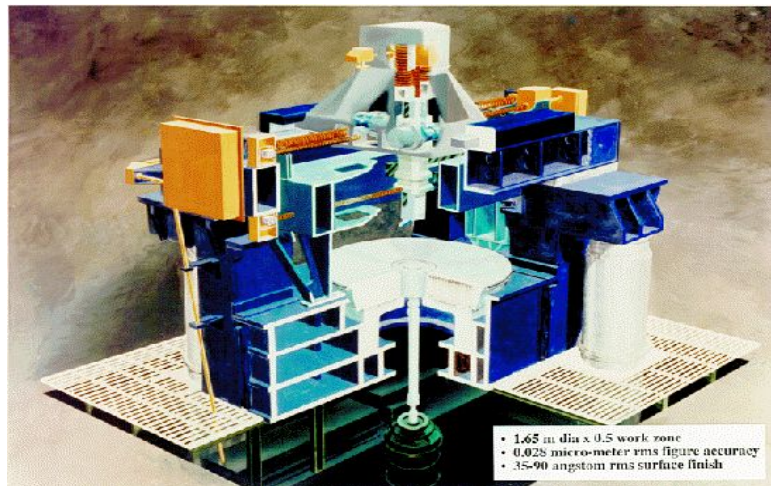
综合利用当代精密机械制造、坐标测量、伺服运动控制、数控、以及环境控制等一系列尖端科技发展成果，其技术核心是超精密加工机床。能控制加工工具实现具有极高分辨率和精度的空间轨迹运动，直接加工出非球面、自由曲面等复杂面形，达到光学级表面质量的零件。能加工传统的非确定性加工技术所不能加工的材料和形状的光学零件，实现高效、低成本、大量生产。



(a) National Aeronautics and Space Administration engineer Holly Cagle examines SPARCLE's primary mirrors on the Large Optics Diamond Turning Machine (LODTM) spindle. (b) A close up of a mirror and the diamond tool on LODTM.



一、精密超精密加工技术的发展历史



LODTM大型立式光学金刚石超精密车床

机床蓝色部分为超级钢、室温稳定性: 0.001°C 量级

加工范围: $\Phi 1500\text{mm} \times 500\text{mm}$;

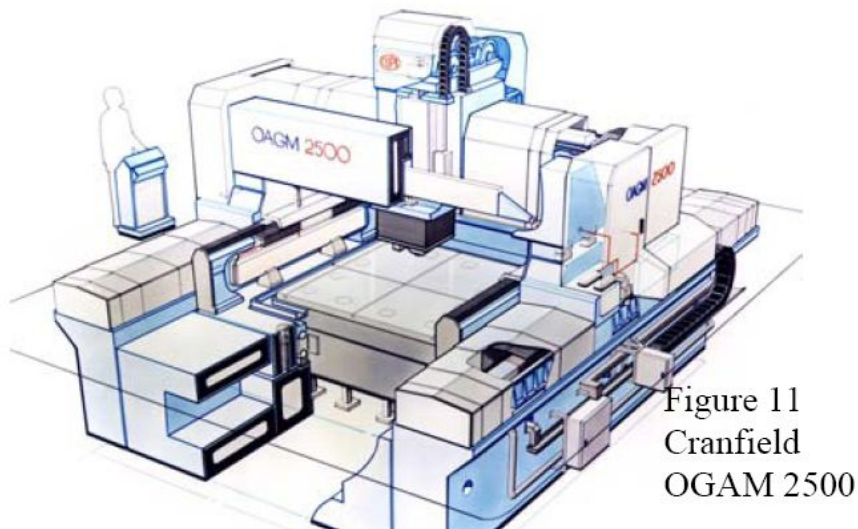
面形精度: $0.028 \mu\text{m}(\text{rms})$; 表面粗糙度: $3.5\text{-}9\text{nm}(\text{rms})$;

(美国Lawrence Livermore National Laboratory, 1984年)

SPARCLE初级反射镜

美国宇航局用的抛物面镜

一、精密超精密加工技术的发展历史



**OAGM 2500离轴光学镜面磨床（目前世界最大的超精密磨床）
（KODAK）/英国Cranfield**

加工范围：Φ2500mm×800mm；分辨率2.5nm

X射线天体望远镜的大型曲面反射镜加工

一、精密超精密加工技术的发展历史



**BoX® Ultra Precision
Free Form Grinding
and Measuring Machine**



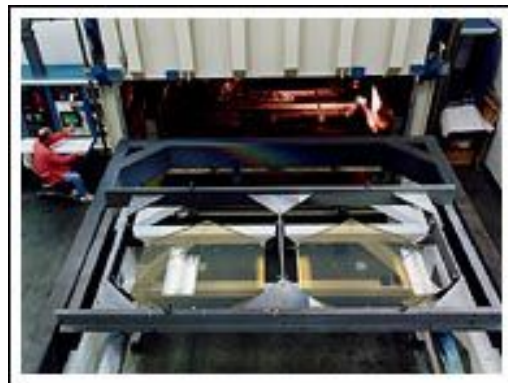
**BOX@超精密自由曲面磨削测量机床
英国Cranfield**

一、精密超精密加工技术的发展历史

1980 - Large Diamond Turning Machine



磁流变抛光设备
(美国QED公司)



离子束抛光设备
(美国Kodak公司)

英国Cranfield
(大立车)

超精密磨床
Cranfield和国立物
理学实验室



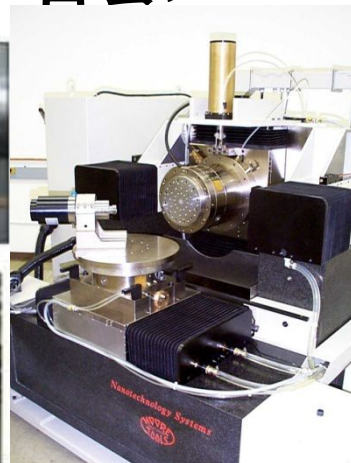
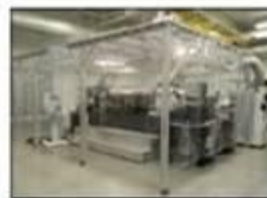
一、精密超精密加工技术的发展历史

商品化的超精密金刚石车床

英国Taylor Hobson公司：长春光机所MSG-325（国内第一台）、昆明298厂、航天230厂、兵器205所等

美国Precitech公司：国防科技大学等

美国Moore公司：天津大学、哈尔滨工业大学、成都菲斯特等
（据了解，目前Moore公司在国内的设备已经超过100台套）





一、精密超精密加工技术的发展历史

日本现有20多家超精密加工机床研制公司，重点开发民用产品所需的超精密加工设备，并成批生产了多品种商品化的超精密加工机床，日本在**相机、电视、复印机、投影仪等**民用光学行业的快速发展与其先进的超精密加工技术有着直接的关系。

（东芝公司的潜艇事件）

➤ 东京精密、丰田精机、东芝、不二越、大阪金刚石等等。



一、精密超精密加工技术的发展历史

国内超精密加工技术的发展



亚微米超精密车床
(哈尔滨工业大学)
2000年



超精密车床
(北京机床所)
2002年



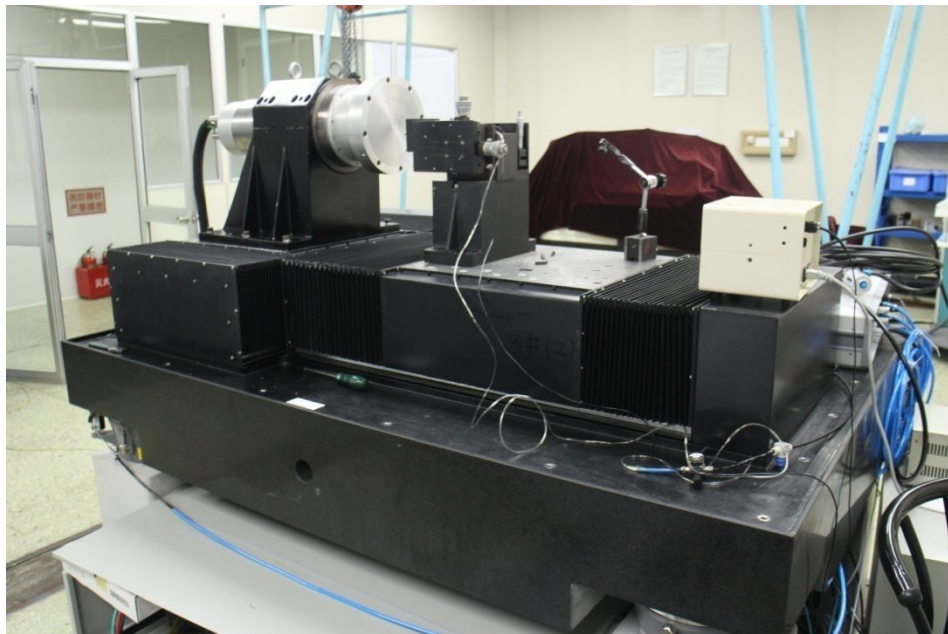
非球面超精密车床
(北京航空精密机械研究所)
2001年

国防科技大学、航天230厂、长春光机所、兵器205所等
(需求也是从军工开始)

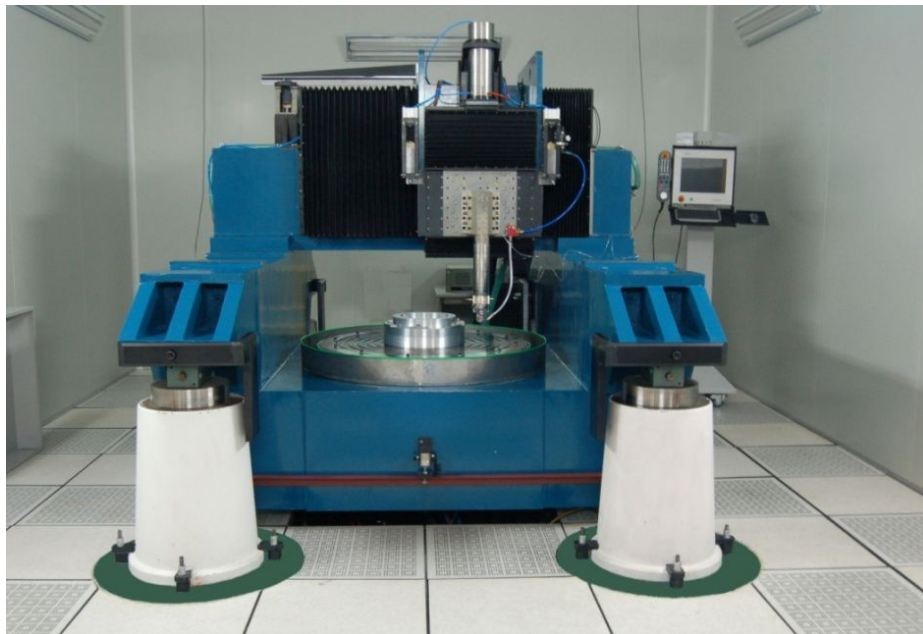


一、精密超精密加工技术的发展历史

国内超精密加工技术的发展



多轴超精密车床 ($\Phi 600\text{mm}$)
(北京航空精密机械研究所) 2012年



大型非球面超精密车床 ($\Phi 1000\text{mm}$)
(北京航空精密机械研究所) 2012年



目录

1

精密超精密加工技术的发展历史

2

精密超精密加工技术在航空中应用

3

精密超精密加工技术在其他领域作用

4

精密超精密加工技术的发展趋势

5

结束语



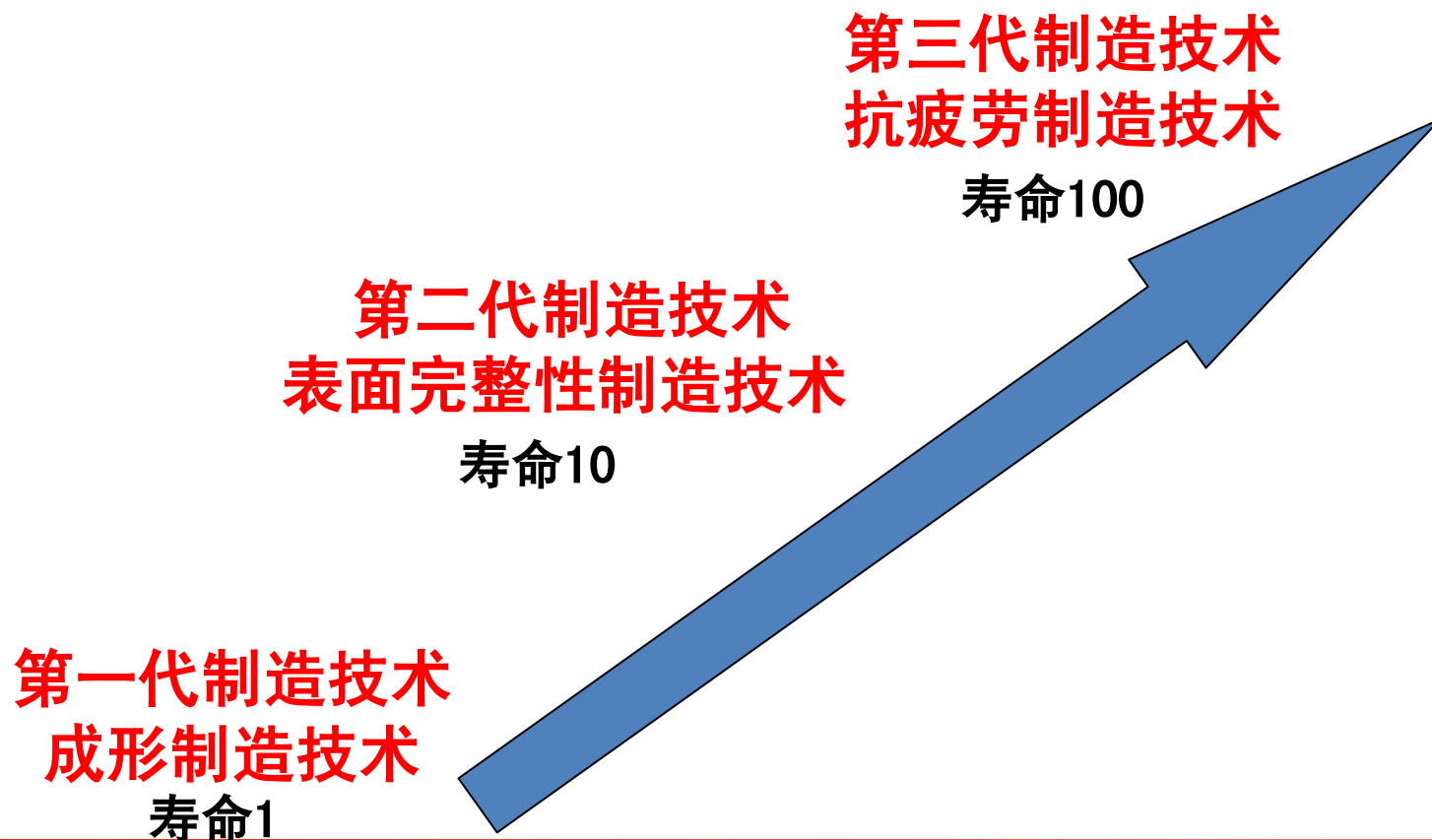
二、精密超精密加工技术在航空中的应用

- **精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术**
- **飞行器减阻防冰微结构功能表面超精密加工**
- **发动机喷嘴精密加工及检测技术**
- **发动机叶片精密磨削及检测技术**
- **精密超精密加工技术在其他领域方面的应用**



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术





二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术

第一代制造技术——成形制造技术

利用加工设备对工件的外形尺寸或性质进行改变的过程，是以满足尺寸、形位公差、表面粗糙度等设计图纸规定的要求为目的，其主要特点是依据表面形貌（粗糙度、划痕等）特征评价加工质量，保证设计图纸尺寸及精度要求，但对构件抗疲劳性能的要求重视程度不够。

航空构件存在的三大问题：寿命短、可靠性差、结构重



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术

第二代制造技术——表面完整性制造技术

控制表面完整性，以疲劳性能为主要判据和提高疲劳强度的制造技术。

表面完整性是指零部件加工后表面**几何特性**和**表面物理性质**的总称，表面几何特性包括表面粗糙度、波纹度、纹理、擦痕、几何形状和尺寸偏差等技术指标；表面物理性质包括表面层的微观组织、塑性变形、再结晶、显微硬度、残余应力、微观裂纹、应力集中等。



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术

第三代制造技术——抗疲劳制造技术

抗疲劳制造技术是在控制工件表面完整性的基础上，以疲劳性能为主要判据和提高疲劳强度的先进制造技术，它是指在不改变零件材料和界面尺寸的前提下，通过在制造工艺过程中改变材料的组织及应力分布状态来提高零部件疲劳寿命的制造技术，这种技术的一个突出特点是不改变零件的结构和材料，不增加材料的重量，但能大幅度提高材料疲劳寿命。**本质是构筑抗疲劳表面变质层，保证疲劳寿命。**

核心技术之一是精密超精密加工工艺，可提高表面质量、改善表面应力状态，从而提高零件的疲劳寿命。



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术

航空关键构件： 工作环境恶劣：动载荷、极端环境（高温等），疲劳是主要失效模式，失效将导致灾难性的后果。

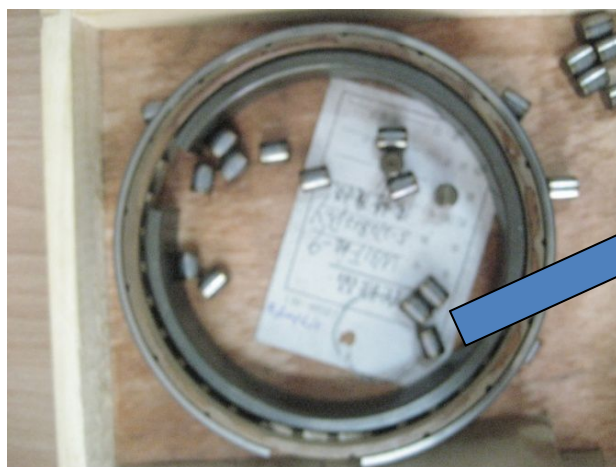
转动件：叶片、**盘**、轴等

传动件：**轴承**、齿轮等

主承力件：起落架、对接螺栓、框、梁等

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术



美国发动机轴承寿命：30000h，我国300h



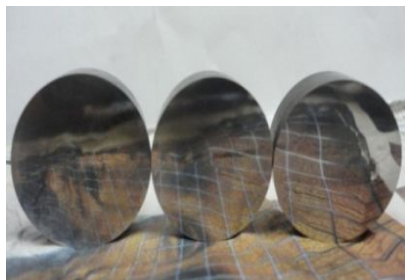
二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术 航空抗疲劳制造技术

- 1、材料改进与制坯
- 2、抗疲劳精密超精密加工
- 3、表层硬化
- 4、表层组织再造改性（表面强化）
- 5、热处理
- 6、装配
- 7、疲劳寿命评价
- 8、精密检测

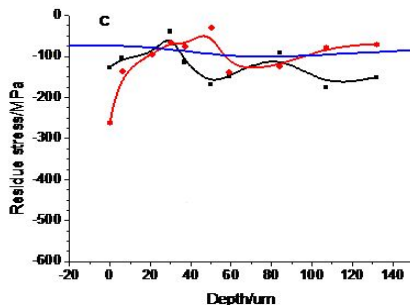
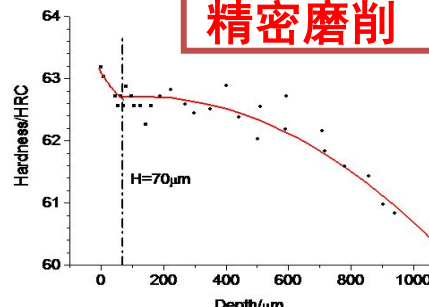
二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术是现代高新技术产业发展基础

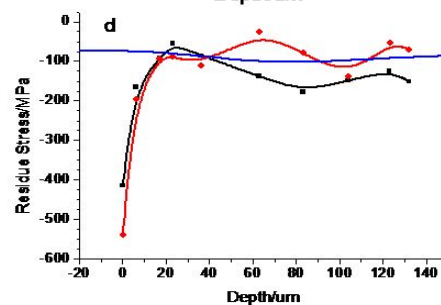
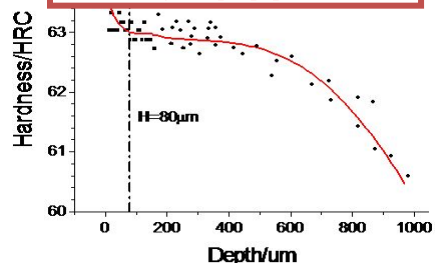


显微硬度场
残余应力场

精密磨削



超精密磨削



超精密磨削及研抛工艺

显微硬度有所提高。

20 μm 深度以内，残余压应力增高。

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术



滚动接触疲劳寿命测试设备

关键技术:

高转速、大承载、高精度轴系（空气静压主轴）；微弱信号采集、识别与分析处理。

二、精密超精密加工技术的作用

➤ 精密超精密加工技术是现代高新技术产业发展基础

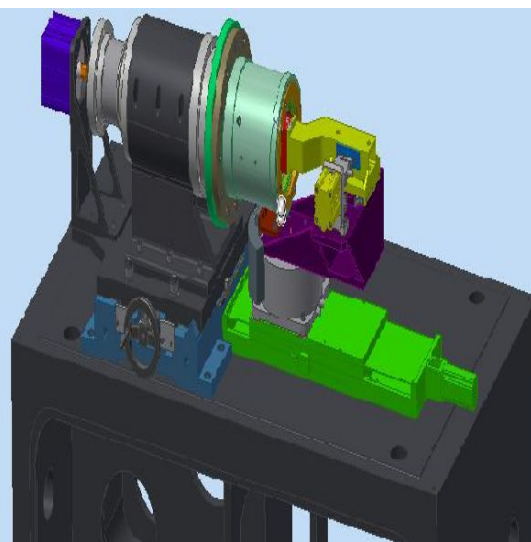
试样	Ra (μm)	Ry (μm)	Rz (μm)	ρ (μm)	Kst
精密磨削	0.291	2.819	0.249	20.459	1.031
超精密磨削	0.035	0.643	0.034	9.454	1.012

加工对象	M50NiL渗碳			M50NiL渗氮	
加工方式	“成形”磨削	超精密磨削	研磨	磨削	研磨
旋弯疲劳寿命	4.5×10^4	7.2×10^5	6.8×10^5	1.36×10^6	1.43×10^6
接触疲劳寿命				1.48×10^7	1.55×10^7

渗碳M50NiL经表面完整性磨削加工后，弯曲疲劳寿命较成形磨削提高约16倍。

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术

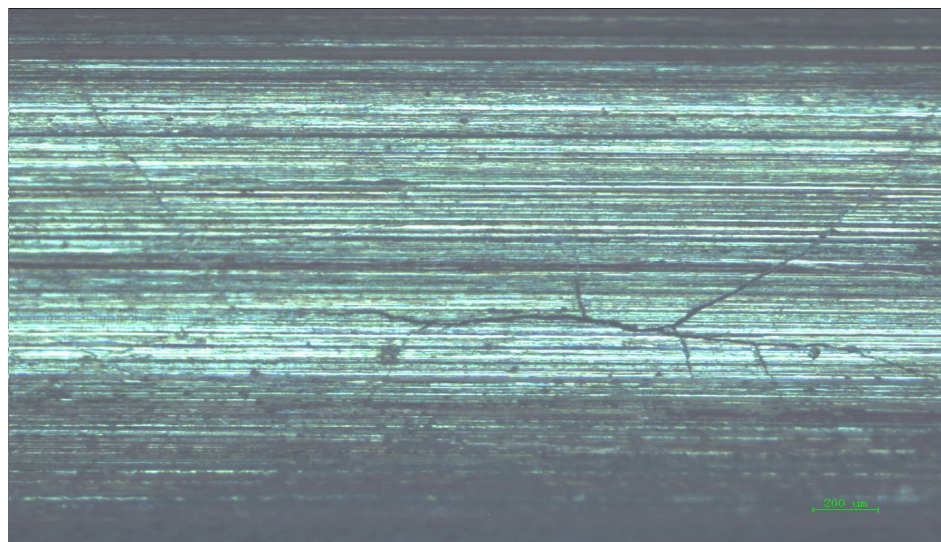


关键技术：**超声振动复合强化**，高频（30KHz）、高能量密度且振幅很小的超声波机械能和冲击激活能的复合能量，在零件表面产生压应力（从900MPa提高到1200MPa），细化金属晶粒提高零件表面的显微硬度、耐磨性及耐腐蚀性，延长疲劳寿命（**提高了3-5倍**）。

强化后不能破坏材料的表面粗糙度等，设备精度高、控制系统复杂。

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

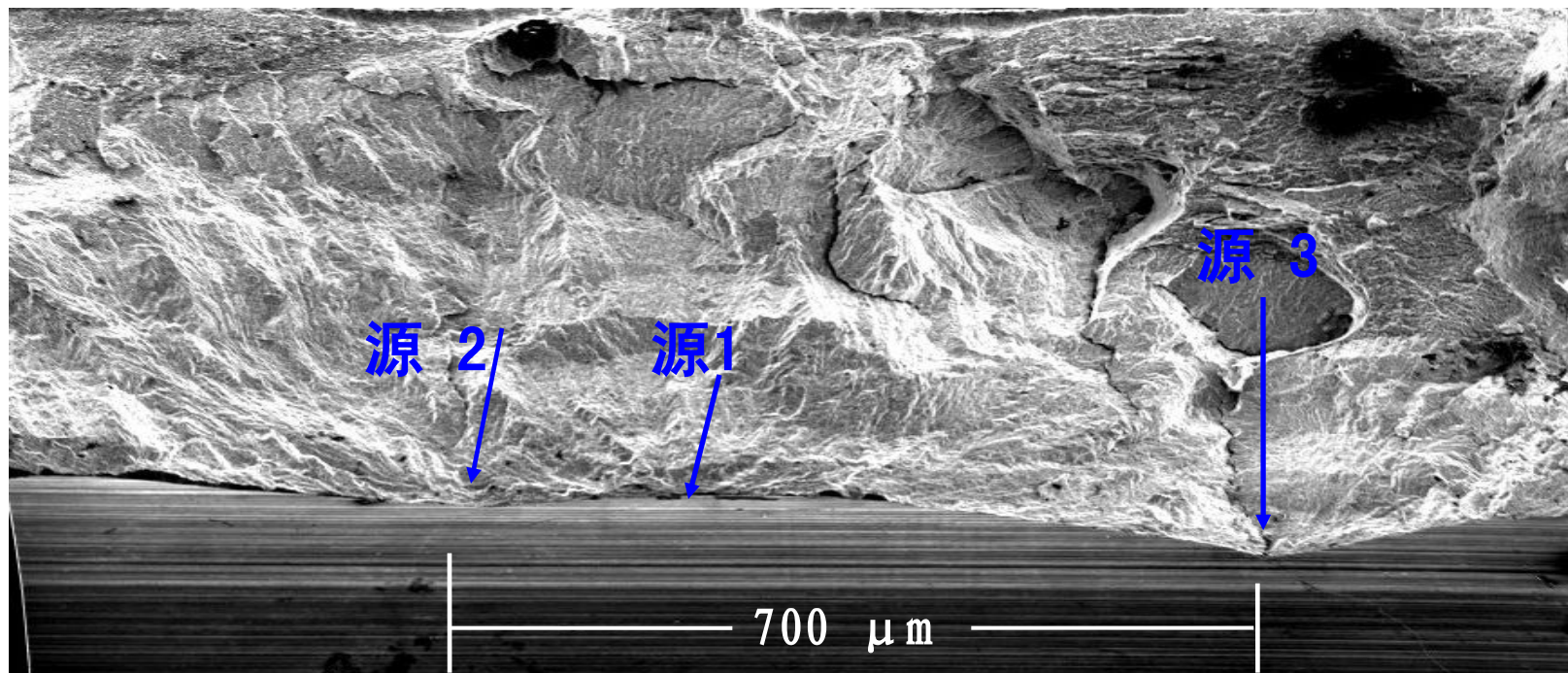
- **精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术**
盘轴类零件的疲劳失效——高压压气机盘：
最早失效不到300h，出现了裂纹。



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

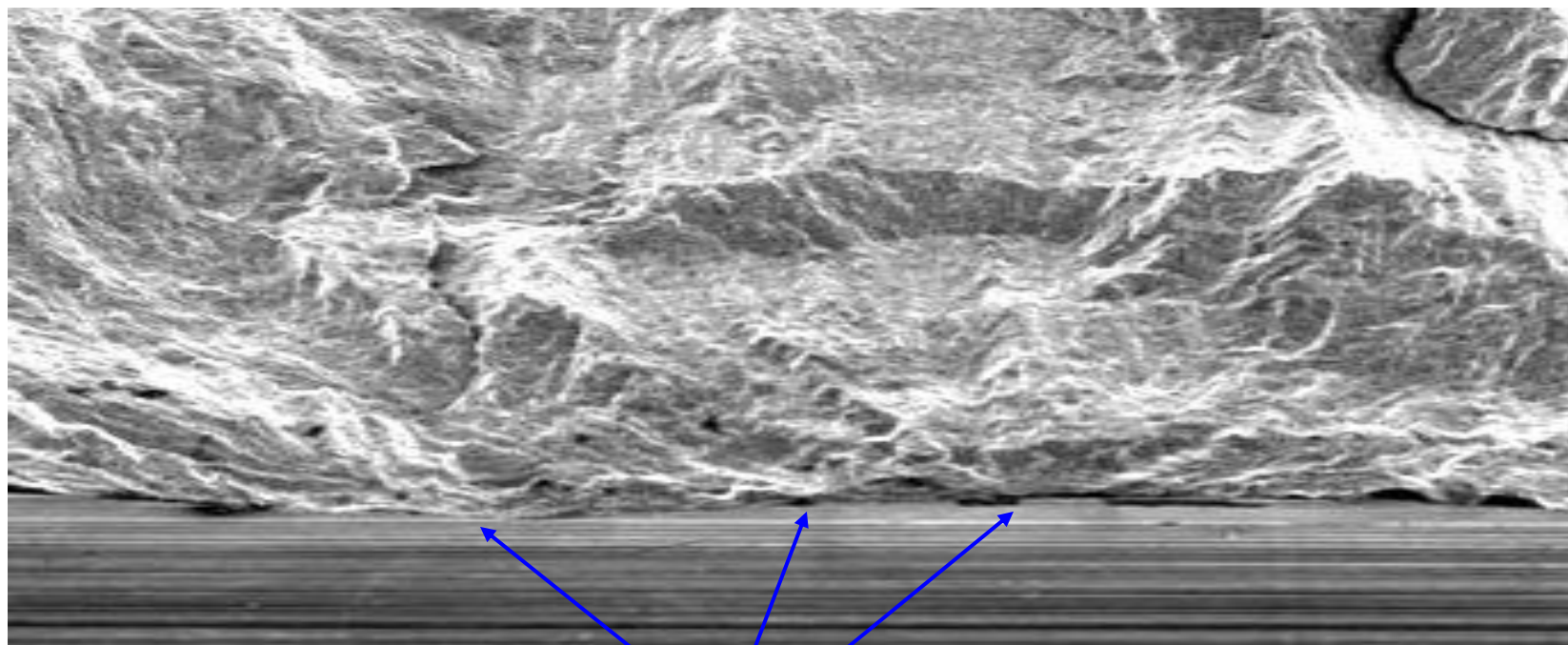
➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术

疲劳特征：表面·多源 TC-17合金脆性大疲劳源自车削刀痕不连续



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术



高应力集中 ←

疲劳源

← 刀痕不连续

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 精密超精密加工技术与航空抗疲劳制造技术



➤ 疲劳裂纹发生在前止口轮缘/腹板转接R2处（并不是孔、榫槽等应力集中系数大的部位）

➤ 成形刀切削、表面质量差（ $Ra6.4\mu m$ ）

- 精密数控切削R2；
- 采用抛光工艺，粗糙度提高到 $Ra0.8-1.6\mu m$
- 进行超声振动复合强化工艺，进一步提高抗疲劳性能

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 飞行器减阻防冰微结构功能表面超精密加工

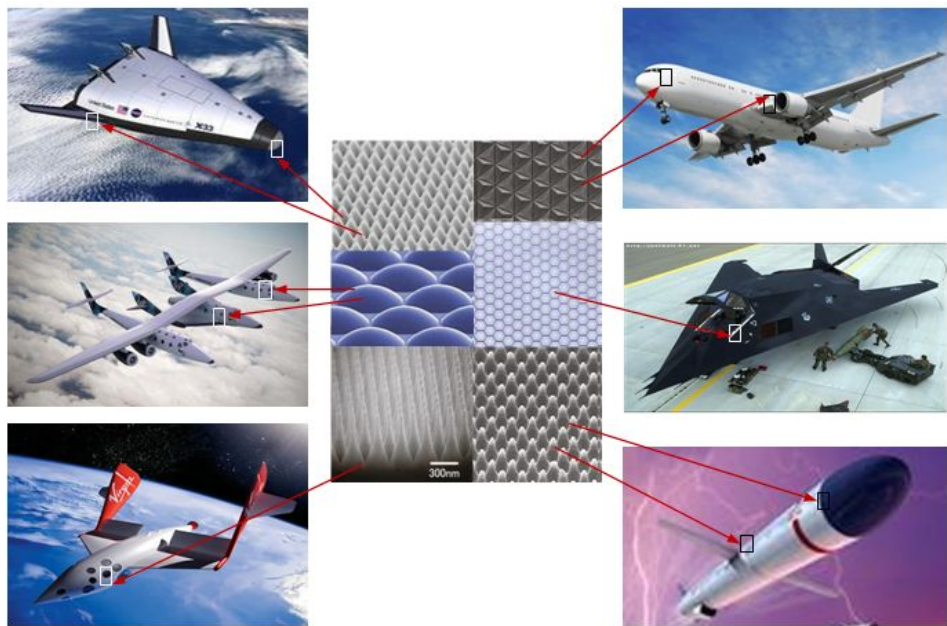


微结构功能表面具有特定的拓扑形状，结构尺寸一般为10–100 μm ，面形精度小于0.1 μm ，其表面微结构具有纹理结构规则、高深宽比、几何特性确定等特点，如凹槽阵列、微透镜阵列、金字塔阵列结构等，这些表面微结构使得元件具有某些特定的功能，可以传递材料的物理、化学性能等，如粘附性、摩擦性、润滑性、耐磨损性，或者具备特定的光学性能等。

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 飞行器减阻防冰微结构功能表面超精密加工

航空、航天飞行器宏观表面加工出微纳结构形成功能性表面，不仅可以减小飞行器的风阻、摩擦阻，减小摩擦，还可以避免结冰层形成，提高空气动力学和热力学功能，从而达到增速、增程、降噪等目的，同时表面特定的微结构特征还能起到隐身功能，增强突防能力。





二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 飞行器减阻防冰微结构功能表面超精密加工 存在问题

低表面能防除冰
疏水涂层技术

薄膜减阻技术
(V、U型槽)

表面微观结构形状精
度和分布等无法控制

涂膜表面的表面微结
构所起到得作用无法
充分发挥

新型的微结构
复合功能薄膜

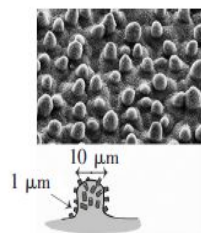
减阻、排污
防冰、除冰

防污、排污
无法解决

影响了减阻效
果，维护困难

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 飞行器减阻防冰微结构功能表面超精密加工



Source: <http://www.sharkinformation.org/photo/>, <http://scienceofnature.com/>

出污泥而不染——疏水防污排污

沟槽形鲨鱼盾鳞肋条结构——减阻



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 飞行器减阻防冰微结构功能表面超精密加工

由于在飞机上无法直接开沟槽，美国3M 公司已提供给美、英、法、德等国的研究者及飞机公司试验用的不同规格的减阻薄膜，供试验研究及飞行试验应用。

➤ 空客把带沟槽的薄膜贴在A320、A340上进行了2年左右的飞行考核试验，结果节油1%-2%；

➤ 香港国泰航空长期在A340上敷贴微结构薄膜减阻，节油约3%；

➤ 国内气动院、南航、西工大等进行过类似模型减阻试验。

➤ 舰船上的使用——美国一条贴有类似薄膜的快艇争得了美洲杯桂冠；

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

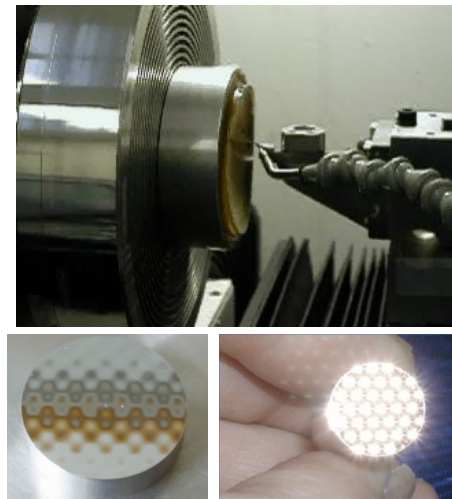
➤ 飞行器减阻防冰微结构功能表面超精密加工 微结构功能表面的加工工艺



辊筒模具超精密加工



超精密铣削



**快速刀具伺服加工
慢速拖板伺服加工**

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机喷嘴的精密加工及检测技术

喷嘴自身特点

- 1、零件结构特征复杂微小
(孔内容槽 0.4 ± 0.05) ;
- 2、尺寸及形位公差要求高
(副喷口内锥孔同轴度 $\Phi 0.01$) 。



存在问题

- 1、加工及检测方法落后；
- 2、缺乏零件重要尺寸在线/ 离线 高精测量技术；
- 3、缺乏喷嘴局部性能检测技术、喷嘴性能综合评价方法。



最终性能表现

- 1、喷嘴尺寸及性能一致性差；
- 2、很多关键尺寸无法检测，只能选配零件；
- 3、全寿命周期雾化质量不高。

无法满足高性能发动机高品质喷嘴的需求！



没有保持锐边
底面坑洼不平
表面粗糙度差

国内生产的喷嘴零件



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机喷嘴的精密加工及检测技术

未来20年国产军机需求量（摘自申万研究2014年8月27日数据）

飞机类型	需求量	更换频率	国产发动机占比	发动机数量	发动机中喷嘴数量估计	喷嘴数量估计、（个）	合计需求（亿元）/ 按每个3万元计算
老战机维护	2000	3	100%	1	12	72000	216
新型战机	3500	3.5	90%	1.5（双发 战机各半）	12	198450	595.35
直升机	2800	2	80%	2（估计）	12	107520	322.56
大运	400	2	100%	2	12	19200	57.6
合计						397170	1191.51



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机喷嘴的精密加工及检测技术

民机用 喷嘴

- 1、C919订单：430架*双发*12支=10320支（凤凰网2014年11月）。
- 2、ARJ-21订单：278架*双发*18支=10008支（凤凰网2014年11月）。
- 3、新舟60订单：210架*双发*14支=5880支（民航咨询网2013年底）。
- 4、喷嘴个数*2万元/支喷嘴~5.2亿元（国内自主客机保守估计）。
- 5、其它大型客机、民用直升机喷嘴数量未包含，其需求量预计将更为庞大。（以上数据均不包含备用件、维护件）

汽车等 其它用 途喷嘴

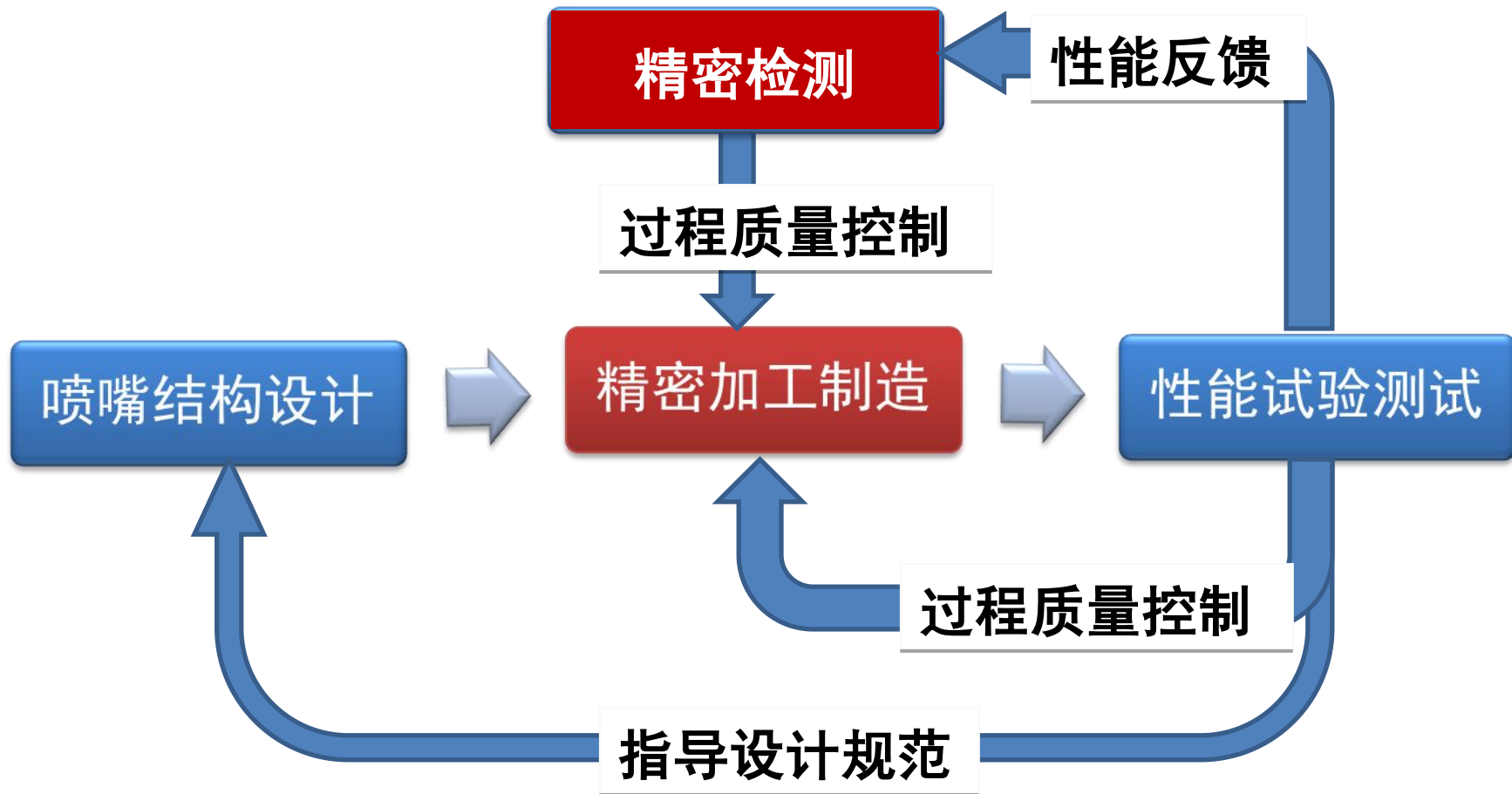
- 2014年汽车的年销售量为1850万辆，按每辆车发动机4缸来计算，喷嘴新增需求量约为1850万辆*4支喷嘴*50元/支=37亿元。
- 此外还可用到巡航导弹、地面重型燃机等领域。

舰用燃 机喷嘴

- 2014年驱逐舰燃机以XX-25000为主，现有6艘*两台机组*16支=192支（不包含备用件）。
- 未来新下水机型将实现全燃化。
- XXC（小功率燃气轮机）应用到军用气垫船，每艘配置两台燃机。

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

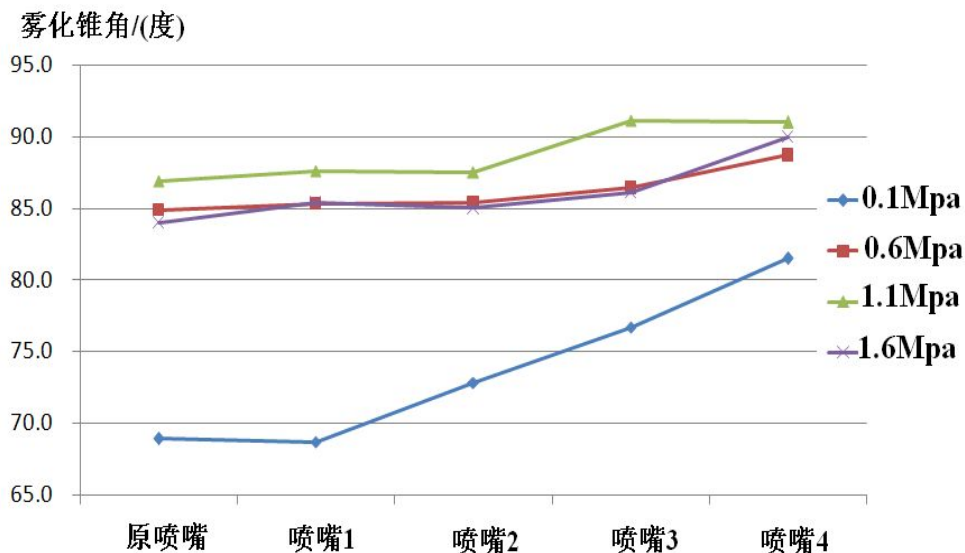
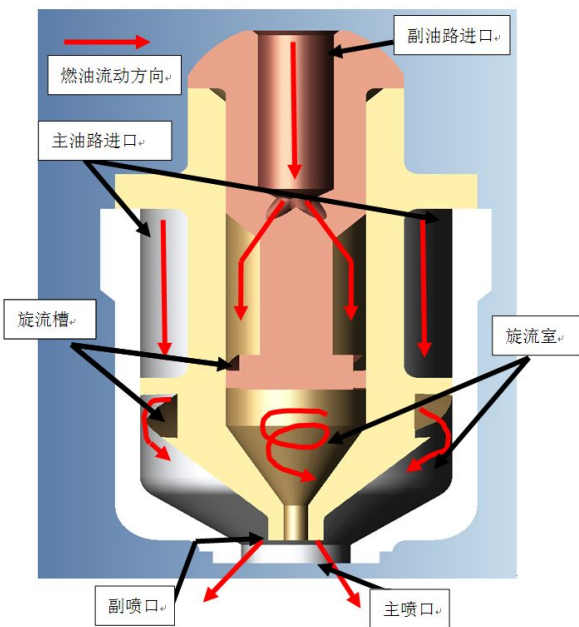
➤ 发动机喷嘴的精密加工及检测技术



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

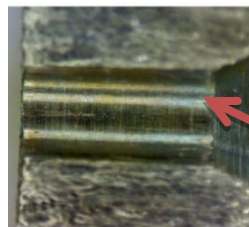
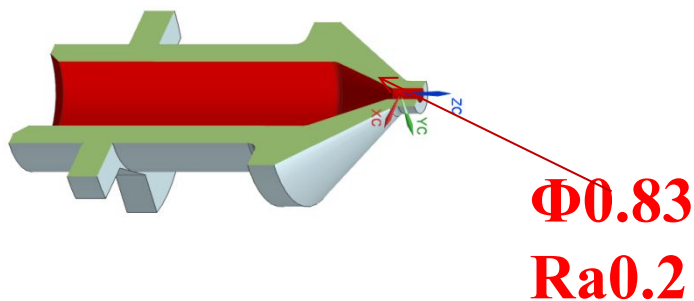
➤ 发动机喷嘴的精密加工及检测技术

• 喷嘴局部性能测试技术及基础数据库的初步建立



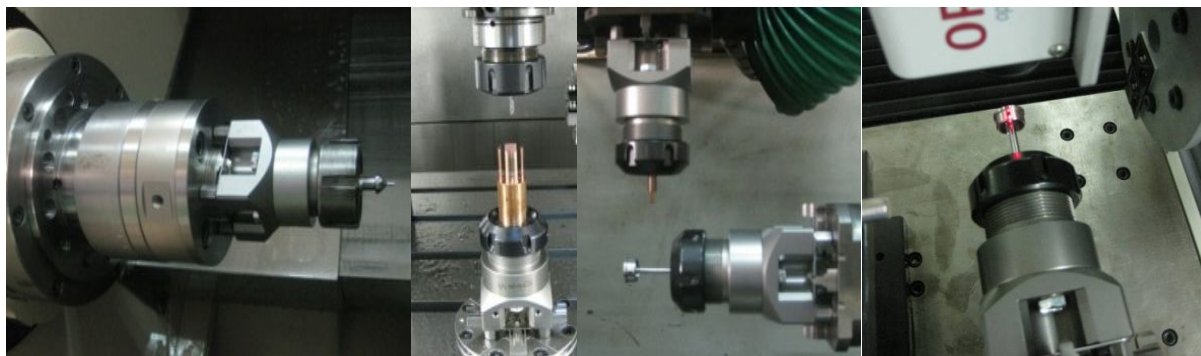
二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机喷嘴的精密加工及检测技术



- 高品质渐变微小锥孔精密制造技术
- 微细结构专用微小异形刀具研制技术

.....



车

铣

电火花

检测

采用高精度免校准车/铣—电火花复合加工、检测方法，在不拆卸零件的前提下，大幅提高重复装夹精度与效率，提高加工、检测过程中电极/零件的稳定性。

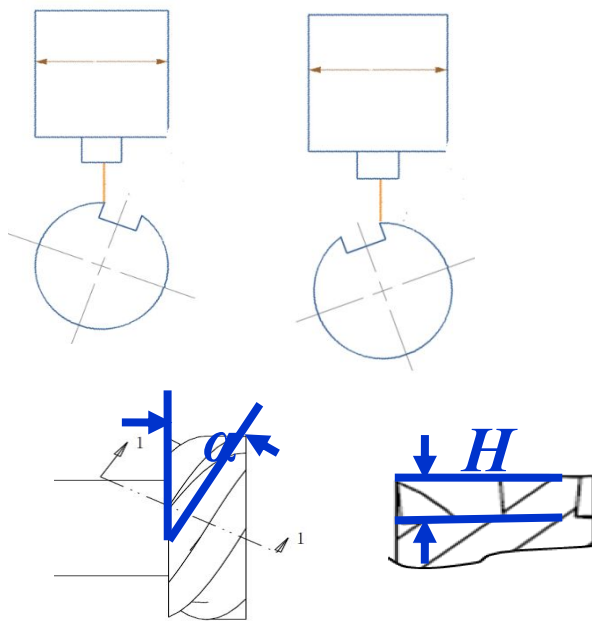
➤ 发动机喷嘴的精密加工及检测技术

基于激光-CCD复合检测技术的 喷嘴零件专用多轴离线检测装置

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

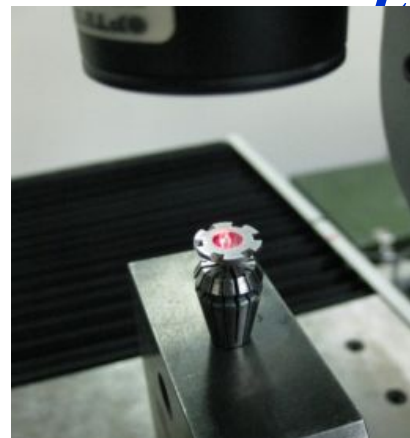
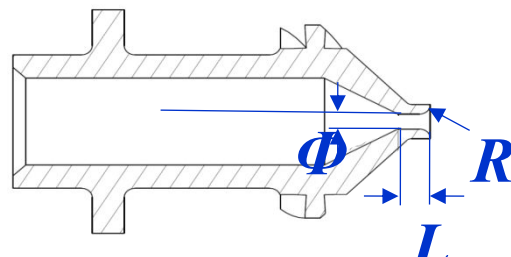
➤ 发动机喷嘴的精密加工及检测技术

➤ 非接触边界（槽边界、外轮廓边界）搜索技术



非接触边界搜索示意

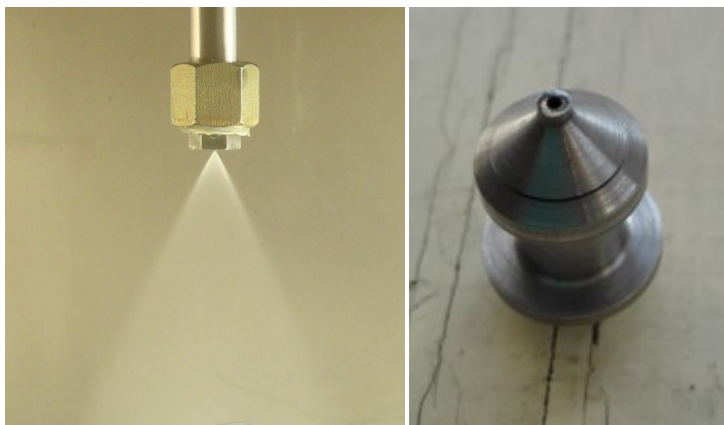
➤ 微小孔（内锥孔、微孔）检测技术



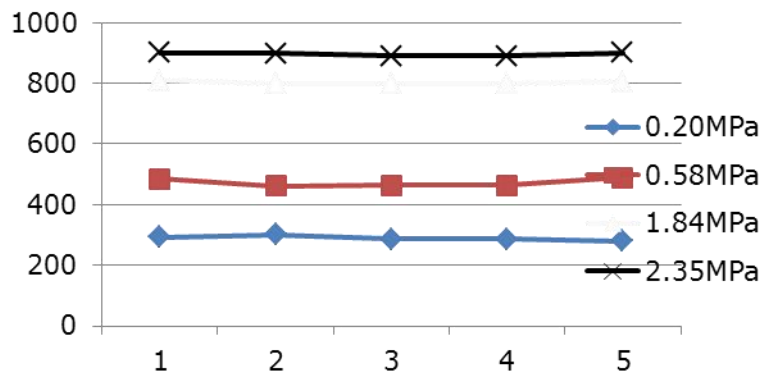
微小孔检测示意

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机喷嘴的精密加工及检测技术



分体式副喷口一致性实验



喷嘴一致性的检验表明
加工的喷嘴一致性良好

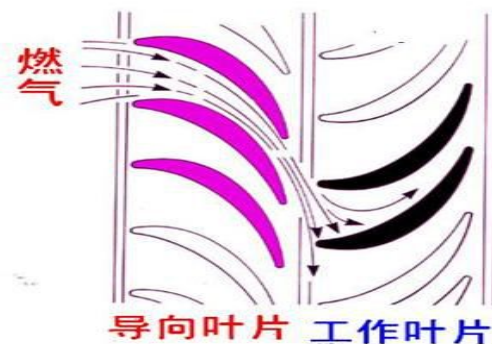
二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机叶片精密磨削及检测技术

叶片进排气边精度和一致性对发动机空气动力的重要影响

◆ 叶片是航空发动机中最为复杂和最为关键的零件之一，叶形及进排气边圆弧则是叶片最为关键的部位，其精度和一致性对航空发动机空气动力性能有着重要影响。

◆ 进排气边影响发动机动力约2~3%，可影响发动机推力约500Kgf；为提高推力，需提高涡轮前温度15~30℃，因此将导致涡轮寿命缩短至原来设计预期寿命的一半。





二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机叶片精密磨削及检测技术

叶片型面设计越来越复杂，精度要求越来越高

- ◆ 现代航空发动机设计载荷越来越高，推重比越来越大，**叶片型面越来越复杂**；
- ◆ 叶片型面是空间自由曲面，每个截面轮廓形状不相同，呈扭转上升状，这是叶片难以加工与检测的最主要原因；
- ◆ 叶片的后缘部分厚度较薄，尤其是**进排气边的半径非常小**，其最小叶尖半径小于0.1毫米，精度要求0.03毫米。
- ◆ **高效精密制造，高精度快速检测，实现叶片批量、高一致性生产。**

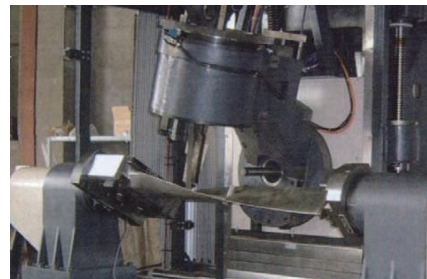
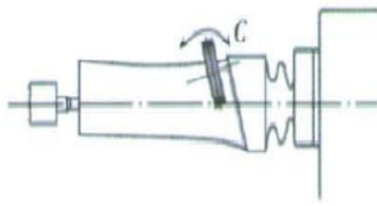
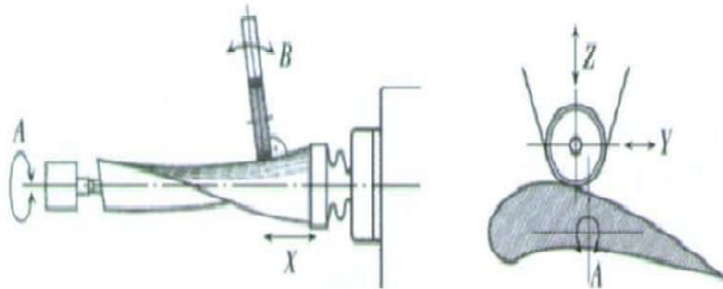
二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机叶片精密磨削及检测技术

◆ 国内航空发动机叶片进排气边加工现状：

目前，在国内航空发动机叶片生产，叶片进排气边的磨削主要靠**手工打磨完成**，不但**工作效率低下**，而且**精度和一致性难以得到保证**。

进排气边磨削有两种方式：砂轮磨削（北航）和砂带磨削（华中科大）。砂轮磨削针对复杂曲面控制难度大；叶片数控砂带磨削在我国还是一个新的工艺方法，六轴联动数控砂带磨床还是一种新机床。距生产使用存在较大差距。

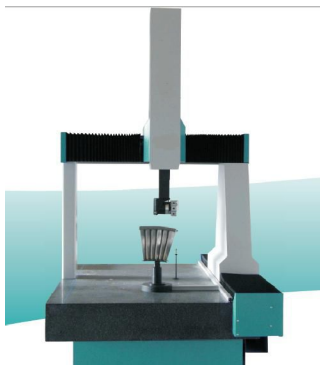


二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机叶片精密磨削及检测技术

◆ 国内航空发动机叶片进排气边检测现状：

生产现场叶片检测**靠手工样板比对**，进排气边精度无法检测。410厂和430厂从WENZEL引进了光学扫描测量机，由于非接触测头标定、工件坐标系定位等原因，造成**测量效率低**，未充分利用。



410引进



430引进



303所研制

二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机叶片精密磨削及检测技术

国外航空发动机叶片进排气边制造现状

国外发动机叶片进排气边的加工，采用多轴数控磨床（砂轮和砂带）装备，六轴联动双矢量控制技术是叶片磨削的关键技术之一。

典型的设备包括德国IBS公司、英国Cyril Adams公司、日本三菱重工和松田精机、美国ExCell10公司及以色列的NEXTEC公司等的涡轮叶片磨床和汽轮机叶片砂带精抛光专用机床。

此类设备的共同点就是均采用多轴联动（基本都是六轴联动）数控；或采用机器人实现多轴联动操作。

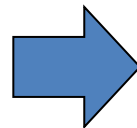
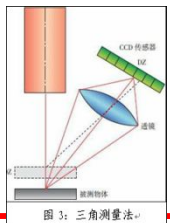
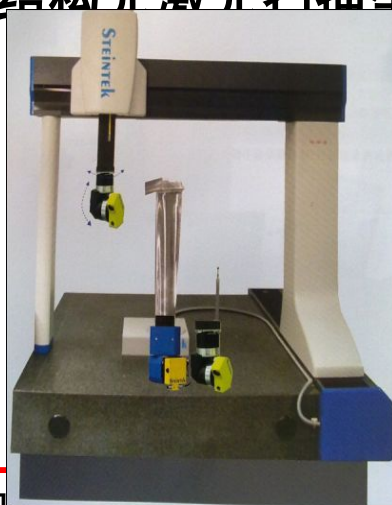
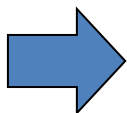


二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机叶片精密磨削及检测技术

德国Wenzel公司于2010年推出首款5轴白光扫描坐标测量机，是目前世界上唯一的五轴光学扫描叶片测量技术。

以色列Nextec公司采用环形光三角测量原理的激光扫描测头，测量精度达到数微米，广泛用于航空航天等复杂结构件的快速坐标测量。是目前世界上最好的点结构光激光扫描坐标测量技术。



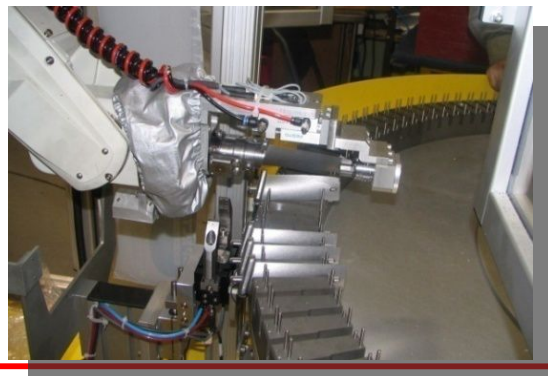
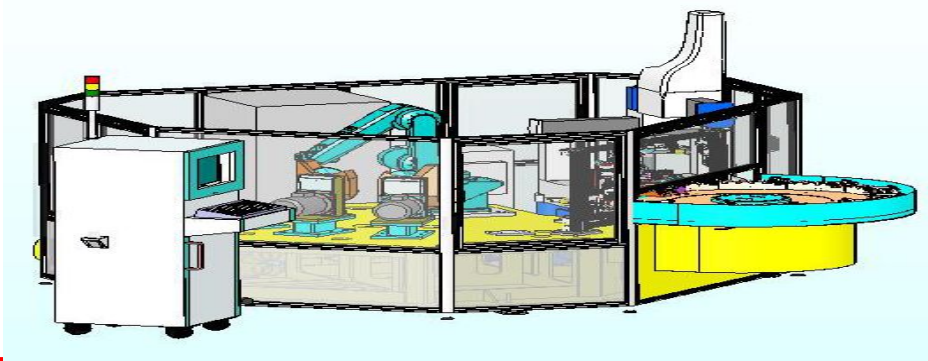
二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机叶片精密磨削及检测技术

国外把叶片进排气边的加工与检测系统集成，用类似流水线制造方式解决叶片单件生产方式效率低和一致性差的难题，缩短研制周期，发展**叶片智能制造技术**。

NEXTEC公司研发的此项技术，可以实现叶片椭圆进排气边磨削和在线检测，进排气边最小圆弧半径0.1毫米，制造效率比手工打磨方式提高数倍以上；由于不需要定制检测样板，叶片研制周期大幅缩短。

Rolls Royce和GE等采用了该项技术，Rolls Royce公司叶片柔性磨削加工检测一体化生产线，已经形成规模化生产能力，年生产叶片数十万片。



二、精密超精密加工技术在航空中的应用

➤ 发动机叶片精密磨削及检测技术

航空发动机叶片生产急需现代先进自动化技术的发展推动。采用智能化的叶片进排气边精密磨削加工检测一体化制造技术，可大幅提高航空发动机叶片进排气边加工制造精度、效率和一致性，降低劳动强度，改善劳动环境，具有重要意义。





目录

1

精密超精密加工技术的发展历史

2

精密超精密加工技术在航空中应用

3

精密超精密加工技术在其他领域作用

4

精密超精密加工技术的发展趋势

5

结束语



三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

- **精密超精密加工技术可促进现代基础科学和应用基础科学的发展**
- **精密超精密加工技术是现代高新技术产业发展基础**
- **精密超精密加工技术是现代战争的重要技术支撑**

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

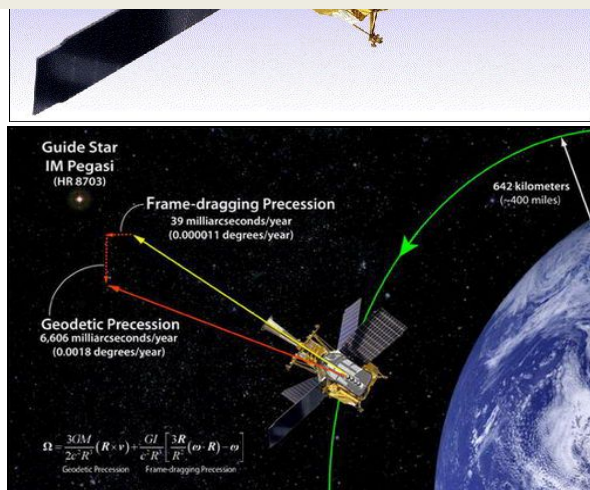
► 精密超精密加工技术在其他领域方面的应用

促进现代基础科学和应用基础科学的发展

地球对周围时空的扭曲和拖拽，陀螺仪指针会倾斜一非常小的角度（**一年内指针仅移动6000毫弧秒**），这就是所谓的重力场弯曲效应和惯性系拖曳效应

广义相对论的实验验证

2004年，NASA为了验证爱因斯坦广义相对论的两项预言：**重力场弯曲效应和惯性系拖曳效应**向地球轨道上发射了一个利用高精度陀螺仪的测量装置——引力探测器（GP-B）。



三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术可促进现代基础科学和应用基础科学的发展

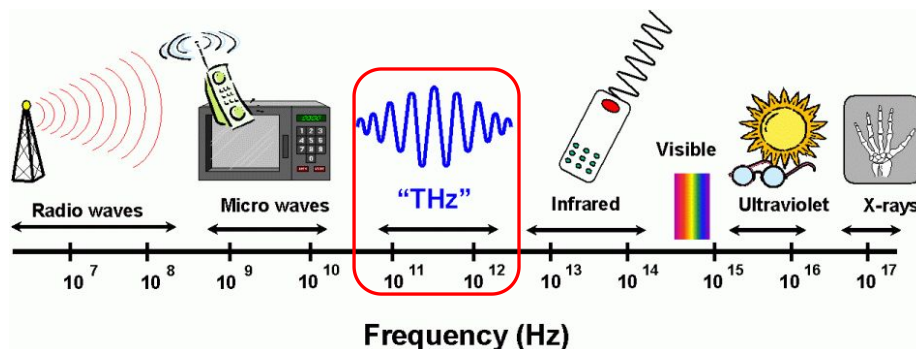


高精度陀螺仪的核心部件——
石英转子（ $\Phi 38.1\text{mm}$ ）的真球度达到了 **7.6nm** 。

若将该转子放大到地球的尺寸，
要求**地球表面波峰波谷误差仅为2.4米**
最终陀螺精度达到了 **0.001 角秒/年**

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术可促进现代基础科学和应用基础科学的发展



介于微波与红外之间

太赫兹技术

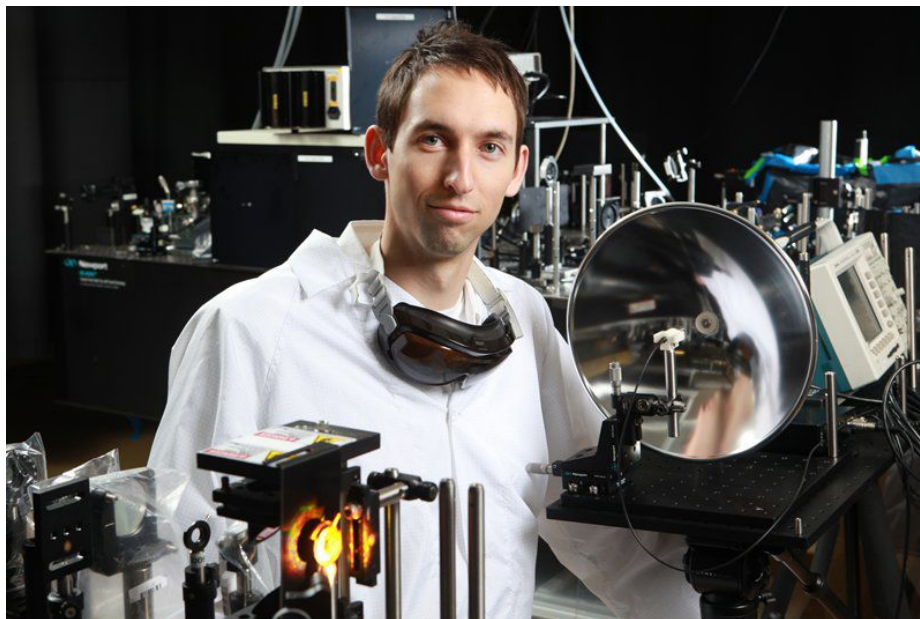
- 隐身飞行器探测技术
- 目标材料特性等探测功能
- 超宽带无线通讯
- 空间探测、材料识别、安检

... ..



三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术可促进现代基础科学和应用基础科学的发展



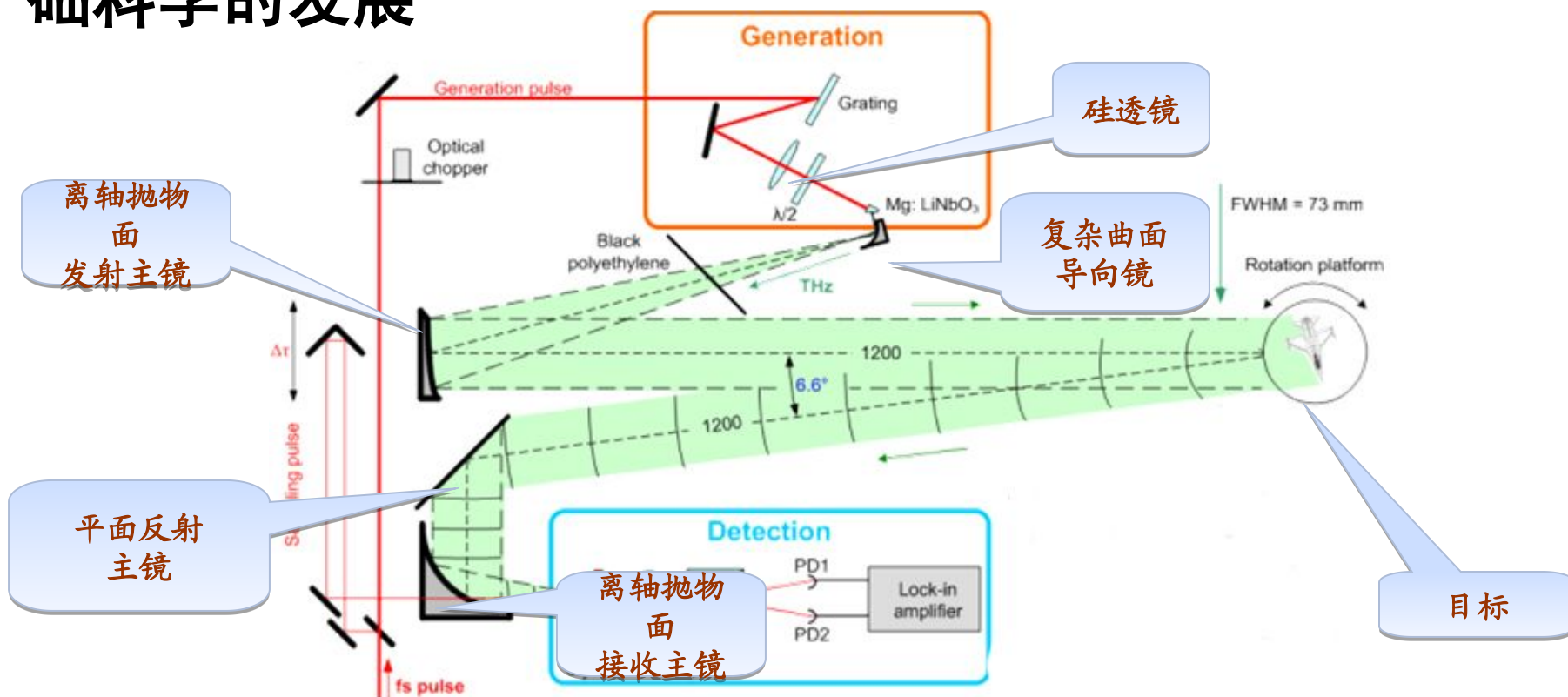
太赫兹技术

关键技术

- 信号生成
- 信号检测
- 信号处理
- 辐射控制（束控）

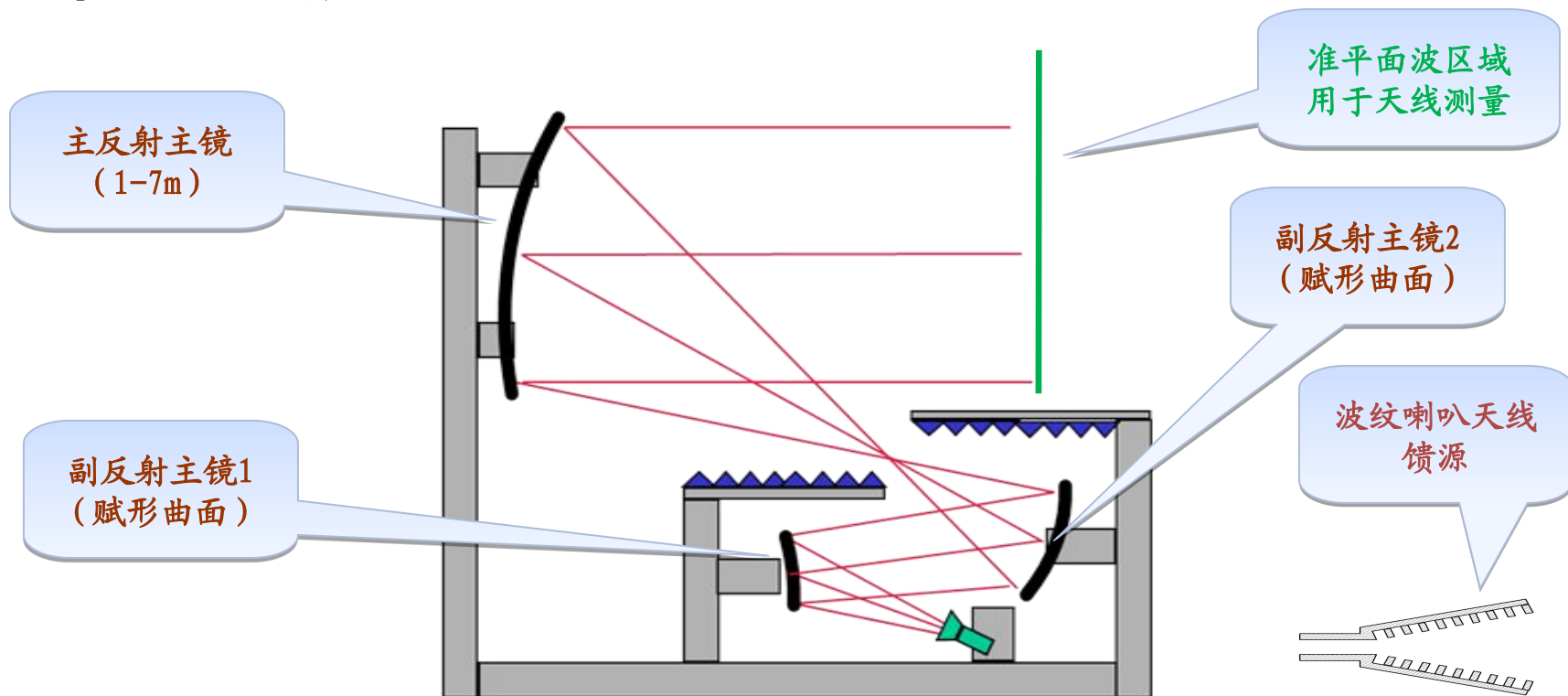
三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术可促进现代基础科学和应用基础科学的发展



三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术可促进现代基础科学和应用基础科学的发展



三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术可促进现代基础科学和应用基础科学的发展

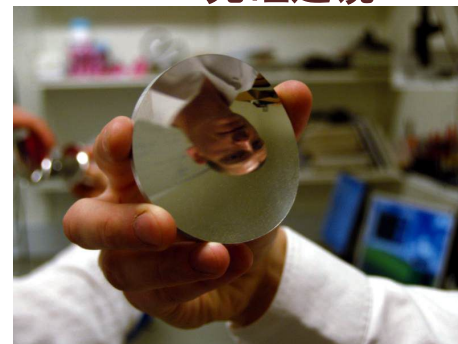


THz光导向抛物面镜

赋值自由曲面
加工、测量



THz光硅透镜

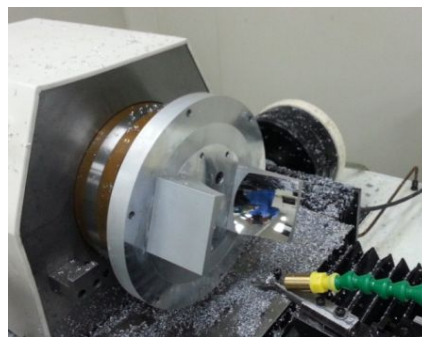
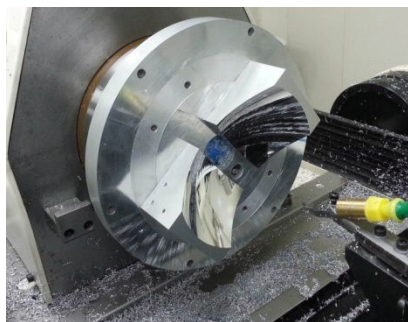
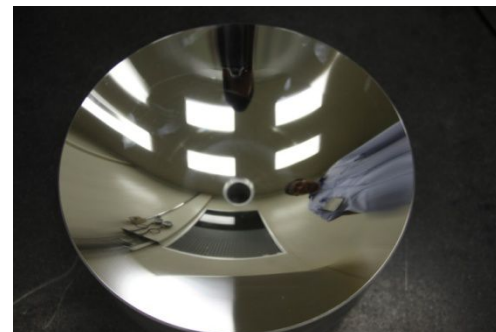
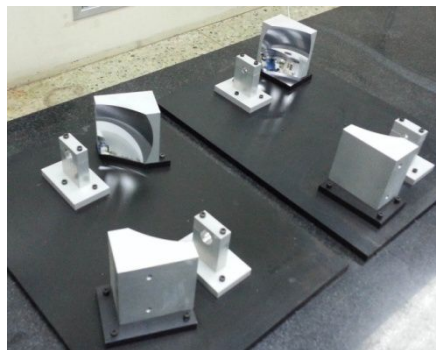
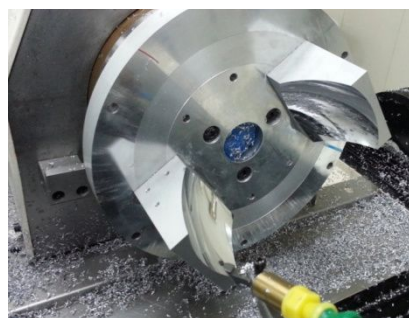


用于THz光瞄准和聚焦的离轴抛物面镜

THz实验系统
几种定制的辐射束控元件

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术可促进现代基础科学和应用基础科学的发展



THz实验系统离轴抛物面镜加工

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术是现代高新技术产业发展基础

高新技术产业

- 航空航天
- 新能源
- 新材料
- 信息
- 生物制药
-

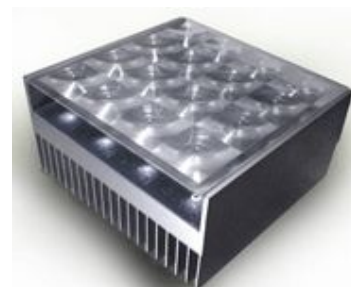
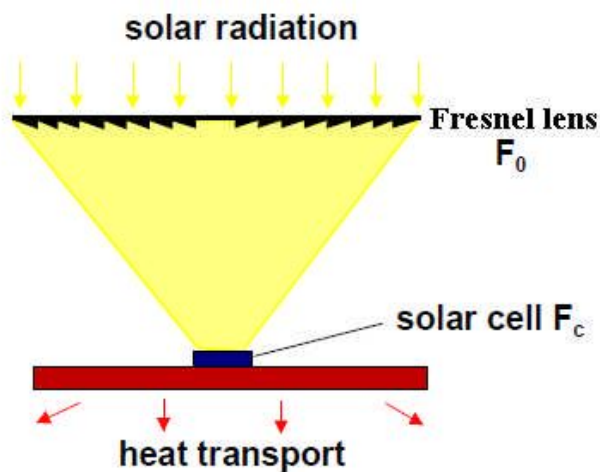
高性能轴承——发动机、高铁、风电



承受高频载荷的部件的使用寿命远远不能满足要求

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

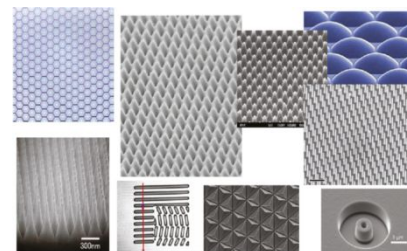
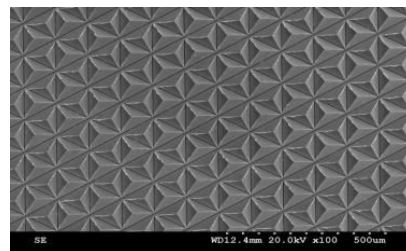
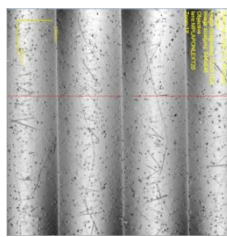
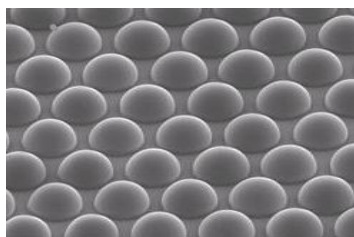
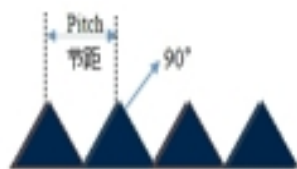
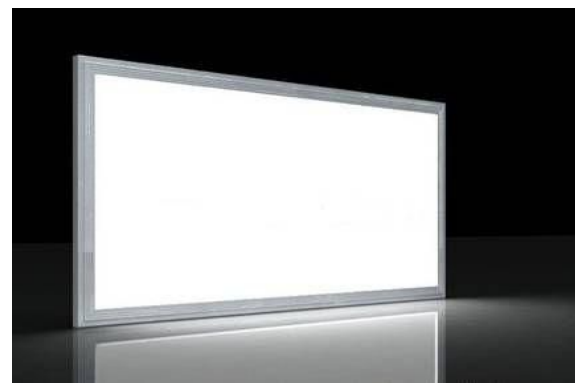
➤ 精密超精密加工技术是现代高新技术产业发展基础



太阳能——硅片切割、抛光、刻划、聚光菲涅尔透镜加工

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术是现代高新技术产业发展基础



平板显示
背光模组

立体电视
3D柱状光栅

LED照明

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术是现代高新技术产业发展基础



人造关节

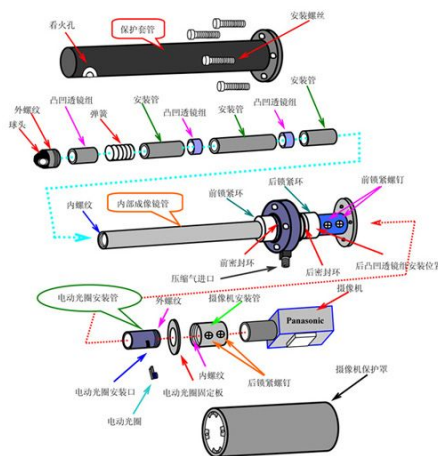
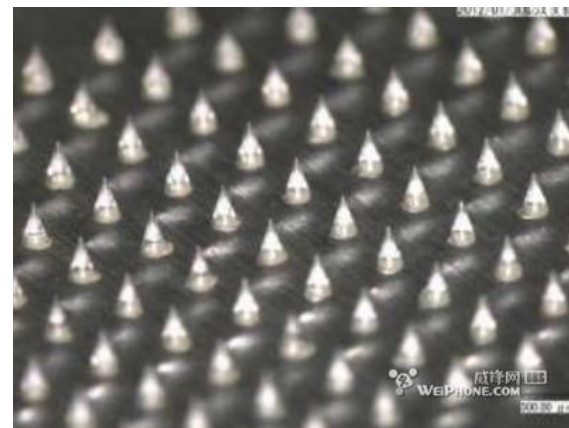


图4 微望远镜示意图

微型内窥镜中的微小透镜及器件

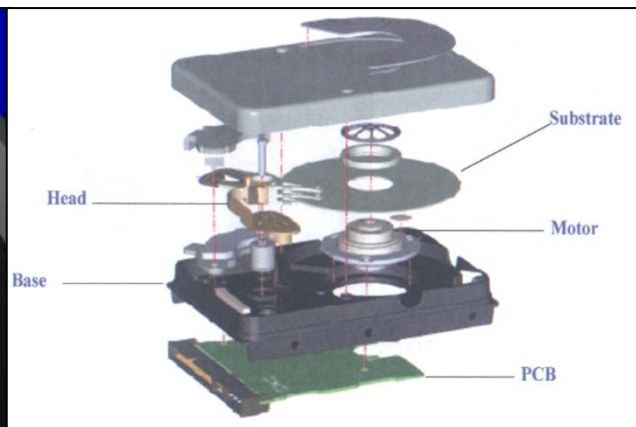
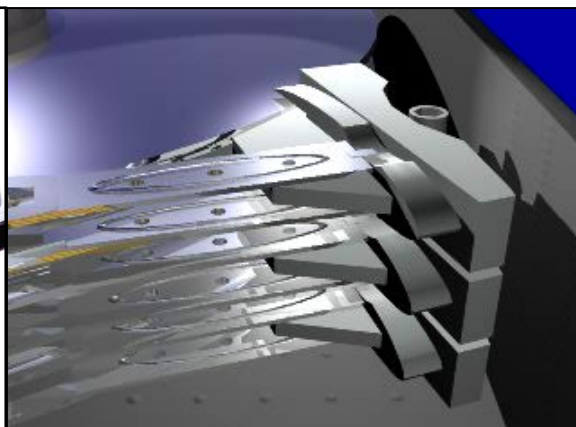
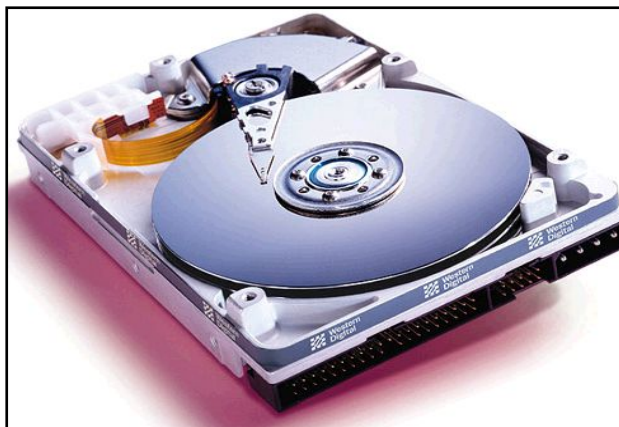


医用微注射头阵列

医疗器械行业

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术是现代高新技术产业发展基础



	目前水平	发展趋势
存储密度:	80 Gb/in ²	1000 Gb/in ²
磁头飞行高度: 3 nm	8 nm	
高度控制精度:	3 nm	1 nm
表面粗糙度: 0.5 μm	2 Å	

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术是现代战争的重要技术支撑

上世纪90年代初，美国就将其列为21项美国国防关键技术之一。

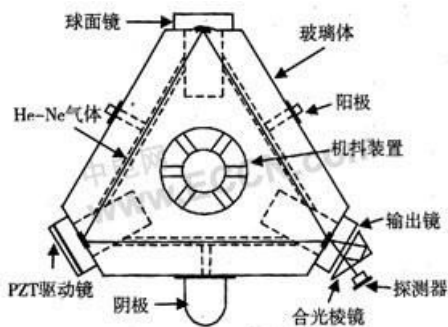
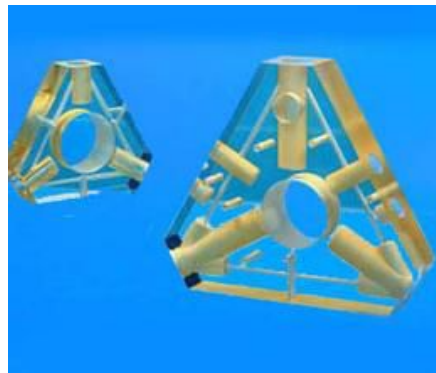


图1 机抖式RLG结构图

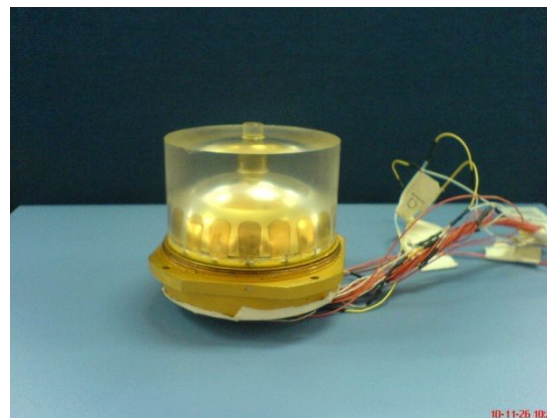
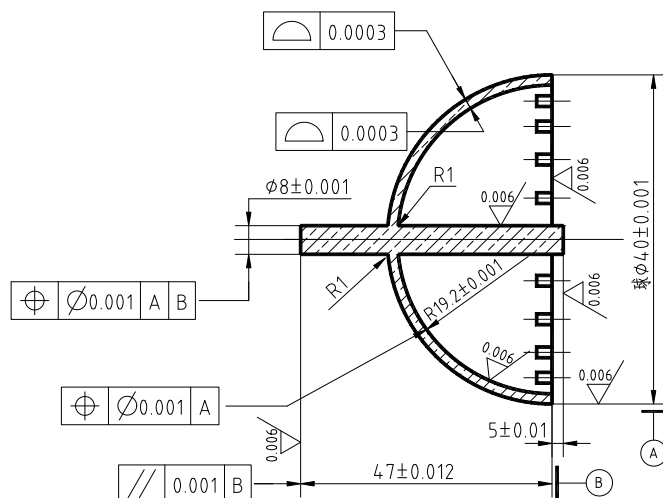


激光陀螺

微晶玻璃：腔体加工、反射镜基片加工、装配调试

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

► 精密超精密加工技术是现代战争的重要技术支撑

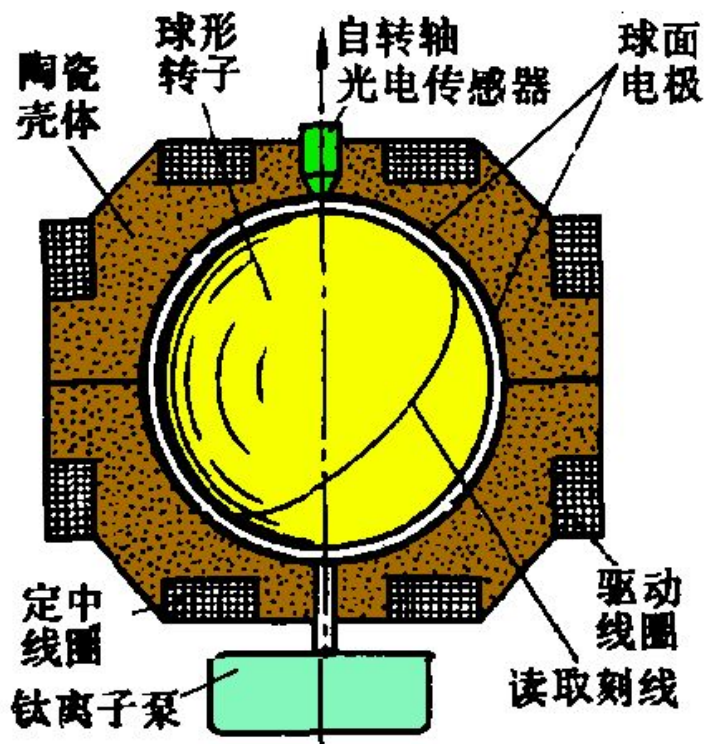


半球谐振陀螺

熔融石英玻璃：极高的面形精度、薄壁（0.8mm）

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

► 精密超精密加工技术是现代战争的重要技术支撑



静电陀螺

球形转子；电极球腔

静电悬浮；超高真空

精度高，真正的自由转子陀螺

结构简单，可靠性高

能全姿态测角

外径：38~50mm

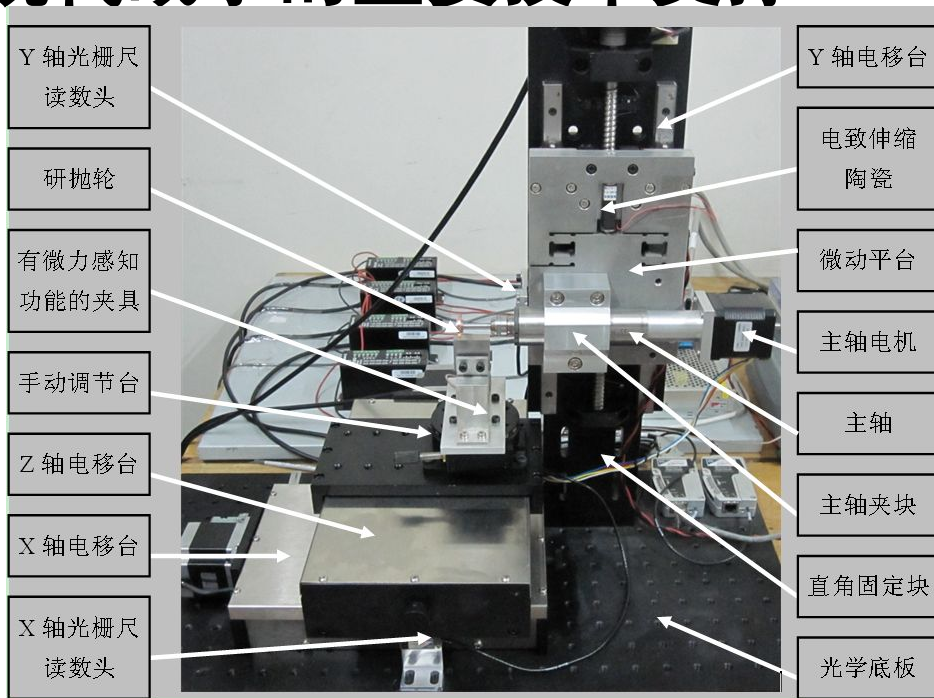
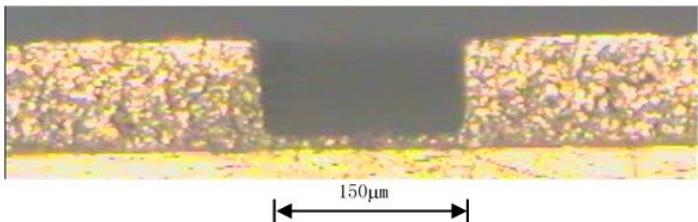
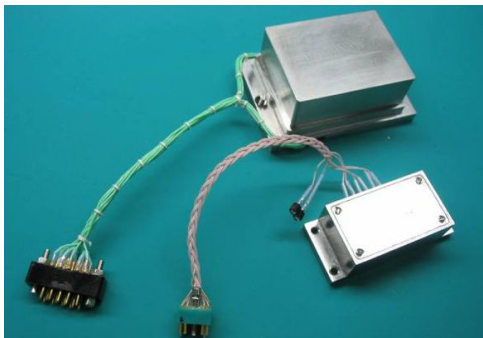
壁厚：0.4~0.5mm

球度：0.1 μm

战略武器、火箭

三、精密超精密加工技术在其他领域的作用

➤ 精密超精密加工技术是现代战争的重要技术支撑



惯性传感器

最小特征尺寸 $9\mu\text{m}\pm 1\mu\text{m}$ 、加工检测装配调试



目录

1

精密超精密加工技术的发展历史

2

精密超精密加工技术在航空中应用

3

精密超精密加工技术在其他领域作用

4

精密超精密加工技术的发展趋势

5

结束语



四、精密超精密加工技术发展趋势

- 被加工材料和工艺方法的不断扩展
- 微纳结构功能表面对超精密加工技术提出了新要求
- 超精密加工开始追求高效
- 超精密加工技术将向极致方向发展——极大、极小、极复杂环境、极复杂结构
- 超精密加工技术将向超精密制造技术发展

四、精密超精密加工技术发展趋势

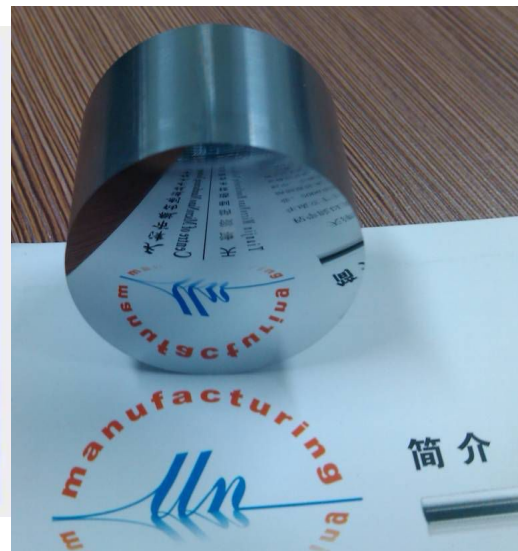
➤ 被加工材料和工艺方法的不断扩展



**钛合金加工
(新的加工工艺)**



**单晶涡轮叶片及叶
盘（无重融层）**



**黑色金属超
精密切削**

四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 被加工材料和工艺方法的不断扩展

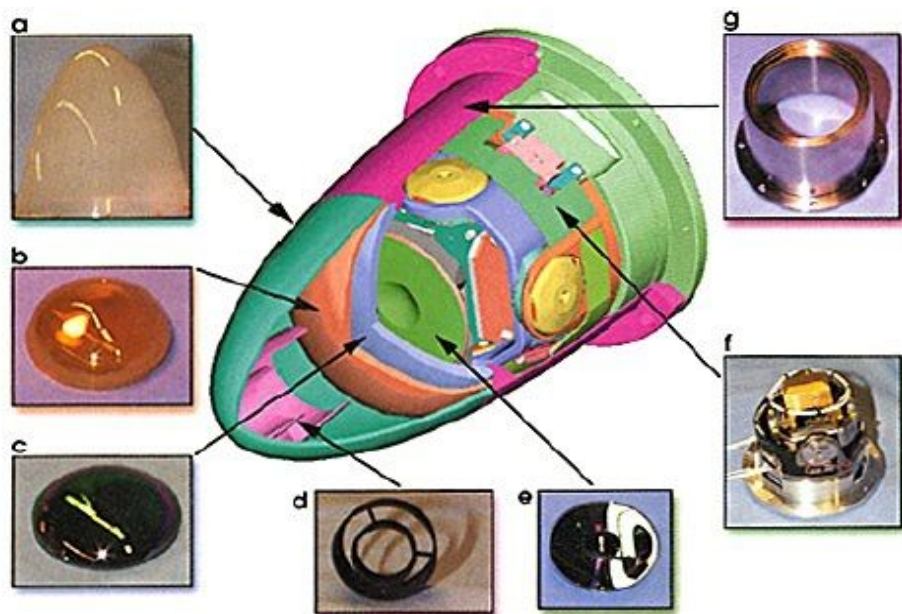
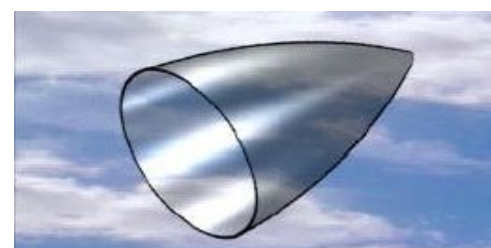


Figure 5. The conformal optics seeker mechanical design model uses many components to correct optical aberrations from the ellipsoidal dome shape: (a) conformal MgF_2 dome; (b) ZnS corrector; (c) $Tl-1173$ corrector; (d) solar baffle; (e) solid CaF_2 catadioptric imaging lens; (f) gimbal assembly; and (g) dome/correctors mount.



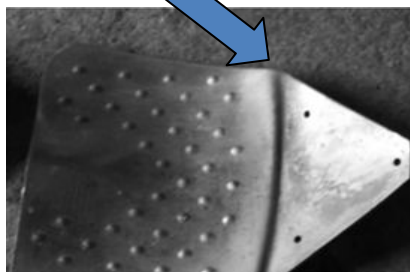
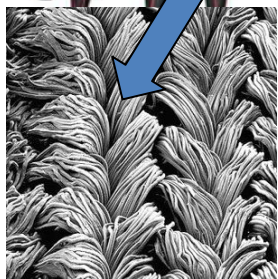
导弹头罩

材料: 红外—蓝宝石—金刚石

形状: 球形—非球面—自由曲面（保形）

四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 微纳结构功能表面的超精密加工技术



➤ 鲨鱼皮泳衣（减阻）

2000年悉尼奥运会，33块游泳金牌中28块被穿有鲨鱼皮泳衣的选手获得

➤ 犁型的表面凸凹（防污减阻）



➤ 工程管道中液体传输

内壁涂料形成凸点防污减阻

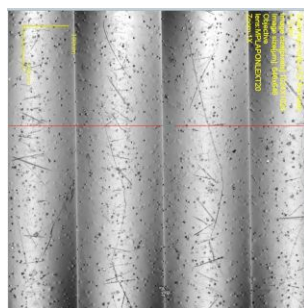
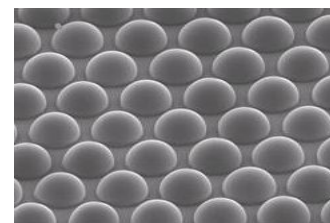
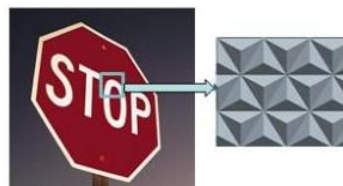
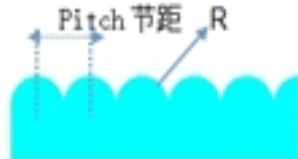
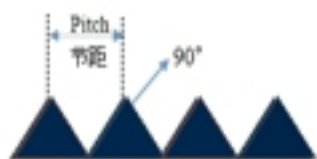
➤ 生物系统中的血液循环

.....

四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 微纳结构功能表面的超精密加工技术

棱镜结构： 柱状透镜结构： 四棱锥结构： 微透镜阵列： 菲涅尔透镜：





四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 微纳结构功能表面的超精密加工技术

在未来零部件设计与制造将会增加一项**功能表面结构的设计与制造**，通过在零件表面设计和加工不同形状的微结构，从而提高零部件力学、光学、电磁学、升学等功能，这将是微纳制造的重要应用领域。2006年成立的国际纳米制造学会经专家讨论并认同，纳米制造中的核心技术将从目前以MEMS技术逐步转向超精密加工技术。

四、精密超精密加工技术发展趋势

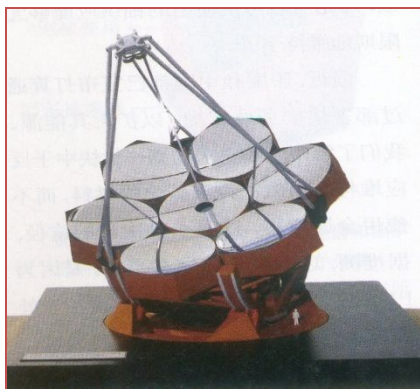
➤超精密加工开始追求高效

天文望远镜天文版“摩尔定律”：每隔几十年，光学望远镜口径会增加一倍

1917 年 胡克望远镜 2.5米

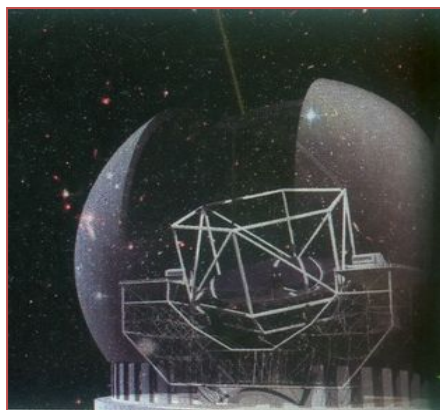
1948 年 海尔望远镜 5米

1992 年 凯克望远镜 10米



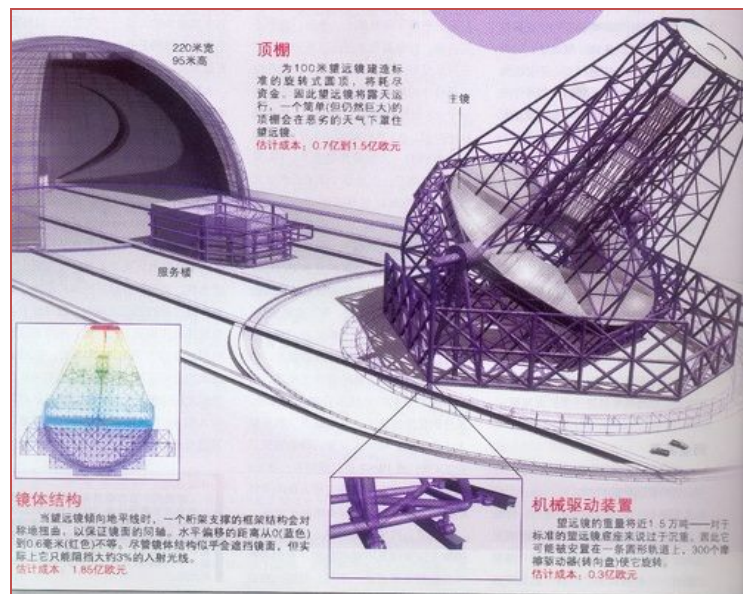
GMT 直径24米

北京航空精密机械研究所



TMT 直径30米

精密制造技术航空科技重点实验室

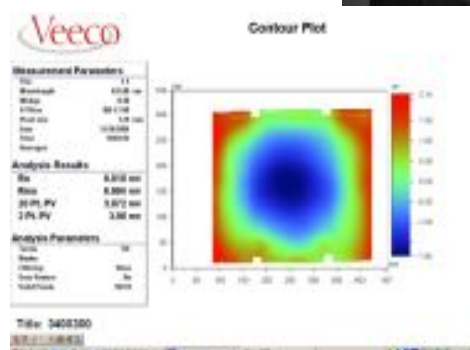


OWL 直径100米

四、精密超精密加工技术发展趋势

➤超精密加工开始追求高效

**激光核聚变点火装置（NIF）
需要7000多块400mm见方的
KDP晶体**

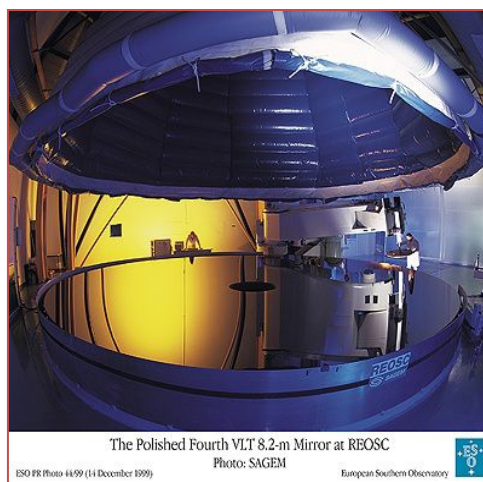
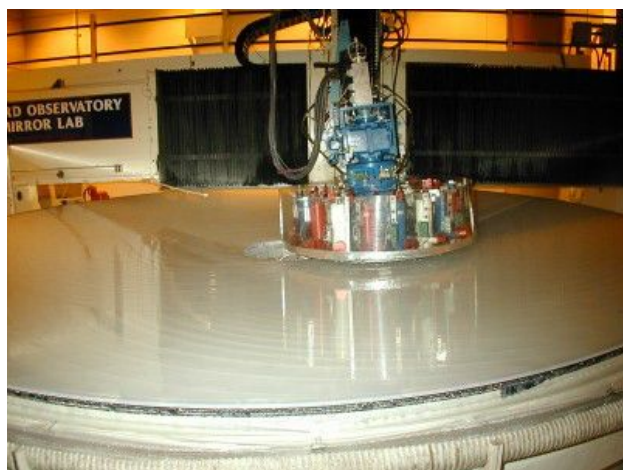


**面形精度达到 $1/6 \lambda$ ，
(P-V) (400mm×400mm)，
优于美国NIF晶体加工机床
加工的面形精度要求**

KDP晶体加工样件及检测结果

四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 超精密加工技术将向极致方向发展——极大



四、精密超精密加工技术发展趋势

➤超精密加工技术将向极致方向发展——极小

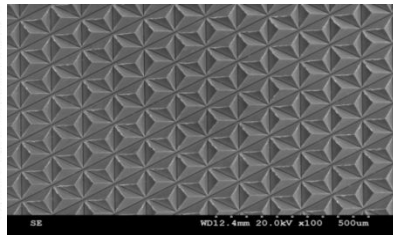
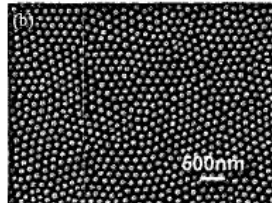
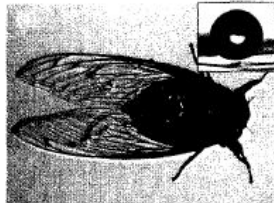
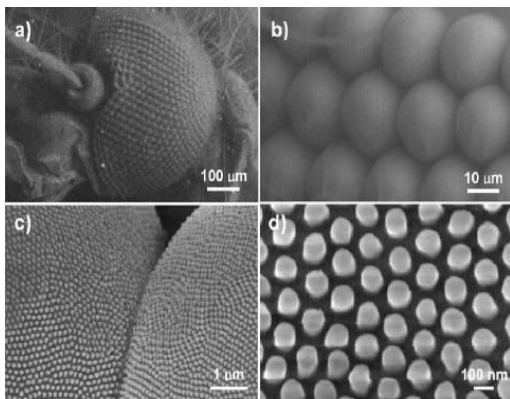
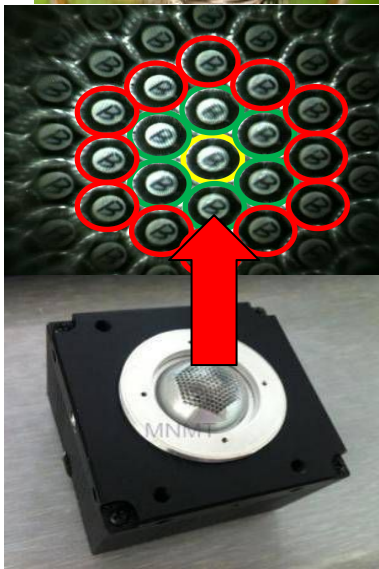
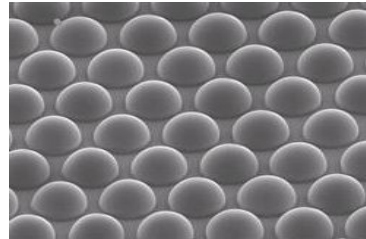
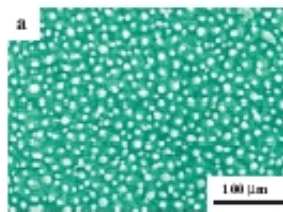


图1 超疏水的蝉翼和表面结构 (a)一只蝉翼的光学图片, 右上角的插图显示一个球形的水滴在其蝉翼表面上;(b)蝉翼表面的纳米结构



苍蝇复眼结构

苍蝇复眼由4000个小眼组成, 时间分辨率比人眼高10倍、视野大

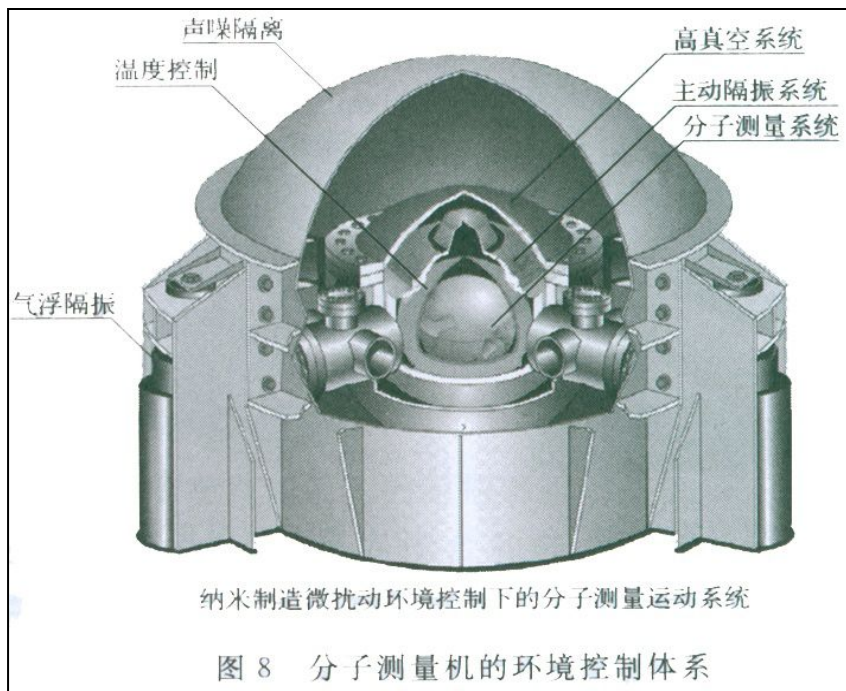


蝉翼表面由规则排列的纳米柱状结构组成. 纳米柱的直径大约在80 nm, 纳米柱的间距大约在180 nm.

疏水特性——排污防污、防冰除冰

四、精密超精密加工技术发展趋势

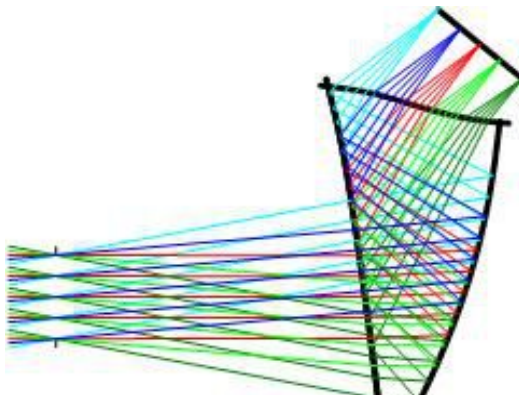
➤ 超精密加工技术将向极致方向发展——极复杂环境



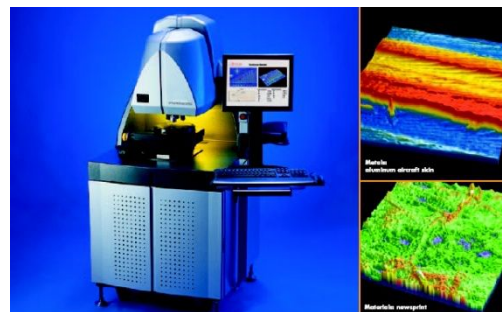
仪器测量范围50mmX50mmX100 μ m，精度达到了1nm，对环境要求及其严格，最内层壳温度控制 $17 \pm 0.01^{\circ}\text{C}$ ，次层壳采用主动隔振，高真空层工作环境保持 $1.0 \times 10^{-5}\text{Pa}$ ，最外层壳用于噪声隔离，最后将整体结构安装在空气弹簧上进行被动隔振。

四、精密超精密加工技术发展趋势

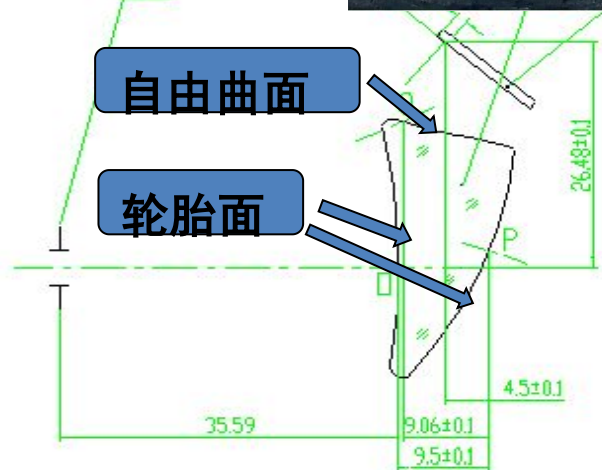
➤ 超精密加工技术将向极致方向发展——极复杂形状



UA3P自由曲面测量



NT8000自由曲面测量



光学自由曲面的加工及检测



四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 超精密加工技术将向超精密制造技术发展

超精密加工技术以往往往是用在零件的最终工序或者某几个工序中，但目前一些领域中某些零部件整个制造过程或整个产品的研制过程都要用到超精密技术，包括超精密加工加工、超精密装配调试以及超精密检测等。

➤ NIF工程

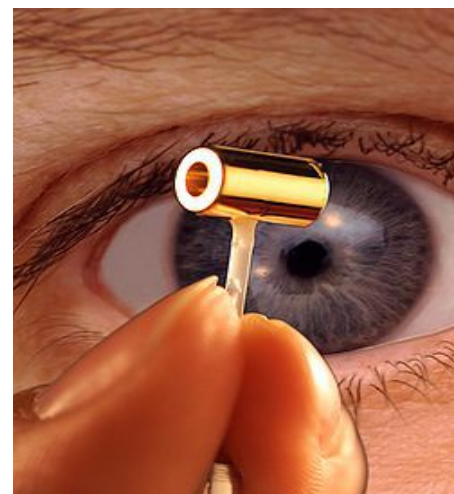
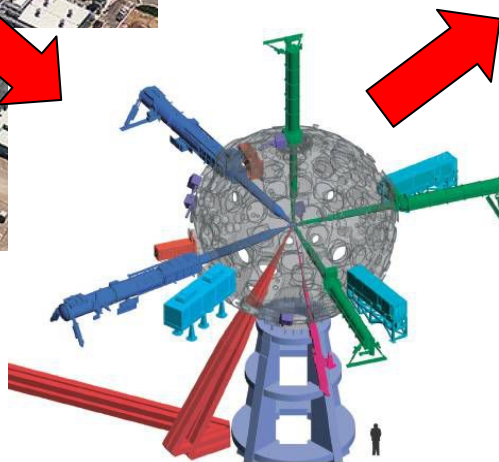
➤ 小型惯性加速度计加工装配

四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 超精密加工技术将向超精密制造技术发展



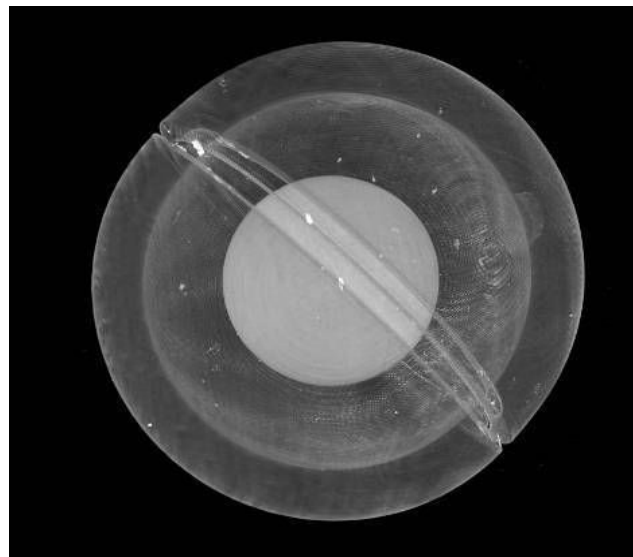
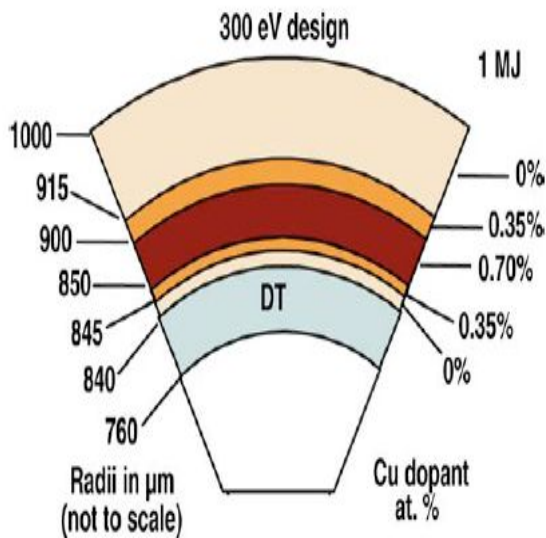
NIF将两个足球场规模激光
器装置能量最终集中
到 2mm的靶丸上



四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 超精密加工技术将向超精密制造技术发展

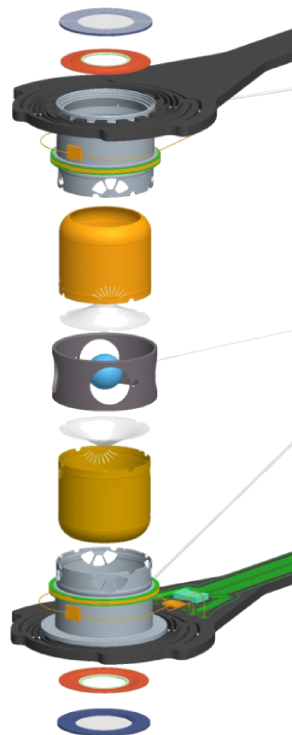
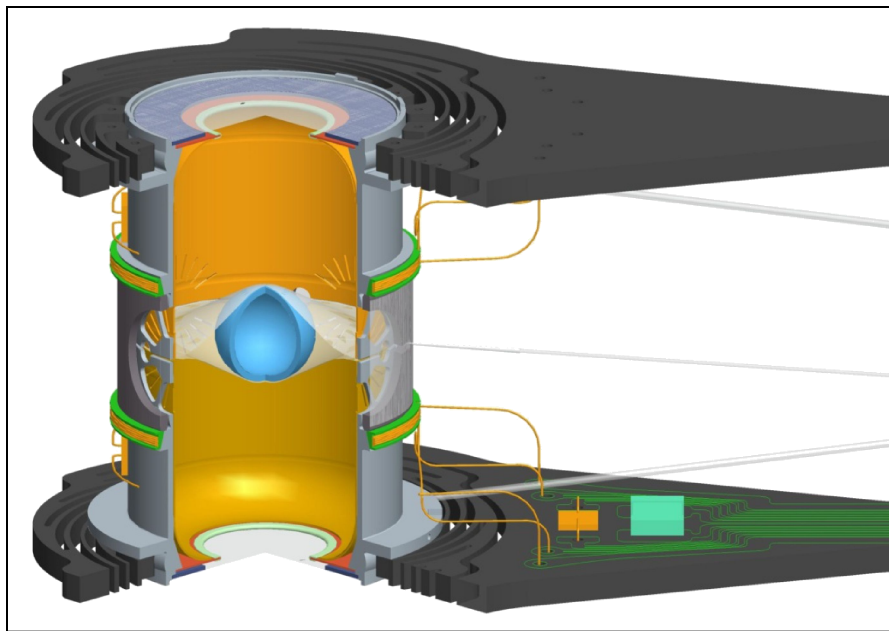
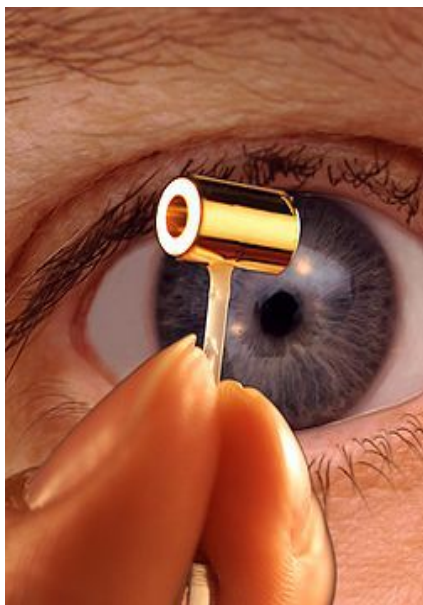
点火靶球的制造



四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 超精密加工技术将向超精密制造技术发展

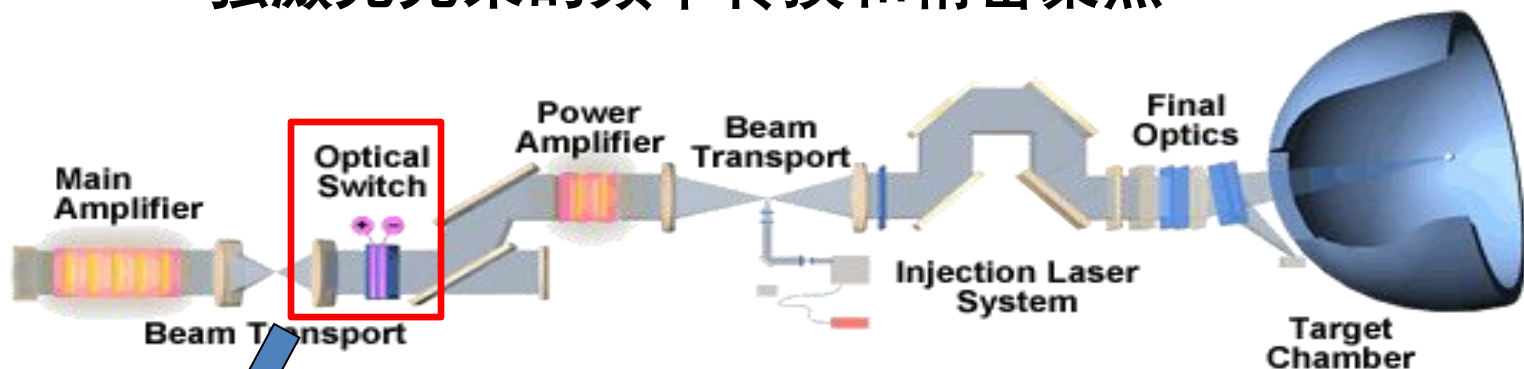
黑腔体的制造、装配及调试



四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 超精密加工技术将向超精密制造技术发展

强激光光束的频率转换和精密聚焦



KDP晶体

- 尺寸：410×410mm²；
- 数量：7000多块；
- 面形精度：优于 $\lambda/20 - \lambda/40$ ；
- 表面粗糙度：Ra<5nm；

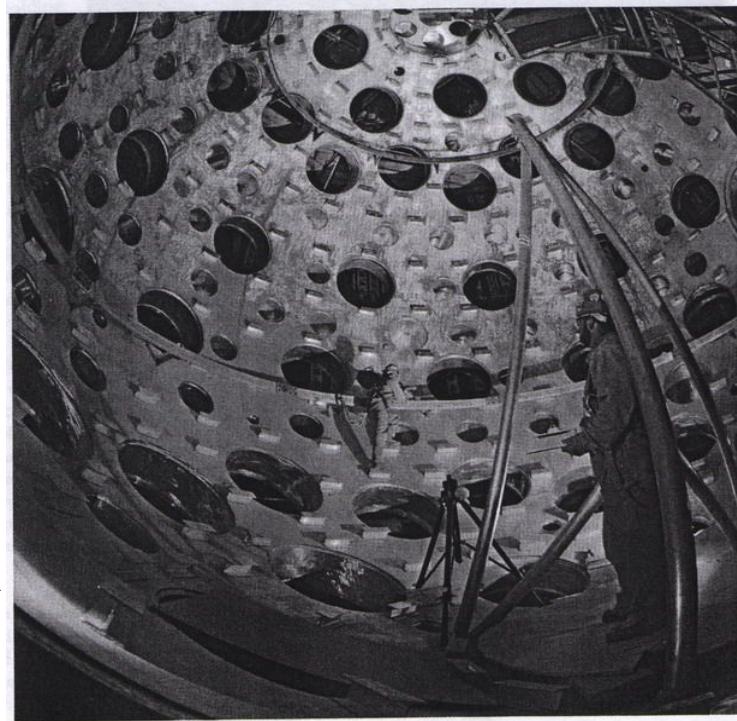
四、精密超精密加工技术发展趋势

➤超精密加工技术将向超精密制造技术发展

- 激光束数量 192束
- 总能量 180万焦耳
- 激光控制点数 6万个

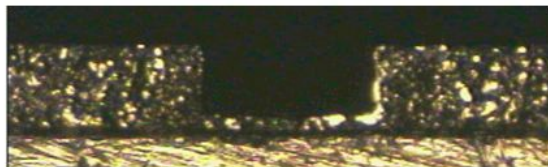
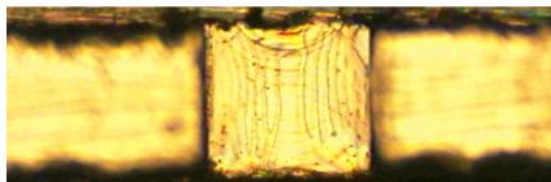
各路激光的调试要求：

- ◆空间几何位置对称性误差小于1%
- ◆到达表面时间一致性误差小于30飞秒
- ◆激光能量强度一致性误差小于1%

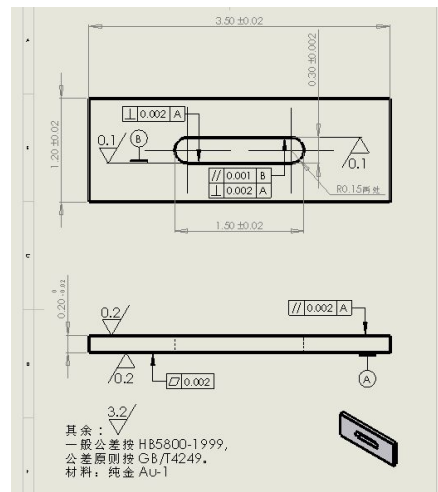


四、精密超精密加工技术发展趋势

➤超精密加工技术将向超精密制造技术发展



150μm



薄壁微槽结构宽150μm，长120μm，深70μm，槽底厚约10μm，

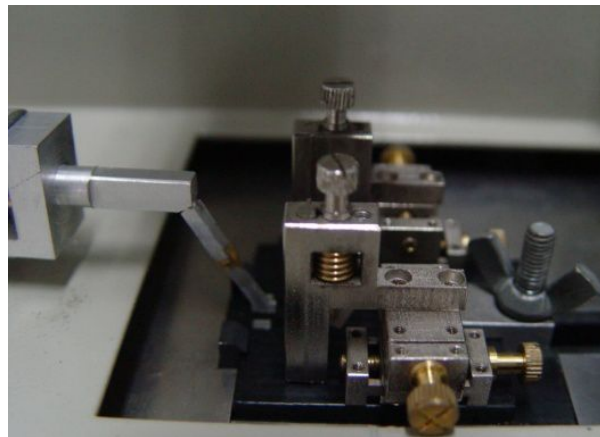
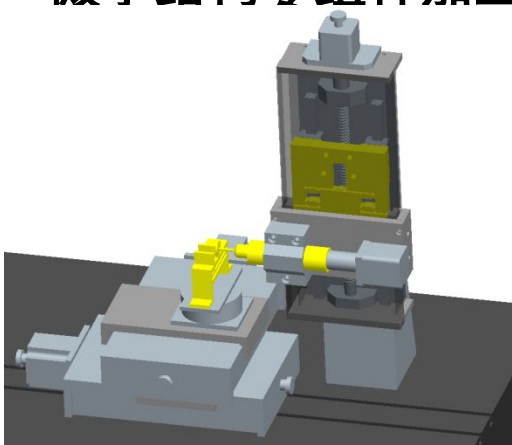
长槽的加工；该槽宽度 0.3 ± 0.002 毫米，侧臂形位误差要求1微米，粗糙度优于0.1微米

高精度惯性传感器典型结构件

四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 超精密加工技术将向超精密制造技术发展

- 高精度惯性传感器结构的微小型化
- 工作部位尺寸及形位精度的亚微米化
- 微小结构零组件装夹、定位、找正的精细化
- 刀具的小型化和加工进给量的微量化
- 非接触面型和尺寸测量显微化
- 微小结构零组件加工和装配工艺





四、精密超精密加工技术发展趋势

➤ 超精密加工技术将向超精密制造技术发展

需建立系统的超精密加工设备及工艺、测量、组装调试工艺技术平台，以微细超精密加工、装配和检测的需求。

这样就实现由单工序的超精密加工向全过程的超精密制造的演变。



目录

1

精密超精密加工技术的发展历史

2

精密超精密加工技术在航空中应用

3

精密超精密加工技术在其他领域作用

4

精密超精密加工技术的发展趋势

5

结束语



结束语

从大到天体望远镜的透镜，小到大规模集成电路等微纳米尺寸及特征零件的制造，超精密加工技术从发展之初一直面临着不断的挑战。当前精密超精密加工技术在不断研究新理论、新工艺以及新方法的同时，将向着高效、极致等方向发展，并贯穿零部件整个制造过程或整个产品的研制过程，向精密超精密制造技术发展。随着我国精密超精密技术的不断发展和进步，必将实现从制造大国向制造强国的飞跃。



谢谢!

中国航空工业集团公司北京航空精密机械研究所
北京市丰台区南苑东路5号

010-68380416

杨

辉

yanghui303@gmail.com