

日本在超精密加工机床上应用 空气轴承的现况

刘承烈

摘 要

本文介绍了作者于1982年11月,参加我所考察超精密加工技术的代表团去日本,了解到的日本在超精密加工机床上应用空气轴承和气浮导轨的情况。本文谈到日本和美国有关的公司认识到空气轴承的有些性能优于液体静压轴承,则在超精密加工机床上采用了空气轴承,收到了良好的效果。我们看到东芝机械株式会社制造的UFG-200P型超精密加工机床,就是采用了空气轴承。在此机床上,经过用金刚石进行超精密切削加工得到的激光镜的精度已达到 $0.06\mu\text{m}$ 的平面度和 $0.01\mu\text{m}$ 的表面光洁度。采用空气轴承的超精密加工机床,其精度高、刚度也足够、附加设备少、使用方便、造价低,所以很受欢迎。东芝机械株式会社生产有各种类型不同尺寸的空气轴承作为商品在出售,日立精机株式会社也制造了采用空气轴承的超精密切削机床,用于切削电子计算机磁盘。还有不二越株式会社和日本精工株式会社也有空气轴承主轴和导轨的产品。我们看到,日本几个单位用空气轴承的超精密加工机床加工出来的部件的精度和表面光洁度都很高。日本在这方面虽然比美国起步的晚,但由于急起直追,可以说日本在这方面的水平已赶上美国的水平,这并不过份。

日本在超精密加工机床上应用空气轴承的现况

中国科学院长春光学精密机械研究所派我们三人去日本考察了超精密加工技术的情况,现在我仅就日本在超精密加工机床上应用空气轴承的现况介绍一下,我们是自一九八二年十一月八日至二十三日在日本的大阪,名古屋,东京等地考察,参观了有关大学,研究所和工厂。其中有几个单位将空气轴承应用于超精密加工机床上。看到的单位虽然不多,但由于我们参观了当时正在大阪开办的国际机床展览会和听取了琦玉大学小林昭教授介绍日本及欧美各国在这方面的情况,基本上对日本在超精密加工机床上应用空气轴承的情况有了较全面的了解。并且通过小林昭教授的介绍也了解到欧美在这方面的情况。因为小林昭教授于一九八二年六月率领几位日本从事超精密加工的科技人员去美国参加了在美国st. paul由SME主办的“精密加工学术报告会”并考察了欧美有关单位,所以他们对欧美这方面的情况也有所深入了解。为了说明一些问题,于此对欧美的这方面情况也要涉及到一些。

由于航空、宇航、原子能、电子计算机等方面尖端工业发展促进了空气轴承的发展。在惯性导航的陀螺、氢循环泵、液氧泵、原子反应堆的循环泵、磁鼓、磁头上应用静压、动压或动静压结合型的空气轴承收到了很好的效果。近几年又由于电子工业、半导体工业的发展,其中一些部件的精度要求越来越高,过去的微米数量级的精度已经不能满足需要,现在已

走向需要 $0.01\mu\text{m}$ 数量级的精度和 $0.001\mu\text{m}$ 数量的光洁度,即要求 $\text{m}\mu\text{m}$ 数量级。例如:在日本使用东芝机械株式会社制造的超精密加工机床,经过用金刚石超精密切削加工得到的激光镜的精度已达到 $0.06\mu\text{m}$ 的平面度和 $0.01\mu\text{m}$ 的光洁度。加工得到这样高精度部件的超精密切削加工机床虽然也有采用液体静压轴承的,但大多数都是采用空气轴承和气浮导轨的,日本丰田工机株式会社由于一直在生产液体静压轴承的高精度磨床,所以在他们已有的液体静压轴承的基础上,又制造了使用液体静压轴承、液体静压导轨的AHP50—32型超精密加工车床现在作为商品出售,已在大阪举办的国际机床展览会上展出。不过,他们的超精密切削加工的结果是 $0.15\mu\text{m}$ 的精度和 $0.03\mu\text{m}$ 的光洁度。现在又生产一种AHN30×25形CNC超精密车床。虽然荷兰飞利浦公司也制造了一种称为Colath的液体静压轴承和液体静压导轨的超精密切削车床,但各国制造的超精密切削加工机床大部分是采用空气轴承和空气导轨的。尤其美国的一些公司几乎都是采用空气轴承。当然在超精密加工机床上究竟采用空气轴承还是采用液体静压轴承是有过不同的看法。尤其以前是有过争论和怀疑的。有些人总是认为空气轴承的刚度小不宜采用,但是经过一些年的实践证明,尤其由于对气体润滑理论的深入探索和设计上想些办法使空气轴承和气浮导轨的性能不断提高的情况下,在超精密加工机床上采用空气轴承和气浮导轨比采用液体静压轴承和液体静压导轨的优点多,况且其刚度已能达到相当高,是比较理想的。例如:美国的Professional Instrument公司的空气轴承主轴,其径向刚度已达到 $347\text{N}/\mu\text{m}$ 轴向刚度已达到 $1,736\text{N}/\mu\text{m}$ 之大。又如美国光学公司由于发觉到Whitton公司制造的液体静压轴承的刚度不够而采用了Professional Instrument公司所制造的空气轴承。此轴承的轴直径为 100mm 、间隙为 $2.5\mu\text{m}$ 、径向振摆为 $0.025\mu\text{m}$ 。据小林昭教授介绍英国的Cranfield大学附属的精密工程研究所(CVPE)正在为加工天文望远镜的非球面反射镜(最大直径 1400mm ,最大长度 600mm 的圆锥镜)研制的超精加工立式车床所采用的空气轴承其径向刚度有 $876\text{N}/\mu\text{m}$ 、轴向刚度有 $2630\text{N}/\mu\text{m}$ 之大。在超精密加工机床上所以采用空气轴承,主要是因为采用液体静压轴承时,控制其液压油的温升比较麻烦,也比较难。如果温度升高 1°C 则在 100mm 长度上就要有 $1\mu\text{m}$ 的伸长。这是对超精密加工很有影响的,是很不利的问题。而采用空气轴承则不成问题,因为气体的温升几乎可以忽略不计。将加工区域附近温度,控制到 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 的恒温即可。我们看到采用液体静压轴承的丰田工机株式会社AHN30×25形超精密车床是带有庞大的控制油温的冷却设备。如图1所示。

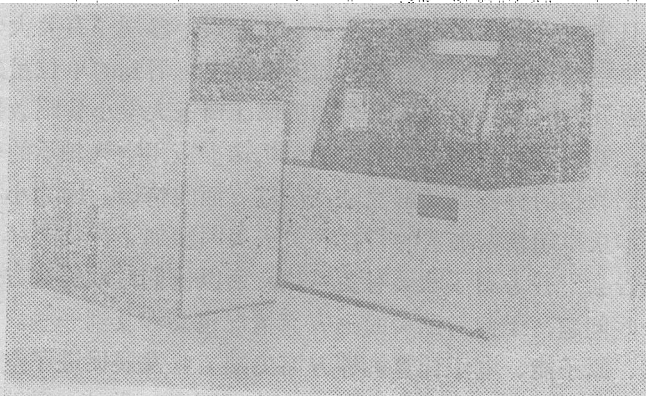


图1

然而,我们看到采用空气轴承的东芝机械株式会社生产的UFG—200P超精密加工机床就没

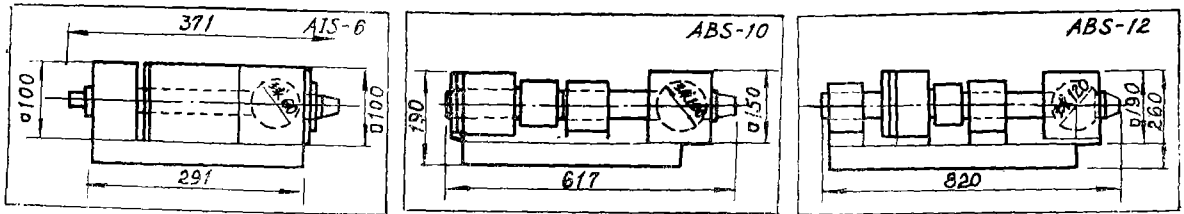
有这种多余的设备。如图 2 所示



图 2

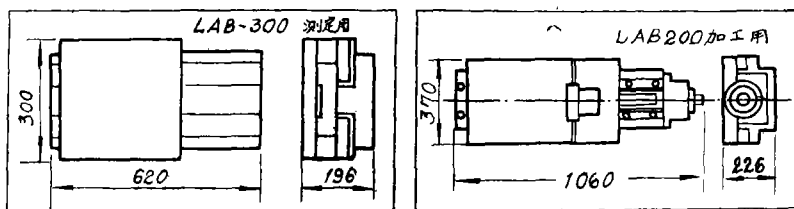
如此，由于采用空气轴承的超精密加工机床。其精度高，刚度也足够。附加设备少，使用方便，造价低，所以很受欢迎。大多数超精密加工机床采用空气轴承是理所当然的。东芝机械株式会社生产有球面空气轴承（ABS形），圆筒形空气轴承（ABC形）和直线动作的空气轴承（气浮导轨）（LAB形），每种类型都有几种不同尺寸的空气轴承作为商品在单独出售，如图 3 所示。

球面空气轴承（ABS形）



规 格		ABS-6	ABS-10	ABS-12
球的直径(mm)		φ60	φ100	φ120
回转精度(μm)	径 向	0.05		
	轴 向			
轴承刚度(kgf/μm) (供气压力6kgf/cm ² 时)	径 向	1.5	5	6
	轴 向	3	6	7
许可负荷容量(kgf) (供气压力6kgf/cm ² 时)	径 向	9	30	35
	轴 向	18	36	40
转数(rpm)	最 大	10,000	6,000	5,000

直线运动空气轴承 (LAB形)



规格	LAB-300		LAB-200
工作台面积(mm×mm)	300×300		370×450
工作台行程(mm)	300		200
工作台运动的直线度 ($\mu\text{m}/\text{mm}$)	水平面内	0.032/300	0.033/200
	垂直面内	0.017/300	0.1/200
侧摆角(" / mm)	0.09/300		0.25/200
俯仰角(" / mm)	0.15/300		1/200
导轨刚度(kgf/ μm)	上下方向	25	30
工作台上许可载荷(kgf)		150	200
供气压力(kgf/cm ²)	5		5

圆筒形空气轴承 (ABC形)

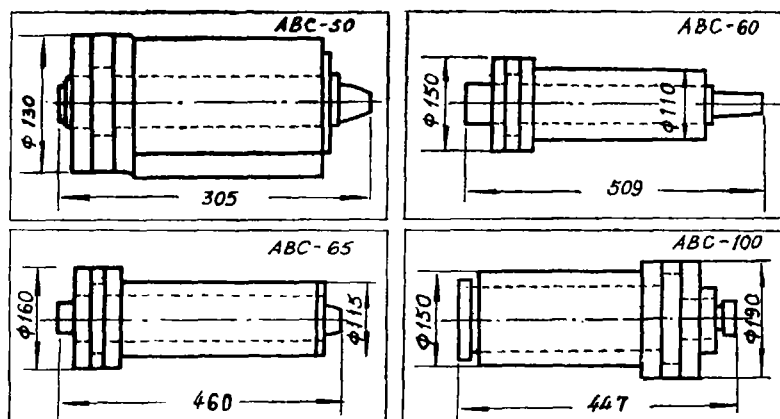


图3 东芝机械株式会社的各种空气轴承

规格		ABC-50	ABC-60	ABC-65	ABC-100
主轴直径(mm)		$\phi 50$	$\phi 60$	$\phi 65$	$\phi 100$
回转精度(μm)	径 向	0.1	0.1	0.05	0.05
	轴 向	0.1	0.1	0.1	0.1
轴承刚度(kgf/ μm)	径 向	2.2	2.5	5	12
	轴 向	4.5	10	11	20
许可负荷容量(kgf) (供气压力6kgf/cm ² 时)	径 向	15	17	35	70
	轴 向	30	60	70	140
转数(rpm)	最 大	10,000	10,000	12,000	3,000

此外，日立精机株式会社也制造了DPL-400型，采用空气轴承，用于切削电子计算机磁盘的超精密切削机床，超精密加工结果得到的平面度为 $0.2\mu\text{m}$ ，表面光洁度为 $0.015\mu\text{m}$ ，还有不二越株式会社和日本精工株式会社也有空气主轴和导轨的产品。

空气轴承由于改进其结构和材料，使其性能更加提高。例如：美国Y-12工厂由于成功地应用了多孔隙石墨材料来做静压空气轴承的轴瓦，能使主轴在大负荷及大转速范围内保证动态稳定。因为石墨具有微观小孔的粘滞阻尼作用。况且石墨具有良好的自润滑性能，当主轴瞬时过载或供气突然中断而发生干摩擦时，轴颈不会损坏。因为空气膜对石墨表面有一个平均效应，所以石墨轴瓦的轮廓精度对主轴的性能不是关键的，但石墨的表面光洁度必须足够好，才能保持所需要的气膜厚度($7.6\mu\text{m}$)。试验表明，主轴的径向和轴向旋转误差约为轴颈圆度的 $1/4-1/5$ 。Y12工厂也选用了石墨气垫块。如图4所示。然而制造多孔隙石墨轴

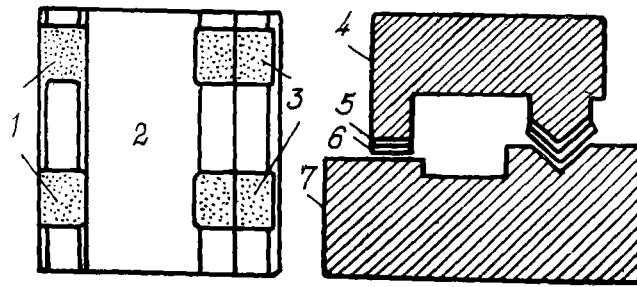


图4 超精车床的石墨气垫块

1—平导轨；2—重心；3—V型导轨；4—滑板；5—钢衬；6—石墨；7—床身

瓦碰到的主要难题是要寻找一种透气性能好满足轴承设计要求的石墨。在美国试验过几种性能较好的多孔隙石墨，即使同一牌号材料的两块试件，其透气性有显著不同。即使在同一试件上，各处透气性也不同。为此，以前曾对轴瓦工作面采用分段调整节流的办法，但也不稳定，有自激振动。后来采取在石墨轴瓦的工作表面上涂一种浸透渗液的办法来改变表层透气性，据说取得了一定效果。不过，据我们这次访问的几个单位的有关人讲，虽然电子技术综合研究所的

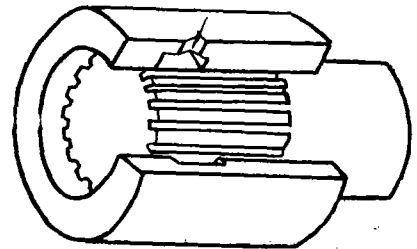


图5 表面带流型轴承

十合晋一等人作过有关多孔性空气轴承的研究但日本由于没有质量合乎要求的石墨，所以日本的空气轴承都没有采用石墨的方法。而是在轴承结构上想尽办法来解决。例如，他们有赞赏美国 Professional Instrument 公司出售供各厂家使用的如图 5 所示结构的高精度、高刚度的空气轴承。即在进气口处不设节流，而在轴上或在轴承面上沿轴向开有很多沟槽，进口的气体由于沟槽的作用在圆周方向保持一定的压力、轴一旦发生偏心时，则在上下面发生压力差，可以得到较高的轴承刚度。其轴承间隙是几个微米的程度。其部件的加工精度要求非常高，而轴承刚度很大。该公司出售的 4B、4R 及 10B 型的空气轴承的性能如表所示。我们看

表

型 式	载 荷 容 量(N)		刚 度(N/μm)		回 转 精 度 μm
	半 径 方 向	轴 方 向	半 径 方 向	轴 方 向	
4B 4R	220	880	116	451	0.050
10B	880	5.290	347	1.736	0.075

professional Instruments 公司制空气轴承主轴的性能

到分解开展的东芝机械株式会社的空气轴承虽然不是这种结构的空气轴承，但有的厂家可能也在仿制这种空气轴承。此外该公司制造有气浮导轨。日本不二越株式会社的伊庭刚二等研制几种平导轨，因采用特殊的表面节流方式，具有刚度大，直进精度高（在 $0.5\mu\text{m}/100\text{mm}$ 以下）。其尺寸和性能如图 6。

表

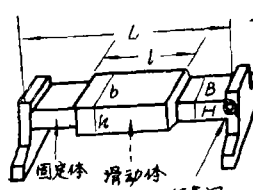
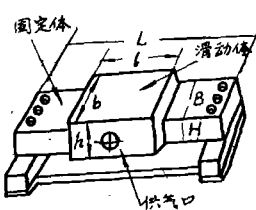
型 号	滑 动 长 度 (mm)	滑 动 体 尺 寸 (b × h × 1) (mm)	固 定 体 尺 寸 (B × H × L) (mm)	刚 度 值 (供气压 $3\text{kgf}/\text{cm}^2$ 时)		主 要 材 料	供 气 位 置	简 图
				含 导 向 部 弹 性 变 位 ($\text{kgf}/\mu\text{m}$)	不 含 导 向 部 弹 性 变 位 ($\text{kgf}/\mu\text{m}$)			
ASL75	75	82 × 72 × 150	58 × 42 × 230	6	14	SUS 420	固定体	
ASL100	100	82 × 72 × 120	58 × 42 × 230	5	12	SUS 420	固定体	
ASL150	150	82 × 82 × 170	58 × 54 × 330	4	14	SUS 420	固定体	
ASL200	200	180 × 115 × 228	140 × 76 × 435	12	75	铝合金 (钝化处理)	滑 动 体	
ASL250	250	180 × 115 × 180	140 × 76 × 435	10	60	铝合金 (钝化处理)	滑 动 体	

图 6 空气支承平导轨

我们在日本看到几个单位用空气轴承的超精密加工机床加工出来的部件的精度和光洁度是很高的。有的当场给我们实际表演。如：琦玉大学小林昭教授的实验室特意给我们实际表

演，并且当场检测、加工后的工件的表面光洁度确实在 $0.02\mu\text{m } R_{max}$ 。看来他们的具有空气轴承的超精密加工机床和超精密加工的技术是相当高的。据一位和小林昭教授在一九八二年六月一同去美国开学术会和考察的东芝机械株式会社的人说，他认为日本和美国在这方面的水平是不相上下的。其实这样说也并不是自夸，因为早在一九七八年日本小林昭教授等用自己研制的空气轴承主轴（径向回转精度为 $0.03\mu\text{m}$ ，轴向精度为 $0.01\mu\text{m}$ 径向刚度为 $25\text{N}/\mu\text{m}$ 、轴向刚度为 $83\text{N}/\mu\text{m}$ ）的超精密加工机床进行超精密加工，得到了 $0.06\mu\text{m } R_{max}$ 的高光洁度的很好结果，在国际机械加工学会（CIRP）年会上发表了。不过，当时出席这个会的有名的美国加利福尼亚大学的 Lawrence Livermor Laboratory (LLL) 的权威 Bryan 教授说，他不见到实物是不能相信这个报告谈到的结果。也就是他不相信日本能有这样高的技术水平。后来于该年末小林昭教授等把加工后的实物样品寄到美国，经过 Bryan 教授检测之后，给日本一个电报写有“Looks Excellent”表示称赞和相信了日本的结果。这样都可以说明日本在这方面的水平比较高，虽然日本比美国开始研究的晚，但由于急起直追，现在可以说已赶上美国的水平，并不过份。