



丝杠加工的隐形壁垒：热处理及热变形解决方案 ——人形机器人专题（六）



作者：光大环保电新 殷中枢、黄帅斌

2024年3月7日



证券研究报告

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

■ 丝杠加工中的热处理工艺及设备

■ 热处理带来的形变及解决方案

■ 工艺升级，兼顾效率与精度

■ 投资建议

■ 风险分析



表1：热处理工艺

目的	工艺	应用场景
预备热处理	退火和正火	退火和正火用于经过热加工的毛坯。含碳量大于 0.5%的碳钢和合金钢，为降低其硬度易于切削，常采用退火处理;含碳量低于0.5%的碳钢和合金钢，为避免其硬度过低切削时粘刀，而采用正火处理。退火和正火尚能细化晶粒、均匀组织，为以后的热处理做准备。退火和正火通常安排在毛坯制造之后、粗加工之前进行。
	时效处理	时效处理主要用于消除毛坯制造和机械加工中产生的内应力。对于一般精度的零件，在精加工前安排一次时效处理即可。精度要求较高的零件(如座标镗床的箱体等)，应安排两次或数次时效处理工序。简单零件一般可不进行时效处理。除铸件外，对于一些刚性较差的精密零件(如精密丝杠)，为消除加工中产生的内应力，稳定零件加工精度，常在粗加工、半精加工之间安排多次时效处理。有些轴类零件加工，在校直工序后也要安排时效处理。
	调质	调质即是在淬火后进行高温回火处理，它能获得均匀细致的回火索氏体组织，为以后的表面淬火和渗氮处理时减少变形做准备，因此调质也可作为预备热处理。由于调质后零件的综合力学性能较好，对某些硬度和耐磨性要求不高的零件，也可作为最终热处理工序。
最终热处理	淬火	淬火有表面淬火和整体淬火。其中表面淬火因为变形、氧化及脱碳较小而应用较广，而且表面淬火还具有外部强度高、耐磨性好，而内部保持良好的韧性、抗冲击力强的优点。为提高表面淬火零件的机械性能，常需进行调质或正火等热处理作为预备热处理。其一般工艺路线为:下料—锻造—正火(退火)—粗加工—调质—半精加工—表面淬火—精加工。
	渗碳淬火	渗碳分整体渗碳和局部渗碳，局部渗碳时对不渗碳部分要采取防渗措施(镀铜或镀防渗材料)。由于渗碳淬火变形大，且渗碳深度一般在0.5~2mm之间，所以渗碳工序一般安排在半精加工和精加工之间。其工艺路线一般为:下料—锻造—正火—粗、半精加工—渗碳淬火—精加工。
	渗氮处理	渗氮是使氮原子渗入金属表面获得一层含氮化合物的处理方法。渗氮层可以提高零件表面的硬度、耐磨性、疲劳强度和抗蚀性。由于渗氮处理温度较低、变形小、且渗氮层较薄(一般不超过0.6-0.7mm)，渗氮工序应尽量靠后安排，为减小渗氮时的变形，在切削后一般需进行消除应力的回火。

热处理的作用是改善行星滚柱丝杠副各零件的材料性能、切削性能以及消除残余应力。热处理工艺可分为两大类：预备热处理和最终热处理。

预备热处理的作用是改善丝杠切削性能、消除残余应力以及为最终热处理做准备，主要工艺包括调质、退火、正火、时效处理等；最终热处理的作用是提高螺纹的表面硬度以及耐磨性。

资料来源：机械工程师微信公众号



根据郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》：

- 1) 丝杠表面热处理采用感应淬火，硬化层深度 1.5~2.0mm；
- 2) 螺母表面热处理采用渗碳淬火，硬化层深度 1.0~1.4mm；
- 3) 滚柱和内齿圈整体进行调质处理，调质硬度 HB235，齿面氮化处理，齿面硬度不低于 HV600，硬化层深度 0.4~0.5mm。

表2：丝杠加工中的热处理工艺

部位	热处理工艺	出发点
丝杠表面	感应淬火	感应淬火后丝杠表面性能提高，心部具有较高韧性；硬化层深度 1.5~2.0mm
螺母表面	渗碳淬火	可以得到高的疲劳强度、硬度及耐磨性，使其能够承受较大的冲击载荷；硬化层深度1.0~1.4mm
滚柱和内齿圈	整体进行调质处理	使滚柱和内齿圈在较大的动载荷作用下，能很好地承受弯曲和扭转力的作用，且硬度和耐磨性也显著提高
	齿面氮化处理	避免其在热处理过程中发生较大热变形，又能使其具有优异的耐磨性、耐疲劳性和耐腐蚀性

资料来源：郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》

表3：丝杠一般工艺流程

序号	丝杠（滚柱丝杠）	滚柱（滚柱丝杠）	丝杠（滚珠丝杠）
1	丝杠毛坯	滚柱毛坯	丝杠毛坯
2	预备热处理	预备热处理	预备热处理
3	校直	校直	校直
4	加工端面及中心孔	加工端面及中心孔	加工端面及中心孔
5	粗车	粗车	粗车
6	高温时效并检验	高温时效并检验	高温时效并检验
7	加工端面及修中心孔	加工端面及修中心孔	加工端面及修中心孔
8	半精车	半精车	半精车
9		滚齿	
10	铣	铣	铣
11	粗磨	粗磨	粗磨
12	感应淬火并检验	表面氮化并检验	感应淬火并检验
13	研中心孔	研中心孔	研中心孔
14	粗磨	粗磨	粗磨
15	探伤	探伤	探伤
16	高温时效并检验	高温时效并检验	高温时效并检验
17	研中心孔	研中心孔	研中心孔
18	半精磨	半精磨	半精磨
19	低温时效并检验	低温时效并检验	低温时效并检验
20	铣键槽	铣键槽	铣键槽
21	磨端部螺纹	磨端部螺纹	磨端部螺纹
22	研中心孔	研中心孔	研中心孔
23	精磨并全面检验	精磨并全面检验	精磨并全面检验
24	入库	入库	入库

资料来源：郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》、郑红《精密滚珠丝



表4：热处理基本工艺分类

序号	工艺类型	概述及作用	工艺细分
1	整体热处理	对工件进行穿透加热，以改善整体的强度、硬度、塑性和韧性	分为退火、正火、淬火、回火、调质等8小类，其中退火、正火、淬火、回火是最常用的热处理方法
2	化学热处理	是改变工件表层化学成分、组织和性能的金属热处理工艺，将工件放在含碳、氮或其它合金元素的介质中加热，保温较长时间，使工件表层渗入碳、氮、硼等元素，以提高工件硬度、耐磨性等	分为渗碳、渗氮、碳氮共渗等7小类
3	表面热处理	是只加热工件表层，以改变其表层力学性能的金属热处理工艺，使工件具有外部强度高、耐磨性好，而内部保持良好韧性、抗冲击力等优点	分为表面淬火和回火、物理气相沉积等5小类，其中表面淬火因为变形、氧化及脱碳较小而应用较广

资料来源：丰东股份招股说明书（公司现已更名为金财互联）

表5：热处理基本工艺分类（四把火）

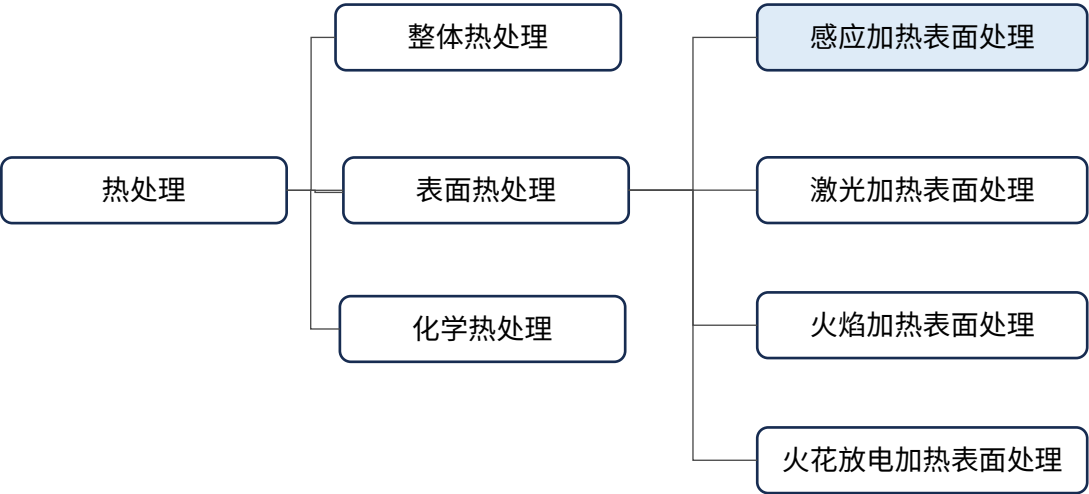
工艺	介绍
退火	退火是将工件加热到适当温度，根据材料和工件尺寸采用不同的保温时间，然后进行缓慢冷却的热处理工艺
正火	将工件加热到适宜的温度保温后在空气中冷却的热处理工艺；正火的效果同退火相似，只是得到的组织更细，常用于改善材料的切削性能
淬火	将工件加热保温后，在水、油等淬冷介质中快速冷却的热处理工艺;最常见的有水冷淬火、油冷淬火、气冷淬火等
回火	将淬火后的工件在高于室温而低于650℃的某一适当温度进行长时间的保温，再进行冷却的热处理工艺

资料来源：丰东股份招股说明书（公司现已更名为金财互联）

整体热处理是指对工件进行穿透加热，以改善整体的强度、硬度、塑性和韧性。表面热处理和化学热处理主要解决零件的表面强化问题，是金属材料整体热处理的补充和完善，三者相互配合，可全面达到零件多种多样的使用性能要求。其中退火、正火、淬火、回火是最常用的热处理方法，俗称“四把火”。



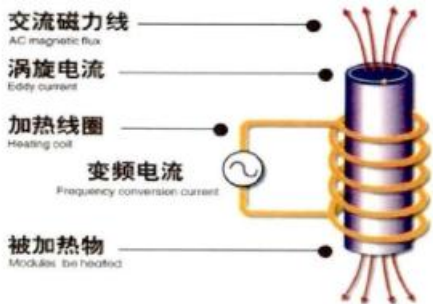
图1：热处理工艺分类图



资料来源：升华感应公开转让说明书

表面感应加热淬火是滚珠丝杠改善表面耐磨性的重要热处理工艺之一。该工艺主要是利用电磁感应原理，以涡流形式将丝杠表面快速加热至淬火温度，而后急剧冷却，形成一定厚度的表面淬硬层，而心部仍保持原有的组织形态。因此，可以满足滚珠丝杠表层具有高硬度、耐磨性而心部则具有高强韧度配合的综合力学性能要求。目前，国内精密滚珠丝杠采用的感应加热淬火工艺并不完善，普遍存在淬硬层浅、硬度梯度分布不合理、变形大等问题，这是制约其定位精度等可靠性指标提升的重要因素之一。

图2：感应加热原理示意图

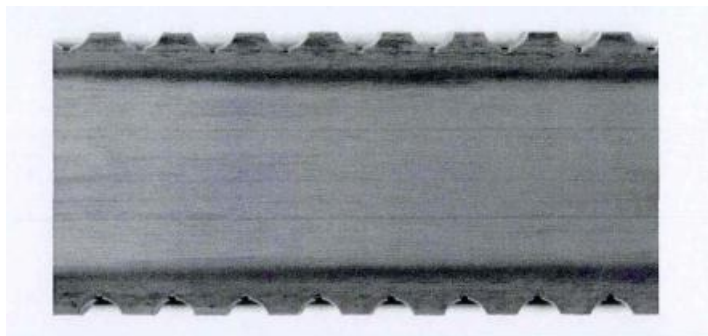


资料来源：闫野《精密滚珠丝杠表面感应加热淬火工艺研究》

根据感应电流频率的不同，感应加热淬火可分为高频淬火（30-1000kHz）、中频淬火（小于10kHz）和低频脉冲淬火（约27MHz）三类。与传统热处理相比，感应加热淬火具有如下优点：（1）加热速度快，热损失小，热效率高。（2）表面氧化脱碳少，淬火变形很小。（3）缺口敏感性低，而冲击韧性、耐磨性和疲劳强度高。（4）淬硬层深度易于控制。（5）生产率高，废品率低，易于实现机械自动化生产。



图3：丝杠淬硬层剖面显示



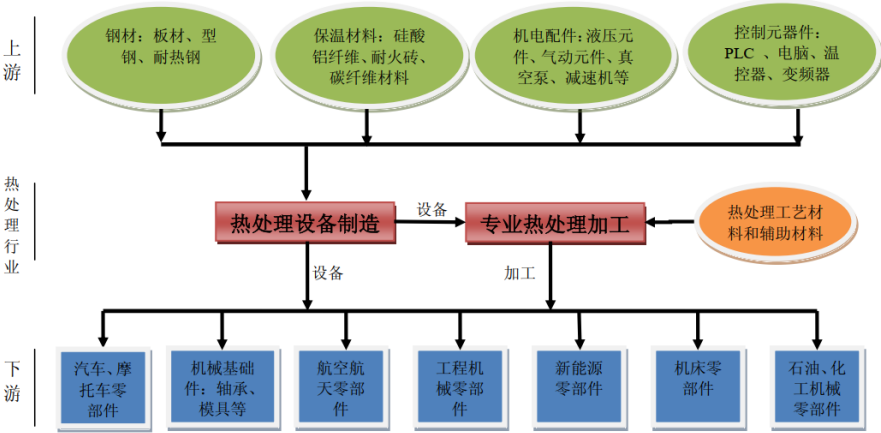
资料来源：黄娟《滚珠丝杠关键制造工艺优化及精度控制方法研究》

按照使用频率的不同，感应淬火分为超高频、高频、中频和工频四种，淬硬层的深度取决于感应电流进入丝杠表面的深度 h ，其又取决于感应电流的频率 f ，可表示为：
$$h = \frac{20}{\sqrt{f}} (800^{\circ}\text{C})$$

高频感应加热的电流频率为200~300kHz，淬应层深度可达1.0~2.0mm，对于行星滚柱丝杠来说，其螺纹牙高度为0.8mm，因此采用高频感应加热淬火来满足其表面热处理性能要求。

国内滚珠丝杠在热处理加工中普遍存在淬硬层浅、硬度分布不合理、组织均匀性差、耐磨性差等缺点，在滚珠丝杠传动系统运行过程中通常发生以磨损、接触疲劳为主的表面损伤失效。这是由于淬火过程中没有对滚道形成有效的淬硬深度和合理的硬度梯度所致。

图4：热处理设备产业链



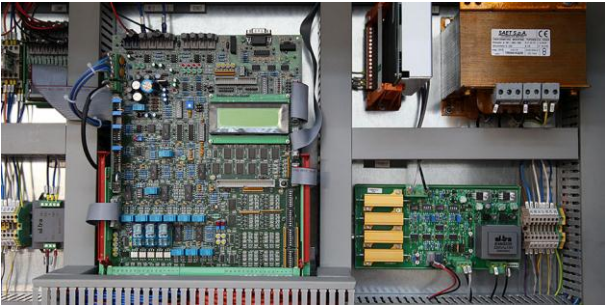
资料来源：丰东股份招股说明书（公司现已更名为金财互联）

图5：全球工业热处理设备厂商



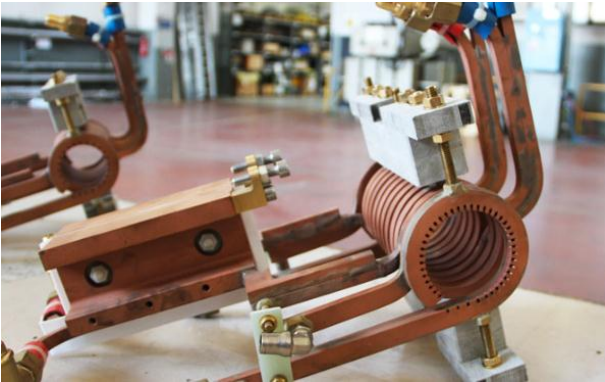
资料来源：QYResearch

图6：淬火设备用电源



资料来源：SAET EMMEDI

图7：淬火设备用线圈（感应器）



资料来源：SAET EMMEDI

中高档感应加热成套设备和感应器的制造属于典型的技术密集型产业，除了涉及机械制造、机电一体化设计技术之外，还要具备工艺气氛智能控制、温度场流场设计控制、传热学设计、工艺数据库及故障自诊断等技术基础。结构方面，包括感应器的设计与制造、感应电源的适配以及数控系统的选择。德国 AEG 公司生产的 6m 数控中频淬火设备，能够自动测量淬火过程中滚珠丝杠螺距的变形量并可自动加以修正，使螺距变形量得到有效控制。感应淬火领域，国内先进的设备制造商包括恒进感应、升华感应、恒精感应，海外龙头包括美国应达、意大利萨伊；气氛炉领域，国内先进的设备制造商包括丰东热技术、江苏金色工业炉、天利热工，海外龙头包括西科沃克、那智不二越、艾伯纳。

丝杠加工中的热处理工艺及设备

热处理带来的形变及解决方案

工艺升级，兼顾效率与精度

投资建议

风险分析



图8：滚珠丝杠软车+磨削工艺路线



丝杠在淬火介质中迅速冷却时，其横截面会产生一定的温度梯度。由于冷却过程中存在温度差，因而沿滚珠丝杠截面不同部位的热膨胀量也将不同，导致滚珠丝杠的不同部位均产生内应力。内应力分布不均匀相应就加大了淬火热变形量，进而影响已车螺纹的螺距误差的改变。

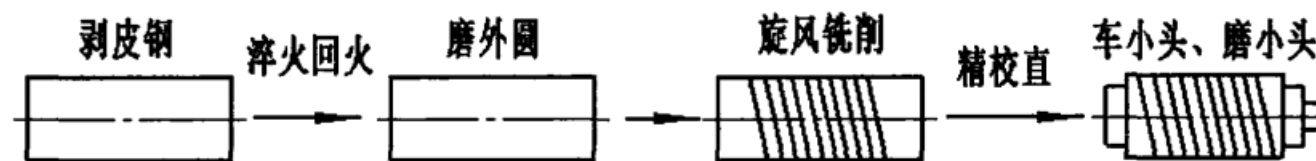
对于实际加工中的滚珠丝杠来说，粗加工螺纹后淬火，**由于各种原因淬火后仍不可避免的出现误差变形**，而丝杠全长螺距变化及丝杠弯曲又会直接影响后续的滚道磨削加工，导致丝杠整体精度下降。如果全长螺距变化过大，就会导致磨削时部分螺纹滚道磨削不下来，造成报废。

在滚道螺纹粗加工时使用数控车对螺距进行误差补偿，以期淬火后还能获得最佳的螺距状态。因此，通过不同规格产品淬火变形量的摸索，找出相对稳定的误差补偿值至关重要。滚珠丝杠的螺距精度最终是靠数控螺纹磨床来保证的，故以数控螺纹磨床的精度为基准进行辅助调整螺距误差也是可行的。大导程的滚珠丝杠由于淬火变形相比其他丝杠更大，且不稳定因素更多，在后续加工中变形很大，故所留余量要比其他丝杠大的多，所以需增加一道**开槽工序**，后在预螺工序时需要对螺距进行二次补偿，通过冷热加工相结合的补偿措施，很好的解决了粗加工螺纹淬火的螺距变形问题。

资料来源：黄娟《滚珠丝杠关键制造工艺优化及精度控制方法研究》



图9：硬铣加工工艺路线

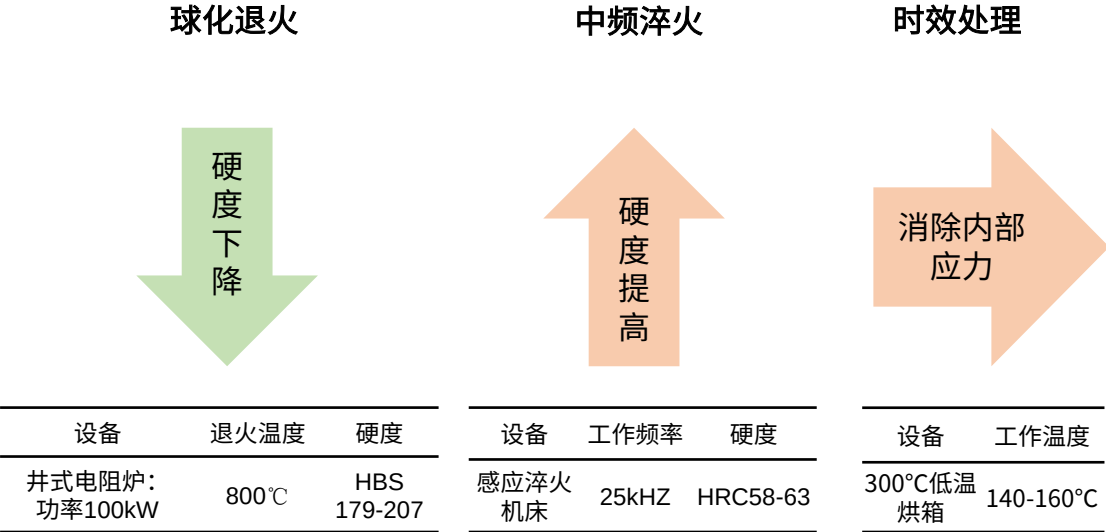


在实际铣削螺纹加工中，做好前期的准备工作后，对螺距误差影响较大应该是**铣削过程中产品的热变形**。如不同批次材料在铣削过程中的热变形大小会不尽相同，因此在螺距误差补偿数值的确定方面需要通过不同批次材料的铣削加工，不断摸索补偿值，积累相关螺距变形的数据，并对这些数据进行曲线分析找出不同批次产品的螺距变化规律，在后续的产品加工中进行补偿。

资料来源：黄娟《滚珠丝杠关键制造工艺优化及精度控制方法研究》



图10：丝杠制造相关热处理方式



资料来源：郑红《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究》

请务必参阅正文之后的重要声明

滚珠丝杠表面感应淬火具体的技术要求如下：

材料选用优质GCr15钢。滚道表面硬度要求为58~63HRC。

淬火硬化层要求：

①深度要求：沿滚道法向表面有效硬化层深度≥1.0mm。

②显微组织要求：在硬化层区域内显微组织为马氏体+残留奥氏体+碳化物，马氏体组织为1~4级。

径跳要求：工件长度≤600mm，径跳≤0.30mm；工件长度≥600mm，径跳≤0.40mm。

螺距变形要求：伸长量≤0.8mm/m×工件长度；收缩量≤0.5mm/m×工件长度。

对于滚珠丝杠淬火硬化层深度要求是基于丝杠耐磨性和长期反复运动的需要，为了保证其能很好地达到设计使用寿命。在对滚珠丝杠淬火硬化层组织的要求中，特别强调马氏体组织必须控制在1~4级，即隐针状马氏体，不允许出现粗针状马氏体。根据生产经验，类似滚珠丝杠这样精密的滚动轴承类产品，如果淬火组织过粗则有可能在后续的磨削加工中产生裂纹。

对于滚珠丝杠表面感应淬火径跳的要求是基于两方面的原因：一是丝杠精度的要求；二是大批量产品生产的要求。

对于螺距变形量的要求是基于一般企业的滚珠丝杠的生产大部分是先开滚道再淬火。一方面这有利于产品的大批量生产，但是另一方面对丝杠的表面感应淬火也提出了控制螺距变形的要求。由于丝杠在淬火过程中不可避免地会产生长度方向的变化，这将会影响原有滚道的尺寸精度。



淬火形变

在丝杠加工过程中，淬火工序通过在工件表面形成坚硬的马氏体组织，从而达到耐磨性的要求。但是，淬火后由于金相组织的改变，将会导致轴向尺寸变化，给丝杠的高精度加工带来挑战。

对于高精度的滚珠丝杠螺纹，欧洲、日本均采用淬火前软车补偿、淬后磨削的工艺。国内部分厂商也尝试采用淬火前软车补偿、旋铣补偿，淬火后磨削的加工方式。但受到国内滚珠丝杠用材的制约，找不到淬火前后滚珠丝杠的变形规律，致使软车补偿、旋铣补偿工艺存在一定的技术风险。摸清淬火的变化规律是螺纹粗加工中必须解决的难题。

目前来看，常见的解决方案有两种：

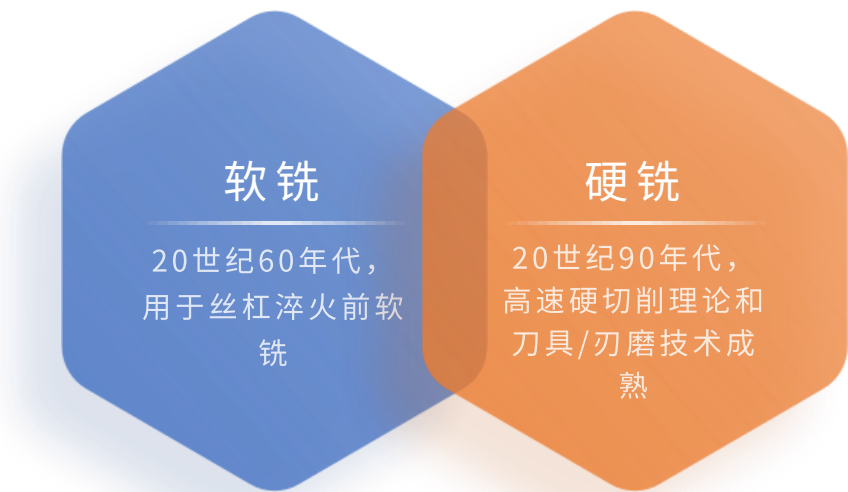
- 1) 淬火前不加工螺纹，光轴淬火后在螺纹磨床上采用强力磨削的方式硬磨螺纹槽。这种工艺虽然避开了淬火轴向变形对螺纹加工的影响，但由于在螺纹开槽过程中金属去除量大、油雾粉尘大、噪声大、对车间环境污染严重；
- 2) 粗车螺纹（按轴向变形量修正导程）后，沿螺纹滚道进行中频淬火。这个方案特别适用于导程大、钢球直径大、有一定批量的产品。

实践证明：不同钢厂的GCr15轴承钢，不同的冶炼炉号（批次），虽然尺寸规格和淬火工艺相同，但轴向变形量依然不同，掌握变形规律是有难度的。如果淬火前的导程修正量不准确，将使磨削余量偏移并导致滚道表面硬化层厚度不均匀，最终影响产品的摩擦特性、接触刚度和使用寿命。

资料来源：黄祖尧《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展(上)》

淬火形变

图11：软铣与硬铣的区别



国内：旋风铣削在我国国内很多机械制造公司都有所应用，最主要的使用在一般钢材各种螺纹软铣的旋风铣头，这种技术突破推广于20世纪60~70年代。在此之后，旋风铣床逐渐在大连机床厂、北京机床研究所、山东博特和南京工艺等投入使用，利用旋风铣床完成精密滚珠丝杠的高效粗加工。南京工艺在2004年首次引进了德国公司的PW160型CNC旋风硬铣机床，在2009年又引进同公司的PW300HP型1000mmCNC旋风硬铣机床，可以精铣出整体800mm以上的大型滚珠丝杠副。

国外：上世纪90年代之前旋铣工艺一直被用作螺纹车削的替代工艺，主要用于软质材料的高效粗加工、半精加工，又被称为 " 软旋铣 " 。随着高速切削理论、硬切削理论研究的不断深入及高性能刀具材料的涌现，使得淬硬轴承钢等难加工材料的高精度切削加工成为可能。1997年德国丝杠制造商BLIS公司与机床制造企业Leistritz公司投资开发了世界上第一台用于生产精密滚珠丝杠的硬旋铣机床（Hard Whirling）。

硬态车削与非淬硬钢车削相比，切削力增加**30%~100%**，切削所需功率增加**1.5~2倍**，所以硬态车削对机床提出了更高要求，如要求机床应具有**高刚度、高转速和大功率等**。

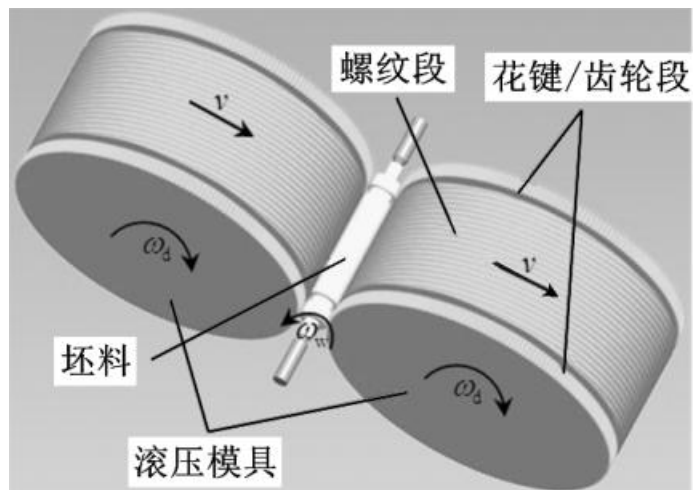
资料来源：黄祖尧《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展(上)》

硬态车削比磨削可降低成本40%~60%。德国汽车工业在加工曲轴、凸轮轴、摩擦盘等零件时均采用硬态车削代替磨削，收到了良好效果。如加工100Cr6（德国DIN牌号，相当于中国的GCr15）的摩擦盘（60~62HRC），加工时间减少了60%。美国用热压陶瓷刀片车淬硬钢轧辊（>50HRC），车外圆、端面、切槽和成形表面等，其 $uc_{粗}=137m/min$ ， $uc_{精}=198m/min$ ， $f=0.13\sim0.33mm/r$ ， $ap=0.51\sim0.89mm$ 。美国另一公司用CBN加工淬硬丝杠时间由原来的170h缩短为1.7h，提高工效近100倍

请务必参阅正文之后的重要声明

淬火形变

图12：滚柱零件一次滚压成形原理图



资料来源：张大伟《行星滚柱丝杠副滚柱塑性成形的探讨》

螺纹滚轧成形技术以金属塑性变形理论为基础，因此丝杠在滚压成形之后使用感应淬火。但淬火后工件会发生轴向尺寸变化，因此掌握变形规律对于丝杠辊轧来说至关重要。

德国宝飞螺公司通过探索摸清了淬火的变化规律。以外径30毫米，螺距5毫米的滚珠丝杆为例，热处理后直径变形量约为+30微米，单个螺距变形量约为-10微米。

此变形量需要在滚压过程中进行预留。同时由于滚珠丝杆对牙形的要求很高，在滚压模具上也**必须要考虑此热处理变形量**。在热处理前加工在某种意义上来说“错误”的尺寸，从而保证热处理后得到完美的产品。有了这些诀窍之后，生产高精度滚珠丝杆成为可能。热处理之后也无需再进行磨削加工，仅仅需要将工件表面抛光，以去除在热处理阶段产生的表面氧化皮。

切削热形变

表6：具体参数及要求（单位：mm）

导程	钢球	中径	长度	留量	圆度	圆柱度	跳动
4	2.381	<25	<800	0.20~0.25	0.02	0.03	0.05
5	3.175	<32	<1000	0.25~0.30	0.02	0.03	0.05
6	3.969	3240	<2000	0.30~0.35	0.02	0.04	0.05
8	4.763	3240	<2000	0.30~0.35	0.02	0.04	0.05
10	6.35	3240	<2200	0.30~0.35	0.02	0.04	0.06
12	7.144	4063	<2500	0.35~0.40	0.02	0.05	0.06
16	9.525	5080	<3000	0.40~0.45	0.02	0.05	0.06

资料来源：张广明《滚珠丝杠滚道硬车加工技术研究》

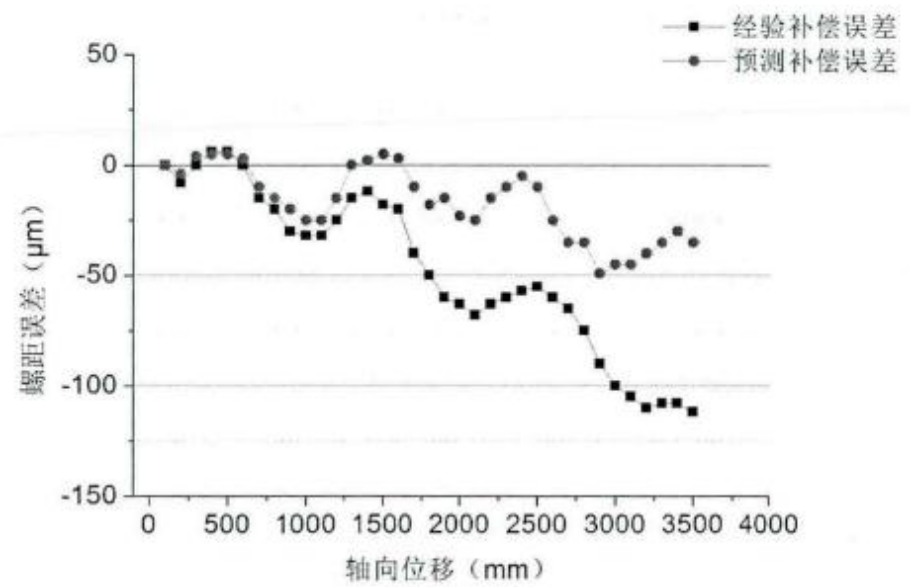
滚道硬车削需考虑车削后的工艺流向，通常情况下滚道硬车削后还需进行低温时效处理，丝杠会产生弯曲变形和长度方向的伸缩，这些变形会因滚珠丝杠长径比、导程、钢球大小、丝杠材质的纯净度等因素的不同而大小不一。根据几年的滚珠丝杠加工工艺试验得出，在硬车滚珠丝杠螺纹滚道时，其留量一般控制在0.25-0.40(直径方向)mm之间比较合适。

控制工件热变形的技术措施

- (1) 根据现有国内材料的情况制定了相关材料的入厂检测验收技术要求，严格控制材料金相及组织，尽量控制材料的质量。
- (2) 对材料进行多扎感应器淬火，确保淬硬层的深度、梯度。
- (3) 对淬火过程中的进给速度、冷却速度、冷却量等淬火参数进行调节确保淬火质量。
- (4) 对棒料淬火前后及精加工的锥度、圆度、粗糙度等指标进行控制，确保前期指标的合格。
- (5) 定制知名厂家的高精度硬切削刀具，保证加工质量。
- (6) 根据产品实际加工情况不断总结调整加工参数，使加工质量达到最优。

切削热形变

图13：补偿前后的螺距误差对比



数控系统同样具备热误差补偿功能。西门子840D数控系统具有螺距误差补偿功能，通过在线监测、离线研究等方法获取误差规律。按照仿真和实验研究的热变形规律进行误差补偿后，螺距累积误差明显减小。

- (1) 硬件补偿原理通过机械方法得到丝杠全程的螺距误差分布曲线，并在丝杠累积螺距误差值达到一个脉冲当量的位置安装挡块。当机床工作台移动时，机床控制开关向控制电路发送误差补偿信号。
- (2) 软件补偿原理通过理想加工与螺距误差测量仪两种状态下得到的丝杠螺距误差值对比，得到螺距误差分布情况与补偿文件，将补偿数据输入数控系统后为下次铣削加工提供补偿值。这种定点补偿方法可以提高定位精度。

资料来源：李彦凤《滚珠丝杠旋风硬铣削加工热变形误差及其控制技术研究》

丝杠加工中的热处理工艺及设备

热处理带来的形变及解决方案

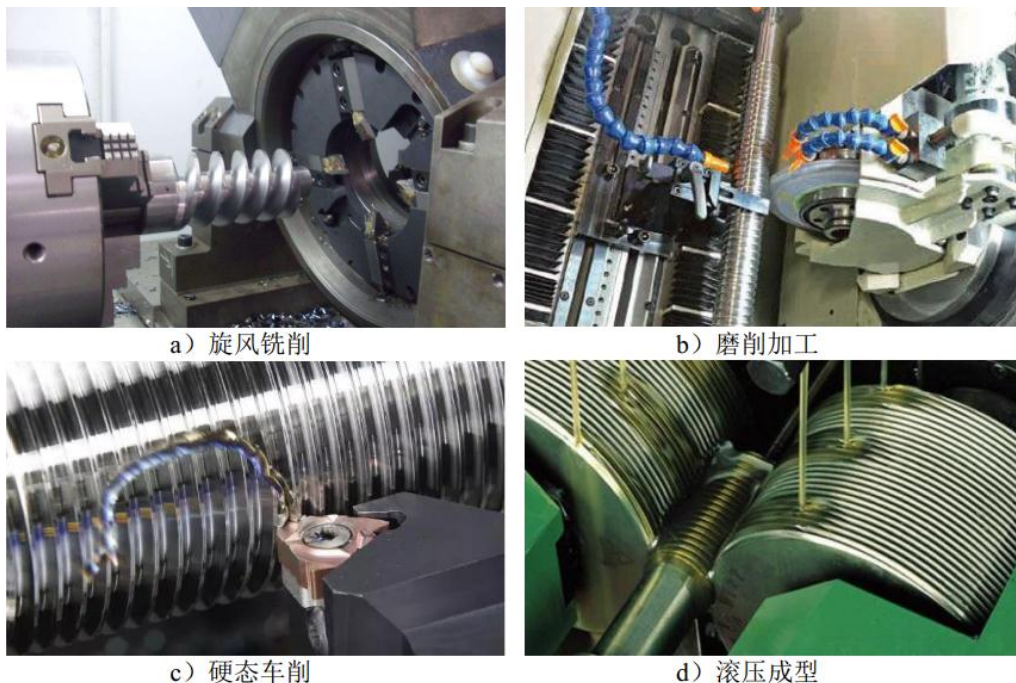
工艺升级，兼顾效率与精度

投资建议

风险分析



图14：行星滚柱丝杠螺纹副的加工工艺方法



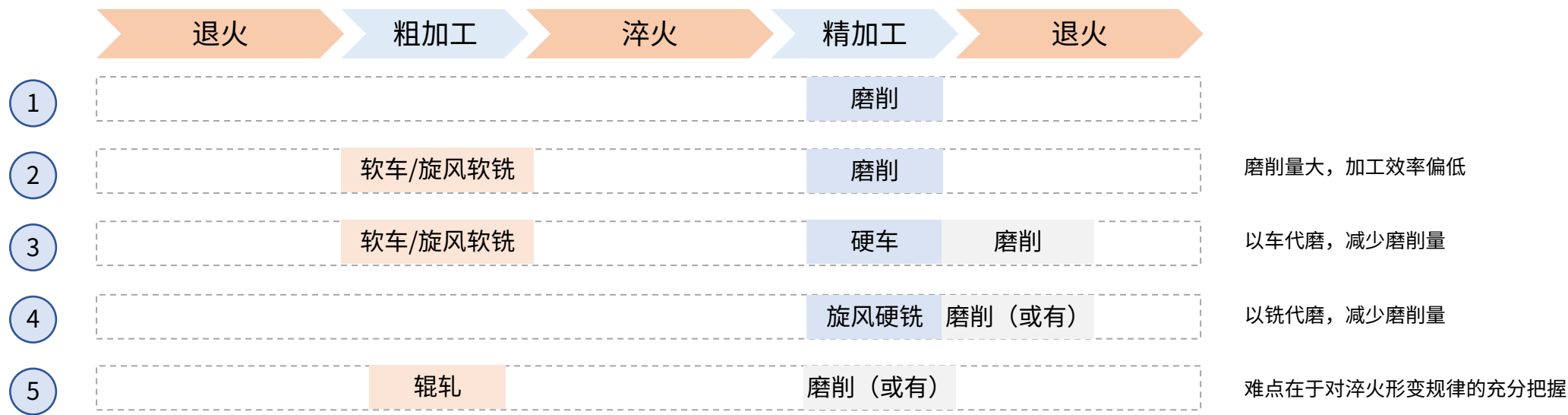
资料来源：陈晖《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究》

工艺方面，需综合考虑丝杠精度与生产效率的平衡。按照精度排序，依次是磨削>旋风铣>辊轧，按照生产效率排序，依次是辊轧>旋风铣>磨削，而硬车削通常作为螺纹滚道半精加工的选择之一。

为了满足人形机器人降本、放量的要求，行星滚柱丝杠的生产效率和量产成本需在当前水平基础上有较大下降。我们预计，在满足精度要求的前提下，中精度丝杠使用旋风铣、辊轧更能适应大批量、快速交付的要求，而磨床将在高精度丝杠中继续占据不可替代的地位。



图15：行星滚柱丝杠加工工艺



资料来源：黄娟《滚珠丝杠关键制造工艺优化及精度控制方法研究》、黄祖尧《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展(上)》、光大证券研究所整理

丝杠加工中的热处理工艺及设备

热处理带来的形变及解决方案

工艺升级，兼顾效率与精度

投资建议

风险分析



表7：滚珠丝杠三种螺纹制造技术的对比

制造工艺	工艺基准	对丝杠材料（精胚）的要求	最高加工精度	齿形精度及表面质量	对有预加负荷BS产品性能的影响	装备及制造成本	生产批量
CNC精密螺纹磨削	中心孔(辅以外圆)	没有特殊要求	P3级，P1级，P0级	砂轮（磨轮）的品质和使用寿命直接影响齿形精度和螺纹表面质量	齿形和中径尺寸的分散度较大影响ΔTPP	螺纹磨床已国产化生产工序多制造成本高	更换工件规格较容易，不受生产批量限制
CNC精密硬旋风铣削	丝杠外圆	对精胚外圆的圆度，圆柱度，直度以及硬化层深度，硬度的均匀性有要求	P3级导程误差的波动小、线性好	Ra=0.4μm，高速、渐近、低温切削，表面质量优于螺纹磨削	齿形和中径尺寸精度稳定有利于改善摩擦特性，ΔTPP误差波动小	关键设备前期投入大，后期成本取决于CBN刀片寿命及刃磨的自主化能力	调整对刀较费事，适于加工有一定批量的产品
CNC精密滚轧成形	丝杠外圆	对精胚外圆尺寸、公差、圆度，圆柱度，直线度有严格要求，对钢材的塑性应变能力、延伸率有较高要求	P3、P5导程误差的波动小、线性好	Ra=0.5~0.8μm表面光滑、处于压应力状态，无磨削加工的弊端	齿形和中径尺寸精度稳定有利于改善摩擦特性ΔTPP误差波动小。摩擦特性、疲劳寿命均优于磨削	关键设备前期投入大，后期成本取决于轧辊寿命、设计制造的研发能力，是否外购	标准化，系列化大批量生产
备注			按ISO3408—3(1996)标准	有待在疲劳寿命试验机上做对比试验			

资料来源：黄祖尧《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展(下)》



表8：国内上市公司中丝杠行业主要参与者

公司	整体实力	丝杠、机器人相关进展
五洲新春	公司主要生产轴承及汽车配件等高端精密零部件。为德国舍弗勒和瑞典斯凯孚两家轴承制造商提供轴承套圈。	公司研发的各类丝杠类产品主要面向新能源汽车产业和机器人产业。公司T型螺纹丝杠开发完成并向客户送样，行星滚柱丝杠零部件向下游重要客户多次送样，公司的短期目标是切入主流客户产业链。
贝斯特	公司业务分为三大板块：一、各类精密零部件、智能装备及工装夹具等原有业务；二、新能源汽车零部件业务；三、工业母机领域，全面布局直线滚动功能部件，产品包括：高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等。	公司通过设立全资子公司“无锡宇华精机有限公司”全面布局直线滚动功能部件（产品包括：高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等），公司生产的滚珠丝杠副、直线导轨副等产品首台套已实现成功下线，部分产品已在送样验证过程中。
恒立液压	经过30多年的专注与创新，从液压油缸制造发展成为集液压元件、精密铸件、液压系统等产业于一体的大型综合性企业，主要市场涵盖20多个国家和地区，产品遍及工程机械、农业机械、工业工程、海洋工程、能源科技、隧道工程等众多行业。	公司拟投资15亿元建设线性驱动器项目，预计2024年第二季度投产。项目达产后将形成年产104,000根标准滚珠丝杠电动缸、4,500根重载滚珠丝杠电动缸、750根行星滚柱丝杠电动缸、100,000米标准滚珠丝杠和100,000米重载滚珠丝杠的生产能力。
浙海德曼	公司专门从事高端数控车床生产，掌握了数控车床三大核心技术，即主轴技术、伺服刀塔技术、伺服尾座技术国家级专精特新“小巨人”企业。与贝斯特、五洲新春、双环传动等建立多年的合作关系。	公司的T系列高端数控车床及高精密度数控车床具备较强的以车代磨效果。该系列的复合加工功能能够实现铣削功能，可以代替部分以铣代磨功能。
华辰装备	公司是国内专业从事全自动高精度数控轧辊磨床研发生产的创新型领先企业。公司公司与德国Wieland公司开展国际合作，开发内外圆复合磨床（亚μ磨削系列产品），属于高精度数控万能复合磨床，具有外圆、内圆、非圆、螺纹磨削功能。	与贝斯特达成全面战略合作关系，共同推动国产高端数控直线导轨磨床关键技术攻关。华辰装备计划于1年内向贝斯特精机提供对标国际行业龙头企业领先水平的精密数控直线导轨磨床产品以及相应技术支持，该产品为目前全球磨削长度最长、技术难度及磨削效率最高的产品。
秦川机床	公司是中国机床工具行业龙头骨干，中国精密数控机床与复杂工具研发制造基地，工业机器人减速器研发制造基地，国家级高新技术企业和创新型试点企业，拥有国家级制造业单项冠军产品和多家国家级专精特新“小巨人”企业。	公司螺纹磨床产品下游市场主要有：滚动功能部件行业、工量具行业、减速机行业、汽车零部件制造（尤其是新能源汽车）、螺杆空气压缩机行业。子公司汉江机床拥有行星滚柱丝杠产品的研发、制造基础，近年来已有多种产品供给某些特殊行业，同时，部分新型号产品正在研制和试验验证。同时也具备旋风铣机床生产能力。
日发精机	日发机床公司定位于高端数控机床，用定制化设计、规模化生产、全方位服务逐步实现进口替代并占有优势的行业地位。	公司数控螺纹磨床用于新能源汽车、人形机器人上的丝杠与螺母的试磨情况良好，高效且精度符合客户要求，获得了客户的认可；用于丝杠螺母的端面外圆磨床已向某客户交付，并与另一客户签订了螺纹磨床合同。



热处理工艺：丝杠加工主要用到感应淬火（丝杠表面）、渗碳淬火（螺母），感应淬火可以使丝杠满足表层具有高硬度、耐磨性而心部则具有高强韧度配合的综合力学性能要求；

热处理设备：包括感应器的设计与制造、感应电源的适配以及数控系统的选择。应淬火领域，国内先进的设备制造商包括恒进感应、升华感应、恒精感应，海外龙头包括美国应达、意大利萨伊；

热处理变形：（1）淬火形变：淬火后由于金相组织的改变，将会导致轴向尺寸变化。硬车/旋风硬铣可一定程度上规避淬火形变；（2）切削热形变：切削过程中发热导致，可通过硬件补偿（安装挡块）、软件补偿（数控系统热误差补偿功能）。

投资方面，建议关注：

- （1）先进的淬火设备，建议关注：恒进感应、升华感应；
- （2）硬车/旋风硬铣可一定程度上规避淬火形变，建议关注相关机床及刀具：浙海德曼、沃尔德、日发精机；
- （3）提高系统刚度的零部件，如静压主轴，建议关注：昊志机电、江苏领臣（未上市）；
- （4）数控系统具备一定误差补偿功能，建议关注：华中数控、广州数控（未上市）。

丝杠加工中的热处理工艺及设备

热处理带来的形变及解决方案

工艺升级，兼顾效率与精度

投资建议

风险分析



- (1) 产业化进程不及预期：目前人形机器人产业链成本仍较高，尚未具备确定的应用场景，若产业化进程不及预期，可能对供应链企业造成不利影响；
- (2) 竞争加剧风险：产业界对人形机器人高度关注，若后续丝杠、空心杯电机、减速器等领域竞争加剧，可能对供应链企业造成不利影响；
- (3) 核心技术进步不及预期：人形机器人的产业化推进有赖于AI、自动驾驶、以及相关零部件的核心技术持续进步，若后续核心技术进步不及预期，可能对产业链落地造成负面影响。

衷心 感谢

光大证券研究所



电新环保研究团队

殷中枢（首席分析师）

📄 执业证书编号：S0930518040004
☎ 电话：010-58452071
✉ 邮件：yinzs@ebscn.com

黄帅斌（分析师）

📄 执业证书编号：S0930520080005
☎ 电话：0755-23915357
✉ 邮件：huangshuaibin@ebscn.com

和霖（分析师）

📄 执业证书编号：S0930523070006
☎ 电话：021-52523853
✉ 邮件：helin@ebscn.com

郝骞（分析师）

📄 执业证书编号：S0930520050001
☎ 电话：021-52523827
✉ 邮件：haoqian@ebscn.com

陈无忌（分析师）

📄 执业证书编号：S0930522070001
☎ 电话：021-52523693
✉ 邮件：chenwuji@ebscn.com

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本研究报告中任何关于发行商或证券所发表的观点均如实反映研究人员的个人观点。研究人员获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户反馈、竞争性因素以及光大证券股份有限公司的整体收益。所有研究人员保证他们报酬的任何一部分不曾与、不与、也将不会与本报告中的具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

行业及公司评级体系

买入—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数15%以上；
增持—未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数5%至15%；
中性—未来6-12个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至5%；
减持—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数5%至15%；
卖出—未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数15%以上；
无评级—因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。
基准指数说明：A股市场基准为沪深300指数；香港市场基准为恒生指数；美国市场基准为纳斯达克综合指数或标普500指数。

特别声明

光大证券股份有限公司（以下简称“本公司”）成立于1996年，是中国证监会批准的首批三家创新试点证券公司之一，也是世界500强企业——中国光大集团股份公司的核心金融服务平台之一。根据中国证监会核发的经营证券期货业务许可，本公司的经营范围包括证券投资咨询业务。

本公司经营范围：证券经纪；证券投资咨询；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问；证券承销与保荐；证券自营；为期货公司提供中间介绍业务；证券投资基金代销；融资融券业务；中国证监会批准的其他业务。此外，本公司还通过全资或控股子公司开展资产管理、直接投资、期货、基金管理以及香港证券业务。

本报告由光大证券股份有限公司研究所（以下简称“光大证券研究所”）编写，以合法获得的我们相信为可靠、准确、完整的信息为基础，但不保证我们所获得的原始信息以及报告所载信息之准确性和完整性。光大证券研究所可能将不时补充、修订或更新有关信息，但不保证及时发布该等更新。

本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次发布时光大证券研究所的判断，可能需随时进行调整且不予通知。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本报告中的信息或所表述的意见并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。

不同时期，本公司可能会撰写并发布与本报告所载信息、建议及预测不一致的报告。本公司的销售人员、交易人员和其他专业人员可能会向客户提供与报告中观点不同的口头或书面评论或交易策略。本公司的资产管理子公司、自营部门以及其他投资业务板块可能会独立做出与本报告的意见或建议不相一致的投资决策。本公司提醒投资者注意并理解投资证券及投资产品存在的风险，在做出投资决策前，建议投资者务必向专业人士咨询并谨慎抉择。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

本报告根据中华人民共和国法律在中华人民共和国境内分发，仅向特定客户传送。本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、复制、转载、刊登、发表、篡改或引用。如因侵权行为给本公司造成任何直接或间接的损失，本公司保留追究一切法律责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。