丝杠磨削过程中的温度场和热变形分析

上海理工大学 (200093) 陈 琳 李郝林

精密滚珠丝杠副是数控机床以及加工中心的关键部件，起到精密传动和定位的作用。随着数控机床加工精度的不断提高，对滚珠丝杠的精度要求也随之提高。众所周知，丝杠属于细长类零件，其长径比一般为 20～50，所以其刚性很差。为了保证丝杠在使用中具有较高的精度保持性，一般把精密磨削作为丝杠加工的最终工序，其对丝杠精度起决定性的作用。磨削过程中磨削热引起的热变形则是精密丝杠磨削过程中重要的误差来源之一，为了提高丝杠的磨削精度，必须对丝杠磨削过程中工件的热变形进行有效的控制。由于精密丝杠热变形的不均匀性和非线性特征，其热变形误差的大小随加工过程中砂轮位置而变化，因而对于丝杠的热变形误差的分析是一件困难的工作。要精确地消除热变形所带来的误差必须对丝杠热变形规律进行定量分析。

本文利用有限元分析理论，对磨削过程中丝杠进行了瞬态、稳态热分析，并以丝杠稳态热分析的温度场为依据，计算出丝杠的热变形，为精密丝杠的误差补偿提供了一定的依据，最后用分析结果和在上海机床厂对丝杠温度以及热伸长进行实时测量的结果进行对比，从而验证了此方法的有效性。

1. 丝杠磨削问题简介

丝杠磨削过程中，砂轮从丝杠一端开始磨削，热源即砂轮和工件的接触点是沿丝杠的螺旋线移动的，因其热源的移动性导致温度场和热变形分布的不均匀性和非线性，为了简化计算过程对丝杠加工作如下假设：

(1) 认为磨削热量以移动柱面热源传入丝杠的，磨削过程中磨削深度、进给速度、切削力等不变，即输入的热量在任一段上是相等的。

(2) 将丝杠看作是一均匀无限长圆柱体，直径为该丝杠的中径，忽略螺纹部分对丝杠热传导的影响，只考虑螺旋槽使丝杠表面积的增加（即换热量加大）。

(3) 由于两端部的换热系数较小，热量散失也较小，可认为两端部绝热，顶尖发热对螺纹部分影响较小。

2. 有限元分析中的关键技术

有限元分析是机械结构虚拟性能分析的重要手段，通过有限元分析能对产品的性能特点和影响产品性能的薄弱环节进行全面掌握。有限元建模是有限元分析中比较重要的步骤，它关系到计算结果的正确性和有效性，在不影响分析精度的前提下，所建立的模型如图 1 所示。在用 ANSYS 软件对滚珠丝杠温度及热变形分析的过程中围绕边界条件的加载考虑了以下关键问题：

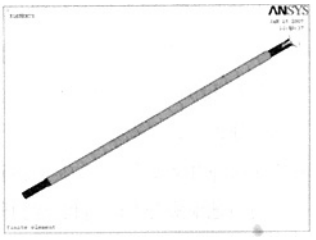

图 1 丝杠简化有限元模型

(1) 边界条件的设定 在实际的丝杠磨削加工过程中，边界条件非常复杂且多变。基于前面的假设，在本次分析中所考虑的热载荷为传入丝杠的磨削热、工件与磨削液的对流换热、机床本身电动机所产生的动力源和工件与空气进行的对流换热。其中磨削热为引起热变形的主要热源。本次分析中机床本身电动机所产生的动力源大小是通过实验的方法获得，并假设初始温度和周围空气温度为 20℃，此外，根据经验值取工件与磨削液的对流换热系数为 20W/（m^2·℃），因考虑到工件的温升一般不是很大而忽略了丝杠与周围环境之间的辐射换热。丝杠在加工过程中所承受的力载荷为切向磨削力 F_t、法向磨削力 F_n 和纵向进给分力 F_s，与前两个力相比，纵向进给分力很小，所以主要考虑前两者所带来的热变形。图 2 为磨削加工中磨削力的三个分力示意图。

(2) 热源的加载 精密丝杠的磨削过程中，磨削热

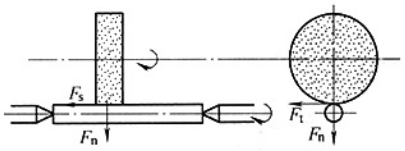

图2 磨削加工中磨削力

的热源即砂轮和工件的接触点是沿丝杠的螺旋线移动，在ANSYS中移动热源并不陌生，但大部分是沿直线移动，而使热源沿曲线移动的例子并不多见。为了真实地模拟磨削热的加载，在考虑有限元模型时就对端面进行映射网格划分，并采用扫掠方式划分实体模型，划分中通过控制单元数来对模型的径向和轴向的节点进行控制。采用结合APDL的DO循环，分别定义轴向移动和径向移动变量，每加载一步就加一，跳到下一步，并通过ANSYS内部的提取函数来选择需要加载的位置，并在每次循环中采用IF语句的嵌套删除上一步的载荷，从而真正达到热源移动的目的。在热变形分析中由于磨削力的位置也随时间的变化而发生变化，所以磨削力的加载也采用同样方法进行合理加载。

(3) 磨削力的计算　在理论计算中，由于磨削力比较难确定，所以本次分析中采用磨削力实验公式来求得：

$$F_t = 453 a_p \times 0.90 v_f \times 0.62 n_w \times 0.76$$

其中 a_p 为磨削深度，v_f 为轴向进给速度，n_w 为工件转速。法向磨削力可根据已知使用砂轮和磨削材料的磨削力比 F_n/F_t 值算得。

(4) 分段误差值的提取　在用ANSYS对丝杠磨削过程进行分析时，因为丝杠长度大，螺纹部分密且多，在ANSYS中建模进行布尔操作时会出现问题，而使用其他三维建模软件建好再进行导入也会由于模型过于复杂而出现网格划分问题，所以在这里模型上不建螺纹部分。为了得到分段螺距误差，让模型网格划分到能够以螺旋线的轨迹来加载热源，最后在轴向以每隔螺距的距离提取节点位移值就是所谓的分段螺距误差值。

3. 丝杠温度场、热变形实验研究

(1) 热分析结果　结合图3和图4结果可知，砂轮接触处温度达到最大值，磨削热对温度的影响仅局限于丝杠和砂轮接触部分附近，远离接触点的部分则影响较小，同时热量主要被已磨削过的区域吸收，这一部分的热伸长占总热伸长量的大部分；而且由于磨削热的不断注入，所以丝杠的变化趋势总是升高的，即靠近头架顶尖一侧的温度始终高于尾座顶尖的温度。因为一般对于左旋丝杠磨削是从尾座磨到头架，而右旋正好相反；丝杠加工中热变形的趋势是随着丝杠温度的升高而上升的，但变化趋势是先快后慢，磨削结束时达到最大值，此后经淋浴冷却后热变形逐渐变小。

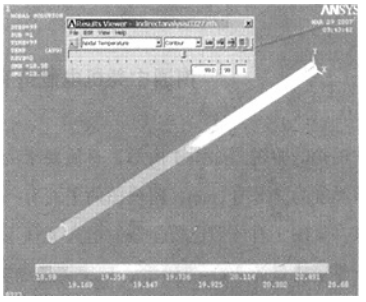

图3 瞬态温度场分析

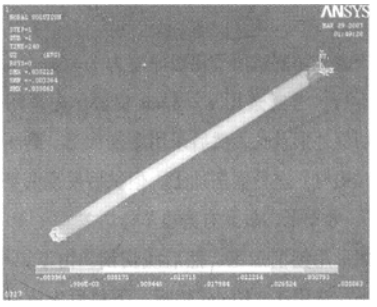

图4 热变形结果

(2) 实验研究　为了验证有限元热分析结果的正确性，对磨削过程中的滚珠丝杠进行了热分析实验。实验采用比较先进的红外测温技术，来对丝杠磨削时的温度场进行测量，所用红外热像仪型号为华中数控有限公司的HY5000。对热变形的测量主要是采用HEIDENHAIN公司的热伸长仪，型号为ND281B，所测对象参数见附表：

中径/mm	螺纹长度/mm	进给量/mm	砂轮转速/r·min^{-1}	工作转速/r·min^{-1}	工作台移动速度/mm·min^{-1}
30	1900	30	1118	10	100

进行实验后对比结果见图5、6。从图5和图6可以看出，运用有限元分析软件ANSYS所得结果与实测值相差不大，误差在10%之内，即分析所得结果要比实测值要高10%左右，这是由于测温试件本身具有误差，因为磨削过程中全淋浴的冷却方式致使红外热像仪只能在磨削完之后对工件的温度场进行测量，这也不可避免地导致误差的存在。

电梯安全部件门锁中零件铝钩的加工

南通中尧机电制造有限公司 （江苏 226600） 崔恒东

零件铝钩的俯视图如图1所示，材质要求为铝，加工后要求厚度为$7.8_{-0.1}^{0}$mm，俯视图两平面有一定的平行度要求。从图1看外形比较复杂，给人无从下手的感觉。由于年销售量为300～350套，精密铸造成本太高。

图 1

由于激光切割适用于铝板厚度为 $t=5$mm 以下，故此方案不行。考虑选用 $t=8$mm 铝板，先采用打钼丝孔，线切割外形及孔，然后采用磨削加工。购买专用磨削砂轮（铝材）进行磨削加工，但试后发现两平面“伤痕累累”，效率低，故此方案也不行。

考虑采用刨削加工，然后线切割。由于铝板较软，表面不平，选用 $t=10$mm 铝板。下料后先放到校平机初校平。在刨床上加工首先考虑的是如何定位，仔细研究图样，发现图样中有几个要加工的大孔。先钻好所有钼丝孔，对其中三个要求加工的大孔扩孔至 ϕ6.8mm（距离尽量远），攻M8螺纹，用沉头螺钉与一块模具垫板相联接，模具垫板与刨床工作台面T形螺栓紧固，如图2所示：

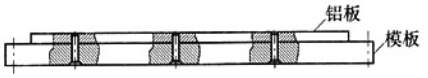

图 2

初刨一面后取下，人工校平，再刨另一面，双面留0.1mm余量，人工校平后线切割外形及孔，线切割完成后放在自制的发纹机双面走一下。实施这个方案，效果很好，表面加工粗糙度值低，能达到使用要求，操作又简单。

（收稿日期：20070529）

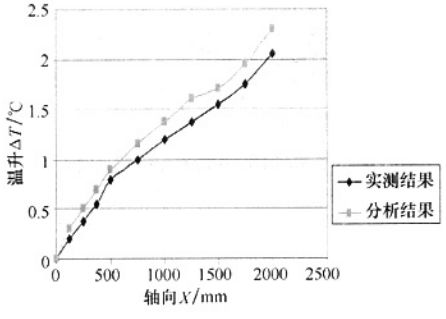

图5 温升对比

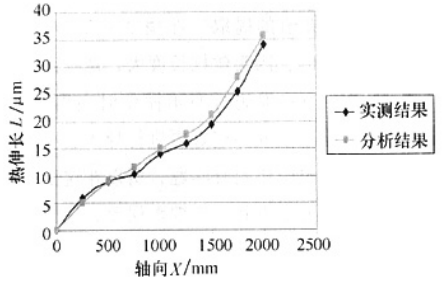

图6 热变形对比

4. 结语

（1）由于滚珠丝杠在磨削加工过程中边界条件的复杂性和导致热变形的非均匀性，采用通常简化后的数学模型无法反映实际情况，而采用有限元法可有效解决这一问题，它并不是把整个问题简化，而是经过离散化后在单个单元上简化，由于单元足够小可以把简化后引起的误差忽略，从而得到问题的真实解。

（2）运用有限元法可以综合考虑各方面的因素，例如，机床动力源的作用、磨削区对流换热系数值的变化等，可以得到与实际情况更为相近的温度场分布，减少了运算量。

（3）对丝杠在磨削过程中的有限元热分析可对磨削过程将会产生的热变形进行预测，并通过数控编程进行适当补偿，从而达到减少工件热变形和提高丝杠螺距精度的要求。

（收稿日期：20070618）