

液体火箭发动机喷管冷却槽数字化加工技术

韩 磊, 何卫东

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 主要针对现有液体火箭发动机喷管冷却槽数字化加工方法与工艺技术存在的精度保证与效率提升难题, 在已开发的加工工艺和加工系统的基础上, 重点研究了局部光亮面蓝油处理技术, 在喷管光亮面均匀涂抹蓝油以降低局部反光程度, 局部光亮区域经蓝油处理后的激光测量精度得到改善。激光传感器可靠校准技术, 借助于三角形辅助支架安装激光传感器在滑枕端部, 保证传感器安装后的位置是固定不变。自动清根加工技术是利用软件生成程序, 执行清根程序, 人工调整角度分度。在某喷管产品上对上述关键加工革新技术进行了工艺试验验证。通过验证试验, 加工后的喷管槽深及壁厚尺寸误差均控制公差范围以内, 较好地满足了喷管尺寸精度要求。应用于实际生产中, 自动化加工比例提升, 零件合格率提升, 加工效率提高了 30%。

关键词: 液体火箭发动机; 喷管; 数字化加工; 加工技术

中图分类号: V434.2-33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 04-0057-05

Digitization process technology of cooling grooves on nozzle of liquid-propellant rocket engine

HAN Lei, HE Wei-dong

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: To solve the problems that the accuracy can not be guaranteed and the efficiency is difficult to improve, which exist in digitization processing method and technology of the cooling grooves on nozzle liquid rocket engine, the technology of local bright surface treatment with blue oil is proposed on the basis of the developed processing technology and system. The degree of partial reflection can be reduced by painting blue oil evenly on the bright surface of the nozzle. The laser measurement accuracy was improved with the local bright surface treatment with blue oil. By means of triangle auxiliary bracket mounted on the end portion of the ram, the reliable calibration technology of laser sensors can ensure that the position of laser sensors is fixed. The proposed software is utilized in the automatic root clearing technology to generate the program, execute the root clearing program and manually adjust the angle indexing. The technologies mentioned above were validated on certain

收稿日期: 2014-03-31; 修回日期: 2014-04-14

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2011JY13)

作者简介: 韩磊 (1971—), 男, 技师, 研究领域为火箭发动机铣槽加工方法与工艺技术

nozzle products. The experimental results show the errors of the groove depth and wall thickness were controlled within the tolerance range and met the requirements of dimensional accuracy of the nozzle. With the technologies, the proportion of automatic processing in actual production was increased, the qualified rate of the parts was improved and the processing efficiency was increased by 30%.

Keywords: liquid-propellant rocket engine; nozzle; digitization processing; processing technology

0 引言

喷管是液体火箭发动机的关键部件之一,其制造工艺的稳定性是保证产品质量和制造效率的重要环节。喷管外表面周向均布有数百条纵向直槽,在其上覆盖不锈钢外壁后形成的冷却通道起到冷却管壁和预热液态燃料的作用。火箭喷管具有几何尺寸大、壁薄、沟槽数量多及母线线型复杂等几何特征,属于典型的大型复杂薄壁零件。以某零件为例,直径为1 500 mm,轴向高度为940 mm,冷却通道数量为784条,毛坯件壁厚约3.6 mm,加工完槽底剩余壁厚约1 mm。这类零件由于结构刚度大,加工后存在明显变形,单件加工周期长,各条槽槽深或剩余壁厚加工精度的一致性难保证。

我国进入火箭高密度发射期,新型号的研制进程不断推进,对喷管的制造质量和效率提出了更高的要求,研究高效、高质的喷管铣槽加工方法与装备迫在眉睫。研究单位研发出了全新的液体火箭发动机喷管冷却槽数字化加工方法,并研制了新式的铣槽机床。解决了多批次喷管的铣槽加工,产品质量稳定、精度一致性好、设备运行

可靠、加工操作方便。

本文主要针对喷管冷却槽数字化加工方法与工艺技术存在的精度保证与效率提升等难题,在原有的加工工艺、加工系统的基础上,进一步开展新工艺技术研究。

1 喷管数字化加工工艺

喷管数字化加工分为几何参数测量、刀位计算及加工执行3个部分,喷管加工工艺方案如图1所示。几何参数包括喷管壁厚和喷管外廓。在零件装夹前,采用超声波测量获得喷管的壁厚。在工件吊装后,采用激光微位移传感器对喷管毛坯件外廓进行非接触采样,进而获得喷管在机床坐标系下的位置。对测量得到的几何参数数据进行预处理,从而完成对加工曲面的重构,得到喷管毛坯件的数字化模型。然后根据这个数字化模型计算得到机床坐标系下的刀位点,生成铣槽加工程序和清根加工程序;最后将数控加工程序传输至数字化加工系统,即可进行铣槽加工和清根加工。该数字化加工方法是在零件一次装夹下完成传感器校准、外廓采样、对称铣槽及自动清根等工艺操作。

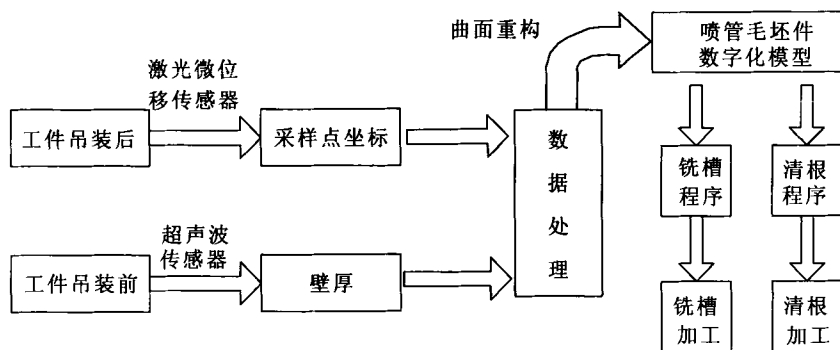


图1 喷管数字化加工工艺方案

Fig. 1 Technology program for digitization processing of nozzle

2 加工技术优化

2.1 局部光亮面蓝油处理技术

点激光传感器位移测量遵循三角几何光路原理。激光二极管射出一束 670 nm 的激光至喷管表面,经漫反射到一个具有高分辨率的 CCD 阵列探测器上,通过感应到光束在感光元件上位置不同,精确测量被测物体的位置变化。该测量方法具有测量速度快、范围宽、无接触力、实时处理能力强等优点,比较适于大型不规则曲面的快速扫描测量。然而,若被测表面光亮,镜面反射强于漫反射,致使测量精度降低。实际加工中的喷管,在焊缝区域和旋压区域均存在局部打磨光亮面。据喷管实际测量数据统计,局部光亮面的激光扫

描测量精度损失在 0.05~0.08 mm 范围内。这对喷管剩余壁厚的加工精度控制极为不利。

在喷管光亮面均匀涂抹钳工划线蓝油的优化技术,以降低局部反光程度。蓝油的基本组分是:体积份数为 2%~4% 紫颜料;体积份数为 3%~5% 虫胶漆片;体积份数为 91%~95% 酒精。在喷管安装就位后,对局部光亮面进行蓝油处理,均匀涂抹。待测量完毕后,再用酒精清洗掉蓝油。实际测量结果表明,局部光亮区域经蓝油处理后的激光测量精度得到改善。

2.2 激光传感器可靠校准技术

传感器校准获取传感器坐标系原点相对于刀具坐标系原点的位置偏差,包括水平偏差 d_h 和竖直偏差 d_v 。传感器偏差校准原理如图 2 所示。

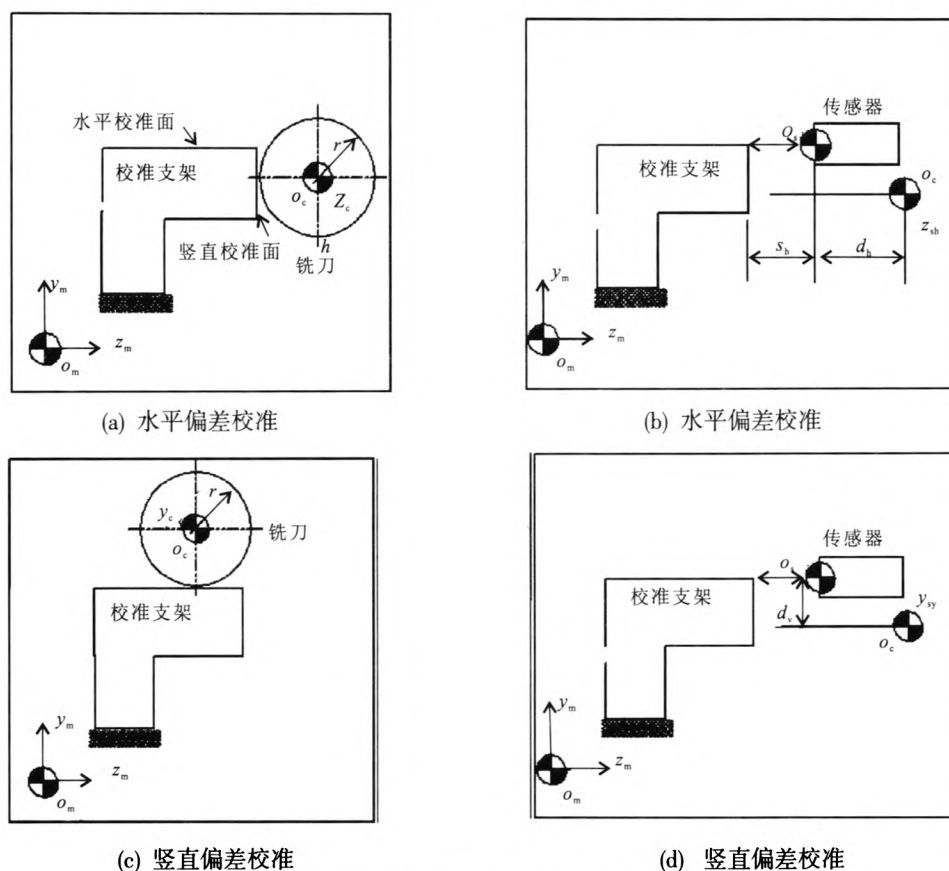


图 2 传感器校准原理

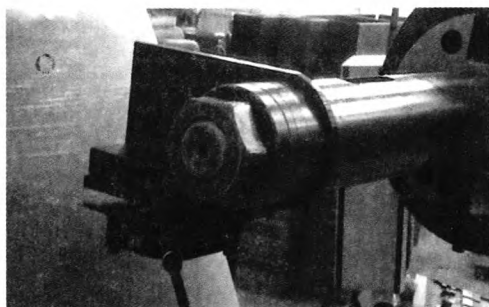
Fig. 2 Calibration principle of sensor

激光传感器的可靠安装不仅是影响激光测量精度的重要环节。传感器初始的安装方案是借助一个辅助转接工装安装至主轴刀杆上。这种方法带来的问题是: 1) 每个工件测量前均需安装,

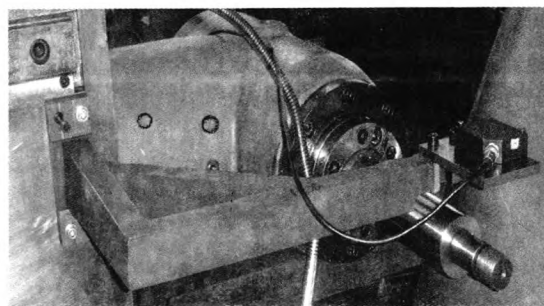
并重新校准一次,大大增加了辅助工作时间和工作量; 2) 采用变频器伺服功能锁住主轴,然而在 4~5 个小时的测量周期内,由于电压波动易造成主轴刀杆蠕动,进而导致传感器的入射方向发

生变化,引起测量误差。本文提出了一种全新的激光传感器安装方案,即借助于三角形辅助支架安装在滑枕端部,利用滑枕基准面确定传感器的

位置,并用定位销锁住,如图3所示。这样就保证传感器每次安装后的位置是固定不变的,每次安装后无需重新校准。



(a) 原安装方案



(b) 优化的安装方案

图3 传感器安装方案革新

Fig. 3 Program innovation for sensor installation

设计了如下校准步骤:

1) 准备工作,具体包括:安装校准支架,使竖直校准面垂直于机床 z_m 轴;用游标卡尺测量片铣刀的直径,安装锯片铣刀。

2) 在JOG状态下,手动操作各伺服轴。锯片铣刀与竖直校准面相切,记录 z_m 轴坐标值;锯片铣刀与水平校准面相切,记录 y_m 轴坐标值。

3) 卸下锯片铣刀,安装激光传感器,调制出射光束,使之与 z 轴重合,完成光束准直。

4) 调整传感器相对于竖直校准面的 z 向距离,当传感器显示值为最佳时,记录机床 z_m 轴坐标;控制传感器沿 y 向运动,速度为30 mm/min,记录传感器示值剧变时对应 y_m 轴坐标。

5) 把上述记录的坐标值带入输入系统,计算得到传感器参考点与刀具参考点的相对位置偏差 d_h 和 d_v ,完成传感器校准。

校准方法的改变可达到一次校准后,不需要每次换产品时再做校准工作,提高了工作效率。采用三角形辅助支架安装使重复定位精度提高,从而提高了激光采集精度。

2.3 自动清根加工技术优化

由于大尺寸铣刀无法加工到冷却通道的根部,因此需要采用高速棒铣刀作清根处理。半自动清根加工基本操作是:

1) 利用加工软件功能生成手动加工程序,并

把系统调整至“自动”状态;

2) 启动清根主轴,人工操作手脉,执行清根程序;

3) 人工调整B轴按设定角度分度至下一条槽;

4) 重复上述操作完成所有槽的清根。比较手动清根,半自动清根在加工效率上有了很大提升,但是仍然要求操作者操作机床完成必要的程序。优化后的自动清根加工技术如图4所示。

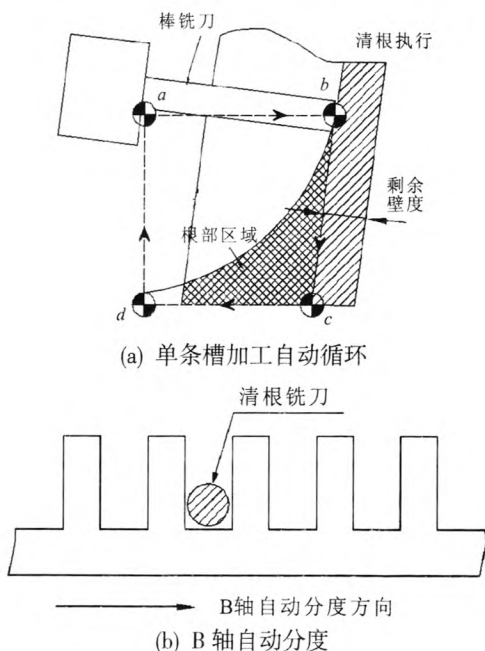


图4 自动清根加工示意图

Fig. 4 Schematic diagram of automatic root clearing processing

设计了如下自动清根加工步骤:

1) 进行清根加工准备。主侧铣头工位调整后,调整电主轴角度,完成棒铣刀进行校正。加工系统利用喷管数字化模型自动生成初始清根程序。

2) 在半自动清根状态下进行试切加工,检测槽深精度和侧筋宽度精度,调整第一条槽的B轴角度位置、深度参数、轴向高度参数及主轴摆角参数。

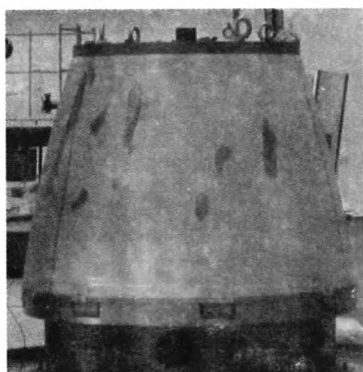
3) 将调整后的参数重新输入系统,自动生成适于自动清根的加工程序,并将机床调整至“自动”状态。

4) 启动自动清根加工程序,系统自动完成清根操作。

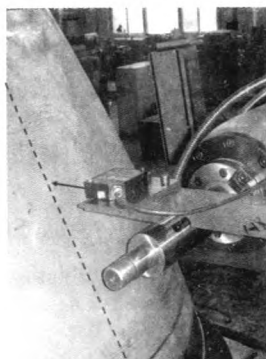
5) 根据槽深精度和筋宽精度变化,需进行借刀操作,包括周向B轴借刀。

3 工艺试验验证

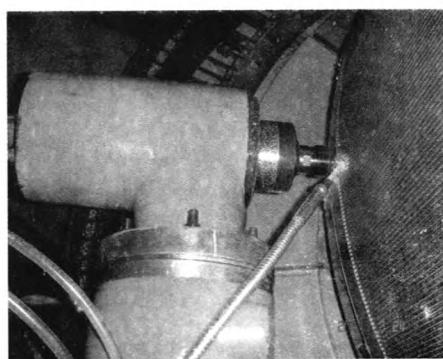
以某喷管产品为工艺试验对象,对上述关键加工技术进行了试验验证,完善了工艺操作规程。经检验,加工后的喷管槽深及壁厚尺寸误差均控制在公差范围以内,较好地满足了喷管尺寸精度要求。



(a) 光亮面蓝油处理



(b) 激光扫描测量



(c) 自动清根加工

图5 关键加工技术加工实例

Fig. 5 Processing examples of key processing technology

4 结束语

本文主要针对液体火箭发动机直槽喷管数字化加工方法与工艺技术存在的精度保证与效率提升等难题,在已开发的加工工艺、加工系统的基础上,开展了局部光亮面蓝油处理技术、激光传感器可靠校准技术及自动清根加工技术等关键加工革新,并应用于实际生产中,自动化加工比例提升,零件加工效率和加工质量有了提高。

参考文献:

[1] 谭永华. 中国重型火箭动力系统研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(1): 1-6.

[2] SUTTON G P. History of liquid-propellant rocket engines in Russia, formerly the Soviet Union[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 1008-1037.

[3] 卢杰持, 胡力耘, 杨金奎, 等. 火箭大喷管数控仿形铣槽控制系统[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(3): 296-299.

[4] 靳惠敏, 薛引慧. 数控仿形铣槽机床仿形系统的设计与改造[J]. 航天制造技术, 2007 (5): 16-19.

[5] 吕明云, 祝明, 王焕, 等. 复杂曲面 FSS 加工系统研究[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 26-32.

[6] 王永青, 卢杰持, 王春, 等. 大型航天火箭喷管铣槽加工系统[J]. 组合机床与自动化技术, 2000 (10): 25-27.

[7] 大连理工大学. 液体火箭发动机喷管直槽冷却通道立式加工方法: 中国, 200810229225.9[P]. 2009-04-22.

(编辑: 马杰)