

自击式喷注器喷注孔测量方法研究

马如军, 李俊, 尚鹏宇, 李素琴
(西安航天发动机厂 陕西 西安 710100)

摘要: 发动机喷注器喷注孔撞击精度等几何参数是试车和飞行振动的重要影响因素之一。因此, 对加工、装配铆接和钎焊后喷注孔的相关尺寸参数进行准确测量、分析和评价, 提高喷注器产品的质量可靠性是亟需解决的问题。通过设计喷注孔自动测量方案, 组建测量系统, 设计专用定位工装和开发数控测量程序, 形成了自击式喷注器喷注孔测量方法, 并对测量数据进行了统计分析。结果表明: 测量方法可靠, 检测效率提高了92%左右。

关键词: 自击式喷注器; 喷注孔; 撞击精度; 测量方法

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 01-0071-05

Measuring method for injecting orifice of self-impinging injector

MA Ru-jun, LI Jun, SHANG Peng-yu, LI Su-qin
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: The impinging accuracy of injecting orifice in the engine self-impinging injector is one of the most notable factors affecting engine vibration in engine testing and operation. Therefore, to precisely measure, analyze and assess the relevant dimension and shape parameters of the injecting hole is very important for improvement of the injector reliability in the manufacturing process, such as rings machining, riveting, assembly and welding. With the design of injecting orifice auto-measurement scheme, composition of measurement system, design of special positioning fixture, development of numerical control measurement program, a method to measure the injecting orifice in the engine self-impinging injector was formed eventually. The statistic analysis of the measured data was performed. The result indicates that the measuring method is reliable, and its detection efficiency is increased by about 92%.

Keywords: self-impinging injector; injecting orifice; impinging accuracy; measuring method

0 引言

推力室是液体火箭发动机实现动力功能的关

键组合件, 而喷注器是推力室的关键件, 主要用于组织推进剂的分布、雾化和混合, 并保证推进剂在燃烧室中按设计要求的混合比稳定地燃烧。因此, 喷注器喷注孔的加工精度及测量数据的可

收稿日期: 2013-09-23; 修回日期: 2013-12-10

作者简介: 马如军 (1971—), 男, 高级工程师, 研究领域为几何量精密测量

靠性, 直接决定一台发动机的整体性能, 甚至试验和飞行的成败。喷注孔的几何精度对推力室的燃烧稳定性有至关重要的影响。根据发动机试车振动异常的分析结果可知, 喷注孔撞击精度是重要影响因素之一。因此, 在型号产品生产过程中, 如何对喷注器喷注孔的加工质量进行评价是急需解决的问题。对推力室头部喷注器喷注孔的形位公差和几何尺寸进行测量分析是十分必要的。

根据喷注器喷注孔的结构和精度的特征参数, 设计、开发出数控测量系统, 首次实现了喷注器喷注孔的全尺寸、高精度数控测量。研究成果成功应用于在制的一级、二级和助推 3 种状态发动机喷注器喷注孔的数控测量, 解决了对大量空间各异微小喷注孔计量检测能力薄弱的问题, 对保证喷注器产品质量、提高发动机可靠性, 有着重要意义。

1 喷注器的特点及技术要求

在以往的测试中, 喷注器喷注孔是通过专用工装、高度尺、百分表等传统量具实现设计参数的符合性测量。这种方法的不足之处在于: 1) 喷注器孔的检测为全手工检测、人工判读、人工记录, 测量效率低、周期长, 无法满足高密度生产交付需求; 2) 目前按照 15%~21% 的比例抽检测量, 若实现所有喷注孔的全覆盖检测, 会耗费大量的时间和人力资源。以上测量方法受选用测量设备自身精度及人为因素的限制, 会带入较大的测量误差, 测量精度保障能力不足。因此, 亟待找到一种能实现全尺寸、高精度的有效测量手段, 从根本上解决上述问题。

喷注孔和喷注器环结构示意图见图 1 所示。由图 1 (a) 可见, 它是由直径大小不等的一套环组成。各环上分别钻有不同直径、角度各异的成对斜孔, 其剖面图见图 1 (b)。喷注器环技术要求如下:

1) 喷注孔孔径公差 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 、圆度公差 0.05 mm ;

2) 撞击角度: 单个喷注孔与盘面夹角公

差 $\pm 10'$;

3) 撞击高度: 成对撞击孔中心线相交点位置距孔出口平面的高度公差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$;

4) 撞击精度: 成对撞击孔空间轴线距离小于 0.05 mm 。

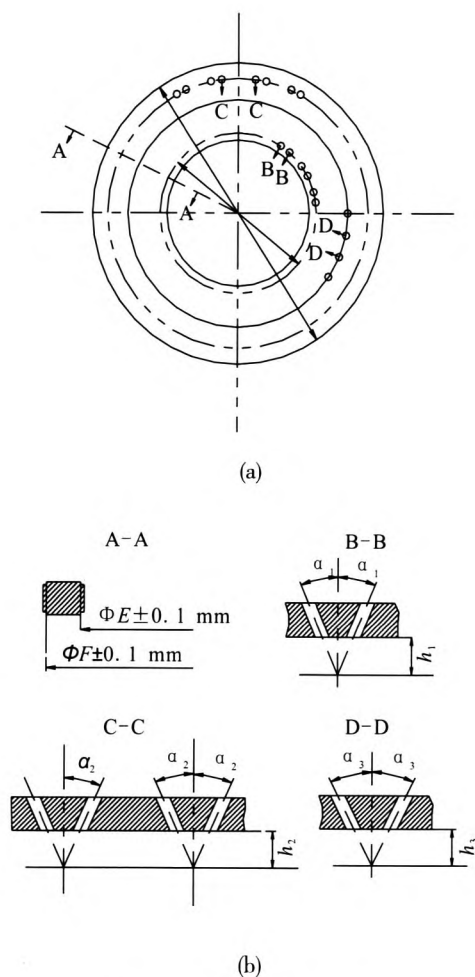


图 1 喷注器环结构示意图

Fig. 1 Schematic view for ring structure of injector

2 喷注器孔自动测量系统的建立

根据喷注孔呈一定的规律分布, 且空间角度各异的特点, 参考大量国内外文献资料, 提出利用三坐标测量机的柔性定位测量能力和高精度数控转台精确定位, 建立一套有效的测量系统。此系统包括三坐标测量机、高精度数控转台、专用工装夹具和 CNC 数控测量软件, 可完全实现自动测量、自动数据处理等功能。

2.1 测量系统的组成

设备包括 DEA 三坐标测量机 (规格: 900 mm × 1500 mm × 800 mm, 精度 1.9 + 3 L/1000 μm, 测座空间分度 5°)、CNC 精密转台精密调心和调平装卡夹具 (单、双环和盘状态夹具)、PC-DMIS 软件平台下的数控测量程序。为了保证测针平行于小孔轴线顺利进入孔内测量, 根据喷注孔空间结构参数, 必须选择空间分度不大于 5° 的测座。要实现精密测量, 提高测量效率必须保证喷注孔在三坐标测量空间的准确定位能力, 因此选择了高精度 CNC 转台的分度精度为 1", 周向定位误差不大于 8 μm, 以确保测针准确进入小孔测量。

2.2 专用工装夹具的设计

专用工装不仅要实现大量小孔在数控测量过程的稳定装夹, 还要保证喷注孔在测量坐标系下相对空间位置的固化, 这样才能实现通过数控测量程序, 使得测针顺利进入小孔进行自动测量。因此设计了具有高精度微分调心、调平能力的盘、环状态工装夹具, 来保证上述功能的实现。

2.2.1 喷注器环状态专用工装夹具的设计

根据喷注器环孔径尺寸参数规律及测量过程调整需求, 分别设计单、双数环装夹工装。装夹时每一个喷注环上的刻线必须与夹具上的刻线目视对齐 (沿刻线的方向观察), 再将每个环 3 点均布紧固, 其中 2 点起定心作用, 调节零件与转台大致同心, 第 3 点沿径向方向起推紧固定作用, 保证工装调心精度达到 0.01 mm。设计工装见图 2 和图 3 所示。



图 2 喷注器环偶数环状态夹具图

Fig. 2 Clamp for injector rings with a quantity of even number

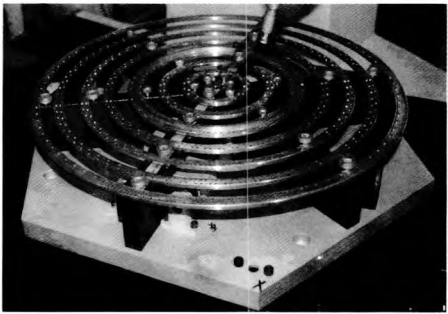


图 3 喷注器环奇数环状态夹具图

Fig. 3 Clamp for injector rings with a quantity of odd number

2.2.2 喷注器盘状态专用工装夹具的设计

如果用环状态的测量方法来测量盘状态的喷注孔, 测针按照喷注孔理论计算的空间位置去测量, 由于喷注孔变形和喷注环位移这两个因素的影响, 会导致测针无法顺利进入喷注孔。因此, 必须针对铆接后喷注盘的状态重新设计装夹和测量方案。

装夹时将喷注器盘水平放置在盘状态夹具上, 喷注器底平面与夹具的 3 个支点接触, 支点为球面万向转动, 具有靠零件自重自动保持支撑面与喷注器底面紧密贴合的功能。在喷注器外圆用 3 点紧固, 其中 2 个点起定心作用, 保证零件与转台大致同心, 第 3 点沿径向方向起推紧固定作用。为了防止在装夹时喷注器盘与夹具发生磕碰损伤, 外圆的 3 个定位、固定点均采用硬质橡胶材料。工装满足调心精度 0.02 mm, 调平精度 0.02 mm。其工装如图 4 所示。

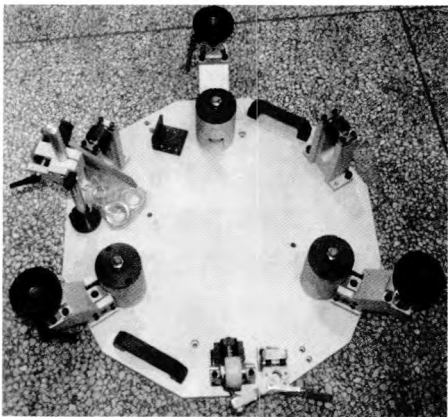


图 4 喷注器盘状态夹具图

Fig. 4 Clamp for injector plate

2.3 测量方案设计

2.3.1 喷注孔的测量流程图

根据喷注孔的特点及其测量参数的要求, 设计了喷注孔的测量方案, 其流程图见图 5。

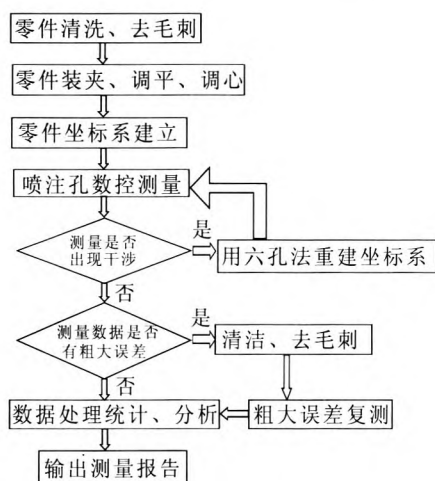


图 5 喷注孔测量流程图

Fig. 5 Flow chart for measurement of injecting orifice

2.3.2 撞击孔测量方案

喷注器环结构特点为: 1~6 环的喷注器环没有分区, 没有分区孔, 均为成对撞击孔; 7 环及 7 环以上的喷注器环均有 6 个分区, 每个分区除两侧各有 1 对分区孔外, 其余均为成对撞击孔; 成对撞击孔呈周向均布分布、空间结构对称, 每一个喷注环分为内圈、外圈两圈孔, 同一圈内喷注孔孔径一致。为了减少测头的空间旋转动作, 提高三坐标测量机测量系统的运行效率, 降低高价值测头的损耗率, 延长测头使用寿命, 有针对性的设计了自动测量程序。

撞击孔自动测量程序编制规则是: 首先选择测头保持 1 个空间角度不变, 让转台按照一定的分度旋转, 通过 CNC 转台的准确定位, 使每一个小孔都转到与测头相切位置, 按顺时针方向从第 1 个撞击孔开始, 连续测量完 1 个分区的奇数撞击孔 (1, 3, 5, 7...); 然后更换另一个测头空间角度姿态, 转台反转, 按逆时针方向从倒数第 1 个撞击孔开始, 连续测量完 1 个分区的偶数撞击孔 (...8, 6, 4, 2); 调取 1-2, 3-4, 5-6... 成对撞击孔的测量数据, 分别计算并输出成对撞

击孔的孔径、圆柱度、撞击角度、撞击高度和撞击精度等数据。

如果按小孔空间顺序测量, 测完 1 套环需要至少做 2 706 次旋转动作, 而本程序设计的测量方法只需做 194 次旋转动作, 大大提高了测量效率。

考虑到撞击孔的设计和加工状态, 每个小孔出口均有倒角, 因为是手工倒角, 倒角长度取极限值。为了减少加工变形、倒角、毛刺对测量数据准确性的影响, 小孔 2 端各去除 0.5~1mm, 实际有效测量区域为去除 0.5~1mm 后剩余部分, 对撞击孔、分区孔测量位置示意图见图 6。根据加工原理, 为了能够比较全面反映元素特征信息和提高测量效率, 程序中规定, 小孔按照圆柱体测量, 取 2 个截面、每个截面 4 个点自动测量。

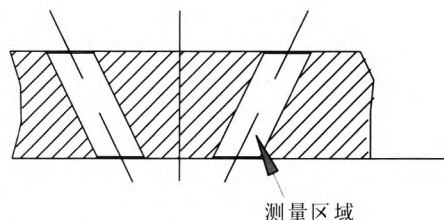


图 6 成对撞击孔、分区孔测量位置示意图

Fig. 6 Measuring location for doublet and partitioned orifice

3 测量数据统计分析

应用三坐标数控测量程序对环状态的所有喷注孔完成了 5 遍测量, 得到大量的试验数据。针对这些数据分析, 在分析过程中不断完善了数控测量程序, 提高测量数据的可靠性。对产品孔径的测量数据做统计、分析 (由于第 1 环构造圆直径小, 多次测量数据不稳定, 故不做分析)。

3.1 重复性精度验证

随机选择 8 个孔: 7 环 1-2 孔、7 环 9-10 孔、13 环 9-10 孔、13 环 11-12 孔, 在相同条件下重复测量 10 次, 做重复性验证。通过数据分析表明: 孔径的重复性误差小于 $8\ \mu\text{m}$, 角度偏差均小于 $6'$, 成对斜孔中心线相交点位置距孔出口平面的高度重复性偏差均小于 $0.04\ \text{mm}$; 8

个小孔所有尺寸的3倍标准偏差值(3σ 值)均小于设计验收公差值的1/3,三坐标测量小孔数据满足设计要求;在孔径重复测量误差分析数据中,测量不确定度值根据JJF1059-1999《测量不确定度评定与表示》中规定的重复误差(A类不确定度)与三坐标综合测量误差(B类不确定度)合成得到。测量不确定度最大值为 $uc=0.004\ 8$,扩展不确定度 $U=2uc=0.009\ 6$ ($k=2$),小于设计公差。三坐标测量小孔装置的综合测量不确定度满足设计公差要求,可用于喷注小孔测量。

3.2 产品测量数据偏差值的概率统计

运用Minitab六西格玛数据分析软件,对孔径测量数据进行数据分析,间接验证该套测量装置的测量能力和可靠性。通过对喷注孔测量数据偏差值概率统计可知:喷注孔孔径测量数据的偏差值呈标准正态图形分布,偏差值的平均值为0.010 6,标准偏差值 $\sigma=0.006\ 6$, $3\sigma=0.019\ 8$ 。由概率统计数据可知,小孔加工尺寸控制在中差,标准偏差的3倍值即 3σ 值不大于喷注孔孔径的公差带宽,所得数据落在设计公差范围内的置信概率大于98%。该套环的整体加工、测量质量得到验证。

4 结束语

采用三坐标组合测量系统解决了发动机喷注器复杂喷注孔的测量难题,首次实现了喷注器喷注孔的全尺寸准确测量,测量方法已经过多套产品的测量验证,不仅彻底解决了目前测试方法带来的问题和隐患,而且提高了测量准确性和测量效率。

参考文献:

- [1] 黄立德. 发动机制造技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1991.
- [2] 王正明. 三坐标测量机自动测量技术的研究[J]. 机床与液压, 2009, 37(12): 1-2.
- [3] 曹序, 李明, 韦庆玥, 等. 三坐标测量中测量点对精度影响的研究[J]. 机械制造, 2013, 51(584): 71-73.
- [4] 张克欣. 三坐标机测量结果的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2009 (11): 87-89.
- [5] 谢祖通. 三坐标测量机探针系统误差的研究[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(9): 52-53.
- [6] 游建民. 喷注器小孔加工[J]. 火箭推进, 2003, 29(3): 41-44.
- [7] 刘建国. 三坐标测量机在空间孔位精密测量中的应用[J]. 工具技术, 2012, 46(9): 132-133.
- [8] 曲巍威, 高峰, 杜发荣, 等. 三坐标测量机分析与修正技术[J]. 机械设计, 2009, 26(6): 76-77.
- [9] 叶辉, 陶琦. 三坐标测量数据预处理系统的设计与开发[J]. 轻工机械, 2010, 28(6): 2-3.
- [10] 马建明, 周长城. 数据采集与处理技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [11] 邓丽媛. 柴油机主轴承孔孔径测量不确定度评估原理与方法[J]. 科技信息, 2011 (35): 202-203.
- [12] 李芳波, 郭俊平. 柴油机气门座圈及导管孔的三坐标测量方法的研究[J]. 柴油机设计与制造, 2007, 15(3): 37-39, 52.
- [13] 索瑞, 卜昆, 程云勇. 考虑半径补偿的三坐标测量数据精确配准方法[J]. 航空制造技术, 2012 (8): 92-94.
- [14] 王爱民. 喷油器喷孔加工及测量技术[J]. 现代制造工程, 2011 (10): 104-108.
- [15] 李治龙, 吴志军, 高原, 等. 基于同步辐射高能 X 射线的喷油器喷嘴内部几何结构及尺寸的测量[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(1): 128-132.

(编辑: 张永秀)