

三坐标测量机超量程深孔测量技术应用

■ 河南柴油机重工有限责任公司（洛阳 471039） 陈 晔 焦会英

摘要：针对某V型柴油机机体气缸孔检测，提出三坐标测量的实现方法，通过测量实例分析了三坐标测量机测量系统不确定度，并在此基础上对部分形位公差检测方法进行探讨，对检测能力进行计算。评定结果表明该三坐标测量系统检测能力足够，检测结果达到测量要求。

1. 某型柴油机机体测量难点

公司某V型柴油机机体结构如图1所示，机体长2 628.5mm、宽1 000mm、高780mm。由于是新产品试制，需要在三坐标测量机上全面测量所有几何参数，其中主轴承孔几何参数与气缸孔几何参数需要重点检测。气缸孔（见图2）深度270mm，因此测头系统需要300mm长才可测量上下两级气缸孔。当三坐标测量机测头系统校验后不能更换，测头系统会占用一定的测量行程，当工件外形长度为 $L_{\text{工}}$ 时，三坐标测量机测量范围 $L_{\text{测}} \geq L_{\text{工}} + 2C$ （ C 为测头系统长度）。因此测量该型机体的三坐标测量机测量行程 $L_{\text{测}} \geq (2\,628.5 + 2 \times 300) \text{ mm}$ ，考虑测头系统回退距离因素，则 $L_{\text{测}} \geq 3\,300 \text{ mm}$ 。而目前我公司仅有一台桥式三坐标测量机的测量行程最接近该尺寸，但最长测量行程只有2 950mm，小于该机体所需测量行程，如图3所示。

气缸孔与基准面夹角 45° ，孔深270mm，机体气缸孔上下直径差4mm，三坐标测量机若正常测量，需要专用测头、定制

300mm专用测针，并且测头旋转 45° 测量气缸孔。而我公司只有标准探针，且长度为50mm，连接加长杆虽然可将探针加长

300mm，但加长杆直径20mm与标准探针直径6mm差14mm，正常测量 ϕd 气缸孔时，加长杆会与 ϕD 孔壁碰撞，干涉探针测量，造成探针触测失败。如图4所示。

2. “倾斜测头采点法”测量原理

在现有条件下通过合理计算，配合编制测量程序，总结出一种三坐标测量机超量程深孔测量技术——“倾斜测头采点

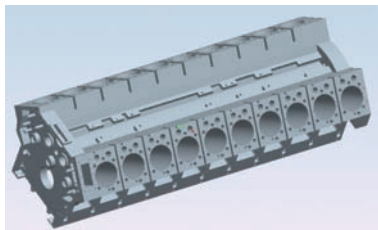


图1 机体三维模型

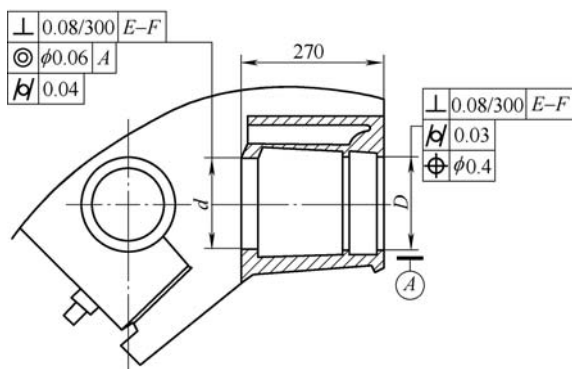


图2 机体气缸孔局部视图

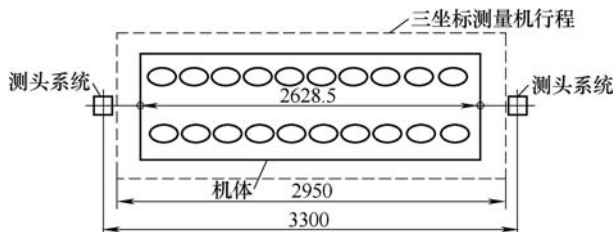


图3 三坐标测量机正常测量示意图

法”，该技术仍采用标准测针连接标准加长杆进行测量，一次解决上述两个测量难点，且成本低、通用性好，精度较高。

传统深孔测量采用专用测头并且定制专用测针，而“倾斜测头采点法”使用普通标准测针连接标准加长杆，通过测头偏转角度、探针斜向采点来解决超程与探针被干涉问题。

“倾斜测头采点法”测量主轴孔时，通过测头偏转角度、测针斜向采点可将有效测量行程控制在2 900mm，小于测量机测量行程，解决了超程问题，如图5所示。

“倾斜测头采点法”测量气缸孔时，同样通过测头偏转角度、测针斜向采点，避免加长杆碰撞孔壁，解决了加长杆干涉测量问题，如图6所示。

“倾斜测头采点法”具体操作步骤是：先将被测零件安装在测量机工作台上，在自动旋转测座与测头传感器之间连接加长杆，测头传感器安装标准测针后，整个测头系统可探测至规定测深，计算确定合适的测座偏转角度，确保测量时既不超程、测针触测时也不会被干涉；确定采

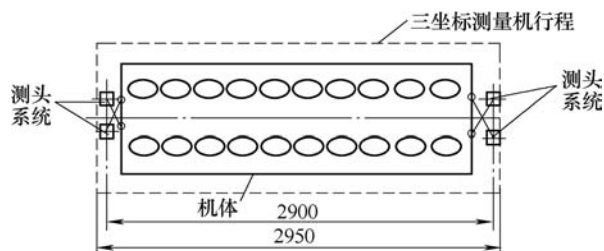


图5 倾斜测头采点法测量主轴孔示意图

点数量，测针测量各点所需的偏转角度，测针标定程序将所需测针偏转角度标定完成；编制测量程序，确定各点坐标及矢量，将测量点拟合形成所需的截面圆，准备后续测量与计算；依靠测量程序驱动三坐标测量机进行深孔测量，根据测量结果出具检测报告。

3. 主轴孔测量方法

三坐标测量机体必须按图样要求建立零件坐标系，如图7、图8所示，即主轴承孔公共轴线找正作为第一基准Y轴，机体底面作为第二基准Z轴，机体端面作为Y原点，主轴承孔作为X、Z原点建立零件坐标系。按“倾斜测头采点法”（见图5），将测头旋转至A90B75（测头A轴旋转至90°，B轴旋转至+75°），测头A、B角如图9所示，依次测量同一截面点1、点2和点3（见图10），然后将测头移至安全位置并旋转至

A90B-75（测头A角旋转至90°，B角旋转至-75°）后，测量同一截面点4、点5和点6（见图11），通过拟合以上点得到主轴承孔截面圆，如图12所示，该截面圆可评价主轴承孔直径、坐标等几何参数。

测量主轴承孔时须确定各点X、Y、Z坐标和i、j、k方向矢量，如图12所示，其中箭头方向为各测量点矢量方向，计算公式如下。X坐标： $(D/2) \cdot \sin \alpha$ （其中D为主轴承孔直径， α 为测点角度）；Y坐标： $(D/2) \cdot \cos \alpha$ ；Z坐标：H（点测量截面深度）；i： $\pm \cos(90^\circ - \alpha)$ （代表X矢量方向）；j： $\pm \cos 90^\circ$ （代表Y

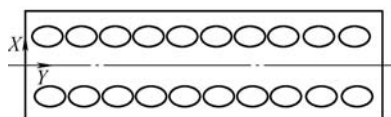


图7 零件坐标系示意图

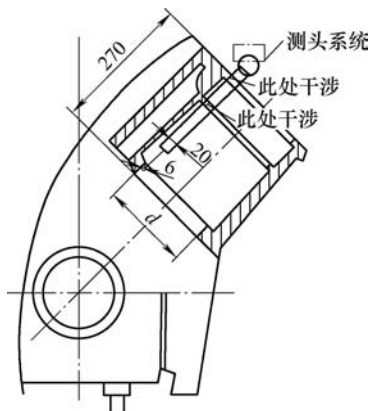


图4 正常测量气缸孔示意图

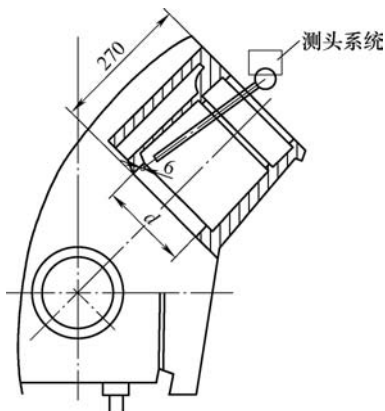


图6 倾斜测头采点法测量气缸孔示意图

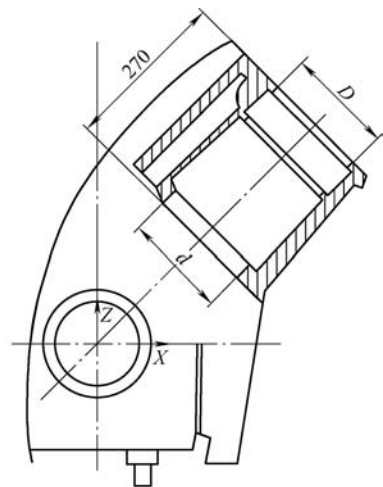


图 8

矢量方向)； $k: \pm \cos \alpha$ (代表Z
矢量方向)。

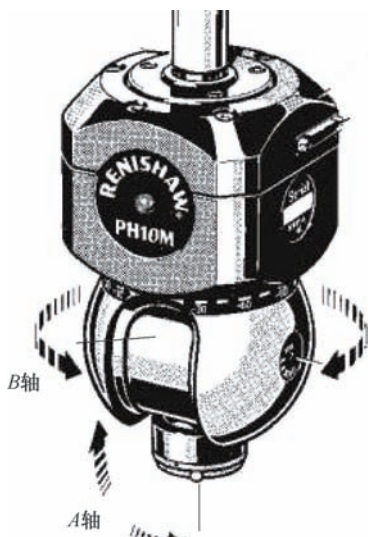


图9 测头A、B轴转角示意图

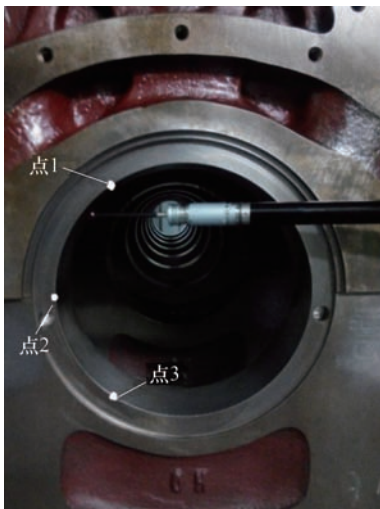


图10 测量主轴承孔点1~点3

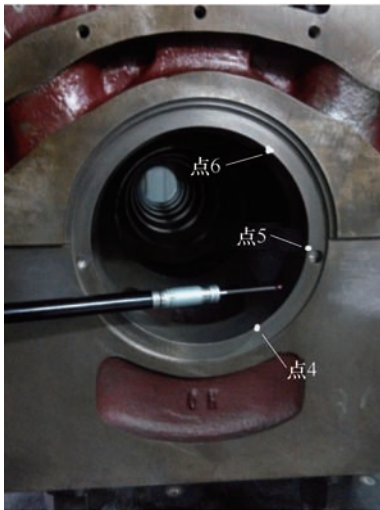


图11 测量主轴承孔点4~点6

使用同样方法测量另一端
主轴承孔截面圆，将两截面圆拟
合成一条直线，得到主轴承孔轴
线。机体端面与底面同样按上述
方式获得，按照图样要求建立零
件坐标系。

4. 气缸孔测量方法

气缸孔轴线与零件坐标系Z
轴夹角 45° ，旋转坐标系使坐标
系Z轴与气缸孔轴线平行，将测
头旋转至A45B90/A45B-90，按正
常方法测量 ϕD 气缸孔，如图13~
图15所示，至少测量3个截面圆，
将上述截面圆拟合成圆柱，评价
该处气缸孔直径、圆柱度、垂直
度和位置度。评价垂直度时，要
求被测元素投影延长线250mm、
公差带0.05mm，基准元素为主轴

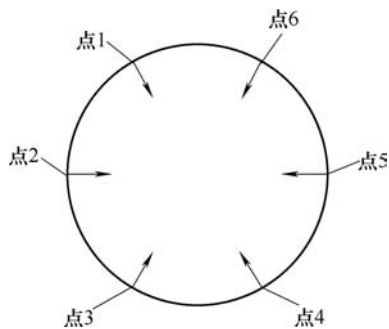


图12 主轴承孔采点策略与拟合截面圆
示意图

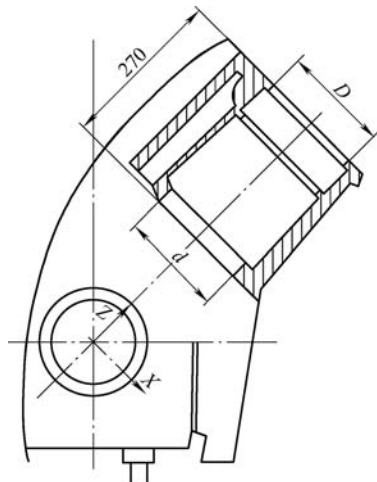


图13 旋转坐标系

承孔轴线。

测量 ϕd 缸孔时，按照“倾斜
测头采点法” (见图6)，使测头
在A45B90/A45B-90转角基础上，
A、B轴再分别偏转 $\pm 7.5^\circ$ ，此时
测头加长杆不会干涉测针测量。
同时为保证足够的测量精度，采
取多次变换测头角度的方法，在
同一截面测量12个矢量点。气缸
孔采点策略如图16所示。至少
测量3个截面，分别拟合3个截
面圆，再将截面圆拟合得到该处
气缸孔圆柱，评价该处气缸孔直
径、圆柱度、垂直度和同轴度。
评价垂直度时同样需要投影延长
线，基准元素为主轴承孔轴线；
评价同轴度时，基准元素为 ϕD
气缸孔圆柱。测量时同样需要确
定各点X、Y、Z坐标和i、j、k矢
量，计算公式同主轴承孔测量。



图14 测头A45B90测量气缸孔



图15 测头A45B-90测量气缸孔

5. 程序设置变量与函数关系式

由于测量点比较多，采用上述公式计算，编制测量程序时工作量很大。可以在测量程序中设置变量，由测量程序运用函数关系式自动运算确定各点X、Y、Z坐标，不同机型机体分别输入不同变量值，大幅减少编程时的计算量，极大提高程序通用性与模块化能力。

程序变量设置如下：设置上部缸孔直径变量C1、设置下部缸孔直径变量C2、设置主轴孔直径变量C3、设置机体端面至A1缸孔距离变量C4、设置机体端面至B1缸孔距离变量C5、设置气缸孔结合面至主轴孔距离变量C6、设置气缸孔深度变量C7。

函数关系式如下：

X坐标

$$(C1.INPUT/2)*\sin\alpha \quad (\phi D孔)$$

$$(C2.INPUT/2)*\sin\alpha \quad (\phi d孔)$$

$$(C3.INPUT/2)*\sin\alpha \quad (\text{主轴承孔})$$

Y坐标

$$(C5.INPUT \pm C1.INPUT/2)*\cos(90^\circ - \alpha) \quad (\phi D孔)$$

$$(C5.INPUT \pm C2.INPUT/2)*\cos(90^\circ - \alpha) \quad (\phi d孔)$$

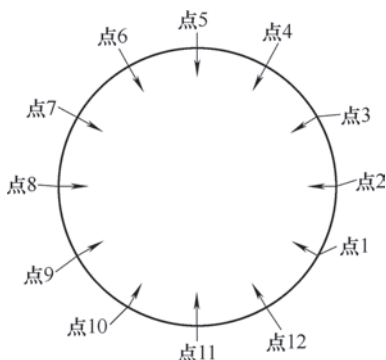


图16 气缸孔采点策略与拟合截面示意图

$$(C3.INPUT/2)*\cos(90^\circ - \alpha)$$

(主轴承孔)

Z坐标

$$C6.INPUT - C7.INPUT - h \quad (\text{测量截面深度})$$

式中，C1.INPUT为读取C1变量；C2.INPUT为读取C2变量；C3.INPUT为读取C3变量；C5.INPUT为读取C5变量；C6.INPUT为读取C6变量；C7.INPUT为读取C7变量；h为截面圆间距； α 为测量点相对X/Y轴角度。

因气缸孔间距固定，仅需编写一组气缸孔程序，然后设置循环变量进行循环测量，循环变量中须设置气缸孔间距与气缸孔数量，这样可以大幅度简化程序，缩短程序的编制时间。

6. 测量不确定度分析

在三坐标测量机测量工件时，测量不确定度与以下几方面有密切关系：

(1) 测量不确定度与选用的测量机有关。这里包括机构误差、力变形误差、热变形误差、探测误差、动误差与软件误差。

(2) 测量不确定度与工件及被测元素本身有关。一是被测元素的形状误差与被测元素的定义，后者主要涉及选用什么样的评定准则来确定替代元素，这与工件的使用要求密切相关；二是工件本身的刚度、温度和热膨胀系数等。

(3) 测量不确定度还与采样策略和测量方法有关。根据测量机工作原理，各测量点坐标值的测量误差会直接影响测量结果，这是造成被测元素测量不确定度的主要因素。一般来说，采样点

越多，测量机的硬件误差与工件形状误差影响越小，但耗时越长。

由上述分析可见，由于测量任务不同，三坐标测量机测量系统的不确定度是不同的。

三坐标测量机测量系统的不确定度主要有以下不确定度分量：

(1) 三坐标测量机精度误差引入的不确定度分量 U_{EC} 。 $U_{EC} = MPE_E \cdot b$ （换算系数 $b=0.7$ ， MPE_E 为三坐标示值误差）。

(2) 测量重复性引入的不确定度分量 U_{RE} 。 $U_{RE} = S_x \cdot h$ （测量次数 ≥ 10 时， $h=1$ ）。其中 S_x 为样本平均值标准偏差， $S_x = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$ （ S_x 为样本标准偏差， n 为测量次数）。

(3) 三坐标测量机与工件最大温度差引入的不确定度分量 U_{TD} 。 $U_{TD} = \alpha_{TD} \cdot b$ （换算系数 $b=0.7$ ），其中 $\alpha_{TD} = \Delta T \cdot \alpha_1 \cdot L$ （ ΔT 为测量机与工件温度差， α_1 为工件线膨胀系数， L 为有效长度）。

(4) 测量温度的影响引入的不确定度 U_{TA} 。 $U_{TA} = \alpha_{TA} \cdot b$ （换算系数 $b=0.7$ ），其中 $\alpha_{TA} = \Delta T_{20^\circ C} \cdot \alpha_1 \cdot L \cdot \Delta C$ （ $\Delta T_{20^\circ C}$ 为测量温度与标准温度 $20^\circ C$ 的差值， α_1 为工件线膨胀系数， L 为有效长度， ΔC 为三坐标测量机与工件之间的线膨胀系数差，一般为10%）。

7. 关键特性值测量不确定度分析

为了比较不同测量对象的不确定度，评定三坐标测量系统对气缸孔关键特性值的检测能力，对以下关键特性值进行了10次测量。关键特性值数据如表1所示。

运用上述不确定度公式计算表1中关键特性值，得到的测量不确定度分量分布结果如图17所示。

从图17中数据可以看出，由三坐标测量机的示值误差引入的不确定度分量 U_{EC} 对总不确定度的影响最大。随着被测元素尺寸的增大，不确定度分量 U_{EC} 也随之增大，这主要是由于机构误差所引起的，测量距离越长，导轨误差和阿贝误差就越大，因而测量误差也就越大。该项误差属于系统误差，可以使用误差评定法进行误差补偿。

三坐标测量机与工件最大温度差所带来的不确定度 U_{TD} 对总不

确定度的影响也较大，而且 U_{TD} 随着被测对象尺寸的增大而成正比增大，该机体气缸孔关键特性值中，最大 U_{TD} 为 $1.96\mu\text{m}$ ，比 U_{EC} 影响小。温度误差不确定度分量 U_{TA} 对总不确定度的影响较小，可控制测量室温度或使用温度误差补偿软件进行补偿。

测量重复性不确定度分量 U_{RE} 在测量气缸孔直径和位置度时较小，说明该系统测量此项目时重复性好，随机误差小。但从图17中可以看出，气缸孔同轴度与垂直度的 U_{RE} 较大，分别占总量的48%、45%和27%。分析判断原因如下：气缸孔为深孔，在采

点策略中采用分层采点法，拟合出气缸孔采样点所在的圆柱面，采点截面距离限制圆柱长短，其中 ϕD 孔处有效测长10mm， ϕd 孔处有效测长30mm。评价同轴度时，图样标注 $\textcircled{\text{C}} \phi 0.06 A$ ，基准A为 ϕD 孔，基准圆柱太短，且与被测元素间距300mm以上，计算同轴度必须将被测元素延长至基准元素处，因此将采样点误差放大10倍以上。评价垂直度时，图样标注 $\perp 0.08/300 E-F$ ，基准为主轴承孔轴线，要求被测元素在300mm投影长度范围内垂直度公差带0.08mm，实际被测元素长度太短，采样点误差分别被放大30倍与10倍。另外，气缸孔与坐标系Z轴夹角 45° ，重复测量时，对该角度的测量不确定度会影响气缸孔同轴度与垂直度计算。可见气缸孔同轴度与垂直度的 U_{RE} 较大主要是由于基准太短，且与被测元素间距较大，造成元素采样点误差被成倍放大所致。分析气缸孔加工状态，其实际加工时一次定位并采用复合刀具一次加工完成，同轴度与垂直度由工艺装备保证，因此测量时为能正确反映加工的实际状态，改进上述形位公差评价方式：评价同轴度时，采用气缸孔公共轴线作为基准，分别计算两级气缸孔同轴度相对公共轴线的同轴度；评价垂直度时，以被测元素长度，或采用气缸孔公共轴心线作为被测元素计算垂直度。改进形位公差评价方式后，测量结果的重复性较好，测量重复性不确定度分量 U_{RE} 明显降低。改进评价方式后关键特性值测量结果如表2所示，关键特性值不确定度分量分布结果如

表1 关键特性值测量结果汇总 (单位: mm)

关键特性值	气缸孔直径 ϕD	气缸孔直径 ϕd	$\textcircled{\text{C}} \phi 0.4$	$\textcircled{\text{C}} \phi 0.06 A$	$\perp 0.08/300 E-F$ (ϕD)	$\perp 0.08/300 E-F$ (ϕd)
测量1	0.004	0	0.334 1	0.078 3	0.108 1	0.091 6
测量2	0.001	0	0.333 1	0.155 1	0.169 7	0.092 2
测量3	0	0	0.333 7	0.051 5	0.115 0	0.086 9
测量4	0	0	0.330 6	0.116 9	0.147 5	0.102 4
测量5	0.001	0	0.331 5	0.091 0	0.080 2	0.077 4
测量6	0.005	0	0.328 1	0.078 0	0.126 4	0.097 7
测量7	0.004	0.001	0.329 1	0.084 9	0.110 3	0.084 9
测量8	0.005	0	0.329 6	0.015 7	0.089 8	0.083 7
测量9	0.004	0.001	0.332 4	0.076 9	0.121 4	0.098 5
测量10	0.004	0	0.331 3	0.040 2	0.106 7	0.092 9

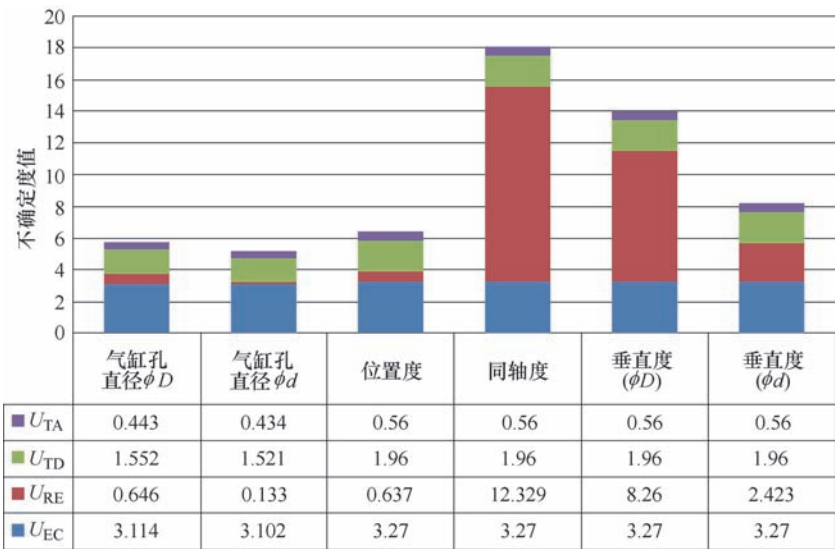


图17 关键特性值不确定度分量分布图 (单位: μm)

图18所示。

8. 检测能力分析

检测能力是保证测量准确可靠的能力。检测能力 $=2U$ ，检测能力指数 $M_{CP} = T/2U$ （ T 为被测参数的公差带， U 为不确定度分量总和）。 M_{CP} 值越大，测量准确度越大，测量误差越小，误判率越低。

一般有如下判定准则：当 $M_{CP} \geq 3$ 时，检测能力足够；当 $M_{CP} = 2 \sim 3$ 时，检测能力基本满足；当 $M_{CP} = 1.5 \sim 2$ 时，检测能力一般；当 $M_{CP} = 1 \sim 1.5$ 时，检测能力不足。

三坐标测量机测量各关键特性值检测能力如图19所示。可以看出，改变评价方法后，检测能力系数明显上升，检测能力满足，各项目不确定度均小于公差范围的1/3，从经济性上考虑，该三坐标测量系统是可以满足检测要求的。

9. 结语

机械制造业的发展对质量控制要求越来越高，三坐标测量已成为质量控制的重要组成部分。这就要求三坐标测量机不仅能够通过编制程序实现自动测量，而且能够根据CAD模型进行自动测量，即信息处理自动化；还要根据测量常识和规则自动选择测量方法和测量路径，即基于知识的智能化。目前测量机和CAD的集成化程度越来越高，测量机操作人员可通过CAD模型确定检测方法和步骤，进而生成控制三坐标测量机测量的程序。因此，随着信息密集型工业的迅速发展，研究与CAD/CAM等集成的智能三坐标测量机是必然发展方向。

表2 改进后的关键特性值测量结果

(单位：mm)

关键特性值	气缸孔同轴度(ϕD)	气缸同轴度(ϕd)	气缸孔垂直度(ϕD 本身长)	气缸孔垂直度(ϕd 本身长)	气缸孔垂直度(缸孔轴心线)
测量1	0.008 3	0.010 1	0.002 3	0.005 1	0.026 1
测量2	0.005 1	0.015 1	0.004 1	0.004 9	0.025 9
测量3	0.004 5	0.014 7	0.004 5	0.005 2	0.027 2
测量4	0.006 5	0.011 5	0.003 5	0.006 1	0.026 8
测量5	0.010 1	0.011 1	0.004 1	0.006 3	0.023 8
测量6	0.007 8	0.010 8	0.003 6	0.007 6	0.025 6
测量7	0.008 6	0.013 2	0.003 5	0.005 4	0.024 1
测量8	0.006 7	0.012 4	0.003 6	0.006 7	0.026 7
测量9	0.009 1	0.009 9	0.002 1	0.006 5	0.024 5
测量10	0.007 3	0.010 3	0.004 3	0.005 8	0.023 8

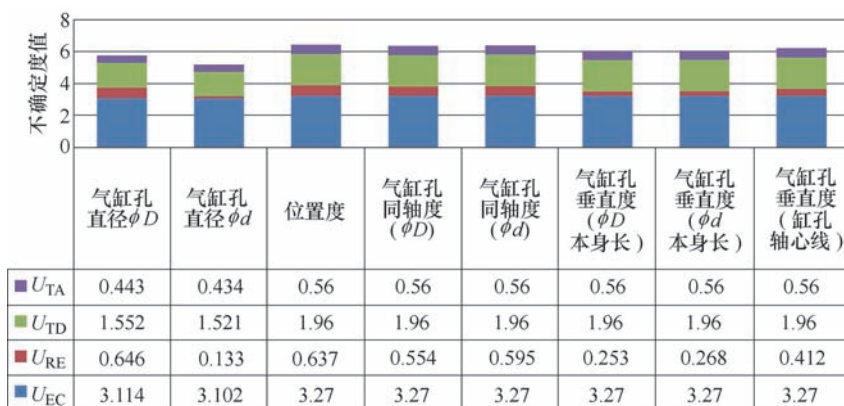


图18 改进后关键特性值不确定度分量分布图 (单位：μm)

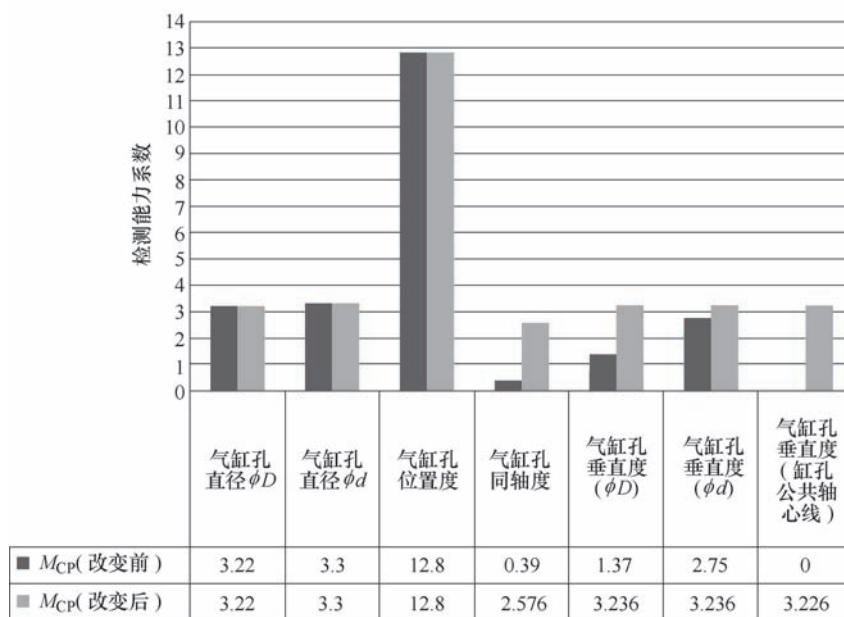


图19 关键特性值检测能力对比

参考文献：

- [1] 王文书. 三坐标测量机对同轴度误差测量方法的探索[J]. 制造技术与机床, 2010 (11) : 94-97.

MW (收稿日期：20170309)