

基于 MBD 的复杂特征检测工艺规划技术研究*

屈力刚,孙业翔,杨野光,叶柏超,田健琪

(沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室,沈阳 110136)

[摘要] 随着数字化集成制造系统的发展与应用,数字化检测技术作为数字化集成制造系统中的重要组成部分,工程需求日益强烈。针对数字化检测过程中缺乏合理的检测工艺的问题,在研究了传统检测方法的基础上,结合 MBD 技术,提出了基于 MBD 的三维检测工艺的关键技术。分析了影响采样点数量及其分布的主要因素,利用量化分析法推导得出了确定规则曲面、不规则平面的测量点数公式。根据采样点数量和被测元素特点,提出了自适应划分形心采样方法,获得了基于复杂特征的检测工艺规划。通过试验验证了所提出测量点数公式和自适应划分形心采样方法的合理性和准确性。

关键词: MBD; 检测工艺; 特征检测; 测量点数; 分布策略

Research on Measuring Points and Their Distributed Strategy of Inspection Feature Based on MBD

QU Ligang, SUN Yexiang, YANG Yeguang, YE Baichao, TIAN Jianqi

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] With the development and application of digital integrated manufacturing system, digital inspection technology as an important part of digital integrated manufacturing system is needed urgently. For the problem that lack of reasonable process during digital inspection, on the basis of the traditional inspection methods, combined with MBD technology, key technology of 3D inspection process based on MBD was proposed. The main factors that influencing the number of sampling points and their distribution were analysed. Ruled surface and complex plane formulas were derived for measuring points using quantitative analysis method. According to the number of sampling points and the characteristics of the measured element, to obtain the inspection process planning based on complex features, sampling method of adaptively dividing centroid is proposed. The rationality and accuracy of measuring points formula and sampling method adaptively dividing centroid is verified by experiment.

Keywords: MBD; Inspection process; Inspection feature; Measuring point; Distribution strategy

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.17.097

现代制造业企业为实现“设计-制造-检测”全过程的数字化,正在从以往基于二维图纸的模拟量传递开始向基于三维数学模型的数字量传递转变。设计环节可基于三维数学模型将零件的几何尺寸信息、形位公差信息、零件技术要求、产品装配信息等定义在模型中,形成一个全信息 MBD 模型^[1-2]。下游检测环节基于 MBD 模型,获得检测工序模型并制定检测工艺规划,最终完成对零件的检测。

在大多数企业中,检测过程是依据二维图纸传递检测信息,基于二维图纸和实体零件制订检测工艺规划,并

依据检测工艺编制测量程序,最终驱动测量机测量^[3-5]。这种检测方式对检测工艺利用率较低,零件检测准备时间与测量员经验有关,且测量程序不具有唯一性。由于缺少检测工艺规划,现场测量员操作水平与实际经验对零件的测量精度影响较大^[6]。同时,由于数据传递过程需要以图纸形式进行,不能实现零件质量的过程控制,无法实现从设计到制造再到检测的数字化和无纸化^[7]。只有一少部分企业实现了基于三维模型的数字化检测过程,但在检测过程中,虽然减少了检测准备时间和基于三维数模的检测,但并未根据不同特征制订检测规划和测量规范来驱动检测过程^[8]。

为实现基于 MBD 的数字化检测过程,打通数字化

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005228);辽宁省高等学校科学研究一般项目(L2014063)。

检测环节,需要制订有效合理的检测工艺和基于特征的测量规范。针对零件检测工艺规划的问题,提出了基于量化分析法的特征采样点数公式和自适应划分形心采样方法(ADCS),实现了基于特征的检测,并在三坐标测量机中实际测量。

1 三维数字化检测工艺规划

随着 MBD 技术的发展和运用,传统的数字量为主,模拟量为辅的工作方式开始被全数字量传递的协调工作方式所代替。基于 MBD 的数字化制造已经成为了未来发展的主流方向。为实现并行制造和加工现场的无纸化,发展基于 MBD 的数字化检测技术显得尤为重要。基于 MBD 的数字化检测技术的核心思想是数据传递和数字驱动,即将检测工序模型中设计尺寸提取出来,获得待测特征的理论量值(特征坐标值和矢量值),用这些数字量值驱动测量机对实际零件进行测量(图 1)^[9-10]。

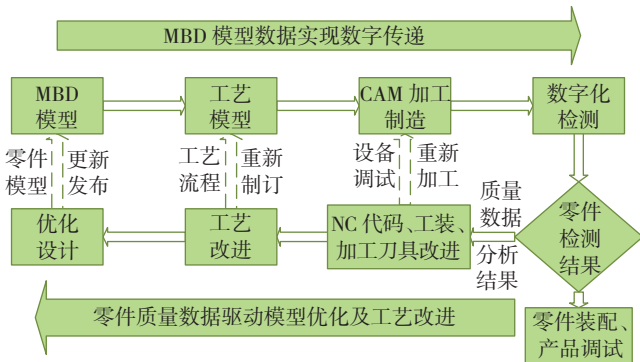


图1 基于MBD的数字化闭环控制系统数据流程
Fig.1 Data flow of digital closed-loop control system based on MBD

检测工艺是指利用测量设备(手动或自动)对机床加工后的成品、半成品零件的尺寸、形状、位置和性质进行测量,将测量数据与原始设计数据进行对比,是否达到要求的过程(图 2)。检测工艺是测量员在零件检测时的重要作业依据。

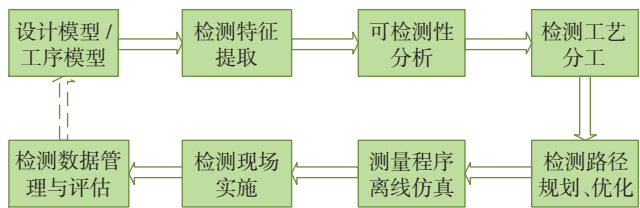


图2 数字化检测工艺过程
Fig.2 Digital inspection process

三维数字化检测工艺是基于 MBD 三维检测工艺模型,将工艺模型中待检测信息等数据提取出来,根据知识库中的信息对模型的可检测性进行分析并根据分析结果来做检测工艺分工,确定零件用何种方式、设备进

行检测。根据模型中所有检测特征进行工艺路线规划(单特征测量路径规划、多特征测量路径规划),并在计算机中进行离线模拟仿真。将仿真后无误的测量程序传递给测量机,驱动测量机对零件进行测量。

2 基于量化分析法的特征测量点数确定

在零件检测的过程中,检测点的数量及分布直接决定零件的测量精度。测量点数的多少受到测量元素的尺寸大小、零件形位公差等级和测量机测量精度的综合影响。待测特征的尺寸较大、公差等级要求较高,则所需的测量点数也就越多,反之亦然^[11-12]。测量机测量精度也是影响零件检测的因素之一,即测量机精度越高,在测量点数相同的条件下,越能反映零件表面的真实形貌,无需进行复校检验,测量效率高。

假设加工误差服从正态分布, $\varepsilon=N(0,\sigma^2)$ 或 $\varepsilon=\sigma \cdot Z$ 。其中, Z 服从标准正态分布, 曲面上的测量点数可由式(1)来确定^[13-14]。

$$N = \frac{1}{2} C \left(\frac{K_{加工} \cdot Z_{1-\delta} - Z_\gamma}{1 - K_{加工}} \right)^2, \quad (1)$$

式中, N 为零件所需的测量点数; C 为曲面的复杂程度系数, 设规则曲面、平面的 $C_{规则}=1$, 则自由曲面的 $C_{自由} = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n) \times C_{规则}$, 其中 α_i 为自由曲面复杂程度系数影响因子且 $\alpha_i = S_i / S_1$, S_i 为组成自由曲面的第 i 部分规则曲面(自由曲面可看作是由多个规则曲面的线性累加); $K_{加工}$ 为加工工艺能力系数, $K_{加工}$ 等于零件公差 T 与加工误差范围 6σ 之比, 即 $K_{加工} = T/6\sigma$; $Z_{1-\delta}$ 、 Z_γ 分别为标准正态分布 $1-\delta$ 、 γ 分位数。

由式(1)可知,在确定曲面测量点时,影响测量点数的因素有 3 种: 零件形位公差、加工工艺能力、检测结果置信度。同时,被测元素的测量点数还会受到测量机精度、特征尺寸等因素的影响,在综合考虑加工工艺能力、零件形位公差、测量机精度以及特征尺寸等因素后,可通过量化分析的方法来确定特征的测量点数。

2.1 规则曲面测量点数确定

规则曲面即可由确定的表达式表示的曲面,常见的规则曲面包括: 圆柱面、圆锥面、球面等。规则曲面是零件中比较常见的特征,有些时候规则曲面会作为零件的基准面或装配表面来使用,其表面的检测结果将直接决定零件的定位精度和使用效率。

规则曲面在加工过程中,通常是由车削、镗削、铣削加工而成,利用统计分析发现,其加工误差与公称尺寸的关系呈三次抛物线,随着零件公称尺寸的增加,零件的加工误差也会增加,并且精加工时的加工误差更小,如图 3 所示。

规则曲面检测时,测量点通常会根据圆柱长径比分

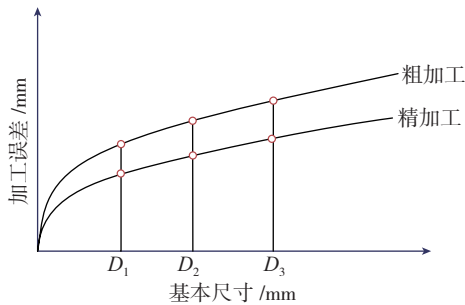


图3 轴(孔)零件加工误差与基本公称尺寸关系

Fig.3 Relation between machining error and nominal size of shaft (hole) part

层布置或根据曲率变化来布置,然后利用最小二乘法、最小区域法等算法将曲面拟合出来,最后对其形位误差进行评价。但对于测量点数并未具体给出确定的计算方法。

设 $\delta=\gamma$,即零件检测结果正确的概率为 $(1-\gamma)$ 或 $(1-\delta)$,由式(1)可得:

$$N = \frac{1}{2} C \left(\frac{-Z_y \times (K_{\text{加工}} + 1)}{1 - K_{\text{加工}}} \right)^2$$

$$= \frac{1}{2} C \left(\frac{Z_y \times (K_{\text{加工}} + 1)}{K_{\text{加工}} - 1} \right)^2$$

零件检测不仅需要考虑加工工艺能力的影响还需考虑检测工艺能力的影响,故 K 应为检测工艺系数与加工工艺共同作用下的综合工艺能力系数 K_z ,且由于是规则曲面可取 $C=1$,则式(1)可变为

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + K_z}{1 - K_z} Z_y \right)^2, \quad (2)$$

其中, K_z 为综合工艺能力系数, $K = \sqrt{K_{\text{检测}}^2 + K_{\text{加工}}^2}$, $K_{\text{加工}} = T_{\text{加工}}/6\sigma$,

$$K_{\text{检测}} = \Delta/\tau, \quad (3)$$

其中, τ 为测量机测量误差, Δ 为零件测量精度要求,可根据被测特征的公差大小和理论公称尺寸进行选取,即 $T/10 \leq \Delta \leq T/5$ 。

若 $K_{\text{检测}}$ 值小于 1,则表示测量设备不能满足零件的检测要求,需要使用精度更高的测量设备。因此,为满足零件的检测要求, $K_{\text{检测}}$ 值必须大于 1。

2.2 不规则平面测量点数确定

平面特征经常会以零件的加工基准、检测基准、装配基准、定位基准等形式存在。为保证检测数据的准确性和可信度,基准平面的质量控制就显得尤为重要。平面测量点数一般根据经验取一个 3×3 的点阵,然后进行测量和拟合评价。而实际零件中的平面特征多为不规则平面,为获得零件表面的实际形貌,需综合考虑平面大小、测量设备精度、检测精度要求、零件形位公差等因素,通过量化分析来计算平面所需的测量点数,即

$$N \propto S \cdot K_{\text{检测}} \quad \circ$$

由图 3 可知,轴(孔)特征基本公称尺寸与加工误差关系呈三次抛物线,即

$$T \propto \sqrt{D} \quad \circ$$

构成轴(孔)类特征的几何元素为圆柱面,圆柱面可沿母线展成矩形平面。为获得平面大小与加工误差关系,亦可将平面等效为圆柱面,即将矩形平面沿着按长(宽)方向不同长径比等效为与面积相同的等效圆柱面,利用等效后的圆柱面与加工误差关系来分析被等效平面与加工误差间关系,即:

$$D_{\text{等效}} = \sqrt{\frac{S}{\pi \cdot l}}, \quad (4)$$

其中, S 为被测平面面积(去除孔、型腔等后剩余平面部分); l 为等效圆柱面的长径比,其值可根据被测平面的长宽之比及其形位公差理论值等相关影响因素综合给出,即理论形位公差值稍大时,根据轴(孔)特征基本公称尺寸与加工误差间关系,可选取比长宽比略大的等效长径比,反之亦然。

根据零件加工误差与轴(孔)特征基本公称尺寸间关系可得等效圆柱面与加工误差间关系,进而得到平面与加工误差关系,即:

$$N = \sqrt{D_{\text{等效}}} \cdot K_{\text{检测}} \quad \circ \quad (5)$$

3 基于特征的采样策略分析

复杂特征在检测时,需要对其可检测性进行分析,根据可检测性分析结果、测量设备资源库和检测工艺知识库对零件进行检测工艺分工,并依据零件被测特征、所使用测量设备制订检测工艺规划驱动测量机测量。根据被测元素的采样点数,结合被测元素的特点,提出了自适应划分形心采样方法(ADCS)。

从 MBD 模型中提取零件的被测元素、夹具信息、定位及装配关系信息和测量设备信息等,生成检测工序模型,并从检测工序模型中提取被测特征的面积 S 。根据测量点数,按照等面积原则将被测特征自适应地划分为 N 块(N 为被测特征的测量点数),每块面积为 A ,即

$$A = S/N \quad \circ \quad (6)$$

设划分后网格在局部坐标系(LCS)下的形心坐标为 (\bar{x}, \bar{y}) ,通过坐标变换后在零件坐标系(WCS)下的坐标为 (x, y) ,坐标变换矩阵为 T 。建立被测特征的零件坐标系(WCS)和所划分等面积网格的局部坐标系(LCS),在 LCS 中求解被测特征中所划分的某一块图形面积的形心坐标 (\bar{x}, \bar{y}) ,通过坐标变换矩阵 T 将得到 WCS 下的坐标 (x, y) ,将其输出作为测量目标点。

$$T = (T_p, T_x) \quad \circ \quad (7)$$

式中, T_p 为形心坐标平移变换矩阵, 即

$$T_p = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ \Delta x & \Delta y & 1 \end{pmatrix},$$

T_x 为形心坐标绕原点逆时针旋转 θ 变换矩阵, 即

$$T_x = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\iint_D x \cdot u(x, y) d\sigma}{m} = \frac{\iint_D x d\sigma}{A} \\ \bar{y} = \frac{\iint_D y \cdot u(x, y) d\sigma}{m} = \frac{\iint_D y d\sigma}{A} \end{cases}, \quad (8)$$

$$(x, y) = (\bar{x}, \bar{y}) \cdot T \quad (9)$$

在接触式测量(CMM)中, 测量采样点分布以减少测量误差影响为基本原则, 主要考虑以下几个方面: (1) 尽可能满足数据处理与质量分析的需要; (2) 尽可能保证采样点均匀分布, 各采样点间距尽可能相近; (3) 采样点尽可能散开覆盖整个表面, 避免采样点过于集中, 以保证检测质量; (4) 避免落入测针不可测达区域; (5) 避免采样点太靠近被测元素边界, 如: 表面边界、障碍边界和孔边界等; (6) 尽量避免测头变换并减少测头方向的使用数目; (7) 尽量避免使用过长的加长杆; (8) 曲线曲面曲率大的区域相应加大点的分布密度^[15-16]。

自适应划分形心采样方法以规则均匀分布为基础, 在综合考虑了被测元素表面形状、表面大小、测量设备等影响因素后, 通过对被测元素进行等面积自适应划分, 求解划分后特征的形心, 并输出形心坐标, 算法流程如图 4 所示。

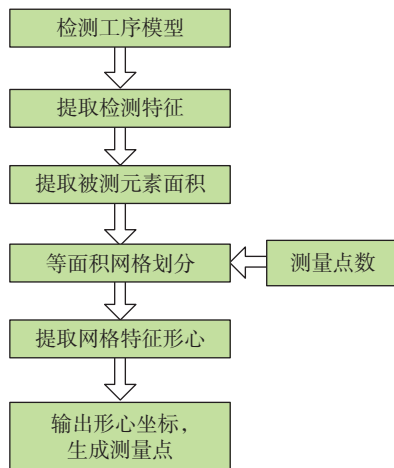


图4 自适应划分形心采样流程
Fig.4 Process of ADCS

为保证采样点在被测要素中分布为最大包容原则, 网格划分步骤可分为 3 步: (1) 确定被测要素中所包含的非测量要素, 如在被测要素中的孔、轴、型腔等; (2) 去除非测量要素的影响, 计算被测要素面积; (3) 根据

采样点在被测要素中分布的最大包容原则, 在被测要素中确定划分中心, 即当被测要素为对称图形时, 可选择其形心作为划分中心, 当被测要素为非对称图形时, 可在被测要素中选择最大圆孔(非测量要素)的圆心作为其划分中心。

将 WCS 下的各网格特征的形心坐标输出, 作为测量机测量时的目标点坐标(如图 5 所示), 驱动测量机进行测量。

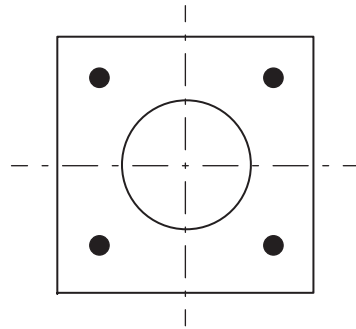


图5 基于形心的测量点布置示意图
Fig.5 Measurement point layout diagram based on centroid

4 实例验证

在被测零件中选取斜平面(含孔)及直径为 $\phi 30\text{mm}$ 圆柱作为测量元素, 如图 6 所示。首先, 在 MBD 模型中将被测特征要素识别出来, 利用基于几何结构和基于拓扑关系的方法将被测要素从 MBD 模型中提取出来, 获得检测工序模型; 其次, 从检测工序模型中获取被测要素已知理论数据, 将其带入式(2)、式(5)确定被测要素测量点数; 再次, 根据被测元素的采样点数, 结合被测元素的特点, 利用 ADCS 方法对被测元素进行划分, 得到网格图形; 最后, 求解网格图形在 LCS 的形心坐标, 通过坐标变换获得其在 WCS 下坐标, 并将其输出作为测量目标点。

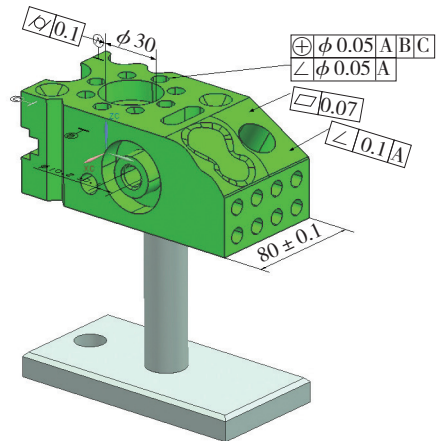


图6 被测零件与测量设备
Fig.6 Measured part and measurement equipment

当测量元素为不规则平面,设其等效长径比 $l=2$,测量机测量精度为 $\tau=2.5\mu\text{m}$,被测平面元素面积、公差可从模型中获取,即 $S=863.0901\text{mm}^2$, $T_{\text{平面}}=0.07\text{mm}$ 。

由式(3)、式(4)可得 $D_{\text{等效}}=11.7203\text{mm}$, $K_{\text{检测}}=2.8>1$,满足测量精度要求。将 $D_{\text{等效}}$ 和 $K_{\text{检测}}$ 带入式(5),可得该平面所需的测量点数 $N=6.3602 \approx 6$,则可将被测平面划分为6块。根据式(7)计算可得各网格图形在 LCS 下的形心坐标,通过式(9)将其转换为 WCS 下的坐标,最终获得平面的采样分布,如图7所示。

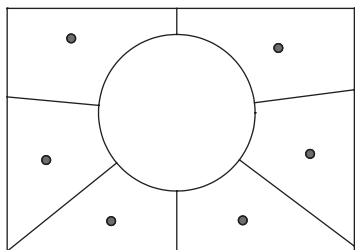


图7 平面采样点分布示意图

Fig.7 Sample point distribution diagram of plane

当测量元素为规则曲面,设零件检测结果正确的概率为 99.5%,零件加工工艺系数 $K_{\text{加工}}=1.67$,测量机测量精度为 $\tau=2.5\mu\text{m}$,从模型中提取圆柱度 $T_{\text{圆柱}}=0.1\text{mm}$ 。

由式(3)可得 $K_{\text{检测}}=4>1$,满足测量精度要求,综合工艺系数 $K=4.33$,带入式(2)可得该圆柱面所需测量点数 $N=8.4902 \approx 9$,被测元素可划分为9块。由于圆柱长径比 $l<1$,故在评价圆柱度时,可按鸟笼法和等面积原则将网格分为两层,求解其在 WCS 下的形心坐标并输出为测量机目标点,最终获得规则曲面的采样分布,如图8所示。

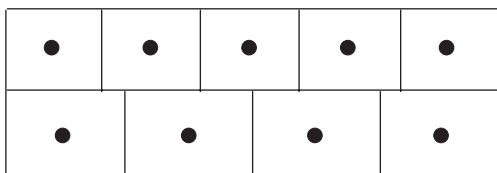


图8 圆柱面采样点分布示意图

Fig.8 Sample point distribution diagram of cylinder

为验证 ADCS 方法在采样点布置时的准确性,在同一被测元素中选取相同的采样点数,分别应用 ADCS 方法和测量机自动布点方法进行采样点的布置,测量结果如表1所示。由表1可知,基于被测元素网格形心来布置测量点所获得的形状误差值与测量机自动布点所获得形状误差值很接近,其差值相对于理论值可以忽略不计。因此,采用基于形心的测量点布置方法也可准确表达出零件表面的实际形貌。

为验证测量点数公式的准确性,同一被测元素在测量时,可取不同的测量点数,按照 ADCS 方法来布置,实

际测量数据如表2、表3所示。由表2、表3可知,圆柱度误差值随着采样点数增加而增加,在采样点增加到9个以后,误差值趋于稳定,平面度误差值随着采样点增加到6个以后也趋于稳定。故表2、表3中数据很好地验证了规则曲面采样公式和不规则平面采样点数公式的准确性。

表1 测量结果比较

参数	理论值	实测值	
		形心布点	测量机自动布点
圆柱度 /mm	0.1	0.0763	0.0771
平面度 /mm	0.07	0.0558	0.0562

表2 圆柱度测量值

测量点数 N	圆柱度 /mm	
	理论值	实测值
5	0.1	0.0658
7		0.0701
9		0.0763
11		0.0765
13		0.0763
15		0.0766

表3 平面度测量值

测量点数 N	圆柱度 /mm	
	理论值	实测值
4	0.07	0.0511
6		0.0558
8		0.0560
10		0.0558
12		0.0559

5 结论

本文对基于 MBD 的数字化检测过程进行了详细的讨论,在研究了现有的检测规划方法和三维数字化的基础上,归纳总结了三维检测工艺的概念,提出了基于 MBD 的数字化检测工艺的关键技术。针对规则曲面、不规则平面的测量,将被测特征公差、测量机精度、零件加工误差与被测元素尺寸关系等主要影响因素进行量化,推导得出了确定规则曲面和不规则平面测量采样点数公式,并基于特征提出了自适应划分形心采样方法(ADCS)。通过实际测量验证了规则曲面、不规则平面测量点数公式和自适应划分形心采样方法的准确性、合理

性和高效性,为零件检测提供了一种新的方法与思路。

参考文献

[1] 张国雄. 三坐标测量机的发展趋势[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1-2): 222-226.

ZHANG Guoxiong. The development tendency of coordinate measuring machines[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(1-2): 222-226.

[2] 胡祥涛,程五四,陈兴玉,等. 基于MBD的产品信息全三维标注方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40:60-63.

HU Xiangtao, CHENG Wusi, CHEN Xingyu, et al. Full 3D annotation of product information based on MBD[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40:60-63.

[3] 杜福洲,梁海澄. 基于MBD的航空产品首件检验关键技术研究[J]. 航空制造技术, 2010(23): 56-59.

DU Fuzhou, LIANG Haicheng. Research on key technology of MBD-based aviation first article inspection[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(23): 56-59.

[4] 周秋忠,查浩宇. 基于三维标注技术的数字化产品定义方法[J]. 机械设计, 2011, 28(1):33-36.

ZHOU Qiuzhong, ZHA Haoyu. Digital product definition method based on 3D annotation technology[J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(1):33-36.

[5] 裴祖荣,石照耀,李岩. 机械制造领域测量技术的发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14):1-11.

QIU Zurong, SHI Zhaoyao, LI Yan. Research on the development of measurement technology mechanical manufacture[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14):1-11.

[6] 徐金亭,孙玉文,刘伟军. 复杂曲面加工检测中的精确定位方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6):175-179.

XU Jintong, SUN Yuwen, LIU Weijun. Optimal localization of free-form shaped parts in precision inspection[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6):175-179.

[7] 葛巧琴. 智能计算机辅助检测规划系统—ICAIP[J]. 东南大学学报, 1992, 22(5):91-99.

GE Qiaoqin. An intelligent computer aided inspection planning—ICAIP[J]. Journal of Southeast University, 1992, 22(5):91-99.

[8] 张昕,秦坤,张超,等. 基于MBD的三维工艺研究与实现[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(2):45-47.

ZHANG Xin, QIN Kun, ZHANG Chao, et al. Design and implementation of three-dimensional CAPP base on MBD[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2013, 49(2):45-47.

[9] 梁勤,张浩波,王强. 基于MBD的数字化检测平台集成与应用研究[J]. 航空精密制造技术, 2014, 50(1):43-45.

LIANG Qin, ZHANG Haobo, WANG Qiang. Digital inspection platform integration and application research base on MBD[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014, 50(1):43-45.

[10] 吴永清,刘书桂,张国雄. 智能三坐标测量机检测规划问题的研究综述[J]. 中国机械工程, 2001, 12(7):828-831.

WU Yongqing, LIU Shugui, ZHANG Guoxiong. A survey of inspection planning problem of intelligent CMMs[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(7):828-831.

[11] ZHANG Y F, NEE A Y C, FUH J Y H, et al. A neural network approach to determining optimal inspection sampling size for CMM[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 1996, 9(3):161-169.

[12] 兰诗涛. 自由曲面接触式测量方法研究与原型系统研制[D]. 杭州:浙江大学, 2004.

LAN Shitao. Research of free surface contact measurement method and prototype system development[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.

[13] MENQ C H, YAU H T, LAI G Y. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed Inspection[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(2):268-278.

[14] 曾德标,郑国磊,曾春玲. 飞机结构件坐标测量机测量方向优化选择[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(12):1607-1613.

ZENG Debiao, ZHENG Guolei, ZENG Chunling. Measuring orientation optimization for aircraft structural parts inspection with coordinate measuring machines[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12):1607-1613.

[15] 郑惠江. 在机检测中曲面拓扑特征重建和检测点分布关键技术研[D]. 天津:天津大学, 2010.

ZHENG Huijiang. Research on the key technology of the topological feature reconstruction and sampling point distribution in OMV[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

[16] 刘达新. 基于三维的智能三坐标测量机检测规划系统的研究与开发[D]. 合肥:合肥工业大学, 2009.

LIU Daxin. Research and development of 3D CAD-based inspection planning system for intelligent coordinate measuring machine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.

(责编 海山)

(上接第 92 页)

化, 2002(2):15-16.

WANG Naicheng. Implementation of new national general tolerance standards[J]. Space Standardization, 2002(2):15-16.

[4] 黄勇,张博林,薛运峰. UG二次开发与数据库应用基础与典型范例[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.

HUANG Yong, ZHANG Bolin, XUE Yunfeng. UG secondary development and foundation of database application with typical examples[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.

[5] 甘永立. 几何量公差与检测[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2010.

GAN Yongli. Geometric tolerance and detection[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2010.

[6] 庞广智,任家骏,吴凤林,等. 基于UG/Drafting的公差标注系统开发研究[J]. 机械管理开发, 2009, 24(3):148-149.

PANG Guangzhi, REN Jiajun, WU Fenglin, et al. Development on tolerance marking system based on UG/drafting [J]. Mechanical Management and Development, 2009, 24(3):148-149.

[7] 董正卫,田立中,付宜利. UG/OPEN API编程基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.

DONG Zhengwei, TIAN Lizhong, FU Yili. UG/OPEN API programming basis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

(责编 海山)