

曲面工件超声检测中碰撞干涉的研究

李雄兵 周晓军 郑慧峰

(浙江大学机械与能源工程学院, 杭州 310027)

摘要 在超声检测自动探伤过程中, 探头可能和工件发生碰撞干涉。根据曲面工件和圆柱形探头碰撞干涉的特点, 给出了一种分级碰撞干涉检测方法。首先利用包围盒算法和几何求交算法剔除大量被检对象分离的情况, 然后将可能干涉的3维对象正投影到2维平面中, 空间碰撞问题就转化为平面碰撞问题, 只需计算投影图是否有重叠就可精确判断是否干涉。工程应用表明, 该方法能满足超声检测机器人碰撞干涉检测的高效性和精确性要求, 该方法也适用于装配和数控加工中复杂曲面和圆柱体之间的碰撞干涉快速检查。

关键词 超声检测 碰撞干涉 分级算法 正投影

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)11-2151-06

Collision Interference in Curved Components Ultrasonic Inspection

LI Xiong-bing, ZHOU Xiao-jun, ZHENG Hui-feng

(College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Transducer and curved component may interfere during automatic ultrasonic inspection. Using the characteristics of collision interference between cylindrical transducers and curved components, a hierarchy method of collision interference detection was proposed. Firstly, algorithms of bounding box and geometric intersection were used to remove most cases where components were separated. Then triaxial components which may collide were projected onto diaxial plane. Finally, collision interferes were accurately identified according to orthographic projections overlap or not. The engineer application results showed that the method can meet the efficiency and accuracy requirements of the ultrasonic inspection. It can also be applied to the cases of assembly and NC machining, where needs rapid collision detection between cylinder and complex curved components.

Keywords ultrasonic inspection, collision interference, hierarchy algorithm, orthographic projection

1 引言

超声波自动探伤已成为航空件等大型曲面构件普遍采用的检测技术^[1,2]。和数控加工、产品装配一样, 扫描检测过程中可能存在碰撞干涉的情况。因此有必要在实际检测之前进行仿真环境下的碰撞干涉检测, 找出发生碰撞干涉的运动点位, 重新进行路径规划, 避免碰撞带来的损失。

国内外学者对碰撞干涉检测进行了深入的研

究, 并做了大量富有成效的工作^[3,4], 其中包围盒算法、空间分解法是当前广泛采用的方法。包围盒算法计算简单, 容易实现快速碰撞检测, 但该方法的精确性不高^[5]; 空间分解法将整个虚拟空间划分成相等体积的小单元格, 然后对占据同一单元格或相邻单元格的几何对象进行相交测试, 精确性高但运算复杂^[6]。本文对曲面构件超声检测环境下的碰撞干涉检测进行了研究, 提出了一种分级碰撞检测的实用算法。

收稿日期: 2007-04-02; 改回日期: 2007-05-31

第一作者简介: 李雄兵 (1977 ~), 男。讲师。2008 年于浙江大学获机械制造及其自动化专业博士学位。主要研究方向为自动化检测与信息处理研究。发表论文 9 篇。E-mail: lixb_ex@163.com

2 基本原理

实验表明:超声检测过程中碰撞干涉一般发生在运动的圆柱形探头与静止的曲面工件之间^[7]。碰撞检测的任务是确定探头和工件的几何模型是否存在交集非空的可能,以及在什么位置发生碰撞。本文从超声检测的实际出发,提出一种分级碰撞检测方法,该方法分为 3 级:包围盒算法、几何求交算法、正投影算法(如图 1 所示)。

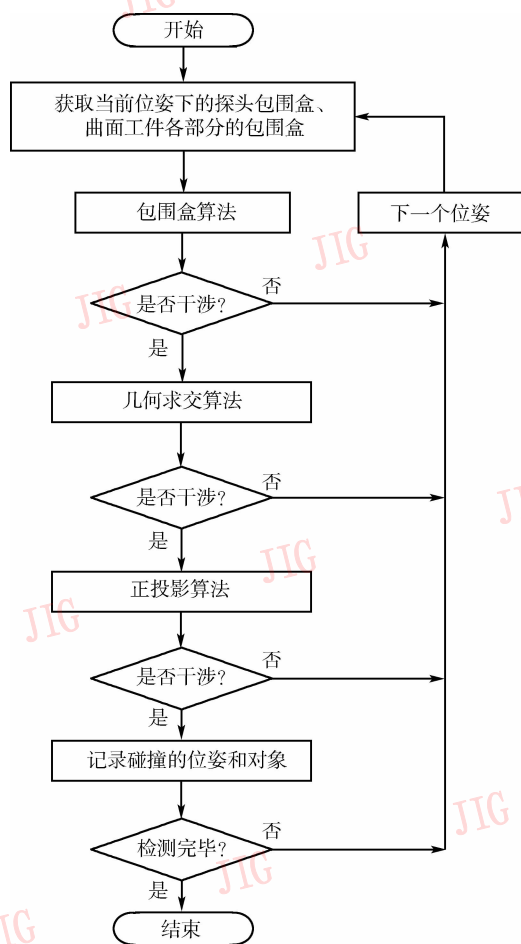


图 1 碰撞干涉分级算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of hierarchy algorithm on collision interference

在包围盒算法中,用一个能够包容待检物体所有几何特征的长方体来表示待检物体。如果包围盒不相交,则待检物体一定不干涉;如果包围盒的一条边和另外一个包围盒的面相交时,物体可能干涉。在实际的碰撞检测时,先根据工件曲率变化情况将其分割成若干部分,每一部分都用一个包围盒代替,再依次与探头包围盒进行干涉检测。通过包围盒检

测,可以剔除很多工件与探头相分离的情况,从而大大减少了计算量。输出的检测结果为探头在什么位姿与工件的哪些部分可能干涉,然后再利用几何求交算法进行下一步检测。

在几何求交算法中,圆柱形的探头仍然用包围盒表示,曲面工件中可能干涉的各部分用若干三角形面片表示。如果每个三角形面片与包围盒都不相交,则待检物体不会碰撞干涉;否则可能干涉,并将可能干涉的所有三角形面片和探头位姿记录下来,利用正投影检测算法来确定是否碰撞干涉。

在正投影算法中,利用 3 个投影图来判断如图 2(a) 所示的圆柱体和三角面片是否干涉:图 2(b) 的投影矢量方向为圆柱体的中心轴线;图 2(c) 的投影矢量方向为三角面片的任意一条边;图 2(d) 的投影矢量方向为圆柱体底面圆的任意一条直径。如果圆柱体和三角面片不干涉,上述 3 个投影图中至少存在一个圆柱与三角形投影分离的。

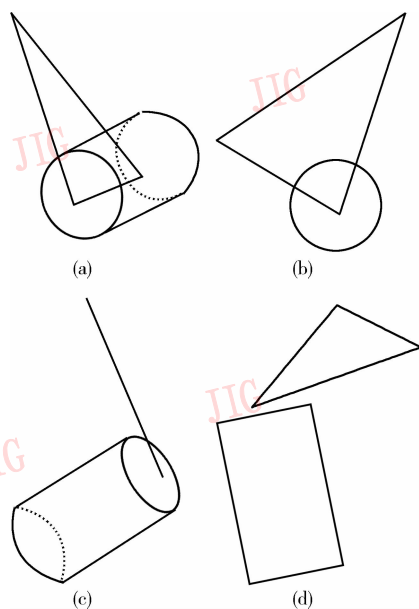


图 2 正投影算法示意图

Fig. 2 Sketch of orthographic projection algorithm

3 实现方法

3.1 获取包围盒

图 3 所示超声检测机器人由 5 根连杆 (L_1, L_2, L_3, L_4, L_5)、3 个移动关节 (A_1, A_2, A_3) 和 2 个转动关节 (A_4, A_5) 组成。按照 Denavit-Hartenberg 方法^[8]和连杆坐标系建立的原则^[9],建立如图 4 所示的连杆坐标系。

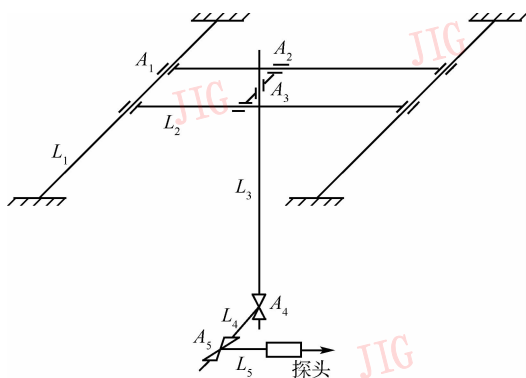


图3 超声检测机器人运动原理

Fig. 3 Kinetic theory of ultrasonic inspection robot

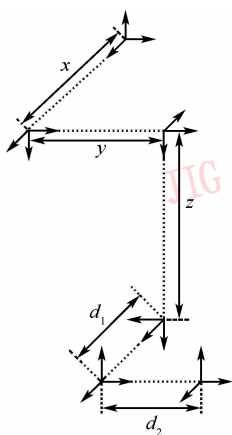


图4 超声检测机器人连杆坐标系

Fig. 4 Linkage coordinate system of ultrasonic inspection robot

通过求解运动方程,机构中每点坐标都可用结构变量和5个关节的位置变量来表示^[10],如探头后端面圆的圆心坐标为

$$(x + d_1 \cos(a) + d_2 \sin(a) \cos(b), y -$$

$$d_1 \sin(a) + d_2 \cos(a) \cos(b), -z + d_2 \sin(b))$$

式中, d_1 为结构常量, d_2 为探头装夹长度, x 、 y 、 z 分别表示检测机器人移动关节 (A_1, A_2, A_3) 的变量值, a 、 b 分别表示检测机器人转动关节 (A_4, A_5) 的变量值。

计算出圆柱体二个端面的圆心坐标,结合它固有的端面圆直径可以构造出来圆柱体的包围盒;曲面工件各部分的包围盒通过其3维坐标的最大值和最小值来构造。

3.2 包围盒算法

如果包围盒相交,则一个包围盒至少存在一条边与另一包围盒的一个面有交点。根据这一理论,只需检查一个包围盒的12条边和另外一个包围盒的6个面是否有交点,就能判断两个包围盒是否干涉。

假设空间直线 $\frac{x-x_1}{a} = \frac{y-y_1}{b} = \frac{z-z_1}{c}$ 和空间

平面 $Ax + By + Cz + D = 0$, 它们的交点有2种情况:

(1) 若 $Aa + Bb + Cc + D = 0$, 则直线与平面平行;

(2) 直线和平面相交,其交点坐标为

$$\begin{cases} x = x_1 - at \\ y = y_1 - bt \\ z = z_1 - ct \end{cases}$$

其中,

$$t = \frac{Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D}{Aa + Bb + Cc + D}$$

只有交点同时位于有界平面和空间线段内,才能判定包围盒相交。交点与矩形的包容性检查可以采用面积判别法,如图5(a)所示。

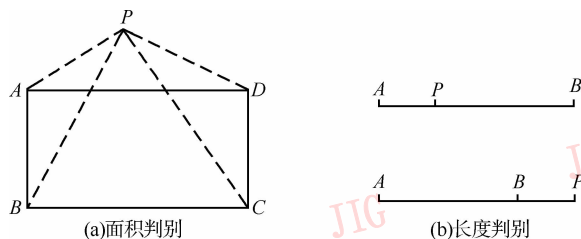


图5 交点包含性判别示意图

Fig. 5 Identification sketch of intersecting point containment

若 $S_{\square ABCD} < S_{\triangle PAB} + S_{\triangle PBC} + S_{\triangle PCD} + S_{\triangle PDA}$, 则点 P 在矩形之外, 否则点 P 在矩形之内; 交点和线段的包容性检查采用长度判别法, 如图5(b)所示, 如果 $AB < PA + PB$, 则点在线段 AB 之外, 否则位于 AB 之间。

3.3 几何求交算法

三角面片和包围盒的干涉检查, 其实就是判断三角形的3条边与包围盒的6个面是否相交, 这便转化成空间线段和空间有界平面的求交问题, 方法和上节所述相同。

3.4 正投影算法

假设投影平面 $Q: ux + vy + wz = 0$, 投影线的单位方向向量 $\mathbf{A} = (u, v, w)$, 空间一点 (x_i, y_i, z_i) , 要确定它在平面 Q 上的正平行投影 (x_s, y_s, z_s) , 投影线的参数方程为

$$\begin{cases} x_s = x_i + ut \\ y_s = y_i + vt \\ z_s = z_i + wt \end{cases}$$

代入方程 $ux + vy + wz = 0$ 得

$$t = -\frac{ux_i + vy_i + wz_i}{u^2 + v^2 + w^2}$$

故投影坐标如下：

$$\begin{cases} x_s = x_i - \frac{u(ux_i + vy_i + wz_i)}{u^2 + v^2 + w^2} \\ y_s = y_i - \frac{v(ux_i + vy_i + wz_i)}{u^2 + v^2 + w^2} \\ z_s = z_i - \frac{w(ux_i + vy_i + wz_i)}{u^2 + v^2 + w^2} \end{cases} \quad (1)$$

这样就可求出三角形顶点及圆柱体底面圆圆心投影坐标。

假设圆柱体底面圆的半径为 r ，圆柱轴线的单位方向向量为 $\mathbf{B} = (l, m, n)$ ，投影平面 $Q: ux + vy + wz = 0$ ，投影平面单位法向量 $\mathbf{A} = (u, v, w)$ 。圆柱体的底面圆投影到平面 Q 上得到一个椭圆，长轴的方向向量为 $\mathbf{A} \times \mathbf{B} = (vn - wm, wl - un, um - vl) = (i, j, k)$ ，长轴的长度 $a = r$ ；短轴的长度

$$b = \frac{r | (ul + vm + wn) |}{\sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)} \sqrt{(l^2 + m^2 + n^2)}}$$

椭圆焦距 $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ ，焦点坐标分别为

$$(x_1, y_1, z_1) = (x_s + ic, y_s + jc, z_s + kc)$$

$$(x_2, y_2, z_2) = (x_s - ic, y_s - jc, z_s - kc)$$

椭圆方程为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^2 \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} = 2a \\ ux + vy + wz = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据以上的推导，容易得到三角形和圆柱体往以下 3 个方向的投影图。如果在这 3 种情况下，它们的投影图都出现了重叠，那么三角形和圆柱体发生了干涉；否则就不会碰撞干涉。

3.4.1 沿圆柱轴线投影

圆柱体和三角形沿着圆柱体中心轴线方向往 XOY 平面正投影，得到的投影图如图 6 所示。圆柱体的投影为椭圆 O_1 ；三角形的投影为三角形 ABC 。满

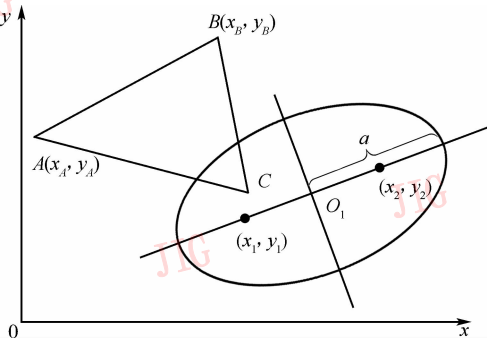


图 6 圆柱轴线方向投影检测

Fig. 6 Inspection by projection along cylinder axis

足下列 3 个条件中的一个时，三角形 ABC 和椭圆 O_1 便会有重叠，被检测的圆柱体和三角形可能干涉。

- (1) 三角形有顶点位于椭圆内；
- (2) 椭圆和三角形的边有交点；
- (3) 椭圆中心在三角形内部。

3.4.2 沿三角形边线投影

当沿着三角形的一条边往平面 XOY 投影，得到的投影图如图 7 所示。三角形的投影为线段 AB ；圆柱体的投影为椭圆 O_1 、椭圆 O_2 及两条平行线段 EF 、 GH 。满足下列条件之一时，被检测的圆柱体和三角形可能干涉：

- (1) 点 A 或点 B 位于椭圆 O_1 或椭圆 O_2 内；
- (2) 线段 AB 与椭圆 O_1 或椭圆 O_2 相交；
- (3) 点 A 或点 B 位于矩形 $DEFG$ 内部；
- (4) 线段 AB 和矩形 $DEFG$ 有交点。

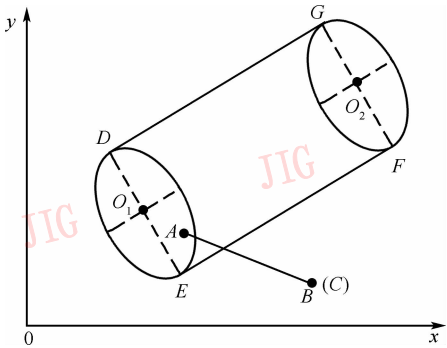


图 7 三角形边线方向投影检测

Fig. 7 Inspection by projection along triangle edge

3.4.3 沿圆柱底面直径投影

沿着圆柱体底面圆直径方向往 XOY 平面投影，得到的投影图如图 8 所示。圆柱体的投影为矩形 $DEFG$ ；三角形的投影为三角形 ABC 。满足下列条

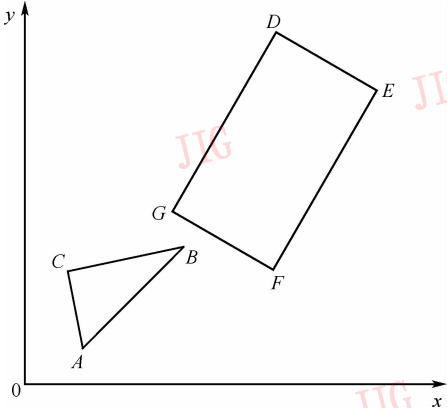


图 8 圆柱底面圆直径方向投影检测

Fig. 8 Inspection by projection along diameter of bottom circle

件之一时,三角形 ABC 和矩形 $DEFG$ 便会有重叠,被检测的圆柱体和三角形可能干涉。

- (1)三角形 ABC 有顶点位于矩形 $DEFG$ 内;
- (2)矩形 $DEFG$ 有顶点位于三角形 ABC 内;
- (3)三角形的一条边与矩形的一边有交点。

4 算法测试

上述算法在 PC Pentium IV 2.8G 上 Visual C++ 实现,并用一系列例子测试了上述算法,图 9 为其中 3

个测试用的曲面工件模型。将曲面工件分解成多少个包围盒以及每个包围盒的大小选择对本文算法的总耗时有很大影响:如果包围盒选得过少,分级算法的第 1 级耗时较少,但留给第 2 级和第 3 级工作量就会增加。表 1 给出了将图 9(b)分解成不同数量的包围盒在本文算法的测试结果。在针对不同形状和大小的曲面工件进行大量仿真实验基础上,得出了圆柱体探头和包围盒的体积比与分级算法的总耗时存在如下关系:当选择的包围盒体积为探头体积的 30~35 倍时,本文算法的效率最高。

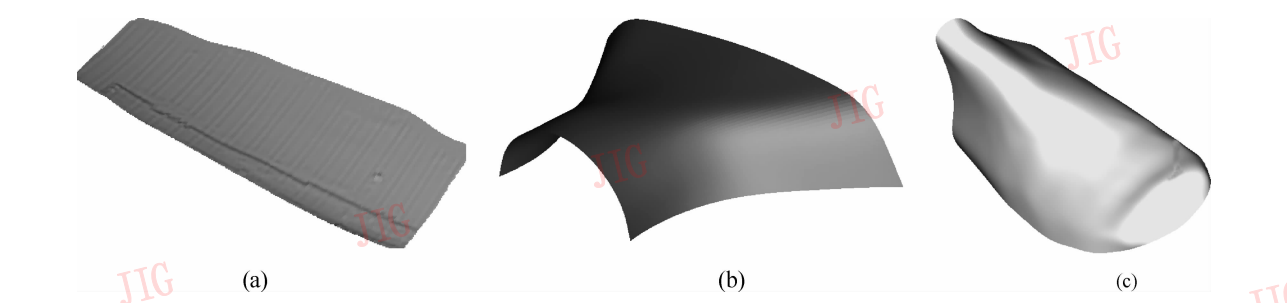


图 9 用于测试的曲面工件模型
Fig.9 Curved components model for test

表 1 包围盒的选择对算法的影响

Tab.1 Affection by choice of bounding box

包围盒和探头体积比	包围盒检测耗时(s)	几何求交检测耗时(s)	投影检测耗时(s)	总耗时(s)
8	0.08	0.85	1.16	2.09
33	0.21	0.18	0.28	0.67
100	1.05	0.40	0.12	1.57

表 3 3 种不同算法的检测结果

Tab.3 Test results of three different algorithms

检测对象	本文算法耗时(s)	空间分解法耗时(s)	距离场算法耗时(s)
图 9(a)	0.22	3.2	2.4
图 9(b)	0.67	5.6	4.5
图 9(c)	1.12	11.3	8.9

对不同曲面工件利用本文分级干涉检测算法进行的测试结果如表 2 所示,为考察该算法的性能,将其与空间分解法和距离场算法^[11]的检测结果进行比较,如表 3 所示。可见本文算法针对超声检测中的碰撞干涉检查效率更高。

表 2 不同模型的检测结果

Tab.2 Test results of different models

检测对象	三角片数量	包围盒和探头体积比	需检测的运动点位	总耗时(s)
图 9(a)	576	31	872	0.22
图 9(b)	1 152	35	1 430	0.67
图 9(c)	2 784	32	2 366	1.12

5 结 论

根据曲面构件超声检测过程中碰撞干涉的特点,给出了一种分级碰撞干涉检测的方法。首先利用包围盒算法和几何求交算法剔除大量不干涉的情况,然后通过正投影将空间碰撞问题转化为平面碰撞问题,并可以精确计算出待检对象是否干涉,如果干涉则根据碰撞位置进行扫描路径的重新规划。多次工程应用验证这种方法针对超声检测机器人的碰撞干涉检测是准确而高效的,同时该方法也可适用于装配和数控加工中复杂曲面和圆柱体之间的碰撞干涉检测。

参考文献 (References)

- 1 Haase W, Maurer A. Latest developments on industrial ultrasonic testing of aircraft components [A]. In: Proceedings of the 16th World Conference on Non-destructive Testing [C]. Montreal, Canada, 2004:225 ~ 236.
- 2 Luo Xiong-biao, Chen Tie-qun. The development trend of ultrasonic non-destructive testing [J]. Non-Destructive Testing, 2005, 27(3): 148 ~ 152. [罗雄彪, 陈铁群. 超声无损检测的发展趋势[J]. 无损检测, 2005, 27(3): 148 ~ 152.]
- 3 Suri S, Hubbard P M, Hughes J J. Collision Detection in Aspect and Scale Bounded Polyhedra [A]. In: Proceedings of the 1998 9th Annual ACM SIAM Symposium on Discrete Algorithms [C], San Francisco, CA, USA, 1998:127 ~ 136.
- 4 Tetsuya U, Toshiaki O, Mario T. Collision Detection in Motion Simulation[J]. Computer & Graphics, 1983, 7(2): 1285 ~ 2931.
- 5 Wang Zhi-qiang, Hong Jia-zhen, Yang Hui. A survey of collision detection problem [J]. Journal of Software, 1999, 5(10): 545 ~ 551. [王志强, 洪嘉振, 杨辉. 碰撞检测问题研究综述[J]. 软件学报, 1999, 5(10): 545 ~ 551.]
- 6 David Baraff. Interactive Simulation of solid rigid bodies[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1995, 15(5): 63 ~ 75.
- 7 Jiang Jian. Key Technology Research of Integrated Ultrasonic-imaging Survey about Aviation Components [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005:14 ~ 16. [江健. 航空构件一体化超声成像检测的若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005:14 ~ 16.]
- 8 Santos V J, Valero-Cuevas F J. Reported anatomical variability naturally leads to multimodal distributions of denavit-hartenberg parameters for the human thumb [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2006, 53(2): 155 ~ 163.
- 9 Abdel-Malek K, Othman S. Multiple sweeping using the denavit-hartenberg representation method [J]. CAD Computer Aided Design, 1999, 31(9): 567 ~ 583.
- 10 Wang Yan-ying, Zhou Xiao-jun, Che Huan-miao. Technique for controllable path measurement and surface reverse in ultrasonic measurement[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(6): 490 ~ 494. [王艳颖, 周晓军, 车焕森等. 超声检测中的路径受控仿形测量和曲面重构技术[J]. 中国机械工程, 2003, 14(6): 490 ~ 494.]
- 11 Fang Xiang, Bao Hu-jun, Heng Pheng-an, *et al.* Algorithm for fast calculating the nearest distance between space point and arbitrary polyhedron[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2001, 13(9): 788 ~ 792. [方向, 鲍虎军, 王平安等. 点到任意多面体距离的快速计算方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(9): 788 ~ 792.]