

doi: 10.7690/bgzd.2014.06.004

## 一种基于激光扫描雷达的挖掘面 3D 重构方法

王钤, 骆云志

(中国兵器工业第五八研究所军品部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为了实现挖掘机器人自动轨迹生成和轨迹跟踪, 提出一种挖掘机器人的挖掘面 3D 重构方法。根据 3D 激光扫描雷达的三角形原理得到扫描点的坐标值, 对扫描点进行聚类分析方法滤除噪声点, 进行初始三角剖分、局部优化、着色和渲染得到三角剖分后平底坑的 3D 物理模型, 并采用倒置棱台进行拟合, 计算了所挖平底坑内腔的上表面和下表面之间的距离和下表面的几何尺寸。实践结果表明: 该方法实现了对不规则平底坑内腔的测量, 为挖掘机器人自主挖掘平底坑的自动轨迹生成和跟踪奠定了基础。

**关键词:** 3D 激光扫描雷达; 平底坑; 三角剖分; 拟合; 棱台

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Digging Surface Three Dimension Reconstruction Method Based on Laser Scanner Radar

Wang Qian, Luo Yunzhi

(Department of Military Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** For realizing digging robot automatic trajectory generation and tracking, put forwards digging surface 3D reconstruction method. According to triangle principle of 3D laser scanner radar to acquire coordinates of scan point. Use clustering analysis method on scan point to delete noise point. Use initial triangulation, local optimization, coloration, and rendering to acquire flat bottom hole 3D physical model after initial triangulation. Then use inversion prism to fitting, calculate distance between upper surface and bottom surface of flat bottom hole lumen and the geometry size of bottom surface. The practice result shows that the method realizes measurement for irregular flat bottom hole lumen and make foundation for realizing digging robot automatic trajectory generation and tracking in flat bottom hole.

**Keywords:** 3D laser scanner radar; flat bottom hole; triangulation; fitting; frustum of a prism

### 0 引言

距离图像的出现对视觉信息处理产生了变革性的影响。与二维图像不同的是, 距离图像的像素代表了 3D 景物的深度, 简化了区域分割、特征抽取、形状复原、景物识别的处理工作。不仅如此, 距离图像还使视觉技术真正进入 3D 非接触测量领域, 利用距离图像和距离信息重建 3D 场景较之视觉系统而言, 更为精准和简便<sup>[1]</sup>, 刘冰、李海伦、吕潮峰和王年都采用三角剖分对凸型目标进行了 3D 建模研究<sup>[2-5]</sup>。

为了实现自主挖掘平底坑作业, 必须要解决挖掘机器人的自动轨迹生成和轨迹跟踪, 为此就得解决以下问题: 所挖平底坑的 3D 物理模型重构; 根据凹型平底坑的 3D 模型自动生成平底坑内腔待挖掘面的几何尺寸和到地面的距离。基于此, 笔者对基于激光扫描雷达的挖掘面 3D 重构进行研究。

### 1 3D 激光扫描雷达系统组成

由于立体 3D 激光扫描雷达不受环境影响, 被

大量应用于实际工程测量, 所以被选择作为 3D 建模的信息采集设备, 安装在挖掘机器人操作机的斗杆上, 如图 1 所示。

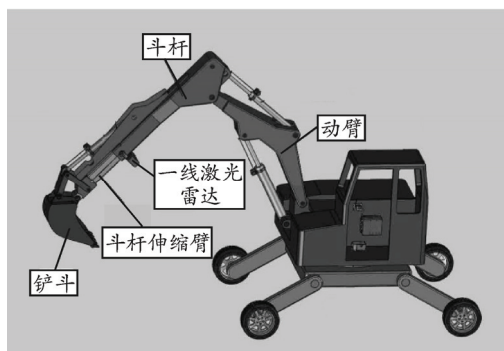


图 1 3D 激光扫描雷达在挖掘机器人上的安装位置

3D 激光扫描雷达由二维激光扫描雷达数据采集器和 3D 激光扫描雷达控制器组成。二维激光扫描雷达数据采集器由二维激光扫描雷达、步进电机、驱动器、减速器、U 型架和接近开关等组成, 外形如图 2 所示。

控制器的主要功能包括 3D 激光扫描雷达数据处理、与 3D 激光扫描雷达控制器通讯以及二维激

收稿日期: 2014-02-15; 修回日期: 2014-03-21

作者简介: 王钤(1984—), 男, 河南人, 硕士, 从事雷达信号处理、多源信息融合研究。

光扫描雷达在俯仰方向上运动控制。每次系统上电时，由控制器控制步进电机寻找零位，此后的运动都以此作为基准，可通过对步进电机脉冲计数来计算二维激光扫描雷达所处的俯仰角。立体激光扫描雷达在俯仰方向上的运动范围如图 3 所示。

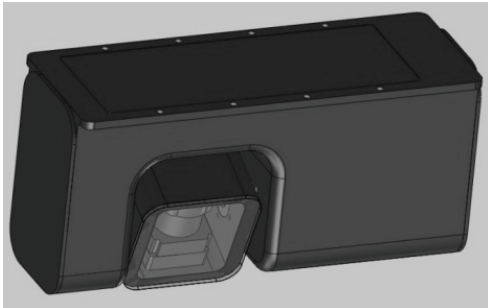


图 2 立体 3D 激光扫描雷达系统外形

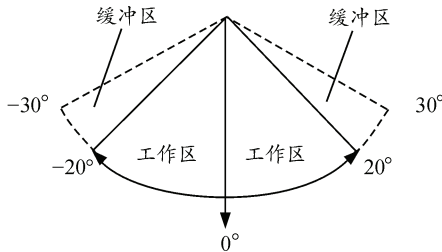


图 3 3D 激光扫描雷达在俯仰方向上工作范围

## 2 检测过程及 3D 点云处理

### 2.1 检测过程

二维激光扫描雷达的主要作用是在二维平面上探测传感器前方 6 m 范围内对象平面距离图像信息，步进电机经减速器驱动二维激光扫描雷达在 ±30° 范围内做俯仰运动实现垂直面扫描，以此组成一个立体激光扫描检测系统，它所采集的平底坑的 3D 点云如图 4 所示。

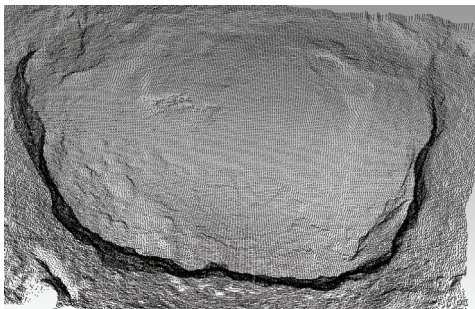


图 4 平底坑的 3D 点云示意图

基于 3D 激光扫描雷达的三角形原理，如图 5 所示，可以得到扫描点在 3D 激光扫描雷达坐标系中的坐标值，如下式：

$$\begin{cases} x = S \cos \theta \cos \alpha \\ y = S \cos \theta \sin \alpha \\ z = S \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

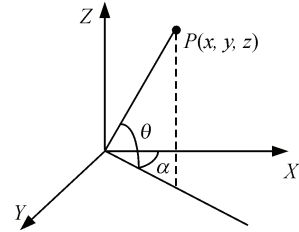


图 5 三角形测量原理示意图

图 5 中的  $S$  为距离， $\theta$  为俯仰角， $\alpha$  为二维激光扫描雷达的方位角。

### 2.2 扫描信息的处理

由于 3D 激光扫描雷达在工作时受到内部电路噪声和外部环境的影响，不可避免会出现噪声，这些噪声点对后期数据处理会产生较大的影响，故需要采用必要措施将这些噪声点滤除掉。采用对扫描点进行聚类分析方法滤除噪声点，具体做法为：结合扫描数据的特点采取最小邻近算法聚类，对 3D 激光扫描雷达每层扫描的二维数据进行滤波。

### 2.3 基于三角剖分的平底坑 3D 物理模型建模

在 3D 激光扫描雷达上使用 3D 重构技术重现平底坑的 3D 物理模型。用 3D 激光扫描雷达对平底坑进行 3D 扫描之后，得到了大量的目标表面 3D 点云数据，这些点云是 3D 重构的基础。由于采用三角剖分具有：足够多的三角形可以更加逼真地描述复杂物体表面；三角形结构简单，易于计算机存储和管理；三角形经系统的各种投影变换后，其基本特征不变，有利于区域填充和裁剪等图形操作等特点。所以笔者采用三角剖分的方法对平底坑 3D 点云进行物理模型建模。

根据 3D 激光扫描雷达逐行扫描特征和相邻扫描线之间数据点的相对位置关系进行初始三角剖分，之后再行局部优化。将优化后的 3D 物理模型进行着色和渲染，得到三角剖分后平底坑的 3D 物理模型，如图 6 所示。

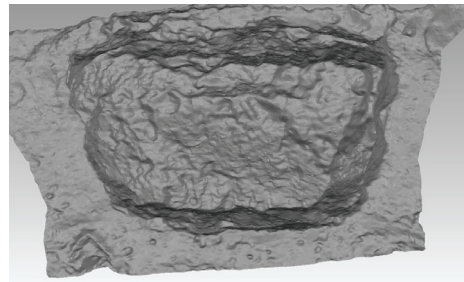


图 6 平底坑 3D 模型

## 3 平底坑内腔的数字 3D 建模技术

基于平底坑 3D 物理模型虽然能直观地显示平

底坑的物理模型表面，但不能提供平底坑 3D 物理模型内腔的几何尺寸。为了实现自主挖掘平底坑，就必须实时自主计算所挖平底坑内腔的上、下表面（待挖掘面）之间的距离和下表面的几何尺寸，所以不能采用实时性不高和需要人工干预的 B 样条曲面模型或 NURBS 曲面拟合法。

经过对所挖平底坑进行分析，得到平底坑内腔是一个自由曲面，对于挖掘而言，不需要对曲面进行高精度光滑拟合，因此笔者采用不规则倒置棱台拟合平底坑内腔的方法建立平底坑内腔数字 3D 模型，来计算所挖平底坑内腔的上表面和下表面之间的距离和下表面的几何尺寸。其处理流程如图 7。

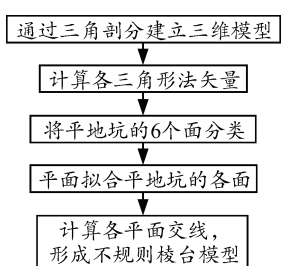


图 7 建立平底坑内腔数字 3D 模型流程

平底坑内腔的六面体所对应的法向量是各向异向，如图 8 所示，利用这一特性可以将这 6 个面加以分割，由三角剖分的各个三角形顶点可以确定 1 个平面，平面方程的一般形式为式 (2) 所示，则平面的法向量可以表示为  $\vec{N}(a,b,c)$ 。

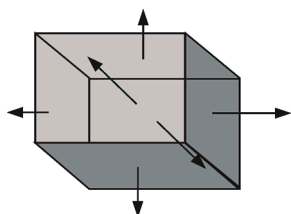


图 8 立方体各面的法向量

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2)$$

由于参数  $a, b, c, d$  不是相对独立的，大小不是绝对的，所以在求解平面法向量时必须对向量进行归一化处理，如下式。

$$\begin{cases} a' = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \\ b' = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \\ c' = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \\ d' = \frac{d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \end{cases} \quad (3)$$

由于平面由  $N$  个三角形组成，其法矢不可能协调一致，需要对其进行调整，在法矢调整时，任选 1 个  $\Delta_i$  和其邻近  $\Delta_j$ ，设 2 个三角形的法矢分别为  $n_i, n_j$ ，若满足式 (4)，就判定这 2 个三角形平行，

$$\cos \alpha = n_i \cdot n_j \approx \pm 1 \quad (4)$$

$\Delta_i$  和  $\Delta_j$  的法矢方向变化连续，否则以  $\Delta_i$  的法矢  $n_i$  为基准，调整  $\Delta_j$  的法矢  $n_j$  方向。遍历所有三角形的法矢，使所有三角形的法矢均指向平底坑 3D 模型内腔曲面的外侧。平底坑 3D 模型法矢量调整前后的 3D 模型分别如图 9。

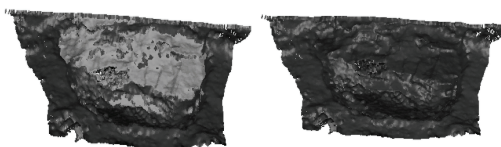


图 9 法矢调整前后的平底坑 3D 模型示意图

可设定平底坑 3D 模型内腔 6 个面的 6 组法向量为： $(0,0,1)$ 、 $(0,0,-1)$ 、 $(0,1,0)$ 、 $(0,-1,0)$ 、 $(1,0,0)$ 、 $(-1,0,0)$ ，这 6 组法矢表示了平底坑 3D 物理模型六面的法向量。在实际计算时，需遍历由三角剖分形成的三角形法矢，按照最近邻原则将各三角形归为这 6 类之一，即实现了平底坑 3D 物理模型的内腔六面分割，如图 10 所示。

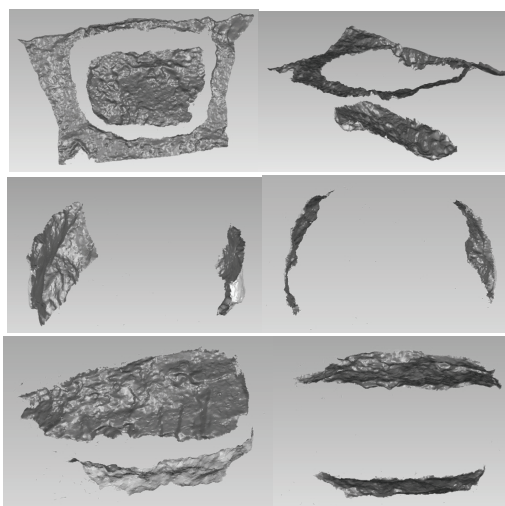


图 10 平底坑 3D 物理模型内腔的六面分割示意图

要实现不规则倒置棱台拟合平底坑内腔建立平底坑内腔 3D 模型，就必须对已分割的平底坑 3D 模型内腔的 6 个面进行平面拟合。采用线性最小二乘法将自由曲面拟合成平面，设待拟合的平面方程为

$$n_x x + n_y y + n_z z + d = 0 \quad (5)$$

式中： $n_x, n_y, n_z$  为待拟合平面的单位法向量的 3 个



分量。由式 (5) 可知, 只要求取了  $(n_x, n_y, n_z)$  就实现了曲面拟合成平面。

设过拟合平面的点为  $P$ 、待拟合平面的法矢为  $n(n_x, n_y, n_z)$  和待拟合的数据点为  $X_i(i=0,1,2,\dots,m)$ , 则拟合平面到数据点集的距离平方和最小, 即满足

$$s = \sum_{i=0}^m ((X_i - P)n)^2 \quad (6)$$

其中过平面的点  $P$  可以通过式 (7) 获取, 即:

$$P(x_p, y_p, z_p) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \quad (7)$$

式 (7) 中

$$\begin{cases} x_p = (x_0 + x_1 + \dots + x_i) / i & i = 0, 1, \dots, n \\ y_p = (y_0 + y_1 + \dots + y_i) / i & i = 0, 1, \dots, n \\ z_p = (z_0 + z_1 + \dots + z_i) / i & i = 0, 1, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

平面法矢  $n$  可通过求取矩阵  $A$  最小特征值对应的单位特征向量获得, 其中矩阵  $A$  为式 (9) 所示:

$$A = \sum_{i=1}^m (X_i - P)(X_i - P)^T \quad (9)$$

式 (9) 中:

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^m (x_i - x_p)^2 & \sum_{i=0}^m (x_i - x_p)(y_i - y_p) & \sum_{i=0}^m (x_i - x_p)(z_i - z_p) \\ \sum_{i=0}^m (y_i - y_p)(x_i - x_p) & \sum_{i=0}^m (y_i - y_p)^2 & \sum_{i=0}^m (y_i - y_p)(z_i - z_p) \\ \sum_{i=0}^m (z_i - z_p)(x_i - x_p) & \sum_{i=0}^m (z_i - z_p)(y_i - y_p) & \sum_{i=0}^m (z_i - z_p)^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

采用平面拟合的平底坑数字 3D 模型如图 11。

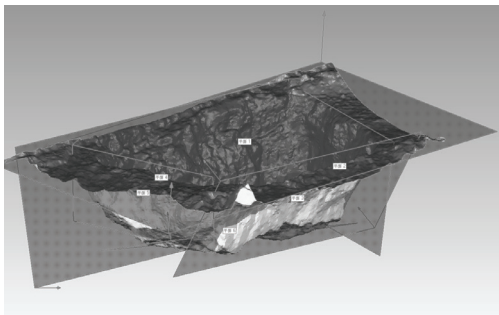


图 11 采用平面拟合的平底坑各拟合平面

计算 6 个平面的交线, 去除交线外多余部分, 便形成了平底坑数字 3D 模型内腔的不规则倒置棱台如图 12 所示。

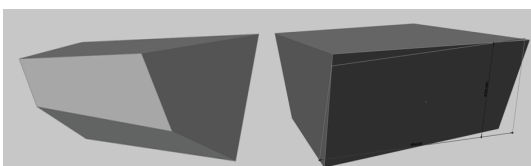


图 12 拟合的棱台模型

#### 4 平底坑内腔的相关尺寸计算

由于生成的棱台是不规则的六面体, 顶面和底面不一定平行, 无法直接计算两平面间的距离, 加之挖掘机器人对精度要求不高, 可以采用间接的方法计算两平面间的平均距离。如图 13 所示,  $F_1$  为棱台的上表面,  $F_2$  为棱台的下表面,  $h_1 \sim h_4$  分别为上表面 4 个顶点到棱台下表面的距离, 顶点到地面的距离由式 (11) 求得。

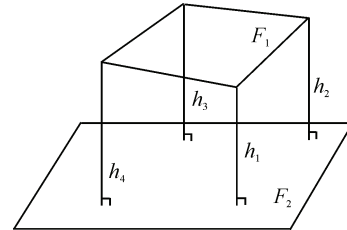


图 13 两平面间的平均距离

设空间中的一点  $p_i(x_i, y_i, z_i)$ , 则该点到空间一平面  $ax + by + cz + d = 0$  的距离  $h$  为:

$$h = \frac{ax + by + cz + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (11)$$

由式 (11) 可以求得不规则倒置棱台上表面的 4 个顶点到棱台下表面的 4 个距离  $h_1 \sim h_4$ , 按式 (12) 对其求均值即认为是该棱台的高度, 即待挖掘面到地面的距离。

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4} \quad (12)$$

用式 (11) 和式 (12) 可以求得棱台左、右两面和前后两面等底部之间的距离, 即可认为是该不规则倒置棱台下表面(待挖掘面)长度和宽度。图 14~图 16 为实验所测得的平底坑图片和 3D 模型图。

对图 15 所示不规则倒置棱台按式 (11)、式 (12) 进行计算, 可得所挖平底坑内腔的几何尺寸(长×宽×高): 3 007.5 mm×4 613 mm×1 598 mm。与实际测量尺寸 3 000 mm×4 550 mm×1 800 mm 相比, 坑的长、宽和高测量尺寸误差分别为: 7.5、63 和 202 mm。



图 14 现场挖掘平底坑图片

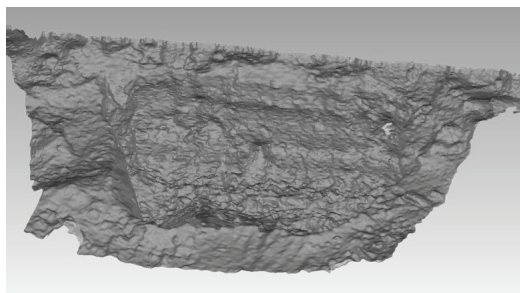


图 15 三角剖分的平底坑 3D 模型

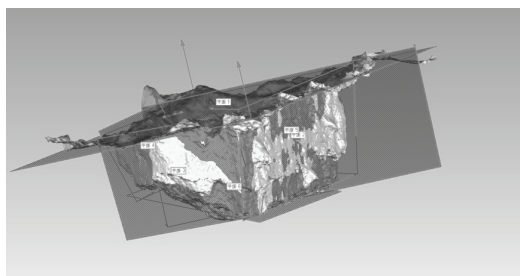


图 16 平底坑 3D 模型的内腔模型

### 5 结束语

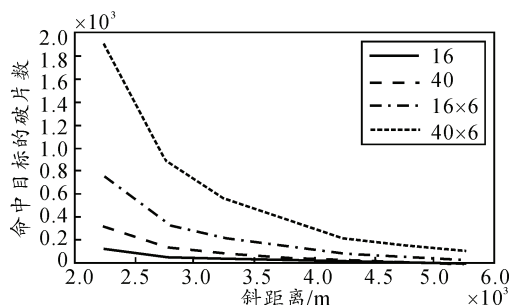
该方法实现了从 3D 激光扫描雷达点云数据采集到采用三角剖分建立被检测平底坑的 3D 物理模型，并实现了用不规则倒置棱台拟合平底坑内腔数字 3D 模型。现场实验结果证实了该方法的正确性和有效性。

### 参考文献：

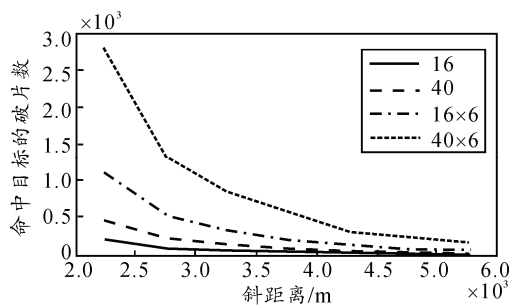
[1] 卿慧玲. 基于激光雷达数据的三维重建系统的研究与设计[D]. 长沙: 中南大学, 2005.  
 [2] 刘冰. 基于 Delaunay 三角剖分的曲面拟合[D]. 天津: 天津大学, 2007.  
 [3] 李海伦. 基于曲率特征的点云数据区域分割和钣金件曲面拟合的技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
 [4] 吕湖峰. 激光雷达三维重建与测量系统关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.  
 [5] 王年. 三维重构中关键算法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2005.

\*\*\*\*\*

(上接第 7 页)



(a) 目标高度 1000 m



(b) 目标高度 1500 m

图 2 命中目标破片数随斜距离的变化曲线

\*\*\*\*\*

(上接第 10 页)

因此，利用环境试验、可靠性研制试验等不同试验的相似产品试验信息，扩大统计样本量，为小子样条件下系统的可靠性准确评估提供依据。

### 参考文献：

[1] 陆廷孝, 郑鹏洲. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 78-79.

### 6 结束语

通过对某防空火箭武器系统对武装直升机的射击能力的研究表明：在未来反空袭作战中，该防空火箭武器系统可以有效对武装直升机进行射击。所建模型和计算数据对于防空火箭武器系统作战能力快速形成具有一定的理论参考价值和指导作用。

### 参考文献：

[1] 邵义龙. 武装直升机对地攻击关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006: 49-67.  
 [2] 张学锋, 徐国雄, 方木云, 等. 防空火箭武器仿真系统的设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(3): 589-597.  
 [3] 宋国合, 陈同军. 某远程火箭炮火控系统仿真训练平台[J]. 兵工自动化, 2013, 32(3): 21-23.  
 [4] 唐兴诚, 周世明. 我军反空袭战役[M]. 郑州: 防空兵学院, 2002: 60-102.  
 [5] 王仰忠, 徐华亮, 宰双胜. 基于灰色层次分析法的某型防空武器系统作战能力评估[J]. 防空兵指挥学院学报, 2008, 25(4): 59-61.  
 [6] 于春海, 潘丰. 三自由度直升机逻辑控制器的研究与设计[J]. 机电工程, 2013, 30(3): 257-260.

[2] 龚庆祥. 型号可靠性工程手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 95.  
 [3] 徐建国, 陈玲, 金昌根, 等. 电火工品发火可靠性数字化测试技术研究[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 69-72.  
 [4] 杨军, 黄金, 申丽娟, 等. 利用相似产品信息的成败型产品 Bayes 可靠性评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(7): 787-788.  
 [5] 张春成. 某产品基于尺寸链的精度设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(11): 92-95.