

凸轮自由曲面反求建模技术

Reverse Modeling Technology for Free Form Surface of Cam

西北工业大学机电学院 张顺琦 秦现生 邓瑞君 尤向荣

[摘要] 自由曲面精确建模是凸轮高精度反求的必要前提。针对三坐标测量机获得的自由曲面点云数据,研究了噪声点快速有效的去除算法、边界数据及整体数据的平滑技术、点云数据的筛选与曲面扩展;最后,结合 VC 强大的数据处理能力以及 UG/Open 二次开发工具,实现大密度点云数据在 UG 环境中的快速精确建模。经验证,该方法数据处理效果明显,曲面建模效率和精度高。

关键词: 反求工程 自由曲面 UG 二次开发 点云数据

[ABSTRACT] Modeling free form surface accurately is necessary precondition for cam high-precision reverse. The point cloud is achieved by measuring free surface via coordinate measuring machine(CMM). Efficient removing algorithm of noisy points, smoothing technology of boundary points and the whole points, filtering of point cloud and expanding of the surface are focused on. Finally, the rapid and precise modeling of high density point cloud in UG environment is realized by combining with VC data processing and UG/Open secondary development tool. The method is tested to improve the efficiency and accuracy of free form surface modeling.

Keywords: Reverse engineering Free form surface UG secondary development Point cloud

反求工程技术是 CAD/CAM 系统中相对独立且非常重要的一个分支,包括数据测量、曲面建模、CAM 建模及数控加工^[1],其中曲面建模是反求工程中难度最大也最为重要的关键技术之一。目前,如 UG、Pro/E 等三维软件具有出色的曲面造型功能,但其对原始曲面点云数据的预处理能力很弱,一般都要依赖于第三方软件进行^[2],而且这些三维软件的反求建模模块(如 UG 的 pointcloud 功能、Pro/E 的 SCANTOOLS 功能等)对于大密度点云数据建模效率低。除此之外,市场上还有一些专业的反求软件,如美国 SDRC 公司的 Surfacer、英国 DELCAM 公司的 CopyCAD 等,但价格昂贵,且功能过于通用,对于特殊情况的点云数据无法

按特定要求处理。为解决上述矛盾,浙江大学研发了基于三角 Bezier 曲面插值理论的反求建模 CAD 软件 RE-SOFT^[3-4]。文献 [5] 提出动力数学值仿真的网格曲面逼近方法,平均误差可达 0.001 067。

本课题以复杂精密凸轮反求为例,研究利用 UG/Open API 的强大造型功能以及 VC 的良好数据处理能力,实现自由曲面点云数据的快速精确建模。

1 凸轮工作曲面点云数据特点

1.1 数据的获取

数据主要通过测量装置来得到,测量方法直接影响被测物的数据描述,最终影响 CAD 模型的精度^[6]。目前,用于反求的测量方式主要有 3 种:接触式、非接触式和破坏式^[7-8]。在这三大类中最具代表性的测量方法有三坐标法、激光三角法、结构光法、工业 CT 法等,其性能比较如表 1 所示。

表 1 典型测量方式性能比较^[9]

测量方式	精度 / μm	测量速度	测量成本
三坐标法	0.6~30	慢	较高
激光三角法	± 5	一般	较高
结构光法	$\pm 1 \sim \pm 3$	好	一般
工业 CT 法	1	好	高

为了保证精密凸轮工作曲面反求建模的准确性,必须采用适当的测量方法来满足精度要求。由于凸轮曲面小且形状复杂,需要对曲面进行高密度的采点。经过比较分析,选用三坐标测量机进行测量,并进行相应的测头补偿处理,局部点云数据如图 1 所示。

1.2 数据类型

由于所用测量方法不同,得到的数据点的分布形态也不同,根据点与点之间的联系可以分为网格状点云、行列状点云和散乱点云 3 种数据类型^[6,9],如图 2 所示。本文所用数据类型为行列状点云,如图 2 (b) 所示。

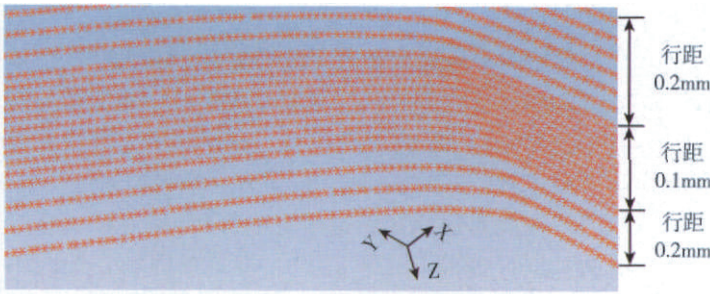


图1 凸轮曲面局部点云图
Fig.1 Partial point cloud of cam surface

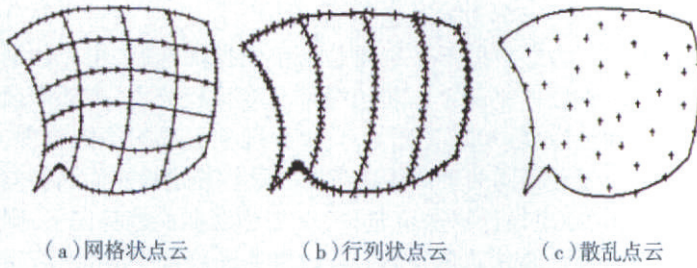


图2 点云数据分布形态^[9]
Fig.2 Distribution patterns of point cloud

1.3 凸轮曲面点云数据的特点

凸轮反求工程中,曲面CAD建模是关键。在航空航天领域中,常常用精密凸轮控制出油规律,其工作曲面多为形状复杂的自由曲面,有些凸轮曲面尺寸还很小。在测量数据时,不但要确定采点密度,还要进行采点规划,总体来说,凸轮曲面数据有以下几个特点。

(1)点云数据密度大。为确保精密凸轮复杂自由曲面反求建模的精度,对曲面进行高密度的采点,用于反映曲面的数据点数量很多。

(2)凸轮工作曲面边界的数据误差较大。凸轮边界曲面的形状通常复杂,并且曲面边界部分形状有突变,用三坐标测量机进行测量时,在接触力的作用下,容易使测头打滑、变形等从而引入误差。

(3)有效点云数据范围比实际凸轮工作曲面小。有些凸轮曲面边界棱边过渡圆角很小,无法用三坐标测量机直接测量获得数据。

2 曲面点云数据预处理

点云数据的预处理一般包括数据点间拓扑关系的建立和数据点的去噪、平滑等处理。通过三坐标测量机获得的数据点之间一般都存在着拓扑关系,因此这种点云数据的预处理重点应放在对数据的去噪、平滑处理。

通过对测量数据点的分析,除了在建模之前对点云数据做必要去噪、平滑外,还需对数据点进行筛选、

扩充。

2.1 去除噪声

复杂曲面数字化检测过程中,测量环境的变化、测量设备内部随机因素的影响以及被测表面因素(粗糙度、波纹等)产生的误差,测量点不可避免地存在噪声点^[10]。此类噪声点可分为明显噪声点和不明显噪声点,对于明显噪声点应予以剔除,对于不明显的噪声点应进行相应的平滑处理。明显噪声点的影响见图3。

明显噪声点的去除方式有2种,第1种为直接检查法,即通过目测找出噪声点并删除,此方法不适合大批量数据的处理;第2种是用批处理的方法,其中主要有曲线检查法、角度偏差法及弦高偏差法^[11],运用这几种方法可有效去除噪声,但运算较为复杂,若点云数据量多,所需的处理时间很长。另外,文献[10]对于较大的误差噪声点给出了距离比较算法。各种算法如图4所示。

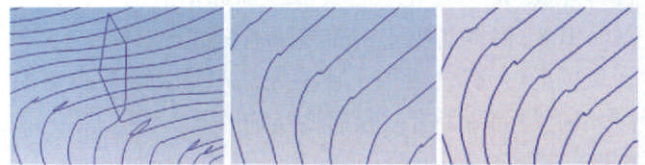


图3 噪声点的影响示意图
Fig.3 Effect of noisy data

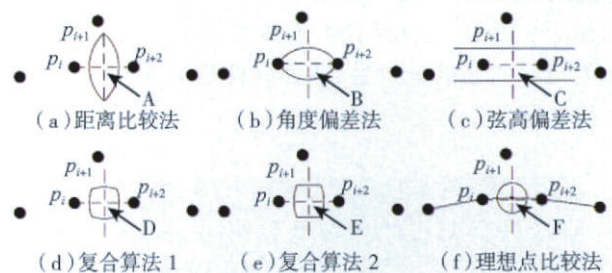


图4 各种去噪算法效果

Fig.4 Effect of different algorithm of removing noisy data

距离比较法算法简单,运算速度快,但仍会留下一些误差较大的噪声点,为了增加去噪区域的可控性,可将距离进行加权后比较,可去除图4(a)中区域A以外的所有噪声点。采用角度偏差法可去除图4(b)中区域B以外的噪声点,去除效果较好,但运算比较复杂。弦高偏差法可去除域C以外的所有点,去除噪声点的区域较小,会留下误差较大的噪声点。为了能较好地快速地去噪声点,宜采用2种或以上的算法结合处理,发挥各自算法的优势,但这个过程至少需要2次去除运算,为了再次简化过程,本课题提出理想点比较

算法,一次性去除所有噪声点。

根据图 4(a)、(b)、(c) 3 种算法去除区域所示,选用距离比较法和角度偏差法组合成复合算法 1,去除效果见图 4(d),处理后的点都控制在区域 D 内;由距离比较法和弦高偏差法组成复合算法 2,去除效果见图 4(e),处理后的点都控制在区域 E 内。运用这 2 种方式可有效地控制数据点的范围。

理想点比较算法的基本思想为: 设 p_{i+1} 为噪声点, 首先找出 p_{i+1} 对应的那个理想点 p'_{i+1} , 若相邻的数据点变化大可采用曲线拟合方法得到理想点, 若点变化缓可把 2 点的中心位置作为理想点; 其次, 计算理想点 p'_{i+1} 与 p_{i+1} 的距离, 若它们的距离超过设定值, 就认为 p_{i+1} 是噪声点, 予以去除。经这种方法去除后, 可将数据点控制在图 4(f) 的 F 区域内。

2.2 数据的筛选和扩展

在反求时获取的数据常常比较多, 包括自由型面及常规形状(圆形、长方形等)的数据, 为了保证精密凸轮反求建模的准确, 一般只对自由型面的点云数据进行建模, 对于常规形状只需得到确定值即可做出模型。因此, 根据凸轮曲面的范围, 对数据进行筛选。点云数据经过筛选, 再加上棱边无法测量获得数据等原因, 最后得到曲面有效数据比实物曲面小, 需对点云数据进行扩充。

首先要得到边界数据, 然后按一定的路径对边界数据进行延伸。延伸的数据仍旧保留了边界数据的误差, 因此在延伸前需对边界数据作平滑处理。最终效果如图 5 所示, 延伸路径为圆弧。另外, 为了保持延伸曲面与原曲面的一致性, 曲面延伸后也需对数据进行平滑处理。

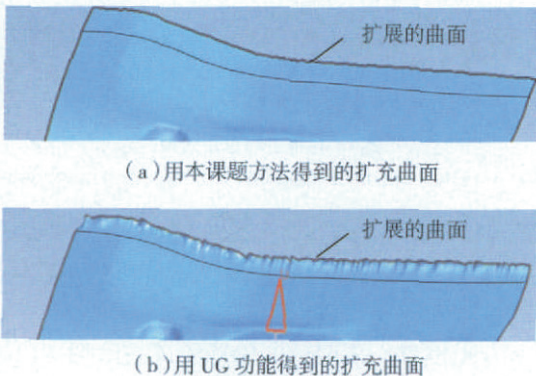


图5 曲面扩展效果比较图
Fig. 5 Comparison of expanding surface

2.3 数据平滑处理

点云数据中的明显噪声点通过以上算法可剔除, 不明显的噪声点也是反映曲面形状的, 这部分点不应

删除, 只能通过平滑来削弱此类噪声点的影响。

常用的平滑滤波算法有: 高斯滤波、均值滤波、中值滤波和小波分析等^[11-12]。高斯滤波能较好地保持原有数据的特征, 但不能对噪声点完全平滑; 均值滤波对高斯噪声有较好的平滑能力, 但容易造成边缘的失真; 中值滤波能对边缘图像有较好的保持, 但对彼此靠近的脉冲噪声滤除效果不好^[11]。根据不同场合选取不同的滤波算法。

对于凸轮曲面建模, 2 个地方需要数据平滑: 一个是边界数据的平滑, 另一个是整个点云数据的平滑。

2.3.1 边界数据平滑

边界数据不平主要是由于数据筛选后, 边界数据不在同一平面上。若边缘部分变化趋势大, 则延伸曲面波纹状严重(见图 6)。根据现象形成的不同原理, 可设计不同的平滑算法予以去除。若边缘曲面趋势向上, 则应设计算法填充波谷; 若边缘曲面趋势向下, 则可设计算法去除波峰; 若边缘曲面趋势平缓, 则可用均值类等算法平滑。

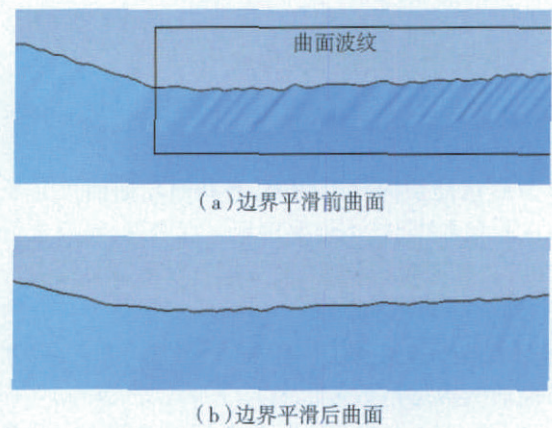


图6 边界数据平滑效果图
Fig. 6 Effect of smoothing boundary data

设点 $P_{i,j}$ 的 3 个坐标点为 $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$, 以 $r_{i,j} = x_{i,j}^2 + z_{i,j}^2$ 作为平滑对象建立如图 6(a) 所示的边界数据平滑模型。用点 $p'_{i+1,j}$ 替代 $p_{i+1,j}$, 通过几何关系计算出 $p'_{i+1,j}$ 点的坐标。

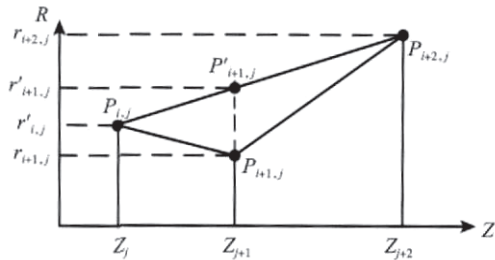
2.3.2 点云数据平滑

点云数据的平滑主要指平滑不明显噪声点。凸轮高精反求建模, 数据点较密, 相邻数据点的曲率变化很小, 可采用均值滤波进行平滑。又因为三坐标测量的数据点难以保证等距或等角度, 在平滑时需考虑相邻点的影响程。因此, 可用加权后的均算法处理。数据处理模型如图 7(b), 取 1 列数据中相连的 3 个点作处理, 其过程为:

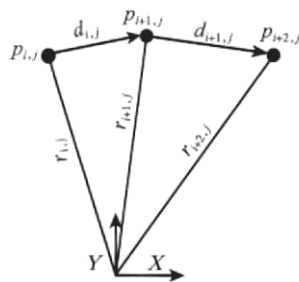
首先,计算 $r'_{i+1,j} = \frac{\alpha r_i + \beta r_{i+1} + \gamma r_{i+2}}{3}$;

其中, α 、 β 、 γ 为各点的权值,即相邻点的影响程度,可取值为 $\alpha=2d_{i+1,j}/(d_{i,j}+d_{i+1,j})$, $\beta=1$, $\gamma=2d_{i,j}/(d_{i,j}+d_{i+1,j})$ 。

最后,通过 $p_{i+1,j}$ 点 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ 的夹角推出 $p'_{i+1,j}$ 的坐标值,用 $r'_{i+1,j}$ 代替 $r_{i+1,j}$ 。



(a) 边界数据平滑示意图



(b) 所有数据点平滑示意图

图7 数据平滑模型

Fig. 7 Model of data smoothing

3 曲面建模

曲面建模是将离散的数据点重构出连续变化的曲面。目前用于曲面建模的主要方式有四边域网格曲面建模和三角域曲面建模^[13]。国际流行的主要 CAD/CAM 软件如 UG、Pro/E 等都采用四边域建模方法。浙江大学研制的 RE-SOFT 反求软件则用的是三角域建模方法^[4]。为了能充分发挥 UG 的 CAD 及 CAM 功能,采用 UG/Open API 实现复杂曲面的高精度建模。

3.1 建立 UG 二次开发框架程序

利用 UG 应用程序开发框架向导建立框架程序有 3 种方法,分别为 UG/Open AppWizard、Win32 Dynamic-Link Library 和 MFC AppWizard(dll)。前 2 种不支持 MFC 类库,VC++ 及其 MFC 的界面灵活性和表达能力均优于 UIStyler 的功能^[14]。本课题首先用 MFC AppWizard(dll) 向导建立

框架程序;然后,在 VC 环境中包含 libugopenint.lib 和 libufun.lib 2 个库文件;其次,在 VC 工程中,新建 4 个文件,分别为 Main.h、Main.cpp、App.h 和 App.cpp。

在 UG 中,每个 User Exit 都有唯一的环境变量和对应的入口函数,以 UG 启动的 User Exit 为例,其入口函数为 ufsta()。UG 启动时注册用户菜单有 2 种方法,即 UF_MB_add_styler_actions() 和 UF_MB_add_actions()^[14]。注册后菜单要进行激发才能响应菜单命令,注册方式不同对应不同的激发方式。UF_MB_add_styler_actions() 对应的是“菜单激发对话框”方式,UF_MB_add_actions() 对应的是“菜单激发应用”方式。经过以上步骤,就可建立 UG 应用程序框架,在 App.cpp 文件中的 Application() 函数中添加自定义的处理方法。

3.2 自由曲面建模

利用 UG 二次开发实现凸轮自由曲面建模,主要调用过点作样条曲线和过线作曲面 2 种函数,分别为

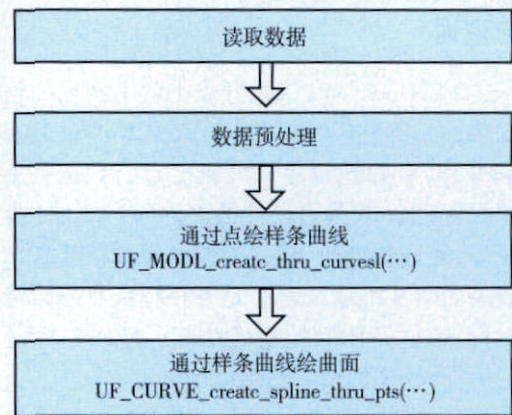
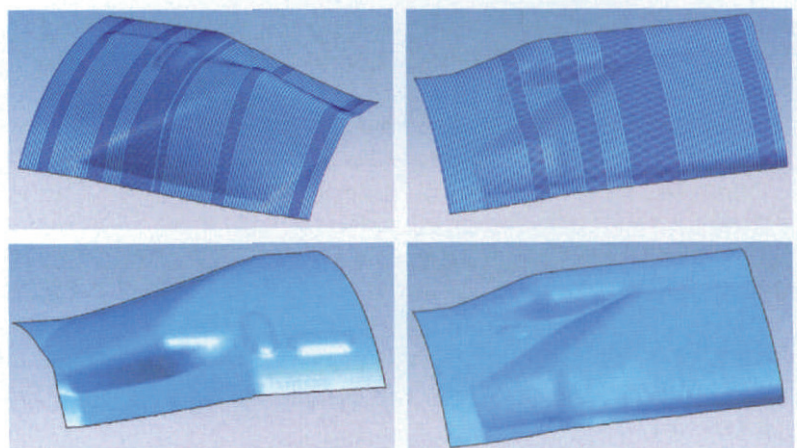


图8 自由曲面建模步骤

Fig. 8 Steps of free surface modeling



(a) 曲面 A

(b) 曲面 B

图9 曲面模型

Fig. 9 Model of surface

表2 点云数据处理时间表

曲面	数据 点数	去噪时间 (s)/次数	平滑时间 (s)/次数	作样条 曲线时间/s	作曲面 时间/s
A	41 127	0.6/2	2/3	0.4	6
B	75 909	4/2	6/3	0.5	8

表3 曲面误差分析表

曲面	检查点数/个	最大误差值/mm	平均误差值/mm
A	1 000	3.41×10^{-4}	2.13×10^{-5}
B	1 000	6.18×10^{-4}	2.36×10^{-5}

UF_CURVE_create_spline_thru_pts(…)和UF_MODL_create_thru_curves1(…),自由曲面建模的完整步骤如图8所示。

4 结束语

通过UG/Open API二次开发平台上实现凸轮自由曲面的快速精确建模,并用VC++6.0环境对点云数据进行预处理,有效地解决了大密度点云数据在UG中快速建模问题。本课题设计的去除噪声算法、曲面平滑算法等,处理速度快,建立的曲面模型精度高。曲面模型效果如图9所示。表2是各种算法及曲面建模的运行时间,表3是曲面的建模精度。经四坐标机床数控加工后,凸轮型面公差达±0.01mm。

参考文献

[1] Werner A,Skalski K. Piszczatowski S, et al. Reverse engineering of free-form surfaces. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 76(1-3): 128-132.

[2] 罗瑜,邱望标. UG二次开发中的点云滤波预处理方法和实现. 兰州理工大学学报, 2008, 34(5):41-44.

[3] 李江雄,柯映林. 基于特征的复杂曲面反求建模技术研究. 机械工程学报, 2000, 36(5): 18-22.

[4] 柯映林,刘云峰. 基于三角Bézier曲面的复杂特征模型重建及特征融合技术研究. 机械工程学报, 2004, 40(6): 85-90.

[5] 刘伟军,孙玉文,刘健. 点云数据的曲面重构新算法. 工程图学学报, 2001(2): 47-52.

[6] 展益彬,林大钧,安琦. 反求工程中基于曲面特性的离散数据优化方法. 东华大学学报(自然科学版), 2008, 34(3): 278-281.

[7] 武剑洁. 基于点的散乱点云处理技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2004.

[8] 张力宁. 点云数据抗噪处理方法及其在叶片重建中的应用研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006.

[9] 何朝明. 离散点云处理的关键技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.

[10] 董明晓,郑康平. 一种点云数据噪声点的随机滤波处理方法. 中国图象图形学报, 2004, 9(2): 245-248.

[11] 王格芳,吴国庆,沙晓光,等. 激光测量的自由曲面点云数据处理方法. 工程图学学报, 2008, (5): 33-37.

[12] 张晓娟,李忠科,赵静,等. 牙冠的三维点云数据重建技术研究. 计算机测量与控制, 2006, 14(10): 1401-1403.

[13] 张宏伟,赵小松,张国雄. 三维曲面重构技术. 天津大学学报, 2002, 35(2): 183-186.

[14] 黄翔,李迎光. UG应用开发教程与实例精解. 北京:清华大学出版社, 2005.

(责编 侧卫)

(上接第67页)

2.3.2 数据库现有数据

数据库中现有数据总量25 000多组,涉及到航空航天、电子、兵器等领域,涵盖了目前国内常用24种金属材料、43台机床、276把刀具、33件典型零件,详细信息如表1所示。

3 结论

(1)针对企业生产应用中存在的缺乏合理的优化型切削参数,导致零件的加工质量差,生产效率低的问题,提出了获得优化型切削加工参数,并建立切削数据库是十分必要的。

(2)本课题提出了一种基于铣削加工动力学仿真的切削参数优化方法,运用自主研发的动力学仿真软件Simucut对颤振稳定域和铣削加工中的各物理量进行仿真,以最大材料去除率为目标函数,以切削力、主轴功率、扭矩、切削速度、刀具使用寿命和颤振稳定域等为约束条件来确定优化的切削参数。

(3)建立切削数据库系统实现了对优化后的切削参数的有效管理,并利用数据查询功能获得符合要求的数据,为工艺人员提供可靠的参考依据。

参考文献

[1] 付秀丽,艾兴,张松,等. 航空整体结构件的高速切削加工. 工具技术, 2006(3):80-83.

[2] 刘强,尹力. 一种面向数控工艺参数优化的铣削过程动力学仿真系统研究. 中国机械工程, 2005, 16(13):1146-1149.

[3] 李忠群,刘强. 基于频响函数的高速铣削颤振稳定域快速分析与研究. 制造技术与机床, 2008, (4):53-57.

[4] 太原市金属切削刀具协会. 金属切削实用刀具技术. 北京:机械工业出版社, 2002.

[5] 顾群业,王晓峰. Dreamweaver网页设计标准教程. 北京:中国电力出版社, 2008.

[6] 章立民. 用实例学ASP.NET-使用C#与ADO.NET. 北京:电子工业出版社, 2005.

(责编 岩石)