



杨俊茹 贾巧辉 李 伟 著

基于 **SINOVATION** 的产品设计系统开发研究实例

清华大学出版社

基于 SINOVATION **的产品设计系统开发研究实例**

杨俊茹 贾巧辉 李 伟 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书分别以曲线文字和曲轴设计为载体,详细阐述基于 SINOvation 进行产品开发的两种方法及过程。

本书包括两部分。第 1~6 章为第 I 部分:基于 SINOvation 的曲线文字设计系统开发及其可靠性研究。阐述第 I 部分研究的现状、曲线文字设计理论、基于 SINOvation 的曲线文字设计系统开发及应用、所开发系统的可靠性及研究结论等。第 7~10 章为第 II 部分:基于 SINOvation 的曲轴设计导航系统研究。阐述第 II 部分研究的现状、曲轴设计内容及设计流程建立、曲轴设计导航系统的开发及应用、第 II 部分研究结论等。

本书适合从事 CAD/CAM 研究和应用的科技工作者及工程师使用,也可供机械工程类专业的高年级本科生和研究生阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于 SINOvation 的产品设计系统开发研究实例/杨俊茹,贾巧辉,李伟著. --北京:清华大学出版社,2012.12

ISBN 978-7-302-30532-3

I. ①基… II. ①杨… ②贾… ③李… III. ①产品设计—研究 ②产品开发—研究 IV. ①TB472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 257611 号

责任编辑:庄红权 洪 英

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:9.5

字 数:205 千字

版 次:2012 年 12 月第 1 版

印 次:2012 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:22.00 元

产品编号:049995-01

SINOvation 是山东山大华天软件有限公司在引进、消化吸收国外先进 CAD/CAM 技术基础上,研发的体现国际最先进设计制造水平的自主知识产权高端三维 CAD/CAM 软件。该软件具有国际领先的混合建模、参数化设计、丰富的特征造型功能、知识融接技术、CAM 加工技术;具有独特的设计导航功能、专业的注塑和冲压模具设计以及国际上独一无二的消失模设计加工和激光切割控制等技术;支持国内外各种主流的 CAD 数据的转换和用户深层次的专业开发,易于将用户的先进设计制造技术和经验软件化。

鉴于目前国内利用 SINOvation 平台进行产品开发研究的资料比较缺乏,作者将课题组近期相关的研究工作进行了整理,出版了本书,希望能够对该领域的研究人员提供有益的帮助。

本书分别以曲线文字和曲轴设计为载体,对基于 SINOvation 进行产品开发的两种方法及过程进行了详细阐述,本书包括两部分:

第 I 部分,在曲线文字设计理论研究的基础上,阐述一种利用 dll 函数,以 VC++ 和 SINOvation 特有的 script 脚本为开发语言,基于 SINOvation 平台的曲线文字设计系统开发理论及方法。其中,dll 函数主要根据得到的文字参数信息提取出文字的轮廓信息,及采用映射理论和文字设计算法计算出曲线文字映射后的文字信息,VC++ 的 MFC 主要用来设计文字系统的界面,script 脚本用来实现文字在 SINOvation 的生成。

第 II 部分,从曲轴设计知识及设计过程的分析,得到曲轴设计流程,在此基础上,阐述另一种利用 SINOvation 的设计导航功能进行产品设计系统开发的方法。该方法使用 XML 语言制作索引文件,使用 HTML 语言记述设计具体内容,二者共同形成网页式设计导航文档。利用 JavaScript 语言编写控制脚本,实现设计文档与三维软件操作的同步进行。

上述两种方法中,第一种方法适用于设计过程全新或需要进行较大改进的新产品的开发;第二种方法适用于设计过程较成熟,但设计知识大量重用,需要将设计知识及经验软件化以大大提高设计效率的产品设计。

本书的出版得到了科技部2012年国际合作项目“新一代高端三维

CAD/CAM 系统的合作研发”(编号 2011DFB11490)以及国家高技术研究发展计划(863 计划)“三维 CAD 平台与应用构件开发”(编号 2012AA040903)的资助,在此表示深深的谢意。

本书的出版还得到了山东山大华天软件有限公司杨超英、张道忠、许宁、魏威、魏松、高鹤等的大力支持和帮助,在此一并表示感谢!

由于水平所限,不足之处在所难免,诚恳希望读者批评指正。

作者

2012 年 8 月于

山东科技大学

第 I 部分 基于 SINOvation 的曲线文字 设计系统开发及其可靠性研究

第 1 章 绪论(I)	3
1.1 引言	3
1.2 三维 CAD/CAM 软件 SINOvation 简介	3
1.3 曲线文字设计研究现状	5
1.3.1 字库的研究现状	5
1.3.2 字体设计软件研究现状	6
1.3.3 曲线文字设计理论研究现状	8
1.3.4 曲线文字设计系统存在的问题	9
1.4 基于架构的软件可靠性研究现状	9
1.4.1 软件架构设计研究现状	9
1.4.2 基于架构的软件可靠性评估	11
1.4.3 基于架构的软件可靠性分配	14
1.5 研究目的、意义及主要内容	14
1.5.1 研究目的和意义	14
1.5.2 主要研究内容	15
第 2 章 曲线文字设计理论	17
2.1 曲线文字设计基本理论及思路	17
2.1.1 曲线文字设计基本理论	17
2.1.2 曲线文字设计思路及流程	18
2.2 曲线文字排版设计	19
2.2.1 文字预排版	19
2.2.2 竖直方向对齐	20

2.2.3	水平方向对齐	21
2.2.4	镜像和反向	21
2.3	映射目标区域的建立	22
2.3.1	直接构造目标区域	22
2.3.2	间接构造目标区域	23
2.4	映射函数的建立	34
2.4.1	直接构造目标区域的映射函数的建立	35
2.4.2	间接构造目标区域的映射函数的建立	36
2.5	文字构成设计	41
2.5.1	文字不变形实现原理	42
2.5.2	文字变形实现原理	42
第 3 章	基于 SINOvation 的曲线文字设计系统开发	44
3.1	曲线文字设计系统功能需求分析	44
3.2	曲线文字设计系统开发过程	45
3.3	曲线文字设计系统物理架构的建立	46
3.3.1	界面 UI 的主要构件及各自的功能	46
3.3.2	dll 的主要构件及各自的功能	48
3.3.3	script 脚本的主要构件及各构件提供的功能	49
3.4	获取文字信息的 dll 函数制作	49
3.4.1	TrueType 字形技术原理	50
3.4.2	TrueType 字体文件格式	51
3.4.3	字体轮廓提取过程	52
3.5	VC++ 的制作	60
3.6	script 脚本的制作	65
第 4 章	曲线文字设计系统应用	69
4.1	曲线文字设计系统界面介绍	69
4.2	曲线文字设计系统应用	70
4.2.1	平面内四边形区域设计	70
4.2.2	平面内沿曲线设计	71
4.2.3	空间内沿面上线设计	73
第 5 章	基于架构的曲线文字设计系统可靠性	76
5.1	曲线文字设计执行可靠性	76



5.1.1 文字在平面四边形区域内设计的可靠性分析	76
5.1.2 文字在平面内沿曲线设计的可靠性分析	78
5.1.3 文字在空间内沿面上曲线设计的可靠性分析	79
5.1.4 曲线文字设计系统本身的可靠度模型	80
5.2 SINOvation 平台启动可靠性研究	81
5.3 曲线文字设计系统总体可靠性模型	82
 第 6 章 第 I 部分总结	 83

第 II 部分 基于 SINOvation 的曲轴设计导航系统研究

第 7 章 绪论(II)	89
7.1 引言	89
7.2 曲轴设计国内外研究现状	90
7.2.1 曲轴设计系统研究	90
7.2.2 曲轴强度研究	90
7.2.3 曲轴平衡性研究	92
7.3 研究目的、意义及主要内容	93
 第 8 章 曲轴设计内容及设计流程建立	 94
8.1 曲轴的工作条件、结构型式及材料选择	94
8.1.1 曲轴的工作条件和设计要求	94
8.1.2 曲轴的结构型式	95
8.1.3 曲轴的材料选择	95
8.2 曲轴结构尺寸分析	96
8.2.1 曲轴曲拐	96
8.2.2 曲轴前端	97
8.2.3 曲轴后端	98
8.2.4 平衡重	98
8.2.5 油孔	99
8.3 曲轴设计计算校核	100
8.3.1 曲轴受力分析	100
8.3.2 圆角名义应力的计算	102
8.3.3 圆角形状系数计算	103

8.3.4	安全系数的计算	104
8.4	曲轴三维模型的建立	105
8.5	曲轴设计流程的建立	108
第 9 章	曲轴设计导航系统的开发及应用	110
9.1	SINOvation 设计导航功能	110
9.1.1	设计导航功能介绍	111
9.1.2	NAVI 与 SINOvation 的通信	111
9.1.3	宏记录辅助功能	112
9.2	设计导航程序运行流程	114
9.3	曲轴设计导航系统开发	115
9.3.1	设计导航文档的制作	116
9.3.2	JavaScript 控制脚本的编码	121
9.4	系统应用	122
9.4.1	新建产品	123
9.4.2	曲拐和平衡块	124
9.4.3	曲轴前后端和油孔	130
9.4.4	曲轴工程图	132
第 10 章	第 II 部分总结	135
参考文献		136

基于 SINOvation 的曲线文字 设计系统开发及其可靠性研究

第 I 部分

第1章

绪论(I)

1.1 引言

随着汽车工业的发展,轮胎产品多样化需求日益增强,所有轮胎必须在外胎胎侧部位标明生产厂家、商标、轮胎规格、层级以及轮胎使用的轮辋等相关信息,并按组的形式分开排列在轮胎胎侧上(如轮胎规格为一组、花纹型号为一组、安全警示为一组等),不同组的字体、字形、大小往往各不相同。这些表达字符内容、字体字形、排列形式和位置等信息的图形称为轮胎胎侧字体排列图,如图 1.1 所示。轮胎胎侧字体排列图是轮胎产品设计图纸中重要的组成部分,其设计效果的好坏直接反映出轮胎产品的外观质量和企业形象。

图 1.1 中,从轮胎胎侧字体排列方式看,文字主要是沿圆弧曲线进行排列,这类文字为曲线文字。曲线文字设计不仅仅存在于轮胎行业,也广泛存在于社会的各个行业领域中,单从文字的分布方式看,行业的不同,分布方式会存在差异。印染和陶瓷花纸等行业开发图案设计系统过程中,用户提出文字沿曲线路径分布的设计要求,如陶瓷行业,要求将一幅文字作为椭圆形盘子的陶瓷花纸,需要将文字沿椭圆路径进行设计。除了指定文字设计路径曲线外,还可以在产品表面设计出具有一定形状的区域,在该区域内进行文字的设计。

另外,随着人们审美意识和欣赏水平的提高,对曲线文字字体设计的要求越来越高,现有的曲线文字设计系统无法满足各个行业的需求。因此,有必要对曲线文字设计系统进行研究。

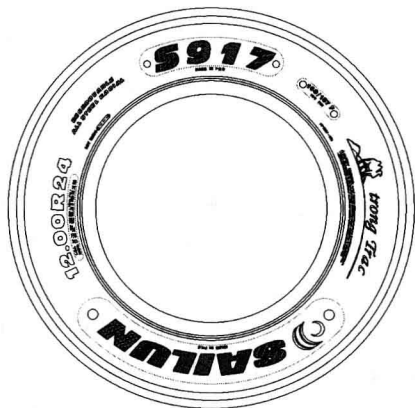


图 1.1 轮胎胎侧字体排列图

1.2 三维 CAD/CAM 软件 SINOVAION 简介

SINOVAION 是华天软件结合日本工业界最佳实践、体现国际最先进设计制造水平的自主版权高端三维 CAD/CAM 软件,是国家支持下与国外优势企业精诚合作的结晶。

SINOvation 具有国际领先的混合建模、参数化设计、丰富的特征造型功能以及知识融接技术,具有独特的设计导航功能,拥有符合工程师工作习惯的设计环境和国际流行的操作界面;拥有经过业界验证的具有国际先进水平的 CAM 加工技术、专业的注塑和冲压模具设计以及国际上独一无二的消失模设计加工、激光切割控制等技术,为模具设计制造提供了全流程解决方案;工业验证的数据交换功能可以轻松获取高质量的数据,提供高压缩比、高质量的轻量化交流格式;支持用户深层次的专业开发,易于将用户的先进设计制造技术和经验软件化。

(1) 强大高效的混合建模、易于使用的装配及工程图设计

在建模方面,SINOvation 提供了基于唯一数据库的复杂曲面和实体特征的混合建模功能,具有很强的曲面创建、填充、编辑能力以及最实用的复杂圆角处理功能,并且对设计模型可进行实时的品质验证和评价。在装配中,它支持自上而下和自下而上的装配建模,具有静态和动态的干涉检查功能。它还能更加快捷地创建符合国标要求的工程图。除此之外,SINOvation 独特的数据自动恢复功能,保证了当系统意外退出时用户的数据完整无损,支持中文文件名,方便国内用户使用。

(2) 独特的设计导航功能

运用 SINOvation 独特的设计导航功能,可以将设计过程录制下来,并用自带专用工具 NaviEditor 生成设计文档和操作脚本;通过另一自带工具 Navigator 实现根据设计文档在软件外部进行模型设计,而不需要直接操作软件本身。除此之外,用户还可以根据企业产品设计过程自行编写设计文档,不仅积累了设计经验,而且大大提高了设计效率。

(3) 经过业界验证的 CAM 加工

SINOvation 的 CAM 模块提供了向导导航与 CAM 浏览器,为初学者或专家提供简单快捷的使用环境,支持二轴、三轴、五轴固定数控钻铣加工,具有丰富的加工策略和强大的路径编辑功能,有详尽的路径干涉检查与加工负荷的计算指示,并且可以自动创建符合用户需求的加工指导书,为其提供加工技术库,支持客户丰富与规范加工资源。还提供了参数化的通用后处理工具,便于用户自由定制。

(4) 专业的注塑模具设计

SINOvation 采用注塑模具设计专业术语,符合注塑模具设计实际流程,能够根据零件的收缩量不同,对模具的局部尺寸进行变形补偿调整。具有自动分型创建功能,可直观地辨认型芯、型腔,并进行自动分离观察。其冷却管道设计直观快捷,并能够自动进行干涉检查,参数化的标准模架库使设计工作更灵活方便,并且提供了专业的电极设计能力及制造功能,大大提高了注塑模具的设计能力及生产效率。

(5) 实用的冲压模具设计

SINOvation 是经过业界验证的基于三维参数化建模平台的冲压模具设计系统,其参数化设计功能和专用功能融合可实现三维模具的快速布局与结构设计,菜单操作简便,用户自定义功能强,可极大地提高模具设计效率和制造质量。还可快速地对模具在机床上的

安装性、吊具的安全性、干涉与间隙等进行检查验证。

SINOVATION 中独特的冲压回弹补偿是冲压模具设计中的一大亮点,利用快速高精度的专业功能轻松实现数模变形,使短时间实现复杂曲面回弹补偿成为可能。利用分析和测量结果可容易地制定高标准的预测回弹对策,大大降低模具制造成本,缩短模具调试周期。

(6) 先进的冲压工艺设计便于灵活的检查与参数化更改

SINOVATION 融合了先进的冲压工艺设计制造经验,采用冲压工艺设计专业术语,提供了拉延件预处理功能。可以自动创建冲压中心、灵活调整冲压方向和实时进行冲压可行性评估,自动创建工艺补充面,易于实现符合用户需求的工艺补充断面线形状的创建和编辑。并且提供了修边线展开及检查评估等功能。

(7) 丰富的数据交换能力

SINOVATION 提供了主流 CAD 软件数据接口的支持,如 CATIA V4/V5、Pro/E、ParaSolid(NX、SolidWorks...)等。提供了标准格式的接口支持,如 DWG/DXF、IGES、JAMA、STEP、STL 等。

三维 CAD/CAM 软件 SINOVATION 包含了国际先进制造企业的设计制造技术与经验,与同类软件相比最注重工程细节设计,其 CAD/CAM 一体化技术保证了设计的高效和产品的质量;工业验证的数据格式转换工具,方便了交流,降低了企业不必要的投资。更重要的是,华天软件拥有 SINOVATION 全部源代码,方便了软件的开发,可为用户量身定做并提供专用的高效设计制造平台。

1.3 曲线文字设计研究现状

下面,主要从字库、字体设计软件和文字设计理论 3 个方面论述该领域的研究现状。

1.3.1 字库的研究现状

计算机字体字库在实际应用中有着非常重要的意义,不仅应用于各种文字平台,而且广泛应用于广告制作、印刷排版、三维动画、辅助设计等领域。字体字库的发展主要表现为格式方面的变化,经历了点阵字库、向量字库和曲线字库 3 个阶段。

点阵字库是将每个字分成 16×16 或 24×24 个点,用每个点的虚实来表示字的轮廓。具体而言,每个字用一个位图表示,位图中每个元素都是一位二进制数,如果字符的笔画经过某位,则该位为 1,且像素为字符颜色;否则该位为 0,且像素为背景颜色,如图 1.2 所示。点阵字库的优点是:保存与显示一致,处理容易,显示速度快,对设备要求低,对系统资源需求少。其缺点是:每种字库都有固定的大小和尺寸,字体种类越多,字形库占据存储空间越大;字库在原始尺寸下使用效果很好,但是,将字库放大或缩小使用效果比较差。

向量字库中的向量字形是在点阵字形基础上,从点阵字形的图像数据中选取最能描述

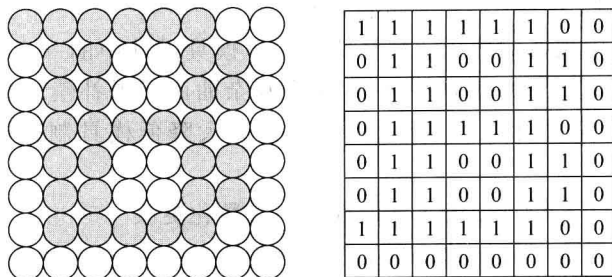


图 1.2 点阵字库

字形特征的点作为关键点,提取出字形轮廓,将提取的关键点按笔画用直线连接,从而得到向量字形,如图 1.3 所示。向量字库保存的是字形的轮廓,具有美观、变换方便、存储量和字大小无关等优点。但是,向量字库存在两大缺点:首先,向量字形轮廓的基本组成单位是直线段,因此,当字的轮廓存在大量的曲线,用直线段来近似描述曲线就产生了失真问题;其次,向量字形轮廓在字形的拐点处轮廓点比较密集,所需要的存储空间仍然较大。

曲线字库是用直线和 Bezier 曲线的集合来描述一个字符的字形轮廓,如图 1.4 所示,可以通过调整控制点来调整曲线的形状。因此,采用曲线逼近向量字形轮廓具有更大的灵活性、更高的适应性、更好的逼近效果。美国苹果公司与微软公司推出的 TrueType 字体吸收了曲线轮廓字形技术的优点,是一种更高水平的曲线轮廓字体,其广泛应用于印刷业领域^[1~3]。

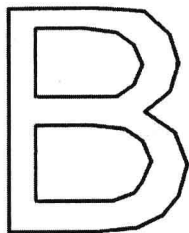


图 1.3 向量字库

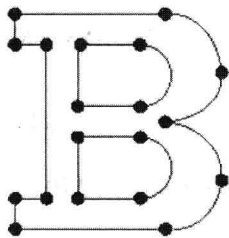


图 1.4 曲线字库

1.3.2 字体设计软件研究现状

当今流行的 CAD/CAM 软件 AutoCAD、UG、MasterCAM、Cimatron、Pro/E、SolidWorks 等都具有字体设计模块(或文本模块)。如 UG“曲线→文本”模块提供了 3 种创建文本方式,分别是平面创建文本、曲线创建文本、曲面创建文本。平面创建文本是指在固定平面上排列文字,曲线创建文本是指沿着曲线的形状排列文字,曲面创建文本指文字绕曲面上线的形状排列^[4]。MasterCAM 提供了 3 种字体: Drafting(D)字体、TrueType(R)真型字体、File(F)文档文字。其中, Drafting 标注文本只能作线性排列,而 TrueType 真型字

体与 File 文档文字可以实现沿圆弧排列。在 MasterCAM 9.0 版中,当使用 Creat→Next Menu→Letters 命令时,会弹出创建文字对话框,在对话框中可以设置文字的类型、对齐方式、字间距等,此外,可以使用主菜单中 Xform→Rotate 来旋转使之对称。在 MasterCAM 9.1 sp2 中, Creat → Next Menu → Add-ins → Txtchain 命令用来处理沿任意曲线排列文字,首先构建曲线,设计出符合要求的形状,然后采用 MasterCAM 绘图中的附加功能方程式文件来操作,使文字沿设计曲线排列^[5~7]。

山大华天的 SINOVAION 软件是三维 CAD/CAM 一体化的具有我国自主知识产权的应用软件系统。该软件具有最先进的混合型建模、参数化设计、丰富的特征造型功能,提供具有国际先进水平的 CAM 加工、冲压模具、注塑模具等应用技术。特别适合汽车、汽车零部件、机床、通用机械、模具及工艺装备等行业的设计及加工应用。其同样具备“立体字”模块,如图 1.5 所示,通过选定基准位置及指定基准位置处的纵横方向,设置输入字符串的字符宽度 W、字符高度 H 及字符拉伸厚度 L,可以实现“立体字”的设计,如图 1.6 所示。

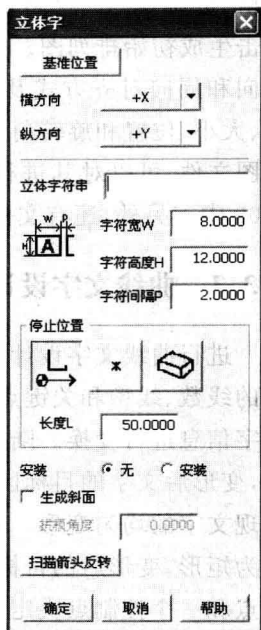


图 1.5 立体字界面



图 1.6 立体字

主流软件通常都留有二次开发接口,以某款设计软件为平台,运用某种开发语言如 AutoLISP 语言、ObjectARX(面向对象的 C++ 开发工具)、ActiveX Automation(面向对象的解释型开发工具)、ADS/ADSRX(结构化的面向过程的开发工具)和 VB 等开发出针对某个行业的文字设计模块。以轮胎胎侧排字系统开发为例,郭俊卿等在 AutoCAD 2000 中,以 VB 6.0 为开发语言,运用 ActiveX Automation 提供的接口,对轮胎模具排字系统进行开发,利用 VB 编程获取排布字体的有关数据(如整块字与每个字的几何中心、字旋转前后的位置坐标、字体大小、字体类型等)、确定各个字的位置、调用 AutoCAD、输出数据到 AutoCAD、实现整块字的旋转、倾角与完全圆弧化^[8~10]。李书晋^[11]在 AutoCAD 14.0 环境中,采用 AutoLISP 语言设计轮胎胎侧字体排列图的计算机程序,该程序由参数输入和图形绘制两部分组成,参数输入采用对话框的形式,参数输入对话框采用控制语言进行描述,对话框由 AutoLISP 语言编写的驱动程序调用。图形绘制程序用 AutoCAD 14.0 内部嵌入 AutoLISP 语言编写。其主要过程为:确定轮胎胎侧字体排列位置→输入绘图所需的参数→根据输入数据绘图→在图上相应部位绘制文字。陈振艺^[12]采用 VB 6.0 开发出一款通用性很强的轮胎胎侧字体图辅助软件 LTSL,用户只需在界面输入一些必要的参数如轮胎的

规格、负荷、压力、轮辋型号和各种标志代号等,或者直接选择一个用户自定义式样,就可以单击生成初始排列图。生成后,可以使用 LTSL 的编辑功能对每个排列项目的字体、大小、径向和周向对齐方式及对齐位置、字符间距等进行整体编辑,也可以对任何一个字符的字体、大小、位置和旋转角度等进行单独编辑。LTSL 能打开以 LTSL 格式保存的胎侧字体排列图文件,可以对其进行进一步编辑修改,也可以直接把胎侧字体排列输入到 AutoCAD 2000 中。另外,还有文件存储、打印、撤销、缩放、视图恢复和密码设置等功能。

1.3.3 曲线文字设计理论研究现状

进行曲线文字设计之前必须首先获取文字信息,文字信息包含轮廓的个数、每个轮廓包含的线数、线型和关键点坐标等。文字设计的基本理论是根据通过某种方式建立的法则对文字信息进行变换。陆海东等^[13,14]提出一种以 B 样条曲线为基础的平面文字自由变形算法,变形后文字的目标区域边界是由若干 B 样条曲线围成,通过对目标区域进行合理分割,实现文字的均匀变形。齐希^[15]提出一种基于 Bezier 曲线的平面字符变形方法,字符的源区域为矩形,变形后的目标区域是由 4 条首尾相连的 Bezier 曲线围成,每条 Bezier 曲线由两个端点和一个控制点决定,用户通过拖动控制点来达到对字符形状的控制。岳华等^[16]提出基于曲线轮廓的汉字字形映射技术,主要介绍了汉字从正方形到任意四边形、环段、Bezier 带及椭圆等形状的映射技术,同时介绍了从正方形向球面和柱面等三维表面的映射技术。陈焯等^[17~20]提出字符连续函数变形算法,其核心思想是根据变形前字符轮廓上各点在字符串整体中位置的比例参数来获得字符变形后新的点坐标,能够较好地保持字符在变形前后的形状特征,Microsoft Word 中的大部分字符变形效果就是采用这种方法。事实上,字符变形算法是图像变形算法的一个分支,只是针对的对象比较特殊,目前人们常用的图像变形算法一般可以分为基于网格、基于骨架、基于点插值等 3 类^[21,22]。网格变形算法是在图像中选择若干特征控制点,建立图像的特征网格模型,通过改变控制点使图像的区域部分在某种规则的约束下自动调整^[23,24]。该方法虽然简单,但是,却不容易得到指定的变形效果,可借助 DFFD 方法^[25]或者建立网格的层次结构^[26~28]来提高变形质量,但是计算量较大。基于骨架的变形通过控制若干特征来改变对象,其中选择的特征被形象地称为骨架^[29],Beier 采用边界附近的轮廓线作为骨架来改变对象,并给出一种基于骨架特征对应的图像渐变方法^[30],D. W. Storti 等^[31]采用体现对象形状地位的几何轮廓作为骨架,比如 2D 对象的骨架是中心轴,3D 对象的骨架是中心面,通过控制低维轮廓来达到改变对象的方法。该方法有时会产生图像失真问题,尤其是当图像较复杂时,难以得到精确的变形效果。基于点插值变形的方^[22,32,33]是指用户通过指定若干特征点的位置,利用插值方法建立特征点的映射关系,进而运用这种映射关系对图像进行变形。该方法整体变形效果好,但是计算速度较慢。于学春等^[34]在此基础上提出了一种基于扫描线的图形变形方法,首先指定原始图像的特征轮廓并获得特征轮廓的控制点,其次对控制点进行调整得到目标图像的边界约束,然后