

目 录

1.1 选题的背景	1
1.2 纺织 CAD 的应用	1
1.3 纺织 CAD 国内外发展状况	4
1.4 纺织 CAD 未来的发展及存在问题	5
1.5 织物仿真的存在的问题	6
1.6 课题的研究内容, 方法及章节安排	8
2 编程语言及工具的介绍	10
2.1 OpenGL 简介	10
2.2 OpenGL 工作原理及流程	11
2.3 三维图像的显示	12
2.3.1 三维图形的绘制	12
2.3.2 场景转换与坐标变换	14
2.3.3 双缓冲技术的原理与运用	16
2.4 颜色、光照、材质的设置	17
2.4.1 颜色的设置	17
2.4.2 光照的设置	18
2.4.3 材质的设置	21
2.5 隐藏面消隐的设置	21
2.6 本章小结	22
3 机织物结构的几何描述	23
3.1 织物几何结构参数	23
3.2 织物内结构受力分析	24
3.3 机织物的 Peirce 模型	26
3.4 平纹织物的几何模型的建立	30
3.5 非平纹织物的几何模型的建立	32
3.6 本章小结	35
4 机织物组织的的计算机模拟	36
4.1 织物组织数学模型	36
4.2 算法实现	39
4.2.1 纱线的产生	40
4.2.2 织物组织的产生	41
4.3 模拟效果图	43

4.4 本章小结	47
5 结论与展望	48
致 谢	49
参考文献	50
附 录	54

1 绪论

1.1 选题的背景

随着世界经济快速发展,各行各业都面临着巨大的竞争,纺织行业犹是如此。现代生活节奏的加快,也导致着人们对生活物质的要求也愈来愈快,愈来愈高。所以谁产品的设计周期短,上市时间快,就能更多地抢占市场的份额。通过织造前对织物外观的仿真模拟,就可以在不需要打小样的情况下,看到所设计面料或者服装的外观,这样不仅大大降低新产品研发的的时间,缩短产品设计周期,而且还能极大的促进纺织技术的发展。因此为了纺织企业能够在风云变化的市场中不断竞争,就必须采用计算机仿真技术,来提高纺织产品的设计效率,减少成品的开发成本、提高市场快速应对能力、增强我国纺织企业的国际竞争能力等都具有深远的影响^[1]。

计算机技术的快速发展以及软硬件的快速更新,各行业的紧密联系使得计算机技术不断融入各行业。而纺织品 CAD (computer aided design for textile) ^[2]。就是运用了计算机强大的信息计算功能、简单实时的方便操作、图像识别处理、海量信息存储、快速计算及显示图形能力,采用人机交互界面,是设计者的想象力,判断力、鉴别力与计算机的优点得到完美融合,这样不仅使设计效率大大提高,又能使设计者能预先了解到织物的外观模拟效果,缩短产品生产周期,取得显著的经济效益和社会效益。

1.2 纺织 CAD 的应用

现代纺织企业中应用的最广泛且最为成熟的设计方法就是纺织品 CAD ^[3]。由于纺织行业包含众多,并无一套能通用的 CAD 技术,在市场经济的作用下,以及多年国内外的研究与发展,纺织 CAD 技术形成一定的规模, CAD 技术逐渐在纺织行业得到推广应用。对与纺织服装行业有关的 CAD 系统目前主要有:小提花 CAD 系统;针织物中的花型 CAD 系统、横机 CAD 系统,经纬编织物 CAD 系统;印花图纹 CAD; 纹织 CAD 系统; 服装 CAD 系统中的款式设计 CAD、修改裁剪 CAD、成品式样 CAD; 电脑绣花 CAD 等。可以看出因为 CAD 软件的应用,使得开发设计有了一个互动的过程,一方面对设计师来说能够更迅速的看到设计的样品,一方面当客户需要发生变化,又可以及时做出调整,充分发挥创造性^[4,5,6,7,8,9,10]。纺织 CAD 分类主要图 1.1 所示。

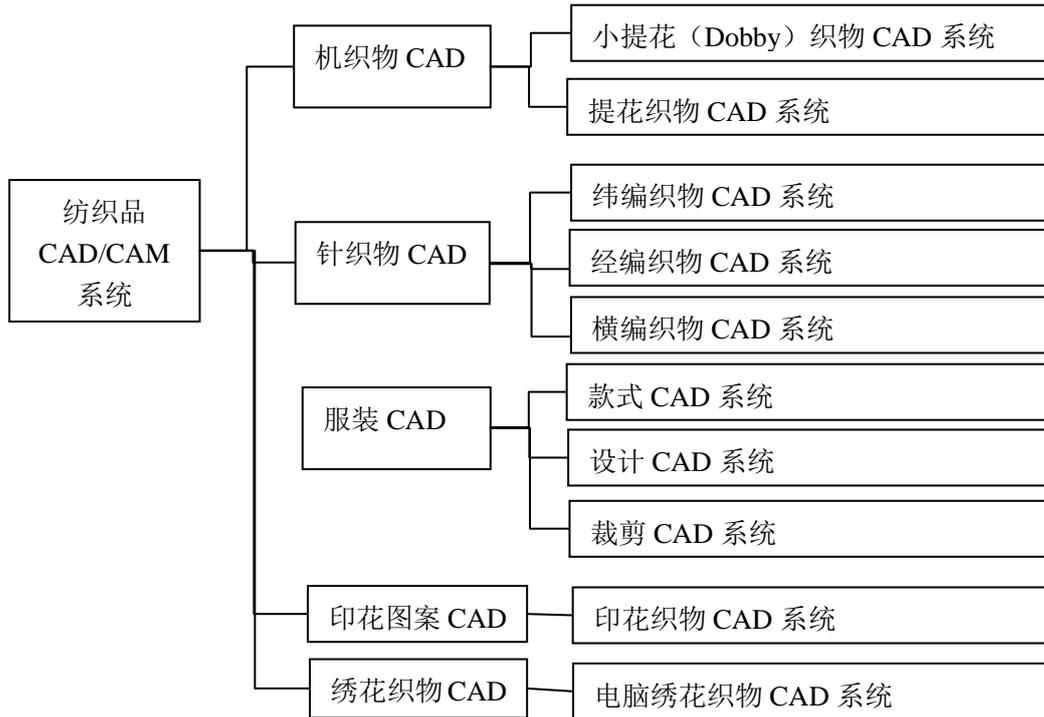


图 1.1 纺织品 CAD/CAM 的分类

(1) 服装 CAD。服装 CAD 是纺织 CAD 的主要应用范围，也是最早应用的技术领域。主要功能有对服装款式设计、结构设计和工艺设计，其中已经比较成熟的有款式设计、样片设计、放码、排料等；应用该系统可在屏幕上任意绘制二维服装款式图，或在事先设定的人体模型上绘制三维服装款式图，系统除能提供足够的色彩以便在款式图上作调色或改色外，在标准化的条件下，还可以与后面将要介绍的织物组织 CAD 系统连接，以便在款式图上显示出织物本身的风格；所谓推挡，便是按不同人体尺寸对输入的衣片自动放码或缩码；排料则是按面料幅宽和服装工艺要求（如对条或对格）自动生成排料方案。它的输出可以是 1:1 的衣片图，也可以是直接控制自动裁床的信号^[1]。

应用服装 CAD 系统，效益是十分明显的。首先，它可以提高用布率，一些企业应用服装 CAD 系统，仅节省布料一项，一年即可节约开支数十万元；其次，可以加快服装设计速度，这对于时尚不断变化的服装市场来说，没有速度就没有市场，而且应用服装 CAD 系统也增加了客户对工厂的信任度。特别是出口企业，不应用服装 CAD 系统，将会失去不少客户的订单。

(2) 机织物组织 CAD，是计算机强力的图像绘制功能与现代纺织技术的完美结合，通过对软件输入织物组织的各种参数就能自动模拟出织物的组织图像。功能比较完善的 CAD 系统不仅能绘制出同种颜色纱线织物，还可以绘制多种不同颜色混纺的纱线、多股异色纱线和一些花色纱线、直径不同纱线交织而成的织物。由织物组织 CAD 系统设计产生一套织物模拟图像只需几十秒到几分钟，而

如果沿袭传统手工打样办法,从设计人员意象中的图样到真正织出一小块样品往往需要好几天,节约了人工成本,提高了设计效率,大大缩短了设计周期。

(3) 印花图案 CAD 系统,是用计算机软件对织物印花图案设计与处理,可以利用软件提供的画笔工具和一系列的动作包含复制、粘贴、剪切、旋转、放大、缩小等,手动生成图案;或者由用户采用工具进行组合创作系统提供的基本形状和简单花型;或者通过彩色画稿扫描到计算机,由计算机对图像进行颜色的添加、纹理的添加等。还可以实现分色配色功能^[12]。

(4) 针织 CAD 系统,主要包含针织圆机 CAD 系统和针织横机 CAD 系统。针织圆机 CAD 系统,用方格来表示针织物线圈,用指定的符号画在方格内,以模拟针织物线圈组织规律;还可以通过计算机系统对花型进行设计,将其转换为通用的数据格式生产;针织横机 CAD 系统,则通过操作人手动输入各类数据,对不同的针织物进行样式设计。系统可以根据织物样式、织物密度、组织及不稳尺寸计算,同时生成上机工艺单,同时计算出产品克重、用纱量和成本。

(5) 绣花 CAD 系统,一般在单头绣花机或者多头绣花机中使用,对绣花样进行计算机智能设计,首先设计出的花样的格式,再由软件将花样转化为绣花机的绣花针法,生成绣花机可以使用的纸带或磁碟^[13]。

目前纺织 CAD 的功能主要有纱线的计算机仿真,主要是模拟仿真纱线外观颜色效果等各种属性;设计机织物组织,包含对基础组织、变化组织,联合组织、复杂组织的大部分组织的设计;针织物组织及花型设计,主要是提花型和结构花型的设计与开发;纺织品印花图案设计,对设计好的组织通过计算机实现花纹图案的印染;以及服装计算机辅助设计,包含着服装设计所有部分,例如服装款式设计,服装工艺设计和服装结构设计等^[14]。

(1) 织物组织的设计:包含着组织图形的绘制、组织图的运算及自动生成、通过不同组织排列合成新组织或绘制新组织、以及在文件库中直接调用。最大的优点就是简单直观的将设计者的作品快速显示。支持对输入的组织图进行关系矩阵分析,并生成穿综图、纹板图、穿综方案或者根据穿综图、纹板图生成组织图。

(2) 织物的纱线设计,通过对设计者所需要使用的各式纱线的仿真,包括普通纱线,混色纱线及花式纱线的仿真。通过对织物中纱线的颜色、捻向、捻度进行设计,根据一些存在参数绘制纱线仿真图形,有的可以模拟出纱线的绒毛。同时生成的纱线图像可以存进数据库,以便日后操作调用。

(3) 织物外观的模拟,在织物组织和纱线模设计完成后,根据选定的参数,对织物进行一个模拟外观仿真,设计者通过仿真可以观察到产品的真实效果,这样可以节省打小样的成本与时间。

(4) 织物的工艺设计,根据设置所选定的参数,系统自动计算综幅、综号等等。

现有的织物 CAD 中对织物外观的真实感的模拟基本上停留在平面的基础上, 而我国起步较晚, 对织物外观的真实感的模拟的技术还不完善, 目前的织物 CAD 外观模拟功能的效果主要缺点就是三维立体感和真实感不够强。以织物的最终效果来指导织物设计是未来设计的路线, 同时还能使设计师能够通过虚拟现实仿真体验织物的最终效果^[15], 以前这种希望只有在试生产织物小样并制作成织物后才能实现, 因此开发出能够真实模拟织物外观效果的 CAD 势在必行。

1.3 纺织 CAD 国内外发展状况

对于纺织品的第一印象, 大多数会第一时间想到的是纺织品的纱线、纤维、染配色或者制作工艺, 这些对于产品的创新来说颇为重要, 但是如何及时根据消费者需求动态、市场供给导向做出快速反应对于才是迅速占领份额的关键。从很大程度上讲, CAD 技术在纺织行业就是扮演了这样的一个角色, 是企业能够快速设计和更新产品^[16]。

织物模拟领域, 由于计算机在国外的纺织行业中普及较早, 在此领域的研究及开发的时间也远比国内早, 因此研究水平处于领先。如美国和德国很早就开发出了能够模拟织物组织的三维效果图的机织物 CAD。如美国罗姆公司的机织物 CAD 系统, 能设计合适的各种织物颜色、规格、图案, 满足不同用户的不同要求; 德国 CIS 公司开发的 Design3 CAD 系统能够在纱线开发的基础上模块化操作, 对模块进行颜色纹理初始化, 并在仿真中进行调用修改; BONAS 机械制造有限公司研发的人机互动开放式提花 CAD 系统能够模拟开发各种多种提花图形, 在设备终端上予以显示, 同时设计者能够以光标等形式进行快捷修改; 在多臂机上, 苏格兰纺织学院研发的计算机辅助设计系统, 能够提供大面积的图案设计区域, 并能真实的模拟出织物的表面质感; ETA 公司研发的织物仿真系统能够对织物纱线的细小纹理做完美的示意, 其中纱线的路径、织物整体的外观绒质感、纱线空间的偏移与隐藏等织物多种表面的外观特点。

国内方面由于起步相比国外晚, 开始是从国外例如美国格柏 (Gerber) 公司引进一些系统进行学习分析。同时, 国内不少于 10 家的科研院所、高等院校在国外产品的基础上消化吸收, 再开发一批我国有自主知识产权的系统。这些单位经过多年的市场竞争, 目前软件拥有了比较完善的功能, 亦具有相当的市场规模。例如杭州爱科公司、原航天部 710 所等; 在印花 CAD 中, 应用较多的出现在棉印、丝绸、装饰、巾被等厂家。例如杭州凯地丝绸公司在应用 CAD 之后, 印制出的真丝挂历、壁画、真丝报纸等、文字清晰、图片精美。传统人工很难达到这样的高度; 纺织物的 CAD 系统受欢迎的有山东宝铃公司、浙江大学纹织 CAD 系统。应用厂家有北京毛巾厂、青岛毛巾厂、南充丝绸集团等; 在织物 CAD 方面, 有中国纺织科学院研究开发的织物组织 CAD 系统、上海毛麻研究所等都有

着广泛的应用范围。在最终织物布面效果应用方面,上海印染技术研究所和石家庄第一印染厂的技术发展较快,可以通过虚拟试衣展示图案人体穿着效果。

1.4 纺织 CAD 未来的发展及存在问题

通过计算机对织物的外观特性进行三维仿真模拟,就需要与纺织品 CAD/CAM 高度地融合,同时还要和我国纺织 CAD/CAM 的未来的发展趋势保持统一。需要注意的是,纺织品 CAD/CAM 系统的飞快迅猛发展,并非是纺织业的高速发展而带动的,而是因为计算机技术的世界范围的更新,这样 CAD 系统中纺织技术的含量还不是很。如果不仔细地研究纺织的独特之处,区别出其他行业,否则纺织 CAD/CAM 也只能处在浅层的应用方面,达不到真实、实用的地步。纺织 CAD 更好的推广及普及纺织 CAD 系统,以后的发展趋势应该包含以下几个方面:

(1) 使 CAD(计算机辅助设计)、CAPP(计算机辅助工艺过程设计)、CAM(计算机辅助设计)更好的实现无缝连接,让不同系统之间信息的传递更加快捷准确,最大限度提高纺织产品的设计生产效率、缩短产品设计与生产周期。同时需要系统高度集成,可使设计与生产过程自由的转换,设计者随时可以对方案进行微调,一方面不用到车间就能了解到生产情况,提高产品质量,另一方面也方便厂家实施全自动生产,提高生产效率,降低生产成本。

(2) 纺织 CAD 与服装 CAD、纹织 CAD 或者印花 CAD 系统的组合。设计者不仅可以看到织物的外观效果,而且还可以看到所设计产品针对不同样式的服装的最终的外观模拟。

(3) 趋于网络的发展。随着因特网的在世界范围内迅速发展,企业也应该充分利用网络信息交换速率快的优势,对企业内部实现资源信息共享,对企业内部的资源进行合理调动与配置,和谐调用企业内部资源。同样,为了利于最终产品的推广和终端的销售,方便对客户信息的反馈收集,纺织品 CAD/CAM 的软件系统还要支持联网,这也是未来发展的重点。

(4) 往智能方向发展。开发出一套能进行自我学习自我记忆的功能的系统一直是纺织 CAD/CAM 的发展方向。当只需向系统输入要设计织物的几个关键字,系统就能准确而迅速的将方案设计出,设计者只需在此基础上查缺补漏,完善设计。这样的智能系统不仅能降低开发设计难度,而且能极大的提高新产品的开发周期与效率。

(5) 企业信息化发展。通过系统,使企业中的各个环节或者因素能有效的结合,包含供应商、客户及企业内部、各环节的信息集成,实现资源共享和前台到后勤的信息畅通,从材料的采购到产品的生产,从物流的配送终端的销售,提高企业快速反应能力。

同时还有一些其他的发展,例如对织物最终应用效果显示,比如模特穿着效果,或作为床单、被套、窗帘、桌墙布等的室内装潢效果图;直接与纺织机械接口,设计文件和数据文件直接输入纺织机械电子控制模块进行生产,即产生 CAD/CAM 集成^[17]。

1.5 织物仿真的存在的问题

通过以上的介绍,可以看出,机织物外观模拟是机织 CAD 系统的一项重要功能,一方面能使设计者充分理解织物的真正结构,另一方面仿真又能减少织小样所带来的时间与材料的消耗,节约不必要的成本。常见的二维平面仿真方法有:配色模纹法、纱线纹理设计的外观模拟法、织物空间结构与光亮度计算的织物模拟法等^[18,19,20,21]。

这些方法所模拟出的效果与真实情况相比,存在着较大的缺陷,对织物内纱线的空间交织不能完美呈现,也不能清楚的展现织物的纹理特征。因此,国内很多科研机构、高等院校相继开展了机织物的三维仿真模拟研究,也有一些成果问世:

H. Y. Lin、A. Newton 以 B 样条曲线为基础,以圆形模拟织物中纱线的横截面,计算出不同密度、不同屈曲波高的简单组织织物,并进行仿真模拟^[22]。

Tian Yi Liao 运用 CAGD 技术(计算机辅助几何设计 Computer Aided Geometric Design),将纱线简化成实心状圆柱体,用三角函数曲线建立经纬纱线的纵向屈曲形态,纱线截面设定圆型、椭圆型、跑道型三种形态,分别进行织物的计算机仿真^[23]。

郑天勇教授在他的博士学位论文中,详细分析了机织物的组织结构,充分肯定织物组织中浮长线的重要作用,对组织的凹凸、花纹的形成有相当重要的影响:浮长线在组织中产生对纱线一个分离、拉拢作用,导致纱线在织物中凹陷或凸起;或者使同一浮长线覆盖下的另一个系统的几根纱线产生移位现象;或者将处在不同浮长线内另一个系统的多跟纱线拉伸开甚至挤压成孔洞状;理论上浮长越长,此浮长处经纬纱线在三维场景中 Z 方向上的凹凸程度越大。以 3 次 B 样条曲线模拟纱线的屈曲形态。织物表面的光照明暗程度则运用 Gouraud 光照模型进行计算,一方面绘制通过组织和光照呈现出织物表面的凹凸状况、纱线的屈曲和纱线原材质,一方面又以消隐技术完善空间中不可见纱线的遮挡与消除,得到织物的三维模拟仿真图^[24]。

王君泽等采用在 Auto CAD 14.0 图形平台上的 Visual Basic 5.0 语言编程,分析织物中纱线受到的三种屈曲力:使纱线发生起伏的垂直于织物表面的力、与织物表面平行但分别垂直经纬纱线的力,并建立了相应的纱线受力模型。在此基础上,建立纱线的三次 B 样条曲线,结合圆形的纱线截面完成对经纬纱线空间交织状态的三维模拟^[25]。

刘基宏等从设计三维纱线总体框架开始,通过织物组织结构参数和纱线参数建立纱线中心的控制点,以线段方式连接控制点组成纱线屈曲形态中心轴曲线,构造出纱线在三维空间的交织状态。以纱线为中心,在纱线周围取 15 个不同的二维坐标点进行,再将这些点彼此首尾相接构成纱线的截面形态。在 OpenGL 中给模拟出的织物添加场景真实感元素。对于纱线表面纹理则采用位图读入的方式,位图文件来自对纱线纹理图片的扫描^[26]。

吴奕立、颜钢锋运用正弦函数描述纱线轴心线屈曲状态,定义纱线截面形态为椭圆形,光照采用 OpenGL 标准模型—Phong 模型,通过对纱线表面各个结构点的分析,计算出光照的一系列的参数,得到纱线表面的每个点的明暗度^[43]。利用正余弦方程构造纱线屈曲方程能模拟出纱线的形态,但与织物内纱线实际的屈曲状态不完全重合,而且应用范围较小。

诸葛振荣采用 Visual Studio C++6.0 平台下结合 OpenGL 函数库进行模拟,理论依据为纬纱大多数粗过经纱很多,跟经纱相比,看起来纬纱的弯曲度要比经纱小很多,故假定纬纱无弯曲,认为经纱围绕纬纱上下波动。组织的不同导致纬纱分层,判断在同一层的纬纱,在显示时可按纱线在同轴线同一水平面上进行计算,不同层次的纬线之间应留有相当的空隙,以便观察纱线的交织关系。以 Peirce 理论为依据,建立三维坐标下的几何模型,最后经、纬纱线的表示为一个个圆柱体套接起来的方式完成对织物经纬纱的三维模拟^[27]。

祝双武以可视化面向对象程序语言 Delphi 作为开发工具,并建立仿真技术 CAD 系统。把经纱交织状态下纱线轴心线的屈曲形态看成一条有规律的三角函数曲线,纱线的屈曲波高即振幅,是由纬纱的几何密度和经纱的连续浮点决定的,以椭圆形截面来模拟纱线的截面形态;系统由图片文件编辑模块、组织图生成模块和织物外观模拟模块三个模块共同组成^[28]。

朱华健等人在现已经完成的织物模拟平面图形基础上,以贴图方式将平面模拟图形作为纹理贴在曲面上,从而达到织物的纹理效果。利用 NURBS 曲面,构造织物的褶皱卷曲形态。最后利用 OpenGL 技术,通过视角变换、场景变换等,对织物模拟效果进行全方位、多角度的模拟^[29]。

苏州大学的秦芳采用多项式拟合对纱线的中心轴曲线进行模拟,曲面采用二次曲面方程构造,以 Visual C++6.0 配合 OpenGL 图像开发库实现三维图像的绘制、转换、旋转等。以多项式函数表达形式上看起来也较简单,而且便于计算和模拟^[30]。非平纹组织则在平纹基础上结合直线进行绘制,总体效果能够达到,但是具体细节方面须待改进。

综合以上国内外的分析,可以看出,在织物外观的计算机三维模拟中,总的方向就是首先要分析织物纱线的空间走向,选择合适方式来进行描述。模拟中大多采用的截面是椭圆或者圆形,屈曲形态多为三角函数、B 样条曲线或多项式方程^[31,32]。

1.6 课题的研究内容，方法及章节安排

织物组织并非是一个二维平面，需要以三维模拟才能更真实的体现出织物中纱线的交织状况和空间走向；同时织物外观不仅仅是纱线颜色和材质的简单模拟，还需要考虑到在织物内部由于受到各种力导致织物形成凹凸不均的花纹；对纱线的空间走向的模型不能只用 Peirce 模型来解决^[33]。织物的表面并非是平平整整，而是一个凹凸起伏状，这些影响到织物的光照效果，最终影响到织物的实际外观。显然，简单的二维模拟很难表述织物的起伏凹凸的花纹、表面的阴影明暗效果。要能使机织物的模拟更加趋近于织物的真实形态，就应该采取织物三维模拟方法。

本文的研究内容就是建立一些能够完成对部分织物组织的外观计算机三维模拟图像，为进一步模拟比较复杂的织物组织和外观指导一些有建设性的思路。研究的内容如下：

(1) 在 Peirce 模型基础上，仔细研究机织物几何结构模型，通过已知的某些参数，计算纱线上组织点的初始位置，计算出由浮长线作用导致纱线上各组织点的最终位置的三维坐标系中初始位置的偏移量，加上 Peirce 模型计算出的纱线上各个组织点的原始坐标，再结合线密度、纱线直径、纱线压扁系数等已知参数就可以得出最终坐标位置；最终用曲线拟合的方法，得出纱线的空间几何形态。

(2) 依据计算机图形学原理，结合 OpenGL 光照、颜色、材质、纹理等设置模型，对织物表面进行颜色添加、场景光照模拟、材质的处理，表现出织物表面不同的凹凸程度的明暗程度。

(3) 对模拟效果进行放大、缩小、旋转等操作，使图像能够在空间中多视角的展示。

本文研究方法：首先，分析织物中经纬纱线受到挤压状态，得出合适的截面模型；再分析被平行于织物表面却垂直于经纬纱的力以及浮长线因素造成的纱线移位与分离拉拢状态，得到纱线的中心轴的屈曲轨迹。然后应用计算机图形显示方法，研究织物表面上点的明暗变化规律，建立织物表面光照模型。通过 OpenGL 编程方法，并对比已有的研究成果，提出改进方案，实现织物外观的计算机模拟。

本文的章节安排如下：

第一章 绪论部分，主要阐述当前织物 CAD 的应用范围、功能特点、技术水平、以及国内外织物仿真模拟的研究部分，和本论文的研究方法和内容；

第二章 介绍编程语言 OpenGL 函数应用库的应用，以及在本文中的地位；

第三章 介绍机织物的一些特征参数，在 Peirce 理论的基础上和浮长线对织物结构的影响下，寻找合适的能够模拟出纱线屈曲形态的数学描述；

第四章 在 Visual studio C++6.0 编程工具下，利用 OpenGL 语言，编写程序，实现对织物几何结构的模拟，并展示模拟效果；

第五章 总结论文的工作，提出不足之处以及未来的研究方向。

2 编程语言及工具的介绍

2.1 OpenGL 简介

OpenGL（即开放性图形库 Open Graphics Library）是由 SGI、IBM、SUN 等多家公司联合推出的一个以 SGI 的 GL 三维图形库为基础的通用共享的开放式三维图形标准。OpenGL 常常被称为“API（应用程序接口，Application Programming Interface）”。这个接口是程序员可以调用的程序，利用 OpenGL 可以编写很多很强大的图形，如今已经称为三维图形的标准，广泛的用于游戏，医学影像、地理信、气象模拟等方面，是高性能图形和交互性场景处理的行业标准^[34]。

严格来说，OpenGL 应该定义为“一种图形硬件的软件接口”。从本质上说，是一个 3D 图形和模型库，一方面具有跨平台的高可移植性，一方面又具有非常快的渲染速度。利用 OpenGL 创造出来的 3D 图像，其视觉质量可以接近于光线追踪仪，符合现实中光学原理，非常适合模拟仿真。OpenGL 主要功能如下：

（1）建模：OpenGL 图形库包含基本的点、线、多边形的绘制函数，还能提供复杂的三维物体，诸如球体、锥体、多面体、茶壶等，复杂曲线和曲面，例如贝塞尔（Bezier）曲线和表面、非均匀有理 B-样条（NURBS）曲线来绘制函数。

（2）变换：包括模型、视图和投影操作，他们由矩阵乘法表示。这些操作包括旋转、移动、缩放、发射、正投影和透视投影等^[35]。

（3）颜色模式设置：包含 RGB 显示模式和颜色索引模式，前者颜色显示数量有帧缓冲区的位平面（bitplane）数量决定，每个像素一个位平面表示一位数据，8 个颜色位平面，每个像素使用 8 位来表示，一共可以显示 $2^8=256$ 中不用的颜色；后者则类似画家调色板混合颜料，准备根据颜色编号绘制场景。

（4）光照和材质：属于 OpenGL 创造 3D 图像的核心所在，可以说正是因为 OpenGL 中出类拔萃的光照和材质功能，才能奠定 OpenGL 图形学中强大的地位。OpenGL 的光照模型把光分为 4 种独立的光：环境光(ambient)、散射光(diffuser)、镜面光(specular)和发射光(emiitted)。对于某个图形，可以说它的表面是有颜色的，其颜色是有反射光的材料组成，还必须指定这种材料对于环境、散射和镜面光源的散射属性。

（5）纹理贴图：通过将现实中的图像，映射到一组多边形构成的表面上，也可以把它贴到曲面上，还可以在一个或者多个方向重复应用同一个纹理来覆盖整个表面。另外还可以把纹理图像自动映射到物体上，用它表示被观察物体的轮廓线或者其他属性。从细节上表现物图的真实感，是通过把图片细节映射到三维图形表面来体现。

（6）位图显示与图像增强：绘制像素、位图、字体、图像，并提供混合、抗锯齿等明显增加模拟真实度的操作。

(7) 双缓存动画：以两个缓冲区进行绘图。当一个缓冲区被显示时，另一个正在进行绘图。

OpenGL 的主要特点在其图像质量高，开发出的图像不仅美观而且真实；拥有国际通用的标准，唯一真正开放性的、独立性与硬件厂商的跨平台标准；拥有良好的可控性与稳定性；利用开源性可以随时的扩充 API 函数，适应最新的硬件发展和绘图要求；API 接口丰富，程序代码简单高效，无需额外更多的封装信息。

2.2 OpenGL 工作原理及流程

一个完整的窗口系统的 OpenGL 图形处理系统的结构为：通过最底层的图形硬件（依赖于硬件，但独立于硬件），由操作系统进行分配合理的资源，经由窗口系统调用 OpenGL 函数库，最后实现应用软件的图像处理。如图 2.1 所示：



图 2.1 OpenGL 图形处理系统

OpenGL 最主要的工作，就是将二维及三维的物体描绘至帧缓存。绘制原理如图 2.2 所示。用户指令首先将几何顶点数据（模型的顶点集、线集、多边形集合）存入求解器，在求解器中对几何顶点数据进行操作和图元组装。很多指令可被安排在显示列表中，通过评价器计算输入值的多项式函数，为近似曲线和曲面等几何物体提供有效手段。和几何顶点数据不同的图像像素数据（像素集、影像集、位图集等），是由像素操作后直接入光栅化处理，最后这两种处理过的数据流都写入帧缓冲器中。几何顶点数据和图像像素数据即可以马上进行处理，又可以存储在显示列表中延迟处理。

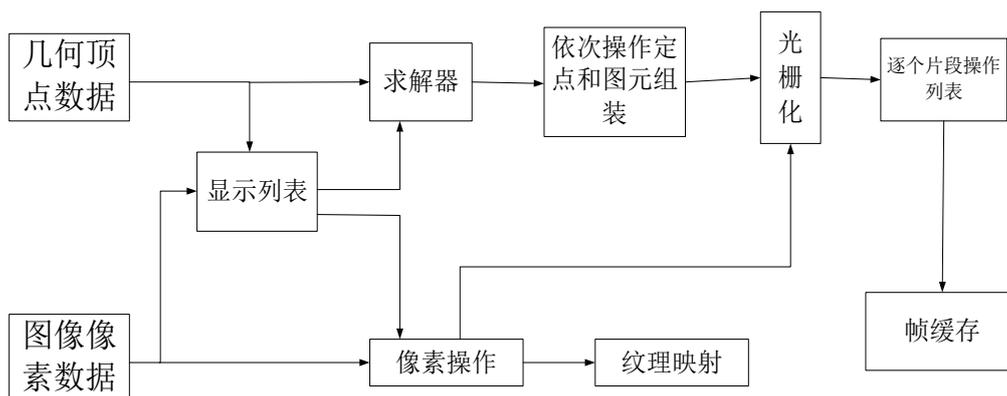


图 2.2 OpenGL 的绘制原理

求解器提供了一种方式，只需要用少数的控制点来制定曲线或曲面表面（或其中的一部分上的点），就可以按照多项式映射来渲染曲线或曲面。此外还可以自动计算表面的法线向量。还可以按照多种方式使用求解器返回的点，例如绘制点状表面、绘制线框表面，也可以绘制进行了完全的光、着色甚至纹理处理的表面^[36]。

OpenGL 要求把所有的几何图形单元都用顶点来描述，这样运算器就可以针对每个顶点分别进行计算和操作，然后进行光栅化形成图形碎片；对于像素数据，像素操作结果被存储在纹理组装用的内存中，再像几何顶点操作一样光栅化形成图形片元^[37]。

将几何顶点数据、图像像素数据对应到各自的处理过程全部由很大数量的状态设定来控制。这些状态在整个绘制系统中不会因为设置其中一个状态而影响到其他状态。这个就是用来更新帧缓存内容的状态机。

2.3 三维图像的显示

在计算机中显示图像，基本步骤包含设置像素格式、建立景物模型、舞台布景、效果处理，最后经光栅化处理存入帧缓冲区。通过帧缓冲区就可以将里面存储的图像显示的显示屏上。

2.3.1 三维图形的绘制

在 OpenGL 中，任何图元都是一组顶点基本数组（点集、线集、面集）的集合，然后由这些基本集合组成了计算机屏幕上显示的任何图形。OpenGL 可以通过内置的 10 种图元绘制函数，包含从最简单的一点到任意数量边的闭合多边形。具体绘制函数见表 2.1 所示：

表 2.1 几何图元的名称和定义

函数名	函数含义
GL_POINTS	单个的点
GL_LINES	连接两个顶点，画一条直线
GL_LINE_STRIP	一系列的连接直线
GL_LINE_LOOP	第一个顶点和最后一个顶点彼此相连的一系列直线
GL_TRIANGLES	连接三个顶点，成为一个三角形
GL_TRIANGLE_STRIP	一系列的三角形
GL_TRIANGLE_FAN	连接成扇形的三角形系列
GL_QUADS	连接4个顶点，成为一个四边形
GL_QUAD_STRIP	四边形的连接串
GL_POLYGON	任意的3个以上的点链接为简单的凸多边形

这些绘制函数的前提是需要程序的 `glBegin()` 和 `glEnd()` 之间描述了 n 个顶点 ($V_0, V_1, V_2, \dots, V_{n-1}$)，这些顶点包含的最重要的信息是它们的坐标，这些坐标由 `glVertex*()` 函数制定。

```
void glVertex[234]{sifd}(TYPE coords);
```

```
void glVertex[234]{sifd}v(const TYPE* coords);
```

此函数指定了一个用于描述几何物体的顶点。既可以提供一个只包含 2 个坐标的 (x, y) 的顶点，又可以提供包含 4 个坐标 (x, y, z, w) 的顶点，如果选择的函数版本没有显式的指定 z 或 w ， z 就会默认 0， w 则当作 1。

当指定好顶点后，就可以利用表 2.1 的函数进行绘制基本几何图元。可以对顶点进行平滑连接组成直线，或者组成各种多边形。同时可以对定点的集合进行自定义。例如我们定义函数

$$f(x) = e^{-|x|} \cos(2\pi x)$$

为了绘制函数，可以简单的在 x 值闭区间 $[0, 4]$ 中进行采样，顶点坐标就可以用 $(x, f(x))$ 来表示，这样在每一个 x 值对应的 $f(x)$ 处画一个点。在连续的 x 值之间就可以得到一个平滑曲线，算法如下：

```
glBegin(GL_POINTS);
  for(GLdouble x=0;x<4.0;x+=0.005)
    glVertex2d(x, f(x));
glEnd();
glFlush();
```

函数图像如图 2.3 所示：

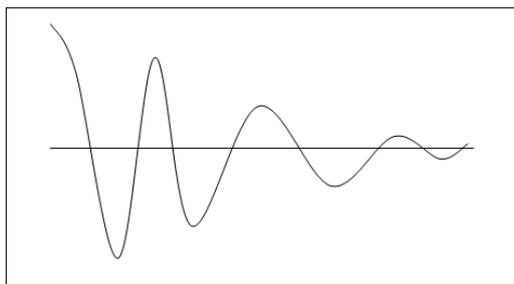


图 2.3 $f(x)$ 对 x 的函数图像

从上可以看出，在 OpenGL 中，我们定义无数个点，将当点的集合够密够多时，就可以形成一条平滑曲线，对于特定的函数或者一些有规律的图像就可以采用此种方法在这个函数绘制不存在问题，但结果会出现一个意料，那就是函数图像将非常小，因此就存在一个坐标转换以及场景造型问题。

2.3.2 场景转换与坐标变换

对于绘制一个真实的物体，首先就必须建立一个适当的坐标系。坐标系可以分为局部坐标系、场景坐标系、视点坐标系以及屏幕坐标系。而在绘图过程中，四种坐标系依次进行转换，因而就存在布景坐标变换、取景坐标变换、以及投影坐标变换。

OpenGL 中，通常认为一个坐标系就是从原点出发的三个轴，但实际上，坐标系是位于“世界”中某一个位置的，这个位置可以位于任意处，它的三个轴一般为三个相互正交的向量，如图 2.4 所示。一个坐标框架应该包含一个原点 ϕ ，和三个互相正交的向量 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} ，如图所示。现在为了表示向量 \mathbf{v} ，可以找到三个数 (x, y, z) ，使这三个数满足：

$$\mathbf{v} = x\mathbf{a} + y\mathbf{b} + z\mathbf{c} \quad \text{式 (2.1)}$$

并就可以称 \mathbf{v} 在这个坐标中表示为 (x, y, z) 。

而同时，针对于点 P ，可以看作是由原点通过一定量的偏移产生的，用三个数字 (p_1, p_2, p_3) 来表示向量

$$\mathbf{P} - \phi = p_1\mathbf{a} + p_2\mathbf{b} + p_3\mathbf{c} \quad \text{式(2.2)}$$

变形得

$$\mathbf{P} = \phi + p_1\mathbf{a} + p_2\mathbf{b} + p_3\mathbf{c} \quad \text{式 (2.3)}$$

这样点 P 的表示不仅是一个三元组，而是一个三元组加上一个原点，说明点 P 处于从原点偏移 $p_1\mathbf{a} + p_2\mathbf{b} + p_3\mathbf{c}$ 的位置上。这样做的是为了让坐标系的原点“明确化”。这在有多个坐标框架和从一个坐标框架向另一个做转换时非常重要。

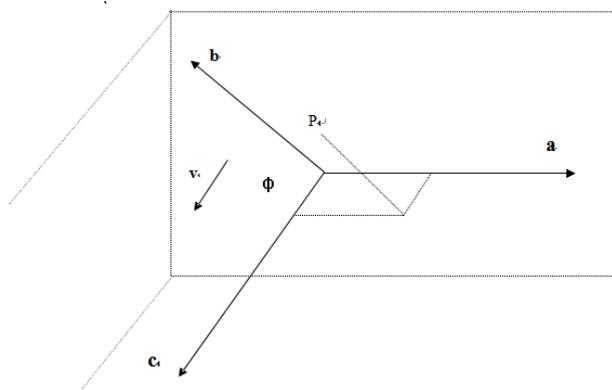


图 2.4 一个坐标框架

对于同一个变换，我们可以通过相对或者绝对的方式来看待。相对变换就是按照原坐标系重新定义一个新的坐标系，在新的坐标系中重新表示物体所有的点。绝对变换就是物体直接变换。在这种变换中，处于最底层的坐标保持不变，对物体上所有的点作一种相同的改变规则。这两种变换紧密联系，都有各自的优点，但他们实现的不一样。

在屏幕显示指定顶点之前，会发生视图转换、模型转换和投影转换。视图是指对于一个特定的物体，观察者或者照相机存在的位置；模型则用来在所创建的坐标系对物体进行位置的移动等基础操作；投影的用途在于可以对观察区进行裁剪和缩放动作。实际上，三种转换都是对定点的矩阵和转换矩阵相乘而产生的新的坐标系。从图 2.5 可以看出，从原始的顶点数组显示屏幕坐标上的过程相当复杂，首先便是需要将顶点数组转化为一个矩阵，包含 x 、 y 和 z 坐标，以及一个缩放因子 w ，默认为 1.0。接着源顶点数据乘以模型视图矩阵，就可以得到视觉坐标，此视觉坐标为经过转换过的。视觉坐标乘以投影矩阵，可以得到一个裁剪坐标。最后就可以通过一个视口转换映射到一个显示屏中。

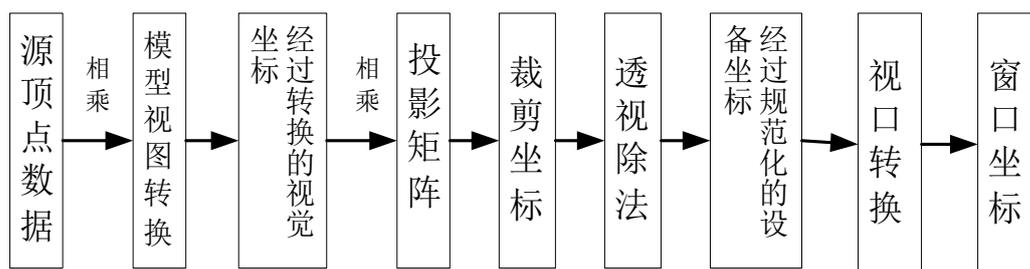


图 2.5 顶点转换流程图

在图 2.5 中，模型的视图矩阵为一个 4×4 的单位矩阵，表示为转换过的坐标系，物体的放置与方向设置都在这个坐标系中完成。顶点则提供为单列矩阵的形式。模型视图的转换的实际上就是将顶点的单列矩阵与模型视图矩阵相乘，产生了与视觉坐标系相对应的经过转换的新坐标。具体的动作表现为对物体的移动、旋转以及缩放^[38]。

`Void glTranslatef(GLfloat x,GLfloat y,GLfloat z)`, 表示物体分别沿着三个坐标轴所移动的数量, 之后创建一个合适的模型视图矩阵, 执行乘法。

`Void glRotatef(GLfloat angle,GLfloat x,GLfloat y,GLfloat z)`, 表示使物体以由参数 `GLfloat x, y, z` 所构成的向量为轴进行旋转, `GLfloat angle` 就是旋转的角度, 单位为角度, 方向为逆时针旋转。

`Void glScalef(GLfloat x,GLfloat y,GLfloat z)`, 是分别沿着 X、Y、Z 轴对物体的所有定点进行缩放, 缩放倍数为 `GLfloat x, y, z` 值的大小, 既可以进行一个整体同倍率的缩放, 又可以进行局部的缩放。

2.3.3 双缓冲技术的原理与运用

当在绘图过程调用绘图函数时, 进行屏幕显示时是调用显示函数实现。当窗口需要重新绘制下一幅画面时, 必须先用背景色将显示区擦除, 然后再调用绘制函数, 而背景色一般都不会与绘制图形的颜色相同, 而且有时候反差特别大, 这样在背景色与显示的图形在屏幕上交替出现, 人眼识别起来就会觉得屏幕在闪动。如果将背景设置成 `NULL` (表示"空"), 这样无论怎样重绘图形都不会闪了, 但是, 这样做会使得窗口的显示乱成一团, 因为重新绘制图形时, 系统并没有对原先的图形颜色用新的背景色覆盖, 在此基础上又添加最新的图形。按照这样的一个绘制机制, 每次对组织图重新绘制时, 会造成一旦刷新, 屏幕就会有会闪动, 用户根本无法看清, 所以需要采用双缓冲技术来解决这个问题^[39]。

双缓冲就是除了图形显示在屏幕上, 而且存储在内存中。这样当需要显示图形时, 系统会从内存中直接调用图形显示在屏幕上, 整个过程的时间非常短, 几乎不需要对背景颜色进行覆盖或者清除, 而且用户也不会感到整个屏幕的闪动, 因为看不见。当贴到屏幕上时, 因为内存中最终的图形与屏幕显示图形几乎没有差别, 这样看起来就不会闪。

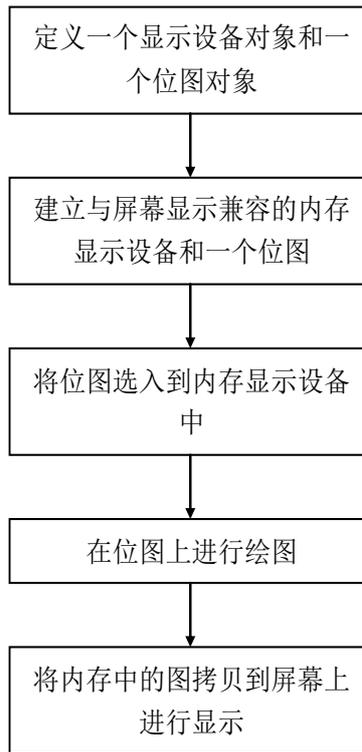


图 2.6 双缓冲程序实现步骤

2.4 颜色、光照、材质的设置

在现实世界中，物体的基本特征不仅是其特有的外形，还有基本的材质、纹理和颜色，还有一个大环境，一个无时无刻不充满光线的环境。而在计算机模拟中，这些都是提高仿真模拟真实度的重要指标。因此要生成具有真实感的织物三维模拟，就必须对织物在一定光照条件下所显示的状态进行解析。

2.4.1 颜色的设置

在 OpenGL 中，对颜色的设置时通过混合不同比例的红、绿、蓝，即所谓的三原色 RGB(Red&Green&Blue)，来确定一种颜色，或者根据颜色索引模式来确定，类似于画家的调色板，根据颜色编号来绘制场景。一般要根据可用的硬件和应用程序来选择使用 RGB 模式还是颜色索引模式。但在绝大多数系统中，RGB 模式能显示的颜色远远多余颜色索引模式，故着重介绍此 RGB 模式。

在 RGB 模式中，每种颜色都可以通过对三原色的正的颜色值进行指定，可以对所有的可用颜色进行建模，创建一个 RGB 颜色空间，如图 2.7 所示，

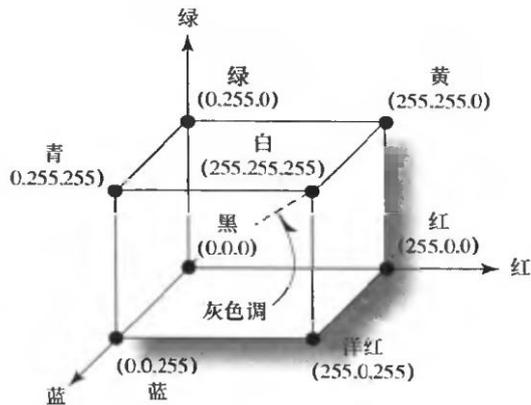


图 2.7 RGB 颜色空间

在此立方体内，三个坐标轴分别表示着红、绿、蓝三种颜色，从原点沿着每条轴的方向，值从 0 到 255，代表着三原色的饱和分布。可以看出，坐标原点 (0, 0, 0) 什么颜色都没有表示纯黑色，而在立方体的一个顶点处 (255, 255, 255) 则表示红、绿、蓝三原色都取最大值，表示纯白色。

设置颜色函数：`void glColor<x><t>(red,green,blue,alpha);`

在这个函数中， x 表示参数的个数，可以为 3 或 4，3 个参数则表示是红、绿、蓝。4 个参数则多了个 Alpha 值。Alpha 成分指定颜色的透明程度。绝大多数使用 `glColour3f` 的 OpenGL 程序在指定每种颜色强度时，最小强度用 0.0 表示，最大强度用 1.0 表示。 t 表示参数的数据类型，可以使 `b`、`d`、`f`、`i`、`s`、`ub`、`us` 和 `ui`，分别表示字节型、双精度型、浮点型、整型、短整型、无符号字节型、无符号整型和无符号短整型。

2.4.2 光照的设置

光照时图形具有真实感的基础。一个没有光照的物体是很难呈现出三维效果的。可以想象一下，同样的一块织物放在阳光下，放在屋子里日光灯下，或者在灰蒙蒙的没有太阳下的场景下，看到的织物颜色将会完全不同。事实上，如果没有光照，通过 OpenGL 绘制的物体根本就像一个三维物体。这就决定了光照在三维模拟中的重要性。OpenGL 可以对场景中物体的光照进行准确的描述，以精确的物理光学特性为原理，模拟出来的物体更加真实。

在 OpenGL 建立的光照环境中^[40,41]，如果物体自身不发射光线的话，一般会受到三种光：环境光 (ambient light)、散射光 (diffuse light)、镜面光 (specular light)、发射光 (emitted light)。

1) 环境光 (ambient light)。也称为背景光。其来源不确定，并非是直接在光源下被照射，只要周围有物体被照明，就能够被看见。当环境光照射到物体表

面时，会使光线向房间中或场景中四处反射，没有方向性。在场景中，被环境光照射的物体亮度均匀。

用漫反射参数 K_d 入射光线中被漫反射部分的百分比，取值来源于物体的材质，范围为大于等于 0，小于等于 1。 I_a 表示场景中环境光强度。

环境光的漫反射公式是：

$$E_1 = I_a K_d \quad \text{式 (2.4)}$$

2) 散射光 (diffuse)。也叫漫反射光，来自于某个方向。如果从正面对模拟物体进行照射，会发现其亮度比别处更亮；反之。如果光照时斜着掠过表面，看起来就是暗淡。但是，同环境光一样，当光线撞击表面时，也会均匀地向所有方向进行发散。

对于织物来说，其散射光可以理解为，场景中某特定方向与强度的光源，照射在纱线表面，表面发射的光向周围各个方向均匀反射，散射光强度与织物自身的属性和光源的位置有关，与观察者视角无关。根据郎伯定律^[41]：对于一个漫反射体，表面的反射光亮度和点光源入射角的余弦成正比，即：

$$E_2 = I_d K_d \cos i \quad i \in (0, \pi/2) \quad \text{式 (2.5)}$$

这里， I_d 为点光源给定方向入射光的光亮度； K_d 为漫反射参数； i 为点光源的入射角，即入射光线与物体表面光点发向量之间的夹角。

真实物体是肯定会受到环境光的照射。因此实际的漫反射量为：

$$E = E_1 + E_2 = I_a K_d + I_d K_d \cos i \quad i \in (0, \pi/2) \quad \text{式 (2.6)}$$

物体表面的亮度还与光源到表面的距离有关。按照常识，观察者对光源距离越远，光强度越弱。理想光照模式是物体表面的光照强度与光源到物体该表面的距离的平方成反比，实际情况中，物体表面的亮度在距离上的衰减规律呈线性分布，则此时可以得到光照模型公式：

$$E = I_a K_d + \frac{I_d K_d \cos i}{D + K} \quad i \in (0, \pi/2) \quad \text{式 (2.7)}$$

K 为常数， D 为物体表面到点光源的距离。

3) 镜面光 (specular light)。来自特定的方向，几乎将所有入射光全部反射，类似与从一面高质量的镜子反射回的情景。具有光泽的金属或者塑料具有非常高的镜面成分，而粉笔，地毯则几乎不存在镜面成分。镜面反射可以在物体表面产生高亮度或者一个亮点，即所谓的“高光”效应^[42]。

对于大多数织物，纱线表面看作是一面面微小的“镜子”组成，随着织物纱线的起伏，“镜子”所面对的方向也跟着变化，这些“镜子”按照镜面反射定律，将射向纱线表面的光发射到周围。镜面反射的公式一般如下：

$$E_3 = I_a K_s \cos^n j \quad j \in (0, \pi/2) \quad \text{式(2.8)}$$

I_a 为从点光源发出的入射光的光强, j 为入射角 i 的余角, n 为镜面反射光的汇聚指数, K_s 为被照射物体的镜面反射系数。当 n 值与物体表面自身材质有关联, 越粗糙的物体越小, 越光滑的物体越大。

4) 发射光 (emitted light)。模拟源自某些物体的光。在 OpenGL 光照模型中, 表面的发射光可以增加物体的强度, 但是它不受任何光源的影响。另外在整体场景中, 发射光也没有起到作为一种额外的光照。可以用一个光强 I_s 表示就行。

当物体表面被多个光源同时照射时, 其表面光照强度为多种光源共同叠加的效果。因此完整的基本光照模型表示如下:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + I_s \quad \text{式(2.9)}$$

OpenGL 中光照函数的使用如下:

```
void glGetLightfv(Glenum light, Glenum pname, GLfloat *params);
```

```
void glGetLightfv(Glenum light, Glenum pname, GLint *params);
```

函数中 `Glenum light` 指定要求查询是哪个光源。范围从 0 到 8, 表示开启几号光源; `Glenum pname` 指定所查询的是光源的属性。具体属性见表 2.2:

表 2.2 光照模型 `pname` 参数列表

参数名	意义
GL_AMBIENT	环境光强度变量
GL_DIFFUSE	散射光强度变量
GL_SPECULAR	镜面光强度变量
GL_POSITION	光源位置的坐标
GL_SPOT_DIRECTION	指向聚光灯的方向
GL_SPOT_EXPONENT	聚光指数
GL_SPOT_CUTOFF	聚光灯的切割角度值
GL_CONSTANT_ATTENUATION	光常量衰减值
GL_LINEAR_ATTENUATION	光线性衰减值
GL_QUADRATIC_ATTENUATION	光二次衰减值

2.4.3 材质的设置

创建了光源之后,就需要设置一些材料属性,这样绘制的物体才能反射光线。一般来说一个物体呈现某种颜色,并不是说这个物体就是此种颜色,而是说这个物体主要是由反射某种颜色的光线的材料组成的,同时还需要指定材料对光照的发射属性。设置材质属性的函数类似于光照函数,具体如下:

```
void glGetMaterialfv(Glenum face, Glenum pname,GLfloat *params);
```

```
void glGetMaterialfv(Glenum face, Glenum pname,Glint *params);
```

此函数用来设置物体光照计算的材质属性。Glenum face 查询当前物体正面或者背面的材料属性,接受的参数为 GL_FRONT、GL_BACK 或者 GL_FRONT_BACK; Glenum pname 查询当前物体是哪种材料属性,具体使用参数如表 2.3:

表 2.3 材料设置函数 pname 参数列表

参数名	意义
GL_AMBIENT	材料的环境颜色
GL_DIFFUSE	材料的散射颜色
GL_AMBIENT_DIFFUSE	材料的环境和散射颜色
GL_SPECULAR	材料的镜面颜色
GL_SHINNESS	镜面指数
GL_EMISSION	材料的发射颜色
GL_COLOR_INDEXES	环境、散射和镜面颜色索引

2.5 隐藏面消除的设置

当多个物体需要同时显示,且这几个物体存在视点彼此遮挡、或者物体相互穿插,则这样的视图就不能准确的将这几个物体在三维空间上的几何深度、空间关系表示出来,如图 2.8 所示,三角形 A 和 B 是相互交错,此时根本看不出 A 和 B 的关系,通过单纯的改变绘图顺序是很难讲 AB 的空间位置表述清楚。经过消隐处理后,如图 2.9 所示,A 和 B 的关系就能很清楚的在空间中表述所在准确位置。这种消隐,就是当场景中所属的凸面物体的可见面被其他物体在空间上和遮挡时,仍然在图形中被显示出来时,判定被遮挡面并消除掉被遮挡面的动作。

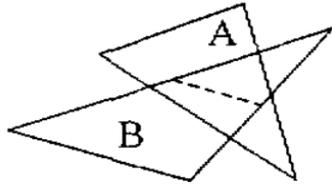


图 2.8 未消除相交片的隐藏面

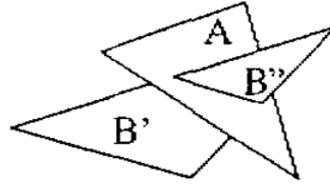


图 2.9 消除隐藏面之后效果图

在 OpenGL 中最容易简单实现的一个消隐隐藏面的程序实现，就是使用深度缓存（也称 z-buffer）算法。主要缺点就是对硬件要求较高，需要耗费大量的内存空间存储了屏幕上每个像素的深度值，同时对已经被遮挡的物体也需要绘制（因此在绘制较远物体时会降低程序时间效率）。每一个被绘制的像素都会被赋予一个深度值，代表着此像素和观察者之间的距离，深度值越高，距离就越小。当这个屏幕位置需要绘制另一个像素时，新的深度值就会与原先已经存储的像素的深度值进行比较，更高深度值的像素的新像素的深度值更低，程序会自动将此像素处理到位于原先那个像素后面，不会对前面的那个像素产生遮挡。

OpenGL 要实现隐藏面消隐，必须在初始化显示模式的时候指明使用深度缓存：

```
glutInitDisplayMode(GLUT_DEPTH|GLUT_RGB);
```

然后启用深度测试：

```
glEnable(GL_DEPTH_TEST);
```

使深度缓存测试保持在开启状态，而且这一操作只需要一次完成。在每一次场景绘制开始之前，必须先初始化深度缓存，之后可以以任意的顺序进行物体的绘制，要调用以下函数

```
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT|GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
```

从而判断任一像素是否会被其他与观察着距离更近的其他像素所遮挡，从而能够准确显示物体 A 和物体 B 的距离观察者的正确距离关系。在创建实心多边形 3D 物体时，深度缓存测试实际上是一个必备的先决条件。否则当视角的不断变化，不同的 3D 图像之间没有达到很好的遮掩关系，会造成 3D 场景的不真实。

2.6 本章小结

本章主要介绍了对于完成本课题所需要的一些 OpenGL 的基础知识以及部分函数。首先介绍了 OpenGL 显示图形的基本原理、工作流程、主要功能和系统结构。再重点介绍了如何在 OpenGL 中绘制三维图形的图形绘制、场景与坐标转换、等基本函数的介绍，同时重点讲解了提高图形真实感的光照、颜色和材质的设置、以及如何实现消隐处理函数。

3 机织物结构的几何描述

3.1 织物几何结构参数

在织物中，经纬纱线互相交织的空间形态关系称为织物结构（fabric structures），利用几何的方法，寻找合适的参数，并运用数学公式描述织物结构则称之为织物几何结构（geometry of fabric structures）。包括经纬纱的交织规律、经纬纱的截面积形状和大小、经纬纱的密度和纱线中心轴曲线的屈曲形态等。众所周知，除开纱线的颜色，织物的外观和大部分的物理性能主要由织物的材质及纱线的交织状态所决定，在纱线材质固定的前提下，如果知道织物的几何结构，确定各几何参数，织物外观也将随之而定^[43]。

影响织物几何结构的因素主要是纱线的截面形态和屈曲形态。一般纱线在自由状态下，其横截面为圆形。由于纱线自身材质的原因，使得纱线织入织物之后，受到了张力导致纱线被压扁，压扁程度的影响因素主要为纱线的原料、捻度以及织物的组织结构、松紧程度等，但一般认为纱线被挤压之后的截面还是以流线型为主^[44]。

表示织物几何结构的参数包括：织物的组织、经、纬纱的屈曲波高、织物的几何结构相、织物厚度与支持面、交织次数、交织面积、平均浮长、平均浮点数、盖覆紧度、纱线的直径系数、织物平衡系数织物结构区域等。以下为主要参数的简单介绍：

（1）经、纬纱屈曲波高。经纬纱的屈曲程度是影响织物结构的一个重要方面。屈曲波高（yarn waviness or cross wave highness）就是描述这种屈曲程度的一个重要特征数。在织物中，织物的外观、物理性能都与屈曲波高有着一定的关系。

（2）织物厚度与支持面。织物厚度即为织物正反表面之间的垂直距离，按照经纬纱的直径可以分为经支持面织物、纬支持面织物以及等支持面织物。厚度对织物某些织物机械性能有很大影响，例如织物的耐磨性和保暖性。

（3）织物的几何结构相。经、纬纱屈曲波高的配合状况，称之为织物的几何结构相（structure phase in geometry）。织物中，可以将经纬纱分为九个数阶，因此经纬纱屈曲波高就能构成九个结构相^[45]。

（4）交织次数与平均浮长。交织（interlacing）和浮长（floating）是由经纬纱屈曲相互交织形成，能描述这两部分结构特征参数的为交织次数与平均浮长，直接影响着织物的牢固度与舒适度。交织次数分为完全组织中的交织次数、单位面积中的交织次数和交织参数。平均浮长则是指规则组织中经纬纱没交叉一次所占用的平均浮点数。

（5）织物内纱线的直径。纱线在织物内的直径可按如下公式计算：

$$d(mm) = K_d \cdot \sqrt{T} \quad \text{式(3.1)}$$

其中： K_d 为纱线的直径系数； T 表示纱线特数。

直径系数 K_d 是纱线形态的重要参数, 其大小受纺纱方法、纤维种类等因素影响, 在采用特克斯制时, 纯棉纱线可近似取为 0.037, 涤/棉纱线可近似取 0.038^[46]。

织物模拟的前提是织物的组织设计。从纱线的形态设计与分析入手, 将影响织物外观的主要因素模型化、数字化^[47]。主要影响因素有经纬纱交织的几何规律, 经纬纱的材质、经纬纱线密度以及上机张力等。在这种前提下, 若要进行精确的模拟则显得很困难, 因此在实际操作中, 学者提出了很多的几何模型, 其基本思想都是假设经纬纱为可弯曲既不能伸长又不能压缩的柔性体, 并忽略一切弯曲阻力, 再通过以合适的几何模型表征, 用数学语言大致描述纱线的截面与屈曲形态。主要有 Peirce 圆形、椭圆截面的理论模型、Kemp 跑道型截面理论模型、Hearle 透镜截面的理论模型^[48]。

3.2 织物内结构受力分析

织物中的经纱和纬纱在相互交织过程中, 要受到垂直于纱线方向的力的作用而出现屈曲现象, 从而影响织物的质地和外观。这种使纱线屈曲的力可概括为, 如图 3.1 示:

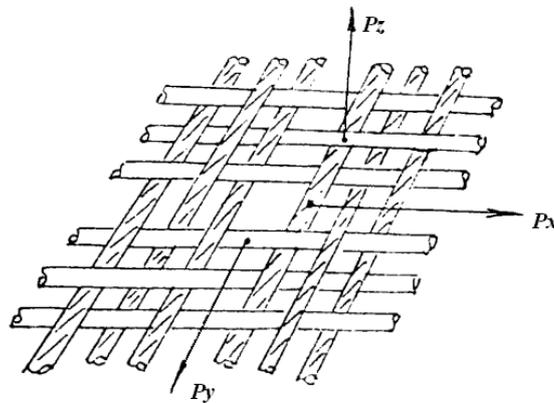


图 3.1 织物中纱线的受力情况

(1) 作用于各根纱线且垂直于织物表面的力, 如 P_z , 造成经、纬纱在织物表面产生凸起或凹陷、或者形成各种花纹, 是纱线屈曲形态的根本原因, 而且决定着织物的厚度和蓬松程度。

(2) 沿着织物表面, 但垂直于经纱方向, 如图中 P_x , 会导致经纱在织物表面沿着 X 方向产生移位现象; 沿着织物表面, 但垂直于纬纱方向, 如 P_y , 会导致纱线在织物表面沿着 Y 方向产生移位现象^[49]。

现在来分析纱线在织物中受到的力。纱线力学模型可以如图 3.2 (a) 所示, 对于平纹织物组织, 其经纬纱每间隔一根纱线就进行一次交织, 且纱线粗细材质、纱线之间的间距都相同, 在纱线两侧几乎是对称结构, 纱线受到的力也几乎相同,

且方向相反, 这样纱线不会受到力的作用而产生移位或者偏移。纱线受到的力 U 就可以相互抵消, 其纱线的受力模型可以简化为如图 3.2 (b) 所示。图中 V 表示垂直于织物表面的力, P 为平均纱距, x 轴位置为织物中心平面位置, U 表示平行于织物表面的力, e 为交织角。

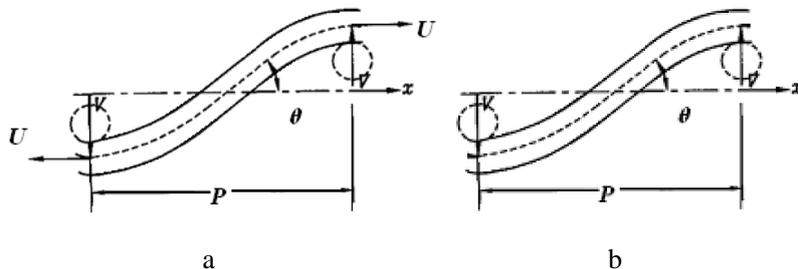


图 3.2 织物中纱线的受力模型

由简化的纱线受力模型可以看出, 织物中某根纱线的屈曲形状由经纬纱交织点处的载荷引起。假如纱线为柔软且容易变形的理想体, 在织物内应力的共同作用下, 纱线的中心轴线曲线 (即屈曲形态) 通过各纱线相交点 (即纱线受力点) 和织物中心平面的交点。

一旦纱线交织处位置和数量产生了变化, 纱线的中心轴走向的曲线形状将发生变化, 但曲线仍通过各交织点和非交织点 (均为受力点)。若将纱线样条当成是一根理想的充满弹性的细小杆状物, 根据欧拉方程给出^[50]:

$$\frac{1}{r(x)} = \frac{M(x)}{EI} \quad \text{式 (3.2)}$$

其中, $M(x)$ 表示弯矩; $r(x)$ 表示曲率半径; E 为杨氏模量; I 为惯性矩。

当曲率半径较小时, 有:

$$r(x) \approx \frac{1}{y''(x)} \quad \text{式 (3.3)}$$

简化的纱线受力模型中, 各受力点可看做是简单支承, 则 $M(x)$ 是线性函数, 可假设 $M(x) = A + Bx$. 则为 (1) 式可变形为:

$$y''(x) = \frac{A + Bx}{EI} \quad \text{式 (3.4)}$$

对 (3) 式积分两次, 得:

$$y(x) = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad \text{式 (3.5)}$$

(4) 式说明纱线样条可由支点间的三次多项式描述。通过对纱线的受力分析可以看出, 在模拟中, 以合适的数学模型来描述纱线的空间走向是可行的。前人有过很多分析其中最经典的就属 Peirce 建立的直线加圆弧的中心线模型。

3.3 机织物的 Peirce 模型

Peirce^[51]假定织物中的经、纬纱都是圆形截面，既不可伸长又不能被压缩的柔性几何体。当经、纬纱线相互包覆屈曲时，其交织部分为圆弧线圈，其余部分则由平滑的直线连接而成。图 3.3 示为一个平纹织物的一个交叉单元的经向剖面图。

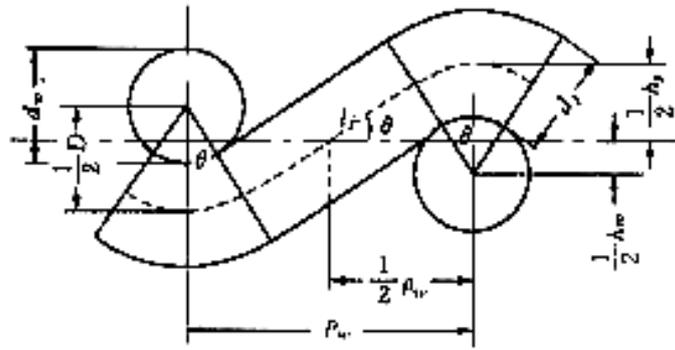


图 3.3 平纹织物的几何结构 Peirce 模型

图中的变量的意义代表如下：

$h_j(h_w)$ ——经（纬）纱屈曲波高，表示织物内经（纬）纱屈曲的波峰和波谷之间垂直于布面方向的距离，单位 mm；

$L_j(L_w)$ ——一个经纱（纬纱）组织循环所占有的距离，即屈曲纱线的长度，单位 mm；

$d_j(d_w)$ ——经（纬）纱直径；

$\rho_j(\rho_w)$ ——几何密度；

$\theta_j(\theta_w)$ ——交织角，即屈曲纱线相对于织物中心平面的最大倾角；

$C_j(C_w)$ ——经纬纱线缩率；

D ——经纬纱线直径之和；

按照各个变量之间所假设的模型满足以下关系式：

$$C_j = \frac{L_j}{\rho_w} - 1 \quad \text{式 (3.6)}$$

$$\rho_w = (L_j - D \theta_j) \cos \theta_j + D \sin \theta_j \quad \text{式 (3.7)}$$

$$h_j = (L_j - D \theta_j) \sin \theta_j + D(1 - \cos \theta_j) \quad \text{式 (3.8)}$$

$$D = h_j + h_w = d_j + d_w \quad \text{式 (3.9)}$$

$$C_w = \frac{L_w}{\rho_j} - 1 \quad \text{式 (3.10)}$$

$$\rho_j = (L_w - D\theta_w) \cos \theta_w + D \sin \theta_w \quad \text{式 (3.11)}$$

$$h_w = (L_w - D\theta_w) \sin \theta_w + D(1 - \cos \theta_w) \quad \text{式 (3.12)}$$

上述关系式中, 可通过其中任意 4 个已知变量, 便可得到方程组中其他所有的变量。为了简洁的给出这些参数间的关系, 且便于运用, 可将上述方程组中的 ρ 和 h 用级数展开。当交织角 θ 很小时, 其高次方程可以略去, 这样变形之后的关系式 h , ρ 和 C 则有如下的关系式:

$$h_j = \frac{4}{3} \rho_w \sqrt{C_j} \quad \text{式 (3.13)}$$

$$h_w = \frac{4}{3} \rho_j \sqrt{C_w} \quad \text{式 (3.14)}$$

$$\theta_j = 106 \sqrt{C_j} \quad \text{式 (3.15)}$$

$$\theta_w = 106 \sqrt{C_w} \quad \text{式 (3.16)}$$

式 (3.13) 到式 (3.16) 被称为 Peirce 模型的近似式, 实际应用中, 因为比较容易获得经纬纱缩率 C_j 、 C_w 和几何密度 ρ_j 、 ρ_w , 所以使用 Peirce 近似公式可以对织物纱结构参数做出一个大概的计算。

而由于织物自身及外界环境的复杂性, Peirce 模型作了很大程度的简化, 前提是假设纱线有圆形的截面和不可压缩的柔软物体, 过于理想化, 只有在紧密度小的织物中才成立, 使用范围太小。实际在织物中, 纱线在织物内的截面形态受到纱线材质, 织物的组织结构和密度等影响, 为了能反映纱线受力产生变形的本质, 就需要充分考虑到以下事实:

- a) 织物受到挤压后, 截面不在是圆形;
- b) 经纱与纬纱交织的地方为面与面的接触, 不是点对点的接触, 需要考虑到接触面的影响;
- c) 纱线之间存在着相对移动^[52];

Peirce 在后来提出了椭圆截面的几何模型, 用适当的椭圆截面的短轴长来表示纱线的直径。其模型示意图如 3.4 所示:

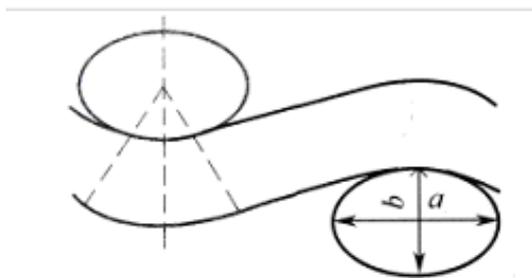


图 3.4 Peirce 椭圆形截面模型

图 3.5 为提取出来的纱线截面具体变形图:

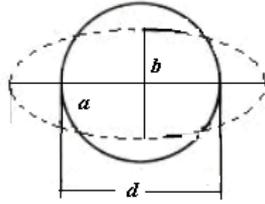


图 3.5 纱线截面挤压变形图

主要参数为椭圆长轴 a 、短轴 b 及压扁系数，挤压其中短轴表示纱线受挤压后的变形直径^[53]。压扁系数的计算公式如下：

$$\eta = \frac{\text{纱线在织物切面图上垂直布面方向的直径}}{\text{利用公式计算的纱线直径}}$$

可以得出：

$$\begin{cases} b = d\eta \\ a = d/\eta \end{cases} \quad \text{式(3.17)}$$

压扁系数的大小与织物组织、密度、纱线原料、成纱材料、织造因素有关，通常用压扁系数来表示纱线被挤压的程度。一般取值为 0.65-0.8。比值越小，纱线被压扁的厉害，织物的组织结构就越紧密，手感更加坚硬；比值接近于 1 时，说明表面织物几乎没有什么挤压力，织物显得柔软。

由于 Peirce 模型的提出，加快了织物几何结构研究的步伐，许多学者对 Peirce 模型进行了研究与拓展，例如 Painten(1952)和 Adams(1956)建立 Peirce 理论的诺谟图解析术，使 Peirce 方程求解趋于简单；Love(1954)提出平纹织物紧密结构条件，提出跑道型纱线截面，建立了非平纹织物紧密结构的最大可织图解；Dickson(1954)给出了在实际中，如何运用非平纹织物紧密结构的最大可织图解；Hamilton(1964)在前人的肩膀上进行了归纳总结。

圆形和椭圆形纱线截面理论主要适用于比较松散的织物，当织物现在简单介绍下比较有名的如图 3.6 所示的 Kemp 跑道型截面理论模型^[54]以及如图 3.7 的 Hearle 的透镜型理论模型。

Kemp 扩展 Peirce 的理论模型，将界面改进为通过跑道型截面。在图 3.6 中所示的图是通过中间的经（纬）纱的一个平纹重复截面。在图 3.6 中，两纬路径的直线部分应是直线相切经截面圈，是最短的。跑道的形状是由两个半圆连接两条平行线，其中跑道上下处于对称的形态，有着相等的长度。L2' 之间的部分与 Peirce 的圆截面模型图是相同的，所以跑道模型可以转换成类似的 Peirce 的模型

方法和方程来解决。在这里，是经线截面的宽度和高度，一些类似的定义与 Peirce 模型的变量定义相同。

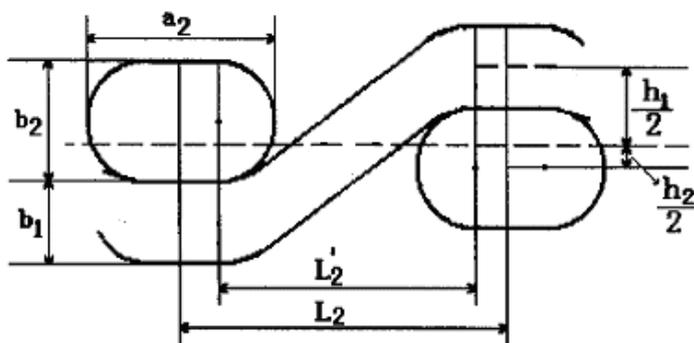


图 3.6 跑道截面示意图

$$L_j = a_j - b_j + (S' - D\theta_w)\cos\theta_w + D\sin\theta_w \quad \text{式 (3.18)}$$

$$h_j = (S' - D\theta_j)\sin\theta_j + D(1 - \cos\theta_j) \quad \text{式 (3.19)}$$

$$S' = S_j - (a_w - b_w) \quad \text{式 (3.20)}$$

$$D = h_j + h_w = b_j + b_w \quad \text{式 (3.21)}$$

式中， L_2' 表示相邻纱线曲线的直线距离； b_1 , b_2 分别为经纬纱的厚度； a_2 为跑道型纱线截面的宽度；

因此，与式 (3.6) 到式 (3.12) 类似，一个跑道模型的问题可以转换为皮尔斯的模型中存在的问题，然后进行解决。然而应当指出，模型的不同，会导致一些参数的不同，在公式上也需要进行修改。

Hearle 构建的透镜模型中，如图 3.7 所示的是织物的最小单元的经向截面图。在图中，纬纱之间纱线的路径应该是一条直线，经过截面的切线应该是最短的。同样可以得到如下的方程来表示透镜模型，各参数类似于 Peirce 模型。

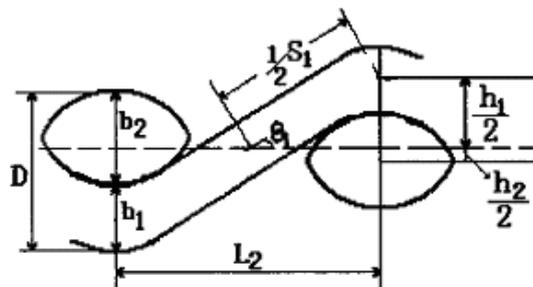


图 3.7 透镜截面图

透镜模型的关系式可以如下表示：

$$L_j = (S_w - D\theta_w)\cos\theta_w + D\sin\theta_w \quad \text{式 (3.22)}$$

$$h_j = (S_j - D\theta_j)\sin\theta_j + D(1 - \cos\theta_j) \quad \text{式 (3.23)}$$

$$D_w = 2R_j + b_w \quad \text{式 (3.24)}$$

$$a_j = 2R_j\sin\phi_j \quad \text{式 (3.25)}$$

$$b_j = 2R_j\cos\phi_j \quad \text{式 (3.26)}$$

$$e_j = b_j/a_j \quad \text{式 (3.27)}$$

$$\sin\phi_j = 2e_j/(1+e_j) \quad \text{式 (3.28)}$$

$$h_j + h_w = b_j + b_w \quad \text{式 (3.29)}$$

透镜上下为两段圆弧，两段圆弧的公共弦中心即为纱线轴线的位置 f_j ，上下圆弧的中心为别为 $(0, 0, f_j+h/2-r)$ 与 $(0, 0, f_j-h/2+r)$ 。如公式所示。

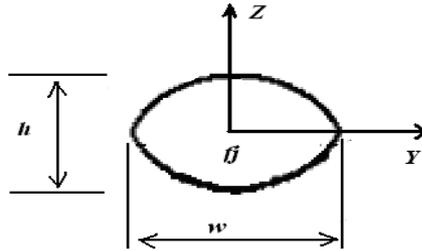


图 3.8 单元透视图

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \frac{w^2 + h^2}{4h} \\ y = r \cos\theta \\ z = r \sin\theta + f_j + \frac{h}{2} - r [0 \leq \theta \leq \alpha] \\ y = r \cos\theta \\ z = r \sin\theta + f_j - \frac{h}{2} + r [0 \leq \theta \leq \alpha] \end{array} \right. \quad \text{式 (3.30)}$$

3.4 平纹织物的几何模型的建立

织物种类繁多，千变万化，无论采取哪一种模型都难以准确的模拟出真实织物效果。

通过以上的分析，可以看出 Peirce 模型或者 Kemp 的透镜模型都只是适用于某些特定的范围。在对织物大量研究证明中，织物内纱线的屈曲形态最接近的描

述为正弦曲线；其经、纬纱的截面形态则以圆形、椭圆形或者正弦曲线加弧线连接较为合适^[43]。

当纱线的屈曲形态以正弦曲线表述时，经、纬纱的屈曲波高表示着正弦曲线的振幅，织物的几何密度表示着正弦曲线的周期；截面采用比较吻合纱线受力特征的椭圆曲线来表示。

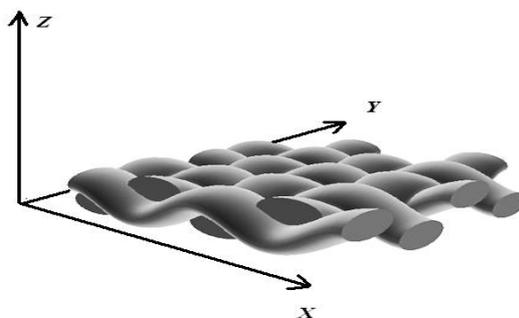


图 3.9 织物模型的三维坐标显示

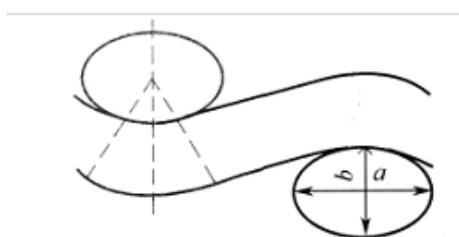


图 3.10 织物截面模型显示

在如图 3.9 所示的三维空间坐标中，XY 轴表示的是经纬纱平面，分别平行于经向、纬向，Z 轴垂直于织物，用来表示织物的厚度或者屈曲波高。简化为图 3.10 的截面，其椭圆的长轴为 b ，短轴为 a ，表示利用公式计算的纱线直径与织物切面图上垂直方向的直径。

纱线空间几何模型：

$$\frac{y^2}{(1/2b)^2} + \frac{(z-f_j)^2}{(1/2a)^2} = 1 \quad \text{式 (3.31)}$$

此方程为经纱截面方程，其中 f_j 经纱屈曲方程，其方程为

$$f_j = A(\sin \omega x) \quad \text{式 (3.32)}$$

正弦曲线振幅 A 为屈曲波高的一半，频率则为相邻两根纱线的距离，即与经纱交织的纬纱的几何密度决定。代入公式可以变形为：

$$f_j = h/2 \sin \pi/\rho \quad \text{式(3.33)}$$

对于已知屈曲波高的计算参考公式,两纬纱的距离可根据上机参数的纬密推算出。

通过以上的分析可以给出在三维坐标下以每个经组织点对应的纬纱的曲线方程以及屈曲波高的高度,如下:

$$\begin{cases} \frac{y^2}{(1/2b)^2} + \frac{(z-f_j)^2}{(1/2a)^2} = 1 \\ f_j = h/2 \sin(\pi/\rho x - \pi/2) x \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad \text{式(3.34)}$$

3.5 非平纹织物的几何模型的建立

在织物中,连续出现的一个系统的相同的组织点,会构成这根纱线连续浮在另一系统之上,这种连续漂浮的纱线的长度叫做浮长。浮长线用组织点数个数示意。浮长线是对织物外观形成的最重要的因素、直接影响着织物的花纹、凹凸感、明亮程度等。因此要能真实的对织物外观进行计算机模拟,就不能忽视浮长线的作用,应对浮长对织物造成纱线的聚拢及分离还有明显凹凸效应仔细分析。浮长线对纱线空间位置有以下作用:



图 3.11 浮长线在织物中示意图

如图 3.11 所示,在织物中,当两种织物的纱线线密度相同或者织物密度相同时,有浮长线,就会松软,浮长线越长,织物越松软,同时纱线的凹凸效应就越明显。如果浮长线相等,浮线长的织物就要更加柔软。总结起来,浮长线的作用大致如下几个方面:

(1) 在特定的条件下覆盖掉同系统附近的纱线。条件为:当紧挨着的纱线在垂直方向的高度大于纱线的直径时,而且当密度较大时,就会发生短浮长线“挤”进长浮长长线底部,使其发生重叠现象。在重纬组织中,纬纱密度大于经纱密度,因此相同空间内纬纱的根数要比经少,导致纬纱的长浮长跟短浮长之间垂直偏移量较大;纬纱之间相互挤压,会导致在垂直方向上产生遮盖与重叠。有些单层织

物中也会形成重叠，如凸条组织、网目组织，形成主要就是相邻的浮长长度差别过于悬殊。

(2) 浮长线使另一系统纱线相互聚拢在浮长线中心处，又让浮长线两端点处的另一系统的纱线彼此分开。织物中的应力导致组织中的纱线产生收缩，在同一浮长线下拉拢作用下使另一系统的多根纱线，使其纱线间的密度减小甚至减至零而紧密接触。浮长线大致以中心为对称点，受到两边的力保持平衡。这样同浮长内其他组织向中央靠拢，一方面使产生纱线距离变小的拉拢作用，一方面又产生同系统的纱线被覆盖的分离作用。

在 Peirce 模型中，有一个假设前提：同一根浮长线覆盖下的的纱线不发生凹凸效应，经纬纱保持一个紧密接触的状态，所以经纬纱的屈曲波高之和等于经纬纱直径之和，若纱线截面为椭圆，经纬纱直径需乘上一个压扁系数，即：

$$h_j + h_w = \eta \times (d_j + d_w) \quad \text{式 (3.35)}$$

h_j 、 h_w 表示纱线的屈曲波高； d_j 、 d_w 表示经纬的直径； η 表示压扁系数；当截面为圆形是，压扁系数等于 1，浮长为 1 或者 2 时，经纬纱，基本紧密接触；当浮长大于 3 时，经纬纱就不一定满足此条件。当浮长大于 3 时，按照 Peirce 模型及改进型计算发现与实际情况有很大出入^[55]。

通过以上分析，对织物就可以简单分为浮长小于 3 的织物和浮长大于 3 的织物，对于浮长为 1 的织物，为平纹织物，已经简单介绍过，而对于浮长为 2 的织物，以 2/2 变化平纹为例，如图 3.12 所示的 2/2 变化平纹截面图：

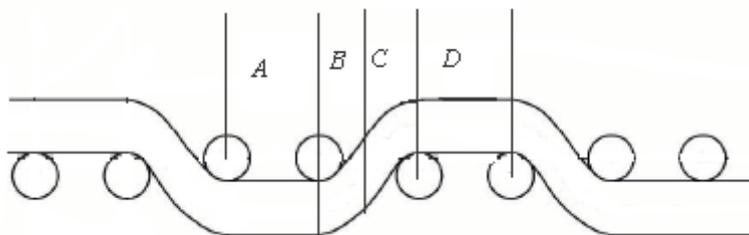


图 3.12 2/2 变化平纹截面图

对于纱线的屈曲状态，可以认为为正弦曲线与直线的结合，其中 A、D 为直线，B、C 段为正弦曲线，由示意图来看，BC 段应该为一个整体，这里将其分开，在后面的算法中将会介绍。对比平纹的的剖面图，其实就是在原本应该是弧线的地方，继续绘制直线，以直线形式来表达浮长为 2 的纱线的屈曲态，当浮长结束时，恢复到 Peirce 模型的应用。A 段中的间距为纱线的密度，即几何密度。

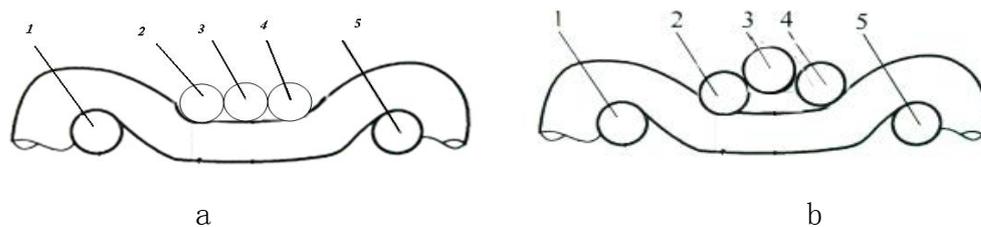


图 3.13 浮长线下的纱线挤压形变图

在对浮长大于 3 的织物中，如图 3.13 所示的截面图，可以看到，在连续的 2、3、4 号，原本在同一直线排列的纱线，受到了来自纱线的内应力，导致产生了挤压形变，挤压的变形量与所在浮长线中位置有关。参考前面浮长线的聚拢作用，可知，当织物的紧度很小时，产生的挤压相对就小；当紧度继续增大时，纱线之前的空隙变的非常小几乎没有时，纬纱对经纱的挤压即便很大，也不会产生很大的偏移。同时，越靠近浮长中心，受到的挤压越小，偏移量也随之较少；越靠近浮长中心，偏移量就相对更多。

在对织物外观模拟中，重点就是需要找出纱线截面中心的坐标位置，根据坐标按照一定的多项式拟合三维实体曲线。

传统的织物模拟式坐标为 X-Y 二维坐标，要完成三维模拟，就必须在 XYZ 坐标下对织物几何结构进行数学描述，因此我们设定，在 X-Y 平面坐标上显示织物的组织图，而在 Z 方向添加织物的屈曲波高。其中相邻两根经纱的距离由经纱的密度决定，表现为 X 方向的变化；相邻两根纬纱的距离由纬纱的密度决定，表现为 Y 方向的变化；而织物的经纱屈曲波高则用来表示 Z 方向的变化。

经纬纱线在三维坐标系中的 Z 方向上的坐标由 Peirce 模型计算结果改良而得。



图 3.14 浮长线拉拢与分离示意图

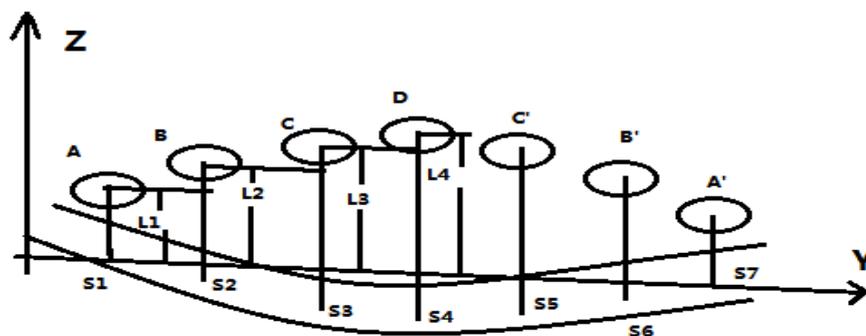


图 3.15 浮长线拉拢与分离示意图简化模型

对图 3.14 所示的浮长线拉拢分离图进行抽象化, 可以得出图 3.15 所示的坐标。可以看出, 浮长线越长, 织物的起伏就越明显。同一个浮长线的组织点距离中心点的位置都不同。对于浮长的两个端点 A 与 A', 离织物的中心线, 也就是 Y 轴很近, 此处的长度可以利用前文分析的 Peirce 模型进行计算。靠近浮长线中心时, 离中心线越来越远, 到了 D 点, 到达浮长线的顶端, 距离中心线的距离也达到最大值。通过一个浮长凹凸系数来表示组织点的凹凸程度。与凹凸程度有关的参数就有浮长线的总长度 F, 该组织点距离较近端点的距离 L, 有:

$$K = \pm \sqrt{Fi \times \eta_1 + Li \times \eta_2} \quad \text{式 (3.36)}$$

其中, 组织点决定着正负号, 经组织点向上凸起, 为正; 纬组织点向下凹陷、为负。i 表示浮长中第几个点。η₁、η₂ 为比例系数, 满足 η₁+η₂=1。根据经验, 一般取 η₁=0.7, η₂=0.3。

图中的简化模型, 理想情况是 A 到 A' 总共 7 根纱线都处在同一平面内, 而纬纱 S1 到 S7 也应呈直线排列。前文中分析的浮长线影响因素, 浮长长度越长, 纱线的凹凸就越明显, 织物组织中纱线 Z 坐标对所在织物理想情况的原本位置也就偏移得更远。偏移量随着浮长的长度增加而逐渐增加, 到达浮长中心达到极值, 又对称地递减, 而偏移量的增量则随着浮长的增加而逐渐减小, 到达某一值时, 不再增加。可以以织物条件类似的平纹织物的组织点系那个比较进行计算, 采用的公式如下:

$$h = \sqrt{|F/2| + 0.5 \times h'} \quad \text{式 (3.37)}$$

F 为组织点所处的纱线浮长长度。若浮长长度大于 12, 则取 12。h' 为平纹织物屈曲波高, 可以参考前文关于 Peirce 模型的公式, 偏移量 h 求出之后, 与 Peirce 模型计算出的中心线高度, 就可以得到 Z 坐标。

3.6 本章小结

本章主要介绍机织物交织模型, 列举了一些常用机织物模型, 并讨论其运用范围。最后在 Peirce 模型的基础上采用三角函数与直线段组合来模拟纱线的屈曲形态并建立数学模型。以 Peirce 模型为平纹织物的模型基础。分别采用圆形截面和椭圆形截面建立模型图。随后根据浮长线的偏移原理, 在平纹交织的基础上建立非平纹织物的模型, 把组织中浮长线对纱线屈曲位置的影响做为本节的重点研究对象。当参数发生变化时, 浮长线相应的左右及上下偏移, 从而拟合光滑曲线来模拟纱线在织物中的中心轨迹, 并建立数学方程。

4 机织物组织的计算机模拟

4.1 织物组织数学模型

通常用组织图来表示织物中经纬纱线相互交织的规律，也称为意匠图，或者方格图。如果将组织图中每个格子看作是一个元素，经浮点用“1”表示，纬浮点用“0”表示，结合最基本的一个循环组织所包含的经纬纱线的数量，这样组织图就可以用一个二维的布尔矩阵来表示，称之为组织矩阵或者组织阵(weave matrix)。矩阵中，类似于平铺的一块织物，以行表示纬纱，以列来表示经纱。令组织矩阵为 W ,

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1j} & \cdots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2j} & \cdots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ W_{i1} & W_{i2} & \cdots & W_{ij} & \cdots & W_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ W_{m1} & W_{m2} & \cdots & W_{mj} & \cdots & W_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{式 (4.1)}$$

此式表示，此组织表述为 m 行和 n 列纱线组成了一个基本循环组织，每一个矩阵的成员都代表一个组织点，其中 W_{ij} 等于 0 或者 1，代表纬或者经组织点， i, j 分别小于或等于 m, n 。式 (4.1) 称为织物组织数学模型的一般形式^[56]。当织物组织图用布尔矩阵描述后，织物中组织点、经纬纱的排列变化规律就可以转化为组织矩阵的运算和处理，这也是计算机对织物仿真模拟的基础。

基础概念术语：

交叉规律：最小组织循环中经纬纱线的交叉数量以及每次交叉时经纬浮长长度的变化规律。

交叉数：分为经向交叉数和纬向交叉数。经纱交叉规律公式中，分子个数与分母个数之和为经向交叉数；纬向交叉数则等于纬纱交叉规律公式的分子与分母的和。

飞数：分为经纱飞数与纬纱飞数。经向飞数等于最小距离的两根经纱上相似点中包含的纬纱数量，上为正，下为负。纬向飞数等于最小距离两根纬纱上相似点中包含的经纱数量，右为正，左为负。

纱线序数：经纱的序数从左往右，逐渐增加；纬纱序数从下到上逐渐增加。

织物中的浮沉规律说明着经纬纱的组织点交织，可以用分式来表示织物的浮沉规律。以经向浮沉规律为例：分子表示每根经纱上的经组织点数，是经纱连续覆盖纬纱的根数，代表的经浮长长度；分母代表每根经纱上纬组织点点数，是纬

纱连续覆盖经纱的根数，也代表着纬浮长长度。有多个浮长的时候，可以确定最小组织循环（或完全组织），用一个复合分式来表示。

织物组织 Z 的符合分式的一般形式如下：

$$Z = \frac{c_1 c_2 \cdots c_x \cdots c_m}{d_1 d_2 \cdots d_x \cdots d_n} \quad (m=n) \quad \text{式 (4.2)}$$

式中 c 为经组织点连续浮长， d 为纬组织点连续浮长， m 、 n 为一个最小循环内出现的经纬纱次数^[57]。

按组织矩阵 Z 绘制组织中第一根经纱时，绘制的次序是由分母到分子，由左到右绘制。具体先绘制第 c_1 个经组织点，再绘制 d_2 个纬组织点，然后绘制 c_2 个经组织点， d_2 个纬组织点， \cdots ，最后画 c_m 个经组织点， d_n 个纬组织点。

对于指定的组织，可以求出其经纬纱循环数 N_2 和 N_1 ，在组织已知的情况下，有：

$$N_1 = N_2 = \sum_{i=1}^m (c_i + d_i) \quad \text{式(4.3)}$$

这样就可以立即得到一个 $N_1 \times N_2$ 的一个二维组织矩阵 F 。

$$F = [a_{11}, a_{21}, \cdots, a_{i1}, \cdots, a_{N_1 1}]^T;$$

显然，按照反序赋值，有：

$$a_{N_1-i+1} = 1 \quad (x > y) \quad \text{或者} \quad 0 \quad (y \geq x)$$

其中， i 为 1 到 N_1 中任意数； x 、 y 为定义作判断用的任意变量，当取 c_i 赋值 x 增 1， y 不变；取 d_i 时 x 不变， y 增 1；

以经向规则组织为例，当第一列的经纱的浮沉规律已知时，可对矩阵 W 中第一列元素赋值，然后按照第一列元素和飞数对矩阵的其他列元素进行赋值。

平纹织物组织的模型与设计

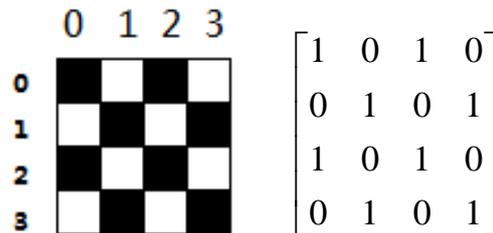


图 4.1 平纹织物组织图

图为平纹织物的组织图，经组织用黑色块表示，反之则为纬组织。按照计算机中二维数组的表示法，经纬纱下表都从 0 开始，这样 W_{ij} 就可以表示任一个组织点。可以得出，当组织点行列下标之和为奇数时，所对应的组织点则为纬组织

点；组织点下表之和为偶数时，所对应的组织点为经组织点。程序代码的实现如下：

```

j=1;
for (i=0;-1;i++i<=m) {
  while (c[i]>0;) {
    W[N1-j+1][1];
    j++;
    c[i--];}
  while (d[i] {
    W[N1-j+1][1]=0;
    j++;
    d[i--];}}
for (j=2;j<=N2;j++) {
  if((i+f)>N1)
    W[i][j]=W[i+f-N1][j-1];
  else
    W[i][j]=w[i+f][j-1];}}

```

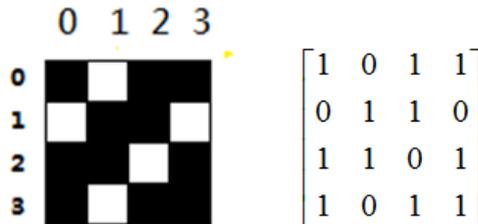


图 4.2 .二上一下斜纹织物组织图

图 4.2 为二上一下斜纹织物的组织图，可以看出当组织点行列下标之和整除 3 时，所对应的组织点为纬组织点，其余皆为经组织点。

规则组织是指交叉规律固定，且飞数也为固定的组织；准规则组织是指交叉规律固定，但是飞数不确定的组织；非规则组织为交叉规律、飞数都不确定的组织。任何一个单层组织都可以由规则组织、准规则组织以及非规则组织中某类经过映射变换得到，复杂组织可有单层组织联合的方式得到。这样，对织物的设计实际上就成为上述三类组织的组织图设计。

以下是一些常见组织模型：

N_f 为组织交叉数， L_i 为浮长序列中第 i 项的组织点数， $S_j(S_w)$ 为经纬向飞数。

平纹组织：组织交叉数 $N_f=2$ ； $L_1=L_2=1$ ；飞数 $S_j=S_w=\pm 1$ ；

原组织斜纹：组织交叉数 $N_f=2$ ； $L_1+L_2 \geq 3$ 且 $L_1=1$ 或者 $L_2=1$ ；飞数 $S_j=S_w=\pm 1$ ；

加强斜纹：组织交叉数 $N_f=2$ ； $L_1+L_2 \geq 4$ 且 $L_1 \neq 1$ ， $L_2 \neq 1$ ；飞数 $S_j=S_w=\pm 1$ ；

复合斜纹：组织交叉数 $N_f \geq 4$ ； $\sum L_i \geq 5$ ；飞数 $S_j=S_w=\pm 1$ ；

4.2 算法实现

通过以上的分析，可以按照以下流程对机织物进行计算机三维的模拟。采用的平台为 Visual C++ 编程与 OpenGL 语言相结合。整体的仿真流程如图 4.3 所示。

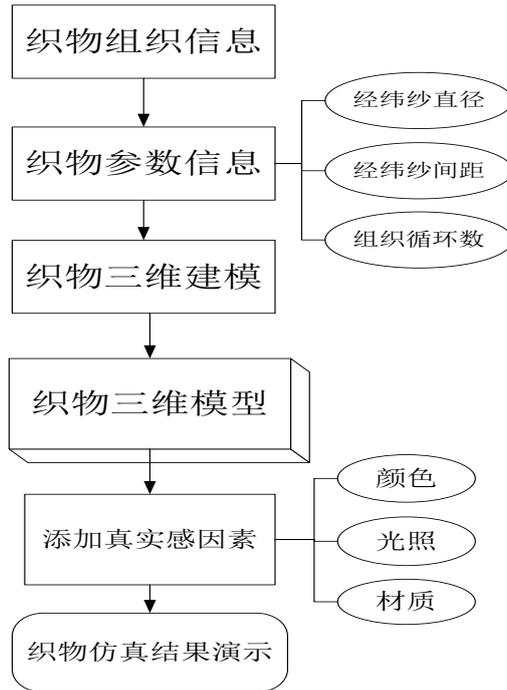


图 4.3 机织物仿真流程图

可以看出，第一步，分析织物的组织，得到建模所需的一些必要参数；第二步，通过已得到的织物组织以及计算得到的模型参数，利用前文提到的数学模型，在三维坐标系中建立经纬纱线的组织点坐标，计算出织物的三维模型；第三步，应用编程工具与语言 OpenGL 程序建立织物的三维模型；第四步，在建立的纱线库中调用纱线纹理，对建立的模型添加织物纹理，然后以前文提到的光照模型对模拟织物添加光照场景，增加模拟真实感。最后，将仿真的结果绘制出来，并向设计人员进行演示。

对于织物组织，在计算机中采用的是组织矩阵，也就是一个二维数组的形式来表现。行代表着纬纱，列代表着经纱，1 表示经组织点，0 表示纬组织点。对二维数组中任意一个数据进行操作，判断值为 1 或是 0，1，对于值为 1 的元素，对此元素所在的列进行循环判定，计算出连续的 1 的个数，即为所在经浮长的长度值；反之，值为 0 的元素则对所在行进行搜索判定，得到连续的 0 的个数。根据上文提到的公式，根据浮长长度的不同分别计算出纱线或者截面中心点的坐

标,最后利用运用 OpenGL 技术绘制出每个组织点的位置,再连接各个组织点的位置用椭圆柱体套接起来,最后添加纱线的纹理或者光照就可以得到组织图的纱线的三维显示,亦可以得到织物的模拟。

4.2.1 纱线的产生

在机织物的模拟仿真中,纱线使被考虑为管状的实心体,截面的形态多种多样,为圆型、跑道型或者透镜型。对于能够标准化的机织物的几何模型,所有的点都是可以被计算出来的。因此对于实心管状的纱线来说,只要能够找出轴心线的轨迹,按照截面形状围绕轴心线建立曲面,那么纱线的表面就能够被绘制出来。如图 4.4 所示长的曲线 L 是纱线的路径;闭合的曲线 C_0 代表纱线的截面形状,可能是圆形,也可能是椭圆、跑道、透镜型;向 V_0 是初始的普通向量,被设置为与 X 轴平行。 P_i 是纱线路径上的一个点, C_i 是过点 P_i 的截面曲线。向量 V_i 是过 P_i 的截面 C_i 的法向量。纱线截面上的点到纱线使垂直于法向量的,根据数学定义,通过向量 V_0 能够通过乘以旋转矩阵得到向量 V_i 。点 P_i 的截面边界曲线 C_i 可以通过曲线 C_0 旋转得到。当在沿着曲线 L 取连续的 P_i 点,每一点都作一个截面边界曲线 C_i ,通过一系列的 C_i 的组合就可以得到图 4.5 的形状,当取点 P_i 足够密集时,就能得到如图 4.6 所示的管状纱线。

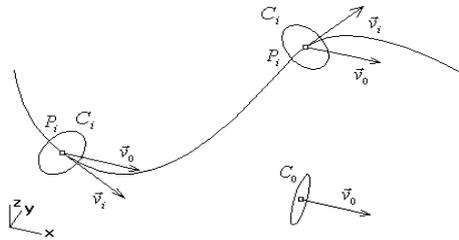


图 4.4 纱线路径以及截面

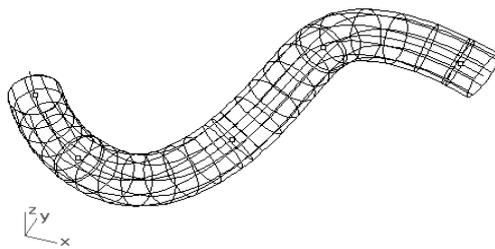


图 4.5 纱线的网格示意

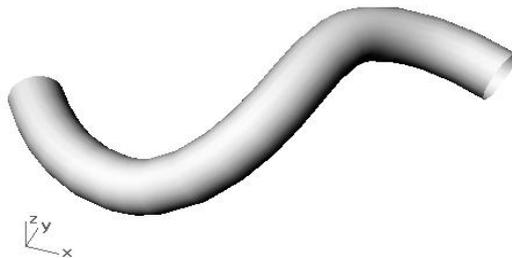


图 4.6 实心的管状纱线

4.2.2 织物组织的产生

在前文提到过，组织的结构可以用一个二维数组来表示，二维数组二等行列与纱线的经纬纱一一对应，如图 4.7 所示的 2/3/1/2 斜纹，左边为二维数组图，右边为斜纹的模拟图，第一列元素分别对应于模拟图的经纬组织点。在组织矩阵中，只存在两个值，1 或者 0；因此，对于每一个确定的组织点的值，只要其周围的组织点的值确定（经纱考虑二维数组中的列元素，纬纱则考虑二维数组的行元素），绘制出相对应的纱线的轨迹，就能完整模拟。

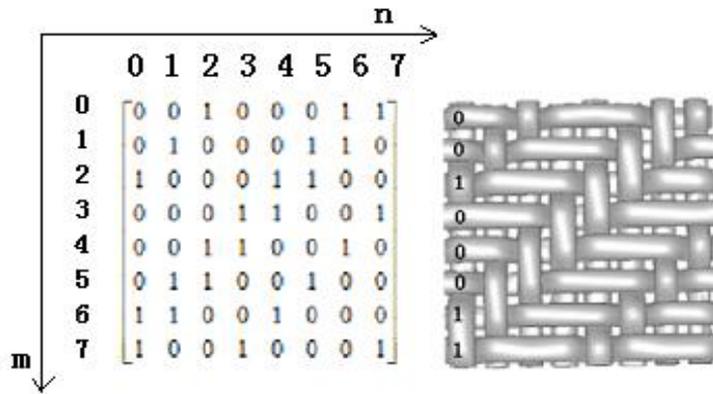


图 4.7 斜纹 2/3/1/2 组织矩阵与织物

在织物中，纱线的屈曲形态可以通过织物组织数组的值来判定。对于平纹织物而言，纱线只存在着弯曲状态，分为两种，向上的弯曲和向下的弯曲。这两种状态简单的重复循环就能够成平纹组织的纱线空间图。对于非平纹织物，则可以用平纹组织的纱线的引申弧线加直线来模拟。为了不与图像模拟中的空间坐标弄混，对此处二维数组的说明采用计算机的标准表示方法：即从数组左上角为起点， m 表示行数， n 表示列数，且 m 、 n 从零开始计数。数组中每一个值可以用 W_{mn} 来表示，例如 W_{35} 第三行第 5 列的值。以组织点的值判定纱线的八种形态如下：

对于特定的 W 点，组织数组值为 1 时：

(1) 同一行的下边相邻（同一列右边相邻）的组织点值为 1 时，织物中表现为浮长线，纱线路径为直线；

(2) 同一行的上边相邻（同一列左边相邻）的组织点值为 1 时，织物中表现为浮长线，纱线路径为直线；

(3) 同一行的下边相邻（同一列右边相邻）的组织点值为 0 时，织物中表现为交叉处，纱线向下右弯曲。如图 4.8 曲线 B；

(4) 同一行的上边相邻（同一列的左边相邻）的组织点为 0 是，织物中表现为交叉处，纱线为向上弯曲，如图 4.8 曲线 A；

特定点 W 点数值为 0 时：

(5) 同一行的下边相邻（同一列右边相邻）的组织点值为 0 时，织物中表现为浮长线，纱线路径为直线；

(6) 同一行的上边相邻（同一列左边相邻）的组织点值为 0 时，织物中表现为浮长线，纱线路径为直线；

(7) 同一行的上边相邻（同一列左边相邻）的组织点值为 1 时，织物中表现为浮长线，纱线路径为上右曲线，如图 4.8 曲线 C；

(8) 同一行的下边相邻（同一列右边相邻）的组织点值为 1 时，织物中表现为交织处，纱线向上左弯曲。如图 4.8 曲线 D；

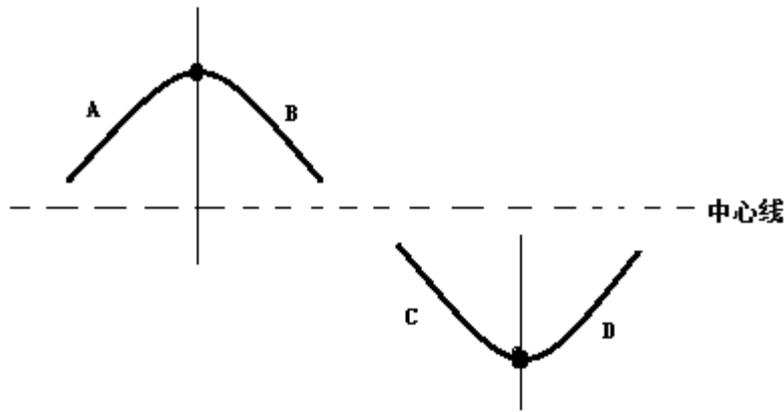


图 4.8 纱线的弯曲状态

纱线的状态 (1) (2) (4) (5) 都为直线，实际上只有 5 种。由于织物是组织的循环，当边界组织点需要判定时，判定点就变为同一行或者同一列的相对应的另一端。

在整个程序中对组织点对应的纱线存在着两种需要判定的内容：浮长线位移的判定与绘制以及纱线屈曲状态的判定与绘制。

浮长线位移的判定采取的方法是对二维组织矩阵的组织点进行一个同行或者同列的循环搜索，当遇到连续相同的组织点时，系统判定为浮长，记录下连续的点的个数作为浮长的长度，同时记录当前点在浮长中的位置，根据之前式(3.37)进行计算，可以得到当前的相对初始位置的偏移量。

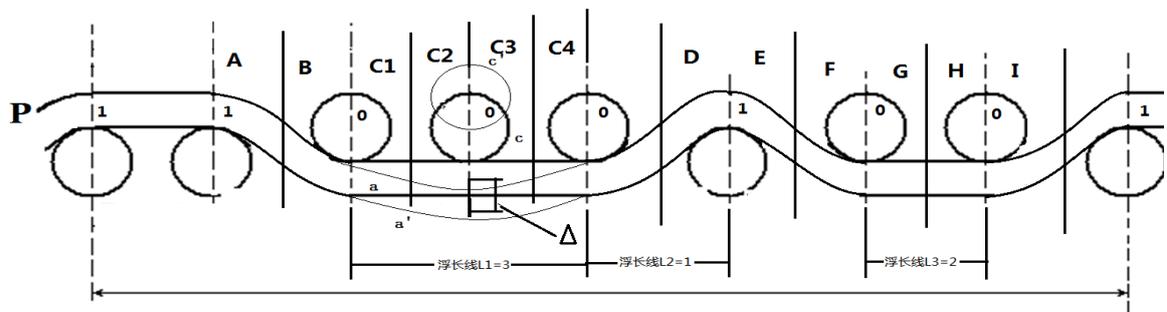


图 4.9 2/3/1/2 斜纹截面图

以 2/3/1/2 斜纹进行分析, P 为纱线路径, 每个组织点对应的值在图 4.9 上标出。在这个组织中, 浮长有在 3 个长度值。浮长为 2 和 1 的都可以采用直线来描述浮长, 在浮长等于 3 的纱线段, 需要继续分析。

A 段组织点以 1 为基准, 右边是 0, 按照纱线状态 (3) 绘制;

B 段组织点以 0 为基准, 左边是 1, 按照纱线状态 (7) 绘制;

D 段组织点以 1 为基准, 左边是 0, 按照纱线状态 (4) 绘制;

E 段组织点以 1 为基准, 右边是 0, 按照纱线状态 (3) 绘制;

F 段组织点以 0 为基准, 左边是 1, 按照纱线状态 (7) 绘制;

G 段组织点以 0 为基准, 右边是 0, 按照直线绘制;

H 段组织点以 0 为基准, 左边是 0, 按照直线绘制;

I 段组织点以 0 为基准, 右边为 1, 按照纱线状态 (8) 绘制;

C 段纱线的有绘制有两个原则, 一是纱线的路径。而是纱线的偏移量, 按照理想情况, 应该是绘制一条直线, 称这条直线中心轴是标准量。在浮长中 L1 中, 两个端点的基准不变, 在浮长中间的点上, 由于受到前文分析的浮长线的挤压和拉伸的影响, 是纱线在原有基础产生了偏移, 又直线 a 变为 a', 因此:

C1 段是以组织点 0 为基准, 右边是组织点 0, 本应该画直线, 可是此时产生了偏移, 这样绘制的直线应该是朝下偏移少许;

C2 段是以组织点 0 为基准, 左边是组织点 0, 因为偏移是绘制的直线向上产生了偏移弯曲;

C3 则绘制右边朝上的曲线, C3 绘制左边朝下的曲线;

C4 段以组织点 0 为基准, 坐标为组织点 0, 绘制一段向左的直线, 由于偏移量的存在, 绘制一段向下偏移的曲线。

程序编写时, 首先对组织点在组织矩阵的二维数据内进行循环搜索, 以上某个条件满足时, 调用相对应的纱线绘制函数, 同时与前面的浮长位移相结合就能得到以图 4.8 为基准的纱线屈曲形态。

4.3 模拟效果图

根据机织物几何结构的数学模型, 在 VC++6.0 的编程平台下, 结合 OpenGL 语言, 就能对部分机织物外观实现计算机的三维模拟。

平纹组织: 平纹组织 (plain weave) 是最常见也最简单的机织物组织, 其组织参数为: 经纬纱循环数都为 2, $R_j=R_w=2$; 飞数为 1, $S_j=S_w=\pm 1$ 。平纹组织最小循环单元为 2×2 组织, 拥有 2 个经组织点和 2 个纬组织点, 是完全对称结构, 正反面没有明显区别。

平纹组织的模拟如下图所示, 分别为平纹组织模拟的正面图, 侧面图、局部组织图, 整体模拟图。

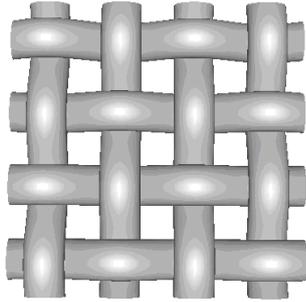


图 4.10 正面图



图 4.11 截面图

可以看到在局部的正面模拟图中，此时经纬纱线的密度选取的较大，使纱线间的间隙较大。而在最后的整体仿真中，最小组织的循环使织物布面效果明显。

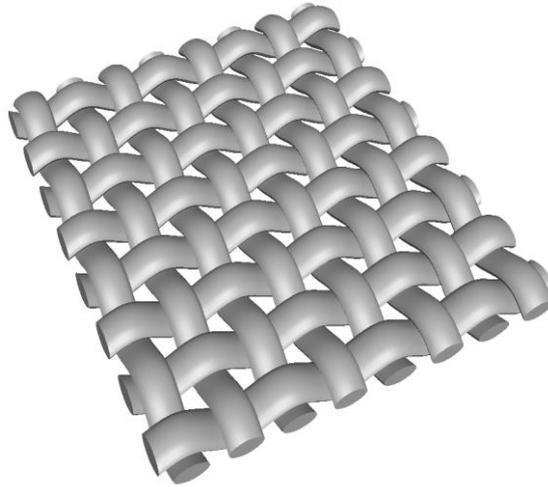


图 4.12 平纹整体模拟图

2/1 斜纹的模拟图：此类斜纹通常是用在精纺毛织物中单面华达呢，组织内纱线循环数比平纹的大，纱线材质相同，纱线线密度和织物密度一定的前提下，不如平纹的坚固，但是摸起来比较柔软。模拟是采用 Peirce 模型的引申，即用直线和曲线来表示，纱线屈曲处用直线。如图所示：

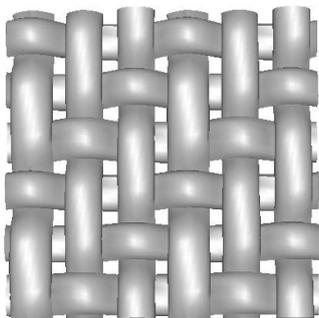


图 4.13 2上1下右斜纹正面图



图 4.14 2上1下斜纹截面图

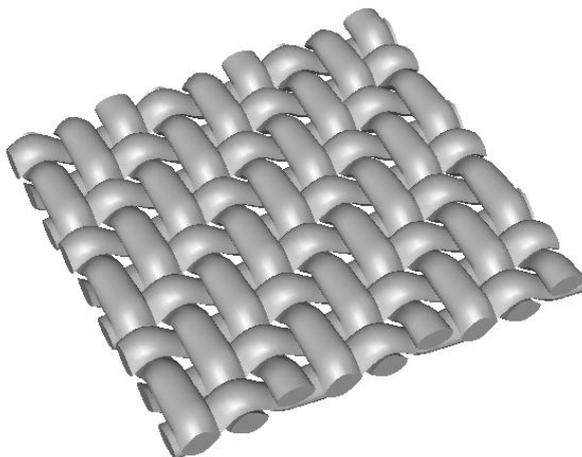


图 4.15 2上1下斜纹

3/1 右斜纹：一个最简单的浮长线为 3 的织物，此处对浮长不再使用直线直接进行模拟，而需要对直线部分增加一个偏移量。如图 4.17 示，可以看到正面效果并不明显，当放到侧面时，如图 4.18 示，就可以明显的看出纱线的屈曲状态，

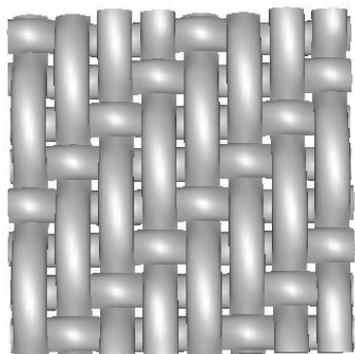


图 4.16 3/1 右斜纹正面模拟图



图 4.17 3/1 右斜纹截面图

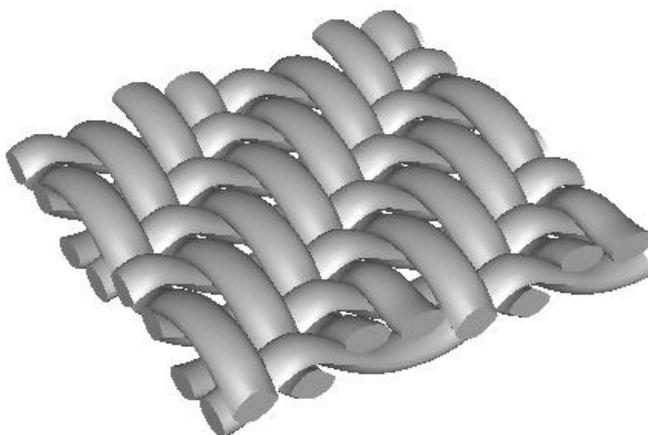


图 4.18 3/1 右斜纹整体模拟图

2/3/1/2 斜纹示意：此组织为本文中的示意组织，见图 4.7，因为浮长线包含多种长度。此织物如图所示。当浮长为 2 时，仍然和之前的 2 上 1 一下右斜纹

一样，采取的是直线形式；浮长为3的时候，就变为了曲线。可以看出织物表面的纱线的弯曲程度较明显。

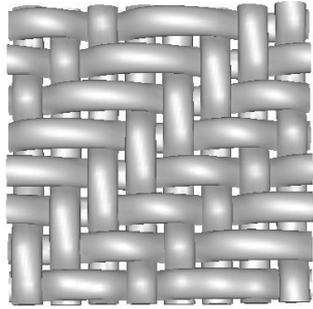


图 4.19 2/3/1/2 斜纹模拟图

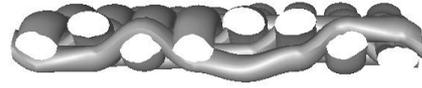


图 4.20 2/3/1/2 斜纹侧面图

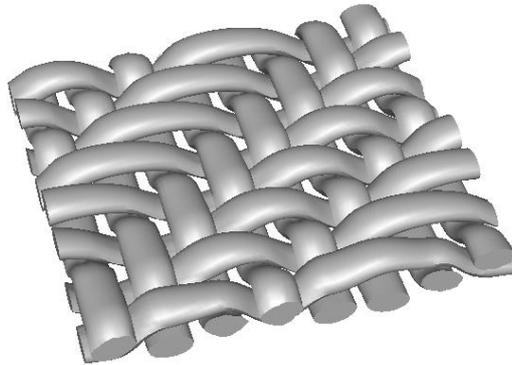


图 4.21 2/3/1/2 斜纹整体模拟图

蜂巢组织：在此织物中，既有各种长度的浮长，又有平纹组织，且同是平纹组织，效应也不同，是一个具有很明显的凹凸花纹的典型织物。在其中的平纹结构中，交织处的组织点个数相对较多。而在经纬纱线的浮长线处，不存在交织点。平纹部分在织物中表现有凸起也有凹陷，当浮长是处在表面的时候则会造成平纹也跟着凸起，而在浮长是在织物反面则会使平纹凹陷。同时也要认识到经纬纱浮长线是慢慢过渡到平纹组织的，所以织物表面的凹凸效应也是慢慢过渡。具体的模拟图如下：

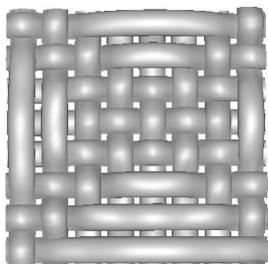


图 4.22 蜂巢组织正面图



图 4.23 蜂巢组织截面图

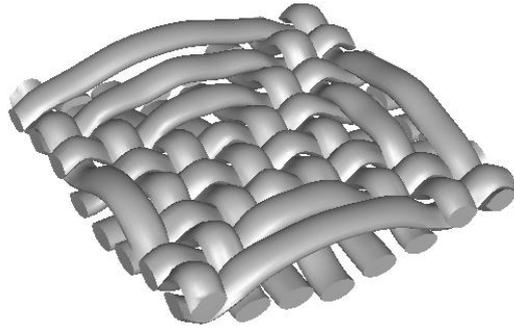


图 4.24 蜂巢组织模拟图

4.4 本章小结

介绍的计算机模拟仿真的基本步骤与算法，介绍了程序的具体执行运用 Peirce 模型及其扩展，对平纹、斜纹和部分联合组织的仿真，可以看到一般都能够以接近真实情况的模拟出来。说明计算机对织物组织结构模拟的可行性与真实性。

5 结论与展望

织物组织点的计算是建立在 Peirce 模型基础之上, 由于 Peirce 模型对于一些织物的不适应性, 本研究对 Peirce 模型的公式进行了经验修正。由于资料不足, 一些经验系数的给出, 是根据计算结果模拟的效果图与真实织物只能用观察方法比较后不断修正得到的。另外, 本计算还没有考虑由于纤维材料或纱线刚度的不同, 导致浮长线或相邻纱线对组织点位置的影响, 若要考虑该因素, 可能需要给各个组织点加一定的权重, 或者采用多重控制节点的方法, 这都需要进一步的研究。要最终解决织物内纱线的构型问题的最根本出路应该是寻找力学模型, 分析纱线在织造过程中的受力情况和染整工艺中的应力松弛, 计算其最终达到一种稳定状态时经纬纱线的形态。

至于浮长线的模拟精度的验证方面, 由于 Peirce 模型织物适应于浮长比较小且经纬纱能够紧密接触的织物, 纱线的变形量不大, 能够紧密接触, 做织物截面切片时比较容易确定纱线的屈曲波高, 因此, 比较好估计误差范围。但对于其他非平纹织物来说, 纱线有时候会变形很大, 如果切片制作的薄会影响数据的精度, 制作的厚又难以测量。目前是通过改变模拟数据, 得出最接近的形态。

在最后模拟图中, 会发现以椭圆为纱线截面模型时, 经纬纱交织的位置, 会产生经纬纱线的部分边缘被互相“吞噬”的现象, 放大之后看起来就像是一根纱线嵌入到另一根纱线中, 这样, 可能对总体的模拟效果影响不是很大, 但是若作为精确描述时, 仍是一个需改进的瑕疵。

致 谢

时光荏苒，光阴飞逝，转眼间就要离开美丽的校园，此刻不是即将进入社会的喜悦，而是要离开校园的淡淡感伤。在此要像对所有曾帮助过我的老师和同学致以最真挚的感谢。

本文是在我的导师邓中民教授的细心指导下完成。邓老师不仅是我良师也是我的益友，他思维活跃、学识渊博，做事勤勤恳恳，一丝不苟，科研求真务实，严谨周密，待人和善可亲，尽心尽力，这些都激励着我在以后的岁月要邓老师看齐。有人说，老师不仅仅是知识的传递者，更是人生道路的指路人。这句话用在邓老师身上最为合适不过了。在论文完成期间，从课题的选定，到基础知识的储备，到理论的分析，到结果的得出，还有最后论文编写的指南与修改，都给予了学生极大的帮助。在这里，对邓老师表示深深的感谢。还要感谢纺材学院的老师及研究生处的老师们，他们给我学习生活都有极大的帮助。

同时还要感谢同实验室的邓文、罗贵军、冉友庭、赵训明及我的好友陈曦、郭晓萌、耿程程等对我的热心支持与帮助，这份友情陪伴我度过了美好时光。此外还要感谢我的父母和家人，感谢他们对我的养育之恩、以及对我无私的关爱和支持，使我今天能顺利的完成学业。

最后感谢其他所有在我学习和成长过程中提供过帮助的人们。

参考文献

- [1] 冯蒲泉.CAD 技术在纺织行业中的应用.江苏纺织,2000(3).11-12
- [2] 韩玲, 段亚峰.纺织 CAD/CAM 现状分析.河北纺织, 2002 (2): 11-15
- [3] 顾平, 蒋高明, 张瑞云.纺织品 CAD 的原理与应用[M],北京: 中国纺织出版社,2005,1-15
- [4] McAllister Isascs. 1999 CAD chart[J].Textile World,1999,(5): 42-44
- [5] Derek Ward,Peter Lennox-Kerr,Towards total. IT integration[J]. Textile Month,1998, (12):20
- [6] Alison Grudier. CAD developers gear up for Y2K[J]. Textile World, 1999, (3):73-76
- [7] Textile World editor. Index to products at ITMA'99[J]. Textile World, 1999, (4):109
- [8] 郑天勇,李克兢.关于机织物 CAD 技术的研究[J].天津纺织工学院学报,1998, 17(2): 97-101
- [9] 缈旭红. 浅谈纺织品 CAD 的应用和发展趋势[J]国外纺织技术, 1998(7)42--44
- [10] 许鹤群.夏尚淳.纺织产品 CAD[M].北京: 中国纺织出版社,1998,57-63
- [11] 浙江丝绸工学院. 当今服装 CAD/CAM 的使用与发展.丝绸技术, 1998 1:40
- [12] 韩容.纺织 CAD/CAM 系统中图案创作的软件设计技巧.现代纺织技术, 2000,8(2):13-17
- [13] 杨斌.配色花纹 CAD 系统.纺织学报, 1996 2: 51
- [14] 任莺, 张瑞云, 李汝勤. 国内外纺织 CAD 发展状况及动向[J],纺织学报()
- [15] 童小素. 织物外观真实感模拟的研究 [D]:硕士论文. 浙江理工: 计算机运用技术 ,2007
- [16] 梁勇.家纺产品开发应用 CAD 浅析.纺织导报, 2002(2):28-32
- [17] 邓中民、吕红梅.机织物 CAD 系统中的仿真技术[J].棉纺织技术.2003(6): 325-328
- [18] 邓中民等. 机织物 CAD 系统中的仿真技术 [J].棉纺织技术, 2003, 31(6): 25-29
- [19] 邓中民等. 经二重组织 CAD[J].武汉纺织工学院学报,1997(2) : 10—13
- [20] 邓中民等. 复杂织物的 CAD 系统开发[J].四川纺织科技, 2000(1)39-42
- [21] 朱李丽等. 织物组织结构与其光照模型的计算机模拟[J]. 棉纺织技术, 2005,33(1):21-23
- [22] H.Y.Lin.Computer representation of woven fabric by using B-splines[J]. J.T.1999,1(1):33—35
- [23] Tian YI Liao, Sabit Adanur.Textile Res,1998,68(11), 841 — 847
- [24] 郑天勇. 机织物结构与外观的三维模拟研究[D].天津工业大学: 学位论文.2000.10
- [25] 王君泽等. 机织物 CAD 及三维仿真系统的研制[J].纺织学报, 2001, 22(6) 151-154
- [26] 刘基宏. 三维真实感织物结构辅助设计软件的制作 [J].上海纺织科技, 2000,28(4):57—58
- [27] 诸葛振荣, 杜淑峰. 基于 OpenGL 的组织图三维模拟显示[J], 纺织学报, 2003 年四月第 24 卷第四期

- [28] 祝双武, 高婵娟, 王彦欣. 织物仿真技术与 CAD 系统的开发[J], 棉纺织技术, 2004 年 5 月第 32 卷第五期
- [29] 朱华建, 张森林. 织物模拟技术分析及其基于 OpenGL 的三维效果实现[J], 江南大学学报(自然科学版), 2004 年 4 月第三卷第二期
- [30] 秦芳. 基于 OpenGL 的织物外观三维模拟. 苏州大学: 硕士学位论文. 2006.05
- [31] Yamaguchi F. A new curve fitting method using a CRT computer display. Graphics and Processing, 1978(7):425-437
- [32] J. L. Hu. Theories of woven fabric geometry[J]. Textile Asia, 1995(1): 58-60
- [33] Peirce F.T, Geometrical Principles Applicable to the Design of Functional Fabrics[J]. Text.Inst.Transaction, 17, 1947:123
- [34] Weil J. The synthesis of cloth objects [J]. Computer Graphics (Proc.Siggraph), 1986, 20:49-54
- [35] Richard S.WRight.Jr 著, 徐波译. OpenGL 超级宝典[M] 人民邮电出版社, 2005.09.01, 106-115
- [36] Dave shreiner 著. 李军、徐波等译. OpenGL 编程指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010 年 03 月
- [37] 朱超军. OpenGL 综述[J], 黑龙江科技信息, 2010, 50-51
- [38] 丁维维. 基于三维重建过程中纹理映射问题的研究[D]. 西安电子科技大学: 学位论文. 2010 年
- [39] 唐琳, 黄猛. 在 Visual C++6.0 中使用 GDI+ 的双缓冲技术绘图[J]. 电脑编程技巧与维护, 2007,(08)
- [40] 张志强, 吴宪平, 夏尊凤等. D2CAD 系统场景显示中光照参数的可视化集中控制[J]. 机械与电子, 2003 (6) :7-9
- [41] Hearn D , Baker M P. 计算机图形学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [42] 吴志明, 王鹏. 基于 OpenGL 的三维服装 CAD 中光照技术的实现, 北京服装学院学报, 2005 (4), 25-29
- [43] 吴奕立, 颜钢锋. 织物计算机模拟显示方法的探索[J]. 纺织学报. 1999 (5): 296-298
- [44] 崔世忠, 郑天勇. 用变截面纱线模型模拟平纹织物的研究[J]. 棉纺织技术. 2007(4). 212-214
- [45] 吴汉金, 织物几何结构概念的应用[J], 上海纺织工学院学报. 1979, 41-46
- [46] 雷利照. 织物的几何结构与规格参数确定[J], 上海纺织科技. 2008 年 6 月. 第 36 期
- [47] 王彦欣等. 机织物外观模拟技术及实现方法[J]. 毛纺科技. 2006(2) 54-58
- [48] 瞿畅等. 机织物几何模型及计算机模拟[J], 纺织学报, 2002(3):210-212
- [49] 杨俊霞, 张力. 织物中纱线的变位与外观的形成. 天津纺织科技. 1998(1): 12-15.
- [50] 曹红蓓. 三维编织物结构分析与计算机仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2002
- [51] Frederick Thomas Peirce, "The Geometry of Cloth Structure", Journal of Textile Institute, March, 1937 T45~T96
- [52] 徐一耿, 织物结构力学理论发展的现状、问题与对策[J], 力学与实践, 1996(1), 9-12
- [53] 贺显伟, 汪军, 植物组织几何模型及其在织物外观模拟上的应用[J]. 纺织导报, 2003(6), 114-116
- [54] A.Kemp, "An extension of Peirce's Cloth Geometry to the Treatment of

Non-circular Threads”, Journal of Textile Institute, 1958 Vol.49 T45

[55] J.B.Hamilton A Central System of Woven Fabric Geometry[J]. Journal of Textile Institute, 1964 Vol.55 67-82

[56] 于新安, 郝凤鸣, 纺织工艺学概论, 1998

[57] 武继松, 机织物组织数学模型及 CAD 技术的研究[D], 硕士学位论文, 华中科技大学: 系统工程, 2005