

西安工业大学

硕士学位论文

制导光纤自动上绕技术研究

姓名：张长荣

申请学位级别：硕士

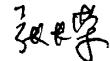
专业：机械电子工程

指导教师：宁生科

20080518

制导光纤自动上绕技术研究

学 科：机械电子工程

研究生签字：

指导教师签字：

摘 要

光纤缠绕是光纤制导导弹中的一项非常重要的技术，决定着成品线包的存放时间、光纤制导导弹的射程、光纤的释放速度、导弹的控制精度等导弹制导的重要特性。而上绕机构在光纤缠绕机中又是关键的技术之一。国内的光纤缠绕机在上绕段主要通过人工来实现，自动化程度比较低，人工参与环节比较多等因素造成上绕时缠绕图样缺陷，使光纤绕组成品率、生产效率不高。所以急需研制一种快速、稳定、高精度的光纤自动上绕机构。

在整个研究过程中根据光纤上绕时的特殊性，对上绕机构的整体功能进行分析，上绕过程各运动分析。在提出了以芯模转动并相对移动的上绕方案以后；提出了具体的上绕工作过程和运动流程。设计出上绕机构，进行上扰时控制量的计算。

其次，利用 SolidWorks 软件对自动上绕机构进行建模、优化与强度分析，得到光纤上绕机构的整体模型，该机构能够完成设计要求的各项指标。再利用运动学知识对机构的运动进行了分析，得到光纤上绕过程中容易产生震动，影响光纤上绕精度，提出解决的方法，并对光纤制导技术做出了展望。

最后得到了稳定性和准确性符合要求的上绕机构的模型，且增强了系统的灵活性和适应能力。但系统快速性有待于进一步改进，自动上绕机构的纠错功能也有待进一步提高。

关键词：光纤缠绕；数学模型；滞后角；上绕机构

Automatic guided around the fiber technology research for Fiber

Discipline: Mchanical and Electronic Engineering

Student Signature: *Zhang Changrong*

Supervisor Signature: *Ning Shengke*

Abstract

Fiber is winding fiber-guided missiles in a very important technology, determines the storage of finished product line packages, fiber-guided missiles the range, speed fiber release, the missile's control, such as precision-guided missiles of the important characteristics. And on institutions around the fiber in the winding machine is one of the key technologies. Domestic optical fiber around the winding machine in the last paragraph, mainly through artificial to achieve, relatively low degree of automation, many aspects of participation, and other factors when winding around on the design defects, the fiber winding yield, production efficiency is not high. Therefore, a urgent need to develop a fast, high-precision optical fiber around the body on automatic.

Throughout the course of the study based on fiber around the time of the special nature of the institutions around on the overall analysis on the movements of the process around. In order to put a core module and turn around on the relative movement of the program, the proposed concrete work on the process and the campaign around the process. On the design around the body, carried out on interference, control of the calculation.

Secondly, the use of SolidWorks software to automatically agencies around on the modeling, optimization and strength analysis, get around on the fiber in the overall model, which is able to complete the design requirements of the various indicators. Re-use knowledge of kinematics the movement was analyzed by fiber around the course easily lead to shock, impact on the fiber around the accuracy and propose solutions to the methods, and guidance technology has made fiber outlook.

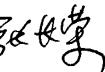
The end of the stability and accuracy to meet the requirements of the agencies around the model, and enhance the system's flexibility and adaptability. However, rapid system to be further improved, automatic functions around the FEC has yet to be further improved.

Key Words: Fiber Winding; Mathematical Model; Lag Angle; Winding Mechanism

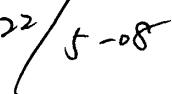
学位论文知识产权声明

本人完全了解西安工业大学有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间学位论文工作的知识产权属于西安工业大学。本人保证毕业离校后，使用学位论文工作成果或用学位论文工作成果发表论文时署名单位仍然为西安工业大学。大学有权保留送交的学位论文的复印件，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

学位论文作者签名：

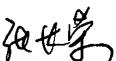
指导教师签名：

日期：

学位论文独创性声明

秉承学校严谨的学风与优良的科学道德,本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的成果,不包含本人已申请学位或他人已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

学位论文与资料若有不实之处,本人承担一切相关责任。

学位论文作者签名: 

指导教师签名: 

日期: 22/5/08

1 绪论

1.1 课题背景和课题来源

1.1.1 课题名称、课题来源

课题名称：制导光纤自动上绕技术研究

课题来源：兵器预研基金项目

1.1.2 课题背景

光纤是一种高质量的远距离信号传输介质，它具有信号损失小、失真低、传输信号速度快、质量高等一系列优点，因此广泛应用于国民经济的各个领域。特别是在军事上，它大量担负着信号采集、传感、输送等不同任务，成为不可缺少的信息载体。

光纤制导导弹是融电视制导、光传感器、计算机智能化数据处理和控制技术等为一体，利用光导纤维双向传输测量信息和控制信号来完成对受控导弹的制导控制，实现图像制导的一种新型武器，已逐渐成为对付坦克、直升机及舰艇等的一种有效杀伤性武器。光纤制导属于遥控制导系统，导弹导引头将所测得的信息通过光纤下行传输到控制站，控制站对信号进行处理并发出新的控制指令，再通过光纤上行传输到导弹上的执行系统，从而完成对导弹飞行的控制。由于光纤制导导弹具有保密性强、发射点隐蔽、抗电磁、核辐射和化学反应的干扰，制导精度高、信息传输容量大、攻击目标的变换速度快、能昼夜工作以及设备简单、体积小、重量轻、成本低和机动灵活等独特优势，深受各国军方的高度重视，应用前景极为广阔^[1~3]。

但是，要使光纤以导弹的飞行速度顺利地放开，就要考虑光纤的释放和光纤的缠绕问题。

首先，光纤的释放的问题。光纤缠绕在专用卷盘上装于导弹尾部，导弹发射后的飞行过程中，光纤释放。光纤释放主要有两方面要求。首先是顺利释放，保证信息的通畅传输。其次要求高速释放，满足导弹飞行速度要求。

对于顺利释放来说，一是光缆发生的微观变形应当在光纤微弯损耗所允许的范围内，以保证信息的不失真；二是在释放过程中不能发生纠缠、卡夹等现象，以免光缆变形，直至断裂使光纤制导彻底失败。对于高速释放来说，光纤的释放速度限制了弹道的飞行速度。

其次，光纤的缠绕问题。光纤的高速释放除了通过其它途径来解决外，一个重要的途径就是通过光纤缠绕来保证光纤的顺利释放。光纤缠绕技术是指把光纤缠绕在线轴上的技术。鉴于光纤较一般纤维的独特性质，以及光纤制导导弹的特殊用途，使得光纤缠绕成为

一项复杂的技术难题。

工业上普遍缠绕的纤维材料包括细丝、纱线、合成纤维和金属线。由于工程上、经济上和技术上的原因，人们总是希望绕制品是有序的、整洁的。整洁缠绕有两点好处，其一，在给定的容积内材料的缠绕量最大；其二，绕组稳定。所谓绕组稳定是指绕制材料不易移位或者解开。

但是，纤维材料与缠绕几何形状的某些组合提出了较大的难题，而且一般来讲对自动缠绕还认为是不现实的。大多数线形材料能够不用粘接整洁而稳定地绕成环状图样，因为它们的线是软的，而且不容易打结，绕线表面有较大的表面摩擦力，同时具有延展性，形状可以保持不变，如果绕线具有较高的抗拉强度，使绕组更趋于稳定了。

光纤比缝纫线和纱线刚硬得多，没有可压缩性，所以绕组的表面层光滑。因此，新层的纤维匝将遵从前一层各匝形成的图样，而不遵守缠绕机的控制。与铜线或钢丝相比，光纤的抗拉强度要低。光纤不像金属，光纤在较大拉力或剧烈弯曲之下容易破碎或断裂。光滑而硬的外包层其表面摩擦力很小，所以绕好的线匝很容易在绕组表面滑动，不容易获得稳定的绕组。

光纤绕组的应用有几个附加要求：

- ①选择的绕组图样不能妨碍高速放线，否则就会断线，另外，绕组必须稳定而不松动；
- ②光纤线缆不管是处于绕好状态还是处于解绕过程，它都可能正在传输信号，因此，信号传输损失必须最小；
- ③要尽可能达到最大缠绕密度。

为了满足这些要求，确定了光纤要尽可能整洁地绕在稍有梢度的线管上，线管的梢度要使光纤从其一端更容易地解绕。由于种种原因，其中包括使之具有更高的缠绕密度和在绕好状态下具有较低的信号传输损失等，选择了环状绕线图样而不是螺旋图样。从根本上讲，绕线是以精确的方式绕在线管上的，每个新绕的匝几乎都挨着前一匝。当线到线管的一端时就完成一层。慢慢地回绕到前一层上时，新一层开始缠绕。线管继续按原来方向转动，于是缠绕以反方向前进，以此方式继续缠绕直至整个绕组完成。

光纤制导导弹对缠绕的主要要求有：

最小的线包体积。由于导弹的特殊弹体结构，容纳光纤线包的容积有限，所以相同直径及长度的光纤所缠绕成的线包体积要尽可能的小。

缠绕图样简单易于高速释放。光纤释放时严禁出现缠结、折断等现象，所以在复杂的释放环境下，线包的缠绕图样是非常关键的。

对以上存在的问题及要求，具体的对光纤缠绕有以下描述及要求：光纤缠绕是把光纤逐匝逐层有序的密绕在一个带锥度的圆柱线轴上，每一条光纤匝的缠绕纹路垂直于线轴，匝与匝互相平行，而上层光纤叠放到下层光纤所形成的沟槽内，在每层光纤的两端相对其下层都有一定匝数的退绕，最后绕制成一个呈纺锤状的线包，如图 1.1 所示。

由于要防线顺利，所以要求光线有序密绕、垂直于线轴、线轴带锥度及每层两端的回退。线包安装在导弹上时，其心轴和弹体心轴平行，光纤沿着线包轴向脱离，带锥度的线包心轴有利于光纤从较小的一端顺利脱出；缠绕图样之所以选择垂直于心轴，是因为放线时每一层与相邻的层是从相对一端开始解绕，但是光纤总是从线轴

的细端引出的，如果缠绕图案带斜角即呈螺旋状，势必有一半的层数解绕时弯曲曲率太大，不利光纤顺利释放，也增加光线损坏的机率。有序缠绕即线包的每匝每层都是依次上绕的，以使放线时的解绕遵循一定的顺序；每层两端的退绕是为了保证线包整体牢固，不至出现垮塌。

在缠绕和放线问题中提到的上绕就是当一层缠满，光纤绕上第二层的行为。导弹在发射时，有很强的冲击过载，要求绕组整体结构牢固坚实，所以每当缠绕后面一层时，后续层在端面必须回退前层一定的匝数。所跨越的前层匝数过多，会直接减少每层的缠绕匝数，相同长度的光纤就需要更多的层数，线包体积增加是显然的。但是，跨越过小会失去跨越本身的意义，导致绕组松弛甚至坍塌，这些都是要杜绝的现象^[4~6]。

1.1.3 前人在本选题研究领域中的成果简述

在 1988 年初，有关方面宣布，法国航空航天公司与德国 MBB 公司合作开发的独眼巨人光纤制导导弹已用改进的导弹进行了试验发射。试验表明，光纤能顺利从导弹尾部释放，长达 6500m，并完好无损和具有要求的传输能力。试验导弹头部安装一台陀螺稳定电视摄像机。导弹巡航高度为 150m，速度为 150m/s。导弹射程为 60km 时，仍具有同样的性能。

1992 年意大利加入独眼巨人导弹项目，1996 年法德意三国承包独眼巨人导弹的公司集团提交的报告称，一架靶机顺利释放了直径 0.25mm 的光纤，长度不少于 60km。光纤线轴安装在靶机尾部，整个光纤质量不到 5kg。在随后 1997 年进行的试验中，一枚独眼巨人演示弹击中 16km 外的目标，精度为 1m。导弹的巡航高度为 150m，目标搜索段的飞行高度约为 600m。

在八十年代末，世界上不仅可以很好地处理光纤的高速放线，包括光纤缠绕技术在内，光纤绕组的稳定性和适合高速放线的绕组已经可以实现自动精确的缠绕，缠绕量可以轻松达到 60km 以上，而且在随后的研究中，不仅实现更精确的缠绕，导弹在飞行过程中导弹尾部可以放线，在地面的发射架上可以实现同步的放线。因此，光纤制导中的传输介质光纤不再是限制导弹速度、飞行高度和距离的主要因素，在缠绕图样的精确度和绕组的存放环境上都有很大的改善。

1990 年，由 James C. White, Decatur, George T. Pinson, Huntsville, 等人申请的美国专利：光纤缠绕机（apparatus for winding optical fiber on a bobbin）。该专利所描述的光纤缠

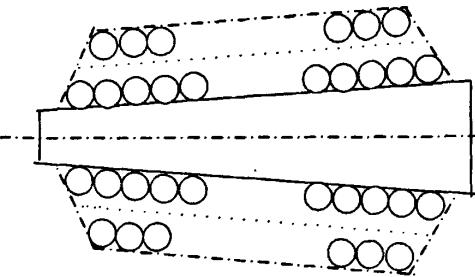


图 1.1 纺锤型线包

绕机已经具备了很多优良特性：

①能自动检测到光纤的匝间间隙和叠层，并当任何时刻检测到间隙或者叠层时绕轴会自动刹车，同时供线盘停止供线；然后绕轴将成功地倒转，以解绕设定匝数，并自动重新开始正常缠绕。

②能把缠绕张力控制在合理范围内，以减小线包的残余应力，减小微弯损耗，增加线包寿命。

③能自动实现光纤上绕控制。

④通过对缠绕滞后角的控制，控制缠绕走向及间隙。

⑤通过调节供线盘转速控制缠绕张力。

总之，上个世纪 90 年代初，美国已经基本实现了光纤缠绕自动化^[1-4]。

国内，起初的缠绕设备简陋，光纤绕轴匀速转动，由人工缠绕光纤。人工有非常明显的缺点：速度慢、各种参数不能量化，质量难以保证、缠绕长度受限制、对操作人员的技术要求较高等。目前，我国实现的半自动缠绕，仍然需要工人操作。因为要保证光纤的正确缠绕，就必须保证一定的缠绕角度和张力，但是其导向功能是由操作人员用手或类似器件来实现的，而且当一层光纤缠绕到绕线管的端部时，电机停转，人工对光纤进行换向操作，之后再启动电机带动滑台反向运动，进行下一层的缠绕，如此反复，完成缠绕作业。除了生产效率低外，成品线包每层两端的回退匝数太多，缠绕的光纤长度一般只能达到 10 公里，只有特殊情况下，才能缠绕成 20 公里长的光纤。且由于线包没有量化参数，为了保证线包传输信息的有效性，保存时间被大大减小，以至人为减少了使用寿命。

很明显，国内制导光纤缠绕技术有一定差距，而且上述方案存在工作效率低下、对操作人员要求高且容易出错等缺陷。实践表明，用这种方法进行的光纤缠绕时，由于自动化程度比较低，人工参与环节比较多等因素造成缠绕图样缺陷，使光纤缠绕成品率、生产效率不高，造成浪费。

2000 年，光纤缠绕机排线系统中滞后角的测量还处于机械式测量阶段，其精度和实时性都较差；对于线包每层两端的回退匝数的目标要求也有 7~8 匝之多。当前，在前人取得的成果基础上以及军事发展要求下，对于光纤自动缠绕提出了更高更新的目标：在缠绕长度上达到 100 公里以上，每层的退匝控制在 1.5~2.5 之间，线包寿命达到 5 年以上，全面量化各重要参数，实现高效率全自动闭环缠绕等。这些目标的提出无疑增加了排线控制的技术难度。

综上所述，在国内，该项研究应该是具有很大的潜在优势^[9]。

1.2 光纤的物理特性

光纤是光导纤维的简称。它是工作在光波波段的一种介质波导，通常是圆柱形。它把以光的形式出现的电磁波能量利用全反射的原理约束在界面内，并引导光波沿着光纤轴线的方向前进。光纤的传输特性由其结构和材料决定。

光纤的基本结构是两层圆柱状媒介，内层为纤芯，外层为包层；纤芯的折射率为 n_1 比包层的折射率 n_2 稍大。当满足一定的入射条件时，光波就能够沿着纤芯向前传播。如图 1.2 所示是单根光纤的结构图。实际的光纤在包层外面还有一保护层，其用途是保护光纤免受环境和机械损伤。有的光纤还有更加复杂的结构，以满足使用过程中不同的要求^[9]。



图 1.2 单根光纤的结构简图

光波在光纤中传播时，由于纤芯边界的限制，其电磁场是不连续的。

1.2.1 光纤的弯曲

光纤的弯曲对光线的影响是很大的。

1) 光学方面

实际使用中，光纤经常处于弯曲状态，光路长度、数值孔径的等诸多参数都会发生变化，如图 1.3 所示为光纤弯曲时光纤传播的情况。光纤在 P 处发生弯曲。光线在距离中心轴 h 处的 C 点进入弯曲工作区域，两次全发射点之间的距离 AB。利用图中的集合关系可得

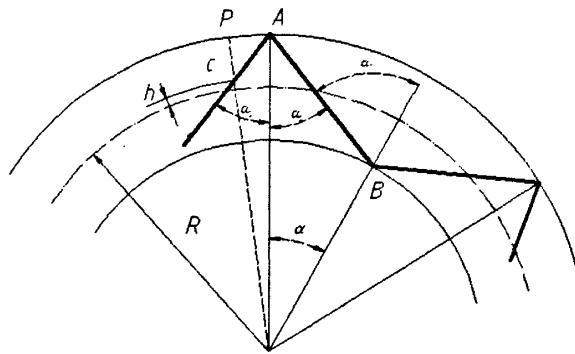


图 1.3 光纤弯曲时光线的传播

$$S_0 = \frac{\sin \alpha}{\beta} \left(1 - \frac{\alpha}{R} \right) S_f \quad (1.1)$$

式中 α 为纤芯半径； R 为光纤弯曲。 S_0 是光纤弯曲时，单位光纤长度上子午线的光路长度。

由于 $(\sin \alpha / \alpha) < 1, (a/R) < 1$, 因而有 $S_0 < S_{\pm}$ 。光纤弯曲时子午线的光路长度减小了。与此对应, 起单位长度的反射次数也变小了, 即 $\eta_0 < \eta_{\pm}$ 。 η_0 的具体表达式为

$$\frac{\eta_0}{\eta_{\pm}} = \frac{1}{\frac{1}{n_0} + \alpha a} \quad (1.2)$$

利用图 1.2 的几何关系, 还可求出光纤弯曲时孔径交 ϕ_0 的表达式为

$$\sin \phi_0 = \frac{1}{n_0} \left[n_1^2 - n_2^2 \left(\frac{R+a}{R+h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.3)$$

由此可见, 光纤弯曲时其入射端面上个点的孔径叫不同, 是沿光纤弯曲方向由大变小。

有上述分析可知, 光纤弯曲时, 由于全反射条件不满足, 其透光量会下降。这时要计算子午线光纤的全反射, 又要推导光线的全反射条件才能求出光纤弯曲时透光量和弯曲半径的关系。当 $R/2a < 50$ 时, 透光量开始下降; $R/2a \approx 20$ 时, 头光率明显下降, 说明大量光能量已从光纤包层飞出。图 1.4 为光纤透光率随弯曲半径变化的一个典型的测量结果 [10]:

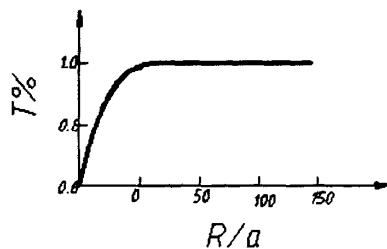


图 1.4 光纤透光率与弯曲半径的关系曲线

可见, 光纤缠绕半径过小会影响数据的传输。

2) 结构方面

在结构方面, 当光纤的弯曲半径太小的时候, 就会出现光纤上的应力集中, 使光纤断裂。如图 1.5 所示。

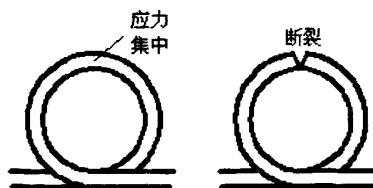


图 1.5 光纤弯曲半径过小发生断裂

1.2.2 光纤的储藏

光纤在绕制好后，必然需要存放，由于在存放过程中光纤的内应力会得到释放，如果在缠绕时，光纤的内应力过大就会导致光纤在存放过程中的变形、老化的问题。

由于内应力过大会导致光纤过快的老化、变形（变细、拉长）。如果绕制时张力过小还会导致光纤在存放过程中松弛，这样会间接导致垮塌的现象。

所以，在光纤缠绕过程中控制光纤的张力是非常重要的^[10]。

1.3 本人在本选题研究领域中的成果简述

作者所做的主要工作包括对光纤缠绕机上绕过程基础理论的学习和研究，提出了上绕机构的运动方案以后，根据上绕时的要求，结合国内外已有的纤维缠绕机、钢丝缠绕机等缠绕设备的工作原理，在经过对不同类型的方案的比较以后，提出了以芯模转动并相对移动为基础的缠绕机的概念模型。

在提出缠绕机的概念模型以后，提出了具体的上绕工作过程和运动流程。设计出上绕机构，进行上扰时控制量的计算。并且对各个部件和整体机构进行了仿真和强度分析，以验证上绕机构方案的优点，并提出后续工作的方向。

2 光纤上绕的原理

为了满足制导光纤缠绕和放线时的要求。就要使放置光纤绕组的线管有一定的梢度，然后光纤一匝匝得以环形缠绕到线管上，形成纺锤体线包。于是在缠绕过程中，每缠完一层退绕到第二层的技术也成了缠绕过程其中的一个关键技术。如图 2.1。本章就光纤上绕的原理进行分析。

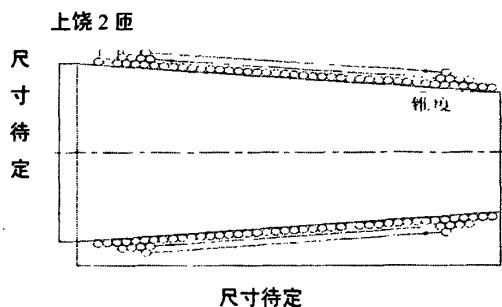


图 2.1 光纤上绕示意图

2.1 光纤上绕机构整体功能分析

上绕是当一层缠满，光纤绕上次一层的运动。如图 2.2 所示。导弹在发射时，有很强的冲击过载，要求绕组整体结构牢固坚实，所以每当缠绕后面一层时，后续层在端面必须跨越前层一定的匝数，这就是线包成纺锤形的原因。所跨越的前层匝数过多，会直接减小每层的缠绕匝数，相同长度的光纤就需要更多的层数，线包体积增加是显然的。

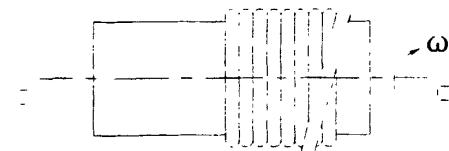


图 2.2 光纤上绕

图 2.3 是绕组的轴向剖面图，对比了在不同跨越匝数的情况下，线包体积的变化，白色所示即跨越过大而没有利用的空间截面。但是，跨越过小会导致绕组松弛甚至坍塌，这些都是要杜绝的现象。

上绕匝数的多少其实是衡量缠绕技术的一个指标，技术措施采取得当时，上绕匝数仅为 1.5~2.5 之间即可达到绕组牢固的要求。

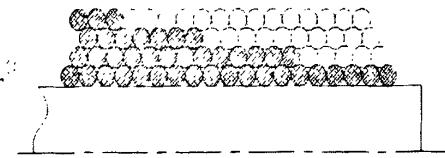


图 2.3 上绕过大的体积浪费

上绕是随着缠绕方向在有限的时间内改变的同时，要控制跨越距离的大小，即跨越有限的匝数 1.5~2.5，由于光纤线径只有 $0.15\text{mm} \sim 0.80\text{mm}$ ，所以这个距离实际上很小，最小只有 2.25mm 。其精确性要求很高。其间，实现绕轴直线运动的电机在完成减速、停止、加速的动作同时要使缠绕符合预定要求；绕轴旋转的电机配合直线运动的变化也要调速。

光纤绕完前一层，绕轴直线运动的电机在换向回走的同时，要使光纤准确地绕制下一层，技术要求为跨越匝数 2 匝，正负误差为 0.5 匝。上绕装置还必须和绕轴直线运动的电机相配合，在其完成时间，滞后角角度调整等多方面都需要控制^[11~12]。

2.2 上绕模型分析

2.2.1 理论模型

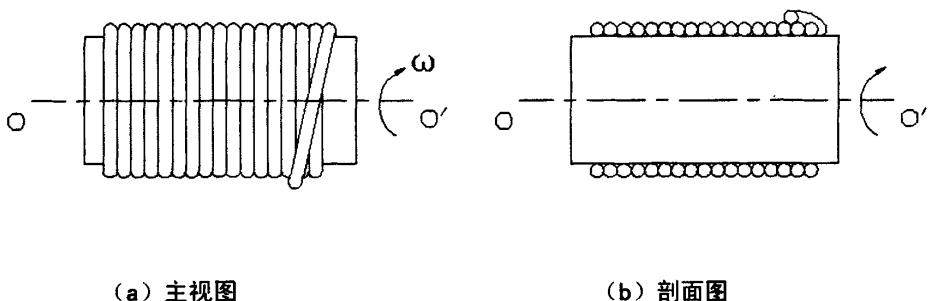


图 2.4 光纤的绕制过程

如图 2.4 所示，当光纤平行密绕完成一层后，光纤从芯模缠绕端点开始，往另一端退绕 1.5--2.5 个线径，与此同时绕线电机带动芯轴转动，于是光纤在芯模的表面形成一条螺旋线，成功地绕制下一层，完成一次上绕过程。

2.2.2 模型适用的前提条件

研究光纤缠绕排列规律便是光纤上绕的基本原理，建立该原理采用的理论模型必须符合相关的条件：

- ①用一束或几股成一束的连续光纤，不间断地进行缠绕。偶尔的断线不在该理论的考虑范围之列；
- ②光纤有次序、按规律稳定地分布于芯模表面；

③芯模呈刚性体，光纤缠绕时受到压紧力，其几何形状基本保持不变。该理论不计芯模微小形变对绕线的影响；

④光纤缠绕能承受一定张紧力，该张紧力远大于纤维自重的影响。该理论对光纤自重忽略不计；

⑤光纤与芯模表面或光纤缠绕层之间存在摩擦力。

2.2.3 上绕的原始物理模型

光纤上绕的原始模型如图 2.5 所示。在上绕过程中绕线芯轴既相对排线嘴做回转运动，又相对排线嘴做进给运动；当一层绕满时就需要上绕并形成跨越，这样就需要保持芯轴与排线导引嘴回转运动完成的同时，完成芯轴与排线导引嘴的反向运动并实现反向后变速度运动，当跨越完成后又进入紧密绕制的过程。所以可以知道芯轴与排线嘴一直做匀速转动，而芯轴相对排线导引嘴的运动是非匀速进给运动，非匀速进给运动是相对整个线包的绕制过程来说的，对于在同一层上的绕制是匀速进给运动，在绕满层后实现反向进给，并且完成一次加速、减速直到上绕过程结束，又转入匀速进给状态^[13~15]。

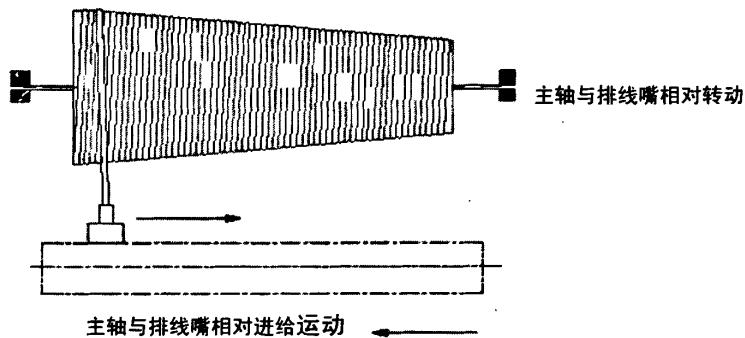


图 2.5 绕线的原始模型

2.3 上绕过程中各运动分析

2.3.1 上绕过程中的回转运动分析

在上绕过程中，为了保证光纤能够顺利缠绕到下一层上，就必须满足芯模（主轴）与排线嘴之间存在相对转动。实现该过程有两种方案，并且在这两种方案中相对转动还可以分为匀速转动、非匀速转动。

在匀速转动时单位时间内绕过的圈数是一致的，但是这时排线嘴送线的速度随着线芯的直径（或者实时直径）的改变而变化。该种运动下系统容易控制。但送线速度难以控制。

在非匀速转动的，转动可以是任意的，但是为了便于控制，或者说带给系统控制的一些好处，所以选择排线嘴送线速度保证匀速。在这种情况下转动的角速度是与线芯直径（或者实时直径）有关。该种情况下系统可以容易的控制光纤的张力。

2.3.2 上绕过程中进给运动分析

为了在上绕过程中能够使光纤有规则的、紧密的绕上下一层，继续完成缠绕，就要保证排线引导嘴与芯模（主轴）之间存在相对平动，在2.3.1节中讨论的两种相对转动速度的控制方法，均能实现该功能。

当主轴匀速旋转并且绕线在同一线层时，该进给运动为匀速进给运动，在该线层绕满后需要上绕时，首先进给加速运动使的满足上绕的条件，上绕后减速，到跨越指定匝数时，进给运动方向相反，继续保持或增大加速度，使得进给在反方向上也满足在同层上的进给速度。该过程主要是要控制上绕过程中的加速度，使得上绕能够发生并跨越一定匝数，而且在进入上层绕层时很能够紧密绕线。

当主轴非匀速转动时，该过程类似，只是进给速度是随绕线变化的，在上绕过程中变化就更加复杂了。

2.3.3 上绕过程中排线嘴送线的分析

排线嘴的运动主要是在高度方向上实现与绕线层保持一致或者近似一致，所以它的控制精度要求较低。有基本的几何关系可知，只是在上绕完成后动作一次，上升 $\sqrt{3}$ 倍的光纤半径。

2.3.4 上绕机构中压线机构的分析

在上绕过程中，由于光纤中张力大小发生变化，而张力大小的变化会引起上绕的质量以及整体绕线的质量，所以在上绕过程中要对光纤的张力的变化进行抑制。所以在此过程中就需要一个压线机构来控制光纤的张力。所以该压线机构只有在上绕过程开始时作用，结束时完成。

3 上绕机构的设计

光纤上绕机构就是实现当光纤缠绕满一层时光纤自动转入下一层缠绕功能的机构。它在光纤缠绕机中是重要的机构之一。

上绕机构要满足以下几个要求：

- ①保证上绕机构根据设计要求，按预定的时间完成上绕；
- ②能够接受动力的来源。；
- ③能够完成与排线系统的通信和协调。且不会在芯模上出现不必要的缠绕；
- ④运动的控制简单。

3.1 上绕机构运动方案设计

3.1.1 原始设计参数的确定

根据设计要求得到工艺参数如下：

线 径:	$\Phi 0.15\text{mm} \sim \Phi 0.80\text{mm}$
节距范围:	$0.100\text{mm} \sim 1000\text{mm}$
节距设定精度:	0.001mm
节距控制精度:	$\pm 0.01\text{mm}$
主轴转速:	$1 \sim 800\text{r/min}$
主轴回旋半径:	150mm
有效工作行程:	450mm
线张力范围:	$80\text{g} \sim 300\text{g}$, 控制精度: $\pm 5\text{g}$
计长范围:	$1 \sim 99999\text{m}$
滞后角测量精度:	0.001°
缠绕光纤长度:	$\leq 62\text{km}$
缠绕线包外形:	纺锤型（单边退绕 $1.5 \sim 2.5$ 匝）
缠绕层数:	≤ 170 层

3.1.2 运动规律的分析

要实现光纤在上绕段按螺旋线方式退绕 $1.5 \sim 2.5$ 匝,然后继续平行密绕绕满该层,重复实现该功能,可以将其分解为以下几 3 个动作:

- ①为了保证光纤能够顺利地缠绕到下一层上,只要保证排线嘴与轴芯做相对转动就可达到该功能。
- ②使光纤在上绕段退绕 $1.5 \sim 2.5$ 匝,完成该动作就必须保证排线嘴与主轴做相对移动。

③光纤两边上绕，要保证光纤上绕就必须保证动作②能够反向，并且在方向初试阶段能够快速运动。

另外，除了实现动作必须完成的动作之外为了能够精确的控制还必须有一些辅助动作，如在绕线跨越到上层后，为了保证光纤的张力以及滞后角的控制，排线嘴必须与绕线层在同一高度。可见必要的辅助动作还要有排线嘴与主轴在高度方向的相对移动。

由于运动②、③能够合成为一起，所以可以合成为一个运动进行分析，该运动必须能够实现变向以及变速的功能。定义自动光纤绕线机的坐标系，沿主轴方向为 X 轴，主轴与排线嘴之间距离方向为 Y 轴，高度方向为 Z 轴。如图 3.1 所示：

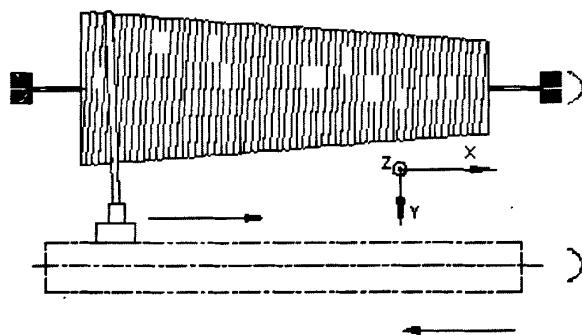


图 3.1 自动光纤缠绕机坐标

综上所述，对运动分解结果如下：

1) 回转运动 A

功能：主运动，用于实现排线嘴与芯模在芯模的径向的相对转动。

数量：一个

2) 相对移动 B

运动形式：直线运动

功能：进给运动，用于实现排线嘴与芯模在芯模的轴线方向的相对移动。（沿 X 轴方向，并且能实现反向、变速）

数量：一个

3) 其它辅助运动 C

运动形式：直线运动

功能：辅助运动，实现排线嘴与绕线层在同一高度

数量：一个

3.1.3 运动形式以及方案的提出

1) A 运动方案的提出

a、方案 1:

主轴不动，使排线嘴相对主轴转动。在上绕段通过排线嘴引导光纤绕到芯模上。运动简图如图 3.2：

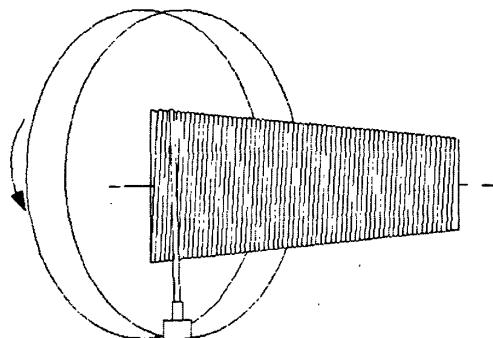


图 3.2 排线嘴相对主轴转动

b、方案 2:

主轴旋转，排线嘴不动。通过主轴的旋转使光纤绕到芯模上。机构运动简图如图 3.3：

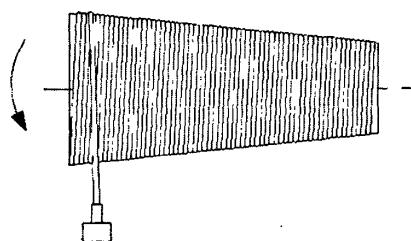


图 3.3 主轴旋转

2) B 运动方案提出**a、方案 1:**

主轴不动，排线嘴做直线运动。在上绕段通过排线嘴的直线运动引导光纤完成退绕 1.5~2.5 匝。运动简图如图 3.4 所示：

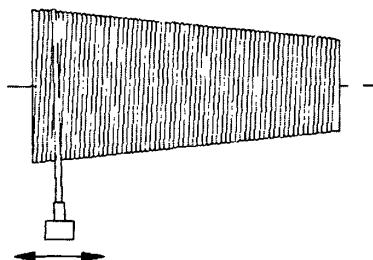


图 3.4 排线嘴直线运动

b、方案 2:

排线嘴不动，主轴做直线运动。在上绕段通过主轴的直线运动完成退绕 1.5~2.5 匝。运动简图如图 3.5 所示

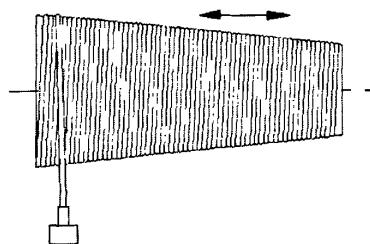


图 3.5 主轴做直线运动

3)C 运动方案提出

a、方案 1：

主轴不动，排线嘴高度方向做直线运动，运动简图如图 3.6 所示：

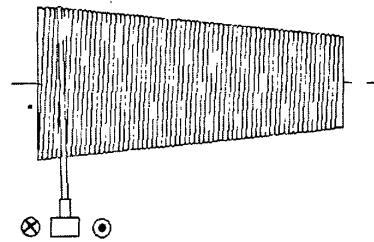


图 3.6 主轴高度不变，排线嘴做直线运动

b、方案 2：

排线嘴不动，主轴做直线运动，运动简图如图 3.7 所示

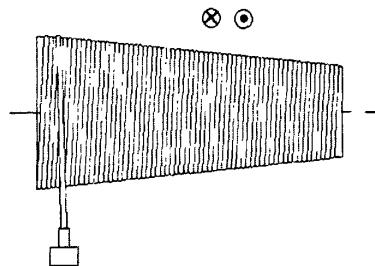


图 3.7 排线嘴高度不变，主轴做直线运动

4) 方案的组合与选择

首先，根据运动 A 和运动 B 组合方案使的方案能够完成其基本的功能，再把辅助运动 C 整合如系统方案。

根据运动 A 和运动 B 组合以下方案：

a、方案一：芯模转动，排线嘴做相对移动

这种方案实现是在上绕段，芯模做回旋运动，排线嘴移动 1.5-2.5 个线径，使光纤按螺旋线方式上绕，然后排线嘴停止运动，开始下一层的缠绕，以次循环进行。

b、方案二:芯模转动并做相对移动

此方案和方案一很类似，只是把相对移动也放在芯模上，利用平行密绕时的滑台电机和绕线电机完成运动。其排线嘴就可以固定起来。

c、方案三:排线嘴转动，芯模做相对移动

排线嘴固定在一个大的圆环上，当圆环转动时，带动排线嘴绕芯模做回转运动，于是就把回转运动加到排线嘴上了，而芯模则做在其轴线方向和排线嘴做相对的运动，其运动过程是：在上绕时，滑台电机带动芯模移动需要的距离，圆环带动排线嘴转动，实现上绕。

d、方案四:排线嘴转动并做相对移动

此方案和方案三很类似，但是把相对移动也放在排线嘴上，即把两个运动都加在一个部件上，既在实现回旋上绕的同时平行移动，实现所制定的上绕。

3.1.4 方案的选择确定

前面所提出的四个运动方案，按旋转运动所在的部件不同，可以分为两大类：方案一和方案二同样是芯模做旋转，这是一类，这里称为芯模旋转类；另一类是排线嘴做旋转运动，就是方案三和方案四，称为排线嘴旋转类。这两个方案的优缺点各不相同。

根据对比发现运动 A 采用主轴旋转方式时，具有转动半径小，并且可使排线嘴固定这样更有利于控制光纤的张力以及送纤速度，而在运动 B 的运动方式选择时，如果采用排线嘴运动时，虽然系统的惯性很小，但是由于排线嘴要进行光纤张力的控制，这样会直接导致光纤张力控制的困难程度。所以采用主轴直线运动的方式。

再考虑到辅助运动 C 时，由于主轴已经叠加了两个运动如果再次叠加运动 C 会使运动的惯量更大，光纤直径很小很难在大的控制惯量下达到精确的控制。另外，由于光纤直径很小所以绕线完成后的直径和初始线芯的直径差距不是很大，而且高度方向上变化对光纤的张力影响不大。所以辅助运动采用排线嘴在高度方向做直线运动。

最终方案确定为：主轴旋转并且能够完成 X 轴方向进给，排线嘴能够在高度方向上实现进给^[19~20]。

3.2 上绕过程设计

研究上绕过程时，该过程可分为三个阶段，他们分别是：①从平行密绕到停止；②从停止到上绕到第一个接触点；③光纤上绕到第一个接触点到上绕结束。下面就对这几个过程进行分析。

3.2.1 上绕过程的第一阶段

上绕的第一个阶段就是从正常的平行密绕到主轴停止进给，该过程的目的就是为上绕做准备，使滞后角能够迅速增大到需要的大小，该过程中主轴保持同样的速度旋转，主轴进给则减速到零。

3.2.2 上绕过程的第二阶段

上绕的第二个阶段就是从主轴停止进给到开始，该过程的目的就是为了增大滞后角，是得满足上绕条件，即 $\theta > -\arctan[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)]$ ^[21]。

当滞后角大于上绕所需的最小滞后角时，上绕发生。该过程中主轴进给应保持静止或者很小的反向进给速度（反向是相对之前的同层缠绕的进给速度），以适应下一阶段的主轴进给速度的调整。

3.2.3 上绕过程的第三阶段

上绕的第三个阶段就是上绕到第一个接触点到上绕结束，此后光纤进入下一纤层进行同层缠绕，此过程的目的就是发生上绕，理想情况下在该过程中主轴旋转一周，光纤达到跨越的指定匝数 N 。所以在该过程中主轴的进给与上绕前主轴进给方向相反，进给速度是则是上绕前的 N 倍。第二过程中主轴保持停转或很小的反向进给（反向是相对之前的同层缠绕的进给速度），而第三阶段则要实现比同层缠绕大的进给速度，所以该机全必然存在加速过成，而完成该阶段后，光线缠绕进入同层内的缠绕，主轴进给速度是不变的，所以最理想的情况就是，在第三阶段主轴进给速度先加速后减速，使得主轴进给速度在该阶段是连续的，并且该过程主轴进给两位 N 倍的线径。则以过程需要在主轴旋转一周的时间内进行，所以对主轴进给系统的电机响应速度要求很高。

另外，在此过程中光纤层发生改变，也就是说排线嘴的高度也需要改变。排线嘴需要在各个过程中进给到光纤下一层的高度，有几何关系可知，上下层光纤的高度差为 $\sqrt{3}$ 倍的光纤直径。该过程需要在主轴旋转一周的情况下完成。

3.3 各执行机构分析

分析已经拟订的方案，可知该方案由三个动作合成而成，所以协调机构各动作一致就非常重要了，当协调了各动作的一致后就该选取机构来完成各个动作了。

3.3.1 拟订运动循环图

对自动光纤缠绕机的工作过程进行分析。首先，光纤在芯模上定位（该动作不由本机完成），然后主轴旋转，以匀速转动进行绕线，此时动作 B 也启动，配合主轴旋转进行匀速进给，通过检测装置可以知道该层绕满时，排线嘴高度移到下一线层，主轴匀速进给立刻停止，并迅速反向加速并减速，使绕线上跨到上一线层并且跨越 1.5~2.5 匝，保持主轴进给匀速。直到该层绕满，在这样循环进入下一线层进行绕线。上绕过程的运动循环图 3.10 所示：

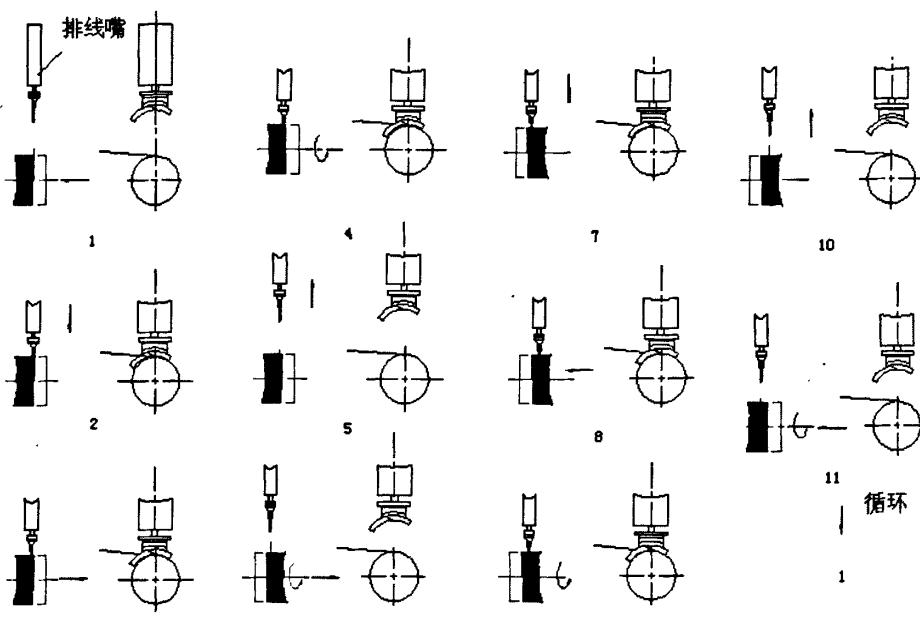


图 3.10 自动光纤缠绕机动作循环图

图 3.10① 收线轴逆时钟旋转，收线轴左移第一层设定宽度到收线轴右端。

图 3.10② 排线嘴缓慢向下移动，至骨架上（卸压），

图 3.10③ 收线轴向右移动设定退绕宽度，

图 3.10④ 收线轴逆时钟旋转一圈，

图 3.10⑤ 排线嘴向上移动，

图 3.10⑥ 收线轴随滑台向右移动，同时逆时钟旋转，将该层绕至设定宽度，

图 3.10⑦ 排线嘴缓慢向下移动至骨架上（卸压），

图 3.10⑧ 收线轴向左移动设定退绕宽度，

图 3.10⑨ 收线轴逆时钟旋转一圈，

图 3.10⑩ 排线嘴向上移动，

图 3.10⑪ 收线轴逆时钟旋转，同时向左移层设定宽度到收线轴右端，工位回至图 3.10 ①。

3.3.2 各动作执行机构的设计

1) 主轴旋转机构的设计

由于主轴转速相对较高，而且扭矩比较小，并且考虑到为主轴水平进给运动减小惯性和冲击，所以主轴采用和电机用联轴器相连。电机直接驱动主轴旋转。

2) 主轴进给机构的设计

由于主轴进给运动要保证光纤紧密的缠绕在芯模或者在每一线层上紧密的缠绕，而光纤的直径又很小，所以要求主轴进给运动的控制精度很高，而且主轴进给运动要实现反向和变速运动。可选取丝杠螺母、气压传动、液压传动机构。

考虑到这么多因素的限制，选用丝杠螺母机构驱动进给在滑轨上运动，这样既能够达到高的控制精度又能够满足双向运动和变速运动。

3) 排线嘴高度方向的进给机构设计

由于排线嘴要在高度方向上实现间歇性进给运动，进给时响应速度要很快。但是该进给运动的进给量每次只是光纤的直径，而光线的直径很小，所以对进给响应速度的要求可以适当降低。考虑到成本以及稳定性等方面的因素，该机构还是选用丝杠螺母机构驱动排线嘴在滑轨上运动。

4) 压线机构的运动

由于压线运动只在上绕过程中作用，所以采用压线勾爪来完成，当上绕开始时放下压线勾爪，上绕结束时抬起。考虑到勾爪需要放下、抬起动作并且作用时间较短，故采用旋转式机构来完成。整个机构固定在排线嘴上。

压线机构的作用是在上绕过程中固定送纤端，保证滞后角精度的机构。卡爪只是在上绕过程中起到固定线的作用，所以只要在上绕过程中作用。上绕前光纤与排线嘴的角度是一定的，上绕结束后光纤与排线嘴的角度还是一致的，至此过程中，只要在光纤上绕开始前放下卡爪，结束后收起卡爪即可。为了使得卡爪尽量少干扰缠绕过程，就必须使得放下、收起迅速可控。

卡爪所受到的力为光纤变向时产生的压力。光纤拉力为 F ，滞后角为 θ ，如图 3.11 所示，卡爪所收到的压力为：

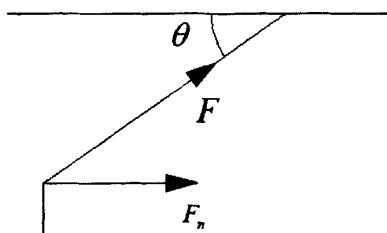


图 3.11 卡爪受力图

$$F_n = F \cdot \tan \theta$$

由设计要求可得，光线的张力为 $80g \sim 300g$ ，所以 $F_n < 300g$ 。设计卡爪时，其强度要大于 $300g$ 。

根据卡爪受力小，需要迅速可控，而且它安装在排线嘴进给机构上，应尽量减化其结构，使得该机构紧凑、小巧。因为舵机由无核心马达所构成，可依据接收机发出的指令，转动至定点的位置。舵机的优点有：1. 结构简单，质量小；2. 可精确控制角度；3. 同质量扭矩大；4. 易安装等优点。故使用舵机直接控制卡爪来实现此机构^[23~26]。

3.3.3 主轴电机扭矩的计算

根据 3.3.1 所列出的工艺、运动参数可知主轴的最高转速为 $800r/min$ ，主轴回转半径为 $150mm$ ，最大张力为 $300g$ ，所以可以估算出主轴的最大扭矩为：

$$T_{\text{有效}} = FR = 300g \times 9.8N/Kg \times 150mm = 441N/mm \quad (3.4)$$

由于主轴转动速度较高，所以传动链较短，估取传动系数为 60% （即 $\eta=0.6$ ），取安全系数为 1.8 （即 $\alpha=1.8$ ），所以需要主轴电机的扭矩为：

$$T_{\text{电机}} = T_{\text{有效}} \alpha / \eta = 441 \times 1.8 / 0.6 = 1.323N/m \quad (3.5)$$

3.3.4 各部分驱动力的计算

常用的驱动器大致有三种：直流电机、步进电机、伺服电机、汽缸等。可能还会有储能器、弹簧等等下面以电机的选择。图 3.12 示意出电机容量选择的方法和步骤。从图 3.12 可知，在决定电机容量时涉及负载的估算、驱动对象运动规律的确定、传动系统转动惯量的折算等内容。下面按照图 3.12 的步骤介绍相关的问题^[27~28]。

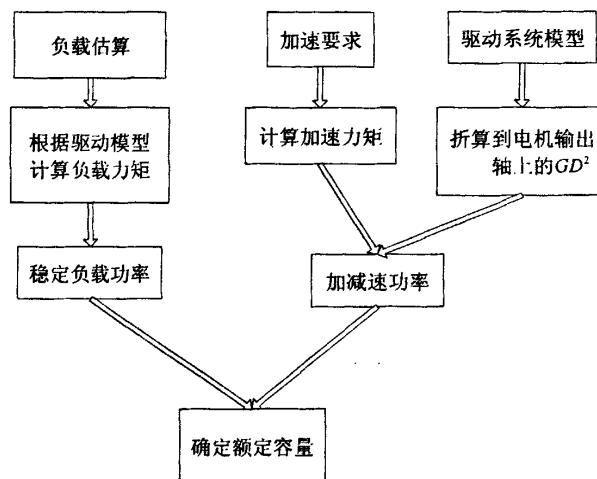


图 3-12 决定电机容量的方法及步骤

负载的估算

决定驱动器容量和传动系统容量是机构设计的内容之一。负载估算的正确性影响到上述系统每一个元器件选择的合理性。从驱动器到负载之间力的传递路线如图 3.13 所示。

电机是将电能转换为机械能的部件,由此发生的力经过以减速器为核心的动力传递系统到达负载端。在此过程中,一部分力克服摩擦,以热能的形式耗散出去,因此传动效率总无法达到100%。在实际设计中,当然应当将上述路线的顺序倒过来,即从负载的大小以及摩擦系数、运动副的效率去推算电机的容量。一般标准运动单元和零部件的传动效率可以从设计手册中查阅到。

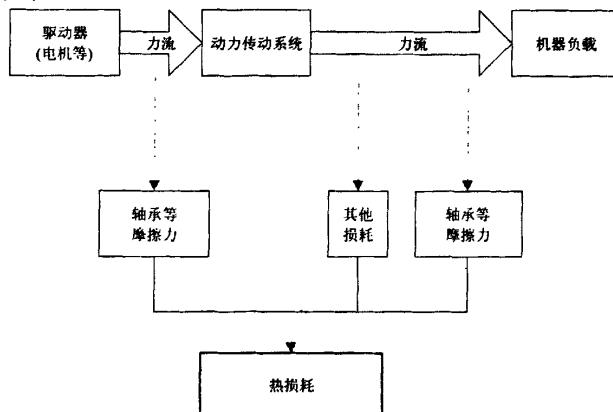


图 3.13 驱动器到负载之间的传递路线

施加于系统的负载大致可以划分成3个基本类型:有效力、无效力、惯性力。

1)有效力的计算方法

机械对外做功,从本质上需要力。自动光纤缠绕机在主轴旋转时,支撑主轴的轴承等与主轴之间存在着摩擦力。图3.14是主轴旋转时受到摩擦力的受力简况。这时摩擦力实际上是工作阻力。从图3.14可以看出,简化后所有的力和力矩在平面里构成一个平衡力系。

图3.15表示有效力克服负载拉力做功的情况。主动转矩是有效力,其大小与缠绕光纤的速度无关,但是与加速度有关。其计算公式为:

$$\text{主动力矩 } T = J\epsilon + DW/2 \quad (3.6)$$

式中, ϵ 是电机转动的角加速度; J 是整个系统转化到电机轴上的折算转动惯量,也包括负载 W 折算的部分。

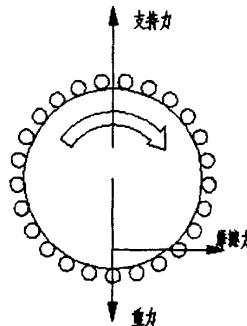


图 3.14 驱动轴受力

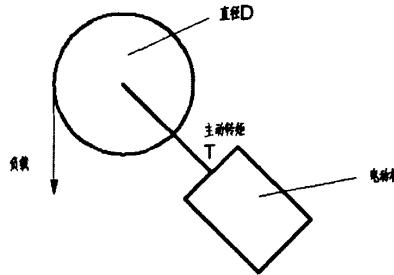


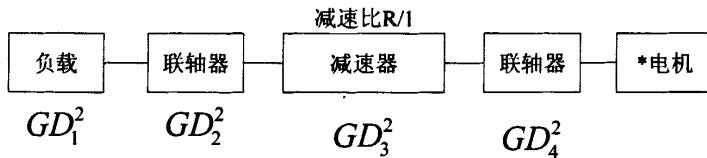
图 3.15 克服负载重力做功

2) 无效力的计算方法

估算无效力比较困难。摩擦力就是一个例子。估计摩擦力在理论上可以用摩擦系数，在经验上常借助传动效率。

$$\text{无效力矩 } T = \mu D W / 2 \quad (3.7)$$

等价 GD^2 折算

图 3.16 GD^2 向电机轴折算

整个传动系统折算到电机轴的等价 GD^2 为

$$GD_n^2 = \frac{(GD_1^2 + GD_2^2)}{R^2} + GD_3^2 + GD_4^2 \quad (3.8)$$

式 (3.2) 中可见，负载的 GD^2 折算到电机轴后，变成 $1/R^2$ 。依次减速比越大，负载对电机转动惯量的影响越小。相反，电机轴联轴器 GD^2 的影响是 1: 1，不可小看。

设负载的 GD^2 为 GD_L^2 、电机的加速力矩为 T 、传动系统的减速比为 $1/R$ ，忽略联轴器的 GD^2 ，则电机从速度 0 加速至 n 所花费的时间 t 也有下式算出：

$$t = \frac{1}{R^2} \frac{nGD_L^2}{375T} \quad (3.9)$$

a、对主轴旋转电机参数的计算

具体的设计参数请参看附录 E 零件图所示。

负载力为光纤的张力，有参数要求可知其大小为 $F_{\text{负载}} = 300g = 3N$ 因为主轴旋转时只需克服轴承的摩擦力，而当轴承润滑良好时阻力很小，所以阻力估算为 $F_{\text{阻力}} = 2N$ ，由设计图可知主轴回转半径为 150mm，光纤最大绕层为 150 层，当缠绕的光纤直径大时，阻力臂长，所产生的力矩大，故假设缠绕的光纤直径为 0.8mm，所以最大的负载力力矩为：

$$T = 3N \times (150mm + (\sqrt{3}-1)0.8mm \times 170) + 2N \times 150mm = 1.04N/m$$

所以由 (3.7) 公式主轴电机的驱动功率

$$P_{\text{驱动}} = \frac{T\omega}{973\eta}$$

其中: T ——驱动力扭矩; N/m

ω ——主轴转速; R/s

η ——效率

$$\text{主轴转速 } \omega = \frac{800 \text{ R/min}}{60 \text{ s}} = 13.33 \text{ R/s};$$

轴承传动的机械效率 $\eta = 0.9$;

$$\text{所以 } P_{\text{驱动}} = \frac{1.04 \times 800 / 60}{973 \times 0.9} = 18W$$

由公式 (3.8)、(3.9) 得到计算加减速扭矩的公式为

$$T_a = \frac{GD^2\omega}{375t_a} \quad (3.10)$$

所以加减速功率为

$$P_a = \frac{T_a\omega}{973} = \frac{GD^2\omega^2}{365 \times 10^2 t_a} \quad (3.11)$$

其中: G ——飞轮重量; N

D ——飞轮直径; m

ω ——飞轮转速; R/min

t_a ——加减速时间。S

由于主轴是连续匀速转动的, 加减速次数少, 且对加减速时间要求较低, 故假设加速时间 $t_a = 0.1s$, 由设计的零件图可知 $G = 100N$, $D = 150mm$, 所以电机加减速的功率为:

$$P_a = \frac{100N \times 150mm^2 \times (800/60)^2}{365 \times 10^2 \times 0.1} = 0.1W \quad (3.12)$$

电机的总功率为 $P = P_{\text{负载}} + P_a < 20W$;

选取主轴电机为 20W 的电机。

b、主轴进给电机的功率计算

电机进给驱动主动件的动力为丝杠螺母结构。首先根据加紧机构需要的速度, 丝杠的导程 4mm, 来计算所需要电机的转速。其次要估算负载, 计算方法同上所讲, 这里不再赘述。

在估算负载的时候还要考虑到惯性里的影响。

丝杠传动模型如图 3.17 所示。加减速所需要的力矩为:

$$T = \frac{lmv_1}{2\pi t_1} \quad (3.13)$$

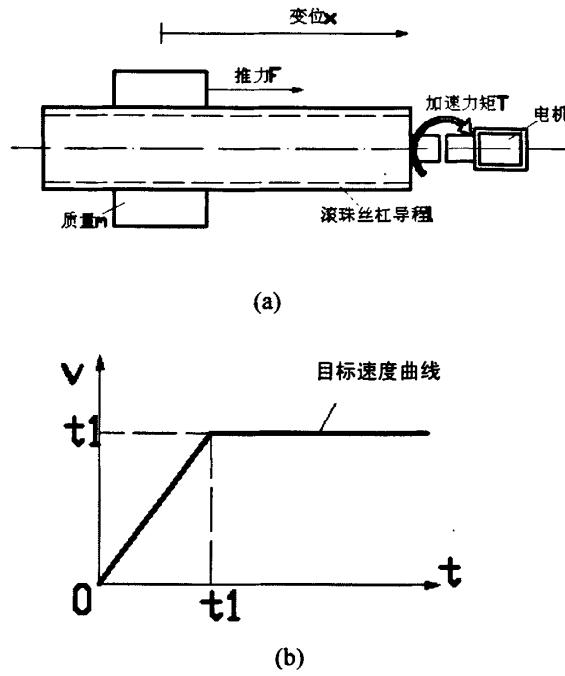


图 3.17 丝杠传动加速模型

当轨道与滑块的润滑状况良好时,假设轨道与滑块的摩擦系数为 0.25,而机械传递效率为 $\eta=0.75$ 。由设计图纸计算得到主轴转动系统重量为 10Kg, 驱动力为

$$F_{\text{驱动}} = \mu G = 0.25 \times 10 \times 10 = 25N$$

$$T_{\text{驱动}} = \frac{lF_{\text{驱动}}}{2\pi} = \frac{4mm \times 25N}{2 \times 3.14} = 0.02N/m$$

所以驱动力功率为:

$$P_{\text{驱动}} = \frac{T_{\text{驱动}} \omega}{973\eta} = \frac{0.02 \times (800/60)}{973 \times 0.75} = 0.01W$$

而丝杠加减速力矩为:

$$T_a = \frac{lmv_1}{2\pi t_1} \quad (3.14)$$

其中: 1——丝杠导程;

M——螺母重量;

v_1 ——螺母移动速度;

t_1 ——加减速时间。

螺母重量为 10Kg,丝杠导程为 4mm, 螺母移动速度与主轴转速以及光纤直径有关,

最大的主轴转速为 $800R/min$ ，最大的光纤直径为 $0.8mm$ 。最大速度发生在上绕过程中，此时 v_{max} 为正常速度的 n 倍， n 由跨越的匝数来决定，所以有

$$v_{max} = nv_1 \quad (3.15)$$

有已知条件计算得到匀速进给速度 v_1

$$v_1 = \frac{\frac{0.8mm}{800R/min}}{60s} = 0.06m/s$$

$$\text{最大速度 } v_{max} = 2v_1 = 2 \times 0.06m/s = 0.12m/s$$

加减速时间 t_1 由上绕过程来计算，上绕过程要完成跨越就必须加速再减速到匀速状态下才能完成此过程，所以加减速必须在此过程中完成上绕过程的时间为

$t_{\text{上绕}} = n/\omega$ ；其中 ω 是主轴的转动速度，单位是 R/s 。 n 为跨越的匝数。所以

$$t_{\text{上绕}} = \frac{2}{800/60} = 0.15s$$

而单次加速或者减速的时间期望越短越好，而滞后角也要控制在一定范围内。要求加减速时间也要在其范围内，选取加减速时间 $t_1 = 0.03s$ 。

所以丝杠的加减速力矩为：

$$T_a = \frac{lmv_1}{2\pi t_1} = \frac{4mm \times 10Kg \times 0.06mm/s}{2 \times 3.14 \times 0.03s} = 0.013N/m$$

所以加减速功率为：

$$P_a = \frac{T_a \omega}{937} = \frac{0.013 \times 13.33}{937} = 0.02W$$

由于主轴进给系统的进给电机功率为：

$$P = P_{\text{驱动}} + P_a \quad (3.16)$$

所以选择主轴进给系统的电机功率为 $5W$ 。

c、排线嘴进给系统电机功率计算

估算排线嘴重量为 $10Kg$ ，光纤张力对排线嘴的压力小于光纤的张力，光纤最大的张力为 $300g$ ，丝杠的导程为 $4mm$ ，所以该排线嘴的计算如下所示：

$$F_{\text{驱动}} = \mu G + F_{\text{压力}} = 0.25 \times 10 \times 10 + 10 \times 0.3 = 28N$$

$$T_{\text{驱动}} = \frac{lF_{\text{驱动}}}{2\pi} = \frac{4mm \times 28N}{2 \times 3.14} \approx 0.02N/m$$

在对加减速进行计算时，该机构主要是间歇性运动，所以速度反映要足够快，由于他的速度反应时间均小于主轴进给系统，所以选取该电机与主轴进给运动的电机相同就足够了。所以排线嘴进给系统的电机也选择为 $5W$ 的电机。

d、压线机构的动力选取

由于压线机构制作短暂作用、作用力很小并且采用旋转机构实现。故选取舵机来作为动力源。舵机作为动力源的优点是：①旋转角度控制精确，迅速；②结构简单。

3.3.5 各部分驱动电机的选择

主轴旋转系统 根据 3.3.3 节中对电机功率的计算的知，主轴旋转电机选择 maxon 的 RE 系列电机中的 RE25。该电机的基本参数如下：

额定电压 24V、空载转速 9550rpm、空载电流 36.9mA、额定转速 8360rpm、额定转矩（最大连续转矩）26.7mNm、最大电流（最大连续电流）1.17A、堵转转矩 257mNm、堵转电流 11.0A、最大效率 86%、电区电阻 2.19 Ω、电区电感 0.238mH、转矩常数 23.4mNm/A、转速常数 407rpm/V、速度/转矩常数 38.1rpm/mNm、机械时间常数 4.28ms、转子惯量 10.7 gm^2 . 所配减速箱的参数减速比为 10：1。

主轴进给系统 根据 3.3.3 节中对电机功率的计算的知，主轴旋转电机选择 maxon 的 RE 系列电机中的 RE16。该电机的基本参数如下：

额定电压 24V、空载转速 13900rpm、空载电流 46.0mA、额定转速 111900rpm、额定转矩（最大连续转矩）3.59mNm、最大电流（最大连续电流）0.531A、堵转转矩 28.8mNm、堵转电流 3.55A、最大效率 78%、电区电阻 3.38 Ω、电区电感 0.113mH、转矩常数 8.11mNm/A、转速常数 1180rpm/V、速度/转矩常数 490rpm/mNm、机械时间常数 6.84ms、转子惯量 1.33 gm^2 . 所配减速箱的参数减速比为 14：1。

丝杠螺母选择：导程=4mm、有效长度=100mm、长度=150mm、最小控制精度 0.001mm，的精密滚珠丝杠。

排线嘴进给系统 电机与主轴进给系统相同。丝杠螺母选择：导程=4mm、有效长度=80mm、长度=110mm、最小控制精度 0.001mm，的精密滚珠丝杠。

理想情况下，额定转速电机旋转一周所需要的时间为 0.012s，电机机械时间常数为 5.24ms，所以该电机在最短的上升时间内可上升的距离为 $4\text{mm} \times (0.075s - 0.00524s) / 0.012s = 23.2533\text{mm} \gg 0.69\text{mm}$ （最大上升距离）。可见该系统速度响应可以满足要求。该电机选用双通道 512 线旋转编码器作为控制反馈，所以它的控制精度为 $4/512=0.0078125\text{mm}$ ，它比最小进给距离 0.13mm 低了一个数量级，所以该系统的控制精度也满足要求。

舵机的选取 舵机由无核心马达所构成，可依据接收机发出的指令，转动至定点的位置。舵机的优点有：1. 结构简单，质量小。2. 可精确控制角度。3. 同质量扭矩大。4. 易安装等优点。该设计中选用的 MC-100MGBB 舵机，该舵机的参数为，速度：0.13 秒/60° 扭矩：3.2Kg/cm 以上 尺寸：28×11.5×29mm 重量：22 克。

卡爪实现下降或上升需要 60~90 度，所以需要时间为：0.13~0.19s。

3.4 控制参数计算

依据设计参数要求采用主轴转数高，并且光纤直径小时的参数进行分析，如果在该种情况下控制精度能够满足，那么在其他任一情况下，上绕的精度同样可以满足。主轴转速主轴最大转速为 800rpm，光纤最大直径为 $\Phi 0.8\text{mm}$ 。每次跨越两个线径，馈线孔到绕轴与光线缠绕点所在平面的距离为 l ，馈线孔到过垂直于绕轴的平面的距离为 s 。

$$\text{光线缠绕一周所以要的时间为 } \frac{60\text{s}}{800\text{rpm}} = 0.075\text{s} = 75\text{ms} ;$$

$$\text{主轴进给速度为 } \frac{0.8\text{mm}}{75\text{ms}} = 10.67\text{mm/s} ;$$

为保证在同一层内紧密缠绕，滞后角 θ 取值范围 $\left[0, -\arctan\left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)\right]\right]$ [43]；

由于 $\theta = \arctan \frac{s}{l}$ ，根据 3.3.4 节中说明，要保证 θ 的取值范围就要保证 s 的取值，同

$$\text{层缠绕时 } s_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{\Delta h^2} \sin^2 \alpha \cos^2(\arctan \mu)}}{\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)} l, \text{ 允许的误差范围是}$$

$$|\Delta s|_{\max} = - \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) + \frac{1 - \sqrt{1 - a^2}}{a} \right] l$$

同层缠绕时， l 的大小随光纤纤层数改变，同一纤层不会改变，主轴匀速旋转、匀速进给，可保证 S 不变，根据 l 的取值选取 S ，使得：

$$\arctan \frac{s}{l} = -\frac{1}{2} \arctan \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right]$$

μ 为光线摩擦系数需要提前测得， Δh 的取值由初始取值和排线嘴进给量确定，一般保证不变，即每次上升 $\sqrt{3}r$ 。

综上所述，主轴电机经减速箱输出转速为 800rpm，主轴进给速度 10.67mm/s，主轴进给电机经减速箱输出的转速为 160rpm。该参数电机机械性能均能够满足。

上绕前准备阶段：

由于舵机转过 60 度的时间为 0.13s，即压线卡爪落下的时间为 0.13s，它应在滞后角变化前落下，压线卡爪放下时主轴转过的圈数为：

$$n = \frac{T_{\text{卡爪}}}{T_{\pm}}$$

其中： $T_{\text{卡爪}}$ 为压线卡爪下落的时间，即 $T_{\text{卡爪}} = 0.13\text{s}$ ；

T_{\pm} 为主轴旋转一周所需要的时间，即 $T_{\pm} = 0.075s$ ；

$$\text{那么 } n = \frac{T_{\text{卡爪}}}{T_{\pm}} = \frac{0.13}{0.075} = 1.7333,$$

所以应在滞后角变化前预留两圈放下压线卡爪。要是上绕发生一定要是滞后角 θ 满足上绕条件，准备上绕阶段要增加主轴进给速度后再减速到变速前主轴进给速度速度，增大

$$S, \text{ 使 } \theta > -\arctan \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right],$$

$$\text{计算 } \Delta s = \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right] - \tan(-\frac{1}{2} \arctan \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right])$$

使得变速位移大于 Δs ，即发生上绕。

结论：上绕准备阶段应在该层缠绕满前 2 圈放下压线卡爪，使得缠满时

$$\Delta s = \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right] - \tan(-\frac{1}{2} \arctan \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right]).$$

上绕过程：

上绕过程维持 S 不变，使得上绕完全发生，并跨越制定圈数。上绕过程中排线嘴做进给运动，该进给运动要在主轴旋转一周的时间内进给光纤层上升的高度，由于主轴最快转速下旋转一周所需要的时间为 $0.075s$ ，当光线直径最大时，光纤上绕后高度增加了 $\sqrt{3}D$ ，所以进给速度为：

$$\frac{\sqrt{3} \times 0.8}{0.075} = 18.475 \text{ mm/s}$$

由于排线嘴进给的丝杠导程为 $4mm$ ，所以排线嘴进给电机每秒最多需要旋转

$$\frac{18.475}{4} = 4.619 \quad \text{转}$$

故排线嘴进给电机经减速箱输出转速为 277.12 rpm 。

上绕后调整阶段：

上绕结束后应进入调整阶段使得进给方向反向，进给速度大小不变，使得

$$\Delta s = 2 \tan(-\frac{1}{2} \arctan \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right]).$$

4 上绕机构建模和运动学分析

自动上绕机构设计其他论文已完成，这里不在累述。在确定了机构的总体运动方案和上绕机构设计以后，本章着重由已有设计图对光纤缠绕机的上绕机构进行建模、强度分析和运动学分析。

4.1 上绕机构的建模与强度分析

4.1.1 上绕机构的建模

根据机构设计中计算结果自己选取尺寸用 SolidWorks 建立模型进行结构分析。检查个模块之间是否干涉等^[29~31]。

首先，对机构的各个功能模块进行建模，下图为主轴旋转机构的模型

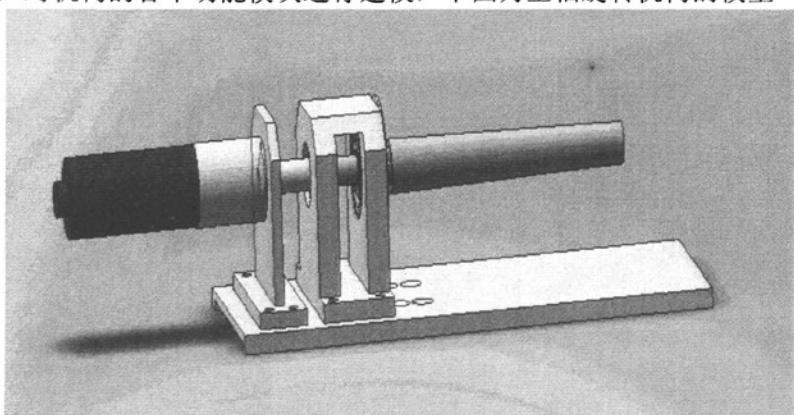


图 4.1 主轴旋转模块模型

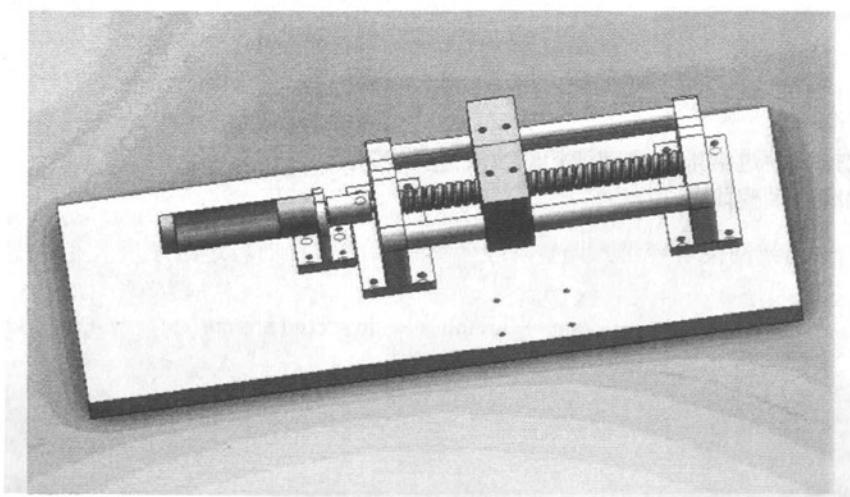


图 4.2 主轴进给模块模型

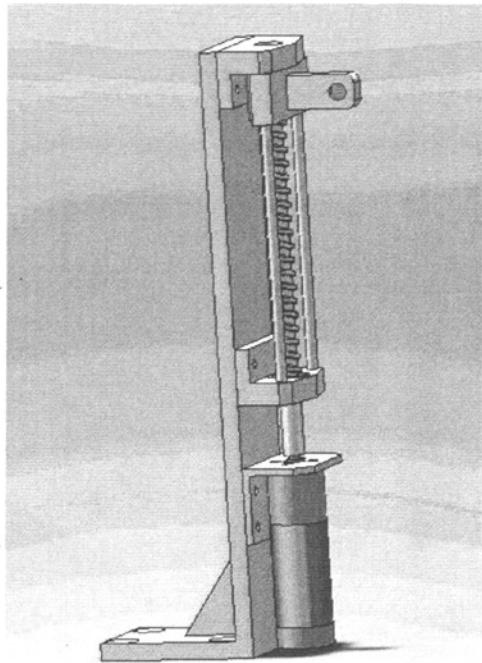


图 4.3 排线嘴进给模块模型

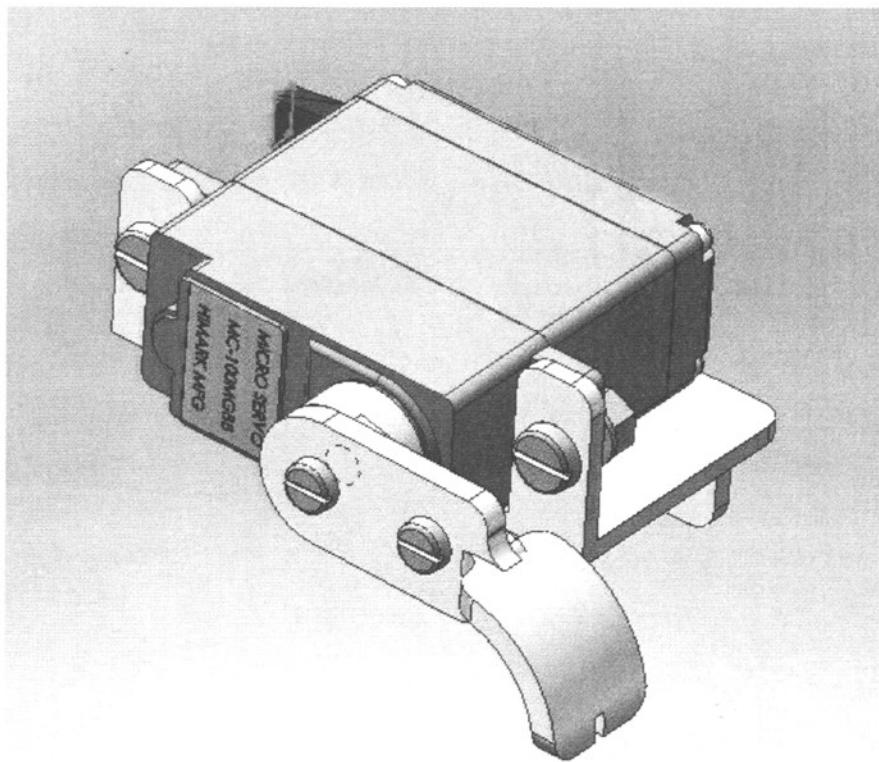


图 4.4 压线机构模型

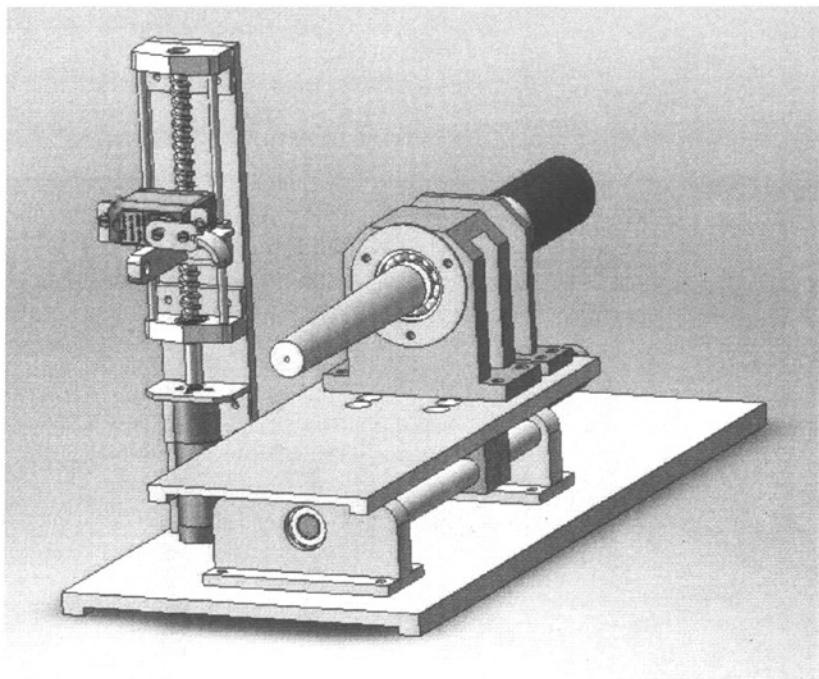


图 4.5 系统整体模型

4.1.2 主轴系统的强度分析

在系统模型建立完成后,为了得到零件会不会断裂? 它会如何变形? 能否可以使用较少材料而又不影响性能? 等问题的答案, 对系统模型进行分析处理。得到需要的结果。

首先, 进行模型的初始化。

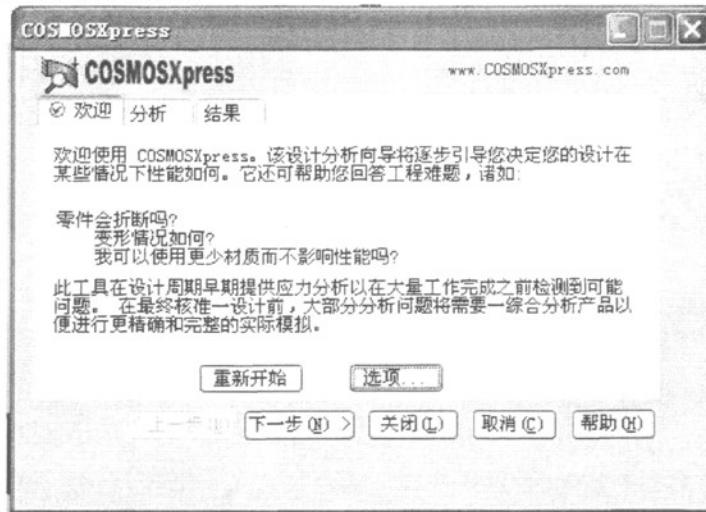


图 4.6 系统模型的初始化

其次进行约束和加载, 主轴主要受到光纤的拉力, 可简化为一作用于主轴上的力, 以最大里进行分析, 力的作用于主轴顶端, 大小为 $10N$ 。如图 4.6 所示。主轴的约束为轴承处的

约束，如图 4.7。所以整个主轴可简化成一悬臂梁结构。

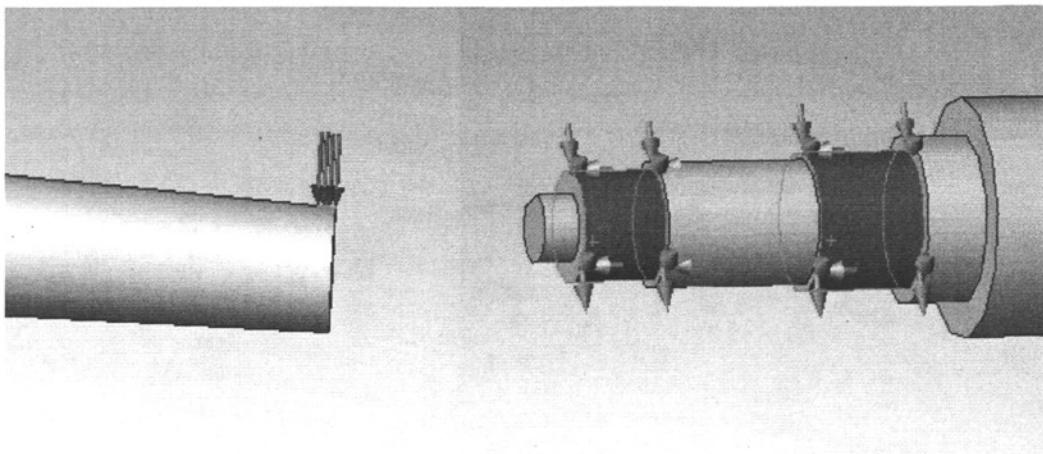


图 4.6 主轴载荷

图 4.7 主轴的约束

分析得到主轴系统的安全系数为 28.1118（由软件计算得到）。由于该模型的尺寸、材料要求能够达到要求，所以不需要对模型进行优化。

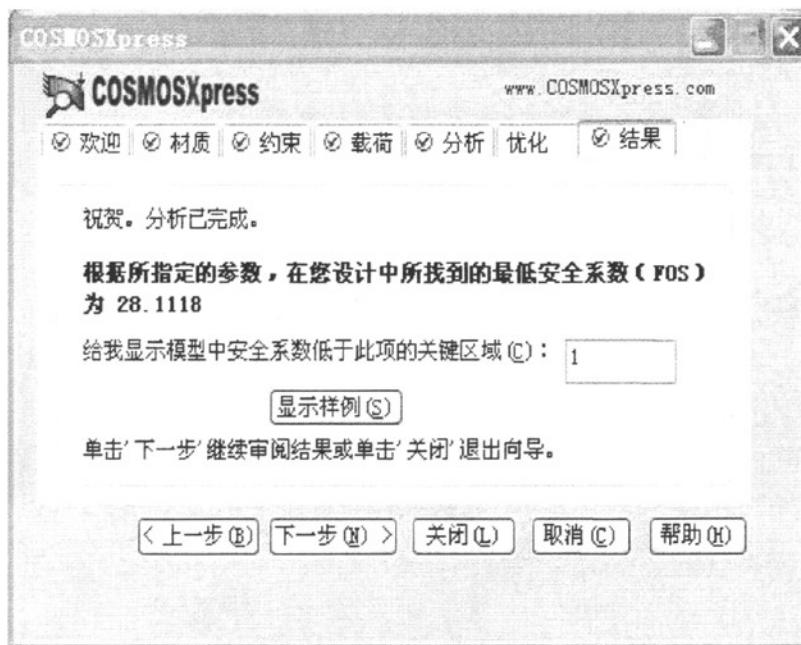


图 4.8 主轴系统的安全系数

在对主轴系统分析后的到主轴受力极限情况下，它的应力分布以及变形情况的分布图如下。在图 4.9 中得到主轴最大的应力出现在主轴前端的轴承支撑段，该处的应力值为 $7.847 \times 10^{-4} N/m^2$ ，该数值的力不会使主轴断裂，是能够接受的。

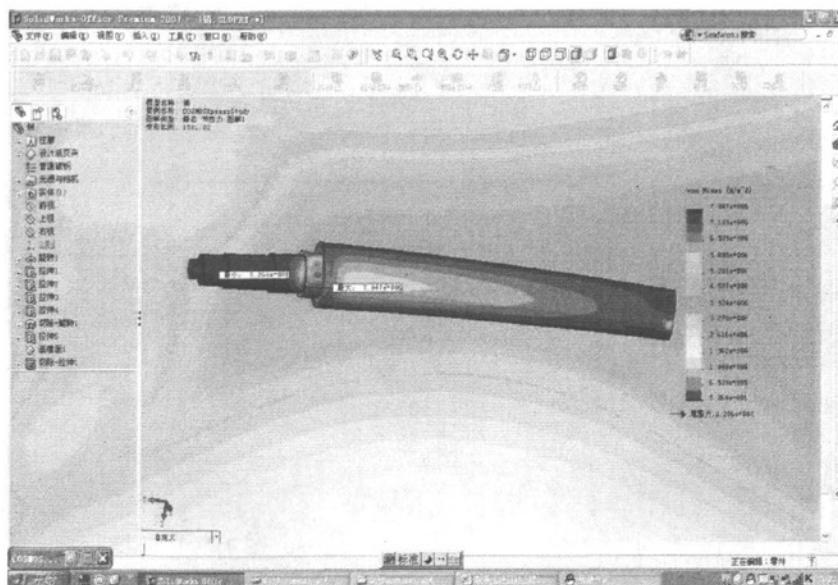


图 4.9 主轴应力分布

考虑应力分布后就要对主轴的变形进行分析，看看主轴的变形量是否处于能够接受的范围，会不会影响到抓后锁功能以及主轴转动所要达到的进度。在对主轴变形进行分析后得到图 4.10。从该图中可以看出最大的变形发生在主轴的尖端，这是由于主轴是一个简化的悬臂梁，该处的变形量为 $8.699 \times 10^{-3} mm$ 。该变形量对光纤（最小半径为 0.18mm）来说是一个很小的量，可以忽略不计。所以主轴的变形也满足设计要求。

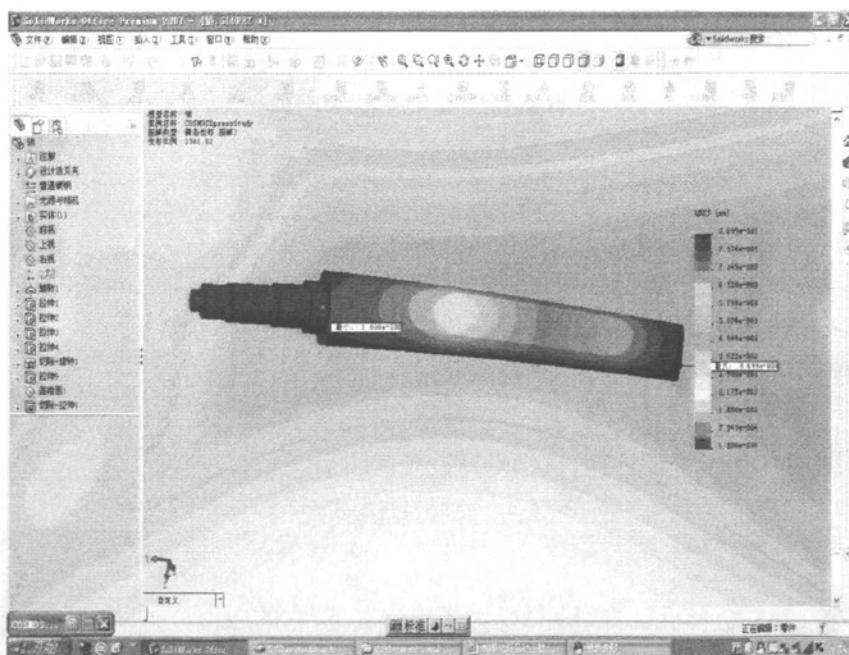


图 4.10 主轴变形分布

4.1.3 主轴进给系统的强度分析

主轴进给系统中，它在结构上只受到主轴旋转结构的压力，所以在进行分析是应对主轴进给系统做一定的简化，简化后的结构如图 4.11 所示，具体尺寸见附录 G，它只是一个导轨，因为在受压时，丝杠螺母不承担力的作用。因为丝杠螺母只是传递轴向力和运动。

对简化模型进行分析的时候，首先选择模型的材料，因为材料直接决定着它所能承受的载荷以及他在受力时的变形量。该模型采用普通碳钢进行分析。下面的图是它分析的过程。

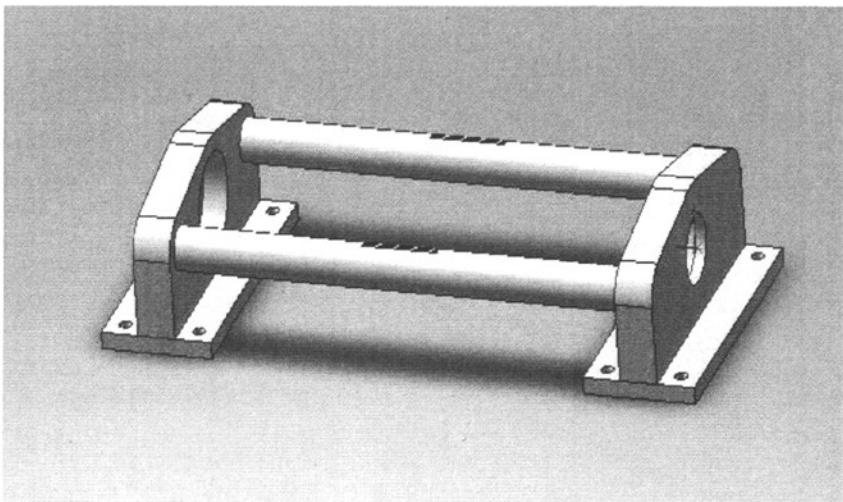


图 4.11 主轴进给系统简化模型

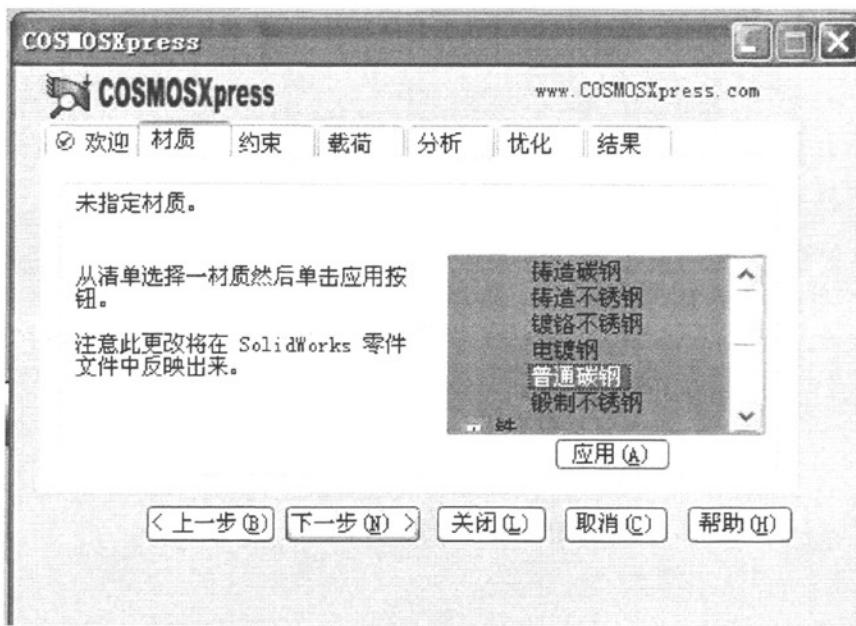


图 4.12 主轴进给模型的材料选择

该简化模型所受到的约束为导轨支架的固定作用，由于导轨支架固定所以导轨支架底座不

能移动，其约束如图 4.13 所示。所受到的载荷为螺母对导轨的压力，由力学方面的只是可知，导轨为一简支梁，当作用在简支梁上的力一定时，移动该力，当该力作用在简支梁的中间时，量的变形最大，所以我们进行分析时取其极限值，即载荷作用在导轨的中央，为在该段的均匀压力，估算主轴旋转系统的重量为 3KG，分析时选用载荷为 10KG，即 100N 压力的载荷分布如图 4.13 所示

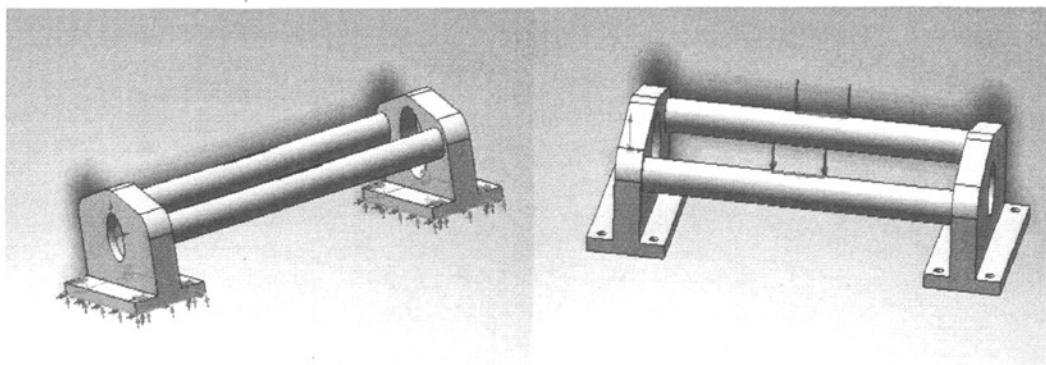


图 4.13 主轴系统简化模型的约束和载荷分布

分析的到主轴下图模型的安全系数，如图 4.14 所示。该模型的安全系数为 16.5564(由软件计算得到)。由于他的尺寸以及材料、重量各方面都满足要求，故不需要对模型进行优化设计。接着进行有限元分析，得到他的应力分配以及各部分的变形情况。

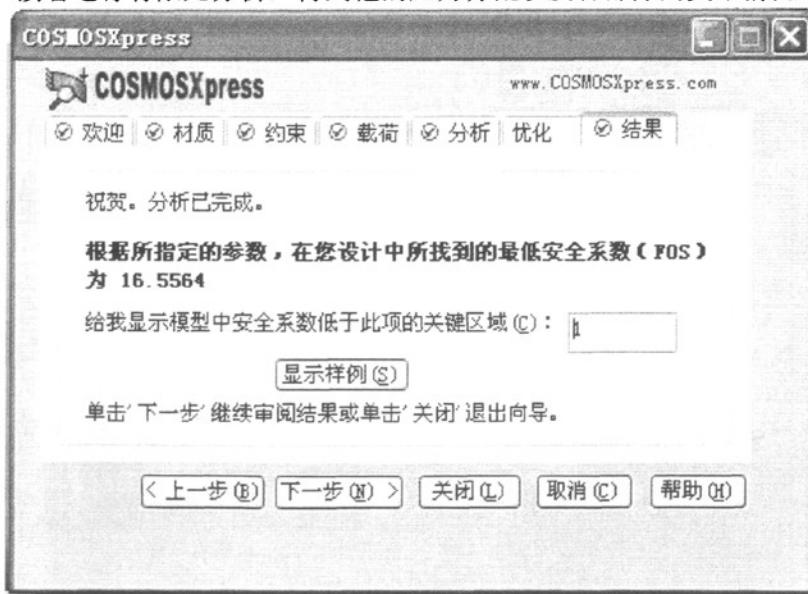


图 4.14 主轴进给模型的安全系数