

硕士 学位 论 文

制导光纤自动缠绕技术

作 者：康葳蕤

指 导 教 师：马保吉 教 授

陈瑞宁 研究员

申请学位学科：机械制造及其自动化

西安工业大学

2006年3月

制导光纤自动缠绕技术

学科：机械制造及其自动化

研究生签字：康藏蕤

指导教师签字：陈华吉

摘要

光纤缠绕是光纤制导导弹中的关键技术，决定着成品线包的存放时间、光纤制导导弹的射程、光纤的释放速度等导弹制导的重要特性。

本文通过对光纤缠绕的特殊性的分析，设计了光纤缠绕的排线系统方案；对缠绕过程进行了微观研究，得到滞后角与匝间间隙及光纤缠绕走向的定量关系；对系统机械特性进行研究，建立了系统的数学模型；在 MATLAB 的 simulink 环境下，搭建系统的仿真模型并进行仿真，结果表明系统的准确性、稳定性基本达到要求，但调整时间过长，针对仿真结果进一步改进系统模型，结果表明改进系统具有了良好的准确性和稳定性，并具有预置滞后角可调、电机匀加速起动功能，但是系统的快速性仍然没有改进；初步把神经网络引入到排线系统，仿真表明系统的相对稳定性得到改善，有望缩小调整时间。

最后得到了稳定性和准确性符合要求的排线系统，但系统快速性有待于进一步改进。

关键词：光纤缠绕；数学模型；滞后角；建模与仿真

Study on The Optical Fibre Automatic Winding

Discipline: Mechanical Manufacture and Automatization

Student signature: *Kang Weinai*

Supervisor signature: *Ma Banji*

ABSTRACT

optical fibre Winding is one of key techniques in optical fibre guided missile and it seriously influences the important character of the missile guide, such as the life of optical fibre bobbin, the cannon-shot of the fibre guided missile and the velocity of releasing optical fibre during guided missile blast-off, and so on.

By analyzing the winding particularity of the guidance optical fibre, this article designs a blue print of the optical fibre winding system; By researching the microcosmic process of the winding, the quantitative relation between the lagging angle and the clearance of optical fibre loops as well as the orientation which winding optical fibre tends towards was built; By studying the mechanical characteristics of this system, the system mathematic model and its simulating model in Simulink Library Brower of MATLAB were established, the simulating test are performed. The result shows that the precision and stability of the system satisfy roughly the requirements, but the adjusting time is too long. Based on the simulating result, the system model are refined, and it can obtain better precision and stability , further more the refined system can adjust the anticipant lagging angle and its motors can jump-start with linear rotate speed, however its sensitivity is still bad; This article also applies the neural net to control the system, and it gets better output.

Finally the article obtains a winding system with good stability and precision, but the sensitivity of this system still need to be improved.

Key word: Optical fibre winding; Mathematic model; Lagging angle; Modeling and Simulation

1 绪论

1.1 课题背景和课题来源

光纤制导是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。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。光纤制导导弹有很多独特功能及特点^{[1][2][3]}。

1.1.1 课题来源

课题来源于兵器预研基金项目。

1.1.2 课题背景

a. 光纤制导的关键技术之一——光纤缠绕

光纤的缠绕与释放技术、导引头和导弹发射系统是光纤制导的关键技术，本文着重讨论光纤的缠绕与释放技术。

首先，光纤的释放的问题。光缆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，光缆释放。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。这里有两方面的含义，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。其次要求高速释放，满足导弹飞行速度要求。目前，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。光纤缠绕技术是指针对光纤制导导弹的要求，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。与光纤自身性质有关的技术难点主要有如下几方面：

- (1) 光纤的表面摩擦系数较小，非常光滑，缠绕过程中绕层容易滑脱；
- (2) 光纤性质较脆，比起普通纤维缺乏柔韧性，所以缠绕中要保证光纤走向圆滑流畅；
- (3) 光纤的径向弹性较小，且因挤压容易使光纤产生形变，增加传输损耗，所以对于匝间间隙的控制精度要求较高；
- (4) 因为存在老化问题，即光纤在应力长期作用下，会产生微小裂纹，且随着时间的推移，裂纹会加大加深，最终使光纤的传输损耗严重加大，甚至报废。所

以在缠绕过程中，控制缠绕的拉力是有限制的，目的是把残余应力控制在要求范围内^{[4][5][10]}。

光纤制导导弹对缠绕的主要要求有：

- (1) 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。
- (2) 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，而上层光纤嵌入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回退，最后绕制成一个呈纺锤状的线包，如图 1.1 所示。

描述中和放线要求有关的有：有序密绕、垂直于线轴的图案、带锥度的线轴及每层两端的回退。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，也增加损耗。如图 1.2 所示，螺旋状图案时的光纤的弯过角度 θ 比垂直图案大 $\Delta\theta$ ，增加了光纤此时的曲率。有序缠绕即线包的每匝每层都是依次绕上的，以使放线时的解绕遵循必要的顺序；每层两端的回退是为了保证线包整体牢固，不至出现意外。

与弹体结构有关的是上层光纤要缠绕在下层光纤形成的沟槽内，首先，这样的图样使线包缝隙小，密度大，空间利用率高，从而节省了导弹的宝贵体内空间；其次，增强线包稳固性。

b. 光纤缠绕的国内外现状¹⁾

国外，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预选匝数，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

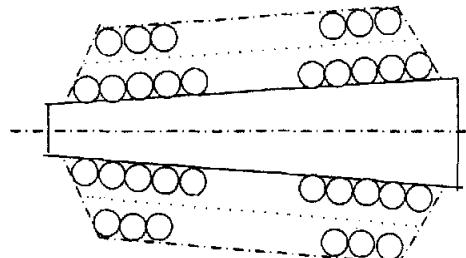


图 1.1 纺锤型线包

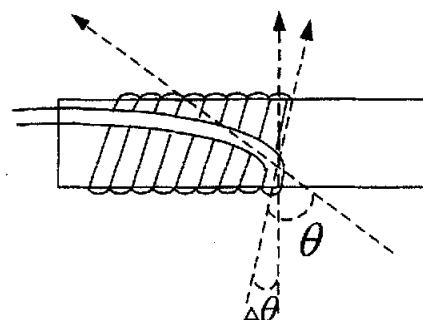


图 1.2 螺旋图案时光纤的过渡弯曲
螺旋状图案时的光纤的弯过角度 θ 比垂直图案大 $\Delta\theta$ ，增加了光纤此时的曲率。

力, 减小微弯损耗^{[9][10]}, 增加线包寿命; 3. 能自动实现光纤上层控制。4. 它通过对缠绕滞后角的控制, 控制缠绕走向及间隙; 5. 它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。

国内, 起初的缠绕设备简陋, 光纤绕轴匀速转动, 由人工摈线缠绕光纤。人工摈线有非常明显的缺点: 速度慢、各种参数不能量化, 质量难以保证、缠绕长度受限制、对缠绕工人的技术要求较高等。目前, 我国实现的半自动缠绕, 仍然需要工人操作。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, 以至人为减少了线包寿命。所有这些现状激励着我国科研人员努力研制自己的自动光纤缠绕机, 并在这个领域做了很多研究。

本文重点研究光纤缠绕的排线问题。对于排线问题的研究, 2000 年, 缠绕滞后角的测量还处于机械式测量阶段, 其精度及实时性都较差; 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^{[7][8]}。

1.1.3 排线系统有待解决的技术问题

a. 缠绕方向及匝间间隙的控制

如前所述, 光纤缠绕的图样比较简单, 即线匝垂直于线轴, 逐层密绕。所谓缠绕方向即光纤线匝在绕轴上增加的方向, 或由左向右或由右向左, 它是由被缠绕光纤的自由端的走向决定的: 匝间间隙和光纤自由端的走向也有着密切联系。光纤缠绕方向和匝间间隙的控制难度主要由以下几方面的原因产生。1. 图样对匝间间隙的要求较为严格, 间隙过大容易产生陷入缺陷, 过小会回叠或者线匝之间挤压过大造成光纤变形, 而损失传输信息, 对于匝间间隙的正常要求是在光纤微弯损耗的允许下, 使光纤受到轻微挤压, 以增强线包牢固性; 2. 由于光纤自身线径细, 只有几百微米, 匝间间隙的数量级就更小了, 所以对于控制精度要求较高; 3. 加了保护层的线径并不均匀, 误差大, 其大小起伏甚至高达 50%, 这就使得匝间间隙的自然变化大, 难以控制; 4. 光纤表面光滑, 摩擦系数小, 使得光纤的自由端对缠绕拉力非常敏感, 轻微的缠绕张力的变化, 就能引起间隙及缠绕走向的明显变化^{[11][12][13]}。

对于排线系统的研究需要分析光纤缠绕的本质特性, 提取最合适的可控参数, 达到缠绕要求。

b. 上绕技术

上绕技术即缠绕从本层过渡到下一层的跨越技术。这是个比较复杂的过程, 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 0.15mm~0.80mm, 所以这个距离实际

上很小，最小只有 2.25mm。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。所以，上绕成了光纤缠绕中的一个技术难点。

1.2 光纤特性及其在缠绕中容易出现的缺陷

光纤缠绕是光纤制导中的关键技术问题，光纤制导对光纤传输系统的主要要求有：1. 绕组结构牢固，所占体积最小；2. 导弹飞行过程中光纤能高速顺利放线；3. 传输损耗最小。这些目标对光纤在缠绕过程中以及成型绕组提出了较高的要求，使得光纤缠绕过程很易出现缺陷。^{[7][12][13]}

1.2.1 与绕组体积及结构有关的缺陷

受导弹尺寸和容积的限制，绕组的体积应该尽可能小，使缠绕密度达到最大。有两种缺陷会增大绕组体积。

a. 匝间间隙过大和回叠现象



图 1.3 间隙过大和回叠现象

绕组每一层匝与匝之间的间隙应该达到最小。如果出现如图 1.3(a)所示匝间间隙过大，将导致绕组内部存在空隙，且致使后续绕层排列杂乱，直接增加成品线包的附加体积。缠绕过程中，匝间间隙是由滞后角控制的，如图 1.4 所示。设馈线孔固定，绕轴的轴向直线运动位移，对随着匝数增加而增加的每一层的实时

长度进行补偿，以此来控制滞后角的大小。如果补偿过快，则出现匝间间隙过大的缺陷；补偿过慢则会发生另一种缺陷，即回叠现象，如图 1.3(b) 所示。回叠也是缠绕中的一种严重缺陷，它和间隙过大一样，会使缠绕杂乱，存留空隙，增加线包体积。

b. 跨越过大或过小

跨越是当一层缠满，光纤绕上第二层的行为。如图 1.5 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

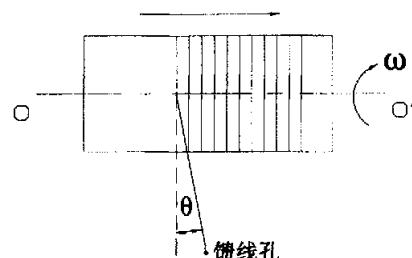


图 1.4 缠绕时的滞后角

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 1.6 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。

跨越匝数的多少其实是衡量缠绕技术的一个指标，技术先进时，跨越匝数仅为 1.5~2.5 之间即可达到绕组牢固的要求。

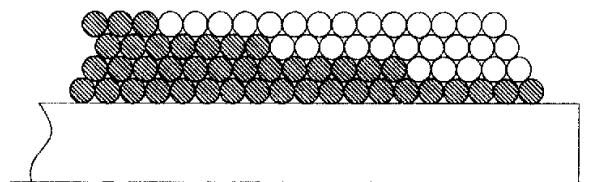


图 1.6 跨越过大的体积浪费

1.2.2 与放线有关的缺陷

导弹的飞行速度直接关系它的作战能力，光纤制导导弹的飞行速度可达到 $300\text{m/s} \sim 320\text{m/s}$ ，但由于光纤释放速度的限制，实际中的飞行速度只有 $125\text{m/s} \sim 220\text{m/s}$ 。光纤缠绕是保证光纤顺利释放的关键技术。要使释放时，光纤不紊乱，不折断，不纠缠，除了其它方面的合理设计，在缠绕时要做到缠绕图样简洁，绕组的匝、层排列整齐流畅。以下分析有关方面的绕组缺陷。

a. 陷入缺陷

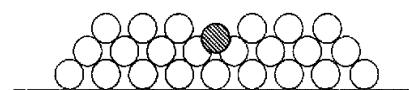


图 1.7 陷入



图 1.8 交叉图样

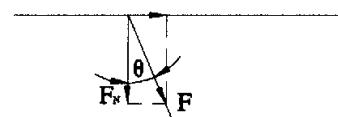


图 1.9 交叉缠绕时的层间作用力分析

如图 1.7 所示，光纤在缠绕时，没有在本层位置正确排列，而是卡进了前一层的两匝间隙中，这就是陷入缺陷。这种缺陷不仅导致前层光纤的变形，本层排列图样的破坏，并给后面的正确缠绕埋下严重隐患；更重要的是，随着后续层数的增加，陷入的光纤会被紧紧卡住，在高速释放时极易被拉断，造成毁灭性失败。

陷入缺陷来自多方面的原因。由于光纤性质较脆，在释放时必须尽量避免过大角度的弯曲，所以我们不能采取在一般纤维缠绕中的排列图样，如图 1.8 所示，即使纤维匝在绕轴上的缠绕轨迹与绕轴轴线不是垂直关系，而是成一斜角，然后使层与层之间的角度交错变换方向，这样会使后层光纤每匝都跨越前层数匝光纤，以回避光纤缠绕路径沿着前层光纤的沟槽。这样排列还会使光纤与绕轴表面、光纤层之间的摩擦力减小，使绕组容易滑脱、松弛；如图 1.9 所示，光纤对轴作用力的方向不再垂直绕轴表面，生成摩擦力 $F_N = F \cos\theta$ ，小于光纤残余应力产生的力 F 。

另外，缠绕对跨越匝数 n 是有限制的，即 1.5--2.5 匝，加之匝间节距的微小，以及为减少光纤弯曲损耗对绕轴最小半径的要求，使得假使缠绕时有跨越，跨越斜角也很小，如图 1.10 所示（ R 为绕轴半径），据有关指标计算，角 Φ 最小只有 0.023° 左右，所以，光纤还是会沿着前层沟槽的自然趋势缠绕。由以上分析可知，光纤缠绕时，除了端面处的跨越，其线匝轨迹应该严格垂直于绕轴，而且，后层光纤是绕在前层光纤形成的沟槽内的。

基于以上所述光纤的特殊缠绕图样，有两个主要因素可导致陷入缺陷的出现，即前述已述及的过大的匝间间隙和过大的缠绕张力。过大的匝间间隙就像陷阱，光纤绕至此处，自然会陷入，随着间隙的过大的程度不同，陷入深度有所区别；缠绕张力过大，会使光纤见缝插针，“挤”进前层间隙中。光纤半径并不是非常均匀的，有资料显示它的误差甚至可达到 50%，这直接导致匝间间隙的误差范围的扩大，所以，张力过大是产生陷入缺陷的一个重要因素。

b. 绕组松弛

绕组的匝与匝、层与层之间如果有接触不紧密的地方，使摩擦力不够大，释放时在强烈的拉动作用下，光纤就会从该处整块出脱，导致放线失败。光纤表面非常光滑，摩擦系数很小，很容易出现绕组松弛的现象；缠绕时的跨越如果控制不当，即“收边”没有做好，也会导致绕组松弛，甚至坍塌。

总之，绕组的很多缺陷，如间隙大、回叠、陷入等，都会导致光纤排列杂乱，在放线时发生折断、纠缠等现象，使放线不能顺利进行。

1.2.3 与传输损耗有关的缺陷

造成信号传输损耗的因素很多，和缠绕有关的主要原因是光纤的宏弯损耗和微弯损耗。对于多模光纤，宏弯损耗指光纤弯曲半径小于某个临界值时，光纤的弯曲辐射损耗就急剧增大；单模光纤的宏弯损耗更复杂一些。宏弯损耗可通过绕轴尺寸的设计有效减小。

微弯损耗指光纤受到侧向压力或产生宽度小于 1mm、幅度为微米数量级的随意弯曲，使光纤芯轴局部扭曲，或其表面产生局部褶皱，而引起导摸转换为辐射模或低阶模之间的耦合，从而导致的损耗。光纤各部分应力不均衡，受拉时

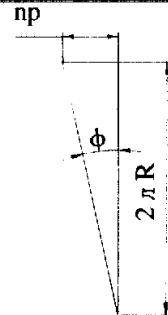


图 1.10 跨越斜角

张力不均，长期使用过程中，由于环境温度、湿度等变化，这些因素都能造成光纤微弯，引起传输损耗。图 1.11 是一条标准多模光纤受侧向压力时，其损耗和压强的关系图。其中，实线代表模式功率达到静态分布的情况，虚线代表模式功率均匀分配的情况， V 为归一化频率。该图说明微弯损耗随线性压强的增加而直线上升。

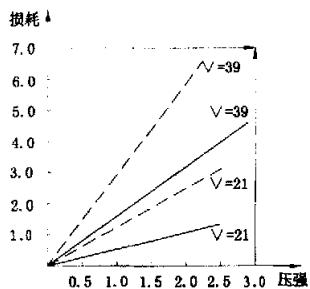


图 1.11 微弯损耗与线性压强的关系

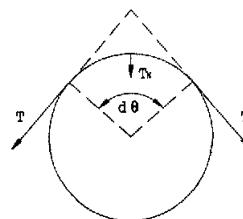


图 1.12 残余拉力对轴作用力

由此可知，光纤缠绕时的一个微观缺陷就是光纤的微弯。

假设绕组成型后，光纤各处的残余拉力是均匀的。截取一匝光纤的一个微小弧段 $d\theta$ ，如图 1.12 所示， T 为残余拉力， T_N 为 $d\theta$ 段残余拉力向轴心的压力。

得： $T_N = 2T \sin \frac{d\theta}{2}$ 。每一微小弧段都将产生这样一个轴心力 T_N ，随着绕组层数的增加，里层绕层将受到越来越大的侧压力，光纤微变也随之增大，而且光纤的损耗是随光纤长度累积的^{[12][13]}，所以，由此产生的传输损耗不容忽视。

绕好的线包不是马上就投入使用，一般应该保证线包存放 5 年时间，传输特性仍能满足要求。因为线包在缠绕时留下的残余应力，会使光纤的微小裂纹生长，这不仅会减弱光纤抗拉强度，同样会增加微变，从而增加损耗。

所以，在缠绕时，过大的张力会造成看不见绕组缺陷。

1.3 本文的主要研究内容

- (1) 针对制导光纤缠绕的特殊性，结合相关学科知识，设计光纤缠绕的排线系统方案。
- (2) 剖析缠绕过程，寻求能反应系统性能的易测量及合理可行的系统控制参数。
- (3) 建立排线系统的数学模型。
- (4) 在 MATLAB 的 simulink 中建立系统的仿真模型，进行系统仿真，分析仿真结果，并改进系统，直至符合系统缠绕要求。

2 排线系统方案

2.1 排线系统的总体要求

2.1.1 排线系统的性能指标

线 径:	$\Phi 0.15\text{mm} \sim \Phi 0.80\text{mm}$
节距范围:	$0.100\text{mm} \sim 1\text{mm}$
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

2.1.2 系统性能要求

a. 稳定性

稳定的控制系统, 其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小并趋于零。具体来说, 对于稳定的恒值控制系统, 被控量因扰动而偏离期望值后, 经过一个过渡过程时间, 被控量应恢复到原来的期望值状态; 对于稳定的随动系统, 被控量应能始终跟随参考量的变化。排线系统本质上是一个机械旋转系统, 它的转动惯量 J 、阻尼比 B 为正值, 所以, 根据劳斯稳定性判别法, 在设计时, 首先要保证绕轴和丝杠的增益为正, 才能得到稳定系统。衡量系统稳定性的指标有超调量 M_p , 它表达了系统的相对稳定性, M_p 越小系统越稳定

[14][15]。

b. 快速性

对于系统过渡过程的快慢提出的要求, 一般称为动态性能。这个过渡过程就是瞬态响应, 即系统受到外加作用激励后, 从初始状态到最终状态的响应过程。

表征系统的灵敏性的指标有: 延迟时间 t_d 、上升时间 t_r 、峰值时间 t_p 、调

整时间 t_s 等。根据绕轴转速 $1 \sim 800 \text{ r/min}$, 得绕轴的最小周期:

$$T_{x\min} = \frac{60}{n_{x\max}} = \frac{60}{800} = 0.075(\text{s}) \quad (2.1)$$

上式中 $T_{x\min}$ 、 $n_{x\max}$ 分别是绕轴的最小周期和最大转速。期望在绕轴缠绕四分之一匝时, 系统达到稳态, 所以系统的调节时间为 $\frac{T_{x\min}}{4} = \frac{0.075}{4} = 0.01875\text{s}$, 这是缠绕速度最快时的最大调整时间, 如果缠绕速度慢, 这个时间可以增加。

c. 准确性

被控量的稳态值与期望值之间会有误差存在, 成为稳态误差。稳态误差是衡量系统控制准确性的重要标志。指标中很明确的要求排线系统输出滞后角的精度控制在 0.001° 之内。

综上所述, 实现系统的快速性和准确性是系统设计的两个难点。

2.2 方案拟定

根据以上对缠绕图样及其缺陷的分析, 以及排线系统的基本运动, 把排线系统主要分为排线主体、参数测量和控制系统三个模块。其关系如图 2.1 所示。^{[17][18]}

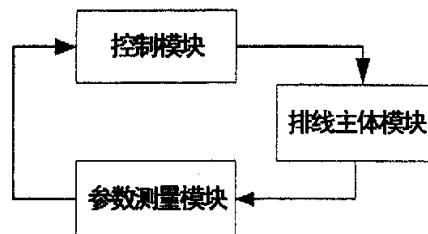


图 2.1 缠绕机各模块间信息流图

2.2.1 排线系统主体模块

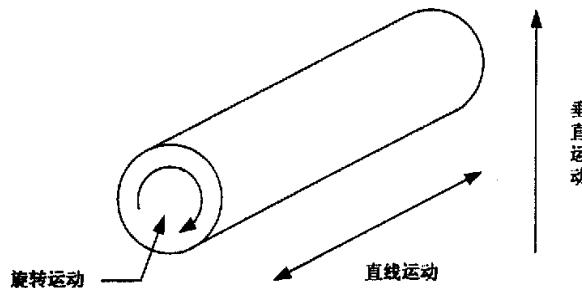


图 2.2 排线系统运动关系图

排线主体模块有三个运动, 一是绕轴自身旋转运动, 二是绕轴的轴向直线运动, 三是馈线孔垂直于绕轴方向的运动。这三种运动是互相关联的。排线系统的运动关系如图 2.2 所示。

a. 旋转运动和水平直线运动的配合方案拟订

显然，排线功能是在绕轴自身的旋转运动和其相对于馈线孔的直线运动的精密配合下完成的，因为绕轴是水平放置的，所以直线运动也是水平的。旋转运动的中心轴必须严格平行于直线运动方向。考虑到两种可能方案实现这个配合^{[16][17][18]}。

(1) 馈线孔直线运动，绕轴直线静止图2.3所示，选择馈线孔运动的优点在于馈线孔装置质量远小于绕轴系统，且比较恒定，所以运动惯性小，容易灵活起、停，但是馈线孔的运动轨迹要平行于绕轴轴心，因为两者距离远，直线运动往复频繁，所以难度比较大。

(2) 馈线孔静止，绕轴直线运动

该方案结构如图2.4所示。

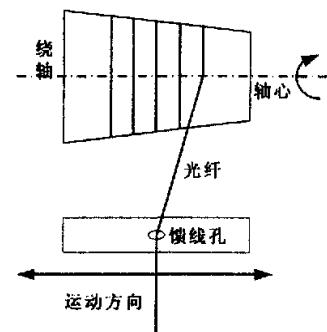


图2.3 馈线孔运动，绕轴静止

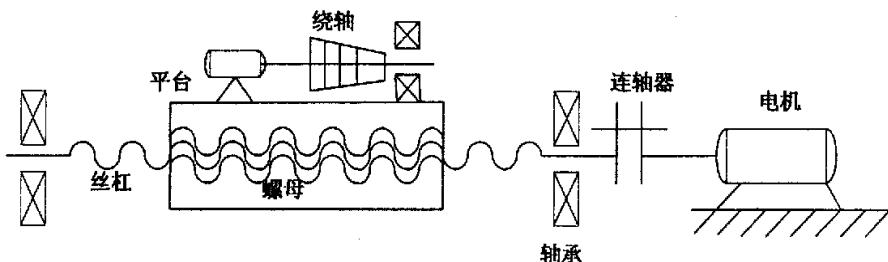


图2.4 旋转运动和直线运动分离

绕轴置于一个平台上，由电机驱动平台做直线运动。该方案结构紧凑，易于保证直线运动和绕轴的平行关系，从而利于排线系统高精度要求的实现。

绕轴平台做直线运动的情况有两种可能，一是利用直线电机直接驱动平台，使绕轴直线运动；二是旋转电机经丝杠带动平台，实现绕轴直线运动。

直线电机^[19]是一种实现直线运动的电机，使用它可以把控制对象和电机做成一体化结构，与普通的旋转电机相比，在精度、快速性、耐久性等方面具有明显的优势。从整个运动链来看，直接驱动省去了机械减速，从而消除了机械减速其所带来的摩擦、后冲、弹性变形等一些不良影响。但是，直线电机伺服控制难度大，其传动控制只能是全闭环控制。这样，工作台的负荷及其变化，对一个稳定系统来说就是外界干扰，若自动调节不好会使系统失稳而震荡。而回转电机传动可采用半闭环隔离这些干扰。即使采用全闭环，由于存在着丝杠等这些弹性中间环节，它们既有刚性差而使加速度上不去的负面影响，又有吸收和抑制干扰的正面作用，而使伺服控制难度减小。此外，由于是在高速、高精度下工作，还要求反馈用位置检测元件具备调速数据采集和响应能力及较高的分辨率。采用丝杠转换运动还可进一步细分直线位移，从而提高系统的平稳性及控制精度。

基于以上分析，选择馈线孔静止，绕轴的旋转运动和直线运动分离的方案，

直线运动由旋转电机和丝杠实现。

b. 旋转运动和垂直直线运动配合方案

为了保证缠绕滞后角（见测量部分）测量的精确性，需要使馈线孔和绕轴之间的一段光纤保持在水平面内，如图 2.5 所示。随着绕轴半径的增大，馈线孔相对绕轴在垂直方向的位置需要调整，实现这个运动的方式有两种，一是馈线孔静止，绕轴做垂直运动；二是绕轴水平相对静止，馈线孔做垂直运动。第一种方式下，绕轴系统集合三种运动（旋转、水平直线和垂直直线运动），结构过于复杂庞大，不宜采用；如果采用第二种方式，因为馈线孔质量轻惯性小，而垂直直线运动是单向的，运动简单，便于控制，运动精度易于保证。所以，垂直运动由馈线孔相对于绕轴运动来实现。

还有一种方法就是，加大馈线孔到绕轴的距离来减小这种误差，但是由于滞后角自身很小，只有 0.023° ，加大距离的效果并不明显，所以还是采用馈线孔垂直运动来保持光纤水平。

2.2.2 驱动电机选择

a. 电机性能比较

目前存在直流电动机、异步电动机、同步电动机三大调速系列。

直流电动机调速系统控制简单，调速性能好，变流装置简单，但是直流电机结构复杂、成本高、故障多、维修困难且工作量大；同步电动机调速系统与异步电动机调速系统相比，具有功率因数高、转子参数可测、效率高、定转子气隙大、控制性能好等方面的优势。特别是对于低转速、负载不断冲击的生产机械，由交—交变频器供电的同步电动机矢量控制系统作为主传动已取得国内外电气传动专家和工程技术人员的认同，其运行的性能达到并超过了直流调速系统的水平。新型永磁材料的出现，使得同步电动机具有很高的动、静态品质，并且做到了无刷励磁，因而在数控机床的进给系统和机器人中得到了广泛的应用。^{[21][22]}

b. 驱动电机选择

(1) 旋转运动和直线运动驱动电机

缠绕系统要完成的主要任务有：一是在每层的匀速缠绕过程中，保持旋转运动速度和直线运动速度的恒定比例关系；二是当缠绕至端点时，按要求（即跨越 $1\sim 2$ 匝）完成上绕至后续层的动作，同时保证不出现线包的其他缺陷^{[23][24]}。

对缠绕过程的分析，得出缠绕运动规律和直线运动规律以及它们的关系。经过中间段的匀速缠绕，当缠绕到端点时，设绕轴转速保持不变，直线进给开始减速，并使光纤回叠（有效回叠），绕上第二层；随之，为了配合直线运动的反向动作，绕轴开始减速，在绕上后续层后，设定绕轴转速的一个周期的时间里，和直线运动同时停止，速度为零。这样做是为了避免因减速时的速度比难以恒

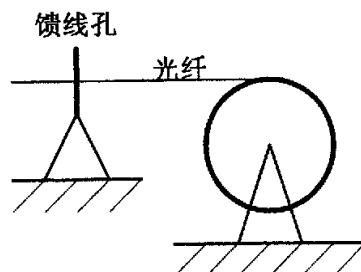


图 2.5 馈线孔与绕轴的垂直位置
Figure 2.5 Vertical position relationship between the feed hole and the winding axis.

定带来的间隙偏离。为了保证光纤确实绕上后续层，旋转运动的减速最好在光纤绕上四分之一周开始为好。在直线运动完成减速、停止的运动状态转换的过程中，其所运行的总位移应该正好满足产生第二层的滞后角的需要。旋转运动和直线运动的速度大致趋势及它们的联系如图 2.6 所示。

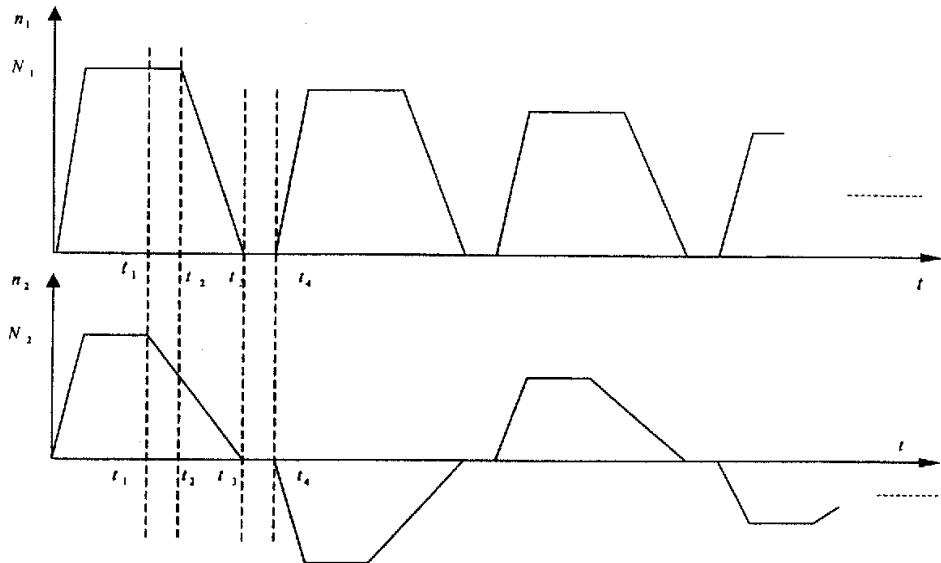


图 2.6 旋转运动和直线运动趋势

图 2.6 中， n_1 为旋转运动的转速， n_2 为直线运动电机的转速， N_1 、 N_2 分别代表匀速缠绕阶段旋转运动转速和直线运动转速，它们之间应该保持恒比关系，这个比例和丝杠螺距及光纤直径有关。 t_1 是缠绕到端点，直线运动开始减速的时刻； t_2 是光纤绕上第二层后，旋转运动开始减速的时刻； t_3 是它们同时停止的时刻， t_4 是后续层开始缠绕的时刻。

由以上分析知，每缠一层，旋转电机就要降低一次速度，直线运动的驱动电机也要配合调速。且光纤本身线径细，所以对两电机的调速要求也较高。排线系统其实是一个伺服系统，需要旋转运动和直线运动的精密匹配，尤其是它们的起动和制动过程在时间上有严格要求。它们的负载特性都是恒功率的。为了便于控制两者的运动匹配，原则上选用相同类型，性能相似的电机作为它们的驱动元件。

经过对直流、异步和同步电机的性能对比，认为永磁同步电机比较适合排线系统的需要，现有的永磁同步电机都自带有转子位置检测装置，应用方便。其中，自控式永磁同步电动机的调速特性与直流电动机基本相同，它的机械转速与转子电流频率呈线性关系，可以实现转速微调；转子电流频率为 0 时，相当于直流励磁，转子转速等于电网同步转速；转子频率为 50Hz 时，转速为 0，相

当于静态机电互联；转子频率大于 50Hz 时，转速为负值，电机反转；转子频率为负值时（即旋转磁场反转），电机转速高于同步转速。从原理上可看出，自控式同步电机便于实现排线系统要求速度微调、频繁起、停的要求，所以选定永磁同步电动机作为排线系统的两个驱动元件^{[23][24]}。

(2) 绕轴相对馈线孔运动

据系统要求，该运动可以采取开环控制。采用步进伺服电机作为馈线孔运动的驱动元件。

2.2.3 参数测量系统

a. 转速测量

增量式光电编码盘包含了电机转子的初始位置信息，是永磁同步电动机自带的转子位置检测器。

通用增量式光电编码盘的技术很成熟，价格比较低，使用很广泛。其输出有 A、B 正交脉冲两路，零脉冲 Z 一路，即 U、V、W 三路互差 120° 的脉冲。一般 A、B 端口每转输出 1000~5000 个脉冲，Z 端口每转输出 1 个脉冲，U、V、W 端口每转输出 P 个周期的矩形脉冲，P 为电机极对数。使用它实现电机转子位置检测的方法如下：

假定它在旋转过程中给定时间 $T_{(t)}$ 内给出脉冲数目为 m，则电机转速 n (r/min) 可表示为： $n = 60 \times m / T \times p_e$ ， p_e 为光电编码盘每转输出的脉冲数。假定电机在静止时转子的初始位置角（电度角）是 θ_0 ，电机的极对数为 p，则从静止开始经过时间 T 后的电机转子位置（机械角）与电机速度 n 之间的关系为：

$$\theta = \theta_0 / p + (n \times T / 60) \times 2\pi = \theta_0 / p + 2\pi \times m / p_e \quad (2.2)$$

若用电度角表示， $\theta = \theta_0 / p + 2\pi \times m / p_e$ ，该 θ 角就是永磁同步电机矢量控制时进行坐标变换所需要的转子位置角^{[25][26]}。

b. 滞后角测量^{[27][28]}

滞后角非常小，其测量精度为 <0.001°，且光纤处于运动状态，考虑采用非接触式的传感器，电荷耦合器件（简称 CCD）来测量滞后角。

电荷耦合器件的突出特点是以电荷作为信号，而不同于其它大多数器件是以电流或电压为信号。CCD 的基本功能是电荷的存储和电荷的转移。电荷耦合摄像器件是用于摄像或像敏的器件，简称 ICCD，它的功能是把二维光学图像信号转变为一维时序的视频信号输出，具有体积小，重量轻，结构简单，功耗小，成本低等优点，广泛用于图像的识别、传输。ICCD 有线型和面型两种。线型 ICCD 直接吸收一维光信息，不能将二维图像转变为视频信号输出，为了得到整个二维图像的视频信号，就必须用扫描方法来实现。这样实时性差，不适合滞后角

的测量。面型 ICCD 是按一定方式将一维线型 ICCD 的光敏单元及位移寄存器排列成二维阵列构成的。面型 ICCD 中的线转移型面阵具有有效光敏面积大，转移速度快，转移效率高等特点，只是电路比较复杂。

CCD 的像素数目范围从 128 个到 1600 万个，若渍线孔距绕轴的距离为 450mm，则选取像素阵列为 4096×4096 的 CCD 就可达到测量精度的要求。所以测量滞后角采用面型固态图像传感器。

c. 放线轴和绕线轴实时半径测量

(1) 半径跟随臂和电位计的组合

实时半径采用半径跟随臂和电位计的组合来测量。图 2.7 是半径跟随臂示意图。图中的滑轴是跟随臂的转轴，它可以沿着滑槽来回移动，使得在缠绕初始位置时，跟随臂与线轴相切，以利于实时半径的计算。对于绕线轴，初始时跟随臂和最小半径相切；对于放线轴，初始时跟随臂和最大半径相切。跟随臂和线轴接触的一端应有一个小轮，图中没有标示。半径跟随臂把实时半径转成

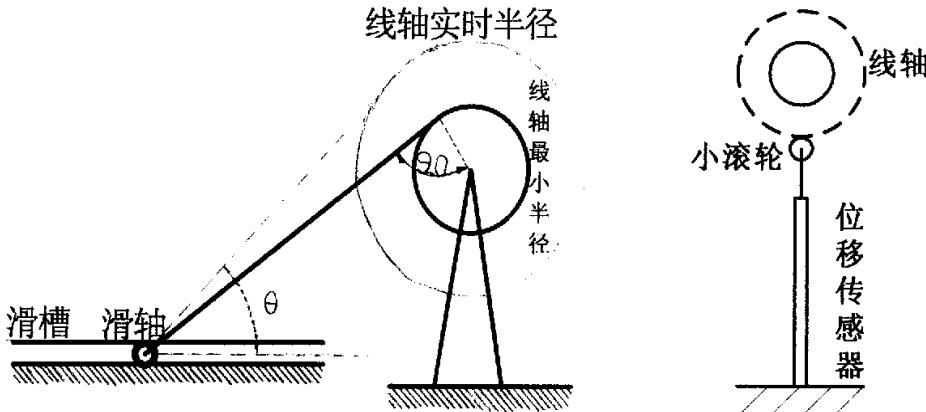


图 2.7 半径跟随臂示意图

角度 θ 输入电位计。电位计可以选用高精度的旋转式电位计^{[28][29][30]}。

(2) 实时半径的直接测量

如图 2.8 所示，用位移传感器直接测量实时半径。位移传感器与线轴的接触点也设置一个小滚轮。选用精度高的、耐冲击的位移传感器。位移传感器直接测量比较半径跟随臂测量，少了一个转换成角度的环节，有利于提高测量精度。但是位移传感器直接测量时，线轴的旋转与位移方向成直角，对传感器冲击大。以上两种方法都是以机械结构为基础的，可靠性较差，维修量大，加之测量精度要求高提高了制造困难，所以考虑采用另一种方法代替绕轴半径的测量。

(3) 计算实时半径

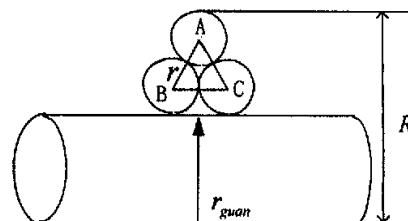


图 2.8 位移传感器测量

在理论上，如图 2.9 示意， r_{guan} 为线包线管半径， r 为光纤线径， R 为绕轴实时半径， ΔABC 为等边三角形，得绕轴实时半径为：

$$R = r_{guan} + nr \sin 60^\circ = r_{guan} + \frac{\sqrt{3}}{2} nr \quad (2.3)$$

其中 n 为正在缠绕的层数。

所以，可以通过计数缠绕层数，推算实时半径。这种方法是求平均值的方法，在某种程度上平均了缠绕误差，比起机械测量，中间环节少，无需多种转换，所以不失为一种好的方法，所以，在实际缠绕时，应用式 (2.3) 计算来推得实时半径。另外，这种方法是建立在前层线包无缺陷的基础上。

d. 直线位移测量^{[31][32]}

缠绕中还需对缠绕点的在绕轴上的位置进行定位，以确定上绕动作的时间。
(1) 计数每层总匝数

对于运动状态的变化位置可以通过计数每层的匝数来确定，但是考虑到光纤直径本身的变化较大，加之匝间间隙的影响，又一层的匝数较多，产生的累积误差也不容忽视，所以这种方法不宜采用。

(2) 常规测量

由于线包成纺锤型，每一层的起始端都是变化的，且因为上绕匝数要求少，对定位精度要求也高，利用常规位移测量法，很难分辨每一层的起始端（边缘），只能固定一个参照点，所以此法也不是理想的办法。

(3) CCD 测量

因为用 CCD 图像传感器测量滞后角，所以可以考虑用该传感器同时定位上线点位置。CCD 可以辨别正在缠绕的层和上一层未被覆盖的部分，由此可以通过确定上层未被覆盖部分的长度定位上线点。CCD 固定不动，绕轴的直线位移使滞后角始终处于 CCD 的检测之中，缠绕到每层的端头，被测量部分会自动进入 CCD 视野，从而不需要较大的面阵。所以，上线点的定位由测量滞后角的 CCD 一并测量，它的精度是没有问题的。

2.2.4 控制模块方案拟定

这里，主要确定控制芯片的类型。数字化使得许多难以实现的复杂控制，如矢量控制中的复杂坐标变换、解耦控制、滑模变结构控制、参数辨识的自适应控制等都解决了。数字化控制技术又给调速系统增加了多方面的功能，特别是故障诊断技术得到了完全实现，且提高了交流调速系统的可靠性和操作、设置的多样性和灵活性。^{[33][34][36]}

用于交流调速系统的微处理器有：单片机、数字信号处理器 (DSP)、精简指令集计算机 (RISC)、高级专用集成电路 (ASIC) 等。

数字信号处理器 DSP 采用数据总线和程序分离的哈佛结构和改进的哈佛结构，有很高的指令执行速度；采用流水线技术，在不提高时钟频率的条件下减少了每条指令的执行时间；配有独立的乘法器和加法器，在同一时钟周期内可

完成相乘、累加两个运算；数据传送速度高；配有中断处理器和定时控制器，可方便地构成一个小规模系统。DSP 面向高速、重复性、数值运算密集型的实时处理，可无间断地完成数据的实时输出与输入；结构单一，采用汇编编程，处理完成时间的可预测性比普通处理器好；可以单周期完成乘加并行操作以及三四次数据存取操作，速度是普通微处理器的 4 倍以上。美国 TI 公司的 16 位定点处理器 TMS320F240 是经过优化专为电机控制开发的。

因此，对于排线系统的交流调速，采用数字信号处理器 TMS320F240 作为控制器，利用矢量控制法实现。

3 缠绕过程剖析及控制参数提取

3.1 光纤缠绕走向及其匝间间隙分析

光纤缠绕时的走向及其匝间间隙直接决定光纤缠绕的成功与否，下面对其的形成原因及影响它们的关键因素进行分析。

3.1.1 光纤缠绕时的几何位置

光纤缠绕时，理想状态下，光纤是紧靠着前一匝已绕好的光纤绕上绕轴的。缠绕过程中，光纤有一个上绕段，如图 3.1 所示。沿着已绕好的两匝光纤的接缝 ab 线把绕轴横切，从 r 方向看去，即线包的轴向剖面，如

图 3.2 所示。其中， R_1 、 R_2 、 R_3 分别是以绕轴轴心 O 为

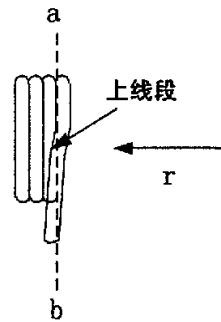


图 3.1 上线段

圆心的已绕好的前匝光纤的内径、中径、外径（已绕好的两匝光纤相切于中径）； P 点是上绕段的起始点，位于中径上； PP' 是光纤的引出方向； OP' 是前匝光纤的一个垂直切面，它通过绕轴轴心 O 和引出光纤与前匝光纤的最后一个接触点 P' ，即上绕段的末尾点； OP' 面在中径处与前匝光纤交于 G 点。从轴向看，在缠绕拉力的作用下， PP' 呈直线状态，实际上它是沿着前匝光纤的表层弯曲而出的。

如图 3.2 所示，截取

包括 \widehat{PG} 弧段的前匝光

纤的一个微小段，分析正

在缠绕的动态引出光纤和已经绕好的静态前匝光纤的位置关系（动、静关系相对于绕轴）。设光纤在缠绕过程中没有挤压变形，而且光纤直径相对于绕轴直径非常小，所以截取的光纤段可以近似为一个直线段。如图 3.3 所示，以 OO' 为中心轴的半圆柱体，是通过中径剖开的光纤微小段的上半部， OO' 即纤芯；椭圆面 $PP'M_2Q_2$ 即图 3.2 中通过上绕段 PP' 、沿绕轴轴向在前匝光纤柱上截面，因为在

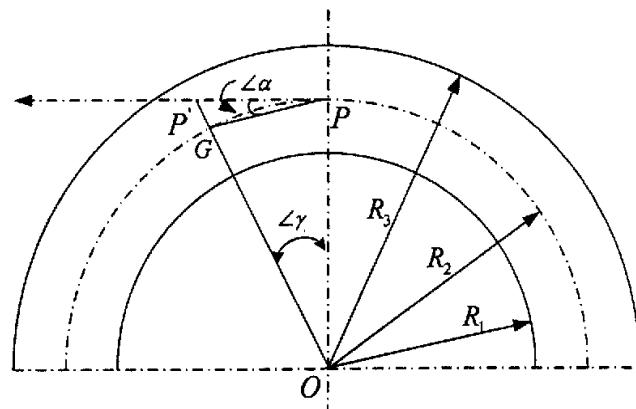


图 3.2 绕轴轴向 (r 向) 剖面图

缠绕拉力 F 的作用下，引出光纤呈直线状态，所以其在前匝光纤柱上的截面为椭圆，即图 3.3 中的 $PP'M_2Q_2$ 椭圆面； O_2 是纤芯 OO' 和直线 GQ_2 的交点，以 O_1 为圆心的光纤截面 $GP'M_1Q_1$ 即图 3.2 中的 OP' 面； XYZ 坐标系是以 P' 点为坐标原点，用来分析缠绕光纤在 P' 点受力情况的坐标系。

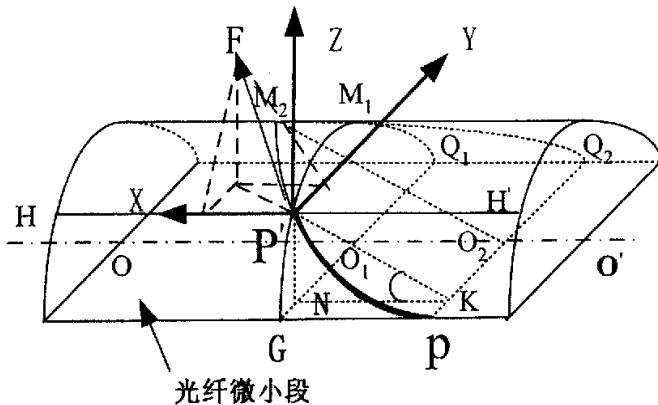


图 3.3 光纤缠绕的位置关系

3.1.2 缠绕过程中光纤的受力情况

截取图 3.3 中的 XYZ 坐标系如图 3.4 所示。 x 轴位于图 3.3 中过 P' 与纤芯 OO' 平行的 $H'H$ 直线上， $H'H$ 位于前匝光纤表面； y 轴平行于绕轴轴心，其正向指向已缠绕的光纤； z 为绕轴表面法向，指向往外。在缠绕过程中，光纤所受拉力 F 是 $xyz-p'$ 空间中的空间力，它可分解为 z 轴的法向力 F_n 和 $xp'y$ 面中的切向力 F_p ；分力 F_p 在 $xp'y$ 面内又分解为 F_{py} 和与轴向垂直的切向力 F_{px} ；角 θ' 是 F 力与 $xp'y$ 面的夹角，角 θ 是分力 F_p 与 x 轴的夹角。据以上关系得：

$$F_n = F \sin \theta' \quad (3.1)$$

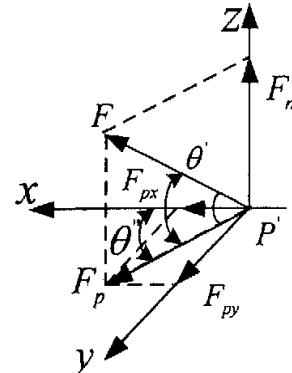


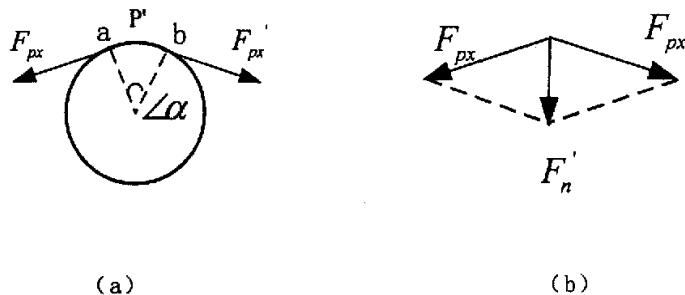
图 3.4 缠绕光纤受力分析

$$F_p = F \cos \theta' \quad (3.2)$$

$$F_{px} = F_p \cos \theta'' = F \cos \theta' \cos \theta'' \quad (3.3)$$

$$F_{py} = F_p \sin \theta'' = F \cos \theta' \sin \theta'' \quad (3.4)$$

a. 分力 F_{px} 作用分析



(a)

(b)

图 3.5 F_{px} 在缠绕过程中的作用

F_{px} 即使光纤卷绕在绕轴上的作用力，它在缠绕中的作用如图 3.5 所示。截取以 P 点为中心点的微小的光纤弧段 \widehat{ab} ， F_{px} 在缠绕中的作用可以等效为图 3.5 (a) 所示。其中，力 F'_px 是光纤产生的力 F_{px} 的反作用力。它们的合力 F'_n (如图 3.5 (b) 所示) 与力 F 在 z 轴的分力 F_n (图 3.4 所示) 作用在同一条直线上，方向相反，随着它们的大小变化，缠绕会出现如下情况：

(1) 当 $F'_n > F_n$ 时，光纤往线轴上卷绕；

(2) 当 $F'_n < F_n$ 时，光纤从线轴上解绕；

(3) 当 $F'_n = F_n$ 时，光纤和绕轴相对静止。

据以上分析有：

$$F'_n = 2F_{px} \sin \frac{1}{2} \angle \alpha \quad (3.5)$$

式中， $\angle \alpha$ 是弧段的中心角 \widehat{ab} ，如图 3.5 (a) 所示。

随着绕轴的旋转，图 3.2 中的光纤上绕段 $P'P$ 会和弧 \widehat{PG} 逐渐重合，随之，图

3.4 中的角度 θ' 也会越来越小，直至为零，从而，力 $F_n = F \sin \theta'$ 也会渐渐变小，直至为零；当 P 点所在光纤接触到线轴上（即 $\theta' = 0$ ）时，残余的 F_n' （也是变化的）作用在线轴表面，线轴表面会有一个反作用力来平衡它。 F_n' 是产生成品线包残余应力的主要来源。

b. 分力 F_{py} 的作用分析

如图 3.3 所示，分力 F_{py} 作用在光纤的垂直切面 $GP'M_1Q_1$ 上，沿此面把绕轴

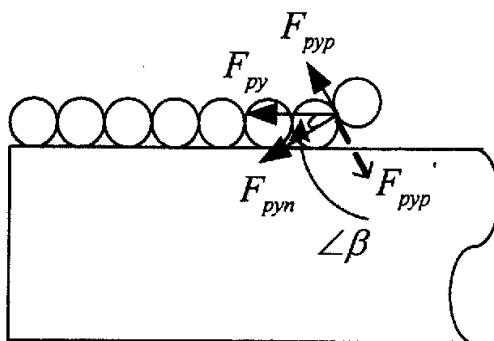


图 3.6 分力 F_{py} 的作用分析

剖开，得图 3.6 所示力 F_{py} 对缠绕的作用。图中， F_{pyp} 和 F_{pyn} 是 F_{py} 在 P 点处分别沿前匝光纤的切向和法向的两个分力； $\angle\beta$ 是 F_{py} 和 F_{pyn} 的夹角。可得如下关系：

$$F_{pyp} = F_{py} \sin \beta \quad (3.6)$$

$$F_{pyn} = F_{py} \cos \beta \quad (3.7)$$

在 F_{pyn} 的作用下， F_{pyp} 会在两匝光纤的接触面上产生一个摩擦力 F_{pyp}' ，该力与 F_{pyp} 大小相等，方向相反。设光纤表面摩擦系数为 μ ，则得摩擦力 F_{pyp}' 的最大值 $F_{pyp(\max)}$ 为：

$$F_{pyp(\max)} = \mu F_{pyn} = \mu F_{py} \cos \beta \quad (3.8)$$

当 $F_{pyp} > F_{pyp(\max)}$ 时，参考 (3.6) 式有：

$$F_{py} \sin \beta > \mu F_{py} \cos \beta \quad (3.9)$$

由(3.9)式推出:

$$\beta > \arctan \mu \quad (3.10)$$

同理, 当 $F_{py} \leq F_{py(\max)}$ 时, $\beta \leq \arctan \mu$ 。

当分力 F_{py} 克服了最大摩擦力 $F_{py(\max)}$ 时, 即:

$$\beta > \arctan \mu \quad (3.11)$$

正在缠绕的光纤会沿着前匝光纤的外表面向上滑动, 且随着光纤的上滑, β 角会越来越大, $F_{py} - F_{py(\max)}$ 的差值也就越来越大, 这种上滑趋势也会随之加剧, 从而, 光纤会缠绕在前匝光纤上面。在宏观缠绕现象中, 这种情况就是光纤上绕到了第二层。

当分力 F_{py} 不能克服最大摩擦力 $F_{py(\max)}$ 时, 即:

$$\beta \leq \arctan \mu \quad (3.12)$$

有 $F_{py} = F_{py(\max)}$, 此时, 光纤会沿着前匝光纤的外表面向下滑动, 在 F_μ 的作用下缠绕在前匝光纤的旁边。与上滑相反, 该种情况下, β 角会越来越小, $F_{py} - F_{py(\max)}$ 的差值为负值, 所以光纤会一直滑下来, 直至缠绕到绕轴上。

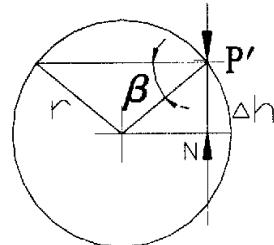


图 3.7 β 角分析

3.1.3 决定光纤缠绕方向的关键因素

据 2.2 节的分析, 在光纤表面摩擦系数确定的情况下, 光纤缠绕方向将绕上第二层还是在原层继续缠绕, 决定于 β 角的大小。

a. β 角的决定因素

图 3.3 中, 垂面 $GP'M_1Q_1$ 所截前匝光纤的截面如图 3.7 所示, 其中 $\angle\beta$ 即图 3.6 中的 β 角。可得:

$$\beta = \arcsin \frac{\Delta h}{r} \quad (3.13)$$

从而知， β 角的大小和光纤直径 r 和高度 Δh 有关。光纤直径由所缠绕的光纤确定，可视为已知量常量， Δh 即图 3 中的 $P'N$ 的高度，它是光纤表面直线 HH' 到底面 Q_1Q_2PG 的距离。把 (3.13) 式代入 (3.10) 式和 (3.11) 式得：

$$\Delta h > r \sin(\arctan \mu) \quad (3.14)$$

$$\Delta h \leq r \sin(\arctan \mu) \quad (3.15)$$

设直线 HH' 到面 Q_1Q_2PG 的距离是 $r \sin(\arctan \mu)$ ，由以上分析可得如下结论：

- (1) 当 P' 点在 HH' 以上时，光纤上绕；
- (2) 当 P' 点在 HH' 以下时，光纤在原层缠绕。

以上分析中的所有角度，都在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

在实际缠绕时， Δh 的大小和 $P'N$ 的大小即 HH' 的位置是很难直接测量的，所以必须找到另外一种能反映它们位置的参数。

b. 延后角 θ 的求解

再次截取图 3.3 中点的 XYZ 坐标系，如图 3.8 所示。其中，角 α 是拉力 F 在平面 $XP'Z$ 上的投影与平面 $XP'Y$ 的夹角，即图 3.3 中椭圆面 $PP'M_2Q_2$ 和底面 Q_1Q_2PG 的夹角，它的大小等于 $\angle M_2O_2O_1 = \angle P'KN$ ；设椭圆两臂分别为 a 和 b ，图

3.3 中，以 O_2 为椭圆圆心， O_2P 为 y 轴， O_2M_2 为 x

轴建立椭圆所在的坐标系，如图 3.9 所示。在实

际缠绕时，图 3.2 中的 PP' 面截取光纤得到的图 3.3 中的椭圆面 $PP'M_2Q_2$ 是平行于水平面的，所以采用 CCD 测量的缠绕滞后角即图 3.9 中所示的 θ 角。

由图 3.3 得椭圆的两臂如下：

$$b = O_2P = r \quad (3.16)$$

$$a = O_2M_2 = \frac{r}{\sin \angle M_2O_2O_1} = \frac{r}{\sin \alpha} \quad (3.17)$$

且可得 $P'K$ 的长度：

$$P'K = \frac{\Delta h}{\sin \angle P'KN} = \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \quad (3.18)$$

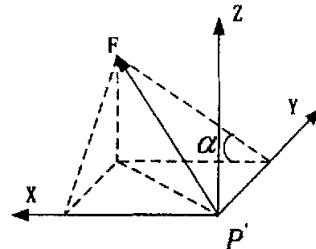


图 3.8 α 角示意图

在图 3.9 中，椭圆方程和 P' 点的横坐标可如下求得：

参考 (3.16)、(3.17) 式得椭圆方程为：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{x^2}{r^2} + \frac{y^2}{r^2} = 1 \quad (3.19)$$

$\frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha}$

由图 3.9 及 (3.18) 式得 P' 点的横坐标为：

$$x_{P'} = -\frac{\Delta h}{\sin \alpha} \quad (3.20)$$

由 (3.19) 式、(3.20) 式得 P' 点的纵坐标：

$$y_{P'} = -\sqrt{r^2 - \Delta h^2} \quad (3.21)$$

据已知椭圆和 P' 点已知坐标，可以得过 P' 与椭圆相切的直线 $P'F$ 的方程及其与 x 轴的夹角 θ ，此角即缠绕滞后角。设 $P'F$ 线：

$$y = kx + b \quad (3.22)$$

联立方程 (3.21) 和 (3.22) 解之，得：

$$k = \frac{\sqrt{r^2 - \Delta h^2} \sin \alpha}{\Delta h} \quad (3.23)$$

从图 3.9 可见：

$$\tan \theta = -k \quad (3.24)$$

所以：

$$\theta = -\arctan k \quad (3.25)$$

代入 (3.23) 式得：

$$\theta = -\arctan \frac{\sqrt{r^2 - \Delta h^2} \sin \alpha}{\Delta h} \quad (3.26)$$

根据 (3.14)、(3.15) 式，令：

$$\Delta h = r \sin(\arctan \mu) \quad (3.27)$$

把上式代入 (3.26) 式得：

$$\theta = -\arctan \left(\frac{\sin \alpha}{\mu} \right) \quad (3.28)$$

如图 3.2 所示 $\angle \alpha$ 即上式中的椭圆 $PP'M_2Q_2$ 和底面 Q_1Q_2PG 的夹角 $\angle \alpha$ ，有：

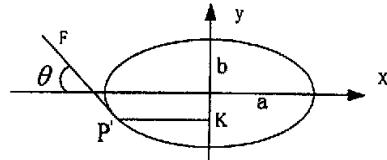


图 3.9 θ 角的计算

$$\angle \alpha = \frac{\angle \gamma}{2} \quad (3.29)$$

α 角的大小是由绕轴的实时半径决定的，半径越大， α 角越小。所以， α 角随着绕层厚度的增加会逐渐减小。在绕轴半径远远大于绕层厚度时，角 α 的变化是很小的，可以忽略不计；在绕层厚度相对绕轴半径较大时，角 α 也可以预先计算得知。所以在缠绕过程中， α 角可以视为一个已知的常量。

此外，式 (3.28) 中的 μ 是光纤表面摩擦系数，为已知量。

所以影响 θ 大小方向的因素有：绕轴实时半径及光纤表面摩擦系数 μ 。

3.1.4 结论

由以上分析可知，随着 θ 角大小方向的变化，光纤缠绕的方向和匝间间隙的变化如下：

(1) 当 $\theta \geq -\arctan\left(\frac{\sin \alpha}{\mu}\right)$ 时，光纤会缠绕第二层；

(2) 当 $0 \leq \theta \leq -\arctan\left(\frac{\sin \alpha}{\mu}\right)$ 时，即如图 3.3 所示，光纤缠绕段 $\overrightarrow{PP'}$ 的最末接触点 P'

在 HH' 以下，也就是它的高度小于 Δh 时，光纤会在原层继续缠绕，而且不产生匝间间隙。

(3) 当 $\theta < 0$ 时，即 θ 与以上两种情况的方向相反时，光纤也会在原层继续缠绕，但是会产生匝间间隙，且 θ 在反向越大，匝间间隙也会越大。

3.2 滞后角与可控量的定量关系

3.2.1 决定滞后角大小的因素

如图 3.10 示， θ 角的大小为：

$$\theta = \arctan \frac{s}{l} \quad (3.30)$$

其中 l 为渍线孔到绕轴与 P 点所在平面的距离，该距离可近似为到绕轴与上线点 P' 所在平面的距离，在缠绕开始后，这是一个固定值； s 是渍线孔到过 P' 垂直于绕轴的平面的距离，它的初始值由理论计算的 θ 角大小确定，在缠绕过程中这个距离由所缠绕层的宽度和绕轴直线位移的差值确定，是一个动态的容易受到影响的变量。所以在缠绕过程中， θ 角是由 s 的值确定的。

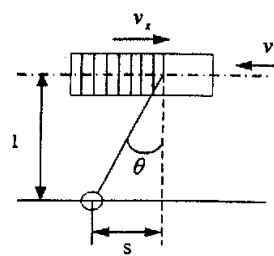


图 3.10 θ 示意图

3.2.2 同层缠绕时影响 s 的参数

设 s 的变量为 Δs , 则得如下公式:

$$\Delta s = \int_0^t (v_x - v_z) dt \quad (3.31)$$

其中, v_x 为缠绕段的运动速度, 有:

$$v_x = \frac{n_x r}{60} = \frac{\omega_x r}{2\pi} \quad (3.32)$$

式中, n 是绕轴转速 (r/min); r 是光纤直径 (m); v 是缠绕段直线速度 (m/s); ω_x 为绕轴转速 (rad/s);

v_z 是绕轴直线运动速度, 有:

$$v_z = \frac{n_z \tau}{60} = \frac{\omega_z \tau}{2\pi} \quad (3.33)$$

式中, τ 是丝杠节距 (m); ω_z 是驱动绕轴直线运动的电机转速 (rad/s); Δt 为该层缠绕时间 (s)。

把 (3.32)、(3.33) 式代入 (3.31) 式, 得:

$$\begin{aligned} \Delta s &= \frac{1}{2\pi} \int_0^t (\omega_x r - \omega_z \tau) dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^t \omega_x r dt - \int_0^t \omega_z \tau dt \right) \end{aligned} \quad (3.34)$$

要保持 θ 角不变, 就要使 $\Delta s = 0$, 则有:

$$\Delta s = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^t \omega_x r dt - \int_0^t \omega_z \tau dt \right) = 0 \quad (3.35)$$

解 (3.35) 式方程得:

$$r(\omega_{x(\Delta t)} - \omega_{x(0)}) = \tau(\omega_{z(\Delta t)} - \omega_{z(0)}) \quad (3.36)$$

则得:

$$\omega_{x(\Delta t)} = \frac{\tau}{r} \omega_{z(\Delta t)} + \left(\omega_{x(0)} - \frac{\tau}{r} \omega_{z(0)} \right) \quad (3.37)$$

其中 $\omega_{x(0)} - \frac{\tau}{r} \omega_{z(0)}$ 为常数, 所以绕轴转速和直线运动驱动电机的实时转速比应为 τ/r 。所以, 影响 θ 大小的因素就是这两个实时转速。

所以, 直线驱动的转速应和绕轴转速保持一个定比 τ/r , 这样就可以维持 $\Delta s = 0$ 。

3.2.3 θ 角的大小及其误差范围确定

a. 同层缠绕时

实际缠绕过程中， Δs 是很难恒为零的，必定有一定的误差，所以必须给出一个合理的误差范围。实际的 θ 角是非常小的，因此，式 (3.28) 可近似看作线性函数，所以在同层缠绕时的 θ 角范围 $\left[0, -\arctan\left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)\right]\right]$ 内，可以取一个中间值作为 θ 的指定值。这样 θ 的正负方向的误差是均匀的。可由下式求得指定值 θ_0 ：

$$\begin{aligned}\theta_0 &= \frac{0 + \left\{-\arctan\left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)\right]\right\}}{2} \\ &= -\frac{1}{2} \arctan\left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)\right]\end{aligned}\quad (3.38)$$

θ 角在 θ_0 点正负方向的最大误差值为：

$$|\Delta\theta|_{\max} = -\frac{1}{2} \arctan\left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)\right] \quad (3.39)$$

考虑到各种不确定因素，以上误差得缩小，并结合 θ 的测量精度最后确定允许误差值 $|\Delta\theta|$ 。

b. 上绕时

上绕时要求光纤跨过的匝数在 1.5~2.5 之间。如图 3.11 所示， R 为线轴实时半径，阴影部分为光纤层。由 3.1.4 结论(1)知：

$\theta > -\arctan\left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)\right]$ 时光纤上绕，设此时缠绕角度为 θ ，并预定跨过的匝数为 2 匝。图 3.11 中，三角形为上绕匝展开示意图， y 是以 θ 缠绕一周后跨过的距离， s 是所要求的 2 匝宽度， x 为跨过 2 匝时，线轴转过的周长，并设其在线轴上对应的中心角为 γ 。可得：

$$\frac{x}{2\pi R} = \frac{s}{y} \quad (3.40)$$

其中， $y = 2\pi R \tan \theta$ ， $s = 2r$ ，带入 (3.40) 式得：

$$x = \frac{2r}{\tan \theta} \quad (3.41)$$

继而得：

$$\gamma = \frac{x}{R} = \frac{2r}{R \tan \theta} \text{ (rad)} \quad (3.42)$$

由此知，上绕时，绕轴转过 γ 角度时，缠绕角 θ 就得恢复到同层缠绕时的大小要求，否则跨越匝数会过多。跨越匝数设为2匝时，有正负半匝的误差，换算成绕轴转角为：

$$|\nabla r| = \frac{r}{2R \tan \theta}.$$

由以上分析知缠绕时刻即缠绕图3.11中的x段的时刻，又由式(3.42)知 x 和 θ 几乎成反比（因为 θ 角很小， $\tan \theta$ 可视为线性），所以 θ 越大 x 越小。这里就涉及到绕轴转速的问题，设此刻，绕轴转速为 ω_r ，则上绕时间计算如下：

$$t_{sh} = \frac{\gamma}{2\pi} T_r = \frac{\gamma}{2\pi \omega_r} \frac{2\pi}{\omega_r} = \frac{\gamma}{\omega_r} \quad (3.43)$$

把(3.42)带入(3.43)式得：

$$t_{sh} = \frac{2r}{\omega_r R \tan \theta} \quad (3.44)$$

实际上， θ 角的变化很小，主要是由绕轴转速决定上绕时间的，再通过考虑系统反应速度和实时性要求，就可以确定一个合理的上绕时间 t_{sh} ，从而再由上绕时间和绕轴转速确定合理的缠绕角度 θ 。由(3.43)得：

$$\theta = \arctan \frac{2r}{R \omega_r t_{sh}} \quad (3.45)$$

此时绕轴转速是由电机起动速度决定的，一般来说有个最小值，所以有：

$$\theta < \arctan \frac{2r}{R \omega_r t_{sh}} \quad (3.46)$$

又有 $\theta > -\arctan \left[\frac{r}{Vh} \sin \alpha \cos (\arctan \mu) \right]$ ，所以得上绕时的缠绕角：

$$-\arctan \left[\frac{r}{Vh} \sin \alpha \cos (\arctan \mu) \right] < \theta < \arctan \frac{2r}{R \omega_r t_{sh}} \quad (3.47)$$

取缠绕角：

$$\theta_{sh} = \frac{1}{2} \left\{ -\arctan \left[\frac{r}{Vh} \sin \alpha \cos (\arctan \mu) \right] + \arctan \frac{2r}{R \omega_r t_{sh}} \right\} \quad (3.48)$$

θ 角的最大允许误差为：

$$|\nabla \theta| = \frac{1}{2} \left\{ \arctan \frac{2r}{R \omega_r t_{sh}} + \arctan \left[\frac{r}{Vh} \sin \alpha \cos (\arctan \mu) \right] \right\} \quad (3.49)$$

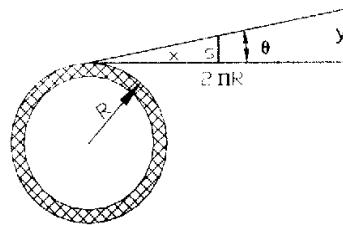


图3.11 上绕匝平展图

3.2.4 s 及其误差 $|\Delta s|$ 范围的确定

a. 同层时

把 (3.38) 式带入 (3.30) 式得:

$$s_0 = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{\Delta h^2} \sin^2 \alpha \cos^2(\arctan \mu)}}{\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)} l \quad (3.50)$$

再把 (3.39) 带入 (3.30) 式，并结合 (3.29) 式得:

$$|\Delta s|_{\max} = - \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) + \frac{1 - \sqrt{1 - a^2}}{a} \right] l \quad (3.51)$$

对上式取合适的比例就会得到 $|\Delta s|$ 值。

b. 上绕时

设上绕时的 s 为 s_{sh} , 结合 (3.30) 式有:

$$\begin{aligned} s_{sh} &= l \tan \theta_{sh} \\ &= l \tan \left(\frac{1}{2} \left\{ -\arctan \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right] + \arctan \frac{2r}{\omega_r t_{sh}} \right\} \right) \end{aligned} \quad (3.52)$$

得 s_{sh} 的最大误差为:

$$|\Delta s_{sh}| = l \left(\frac{2r}{\omega_r t_{sh}} - \tan \theta_{sh} \right) \quad (3.53)$$

设上绕时与同层缠绕时的 s 的差值为 Δs_{ch} , 则得:

$$\Delta s_{ch} = s_{sh} - s_0 \quad (3.54)$$

把 (3.50) 式和 (3.52) 式带入上式得:

$$\Delta s_{ch} = \left\{ \begin{aligned} &\tan \left(\frac{1}{2} \left\{ -\arctan \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right] + \arctan \frac{2r}{\omega_r t_{sh}} \right\} \right) \\ &- \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{\Delta h^2} \sin^2 \alpha \cos^2(\arctan \mu)}}{\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)} l \end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

其中， I 的系数除了 t_{sh} 需要根据电机参数待定外，其它均可看成常数，因此为简便起见，令：

$$\Delta s_{ch} = Kl \quad (3.56)$$

其中常数

$$K = \tan \left(\frac{1}{2} \left\{ -\arctan \left[\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu) \right] + \arctan \frac{2r}{\omega_r t_{sh}} \right\} \right)$$

$$-\frac{1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{\Delta h^2} \sin^2 \alpha \cos^2(\arctan \mu)}}{\frac{r}{\Delta h} \sin \alpha \cos(\arctan \mu)}$$

3.2.5 上绕过程设计

a. 上绕过程分段

如图 3.12 所示，上绕时，滞后角 θ 的方向不变，等到上绕成功时，即光纤在第二层的第一匝绕过主轴的 γ 角度之后， θ 角要改变方向开始缠绕第二层。图中的 A、B、C、O 是上线点上绕时相对馈线孔的不同位置。上线点从最初的 A 点到上绕后的 B 点，到 O

正负过渡的 O 点，再到缠绕第二层时的 C 点，A-B-O-C 即上线点上绕时的路线。

进入上绕过程，就不需要线径补偿， θ_{sh}

是由上线点位置确定的。所以这个过程中主要计算上线点的位移量。

上线点的路径为：

(1) A-B 段。把 A-B 的过程分为两个过程：A-m-B。A-m 段，绕轴直线运动开始加速，运动方向保持不变，

不再维持 $\frac{\omega_{x(\Delta t)}}{\omega_{z(\Delta t)}} = \frac{\tau}{r}$ 的比例，得到 θ_{sh} ，

使光纤绕上第二层；m-B 段内，光纤缠绕方向即缠绕走向已变，但绕轴直

线运动方向依然不变，上线点即绕轴直线运动减速，运动到 B 点得到 θ_{sh} 的最大

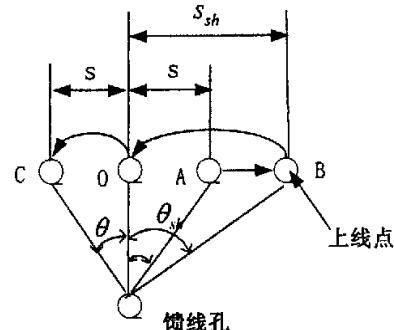


图 3.12 上绕时 s 的变换关系图

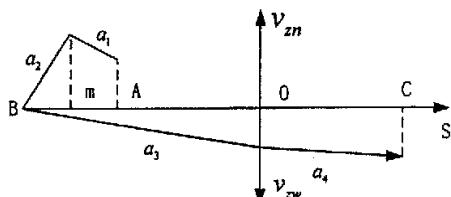


图 3.13 饲线孔速度与位移关系略图

值，且要求绕轴直线运动速度减为零；

(2) B-C 段。上线点改变运动方向，加速，并在 BC 段内，速度达到第二层缠绕速度。期间，在 t_{sh} 末运动到 0 点，使滞后角 θ 为零；然后在绕轴缠绕第一匝剩余的 $2\pi - \gamma$ 的时间里，速度达到第二层缠绕速度。这段位移内，电机加速需要两个以图上加速度。馈线孔运动示意图如图 3.13。图中假设电机没有停顿时间。

主轴旋转运动为：

为了保证上绕成功，馈线孔处于 A-B 段时，主轴缠绕转速不变；当馈线孔处于 B 点位置时，主轴开始减速；馈线孔到达 0 点时，主轴转速减为零；馈线孔处于 0-C 段时，主轴加速，到达 C 点时，主轴转度达到第二层缠绕转速。

a. 上绕过程参数计算

设所有的加减速都是恒加减速。

(1) 有关的距离

$$AB = l(\tan \theta_{sh,max} - \tan \theta_{max}), \quad AO = OC = l \tan \theta$$

(2) 馈线孔速度

设缠绕内层时，馈线孔速度为 v_m ，二层时为 v_w ；设在不同的阶段(如图 3.13)所示，馈线孔加速度分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ；所用时间分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ；所经过的位移分别为 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 。

首先计算馈线孔在 Am 段的速度。此段内，绕轴速度 ω_x 不变，直线运动转轴速度 $\omega_z = a_1 t + \omega_m$ ，并设 A 点为起始点，结合以上条件，把 (3.56) 式带入 (3.34) 式得：

$$Kl = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{t_1} \omega_x r dt - \int_0^{t_1} \omega_z r dt \right) \quad (3.57)$$

对上式进行化简得 a_1 和 t_1 的关系方程为：

$$a_1 \tau t_1^2 + 2(\omega_m \tau - \omega_x r) t_1 + 4\pi Kl = 0 \quad (3.58)$$

经以上分析得如下关系方程组：

$$\left\{ \begin{array}{l} s_1 = v_{zn} t_1 + \frac{1}{2} a_1 t_1^2 \\ s_2 = \frac{1}{2} a_2 t_2^2 \\ s_3 = \frac{1}{2} a_3 t_3^2 \\ s_4 = a_3 t_3 t_4 + \frac{1}{2} a_4 t_4^2 \\ t_1 + t_2 + t_3 = t_{sh} \\ s_1 + s_2 = AB \\ s_3 = BO \\ s_4 = AB \\ a_1 \tau t_1^2 + 2(\omega_{zn} \tau - \omega_y r) t_1 + 4\pi K l = 0 \\ -a_2 t_2 = \omega_{zn} + a_1 t_1 \\ a_3 t_3 + a_4 t_4 = \omega_{zw} \end{array} \right. \quad (3.59)$$

注意，由图 34 可看出，mB 段的减速最快，对系统实时反应的要求也最高，所以，在求解上述方程组以确定 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 和 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 时，首先结合电机及系统的反应速度确定 t_2 和 a_2 ，再求取其他参数。

(3) 绕轴转速

设缠绕第一层即内层时，绕轴转速为 ω_{zn} ，缠绕第二层即外层时为 ω_{zw} ；BO 段加速度为 a_{x3} ，OC 段加速度为 a_{x4} ，则有：

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{zn} = -a_{x3} t_3 \\ \omega_{zw} = a_{x4} t_4 \end{array} \right. \quad (3.60)$$

可解得 a_{x3} 、 a_{x4} 。

4 排线系统数学模型

4.1 电机模型

系统所用两个同步电动机都采用自控式正弦波永磁同步电动机，它由供电变频器、永磁同步电动机、转子位置闭环控制系统组成。两个同步电动机都采用 $i_d = 0$ 的矢量控制法。^{[14] [15] [26] [36]}

正弦波永磁同步电动机数学模型如下：
定子电压方程：

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q + R_1 i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d + R_1 i_q \end{cases} \quad (4.1)$$

式中， u_d 、 u_q 分别表示定子电压的交、直轴分量； ψ_d 、 ψ_q 分别表示定子磁链的交、直轴分量； i_d 、 i_q 表示定子电流的交、直轴分量； ω 为转子角频率； R_1 、 R_2 分别为定、转子内阻。

定子磁链方程：

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (4.2)$$

ψ_f 是永磁体产生的磁链

电磁转矩方程：

$$T_{em} = p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (4.3)$$

$i_d = 0$ 矢量控制中的电磁转矩方程：

$$T_{em} = p\psi_f i_q \quad (4.4)$$

电机机械运动方程：

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - T_L - R_\Omega \omega \quad (4.5)$$

式中， J 为转动惯量（包括转子转动惯量和负载机械折算来的转动惯量）； R_Ω 为

阻力系数； T_L 是负载转矩。

$i_d = 0$ 控制法中的定子电流

$$\begin{cases} i_u = \sqrt{\frac{2}{3}} i_d (-\sin \theta) \\ i_v = \sqrt{\frac{2}{3}} i_d \left(-\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \\ i_w = \sqrt{\frac{2}{3}} i_d \left(-\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \end{cases} \quad (4.6)$$

式中， θ 是位置检测器测出的转子磁极轴线（直轴）与 u 相定子绕组轴线的夹角（电角度），且：

$$\theta = \int_0^t \omega dt + \theta_0 \quad (4.7)$$

即：

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.8)$$

永磁同步电机矢量控制结构简图如图 4.1 所示。

对 (4.4)、(4.5)、(4.8) 式进行拉普拉斯变换得：

$$\begin{cases} T_{em}(s) = p\psi_f I_q(s) \\ Js\omega_s(s) = T_{em}(s) - T_L(s) - R_\omega \omega_s \\ \omega_s(s) = s\theta(s) \end{cases} \quad (4.9)$$

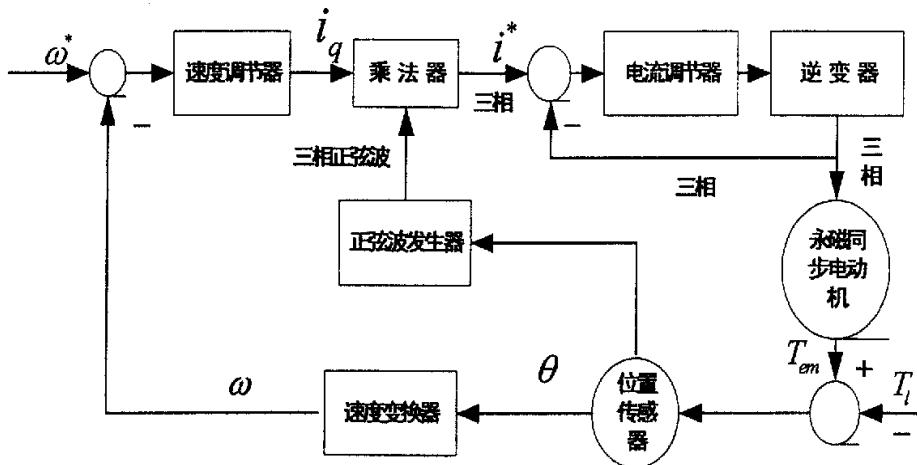


图 4.1 正弦波永磁同步电动机机构示意简图

整理上式可得：

$$\begin{cases} I_{q(s)} = \frac{1}{p\psi_f} T_{em(s)} \\ T_{em(s)} = T_{L(s)} + (R_w + Js) \omega(s) \\ \omega(s) = s\theta(s) \end{cases} \quad (4.10)$$

正弦波发生器的模型求解如下。

它的时域表达式为：

$$\begin{cases} y_1 = \sin \theta \\ y_2 = \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ y_3 = \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (4.11)$$

$$y_1 = \sin \theta = \frac{1}{2j} (e^{j\theta} - e^{-j\theta}) \quad (4.12)$$

对 (4.11) 式进行拉普拉斯变换：

$$Y_{1(s)} = \int_0^\infty \frac{1}{2j} (e^{j\theta} - e^{-j\theta}) e^{-st} dt = \frac{\sin \theta}{s} \quad (4.13)$$

同理可得：

$$\begin{cases} Y_{2(s)} = \frac{\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)}{s} \\ Y_{3(s)} = \frac{\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)}{s} \end{cases} \quad (4.14)$$

又有：

$$i_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[-i_u \sin \theta - i_v \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) - i_w \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (4.15)$$

把 (4.14) 式代入 (4.4) 式得：

$$T_{em} = \sqrt{\frac{2}{3}} p\psi_f \left[-i_u \sin \theta - i_v \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) - i_w \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (4.16)$$

在瞬时刻， θ 可以看成常数，对上式两边求拉普拉斯变换：

$$T_{em(s)} = \sqrt{\frac{2}{3}} p\psi_f \left[-I_{u(s)} \sin \theta - I_{v(s)} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) - I_{w(s)} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (4.17)$$

此外，速度控制器采用适合没有确定数学模型的 PID 调节器，它的数学模型为：

$$G_{(s)} = \frac{I_{q(s)}}{\omega_{(s)}} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.18)$$

其中， K_p 是调节器的比例增益； T_i 是积分时间常数； T_d 是微分时间常数。

由 (4.10)、(4.13)、(4.14)、(4.17)、(4.18) 可得出正弦波永磁同步电动机的数学模型框图如图 4.2。

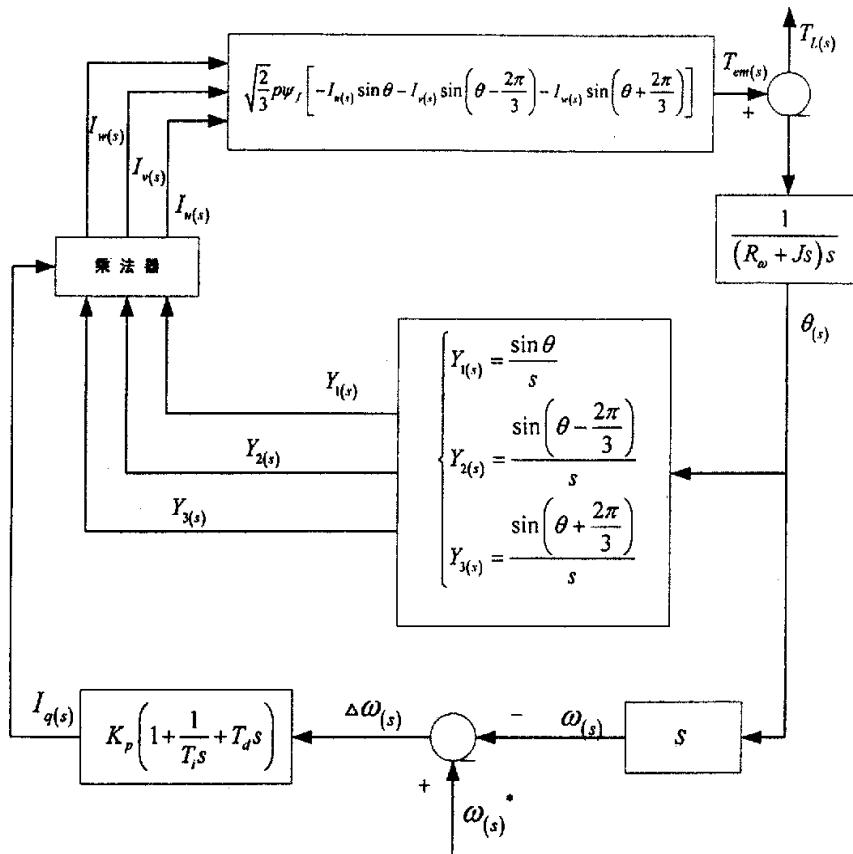


图 4.2 正弦波永磁同步电动机模型框图

4.2 绕轴模型

绕轴等效系统如图 4.3 所示。设绕轴初始条件为零。其微分方程为^{[14][37]}：

$$T_L = J\ddot{\theta}_{(t)} + B_J\dot{\theta}_{(t)} + K_J\theta_{(t)} \quad (4.19)$$

其中, T_L 是输入扭距, $N \cdot m$; J 等效转动惯量, $N \cdot m^2$; B_J 是等效回转粘性阻尼系数, $N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$; θ 是

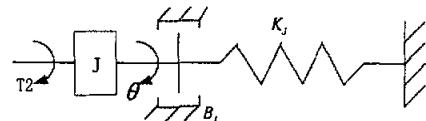


图 4.3 绕轴等效图

转角, rad 。又 $\ddot{\theta}_{(t)} = \dot{\omega}_{(t)}$, $\dot{\theta}_{(t)} = \omega_{(t)}$, $\theta_{(t)} = \int_0^t \omega_{(t)} dt$, 所以得:

$$T_L = J\dot{\omega}_{(t)} + B_J\omega_{(t)} + K_J \int_0^t \omega_{(t)} dt \quad (4.20)$$

对 (4.20) 式进行拉普拉斯变换, 并整理得:

$$\frac{\omega_{(s)}}{T_{L(s)}} = \frac{s}{Js^2 + B_Js + K_J} = \frac{\frac{1}{K_J} * s}{\frac{J}{K_J}s^2 + 2\sqrt{\frac{J}{K_J} * \frac{B_J}{\sqrt{4K_JJ}}}s + 1} \quad (4.21)$$

又得:

$$\frac{T_{L(s)}}{\omega_{(s)}} = \frac{Js^2 + B_Js + K_J}{s} \quad (4.22)$$

由式 (4.21) 可知, 绕轴的传递函数由一个比例环节、一个微分环节和一个振荡环节串连而成。图 4.4 是其方框图。

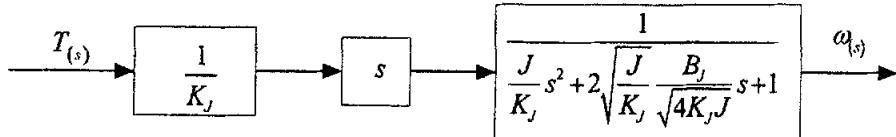


图 4.4 绕轴模型方框图 1

由式 (4.22) 得图 4.5 绕轴模型方框图 2。

4.3 丝杠模型

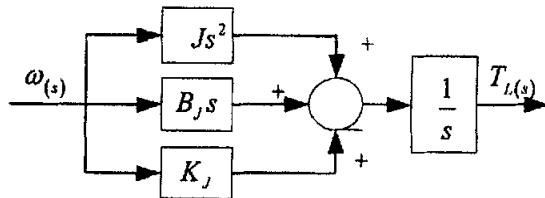


图 4.5 绕轴模型方框图 2

丝杠由螺栓输入转矩, 转换成转速 $\omega_{(t)}$, 再转换成转角 $\theta_{(t)}$; 由螺母输出直线

位移的速度是 v 。

从转矩到转速的模型同绕轴模型。下面是从转速到位移的模型^[19]。

设丝杠的节距为 τ ，则有：

$$v = \frac{\omega \tau}{2\pi} \quad (4.23)$$

对上式取拉普拉斯变换得：

$$V_{(s)} = \frac{\tau}{2\pi} \omega_{(s)} \quad (4.24)$$

绕轴模型接上图 4.5 的丝杠模型图，就是丝杠模型了。

4.4 总体模型

这里只建立总体系统的简明模型，省略了测量部分。

首先求解绕轴转速到上线点位移速度的模型。设上线点的直线位移速度为 v_{sh} ，则有：

$$v_{sh} = \frac{\omega r}{2\pi} \quad (4.25)$$

式中， ω 为绕轴转速， r 为光纤线径。对上式求拉普拉斯变换：

$$V_{sh(s)} = \frac{r}{2\pi} \omega_{(s)} \quad (4.26)$$

下面图 4.6 是系统总体模型框图。

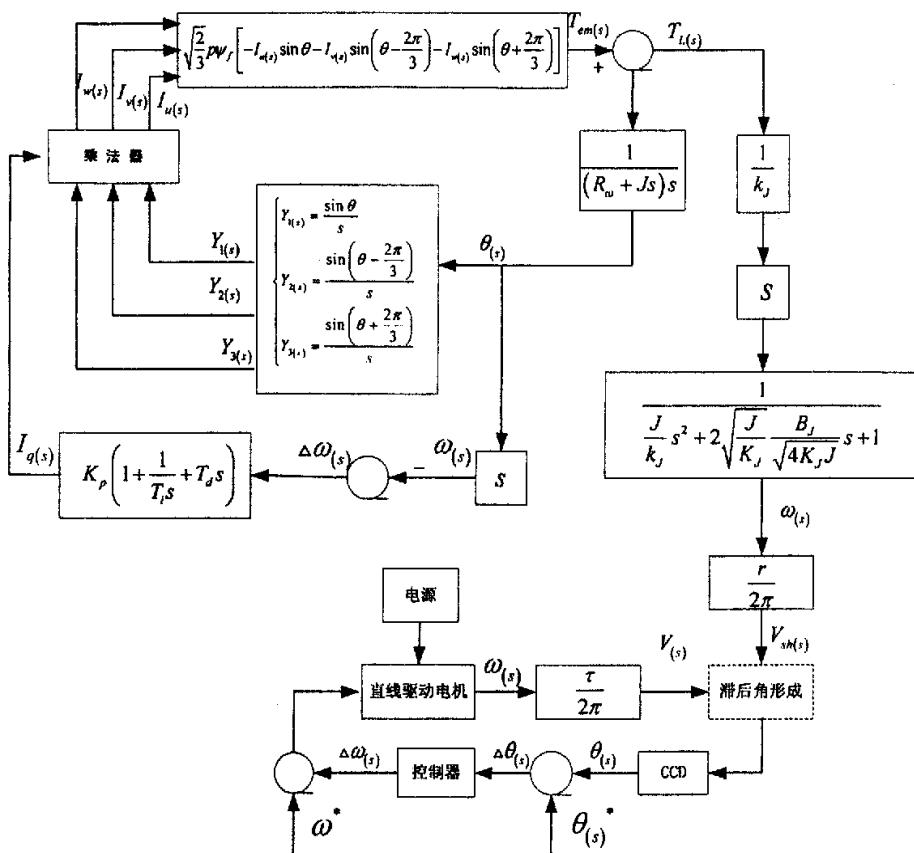


图 4.6 排线系统模型

5 系统控制及其在 MATLAB 中的实现

5.1 开环系统在 MATLAB 的 SIMULINK 动态仿真集成环境中的实现

5.1.1 MATLAB 及其 SIMULINK 动态仿真简介

MATLAB 全名为 Matrix Laboratory, 中文意义为矩阵实验室。经过多年发展和完善, MATLAB 已经发展成为一个多领域、多学科、多功能的优秀科技应用软件。它有以下特点: ^{[38][39]}

首先, 超强的数值运算功能。在 MATLAB 环境中, 有超过 500 种的数学、统计、科学及工程方面的函数可供使用, 且使用简单快捷。一个复杂的问题只用几条简单的指令就可以解决, 这样可以使用户把精力集中在解题方面, 而不必在电脑编程上浪费太多时间。

第二, 强大的数据可视化功能。MATLAB 的图形功能使用户可以进行视觉数据处理和分析。科学家和研究人员在完成科学性或工程性文章时, 可以用 MATLAB 制作高质量的图形, 从而写出图文并茂的文章。

第三, 开放的架构和可延拓的特性。除了内部函数外, 所有 MATLAB 主包文件和各工具包都是可读可改的源文件, 用户可以检查算法、修改现有函数, 甚至加入自己的函数、构成新的工具包, 使 MATLAB 拥有适合用户的环境。

第四, 丰富的工具箱。由于 MATLAB 的开放性, 许多领域的专家都为 MATLAB 编写了各种程序工具箱。这些工具箱提供了用户在特别应用领域所需的许多函数, 这使得用户不必花大量的时间和精力, 达到事半功倍的效果。

Simulink 是实现动态系统建模和仿真一个集成环境。MATLAB 的这一功能实现了可视化建模, 把理论研究和工程上的实现有机地结合在一起。Simulink 为用户提供了很方便的可视化功能模块建模, 用户可以很迅速地连接成一个模拟系统。

鉴于 MATLAB 及其 Simulink 的以上特点, 在研究光纤缠绕排线系统时, 运用 MATLAB 软件对系统进行建模并仿真其特性。

5.1.2 开环排线系统在 simulink 中的实现

在本文的第四章中, 已经建立了一些系统的数学模型, 在这个基础上在 simulink 里实现系统模型, 并运行仿真观察系统运行效果 ^{[40][41][42]}。

a. 各主要子系统模型

(1) 矢量控制永磁同步电机模型

在 simulink 里的电机模型如图 5.1 所示。

其中, dq2abc 模块即实现由旋转坐标交轴电流 i_q 到三相定子电流的矢量控

制，其零输入即直轴分量，在矢量控制中其值为零；“the”为相角输入。PWMinv.

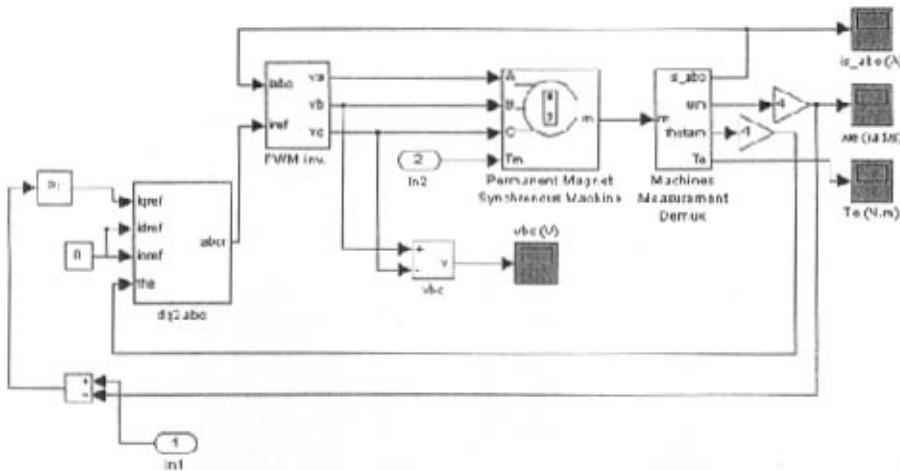


图 5.1 矢量控制永磁同步电机的 simulink 模型

模块是脉宽调制器，通过它三相定子电流转换成定子电压最终控制电机输出转矩和转速；In1 和 In2 是电机的两个输入，In1 输入转速，In2 输入电机需要的输出转矩，这两个输入的乘积决定电机的输出功率。

Permanent Magnet Synchronous Machine 即永磁同步电机模块，双击该模块可以得到它的参数设置对话框，如图 5.3 所示。图中，Flux induced by magnets(wb) 是转子磁钢在定子上的耦合磁链 ψ_b ，根据电机模型式 (4.4) 可知调节它可以调节电机的输出转矩；Inertia 为电机自身的转动惯量，根据电机拖动系统的转动惯量来选取电机的转动惯量，一般为系统转动惯量的四分之一。

(2) 绕轴模型的 simulink 实现

根据第四章绕轴模型在 simulink 里建立绕轴模型如图 5.2 所示，与图 4.4 比较起来，系统的微分环节放在了振荡环节的后面，是因为在输入常值时，首先进行微分会使系统输入响应为零，这是在 MATLAB 仿真时发现的问题。图 5.4 为转换函数的参数设置对话框，其中的参数设置将在仿真时说明。

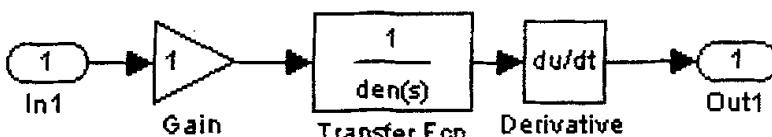


图 5.2 simulink 中的绕轴模型

(3) 丝杠模型的 simulink 实现

第四章中只是建立了丝杠输入转速和输出直线位移速度的模型关系，实际丝杠的输入量是转矩，由转矩产生转速。这个系统和绕轴系统是相似的，同属于机械系统的转动问题，所以它们有相同的模型结构，只是参数有所不同；该

模型结合第四章的丝杠模型即丝杠的仿真模型。如图 5.4 所示。其中, gain2 和



图 5.3 永磁同步电机参数设置对话框

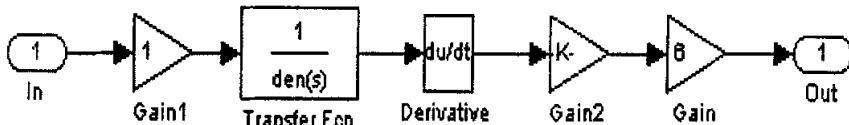


图 5.4 simulink 中的丝杠模型

gain 为转速向直线速度转换的关系。丝杠节距为 6mm。传输方程中的 den (s) 设置如图 5.5 所示, 但是数据和绕轴不一样, 主要是转动惯量加大。

(4) 滞后角的 simulink 实现

在实际系统中滞后角的大小是由图像传感器 CCD 测量的, 在 MATLAB 里面滞后角是用上线点和绕轴直线运动的速度差来计算的, 所以此处不能用 CCD, 即在模型中认为 CCD 的测量误差为零。以下是滞后角计算过程。

如图 3.10 所示, s 的误差为:

$$\Delta s = l(\tan \theta - \tan \theta^*) \quad (5.1)$$

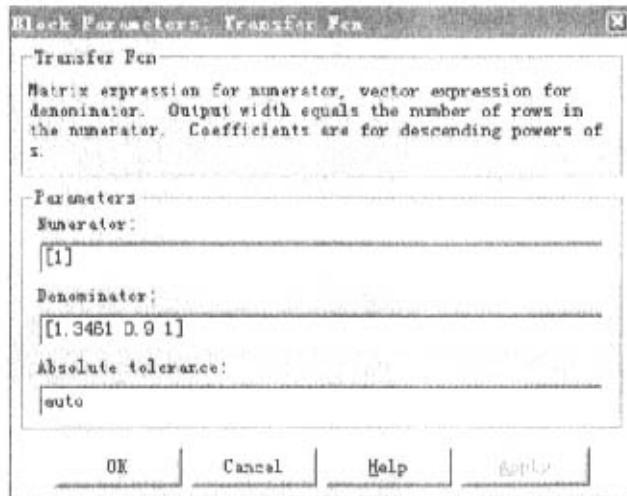


图 5.5 绕轴及丝杠振荡环节参数设置

其中，按照方案和指标性能有（见后说明）： $l = 90\text{mm}$ ， $\theta^* = 0.023^\circ$ ；又有：

$$\Delta s = \int_0^t \Delta v dt = \int_0^t (v_z - v_x) dt (\text{mm}) \quad (5.2)$$

把式 (5.2) 和式 (5.3) 联合得：

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan \left(\frac{\Delta s}{l} + \tan \theta^* \right) = \arctan \left(\frac{\int_0^t \Delta v dt}{l} + \tan \theta^* \right) \\ &= \arctan \left(\frac{\int_0^t \Delta v dt}{90} + \tan 0.023^\circ \right) = \arctan \left(0.0111 \int_0^t \Delta v dt + 0.0004 \right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

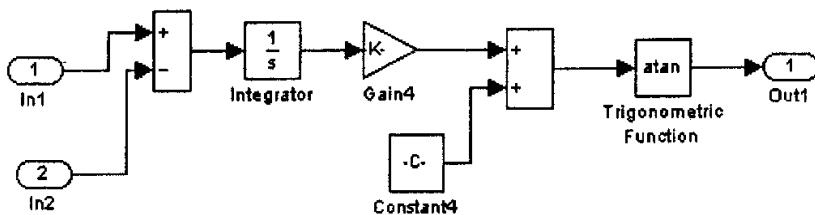


图 5.6 simulink 中的滞后角

其中 $\Delta v = v_z - v_x$ 。据式 (5.3) 式建立滞后角的 simulink 模型如图 5.6 所示。

图中 In1 为上线点速度 v_z ，In2 为绕轴直线位移速度 v_x ，输入 out 即为滞后角；

此外图中的 Constant4 常数是按照设定滞后角的计算的 s 值，但是在实际仿真中，直线驱动电机的加速超调总是大于绕轴加速，所以可以调整 Constant4 的数值来尽量减小起动时的滞后角激变。

(5) 系统输出转速和电机输入转矩的关系及其 simulink 实现

对式 (4.19) 绕轴的微分方程两边求拉普拉斯变换并整理得：

$$T_{(s)} = \left(Js + B + \frac{K}{s} \right) \omega_{(s)} \quad (5.4)$$

当输出转速为常量时，设 $\omega_{(t)} = \lambda$ ，则有： $\omega_{(s)} = \frac{\lambda}{s}$ ，把该式代入 (5.4) 式得：

$$T_{(s)} = \frac{K\lambda}{s^2} + \frac{B\lambda}{s} + J\lambda \quad (5.5)$$

对上式求反拉普拉斯变换得：

$$T_{(t)} = K\lambda t + B\lambda + J\lambda \delta_{(t)} \quad (5.6)$$

据上式得系统输出匀速 λ 时和电机输入转矩的 simulink 模型，如图 5.7 所示。图中省略了脉冲输入函数，因为它的作用时间为零。Ramp 模块的斜率为 $K\lambda$ ，constant 模块的常数值为 $B\lambda$ ， K 为系统增益， B 是系统粘性阻尼比。Out 为模块输出转矩即电机的输入转矩，接电机模块的 In2。

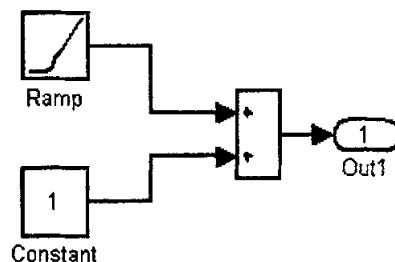


图 5.7 转速恒定时的电机输入转矩的 simulink 实现

b. 开环系统的 simulink 模型及其仿真结果

开环系统的 simulink 模型建立并仿真需要一些具体参数，首先计算相关参数。

(1) 参数计算

① 绕轴和丝杠的转动惯量计算^{[43][14]}

绕轴近似为实芯铁质绕轴。

$$\text{有: } J = \frac{\pi \rho d^4 l}{32} (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

其中: J ——绕轴转动惯量—— $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

ρ ——材料密度—— kg/m^3

d ——传动件等效直径—— m

l ——传动件轴向长度—— m

据以上指标取近似值，可得绕轴转动惯量的参考值。

$$J = \frac{\pi \rho d^4 l}{32} = \frac{3.1416 \times 7.8 \times 10^3 \times 0.25^4 \times 0.45}{32} \approx 1.3461 (kg \cdot m^2) \quad (5.7)$$

丝杠的转动惯量比绕轴大，估计取为 $1.8922 kg \cdot m^2$ ，不再另行计算。

② 系统阻尼和增益的选择

系统阻尼和增益可以在实际设计时增加或者减小，仿真时，绕轴和丝杠系统的阻尼都取 0.9，系统增益取 1。可以根据仿真效果进行适当的调整。

③ 其它数据确定

设仿真缠绕的光纤线径为 $0.50mm$ ，绕轴转速 $12 rad/s$ ，丝杠节距 $6mm$ ，据绕轴转速和直线电机的转速比，得直线电机转速为 $1 rad/s$ 。

(2) 开环系统的 simulink 模型

在以上各子系统模块和参数的基础上建立的开环系统的 simulink 模型如图 5.8 所示。它的简装图如图 5.9 所示，在 simulink 中双击 khpxxt 模块即可得图 47 的系统模型内容。图 5.7 中，输入为 ω 为直线驱动电机相对于绕轴转速的设定转速，单位 rad/s ，在以上参数设置中，它应该为 1；输出“jiao”模块输出为缠绕滞后角。

(3) 开环仿真结果

仿真说明：该开环仿真是仿真线径为 $0.50mm$ 的光纤同层缠绕情况，设绕轴转速为 $12 rad/s$ ，则直线驱动电机转速为 $1 rad/s$ ，由此根据式 (5.6) 及图 5.7 的模型，图 4.6 中的绕轴电机转矩输入中，constant 为 6，ramp 斜率为 12；丝杠驱动电机输入的转速 ω 取为 $1 rad/s$ ，根据仿真经验，constant4 设为 0.0255。以下为在上述情况下的仿真结果：图 5.10 为滞后角输出，图 5.11 为上线点和绕轴直线位移速度差，图 5.12 的前两项分别为上线点和绕轴直线位移速度。

图 5.13、5.14、5.15 分别为 constant4 设置为 0.027 的情况下的开环系统仿真滞后角、转速差、绕轴转速及绕轴直线位移速度。

由以上仿真结果看出：系统输出稳定；调节 constant4 可以改变滞后角的大小，但调整规则不确定；系统的调节时间长达 $10s$ ；超调大，滞后角最大最小输出差达到 0.007° ，相对稳定性不好。

分析其原因，可以看出问题主要在于两电机的起动加速度不同，导致起动超调不同，期望引入智能闭环控制，解决这个问题，使超调减小，调节时间缩短到合理范围。

5.2 闭环系统在 SIMULINK 动态仿真集成环境中的实现

5.2.1 神经网络控制方法

a. 神经网络控制

(1) BP 神经网络^{[44][46][48][47][48]}

神经网络具有分布式存储信息、对信息的处理及推理的过程具有并行、对

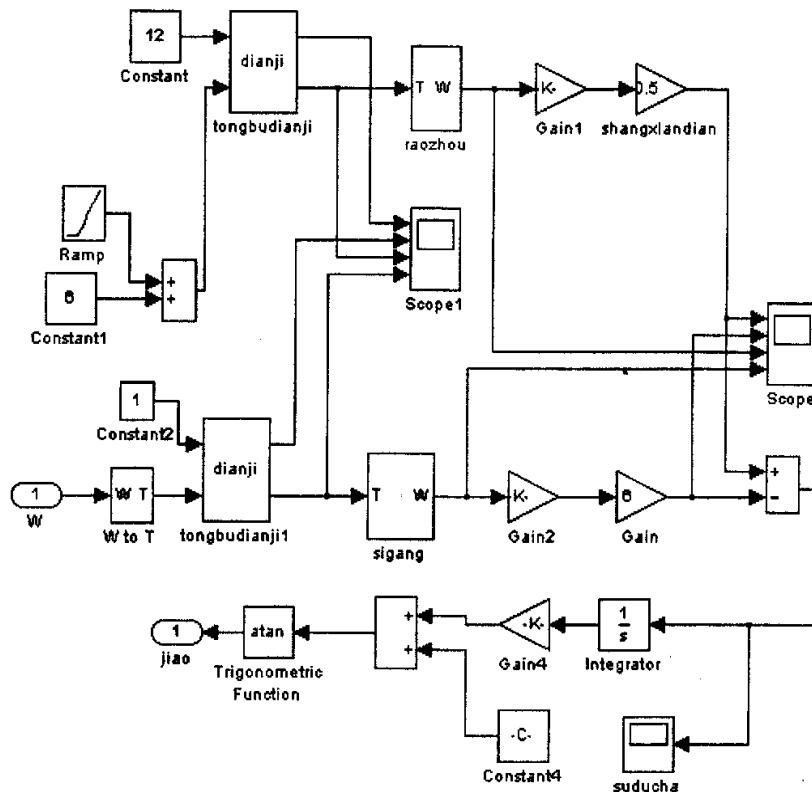


图 5.8 开环排线系统的 simulink 模型

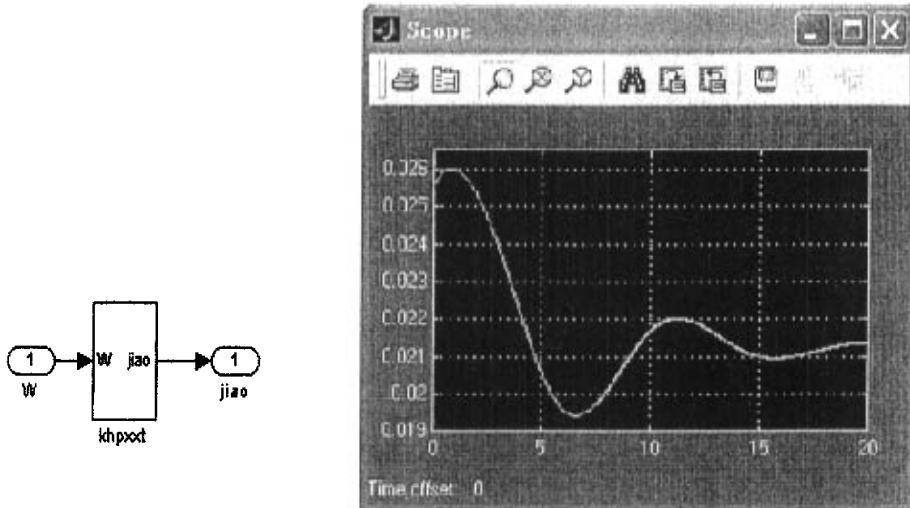


图 5.9 开环排线系统简图

图 5.10 0.0245 滞后角输出

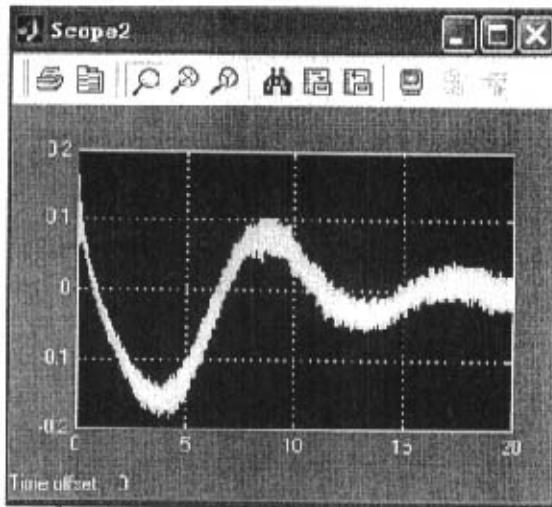


图 5.11 0.0245 速度差

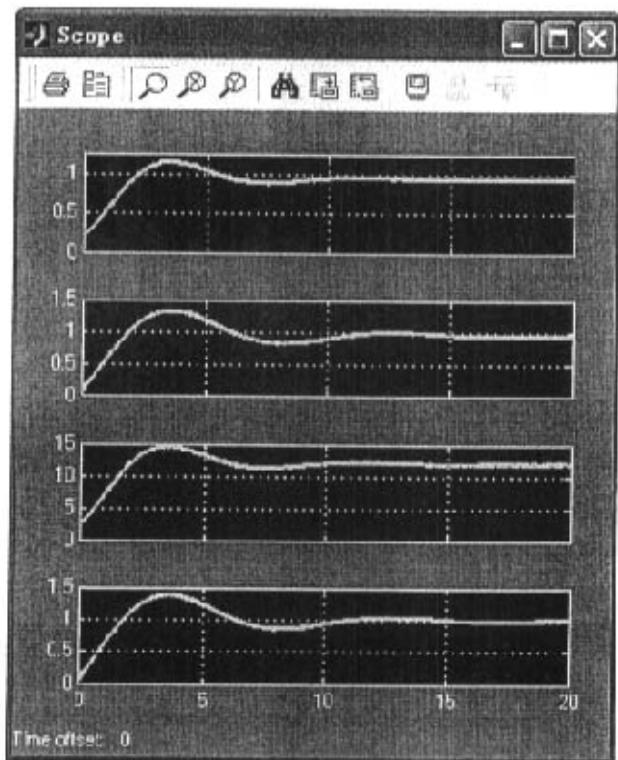


图 5.12 0.0245 转速

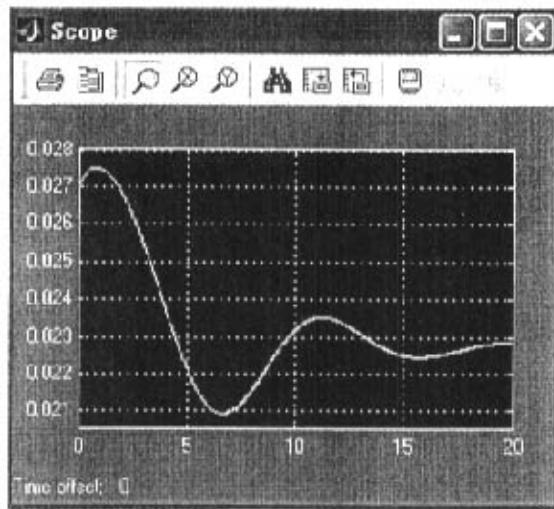


图 5.13 0.027 滞后角

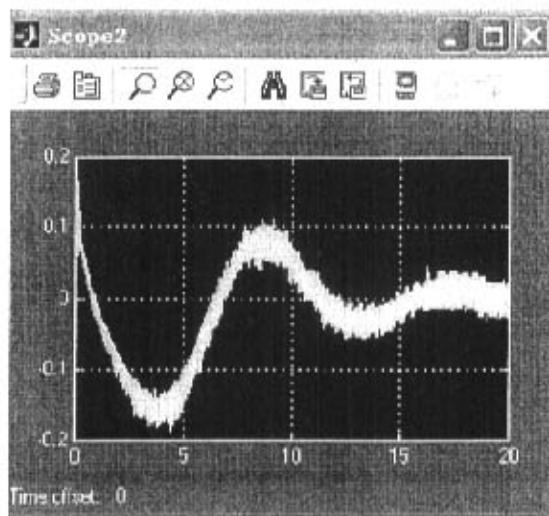


图 5.14 0.027 转速差

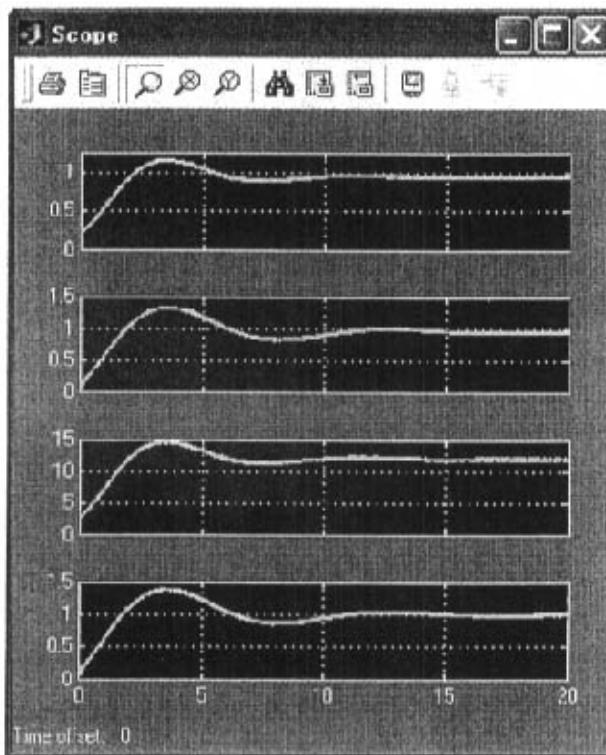


图 5.15 0.027 转速

信息的处理有自组织、自学习的特点。比较模糊控制和专家控制有较强的控制非线性系统的能力。

BP 神经网络是一种利用误差反向传播训练算法的典型的神经网络，是具有隐含层的多层前馈网络，系统地解决了多层网络中隐含层单元连接权的学习问题。已经证明具有三层以上的前馈神经网络对任意非线性函数有无限逼近的能力。从原理上讲只要有足够多的隐含层和隐含点，即可实现复杂的映射关系，但是如何根据特定的问题来具体确定网络的结构尚无很好的方法，仍需凭借经验和试凑。BP 网络有较好的容错性和很好的逼近非线性映射的能力。

对于排线系统，理论上讲 BP 网络的性能可以满足排线系统的要求，所以其它模型不再详细介绍。

(2) 神经网络控制与 MATLAB 实现

MATLAB 软件的神经网络工具箱提供了许多进行网络设计和分析的工具函数，给用户带来了极大方便，即使不了解算法的本质，也可以直接应用丰富的函数来实现自己的目的。其神经网络工具箱内容越来越丰富，包括了很多现有的神经网络新成果，涉及的网络模型有感知机、线性神经网络、BP 神经网络，等等。工具箱提供了很多典型的学习算法，使用它能够快速地实现对实际问题的模型求解。其编程简单，可节省大量的时间。

MATLAB 神经网络工具箱还提供了基于 Simulink 的三种典型神经网络控制系统：神经网络模型预测控制（NN Predictive Controller），用于预测系统未来

的行为，并且找到最优算法，用于选择控制输入，以优化未来的性能；反馈线性化控制 (NARMA-L2 Controller)，仅仅是将系统模型进行重整；模型参考控制 (Model Reference Controller)，控制器是一个神经网络，它被训练并用于控制系统，使系统跟踪一个参考模型，这个神经网络系统模型在控制器训练中起辅助作用。它们是比较典型的神经网络结构，常用于预测和控制。

对于排线系统的控制采用这三个现成的神经网络控制结构。经过比较，反馈线性化控制的作用较好，所以采用了这个结构对排线系统进行闭环控制。

5.2.2 闭环排线系统控制仿真结果

a. 反馈线性化控制 (NARMA-L2) 模块简介

反馈线性化控制 (NARMA-L2) 的中心思想是通过去掉非线性，将一个非线性系统转换成线性系统。

第一步，辨识被控系统。通过训练一个神经网络来表示系统的前向动态机制，在第一步中首先选择一个模型结构以供使用，如图 5.17 所示，在 simulink plant model 栏选择要控制的开环系统 pxxt，即排线系统。非线性自回归移动平均模型 (NARMA) 用来代表一般的离散非线性系统的标准模型。

在系统辨识窗的 network architecture 栏设计神经网络的结构，这里只有隐含层的神经元个数可供选择，一次仿真的个数取 15；从这里还要指定加到系统网络模型的输入输出延迟，一次都设为 1s；还有程序从 simulink 中采集数据的间隔，一次取 0.2s。

Training Data 块用来提供系统辨识的数据，这里需要提供的主要的参数有系统随机输入输出的最大最小值，一次仿真的系统输入范围即系统输入转速是 $0.98 \sim 1.01 \text{ rad/s}$ ，输出即系统期望输出滞后角范围是 $0.0225^\circ \sim 0.0235^\circ$ 。

Training Parameters 窗用来设置训练网络的迭代次数和指定训练函数。一次仿真的迭代次数为 200，训练函数选择 trainlm，即 Levenberg—Marquardt 反向传播算法训练函数。

以后的仿真中，有关参数设定直接反应在窗口中不再说明。

设置完参数后点 generate data 按钮，可以得到训练数据，如图 5.18 所示，数据合格再点其中的 accept data 按钮，进入第二步。

第二步，控制器训练。点击 training parameter 中的 train network 即可按照设置的迭代次数和训练函数训练控制器。

b. 闭环系统的反馈线性化控制 (NARMA-L2) 仿真结果

(1) 一次仿真

系统设置：阻尼均为 0.5，增益均为 1，constant4 为 0.027；电机输入转矩模型常数为 ramp=6, constant=0.5。

排线系统闭环结构如图 5.16 所示。

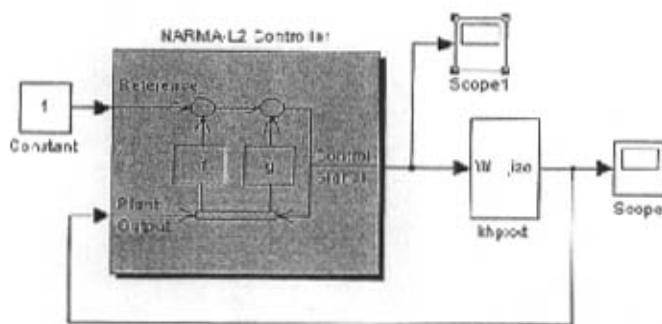


图 5.16 系统闭环结构



图 5.17 参数辨识窗口

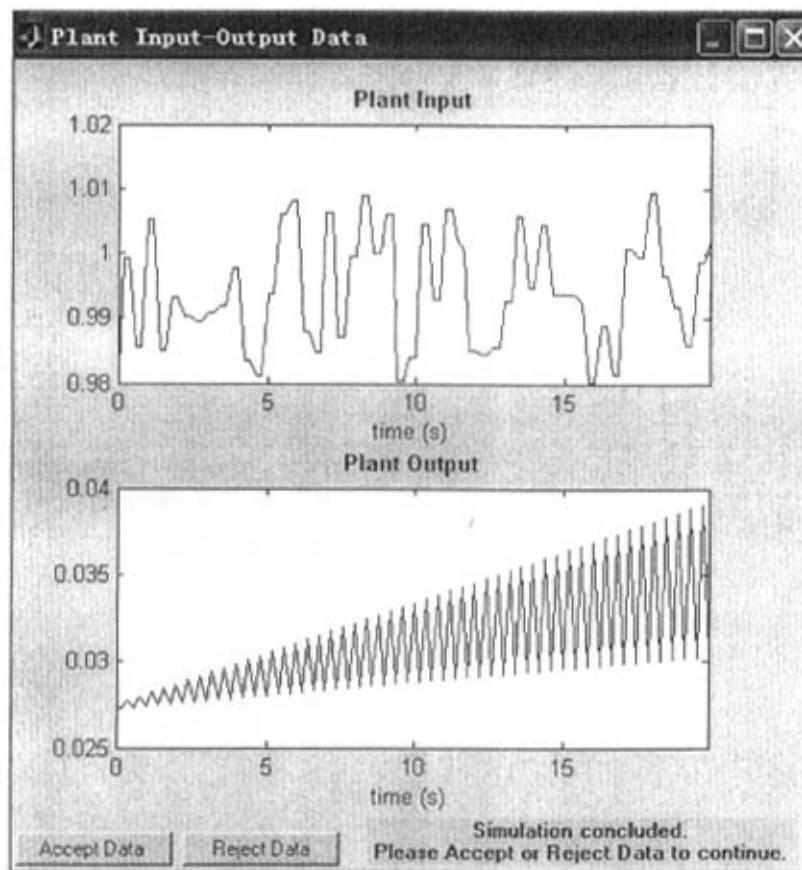


图 5.18 一次仿真系统辨识数据

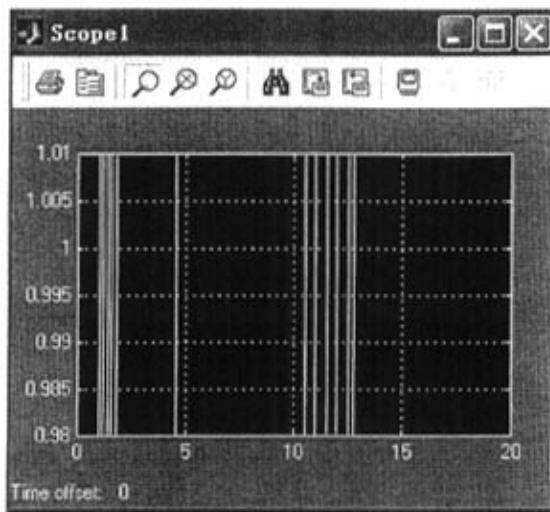


图 5.19 一次仿真控制器输出

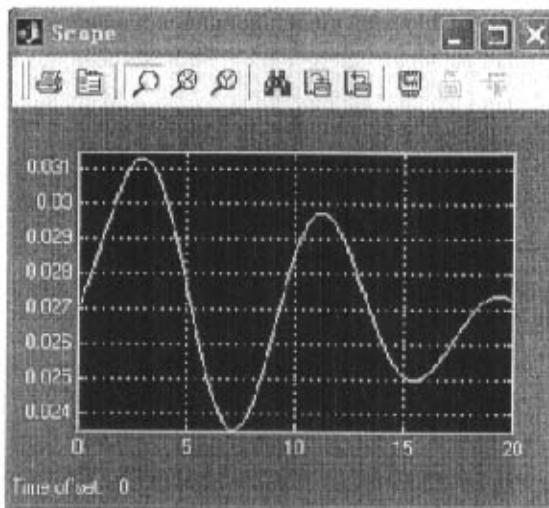


图 5.20 一次仿真系统滞后角输出

控制器参数设置：如图 5.17 所示。

系统辨识训练数据结果：如图 5.18 所示。

仿真结果：

从图 5.19 可以看出，控制器对系统是有调节作用的，图 5.20 说明了系统的趋势是稳定的，但超调大，最大最小输出差值达到 0.008° ，调节时间达到 20s，比开环系统的性能更差。但是稳态值趋于系统 constant4 设置的 0.027。

结果分析：

在其它参数不变的情况下变化 constant4=0.023，再仿真一次，发现输出滞后角发现系统不稳定了，且控制器输出为恒值，没有调节作用。在开环稳定的情况下闭环出现这种情况，怀疑系统输入精度设置太低，波动超出了控制器对系统的调整范围。

重新设置输入精度，训练控制器，继续观察结果。

(2) 控制器输出在 0.095~1 时的仿真

控制器输出调节到 0.095~1 时，得到的控制器输出、滞后角输出、上线点和绕轴直线位移速度差的结果分别如图 5.21、5.22、5.23 所示。

仿真结果：

可以看出系统的稳定性得到了较大的改善，说明系统（注：当系统输入改变时，控制器训练会改变控制器权值和阈值参数，所以实际是改变了闭环系统，所以稳定性会有所改变）的输入精度对闭环系统的稳定性有很大影响，但是系统的超调量没有得到改善，最大最小输出之差还处在 0.008° ，系统调整时间较开环反而增加。

结果分析：

在这个分析结果上，考虑到系统的模型，其输入转速是通过一个微分环节和一个积分环节作用于系统的，输入的微细变化都能对系统产生大的影响。且开环系统的输入设置是建立在系统转速输出为阶跃恒值的基础上设计的，没有

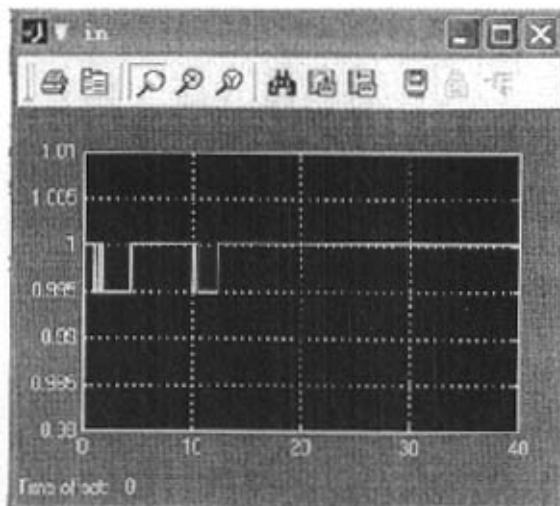


图 5.21 0.095~1 仿真控制器输出

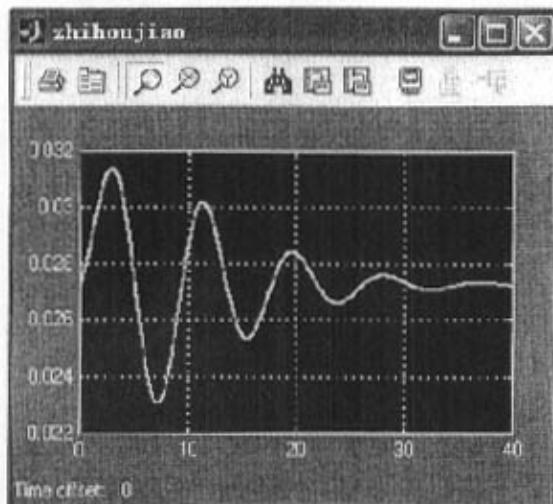


图 5.22 0.095~1 二次仿真系统滞后角输出

考虑到电机的加速环节，但是无论在开环还是闭环仿真中发现，影响系统输出的主要原因集中在电机加速时，两电机的加速度难以配合的，造成系统输出滞后角超调过大，从而调整时间也减不下来。

改进方向：

考虑进电机加速的问题，重新设计系统输入对电机转矩的控制。

5.2.3 改进后的开环系统及其闭环控制

a. 带加速度输出时的电机转矩输入

鉴于以上仿真结果，考虑转速求转矩的模型是不精确的，严重增加了系统超调，所以对电机的转矩输入考虑进系统输出的加速情况。在时域内计算这个

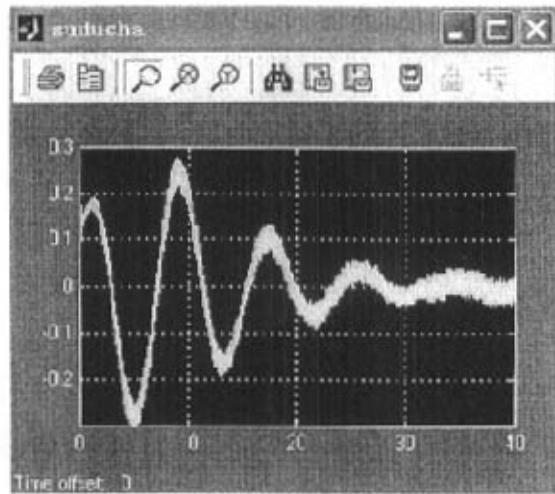


图 5.23 0.095~1 仿真速度差

关系。设系统加速时间为 m , 末速度为 λ , 则带加速度的转速表达式为:

$$\omega_{(t)} = \frac{\lambda}{m} t \left(1_{(t)} - 1_{(t-m)} \right) + \lambda \times 1_{(t-m)} \quad (5.8)$$

又根据式 (4.21) 系统的转矩表达式, 在 simulink 中分别建立的转速和转矩模型如图 5.24、5.25 所示。

转速模型中, step 是终值为 1, 没有延时的阶跃函数; step2 是终值为 1, 延时为 m 秒的阶跃函数; step3 是延时 m 秒, 终值为 λ 的阶跃函数; ramp 的斜率为 $\frac{\lambda}{m}$ 。

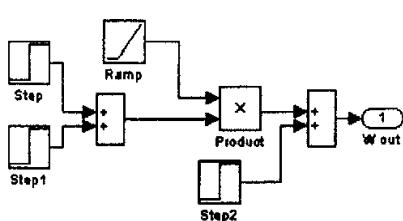


图 5.24 带加速度的转速模型

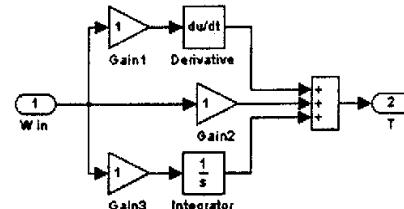


图 5.25 带加速度的转矩模型

转矩模型中, gain1、gain2、gain3 分别为系统的转动惯量 J 、粘性阻尼比 B 、系统增益 K 。

在理论上, 该模型可以通过调整对应参数, 任意设置系统加速时间 m , 和系统的期望输出末速度。比较适合排线系统转速变化频繁的情况。

下面是以丝杠输入速度为例的速度和转矩仿真结果。图 5.26 为转速结合转矩的模型图, 图 5.27、5.28 分别为丝杠的速度及在此速度下所求的转矩输入。可以看出速度函数正是设计的函数, 转矩曲线在 5s 时有明显调整。

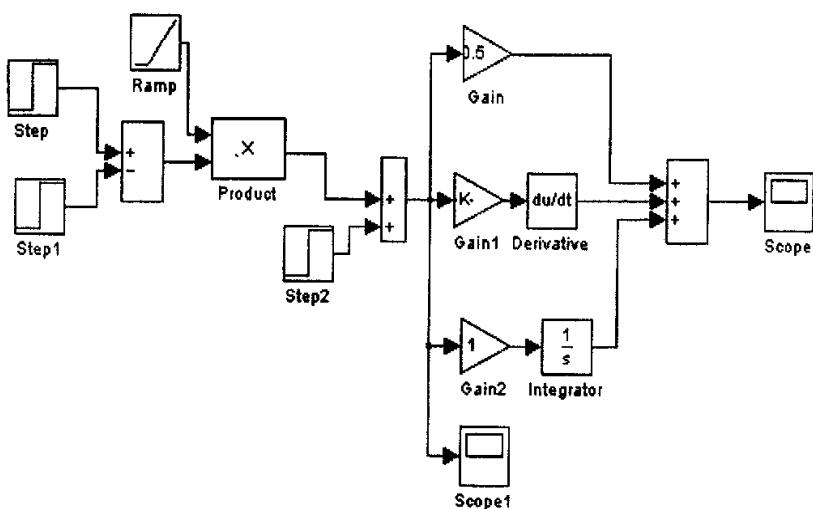


图 5.26 考虑输出加速度的系统转矩输入

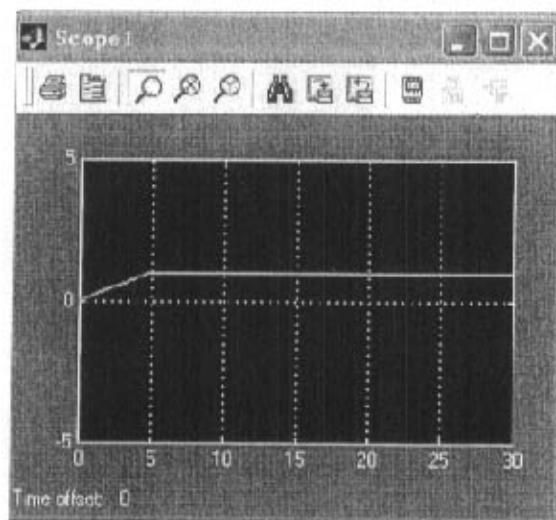


图 5.27 期望系统输出的速度函数

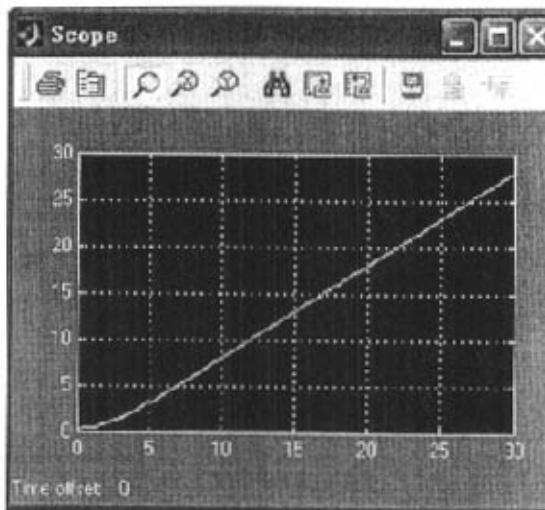


图 5.28 对应图 75 的系统转矩输入

b. 考虑加速度的开环系统仿真——constant4 的可调性

(1) constant4=0.027

系统设置：绕轴转速 12 rad/s ，直线驱动转速 1 rad/s ，加速时间设为 5s ，
系统其它参数同开环仿真系统，constant4 设为 0.027 。

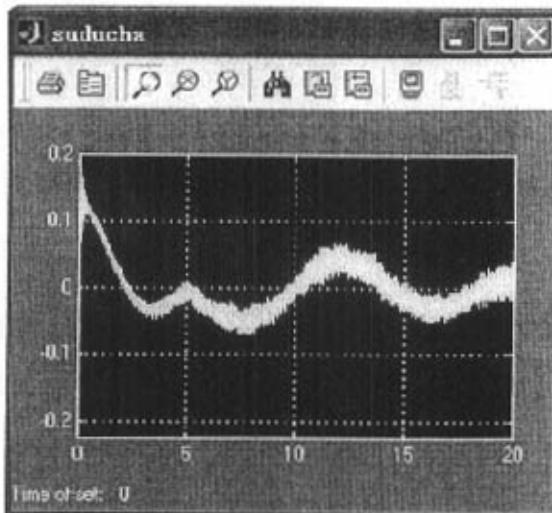


图 5.29 上线点和绕轴直线位移速度差

仿真结果：

图 5.29、5.30、5.31 分别是转速差，滞后角和转速的结果。图 5.31 中的转速图形里，前一、二项分别是上线点位移和绕轴位移，三、四项分别为绕轴和丝杠的输出转速。

结果分析：

可以看出，结果得到了明显改善，尤其是系统超调，输出最大最小值之差

从原来 0.008 下降到 0.003，上线点和丝杠直线位移速度几乎没有超调，且都在 5 秒时达到速度要求，加速曲线近似直线。输出滞后角稳态值接近 constant4 即 0.027。

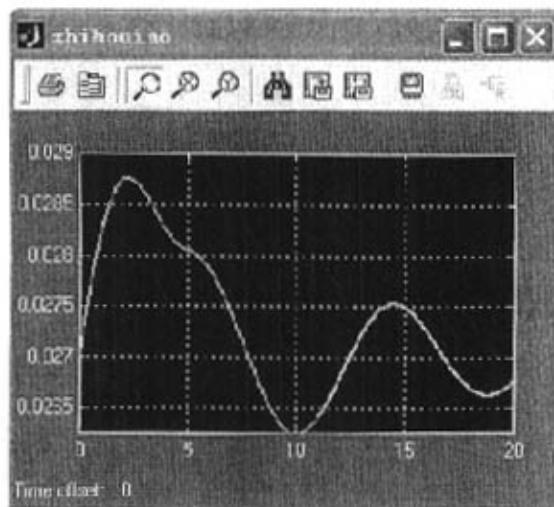


图 5.30 带加速度的开环系统输出滞后角

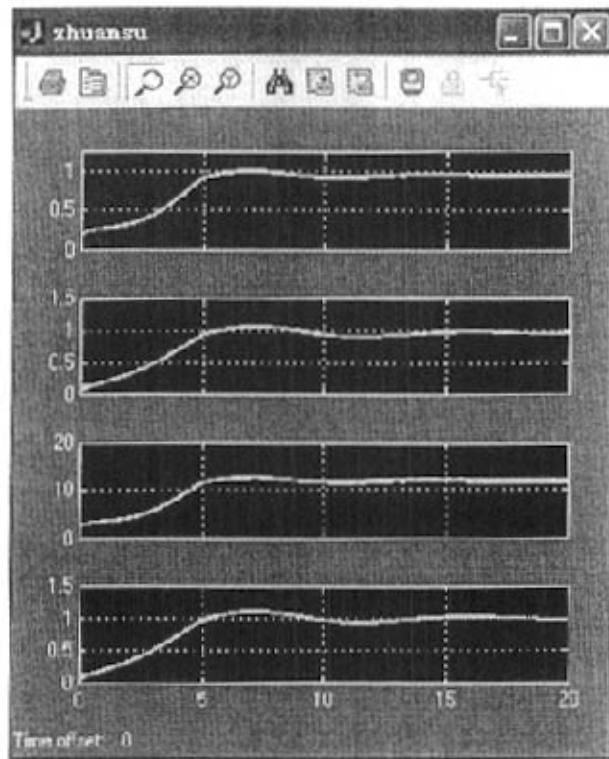


图 5.31 转速输出

(2) $\text{constant4} = 0.023$

根据(1)的现象，在系统其它参数不变的情况下，把 constant4 的输入值改为 0.023 观察仿真结果。

图 5.32、5.33 分别是 constant4 为 0.023 时的输出滞后角、转速差。

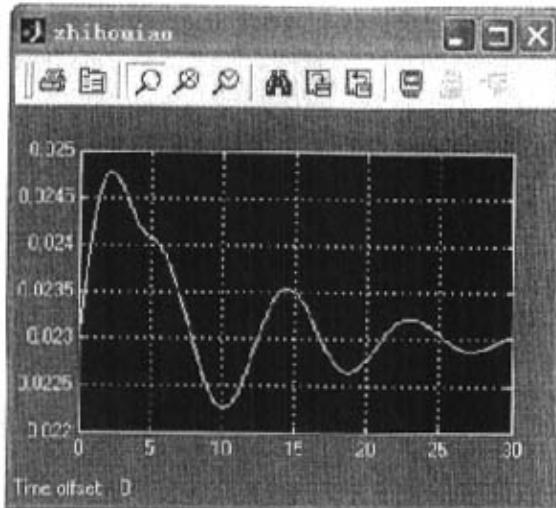


图 5.32 $\text{constant4} = 0.023$ 的滞后角输出

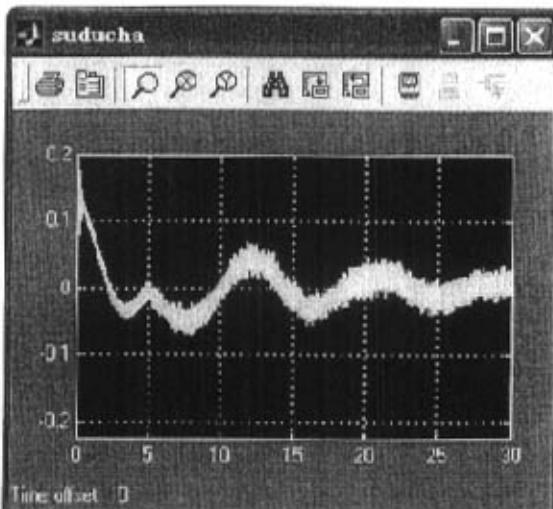


图 5.33 $\text{constant4} = 0.023$ 的转速差

观察结果发现除了滞后角稳态值最终趋于 0.023，其它参数和上面仿真结果一样，说明这个系统的确具有用 constant4 设置调节滞后角大小的功能。

a. 考虑加速度的闭环系统仿真

把图 5.26 所示的模型和图 5.26 所示的模型，分别引入到 b 节得“闭环系统的反馈线性化控制（NARMA-L2）仿真结果”中的“(2)控制器输出在 0.095~1 时的仿真”中闭环系统中，作为绕轴电机的速度输入和丝杠电机的转矩输入，仿

真并观察结果。

参数设定：

绕轴输入转速：ramp=2.4，各个 step 的参数如表 1 所示。

表 1 绕轴转速输入

	Step	Step1	Step2
Step time	0s	5s	5s
Final value	1 rad/s	1 rad/s	12 rad/s

绕轴和丝杠转矩模型参数

各个 gain 的参数如表 2 所示。

表 2 转矩模型参数

	Gain1	Gain2	Gain3
绕轴	1.3461 N·m ²	0.5 N·m·s·rad ⁻¹	1
丝杠	1.8922 N·m ²	0.5 N·m·s·rad ⁻¹	1

闭环结构如图 5.16 所示。

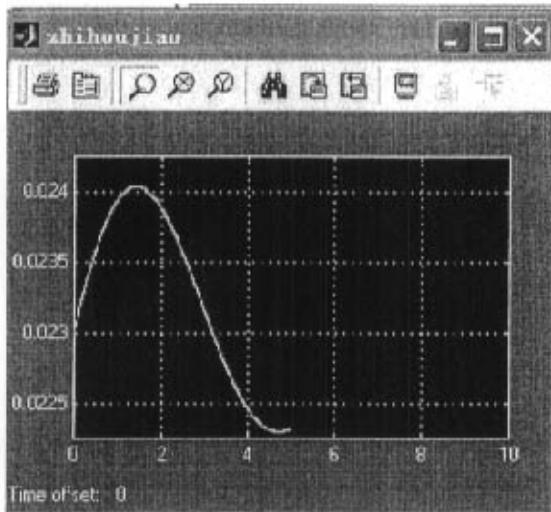


图 5.34 系统改进改进后的闭环控制输出滞后角

仿真结果：

图 5.34 和图 5.35 分别是仿真的输出滞后角和控制器输出即系统输入。从图 5.34 明显看出输出平滑，超调减小，输出最大最小差值减小到 0.002，比开环减小了 20%。这个结果说明改进后的系统相对较为合理，控制器效果显著，但是仿真到达 5s 时，迭代步长小于控制器精度，不能继续仿真；从现有结果看，调整时间还是过大。

结果分析：

利用神经网络控制开环系统，减小了系统超调，仿真速度加快，说明闭环

控制的确能改善系统性能。

但是结果也反应了反馈线性控制的精度不能达到系统控制要求；另外，经过仿真，MATLAB 的 simulink 模块函数库中的另外两个现成控制器神经网络模型预测控制和模型参考控制都控制系统时出错。

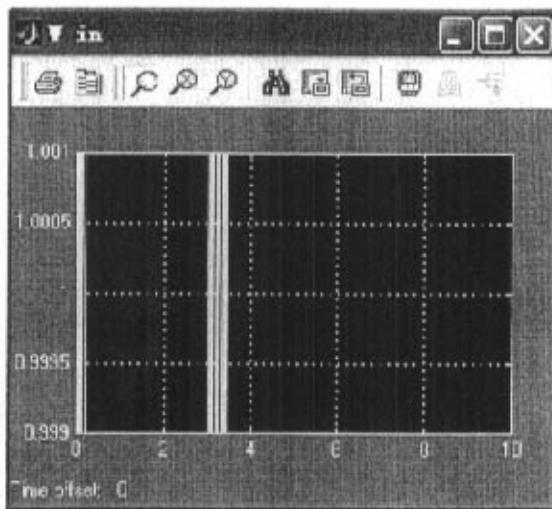


图 5.35 系统改进改进后的闭环控制控制器输出

结果分析：[49][50][51][52]

首先，线性反馈控制的中心思想是通过去掉非线性，将一个非线性的系统变换为线性系统，而排线系统是一个大的复杂二阶振荡系统，通过非线性自回归移动平均模型把系统线性化，势必误差大，使控制器的系统辨识并不能准确反应实际系统。

而神经网络模型预测控制和模型参考控制这两个控制器，都是只有一个隐含层的 BP 神经网络。BP 神经网络只有在隐含层层数足够、每个隐含层的神经单元个数足够的情况下，才能在某个精度范围内逼近非线性函数；且它们的输出层激活函数都是 Sigmoid 函数（不能通过设置改变），所以其输出值只能接近于 1 或者 0，而不能达到 1 或者 0，但是仿真系统要求控制器的输出恰好是以 1 为核心，上下波动调整系统的，所以，这两个控制器对于系统也不合适。

所以需要自行设计结构较复杂的控制器。如采用 BP 网络，可以选择两个隐含层的结构，增加每层的神经单元个数，以使控制器有效逼近非线性系统，并在输出层采用线性激活函数 purelin 代替 Sigmoid，以期避免输出不能为 1 的情况；在控制结构和网络学习方法上也要进行有效选择。

6 结论

6.1 结论

- (1) 根据光纤缠绕较普通纤维的特殊性及其军事上的高精度要求，结合电机、测量、传动等学科的知识，设计了较合理的光纤缠绕的排线系统方案。
- (2) 通过对缠绕过程微观分析研究，从理论上推导了易测量——缠绕滞后角和光纤缠绕走向的定量关系；阐明了绕轴电机和丝杠电机转速与缠绕滞后角大小的关系，提取了合理可行的系统控制参数——绕轴和丝杠电机的转速；并初步推导设计了缠绕的上绕过程。
- (3) 建立了排线系统各个子模块和整体的数学模型。
- (4) 在 MATLAB 的 simulink 中建立了系统的仿真模型；实现了系统输出滞后角的可调性、控制绕轴和丝杠匀加速起动；得到开环系统超调量为 0.025° ，稳态误差只有系统要求的 10% 的精度。系统的准确性和相对稳定性能够满足光纤缠绕的技术要求，且增强了系统的灵活性和适应能力，为光纤的自动上绕奠定了基础。

6.2 展望

- (1) 已建立的开环系统有较好的稳定性和准确性，但是快速性远不能达到要求，应该设计适应系统的闭环控制器，以期缩短调整时间，满足要求。
- (2) 文中的仿真只是研究了缠绕过程的一个关键环节，要最终完全地自动缠绕不同线径的光纤，需要计算各种光纤不同层的有关参数，如绕轴转速、匝数、实时半径、上绕位置等等，并置表设置在 DSP 里面。
- (3) 本文对上绕过程进行分析，设计了粗略的过程，并在开环模型中实现了有一个恒加速度的模型，但是对于上绕过程的复杂性，仍需在仿真及试验的过程中继续研究改进，以期得到适应能力强的模型，使能实现上绕的电机转速函数在简单的参数设置下得到控制，最终实现自动上绕。

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 康蕊蕤, 孙冬, 范植坚, 马保吉. 光纤自动精密缠绕的机械结构分析. 中国科协第五届青年学术年会陕西卫星会议论文集, 2005 年 3 月。
- [2] 康蕊蕤, 马保吉, 陈瑞宁. 光纤精密缠绕的缺陷及原因分析. 弹箭与制导学报, 2005 年 10 月

致 谢

在本论文结束之际，首先向导师马保吉教授致以由衷的感谢和崇高的敬意！作者在攻读硕士学位期间始终得到了导师的大力支持、指导和教诲，使作者得以顺利完成课题的研究工作。马保吉教授治学严谨、诲人不倦、见解独到、有强烈的事业心责任感，是激励每一位学生追求理想，实现人生价值的榜样。马保吉教授渊博的学识、敏锐的思维、民主而严谨的治学态度，给学生留下了深刻印象，使学生受益无穷。其次，由衷感谢陈瑞宁导师，他耐心细致的讲解和亲躬亲为的动手精神使学生倍受感动。

衷心感谢范植坚教授。在课题研究期间，得到了范老师从生活到学习上的无私关怀。范老师是一位生命不息，奋斗不止的仁厚长者，她的形象将永远鞭策着学生不懈的努力。

感谢我的同学们，永远记住相互之间在学术上的讨论交流、在困难时的相互鼓励和帮助。

感谢我的父母和两个可爱的妹妹，是他们撑起了我后方的一片蓝天，使我得以专心地投入到的课题的攻克中。

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西安工业大学。本人保证毕业离校后，使用学位论文成果或用学位论文工作成果发表论文时属名单位仍然为西安工业大学。学院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、缩印或其它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： 廉葳蕤

指导教师签名： 陈东志

日 期： 2006年4月9日

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的已经发表或撰写过的研究成果，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： 康藏蕤

指导教师签名： 陈晓东

日 期： 2006年4月9日

参考文献

- [1] 谭显裕. 光纤制导导弹技术发展概述 [J]. 火力与指挥控制. 2000, 25 (1): 8—13.
- [2] 陆永红, 钟生新. 光纤技术及其军事应用 [J]. 光电子技术. 2004, (3): 6—9.
- [3] 白木, 周洁, 王泽和. 光纤制导导弹综述 [J]. 航空兵器. 2003, (3): 40—43.
- [4] 刘永, 水昌. 光纤导弹 技术分析和研究 [J]. 应用光学. 1994, 15 (3): 49—56.
- [5] 林玉琛. 光纤导弹技术及其应用和发展 [J]. 现代防御技术. 1998, 26 (3): 2 18.
- [6] 崔得东, 郝重阳等. 光纤制导系统光损耗动态范围测试研究 [J]. 弹箭与制导学报. 2003, 23 (3): 28—30.
- [7] J.Y. Hung and H.V. White, "Precision winding of fiber optic filament, part 2 winding control", IEEE Trans. Ind. Electron., to appear, Aug. 1992
- [8] Thomas L. De Fazio, "Development issues for optic fiber coil winding" Andre Sharon, "Development of an automated fiber optic winding machine for gyroscope production", Robotics and computer integrated manufacturing, 2001
- [9] 高锟. 光纤系统 [M]. 北京: 国防工业出版社. 1994.
- [10] 胡君良. 制导光缆线包光附加损耗分析与计算 [J]. 应用光学. 1998, 19 (6): 44—47.
- [11] L.M. Sheppard, "The revolution of filament winding," Advanced Materials & Processes Incorporating Metal Progress, vol. 132, no. 7, pp. 31-35, July 1987
- [12] John Y·Hung and H·Van white, "precision winding of fiber optic filament, part1: winding characteristics, IEEE Trans.Ind.Electron., vol.39, no.3, June 1992.
- [13] 彭吉虎, 吴伯瑜. 光纤技术及应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [14] 陈康宁, 王馨, 李天石. 机械工程控制基础 [M]. 西安: 西安交通大学出版, 1997.
- [15] 胡寿松. 自动控制原理 (第四版) [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] 机械工程手册编辑委员. 电机工程手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [17] 徐元昌. 机电系统设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [18] 成大先. 机械设计手册 [M]: 单行本. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [19] 机械设计手册编委会. 机械设计手册 [M]: 新版. 第 2 卷. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [20] 丁志刚. 直线步进电动机的原理控制和应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [21] 汤蕴寥. 电机学-机电能量转换 (上册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.

- [22] 曹承志. 电机、拖动与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [23] 陈荣, 严仰光. 永磁电机的转子位置检测与定位. 中小型电机 [J], 2003, 30 (3): 21—25.
- [24] 机械工程手册编辑委员会. 电机工程手册 第4卷 电机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [25] 李叶松, 邓忠华, 秦善美, 秦忆. 交流伺服系统速度高精度特性的研究. 华中理工大学学报, 1994, (4): 13—16.
- [26] 李华德, 白晶, 李志民, 李擎. 交流调速控制系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [27] 何希才. 传感器及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [28] 何金田. 传感器技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [28] 王春香, 王永章等. 精密张力控制系统及其控制精度的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2000, 21 (4): 407—409.
- [29] 王春香, 付云忠等. 纤维缠绕过程中的张力分析 [J]. 复合材料学报, 2002, 19 (3): 120—123.
- [30] 樊尚春. 传感器技术及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [31] 何希才, 刘洪梅. 传感器应用接口电路 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997, 4.
- [32] 余瑞芬. 传感器原理 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- [33] 薛钧义, 武自芳. 微机控制系统及其应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [34] 周霖主. DSP 系统设计与实现 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [35] 王晓明, 王玲. 电动机的 DSP 控制: TI 公司 DSP 应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [36] 李永东. 交流电机数字控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 5.
- [37] 李少康. 控制工程基础 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [38] 苏晓生. 掌握 MATLAB6.0 及其工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [39] 楼顺天, 于卫. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——控制系统 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [40] 张志涌. 精通 MATLAB6.5 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [41] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 5.
- [42] 周渊深. 交直流调速系统与 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [43] 朱耀忠, 刘景林. 电机与电力拖动 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [44] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [45] 周开利, 康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [46] 蔡自兴. 智能控制 (第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [47] 张吉礼. 模糊—神经网络控制原理与工程应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.

- [48] 刘长安, 王怀生. 数值计算的理论和方法 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 2004.
- [49] 刘兴堂. 应用自适应控制 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003.
- [50] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [51] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 (第 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [52] 张国良, 曾静, 柯熙政, 邓方林. 模糊控制及其 MATLAB 应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [53] Bobbin Akira Akiyama, Mitsuru Shibata, Shinji Araki A Theory of Unwinding Optic Fiber's Motion for Fiberoptic Data Link and Hiromitsu Ishii Electronics and Communications in Japan, part 1, Vol.85, No.3, 2002
- [54] Cyntia Cristina de paula, "Fabrication of glass carbon spools for utilization in fiber optic gyroscopes", Carbon, 2002
- [55] K.J. Astrom and B. Wittenmark, Adaptive Control. Reading, 1989
- [56] R. Roser, "Filament winding," Modern plastics, vol. 66, no. 11, pp. 309-310, Oct. 1990
- [57] J.C. Hung, C.D. Mabee, and H.V. White, "Development of control subsystems for an automatic fiber winder," Technical report TR-TG-85-23, U.S. Army Missile Command, Redstone Arsenal, AL, AUG. 1985
- [58] John Y-Hung and H-Van white, "precision winding of fiber optic filament, part1: winding characteristics, IEEE Trans. Ind. Electron., vol.39, no.3, June 1992.