

中文摘要

校直行程的精密预测及其模型对以行程控制方式工作的自动校直机意义重大, 不仅大大提高校直系统的精度和校直效率, 同时精确的校直预测模型能为校直机提供良好的扩展性。本文研究的目的是针对目前研究较少的非规则截面的直线导轨类金属条材, 建立一种精密的适用于自动校直机控制的校直行程预测模型, 为校直系统的开发提供理论依据。

本文分别采用弹塑性理论、有限元、实验法, 建立初始挠度—行程的预测模型, 并对三者进行了对比分析, 得到最优化的精密预测模型, 提出了一种新的精确的行程预测公式; 同时以直线导轨为研究对象, 针对不同型号或状态的直线导轨, 建立了可供修正参考的校直数据库及行程预测公式库, 开发了校直行程计算模块, 为校直控制系统提供了极大的扩展性。研究内容主要包括:

首先, 采用弹塑性弯曲理论, 在已有压力校直载荷—位移模型基础上, 以矩形条材校直计算公式为原型, 找出相关参数修正, 建立直线导轨的传统校直模型。引入了 MATLAB 编程, 简化了复杂的模型计算。同时基于初始挠度—校直行程两者的关系, 建立适用性更好的校直行程预测模型。

其次, 运用有限元方法, 在 ANSYS 软件中对三点弯曲的加载卸载过程进行材料非线性仿真分析, 给出了仿真过程及其数值解, 反求出导轨校直的载荷—位移模型以及新提出的挠度—校直行程模型。

再次, 采用实验法进行研究, 在精密设备上进行弯曲实验以反求校直模型。对实验数据处理, 分析建立的校直行程预测模型, 采用多项式拟合得到精密的校直行程预测公式, 突破了以往经验公式为线性的精度局限。

最后, 比较分析三种行程预测模型, 建立不同条件下不同类型导轨的反求校直行程预测参考数据库以及精密行程预测公式库, 采用数据拟合技术建立行程预测修正公式, 并在 LABVIEW 平台上开发了适用于自动校直机的校直行程计算模块。

关键词: 校直, 行程预测, 直线导轨, 挠度—行程模型

Abstract

The precision prediction model of straightening stroke has great significance for automatic straightening machine which working mode is stroke controlling. This model will not only greatly improves the straightening accuracy and efficiency of straightening system, but also provides good expansibility for straightening machine.

The research purpose of this paper is aiming at linear guide rails which sections are non-regular, establishing a precision prediction model of straightening stroke which is most suitable for automatic straightening machine control and it can provides theory basis for straightening system development.

In this paper, take the LG series linear guide rails for example, a new way of establishing straightening stroke prediction model is proposed based on the combination of elastoplasticity theory, the finite element method and bending experiment. We establish the initial deflection-straightening stroke prediction models by above 3 different methods, we analyze them, then get the optimization precise prediction model, and put forward a new kind forecasting formula of stroke prediction which is simplicity and precision. At the same time, we establish the compensation database and forecasting formula table for reference and correction models which aiming at different straightening conditions and guide rails. Develop the straightening stroke calculation module which provides tremendous expansibility for control system.

The main research contents as follows:

Firstly, using elastic-plastic bending theory, based on the existing pressure straightening load-displacement model and straightening formulas of rectangular section bar, finding the relevant correction parameters, reforming the model of linear guide rail. We use MATLAB software to programming which greatly simplified the traditional calculating. And establish better applicability straightening stroke prediction model based on the relationship between initial deflection and straightening stroke.

Secondly, by using finite element method, we simulate the loading-unloading

process of 3-point reverse bending of guide rails in ANSYS software. It's material nonlinearity numerical analysis. Then we establish the straightening load-displacement model and propose deflection – straightening stroke model.

Thirdly, we use experimental method to establish straightening model, doing bending experiment in precision equipment. Experimental data processing can reverse establish straightening stroke prediction model. We use polynomial fitting to get precise straightening stroke prediction forecasting formula which improves the currently linear empirical formulas.

Finally, we compare above three stroke prediction model, establish straightening stroke prediction reference database and forecasting formula table of different types of guide rail. We take data fitting technology to correct and expand empirical formula. And develop the straightening stroke calculation module in LABVIEW platform for automatic straightening machine.

Key words: Straightening, Stroke prediction, Linear guide rail, Deflection-stroke model

独创性声明

本人声明,所呈交的论文是本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,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得武汉理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。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谢意。

研究生签名: 张潇 日期 2009.5.26

关于论文使用授权的说明

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定,即:学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人授权武汉理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存或汇编本学位论文。同时授权经武汉理工大学认可的国家有关机构或论文数据库使用或收录本学位论文,并向社会公众提供信息服务。

研究生(签名): 张潇 导师(签名): 张潇 日期: 2009.5.26

第 1 章 绪论

1.1 课题研究的的目的和意义

精密直线导轨在机床, 自动化设备等许多精度要求较高的工业设备中被广泛应用, 如图 1-1 示, 为某一系列非规则截面的直线导轨, 直线导轨作为一种滚动导引, 由钢珠在滑块与导轨间作无限滚动循环, 负载平台能沿着滑轨轻易的以高精度作线性运动。由于滚动摩擦的摩擦系数较低, 相对的减少无效运动的发生, 故能轻易达到 μm 级进给和定位。由于在工作过程中磨耗少, 因此直线导轨在出厂时的精度必须严格满足要求, 而直线导轨的平直度的保证在精密机床等设备中显得尤为重要。

但是大量的直线导轨在轧制、锻造、挤压、运输、冷却及各种加工过程中, 常因外力作用、温度变化以及内力消长等发生弯曲或扭曲变形, 特别是在热处理工艺后, 为获得高精度成品必须对其进行校直, 以满足其平直度要求, 另外导轨经过一段时间的使用后, 因弯曲变形达不到使用要求, 需采用校直工艺进行修复, 从而延长其使用寿命, 获得显著的经济效益。

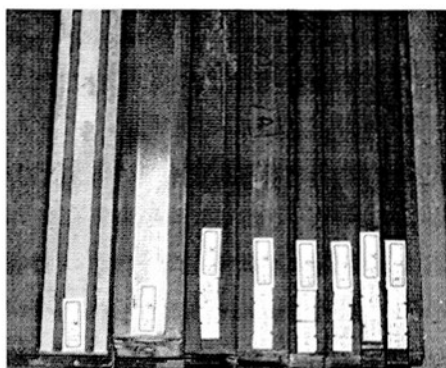


图 1-1 热处理后的直线导轨

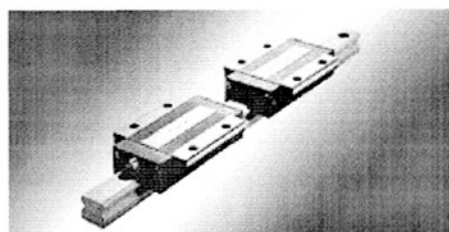


图 1-2 直线导轨副

校直技术是板材、线材、管材、棒材和带材等各种金属条状型材(条材)生产中的重要工序之一。“校直”是使弯曲的板料、型材和管料等工件变为平直状态的塑性加工方法, 多用于零件的生产制造中或零件的修复。

在现实需求中,根据行业和加工对象的需要,且由于材料种类各异,各自所要求的校直方法也不尽相同,通常校直方法主要分为:压力校直法、平行辊校直法、斜辊校直法、转轂校直法、平动校直法、拉伸校直法、拉弯校直法及其他一些特殊校直法^[1]。而以这些技术为基础发展起来的自动校直设备有:压力校直机、辊式校直机、拉伸校直机、拉弯校直机等。

根据是否加热,校直分为热校直和冷校直,一般均采用冷校直技术,最常用的冷校直方法是压力校直,压力校直是以外加静载荷使弯曲零件产生反向变形以达到校直的一种方法。它具有校直力大、精度可控性高、柔性好、实现容易、适用复杂零件等特点,可广泛应用于大型管、棒材、非对称截面型材、导轨类、非规则表面长轴类零件以及特种钢的校直工序。本文将主要针对压力校直技术进行深入研究。

压力校直的工艺过程是将工件两端支撑,在工件弯曲中间反向加压,使工件产生反向变形,卸去压力后,工件发生一部分的永久塑性变形,一部分弹性回弹,若弹性回复量刚好等于反向变形量时,则工件被校直,所以,压力校直又称为三点反弯校直^[2]。随着机械工业的发展,各种中小型条材类零件生产批量越来越大,种类繁多,手工校直已远远不能满足生产需要,因此产生了自动校直技术。自动校直技术是一种先进制造技术,通过自动校直设备完成对轴、管、棒等各种金属条状型材零件的校直,是机械加工中保证产品质量的重要工序,广泛应用于汽车、机床装备、工程机械、军工机械等机械制造行业。

随着自动冷校直技术的发展,目前压力校直技术的研究,主要包括两个方面:压力校直工艺理论研究和压力校直设备研发;而校直设备的精密控制需要精密的校直工艺理论支持,因此开展精密校直工艺理论的研究成了实现校直设备数控化、自动化、柔性化的关键技术。当前针对自动校直机的校直理论研究大多局限于轴类零件,对其他截面形状的零件研究较少;大多数校直工艺理论研究建立的理论模型由于对材料的应力模型,热处理,几何等因素的简化处理并不精确,且对于重要工艺参数计算的几种方法各有优缺点,但没有很好的结合自动校直机的应用性来考虑。

因此本课题将重点研究对直线导轨这类非规则截面的条材如何建立更精密的校直数学模型,准确预测计算校直行程,提高理论模型在自动校直机上的控制实用性,提升自动校直机的工作效率。

1.2 本课题有关的国内外研究现状

1.2.1 国内外校直设备的发展现状

长久以来,压力校直工艺的实施多由工人凭经验和估计校直行程,反复测量和试校。这种做法不仅效率低、劳动强度高,而且不易保证精度,工件的工作性能也受影响。早期采用的压力校直设备,或是手动螺旋式压力机,或是通用型的压力机,或是由压力机改造而成的校直机。随着技术的发展和生产的需要,设计出了具有行程小、支点位置可调等校直工艺特点的专用压力校直机。但是,这些设备在使用时,仍然需要凭经验估计校直行程,人工所占比例较大,效率低,校直精度不易保证。

随着自动校直技术的发展,自动校直设备能有效提高产品质量。发达国家十分重视此项技术的研究,并投入大量的人力、物力开展此项技术的研究工作。自20世纪七、八十年代起,意大利、德国、日本、美国等少数发达国家先后研制出具有本国特色的全自动精密校直机:如意大利GALDABINI公司、德国MAE公司、美国EITEL公司、日本东和精机株式会社开发出的自动校直机等;由于全自动校直机增加了检测装置、自动送取料装置和计算机控制系统,因而校直效率和精度明显提高,集中表现在自动化、智能化、测量精度高、生产节拍快等方面。这些均表明当前在一些发达国家校直技术研究比较完善,但因技术保密,在校直技术方面的资料较少。以下是国外这几种校直设备校直工艺的简要特点^[3]:

1、德国MAE公司自动校直设备校直工艺主要特点:

- 1) 提供多组压点和支点,且压点和支点组合构成三点弯力学加载模式;
- 2) 每次校直完成后,残余跳动量被实时在线检测,判断并计算是否继续实施校直工艺。校直行程计算方法是递推算法,采用一定的优化思想需逐步调整;
- 3) 校直工艺决策程序根据粗、精加工不同,顺序采用4种不同校直策略;
- 4) 校直动作和校直检测环节可相互配合,分4种模式,可提高效率。

该设备校直工艺中提出的对校直行程优化思想,是其它设备校直工艺中所没有的。但其校直流程是固定的,有关较繁杂的经验参数的设置还需人工输入,对工人素质要求较高。

2、美国 EITEL 公司自动校直设备校直工艺主要特点：

- 1) 校直参数的调整设置是该设备控制校直过程关键因素，通过调整校直参数，能改善校直时加工水平。校直参数调整围绕着每一个压点进行，对每一个压点配备固定的支点组合。
- 2) 配备有先进的裂纹检测装置，能有效控制校直中因校直行程量过大造成的工件断裂现象；
- 3) 提供 3 个压点，5 个支点，但控制方式较差，单个校直循环时是通过由检测传感器构成的简单闭环反馈结构；

该设备中突出优点是考虑了裂纹是导致工件断裂的思想，能及时检测在校直过程中出现裂纹而调整校直行程；但是其中参数设定需全部由有经验的技术人员完成，不具备智能性。

3、日本精机株式会社校直机校直工艺主要特点：

- 1) 校直对象针对轴类零件，控制系统根据轴的不同材料、轴径、热处理工艺，将轴的变形规律以及校直后的反弹等参数存入数据库，建立经验数据库；
- 2) 系统检测得到的最大变形量与库中相关参数的经验变形量比较，由数据库中的经验数据确定合理的压头行程，争取减少校直次数，以获得合格产品；

该设备突出优点是快捷方便，但是其校直行程的确定全凭与数据库中经验数据的插值比较，采用的是经验数据对实时监测到的情况进行判断，并未构成完整系统的校直工艺数学模型，有一定局限性。

综合上述 3 种典型的自动校直机的校直工艺理论及控制系统分析，各有优缺点，且均是针对轴类、管状零件等截面形状规则的条材，相应的控制系统及其校直策略，也尚未出现功能全面的、智能化的校直决策工艺控制系统。因此，达到真正的精密全自动还需要研究的继续深入和探讨，目前研究表明，当今全球对自动精密校直设备的发展呈现如下趋势^[4,5]。

- 1) 系列完善，品种规格齐全；
- 2) 行程精度高，检测、显示手段完善；
- 3) 向数控化、柔性化、自动化方向发展；
- 4) 校直工艺范围不断扩大；

近年来,我国在精密全自动校直设备的研制和生产上也取得了进展,如:合肥锻压机床股份有限公司和合肥工业大学合作研制出具有先进水平的 YH40-25 全自动精密校直液压机^[4,5];该设备是集机电、液压、检测和计算机为一体的一种

新的国产最早的自动校直设备, 该设备已通过鉴定, 达到国外九十年代水平, 可替代进口。

长春实验机研究所也与日本公司进行技术合作研制生产了 ASC 系列自动校直机, 并自主开发了 ASC II 系列^[4,5]。该校直机有智能化的分析测量系统、可编程的电机、电器、机械、液压、空压控制技术。

但是各种设备依然存在加工对象单一(基本为轴类零件), 校直理论模型不能很好的融入控制系统等问题。要进一步扩大校直范围, 保证和提高自动校直机中的校直精度, 使得精密校直模型和校直行程的精确预测成了当前研究的重点。

1.2.2 校直工艺理论的研究现状

工件的压力校直过程实际上是一个弹塑性弯曲变形的过程, 它通过对工件进行反向弯曲产生部分永久塑性变形来达到校直的目的。对于压力校直工艺理论而言, 研究的重点在于主要校直参数的确定: 包括压点、支点位置的确定, 校直行程的预测。而这些参数的确定方法也决定了自动校直设备的控制方式及校直精度。

一般的工件弯曲可以分为单弧度和多弧度以及复杂空间弯曲, 目前对于几种不同弯曲情况, 压点和支点的位置确定如下:

1、单弧度弯曲型

压点的位置在最大弯曲挠度处, 支点对称分布于压点两侧, 这是因为根据材料力学关于简支梁受横向集中载荷的挠度计算, 不管集中载荷距支点的位置如何, 发生最大挠度的截面仍然会在跨度中点附近^[4,6]。因此, 校直时支点应尽量对称分布于压点两侧。对于两支点距离的确定原则是: 使弯矩变化梯度和零件初始曲率变化梯度尽可能一致, 从而取得较好的校直效果。

2、多弧度弯曲

第一: 可将多弧度分解为若干单弧度, 压点和支点的布置如前, 逐步校直。

第二: 当采用多压点和支点布置时, 文献[7]对此进行了一定的研究, 校直过程中以反向校直弯曲作为约束条件之一, 利用滚动优化算法实现校直工艺实时预测, 得到实时校直压点、支点位置和行程信息, 实现有效校直。

3、空间复杂弯曲

校直工艺参数确定较困难, 尚未见文献报道。

在压力校直中的各参数中,因下压量的计算结果将直接影响校直精度及校直效率,如何准确确定或计算校直行程往往比较困难,是校直工艺的技术关键,在自动校直机研发过程中起着重要的作用。对于校直机来讲,下压量定义为校直行程,即压头从接触工件开始到压至最低点所经过的距离。根据当前的研究情况,校直行程的计算主要可归纳为以下的3种方法:

1、基于弹塑性理论的行程计算

压力校直的反弯过程实际上是工件材料弹塑性变形的过程,对于不同截面形状的工件,文献[1,8]中崔甫基于弹塑性弯曲理论,进行了较为系统化的研究,奠定了压力校直工艺研究的理论基础;其主要内容为:

- 1) 在满足一定的材料力学简化假设仍适用的前提下进行计算,如满足材料各向同性,单向应力假设和伯努利平面假说等;
- 2) 根据零件的材料简化其应力应变模型,为理想弹塑性材料或线性强化弹塑性材料等,建立零件校直的弹塑性力学模型;
- 3) 确立校直过程中弹塑性弯曲时的弯矩和工件各种曲率间的关系,建立弯矩一曲率关系和能量关系,推导出校直曲率方程式;
- 4) 根据变形挠度与弯曲曲率的关系,可获得校直挠度方程进行校直行程的计算^[1,2,8]。

翟华等学者在上述研究基础上,转换挠度与曲率的关系,提出了一种基于行程控制的计算方法^[9]。李骏等人也根据参数转换提出了载荷—挠度模型^[10,11],可以求出校直力和行程。日本的荒木慎一郎和铃木弘主要研究了圆轴校直中的应力和曲率变化,并进行了数值分析^[3];但是,上述计算方法存在的主要问题:一是计算前必须通过测量拟合出零件轴线的曲线方程,以得到零件的初始弯曲曲率进行后续计算。这就人为地引入了测量误差线拟合误差;二是计算模型不能直观地反映压力校直的过程,不便应用于校直过程的控制;三是,经过很多简化,预测的行程不是很精确,大多适用于规则截面,效率较低。

2、基于有限元法的行程计算

随着有限元技术和有限元软件的不断完善和成熟,在校直行程的计算中的应用日趋广泛。钦明浩等人^[12,13]最早利用 ADINA 有限元程序进行了校直行程的计算,在输入材料的弹性模量、硬化模量及初始屈服应力等参数后,可计算零件在施加不同压力时产生的位移和残余变形,从而获得不同初始弯曲量时所需的校直行程;李骏等人利用有限元 ANSYS 软件的材料非线性分析方法对零件的校

直行程进行了计算^[14,15],其计算结果具有较高的精度,解决了有限元通用软件在自动校直行程计算中的应用问题。

有限元计算方法技术成熟、应用广泛,能对不同形状、不规则形状的零件进行校直行程计算,但计算结果的精度主要取决于输入参数的准确性。该方法需要借助专门的有限元软件,对计算机设备的要求较高,且前后期工作量较大,不适合在自动校直机上直接应用,但可以为我们的理论研究和实验研究时提供非常有效的帮助。

3、基于经验公式的行程计算

对于同种同批零件而言,其几何特性、材料特性、加工工艺和热处理工艺是基本相同的,因此它们弯曲变形的校直量计算是有一定规律可循的。经验公式是根据大量的实验或生产数据提出的,公式形式简单,并具有一定的补偿或修正能力。文献[16, 17, 18]中的公式是目前经验公式的主要形式。其中文献[16]、[17]是单步校直下压量的经验式,其校直行程均与初始弯曲量成线性关系,所不同的是影响因素:分别是考虑系统刚性和考虑加压次数对校直行程的影响。文献[18]是多步校直下压量的经验计算公式,该公式计算简单易行,编程容易,但校直质量不稳定,仅适用于弯曲变形有规律的单一零件校直。国外 Katoh T 等人^[19]用经验法研究无缝钢管的单点校直问题,也着重介绍了采用经验公式建立零件回弹量的预测方法。

经验公式虽然计算速度快,计算结果比较精确。但这一经验公式的获得困难,且不同的工件需要建立不同的经验公式,适用范围受到较大限制,不适应现代生产柔性化发展的要求。但是同样因为其精确度及简易编程的优点是校直机控制工艺理论重点研究的方向。目前上述经验公式在各自的文献中均没有得到具体的阐述,如何实际应用也未作说明。表明这方面的研究工作尚未得到很好地开展。

另外,在校直工艺理论研究中,文献[20]中采用校直载荷控制来进行校直,也取得了一定效果。

1.2.3 校直工艺理论存在的问题及发展趋势

1. 现有校直工艺理论研究针对对象面很窄,大多是针对轴类零件和管状零件,而生产中存在较多的非轴类零件的校直问题,如各种截面钢材、结构焊接件

等,尚涉足较小;

2. 由于零件材料,热处理工艺,几何差异等因素的影响,现有校直行程理论模型计算难度大、实用性差、不易控制,精密校直理论的建立较困难,因此新的理论模型和修正模型是值得关注的重点。
3. 目前针对校直理论研究的实验研究还不多见,通过实验研究,分析误差原因,改善和提高模型精度是十分必要的。
4. 校直行程计算经验公式具有计算速度快,易于实现自动校直机智能控制的优点,但其理论研究还不够深入。将理论、经验公式、实验结合起来进行分析研究值得关注。
5. 现有很多校直模型需要根据校直设备的智能化要求进行修正,校直工艺决策方法的优化,专家系统、数据库等技术的引入是今后重点的研究方向。

基于上述问题^[4,5],扩大压力校直工艺理论研究的对象,丰富压力校直技术的内容,建立高精度的、实用的、易于控制的简易校直行程计算模型或修正模型将是校直工艺理论重点研究的方向。

1.3 本文课题来源及主要工作

本课题来源:湖北省自然科学基金:集多挠度在线检测与回弹预测的多点多步校直方法研究,NO:2008CDB294。

本文从目前校直工艺理论存在的问题及发展趋势出发,以已有标准型号的精密直线导轨为对象,采用3点弯曲压力校直法,在已有校直理论模型的基础上,采用不同方法验证并比较,建立更精确的校直模型,最终得到一种适合精密直线导轨校直机控制的校直模型,快速精确预测校直行程,并且引入了数据库技术,从而提高校直的精度和工作效率。主要内容及技术方案如图1-3所示:

第一章:阐述了本文研究的目的意义,校直课题的国内外研究现状及存在的问题和趋势,拟定了主要研究内容和技术方案。

第二章:以弹塑性理论为基础,分析弯矩和曲率的关系,借鉴已有的校直载荷-挠度模型,推导建立非规则截面条材即直线导轨的校直载荷—行程模型,并由此建立更直观的挠度—校直行程数学模型。

第三章:利用有限元理论,采用ANSYS有限元软件对各精密直线导轨的弯曲校直过程进行仿真分析,其中充分考虑材料的应力应变模型,热处理工艺,

不规则几何截面的影响，由分析结果反向推导得到导轨的校直载荷—行程模型以及挠度—行程预测模型。

第四章：对不同系列的精密直线导轨进行弯曲实验研究，通过实验得到大量载荷、下压行程、回弹量的数据，进行数据处理反求得到各型号导轨的挠度—行程预测模型。

第五章：对上述三种方法建立的模型进行比较，并由实验结果进行理论验证，并且可对前者进行修正得到修正模型；以实验数据为基础构建校直参考修正知识数据库，由此获得适用于自动校直机的简易快速行程预测公式库，在自动校直机的软件控制开发中采用实用公式及调用数据库的方法，大大提高了校直机效率，满足了柔性化、智能化的发展趋势。

第六章：总结与展望。总结本文所做的工作及需改进和研究的方向。

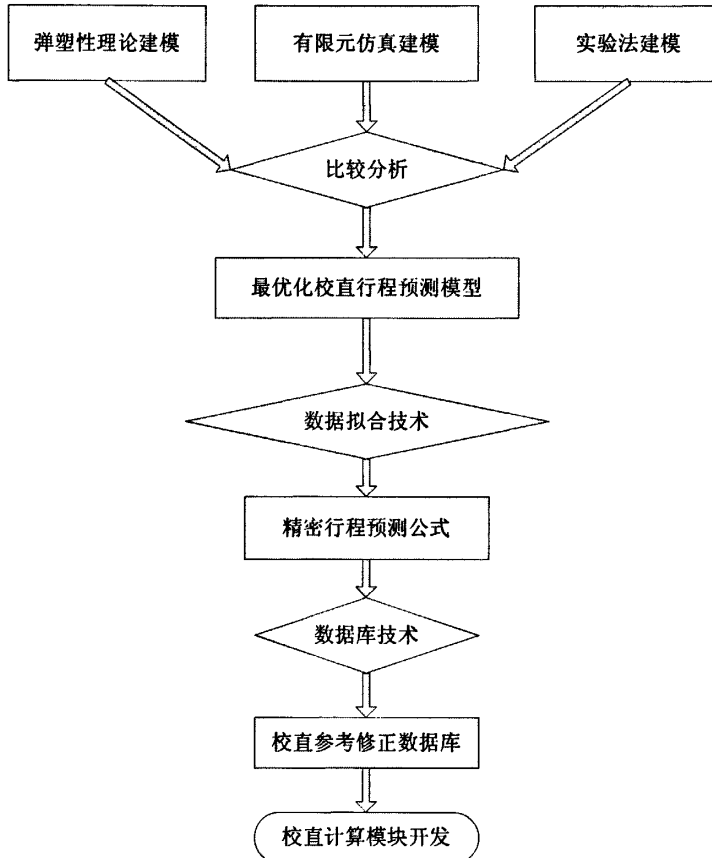


图 1-3 论文总体技术方案

第 2 章 基于力学理论的精密直线导轨行程预测模型

2.1 引言

压力校直技术的力学理论基础主要是材料力学和弹塑性力学，本章将根据自动校直设备的要求，以单弧度弯曲的直线导轨为对象，针对已有的压力校直过程模型，在弹塑性力学的基础上，重点对实际对象弯曲的曲率、弯矩、挠度之间的关系进行分析，得到导轨类不规则截面形状条材校直理论的精密数学模型，并可由 MATLAB 数学软件编制程序进行行程预测计算。

2.2 精密直线导轨概述

直线导轨是 1932 年法国专利局公布的一项专利，经过几十年的发展，直线滚动导轨副已经日趋成为国际通用的一种支承及传动装置，越来越多的被数控机床，自动化设备所采用，在工业生产中得到广泛的应用。直线滚动导轨副一般由导轨、滑块、反向器、滚动体和保持器等组成，它是一种新型的作相对往复直线运动的滚动支撑。

直线导轨是该装置的重要组成部分，直线导轨又可称精密滚动导轨副、滑轨、线性导轨、线性滑轨、滚动导轨，用于需要精确控制工作台行走平行度的直线往复运动场合，拥有比直线轴承更高的额定负载，同时可以承担一定的扭矩，可在高负载的情况下实现高精度的运动。其作用是用来支撑和引导运动部件，依靠导轨两侧两列或四列滚珠循环滚动带动工作台沿给定的方向平稳移动作往复直线运动。它承受其支撑的运动部件和工件的质量及切削力。导轨要满足两个重要条件：第一是导向精度，主要是指导轨副相对运动的直线度（直线运动导轨）或圆度（圆周运动导轨）。而影响导轨精度的因素很多，最主要的是导轨的几何精度，因此在国家标准中对导轨纵向直线度及横向直线度的检验有明确规定；第二是精度的保持性；

综上所述，直线导轨的直线度可以说是其生命线，因此针对价格昂贵的直线导轨，采用自动校直机对未达到要求的导轨进行精密校直具有很大的经济意

义。本文以 LG 系列不同型号的直线导轨为研究对象，其截面形状如图 2-1 所示，属于非规则截面类条材，论文对其进行精密校直模型的研究：

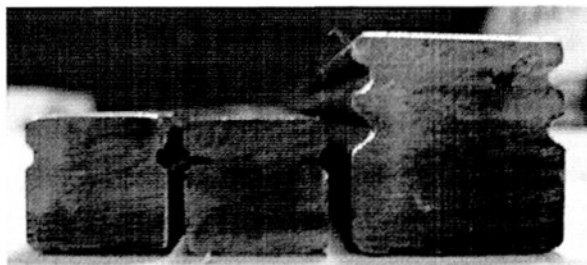


图 2-1 导轨 LG15、LG20、LG25 的截面形状图

2.3 精密直线导轨自动校直机的工作原理

压力校直法即反弯校直法是指对于弯曲的金属条材，根据原始弯曲的程度不同加以不同程度的反向弯曲，从而达到校直的目的。其机械化的表现即为压力校直机，条材在压头与支点之间形成反弯，并不断改变压下量，可使各种程度的原始弯曲得到校直。在压力校直工艺中，由于各处条材的原始曲率的不同，因此条材可分为若干单弧度段分别进行反弯校直，且支点距可调，压下量可调，保证压力集中作用在原始曲率最大处，条材能翻转角度，可使各方向的弯曲得到校直。

由于本课题研究的校直理论将主要应用于直线导轨类条材的自动校直机，而校直理论与实际校直设备的工作原理和结构息息相关，因此，了解该校直机的工作原理是导轨精密校直理论模型研究的第一步。

如图 2-2 所示为该直线导轨自动校直机工作原理平面结构示意简图，该校直机主要由四大模块组成：进料模块、测量模块、计算控制模块，执行模块。校直机采用的校直方式为三点反弯压力校直，即工件两端固定，中点加压反向校直，该机通过行程控制，压头总是在跨距的中央，之所以选择压力校直，是因为这种方式的校直力大，能满足各种高强度材料条材校直需要，而压头的位置固定布置即有前面提到的材料力学理论支持，同时也考虑到针对该校直机的校直控制理论的适用性。

校直机基本工作流程：

(1) 工件先由辊道输入，当经过夹头 A 处时，由安装在此处的光幕传感器检测到工件的进入，则辊道输送停止，夹头 A 由伺服电机控制夹紧工件并向前方输送；

(2) 中间的压头实际为一个曲柄连杆滑块机构，可进行左右推拉，完成两个方向的校直；中间有一通孔，由夹头拖动工件穿过该机构，其中夹头 A 和 B 为对称布置，且其由同步带控制，当 A 拖动工件穿过压头时，则 A 到达行程极限，B 夹头同样到达紧靠压头滑块部位，则 A 夹头松开，B 夹头夹紧（这是因为在光幕传感器检测到工件的时候留有一定的预留量，刚好在 A 极限行程时，工件穿过压头能被 B 夹住）；

(3) 此时 B 夹头将根据设定好的跨距拖动工件到达设定位置，B 夹头松开，A、B 夹头同时夹紧工件；

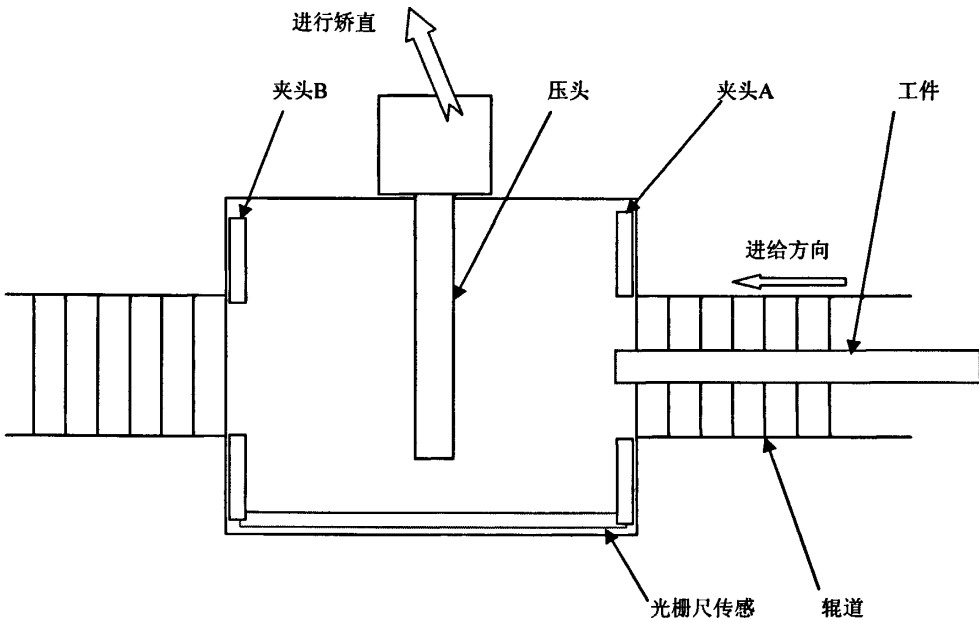


图 2-2 直线导轨自动校直机执行机构平面示意图

(4) 此时测量机构（传感器等）测量工件在夹头及压头接触处三点在直线度方向坐标位置，反馈给控制系统，经处理、判断及校直理论模型的计算，得

到校直行程，由压头进行校直控制（如检测满足直线度要求，进行下一步动作）。

(5) 完成一次校直动作后，由传感器重新进行检测，如达到要求，则根据设定的进给位置（校直机通过多个单弧度段来校直，每次进给量可设定，如 1/3 跨距等，但都是重复叠加的，因此能保证工件被校直），松开 B 夹头，由 A 夹头拖动工件到进给位置，然后重复上述夹紧动作，进行新一轮的检测、校直行程预测及校直。如若未达到直线度要求，则由传感器再测定，执行机构再校直，直到达到规定的平直度要求，继续下一步动作，最终整体校直，工件由辊道输出。如果由于工件本身挠度太大，不可能被校直，则会由控制软件直接提示，工件退出。

由该校直机的基本结构及工作原理知，本课题研究以直线导轨为代表的金属条材类工件的校直精密理论模型的建立和优化，是以单弧度弯曲的工件为前提的，对于多弧度弯曲的工件，通过调整跨距和进给量来达到最终的校直，而这种多步校直的决策工艺方法将作后续研究，本文将着重于单弧度情况下校直行程预测的精确性及实用性，以减少校直次数，争取达到一步校直，同时建立适用于自主研发的自动校直机的快速精确预测模型，提升控制系统的智能化作用。

2.4 直线导轨压力校直的理论基础

2.4.1 压力校直过程模型

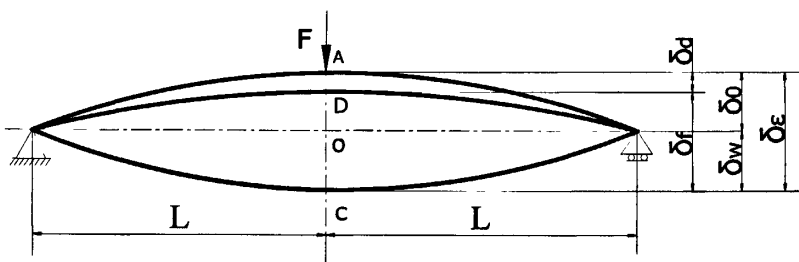


图2-3 压力校直过程示意图

压力校直实际是一个弹塑性反弯的过程，如图 2-3 示，校直时，具有初始弯曲量 δ_0 的零件，两端简支，中点施加集中载荷 F 后产生反向弯曲，反弯量为 δ_w ，零件发生弹塑性变形；在卸去载荷后，零件有一部分发生永久塑性变形（ δ_e ），

还有一部分弹性回弹 (δ_f), 若弹复量刚好等于反弯变形量 δ_w , 即 $\delta_f = \delta_w$, 则零件被校直。此时, 总压下量即校直行程为 $\delta_\epsilon = \delta_0 + \delta_w = \delta_d + \delta_f$ 。

根据上述关系, 校直的整个弯曲变形过程可用图2-4所示的载荷—挠度 ($F-\delta$) 模型 (校直过程模型) 表示, 该模型^[11,21,22]由前面上海交大学者李骏, 熊国良等率先提出并应用, 有较好的应用效果, 因此本文选择该模型进行扩展研究:

图中将校直过程分为三个阶段, 弹性变形加载阶段 AB 、弹塑性变形加载阶段 BC 和弹性卸载回弹阶段 CD 。根据卸载定律, CD 阶段被认为是弹性回弹阶段, 由虎克定律, AB 和 CD 近似的平行, 具有相同的斜率 K , B 点称为屈服点, 作为进入塑性的分界点。通过 $F-\delta$ 图, 在实际应用中只需测量中点的弯曲挠度, 即零件的初始弯曲量 δ_0 , 就可确定 D 点位置, 已知斜率 K , 过 D 点作弹性回弹线与加载曲线相交, 得到交点 C , 即可计算出相应的 δ_ϵ , 即所需的校直行程。同时能得到校直力 F_C 。

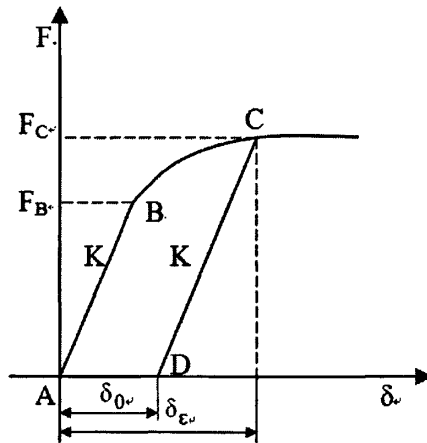


图2-4 载荷-挠度模型

该校直过程模型, 简单明了, 较适合于自动校直机的校直控制。

2.4.2 基于弹塑性理论的校直过程数学模型

由上述分析可知, 要研究压力校直过程中的受力和位移, 必须从弹塑性力学理论着手进行研究。首先我们来看其概念: 弹塑性力学是变形固体力学的一个重要分支, 是研究可变形固体受到外载荷、温度变化等因素的影响而发生的应力、应变和位移及其分布规律的一门科学。但是和材料力学不同的是: 它尽量

不用或少用材料力学中那些变形及应力情况的假设，而把基本方程建立在微分体之间固有的内部联系上。这固然会带来一定程度的数学分析的复杂性，但却可以得到比材料力学更精确的或材料力学无法得到的解答(应力集中、接触应力问题等)。因此，由弹塑性理论建立的模型更精确。

固体受外力作用时，一定会产生变形。弹性变形指物体卸载外力后，能自动恢复的变形。而当外力增加到超过某一限度时，卸去外载，则物体不能完全恢复其原有的形状而产生一部分不能消失的永久变形，这种不可恢复的变形称为塑性变形。根据变形的特点，固体在受载过程中通常呈现两种不同而又连续的变形阶段：先是弹性变形阶段，紧接着是弹塑性变形阶段，若从后者中忽略弹性变形，则称为塑性变形阶段。

弹塑性力学理论的主要内容包括以下两个部分^[23]：

1. 弹塑性本构关系

本构关系是材料本身固有的一种物理关系，指材料内任一点的应力和应变之间的关系；弹性本构关系是广义虎克定律，而塑性的本构关系远比弹性的本构关系复杂。在不同加载条件下，要服从不同的塑性本构关系。塑性本构关系分为两大类：增量理论与全量理论。

2. 研究荷载作用下物体内任一点的应力和变形

在荷载作用下，物体内会产生内力，因此，每一点都存在着应力，并且物体内每一点会发生位移，因此存在着应变。研究由荷载产生的应力和变形有助于了解材料的强度和刚度，使材料得到更好的利用。

确定正确的本构关系是解决力学问题的关键，所以上述第1部分是第2部分的基础。但是固体材料的微观结构是多样的、复杂的，通常对于固体物性的方向性、组成材料的均匀性以及结构上的连续性问题，根据具体研究对象的性质，弹塑性力学对其研究对象的物理和几何性质加以抽象，提出如下基本假设：

1. 连续性假设

假定物质充满了物体所占有的全部空间，不留下任何空间。这样，物体内部的一些物理量，例如应力、应变、位移等才可能是连续的，因而可用坐标的连续函数来描述它们的变化规律。

2. 均匀性与各向同性的假设

假定物体内部各点处以及每一点处各个方向上的物理性质相同。这样，物体的弹性常数(弹性模量、泊松系数等)和塑性常数将不随坐标的位置和方向而

变化。

3. 力学模型的简化假设

包括完全弹性假设和弹塑性假设：弹性假设中材料服从虎克定律，加载与卸载规律相同，应力与应变呈线性关系；弹塑性假设中材料加载与卸载的规律不一样，同时应力应变关系曲线是非线性的。可采用理想弹塑性材料或线性强化材料；

4. 满足平截面假设原理：

符合材料力学的弯曲条件，变形与断面高度的关系必将是线性关系。

在满足上述理论条件下，我们可建立起图2-4中校直过程载荷—挠度的数学模型为：

$$F = \begin{cases} k\delta & (0 < F \leq F_B) \\ f(\delta) & (F_B < F \leq F_C) \\ k(\delta - \delta_0) & (0 < F \leq F_C) \end{cases} \quad (2-1)$$

该数学模型分别为弹性加载阶段、弹塑性加载阶段、弹性回弹卸载阶段的模型，其中 F_B 为弹性极限载荷， F_C 为校直允许的最大载荷，通过这种极限载荷的约束，能得到单次校直时工件的极限校直行程，从而避免工件被破坏甚至断裂。

了解上述弹塑性理论的概念及相关假设条件后，我们了解了变形的本质，从而在上述条件下进行进一步的研究。

2.5 直线导轨载荷—位移理论模型的建立

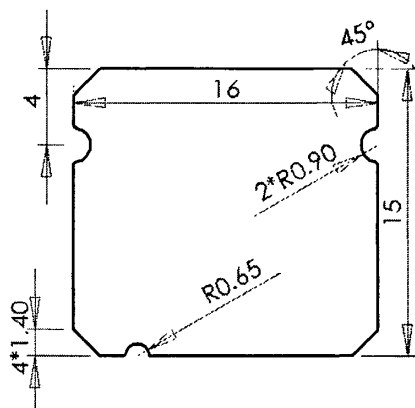


图2-5 LG15导轨截面形状图

如图2-5示为LG15型号直线导轨的截面形状图，以该导轨为例，在满足以上假设条件情况下，以矩形弹塑性弯曲理论为基础推导弯曲及校直时弯矩—曲率—挠度间的关系，从而获得校直理论模型。

该直线导轨的各校直参数如下表2-1（材料属性为实验测得）：

表2-1 直线导轨LG15属性表

材料	轴承钢GCr15
热处理状态	退火后
弹性模量	$E=190089\text{MPa}$
屈服极限	$\sigma_s = 382\text{MPa}$
初定校直跨距	$2L=200\text{mm}$
导轨截面对中性轴的惯性矩	$I=4432.3\text{mm}^4$

2.5.1 弹性变形阶段数学模型

弹性变形存在于两个阶段：弹性加载和弹性卸载回弹。根据材料力学简支梁受力及位移理论公式，可知：

在中点加载处弯曲弹性加载阶段的载荷与弯曲挠度的关系为：

$$\delta = \frac{F(2L)^3}{48EI} = \frac{FL^3}{6EI} \quad (2-2)$$

$$\text{即 } F = \frac{6EI}{L^3} \delta = \frac{6 \times 190089 \times 10^6 \text{ Pa} \times 4432.3 \text{ mm}^4}{(100 \text{ mm})^3} \delta = 5055.2\delta \quad (2-3)$$

卸载时，材料弹性回复的载荷与位移的关系：

$$F = 5055.2(\delta - \delta_0) \quad (2-4)$$

其中 δ_0 ——中点处初始挠度。

2.5.2 弹塑性变形阶段数学模型

最关键的弹塑性弯曲部分的关系 $F = f(\delta)$ 为非线性关系，可以通过以下的推导得出：

由于导轨外形与矩形截面梁类似，我们借鉴了矩形断面工件校直计算的相关理论^[1,8]，对导轨反弯校直中受到的弯矩，材料的弯曲曲率及其与挠度的关系的分析计算，能够得到校直所需的校直行程 δ_z 以及校直力 F 。由于金属材料的反弯

属于大变形弹塑性弯曲过程，均在满足上述力学模型假设的前提条件下进行推导计算。

由于材料的真实应力应变模型较为复杂，因此在理论计算中必须将材料的应力应变模型进行适当简化来分析。几种简化模型分别为：理想弹塑性模型、理想刚塑性模型、理想弹塑性强化模型和理想刚塑性线性强化模型。这些模型是根据具体问题的特点对应力应变图形的简化。如图2-6示，为材料的几种典型的应力应变分布趋势图，即按下面3种韧性不同的材料来分析（基本涵盖了所有金属材料），韧性大材料(a)在开始屈服之后，产生一段较长的波动过程，由于幅值小而呈现为一段近似平坦的屈服现象，称为屈服平台。随着韧性减小，此平台相应缩短，中等韧性的材料(b)仍有屈服平台，但是不大；韧性小材料(c)则没有屈服平台。在变形超过屈服平台之后，进入金属强化阶段，变形阻力又随变形程度的增加而增大，直到出现缩径。名义应力达到极限值即强度极限(σ_b)，然后很快断裂。

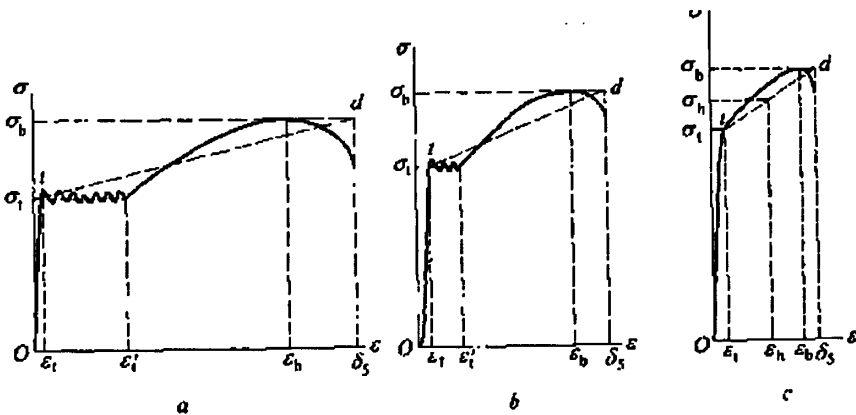


图2-6 材料的几种典型应力-应变趋势图

而当前导轨材料轴承钢GCr15的材料性能是：

- 1) 具有高而均的硬度和耐磨性；
- 2) 具有高的接触疲劳强度和弹性极限；
- 3) 具有足够的韧性、淬透性和耐蚀性。

根据其上述特点，应选取理想弹塑性简化模型(a)进行分析^[1,8]：

1、弹塑性弯曲的弯矩

如图2-7示为不计三向应力影响的简单弯曲的平面应力应变模型^[8]：

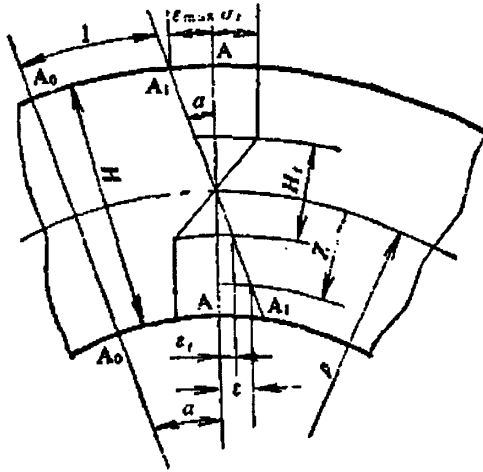


图 2-7 简单弯曲的应力与应变

单位长度的条材 A_0A_1 受弯曲后，其 A_1A_1 截面转到 AA 位置。这时 $\overline{A_0A}$ 长度代表纵向纤维 A_0A_1 的应变变量，用 ϵ_{\max} 表示。由图上的几何关系知

$$\therefore \epsilon_{\max} = \frac{H}{2} \alpha \quad (2-5)$$

式中 α —— 弯曲时条材横截面的角位移， H —— 截面高度，由几何关系知：

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \quad (2-6)$$

式中 ρ —— 条材中性层的曲率半径。

假设条材任意厚度处纤维的纵向变形为 ϵ ，在弹塑性交界处的变形为 ϵ_t ，在弹塑性交界处的厚度为 H_t ，任一点到中性层厚度 H 。于是可写出如下关系式：

$$\begin{aligned} \epsilon_t &= \frac{H_t}{2} \alpha = \frac{H_t}{2\rho} \\ \epsilon &= z\alpha = \frac{z}{\rho} = \frac{2z}{H} \epsilon_{\max} = \frac{2z}{H_t} \epsilon_t \\ H_t &= 2\rho\epsilon_t = 2\rho \frac{\sigma_s}{E} \\ \rho &= \frac{EH_t}{2\sigma_s} \\ \epsilon_{\max} &= \frac{H}{H_t} \epsilon_t = \frac{H\sigma_s}{EH_t} \end{aligned} \quad (2-7)$$

其中把 $\xi = \frac{H_t}{H}$ 定义为弹区比。

由图2-7的弯曲应力与应变关系，设导轨的宽度为B，则其受到弯矩为^[8]：

$$M = 2 \int_0^{\frac{H_t}{2}} B \sigma z dz + 2 \int_{\frac{H_t}{2}}^{\frac{H}{2}} B \sigma_s z dz \quad (2-8)$$

由几何关系知应力 $\sigma = \frac{2z\sigma_s}{H_t}$ ， σ_s 为材料的屈服极限，代入上式，得

$$M = 2B \int_0^{\frac{H_t}{2}} \frac{2\sigma_s}{H_t} z^2 dz + 2B \int_{\frac{H_t}{2}}^{\frac{H}{2}} \sigma_s z dz \quad (2-9)$$

积分后整理，得

$$M = Z_t \sigma_s (1.5 - 0.5\xi^2) = M_t (1.5 - 0.5\xi^2) \quad (2-10)$$

式中 Z_t ——弹性断面模数，

$$\text{该直线导轨 } Z_t = \frac{BH^2}{6} = \frac{16\text{mm} \times (15\text{mm})^2}{6} = 600\text{mm}^3; \quad (2-11)$$

$$M_t \text{——弹性极限弯矩, } M_t = Z_t \sigma_s = 600 \times 382 = 229.2\text{N}\cdot\text{m}。 \quad (2-12)$$

假设 $\frac{M}{M_t} = \bar{M}$ 称为塑弯比，对于导轨而言，它与弹区比的关系为：

$$\bar{M} = 1.5 - 0.5\xi^2 \quad (2-13)$$

$$\text{弯矩为: } M = M_t \bar{M} = 229.2 \bar{M} \quad \bar{M} \in [1, 1.5] \quad (2-14)$$

当 $\xi = 1$ 时，为纯弹性弯曲， $\bar{M} = 1$ ，即 $M = M_t$ ；

当 $\xi = 0$ 时，为极限弹塑性弯曲， $\bar{M} = 1.5$ ，即 $M = 1.5M_t$ ；

由此我们可定义单次下压的极限行程：即弯矩为 $1.5M_t$ 时的下压行程。超过该行程，则材料可能进入完全塑性状态，导致破坏或断裂。这是在校直时必须注意的问题。

2、弹塑性弯曲的曲率^[1]

如图2-8示，取单位长度的条材分析其中性层弯曲及弹复后各曲率间的关系：图中最下层曲线为简化的条材初始状态位置，最上层为弯曲后的状态，中间层为卸载后的最终状态。由图中原始曲率、弯曲后曲率、弹复后残留曲率分别为 C_0 ， C_w ， C_c ，相应的曲率半径为 ρ_0 、 ρ_w 、 ρ_c ；弹复曲率为 C_f ，曲率半径 ρ_f ；总弯曲曲率 C_s ，是压弯前后的曲率差，曲率半径 ρ_s ；塑性曲率 C_p ，是压弯前与弹复后曲率差，曲率半径为 ρ_p 。

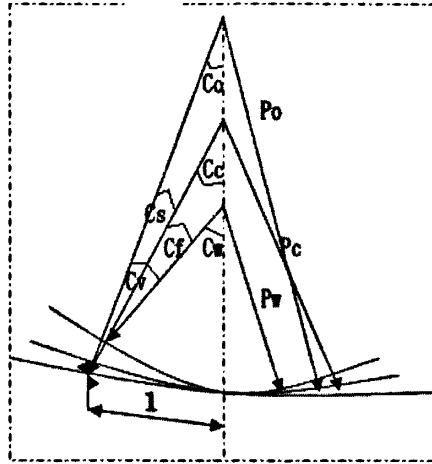


图2-8 各曲率间关系

由上述角度关系有：

$$\begin{cases} C_\Sigma = C_w - C_0 \\ C_f = C_w - C_c \\ C_s = C_c - C_0 \end{cases} \quad (2-15)$$

其中我们称为 $\bar{C}_\Sigma = \frac{C_\Sigma}{C_t}$ 相对总曲率， $C_t = \frac{M_t}{EI}$ 为弹性极限曲率。

$$\text{因此有：} \bar{C}_\Sigma = \frac{C_\Sigma}{C_t} = \frac{H}{H_t} = \frac{1}{\xi} \quad (2-16)$$

$$\text{由前式 (2-13) 代入有} \quad \bar{C}_\Sigma = \sqrt{\frac{0.5}{1.5 - \bar{M}}} \quad (2-17)$$

3、弯矩、曲率与挠度的关系

如图2-9示为条材断面的塑性区及弯矩分布图，阴影部分为发生了塑性变形的区域，其边界线是 $\xi - x$ 线，区域长度为 $2x_t$ 。而零件在整个长度 $2L$ 方向上的弯矩分布为^[1,24]：

$$M_x = \frac{F}{2}(L - x) \quad (2-18)$$

在塑性变形区域内 ($-x_t \leq x \leq x_t$) 的某截面弯矩为：

$$M_x = M_t(1.5 - 0.5\xi_x^2) \quad (2-19)$$

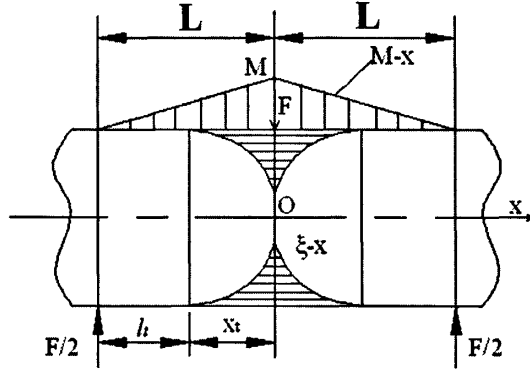


图2-9 直线导轨断面的塑性区及弯矩分布图

因此在中间压点处，即 $x=0$ 处，联立求解式(2-18)和式(2-19)，得到压点处产生弹塑性变形时载荷 F 和弹区比 ξ 的关系：

$$F = 2M_t(1.5 - 0.5\xi^2)/L = 2M_t\bar{M}/L \quad \bar{M} \in [1, 1.5] \quad (2-20)$$

根据参考文献[1]中推导的矩形梁的挠度与三者的关系可得到，其中点下压位移为：

$$\delta_\Sigma = \frac{F}{6EI} \left(\frac{2M_t}{F} \right)^3 + C_t \left[\frac{4}{3} \left(\frac{2M_t}{F} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(3 \frac{2M_t}{F} + L \right) \frac{2M_t}{F} \sqrt{3 - 2L \frac{F}{2M_t}} \right] \quad (2-21)$$

$$2M_t/L \leq F \leq 3M_t/L$$

将直线导轨的实际参数代入计算，有：

$$\begin{cases} \delta_\Sigma = \frac{M_t}{3EI} \frac{L^2}{\bar{M}^2} [5 - (3 + \bar{M})\sqrt{3 - 2\bar{M}}] & (\bar{M} \in [1, 1.5]) \\ F = \frac{2M_t}{L} \bar{M} \end{cases} \quad (2-22)$$

$$\text{即} \begin{cases} \delta_\Sigma = \frac{0.9068}{\bar{M}^2} [5 - (3 + \bar{M})\sqrt{3 - 2\bar{M}}] & (\bar{M} \in [1, 1.5]) \\ F = 4584\bar{M} \end{cases} \quad (2-23)$$

为导轨在弹塑性段载荷—挠度方程。

则结合前面建立的弹性区的方程，最终建立的直线导轨整个校直过程的数学模型为：

$$\begin{cases} F = 5055.2\delta & (0 < F \leq F_B) \\ \delta_{\Sigma} = \frac{0.9068}{\bar{M}^2} [5 - (3 + \bar{M})\sqrt{3 - 2\bar{M}}] & (\bar{M} \in [1, 1.5]) \quad (F_B < F \leq F_C) \\ F = 4584\bar{M} & \\ F = 5055.2(\delta - \delta_0) & (0 < F \leq F_C) \end{cases} \quad (2-24)$$

其中 F_B 为弹性极限载荷, F_C 为校直允许的最大载荷:

$$F_B = 2M_t / L = 4584(N) \quad F_C = 2M_t \bar{M}_{\max} / L = 6876(N)$$

2.6 基于理论建立的直线导轨的校直行程预测模型

由上述校直载荷—挠度数学模型, 可得如下图 2-10 示载荷—挠度图形, 该模型即为前述图 2-4 模型的具体表现:

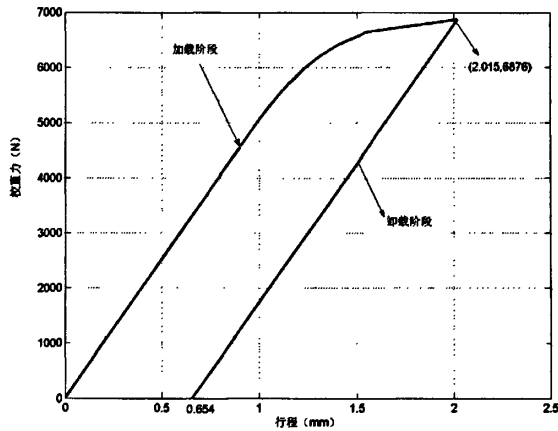


图 2-10 导轨校直载荷—行程模型图

由该模型及数学公式, 采用 MATLAB 数学软件编程^[25], 可以很方便的通过上述挠度—校直行程的关系计算出校直行程。MATLAB (Matrix Laboratory) 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件, 用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境。可以进行矩阵运算、绘制函数和数据、实现算法、创建用户界面、连接其他编程语言的程序等, 其基本数据单位是矩阵, 它的指令表达式与数学、工程中常用的形式十分相似, 用

MATLAB 来解算问题要比用 C, FORTRAN 等语言完相同的事情简捷得多, 可以直接被调用, 用户也可以将自己编写的实用程序导入到 MATLAB 函数库中方便自己以后调用。

正因为 MATLAB 强大的数学功能能很轻易的解决上述复杂的数学模型, 同时与我们开发的控制系统平台具有兼容性, 因此我们采用其进行程序编制计算。如下即为编制的 M 文件程序。

校直行程 MATLAB 计算 M 文件:

```
function y=stroke(a)
[a, x]=solve('0.9068*(5-(3+1.1028*(x-a))*sqrt(3-2.2056*(x-a)))/
(1.1028*(x-a))^2-x=0', strcat(' a=', num2str(a)))
for i=1:length(x)
    if imag(x(i))==0
        if (x(i)) >= a
            if x(i) <= 2.015
                y=x(i)
            end
        end
    end
end
end
```

其中 stroke 为 M 文件名, 括号中 a 为测量出的初始挠度, solve 中的公式为弹塑性段与弹性段相交的公式, 而校直行程 $y=x(i)$ 的逻辑判断是根据极限校直行程的范围, 从而判断出正确的校直行程值输出。通过该 M 程序文件只需输入初始挠度 a, 即可获得校直行程, 大大简化了以往前述复杂的公式推导计算, 同时可以编辑 M 文件界面。

取一组不同的初始挠度, 经上述程序计算得到相应的校直行程, 如下表 2-2。

根据表 2-2 得到的数据, 可以绘图得到两者的分布关系。图 2-11 即为理论计算得到的导轨挠度—校直行程曲线图, 从中可以看出两者的分布并不是简单的线性关系, 而传统的经验公式一般将两者关系简化为线性关系, 加以修正系数, 如文献[16][17]中经验公式分别为: $Y=aX+b+c-d$, 其中 Y 为校直行程, X 为初始弯曲量, a,b,c,d 分别为比例系数、刚性系数、正补偿量、负补偿量; $Y=aX+b+c(n-1)$, 其中同样 Y 为校直行程, X 为初始弯曲量, 但是 a,b,c,n 分别为屈服点

斜率、屈服点的位移量、修正系数和加压次数。我们从中不难发现 Y 与 X 的关系始终是线性关系,但实际情况并非如此,文献[26,27]中曾提出过幂函数的概念,但均没有展开具体研究,因此本文将从这方面着手,进一步对比研究两者的关系,以求得到精确的预测模型。该精密的行程预测模型将在后文中继续研究。

表 2-2 弹塑性理论计算的挠度—校直行程数据表

初始挠度 (mm)	理论计算的校直行程 (mm)	初始挠度 (mm)	理论计算的校直行程 (mm)
0.02	1.141	0.35	1.691
0.05	1.237	0.4	1.748
0.07	1.285	0.45	1.803
0.1	1.345	0.5	1.856
0.15	1.429	0.55	1.908
0.2	1.503	0.6	1.960
0.25	1.569	0.654 (当次 最大可校挠 度)	2.015 (当次极限行 程)
0.3	1.632		

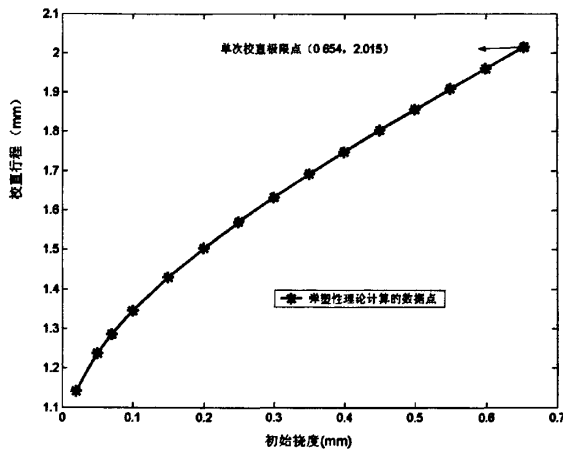


图 2-11 理论计算的挠度—校直行程分布图

2.7 本章小结

本章主要介绍了所研究的直线导轨自动校直机的基本工作原理, 针对具体对象 LG15 导轨, 在已研究的载荷—位移模型基础上, 采用弹塑性理论建立了以往极少研究的非规则截面该类条材具体的校直载荷—位移数学模型, 并采用 MATLAB 编程得到更方便的校直行程计算程序, 并取得一组有效的计算数据进行进一步分析。

第 3 章 基于有限元法的行程预测模型

3.1 引言

由于采用传统材料力学及弹塑性理论的校直行程计算具有很大的局限性，比如采用近似截面原则计算，需要借助一定的假设条件等，因此计算的结果往往不够精确，需要进行多次的校直来完成甚至不能校直，效率较低，因此有必要采用弹塑性有限元理论来探讨更精确的计算模型，同时能极大的扩展应用对象的范围。

3.2 有限元法简介

有限单元法 (Finite Element Method, FEM) 也称有限元法^[28]，是随着计算机发展而迅速发展起来的一种现代计算方法，是 20 世纪 50 年代首先在连续力学领域——飞机结构、动态特性分析中应用的一种有效的数值分析方法，随后很快的广泛应用于求解热传导、电磁场、流体力学等连续性问题。

该方法的基本思想是把整体结构看作是有限个单元相互连接而组成的集合体，每个单元赋予一定的物理特性，然后组合在一起就能近似等效整体结构的物理特性。比如用有限单元法对长圆柱体进行变形和应力分析，采用八节点四边开等参单元把长圆柱体划分成网格，这些称为单元。网格间相互连接的交点称为节点，网格与网格的交界线称为边界。显然，节点数是有限的，单元数目也是有限的，所以称为“有限单元”。这就是“有限元”一词的由来。

有限元分析 (Finite Element Analysis, FEA) 是利用数学近似的方法对真实物理系统 (几何和载荷工况) 进行模拟。利用简单而又相互作用的元素，即单元，就可以用有限数量的未知量去逼近无限未知量的真实系统。有限元分析基本求解步骤如下：

1. 结构的离散化
2. 选择插值函数
3. 建立控制方程

4. 求解节点变量

由于有限元法计算精度高、适应性强、计算格式规范统一，有限元计算结果已经成为各类工业产品设计和性能评估的可靠依据，已经成为工程设计中不可缺少的一种重要方法，为大型结构应力应变分析、稳定性分析、传热分析、电磁场分析、流体分析等方面扮演越来越重要的角色。

3.3 弹塑性有限元方法概述

弹塑性有限元分析^[29,30]是在弹性有限元分析的基础上发展起来的，其中弹性有限元公式依然适用，只是由于材料屈服以后其应力应变关系进入非线性状态，从而描述应力应变关系的弹性矩阵不再是常值矩阵，引起“材料非线性问题”。

1、材料非线性问题

众所周知，对大多数金属结构材料在弹性范围类应力应变关系是线性的，也就是弹性矩阵[D]只与选用什么样的材料有关，一旦材料确定之后[D]保持常数，与所达到的应力（获应变）水平无关。当应力水平达到某一限度从而使材料进入塑性状态后便改变了材料的性态，这时应力应变关系为非线性的，[D]不再是常数，而是应力应变的函数。则应力应变关系为：

$$\{\sigma\}=[D]^p\{\varepsilon\} \quad (3-1)$$

这里[D]^p为弹塑性矩阵，它不但与材料性质有关，还与所达应力水平有关。

2、屈服条件

经实验证明，米赛斯屈服条件对绝大多数金属结构材料比较符合，而且不需要事先判定三个主应力的次序，这给结构分析带来很大方便。虽然表达式较复杂，但弹塑性有限元分析的运算工作全部有计算机完成，且不会增加很大的计算量，所以在计算中全部采用米赛斯屈服条件。其条件可描述为：某一点的相当应力 σ_i 达到其单向拉伸的屈服极限 σ_s 时，材料开始进入初始屈服状态。数学表达式为：

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \geq \sigma_s \quad (3-2)$$

在简单加载情况下，满足上式为塑性状态，否则为弹性状态。

3、弹塑性有限元方法的分类

弹塑性有限元法不可能像线弹性有限元那样，通过直接求解线性代数方程组

来求得与给定载荷列矩阵相适应的精确的位移解答，而必须通过一定的迭代形式来逐步求得一个满足一定精度要求的近似解。按所采用塑性理论的不同。可分为两类：

第一类是应用塑性理论中的全量理论，称为全量法。特点是使用外载荷的全量进行迭代计算。由于全量理论给出的是应力变量与应变全量之间的关系，所以可直接求得在全量外载荷作用下结构的位移、应力等结果。其处理非线性的应力应变关系是采取逐步逼近的迭代方式。证明是可以收敛的。

第二类应用塑性理论中的增量理论，称为增量法。其应力应变关系是用应力微分和应变微分的形式来描述的。从根本上说，应用增量理论只能解决一个微分增量段内的外载一位移或应力—应变之间的关系。在实际计算中用有限的差分来逼近这微分增量，即相应地把外载荷分为若干增量段，即相应地把外载荷分为若干增量段只要每个载荷增量段适当的小，便可以把在这一小段载荷增量内所产生的应力应变描写为为差分增量形式。其特点是将外载荷分作若干增量段，每增量段进行线性化，也就是以分段线性化来逼近其非线性的应力应变关系。每段内计算与线弹性完全类似。

分析两类理论的特点，我们可采用全量理论进行精确的收敛计算。

3.4 有限元分析软件 ANSYS 简介

ANSYS 软件^[31]是融合结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元分析软件，可广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船等一般工业及科学研究。该软件是由世界著名的有限元分析该公司 ANSYS 开发，可在大多数计算机及操作系统中运行，从 PC 到工作站直到巨型计算机，ANSYS 文件在其所有的产品系列和工作平台均兼容。它能与多数 CAD 软件（如 AUTOCAD、PRO/E 等）结合，实现数据的共享和交换，是现代产品设计的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 包括以下主要功能模块：结构分析、热分析、电磁分析、流体分析（CFD）、耦合场分析—多物理场。而本课题的研究属于结构非线性分析。

ANSYS 有限元分析一般包含三个主要的步骤^[32]：

（1）创建有限元模型

包括：创建或读入有限元模型、定义材料属性、划分网格（节点和单元）。

(2) 施加载荷并求解

包括：施加载荷及载荷选项、设定约束条件、求解。

(3) 查看结果

包括：查看分析结果、检验结果。

3.5 直线导轨的弯曲回弹有限元分析

由上述理论知，压力校直过程是一个弹塑性弯曲过程，由于面对的直线导轨弯曲度各不相同，且具有一定弯曲量的导轨存在一定的残余应力，则因为包辛格效应的影响，在反求中单独研究一个具有挠度的直线导轨弯曲分析意义不大，因此本研究采用平直的导轨进行弯曲加载，然后卸载回弹。通过对这一过程进行有限元分析，得到有效仿真数据，从而反向建立起导轨校直的数学模型。

针对不同材料、不同截面、不同热处理工艺的直线导轨，只需输入相应的各种不同参数，在 ANSYS 软件中建立导轨有限元模型，进行加载—卸载，通过后处理得到相关数据，通过仿真代替实验，能大大节约成本。

由于方法相同，本文仅以上述直线导轨中 LG15 为例进行有限元分析^[33~39]。

3.5.1 导轨材料基本概况

导轨截面图如前图 2-5，材料为轴承钢 GCr15，热处理工艺为退火，导轨长度为 250mm，两端支点跨距可调，现根据实际情况，将支点跨距定为 $2L=200\text{mm}$ ，由于分析结果很大程度取决于输入的相关参数，为提高分析精度，其中材料的弹性模量及屈服极限均由实验获得，分别为 $E=190089\text{Pa}$ ， $\sigma_s=382\text{MPa}$ 。条件与理论计算时一致（见前表 2-1）。现在对导轨进行的弯曲回弹分析分为弯曲和回弹两个部分，下面分为两个载荷步：加载和回弹进行仿真，由于涉及到塑性，属于材料非线性分析。

3.5.2 弯曲回弹分析前处理

1、定义单元

由于弹塑性分析基本由材料非线性引起，即结构具有非线性的应力应变关系引起，材料具有弹塑性，因此根据材料及结构的特性，采用实体单元进行精密

计算, 在 ANSYS 中选择单元 Solid95。该单元的特点是: 用于 3 维实体结构模型, 为 3 维 20 节点实体。该元素是 Solid45 的高次形式, 能够用于不规则形状, 而且不会在精度上有任何损失。该元素具有位移协调形状, 适用于模拟弯曲边界。该元素由 20 个节点定义, 每个节点 3 个自由度: x,y,z 方向; 该元素具有空间的任何方向, 并具有塑性, 徐变, 膨胀, 应力强化, 大变形, 大应变能力, 同时提供多种输出选项。完全符合实际材料结构特征。

2、材料属性定义

ANSYS 中提供了多种塑性材料模型, 对于弹塑性材料而言有以下几种:

- 1) BKIN(经典双线性随动强化材料模型)
- 2) MKIN 和 KINH(多线性随动强化材料模型)
- 3) BISO 双线性等向强化材料模型
- 4) MISO 多线性等向强化材料模型

这 4 种模型各有特点, 相当于前面提到的几种典型材料的应力应变模型, 本研究选用 BKIN 双线性随动强化材料模型, 使用两条直线斜率来表示应力应变关系, 包含包辛格效应, 适用于遵守 Von Mises 屈服准则, 初始为各向同性的材料小应变问题。正符合该导轨材料的特点。

3、直线导轨有限元模型的创建

如图 3-1 示为直线导轨的有限元模型, 是直接在 ANSYS 中创建的几何模型经扫略网格划分得到。根据简化原则, 该模型的细节可作相应简化处理, 而不会影响到计算结果的精度, 因此对导轨周边的小的倒圆角进行了简化。该模型由 6880 个单元及 30923 个节点构成。能有效保证计算的精确性。

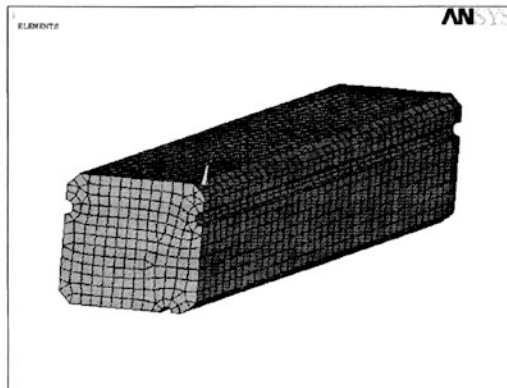


图 3-1 精密直线导轨有限元模型图

3.5.3 导轨的边界条件及加载求解

根据三点压力校直的实际工况来定义边界条件，跨距为 200mm，跨距两端简支约束，导轨中点施加压力载荷，该仿真通过两个载荷步分别模拟加载和卸载两个过程。加载过程可以采用两种控制方式：位移加载和力加载。分析类型为静力分析，同时求解控制选项的设置对于结果很重要。确定适当的载荷步和子步数、收敛准则以及输出选项，如图 3-2 示。在一个载荷步内分解成 100 个子步（以取得 100 组数据），以模拟力随时间的缓慢加载。挠度相对于导轨的整体而言属于小变形范围。在加载方式上可选用压力加载以及位移加载两种方式进行，两端简支约束，如图 3-3 所示，分别为两种方式的加载约束图。

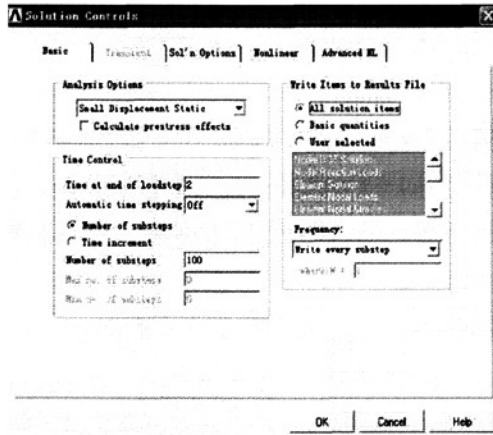


图 3-2 加载求解设置图

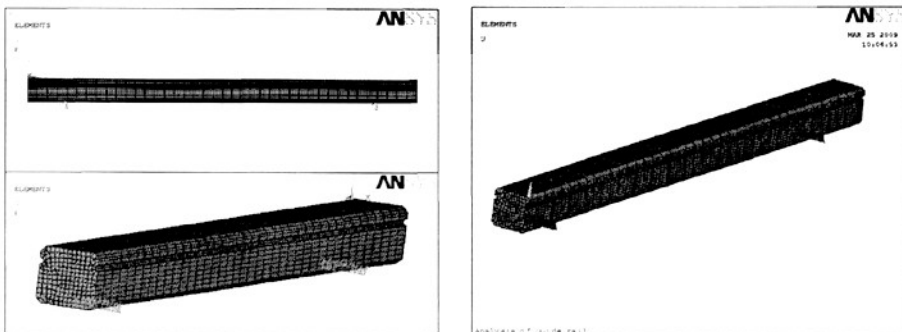


图 3-3 位移加载及力加载的加载约束图

由于本课题研究的校直过程实现采用行程控制^[40]，则首先模拟对中点加压到向下弯曲 3mm，从而得到载荷—位移模型。其次，采取加载一组不同力的模式，进行仿真分析，可得到加载及卸载后相应的挠度及应力数据。整个过程可采用 APDL（ANSYS 内部编程语言）进行参数化编程实现。

3.5.4 后处理结果分析

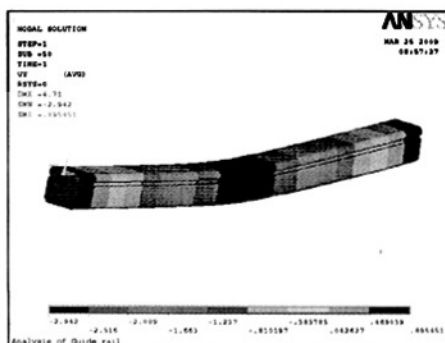


图 3-4 加载后 Y 向位移云图

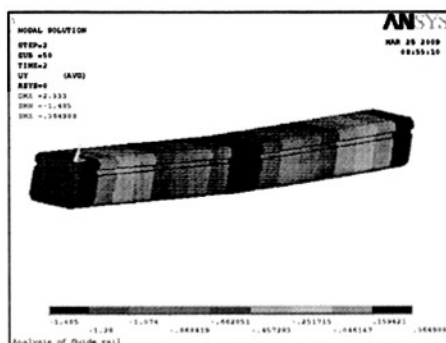


图 3-5 卸载后 Y 向位移云图

如图 3-4 示为导轨中点位置加载到 3mm 处时导轨总体的位移变化云图，中间蓝色部分由数值知被压下到指定行程位置，下压位移为 2.941mm，图 3-5 为压力卸载后，导轨发生弹性回弹后的 Y 向位移云图，图中导轨中点处不能恢复到初始的平直状态，证明存在塑性变形，即残余变形，其中蓝色部分数值为 -1.485，即残余挠度为 1.485mm。

由于压力校直实质为反向弯曲的过程，因此，由前述给定一组不同的下压行程/压力进行加载—卸载分析，可由上述后处理得到的一组残余挠度、下压行程、加载力的数据反求出导轨校直的载荷—挠度模型（可见后文图 3-12），以及新的行程预测模型：挠度—校直行程模型（可见图 3-13）。

除了上述位移云图的分析，下图 3-6、3-7 分别为加载和卸载后的导轨应力云图，从图中的分布来看，加载时，可以发现导轨受压后的应力成层状分布，超过了屈服极限的部位即已进入弹塑性状态（如红色部位，通过数值比较，大于屈服极限 382MPa），与第 2 章理论中塑性变形区（图 2-9）的分布较吻合。卸载后的残余应力也集中在受压点附近，而其他部分不受影响，与实际吻合。也可以从受到应力的数值比较来判断导轨是否进入弹塑性状态。

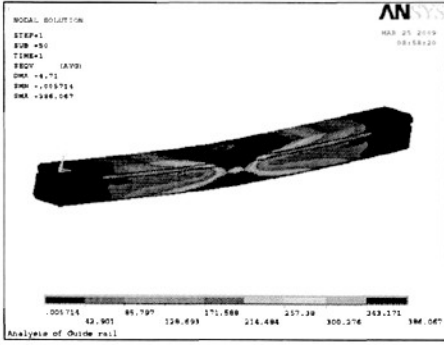


图 3-6 加载后 Von Mises 应力云图

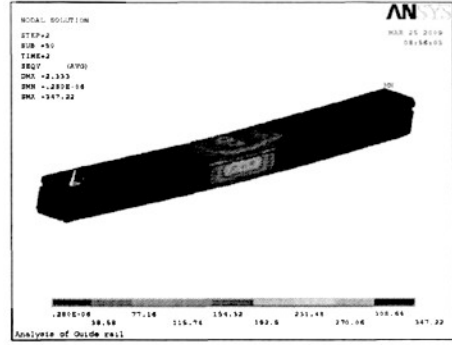


图 3-7 卸载后 Von Mises 应力云图

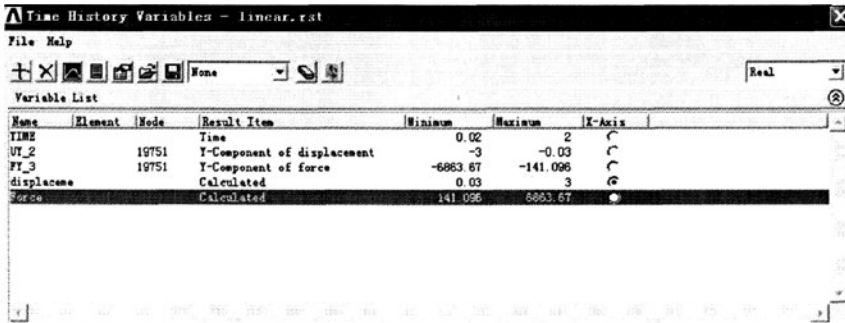


图 3-8 时间后处理导轨中点受力及位移结果查看设置

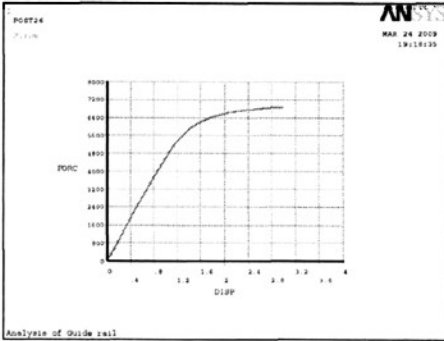


图 3-9 中点处加载段载荷—行程曲线

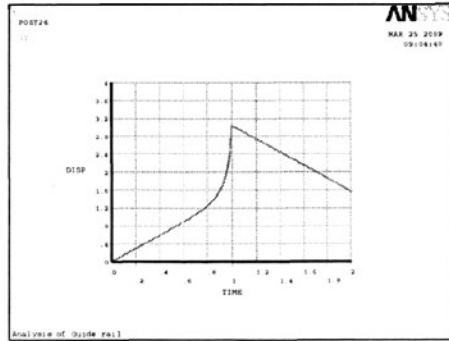


图 3-10 中点处行程—时间变化曲线

***** ANSYS POST26 VARIABLE LISTING

TIME	6 ADD displace ment	7 ADD Force
0.20000E-01	0.30000E-01	141.096
0.40000E-01	0.60000E-01	282.193
0.60000E-01	0.90000E-01	423.289
0.80000E-01	0.120000	564.385
0.10000	0.150000	705.481
0.12000	0.180000	846.578
0.14000	0.210000	987.674
0.16000	0.240000	1128.77
0.18000	0.270000	1269.87
0.20000	0.300000	1410.96
0.22000	0.330000	1552.06
0.24000	0.360000	1693.16

图 3-11 加载处载荷—位移数据

除了在 ANSYS 的 General Postprocess (一般后处理) 模块中得到上述位移及应力结果外, 还能在 Timehist Postprocess(时间后处理) 中得到整个过程的力, 位移随时间的变化关系。图 3-8 为时间后处理中的加载时段力—位移的结果查看设置, 其中 19751 即为导轨中点的节点编号, 通过符号转换得到所需要的力和位移的结果。图 3-9 即为给予导轨 3mm 位移加载时载荷—位移的关系曲线, 从图中可知与上文弹塑性理论的建立的校直模型加载段趋势一致, 直线处为弹性段, 然后进入曲线阶段, 即为弹塑性阶段。而图 3-10 中是导轨中点处在整个加载卸载过程中位移随时间的变化曲线, 总时间为 2s, 可以看到加载段两者关系为非线性的, 而卸载段为线性的, 进一步证明了材料力学卸载定律。图 3-11 为从软件中导出的加载段导轨中点处的载荷-位移数据, 以反求校直模型。

3.6 直线导轨校直载荷—行程模型的建立

图 3-12 示为上述经 FEA (有限元分析) 得到的载荷—行程模型, 由于卸载曲线较多, 选择了两条卸载曲线, 从图中可以看出这两条卸载曲线与前面的弹性加载段基本平行, 进一步证明卸载段为完全弹性段。第一条卸载曲线为加载到 2.3mm 处卸载, 得到残余挠度 0.884mm。第二条卸载曲线为加载到 3mm 时卸载, 得到残余挠度 1.485mm。

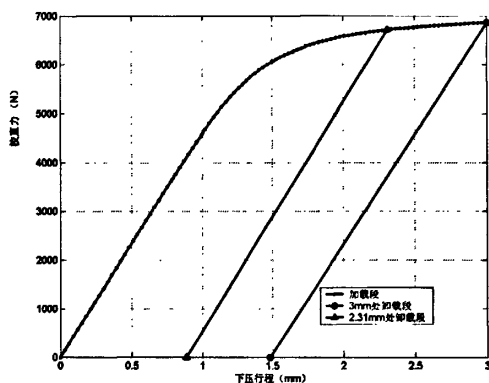


图3-12 FEA得到的校直载荷—行程模型

由上述数据得到的曲线模型可以按第二章的理论模型三个阶段来建立数学模型，具体的构建方法由于与实验方法相同，将由后文实验中的构建方法阐述，这里就不再列出具体的数学模型。从总体上看，与理论模型趋势一致。

3.7 直线导轨校直行程预测模型

为了得到校直更直观简便的模型，在上章也提过，分析校直行程与初始挠度之间的关系，从以往学者的研究来看，两者呈幂函数的关系更为准确。但是现有公式将两者的关系都线性化，因此有必要从这方面着手分析。下表 3-1 即为 FEA 得到的挠度—校直行程数据表。

表 3-1 FEA 得到的挠度—校直行程表

初始挠度(mm)	FEA得到的校直行程(mm)
0.01	1.078
0.023	1.143
0.067	1.274
...	...
0.283	1.629
0.415	1.796
0.884	2.3
1.32	2.741
1.485	2.942

表中数据为一组不同的载荷作用在导轨中点所得，将上述数据以曲线的形式表现出来如下图 3-13，即可建立初始挠度—校直行程的预测模型，下图显示的该校直模型与理论计算得到的数据趋向一致，本文采用类似幂函数的最小二乘多项式拟合法，对数据进行处理，并最终得到确定的关系即预测公式，将在第四章实验建立该模型时具体阐述。从该模型看与前面理论建立的预测曲线趋势一致，均为非线性的关系。

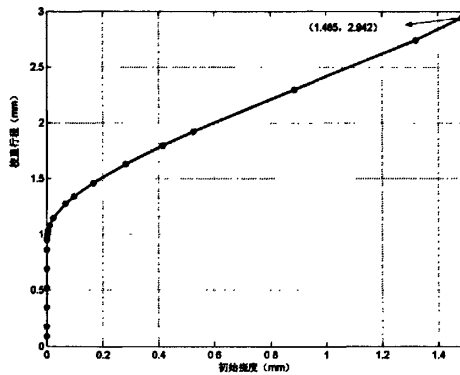


图 3-13 FEA 建立的初始挠度—校直行程预测模型

3.8 本章小结

本章通过对直线导轨 LG15 的 3 点弯曲加载卸载过程进行有限元分析，查看导轨加载卸载时挠度及应力的变化，得到有效数据，反求出该导轨校直的行程预测模型。提供了一种有效的校直行程预测的计算方法。同时为同等条件下不同方法建立的模型进行对比分析提供了有效的参考数据与模型。

第 4 章 基于实验法的行程预测模型

4.1 引言

长期以来,出于成本及实验设备精度方面的考虑,人们对于校直实验的研究较少,对于校直行程的预测更多的是采用理论简化的计算,甚至是凭人工经验判断。而且现有的实验研究也大多针对于轴类零件等规则截面条材零件,其他非规则截面类条材(如直线导轨、电梯导轨、铁路轨道、油田钻杆、型钢等)涉及的很少^[41]。但是从实验的角度出发来进行校直理论和校直模型的研究是非常有必要的,不仅能有效验证理论计算的结果的正确性,而且因为实验的精度更高,对材料弯曲变形的特点更了解,能针对具体的实验对象,找出其变形及回弹的规律,分析回弹数据规律来实现精确的校直行程控制^[42]。对于以自动校直机为服务对象的校直行程预测模型而言,能够以弯曲实验得到的数据为依据,建立精确的挠度—校直行程模型,得到简单可行的精密校直行程预测公式,甚至于校直行程预测知识库,能有效的提高校直机预测系统的精确性、实用性以及智能性,争取达到一次校直,大大提高效率,简化系统操作的复杂性。

4.2 弯曲实验设备及方案

材料的压力校直实际是 3 点弯曲过程,因此通过 3 点弯曲实验反向研究校直具有可行性^[43,44]。当前对于校直理论及模型的研究,特别是针对于校直机设备计算控制用的模型,采用实验法进行研究的很少。前面提到的经验公式的研究,实际上是对于需要大批量校直的同批次,同类型零件,人们通过大量的经验数据或者实际数据的研究得出的简易精确的公式,目前研究的经验公式种类各异,一般是线性公式,但是由于这些数据的规律是在人为的经验或者是在精度较低的设备测试条件下获得,因此对于校直公式的精密性有一定影响,甚至于公式的形式也会发生改变。因此采用精密的试验设备得到更精确的实验数据,是实

验法的关键任务。

4.2.1 弯曲实验设备

实验设备采用英国英斯特朗 (INSTRON) 公司的电液伺服材料试验机, 如下图 4-1 示, 该试验机为闭环控制, 并采用应变片式载荷传感器。英斯特朗材料试验机及结构试验系统以其技术先进、质量优良、可靠和完善的售后服务、具有极强的竞争力, 所有英斯特朗材料试验设备及结构试验系统都符合国际通用试验标准如 ISO、ASTM、EN 等标准, 并可按照这些标准中的有关规范对金属、陶瓷、橡胶、塑料、复合材料、木材、纸张、食品等各种材料进行力学性能的试验和研究。

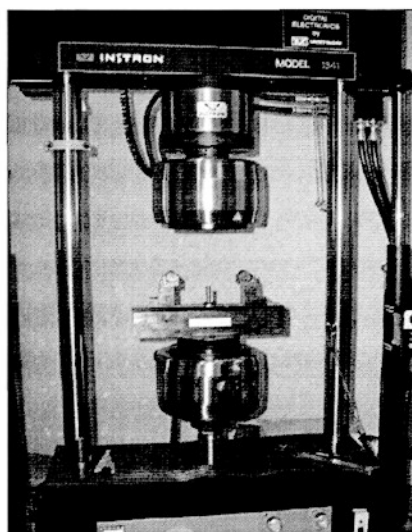


图 4-1 INSTRON1341 电液伺服材料试验机

其性能指标如下表 4-1:

表 4-1 INSTRON1341 电液伺服材料试验机性能参数

载荷量程	$\pm 100\text{KN}$
作动器行程	$\pm 75\text{mm}$
应变测量范围	$-10\% \sim +50\%$
测量相对误差	$\leq 0.5\%$
测量工作频率	$0-25\text{HZ}$

系统采用电液伺服闭环控制方式，通过载荷、位移、应变三个相互独立并可转换的控制模式分别对试样进行试验。

4.2.2 实验方案及步骤

导轨弯曲实验的最终目的是为了获得直线导轨在给定下压行程的条件下卸载后的残余挠度，在忽略包辛格效应的情况下，以此来反求出初始挠度与校直行程的关系。即首先加载一定的校直行程，达到指定值后卸载压力，让直线导轨弹性回弹，测量导轨的最终位置值，从而取得校直行程、残余挠度值、弹性回弹值。

因此要得到预定的值，需要根据现有设备的条件制定好实验方案：

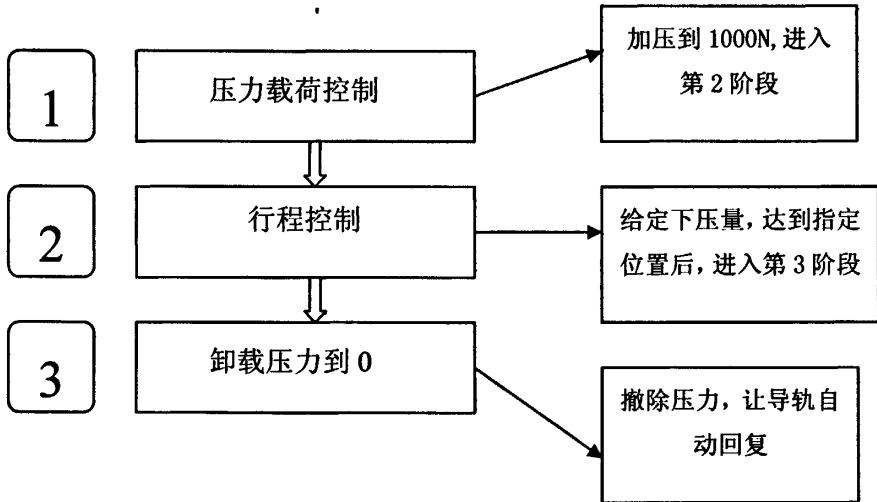


图 4-2 导轨 3 点弯曲实验总体方案

如图 4-2 为实验总体方案图，总共分为 3 个阶段，将导轨按跨距两端支撑，中点由压头加压，但是由于试验设备并非专业测试挠度的机器，因此记录下的数据并不是最终需要的实验目的数据，需要经过处理得到目的数据。同时，由于材料试验机的闭环控制系统需要压头总是与直线导轨接触，才能保证所获位移各数据的精确性。而我们主要是通过给定下压量，驱动压头，使直线导轨被压下指定的行程，并且在卸载后获得残余的形变，即残余挠度。因此制定了上

述方案，以保证实验获取准确的数据。

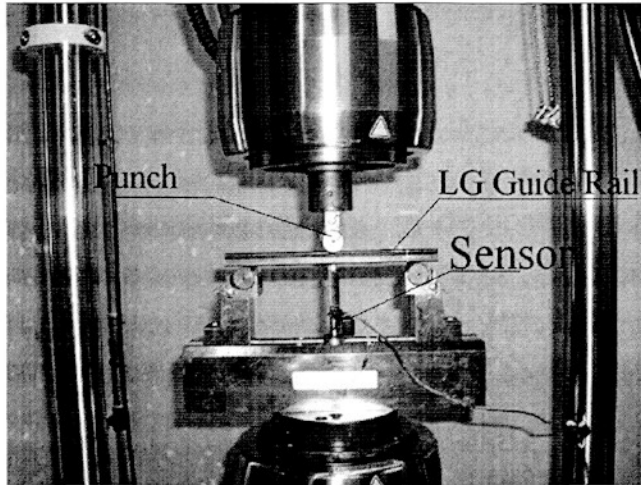


图 4-3 导轨弯曲实验图

如图 4-3 即为 3 点弯曲的实验装置，两端为辊子支点，中间为压头，直线导轨下面连接有引伸计，即位移传感器。但是当前材料试验机的工作原理与试验目的存在的分歧为：其所给出的位置测量数据均是以两边立柱为基准的刻度位置，即刻度尺在立柱上，记载的试验数据均为位置数据，即后文所说的机器位置。同时力传感器存在着“漂移”现象，为保证数据结果的准确性，必须保证压头始终与直线导轨接触，传感器连接在压头及导轨上。

因此，我们将整个实验过程分为 3 个阶段：

- 1) 第一阶段：压力控制。首先通过给压头一个恒定的压力来控制导轨的弯曲，给定压力 1000N（经计算及实验知该压力作用下导轨处于完全弹性变形状态），即从压头与导轨接触开始，加压到 1000N 即停止，立即转入第 2 阶段。使我们在进入第 2 阶段行程控制加载时，保证压头与导轨接触，传感器数据准确。
- 2) 第二阶段：下压行程控制。向导轨中点加载给定的位移（以理论预计的范围为参考），压下指定的位移后停止，转入第 3 阶段。
- 3) 第三阶段：卸载压力，导轨自然回弹。前面两个阶段是加载的过程，因此加载到位后，即卸载。压头向上运动，逐渐减小到 0。这一阶段到最

后可能导轨与压头会脱开，但是不影响导轨回复后位置的测量，因为下一次加载的初始位置，即为上次加载后，导轨回弹后的最终位置。

以上整个弯曲加载—卸载过程的实时数据，如力、位移、应变都能从材料试验机的软件系统中获得，准确性较高。但为了得到更直观的数据，以便建立精确的校直模型，我们需要对其进行相关处理。

以下为根据上述方案制定的具体实验步骤：

1. 打开机器电源，预热一会，开启计算机控制系统；
2. 设备回到机器原点，装夹好导轨试样；
3. 设置好控制软件中：第一阶段的压力值 1000N；第二阶段的指定下压量；第三阶段卸载到 0。（根据预计的极限范围设置）
4. 设置好软件中的输出文件、加载速率及数据采集模式等相关参数；检查设备的上下限保护是否设置正确。
5. 进行第一次加载实验，注意观察，若发生意外立即终止试验，如正常运行则进行至卸载完成（第 3 阶段）后停止；
6. 调整步骤 3 中的下压量，开始第二次实验，同步骤 5；
7. 重复上述步骤进行多次加载，实时记载保存实验数据；
8. 实验完成，设备回零；从计算机中取出数据文件，结合记录的数据进行处理分析；
9. 建立相关校直模型，将实验得到的数据与理论计算的及有限元仿真的数据进行比较，分析原因。

4.3 实验数据处理

实验目的数据：总体下压行程、反求的导轨初始挠度（残余挠度）、压下载荷。

通过对平直的直线导轨 LG15 进行多次的加载—卸载，获得如下的实验数据。但由于每次单独加载的实时数据较多，因此只需取出每次加载的关键数据即可，如现有记录的实验数据表 4-2：

从该初始记录表不难看出压力可以直接得出，而所需的其他两项实验数据如下，均需要由传感器的数据处理^[45]得出：

- 1) 反求的初始挠度（残余挠度）=加载后所处的机器位置-加载前所处的机

器位置；

2) 总体的下压行程=第一阶段的行程+第二阶段行程。

表 4-2 实验数据初始记录表

直线导轨弯曲实验记录表		
零件编号	1号(LG15)	
实验设备	INSTRON 电液伺服材料试验机	
基本性能参数		
热处理状态	退火	
力学性质	弹性模量 E (MPa)	190089
	屈服极限 Ds (MPa)	382
截面基本形状尺寸	截面宽 B(mm)	16
	截面高 H(mm)	15
支点跨距(mm)	200	
环境参数	温度	17℃
	空气湿度	70%RH
加载序列	第 2 阶段下压量 (mm)	压力 (N)
第 1 次加载	0.4	3252.8
第 2 次加载	0.6	3734.9
第 3 次加载	0.7	4420.9
第 4 次加载	0.8	4773.9
...
第 29 次加载	3.5	8450.0
第 30 次加载	4.0	8889.9

如下图 4-4, 4-5, 4-6 分别为上表记载的第 2 次、第 20 次和第 30 次加载时的载荷—导轨中点处机器位置的关系图，图中横坐标为加载点所处机器绝对位置，纵坐标为压力，绿色点为传感器给出的实时数据点，而红线为拟合的曲线，从 3 副图片中数据的分布规律可以看出，导轨在加载时分别处于完全弹性、弹

塑性、塑性的状态。

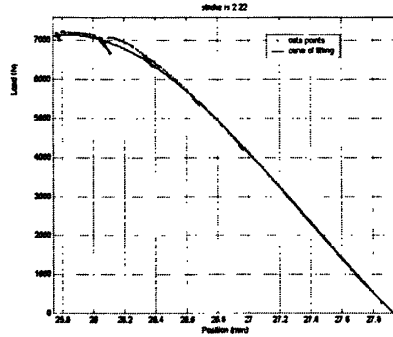
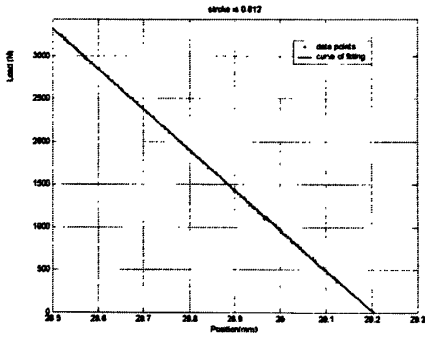


图 4-4 总行程为 0.6mm 时载荷—位置图 图 4-5 总行程为 2.2mm 时载荷—位置图

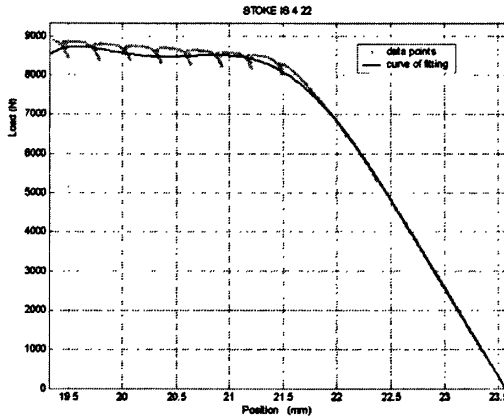


图 4-6 总行程为 4.2mm 时位置—载荷图

由于在加载 1000N 处，导轨处于完全弹性状态，因此我们可以根据虎克定律，对其数据点进行直线拟合，获得第一段加载时的行程以及导轨加载前所处的机器位置。因此可由上述每次加载时得到的机器位置—载荷曲线得到加载前导轨所处的精确位置，由于进行了连续多次的弯曲实验，由规律有：导轨卸载后所处的机器位置=下一次实验的加载前机器位置。经上述简单数据处理，可得到如下实验记录表 4-3:

表4-3 直线导轨LG15实验处理结果表

实验编号	总下压行程 (mm)	加载前所 处的机器位 置(mm)	卸载后 所处的机 器位置 (mm)	回弹量 (mm)	下压力(N)
1	0.612	0	0	0.612	3252.78
2	0.714	0	0.00346	0.71054	3434.6
3	0.811	0.00346	0.0036	0.81086	4773.92
4	0.912	0.0036	0.1337	0.7819	4420.94
...
10	1.119	0.07866	0.13256	1.0651	4843.5
11	1.214	0.13256	0.20156	1.145	5285.18
12	1.314	0.20156	0.2872	1.22836	5844.58
...
28	2.723	1.71176	2.54816	1.8866	7553.4
29	3.221	2.54816	3.90416	1.865	7983.5
30	3.722	3.90416	5.6416	1.98456	8450

根据上述实验所得到的数据，可以建立相关模型，进行进一步的分析，反向建立其校直模型。

4.4 实验法建立的导轨校直载荷—行程模型

由上述实验结果反求得到直线导轨 LG15 的校直载荷—行程模型，如下图 4-7。

该模型曲线是通过实验数据点经线性及多项式拟合而成，由于整个过程分为三个阶段，因此我们需要找到加载时候导轨的屈服点，从而准确拟合出导轨弹性段加载的数学模型，而对于弹塑性部分，在 MATLAB 中采用多项式拟合逼近，得到最贴近实验数据点的公式，由于回弹属于完全弹性，该部分的数学模型同样可以根据第一段的公式得出。从图中可以看到，各位置的回弹曲线斜率与弹性加载时的斜率基本一致，符合简单卸载定律，同样证明了第一段拟合的加载斜率的正确性。

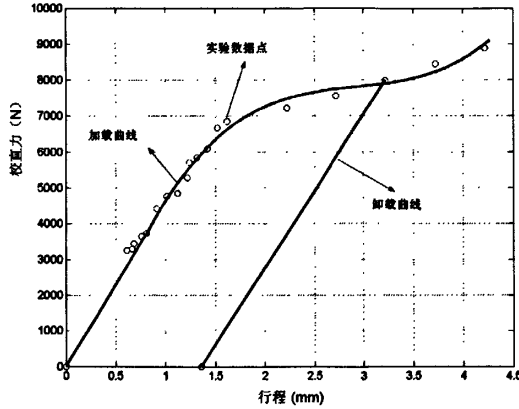


图 4-7 实验校直载荷—行程模型

而从众多实验数据中对于弹性屈服点的准确确定也是一个难点，本文是通过在 MATLAB 软件中编制程序，对现有的实验数据点进行直线拟合^[25]，具体的操作如下：一般由于弹性段与弹塑性段的斜率不同，如下图 4-8 和 4-9 为两种不同的数据点直线拟合方法，第一种方法采用相邻两数据点间的斜率比较，后一种采用的总是与前面所有的区域点拟合计算的直线斜率比较。

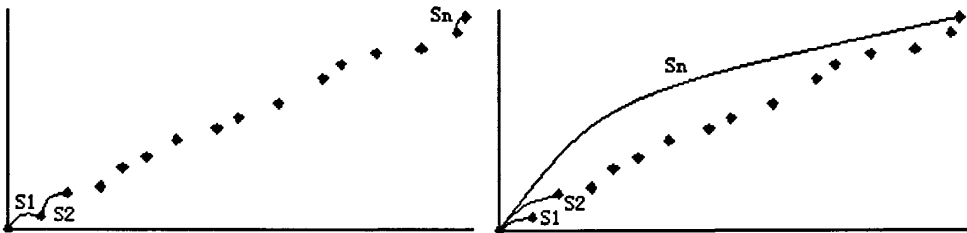


图 4-8 弹性区域内由相邻两点计算斜率 图 4-9 弹性区域所有点拟合计算斜率

由于实验数据中由于传感器本身的原因可能随机性比较大，采用第一种方法构建的误差较大，本文采用第 2 种比较方法，通过在 MATLAB 中编制计算塞选程序，对已知的载荷—行程数据点进行拟合，计算斜率并进行对比，将一定范围内的值放入一个矩阵，找到屈服点，确定完全弹性区域。这是因为弹塑性区域内的点与弹性区的点拟合与前面比较的差别较大，可以根据对比误差值来确定屈服点。如图 4-10 示，确定了完全弹性区的数据点后，进行最小二乘直线拟合，拟合得到最佳的弹性段曲线及数学模型。图中采用的并不是最大斜率，

而是平均斜率；同时以屈服点为分界点，进行弹塑性段的拟合。卸载段的可以直接将卸载后的挠度与校直行程点相连。由于加载的行程不同，因此存在多个卸载曲线，图 4-7 中模型显示的为下压行程 3mm 时的卸载曲线。

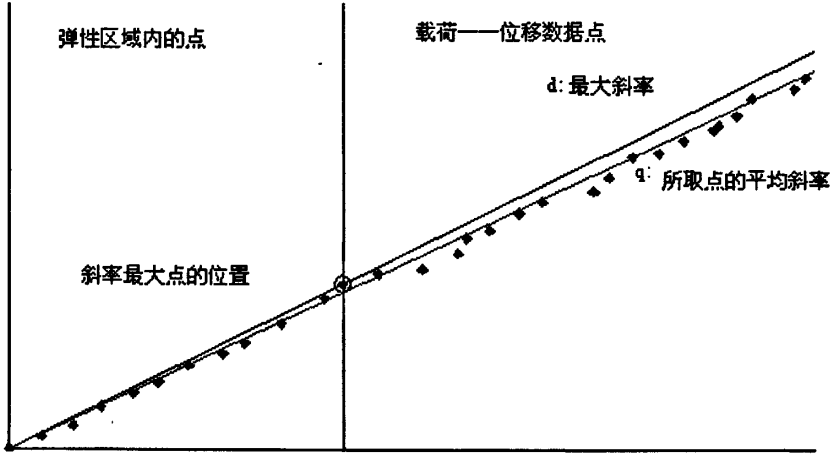


图 4-10 弹性加载段直线拟合斜率的确定方法图

4.5 实验的直线导轨挠度—校直行程模型

表 4-4 实验反求挠度—校直行程数据表

初始挠度 (mm)	实验得到的校直行程 (mm)
0	0.612
0.001	0.714
...	...
0.054	1.119
0.068	1.235
0.086	1.314
...	...
1.356	3.221
1.737	3.722

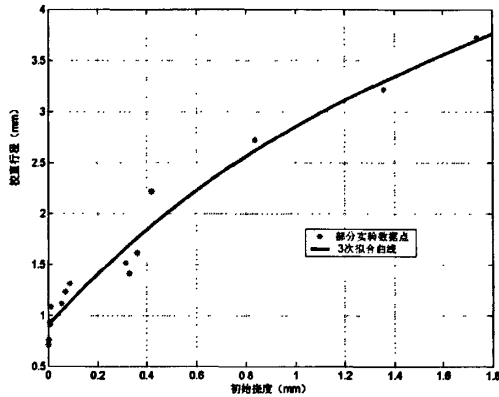


图 4-11 实验建立的初始挠度—校直行程模型

上表 4-4 为由实验反求得到的初始挠度—校直行程数据表, 图 4-11 为初始挠度—校直行程模型, 传统实验法研究得出的经验公式, 校直行程与初始挠度之间的关系均为线性关系, 但是从文献[26]中可以看出这种关系是将弹塑性段载荷位移曲线简化成直线的情况下得出的, 前面有学者提出为幂函数关系^[27]可能更准确。从当前数据点的分布特点来看(前两者该数据模型分布也一样), 只要存在初始挠度, 在 MATLAB 中进行拟合时最接近于多项式的形式, 相当于幂函数上再添加了一个修正量, 因此本文采用最小二乘多项式自动拟合, 在一定的应用范围内, 简便误差小, 并且分析多个导轨的实验数据, 发现采用 3 次曲线拟合误差最小。

因此我们可以得到初始挠度—校直行程的简易精密公式:

$$S = 0.1564D^3 - 0.8953D^2 + 2.6905D + 0.9056 \quad (4-1)$$

$$D \in (0, 1.8) \quad S \in (0, 3.873)$$

其中 S 为校直行程, D 为测量的中点初始挠度。拟合最大误差为 0.63006。其中 D 的范围即为单次可被校直的最大挠度, 同时可确定单次校直行程的范围, 超出了极限值, 材料可能被破坏, 其值的确定主要是由材料的强度极限决定的。

4.6 本章小结

本章主要通过对直线导轨进行 3 点弯曲实验, 研究这种非规则截面导轨在一

定跨距下的弯曲及回弹特性，在现有设备条件下，通过相关数据处理得到所需的数据，从而建立了更准确直观的校直行程预测模型，给出了新形式的精密校直行程经验计算公式。

第 5 章 校直预测模型修正数据库技术

5.1 引言

以上分别采用了当前三种主流的计算方法对校直行程进行预测，建立了相应的模型，特别是针对直线导轨类的不规则截面形状的条材进行了具体的研究，为最终实现各类金属条材在自动校直机上的校直参数获得提供了可行的方法。但是如何能得到更精确的模型，在校直机系统上的实用性如何，需要我们对此进行进一步的对比分析，找出最佳方案。本章将就这些问题和大家进行探讨。

5.2 三种不同方法建立的校直模型比较

首先我们来看载荷—行程模型比较，如图 5-1 示，不同颜色和线型代表了不同的模型，三者的共同点：从加载曲线段来看，加载段中的弹性段基本处于一致的状态，证明在弹性段的计算和实际相差较小；弹塑性段的弯曲趋势大体一致，这样就通过实验很好的验证了校直理论及 FEM 模型的正确性。此外，卸载曲线基本与弹性段平行，符合卸载定律。三者之间的差异：理论的极限校直行程较短，FEA 建立的弹塑性段会趋近于与 X 坐标平行，而实验的情况是逐渐向上。差异的主要原因是由于理论计算时候的简化计算、有限元分析时候材料应力应变属性的精确性，以及实验数据点由于机器误差及认为误差而造成的。对于同样的初始挠度，校直行程的计算，理论模型的结果小于实验模型的结果，有限元模型与理论模型的基本相同，但对于校直力而言，同样的行程，理论模型的结果较小，有限元计算的结果较大。以上对比，对于建立精确的校直模型有很大的参考价值，可对数学模型加入修正系数或建立参考数据库等。

其次，我们可以对比三种方法建立的最直观的初始挠度—校直行程模型，即本文提到的行程预测模型。如下图 5-2 示，由弹塑性理论建立的预测模型与 FEA 建立的基本重合，只是 FEA 的极限行程更大，而实验的预测模型在初始挠

度小于 0.36mm 时计算的校直行程较前者小，而初始挠度大于 0.36mm 时，实验值较高，且行程范围更广，与前者的值相差更大。这也更能说明在一定的小范围内三者的校直行程值很接近的数据研究结果。但是随着初始挠度的增大，误差逐渐加大。

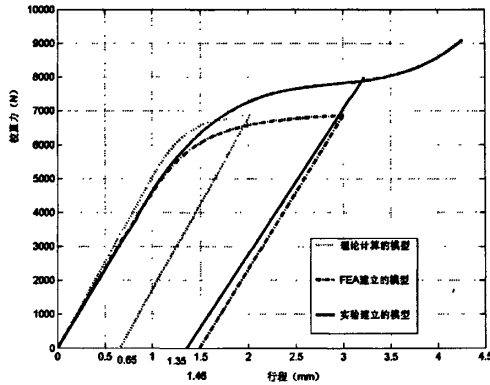


图 5-1 三种方法建立的载荷—行程模型对比

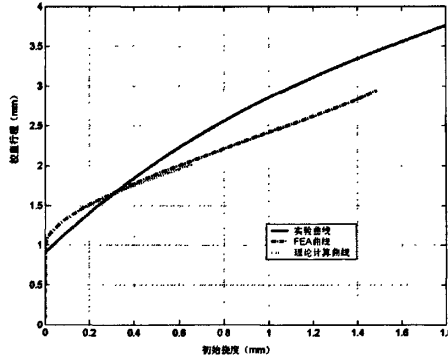


图 5-2 三种方法建立的初始挠度—校直行程模型对比

由上述两类模型的对比我们不难发现，后者相对于自动校直机而言更简明直观，能很好的作为校直机软件控制平台中参数获取的理论依据，因此初始挠度—校直行程模型是本课题研究的重点采取的校直行程预测模型。由于实验得到的结果更准确，因此我们可以采用上述实验模型作为基础，建立参考数据库。但同时由于材料包辛格效应的存在，弯曲实验结果与校直的结果稍有区别，我们也可以对实验数据与 FEA 数据进行修正。

5.3 实验及修正后的校直预测模型数据库

由于自动校直机所针对的对象一般是特定的工件，需要进行批量的校直，因此快速性是校直判断模型的重要要求之一，能在短时间内针对实时测量的结果预测准确的行程，需要预测方法能在校直系统软件中快速运行，同时还要保证高的精度，以减少校直次数，提高效率；限定单次加载的极限校直行程，避免工件被破坏。

这些都对校直行程预测模型提出了高的要求，传统的理论计算方法前面也提到过，精度较差，仅限于几种规则截面的条材，且上述模型的推导较复杂；有限元分析需要借助专门的有限元分析软件，还需要经过后处理，若嵌入校直机的软件控制系统中，则对操作人员的专业水平要求较高，且速度较慢，时效性差；经过弯曲实验法得到的模型，其精度很高，建立上述模型较简单，能针对各种对象的工件。特别是在现有校直机拥有高精度测量设备的前提下，以前一直存在的高昂实验成本费用大大减少，针对不同的工件，均可以在校直机上进行弯曲实验反求校直行程预测模型，且精度与实验设备的检测精度持平。因此实验法及经验数据研究得到的经验预测公式成为校直机控制理论模型的首选。

因此，本文结合数据库技术^[4,5]，提出的将各种常用型号的导轨，甚至各类金属条材，采用实验的方法建立常用校直行程模型数据库，以及相应的行程预测公式库，便于控制软件的编程和调用。同时数据库中没有的零件，可以采用上述方法在校直机实际校直过程中（相当于实验），添加并修正数据库，进行数据管理。从图 2-1 中可见直线导轨 LG20 和 LG25 的截面实图，图 5-3、5-4 即为上述两种不同型号、不同热处理状态的直线导轨在跨距 200mm 下经实验法得到的校直行程预测模型。其中跨距的选择也极其重要，一旦跨距改变，整个模型也产生变动，因此可根据校直机的极限范围，选择多个合适的跨距进行建模，以满足各种弯曲的需要，以在校直控制软件中可以直接选用，而不需要输入。

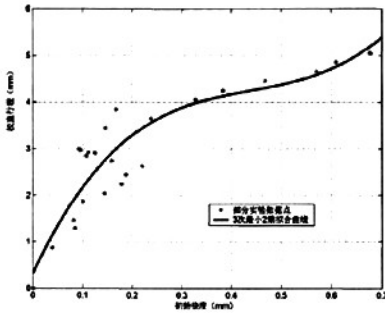


图 5-3 导轨 2 的挠度—行程图

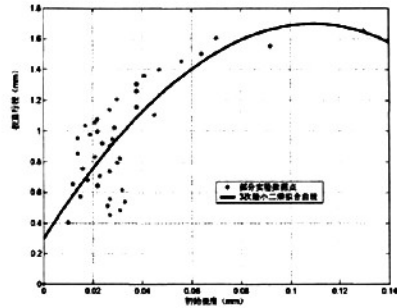


图 5-4 导轨 3 的挠度—行程图

现在以这三种型号的导轨为例建立校直行程预测的参考数据库，以便在校直时参考及修正，同时，这种按型号分类建立的数据库，能大大提高校直机的效率，同时在校直时能添加实际数据进行修正，极大的提高了精度。

下图 5-5 为在数据库软件 Microsoft Access 中建立的数据库功能窗体：

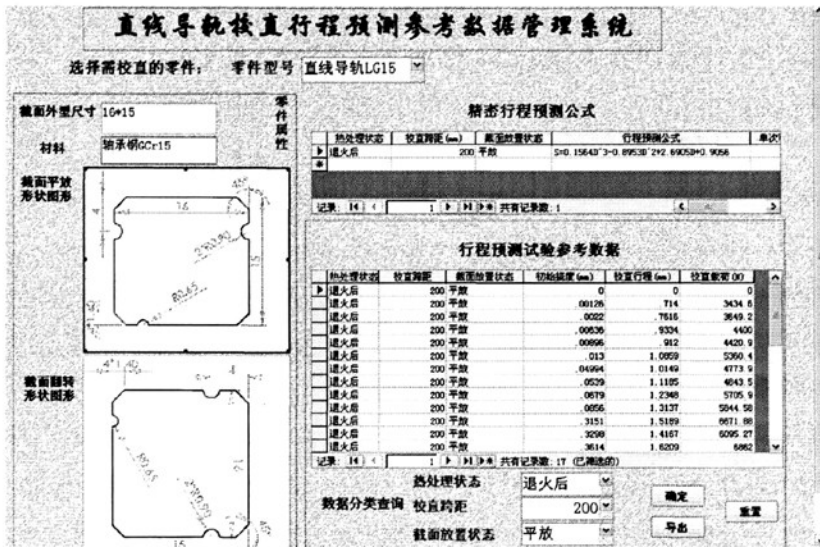


图 5-5 直线导轨校直行程预测参考数据库窗体图

在该数据库管理系统中通过选则需校直的零件型号，即可获得零件的相关属性，同时可获得实验法得到的精密行程预测公式，以及实验的相关数据，其中在公式库和数据库中，包括了不同热处理状态、不同跨距及不同的放置状态的数据及公式，同时数据可以查询、导出、添加、修改，以在实际应用中不断完善。

5.4 简单精密的行程预测公式数据库

从上节的直线导轨校直行程预测参考数据库中看到，为方便控制软件的开发，将上述行程预测模型的数学模型，即对应的有效精密行程预测公式加入数据库，不仅可以作为软件开发的原始依据，而且可以在此基础上进行进一步的修正。因此按上述建立一个大型的精密行程预测公式库很有必要。

针对现有条件建立的行程预测公式^[46,47]，我们将建立精密行程预测公式库，如下表 5-1:

表 5-1 几种型号导轨的精密行程预测经验公式表

直线导轨 型号	热处理状 态	校直跨距 (mm)	校直行程预测精密公式
LG15	退火后	200	$S = 0.1564D^3 - 0.8953D^2 + 2.6905D + 0.9056$ $D \in (0, 1.8) \quad S \in (0, 3.873)$
LG20	回火后	200	$S = 36.118D^3 - 47.666D^2 + 22.905D + 0.3219$ $D \in (0, 0.7) \quad S \in (0, 5.388)$
LG25	回火后	200	$S = -68.922D^3 - 101.88D^2 + 24.755D + 0.30096$ $D \in (0, 0.14) \quad S \in (0, 1.581)$

其中公式中 S 为校直行程，D 为测量的挠度，D，S 的范围即单次可校直的极限范围。同时如果在实际校直过程中，由弯曲实验得到的预测模型可与 FEA 或理论的模型进行修正，如下图所示为 LG15 直线导轨在前述参数条件下的 FEA 数据与实验数据得到修正曲线模型：

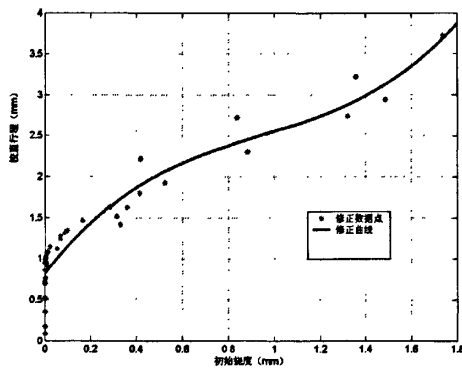


图 5-6 FEA 与实验的修正行程预测模型

同理，可得到相应的预测公式：

$$S = 1.0217D^3 - 2.9101D^2 + 3.6247D + 0.81854 \quad (5-1)$$

$$D \in (0, 1.8) \quad S \in (0, 3.873)$$

5.5 在 LABVIEW 开发系统中调用参考数据库

本课题的研究最终需要将精密的校直行程预测模型应用在自主开发的自动校直机上，因此如何将这种更精密的校直模型及数据库技术引用到校直机的软件开发控制系统中也是我们需要解决的问题^[48-50]。

零件校直行程计算模块

选择零件校直条件

零件基本属性

输入初始挠度 (mm)

校直行程 (mm) 单次最大校直行程 (mm) 3.873

查看参考数据库 结束程序 查看错误信息

零件型号	热处理状态	校直跨距 (mm)	截面放置状态	初始挠度 (mm)	校直行程 (mm)	校直载重 (N)
直线导轨LG15	退火后	200	平放	0.3614	1.6209	6862
直线导轨LG15	退火后	200	平放	1.418300000000000	2.2193	7227
直线导轨LG15	退火后	200	平放	1.836399999999999	2.7227	7553.4
直线导轨LG15	退火后	200	平放	1.356	2.2213	7989.5
直线导轨LG15	退火后	200	平放	1.7374	2.7222	8450

图 5-7 LABVIEW 开发的简易校直行程预测及数据库调用模块

在金属条材自动校直机的课题研究中，我们综合各方面的考虑，采用 LABVIEW 软件作为开发平台，快捷高效，兼容性强。LABVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) ^[51]，是由美国国家仪器 (NI) 公司研制开发的。类似于 C 和 BASIC 的程序开发环境，所不同的是 LabVIEW 使用的是图形化编辑语言，又称为“G”语言。使用这种语言编程时，基本上不写程序代

码，取而代之的是流程图或框图。它尽可能利用了技术人员、科学家、工程师所熟悉的术语、图标和概念，因此，Labview 是一个面向最终用户的工具。它可以增强你构建自己的科学和工程系统的能力，提供了实现仪器编程和数据采集系统的便捷途径，同时开发速度是其他语言的 4—10 倍。

本课题研究的内容属于校直机控制软件中的校直参数设置模块，如上图 5-7 示为采用 LABVIEW 开发的以数据库及预测公式为基础的校直计算模块，它将作为整个控制软件的一个重要部分。其中由于导轨在一定的条件下进行批量校直，各校直条件下行程预测公式不同，所以可在常用的校直条件进行列表选择，本数据库作为一种方法研究，选择的零件校直条件有限，但是可在实际的加工中不断添加和修正。其中输入的初始挠度实际是读取挠度测量的信号，而在本模块作为试验的单独模块可直接输入计算得到校直行程。同时下面的查看参考数据库则调用了我们先前开发的数据库，将数据库中大于该挠度的数据显示在下方以供参考，而在实际的加工中可将实际的数据添加进同一校直条件的数据库。当然上述建立的这一计算模块仅供模拟参考，真正的校直控制系统还需要我们进行全方位进一步的设计。

5.6 本章小结

本章对前述几种方法的校直预测模型进行了比较分析，并得出了最佳方案。给出了行程预测公式的拟合方法，同时以实验法建立了校直行程预测模型的参考数据库。可在实践中以此数据进行模型修正，同时在 LABVIEW 开发平台上应用了精密的行程预测公式编程及数据库的调用，开发了校直机行程预测模块。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文总结

精密的行程预测模型及应用一直是当前校直模型的研究重点，本课题研究重点在于如何建立非规则截面的精密直线导轨类的校直行程预测模型，其研究成果能很好的应用在自动校直机的软件系统开发上。本论文来源于湖北省自然科学基金：集多挠度在线检测与回弹预测的多点多步校直方法研究。

在研究本课题的过程中，我们以以往研究极少的非规则截面的精密条材类零件—直线导轨为对象，进行了以下研究工作：

- 1) 采用弹塑性弯曲理论，在已有压力校直载荷—位移模型基础上，以矩形条材校直计算公式为原型，找出相关参数修正，建立直线导轨的传统校直载荷—挠度模型。引入了 MATLAB 编程，简化了复杂的模型计算。同时基于初始挠度—校直行程两者的关系，建立适用性更好的校直行程预测模型。
- 2) 运用有限元理论，在 ANSYS 软件中对三点弯曲的加载卸载过程进行材料非线性仿真分析，给出了仿真过程及其数值解，反求出导轨校直的载荷—位移模型以及新提出的挠度—校直行程模型。
- 3) 采用实验法，在精密设备上进行弯曲实验以反求校直模型。对实验数据处理，分析建立校直行程预测模型，采用多项式拟合技术得到精密的校直行程预测公式，突破了以往经验公式为线性的精度局限。
- 4) 比较分析三种行程预测模型，选择最优模型，运用数据库技术，建立不同条件下不同类型导轨的反求校直行程预测参考数据库，采用数据拟合技术建立行程预测修正公式。
- 5) 以上述模型为基础，在 LABVIEW 平台上开发了适用于自动校直机的校直行程计算模块。

6.2 研究展望

在今后的研究中，我们还将重点研究以下几个方面：

第一，进一步分析弹塑性理论模型与实验模型的关系，找出合适的修正方法或修正系数，最终可由修正的精密理论预测模型建立通用数据库，在数据库中加入工艺决策部分，在实际校直过程中完善数据库技术。

第二，考虑反复校直弯曲的包申格效应，进行基于滚动优化的实时预测控制方法研究。以精密回弹控制为目标，优化多步加载校直行程的控制算法，实现多步校直的控制；

第三，将开发的校直行程预测模块运用在自主开发的全自动金属条材校直机上，通过校直实验验证。同时开发各种常用规则截面的金属条材的行程预测模块。

参考文献

- [1] 崔甫. 矫直理论与参数计算 (第 2 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 1~88.
- [2] Das Talukder NK, Singh AN. Mechanics of bar straightening, Part 1: General analysis of straightening process. [J]. Journal of Engineering for Industry, 1991. 113(2): 224~227.
- [3] 翟华. 轴类零件校直工艺理论研究: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [4] 李骏, 邹慧君, 熊国良. 压力校直工艺理论研究的现状与展望 [J]. 机械设计与研究, 2004. 20(4): 69~71.
- [5] 曹爱文, 熊国良. 压力校直技术的发展 [J]. 锻压设备与制造技术, 2007. 1(1): 9-12.
- [6] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [7] 钦明浩, 柯尊忠, 张向军, 等. 精密矫直机中轴类零件矫直工艺理论研究 [J]. 机械工程学报, 1997. 33(2): 48~53.
- [8] 崔甫. 矫直原理与矫直机械 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [9] 翟华, 韩春明, 柯尊忠等. 轴类零件精密校直行程算法 [J]. 重型机械, 2001. 3(10): 23~26.
- [10] 陈慧, 熊国良, 李骏. 基于 F- δ 模型的校直压下量确定方法及应用 [J]. 机械设计与研究, 2005. 21(4): 70~74.
- [11] 李骏. 压力校直过程的理论模型及其应用研究: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- [12] 钦明浩, 张向军, 蒋守仁, 等. 轴类零件校直理论分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1996. 19(4): 22~28.
- [13] 钦明浩, 吴焱明, 蒋守仁, 等. 轴类零件校直的有限元解法 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1996. 19(2): 24~29.
- [14] 李骏, 邹慧君, 熊国良, 等. 压力矫直过程模型的有限元分析及应用 [J]. 重型机械, 2004. 1: 28~30.
- [15] 盛艳明, 李骏. 钢轨端部压力矫直的有限元分析 [J]. 重型机械, 2007. 5: 53~54.
- [16] 于晓平. 轴类全自动校直机 [J]. 金属热处理, 2002. 27(9): 45~46.
- [17] 单淑梅. 液压自动校直机的应用与研究 [J]. 汽车技术, 1998. (11): 27~29.
- [18] 翟华. 轴类零件校直工艺广义预测多步算法研究 [J]. 塑性工程学报, 2004. 11 (5): 50~53.
- [19] Katoh T, Urata E.: Measurement and Control of a Straightening Process for Seamless Pipes [J]. Journal of Engineering for Industry. 1993. 115(3): 347~351.

- [20] 刘立玺.轴类零件校直压力模型的研究: [硕士学位论文].长春:吉林大学,2006.
- [21] 李骏,熊国良,邹慧君.轴类零件压力矫直过程的数学模型与行程计算[J].重型机械, 2004.6:41~44.
- [22] Stelson K A, Gosard D C. An adaptive press brake control using an elastic-plastic material model. Eng for Industry, 1992.104(11):389~393.
- [23] 陈明祥.弹塑性力学[M].北京.科学出版社.2007
- [24] Naumann N.Straightening of long products about the-1st moment of area: [硕士学位论文]. Montana university Fat Leoben, Austria,1998.
- [25] 林雪松,林德新,等.MATLAB7.0 应用集锦[M].北京.机械工业出版社.2005.
- [26] 李骏,熊国良,邹慧君.校直机行程计算经验公式的理论依据分析[J].锻压装备与制造技术,2003.(6):22~24.
- [27] 李骏,邹慧君,熊国良.自动校直机校直修正量计算公式的理论探讨[J].金属热处理, 2004. 29(5):72~74.
- [28] 王勖成.有限单元法. [M].北京.宇航出版社.清华大学出版社.2003.
- [29] 王祖城,汪家才. 弹性和塑性理论及有限单元法[M].北京.冶金工业出版社.1983
- [30] 姜晋庆,张铎.结构弹塑性有限元分析法.[M].北京.宇航出版社.1990.
- [31] 周宁,沈进.ANSYS 机械工程应用实例[M].北京.中国水利水电出版社.2006.
- [32] 任重.ANSYS 实用分析教程[M].北京.北京大学出版社.2003
- [33] 徐曼琼,蔺书田,汪北平,等.电梯导轨反弯矫直弹塑性变形分析[J].机械科学与技术. 2007.26(8):1010~1012.
- [34] 郭华,邓勇.钢轨矫直压力的有限元计算[J].重型机械.2006.5:53~54.
- [35] HOON Huh, HYOONG Wook Lee, SANG Rae Park ,et al. The parametric process design of tension leveling with an elasto-plastic finite element method.[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001.113:714~719.
- [36] 于凤琴.圆钢压力矫直的有限元研究[J].重型机械.2007.4:20~22.
- [37] 王会刚.H 型钢矫直机理及有限元动态仿真研究: [硕士学位论文].北京:北京科技大学,2005.
- [38] S L Srimani , J Basu. An investigation for control of residual stress in roller-Straightened rails[J]. Strain Analysis.2003.38:261~268
- [39] Naksoo K, Shiro K,Taylan A. Three-dimensional analysis and computer simulation of shape rolling by the finite and slab element method. Inter J Machine Tools & Manufacture, 1991. 31(4):553~563

- [40] Reissner J, Meier M. Computer-aided three bending of multiple-bend profiles. *Annals of the CIRP*, 1985.(34):259~262
- [41] John B. Modern straightening machines for pipe, tubes, bars and sections. *Iron and Steel Eng*,1997.(11):38~45.
- [42] DING Shuguang, HAN Chunming, ZHAI Hua,et.Research on the numeric processing algorithm in automatic detecting systemof precise straightening press.*Mechanical Science and Technology*,2000.19(1):62~63.
- [43] Michael G,Boyarshinov,Michael B,Gitman,PeterV.A method of solution for the cyclic bending problem. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1992.134(11): 881~889.
- [44] 王臣.重轨压力矫直变形残余应力的数值模拟及实验研究: [硕士学位论文].包头:内蒙古科技大学,2007.
- [45] 费业泰.误差理论与数据处理(第5版).[M].北京.机械工业出版社.2007
- [46] Chen Z X, Chen H. A method of the calculation of straightening stroke for automatic precise pressure straightening.[J] *East China Jiaotong University*, 2007.24 (2): 127~130.
- [47] 李春风.轴类零件矫直压下量的实用算法[J].*应用科技*,2003.30(7):11~12.
- [48] 赵永.压力校直过程中材料参数的在线识别: [硕士学位论文].南昌:华东交通大学,2006.
- [49] Tani G,Tomesani L. Adaptive control in the straightening process of case hardened parts. *Proceedings.International Manufacturing Engineering Conference*,1996.356~358.
- [50] Seung-Cheol Kin,Sung-Chong Chung.Synthesis of the multistep straightness control system for shaft straightening processes[J].*Mechatronics*,2002.(12):139~156.
- [51] 陈锡辉,张银鸿.LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通[M].清华大学出版社,2007.

致 谢

本论文的完成是在我的导师卢红教授的悉心指导和帮助下完成的。在我攻读硕士学位的三年中，导师卢红教授以其渊博的知识、高尚的情操、丰富的阅历、严谨的治学态度和宽严有度的授业方法，在科研工作、专心学习和日常生活上对我的关心、教育和培养，使我从中得到诸多启迪和有益的教诲。在这里衷心的感谢您。

在整个研究生期间，本人还得到了众多实验室课题组老师的关心和帮助，借此机会，感谢你们，感谢你们这三年中对我的关心和帮助！

课题研究的顺利进行，还离不开凌鹤、雷波两位博士师兄和郭昌桥、李益芝、关伟智、胡佳敏、刘云、夏俊召等同学在各方面的支持、帮助和配合。在这里我深深感谢你们。

特别感谢我的父母、亲人和朋友们，在我多年的学习生涯中，在物质上和精神上给予我的无私帮助，在此感谢他们。如果没有他们的鼎力支持，我就不可能顺利完成自己的学业。

衷心感谢所有曾经帮助过我、关心过我的朋友们。

2009年4月
于武汉理工大学

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] Lu Hong, Zhang Xiao, Juergen Leopold. Straightening Model and Prediction of Straightening Stroke of Precision Linear Guide Rail. In: Caihua Xiong ,Honghai Liu,eds., Proceedings of the 1st International Conference of Intelligent Robotics and Applications. Wuhan: ICIRA2008, Part(2), LNAI5315,2008.321~328. (EI 收录,收录号: 20084911762325)
- [2] LU Hong, LING He, Juergen Leopold, ZHANG Xiao, GUO ChangQiao. Improvement on straightness of metal bar based on straightening stroke-deflection model. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009.52(7).(已录用, SCI 刊源)
- [3] LU Hong, LING He, JUNG Jae-Youn, ZHANG Xiao, GUO Changqiao. Bending Properties of GCr15 Steel Guide Rail under the Multi-step Loading. Journal of Wuhan University of Technology-Mater.Sci.Ed. 2010.No2 出版. (已录用, SCI 刊源)
- [4] 郭昌桥,卢红,张潇.基于 PLC 的校直控制系统研究.中国科技论文在线.2008-12-26.
- [5] 卢红,郭昌桥,张潇.一种简化的压力校直工艺理论.中国科技论文在线.2009-02-05