

硕士学位论文

(工程硕士)

双排式钢卷托盘运输提升装置的 一体化设计与研究

**INCORPORATE DESIGN AND RESEARCH OF THE
HOISTING MECHANISM IN THE PALLET
CONVEYING SYSTEM**

王烈

哈尔滨工业大学

2014 年 6 月

国内图书分类号: TG506.1/1
国际图书分类号: 658.5

学校代码: 10213
密级: 公开

工程硕士学位论文

双排式钢卷托盘运输提升装置的一体化设计与研究

硕 士 研 究 生: 王烈

导 师: 杨斌久 教授

申 请 学 位: 工程硕士

学 科: 机械工程

所 在 单 位: 北京首钢国际工程技术有限公司

答 辩 日 期: 2014 年 6 月

授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: TG506.1/1
U.D.C: 658.5

University Code:10213
Security:Open

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**MECHATRONICS DESIGN OF THE HOISTING
MECHANISM IN THE DOUBLE BANK TYPE OF
THE PALLET CONVEYING SYSTEM**

Candidate:	Wang Lie
Supervisor:	Prof. Yang Binjiu
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Mechanical Engineering
Affiliation:	Beijing Shougang International Engineering Technology CO.,LTD
Date of Defence:	Jan, 2014
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

在首钢京唐钢铁公司一期热轧工程建设中，每年 800 万吨的钢卷运输量成为制约生产、考验后部物流工序的一大难题。首钢国际工程公司在考察研究国内外多种运输方式的基础上，自主设计开发了双排式托盘钢卷运输系统用于解决这一难题。而提升机构是该运输系统中的核心设备，用于解决运输过程中出现的高度变化问题，但由于热轧钢卷和双排式托盘运输系统的特殊性，因此提升装置在此领域鲜有应用。

本文在分析了双排式钢卷托盘运输系统的组成和工作原理基础上，明确了提升装置需要满足的技术条件和要求；在对国内外多种提升机构的结构形式、起升和传动方式的对比分析中初步确定了不同工况下重载和轻载托盘提升装置的结构型式。在重载提升装置方案设计中，通过对工况和受力计算先后完成了液压系统原理、压力设计和部分液压元件的选型；在轻载提升装置方案设计中，详细计算了钢丝绳、卷筒、轴承、提升电机及减速机的能力，并对钢丝绳、轴承等关键部件进行了强度校核以确保设计选型安全可靠。CAE 计算机辅助工程已成为工业产品仿真设计的重要方法，本文以 SolidWorks Simulation 软件为平台，通过对重载提升装置创建三维模型、设定约束、施加载荷、划分网格和和计算等手段对关键部件提升托架进行有限元分析，根据得到的应力、位移和安全系数云图分析结构设计中存在的问题，并运用优化理论提出改善措施，再通过二次验算分析优化后的模型，得到了结构稳定、经济可靠的提升托架设计方案。在完成设备设计的基础上，以 PLC 作为自动化控制核心，完成了重载和轻载提升装置顺序控制流程设计。实际应用是对设计的最好检验，本文跟踪提升装置的现场调试和生产使用，对出现的问题进行分析改进，通过实际使用效果弥补了不足，也验证了本课题设计理论方法的准确性。

本文从液压、机械、有限元分析、设计优化和自动化设计五个方面研究了托盘提升装置的机电液控一体化设计的基本原则和方法，特别是在结构设计和优化方面采用了有限元分析优化的方法并实现了设计产品的实际生产使用，为今后研发其他工况或类型的提升机构提供了有益的借鉴和参考。

关键词：托盘；提升装置；一体化设计；有限元；

Abstract

In Hot-rolled iron and steel project of Shougang Jingtang Iron and Steel Company, the transporting of eight million tons coils per year is a pivotal problem. The double bank type of the pallet conveying system was designed and developed to solve the transport by the Beijing Shougang International Engineering Technology Company. Hoisting mechanism is the main equipment to achieve the height changing of the coil transport in the design. However, the hoisting mechanism applications is seldom used in this regard because of the peculiar characteristics of the hot rolling coils and the pallet conveying system.

In the article the composition and working principle of the system of coil pallet lifting device's transport are first described, and the hoisting mechanism's technical conditions and requirements are determined; Then, this article determine the design of pallet lifting device in different working conditions through contrasting structure form, lifting mode and transmission of multiple hoisting mechanism that have so far existed. According to the design of heavy hoisting mechanism, hydraulic system is optimized and the components are chosen. And according to the design of light hoisting mechanism, the tightwire, reel, bearing and lifting motor are chosen. CAE is an important method to simulate the design of industrial products. Making use of the software in SolidWorks Simulation, through predigesting model, limiting conditions and setting load, the hoisting frame of the heavy hoisting mechanism is analysed by the stress and safety factor cloud charts. By using the optimization theory to improve measures, the structure stability and economic and reliable design target are achieved. This article introduces the design of the hoisting mechanism automatic base on PLC. Finally, through the analysis of the actual use effect, the accuracy of the design is verified.

The basic principle and method of the mechanism-hydraumatic-electricity design of the pallet lifting device system are discussed. This paper proposes a way to improve the structure and design. Through the practical application, it provides some reference of the research for the other condition or type of hoisting mechanism in the future.

Keywords: pallet, Lifting device, Mechatronics, CAE

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.1.1 课题背景	1
1.1.2 课题研究的目的和意义	5
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 国外研究现状	6
1.2.2 国内研究现状	7
1.3 本课题主要研究内容	9
第 2 章 提升装置系统设计与实现	10
2.1 钢卷托盘运输系统	10
2.1.1 钢卷托盘运输系统	10
2.1.2 托盘运输系统设备构成	12
2.2 提升装置结构	16
2.2.1 重载提升装置	16
2.2.2 轻载提升装置	17
2.3 重载提升装置液压系统设计	17
2.3.1 基本条件	18
2.3.2 受力分析	18
2.3.3 液压缸选型	19
2.3.4 液压系统原理图	20
2.3.5 液压系统主要参数计算	21
2.4 轻载提升装置结构设计	23
2.4.1 钢丝绳的选型	24
2.4.2 卷筒的选型	26
2.4.3 轴承的选型及校核	27
2.4.4 电机及减速机的选型	27
2.5 本章小结	29
第 3 章 提升装置 CAE 分析及优化	30
3.1 CAE 原理及分析软件简介	30

3.1.1 CAE 原理介绍	30
3.1.2 SolidWorks Simulation 分析软件	32
3.2 提升装置的三维建模	33
3.2.1 重载提升装置装配体	33
3.2.2 轻载提升装置装配体	34
3.3 重载提升托架有限元分析	35
3.3.1 有限元分析前处理	35
3.3.2 有限元分析后处理	38
3.4 重载提升托架优化设计	40
3.4.1 提升托架优化措施	40
3.4.2 提升托架优化分析	40
3.4.3 提升托架优化结果	42
3.5 本章小结	43
第 4 章 提升装置自动化系统设计	44
4.1 自动化系统概述及设计要求	44
4.1.1 自动化系统概述	44
4.1.2 自动化系统设计要求	45
4.2 托盘运输系统自动化系统功能	45
4.2.1 系统构成	45
4.2.2 技术特点	46
4.3 提升装置自动化控制功能	48
4.3.1 重载提升装置自动化控制功能	48
4.3.2 轻载提升装置自动化控制功能	55
4.4 本章小结	59
第 5 章 提升装置使用效果分析	59
5.1 托盘运输系统使用效果	60
5.2 提升装置使用效果分析	61
5.2.1 重载提升装置使用效果分析	61
5.2.1 轻载提升装置使用效果分析	62
5.3 本章小结	64
结 论	65
参考文献	67
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	71

目 录

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限	72
致 谢	73
个人简历	74

第 1 章 绪 论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

1.1.1 课题背景

为了适应北京作为国家首都、国际城市、文化名城和宜居城市的功能定位，同时促进我国钢铁企业布局调整和产业结构优化升级，经国务院批准，首都钢铁集团启动了涉钢产业整体搬迁的伟大工程，并于 2011 年初实现钢铁主流程的全线停产。

曹妃甸，渤海湾沿岸的一座无名小岛，因为首钢京唐钢铁公司的建设而成为举世瞩目的焦点。作为国家“十一五”规划中最大的单体工业项目，首钢京唐钢铁基地共分三期进行建设。其中，一期工程总投资即达到 677 亿元，形成年产铁 898 万吨、钢 970 万吨、材 913 万吨的生产能力。其中，成品钢材全部定位为高端热轧和冷轧板带体系。

面对如此巨大的钢卷运输量和多厂多库之间的频繁倒运，特别是在建设过程中还要兼顾由于分期建设带来的预留和未来衔接的问题，这在世界范围内尚属首例。而钢铁企业内部的物流运输对动态有序、紧凑化和连续化等方面提出了更高的要求。综合国内外钢铁流程发展趋势，物流运输已经由工序之间、车间之间的运输方式向以跨车间跨工序的“在线”不落地的运输方式进行转变，通过选择合适的运输方式、途径和速度，来获得最短的物流周期和“最小运输功”，通过选择最短的路径来实现物流的简便快捷运行^[1]。而至关重要的正是如何选择运输方式。

传统的钢卷运输方式有火车运输、汽车运输、过跨车运输、链式输送机运输和步进梁式运输。其各自特点如下：

（1） 火车运输。火车运输的最大特点是单次的运输量大，运输距离较长，装卸需要天车辅助，不能直接受卷。

（2） 汽车运输。汽车运输的最大特点是灵活，利用厂区道路便捷连接各工序车间，完成物流运输要求。但汽车运输需要配备专用车辆和驾驶人员，装卸需要天车辅助，而且其维修保养、运营以及人员费用等成本较高，同时受到运输距离、运输量、车辆配备等影响可能无法满足快节奏生产的要求。

（3） 过跨车运输。过跨车运输运行速度慢、运输距离短、单次运输量受车体限制不宜过大。

（4） 链式输送机运输。链式输送机一般是指钢卷放置在鞍座上通过运输链

条进行输送，此方式整体运输距离长，但是受链条自身结构原因，单根链条的运输距离有限，因此需要使用步进梁来完成链条之间和转向的衔接，而步进机构复杂，转向节奏慢，可能对生产节奏产生影响。

(5) 步进梁式运输。步进梁式运输的特点是步进梁每次移动的距离都是固定步距，同时由于钢卷转向结构复杂，因此步进梁式运输适用于运输距离较短，生产节奏较慢的环境，此外，步进梁式运输结构还需要分段配备相当规模的液压站，再加之其设备本身重量较大，因此投资和运营成本较高。

针对传统运输方式存在的不足，近几年，随着技术的发展创新，出现了一种新的运输方式—托盘来解决各工序间的物流运输问题。托盘运输方式与传统运输方式相比具有以下优点：

(1) 减少厂房占地。传统运输方式需要增加过渡跨或周转跨来进行缓冲以解决后部工序的上料问题，而采用托盘运输方式后，钢卷可以直接从上道工序下料通过托盘运送至下道工序，实现前后工序能力的匹配，从而取消缓冲环节带来的厂房占地问题。

(2) 简化上下料工序，减少钢卷倒运次数。采用传统运输方式时，工序间的上下料衔接主要采用步进梁式机械结构和天车辅助吊运，不仅需要配备相当规模的液压站，而且天车作业率较高，多次吊运也容易损坏钢卷卷型和表面质量；而采用托盘运输方式则可以通过专用的“C”型小车直接从辊道上取料或通过辊道实现直接上料，极大地减少了钢卷的倒运次数。

(3) 减少天车数量和运行成本。传统运输方式中天车的作业率较高，一般成品库或周转跨需要配备 3~4 台天车，同时受吊运位置的影响，天车运输距离较长，天车间可能产生交叉作业，而采用托盘运输方式后，由于托盘辊道直接在卷取区受卷，天车在整个运输过程不需要辅助，因此仅需考虑设备检修和事故状态处理而配备 2 台天车即可满足要求，而且天车运输距离短，基本无交叉作业。

(4) 提高自动化控制水平。传统运输方式受工序间天车倒运的限制，主要由人工调度完成，而采用托盘运输方式后，基本不需要天车辅助吊运，钢卷在整个运输过程中无落地点，无需人工干预，因此为钢卷运输全自动化操作提供的必备条件。此外，在采用预设程序实现正常生产中的自动化控制的同时，通过对钢卷的全程跟踪和对各工序的实时监控，动态调控钢卷在运输途中的局部存储，实现对上下游工序的缓冲。

(5) 降低投资。传统运输方式本身在设备投资上就有所不同，但与托盘运输方式相比，在节省厂房占地、减少天车和操作人员数量、降低工程总投资和运行成本等方面，托盘运输方式具有明显优势。

因此，相较于传统运输方式，采用托盘式钢卷运输系统在减少占地、降低投资和运营成本、提高自动化控制水平等方面的优点体现得尤为明显。

三种钢卷运输方式的性能对比如表 1-1 所示。

表 1-1 三种钢卷运输方式性能对比表

	链式运输	步进式运输	托盘式运输
动作周期	较慢 (交叉时>100 秒)	较慢 (交叉时>100 秒)	较快 (交叉时<60 秒)
交叉及转向	困难	困难	容易
钢卷质量	较好	不好	好
自动控制	困难	简单	简单
分期衔接性	较难	困难	简单
设备基础面	深 (约-6000mm)	深 (约-6000mm)	浅 (约-700~-3000mm)
设备基础坑	有基础坑 通行不便	有基础坑 通行不便	无基础坑 通行方便
与外部交叉	较复杂	复杂	简单
液压系统	较大	庞大	较小
设备重量	轻	重	轻
设备结构及运行维护	复杂	复杂	简单
设备投资	较大	大	小
设备运营成本	较高	高	低
可靠性	一般	好	好

托盘式运输系统目前在世界上已有应用的是一种上下双层结构，其中上层是用于运输重载托盘的辊道，下层是用于运输轻载托盘的辊道。双层式托盘运输系统相比于传统式钢卷运输方式，不仅在满足生产节奏、保证系统可靠性、提高自动化控制水平等方面优势明显，而且还可以降低工程投资和运行成本，已成为传

统运输方式的替代技术。但双层结构也有其致命的缺陷，那就是由于上层机械结构的限制，导致下层设备的安装、检修极为不便。尽管经过不断改进，上层结构设计成为多模块可拆卸结构，方便吊装，但整个双层结构都位于较深的设备基础坑内，人员操作空间狭小，维护不便，而且基础处理费用较高，工程投资加大，特别是对于地基条件不好的滩涂地带，这种缺陷尤为明显^[2]。

因此，首钢国际工程公司在原双层结构的基础上设计开发了另一种结构形式——双排托盘运输系统。该系统将上下结构改为平行结构，即平行的运输线一侧为运送重载托盘的辊道，另一侧为送空托盘返回至待机位的轻载辊道。此两种系统性能对比见表 1-2^[3]。

表 1-2 双排式与双层式托盘运输系统性能表

	双排运输系统	双层运输系统
设备重量	小	大
车间占地	少	多
基础深度	浅	深
安装	简单	上层辊道简单 下层辊道复杂
检修	简单	复杂
维护	容易	困难
工序衔接	简单	复杂
工程投资	较少	较多

双排式托盘运输系统是在双层式托盘运输系统基础上创新发展而来的一项技术，相比于双层式托盘运输系统，它的创新点主要有：

（1）从冶金流程工程学理论上，双排式运输系统更加符合物质流在运输流程网络中对时间和能量消耗的动态有序、高效优化的要求；

（2）从生产工艺及物流运输要求上，双排式运输系统在承载了双层式运输系统中采用托盘和辊道运送钢卷的优点的同时，通过并排布置重载和轻载两种辊道来减少设备基础深度和设备结构重量，在此基础上通过设置改善钢卷头尾塔形的自动修正机构和用于产品取样与表面检查的钢卷检查站，实现钢卷的不间断运输和在线完成检测修正，即满足了生产工艺的要求，车间也更加整洁美观；

(3) 从设备结构上, 双排式运输系统由于采用了单层结构, 重载与轻载运输互不干涉, 因此其横移机构和提升机构相较于上下双层结构运输时设备结构更加简单, 动作控制更加方便。通过自主创新、优化设计的托盘本体结构强度高、免维护, 更加适宜热轧钢卷高温重载运输要求;

(4) 从电气和自动化控制要求上, 双排式运输系统采用全新控制理念, 保证每个钢卷从卷取区到存放区再到后序加工区的全程跟踪, 而且由于轻载和重载提升机构布置在不同的运输线上, 控制简单可靠, 其他关键设备和工序, 如回转装置、称重装置、打捆喷号及自动塔形修正装置等能够自动连锁, 从而更加有利于实现整个运输过程的全自动化控制; 电气上采用变频控制技术, 保证了整个运输系统的可靠性;

(5) 从生产及实际应用上, 双排式运输系统安装调试简单、检修维护方便、生产运行成本低, 车间占地小, 特别是在对钢卷表面质量要求更高的冷轧和有色金属轧制领域, 托盘运输的不落地、免吊运可以更有效地保护成品钢卷, 减少工艺事故外损耗, 提高产品竞争力^[4]。

首钢京唐钢铁公司最终选择了由首钢国际工程公司负责研发设计并成套供货的双排式托盘运输系统来完成整个厂区的钢卷物流运输, 成为世界首创。

在热轧带钢生产线上, 轧制后的带钢由位于地下 4 米深处的卷取机卷成钢卷, 再通过运卷小车运送到托盘上, 而双排式托盘运输系统为了减少地下工程量, 一般是布置在地面之上, 由此在运输过程中产生了高差。此外, 在通往其他工序的运输过程中受到地形变化或者道路、桥架等影响, 也会产生高差。为了保证托盘运输系统能够适应各种外部条件, 需要设计研发一种提升机构来解决托盘的升降问题。

1.1.2 课题研究的目的和意义

自 19 世纪中叶现代炼钢技术问世之后, 钢铁一直是各国国民经济和社会发展的重要基础材料, 不仅国民经济各个部门都离不开它, 甚至一度成为国家国力的重要标志。2011 年, 全球粗钢产量突破十五亿吨大关, 可以说, 当今的世界还是钢铁的世界。钢铁的生产水平是衡量一个国家现代化水平的重要指标。经过二十一世纪初的十年迅猛发展, 我国的钢铁产量已占到世界总产量的一半, 连续 17 年保持世界第一, 但生产技术水平与世界先进水平还有不小的差距。我国已大力开展对钢铁制造流程系统的优化, 通过积极推进最有效技术为动力, 不断使钢铁制造流程从间歇—停顿—长流程向紧凑化—准连续化—短流程方向发展, 从而提高市场竞争力, 又有助于实现环境优化和可持续发展^[5]。

对于钢卷的物流运输来说, 国内绝大部分企业采用的仍是天车、汽车和步进梁、

链式输送机等传统运输方式，不仅工作效率低，运输成本高，而且自动化控制水平低，需要投入更多的人力资源。首钢国际工程公司设计研发的双排式托盘运输系统具有结构重量轻、基础浅、投资及运营成本低、自动化控制水平高等特点，是钢卷运输系统的一项创新技术，具有广阔的应用前景和发展空间。而如果要提高该系统对不同地形和外部条件的适应性，增强其市场竞争力，就必须设计出一种托盘提升装置来解决运输过程中的场地地形或工艺要求的高度变化问题。

1.2 国内外研究现状

提升装置是一种通过改变势能进行运输的机械设备，广泛应用于矿山、冶金、化工、农业、建筑、航天等各个领域。提升装置的分类方式有很多种，主要分类形式如下：

提升装置按照提升原理一般可以分为摩擦式提升机和缠绕式提升机。其中，缠绕式提升机可分为单筒和双筒两种结构型式，而提升机的产品系列划分主要是依据滚筒的直径大小，目前应用较为广泛的是直径小于 2 米的提升机^[6]。

此外，提升装置的分类方法还有按照结构形式分为井架式提升机和龙门架式提升机；按照有无导轨可以分为有轨提升装置和无轨提升装置；按照高度不同可以分为低层型，中层型和高层型；按照驱动方式的不同可以分为液压驱动、电力驱动和机械驱动等。

1.2.1 国外研究现状

在十八世纪末，欧洲工业革命开始蓬勃发展，第一台由蒸汽机推动的采用木质卷筒的缠绕式提升机出现在了德国，随后，更加坚固耐用的钢质卷筒提升机在十九世纪初被发明并得到应用。世界上第一台单钢丝绳摩擦式提升机是在 1977 年诞生于德国，进入二十世纪后，同样在德国诞生了第一台电动提升机，随着电力的逐步普及，蒸汽提升机逐步淡出历史舞台；第一台多绳摩擦式提升机是在 1938 年由瑞典人发明的；而单绳缠绕式提升机则是在 1957 年出现。在第二次世界大战之后，世界各国都致力于经济重建，随着各个行业的复苏和发展，提升机构得到了更加广泛的使用。20 世纪 80 年代初，超过 4000 台套的提升装置在世界范围内应用，美、日、欧国家占比最多。提升装置虽然起始于美国和德国，但在应用数量上日本居多，除了德国、美国和日本外，许多西欧国家在研究提升装置方面也取得了长足进步，通过不断采用新技术、新工艺，诸如新型制动器、液压站、钢丝绳等硬件系统和直流拖动、交流变频技术、可控硅技术、计算机应用等软件系统，提升装置的设备能力、自控化水平和安全可靠性得到了很大的发展^[7,8]。现在箕斗式提升装置的有效

载重量已超过 50 吨，提升速度已达 25 米/秒，提升功率达 10000 千瓦以上，多绳提升机的绳数已超过 10 根，提升高度超过 3000 米^[9]。而用于冶金行业钢卷运输的提升装置也是在 80 年代末出现的，主要是美国和德国等几家工程设计公司研发并运用于冶金领域。

随着科学技术的发展，世界主要工业国家已不在将大型化作为发展方向，而是着眼于开发性能可靠、技术先进的新产品。在提升装置方面，不断推出具有适应各类工况的特殊外形的设备，其性能更加可靠，自动化控制技术更加先进，在提高提升装置运行速度的同时，追求更高的定位精度，并对产品生产提出更加专业化、规模化的要求，以期保证产品质量和降低成本。

关于提升机构的控制，随着计算机技术的不断进步，国外已发展到了相当成熟的阶段。计算机系统运行速度快，处理能力强，具有自学习自诊断功能，可以简单精确地实现提升过程的控制与监测。提升机的控制从本质上讲是对位置和速度的控制。通过计算机控制提升过程，其位置控制精度可以达到 $\pm 2\text{cm}$ ，不仅可以实现无爬升阶段提升，而且通过采集各路传感器信号实现实时监测、处理和控制，大大提高了可靠性和安全性^[10]。

1.2.2 国内研究现状

公元前 1100 年，古人发明了辘轳来提升重物，现代提升机由此演变而来。由于我国封建社会时期较长，现代工业的发展极其缓慢。

直到 1949 年新中国成立后，随着社会主义建设的快速发展，我国的机械制造业也取得了长足的进步。抚顺重型机械厂在 1953 年制造出了我国第一台单绳缠绕式提升机；1958 年洛阳矿山机械厂通过仿制和改进苏联产品自行制造出了我国第一台多绳摩擦式提升机，随后，在 1971 年，以 XKT 型提升机为原型基础设计并制造了 JK 系列单绳缠绕式提升机，洛阳矿山机械厂设计改良的该系列提升机不仅采用了新的工艺技术和结构形式，使得提升机的提升能力平均提高了 25%，而且装置自身的重量还减轻了 10%，成为当时标准的系列提升产品对外销售^[11]。纵观我国国产提升机的发展历史，其主要经历了仿制、改进和自行设计三个阶段。到目前为止，我国已经能够自行设计并制造绝大部分型号的单绳缠绕式和摩擦式提升机构。

多年来，我国逐步建立起了一整套设计和制造体系，使得单绳缠绕式提升机的生产日趋成熟，并具有较强的竞争力。但随着大型矿井和深度井筒的不断发展，其能力已略显不足，多绳摩擦式提升机的设计开发与集成制造迫在眉睫。

在提升机的设计方面，我国的技术也在不断发展进步。中国矿业大学葛世荣教

授在上世纪 90 年代率先在缠绕式提升机滚筒强度设计中提出了可靠性设计理念,其成果得到广泛应用^[12]。通过多年研究,华中科技大学刁柏青等人提出了提升装置用钢丝绳安全系数可靠性设计的理论方法^[13]。辽宁工程技术大学郭宏等人在分析缠绕式提升机滚筒结构时通过运用 ANSYS 软件模拟出了滚筒支轮在不同位置 and 不同厚度的条件下,滚筒结构发生的不同应力和应变分布,从而获得结构优化设计的理论依据^[14]。

此外,湖南益阳的郭燕华在徐绍军等提出的筒壳强度理论计算方法的基础上运用 NISA 有限元分析方法,对多绳摩擦提升机轮壳结构进行模拟仿真设计,有效改善了轮壳的结构和受力情况,使提升能力得到了极大地提高^[15]。黑龙江科技学院何凤梅在分析木衬对缠绕式提升机滚筒强度的影响中运用有限元分析软件建立模型,通过计算模拟出了木衬在滚筒变形时对滚筒本身和筒壁的应力和应变的影响,提出了一种带木衬提升装置滚筒的设计方法^[16]。

经过大量的仿制、改制和自行设计,目前我国已经建立起了多种类型的提升机的设计、制造和自动化控制的完整体系,通过广泛的研究与应用,目前国产提升机具有重量轻、体积小、能力大、性能可靠、使用安全等优势,其技术装备处于世界领先水平。

在冶金领域,钢卷运输除了采用传统的吊车作为起升装置外,热镀锌行业最早出现了一种钢卷提升装置,其结构属于井架式提升机。世界上首次在热轧带钢生产线上采用此类解决方案的项目是 2007 年 2 月投产的马鞍山钢铁集团 500 万吨新区 2250mm 热轧项目。但由于该项目当时采用的是双层式托盘运输方式,因此提升装置结构与双排式运输方式有较大不同。

在控制方面,我国 90%以上的矿井提升机采用的是 1000KW 以下的交流异步电机传动,继电器和接触器是其控制装置的主要组成部分,对电机的调速主要是通过串、切转子回路中的附加电阻来完成^[17]。这种控制方式在启动时会对电机内部结构造成较大冲击,导致电能损耗大,电机效率低,而且此方式无法实现无极调速,调速范围较小,控制精度较低。对于直流电机传动系统来说,触点式继电器构成了其逻辑控制的主要部分,但是这种方式受继电器设备本身的制约,可靠性较差,日常维护复杂,应用较少^[18]。中国矿业大学、煤炭科学研究总院等科学院校和研究机构也在提升机传动控制方面进行了不断探索^[19]。随着控制技术的发展,一种可编辑逻辑控制器 PLC 控制装置应运而生,它采用可编程的存储器,通过预编程序设计来控制提升装置的各种动作,如自动、手动、低速运转等,控制和操作简单,而且能够满足高精度和安全性的要求;同时 PLC 可以通过增减专业电子模块对系统进行扩展,适应不同提升机的动力制动或低频制动的控制要求,而且调试方便,

日常维护少，成为工业控制领域必不可少的重要组成部分^[20]。

1.3 本课题主要研究内容

本课题的主要研究内容有：

(1) 通过分析钢卷托盘运输系统的组成、工作原理和对国内外多种提升机构的结构形式、起升方式和传动方式的对比分析，研究提升机构的技术条件、工况要求和不同工况下托盘提升装置的设计方案；

(2) 针对不同工况下的重载提升装置和轻载提升装置的设计方案，对重载液压系统和轻载提升装置钢丝绳、卷筒、轴承、提升电机及减速机速的设计选型进行详细计算。

(3) 针对两种提升装置的设计方案，根据二维图纸运用 SolidWorks 软件建立装置的三维模型，运用 Simulation 分析软件，采取创建模型、设定约束、施加载荷、划分网格和计算等手段对重载提升装置的关键部件—提升托架结构进行有限元分析，并对分析中出现的应力集中和安全系数低等问题采用设计优化理论寻找改善措施，对优化后的模型进行分析对比，研究出一种结构稳定、经济可靠的方案。

(4) 在研究 PLC 控制技术和设计要求的基础上，开展两种提升装置的自动化控制流程图的设计。

(5) 对提升装置的实际使用情况进行分析，对生产中出现的问题进行研究，并寻找解决方案。

本课题从液压、机械、有限元分析、设计优化和自动化设计五个方面对托盘提升装置的机电液一体化设计的基本原则和方法进行研究，特别是在结构设计和优化方面探索一种有限元分析优化的思路方法，并将最终设计产品应用于实践，通过实际使用情况来进一步研究设计中的不足和改进方法，为今后研发其他工况或类型的提升机构提供借鉴和参考。

第 2 章 提升装置系统设计与实现

本章通过分析钢卷托盘运输系统工艺设计要求和关键设备参数，确定了两种提升装置的结构形式和工作原理，并通过对重载提升装置的液压系统和轻载提升装置主要设备进行选型计算完成了提升装置的设计方案。

2.1 钢卷托盘运输系统

2.1.1 钢卷托盘运输系统

双排式钢卷托盘运输系统采用并排布置的钢卷托盘运输理念，可以实现全线自动化控制，中间过程不需要人工干预，减少了操作人员数量，也减少了设备占地。钢卷经地下卷取机卷曲后通过卸卷小车放到承载托盘上，然后通过回转台和提升机灵活实现钢卷的转向和运输高度的变化，通过运输辊道运送到钢卷检查站、成品库、周转库和平整分卷、冷轧等后部加工工序的原料库，钢卷在整个运输过程中不需要吊装倒运，减少了钢卷运输过程中可能带来的表面划伤；而且通过自动化系统将卸卷小车、运输辊道、托盘等设备动态有序的控制组合，满足高生产节奏的要求，同时还可以根据各工序的实际情况通过预设程序控制来实现连续运输过程中的局部动态存储功能，即在不影响上游工序正常生产的情况下，为下游工序提供缓冲时间，具有自动化、智能化的特点。双排式钢卷托盘运输系统相较于目前其他运输方式，具有运输功最小、运输周期最短的显著优势，成为该领域未来技术发展的方向。

下面以首钢京唐热轧厂某车间为例简要介绍一下双排式托盘运输系统工艺流程，其设备布置如图 2-1 所示，实景见图 2-2。

托盘运输系统工艺流程简述如下：

热轧带钢经过地下卷曲机卷取完毕，卸卷小车按设定程序上升压住带钢尾部，液压缸升起将钢卷托起，同时，卷取机内卷筒收缩，外支撑打开。卸卷小车横移装置把钢卷从卷曲工位移至打捆工位，经机旁自动打捆机打捆完毕后，在由运卷小车将钢卷托放到重载托盘上。重载托盘沿运输辊道将钢卷输送至后部工序。重载提升装置将钢卷连同托盘从地下卷曲坑内提升至车间地坪之上。需要进行检查取样的钢卷通过移出装置离开运输线，由 C 型小车送入检查线。检查工序首先利用开卷辊将钢卷打开并送入液压剪将头部切除，然后按要求切取试样和检查钢板上下表面质量缺陷。切取的试样通过导板滑入移出收集装置，检查钢板则通过矫直辊将一部分钢板矫平送入检查辊道进行正反两面检查。检查合格后的钢卷再通

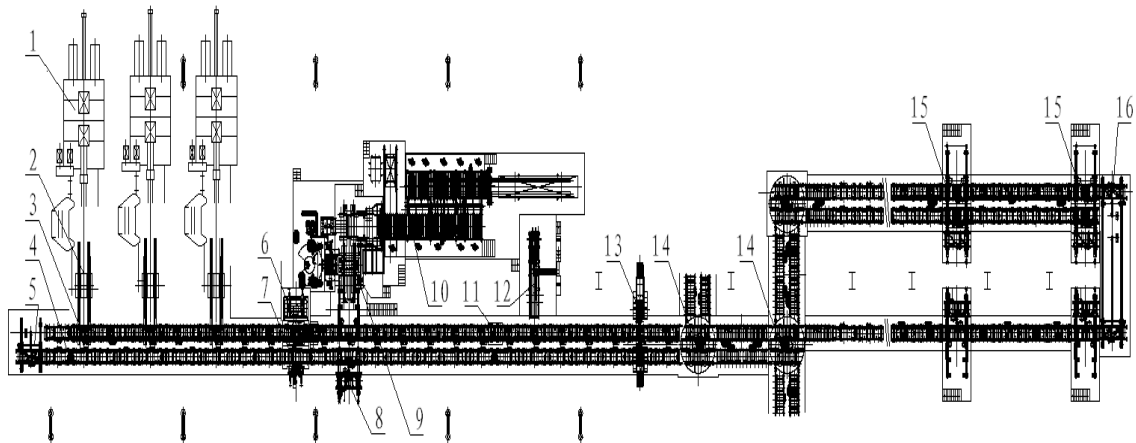


图 2-1 双排式托盘运输系统布置图

1、地下卷曲机；2、卸卷小车；3、重载运输线；4、轻载运输线；5、横移装置；6、重载提升装置；7、轻载提升装置；8、重载移出装置；9、取样站；10、检查站；11、称重站；12、喷印机；13、塔形修整装置；14、回转台；15、卸卷站；16、空盘移送装置



图 2-2 双排式托盘运输系统实景图

过移出装置返回运输线。然后，钢卷进行称重和喷印工序，再通过扫描仪自动判断钢卷塔形是否超标并对超标钢卷进行修复。合格后的钢卷按照预先程序设定通过回转台送入中间库、热轧成品库、后部处理区或冷轧车间等。通过回转台的合理布置实现钢卷的多通道多目的地运输。到达目的地后，经过卸卷站将钢卷卸下，

空托盘通过移送装置进入轻载运输线并再次经过回转台、轻载提升机和横移装置最终返回卷曲区等待接送下一个钢卷。

2.1.2 托盘运输系统设备构成

(1) 卷取机

功能：将热轧带钢卷曲成钢卷。

结构：全液压固定式卷取机，由助卷辊、卷辊和卷筒组成。助卷辊带液压缓冲；卷辊彼此分开，具有独立的枢轴和回转驱动装置；卷筒可以通过液压控制来进行膨胀和收缩。

技术参数：

卷取带钢厚度：	1.2~12.7 mm
卷取带钢宽度：	700~1450 mm
卷取带钢温度：	850~200℃
卷取速度：	Max.22 m/s
钢卷最大外径：	Φ2100 mm
钢卷最小外径：	Φ1050 mm
助卷辊最大开口度：	Φ2400 mm
钢卷最大重量：	28 t

(2) 卸卷小车

功能：将钢卷从卷筒卸下运到托盘运输线上。

结构：液压升降、液压行走结构。架体为焊接件

技术参数：

钢卷最大重量：	28t
升降缸：	Φ250/Φ180×300 mm
升降速度：	140mm/s
行走液压缸：	Φ140/Φ100×6000 mm
行走速度：	350 mm/s
工作压力：	16 MPa

(3) 重载运输线

功能：根据工序要求，把钢卷托盘送到不同目的地。

结构：辊道架带有支座，辊子安装在滚动轴承上，由带制动功能的齿轮电机传动带有链轮的辊子。

技术参数：

负荷:	33000 kg
辊道速度:	0.5 m/s
功率:	5.8 kW
辊轮直径:	200 mm

(4) 轻载运输线

功能: 根据工序要求, 把空托盘送到卷取机前受卷位置。

结构: 辊道架带有支座, 辊子安装在滚动轴承上, 由带制动功能的齿轮电机传动带有链轮的辊子。

技术参数:

负荷:	3000 kg
传输速度:	0.5 m/s
功率:	1.2 kW
辊轮直径:	110 mm

(5) 横移装置

功能: 该装置将空托盘缓存线上的托盘移到卷取机前的重载运输线上。

结构: 车架为型钢和钢板焊接结构, 通过托缆供电的电机直接驱动主动轴带动四个车轮在钢轨上运动。

技术参数:

运输距离:	2000 mm
运输负荷:	轻载托盘辊道及空托盘
传动速度:	0.5 m/s
横移电机功率:	3.5 kW

(6) 重载提升装置

功能: 把钢卷从地下提升到地面, 并把托盘送到下游辊道。

结构: 液压提升型式, 提升台架和导向架为刚性很好的焊接结构, 导向架上带有导轨对提升台架进行导向, 并固定提升缸。

技术参数:

液压缸:	$\Phi 220/160 \times 3270 \text{ mm}$
提升行程:	2500 mm
提升速度:	0.1 m/s

(7) 轻载提升机构

功能: 把钢卷从轧机地坪标高的空载辊道上降到地下标高处, 并运送到返回

辊道上。

结构：电动卷扬型式，提升台架和导向架均为刚性很好的焊接结构,导向架上带有导轨对提升台架进行导向。

技术参数：

提升行程：	2500 mm
提升速度：	0.4 m/s
提升传动：	电动卷扬

(8) 重载移出装置

功能：将钢卷横移送到检查线,同时第三个辊道段填补空位,钢卷检查完并返回到托盘后,再横移回运输线。

结构：车架为型钢和钢板焊接结构，通过托缆供电的电机直接驱动主动轴带动四个车轮在钢轨上运动。

技术参数：

传动距离：	2000 mm
功率：	5.5 kW
传输速度：	0.5 m/s

(9) 检查站

功能：液压剪切除带钢头部，并完成取样和检查样板的剪切。在带翻板装置的辊道上人工完成带钢表面检查。

结构：剪机由一个固定的下剪刀和一个液压移动的上剪刀构成，剪架及附属结构为焊接结构。

技术参数：

剪切钢卷厚度：	max. 12.7 mm
切头/试样长度：	max. 500 mm
剪切时间：	6s
检查带钢厚度：	max.8 mm
传动功率：	2.2 kW
翻板角度：	90°

(10) 称重站

功能：称量钢卷重量。

结构：辊道直载式电子称，称重传感器安装在辊道组框架下方，托盘停稳后称出整体重量。

技术参数:	
称重类型:	压力传感器
称重范围:	500~35000 kg
静载荷:	4000 kg
显示精度:	10 kg

(11) 喷印站

功能: 对托盘上钢卷的侧面和外表面喷印标记

结构: 喷号机为机械手型, 采用气动系统控制设备的动作

技术参数:

钢卷温度:	100~850℃
周期:	45 秒
字符类型:	符合 ASCII 码的阿拉伯数字

(12) 回转台

功能: 用于改变重载托盘和空托盘的传输方向。

结构: 回转台底座为焊接结构, 带回转支承轴承, 通过带制动功能的齿轮电机和齿轮传动旋转

技术参数:

旋转角度:	90°
功率:	5.8 kW
转速:	1 rpm

(13) 空盘移送装置

功能: 该装置位于钢卷库, 从两条重载辊道上接收一个卸卷后的空托盘, 并把它移到返回卷取区的空托盘输送线。

结构: 车架为型钢和钢板焊接结构, 通过托缆供电的电机直接驱动主动轴带动四个车轮在钢轨上运动。

技术参数:

运输距离:	2000/10000 mm
负荷:	轻载托盘辊道及空托盘
横移电机功率:	3 kW
传动速度:	0.5 m/s

2.2 提升装置结构

根据提升对象重量的不同，钢卷运输用托盘提升装置分为重载和轻载两种。

2.2.1 重载提升装置

重载提升装置用于提升带有钢卷的托盘，由于起升总重量在 40 吨以上，提升周期小于 20 秒，同时要求提升平稳，运行可靠。因此，设计采用框架式液压驱动的提升结构，其总体结构如图 2-3 所示。

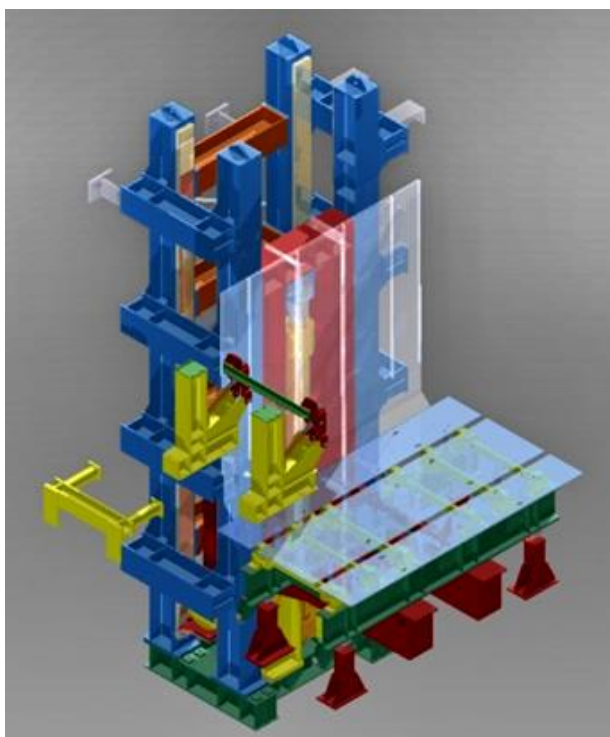


图 2-3 重载提升装置模型

其工作原理是：装有钢卷的重载托盘经输送辊道运送至重载提升装置受卷工位前，重载提升装置上的辊道同步动作将重载托盘运送到提升装置提升托架上。通过位置传感器检测到重载托盘到位信号后发出指令提升液压缸动作，通过提升框架将托盘提升至高位。锁定机构得到高位检测信号后完成锁定动作并反馈给提升液压系统，然后提升液压缸下降至卸载位置。待液压系统泄压提升托架停稳后，提升托架上的辊道与后部输送辊道同步动作，将钢卷托盘运送出提升托架。待光电开关检测到托盘离开提升托架后，提升液压系统重新启动，液压缸先上升至高处锁定位，然后锁定机构得到位置信号打开锁定，提升托架在液压缸带动下返回初始位置，等待下一个工作周期。

2.2.2 轻载提升装置

轻载提升装置用于将不带钢卷的空托盘输送至轻载运输线。由于空托盘的起升重量约 3 吨，提升周期小于 15 秒，同时要求提升平稳，运行可靠。因此，设计采用龙门架式电动提升结构，其总体结构如图 2-4 所示。

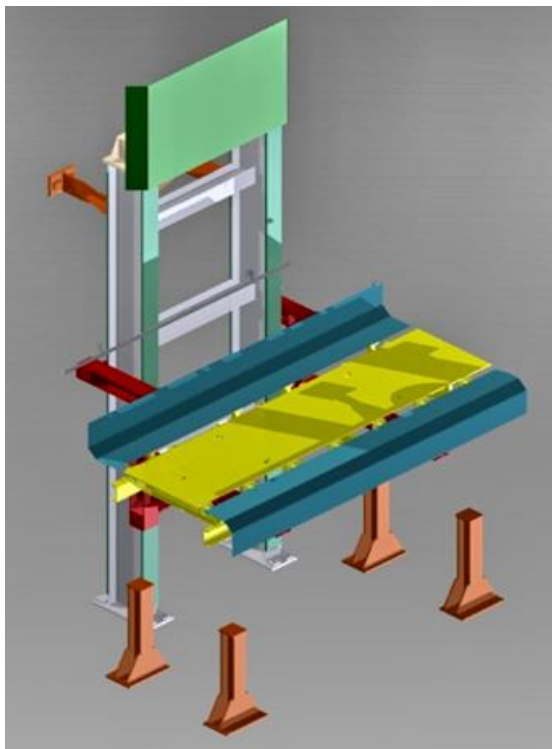


图 2-4 轻载提升装置模型

其工作原理是：返回的空托盘经辊道运送至轻载提升装置前，轻载提升装置上的辊道同步动作将空托盘运送到提升装置上，位置传感器检测到到位信号后提升电机启动，由线性传感器控制将空托盘下降至低位后电机停止，提升装置上的辊道与后部辊道同步动作，将空托盘运送出提升装置。待托盘离开后，提升装置提升返回初始位置，等待下一个工作周期。

2.3 重载提升装置液压系统设计

液压系统是重载提升装置的重要组成部分，作为动力源泉，液压系统保障着重载提升装置的工作性能和可靠性；同时，液压系统还应满足系统简单高效、节省投资、方便维护等条件，实现功能性与实用性的和谐统一^[21]。

液压系统设计的一般流程如图 2-5 所示^[22]。

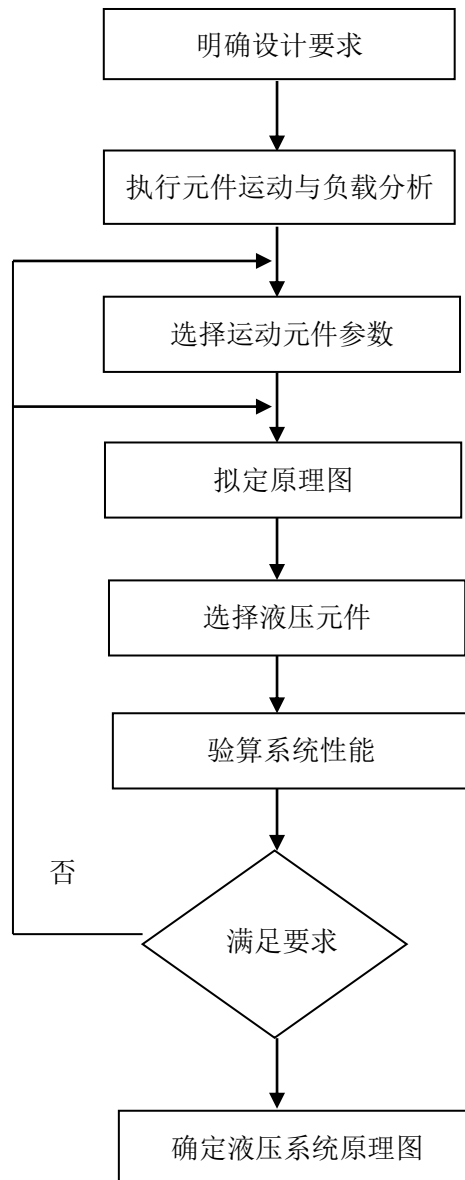


图 2-5 液压系统设计的一般流程

2.3.1 基本条件

钢卷最大重量 28t；重载提升装置的总提升重量 $m=40\text{t}$ ；静摩擦系数 $f_s=0.2$ ；动摩擦系数 $f_d=0.1$ ；提升行程 $H=2.5\text{m}$ ；提升速度 $V=0.1\text{m/s}$ 。

2.3.2 受力分析

重载提升阶段负载分析^[23]：

$$\text{静摩擦力： } F_{fs} = f_s F_N = 0.2 \times 40 \times 10^3 \times 9.8 = 7.84 \times 10^4 \text{ N}$$

$$\text{动摩擦力： } F_{fd} = f_d F_N = 0.1 \times 40 \times 10^3 \times 9.8 = 3.92 \times 10^4 \text{ N}$$

$$\text{惯性力 } F_a = m \frac{\nabla v}{\nabla t} = \frac{28000 \times 200 \times 10^{-3}}{1.5} N = 3733 N$$

下降阶段负载分析:

$$\text{静摩擦力: } F_{fs} = f_s F_N = 0.2 \times 40 \times 10^3 \times 9.8 = 7.84 \times 10^4 N$$

$$\text{动摩擦力: } F_{fd} = f_d F_N = 0.0 \times 40 \times 10^3 \times 9.8 = 3.92 \times 10^4 N$$

$$\text{惯性力: } F_a = m \frac{\nabla v}{\nabla t} = \frac{28000 \times 200 \times 10^{-3}}{1.5} N = 3733 N$$

式中 F_{fs} ——静摩擦系数;

F_{fd} ——动摩擦系数;

F_N ——提升或下降时压力 (N);

m ——总提升质量 (kg)。

取液压缸机械效率 $\eta_m = 0.9$, 则液压缸在提升和下降各阶段的负载情况见表 2-1。

表 2-1 各阶段负载数值表

	公式	总负载 N
提升阶段启动	$F = (F_{fs} + m \times g) / \eta_m$	392000
提升阶段加速	$F = (F_{fd} + F_a + m \times g) / \eta_m$	352592
提升阶段上升	$F = (F_{fd} + m \times g) / \eta_m$	348444
提升阶段减速	$F = (F_{fd} - F_a + m \times g) / \eta_m$	344297
提升阶段停止	$F = (m \times g) / \eta_m$	304889
下降阶段启动	$F = (m \times g - F_{fs}) / \eta_m$	217778
下降阶段加速	$F = (m \times g - F_{fd} - F_a) / \eta_m$	257186
下降阶段下降	$F = (m \times g - F_{fd}) / \eta_m$	261333
下降阶段减速	$F = (m \times g - F_{fd} + F_a) / \eta_m$	265481
下降阶段停止	$F = (m \times g) / \eta_m$	304889

2.3.3 液压缸选型

根据对提升装置负载的计算和实际工况的分析, 下面将研究确定液压缸的主要参数。

第一步, 确定液压缸工作压力。液压缸工作压力是否合理决定了整个液压系

统是否合理。如果压力选择过低，系统中的液压缸径、管径将偏大，相关元件的尺寸将加大，导致整个液压系统庞大，投资大；如果压力选择过高，将提高泵站和元件的耐压等级，导致系统使用寿命降低，噪音和振动增大^[24]。

根据轧钢机械设计手册中对冶金行业的建议，预选工作压力一般在 14~16MPa，考虑到提升总重量 40t，根据以往工程经验，本设计按 14MPa 计算。

第二步，计算液压缸缸径。以工程中应用广泛的单杆活塞式液压缸为例，需要计算的主要参数为液压缸内径 D 和活塞杆直径 d 。

液压缸内径 D 首先依据工作压力和系统载荷，或者机构运动速度和系统流量通过相关公式来计算得出，然后再根据 GB/T2348-93 液压缸内径及活塞缸外径选取相近的标准值而确定。

根据液压缸在各运行阶段的负载计算结果可知，最大负载出现在提升阶段启动时，即 $F=N$ ，因此，根据公式 (2-1, 2-2)

$$p_1 A_1 = p_2 A_2 + F \quad (2-1)$$

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4}; A_2 = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} \quad (2-2)$$

计算得出 $D=204\text{mm}$ ， $d=129\text{mm}$ 。

查询 GB/T2348-93 液压气动系统及元件缸内径及活塞杆外径标准和机械设计手册，最后选用 $D=220\text{mm}$ ， $d=160\text{mm}$ 。

根据标准直径可得液压缸的有效面积为

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{4} \times 220^2 = 37994 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi}{4} \times (220^2 - 160^2) = 17907 \text{ mm}^2$$

$$A_1 - A_2 = 20087 \text{ mm}^2$$

液压缸行程的确定：

根据起升高度的要求，液压缸的起升行程确定为 $S=2500+20=2520\text{mm}$ ；

根据机械设计手册中 CD250AB 差动重载液压缸样本查得 $L=750\text{mm}$ ；

最终确定液压缸总长度 $L'=S+L=3270\text{mm}$ 。

根据以上分析计算，确定所选液压缸规格尺寸为： $\Phi 220/\Phi 160 \times 3270\text{mm}$ 。

2.3.4 液压系统原理图

根据提升装置的工况要求，液压系统主要由液压站、阀台和执行液压缸三个部分组成。其中液压站内主要有液压泵 2 台（一用一备）、油箱、过滤器、各种控

制阀和检测仪表等；阀台上主要选用的是控制动作的换向阀和控制速度的节流阀；具体原理如图 2-6 所示。

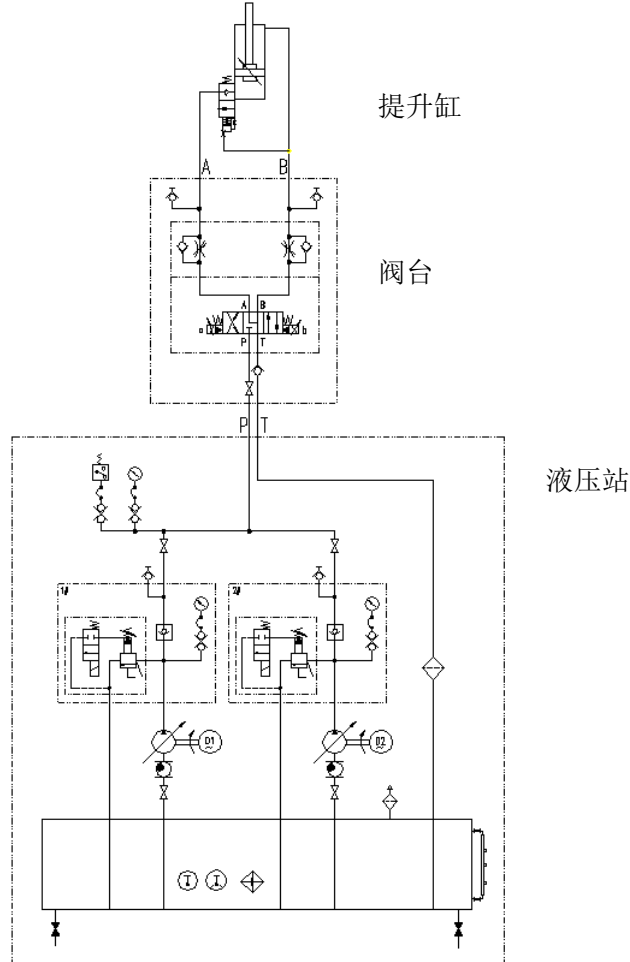


图 2-6 液压系统原理图

2.3.5 液压系统主要参数计算

(1) 系统压力

系统压力公式见公式 (2-3)：

$$P = P_1 + \sum \Delta P_1 \quad (2-3)$$

式中 P_1 ——液压缸提升时工作压力 (MPa)；

$\sum \Delta P_1$ ——提升过程总的压力损失，包括阀和管路的压力损失。

阀的压力损失可查询阀的特性曲线确定。

经查各阀特性曲线可得 $\sum \Delta P_{\text{阀}} = 3 \text{ MPa}$

管路的压力损失应根据管子的规格和长度计算，可先预估 1MPa，待确定管径后校核时计算。

由以上数据计算可得

$$P = 14 + 3 + 1 = 18 \text{ MPa}$$

考虑到实际工作中的损耗和余量，系统压力确定为

$$P_{\text{系统}} = 18 \times 1.1 = 20 \text{ MPa}$$

(2) 液压泵

液压泵流量计算公式见式 (2-4)：

$$Q_{\max} = K Q_{\text{缸}} \quad (2-4)$$

式中 $Q_{\max}$ ——满足系统工作时，泵需要提供的最大流量 (L/min)；

$Q_{\text{缸}}$ ——液压缸最大工作流量， $Q_{\text{缸}} = 228 \text{ L/min}$ ；

K ——系统泄漏系数取 $K = 1.1 \sim 1.3$ ，此系统为单缸简单回路，取 $K = 1.1$ 。

由以上参数可得： $Q_{\max} = 1.1 \times 228 = 251 \text{ L/min}$

按泵的规格选用泵额定排量为 180mL/r 的泵 2 台 (1 台使用，1 台备用)，额定转速 1500r/min 时的额定流量为 $Q_N = 270 \text{ L/min}$

根据额定转速 1500r/min，查得相应泵的容积效率为 0.95，泵的实际输出流量为 $256.7 \text{ L/min} > 251 \text{ L/min}$ ，能够满足使用要求。

(3) 电机

电机功率计算公式如式 (2-5)：

$$P = \psi P_N Q_N / 60 / \eta_p \quad (2-5)$$

式中 ψ ——转换系数，这里取 $\psi = P_{\max} / P_N$ ， $P_{\max} = 20 \text{ MPa}$ ；

η_p ——泵的总效率，取 $\eta_p = 0.85$ 。

计算可得

$$P = 20 \times 270 / 60 / 0.85 = 105.9 \text{ kW}$$

根据标准电机规格选择功率 110 kW，转数 1500r/min 的电机。

(4) 管径计算

冶金行业常规液压系统选用 20 号钢无缝钢管。

由公式 (2-6) 和壁厚验算公式 (2-7)

$$Q = VA = \pi / 4 V d^2 \quad (2-6)$$

$$\delta = P d n / 2 \sigma_p \quad (2-7)$$

式中 Q ——通过管道内的流量 (L/min);

V ——管道内的流速, 取吸油流速取 0.5m/s, 回油流速取 2 m/s, 供油流速取 4m/s;

A ——管道的截面积 (mm^2);

d ——管道的内径 (mm);

p ——管道内的压力 (MPa);

δ ——管道的壁厚 (mm);

σ_p ——抗拉强度 (MPa);

n ——安全系数, $n=6$ 。

经计算可得各管子内径及壁厚, 并按标准规格选用管子。计算和选用结果见表 2-2。

表 2-2 各部分管径及壁厚参数表 (mm)

尺寸	吸油管 S	供油管 P	回油管 T	有杆腔进油 A	无杆腔进油 B
管子内径	104.23	36.9	52.11	36.9	23.82
管子壁厚	1.11	4.9	0.55	4.9	3.17
管子规格	114×4	48×5	60×4	48×5	34×4.5

(5) 油箱容积的计算

油箱容积计算公式见 (2-8)。

$$V = kQ_N \quad (2-8)$$

式中 V ——油箱容积 (L);

k ——安全系数, 常规冶金液压系统选用 $k=7$ 。

计算可得

$$V = 7 \times 270 = 1890 \text{ L}$$

根据标注油箱规格, 确定油箱容积为 2m^3 。

液压系统中的过滤器、各类阀门、油箱加热器等元件的计算、设计和选型在本文中不再详述。

2.4 轻载提升装置结构设计

根据轻载提升装置的实际工况, 兼顾安全性和易维护的原则, 轻载提升装置选用钢丝绳起升方式。该方式具有强度高、自重轻、柔性好、投资低、安全可靠等优

点，是最常用的起升方式^[25]。

下面对轻载提升装置中的钢丝绳、滚筒、轴承、电机和减速机等进行系统设计研究。

2.4.1 钢丝绳的选型

钢丝绳的选型计算步骤为确定最大张力，计算直径并初选，强度验算^[26]。

(1) 确定最大张力

在起升过程中，钢丝绳最大工作静拉力不仅包括起升物体的重量和自身装置的重力（起升高度小于 50 米的钢丝绳自身质量不计），还要考虑滑轮组和承载分支数的影响。

根据设计条件，起升物体主要为空托盘，自身装置主要为带有传动装置的辊道及支架、保护罩等，总起升载荷按 5 吨计算。

滑轮组按使用的目的可分为省力滑轮组和增速滑轮组两类。在提升装置中使用较为普遍的是省力滑轮组。应用这种滑轮组后，当重量一定时，绕入卷筒的绳索分支比不用滑轮组而直接绕入卷筒的绳索分支力要小，但带来的升降速度却比不用滑轮组的速度低。而省力滑轮组又可根据绕入卷筒的绳索分支数分为单联滑轮组和双联滑轮组^[27]。

滑轮组的倍率 a 是用来表征滑轮组减速（或省力）的大小的参数。其计算公式如（2-9）：

$$a = \frac{Z_c}{Z_j} \quad (2-9)$$

式中 Z_c ——滑轮组中承载绳索分支数；

Z_j ——绕入卷筒的绳索分支数。

在本设计中只选用单联滑轮组改变运动方向，因此 $a=1$ ， $i_h=1$ 。

钢丝绳最大张力计算公式如（2-10）：

$$F_{\max} = \frac{Q + G_0}{a i_h \eta_h} \quad (2-10)$$

式中 $Q + G_0$ ——取物装置与起升装置重量之和（N）；

a ——滑轮组的倍率；

i_h ——滑轮组型式的系数；

η_h ——滑轮组的效率，查表 $\eta_h=0.98$ 。

经计算可得：

$$F_{\max} = \frac{5000 \times 9.8}{1 \times 1 \times 0.98} = 50000 \text{ N}$$

(2) 计算钢丝绳直径

钢丝绳直径计算公式如 (2-11):

$$d = C \sqrt{F_{\max}} \quad (2-11)$$

式中 d —— 钢丝绳最小直径 (mm);

C —— 选择系数;

$F_{\max}$ —— 钢丝绳最大静拉力 (N)。

选择系数 C 按 (2-12) 式计算:

$$C = \sqrt{\frac{n}{K \omega \frac{\pi}{4} \sigma_b}} \quad (2-12)$$

式中 n —— 安全系数, 查表选取 $n=6$;

K —— 钢丝绳捻制折减系数, $K=0.82$;

σ_b —— 钢丝的公称抗拉强度, $\sigma_b=1700\text{MPa}$;

ω —— 钢丝绳充满系数, $\omega=0.46$ 。

由上述的公式可求得 $d = 0.109 \sqrt{50000} = 24.4 \text{ mm}$

根据以上结果, 初步选择直径为 26mm, 结构形式为 6×19+FC, 公称抗拉强度 $\sigma_b=1770\text{MPa}$, 最小破断力 $F_0=395\text{KN}$ 的纤维芯钢丝绳。

钢丝绳标记:

26NAT6×19+FC1770ZS GB/T8918

(3) 强度验算

按钢丝绳所在机构工作级别有关的安全系数来选择钢丝绳直径时, 所选择钢丝绳的破断拉力还应满足式 (2-13) [28]:

$$\frac{nF_{\max}}{K} \leq F_0 \quad (2-13)$$

式中 F_0 —— 所选用的钢丝绳最小破断力 (N);

n —— 安全系数, 选取 $n=6$;

K —— 折减系数, 选取 $K=0.88$ 。

$$\frac{4 \times 50}{0.88} = 227 \text{ kN} \leq 395 \text{ kN}$$

由上可知所选钢丝绳性能满足使用要求。

2.4.2 卷筒的选型

(1) 卷筒直径的选择

卷筒直径选择的原则是使钢丝绳缠绕时不要产生过大的弯曲应力以保证其承载能力和使用寿命。其计算公式如 (2-14)：

$$D \geq 20d, D \geq 1200\delta \quad (2-14)$$

式中 d ——钢丝绳直径 (mm)；

δ ——钢丝绳中最粗钢丝直径 (mm)。

(2) 卷筒宽度的选择

卷筒宽度由所需容纳的钢丝绳长度确定，主要由提升高度、试验长度和保留长度三部分构成。同时，卷筒的宽度还应考虑到缠绕型式（单层或多层）、安装位置、设备中心距等因素^[29]。

本方案按单层缠绕设计，计算公式如 (2-15)：

$$B = \left(\frac{H + L_s}{\pi D} + m \right) (d + \varepsilon) + 1.5d \quad (2-15)$$

式中 L_s ——钢丝绳试验长度 (mm)；

m ——摩擦圈，一般取 3 圈；

ε ——钢丝绳线圈间隙，取 $\varepsilon=2\text{mm}$ ；

H ——提升高度 (mm)。

(3) 卷筒厚度的选择

卷筒厚度计算经验公式如 (2-16)、(2-17)：

$$\delta = (0.35 \sim 0.4) \times A_n \times d \quad (2-16)$$

$$A_n = \sum_{i=1}^n \frac{1}{1 + (n - 0.5)\lambda}, \quad \lambda = \frac{E_s F_s}{E \delta (d + \varepsilon)} \quad (2-17)$$

式中 A_n ——钢丝绳缠绕系数；

δ ——筒壳厚度 (mm)；

E ——材料挤压弹性模量 (GPa)。

E_s ——钢丝绳弹性模量 (GPa)；

F_s ——钢丝绳横截面积 (mm^2)；

根据以上计算公式，最终得到卷筒的设计尺寸如下：

卷筒直径 $D=600\text{mm}$ ；卷筒宽度 $B=235\text{mm}$ ；卷筒厚度 $\delta=20\text{mm}$ 。

2.4.3 轴承的选型及校核

轴承是轴组件的重要构件。轴组件的工作性能受其类型、结构、安装精度、润滑冷却的影响很大。常用类型为滚动轴承和滑动轴承，滚动轴承选购维修方便，应用广泛，按滚动体结构，滚动轴承可分为球轴承、圆柱滚子轴承和圆锥滚子轴承。

根据轻载提升机的工作条件，选用 $d=80\text{mm}$ 的两个并排的深沟球轴承，轴承承受径向载荷 $F_r=25\text{kN}$ ，转速 $n=25\text{r/min}$ ，要求寿命 $L_h=12000\text{h}$ 。

(1) 基本额定动载荷的计算如 (2-18)：

$$C = \frac{f_h f_m f_d}{f_n f_T} P = \frac{2.89 \times 1 \times 1}{1.11 \times 1} \times 25 = 65.09 \quad (2-18)$$

式中 C ——基本额定动负荷计算值 (N)；

P ——当量动负荷 (N)；

f_h ——寿命因数；

f_n ——速度因数；

f_m ——力矩载荷因数，力矩载荷较小时 $f_m=1.5$ ，力矩载荷较大时 $f_m=2$ ；

f_d ——冲击载荷因数；

f_T ——温度因数。

(2) 基本额定静载荷的计算见式 (2-19)：

$$C_0 = S_0 P_0 = 1.5 \times 25 = 37.5 \quad (2-19)$$

式中 C_0 ——基本额定静载荷计算值 (N)；

P_0 ——当量静载荷 (N)；

S_0 ——安全因数。

(3) 选定轴承

查表 7-2-53^[30]，轴承 6216-Z 的径向基本额定动载荷 $C_r = 71.5\text{kN}$ ；

径向基本额定静载荷 $C_{or} = 54.2\text{kN}$ ；

因此，6216-Z 型轴承满足使用要求。

2.4.4 电机及减速机的选型

提升装置的启动加速、平稳运行及制动减速都是由牵引电机控制，牵引电动机不仅要频繁的启动、制动、正转、反转，而且负荷变化大，所以牵引电机的性

能直接决定了提升装置的性能。

根据工作特性，牵引电动机具有以下特点：

- (1) 具备频繁的制动和启动能力；
- (2) 有稳定的机械特性，不会因为负载的变化而导致起升速度发生较大的改变；
- (3) 通过自身特性控制牵引系统在不同工况下的速度；
- (4) 电动机运转平稳，工作可靠，起动电流较小，运行噪声低^[31]。

在提升装置上常用的电机有直流电动机和交流电动机两大类。其中被广泛采用的是交流绕线型异步电动机，其具有设备简单、使用可靠和投资低、维护方便等优点^[31]，但一般单机容量不超过 1000kw。根据工况确定本设计采用交流绕线型异步电动机。

选择电机调速方式主要有交流变极调速、交流变压调速和变频变压调速等。为了降低起、制动的加速度带来的运行波动，本设计选择交流调压调速系统，采用可控硅控制起制动电流，实现制动速度的闭环控制，提高系统的平稳度。

牵引电机作为动力源，牵引提升装置运行。根据提升速度和重量计算装置运行对牵引机的功率需求，为选择电机提供依据。

牵引电机容量的选择公式见 (2-20)：

$$P = \frac{(Q + G_0) \times v}{1000 \times \eta_h} \quad (2-20)$$

式中 $(Q + G_0)$ ——额定载重量 (kg)；

v ——提升速度， $v = 24 \text{ m/min}$ ；

η_h ——机械效率， $\eta_h = (Q + G_0) / F_{\max} = 0.75$ 。

计算得

$$P = \frac{49000 \times \frac{24}{60}}{1000 \times 0.75} = 26.1 \text{ kW}$$

根据机械设计手册表 17-1-87YZR 系列技术数据，选择 YZR250M1 型号电机，功率 37KW，转速 960r/min，转动惯量 1.52kgm²，电压 380V，频率 50Hz，工作制度 S3，防护等级 IP44。

根据提升线速度 $V = 24 \text{ m/min}$ 的要求，初步确定减速比

$$i = \frac{n\pi d}{60 \times 2V} = 38$$

减速机是提升装置重要的配套设备，由于在实际工况中承受的冲击载荷较大，而且长时间频繁启动制动，因此其可靠性直接影响生产运行，必须在设计、选型、

制造和维修等方面给予高度重视^[32]。

2.5 本章小结

本章首先简要介绍了双排式钢卷托盘运输系统的技术优势、工艺流程和关键设备参数，并通过对实际工况的分析提出了两种提升装置的结构形式和工作原理。然后详细介绍了重载提升装置的液压系统的设计和轻载提升装置中的主要设备，如钢丝绳、卷筒、轴承、主电机和减速机的选型计算，从而完成了重载和轻载两种托盘提升装置的设计方案。

第 3 章 提升装置 CAE 分析及优化

本章采用 CAE 理论对重载提升装置提升托架进行有限元分析,根据应力、应变、位移和安全系数等数据得到原设计存在的结构问题,并通过设计优化和分析对比,完成了提升托架设计方案。

3.1 CAE 原理及分析软件简介

3.1.1 CAE 原理介绍

计算机辅助工程 CAE 作为一门新兴学科,是二十世纪 60 年代伴随着计算机技术的进步而不断发展起来的解决工程技术问题的方法。该方法的特点是通过建立计算模型并进行仿真分析求证未来工程、产品功能和性能的可用性与可靠性。CAE 技术的应用不仅为工业产品设计带来了革命性的变化,而且其应用范围也从传统的力学领域扩展到物理、化学、材料、生物、机电、建筑、航空航天和海洋等众多工程领域^[33]。

CAE 的重要分析方法——有限元法的基本思想是将结构进行有限元离散化,利用有限个、按一定方式连接起来的单元来表示复杂的工程结构,各单元之间通过有限元相互连接,根据有限元基本理论建立有限元总体平衡方程组,通过求解最终获得复杂模型的近似数值解^[34-35]。

有限元法分析问题的步骤主要包括三个阶段:

(1) 前处理阶段:首先利用图形软件对工程或产品进行实体建模和参数化建模,然后利用有限元网格的自动剖分建立有限元分析模型,其中还包括对材料和外部荷载、约束等参数的直接定义或参数化导入、对网格节点参数的修改和再生、载荷数据的生成和分析文件的生成等。

(2) 有限元分析阶段:对创建的有限元模型进行单元分析,通过对单元位移分布做出的假设,选择适当的位移函数,利用材料库相关算法、约束处理算法分析由每个单元建立的刚度矩阵,进而得到按照一定节点编码顺序构造的整体刚度矩阵,加入边界条件、初始条件等约束进行求解,根据节点的值和形函数求解所要分析的静力、非线性、动力学、流体力学、热力学等问题。

(3) 后处理阶段:根据用户提出的工程或产品模型的设计要求,对有限元分析的数据结果进行重现检查和可视化加工,其中主要包括对各种物理量,如结构变形图、应力应变图、热力场图等的直观显现和数据分析,最终以图形方式为用户展示计算结果,辅助用户判定分析的准确性和工程或产品设计方案合理性,

并根据用户对工程或产品设计与标准规范进行对比和校核，结合分析结果进行设计优化，最终完成对计算结果进行产品定型和文档管理^[36-37]。

完整的有限元分析流程如图 3-1 所示^[38-40]。

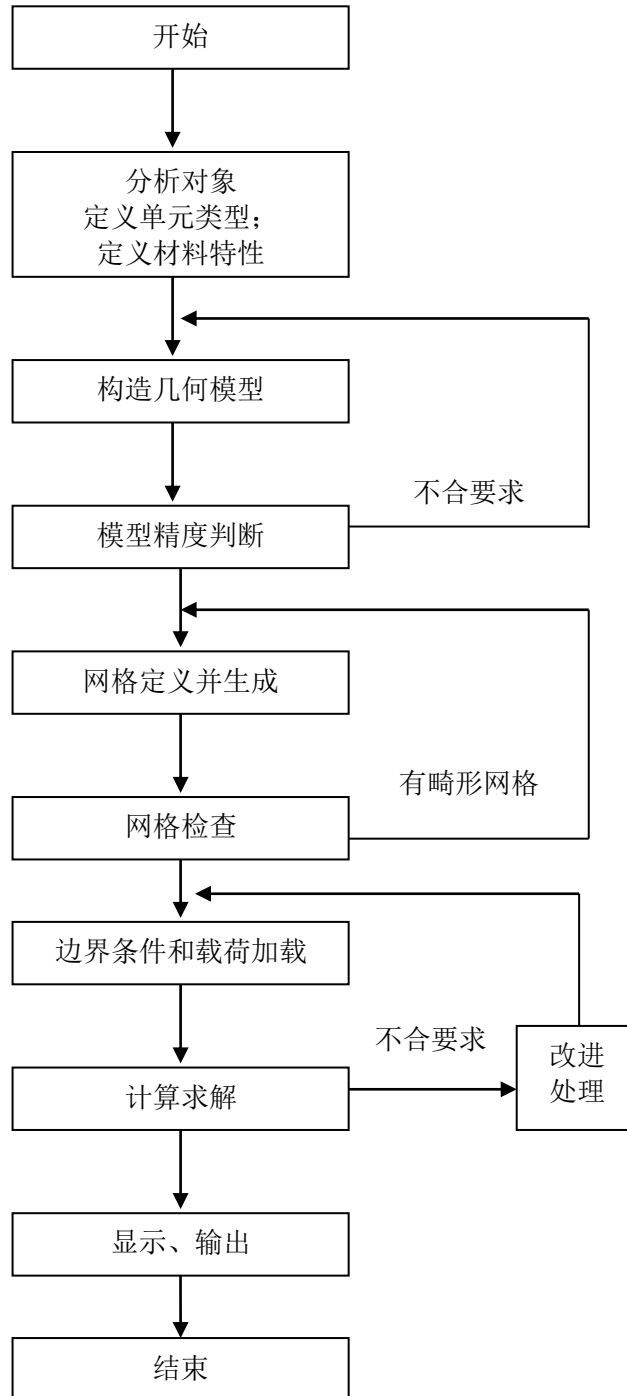


图 3-1 有限元分析流程图

3.1.2 SolidWorks Simulation 分析软件

SolidWorks 软件是世界上第一个基于 Windows 开发的三维 CAD 系统，它不仅提供直观设计、智能装配、动态干涉检查、特征自动识别等功能，同时对每个工程师和设计者来说，操作简单方便、易学易用。

该软件的主要特点包括^[41]：

(1) 操作使用简单

SolidWorks 提供了一套完整的动态界面和鼠标拖动控制，使用户在较短的时间内能够完成较大型的装配设计。它提供的 AutoCAD 模拟器，可以使用户在不改变原有绘图习惯的前提下顺利地由二维设计转向三维实体设计。

(2) 设计功能强大

SolidWorks 资源管理器是唯一一个类似于 Windows 资源管理器的 CAD 文件管理器。其在配置管理的设置上独具匠心，可以轻松地协助设计者通过改变不同参数或不同组合方式，在一个 CAD 文档中派生出不同的零件或装配体。它还可以动态地检查所有装配体运动，以及在运动过程中是否存在干涉、进行间隙测试和自动显示提醒问题部件。

SolidWorks 智能零件技术可以自动完成重复设计，能产生基于已有部件的新部件；同时用智能化装配技术将零件模拟装配起来，还可以进行后续的装配干涉分析、运动仿真模拟、物性分析、有限元分析等。

(3) 协同设计环境优越

SolidWorks 软件开发了更加适用于互联网协同工作的先进有效的实用工具和庞大的数据库模板，用户可以直接从特征模版库中选用标准的零件和特征，并通过协同工具实现共享。

SolidWorks Simulation 是一款基于有限元技术的设计分析软件，它作为嵌入式分析软件与 SolidWorks 无缝集成。运用 SolidWorks Simulation 进行有限元分析的关键步骤主要包括^[42]：

(1) 创建算例：在 Simulation 中每次模型分析都可以成为一个算例，而每个模型也可包含多个算例；

(2) 应用材料：给模型添加包含各类物理信息的材料属性是通过 Simulation 材料库完成；

(3) 添加约束：Simulation 提供各种类型夹具模拟真实的装夹方式，可对模型的面、边、点等添加约束；

(4) 施加载荷：对约束好的模型施加外部载荷，通过 Simulation 提供的多

种外部载荷形式进行加载以反映作用在模型上的力；

(5) 划分网格：通过 Simulation 自动网格划分器将模型细分为有限个单元，通过输入参数控制网格的大小和质量；

(6) 运行分析：使用 SolidWorks Simulation 求解器来计算应力、应变、位移等数据；

(7) 分析结果：对计算后的数据采用所需的格式表达出来，结合各种假设、简化约定和建模求解差生的误差对结果进行综合分析^[43]。

3.2 提升装置的三维建模

3.2.1 重载提升装置装配体

重载提升装置主要部件三维模型和装配体如图 3-2、3-3、3-4 所示。

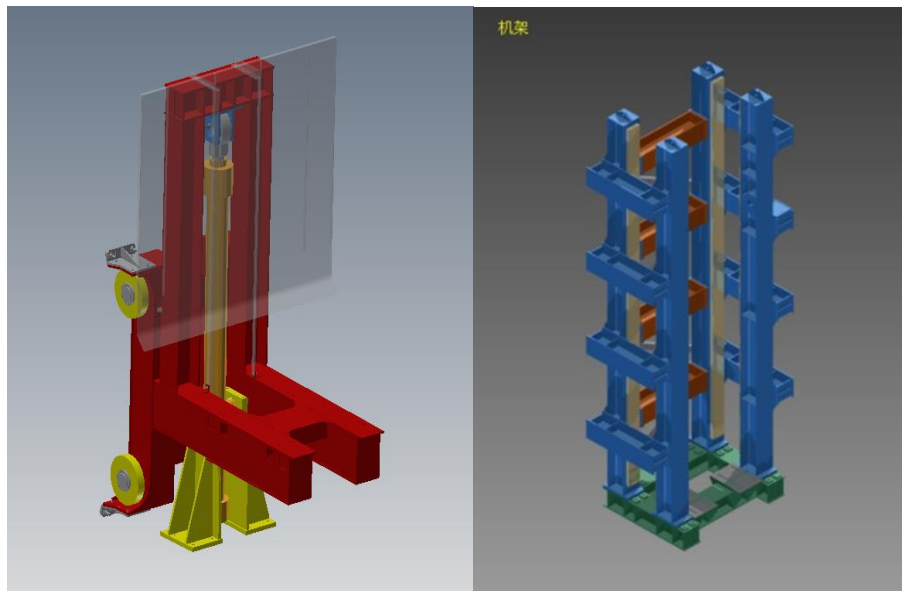


图 3-2 提升托架和支架模型

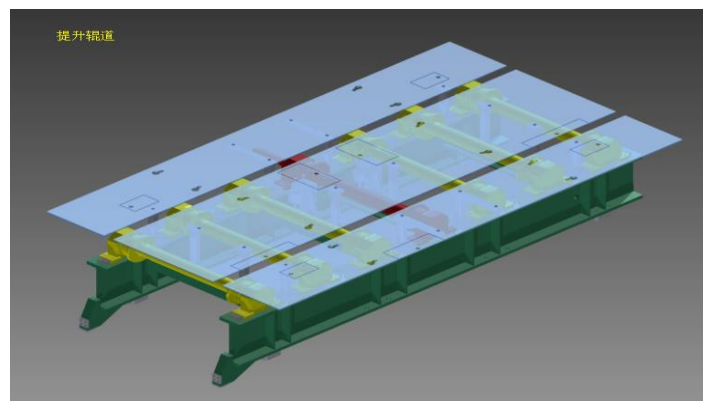


图 3-3 提升轨道模型

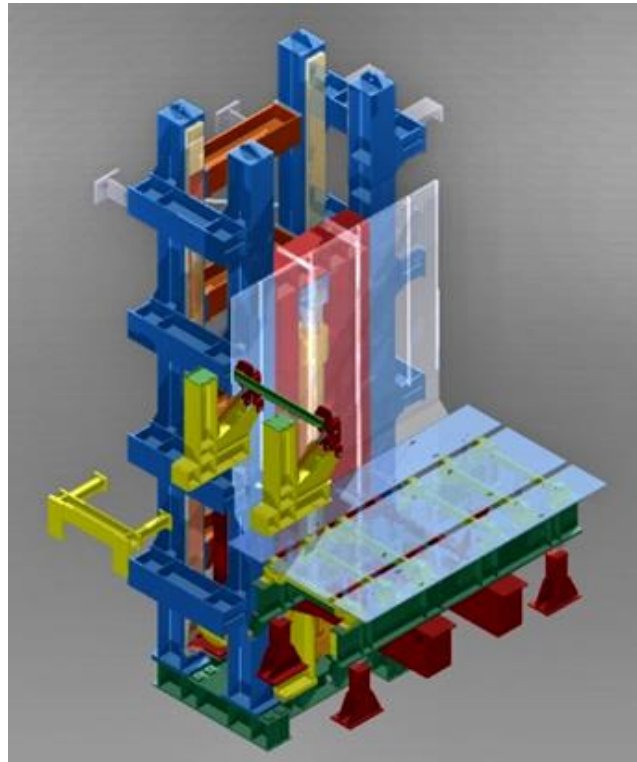


图 3-4 重载提升装置装配体

3.2.2 轻载提升装置装配体

轻载提升装置主要部件三维模型和装配体如图 3-5、3-6 所示。

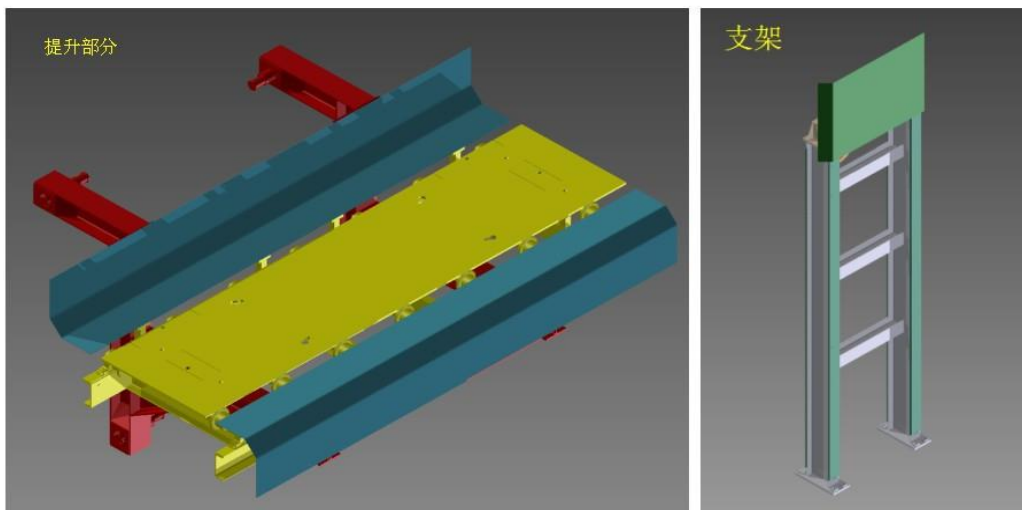


图 3-5 轻载提升装置主要部件

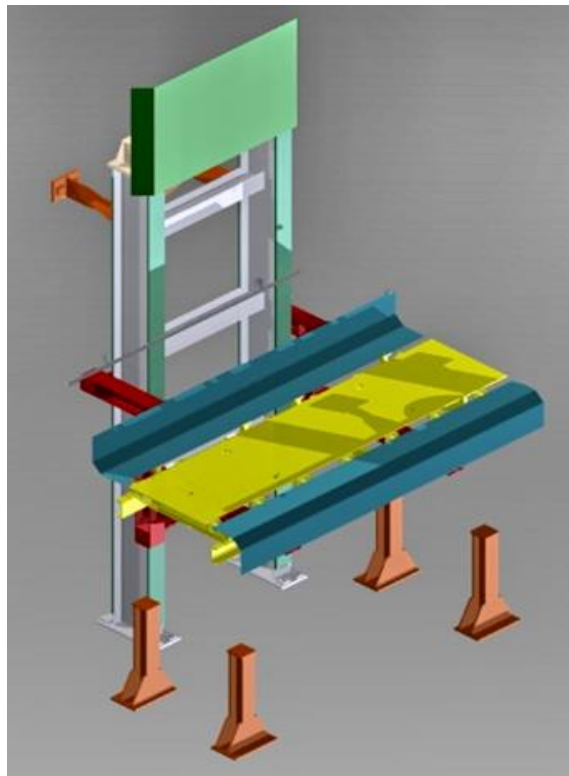


图 3-6 轻载提升装置装配体

3.3 重载提升托架有限元分析

在两种提升装置中,相比于轻载提升装置,重载提升装置承受着更大的起升重量,受力情况也更加复杂,其设备的强度、可靠性和稳定性分析更加具有代表性。而在重载提升装置中,提升托架不仅受到钢卷及托盘约 40t 重量的向下的压力,而且承受着液压缸向上提升的载荷,同时还受限于滚轮沿提升框架运动,属于重载提升装置的关键部件。因此,本节将对重载提升装置中的提升托架进行 CAE 分析,计算原设计中的结构应力、应变、位移等情况,并通过对计算后的数据进行分析,寻找改善受力、优化结构、减轻重量的方向方法,为提升托架设计优化提供基础。

3.3.1 有限元分析前处理

(1) 创建模型

建立模型是进行有限元分析的前提条件。Soildworks 与 Simulation 具有完全兼容的特性,因此,可将上一节中建立的实体模型直接用于 Simulation 计算。但由于提升托架的八个滚轮是在轨道中上下滑动,为施加夹具方便,在滚轮处增加了与导轨平行的面。提升托架模型如图 3-7 所示。

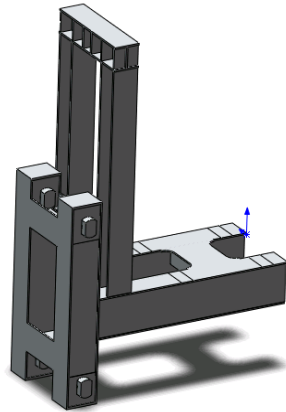


图 3-7 提升托架分析模型

(2) 定义算例

在 SolidWorks Simulation 中，每个分析都是一个单独的算例。当定义完一个算例后，软件会自动生成一个文件夹用于存储各项设置和分析数据与结果。在菜单选项中选择【New Study】，将本次对提升托架的分析定义为“zztstj analysis”。同时，指定材料属性，在【材料】中选择 Q235-A。

(3) 添加约束

要对提升托架进行静力学分析，模型必须被正确的约束，使之无法移动。因为提升托架的四组滑轮处只能在轨道中上下滑动，因此只承受与轨道垂直方向的力，故施加“滚柱\滑杆”夹具；此外，将液压缸支座处作为固定点，施加“固定几何体”夹具。选定夹具类型后，在模型上选择施加载荷的面，定义完成后即限制了模型的空间运动，使之在没有弹性变形的情况无法移动。约束后的提升托架模型如图 3-8 所示。

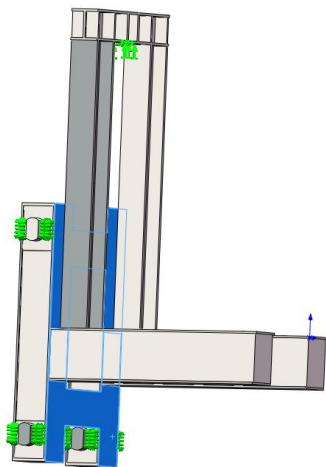


图 3-8 添加约束

（4）施加载荷

模型约束好后，需要加载外部载荷。SolidWorks Simulation 提供了多种形式的外部载荷，包括力、力矩、压力、引力、离心力、轴承载荷、远程载荷和分布质量等。根据提升托架的工作原理，对其受力进行分析：钢卷、运卷小车和辊道总重 40t，其压力作用在托架臂上的 4 个接触点，每处各 10t 的载荷；提升装置在运行时，克服自身重力。施加载荷如图 3-9 所示。

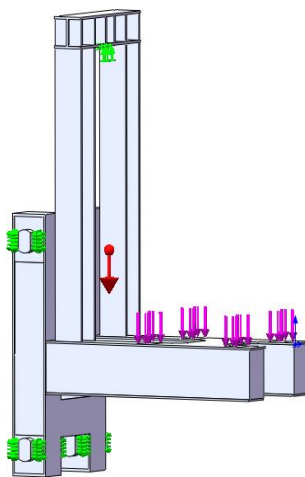


图 3-9 施加载荷

（5）划分网格

网格划分的精细度不同将直接影响着计算结果。因此，对模型的网格划分需要遵循一些原则：

- a) 合理选择网格密度。综合计算精度和时间要求来选择网格密度，对应力集中位置要求适当提高。
- b) 合理选择单元层次。为了提高边界几何形状的近似程度，要优先选用具有边中节点的三维单元，而非线性三维单元。在满足计算要求的前提下尽量不选择高次单元
- c) 减少畸形网格数。通常，单元细长比小于 7 得到的位移效果较好，小于 3 得到的应力效果较好。
- d) 单元边长不大于厚度的 5 倍，否则计算结果不收敛^[44]。

SolidWorks Simulation 中设有【高】和【草稿】两种品质的单元划分网格。【高】和【草稿】两种单元的区别就在于使用的是一阶还是二阶单元，软件系统默认的是品质高的二阶单元。通过自动网格划分器，网格密度选择“良好”得到的提升支架网格如图 3-10 所示。

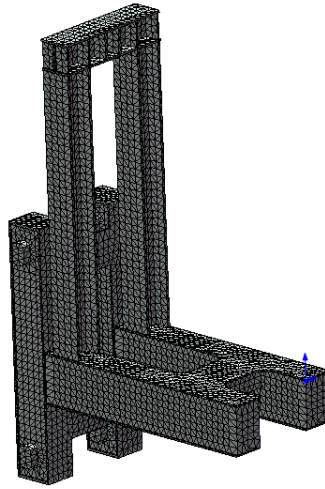


图 3-10 网格划分

3.3.2 有限元分析后处理

在完成了对提升托架的有限元分析前处理工作后，即可进行有限元分析计算，主应力结果如图 3-11、3-12 所示，位移结果如图 3-13、3-14、3-15 所示，安全系数结果如图 3-16、3-17 所示。

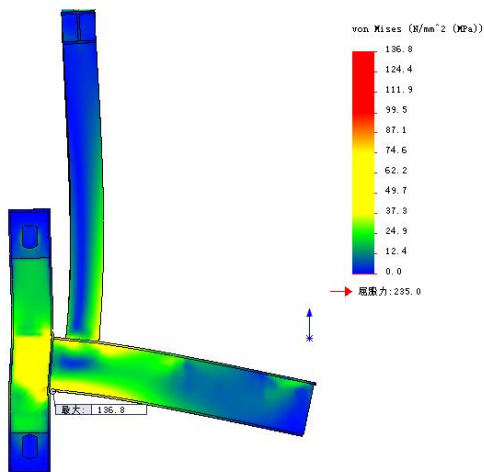


图 3-11 主应力云图（主视图）

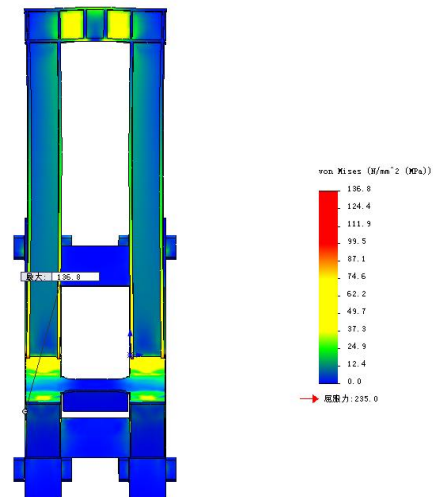


图 3-12 主应力云图（侧视图）

通过主应力云图可以得出最大应力值为 136.8MPa，位置发生在重载提升托架的水平支架与导轮支架的夹角处。

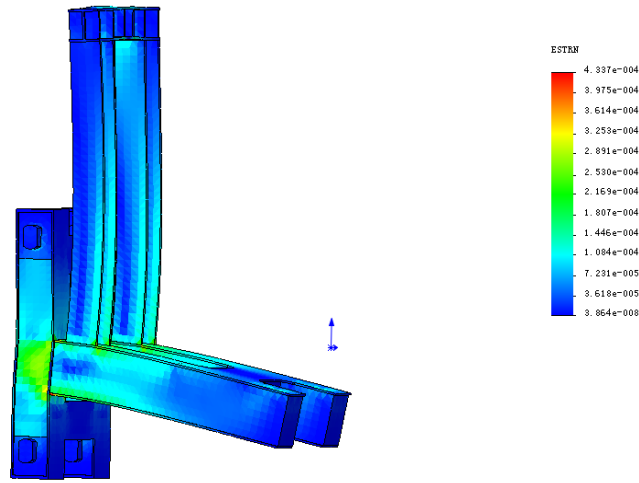


图 3-13 主应变云图

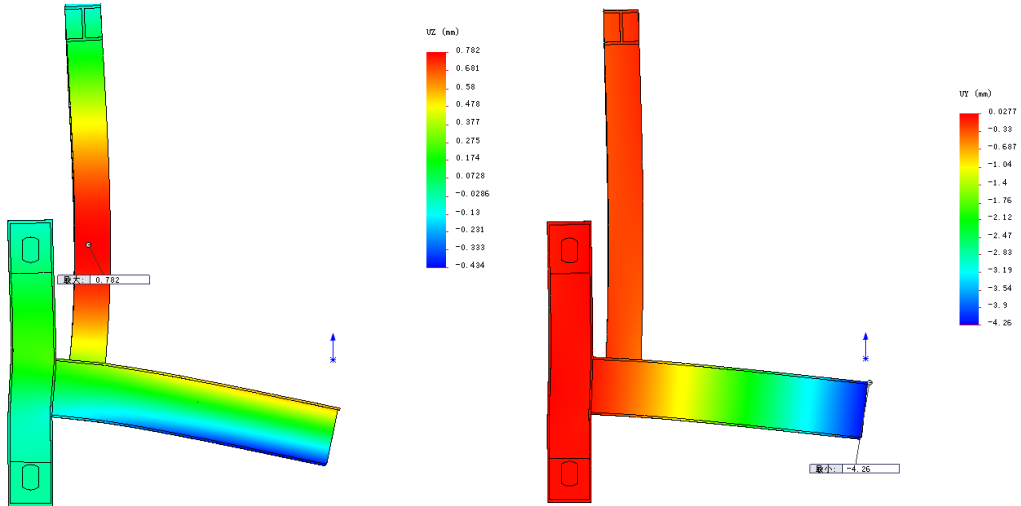


图 3-14 位移云图（水平方向）

3-15 位移云图（垂直方向）

通过位移云图可以得出水平方向的最大位移出现在垂直支架中部，最大值为 0.782mm；垂直方向的最大位移出现在水平支架末端，最大值为 4.26mm。根据设计要求，垂直方向位移偏大，结构强度不足，建议采取措施优化。

通过下面的安全系数云图 3-16、3-17 可以得出提升托架结构最小安全系数为 1.72，图 3-17 中红色部分为安全系数小于 6 的区域，主要集中在导轮支架中部与水平支架连接的部位，水平支架处也有部分安全系数较低，应采用措施进行加强；而垂直支架处整体安全系数较高，建议从经济性考虑，可对材料进行优化。

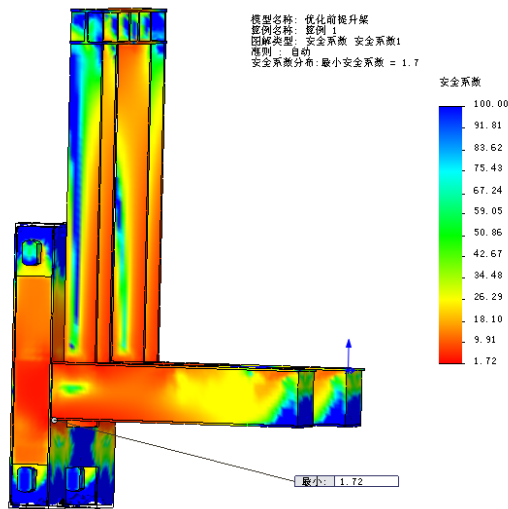


图 3-16 安全系数云图

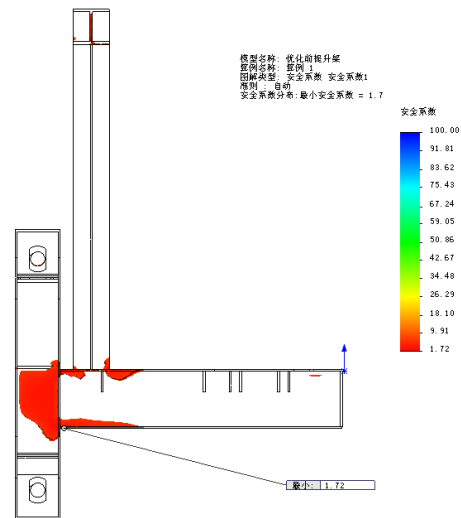


图 3-17 小于 6 的安全系数云图

3.4 重载提升托架优化设计

优化设计是 20 世界 60 年代初发展起来的一门学科，所谓机械优化设计就是在给定的载荷和外部条件下，在机械产品的外形尺寸、结构等因素的限制范围内，以机械系统的功能、强度和经济性为对象，使目标获得最优值的一种现代设计方法^[45]。

3.4.1 提升托架优化措施

根据对提升托架的分析结果，针对其中出现的应力和位移偏大、安全系数不均衡等问题，本节将采取如下措施进行优化：

- (1) 在水平支架和垂直支架之间增加斜筋板；
- (2) 在水平支架和导轮支架之间增加斜筋板；
- (3) 将垂直支架材料厚度由 30mm 减薄至 20mm；

3.4.2 提升托架优化分析

根据优化措施修改提升托架模型，并对其重新施加载荷和划分网格，结果如图 3-18、3-19 所示。

对优化后的提升托架模型重新进行有限元分析计算，主应力结果如图 3-20、3-21 所示，位移结果如图 3-22、3-23、3-24 所示，安全系数结果如图 3-25、3-26 所示。

通过主应力图可以得出发生在提升托架水平支架与导轮支架的夹角处的最大应力 88MPa，相比于优化前的 136.8MPa 减小了 48.8MPa，改善了 36%。

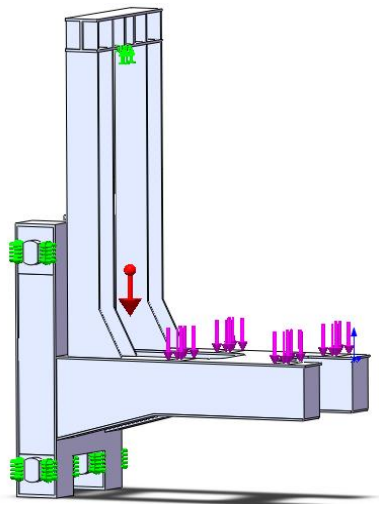


图 3-18 施加载荷

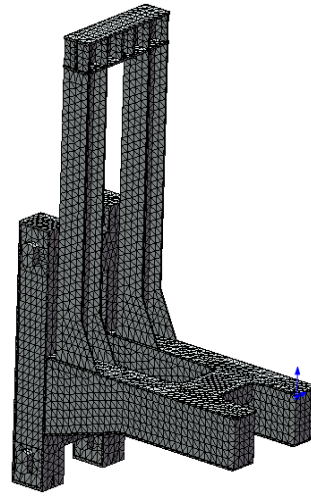


图 3-19 网格划分

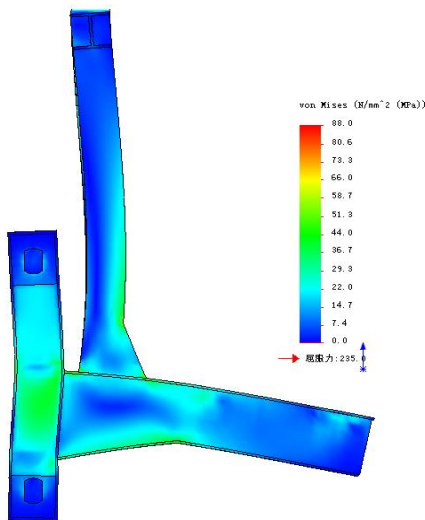


图 3-20 主应力云图（主视图）

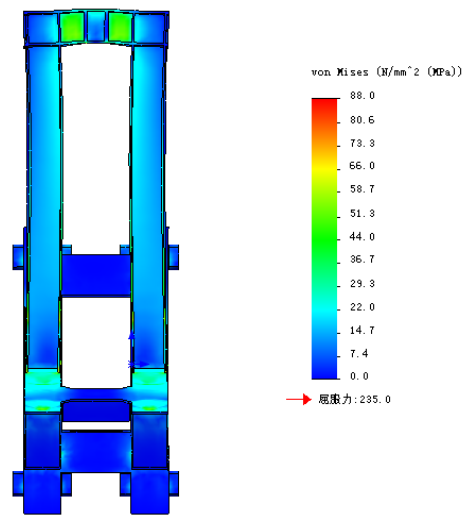


图 3-21 主应力云图（侧视图）

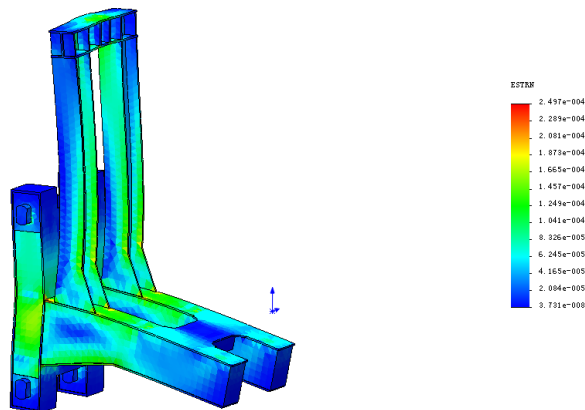


图 3-22 主应变云图

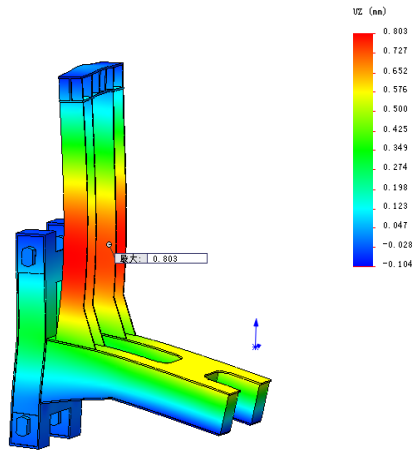


图 3-23 位移云图（水平方向）

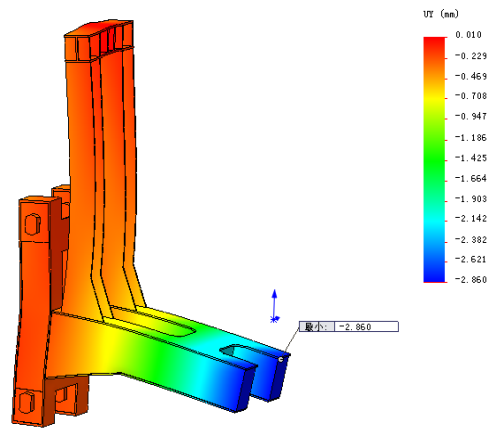


图 3-24 位移云图（垂直方向）

通过位移云图可以得出水平方向的最大位移为 0.802mm，比优化前的 0.782mm 增加了 0.02mm，其主要原因是由于垂直支架板厚由 30mm 减小到 20mm 引起的，但仍在设计允许范围内。垂直方向的最大位移 2.86mm，比优化前的 4.26mm 减小了 1.4mm，改善了 33%。

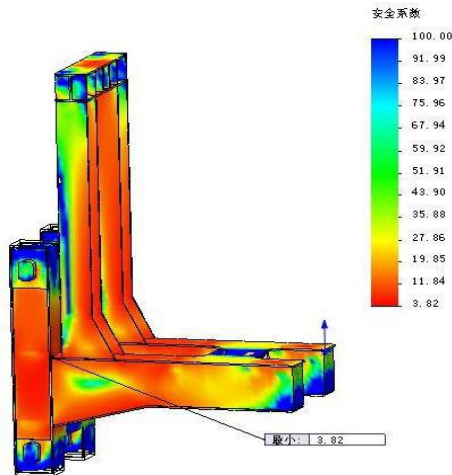


图 3-25 安全系数云图

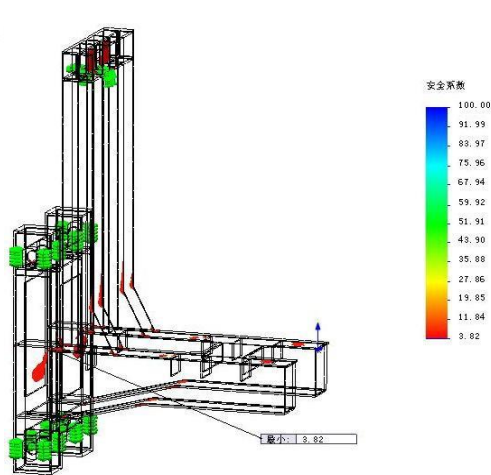


图 3-26 小于 6 的安全系数云图

对比优化前和优化后的安全系数云图可以发现，最小安全系数从 1.72 增加到 3.82，位置也发生转移，增加的筋板将设备安全系数提高了 122%，而且安全系数小于 6 的区域大幅度减少，比优化前有了明显改善。

3.4.3 提升托架优化结果

通过采取三项优化措施，提升托架的应力集中和设备变形问题得到了明显改善，结构的整体安全系数明显增加。此外，尽管对垂直支架材料厚度进行减小，

但由于在水平支架和垂直支架之间、水平支架和导轮支架之间增加了斜筋板，使得优化前后设备总体重量相差仅为 18kg。虽然设备重量相差无几，经济性能改善不明显，但设备垂直变形量得到了大幅度的减小，结构安全系数得到了大幅度的增加，设备稳定性和可靠性得到了明显改善。

提升托架优化前后计算结果对比如表 3-1 所示。

表 3-1 提升托架优化前后计算结果对比

	优化前	优化后	说明
最大应力	136.8MPa	88MPa	改善 36%
水平方向最大位移	0.782mm	0.802mm	恶化 2.5%
垂直方向最大位移	4.26mm	2.86mm	改善 33%
安全系数	1.72	3.82	改善 122%
设备重量	5461Kg	5443Kg	改善 0.3%
设备强度	较差	较好	
经济性	较好	较好	

3.5 本章小结

本章在提升装置设计方案的基础上，首先利用 SolidWorks 建立了三维模型装配图。然后，通过 SolidWorks Simulation 对重载提升装置的提升托架进行有限元分析，针对分析中出现的应力大、变形量大、安全系数低等问题提出了 3 项措施进行优化，并对优化后的模型再次进行了分析和对比，得到了改进后的设计方案，同时也提出了一种结构设计优化的思路和方法。

第 4 章 提升装置自动化系统设计

现代工业已全面进入自动化控制时代，本章通过研究分析自动化控制设计要求和托盘运输系统的技术特点，以 PLC 控制技术为基础，根据实际工况中的动作顺序详细设计完成了提升装置自动控制流程图。

4.1.1 自动化系统概述

为了保证提升装置的运行可靠，选用可编程控制器进行实时控制其动作，以满足不同的动作要求。

PLC 可编程逻辑控制器是专为在工业环境中应用而设计的一种数字运算操作电子系统，它通过内部可编程的存储器来存储预设程序，并执行逻辑运算、数学运算、顺序控制、计时计数等指令，再通过数字或模拟量的输入输出来控制各类机械动作或生产过程^[46]。特别是多个可编程序控制器可组成经济小巧、设计调试方便的综合控制系统，实现逻辑控制、工程控制、数据采集及控制和图形工作站等复杂功能^[47,48]。可编程序控制器结构如图 4-1 所示。

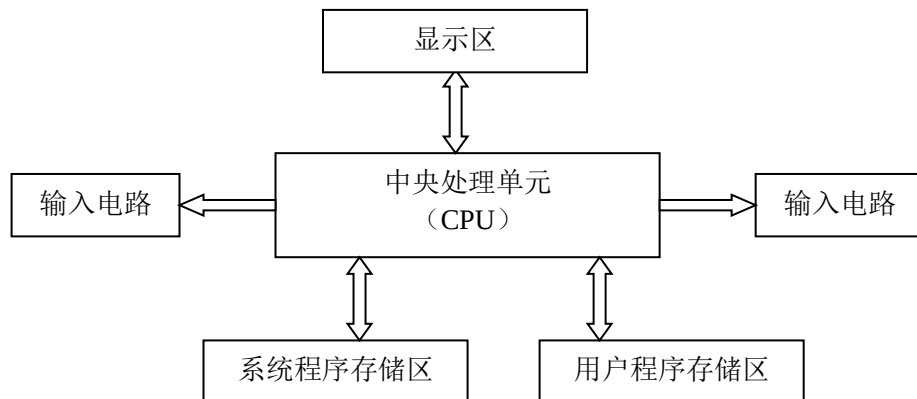


图 4-1 可编程序控制器结构图

PLC 的逻辑运算原理是用逻辑代数中的 1 和 0 来表示继电器线圈的通断电；同样可以使用 PLC 梯形图或 CFC 功能块图来实现 PLC 的数字量逻辑运算^[49]。

CPU 连续执行用户程序、任务的循环序列称为扫描，一个扫描周期通常包括数据读入、程序运行、通信请求处理、自诊断测试和数据输出等组成部分^[50-52]。其流程如图 4-2 所示。

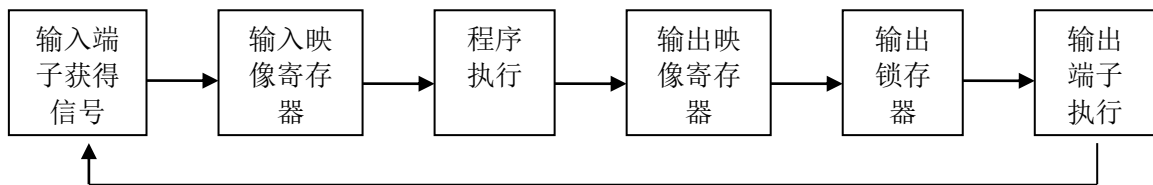


图 4-2 PLC 的循环扫描过程

PLC 的工作原理就是一直周而复始地循环扫描并执行由系统软件规定好的任务，典型的 PLC 扫描周期包括 [53-55]：

- (1) 自诊断扫描过程。为保证设备的可靠性，及时发现并反映出现的故障，PLC 具有自监视功能；
- (2) 与网络进行通讯的扫描过程。用于在配备网络的 PLC 之间及 PLC 与上位计算机或终端设备之间的通信；
- (3) 用户程序扫描过程。在 PLC 正常运行状态下，用户程序可按预先设计确定是否执行；
- (4) 读输入、写输出扫描过程。在 PLC 正常运行状态下，CPU 读取自输入映像寄存器处理用户程序，运算的结果送到输出映像寄存器。

4.1.2 自动化系统设计要求

对于双排式托盘运输系统的自动控制要求包括一级基础自动化和二级过程自动化控制。一级自动化控制系统主要完成钢卷从卷取机进入托盘运输系统后，重载提升、转台、检查线、称重装置、喷号机、对夹装置、转台、卸卷台、空载提升等设备的动作控制，同时对整个运输系统进行多段式独立自动运行和自动衔接进行；二级过程控制系统主要完成钢卷在整个运输过程中的全程跟踪，并实现与轧线系统、工厂管理系统信息的实时交互。

对于提升装置的自动化控制要求主要是完成顺序控制，即通过金属检测器和位移传感器的反馈完成对提升工序中各受控设备的顺序动作和连锁关系的控制，实现重载和轻载托盘的升降。

4.2 托盘运输系统自动化系统功能

4.2.1 系统构成

双排式托盘运输自动控制系统主要由一、二两级组成，两级系统配置图如图 4-3 所示。

一级控制系统为基础自动化，主要用于操作人员通过在上位机中设置的人机界面

(HMI) 来实现整个运输线主体与辅助设备的运行和监控。在硬件方面，主

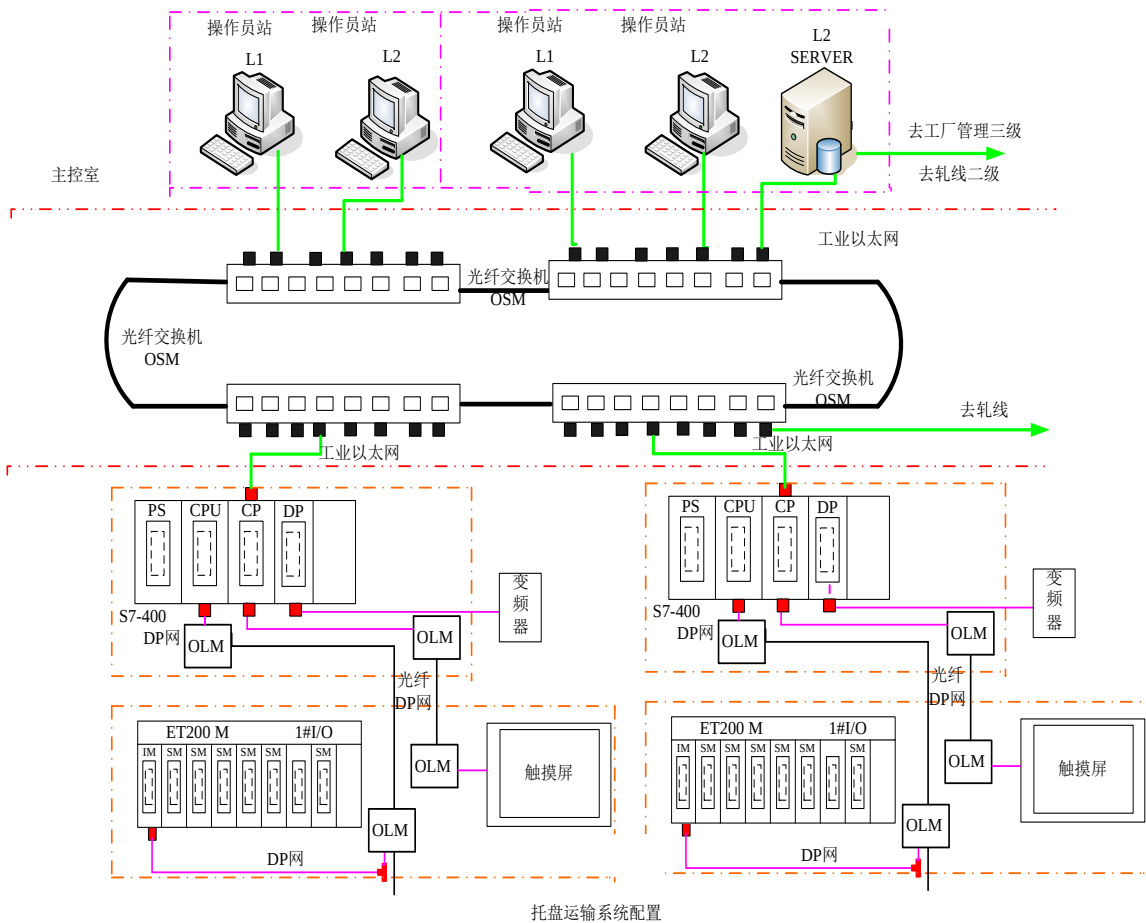


图 4-3 托盘运输控制系统配置图

线 PLC 选用的是西门子 S7—400 系列，实现现场与远程的信号采集和控制输出的 IO 站选用的是西门子 ET200M；同时，自动喷号机、自动打捆机等设有独立 PLC，与主线通过横向通讯完成各自功能，这样不仅实现了控制系统的高效性和稳定性，而且通过采用功能分区控制，可以灵活处理局部故障，保证运输系统的整体安全性。

二级控制系统为过程自动化，其主要功能是通过对各种数据的采集处理和交互实现对钢卷运输过程的全程跟踪，同时完成在线喷号、打捆、检查、处理和转运等工序的自动衔接控制。在硬件方面，主要配置了一套二级服务器和用户操作机，并通过工业以太网与运输线一级、主轧线和车间生产二、三级系统连接，实现“一键式、全自动”的运输功能^[56]。

4.2.2 技术特点

由于双排式托盘运输系统承载的钢卷运输量大、运输周期短、运输路径复杂，

特别是在热轧生产线应用时现场环境温度较高，不适于人工操作，因此该运输系统对设备的自动化控制水平和物料跟踪要求更高，其一级和二级自动化系统特点如表 4-1 所示。

表 4-1 自动化系统特点

编 号	特 性	一级系统	二级系统
1	硬件配置特点	由于整个托盘运输线距离长，设备分散，仅热轧区域一级自动化系统就设置了10套现场IO柜，用于采集和控制设备信号的输入输出。同时，现场柜采用触屏操作模式替传统的按钮式操作盘，操作方便，简洁灵活，可以自由选择一个或多个设备。现场操作柜不仅节省了电缆长度，而且就近操作减少了干扰源和故障点，提高了信号的稳定性。	为了实现二级自动化控制系统的高效稳定运行，所需服务器使用的是配备了 Intel 公司 Xeon 处理器的 Stratus Server 系列服务器，能够在 Windows 环境中实现99.999+%连续运行时间的标准容错服务器，为系统实现高可靠性连续运行提供保障。同时，为了保障系统运行安全，可以做到在线离线双备份，支持两个相同机架之间的在线切换。
2	系统通讯特点	为适应托盘运输线运输距离长、分布范围广的特点，一级系统采用光纤以太网与各操作室和主控制器连接；对分散在运输线现场的数十套远程IO柜采用DP光纤网络，增加了网络传输速度和长度，保证了网络系统不受干扰、运行稳定。	在服务器与 PLC 之间采用不同定义数据包进行多端口通信，在服务器与 HMI 之间采用实时控制数据传输，因此均选用了 TCP/IP 通讯方式。在服务器与生产二级、车间三级系统通信中，主要是实现数据的准确传输，因此选用了 DBTODB 通信方式。
3	自动控制特点	一级系统主要采用分区域控制原则将整个运输系统分为多个自动控制段，这主要是因为托盘运输线运输距离长，设备相对分散。每个控制区域不仅可以与上下游自动衔接运行，也可以独立操作，即实现全线自控也可对局部设备故障进行单独处理，减少对整个运输线的干扰。同时，一级系统通过预定程序控制设备运行，利用操作室上位画面进行监控，操作方面只需根据生产需要简单选择手/自动启停，极大降低劳动强度。	二级系统从卷取机生产出成品钢卷开始，在无故障情况下，即可实现全程自动跟踪、转台旋转和升降装置启停控制、自动打捆、称重和喷号操作、开卷检查及取样控制、自动判断塔形及修复操作、自动选择运输目的地和吊装存贮位置，并对全程跟踪每个钢卷的运输过程，同时采集和记录运行数据。在整个运输过程中的跟踪，可以具体到区域内的每组辊道，并实现与轧线系统、工厂管理系统信息的实时数据交互。

双排式托盘运输一级自动化系统通过采用分布式远程触屏 IO 柜、分区式控制

和光纤网络通讯实现了设备控制的高效性和稳定性；二级自动化系统通过采用高性能容错服务器和高可靠性通讯实现了控制系统顺畅运行，而且二级系统作为中转系统，不仅控制和管理一级系统操作运行数据，而且对来自车间三级系统的数据和指令，分析判断后发送至一级系统执行，并负责反馈最终结果。整个控制系统通过预设程序控制和实时数据交互实现了运输过程的全自动运行，最大限度的避免了人为干预。

4.3 提升装置自动化控制功能

4.3.1 重载提升装置自动化控制功能

重载提升装置位于低位的初始位置，当接收道前面辊道送来的托盘后提升液压缸将托盘提升到卸载位后多抬起10mm，然后支撑机构旋转至锁定位。接着提升液压缸压力释放，下降放至支撑机构上。提升装置辊道和后部辊道启动，将托盘送至后部工序。当托盘被卸载后，压力释放阀关闭。提升装置抬起10mm然后支撑机构旋转回非锁定位，接着提升装置回到低位，等待下一个工作周期。提升装置的位置通过提升液压缸内的线性传感器检测得出。所有的托盘传送均通过计算机控制。设备示意如图4-4所示。

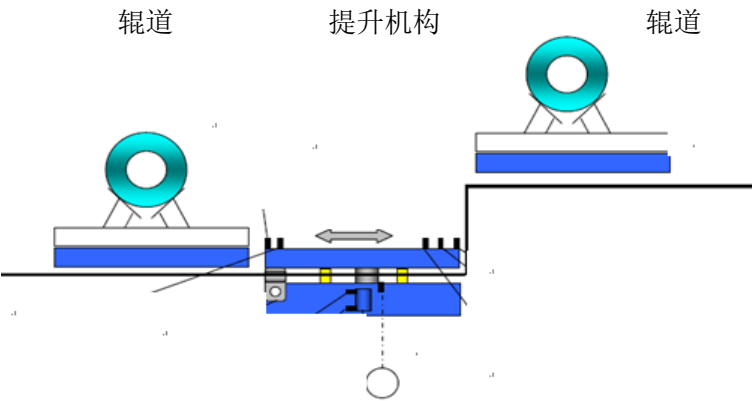


图4-4 重载提升装置控制设备示意图

(1) 控制设备表

控制设备如表4-2所示。

表4-2 控制设备表

序号	设备名称	类型	数量	设备位号
1	提升机构	液压缸	1	SU11 YVHP 1
2	提升切断阀	液压缸	1	SU11YVH1
3	提升压力释放阀	液压缸	1	SU11YVH2

表 4-2（续表）

序号	设备名称	类型	数量	设备位号
4	压力开 / 关	液压缸	1	SU11YVH3
5	提升锁定缸	液压缸	2	SU14YVH1 SU15YVH1
6	重载辊道驱动	变频电机	1	SU12 MKL 1
7	提升位置检测	位置检测器	1	SU11BS1
8	提升位	限位开关	1	SU11 SE 1
9	下降位	限位开关	1	SU11 SE 2
10	重载辊道后退停止位	接近开关	1	SU12 SBE 1
11	重载辊道缓慢停止位	接近开关	1	SU12 SBE 2
12	重载辊道前进停止位	接近开关	1	SU12 SBE 3
13	重载辊道后退极限位	限位开关	1	SU12 SE 1
14	重载辊道前进极限位	限位开关	1	SU12 SE 2
15	过滤器堵塞检测	压差开关	1	SU11FDD1
16	阀台压力	压力开关	1	SU13FD_A1
17	阀位置	接近开关	1	SU13SBE1
18	1# 液压缸非锁定	接近开关	1	SU14SBE1
19	1# 液压缸锁定	接近开关	1	SU14SBE2
20	2# 液压缸非锁定	接近开关	1	SU15SBE1
21	2# 液压缸锁定	接近开关	1	SU15SBE2

（2）控制顺序说明

第一步：将重载托盘运送至提升装置辊道上；

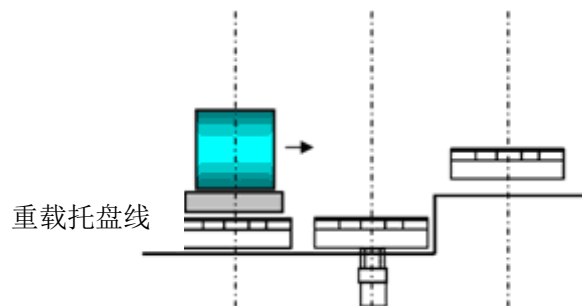


图 4-5 重载提升装置控制动作（一）

第二步：提升至锁定位置；

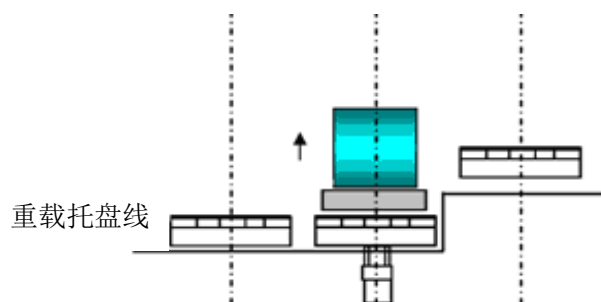


图 4-6 重载提升装置控制动作（二）

第三步：锁定机构锁定；

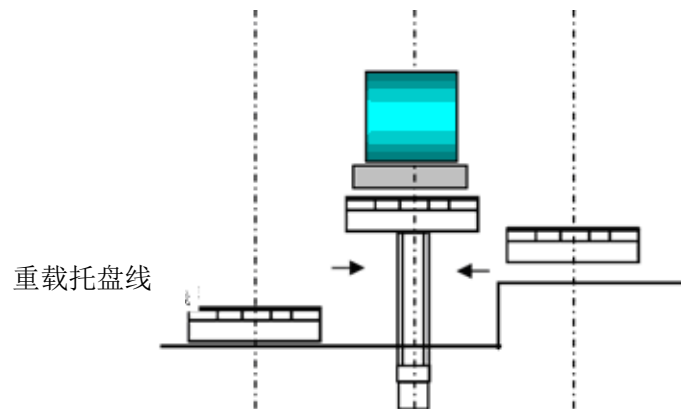


图 4-7 重载提升装置控制动作（三）

第四步：提升装置下降至卸卷位；

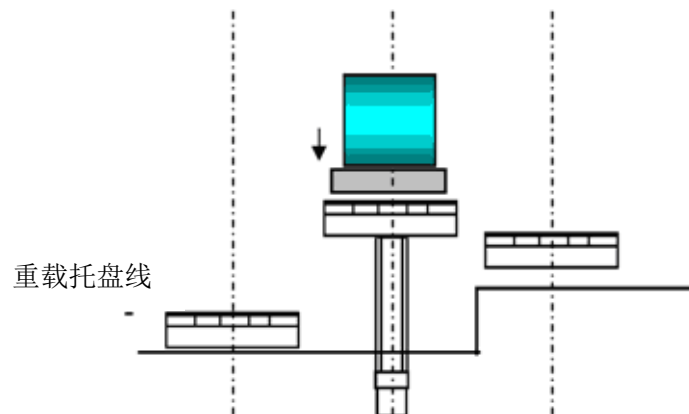


图 4-8 重载提升装置控制动作（四）

第五步：提升装置泄压，辊道启动将托盘运出；

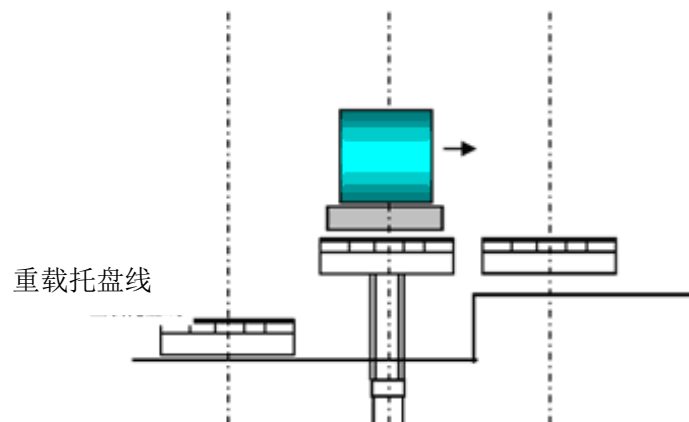


图 4-9 重载提升装置控制动作（五）

第六步：提升装置上升至锁定位；

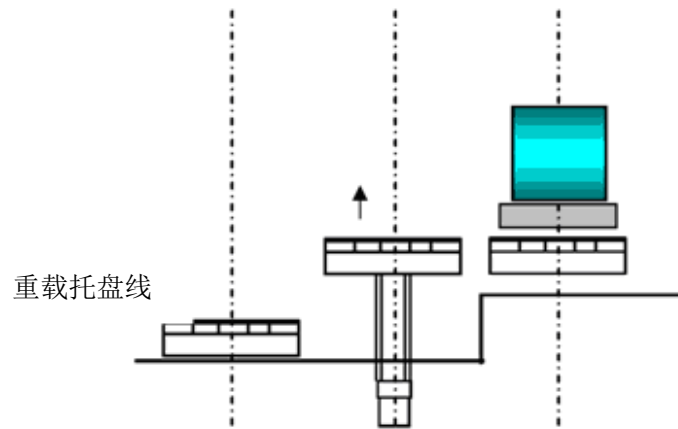


图 4-10 重载提升装置控制动作（六）

第七步：锁定机构打开；

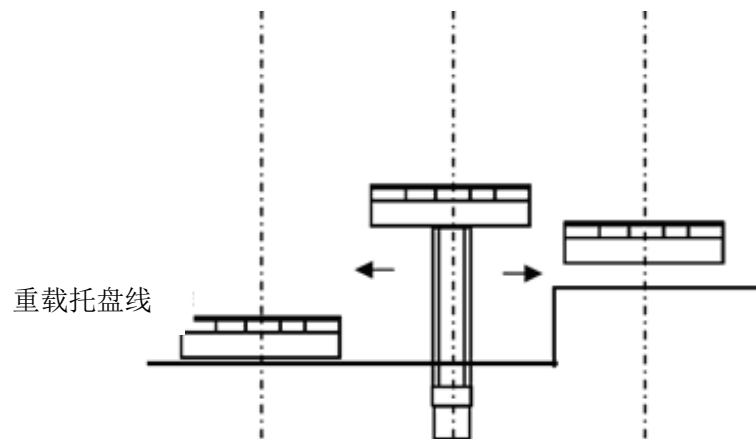


图 4-11 重载提升装置控制动作（七）

第八步：提升装置下降返回初始位。

(3) 自动控制流程图

重载提升装置自动控制流程如图4-12、4-13、4-14所示。

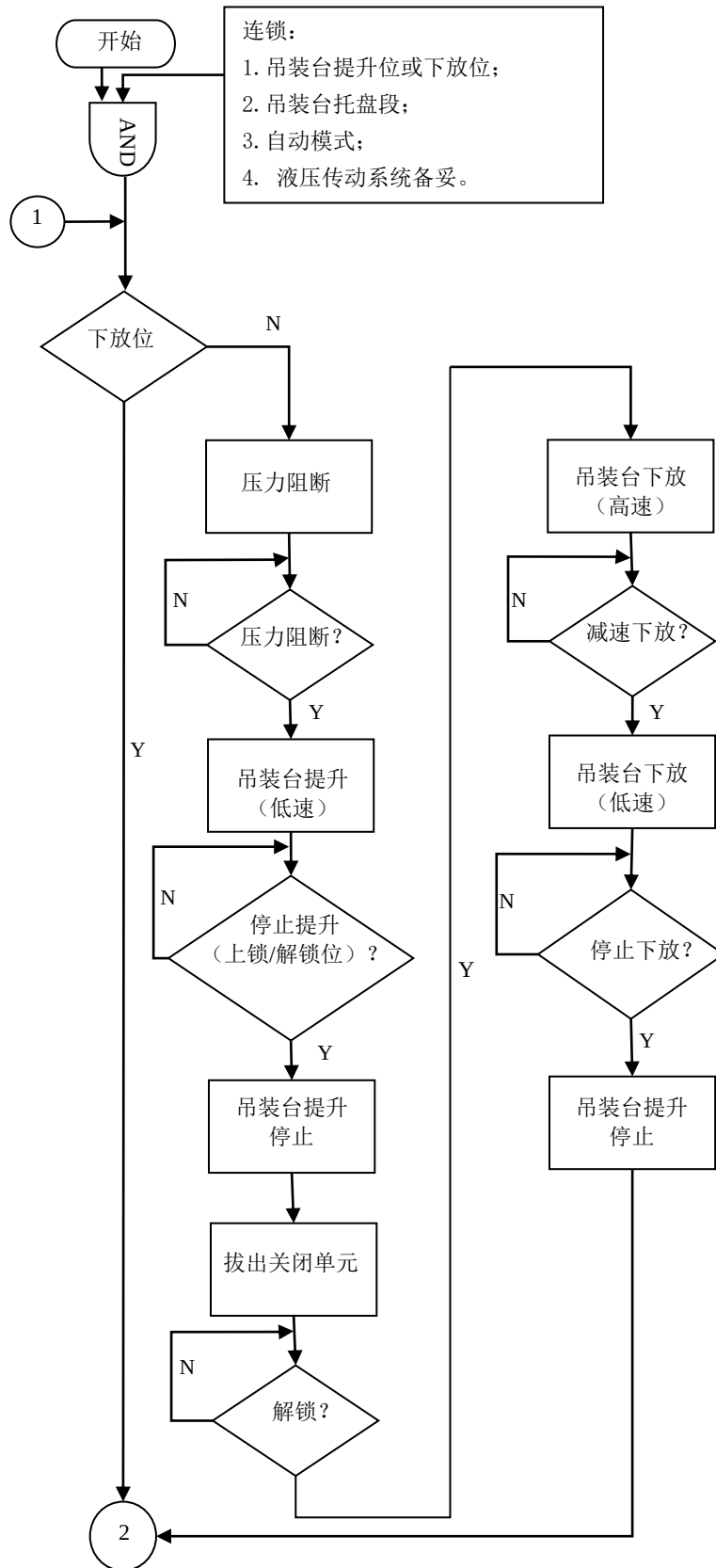


图 4-12 重载提升装置自动控制流程图（一）

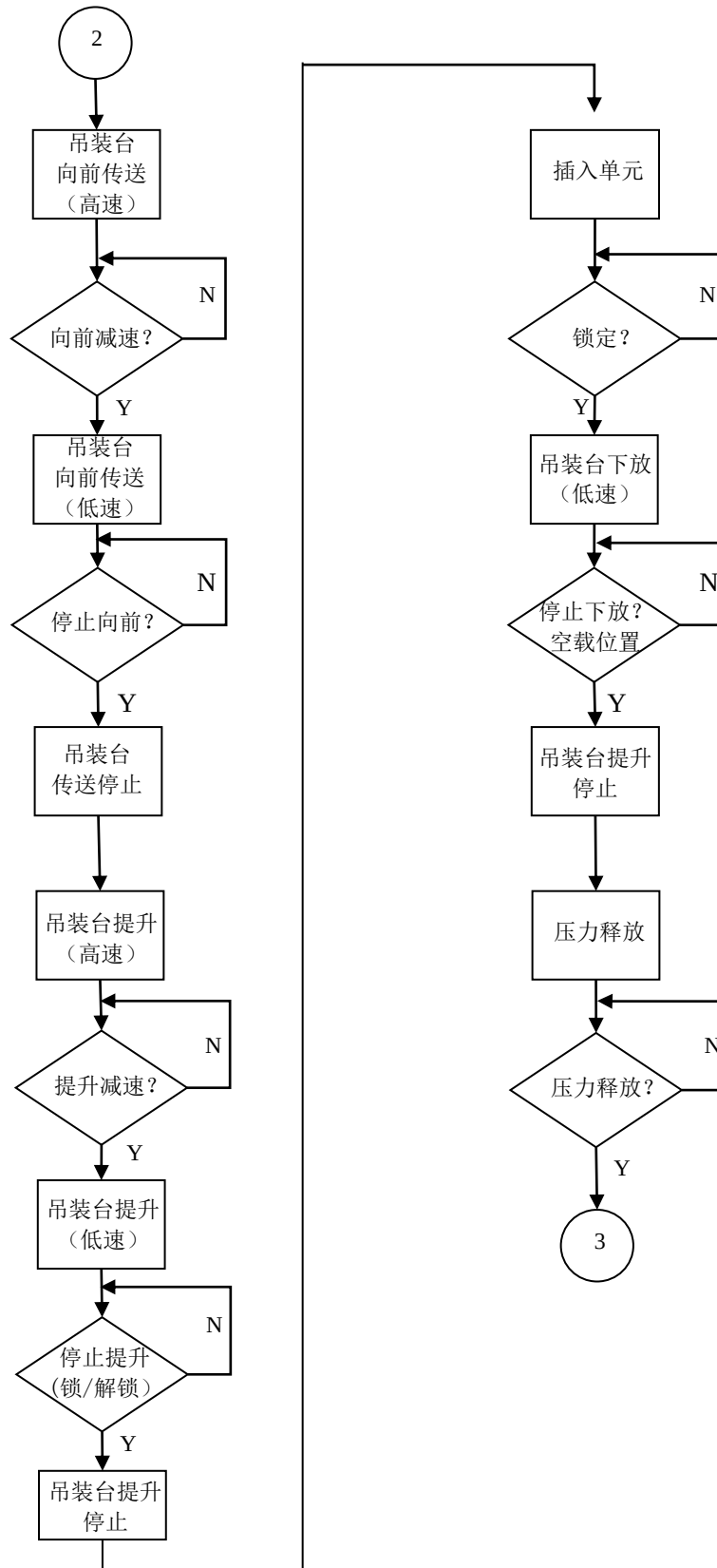


图 4-13 重载提升装置自动控制流程图（二）

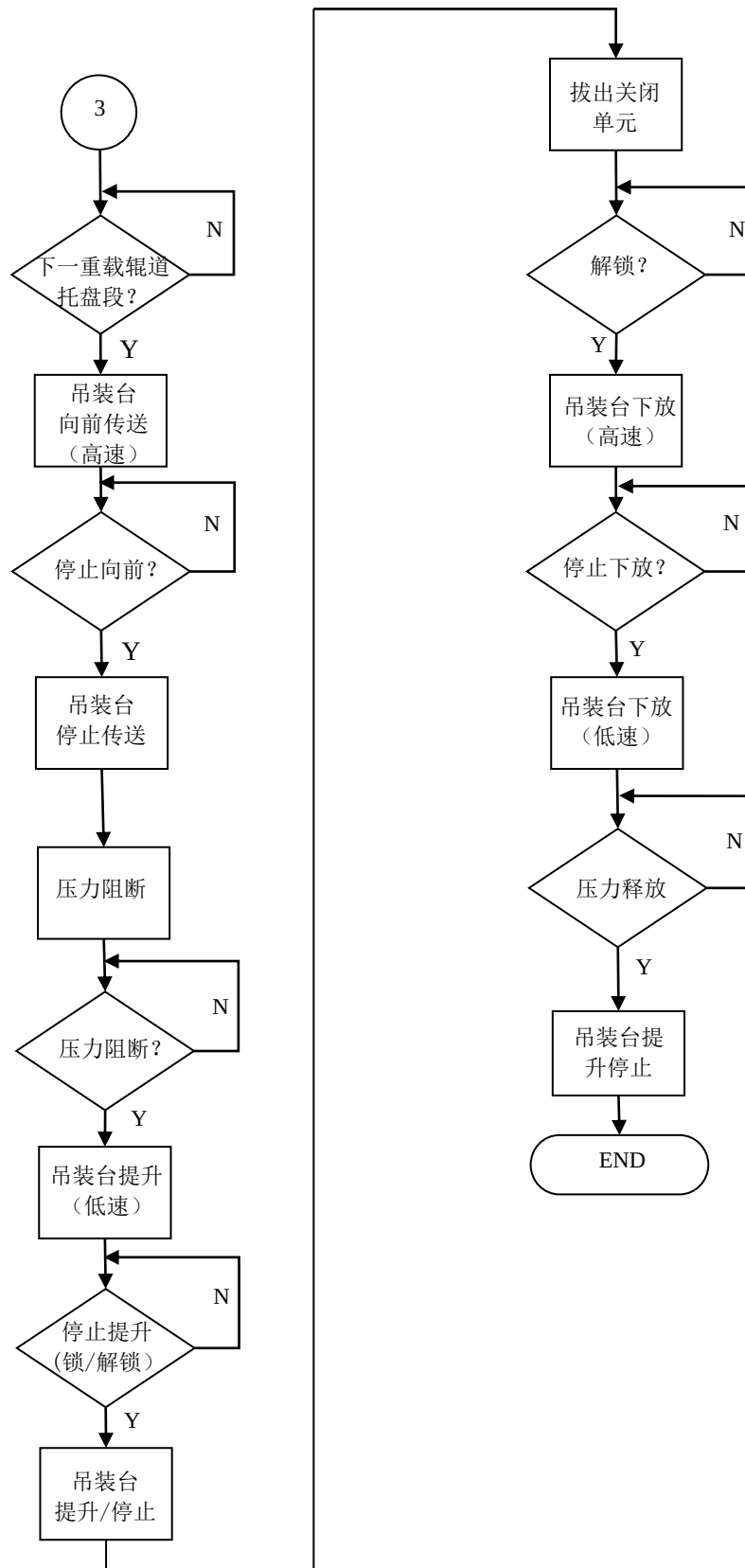


图 4-14 重载提升装置自动控制流程图（三）

4.3.2 轻载提升装置自动化控制功能

轻载提升装置位于高位的初始位置，当接收到前面辊道送来的空托盘后提升电机启动，提升装置下降到低位，然后提升装置辊道和后部辊道启动，将空托盘送至后部工序。当托盘被卸载后，提升装置回到高位，等待下一个工作周期。提升装置的位置是通过线性传感器检测得出。所有的托盘传送均通过计算机控制。设备示意如图 4-15 所示。

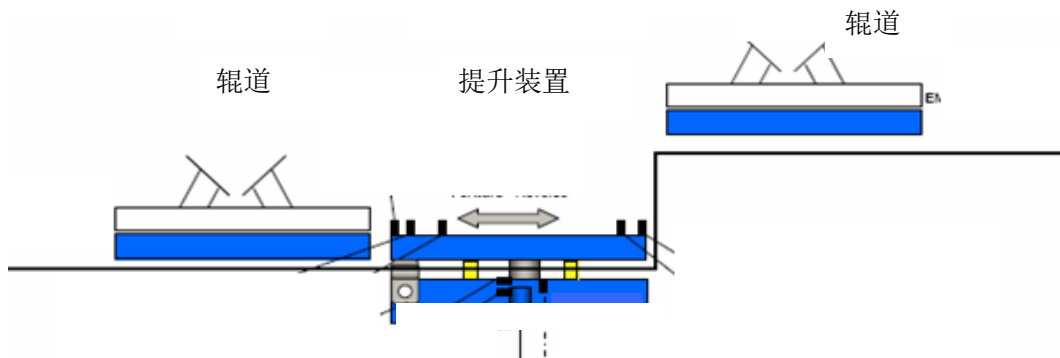


图 4-15 轻载提升装置控制设备示意图

（1）控制顺序说明

第一步：空托盘运送至提升装置辊道上；

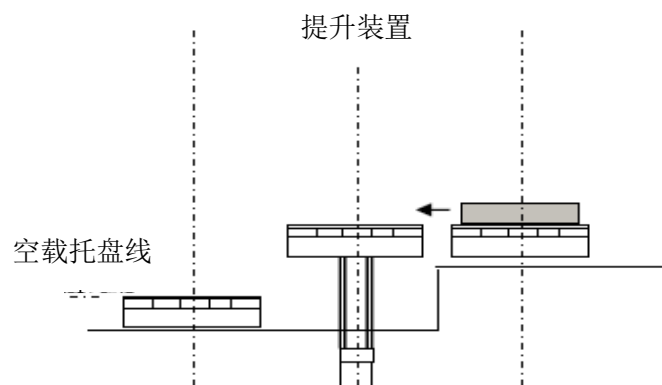


图 4-16 轻载提升装置控制动作（一）

第二步：提升装置下降至低位；

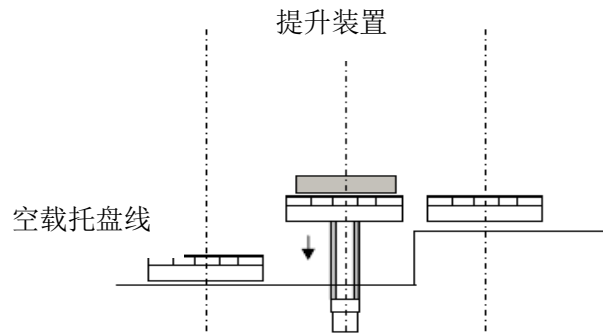


图 4-17 轻载提升装置控制动作（二）

第三步：辊道启动将托盘运出提升装置；

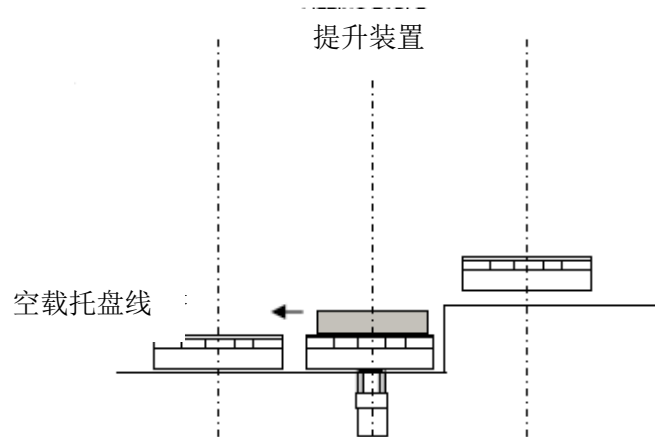


图 4-18 轻载提升装置控制动作（三）

第四步：提升装置上升至初始位；

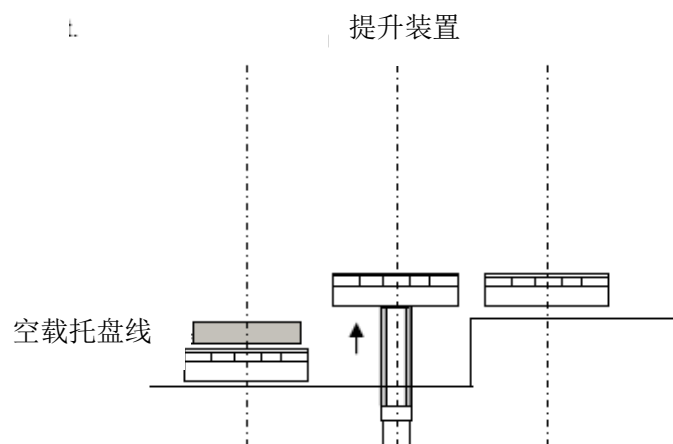


图 4-19 轻载提升装置控制动作（四）

(2) 自动控制流程图

轻载提升装置自动控制流程见图4-20、4-21所示。

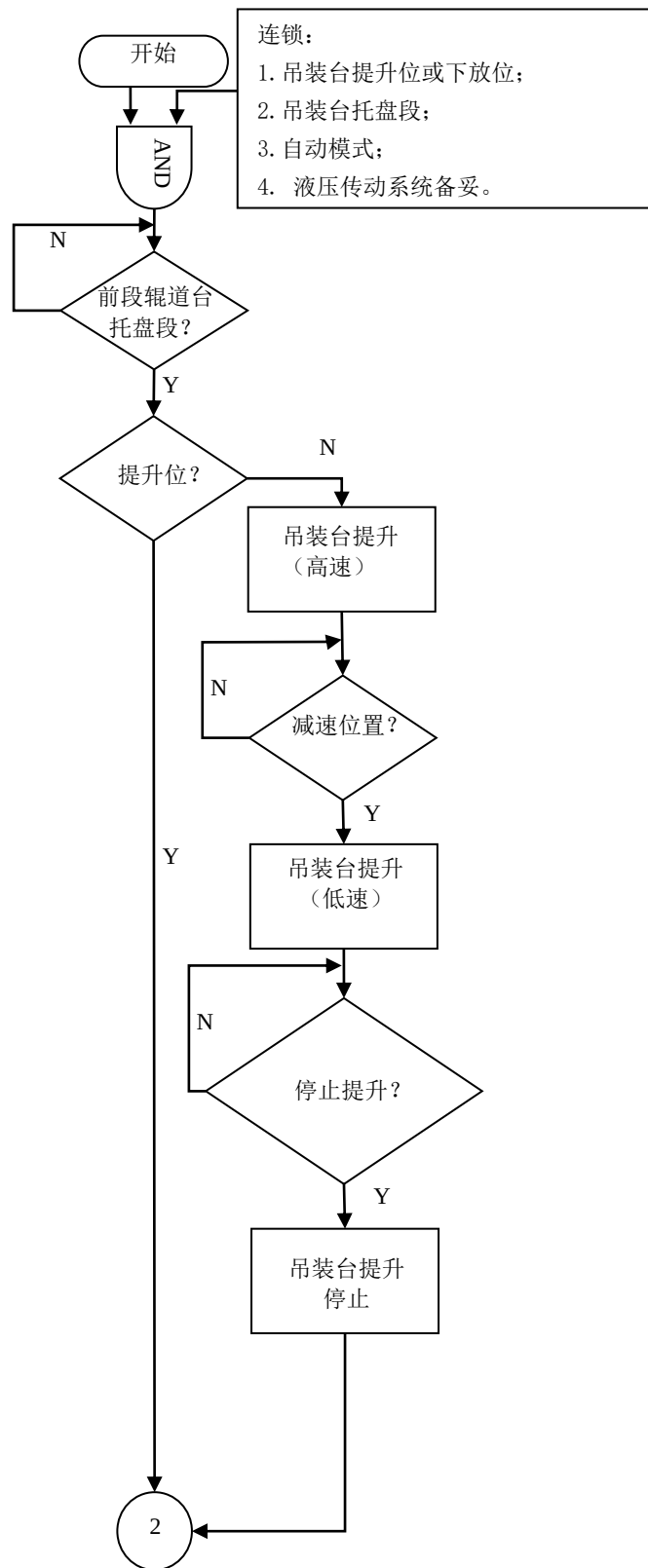


图 4-20 轻载提升装置自动控制流程图（一）

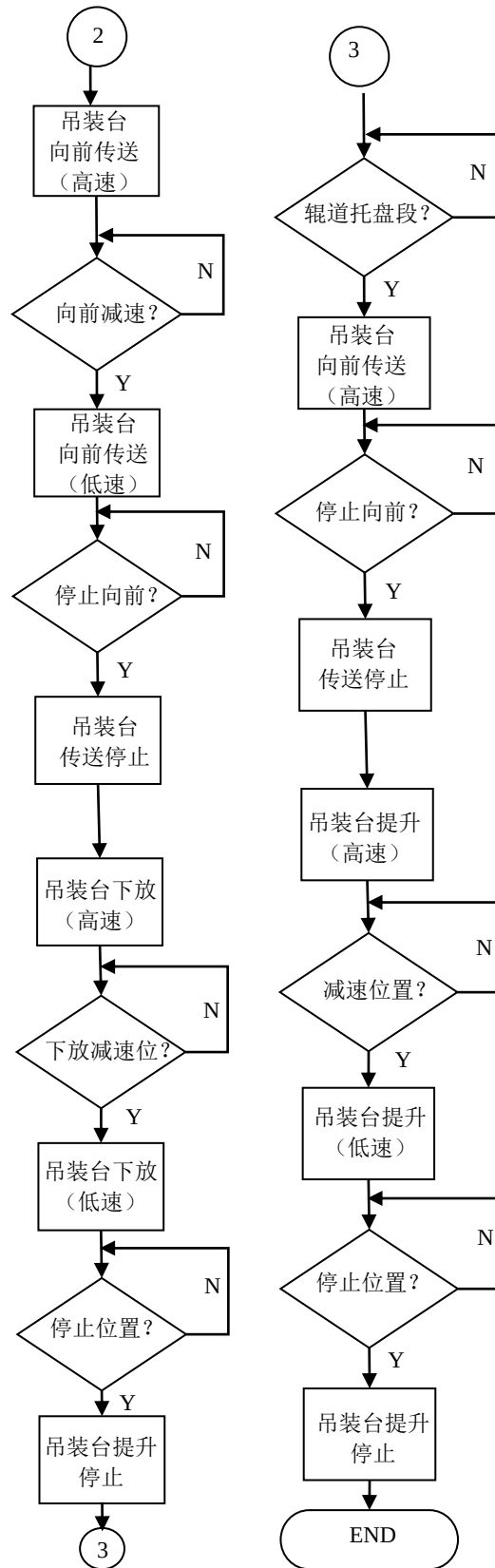


图 4-21 轻载提升装置自动控制流程图（二）

4.4 本章小结

本章简要介绍了 PLC 的工作原理并提出了自动化控制设计要求，分析了托盘运输自动化控制系统的构成和技术特点，根据实际工况中的动作顺序详细设计了重载提升装置和轻载提升装置自动控制流程图。

第 5 章 提升装置使用效果分析

现场实际应用是对理论设计的最好检验。本章针对现场调试和实际生产运行中出现的问题进行分析，制定了改进措施和优化方案，验证了两种提升装置设计理论的准确性。

5.1 托盘运输系统使用效果

经过近五年的建设，首钢京唐钢铁基地一期工程顺利投产，两条年产量 1000 万吨的中宽热轧带钢生产线和 3 条冷连轧机组相继投入运行，每年 900 多万吨的热轧钢卷和 200 多万吨的中间原料卷、冷轧成品卷运输量考验着双排式钢卷托盘运输系统。经过一年多的生产实践，该系统不仅运行稳定高效，维护简便，厂房美观，而且使用成本低，极大的减少了汽车等运输方式倒运带来的能源消耗和污染，同时能够与厂区内外运输系统实现良好衔接，特别是通过自动化系统的不断升级完善，使得多工序、多目的地的运输过程全部实现了自动控制，减少了人为因素的干扰和人员岗位，为京唐钢铁公司创造了巨大的经济和环境效益。生产运行实景如图 5-1、5-2 所示。



图 5-1 双排式托盘运输系统生产运行图（一）



图 5-2 双排式托盘运输系统生产运行图（二）

5.2 提升装置使用效果分析

5.2.1 重载提升装置使用效果分析

重载提升装置为液压升降型式，提升台架和导向架为焊接结构，并配套建设有液压站，其生产运行实景如图 5-3 所示。



图 5-3 重载提升装置生产运行图

在重载提升装置生产调试阶段，主要从设备提升能力、结构稳定性和动作周

期三个方面进行考核。在按最大卷重 28t 进行提升能力调试过程中,重载提升装置的各部分支架和提升托架未发生明显变形和位移,刚性良好,强度满足工作要求。在液压系统参数设定中,液压泵出口压力最初按设计计算值选用 14MPa,重载提升装置运行速度偏低,对生产节奏产生了一定影响,因此,最终液压泵出口压力调整为 16MPa,但仍低于系统设计压力 20MPa,同时提高了运行速度,满足了生产要求。

此外,由于热轧钢卷温度一般在 600℃左右,最高可达 800℃,其辐射热可能导致提升支架和液压缸产生变形,而原设计方案中的隔热措施考虑不足,因此在投入生产使用前,通过设计优化增加了双层岩棉隔热板以保护相关设备。经过一年多的生产实践,重载提升装置运行稳定,液压系统高效节能,充分验证了设计的正确性。

5.2.1 轻载提升装置使用效果分析

轻载提升装置为电动卷扬型式,其提升台架和导向架均为焊接结构。在实际使用中,各部分结构刚性良好,运行稳定,提升平稳,节奏满足生产要求,运行实景如图 5-4 所示。



图 5-4 轻载提升装置生产运行图

但轻载提升装置相对薄弱的部位是卷筒和钢丝绳,特别是在投入生产初期,出现了钢丝绳过早断丝、断股的现象。现对该问题的分析如下:

(1) 设备性能

轻载提升设备钢丝绳和卷筒设备参数如表 5-1 所示。

表 5-1 设备性能参数表

钢丝绳	性能参数	卷筒	性能参数
形式	6×19+FC 纤维芯	材质	Q235B
直径	26mm	直径	600mm
公称抗拉强度	1770MPa	宽度	235mm
最小破断力	395KN	厚度	20mm

（2） 事故原因分析

引发钢丝绳断丝的原因主要有磨损、过载、疲劳、锈蚀、塑性磨损、马氏体化和剪切断丝等^[57]，如图 5-5 所示。

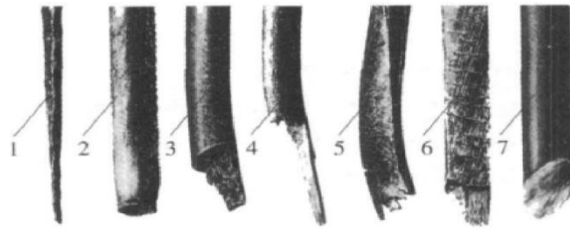


图 5-5 断丝的原因

1、磨损；2、过载；3、疲劳；4、锈蚀；5、塑性磨损；6、马氏体化；7、剪切；

首先对设备性能进行核算，原设计参数能够满足使用要求。其次，对现场情况进行分析排查，发现导致钢丝绳过早出现断丝问题的主要原因是绳轮保护架和导向轮安装不到位，使滑轮槽因磨损而损坏，钢丝绳运行时无法得到良好的约束而导致乱排，使得钢丝绳长时间受力不均而受损，进而导致断丝。而滑轮槽直径偏小，也是导致乱卷的原因之一。此外，京唐钢铁公司所处的海洋气候也加剧了对钢丝绳的腐蚀作用。

（3） 改进措施

针对生产中出现的问题和现场实际使用情况分析，对钢丝绳的使用采取了以下改进措施：

a) 调整滑轮绳槽半径，按 $0.538d$ (d 为钢丝绳公称直径) 取值 14mm,，改善因绳槽原因导致的乱卷现象；

b) 机械结构的不合理会对钢丝绳产生较大的接触应力、弯曲应力和挤压力，这类疲劳损伤将加速断丝周期，增加钢丝绳出现变形的几率，最终导致寿命缩短。因此，严格执行设备巡检制度，对绳轮保护架、导向轮等设备重点维护，发现乱卷等问题及时修复。

c) 规范使用制度, 设定合理的提升速度。新钢丝绳禁止直接高速重载运行, 同时避免与轮槽外物体发生摩擦, 避免表层出现马氏体组织。

d) 重视钢丝绳使用中的维护和保养, 定期润滑, 减少锈蚀损伤, 定期检查, 及时发现并处理问题^[58-59]。

通过采取以上措施后, 钢丝绳断丝现象基本得到解决, 保证了轻载提升装置的长期稳定运行。

5.3 本章小结

本章不仅分析了重载提升装置在生产调试阶段出现的问题和实际使用中的设计优化方案, 而且也分析了轻载提升装置在生产运行中出现的钢丝绳断丝问题的原因和改进措施。通过对两种提升装置使用效果的分析验证了本课题所提出的设计理论的准确性。

结 论

本文为满足双排式钢卷托盘运输系统对不同地形高度的适应要求，针对不同工况条件提出了重载和轻载两种提升装置设计方案，并在对普通提升机构的分析研究基础上，通过综合运用液压传动和控制理论、机械设计理论、CAE 有限元分析理论、设计优化理论和 PLC 自动化控制理论等方面的知识，完成了两种提升装置的机电液控一体化设计，最终成功应用于首钢京唐钢铁公司，解决了大密度、高强度、高温度的钢卷运输问题。

本论文完成的主要工作：

(1) 针对托盘运输中不同重量的钢卷起升要求，设计了重载和轻载两种提升装置的结构方案；计算分析了重载提升条件和液压系统受力，详细设计了液压系统原理图和主要液压元件选型；根据轻载提升装置的使用条件和起升方式，详细计算并完成了的钢丝绳、卷筒、轴承、电机及减速机的设计选型和关键部件的强度及使用寿命校核；

(2) 通过采用 Solidworks 软件建立了重载和轻载提升装置的三维模型装配图；并运用 Simulation 软件对重载提升装置关键部件—提升托架进行了有限元分析；通过对计算得到的主应力、位移和安全系数云图进行分析，针对出现的应力和位移偏大、安全系数不均衡等问题采用设计优化理论提出改进措施，经过二次分析，得到了结构更加稳定、重量更轻、经济可靠的优化方案；

(3) 基于安全可靠的工业用 PLC 控制系统平台，研究了双排式托盘运输自动化控制系统的主要构成和技术特点，并根据工艺和设备要求完成了重载和轻载提升装置控制流程图，满足了实际生产的自动化和半自动化控制要求；

(4) 全面跟踪提升装置的现场安装调试和生产使用情况，从设备提升能力、结构稳定性和满足生产节奏等方面考核设计产品，并对实际生产中出现的钢丝绳断丝、隔热保护等问题进行分析和改进，通过实际使用效果验证了本课题的设计方法和产品的准确性。

本文以钢卷托盘提升装置为对象，运用系统工程设计理念，从液压、机械、有限元分析、设计优化和自动化设计五个方面研究了机电液控一体化设计的基本原则和方法，特别是在产品结构设计和优化方面采用了一种基于有限元分析理论基础的具有广泛适用性的优化思路和方法，并通过设计产品在生产中的应用，实现了产品的功能性和安全可靠，不仅为企业节省了运行成本，也为今后研发其他工况或相关类型的提升机构提供了有益的借鉴和参考。

提升机构是一种广泛应用于矿山、冶金、化工、农业等各个领域的机械设

备，其研究、设计和制造具有重要的现实意义和使用价值。在本课题的设计与研究过程中，由于时间仓促和本人的学识有限，尚有许多工作需要更加深入的研究，比如对整体机构的动静态特性、热变形等因素分析、以提高可靠性和降低设备造价为目的的系统优化、自动化控制界面优化等，以上工作将对提高双排式钢卷托盘运输系统的产品质量、市场竞争力有着重要影响，有待今后进一步完善。

参考文献

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M].北京: 冶金工业出版社, 2004:128-130.
- [2] 韦富强. 首钢京唐公司热轧钢卷运输系统研究[J].轧钢, 2007 (6): 36-40.
- [3] 韦富强. 首钢国际工程公司总体设计的首钢京唐项目技术创新成果展系列报道(九)[N].世界金属导报, 2009-12-06 (24) .
- [4] 韦富强, 李春生, 何其佳等. 首钢京唐钢铁公司热轧钢卷运输系统研究[C]//中国钢铁工业协会.2007 年中国钢铁年会论文集(上册).北京: 冶金工业出版社, 2007:168-170.
- [5] 殷瑞钰. 节能、清洁生产、绿色制造与钢铁工业的可持续发展[J].钢铁, 2002 (8): 1-8.
- [6] 张英爽, 杜波等. 多绳提升机技术资料 MSI 系统开发与应用[J].矿山机械, 2001 (8): 27-29.
- [7] S.U.Dzholdashekov. Developments in hoist design technology applied to a 4000m deep shaft[J].Mining Technology.1995 (77) :886.
- [8] M.J.Beus,M.Ruest. New technology for hoist conveyance monitoring and analysis[J].CIM Bulletin.2002 (95) :1065.
- [9] 洪晓华. 矿井运输提升[M].北京: 机械工业出版社, 2000:13-15.
- [10] 饶绮麟. 21 世纪矿山机械的研究与开发[J].北京: 矿冶, 2013 (3) :1-4.
- [11] 戚天明. 从世界矿山机械发展趋势谈我国矿山机械发展的趋势[J].北京: 矿山机械, 2007 (10): 7-18.
- [12] 葛世荣. 缠绕式提升机筒壳强度的可靠性设计[J].北京:矿山机械, 1988 (3) :387-399.
- [13] 刁柏青. 钢丝绳安全系统可靠性评估[J].郑州:机械强度, 1994 (3) :206-209.
- [14] 郭宏. 用 ANSYS 软件对提升机滚筒进行优化设计[J].哈尔滨: 煤矿机械, 2003(12):13-14.
- [15] 郭燕华. NISA 有限元法在多绳摩擦提升机设计中的应用[N].长沙铁道学院学报, 2011-06-07(6).
- [16] 何凤梅. 缠绕式提升机中木衬对卷筒强度影响的有限元分析[J].哈尔滨: 煤矿机械, 2003(12):42-43.
- [17] 刘希萍, 李诚. PLC 控制技术的应用[J]. 北京: 科技传播, 2012 (2) : 77-79.
- [18] 李彬. PLC 在工业现场控制中的应用研究[J]. 郑州: 河南科技, 2013 (11) : 118-119.

- [19] 刘辉, 倪文婧. 大型矿井提升机电控系统研究[J]. 北京: 煤炭科学技术, 2013 (7): 96-99.
- [20] 王安山, 刘竞雄. 矿井提升机电气控制系统的发展[J]. 常州: 煤矿自动化, 1992(2):21-23.
- [21] 裘嗣明. 典型冷轧带钢处理线液压系统设计[J]. 宝钢技术, 2006 (2): 18-21.
- [22] 王益群, 张伟. 流体传动及控制技术的评述[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 95-99.
- [23] Wang F, Chen Y . Design and experimental study of oil-based pressure-compensated underwater hydraulic system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2013: 0959651813514219.
- [24] 朱小明. 我国液压行业技术创新策略的分类及其特性[J]. 流体传动与控制, 2012 (2): 6-9.
- [25] 陆元宁. 钢卷提升机系统设计及接触有限元强度分析研究[D]. 重庆: 重庆大学学位论文, 2008:5-8.
- [26] Osamu Maeda, Yuzhong Cao, Yusuf Altintas. Expert spindle design system [J]. Int.J.Mach. Tools Manufact ,1997, 37 (2) :178-181.
- [27] 董立立, 赵益萍, 梁林泉等. 机械优化设计理论方法研究综述[J]. 机床与液压, 2010 (15) : 114-119.
- [28] 唐建勇, 李宏业. 机械设计中优化设计的重要性和实现路径的探讨[J]. 黑龙江科学, 2014 (4) : 121.
- [29] 段鹏文. 缠绕式提升机卷筒壁厚设计方法研究[J]. 煤炭工程, 2005 (11): 17-18.
- [30] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004:7-139-142.
- [31] 胡文华. 浅谈变频调速电动机选型要点[J]. 机械管理开发, 2010 (1) : 42-43.
- [32] E.B.Kivan, E.Budak. Structural modeling of end mills for form error and stability analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44:1151-1161.
- [33] 张洪武, 关振群, 李云鹏. 有限元分析与 CAE 技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004:11-12.
- [34] 王庆五, 左昉, 胡仁喜. ANSYS10.0 机械设计高级应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:6-10.
- [35] Ramezanali Mah davinejad. Finite element analysis of machine and workpiece instability in turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45:73-760.

- [36] Wiesinger H. Development of New Technologies Opportunities and Pitfalls[J]. Iron and Steelmaker, 1997 (12) :33.
- [37] 孙伟. 现代机械产品设计规划及可视优化设计方法研究[D].辽宁: 东北大学学位论文, 2007:57-59.
- [38] Leu L J, Lee C H. Optimal design system using finite element package as the analysis engine[J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10 (6) : 713-725.
- [39] 许丽娇, 叶平, 叶惺. 浅谈大型有限元分析软件 ANSYS[J].煤矿机械, 2005 (4) :18-20.
- [40] 吴立言, 刘更, 贺朝霞. 用有限元法进行结构强度计算时极限应力的确定[J]. 机械科学与技术, 2004 (11) :21-22.
- [41] 赵恒华, 高兴军. ANSYS 软件及其使用[J]. 制造业自动化, 2004 (5) :14-16.
- [42] 陈超祥, 胡其登. SolidWorks Simulation 高级教程[M].北京: 机械工业出版社, 2013:1-4.
- [43] 陈永当等. 基于 SolidWorks Simulation 的产品设计有限元分析[J]. 计算机技术与发展, 2012 (9) :42-43.
- [44] 高耀东. ANSYS 机械工程应用精华 50 例[M].第 3 版.北京: 电子工业出版社, 2011:34-38.
- [45] 刘丽, 曹桂霞, 冯长建. 基于实体有限元的机械优化设计方法及其应用[J]. 大连民族学院学报, 2005, 7 (5) : 67-69.
- [46] Peshek.Clifford.J, Mellish.Michael.T. Recent developments and future trends in PLC programming languages and programming tools for real time control[C].IEEE Cement Industry Technical Conference, 1993: 219-230.
- [47] Hibino Y Maruno , T Okamoto K. Recent progress on large-scale PLC technologies with advanced functions[J].NTT Review, 2001:4-9.
- [48] Younis, Mohammed, Bani Frey. Georg Formalization of PLC programs to sustain reliability[C].2004 IEEE Conference on Robotics. Automation and Mechatronics, 2004:10-13.
- [49] Gerold J S. Siemens rolls out new PLC series[J]. Control Engineering, 1994, 41(8): 69-69.
- [50] 王玉铎. PLC 可编程控制器原理及其在工业上的应用[J]. 科技传播, 2013, 19: 154.
- [51] Surma S. Integrated software environment dedicated for implementation of control systems based on PLC controllers[J]. Transport Problems, 2007, 2: 63-68.
- [52] 马汉伟. 基于 PLC 的矿井提升模拟系统设计[D]. 南京理工大学, 2013.

- [53] SIEMENS SIMATIC S7-300 和 S7-400 逻辑编程[M].西门子, 2004:3-6.
- [54] 廖常初. S7300/400PLC 应用技术[M].北京: 机械工业出版社, 2004:47-49.
- [55] Oommen M.dt . Maintainability Improvement of Mining Mochipes Using Knowledge based Expert System[C]. IEEE Mining Industry Technical Conference, 1987:31.
- [56] 王夏书, 王超, 李洪波. 首钢迁钢 1580mm 热轧双排式托盘运输自动化控制系统研究与应用[N].世界金属导报, 2012-07-24 (28) .
- [57] 孙晔. 起重机用钢丝绳使用寿命的探讨[J].北京: 建设机械技术与管理, 2008 (2) :18-22.
- [58] 杨岳民, 潘保龙. 影响钢丝绳使用寿命的因素及改进措施[J].郑州: 金属制品, 2011 (6) :60-63.
- [59] 崔影. 润滑对钢丝绳使用寿命的影响机制[J].郑州: 金属制品, 2013 (1) :31-33.

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

无

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《双排式钢卷托盘运输提升装置的一体化设计与研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。

作者签名：

王烈

日期： 年 月 日

学位论文使用权限

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

(1) 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；(2) 学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；(3) 研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。

本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：

王烈

日期： 年 月 日

导师签名：

王烈

日期： 年 月 日

致 谢

衷心感谢导师杨斌久教授对本人的精心指导。杨教授不仅在立题之初就选题和论文结构编排的问题为本人耐心讲解，并提供了大量珍贵资料，而且在论文的撰写过程中不厌其烦的修改校勘，特别是在本人因畏难情绪而对完成论文失去信心的时候给予了极大的鼓励和帮助。他的言传身教将使我受益终生。

此外，衷心感谢首钢国际工程技术有限公司韦富强部长对本人的帮助。作为专利持有人，正是在韦富强部长的大力支持下，本人才得以完成此文。同时，感谢俞斌、秦艳梅、杨成功、王超等同事们，在他们的热情帮助与指导下，本文的机械、液压、电气自动化设计先进合理，并通过了实际生产的检验，实现了设计向生产的转化！

最后，对关心和帮助过本人的哈尔滨工业大学（威海）船舶与海洋工程学院的刘文剑、张颖、金鑫、赵翼飞等各位老师、同学以及航天三院教育学院的姚兰老师和我的父母表示衷心的感谢！

个人简历

1979 年 4 月 29 日出生于辽宁省锦州市黑山县。

1998 年 7 月考入北京科技大学材料科学与工程学院金属压力加工专业，2002 年 7 月本科毕业并获得工学学士学位。

获奖情况：优秀团干部。

工作经历：

2002 年 8 月进入北京首钢国际工程技术有限公司轧钢设计研究所工作至今。