
摘 要

活套是现代酸洗连轧、连续退火、彩涂、镀锌等冷轧生产线连续运行的关键性设备，作为带钢贮存系统在头部焊接、尾部剪切及光整换辊等情况下保证工艺段生产的连续性，同时作为重要张力分区影响相邻区域的张力控制及带钢纠偏装置的工作性能。作为同时包含位置控制和张力控制的全线最为复杂的系统，活套控制的优劣影响全线的控制性能。

本文结合鞍钢莆田冷轧镀锌线的现场实际，以出口立式活套为研究对象，分析活套位置、速度和张力控制之间的联系，使用神经网络的建立活套的张力控制模型，并验证模型的精确性，而后在仿真模型的基础上进行系统仿真。通过分析得出虽然常规 PID 控制器能够基本满足现场的工艺要求，但对于立式活套这种耦合、非线性的复杂控制对象，很难达到较高的控制精度。为解决控制中存在的问题，提出采用单神经元自适应 PID 控制器代替常规的 PID 控制器以改善活套张力的控制性能。并对已建立的出口活套张力模型使用单神经元自适应 PID 控制器进行仿真实验，测试系统的控制性能和鲁棒性。

本文使用 MATLAB 中的 S 函数和 Simulink 对活套系统的张力模型进行仿真实验。对活套张力模型分别进行常规 PID 控制和单神经元自适应 PID 控制仿真，通过对仿真结果的比较与分析，得出单神经元自适应 PID 控制器的响应速度快、超调量小、稳态性能佳，对被控对象的特性变化有很强的适应能力。优于常规的 PID 控制器。他通过对参数在线的自我调整特改善活套系统的控制精度，增加其快速性和稳定性，进而改善整条生产线的控制指标，使得产品质量和生产线的稳定运行时间得到提高，具有十分重要的理论意义和实践意义。

关键词：立式活套；张力控制；神经网络；单神经元自适应 PID 控制器

Research on modeling and control system for vertical looper of strip cold tandem mill

Abstract

Looper is the key equipment in modern PL-TCM、CAL、CGL production Line ,As the store system of the line, Looper used to keep the line continue running during the time welding cutting and SPM roll changing, As the tension section infect the neighbor section tension control and the function of the CPC system. The control system of the Looper is the most complicate in the whole line.

The thesis's background is the Putian continuous galvanizing line, and the subject investigated is the exit loopers. Firstly, the thesis analysis the relationship between the position control, speed control and tension control of the loopers. Then according to the their relation and locale situation, it analysis the method of complex tension control the exit vertical loopers used, and finds the problems of the present looper system in Sync-control. Secondly, the thesis uses the method of BP neural network to establish the model of speed and tension of loopers system, and validates that the model accords with the locale situation generally. The conventional PID controller satisfies with the technological requirements, but for the time-change and non-linear model as vertical loopers, it has difficulties in filling the purposes of high precision control and robustness. Finally, the thesis uses single neur self-regulating PID controller to perform an experiment in tracking and robustness.

The thesis uses S-function and Simulink in MATLAB to make an experiment with simulation. According to the analysis and comparison between conventional PID and single neural self-regulating PID controller, the thesis comes to a conclusion that the system which single neural self-regulating PID controller has the characteristic of responding quirkier, better steady state performance and smaller overshoot, besides, it has the capability of suiting with the parameters' changes, which has improve the control precision of the looper system. increase its rapidity and stability ,It has important actual and academic value in improving the level of looper control and steel quality.

keywords: Vertical looper;Tension control; BP neural network; single neur self-regulatingPID control

目录

独创性声明	I
摘 要	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪 论	- 1 -
1.1 课题研究背景	- 1 -
1.2 鞍钢莆田冷轧热镀锌线项目概述	- 1 -
1.3 冷轧立式活套的研究现状	- 5 -
1.4 本文的研究内容	- 8 -
第 2 章 立式活套的速度和张力的控制	- 11 -
2.1 出口立式活套的分析	- 11 -
2.1.1 出口活套装置技术参数	- 11 -
2.1.2 出口段工作过程描述	- 12 -
2.2 立式活套的位置控制	- 13 -
2.3 立式活套的张力控制	- 16 -
2.3.1 张力产生的基本原理	- 16 -
2.3.2 带钢张力的种类和作用	- 18 -
2.4 张力的控制方式及原理	- 20 -
2.4.1 直接张力控制	- 20 -
2.4.2 间接张力控制	- 22 -
2.4.3 立式活套的复合张力控制	- 24 -
2.5 立式活套张力控制的前馈补偿	- 26 -
2.5.1 转动惯量补偿力矩	- 26 -
2.5.2 机械损耗补偿力矩	- 27 -
2.6 立式活套控制中存在的问题	- 28 -
2.7 本章小结	- 29 -
第 3 章 莆田镀锌线活套控制的实现	- 31 -
3.1 莆田镀锌线活套控制系统配置	- 31 -

3.2 莆田镀锌线的活套控制	- 35 -
3.2.1 莆田镀锌活套套量与同步控制	- 36 -
3.2.2 莆田镀锌活套张力控制	- 37 -
3.2.3 目前张力控制的缺点	- 41 -
3.3 本章小节	- 42 -
第 4 章 基于神经网络的活套张力建模	- 43 -
4.1 系统模型辨识的基础	- 43 -
4.1.1 非线性系统的辨识模型及结构	- 44 -
4.1.2 系统辨识中的基本问题	- 45 -
4.1.3 基于神经网络的系统辨识的基本思路	- 46 -
4.2 建立 BP 网络模型算法的实现	- 47 -
4.2.1 BP 网络拓扑结构和数学描述	- 47 -
4.2.2 标准 BP 运行算法	- 49 -
4.3 基于 BP 神经网络的活套速度和张力建模	- 50 -
4.4 本章小结	- 58 -
第 5 章 活套系统单神经元自适应 PID 控制	- 59 -
5.1 PID 控制器概述	- 59 -
5.2 神经网络控制的基本原理	- 61 -
5.3 单神经元自适应 PID 控制器及其算法	- 63 -
5.4 单神经元自适应 PID 控制器的实现	- 66 -
5.5 仿真模型的建立及分析	- 67 -
5.5.1 活套单神经元自适应 PID 仿真模型的建立	- 67 -
5.5.2 仿真结果分析	- 70 -
第 6 章 结论与展望	- 73 -
6.1 结论	- 73 -
6.2 展望	- 73 -
参考文献	- 75 -
致 谢	- 77 -

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究背景

作为最重要的基础工业之一，钢铁工业在社会发展、经济建设、国防建设、财政税收以及稳定就业率等方面发挥着重要的作用，是国家基础设施建设和国防建设的基础，钢铁工业的发展水平直接决定了汽车、建筑、家电、机械、造船以及国防航天等产业的发展水平，是衡量一个国家经济水平和综合国力的重要标志。

我国粗钢产量高，低档次普通钢材产能相对过剩，高端钢材产品自给能力不足，而且随着中国城市化进程的推进，汽车行业和家电制造业有了飞速的发展，同时我国也正在进行自主飞机、高速铁路和电动汽车的重点工程建设。这些都加大了对连退板、镀锌板及其他冷轧后处理板材等高附加值产品的需求。针对行业现状和市场需求情况，鞍钢集团在近年做出了一系列调整措施：先后通过引进西门子控制系统建设了冷轧 1#-3#镀锌线，4#-5#镀锌线，2007 年以鞍钢自动化公司为基础建成了第一条自主知识产权的鞍钢 1450 连续退火线，而后在 2011 年建成莆田冷轧 1450 连续退火线，2013 年建成莆田冷轧镀锌线。

本文拟通过现场数据的采集结合实际设计参数，对活套进行数学模型仿真，并针对其不同规格不同材质不同的张力设定值的特点，以单神经元自适应 PID 代替原有的老式经典 PID 算法，达到在编程的过程中能使用模型进行初步测试，设定初始参数，在现场调试过程中通过自适应匹配更适合的参数，在提高调试效率及安全性的同时使系统有更好的快速性和稳定性。

1.2 鞍钢莆田冷轧热镀锌线项目概述

鞍钢莆田冷轧是鞍钢集团继朝阳和鲅鱼圈战略发展后的又一重大发展规划，为了更好的满足国内外市场需求，充分利用福建沿海优势，从而增强公司对东南沿海地区市场的辐射能力，项目规模为年产冷轧产品 100 万吨，以家电板为主，同时兼顾建筑和汽车用板。

鞍钢莆田冷轧主要包括：1 条酸洗轧机联合机组、1 条连续退火机组、1 条热镀锌机组、2 条重卷机组、3 条包装机组及相应的配套公辅设施组成。在该项目年产 100 万吨的冷轧产品中，热镀锌卷年产量为 30 万吨、冷轧卷年产量为 70 万吨。冷轧产品的生产标准按照 JIS3135、JIS4141 标准执行，热镀锌产品生产标准按照 EN10147、EN10142 标准执行。产品规格为宽度 700-1350mm，厚度 0.25-2mm。

为确保产品质量和生产能力，该项目采用 Alstom 公司的 HPC 系列高性能控制器组成自动

化控制系统，采用最先进的工艺控制和产品质量控制系统，同时在生产操作管理、产品及合同管理和设备管理方面也采用了最先进计算机控制系统。

冷轧处理线一般按活套进行区域划分，入口活套前一直到开卷机为入口段，从入口活套到出口活套为工艺段，出口活套到检查台活套为光整区，从检查台活套到卷曲机为出口段，在加上出入口的钢卷运输系统与液压站系统，就构成了整个生产线。

该镀锌线入口段为上下线双开卷布置方式，单线从开卷机开始经磁力皮带、入口夹送辊、矫直机前夹送辊、矫直机、剪前夹送辊、横切剪、转向夹送辊到公共夹送辊合并进入焊机，上下线设备布置和功能完全一致，正常生产状况下两台开卷机交替工作，一台工作的同时，另一台进行上卷，带头废料剪切等准备工作，然后将带钢头部定位到焊机前等待，等另一台开卷的带钢甩尾结束后马上进行焊接，从而减少入口段因准备工作而产生的停机时间，缓解活套的存储压力，保证带钢的连续运行。

工艺段为生产线的核心区域，在生产过程中，出入口段应利用活套的存储能力产生的停机时间进行钢卷的上下线工作，保证工艺段的连续运行，如果发生故障，引起工艺段停机，轻则产生大量的废品造成损失，重则产生断带事故。

工艺段由入口活套开始，经清洗段、连续退火炉、锌锅、冷却塔、光整机、拉矫机、辊涂机、圆盘剪完成一系列的工艺过程，改变带钢从金相、屈服强度、表面粗糙度等一系列的工艺参数，带到客户的需求，具体过程下面再详细介绍。

出口段从出口活套开始，依次经检查台、测厚测宽仪、涂油机到飞剪进行带钢的采样、头尾废料及焊缝的剪切，最后在开卷卷成成品卷，成品卷由出口卸卷小车从卷曲机上运送到出口步进梁，再由步进梁运输至打包机组对成品卷进行包装。

生产线整体布局简图如图 1.1 所示。

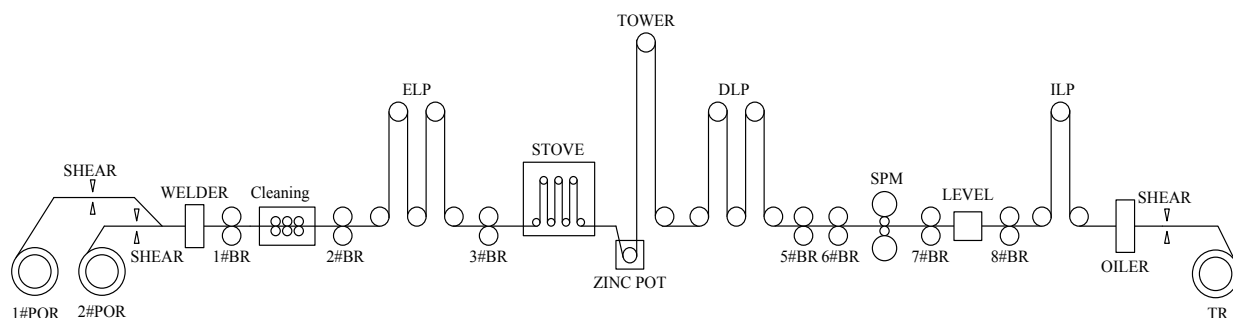


图 1.1 生产线整体布局图
Fig1.1 Product Line Position

设备中文说明如下表：

表 1.1 生产设备说明
Table1.1 Description of product device

符号	说明	符号	说明
POR	开卷机	TOWER	冷却塔
BR	张力辊	DLP	出口活套
ELP	入口活套	SPM	光整机
STOVE	加热炉	LEVEL	拉矫机
ZINC POT	锌锅	ILP	检查活套
OLIER	涂油机	TR	卷曲机

下面简要介绍一下一卷带钢在镀锌线上的生产流程。首先吊车将原料卷吊放到入口步进梁上，同时钢卷跟踪系统接收到鞍座的占用信号，就会将来自三级生产管理的钢卷基本信息显示到画面并存入缓存区待钢卷上线后使用，随着钢卷不断上线，步进梁会自动步进，保持最内侧的卷位有卷，等待运输小车接卷，钢卷运输车根据卷曲的选择信息将钢卷运送到相应的开卷机入口。每台开卷机都有一个单独的上卷小车，主要负责从钢卷运输车上将钢卷运送到开卷地辊位，生产操作人员将在地辊位给钢卷拆打捆带，并用地辊将带头旋转到合适的角度准备上卷。待开卷机上的钢卷甩尾完成后，小车将对钢卷进行直径测量，同时自动调整到芯轴高度上卷，小车前进到芯轴中心位置后，抬起芯轴外支撑臂，同时将芯轴涨紧固定钢卷。利用磁力皮带吸住带头，配合开卷伸缩导板将带头引入入口夹送辊。同时将入口矫直机根据来料厚度调整好辊缝，待带头进入矫直机后压下，保证带头的板型，防止卡在机械的缝隙中。而后带头自动定位到入口横切剪，进行带头超差部分的废料剪切，切下的废料由运输带运到废料箱内。废料剪切完成后将带头自动定位到焊机入口等待，等上卷带尾定位焊机完成后进行焊接，焊接完成启动定位到月牙剪，进行焊缝的背凸测试，测试合格就可以入口段建张运行了。

带钢从入口上线以后首先进入到清洗段，清洗段主要由碱洗槽、电解清洗槽、热水漂洗槽、刷洗单元、挤干辊单元、热风干燥系统以及循环系统组成，主要为除去带钢表面在冷轧时吸附的轧制油，改善带钢表面清洁度以满足后续的工艺要求。循环系统主要为给部分配置所需浓度的清洗液及电解液，根据电导率反馈进行配置流量的调节，同时还通过各部分的喷嘴进行喷射清洗，并利用蒸汽调节各部分的温度。电解清洗是利加直流电压的电极板，在带钢经过两个电极板过程中。通过电场电流降低带钢与电解质溶液的界面张力，电解质溶液渗透到带钢表面的油脂下面，通过氧化还原反应在界面产生大量的起泡，从污物和金属的缝隙中逸出，使得污物从带钢表面脱落，达到清洗的目的。挤干辊单元和热风干燥的目的是防止带钢将水带到后续工艺，影响其他的工艺效果。

带钢出清洗段后经由 2#张力辊进入入口活套。入口活套为单立式活套，在生产线正常运

行的时候保持满套位置，保证在入口上卷焊接的时间工艺段不受影响，在入口焊接结束后便高速充套，等待下一次焊接。在活套底部装有 CPC 即带钢对中装置，防止在生产线运行过程中由于带钢跑偏刮蹭引起断带等事故。CPC 装置利用电磁检测或自动巡边装置检测带钢的实际位置，通过纠偏辊进行调节，保证带钢始终运行在中心线附近。全线根据机械结构设有多处对中装置，在带钢建立张力并以一定速度运行时自动投入使用。

带钢离开口活套经过 3#张力辊进入炉区。退火炉的主要功能是根据带钢的热力学模型，把带钢沿一定的温度曲线加热到设定的温度、并根据适当的冷却曲线冷却。降低的冷加工硬化，改善薄板的成型性能。加热段由上下导辊形成通道，在通道两侧装有辐射管，透过燃烧控制加热辐射管从两面加热带钢，对带钢宽度方向均匀加热，从辐射管排出的燃烧气体集中到汇流室，在排烟风机的作用下形成负压状态，每段的温度通过调节燃烧气体的流量和助燃风量的大小进行控制。根据冶金学原理，退火分为两个阶段，第一阶段是再结晶和晶粒长大过程，这一阶段包括加热、退火温度下的保温和第一段中速冷却，这一阶段的目的是形成对带钢成型性能很重要的组织结构特征，第二阶段包括快速冷却和过时效处理，这一阶段决定了带钢组织中碳化物分部特性和过饱和固溶的碳含量，给定了带钢的实效行为。

锌锅位于炉子出口处，锌锅利用大功率感应电炉来融化锌锭，同时补偿镀带钢从锌锅中通过带走的热量，维持稳定的镀锌温度，带钢经炉鼻进入锌锅中的锌液进行浸镀，绕过沉没辊后出锌锅，再通过稳定辊和气刀进入冷却阶段。浸在锌液中的稳定辊用于控制带钢的摆动，带钢从锌锅出来后，气动和冷却风箱的巨大气流会使带钢发生摆动，通过调整沉没辊上部稳定辊的水平距离，可增大带钢张力防止摆动，气刀是利用气体喷吹来控制镀层的厚度，通过安装在后面的镀层测厚仪进行反馈，调节气刀风机的气刀间隙角度和风量，达到要求的镀层厚度。

带钢出锌锅经冷却塔冷却进入光整区，光整机利用轧制力控制，可以产生一定的延伸率，能够改善带钢的机械性能，消除屈服平台，同时控制板型，提高产品质量，光整的另一功能是对带钢表面质量的改善，压平带钢表面，使锌层能够更好的附着在带钢表面上，传递粗糙度，使带钢更容易进行防锈处理，拉矫机是通过调整辊的插入量，利用张力产生一定的延伸率，区别于光整机主要针对带钢表面，拉矫机作用于带钢整个截面，具有横向、纵向和垂直于厚度方向的三个自由度的变形，因而在所有轴线上的滑移面都能活动，可以消除带钢浪边、浪形、瓢曲和轻度镰刀弯。后经过滚涂机进行表面涂层，滚涂机后布置有圆盘剪，对带钢进行切边后就进入出口活套。

出口活套在正常转车时保持空套，当出口段进行剪切、卸卷或检查台对带钢进行表面质量检查时，活套会向上拉升，存储带钢，保证工艺段的生产速度，出口活套后带钢进入检查台，检查台内有测宽、测厚及表面检查仪用于测量产品规格和质量，同时质量检查员，通过垂直检

查室和水平检查台进行监测。尾部摄有静电涂油机，对带钢表面进行涂油。

出口飞剪可以在运行的情况下进行带钢的连续剪切，当飞剪分切完成后，前一卷带钢进行自动甩尾，飞剪继续按操作设定进行带尾带头的样品和废料剪切，剪切完成后带头到等待位等待，前一卷钢卷下线并且卷曲穿带准备好后进行穿带。带头由穿带导板引入卷取机。皮带助卷器用于将带钢头部缠绕到卷筒上。通过对带钢头部的跟踪，当缠绕一定圈数后，各穿带辅助设备就会自动打开。

成品卷甩尾完成后，出口卸卷小车上升顶住钢卷，卷取机芯轴收缩，小车将钢卷先将运到称重位称重，并由打捆机打捆，再将钢卷运送到出口步进梁，步进梁将钢卷送到包装线进行包装，然后就可以吊到成品卷库等待发货了。

1.3 冷轧立式活套的研究现状

镀锌、彩涂、连续退火、酸洗连轧、等冷轧生产线之所以能够保持连续运行，就是因为有活套的存在，作为带钢贮存系统在头部焊接、尾部剪切及光整换辊等情况下保证工艺段生产的连续性，同时作为重要张力分区影响相邻区域的张力控制及带钢纠偏装置的工作性能。作为同时包含位置控制和张力控制的全线最为复杂的系统，活套的控制性能直接影响全线控制系统性能。

活套在冷轧带钢处理线中可以分三种结构，分别是立式活套、卧式活套和螺旋式活套。卧式活套是横向水平布置，特点是对空间的横向占用不要求厂方的高度，而且有较大的牵引力，一般用于空间较充足且对带钢张力要求较大的生产线，螺旋式活套机械部分比较复杂，且在安装维护上要求较高，同时在速度和张力方面有些限制，没有得到广泛的应用。而立式活套是在近些年发展起来的一种技术，虽然还不是十分成熟。但相对于卧式活套有很多优点，其占用空间较小，活套套量却可以很大，对带钢张力的控制精度很高^[5]。虽然目前国内冷轧生产线多使用卧式活套，但从目前国内外的发展趋势看，立式活套的优点将会使他逐渐取代卧式活套，成为主流应用，因此本文选用立式活套作为研究对象。

目前活套装置有以下几个广泛应用的方面：

（1）活套位置的测量装置

由于在生产过程中需要对活套位置进行控制，所以必须实时检测活套的实际位置，在热轧以及棒线材生产线，由于活套的机械结构的关系，一般采用活套位置扫描器对活套位置进行检测，活套位置扫描器通过对热金属检测的原理来测量活套高度，也有的生产线使用内置于液压缸中的位置传感器来计算活套的位置。

而冷轧立式活套的机械结构和热轧有很大区别，通常套量要大很多，无法使用直接的扫描

装置检测活套位置，所以一般使用安装在活套卷筒后面的绝对值码盘来计算活套的位置，使用现场总线将数据采集到 PLC，使用编码器便于安装和维护，而且可以保持一定的检测精度，目前多数冷轧立式活套都采用这种位置检测方法。

（2）活套塔的设计

活套塔一般根据生产线的生产节奏和运行速度来进行设计，对于生产节奏和运行速度都比较慢的生产线，对活套的套量需求较小，活套塔可以设计为单塔，单活套的系统惯量小，所以控制起来比较简单，而且不存在双活套位置同步问题；而对于镀锌线等大型系统而言，其双开卷双卷曲的结构使得其生产节奏很快，运行速度也比较快，薄料可以达到 1000m/min 左右，单塔活套难以满足生产线大套量的需求，如果将单塔活套设计的很大，又很难保证其控制的精度。所以一般对于有较大套量需求的生产线，通常设计为双立式活套，将一个大活套拆分成两个独立的小活套，只是在两个独立活套之间增加位置同步控制。

活套通过对传动装置对卷扬电机进行双闭环控制，带动卷筒缠绕钢绳，通过滑轮组拉动小车在活套内产生带钢张力，通过控制卷扬电机的速度和转矩来实现对活套卷扬的位置、速度和张力的控制。

目前的活套控制方式：

（1）传统的活套控制

传统的活套控制方法是通过改变卷扬电机的输出力矩来调节活套张力的，这种控制方法是以活套的实际检测张力为反馈，通过速度电流的双闭环调速系统进行调节，在调试过程中需要对张力环、速度环与电流环的参数进行整定，但其并未考虑速度与转矩的耦合关系，只是构建了张力的闭环控制系统，所以在控制过程中难以达到很好的控制精度，传动的活套控制方法结构清晰容易理解实现，并且在以往的调试过程中积累的经验参数也使得调试过程简单化，所以目前的应用较为广泛。

（2）互不相关活套控制

考虑到活套卷扬电机速度与转矩之间的耦合关系，为更好的对活套进行控制，需要对两者进行解耦，采用前置补偿器的解耦方法是目前应有较多的解耦方法，使用状态解耦、角形解耦和对角优势解耦等方法，可以避免活套卷扬速度与转矩之间互相干涉，使控制简化为单变量的闭环控制，所以也叫做互不相关活套控制，互不相关活套控制也存在着一些缺点：

卷扬传动的速度调节器依然影响张力控制；

张力调节的快速性会受到影响，因为速度调节的快速性受到了限制，而因此会产生张力波动。

（3）活套多变量最优控制

活套张力控制系统是由三个部分组成的：活套卷扬电机的传动控制系统；活套张力控制系统和活套提升系统。可以使用最优化的调节理论对这三个部分进行控制建模，对三部分进行协调控制，使整个系统近似线性化，活套的最优多变量控制系统的优点是能把活套的张力控制与速度控制进行协调，但由于需要对三部分建立相应的控制矩阵，所以在控制器的设计和调试上都有一定的难度，所以这种控制方法没有的到广泛的应用，只有在个别对控制有特殊要求的场合进行使用。

(4) 模糊 PID 控制

活套张力控制系统采用常规 PID 控制，很难达到较高的控制精度。因为传统的 PID 调节器在系统进入稳态时也就是偏差相对较少的时候有较好的控制性能，但在建立初始张力和张力波动较大的情况下，由于系统偏差较大，常规 PID 控制器会产生较大的超调量，同时需要很长的调节时间，会对带钢的质量产生影响。而模糊控制在大偏差系统的调节上有很好的控制性能。国内外在近些年提出了 Fuzzy-PID 复合控制方法。该方法的控制思想是：在活套建立初始张力的阶段，使用模糊控制器对活套张力进行控制，而当活套建张完成进入稳态运行阶段，则切换到传统的 PID 进行控制，利用两种控制的特点，使活套在初始阶段据有较快的响应速度，而在稳态运行阶段具有较好的稳态性能。模糊控制器需要较长时间完成其解模糊化和模糊推理的工作，但在实际过程中受扫描周期的时间限制，所以需要设计模糊控制查询表，将活套张力偏差 E 和偏差变化率 EC 作为输入，通过一个输入域到输出域的查询表。输出活套的附加转速给定^[7-9]。

在模糊控制器的设计过程中，能够借助以往现场调试经验对复杂的问题进行简单有效的处理，如果对模糊控制器的结构和层级设计的合适，同时对控制对象的先验知识较丰富，在对控制器的设计和调试当中能够很好的整定，模糊控制器可以达到较好的效果，但其受人为经验的影响也较大，且其本质上是一个变参数的 PID 控制器，很容易产生振荡^[10]。

1.3.1 出口活套的控制原则

出口活套若要满足工艺需求，需遵循以下两点的控制原则：

(1) 物料平衡原则

活套入口、出口的物料流量和活套内带钢的存量应保持物料平衡的原则，即活套的套量、运行速度与活套出入口的运行速度遵循如下的关系：

$$h = (L_{\text{工艺}} - L_{\text{出口}}) / n \quad (1.1)$$

$$V_h = (V_{\text{工艺}} - V_{\text{出口}}) / n \quad (1.2)$$

其中 h 、 V_h 表示活套的行程、速度； $L_{\text{工艺}}$ 、 $V_{\text{工艺}}$ 表示活套入口侧即工艺段的带钢的行程和速度， $L_{\text{出口}}$ 、 $V_{\text{出口}}$ 表示活套出口侧带钢的行程和速度； n 表示活套内带钢的股数。

（2）张力恒定原则

对同一规格的带钢，活套的带钢张力 T 应该保持设定值不变即：

$$T_{\text{实际值}} = T_{\text{设定值}} = \text{常数} \quad (1.3)$$

活套内带钢的重量 W_s 正比与活套的套量，所以在充套、放套过程中应该根据套量的变化对张力设定 $T_{\text{设定值}}$ 进行补偿，保证活套内带钢张力维持不变，修正值 ΔT 与活套套量的变化范围也就是带钢的重量成比例，即 $0 \leq \Delta T \leq K \leq W$ ，补偿方式为 $T_{\text{设定值}} \pm \Delta T \rightarrow T_{\text{设定值}}$ 。

对于出口活套来说，活套的机械结构包括活套高度和带钢股数都已经固定，所以活套内带钢重量 W_s 只由活套套量来决定；在生产过程中，工艺段速度即活套入口速度恒定，所以活套的套量和活套出口的速度，即光整段的速度有紧密关系。

综上所述，出口活套想要满足生产的工艺需求和技术要求，就必须准确、实时地控制活套小车的速度。

1.4 本文的研究内容

本文以莆田镀锌生产线为背景，以出口立式活套为研究对象，首先通过现场的调试工作了解立式活套的控制的原理及方法，同时发现了一些在活套控制方面的不足，在对活套的特点和控制原理方法进行分析后，提出使用新型的智能控制方法对活套进行控制。主要完成了以下几个方面的工作：

- （1）对鞍钢莆田镀锌线进行整体上的概述，简要介绍了冷轧立式活套的发展和研究现状；
- （2）介绍连续镀锌生产过程中立式活套机械装置的结构、技术参数和生产工作过程，介绍立式活套的位置、速度及张力控制原理和方法，结合项目对张力的控制方法及原理进行分析，同时提出当前广泛使用的常规 PID 的控制方式存在的一些问题；
- （3）基于立式活套耦合、非线性、时变的对象特点，使用 BP 网络建立活套的张力模型，使用现场采集的 PDA 历史数据对模型进行训练，通过改进算法和参数使模型达到预期精度，并使用数据对模型精度进行验证；
- （4）结合活套时变、非线性的控制特点，提出将单神经元自适应 PID 控制算法应用到活

套的张力控制系统中。然后设计了单神经元自适应 PID 控制器，并使用 S 函数构建了单神经元控制器，通过在 simulink 中对带钢张力模型的仿真，验证了单神经元自适应 PID 控制器在活套张力控制中的可行性；

（5）通过对带钢建模和单神经元自适应控制器的仿真研究，提出了对建模精度、建模参数与算法选择、以及单神经元控制器的稳定性分析等新的改进与研究方向。

第2章 立式活套的速度和张力控制

2.1 出口立式活套的分析

2.1.1 出口活套装置技术参数

出口活套由活套车、辊系、卷扬装置、配重、轨道及塔式钢架等部分组成，立式活套为机械配重式结构，钢绳的一端固定在卷扬卷筒上，一端固定在活套小车上，卷扬电机通过变速箱带动卷筒旋转缠绕钢绳，经安装在活套塔顶部的转向轮提升活套小车，在活套小车上安装有一定数量的活套辊，活套小车带动活套辊上升下降来进行充放套。小车上的活套辊一般为被动辊，在活套塔下面还安装有对应数量的固定底辊，一般带有传动系统，用来补偿带钢在转向时产生的张力损失，在部分活套底辊的轴承座上安装有活套安全销，在张力达到一定大小的时候会使安全销动作，发送给 PLC 急停信号，起到安全保护作用，同时还安装有断带制动器，当 PLC 通过计算检测到断带发生时，断带制动器就会动作夹紧带钢，防止高处的带钢掉落造成设备和人员的伤害，活套上还装有纠偏单元，用来防止活套塔中的带钢跑偏。出口活套示意如图 2.1 所示。

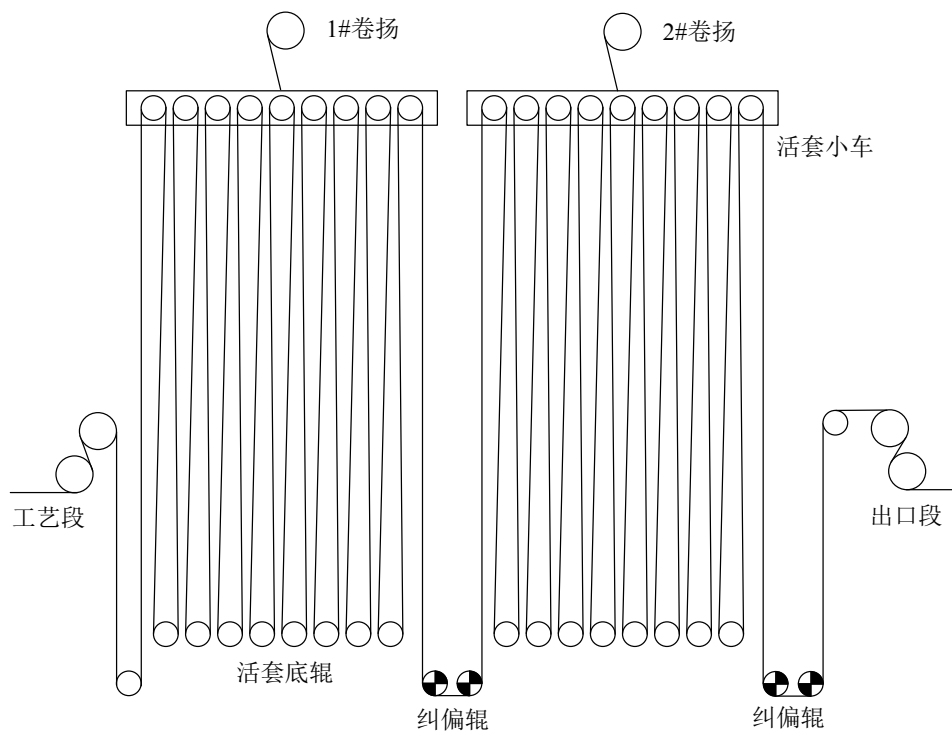


图 2.1 出口活套示意图

Fig2.1 Exit looper

2.1.2 出口段工作过程描述

出口活套位于工艺段与出口段之间，主要用来在出口段剪切卸卷的过程中保持工艺段连续运行。出口活套通常有一个较低的位置设定值，在机组正常连续运行时，工艺段与出口段保持相同的速度，出口活套工作在设定位置，当焊缝距离飞剪一定距离的时候，出口速度降到甩尾速度准备剪切，这是出口活套开始充套，保证工艺段的速度保持不变，直到出口段卸卷完成，下一卷带钢卷入卷曲后，出口加速拉套，把出口活套拉空到设定值后，出口速度降为和工艺段相同的速度，此时活套位置保持不变，等待下一个焊缝再进行上述动作。

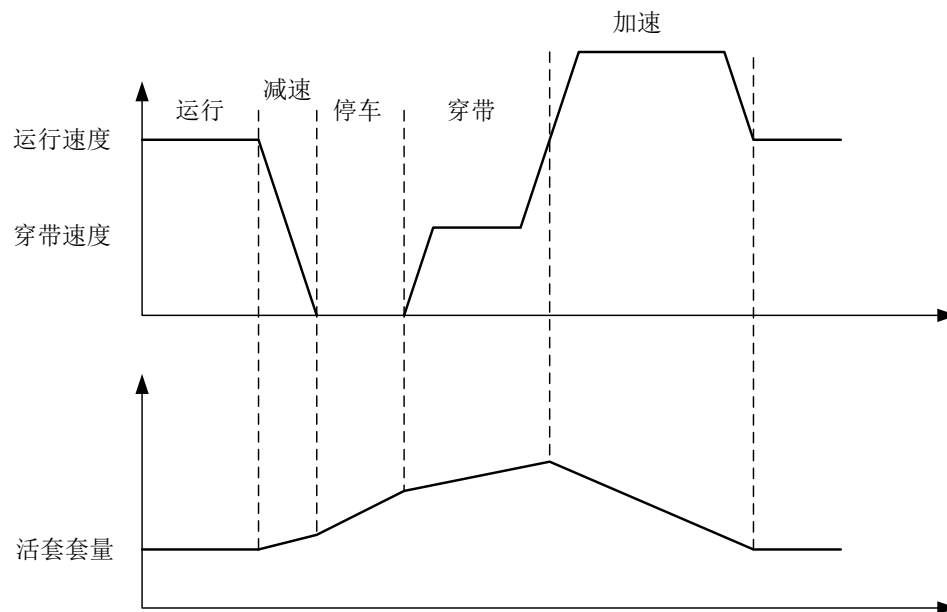


图 2.2 活套速度与套量变化图
Fig2.2 Change of looper speed and reserves

出口活套塔出口带钢速度变化过程为：首先工艺段出口段同速运行，活套工作在设定位置，当焊缝到达减速位，出口带钢速度从工艺段速度降至剪切速度 60m/min，为保证带钢在飞剪处达到剪切速度，从减速位到飞剪的距离应稍大于带钢由最大工艺降到剪切速度的距离，当跟踪程序计算焊缝位置到达飞剪时启动剪切程序，第一刀分切完成后卷取机启动带尾定位程序进行甩尾，飞剪按照操作人员的设定进行带头带尾的取样和废料剪切，剪切完成后降到零速等待，卷曲机完成卸卷后进行穿带准备，穿带准备完成后出口启动到 60m/min 的穿带速度进行穿带，带钢经磁力皮带导入助卷器，由带头跟踪程序计算缠绕 3 圈后产生 engage 信号，落下磁力皮带，打开助卷器抱臂，待辅助设备动作到位后出口段开始升速，并上升到最大速度对出口活套进行放套。待出口活套套量达到设定位置后，出口速度也同步到工艺段速度，至此出口活套完成了一个工作循环。在出口卸卷剪切过程中，出口段速度、出口活套小车速度及出口活套套量

变化趋势如图 2.2 所示。

2.2 立式活套的位置控制

通过对出口活套工作过程的分析，活套在生产过程中是通过控制套量来保证全线的速度连接，主令控制系统根据活套的套量给定全线的速度，确保活套保持合适的位置既不被拉空，也不会充满。

出口活套塔的上下两端分别装有 4 个极限开关，其中在小于 0%和大于 100%的位置装有 2 个羊角开关，作为机械保护，当开关被触发时产生急停信号，在套量 0%和 100%处装有 2 个磁感应的快停开关，这两个开关被触发时产生快停，通常这 4 个极限开关是不被触发的，在操作室的 HMI 上有限制在 5%到 95%之间的活套空满两个设定值，正常生产过程中活套一直工作在空满套设定值之间。

出口活套位置控制的设计思想是当活套运行到设定点时，出口段速度能够跟工艺段速度保持一致，当设定值发生变化时，根据新的位置设定值和当前的实际位置计算出附加速度，调整出口段的运行速度使活套重新达到设定位置，当活套重新达到设定位置后，出口段速度又将等同于工艺段速度，当工艺段速度发生变化时，出口段的速度也随之变化，保持活套位置维持在设定位置不变。

若要达到活套位置的实时控制，需要以下几个功能：

- (1) 对活套位置的实时监测
- (2) 对活套位置的标定
- (3) 通过活套位置控制器对充放套速度进行调节
- (4) 对活套小车的速度调节

2.2.1 活套的实时套量计算

活套套量既活套内储存的带钢长度 L_{act} ，分为固定长度和变化长度两部分：

$$L_{act} = L_{con} + L_{var} \quad (2.1)$$

其中固定长度 L_{con} 为活套上辊上表面到辊的轴心高度加上下辊轴心高度到下表面高度的存储带钢长度，这部分长度不随活套位置发生变化，实际长度等于活套辊的半周长乘活套辊的个数：

$$L_{con} = \pi \times D \times N \quad (2.2)$$

式中： D 为活套辊直径

N 为活套辊个数

而可变长度部分 L_{var} 则对应于活套上辊系和下辊系轴心高度差再乘以带钢的层数：

$$L_{\text{var}} = H \times K \quad (2.3)$$

式中： H 为上下活套辊中心高度差

K 为活套内带钢的水平层数

其中 H 为时变的测量值，由于下辊为固定辊，所以 H 是由活套小车的实际位置决定的，活套小车的位置测量由安装在卷筒上的编码器来测量，编码器的测量脉冲数通过 PROFIBUS 网络传到 PLC，活套的实际位置由以下公式计算：

$$Pos.Act = P_{Encoder} / Step \cdot D \cdot \pi / i \quad (2.4)$$

式中 $Pos.Act$ 表示活套小车的实际位置

$P_{Encoder}$ 表示编码器的标定值

$Step$ 表示编码器转一圈产生的脉冲数 4096

D 表示活套卷扬卷筒的直径

i 表示钢绳在活套车上缠绕的匝数，现场实际为 6，既卷筒转 6 个单位长度，小车移动 1 个单位长度

其中 $P_{Encoder}$ 表示编码器的标定值，在活套中部安装有一个磁感应开关，用于活套小车的位置标定，每当小车经过标定开关时，PLC 中的活套标定程序就将 $P_{Encoder}$ 标定为标定开关所对应的实际位置，用来消除累计误差。

2.2.2 活套的速度控制

活套的位置控制实际上是由控制活套小车的速度实现的，而活套小车的速度是由活套的入口速度和出口速度决定的：

$$V_{\text{looper}} = (V_{\text{process}} - V_{\text{exit}}) / N \quad (2.5)$$

式中： V_{looper} 为活套小车的速度

V_{process} 为工艺段速度

V_{exit} 为出口段速度

N 为活套内带钢的股数

当 $V_{process} > V_{exit}$ 时, $V_{looper} > 0$, 活套小车向上移动, 活套处于充套状态, 套量增大;

当 $V_{process} < V_{exit}$ 时, $V_{looper} < 0$, 活套小车向下移动, 活套处于放套状态, 套量减小;

当 $V_{process} = V_{exit}$ 时, $V_{looper} = 0$, 活套小车位置不变, 套量不变;

就出口活套而言, 当出口进入焊缝定位阶段, 工艺段速度大于出口速度, 活套车向上移动, 当出口穿带完成后出口段加速, 出口段速度大于工艺段速度, 活套车向下移动, 当到达设定位置时 $V_{process} = V_{exit}$, $V_{looper} = 0$ 达到同步控制。

控制活套的位置基于控制活套车的速度 V_{looper} , 又工艺段速度在正常生产时是保持不变的, 所以调节活套车速度实际是基于的出口速度的控制, 在出口剪切时, 出口段退出同步控制执行剪切速度, 当穿带完成后进入同步控制, 则出口速度如下式:

$$V_{exit} = V_{process} + \Delta V \quad (2.6)$$

其中 V_{exit} 为出口速度设定值, 为 $V_{process}$ 工艺段速度实际值, ΔV 为活套位置调节器输出的速度调节量, 活套位置调节器根据输入的活套位置设定值和活套位置实际值, 计算出出口附加速度:

$$\Delta V = (P_{set} - P_{act}) / P_{reg} \cdot V_{max} \quad (2.7)$$

式中: ΔV 为位置调节附加速度

P_{set} 为活套位置设定值

P_{act} 为活套位置实际值

P_{reg} 为活套位置调节区间

V_{max} 为活套所允许的最大速度限幅

当设定值与实际值偏差大于调节区间时, 调节器输出为最大允许速度, 最大允许速度的大小取决于卷扬电机的额定速度, 当位置偏差值小于调节区间时, 调节速度开始下降, 当设定值与实际值相同时, 偏差为零, 调节器输入也为零, 活套进入同步位置稳定运行。

出口活套的同步工作位置为下限设定值, 而出口活套的上限设定值是当出口降速或停车时间过长时, 活套套量达到上限设定, 出口 PLC 将会通过 PLC 间通讯告知工艺段 PLC, 进行减速停车。

2.3 立式活套的张力控制

张力控制是冷轧生产线中非常重要的一个环节，冷轧带钢只有在适当的张力下才能稳定连续的运行，并且在短时间的停车期间也要保持一定的静态张力，可以说张力控制贯穿着整个生产的式中，不但影响生产的稳定性和连续性，同时还会影响产品的质量，甚至如果张力控制的不好，过大的张力会拉断带钢，造成重大事故，下面就从张力的基本概念入手，详细的阐述一下出口立式活套的张力控制原理。

2.3.1 张力产生的基本原理

冷轧生产线中带钢的张力是靠带有传动的辊子对带钢的拉伸产生的，带钢由拉伸所产生速差，使金属各处产生相对位移，从而产生张应力，也叫做平均单位张力 δ ，用带钢的截面积 A 乘以平均单位张力 δ ，可以计算出作用在整段带钢上的张力：

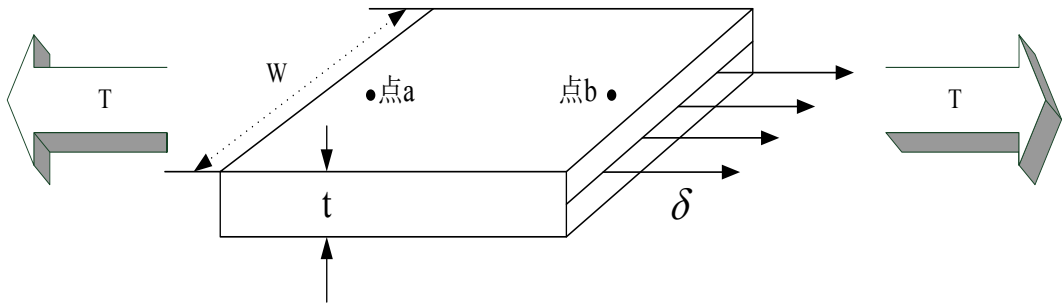


图 2.3 作用在带钢上的张力
Fig2.3 Tension on the strip

张力计算公式如下：

$$T = A \cdot \delta = W \cdot t \cdot \delta \quad (2.8)$$

式中： T 是作用于带钢横截面上的张力； A 是带钢的截面积； δ 是单位平均张力。由胡克定律可知，金属的弹性应变 ε 与单位张应力 δ 成正比的关系：

$$\varepsilon = \delta / E \quad (2.9)$$

其中 E 是带钢的杨氏弹性模数，定义为张应力与应变的比值，在数值上等于单位应变时的张应力； ε 为弹性应变，即带钢在单位长度上的伸长量。

据上图所示在带钢上分别取任意两点 a 和 b 来分析，两点之间的距离用 L_0 表示，用 V_a 和 V_b 分别表示 a 、 b 两点的运动速度，方向是从 a 到 b ，并且 $V_b > V_a$ ，带钢在长度方向上的位移为 ΔL 。弹性应变的表达式应为：

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (2.10)$$

如果对张力进行几何分析，则如下图所示：

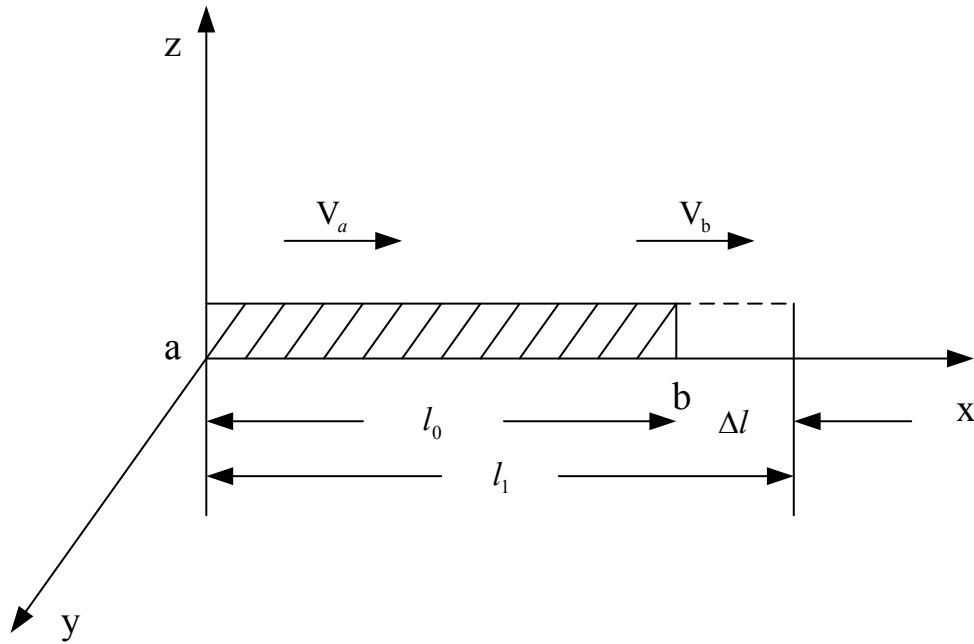


图 2.4 张力产生原因

Fig2.4 cause of tension generation

材料在长度方向上的形变决定了所产生应力的大小，形变的量值既两点间的相对位移量， a 和 b 两点以不同的速度运动，由其相对速差产生相对的位移量。先求出应变值，再通过应变值计算出产生的应力，得出的就是张应力，用 δ_T 表示：

$$\delta_{T0} = E \cdot \varepsilon \quad (2.11)$$

$$d(\delta_{T0}) = E \cdot d \cdot \varepsilon = E \cdot d \cdot \left(\frac{\Delta L}{l_0} \right) = \frac{E}{l_0} (V_a - V_b) \cdot dt \quad (2.12)$$

所以

$$\delta_{T0} = \frac{E}{l_0} \int (V_a - V_b) \cdot dt \quad (2.13)$$

因此，当 a 、 b 两点分别以 V_a 、 V_b 速度运动时，带钢上产生的张力值为 T_0 ：

$$T_0 = \frac{AE}{l_0} \int (V_a - V_b) \cdot dt \quad (2.14)$$

其中 A 、 E 和 L 在具体情况下皆为常数值，所以生产过程中张力的大小全部取决于 a 点和 b 点的速度偏差。在实际生产过程中， V_a 和 V_b 是不断变化的，当 V_a 和 V_b 分别产生大小为 ΔV_a 和

ΔV_b 的微小变化时，其在带钢上形成的张力也会产生相应的变化量，其对应关系为：

$$\Delta \delta_{T0} = \frac{E}{l_0} \int (\Delta V_a - \Delta V_b) \cdot dt \quad (2.15)$$

$$\Delta T_0 = \frac{AE}{l_0} \int (\Delta V_a - \Delta V_b) \cdot dt \quad (2.16)$$

所以作用于带钢上的张应力除了两点速度差的分量外，还应包含由速度本身变化所产生的分量，则张应力和张力的分别为：

$$\delta_T = \delta_{T0} + \Delta \delta_T = \frac{E}{l_0} \int (V_a - V_b) \cdot dt + \frac{E}{l_0} \int (\Delta V_a - \Delta V_b) \cdot dt \quad (2.17)$$

$$T = T_0 + \Delta T_0 = \frac{AE}{l_0} \int (V_a - V_b) \cdot dt + \frac{AE}{l_0} \int (\Delta V_a - \Delta V_b) \cdot dt \quad (2.18)$$

由以上关系式可知，由电气传动系统拉伸带钢，使带钢各处产生微小的速度差，从而产生的张力，同时张力的变化是由各处速度的变化引起的。单位张力和张力只与各处的速度差大小有关系，而与带钢本身的运行速度没有关系。

2.3.2 带钢张力的种类和作用

(1) 带钢张力的种类

(a) 穿带张力：是指带钢在剪切以后进行穿带或甩尾的张力，因为在穿带和甩尾时的速度很低，所以穿带张力也比较小，一般为运行张力的 40%。活套没有穿带张力。

(b) 运行张力：全线正常运行时的张力，根据带钢规格和工艺要求有不同的运行张力值。

(c) 静张力：生产线在进行维护检修和事故临时停车时的张力。机组临时停车达到一定的时间，张力就切换为静张力，等生产线恢复运行时再切换为运行张力。静张力为了降低电机长期堵转所产生的热量，电机在机组没有运行的静态建张中实际是处于堵转状态，所以静张力不宜过大，时间也不宜过长。静张力一般为运行张力的 50%。如果机组长时间没有恢复运行，则进行张力切断。

(d) 点动张力：电动张力是为了在操作人员需要对机组进行手动前进后退时使用，避免在手动电动过程中产生跑偏和擦划，点动张力也比较小，一般为运行张力的 30%。

(2) 带钢张力的作用

张力在生产过程中主要有四方面的作用：即使带钢获得一定的延伸率；防止带钢跑偏；使带钢获得较好的板型；工艺需求（开卷与卷取）。张力主要作用有以下几个方面：

(a) 有利于生产线稳定

带钢在没有张力的情况下非常容易跑偏,单独依靠自动对中装置 CPC 很难完成带钢的纠偏工作,只有在合适的带钢张力下才能充分的发挥自动纠偏装置的功能,保证带钢在连续生产的过程中始终处于中心线附近。

(b) 有助带钢板形平直 (SPM/WCR)

张力控制的不好可能会在生产过程中产生一些板型问题,如:边浪、中间浪、镰刀弯、宽度及长度方向反弯等,其主要原因是各方向延伸不均,带钢中的残余应力引起带钢在各方向上的变形。拉矫机就是利用大张力,消减带钢中的残余应力,使带钢在各方向上的变形趋于一致,在经过拉矫后得到比较平直的板型。

另外在炉区的各个加热段和随后的各种冷却段中,如果没有合适的张力,则带钢在与辊面接触时可能产生瓢曲,进而影响加热的均匀性,使带钢的温度分布不均,待温度冷却后就会产生板型问题。

(c) 调节带钢延伸率 (平整机)

光整机是通过调节轧制力来使带钢产生一定的延伸率的,一定的延伸率可以改变带钢内部的应力情况,使带钢获得较好的性能和表面质量,但如果没有张力的作用,金属在变形区中只有三向的压应力作用,需要很大的轧制力才能产生形变,而通过对带钢施加一定的张力,可以使水平的张应力变为拉力,垂直方向的压应力变得更小,较小的轧制力就可以产生很大的形变,使得光整机的控制更加容易,可以达到更好的控制精度,同时,使用较小的轧制力还可以降低产生延伸率的能源消耗。

(d) 辅助生产线开卷工作

开卷机的张力主要是保证带钢能顺利开卷,如果张力过大,则无法进行穿带,如果张力过小,会在开卷前产生堆钢现象,而且开卷的张力应充分考虑前道生产工序的张力,否则过大的张力会引起带钢的层间滑动,造成表面擦划伤,同时,如果在升减速过程中对开卷的张力控制不好的话,会使较薄的带钢变形甚至断代。

(e) 辅助生产线卷取机工作

带钢张力对卷起来说更为重要,一般对卷曲机来讲都会有带钢的硬核控制,就是在最初的一段带钢施加较大的张力来进行卷曲,避免因张力小而引起的内圈松动,在卸卷的过程中出现问题,同时,如果在卷曲过程中张力不适合,会在卸卷后发生塌卷现象,无法进行下一步工序,卷曲的张力波动能导致 EPC 装置的振动,产生塔形或溢出边的情况,如果生产的是成品卷,则不能满足合同的要求。

在机组停车期间也必须维持一定的静态张力,即前文提到的静张力,防止带钢在没有张力

的情况下与设备和辊子之间产生相对位移，使带钢表面产生擦划伤，带钢张力在整个生产过程中起到至关重要的作用。

2.4 张力的控制方式及原理

冷轧镀锌线和其他的冷轧处理线都采用分区张力控制的方式，利用张力辊和活套的张力隔断作用，把整条生产线按工艺需求分割成许多大小不同的张力区，对每个张力区进行单独的张力控制。

冷轧处理线一般有直接张力控制、间接张力控制和复合张力控制三种不同的张力控制方法，根据每个张力区的实际情况选择合适的张力控制方式，直接张力控制就是指直接读取张力计的数值作为张力反馈，进入张力控制器进行张力闭环控制；而间接张力控制则是使用一些其他的如转矩等反馈值计算出实际张力，再用计算值来进行张力的闭环调节，另外还有一种复合张力控制的方法，在目前的实际生产中也有比较广泛的应用，他是结合前两种控制方式，混合使用，达到一个理想的控制效果，下文将进行详细介绍。

2.4.1 直接张力控制

我们称用张力计测量值作为反馈的张力控制方式为直接张力控制，直接张力控制是目前使用最为广泛的一种张力控制方式，他的控制精度高和响应速度快，一般都用在对张力控制精度和响应速度要求较高的张力区，因为张力计成本较高，所以在对张力控制性能要求不高的张力区，一般用其他的控制方式代替直接张力控制，同时，直接张力控制由于其响应速度快，所以比较容易振荡，要求在调试过程中反复修改参数，调试比较复杂。

莆田镀锌生产线炉子段、锌锅段、平整机段以及立式活套部分等工艺段的张力控制采用直接张力控制，用来满足这些工艺段对张力精度要求高，要求张力调节响应速度快的工艺需求。

下面简单介绍一下直接张力控制的基本原理：

由上一小节的公式可知影响张力的变量为 $(V_2 - V_1)$ 关于时间的积分，公式给出了 a 到 b 点长度为 l 的带钢的张力随时间变化的函数。但是如何求得对于两个固定传动辊之间的张力呢？不妨假定存在从 a 到 b 长度为 l 的一段带钢(l 很短)，当 a 和 b 点进入图 3.4 所示的 L 区域时，这段长为 l 的带钢的张力变化为：

$$\Delta T = \frac{EA}{l} \int (V_b - V_a) dt \quad (2.19)$$

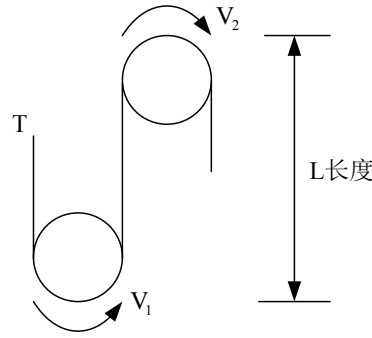


图 2.5 速度差与张力的关系

Fig2.5 Tension and Speed

由于 l 很短，对于长度 L 可以认为 l 是一个点，那么这段带钢在上述区域经过的时间可以近似计算：

$$\Delta t = \frac{L}{V_1} \quad (2.20)$$

又各小段的拉伸量在整段带钢是均匀分布的，则可以得到：

$$(V_b - V_a) = \frac{l}{L}(V_2 - V_1) \quad (2.21)$$

将式(2. 19 和(2. 20 带入到(2. 21)，可以得到 $a-b$ 段经过此区域时的张力变化量：

$$\Delta T = \frac{EA}{l} \int_0^{L/V_1} \frac{(V_2 - V_1) * l}{L} dt = \frac{EA}{l} \int_0^{L/V_1} (V_2 - V_1) dt \quad (2.22)$$

如果速度差值 $(V_2 - V_1)$ 是固定的，那么此段带钢的张力变化量为：

$$\Delta T_0 = \frac{EA}{l} \cdot \frac{L}{V_1} \cdot (V_2 - V_1) = \frac{EA}{V_1} (V_2 - V_1) \quad (2.23)$$

对张力基本表达是中的积分运算的惯性问题进行处理。一般可以将积分环节等效为大惯性环节，将积分时间常数 L/V_1 等效为大惯性环节的时间常数。将惯性环节引入系统的动态函数当中，并在不考虑入口张力 $T_0 = 0$ 的情况下，张力的实际处理模型 T 的 s 函数如下：

$$T = T_0 + \frac{\frac{EA}{V_1}}{1 + \frac{L}{V_1}s} (V_2 - V_1) \quad (2.24)$$

式中， E 为杨氏模量； A 表示截面积； L 表示带钢长度。

根据上面的公式，要想维持张力的恒定，则需要控制 $(V_2 - V_1)$ 的值保持恒定。但是根据每

个张力去的结构不同, 根据情况选择控制入口或出口的速度 V_2 或者 V_1 。但无论选择控制哪个速度, 都必须满足速度差保持恒定, 直接张力控制从本质上就是控制速度差。假定出口速度保持 V_2 不变, 入口速度 V_1 同张力成反比, 因此应使用张力偏差 $(T_{FBK} - T_{REF})$ 作为控制器输入量, 张力偏差经过控制器运算后, 作为附加速度加到入口速度 V_1 上。通过上面的描述可以绘制出直接张力控制的控制框图。

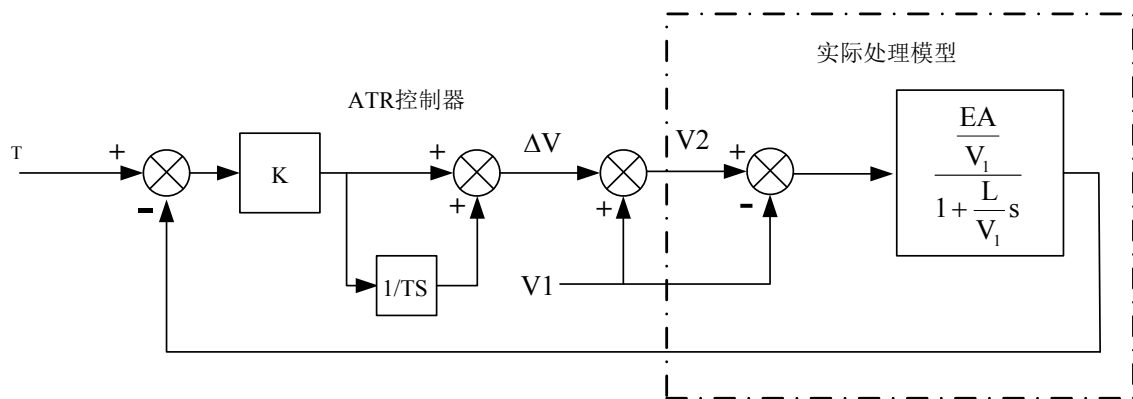


图 2.6 直接张力控制框图

Fig2.6 Direct Tension Control

直接张力控制器通常采用 PI 调节器, 按照无静差系统设计系统时, 一般使用纯积分环节设计前向开环传递函数, 使闭环传函成为一个一阶惯性环节。

2.4.2 间接张力控制

由于直接张力控制存在着一些问题, 特别是张力计成本很高, 在一些恶劣的生产环境容易损坏。并且随着矢量控制理论在变频器上的应用, 使变频器能够进行直接转矩控制, 间接张力控制方法因此产生。间接张力控制是一种张力开环控制, 有电机的额定功率、齿轮比、辊径以及张力设定, 计算出电机应该输出的电磁转矩, 直接对变频器进行转矩控制。这种方法控制结构简单, 张力控制稳定, 但由于其开环的特性, 实际是一种有静差的张力控制。

在目前的冷轧生产线中, 应用最广泛的就是直接张力控制和间接张力控制, 基本上在对精度和响应速度要求高的地方采用直接张力控制, 而在对张力控制精度要求不高, 但的控制的稳定性有要求的地方使用间接张力控制。

间接张力控制的原理如下:

在张力辊的工作过程中, 张力力矩 M_T 与电动机电磁转矩 M_D 、空载转矩 M_0

、动态转矩有以 M_d 之间下关系：

$$M_D = \frac{M_T}{Gr} \pm M_d + M_0 = \frac{T \times D}{2Gr} \pm M_d + M_0 \quad (2.25)$$

又因为电动机电磁转矩为：

$$M_D \approx C_T \Phi I \quad (2.26)$$

张力为：

$$T = \frac{P}{V} = \frac{EI}{V} \approx \frac{UI}{V} \quad (2.27)$$

若忽略电动机和机械系统的空载损耗，并在恒速时 $M_D = 0$ ，可忽略不计，于是张力(张力差)为：

$$T = \frac{2Gr \times C_T \times \Phi \times I}{D} = K \times \frac{\Phi}{D} \times I \quad (2.28)$$

在式(2.24)~(2.26)中， M_T 为张力力矩； M_D 为电动机电磁转矩； M_0 为空载转矩； M_d 为加速过程中的加速转矩； U 、 I 为电动机的电枢电压、电动势和电枢电流； V 为生产线运行速度；对于开卷(卷取)机 T 为开卷(卷取)张力，对于张力辊和传动辊， $T = \Delta T = T_{DEL} - T_{ENT}$ ； D 为辊子的直径； Gr 为减速箱的齿轮比； C_T 为电动机的转矩常数； Φ 为电动机磁通量； P 为电动机功率。

控制电机转矩是间接张力控制的核心问题，对于传动装置本身就是要使电流 I 和磁场 Φ 按照指定的要求变化。根据矢量控制的原理，可以单独调节磁场 Φ 使其保持恒定，这样问题就转化为如何使按照张力的要求控制转矩电流 I ，即 I 可以用函数表示 $I = f(D, \Phi)$ 。因此间接张力控制也可叫做转矩控制。

间接张力控制不需要对张力进行直接的测量，所以间接张力控制系统中没有张力控制器，张力设定值通过计算得出电磁转矩给定，直接发送到传动装置进行控制，在工作过程中只有传动装置的电流调节器处于工作状态，而对于传动装置的速度调节器，通常是附加一个偏差速度使其处于饱和状态。

不需要测量张力反馈是间接张力控制最大的优点，同时间接张力控制与直接张力控制相比，没有张力控制器，速度调节器也工作在饱和状态，少了两个调节环节，使得其控制性能比较稳定，仅仅依靠电流环对励磁和转矩电流的矢量控制，实现对张力的开环调节。

所以当系统受到扰动影响时，如摩擦、升降速(dn/dt)等因素，只能依靠补偿值来微调转矩，消除扰动的影响，补偿值的准确与否极大的影响了张力的控制效果。

最典型的间接张力控制为开卷机和卷曲机。开收卷电机由矢量型变频器 S120 控制，工作在转矩限幅模式下，在 PLC 程序中始终叠加一个附加速度在开卷和卷曲的速度给定上（开卷为负速度），由于速度调节器的输入始终不为零，所以速度调节器始终工作在饱和状态，这个时候只有转矩限幅起作用，将速度调节器的输出限制在想要的工作转矩输出给电流调节器。电流调节器根据设定与实际的偏差进行 PI 调节以控制活套卷扬。在转矩控制下的传动装置同样也有附加转矩给定，同时附加转矩给定也相应的加到限幅值上，这种控制方法也称为转矩限幅控制，控制框图如图 2.7 所示：

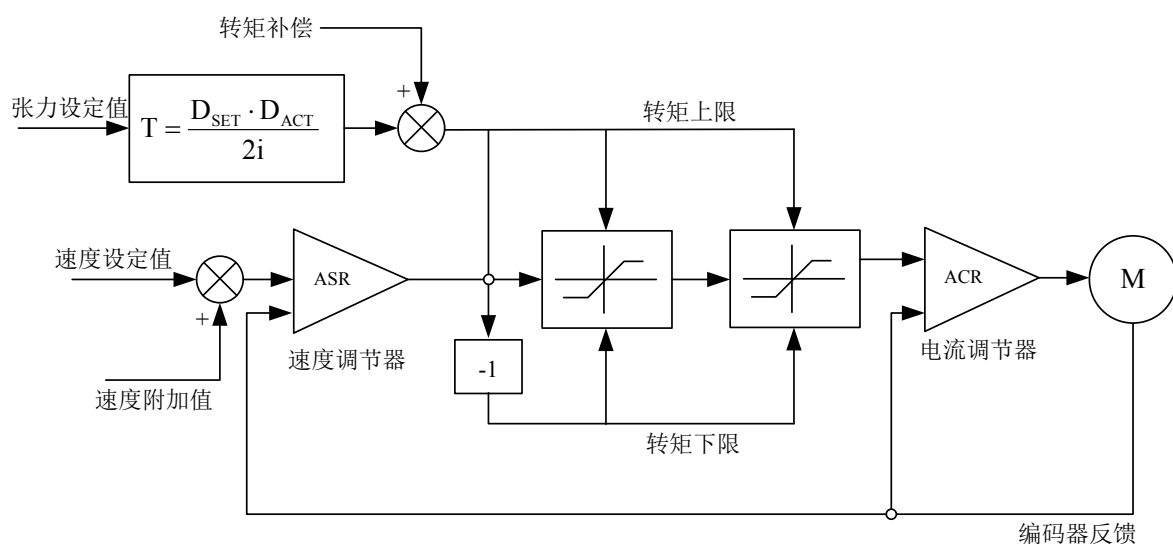


图 2.7 变频器的双闭环转矩控制
Fig2.7 Double-closed-loops control

对于转矩控制方式下，张力参考值加上张力控制器的附加张力值作为传动设备的张力设定值，即转矩限幅值，PLC 通过调整传动的转矩限幅去控制实际张力。

2.4.3 立式活套的复合张力控制

不同的张力控制方式使用与不同的场合，而对于立式活套的张力控制，其控制性能的判定取决于三个方面的调节能力：

第一，在静态建张阶段，使活套稳定在静态张力。

第二，在活套出入口速度有差的情况下，即活套小车处于运动的状态下，克服加减速对活套张力的影响，避免活套张力的波动。

第三，在机组稳态运行的阶段，即活套出入口同速运行，活套能过保持运行张力稳定，避免扰动带来的张力波动。

针对第一个和第三个问题，因为卷扬机的机械结构是通过钢绳经滑轮组拉升活套小车，活套小车拉动带钢产生张力，在力传导的过程中，钢绳的重量、带钢的自重以及钢绳的弹性都会对活套张力产生一定的影响，因此要通过张力的闭环控制达到无差调节。

针对第二个问题，一般靠在升减速过程中投入速度调节器或者加长升减速的时间来改善，但是以上两种方法都是以牺牲系统的快速性来换取稳定性，这在活套的控制上是不可取的。由于张力的闭环控制是靠反馈张力来进行调节，实际上要等到张力出现偏差以后才能反映到活套卷扬的转矩上，反馈闭环控制实际上是一种滞后的控制，而如果想消除因之后而引起的张力波动，则需要对系统引入前馈控制，对于活套的升降速而言，就是通过在调试过程中测得的活套系统的转动惯量，根据系统的加速度，计算出活套所需的加速转矩，以前馈的方式补偿到活套的转矩上，使其代替由闭环控制调节出的那部分加速转矩，同时还对不同速度的摩擦力变化进行补偿，通过补偿的引入，能使系统在升减速过程中始终跟随生产线的速度变化，解决加减速过程中产生张力波动的问题。

综上所述，使用传统的直接张力控制和间接张力控制都很难达到很好的控制效果，因此，结合直接张力控制响应快精度高，间接张力控制稳定的特点，设计出两者结合的复合张力控制，即保留速度调节的快速性，又利用转矩限幅调节的稳定性。

对于本项目中出口活套的张力控制采用复合张力控制，如图 2.7 所示。

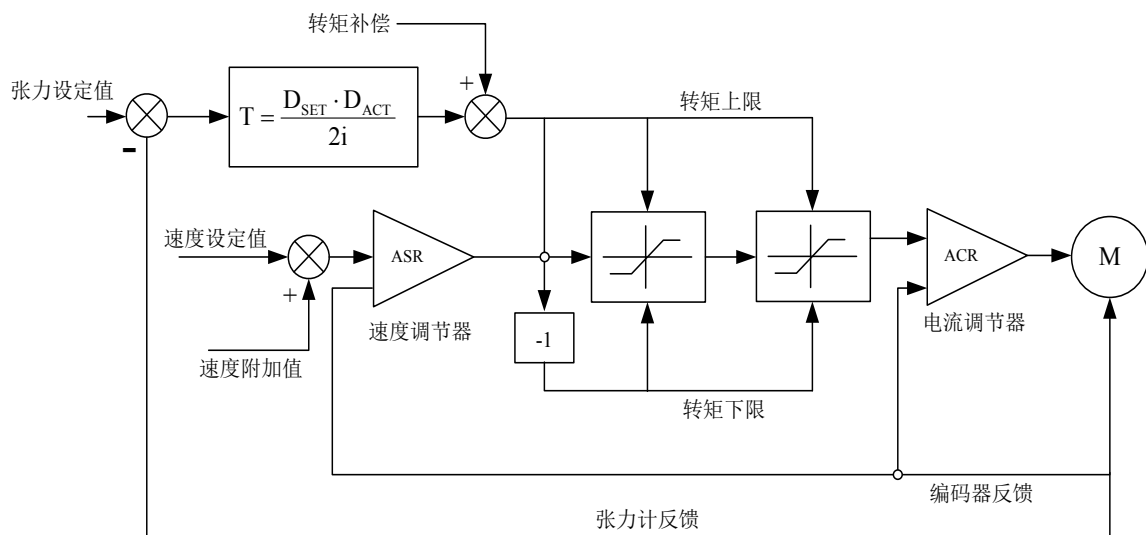


图 2.7 复合张力控制原理图
Fig2.7 composite tension control theory

系统外环为张力环，运用张力传感器进行直接张力控制；对活套张力起直接影响的2#卷扬电机作为张力系统的内环，运用矢量变频器进行间接张力控制。系统的张力设定值经过张力/转矩转换，在加上各种前馈补偿后，作为转矩设定值输入到变频器，而张力环的反馈信号为张力传感器输入给PLC的实际张力值。输入到变频器的转矩值作为转矩调节器的限幅，编码器反馈的频率值作为内环的反馈信号。需要指出的是，在活套的复合张力控制中，根据张力传感器反馈得到控制偏差 ΔT 后，通过ATR（自动张力调节器）转化为转矩修正值 ΔMT ，而不是转化为速度修正值，然后将其作为张力矩补偿加到转矩限幅上，作为转矩限幅值的一部分。因此这与一般ATR是有不同的。而正是因为在活套转矩的限幅中加入了直接张力控制的偏差分量，这样就有效提高了张力控制的精度。同时张力设定值（相当于前馈量）作为控制电流限幅的一部分，在不影响张力控制精度的同时，有效地提高了系统响应快速性能。张力复合控制的PI调节器的设计方法，基本与前文直接张力控制方式中所述的“速度差控制算法”的PI调节器设计方法类似，这里不再赘述。

2.5 立式活套张力控制的前馈补偿

要准确快速地控制活套张力，有必要对活套转动过程中的各种损耗进行补偿。活套前馈补偿力矩包括：转动惯量补偿力矩（加速度补偿）、机械损失补偿力矩、风量损耗补偿力矩，带钢自重补偿力矩。前馈补偿的前提条件是对系统的数学模型有准确的了解。下面分析一下转动惯量补偿力矩、机械损失补偿力矩、风量损耗补偿力矩、带钢自重补偿力矩各自的作用和数学模型。

2.5.1 转动惯量补偿力矩

活套卷扬的运动是旋转式的，运动方程为：

$$T_e - T_L = \frac{d}{dt}(J\omega) = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} \quad (2.29)$$

式中 T_e 为电机电磁转矩； T_L 为负载转矩； ω 是角速度； J 为活套的转动惯量； $J\omega$ 是动量矩。 $\omega(dJ/dt)$ 项对于那些变惯量转动装置是很重要的。例如离心机和卷曲机的传动装置，它们的负载几何形状与转速或时间有关，几何形状可变的工业机器人也是这样的。然而在很场合如活套装置，可以假设转动惯量是常数， $J = \text{const}$ 因此：

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.30)$$

式(2.9)表明,电动机内部电磁转矩与负载转矩之差,便是电动机本身的惯量加速和克服电动机内部摩擦转矩所需的转矩。在加减速过程中,变频器根据速度给定和速度反馈计算电动机所需的电磁转矩,从而达到加减速的目的,这是典型的反馈控制系统。反馈控制系统在响应时间要求较快,同步性要求较高的场合无法满足用户的要求。转动惯量补偿就是针对反馈控制的不足,在活套加减速时人为地加大或者减小传动电机的输出电磁力矩 T_e ,相当于转速起变化之前提前插入额外的电磁力矩,用于 $J(d\omega/dt)$,从而加快系统加减速时的响应速度。这是一种动态的前馈补偿,需要实时计算转动惯量补偿的值。要计算系统的转动惯量补偿力矩,首先要了解系统的转动惯量。活套转动惯量由活套卷扬传动机构、卷筒等部分的转动惯量组成。理论上一个为 M ,半径为 r 的圆柱体刚体的转动惯量 J 可由下式计算得出:

$$J = \int_0^M r^2 dM \quad (2.31)$$

因此转动惯量力矩计算公式如下:

$$T_{qi} = J \frac{d\omega}{dt} = (J = \int_0^M r^2 dM) \frac{d\omega}{dt} \quad (2.32)$$

$d\omega/dt$ 可由线加速度得出:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{a}{R} = \frac{1}{R} \frac{dV}{dt} \quad (2.33)$$

其中 a 是加速度; R 是卷扬卷筒的半径; V 是线速度。

对于一个复杂的非匀质物体,例如包含形状复杂的铁、铜和绝缘材料的电机转子,其转动惯量实际上只能用近似方法确定。在带有机机械负载时,问题就变得更复杂了,用户通常并不知道负载在结构上的细节。有时转动惯量不是一个常数,而是一个在平均值附近周期性的变化着,例如带有曲轴和连杆的活套压缩机就是这种情况。所以在实际工程中无法采用式(2.32)计算转动惯量,工程中都采用实验测定法确定其转动惯量。

2.5.2 机械损耗补偿力矩

摩擦补偿力矩由以下公式计算得到:

$$T_{qf} = \mu F \frac{D}{2} \quad (2.34)$$

式中 D 是轴径直径; F 是卷重和张力的合力; μ

是轴径摩擦因数。但此式只用作理论研究，目前实际工程上的摩擦补偿力矩计算采用如图 2.8 所示的曲线。

摩擦补偿力矩在电机转速较小时电机转速成正比，当电机达到一定的转速后，电机克服的摩擦力矩为一定值。该值需要在现场调试时给出。

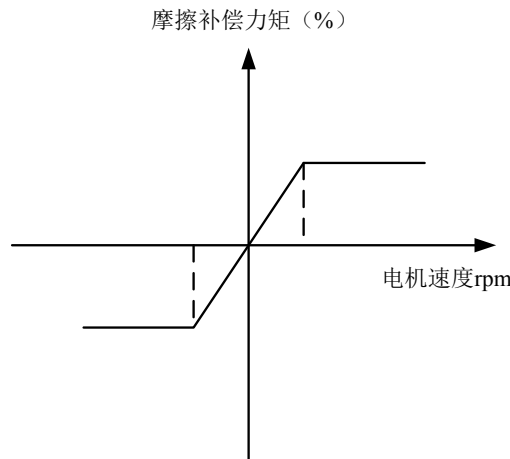


图 2.8 摩擦补偿与电机速度关系

Fig2.8 Relationship between friction loss torque and motor speed

还有一些其他的补偿量，诸如：钢绳重量补偿、风量损耗补偿等，所占总转矩的百分数较小，在要求不高的情况下通常忽略，这里就不再赘述了。

2.6 立式活套控制中存在的问题

虽然项目中的复合张力控制经调试后，整定出一组能基本满足设计需求的张力控制器 PID 参数值，但这样的设计仍然存在着以下一些问题：

(1) 出口活套的一个工作周期包括套量稳定阶段、匀速充放套阶段、加减速充放套阶段，在每个工作阶段均使用同一组 PID 参数，必然不能使每个工作阶段的张力控制效果达到最优，这组 PID 参数只能是各个工作阶段的一个折衷值；

(2) 前面介绍的转动惯量补偿、摩擦损耗补偿、风量损耗补偿等前馈力矩都是通过一些近似的工程测定手段获得的，难以保证其补偿的精确性；

(3) 立式活套是一个非线性、时变的对象，对于一个变化的对象使用简单的 PID 控制显然不能达到很好的控制效果；

(4) 对于速度控制的 1#活套和转矩控制的 2#活套之间，使用同步模块来使它们同步，虽然基本满足调试要求，但对于快速性要求较高的情况，这种简单的同步方式将产生两个活套的短时异步，严重时甚至会造成机械损坏。

基于以上问题，改进活套内带钢张力 PID

控制器是十分具有意义的一个工程问题。所以本文拟采用一种能够克服这些控制缺陷的智能控制策略，即单神经元自调整 PID 控制。通过理论论证和仿真验证这种控制器的控制效果和可行性。同时，为了避免出现活套异步的问题，并给张力单神经元自调整 PID 控制器的仿真研究提供合理的活套系统模型，将运用神经网络建立活套的速度和张力模型。

2.7 本章小结

首先从物理角度分析了带钢中产生张力的根本原因，简要介绍了冷轧处理线中带钢张力的作用和种类。接着介绍了目前广泛应用的三种张力控制方式，重点分析了冷轧镀锌线立式活套卷扬张力控制方式的独特设计，以及各种转矩前馈补偿的实现方法。现场在使用了上述设计方案后，基本可以实现在生产过程中维持活套带钢张力恒定的目的。但当前的控制系统还存在着诸多缺陷，于是提出使用一种能够克服控制缺陷的智能化张力控制策略，即单神经元自调整 PID 控制。这种控制策略即发挥了单神经元控制在线参数自整定的优势，同时保留了 PID 对过程控制良好的控制效果和适应性。该控制器的设计工作在第五章中完成。同时，为了给张力单神经元自调整 PID 控制器的仿真研究提供合理套内带钢张力模型，将运用神经网络建立活套内带钢张力的模型。

第3章 莆田镀锌线活套控制的实现

3.1 莆田镀锌线活套控制系统配置

莆田镀锌线基础自动化系统的主要任务是：传动、工艺控制功能和仪表仪器处理相关的控制；设定值如张力、延伸率等控制和实际值处理；入、出口的自动顺序控制；带钢跟踪；HMI显示等。

基础自动化控制器主要由高性能控制器 HPC 所组成，对于不同的功能，每一个控制器独立地运行。这些自动化控制器之间的通讯协议采用 EGD 通讯。CPU 之间单独网段保证通讯速度。每个控制器能连接到分别的仪表、智能远程 I/O、传动控制器，CPU 控制器与这些设备的通讯以流行的现场总线 ProfiBus DP 为主，对于实时性求低的采用以太网通讯。一级通过高性能控制器经由 100Mb/s 以太网接受来自二级的输入数据和经由 HMI 的操作员输入数据，并在 HMI 系统做必要数据显示，HMI 计算机基础自动化画面同二级画面合二为一，HMI 单独网段同二级服务器和 HMI 服务器通讯。二级同三级计算机通讯独立网卡完成。连退线的紧急停车由德国 PILZE 公司的过程安全 PLC 系统构成。系统配置示意图如图 3.1 所示。

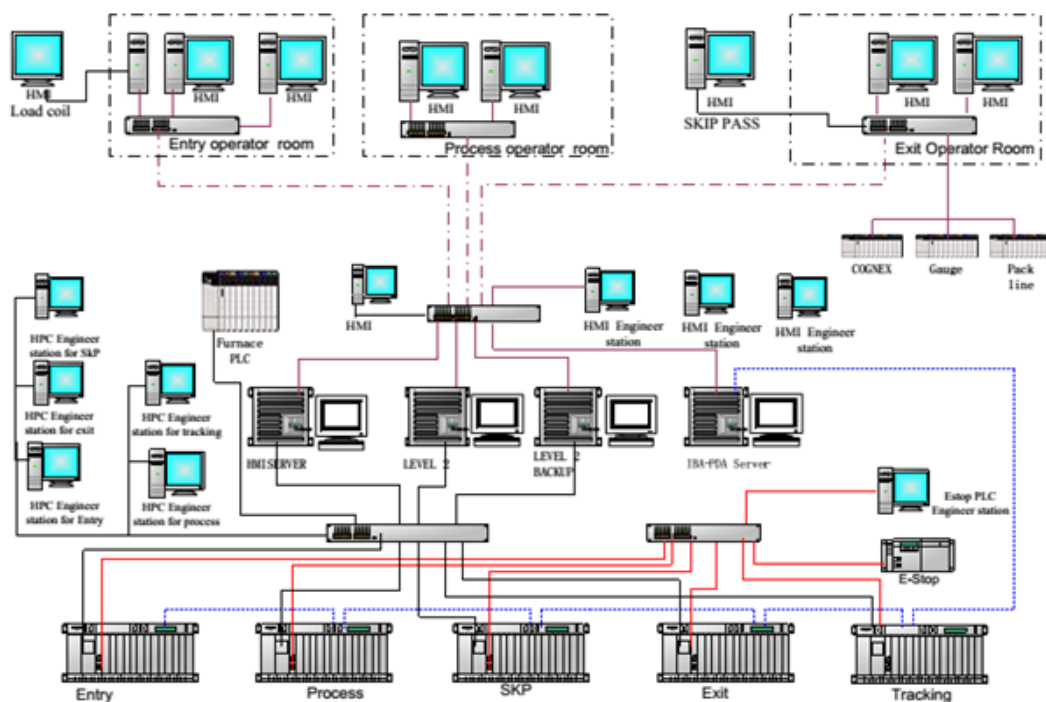


图 3.1 莆田生产线控制系统结构

Fig3.1 Control system of putian CGL line

整个镀锌线自动化系统的配置由五部分通讯网络构成：

第一部分为现场总线 Profibus DP 网，主要是提供各区域的控制器与主/辅电气传动、远程

I/O 及部分仪表的通讯,最高通讯速度达 12Mb/s。轧线上的所有主、辅电气传动都通过 Profibus DP 网与相应区域的控制器相连,控制器为 DP 网主站,电气传动控制器为从站;各区域的远程 I/O 及相应操作台与操作箱 I/O 和操作单元 OPU 的 I/O 单元均通过 Profibus DP 网与主控制器相连。

第二部分是 100Mb/s 的基于 TCP/IP 协议的以太网,主要完成 HPC 控制器之间、HPC 控制器同急停 PLC 的数据通讯,HPC 之间采用 EGD 通讯,HPC 同急停 PLC 采用标准 TCP/IP 协议通讯。

第三部分调试工程师站、特殊功能站、第三方具有以太网通讯能力的仪表、控制器,以及 HMI 服务器、二级系统之间通讯。

第四部分是二级服务器、HMI 服务器、各个操作室的 HMI 客户机之间的通讯。完成画面的显示。

第五部分是二级服务器的一个单独 1000Mb/s 网卡,单独连接到三级计算机的交换机上,该网不连接连退线的任何其他设备。

其中包含出口活套控制的光整区控制器配置和主要控制功能为:

光整和出口区域从出口活套开始,由一个 HPC 框架组成,两个 HPC 的 CPU 完成光整区域和出口区域的控制。

控制包括:出口活套的控制,光整区域的顺序控制、点动、联动及运行控制,张力、速度控制,光整机的顺序、工艺控制功能,光整机电气传动设备控制,光整机液压系统控制,湿平整控制,换辊控制,光整机油气润滑控制,空气吹扫控制,与板型控制系统的接口,数据通讯等,主机架配置如下图:

Board	3 VMIC-HPC SPM																			
	Rack VME 20(VMIVME-M20)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	VMIC7807-311	CPU	VMIC7807-311	CPU				DIZ232.1	high speed Counter	SSI 232.1	绝对值信号接口模块	ADA 232 U	模入/模出接口模块						SST-PB3-VME-2	ProfibusDP 板
											IBA								SST-PB3-VME-2	ProfibusDP 板

图 3.2 光整段 HPC 系统配置

Fig3.2 SPM section system configuration

配置有双口 PROFIBUS 网板,完成同电气传动变频器通讯、远程站的通讯、码盘和位置传感器通讯,CPC、张力计第三方控制设备的通讯。一块 IBA 数据采集板。本文使用的 PDA

历史数据就是通过 IBA 板卡采集到 PDA 服务器进行记录的,计数器板作为电气传动码盘数据采集接口。用来对带钢位置进行跟踪,绝对值信号接口板用于连接光整机的磁尺等,模拟量板用于连接液压控制器,出口 CPU 双以太网接口,一个接口采用 EGD 通讯方式,完成 CPU 之间通讯,完成同急停 CPU 的通讯。另一个以太网口负责同 HMI 服务器通讯、编程调试工程师站、其他第三方需要以太网通讯的设备通讯。

采用高性能控制器多 CPU 结构, CPU 为 Pentium M 1.6GHz 产品,内存 512MB,最快控制周期可小于 1ms,适用于对控制精度要求高的快速系统。使用高集成度的工业级芯片,对恶劣的工业环境有很强的适应能力。办卡带有视频、鼠标键盘接口,可以方便的使用显示器监视其运行状态,方便故障诊断。

图 3.3 为高性能控制器的 CPU 板卡。



图 3.3 高性能控制器 VMIC7807

Fig3.3 High performance controller VMIC7807

多 CPU 结构和实时多任务 VxWorks 嵌入式操作系统环境,适合于冷轧处理线控制系统这样的实时多任务多时间周期的工作方式。根据实际需求对程序定义不同的扫描周期。

从表 3.1 程序扫描周期分配表中看到,在 CPU 中根据程序所处理内容对实时性和控制精度的要求分配不同的扫描周期,对实时性和控制精度要求高的程序如:

- (1) 活套张力、位置控制及光整机轧制力、延伸率控制都采用最快的 20ms 的扫描周期,用来保证其控制的精度和实时性;
- (2) 对于 CPU 间通讯、和 CPC 的通讯及线的顺序控制程序,选取 40ms 的扫描周期;
- (3) 对于单独点动、组点动以及光整机辅助系统这些实时性要求不高的程序,采用 100ms 的扫描周期。

这样的多时间周期工作方式,能充分的利用 CPU 的能力,提高控制精度。程序中扫描周期按其控制功能分配如下表所示:

表 3.1 程序扫描周期表
Table3.1 Program scan time table

程序内容	扫描周期 (ms)
Remove I/O Input and output data Counter	20
Read Global Logic variable read and write	20
SPM force,bending,Elongation control	20
Main speed and Drive logical control	20
Drive control reference set point	20
Looper tension,running,position control	20
Strip on line position ,Tension on control	20
Communication with Process and Tracking	40
EGD communication	40
ProfiBus Communication with CPC	40
communication life signal	40
Emergency stop / Quick Stop	40
Main line normal running control	40
Tandem Jog control and Individual Jog control	100
Drive Group Power control	100
SPM Auxiliary system control	100

高性能控制器的编程和开发环境采用 Converteam 的 P80i 编程软件，它使用国际通用的 IEC61131-3 编程规范，IEC61131-3 编程环境是经过 PLCOpen 认证，包括所有 DCS/PLC 典型编功能如：功能块编程；程序拷贝自动变量替代功能；三段变量名管理，中间变量自动管理，地址无关性；程序源独立变量空间，变量空间可调整；停电不丢失变量保证系统停电后变量不变等等

编程环境为控制程序图形化编程提供了一整套完整的功能模块：

计时器、计数器、各种逻辑运算；

上升、下降、延时等多种触发模式；

多路器、格式转换、数据解码、编码；

布尔、整型、实整数、长整形数据，以及相互转换及各种数学计算；

各种 PID 调解，定位、速度发生器、张力等控制模块；

EGD、TCP/IP、UDP 等各种通讯模式的功能块；

数据库管理、数据库指针等工具。

活套卷扬电机的传动控制系统采用西门子 SINAMICS S120 系列驱动装置，SINAMICS S120 是西门子公司推出 6SE70 系列变频器的替代产品，他采用模块化的设计，通过对功率组件的并联实现简单的功率扩容，在维护的备件方面都变得十分便利，同时他采用 CU 集中控制的拓扑结构，一个控制单元可以控制最多 6 个矢量轴，在控制单元内部可以进行轴之间的数据交换，主从驱动等控制变得十分容易，这在张力辊组的控制上显得尤为明显，控制单元与电机

模块之间使用 DRIVE -CLIQ 连接，在调试过程中使用自动配置功能可以快速的完成系统组态，如果选择带 DRIVE -CLIQ 接口的电机与编码器，也可以通过自动配置读取参数，自动配置，节省了大量的调试时间也不容易出错。

活套传动系统控制单元 CU320 通过 Profibus 与 PLC 进行数据交换，接收速度设定、附加转矩及控制方式来控制活套卷扬电机，同时反馈实际速度、实际转矩及状态给 PLC，用来监控和控制。功率单元采用公共母线整流的方式，使活套及其他四象限运行的设备能在发电状态回馈能量，提高效率。

3.2 莆田镀锌线的活套控制

莆田镀锌线出口活套为立式双活套，在入口、中部和出口安装 TM16、TM17、TM18 三个张力计，1#2#活套塔分别有 4 个和 7 个带传动的活套底辊。活套卷扬电机安装增量式编码器通过编码器模块进入传动系统作为实际速度检测，活套卷扬卷筒安装绝对值编码器通过 Profibus DP 连接到 PLC 作为套量检测。出口活套的控制画面如下图：

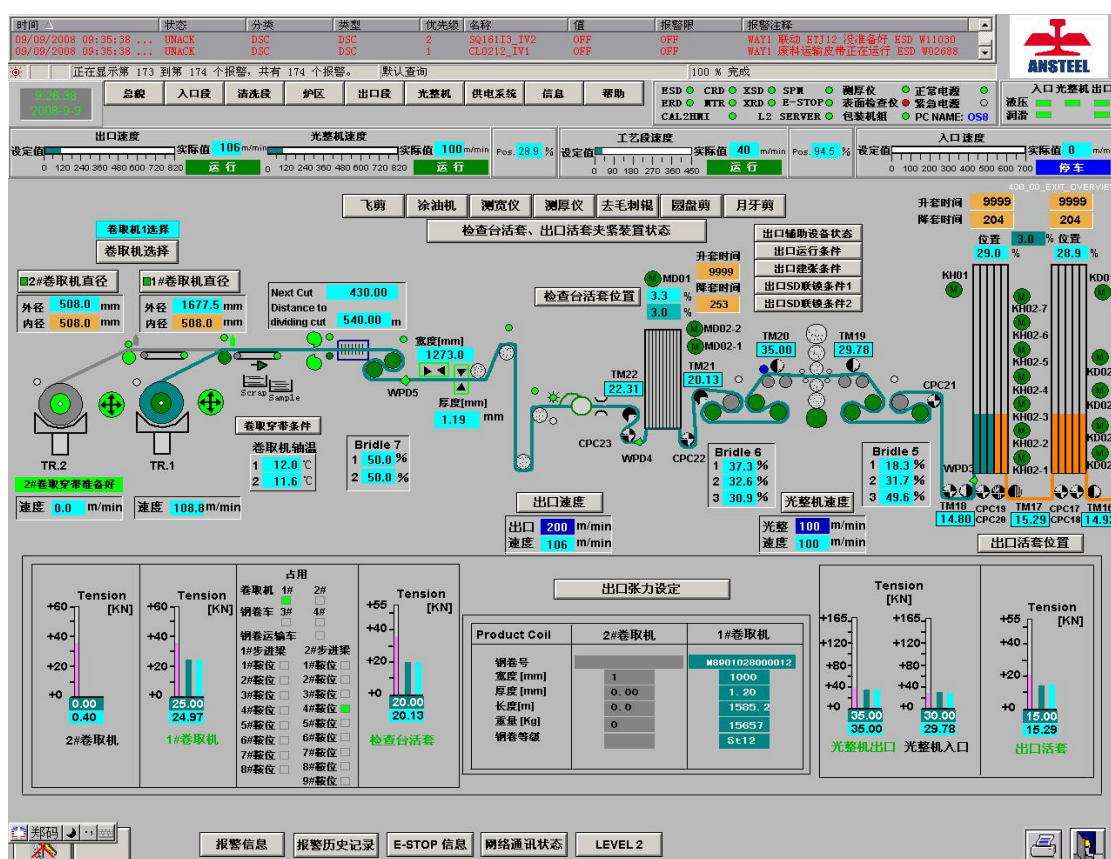


图 3.4 光整段 HMI

Fig3.4 SPM section HMI

在生产过程中,操作人员是通过 HMI 画面根据现场实际生产情况对活套进行控制的, HMI

采用服务器客户端方式，服务器采用冗余配置，保证在一台服务器出现问题的情况下不影响生产。

从上图的 HMI 中可以看出，操作人员通过改变活套位置设定值来控制活套的运行位置；通过改变炉区和光整段的速度设定控制活套的升降套速度；通过改变活套的张力设定来控制活套的运行张力。在 P80i 中通过 3 个不同的 Task 使用相应的定位块和张力控制块来编写活套位置、速度和张力的控制程序。

3.2.1 莆田镀锌活套套量与同步控制

(1) 位置控制

根据工艺需求出口活套的套量设定位置通常是空套套量，如上图 HMI 中设置为 3%，根据出口工艺流程，在出口剪切、卸卷过程中，出口速度小于工艺速度，活套处于充套状态，此时活套为速度控制模式，只在达到满套位置后停车，按活套的结构控制其卷扬速度，活套卷扬的速度设定按如下公式计算：

$$V_{\text{卷扬速度}} = (V_{\text{光整}} - V_{\text{出口}}) \times S / n \quad (3.1)$$

其中 $S=6$ 为活套钢绳股数； $n=48$ 为活套带钢股数。

在出口完成穿带以后，需要高速拉套，将活套位置降到设定值，从而保证下个工艺流程的正常进行，此时活套为位置控制方式，在 PLC 程序中，通过 P_LOOP 活套位置控制块实现，P_LOOP 活套位置控制块是通过码盘计算活套的实际套量与 HMI 设定套量进行计算，输出附加速度调节光整出口段的速度设定，对活套的套量进行控制，其设定参数如下表所示：

表 3.2 位置调节块参数

Table 3.2 Parameter of position control block	
参数	设定值
Minimum length in meters	41m
Maximum length in meters	603.4m
Dead band in %	0.4%
Maximum speed in m/min	450m/min
Regulation area in meters	100m

其中 41m 和 603.4m 分别对应活套 0%和 100%的套量，模块根据实际套量计算附加调节速度，在实际套量与设定套量的偏差大于死区 0.4%时位置控制使能，对附加速度的最大限幅值为 450m/min，这是根据卷扬电机的额定转速与齿轮比，卷筒直径和活套的机械参数决定的，在偏差大于调节范围值 100m 时活套位置控制附加速度为最大值，在偏差进入调节区域后，按照下面公式计算：

$$V_{\text{附加}} = \left(\frac{PV}{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}} - PS \right) \times V_{\text{max}} \times \frac{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}{100 \times L_R} \quad (3.2)$$

其中 PV 为实际套量单位米数，PS 为设定套量单位为百分数， L_{max} 、 L_{min} 分别为最大套量 603.4m 和最小套量 41m， V_{max} 为最大附加速度 450m/min， L_R 为调节范围 100m。

(2) 同步控制

由于出口活套的套量很大，为避免惯性过大难以控制的问题，出口活套设计为两个活套小车分别由两个卷扬控制，这样就可以保证活套稳定的充放套，同时也需要用一个位置同步控制器来调节两个活套的套量平衡。

出口活套的同步控制器以 1 号活套小车的实际位置为参考值，以 2 号活套小车的实际位置为实际值，根据两个活套小车的位置偏差调节出一个补偿速度来附加到 2 号小车的设定速度上，控制框图如下：

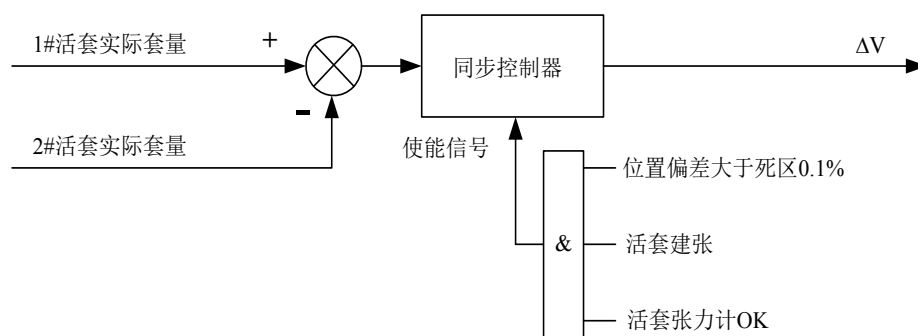


图 3.5 活套同步控制框图

Fig3.5 Looper synchronization control diagram

活套张力建立以后同步控制器开始工作，当两个活套小车的位置偏差进入死区时，这个附加速度就为 0。在程序中使用一个纯比例的 PID 调节器作为同步控制器。

3.2.2 莆田镀锌活套张力控制

(1) 活套张力控制使能

首先，在生产线运行之前要对活套建立静态张力，程序中使用 BDFV2 和 FMTON 块进行活套建张控制，在满足建张条件的情况下通过 HMI 操作画面或建张操作按钮对活套进行建张，使能活套的张力调节，并在活套建张条件丢失的情况下中断使能，确保安全。图 3.4 为建张控制块的示意图：

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/398070105137006051>