

分类号_____ 密级 _____

UDC _____

学 位 论 文

冷轧带钢卷取机张力控制的研究

作 者 姓 名： 颜廷洲

指 导 教 师： 钱晓龙 教授

东北大学信息科学与工程学院

申请学位级别： 硕士 学 科 类 别： 专业学位

学科专业名称： 控制工程

论文提交日期： 2012 年 6 月 论文答辩日期： 2012 年 6 月

学位授予日期： 2012 年 7 月 答辩委员会主席： 高宪文教授

评 阅 人： 赵东林 高级工程师 郑艳 副教授

东 北 大 学

2012 年 6 月

A Thesis in Control Engineering



Study on the Coiler Tension Control of Cold Rolling Production Line

By Yan Tingzhou

Supervisor: Professor Qian Xiaolong

**Northeastern University
June 2012**

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：颜廷洲

日期：2012.6.18

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☐ 一年 ☐ 一年半 ☐ 两年 ☒

学位论文作者签名：颜廷洲

导师签名：袁晓龙

签字日期：2012.6.18

签字日期：2012.6.18

冷轧带钢卷取机张力控制的研究

摘 要

本文以首钢迁钢公司“冷轧后部处理线”项目为依托，对其中的卷取张力控制设备进行了技术消化，在综合研究国内外卷取张力控制技术的基础上，本文对卷取机的卷取张力控制进行了讨论。

首先，要精确、实时而又有效地控制张力并使其波动小，主要是通过控制速度来实现。从带钢张力与带钢速度之间的动态方程出发，阐明了速度与张力的动态关系为惯性环节，这比通常使用的积分关系更符合实际情况。这一部分的分析为间接张力控制方法提供了理论基础。其次，对机组卷取机传动系统进行分析，建立了卷取机动力系统速度控制数学模型，并探讨机组在建立张力过程中的惯性力矩补偿问题，找出了建立张力过程中张力波动的原因并得到相应的控制方法。最后，针对卷取机张力控制的参数时变问题，在速度调节器上采用增益自调节 PID 控制器，其增益大小仅取决于钢卷瞬时直径大小。在此基础上，研究了带钢运动规律，利用计数测量的原理，得到钢卷直径数值基准。用秒流量相等原则对该基准值进行修正，得到钢卷实时直径计算模型。从而为带钢张力控制提供准确而又稳定的直径参数。

通过运用卷取工艺板 T400，利用特定的钢卷直径算法，在连续酸洗生产线卷取张力控制系统中进行实际调试，实测数据的结果验证了本文提出的钢卷直径算法的正确性。

关键词：卷取机；张力控制；钢卷直径；冷轧带钢

Study on the Coiler Tension Control of Cold Rolling Production Line

Abstract

On the basis of technical transformation of coiler tension control equipments in continuous pickling line in Shougang qian'an iron & steel company, this thesis thoroughly studies the coiler tension control equipment and digests the related technique. This paper will mainly discuss the tension control of coiler.

Firstly, in order to control coiler tension accurately and effectively, controlling the speed of strip steel is a feasible scheme. By the dynamic equation between speed and tension, the paper points out that the dynamic relation is one order system other than integral system used usually. This conclusion sustains the theory of indirect tension control. Secondly, with analysis of the coiler driver system, the mathematic model of the coiler speed system is constructed. Furthermore, the paper acquires the cause and the countermeasure of the undulate tension in the course of forming tension by discussing the compensations of dynamic torque in detail. In the end, tension control of coiler is a time-varying parameter system. As a result, the adaptive control theory is applied on the speed controller. KN adaption of speed controller is related to the coil diameter. By studying the rule of winding steel, this thesis acquires the counter diameter as the primary diameter. Using the rule of mass flow conservation, this thesis monitors and corrects the primary diameter. Therefore, the algorithm of coil diameter is built. the thesis analyses the data acquired in the course of debugging tension control system in continuous pickling line.

Using the algorithm of coil diameter and the T400 technology board, the toiler tension is nearly constant.

Keywords: coiler; tension control; coil diameter; cold rolling strip

目 录

独创性声明.....	I
摘 要.....	II
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 本课题研究背景.....	1
1.2 张力控制的国内外研究现状.....	3
1.3 本课题研究的意义与目的.....	5
1.4 本课题研究的内容.....	6
第 2 章 基于恒线速度的张力控制方法.....	7
2.1 冷轧带钢生产线中张力控制方法.....	7
2.2 卷绕机构带材张力的产生机理.....	8
2.3 带钢张力控制数学模型的建立.....	11
2.3.1. 电机控制张力的方法分析.....	11
2.3.2. 对象电机数学模型.....	12
2.3.3. 卷取张力间接控制调节器参数整定.....	14
2.4 自增益调节速度控制器设计.....	17
2.5 本章小结.....	19
第 3 章 卷取机惯性力矩补偿.....	21
3.1 钢卷直径变化率.....	21
3.2 转动惯量变化率.....	21
3.3 由电机转速变化造成的惯性力矩.....	22
3.4 惯性加/减速动态力矩的计算.....	22
3.5 惯性加/减速动态力矩补偿电流的计算.....	26
3.6 本章小结.....	26
第 4 章 钢卷直径测量的算法.....	27
4.1 计数法计算钢卷直径.....	27
4.2 流量相等法计算钢卷直径.....	27
4.3 计算卷径修正值.....	29
4.4 钢卷直径实时数值的输出.....	30
4.5 本章小结.....	30
第 5 章 卷取张力控制系统现场应用分析.....	31

5.1 卷取张力控制系统结构31

5.2 带钢卷取控制系统37

5.3 冷轧带钢卷取机张力控制效果分析42

5.4 本章小结53

第 6 章 总结与展望.....55

参考文献.....57

致 谢.....61

第1章 绪 论

1.1 本课题研究背景

自从二十世纪二十年代第一卷热轧钢卷在 Armco Butler 热轧厂生产出来, 金属带材的生产出现了新的领域。令人吃惊的是, 人们对卷取技术似乎一直不太关注。直到客户对钢材的外观质量与表面质量提出要求时, 卷取技术才纳入工程师们的研究范围。这是因为, 卷取技术作为生产工艺中的最后一道工序直接影响产品的质量。在历史上, 由于卷取技术的原因, 曾出现过高达 10%次品率。为了解决卷取技术中的难题, 各个国家都花费了大量的物力、财力进行技术研究及技术改造。然而, 卷取过程中造成次品的原因一般都不能很好解释(人工操作的随机性与次品率有相关性), 原因是人们缺少直接检测和分析的手段, 人们唯一能进行的就是对卷取过程中的张力进行分析。经过几十年的知识积累, 人们已总结了最优的卷取策略。

我们知道, 一条纸带如果没有绷紧, 是没有办法卷紧的。如果张力过小, 纸卷的边缘将不齐, 纸卷有的紧, 有的松散。张力过大, 纸张则容易拉断。在冶金行业中, 对薄钢板的卷取也有相同的问题, 并且有其特殊性。如果张力过小, 钢卷会在自身重量下松散, 钢卷在散开过程中由于相对滑动, 会在钢板表面产生划痕, 影响钢材的表面质量, 或者由于钢卷的内层松散突出, 无法包装; 如果张力过大, 在钢材卷取过程中, 会使钢卷内卷产生滑动, 由于滑动造成表面划痕, 影响了钢材的表面质量; 更重要的是, 由于张力过大, 会造成钢卷内部应力过大, 致使钢卷的内孔内陷或者整个内层卷突出(塔形), 一旦发生这种情况, 就会降低钢卷的等级。为了防止层间滑动, 层间的径向作用力乘以摩擦系数的值应大于张力力矩除以半径所得值, 在实际生产中, 滑差率(不产生相对滑动的最大张力力矩与实际力矩之比)必须大于 1.0。为了提高钢卷的成材率, 应根据不同的加工工艺(连轧、平整、酸洗、涂层等)及被卷取的物料的特性设置相应的张力, 然后, 在卷取过程中, 保持该张力值恒定。综上所述, 恒张力控制是卷取技术的关键。

同样, 在纺织、造纸、印刷、化纤等行业中, 张力控制也是一个重要的研究领域。例如, 在复合材料的缠绕工艺中, 如果张力控制不恰当, 或者张力控制不稳定, 就会使复合缠绕材料的强度下降 20%-30%, 如果张力得到了很好的控制, 就可以控制树脂和纤维在芯模上按规定的线形排列, 提高了纤维树脂复合材料的强度。在印染行业中对张力控制也有相近的要求, 例如, 在印染过程中, 织物的张力影响织物的着色色差、着色强度, 最终直接影响到产品的质量。

恒张力控制一般分为开环控制和闭环控制两大类。开环控制就是利用有些电机的本身所具有的与卷绕特性相似的软机械特性，直接用这类电机来传动卷绕机构，以获取近似的恒张力控制；闭环控制又分为直接张力控制、间接张力控制和复合张力控制三种方式：直接张力控制是一种最直接、最有效的控制方式之一，直接张力控制方式中，设置有张力检测元件、张力辊和张力的控制环，利用张力检测元件的检测信号与给定张力值比较，经张力控制环后去驱动执行机构，控制张力辊的位置，达到控制张力的目的，这种张力控制方式优点是张力控制精度高，从理论上可以实现零误差控制；缺点是控制精度依赖于张力检测元件的精度，如果，现场环境比较恶劣，如酸雾对检测元件的腐蚀，就可能导致张力控制失效。间接张力控制系统中没有张力检测元件，对张力的控制是通过卷取机构的物理方程进行静态、动态分析，从中找出影响张力的所有电气物理量，对这些物理量进行控制，从而达到恒张力控制的目的。根据不同的物理量采用不同的方法，一般有电流反馈、电枢反电势反馈、卷径反馈等。由于间接张力控制涉及多个参数的控制，一般需采用多闭环的控制方式来实现。这种恒张力控制方式的优点是减少了张力辊及相应的检测元件，降低了系统成本，缺点是控制方式更为复杂，控制精度相对地比直接张力控制方式的低，并且完全依赖于控制器的精度。复合恒张力控制方式是在间接张力控制方式的基础上，再增加一个张力闭环，形成一个三环控制系统，该控制方式优点是不仅具有直接张力控制的精度，还具有间接张力控制方式的快速性能和跟随性能，缺点是投资成本大，控制方式更为复杂。

在实际中，应用最为广泛的是间接张力控制方式，其控制精度完全取决于控制器。在上世纪八十年代以前，控制系统一般以模拟器件为主，系统的精度一般都不高。进入九十年代后，随着机电制造技术、电力电子技术、计算机技术、检测技术的发展，专用张力控制设备（器件）有了飞速的发展，张力控制的精确度也得以不断提高。传统的张力控制主要采用常规的 PID 控制，PID 控制是基于偏差的比例、积分和微分的集成式控制方法，具有原理简单、易于实现、鲁棒性强和适用面广，可以改善系统的动态特性和稳态特性等优点，只要正确的设定其参数便可以实现其控制作用，因而被广泛的作为控制器应用于张力控制系统中。我们在进行 PID 控制器的参数整定时，一般认为被控制对象的参数是恒定不变的，即假设系统是一个时不变系统，通过对转动惯量的补偿和卷径的扰动补偿，实现恒张力控制。其实，我们在进行惯量补偿计算时就知道，随着带钢被卷绕在卷筒上，卷筒的转动惯量是在不断的增大的。同时由于张力控制系统中速度和张力是交叉耦合的，并且是多输入多输出的非线性系统，而采用常规 PID 控制理论进行张力系统设计，控制器的参数一般是按照卷筒空卷时进行整定的，在实际运行时

调节器参数并不能随着系统的参数改变而改变,对系统模型的精确性依赖较强,所以原控制器设计的指标往往是达不到的。随着人们对产品质量要求的提高,常规 PID 控制很难获得满意的控制效果,人们也在不断的寻找新的控制方法,因此有人提出了模糊自适应控制的方法。

根据系统中是否设有张力检测元件,张力控制方法可以分为直接张力控制和间接张力控制。在直接张力控制系统中,张力检测元件的精度直接影响张力控制精度;对于间接张力控制系统,其控制算法直接影响张力控制精度。直接张力控制系统和间接张力控制系统应用在不同的工艺条件下。在带钢连轧、平整机组中,带钢张力参与厚度控制、板形控制,因此在机组中设置张力检测元件,采用直接张力控制方法。在带钢表面处理机组中,如酸洗、镀锌和彩涂等机组,对张力控制的要求仅为保持其恒定,避免带钢跑偏,保证带钢稳定运行,机组中一般不设置张力检测元件,采用间接张力控制方法。

对于卷取间接张力控制系统,其中关键的环节除了控制算法外,钢卷直径的获取方法也非常重要。目前国内外对间接张力控制系统的研究主要集中在控制算法上,目前已有一些新的控制算法的出现,如 NIRECO 公司的指数算法,它使张力控制与卷径无关,并且提高了系统的稳定性、响应性^[1]。随着智能控制理论的发展,新型张力控制系统也得到了应用,如模糊参数自整定 PID 张力控制^[2],基于神经网络的张力控制系统^[3]。通过测量获取钢卷直径的方法,从文献资料来看,一般有半径跟随臂测量卷径^[4],位移传感器接触测量卷径^[5-6],在这些测量方法中,测量精度与给定电源的稳定性、电位计精度、位置传感器精度等有关,这些精度直接影响卷径的精度。通过计算获取钢卷直径的方法,从目前获取的文献看,大部分采用的是模拟电路实现对卷径的三次方和四次方求取,由于模拟电路的精度受环境的影响较大;同样对系统的补偿精度也存在较大的影响。如何准确地得到钢卷的直径是必须认真考虑的。

1.2 张力控制的国内外研究现状

在上世纪八十年代以前,卷取张力控制系统一般以模拟器件为主。传统的模拟控制系统张力精度低、调试难度大、张力波动范围大,这些因素直接影响到彩涂钢板的产品质量;又因其硬件成本高,所以花费巨大。

进入九十年代后,随着机电制造技术、电力电子技术、计算机技术、自动化检测技术的发展,专用张力控制设备有了飞速的发展。近十余年来,在国外有公司将卷径测量及张力控制系统做成标准控制板并配有专用卷绕软件,在国内也有人开发了单片机张力控制系统。这样,虽然张力控制系统的精度提高了,但是在

一些中小型项目中，由于硬件和软件的投资较大，投资方往往不愿意承受昂贵的价格。

近几年来，卷取张力控制设备有以下两个方面发展：

(1) 以磁粉离合器（制动器）为基础的张力控制设备

其特点是磁粉离合器（制动器）的励磁电流与输出力矩有较好的线性关系，通过相应的检测元件的信号来控制 and 调节磁粉离合器的励磁电流的大小，控制其输出力矩，从而实现卷取过程中的张力控制。该控制系统由于受到磁粉离合器输出力矩的大小限制，主要应用领域为轻工业，如造纸、纺织、印刷等行业。主要代表产品有 WARNER 电气公司的张力控制系统、NIRECO 公司的卷材张力控制系统、日本三菱公司的张力控制系统等。

(2) 以变频器为基础的张力控制系统

其特点是采用专用的张力控制板来完成张力控制所需的动态力矩补偿、卷径计算、恒张力控制等功能，通过变频器来实现恒张力控制。其主要代表产品有德国西门子的张力控制系列板及相应变频器系列；张力控制板从 PT10、T300 到目前最新的 T400，由张力控制板与相应的变频器结合，完成恒张力控制。

改革开放以来，随着与国外技术交流日益密切，国内卷取张力控制设备基本上与国外保持同步。对于以永磁式离合器（阻力器）为基础的永磁式张力控制系统，有上海佐林电器有限公司生产的 YZ 系列产品；以磁粉离合器（阻力器）为基础的张力控制系统，有上海佐林电器有限公司生产的 ZA 系列产品、海安前卫机电厂生产的 ZK0 系列张力控制系统。另外，国内有许多厂家、科研院所、高校研制和开发了以变频器为基础的张力控制系统，其中有南京航空航天大学开发的 HI 系列高性能微机控制变频器，其力矩补偿可进行 256 种选择；华为公司生产的 TD3300 系列张力控制专用变频器，本身自带有惯量静态和动态补偿、弯曲力矩补偿等功能，不需要专用的张力控制工艺板就能完成张力控制的功能。

相对来说，国外的张力控制系统设备不仅对于卷取过程中张力有严格精确的控制，而且对于初始建立张力、抛尾过程张力都有较好的控制，有友好的人机界面、完善的功能，如缓冲启动、防松卷功能、手动/自动控制、模式选取、控制参数的保存和调用、自诊断模式、多种通讯接口等。国外公司的张力控制设备一般都是系列产品，能提供多种方案选择，以满足不同用户的不同卷取工艺需求。

从国内外现有的张力控制设备的状况来看，张力控制设备的发展趋势是向功能多样化、产品系列化方向发展，集机械、液压、电气、计算机控制于一体。对张力检测元件的开发和张力控制算法的研究也是张力控制设备开发研究的一个重点。在直接张力控制系统中，检测元件精度直接影响张力控制精度；在间接张力

控制系统中，其张力控制算法直接关系到张力控制精度。

1.3 本课题研究的意义与目的

在卷取过程中，卷取张力的产生是由于带钢在张力辊出口的速度与卷取的速度不同而造成的，即速差产生了张力。也可以这么说，卷取机在顺着运行方向上对带钢有一个作用力（由卷取电动机的转矩提供），而张力辊在带钢运行逆方向上对带钢有一个反作用力，二者合成产生了张力。为了保持张力的恒定，就必须要使速差保持恒定。带钢在张力辊的出口速度由主传动速度控制系统控制，卷取速度由卷取机张力控制系统控制。

对于卷取机张力控制系统的控制性能来说，其优劣程度取决于对以下三个方面的调节能力：第一，在主机加减速阶段，也就是建张阶段，如何控制卷取机使其跟随主机速度的变化，克服（补偿）加减速造成的动态力矩对张力的影响，避免张力的振荡；第二，在主机稳速阶段，如何克服卷径的变化带来的张力波动；第三，如何解决由于卷径及其它工艺参数的改变而造成的系统模型参数改变的问题。

在国内的很多生产线中，卷取张力控制都是通过控制速度来实现的。要达到通过控制带钢速度来控制带钢张力的目的，首先必须明确带钢速度与带钢张力之间的关系。在很多教科书和有关文献^[7-8]中，提供的张力模型是以两点之间速度差的积分描述的。这对于实际卷取张力系统不太合适。因为在实际系统中，若张力对象为积分环节，系统中将有两个纯积分环节，属于结构不稳定系统，显然与实际情况不相符。实际卷取张力与速度之间的传递函数应当是一个惯性环节，它与卷取速度、张力设定值和其它工艺参数有关。

卷取过程中，随着带钢不断被卷取到卷筒上，折算到传动电机轴上的转动惯量变化很大，相应的系统参数变化就很大。如果是常规的 PID 调节器，随着系统参数的改变，原设计指标就达不到。应用现代控制理论，国内外许多文献都论述了相应成功的应用，如基于神经网络的张力控制系统^[9]，模糊控制在张力控制系统中的应用^[10-11]，自适应张力控制系统的研究与应用^[12-13]，等等。这些控制方法都需要得到准确的钢卷直径数值，计算控制系统参数。因此如何准确地得到钢卷的直径是必须认真考虑的。

随着现代工业控制设备水平的提高，连续带钢生产线中已广泛应用高速数字控制器，间接张力的控制算法在不断进步，由于卷取张力控制系统是一个复杂的系统，有必要对现有的张力控制算法进行研究，学习其中的优点，完善其中的钢卷直径计算方面的内容，进一步提高张力控制效果。

1.4 本课题研究的内容

(1) 卷取张力产生机理及张力控制原理, 探讨基于恒线速度的间接张力控制方法;

(2) 分析卷取惯性力矩的扰动补偿, 并重点研究钢卷瞬时直径的计算方法;

(3) 在介绍实际系统的配置情况下, 分析实际系统中卷径计算及张力控制的效果。

本文通过对基于恒线速度的卷取张力控制系统分析, 建立卷取系统的数学模型, 通过对系统的参数变化特性分析及其调节器的参数整定原理分析, 应用自适应控制的有关原理, 研究和探讨了增益自调节 PID 控制算法在张力控制系统中的应用。本文提出的解决方案中, 卷取机在主机加减速阶段, 也就是建张阶段是一个速度控制系统, 控制系统的目标是控制卷取机电机的转速, 使卷取机入口的带钢运行速度达到设定值的要求。张力建立后, 卷取机控制转为转矩控制系统, 保证卷取机转矩跟随控制对象的参数变化而变化, 从而保证带钢张力恒定。卷取机控制系统是转速电流双闭环的反馈系统。在建立张力期间, 速度调节器和电流调节器均投入使用, 速度调节器的输出作为电流调节器的给定值。为了避免速度的超调造成的力矩波动, 速度调节器的输出值经过一个限幅器。由于卷取机系统是一个参数时变的系统, 为了适应系统参数的变化, 达到较好的控制效果, 速度调节器设计成自适应调节器, 根据系统参数的变化调节速度调节器的比例系数。摩擦力矩补偿、惯性力矩补偿以及张力给定值力矩控制速度调节器的输出极限值。当卷取机的输出速度达到给定值, 张力建立后, 对速度调节器给定一个 ΔV , 使速度调节器进入饱和区域, 由摩擦力矩补偿、惯性力矩补偿以及张力给定值力矩作为电流调节器的给定, 此时电流调节器作为系统的张力控制器。当卷取机输出速度的变化在一定范围内, 由电流调节器控制卷取机电机, 使其根据负载的变化控制卷取机电机的输出力矩, 保持张力恒定。

本文研究通过间接计算获取实时钢卷直径的方法, 借助于在现代带钢生产线中被广泛使用的具有高速运算能力的 32 位数字控制器, 可以有效地减小如滑移等各种干扰因素的影响, 得到准确的钢卷直径实时数值, 为卷取机张力控制系统提供准确的参数, 从而可以有效地对钢卷直径变化产生的扰动进行补偿。

最后根据作者参与研制的冷轧后部处理线机组卷取机张力控制系统的实际情况, 详细分析带钢速度控制的效果, 探讨速度对卷径计算以及张力控制效果的影响。

第2章 基于恒线速度的张力控制方法

2.1 冷轧带钢生产线中张力控制方法

现代带钢生产线中，张力是分段控制的。机组的不同部位，工艺要求的带钢张力是不同的。以某厂连续酸洗机组为例，机组的张力控制主要分为以下几个部分。入口段张力控制，即开卷机和 No.1 张力辊之间的带钢张力控制，通过控制开卷机的速度和转矩来完成。入口活套张力控制，通过控制入口活套卷扬来完成。拉伸矫直段张力控制，通过控制拉伸机入口侧的 No.2 张力辊和出口侧的 No.3 张力辊的速度，维持一定的速度差来控制拉伸区域带钢张力。出口活套内带钢张力控制，通过控制出口活套卷扬来完成。卷取段带钢张力控制，通过控制卷取电机的输出速度和转矩来完成。

全线张力按生产的需要可分为 7 段，如图 2.1 所示。

(1) 开卷机到入口活套为开卷机张力控制，有开卷机和 1#张力辊建张。开卷时，开卷机电机处于电动状态，提供前向力，保证穿带成功。当带钢缝合完成时，可以建立张力，此时，开卷机电机处于发电状态，提供后向力，1#张力辊处于电动状态，牵引带钢开卷，建立张力，此段的张力控制属间接张力控制，开环控制。

(2) 入口活套为活套张力控制，由 1#、2#张力辊和活套卷扬机共同建张，通过张力计反馈信号，由变频器调节 1#、2#张力辊电机的给定转速，以及活套卷扬电机的输出转矩，建立张力，此段属直接张力控制，闭环控制。

(3) 入口活套出口到炉前为线上张力控制，由 2#、3#张力辊建张，属直接张力控制。通过张力计反馈信号，由变频器调节 2#、3#张力辊电机的给定转速，使 3#张力辊处于电动状态，2#处于发电状态，产生速度差，建立张力，此段属直接张力控制，闭环控制。

(4) 炉子段为炉区张力控制，由 3#、4#张力辊建张，通过调节 3#、4#张力辊的给定速度，使其产生速度差，进而建立张力，此段也装配有张力计，属于直接张力控制，闭环控制。

(5) 炉子出口到出口活套为线上张力控制，由 4#、5#张力辊建张，通过调节 4#、5#张力辊的给定转速，建立张力，属直接张力控制，闭环控制。

(6) 出口活套为活套张力控制，由 5#、6#张力辊及卷扬机共同建张。此段张力控制与入口活套同理，通过调节卷扬电机输出转矩量，调节活套内张力，装有张力计，属直接张力控制，闭环控制。

(7) 出口活套至卷取机为出口卷取控制，由 6#张力辊和卷取机完成建张。卷取

机提供前向力，6#张力辊提供阻力矩，建立张力，完成卷取，属间接张力控制，开环控制。

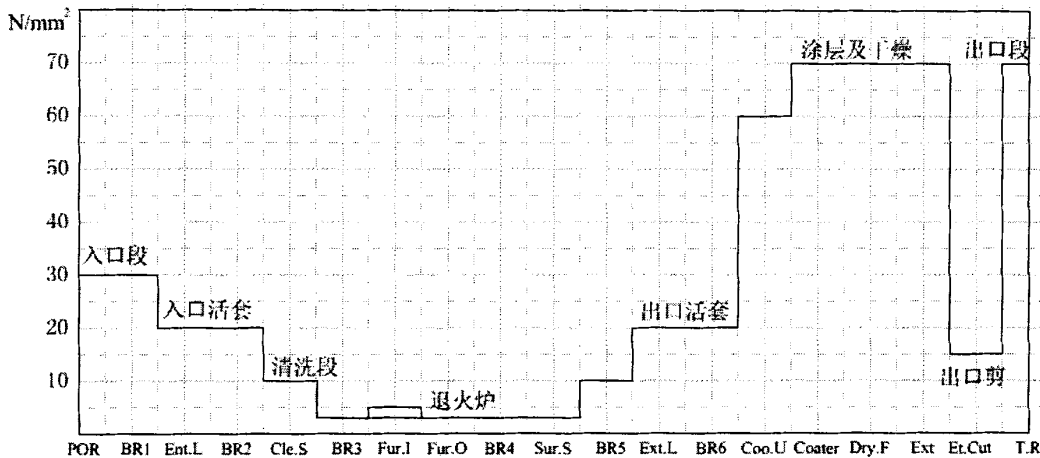


图 2.1 全线张力分段控制示意图
Fig.2.1 General diagram of tension control of all line

张力分段控制是通过在机组内设置张力辊来完成的。张力辊具有对进出口带钢张力放大或缩小的作用。当张力辊处于“发电状态”工作，带钢拖动张力辊转动，带钢所受摩擦力与转动方向相反，张力逐级放大，张力辊出口带钢张力大于入口带钢张力。当张力辊处于“电动状态”工作，带钢靠张力辊拖动而前进，带钢所受摩擦力与转动方向相同，张力逐级变小，张力辊出口带钢张力小于入口带钢张力。

张力辊的结构形式一般有两种，一种为导向辊结构形式，一种为 S 辊结构形式。前者用于带钢张力较小的工况，后者用于带钢张力较大的工况。作者参加的连续酸洗机组中张力辊为 S 辊结构。由于带钢张力分段控制，张力辊前后带钢张力波动的影响被隔离。因此我们研究卷取机张力控制，只需要考虑张力辊与卷取机之间的设备。

2.2 卷绕机构带材张力的产生机理

在很多教科书和有关文献中，提供的张力模型是以两点之间速度差的积分描述的。这对于实际卷取张力系统不太合适。因为在实际系统中，若张力对象为积分环节，系统中将有两个纯积分环节，属于结构不稳定系统，显然与实际情况不相符。实际卷取张力应当是一个惯性环节，它与卷取速度、张力设定值和其它工艺参数有关。

如图 2.2 所示，张力区带材被拉伸产生张力，弹性变形符合胡克定律： $\epsilon = \sigma / E$ 。其中， E 为带材的弹性模量 (N/m^2)， ϵ 为相对拉伸量， σ 为张应力，因此张力

的大小为 $T = \sigma h B$ ，其中， h 为带钢厚度， B 为带钢宽度。

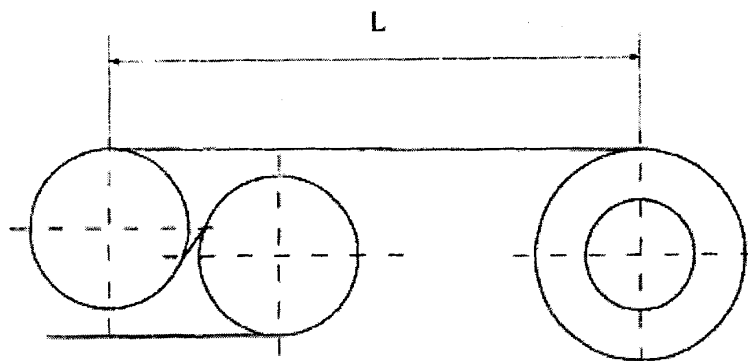


图 2.2 卷取系统张力区示意图

Fig. 2.2 General diagram of tension area of coiler system

再讨论带材相对拉伸量，图 2.2 中张力区带材的绝对拉伸量为：

$$\Delta l = \int_0^t (V_{coil} - V_{gh}) dt \quad (2.1)$$

式中： Δl ——张力区带材的绝对拉伸量；

V_{coil} ——卷取机入口处的带钢速度；

V_{gh} ——张力辊出口处的带钢速度；

t ——带钢从张力辊到卷取机之间的运行时间。

在一定张力条件下，带钢的出口速度大于张力辊线速度在该点处的水平分量，这叫做前滑。由于前滑的存在，使带钢在张力区的入口速度发生变化，如下式所示：

$$V_{gh} = V_g (1 + S_g) \quad (2.2)$$

式中： V_g ——张力辊线速度；

S_g ——带钢前滑值；

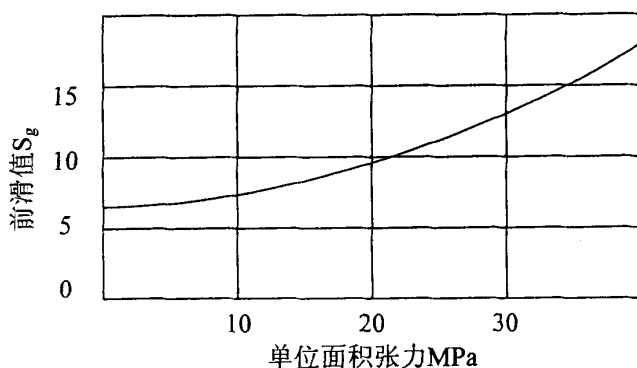


图 2.3 前张力影响实验曲线

Fig.2.3 Test curve of influence of in front tension

当张力在通常的应用范围内变化时, 前滑与张力的关系可以用直线规律来表示。

$$S_g = S_{g0} + \alpha \cdot T \cdot S_{g0} \quad (2.3)$$

式中: S_{g0} ——张力变化前的前滑值;

α ——系数;

T ——单位前张力或前后单位张力差;

则带钢在张力辊出口速度为:

$$V_{gh} = V_g (1 + S_{g0} (1 + \alpha T)) \quad (2.4)$$

因此带材的相对拉伸量为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L} = \frac{\int_0^t (V_{COIL} - V_g (1 + S_{g0} (1 + \alpha T))) dt}{L} \quad (2.5)$$

式中: L 为卷取机和张力辊中心线之间的距离。

$$\frac{dT}{dt} = E \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot h \cdot B = \frac{E \cdot h \cdot B}{L} \cdot \Delta V - \frac{E \cdot h \cdot B}{L} \cdot S_{g0} \cdot \alpha \cdot V_g \cdot T \quad (2.6)$$

式中: $\Delta V = V_{COIL} - V_g (1 + S_{g0})$

取拉氏变换:

$$T(s) \cdot \left[s + \frac{E \cdot h \cdot B}{L} S_{g0} \cdot \alpha \cdot V_g \right] = \frac{E \cdot h \cdot B}{L} \cdot \Delta V(s) \quad (2.7)$$

$$\text{则 } W(s) = \frac{T(s)}{\Delta V(s)} = \frac{\frac{1}{S_{g0} \cdot \alpha \cdot V_g}}{1 + s \frac{1}{\frac{E \cdot h \cdot B}{L} S_{g0} \cdot \alpha \cdot V_g}} = \frac{K_t}{1 + T_t s} \quad (2.8)$$

其中, $K_t = \frac{1}{S_{g0} \cdot \alpha \cdot V_g}$, $T_t = \frac{1}{\frac{E \cdot h \cdot B}{L} S_{g0} \cdot \alpha \cdot V_g}$ 。

将各量单位代入上式中可以验证, T_t 的单位为 s , K_t 的单位为 $kN \cdot s/m$ 。传递函数 $W(s)$ 输入的单位为 m/s 时, 则输出张力单位为 kN 。

实际运行中计算上述张力模型, 应当有一个 S_{g0} 、 α 的经验取值方法。在钢铁工业中, S_{g0} 的取值一般在 0.05-0.09; 在有色系统中 S_{g0} 的取值一般在 0.05-0.12。具体取值方法可以根据相对压下率来取经验值。 α 取值是根据张力设定值来决定, 当前道次张力设定值达到额定张力时, $\alpha = 0.5$, 一般 α 在 0.35-0.55 范围内取值。通过调整传递函数中的参数大小, 适应工艺参数变化, 避免张力波动。

2.3 带钢张力控制数学模型的建立

在下面的讲述中，卷取传动的电机将以直流电机作为模型，这样做的目的是便于分析。在实际应用机构中，现在的卷取传动电机一般采用交流电机。其实两者并不矛盾，随着矢量控制技术和变频器技术的发展，对于交流电机的控制可以等效为对直流电机的控制。

2.3.1 电机控制张力的方法分析

卷取机传动电机轴上的力矩平衡方程为：

$$M = M_T + M_f + M_a \quad (2.9)$$

式中： M ——卷取传动电机的输出力矩；

M_T ——达到工艺要求大小的张力所需的张力力矩；

M_a ——加、减速及钢卷直径变化时的惯性力矩；

M_f ——摩擦力矩。

在稳态时，并且不考虑钢卷直径变化，不考虑摩擦力矩， M_a 为0， M_f 为0。

$$M = M_T = \frac{T \cdot D_{ACT}}{2\eta \cdot i_{COIL}} \quad (2.10)$$

式中： T ——张力辊出口与卷取机之间的带钢张力；

D_{ACT} ——钢卷瞬时直径；

i_{COIL} ——卷取机传动比；

η ——传动装置机械效率。

根据直流电机学，可知：

$$M = C_m \cdot \phi \cdot I_a \quad (2.11)$$

则可以计算出：

$$T = C_m \cdot i_{COIL} \cdot \eta \cdot \frac{\phi \cdot I_a}{D_{ACT}} \quad (2.12)$$

由上式可知，要维持卷取张力恒定可采用两种方式：一是维持 I_a 和 ϕ/D_{ACT} 均为常数，此即电流、电势复合控制法。另一种是使 ϕ 保持最大， I_a 根据 D_{ACT} 变化，此为最大力矩控制法。

电流、电势复合控制法一般由电枢电流控制和磁场控制两部分组成。它的优点是电枢电流与张力成正比，而 ϕ 与 D_{ACT} 成正比，控制起来比较直观。它的缺点主要是：由于在卷取过程中必须保持 ϕ/D_{ACT} 为常数，这样在钢卷直径较小时，卷取机电机要经常在弱磁下工作，电机的力矩不能充分利用，同时电机 ϕ 要随环 D_{ACT}

变化，故在选择卷筒传动电机时，弱磁倍数至少要等于钢卷直径变化的倍数，这样当钢卷直径变化较大时，相应电机的弱磁倍数要加大，将使电机的体积增大，系统转动惯量增大，同时价格上升。由于电机经常不在全电压下工作，功率因数低。

而最大力矩控制法的原则是，在电机基速段维持磁通满磁，通过调整电枢电流来维持张力恒定，此时钢卷直径较大，电机输出最大转矩。在高速段维持电压满压，通过调整磁通来维持张力恒定，此时电机输出转矩小于最大转矩，但由于卷取机以高转速工作时，钢卷直径较小，使电机的力矩能得到最大的发挥。这种系统的实质是：电枢电流随卷径成正比变化；磁通保持相对不变，即指磁通的变化不是由卷径的变化引起的，而是由励磁回路根据电机工作状态来决定的。该方法的电枢回路和励磁回路的控制原理图，分别如图 2.4 和图 2.5 所示。



图 2.4 电枢电流控制回路原理图

Fig.2.4 Principle diagram of armature current control return

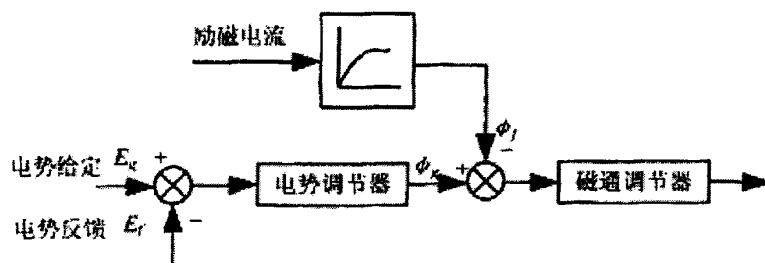


图 2.5 电枢励磁控制回路原理图

Fig.2.5 Principle diagram of armature excitation control return

最大力矩控制法具有以下优点：电动机的弱磁倍数与卷径无关，故可选用弱磁倍数小的电动机，有利于电动机的制造；由于基速以下电动机在满磁下运行，因此，不仅起动、制动时的过渡过程加快，而且还可输出最大转矩，增加过载能力；电动机可得到充分利用，因为电动机在基速以下可输出最大的力矩，在基速以上可输出最大的有效功率；电动机在起（制）动时，卷取机引起的无功冲击负荷较小；电流闭环同电机激磁闭环各自独立，系统设计上灵活。

2.3.2 对象电机数学模型

在额定励磁下，可列出直流电机的微分方程为：

$$U_{d0} - E = R \cdot I_d + L \cdot \frac{dI_d}{dt} = R \left(I_d + T_l \frac{dI_d}{dt} \right) \quad (2.13)$$

式中: $T_l = \frac{L}{R}$ 为电枢回路电磁时间常数(s)

在零初始条件下, 对上式两侧取拉氏变换, 得电压与电流的传递函数为:

$$\frac{I_d(s)}{U_{d0}(s) - E(s)} = \frac{1/R}{T_l s + 1} \quad (2.14)$$

在不考虑摩擦力矩和钢卷直径变化的情况下, 电机的运动微分方程为:

$$M - M_r = \frac{(J_0 + J_1)\pi}{30} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (2.15)$$

式中: J_0 ——电机的转动惯量及卷筒轴上的转动惯量转化到电机轴上的部分;

J_1 ——钢卷的转动惯量等效到电机轴上的部分;

n ——卷取机传动电机的转速。

因为 $M = C_m I_d$ (额定励磁下的电磁转矩), $E = C_e n$, 所以:

$$I_d - I_{dr} = \frac{(J_0 + J_1)\pi}{30 C_m C_e} \cdot \frac{dE}{dt} = \frac{T_m}{R} \cdot \frac{dE}{dt} \quad (2.16)$$

式中: I_{dr} ——形成张力力矩的电枢电流;

C_m ——直流电机转矩常数;

C_e ——直流电机电势常数;

取拉氏变换, 可得电流与电动势之间的传递函数为:

$$\frac{E(s)}{I_d(s) - I_{dr}(s)} = \frac{R}{T_m s} \quad (2.17)$$

由上式可作出直流电机的动态结构图:

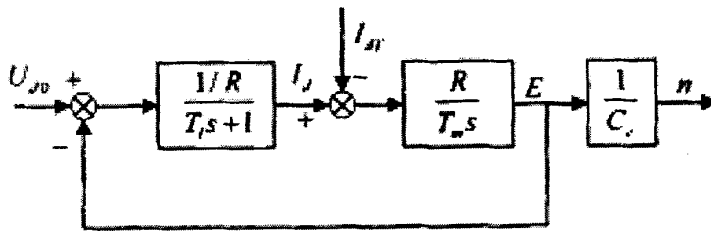


图 2.6 直流电机动态结构图
Fig.2.6 Dynamic structure diagram of DC motor

整流环节包括晶闸管触发和整流装置, 在工程实际中, 可近似为一个一阶惯性环节, 它的传递函数为:

$$\frac{U_{d0}(s)}{U_{\alpha}(s)} = \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad (2.18)$$

式中: K_s ——整流环节放大倍数;

T_s ——晶闸管最大失控时间;

2.3.3 卷取张力间接控制调节器参数整定

首先,按照空卷时的状态设计卷取机速度控制系统,采用传统 PID 控制。按照工程设计方法设计双闭环系统的电流调节器和转速调节器。

设计多环控制系统的一般原则是:从内环开始,一环一环地逐步向外扩展。在这里先从电流环入手,首先设计好电流调节器,然后把整个电流环看作转速调节器中的一个环节,再设计转速调节器。

由于电流检测信号中常含有交流分量,须增加低通滤波环节,其滤波时间常数 T_{oi} 按照需要选定。滤波环节可以抑制反馈信号中的交流分量,但同时也给反馈信号带来延滞。为了平衡这一延滞作用,在给定信号通道中加入一个相同时间常数的惯性环节,称作给定滤波环节。其意义是:让给定信号和反馈信号经过同样的延滞,使二者在时间上得到恰当的配合,从而带来设计上的方便。

转速反馈电压也需要滤波,滤波时间常数以 T_{on} 表示。根据和电流环一样的道理,在转速给定通道中也配上时间常数为 T_{on} 给定滤波环节。

(1) 电流调节器的设计

(a) 电流环结构图的简化

把电流环单独拿出来设计时首先遇到的问题是反电动势产生的交叉反馈作用,它代表转速环输出量对电流环的影响。现在还没有设计转速环,要考虑它的影响自然比较困难。由于实际系统中的电磁时间常数 T_l 一般都远小于机电时间常数 T_m , 因而电流的调节过程往往比转速的变化快得多,也就是说,电流的调节过程比反电动势 E 的变化快得多。反电动势对电流环来说只是一个变化缓慢的扰动作用,在电流调节器的调节过程中可以近似地认为 E 基本不变,即 $\Delta E \approx 0$ 。这样,在设计一电流环时,可以暂不考虑反电动势变化的动态作用,而将电动势反馈作用断开,当满足

$$\omega_{ci} \geq \sqrt[3]{\frac{1}{T_m \cdot T_l}} \quad (2.19)$$

式中: ω_{ci} ——电流环的截止频率。

可以得到忽略电动势影响地电流环近似结构图,如图 2.7 所示。

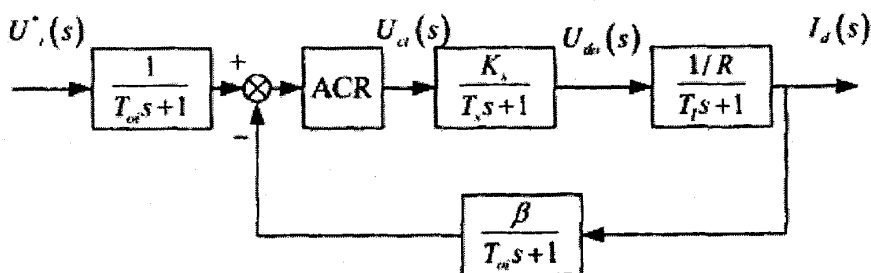


图 2.7 电流环近似结构图
Fig.2.7 Similar structure diagram of current circle

再把给定滤波和反馈滤波两个环节等效移到环内。 T_s 和 T_{oi} 一般都比 T_i 小得多，当满足下面的条件时，可以当作小惯性环节处理

$$\omega_c \leq \sqrt[3]{\frac{1}{T_s \cdot T_{oi}}} \quad (2.20)$$

取 $T_{\Sigma_i} = T_s + T_{oi}$ ，则电流环结构图最终简化成如图 2.8 所示。

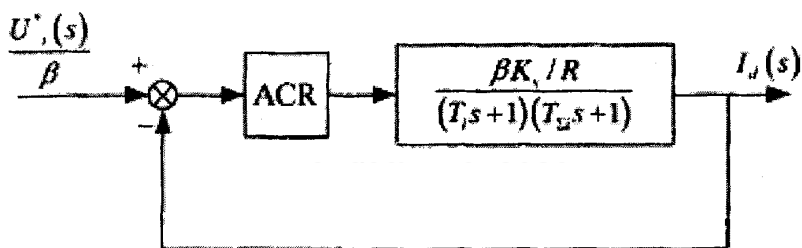


图 2.8 电流环最终结构图
Fig.2.8 Final structure diagram of current circle

(b) 电流调节器结构的选择

电流环的一项重要作用就是保持电极电流在动态过程中不超过允许值，因而在突加控制作用时不希望有超调，或者超调量越小越好。从这个观点出发，应该把电流环校正成典型 I 型系统。

图 2.8 表明，电流环的控制对象是双惯性型的。要校正成典型 I 型系统，显然应该采用 PI 调节器，其传递函数可以写成

$$W_{ACR}(s) = K_i \cdot \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (2.21)$$

式中： K_i ——电流调节器的比例系数；

τ_i ——电流调节器的超前时间常数。

为了让调节器零点对消掉控制对象的大时间常数极点，选择

$$\tau_i = T_i$$

则电流环的动态结构图便成为图 2.9 所示的典型形式

$$K_I = \frac{K_i \cdot K_s \cdot \beta}{T_I \cdot R} \quad (2.22)$$

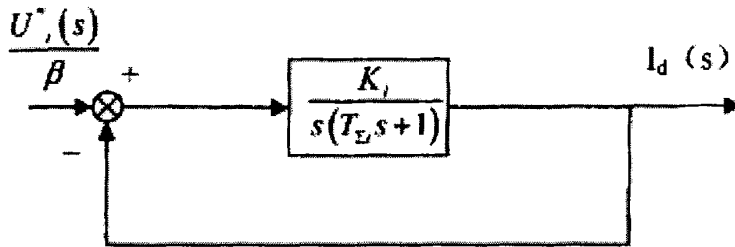


图 2.9 电流环动态结构图
Fig.2.9 Dynamic structure diagram of current circle

(c) 电流调节器参数的选择

电流调节器的参数包括 K_I 和 τ_i 。

时间常数 τ_i 已经选定为 T_I 。比例系数 K_I 取决于所需的 ω_{ci} 和动态性能指标。在一般情况下，希望超调量 $\alpha\% < 5\%$ 时，可取阻尼比 $\xi = 0.707$ ， $K_I T_{\Sigma I} = 0.5$ ，因此

$K_I = \omega_{ci} = \frac{1}{2T_{\Sigma I}}$ ，从而可以得到：

$$K_I = \frac{T_I \cdot R}{2K_s \cdot \beta \cdot T_{\Sigma I}} = 0.5 \frac{R}{K_s \cdot \beta} \left(\frac{T}{T_{\Sigma I}} \right) \quad (2.23)$$

(2) 转速调节器的设计

(a) 电流环的等效闭环传递函数

在设计转速调节器时，可以把已经设计好的电流环看作转速调节系统中的一个环节，为此，必须求出它的等效传递函数。如图 2.9 所示

转速环的截止频率 ω_{cn} 一般较低，当满足

$$\omega_{cn} \leq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{K_I}{K_{\Sigma I}}} \quad (2.24)$$

可降阶近似为

$$W_{oi}(s) \approx \frac{1}{2T_{\Sigma I} s + 1} \quad (2.25)$$

电流环闭环后，整个电流环等效为一个无阻尼自然振荡周期为 $\sqrt{2}T_{\Sigma I}$ 的二阶振荡环节，或者近似为只有小时间常数的一阶惯性环节。这就表明，电流闭环后，改造了控制对象，加快了电流的跟随作用。

(b) 转速调节器结构的选择

用电流环的等效环节代替电流闭环后,并将给定滤波和反馈滤波环节等效地移到环内,把时间常数 T_{0n} 和 $2T_{\Sigma i}$ 的两个小惯性环节合并起来,近似成一个时间常数为 $T_{\Sigma n}$ 的惯性环节,且

$$T_{\Sigma n} = T_{0n} + 2T_{\Sigma i} \quad (2.26)$$

则转速环结构图可简化成图 2.10 所示。

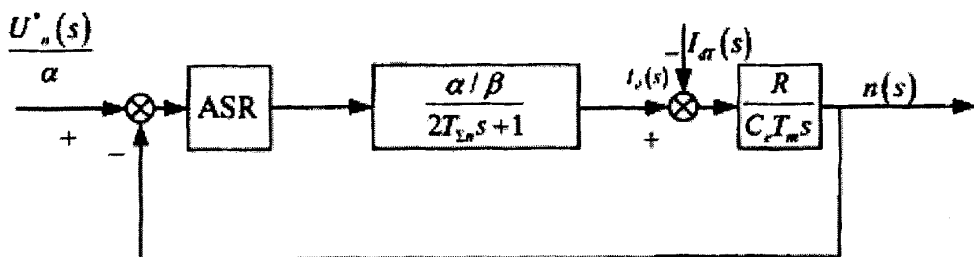


图 2.10 转速环简化图
Fig.2.10 Simplify diagram of speed circle

转速环应该校正成典型 II 型系统是比较明确的。这首先是基于稳态无静差的要求。由图 2.10 可以看出,在负载扰动作用点后已经有了一个积分环节。为了实现转速无静差,还必须在扰动作用点前设置一个积分环节,因此需要 II 型系统。再从动态性能上看,调速系统首先需要有较好的抗扰性能,典型 II 型系统恰好能满足这个要求。

要把转速环校正成典型 II 型系统,ASR 也应该采用 PI 调节器,其传递函数为:

$$W_{ACR}(s) = K_n \cdot \frac{\tau_n s + 1}{\tau_n s} \quad (2.27)$$

式中: K_n ——转速调节器的比例系数

τ_n ——转速调节器的超前时间常数。

这样,转速环开环增益为:

$$K_N = \frac{K_n \alpha R}{\tau_n \beta C_e T_m} \quad (2.28)$$

转速调节器的参数包括 K_n 和 τ_n 可以按照典型 II 型系统的参数选择方法,根据系统对动态性能的要求来决定。

2.4 自增益调节速度控制器

在实际生产中,卷取机上钢卷直径在卷取过程中是不断变化的,造成卷取机传动控制系统的转动惯量不断变化,因此卷取张力控制系统的机电时间常数 T_m 是

不断发生变化的。上面研究的速度调节器参数整定是按照空卷时的机电时间常数进行的。其实，随着带钢被卷绕到卷筒上，卷筒的转动惯量在不断地增大。通过计算可以知道，满卷时的钢卷的转动惯量折算到传动电机轴上的值为空卷时的三倍以上，此时电机的机电时间常数 T_m 变化很大，被控系统其实是一个参数时变系统。如果调节器的参数一直按照卷筒空卷时整定，并且不随系统参数的改变而改变，当被控对象的参数改变后，原设计指标达不到。

这里讨论增益自调节 PID 控制器在卷取张力控制系统中的应用。自适应控制可以在系统的参数发生变化时，自动调整控制器的控制方法和参数，使被控对象的特性达到最优。自适应 PID 控制器不仅具有自动辨识被控过程参数、自动整定控制器参数、能够适应被控过程参数的变化等一系列优点；而且它又具有常规 PID 控制器结构简单、鲁棒性好和可靠性高等优点。自适应 PID 控制所具有的这两大优势，使得它成为过程和传动控制的一种较理想的自动化装置，这也是在进行张力控制时采用自适应 PID 控制的主要原因。自适应 PID 控制器根据参数的提取可分为两大类，一类基于被控过程参数辨识，统称为参数自适应 PID 控制器，其参数的设计依赖于被控过程模型参数的估计。另一类基于被控过程的某些特征参数，诸如临界振荡增益 K_c 、临界振荡频率 ω_c 等。这种类型的自适应 PID 控制没有一个统一名称，姑且称为非参数自适应 PID 控制器。根据控制器参数设计的原理来分，自适应 PID 控制器又可分为五大类，它们是：极点配置自适应 PID 控制器、相消原理自适应 PID 控制器、基于经验规则的自适应 PID 控制器、基于二次型性能指标的自适应 PID 控制器和智能或专家自适应 PID 控制器。根据卷取张力控制系统的模型和自适应的控制类型，本文将速度调节器设计为增益自调节 PID 调节器。

先对上面分析的双闭环控制系统结构图进行分析，传动电机的机电时间常数 T_m 在电流环外，在进行电流环设计时可以不考虑机电时间常数 T_m 变化带来的影响。对电流环设计还是按照上面的参数整定。速度环被校正成典型 II 型系统。转速环传递函数的开环增益参数中包含系统机电时间常数 T_m ，因此当机电时间常数 T_m 变化时，转速环的开环增益应该同样发生变化。但是，如果采用常规 PID 调节器，开环增益不能随系统参数变化而变化。

在增益自调节 PID 控制器设计中，比例系数 K_p 应根据时间常数 T_m 增加而增加，这样就可以消除机电时间常数 T_m 变化的影响。根据前面介绍 $T_m = \frac{(J_0 + J_1)\pi R}{30C_m C_e}$ ，其中 J_1 为钢卷折算到电机传动轴上的转动惯量。因此需要在控制过程中准确计算出钢卷转动惯量。

2.5 本章小结

本章首先介绍了通过电机控制张力的方法。基于恒线速度的间接张力控制系统本质上是一个速度控制系统。通过电流、速度双闭环调速控制系统来保证卷取机的输出转速达到预设定的目标值。卷取机的转速设定是根据机组工艺要求的线速度和钢卷直径来确定的。根据卷绕机构张力产生的机理，在带钢设定张力已经确定的情况下，控制卷取机与张力辊之间的速度差就可以控制带钢张力。

在实际生产中，钢卷直径变化造成卷取机系统机电时间常数变化。因此卷取机速度控制器必须考虑机电时间常数变化的影响。本章探讨了速度调节器参数增益自调节的算法，通过在控制过程中计算钢卷直径，进而计算钢卷转动惯量，根据系统转动惯量的变化调节速度调节器的增益，可最大限度地减小钢卷直径变化对卷取张力波动的影响。

第3章 卷取机惯性力矩补偿

电机旋转轴上的惯性力矩由两部分组成。一部分由电机的转速变化率引起，一部分由电机旋转轴上的等效转动惯量变化率引起。电机转速变化的原因除了因为带钢运行速度变化导致电机转速变化外，更因为在卷取过程中钢卷直径在不断变化。显然，在带钢运行速度不变的情况下，随着卷取过程的进行，电机转速应逐渐变小。同时，由于钢卷直径在卷取过程中不断变化，所以卷取机传动电机的等效转动惯量会发生变化。因此，卷取机的惯性力矩表达式如下：

$$M_A = \frac{\partial(J \cdot \omega)}{\partial t} = \omega \frac{\partial J}{\partial t} + J \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (3.1)$$

3.1 钢卷直径变化率

由于卷筒每转一圈，卷径增加两个带钢厚度，即 $2h$ 。当卷取时间为 t 时，卷筒转过的角度为 $\int_0^t \omega dt$ ，则有：

$$D_{ACT} = D_0 + \frac{\int_0^t \omega dt}{2\pi} \cdot 2h = D_0 + \frac{2h}{\pi} \cdot \int_0^t \frac{v_{COIL}}{D_{ACT}} dt \quad (3.2)$$

式中： D_{ACT} 为钢卷瞬时直径； ω 为卷筒转动角速度； h 为钢板厚度； D_0 为钢卷初始直径。

3.2 转动惯量变化率

电机轴上总的转动惯量可以分为两部分。一部分为固定不变的 J_0 ，它等于电机的转动惯量及卷筒轴上的转动惯量转化到电机轴上的部分。另一部分为可变的转动惯量 J_1 。它等于钢卷的转动惯量等效到电机轴上的部分。而钢卷可以近似地看成一个空心的圆柱体，它绕轴线的转动惯量可用空心圆柱体绕轴线的转动惯量来表示，以钢卷的紧密系数 s 来修正。

$$J_1 = \frac{1}{32i_{COIL}^2} \pi \cdot \rho \cdot s \cdot b (D_{ACT}^4 - D_0^4) \quad (3.3)$$

式中： ρ 为带钢热态密度； s 为钢卷紧密系数，一般取为 0.85-0.90； b 为带钢宽度； i_{COIL} 为卷取机传动比。

转动惯量中不变部分 J_0 可以通过计算求取，在生产实践中一般通过进行空载试验的方法测量。进行空载试验时，卷取机电机在力矩控制模式下带动卷取机卷筒工作，设定速度限制在电机额定转速的 50%。给电机施加一个力矩给定 M_B ，一

一般为电机额定转矩的 10%，给定力矩的数值在电机工作过程中保持不变。这样电机在转矩给定为 M_B 的情况下，加速到设定速度，记录电机从零速到设定速度的时间为 T_H 。电机达到设定速度后，给定力矩反向，变为制动力矩，使电机减速直到速度为 0。记录电机减速的时间为 T_R 。设卷取机传动系统中的摩擦力矩为 M_f ，我们可以分别分析卷取机电机在加速和减速过程中的力矩平衡方程。

加速阶段：

$$M_B = 2\pi \cdot \Delta n \cdot J_0 \cdot \frac{1}{T_H} - M_f \quad (3.4)$$

减速阶段：

$$M_B = 2\pi \cdot \Delta n \cdot J_0 \cdot \frac{1}{T_R} - M_f$$

则：

$$M_B = \left(2\pi \cdot \Delta n \cdot J_0 \cdot \frac{1}{T_H} + 2\pi \cdot \Delta n \cdot J_0 \cdot \frac{1}{T_R} \right) / 2$$

$$M_B = 2\pi \cdot \Delta n \cdot J_0 \cdot \frac{1}{T_M} \quad (3.5)$$

式中： T_M 为等效时间。

3.3 由电机转速变化造成的惯性力矩

因为

$$\omega = \frac{2 \cdot i_{COIL} \cdot v_{COIL}}{D_{ACT}}$$

所以

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2 \cdot i_{COIL}}{D_{ACT}^2} \left(D_{ACT} \cdot \frac{dV_{COIL}}{dt} - V_{COIL} \cdot \frac{dD_{ACT}}{dt} \right) \quad (3.6)$$

$$J \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{2 \cdot i_{COIL}}{D_{ACT}} \left(\frac{dV_{COIL}}{dt} - \frac{2 \cdot h \cdot V_{COIL}^2}{\pi \cdot D_{ACT}^2} \right) \cdot (J_0 + J_1) \quad (3.7)$$

在获得瞬时钢卷直径的数值后，根据上面的公式进行实时计算，得到卷取传动系统转动惯量的可变部分。

3.4 惯性加/减速动态力矩的计算

严格来说，稳定的卷取是不可能实现的，这是由于带钢在卷取过程中，卷筒的卷径将逐渐增大，甚至达到原卷径的两倍以上，对于钢卷来说，卷筒的转动惯量变化很大。当系统有加、减速指令时，由于卷筒的转动惯量不同（即为变量），且卷筒的转动惯量大于张力辊的转动惯量，导致卷取机卷筒边沿点的线速度 V_2 可能跟不上张力辊边沿点的线速度 V_1 的变化，带钢加/减速因系统机械惯性会产生动态力矩，导致张力波动。

为了消除这种干扰因素，在系统加减速过程中，必须在变频器调节力矩给定电流时加入动态补偿电流部分，即对卷筒的惯性进行补偿，以补偿张力损失值，也称为动态力矩补偿。

电机拖动的动态力矩：

$$M_D' = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dJ}{d\varphi} \quad (3.8)$$

式中： J ——卷取钢卷的转动惯量。

用式(3.8)计算时， φ 角是用度来表示的，而且变化范围在 $0-360^\circ$ 。

为了公式推导的需要，用增量形式来表示动态力矩，即

$$M_D' = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} + \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{\Delta J}{\Delta\varphi} \quad (3.9)$$

同时，把 J 、 ω 也用增量形式表示，即

$$\Delta J = \frac{\Delta GD^2}{4g} \quad (3.10)$$

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot \Delta n \quad (3.11)$$

式中： g ——重力加速度。

把上面 2 式代入式(3.9)，得到用增量形式表示的动态力矩：

$$M_D' = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} + \frac{v^2}{2GD^2} \cdot \frac{\Delta(GD)^2}{\Delta\varphi} \quad (3.12)$$

因为 $v = \omega \cdot r$ ，所以

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = r \frac{\Delta\omega}{\Delta t} + \omega \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (3.13)$$

把角速度增量 $\Delta\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot \Delta n$ 代入上式并简化，得

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{60}{2\pi r} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} - \frac{n}{r} \cdot \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (3.14)$$

接下来推导 $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ ：

考虑在 Δt 时间间隔内，带钢半径从 r 变到 $r + \Delta r$ ，带钢总的卷取长度变化值：

$$\Delta s = 2\pi(r + \Delta r) - 2\pi r = 2\pi\Delta r \quad (3.15)$$

钢卷的线速度变化值：

$$\Delta v = \omega(r + h) - \omega r = \frac{v}{r} h \quad (3.16)$$

式中： h ——带钢厚度。

由 $\Delta s = \Delta v \cdot \Delta t$ ，结合上两式得

$$\frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{vh}{2\pi r} = \frac{nh}{60} \quad (3.17)$$

把式(3.17)代入式(3.14)，且 $n = \frac{60v}{2\pi r} = \frac{60v}{\pi D}$ ，则得

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{60}{\pi D} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{120hv^2}{\pi^2 D^3} \quad (3.18)$$

现在来推导式(3.12)中 $\Delta(GD)^2$ 的表达式：在考虑 GD^2 变化时，只要计及 $0-360^\circ$ 中的变化，而在这个区域中，卷筒上只有一层钢卷的 GD^2 发生变化，所以此时的 GD^2 变化为：

$$\Delta(GD)^2 = \frac{1}{2} \cdot G \cdot [D^2 + (D-2h)^2] \quad (3.19)$$

式中： G 为钢卷卷一圈增加的质量， $G = \frac{\pi \rho b}{4} \cdot [D^2 - (D-2h)^2]$ ；

ρ 为钢卷密度； B 为带钢宽度。

将 $\Delta(GD)^2$ 化简得：

$$\Delta(GD)^2 = \frac{\pi \rho b}{8} \cdot [D^4 + (D-2h)^4] \quad (3.20)$$

考虑到 φ 角的变化范围为 $0-360^\circ$ ，所以

$$\Delta\varphi = 360^\circ - 0^\circ = 2\pi \quad (3.21)$$

这样，可求得 GD^2 随 φ 的变化，即

$$\frac{\Delta(GD)^2}{\Delta\varphi} = \frac{\rho b}{16} \cdot [D^4 + (D-2h)^4] \quad (3.22)$$

把式(3.18)、(3.22)代入式(3.12)后，得

$$M_D' = \frac{60GD^2}{375\pi D_D} \cdot \frac{dv}{dt} - \frac{120hv^2GD^2}{375\pi^2 D_D^3} + \frac{\rho bv^2}{32gD_D^2} \cdot [D^4 - (D-2h)^4] \quad (3.23)$$

又因为

$$GD^2 = GD_1^2 + GD_2^2 + GD_3^2 = GD_1^2 + GD_2^2 + \frac{\pi \rho b S (D_D^4 - D_0^4)}{8} \quad (3.24)$$

其中： $GD_3^2 = \frac{\pi \rho b S (D_D^4 - D_0^4)}{8}$ ，所以整理得

$$M_D' = \left(\frac{60}{375\pi D_D} \cdot \frac{dv}{dt} - \frac{120hv^2}{375\pi^2 D_D^3} \right) \cdot \left[GD_1^2 + GD_2^2 + \frac{\pi\rho bS(D_D^4 - D_0^4)}{8} \right] \quad (3.25)$$

$$+ \frac{\rho bv^2}{32gD_D^2} \cdot [D_D^4 - (D_D - 2h)^4]$$

$$M_D = \frac{M_D'}{i_2\eta} \quad (3.26)$$

式中： M_D' 为卷筒上的动态力矩； M_D 为折算到卷取机电机轴上的卷筒的钢卷的动态力矩； η 为机械传动装置得效率； i_2 为卷取机减速器减速比； GD^2 为折算到卷取机卷筒上的整个系统的飞轮惯量； GD_1^2 为折算到卷取机卷筒上的卷取电机的飞轮惯量，为常数； GD_2^2 为卷取机械折算到卷取机卷筒上的飞轮惯量，包括卷筒和减速机，为常数； GD_3^2 为钢卷的飞轮惯量； ρ 为咋冈卷密度； b 为带钢宽度； S 为带钢卷取的充填率，与钢卷卷层致密程度、卷取张力有关； D_D 为钢卷的动态直径； D_0 为卷取机卷筒的直径。

式(3.26)表明：当带钢的品种、规格及卷取工艺确定以后，影响惯性力矩的因素只有卷取速度 v 及其变化率和卷径 D ，而卷取速度 v 及其变化率是由生产工艺给定的，因此可以得到惯性力矩的一般变化规律。

又由于 $v = \pi \cdot \frac{n_1}{i_1} \cdot D_s$ (v 的单位为 m/min 时)，所以式(3.26)中的 $\frac{dv}{dt}$ 可以通过如

下图 3-1 的系统结构图得出。

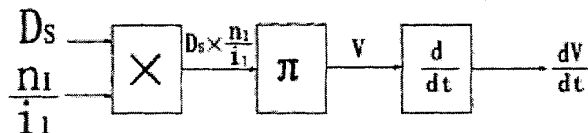


图 3.1 计算速度积分的系统结构图

Fig. 3.1 System structure diagram of speed integral count

图中： D_s 为张力辊辊子直径； n_1 为张力辊电机的转速； i_1 为张力辊电机的减速比。

由电机学公式可知： $M_D = C_m \Phi I_D$ ，带入式(3.26)得

$$I_D = \frac{1}{i_2\eta C_m \Phi} \left\{ \left(\frac{60}{375\pi D_D} \cdot \frac{dv}{dt} - \frac{120hv^2}{375\pi^2 D_D^3} \right) \cdot \left[GD_1^2 + GD_2^2 + \frac{\pi\rho bS(D_D^4 - D_0^4)}{8} \right] + \frac{\rho bv^2}{32gD_D^2} \cdot [D_D^4 - (D_D - 2h)^4] \right\} \quad (3.27)$$

从公式(3.27)就可得出实现动态补偿所需的动态控制电枢电流 I_D ，将 I_D 加入到卷取传动电机的电流调节器（ACR）的输入端，就可实现卷取系统在加/减速过程中所需的动态力矩补偿。

3.5 惯性加/减速动态力矩补偿电流的计算

由于在本系统中采用西门子 6SE70 系列矢量控制逆变器作为交流电机的驱动单元，所以对交流电机的力矩电流和励磁电流实现了很好的解耦控制，对交流电机力矩电流的控制可以像对直流电机那样操作。

由于交流电机基频以下属于恒力矩调速性质，基频以上属于恒功率调速性质，因此对力矩电流的控制应分为非弱磁段和弱磁段两种情况考虑。

动态力矩补偿电流计算步骤：首先对卷取机电机当前转速 n 进行采样，然后与电机额定转速 n_e 相比较。当转速采样值低于电机额定转速时，电机在非弱磁工作段，此时电机的额定力矩不随转速变化；当转速采样值超过电机额定转速时，电动机进入弱磁工作段，额定力矩与转速有关，电机具有恒功率特性，需对电机在该时刻能提供的额定力矩进行计算，即额定力矩 $M_e = \frac{P_e}{\omega_i}$ ，其中， P_e 为额定功率， ω_i 为该时刻转速。

因为西门子该系列逆变器的力矩电流的给定值要求以电机额定电流的百分值给出，所以在计算出额定力矩值后利用下式可计算出动态力矩补偿电流的百分值：

$$\frac{I_D}{I_e} = \frac{M_D}{M_e} \quad (3.28)$$

其中： M_D ——惯性加减速动态力矩， M_D 值可由式(3.26)求出。

3.6 本章小结

通过上面叙述的卷取机惯性力矩补偿的原理可以知道，卷取机惯性力矩变化率可以分为两部分，一是电机转速变化引起的，一是系统转动惯量变化引起的。卷取机张力控制系统是一个参数时变的系统。主要原因在于卷取过程中钢卷直径不断发生变化，造成卷取机电机转速不断发生变化。同时，由于钢卷直径的变化，造成系统转动惯量的变化，从而使系统的机电时间常数 T_m 是一个变量。因此，钢卷实时直径是卷取张力控制系统中的非常重要的参数。为了达到张力恒定的控制目标，必须要得到准确的钢卷直径实时数值。

第4章 钢卷直径测量的算法

在本系统中采用间接计算的方法获取钢卷实时直径数值。首先，我们从酸洗原料数据中可以得到带钢厚度值，钢卷的初始直径值，即卷筒涨径后的直径值。钢卷初始直径和厚度已知后，可以采用以下的办法计算钢卷直径。

4.1 计数法计算钢卷直径

随着卷取过程的进行，钢卷直径会逐渐变大。钢卷每转过一圈，钢卷直径的变化值为 2 倍的带钢厚度，因此我们可以通过下面的公式计算出钢卷实时直径。

$$D_{CNT} = D_{CNT}(n-1) + (2 \cdot \rho \cdot M_{RPM} \cdot h) \quad (4.1)$$

式中： D_{CNT} ——通过计数法计算出的钢卷直径；

$D_{CNT}(n-1)$ ——前一次测量周期计算出的钢卷直径；

n ——进行的测量周期的次数；

ρ ——钢卷的占积率，对给定生产工艺，本文分析中取为 0.95 ；

M_{RPM} ——测量周期内钢卷转过的圈数，本文分析的系统中取为 1；

h ——带钢公称厚度。

通过计数法计算出的钢卷直径是稳定的并且不受外界因素的干扰（转向辊打滑，钢卷偏心），因此，计算出的 D_{CNT} 值被用做钢卷直径的基准值。

4.2 流量相等法计算钢卷直径

但是在实际生产中，钢卷初始直径往往不是很准确，同时还要考虑带钢厚度化以及钢卷的层间滑移。这些因素造成计数法测量出的钢卷直径的数值会偏离钢卷直径的实际数值，因此需要对计算出的 D_{CNT} 数值进行修正。

带钢在带张力运行时，忽略带钢本身张力引起的运行方向上的微小弹性伸长，每处的运行速度是相等的。这样在给定的时间周期内，带钢通过张力辊的长度与通过卷取机卷筒的长度是相等的，即

$$\Delta\phi_m \cdot \frac{D_{COIL}}{2} = \Delta\phi_n \cdot \frac{D_B}{2} \quad (4.2)$$

式中： $\Delta\phi_m$ ——时间 t 钢卷转过的角度；

D_{COIL} ——流量相等法计算出的钢卷有效直径；

$\Delta\phi_n$ ——时间 t 张力辊转过的角度；

D_B ——张力辊的直径。

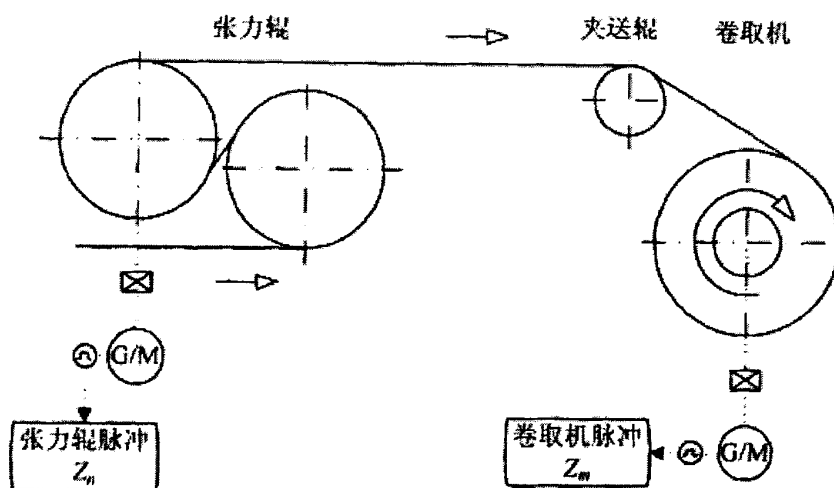


图 4.1 卷取机卷径测量系统示意图

Fig. 4.1 General diagram of coil diameter measurement

如果卷取机传动电机转动一周，装在传动电机轴上的光电编码器发出的脉冲数为 Z_{m0} ，对应于钢卷转过 $\Delta\phi_m$ 角度的脉冲数为 Z_m 。张力辊传动电机转动一周，装在传动电机轴上的光电编码器发出的脉冲数为 Z_{n0} ，对应于转过 $\Delta\phi_n$ 角度的脉冲数为 Z_n ，则下面的关系式成立：

$$\frac{Z_{m0}}{2\pi} = \frac{Z_m}{\Delta\phi_m \cdot i_C} \quad (4.3)$$

$$\frac{Z_{n0}}{2\pi} = \frac{Z_n}{\Delta\phi_n \cdot i_B} \quad (4.4)$$

式中： i_C ——卷取机传动比；

i_B ——张力辊传动比。

将式(4.3)和式(4.4)分别求出的 ϕ_m 和 ϕ_n 再代入式(4.2)中，得：

$$D_{COIL} = \frac{D_B \cdot Z_{m0} Z_n \cdot i_C}{Z_{n0} Z_m \cdot i_B} = \frac{D_B \cdot Z_{m0} \cdot i_C}{Z_{n0} \cdot i_B} \cdot \frac{Z_n}{Z_m} \quad (4.5)$$

将 $\frac{D_B \cdot Z_{m0} \cdot i_C}{Z_{n0} \cdot i_B}$ 记为卷径计算常数 K_D ；

则式(4.5)可以写成

$$D_{COIL} = K_D \cdot \frac{Z_n}{Z_m} \quad (4.6)$$

由此可以看出，利用装在卷取机传动电机轴和张力辊传动电机轴上的光电编码器发出的脉冲数，就可以求得实时卷径值。用流量相等法求出的卷径值记作 D_{COIL} 。

流量相等法求出的卷径值精度主要由光电编码器的精度决定,故公式(4.6)的精度可根据需要确定。

4.3 计算卷径修正值

带钢在带张力运行时张力波动会引起带钢弹性变形波动,机组各种振动会导致带钢与张力辊接触面的摩擦状况变化,由于这两个原因,缠绕在张力辊上的带钢可能发生打滑。张力辊在运行一段时间后,磨损使辊径变小,张力辊与卷取机间设置的转向辊和托辊与带钢之间作用有摩擦力,这些因素都可能造成张力辊处的带钢运行速度与卷取机处的带钢运行速度并不相等。因此每次测量周期内按式(4.6)测出来的钢卷直径 D_{COIL} 不能用来直接对 D_{CNT} 值进行修正,需要对计算出的 D_{COIL} 数值进行处理,然后通过与 D_{CNT} 比较得出卷径计算的修正值。

在每一次测量周期后,通过流量相等法测出的卷径值,要与前一次测出的卷径值进行对比。

$$\Delta D_{COIL} = D_{COIL}(n) - D_{COIL}(n-1) \quad (4.7)$$

ΔD_{COIL} 称为卷径偏差值。每次计算出的 ΔD_{COIL} 储存在电脑里,然后对这些偏差值进行数值分析,求其算术平均值和方差。

一般取最近 8 次的卷径计算偏差值进行数值分析。

$$MV\Delta D_{COIL} = \frac{1}{8} \cdot \sum_{n=1}^8 D_{COIL}(n) \quad (4.8)$$

$$Var^2 = \frac{1}{8-1} \cdot \sum_{n=1}^8 (\Delta D_{COIL}(n) - MV\Delta D_{COIL})^2 \quad (4.9)$$

式中: $MV\Delta D_{COIL}$ ——卷径偏差值的算术平均值;

Var ——为卷径偏差值的方差。

如果 Var 值在设定的范围内,认为此次计算出的卷径 D_{COIL} 是可信的,将 $MV\Delta D_{COIL}/2$ 数值当作带钢厚度值 h 。同时将 D_{COIL} 与 D_{CNT} 进行比较,如果二者之间的偏差超出一定的范围,需要用 ΔD_{KORR} 对 D_{CNT} 的数值进行修正。

这样在接下来的三个测量周期内对 D_{CNT} 的数值进行修正后,再比较 D_{COIL} 与 D_{CNT} 的数值,如果此时偏差在设定范围内,则将 ΔD_{KORR} 的数值置为 0。如果偏差仍然超出设定范围,则用此时的偏差值,计算修正值。

因此,式(4.1)应修正为:

$$D_{CNT} = D_{CNT}(n-1) + (2 \cdot \rho \cdot M_{RPM} \cdot h) + \Delta D_{KORR} \quad (4.10)$$

通过式(4.10)计算出的钢卷直径的数值减少了钢卷初始直径不准确造成的影

响。由于计算出的钢卷直径的数值是以式(4.1)计算出的数值为基础,保证了计算出的钢卷直径数值与实际值的偏差在一定范围内。因此,式(4.10)计算出的钢卷直径的数值是比较准确的。在增加了 ΔD_{KORR} 的修正后,可以减少由于钢卷初始直径、带钢厚度不准确及钢卷层间滑移的影响。由于计算出的钢卷直径的数值是以式(4.1)计算出的数值为基础,保证了计算出的钢卷直径数值稳定。因此式(4.10)计算出的钢卷直径的数值是比较准确的。经过修正后的 D_{CNT} 值被用作下一个测量周期的初值。

4.4 钢卷直径实时数值的输出

由于每次的测量周期时间比较长,为了使输出的实时卷径的数值 D_{ACT} 是一个连续变化量,式(4.10)计算处的 D_{CNT} 的数值通过一个积分器输出。

积分器的初值为 D_{CNT} ,积分器的目标值是 $D_{CNT} + (2\rho \cdot M_{RPM} \cdot h) + \Delta D_{KORR}$,在开始运算时, D_{CNT} 取值为 D_0 ,卷取机卷筒涨径后的直径值,带钢公称厚度值取自酸洗原料数据。带钢穿带完成,卷取机和张力辊联动后,用计算出的 $MV\Delta D_{COIL}/2$ 作为带钢厚度的数值,从而减少带钢厚度变化对钢卷直径计算的不利影响。钢卷直径计算的流程如图4.2所示。计算出的钢卷直径值送到动态力矩计算一单元以及自适应速度调节器整定单元。

$$y_{int} = y_{int}(n-1) + xd(n-1) \cdot \frac{T_A}{T_I} \quad (4.11)$$

式中: y_{int} ——积分器的输出;

xd ——积分器的输入;

T_A ——采样时间;

T_I ——积分时间。

4.5 本章小结

钢卷直径是卷取张力控制系统中非常重要的一个参数,钢卷直径计算的精确度关系到张力控制的稳定性。本章研究的钢卷直径计算采用了多种计算方法,分别根据卷取的不同规律,然后以计数法为基准值,以流量相等法去修正,保证钢卷直径计算准确。

第5章 卷取张力控制系统现场应用分析

5.1 卷取张力控制系统结构

连续酸洗生产线控制系统的硬件设备均采用先进、成熟的具有高信誉度的产品；软件功能设计不仅满足生产工艺的要求，还突出了人机交流，具有非常友好的人机界面，特别是高效的故障诊断和监控系统，使工作人员在出现故障后能及时做出判断，保证系统以最快的速度恢复正常运行；整条生产线可以完成自动设定、自动运转等功能。控制设备主要包括可编程控制器，以及相应的上位机(工控机)等，传动设备主要是相应的变频器、光电编码器、传动电机。系统配置图如图 5.1 所示，以下对本文研究的系统中选用的这些核心设备进行介绍。

(1) 可编程控制器(PLC)

系统采用西门子 SIMATIC S7-300 可编程控制器作为系统的基础控制器件。SIMATIC S7-300 是用于中、高档性能范围的可编程序控制器，其特点是模块化无风扇的设计，坚固耐用，容易扩展和广泛的通讯能力，特别是多种级别(功能逐步升级)的 CPU，种类齐全的通用功能的模板，使用户能根据需要组合成不同的专用系统。当控制系统规模扩大或变得更加复杂时，不必投入很多费用就可以进行升级。一个 PLC 系统可包括：

- (a)中央机架单元(RACKS)：为 PLC 的安装提供平台；
- (b)电源模板(PS)：将 SIMATIC S7-300 连接到 120/220VAC 或 24VDC 电源上；
- (c)中央处理单元(CPU)：多种 CPU 可供用户选择，带有内置 PROFIBUS-DP 接口；
- (d)数字量输入和输出(DI/DO)和模拟量输入和输出(AI/AO)的信号模板(SM)；
- (e)通讯处理器(CP)：用于总线连接和点到点连接；
- (f)功能模板(FM)：专门用于计数、定位、凸轮等控制任务。
- (g)工业以太网

工业以太网(Ethernet)是以以太网为基础，为工业应用而专门设计的，是一种遵循国际标准 IEEE802.3 的开放式网络，使用 CSMA/CD（带冲突检测的载波监听多点接入）协议。其通讯速率有 10/100Mbit/S 两种，通讯介质有双绞线、同轴电缆、光纤三种。可编程控制器 PLC 通过以太网通讯模块 CP443-1 进行互连，并通过以太网卡可连接到上位机和服务器，以组成网段和网络。CP443-1 支持 TCP/IP 协议，带有自身的处理器，能根据终端设备的以太网（MAC——媒体访问控制子层）地址对数据进行过滤，保证本地数据通讯在本地进行，只有目的地址是网络其

它部分的数据才通过模块转发，该功能不仅减轻了 PLC 与 CPU 的通讯量，还减轻了网络的通讯量。本系统下列设备接入以太网：

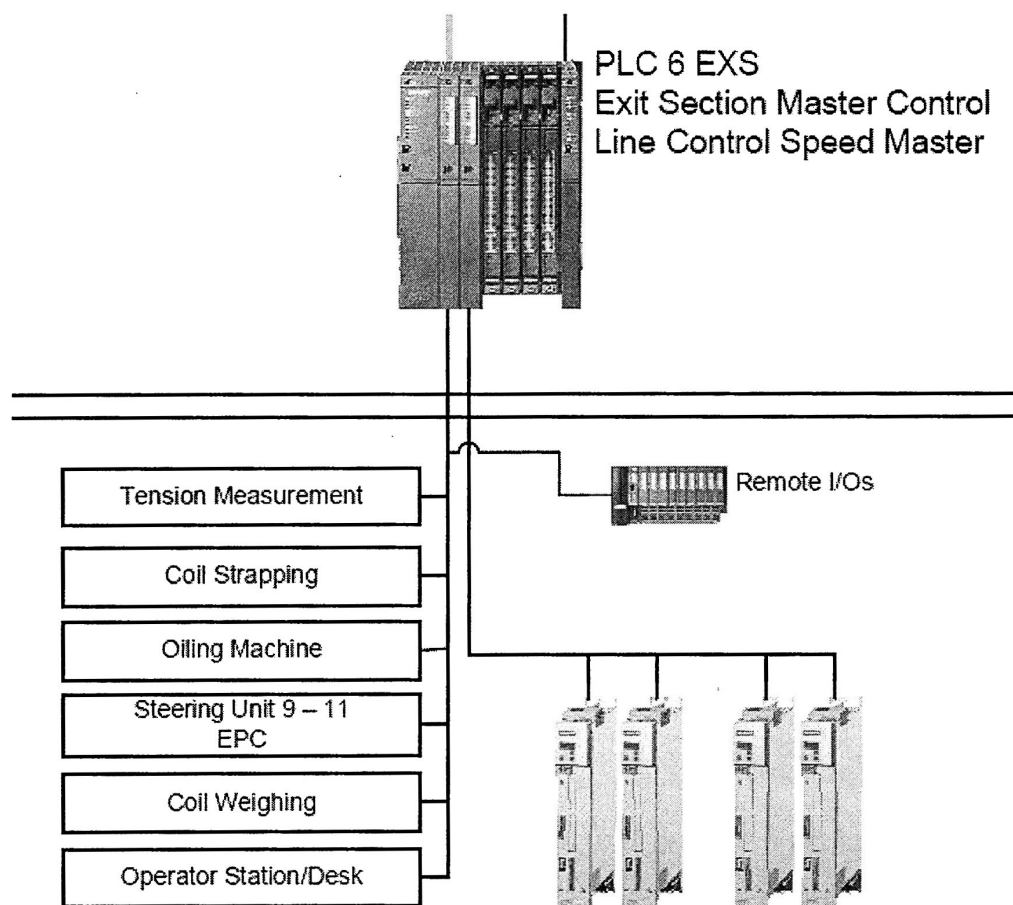


图 5.1 连续酸洗机组系统配置图
Fig.5.1 Configuration diagram of continuous pickling line system

- (a)SIMATIC PLC;
- (b)工艺设计用 PC 机(工程师操作站);
- (c)操作监控系统(HMI)的服务器和客户机;
- (d)现场总线 PROFIBUS。

现场总线 Profibus (Process Field Bus)是由西门子公司倡导的开放式总线，1996 年被批准为欧洲标准(EN50170)，1992 年 12 月被批准为 IEC61158 的组成部分。Profibus 现场总线体系结构基于 ISO/OSI 模型的物理层、数据链路层、应用层；其通讯方式有主从方式、纯主方式、多主从方式；主站对总线具有控制权，主站间通过传递令牌取得对总线的控制权，取得控制权的主站可向从站发送、获取信息。Profibus 总线包含三个方面的内容，即 FMS、DP、和 PA，它们分别适用于不同的领域。FMS 主要用于车间级控制网络；DP 是一种高速的低成本通一讯连接，用

于设备级控制系统与分散式 I/O 通一讯：PA 是专为过程化设计的，可将传感器和执行机构连在总线上，具有本征安全规范。本机组系统采用的是 Profibus-DP，DP 总线有较高的实时性，数据传输率为 9.5kbit/S-12.0Mbit/s，响应时间为几百微秒到几百毫秒；采用的传输介质是双绞线，具有低成本、高可靠性的数据传输特性。

(4)变频器

电气传动分成不调速和调速两大类，调速又分为交流调速和直流调速两种方式。不调速电动机直接由电网供电，但随着电力电子技术的发展，这类原来不调速的机械越来越多地改用调速传动以节约电能（节约 15%-20%或更多），改善产品质量，提高产量。在我国 60%的发电是通用电动机消耗掉的，因此调速传动是一个重要行业，一直得到国家重视，目前已有一定规模。近年来，交流调速中最活跃，发展最快的就是变频调速技术。变频调速以其优异的调速和起制动性能，高效率，高功率因数和节电效果及其它许多优点而被国内外公认为最有发展前途的调速方式，成为了电气调速传动的主流。变频调速传动系统无论在性能、装置体积、设备维护还是在节能乃至环保等方面均体现了巨大的优势。

变频器分为交—交和交—直—交两种形式。交—交变频器可将工频交流直接变换成频率、电压均可控制的交流，又称直接式变频器。而交—直—交变频器则是先把工频交流通过整流器变成直流，然后再把直流变换成频率、电压均可控制的交流，又称间接式变频器。前者主要用于低速大功率无齿轮传动领域，后者广泛应用于各种场合。本系统中选用交—直—交变频器，以下简称变频器。

变频器的基本构成如图 5.2 所示，由主回路（包括整流器、中间直流环节、逆变器）和控制回路组成，分述如下。

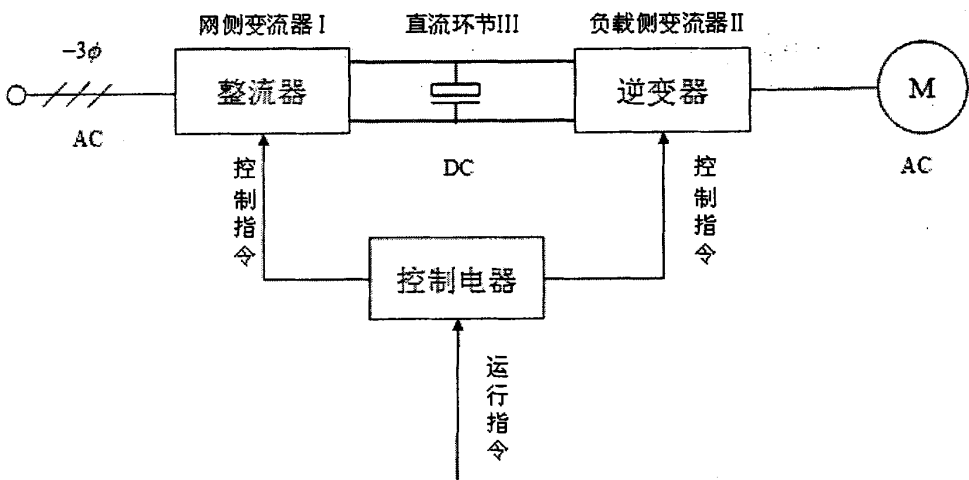


图 5.2 变频器的基本结构图
Fig.5.2 Basic structure diagram of frequency converter

电网侧的变流器Ⅰ是整流器，它的作用是把三相（也可以是单相）交流整流成直流。

负载侧的变流器Ⅱ为逆变器。最常见的结构形式是利用六个半导体可控主开关器件组成的三相桥式逆变电路。有规律地控制逆变器中主开关的通与断，可以得到任意频率的三相交流输出。

由于逆变器的负载为异步电动机，属于感性负载，无论电动机处于电动或发电制动状态，其功率因数总不会为1。因此，在中间直流环节和电动机之间总会有无功功率的交换。这种无功能量要靠中间直流环节的储能元件（电容器或电抗器）来缓冲，所以又常称中间直流环节为中间直流储能环节。

控制电路常由运算电路、检测电路、控制信号的输入、输出电路和驱动电路等构成。其主要任务是完成对逆变器的开关控制、对整流器的电压控制以及完成各种保护功能等。控制方法可以采用模拟控制或数字控制。高性能的变频器目前已经采用微型计算机进行全数字控制，采用尽可能简单的硬件电路，主要靠软件来完成各种功能。由于软件的灵活性，数字控制方式常可以完成模拟方式难以完成的功能。

近年来，随着电力电子技术、计算机技术、自动控制技术的迅速发展，变频调速技术面临着一场历史性革命，计算机数字控制技术取代模拟控制技术已成为发展趋势。传统的变频器模拟控制技术限制了变频器性能的改善，而全数字控制方式具有模拟控制无可比拟的优点：

精度高：数字计算机的精度与字长有关，变频器中使用16位乃至32位微处理器作为控制器，精度在不断提高。

稳定性好：由于控制信息为数字量，不会随着时间发生漂移。与模拟控制不同，它一般不会随温度和环境条件发生变化。

可靠性高：系统中采用大规模集成电路，硬件数量大为减少，相应的故障率大大降低。

灵活性好：系统中硬件向标准化，集成化方向发展，可以在尽可能少的硬件支持下，由软件去完成复杂的控制功能。适当地修改软件，就可以改变系统的功能或提高其性能。

存储能力强：存储容量大，存放时间几乎不受限制，这是模拟系统不能比拟的，利用这一特点可在存储器中存放大量数据或表格，利用查表法简化计算，提高运算速度。

逻辑运算能力强：容易实现自诊断、故障记录、故障寻找等功能，使变频装置的可靠性可使用性可维修性（即所谓的RAS，Reliability Availability

Service-ability) 大大提高。

在中小功率变频器技术方面,国外的一些大公司的产品已实现控制系统的全数字化,而且通常采用较先进的控制理论和高性能的处理器,如 16 位、32 位高速微处理器, DSP 和专用集成电路(ASIC)等。

作为交流变频调速控制方式, V/F 控制比较简单,机械特性硬度也比较好,能满足一般平滑调速的要求,但是这种控制在低频时,其动态转矩能力和静态调速性能比直流调速性能差。如果对系统静态调速性能要求比较高,就要考虑采用矢量控制作为交流变频调速控制方式。

70 年代西门子工程师 F.Blaschke 首先提出异步电机矢量控制理论来解决交流电机转矩控制问题。矢量控制的基本原理是通过测量和控制异步电动机定子电流矢量,根据磁场定向原理分别对异步电动机的励磁电流和转矩电流进行控制,从而达到控制异步电动机转矩的目的。具体是将异步电动机的定子电流矢量分解为产生磁场的电流矢量(励磁电流)和产生转矩的电流分量(转矩电流)分别加以控制,并同时控制两分量间的幅值和相位,即控制定子电流矢量,所以称这种控制方式为矢量控制方式。矢量控制方式又有基于转差频率控制的矢量控制方式、无速度传感器矢量控制方式和有速度传感器的矢量控制方式等。这样就可以将一台三相异步电机等效为直流电机来控制,因而获得与直流调速系统同样的静、动态性能。矢量控制算法已被广泛应用在 SIEMENS、AB、GE 等国际化大公司变频器上。

采用矢量控制方式的通用变频器不仅可以在调速范围上与直流电机相匹配,而且可以控制异步电动机产生的转矩。由于矢量控制方式所依据的是准确的被控异步电动机,有的通用变频器在使用时需要准确地输入异步电动机的参数,有的通用变频器需要使用速度传感器和编码器。日前新型矢量控制通用变频器中已经具备异步电动机参数自动检测、自动辨识、自适应功能,带有这种功能的通用变频器在驱动异步电动机进行正常运转之前可以自动地对异步电动机的参数进行辨识,并根据辨识结果调整控制算法中的有关参数,从而对普通的异步电动机进行有效的矢量控制。

本系统中选用的 SIEMENS 公司 6SE70 系列全数字式交流调速装置对线上调速设备进行调速控制,选用整流器+DC 直流母线+逆变器配置方案。矢量控制变频器为模块化设计、全数字控制,其逆变器为电压型,它适用于交流笼型电机。所有元件都达到了 VDE、IEC、NEMA 和 CSA 标准的要求。它将频率固定、电压固定的三相交流电变换成频率、电压均为可调的三相交流电。在变频器的机箱内还可以插入两块附加功能板,如 CBP 通讯板、T400 工艺板等。

该变频器具有如下特点:

- (a)功率范围达到 2.2-1500kW;
- (b)低功耗的 IGBT(绝缘门极的双极性晶体管)及优化正弦调制的“脉宽调制”(PWM)保证高的驱动效率;
- (c)基于多处理器的数字控制;
- (d)具有高精度速度及转矩控制,可带有脉冲产生器反馈的磁场定向矢量控制;
- (e)具有 1/1000Hz 分辨率及转差补偿的 V/F 开环控制;
- (f)输出频率为 0-300Hz;
- (g)带有标准的 PROFIBUS-DP 接口;
- (h)自我优化驱动控制:通过测量及测试程序自动计算及设定控制参数;
- (i)逆变器的机箱可以安装两块辅助功能板:
 - 通讯板,用于串行通讯、USS 协议通讯及 PROFIBUS 通讯;
 - 工艺功能控制板,用于卷取控制、同步控制、活套控制等。
- (j)用于快速一记录逆变器实际值的内部跟踪缓冲器,带有纯文本显示的操作员控制面板(根据需要可以进行拆卸);
- (k)启动及参数设定:通过良好显示界面的操作面板来输入运行设定点及相关传动的数据。
- (l)带有可调的设定值、上升、下降时间,电流极限, V/F 特性曲线等的四个可选数据组。
- (m)综合的自我保护方案包括:
 - 电机及传动装置的温度监测;
 - 电子器件过载监视;
 - 电源及保险监视;
 - 接地故障监视。
- (n)为了便于启动、调试及维护,可以通过连至中央控制的工程师操作站(工业用 PC 机)来对 SIMOVERT 变频器系统进行控制、观察及参数化。

与主传动系统有关的设备还包含有:进线电抗器、整流回馈单元、自耦变压器、输出电抗器等设备。由于主传动系统采用公共 DC 母线,这样使系统具有因能量均衡而节省能量的优点,并且系统所需的馈电功率低于总装电机功率,在整个速度及负载范围内功率因数约等于 1。

(5)光电编码器

光电编码器是一种将旋转位移转换成一连串数字脉冲信号的旋转式传感器。这些脉冲能用来控制角位移,如果编码器与齿轮齿条或螺旋丝杠结合在一起,也

可以用于测量直线位移。

旋转时产生的电信号可由下列装置进行处理：数控装置(CNC)，可编程逻辑控制器(PLC)、控制系统等。这些传感器主要应用在下列方面：机床、材料加工、机器人、电动机反馈系统以及测量和控制设备。编码器的角位移的转换采用了光电扫描原理。读数系统是基于径向分度盘的旋转，该分度盘是由交替的透光窗口和不透光窗口构成的。此系统全部由一个红外光源垂直照射，这样光就把盘子的图像投射到接收器表面上，该接收器覆盖着一层光栅，称为准直仪，它具有和光盘相同的窗口。接收器的工作是感受光盘转动所产生的光变化，然后将光信号变化转换成相应的电信号变化。

要使电信号上升到较高电平，并产生没有任何干扰的方波脉冲，这就必须用电子电路来处理。读数系统常用差分方式，即将两个几乎一样但相位差 180° （电气上）的不同信号进行比较，以便提高输出信号的质量和稳定性。读数是在两个信号一的差别基础上形成的，从而消除了干扰。此方法称为“共同偏移法”，因为它们对每一种波形都以相同的方法交叠在一起。

用于测量卷取机转速的编码器为增量型编码器。增量型编码器一般给出两种方波，他们的相位差 90° （电气上），通常称为通道 A 和通道 B。只有一个通道的读数给出与转速有关的信息，与此同时，通过所取得的第二通道信号与第一通道信号进行顺序对比的基础上，得到旋转方向的信号。还有一个可利用的信号称为 Z 通道或零通道，该通道给出编码器轴的绝对零位。此信号是一个方波，其相位与 A 通道在同一中心线上，宽度与 A 通道相同。

增量型编码器精度取决于机械和电气两种因素，这些因素有：光栅分度误差、光盘偏心、轴承偏心、电子读数装置引入的误差以及光学部分的不精确性。确定编码器精度的测量单位是电气上的度数，编码器精度决定了编码器产生的脉冲分度。可以用 360 电气度数来表示机械轴的转动，而轴的转动必须是一个完整的周期。要知道多少机械角度相当于电器上的 360° 。

编码器分度的误差是以电气度数为单位的两个连续脉冲波的最大偏移来表示。误差存在于任何编码器中，这是由前述各因素引起的。

5.2 带钢卷取控制系统

卷取机控制是带钢表面处理中很重要的环节，它对保证钢卷的质量起决定性作用。在本系统中，卷取传动电机采用变频器调速，变频器机箱内配有 T400 工艺板和 CBP 通讯板，通讯板 CBP 是扩展 PROFIBUS-DP 通讯处理模块，将 SIMOVERT 连接到 PROFIBUS 上。通过 PROFIBUS，变频器 SMIOVERT 与 PLC 及上位机进

行数据交换，如控制数据、状态数据等。工艺板 T400 是一个以单片机为核心的卷取张力控制工艺板。通过相应的输入设备（随机的操作板 OP，或者由上位机通过 Profibus 传输到 T400）设定初始值和相应的现场信号传输到 T400 板，通过其计算及把结果传输到变频器 SIMOVERT，使变频器产生的输出特性满足恒张力控制的工艺要求。

T400 是本次项目所使用的一个至关重要工艺技术模板，主要负责卷筒的速度控制、恒张力控制。使用 T400 技术模板和各种接口模块可以扩展数字 SIMOVERT MASTER DRIVES 和 SIMOREG DC-MASTER 整流器。经常使用的标准软件包有：角同步、飞剪、轴卷取控制。如果标准软件包的技术功能要扩展实现特定的需要，则需购买软盘装的软件包，然后再用 CFC 组态工具修改。

T400 技术模块是一个处理器模块，可通过 CFC 自由组态。它与 SIMADYIVD 兼容，专为 SIMOVERT MASTERDRIVES，SIMOREG DC-MASTER 整流器和 SRT400 子机架设计。CFC 组态工具用来定义不同模块的功能。生成的软件下载到 T400 的程序内存中。与主驱动之间的通讯通过平行接口，又称为双口 RAM (DPR) 实现。另外，T400 能通过 PROFIBUS DP、USS 和 peer-to-peer 进行通讯。表 5.1 列出了 T400 的基本特性。

表 5.1 T400 的基本特性
Table 5.1 Basic characteristic of T400

处理器/时钟频率	RISC 3081/32 兆赫
RAM 存储器	4 兆字节
与 CPU 间的通讯	并行总线，双口 RAM，16 字
程序存储器	2 兆字节 EPROM，2K 字节 EEPROM，128 字节 NOVRAM
数字输入	12 路，4 个双向输入输出 24V
数字输出	6 路，4 个双向输入输出 24V，50mA
模拟输入	5 路 12 位±10V（2 路差动信号）
模拟输出	2 路 12 位±10V，50mA
串口	2 路 IXRS232 or RS485（2 线）XRS485（2 线或 4 线）
脉冲编码器输入	2 路 1×track A, B, zero, HTL(15V)or TTL/RS422(5V) 1×track A, B, zero and coarse HTL pulse

在高级自动化系统，需要 SIMOVERT MASTERDRIVES 变频器和 SIMOREGDC-MASTER 整流器的应用中，根据所需协议会用到接口模块。这样，自动化系统可以读取并更改设定点、实际值、技术参数以及主驱动参数。PROFIBUS-DP 是理想的通讯方式。这样就需要使用接口模块 CBP 及 ADP 或 CBI。如果使用 CUVC 或 CUMC，则将位于 ADB 加载组件（ADB 中较低的插口）上的 PROFIBUS 接口组件 CBP 装载到电子箱的插口 3 上。如果使用 CU2 或 CU3 其中之一，则 PROFIBUS

接口组件 CB1 装载于插口 3 上。Peer to peer 和 USS 接口模块 SCB1 或 SCB2 位于插口 3。T400 工艺附加板必须和总线适配器 LBA 一起安装，如果 LBA 尚未装入 SIMOREG 整流器中，则在推入 T400 前，必须先将 LBA 装入电子箱。

标准软件包中所有的 T400 接口：PROFIBUS，Peer to peer，USS-BUS；基本驱动接口，主驱动或转换器；输入/输出接口；模拟和数字输入/输出；测量接口：2 个增量型编码器。

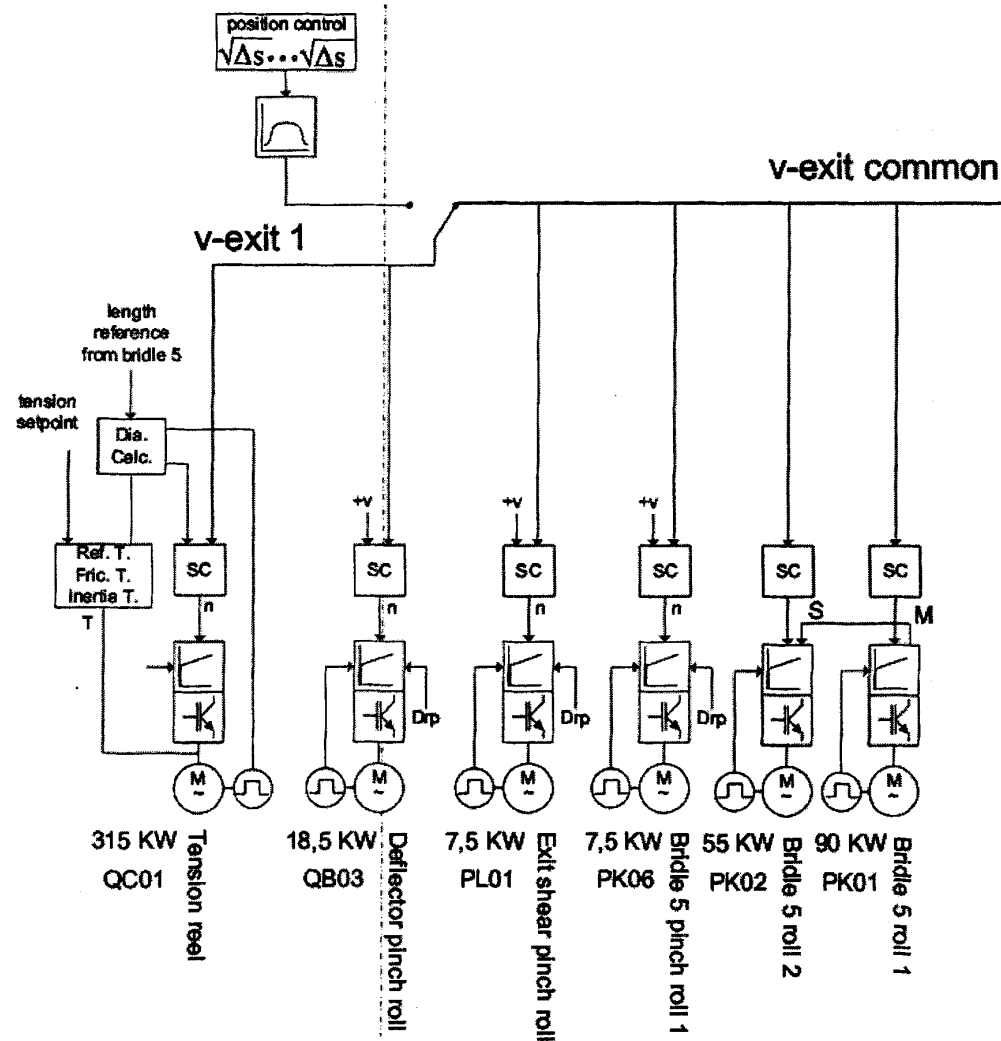


图 5.3 T400 工艺板张力控制框图
Fig.5.3 Tension control block diagram of T400 technical board

所有接口是用来传送过程和参数数据。其中，T400 技术模块和主驱动之间的过程量和参数的快速传递是通过背板总线由并行双 RAM 接口来实现的。长期设定的和可以自由选择の設定点和实际值能通过 PROFIBUS-DP 网通讯模块传递，这种情况下，只能是 CBI，CBP 或 ADB。带通讯板的 T400 只有一个 PROFIBUS 从属

功能。通讯板在主驱动上被参数化,如:PPO 类型,波特率,报文长度等。点对点的通讯通过设置串行接口 X02 符合点对点协议。协议允许数据超快速,无延迟传送到附加 T400、带 SCB2 的其他驱动转换器。通过 USS 的通讯可选用串行接口 X01 (RS232/RS485)做参数化。这种功能在 T400 应用于 SRT400 上时被专门提供。还可将基于 SIMADYN D 监视器的操作控制程序连接于串行接口 X01(RS232)。这样一来就允许显示和改变各个连接器。通过数字和模拟输入输出通道可以读入控制信号和设定值,输出状态信号和实际值。T400 组件的数字输入输出需要 24 伏电源信号,所以,数字输出的 24 伏电源电压需外部设备提供。

T400 采用的软件包是 Axial Winder SPW420。这个软件包的主要功能有读入设定值、检测实际值、闭环速度控制、卷径计算和监视报警等。利用它的 Winder with indirect tension control 功能,实现间接张力控制。其控制框图如图 5.5 所示,这是一个间接张力控制的系统功能流程图。

该系统有两个控制环,一个是速度控制环,一个是电流控制环。其控制原理为:当张力建立起来后,即系统检测到张力建立起来,实际上是检测电流值的突变后,在速度环给定上面叠加一个 5%左右的给定值,保证速度环饱和,饱和后的速度环输出值作为电流环的给定值,饱和的速度输出值将导致电流环限幅输出,这时使用不同钢种的张力值乘以变化的钢卷直径得出的转矩值来实时调整电流限幅值来实现恒张力控制。如图 5.3 所示,脉冲编码器用来检测速度的实际值。当速度环饱和时,系统自动从闭环速度控制切换到张力控制。当张力建立后,转矩限幅值自动接管了系统的控制。

脉冲编码器作为轴测速计,用来测量速度实际值。卷径计算单元根据第五章中介绍的卷径计算原理连续计算直径。计算出的钢卷实时直径作为速度设定、张力力矩给定、惯性力矩补偿、机电时间常数计算的参数。

卷取工艺板 T400 带有光电编码器的接口电路(可接入两个)。并为光电编码器提供 24V 的直流电源(100mA)。当工艺板的电源不能满足光电编码器的需求时,可以外接电源。对光电编码器的信号接入必须采用屏蔽电缆,并且,屏蔽线接地阻抗要尽可能的低,在生产现场中推荐使用电缆夹。工艺板 T400 对所接入的光电编码器的最大频率限制为 1.5MHz。为了减少振动对光电编码器产生的计数干扰,工艺板设置有滤波程序,滤波时间常数一般带有出厂设定,也可以根据实际需要自行设定。

光电编码器的信号输入到卷取工艺板 T400 后,经过滤波,由采样子程序进行采样计数后,被保存到固定的内存单元;张力辊的直径乘以获取的张力辊的转速,得到带材卷取的线速度,用该值除以卷筒的转速,得到卷筒的卷径 D_{coil} ,具体实

现见前面介绍。光电编码器是一个高精度的测量元件，虽然卷取工艺板 T400 带有抗振动干扰的滤波程序，但是在安装过程中，一定要保证安装的径向、轴向精度，防止轴向跳动给光电编码器带来技术误差。

张力设定点和带速设定点来自自动系统，作为模拟量输入或作为参数。速度控制器接到一个速度设定点，一该点对应实际带速与饱和设定点相加的和。过控制是指带材存在时，比如它达到正输出极限，速度控制器将会过控制。当用饱和设定点增加轴速度时，速度控制器输出根据选定的张力设定点达到相应转矩极限。这样，张力设定点通过适当控制转矩极限来控制电流控制器的转矩。间接张力控制的核心是指张力设定点乘以标准化直径 D_{ACT} 作为转矩输入（最大直径和最大张力设定点得出最大转矩）。为了使输入转矩尽可能反应材料张力，有必要精确补偿摩擦和加速转矩，这些必须被另外克服。摩擦转矩总沿旋转方向，惯性补偿在减速时有制动效果，在加速时有提速效果。当出现断带或塔形时，速度控制器阻碍卷取机超速，这一点是通过控制圆周速度小于带速与饱和设定点（超速保护）的和来做到的。通过适当参数化断带检测和评估断带信号，可关闭驱动装置。

卷取工艺板 T400 的重要预设定参数包括：

- ①张力值设定；
- ②带钢参数设定，其中包含带钢的宽度、厚度；
- ③张力辊直径预输入；
- ④空载时的转动惯量；
- ⑤减速比以及传动电机的有关参数等。

当预设定参数值被设定后，由卷径获取子程序采样光电编码器的输入，计算后得到钢卷直径的实时值，并用给定的带钢线速度除以计算获得的卷径 D_{ACT} ，得到卷取传动电机的转速度给定值，输出到速度调节器。在实际现场中，卷径 D_{ACT} 是不断增大的，卷取转速给定值是一个不断减小的值。但是卷取机处的带钢运行线速度要始终能够跟随张力辊带钢运行速度变化，也就是张力辊转速的变化（因为张力辊直径被认为是一个定值）。

卷径 D_{ACT} 还被用来计算转动惯量补偿，其具体分析可参见第四章中分析。在卷取工艺板 T400 的控制算法中，对补偿的处理与传统的补偿直接加到电流调节器中是有区别的。图 5.4 中计算出的 M_d 主要补偿电机转速变化形成的惯性力矩。由于转动惯量变化还会造成系统机电时间常数变化，系统是参数时变的。卷径环。通过计算后得出图 5.3 中的动态惯量值，确定机电时间常数变化值，从而确定转速调节器的增益变量，实现增益自调节控制。

摩擦力矩的补偿取决于传动电机的转速，在传动速比比较高的情况下，补偿的摩擦力矩还与齿轮箱的温度有关，对摩擦力矩的补偿特性应进行重新设定。

5.3 冷轧带钢卷取机张力控制效果分析

本文研究的系统为冷轧连续酸洗生产线机组的卷取机张力控制。成品带钢宽度为 750-1350mm，带钢厚度为 1.8-3.0mm，钢卷内径中 762mm 钢卷外径 $\phi 900$ - $\phi 2100$ mm。最大卷重 30000kg。酸洗工艺段速度为 100m/min 卷取段带钢运行线速度最大为 170m/min，加减速度为 20m/min/s，卷取张力为 41060N，单位面积带钢张力为 12.5N/m 时。卷取机传动电机为交流变频调速电机，型号为 YPT355L2-8，功率为 200kW，传动比为 12.25。卷取机最大转速为 1450r/min，相应的转矩为 15363Nm。

张力辊直径为 $\phi 1000$ mm，为 S 辊结构形式。入口张力为 54530N，单位面积带钢张力为 16.6N/mm^2 ，主要为圆盘剪剪切提供动力。出口张力为 39420N，单位面积带钢张力为 16.6N/mm^2 。入口张力辊传动电机为 YPT315L1-6，为 110 kW 传动比为 16；出口张力辊传动电机为 YPT280M-6，为 55 kW，传动比为 16。

在带钢连续生产线中，一般分为入口段、工艺段、出口段三个区域。对于连续酸洗机组来说，其工艺段为酸洗槽，连续酸洗机组的操作因而可以分为入口段操作、酸洗段操作、出口段操作三个阶段。

(1) 卷取机卷绕特性

我们知道，为了保证带材质量，在卷取过程工艺中，必须要保持带材在卷取时的张力恒定。因此，有必要对卷筒及其传动电机进行受力分析。

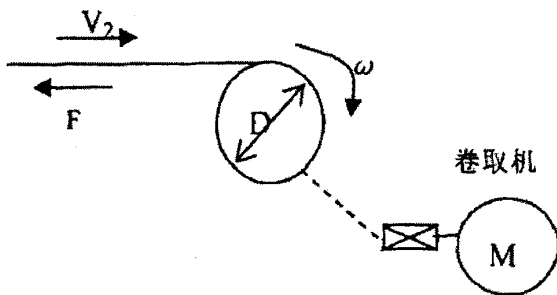


图 5.4 卷曲系统示意图
Fig.5.4 Diagram of coiling system

图 5.4 为带材卷取系统，其带材的卷取张力为 F ，卷筒的直径为 D ，卷筒的前一单元的带材线速度为 V_1 ，卷筒的卷取线速度为 V_2 。在开始卷取过程时，显然应使 $V_2 > V_1$ ，则带材在卷取时有张力，并逐渐增大；如果控制 $V_2 < V_1$ ，则卷取过程没有张力，无法保证卷取质量。故为了保证正常的卷取，在卷取机构卷取启动初期，

一般是控制使 $V_2 > V_1$ ，此时，带材将受到拉力而产生弹性变形。根据胡克定律，带材的卷取张力 F 为：

$$F = \frac{\delta \cdot E}{l} \int_0^{t_1} (V_1 - V_2) dt \quad (5.1)$$

式中， E ——带材的弹性模量；

δ ——带材的截面积；

l ——卷筒与前一单元之间的距离；

t_1 ——卷取机构的建立张力时间。

从式(5.1)可以看出，带材作为卷取张力的调节对象时，是一积分环节，所以在刚开始启动过程中，当带材的张力达到工艺所要求的张力给定值时，就应该及时调节 V_2 ，使卷筒的线速度 V_2 保持稳定，此时，就可以保证带材在给定的张力值下正常卷取。显然在稳定运行中，无论是线速度 V_1 还是卷筒的线速度 V_2 有任何波动，都将引起带材的卷取张力波动。

现在对卷筒的传动电机进行分析，现假定线速度 V_1 是一稳定值（在实际生产中情况也是如此）；设定卷取机构的卷筒的线速度 $V_2 = \pi D n_2$ 。如果卷筒的卷取电机的转速 n_2 恒定不变，则卷绕过程中随着 D 的不断增大，卷筒的线速度 V_2 将正比地增大。张力 F 将随 D 的上升而线形增长，其卷筒轴上的卷绕力矩 $M_F = F \cdot D/2$ 将以更快的速率增加。在实际生产中，这种卷绕特性绝对不允许，所以，在张力建立起来后，应该保持 $V_2 = V_1$ ，在 V_1 为定值时，则应保持 V_2 不变，就可保证卷取张力的恒定。要保证恒张力卷取，则卷取电机的转速 n_2 随卷径的增加而反比地下降，即 $n_2 = V_2 / \pi D$ 。于是卷绕力矩 M_F 与卷轴的转速 n_2 的乘积等于张力与卷筒线速度的乘积，即

$$M_F \cdot n_2 = F \cdot V_2 / 2\pi \quad (5.2)$$

变形得，

$$n_2 = \frac{K}{M_F}$$

而式 $K = F \cdot V_2 / 2\pi$ ，即 K 为定值。

在下面的讲述中，卷取传动的电机将以直流电机作为模型，这样做的目的是便于分析；在实际应用机构中，现在的卷取传动电机一般采用交流电机；其实，两者并不矛盾，随着矢量控制技术和变频器技术的发展，对于交流电机的控制可

以等效为对直流电机的控制。

(2) 卷取恒张力控制原理

卷取恒张力控制一般分为开环控制和闭环控制两大类。开环控制就是利用有些电机的本身所具有的与卷绕特性相似的软机械特性，直接用这类电机来传动卷绕机构，以获取近似的恒张力控制。

电动机的输出转矩为：

$$M_D = C_M \phi I_d = M_F + M_O + M_d \quad (5.3)$$

式中， M_F ——卷取张力力矩， $M_F = \frac{F \cdot D}{2i}$ ，（ F 为卷取张力， D 为卷筒直径）；

M_O ——电动机空载力矩；

M_d ——加减速时的动态力矩；

I_d ——电动机电枢电流；

C_M ——电动机转矩常数；

ϕ ——电动机磁通。

动态力矩 M_d 仅在动态过程中出现，在恒速卷取时， $M_d = 0$ 。而机械损耗力矩 M_O 的变化规律比较复杂，且一般数量不大，在分析时可略去不计。所以在稳定运行时，张力的主要扰动量是卷径 D 和线速度 v 。

$$M_D = C_M \phi I_d = \frac{F \cdot D}{2i} \quad (5.4)$$

于是卷取张力为：

$$F = 2i C_M \frac{\phi I_d}{D} = K \cdot \frac{\phi I_d}{D} \quad (5.5)$$

式中， $K = 2i C_M$ ，为常数。

(3) 卷径跟踪方式的恒张力控制

实现卷绕机构恒张力控制，主要扰动量是卷径 D 的变化。因此，实现卷径跟踪恒张力控制就是在保持磁通中不变的条件下，电机电枢电流 I_d 随卷径的增加而成比例增加，此方法的关键是卷径的测量。

$$\text{根据 } V_1 = 2\pi n_1 R_1 = \pi D_1 n_1 \quad (5.6)$$

$$V_2 = 2\pi n_2 R_2 = \pi D_2 n_2 \quad (5.7)$$

而且系统要求： $V_1 = V_2$

$$\text{因此有： } D_2 = \frac{n_1}{n_2} D_1 \quad (5.8)$$

即只要测得带钢的速度 n_1 和卷筒速度 n_2 ，经除法器，即可测得卷径 D_2 的信号。本系统采用旋转编码器 SF_1 检测带钢速度 n_1 ；旋转编码器 SF_2 检测卷取机速度 n_2 。

异步电动机的转矩为：

$$M_D = C_M \phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (5.9)$$

其中 ϕ 为气隙磁通，它是由定子电流和转子电流共同磁化的结果，并以电流频率的同步速度在空间旋转； I_2 为转子电流，在鼠笼异步机中这个电流不是直接可控的。

由式(5.9)可以看出，异步机的转矩 M_D 不仅与磁通 ϕ 有关，还与转子电流 I_2 有关，且 ϕ 、 I_2 不是两个相互独立的变量。转矩的这种复杂性是异步机难以控制的基本原因，但若以磁通这一旋转的空间矢量为参考坐标，利用静坐标系到旋转坐标系之间的变换，将交流电动机的定子电流分解成产生磁通 ϕ 的定子磁场电流分量 i_{sd} 和产生转矩的定子转矩电流分量 i_{sq} ，并使二者相互成直角，相互独立，然后分别进行调节，则交流机的转矩、转速控制从原理上就和直流机相似了，即

$$M_D = \frac{F \cdot D}{2i} = C_M \phi i_{sq} \quad (5.10)$$

式中： C_M ——常数；

ϕ ——磁通量；

i_{sq} ——产生电磁转矩的电流分量。

则可写成

$$F \approx K i_{sq} \phi / D \quad (5.11)$$

其中， $K = 2iC_M$ 。

于是，保持磁通 ϕ 恒定，电流 i_{sq} 和转矩成正比。根据卷径的变化，通过预设转矩参考值的变化，使在恒定的预设定点上转矩的变化是卷径变化的函数，电流 i_{sq} 变化是卷径变化的函数，即 i_{sq}/D 为常数，张力调节原理如图 5.5 所示：

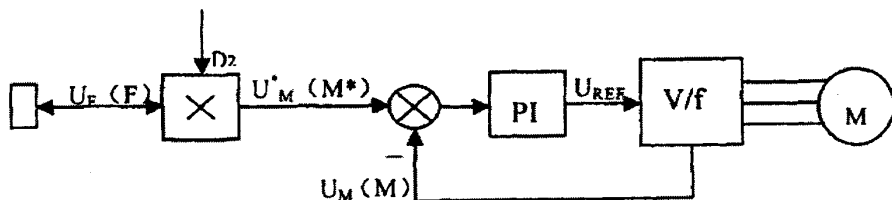


图 5.5 张力调节原理图
Fig.5.5 Schematic diagram of tension adjustment

由图 5.8 可知, 当卷径 D_2 增加时, 即:

$D_2 \uparrow \rightarrow M \uparrow \rightarrow U_M \uparrow \rightarrow U_{REF} \uparrow \rightarrow f \uparrow \rightarrow n_2 \uparrow \rightarrow i_{sq} \uparrow \rightarrow U_M \uparrow \rightarrow U_{REF} \downarrow \rightarrow f \downarrow \rightarrow n_2 \downarrow$, 可见当卷径 D_2 增加时卷筒速度 n_2 下降, 即 $i_{sq}/D=\text{常数}$, 因此实现卷径跟踪的恒张力控制。

在上一个钢卷的带尾快要甩尾之前, 开卷机上的自动停车装置将及时对入口段进行减速, 当达到甩尾速度时, 处理器的矫直辊压下, 同时焊机后的夹送辊的压辊、No.1 纠偏辊的压辊以及 No.1 张力辊的压辊也压下。一旦带尾离开开卷机, 其卷筒立即收缩, 同时夹送辊和矫直机抬起。然后可以进行下一个钢卷的相同的穿带程序。被矫直的带尾送进 No.1 分切剪或 No.2 分切剪, 切去不合格部分。带尾进入焊机, 在带尾停止之前, 通过 No.1 纠偏辊和 No.1 张力辊的传动压辊停止, 这样焊机出口夹送辊与 No.1 纠偏辊之间形成活套。然后焊机完成带尾的定位、对中及夹紧等操作。一旦上一卷带钢的带尾离开 No.2 转向夹送辊, 已经在 No.2 转向夹送辊前等待位置的另一个通道的带头将向前送入焊机。当带头到达焊机内的挡块位置时, 将与带尾一样进行定位、对中及夹紧, 当带头、带尾相互对齐时, 焊机将启动自动剪切和焊接。当焊机焊接操作全部完成后, 入口段开始加速, 加速到设定的充套速度快速充套, 活套充满后入口段降速至工艺段正常生产速度。带钢在拉矫机装置内, 通过相对较小的弯曲辊和矫直辊, 其弯曲应力叠加在张应力上而达到改善板形和破鳞的效果。酸洗段共三个酸洗槽, 酸洗槽之间通过一对挤干辊互相隔开。清洗槽与酸洗槽相似, 与酸洗槽形成一条线。带钢经酸洗、冲洗、烘干后, 经 No.5 双辊纠偏转向装置进入酸洗出口活套。带钢离出口活套后, 经过月牙剪到达 No.6 纠偏辊和圆盘剪。如果带钢宽度有变化, 通过焊缝检测装置将自动停止带钢, 使焊缝停在月牙剪区域, 并进行冲边剪切。然后带钢移动到圆盘剪处, 圆盘剪进行宽度调节, 通过 No.4 张力辊使焊缝离开圆盘剪。带钢经 No.4 张力辊转向到分切剪平台, 根据出口钢卷的重量或焊缝跟踪信号自动停车, 然后手动操作进行分切。分切后的带尾由卷取机进行卷取, 而带头将以穿带速度立即送入另一台卷取机, 经转向夹送辊沿穿带导板台送入卷取机钳口, 当卷取机卷取 2-3 圈后, 出口段升速迅速将出口活套的带钢拉空, 以便下一卷存贮带钢。卸卷小车从卷取机上卸下钢卷后运送到往返小车, 然后经出口步进梁过跨运送到轧前库存放。

S7-300 可编程控制器、T400 工艺板与变频器结合对 No.4 张力辊至卷取机段的带钢张力进行控制。卷取工艺板的预设参数通过控制板 OPI 设定, 或者通过网络由 PC 机来设定。参数设定包含变频器参数设定和 T400 板参数设定两个部分。

变频器的参数设定包含交流电机的参数设定、编码器参数设定、变频器优化

设定三个部分。在本系统中，变频器的参数设定分别如下：

交流电机的参数设定值：

P101=380V（电机的额定电压值）；

P107=0.84（电机的铭牌功率因素值）；

P108=280（电机的基速值）；

额定频率为默认值，即为 50HZ。

编码器参数设定：

P130=15（三通道信号接入，即编码器的三个信号 A，B，Z 必须接入）；

P151=1024（编码器每转的脉冲数）；

变频器优化设定：

P115=8（变频器对电机参数的辨识）；

T400 板参数设定包含速度调节器的参数设定和编码器的参数设定两个部分，其参数设定分别如下：

速度调节器优化又分为空载参数优化和满载参数优化，其中，空载优化包含两个参数：

P255：空载时速度调节器的比例系数；

P256：空载时速度调节器的积分系数；以上两参数在现场需要修改和调试。

满载优化是由系统自动完成，即根据实时所测得的卷径，计算出相应的转动惯量，按照工程最优化方法，整定出相应的速度增益系数，即实现了增益自调节控制，使系统参数最优，性能最佳。

编码器参数设定：

H215=1450（张紧辊的额定值）

H213=600（编码器每转的脉冲数）

当以上参数设定完后（系统中还有一些参数是由厂家设定，或者根据不同工艺进行设定），张力段的分系统就可以单独进行调试（也可以联网试车），一般是空载试车，各个动作单元正常后，进行带卷试车，其间要进行参数修正。在正常生产时，系统启动后，由 PLC 控制酸洗线的工艺流程和酸洗工艺监控，卷取张力控制作为系统的一部分。由系统控制程序来完成，不需要人工控制。

连续酸洗机组运行的现场实测数据是通过 PDA(Process Data Acquisition)软件进行记录，然后通过专业的数据分析软件 ibaAnalyzer 对所记录的数据进行详细的分析。

系统调试时记录的 No.4 张力辊处的带钢运行速度曲线如图 5.6 所示，No.4 张力辊编号为 S4。光电编码器获取张力辊电机的转速，然后通过计算可以得到张力

辊运行线速度，然后得到该曲线。图 5.6 中的横坐标代表系统运行时间，纵坐标表示带钢运行线速度(m/s)。在连续酸洗机组中，工艺段也就是酸洗槽、清洗槽中带钢运行速度应一该是稳定的，No.4 张力辊处的带钢运行速度根据出口活套内的带钢储存的料量进行调整。当出口活套内带钢储存量大时，No.4 张力辊处的带钢运行速度高，把出口活套拉空后，No.4 张力辊处的带钢运行速度应与工艺段保持同步。活套套量是一个动态变化量，因此 No.4 张力辊处的带钢运行速度给定值不是一个定值，造成带钢速度是始终波动的。

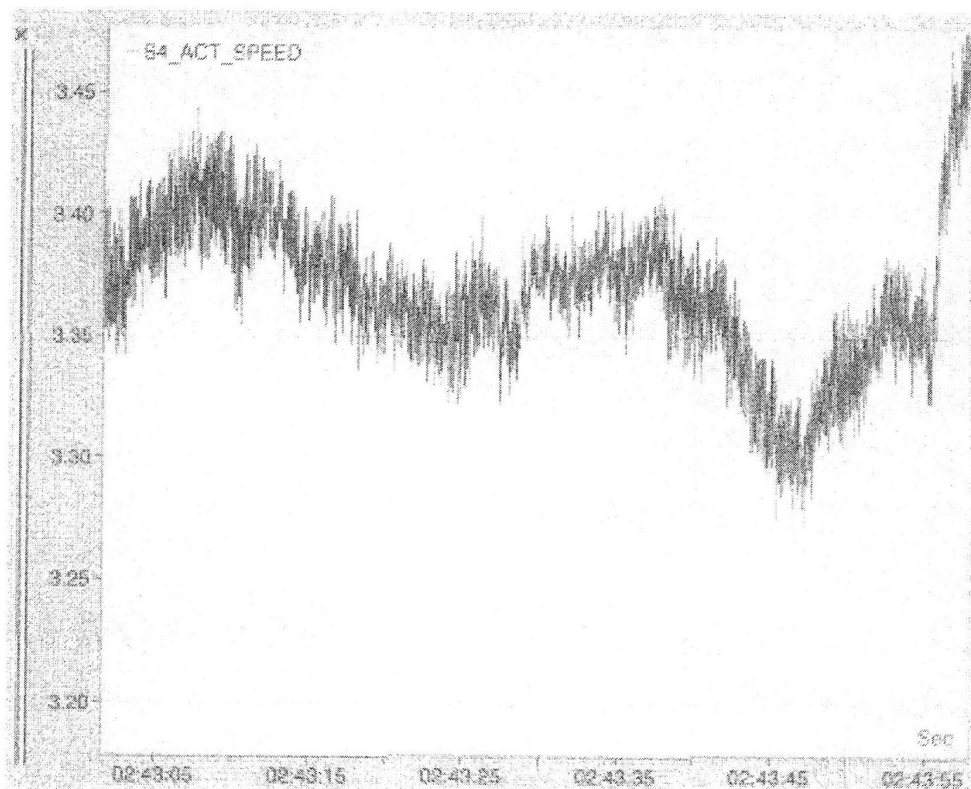


图 5.6 No.4 张力辊处带钢运行速度曲线
Fig.5.6 Strip speed curve at tension roll No.4

卷取区域的其它设备（包括卷取机）以 No.4 张力辊处的带钢运行速度为基准。No.1 卷取机处的带钢运行速度曲线如图 5.7 所示，No.1 卷取机编号为 TR1。光电编码器获取卷筒的转速，然后与卷取机传动比和钢卷直径 D_{ACT} 相计算，得到卷取机处的带钢运行速度。比较图 5.6 和图 5.8，可以发现卷取机处的带钢运行速度始终跟随 No.4 张力辊处的带钢运行速度的变化而变化。并且卷取机处的带钢运行速度与 No.4 张力辊处的带钢运行速度之间始终有一个差值。此差值是为了保持一定的带钢张力而设定的。要控制卷取区域带钢张力恒定，除了要保证卷取机处的带钢运行速度始终跟随 No.4 张力辊处的带钢运行速度，同时要保证二者之间的差值恒定。

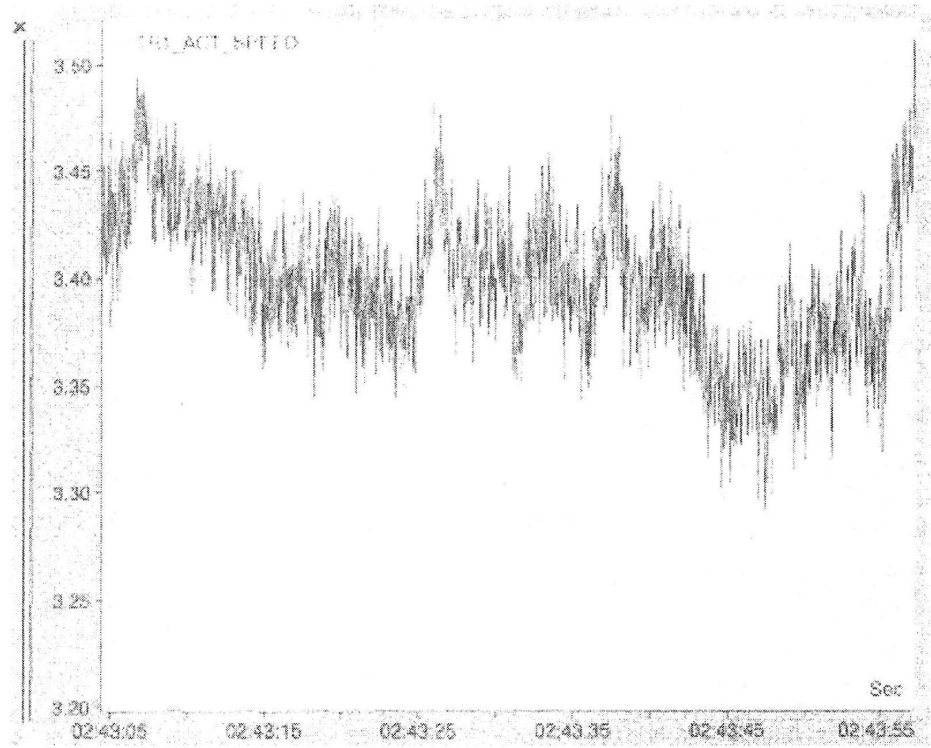


图 5.7 No.1 卷取机处带钢运行速度曲线
Fig.5.7 Strip speed curve at coiler No.1

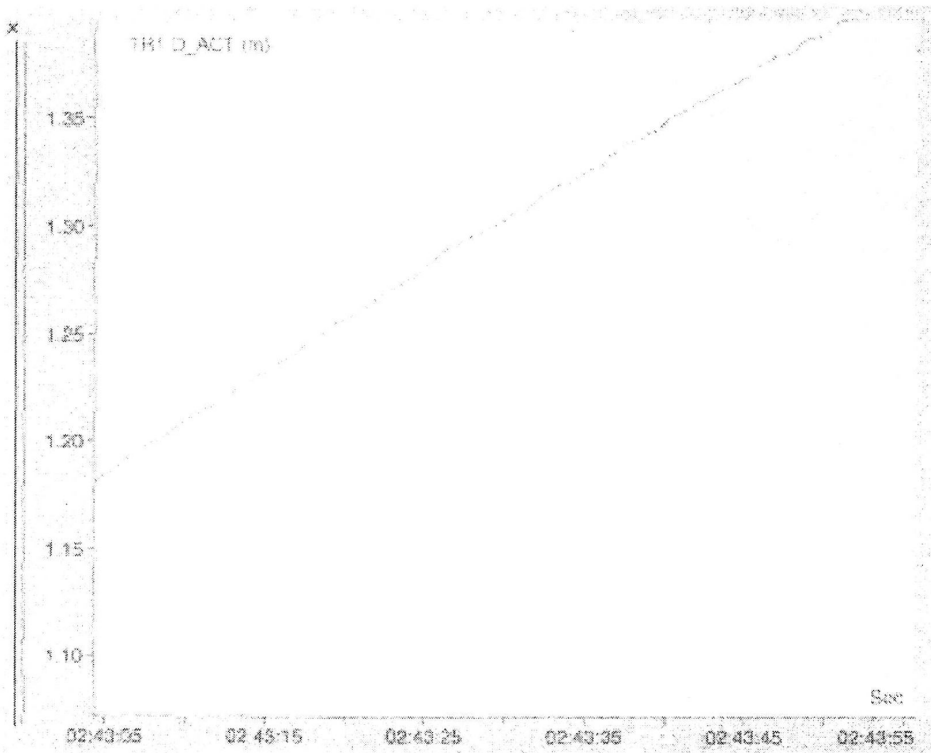


图 5.8 钢卷直径变化曲线
Fig.5.8 Changing curve of coil diameter

比较图 5.6 和图 5.7 可以发现，卷取机处的带钢运行速度波动量比较大。因为卷取机处的带钢运行速度变化的影响因素比较多。除了受系统设定速度变化影响外，还要受钢卷直径变化的影响。

No.1 卷取机上钢卷直径变化曲线如图 5.8 所示。理想情况下，钢卷直径变化斜率应当是一个定值。从图中可见，钢卷直径波动量较小。分析图 5.9 钢卷直径变化曲线放大图，钢卷直径的数值在每个测量周期内变化量是比较稳定的，因为钢卷直径的计算方法是以计数法为基准的，它受外界条件变化的影响较小。钢卷直径的测量周期长短是不断变化的，它与带钢运行速度有关，具体见图 5.10 这也验证了前面研究的钢卷直径的算法是正确的。

分析图 5.11 钢卷直径变化曲线在 02:43:06 与 02:43:07 之间斜率变大，表明计算出的钢卷直径数值偏离了钢卷直径的实际值。主要是因为此时 No.4 张力辊与卷取机之间的速度差发生了变化，造成张力产生了波动。由于钢卷直径算法中考虑了修正值，所以在 02:43:07 后的一段曲线为水平，使钢卷直径数值不会偏离太大，计算出的钢卷直径变化曲线在修正后恢复到原有的斜率

如图 5.12 所示为 No.1 卷取机与 No.4 张力辊速度差变化曲线，由图中可以看出，速度差值在 0.025m/s 左右波动。根据带钢速度差与带钢张力之间的关系，可以计算出卷取张力的大小。如图 5.13 所示，最大张力变化范围为 650N，张力波动控制在 1.58%，张力基本保持恒定。

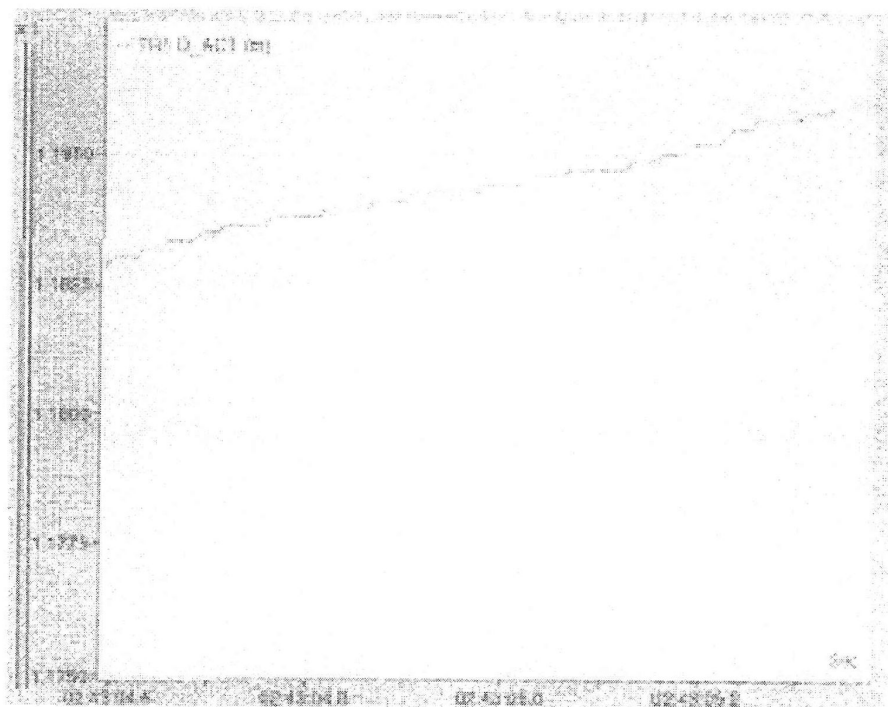


图 5.9 钢卷直径变化曲线局部放大图 1

Fig.5.9 Zoom in changing curve of coil diameter 1



图 5.10 No.4 张力辊处带钢运行速度曲线局部放大图
Fig.5.10 Zoom in Strip speed curve at tension roll No.4

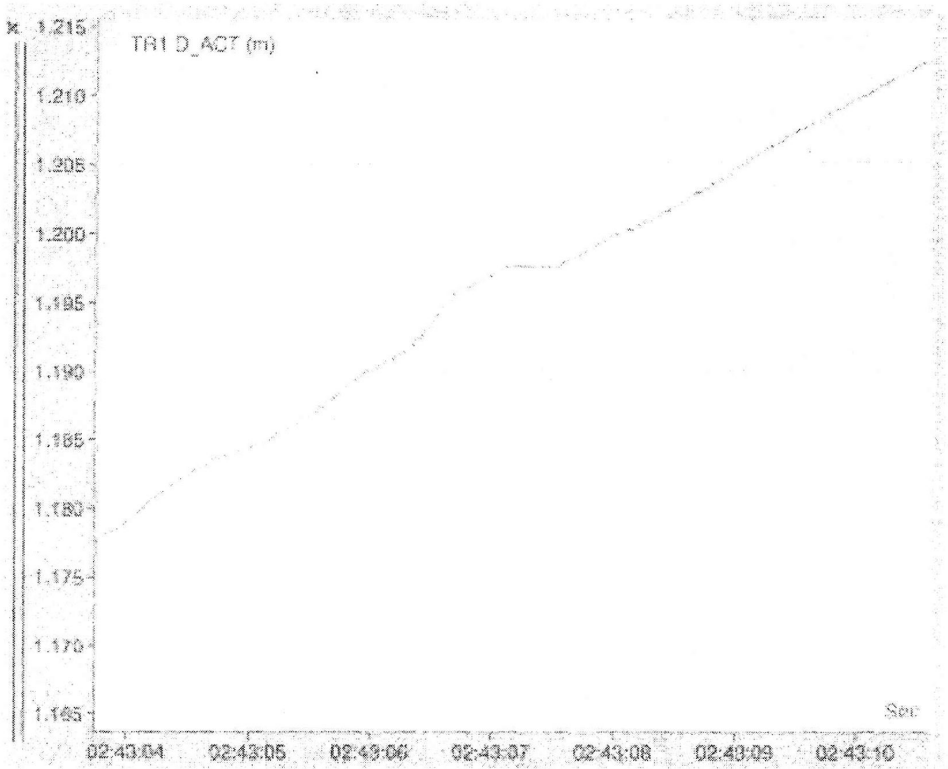


图 5.11 钢卷直径变化曲线局部放大图
Fig.5.11 Zoom in changing curve of coil diameter 2

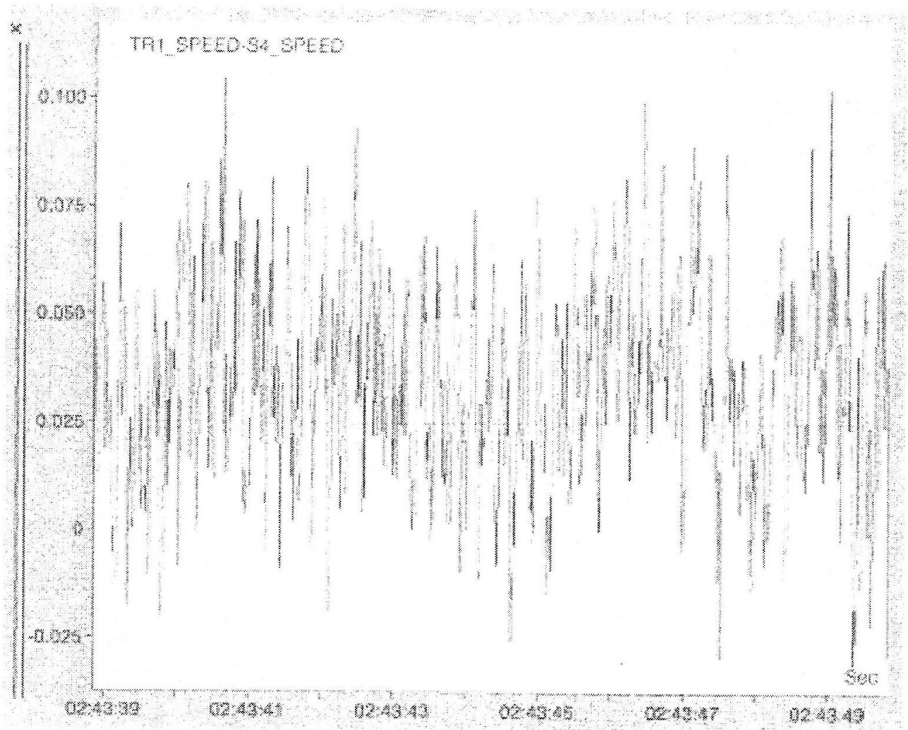


图 5.12 No.1 卷取机与 No.4 张力辊速度差变化曲线
Fig.5.12 Changing curve of speed difference between coiler No.1 and tension roll No.4

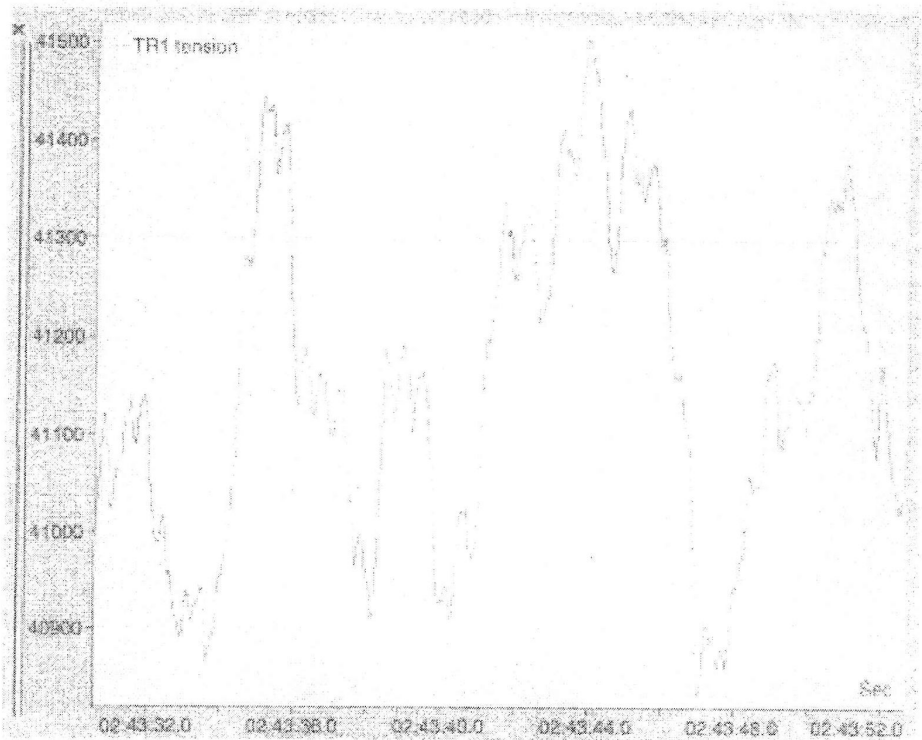


图 5.13 卷取张力变化曲线
Fig.5.13 Changing curve of coiling tension

5.4 本章小结

本章在具体介绍连续酸洗机组控制系统配置的前提下，分析了利用卷取张力的控制效果。着重分析了钢卷直径变化曲线，验证了本文提出的钢卷直径计算方法。卷取机采用间接张力控制方法，保证卷取机与张力辊之间的带钢速度差值恒定，根据速度与张力之间的关系，得出张力变化曲线。根据现场实际情况，张力控制效果良好。

第6章 结论与展望

本文论述了张力控制在现代带钢生产线中的重要作用,讨论了张力的形成过程,并对间接张力控制的原理进行了论述。在此基础上,主要对连续酸洗机组的卷取机张力控制进行系统分析,建立了卷取机张力控制系统的数学模型。主要取得了以下研究成果:

(1)研究了卷绕机构张力产生的机理,分析了带钢运行速度与张力之间的关系。通过改变速度与张力之间传递函数的参数解决生产过程中由于工艺参数的改变而造成的系统模型参数改变的问题。

(2)在研究了带钢张力与速度的关系的基础上,提出了基于恒线速度张力控制的方法。利用惯性力矩补偿减小主机加减速阶段,也就是建张阶段,张力的振荡。卷取机张力控制系统是一个参数时变系统,考虑了系统转动惯量变化造成系统机电时一间常数变化,因此速度调节环节要设计成增益自调节调节器。解决主机稳速阶段,如何克服卷径的变化带来的张力波动问题。

(3)对卷取过程中的惯性加/减速动态力矩和空载力矩的补偿作了比较详尽的分析和研究。动态力矩和空载力矩的补偿减少了系统在加减速动态过程中的张力波动量。

(4)把计数精度高的脉冲编码器用在卷筒卷径的计算上,克服了传统的半径跟随臂测量卷径、位移传感器接触测量卷径等方法的缺陷,保证卷筒卷径实时计算的准确性,提高了张力控制精度。

(5)对卷取机张力控制系统的控制原理进行了仔细分析和研究,获得了卷取间接张力控制系统的 PID 控制算法。在选定间接张力控制方式下,建立了系统的数学模型,并按照工程设计的方法完成了电流环、速度环等各环节的 PID 参数整定工作,使得卷取机可以在调速状态下工作。在间接张力控制下,采用最大力矩方式,提高了系统的性能。实践证明:卷取机间接张力控制算法能够保证系统的张力控制精度,克服在卷取过程中系统参数变化带给系统控制精度和品质的影响。

(6)卷取机张力控制系统中,钢卷瞬时直径是一个很重要的参数,准确的钢卷直径的获取对保持带钢张力恒定是非常重要的,因此本文对钢卷直径计算的算法做了详细的研究。

本文在卷取张力控制系统的研究方面做了一些工作,,但由于实际条件限制,只分析了间接张力控制方法,其本质是通过控制速度来达到控制张力的目的。而直接张力控制是一种反馈控制,它的系统响应快,精度高,没有稳态误差。在表

面处理机组中, 由于带钢厚度不发生变化, 因此间接张力控制方法已经可以满足系统卷取工艺要求。在连轧机组中, 由于带钢厚度在轧制过程中发生变化, 同时带钢卷取张力的大小和稳定程度将影响到带钢轧制效果, 因此在连轧机组中一般有张力检测环节, 采用直接张力控制方法。本文研究的冷轧后部处理线机组速度在表面处理机组中已经属于高速机组, 在这种工况条件下, 带钢张力控制效果好。如果机组速度进一步提高, 间接张力控制是否还能保证较好的控制效果, 是否需要增加张力检测元件, 是一个值得深入研究的问题。

另外, 本课题研究的卷取机张力控制是冷轧带钢生产线中的一部分, 是通过间接张力控制来实现。由于系统的复杂性, 仍有如下问题需要进一步研究。

(1)对卷取机张力控制系统的自增益调度 PID 控制算法的稳定性从理论上未作论证和研究;

(2)对系统进行进一步的深入研究, 建立更适合实际的系统仿真模型, 以便于对整个卷取机系统进行更加精确的分析;

(3)研究自适应模糊控制器、神经网络控制器等新控制方法, 从方法上进一步提高系统的动态性能和静态性能。

(4)研究新的张力检测方法或者手段, 从而提高张力控制系统的控制精度。

(5)由于冷轧带钢生产线全线设备众多, 各个设备的控制方式各不相同, 各个系统之间存在相互联系、相互影响的复杂关系, 所以卷取机张力控制系统并不是独立的控制系统, 它与钢板厚度控制系统、板形控制系统等系统之间存在着一定的联系。在本课题中并没有深入研究这些领域, 因此对张力的各种补偿控制没有进行更详细的研究。

参考文献

1. W. John Edwards, Gary J. Boulton. "The Science of Coil Winding"[J], AISE Steel Technology(America), 2001(11):24-33.
2. 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M], 北京: 机械工业出版社, 1997.
3. 陈振翼, 杨公源, 沈洪勋. 张力控制系统[M], 北京: 纺织工业出版社, 1988.
4. 杨振兴. 恒张力复合控制系统及仿真[J], 中南工业大学学报, 1995, 第 26 卷: 398-401.
5. 李昌禧. 卷绕系统的卷径检测和张力控制[J], 华中理工大学学报, 1996, 第 24 卷: 38-40.
6. 孙一康. 带钢冷连轧计算机控制[M], 北京: 冶金工业出版社, 2002.
7. 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M], 北京: 清华大学出版社, 2002.
8. 赵会平. 韩国东部钢厂新建酸轧线的电气与自动化设备[J], 世界钢铁, 2001 (6): 29-36.
9. 郁有文, 常健. 传感器原理及工程应用[M], 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
10. 聂善峰. 利用全数字传动装置 SSD-590 实现张力控制[J], 有色设备, 1998.
11. 倪忠远. 直流调速系统[M], 机械工业出版社, 1996.
12. 白云峰. 1600 分卷剪切机卷取机张力控制系统[J], 轻金属, 1998 年 8 期: 40-42.
13. 田中捷. 中心卷取张力控制系统的研制[J], 武汉冶金科技大学学报, 1997, 144-148.
14. 张浩. 连续电镀锡机组卷取张力控制分析[J], 有色冶金设计与研究, 1997, 20-24.
15. 孟文博, 孟文涛. 全数字电枢电流控制卷取机恒张力系统[J], 北京科技大学学报, 2000.
16. 何致远. 模糊自整定 PID 在交流收卷张力控制中的应用[J], 浙江工程学院学报, 2000(6): 99-102.
17. 杨自厚主编. 自动控制原理[M], 北京: 冶金工业出版社, 1990.
18. 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M], 北京: 机械工业出版社,

1998.

19. 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真[M], 北京: 国防工业出版社, 2001.
20. 尹征琦, 诸劲. 自适应张力控制[M], 电气传动, 2001 (6): 35-37.
21. 王春香, 付云中, 王永章. 基于神经网络的张力控制系统[M], 中国机械工程, 2001(8): 873-875.
22. 王春香, 王永章, 路华. 精密张力控制系统及其控制精度的研究[J], 仪器仪表学报, 2000 (8): 407-415.
23. 李清泉. 自适应控制系统理论、设计与应用[M], 北京: 科学出版社, 1990.
24. 王春香, 付云中, 王永章. 基于神经网络的张力控制系统[J], 中国机械工程, 2001(8): 873-875.
25. 王春香, 王永章, 路华. 精密张力控制系统及其控制精度的研究[J], 仪器仪表学报, 2000(8): 407-415.
26. 夏超英著. 交直流传动系统的自适应控制[M], 北京: 机械工业出版社, 1998.
27. 贺建军, 喻寿益, 钟掘. 板带钢平整机张力一速度解耦控制[J], 控制与决策, 2003.
28. 肖林, 杨成仁, 刘馄明, 苏逢荃. 带材拉弯矫直过程中张力波动及打滑研究[J], 青岛建筑工程学院学报, 1998.
29. 赵炳利. 连续拉伸弯曲矫直带材的张力研究[M], 一重技术, 1995.
30. 何致远. 开卷张力模糊控制器的局部遗传优化研究[J], 浙江科技学院学报, 2002.
31. 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M], 工业仪表与自动化装置, 1997(5): 50-61.
32. 巴筱云. 自适应控制在卷取张力控制中应用[J], 浙江丝绸工学院学报, 1995(6): 34-37.
33. 王英杰, 李文宁, 籍淑萍. 1700mm 冷轧机开卷机恒张力控制系统分析[M], 轻合金加工技术, 2002.
34. 宁宇. 提高卷取机张力控制精度的实用技术[J], 有色设备, 2000, (2): 11-13.
35. 何晓航. 减少卷取机卷径计算偏差的方法[J], 有色设备, 1998, (3): 1-3.
36. Prabhakar R. Pagilla, Ramamurthy V Dwivedula, Yongliang Zhu, Lokukaluge P.Perera. Periodic Tension Disturbance Attenuation in Web Process Lines Using Active Dancers[J], Journal of Dynamic Systems, 2003.
37. 阎波, 张业. 用卷径检测值分别调节电枢电流和磁通的实现恒张力控制系统[J],

轻合金加工技术, 1995: 13-17.

38. 赵德安, 赵不赟, 刘星桥. 一种基于 PLC 和 Profibus-DP 总线的张力自适应控制系统[J], 信息与控制, 2002(04): 122-126.

39. 李实勇, 王钦若. 模糊控制在薄膜张力控制系统中的研究与应用[J], 电气传动自动化, 2001(10): 33-35.

40. 王春香, 王永章, 贾延林. 精密张力控制系统研制中的几个问题[J], 黑龙江自动化技术与应用, 1999(04): 20-22.

41. Richard C. Benson. Lateral Dynamics of a Moving Web with Geometrical Imperfection[J], Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2002.

42. 张美. 冷轧酸洗线入口活套控制系统[M], 电气开关, 2001.

43. 曹丽华, 唐伟, 曹凯. 鞍钢冷轧厂酸洗连轧联合机组过程自动化系统[M], 冶金自动化, 2002.

44. 李九岭. 带钢连续热镀锌[M], 北京: 冶金工业出版社, 1995.

45. 刘芙蓉, 甘朝辉, 孙宝泰. 中心卷取张力模型的探讨与仿真[J], 系统仿真学报, 2000(05): 233-236.

46. 张建成. 全数字带材加工线张力控制系统[M], 电气传动自动化.1997.

致 谢

本论文的研究工作一直得到了钱老师的悉心指导。钱老师不仅为本论文的研究指出了方向，而且提出了许多方向性的指导意见，使我受益匪浅。在日常的学习和生活中，钱老师也给予了我很多宝贵意见和帮助。导师深厚的基本功、严谨求实的治学态度、孜孜不倦的工作精神及博大精深的知识体系使我受益终身；导师对新知识的浓厚兴趣，敏锐把握，更给我极大的启迪，是我在今后的学习和工作中的榜样。我不仅学到了宽广的专业知识，打下了扎实的基础，而且也学会了很多为人处世的道理。在论文完成之际，谨向尊敬的导师钱晓龙教授致以深深的谢意和最诚挚的祝福。

然后，还要感谢苗贺武、杨佳等同学，在本文的撰写过程中给予我很大帮助和支持，由衷地感谢他们。

同时感谢 3 年学习期间，各位教授、导师的精心培育和爱护，感谢首钢迁钢公司领导为我提供的这次学习深造机会。在今后的工作中，我将秉承“自强不息，知行合一”的东大校训，以更好的工作成绩回报母校，回报首钢。