

冶金系统跨世纪学术技术带头人著作丛书

轧机传动交流调速机电液力控制

李崇坚 段巍 著

冶金工业出版社

序

冶金企业轧机生产线是工业自动化系统中电气自动化设备最先进的生产过程之一,其自动化程度直接决定着产品的品种、质量和生产率,保证了安全生产和节约能源。很多国际和国内的轧机传动都已采用全数字控制的交流调速系统,表现出优越的技术经济性能。但当控制器仍用常规的PI算法时,咬钢和抛钢时的动态抗扰与恢复过程都随负载和参数的变化而改变,鲁棒性不够强,而轧机传动系统的机电共振和扭振引起的事故也屡见不鲜,这些都是进一步提高轧机自动化系统的品质和可靠性所需解决的问题。本书是在工程实践的基础上针对这些问题编写的,书中既提供了分析和研究这些问题的基础理论,又给出了经过实践考验的具体解决办法,是一本在理论和实践上都有重要价值的著作。

冶金自动化研究设计院是我国冶金自动化技术研究与电气设备制造的著名单位,历史悠久,基础雄厚,主持或参与了国内外很多重要冶金企业的工程建设。改革开放以来,经历了技术引进、合作设计、自主研究制造的各段历程。李崇坚博士是该院的杰出人才之一,负责过包钢轨梁轧机、重钢中板轧机、攀钢热连轧机等大容量交交变频调速系统的设计与建设工作,解决了许多有关

的重大技术问题,包括机电振动控制等问题。他在坚实的理论根底和丰富的实践经验基础上,与段巍硕士合作,写出这本著作,出版后,无疑将对我国冶金自动化事业产生良好的作用。书成之后,嘱我作序,遂欣然命笔。

上海大学教授,博士生导师
中国电力电子学会副理事长



2003年8月8日

前 言

现代轧钢工业对产品的质量要求越来越高,从而对轧机主传动系统提出了高精度和高动态性能的技术要求。随着电力电子技术的发展,轧机传动已由先进的交流调速取代了传统的直流调速。交流传动转动惯量小,过载能力大,加速性能好,控制精度高,大大提高了轧机传动的技术性能指标。但在轧制过程中,传动系统存在的机电振动现象,将影响轧制精度和产品质量,甚至会造成轧钢机械组成部件的损坏,危及生产。因此,近几年来,轧机传动机电振动理论及对电振动的抑制成为国际轧机传动领域研究的热点。

轧机传动系统由于轧辊惯性大,电机与轧辊间采用长轴连接,其机械固有频率低,大约为 20 Hz 左右。随着电力电子技术的飞速发展,交流传动系统的响应越来越快,逐步接近机械固有频率,同时多质量弹性体的连接造成电机速度与轧辊速度存在差别,即产生扭振现象。机电振荡和扭振一方面破坏了控制系统的稳定性,另一方面会造成机械传动部件的破坏。此外,轧制负荷扰动造成调速系统的动态速降将影响轧机工艺自动控制及成品质量。我国 20 世纪 80 年代末从国外引进的大型轧机交流传动出现多次机电振荡事故,宝钢引进的 2030 mm 冷连轧机振动现象造成该厂多年不能达产。我国高校、研究所和钢铁厂对轧机振动和传动系统扭振现象进行了深入的理论研究和仿真分析,提出轧机振动的测试理论与方法,建立了较完整的轧机传动机电系统模型和仿真程序,改进了轧机工艺条件和机械设备,解决了轧机振动对轧钢生产的影响。这些研究成果基本上是从轧机传动的机械与工艺条件出发,通过对机械系统的合理设计或者改变系统的参数来减小机电共振现象,很少涉及轧制扰动对电气系统的影响,以及从电气传动自动化系统的角度解决轧机传动机电振动的问题。

从自动控制系统的角度出发,轧机传动系统在轧制扰动时出现的动态速降和机械扭振现象,可以归结为自动控制系统的外扰调节问题。轧制负荷,机械弹性体的扭转振荡,齿轮传动齿隙、联轴器间隙、轧辊偏心等传动部件在运转过程中产生的周期振荡,交流调速系统电流及速度检测的谐波,以及电机转矩脉动等因素都作为外扰模型施加到控制系统中。自动控制系统的任务是在外扰作用条件下,保证系统稳定工作,并减少外扰对控制期望值的影响,增强系统抗扰动的鲁棒性,同时抑制机械扭振。因此,现代的轧机传动交流调速系统除了具有高精度、高动态响应的特性指标、良好的系统稳定性外,还要能够有效地抑制轧机扭振,避免机械固有频率的共振,同时对轧制负荷扰动具有较强的鲁棒性。

近两年,西门子、ABB、东芝等电气公司在交流传动机电振动控制技术上取得了较大突破,已应用于轧机传动。由于轧机传动系统涉及到轧钢机械、电机、自动控制、功率变换器及供电等多个学科,而机电配合产生的振荡现象又涉及到轧制工艺、负荷变化等诸多因素,系统庞大复杂,有关轧机传动机电振动的研究,国内学术界很少有人涉及。作者在国家自然科学基金“国家杰出青年科学基金”的支持下,依托国家“九五”重大技术装备攻关项目,针对国产大型热连轧机主传动交流调速系统的研制,开展交流调速轧机传动机电振荡机理及抑制方法的研究。本书以近几年的科学研究成果为基础,参考和分析国外有关轧机传动机电振动控制研究的论文和资料编著而成,以期推动现代控制理论与方法在轧机传动交流调速机电振动控制中的应用和进一步发展。

本书的写作和出版得到国家自然科学基金委员会“国家杰出青年科学基金”(No. 59625713)资助。

为了使本书在轧机传动机电振动控制理论上保持完整性,本书在轧机传动扭振和机械动力学模型的推导和叙述过程中,引用了沈标正教授级高工对轧机传动扭振,邹家祥、徐乐江对冷连轧机系统振动控制的研究成果。作者在此向他们,同时也向攀枝花钢铁公司、冶金自动化研究院、原冶金部等所有对本研究给予过支持

的人致以谢意。作者还愿借本书出版之机,特别对恩师高景德、李发海先生和张志豪、陈自勉等先生多年来给予的培养和教诲表示深深的感谢。我们还要向 10 多年来对中国轧机传动交流调速技术的研究开发和工程应用,历尽艰辛、不懈努力,做出突出贡献的冶金自动化研究院交流调速工程开发中心的于永革、李向欣、王征、杜伟、何山等全体同仁,致以诚挚的敬意。

由于时间紧迫,书中内容难免存在许多不当之处,作者深感不安和歉意,敬请有关专家和各位读者给予批评指正。

作 者

2003 年 3 月于北京

出版者的话

为了贯彻落实江泽民同志提出的“要造就一批进入世界科技前沿的跨世纪的学术和技术带头人”的战略方针,推动冶金学科发展和冶金工业科技进步,我们组织策划了《冶金系统跨世纪学术技术带头人著作丛书》。这套丛书的组稿对象是冶金系统(黑色、有色)内年龄在 45 周岁以下、具有正高职称的省部级以上的学科和技术带头人。每位作者可以根据自己正在从事或已经从事过的科学研究或技术开发成果,独立或合作撰写一本专著。如果是理论著作,要求在基础研究和基础理论上有一定的创新和突破;如果是工程技术著作,要求其技术处于国内或国际先进水平,或指导实践取得了重大经济效益。丛书总数暂不定,根据作者的实际情况、成书的条件和稿件的质量,计划到 2010 年,每年安排出版几种。

我们编辑出版这套丛书的目的,是希望优秀的跨世纪青年人才脱颖而出,激励他们经过不断的创新与总结,在科技领域确立自己的学术地位和技术地位,促进冶金科学技术的传播和向生产力的转化,推动冶金学术建设的繁荣和健康发展,为国家“百千万人才工程”培养、选拔和输送杰出人才。

欢迎优秀的跨世纪青年专家参加本丛书的著述。

目 录

1 绪论	1
1.1 轧机传动机电振动问题的提出	1
1.2 轧机传动对电气传动系统的要求	5
1.2.1 轧机传动的要求	5
1.2.2 轧制工艺对传动系统技术性能的要求	5
1.3 轧机传动交流调速技术的现状与发展	7
1.3.1 交流电机与直流电机调速的比较	8
1.3.2 同步电机和异步电机调速的比较	11
1.3.3 轧机交流传动方式的比较	14
1.3.4 中国轧机传动交流调速技术的发展	19
1.4 轧机传动机电振动控制技术的发展	23
2 交流传动控制系统的模型	31
2.1 直流电机模型	31
2.2 磁场定向控制同步电机调速系统	33
2.2.1 同步电机的数学模型	33
2.2.2 同步电机磁场定向控制原理	44
2.2.3 同步电机磁场定向控制系统结构	47
2.2.4 磁场定向控制同步电机的传递函数	58
2.3 磁场定向控制异步电机调速系统	59
2.3.1 磁场定向控制异步电机的数学模型	59
2.3.2 异步电机磁场定向控制系统	62
2.3.3 磁场定向控制异步电机的传递函数	67
2.4 电磁转矩调节环	69

3 轧机传动系统的动力学模型	71
3.1 概述.....	71
3.1.1 轧机传动系统的模型.....	71
3.1.2 数学描述与分析的相关准备知识.....	74
3.2 二质量系统的模型.....	80
3.2.1 二质量系统的传递函数.....	80
3.2.2 二质量系统的极点分析.....	83
3.2.3 二质量系统的零点分析.....	84
3.2.4 举例分析.....	85
3.2.5 机械参数的影响.....	89
3.2.6 状态方程.....	90
3.3 多质量系统的模型.....	92
3.3.1 三质量系统的模型.....	92
3.3.2 四质量系统的模型.....	95
3.3.3 多质量系统的模型.....	97
3.4 齿隙的影响	102
3.5 摩擦力的影响	104
4 轧机传动系统的扭振	107
4.1 轧机传动系统的扭振现象	108
4.1.1 扭振动力学参数	108
4.1.2 轧钢过程的扭振现象	110
4.1.3 扭振的测试	116
4.2 轧机传动扭振模型分析	121
4.2.1 咬入过程的扭矩变化规律	122
4.2.2 稳定轧制过程	123
4.2.3 阶跃加载的动态响应	123
4.3 采用滤波器抑制机电振荡	124
4.3.1 滤波器原理	124

4.3.2 滞后滤波法	126
4.3.3 陷波滤波法	128
4.4 陷波滤波器的实际应用	132
4.4.1 交交变频调速系统中的陷波滤波器	132
4.4.2 交流调速全数字控制系统中的陷波滤波器	134
5 轧制扰动对电气传动系统的影响	141
5.1 轧制扰动的动态速降现象	141
5.2 动态速降指标	143
5.3 轧制扰动的电气传动系统模型	149
5.4 控制系统工程最佳设计法	152
5.4.1 工程最佳原理	152
5.4.2 二阶工程最佳	153
5.4.3 三阶工程最佳	155
5.4.4 二阶与三阶工程最佳系统比较	157
5.5 控制系统扰动稳态误差的分析	161
5.6 双闭环控制系统的轧制扰动过程分析	163
6 轧制扰动负荷观测器控制	166
6.1 外扰负荷观测器控制系统	167
6.1.1 带外扰的反馈控制系统	167
6.1.2 外扰负荷观测器控制的基本原理	168
6.1.3 轧机传动外扰负荷观测器控制系统	171
6.2 外扰模型前馈控制(SFC)	177
6.2.1 外扰模型前馈控制的基本原理	177
6.2.2 外扰模型前馈控制系统的传递函数	179
6.2.3 外扰模型前馈控制系统的稳态误差分析	181
6.2.4 SFC的实际应用效果	182
6.3 外扰负荷观测器控制的机电振荡抑制分析	186
6.3.1 负荷观测器控制系统机电振荡分析	186

6.3.2 机电振荡抑制控制系统	187
6.4 共振比控制系统	190
6.5 轧制扰动负荷观测器的实际工程应用	195
6.5.1 工程应用的负荷观测器	195
6.5.2 交交变频调速系统中的负荷观测器	199
7 状态观测器反馈控制	205
7.1 状态观测器反馈控制基础	205
7.1.1 状态反馈控制	205
7.1.2 闭环系统的极点配置	209
7.1.3 状态观测器	209
7.2 轧机传动全维状态观测器控制	212
7.2.1 全维状态观测器	212
7.2.2 轧机传动系统的状态方程	213
7.2.3 全维状态观测器的设计	214
7.2.4 全维观测器的仿真	217
7.3 轧机传动降维状态观测器控制	220
7.3.1 降维状态观测器	220
7.3.2 轧机系统降维状态观测器的设计	223
7.3.3 降维观测器的仿真	227
7.3.4 降维观测器的反馈控制系统	227
7.4 轧机传动复合降维观测器控制	231
7.4.1 复合降维观测器的原理	231
7.4.2 复合降维状态观测器的设计	231
7.4.3 复合降维观测器的仿真	234
7.5 轧机传动状态观测器控制方案的比较	238
7.6 状态观测器在轧机传动工程中的应用	240
8 轧机传动机电振动的现代控制方法	245
8.1 轧机传动系统的卡尔曼滤波应用	246

8.1.1 卡尔曼滤波原理	246
8.1.2 卡尔曼滤波观测器控制系统	249
8.2 轧机传动系统的 H^∞ 控制	256
8.2.1 H^∞ 控制问题	256
8.2.2 H^∞ 状态观测器	259
8.2.3 轧机传动 H^∞ 控制器	261
8.3 轧机传动系统的智能控制	266
8.3.1 智能控制的基本概念	266
8.3.2 神经网络控制	269
8.3.3 人工神经网络的构成	272
8.3.4 人工神经网络的学习	272
8.3.5 神经网络观测器实现方法	275
8.3.6 用于轧机传动系统的神经网络观测器	276
参考文献	280

1 绪 论

1.1 轧机传动机电振动问题的提出

现代钢铁工业向着节约能源、增加品种、提高质量、清洁生产的方向发展。随着市场对薄板、管材需求的增加,轧钢产品对品种质量的要求越来越高,现代轧钢机都安装了板材自动厚度控制(AGC)、自动宽度控制(AWC)以及板形检测与控制等自动化系统。轧机装备水平的提高对传动系统提出了高精度和高动态性能的技术要求。为了适应现代轧钢工业的发展,我国轧机在近期都进行了大规模电气自动化系统的技术更新改造。由于采用了先进的全数字交流调速控制系统,电机转矩增加,控制系统响应速度加快,而轧机大多利用原机械设各,机械与电气配合不好,容易出现传动系统的机电振动现象。在轧钢过程中,轧机传动机电振动将使活套、AGC、板形控制无法正常工作,起不到自动控制的效果,影响产品的质量和正常的轧钢生产,甚至发生断辊、断轴等事故,造成轧钢机械设备的损坏,危及安全生产,是获得高质量、高精度轧钢产品的一大障碍。因此,对大型轧机主传动系统的机电振动问题进行研究,并针对电气传动自动化系统改造的工程实践,提出一些解决轧机传动机电振动问题的方法是一项很有意义的工作。在大型轧机装备中,电气传动系统作为轧机与电气系统的接口,将电能转变为机械能,并具有轧钢生产工艺所需转矩和速度的高精度、高动态控制性能。轧机传动系统涉及到轧钢机械、电机、自动控制以及供电等多个学科,系统庞大;而机电配合产生的机电振动现象,又涉及到轧制工艺、负荷变化等诸多因素。因此,尽管轧机传动机电振动现象普遍存在,但有关轧机主传动机电振动的研究在国内学术界很少有人涉及。

轧钢过程中产生的机电振动现象常常表现为:

(1) 轧机机械固有频率与传动系统电气频率吻合产生机电共振现象。根据对轧机主电机电流振荡引起的轧机传动系统共振现象的实测和研究,发现当具有快速响应的现代轧机电气传动控制系统的某些电气参数和机械设备的固有频率相吻合时,会引起共振,即产生所谓的“拍”现象,对生产和设备将造成严重的影响。某大型热轧板带轧机的减速器齿轮在轧钢过程中发生爆炸性的强烈噪声,经计算发现是由于电气控制系统反馈网络的频率和轧机传动轴的某一自振频率接近,引起机械与电气系统的共振所致。而某工厂一台初轧机的电动机升高片在一年内断裂了数十片,经计算和测试表明,电机的升高片疲劳振动频率和轧机传动机械系统的固有频率相近,也是系统共振引起的电机升高片疲劳断裂。此后改变了电机升高片结构,使其频率远离传动系统的固有频率,改造后运行正常。

(2) 轧制过程中负荷周期性变化产生的振动。轧钢机械或工艺控制常出现轧辊偏心、轧件材质变化、活套控制等,这些都会引起电机负荷周期性变化,产生电流振荡,进而造成轧机传动系统振荡,影响产品质量。

(3) 轧机在承受冲击负荷时产生的扭转振动现象。轧机的主传动系统是一个由若干个惯性元件,包括电机、联轴器、轧辊等连接组成的“质量弹簧系统”。在稳定加载时该系统不会发生振动,连接轴中的转矩变化是静态平稳的。但是在轧制负荷扰动,如咬钢、抛钢、制动、变速等作用条件下,质量弹簧系统会发生不稳定的扭转振动,也称为扭振,这时连接轴上的扭矩就随着扭转角的周期变化而变化。扭矩周期变化的频率就是质量弹簧系统的扭振固有频率,由扭振造成的连接轴上的最大扭矩值比正常轧制时的静态扭矩要大得多,严重时 would 超过连接轴材料的强度,造成轧机设备的破坏,影响生产的正常进行。这种振动与正常的稳态振动不同,它伴随冲击负荷出现,冲击负荷每出现一次,就会激起一次振动,随即衰减消失。

扭振对轧机的破坏非常严重,它将使传动部件产生疲劳损伤,

降低部件的使用寿命。剧烈的振动还会引起部件的突然破坏性断裂,造成很大的经济损失。国内外轧机在生产过程中,因扭振而导致传动部件损坏并影响轧钢正常生产的事故均有发生。

20 世纪 80 年代,我国一些钢铁厂相继由国外引进了交交变频同步电机调速系统,改造轧机原来的直传动。交流调速在过载能力、转动惯量、动态响应、加速性能等方面较直传动有明显的提高,新系统投入运行后在增产、节电、维护等方面取得了显著成效。但投产以后,其轧辊轴系相继发生重大的破坏性事故。上辊中间轴的扁头断裂,轴承座的地脚螺栓被拉断,轴承座上瓦盖全部碎裂。经分析和测试发现,由于轧制过程中发生下辊打滑,全部轧制负荷转移到上辊,对上辊施加了很大的冲击负荷,上辊轴系发生扭振,扭矩放大系数值骤然增高,致使上辊轴系和轴承断裂。此后采取了降低控制系统力矩电流限幅、设置速度反馈滤波环节等措施,减少了交交变频同步电机的输出力矩并软化了机械特性,使轧制过程的负荷冲击影响得以减弱,减小了冲击负荷引起的扭转振动,但也牺牲了交流调速改造带来的大过载能力和高动态响应的优点。

某钢铁公司 2030 mm 带钢冷连轧机是由国外引进的 20 世纪 80 年代先进设备,但投产后,轧辊转速达到 900~1000 r/min 时,轧机发生剧烈振动,并伴有轰鸣声,迫使轧机降速运行,而其设计的最高转速应为 1900 r/min,严重影响冷轧钢板的质量和产量,为此国家组织有关高校、科研院所,配合外国专家进行了长达 5 年的科技攻关,对该轧机的机械、电气、控制系统进行了监测、分析,并加以改进,才使冷轧机的生产能力得到恢复。

某钢铁公司 1450 mm 热连轧主传动交交变频调速系统改造工程,将直传动改造为先进的交交变频同步电机传动系统。为了提高产量和增加品种,加大了电机容量,电机功率由 3500 kW 提高到 5000 kW,加大了 43%,而电机转动惯量由 $21.63 \times 10^4 \text{ Nm}^2$ 减小到 $10.62 \times 10^4 \text{ Nm}^2$,减小了 51%。由于交流同步电机采用了全数字矢量控制系统,动态响应大大加快,电流响应小于 15 ms,速度

响应由原来的 300~500 ms 减小到 100 ms 以内。传动系统性能的提高对热轧板产量和质量提高和改善起到了重要的作用,但也带来了传动系统与旧有轧机之间配合不当而产生机电振荡的难题。

热连轧粗轧机 R_2 的主传动为上、下辊单独传动,上辊带上中间轴后,由于交流电机较原直流电机转动惯量大大减小,中间轴刚度较差,机械固有频率与矢量控制系统输出频率形成谐振,电机无法运行。针对这一现象,在矢量控制系统速度反馈通道中设置了陷波滤波器,使陷波频率等于机械固有频率,有效地消除了机电谐振故障。

热连轧精轧机 $F_1 \sim F_6$ 主传动系统改造后,速度响应大大加快,咬钢时动态恢复时间由 500 ms 减少到 100 ms 以内,但快速灵敏的电气传动系统对负荷扰动的敏感性亦大大提高, F_4 机架由于轧辊偏心而造成负荷周期性变化,引起电流振荡,造成系统速度不稳定,使活套调节困难。而这种负荷周期性变化的频率是随转速等状态变量变化的,无法用陷波滤波器避开。

改造后的热连轧机为了增加品种,轧制薄钢板,需要增加各机架的轧制力和轧制功率,咬钢时电机的冲击负荷达到 2 倍额定。由于交流电机功率大,响应快,原轧机机架和机械传动系统在巨大的咬钢冲击,传动系统强有力的驱动和快速响应作用下,产生强烈的机构刚性振荡,反映到电机控制系统中即出现负荷电流激振,引起过电流跳闸。为了防止电流激振跳闸,只好牺牲速度控制系统的响应,减小放大系数,放慢咬钢恢复时间。采用负荷观测反馈控制后,大大改善了系统抗扰动的特性,传动系统在咬钢后,只一个振荡周期就恢复到原来速度,消除了电流激振,加快了速度降恢复时间,使整个轧机系统机电稳定性大大加强,提高了轧机的轧制能力。加入负荷观测器反馈控制之后,尽管轧辊偏心造成的负荷变化引起电流波动,但对速度没有影响,说明系统对负荷扰动有良好的鲁棒性,大大改善了活套和 AGC 控制,为提高产品质量奠定了基础。

1.2 轧机传动对电气传动系统的要求

1.2.1 轧机传动的要求

电气传动系统作为机械与电气能量的转换环节,应满足生产工艺的需要,同时又要适应电网的要求,实现高效率运行和高水平生产。在选择轧机主传动电机调速系统时应考虑以下因素:

(1) 满足工艺要求。电机调速系统应满足轧制工艺所要求的轧制功率、转矩、转速、调速范围,根据轧制的最大负荷确定传动系统的过载能力,同时要考虑电机是否可逆运转、加速和减速时间、恒转矩和恒功率运行的范围等。

(2) 传动系统的性能指标。作为电气传动系统,应考虑电机调速控制系统的性能指标、速度控制精度、转矩或电流控制的动态响应、速度控制的动态响应等。

(3) 适应电网要求。选择电机调速系统时应考虑电气传动系统中电机和电力电子变换器的能量变换效率、电力电子变换器注入电网的电流谐波和功率因数是否满足电业部门的规定和要求,是否需要增加谐波与无功补偿装置。

(4) 自动化、信息化要求。电气传动系统与轧机自动化系统的硬件与软件接口,其通讯接口应适应自动化网络的开放性、标准化和高性能的要求,同时应考虑电气传动系统状态信息的收集、管理、传递,具有良好的人机界面。

(5) 经济性。电气传动系统的选择应考虑投资少、运行成本低、装备与系统的可靠性以及设备运行的维护和备件供应等经济因素。

1.2.2 轧制工艺对传动系统技术性能的要求

大型轧机按生产工艺要求大致可分为中厚板轧机、型钢轧机、热连轧机、冷连轧机、高速线材轧机、冷轧加工线等几种。

轧制工艺对电机转速和功率范围的要求如图 1-1 所示,对调速性能指标的要求如图 1-2 所示。