

大型轧机载荷工况 在线检测及动态特性分析

史 荣 王海儒 著



科学出版社

大型轧机载荷工况在线检测 及动态特性分析

史 荣 王海儒 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书题材来源于生产实践,以大型轧机生产过程中亟待解决的问题与设备故障为主线,以试验方法及试验结果为主要内容,注重展示“原汁原味”的试验曲线及实测数据。内容力求通俗易懂、结论明确、图文并茂,以最少的篇幅传递最大的信息量。

本书以大型轧制设备为依托,内容涉及测试技术、动力学建模与分析、轧制设备的力能参数计算及动态特性分析等。主要包括:第1章,HH大侧压调宽机执行机构的运动状态及动态特性测试方法、试验结果及易损件的寿命分析;第2章,1580PC轧机辊系交叉机构轴向力测试及零调偏差控制技术研究;第3章,2050CVC轧机生产能力评估及轧辊轴承失效原因试验研究;第4章,1780热连轧卷板生产线R1粗轧机垂扭耦合振动分析及F1、F4精轧机载荷工况试验研究;第5章,大型宽厚板轧机扭矩动态特性试验研究及关键零部件的应力状态分析。通过试验研究,捕捉到轧机轴承座的拍振、主传动系统间隙振动等真实案例,不但为轧制设备维护及轧制工艺参数控制提供依据,同时也为轧机振动理论的研究提供了基础数据。

本书主要面对设备设计人员、生产一线的工程技术人员与操作人员,同时可作为高校相关专业案例式教学的参考教材与阅读资料。

图书在版编目(CIP)数据

大型轧机载荷工况在线检测及动态特性分析/史荣,王海儒著. —北京:科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-045453-9

I. ①大… II. ①史…②王… III. ①大型轧机—载荷工况—动态特性—试验研究 IV. ①TG333.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第190498号

责任编辑:朱晓颖 张丽花 / 责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年11月第一次印刷 印张:15 7/8

字数:390 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着我国产业结构的调整,经济建设与国防工业对高精度、高强度、大断面钢材需求量大大增加,为了满足市场需求,各钢铁企业纷纷更新换代,装备了重载、高速、技术集成度高的大型升级版轧制设备。然而,随着轧机向大型化、高速化方向发展,轧机的故障特征也在“与时俱进”,与轧机动态特性相关的产品质量问题及关键零部件的短寿问题时有发生,成为影响轧机产量与产品质量的主要原因之一。

本书是作者对各类典型现代化轧机力能参数、动态特性试验研究的全面总结,本书题材来源于生产实践,以轧制过程中亟待解决的问题为主线,通过对相关参数的在线检测与分析,结合理论研究,给出了与生产工艺有关的试验曲线、与生产能力有关的统计数据、与运动状态有关的动态特性、与关键零部件动强度有关的使用寿命,并就现场存在的问题进行了分析。本书的研究成果具有较强的实践性与针对性,充分体现了“科学研究的基础是生产,科学研究的基地在现场,科学研究的成果来自实践”的科研理念。

本书是以案例形式构建的一本专著,是理论与实践相结合的产物。其最大特点是突出试验方法与试验数据、突出试验结果。本书对大侧压调宽机的冲击振动、PC 轧机的零调偏差控制、轧机轧辊轴承故障分析及轧机能力评估、大型板带生产线粗轧机的垂扭耦合振动、宽厚板轧机主传动系统关键部件的非正常破坏等具有代表性的问题开展了试验研究与分析探讨。本书所涉及的设备属于现代化大型轧制装备,是目前钢铁生产的主导机型,因此,本书内容具有很强的实用价值。

本书的写作方法力求通俗易懂,避开大量的理论推导,注重试验结果的“原汁原味”,采用最常用的分析计算方法,给出最明确的结论,在有限的篇幅中融合最大的信息量,实现涵盖内容的最大化。

本书主要面对生产一线的工程技术人员,轧制设备设计部门的设计人员、同时也可作为高校教师、本科生、研究生的教学参考书。特别是书中给出了大量的试验曲线与试验数据,资料完整,数据可靠。在试验过程中发现的轧机拍振、间隙振动、扭矩偏载等现象,不但为轧制工艺参数设计提供了参考,也为轧机振动理论的研究提供了案例。这些试验数据对加强相关领域研究生论文的实践性提供了有价值的参考资料,也可作为教师案例式教学的实例。

随着设备故障的复杂化,近年来人们更注重轧制工艺及设备的试验研究工作。但是,轧机载荷工况在线检测与动态特性试验是一项实验工程,要投入大量的人力和物力,成本高、工作量大,特别是大型轧机,设备复杂、工作条件恶劣,组织现场跟踪测试涉及方方面面的工作,具有很大的难度,因此有些试验是不可复制的。为此,作者特著此书,以便

交流试验结果，抛砖引玉，希望对行业的发展有所贡献。

在本书出版之际，要特别感谢宝山钢铁股份有限公司热轧厂、河北钢铁集团承德新新钒钛股份有限公司、首钢总公司秦皇岛首秦金属材料有限公司等相关部门的大力支持，感谢项目合作者的协同攻关与真诚合作。感谢燕山大学机械学院对本书出版的资助。感谢课题组成员及研究生所做的基础性工作。感谢所有支持本书出版与发行的志士同仁，钢铁工业与重型机械行业的振兴与发展是我们共同的心愿。

由于作者水平有限，书中尚存不足之处，诚心希望广大读者批评指正。

作 者
2015 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 侧压调宽机动态特性在线检测与故障分析	1
1.1 SP 侧压调宽机构简介	1
1.2 SP 轧机动态特性试验方法	2
1.2.1 测点选择	2
1.2.2 传感器的选择与安装	3
1.2.3 测试软件的应用	4
1.3 SP 轧机侧压机构运动学仿真	5
1.3.1 机构简化	5
1.3.2 侧压机构的数学模型	6
1.3.3 侧压模块运动规律仿真分析	7
1.4 SP 轧机侧压模块运动状态试验结果分析	8
1.4.1 侧压模块的加速度与速度	8
1.4.2 侧压框架的加速度与速度	9
1.4.3 仿真结果的试验验证	10
1.4.4 两侧侧压机构的相位比较	11
1.4.5 侧压模块加速度信号频谱	12
1.5 SP 轧机侧压过程的金属流动状态数值模拟及冲击力计算	13
1.5.1 侧压冲击力的有限元模拟	13
1.5.2 模拟结果分析	15
1.5.3 基于试验的侧压过程冲击力计算	17
1.6 SP 轧机侧压机构动力学仿真	19
1.6.1 侧压机构动力学模型的建立	19
1.6.2 侧压机构的刚弹耦合动力学分析	20
1.6.3 仿真结果分析	22
1.7 衬板的疲劳寿命分析	27
1.7.1 衬板受力状态试验研究	27
1.7.2 试验方法	28
1.7.3 试验结果分析	29
1.8 衬板疲劳极限测定	32
1.8.1 试验设备	32

1.8.2	衬板试件制备	32
1.8.3	试验结果分析	33
1.8.4	影响衬板寿命的主要因素	34
1.8.5	衬板结构的改进	37
第 2 章	1580 PC 轧机轴向力在线检测及辊系交叉状态分析	38
2.1	PC 轧机辊系交叉机构简介	38
2.2	自适应均载机构工作原理	40
2.2.1	均载机构的力学模型	40
2.2.2	均载机构的移动轨迹仿真	41
2.2.3	工作辊 PC 轮与支承辊耳座的均载特征	42
2.3	PC 轧机辊系交叉状态分析	42
2.3.1	工作辊与支承辊交叉状态解析	43
2.3.2	工作辊之间的交叉状态	45
2.3.3	计算实例	46
2.4	PC 轧机的零调偏差	46
2.4.1	零调静偏差成因	47
2.4.2	轧制力静偏差的有限元模拟	49
2.4.3	辊系动偏差的产生	51
2.5	轧辊轴向力与轧制力动偏差	52
2.5.1	轧辊轴向力计算实例	52
2.5.2	轴向力对轧制力动偏差的影响	53
2.6	交叉头磨损与轧制力偏差	56
2.7	PC 轧机轴向力在线检测	57
2.7.1	轧机基本参数	58
2.7.2	试验目的与试验内容	58
2.7.3	试验原理及试验方法	58
2.7.4	传感器设计	60
2.7.5	轴向力测试系统	63
2.7.6	测试系统的标定	63
2.7.7	相关参数的检测及设备维护	65
2.7.8	试验步骤	66
2.8	PC 轧机零调过程相关参数实测结果分析	66
2.8.1	轧机的零调过程	66
2.8.2	零调过程实测信号的动态特性	68
2.8.3	动态零调过程的轴向力	69
2.8.4	零调过程的辊系交叉状态分析	71

2.9 轴向力与轧制力偏差试验结果分析	72
2.9.1 轧制过程被测信号动态特性	72
2.9.2 PC 角与轧制力偏差实测结果分析	75
2.9.3 PC 角与支承辊轴向力实测结果分析	77
2.9.4 工作辊轴向力实测结果分析	80
2.10 轧制力偏差影响因素的模拟试验	83
2.10.1 模拟试验轧机设计	83
2.10.2 试验目的与方法	84
2.10.3 轴承座侧隙对轧制力偏差的影响	86
2.10.4 辊系交叉状态对轧制力偏差的影响	87
2.10.5 交叉点移动对轧制力偏差的影响	91
2.11 零调偏差控制方法研究	91
2.11.1 传统零调工艺分析	91
2.11.2 辊系两侧刚度差及垂直方向尺寸差控制	92
2.11.3 交叉头间隙的自位补偿	92
2.11.4 自位补偿法的试验验证	96
2.12 PC 轧机主传动系统的扭振分析	97
2.12.1 PC 轧机扭矩实测	97
2.12.2 试验结果分析	99
2.12.3 扭矩放大系数	100
第 3 章 2050 CVC 轧机载荷工况在线检测	102
3.1 轧机基本参数	102
3.2 测试系统组成	103
3.3 生产过程的轧制力跟踪	103
3.3.1 轧制力信号的采集	103
3.3.2 轧制力信号波形	104
3.3.3 轧制力实测结果统计分析	107
3.4 实测轧制力矩	109
3.4.1 扭矩检测原理及扭矩信号的传输	109
3.4.2 重载转子的扭矩标定	110
3.4.3 扭矩信号测点布置	112
3.4.4 扭矩信号实测波形	112
3.4.5 轧制力矩统计分析	115
3.4.6 扭矩放大倍数	119
3.5 实测轧制速度	120
3.6 F4 轧机齿轮分配箱齿轮轴的轴向力	121
3.6.1 单斜齿齿轮轴基本参数	121
3.6.2 斜齿齿轮轴的轴向力	121

3.6.3	轴向力计算结果分析	122
3.7	主传动系统扭振分析	123
3.7.1	扭振力学模型	123
3.7.2	扭振数学模型的建立	124
3.7.3	F1 轧机主传动系统固有频率与主振型	125
3.7.4	F4 主传动系统固有频率与主振型	126
3.7.5	固有频率实测值	127
3.7.6	主传动系统动态响应	129
3.7.7	速度对轧机主传动系统力学特性的影响	131
3.7.8	基于试验结果的含间隙系统动力学特性	132
3.8	CVC 轧机工作辊轴承载荷工况在线检测	133
3.8.1	轴承结构与测试内容	134
3.8.2	轴承径向压力分布试验设计	134
3.8.3	轴承轴向载荷测试方案	134
3.8.4	轴承座内温度测量	135
3.8.5	测试系统组成	135
3.8.6	试验结果分析	136
第 4 章	1780 热连轧卷板生产线主要设备载荷工况在线检测与振动分析	139
4.1	R1 轧机动态特性分析	140
4.1.1	主传动系统扭振分析	141
4.1.2	轧机垂直振动分析	144
4.1.3	垂扭耦合振动分析	148
4.1.4	轧机扭矩在线检测与分析	152
4.1.5	基于试验的 R1 主传动系统扭振分析	159
4.1.6	轧制力在线检测及分析	161
4.1.7	工作辊轴承座振动状态分析	164
4.2	F1 精轧机载荷工况及动态特性	167
4.2.1	轧机结构与基本参数	167
4.2.2	实测扭矩幅值及放大倍数	168
4.2.3	主传动系统扭振分析	172
4.2.4	实测轧制力分析	175
4.2.5	支承辊轴承座振动分析	178
4.3	F7 轧机力能参数检测	182
4.3.1	轧机结构与基本参数	182
4.3.2	轧制力矩及动态特性	183
4.3.3	扭矩放大倍数	185
4.3.4	轧制力分布	188

第 5 章 宽厚板轧机主传动系统力学特性分析及关键零部件应力计算	191
5.1 4300mm 中厚板轧机主传动系统力学特性分析	192
5.1.1 轧机基本结构及基本参数	192
5.1.2 轧机扭矩在线检测	193
5.1.3 测点选择	196
5.1.4 扭矩信号的时域特征	196
5.1.5 扭矩实测结果分析	199
5.1.6 典型产品轧制过程的扭矩实测结果统计	201
5.1.7 主传动链实测扭矩比较	205
5.1.8 轧机主传动系统扭振分析	207
5.1.9 主传动系统关键部位应力检测	215
5.1.10 轧机主传动系统动态特性分析	221
5.1.11 传动系统主要零件应力分析	227
5.2 5m 宽厚板轧机主传动系统扭振分析	229
5.2.1 轧机主传动系统简介	230
5.2.2 主传动系统扭振分析	230
5.2.3 扭矩放大倍数	234
5.2.4 主传动系统动态特性试验研究	235
5.2.5 试验结果分析	236
5.2.6 十字节叉头异常损坏分析	239
参考文献	242

第 1 章 侧压调宽机动态特性在线检测与故障分析

要点：鉴于侧压定宽机特殊的工作原理，通过对其运动状态与动态特性的在线检测，分析了调宽执行机构的运动规律；以试验结果为依据，对侧压机构进行了动力学分析，给出了各运动副的受力状态；分析了板坯定宽过程的金属变形规律；并就生产实践中关注的衬板强度问题进行了试验研究。



在钢铁生产领域，随着连铸连轧技术的迅速发展，板坯在线调宽技术得到了广泛应用^[1,2]。调宽技术作为连铸和连轧的中间环节，在整个轧制生产线上起着重要的作用，从某种意义上说，调宽技术实现了从坯料到产品在宽度尺度上的无缝连接，是实现多规格大批量连续化生产的关键技术。

目前，常用的连铸板坯在线调宽技术主要有大立辊调宽，简称立辊轧机；以及板坯定宽压力机(Sizing Press)，简称 SP 轧机。立辊轧机通过两垂直布置的轧辊对板坯进行宽度方向连续挤压轧制，道次压下量受到限制。而 SP 轧机依靠两侧侧压模块对板坯进行锻打，大大增加了道次压下量，有效提高了定宽效率，可显著减少连铸板坯的宽度规格，实现了连铸机的专业化生产，减少了板坯库存，提高连铸与轧钢的一体化水平。鉴于 SP 轧机大的调宽能力，我国宝钢、鞍钢及迁钢等大型钢铁企业均引进了该设备，对扩大产品规格、增加钢材产量起到了积极作用。

图 1-1 和图 1-2 分别为板坯立辊调宽与侧压调宽示意图及其机械设备。

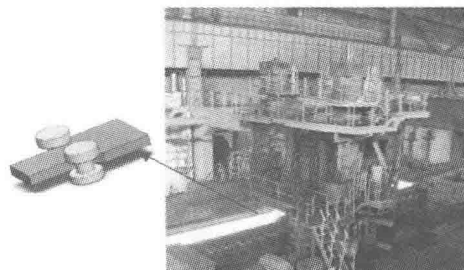


图 1-1 立辊调宽技术

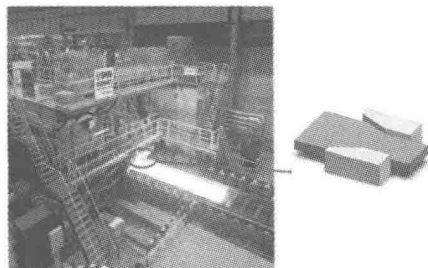


图 1-2 大侧压调宽技术

1.1 SP 侧压调宽机构简介

图 1-3 为 SP 轧机机构工作原理图。与普通的轧制方式不同，SP 轧机依靠定宽执行机构——模块的步进式对向拍击完成板坯的减宽过程。其主要机构包括侧压机构、同步机构、调宽机构三个部分。侧压机构由偏心轴、连杆、侧压模块组成，其主要功能是完成板坯的

侧压。同步机构由同步传动机构、大小偏心和同步框架组成，其主要功能是保证在侧压过程中模块和板坯在轧制方向上的速度一致。通过两机构的复合运动实现其同步减宽。调宽机构采用两台电机传动，经传动系统推动侧压框架的外层框架，调整两侧模块的开口度，确定轧件的宽度。为了确保 SP 轧机的稳定轧制，还配有上下压紧辊及入口与出口夹送辊等辅助设备^[3]。

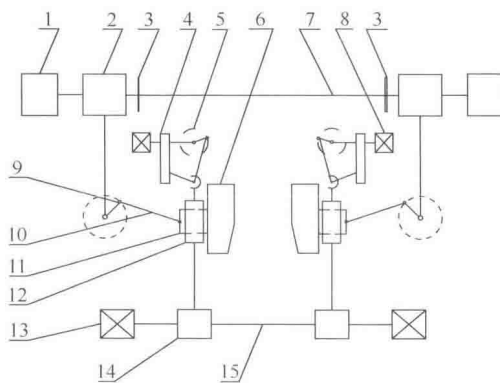


图 1-3 SP 轧机机构简图

- 1-调宽机构电机；2-主传动减速器；3-飞轮；4-增速机；5-大、小同步偏心轴及同步连杆；
6-侧压模块；7-主传动同步轴；8-同步机构电机；9-主偏心轴；10-侧压连杆；
11-侧压框架；12-同步框架；13-调宽机构电机；14-伞齿轮箱；15-调宽机构同步轴

1.2 SP 轧机动态特性试验方法

自第一套侧压调宽机问世以来，对其动态特性的研究十分活跃，许多学者采用解析法或仿真分析法给出了侧压模块运动轨迹、速度、加速度的理论分析结果，对 SP 轧机轧制理论的发展具有一定的指导意义^[4,5]。然而在生产实践中，SP 调宽机长时间工作在大侧压量的高负荷区域，加之工作中的冲击振动，一些部件在达到预期寿命之前出现各种故障，致使生产线停产，造成较大的经济损失。据某企业统计，仅在一年内，由于 SP 轧机故障造成的整条生产线非计划停机的直接经济损失近千万。为此，通过试验研究，深入分析影响产品质量与设备寿命的主要原因，是生产现场急需解决的课题^[6]。

为找出 SP 轧机故障原因，最有效的方法是进行现场实测，从生产实践中发现问题，解决问题。针对 SP 轧机的故障特点，试验研究的主要内容包括侧压模块、同步框架的运动规律与振动状态、衬板的应力及振动等参数的测试。试验在生产条件下进行，试验结果反映了上述机构在工作状态下的运动与动态特性，为 SP 轧机冲击振动的理论分析及关键部件的寿命计算提供基础数据。

1.2.1 测点选择

模块是 SP 轧机侧压过程的执行机构，其运动参数和振动状态与产品质量息息相关，因此，侧压模块运动状态是首选的测试目标，其次是使模块完成同步运动的外部侧压框架。

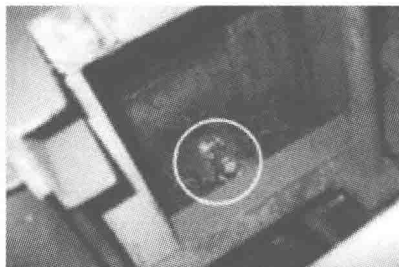
在生产过程中,由于衬板故障频发,在衬板的相关位置设置了反映衬板振动状态及动态应力的测点。

为此,在模块的上表面安装了侧压方向(水平 Y 方向)与重力方向(Z 方向)的振动传感器,在框架上安装了侧压方向(Y)与同步方向(水平 X 方向)的传感器。为了考察衬板的受载状态,在衬板上安装了重力方向的振动传感器,以及检测其应力状态的应变片。

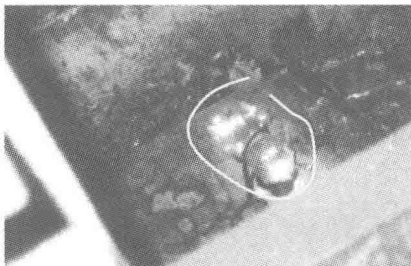
图 1-4 为安装在各测点的振动传感器。



(a) 衬板上安装的 Z 方向传感器



(b) 轴承座上安装的 X 、 Y 方向传感器



(c) 侧压模块上安装的 X 、 Y 方向传感器



(d) 框架上安装的 X 、 Y 方向传感器

图 1-4 振动传感器的安装位置

1.2.2 传感器的选择与安装

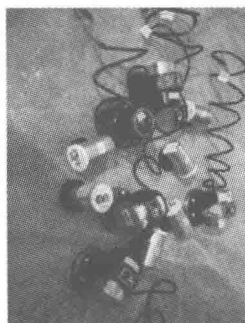
振动传感器主要有压电式、磁电式和电涡流式等。由于 SP 轧机模块运动具有频率低,冲击大,轧件温度高,轧制时在冷却水作用下模块上产生巨大的气团,模块工作条件十分恶劣等特点,因此传感器的选择是现场测试工作成败的关键。通过对传感器的性能比较,选择 891-2 型拾振器作为检测元件。这种传感器属于磁电式传感器,以速度信号为直接检测对象,经微积分变换,可确定模块的位移与加速度。这种传感器采用无源伺服技术,具有动态范围大、低频特性好、输出信号大、抗干扰能力强等优点。

图 1-5 为 891-2 型拾振器的外形及原理,其技术指标见文献[7]。

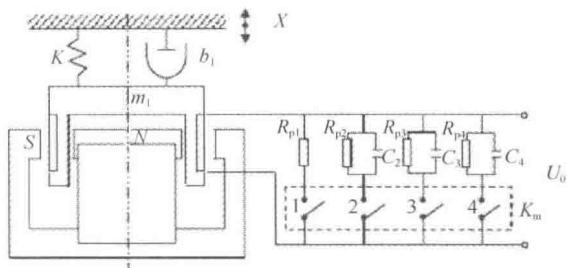
与 891 振动传感器配套的信号调理系统为 891 型放大器,其基本功能包括放大、滤波、阻抗变换等。

为保证安装精度,首先要对 SP 轧机的测点进行清洗与打磨,采用黏结力极强的黏接剂,将传感器牢牢地固定在测点上,严格控制传感器在 X 、 Y 、 Z 方向的安装角度。与传感器配套的引线为具有耐热、防水、抗干扰功能的专用屏蔽线。由于 SP 轧机属于重型设备,891-2

型拾振器的质量与被测运动部件的质量比较, 传感器附加质量的影响微乎其微, 加之采用了高刚度的连接方式, 使得传感器安装引起的误差降为最低。



(a) 传感器外形



(b) 传感器原理

图 1-5 891-2 型拾振器及其工作原理

1.2.3 测试软件的应用

随着计算机技术的发展, 测试技术产生了质的飞跃, 各种虚拟仪器技术及数据处理软件层出不穷, 大大提高了数据处理的工作效率及数据处理结果的正确性。

SP 轧机动态特性试验采用 DASyLab 软件作为测试平台, 开发了适用于振动试验的信号采集控制与信号分析系统, 图 1-6 为该软件的编程面板。

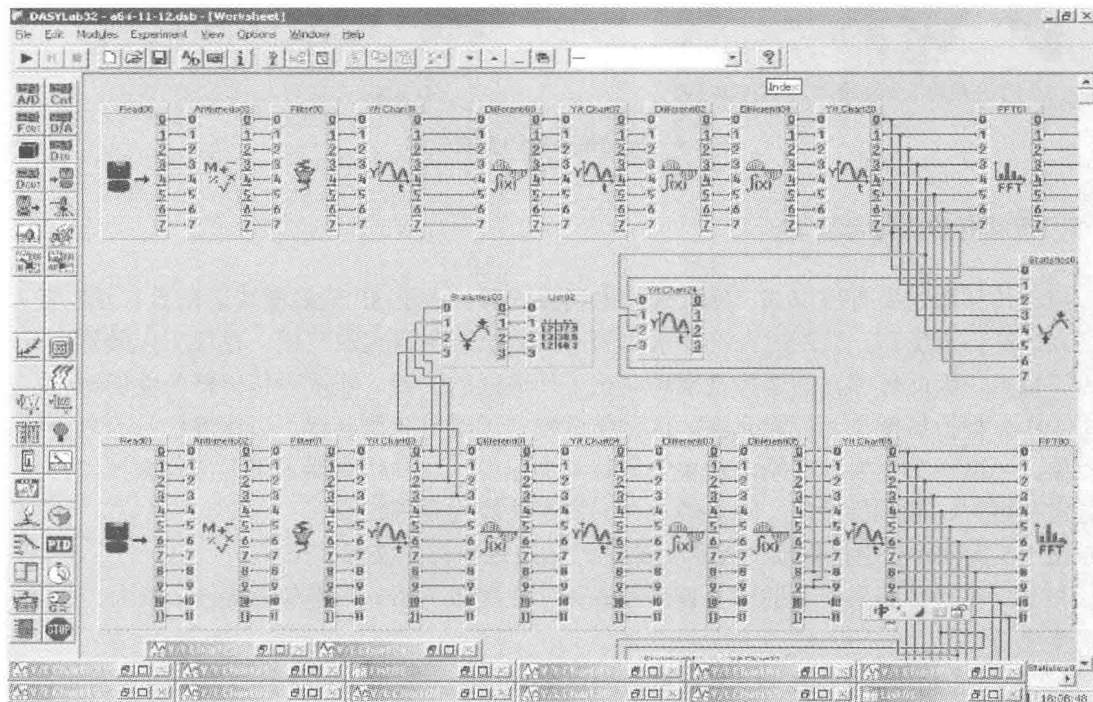


图 1-6 信号分析程序界面

DASYLab 软件属于虚拟仪器技术领域的一种测试软件平台,是能够在 Windows 环境下运行的图形组态式数据实验室系统^[8],其最大特点是:包含许多功能强大的模块,用户只要按照自己的需要,以图标形式调用这些模块,设定好模块参数,并用数据通道连接线将它们恰当地连接起来,就可以形成用户期望的应用程序。DASYLab 在系统具备数据采集硬件设备的条件下,可以直接建立测量、分析和控制等任务。

SP 轧机运动规律与动力学特性试验在生产条件下进行,传感器在高温、高湿度、大冲击等极端恶劣环境下工作,必须做好传感器、连接导线等硬件的保护。同时要做好与调度、生产、机电维护等部门的协调与沟通,保证测试工作的正常进行。

1.3 SP 轧机侧压机构运动学仿真

运动学仿真是研究机构运动规律的有效方法之一。由于 SP 轧机的侧压运动是由两个机构组成的复合运动,具有一定的复杂性,因此首先采用运动学仿真方法对侧压模块的运动状态进行仿真分析,为 SP 轧机的动态特性试验提供参考。

1.3.1 机构简化

SP 轧机侧压机构可简化成具有同步运动和侧压运动的 3 自由度 8 杆机构,简化模型如图 1-7 所示。图中 $GFEQ$ 与 $ABCD$ 分别组成了侧压机构与同步机构的矢量多边形,其中主偏心轴 FG 、连杆 FE 、模块 PE 构成 SP 的侧压机构。小偏心 CD 、大偏心 AB 及连杆 CB 构成了 SP 轧机的同步机构。取侧压主偏心轴的一端 G 点为坐标原点, X 方向为板坯运行方向, Y 方向为模块侧压方向,可建立模块的运动轨迹方程。

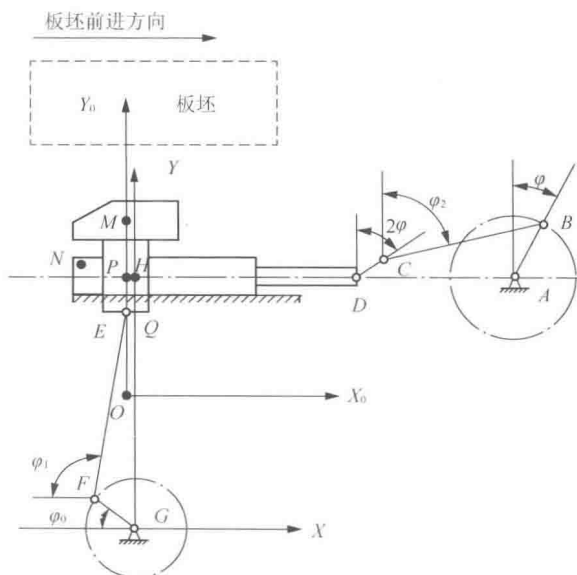


图 1-7 SP 轧机侧压机构简图

1.3.2 侧压机构的数学模型

设 $FG = r_0$, $AB = r_1$, $DC = r_2$, $AH = l_{01}$, $DP = l_{02}$, $EF = l_1$, $BC = l_2$, $DA = S$; FG 、 AB 、 CD 分别以角速度 $\bar{\omega}$ 、 $\bar{\omega}$ 、 $2\bar{\omega}$ 做匀速转动。

对于同步机构 $ABCD$, 其封闭向量方程式为

$$\overrightarrow{DC} + \overrightarrow{CB} = \overrightarrow{DA} + \overrightarrow{AB} \quad (1-1)$$

将式(1-1)投影到 X 轴和 Y 轴上, 得

$$\begin{cases} r_2 \sin 2\varphi + l_2 \sin \varphi_2 = S + r_1 \sin \varphi \\ r_2 \sin 2\varphi + l_2 \cos \varphi_2 = r_1 \cos \varphi \end{cases} \quad (1-2)$$

则

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_1 \cos \varphi - r_2 \cos 2\varphi}{l_2} \quad (1-3)$$

将式(1-3)对时间 t 求一阶导数和二阶导数, 即得连杆 BC 的角速度 $\bar{\omega}_2$ 、角加速度 ε_2 为

$$\bar{\omega}_2 = \frac{\bar{\omega}(r_1 \sin \varphi - 2r_2 \sin 2\varphi)}{l_2 \sin 2\varphi} \quad (1-4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\bar{\omega}^2(r_1 \cos \varphi - 4r_2 \cos 2\varphi) - \bar{\omega}_2^2 l_2 \cos \varphi_2}{l_2 \sin \varphi_2} \quad (1-5)$$

由式(1-2)得

$$S = -r_1 \sin \varphi + r_2 \sin 2\varphi + l_2 \sin \varphi_2 \quad (1-6)$$

因为

$$x = l_{01} - l_{02} - S$$

则

$$x = l_{01} - l_{02} + r_1 \sin \varphi - r_2 \sin 2\varphi - l_2 \sin \varphi_2 \quad (1-7)$$

对于侧压机构 $GFEQ$, 其封闭向量方程式为

$$\overrightarrow{GQ} + \overrightarrow{QE} = \overrightarrow{GF} + \overrightarrow{FE} \quad (1-8)$$

将式(1-8)投影到 X 轴和 Y 轴上, 得

$$\begin{cases} x = -r_0 \cos \varphi_0 - l_1 \cos \varphi_1 \\ y = r_0 \sin \varphi_0 + l_1 \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (1-9)$$

设 $\varphi = 0^\circ$ 时, $x = a$; y 的最小值为 b , 其中 $ME = h$ 。将坐标原点平移到 $O(a, b)$, 建立新的坐标系 X_0OY_0 , 则 $x = x_0 + a$, $y = y_0 + b$ 。因此, M 点的位移为

$$\begin{cases} x_0 + a = -r_0 \cos \varphi_0 - l_1 \cos \varphi_1 \\ y_0 + b + h = r_0 \sin \varphi_0 + l_1 \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (1-10)$$

式(1-7)变为

$$x_0 = l_{01} - l_{02} + r_1 \sin \varphi - r_2 \sin 2\varphi - l_2 \sin \varphi_2 - a \quad (1-11)$$

将式(1-11)对时间 t 求一阶导数和二阶导数即得侧压模块在 x_0 轴方向运动的速度 $\dot{x}_0$ 和加速度 $\ddot{x}_0$ 分别为

$$\dot{x}_0 = \bar{\omega}(r_1 \cos \varphi - 2r_2 \cos 2\varphi) - \bar{\omega}_2 l_2 \cos \varphi_2 \quad (1-12)$$

$$\ddot{x}_0 = -\bar{\omega}^2(r_1 \sin \varphi - 4r_2 \sin 2\varphi) + \bar{\omega}_2^2 l_2 \sin \varphi_2 - \varepsilon_2 l_2 \cos \varphi_2 \quad (1-13)$$

由式(1-10)得

$$\cos \varphi_1 = -\frac{x_0 + a + r_0 \cos \varphi_0}{l_1} \quad (1-14)$$

将式(1-14)对时间 t 求一阶导数和二阶导数即得连杆 EF 的角速度 $\bar{\omega}_1$ 和角加速度 ε_1 为

$$\bar{\omega}_1 = \frac{\dot{x}_0 - \bar{\omega} r_0 \sin \varphi_0}{l_1 \sin \varphi_1} \quad (1-15)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\ddot{x}_0 - \bar{\omega}^2 r_0 \cos \varphi_0 - \bar{\omega}_1^2 l_1 \cos \varphi_1}{l_1 \sin \varphi_1} \quad (1-16)$$

由式(1-10)的第2式得

$$y_0 = r_0 \sin \varphi_0 + l_1 \sin \varphi_1 - b - h \quad (1-17)$$

将式(1-17)对时间求一阶和二阶导数,即得侧压模块在 y_0 轴方向运动的速度 $\dot{y}_0$ 和加速度 $\ddot{y}_0$ 分别为

$$\dot{y}_0 = \bar{\omega} r_0 \cos \varphi_0 + \bar{\omega}_1 l_1 \cos \varphi_1 \quad (1-18)$$

$$\ddot{y}_0 = -\bar{\omega}^2 r_0 \sin \varphi_0 - \bar{\omega}_1^2 l_1 \sin \varphi_1 + \varepsilon_1 l_1 \cos \varphi_1 \quad (1-19)$$

则 SP 轧机运动的数学模型如下。

侧压模块的位移:

$$\begin{cases} x_0 = l_{01} - l_{02} + r_1 \sin \varphi - r_2 \sin 2\varphi - l_2 \sin \varphi_2 - a \\ y_0 = r_0 \sin \varphi_0 + l_1 \sin \varphi_1 - b - h \end{cases} \quad (1-20)$$

侧压模块的速度:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = \bar{\omega}(r_1 \cos \varphi - 2r_2 \cos 2\varphi) - \bar{\omega}_2 l_2 \cos \varphi_2 \\ \dot{y}_0 = \bar{\omega} r_0 \cos \varphi_0 + \bar{\omega}_1 l_1 \cos \varphi_1 \end{cases} \quad (1-21)$$

侧压模块的加速度:

$$\begin{cases} \ddot{x}_0 = -\bar{\omega}^2(r_1 \sin \varphi - 4r_2 \sin 2\varphi) + \bar{\omega}_2^2 l_2 \sin \varphi_2 - \varepsilon_2 l_2 \cos \varphi_2 \\ \ddot{y}_0 = -\bar{\omega}^2 r_0 \sin \varphi_0 - \bar{\omega}_1^2 l_1 \sin \varphi_1 + \varepsilon_1 l_1 \cos \varphi_1 \end{cases} \quad (1-22)$$

采用 Matlab 软件中的数值计算模块,将已知参数代入方程,即可确定侧压模块的运动规律。本算例针对某企业的 1580SP 侧压调宽机,其相关参数如表 1-1 所示。

表 1-1 方程的计算参数

杆长/mm	FG	FE	PE	DP	CD	BC	AB	PH
	100.0	216.0	3700.0	2300.0	14.21	1651.84	92.08	50.0
夹角/(°)	φ_0	φ_1	φ_2	φ	角速度/(°/s)		$\bar{\omega}$	
	60	120	88	5				
								298.8

1.3.3 侧压模块运动规律仿真分析

代入各个杆的长度和机构的初始角,求得侧压模块位移、速度、加速度的变化规律,如图 1-8 所示。其中(a)为侧压模块 X 、 Y 方向的位移曲线;(b)为侧压模块的运动轨迹,它