

浙江大学机械工程学系

---

硕士学位论文

---

炼钢转炉实时状态监测系统研究与开发

---

姓名：沈国振

---

申请学位级别：硕士

---

专业：机械制造及其自动化

---

指导教师：李培玉

---

20100309

## 摘 要

钢铁在国民经济发展中有着不可替代的作用，转炉炼钢作为当今炼钢工业的主要炼钢方法，约占世界钢铁产量的 60%和中国的 80%，因此炼钢转炉状态监测对及时发现故障隐患，保证炼钢生产顺利进行、降低设备维护成本、提高产品质量具有重要的现实意义。本课题以国内大型钢铁企业“炼钢转炉实时状态监测”为研究对象，在充分调研转炉设备构造及炼钢工艺特点的基础上，分析转炉炼钢过程中设备的工作特性、故障类型与特点，结合钢铁企业实际需求，提出了一套基于多传感器状态信号转换、数据采集、状态分析判断与显示的综合性炼钢转炉实时状态监测系统实现方案，并完成了系统的具体设计与实现。

对炼钢工艺过程中设备的力学传递关系及扭振现象产生机理进行研究，利用应变检测法监测转炉耳轴及扭力杆动态力矩特性，并对相关监测原理及测量电路设计进行阐述。

根据转炉状态监测的特点，结合炼钢现场实际情况，完成监测系统总体框架设计，并详细阐述系统硬件组成、数据采集设备选型、状态信号采集与传感模块设计、以及系统信号连接关系。

结合钢铁企业实际需求，分析系统监测软件运行平台选择及功能需求，提出采用多线程和模块化方法进行系统软件总体设计的思路；阐述动态链接库、多线程技术和数据存储与管理技术在监测软件开发中的具体应用；重点描述开发过程中软件模块的划分和相互关系，并详述各个模块的具体实现及技术要点；

基于以上研究成果，开发了炼钢转炉实时状态监测系统，并在首钢迁钢转炉炼钢现场进行了测试；结果表明，系统运行良好，监测数据准确可靠，满足了企业对炼钢转炉状态监测需求。

**关键词：**转炉；状态监测；数据采集；状态显示；软件开发

## Abstract

Iron and Steel plays an irreplaceable role in national economic development. Converter steelmaking, as the major steel-making method of the current steel industry, approximately accounts for 60% of the world's steel output and 80% of China's. Therefore, condition monitoring of the steel-making converter has important practical significance in many aspects, such as timely discover hidden failures, ensure the smooth progress of steel production, reduce maintenance costs, and improve product quality. This subject took "Real-time condition monitoring of converter steel-making" from the domestic large-scale iron and steel enterprises as research object. On the basis of full investigation and study of construction and steel making process characteristics of the converter equipment, analyzed device operating characteristics, fault types and features of the converter steelmaking process. Combined with the actual demands for iron and steel enterprises, an integrated real-time condition monitoring system of steelmaking converter implementation program based on multi-sensor signal conversion, data acquisition, state analysis, state determine and display was proposed, and the system specific design and implementation was completed.

The device mechanical transmission relationships and the mechanism of torsional oscillation phenomenon in the steel-making process was studied, using strain detecting method to monitor the dynamic torque characteristic of the converter trunnion and torsion bar, expounded the relevant monitoring theory and measurement circuit design.

According to the characteristics of converter condition monitoring, combined with the actual situation of steelmaking field, the overall framework design of the monitoring system was accomplished, and the system hardware component, data collection equipment selection, status signal acquisition and sensor module design, and the system signal connection relationship were expounded in detail.

Combined with actual needs of the steel enterprises, analyzed software operating platform selection and functional requirements of the monitoring system, the idea of the overall system software design was proposed, using multi-threaded and modular design methods. The specific application in the monitoring system software development of dynamic link library(DLL), multi-threading technology, data storage and management technology was represented. Described the division of software modules and the relationships between them in the development process, and detailed the specific implementation and technical points of each module.

Based on the research above, a real-time condition monitoring system of steel-making converter was developed, and it was tested in Shougang Qiangang converter steelmaking site, the results show that the system was running well, monitoring data was accurate and reliable, could meet the converter condition monitoring needs of the steel enterprises.

**Keywords:** converter; condition monitoring; data acquisition; status display; software development

## 浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。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：沈国振      签字日期：2010年3月18日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 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和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：沈国振

导师签名：李培江

签字日期：2010年3月18日

签字日期：2010年3月18日

## 致 谢

光阴似箭，转眼间两年半的研究生学习生活即将接近尾声；回首在浙江大学的求学之路，点点滴滴，都让我永远铭记于心。饮水思源，借此良机，谨向所有关心和支持过我的良师益友和亲人们致以最衷心的感谢。

首先感谢我的导师李培玉副教授的谆谆教诲和悉心指导，自我攻读硕士学位开始，李老师就始终关心我的成长，在学习中给予我孜孜不倦的教诲，在生活上给予我亲切的关怀。李老师渊博的学术知识、丰富的实践经验、独特的思维方式、求实的治学态度，坦诚的待人之道，都在我的研究生学习生涯中激励着我，并对我的人生观和世界观产生了深远的影响。在此谨向尊敬的导师致以深深的谢意，并送去学生最诚挚的祝福。

同样感谢我们振动实验室的何闻教授和魏燕定教授在学习和科研过程中给予我的指导。您们知识渊博、工作孜孜不倦，是我们年轻人学习的榜样。

感谢曾在实验室及导师公司一起奋斗过的同志们，和你们一起愉快地渡过了两年半快乐的学习和科研时光，你们在生活上和课题研究中给了我许多无私的帮助和有益的指导，让我在学习中少走弯路并勇敢地克服遇到的困难，并祝愿你们在以后的人生道路上，前程似锦，一帆风顺。尤其是感谢谭大鹏博士，江俊博士生，陈尚俭硕士，郑俊硕士，徐立硕士，林博宇硕士，在项目研究和论文写作过程给予我的悉心指导和帮助，和你们一起学习和工作给了我很大的快乐。感谢甘涛硕士生，王亮硕士生，王部军硕士生，王团结硕士生，郝明金硕士生，你们也给了我很大的鼓励和支持，谢谢你们。

感谢我的室友汤旅军博士生、张旭光硕士生、张宗常硕士生，与你们共同生活的岁月给我带来了极大的快乐，永远难忘和你们一起至诚相处的美好时光和结下的真挚友情，并祝愿你们在以后的人生路上，前程似锦！

最后我要深深地感谢我敬爱的母亲和远在天堂的父亲，你们始终如一的支持和无私的关怀伴随着我走过了这么多年的求学之路，我的每一点成绩都是与你们无私的关爱和支持分不开的，因此谨向我含辛茹苦的父母致以最崇高的敬意！

在这里向上述提及的和没有提及的关心我的师长、亲人和朋友们表示最衷心的感谢，并致以最崇高的敬意。

沈国振

二零一零年一月于求是园

# 1 绪论

## 1.1 引言

钢铁是应用最广泛的一种金属材料，工业、农业、交通运输、建筑以及国防等部门都离不开它，钢铁生产对国民经济的发展有着极其重要的作用。近年来，随着冶金技术的发展和相关学科的进步，中国钢铁工业的生产技术和生产工艺发生了深刻的变化，通过技术引进和对引进技术的消化，使中国钢铁企业自动化、信息化水平基本接近世界先进水平，钢铁产量迅速增长，截止到 2008 年，粗钢产量已经达到 5.02 亿吨，占全球总产量的 37.8%，超过日本、美国、俄罗斯、印度、韩国、德国、乌克兰、巴西、意大利等世界前 10 钢铁生产国中 9 国的总和<sup>[1]</sup>。

转炉炼钢是当今世界上最主要的炼钢方法，目前全世界约有 60%、中国约有 80%的钢是由转炉冶炼的。尤其是近十年中，转炉炼钢规模迅速扩大，产量不断增长，以转炉为中心的高炉-铁水预处理-转炉顶底复合吹炼-炉外精炼-连铸连轧工艺，经过优化组合、结构调整，已经成为现代大型钢铁厂普遍采用、具有钢铁产品制造、能源转换、社会部分大宗废弃物的处理和消纳功能的模式。

随着工业和科学技术的发展，对钢材质量和性能提出了更高的要求。迫使人们开发和冶炼更多品种和高质量的钢材，从而推动了炼钢技术的不断发展。转炉冶炼采用铁水预处理、炉外精炼工艺后，出钢质量大大提高，转炉炼钢品种也不断增加，不仅能够冶炼普通钢种，而且也能冶炼高级优质钢种及包括不锈钢在内的特种钢，可以说转炉几乎可以冶炼所有钢种<sup>[2]</sup>。

鉴于转炉在钢铁生产和冶炼中的重要地位，对炼钢转炉状态的监测就显得尤为重要，炼钢转炉状态实时监测系统实现了对转炉设备全方位在线实时监控，及时发现故障隐患，对保证炼钢生产的顺利进行、降低设备维护成本、提高产品质量具有重要的现实意义。

## 1.2 论文研究背景

### 1.2.1 状态监测与故障诊断技术

设备状态监测和故障诊断技术（简称故障诊断技术）是现代科学技术与生产高度发展的产物。故障诊断技术是利用设备在运行过程中的温度、压力、振动、噪声等特征状态信息，通过对实测物理信号的分析 and 处理，结合诊断对象的设计标准和历史状态来量化识别设备及其部件的工作状态和故障征兆，进而判断特定设备的故障类型或工作状态的一种新兴的综合性多学科技术。其最终目的是防患于未然，早期诊断，及时分析故障形成原因并

进行相应的维护，以提高设备的安全性、运行效率及可靠性<sup>[3]</sup>，如图 1.1 为故障诊断系统应用逻辑结构。

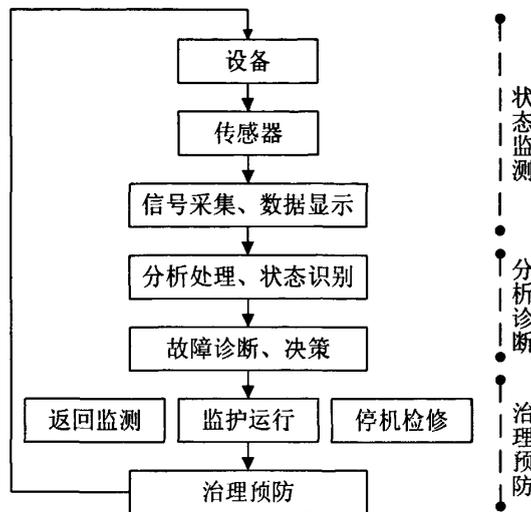


图 1.1 设备状态监测与故障诊断系统应用逻辑结构

状态监测与故障诊断技术是大型机械设备安全可靠运行的关键技术之一，是进行预知性维修和管理的基础。它对工业企业的作用和意义，主要可以归纳为以下几方面<sup>[4][5]</sup>：

(1) 及时、正确的掌握设备运行的各种异常状态或故障早期征兆，以便采取相应的处理措施，预防或消除故障，提高设备运行的可靠性、安全性和有效性，以求将设备故障损失降低到最低水平。

(2) 一旦发生故障，可记录下故障过程中的历史数据和信息，便于事后进行故障原因分析，减小维修时间，提高维修质量，节约维修费用，保障设备的利用率，避免同类事故的再次发生。

(3) 通过对设备运行状态异常的原因和性质进行分析，制定合理的检测维修制度，充分挖掘机械潜力，延长设备服役期限和使用寿命，降低其全寿命周期费用。

(4) 通过对设备的状态监测、故障分析、性能评估等，为设备结构调整、优化设计、合理制造及生产过程提供大量有用的数据和信息。

故障诊断技术是一门综合性的、多学科交叉的实用性技术，它的发展已有近 50 年的历史。随着现代科学技术的进步和发展，对设备的安全、稳定、长周期、满负荷运行的要求越来越迫切，希望能及时了解设备运行状态、预防故障、延长运行周期、最大限度地发挥其生产潜力<sup>[6]</sup>。状态监测与故障诊断技术就是为了解决这个问题而逐渐发展起来的，它具有很强的工程应用背景，它以系统论、信息论、控制论、可靠性理论、失效理论为理论

基础,以现代测试仪器和计算机为技术手段,综合具体诊断对象(系统、工艺设备和装置、工艺过程等)的特殊规律逐步形成的具有广泛应用前景的新技术<sup>[7]</sup>。

故障诊断技术最早是在 20 世纪六十年代初期,由于核电、宇航、航空的需要而发展起来的,以后逐步推广到冶金、石化、发电、船舶等部门中去。1961 年设备诊断技术应用于阿波罗计划;七十年代初形成于英国,并且在航空、核工业及军事部门等方面占有领先地位;日本则在某些民用工业,如钢铁、化工、铁路等部门发展较快,占有某种优势<sup>[8][9]</sup>。我国设备诊断技术的研究工作起源于 20 世纪七十年代,国内一些院校和科研单位结合教学和有关设备诊断技术的研究课题,逐渐开始进行机械设备状态监测与故障诊断技术的理论研究工作和小范围的应用研究。从 1979 年开始,一些工厂企业也开始研究美、日、英等国的设备维修体制,从中感受到状态监测和诊断维修的重要意义,并逐步进入研究和实践的阶段<sup>[10]</sup>。由于其实用性以及为社会和企业带来的巨大经济效益,日益受到企业和政府主管部门的重视。1983 年 1 月,中国国家经委下达的“国营工业交通设备管理试行条例”,就明确的提出“要根据生产需要,逐步采用现代故障诊断和状态监测技术,发展以状态监测为基础的预防维修体制”<sup>[11]</sup>。从而正式把设备诊断技术工作列入企业管理法规,并指出设备诊断技术要为维修体制改革服务这一方向,这极大地促进了设备诊断技术的发展。特别是近年来,随着科学技术的不断发展,尤其是计算机和传感器技术的发展,信号分析手段的不断增多与完善,设备诊断技术已逐渐形成一门较为完整的新兴边缘性综合工程学科。过去难以解决的信号分析或状态识别问题,由于高速、大容量的计算机的出现,特别是分布、并行处理技术的发展,而变得简单。当今故障诊断技术的发展趋势是传感器的精密化、多维化,诊断理论、诊断模型的多元化,诊断技术的自动化、智能化<sup>[12]</sup>。

### 1.2.2 转炉炼钢技术概述

钢铁在国民经济中具有非常重要的作用,一个国家的经济实力在某种程度上是由它的钢铁产量来决定的。人类对钢铁的冶炼手段在不断的发展和完善,从由矿石直接还原铁到吹氧法强化炼钢过程,到后来重熔法的出现和发展以及二次冶金的出现与发展,都充分的说明了钢在生产生活中的重要地位<sup>[13][14]</sup>。

自从上世纪中叶氧气顶吹转炉问世以来,转炉的生产规模不断扩大,设备和自动控制水平不断得到发展和提高,并在世界范围内获得广泛应用。转炉炼钢技术在当今的炼钢工业中占有主导地位,占世界钢铁总产量的 70%左右<sup>[15]</sup>。氧气顶吹转炉炼钢法的优点是炉内反应速度快,冶炼时间短,具有很高的生产效率,可冶炼钢的品种多,质量好,原材料选用性强,耐火材料消耗低,投资省、建设速度快,因此也是当今世界上效率最高的炼钢

方法。氧气顶吹转炉可冶炼平炉的所有钢种和电炉的部分钢种，同时氧气顶吹转炉不仅能吹炼平炉炼钢生铁，而且能吹炼中磷和高磷生铁<sup>[16][17]</sup>。

转炉炼钢的基本原料包括：铁水、废钢、铁合金、造渣料、熔剂、冷却剂、氧气、氮气、氩气、二氧化碳等。炼钢过程中通过造渣原料和氧气的共同作用达到去除铁水中的杂质的目的，从而冶炼出合格的钢材<sup>[18]</sup>。这一过程中伴随着激烈而复杂的物理化学反应，而转炉内的成分也不断发生着变化，整个转炉冶炼工艺流程如图 1.2。

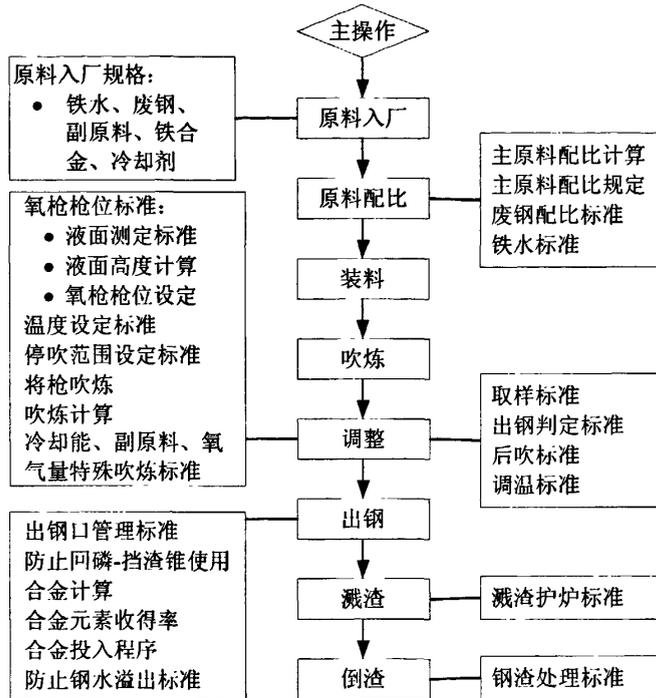


图 1.2 转炉冶炼工艺流程图

冶炼过程中根据钢水成分变化，通常把冶炼过程分为三个阶段<sup>[19][20][21]</sup>。

(1) 吹炼前期 吹炼初期由于铁水温度低，Si、Mn 的氧化速度比 C 快，开吹 2-4 分钟时，Si、Mn 已基本被氧化。同时，铁水也部分被氧化形成 FeO 进入渣中，石灰石逐渐溶解，使 P 也被氧化进入炉渣中。Si、Mn、P、Fe 的氧化放出大量热，使熔炉迅速升温。吹炼初期炉口出现黄褐色的烟尘，烟尘燃烧生成火焰，这是因为带出的铁尘和小铁珠在空气中燃烧而形成的。开吹时，由于渣料乳化形成而噪声变得柔和。吹炼前期的任务是化好渣、早化渣，以利磷和硫的去除；同时也要注意造渣，以减少炉渣对炉衬材料的侵蚀。

(2) 吹炼中期 铁水中的 Si、Mn 氧化后，熔池的温度升高，炉渣也基本化好，C 的氧化速度加快。此时从炉口冒出的浓烟急剧增多，火焰变大，亮度也提高；同时炉渣起泡，炉口有小渣块溅出，这标志着反应进入吹炼中期。吹炼中期是碳氧反应剧烈时期，此间供

熔池中的氧气几乎 100% 和碳反应, 使脱碳速度达到最大。由于碳氧剧烈反应, 使炉温持续升高, 渣中 FeO 的含量降低, 磷和锰在渣-金间分配发生变化, 产生回磷回锰现象。但此间由于高温、低 FeO、高 CaO 的存在, 使脱硫反应得以大规模进行。同时, 由于熔池温度升高使废钢大量熔化。吹炼中期的任务是脱碳和去硫, 因此应控制好供氧和底气搅拌, 防止炉渣反干和喷溅的发生。

(3) 吹炼后期 吹炼后期, 铁水中碳含量低, 脱碳速度减缓, 从炉口排出的火焰逐渐收缩, 透明度增加。这时吹入熔池中的氧气使铁水部分氧化, 使渣中 FeO 和钢水中 O 含量增加。同时, 温度达到出钢要求, 钢水中磷、硫去除完毕。吹炼后期要做好终点控制, 保证温度和 C、P、S 含量符合出钢要求。

转炉炼钢是一个复杂的高温物理化学反应过程<sup>[22]</sup>, 期间涉及气体、液体、固体在钢液、炉渣和炉气三相间的流动、传热、传质、熔化、溶解和高温化学反应等复杂过程。转炉炼钢的目的就是将含有较多杂质的铁水与吹入的氧气发生反应, 达到去除杂质的目的, 从而获得要求的钢水成分和温度。

### 1.2.3 转炉构造与状态监测

基于转炉炼钢技术的重要地位及状态监测与故障诊断技术对现代工业大型机械设备正常运行所能起到积极作用与意义, 有必要将故障诊断技术引入到转炉炼钢设备状态监测与设备维护中来, 提高转炉炼钢的可靠性、安全性与生产率。

转炉设备构造主要包括炉壳、托圈、耳轴及倾动机构<sup>[23][24]</sup>, 如图 1.3:

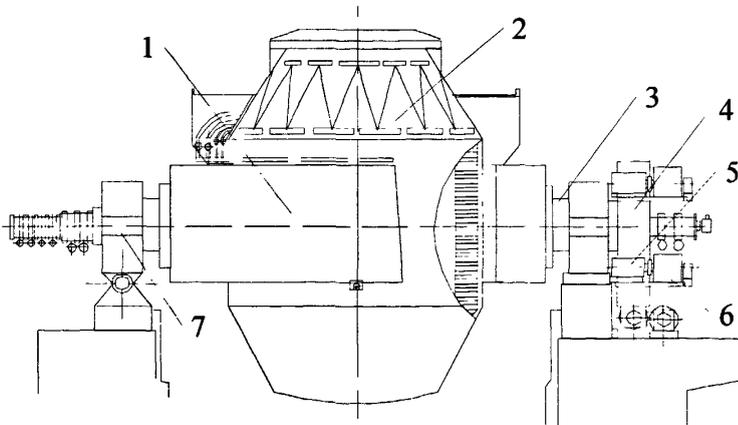
(1) 炉壳: 由炉帽、炉身及球形炉底三部分组成, 炉帽由炉口法兰、截圆锥形炉帽、出钢口组成。为与托圈连接, 出钢时为使炉内钢水流尽, 并减少炉内钢渣流入大包, 出钢口设置在炉身与炉帽耐火衬交界处, 炉身是炉壳的中间部分, 呈圆筒状, 它是炉体的主要承载部分, 炉体的全部重量(包括钢水、炉衬、炉壳及附件重量)都通过炉身和托圈的连接装置传递到支撑系统上。炉底采用倒截圆锥形和球形焊接, 为较少弯曲应力, 在倒截圆锥和球形的过渡处采用圆弧连接。各部分用钢板成型后再焊接成整体。钢板厚度主要取决于炉子容量, 炉壳的损坏主要是产生裂纹和变形。因此, 要求炉壳材质有良好的焊接性能和抗蠕变性能。为防止炉帽变形, 近年来广泛采用水冷炉口。

(2) 托圈: 托圈是转炉的重要承载和传动部件, 在工作中除承受炉体、炉衬和自重等全部净负荷外, 还要承受由于频繁启、制动所产生的动负荷和操作过程引起的冲击负荷, 以及来自炉体、钢包等辐射作用而引起的托圈在径向、圆周和轴向存在温度梯度而产生的热负荷, 故托圈需要有足够的强度和刚度才能保证转炉的正常生产。托圈是由驱动侧耳轴

块、非驱动侧耳轴块、出钢侧扇形体和出渣侧扇形体焊接组成的整体结构。

(3) 耳轴：转炉工艺要求炉体应能正反转  $360^\circ$ ，在不同操作期间，炉子要处于不同的倾翻角度。为此转炉有两根旋转耳轴，一侧耳轴与倾动机构相连从而带动炉子旋转。为减少托圈各部位的温度梯度，降低托圈的热应力，托圈采用循环水冷却，冷却水从非驱动侧耳轴进入，经过炉口、炉帽后在托圈内循环一周，从驱动侧耳轴排出。耳轴和托圈用法兰盘、螺栓或焊接等方式连接成整体。耳轴位置通过重心计算确定，能保证在倾动机构失效时，转炉能靠本身的自重自动回到垂直位置。

(4) 倾动机构：倾动装置目前广泛采用四点全悬挂结构，主要由电机、制动器、一次减速机、二次减速机、扭力杆装置和润滑系统组成。一次减速机通过法兰固定在二次减速机箱体上，其输出轴上的齿轮轴与悬挂在驱动侧耳轴上的大齿轮组成二次减速机，二次减速机大齿轮与耳轴采用两组切向键连接。扭力杆装置是平衡转炉倾动时引起悬挂减速机箱体旋转的旋转力矩平衡装置，借助于扭力杆本身的扭转变形随时吸收和缓冲倾动装置正反向旋转时交替产生的双向冲击力矩，并将二次减速机箱体上的旋转反力，通过扭力杆支座传递到基础上。倾动机构的作用是倾动炉体，以满足兑铁水、加废钢、取样、出钢和倒渣等操作要求，该机构应能使转炉炉体正反转  $360^\circ$ ，在启动、旋转和制动时，能保持平稳，并能准确停在要求的位置上，安全可靠。



1—托圈；2—炉体；3—耳轴；4—悬挂齿轮箱；5—电机及制动器；6—减速机；7—轴承及支承座

图 1.3 转炉构造图

转炉倾动的工作特点是减速比大<sup>[25]</sup>，通常约为 600~900，倾动力矩大（国内 300 吨转炉倾动力矩可达到 650 t·m，倾动机构是由惯性元件和弹性元件组成的“质量—弹性系统”，在稳定加载荷作用下，弹性元件中力矩的变化是平稳的，按倾动力矩曲线（即静力矩曲线）

规律变化。但在实际操作中，由于转炉倾动机械在运转中存在着反复频繁的启动、制动以及掉渣、顶渣等操作，会产生突加或突减载荷，于是弹性系统便发生弹性扭振，反映在传动轴上的扭矩呈现振动波形变化，即表现出周期性循环力矩，交变循环扭转力矩将直接影响到设备的疲劳强度，如果设备关键部件频繁出现疲劳过载，设备就会存在事故隐患。因此，为了避免事故的发生，应对转炉耳轴、扭力杆等关键部件进行应力应变测试和扭矩计算，获得这些部件应力与传动扭矩在实际操作过程中的分布情况<sup>[26]</sup>。

另外扭振所产生的最大附加应力可以超过驱动力矩所产生的工作应力的几倍甚至几十倍，扭振所产生的振动频率是工作频率的数百倍甚至更高，同时扭振引起的传动系统轴系的强烈振动，其振动幅度可达倾动力矩最大设计值的 2-3 倍，它不仅影响了倾动机构的使用寿命，同时也影响到其他电气控制系统的稳定性<sup>[27]</sup>。鉴于转炉倾动机械的载荷性质，需要对其倾动力矩、扭振及扭力杆力矩平衡缓冲装置应力状态进行实时监测，及时发现发生冻炉、炉衬塌落等事故时倾动力矩的超载，预防因机械或电气故障导致扭力杆平衡装置的严重过载、疲劳损坏和塑性变形，保证倾动机构及力矩平衡装置具有足够的强度和缓冲性能。

转炉工作时，冲击负荷大、运转振动大、环境恶劣，倾动机构减速机、轴承、和轴瓦等部件主要采用稀油站油箱供油润滑，润滑油经油泵加压后输送至各润滑点。由于耳轴托圈、轴承座密封很难保证，进入减速机及轴承的润滑油泄漏现象时有发生，在运动副之间产生锈斑。如果长期运行，必然会使齿轮、轴承滚柱磨损不均，造成轴承柱碎裂、齿轮疲劳损坏，致使如此关键设备的故障不断。同时，由于润滑油的泄露，严重影响了现场的操作环境，而且在钢渣喷溅时可能会引发火灾事故，造成人力、物力和财力的极大浪费<sup>[28]</sup>。另外由于耳轴冷却水泄漏、现场粉尘、元件磨损带来的金属碎屑等因素造成的润滑油油质、油温、油压的改变，均会对转炉设备的润滑效果产生重要影响，因而需要对转炉设备润滑油的油箱油位、油质、油温、油压等进行监测和异常提示。

转炉倾动机构属刚性齿轮传动，由直流电机直接驱动减速器，经大型齿式联轴器将减速机输出轴与转炉耳轴联结，完成转炉的投料、出钢、倒渣等翻转动作<sup>[29]</sup>。因转炉炼钢工况的特殊性和危险性，对倾动机构工作的动作灵敏度和安全可靠度有着非常高的要求，而电机作为转炉倾动的直接驱动设备，其工作状态和运行参数对整个倾动机构的正常运行起着决定性的作用，因此需要对转炉倾动驱动系统电机的电压、电流以及转速进行实时监测，及时掌握转炉倾动过程中电机运行的异常信息，防范于未然，及早发现因电气控制系统或电机自身故障所引起安全隐患，并采取必要的措施解决问题，保证炼钢生产的顺利进行

以及工作人员的生命财产安全。

### 1.2.4 转炉状态实时监测系统功能与特点

根据转炉炼钢技术的特点,利用现代设备状态监测与故障诊断技术研究成果,结合钢铁企业对炼钢转炉耳轴与扭力杆扭矩和扭振现象、驱动电机运行参数、炉体倾角以及润滑系统状态进行监测的实际需求,所研究的炼钢转炉实时状态监测系统应具备以下功能:

#### (1) 状态数据采集

转炉主要工作部件的状态信息经多种传感器进行信号转换和预处理后,由 PC 端监测软件通过调用数据采集卡动态链接库控制采集卡对各转炉工作状态参量进行数据采集,采集到的数据包括扭力杆应变、炉体倾角、电机电压、电流、转速以及润滑系统状态。

#### (2) 数据管理与分析计算

数据管理主要是将采集上来的各状态数据根据类别分配到各自的待处理缓冲区,并提供相应的读取接口。分析计算主要是对各类采样数据的算法预处理及通过灵敏度换算得出状态参量真值的过程。

#### (3) 良好的用户交互与图形显示界面

它是系统与用户信息交互的桥梁,一方面要实时响应用户的控制命令,包括启动和停止系统、系统运行参数设置和数据库连接与存储操作等操作;另一方面是实时地显示转炉炉体倾角、扭矩、电机运行电压、电流、转速状态参量及润滑系统状态等参数状态曲线和实时数值大小,以供技术人员参考图形界面和数据显示来判断设备的运行状况,从而及时发现故障隐患,提前预防和维护。

#### (4) 状态量输出与报警

根据各状态参量的计算结果和客户实际需求,通过 RS485 串口协议输出部分状态参量至现场显示屏显示,并将各参量与系统设定的参量警戒值进行对比判断,对超出警戒值范围的状态参量(扭矩、电机电压、电流、转速、润滑系统状态等),通过控制输出卡输出数字量控制现场状态指示灯显示该状态参量异常及报警器报警。

#### (5) 数据库存储

将经过实时分析计算得出的状态量真值存储到本机 SQL Server 数据库进行数据储存和管理,为转炉状态历史数据的趋势分析提供数据支持。另外也可以根据客户需求,将这些数据上传至钢厂远程数据中心服务器,便于企业对整个炼钢工艺流程状态的统一监控和管理。

当然,转炉状态监测系统还可以增加更为丰富的功能,但作为状态监测与故障诊断技

术在冶金企业应用的典型案例，这是一个很好的开端，且以上功能满足了目前钢铁企业对转炉状态监测的需求，对其转炉炼钢生产具有非常重要的现实意义。另外转炉状态实时监测系统还具有以下特点：

- (1) 集状态数据采集、分析于一体，功能丰富；
- (2) 状态监测数据可靠，测量精度高；
- (3) 实时状态显示、输出、异常报警，方便技术人员及时正确掌握设备运行各种异常状态或故障早期征兆；
- (4) 强大的数据库存储与管理支持；
- (5) 人机交互界面友好，操作简单方便；
- (6) 采用模块化的设计方法，可扩展性强，应用软件易于版本升级和二次开发。

### 1.3 计算机辅助测试技术

计算机是整个转炉状态监测系统的核心，转炉运行过程中的各种状态量的采集、处理、显示、判断输出等状态监测功能都是通过计算机辅助测试技术来实现的，计算机在整个监测系统中有着不可替代的作用。

#### 1.3.1 计算机辅助测试技术概述

在机械设备运行过程中，经常要对机械参数和状态进行在线监测。传统的检测系统由分立的测量仪器组成，随着对生产过程自动控制要求的不断提高，传统测试系统的缺点越来越突出，诸如各台仪器间的匹配问题、仪器本身的测量精度问题、信号的传输速度和实时分析问题都亟待解决。随着计算机技术的发展，它在测量领域的应用不断扩大，由此产生了计算机辅助测试技术，在很大程度上解决了上述问题。它是在线测量的一大飞跃并具有许多传统测量方法不能比拟的优越性<sup>[30]</sup>。

所谓计算机辅助测试技术 (Computer Aided Test, 简称 CAT)，就是在计算机的辅助下完成对连续模拟信号的采集、处理和显示的过程<sup>[31]</sup>。由于计算机可快速对所测的数据进行分析和综合处理 (甚至是实时处理)，因此，采用计算机技术的测试系统，就极大的提高了测试效率。它在测试系统中对传感器特性能自动作非线性校正或温度校正，可以最大限度的发挥测试设备的潜力，在保证测试结果仍具有较高精度的情况下，降低了对设备的要求，促进了测试仪器和测试系统向实时性和智能化发展的过程，因此利用计算机辅助测试技术实现对转炉状态的实时监测具有非常重要的现实意义。

计算机辅助测试系统由硬件和软件共同组成，相对于传统测试系统，具有以下突出优点<sup>[32][33]</sup>。

(1) 测试速度更快, 测试的准确性、可靠性、经济型较高, 投资小, 收效大, 测试性能更加优异;

(2) 系统总逻辑由软逻辑和硬逻辑组成, 具有柔性, 特别适合用于小批量、多品种产品的测试;

(3) 系统功能更强, 形式更加多样化;

(4) 系统开发更方便, 人机交互界面更加形象、美观。

基于以上优点, 计算机辅助测试在工程测试上日益得到重视和发展, 在不少场合, 例如动态测试、瞬态信号测试等, 只有在计算机的辅助下才能正确的和实时的完成。目前, 计算机辅助测试在工程上的应用主要包括<sup>[34]</sup>:

(a) 对已测得的信号作数字信号分析处理, 以获取有用信息, 例如以 FFT 为核心内容的数字式频谱分析, 现代谱分析及模态分析。

(b) 改善测试系统的特性或功能, 例如使测试系统能自动地做非线性校正、零点漂移校正、自动切换量程、自动切换测量顺序等。

(c) 在计算机应用软件的辅助下, 开发各种用途的测试方法, 进行在线测试。

(d) 以微计算机为核心组成自动测试系统, 完成非人工所能胜任的测试工作。

### 1.3.2 现代测试中的数据与数据库技术

数据作为事物信息的一种描述形式, 是现代测试技术的基础和信息来源。另外在现代测试的实际应用过程中, 需要对大量的测试数据进行存储和管理; 数据库作为存储数据的仓库, 是管理信息系统开发和设计的核心和基础。从小型的单项事务处理系统到大型复杂的信息系统, 都需要先进的数据库技术来保持系统数据的整体性、完整性和共享性。数据库把信息系统中大量的数据按一定的模型组织起来, 提供存储、维护和检索数据等功能, 使信息系统可以方便、及时、准确地从数据库中获得所需的信息<sup>[35]</sup>。在现代测试中, 需要收集大量的数据, 并对数据进行存储, 以供进一步分析处理, 抽取有用信息并最终产生测试结果。通常测试结果的准确性和可靠性需要以大量的历史数据为基础, 为了加强对海量历史数据的存储和管理, 便于对历史数据的分类、组织、编码、存储、检索和维护, 将数据库技术引入到现代测试中来。

数据是数据库中存储的基本对象。可以对数据做如下定义: 描述事物的符号记录称为数据。描述事物的符号可以是数字, 也可以是文字、图形、图像、声音、语言等, 数据有多种表现形式, 它们都可以经过数字化处理存入计算机。数据库是以一定的组织方式存储在计算机中按照某种规则相互联系的数据的集合。它按照信息的自然联系来存放数据, 也

就是把数据本身和实体间的描述都存入数据库,用各种存取方法来对数据进行各种操作组合以满足各种应用需求。一旦数据被存储至数据库,用户可以方便地使用各种条件来查询和管理这些信息。数据在数据库中存储的方式决定了根据多个条件来查找信息的难易程度。此外,数据库还应该便于数据的添加、修改和删除。描述、管理和维护数据库的程序被称为数据库管理系统。

数据库是大量数据文件的集合,但并非这些文件的简单相加,而是将其信息重新组织,以去掉其重复多余部分,增加数据关系的描述,并能以多种组合方式为各种应用服务。因而数据库具有如下特点<sup>[36][37]</sup>:

- (1) 冗余度最少,故可避免数据的不一致性;
- (2) 数据的物理存储独立于应用程序之外,因而对数据进行扩充、修改不需要修改应用程序;
- (3) 提供统一的操作(增、删、更新、检索)手段;
- (4) 有保证数据的安全、完整和保密性的机构;
- (5) 数据可在记录或数据项上定义地址,使用时可按地址取得有关记录的数据项,不必把整个文件调入内存,减少对内存的需求量。

数据库技术是信息社会的重要基础技术之一,是计算机科学领域中发展最为迅速的重要分支,也是应用最广的技术之一,而且已经成为电子信息系统的重要核心技术。随着计算机技术的不断发展,信息管理自动化程度的不断提高,数据库在信息管理中作用日益重要,数据库技术的应用范围正在从统计、管理等领域迅速扩大到工程实践中<sup>[38]</sup>。

### 1.3.3 转炉状态监测中计算机辅助测试技术应用

计算机辅助测试技术包括计算机技术和数字信号处理技术,是一门新兴的技术,围绕其所能实现的功能,它的理论基本体系由下述四个方面组成:数据采集与转换技术、数据分析技术、数字滤波技术和计算机自动测试技术<sup>[30]</sup>。

数据采集与转换技术:计算机只能识别和处理数字量,但几乎所有工程信号都是以连续可变的模拟量形式出现的。因此,这些采集到的模拟量在被计算机处理之前,必须经过模-数(A/D)转换。数据的采集就是在计算机控制下,通过A/D器件,把模拟量转化为离散量。而计算机输出的结果为数字信号,需要经过数-模(D/A)转换才能符合实际需要。因此数据转换包含两个方面:一是模拟信号在进入计算机进行数字处理之前的A/D转换,二是数字信号从计算机中输出时要经过D/A转换才能适应工程应用。

数据分析技术是在时域和频域范围内对信号序列进行分析和处理,其中的处理算法包

括时域内信号的均值、均方值、方差等；频域的幅值谱、相位谱、功率谱等，具体应用根据实际情况进行选择。

数字滤波技术是通过用数字计算的方法来增强信号中的有用成份，降低干扰的技术。随着计算机的普及、数字通讯技术的发展和大量数字化分析仪器的出现，数字滤波器的应用场合越来越多，所发挥的作用也越来越大。

计算机自动测试技术，一个自动测试系统，一般由四个组成部分：第一是微机或微处理器，它是整个系统的核心；第二是被控制的测量仪器或设备，作为可编程仪器；第三是接口；第四是测试软件。

本课题所研究的炼钢转炉实时状态监测系统的结构就是根据计算机辅助测试技术的理论体系而设计的，其整体架构就是一个计算机自动测试系统，由工业控制计算机、信息采集传感器、监测软件及相互间的接口组成；通过数据采集与转换技术进行转炉状态信号的采集与转换，再经数字滤波技术和数据分析技术分析，通过监测软件可视化界面进行状态显示。

#### 1.4 论文研究的意义和主要内容

本课题研究设计的炼钢转炉实时状态监测系统，是在充分调研炼钢转炉工作状态、故障特征及设备维护内容的基础上，针对转炉设备运行状态监测的实际需求，以状态监测与故障诊断技术和计算机辅助测试技术为基础，提出了基于多传感器状态信号转换、数据采集、数据分析与状态量计算、状态显示与数据存储的综合性实时状态监测系统。该系统的开发对实际转炉炼钢生产的意义有如下几个方面：

a) 实时监测，掌握工况 在线实时监测转炉炼钢过程中倾动力矩、炉体倾角、电机转速、电压、电流、润滑系统状态参数，掌握转炉运行状况；

b) 安全生产、挖掘潜力 在保证转炉炼钢生产安全可靠的前提下，最大限度的发挥设备潜力，提高炼钢生产率；

c) 设定预值、指导操作 当转炉传动系统、电气系统、润滑系统超过极限门限值时，发出报警，指导技术人员科学操作；

d) 故障回放、原因分析 转炉设备出现故障后，可对当时转炉工作状态参数信息进行回放，快速分析故障产生原因。

论文的主要研究内容有：调研炼钢转炉的机构组成、工作原理；对其工作状态下的传动性能和力学关系进行分析计算；根据多个转炉状态参量的监测需求，进行硬件选型和系统总体设计；在此基础上进行系统软件的需求分析和功能设计与实现，最终完成监测系统

在实际转炉炼钢现场的测试与应用，验证系统设计的正确性与稳定性。

主要研究工作安排如下：

第一章介绍状态监测与故障诊断技术，对转炉炼钢技术与工艺进行阐述，结合转炉构造和工作特性，阐明对转炉工作状态进行监测的可行性和必要性，提出本课题所研究的炼钢转炉实时监测系统应具有的功能和特点；最后探讨计算机辅助测试技术和数据库技术在转炉状态监测中的应用。

第二章介绍转炉倾动机构组成及工作原理，描述其工作状态下的扭矩传递关系和机构受力情况，针对转炉倾动过程中的扭振现象进行分析和计算，并详细阐述本课题所采用的扭矩检测原理和方法。

第三章介绍转炉实时状态监测系统的总体架构，根据数据采集设备的选用标准进行设备选型，并对其工作特性进行描述；针对系统多个状态量的监测需求，阐述各状态传感模块的传感器选用与模块设计方法；最后对整个监测系统信号连接关系进行介绍。

第四章介绍监测系统软件的开发工具和开发环境，对系统软件运行平台及功能需求进行分析，提出采用多线程和模块化方法进行系统软件总体设计的思路；阐述动态链接库、多线程技术理论和数据存储与管理技术在系统软件开发中的具体应用；重点描述软件开发过程中软件模块的划分和相互关系，并详述各个模块的具体实现及技术要点；最后对整个监测系统软件的运行流程和实际效果图进行说明。

第五章介绍系统在转炉炼钢现场的测试情况，根据测试转炉的结构特点和测试需求，完成监测系统的搭建与测试方案的制定，通过对转炉在空炉模拟装球及热态条件下的全面测试及历史数据的详细分析，验证了监测系统设计方案的正确性，系统运行稳定、可靠，满足了钢铁企业对转炉运行状态监测的实际需求。

第六章总结论文的研究工作并对未来的研究作相关展望。

## 2 转炉力矩监测原理与方法

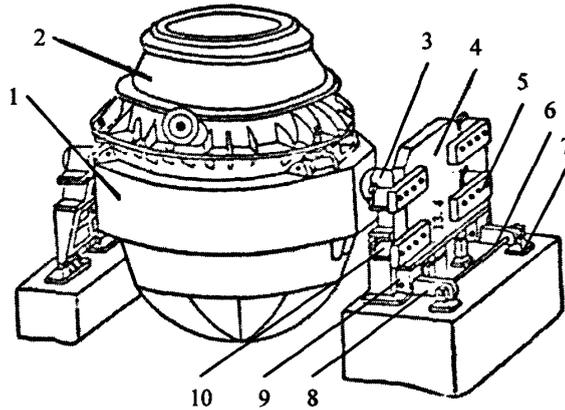
力矩是转炉状态监测的重要组成部分,本章将介绍转炉倾动机构组成及工作原理,描述其工作状态下的力矩传递关系和机构受力情况,针对转炉倾动过程中的扭振现象进行分析和计算,并阐述了本课题所采用的扭矩检测原理与方法。

### 2.1 转炉倾动机构力学模型

#### 2.1.1 转炉倾动机构工作原理

转炉倾动机构被用于氧气顶吹转炉炼钢设备中炉体的平稳启动及准确定位,由二次减速机及扭力杆缓冲系统组成,其作用是倾动炉体,满足兑铁水、加废钢、取样、出钢和倒渣等工艺操作需求,可令炉体正反向 $360^\circ$ 旋转,保持炉体启动、旋转和制动时的平稳,并准确、安全地停在要求的位置上,其工作特点是<sup>[39][40]</sup>:低速,重载,环境高温,大速比,启动、制动频繁,承受较大的冲击负荷,工作条件恶劣。目前国内的转炉倾动装置普遍采用扭力杆结构(如图 2.1),具有传动平稳,性能先进,安全可靠等特点。倾动机构采用全悬挂四点啮合柔性驱动装置,由四个一次减速机和一个二次减速机组成,四点啮合共同驱动二次减速机中的大齿轮,二次减速机悬挂于耳轴上,从而带动转炉炉体倾动、旋转工作,倾翻力矩通过扭力杆缓冲止动装置进行平衡。扭力杆装置主要由扭力杆、曲柄、轴承座、上下联接板、关节轴承及高强度联接螺栓组成,扭力杆位于减速机箱体下方,安装在两端轴承座上,是转炉倾动机构缓冲系统的重要零部件。在左右两端,设有扭力杆系统失效时起到支撑作用的辅助装置,在炉体启动、制动过程中,倾动机构系统的回转动能经联接板转变为扭力杆的扭转变形,从而达到支撑和缓冲的作用<sup>[41]</sup>。

转炉倾动过程中的负载力矩主要由三部分组成,即空炉力矩,液体力矩和摩擦力矩。其中空炉力矩是由炉壳和炉衬的质量引起,空炉力矩为倾转角的正弦函数;液体力矩是由铁水和熔渣引起的力矩,倾动时因液体的形状随倾角变化而不断变化,其重心位置变化非常复杂,通常需要用繁琐的公式进行计算;摩擦力矩由倾动过程耳轴上的摩擦力引起,方向始终和倾动方向相反,大小基本不变。上述三个力矩的计算,尤其以铁水和熔渣的重心位置计算最为复杂<sup>[42]</sup>。



1—托圈；2—炉体；3—耳轴；4—二次减速机；5—一次减速机；  
6—扭力杆；7—轴承座；8—曲柄；9—上下联接板；10—电机

图 2.1 转炉倾动系统结构图

### 2.1.2 倾动机构力学分析

扭力杆作为大型转炉倾动机构的缓冲装置，在炉体倾动过程中，由于炉体与减速机作为相对静止部分一起绕耳轴整体转动，倾动力矩在悬挂减速机壳上形成旋转力矩，使得减速机下部左右两联接板一个受拉力作用、一个受压力，并通过曲柄将力传递给扭力杆，在拉压板两端形成大小相等、方向相反的一对力偶，使扭力杆发生扭转变形，从而起到支撑和缓冲作用。扭力杆通过本身的弹性变形与作用在杆上的扭矩达成平衡，并通过扭力杆支座最终将由悬挂减速机壳的旋转力矩产生的垂直力传递到基架上，这样就不会对耳轴轴承产生附加水平力，对设备基础也无水平力和倾翻力矩作用<sup>[43]</sup>。

如图 2.2 为转炉倾动机构受力图， $M$  为转炉倾动过程中耳轴所受力矩， $F$  为左右联接板所受的拉力和压力， $T$  为扭力杆所受的扭转力矩， $L$  为扭力杆长度， $R$  为曲柄长度， $d$  为扭力杆直径。根据转炉倾动过程中，各部件的力矩传递关系，按式(2-1)、(2-2)可得：转炉耳轴所受的力矩可由扭力杆力矩经换算得到；扭力杆所受的力矩又与其横截面所受的剪切应力存在线性关系。因此可以通过测量扭力杆横截面所受的剪切应力，达到同时测量出扭力杆和耳轴所受的旋转力矩的大小。

$$\begin{aligned}
 F &= M / L \\
 T &= F * R = (M / L) * R = (R / L) * M \\
 \Rightarrow M &= T * (L / R)
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

$$\begin{aligned}
 T &= W_p * \tau_{\max} \\
 \Rightarrow M &= W_p * \tau_{\max} * (L / R)
 \end{aligned}
 \tag{2-2}$$

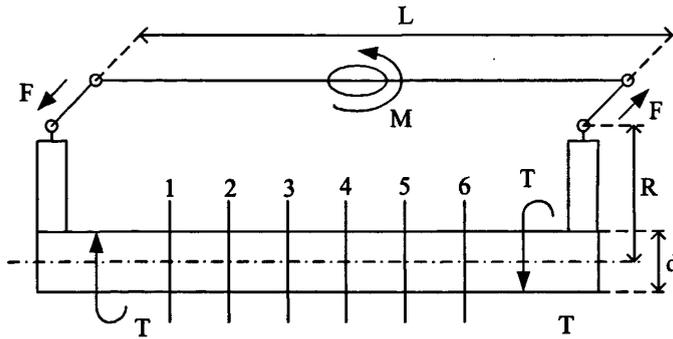


图 2.2 倾动机构受力图

### 2.2 转炉倾动机构扭振分析

扭转振动是旋转机械中普遍存在的现象<sup>[44]</sup>。在转炉倾动过程中，明显出现的扭转振动表现为炉子的“点头”。转炉系统的扭转振动是由突加（或突减）载荷（如启动、制动，以及顶渣、掉渣等）引起的。它是一种衰减振动，所以称为瞬态振动。

扭振引起的最大附加应力可以超过驱动力矩所产生的工作应力的好几倍。因此，扭振系统的固有频率、主振型以及动应力的计算和测量常是旋转机械设计和试验工作中不可缺少的一部分。由于炉体和倾动机械结构比较复杂，所以转炉倾动系统的扭振问题需要简化为简单的力学模型来进行计算和研究。简化时，通常是把质量部分按重心不变原则集中为若干具有等效转动惯量的圆盘，圆盘之间由具有等效扭转刚度的弹性轴段连接，这样就构成一个弹性轴上有若干圆盘的扭振系统，圆盘数即自由度数，实际系统多为多自由度系统。等效转动惯量和等效扭转刚度可由计算及试验确定<sup>[45]</sup>。

根据研究表明，转炉倾动系统可以简化成由两个质量圆盘和一个弹性元件组成的“质量—弹性系统”，如图 2.3 所示为简化的二质量系统模型。 $J_1$ 是驱动端（包括电机、联轴器及制动轮等）的转动惯量， $J_2$ 是工作端（炉体）的转动惯量。驱动端与炉体之间通过扭转刚度为  $C_1$  的弹性轴段连接<sup>[46]</sup>。

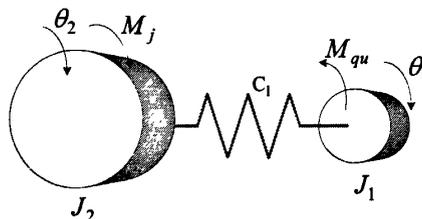


图 2.3 二质量热振系统

#### 一、突加力矩在弹性轴上产生的动力矩分析<sup>[47][48]</sup>

对于转炉倾动系统因为启动、制动及顶渣、吊渣形成的突加力矩，在弹性轴引起的动

力矩，可按下面公式(2-3)和(2-4)计算。

当启、制动时：

$$M = M_j + \frac{J_2}{J_2 + J_1}(M_{qu} - M_j) - \frac{J_2}{J_2 + J_1}(M_{qu} - M_j) \cos(pt) \quad (2-3)$$

当炉口清渣时：

$$M = M_j + M_{do} = M_j + \omega \sqrt{\gamma C_n J_1} \quad (2-4)$$

式中  $J_1$ —电动机转子和联轴器制动轮的推算转动惯量； $J_2$ —转炉部件及全部齿轮的转动惯量； $M_{do}$ —由  $J_1$  动能转化为弹性元件变形能引起的动力矩； $\gamma$ — $J_1$  的动能转化为弹性元件变形能的部分占  $J_1$  总动能的倍数（ $\gamma$  为小于 1 的系数）； $M_{qu}$ —施加于  $J_1$  上的驱动（突加）力矩； $M_j$ —系统的负载力矩（施加在  $J_2$  上）； $\omega$ —清渣碰撞前系统角速度； $t$ —突加力矩作用时间； $p$ —转炉二质量系统的固有角频率， $p^2 = C_i(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2})$ ； $C_i$ —两个集中质量  $J_1$  和  $J_2$  的中间连接轴的刚性系数； $C_i = \frac{CC_0}{C+C_0}$ ； $C$ —三质量系统时，传动轴的总刚度系数，如图 2.4 所示； $C_0$ —柔性部件（扭力杆、弹簧组）的刚性折算系数。

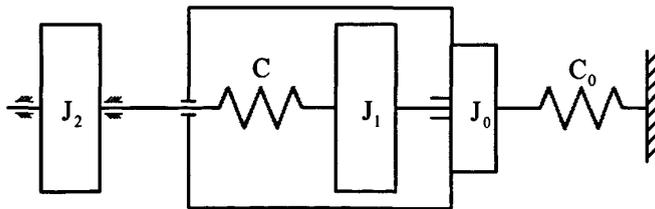


图 2.4 转炉三质量系统图

柔性部件的折算刚性系数公式：

对于扭力杆：

$$C_0 = C_n \left(\frac{1}{r}\right)^2 \quad (2-5)$$

式(2-5)中  $C_n$ —扭力杆的抗扭刚度系数， $C_n = \frac{GJ_p}{l} = \frac{\pi Gd^4}{32l}$ ； $l$ —两垂直杆之间距离(如

图 2.5)； $r$ —曲柄半径； $G$ —材料剪切弹性模量； $J_p$ —扭力杆截面积惯性矩。

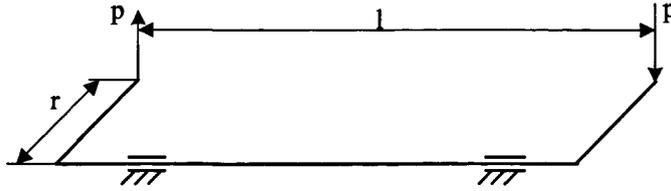


图 2.5 扭力杆结构尺寸图

对于蝶形弹簧组:

$$C_0 = KL^2 \tag{2-6}$$

式(2-6)中 \$K\$—蝶形弹簧组中心线之间的距离; \$L\$—耳轴中心线至弹簧组中心线之间的距离。

对于式(2-3), 当 \$\cos(pt) = -1\$ 时, 得最大动力矩为:

$$M_{\max} = M_j + 2 \frac{J_2}{J_2 + J_1} (M_{qu} - M_j) \tag{2-7}$$

突加力矩引起扭转振动力矩 (转矩) 的时间曲线 (M-t), 如图 2.6(a) 所示。在 \$M\_{qu}\$ 作用时间内, 振动是以 \$M\_m = M\_j + \frac{J\_2}{J\_2 + J\_1} (M\_{qu} - M\_j)\$ 为平衡中心进行的, \$M\_{qu}\$ 一旦消失, 振动将围绕新的平衡中心 \$M'\_m = M\_j\$ 进行。

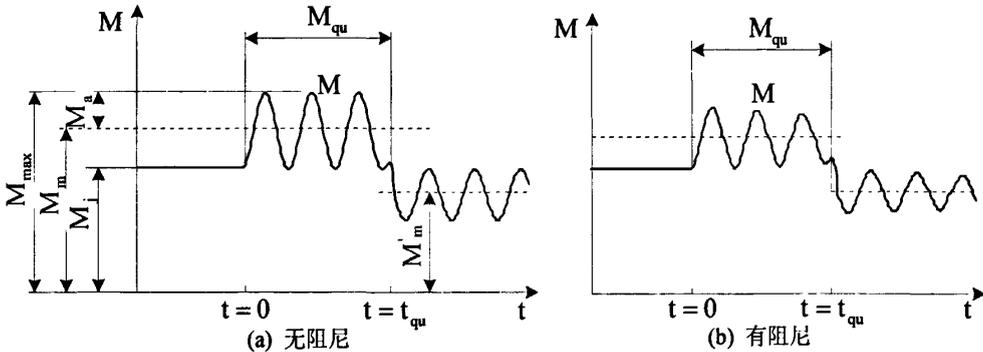


图 2.6 扭转振动力矩时间曲线

由于系统存在阻尼, 扭振的实际曲线为图 2.6(b) 所示的衰减振动波形, 并逐步趋于平稳。由于转炉在运转中突加力矩的作用是断续的, 故形成先后各次激振互相递续。

转炉瞬态扭转振动问题的输入 (激励)、输出 (响应) 与系统的关系, 可用框图表示 (如图 2.7)。图中间的方框图表征转炉倾动系统本身的振动特性 (其主要参数为转动惯量 \$J\$、刚性系数 \$C\$、阻尼系数 \$\zeta\$); \$M\_{qu}\$ 是外界对系统的激励输入, 即前面所提的作用于系统的突加、突减力矩; \$M\$ 是转炉倾动系统在输入作用下产生的输出, 即转炉倾动系统的动态响

应，可由式(2-3)或(2-4)求出。

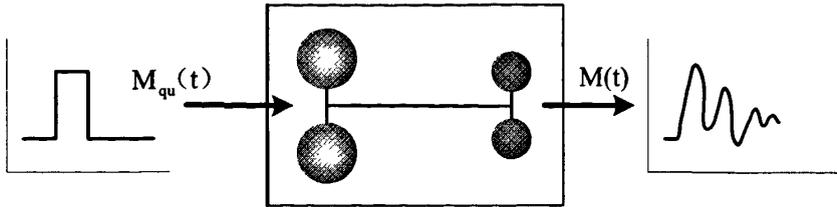


图 2.7 扭振原理框图

由图 2.6 可知，在系统存在扭振的情况下，系统构件承受的尖峰负荷值  $M_{max}$  要比平常静负荷  $M_j$  增大一个  $2\frac{J_2}{J_2+J_1}(M_{qu}-M_j)$  值，见式(2-7)。  $M_{max}$  与静负荷力矩  $M_j$  的比值为动负荷系数  $K_d$ ；此外，在扭振情况下，造成转炉系统扭转力矩呈交变循环状态，这种交变循环又造成轴内切应力的交变循环；转矩的交变幅度为  $M_a = \frac{J_2}{J_2+J_1}(M_{qu}-M_j)$ ，切应力的交变循环次数应按扭振的循环次数计算，它比常规设计计算考虑的扭转循环次数要大很多。扭振循环次数决定于系统的固有频率，为了保证转炉倾动系统构件的安全，应使动负荷系数  $K_d$  及转矩交变幅度  $M_a$  尽可能低，它们取决于  $\frac{J_2}{J_2+J_1}$  和  $(M_{qu}-M_j)$  的值。其中  $\frac{J_2}{J_2+J_1}$  是由倾动系统的设计决定的，对于一般情况下的转炉系统为 0.2 左右，对构件的强度影响是个固定因素；而突加力矩  $M_{qu}$  的大小却是在设计和操作中都无法完全确定的因素，应当避免过大的启动、制动、刮渣等力矩的作用，以保证构件的安全。

此外，还应指出的是：

- (1) 由于齿轮、联轴器等传动间隙的存在，在转矩方向改变时，造成突加力矩冲击作用的加剧，因而，  $M_{max}$  和  $M_a$  的数值将进一步增大；
- (2) 考虑突加力矩  $M_{qu}$  和静负荷力矩  $M_j$  同向的情况（如抬炉或放炉制动的情况），此时平衡中心  $M_m$  的情况将于图 2.6 所示情况不同，波形的走向也将有所差异；
- (3) 突加力矩的时间函数形式，不一定是如图 2.7 所示的简单阶跃函数，也可能是其它复杂形式。

## 二、传动间隙在弹性轴上产生的动力矩分析<sup>[49]</sup>

传动间隙产生的附加动力矩可按下式计算：

$$M_{\max} = \frac{2J_2}{J_2 + J_1} \Phi_{\max} \tag{2-8}$$

式(2-8)中  $\Phi_{\max}$  一 转炉二质量系统中质量  $J_1$  和  $J_2$  之间最大相对转角度 (亦即二质量系统撞击前消除间隙的最大转角) / (弧度),  $\Phi_{\max} = \frac{M_0}{J_1 n^2} \sqrt{1 + (\frac{J_1 \omega_1 n}{M_0})^2}$ ;  $M_0$  一 电动机最大启动力矩 / (Kg·g·m);  $n$  一 电动机转速 / (转/分);  $\omega_1$  一 二质量系统, 质量  $J_1$  相对  $J_2$  运动的角速度,  $\omega_1 = (1 - \frac{M_j}{M_0})(1 - e^{-\alpha})n_0$ ;  $t$  一 传动系统消除传动间隙所需时间 / (s),  $t = \frac{1}{C} \ln \frac{M_0 - M_j}{M_{qd} - M_j}$ ;  $M_{qd}$  一 电动机启动力矩 / (Kg·g·m),  $M_{qd} = M_j + (M_0 - M_j)e^{-Ct}$ ;  $C_t$  一 时间常数,  $C_t = \frac{M_0 K}{J n_0}$ ;  $n_0$  一 电动机最大转速 / (转/分);  $J$  一 电动机转子和被加速机械的总转动惯量 / (Kg·m<sup>2</sup>);  $K$  一 单位换算常数, 当  $J$  取 GD<sup>2</sup> / (Kg·m<sup>2</sup>),  $M_0$ 、 $M_j$  的单位为 Kg·g·m,  $n_0$  的单位为转/分时,  $K=374.7$ 。

当无间隙时 (即  $\omega_1=0$ ):  $M_{\max} = \frac{2J_2}{J_2 + J_1} M_0$ ; 当速度起决定作用时 (即  $\frac{J_1 \omega_1 n}{M_0} \gg 1$ ):

$$M_{\max} = \frac{2J_2}{J_2 + J_1} \frac{\omega_1}{n}$$

### 2.3 扭矩测量原理与方法

通过以上对转炉倾动机构力矩传递原理及扭振现象的详细分析, 下面将对本系统所采用的转炉倾动力矩及扭转振动的具体检测原理及方法进行具体阐述与分析计算。

#### 2.3.1 扭矩测量方法

使机械元件转动的力偶或力矩叫做转动力矩, 简称转矩。任何元件在转矩的作用下, 必定产生某种程度的扭转变形。因此, 习惯上也常把转动力矩叫做扭转力矩, 简称扭矩。从严格的力学角度来说, 转矩与扭矩在概念上是完全不同的, 前者指的是外力矩, 而后者指的是内力矩。但是, 当轴上只受到一个扭矩的作用时, 转矩和扭矩在数值上是相等的。

扭矩测量方法按照基本原理可以分为三类: 传递法 (扭轴法)、平衡力法 (反力法) 及能量转换法<sup>[50][51]</sup>。

##### 1、传递法

传递法是根据弹性元件在传递扭矩时所产生的物理参数的变化而测得扭矩的方法。这里所根据的物理参数可以是弹性元件的变形、应力或应变。最常用的测量扭矩的弹性元件

是扭轴。

### 2、平衡力法

对于任何一种匀速工作的动力机械或制动机械，当它的主轴受扭矩作用时，在其机体上必定同时作用着方向相反的平衡力矩（或称为支座反力矩），测量机体上的平衡力矩以确定机器主轴上作用扭矩大小的方法，就是平衡法，亦称反力法。

### 3、能量转换法

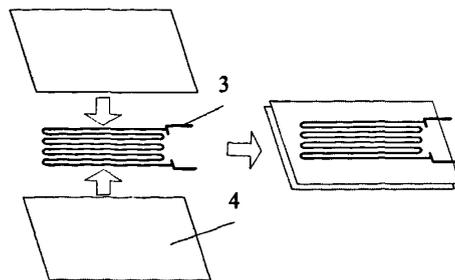
这是根据其他能量参数（如电能参数）测量机械能参数及扭矩的方法。根据能量转换的观点：动力机械，如电动机、内燃机等，分别是把电能、化学能转换为机械能的机构；而制动机械，如发电机、水利制动器等，则是分别把机械能转换为电能、热能的机构。

在工程应用中，几乎 85% 的扭矩测量都采用传递法。本课题针对转炉炼钢生产现场实际，结合倾动机构机械元件组成、工况条件及传递法测量扭矩的各自特点，确定采用变形法来获取扭矩信号，变形量通过一些必要的转换装置，最终由电阻应变片获取并且转换为电信号。

#### 2.3.2 应变检测原理

旋转轴扭矩的电测方法中，最简单可靠的方法是在被测机械旋转轴上粘帖电阻应变片，因弹性轴扭转而在表面产生应变，引起应变片电阻值的变化，从而达到测量扭矩的目的，目前国内测量扭矩主要采用的是这种传统方法<sup>[52]</sup>。

电阻应变计俗称电阻应变片，简称应变计，是一种能将被测试件的应变量转换成电阻变化量的敏感元件。电阻应变计主要由敏感栅、基底、引出线及覆盖层等部分组成（如图 2.8）。敏感栅是把结构应变转换成电阻变化的敏感元件；基底材料是支撑敏感栅，使其保持一定几何形状并使敏感栅与被粘试件间具有良好的电绝缘；覆盖层是保护敏感栅避免受外界机械损伤并防止环境温度、湿度的侵扰；引出线则是连接敏感栅与测量仪器，把应变计的电信号送到仪器内。应变计的各组成元件的性能将直接影响电阻应变计的各项特性。



1—敏感栅;与; 2—覆盖层; 3—引出线;4—基底

图 2.8 电阻应变计组成

用电阻应变片作为传感器件, 测量应变、应力及与之相关的物理量, 是一种常见的实验应力分析方法, 其测试框图可用图 2.9 表示; 电阻应变片将被测试件所受的应变  $\varepsilon$  转换成电阻的相对变化  $\Delta R/R$ ; 测量电路包括信号放大器和滤波器, 其作用是对信号进行必要的调整。应变测量原理如下: 将电阻应变计粘帖在被测构件表面上, 并接入测量电路, 当被测构件受外力作用产生变形时, 应变片敏感栅随之变形, 敏感栅的电阻值也发生相应变化, 其变化量的大小与构件表面所受外力成一定的线性比例关系, 经测量电路(如测量电桥)转换为电信号输出, 测量结果应为应变值, 通过应变与应力的力学关系, 可计算出被测构件所受应力的大小。



图 2.9 应变测量框图

设被测物体原始长度为  $L$ , 变形后的长度为  $L + \Delta L$ , 物体受力后发生的相对变形(应变)为  $\varepsilon$ , 则:  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ 。如电阻应变片的电阻为  $R$ ,  $R$  随被测物理的变形而改变, 并有如下关系:

$\frac{dR}{R} = K \frac{dL}{L} = K\varepsilon$ , 其中,  $K$  为应变计的灵敏度系数。

与其他测量手段相比, 电阻应变片有以下优点:

- (1) 灵敏度和精确度高, 性能稳定、可靠, 可测  $1 \sim 2 \mu\varepsilon$ , 误差小于 1%;
- (2) 尺寸小、重量轻、结构简单、使用方便、响应速度快。测量时对被测件的工作状态和应力分布影响较小, 既可用于静态测量, 又可用于动态测量;
- (3) 测量范围大。既可测量弹性变形, 也可测量塑性变形。变形范围可从 1% ~ 20%;
- (4) 适应性强。可在高温、超低温、高压、水下、强磁场以及核辐射等恶劣环境下使用;
- (5) 便于多点测量、远距离测量和遥测。

粘帖应变片是电测法的一个重要环节, 它直接影响测量精度。粘帖时, 必须保证被测物体表面的清洁、平整、光滑、无油污、无锈迹; 其次要保证粘帖位置的准确, 并选用专用粘接剂; 应变片引线的焊接与导线的固定要牢靠, 以保证测量时导线不会扯坏应变计<sup>[53]</sup>。

### 2.3.3 测量电路设计与计算

由于电阻的相对变化难以测量, 通常用惠斯登电桥将其变换成电信号<sup>[54][55]</sup>。如图 2.10 为惠斯登直流电桥, 由四个电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  组成四个桥臂; A、C 为供桥端, 接电压为  $U_0$  的直流电源; B、D 二顶点接测量仪表, 为测量端或输出端; 电桥的输入信号为各

桥臂电阻值的相对变化量，即  $\frac{\Delta R}{R}$ 。

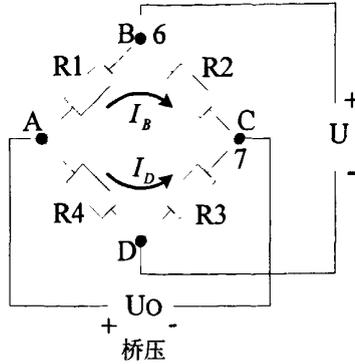


图 2.10 惠斯登直流电桥

(1) 直流电桥平衡

电桥的平衡是指电桥在供桥电压  $U_0$  的作用下，各桥臂阻值不发生变化(即输入信号为零)的条件下，电桥的输出电压为零。

当电桥输出端 BD 接入的负载（仪表或放大器）输入阻抗足够大（与桥臂阻抗相比，负载阻抗可视为无穷大）时，输出端可视为开路状态，因此可以假设把整个电桥分为两个之路 ABC 和 ADC（图 2.10）。流经 ABC 支路中的电流  $I_B$  为： $I_B = \frac{U_0}{R_1 + R_2}$ ；B 点的电位

$U_B = I_B R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_0$ ；同理，在 ADC 支路中，D 点的电位为  $U_D = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_0$ ；因此电

桥的输出电压 U 为 B、D 两点之间的电位差，计算方法如式(2-9)所示：

$$U = U_B - U_D = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_0 \quad (2-9)$$

式(2-9)说明，输出电压 U 是供桥电压  $U_0$  的线性函数，它与各桥臂阻值  $R_i$  和供桥电压  $U_0$  有关；该直流电桥的平衡条件为  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。为了保证测量精度，在进行测试之前，应使电桥处于平衡状态，以使工作电桥的输出只与应变片感应力引起的电阻变化有关。

(2) 电桥电压输出

当电桥的输出端接入负载（如放大器）电阻足够大，此时电桥输出的是电压信号，称为输出电压。若各桥臂的应变片  $R_i$  产生电阻微小变化  $dR_i$  时，电桥失去平衡，输出电压 U 也有  $dU$  变化。由于  $dR_i \ll R_i$ ，故此时电桥的输出电压可通过微分式(2-10)求得：

$$\begin{aligned}
 dU &= \frac{\partial U}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial U}{\partial R_2} dR_2 + \frac{\partial U}{\partial R_3} dR_3 + \frac{\partial U}{\partial R_4} dR_4 \\
 &= \left[ \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} dR_1 - \frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2} dR_2 + \frac{R_4}{(R_3 + R_4)^2} dR_3 - \frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2} dR_4 \right] U_0 \\
 &= \left[ \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} \right) + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} \left( \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right) \right] U_0 \quad (2-10)
 \end{aligned}$$

这是电桥的输出电压与各桥臂的电阻增量的一般关系式，称为电桥输出电压表达式。

为了简化桥路设计，通常采用全等臂电桥，即四个桥臂阻值皆相等，式(2-10)可简化为：

$$\Delta U = \frac{1}{4} U_0 \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2-11)$$

根据应变片的阻值变化与应变的关系式： $\frac{\Delta R_i}{R_i} = K\varepsilon_i$ ，若各桥臂应变片的灵敏度系数

K 值均相等，则输出电压  $\Delta U$  与各桥臂应变  $\varepsilon_i$  的关系可表示为：

$$\Delta U = \frac{1}{4} U_0 K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2-12)$$

在测试技术应用中，常将接入应变片的电桥称为应变电桥。由于被测试件的结构不同，再加上承受多种外力作用，为了测出其中某种外力引起的变形，而排除其他外力的影响，必须合理地选择应变片数量、粘帖位置和组桥方式。根据电桥的工作桥臂数目，应变电桥可分为半桥单臂、半桥双臂、全桥三种工作方式。

1、半桥单臂。若电桥四臂中，只有一个桥臂接入应变片，其余桥臂皆为固定电阻，在受到外力时，应变片阻值  $R$  有一微小增量  $\Delta R$ ，此时电桥的输出电压为：

$$\Delta U = \frac{1}{4} U_0 \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{1}{4} U_0 K \varepsilon \quad (2-13)$$

2、半桥双臂。若相邻的两个桥臂  $R_1$  和  $R_2$  都接入应变片，其中一枚应变片受拉，另一枚受压；其余两个桥臂为固定电阻。此时在外力作用下电桥输出电压为：

$$\Delta U = \frac{1}{4} U_0 \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = 2 \left( \frac{1}{4} U_0 \frac{\Delta R}{R} \right) = 2 \left( \frac{1}{4} U_0 K \varepsilon \right) \quad (2-14)$$

3、全桥。若电桥四个桥臂都接入应变片，则这种电桥为全桥。其中两枚应变片  $R_1$  和  $R_3$  受拉，其余两枚  $R_2$  和  $R_4$  受压，且使受力状态相同的两枚应变片接入电桥的相对桥臂上，此时全桥的输出电压为：

$$\Delta U = \frac{1}{4} U_0 \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = 4 \left( \frac{1}{4} U_0 K \varepsilon \right) \quad (2-15)$$

因此在选定组桥方式后，通过测出电桥输出电压，便可以求出此时所测应变值。由于电桥输出为低频缓变直流信号，信号非常微弱，需要专门的放大电路将其放大，经过模数转换（A/D）和接口电路输入计算机、分析仪器进行分析处理。

电桥电路有着很高的灵敏度和精度，而且结构形式多样，适用于不同的应用。但电桥电路也容易受到不同外界因素的影响，如温度、电源电压及频率以及导线等，此外在不同的应用中需要调节电桥的灵敏度，以适应不同的测量精度。因此，在电桥应用中应注意以下几点：连接导线的补偿、电桥灵敏度的调节和测量小电阻阻值的电桥。

### 2.3.4 弹性轴扭矩测量原理

如图 2.11，当弹性轴受到扭转时，传递的扭矩是剪应力对横截面扭心的合成力矩<sup>[56]</sup>。剪应力在横截面上的分布规律可表示为：

$$\tau_{\max} = \frac{M}{W_p} = M / \frac{\pi D^3}{16} \quad (2-16)$$

式中  $\tau_{\max}$  — 扭轴横截面上的最大剪应力；M—轴所受的扭矩； $W_p$ —转轴抗扭截面系数；D—实心扭轴直径。

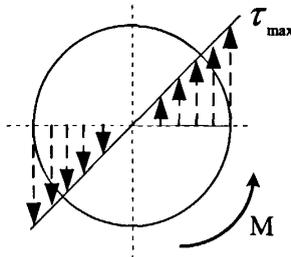


图 2.11 扭轴横截面上的剪应力分布

如图 2.12 所示，转轴扭转时切应力处在纵向轴的径向面上，在轴表面用两个横截面，两个径向纵截面及两个轴向纵截面截取出一个单元平行六面体来研究，因边长均为微量，故此六面体非常接近于正六面体。由圆轴扭转时应力分析可知，此单元处于纯剪切应力状态。所以轴表面任何单元平面的法向应力值都符合平面应力状态理论。如图 2.13 所示，在轴表面与轴向呈  $45^\circ$  和  $-45^\circ$  方向上分别产生最大拉应力和压应力<sup>[57]</sup>，其值为：

$$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \tau_{\max} = M / \frac{\pi D^3}{16} \quad (2-17)$$

相应的主应变  $\varepsilon_{\max}$  和  $\varepsilon_{\min}$  为：

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_{45^\circ} = \frac{\sigma_{\max}}{E} - \mu \frac{\sigma_{\min}}{E} = \frac{1+\mu}{E} \sigma_{\max} \quad (2-18)$$

$$\varepsilon_{\min} = \varepsilon_{-45^\circ} = \frac{\sigma_{\min}}{E} - \mu \frac{\sigma_{\max}}{E} = -\frac{1+\mu}{E} \sigma_{\max} \quad (2-19)$$

式中 E—杨氏弹性模量； $\mu$ —泊松比。

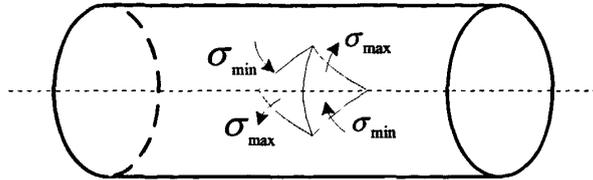


图 2.12 扭轴表面应力状态

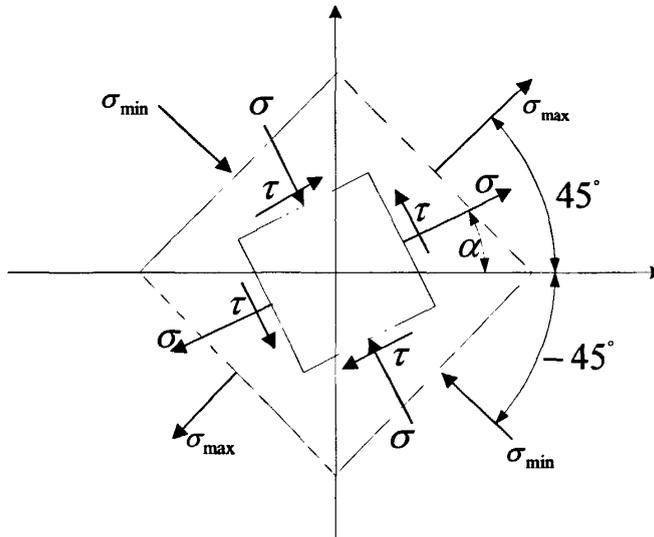


图 2.13 单元面积上的应力分析

可将应变片沿转轴轴线  $45^\circ$  和  $-45^\circ$  方向粘帖在转轴表面，就会受到相应的最大拉应力和压应力作用，将应变片组成半桥双臂测量电路（如图 2.10）。测量前调整电桥至平衡状态，当弹性扭力杆受扭矩 M 作用时，工作应变片  $R_1$  和  $R_2$  分别产生最大正负应变，此时测量电桥的输出电压为：

$$\Delta U = 2 \left( \frac{1}{4} U_0 \frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{1}{2} U_0 K \varepsilon \quad (2-20)$$

根据式 (2-17)、(2-18)、(2-19)、(2-20) 可得到应变电桥输出电压与扭轴所受扭矩的关系为：

$$\Delta U = \frac{1}{2} U_0 K \varepsilon = \frac{1}{2} U_0 K \frac{1+\mu}{E} \sigma_{\max} = \frac{1}{2} U_0 K M \frac{16(1+\mu)}{\pi D^3 E} \quad (2-21)$$

## 2.4 本章小结

本章首先介绍了转炉倾动机构的零部件组成及工作原理，并对转炉工作状态下倾动机构的负载力矩和力学关系进行了分析；接着对机构工作中的扭振现象进行了深入的计算与分析；最后结合实际课题研究的需求，对常用扭矩检测方法和应变法测扭矩原理进行了阐述，分析了惠斯登电桥测量电路的平衡条件和电桥电压输出关系，介绍弹性轴扭矩测试原理并得出了应变电桥输出电压与弹性轴扭矩间的对应关系。

### 3 转炉状态监测系统总体架构

本章介绍转炉实时状态监测系统的系统组成与总体架构,结合系统设计需求及数据采集设备和传感器的选用原则,进行数据采集设备与各信号传感模块的选型与设计,并对传感输入、控制输出、采集设备输入输出信号的电气连接关系作了说明。

#### 3.1 状态监测系统总体架构

开发具有设备状态信息的采集、数据传输、数据分析、实时状态显示、数据存储与管理、以及多任务操作等特点的设备综合状态监测与故障诊断系统,首先必须建立一个合理、可行的系统总体框架,确定基本实现方案,这是系统设计阶段的根本目标。在炼钢转炉实时状态监测系统的整个开发过程中,系统总体架构设计是一个必不可少的关键环节,系统整体设计的合理性在很大程度上决定了整个监测系统最终的成败。

设备的状态监测与故障诊断是一门正在高速发展的多学科交叉的边缘性学科,涉及机械、电子、测控、数字信号处理、统计模式识别以及计算机等技术,随着近年来测试技术、计算机技术、电子技术的迅速发展,状态监测及故障诊断方法也日新月异,因此在系统整体架构设计时,无论是硬件配置还是软件设计方面,都应充分考虑系统的适应性、灵活性和可扩展性,便与根据需要,不断扩展或更新系统。因此,在系统的硬件和软件设计时应考虑:

- 选用的处理模块,必须具备必要的功能及可扩展性;
- 软件结构设计上采用模块化的设计方法,降低软件开发的复杂度,保证模块的独立性,并根据需要进行增加和删减;
- 硬件配置采用拼装式积木结构,这样可根据需要随时更换和增加必要的功能部件,增强硬件的可维护性和替代性。

转炉实时状态监测系统主要由数据采集和状态监测两部分组成(如图 3.1):数据采集部分由各转炉倾动状态信息传感器、信号转换调理电路和数据采集卡组成,主要负责对转炉炉体倾角、扭力杆扭转应变、倾动电机转速、电压、电流以及润滑系统状态信号的采集、调理及转换,并经数据采集卡 A/D 转换后上传至工业控制计算机,实现对转炉状态信息统一采集与管理。状态监测部分主要由运行于工业控制计算机上的转炉状态监测软件和数据服务器组成,状态监测软件通过调用动态链接库实现对数据采集卡的参数配置、实时转炉状态数据读取;并对实时数据进行分析计算,以动态曲线及特征量形式对各状态量进行显示;对于超出系统设定警戒值的状态量,系统输出控制量进行异常显示和报警;对状态量进行预警判断的同时,把各状态量通过局域网上传至本地及炼钢厂中心数据库进行统一监

控和管理；并通过 RS485 总线将部分状态信息输出到现场显示屏进行显示，供现场技术人员参考；另外系统还可以实现历史状态数据的查询、回放与趋势分析。

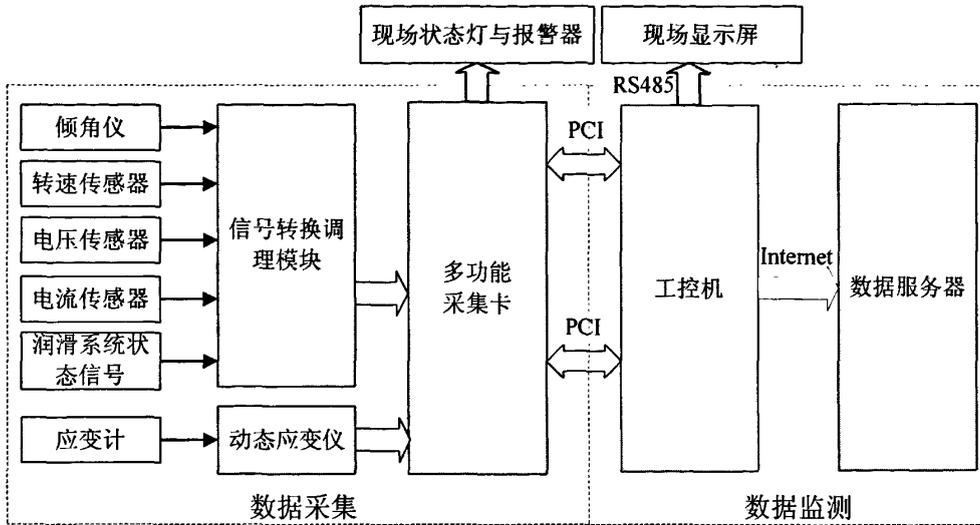


图 3.1 系统总体架构

本系统实现了对炼钢转炉工作过程中驱动电机运行状态参数、耳轴、扭力杆扭矩、转炉炉体倾角以及润滑系统状态的实时监测，及时发现各种异常状态信息，发出报警提示技术人员进行安全检查，排除事故隐患；另外当设备出现故障时，还可以根据历史数据回放，对故障原因进行初步诊断，减少设备维修时间，提高设备生产效率。

### 3.2 数据采集设备选型

数据采集是整个监测系统的设备运行状态信息的来源，其性能对系统运行的稳定性和可靠性起着决定性的作用。在选用数据采集设备时需要考虑以下因素<sup>[58]</sup>：

(1) 分辨率。分辨率是指数据采集设备区分两个相邻模拟电压的能力，通常用 A/D 转换的位数表示。

(2) 通道数。通道数是指输入信号通道的数量，选择时必须保证有足够的通道供测试系统使用；

(3) 输入信号范围。输入模拟通道的信号必须在数据采集设备的模拟信号输入范围内，才能被其正确处理；

(4) 最高采样频率。采样频率  $f$  是数据采集设备采集相邻两个数据的时间间隔  $\Delta T$  的倒数，即  $f=1/\Delta T$ ，而最高采样频率表示了数据采集设备所允许的最小时间间隔的倒数，根据香农采样定理，选择数据采集设备时其最高采样频率必须大于被测信号最大分析频率的 2 倍以上；

(5) 信号传输方式。常用的信号传输方式有串口传输、总线传输、USB 传输等；

(6) 其它功能。很多多功能数据采集卡还带有数字 I/O 口、计数器等功能。

本课题所研究的炼钢转炉状态监测系统共有 15 路模拟输入状态信号、2 路数字量输入信号，分别为：6 路应变测试信号、4 路电机电压信号、4 路电流信号、1 炉体倾角信号；2 路数字量输入信号组合表示润滑系统正常、油位低、油压低、油温高四种状态；8 路数字量输出信号，分别为：4 路电机异常信号、3 路润滑系统异常信号、1 路力矩异常信号；还需要 4 个计数器来进行电机转速测量。

根据系统的信号输入输出实际需求，选用 UA201 型 PCI 总线多功能采集卡作为监测系统数据采集设备，其主要性能指标如下：

- a) 分辨率：12bit
- b) 精度：低于 0.05%（满量程）
- c) 最高采样频率：125KHz
- d) 模拟输入通道：32 路单端或 16 路差动
- e) 输入范围：±5V
- f) 可选程控增益：1、2、4、8、16 倍
- g) 传输方式：PCI 总线
- h) 输入阻抗：>100MΩ
- i) FIFO 数据存储：16KB
- j) 数字 I/O 口：24 路（1 片 8255，可编程输入或输出，TTL 电平兼容）
- k) 定时计数器：6 通道 16 位可编程定时计数器（2 片 8254）
- l) 内部晶振：4MHz

该多功能数据采集卡的模拟输入通道数、分辨率、最高采样频率、数字输入输出通道、计数器等基本性能均满足监测系统的需求，而且使用微型计算机 PCI 总线形式与数据采集设备进行通信，不仅安装简单方便，而且数据传输速度快。此外，该数据采集卡拥有一个 16KB 的 FIFO 数据存储，允许一次采样大量数据，解决了数据采集设备与计算机速率不匹配带来的同步问题。该数据采集卡还拥有 1 片 8255 数字 I/O 并口芯片和 2 片 8254 定时计数芯片，满足了系统对数字量输入输出和电机转速测量的需要。因此 UA201 型数据采集卡满足本转炉状态监测系统开发的要求。

数据采集卡 UA201 的模拟信号输入范围为 ±5V，因此各路转炉状态信号都需要经过传感器与其放大调理电路将信号转变为此范围内的电压信号，才能输入采集卡进行正确采

集和处理。数据采集过程中,采集卡将采集到的各通道的模拟信号经过 A/D 转换后保存到 FIFO 数据存储单元内,此时系统控制计算机就可以通过向采集卡发送数据传输命令,将数据接收到计算机上进行进一步处理。但是,如果数据采集量较大,计算机处理速度又比较慢,一直存储在 FIFO 内的数据无法及时读取而导致 FIFO 存储器数据溢出,此时会造成存储器内部分采集数据丢失、采样信号不完整的情况,因此要保证数据的完整性,数据处理计算机必须及时读取存储在 FIFO 内的采样数据。

### 3.3 状态信号传感模块设计

#### 3.3.1 传感器选型

传感器是测试系统的起点,合理选择传感器是数据采集正确性的有效保证。传感器的选用原则主要有<sup>[58][59]</sup>:

(1)灵敏度。灵敏度是指输出端信号的变化量与引起该变化量的被测量变化量的比值。在量程范围内传感器的灵敏度越高越好,但要注意外界噪声干扰对传感器灵敏度的影响。

(2)线性范围。线性范围是指传感器输入量与输出量之间保持线性比例关系的测量范围。线性范围越宽,表明传感器的工作量程越大。

(3)动态特性。动态特性是指测量交变信号时,传感器在其所测频率范围内保持信号不失真的测量特性,主要包括传感器的响应时延、幅频特性及相频特性等。一般要求传感器的响应延迟时间越短越好;且在所测频率范围内,要求其幅频特性近似平直,相频特性为线性或者恒定不变。

(4)稳定性。稳定性是指传感器经过长时间的测试,其输出特性不发生变化的性能。影响传感器稳定性的主要因素有使用时间、温度、湿度等环境因素。

(5)精度。传感器的精度表示传感器的输出量与被测量之间的近似程度,包括传感器的测量值精度和重复精确度。一般定量分析测试对传感器的测量值精度和重复精确度要求较高,而定性分析测试一般只要求有较高的重复精度即可。

(6)测量方式。测量方式是指传感器在实际测量过程中的工作方式,例如:在线与非在线测量;接触式与非接触式测量等。

(7)其它因素。主要包括传感器的结构、信号输出形式、以及传感器信号线屏蔽等。

通常传感器传感元件所测得的物理量变化都较小,且无法直接测量,需要通过放大器将传感器敏感元件的物理变化量转变为实际可以测量的电信号输出。放大器选用主要与所用传感器的类型和特性有关,不同类型的传感器选用不同的放大器。此外,选用放大器通常还需要考虑以下几个原则:

(1)输入特性。输入特性包括信号输入的方式—差动输入或单端输入；信号输入耦合方式—交流耦合或直流耦合方式，以及共模抑制比等；

(2)输出特性。通常信号输出方式有电压输出和电流输出两种，信号输出类型要与采集设备相匹配。本监测系统数据采集卡的输入特性为-5~5V的电压信号，因此传感信号经过放大器处理后的输出信号必须是在此范围内的电压信号。此外，还应考虑输出阻抗及输出的稳定性：

(3)放大特性。放大特性包括增益范围、带宽、线性度以及增益的稳定性；

(4)其它特性。包括信噪比、零点漂移、温度漂移等。

### 3.3.2 应变传感模块设计

根据第二章弹性轴扭矩测量原理，系统采用应变检测方法对转炉倾动机构扭力杆扭矩进行动态测量，并通过耳轴与扭力杆转矩传递与换算关系，达到同时监测扭力杆和耳轴实时力矩状态的目的。电阻式应变计作为应变检测方法的主要测量元件，其基本特性有如下几个方面<sup>[60]</sup>：

#### (1) 灵敏系数

灵敏系数是指应变片安装于被测试件表面，在其敏感栅方向的单向应力作用下，应变片阻值的相对变化与试件表面上安装应变片区域的轴相应变之比。实验表明，电阻应变片的灵敏系数  $k$  恒小于电阻丝的灵敏度  $k$ ，其原因除了粘结层传递变形失真外，还存在有横向效应。

#### (2) 横向效应

粘贴在受单向拉伸应力试件上的应变片，其敏感栅是由多条直线和圆弧部分组成。这时，各直线段上的金属丝只感受沿轴向拉应变，电阻值将增加，但在圆弧段上，各微段不仅受到轴向应变产生阻值的变化，还受到垂直于轴向的横向应变产生的阻值的变化，这种现象称横向效应。

#### (3) 机械滞后

应变片安装在试件上以后，在一定温度下，其  $\frac{\Delta R}{R} - \varepsilon$  的加载特性与卸载特性不重合，在同一机械应变值  $\varepsilon$  下，其对应的  $\frac{\Delta R}{R}$  值不一致。加载特性曲线与卸载特性曲线的最大差值  $\Delta\varepsilon$  称应变片的机械滞后。产生机械滞后的原因，主要是敏感栅、基底和黏合剂在承受机械应变后所留下的残余形变所造成的，为了减少滞后，除选用合适的黏合剂外，最好在

新安装应变片后，做三次以上的加卸载循环后再正式测量。

(4) 零漂和蠕变

粘贴在试件上的应变片，在温度保持恒定、不承受机械应变时，其电阻值随时间而变化的特性，称为应变片的零漂。

如果在一定的温度下，使其承受恒定的机械应变，其电阻值随时间而变化的特性，称为应变片的蠕变。一般蠕变的方向与原应变变量变化的方向相反。

这两项指标都是用来衡量应变片传感特性对时间的稳定性，在长时间测量中其意义更为突出。

(5) 绝缘电阻

绝缘电阻是指应变片的引线与被测试件之间的电阻值。通常要求 50~100MΩ 左右。绝缘电阻过低，会造成应变片与试件之间漏电而产生测量误差。

根据电阻式应变计的上诉特性及传感器选用原则，结合转炉倾动机构扭力杆工作中的受交变循环应力作用及现场环境因素恶劣的特点，选用 BX120-4HA(11)型双轴向 45° 应变片，该系列应变片灵敏度高、受环境因素影响小，工作寿命长，性能稳定可靠<sup>[61]</sup>，其具体性能指标如表 3.1:

表 3.1 应变计性能指标

型号	BX120-4HA(11)	精度等级	A
电阻	120.2 ± 0.2Ω	栅长*栅宽	2 (4*3)
灵敏系数	2.08 ± 1%	横向效应	室温下 0.5%
机械滞后	室温下 2 με	疲劳寿命	室温下 10 <sup>7</sup>
蠕变	室温下 2 με (1 小时)	绝缘电阻	50000 MΩ

根据放大器选用原则及第二章应变测量电路设计要求，系统采用 SDY2101 型动态应变仪配合 BX120-4HA(11)型应变计组成应变测量电桥，完成应变物理信号到电信号的转换及与采集设备的信号匹配问题；SDY2101 型应变仪是一种具有自动平衡功能的动态电阻应变仪，主要用于实验应力分析及动力强度研究中，对结构及材料的任何变形进行动态应变测量。通道数量可以 2、4、6、8 自由组成，体积小、重量轻，便于携带和运输，采用直流电桥，电桥采用六线制，具有长导线补偿功能。仪器频带宽、校准方便，配接不同类型的应变片及应变式传感器，可以实现应力、拉压力、速度、加速度、位移、扭矩等多种物理量的测量，其典型测试框图如图 3.2。

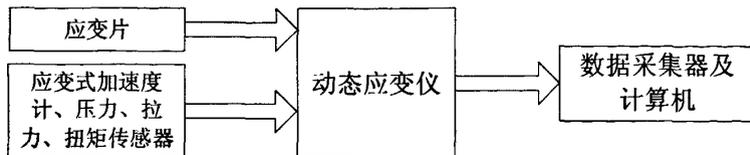


图 3.2 应变仪典型测试框图

SDY2101 型动态应变仪技术指标如下<sup>[62]</sup>:

- 通道数：2、4、6、8 等多通道组合
- 适用电桥电阻：60~1KΩ
- 供桥电压：2V、4V、8V（电流不小于 33mA）
- 应变系数：K=2.00
- 平衡范围：使用电桥电阻的 ±1%（约 ± 5000 με）  
    微调范围：± 5000 με
- 输入阻抗：>100MΩ
- 灵敏度：1.2V/100 με（桥压 4V）
- 非线性度：< ± 0.1%
- 频响：DC~35kHz(± 0.5dB)
- 信噪比：>50dB
- 共模抑制比：100dB
- 稳定性：零点漂移< ± 0.5%F.S ± 1 με（4 小时）  
    灵敏度变化< ± 0.2%F.S（4 小时）

转炉倾动机构扭力杆扭矩及扭振情况的监测是炼钢转炉状态监测的重要组成部分，本课题采用应变检测原理实现对扭力杆扭矩的实时监测，通过 SDY2101 型动态应变仪对安装在扭力杆轴表面的六通道应变计进行动态应变测量，应变仪在监测系统应用中的注意事项如下：

### 1、电桥平衡

各应变测量通道通电前接入应变仪组成电桥桥盒，开启应变仪电源开关，各测量通道进入工作状态，绿灯指示灯亮，将功能转换置于“测量位置”，增益开关放在欲选择的档位，按动“自动”电桥平衡按钮，然后调整“电桥平衡微调”电位器，使电桥平衡零点值最小，使放大器近似达到理想平衡状态。

### 2、桥压、增益选择

应变仪通道信号放大的增益开关设置 0、1/20、1/10、1/5、1/2、1 六档，桥压分 2V、

4V、8V 三档，增益微调可使被测信号有一个合适的输出幅度，使测量更准确。为此，预测被测输出电压值或应变值是必要的。每个通道放大器最大放大倍数为 6000 倍，若桥压为 2V，单应变片产生  $1\mu\epsilon$  应变时，应变仪输出约 6mV 峰值电压，使用时可以根据预计的应变产生值来选择合适增益开关位置，表 3.2 为应变仪增益与桥压选择组合对应的应变测量范围。

表 3.2 增益、桥压与应变测试范围

增益开关	增益微调	应变测量范围 ( $\mu\epsilon$ )		
		桥压 2V	桥压 4V	桥压 8V
1	最大	5~1300	3~650	2~325
	最小	13~3250	7~1600	4~800
1/2	最大	10~2600	5~1300	3~650
	最小	26~6500	13~3250	7~1620
1/5	最大	25~6500	13~3250	7~1620
	最小	65~16250	33~8100	17~4050
1/10	最大	50~13000	25~6500	13~3250
	最小	130~32500	65~16200	33~8100
1/20	最大	100~26000	50~13000	25~6500
	最小	260~65000	160~32500	65~16250

根据调查，国内大型 210 吨转炉最大事故倾动力矩约为 1300t·m，此时扭力杆所受最大扭矩约为 150t·m，根据第二章式(2-17)、(2-18)预测扭力杆最大应变值约为  $1100\mu\epsilon$ ，因此在实际测试过程中，应变仪桥压选 2V，增益开关选 1/5，此时当测得的应变值达到事故极值  $1100\mu\epsilon$  时，应变仪输出电压为 2.65V，在 UA201 采集卡模拟输入范围内。

在连续信号测量时，还可以通过观察过荷灯来适当调节增益，以保证仪器输出不过荷，输出信号又比较大。

### 3、校准值给定

应变仪“校准”功能相当于在每个通道内设置一个简易标准应变模拟仪，用以方便的校准被测应变值大小。例如：校准置“ $+500\mu\epsilon$ ”时，仪器的输出为 2.00V，置“测量”档，仪器输出信号峰值也为 2.00V，则说明测量信号的应变值为  $+500\mu\epsilon$ 。

为使校准更准确，校准前先将校准开关置“0”位，校准调零后再选择不同的应变值进行正负校准，校准完成后开始进行正常信号测量。

### 4、低通滤波器的选择

应变仪带有二阶巴特沃斯型有源低通滤波器，截止频率(HZ)分为 10、100、300、1K、10K。为了滤除测量信号中不必要的频率分量，应将滤波器开关置于高于被测信号 5-10 倍

的截止频率处，这样既可滤掉不相关的频率分量又能保证被测信号量的信号无衰减。

转炉倾动机构扭力杆扭矩和扭振应变信号频率范围在 30Hz 以下，因此在课题实际应用中选用低通滤波器的截止频率为 300Hz。

### 5、桥路的连接

桥盒是应变测量元件与应变仪连接的桥梁，SDY2101 桥盒引线结构如图 3.3 所示，R 为放在桥盒内的 120Ω精密线绕电阻，作为辅助电桥用。

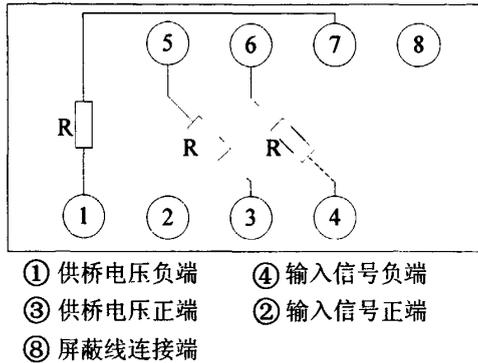


图 3.3 桥盒结构及引线说明

如图 3.4 为本课题所采用的半桥双臂桥路引线连接方法，R1、R2 为安装在现场倾动装置扭力杆上的电阻应变计，敏感栅粘帖方向分别沿转轴线 45°和 -45°方向，在扭矩作用下相邻两侧应变片敏感栅分别受到相应的最大拉应力和压应力作用，产生大小相等方向相反的正负应变。在实际测量时，应变片的连线，桥盒接线柱之间的连接都采用烙铁焊接，为防止外部电磁干扰，特别是 50Hz 交流供电干扰，桥盒与应变片之间采用三芯同轴屏蔽线，并将屏蔽层与接线盒⑧号端连接，提高信号传输的抗干扰性能。

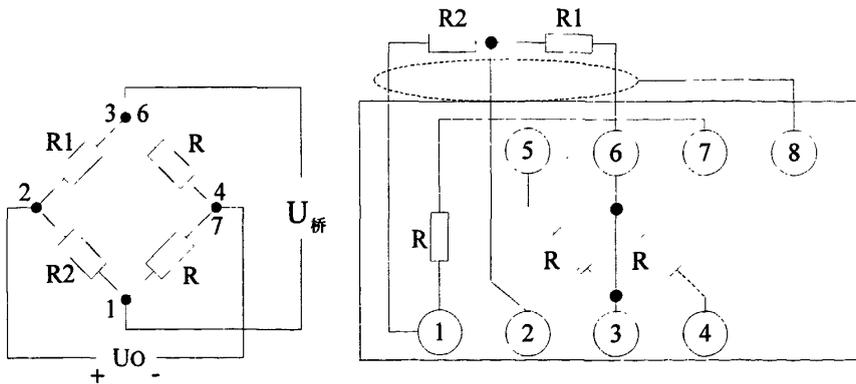


图 3.4 半桥双臂桥路引线连接

### 6、应变片灵敏度系数修正

SDY2101 动态应变仪设计使用的应变片灵敏度系数  $K=2.00$ ，但本课题实际使用的应变

片灵敏度系数  $K_p=2.06$ ，那么实际的应变值为：

$$\varepsilon_p = \frac{K}{K_p} \varepsilon_c \tag{3-1}$$

式中： $\varepsilon_p$ 为实际的应变值； $\varepsilon_c$ 为应变仪测得的应变值； $K_p$ 所使用的电阻应变片的灵敏度系数。

### 3.3.3 电机转速传感模块设计

转速测量传感器有模拟式和数字式两种。模拟式转速传感器通常采用测速发电机，输出的是模拟电压信号；数字式转速传感器常见的测速元件有光电编码盘、霍尔元件等，输出的是数字信号<sup>[63][64][65]</sup>。本转炉状态监测系统驱动电机转速传感模块选用性价比高的霍尔元件作为转速传感器，其响应频率  $\geq 5\text{KHz}$ ，工作精度 $\pm 1$ 个脉冲，有效工作距离 1-5mm，在 5V 工作电压下，其方波脉冲输出高电平约为 5V，低电平 $\leq 0.3\text{V}$ ，与 TTL 电平兼容。转炉倾动电机的工作转速范围为 600-1000 rpm，该传感器可以满足转速测量要求。

安装时将转速传感器通过支架固定在电机座上，并在轴套表面正对传感器下方位置安装一片磁钢，调整传感器与磁钢表面间的距离，使其处于有效工作距离范围内，这样电机主轴每转一圈转速传感器便输出 1 个 TTL 脉冲信号。

电机转速的测量是利用 UA201 采集卡的 8255 数字 I/O 芯片和 8254 定时计数芯片实现的。具体实现方案如图 3.5：4 个转速传感器脉冲信号输出端 P0-P3 分别与 8255 的 PC0-PC3 端口相连，使计算机可以通过查询采集卡 PC 端口检测传感器输出脉冲；晶振接到 8254(1) T2 定时计数器 CLK2 端，T2 输出端 OUT2 作为其余计数器的时钟信号；将 T2 置为分频模式工作(即工作方式 3)，并写入初值 400，则其输出端 OUT2 产生 0.1ms 的方波信号，并输入其余四个 CLK 输入端口，作为各端口时钟信号。8254(1)和 8254(2)的 T0、T1 设置为计数器模式，分别对应 4 个转速传感器(对应关系见表 3.3)，当查询到 8255 PC 端口对应转速传感器第一个脉冲信号时向对应的计数器写入初值，启动其计数，第二个脉冲信号到来时停止计数器计数，并读取当前的计数值 N,可得转速为：

$$n = 60 / (0.1 * 10^{-3} * N) = 6 * 10^5 / N \text{ (rpm)} \tag{3-2}$$

表 3.3 电机转速传感器与定时器对应表

转速传感器	对应定时器	转速传感器	对应定时器
1#电机	8254(1) T0	3#电机	8254(2) T0
2#电机	8254(1) T1	4#电机	8254(2) T1

当倾动电机以最高转速 1000rpm 运行时，在转速传感器脉冲输出间隔时间内，计数器

时钟脉冲为 600 次(即计数器计数 600); 以最低转速 450rpm 运行时, 计数器时钟脉冲约为 1333 次(即计数器计数约 1333), 均不会超出计数器计数范围 65535(2<sup>16</sup>-1), 因此各计数器初值默认设置为 10000。

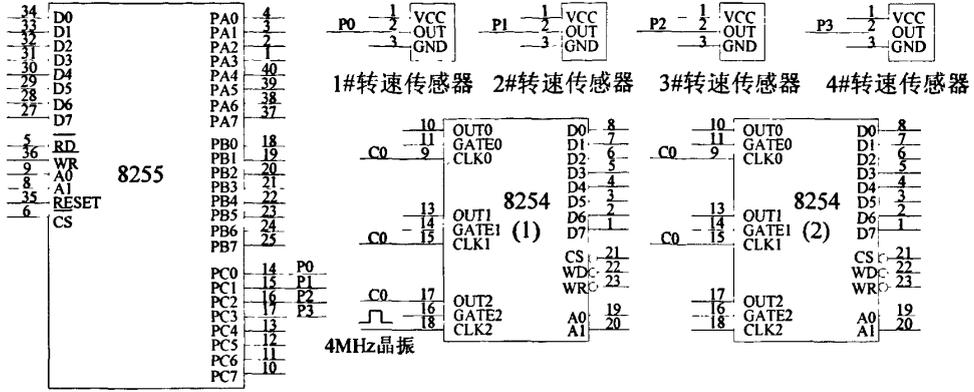


图 3.5 转速传感模块电路图

### 3.3.4 电压、电流与倾角传感模块设计

对电机电压、电流参数的监测采用的是 LV100 电压传感器和 LT 2005-S 多级电流传感器, 两种传感器内部均为带霍尔元件的闭环磁平横式结构, 以原、副边磁场补偿原理作为信号转换的依据。霍尔电流、电压传感器综合了互感器与分流器的所有优点, 同时又克服了互感器与分流器的不足(互感器只适用于 50Hz 工频测量; 分流器无法进行隔离测量)。该类型传感器具有以下特点<sup>[66][67]</sup>:

- 可测量任意波形的电压和电流。霍尔电压、电流传感器可测量任意波形的电压和电流参量, 如直流、交流和脉冲波形等, 也可以对瞬态峰值参数进行测量, 其副边电路可以如实的反映原边电流的波形;
- 精度高。一般霍尔电流、电压传感器在工作区域内的精度优于1%, 该精度适合于任何波形的测量;
- 线性度优于0.1%;
- 动态性能好。一般霍尔电流、电压传感器动态响应时间小于1 μs, 跟踪速度 di/dt 高于 50 A/ μs;
- 工作频带宽。可在 0~100kHz 频率范围内很好地工作;
- 过载能力强, 测量范围大 (LV100 测量范围为 0-2500V; LT 2005-S 测量范围为 ± 2000 A);
- 可靠性高。平均无故障工作时间大于 5\*10<sup>4</sup> 小时;
- 尺寸小, 重量轻, 易于安装且不会给系统带来任何影响。

上述 LV100 电压传感器和 LT 2005-S 电流传感器, 信号输出端电压由串联在传感器原边回路上的外部电阻 R 决定, 当 R=50Ω 时, 输出端电压为 -5~5V, 可以直接接到数据采

集卡模拟量输入端。

转炉炉体倾角传感模块采用 FEC-180-1I-I1 型工业级电流倾角传感器，角度测量范围  $\pm 180^\circ$ ，分辨率为  $0.01^\circ$ ，输出信号为 4~20mA 直流信号，在信号采集端通过串接  $250\Omega$  精密电阻将其转换成 1~5V 电压信号。

### 3.4 系统信号连接关系

综合前面所述，本转炉状态监测系统需测量模拟信号 15 路，其中应变信号 6 路，电机电压、电流模拟信号各 4 路，炉体倾角信号 1 路；需测量的脉冲转速信号 4 路，即 4 个电机转速；需测量的数字量输入信号 2 路，即 2 位的转炉润滑系统状态信号；需要输出的数字信号 8 路，即 4 路电机异常信号、3 路润滑系统异常信号、1 路力矩异常信号。各输入输出信号连接对应关系如表 3.4 所示：

表 3.4 系统输入输出信号连接对应关系表

信号输入处处端类别	接入数据采集卡位置
扭力杆六路应变传感模块输出端	差分模入通道 0~5
1-4#电机电压传感模块输出端	差分模入通道 6~9
1-4#电机电流传感模块输出端	差分模入通道 10~13
炉体倾角传感模块输出端	差分模入通道 14
1-4#电机转速传感模块输出端	数字量 I/O: PC0~PC3
润滑系统状态信号输出端	数字量 I/O: PA0、PA1
1-4#电机异常状态灯输入端	数字量 I/O: PB0~PB3
润滑系统异常状态灯输入端	数字量 I/O: PB4~PB6
倾动力矩异常状态等输入端	数字量 I/O: PB7

除了以上信号以外，系统还需要通过 RS232-485 转换器将现场 RS485 接口显示屏与工业控制计算机 RS232 接口连接，将实时炉体倾角与力矩信息传输到现场转炉操作台进行显示。

### 3.5 本章小结

本章首先确定了运用多种信号传感模块、数据采集设备和工业控制计算机建立基于 PC 机的转炉实时状态监测系统的整体设计方案，然后提出数据采集设备与传感器选用的基本原则，接着综合系统需求和设备特性选择 UA201 作为数据采集与信号输出设备，并对应变传感模块、电机转速传感模块、电压、电流与倾角传感模块的设计与选型做了阐述，最后描述了系统各个信号输入输出连接对应关系，完成监测系统电气部分设计。

## 4 转炉状态监测系统软件设计与实现

监测软件设计是转炉状态监测系统的重要组成部分,它不仅实现了系统硬件资源的互联与控制,还承担了与用户间的人际交互功能。本章将对监测软件的运行与开发环境加以介绍,并对监测软件所应具有的功能需求进行分析,进而提出了监测软件的整体设计框架,并在此基础上对相关的设计技术要点及软件模块划分与具体功能实现进行阐述。

### 4.1 软件运行环境与开发工具

转炉状态监测软件所采用的开发工具为目前流行的面向对象的可视化开发工具 Visual C++ 6.0,运行于目前工业测试与控制领域最流行的 Windows 2000 操作系统。

Windows 2000 是一个有着图形用户界面(GUI)的抢占式单用户多任务操作系统,拥有全球最大的市场占有率,广泛应用于个人 PC、服务器、和工业测控领域。GUI 是当今计算机发展的重大成就之一,它极大地方便了非专业用户对计算机的操作和管理;为了方便多个程序的运行以及这些程序间信息的交换,Windows 支持多任务,在同一时刻能支持多个应用程序运行与管理。

“动态链接”是 Windows 系统运转的核心,它为应用程序提供了丰富的函数调用接口,用于实现其内部事务处理及在用户界面及视频显示器上显示图形与文本信息,这些函数都是通过动态链接库即 DLL 实现的。Windows 主要功能由三个动态链接库实现,它们分别为 Kernel, User 和 GDI: Kernel 处理所有通常由操作系统内核处理的事务——内存管理、任务处理和文件读写; User 指用户界面 DLL 动态链接库,用于实现所有窗口逻辑; GDI 是一个图形设备接口,允许程序在显示屏及打印机等设备上显示图形和文本信息<sup>[68]</sup>。

Windows 2000 系统综合了 Windows 98 的易用性、用户友好性与 Windows NT 系统的健壮性、可靠性和安全性,可扩展和可移植性好,非常适合在工业测控领域使用。

面向对象的程序设计技术是当今全球程序员普遍采用的一种程序设计方法,是软件开发的最新潮流。在众多的开发工具中,Microsoft 公司的 Visual C++ 6.0 独树一帜,将面向对象的程序设计方法和可视化的软件开发环境完美的结合起来。作为一个基于 Windows 操作系统的可视化集成开发环境(Integrated Development Environment, IDE),它由许多组件组成,包括编辑器、调试器以及程序向导 App Wizard、类向导 Class Wizard 等开发工具,这些组件通过一个名为 Developer Studio 的组件集成为和谐的开发环境,使得开发 Windows 平台的应用程序更加方便、深入。Visual C++ 程序的执行速度以及对操作系统访问的权限之高,是其它许多语言无法比拟的,加上 Windows 操作系统的支持,使得 Visual C++ 的高

级程序员对整个计算机的硬件系统与软件系统在各方面的访问和控制更加游刃有余。因此,有人说:“用 Visual C++的眼光看,整个计算机都是透明的,或者说是完全裸露的”<sup>[69]</sup>。

Visual C++它大概可以分成三个主要的部分:

1. Developer Studio, 这是一个集成开发环境, VC 开发工作的 99%都是在它上面完成。

2. MFC。从理论上讲, MFC 并不是专用于 Visual C++, Borland C++, C++ Builder 和 Symantec C++同样可以处理 MFC。同时,用 Visual C++编写代码也并不意味着一定要用 MFC,只要愿意, Visual C++也可以用来编写 SDK 程序,或者使用 STL、ATL。不过, Visual C++本来就是为 MFC 打造的,其中的许多特征和语言扩展也是为 MFC 而设计的,所以用 Visual C++而不用 MFC 就等于抛弃了 Visual C++中很大一部分功能。但是, Visual C++也不等于 MFC。

3. Platform SDK。这才是 Visual C++和整个 Visual Studio 的精华和灵魂,虽然很少能直接接触到它。大致说来, Platform SDK 是以 Microsoft C/C++编译器为核心,配合汇编开发环境 MASM,辅以其他一些工具和文档资料。上面说到 Developer Studio 没有编译程序的功能,编译功能都是由 CL, NMAKE, 和其他许许多多命令行程序完成的,这些底层程序才是构成 Visual Studio 的基石。

## 4.2 监测系统软件总体设计

### 4.2.1 软件需求分析

转炉状态监测系统软件运行于基于 Windows 2000 操作系统的工业控制计算机,通过控制 PCI 多功能数据采集卡实时采集转炉扭力杆扭矩、炉体倾角、倾动电机电压、电流、转速以及润滑系统状态等数据,并承担实时采样数据的处理、分析和计算,将转炉各状态量的计算结果以动态参数和波形曲线的形式进行实时显示,同时根据预先设定的各状态量警戒值进行转炉状态异常判断,输出转炉力矩、电机、润滑系统等运行状态控制量控制现场状态指示 LED 进行显示及报警器报警,并将部分信息通过 RS232 转 RS485 串口传输到转炉操作现场 LED 数字显示屏显示,供现场技术人员及时了解和掌握转炉实时状态信息,另外系统会将这些状态数据存储到本地及局域网中心 SQL Server 数据库,供炼钢厂控制中心对数据进行统一监控及本地系统对历史数据的查询、分析和回放。

系统软件的任务是开发出运行于 Windows 2000 平台的高效、快速采集数据、计算分析,并进行显示、控制输出和数据库存储的应用程序,所使用的开发工具是 Visual C++ 6.0 和 SQL Server 2000,它需要具备以下功能:

#### (1) 数据采集

通过数据采集卡动态链接库控制采集卡采样参数设置(包括采样点数、采样频率和采样通道)、I/O口读写以及定时计数器设置,实时采集扭力杆扭矩、炉体倾角、电机电压、电流、转速以及润滑系统状态等状态数据;

### (2) 数据管理与分析计算

数据管理主要是将采集上来的各状态数据根据类别分配到各自的待处理缓冲区,并提供相应的读取接口。分析计算主要是对各类采样数据的算法预处理及通过灵敏度换算得出状态参量真值的过程。

### (3) 良好的用户交互与图形显示界面

它是系统与用户信息交互的桥梁,一方面要实时响应用户的控制命令,包括启动和停止系统、系统运行参数设置和数据库连接与存储操作等操作;另一方面是实时地显示转炉炉体倾角、扭矩、电机运行电压、电流、转速状态信息及润滑系统状态等参数状态曲线和实时数值大小,以供技术人员参考图形界面和数据显示来判断设备的运行状况,从而及时发现故障隐患,提前预防和维护。考虑到功能的差异性和操作的方便性,可分以下几个子界面:

#### ➤ 系统参数设置界面

采样通道、采样频率、采样次数的设置;扭矩零点基量设置、灵敏度设置;倾角范围设置、扭矩范围设置、炉体零位设置、电机参量设置;趋势分析与查询窗口缩放范围和时间设置;根据用户的需求可修改系统参数配置值,自动与其它功能界面建立动态链接,实现参数配置表的动态设置与读取。

#### ➤ 数据库设置界面

设置需要连接的本地数据库的服务器名、DSN、数据库名及授权用户名和密码,及测试连接操作;设置需要上传数据的远程中心数据库的服务器名、DSN、数据库名、授权用户名和密码、扭矩字段标签、电机参量标签及测试连接等操作;根据实际情况选择是否将实时数据上传至远程中心数据库及现场显示屏。

#### ➤ 系统控制界面

启动/停止监测系统;激活系统参数设置、数据库设置、和趋势分析界面。

#### ➤ 实时图形界面

将采集上来的实时状态数据进行分析和预处理后,通过灵敏度换算处理实现从传感器信号转换、A/D模数转换到真实状态测量值的换算;将各状态量的计算结果以实时动态曲线及特征量的形式进行显示。

在对设备进行状态监测时，由于传感器检测到的扭转应变、倾角、电压、电流等各种信号都是连续信号，需经过 A/D 采样将连续信号转换为离散信号，即时间序列，才能通过计算机对信号进行分析、处理和显示。由于状态信号的动态过程比较复杂，很难从测量到的信号数值直接分析系统状态的变化规律，因此采用实时图形曲线及特征量的方式将测试数据形象化的表达出来，尤其是人们所关心的特征（比如最大、最小值等），以便更深刻和集中的了解设备运行过程中的状态参量变化规律，判断设备状态的变化趋势以及状态的属性<sup>[70]</sup>。

#### ➤ 历史回放界面

设置历史回放与数据趋势分析参数（查询单位、起始时间、截止时间、显示参量）；历史状态参量趋势图显示（扭矩、倾角、电机运行参量、润滑状态参量的趋势图）；提供时间段查询、和查询单位选择接口，实现对相应时间段、相应时间单位下历史状态参量数据的趋势图回放。

历史回放是把所测得的状态数据值按一定的时间顺序排列起来进行趋势分析。这些特征数据随着时间推移所产生的状态变化，对机械设备的故障预判和设备维护有重要作用。

#### (4) 状态量输出与报警

根据各状态参量的计算结果和客户实际需求，通过 RS485 串口协议输出部分状态参量至现场显示屏显示，并将各参量与系统设定的参量警戒值进行对比判断，对超出警戒值范围的状态参量（扭矩、电机电压、电流、转速、润滑系统状态等），通过多功能数据采集卡 I/O 口输出数字量控制现场状态指示灯显示设备该状态参量异常及报警器报警。

#### (5) 数据库存储

将经过实时分析计算得出的状态量真值存储到本机 SQL Server 数据库进行数据储存和管理，为转炉状态历史数据的趋势分析提供数据支持。根据客户需求，将这些数据上传至钢厂远程数据中心服务器，便于企业对整个炼钢流程状态的统一监控和管理。

### 4.2.2 软件框架设计

根据以上对系统软件功能需求的分析，为了充分利用计算机 CPU 资源，加快系统运行和响应速度，提高监测系统实时性能，系统软件采用多线程运行的方式并行处理各项功能任务<sup>[71]</sup>，其中主线程负责系统控制、图形及状态显示和历史数据趋势分析等功能的实现，完成应用程序界面的创建和用户消息处理和功能响应。而其开辟的三条子线程中，数据采集管理子线程用于对采集卡端口模拟量数据的实时采集并把数据分发到各指定的状态量缓存区；而数据分类处理子线程是根据图形界面显示和数据存储的需要，分别对数据进行

相应处理和分析计算，得出测量参量特征值；判断输出线程则根据计算得出的实时状态参量与系统设定的参量警戒值依照预定规则进行对比判断，并输出控制量进行状态显示及报警控制。当主线程接收到用户的系统停止的消息后，将销毁三条子线程，直至再次接收到用户启动系统消息，重新开启子线程。

采用模块化软件设计方法，即将应用软件根据功能划分成多个模块，每个模块保持一定的独立性，在协同工作时，通过相互之间的接口完成实际的功能任务。软件设计的模块化降低了设计开发的复杂度并使设计步骤更加清晰，有利于提高软件健壮性、灵活性和可复用性<sup>[72][73]</sup>。

基于模块化设计思想，便于根据需求对软件的修改维护和后续开发，监测系统软件可划分为状态数据采集管理模块、参数配置模块、系统控制模块、数据分析模块、图形显示模块、趋势分析模块、数据库存储模块、输出报警控制模块。各线程调用上述模块来完成系统功能，其调用关系如图 4.1 所示。

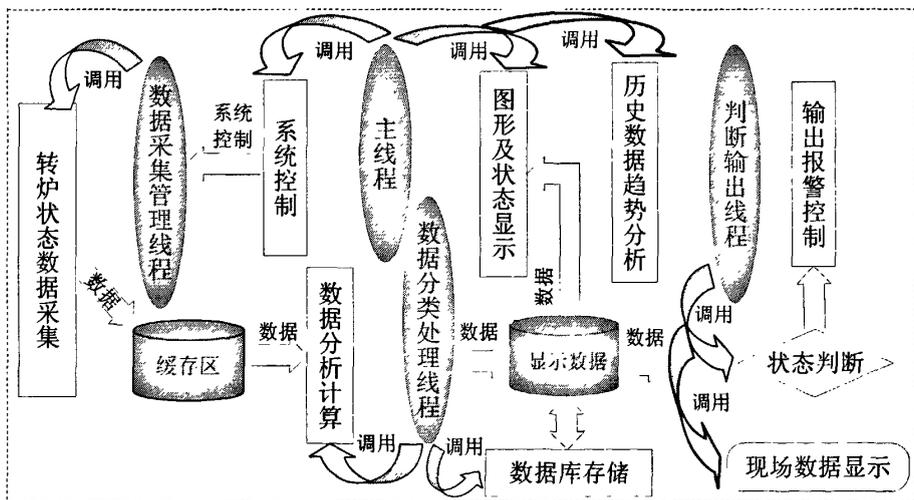


图 4.1 线程与模块调用关系图

### 4.3 监测软件设计技术要点

#### 4.3.1 动态链接库在数据采集中的应用

动态链接库 (Dynamic-Link Library), 简称 DLL, 是一个可以被任何应用程序共享的程序模块, 其中封装了一些可以被共享的资源 and 例程。它是基于 Windows 系统进行应用程序设计的一个重要组成部分。如果在软件开发中使用普通的函数库, 那么在程序链接时会将库函数代码拷贝到程序可执行文件中, 这是一种隐式链接, 当多个同样的程序执行时, 系统内存会保留许多重复的代码副本, 造成了内存资源的浪费。但是使用显示链接 DLL

却不是简单的将库函数代码拷贝，而是在程序中记录了函数的接口和入口点，程序只有在执行时才将库代码载入内存。无论有多少程序使用同一 DLL，内存中都只有一个该 DLL 的副本，当它没有被任何程序调用时，就会被系统自动移出内存区，从而减少系统对内存与磁盘的需求。因此，在建立应用程序的可执行文件时，只需要在程序运行时动态装载 DLL 即可，并不需要将 DLL 文件静态链接到程序代码中。

在大型软件系统开发过程中 DLL 发挥着非常重要的作用。一个大型系统如果只用一个 .exe 可执行文件完成，那么程序势必会非常庞大，而且也不可避免的会有很多重复的功能代码。如果能将单一的庞大程序分成主程序和一些小的 DLL 动态链接库来分别进行开发，不但可以减少软件开发的工作量，而且访问速度也会得到提高。

应用程序与动态链接库链接，DLL 才能通过应用程序调用执行。链接的方法，主要有两种：隐式链接和显示链接<sup>[74]</sup>：

#### ➤ 隐式链接

即静态加载，需要把生成动态连接库时产生的库文件加载到应用程序工程中，执行应用程序的同时也加载所需的 DLL，在应用程序退出之前，DLL 一直存在于该应用程序的地址空间中。这种链接方式由编译系统完成对 DLL 的加载和应用程序结束时对 DLL 卸载，简单实用，但不够灵活，只能满足一般要求。

#### ➤ 显式链接

即动态加载，是指应用程序在执行过程中随时可以加载 DLL 文件，也可以随时卸载 DLL 文件，这是隐式链接所无法做到的，所以显式链接具有更好的灵活性，对于解释性语言更为合适。但是实现显式链接要复杂一些，在应用程序中用 LoadLibrary 或 MFC 提供的 AfxLoadLibrary 显式的将自己所做的动态链接库调进来，动态链接库的文件名即是上述两个函数的参数，此后再用 GetProcAddress 获取想要引入的函数。自此，你就可以像使用如同在应用程序自定义的函数一样来调用此引入函数。在应用程序退出之前，应该用 FreeLibrary 或 MFC 提供的 AfxFreeLibrary 释放动态链接库。这种方式虽然使用上略显复杂，但能更加有效地使用内存，是编制大型应用程序时的重要形式。

系统监测软件控制 UA201 多功能数据采集卡对其工作参数进行设置，比如采样点数、采样频率和采样通道、I/O 口设置以及定时计数器设置等。这些控制的实现是通过链接数据采集设备所提供的动态链接库，进而调用该链接库所提供的数据采集与设备控制函数来实现的。

UA201 多功能数据采集卡提供了一个名为 UA200.DLL 的动态链接库，在此动态链接

库中包含了所有对设备进行参数配置及数据采集控制的函数，支持 UA201 采集卡的各种功能，监控系统可以通过调用这些函数完成各项数据采集与控制输出任务。

本监测系统采用动态加载方式实现对采集设备的控制，这样即可以实现对设备控制函数的灵活调用，又能减少系统内存占用。在数据采集模块中，用户通过选择控制界面上的“启动监测”选项，此时，系统便自动通过 LoadLibrary 显式的与动态连接库建立链接，并调用链接库中对应控制函数的进行设备启动、初始化、数据采集及 I/O 输入输出控制；当用户选择“停止监测”选项时，系统就调用结束采样和设备关闭函数，并利用 FreeLibrary 释放动态链接库。

因操作系统链接动态链接库时，先从当前可执行文件所在目录开始搜索配对，然后在到其它工作目录进行搜索，因此为了节省系统搜索时间，必须将 UA200.DLL 和 UA200.H 两个文件存储到当前可执行文件所在文件夹目录下，这样在采用显示链接方法时，系统会在第一时间完成 DLL 链接。

系统调用动态链接库设备功能函数的代码如下：

```
typedef HANDLE _stdcall(*pOpen)();
typedef HANDLE _stdcall(*pClose)(HANDLE h);
typedef void _stdcall (*pmm)(HANDLE h, short *addat, short fch,short chn, unsigned
short fcode, long leng, short gain, short tr)
typedef void _stdcall (*pstart)(HANDLE h, short fch, short chn, unsigned short fcode,
short gain);
typedef void _stdcall (*pend)(HANDLE h);
typedef void _stdcall (*poutb) (HANDLE h, UCHAR addr, UCHAR dat);
typedef UCHAR _stdcall (*pinb)(HANDLE h, UCHAR addr);
//定义指向和 DLL 中相同的函数原型指针
HINSTANCE hDLL;
hInst = LoadLibrary("ua200.dll");
//显式调用动态链接库
(pOpen)function_open = (pOpen)GetProcAddress(hInst,"OpenUA200");
//获取打开设备函数
(pstart)function_start = (pstart)GetProcAddress(hInst,"Start_201");
//获取采样参数初始化函数
(pmm)function_readdata = (pmm)GetProcAddress(hInst,"Mm201");
```

```
//获取采样数据读取函数
(pstart)function_endread = (pstart)GetProcAddress(hInst,"End_201");
//获取停止采样函数
(pClose)function_close = (pClose)GetProcAddress(hInst,"CloseUA200");
//获取关闭设备函数
(poutb)function_outb = (poutb)GetProcAddress(hInst,"outb");
//获取 I/O 口输出函数
(pinb)function_inb = (pinb)GetProcAddress(hInst,"inb");
//获取 I/O 口读取函数
FreeLibrary(hInst);
//释放对动态链接库的动态调用
```

当然,设计时必须要在软件的头文件中首先对上述函数加以声明。利用动态链接库的方法进行软件开发,方便的解决了 PC 机和数据采集设备在不同平台内的编程,不同编译器编译等问题。开发人员只需获得到采集设备的程序头文件及其动态链接库,并掌握该动态链接库中的函数名及参数形式,而不需要知道具体功能函数的实现形式,就可以实现函数调用。

#### 4.3.2 多线程技术应用

系统在对转炉状态进行实时监测任务时,需要不断的控制数据采集设备进行数据采集,并实时读取采集上来的应变、电压、电流、转速、倾角等原始数据;与此同时,系统将这些不同的状态数据通过各自的数据处理方法进行分析计算,将最终的状态真值以实时波形及特征量的形式进行动态显示,并将实时状态数据存储到本地及远程数据库;此外,还需要对这些状态量根据预先设定的预警规则进行异常判断,并根据判断结果控制现场状态指示灯及报警器状态。为了提高系统的数据处理能力与资源使用效率,保证系统状态监测的实时性,设计时采用多线程方法来实现上述功能。

线程(thread),有时被称为轻量级进程(Lightweight Process, LWP),是程序执行流的最小单元。一个标准的线程由线程 ID,当前指令指针,寄存器集合和堆栈组成。另外,线程是进程中的一个实体,是被系统独立调度和分派的基本单位。进程作为应用程序的执行实例,拥有运行的程序及程序所用到的内存和系统资源,一个进程可以由多个线程组成,但线程本身不拥有系统资源,但它可与其所在进程下的其它线程共享进程所拥有的全部资源。对于一个应用程序来说,所有线程都并行运行在这个程序内,使用与该应用程序相同

的地址空间，各自执行不同的功能任务。

采用多线程的优势在于可以提高 CPU 的利用率，特别是在一个应用程序中需要在同一时间完成多项任务时，多线程可以把程序中占据长时间的等待任务作为一个单独线程放到后台去处理，实现多个任务线程的并行处理，避免某项任务因为等待而长时间占用 CPU 时间，从而提高了程序的运行效率。另外，线程间的通信也非常方便，在 Windows 系统中每个线程都拥有自己的消息队列，各线程可以通过给其它线程发送消息的形式来进行相互通信。当然多线程机制也并不是完美无缺的，线程也是程序，需要占用内存空间，线程越多内存空间消耗也越大；多线程也需要操作系统管理和协调，CPU 会以轮转方式为每个线程提供时间片进行管理与调度，因此需要消耗一定的 CPU 时间；另外线程之间对共享资源的访问也会相互影响。

系统软件在进行监测任务过程中，需要在较短的时间内完成系统控制、状态数据采集、分析计算、图形显示、数据库存储及报警输出等任务，因此本系统软件在设计过程中充分利用 Windows 系统多线程的特点将各个不同的任务分布到 1 个主线程和 3 个子线程中，使各个任务同步协调运行，保证监测的实时性。其中主线程负责用户界面的创建、消息处理、以及系统控制、图形及状态显示和历史数据趋势分析等任务。另外 3 条子线程分别为：数据采集管理子线程——负责对多功能数据采集卡进行参数配置、状态模拟数据采集以及对采集数据的分类管理，数据采集管理任务源源不断的提供转炉设备的实时状态数据，是整个系统正常运行的基础和保证，因此为了保证数据采集的稳定性和可靠性，在开辟该线程时为其设置较高的优先级；数据分类处理子线程——负责对采集过来的不同类别的状态数据进行分析计算，状态真值计算结果的数据库存储，为图形显示、判断输出、及历史数据回放提供数据支持；判断输出子线程——负责根据计算得出的实时状态参量真值与系统设定的参量警戒值依照预定规则进行对比判断，并输出控制量进行状态显示及报警控制。

在 Visual C++开发环境下可以方便的实现多线程编程技术，它提供很多与多线程相关的函数和类，用于 VC 环境下实现多线程的创建、挂起、恢复和终止等操作。下面以数据采集管理子线程为例，对其实现过程作如下说明：

```
void CForcemonDlg::OnStart() //监测启动函数
{
    .....
    hThread = CreateThread(NULL, 0, SampleDataThread, this, 0, 0);
    //创建线程
    SetThreadPriority(hThread, THREAD_PRIORITY_HIGHEST);
```

```
    //设置线程优先级
    .....
}
void WINAPI SampleDataThread (LPVOID pParam)//数据采集管理线程
{
    .....//代码实现
}
```

在系统启动监测的同时，创建数据采集管理线程，并为其设置高优先级，线程自动运行开始数据采集与管理，其它线程的实现方法基本一致。

由于系统运行时，数据采集管理线程与据分类处理线程、数据分类处理线程与主线程数据显示及判断输出线程之间存在着临界数据资源缓冲区，为了保证数据的正确性和完整性，程序中采用关键区域 (Critical Section) 来实现线程间的同步。Critical Section 是 Win32 程序中使用最普遍的一种线程同步机制，在程序中通常将多个线程访问共享资源的代码部分作为关键区，保证该共享资源在同一时间只能被一个线程访问，使用过程中应注意访问完成后及时释放关键区，便于其它等待访问该共享资源的线程及时获得访问权。

在本监测系统中，数据采集管理线程需要将实时采集上来的状态数据按类别写入缓存区，而数据分类处理线程又要及时从缓存区读取新的状态数据进行处理，因此在每次数据采集管理线程向缓存区写数据时，将该代码段定义为关键区，在开始处调用 EnterCriticalSection 函数，判断是否有线程访问缓存区，如果没有，则更新 CRITICAL\_SECTION 结构成员变量的值，并将当前的调用线程赋予资源访问权，如果有线程正在访问临界区的资源，该函数则将调用线程置为等待状态；在代码结束处调用 LeaveCriticalSection 函数，释放关键区资源的所有权，使其它等待临界区资源的线程能够有机会获得关键区资源的所有权。具体应用实例如下：

```
CRITICAL_SECTION SampleSection;
void WINAPI SampleDataThread (LPVOID pParam)//数据采集管理线程
{
    .....
    EnterCriticalSection(&SampleSection);
    //缓存区操作代码
    LeaveCriticalSection(&SampleSection);
    .....
}
```

主线程的图形显示与判断输出线程的状态判断及控制输出都要依赖于数据分类处理线程对实时采样数据的处理结果，因此线程间采用事件(Event)来进行相互通信，当数据分类处理线程处理完一组状态数据时，便对数据处理完成事件进行置位，通知其它两个线程进行数据读取，实现过程如下：

```
HANDLE hDataReadyEvent = NULL; // 数据处理完成事件句柄
void WINAPI DataManageThread (LPVOID pParam)//数据分类处理线程
{
    .....
    hDataReadyEvent = CreateEvent(NULL,FALSE,FALSE,NULL);
    //事件创建
    .....//数据处理
    SetEvent(hDataReadyEvent);//处理完毕，事件置位
    .....
}
void WINAPI OutPutThread (LPVOID pParam)//判断输出线程
{
    .....
    while(true)
    {
        DWORD dwRet = WaitForSingleObject(hDataReadyEvent, INFINITE);
        //等待事件发生
        if (dwRet == WAIT_OBJECT_0)
        {
            .....
            ResetEvent(hDataReadyEvent);
            .....//状态判断与输出操作
        }
        .....
    }
}
```

#### 4.3.3 数据存储与管理

##### 一、数据存储与管理方式选择及数据表设计

在炼钢转炉实时状态监测系统中，能否对实时状态数据进行有效管理关系到系统整体性能的优劣。为了便于对转炉设备的维护，需要将转炉历史运行状态数据保存下来，为日后设备出现故障时进行历史数据回放及诊断分析提供数据支持。另外在对设备进行历史状

态回放时，需要根据用户需求选择一定的时间范围内全部或者部分状态信息进行查询，被查询出来的历史数据希望是按特定的关键词有序排列的(如按时间排序)。

在 Windows 系统中使用最多的数据存储与管理方式主要有两种：一是文件方式；二是数据库方式。文件作为传统的数据存储与管理方式，操作系统对其有完善的支持，无论在读写方式，还是在存取速度上都具有不可替代的优势。但是文件管理无法提供查询、排序等复杂的数据管理功能。随着现代社会的发展，数据管理的规模日趋增大，数据量急剧增加，文件管理系统已不能满足要求，而数据库技术为用户提供了更广泛的数据共享和更高的数据独立性，进一步减少了数据的冗余度，并为用户提供了方便的操作使用接口。数据库系统对数据的管理方式与文件管理系统不同，它把所有应用程序中使用的数据汇集起来，以记录为单位进行存储，在数据库管理系统的监督和管理下使用，可以方便的实现根据特定条件对数据进行查询、记录添加与删除、关键词排序等复杂的功能。

因此本系统采用数据库来进行数据的存储和管理，所使用的数据库系统版本为 SQL Server 2000。它是由美国 Microsoft 公司推出的一种关系型数据库系统，是一个可扩展的、高性能的、为分布式客户机/服务器计算所设计的数据库管理系统，实现了与 WindowsNT 的有机结合，提供了基于事务的企业级信息管理系统方案。其主要特点如下<sup>[75]</sup>：

- (1)高性能设计，可充分利用 WindowsNT 的优势；
- (2)系统管理先进，支持 Windows 图形化管理工具，支持本地和远程系统管理和配置；
- (3)强壮的事务处理功能，采用各种方法保证数据的完整性；
- (4)支持对称多处理器结构、存储过程、ODBC，并具有自主的 SQL 语言。

根据系统对多个转炉状态参量进行监测的实际情况，以及对历史数据在存储、查询格式等方面的特殊要求，对其数据表设计如图 4.2 所示，包括时间、炉体倾角、倾动力矩、1-4#电机电流、电压、转速、润滑系统状态等字段。

列名	数据类型	长度	允许空
SampleTime	datetime	8	
Angle	float	8	
Force	float	8	
Flow1	float	8	
Flow2	float	8	
Flow3	float	8	
Flow4	float	8	
Voltage1	float	8	
Voltage2	float	8	
Voltage3	float	8	
Voltage4	float	8	
Speed1	float	8	
Speed2	float	8	
Speed3	float	8	
Speed4	float	8	
LubricateStatus	bit	1	✓

图 4.2 系统数据库表设计

## 二、数据库编程

如上所述，完成了对数据存储与管理方式选择以及关系数据库数据表的设计与创建，接下来可以通过数据库编程来实现系统所需的各项存储、管理与查询操作。本系统软件所采用的开发工具 Visual C++ 中的 MFC 提供了对数据库编程的强大支持。对于数据库的访问，MFC 提供了两组类，ODBC(Open Database Connectivity, 开放式数据库互连)和 DAO(Database Access Object)。

系统采用 ODBC 类来进行数据库编程，ODBC 是微软公司开放服务结构(Windows Open Service Architecture, WOSA)中有关数据库的一个重要组成部分，它建立了一组规范，并提供了一组对数据库访问的标准 API，这些 API 利用 SQL 来完成其大部分任务；同时 ODBC 本身也提供了对 SQL 语言的支持，用户可以直接将 SQL 语句传送给 ODBC。一个基于 ODBC 的应用程序对数据库的操作不依赖任何数据库管理系统(Database Manager System, DBMS)，不直接与 DBMS 打交道，所有的数据库操作有对应的 DBMS 的 ODBC 驱动程序完成。因此，无论是 SQL Server、FoxPro 还是 Oracle 数据库，均可用 ODBC API 进行访问。

MFC 对 ODBC 的封装主要是开发了 CDatabase 类和 CRecordSet 类。CDatabase 类主要用于应用程序建立同数据源的连接关系，而 CRecordSet 主要是在 CDatabase 与数据源建立连接的基础上实现对结果集的数据操作。系统设计时，主要采用这两个类及相应的 SQL 语句来实现与数据库的连接、数据插入、查询、排序等操作，其中部分关键操作代码如下所示：

```
m_Database.OpenEx(m_strConnect,CDatabase::noOdbcDialog|CDatabase::useCursorLib);
//ODBC 数据库连接，m_strConnect 包含数据库的 DSN、数据库名、授权用户用户名
及密码等信息。

m_Database.ExecuteSQL(strSQL); //CDatabase 执行 SQL 语句

strSQL = "INSERT INTO DataRecords (SampleTime, Angle, Force, Flow1, Flow2,
Flow3, Flow4, Voltage1, Voltage2, Voltage3, Voltage4, Speed1, Speed2, Speed3 ,Speed4)
VALUES(szSampleTime, szAngle, szForce, szFlow1, szFlow2, szFlow3, szFlow4, szVoltage1,
szVoltage2, szVoltage3, szVoltage4, szSpeed1, szSpeed2, szSpeed3, szSpeed4)";

//转炉状态数据插入数据库对应 SQL 语句，

m_QueryRecordSet.Open(CRecordset::snapshot,strQuery,CRecordset::readOnly);
// CRecordSet 执行 SQL 语句

strQuery = "Select * From strTable Where SampleTime >=strBeginTime AND
```



出判斷模塊(OJM)對轉爐運行狀態判斷預警提供數據參考;回放參數設置用於系統在歷史回放模式時,其回放窗口縮放範圍的設置。每次修改PCM模塊參數信息後,系統會自動保存這些信息到參數配置表,每次系統運行時,都會自動調用最近一次保存的系統參數配置信息,如圖4.4為系統參數配置界面效果圖。

圖 4.4 參數設置界面效果圖

#### 4.4.3 數據採集與數據分析模塊

數據採集模塊(DCM)架構於操作系統和數據採集設備驅動程序之上,是監測系統软件的底層模塊,為整個監測系統提供原始狀態數據的來源,數據分析模塊(DAM)、數據存儲模塊(DSM)、圖形顯示模塊(GDM)的正常運行都有賴於DCM模塊的數據支持。

根據監測系統對轉爐設備狀態數據的需求,DCM模塊需要實時採集轉爐傾動裝置扭力杆應變信號、電機電壓、電流、轉速信號、爐體傾角信號以及潤滑系統狀態信號等狀態數據。整個數據採集過程的軟件實現流程如圖4.5所示,在每次啟動系統狀態監測後,DCM首先從系統參數配置表中讀取相關採樣參數,並根據參數信息設定數據採集時間間隔,使數據採集設備在軟件控制下每隔時間 $T$ 採集一組完整的轉爐狀態數據。因扭力杆應變信號相對電壓、電流、傾角等信號比較弱,易受現場環境不確定因素的影響,且精度要求高,在對其進行數據採集時,每次均採用多點採集方式採集一組連續應變數據,經過後續數據

分析模块(DAM)去极值平均滤波算法算法处理,减小噪声及其它环境因素影响,提高测量精度与数据可靠性。

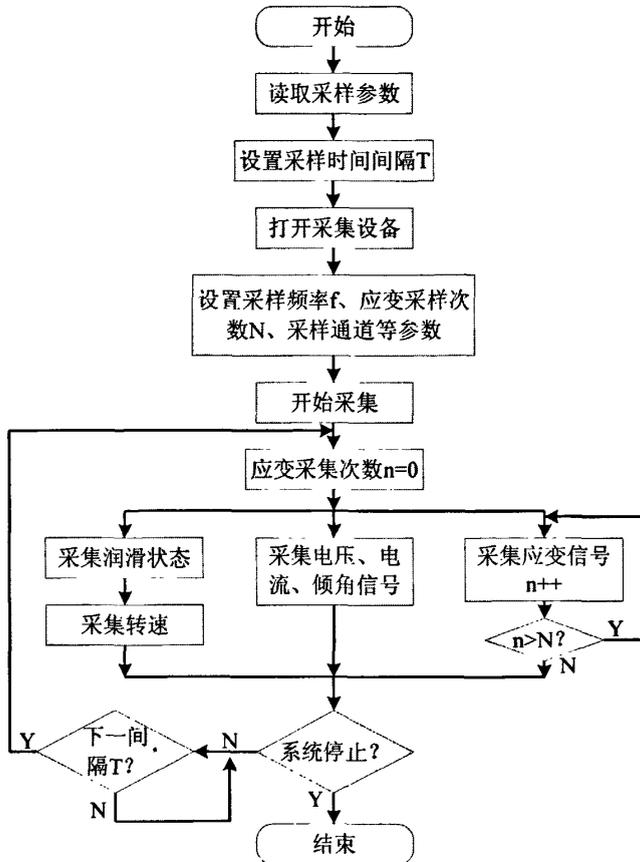


图 4.5 数据采集流程图

根据用户对系统实时性的不同需求,可以在系统运行前,通过 PCM 模块修改对应的数据采集部分的采样间隔、采样频率、采样次数等参数,修改后系统会自动将最近一次修改的参数信息保存到系统参数配置表,DCM 模块每次运行前都会重新读取相关参数配置信息。

数据分析模块(DAM)的功能是将 DCM 模块采集上来的离散数字原始状态数据进行计算和转换,对经过传感器信号变换、放大器处理、A/D 采样的真实转炉运行状态物理量进行还原,还原后的状态真值供图形显示模块(GDM)、输出判断模块(OJM)进行实时图形与数据显示及判断预警。

本监测系统所采集的转炉状态信号有应变、倾角、电压、电流、转速、润滑状态,除了转速与润滑状态信号以外,其余四种信号都是通过相应的传感元件及放大器将非电物理信号转换为电压信号,然后经过数据采集卡模数转换后获得 12 位精度的数字量,最终经

系统 DCM 模块将数据采集到计算机监测软件中进行处理。根据传感器测量原理, 其所测物理量  $x$  与输出电压  $U$  存在线性比例关系, 通常用传感器的灵敏度系数  $k$  和零点偏移量  $e$  来表示, 如式(4-1):

$$U = kx + e \quad (4-1)$$

假设所采用的数据采集卡采样精度为  $N$  位, 即采样数据范围为  $0 \sim 2^N - 1$ , 信号输入范围为  $U_{\min} \sim U_{\max}$ , 那么当该采集卡采样得到某通道的数据值为  $n$  时 ( $0 < n < 2^N - 1$ ), 则根据数据采集卡输入电压  $U$  和模数转换后的输出数字量  $n$  之间的线性比例关系, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{U - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} &= \frac{n}{2^N - 1} \\ \Rightarrow U &= n(U_{\max} - U_{\min}) / (2^N - 1) + U_{\min} \end{aligned} \quad (4-2)$$

在传感器灵敏度系数  $k$  和零点偏移量  $e$  已知的情况下, 且本系统所采用的多功能采集卡 UA201 采样精度为 12 位, 信号输入范围为  $-5V \sim +5V$ , 可得还原后的测量物理量实际值为:

$$x = (n(U_{\max} - U_{\min}) / (2^N - 1) + U_{\min} - e) / k = (10n / (2^{12} - 1) - 5 - e) / k \quad (4-3)$$

根据式(4-3), 结合各传感器的具体参数, 可得到还原后的应变、倾角、电压、电流信号状态真值。另外根据第二章转炉扭矩监测原理与方法, 系统对扭力杆应变监测的最终目的是, 通过扭力杆与耳轴力矩与应力应变之间的线性关系, 达到监测转炉实时倾动力矩状态的目的。根据第二章式 (2-1)、(2-17)、(2-18)、(2-19), 可得扭力杆扭矩与应变关系为:

$$T = \frac{E}{1 + \mu} \cdot \frac{\pi D^3}{16} \cdot \varepsilon_{\max} \quad (4-4)$$

耳轴力矩与应变关系为:

$$M = T \cdot (L/R) = \frac{E}{1 + \mu} \cdot \frac{\pi D^3}{16} \cdot \frac{L}{R} \cdot \varepsilon_{\max} \quad (4-5)$$

转炉力矩监测是目前钢铁企业最为关心的一项转炉状态监测指标, 也是本系统的重点监测对象之一, 为了提高力矩监测的准确性和可靠性, 在根据式(4-3)、(4-4)、(4-5)对应变、力矩状态真值进行还原前, 先对 DCM 模块采集的应变原始数据进行去极值平均滤波算法处理, 即对每次采样得到的  $N$  组 6 通道应变数据, 从每组数据中去掉数值最大和最小的两路应变测试数据, 再对  $N$  组数据进行整体取平均值, 得出最终参与实际应变与力矩换算的数值大小。具体程序实现流程如图 4.6 所示。

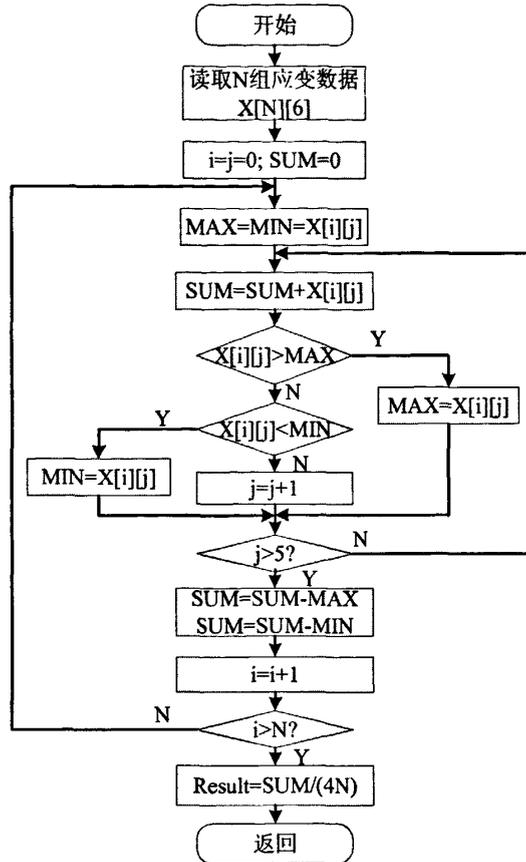


图 4.6 去极值平均滤波程序流程

因转炉稀油供给站自带润滑油油位、油压与油温传感器及异常输出控制电路，其输出信号为 2 路 TTL 电平信号。因此，系统对润滑系统状态的监测方法为：将 2 路 TTL 转炉润滑状态信号引至采集卡 8255 芯片 PA0、PA1 数字 I/O 端口，由 DCM 模块在每次数据采集时读取两个端口状态，根据稀油站信号输出规范，得出其信号输出与润滑状态对应关系如表 4.5:

表 4.5 稀油站信号输出与润滑状态关系表

编号	PA1 状态	PA0 状态	润滑系统状态
1	高电平(1)	高电平(1)	润滑系统工作正常
2	高电平(1)	低电平(0)	工作异常，稀油站油位低
3	低电平(0)	高电平(1)	工作异常，稀油站油压低
4	低电平(0)	低电平(0)	工作异常，稀油站油温高

电机转速信号的测量通过数据采集卡上的 8255 数字 I/O 芯片及 8254 定时计数芯片来实现的，具体可参考第三章电机转速传感模块的设计，转速公式如式(3-2),转速测量软件

流程如图 4.7 所示。

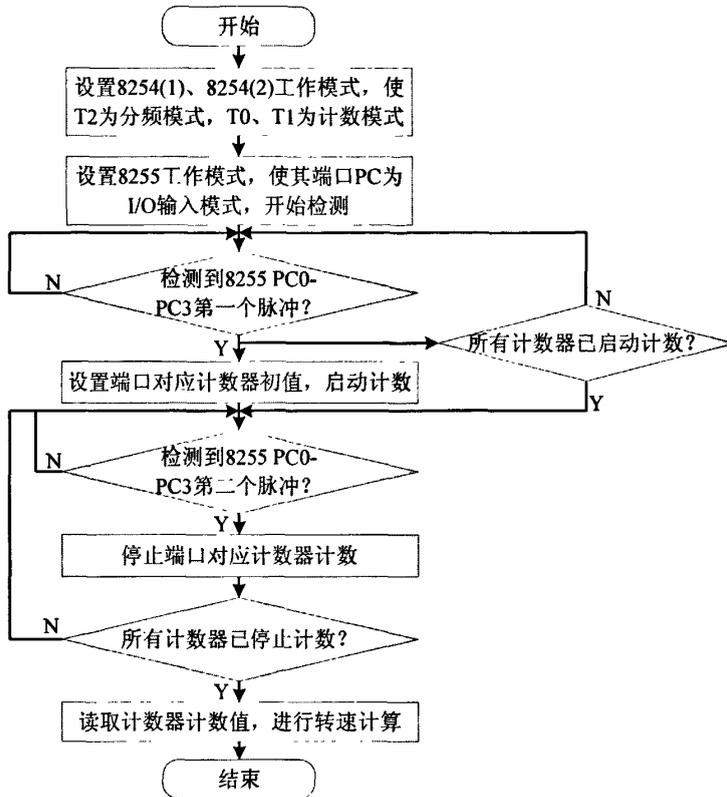


图 4.7 转速测量程序流程图

#### 4.4.4 图形显示与历史回放模块

图形显示模块(GDM)的主要任务是将反映转炉工作状态的各类数字量信息, 转化为更为简单和形象的图形状态曲线的形式进行显示, 方便技术人员更加直观的了解转炉的工作状态。在不同的系统运行模式下, 其工作职能也有所不同(如图 4.8)。在系统实时监测模式下, GDM 模块实时响应数据分类处理线程发出的数据处理完成事件, 并将最新处理完的各类状态数据进行图形曲线绘制, 实时显示; 在历史回放模式下, GDM 模块接收历史回放模块(HPM)的调用命令, 将由 HPM 模块查询到的转炉历史状态数据进行显示; 同时为了方便用户了解转炉运行的历史整体趋势及特定时间范围内的局部细节, GDM 模块针对历史回放的特殊要求, 提供专门的整体浏览、局部缩放、游标跟随数值显示等功能。

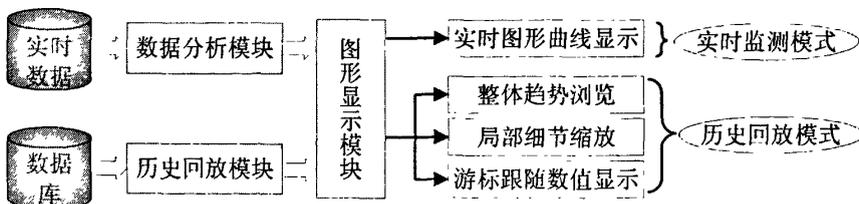


图 4.8 工作模式与图形显示模块功能关系

在系统工作过程中, GDM 模块一接收到数据分析模块(DAM)或历史回放模块(HPM)的绘图命令及状态数据后, 便开始进行图形曲线绘制, 绘制流程如下:

- (1) 获取绘图区设备环境 DC;
- (2) 绘制绘图区背景与坐标系网格;
- (3) 设置当前系统时间为绘图区横坐标起始时刻, 并根据 PCM 模块设置的绘图区纵坐标数值显示范围与横坐标时间显示范围, 在绘图区显示纵坐标与横坐标刻度;
- (4) 根据绘图区纵坐标数值显示范围与横坐标时间显示范围, 将绘图数据转换为绘图区内对应的像素点;
- (5) 根据系统预定的状态数据图形曲线颜色, 选取相应颜色画笔在对应的像素点位置进行曲线绘制;
- (6) 当绘图数据时间刻度超出绘图区横坐标时间显示范围时, 返回到第(2)步, 并以该时刻为横坐标起始值更新横坐标时间显示范围, 开始新一轮的状态曲线绘制。

完成以上图形绘制流程所需调用的功能函数如表 4.6:

表 4.6 图形绘制功能函数表

函数名	功能
Void OnPaint()	绘图区初始化
Void BackGround(CDC, Rect)	绘制背景
Void DrawBoard()	绘制坐标系与网格
Int TimeToXRatio(CTime)	数据时间与横坐标像素转换
Int ValueToYRatio(float)	数值大小与纵坐标像素转换
Void DrawPoint(int, int)	绘制数据曲线
Bool CompareSystemTime(CTime, CTime)	时间先后顺序比较
Void UpdateXYCoordination()	更新坐标系刻度范围

历史回放模块(HPM)是根据用户的实际需求将存储在本地数据库中的转炉历史运行状态数据进行查询, 并按照存储的时间顺序进行数据读取, 获得的历史状态数据由 GDM 模块进行图形显示, 它使得历史状态数据的查看与分析变得更为方便生动。如图 4.9 所示为历史回放模块的控制界面, 用户可以选择历史数据回放的起始和截止时间, 并以秒、分或小时为单位进行本地数据库历史数据查询, 并将符合条件的数据按照时间顺序进行图形显示, 方便技术人员根据历史图形曲线对转炉

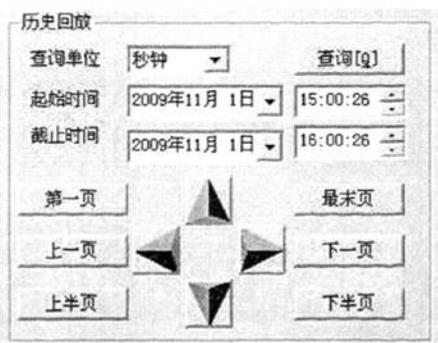


图 4.9 历史回放控制界面

工作状态进行性能评估及事后故障原因分析。

#### 4.4.5 输出判断模块

输出判断模块(OJM) (图 4.10) 主要有两个功能: 倾角、力矩现场显示与预警判断。

##### 一、倾角、力矩的现场显示

该功能是将实时炉体倾角和力矩数值通过串口通信发送到现场转炉操作台 LED 数码显示屏进行显示, 为现场操作人员提供参考, 提高操作的规范性与安全性。

操作台数码显示屏提供有效位数为 5 的静态数码显示, 通讯端口为 RS485, 刷新时间为 0.5s, 其通讯协议为:

数据 8 位, 停止位 1 位, 波特率 '9600', 校验位 '0DD'。

写指令发送规则: 01 31 adl adh xx andl andh 00

上诉指令中: 01—为显示屏地址; 31—为写数据指令; adh,adl—数据地址; xx—数据 ('0-9' 显示 '0-9', 'A' 显示消隐, 'B' 显示 '-'); andh, andl —校验和 (andh, andl=01+31+adl+adh+xx); 00—结束符。其中显示屏高 1 位数据地址为 B2 00; 中 2 位数据地址为 B1 00; 低 2 位数据地址为 B0 00。

##### 二、预警判断

该功能是根据系统设定的转炉异常状态判断规则对其实时工作状态进行逻辑判断, 产生判断结果, 并通过控制多功能数据采集卡 I/O 口 TTL 逻辑电平输出控制现场状态指示灯显示与报警器报警, 通知现场技术人员对设备进行故障检查和维护。

转炉运行状态异常判断规则如下:

- 监测力矩大于转炉设计最大工作力矩 10s 以上, 输出力矩异常报警;
- 监测力矩大于转炉设计最大事故倾动力矩, 输出力矩异常报警;
- 炉体在零位时, 监测力矩大于最大工作力矩 35%以上, 输出力矩异常报警;
- 监测电机电流大于电机最大过载电流, 输出电机异常报警;
- 监测电机转速高于或低于设定转速 10%以上, 输出电机异常报警;
- 监测电机驱动力矩大于最大驱动力矩 10s 以上, 输出电机异常报警;
- 监测电机相互间电压、电流误差在 15%以上, 输出电机异常报警;
- 监测润滑系统油压低、油温高、油位低信号时, 输出润滑系统异常报警。

其中电机驱动力矩计算公式如下:

$$M = \frac{0.975 * 4 * \eta * N}{K * n} \quad (4-6)$$

式中  $M$ —为电机驱动力矩； $\eta$ —总机械效率 0.85-0.95，取 0.92； $N$ —电机功率(KW)； $K$ —电压降及电机不同步造成的误差，取 1.3； $n$ —炉体转速(转/分)。

根据第三章系统信号连接关系，多功能数据采集卡有 I/O 输出口分别对应 8 个状态指示灯，当 I/O 口输出高电平时，对应指示灯为绿色(工作正常)，报警器不报警；当任一 I/O 口输出为低电平时，对应指示灯为红色(工作异常)，报警器报警。共有八种异常报警状态，即 1#电机工作异常报警、2#电机工作异常报警、3#电机工作异常报警、4#电机工作异常报警、油位低报警、油压低报警、油温高报警以及力矩异常报警。

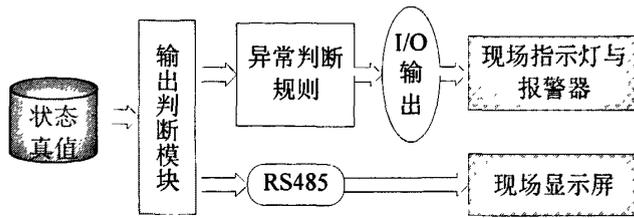


图 4.10 输出判断模块结构图

#### 4.4.6 数据存储模块

数据存储模块(DSM)的主要任务是获得 DAM 模块的转炉实时状态数据分析结果，并将这些状态值存储到本地 SQL Server 数据库进行存储和管理，为 HPM 模块进行历史数据回放与趋势分析提供数据支持；另外根据客户需求，DSM 模块还可以实现将实时状态数据经过以太网传输到炼钢企业内部中心数据库，便于企业对整个炼钢流程状态进行统一监控和管理。

要实现以上功能首先要对系统的数据库连接参数进行设置，如图 4.11 为系统数据库设置界面，需要设置的参数包括：本地数据库的服务器名、DSN、数据库名及授权用户名和密码；企业远程中心数据库的服务器名、DSN、数据库名、授权用户名和密码、扭矩、电机参量、倾角、润滑状态等字段标签名；根据实际情况选择是否将实时数据上传至远程中心数据库。

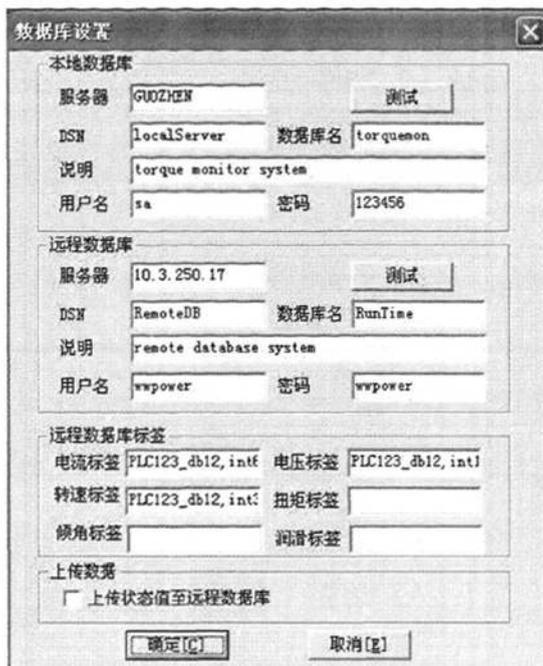


图 4.11 系统数据库设置界面

当系统在实时监测模式下运行时，DSM 与 DAM 模块共同隶属于数据分类管理线程控制，DAM 一完成实时分析操作，线程就自动调用 DSM 模块进行远程数据库连接与数据存储操作，具体程序实现参考本章 4.3.3 节数据存储与管理相关论述。

#### 4.5 监测系统软件运行流程及效果图

转炉状态监测软件是整个系统的对外接口，虽然功能的内部实现过程相对复杂，但它具备友好的人机交互界面，用户只需根据实际情况完成相应的系统运行参数与数据库连接设置，便可开始对转炉设备的进行实时状态监测与历史回放操作，监测软件运行流程如图 4.12 所示。

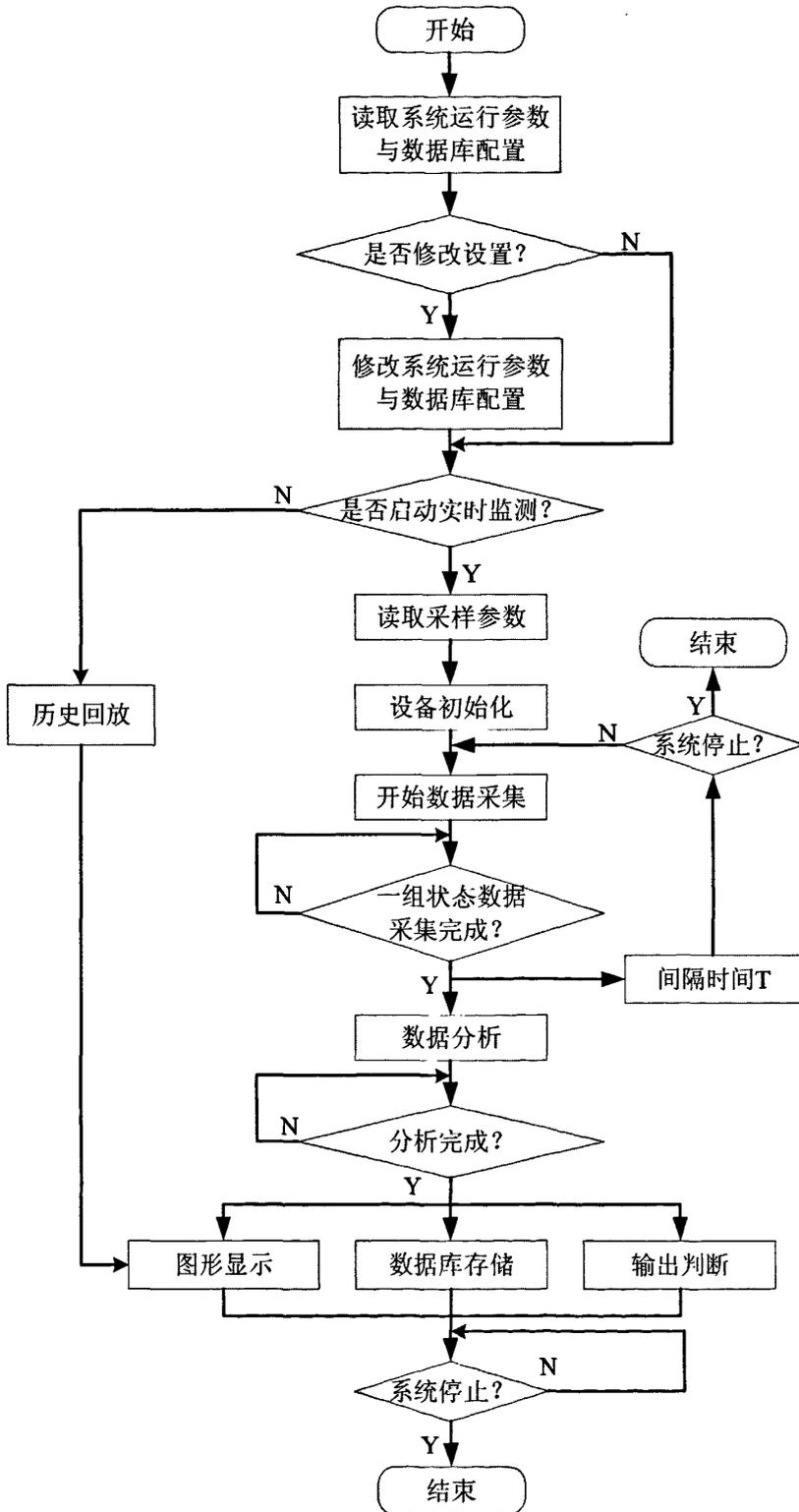


图 4.12 监测系统软件运行流程框图

如图 4.13、图 4.14 所示分别为系统监测软件运行主界面与全屏监测模式界面效果图。

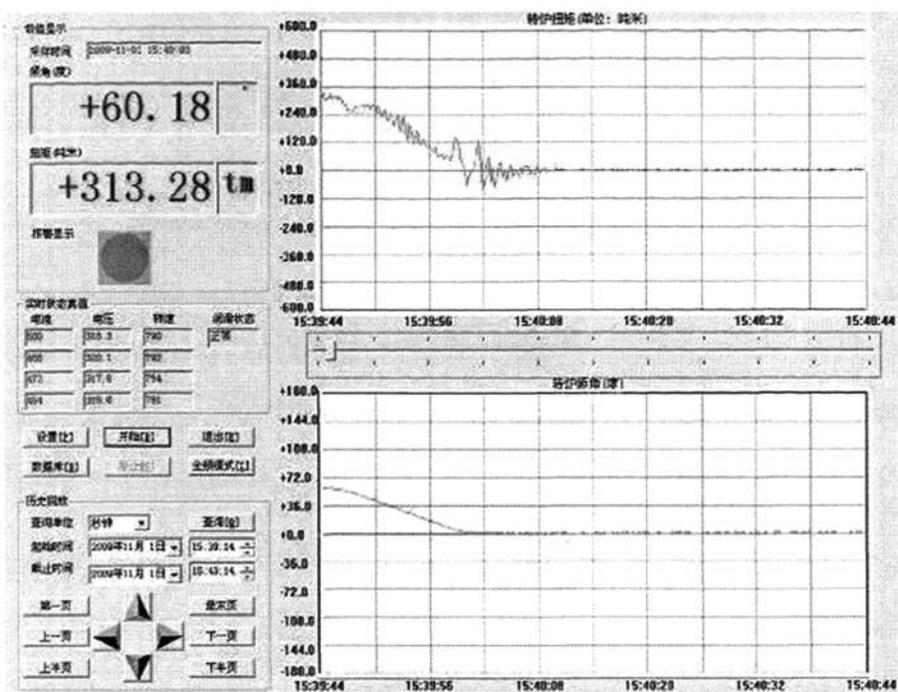


图 4.13 监测系统软件主界面效果图

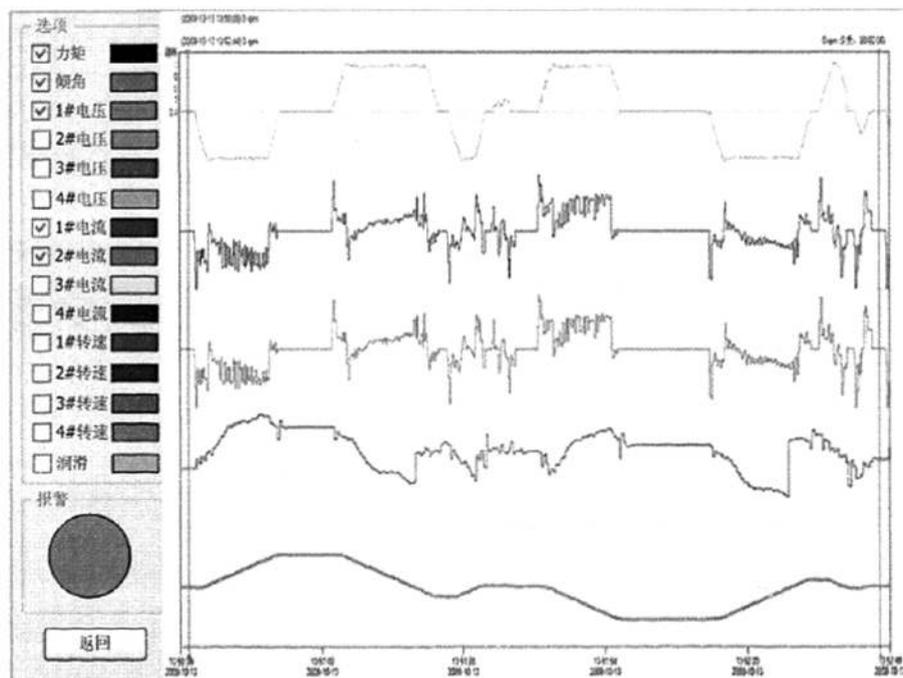


图 4.14 监测系统软件全屏监测模式效果图

## 4.6 本章小结

本章首先介绍了转炉状态监测系统软件的运行环境与开发工具，在分析监测软件功能需求的基础上，采用多线程与模块化软件设计方法进行系统软件框架的整体设计；接着对监测软件开发过程中的动态链接库技术、多线程技术以及数据存储与管理技术的具体应用进行了阐述；根据模块化设计思想，将监测软件划分为系统控制模块、参数配置模块、数据采集模块、数据分析模块、数据存储模块、图形显示模块、输出判断模块、历史回放模块等八个功能模块，并对个模块的具体功能、相互关系及程序实现作了详细论述；最后对监测系统软件的运行流程及效果图进行了展示。

## 5 系统现场测试与应用

第三章、第四章分别完成了转炉状态实时监测系统的硬件总体架构设计以及系统监测软件的设计与实现,本章主要介绍系统在首钢迁钢转炉炼钢现场的测试与实际应用,根据钢厂实际需求,制定测试方案,按照测试方案完成测试任务,并对测试结果进行描述和分析,验证监测系统运行的稳定性和监测数据的可靠性。

### 5.1 现场测试与应用实例

#### 5.1.1 测试转炉结构特点

2009年10月至11月期间,系统在首钢迁安钢铁厂新建4# 210吨转炉上进行了现场安装与测试(如图5.1)。该转炉倾动装置采用全悬挂多点啮合柔性驱动装置,力矩平衡方式采用扭力杆结构,具有传动平稳,性能优越,安全可靠等特点。其减速装置由四个一次减速机和二个二次减速机组成,四点啮合共同驱动二次减速机中的大齿轮旋转;二次减速机悬挂于耳轴上,直接驱动转炉倾动旋转操作。倾翻力矩通过扭力杆装置进行吸收和平衡,炉体、托圈与减速机之间通过耳轴连接并传递倾翻力矩。炉体在倾动与制动过程中,与弹簧板、托圈一起绕耳轴旋转。扭力杆作为缓冲装置,通过发生静力扭转变形来起到支撑和平衡整个转炉倾动过程中所产生的正负交变旋转力矩。该转炉倾动电气调速系统采用4台全数字直流调速装置(一台装置对应一台倾动电机)进行无级调速。

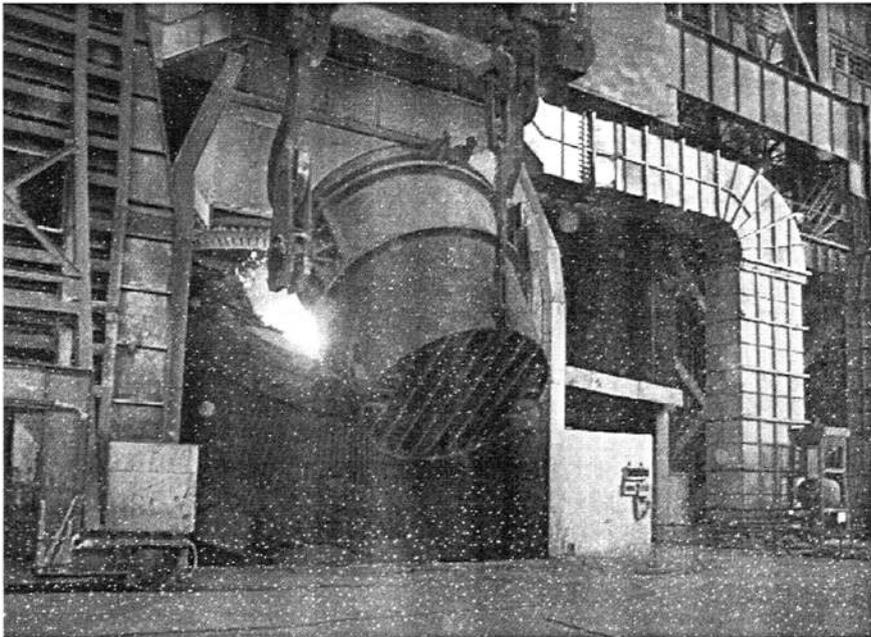


图 5.1 迁钢 4# 210 吨转炉炼钢现场

为提高新建转炉运行的安全稳定性,4#转炉整体由首钢设计院按全正力矩设计,倾动

装置也重新进行了详细设计,耳轴中心线比 1#、2#转炉上移 250mm,耳轴轴承直径增大为  $\Phi 1180\text{mm}$  (1#、2#炉为  $\Phi 1060\text{mm}$ ),其扭力杆直径也增大为  $\Phi 360\text{mm}$  (1#、2#炉的直径  $\Phi 340\text{mm}$ )。另外 4#转炉设计最大工作转速 1.5rpm,比 1#、2#、3#转炉的 1.0rpm,提高 0.5rpm,有利于提高冶炼工艺水平。其基本设计参数如下:

- 公称出钢量: 210 t
- 最大出钢量: 225 t
- 炉体转速: 0.15 ~ 1.5rpm
- 减速机减速比: 635.72
- 加速和制动时间: 2s; < 4s
- 耳轴直径: 1180mm
- 转炉倾动力矩:
  - 最大工作倾动力矩: 520 t·m
  - 最大事故倾动力矩: 1300 t·m
  - 制动器制动力矩: 500-9400N·m
- 力矩吸收装置: 扭力杆
  - 扭力杆(轴)长度: 5200 mm
  - 扭力杆(轴)直径:  $\Phi 360\text{ mm}$
  - 扭力杆扭臂半径: 560 mm
  - 材质: 40CrNiMo
  - 弹性模量:  $E=2.07 \times 10^5\text{ N/mm}^2$
  - 泊松比:  $\mu=0.28$
- 直流驱动电机: 4 台
  - 额定功率: 270KW
  - 额定转速: 960rpm
  - 工作电压: 440VDC
  - 额定电流: 488A
  - 工作制: 每小时启动次数 30-60 次
  - 短时过载能力: >2.8 倍额定力矩, 启动力矩>1.5 倍额定力矩

### 5.1.2 系统搭建与测试方案

根据测试转炉的结构特点及现场实际的测试环境,按照第三章转炉状态监测系统硬件

总体设计架构，系统在迁钢技术人员的协助下完成了传感器安装、信号线布线、状态信号连接与调试等工作，如图 5.2、5.3 为现场扭力杆应变片粘帖、系统控制柜及部分状态信号连接实物图，其中系统控制柜是整个转炉状态实时监测系统的核心，主要由五部分组成：信号连接与转换部分、动态应变仪、数据采集设备、工业控制计算机以及电源管理。所有来自现场传感器的转炉状态信号都在这里完成和数据采集设备的信号连接与转换，同时控制柜也负责对整个监测系统工作电源进行管理。



图 5.2 扭力杆应变片粘帖图

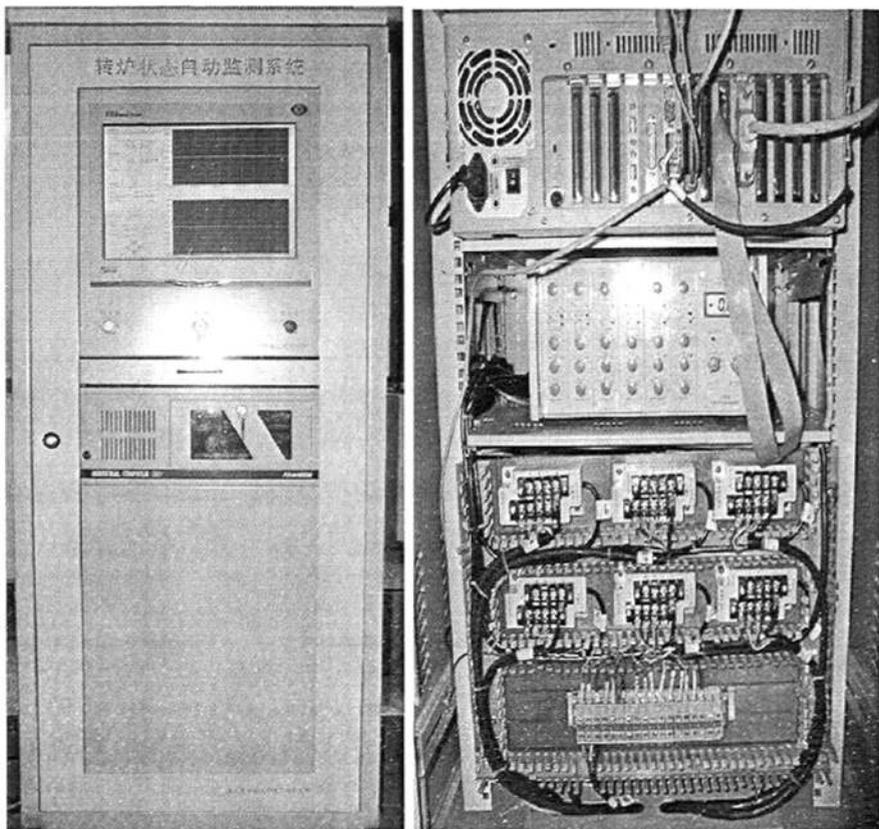


图 5.3 监测系统控制柜与信号连接

本次测试受首钢迁钢公司委托，对其新建 4# 210 吨转炉运行状态进行实时监测，其目的是考验新建转炉倾动设备在重负荷下的运转与操作性能，检查转炉机电设备及润滑与控制系统运转状况，为制定合理的转炉倾动操作规范提供依据。

为了全面了解新建转炉运行状况，提高转炉投产后的稳定性与安全性，测试方案分空

炉和热态两种情况下进行。(1) 空炉测试：即在炉体未砌内衬耐火砖的情况下，对转炉在空载和模拟装球状态下进行倾动操作，监测倾动过程中的设备运行状态，并对测试结果进行分析；(2) 热态测试：即在完成空炉测试后，转炉投产时，对实际炼钢生产过程中的转炉运行状况进行监测，获得转炉在倒铁水、摇炉、出钢等多种工况下的运行状态数据。其中空炉模拟装球测试分四个批次，四种负载情况下进行测试，计划铁球装载量分别为 80 吨、160 吨、240 吨和 320 吨。

### 5.2 空炉测试结果与分析

根据 4#转炉状态测试方案，首先对其进行空炉测试，实际四个批次下转炉铁球装载量分别为 84 吨、164 吨、248 吨和 320 吨。整个测试过程中，转炉均未出现报警状况，倾动力矩、电机运行状态、润滑系统等均工作正常，转炉状态数据在各批次测试过程中均出现规律性轨迹变化趋势，因 164 吨及 248 吨模拟装球载荷最接近转炉实际炼钢载荷，且其状态数据变化轨迹也具有一定的典型性和代表性，故下面就对转炉在装球 164 吨、248 吨情况下各状态数据监测情况进行描述和分析。

#### 5.2.1 164 吨模拟装球测试

从零度开始，前向摇炉，启动时间为 2.0 s，制动时间 1.0 s，转速为 1.25 rpm，转炉耳轴力矩测试趋势曲线如图 5.4 所示。图中耳轴最大力矩为 385 t·m，出现在倾角为 75° 到 85° 附近；最大制动扭振力矩为 347 t·m，扭振次数 8 次，振荡频率为 1.4Hz 左右。与之相对应的扭力杆最大扭转力矩约为 41.5 t·m，最大制动扭振力矩为 37.4 t·m，表面最大加载剪应变和剪应力分别为 280.4  $\mu\epsilon$ 、45.3Mpa，最大制动振荡剪应变和剪应力为 252.6  $\mu\epsilon$ 、40.8Mpa。

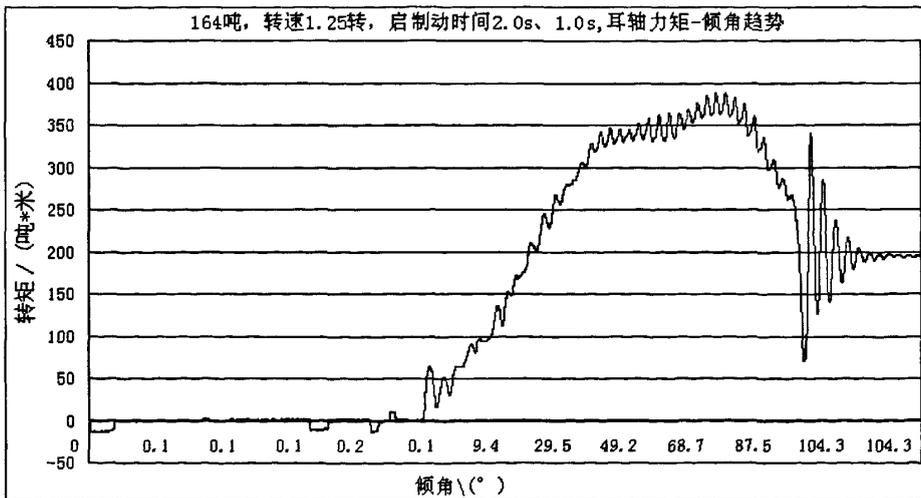


图 5.4 164 吨负载下转炉耳轴力矩趋势图

如图 5.5 所示为 164 吨模拟装球负载下，炉体转速 1.25 rpm，启动时间 2.0 s，制动时间 1.0 s 状态下转炉四个倾动电机电流变化趋势图。图中四个电机最大启动电流分别为 781 A、749 A、771 A、760 A；最大制动电流分别为 -161 A、-153 A、-141 A、-150 A；前向倾动摇炉过程中最大电流分别为：542 A、525 A、559 A、538 A。启动和运行过程中电机最大电流均超出电机额定电流（488A），但未超出电机允许短时过载电流范围（2.8 倍额定电流）；同时在整个运行过程中四个电流存在较大幅度的波动，这主要是由模拟负载铁球与实际炼钢铁水在流动性上存在明显差异性引起的，造成炉体负载力矩出现不规则的脉动突变，最终导致倾动电机输出电流的宽幅波动，这一情况在实际炼钢过程中将得到明显改善。

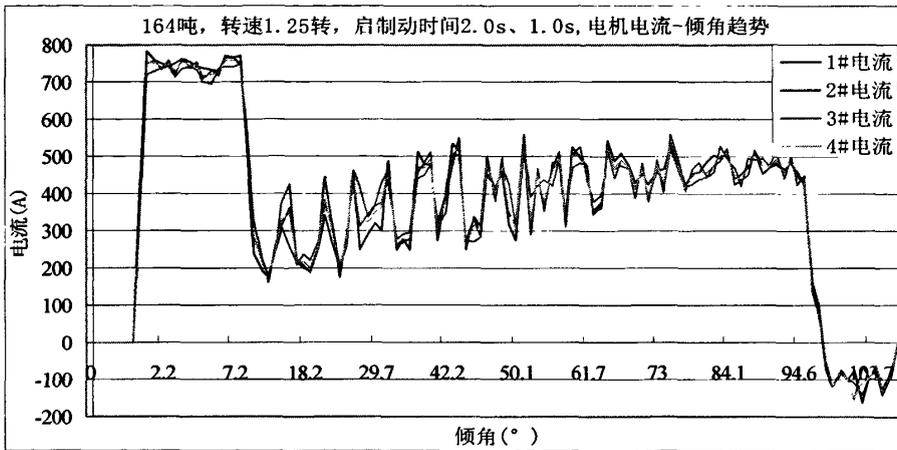


图 5.5 164 吨负载下电机电流趋势图

在整个前向摇炉过程中，倾动电机电压趋势平稳，四个电机之间具有很强的一致性。如图 5.6 所示为 1#、2#电机电压-倾角趋势图，转炉倾动电机启动采用软启动方式，即降压启动，降低驱动电机启动电流。图中电机启动电压约为 260V，正常运行过程中电压范围为 330-360V，电压浮动范围小，运行平稳；最大制动电压约为 -160V。

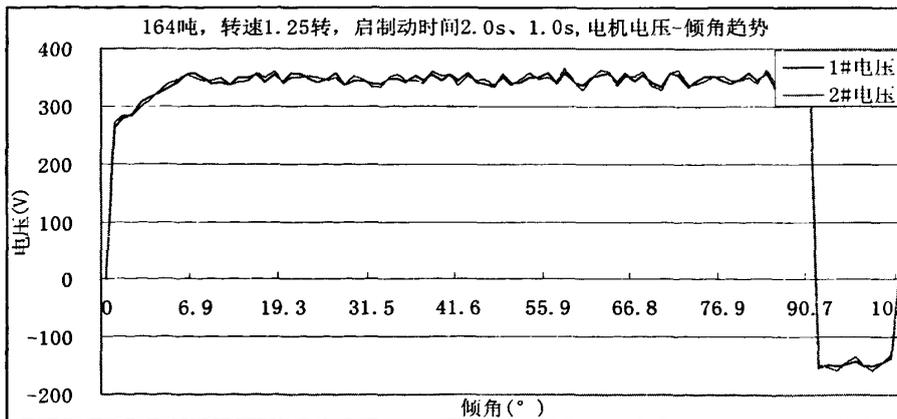


图 5.6 164 吨负载下电机电压趋势图

转速是转炉炼钢工艺的一个重要参数，转速越快对转炉炼钢工艺越有利，但是转速越快，对倾动机构机械、电器设备的性能要求越高，尤其是在启制动过程中，电机启动电流、启动力矩增大，制动及冲击载荷引起机械扭振情况加剧，过高的转速会导致设备故障频发，大大减少转炉设备的使用寿命。因此，转炉技术人员通常会根据每个转炉设备的实际情况，在保证转炉设备具有一定的使用寿命和低故障率的情况下，经过不断调整和优化得出一个经验最优转速值，并严格按照该转速值进行炼钢生产，通常判断转速正常的标准为实际炉体转速与设定转速误差在 10% 以内。在本次 164 吨模拟装球负载下，炉体设定转速 1.25 rpm，倾动过程中 4 电机实际输出转速基本一致，图 5.7 以 1#电机为例，对本次测试过程中电机转速趋势进行说明。除启动、制动过程外，4 电机最高转速 817 rpm，最低转速 761 rpm，根据 4#转炉减速机减速比为 635.72 可得，实际炉体转速范围为 1.20~1.28 rpm，在允许转速误差范围内。

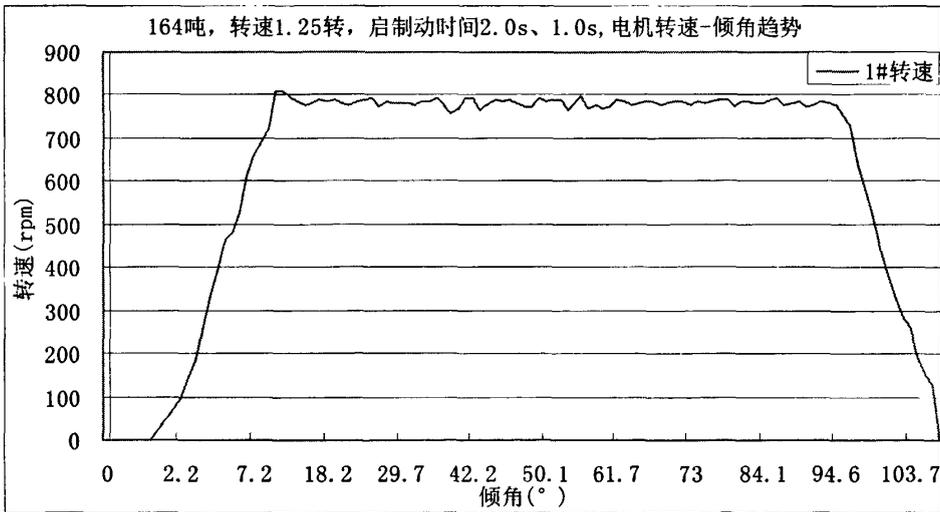


图 5.7 164 吨负载下电机转速趋势图

如图 5.8 所示为 164 吨模拟装球负载下，炉体设定转速 1.25 rpm，启动时间 2.0 s，制动时间 1.0 s 状态下实际炉体倾角-时间趋势图。除倒渣操作外，通常摇炉过程中，炉体倾角控制在  $\pm 110^\circ$  范围内，防止钢水或铁球从炉口倒出。

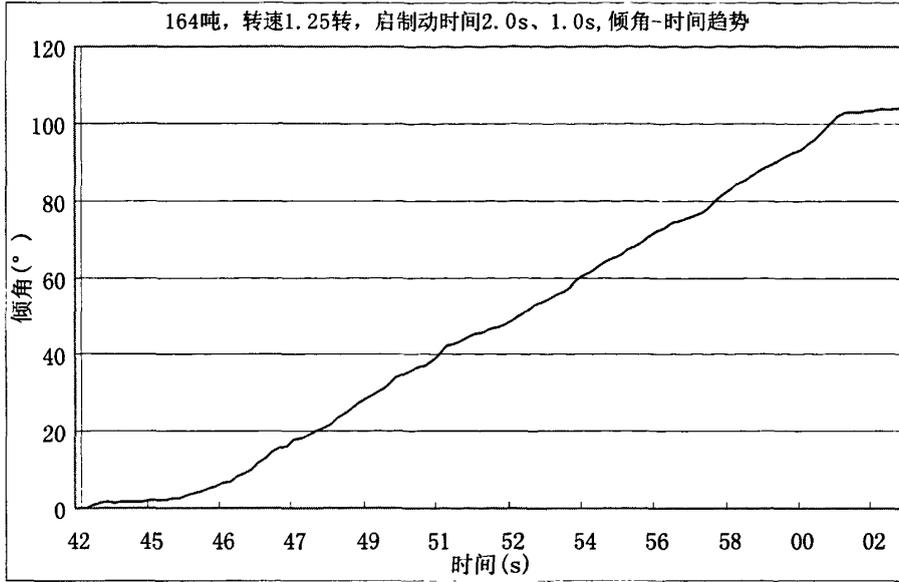


图 5.8 164 吨负载下炉体倾角趋势图

### 5.2.2 248 吨模拟装球测试

当空炉测试负载增加至 248 吨时, 从零位开始, 前向摇炉, 启动时间为 2.0 s, 制动时间 1.0 s 不变, 设定转速仍为 1.25 rpm, 转炉耳轴力矩测试趋势曲线如图 5.9 所示。图中耳轴最大力矩为 491 t·m, 出现在倾角为 60° 到 70° 附近; 最大制动扭振力矩为 527 t·m, 扭振次数 11 次, 振荡频率为 1.4Hz 左右。与之相对应的扭力杆最大扭转力矩约为 52.9 t·m, 最大制动扭振力矩为 53.7 t·m, 表面最大加载剪应变和剪应力分别为 357.4  $\mu\epsilon$ 、57.8Mpa, 最大制动振荡剪应变和剪应力为 362.8  $\mu\epsilon$ 、58.6Mpa。

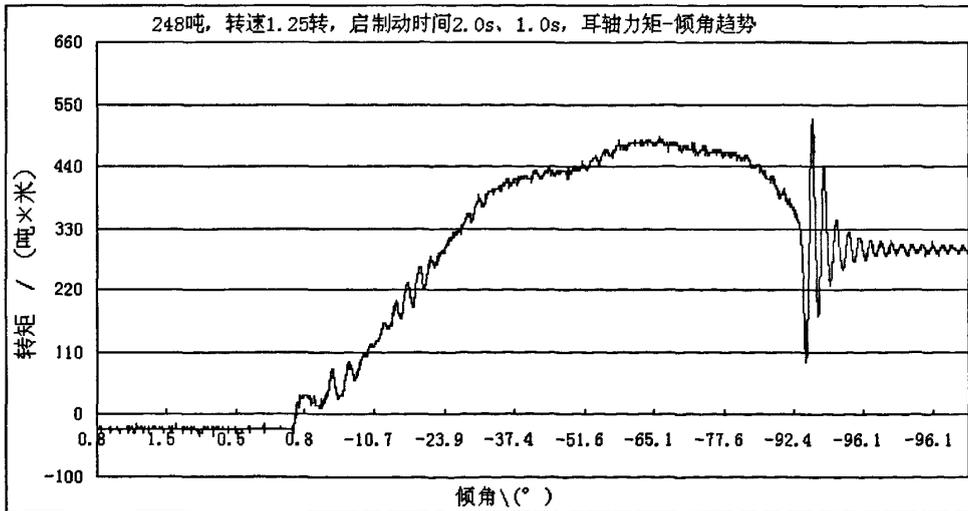


图 5.9 248 吨负载下转炉耳轴力矩趋势图

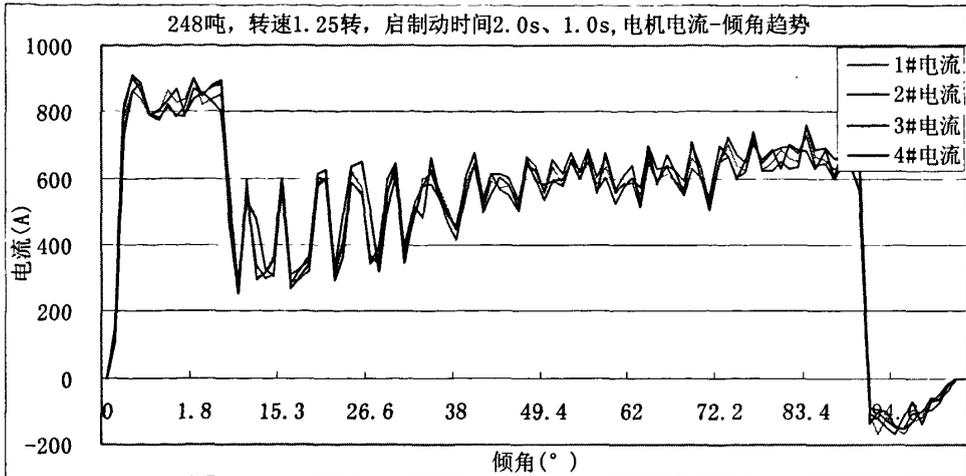


图 5.10 248 吨负载下电机电流趋势图

如上图 5.10 所示为 248 吨模拟装球负载下，炉体设定转速 1.25 rpm，启动时间 2.0 s，制动时间 1.0 s 状态下转炉四个倾动电机电流变化趋势图。图中四个电机最大启动电流分别为 900 A、883 A、905 A、913 A；最大制动电流分别为 -171 A、-168 A、-151 A、-155 A；前向倾动摇炉过程中最大驱动电流分别为：753 A、707 A、757 A、729 A。启动和运行过程中电机最大电流均超出电机额定电流(488A)，但未超出电机允许电流短时过载范围(2.8 倍额定电流)。

在 248 吨模拟装球负载下，电机电压趋势与 164 吨负载下基本一致，趋势曲线平稳，电压波动范围在  $345 \pm 15V$ ；电机转速趋势曲线与 164 吨负载下趋势基本吻合，换算后得出的实际炉体与设定转速误差在  $\pm 5\%$  以内，符合转炉炼钢工艺要求。

### 5.2.3 测试数据对比分析

#### 5.2.3.1 空炉各载荷下电机驱动力矩与应变测试力矩对比

在转炉工作过程中，电机驱动力矩是实现转炉倾动的动力来源，从理论角度上看，在转炉平稳倾动过程中，耳轴所受力矩与电机输入力矩基本一致。根据第四章公式(4-6)可得转炉电机驱动力矩值：

$$T = 2.718 \times \frac{\text{电压}(V) \times \text{电流}(A)}{\text{转速}(\text{转}/\text{分})} \times 10^{-3} (\text{吨} \cdot \text{米})$$

如表 5.1 所示为电机计算驱动力矩与实际应变测试力矩对比，从表中可知，虽然计算得出的电机最大驱动力矩与应变测试力矩存在小幅误差，这与机械结构在能量传递效率、时间滞后等方面以及铁球在炉内滚动的不确定性等因素有关，但误差力矩与转炉工作力矩相比，几乎可忽略。因此，总的来说电机驱动力矩与应变测试力矩具有较好的一致性，验

证了应变测试力矩的可靠性与准确性。

表 5.1 电机驱动力矩与应变测试耳轴力矩对比

装球量(t)	转速(rpm)	电机最大驱动力矩(t·m)	应变最大测试力矩(t·m)
84.4	1.0	193.1	196.5
	1.5	146.2	146.2
164.6	1.0	241.3	233.2
	1.25	373.1	385.1
	1.5	352.1	341.7
248	1.0	454.9	461.2
	1.25	507.8	491.3
	1.5	488.2	495.6
320	0.75	574.9	570.3
	1.0	603.3	602.1

5.2.3.2 空炉各载荷下耳轴、扭力杆应力应变状态分析

对于转炉系统，为提高结构的安全性，耳轴与扭力杆工作表面的剪切应力与应变必须小于结构的许用应力。一般而言，其许用应力有如下关系：

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}$$

其中  $[\sigma]$  为许用应力， $\sigma_s$  为材料屈服极限， $n$  为安全系数。对于 40GrNiMo，屈服极限为 785Mpa，安全系数取 3，则许用应力为 262Mpa。

扭转剪切许用应力一般有： $[\tau] = (0.5 \sim 0.6)[\sigma]$

故扭转剪切许用应力为 131~157 Mpa，取 140Mpa，许用剪切应变为 866 $\mu\epsilon$ 。

在各种不同载荷下，扭力杆和耳轴的应力应变状态分析结果可参见表 5.2、表 5.3。从表中可知在空炉模拟装球测试过程中，由转炉倾动力矩引起的耳轴与扭力杆的扭转变形应力、应变均未超出材料许用应力和许用应变，且耳轴所受应力、应变相对扭力杆而言，远远低于材料许用应力与应变，在同等条件下，扭力杆更容易发生疲劳损坏，因此要加强扭力杆装置的力矩监测与分析。分析结果表明耳轴与扭力杆工作正常，可以进行热态测试。

表 5.2 扭力杆应力应变状态分析

40GrNiMo 许用剪切应力 $[\tau]=140\text{MPa}$ 许用剪切应变为 866 $\mu\epsilon$							
装球量 (t)	转速 (rpm)	最大工作力矩状态			制动扭振状态		
		力矩 (t·m)	应力 (Mpa)	应变 ( $\mu\epsilon$ )	力矩 (t·m)	应力 (MPa)	应变 ( $\mu\epsilon$ )
84.4	1.0	21.2	23.16	143.2	19.3	21.04	130.1
	1.5	15.8	17.26	106.8	18.2	19.93	123.3
164.6	1.0	25.1	27.42	169.6	21.5	23.44	145.0

表 5.2 扭力杆应力应变状态分析(续)

40GrNiMo 许用剪切应力[t]=140MPa 许用剪切应变为 866 $\mu\epsilon$							
装球量 (t)	转速 (rpm)	最大工作力矩状态			制动扭振状态		
		力矩 (t·m)	应力 (Mpa)	应变 ( $\mu\epsilon$ )	力矩 (t·m)	应力 (MPa)	应变 ( $\mu\epsilon$ )
164.6	1.25	41.5	45.34	280.4	37.4	40.89	252.9
	1.5	36.8	40.21	248.6	39.4	43.06	266.3
248	1.0	49.7	54.30	335.8	46.6	50.92	314.9
	1.25	52.9	57.80	357.4	56.8	62.06	383.8
	1.5	53.4	58.34	360.8	58.6	64.01	395.9
320	0.75	61.5	67.19	415.5	60.7	66.30	410.0
	1.0	64.9	70.91	438.5	65.9	72.04	445.5

表 5.3 耳轴应力应变状态分析

40GrNiMo 许用剪切应力[t]=140MPa 许用剪切应变为 866 $\mu\epsilon$							
装球量 (t)	转速 (rpm)	最大工作力矩状态			制动扭振状态		
		力矩 (t·m)	应力 (Mpa)	应变 ( $\mu\epsilon$ )	力矩 (t·m)	应力 (MPa)	应变 ( $\mu\epsilon$ )
84.4	1.0	196.5	6.09	37.6	178.7	5.72	35.3
	1.5	146.2	4.53	28.0	169.3	5.42	33.5
164.6	1.0	233.2	7.23	44.7	199.1	6.37	39.4
	1.25	385.1	11.94	73.8	347.3	11.11	68.7
	1.5	341.7	10.67	65.9	365.7	11.70	72.3
248	1.0	461.2	14.41	89.1	432.5	13.84	85.5
	1.25	491.3	15.35	94.8	527.1	16.87	104.3
	1.5	495.6	15.48	95.7	543.7	17.40	107.5
320	0.75	570.3	17.82	110.1	563.1	18.02	111.4
	1.0	602.1	18.81	116.2	611.9	19.58	121.0

5.2.3.3 不同测试条件下电机状态参数对比

如图 5.11 所示为 248 吨模拟装球载荷下，转炉 1#倾动电机分别在 1.0 rpm、1.25rpm 和 1.5rpm 炉体转速条件下电流趋势曲线对比。从图中可知，在不同转速条件下，电机电流趋势基本一致，转速越高电机运行电流越大。

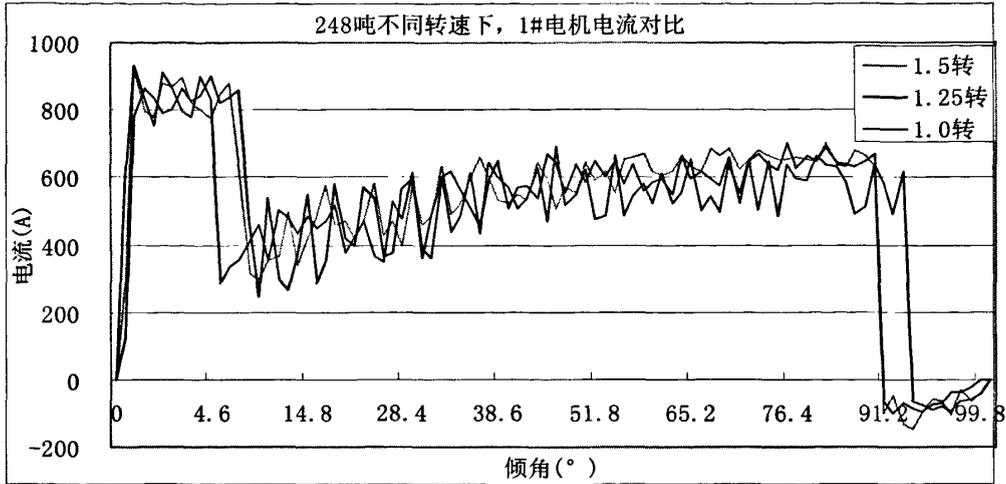


图 5.11 248 吨载荷不同转速条件下电机电流对照图

如图 5.12 所示为炉体设定转速 1.25 rpm，倾动电机分别在 167 吨及 248 吨模拟装球载荷下，电机运行电流趋势曲线对比。从图中可知，在不同负载条件下，电机电流趋势基本一致，电机运行电流趋势随载荷的增大而增大，与理论电流变化趋势一致。

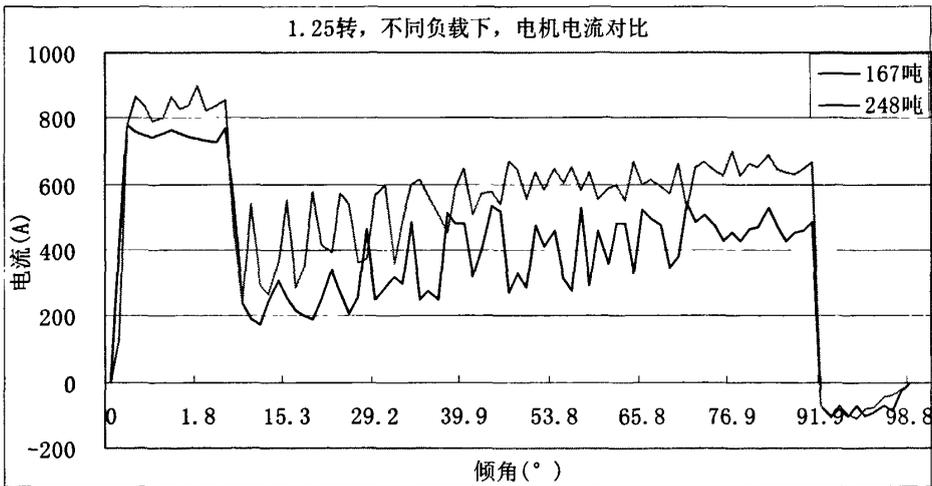


图 5.12 相同转速不同负载条件下电机电流对照图

如图 5.13 所示为 248 吨模拟装球载荷下，转炉 1#倾动电机分别在 1.25 rpm 和 1.5 rpm 炉体转速条件下电压趋势曲线对比。从图中可知，在不同转速条件下，电机电压趋势基本一致，除启动、制动过程外，电压波动小，趋势平稳，电机运行平均电压在炉体转速为 1.5 rpm 条件下相对于 1.25 rpm 条件下要近似高 50V。

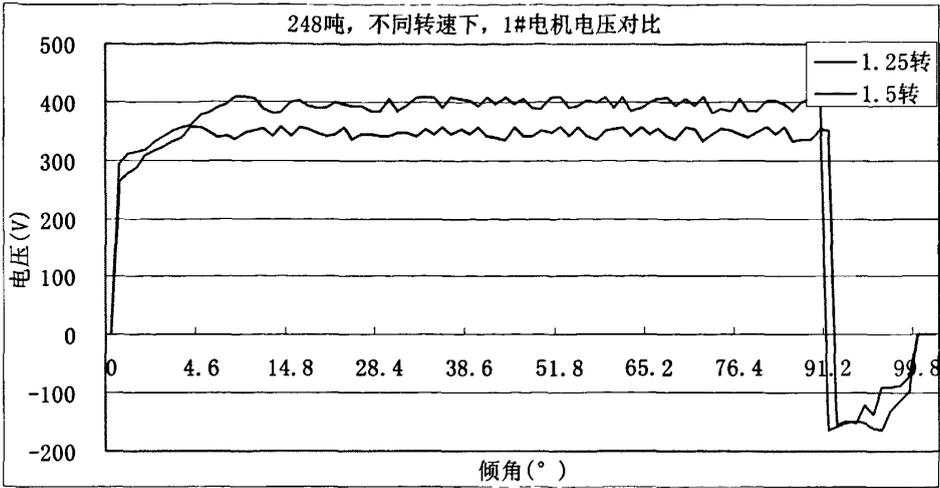


图 5.13 248 吨负载不同转速条件下电机电压对照图

如图 5.14 所示为炉体设定转速 1.25 rpm, 倾动电机分别在 167 吨及 248 吨模拟装球载荷下, 电机运行电压趋势曲线对比。从图中可知, 在不同负载条件下, 电机电压趋势平稳, 波动范围小( $\pm 15V$ ), 曲线轨迹基本重合。

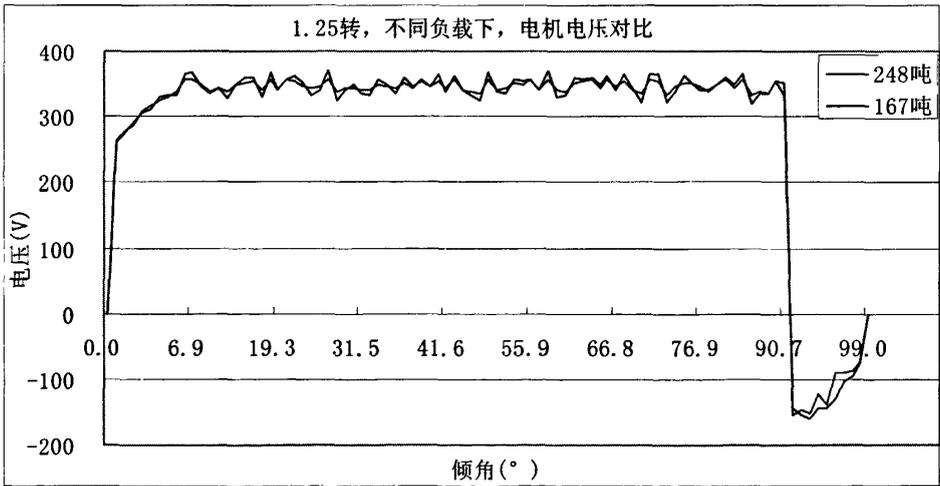


图 5.14 相同转速不同负载条件下电机电压对照图

### 5.3 热态测试结果与分析

根据空炉模拟装球状态下的转炉运行状态测试结果, 转炉倾动机构力矩、电机运行状态、润滑系统等均工作正常, 具备热试条件。为了进一步考验迁钢 4#转炉设备在新炉冶炼工艺条件下的操作性能, 继续对转炉在倒铁水、吹氧、摇炉、出钢等多种工作状态的电机运行参数、驱动力矩、制动力矩、润滑系统状态进行监测。

因实际炼钢过程中, 铁水的流动性明显优于模拟装球测试条件下铁球的流动性, 因而

在同等负载情况下，电机驱动力矩、耳轴负载力矩、扭力杆平衡力矩均小于模拟装球测试力矩。在整个热态测试过程中，转炉均未出现报警状况，倾动力矩、电机运行状态、润滑系统均工作正常，转炉状态数据变化趋势与空炉测试条件下基本一致。另外在转炉实际炼钢工艺过程中，启制动较模拟测试条件下更为频繁，每次操作引起的扭振交变力矩过程在 14-17 次不等，频繁的扭振循环力矩容易造成扭力杆装置的疲劳损坏，这也是转炉炼钢技术人员最为关心的问题，下面着重对转炉炼钢工艺中，倒铁水、前向摇炉和后向出钢过程中耳轴及扭力杆力矩测试情况进行描述和分析。

### 5.3.1 倒铁水过程测试

当转炉炉龄为 50 次时，对其倒铁水过程进行了记录，耳轴测试力矩趋势如图 5.15 所示。从图中可以看出，在转炉到达前向 32° 位置时，受到约 45 t·m 的正力矩，在铁水逐渐倒入的过程中，转炉不断启动、制动，逐渐增大炉体倾角，便于钢包内铁水顺利倒入炉内，同时耳轴力矩值也不断增大，在 65° 附近出现最大正力矩 355 t·m，整个过程中最大制动扭振力矩达到约 450 t·m。在倒铁水过程中耳轴一直受正力矩作用，铁水倒完后，转炉开始回零位，力矩不断减小。

倒铁水的过程中，扭力杆不断吸收启制动引起的扭振交变力矩，上述操作中，扭振过程共出现 14 次，扭力杆上的最大扭振力矩有 48.5 t·m 左右，最大剪切应变约为 327.6  $\mu\epsilon$ ，最大剪应力为 52.9 Mpa。

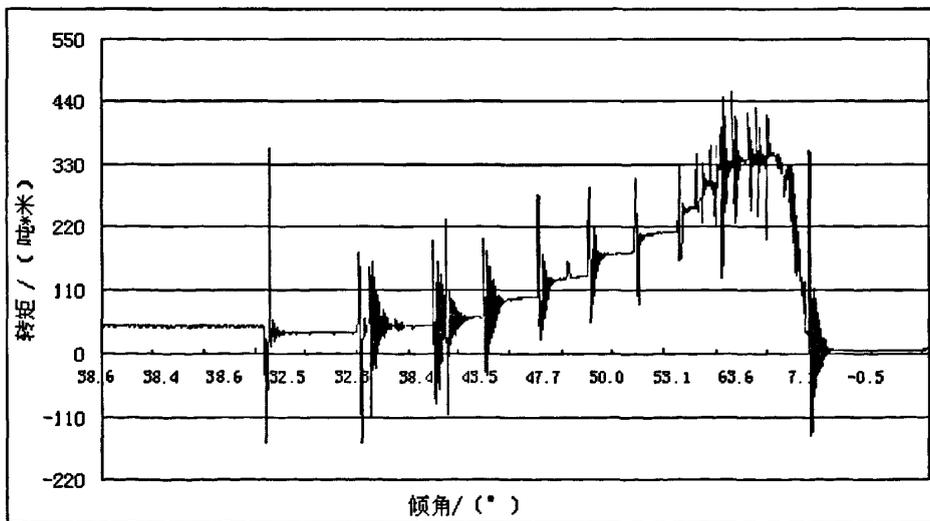


图 5.15 倒铁水耳轴力矩趋势图

### 5.3.2 前向摇炉过程测试

当转炉炉龄为 55 次时，对其摇炉操作过程进行了记录。如图 5.16、图 5.17 所示为一

个连续摇炉过程中的耳轴力矩趋势图。图中转炉炉体倾角从零位转动到前向 65° 附近，力矩值先增加到 42 t·m 左右，然后随着倾角的增大，力矩值逐渐增加。当炉体倾角增至 46° 附近时，耳轴力矩为 100 t·m 左右；当倾角达到最大角度位置时，力矩约为 380 t·m。此后转炉开始回摇到零位，力矩值逐渐减小，一次摇炉过程完成，除制动扭振过程外整个摇炉操作耳轴所受力矩均为正力矩，在摇炉制动过程中，扭振衰减交变力矩振幅较大，最大振幅达到 260 t·m 左右。

整个摇炉过程中，启制动造成的扭振过程共出现 13 次，在扭力杆上引起的最大扭振力矩约 47.9 t·m，最大剪切应变约为 324  $\mu\epsilon$ ，最大剪应力为 52.4 Mpa。

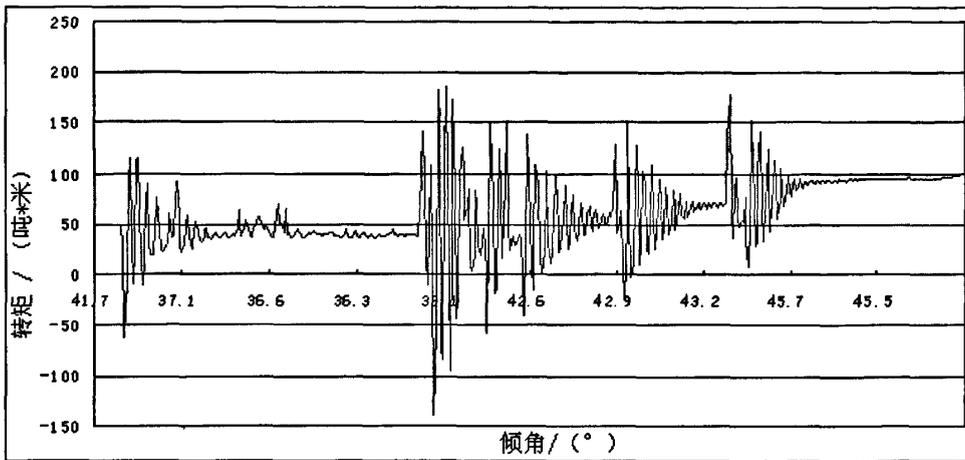


图 5.16 前向摇炉耳轴力矩趋势图

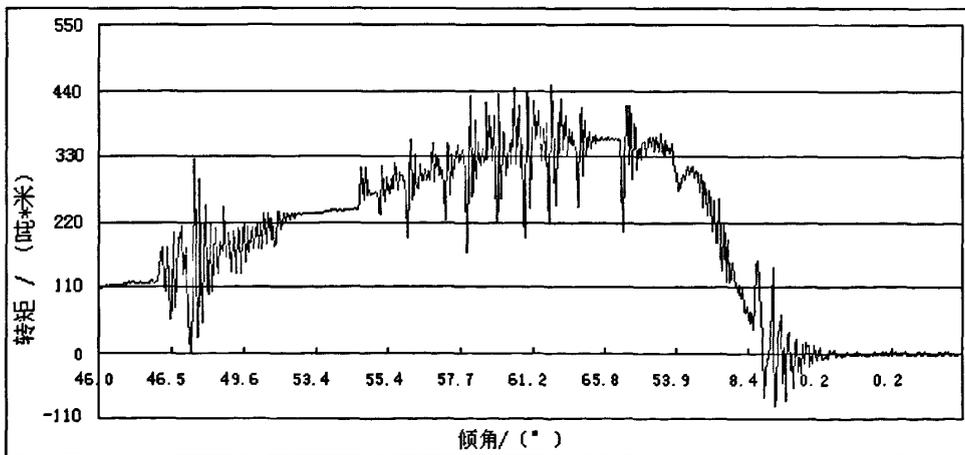


图 5.17 前向摇炉耳轴力矩趋势图(续)

### 5.3.3 后向出钢过程测试

如图 5.18、图 5.19 所示为转炉炉龄 55 次时出钢过程耳轴力矩趋势图，从图中可以看出，在转炉出钢操作开始时，炉体后摇，随着倾角的增大，耳轴力矩也不断增大，当炉体

倾角摇至 70° 左右时，力矩值达到 300 t·m，出钢口开始出钢，随着钢水不断从转炉流入大包，力矩逐渐减小；在这个过程中同时伴随着倾动机构的不断启动制动，逐渐扩大炉体倾角，保证出钢过程的顺利进行；制动造成的最大振荡力矩达到 400 t·m；在炉体倾角 95° 附近，出钢结束，转炉开始回零位。

在转炉出钢过程中，扭力杆共受到扭振交变力矩 12 次，最大扭振力矩 43.1 t·m，最大剪切应变约为 291  $\mu\epsilon$ ，最大剪应力为 47.1 Mpa。

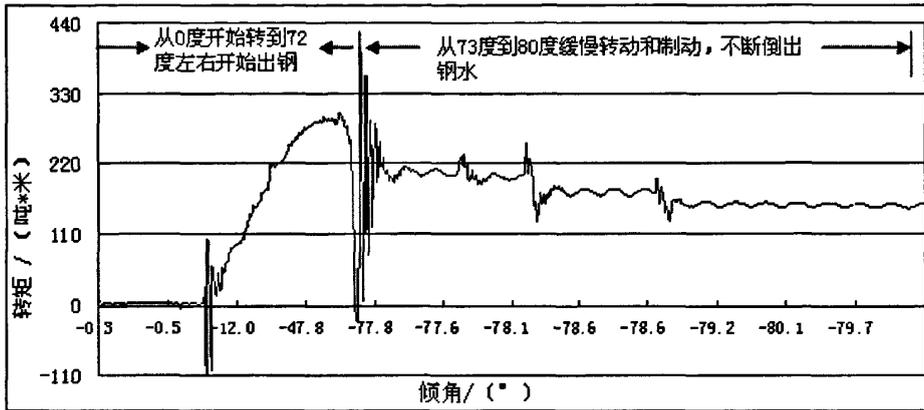


图 5.18 后向出钢耳轴力矩趋势图

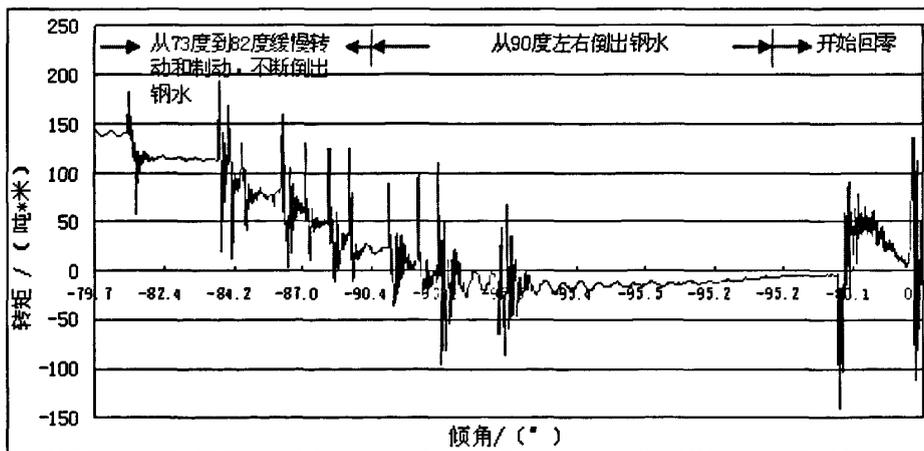


图 5.19 后向出钢耳轴力矩趋势图(续)

## 5.4 本章小结

本章介绍了首钢迁钢新建 4#转炉的结构特点，描述本文所研究的转炉状态监测系统在现场的安装情况，根据新建转炉实际情况制定系统测试方案，对转炉在空炉和热态测试条件下的运行状态进行实时监测，对监测所得的历史数据进行对比与分析，测试结果表明，系统运行稳定，监测数据准确可靠，达到预定设计要求，可以实现对转炉运行状态的监测要求。

## 6 总结与展望

### 6.1 研究总结

本论文以国内钢铁企业大型炼钢转炉设备的运行状态监测需求为背景,在充分调研转炉构造及炼钢工艺特点,参考大量历史文献和前人工作的基础上,总结转炉炼钢过程中设备的工作状态、故障类型与特点和常用维护方法,以状态监测与故障诊断技术和计算机辅助测试技术为理论基础,研究开发了基于多传感器状态信号转换、数据采集、状态分析判断与显示的综合性炼钢转炉实时状态监测系统,现将主要研究内容总结如下:

1) 根据企业需求,通过大量理论调研和现场考察,确定本系统对炼钢转炉生产过程中的状态监测和故障诊断具有很高的可行性,对钢铁企业降低转炉设备故障率、节约设备维护成本、提高炼钢生产效益具有积极的作用。

2) 介绍当前状态检测和故障诊断技术的发展现状,阐述转炉炼钢技术的发展历程及其在国民经济发展中的重要地位,结合计算机辅助测试技术,提出转炉状态监测系统实施方案。

3) 通过查阅大量文献资料及与转炉炼钢技术人员的广泛交流,研究转炉设备机械构造和工作特性,分析炼钢工艺过程中设备的力学传递关系及扭振现象的产生机理,提出采用应变检测法监测转炉耳轴及扭力杆动态力矩特性,并对相关监测原理及测量电路设计与计算进行阐述。

4) 根据转炉状态监测的特点和炼钢现场实际情况,描述监测系统组成,并进行系统总体框架设计与搭建,详细介绍系统数据采集设备的选型、状态信号采集与传感模块的设计过程以及系统电气信号的连接关系。

5) 重点研究监测系统软件开发过程与设计要点,分析系统软件功能需求,进行软件框架总体设计,采用多线程技术,提高系统实时数据采集与处理性能,基于模块化设计思想,对监测系统软件进行功能模块划分,并对各模块间的相互关系及具体实现方法进行详细阐述。

6) 通过在转炉炼钢现场的实际测试,并对历史监测数据进行对比和分析,验证了本论文设计的炼钢转炉实时状态监测系统的可行性与可靠性。

## 6.2 工作展望

本论文设计的炼钢转炉实时状态监测系统基本满足钢铁企业对炼钢转炉运行状态的监测要求，目前系统已经在首钢迁钢新建 4#转炉获得成功应用，运行状况良好。但是转炉实际炼钢工艺过程中的设备运行异常状况非常复杂，由于时间仓促，加上测试条件的局限性，目前只实现了对部分状态参量进行有重点、有目的的监测与故障特征研究，未能做到系统的、全面的状态监测与故障诊断。因此在本监测系统的基础上，还可以做进一步深入研究：

1) 在系统使用过程中，操作人员需要对转炉状态趋势不断进行总结，在提高状态信号故障特征提取能力的同时，归纳出各种状态异常特征，并反馈给设计人员；设计人员根据这些资料，对系统不断进行升级与改进，形成良性循环，提高状态监测系统的智能化水平。

2) 随着钢铁企业自动化、信息化需求不断提高，可以将更多的状态量监测任务整合到系统中来，比如转炉耳轴轴承状态监测、炉衬厚度监测等；另外随着故障诊断技术的进步，可以进一步研发面向转炉设备的故障诊断专家系统，降低目前系统在故障判断和原因分析中对技术人员的实际经验和理论水平的依赖性。

3) 目前系统在信号采集、传输上采用传统的有线连接方式，信号传输易受现场复杂环境因素的影响，随着无线传感技术的迅速发展，可以对系统的传感与信号传输方式进行升级，将无线传感与测量技术应用到监测系统中来，降低信号线排布的空间限制，提高系统应用的灵活性。

4) 扭矩测试与分析、电机运行状态监测技术在工业领域有着广泛的应用前景，根据面向对象系统设计的特点，对软件功能加以改进和扩充，可将系统应用对象推广到更多大型机电设备的状态监测与故障诊断中去。

## 参考文献

- [1] 新浪网. 2008 年世界钢铁产量排名 [EB/OL]. (2009-02-07) [2009-11-18]. [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_5a53af350100bcen.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_5a53af350100bcen.html).
- [2] 王社斌, 宋秀安. 转炉炼钢生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 17-25.
- [3] 杨志伊. 设备状态监测与故障诊断[M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [4] 张梅军. 机械状态检测与故障诊断[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [5] 江潮. 大型机械监测诊断系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [6] 夏成泉. 设备状态监测与故障诊断的探讨[J]. 中国科技博览, 2009(11): 246-247.
- [7] 师黎. 基于软计算的故障诊断机理及其应用研究[D]. 上海: 上海大学, 2007.
- [8] 杨建平. ZY65 履带式装载机液压系统性能测试与故障分析[D]. 长春: 吉林大学, 2003.
- [9] 张静. 机械设备故障诊断技术先进方法学的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004.
- [10] 陈大禧, 朱铁光. 大型回转机械诊断现场实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [11] 杨志伊, 郑文. 设备状态监测与故障诊断[M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [12] 倪笑斐. 基于 Windows CE 的手持式振动检测仪软件开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [13] 林立恒. 当代世界转炉炼钢现状及其发展方向[J]. 现代冶金, 2002(4): 23-26.
- [14] 王社斌, 宋秀安. 转炉炼钢生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [15] 中国钢铁协会. 中国重点企业产钢铁材料统计[J]. 冶金信息导刊, 2007(2): 5-8.
- [16] 高泽平. 炼钢工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [17] BoneB., Brilich M., Parzys W. et al. Renovation of a steel converter[J]. Cahiers D'Informations Techniques, 1993, 90(1): 43-51.
- [18] 张芳. 转炉炼钢 500 问[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [19] 王社斌, 宋秀安. 转炉炼钢生产技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [20] 顾启伟. 炼钢转炉炉口火焰信息采集处理系统的同步及实时化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [21] Martin M., Rendueles M., diaz m.. Steel-slag mass transfer in steel converter bottom and top/bottom combined blowing through cold model experiments[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2005, 83(9): 1076-1084.
- [22] 冯捷, 张红文. 转炉炼钢生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [23] 齐凯. 300t 转炉结构概述[J]. 一重技术, 2008(4): 23-25.
- [24] Wagener E., De Sinha k.M.. Construction and operation of metal refining converter for foundries and mini steel mills[C]//International Foundry & Heat Treatment Conference. Johannesburg , S. Afr.: South African Inst of Foundrymen, 1985, 85: 603-610.
- [25] 闫开宇, 孙健. 转炉倾动机构研究[J]. 一重技术, 2007, (2): 19-20.
- [26] 刘树杰, 郑德全. 转炉操作中阻力启动扭振力矩的计算和分析[J]. 山东冶金, 2001, 23(5): 45-47.
- [27] 马敬勋. 济钢 25t 转炉倾动系统扭振理论分析[J]. 山东冶金, 1999, 21(4): 39-42.
- [28] 丁剑, 高敬博. 炼钢厂设备润滑问题[J]. 设备管理与维修, 2007, (8): 51-52.

- [29] 严爱军, 李友荣. 转炉倾动机构测试及其故障诊断[J]. 冶金设备, 2007, (165): 59-62.
- [30] 梁弘志. 烧结单辊破碎机主轴扭矩在线检测研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- [31] 刘凤新, 黄玉金, 潘小莉等. 计算机辅助测试技术导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [32] 郑淑芳. 计算机辅助测试[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [33] 连海洲, 赵英俊. 计算机化仪器技术发展展望[J]. 测控技术, 2001, 20(10): 5-8.
- [34] 李迅波. 机械工程测试技术基础[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1998.
- [35] Rob,P., Coronel,C.. 数据库系统设计、实现与管理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [36] 萨师焯, 王珊. 数据库系统概论(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [37] Silberschatz,A.等著. 数据库系统概念[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [38] 徐立. 结晶器振动与分析系统软件开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [39] Markarian K. M., Maude Jonathan J., Havel Daniel F., et al. Modernization of LTV BOF system[J]. *Iron and Steel Engineer*, 1994, 71(8): 37-42.
- [40] 高素荷. 大型转炉倾动机构扭力杆有限元分析[J]. 计算机辅助工程, 2006, 15(6): 47-55.
- [41] 戴云阁, 李文秀, 龙腾春. 现代转炉炼钢[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1998.
- [42] 章文超. 转炉倾动力矩计算方法探讨[J]. 上海金属, 2007, 29(6): 47-55.
- [43] 江宇辉. 2#转炉扭力杆轴承损坏故障分析[J]. 湘钢科技, 2002, (1): 34-37.
- [44] 刘方抗. 机械振动学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [45] 马敬勋. 济钢 25t 转炉倾动系统扭振理论分析[J]. 山东冶金, 1999, 21(4): 39-42.
- [46] 刘树杰, 郑德全. 转炉操作中阻力起动扭振力矩的计算和分析[J]. 山东冶金, 2001, 23(5): 45-47.
- [47] 王雅贞, 张岩, 张红文等. 氧气顶吹转炉炼钢工艺与设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [48] 谭牧田. 氧气转炉炼钢设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [49] 机械工程手册编委会. 机械工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [50] 康维绿, 廖德源, 钱顺章等. 现代扭矩测量技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999: 1-185.
- [51] 章有颐. 转矩测量技术[M]. 北京: 计量出版社, 1986.
- [52] 文成. 基于虚拟仪器技术的应变测试仪的研究与开发[D]. 四川: 重庆大学, 2004, 7-15.
- [53] 王昌明, 孔德仁, 何云峰等. 传感与测试技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [54] 黎景全. 轧制工艺参数测试技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [55] 陶宝祺, 王妮. 电阻应变式传感器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [56] 王守新. 材料力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [57] 陈经明. 扭矩扳手检定仪研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2002.
- [58] 杨帮文. 新编传感器实用宝典[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [59] 袁希光. 传感技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [60] 陶宝祺, 王妮. 电阻应变式传感器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [61] 浙江黄岩测试仪器厂. 传感器用电阻应变计 [EB/OL]. (2007-8-3) [2009-12-15].

<http://www.hycsyq.com/cn/03-1.htm>.

- [62] 北戴河实用电子技术研究所. SDY2101 型动态电阻应变仪[EB/OL]. (2007-8-3) [2009-12-15].  
<http://www.bdhsd.com/text-Dynamic%20Strain%20Amplifier.htm>.
- [63] 沙占友, 薛树琦. KM115 系列集成转速传感器的原理与应用[J]. 国外电子元器件, 2003, 7: 67-69.
- [64] 陈杨, 一种转速测量电路的设计[J]. 天津商学院学报, 2003, 23(6): 15, 16-48.
- [65] 杨光, 史小路, 杨家春等. 霍尔传感器在轧辊速度测量中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2006, 35(4): 63-65.
- [66] Bruno Luigi, Maletta Carmine. Real-time calibration of open-loop piezoelectric actuators for interferometric applications[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2008, 4(2): 97-103.
- [67] 吴金宏, 倪向阳, 吴昊. 霍尔电流电压传感器/变送器模块的性能及应用[J]. 国外电子元器件, 2001, (1): 12-14.
- [68] Charles Petzold 著, 北京博彦科技发展有限公司译. Windows 程序设计[M], 北京: 北京大学出版社, 1999.
- [69] 杨永国. Visual C++ 6.0 使用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [70] Du R, Elbestawi M A, Wu S M. Automated monitoring of manufacturing processes part1: monitoring methods, Transaction of ASME, Journal of Engineering for Industry, 1995, 117(5): 121-132.
- [71] 王险峰, 刘宝宏. Windows 环境下多线程编程原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [72] 陈海波, 王申康. 新编程序设计方法学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004.
- [73] 庞茂, 周晓军, 胡宏伟等. 基于模块化的容错技术在测控系统软件开发中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(1): 537-540.
- [74] 冉林仓. Windows API 编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [75] 李春葆, 曾平编著. 数据库原理与应用: 基于 SQL Server 2000[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

## 攻读硕士学位期间科研成果

### 学术论文:

- [1]. 沈国振, 李培玉, 甘涛. 便携式结晶器振动检测系统研究与开发[J](已录用). 重型机械, 2009.11
- [2]. 李培玉, 甘涛, 沈国振. 基于红外热成像原理的嵌入式下渣检测方法研究[J](已录用). 钢铁研究学报, 2009.12

### 国家发明专利:

- [1]. 李培玉, 沈国振, 陈尚俭等. 一种连铸大包下渣检测远程监控系统及方法. 专利申请号: 200910152594.7/2009.9.17
- [2]. 李培玉, 沈国振, 郑俊等. 一种连铸结晶器振动检测装置及检测方法. 专利申请号: 200910152595.1/2009.9.17
- [3]. 李培玉, 沈国振, 甘涛等. 结晶器偏振检测装置. 专利申请号: 200910100687.5/2009.7.17
- [4]. 李培玉, 甘涛, 沈国振等. 一种连铸大包振动检测传感器安装装置. 专利申请号: 200910100688.X/2009.7.17

### 软件著作权:

- [1]. 李培玉, 沈国振, 陈尚俭等. 连铸大包下渣检测远程监控系统服务端软件 V1.0. 证书号: 软著登字第 0184021 号/2009.12.8
- [2]. 李培玉, 沈国振, 甘涛等. 结晶器振动检测系统 PC 端数据管理软件 V1.0. 证书号: 软著登字第 0183371 号/2009.12.3
- [3]. 李培玉, 沈国振, 郑俊等. 基于 Windows CE 的手持结晶器振动检测软件 V1.0. 证书号: 软著登字第 0179798 号/2009.11.13
- [4]. 李培玉, 王亮, 沈国振等. 大包下渣检测远程监控系统日志分析软件 V1.0. 证书号: 软著登字第 0178708 号/2009.11.6