

北京工业大学

---

硕士学位论文

---

连铸机结晶器非正弦振动装置理论分析优化与应用

---

姓名：李鸿春

---

申请学位级别：硕士

---

专业：环境工程

---

指导教师：刘中良;陈廷明

---

20050801

## 摘要

随着连铸技术的发展,对铸坯表面质量的要求也越来越高,严格控制振痕深度是解决铸坯表面质量的主要途径。提高振频、减少负滑脱时间、改善保护渣润滑效果是提高拉速、减少振痕深度的有效工艺措施。但振频提高会使保护渣流入减少、结晶器摩擦阻力增大,从而增大了粘结漏钢的几率;同时,受到机械装置结构限制和精度的影响,这一矛盾是正弦振动设备无法克服的。为此出现了结晶器非正弦振动装置。

结晶器非正弦振动主要包括机械式和液压两种方式。机械式非正弦振动设备包括:电机、减速器、非圆齿轮箱、偏心机构、四连杆、减震装置等元部件组成。机械式非正弦振动装置具有设备简单、投资少的优点,但它也存在调整困难、精度低的缺陷。结晶器液压非正弦振动设备的液压系统由伺服阀、伺服缸、位移传感器、振动波形发生器、计算机、电气控制装置等构成,它是一套由速度和位置传感器跟踪波形信号的典型伺服控制系统。

现有四连杆振动波形不佳是影响首钢第二炼钢厂板坯铸坯表面质量的主要问题。课题组主要工作是确定了在传动环节增设非圆齿轮减速箱的改造方案,经过建立优化模型、有限元分析、计算机优化、生产试验、改进提高和现场参数波形测试,改造取得成功。设备改造以后溢漏率减少 0.1%,表面缺陷减少 60%。正式投入使用后,在同等条件下拉速提高 0.1~0.2m/min。提高了成材率和生产效率,降低了矿产资源和水电等能源消耗;同口径比较能耗可以降低 3~5Kg 标准煤/吨钢,生产成本可降低 5~10 元/吨钢。同时减小了表面的火焰清理量和设备维修量,改善了生产环境和工人的维修环境。

充分利用现有板坯改造机会积累经验,在生产实践中掌握非正弦振动规律与工艺条件的关系,进一步研究液压振动的原理和应用以及根据钢水的具体条件及钢种和产量等生产实际条件合理调整振动参数,对于指导实际板坯连铸机生产具有非常重要的意义。并可为迁钢二期板坯铸机的设备选型及应用提供必要技术支持。

**关键词:** 连铸机 结晶器 非正弦振动 优化 应用

## Abstract

As the development of continuous casting technology, the request for the surface quality of slab is higher than ever. Strictly controlling oscillation mark depth is the mostly approach to solve the surface quality of slab. Improving oscillation frequency and reducing negative surge time are good technology measurements for improving casting speed and reducing oscillation mark depth. But improving oscillation frequency can reduce feeding of powder and accrete the mold friction. So the probability of steel sticker and leak is accreted. At the same time, it is restricted by machine and influenced by precision. It can not be conquered by sinusoidal oscillation. Therefore people use the no-sinusoidal oscillation for mold. By ameliorating drive section to alter oscillation wave's slope, mechanical no-sinusoidal oscillation can realize no-sinusoidal rule in theory. Hydraulic oscillation can on-line adjust stroke and frequency according to steel group, casting speed, slab section and molten steel condition, so it can acquire the best negative surge time and the effect of powder. The no-sinusoidal hydraulic oscillation for slab mold can reduce mark depth and dregs, improve quality of the surface of slab.

The no-sinusoidal oscillation of mold includes mechanism and hydraulic form. The mechanical system of no-sinusoidal oscillating equipment has motor, reducer, no-round gear box, partiality machine, four staff, damping equipment. The mechanical system of no-sinusoidal oscillating equipment is simple and invested little, but adjusted difficulty, precision low. The hydraulic system of no-sinusoidal oscillating equipment for mold includes servo valve, servo cylinder, position transducer, oscillate wave generator, computer, electric control equipment etc. It is the typical servo control system of speed and position following the wave generator's signal. Because of highness of oscillation frequency and repeated precision and small distortion of wave following performance, the difficulty of technology is very high. The price is very higher than mechanism. So the mechanical system of no-sinusoidal oscillating equipment is fit for square slab casting machines and slab casting machines'alteration, new slab casting machines and big square slab casting machines adopt the hydraulic system of no-sinusoidal oscillating equipment. So using slab machining alteration to fund experience, we hold the connection between

no-sinusoidal oscillation and technics condition in produce. The modification for equipments result as below: less leakage ratio 0.1%, less surface trouble 60%. After using the equipments, if other factors are steadiness, those results are as below: increase the slab speed 0.1—0.2m/min, increase the product ratio and the efficiency, decrease the energy consumption of minerals, electric power and water, decrease the process energy consumption 3—5kg standard coal per ton, decrease the product cost 5—10¥/t, decrease the work for slab surface and equipment maintenance, make better the environment for process and maintenance.

Studying the principle and use of hydraulic oscillation, it has the very important meaning for instructing the slab production according to the steel grade and concrete condition of the steel water to adjust oscillating parameter in reason. On the base of the mechanical system of no-sinusoidal oscillating equipment, the hydraulic oscillation system are studied in the text. It will supply technological gist for introducing hydraulic oscillation system for choosing equipment type of Qian Gang's slab continuous caster.

**Key Words: Continuous Caster Mold No-sinusoidal Oscillation  
Optimization Application**

## 独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，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，也不包含为获得北京工业大学或其它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了谢意。

签名： 李鸿春 日期： 2006.4.20

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内 容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签名： 李鸿春 导师签名： 王) 中 日期： 2006.4.20

## 第1章 绪论

### 1.1 课题背景

#### 1.1.1 课题来源

2001年首钢搬迁工程迁钢项目启动,一期为方坯铸机,按长远规划,其产品定位在高端板材,二期将上马板坯铸机及先进的炉外精炼设备。为了尽早着手迁钢板坯铸机的技术准备,并解决二炼钢板坯铸机现存溢漏率较高和铸坯表面缺陷问题,2000年10月首钢第二炼钢厂1800板坯连铸机着手改造,其中关键项目之一就是根据现有条件将结晶器振动装置由导轨仿弧振动机构改造为短臂四连杆的仿直线振动机构,在传动环节中增设非圆齿轮减速箱,用机械方式实现非正弦规律;同时在铸机内侧增设弹簧缓冲装置,用来平衡振动装置及结晶器的重量、消除机械间隙、缓解机械冲击、保证振动精度。2005年3月首钢迁钢公司二期工程启动,拟从奥钢联<sup>[2]</sup>引进两台900-2150×230,250mm的双流板坯连铸机<sup>[1]</sup>,结晶器振动装置均采用液压非正弦振动装置,因此进一步对结晶器振动系统进行科学的研究,不仅可以为迁钢公司引进结晶器液压振动系统提供依据,还可以有效地充分利用液压非正弦振动优良设备性能,提高产品质量和生产效率。本课题旨在机械式非正弦振动实践基础上对结晶器液压非正弦振动装置进行理论分析,为将来的生产做好技术储备。

由于矿产资源供应紧张,能源价格飞涨,造成吨钢成本大幅增加。同时面临着环保压力和可持续新发展的要求。因此对影响连铸机产品质量和生产效率的关键环节结晶器振动进行分析优化并付诸于实践是十分必要的。

#### 1.1.2 课题的理论意义和实用价值

结晶器振动形式经历了同步、梯形和正弦振动3种形式,正弦振动现在为世界上大多数连铸机所采用。随着高速连铸生产无缺陷铸坯技术的发展,对于铸坯表面质量要求越来越高,严格控制振痕深度是解决铸坯表面质量的主要途径,提高振频、减少负滑脱时间是提高拉速、减少振痕深度的有效工艺措施<sup>[2]</sup>。但振频提高会使保护渣流入减少、结晶器摩擦阻力增大,从而增大了粘结漏钢的几率。这一矛盾是正弦振动无法克服的,为了解决这一问题,人们提出采用非正弦振动的结晶器。板坯结晶器非正弦振动可以减少铸坯表面的裂纹,有利于改善轧后中板的表面质量,提结晶器非正弦振动可以减少铸坯表面的裂纹,有利于改善轧后中板的表面质量,提

高中板产品的市场竞争力；尤其是液压振动系统可以在浇铸过程中动态控制振幅、频率及波形偏斜率（主要是调整结晶器上升下降时间），从而取得最佳的负滑动时间<sup>[3, 4, 5]</sup>和保护渣熔化流动效果。结晶器壁对运动坯壳的摩擦力被认为是撕裂坯壳进而限制浇铸速度的主要因素，在初生坯壳与结晶器壁之间存在一液体渣膜，此处的摩擦为粘滞摩擦，即摩擦力大小正比于相对运动速度和渣膜粘度，反比于渣膜厚度。这样，在结晶器振动正滑脱期间这一摩擦力及其引起的对坯壳的拉应力就较大，可能将初生坯壳拉裂。理论研究及模拟实验表明，适当选择非正弦振动参数（偏斜率）可使摩擦力减小 50%~60%。减少铸机粘结漏钢的次数，相应减少了因漏钢卧坯而造成的扇型段辊子弯曲现象，降低检修费用，减少事故损失、金属损耗和设备维修费用，提高铸机拉速及作业率，提高铸机对高品质钢种生产的适应性<sup>[3, 4]</sup>。另外，负滑动时间缩短能使板坯振动痕迹变浅，控制了板坯表面横向裂纹产生的根源。

### 1.1.3 国内外研究现状与发展趋势

结晶器机械非正弦振动由于其振动参数调整困难、精度低，所以在技术含量较高的板坯铸机应用受到限制。而结晶器液压非正弦振动装置由于振动频率高、重复精度要求高、波形跟踪性能失真度要求小，因而技术难度相当大<sup>[5, 6]</sup>。这种液压伺服振动装置能够在线调节振幅、频率和偏斜率三个参数，对提高铸坯的质量和产量有极大的好处。因此，在使用机械非正弦振动经验的基础上，深入研究液压振动的原理和应用，并根据钢水的具体条件及钢种和产量等生产实际条件合理调整振动参数，对指导板坯连铸机的实际生产具有非常重大的意义。

## 1.2 钢铁冶金概论

### 1.2.1 连续铸钢技术简介

连续铸钢就是把高温钢水连续不断地浇铸成具有一定断面形状和尺寸规格铸坯的生产工艺过程。其工艺流程<sup>[7]</sup>如图 1.1 所示：

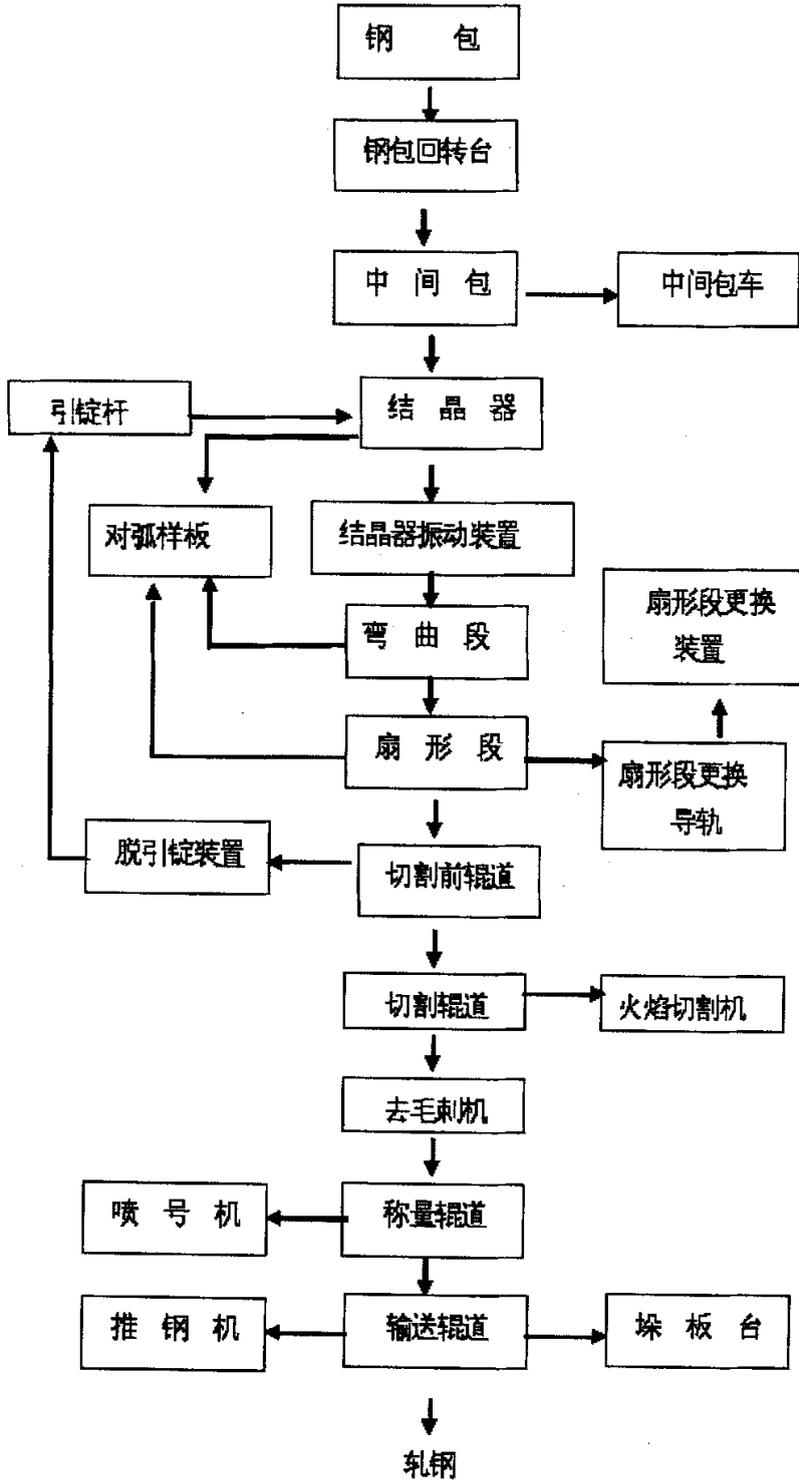


图 1.1 板坯连铸机主要设备构成图

## 1.2.2 连续铸钢的优越性

20 世纪 70 年代以后连续铸钢技术发展很快,究其原因主要是它与以往的模铸相比有很多优越性。连铸和模铸的根本差别在于模铸是在间断情况下,把一炉钢水浇铸成多根钢锭,脱模之后经初轧机开坯得到钢坯;而连铸是把一炉或多炉钢水连续不间断地注入结晶器,从而得到长度连续的铸坯,再经切割后直接形成定尺的铸坯;模铸时铸坯冷却速度缓慢,连铸时因强制冷却使冷却速度变快。基于这些基本差别,使得连铸和模铸在许多方面都形成了鲜明的对比<sup>[8,9]</sup>。

1、提高了综合成材率。一般来说,模铸时综合成材率只有 80%左右,而连铸时综合成材率可达 95%以上。据测算,连铸比每提高 10%,可使综合成材率提高 0.8%~1.5%。提高了资源的利用率。

2、降低能耗。连铸节能主要体现在省去开坯工艺的直接节能,以及由于提高成坯率和成材率的间接节能两方面。据有关资料介绍,目前每生产一吨铸坯可以节约 21.4~35.7kg 标准煤。

3、产品的均一性好、质量高。模铸钢锭凝固时间长,元素偏析显著;而连铸坯断面比小、冷却速度快、树枝晶间距小、偏析程度较轻,尤其是沿铸坯长度方向的化学成分比较均匀,因而其轧材的均一性比模铸高。

4、易于实现机械化自动化。在炼钢生产过程中,连铸由于其自身设备和工艺的特点,非常易于实现机械化自动化。近年来电子计算机已经广泛应用于连铸生产的控制,已经实现了电气、仪表、计算机一体化。

尤其是近终型设计使薄板坯连铸连轧较常规板坯连铸机铸坯厚度更接近于最终轧材的状态,使工艺流程更加紧凑,从钢水到成材的生产周期大大缩短。连铸还具有占地面积小、生产周期快、吨坯成本低等优点<sup>[10]</sup>。因此连铸机取代传统生产模式,其快速发展正改变着从炼钢到轧钢的工艺流程和效率。

## 1.2.3 世界连铸技术的发展

早在 1857 年,贝塞麦(H. Bessemer)就获得了连铸薄钢板的英国专利。20 世纪 40 年代在美国建成了第一台试验性连续铸钢装置,并取得了工业实验成功。目前连铸已经成为钢铁工业生产工艺的一个重要环节,连铸技术的发展程度,已成为衡量一个国家钢铁工业水平的重要标志<sup>[11,12]</sup>。

进入 20 世纪 80 年代以来, 连铸技术发展迅速, 使传统连铸逐渐进入工业成熟期。其特点是世界连铸比迅速增长, 到 2003 年世界平均水平达到 87%, 工业化国家达到 95% 以上, 我国的连铸比也由 70 年代的 21% 到现在超过 95%。各种提高连铸坯质量、减少成本、扩大连铸品种、降低消耗和能耗的措施竞相出现。连铸机本体和辅助设备向高复型发展。工艺过程高度自动化, 在线质量控制和计算机的介入, 使操作的稳定性和安全性都达到了较高的程度, 把连铸推向更高的发展阶段。因此连铸获得了世界钢铁界的重视。

### 1.2.3.1 传统连铸进入工业成熟期的技术发展

为了提高连铸生产率采取多项新技术:

#### (1) 进一步提高浇铸速度

浇铸速度是影响生产能力的重要因素。板坯连铸机的浇铸速度多数在 2.0m/min 以下, 而日本钢管公司福山厂 5 号板坯连铸机的浇铸速度一直保持在 2.5~3.0m/min 的水平。据日本有关资料报道, 最新连铸机拉速设计为 2.5~3.5m/min, 生产能力超过 0.3Mt/月。

#### (2) 多炉连浇技术

多炉连浇可以大幅度提高产量和金属收得率, 如: 连浇 5 炉与单炉相比, 其产量可以提高 50%, 金属收得率可以提高约 3%, 操作费用降低 25% 左右。

为提高铸坯质量的技术措施

(1) 炉外精炼处理: 可以有效控制钢水的成分、温度。

(2) 惰性气体保护浇铸: 可以避免高温钢水的二次氧化。

(3) 电磁搅拌技术: 电磁搅拌可减少铸坯的中心偏析和疏松, 扩大等轴晶区, 减少表面裂纹等缺陷。

(4) 气雾冷却技术: 气雾冷却比喷淋冷却均匀, 且调节范围宽, 冷却效率高, 可减少铸坯裂纹, 提高铸坯质量。

(5) 多点及连续矫直的应用: 多点矫直是将矫直变形分散到若干个矫直点上, 逐步完成变形, 最多可达 19 点。多点矫直变形率小, 变形速度慢, 对铸坯的内表面裂纹、内部裂纹均有所改善。

连续矫直使铸坯变形速率恒定, 并使其剪切力减小到几乎为零, 矫直负荷也降低到最小值。对铸坯的内表面裂纹、内部裂纹均有明显改善。

6) 非正弦振动技术: 现在已经判明, 振痕是由于弯月面附近坯壳发生折叠造成的, 而折叠过程是振动造成的。影响振痕深度<sup>[13, 14]</sup>的主要因素是负滑动时间, 负滑动时间小则振痕小, 减少负滑动时间就要提高振动频率。这就是近年来倾向于非正弦振动<sup>[11]</sup>的原因。

板坯连铸机采用小振痕 ( $\pm 1\sim 3\text{mm}$ ) 及高频率 (200~400/min) 及一定偏斜率的非正弦振动后, 有效地改善了铸坯表面质量。

### 1.2.3.2 连续铸钢技术的最新发展和我国的现状

#### 1、热送热装及直接轧制技术

1970 年代初受石油危机的冲击, 为了能够最大限度地降低能耗, 提高金属收得率, 缩短从钢水到成材的生产周期, 一些发达工业化国家纷纷采用热送热装技术。热送热装技术及直接轧制技术的前提是连铸机能够生产高温无缺陷的铸坯。实现这个目标的关键是对整个生产流程进行精确控制, 即从高炉到热轧精整的全过程计算机管理。

#### 2、近终形连铸

所谓“近终形连铸”指的是铸坯接近最终产品尺寸、形状的浇铸方式。近终形连铸包括薄板坯、带钢、型材、管材、棒材等。

#### 3、连铸机的关键技术

结晶器专家系统: 即结晶器液位控制和拉漏预报技术的广泛应用, 有效地解决了铸坯表面质量, 减少了铸机溢漏率。

液压非正弦振动系统: 可以在浇铸过程中调整振幅、频率、波形偏斜率, 以取得最佳的负滑动时间和保护渣流动效果, 改善铸坯表面质量。

智能扇形段技术: 即自动调辊缝、动态轻压下技术<sup>[15, 16]</sup>在新建板坯铸机广泛采用。对于生产率高的板坯连铸机, 远程快速调辊缝技术成为大型板坯连铸机必不可少的设备措施。

二冷水动态控制显著地改善了铸坯的内、外部质量。

计算机技术的广泛应用实现了生产过程的高度自动化。

板坯连铸设备将会围绕工艺要求在设备结构的优化、可靠性、维修性、可操作性、使用寿命等方面开展研究工作。在连铸工艺方面也还有很多需要深入研究的技术, 如: 包晶钢种连铸, 减少铸坯半宏观偏析和宏观偏析技术, 纯净钢的生产技术,

不锈钢及其他特殊钢种的生产技术。具有高洁净、高均匀性、超细晶的新一代钢铁材料将会成为有实力的钢铁企业的竞争目标，谁掌握了这些生产技术，谁的产品就有更多的市场占有率<sup>[5,6]</sup>。总之，连铸机关键技术选用及配套使用的目的是为了提高连铸机的装机水平，提高连铸板坯质量，提高拉速、生产率、金属收得率，降低成本，最大限度地发挥连铸机的高效、节能特点。

改革开放以来，国家对发展连铸技术一直予以高度重视，大力发展连铸生产和建设成为我国钢铁技术发展中的重要政策。先后从日本、奥地利、德国的冶金技术发达的工业化国家引进了多台不同技术类型的铸机，但是由于研发力度不够、消化不彻底，尽管产量规模很大达到 3.5 亿吨，但是精品不多，效益较差。我国连铸的实际情况是：

#### 1、在某些关键技术和装备方面仍经验不足

关键技术和装备，不得不依赖国外，如：结晶器专家系统、液压振动系统及扇形段辊缝自动调整、动态轻压下技术等。

#### 2、基本工艺设备的改进与完善

连铸冶金流程包括钢水准备、输送、浇铸及凝固控制和后续处理等基本工序。只有把各个工序有效地结合起来，连铸生产及产品质量才能得到保障。

#### 3、设计、制造连铸设备要与开发、使用生产技术相结合

近年来，我们相继上马了不少短流程生产线，这些生产线从设备装备来说都是不错的，但投入后，并不是所有的铸机都能生产出优质的产品。其中一个重要原因是缺乏必要的生产技术软件。连铸技术软件可以引进，但更为重要、更为实际的是组织自己的力量开发和利用它们，当然开发也包括在吸收消化引进技术基础上的创新，唯有如此才能减少对国外的技术依赖。

#### 4、加强管理、强化人员培训、开展信息交流

中国是开发和应用连铸技术较早的国家之一，在几十年的生产过程中，积累了不少宝贵的经验。按照连铸生产的客观规律并结合本厂的具体情况去组织和管理好与连铸机有关的各种条件，这就要求管理者、技术人员乃至操作者具有较高的素质，不仅要通晓连铸冶金学及相关的知识，且能在此技术的基础上严格执行有关的规范和规章制度，还能根据实际需要，凭借知识和经验追求技术的不断改进，促进生产的持续发展。因此，人员的培训，包括对操作者和管理者、技术人员的培训不是一

时的应对手段，而是应该长期坚持的一项制度。蓬勃发展的连铸技术，发生的信息量之大是冶金技术领域其他学科难以比拟的，在这种情况下，开展信息交流和研究可以获得为我所用的信息和技术，这是非常重要的<sup>[17]</sup>。

## 1.2.4 铸坯的表面缺陷

### 1.2.4.1 连铸坯凝固过程特点

把钢水由液体变成固体是一个凝固过程。由凝固原理可知，当钢水凝固后，在随后的热加工过程中就不能对钢材的产品质量有本质上的改进了。因此浇铸和凝固工艺<sup>[17]</sup>对产品的质量和成本有重大的影响。众所周知，连铸坯和钢锭的低倍结构虽然基本相近，但是连铸和模铸的凝固工艺却有很大的差别。连铸坯的凝固过程的基本特点可以概括如下：

#### 1、连铸坯凝固过程实质上是热量传递过程

凝固是液态向固态的转变，表现为原子热运动速度的突然降低并伴随有热量的释放：



单位重量钢水放出的热量  $Q$  包括：

- 1) 过热显热：从浇铸温度  $T_c$  冷却到液相线温度  $T_L$  放出的热量；
- 2) 潜热：从液相线温度  $T_L$  到固相线温度  $T_s$  放出的热量；
- 3) 过冷显热：从固相线温度  $T_s$  冷却到表面温度到  $T_0$  (1000℃左右) 放出的热量。

上述三部分热量可表示为：

$$Q = C_L(T_c - T_L) + L_f + C_s(T_s - T_0) \quad (1.1)$$

式中： $C_L$ ——钢水比热，0.84kJ/(kg·℃)

$C_s$ ——固体钢比热，0.67kJ/(kg·℃)

$L_f$ ——凝固潜热，低碳钢 310 kJ/kg

钢水从液态凝固冷却到室温，大约 1/3 的热量在由液态到固态的转变过程中放出的，其余 2/3 的热量是完全凝固后冷却时放出的。

钢水在连铸机中的凝固是一个热量释放和传递过程，铸坯边缘优先散热凝固，形成了液相穴相当长的一段铸坯。为此连铸机分成了三个传热冷却区：

1) 一次冷却区: 钢水在结晶器中形成足够厚的均匀坯壳, 以保证铸坯出结晶器时不被拉漏。

2) 二次冷却区: 喷水加速铸坯内部热量的传递, 使铸坯完全凝固。

3) 三次冷却区: 铸坯向周围环境通过辐射散热, 使铸坯温度均匀化。

钢水从结晶器→二冷区→辐射区大约有 40%的热量放出来铸坯才能完全凝固。这部分热量放出的速度决定了铸机的生产率和铸坯质量。因此要研究结晶器和二冷区的传热以及提高传热速率。

铸坯切割后大约还有 60%热量释放出来, 为了利用这部分热量, 节约能源, 又成功地开发了连铸坯的热装和直接轧制工艺, 现已得到了广泛的应用。

2、连铸坯凝固<sup>[18, 19, 20]</sup>是沿液相穴在凝固温度区间把液体转变为固体的工艺过程

连铸坯可以看成是液相穴很长的钢锭, 以一个固定的速度在连铸机内沿弧形轨道运动。铸坯在运动中凝固, 实质上是潜热的释放和传递的过程, 也可看成是在凝固温度区间 ( $T_L \rightarrow T_s$ ) 把液体转变为固体的加工过程。在固液界面附近存在一个凝固脆化区,  $TF0$  为强度  $\sigma = 0$  的温度, 叫零强度温度,  $TR0$  为断面收缩率  $R=0$  的温度, 叫零塑性温度。一般认为:

$$TF0 = T_s + 20 \sim 30^\circ\text{C}$$

$$TR0 = T_s - 30 \sim 50^\circ\text{C}$$

$T_s$  为某钢种的固相线温度。一般来说, 在  $TF0$  和  $TR0$  温度区间是一个裂纹敏感区。在固液界面的糊状区, 大约还有约 10%钢液未凝固, 此时晶体强度非常小, 塑性为零, 当铸坯受到外力作用时, 就在凝固前沿产生裂纹, 这是铸坯产生内裂的原因。只有在固相线温度  $T_s$  以下 30~50°C, 钢具有良好的塑性时, 才能受到外力的作用而不产生裂纹。

固液界面的临界强度和塑性是与钢的成分有关, 当作用于凝固壳的外部应力(如热应力、鼓肚力、矫直力等)使其变形超过临界值时, 铸坯就在固液界面产生裂纹, 并沿柱状晶界面扩展, 直到凝固壳能抵抗外力为止。

从液态凝固到固态要产生收缩。钢水在结晶器中凝固要产生线收缩, 导致坯壳与铜板间形成空隙, 并被空气填充, 气隙热阻占结晶器传热总热阻的 80%以上。

3、连铸坯凝固是分阶段的凝固过程。

在连铸机中铸坯的凝固经历三个阶段：

- 1) 钢水在结晶器中形成初生坯壳；
- 2) 带有液芯的坯壳在二冷区稳定生长；
- 3) 临近凝固末期的坯壳加速生长。

在结晶器弯月面冷却速度非常快，在外层形成细小晶体的激冷层。二冷区喷水（或气雾）冷却，垂直于铸坯表面散热最快，使树枝晶平行生长成柱状晶。在中心形成的中心粗大的等轴晶。

4、在铸机内运行的凝固坯壳的冷却可看成是经历“变形热处理”过程。

铸坯在运行中，受热应力和机械力的联合作用下的坯壳会变形。从冶金学的角度看，随温度下降，坯壳发生相变，特别是在二冷区，坯壳温度的反复下降和回升，使铸坯组织发生变化，就相当于“热处理”过程。

#### 1.2.4.2 铸坯的表面振痕

随着连铸坯热装、热送和直接轧制技术的发展，对铸坯的表面质量<sup>[18,19,20]</sup>的要求不断提高。生产和研究发现，铸坯的表面振痕对其表面质量影响很大。

##### 1) 振痕的危害

通过对铸坯振痕金相组织的分析发现，在振痕谷底夹渣，成分偏析较严重。同时还伴随有微观裂纹，而且振痕愈深上述情况愈严重。振痕的危害是多方面的：振痕较深时可能在矫直时产生横裂，严重时甚至引起拉漏；振痕谷底的夹渣，成分偏析将影响轧材的成分均匀和机械性能。较深的振痕在冷轧或热轧带卷上产生振痕条纹。其定量关系如下图 1.2 所示：

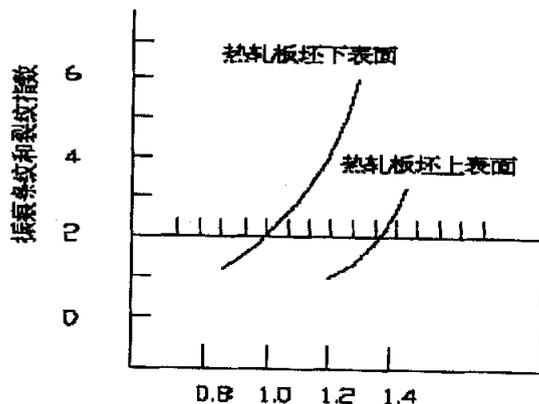


图 1.2 振痕条纹和裂纹与振痕深度的关系

## 2) 振痕的形成

## ① 结晶器内钢液的弯月面及初生坯壳

在结晶器内由于钢水表面张力的作用形成了具有弹性薄膜的弯月面，如图 1.3 所示。可把弯月面看成近似  $1/4$  圆弧。弯月面能抵抗微小的应力作用。在弯月面的下端部由于铜壁的冷却作用迅速形成了初生坯壳。

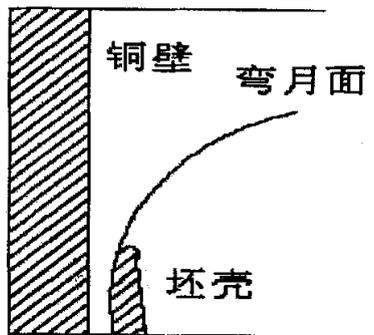


图 1.3 弯月面形成示意图

## ② 振痕的形成机理

对于振痕的形成提出了三种主要机理。如下图 1.4 所示。它们全部都是以结晶器弯月面处的凝固为基础。弯月面处形成镰刀状的凝壳，它的形状和长度取决于结晶器的冷却效果、结晶器的振动形式和坯壳与结晶器壁交界面的性能。

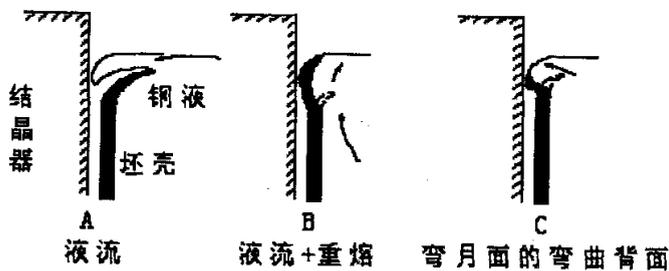


图 1.4 振痕形成机理

A、第一种机理，由于结晶器振动和拉坯的作用，凝壳向下移动，钢液越过镰刀状凝壳，再一次沿结晶器壁凝固产生新的镰刀状凝壳。

B、第二种机理，这是前一种凝固机理的变种，假定镰刀状凝壳全部重熔或部分重熔。

C、第三种机理，假定镰刀状凝壳在钢水静压力作用下向结晶器一面弯曲。从而导致连铸坯表面产生横向凹坑。

结晶器每振动一个周期，在铸坯表面就形成一个振痕。振痕间距可以按下式确定，

$$L = \frac{v_c}{f}$$

其中， $v_c$  为拉坯速度， $f$  为振动频率。

### 3) 减轻振痕的措施

影响振痕的因素很多，如钢种、保护渣、负滑动时间及结晶器弯月面区域的热交换等都会影响到振痕的生成和状态。

据有关文献报导，含碳量 0.1~0.2% 的碳素钢和 Ni/Cr 当量为 0.55 的不锈钢振痕最深，随着保护渣相对粘度的增加振痕深度会减小。不过，由于粘度的增加使保护渣的消耗量减少而对铸坯的润滑不利。负滑动时间<sup>[23, 24]</sup>对振痕的影响最大，振痕深度随着负滑动时间的减少而减小。减少结晶器弯月面区域的热交换可以有效地减轻振痕深度。

根据以上各因素对铸坯表面振痕的影响，可以看出减轻振痕的措施有两个：一个是通过控制结晶器的振动参数来减少负滑动时间，另一个是在结晶器弯月面处增加热阻减小热量传递速率。

#### ① 减少负滑动时间

减少负滑动时间可以明显地减小振痕地深度。

负滑动时间  $t_N$  与结晶器的振动频率  $f$ ，振动的冲程（振幅的 2 倍） $h$  及拉速  $V_c$  有关。对于正弦振动其数学关系式如下：

$$t_N = \frac{60}{f\pi \arccos\left(\frac{1000v_c}{fh\pi}\right)} \quad (1.2)$$

设  $Z = \frac{h}{v_c}$ ，则：

$$t_N = \frac{60}{f\pi \arccos\left(\frac{1000}{fZ\pi}\right)} \quad (1.3)$$

式中  $f$  ——振动频率, 1/min;  
 $h$  ——振动冲程, mm;  
 $v_c$  ——拉坯速度, m/min。

对于非正弦振动其数学关系式如下:

$$t_N = \frac{60}{2f \sqrt{1 - \frac{1000(1-a)}{3fz}}} \quad (1.4)$$

式中  $a$  是波形偏斜率, 其余参数同正弦振动。

不管是正弦振动还是非正弦振动提高振动频率  $f$ , 减少振幅, 提高拉速, 可以明显地减少负滑动时间。目前有关文献报导对于不同的钢种最佳负滑动时间为 0.1 秒左右。其实还可以更小,  $t_N$  取值远小于 0.1 秒的正弦振动同步控制模型已经在生产中使用。例如: 德国布什辉腾厂实验厂的薄板坯连铸机, 其铸坯断面为  $50 \times 1600 \text{mm}^2$ , 采用正弦振动, 振动行程  $h$  为 6mm, 当拉速  $v_c = 4 \text{m/min}$  时, 振动频率  $f = 260 \text{min}^{-1}$ , 经计算得  $t_N = 0.045 \text{s}$ 。生产实践表明此时的铸坯表面质量良好, 表面振痕非常浅, 有时甚至没有表面振痕出现。当然  $t_N$  并不是无限小下去, 如果过小, 则拉速或频率的微小波动都极易拉漏。所以  $t_N$  应有一个下限要求, 对于不同的连铸条件, 其下限值不同, 一般保持在 0.04 秒以上。

## ②减少弯月面区的热交换

由振痕形成机理得出, 振痕的形成是以结晶器弯月面弧形处的凝固为基础, 由此而形成的振痕结构、形状和深度取决于结晶器弯月面区的热交换, 显然减少弯月面区的热交换可以有效地改善铸坯表面的振痕。据报道, 法国钢铁公司与连铸设备制造商 Clrecim 合作, 基于上述思想开发了所谓“热顶结晶器”(hot top mold)。这种结晶器上部的内腔铜壁上增加一个附加热阻以减少弯月面区的热交换。

## 1.2.5 连铸保护渣的润滑作用

### 1.2.5.1 连铸保护渣的润滑机理

在炼钢过程中, 连铸保护渣对产品质量和铸机生产能力有十分重大的影响。如果没有保护渣的润滑作用<sup>[21,22]</sup>, 铸坯是很难从结晶器中顺利下行的。保护渣的基本作用表现在以下五个方面:

- 1) 使钢水表面保温;
- 2) 防止二次氧化, 即防止钢水与空气中的氧气直接接触;
- 3) 从钢水中吸附夹杂物;
- 4) 润滑铸坯表面;
- 5) 在凝固壳与结晶器之间保持均匀的传热。

保护渣是多种成分的混合物, 其中任一种成分的变化, 都会导致保护渣化学性质和物理性能的变化。目前, 保护渣的主要成分是  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 此外还有一定量的碱金属氧化物如:  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$  等及氟化物和碳质材料。这些少量成分主要是调整保护渣的性能。在浇铸过程中采用何种性能的保护渣应根据浇铸的钢种和铸机状况来定, 而世界上大多数连铸厂家使用的保护渣都是由推荐值并根据实际浇铸情况来适当调整。对保护渣定量、定性分析的虽然有一些, 但大都是具体分析某一种保护渣在使用时对铸坯质量的影响, 以及对此保护渣做适当的调整对铸坯质量有何改善。

连铸保护渣的最重要的作用在于它的润滑作用。连铸机在使用保护渣的情况下, 凝固坯壳与结晶器壁之间的润滑只有靠保护渣的熔渣去实现。润滑状况的好坏, 在很大程度上取决于保护渣在需要润滑的部位所呈的状态。要保证良好的润滑, 凝固坯壳与结晶器壁之间必须有一层性状合适、厚度均匀适中的润滑渣膜。能否形成这样一层渣膜, 不仅取决于保护渣本身, 还取决于其它相关条件。保护渣本身方面: 熔渣的凝固温度、析晶倾向和析晶温度、粘度随温度降低而升高的幅度及熔渣和凝渣的导热性等因素; 相关条件方面: 结晶器的振动制度、浇铸温度、拉坯速度、由钢液转入熔渣中的非金属夹杂物的种类和数量等。熔渣自身的特性和相关条件必须相互配合不可失调, 否则便会造成润滑不良, 一旦造成润滑不良, 轻则拉坯阻力增大, 重则引起表面缺陷、甚至酿成穿钢拉漏事故。

一般来说渣的熔化物介于结晶器壁和凝固坯壳之间, 靠结晶器一侧为固态即非流动层, 靠凝壳一侧为液态即流动层, 如果使用的渣有明显的析晶倾向, 则固——液之间有相当数量的高粘度过渡层。固态渣将随结晶器壁一起上下振动, 是非消耗性的, 液态渣是有效的润滑剂, 它随坯壳被带出结晶器是消耗的。在液态渣被消耗的同时, 液面上的熔渣经弯月面的通道不断地向下补充。于是便形成了稳定的润滑渣膜。

作为润滑剂的液态渣膜，在其厚度方向上存在温度梯度、粘度梯度、流动速度梯度。渣膜中温度分布，决定了粘度分布，流动速度分布不仅取决于粘度分布，还取决于结晶器的振动速度和拉速。

我们把渣膜看成是塑性粘弹性非牛顿流体，由流体力学的一些结论和公式可以得出：降低粘度、提高振动频率和拉坯速度均可使流速加快。

渣膜厚度和渣耗：

在将渣膜看作塑性粘弹性流体的前提下通过计算渣膜厚度  $d$ 、粘度  $\mu_s$ 、相对速度  $V_0$  的关系如图 1.5 所示。

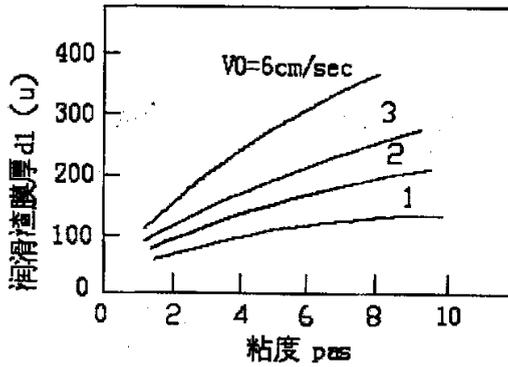


图 1.5 润滑渣膜厚度与粘度  $\mu_s$  和相对速度  $V_0$  的关系

从图中可看出，在振动频率等条件固定的前提下，渣膜厚度随粘度和相对速度的提高而增厚，或在振动制度固定的条件下，渣膜随拉速增高而变厚。从渣膜厚度和渣膜内流速的分布可求出渣的流量，沿铸坯周长积分，便得渣耗量。如下图 1.6：

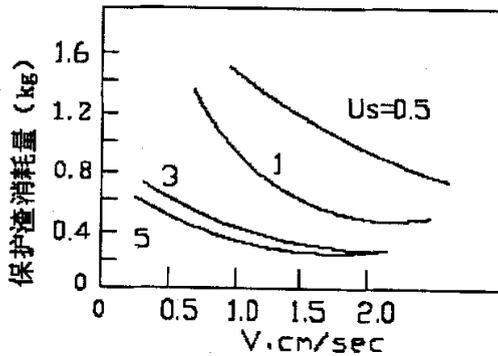


图 1.6 膜耗与粘度  $\mu_s$  和拉坯速度  $V$  的关系

此图表明，在振动制度和铸坯断面一定的条件下，由渣膜引起的渣耗随粘度和拉速的提高而降低。

### 1.2.5.2 结晶器内摩擦力的分析

要使凝固坯壳得到润滑，在结晶器中的凝固坯壳外表面必须有一层润滑渣膜。在此前提条件下，渣膜对凝固坯壳的润滑状况，应由拉坯运动和结晶器的振动运动通过润滑渣膜作用到凝固坯壳外表面的剪应力的的大小来衡量。此剪应力决定于渣膜粘度、渣膜中流速的分布和渣膜厚度等因素。而渣耗是这些因素的综合体现。此剪应力亦是对坯壳的摩擦力，通过该过程产生的摩擦力称谓“液态摩擦力  $f_L$ ”，用公式表示：

$$f_L = \eta \times (V_m - V_c) \frac{1}{d_L} \quad (1.5)$$

式中,  $V_m$ : 结晶器的振速;

$V_c$ : 拉速;

$\eta$ : 液态保护渣的粘度(kg/m.s);

$d_L$ : 保护渣的厚度(m);

当结晶器壁和固态保护渣之间产生相对运动时，这种固体和固体接触而产生的摩擦力叫固体摩擦力，用公式(6)表示:

$$f_s = \eta_s H \quad (1.6)$$

$\eta_s$ : 固体的摩擦系数;

$H$ : 钢水的静压力(kg/m<sup>2</sup>)

把结晶器的有效长度，即从弯月面到结晶器出口的距离分成单位长度，来计算液体和固体两种摩擦力并进行比较，取较小值作为该处的摩擦力。

为了计算距弯月面任意处的液体和固体保护渣的摩擦力，必须首先知道保护渣的厚度和温度。

渣耗是影响润滑的各种因素的综合体现，渣耗量大说明状况好，渣耗量小说明润滑状况不好。

研究保护渣的润滑作用主要是防止粘结型漏钢，据报导，板坯连铸一次典型的漏钢可以造成 20 万美元的损失，而 80% 的漏钢属于粘结型漏钢<sup>[2]</sup>。

为了防止粘结型漏钢就必须：

- 1) 降低保护渣的粘度;

- 2) 减少结晶器与铸坯之间的速度差;
- 3) 增加保护渣的消耗量。

## 第2章 结晶器振动装置发展

### 2.1 结晶器振动技术的发展

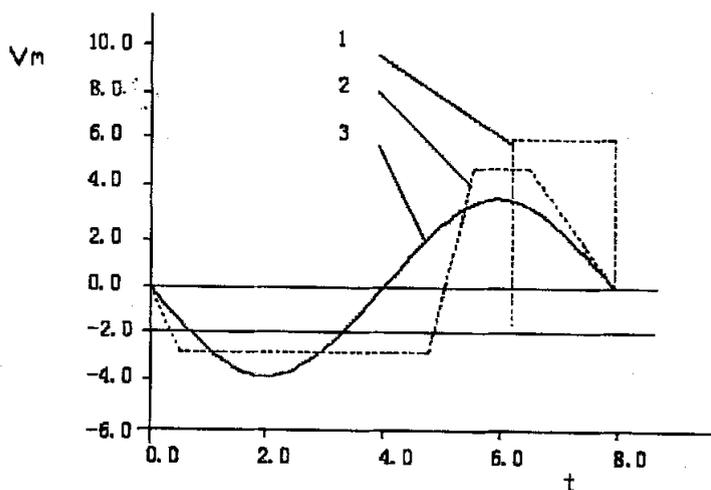
结晶器振动装置用于支撑结晶器并使其沿铸机半径作近似圆弧的上下往复振动。在连续浇铸过程中必须一直进行这种振动，以防止因初生坯壳与结晶器粘结而被拉裂，并有利于保护渣在结晶器壁的渗透使结晶器得以充分润滑和顺利脱模。对结晶器振动的技术要求是：

- 1) 振动的方式能有效地防止因坯壳的粘结而造成拉漏事故；
- 2) 振动参数有利于改善铸坯表面质量，形成表面光滑的铸坯；
- 3) 振动机构能准确实现圆弧轨迹，不产生因过大的加速度引起的冲击和摆动；
- 4) 设备的制造、安装和维护方便，便于处理各种事故，传动系统必须有足够的安全性能。

不同的振动方式有不同的振动效果，对铸坯的表面质量的影响也不一样。在结晶器振动技术方面，业内普遍认同容汉斯和罗西做了开拓性的贡献。这项技术有效地解决了早期固定结晶器时，由坯壳粘结而引起的拉裂及漏钢等一系列连铸技术关键问题。

历史上最早出现的振动方式为同步式振动，其结晶器速度变化规律如图 1.7 中曲线 1 所示。其特点是：结晶器下降时与铸坯保持同步运动，下降速度  $V_{m2}=V$ ，使拉裂的坯壳在此阶段得以愈合，其愈合时间大约占整个运动周期的 75%。然后再以三倍的拉速上升，即上升速度  $V_{m1}=3V$ 。结晶器在下降过程中转为上升时，其转折点处速度变化很大，实际上，理论上该点的瞬时加速度为无限大，这对铸坯质量和设备都是不利的。早期出现的另一种振动方式是在同步式振动的基础上，通过对其改进而得到的所谓梯形振动，其结晶器速度变化规律如图曲线 2 所示。这种振动方式在连铸发展的头十年被广泛采用。它与同步式振动的区别：其一，结晶器的下降速度稍大于拉坯速度，使坯壳在结晶器下降过程中承受一定的压力，以利于使拉裂坯壳更有效地愈合，同时也利于脱模；其二，在结晶器下降和上升的转折点处，速度的变化较同步式有所缓和，使运动的平稳性有所提高。该振动方式仍保留同步式振动愈合时间较长的特点，愈合时间约占整个周期的 66-71%。以上两种振动方式其振动机构均需利用凸轮机构。为简化振动机构利用曲柄连杆机构的正弦式振动得到发展。

在正弦振动中，结晶器的速度和加速度分别按正弦、余弦规律变化<sup>[23,24]</sup>。其速度变化规律如图中曲线3所示。正弦式振动方式的特点是：①在运动过程中虽然没有稳定速度阶段，但仍有一小段负滑脱阶段，具有脱模作用。②由于速度是按正弦规律变化的，所以其加速度必然按余弦规律变化，过渡比较平稳，没有大的冲击。③由于加速度小，可以提高振动频率，减轻铸坯表面振痕深度。④正弦振动可以通过偏心轴来实现，加工制造很容易。⑤既然结晶器与铸坯之间没有严格的同步速度关系，就没有必要采用速度连锁系统，因而简化了驱动装置，可用交流电机驱动。基于上述优点，正弦振动方式被广泛采用。



1 同步振动；2 梯速振动；3 正弦振动

图 2.1 结晶器的振动规律

正弦振动虽然有其优点，但是由于坯壳处于负滑动状态的时间短，且结晶器上升时间占振动周期的一半，而增加了拉断的可能性。为弥补这一弱点，可采用高频振动来提高脱模的效果。一些发达国家的连铸技术正朝着高频率小振幅和快拉速方向发展，以便获得高温无缺陷的优质铸坯，从而实现铸坯热装和直接轧制。

对于飞速发展的现代连铸来说，正弦振动已经不能满足连铸工艺的要求了。适应于铸坯热装和直接轧制提出了非正弦振动如图（2.2、2.3）所示。

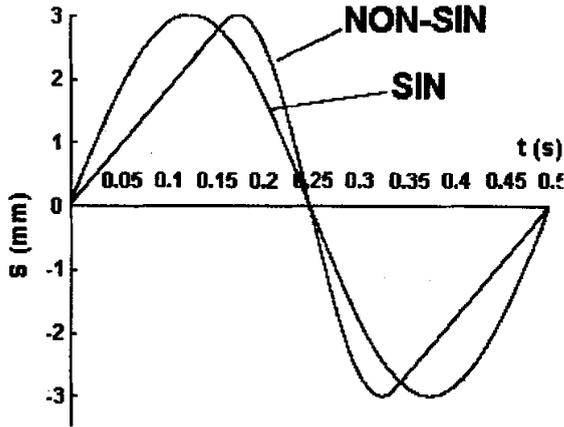


图 2.2 正弦与非正弦振动位移图

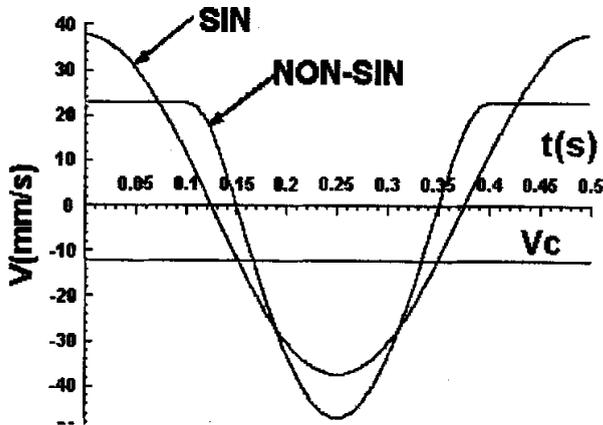


图 2.3 正弦与非正弦振动速度图

## 2.2 结晶器振动装置

结晶器振动装置主要功能是使结晶器按给定的振幅、频率和波形偏斜特性沿连铸机外弧线运动。其目的是便于“脱模”，防止铸坯在凝固过程中与结晶器铜壁发生粘结而出现粘挂漏钢事故。

结晶器振动装置种类很多，但目前用于板坯连铸机的振动装置按驱动方式分主要有机械振动（近似正弦振动曲线）和液压振动（正弦和非正弦振动曲线）。而机械振动又有电机驱动的短臂四连杆式和电机驱动的四偏心轮板簧导向式。液压振动也有单液压缸驱动短臂四连杆式、双液压缸驱动短臂四连杆式或垂直升降式。新建的板坯连铸机很多已采用液压振动装置，而鞍钢、珠钢、邯钢、包钢引进的中厚板

坯及多条薄板坯连铸连轧生产线也采用了液压振动装置<sup>[8, 17]</sup>。国外的连铸公司 20 世纪 90 年代中末期纷纷推出这一关键技术。我国安阳钢厂 1999 年 11 月 18 日投产的板坯连铸机该项技术是从奥钢联引进的，是我国首台采用液压振动装置的常规板坯连铸机，而鞍钢、珠钢、邯钢、包钢引进的中厚板坯及多条薄板坯连铸连轧生产线也采用了液压振动装置。图 2.4 是机械式结晶器振动装置。

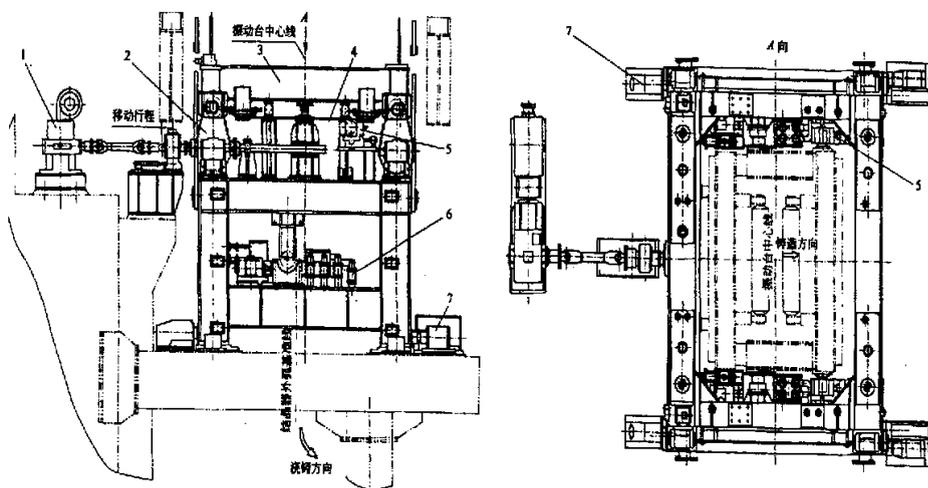


图 2.4 机械式结晶器振动装置

1-驱动装置；2-振动发生装置；3-振动框架；4-振动台导向装置；5-弯曲段支座；  
6-配水装置；7-结晶器安装定位装置

图 2.5 是奥钢联工程技术公司最新开发的 DYNAFLEX 结晶器振动装置，动态灵活。主要结构特点是一个底板（10）通过底板连接梁（2）构成了一个 U 型底座，一个底板上方有一个振动台架（5），左右两个台架可以互换。台架用来支撑和紧固结晶器，每个台架下方各有一个带阀块的液压缸（8），使台架和结晶器能够上下振动，两个台架下方共有四个螺旋弹簧缓冲装置（9），每个台架有两组长板簧导向组件（6、7），两侧底板上设置了弯曲段安装底座（3）。

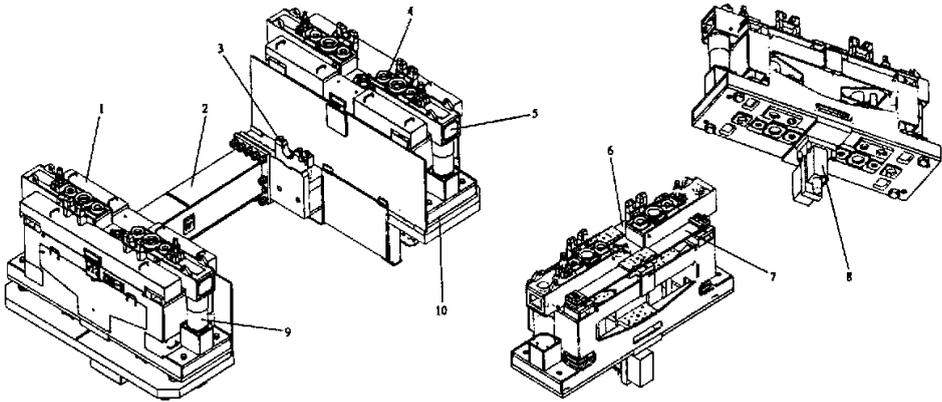
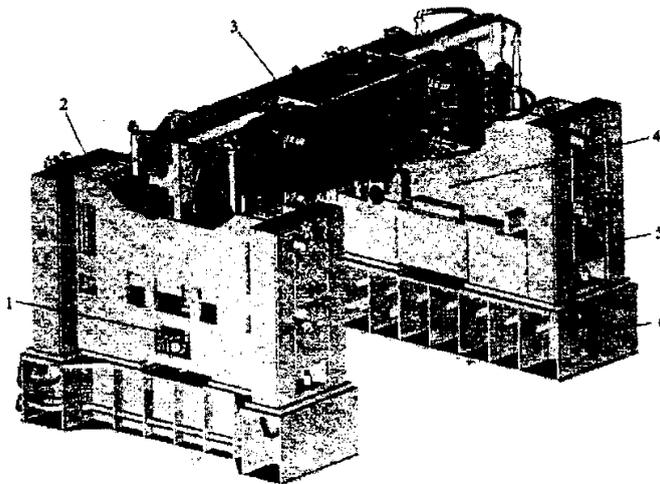


图 2.5 DYNAFLEX 结晶器振动装置

1-板弹簧罩；2-底板连接梁；3-弯曲段耳轴座；4-结晶器配水板；5-振动台架；  
6-左板簧组；7-右板簧组；8-伺服阀块的液压缸；9-缓冲弹簧；10-底板

图 2.6 是西马克/德马克公司最新开发的双液压缸驱动的双液缸驱动的振动装置，它是由谐振式结晶器演化而来。这种振动装置除了具有图所示的振动装置的许多特点外，还具有下列三个特点：一是它采用 8 组 32 片短板簧导向；二是两个带阀块的伺服液压缸被设置在密封箱内，防止粉尘进入；三是整个振动装置由振动框架、中间框架和下框架 3 部分组成。



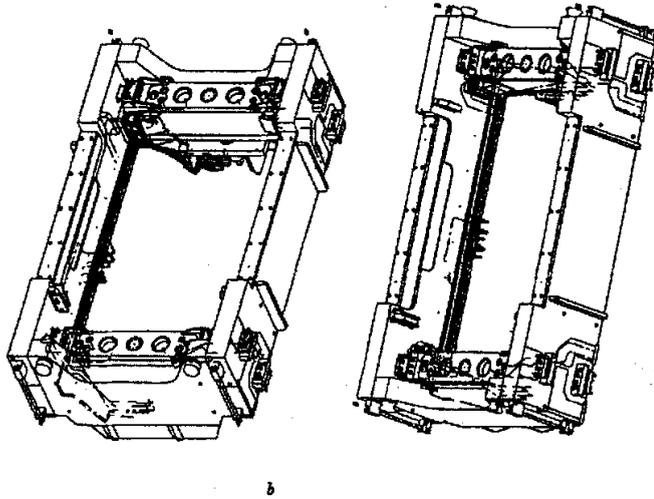


图 2.6 西马克/德马克双液压缸驱动结晶器振动装置

a-与结晶器的组装图；b-振动框架与中间框架图

1-带密封箱、伺服阀控制的液压缸；2-短的板簧组；3-结晶器；4-上框架；  
5-中间框架；6-下框架

图 2.7 是 JSP 公司的单电液缸执行机构驱动的短臂连（摇）杆式结晶器振动装置，这种机构出现的较早。在 20 世纪 70 年代就成功地应用于工业生产，在全弧型连铸机<sup>[3,12,16]</sup>上它的运动轨迹是仿弧曲线，在直结晶器所在的连铸机上它的运动轨迹是一条近似的直线。在问世初期它是通过电机带动偏心轴和偏心轮传递动力。后来住友重机公司用伺服液压缸替代了机械的电机、减速机、偏心传动系统，使结晶器振动装置的研究当时在世界上处于领先水平。现在伺服液压缸已被可靠、实用、控制精度高的电液执行机构取代。如图所示，它主要是由传递动力的摇杆（2）做定轴转动，带动 4 个铰链点约束其他杆件运动，使安装在振动台架（3）、（5）上面的结晶器按照设定的轨迹运动。摇杆（2）通过带平衡重的摇杆（1）与电液执行机构连接，电液执行机构和振动装置的固定底座均固定在基础上。

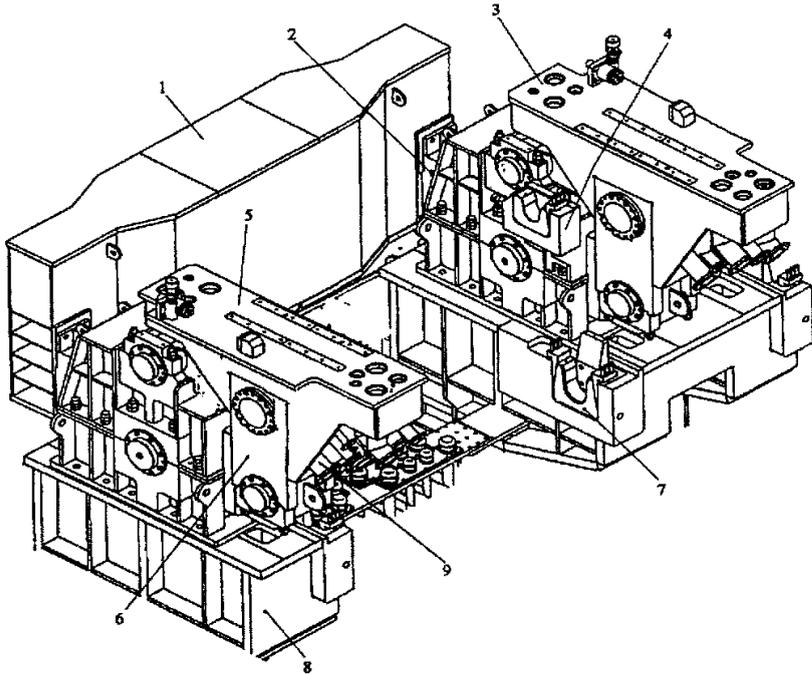


图 2.7 JSP 公司的短臂连（摇）杆式结晶器振动装置

- 1-平衡重升降杆；2-传递动力的摇杆；3-右振动台；4-弯曲段上支撑座；  
5-左振动台；6-连杆；7-弯曲段下支撑座；8-固定底座；9-配水装置

达涅利公司发明了 INMO (integral motion) 结晶器及与之相适应的结晶器振动装置。结晶器是不带外框架的结构，振动装置为双液压缸结构。和其他厂家主要不同点在于其结晶器的导向方式。它既不是过去曾出现过的定轴转动的滚轮导向，也不是板簧导向，而是利用平面运动的 12 个滚动体（圆柱导向滚动体，在厚度方向设置 8 个，宽度方向设置 4 个）进行导向。

结晶器振动装置的主要参数包括振幅、频率、非正弦振动曲线的波形偏斜率、负滑动时间、振动行程、摆动偏差极限值、相位差、驱动电机功率等。板坯连铸机的振幅范围一般为  $0 \sim \pm 7\text{mm}$ ，而生产中应用较多的是  $\pm 2.5 \sim \pm 4.5\text{mm}$ 。振动频率设计值一般为  $0 \sim 400\text{rpm}$ ，而传统板坯连铸机一般应用的是  $100 \sim 200\text{rpm}$ ，薄板坯连铸机为  $200 \sim 400\text{rpm}$ 。只有液压振动装置可动态调节波形偏斜率<sup>[25, 26]</sup>，一般在  $10\% \sim 50\%$  之间调节。负滑动时间一般小于  $0.2\text{s}$ ，且取值越小越好，国外有的专家认为最好小于  $0.11\text{sec}$ 。

结晶器振动装置关键技术：

- 1) 能够在浇铸过程中改变振幅、频率和波形偏斜率的液压伺服振动机构。

- 2) 缓冲力的优化。
- 3) 高频率小振幅工艺的优化以达到最佳的负滑动时间, 实现最佳的保护渣熔化润滑状态。
- 4) 振动体质量的最小化及板簧导向系统。
- 5) 外装式结晶器电磁搅拌装置的支撑与运转机构。
- 6) 内装式结晶器电磁搅拌装置的支撑机构。
- 7) 结晶器运动状况动态监视系统(主要监视摩擦力的变化)
- 8) 为了保持保护渣消耗量的恒定, 奥钢联开发了结晶器振动反向控制模型, 即拉速提高、频率降低、振幅提高。

### 2.3 非正弦振动的产生及其特点

振动就要产生振痕,它直接影响到铸坯的表面质量,同时它还是引起表面横裂纹的原因。振痕的形成是由于有一个造成坯壳折叠的机械作用,增加了弯月面区坯壳变形造成的。

最近的研究结果表明,结晶器的摩擦对振痕的影响是微不足道的,但是负滑动时间对振痕却有着非常明显的影响。负滑动时间短,则振痕浅;负滑动时间长,则振痕深。但是负滑动时间不能无限的小,因为负滑动时间减少,保护渣消耗量也随之减少,过小的负滑动时间会导致坯壳的粘结现象。研究和实验表明,保护渣消耗量正比于正滑动时间。为实现短的负滑动时间、长的正滑动时间,以满足高速浇铸特别是薄板坯连铸的需要,产生了结晶器的非正弦振动<sup>[27,28,29]</sup>。

非正弦振动是上升时间比下降时间长的振动。

非正弦振动是相对于正弦振动而言的。非正弦振动曲线相对于正弦振动曲线的改变程度用修正率  $a$  来表示:

$$a = \frac{A_1}{A_2} \times 100\% = \frac{t_m}{\left(\frac{T}{4}\right)} \times 100\% \quad (2.1)$$

式中  $t_m$  是结晶器由平衡位置上升到最高位置时正弦振动和非正弦振动的时间差。

$T$  是正弦振动的周期。

非正弦振动有以下特点:

1) 正滑动时间较正弦振动长, 因而使保护渣消耗量增加, 弯月面附近的液体摩擦力减小。

2) 负滑动时间较正弦振动短, 使得铸坯振痕较正弦振动浅, 提高了铸坯表面质量。

3) 正滑动时间内, 结晶器振动速度与拉速之差减小, 从而使正滑动时间内铸坯所受的拉应力减小, 减小了拉漏的可能性。

4) 负滑动时间内, 结晶器振动速度与拉速之差变大, 有利于铸坯脱模。

5) 修正率  $a$  越大, 即非正弦振动相对于正弦振动曲线的改变程度越大, 结晶器振动速度与拉速之差越小, 坯壳所受的液体摩擦力越小。

6) 虽然负滑动时间较正弦振动时小, 但负滑动量可以保持不变, 甚至有些增加, 从而有利于脱模。

另外, 从传热角度来看, 由于非正弦振动改善了弯月面附近的润滑条件, 使保护渣消耗量增加, 保护渣的流入更连续、均匀, 从而减小了铸坯和结晶器之间的热阻, 改善了结晶器的传热条件, 有利于拉速的提高。

液体摩擦力随波形偏斜率  $a$  的增大而减小, 当  $a$  为 40% 时, 液体摩擦力估计减小 40%, 按此推算, 在正滑脱期间, 结晶器与铸坯的相对速度的降低, 将使摩擦力下降约 30%。

虽然, 非正弦振动的负滑脱时间比正弦振动的时间短, 而两种振动对坯壳施加的压力可保持一样大, 这是因为非正弦振动的振动速度降低的更快的缘故。

## 2.4 课题基本情况和研究内容

### 2.4.1 课题的基本情况

为了尽早着手迁钢板坯铸机的技术准备, 并解决二炼钢板坯铸机现存溢漏率较高和铸坯表面缺陷问题, 2002 年 10 月首钢第二炼钢厂 1800 板坯连铸机着手改造, 其中关键项目之一就是根据现有条件将结晶器振动装置由导轨仿弧振动机构改造为短臂四连杆的仿直线振动机构, 在传动环节中增设非圆齿轮减速机, 用机械方式实现非正弦规律, 同时在铸机内侧增设弹簧缓冲装置, 用来平衡振动装置及结晶器的重量、缓解机械冲击、消除机械间隙、保证振动精度。2005 年 3 月首钢迁钢公司拟从奥钢联引进两台 900-2150×230, 250mm 的双流板坯连铸机, 结晶器振动均采用液压非正弦振动装置, 因此进一步对结晶器振动系统进行科学的研究, 不仅可以为

迁钢公司引进结晶器液压振动系统提供依据，还可以有效地充分利用液压非正弦振动优良设备性能，提高产品质量和生产效率。本课题旨在机械式非正弦振动实践基础上对结晶器液压非正弦振动进行理论分析，为将来的生产做好技术储备。

#### **2.4.2 研究内容范围**

- (1) 对板坯结晶器机械振动系统进行分析研究；
- (2) 对板坯结晶器液压振动的控制原理及特点的研究，为设备的引进和应用提供依据。

## 第3章 结晶器机械振动系统

### 3.1 四偏心机械正弦振动机构

#### 一、四偏心振动机构的组成和特点

四偏心振动装置<sup>[30]</sup>属于正弦振动方式，结晶器壁的弧线运行是借助于两对偏心距不等的偏心轮及连杆机构而进行的。结晶器弧线运行的定中（导向）是利用两条板式弹簧，一头连接在快速更换台框架上，另一头连接在振动头恰当位置上来实现的。板式弹簧使振动台只能作弧形摆动，而不能产生前后左右的位移，适当选定弹簧的长度，可以使运行轨迹的误差不大于 0.2mm，由于结晶器振动的振幅不大，可以把两根偏心轴进行水平安装，而不会引起明显的误差。

#### 二、四偏心振动机构的主要优点

四偏心振动装置具有以下四个优点：

（1）可以对结晶器振动从四个角部位置上进行支撑，因而结晶器振动平稳，无摆动现象；（2）振动曲线与浇铸弧形线同属一个圆心，无任何卡阻现象，不会影响铸流的顺利前移；（3）结构稳定，适合于高频小振幅技术的应用；（4）该振动机构中，除结晶器振动台的四角外，不使用短行程轴承，因使用弹簧板组件导向，而无需导辊导向。

#### 三、四偏心振动机构的传动系统

四偏心振动传动系统<sup>[21,22,23]</sup>由一台电动机、两个法兰接手、一根万向接轴、一个快速联轴器、一个中心减速机、两个带法兰的左右方向接轴、两个角部减速机、两个带轴承组件的偏心轴组等组成。它们的工作原理如下：

电动机将传动通过一根带快速联轴器的万向接轴传给一台中心减速机。从该中心减速机的两侧各通过一根带法兰接手的万向轴，将转动传给各自的左右角部减速机。这两个左、右角部减速机再将转动按跟原来的运动成 90° 角的方向，分别传给左（右）的一根具有两个不同偏心量的同向偏心点的偏心轴<sup>[31, 32]</sup>上。左（右）偏心轴再通过各自两个偏心轴颈上的两个轴承及套装在轴承座上的两个与上部振动台相连接的连杆上，将转动转换为由弹簧组件导向的近似圆弧的往复振动。

连接的连杆上，将转动转换为由弹簧组件导向的近似圆弧的往复振动。

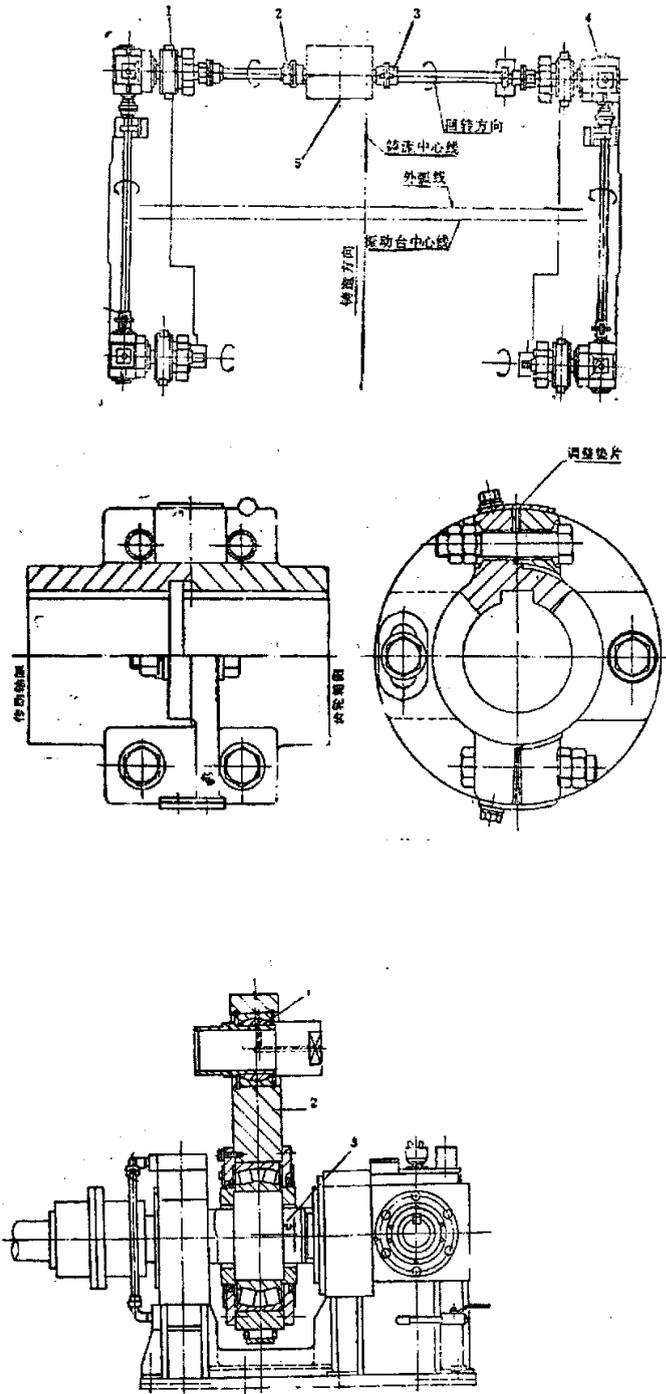


图 3.1 振动传动系统

1- 电动机; 2- 接手; 3- 偏心轴; 4- 角部减速机; 5- 中心减速机

这种振动方式中振幅的改变只能在离线的机械维修场通过更换偏心轴来实现，随着现代高效连铸的发展，这种振动机构已经不能满足生成实际的要求，新铸机上已经不再使用，在旧有的铸机上也大都进行了改造和更新。

### 3.2 非圆齿轮驱动的短臂四连杆非正弦振动机构

2001年首钢搬迁工程迁钢项目启动，一期为方坯铸机，按照长远规划，其产品定位在高端板材，按规划二期将上马板坯铸机及先进的炉外精炼设备。为解决二炼钢板坯铸机现存溢漏率较高和铸坯表面缺陷严重问题，并尽早着手迁钢板坯铸机的技术准备。2002年10月首钢第二炼钢厂1800板坯连铸机改造，其关键项目之一就是根据现有条件将结晶器振动装置由导轨仿弧振动机构改造为短臂四连杆的仿弧线振动机构，在传动环节中增设非圆齿轮减速箱，用机械方式实现非正弦规律，同时在铸机内侧增设弹簧缓冲装置，用来平衡震动装置及结晶器的重量、消除机械间隙、缓解机械冲击、保证振动精度。

为此首钢与燕山大学合作，进行专题研究。课题组主要面临以下问题：

a、国外的液压振动装置机械结构紧凑，质量较小，精度高。而现有改造受到场地及资金的限制，只能采用投资较少、与现有土建基础相适应的四连杆机构。这样，势必存在振动装置质量大，冲击较严重的问题。

b、国外的液压振动装置振动源为伺服液压缸，与计算机结合很容易获得与连铸理论相符的振动规律。而机械式非正弦振动产生偏斜率的是非圆齿轮和偏心套，所以实际的装置不可能适时无限调节，实现与拉速、钢种、断面的匹配。这样就必须根据产品大纲要求慎重考虑振动模型。

c、为了提高板坯连铸机保护渣的润滑效果，减少板坯的粘结拉漏、拉裂，改善板坯的表面质量，对非正弦振动参数进行优化。

#### 3.2.1 机械式非正弦谐振技术的开发与应用

##### 3.2.1.1 保护润滑机理的研究

根据结晶器润滑机理<sup>[18,19,20]</sup>，在结晶器壁和坯壳之间有一层保护渣薄层，并且接触坯壳的为液态，接触结晶器的为固态。结晶器中摩擦力产生的机理有两种，结晶器相对于坯壳的运动是在液体保护渣膜内进行而产生的摩擦力称为“液体摩擦力  $f_l$ ”，用式 1 表示：

$$f_l = \frac{\eta \times (v_m - v_c)}{d_L} \quad (3.1)$$

式中  $v_m$  --- 结晶振速, cm/s

$v_c$  --- 拉坯速度, cm/s

$\eta$  --- 液态保护渣膜的粘度, g/cm.s

$d_L$  --- 液态保护渣膜的厚度, cm

当结晶器壁和固态保护渣之间相对运动时, 这种固体与固体接触产生的摩擦力称为“固体摩擦力  $f_s$ ”, 用公式 3.2 表示:

$$f_s = \eta_s H \quad (3.2)$$

式中  $f_s$  --- 固体摩擦力

$\eta_s$  --- 固体摩擦系数

$H$  --- 钢水净压力

对于从弯月面到结晶器出口的各个位置, 根据操作条件 (浇注速度、结晶器振动条件、保护渣物性) 计算固体和液体摩擦力的大小, 据此来判断是液体润滑还是固体润滑起到支配作用。显然是较小的摩擦力起到支配作用, 并作为该处的摩擦力。

根据结晶器润滑机理可以把液体摩擦力和固体摩擦力作为弯月面某一距离的函数来计算。结晶器采用正弦振动时期<sup>[14-15]</sup>计算结果如图 3.2 所示。

液体摩擦力的最大值 A、B 呈现于振动周期内最大相对速度的时候, 如图 3.2 中的两条曲线。当相对速度等于 0 时 ( $v_m = v_c$ ) 液体摩擦力  $f_l = 0$ , 因此在一个振动周期中液体摩擦力在两条曲线 A 和 B 之间变化。负滑动时间的相对速度比正滑动时间的小, 因此负滑动期间的液体摩擦力绝对值较小。

固体摩擦力是由两条直线  $f_s$  表示的。

由此可以看出液体润滑在结晶器上部其支配作用, 而在结晶器下部固体摩擦力<sup>[33]</sup>比最大的液体摩擦力要小, 因此在此部位固体润滑起支配作用。

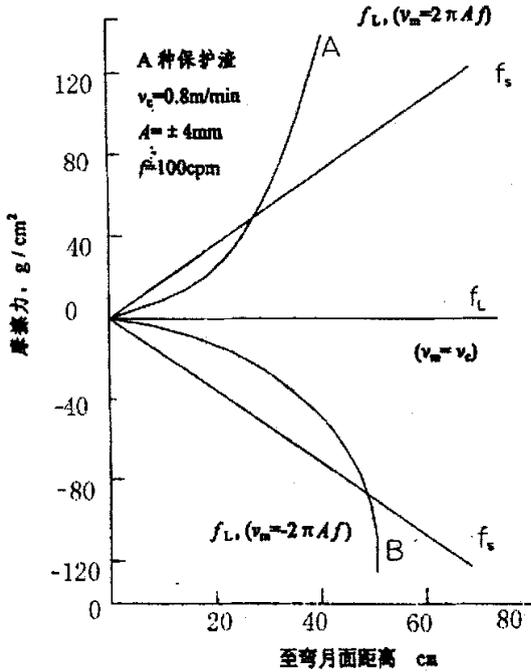


图 3.2 结晶器内液体保护渣膜和固体保护渣摩擦力的分布

### 3.2.1.2 非正弦振动最佳振动模型的确定

在浇注时，凝壳因摩擦力产生的拉应力大于铸坯凝壳的强度时，坯壳就会断裂。这种断裂称之为“粘结型断裂”。据弯月面  $Z$  处的坯壳拉应力  $\sigma_f$  表示，它与摩擦力  $f$ 、坯壳厚度  $D_s$  的关系用式 3 表示：

$$\sigma_f = \int_0^z f dZ / D_s \quad (3.3)$$

式中  $f$ —单位面积上的摩擦力， $g/cm^2$ ，取  $f_L$ 、 $f_s$  中较小的一个。

$Z$ —至弯月面的距离， $cm$ 。

浇注时坯壳的  $\sigma_f$  与高温拉伸强度  $\sigma_B$  的对应情况如图 3.3 所示。

当拉速超过  $1.8m/min$  时，距离弯月面  $5cm$  处的  $\sigma_f$  大于  $\sigma_B$ 。因此，铸坯可能产生粘结型断裂。而在弯月面稍低位置  $Z=20cm$  处，在图 3.3 所示的拉速范围内， $\sigma_f$  从不超过  $\sigma_B$  铸坯不会有断裂的危险。

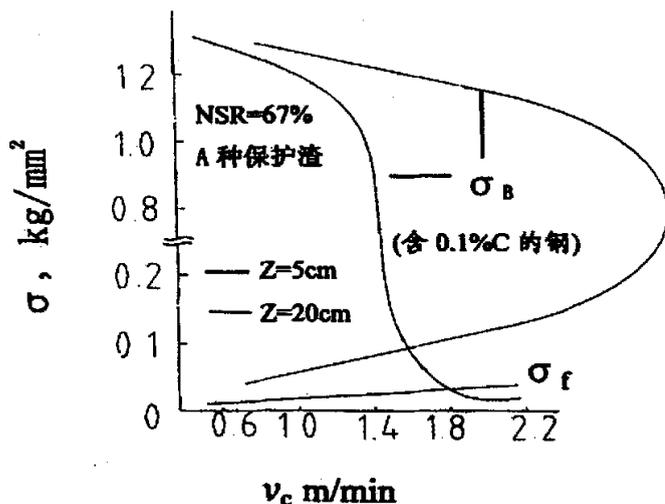


图 3.3 浇注时铸坯凝壳所受的拉应力与钢的高温强度比较图

因此，在高速浇注时为了防止粘结型拉漏，只需要改善结晶器的上部，特别是紧挨着弯月面下面的润滑，即液体润滑。为此，可根据式(1)来建立高速铸造时结晶器的最佳振动波形。根据结晶器内部保护渣润滑机理的研究结果所得出的最佳振动模型如图 3.4 所示：

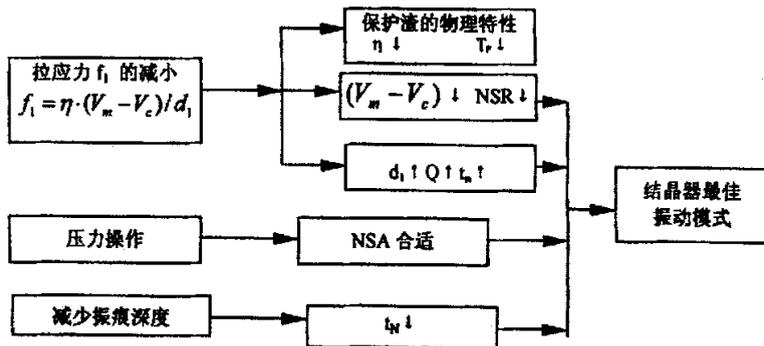


图 3.4 最佳振动模型

- $v_m$ ：结晶器振速；
- $V_c$ ：拉坯速度；
- $\eta$ ：保护渣粘度；
- $d_l$ ：保护渣膜厚度；
- $t_N$ ：负滑动时间；
- $T_F$ —保护渣熔点；
- $NSR = t_N / (T/2)$ ；
- $Q$ ：保护渣消耗量；
- $t_p$ ：正滑动时间；

图 3.4 示出了最佳波形的产生原理, 显然目前广泛应用的正弦振动波形不能满足最佳振动模型<sup>[34, 35]</sup>的条件, 只有非正弦振动才能满足上述条件。

### 3.2.1.3 非正弦振动波形及其函数

非正弦振动波形具有以下特点:

根据前面所述的最佳振动模型可知, 结晶器振动在高速浇注时要避免粘结性拉漏必须满足下面两个条件:

- (1) 减少弯月面附近坯壳的拉应力;
- (2) 对弯月面附近的坯壳施加压应力。

为了同时满足以上两个条件, 提出了结晶器最佳振动波形——非正弦振动波形<sup>[36,37]</sup>, 如图 3.5 所示:

非正弦振动波形具备以下特点:

- (1) 正滑动时间较长, 使保护渣的消耗量增加, 弯月面附近的液体摩擦力减小;
- (2) 在正滑动时间内结晶器的振动速度与拉坯速度 ( $v_m - V_C$ ) 之差减小。因此, 作用在弯月面下的坯壳拉应力减小。

(3) 在负滑动时间内  $v_m$  与  $V_C$  之差较大, 因此作用于坯壳上的正压力较大, 有利于铸坯脱模;

- (4) 负滑脱时间短, 更接近 0.1sec, 铸坯表面振痕浅

非正弦振动波形函数:

根据非正弦振动波形的特点, 课题小组开发了三种适合于不同实现形式的非正弦振动的波形函数。

- (1) 用分段函数表示的非正弦振动波形函数如图 3.6:

$$V = \begin{cases} v_2 \cos \left\{ t - \left( \frac{1+\alpha}{4f} - \frac{1}{4f_2} \right) \right\} & v_2 0 \leq t \leq t_B \\ -\frac{\pi fh}{1-\alpha} \sin \left[ \frac{2\pi f}{1-\alpha} \left( t - \frac{1+\alpha}{4f} \right) \right] & t_B \leq t \leq t_C \\ v_2 \sin \left\{ 2\pi f_2 \left[ t - \left( \frac{1}{f} - \frac{1+\alpha}{4f} \right) \right] \right\} & t_C \leq t \leq t_E \\ v_2 t_F \leq t \leq T \end{cases} \quad (3.4)$$

式中:  $v_2 = \frac{\pi f^2 h}{f_2(1-\alpha)^2}$

$$f_2 = \frac{\pi f(1+\alpha)}{4(1-\alpha)^2} + \frac{f}{4(1-\alpha)^2} \sqrt{\pi^2(1+\alpha)^2 - 8(\pi-2)(1-\alpha)^2}$$

式中:  $f$ —振动频率;

$h$ —振动冲程;

$t$ —时间;

$\alpha$ —波形偏斜率;  $\alpha = t_m / (T/4)$

$t_m$ —非正弦与正弦振动波形最大位移时间差;

$T$ —振动周期。

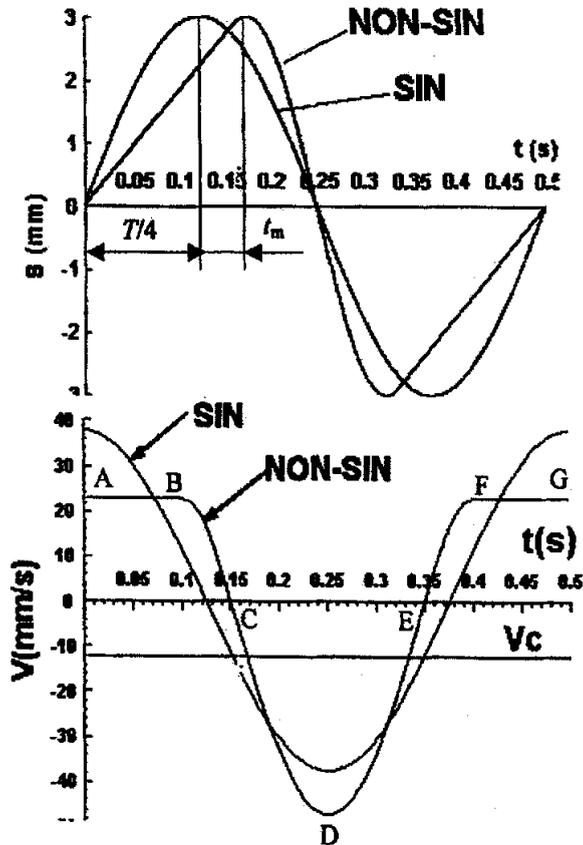


图 3.5 正弦与非正弦振动波形比较

该非正弦振动波形曲线的各组成曲线段均是而且仅是  $\alpha$ 、 $f$ 、 $h$  的函数。当  $\alpha$ 、 $f$ 、 $h$  给定后非正弦振动的速度曲线就被唯一确定。

该波形函数具有非正弦振动的全部特征，又有正弦振动的优点，波形偏斜率  $\alpha$  值越大，其非正弦振动特征越明显， $\alpha$  值越小，其正弦振动特征越明显，当  $\alpha$  等于零时，其变为正弦振动。下面给出两组振动参数， $f=120\text{min}^{-1}$ 、 $h=6\text{mm}$ 、 $\alpha$  分别为 10%、40%。由计算机绘出的非正弦振动速度波形如图 3.6 所示。

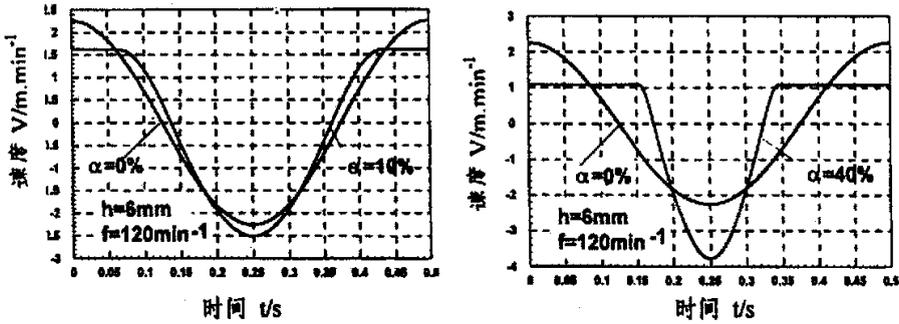


图 3.6 分段函数非正弦波

该非正弦振动波形曲线适合用于有电液伺服驱动的非正弦振动系统。

(2) 用复合正弦函数表示的非正弦振动波形函数

$$v = v_c \cos(\omega t) - A v_c \cos(2\omega t) \quad (3.5)$$

式中： $v_c$ ——拉坯速度；

$\omega$ ——角频率；

$A$ ——常数

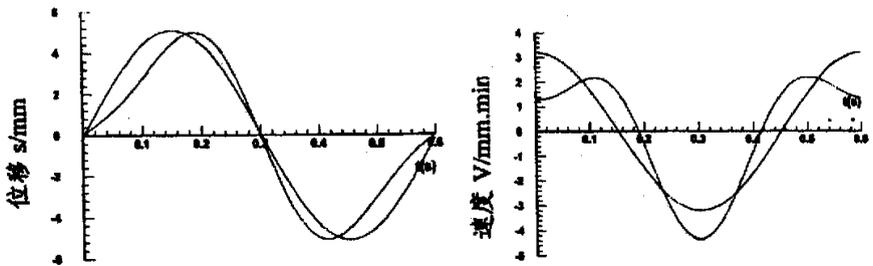


图 3.7 复合函数非正弦波形

该非正弦振动波形曲线是用于由双曲柄连杆非正弦振动发生系统。

(3) 用整体函数表示的非正弦振动波形函数

正弦位移曲线可以看作是一逆时针匀速旋转的矢量在位移  $s$  轴上的投影随时间变化的曲线, 矢量的模数等于该正弦曲线的峰值。

不难看出若是旋转矢量<sup>[38]</sup>在每一转中的角速度按照图 3.8 所示的规律变化, 即在  $0 \rightarrow \pi/2$  及  $3\pi/2 \rightarrow 2\pi$  相限时慢速旋转, 而在  $\pi/2 \rightarrow 3\pi/2$  相限时快速旋转。则该旋转矢量所描述的位移曲线向上达到峰值的时间要比正弦位移曲线向上达到峰值的时间有一个滞后, 即为图 3.8 所示的非正弦振动的位移曲线。

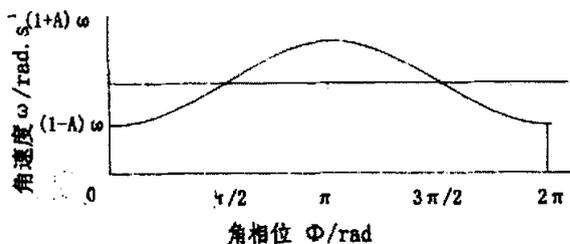


图 3.8 旋转曲线角速度变化曲线

该角速度按余弦规律变化

$$\omega[1 - A \cos(\omega t)]$$

当旋转矢量的模数为  $h$  时, 在该变角速度下位移曲线的解析式为

$$\begin{aligned} S &= h \sin \int_0^t \omega[1 - A \cos(\omega t)] dt, \\ &= h \sin(\omega t - A \sin(\omega t)) \end{aligned} \quad (3.6)$$

该式即为德马克公司给出的非正弦振动波形位移曲线的数学表达式。

速度曲线的解析式为

$$V = h\omega[1 - A \cos(\omega t)] \cos[\omega t - A \sin(\omega t)] \quad (3.7)$$

波形偏斜率因子  $A$  与波形修正率  $\alpha$  的对应关系:

由式 (3.6) 可知, 当  $s=h$  时, 可求得非正弦振动位移曲线向上达到峰值的时间  $t$ .

$$\begin{aligned} \because h &= h \sin \int_0^t \omega[1 - A \cos(\omega t)] dt, \\ \therefore \int_0^t \omega[1 - A \cos(\omega t)] dt &= \frac{\pi}{2} \\ \omega t - A \sin(\omega t) - \frac{\pi}{2} &= 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

该式为一超越方程, 可采用数值法求解。

当  $A=0.4$  时, 解得

$$t = \frac{0.618589\pi}{\omega}$$

时间滞后

$$t_m = t - \frac{T}{4} = \frac{0.618589\pi}{\omega} - \frac{0.5\pi}{\omega} = \frac{0.118589\pi}{\omega}$$

波形修正率

$$\alpha = \frac{t_m}{\left(\frac{T}{4}\right)} = \frac{\frac{0.118589\pi}{\omega}}{\frac{0.5\pi}{\omega}} \approx 0.24$$

当  $A=0$  时, 解出

$$t = \frac{T}{4}, \alpha = 0$$

采用整体函数法课题组构造了一个比德马克非正弦振动曲线波形更好一些的波形曲线函数:

位移函数:

$$S = h \sin \left\{ 2 \arctg \frac{1+A}{1-A} (\pi ft) \right\} \quad (3.9)$$

式中:  $h$ —振幅;

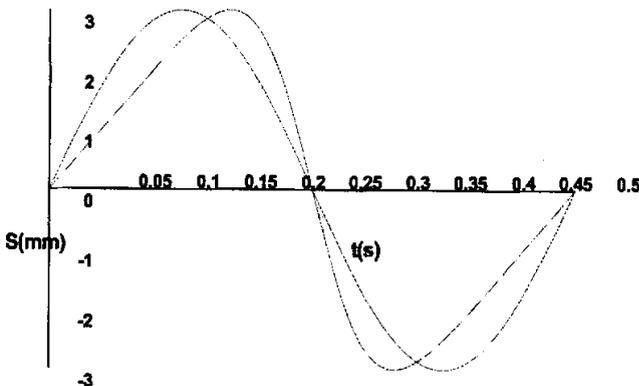
$\omega$ —振动角频率;

$A$ —波形偏斜因子, 与波形修正率  $\alpha$  由对应关系。

速度函数:

$$V = h \frac{(1-A^2)\omega}{1+A^2-2A \cos(\omega t)} \cos \left\{ 2 \arctg \left[ \frac{1+a}{1-A} \operatorname{tg}(\pi ft) \right] \right\} \quad (3.10)$$

其波形曲线如图 3.9 所示。



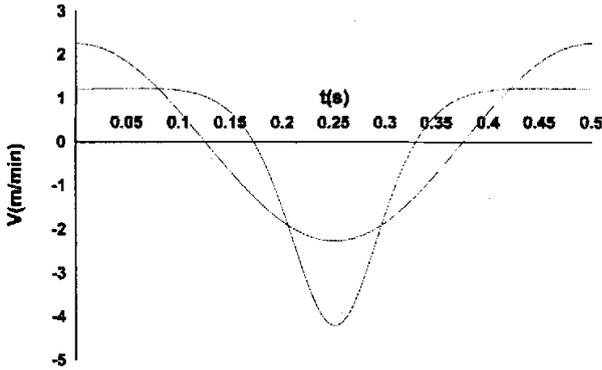


图 3.9 整体函数表示的非正弦振动波形

该非正弦振动波形曲线是用于椭圆齿轮驱动的非正弦振动发生系统。在首钢第二炼钢厂已经完成的板坯连铸机结晶器非正弦谐振改造中采用的就是整体函数表示的非正弦振动波形函数，采用了非圆齿轮组成的非正弦振动发生系统。

#### 3.2.1.4 非正弦振动装置的开发

(1)、振动装置基本参数:

型 式: 结晶器振动装置为机械非圆齿轮驱动的短臂四连杆非正弦振动谐振方式

设备构成: 结晶器台架; 四连杆仿直线装置; 拉杆; 偏心振动系统; 标准齿轮及非圆齿箱; 弹簧缓冲装置; 冷却水及润滑配管等。

振动频率: 40~200 次/min

振 幅: 0~±5mm, 分级 0.5mm

频率调节: 随拉速自动调整

振幅调节: 停机调节

振动轨迹偏差要求: 沿浇铸方向  $\leq \pm 0.2\text{mm}$ ; 垂直于浇铸方向  $\leq \pm 0.15\text{mm}$

(2)、机械式非正弦振动装置的基本原理和特点:

如图 3.10 所示, 在原有正弦振动装置的减速箱和偏心轴之间增加一个非圆齿轮减速箱, 通过改变偏心轴的转速变化方式实现结晶器振动速度的非正弦变化, 为增加结晶器振动过程的平稳、减少冲击, 在内弧结晶器鞍座下部增设了两组弹簧缓冲器。由非正弦振动产生的机理及整体函数表示的非正弦振动波形函数可知, 旋转矢量在一周内作非匀角速度旋转, 故曲柄的驱动机构也应作非匀速旋转, 因为一般齿轮的

角速度是均匀的,所以非正弦振动的驱动机构采用了非圆齿轮传动,非圆齿轮主动轮与标准减速机相连,做匀速转动,而被动齿轮(驱动曲柄的齿轮)则做非匀速转动,这样旋转矢量(曲柄)非匀速转动,而其驱动的连杆及其结晶器作非正弦振动.实现了式(3.9)及式(3.10)所表示的非正弦振动。

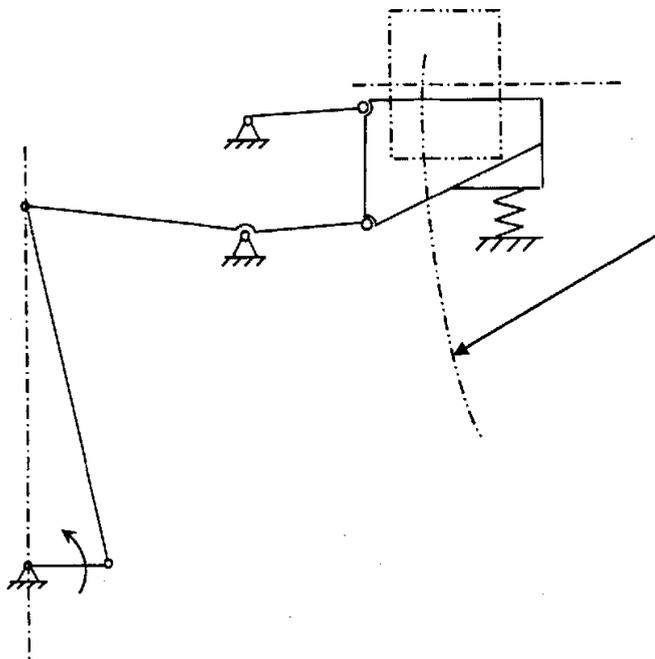
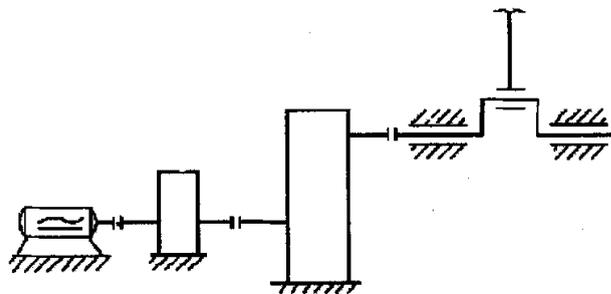


图 3.9 非正弦振动



b 传动机构

图 3.10 机械非正弦谐振机构原理图

### 3.2.1.5 机械装置的力学分析

由于结晶器的振动质量较大, 振动频率较高, 因此在构造非正弦振动波形函数时, 除了必须使其具有最佳振动模型的全部特征外, 还必须具有良好的动力学特征<sup>[6,9,10]</sup>; 同时由于非正弦振动的波形曲线具有较大的加速度, 使振动装置产生较大的动载荷, 因此, 有必要对振动机构进行力学分析, 确保振动装置的运行安全。

#### 1) 非正弦振动波形动力学分析

由于此非正弦振动波形函数是初等连续函数, 所以其倒数也是初等连续函数, 其加速度函数也是连续的, 根据机构学理论可知, 由该函数所决定的非正弦振动波形不会产生刚性冲击和柔性冲击。

#### 2) 机构振动动力学分析

由于首钢二炼钢振动机构为一六杆机构, 自重较大, 而改后的振动参数有些变化, 故有必要对振动机构作动力学分析, 以确定振动机构满足新的振动参数的要求。

由于改造后保留了原振动机构的运动轨迹形成部分, 因而设计误差和制造安装误差及应力变形误差、温度引起的误差几乎不变, 只有激振力发生变化。根据振动理论, 只有当施加于系统上的外界激振力频率与振动系统自身的固有频率接近时, 系统才发生共振, 振动装置才能引起较大的变形, 因而我们必须对设备进行固有频率分析。

#### 1. 振动的基本理论

利用有限元法进行机构的动力学分析, 它的控制方程为:

$$[K]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [M]\{\ddot{\delta}\} = \{F(t)\} \quad (3.11)$$

式中: [K]—结构刚度矩阵;

[C]—阻尼矩阵;

[M]—质量矩阵;

$\{\delta\}$ —位移向量;

$\{\dot{\delta}\}$ —速度向量;

$\{\ddot{\delta}\}$ —加速度向量;

$\{F(t)\}$ —随时间变化的等效节点载荷。

理论和实践表明,结构的阻尼对结构的固有频率的影响很小,所以在确定固有频率可以不考虑阻尼的影响,即有 $[C]=0$ ,

$$[K]\{\delta\} + [M]\{\ddot{\delta}\} = \{F(t)\} \quad (3.12)$$

由此方程计算可得系统的振动频率——固有频率和与之对应的变形模式。

在结构分析中,我们采用 SAP 系列中的 Super SAP 对振动机构进行分析。在机构有限元模型的建立过程中,我们尽量避免模型的简化,使其充分体现机构的实际特点,以保证计算结果的真实性。

## 2. 动力模型的建立

我们将机构分为三维板梁<sup>[39, 40]</sup>单元结构,具体的单元划分如图 3.11 所示。板梁单元所承受的力包括节点力、节点力矩、重力以及作用于单元任意位置上的分布力、集中力和力矩,机构所受到的外激励为结晶器的拉坯阻力和惯性力、弹簧力,单元变形为拉压变形和扭转变形以及两个方向弯曲变形的综合,因此板梁单元可以反映机构实际受力状况及其变形特点。

以上两个模型图是按机构的实际尺寸绘出的,故输入数据时只输入截面面积、材料特性、转动惯量等少数数据即可。

## 3. 固有频率分析

在对振动机构分析后可以看出,由于振动的速度曲线及加速度曲线以及振动参数有所改变,激振力的大小及频率有所改变,因此有必要对振动机构作动力学分析。

在分析中,为了便于比较,我们对图 3.11、图 3.12 分别计算,并把机构传动系统用边界单元表示,其刚度值赋予整个传动系统的等效刚度。之后,利用软件包,我们计算了振动机构的前 30 阶固有频率,表 3.1 只列出了前 10 阶固有频率。

表 3.1. 机构前十阶固有频率 单位: HZ

阶数	无结晶器	有结晶器
1	$1.0096 \times 10^2$	76.347
2	$1.3033 \times 10^2$	81.598
3	$1.7766 \times 10^2$	$1.0195 \times 10^2$
4	$1.8821 \times 10^2$	$1.2694 \times 10^2$
5	$2.3220 \times 10^2$	$1.3747 \times 10^2$
6	$2.4062 \times 10^2$	$1.7747 \times 10^2$
7	$2.5624 \times 10^2$	$1.8640 \times 10^2$
8	$2.5984 \times 10^2$	$2.2223 \times 10^2$
9	$2.7544 \times 10^2$	$2.4982 \times 10^2$
10	$2.7975 \times 10^2$	$2.5751 \times 10^2$

由以上结果可以看出,对于振动机构的振动频率(对于不同拉速有不同的频率,一般 130cpm),机构的固有频率有相当大的富裕量。因此,我们认为采用非正弦振动后,振动机构仍然是安全的。

#### 4. 振型分析

我们还利用此软件对振型作了进一步的分析。振型图如图 3.12 图 3.14。由振型分析可以看出,振动机构的扭转刚度(绕 x 轴)是最弱的,因此,最低阶固有频率是振动的扭转频率,而振动机构铅锤方向(y 方向)的刚度较大,该方向机构的振动固有频率也较大,这种刚度分布形式是合理的。从前三阶振型可以看出,此振动台传动机构的刚度是足够的,若振动轨迹仍有较大的误差,应考虑提高振动台与结晶器连接处的刚度<sup>[41]</sup>。

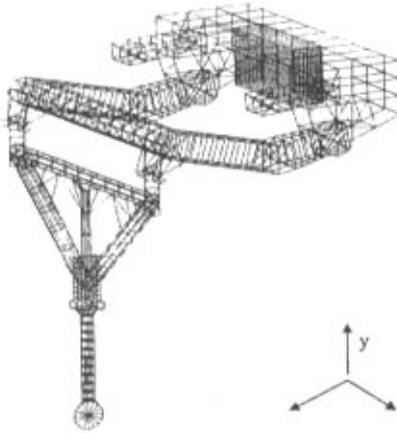


图 3.11 振动机构划分单元

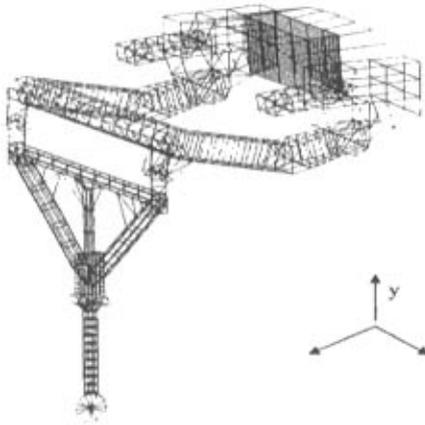


图 3.12 振动机构一阶振型

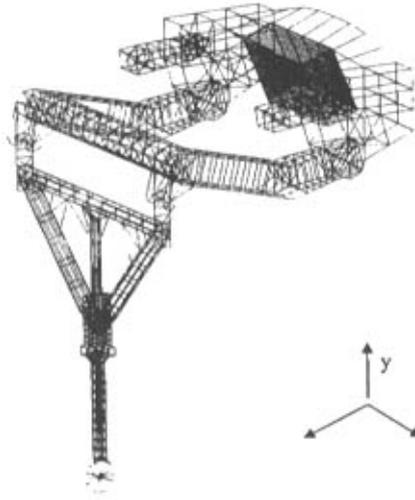


图 3.13 振动机构二阶振型

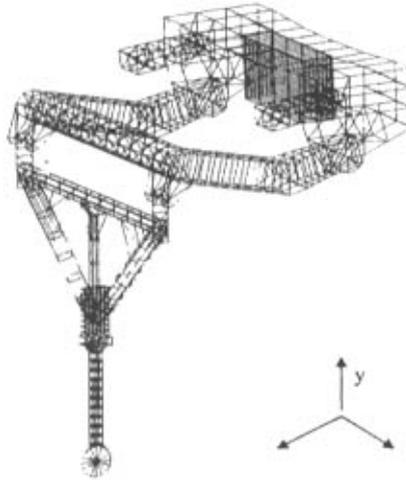


图 3.14 振动机构三阶振型

## 5. 结论

根据以上分析结果可以得到：

采用非正弦谐振技术后，虽然振动的速度曲线、加速度曲线以及振动参数有所变化，即激振力及其频率有所变化，但是，机构的固有频率远大于激振力频率，系统不会发生共振。即采用非正弦谐振技术后，不会影响到振动机构的轨迹误差。从振型分析看出，此种振动机构是合理的。

### 3.2.1.6 机械非正弦谐振技术的应用

#### 1) 四连杆振动机构振动轨迹进度分析

弧形板坯连铸机的四连杆振动机构<sup>[28,29]</sup>实例如图 3.15 所示

#### a) 四连杆振动机构的工作原理

用于板坯连铸机的四连杆振动机构如图 3.16 所示.该机构由实现近似圆弧轨迹的四杆机构(图 3.10 所示)及传递运动和动力的六杆机构组成.结晶器安装在振动台架上,即固结在四连杆机构的连杆上,其工作原理是利用四连杆机构的连杆实现近似地沿连铸机的圆弧运动.适当地选择各杆的长度及安装的初始位置,可以得到轨迹误差  $\Delta R < 0.1\text{mm}$ , 从而保证结晶器与二冷段具有较高的对弧精度.由于四连杆机构在振动过程中连杆作平面运动,所以连杆上各点的运动不同,他们的连杆曲线也不同.因此,在进行轨迹误差计算时应在结晶器铜壁上某些特征点来校核计算.同时在给定结晶器振幅时必须指明它是结晶器中那一点的振幅.

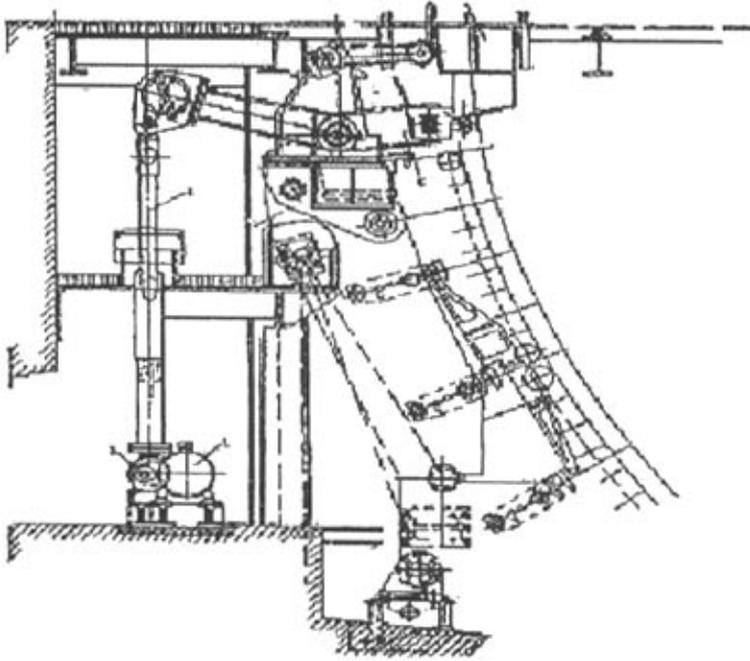


图 3.15 仿弧形结晶器振动

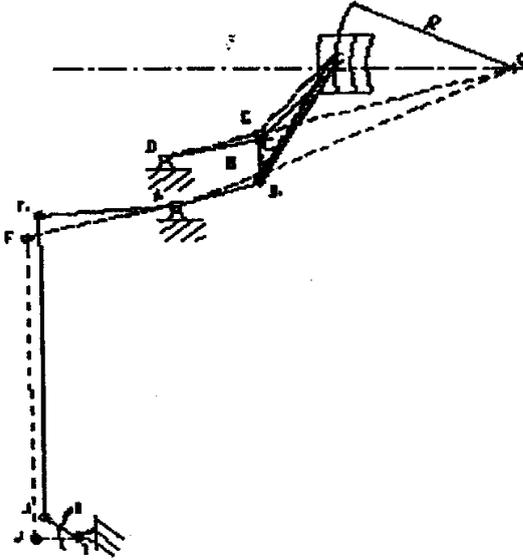


图 3.16 板坯连铸机振动装置原理图

## b) 振动轨迹误差的计算

图 3.17 是弧形连铸机四连杆振动机构的原理图。

四边形 ABCD 为四连杆振动机构的平衡位置，即结晶器固结在连杆 BC 上。

在设计四连杆振动机构的平衡位置时，其初始条件为：杆件 AB 和 CD 的长度相等，杆件 AB 和 CD 的延长线交于连铸机的圆弧中心 O，杆件 AB 和 CD 与连铸机的水平半径夹角分别为  $\angle A$  和  $\angle B$ 。结晶器外侧圆弧半径（连铸机的圆弧半径）为 R，铰点 B 和 C 到 O 点的距离为  $R_1$ ，铰点 A 和 C 到 O 点的距离为  $R_2$ ，A 点到连铸机水平半径的距离为 H。

问题是如何确定结晶器铜壁<sup>[42, 43, 44]</sup>上任意一点由平衡位置振动到极限位置时的轨迹误差  $\Delta R$ 。若在结晶器铜壁任取一点 E，设 E 点到连铸机水平半径的距离为 L，选取直角坐标系，设 y 轴为虚轴、x 轴实轴。当 E 点向下运动到极限位置  $E_1$  点时，机构处于  $AB_1C_1D$  位置。

把四连杆机构视为一个矢量封闭四边形，则以复数矢量的形式表示的约束方程是：

$$L_1 e^{i\alpha_1} + L_2 e^{i\alpha_2} = L_3 e^{i\alpha_3} + L_4 e^{i\alpha_4} \quad (3.13)$$

从图 3.17 所示的几何关系中容易看出：

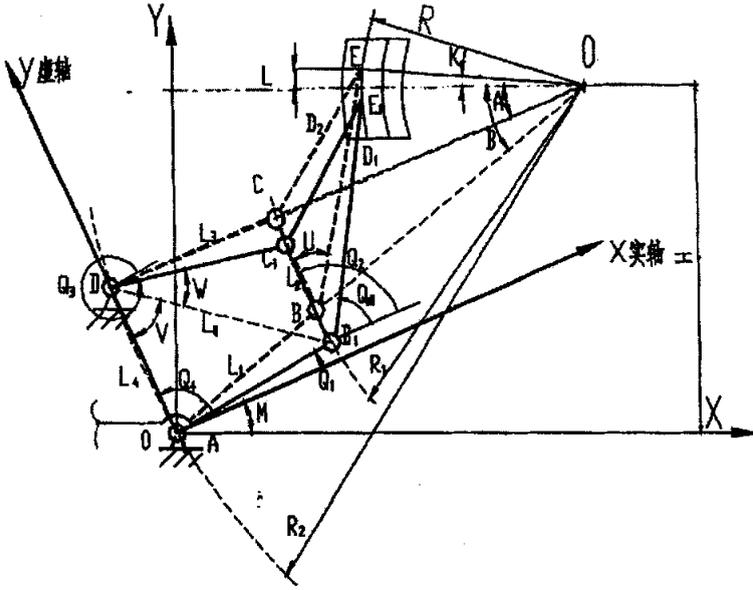


图 3.17 弧形连铸机四连杆振动机构的原理图

$$Q_4 = \frac{\pi}{2}$$

$$L_1 = L_3 = R_2 - R_1 \quad (3.14)$$

$$L_2 = 2R_1 \sin \frac{B-A}{2} \quad (3.15)$$

$$L_4 = 2R_2 \sin \frac{B-A}{2} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} L_0 &= \sqrt{L_1^2 + L_4^2 - 2L_1L_4 \cos(Q_4 - Q_1)} \\ &= \sqrt{L_1^2 + L_4^2 - 2L_1L_4 \sin Q_1} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$W = \arccos \frac{L_3^2 + L_0^2 - L_2^2}{2L_3L_0} \quad (3.18)$$

$$V = \arccos \frac{L_4^2 + L_0^2 - L_1^2}{2L_4L_0} \quad (3.19)$$

$$Q_3 = \frac{3}{2}\pi + W + V \quad (3.20)$$

由 (3.13) 式取实部有:

$$L_1 \cos Q_1 + L_2 \cos Q_2 = L_3 \cos Q_3 \quad (3.21)$$

$$\therefore Q_2 = \arccos \frac{L_3 \cos Q_3 - L_1 \cos Q_1}{L_2} \quad (3.22)$$

设:

$$K = \arcsin \frac{1}{R} \quad (3.23)$$

则:

$$D_1 = \sqrt{R^2_1 + R^2 - 2R_1R \cos(B+K)} \quad (3.24)$$

$$D_2 = \sqrt{R^2_1 + R^2 - 2R_1R \cos(A+K)} \quad (3.25)$$

$$U = \arccos \frac{D_1 + L^2_2 - D^2_2}{2D_1L_2} \quad (3.26)$$

$$Q_{d1} = Q_2 - u \quad (3.27)$$

$E_1$ 点在  $xOy$  直角坐标系中的坐标:

$$x_{E1} = L_1 \cos Q_1 + D_1 \cos Q_{d1} \quad (3.28)$$

$$y_{E1} = L_1 \sin Q_1 + D_1 \sin Q_{d1} \quad (3.29)$$

连铸机圆心  $O$  点的坐标:

$$x_0 = R_2 \cos \frac{B-A}{2} \quad (3.30)$$

$$y_0 = \frac{L_4}{2} \quad (3.31)$$

若结晶器由平衡位置向下或向上振动到极限位置时, 其相应的角  $Q_1$  可求, 则结晶器铜壁上任意一点  $E$  的轨迹误差为:

$$\Delta R = \sqrt{(x_{E1} - x_0)^2 + (y_{E1} - y_0)^2} - R \quad (3.32)$$

结晶器由平衡位置到极限位置的垂直位移为结晶器振动的振幅。E 点的振幅  $S$  可以通过如下的过程求得:

将  $xOy$  直角坐标系按顺时针方向旋转  $M$  角使  $oy$  轴垂直于水平半径, 即得到变换后得坐标系  $XOY$ 。E<sub>1</sub> 点在  $XOY$  坐标系中沿  $Y$  轴的坐标为:

$$Y_{E1} = y_{E1} \cos M + x_{E1} \sin M \quad (3.33)$$

式中

$$M = \frac{B-A}{2} + A = \frac{B+A}{2} \quad (3.34)$$

E 点在 XOY 坐标系中沿 Y 轴的坐标为:

$$Y_E = H+1 \quad (3.35)$$

则结晶器由平衡位置向下振动到极限位置时 E 点的振幅为:

$$S = Y_E - Y_{E1} \quad (3.36)$$

结晶器由平衡位置向上振动到极限位置时 E 点的振幅为:

$$S = Y_{E1} - Y_E \quad (3.37)$$

将公式 (3.36)、公式 (3.37) 合并计算振幅的通式为:

$$\pm S = Y_E - Y_{E1} \quad (3.38)$$

结晶器由平衡位置向上振动时 S 取负号, 向下振动时取正, 由于结晶器上铜壁上 E 点的振幅是给定的, 所以可由公式 (3.38) 求得  $Q_1$ 。

将式公式 (3.33)、(3.29)、(3.28)、(3.35) 代入公式 (3.38) 得:

$$\pm S - H - 1 + L_1 \sin(Q_1 + M) + D_1 \sin(Q_{d1} + M) = 0 \quad (3.39)$$

求解  $Q_1$  归结为求解方程 (3.39)。由于其中多层的复合函数关系无法将  $Q_1$  直接解出, 可用“二分法”通过电算求得任意精度的近似解。

二分法求根的框图如图 3.18 所示, 其中  $a$  和  $b$  为有根区间  $[a, b]$  的两个端点,  $\varepsilon$  为给定的误差限。

$Q_1$  解出后可解出  $Q_2$ 、 $Q_{d1}$  等全部未知量, 结晶器铜壁上任意一点的振动误差  $\Delta R$  得解。

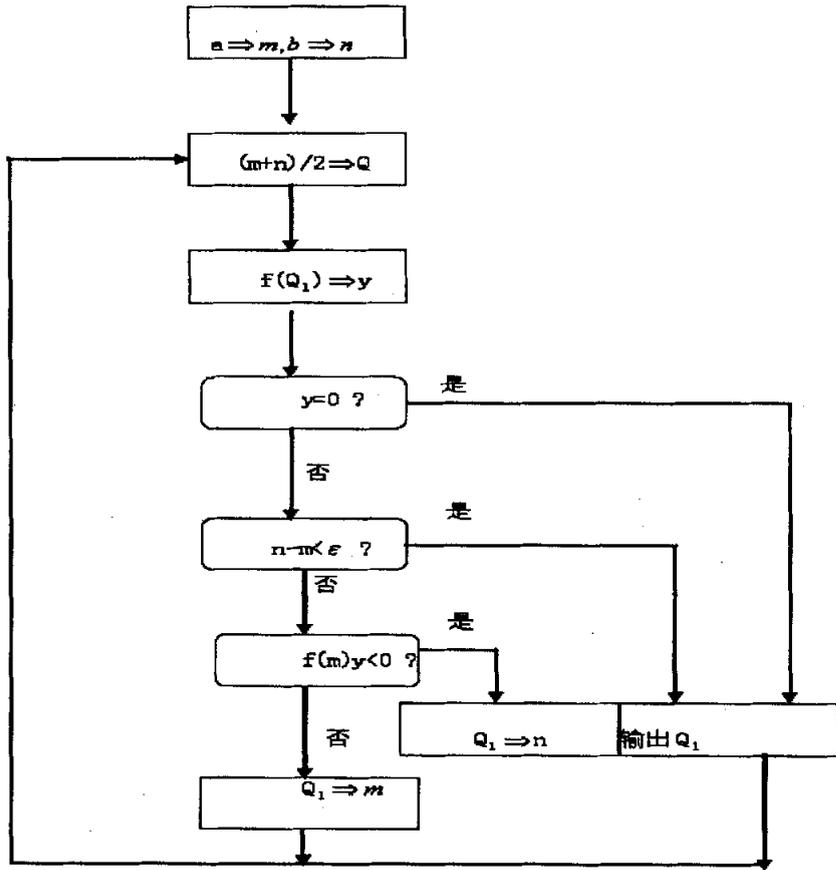


图 3.18 电算框图

(2) 机械驱动非正弦谐振技术

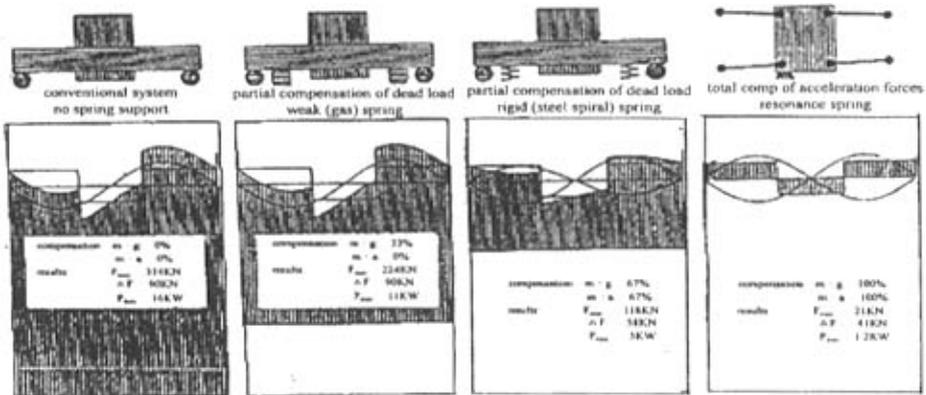


图 3.19 曼内斯曼·德马克谐振结晶器

曼内斯曼·德马克谐振结晶器的主要特点通过弹簧将振动物体的自重及惯性力完全平衡掉，使振动电机的驱动力只用以克服铸坯和结晶器之间的摩擦力，从而使驱动功率大幅度降低，如图 3.19 所示。

#### 机械驱动非正弦谐振技术

由于机械驱动非正弦谐振技术的主要问题是振动冲击和噪音比较严重，因此，课题组开发的机械非振动正弦谐振技术是以有效地降低振动冲击和噪音，兼顾驱动功率的明显降低为主要目标。

#### a) 振动冲击和噪音产生的原因

由于非正弦振动本身的特点，它的速度曲线变化比正弦振动的速度曲线变化的陡，其加速度大，惯性力也大，这样就会在传动系统的齿轮箱中齿轮啮合处或在齿型联轴器中产生冲击，从而产生较大的噪音。产生冲击和噪音的原理如图 34 所示。

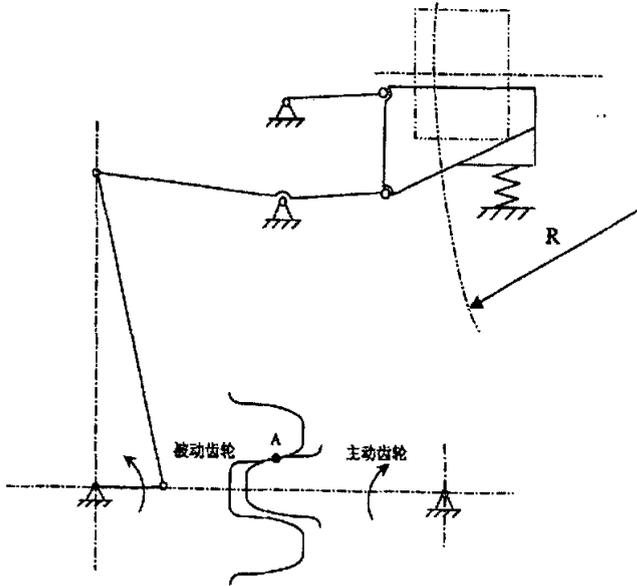


图 3.20 冲击和噪音的原理图

若没有弹簧，结晶器由下死点开始向上运动时，主动齿轮驱动被动齿轮使曲柄逆时针由下向上运动，这时主动齿轮和被动齿轮啮合点为 A，齿侧间隙在下；而当结晶器运动到上死点，开始向下运动时，曲柄逆时针由下向上运动，由于结晶器及四杆振动机构的自重，在重力的作用下会自动向下运动，而且重力加速度大于结晶器非正弦振动的加速度，这使得被动齿轮转动速度大于主动齿轮的速度，使主动与

被动齿轮之间的啮合间隙换向，即 A 点脱离接触，齿侧间隙在上；而当结晶器运动到下死点，主动齿轮必须驱动被动齿轮才能使结晶器向上运动，这时啮合间隙又换向，原来在上面的啮合间隙又转为在下，A 点又恢复接触，此时会产生较大的冲击和噪音。这种情况在实际使用过程中已经明显的暴露出来，而且这种分析与实际产生冲击和噪音的情况相符。

#### b) 解决冲击和噪音的方法——结晶器谐振

为解决非正弦振动冲击和噪音大的问题，根据曼内斯曼·德马克液压驱动谐振结晶器的思想，开发了机械非正弦谐振技术，主要方法是在结晶器安座下加两组缓冲弹簧，来平衡振动体的大部分质量力合惯性力，起到缓冲减震作用，弹簧力的大小根据以下原则确定：

- 在结晶器由上死点开始向下运动时，最小的弹簧力、质量力和惯性力的合力应能够保证结晶器向下运动的加速度小于结晶器此时非正弦振动的加速度，这样啮合间隙就不会换向，主动齿轮就会驱动被动齿轮使结晶器向下运动。
- 在结晶器由下死点<sup>[46]</sup>开始向上运动时，最大的弹簧力、质量力和惯性力的合力不能够使结晶器向上运动的加速度大于此时结晶器非正弦振动的加速度，这样保证主动齿轮还是主动，啮合间隙不会换向。

根据上述原则确定弹簧刚度，结晶器振动时，主动齿轮和被动齿轮啮合的间隙就不会出现换向的情况，齿轮箱和齿型联轴器处就不会产生冲击和噪音。同时，由于缓冲弹簧平衡掉了大部分的振动质量力，也使得驱动电机的功率有了明显的降低。通过在首钢二炼钢的生产实践表明，机械驱动的结晶器谐振技术对减少振动冲击和噪音以及减少驱动电机的功率效果明显，为机械驱动结晶器非正弦振动的平稳运行奠定了基础。

### 3.2.1.7 振动参数的优化

振动参数的优化<sup>[37]</sup>主要体现在  $v_c$ — $f$  同步控制模型的建立，可依据负滑动时间等值曲线来确定。如图 3.21 所示，在该图上还画出了  $t_p$ 、 $\Delta v$ 、NS 等值曲线，以便在建立模型时能够比较全面地照顾到各个工艺参数。

对比图 3.21 (a) 3.21 (b) 可知， $h$  值较大的  $t_N$  等值曲线所对应的拉速范围较大。因此，可根据拉速选择  $h$ ，如板坯连铸  $V_c \leq 2\text{m/min}$ ，选择  $h=6\text{mm}$ ，即可根据图 3.21

(a) 建立  $V_c$ — $f$  同步控制模型。再根据所浇钢种, 如选择  $t_N=0.1$  秒为最佳值, 并在浇铸过程中基本保持不变。因此, 可以顺着  $t_N=0.1$  秒的等值曲线画一条向下倾斜的直线段来近似  $t_N$  曲线, 根据对  $NS$  等值的要求可以将该直线的下端点选在  $t_N$  曲线与  $NS=0.024$  射线的交点上, 或选在曲线与  $NS=-0.2$  射线的交点上。当然用直线代替曲线时要将误差分布在直线两侧。若拉速较高, 如  $V_c \leq 3.5$  m/min 时, 可选  $h=10$  mm, 即可根据图 3.21 (b) 用同样的方法来建立  $V_c$ — $f$  同步控制模型。

该模型<sup>[44, 45, 46]</sup>的优点是在浇铸过程中  $t_N$  基本保持恒定,  $t_p$  随  $V_c$  增大而增大。

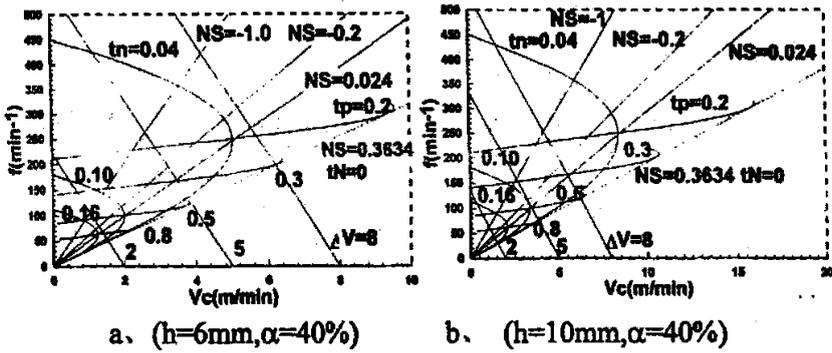


图 3.21  $t_N$ ,  $t_p$ ,  $NS$ ,  $\Delta v$  等值曲线

根据上述两种拉速范围所建立的  $V_c$ — $f$  同步控制模型, 课题组对首钢二炼钢板坯连铸机结晶器非正弦谐振技术的振动参数进行了优化, 并进行了对比, 其结果如下:

a) 首钢二炼钢原正弦振动参数

表 3.2 原正弦振动工艺参数

$V_c$ (m/min)	$F$ (min <sup>-1</sup> )	$t_N$ (s)	$NS$ (%)	$NSA$ (mm)	$NSR$ (%)	$t_p$ (s)	$\Delta v$ (m/min)
0.3	35	0.57	-29	1.91	66.7	1.14	0.91
0.4	47	0.42	-29	1.91	66	0.86	1.21
0.5	58	0.35	-29	1.91	68	0.68	1.50
0.6	70	0.29	-29	1.91	68	0.56	1.81
0.7	81	0.25	-29	1.91	68	0.49	2.10
0.8	94	0.22	-29	1.91	68	0.42	2.42

偏斜率:  $\alpha=0$

冲程:  $h=5.5\text{mm}$

频率:  $f=117 V_c$

起步拉速  $V_c=0.3 \text{ m/min}$

工作拉速  $V_c=0.6\sim 0.8\text{m/min}$

b) 首钢二炼钢现非正弦振动参数

偏斜率:  $\alpha=31\%$

冲程:  $h=5.5\text{mm}$

频率:  $f= \begin{cases} 60v_c \leq 0.4 \\ 103v_c v_c \Phi 0.4 \end{cases}$

表 3.3 非正弦振动工艺参数

$V_c$ (m/min)	$F$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$t_N$ (s)	NS (%)	NSA (mm)	NSR (%)	$t_p$ (s)	$\Delta v$ (m/min)
0.3	60	0.3	-219	3.88	60	0.7	0.92
0.4	60	0.29	-140	3.40	58	0.6	1.02
0.5	65	0.26	-108	3.11	56	0.66	1.17
0.6	78	0.21	-108	3.11	55	0.56	1.41
0.7	91	0.18	-108	3.11	55	0.48	1.61
0.8	104	0.16	-108	3.11	55	0.42	1.88

下面对以上两种参数进行对比, 在振幅和频率基本相同的条件下优化后的模型达到了减小负滑动时间  $t_N$ 、减小最大相对速度  $\Delta v$ 、确定合理的负滑脱率的作用。

### 3.2.2 试用效果

在减少粘结型漏钢方面, 非正弦振动的积极效果在此项试用中得到了较为肯定的体现。典型的例子是 2001 年 10 月 19 日因接手磨损而不得不把 I 流非正弦振动方式恢复为正弦振动方式, 10 月 21 日即发生了粘结漏钢事故。2001 年至 2002 年 5 月底板坯粘结漏钢发生情况见下表 3.4:

	次数	漏钢率
未用非正弦振动时期	I 流, 4 次	0.14%
	II 流, 5 次	
试用非正弦振动时期	I 流, 2 次	0.10%
	II 流, 2 次	

表 3.4 粘结漏钢统计

其中试用非正弦振动时期 I 流的两次粘结拉漏原因分别是:

- ① 3 月 14 日浇 50# 钢使用中碳保护渣, 保护渣选择错误;
- ② 5 月 11 日, 因钢水温度低造成保护渣熔化不良而导致粘结拉漏。

为验证采用非正弦振动后在改善铸坯表面质量方面达到工艺效果, 我厂在不同的钢种上分四次对使用非正弦振动方式的 I 流铸坯和使用正弦振动方式的 II 流铸坯分别取样, 做对比分析。取样方法如下: 先以垂直浇注方向取一段长度为 150—200mm 的铸坯, 再沿着浇注方向将该段铸坯总剖成 3—4 段, 然后将纵剖面进行酸浸及低倍检查, 检查结果表明试样中发现的表面微裂纹均为垂直于铸坯表面 (或呈一定角度) 的发纹。而采用非正弦振动时发生裂纹的次数比正弦振动要减少 67%。可见, 采用非正弦振动对减轻铸坯表面裂纹的发生有一定的作用。

通过近一年的试用, 表明该机械式非正弦振动装置在改善铸坯和结晶器铜板间的润滑, 提高铸坯表面质量, 减少粘结漏钢等方面效果明显。相应地也减少了因漏钢卧坯而造成的扇形段内弯辊现象, 从而降低设备检修费用和检修时间, 提高了金属收得率。

表 3.5 板坯表面质量统计表

序 号	取 样 日 期	钢 种	试 样 编 号		试样分析结果 (裂纹长度 mm/数量条)	
					内弧	外弧
1	2001年 10月16 日	Q390C	非正弦	1#	无	无
				2#	无	无
			正 弦	3#	1.0/1	无
				4#	1.0/1, 2.0/1	2.0/1
2	2002年2 月4日	Q345C	非正弦	1#	0.5/1	侧面: 5.0/1, 10.0/1
				2#	无	1.0/1
				3#	无	无
			正 弦	4#	无	无
				5#	1.0-2.0/6	无
				6#	1.0/2	侧面: 40.0/1
3	2002年3 月14日	Q235B	非正弦	1#	无	无
				2#	无	无
			正 弦	3#	无	无
				4#	无	无
4	2002年3 月26日	50#	非正弦	1#	无	无
				2#	无	无
				3#	无	无
			正 弦	4#	无	2.0/1, 3.0/1
				5#	无	无
				6#	无	无

### 3.2.3 经济效益

按单流采用非正弦振动装置后溢漏率下降 0.04%，全年板坯产量 200 万吨计算，双流改成非正弦振动后可减少粘结漏钢： $2000000/197 \times 2 \times 0.08\% = 5.3 \approx 17$ (次)，平均每次粘结漏钢后造成的直接设备损失(结晶器铜板修复、足辊修复、I 段辊组修复、1-4 区二冷喷嘴修复等)按 30 万元计算，双流改成非正弦振动后可减少直接设备损失 510 万元/年。上述改造需重做减速机底座，增加非圆齿轮减速箱等，一次性设备投资增加 21 万元，故现有铸机采用非正弦振动后可获直接经济效益约 470 万元。

### 3.2.4 本章小结

1. 该技术在减少粘结性拉裂、拉漏、减轻铸坯表面振痕深度、减少铸坯皮下裂纹，提高铸坯表面质量等方面效果明显；机械驱动的非正弦振动装置能够发挥出非正弦振动的主要优越性，满足生产工艺的要求；由于其结构简单，投资少，允许可靠，维护方便，很适合于老连铸机的改造，从而有利于非正弦振动技术的推广应用。

2. 机械驱动非正弦谐振技术对于减少振动冲击和噪音、减少驱动力效果明显，更有助于机械非正弦振动优越性的发挥。

3. 机械非正弦振动技术不但适用于板坯连铸，更适用于矩形坯、方坯及圆坯连铸。

4. 由于受到机械结构的限制，相对液压非正弦振动调整振幅困难，偏斜率范围相对较小。

5. 对我们今后采用液压非正弦振动提供了宝贵的实践经验。

## 第4章 结晶器液压振动装置

20世纪80年代初期,日本住友重机和日本钢管公司合作,在日本钢管京滨2号试验样机上开始液压振动试验,1985年首次应用在福山5号板坯连铸机上,以后又应用到福山6号板坯连铸机等许多连铸机上<sup>[2]</sup>。这种液压振动装置最初采用的是单液压缸伺服驱动短臂四连杆式,目前已改进为单缸电液执行机构带动的短臂四连杆式。

液压振动的主要目的是在浇铸过程中动态控制振幅、频率及波形偏斜率。当高速浇铸时,结晶器上升时间延长,下降时间相对缩短,负滑动时间相对减少,低熔点保护渣下流速度加快,从而降低了因拉速提高使结晶器铜板与坯壳之间的摩擦力增加的幅度。据报道,结晶器总摩擦力可减少25%~30%,另外,负滑动时间缩短能使板坯振动痕迹变浅,控制了板坯表面横向裂纹产生的根源。

奥钢联开发的双缸对称驱动的伺服液压振动装置,于1997年和1998年分别应用在林茨钢厂和日本中山钢厂。新一代DYNAFLEX型分离式对称振动台架液压振动装置,于1998年和1999年应用于巴西、我国安阳钢厂,后来又在许多钢厂得到应用。

日立造船在快速更换台式的振动装置上去掉了电动四偏心振动发生机构,而在左右两侧安装了两个步进液压缸,其振动行程通过脉冲检测。1998年该装置成功地应用于川崎制铁水岛4号双流板坯连铸机上,液压系统压力为21MPa。

液压振动装置<sup>[8]</sup>的另一种形式—谐振式结晶器是德马克公司于1992年发明的。1993年首次投入生产,目前已投入生产和制造的有30多台,在韩国浦项等许多薄板坯和常规板坯连铸机上得到应用。这种结晶器的铜板和水箱<sup>[46]</sup>一起相对于结晶器外框架进行振动,它除了具有液压振动装置所应有的功能外,还具有振动时导向精度高,振动质量和惯性力被导向的重叠板簧组补偿,激振力仅仅是为了克服铸坯摩擦力和浇铸条件的变化因素。这种谐振结晶器依靠两侧两个液压缸垂直作用于振动体上,液压缸的布置形式与奥钢联和日立造船开发的液压振动装置液压缸的布置形式相同。西马克<sup>[2]</sup>公司设计的双液压缸伺服控制振动装置,应用于1998年投产的德国Stahlwerke厂立弯型板坯连铸机上。西马克、德马克公司合并后,在德国胡金根厂3号板坯连铸机上又设计了最新的短板簧的双液压缸振动装置,与以前的最大不同在于长板簧导向换成了短板簧导向,于2000年12月投产。

达涅利公司开发的双缸对称布置液压伺服控制的液压振动装置，应用于 1999 年投产的韩国浦项光阳厂 4 号板坯连铸机上，液压缸的更换时间为 4h，伺服阀寿命 7500h。

液压振动可以达到正弦或非正弦的效果，它能够动态控制结晶器上升与下降时间，如果上升和下降时间相同时，是完全的正弦振动，即谐振动方程： $y=A\sin(\omega t+\phi)$ 。而常用的四偏心机械振动机构的振动方程为： $y=r[1-\cos\omega t-\lambda/4\cos\omega t+\lambda/4]$ ，非常接近正弦振动。

德马克试验表明，液压非正弦振动时，对于表面横裂敏感钢种的无缺陷率会由四偏心振动时的 55% 提高到 75%。液压振动可以在浇铸过程中调整振幅、频率及波形偏斜率，从而取得最佳负滑动时间和保护渣熔化流动效果，因而在 20 世纪 90 年代中后期得到推广，在传统板坯连铸机上大有替代机械振动的趋势。

#### 4.1 结晶器液压振动装置工作原理

液压振动结构<sup>[8]</sup>原理如图 4.1 所示。结晶器液压振动装置的液压系统包括伺服阀、伺服缸、位移传感器、振动波形发生器、计算机、电气控制装置等，它是一套速度和位置跟踪波形信号的典型伺服控制系统。液压振动的动力装置为液压力站，它作为动力源向振动液压缸提供稳定压力和流量的油液。液压力站的信号由主站室内的计算机通过 PLC 系统来控制。液压振动<sup>[47]</sup>的核心装置为振动伺服阀。振动伺服阀灵敏度极高，液压力站提供动力如有波动，伺服阀的动作就会失真，造成振动时运动不平稳和振动波形失真。为此，要在系统中设置蓄能器以吸收各类波动和冲击，保证整个系统的压力稳定。

正弦和非正弦曲线振动靠振动伺服阀控制，而振动伺服阀<sup>[12]</sup>的控制信号来自曲线生成器，主控室的计算机通过 PLC 控制曲线生成器设定振动曲线（同时设定振幅和频率）。曲线生成器通过液压缸传来的压力信号和位置反馈信号来修正振幅和频率。经过修正的振动曲线信号转换成电信号来控制伺服阀。只要改变曲线生成器即可改变振动波形、频率和振幅。曲线生成器输入信号的波形、频率和振幅可在线任意设定，设定好的振动曲线信号传给伺服阀，伺服阀即可控制液压缸按设定参数振动。在软件编程中，同时还设置多种报警和保护措施以避免重大事故的发生，这种在线任意调整振动波形、振幅和频率是机械振动系统所实现不了的。

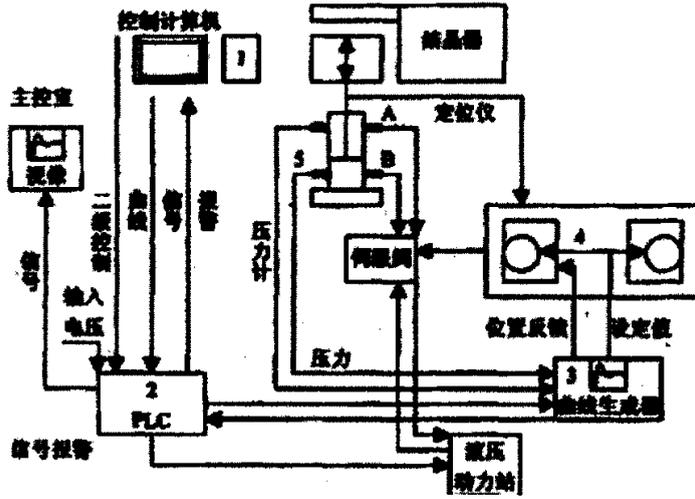


图 4.1 液压振动结构组成及控制原理图

Oscillation Capabilities

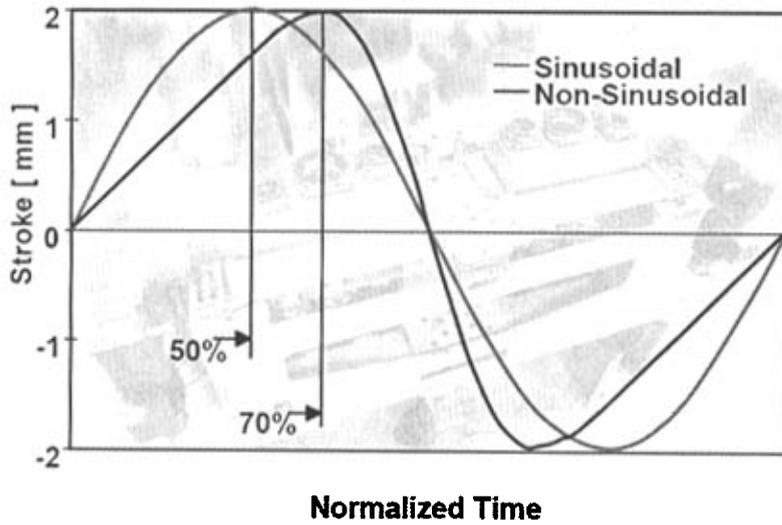


图 4.2 奥钢联提供的结晶器液压振动波形示意图（正弦与非正弦）

## 4.2VAI 液压振动装置简介

液压振动装置由两个相互独立的机械单元组成，两单元可互换，并用 C - 型框架相连，通过直接采用液压缸和耐磨损板簧导向系统，可实现高振频下的最小水平位移；通过平衡减震弹簧可以平衡结晶器以及振动台架及其他附件的重量，减小伺服缸的负荷。

结晶器液压伺服振动装置由电气控制部分和液压驱动部分组成。电气控制部分组如图 4.3 所示。

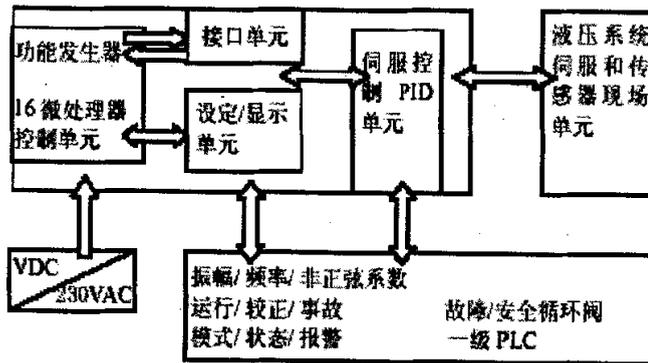


图 4.3 功能发生器组成框图

液压振动电气控制部分是一个单独的子系统，结晶器的液压振动参数可一级或二级 HMI 上设定，设定值通过 H1 网上的铸流 PLC 或下载二级过程机控制系统的数  
据发送给液压振动装置的电气控制单元。液压驱动部分由基础框架支撑，框架用螺栓固定在基础上，振动驱动液压缸直接放置在结晶器台架下，液压缸为直接伺服驱动型。

### 一、结晶器液压振动控制系统

液压振动 PLC 是一个模块独立专用控制器。独立控制器的优点主要有：

- 其他不相关过程干扰的相对独立
- 快速动态响应
- 高度可靠性
- 容易集成到现有自动化系统
- 短的启动时间

位置传感器的信号输出通过一个放大器接口到控制器,这个放大器输出 4-20mA 信号比例到油缸冲程以及控制器。控制器输出一个模拟信号,控制液压启动器(伺服比例阀)<sup>[14]</sup>。通过活塞上的实际测量压力和每个油缸的活塞杆计算出摩擦力。

PLC 有一个带文本显示和功能键的集成终端,用于局部操作。这个终端的功能如下:

- 油缸人工操作
- 操作模式选择
- 安装数据输入区
- 实际数值显示
- 警报/事件显示

振动控制器控制单个振动油缸之间的机械同步的液压阀。振动控制器考虑到浇铸速度和振动表的参数,允许自动模式下振动。

紧急情况下控制器使用实际设定值继续操作,如果必要可以在控制盘上修改设定值。

振动控制系统主要操作模式:

使用指定的功能键,可以在终端选择操作模式。可能有下列操作模式:

人工模式

这个模式用于测试目的。这种模式下,只要键在启动状态(控制移动),振动器将被转向选择的方向(上/下)。在这种模式下,通过指定键选择油缸也可以移动单个油缸。

检查模式

这种模式用于检查结晶器窄侧的锥度。从铸机初级自动化系统选择这种模式。只有在振动器处于人工模式时这种模式才是有效的。振动器移动到下位。选择上/下的功能键停止了。

定位模式

这种模式也用于测试目的。这种模式下,只要键在启动位置,振动器将以选择方向移动。

自动局部模式

这种模式下，诸如油缸行程、频率、偏斜率等非正弦曲线因素的振动参数将被输入终端。使用键开始和停止，振动器就可以开始和停止。振动器使用人工输入终端的设定值，独立于浇铸速度。这种模式也用于测试目的。

#### 自动远程模式

这种模式下，可以从振动实践表中选择振动参数。振动器将随着拉坯传动的开始而自动开始。设定值取决于选择的振动时间表和浇铸速度。这种模式在浇铸的时候使用。

#### 二、结晶器液压振动装置与机械振动装置相比具有以下优点：

- (1) 振幅和振动参数可以在线调整，优化表面质量和降低渣耗的振动曲线模式；
- (2) 高拉速时确保表面质量，减轻振痕；
- (3) 最小水平偏移的预应力导向系统；
- (4) 较低的振动质量；
- (5) 自动、快速更换连接，减少停机时间；
- (6) 易于更换组件和进行维修；
- (7) 技术组合的离线测试，保证连铸机无故障安装、启动和运行。

基于以上的研究，为首钢迁钢公司引进板坯连铸机结晶器的振动系统提供了理论依据。但如果要使用好结晶器液压振动系统，充分发挥在高速连铸中的作用，就要结合生产实际，不断摸索，总结经验，合理设定振动参数。

## 结 论

通过对结晶器振动装置进行了分析研究,为迁钢板坯连铸连轧生产线中的结晶器液压振动系统的引进提供了依据,初步分析了液压振动的控制原理,可得到以下结论:

1、采用非正弦振动,在同样条件下,可以有效地减少负滑脱时间,减小振痕,增加正滑脱时间,有利于结晶器的润滑;波形变形系数的取值应小于150/180,过大则体现不出非正弦振动的优点;

2、采用非正弦振动,在同等振幅和频率条件下增大了结晶器向下运动的最大速度,故有利于拉速的提高,提高了铸机的效能;

3、采用非正弦振动,在通过增加振动频率来减少负滑脱时间困难时,可进一步降低负滑脱时间;

4、振动参数采用高振频、小振幅,将振频随拉速增加而减小改为振频随拉速增加而增大,振幅随拉速增加而增加改为振幅随拉速增加而减少。提高了铸坯的表面质量,基本适应板坯连铸的生产需要。

5、结晶器液压振动系统取代机械振动系统是板坯连铸技术发展的必然趋势,连铸生产技术的发展仍然是今后相当长一段时间内推动钢铁科技进步最重要的动力。

6、结晶器非正弦振动装置的应用,降低了生产成本,减少了矿产资源和能源的消耗,改善了岗位工人的操作环境,减轻了操作工人的工作环境。

## 参考文献

1. 张会良. 首钢第二炼钢厂设备使用维护规程. 2003. pp23~37.
2. 杨拉道. 连续铸钢国内外概况. 2001. 4. pp20~30.
3. 王雅贞. 新编连续铸钢工艺与设备. 北京: 冶金工业出版社, 2002. pp12~22.
4. 郑学然. 连铸结晶器非正弦振动的研究. 1998. pp2~33.
5. 史宸兴, 余志祥, 叶枫. 实用连铸冶金技术. 北京: 冶金工业出版社, 2003. pp45~70.
6. 杨拉道, 谢东钢. 常规板坯连铸技术. 北京: 冶金工业出版社, 2002. pp11~18.
7. 那贤昭 摘译. Dynaflex Technology. Iron & Steel Review. 2001. 5. pp22~32.
8. 张长征. 现代板坯连铸机中结晶器液压振动装置. 开封: 河南冶金工业出版社, 2000. pp26~55.
9. 孙平. 珠钢 CSP 铸机液压振动结晶器的控制技术. 北京: 冶金丛刊, 2001 年第 2 期. Pp55~71.
10. H preissl, W obermann, N Hubner. Advances And Future Aspects In Continuous Casting .Steel Times ,2001. pp31~36.
11. 卢盛意. 连铸坯质量. 北京: 冶金工业出版社, 2003. pp4~33.
12. 杨涛. 液压非正弦振动的研发. 中国冶金报, 2002 年第 218 期. Pp14~45.
13. 萧忠敏. 武钢炼钢生产技术进步概况. 北京: 冶金工业出版社, 2003. pp64~69.
14. 李宪奎. 液压伺服驱动连铸结晶器振动控制系统的设计. 北京: 冶金自动化出版社, 2000 年第 1 期. Pp25~33.
15. A Eichinger, K Frauenhuber, H Hodl. Advanced Equipment For High Performance Continuous Casting. Steel World, 1999, 4(1). Pp43~61.
16. 蔡开科. 连续铸钢原理与工艺. 北京: 冶金工业出版社, 1994. pp23~32.
17. A Wagner, A Ganter, J Watzinger. 奥钢联中等厚度板坯连铸技术最新发展. 1999 年中国钢铁年会论文集. Pp87~133.
18. Wolf, M.M..History Of Continuous Casting, Steelmaking Conference
19. Proceedings, Iss-Aime, Vol.75, 1992, pp83~137.

20. Harter, Jr., I., Continuous Casting of steel, Aise Yearly Proceedings, 1956, pp258~262.
21. Saavage, J., and Pritchard, W.H., "The Problem of The Rupture of Billet In The Continuous Casting of Steel", Journal of The Iron And Steel Institute, Vol, 178, 1954 (11), pp269~277.
22. Yamashita, K. Sakaki, T. Yamamoto, M. Yamiji, Mold Oscillation Drive System of the Electrohydraulic Servo-cylinder Type, Concast Workshop on Slab Casting, Kashima, 1987, May 11~13, pp59~61.
23. M. Nadif, A. Solimine, P. Ominetti, P. Velluet, M. Blandel, M. Roscin, Influence of Shell Solidification on Generation of Slab Surface Defects, Use of Hydraulic Mold Oscillation in Sollac Florange, 1st European Conference on Continuous Casting, Florence, Italy, September, 1991, pp1509~1518.
24. E. Takeuchi, J.K. brimacombe, Effect of Oscillation Mark. Formation on the Surface Quality of Continuously Cast Steel slabs, Metallurgical Transactions B, Vol. 16B, Sept, 85, pp605~625.
25. E. Takeuchi, J.K. Brimacombe, The Formation of Oscillate -ion Marks in the Continuous Casting of Steel Slabs, Metallurgical Transactions B, Vol. 15B, Sept, 84, pp493~529.
26. S. Itoyama, Effect of Casting conditions on Oscillation Mark Depth, CAMP-ISIJ, Vol. 5, 1992, pp1, 225~1, 228.
27. Howe, I. Stewart, Reduction of Reciprocation Marks By High Frequency Vibration of Continuous Casting Mould, Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, 1987, Vol. 70, pp417~425.
28. Edward S. Szekeres, Overview of Mold Oscillation in Continuous Casting, Iron and Steel Engineer, July, 1996, pp29~37.
29. 汪兴富. 高速连铸的关键技术, 重型机械出版社, 1995, No6, pp3~6.
30. 史宸兴. 对开发高速连铸技术的思考, 连铸, 1996, No3, pp7-10.
31. 王新华, 赵沛, 周荣章. 高速连铸的几项关键技术, 炼钢, 1995, 8, pp21~29.

32. 张洪波. 高速连铸的基本工艺条件, 炼钢, 1995, 2, pp32~35.
33. 张洪波. 结晶器非正弦振动的理论分析, 连铸, 1994, №2. pp241~333.
34. 张洪波. 高效连铸时结晶器振动形式及振动参数的选择, 钢铁, 1994, №12. pp201~233.
35. 盛义平, 任廷志, 张兴中. 结晶器非正弦振动, 钢铁, 1996, 7, Vol, 31. pp145~203.
36. 李宪奎, 钟汉等. 连铸结晶器正弦振动参数的确定, 钢铁, 1992, 9. pp48~107.
37. 盛义平, 刘剑平. 结晶器正弦振动参数的优化, 钢铁, 1994, 6, 12. pp57~203.
38. 李宪奎. 连铸坯表面振痕的改善, 河北冶金出版社, 1992, №6, pp18~20.
39. 张一夫, 张庆国. 振痕形成机理初探, 河北冶金出版社, 1994, №3. pp165~254.
40. 李宪奎, 汤雪华. 关于连铸负滑动时间曲线的讨论, 冶金设备出版社, 1991, №2. pp122~383.
41. 潘毓醇. 关于结晶器连铸设备负滑动理论的探讨, 冶金设备出版社, 1984, 3. pp36~81.
42. 吴国付. 优化结晶器运作参数, 提高连铸方坯质量, 连铸, 1996, 10, pp12~14.
43. M. EMI, 粘结性拉漏机理及连铸结晶器保护渣的新发展, 国外钢铁, 1992, 8. pp256~321.
44. 王新华. 高速连铸的几项关键技术, 全国连铸技术研讨会论文集, 中国金属学会, 1994, 11. pp154~265.
45. 张洪波. 两种振动频率与拉坯速度匹配高效的比较与分析, 炼钢, 1996, 1, pp19~21.
46. 李宪奎, 张德明, 宋激. 薄板坯连铸结晶器振动参数的控制, 机械工程学报, Vol. 31, №2, 1995, 4, pp84~87.
47. 李宪奎, 钟汉, 巩世春. 连铸最佳拉速——频率线性控制模型, 钢铁, Vol. 30, №7, 1995, 7, pp15~17.

## 在学研究成果

### 一、 在学期间发表的论文

- [1] 李鸿春 . 板坯连铸机结晶器液压振动的研究 . 黑龙江科技信息报 . 2005  
(11) .P184

## 致 谢

本论文是在导师刘中良教授的悉心指导下完成的。从论文的选题到方案的论证都得到了老师的关心和帮助，他严谨的治学态度令我十分钦佩，他精心的指导令我十分感激。在此对导师表示最诚挚的谢意。同时衷心的感谢首钢迁钢公司炼钢分厂厂长助理高级工程师李志新在论文撰写中给予的大力支持和帮助。

最后由衷地感谢在本人就读以及论文撰写期间，所有给予支持和帮助的同事以及北京工业大学的老师。

李 鸿 春

2005年12月1日