

热轧轧机机电共振分析及其电气解决的改进方案

程 玮

(厦门海洋职业技术学院海洋机电学院, 福建 厦门 361100)

摘要: 随着我国近年来社会经济与科学技术的协同发展, 钢铁行业的发展也十分迅速, 为实现生产力的进一步提升, 以此来满足社会对于钢铁的实际需求, 热轧机组开始在钢铁生产中得以广泛应用。而在热轧机组的应用过程中, 机电共振问题是一种常见问题, 如果此类问题得不到有效解决, 不仅会影响到钢铁生产效率与质量, 也会导致热轧机组中的设备损坏, 甚至会酿成安全事故, 为钢铁企业的经营和发展带来很大程度的不利影响。为有效解决此类问题, 本文对其共振现象进行了分析, 并提出了相应的电力解决改进方案。希望通过本次的分析, 可以让热轧机组的使用质量得以进一步提升, 使其在钢铁行业中发挥出更好的优势。

关键词: 钢铁企业; 钢铁生产; 热轧机组; 机电共振

在钢铁企业通过热轧机组进行钢铁生产的过程中, 机电共振问题的解决是保障钢铁生产质量、生产效率与生产安全的关键。因此, 在具体应用中, 运维人员一定要充分了解热轧轧机的机电共振现象及其产生原因, 并以此为依据, 采取合理的方案来加以改进。通过这样的方式, 才可以有效解决其机电共振问题, 保障热轧机组的安全稳定运行, 避免机电共振所带来的不利影响。

一、热轧机的机电共振现象分析

在通过热轧机组进行轧钢生产的过程中, 机电共振的典型现象主要表现为以下的三种:

(一) “合拍”共振现象

热轧机自身的机械共有频率和传动系统所具备的电气频率相吻合, 进而出现了机电共振情况。随着近年来现代化连续性热轧机的应用, 此类机电共振现象的发生几率也越来越高。通过实测和相关研究发现, 在快速响应形式的现代化热轧机电设备传动控制系统内的一些机械设备固有频率和电气参数相吻合的情况下, 机电共振现象就会产生, 这也就是人们经常说到的“合拍”, 这种现象将会严重影响到生产设备自身质量及其运行效果。

(二) 周期共振现象

在热轧钢的过程中, 负荷的周期性变化也会导致机电共振。在具体的热轧工艺或机械控制中, 轧辊偏心、活套控制以及轧件发生材质变化等的情况十分常见, 在这样的情况下, 其负荷就会呈现出周期变化的情况, 进而有电流振荡产生, 导致热轧机出现机电共振现象, 这种共振也会呈现出周期性, 进而对产品质量造成严重影响。

(三) 扭转振动

在热轧机组受到冲击负荷的情况下, 便会出现扭转振动现象。因为热轧机组的主要组成部分包括轧辊、联轴器以及电机等的很多个元件, 这些元件连接在一起, 将会形成一个“质量弹簧系统”。如果机组加载处于稳定状态, 系统将不会出现振动情况, 连接轴内的转矩也会呈现出平稳的静态变化趋势。但是若受到变速、制动、抛钢、咬钢等的负荷扰动, 导致这个质量弹簧不再稳定, 系统便会出现扭转共振现象。在这样的情况下, 连接轴上的转矩将会随着扭转角呈现出周期性的变化, 进而产生比静态趋势下大很多的转矩值。相比较正常的振动情况而言, 此类振动会随着冲击负荷产生, 每出现一次冲击负荷都会产生一次强烈的共振, 随着负荷消失, 共振也迅速衰减和消失。这种共振现象会让设备和生产质量受到严重影响。

二、热轧机的机电共振现象产生原因和特征分析

(一) 机电共振现象的产生原因分析

随着近年来各大钢铁企业对热轧机组机电共振的分析与研究发现, 导致其发生机电共振的原因主要有两个:

第一, 在当今的国民经济迅速发展, 社会对于钢铁的需求量也在日益提升, 在这样的情况下, 为有效满足社会所需, 各大钢铁企业便开始了大范围的扩张。为实现热轧机生产能力的进一步提升, 制造商也开始注重高速化、大型化以及现代化热轧机械设备的制造, 进而让热轧机的轧制力矩及其驱动功率都在不断增加。同时, 很多钢铁企业为实现产量的提升, 会对压下量以及穿带速度加以过分追求, 进而导致热轧机所受到的咬钢冲击越来越大。加之很多的钢铁企业为最大化降低成本而对热轧机内的各种结构部件进行简化设计, 设计中仅仅对其静态振动强度加以考虑, 并未做好共振强度的计算。这样的情况就更容易产生机电共振现象, 且对设备造成损坏的几率也在日益提升。

第二, 在当今的电子电力技术以及自动化控制技术的不断发展中, 热轧机也具备了越来越高的自动化程度, 因此, 其系统的响应速度也得到了显著提升。在热轧机组内, 响应频率可以接近或者是等同于传动系统轴系中所固有的振动频率。在这样的情况下, 电控系统在热轧机传动轴系内就形成了一个强迫干扰源, 进而导致机电耦合共振现象产生, 这是一种具有强迫性振荡形式的共振现象, 这种现象不仅持续的时间很长, 而且危害性也非常大。另外, 随着近年来电气自动化系统在我国的大规模改造, 热轧机组中的传动系统已经从原来的直流改为交流, 但是热轧机组中的机械设备却大多都是一些老旧设备, 这些设备不能和改造中所增设的现代化电气设备之间达到良好的匹配效果, 所以也更容易产生机电共振现象。

(二) 机电共振现象的基本特征

在热轧机发生机电共振现象时, 由于这种振动和稳定振动不同, 所以会呈现出随机的、非线性形式的振动特征。其共振的频率、强度将会受到很多方面因素的影响。以下是其基本特征:

1. 阻尼衰减形式的共振共振: 其振动幅值以及持续时间和轴系内部的具体惯量分布情况、输入力矩时间函数、阻尼系数、传动轴自身的弹性系数、滑块与齿轮之间的间隙都有关。
2. 强迫振荡形式的共振: 在电控系统所具有的响应频率和轴系自身固有的频率相一致时, 此类共振现象便有可能出现。
3. 间接形式的不稳定共振: 在扭矩比较特殊的条件下, 机组的振动频率与振幅将会变得不稳定, 进而产生此类机电共振现象。
4. 等幅共振: 当电动机处于低速空载运行或者是轻载运行状态时, 可能会产生幅值很低的等幅共振现象, 这样的共振现象并不会对整个热轧系统造成损害。

三、热轧机组机电共振现象的电气解决方案分析

(一) 通过陷波滤波器来解决其机电共振问题

在机械轴系中的某一频段出现谐振现象时, 其谐振成分便会在实际的速度信号值中叠加。在借助于PI调节器对这种谐振分量进行放大处理之后, 这个被放大之后的交变分量就会包含在给定的输出转矩中, 进而导致速度谐振现象加剧。在热轧机组的具体应用过程中, 为了有效克服这种机械谐振现象, 避免轴承遭到破坏, 可以在其中进行一个或者是几个陷波滤波器的设置, 让陷波滤波

器中的滤波频率和热轧机组轴系所固有的扭振频率保持一致。通过这样的方式,就可以让热轧机组扭振频率点的增益值降低为零,机电共振问题也将得以有效解决。下图是陷波滤波器的典型应用原理图:

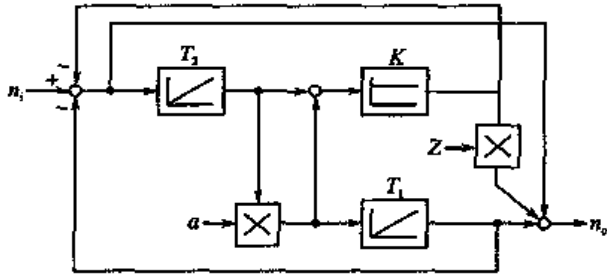


图 1- 陷波滤波器的典型应用原理图

在上图中, T1 和 T2 均属于积分环节, T1 的传递函数是 $G_{T1}(s) = \frac{1}{T1s}$ (s 为共振持续时间, 其单位是 s); T2 的传递函数是 $G_{T2}(s) = \frac{1}{T2s}$; K 属于一个比例环节, 其传递函数是 $G_K(s) = K$; \otimes 所代表的是乘法器。

(二) 负荷平衡方案的科学设置

在对热轧机组的机电共振问题进行电气解决方案的设计中, 负荷平衡方案的主要功能是让上下辊之间达到一种均匀负荷状态, 而其设计基础就是对上下辊所给定的转速控制加以修正。下图是

热轧机组上下辊的运行示意图:

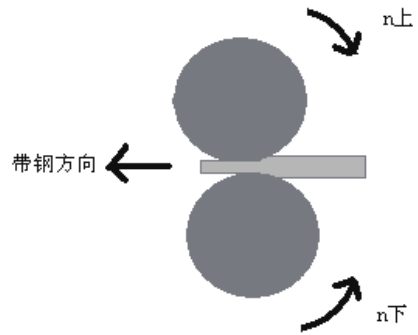


图 2- 热轧机组上下辊的运行示意图

具体运行中, 如果上辊有着比较轻的工作负荷, 将上辊给定的运行速度值加大, 让上辊运行速度比下辊运行速度略快一些; 如果上辊有着比较重的工作负荷, 将上辊给定的运行速度减小, 让上辊运行速度比下辊运行速度略慢一些。通过力学分析可以发现, 热轧机的马达速度及其所受力矩之间有着整函数关系, 所以通过这样的电气改进方式, 可以让上下辊实现马达负荷的有效平衡。

如下图所示, 在热轧机组上下辊系统 R1 中, TMETC TMD70 速度参考值单元就具备平衡负荷这一功能:

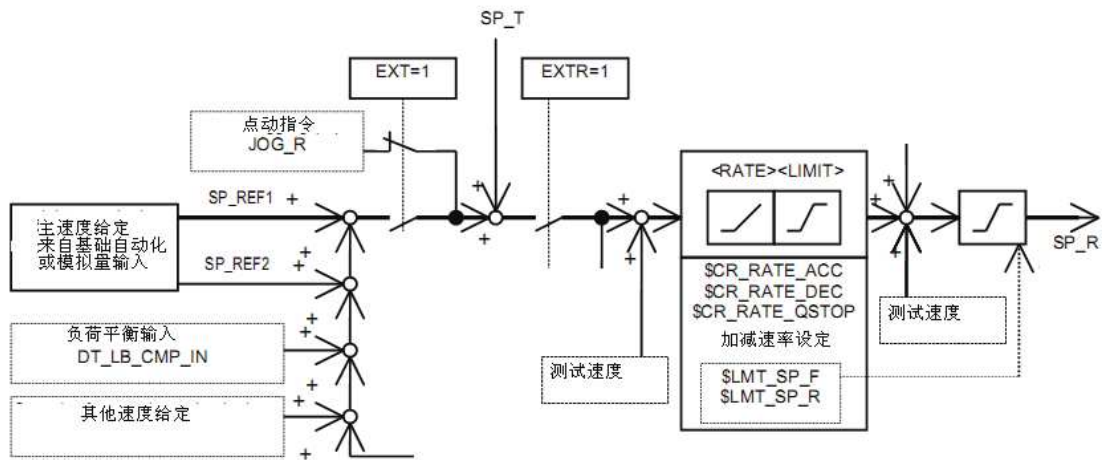


图 3-TMETC TMD70 速度参考值单元负荷平衡功能示意图

通过该参考单元的应用, 可以让上下辊之间保持负荷平衡, 但是在具体应用中, 应该对其投入的时刻加以良好控制。在咬钢之前, 上下辊都处在一种无负荷情况下, 如果此时将该参数单元投入, 在其不间断的调节作用下, 上下辊给定的速度值反而会变得不稳定。所以在现场的具体投入过程中, 应该在咬钢一段时间之后再将该参数单元投入, 这样才能起到有效的负荷平衡效果, 避免咬钢所导致的热轧机组机电共振现象发生。

(三) 通过 SCF 的设置来消除共振

SCF 是一种仿真前馈控制装置, 同时也是 TMD70 所自带的一种负荷观测器模型。通常情况下, 在咬钢等的双闭环控制轧制扰动过程中, 板带所产生的变形阻力将会进入到轧辊之间, 进而让热轧机组所受的制动力矩显著加大, 使其原来的转矩平衡遭到破

坏, 传动电机运行速度也会迅速降低, 转速反馈信号会随之减小, 而在速度调节器中给定的转矩电流输出量将会增加, 并试图增加电机中的电压值。但是由于电机自身的转动速度在下降, 反电势在降低, 所以电机中的电流将会快速增加, 其负反馈比也会随之加大, 并试图借助于电流调节器的作用来降低电机中的电压值。因为这两种调节作用之间有着相互矛盾的关系, 且电流有着很快的环响应速度, 所以转矩速度的增加程度会逐渐延缓, 其平衡时间也将逐渐延长, 进而使其动态速度降低幅度显著增加。在这样的情况下, 热轧机组就会出现比较严重的机电共振现象, 而要想有效解决此类的共振现象, SCF 设置就是一个科学有效的方法。下图是 SCF 的主要功能示意图:

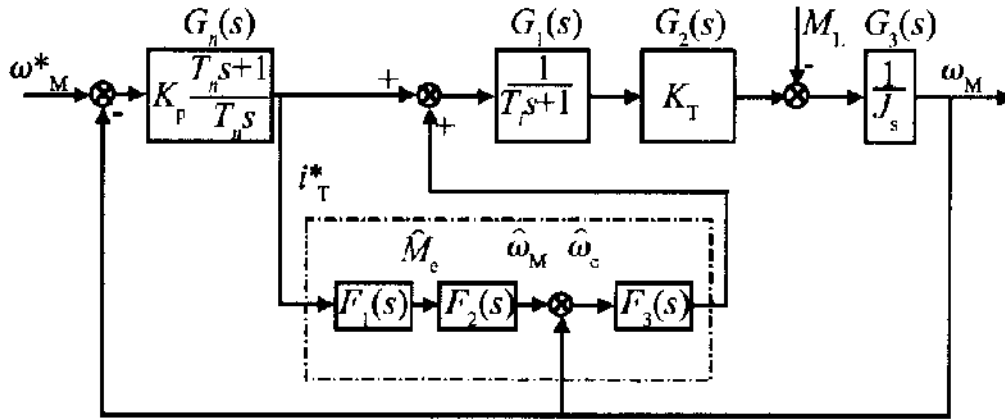


图 4-SCF 的主要功能示意图

如图所示，F1 (S)、F2 (S) 以及 F3 (S) 是 SCF 模拟器的主要构成部分。在这个模拟器中，将给定的电流用作输入量，借助于一个等效电流环形式的时间常数惯性滞后环节 $\frac{1}{T_i s + 1}$ ，便可以近似获得电机自身的电磁转矩 \hat{M}_c ；再借助于一个 $\frac{1}{J s}$ 积分环节，便可获得到电机在没有受到外界条件扰动作用下的转速 $\hat{\omega}_M$ ，将这个转速和电机的实际转速作差，便可计算出电机在外力扰动作用下的速度偏差值 $\hat{\omega}_c$ ；再借助于 F3 (S) 这一比例环节，即可将与电机所受外部干扰电流相当的补偿电流输出，使其增加到给定的电流值中，以此来实现外界干扰作用的有效消除，避免由于外界干扰所导致的热轧机组机电共振现象。

(三) 通过速度调节器的应用来解决共振问题

在热轧机组的电机调速系统内，PI 调节器是最为常用的一种速度环调节器，这种调节器的通用传递函数如下：

$$G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$$

在以上函数公式中，Gc (s) 代表电机速度调节效果，Kp 代表比例增益；T1 代表积分时间，s 代表运行速度。

按照这一函数关系，我们可以将变频器（驱动机构）和电机（执行器）具体的传递函数简写成以下的形式：

$$G_d(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1}$$

在以上函数公式中，Gd (s) 代表的是变频器（驱动机构）和电机（执行器）的调速效果，K0 代表的是变频器（驱动机构）和电机（执行器）的比例增益，T0 代表的是变频器（驱动机构）和电机（执行器）的积分时间。

所以，我们可以按照以下公式来表示系统中的闭环传递函数：

$$H(s) = \frac{T_i s}{(\frac{T_i T_0}{K_p K_0} s^2 + \frac{K_p K_0 + 1}{K_p K_0} T_i s + 1)}$$

因为 KPK0 远远大于 1，所以上式可简化为：

$$H(s) = \frac{T_i s + 1}{(\frac{T_i T_0}{K_p K_0} s^2 + T_i s + 1)} \approx \frac{1}{(\frac{T_0}{K_p K_0} s + 1)}$$

由此可见，在这个阶跃响应形式的过渡过程中，其时间是：

$$t = \frac{3T_0}{K_p K_0}$$

同时，因为速度响应过程中的截止角频率与其时间之间有着

正比关系，其经验公式为：

$$t \approx \frac{4-9}{\omega_c}$$

在以上公式中， ω_c 代表响应截止角速度。

比如，在某钢厂的热轧机组中，上下辊之间的耦合共振频率可以达到 7.91Hz，所以在具体共振问题的解决过程中，为了让机械频率以及电力频率之间能够错开超过三倍，则需要通过以下方式进行速度调节器的参数设计：

表 1- 某钢厂热轧机组速度调节器的参数设计

序号	项目	参数设计
1	固有电气频率	<2.64Hz 或 >23.73Hz
2	响应截止角频率	<16.6r/s 或 >149r/s

出于实际情况考虑，响应截止角的频率不可能超过 149r/s，所以在具体设计中，应将其频率控制在 16.6r/s 以下。通过这样的方式，才可以让电机速度得到良好调节，以此来有效解决热轧机组的机电共振问题。

四、结语

综上所述，在通过热轧机组进行轧钢生产的过程中，很多因素都会引发机组的机电共振现象。因此，具体生产中，要想有效避免此类现象的产生，解决用于机电共振所带来的系统运行问题或安全问题，提升钢铁企业的生产效率、质量与安全，企业应全面分析共振的典型现象及其主要特征，并对其形成原因进行全面分析。然后通过陷波滤波器的设置、负荷平衡方案的设计、SCF 的设置以及速度调节器的设置来有效解决此类问题，保障整个热轧机组的运行效果，满足当今社会所需，促进钢铁行业的良好经营与发展。

参考文献：

[1] 董志奎, 梁朋伟, 糕超越, 等. 基于 DBN 算法的热轧高强钢薄板轧机振动预报研究 [J]. 矿冶工程, 2020 (4): 135-141.
 [2] 黄金磊, 臧勇, 郜志英. 热轧过程中摩擦系数非对称性对轧机振动及稳定性的影响 [J]. 工程科学学报, 2019 (11): 1465-1472.
 [3] 商孝鹏, 陈鑫. 热轧精轧主传动振动在线监测及故障诊断设计 [J]. 冶金设备管理与维修, 2019 (3): 7-11.

作者简介：程玮 (1982—)，男，汉族，籍贯：福建宁德，讲师，硕士，主要从事自动化系统控制、单片机技术应用的教學和研究。