

冷轧机传动系统振动测试与控制策略*

杨旭^{1,2}, 李江昀^{1,2}, 童朝南^{1,2}

(1. 北京科技大学自动化学院 北京, 100083) (2. 北京科技大学钢铁流程先进控制教育部重点实验室 北京, 100083)

摘要 针对某厂单机架冷轧机在轧制升速、稳速阶段存在的主机、卷取机电枢电流波动异常现象, 使用霍尔传感器对轧机主传动直流调速系统的直流侧电枢电流进行检测。检测数据由数字示波器观测、导出并进行频谱分析。经对测试结果和所有可能外部扰动的分析发现, 该轧机传动系统电流大范围波动主要是由于主传动系统的扭转振动以及外来负荷扰动。通过对振动频率的分析、配置速度环滤波时间常数和调整电流环比例系数之后, 对轧机的扭振以及电流波动异常得到了很好的抑制, 电流波动范围控制在 $\pm 3\%$ 以内。

关键词 冷轧机; 扭转振动; 频谱分析; 传动系统; 滤波

中图分类号 TG333; TP271

引言

现代科学技术的发展使轧机的轧制速度大幅度提高, 同时, 现代工业的发展对冷轧带材表面质量的要求也越来越高。降低生产成本、提高生产率和产品质量始终是轧制行业的主要诉求之一。然而, 轧机振动作为轧制过程中一种普遍存在的现象, 对系统会产生很大危害, 轻则会导致带材表面形成振纹、产生厚度差; 重则甚至导致断带和机械设备的损坏, 从而降低了产品质量和生产率, 增加了维修费用。

轧机振动主要分为两大类: 轧机主传动系统的扭转振动与轧机垂直系统的振动(三倍频振动和五倍频振动)。对于不同的轧机和轧制环境, 轧机的振动现象无论从外在形态还是内在机理上均有很大的差异, 所以对于轧机设备的合理测试与分析, 从而找出振动源头、掌握其振动规律并提出解决方案, 具有重要的理论和实际意义^[1-5]。

笔者针对某厂冷轧机在稳速轧制和升速阶段出现的主机电流波动过大的问题, 通过现场检测和实验分析, 调整主传动调速控制系统的相关参数, 消除了扭振对轧机系统的影响, 使得轧机提速30%以上, 并消除了卷取过程中严重的产品窜层现象, 提升了轧机的整体性能与生产效率。

1 轧制过程特点及设备问题描述

1.1 轧制过程特点

冷轧生产的特点之一是采用较大的张力进行开卷和卷取, 由于张力会直接影响产品的质量和精度, 因此卷取张力通常采取恒张力控制方法。一般单机架卷取张力控制采用“最大力矩法”, 即: 从卷筒起步开始工作到静态建张阶段, 卷取机的控制是典型的速度、电流双闭环控制系统; 当张力建立之后, 人为给定一较大的速度阶跃, 使速度调节器在饱和区运行, 即速度环开环, 速度调节器的输出为其上限幅值, 该限幅值是经过折算的张力力矩, 它被换算成电流环的给定值, 使力矩电流可以进行调节, 这样便能够在轧制过程中的张力恒定。

轧制过程中张力的存在是保证开卷、卷取的前提条件。从工艺角度而言, 开、卷机张力对于能否保证顺利穿带起着关键作用。如果张力过大, 会导致带材断裂, 而过小的张力会产生带材的堆料现象。另外, 在轧制过程中, 卷取张力的恒定对于产品的厚度差和窜层也有重要影响。

从控制系统的角度而言, 主轧机和开卷机、卷取机均由直流电动机驱动。假设电动机转速恒定且相

* 国家自然科学基金资助项目(50125018); 中国博士后基金资助项目(2012M510321); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-12-104A, FRF-SD-12-008B); 北京市重点学科共建资助项目(XK100080537)

收稿日期: 2012-01-12; 修改稿收到日期: 2012-04-22

同,当开卷的卷径逐步变小,如果此时开卷速度不发生变化,轧件则会越来越紧,最终导致断带。可见,在直流调速系统中虽然调节的对象仍是电动机,但是要保持恒定的量是张力,而不是电动机的转速。

对于张力的控制方法,一般有直接法和间接法两种^[6]。目前,绝大多数轧机卷取系统都采用间接法进行张力控制。图1为卷取机传动系统示意图。图中: M_D, n_D 为电机的输出转矩和输出转速; M, n 为轧辊驱动侧的转矩和转速; T 为带材张力; v 为卷取机速度。

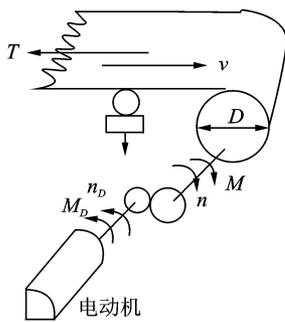


图1 卷取机传动系统示意图

电动机的输出转矩为

$$M_D = M_J + M_T + M_0 = C_m \phi I_a \quad (1)$$

其中: M_J 为加、减速所需的动态力矩; M_0 为空载力矩; M_T 为张力力矩; C_m 为电动机结构常数; ϕ 为电动机磁通; I_a 为电动机电枢电流。

当稳态轧制时, M_0, M_J 为零,此时

$$M_D = M_T = C_m \phi I_a = F_T \frac{D_B}{2i} \quad (2)$$

其中: F_T 为卷取张力; D_B 为卷取机卷筒卷径; i 为减速比。

可以看出,如果要维持张力 F_T 恒定有两种方法:维持 $I_a = \text{常数}$ 和 $\phi/D_B = \text{常数}$;或使 I_a 正比于 ϕ/D_B 而变化,这种方法被称为最大转矩法。当卷取机在基速以下运行时,电动机按满磁状态工作;在基速以上工作时,电动机在弱磁状态下工作,从而实现恒张力控制。这种控制系统可以合理利用电动机的功率,提高生产效率。

由式(1)可以看出,为了保证系统的张力恒定,在卷取机进行加、减速操作的时候,控制系统必须进行动态补偿,即根据动态力矩的大小,适当、准确地补偿主回路电枢电流的动态分量;因此在卷取机工作过程中,电流的某种有规律的小幅波动是正常的,这属于一种主动的电流调节方式,但是除此以外的

电流波动异常(如卷筒偏心造成的电流波动、来自主机的外部扰动)对系统本身是有害的,它将会影响到卷取机的工作性能,导致带卷窜层,出现塔形。

1.2 设备问题描述

某厂宽板带不可逆冷轧机可以轧制多个道次,其中典型轧制工艺为轧制7.0 mm→0.5 mm规格,分4个道次,各个道次相对压下率约为40%→55%。主轧机是采用液压推上的四辊轧机,由2台直流电机串联驱动(单机为1 800 kW),主机调速分高、低速档,其中主机低速档为200~500 m/min,高速档为480~1 200 m/min,开卷机由2台直流电机串联驱动(单机为390 kW),卷取机由2台直流电机串联驱动(单机为660 kW),轧机的主要设备构成由图2所示。

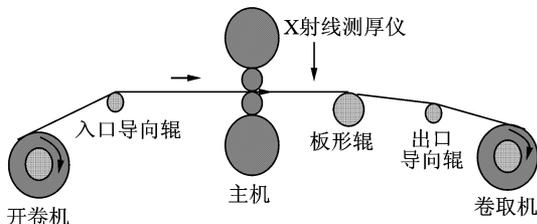


图2 宽板带冷轧机设备示意图

此单机架宽板带冷轧机投产不久,便在轧制过程的升速和稳速阶段出现主机、开卷机、卷取机电枢电流波动过大的现象。其中,以主轧机主、从机电流的波动尤为突出,轧制电流越大,波动越剧烈,当该电流接近额定电流阶段时,波动范围可达±15%,并且两台电机均存在三相交流电进线不平衡的现象。

生产表现为产品轧制无法达到额定电流,否则产品出现明显振痕,卷取窜层严重,轧机噪音增大,严重时产生断带。经过多位现场工程师4年调试以及聘请机械、电力、传动和控制专家进行现场测试和分析优化,问题一直没有得到有效解决。

轧机主、从机电流波动异常和三相电不平衡的存在,一方面使得操作工在操作过程中无法正常升速,轧制速度只能维持在400~500 m/min,大大低于轧机的设计速度,导致轧机生产效率低下;另一方面,这种异常的电流波动和三相电不平衡会对轧机设备及电网造成破坏性的影响,导致设备经常性的维护检修。

此外,由于此轧机采取恒张力控制方式进行开卷

和卷取,在轧制过程中需维持张力系统的稳定,而张力系统的稳定与电枢电流有直接关系。因此,卷取机电流的无规律波动对于轧机系统和产品生产十分不利。

经过课题组的现场调研和前期分析,初步认为主轧机的电流波动、三相电不平衡问题以及卷取机的电流波动问题的根源均在于主机,可能是由于冷轧机主传动系统扭转振动及轧机外部干扰引起,而轧机的振动问题是先前的排障工作没有考虑过的。

2 现场测试与分析

根据对现场电流波动现象的初步了解和分析,课题组在2010年至2011年分3次去现场进行测试,经过研究发现,此轧机闭环控制所采用的电流反馈是由ABB DCS800直流调速系统将电网输送来的三相交流电通过两相互感器检测,再经软件拟合之后得出,并非直流输出侧直接检测获得,即这个直流观测量是DCS800控制器根据交流用电量模拟而来,不是直流实测值。为了获得准确的主轧机电枢电流,课题组将霍尔传感器放置于轧机主机DCS800调速器直流侧母排上,如图3所示,通过它可以测得真实的直流电流,并通过示波器观测波形,从而保证数据的真实有效性。



图3 电流测试信号采集图

2.1 测试记录1

将轧机主传动电枢电流推至额定电流附近,通过示波器将霍尔传感器采集的电流波形与经DCS800软件模拟后输出的电流波形进行对比。将示波器横坐标调在2.5 ms一格,整个横坐标时间为25 ms,如图4所示,图线中、下部分为直流侧输出的单向脉动整流波形,频率为300 Hz,此为DCS800 6个晶闸管构成的桥式电路经50 Hz工频交流电产生。图线中、上部分为DCS800的输出模拟波形。由于霍尔传感器电流量

程为0~3 kA,电压量程为0~4 V,通过万用表测量传感器输出端的电压并根据示波器纵坐标推理计算后可得,电流约为2.5 kA,较为接近额定电流(2.8 kA),测试结果有代表意义。

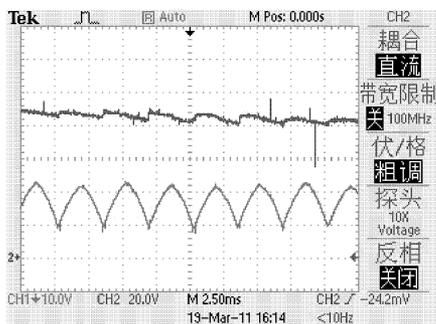


图4 霍尔传感器与DCS800输出电流波形对比

2.2 测试记录2

放宽示波器横坐标量程至合适值,如图5所示,可以看出,主轧机在稳态轧制阶段电流波动非常大、尖峰毛刺多且存在周期性的规律。

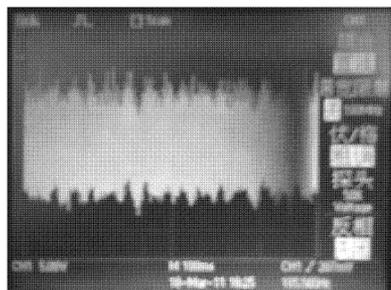


图5 主机电流波动示波器截屏图

将图5波形数据通过示波器提取相关数据,在计算机上对其进行频谱分析,纵坐标为最强信号与最弱信号的幅值比,即增益,如图6所示。可以发现,主机电流波动的频率主要集中在1 Hz左右,10 Hz和20 Hz这3个范围,其中20 Hz,1 Hz频率点最为密集,10 Hz其次,除此之外的少量波动是来料变化造成的非周期干扰波。经过分析与计算发现,1 Hz

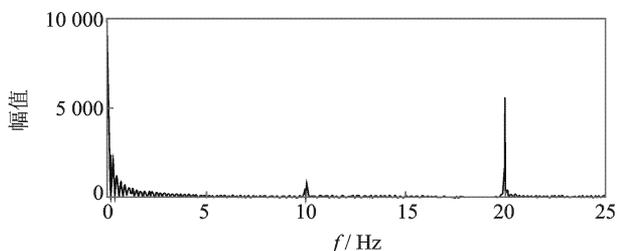


图6 主机电流原始信号频谱分析

频率的电流波动主要原因是支承辊的偏心,10 Hz左右的电流波动是开卷机和卷取机为补偿卷径,主动调节引起的电流波动而产生的对主机电流的影响,是一种外扰作用;20 Hz的电流波动属于一般的扭转振动频率(范围为5~30 Hz),它的确是主传动系统扭转振动导致,且频谱幅值很大。从电气控制的角度出发,尽量避让或消除轧机扭转振动和负荷外扰引起的电流波动是解决电流波动问题的关键所在。

3 主传动系统振动控制策略

经过现场的测试与分析发现,对于主轧机电机的电流波动异常及三相电不平衡问题的根源在于轧机主传动系统扭转振动及外界负荷扰动的影响所致。一方面,轧机扭转振动是轧机系统的共性,是客观普遍存在的,它是否振动、振动程度大小取决于轧

机机械设备的设计与安装,电工系统的参数调整,工艺润滑状态以及电网系统等。从电控的角度来说,它是无法进行消除的,只能通过设计、调节参数对其进行避让,从而达到振动抑制的作用。另一方面,外部负荷扰动导致的电流波动现象是由于轧机电控系统回路中传动系统作为轧机与电气系统的接口受到电气系统各种变化的影响^[7]。如轧机承受负荷产生的振动和轧机机械固有频率与传动系统电气频率吻合,导致电流波动的出现,这可以通过调整控制回路的参数来进行调节。

3.1 控制回路参数调整

冷轧机的传动系统直流电机采用典型的双闭环调速^[8](电流内环、速度外环),它的动态结构如图7所示。图中: W_{ASR} , W_{ACR} 分别为速度环节和电流环节的控制,此冷轧机传动系统采用的是经典的PI调节器控制; α , β 分别为两个环节对应的滤波调节器。

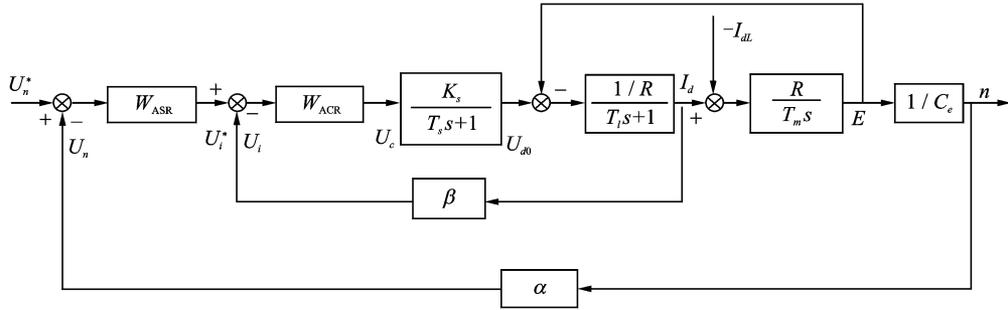


图7 双闭环直流调速系统的动态结构图

根据理论分析与现场经验,调节多环控制系统的一般原则是:从内环开始,一环一环逐步向外扩展。通过对电流波动波形的分析发现,电流波形中超调比较严重,于是首先将 W_{ACR} 电流PI调节器中的 P 参数由 $P_0=0.35$ 调整至 $P_1=0.28$,积分常数 $I=20$ ms保持不变,示波器采集的波形电流为2 500 A左右,横轴坐标时间为5 s,如图8所示。可以看出,此波形较图5参数未调整前波形已有明显改善,但是波动仍然比较大。图8中、下部曲线为霍尔传感器测量所得,上部曲线为DCS800模拟波形。

继续调整 P 参数,将其由 P_1 调整至 $P_2=0.2$,轧制规格为相同道次,电流为2 400 A左右,如图9所示,通过与图8对比发现,波形进一步得到改善,波动明显减小。之后试图进一步降低 P 参数,发现效果不明显并可能导致系统特性“过软”,于是将 P 参数确定为 P_2 。此时,电流的波动仍然存在,需要进一

步采取其他措施进行改善。图9下部曲线为霍尔传感器测量所得,上部曲线为DCS800模拟波形。

通过上述调节过程,一方面更改了轧机的电流环特性,使其能够更好地抑制外部扰动的影响;另一方面可以改变双闭环调速系统的传递函数形式,使

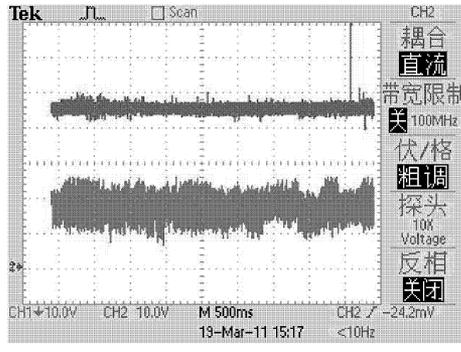


图8 $P=P_1$ 时主机电流波动对比

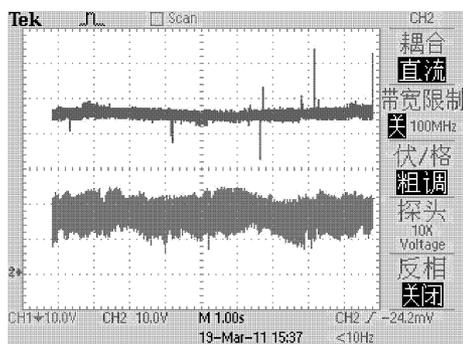
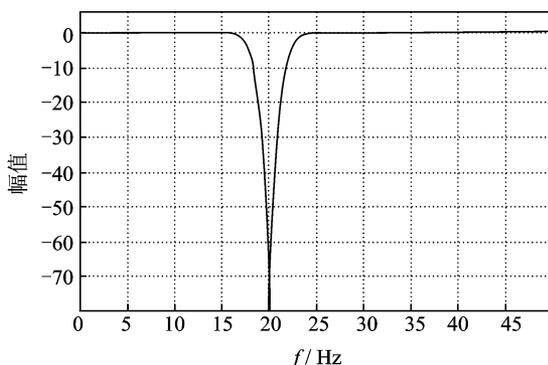
图9 $P=P_2$ 时主机电流波动对比

图10 陷波滤波器幅频响应曲线

其频率初步避开本轧机扭转振动频率20 Hz。对轧机传动系统动态性能的改善可以通过设计相应的滤波器来实现。

3.2 速度环节滤波器设计

当机械轴系发生某种谐振时,速度反馈通道的信号中会叠加谐振的成分,这种谐振分量经过速度环PI调节器放大后,给定转矩的输出会含有放大的交变分量,加剧速度环的振动,导致电流环随之波动。从电气控制的角度出发,对于谐波丰富的传动系统要完全避免这种波动是不太可能的^[9-10],可以通过设置滤波调节器来避让电气系统与机械系统共振点的吻合。一般而言,通常根据轧机系统的实际情况在速度环中设置滞后滤波器或者陷波滤波器来进行振动频率的有效避让。

3.2.1 陷波滤波器设计

陷波滤波器是一种带阻滤波器,它既可以避开机械振动频率且不影响系统的响应特性,将其安放在速度环通道中可以有效消除轧机扭转及电流波动的产生。

针对本轧机20 Hz的扭振频率,设计相应频率的陷波滤波器并通过计算机进行仿真,其幅频响应由图10所示。陷波滤波器为6阶Chebyshev Type II算法。采样频率为1 kHz,中心频率为20 Hz,带宽为3.5 Hz。利用Matlab Simulink中信号处理工具箱进行仿真试验,输入信号是幅值为1、频率为20 Hz的正弦波曲线,经过陷波滤波器后如图11所示。图中虚线为经滤波器衰减后信号,实线为正弦波输入。可以发现,信号衰减明显且信号没有滞后,不会影响系统的动态特性。可见,陷波滤波器用于低频带阻滤波效果明显,使用此滤波器对于控制系统其他特性几乎不变。

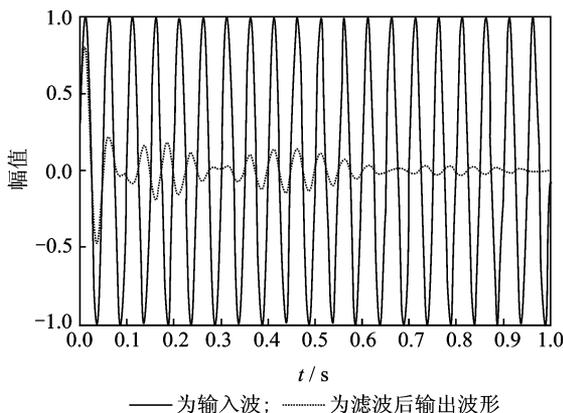


图11 陷波滤波器控制性能

3.2.2 滞后滤波器设计

陷波滤波器对于振动信号的消除与抑制效果非常明显。但是,本冷轧机传动系统所用的DCS800控制器速度环反馈通道没有提供内置陷波滤波器。如果要采用陷波器,必须在外部反馈通路串入硬件陷波器,这样做需要停产调试,并可能存在潜在的不可预知风险。于是考虑改为用DCS800内置的滞后滤波器来代替陷波器,尽可能减小扭转振动对主轧机电流波动造成的影响,同时保证适当滞后的系统响应对轧机运行没有大的影响。滞后滤波器消除这种振动形式的方法是简单易行,处理也比较方便,只需调节速度环中的滤波时间常数即可。但是,这种滞后环节的加入会影响系统的动态响应特性,如果取值不当会造成严重的不可预知的设备异常。因此,选择一个合适的滤波时间常数是设计滞后滤波器的关键。

对于20 Hz频率的扭转振动波在计算机上采用滞后滤波器进行仿真,如图12所示,当输入幅值为1的正弦波,设置滤波时间常数为 $T_0=75$ ms时,正弦波幅值衰减至10%左右。此时如果继续增大滤波时

间常数,幅值下降的效果不再明显,同时波动滞后现象开始严重,这会破坏传动系统的动态特性。

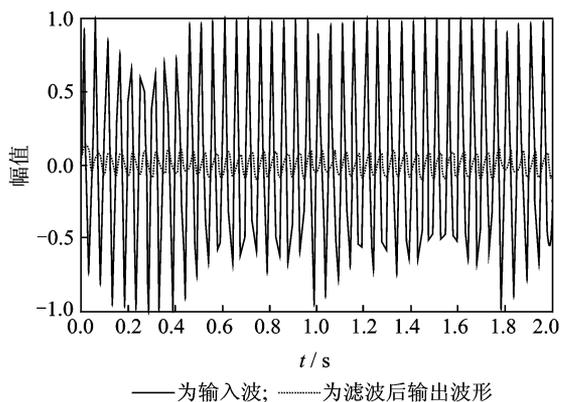


图12 滞后滤波器控制性能

3.3 问题解决

3.3.1 轧机主传动

针对以上仿真分析,在初道次稳态轧制阶段将DCS800双闭环调速系统中的速度环反馈通道滤波时间常数由原始的 $T_1=20\text{ ms}$ 改为 T_0 ,电流环调节器 P 参数保持为 P_2 。通过示波器观测主机电流,此时的单机电枢电流约为 $2\ 500\text{ A}$,如图13所示。可以看出,在调整电流环参数并加入滤波器的传动系统电枢电流波动已完全降低至正常范围,此时通过观察电控柜三相进线电流表可以发现,主机中存在的三相交流电不平衡问题已完全解决,A,B,C三相表针在稳态轧制过程中基本维持不动。(上侧曲线为霍尔传感器测量所得,下侧曲线为DCS800模拟波形)

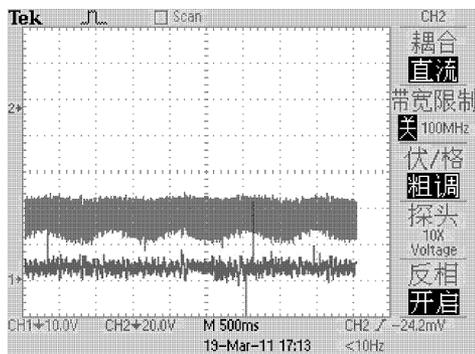


图13 调整滤波时间常数后的电枢电流波动对比

将滤波时间常数 T_1 与 T_0 多次切换,反复试验,证实电流波动对滤波常数 T_0 十分敏感。一旦去除滞后滤波,电流立即开始大范围波动,进线电流表剧烈摆动;反之,电流波动控制在 $\pm 3\%$ 以内,进线电流表

肉眼看不出波动。轧机正常生产,无不良反应。试验证实,20 Hz左右的扭转振动是造成该轧机电枢电流波动异常的主要原因。

此外,图中存在频率在1 Hz左右的电流细微波动,这是由于轧机支承辊偏心(直径为 $1\ 120\text{ mm}$)所导致,因其波动范围很小,从电控角度来说不是解决本问题的关键。

3.3.2 卷取机传动

对于卷取机的电流波动,要区分它是一种主动控制的调节方式(卷径动态补偿)还是被动的波动。通过现场测试后发现,卷取机电流波动范围较为正常,但同样存在10 Hz左右的周期波动,这正与控制系统为补偿卷径变化(PLC 100 ms循环周期)而改变补偿给定的电流波动周期相吻合,它是动态力矩补偿导致的有规律波动。同时,由于主轧机轧制电流和轧制功率均远远高于卷取机,主轧机电流的波动也会对卷取机构造成影响。解决主轧机的电流波动问题后,再通过霍尔传感器和示波器观测振动幅值。图14为示波器采样值输出曲线,其中横坐标为采样点计数,纵坐标为示波器采样幅值(经示波器y轴调幅后的电压值)。在示波器同一设置并且轧制相同道次时,对比参数调整前、后的卷取机电流波形曲线。

令调整前波动峰值为 V_0 ,调整后波动峰值为 V_1 ,则调整后的波动量减少百分比 δ 为

$$\delta = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% \quad (3)$$

当 $V_0=20, V_1=17$ 时,估算 $\delta=15\%$;当 $V_0=20, V_1=16$ 时,估算 $\delta=20\%$ 。

由此推论,卷取机电枢电流的波动量减少了约 $15\% \sim 20\%$ 。同时,参数调整前卷取机的电流波形存在周期性的暗纹且峰值较高;调整后,周期性暗纹随之消失,系统稳定性进一步提高。

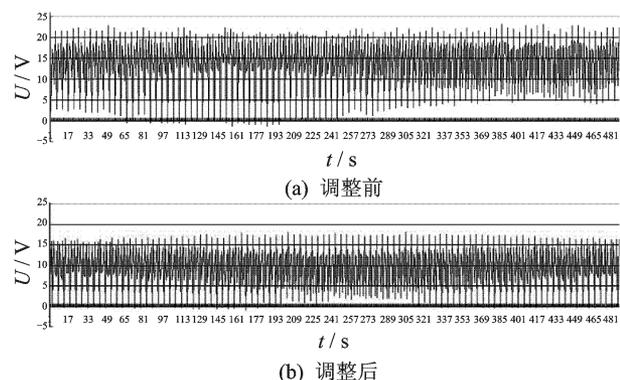


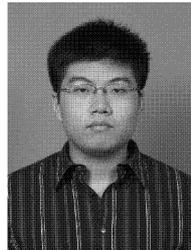
图14 主机参数调整前、后卷取机电枢电流波动对比

4 结束语

针对某厂冷板带轧机主机电流波动过大问题进行了前期理论分析和现场测试,通过霍尔传感器和示波器观察DCS800直流母排侧电枢电流波形,经分析计算后得出轧机电流波动原因主要在于传动系统的扭转振动及外来负荷扰动。由此,通过调整传动系统电流环比例系数及设置速度环反馈通道滤波时间常数,对轧机系统振动频率进行避让和遏制,降低了主机电流波动范围,提高了设备的生产效率,消除卷取窜层现象和减少产品厚度超差。

参 考 文 献

- [1] 邹家祥,徐江乐.冷连轧机系统振动控制[M].北京:冶金工业出版社,1998:1-22.
- [2] 唐华平,吴运新,段吉安,等.铝板带材轧机振动测试分析[J].振动、测试与诊断,2002,22(2):93-98.
Tang Huaping, Wu Yunxin, Duan Jian, et al. Analysis of vibration of aluminum strip hot rolling mill[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2002, 22(2):93-98. (in Chinese)
- [3] 范小彬,臧勇,王永涛,等.CSP轧机振动的测试与抑制[J].振动、测试与诊断,2007,27(2):156-158.
Fan Xiaobin, Zang Yong, Wang Yongtao, et al. Test and vibration suppression research of CSP rolling mill[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2007, 27(2):156-158. (in Chinese)
- [4] 杨旭,童朝南,孟建基.冷板带轧机含振动因素的轧制力模型[J].振动、测试与诊断,2010,30(4):422-428.
Yang Xu, Tong Chaonan, Meng Jianji. Mathematical model of rolling force in the analysis of cold rolling chatter[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4):422-428. (in Chinese)
- [5] Belli P, Bittanti S, De Marco A. On the origin of torsional vibrations in hot rolling mills and a possible remedy[J]. Transaction of ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2004, 126(4):811-823.
- [6] 孙一康.带钢冷连轧计算机控制[M].北京:冶金工业出版社,2002:79-83.
- [7] 吕金,朱传磊.陷波滤波抑制轧机扭振[J].电气传动,2008,38(6):8-11.
Lü Jin, Zhu Chuanlei. Trap filter control torsional vibration on rolling mills[J]. Electric Drive, 2008, 38(6):8-11. (in Chinese)
- [8] 李崇坚,段巍.轧机传动交流调速机电振动控制[M].北京:冶金工业出版社,2003:163-165.
- [9] Hori Y, Saeada H, Chun Y. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(1):162-168.
- [10] Kim J S, Yang I W, Kim Y K, et al. The vibration suppression control of the two-mass resonant system using H_{∞} filter[C]//Proceeding of the 24th Annual Conference of the IEEE industrial Electronics Society. Aachen, Germany:[s. n.],1998,3:1464-1470.



第一作者简介:杨旭,男,1983年11月生,讲师、博士后。主要研究方向为冶金机械动力学特性分析与控制方法、机械设备故障诊断与容错控制。曾发表《Coupling dynamic model and control of chatter in cold rolling》(《Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Transaction of ASME》2012, Vol. 134, No. 4)等论文。

E-mail: yangxu@ustb.edu.cn

通信作者简介:李江昀,男,1977年1月生,博士、副教授。主要研究方向为冶金过程自动化先进与智能控制,轧机机械、液压和电气引起的振动问题以及利用自动控制手段解决系统振动等。

E-mail: leeji@ustb.edu.cn