

官地水电站发电机转子组装机

程仕伟, 吕玉忠

(中国水利水电第七工程局有限公司机电安装分局 四川 彭山 620860)

摘要:为解决官地水电站超大型转子现场组装机工期长、工序繁多、工艺控制困难等问题,在介绍转子支架、磁轭结构特点的基础上,详细介绍了转子的组装机,包括转子支架组焊,副立筋配刨,磁轭装配,磁极挂装及调整等方面。实际运行情况表明官地水电站转子的装配工艺控制和改进措施成功有效,1号、2号机转子运行情况良好。

关键词:发电机转子;焊接变形;热加垫;磁极挂装;官地水电站

中图分类号:TV547.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-7647(2013)S2-0007-04

1 官地水电站转子特点

官地水电站转子主要由中心体、6个扇形支臂、磁轭和磁极组成,转子下部与发电机大轴、推力轴承相连,转子上部与上端轴通过法兰盘和连接螺栓相连,形成“立轴半伞式”结构。转子中心体和扇形支臂在现场组装机焊接成一体^[1]。磁轭外径为14 300 mm,磁轭高度为3 215 mm,由3 mm厚的热轧WDER650型钢片在现场叠装而成,热套于转子支架外侧,磁轭的外侧挂装60个磁极。转子的最大外径为14 938 mm,组装机后质量约为1 497.7 t。

1.1 转子支架结构特点

官地水电站发电机转子支架为斜立筋结构,需在工地现场与转子中心体间进行组装机焊接;转子中心体放置在中心体支墩垫板上,支墩与中心体无螺栓把紧,通过增减调整垫片的方式调整中心体水平;制动环采用加垫调整的方式把合在转子支臂制动环连接板的下平面;副立筋根据转子支架组装机后主立筋的实测半径和垂直度进行配刨,然后通过螺栓把合,再用焊接的方式与主立筋连成一体^[2]。转子支架结构参见图1。

1.2 磁轭结构特点

磁轭通过热加垫方式热套于转子支架外侧,通过磁轭凸键和磁轭副键传递径向力和切向力^[3],磁轭结构主要特点如下:①磁轭尺寸大。叠装机后磁轭半径为7 150 mm,高度为3 215 mm,磁轭质量为718 t。②叠片方式不同。磁轭设有2层通风槽片,以“逆

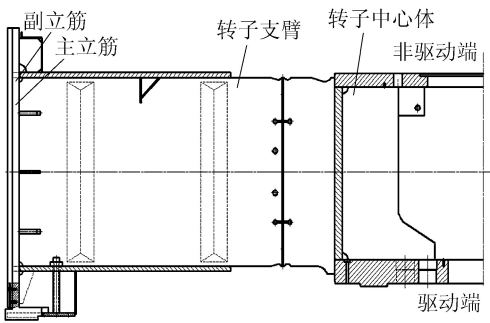


图1 官地水电站转子支架结构示意图

三顺四”的方式叠装(先俯视逆时针相错叠3层,再俯视顺时针相错叠4层),每4张片为1层,层间错开1个磁极距,自然形成通风沟,以增强磁轭的散热性能。③磁轭的径向水平采用补偿片调整,但周向波浪度调整无补偿片,叠片时严格按照“同层、同重量等级”的原则进行叠片。④压紧力矩逐步增大。磁轭分6次压紧,第一次压紧力矩为1 000 N·m,最后一次压紧力矩为3 150 N·m。⑤换装永久螺杆前需铣螺孔。磁轭预压完成后,需依次对600个直径为45.25 mm的螺孔进行铣削加工,然后逐一换成直径为45 mm的永久螺杆(永久螺杆装入螺孔后单侧间隙小于或等于0.125 mm),永久螺杆预紧力达490~530 kN,伸长值为5~5.5 mm。⑥为保证磁轭与转子支架间传力良好,永久螺杆换装完成后,需对24个磁轭键槽进行铣加工,以保证磁轭与凸键有75%以上接触面积。⑦与传统制动闸板装配于磁轭底部不同,官地水电站转子制动闸板装配于转子支架底部,通过加垫方式调整制动环安装高程、水平及

整圈波浪度。

1.3 磁轭与转子支架连接结构特点

a. 径向连接。转子磁轭键 24 对,磁轭键槽铣完后,测量磁轭键槽底部至副立筋槽底的距离 d ,然后计算热加垫垫片厚度(垫片厚度 = d + 胀量 - 凸键厚度)并制作垫片,最后将 24 根磁轭凸键放入键槽开始磁轭加热,胀量达到设计值后,迅速将垫片插入凸键背后,停止加温,缓慢冷却至室温,完成磁轭与转子支架的热套连接(径向连接)。

b. 周向连接。转子加温完成并完全冷却后,研磨磁轭副键(切向键),必须保证磁轭主、副键沿键长方向有均匀接触点。磁轭凸键两侧各有 1 根斜度为 1 : 200 的副键研配合格后打紧,转子旋转形成的绝大部分扭矩通过磁轭副键传递给磁轭,其余部分扭矩可通过磁轭凸键于转子支架的摩擦力传递。磁轭与转子支架连接方式见图 2,该连接结构能保证转子在正常运行和暂时过载工况下的圆度和同心度,做到不使转子重心偏移而产生振动且能有效地传递扭矩。

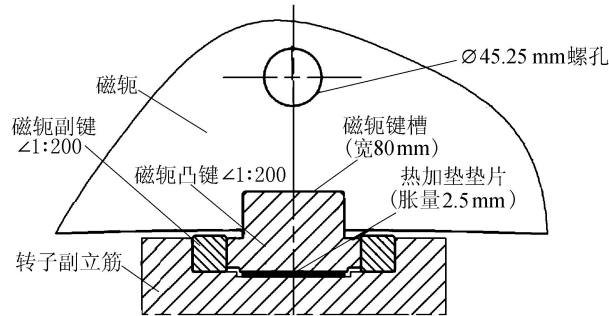


图 2 磁轭与转子支架连接方式

c. 磁极与磁轭连接结构特点。磁极与磁轭以单鸽尾方式进行连接,相接触的 5 个面均设计有不同规格的垫片,通过增减垫片方式调整磁极半径、垂直度以及间隙,合格后将磁极链条键打紧。为减小转子旋转时磁极线圈产生的弯曲应力,在每个磁极间设置绝缘撑块,在磁轭下压板上设有调整磁极高程用的顶丝。

2 转子组装工艺

2.1 转子组装工艺流程

官地水电站转子组装工艺流程(图 3)如下:转子支架组装焊接、副立筋配刨、副立筋装焊、磁轭叠压、磁轭热加垫、磁极挂装调整、转子引线和极间连线装配、附件安装及转子耐压试验。

2.2 转子支架组焊

a. 转子支架组装。根据厂家作业指导书及设计图纸,转子中心体摆放在中心体支墩的钢垫板上,用加垫方式调整中心体水平,设计理念为转子中心体是自由支承,靠重力保持稳定。但这种支承方式

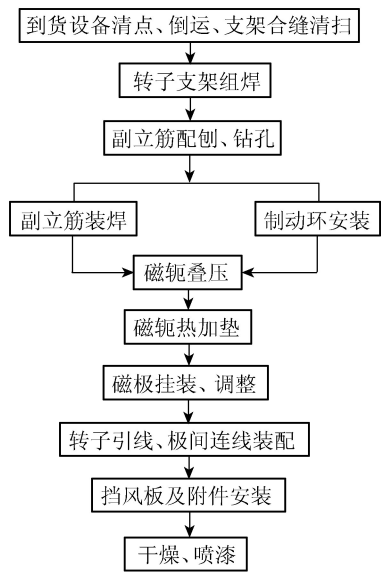


图 3 转子现场装配施工工艺流程

要求中心体四周受力必须完全均匀一致,否则一旦中心体受力发生改变,其水平必将受到影响。实际作业过程中,转子中心体受力要保持均匀极其困难,极易导致中心体水平发生变化。通过分析,决定对转子中心体采取传统刚性固定方式,强制保持其稳定,具体方法如下:采用 8 根 14 号槽钢按周向均布方式,一端先与地面预埋基础板进行可靠焊接,将另一端与调整水平的转子中心体立筋进行贴焊牢固,焊接过程中,始终用水平仪实时对转子中心体进行水平监控。中心体调整后,挂装扇形支臂。调整转子支架结构尺寸时,考虑支架焊接收缩,需将转子支架半径放大 5 mm,且保证各弦距均分。调整扇形支臂半径、弦距时,兼顾主立筋垂直度,使转子支架整体呈“上小下大”趋势。转子支架调整完成后,重新检查各主要尺寸,满足要求后依次对转子支架进行加固焊、定位焊和正式焊接。

b. 转子支架焊接。转子支架的焊接顺序为:工艺加强板焊接→定位焊→中心体与扇形支臂立缝焊接(24 条)→中环板径向缝焊接(6 条)→上环板径向缝焊接(6 条)→下环板径向缝焊接(6 条)→上挡风板焊接。焊接过程中主要控制中心体水平、转子支架半径、主立筋垂直度、弦距和挂钩水平在合格范围之内,其次兼顾立缝角变形和接头处错牙等情况。转子支架焊接主要控制尺寸如下:主立筋至中心的半径为 (6333 ± 3) mm,两个相邻的主立筋之间弦距为 (1653.24 ± 3) mm,磁轭挂钩处的平面度小于或等于 1.5 mm,主立筋垂直度小于或等于 0.15 mm/m,各合缝接头处错口小于或等于 2 mm。正式焊接时,根据不同的焊接变形采取相对应的焊接工艺。例如,在 3 号机转子支架定位焊后,转子支架半径收缩余量仅为 1.7 mm,正式焊接时,采用 $\varnothing 3.2$ 焊条,并

按照“小电流、多层多道”方式进行焊接,最终控制转子支架半径收缩量为 2 mm,比设计半径偏小 0.3 mm。另外,焊接过程中主立筋垂直度超标时,可采取由下往上或者由上往下“分段退步焊”方式降低收缩量。具体焊缝分段的方式、分段长度和电流大小等根据主立筋垂直度的具体情况而定。此外,在对合缝背面进行焊接时,由于刨开的坡口深且焊接量大,焊接时极易发生角变形情况,应采用小电流进行焊接。

c. 焊后处理。转子支架焊后如主立筋半径、弦距、垂直度超标,可以通过副立筋配刨方式予以弥补;若磁轭挂钩平面度超差,则通过堆焊或打磨的方式对其进行处理。焊后处理只是一种补救措施,在焊接过程中必须采取严格的焊接工艺控制焊接变形,尽量使转子支架各尺寸在合格范围之内。

d. 焊接控制要点。①每天检测转子支架变形量,根据检测变形方向和变形量的大小,随时调整焊接的工艺技术措施、工艺参数、焊接的程序。②尽可能按照“小焊条、小电流、分段退步、多层多道”的原则进行焊接,对焊缝间隙大于 8 mm 的焊缝采用镶边焊,尽量少采用大电流进行焊接。③控制预热温度,焊前对坡口及附近局部预热,控制焊缝内外部质量。预热温度不小于 80℃,层间温度不大于 150℃。

2.3 副立筋配刨

转子支架焊接完成后,根据主力筋垂直度和半径大小配刨副立筋,通过副立筋调整可优化转子支架绝对半径和垂直度^[4]。副立筋配刨完后再通过把合、焊接的方式固定于主立筋表面,其结构形式如图 4 所示。

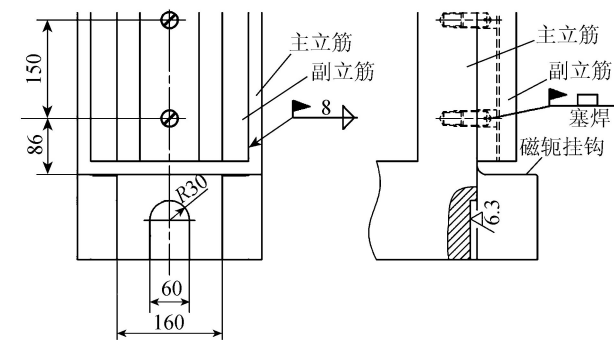


图 4 副立筋安装示意图(单位:mm)

官地水电站 1 号机转子副立筋加工完并用螺栓把紧在主立筋上后,测量其垂直度(上、中、下测量 3 个点),发现副立筋上下垂直度在 0.2 mm 以内,满足规范要求,但中间普遍存在凹陷情况(副立筋中间可能被多加工 0.5~0.7 mm),主要原因是副立筋加工时,只提供给加工人员 4 个角的切削量,中间的切削量是按照副立筋两头配刨量的平均值进行计

算。此种加工方法存在两大问题:①由于切削量等于副立筋毛坯实测厚度减去副立筋理论厚度,而副立筋毛坯加工精度较差,影响毛坯实测厚度的准确性,从而导致切削量不准确(副立筋理论厚度可通过电测法测量,误差小于或等于 0.05 mm,可忽略不计)。②副立筋中间位置加工量取两头平均值,没有考虑副立筋加工完之后厚度是否呈线性分布,进一步影响副立筋的加工误差。

官地水电站 2 号、3 号机副立筋配刨过程改变了副立筋加工工艺,即通过测量计算出副立筋所需理论厚度后,只提供加工人员副立筋理论所需厚度,避免了由测量毛坯件产生的测量误差。副立筋中间厚度按照两头理论厚度的平均值控制,保证了副立筋加工完成后加工面呈线性分布,不会出现中间部位凹凸不平的现象,保证了副立筋装焊后的直线度和垂直度。

2.4 磁轭装配

在磁轭叠装前需完成的准备工作如下:①复测转子中心体水平不大于 0.02 mm/m,如有必要可进行适当调整;②检查副立筋垂直度及弦距不大于 0.2 mm;③摆放磁轭支墩和下压板,通过调整支墩顶丝来调整下压板水平,合格后用 120 根钢筋对下压板进行加固,并对挂钩处用短钢筋及拉紧器进行加固,防止挂钩出现间隙;④在副立筋中间隔装入用于在叠片过程中对铁片起周向定位作用的 12 根凸键。

正式叠片时,采用长、短叠片销钉和磁轭凸键进行综合定位,磁轭叠高达 350 mm 时,装入整形定位专用楔形工具。磁轭高度每增高 100 mm 进行 1 次调圆和整形,每叠 500 mm 进行 1 次预紧,力矩达到要求后在磁轭每个磁极的内外侧各焊 1 根 $\varnothing 20$ 圆钢加固,而后松开预压螺杆继续叠片,在叠片过程中长叠片销钉随着磁轭往上升,短销钉则留在磁轭底部,防止下压板发生周向位移。

转子磁轭叠片方式采用“逆三顺四”方式,这种叠片方式不仅结构合理,磁轭的整体性得到增强,而且自身能形成通风槽,简化了磁轭结构。叠片过程中,控制好磁轭圆度和形状,对永久螺杆换装、键槽铣加工和磁极挂装等后续工作均有重要意义。

由于磁轭尺寸较大(半径 7150 mm,高度 3215 mm),磁轭冲片数量多,冲片的加工质量对磁轭叠装质量影响较大。在对磁轭冲片抽样测量时,发现所有铁片中间较两侧厚(约 0.02 mm),为保证磁轭压紧后磁轭层间不产生间隙,在磁轭压紧过程中,采用在磁轭内外侧添加补偿片的方法,控制磁轭内外高差在 5 mm 之内。具体方法如下:通过磁轭叠装高度,计算出需要增加的补偿片层数,再计算出每次压紧高度需增加的补偿片层数。在补偿片叠装过程中,2 个相邻

的补偿片间应保留至少 1 mm 左右的间隙,严禁搭接,否则会影响磁轭叠装的整体效果。最后根据上一段磁轭压紧后的高差情况,在下一段叠片过程中增加或减少磁轭补偿片,以提高磁轭叠片安装质量。添加补偿片不仅可以调整磁轭内外高差,还可以增加磁轭密实度,改善压紧效果。

转子磁轭压紧时原则上按照中间—内侧—外侧的顺序,对称、跳跃逐步拧紧,跳跃间隔 2 个磁极,压紧时允许用铜锤进行锤击,使冲片服帖振实。压紧过程中根据磁轭高度适当调整压紧顺序,应先压磁轭高度最高位置的螺杆。每个磁极对应位置螺杆的压紧编号示意图见图 5(说明:每次先压图中编号为 1 的螺杆,中间间隔 2 个磁极位置,待所有编号为 1 的螺杆压紧完毕后,再压紧编号为 2 的螺杆,依次类推)。

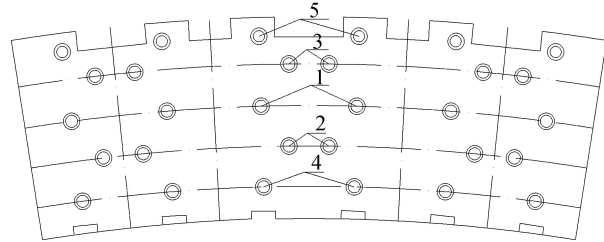


图 5 螺杆压紧编号示意图

当磁轭达到设计高度且压紧完成后,用圆铣刀对螺孔逐一铣孔,然后换装永久螺杆,并进行液压拉伸。永久螺杆换装完毕后对所有螺杆拉伸一次,使各个螺杆受力均匀,可防止螺杆漏压的情况。为保证在磁轭永久螺杆换装过程中不影响磁轭的压紧以及磁轭的圆度,必须按照更换一根压紧一根再松开一根的方式更换。

为使转子支架与磁轭间受力良好,在永久螺杆换装完成后,需对磁轭键槽进行铣削,通过吊车拉铣的方式,使凸键装与磁轭接触面积在 75% 以上,键槽铣加工合格后再将所有凸键放入键槽,拆除磁轭支墩,准备磁轭热加垫,使磁轭与转子支架形成整体。

2.5 磁极挂装及调整

磁极挂装前,将磁轭外表面上所有高点打磨干净,仔细检查磁极铁芯表面有无铁片突出,确保挂装后磁极与磁轭接触面贴实。

根据转子热加垫后磁轭的圆度和半径,可计算出各个磁极的加垫量(图 6),每个磁极挂装前先将 A、E 两处垫片点焊在磁极背部,然后在挂装时加入 B、D 处垫片,链条键从 B 处放入并打紧,检查磁极 A、B、D、E 垫片与磁轭接触面有无间隙,如有间隙则通过加减垫片的方式进行调整,直至无间隙(局部允许 0.5 mm 间隙);最后插入 C 垫片,此垫片不做具体要求,塞实即可。垫片有多种规格,可调整转子圆度、空气间隙。

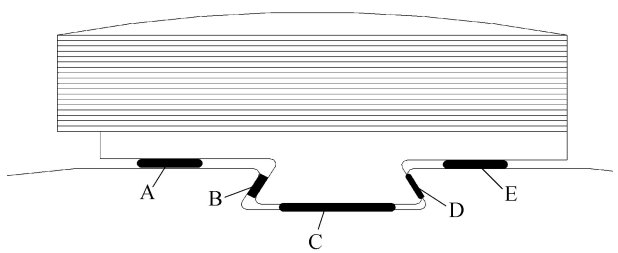


图 6 磁极加垫示意图

磁极挂装后通过下压板上的磁极顶丝调整磁极高程,合格后再将楔形键打紧,使磁极固定在磁轭鸽尾槽中。磁极楔形键呈锯齿形,磁极键斜率较大,适合长铁芯磁极且打键容易。磁极键打紧后复查转子半径、垂直度,对个别数据超标的磁极拔出检查,重新检查磁轭、磁极接触面有无高点,重新确定加垫量,直至转子圆度合格。最后,安装磁极键压板、极间支撑、磁极挡风板和其他附件,完成后清扫并喷绝缘漆。

3 结 语

目前官地水电站 1 号、2 号机转子装配已经结束,转子装配工艺控制和改进措施成功有效,运行情况良好,该工程转子的组装机工艺可为国内同类大型转子装配施工提供借鉴。

- a. 转子圆盘支架的尺寸控制靠焊接来保证,焊前调整需放大转子支架几何尺寸,所有对接缝采用约束焊减小焊接变形,焊接过程中需加强数据的测量采集,并根据数据适时调整焊接工艺,以控制焊后尺寸。
- b. 转子支架在调整过程中,需根据焊接收缩变形预先放大组装尺寸,这样将导致焊缝加大,焊接工作量及调整工作量也相应加大。
- c. 在实际施工过程中,转子中心体的无约束自由状态,相对传统的刚性固定方式,存在较大的实施困难,建议采用更利于施工控制的传统方式。
- d. 转子装配施工控制工艺繁琐、复杂,实施过程中必须加强过程控制,为提高效率并满足工期和质量要求,应根据具体实施情况适当改进工艺。

参考文献:

[1] 邓惠文,谢明李,曹虎,等. 直驱永磁同步风力发电机转子位置测量的研究[J]. 电工电能新技术,2013,32(3): 31-35.

[2] 柳永香. 广蓄二期工程发电机转子组装机工艺[J]. 云南水力发电,2006,22(4): 76-77.

[3] 徐立志. 万家寨水电站发电机转子组装机工艺探讨[J]. 水电站机电技术, 2001(5): 14-16.

[4] 尚培轩. 水轮发电机转子支架配刨副立筋的工艺方法[J]. 防爆电机:工学版,2013,48(4): 55-56.

(收稿日期:2013-07-22 编辑:骆超)