

钢筋顶弯机设计应用于地铁管片预制

贾良飞

(中交三航局第六工程(厦门)有限公司 福建 厦门 361000)

摘要: 顶弯成形是一种节材节能的金属成形工艺,顶弯机能耗少、制造成本低、用途广泛,可对各种异型钢材进行顶弯处理,是一种高效的加工设备。针对现有顶弯机存在的问题,本文提供一种弧形钢筋顶弯装置设计,设计包括钢筋顶弯机整体设计、电气控制系统设计、液压系统设计。本顶弯机可顶额定载荷范围内各种大小钢筋、管材等,在顶弯不同大小的钢筋时,只需核算顶弯力,调至相应工作压力即可。本顶弯机工作可靠,操作方便,可用于地铁、隧道等管片钢筋加工,达到设计目的。

关键词: 热轧带肋钢筋; 液压缸; 顶弯

1 设计背景

在地铁管片制作过程中,管片环向拼接由圆弧螺栓连接,圆弧螺栓孔在管片预制时,首先进行套弯管预埋;在管片钢筋笼加工制作时,圆弧螺栓预埋式弯管处需要钢筋笼主钢筋进行避让;在钢筋笼加工时,钢筋笼主钢筋弯管部位需要弯曲成近似 Ω 的形状,在弯曲的同时要避免钢筋笼主钢筋变形。

而目前市场上现有的钢筋弯曲设备中,钢筋弯曲机试弯过程中弯曲弧度难以控制,钢筋弯弧质量不稳定,改变了钢筋笼主钢筋原有形状,不能满足设计图中一次成形两侧带有圆角圆弧的顶弯需求。由于钢筋笼主钢筋是弧形的,钢筋长度较长,现有的钢筋弯曲机在弯曲弧形主钢筋时,弧形主钢筋会扫过较大面积,钢筋弯曲机的两侧要求有较大的空间,占用场地,同时容易对作业人员造成伤害。此外,现有的钢筋弯曲设备也达不到技术要求。

本设计的目的在于提供一种弧形钢筋顶弯装置,以解决现有钢筋弯曲设备无法实现要求的问题。

2 顶弯机的外形和结构设计

本顶弯机设计机架采用焊接结构,具有强度高、工作稳定的特点。顶弯机结构示意图如图1所示。工作台上设有顶弯主油缸和两组推辊及四组导向辊。主油缸与两组推辊相对设置,且主油缸位于两组推辊连线的中轴线上。主油缸与推辊之间放置钢筋工件,主油缸活塞杆头连接一圆柱形顶推头,顶着钢筋工件向两组推辊方向移动,钢筋长度方向沿导向

辊由两侧向中间移动弯曲,达到与外形尺寸相符的要求。顶升油缸设计安装于工作台机架底部,与顶升装置可拆卸连接,用于钢筋顶弯完毕后工件的取出。顶升装置设计有两平衡导向板,两平衡导向板一端连接在顶升油缸活塞杆头上,工作面板上设置有导向孔,在顶升油缸驱动下导向板沿着导向孔向上顶出弯曲好的钢筋工件。导向辊呈弧形分布在主油缸同一侧钢筋工件长度方向上,起到防止钢筋工件在顶弯时两端反向变形及导向作用。

3 液压系统设计

3.1 负载分析

管片钢筋笼设计图中一次成形两侧带有圆角圆弧的钢筋顶弯,热轧带肋钢筋^[1],牌号为HRB400E,直径 $\phi 28\text{mm}$,通过查询钢材生产厂家信息,屈服强度 $\sigma_s: 460\text{MPa}$,抗拉强度 $R_m: 635\text{MPa}$,延伸率 $\delta_p: 13.3\%$ 。弯曲成半圆形状半径 80mm ,顶弯时两推辊中心位置间距为半圆直径加钢筋直径加推辊直径,长度为 $160\text{mm}+28\text{mm}+$ 推辊直径,初步设定为 250mm ,主油缸行程必须大于 80mm ,在两推辊连线中点上施加一水平顶弯推力 F 使钢筋弯曲,弧形钢筋弯曲尺寸图、负载受力分析图分别如图2、图3所示。

3.1.1 弯矩计算

根据钢筋弯矩计算公式:

(1) 达到屈服极限时的始弯矩:

$$M_0 = K_1 W \sigma_s = 1.7 \times 2154.04 (\text{mm}^3) \times 460 (\text{N/mm}^2) = 1684.46 (\text{Nm}) \quad (1)$$

式中: M_0 —始弯矩;

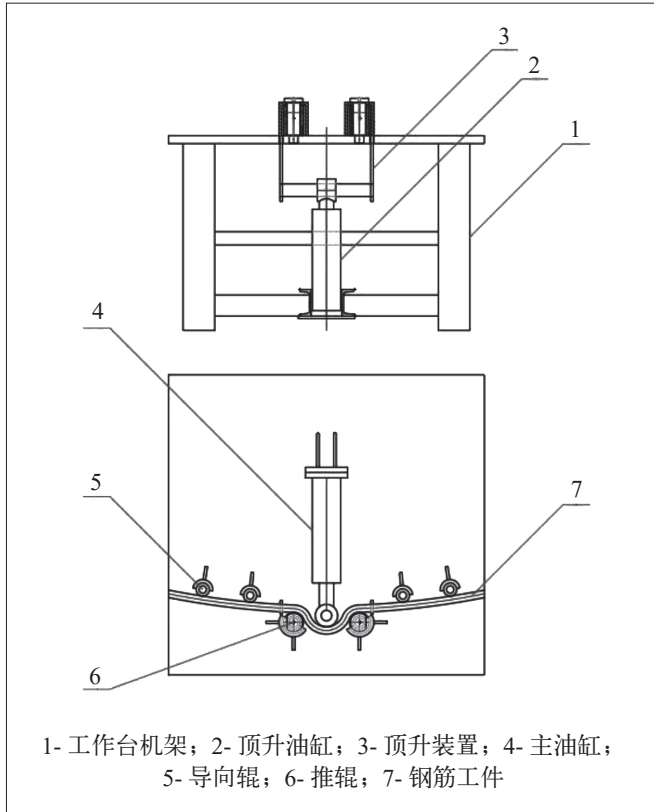


图 1 顶弯机结构示意图

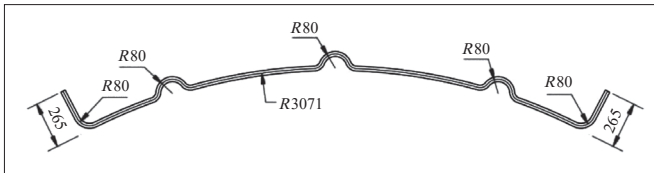


图 2 弧形钢筋弯曲尺寸图

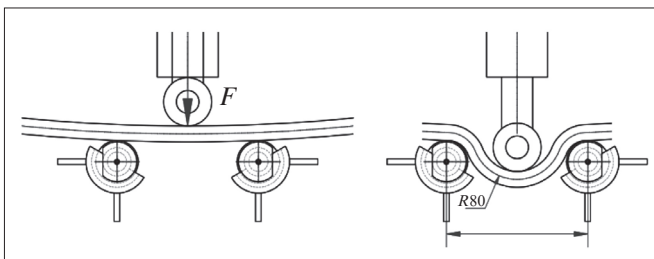


图 3 负载受力分析图

K_1 — 截面系数, 对于圆截面, 取 $K_1=16/3\pi=1.7$;

W — 抗弯截面模数^[2], 取 $W=\pi d^3/32=3.14 \times 28^3/32=2154.04 \text{ (mm}^3\text{)}$;

σ_s — 屈服强度, 取 $\sigma_s=460 \text{ (MPa)}=460 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ 。

(2) 钢筋变形硬化后的终弯矩:

$$M_1 = (K_1 + K_0/2R_x) W \sigma_s \quad (2)$$

式中: K_0 — 强化系数;

R_x — 相对直径。

强化系数 K_0 计算公式如下:

$$K_0 = E / \delta_p = 2 / 0.133 = 15.04 \quad (3)$$

式中: E — 弹性模量^[3], 取 $E=2$;

δ_p — 延伸率。

相对直径 R_x 计算公式如下:

$$R_x = R / d_0 = 3d_0 / d_0 = 3 \quad (4)$$

式中: R — 弯心半径, 取 $R=3d_0$ 。

将公式 (3)、(4) 代入公式 (2) 可得: $M_1 = (1.7 + 15.04/2 \times 3) \times 2154.04 \text{ (mm}^3\text{)} \times 460 \text{ (N/mm}^2\text{)} = 4171.51 \text{ (Nm)}$ 。

(3) 钢筋弯曲所需弯矩:

$$\begin{aligned} M &= [(M_0 + M_1)/2] / K \\ &= [(1684.46 + 4171.51)/2] / 1.05 = 2788.56 \text{ (Nm)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: K — 弯曲时的滚动摩擦系数, 取 $K=1.05$ 。

3.1.2 弯曲力计算

弯曲力的大小与钢筋尺寸、钢筋力学性能、推辊支点间的距离、相对弯曲半径、弯曲方式等因素有关, 通常是采用经验公式或经过简化的理论公式计算。

$$\begin{aligned} F &= 0.6KdR_m / R \\ &= 0.6 \times 1.3 \times 28 \times 635 / 80 = 173.355 \text{ (MPa)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: K — 安全系数, 取 $K=1.3$;

d — 弯曲钢筋直径, 取 $d=28\text{mm}$;

R_m — 材料抗拉强度, 取 $R_m=635\text{MPa}$;

R — 弯曲半径, 取 $R=80\text{mm}$ 。

3.2 液压缸主要参数的确定

按主机类型选择设计压力^[4], 预选液压缸的设计压力 $P_1=30\text{MPa}$, 将液压缸的无杆腔作为主工作腔, 选取缸的机械效率 $\eta_{cm}=0.91$, 则液压缸无杆腔的有效面积为:

$$\begin{aligned} A_i &= F_{\max} / \eta_{cm} P_1 \\ &= 173355 \text{ (N)} / 0.91 \times 30 \text{ (N/mm}^2\text{)} = 6350 \text{ (mm}^2\text{)} \end{aligned} \quad (7)$$

液压缸内径 (活塞直径):

$$D = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 6350}{3.14}} = 89.94 \text{ (mm)} \quad (8)$$

本文将液压缸内径调整为标准值 $D=80\text{mm}$ 。

杆径比 $\phi=d/D$ 可按压力选取。当压力 $\geq 7\text{MPa}$ 时, 杆径比 $\phi=d/D=0.7$, 则活塞杆径 $d=0.7D=0.7 \times 80=56\text{mm}$, 取标准值 $d=56\text{mm}$, 从而可

算得液压缸实际有效面积为:

无杆腔面积:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} \times 8^2 = 50.24 \text{ (cm}^2\text{)} \quad (9)$$

有杆腔面积:

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \times (8^2 - 5.6^2) = 25.622 \text{ (cm}^2\text{)} \quad (10)$$

活塞杆面积:

$$A = A_1 - A_2 = 24.618 \text{ (cm}^2\text{)} \quad (11)$$

3.3 液压原理图的拟定

考虑到顶弯机需顶弯 HRB400E 热轧带肋钢筋 $\phi 28\text{mm}$, 所需功率大, 故采用手动变量轴向柱塞泵供油, 液压缸的运动方向采用三位四通电磁换向阀或手动换向阀控制, 停机时多路换向阀处于中位, 中位选用 O 型机能, 压力油通过多路换向阀内部安全溢流阀卸荷。泵出口位置设有用于系统安全保护的溢流阀; 一个压力表和它的开关设置在泵的出口处, 用来测量系统压力。拟定的顶弯机液压原理图如图 4 所示。

3.4 液压元件的选择

3.4.1 液压泵及其驱动电动机的选择

液压缸的最高工作压力出现在加压顶弯阶段, 计算泵的最高工作压力 p_p :

$$p_p = p_1 + \Delta P = 30 + 0.5 = 30.5 \text{ (MPa)} \quad (12)$$

式中: p_1 — 液压缸的最高工作压力, 取 $p_1 = 30\text{MPa}$;

ΔP — 泵至液压缸之间进油路压力损失, 取 $\Delta P = 0.5\text{MPa}$ 。

与相近钢筋弯曲机械相类比^[4], 设定液压缸的快进、快退的速度相等, 且 $v_1 = v_3 = 80\text{mm/s}$ 。

液压缸的输入流量计算如下:

$$q_{\text{快进}} = A v_1 = 24.618 \text{ (cm}^2\text{)} \times 8 \text{ (cm/s)} = 196.944 \text{ (cm}^3\text{/s)} = 11.817 \text{ (L/min)} \quad (13)$$

$$q_{\text{快退}} = A_2 v_3 = 25.622 \text{ (cm}^2\text{)} \times 8 \text{ (cm/s)} = 204.976 \text{ (cm}^3\text{/s)} = 12.299 \text{ (L/min)} \quad (14)$$

液压泵最大供油量 q_p 按照液压缸的最大输入流量进行估算, 取泄漏系数 $K = 1.1$, 则: $q_p \geq q_v = 1.1 \times 12.299 \text{ (L/min)} = 13.529 \text{ (L/min)}$ 。

根据系统所需流量, 选取转速, 计算液压泵的排量为:

$$V_g = \frac{1000 q_v}{n \eta_v} = \frac{1000 \times 13.529}{1500 \times 0.9} = 10.02 \text{ (mL/r)} \quad (15)$$

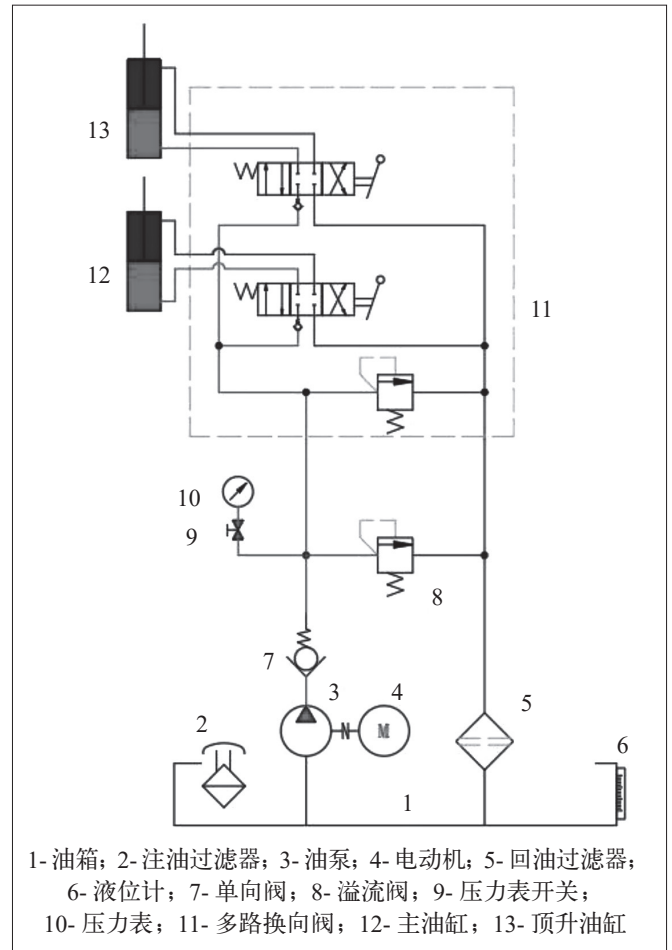


图 4 顶弯机液压系统原理图

式中: n — 转速, 取 $n = 1500\text{r/min}$;

η_v — 泵的容积效率, 取 $\eta_v = 0.9$ 。

根据以上计算结果, 选用型号为 SCY14-1B 的手动变量轴向柱塞泵, 选用的柱塞泵额定压力 31.5MPa , 公称排量 $V = 10\text{mL/r}$, 额定转速 $n = 1500 \text{ r/min}$, 容积效率 $\eta_v = 0.94$ 。所选泵额定流量为:

$$q_p = V n \eta_v = 10 \times 1500 \times 0.94 = 14100 \text{ mL/min} = 14.1 \text{ L/min} \quad (16)$$

额定流量大于计算所需液压泵最大供油量 q_p , 选取符合要求。

电动机所需功率为:

$$P_p = \frac{p_p q_p}{\eta_p} = \frac{30.5 \times 14.1}{0.9 \times 60} = 7.96 \text{ (kW)} \quad (17)$$

式中: η_p — 选取泵的总效率, 取 $\eta_p = 0.9$ 。

因此, 选用 YE 系列 YE3-132M-4 三相异步电动机, 功率 11kW , 转速 1440r/min 。根据所选电动机

的转速和所选液压泵的排量，计算液压泵的最大实际流量为：

$$\begin{aligned} q_t &= nV\eta_v = 1440 \times 10 \times 0.94 \\ &= 13536 \text{ mL/min} = 13.536 \text{ (L/min)} \end{aligned} \tag{18}$$

最大实际流量大于计算所需液压泵最大供油量 $q_p = 13.529 \text{ L/min}$ ，满足使用要求。

选用的液压泵结构示意图见图 5。油泵采用支座安装，在油箱盖上设置安装板材或支座，泵机与电动机同时安装在油箱盖上。泵的传动轴与电动机输出轴向的同轴度误差 $\leq \phi 0.05 \text{ mm}$ ，泵与电机输出轴间采用弹性联轴器连接。油泵吸油管道内径 $\geq \phi 16 \text{ mm}$ ，出口管道内径 $\geq \phi 13 \text{ mm}$ ，回油口管道内径 $\geq \phi 8 \text{ mm}$ 。油泵的泄油管直接与油箱相连，选用 N46 抗磨液压油。

3.4.2 油箱及辅件的选择

液压阀选用型号 ZD-L20-2T 多路换向阀。由于开式油箱应用广泛、利于散热，选用开式油箱。在油箱顶部加油口设置空气滤清器，油箱内泵的吸油口尽量远离回油口，便于油液长距离循环散热。吸油管应插入靠近油箱底部，以免发生吸空及回油冲溅产生气泡。油箱底部应设置排污孔，使换油时脏油能从排污孔流出。为了能够观察油箱液位高度，设置液位计。油箱内壁喷砂处理清除焊渣和铁

锈，清理干净后采用磷化处理，整个系统应清洗干净。

4 电控系统设计

本机采用三相交流 380V，50Hz 供电，控制电路电压 220V。本机设计电气控制箱及按钮操作手柄，操作手柄选用 8 档行程按钮开关，信号指示灯设置在电控箱面板上，电气箱内部配有小型断路器、交流接触器、热继电器、中继电器等多种控制元件。为完成钢筋的顶弯工艺，要求主油缸能实现“快进—工进—快退—停止”的工作循环；要求顶升油缸实现“顶出工件—向下退回停止”的动作循环。

电磁铁数量为 4 个，电磁铁线圈电压选用 220V AC。主油缸换向电磁铁设定为 YA1、YA2，顶升油缸换向电磁铁设定为 YA3、YA4。顶弯机完成一个工艺动作，电磁铁得（失）电情况：YA1 得电（主油缸伸出）→ YA1 失电，YA2 得电（主油缸退回）→ YA3 得电（顶升油缸顶出）→ YA3 失电，YA4 得电（顶升油缸退回）。根据电磁铁通断电情况，设计电气控制原理图如图 6 所示。

根据图 6，分析电气控制原理：合上开关 QF，控制回路已接通电源，按下 SB2 按钮，KM 接触器通电并自锁，油泵电动机通电启动。放置好待顶弯

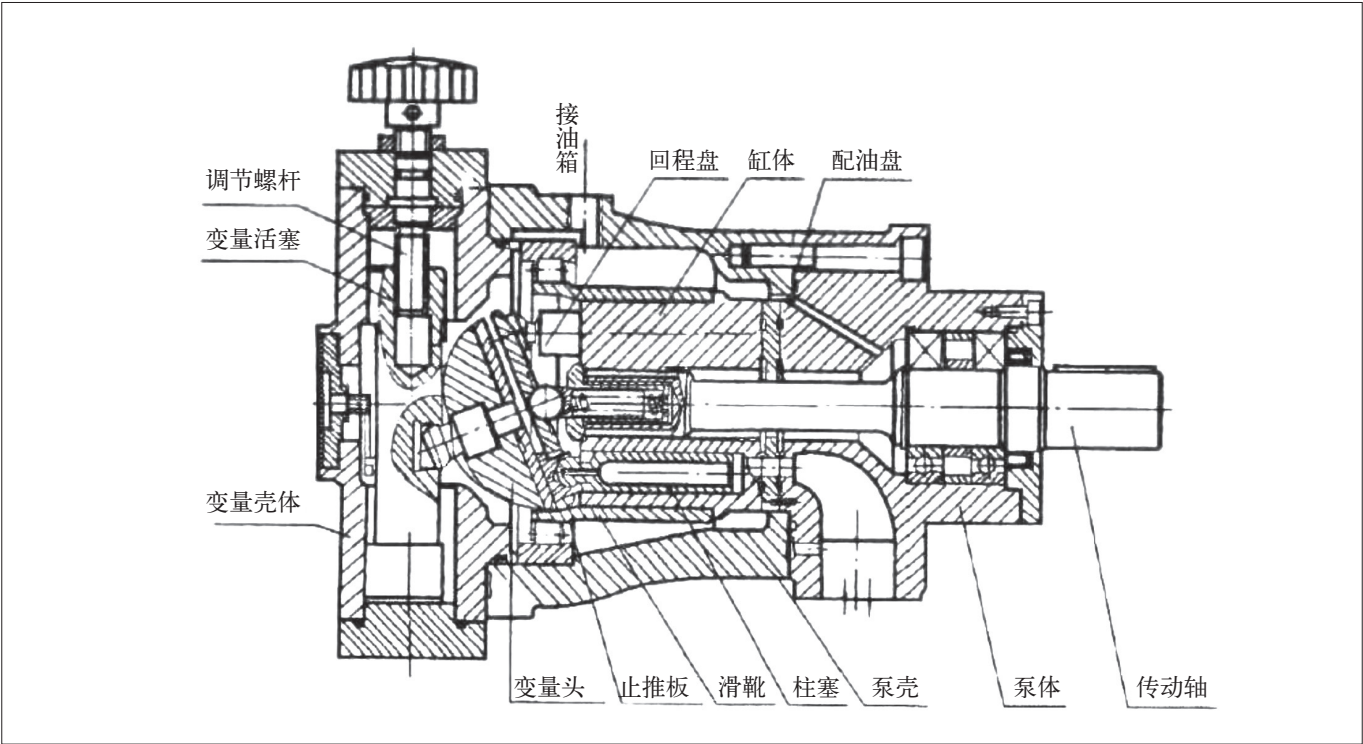


图 5 选用液压泵结构示意图

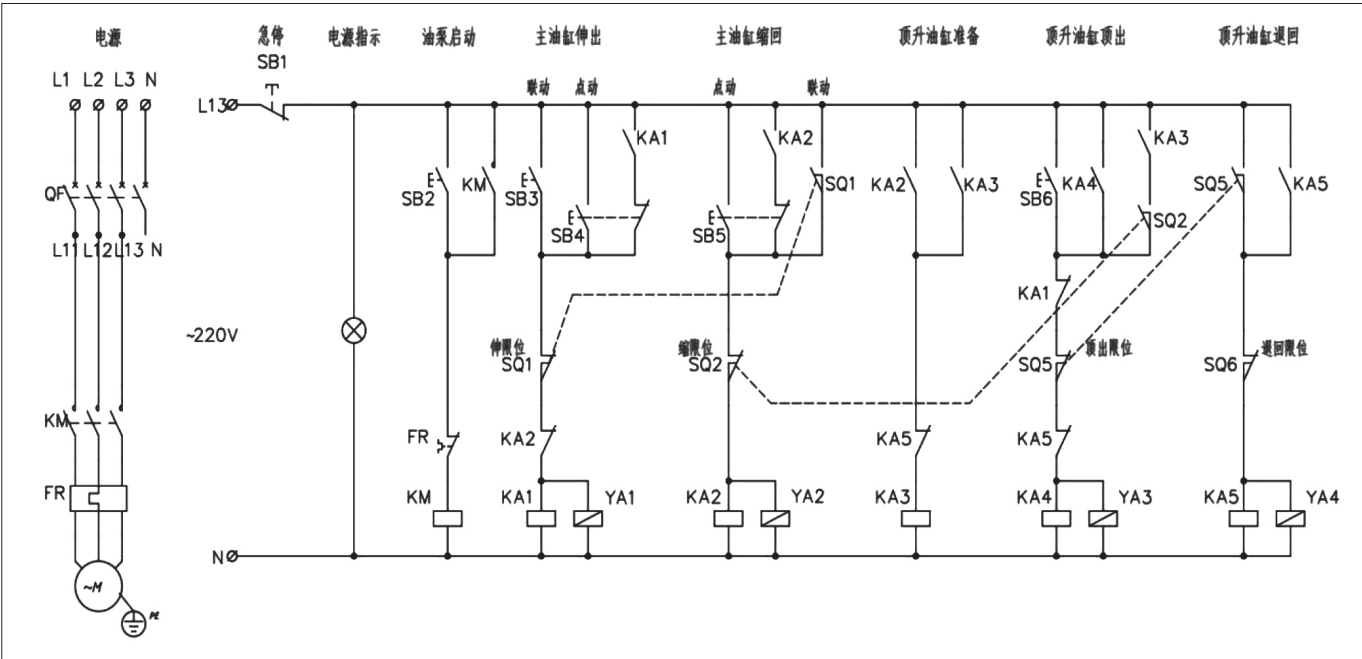


图 6 顶弯机电气控制原理图

的弧形钢筋后，按下 SB3 按钮，KA1 中间继电器通电并自锁，电磁铁 YA1 得电，主油缸伸出顶弯工件，顶弯到位后碰触主油缸伸限位 SQ1 使其断开，KA1 断电复位，YA1 失电，同时 SQ1 限位常开触点闭合，中间继电器 KA2 通电并自锁，电磁铁 YA2 得电，主油缸退回。此时钢筋工件已顶弯好，卡在导向辊与推辊之间，等待顶升油缸将其顶出。KA2 常开触点闭合，中间继电器 KA3 通电并自锁，顶升油缸已做好准备顶出，当主油缸全部退回触碰到缩限位 SQ2，SQ2 常闭触点断开，KA2、YA2 断电，SQ2 常开触点闭合，中间继电器 KA4 通电并自锁，电磁铁 YA3 得电，顶升油缸顶出钢筋工件。顶升油缸伸出碰触极限位 SQ5，SQ5 常闭触点断开，KA4、YA3 断电，SQ5 常开触点闭合，中间继电器 KA5 通电并自锁，电磁铁 YA4 得电，顶升油缸退回，工作循环结束。

5 零部件推辊的设计

主油缸与两组推辊相对设置，且主油缸位于两组推辊连线的中轴线上，钢筋工件放置在主油缸与推辊之间，主油缸活塞杆头部连接一圆柱形顶推头，顶着钢筋工件朝两组推辊方向移动，两推辊固定在工作台面上，给钢筋工件反向支撑力。钢筋沿推辊从两侧向中间移动弯曲时，会与推辊发生摩擦，为减轻摩擦造成的推辊损坏，将推辊易损件设计成可

更换的件。当其与钢筋发生滚动摩擦，减少对推辊单边固定磨损造成损坏。

在工作台面上直接钻孔，固定轴一端直接插入孔内，另一端通过固定支座中心定位孔固定，固定支座底部外圈与工作台面焊接固定。在固定轴外圈套上一滚动套与钢筋接触，当滚动套磨损时，只需将固定轴抽出即可更换。固定轴沿中心轴线钻黄油通道孔，径向上钻一小孔，尾端上部设置一黄油嘴，加注润滑油进行润滑，使滚动套在固定轴上能灵活转动。当顶弯钢筋时，钢筋沿着推辊朝液压缸伸出方向延展，与推辊滚动套发生滚动摩擦，降低推辊磨损情况。设计示意图如图 7 所示。

6 结语

在地铁管片钢筋笼制作时，钢筋笼主钢筋在弧形螺栓预埋弯管处需进行避让，弧形主钢筋避让位置需加工近似成 Ω 形状，现有钢筋加工设备无法实现，市场上也未发现有现成能加工该位置形状的设备，为了保证钢筋笼正常生产，克服现有技术中存在的问题，本文研究设计了新型钢筋顶弯机的技术方案，其效率高，顶弯钢筋尺寸准确，解决了管片钢筋笼主钢筋弯管部位弯曲形状现有钢筋弯曲设备无法实现的问题，达到了设计目的。加工好的钢筋照片如图 8 所示。

利用本文设计的新型钢筋顶弯机，弧形主钢筋生产效率得到提高，降低了工人的劳动强度，提高

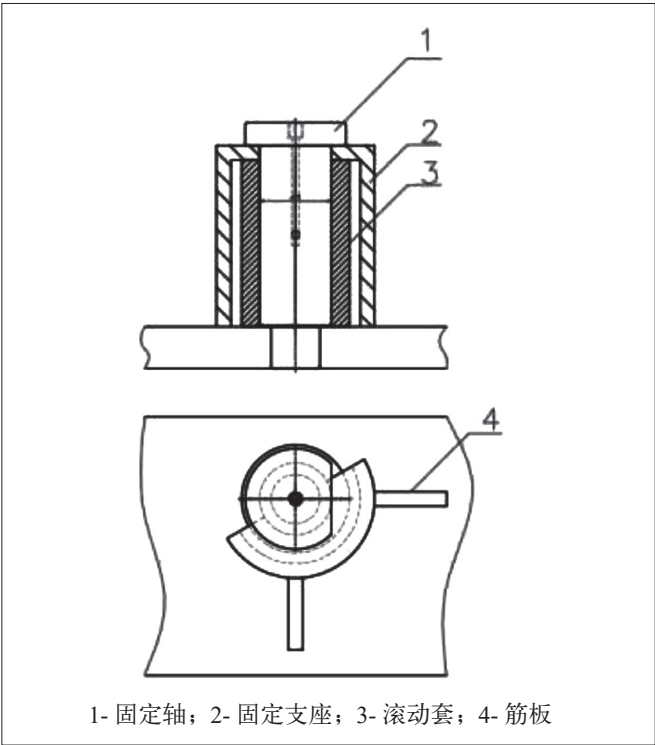


图 7 推辊结构示意图

了钢筋加工精度，操作过程安全。通过强度计算分析，改变个别零部件及电动机功率即可大幅提高加工能力。本顶弯机工作可靠，操作方便，可用于地铁、隧道等管片钢筋加工。本机不仅工作可靠、体积小巧、功能齐全、操作简便、生产效率高，而且加工的钢筋弧型优美、精确度高、稳定性好，顶弯后不变形，是目前比较理想的顶弯设备。

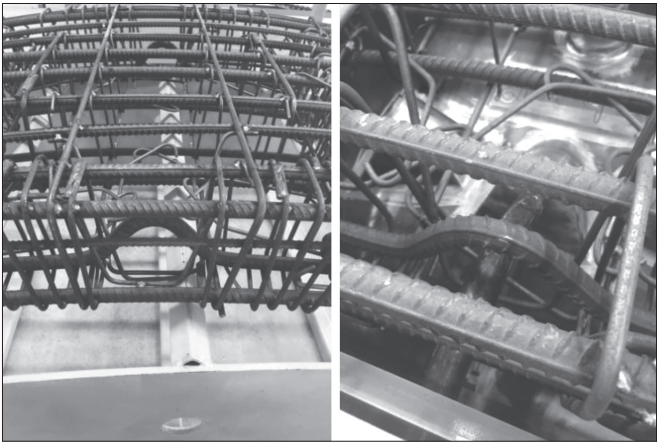


图 8 顶弯成形钢筋安装图

参考文献：

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会．钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋：GB/T 1499.2-2018[S]．北京：中国标准出版社，2018:3.

[2] 孙训方，方孝淑，关来泰．材料力学 I [M].6 版．北京：高等教育出版社，2019:123.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局．混凝土结构设计规范：GB 50010-2010[S]．北京：中国建筑工业出版社，2015:25.

[4] 张利平．液压传动系统设计及使用 [M]．北京：化学工业出版社，2013.

作者简介: 贾良飞 (1986.09-)，男，汉族，湖南益阳人，本科，工程师 / 一级建造师，研究方向：机电技术应用、电气自动化。