

# 基于模糊预估的驱动轮轴自锁螺栓定位装配系统\*

王国峰<sup>1</sup> 范云生<sup>1</sup> 赵永生<sup>1</sup> 谢商敏<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学信息科学技术学院, 大连 116026; 2. 第一拖拉机股份有限公司第三装配厂, 洛阳 471004)

**摘要:** 为了实现拖拉机驱动轮轴的自动化装配, 提出了自锁螺栓拧紧装配模糊预估的控制方法。根据螺栓拧紧特性对预紧力、扭矩和角度进行预估, 用嵌入式装配控制器对拖拉机驱动轮轴总成装配中的自锁螺栓进行拧紧控制, 结合光纤传感检测和机械设计技术进行锁片定位装置及其辅助装置的设计。智能化模糊控制算法的运用, 完成了对驱动轮轴总成的轴向预紧力、自锁螺栓的扭矩及角度定位多变量目标的模糊智能控制。经实际生产验证, 该系统解决了带有锁片定位功能的自锁螺栓装配问题, 并且系统具有很高的预测准确率, 提高了生产效率和产品质量。

**关键词:** 驱动轮轴 自锁螺栓 定位装配系统 模糊预估控制

**中图分类号:** TG95; S219.032.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0293-06

## Positioning Assembly System for Self-locking Bolt of Driving Wheel Axle Based on Fuzzy Prediction

Wang Guofeng<sup>1</sup> Fan Yunsheng<sup>1</sup> Zhao Yongsheng<sup>1</sup> Xie Shangmin<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

2. Department of The Third Assembly Plant, The First Tractor Co., Ltd., Luoyang 471004, China)

**Abstract:** With the realization automation assembly for the tractor of driving wheel axle, the control method of fuzzy prediction was proposed for self-locking bolt tightening assembly. According to the bolt tightening characteristic, the clamping force, torque and angle were predicted, and the self-locking bolt tightening process for the tractor of driving wheel axle assembly were controlled by using the embedded assembly controller. Moreover, the positioning device of lock blade and assist device were designed with combining the technology of fiber optical sensor detection and mechanical design. By the application of intelligent fuzzy control arithmetic, the multivariable target fuzzy intelligent control for axial pre-tightening force, self-locking bolt tightening torque and angle position of driving wheel axle were achieved. Verified by the actual production process, a self-locking bolt assembly question with the function of lock blade positioning was resolved. It had higher prediction accuracy and improved the assembling quality and efficiency.

**Key words:** Driving wheel axle Self-locking bolt Positioning assembly system Fuzzy prediction control

### 引言

目前, 先进的装配制造技术在拖拉机的生产装配线上逐渐被应用<sup>[1]</sup>。提高我国的拖拉机整车和

零部件的装配性能、装配质量和装配效率是当务之急<sup>[2]</sup>。

由于受到拖拉机装配制造中的多种条件限制, 带有定位等特殊装配工艺的驱动轮轴自锁螺栓装配

是众多拖拉机生产企业难以解决的问题<sup>[3-4]</sup>。传统的装配方法是利用气动冲击扳手拧紧自锁螺栓,装配操作者根据经验手动调整自锁螺栓和定位锁片的位置,这种方法劳动强度高,精确度低,生产效率低<sup>[5]</sup>。随后提出的多种改进方法依然不理想,产品一次性合格率较低,而且还要靠装配工人的经验重新对位,质量难以保证。这些方法都不适合拖拉机现代化装配制造生产线对装配效率和装配质量的要求。

为此,本文在自锁螺栓拧紧装配控制系统的设计中,引入模型预估和智能模糊控制相结合的定位方法,根据装配工艺特性对螺栓拧紧时产生的预紧力、扭矩、角度进行预估,对拖拉机驱动轮轴总成的轴向预紧力、自锁螺栓的扭矩及角度定位等多目标变量进行模糊预估控制。

## 1 驱动轮轴总成的装配工艺

### 1.1 驱动轮轴总成的结构

我国生产制造的拖拉机种类繁多<sup>[6]</sup>,其中东方红系列拖拉机的驱动轮轴总成结构实物图如图1所示。

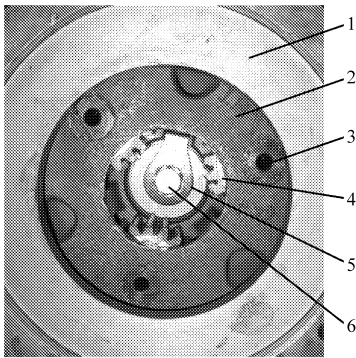


图1 驱动轮轴总成结构实物图

Fig.1 Assembly structure of driving wheel axle

1. 传动壳体 2. 行星架 3. 行星齿轮轴 4. 行星齿轮 5. 定位锁片 6. 自锁螺栓

驱动轮轴总成主要由传动壳体、行星架、行星齿轮、行星齿轮轴、定位锁片、自锁螺栓等部件组成,是拖拉机动力驱动系统中的重要组成部分。其中,自锁螺栓的装配是一道关键的工序。

### 1.2 自锁螺栓的装配工艺

驱动轮轴总成中,自锁螺栓与定位锁片的装配工艺如图2所示, $\theta$ 表示拧紧转角。

首先预紧自锁螺栓以消除尺寸链间的装配间隙,然后在规定的拧紧扭矩范围内,使得自锁螺栓可以进行角度定位。定位装配过程中,当到达定位点后,以 $30^\circ$ 为一个定位周期进行角度定位。最后安装定位锁片,防止自锁螺栓松动,巩固装配效果。

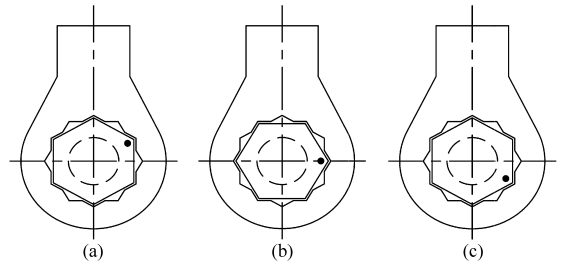


图2 自锁螺栓与定位锁片的装配工艺示意图

Fig.2 Assembly process of self-locking bolt and positioning lock blade

- (a) 定位起始点  $\theta = 0^\circ$  (b) 定位过程点  $\theta = 30^\circ$   
(c) 定位过程点  $\theta = 60^\circ$

## 2 自锁螺栓拧紧的模型预估控制

### 2.1 拧紧过程模型的建立

驱动轮轴总成的自锁螺栓装配属于螺纹联接范畴,可应用螺纹联接预紧原理建立拧紧过程模型。螺栓装配时会产生轴向预紧力,由三角螺纹副产生的轴向预紧力包括垂直于螺纹表面的正压力和螺纹表面的摩擦力。所以施加在自锁螺栓上的拧紧扭矩 $T$ 主要分为两部分<sup>[7-8]</sup>:克服螺纹副摩擦作用的力矩 $T_1$ ;克服承压面的摩擦力矩 $T_2$ 。其与预紧力 $F'$ 的关系为

$$T = T_1 + T_2 = \frac{d_2 F' \tan(\psi + \rho')}{2} + \frac{\mu_n F' (D_1^3 - D_0^3)}{3(D_1^2 - D_0^2)} \quad (1)$$

式中  $d_2$ ——螺栓的中径

$\psi$ ——螺栓的螺纹升角

$\rho'$ ——当量摩擦角

$\mu_n$ ——螺栓与其支撑面间摩擦因数

$D_0, D_1$ ——螺栓支撑面内、外径

将式(1)整理后得到

$$T = \left[ \frac{d_2 \tan(\psi + \rho')}{2d} + \frac{\mu_n (D_1^3 - D_0^3)}{3d(D_1^2 - D_0^2)} \right] F' d = k_i F' d \quad (2)$$

式中  $k_i$ ——扭矩系数,可概括为影响拧紧扭矩与预紧力关系的每一个因素,如摩擦因数、扭转变形、弯曲变形或塑性变形等  
 $d$ ——螺栓的公称直径

当自锁螺栓被拧紧时,也可以通过测量其旋转角来控制预紧力。实际拧紧自锁螺栓时,在螺栓尚未接触被联接件前,空转时不会产生预紧力;螺栓接触被联接件后才开始产生预紧力,这时由于接触面较小,尚未完全贴紧,虽然预紧力很小但却增长迅速;在自锁螺栓贴紧之后的弹性变形区间内,预紧力与转角呈线性关系,直至到达屈服点;在螺栓达到屈

服点后的塑性变形区,在相同的转角增量下,预紧力  $F'$  变化很小,预紧力与拧紧转角呈非线性关系。在弹性区内其预紧力与转角的表达式为<sup>[9-10]</sup>

$$F' = C_s P \theta / 360^\circ = C_b C_j P \theta / (C_b + C_j) \quad (3)$$

式中  $C_s$ ——螺纹联接的系统刚度

$C_b$ ——螺栓的刚度

$C_j$ ——被联接件的刚度

$P$ ——螺栓的螺距

将式(3)代入式(2)中,根据预紧力相等条件,可建立自锁螺栓装配过程拧紧扭矩与拧紧转角关系式为

$$T = (k_i C_s P d / 360^\circ) \theta = k_s \theta \quad (4)$$

式中,  $k_s$  为扭转系数,即扭矩值增量与转角增量的比值,是影响自锁螺栓装配拧紧扭矩和拧紧转角等所有因素的综合反映。

### 2.2 模型预估控制方法

建立的自锁螺栓预紧过程模型如图3所示,其中,自锁螺栓装配过程的拧紧扭矩与转角关系模型如图3中的曲线  $s$  所示。

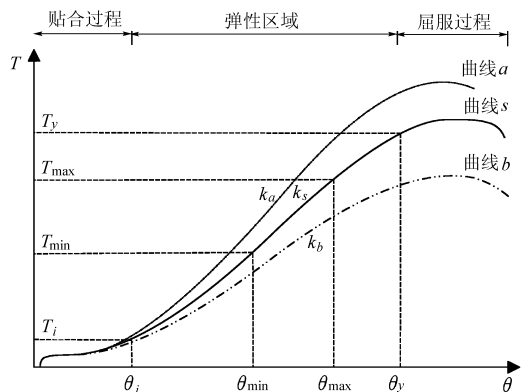


图3 自锁螺栓拧紧扭矩与转角关系曲线

Fig.3 Curve of relationship between tightening torque and angle

由模型曲线可知,在贴合扭矩  $T_i$  与贴合角  $\theta_i$  交点之前为贴合阶段;在屈服扭矩与屈服角度交点处进入屈服阶段;屈服状态时,随着转角的增加,扭矩变化不大,扭转系数  $k_s$  趋于零;在贴合阶段与屈服过程之间为弹性区域,此时扭转系数  $k_s$  基本为一个定值。根据驱动轮轴自锁螺栓的装配工艺,并结合式(4)可以确定自锁螺栓的拧紧扭矩范围为  $T_{\min} \sim T_{\max}$ ,转角范围为  $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$ ,只要最终的结果在这个范围内,则认为装配合格。

由于联接件的各结合面在拧紧时的状态和摩擦因数不同,装配零件的刚性也存在着个体的差异,因此,不同的  $k_s$  值形成不同的拧紧曲线。图3中的曲线  $a$  的扭转系数  $k_a$  大于  $k_s$ ,曲线  $b$  的扭转系数  $k_b$  小于  $k_s$ 。在自锁螺栓的拧紧扭矩范围  $T_{\min} \sim T_{\max}$  和转

角范围  $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$  内的扭转系数  $k_s$  预估计算式为

$$k_s = (T_{\min} - T_i) / (\theta_{\min} - \theta_i) \quad (5)$$

适当选择贴合扭矩  $T_i$  与贴合角  $\theta_i$ ,能运用模型曲线建立的扭转系数  $k_s$  更加接近实际值。

## 3 模糊预估控制器的设计

### 3.1 模糊预估控制器的结构

在自锁螺栓模糊预估装配控制器的设计中,需要根据螺纹联接拧紧过程的动态模型,预估未来装配过程模型参数的变化,实时计算未来的扭转系数。通过预估的转角位置和拧紧扭矩关系模型来计算对应的拧紧转角范围和转角定位点的个数,并利用专家知识或手动操作熟练人员长期积累的经验转化的模糊控制策略来确定自锁螺栓拧紧转角<sup>[11]</sup>。而后通过定位装配执行机构来实现自锁螺栓的定位装配。其中,模糊预估控制器结构如图4所示。

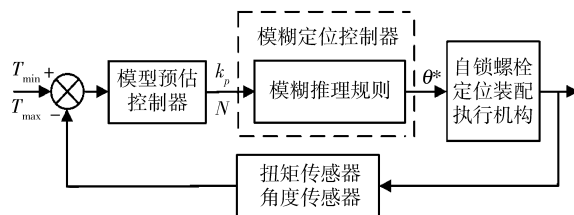


图4 模糊预估控制器原理图

Fig.4 Schematic diagram of fuzzy prediction controller

首先设定自锁螺栓装配工艺期望的拧紧扭矩范围  $T_{\min} \sim T_{\max}$ ,根据装配曲线,预估控制器计算扭转系数  $k_p$ ,并经过模糊定位控制器计算出转角定位值  $\theta^*$ ,作为自锁螺栓定位装配执行机构的转角位置期望输入,完成智能的定位装配。

### 3.2 预估控制器的设计

根据式(5)的预估计算方程,并通过对模型预估的滚动优化和在线动态修正,可以得到更精确的预估扭转系数  $k_p$ ,其模型预估控制器的计算方式是将  $T_i \sim T_{\min}$  的扭矩范围区间分为大小为  $\Delta T$ 、数量为  $i$  个的小区间。则预估扭转系数在线实时动态优化的计算方程为

$$k_p = \left( \frac{T_2 - T_1}{\theta_2 - \theta_1} + \frac{T_3 - T_2}{\theta_3 - \theta_2} + \dots + \frac{T_{\min} - T_i}{\theta_{\min} - \theta_i} \right) \frac{1}{i} = \sum_{j=1}^i \frac{k_{sj}}{i} \quad (6)$$

其中  $i = (T_{\min} - T_i) / \Delta T$

式中  $T_1$ ——起始点扭矩之后第一次定位点的扭矩

$\theta_1$ ——第一次定位点扭矩对应的转角

$k_{sj}$ ——第  $j$  个区间内的扭转系数

驱动轮轴中的定位锁片有12个定位角,从第一次的定位开始,自锁螺栓每转动  $30^\circ$  时,便有一次定位点,可供定位锁片固定装配。在规定的自锁螺栓

拧紧扭矩范围内,将扭转系数  $k_p$  模糊化得到自锁螺栓拧紧装配定位点的个数为

$$N = \left( \frac{T_{\max} - T_{\min}}{k_p} - \Delta\theta \right) / 30^\circ + 1 \quad (7)$$

其中,  $\Delta\theta$  为自锁螺栓拧紧转角超过  $T_{\min}$  对应的  $\theta_{\min}$  之后,第一次到达转角定位点的相对转过角度,且  $\Delta\theta \leq (T_{\max} - T_{\min}) / k_p$ 。

### 3.3 模糊控制器的设计

根据现场操作者和专家的经验知识<sup>[12]</sup>,利用模型预估的扭转系数  $k_p$  和定位点数  $N$ ,制定模糊定位装配控制器的模糊逻辑控制策略,推理出最优的定位点个数  $n^*$ 。定义的模糊逻辑控制规则库由4个双输入单输出规则组成<sup>[13]</sup>,还可以在实际工程应用中不断调整和增加,主要的模糊规则有

IF  $k_p > k_s$  AND  $N > 1$  THEN  $n^* = N$

IF  $k_p < k_s$  AND  $N > 1$  THEN  $n^* = 1$

IF  $k_p = k_s$  AND  $N > 1$  THEN  $n^* = N/2$

IF  $k_{\min} \leq k_p \leq k_{\max}$  AND  $N = 1$  THEN  $n^* = 1$

模糊控制规则中的  $k_{\min} \leq k_p \leq k_{\max}$  表示:实际装配过程中预估的扭转系数在装配工艺规定的最大扭转系数  $k_{\max}$  与最小扭转系数  $k_{\min}$  之间。将模糊拧紧定位装配控制器确定的优化定位点个数  $n^*$  解模糊化,求得定位转角具体数值  $\theta^* = n^* \times 30^\circ$ 。最终,自锁螺栓定位装配系统的转角位置输入为  $\theta = \theta^* + \Delta\theta$ 。

## 4 智能装配系统设计

### 4.1 装配系统的整体结构设计

自锁螺栓定位装配系统的整体结构如图5a所示。它主要由装配操作体、升降进给机构、辅助机械机构和定位装配控制系统组成。

装配操作体中的拧紧轴总成和锁片定位装置是自锁螺栓定位装配执行机构的核心单元,其结构设计如图5b所示。定位装配执行机构采用模块化的机械结构,主要由伺服电动机、三级行星减速器、扭矩传感器、前支座、定位光纤、定位挡铁、定位反力杆和定位套筒组成。伺服电机的后端带有光栅式角度编码器,其精度为2500 P/r,为拧紧轴提供精确的角度控制与检测。GSE系列合金钢材料的扭矩传感器含有智能检测电路,测量精度为0.5%,测量不确定度为0.5% FS,为装配控制器提供调理后的扭矩信号。定位装置中的一部分需要跟随自锁螺栓一起旋转,定位系统的角度定位采用基恩士的FS-V30系列数字光纤传感器实现,放大模块固定在装配操作体上,通过光纤传感器、透镜和定位套筒的相对运动

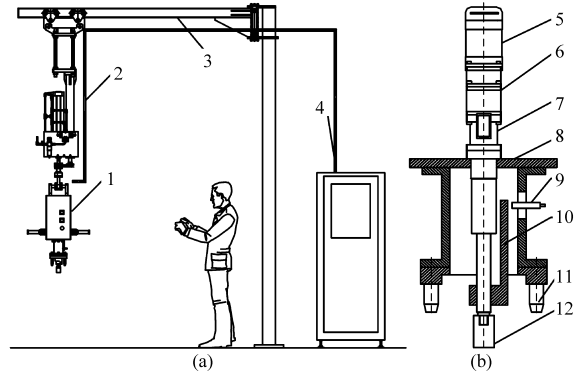


图5 定位装配系统结构图

Fig. 5 Structure of positioning assembly system

(a) 整体结构 (b) 装配操作体结构

1. 装配操作体 2. 升降进给机构 3. 辅助机械机构 4. 定位装配控制系统 5. 伺服电动机 6. 行星减速器 7. 扭矩传感器 8. 前支座 9. 定位光纤 10. 定位挡铁 11. 定位反力杆 12. 定位套筒

实现定位的控制。

### 4.2 装配控制系统的结构设计

自锁螺栓装配控制系统的核心控制部分包括计算机和智能装配控制器<sup>[14]</sup>,其结构如图6所示。

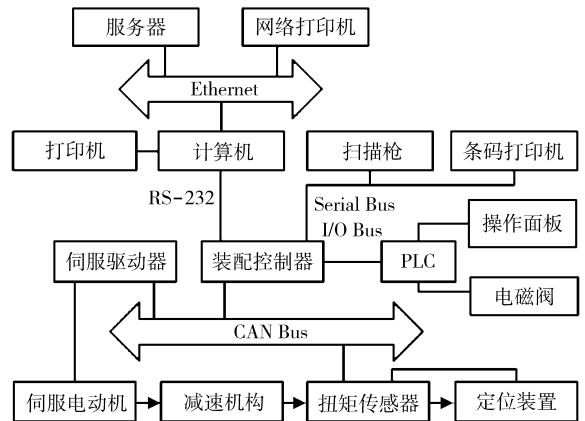


图6 装配控制系统结构框图

Fig. 6 Structure of assembly control system

其中,装配控制器采用的超低功耗混合信号系统级芯片C8051F040为嵌入式实时操作系统的微处理器,并以 $\mu\text{COS-II}$ 为嵌入式实时操作系统内核。其外部丰富的接口可连接串行总线的条码扫描枪和打印机,I/O总线的PLC控制模块等多种外设。现场操作面板和气动控制系统中电磁阀等辅助控制装置可以通过PLC控制模块与系统相连。驱动器、拧紧轴和定位装置是现场执行部分,其FS-V30光纤传感器和扭矩传感器等信号集成在现场装配信号采集模块中,通过CAN Bus总线网络与装配控制器连接<sup>[15]</sup>。C8051F040芯片内部CAN Bus控制器可以实现CAN2.0B协议,总线驱动器82C250芯片实现CAN总线数据的差动收发功能,提高定位装配系

统数据信息长线传输的可靠性和实时性。

### 5 工程应用

选择东方红 X70 ~ 95 大型轮式拖拉机的驱动轮轴自锁螺栓的定位装配进行工程验证,其自锁螺栓为  $M16 \times 1.5 \times 45$  六方螺栓,强度等级为 10.9。自锁螺栓的装配工艺规定最小拧紧扭矩为  $T_{min} = 213 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,最大拧紧扭矩为  $T_{max} = 277 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,取起始点拧紧扭矩为  $T_1 = 180 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,对应的拧紧转角清零 ( $\theta_1 = 0^\circ$ ),并开始角度计算,得到  $\Delta\theta = 6^\circ$ 。设定  $\Delta T = 8 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,经过装配模型预估的优化扭转系数  $k_p = 1.337$ ,而后经过模糊定位控制器的计算得到  $\theta^* = 36^\circ$ ,由自锁螺栓拧紧装配控制系统进行定位控制,最终的定位装配拧紧扭矩为  $261 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,控制在装配工艺规定的范围内,同时可使得定位锁片顺利安装,完成锁紧螺母的定位装配。其智能定位装配控制过程的监控管理结果如图 7 所示。

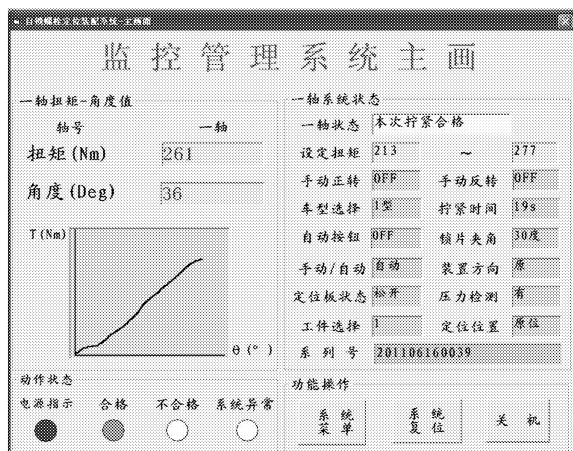


图 7 定位装配过程的监控管理

Fig. 7 Monitoring and management of positioning assembly process

基于模糊预估的驱动轮轴自锁螺栓定位装配系统的实际工程应用现场如图 8 所示。

为了验证自锁螺栓定位装配系统的各项性能指标,在东方红大型轮式拖拉机系列总装车间选择两条驱动轮轴总成生产装配线进行对比分析。其中一条生产装配线的自锁螺栓装配工位应用本文设计的智能定位装配系统,另一条生产线依然用人工的方

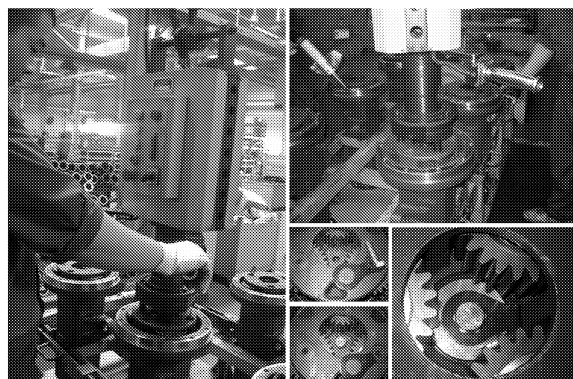


图 8 定位装配系统工程应用现场图片

Fig. 8 Application of positioning assembly system

法进行拧紧和定位装配。通过对 1 000 件自锁螺栓的定位装配进行统计分析,并分别从装配平均完成时间、装配结果的预测准确率、装配质量控制、操作者的劳动强度和对工作环境的噪声污染等性能指标对两种装配方式进行比对,其结果如表 1 所示。

表 1 实际生产中自锁螺栓装配性能指标对比

Tab. 1 Comparison of assembly performance index

性能指标	装配方式	
	传统手动操作装配	模糊预估定位装配
平均完成时间/s	75	20
预测准确率/%	无	>95
质量控制	不可控	较好
劳动强度	重	轻
噪声污染	严重	<60 dB(A)

### 6 结束语

通过对拖拉机驱动轮轴总成自锁螺栓拧紧过程中的拧紧力矩、拧紧转角和扭转系数等状态参量的内在复杂关系进行分析后,建立了拧紧模型预估方法并在线预估扭转系数,计算拧紧扭矩和拧紧角度,利用设计的智能模糊控制策略实现了自锁螺栓拧紧扭矩与定位角度的模糊智能控制。

设备经过拖拉机总装车间的驱动轮轴总成装配生产线实际使用和对比后工作正常稳定,解决了拖拉机驱动轮轴总成装配生产线中自锁螺栓智能定位装配技术的难题,减轻了工人的劳动强度,提高了生产效率和产品合格率。

### 参 考 文 献

- 赵剡水,杨为民. 农业拖拉机技术发展观察[J]. 农业机械学报,2010,41(6):42~48.  
Zhao Yanshui, Yang Weimin. Technological development of agricultural tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(6):42~48. (in Chinese)
- 倪向东,梅卫江. 国外大功率拖拉机新技术新结构和发展趋势的研究[J]. 农机化研究,2007,29(1):25~27.  
Ni Xiangdong, Mei Weijiang. Research on the new structure and technology of the development trend for the foreign large power tractor [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(1):25~27. (in Chinese)
- 胡洪国,杨汝清. 光电对孔技术及其在汽车主锥总成对孔装配工艺自动化中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术,

- 1999(11):30~31.
- Hu Hongguo, Yang Ruqing. Application of photoelectric hole positioning technology in automobile driving taper gear hole positioning assembly process [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 1999 (11): 30 ~ 31. (in Chinese)
- 4 卫道柱, 桂贵生, 高雷, 等. 基于差速拧紧的装载机主动锥齿轮预紧力测量方法[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 105 ~ 110.  
Wei Daozhu, Gui Guisheng, Gao Lei, et al. Measuring methods of pre-tightening force of loader driving bevel gear based on differential tightening [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(9): 105 ~ 110. (in Chinese)
- 5 范云生, 郭晨, 周守民. 基于模型预估的汽车主动锥齿轮总成锁紧螺母拧紧机[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6): 1 433 ~ 1 440.  
Fan Yunsheng, Guo Chen, Zhou Shoumin. Locking nut tightening machine of automobile driving taper gear assembly based on model prediction [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(6): 1 433 ~ 1 440. (in Chinese)
- 6 王道玺. *汽车拖拉机制造工艺学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- 7 Mori K, Hashimura S, Murakami Y, et al. A new tightening method for bolted joints by the simultaneous application of torque and compressive force [C]. *SAE Paper 2001-01-0978*, 2001.
- 8 Goran Toth R. Torque and angle controlled tightening over the yield point of a screw-based on monte-carlo simulations [J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(4): 729 ~ 736.
- 9 Nassar S A, Matin P H. Clamp load loss due to fastener elongation beyond its elastic limit [J]. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, 2006, 128(3): 379 ~ 387.
- 10 Nassar S A, Matin P H. Cumulative clamp load loss due to a fully reversed cyclic service load acting on an initially yielded bolted joint system [J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2007, 129(4): 421 ~ 433.
- 11 Nitin Dhayagude, Gao Zhiqiang, Fouad Mrad. Fuzzy logic control of automated screw fastening [J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 1996, 12(3): 235 ~ 242.
- 12 Seong-Hoon P W, Farid G, Wael W M. A fastening tool tracking system using an IMU and a position sensor with Kalman filters and a fuzzy expert system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(5): 1 782 ~ 1 792.
- 13 叶秉良, 俞高红, 赵匀. 拖拉机最终传动多目标模糊可靠性优化设计[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(4): 95 ~ 100.  
Ye Bingliang, Yu Gaohong, Zhao Yun. Multi-objective fuzzy reliability optimization design of tractor's final transmission [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(4): 95 ~ 100. (in Chinese)
- 14 Fan Yunsheng, Guo Chen, Wei Meng. Study of distributed multiaxial intelligent tightening machine based on fieldbus control system [C] // *IEEE 2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, Dalian, 2010: 415 ~ 419.
- 15 Zhou Yonghan, Wang Zhonghua, Li Jiawei. Design of the control system of tightening machine based on CAN Bus [C] // *2009 International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Ji'nan, 2009: 2 219 ~ 2 225.