

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.014

预应力自动张拉同步控制算法研究*

吕颖钊¹, 冯清秀^{2*}, 陈国强¹, 姚鸿梁³

(1. 杭州市公路管理局, 浙江 杭州 310030; 2. 华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 上海同禾土木工程科技有限公司, 上海 200092)

摘要:针对梁板预应力人工张拉测量误差大、回缩值不可测、两端同步率低、缺乏可靠的过程控制手段和有效的检测评估办法等不足,对自动张拉控制系统、张拉控制过程和系统的数学模型进行了详细的研究,提出了一种基于压力同步的预应力自动张拉控制算法,并给出了具体的控制参数。研究表明,该自动张拉控制系统能实现压力同步的自动控制以及伸长量、压力、回缩量的自动测量和记录,并按要求自动生成各种报表;该算法实用、控制精度高,能满足梁板的预应力张拉控制要求,解决人工张拉的各种问题。实践证明,该算法控制压力同步精度可达2%。

关键词:预应力;自动张拉;控制算法;数学模型

中图分类号:TH39;TU741.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0884-04

Study on synchronization control algorithm for automatic tensioning prestress

LV Ying-zhao¹, FENG Qing-xiu², CHEN Guo-qiang¹, YAO Hong-liang³

(1. Highway Administration of Hangzhou, Hangzhou 310030, China; 2. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Shanghai Toehold Civil Engineering Technology Co., Ltd. Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at the problems of prestressed tensioning artificially, such as large measurement error, retraction value unmeasurable, low both ends synchronization rate, lacking of reliable means of process control and effective methods of inspection and evaluation. In order to solve these problems, the automatic tension control system, mathematical model of tensioning control processes and system were studied in detail. A prestressed automatic tensioning control algorithm based on pressure synchronization was proposed, and the specific control parameters were given. The results show that the system can achieve automatic control of pressure synchronization, and automatic measure and record of elongation, pressure, shrank back shrinkage, and generate various reports automatically as required. The algorithm is practical and high control accuracy, which can meet tension control requirements of prestressed beam and slab, and solve other problems of artificial tensioning. Practice has proved that the pressure synchronization accuracy of the algorithm is up to 2%.

Key words: prestress; automatic tensioning; control algorithm; mathematical model

0 引 言

预应力混凝土桥梁是桥梁工程中常采用的一种结

构型式。以往预应力结构采用人工控制方式进行张拉,存在现场操作繁琐、控制精度不高、质量问题较多等不足,不利于预应力梁板的正常使用和耐久性。

收稿日期:2014-04-09

基金项目:浙江省交通运输厅科技计划资助项目(2012H55)

作者简介:吕颖钊(1978-),男,浙江湖州人,工学博士,高级工程师,主要从事公路技术方面的研究。E-mail:lyz117@126.com

通信联系人:冯清秀,女,副教授,硕士生导师。E-mail:hustfqx@163.com.

为克服人工张拉测量误差大、回缩值不可测、两端同步率低、缺乏可靠的过程控制手段和有效的检测评估办法等不足,目前国内已较多采用自动张拉设备进行梁板预应力张拉^[1-2],如:上海同禾土木工程科技有限公司开发的 TH-PT(x) 预应力程控张拉系统。预应力张拉涉及到预应力损失、温度效应等诸多因素的影响,是一个复杂非线性力的传递和分配过程^[3]。自动张拉仪张拉质量主要取决于其所采用的控制算法,鉴于目前业内尚无精确的数学模型和控制算法,所以对于该算法的研究可以解决非常重要的实际问题。

本研究提出一种基于压力同步的预应力自动张拉控制算法,并给出具体的控制参数。

1 自动张拉设备介绍

自动张拉设备的实际执行部分仍与人工张拉相同,即油泵与千斤顶结合的方式,控制油泵的流量即可控制千斤顶的伸缩,从而实现预应力张拉。

自动张拉设备的结构框图如图 1 所示。

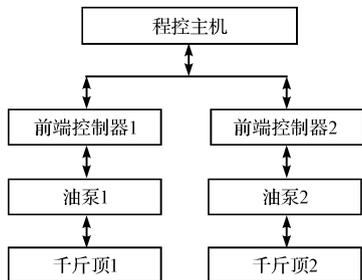


图 1 自动张拉设备结构框图

程控主机由嵌入式单板计算机和触摸屏组成,接受前端测控器的检测数据(位移量和压力),根据设定要求对数据进行相应处理,实现单个前端测控器的压力控制和位移测量,或对两个前端测控器的压力同步控制和位移测量。即主机根据规范或设定要求完成载荷试验的控制和数据处理。

前端控制器由单片计算机组成,接受主机的命令,控制变频器实现载荷的压力控制,并检测位移传感器的位移量传送给主机。

主机和前端测控器采用 MODBUS 通讯协议、通过无线传输交换数据^[4,6]。

自动张拉系统的工作流程如图 2 所示^[7]。

为使控制系统简单有效,油泵流量的控制多采用变频器控制油泵电动机转速的方式,本研究提出的控制算法所针对的自动张拉设备的前端控制的基本组成

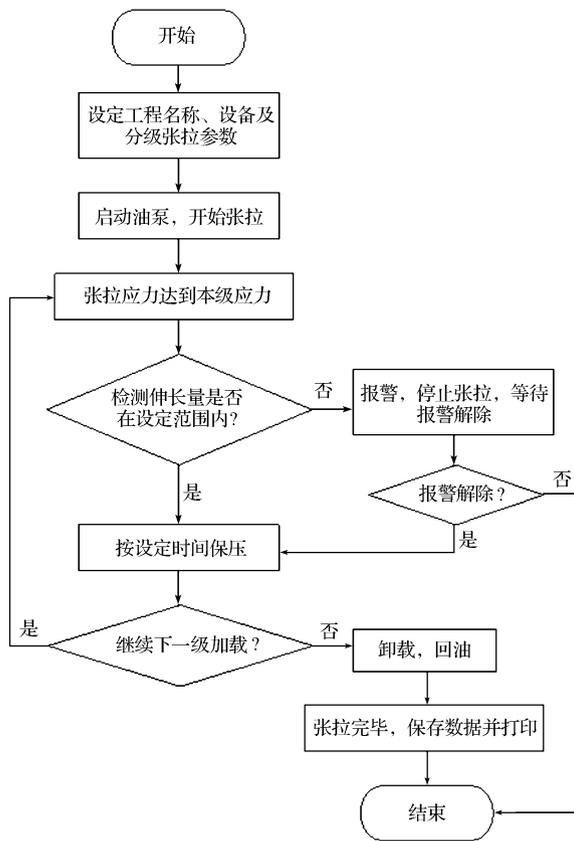


图 2 自动张拉系统的工作流程

如图 3 所示。其工作过程为:控制器采集位移和压力信号,传输到上位机,上位机根据输入,由控制算法得出变频器输出频率,然后传输到前端控制器并且控制变频器输出指定的频率,从而控制泵的流量,达到两端张拉自动同步控制^[8]。

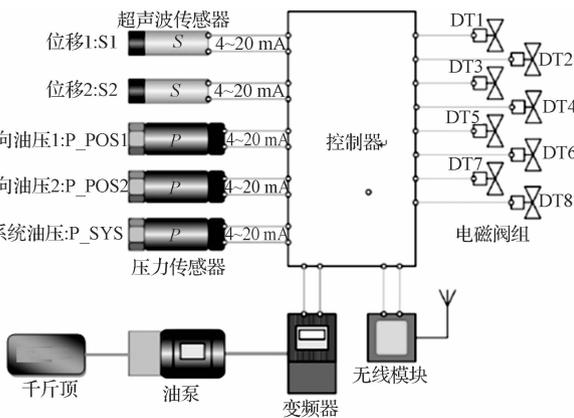


图 3 自动张拉设备组成

2 自动张拉控制系统的数学模型

2.1 系统实际输出流量与给定频率之间的关系

如果忽略变频器低频转矩补偿电压,则变频器给定频率和输出电压之间的关系为^[9]:

$$U = \frac{220}{50}f = 4.4f = K_1 f \quad (1)$$

式中: U —变频器输出的电机定子相电压, f —变频器给定频率。

三相异步电动机的机械特性方程如下式所示:

$$T_n \approx \frac{3pU^2}{2\pi f R_2} S \quad (2)$$

式中: p —三相异步电动机的极对数, $p=2$; R_2 —异步电动机折合到定子侧的转子每相电阻; S —异步电动机转差率, $S=1-n/n_0$; n —异步电动机实际转速; n_0 —异步电动机同步转速, $n_0=60f/p$ 。

将转差率 $S=1-n/n_0$ 代入式(2)中得:

$$T_n = \frac{3p}{2\pi R_2} \left(\frac{U}{f} \right) U - \frac{p^2}{40\pi R_2} \left(\frac{U}{f} \right)^2 n = \frac{3p}{2\pi R_2} K_1 U - \frac{p^2}{40\pi R_2} K_1^2 n = K_2 U - K_3 n \quad (3)$$

式中: $K_2=3pK_1/2\pi R_2$, $K_3=p^2 K_1^2/40\pi R_2$ 。

将公式(3)变换得:

$$n = \frac{K_2}{K_3} U - \frac{1}{K_3} T_n \quad (4)$$

油泵的转矩方程为^[10]:

$$T_p = VP_p/\eta \quad (5)$$

式中: T_p —泵的输入转矩, V —泵的排量, η —泵的机械效率, P_p —系统压力。

忽略非线性摩擦转矩, 泵的阻尼及转动惯量, 泵的输入转矩与电机的输出转矩相等, 即 $T_n = T_p$ 。

将式(1,5)以及 $T_n = T_p$ 代入式(4)得:

$$n = \frac{K_2}{K_3} K_1 f - \frac{V}{K_3 \eta} P_p \quad (6)$$

由式(6)知电机转速受负载压力影响, 负载压力越大, 电机转速降越大。

油泵的流量方程为:

$$q_p = nV - C_{pi} P_p \quad (7)$$

式中: q_p —泵的实际输出流量, C_{pi} —泵的泄露系数。

千斤顶的流量方程为:

$$q_j = q_p - C_{ji} P_p \quad (8)$$

式中: q_j —输入千斤顶的实际流量, C_{ji} —千斤顶的泄露系数。

输入千斤顶的实际流量就是系统的实际输出流量, 将式(7)代入式(8)中, 得:

$$q_j = nV - (C_{pi} + C_{ji}) P_p \quad (9)$$

由式(9)知, 忽略系统油路泄露, 张拉系统的实际输出流量和千斤顶的泄露系统, 泵的泄露系统及系统压力有关, 泄露系数越大, 压力越大, 系统的实际输出流量越低。将式(6)代入式(9)中得系统实际输出流

量与给定频率的关系:

$$q_j = \frac{K_2 V}{K_3} K_1 f - \left(C_{pi} + C_{ji} + \frac{V^2}{K_3 \eta} \right) P_p \quad (10)$$

故在给定频率下, 系统的流量损失由两部分组成: 一是由负载导致电机产生转速降, 导致泵的转速降低, 输出流量减少; 二是由于系统泄露, 且系统的泄露流量与系统压力有关, 系统压力越大, 泄露流量越大。

2.2 两端同步张拉的补偿频率计算

张拉不同步的原因主要是由于两端张拉设备液压系统性能的不一致导致的。传统的张拉方法, 电机满速运转, 频率不可调, 当出现不同步时通过人工控制阀门开口的大小来改变系统的流量, 从而使两端同步。对于该系统, 由于电机的转速可由变频器控制, 当出现不同步时, 可通过调整变频器的频率来改变电机转速, 从而改变系统流量, 实现同步。因此同步算法的核心在于根据不同步位移量的大小确定变频器的频率增量, 从而进行流量补偿。

因为钢绞线为弹性负载, 忽略其加速度和阻尼系数, 则力平衡方程为:

$$AP_p = KL + F_{干扰} \quad (13)$$

式中: A —千斤顶的作用面积; L —钢绞线的真实伸长量(去掉了虚量的那部分); K —钢绞线的弹簧刚度; $F_{干扰}$ —作用于钢筋线上的除了张拉力以外的所有力之和, 由实际工况决定。

设未补偿前频率为 f_1 , 则根据式(12,13), 在 Δt 时间内有:

$$L_1 \cdot A = \left[\frac{K_2 V}{K_3} K_1 f_1 - \left(C_{pi} + C_{ji} + \frac{V^2}{K_3 \eta} \right) P_{p1} \right] \cdot \Delta t \quad (14)$$

式中: L_1 —钢绞线伸长量; P_{p1} —系统压力, $P_{p1} = (KL_1 + F_{干扰})/A$ 。

补偿后频率为 f_2 , 则在 Δt 时间内有:

$$L_2 \cdot A = \left[\frac{K_2 V}{K_3} K_1 f_2 - \left(C_{pi} + C_{ji} + \frac{V^2}{K_3 \eta} \right) P_{p2} \right] \cdot \Delta t \quad (15)$$

式中: L_2 —钢绞线伸长量; P_{p2} —系统压力, $P_{p2} = (KL_2 + F_{干扰})/A$ 。

式(15)减式(14), 得:

$$\Delta L \cdot A = \left[\frac{K_2 V}{K_3} K_1 \Delta f - \left(C_{pi} + C_{ji} + \frac{V^2}{K_3 \eta} \right) K \Delta L / A \right] \cdot \Delta t \quad (16)$$

式中: $\Delta L = L_2 - L_1$, $\Delta f = f_2 - f_1$ 。

由式(16)得当两前端位移不同步量为 ΔL 时,位移量小的一端的频率增量:

$$\Delta f = \frac{K_3 A}{K_1 K_2 V} \cdot \dot{\Delta L} + \left(C_{pi} + C_{ji} + \frac{V^2}{K_3 \eta} \right) \frac{K_3 K}{K_1 K_2 A V} \cdot \Delta L \quad (17)$$

两个张拉前端各有一个位移传感器检测钢绞线伸长量, ΔL 可由两侧位移传感器差值求出,其他值均为已知量,故可以根据式(17)对位移量小的前端进行流量补偿,从而实现同步张拉控制。

4 工程应用

该控制算法已运用在上海同禾土木工程科技有限公司的 TH-PT(X) 型张拉程控系统中,张拉曲线如图 4 所示。其中,左图为张拉力-位移 ($F-S$) 曲线,右图为张拉力/位移-时间 ($F/S-T$) 曲线。

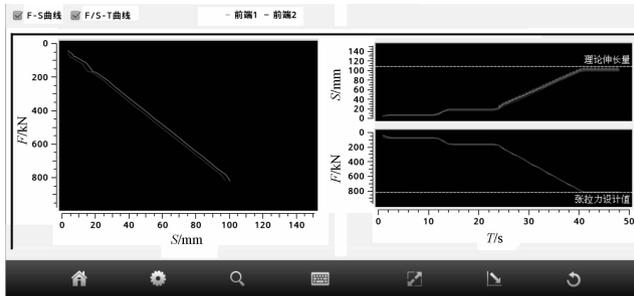


图 4 两端同步张拉曲线

下面以图 4 的右图为例说明曲线的含义。右图中,横坐标为时间轴,上半部分纵坐标为伸长量,下半部分纵坐标为张拉力。粗线为一个前端的曲线,细线为另一个前端的曲线。2 条曲线的重叠性表明张拉两端压力和位移的同步性。

压力同步性指标在现有的规范中没有具体的要求,该系统按 2% 压力同步设计,事实证明该算法张拉精度满足工程要求,且具有较高的实用性。

4 结束语

预应力度控张拉是当前公路工程中预应力混凝土桥梁施工的一种趋势,全国有多个省市交通质监部门对高速公路桥梁需用程控张拉设备进行预应力施工提出了明确的要求,而同步控制算法是预应力度控张拉工艺的一个核心和难点问题。

本研究通过张拉流程设计和数学推导,给出一种基于压力同步的预应力自动张拉控制算法,并在预应力度控张拉设备开发中得以成功应用。该算法控制精度在 2% 以内,满足实际工程预应力张拉施工需要。

参考文献 (References):

- [1] 钱厚亮,贾艳敏,林锦国,等. 新型智能预应力张拉设备的研制[J]. 自动化仪表,2009,30(12):49-51.
- [2] 郭全全,李 珠,张善元. 预应力数字化张拉技术的研究[J]. 土木工程学报,2004,37(7):13-17.
- [3] 贾敏智,李 珠,石晓敏. 基于 PLC 的自适应 PID 控制器在预应力张拉仪中的应用[C]//第 19 届全国结构工程学术会议论文集. 济南:[出版者不详],2010:517-522.
- [4] 顾波飞,赵伟杰,吴开华. 基于 Modbus 协议的单片机与触摸屏通信设计[J]. 机电工程,2012,29(1):104-107.
- [5] 高章飞,朱善安. 基于单片机 MSP430 和 nRF905 的无线通信模块[J]. 机电工程,2006,23(2):39-43.
- [6] 王建平,焦国太,张世豪,等. 基于单片机的多路数据采集和 CAN 通信系统设计[J]. 机械,2012(2):55-57.
- [7] 郝志红. 全自动预应力张拉仪的研究[D]. 太原:太原理工大学信息工程学院,2007.
- [8] 谷文军. 基于 S3C44BOX 控制的数字化预应力张拉仪系统的设计[D]. 太原:太原理工大学信息工程学院,2011.
- [9] 冯清秀,邓星钟. 机电传动控制[M]. 5 版. 武汉:华中科技大学出版社,2011.
- [10] 杨曙东. 液压传动与气压传动[M]. 3 版. 武汉:华中科技大学出版社,2008.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

吕颖钊,冯清秀,陈国强,等. 预应力自动张拉同步控制算法研究[J]. 机电工程,2014,31(7):884-887.

LV Ying-zhao, FENG Qing-xiu, CHEN Guo-qiang, et al. Study on synchronization control algorithm for automatic tensioning prestress[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(7):884-887.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>