

一种大卷装带材收卷过程中张力控制的优化设计方法

张海荣, 吴德会, 聂均, 李磊

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 提出了一种适合高品质、大卷装收卷的控制张力设计方法。首先, 介绍了收卷机张力控制的主要结构及其工作原理。再根据弹性力学原理, 分析了收卷张力与卷装内应力分布的关系模型。在此基础上, 讨论了恒张力收卷、锥度收卷和恒力矩收卷模型, 并计算了其卷装的内应力分布情况。最后, 提出了一种应用单纯形法进行最优收卷张力求取的方法。实验结果表明所提设计方法能有效保证所收卷的大卷装具有均匀的内张力分布。

关键词: 收卷过程; 张力控制; 卷装; 单纯形方法

中图分类号: TS101 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8829(2011)04-0038-05

Optimal Design of Control Tension in Winding Process for Large Wound Roll

ZHANG Hai-rong, WU De-hui, NIE Jun, LI Lei

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract A new design method to tension control in winding process is developed for producing high-quality large wound roll. Firstly, the work theory and equipment construction of tension control system in a winding machine are introduced. Secondly, the relationships between winding tension in the winding section and internal stress distribution within wound roll are analyzed based on the elasticity mechanics theory. Thirdly, the cases of constant tension, taper tension and constant torque winding are discussed, and the distributions of internal stress in the wound rolls are calculated. Finally, an application of simplex method to searching for the optimal winding tension is presented. The experimental results show that the proposed design method can ensure the internal tensions in a large wound roll to get uniform distribution.

Key words winding process; tension control; wound roll; simplex method

柔性带状材料(如下简称带材)传送中的张力控制广泛存在于造纸、纸产品加工、印刷业、薄膜胶片生产加工、粘结带生产、纤维工业、织物印染等相关行业中的复卷机、分切机、印刷机、镀膜机、层合机、涂布机、验布机等设备或生产线上^[1]。目前,关于此类张力控制系统的研究主要集中在提高带材的卷装速度和张力控制的精确性、稳定性方面。

国外带材收卷张力控制技术已有较高的发展水平,神经网络、模糊控制等控制学科前沿理论均有较好的应用。如K hong Pak等设计了利用参数自适应技

术的张力速度控制系统^[2]; Young和 Reid利用线性模型分析了径向和侧向张力分布规律,并设计了相应的PID张力控制器^[3]; Knittel等人提出了一种多元张力速度鲁棒控制技术,能有效平衡速度与张力控制的过渡^[4]。国内关于收卷张力控制技术的研究起步较晚,目前主要集中在各种具体张力控制设备的研制上。如:冯小金等设计了一种利用三菱专用变频器实现的凹印机张力控制系统,减小了张力控制的响应时间^[5];张池和杨琳设计了以PLC为控制器、以变频器为拖动的连续造纸机收卷装置^[6]。

但是在实际收卷过程中,由于外层带材对卷装内部形成的径向压力,卷装内部带材最终的张力并不等于卷缠时张力控制系统施加的张力,而是随着卷装直径的加大不断减小^[7]。特别是现在随着超大卷装的出现,卷装的规模也由原来的1000~2000m发展到10000

收稿日期: 2011-02-22

基金项目: 中央高项基本科研业务费资助项目(2010121041)

作者简介: 张海荣(1984-),男,山东沂南人,硕士研究生,主要研究方向为自动化技术和测控技术理论。

~ 30000 m, 卷装直径可达 1.5 m 以上。此时, 卷芯部分的带材出现折皱、层间滑移、破损等质量问题就显得尤为突出。所以, 即使在卷装时实现了较高精度的张力控制, 也不能保证整个卷装张力分布达到满意效果。现有张力控制的研究多以提高控制精度为目标, 而如何控制整个带材卷装张力分布的研究还比较鲜见。

笔者利用弹性力学分析了大卷装带材收卷过程中的内、外张力变化的规律, 并给出一种适合大卷装分析的内张力计算模型; 在该模型的基础上分析了现有恒张力收卷、恒力矩收卷和锥度张力收卷模式存在的问题, 最后给出了一种利用单纯形法整体卷装实现张力优化分析的设计策略。

1 基于弹性力学的带材卷装内张力分析

带材的典型收卷控制系统结构如图 1 所示, 主要由张力传感器 (TE)、光电编码器 (PG)、张力控制器 (TC)、变频器 (VVVF)、变频电机 (M) 及收卷辊构成。采用直接式张力控制原理, 通过光电编码器 (PG) 计算收卷系统的线速度 V , 再结合变频器输出即可推测出当前卷装的卷径 R 。随后, 利用固化在张力控制器内的收卷张力模型计算对应此时卷径 R 的张力设定值; 再由张力传感器 (TE) 直接对带材实际收卷张力进行检测, 其输出信号作为张力反馈量给张力控制器, 产生张力控制的闭环。最后, 通过控制变频器驱动电机实现预定张力收卷^[8]。

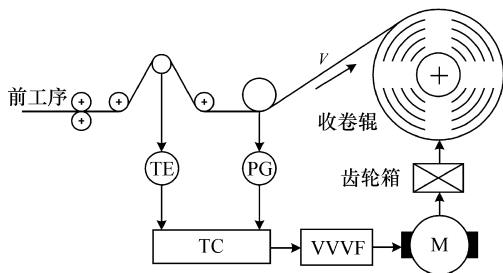


图 1 带材收卷张力控制系统结构示意图

但在实际的大卷装收卷过程中, 外层带材对已卷完的内部各层存在“放松”效应。因此, 必须对收卷过程中卷装内部各层张力的分布及变化进行分析, 建立卷装的内张力分布数学模型, 才能有效克服上述影响。而常规带材 (如纸张、织物、金属箔等) 收卷过程不允许破坏材质的微结构, 因此其作用张力都是控制在材料的弹性范围之内, 一般不会超过弹性极限的 10%, 因此可利用弹性力学理论对带材的内张力分布进行分析。

由于在带材收卷中通常使用无缝钢管作为收卷卷芯, 其刚度比带材大得多, 因此可假定卷芯在收卷过程中不发生形变, 其半径为 R_0 。收卷带材的平均厚度为 h , 满卷装后共需收卷 n 层带材。则可记 $R_i = R_0 + ih$, i

$= 1, 2, \dots, n$ 为收卷第 i 层时卷装的当前外半径, 很明显 R_n 则表示为满卷装的最大外半径。

为了分析方便且不造成混淆, 本设计特别定义了 3 个相关的作用力:

① 外张力 (也称收卷张力) T_i , $i = 1, 2, \dots, n$ 。它表示带材在收卷第 i 层时, 作用在带材单位宽度上的外部张力, 它由张力控制器直接产生收卷张力。其中, n 为该卷装的最大层数。

② 内张力 $T_{i,j}$, $i < j \leq n$ 。它指带材在收卷第 j 层时, 在卷装内部第 i 层带材单位宽度上所承受的实际张力。

③ 环向应力 $\sigma_{i,j}$, $i < j \leq n$ 。它表示在收卷第 j 层时, 在卷装内部第 i 层位置上所承受的环向应力值。当然, 该应力值是一个力学分析量, 与具体带材的厚度无关, 很明显有 $T_{i,j} = \sigma_{i,j} h$ 。

随着收卷过程的进行, 每收卷一层带材, 都会对前面已收卷的各层带材产生内压力, 导致其内部各层内张力下降。若当前已收卷 j 层带材, 布筒的半径达到 R_j , 此时外层带材收卷会对整个卷装产生一个对内的均匀径向压力 P , 上述各力之间的相互作用与关系如图 2 所示。

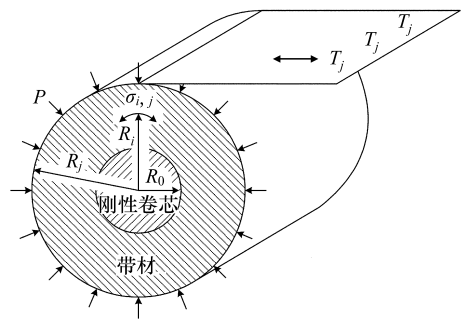


图 2 带材收卷过程中内应力分布示意图

则对于图 2 所示的力学问题, 可由弹性力学求得作用于 R_j 的径向压力 P 对布筒内 R_i 处带材造成的环向应力影响 $\sigma'_{i,j}$ 为

$$\sigma'_{i,j} = - \frac{PR_j^2}{R_j^2 + (1 - 2\nu)R_0^2} \left[1 - \frac{(1 - 2\nu)R_0^2}{R_i^2} \right] \quad (1)$$

式中, ν 为被收卷带材的泊松比。

由于, 上述径向压力 P 是由卷制外张力 T_j 产生的, 即有 $P = T_j / R_j$, 代入上式可得

$$\sigma'_{i,j} = - \frac{T_j R_j}{R_j^2 + \lambda} \left[1 - \frac{\lambda}{R_i^2} \right] \quad (2)$$

式中, 记 $\lambda = (1 - 2\nu)R_0^2$ 。通过式 (2) 可以方便地求出当收卷第 j 层带材时, 卷装内部第 i 层处内应力分布的变化量。由于收卷张力都是控制在材料的弹性范围之内, 因此根据弹性力学原理, 在卷装完成时 (收卷第 n 层带材), 作用在第 i 层带材上的实际内应力 $\sigma_{i,n}$ 应为

最初卷制张力 T_i 及第 i 以上各层对其产生的应力影响 $\sigma'_{i+1}, \sigma'_{i+2}, \dots, \sigma'_{i_n}$ 之和^[9]。

因此可建立带材收卷的内应力分布模型为

$$\sigma_{i_n} = \frac{T_i}{h} + \sigma'_{i+1} + \sigma'_{i+2} + \dots + \sigma'_{i_n} = \frac{T_i}{h} + \sum_{j=i+1}^n \sigma'_{ij} \quad (3)$$

将式 (2) 代入式 (3), 即可求得卷装内各层带材的最终内张力离散分布模型为

$$\begin{aligned} T_{i_n} &= h\sigma_{i_n} = T_i + h \sum_{j=i+1}^n \sigma'_{ij} \\ &= T_i - h \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2}\right) \sum_{j=i+1}^n \frac{R_j T_j}{R_j^2 + \lambda} \end{aligned} \quad (4)$$

上述离散分布模型适合卷装较小, 对应的带材层数不多时。但对于大卷装, 其内部可达数千层, 式 (4) 中的累加求解计算量偏大。此时考虑到由于玻璃布平均厚度 h 相对较小, 可将其视为卷径增量 dR 。这样, 式 (4) 可转换成连续函数的积分形式进行计算, 则建立大卷装内张力分布模型

$$T_{i_n} = T_i + h \sum_{j=i+1}^n \sigma'_{ij} = T_i - \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2}\right) \int_{R_i}^{R_n} \frac{T_R R dR}{R^2 + \lambda} \quad (5)$$

通过式 (4) 或式 (5) 可以方便地计算卷装完成后, 其内部任意 R_i 位置处的内张力分布情况^[10]。

2 现有收卷模型的内张力分布分析

常规张力控制器中典型使用的收卷模型主要有恒张力模型、恒力矩模型和锥度模型。这 3 种张力控制模型分别如下

$$T_i = T_0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$T_i = T_0 \frac{R_0}{R_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$T_i = T_0 \left(1 - \alpha \frac{R_i - R_0}{R_i}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中, α 为锥度系数, $0 \leq \alpha \leq 1$; R_0 为卷芯半径; f_0 为初始张力。

上述 3 种主要张力收卷模型的张力变化曲线如图 3 中所示。图中, 各张力控制的初始张力 T_0 均设为 1 kN, 卷芯半径均为 100 mm。对于锥度收卷模型, 张力控制与锥度系数的取值有关, 该图中分别给出了锥度系数 α 取 0.25、0.5 及 0.75 的情况。

无论是从式 (8) 所示的锥度收卷控制数学模型, 还是从图 3 中各收卷张力曲线分布都不难看出: 当锥度系数 α 取 0 时, 根据式 (8) 所示的锥度收卷张力公式可得其收卷张力 $T_i = T_0$, 即为恒张力收卷; 而当锥度系数 α 取 1 时, 则锥度收卷模型又退化为恒力矩模型。因此, 可以将传统的锥度收卷看成是恒张力收卷和恒力矩收卷的折中。

对于恒张力收卷, 可将其收卷张力模型 (式 (6) 所示) 代入式 (5), 以求得恒张力卷装的内张力分布情况

$$\begin{aligned} T_{i_n} &= T_0 - T_0 \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2}\right) \int_{R_i}^{R_n} \frac{R dR}{R^2 + \lambda} \\ &= T_0 - \frac{T_0}{2} \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2}\right) \ln \frac{R_n^2 + \lambda}{R_i^2 + \lambda} \end{aligned} \quad (9)$$

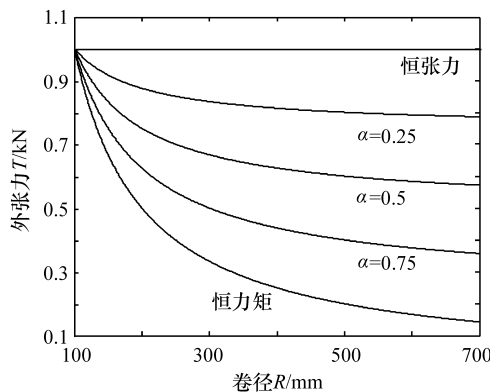


图 3 典型收卷张力控制变化曲线

对于恒力矩收卷模型, 其收卷张力 T_i 与卷径有关, 因此将式 (7) 代入式 (5) 即可求解恒力矩条件收卷的内张力分布为

$$\begin{aligned} T_{i_n} &= \frac{T_0 R_0}{R_i} - T_0 R_0 \left(1 - \frac{\lambda}{R_i^2}\right) \int_{R_i}^{R_n} \frac{dR}{R^2 + \lambda} \\ &= \frac{T_0 R_0}{R_i} - \frac{T_0 R_0}{\lambda} \sqrt{\lambda} \left[1 - \frac{\lambda}{R_i^2}\right] \left[\arctan \frac{R_n}{\sqrt{\lambda}} - \arctan \frac{R_i}{\sqrt{\lambda}}\right] \\ &= \frac{T_0 R_0}{R_i} - T_0 R_0 \sqrt{\lambda} \left[\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{R_i^2}\right] \arctan \left[\frac{R_n - R_i}{\lambda + R_n R_i} \sqrt{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (10)$$

由上述两式可以看出, 若带材 (泊松比)、卷芯半径 R_0 及初始张力 T_0 确定, 则恒张力和恒力矩卷装内部 R_i 处的内张力分布仅与卷装半径 R_n 有关。

通过分析可知, 恒张力收卷的结果是“内松外紧”, 而使用恒力矩收卷又会造成“内紧外松”, 这与实际情况一致。锥度收卷则相当于是采用了一种折中策略, 通过锥度系数 α 调整两种内张力分布的比例, 以实现相对均匀的“内外紧, 中间松”分布。当然, 从锥度收卷内张力分布模型中也可看出, 锥度收卷也不可能实现均匀的内张力分布, 特别是对于大卷装 (R_n 较大时), 这种不均匀性更为明显。

3 大卷装收卷张力的单纯形法优化

由以上分析不难看出, 大卷装的内部张力分布具有明显的不均匀性。因此, 如何有效设计收卷张力, 使最终卷装内部各处的环向应力 (或张力) 均相等, 是提高大卷装收卷质量的关键。在前面的工作中, 已有效建立了一个可根据带材收卷时的外张力 T_i 求取最终卷装内张力 T_{i_n} 分布的数学模型 (式 (5) 所示)。但如何根据卷装理想的内张力分布“反求”最优的收卷张力 T_i , 还是一个有待解决的难题。

笔者给出了一种利用单纯形法设计最优收卷张力

的方法。设计思路是:将第 1 层到第 n 层的收卷张力 $T_i, i=1, \dots, n$, 视为一个矢量 T , 即有 $T = \{T_i\}_{i=1}^n$, 则收卷张力设计问题可转换为 n 维矢量 T 的寻优问题。

不妨记期望的内张力分布为 $\hat{T}_{i,n}, 1 \leq i \leq n$, 则很明显可引入均方误差 (MSE, mean square error) 来评价实际卷装内张力分布的情况

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon^2(i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \hat{T}_{i,n})^2 \quad (11)$$

式中, $\varepsilon(i)$ 为卷装第 i 层实际内张力分布与期望设计的偏差。

将式 (4) 代入上式, 则可建立以矢量 T 为自变量的收卷张力设计优化目标为

$$\min_T J(\cdot) = \min_T \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[T_i - \hat{T}_{i,n} - h \left(1 - \frac{\lambda}{R_j^2} \sum_{j=+1}^n \frac{R_j T_j}{R_j^2 + \lambda} \right) \right]^2 \quad (12)$$

本文中采用单纯形法 (SM, simple method) 求解上述优化目标。SM 法也称为可变多面体搜索法, 是一种传统的无约束最优化的直接算法。对于本文问题, 该方法在矢量 T 对应的 n 维空间中, 用 $n+1$ 个顶点 (对于 $n+1$ 个样本) 构成一个超多面体。利用式 (12) 求出各顶点 (样本) 的适应值, 并确定其中的最优点、次优点和最差点。然后用 SM 方法中的反射、扩张、收缩策略找出一个较好点, 取代最差点, 从而构成新的多面体。进行重复迭代, 最终可以逼近或收敛到一个最优样本, 即最优的收卷张力矢量 \hat{T} 。

首先, 在 $n+1$ 个样本中, 找出目标函数式 (12) 取值最大的样本 T_H 、目标值最小的顶点 T_L 和目标函数取值次大的顶点 T_C 。然后, 再求出除最差样本 T_H 外的 n 个顶点的形心 \bar{T} , 并计算出 T_H 关于形心 \bar{T} 的反射点 T_R 。若样本 T_R 的目标函数值小于最优点 T_L 的函数值 (即 T_R 更优), 则在该方向上向外执行一次扩张; 若该点目标函数值大于次大点 T_C 函数值, 则在该方向上向内执行一次收缩。当该方法探测到“谷底”时, 则在各个方向上均向内执行一次收缩, 以使单纯形整体更接近最低点, 再进入下一次迭代。

关于具体 SM 方法中的反射因子、扩张因子、正向收缩因子和反向收缩因子的具体含意及常规选取策略, 可参考文献 [11], 本文中不再赘述。

当然, 常规 SM 方法是通过一个随机生成的初始单纯形开始迭代寻优。但是, 本设计中进行的收卷张力优化问题有一定的特殊性。通过前面的分析可以看出, 现有的锥度收卷模型与均匀内张力收卷的目标比较接近, 因此可将锥度收卷的张力矢量作为单纯形初始状态。为此, 给出如下使用 SM 方法求取大卷装收卷张力优化步骤:

① 构成初始单纯形样本集。初始化 SM 中相关参数, 并在 $0 \sim 1$ 范围内随机生成 $n+1$ 锥度收卷系数 α 并

求取 $n+1$ 种锥度收卷的张力矢量 T 作为初始单纯形。

② 求解样本集目标值。将样本集各个样本代入式 (12), 计算相应的目标函数值, 确定最好点 T_L 、最差点 T_H 和次差点 T_C 。

③ 收敛性检验。每次求解新的单纯形之后, 应检验收敛性, 判断是否满足停止准则。如果满足则停止迭代, 输出最优的收卷张力矢量 \hat{T} ; 否则执行 ④。

④ 形成新的单纯形样本集。根据各样本的目标函数值计算反射点 T_R ; 并与次差点进行比较, 确定是压缩还是扩张, 并用新的较优点代替最差点 T_H 。如果压缩无效, 则原单纯形缩小至一半。

⑤ 重复到 ②, 直至 ③ 满足。

4 案例实验

在长江玻纤厂 (九江) 开展相关收卷控制的实证研究。现以实际玻纤纺织产品的收卷包装为案例, 验证及说明本文中给出外张力优化方法的有效性和具体过程。该设备使用实心硬木棍作卷芯, 卷芯半径 $R_0 = 50$ mm, 被收卷织物平均厚度 $h = 0.35$ mm, 卷装完毕时半径 $R_n = 700$ mm。要求对该卷装收卷张力进行优化设计, 使得整个卷整完成后, 卷装内各层织物均处于 0.1 kN 的均匀内张力分布状态。

从该收卷包装实际的参数可以看出, 该卷装共可卷入 1857 层织物, 总长度可达 4370 m。在该卷装中, 卷装半径与卷芯半径比可达 14:1, 因此属于典型的大卷装。

根据文中给出的 SM 方法求取大卷装收卷张力的步骤, 建立含有 1858 个样本的单纯形样本集。各样本由锥度收卷的张力矢量构成, 其中锥度系数分别取 $0 \sim 1$ 范围的随机数。

同样用式 (12) 的平均值作为 SM 方法收敛与否的评价指标。根据收卷织物材料特性, 材料的泊松比 ν 可取 0.36。执行张力优化步骤, 收卷张力优化的 SM 收敛过程及评价函数取值变化如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 整个单纯形收敛速度很快, 也很稳定, 基本无振荡过程。在迭代了 120 代之后, 单纯形收敛。图 5 中给出了设计的最优收卷张力, 及用该张力收卷的卷装内张力分布情况。

如图 5 所示, 该大卷装应从 0.83 kN 的外张力开始收卷, 并按设计结果逐渐减小, 直至最外层 0.1 kN。而收卷卷装内张力分布较均匀, 卷芯处和外端也基本保持在 0.1 kN 左右, 因此所讨论的收卷张力优化设计方法有效。

5 结束语

根据弹性力学原理建立了大卷装内张力分布模

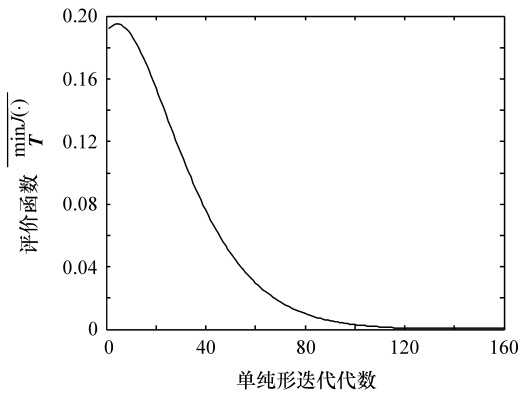


图4 收卷张力优化单纯形收敛过程

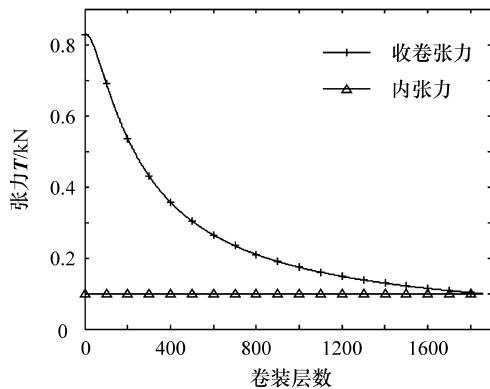


图5 大卷装最优张力设计的外、内张力分布

型,利用该模型可以方便地根据收卷时外张力计算卷装内部任意处的内张力分布。通过对常规恒张力、恒力矩和锥度收卷模式的分析,得到锥度收卷模式的内张力分布要优于恒张力和恒力矩收卷的结论,但锥度收卷仍不可能实现均匀内张力分布的要求。

根据内张力分布模型,建立了收卷张力设计的优化目标。再利用单纯形法对其进行最优解的求取,并给出求解的具体步骤。实验结果表明该方法寻优速度较快,在大卷装条件下也能达到令人满意的收卷效果。

参考文献:

[1] 应腾云,张森林.基于模糊-PI并联控制的经纱张力控制系统[J].纺织学报,2010,31(9):122-127.
 [2] Kim H, Hwang K, Jeong H H. Design of an adaptive tension/velocity controller for winding processes[A]. Proceedings of 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics[C]. Pusan, South Korea, 2001: 67-72.
 [3] Young G E, Reid K N. Lateral and longitudinal dynamic behavior and control of moving webs[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1993, 115(2B).
 [4] Knittel D, Lamche E, Gagan D et al. Tension control for winding systems with w degrees of freedom H_{∞} controllers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39.
 [5] 冯小金,李昉,任朝胜.基于三菱卷取专用矢量变频A740-A1的凹印机张力控制系统[J].电机与控制应用,2010,37(3):40-43

[6] 张池,杨琳.基于PLC与变频器的造纸机张力控制系统[J].中国造纸,2010,29(9):53-55
 [7] Lee C W, Shih K H. A study on taper tension control considering telescoping in the winding system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(2): 687-693.
 [8] 王春香,付云忠,杨汝清,等.纤维缠绕过程中的张力分析[J].复合材料学报,2002,19(3):120-123.
 [9] Timoshenko S P, Goodier J N. 弹性理论[M].徐芝纶,译.北京:高等教育出版社,1990.
 [10] 吴德会,谭珍祥,杨华群.玻璃布包装中锥度收卷的内张力分布及其参数确定[J].包装工程,2005,26.
 [11] Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization[J]. Computer Journal, 1965, 7(4): 308-313. □

(上接第37页)

6 结束语

工程应用中,对于各种环境中的信号采集及其校准一直是测试测量领域的重点和难点。尤其是对于纳微伏级微弱信号的精确测量更为重要,根据现代测试环境的复杂性,本文介绍了一种具有实用意义的微弱信号采集系统。该采集系统通过了联机调试,顺利实现了对150路微弱电流信号的采集和各个模拟通道的校准,大大减轻了测量人员的工作强度,并为今后分布式多通道信号采集提供了实用工具,对其他相关采集系统提供了良好的设计思路,具有较大的工程应用及推广价值。

参考文献:

[1] 高晋占.微弱信号检测[M].北京:清华大学出版社,2004:11.
 [2] Delic H. Distributed weak signal detection and asymptotic relative efficiency in dependent noise[J]. Signal Processing, 1999, 77(3): 335-342.
 [3] 孔鹏,方源达,柯富茗,等.基于LabVIEW的无线分布式数据采集系统[J].计算机与数字工程,2009,37(11).
 [4] Kurniš K, Karličin V, Pločin V. A statistical method of detection and conversion of weak signals[J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2006, 40(4): 15-21.
 [5] Liang X M, Liu Z H, Li B W. Weak signal transmission in complex networks and its application in detecting connectivity[J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics, 2009, 80(4): 27-30.
 [6] 高志华,孙秀霞. LabWindows/CVI开发环境下实现串口通讯的方法[J].现代电子技术,2004,27(2):62-64.
 [7] 戴逸松.测量毫微伏电压的DPSD算法研究[J].长春大学学报,1996(1):1-7.
 [8] 冯莹,王天质,时龙兴.基于LabWindows/CVI的电子系统电压/电流性能测试系统[J].电脑知识与技术,2009,5.
 [9] 刘君华.虚拟仪器编程语言 LabWindows/CVI教程[M].北京:电子工业出版社,2001:08. □