

基于 STM32 的增量式编码器测速 设计及实验验证

鲁伟, 刘士兴, 孙操, 李隆

(合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 齿轮渐进式防坠安全器是施工升降机最重要的安全部件, 防坠安全器的定期检测尤为重要; 为解决施工升降机的实时速度检测问题, 提出基于 STM32 的增量式编码器测速模块设计, 并在东元 TSTA 系列伺服驱动器测速试验台上进行速度 (100~1000 r/min) 标定实验, 以验证设计的可靠性; 数据分析表明测量速度范围在 100~500 r/min 时速度误差在 $\pm 1\%$ 以内, 满足渐进式防坠安全器的安全标准 (GB/T 34025-2017) 要求。

关键词: 防坠安全器; 测速; 增量式编码器

Design of Incremental Encoder Speed Measurement System and Experimental Verification Based on STM32

Lu Wei, Liu Shixing, Sun Cao, Li Long

(School of electronic science and applied physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The gear progressive anti-falling safety device is the most important safety component of the construction lift, and the periodic test of the anti-falling device is especially important. In order to solve the problem of the real-time speed detection of the construction lift, the design of the incremental encoder speed measurement system based on STM32 is proposed in this dissertation, and the speed (100~1000 r/min) calibration experiment on the TECO TSTA series servo driver speed test bench is carried out to verify the reliability of the design. The data analysis results show that the speed error is within $\pm 1\%$ when the measurement speed ranges from 100 to 500 r/min, which meets the requirements of the safety standard of the progressive anti-falling safety device (GB/T 34025-2017).

Keywords: anti-falling safety device; speed measurement; incremental encoder

0 引言

施工升降机的防坠安全器是在升降机的限定距离内快速制动锁定吊笼, 及时刹车, 起到保护地面人员的生命安全和防止被吊工件物体损坏的装置。当前, 为保证防坠安全器有效可靠, 对防坠安全器性能的检测方法主要有试验台法和实验架法^[1], 并且由于施工现场环境位于室外, 有震动、粉尘、电磁干扰等不利因素, 对防坠安全器制动速度的实时检测仍没有一个可靠的电子测量手段^[2]。因此本文设计了一种基于 STM32 的增量式编码器测速模块, 编码器通过联轴器连接齿轮并与齿条啮合, 升降机吊笼运动带动齿轮旋转, 后测速模块测量编码器的转速, 达到实时检测施工升降机升降速度的目的^[3]。根据齿轮渐进式防坠安全器的标准 GB/T 34025-2017《施工升降机用齿轮渐进式防坠安全器》规定齿轮渐进式防坠安全器最大制动速度

414r/min、误差范围为 1%, 实测防坠器动作速度 (平均值) 为 110 (r/min)。因此本文在速度标定实验台上进行了速度 (100~1000 r/min) 标定实验。由于施工现场噪声较大, 环境复杂, 会对采用增量式编码器及单片机作为前端数据采集模块这一精度与灵敏度较高的电子器件产生噪声干扰。为了降低环境因素对信号实时采集的影响^[3], 有效还原测量结果的真实性, 需对测量结果进行信号滤波处理, 而数据滤波可以有效降低受环境噪声干扰产生的测量偏差, 以验证数据采集系统的可靠性, 实现对施工升降机速度的准确测量。本文通过卡尔曼滤波 (Kalman filtering) 算法对数据结果进行处理, 结果表明本设计满足齿轮渐进式防坠安全器测速标准的要求。

1 卡尔曼滤波算法原理

卡尔曼滤波算法在通信、信息控制等领域应用广泛。它是一种建立在线性系统的空间状态基础上, 根据上一时刻系统状态 (测量和预估最优值) 和扰动来估算系统当前状态的最优值, 其采用状态空间的描述法和递归形式, 得到与真实值误差最小的估计值。对于整个滤波过程可描述为已知当前系统的最优估计 (上一时刻的系统状态及输入和扰动对当前系统作用的最优解) 结合下一时刻的输入量和系统扰动推算下一时刻整个系统的状态过程。并且卡尔

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-06-29。

基金项目: 国家质检总局科技计划应用技术研究类项目 (2014QK002); 安徽省质量技术监督局科技计划项目 (13ZJ370020)。

作者简介: 鲁伟 (1993-), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事可编程器件与系统设计方向的研究。

刘士兴 (1969-), 男, 安徽宿州人, 副教授, 主要从事可编程器件与系统设计方向的研究。

曼滤波算法针对计算量较小的数值滤波需求具有良好的处理能力, 对于有噪声扰动 (高斯白噪声) 的非平稳系统状态具有更好的分析能力^[4], 其具有三个基本的特征: 一是卡尔曼滤波是适用于有限维、离散和线性系统的算法, 均可转换为以状态空间描述的系统, 二是系统测量值 (输入量) 并不能确定当前系统状态且与增益无关, 三是系统状态量与控制量服从高斯分布时, 才可有卡尔曼滤波递归公式计算得到的高斯随机变量的条件均值和方差, 以此得到最优估计值。因此针对本文的测速环境和滤波需求, 卡尔曼滤波是一种最优的数字滤波和信号处理器。

为了很好地描述卡尔曼滤波过程, 需引入一个离散控制过程的系统, 并用式 (1) 的线性随机微分状态方程和式 (2) 的观测方程来表示^[5]。

状态方程:

$$X_k = AX_{(k-1)} + BU_{(k-1)} + W_{(k-1)} \quad (1)$$

观测方程:

$$Z_k = HX_k + V_k \quad (2)$$

上述两式中, k 时刻的状态量、观测值和观测噪声分别为 X_k 、 Z_k 和 V_k , $k-1$ 时刻的状态量、控制量和系统噪声分别为 X_{k-1} 、 U_{k-1} (无控制量则为零) 和 W_{k-1} , A 、 B 、 H 为系统参数, 若是多模系统则都为矩阵。

实际运用中, 所要滤波的系统除要满足上述两个基本公式之外, 由上文叙述的卡尔曼滤波基本特征可知还需假定系统为高斯白噪声激发的线性动态系统且每次测量值还需含有高斯白噪声分量。在满足这些条件之下, 整个卡尔曼滤波可分为两个步骤即预测和更新, 其中预测过程是指前一时刻的状态最优估值来估计当前状态的最优值, 更新过程是指利用预测过程得到的当前时刻最优估值更新当前系统的状态量, 因此卡尔曼滤波算法是一种不断迭代递归的预测-更新方法。则用于描述卡预测过程的方程见式 (3) 及 (4), 描述状态更新方程则由式 (5)、(6) 和 (7) 三个方程组成^[5]。

$$\hat{X}_{k_p} = A\hat{X}_{k-1} + BU_{k-1} \quad (3)$$

$$P_{k_p} = AP_{k-1}A^T + Q \quad (4)$$

当前状态卡尔曼滤波增益:

$$K_k = \frac{P_{k_p}H^T}{HP_{k_p}H^T + R} \quad (5)$$

当前状态最优估算值:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k_p} + K_k(Z_k - H\hat{X}_{k_p}) \quad (6)$$

均方差更新公式:

$$P_k = (I - K_kH)P_{k_p} \quad (7)$$

其中: \hat{X}_{k_p} 为 k 时刻迭代前预测估计值, 是滤波算法迭代公式的中间计算值, \hat{X}_k 为 k 时刻迭代后预测估计值; P_{k_p} 为迭代前协方差估计值也为中间计算值, P_k 为迭代后协方差估计值; Q 为系统过程噪声激励协方差; K_k 为卡尔曼滤波增益矩阵, 是滤波的中间计算结果; R 为测量噪声的协方差; Z_k 为 k 时刻的测量值, 是算法迭代过程的输入量; A 、 B 、 H 为系统转移矩阵。实际运用中, 通过建立滤波问

题模型, 在给定系统协方差和状态初始值时, 可确定 A 、 B 、 H 、 Q 和 R 的值, 由卡尔曼滤波的五个迭代方程估计下一时刻的系统最优估计状态^[6]。

本文建立的速度测量系统中, 升降机速度可认为是连续变化的, 同时整个坠落过程中并没有额外增加系统控制量, 因此卡尔曼滤波迭代方程中可选定 $A=1$, $BU_{k-1}=0$, $H=1$ 。但由于测速系统在不同的环境下速度值不同, 因此, Q 和 R 的值将通过具体的实验确定。

2 硬件设计

2.1 速度传感器

设计中主要由增量式编码器和信号采集模块组成速度传感器。

2.1.1 增量式编码器

现场对施工升降机进行测试实验时, 增量式编码器通过联接器硬连接在齿轮上, 是直接采集齿轮转速的前端器件, 因此对编码器的选型变得尤为重要, 其精度直接影响测速的准确性^[7-9]。文中采用的增量式编码器 (HN3806-1200-AB) 分度为 1200 脉冲/转、每分钟最大转速 5000 rpm, 能够识别 0.3° 的转角变化, 在具有较高测速精度的同时, 还拥有抗震、抗冲击的能力, 能很好地应用于现场工作环境。

2.1.2 信号采集模块

设计中选用的微处理器为意法半导体公司的 STM32F103 工控板作为信号采集和处理单元, 其主要具有 CAN 总线、RS232 全双工串行总线等工业上常用的通信接口, 512 kB 的 Flash 容量, RAM 大小为 64 kB, 还拥有 80 个通用 I/O 口和 8 个 16 位通用定时器, 适合作为数据采集和处理的控制模块。

信号采集模块内部连接如图 1 所示。首先增量式编码器的 A、B 相分别与单片机的 PA1、PA0 两个 I/O 口引脚实现信号线连接, 其次, 当编码器输出脉冲信号时, 由单片机接收并处理, 数据处理完成后通过 PA9、PA10 两个串口将表示速度的信号电平传输至用于信号电平转换的 MAX232 模块, 最后, 通过 DB9 航空插头实现与上位机的硬连接, 达到实时采集速度数据的目的。

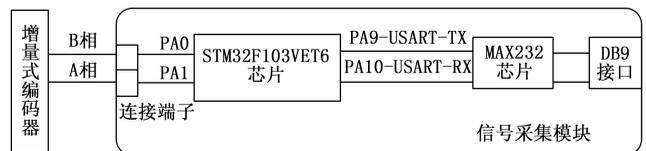


图 1 信号采集模块连接示意图

2.2 速度标定实验台

为了检验信号采集模块实时采集速度数据的准确性, 在速度标定实验台上进行了多次速度标定实验, 实验采用 TSTA (东元) 系列的伺服电机及伺服驱动器, 且试验台内设置了分辨率为 8192ppr 的编码器, 在设定额定转速条件下, 电压变动率 ($\pm 10\%$) 对伺服系统的影响在 $\pm 0.2\%$ 以下,

而负载变动率 (0~100%) 伺服系统的影响也在 $\pm 0.03\%$ 以下, 具有很高的速度控制精度且标定试验台本身的误差为 0.049%。实验原理示意图如图 2 所示。

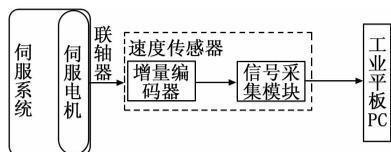


图 2 速度标定试验台结构图

如图 2 所示, 伺服电机通过联轴器与编码器相连, 当伺服控制系统设置标定转速时, 由伺服驱动器驱动编码器旋转, 速度稳定后, 由信号采集模块对编码器的输出脉冲计数并定时测速, 后通过 DB9 接口传输至上位机 PC, 做进一步的优化和显示。编码器转速计算公式见式 (8)。

$$V = \frac{N}{MT} (\text{r/min}) \quad (8)$$

N 为时间 T 内单片机读到的脉冲个数, T 为单片机定时时间 (s), M 为增量编码器的线数。

3 软件设计

为提高采样精度, 降低速度误差率, 采用变 M 算法即对编码器输出的脉冲数 4 倍叠加^[10]、计数时的上下溢预处理和定时器 16 位扩展成 32 位等处理, 可保证在没有强电干扰或巨大噪声等恶劣环境下, 基本不丢失脉冲。并且在 STM32 正交编码模式下, 计数器会根据增量编码器的速度和方向自动进行修改, 其内容始终表示编码器的位置, 计数方向对应于所连传感器的旋转方向^[11]。且 STM32 单片机正交编码模式自带的计数方向识别, 抖动滤波处理让编码器的使用更加高效, 精准, 这是不使用其他类型单片机作为系统微处理器的主要原因^[12-13]。该模式下, 理论可测速度值为 $1/4 \sim 2^{32}/4$ (r/min), 因此在给定的误差下, 本设计理论上完全可以应用于低速环境下测速。

信号采集模块—编码器硬件配置过程中, 将 STM32F103 工控板的 PA0、PA1 两个 I/O 口先配置成数据输入输出串口, 并与编码器的 B、A 相信号线连接, 用于接收编码器的输入脉冲信号; 将 STM32F103 集成的定时器 TIM2 配置成正交编码器模式, 对从增量式编码器接收的每一个脉冲信号的上升沿和下降沿各计数一次; 将定时器 TIM3 配置成定时中断模式, 用于计算定时中断周期内的编码器转速, 并通过 DB9 接口实时速度数据传输至上位机, 完成数据采集与处理, 其数据采集处理流程如图 3 所示。

工控板通电进行数据采集和处理之前, 数据采集模块需先完成程序初始化, 主要包括串口初始化和定时器初始化等。

3.1 串口初始化

设计中两个 I/O 口与上位机通信, 两个 I/O 口用于接收编码器脉冲信号。程序通过调用 GPIO_init() 函数初始化 I/O 口, 将输入信号脉冲的 I/O 口配置成浮空输入, 用于全双工通信的 I/O 口配置为复用推挽输出和浮空

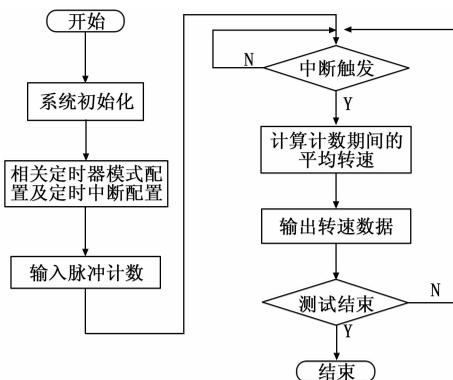


图 3 脉冲计数、定时测速程序流程图

输入, 最后设置校验位、停止位和波特率等做串口通信协议匹配。

3.2 定时器初始化

信号采集单元功能设计核心是利用定时器定时对编码器信号脉冲计数。首先将一个定时器初始化为正交编码器模式, 用于对脉冲信号计数, 另一个定时器初始化为定时中断模式, 实现周期性的数据处理

4 误差分析

对本设计的速度测量范围和可靠性进行分析, 在速度标定实验台上进行了多次标定实验, 在数据采样周期为 10、15、20、25、30 ms 和速度标定试验台标定速度范围为 100~1000 r/min 条件下, 本系统测量的速度误差和方差如图 4、5 所示 (已叠加标定试验台本身的误差 0.049%)。

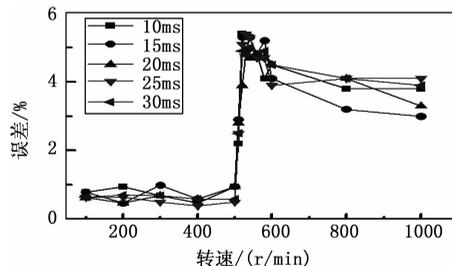


图 4 速度误差与转速的关系

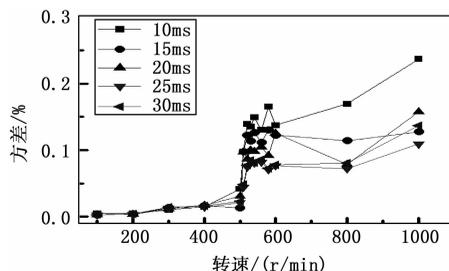


图 5 速度方差与转速的关系

考虑到施工升降机的速度平均值为 1 m/s 即 159 r/min 左右, 如图 4、5 所示, 速度 200 r/min 以内采样周期为 25 ms 误差率更为稳定, 数据离散型也较小。可以看出, 速度为 500~510 r/min 时, 速度误差和方差发生了剧增, 所以为得

到极限测量值, 在标定速度为 500~510 r/min, 采样周期为 25 ms 条件下又进行了多次标定实验, 实验结果见表 1。

表 1 采样周期 25 ms. 速度误差

速度 r/min	501	502	503	505	507	509
误差%	1.752	2.042	3.487	3.731	4.323	5.124

用 origin 做处理后的结果如图 6 所示。

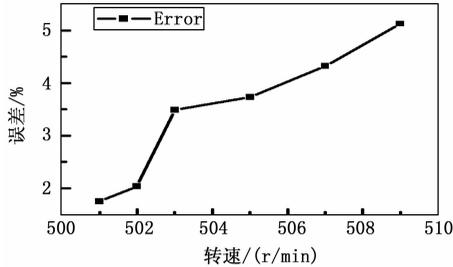


图 6 采样周期 25 ms, 速度误差与转速的关系

如图 6 所示, 速度在 502 r/min 之后, 误差会有一个很大的增加, 因此本系统对速度的极限测量值为 502 r/min。因此被测速度在 100~502 r/min 范围内, 系统测量精度较高。由上述分析可知速度在 100~500 r/min 之间时, 误差率都在 1% 以内, 而一旦超过 500 r/min 时误差会快速增大, 超过 510 r/min 时误差急剧增大。且该速度范围内的数据离散程度大致相同, 表示实验采用的算法能够使单片机稳定采样, 反之, 当转速超过 500 r/min 时误差率, 方差迅速增大, 单片机不能准确采样, 数据离散程度急剧增大。

但是由图 4、5 可知, 误差均大于 0, 说明存在系统误差, 这是由于标定试验台测试时抖动引起的噪声影响。为了更加准确的得到系统检测速度的误差范围, 采用卡尔曼滤波的方法对数据进行处理。实际检测中, 由于施工升降机实际工作的转速分别约为 159 r/min 和 382 r/min, 因此选取了 5 个需标定的转速点分别为 100、200、300、400、500 r/min, 并分别在采样周期为 10、15、20、25、30 ms 时, 利用 MATLAB 分析软件对每组数据采集点进行滤波仿真分析, 处理结果如图 7 所示。

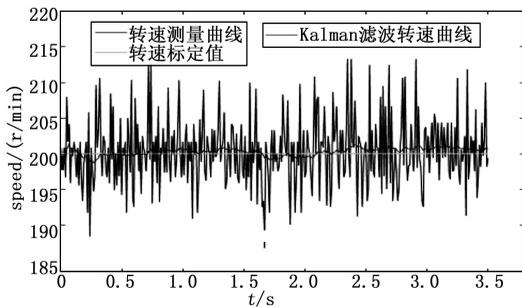


图 7 转速测量及滤波曲线

如图 7 所示, 在对测量数据进行卡尔曼滤波处理前, 转速测量曲线存在较大的波动, 而滤波之后, 转速测量值明显收敛于速度标定曲线。因此分别对不同采用周期、不

同标定转速的测量数据进行滤波处理, 并分析得到每组实验转速平均值, 然后比较不同条件下测量速度的误差变化, 转速验证试验的测量结果如图 8 所示。

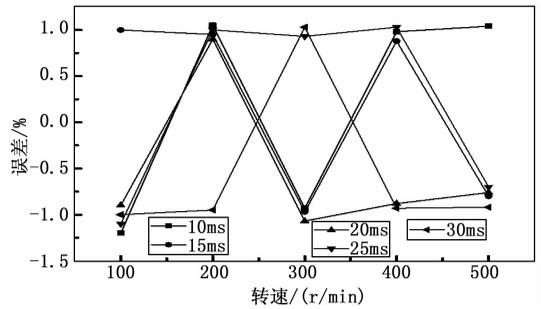


图 8 滤波后的转速误差

通过图 8 中转速验证实验的测量结果可以看出, 在设定的采样周期范围内, 转速测量结果受采样周期的变化影响较小, 并且转速范围在 100~500 r/min 之间的测量误差均约为 ±1%, 满足齿轮渐进式防坠安全器对动作速度测量的检测要求。

5 结论

标定速度超过 500 r/min 时, 误差开始增大, 且要考虑现场干扰等情况, 被测物速度不宜超过 500 r/min 即 3 m/s。因此本设计采用的算法适合在低速情况下测量。

根据施工升降机的安全标准 GB/T 34025-2017, 防坠安全器的最大制动速度为 414 转/min 且速度误差 1%, 并且一般施工升降机的平均实测速度为 110 r/min。数据分析表明, 测量速度范围在 100~500 r/min 之间时, 误差率都在 ±1% 以内, 因此本设计完全符合工程施工安全要求, 可应用于施工升降机的实时检测。

参考文献:

- [1] 冯功斌, 段红莉. 施工升降机防坠试验方式探讨 [J]. 建筑机械, 2016 (4): 85-86.
- [2] 卢立东, 马俊. 便携式施工升降机防坠安全器检测装置 [J]. 建筑机械, 2013 (21): 113-114.
- [3] 马溢坚, 黄胜红, 陈巍. 防坠安全器现场检测装置信号处理方法 [J]. 起重运输机械, 2017 (8): 37-41.
- [4] 窦晓波, 焦阳, 全相军, 等. 基于线性卡尔曼滤波器的三相锁频环设计 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (3): 206-218, 336.
- [5] 严锦涛, 陈砚桥, 刘晓威. 基于卡尔曼滤波理论的质量数据评估方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2018, 38, 290 (8): 142-145+184.
- [6] Xu Y B, Xu K, Wan J W, et al. Research on Particle Filter Tracking Method Based on Kalman Filter [J]. IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, 2018, 1564-1568.
- [7] 徐洋, 余辉, 黄敬贵. 基于 STM32 单片机的增量式编码器模拟装置设计 [J]. 工业控制计算机, 2015 (5): 59-61.
- [8] 王少君, 刘永强, 杨绍普, 等. 基于光电编码器的测速方法研

究及实验验证 [J]. 自动化与仪表, 2015, 30 (6): 68-72.

[9] 丁卫东, 朱卫民, 曹玲芝. 基于增量式光电编码器电机测速系统的设计 [J]. 轻工学报, 2013 (6): 95-97.

[10] 文晓燕, 郑琼林, 韦克康, 等. 增量式编码器测速的典型问题分析及应对策略 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (2): 185-189.

[11] 宋刚, 秦月霞, 张凯, 等. 基于普通编码器的高精度测速 (上接第 258 页)

$W = \{0.1189, 0.0906, 0.1022, 0.0808, 0.0749, 0.0677, 0.0711, 0.0482, 0.0425, 0.0686, 0.0645, 0.0737, 0.0593, 0.0372\}$ 。

6.2 评价数据分析

6.2.1 评价指标分值数据分析

根据测试人打分计算均值, 可以看出座椅排距、过道和空间压抑感评分排列最高。验证结果符合测试场景的安排。在测试前, 将座椅排距设置的相对较大。因此, 被测试者感觉到舒适性, 给予最高的评分; 客舱是模拟 C919 客舱段, 过道宽度比目前现有飞机略宽。因此让被测试者感到舒适。在空间方面, 由于设置了情景照明系统, 压抑感减到最小, 也让被测试者感到舒适。

6.2.2 客舱舒适性整体评分分值分析

根据受试者的舒适性指标打分数据, 结合前一节的权重向量, 可以计算出此舱段舒适性的总评分为 6.4。舒适性满分以 10 分为标准, 因此此客舱段的舒适性还有待提高。这与当前舱段的现状是非常吻合。该舱段仅仅是简单模拟了 C919 舱段, 在制作细节和真实性方面与实际仍然有差距。

6.2.3 评价过程分析

通过应用基于层次分析法的客舱舒适性评价方法, 开展评价工作有了具体的评价标准指导, 便于被测试者使用和打分。同时, 整个过程也较为方便。

7 结论

1) 开展了舒适性理论分析。舒适是与周围环境相互作用, 受心理、生理和身体因素影响的主观和个人状态结果。共有 22 个因素影响乘客的舒适性。座椅、腿部空间、IFE、温度、活动、噪声和服务是最重要的因素。

2) 提出了基于层次分析法和指标评分标准的飞机客舱舒适性评价方法。首先需要确定飞机客舱舒适性评价的指标, 并构建完整的指标体系。进一步, 逐个确定舒适性评价指标的评分标准。然后运用层次分析法, 建立民航客舱评价的递阶层次结构, 构造两两比较判断矩阵, 逐层计算排序权重向量, 计算总目标排序向量。最后结合总目标排序向量, 得出整个客舱舒适性评价分值。

3) 构建了完整的民航客舱舒适性评价指标体系, 并建立客舱舒适性评价的层次结构图。准则层包括 5 个方面因素: 座椅、IFE 设备、环境、乘客活动和主观感受。C 层子准则层 (指标层), 共细分为 21 个指标因素。

4) 制定了具体舒适性指标的具体评分标准。对于舒适

速方法 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36 (8): 1169.

[12] 杜颖财, 王希军, 王树洁, 等. 增量式编码器自动检测系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26 (11): 993-998.

[13] 赵长海, 万秋华, 孙莹. 光电轴角编码器的误码检测系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26 (5): 463-468.

性指标的评分结果采用 0~9 分的 5 级评分标准, 分别对应于 1、3、5、7、9 分的分值。简便易行, 一定程度上降低了打分过程中的主观随意程度。

参考文献:

[1] 王庆. LED 室内照明舒适性视觉评价方法及技术的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

[2] 薛铁龙. 某轿车乘员舱内环境舒适性评价与分析研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.

[3] 薛红军, 陈迎春, 张晓燕. 基于人体测量及座压分布的座椅空间舒适性模型 [A]. 智能信息技术应用学会会议论文集 [C]. 2011.

[4] Intelligent Information Technology Application Association. applied computing, computer science, and computer engineering (ACC 2011 V1) [C]. Intelligent Information Technology Application Association, 2011: 7.

[5] 王海涌. 高速列车舒适度评价机理及其应用研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.

[6] 陈祥. 高速铁路客车乘坐舒适度综合评价模型研究 [D]. 西南交通大学, 2010.

[7] 刘敬, 余隋怀, 初建杰. 基于主客观综合赋权的民航客舱舒适性评价 [J]. 图学学报, 2017, 38 (2): 192-197.

[8] 许松林, 周健, 樊彦予. 民用支线飞机客舱空间舒适性评价研究 [J]. 航空科学技术, 2014, 25 (7): 17-22.

[9] Pineau C. The psychological meaning of comfort [J]. International Review of Applied Psychology, 1982, 31: 271-283.

[10] Slater K. Human comfort [M]. Springfield, IL: Charles Thomas, 1985.

[11] Dumur E, Bernard Y, Boy G. Designing for Comfort [M]. Human Factors in Design, edited by D. Ward, K. A. Brookhuis, and C. M. Weikert, Maastricht: Shaker Publishing, 2004.

[12] Richards L G. On the psychology of passenger comfort [M]. Human Factors in Transport Research (Vol. 2), edited by D. J. Osborne and J. A. Levis, London: Academic Press, 1980.

[13] Richards L G, Jacobson I D, Kalthau A R. What the Passenger Contributes to Passenger Comfort [J]. Applied Ergonomics, 1978, 9 (3): 137-142.

[14] Naseem A, et al. The thematic structure of passenger comfort experience and its relationship to the context features in the aircraft cabin [J]. Ergonomics, 2014, 57: 801-815.

[15] 上海飞机客户服务有限公司. 民用飞机客舱舒适性评价指标评分标准研究报告 [R]. 2018.

[16] 上海飞机客户服务有限公司. 民用飞机客舱舒适性评价方法实体模型评分验证报告 [R]. 2018.