

基于层次分析法的装配序列评价技术^①

谢海涛, 仲梁维

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 提出了一种基于层次分析法的装配序列评价方法, 该方法通过计算评价子项相对权重, 利用基于 BP 神经网络的判断矩阵调整方法对对比矩阵进行一致性检验与修正, 以此获得装配序列总体评价结果。该评价方法的实现, 提高了装配序列优选的自动化水平, 并以小车总成虚拟装配实例对该评价方法进行了验证。

关键词: 装配序列; 层次分析; BP 神经网络; 序列规划; 序列评价

Assembly Sequence Evaluation Method Based on Analytical Hierarchy Process

XIE Hai-Tao, ZHONG Liang-Wei

(College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: This paper proposes an assembly sequence evaluation method based on the analytical hierarchy process (AHP) which can evaluate the product assembly quality by calculating the index weights. Then we give a new method based on the BP Neural Network to check and amend the compatibility of the contrast matrix. Using this method, the evaluation efficiency is heightened. The theory is validated by an example of vehicle system.

Key words: assembly sequence; analytical hierarchy process; BP neural network; sequences planning; sequences evaluation

装配序列规划是在装配建模的基础上, 对满足一定约束条件的零件序列的装配顺序进行推理^[1]。传统的机械产品生产制造中往往到产品的最终装配时才能发现设计缺陷, 从而影响产品的质量和生产周期。为了达到降低装配成本, 提高装配效率的目的, 在满足装配体几何、工艺、机械等要求的前提下, 找出一条比较合理的装配路线在整个虚拟装配过程中具有重要意义。

目前装配序列评价方法主要是根据工艺性要求对可行序列进行整体性评价, 具体方法有模拟退火法、模糊综合评价法^[2,3]和熵权法^[4]等。王孝义等^[5]提出基于模拟退火算法的装配序列优化规划模型, 并对算法的性能和速度进行了分析、处理; 周开俊等^[6]从信息论的观点出发, 提出基于熵权与模糊集的产品装配序列综合评价方法。本文提出了基于层次分析法的装配序列评价方法, 能有效的提高装配序列优选的自动化水平。

1 基于层次分析法的装配序列评价

1.1 层次分析法简介

层次分析法(AHP)是一种将定性与定量分析有机结合的多属性决策方法, 该方法按照思维、心理的规律把决策过程层次化、数量化, 从而便于决策^[7]。层次分析法进行评价决策的一般流程如图1。

该方法进行决策分析的一般步骤是: 第一步: 确定评价目标, 找出影响目标优劣的评价属性项。第二步: 建立评价模型, 因为分层影响评价的运算复杂性, 所以在层次分析法中两层结构的模型。第三步: 提取判断矩阵, 一般通过咨询专家来获取。判断矩阵元素的取值一般按照萨迪 1~9 标度给出。具体含义如表1。第四步: 判断判断矩阵是否符合一致性要求, 并对判断矩阵进行实时调整; 第五步: 对符合要求的判断矩阵进行运算, 计算出它的权重向量进行向量排序。第六步: 完成评价决策。

① 收稿时间:2011-05-27;收到修改稿时间:2011-07-08

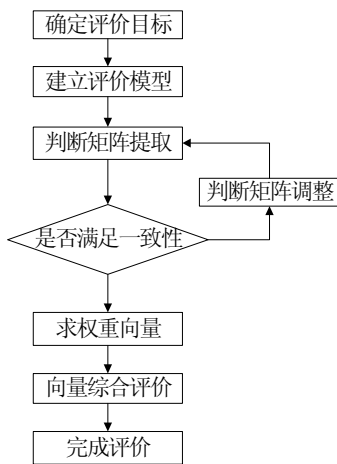


图 1 层次分析法操作流程

表 1 萨迪标度取值

S_i 比较 S_j	标度 a_{ij}
同样重要	1
稍微 (不) 重要	3 (1/3)
相当 (不) 重要	5 (1/5)
强烈 (不) 重要	7 (1/7)
极端 (不) 重要	9 (1/9)
重要介于相邻两奇数之间	2 4 6 8
不重要介于相邻两奇数之间	1/2 1/4 1/6 1/8

1.2 装配序列评价模型的建立

根据生成的不同装配序列建立装配序列评价模型。评价模型可以分为三层结构：第一层为总体评价目标，第二层为参与评价的装配序列子项目，第三层为评价标准。评价模型如图 2。

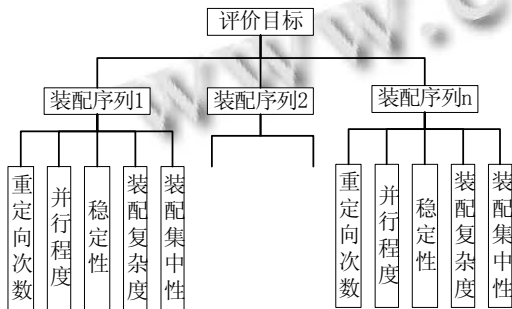


图 2 装配序列评价模型

1.3 评价子项相对权重的获取

在上述五个评价子项的相对评分值的获取上采用

咨询某集团具有丰富设计经验的设计人员的方式获取，并对图 2 的各评价项目作如下定义： A_1 ，重定向次数； A_2 ，并行程度； A_3 ，稳定性； A_4 ，装配复杂度； A_5 ，装配集中性。同时定义 a_{ii} 表示 A_i 对其自身的重要程度， a_{ij} 表示 A_i 对 A_j 的重要程度。

根据咨询结果求出成对比较矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵中的元素 a_{ij} 存在如下关系：

$$\begin{cases} a_{ij} > 0 \\ a_{ii} = 1 \\ a_{ij} = 1/a_{ji} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)为评价模型对比矩阵，其规模的大小和评价模型的分级与评价子项目的多少有关。一般每级的评价属性控制在 7 个以下，即总对比数不超过 21 组，如果超出则再分层处理。本论文评价模型采用三层结构最底层有 5 个子评价属性，在合理的范围内。

在求得成对比较矩阵后，可根据式(3)求解矩阵的 n 个特征值、最大特征值为和特征向量：

$$(A - \lambda I)X = 0 \quad (3)$$

式中： A 为 $n \times n$ 的一致性矩阵。

令 ω_i ， ω_j 为属性 A_i ， A_j 的权重，并作如下定义 $a_{ij} = \omega_i / \omega_j$ ，则式(1)可变换为：

$$A = \begin{bmatrix} \omega_1 / \omega_1 & \cdots & \omega_1 / \omega_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_n / \omega_1 & \cdots & \omega_n / \omega_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

使 W 为 n 个子评价属性的权重向量，即 $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ ，则矩阵 A 与 W 的内积为

$$AW = \begin{bmatrix} \omega_1 / \omega_1 & \cdots & \omega_1 / \omega_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_n / \omega_1 & \cdots & \omega_n / \omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n\omega_1 \\ \vdots \\ n\omega_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据(3)，可求出式(5)中权重向量 W 恰为矩阵 A 的特征向量，且 n 恰为一个特征根。记 λ_{\max} 为最大特征值，则式(5)改写为：

$$AW = \lambda_{\max} W$$

式中： W 为非零向量，且满足 $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1$ 。

1.4 对比矩阵一致性检验与修正

专家根据经验给出的矩阵 A 可能存在不一致性现象,这就需要进行一致性检验与修正。验证判断矩阵的一致性,需要使用一致性指标 C.I.(consistency index),定义如下:

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \begin{cases} =0, & \text{判断矩阵具有完全一致性} \\ >0.1, & \text{判断矩阵不符和一致性要求} \\ \leq 0.1, & \text{判断矩阵不完全符合一致性} \\ & \text{但在允许范围内} \end{cases} \quad (6)$$

式中: λ_{\max} 为矩阵 A 的最大特征值, n 为矩阵的阶数。

在实际应用中当增加评价子项目时会增加判断矩阵的阶数,这样会造成判断矩阵一致性不同程度的改变。由此, Saaty 给出了随机性指标 R.I. (random index), 用来调整判断矩阵因阶数变化引起 C.I. 值的变化, 从而得到一致性比率 C.R. (consistency ratio)。随机指标采用表 2 所列数值, C.R. 与 C.I.、R.I 存在如下关系:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (7)$$

当时, 判断矩阵 A 满足一致性要求。

表 2 平均随机一致性指标 R.I.

矩阵阶数	1	2	3	4	5
R.I.	0	0	0.52	0.89	1.12
矩阵阶数	6	7	8	9	10
R.I.	1.26	1.36	1.46	1.49	1.52
矩阵阶数	11	12	13	14	
R.I.	1.54	1.56	1.58	1.59	

对判断矩阵的修正的方法有许多, 本文提出一种基于 BP 神经网络的判断矩阵调整方法, 具体步骤如下:

1) 构建完全一致性矩阵。假设专家给出的判断矩阵为 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 对其施加如下数学变换:

$$a' = \sum_{i=1}^n a_{il} / \sum_{j=1}^n a_{jl}, \text{ 其中 } i, j \in \Omega \quad (8)$$

则由此构建的判断矩阵 $A' = (a'_{ij})_{n \times n}$ 即为完全一致性矩阵。

2) 建立判断矩阵调整的 BP 神经网络模型。BP 神经网络的结构由输入层、输出层和中间层(或称隐含层)组成。根据 BP 神经网络的结构进行模型转化。由式(2)可以把矩阵转化为如下形式:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

把判断矩阵 A 的元素 a_{ij} 作为 BP 神经网络输入层的输入“ x_i ”, 则 BP 神经网络共有 n_2 个输入; 同理, BP 神经网络输出层的输出“ y_i ”也有 n_2 个。隐含层神经元个数一般不超过 30 个^[8]。由式(8)构造完全一致性矩阵, 作为 BP 神经网络的教师信号。转化的模型如图 3。

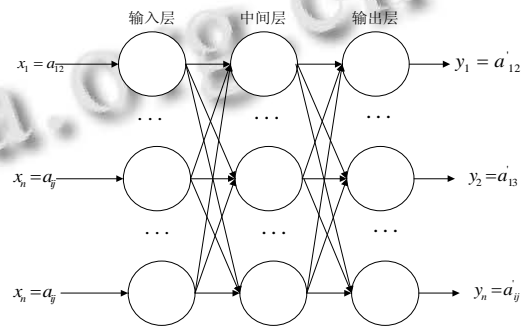


图 3 BP 神经网络模型

3) 简化 BP 神经网络模型。随着判断矩阵阶数的增加 BP 神经网络模型的输入层神经元个数会成二次方形式增加, 从而使神经网络复杂化。所以有必要利用判断矩阵的性质对 BP 神经网络模型进行简化。观察判断矩阵我们可以得到矩阵 A 具有以下特点:

- ① 正互反性;
- ② 主对角线元素恒为 1;
- ③ 由萨迪 1~9 标度可知判断矩阵 A 的元素的取值 $a_{ij} \in (1/9, 9)$, 且大于 1 的元素的个数等于小于 1 的元素的个数。

在借助于 MATLAB 神经网络工具箱进行 BP 神经网络算法编程时选择双曲正切 S 型函数作为 BP 神经网络的传递函数。该函数返回值在 (-1, 1) 之间。结合矩阵 A 的三个特点, 选择矩阵 A 中除主对角线元素以外元素值小于等于 1 (如果等于 1 则等于 1 的元素一定是成对出现取等于 1 的元素个数的一半) 的元素作为 BP 神经网络输入层的输入“ x_i ”。则输入层神经元的个数可以减少为: $n(n-1)/2$ 个。相应的输出层的输出“ y_i ”也减少为 $n(n-1)/2$ 。这样 BP 网络模型就得到了大大的简化。

4) MATLAB 编程求解, 对判断矩阵 A 做调整。首先计算矩阵 A 的最大特征值和一致性指标 CR, 如果

CR 不满足要求则需要对矩阵 A 进行调整。在进行 BP 神经网络算法调整前要明确神经网络的输入、教师信号和预设误差精度 ϵ 。其次，经 BP 算法调整后的判断矩阵 A' 要重新返回专家组调整确认。最后计算调整后的判断矩阵 A'' 的最大特征值和一致性指标 CR，判断 CR 是否满足要求，若不满足要求则返回 BP 神经网络算法修改误差精度 ϵ 重新调整；若 CR 满足要求则结束调整。

5) 根据求解结果重构判断矩阵。

6) 返回专家把使判断矩阵元素调整为最接近的打分值，使其符合萨迪标度。

1.5 方案比较与衡量

利用层次分析法对三条装配序列 P_1, P_2, P_3 进行评估。层次分析法评比较装配序列时不进行客观评估的步骤，而是采用不同装配序列间彼此两两比较的方式，让专家根据自己的偏好对装配序列直接打分。例如，对于装配序列 P_1, P_2 专家只需要衡量出其相对于评价子项目 A_1, A_2, \dots, A_n 的符合程度是绝对符合、颇符合或是同等符合即可。

对每个属性进行装配序列间比较的具体步骤是：评估尺度收集，本系统仍然采用咨询专家的形式；装配序列间成对比较矩阵的获取；特征值、特征向量计算；一致性验证。

建立装配序列间的成对比较矩阵。令矩阵 P_1 为考虑属性 A_1 下 3 个装配序列间的成对比较矩阵，以 p_{12} 表示装配序列 P_1 相对于装配序列 P_2 符合属性 A_1 的程度，则属性 A_1 下装配序列间的成对比较矩阵 P_1 如式(9)所示：

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & p_{12} & p_{13} \\ 1/p_{12} & 1 & p_{23} \\ 1/p_{13} & 1/p_{23} & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

令 P_2, P_3 依次分别为考虑属性 A_2, A_3 下 3 个装配序列间的成对比较矩阵，由此可求出 P_4, P_5 分别相对 A_4, A_5 的比较矩阵。

求出成对比较矩阵 P_i 的特征向量 $\omega_{p_i} = [\omega_{1p_i} \ \omega_{2p_i} \ \omega_{3p_i}]^T$ (其中 $i=1,2,\dots,5$)，写成矩阵的形式如下式所示：

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_{p_1} & \omega_{p_2} & \omega_{p_3} & \omega_{p_4} & \omega_{p_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1p_1} & a_{1p_2} & a_{1p_3} & a_{1p_4} & a_{1p_5} \\ a_{2p_1} & a_{2p_2} & a_{2p_3} & a_{2p_4} & a_{2p_5} \\ a_{3p_1} & a_{3p_2} & a_{3p_3} & a_{3p_4} & a_{3p_5} \end{bmatrix} \quad (10)$$

AHP 在装配序列成对比较矩阵所得的特征向量，反映的是 3 个装配序列在各个属性下的相对价值，且其总合为 1。因此，被评估的装配序列越多，每个装配序列分配到的相对价值越少。

根据一致性指标 C.I. 的定义，使用 5 个成对比较矩阵求得的最大特征值，可分别验证 3 个成对比较矩阵的一致性。要求一致性比率 $C.R. \leq 0.1$ 时，成对比较矩阵才符合一致性要求。

将权重矩阵 W 和打分矩阵 ω 做内积，即可求得每条装配序列的总得分，并以此作为装配序列 P_1, P_2, P_3 的最后排序，如下式：

$$\omega W = \begin{bmatrix} \omega_{1p_1} & \omega_{1p_2} & \omega_{1p_3} & \omega_{1p_4} & \omega_{1p_5} \\ \omega_{2p_1} & \omega_{2p_2} & \omega_{2p_3} & \omega_{2p_4} & \omega_{2p_5} \\ \omega_{3p_1} & \omega_{3p_2} & \omega_{3p_3} & \omega_{3p_4} & \omega_{3p_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \\ \omega_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{1p_1}\omega_1 + \omega_{1p_2}\omega_2 + \omega_{1p_3}\omega_3 + \omega_{1p_4}\omega_4 + \omega_{1p_5}\omega_5 \\ \omega_{2p_1}\omega_1 + \omega_{2p_2}\omega_2 + \omega_{2p_3}\omega_3 + \omega_{2p_4}\omega_4 + \omega_{2p_5}\omega_5 \\ \omega_{3p_1}\omega_1 + \omega_{3p_2}\omega_2 + \omega_{3p_3}\omega_3 + \omega_{3p_4}\omega_4 + \omega_{3p_5}\omega_5 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2 小车总成装配实例

小车总成由小车架、梯子平台、小车车轮组、起升滑轮组，司机室等组成，其装配结构图如图 4 所示：

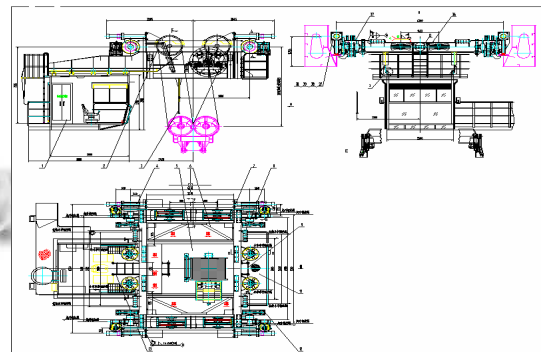


图 4 小车总成装配结构图

1) 装配约束

在小车总成的装配中用到的约束类型主要有面对齐、面匹配、轴对齐等几种约束类型。例如司机室与小车架的装配关系为三面对齐约束，小车车轮组与小车架的配合关系为一轴对齐两面匹配约束。最终在 PRO/E 环境下完成的小车总成装配模型如图 5：

2) 装配序列规划

由于小车的组成零件较多因此完全确定小车的全

装配序列比较困难，系统采取分层确定的方法，最后综合在一起就是整体模型的装配序列。下面以小车架的中间横梁为例说明装配序列的确定。如图 6 小车架中间横梁由上下盖板 3，中间筋板 2 和加强板 1 组成，共 5 个零件。

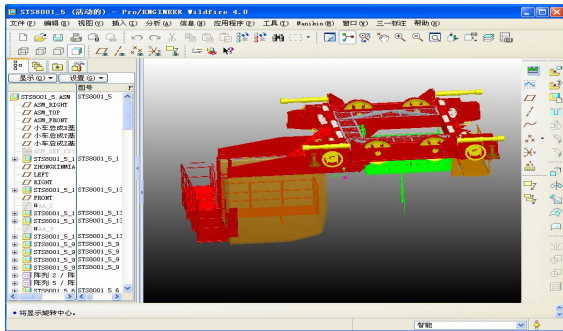


图 5 Pro/E 环境下小车总成虚拟装配

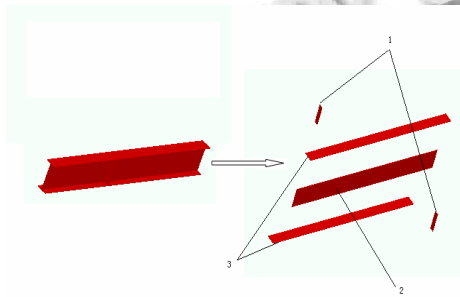


图 6 小车架中间横梁

从图 6 可以看出小车架中间横梁可行的装配序列总共有 4 条，包括：○13-2-3-1-1；○23-2-1-1-3；○32-3-3-1-1；○42-3-1-1-3。

3) 装配序列评价

让专家对 4 条装配路线进行打分得到的成对比较矩阵 A 为：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/9 & 3 & 1/5 \\ 9 & 1 & 5 & 2 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 1/2 \\ 5 & 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

对判断矩阵进行一致性检验，计算矩阵 A 的最大特征根 $\lambda_{max} = 4.4644$ 。

由式(6)、式(7)得： $CR=0.172 > 0.1$ 不满足一致性要求，需要进行一致性调整。在进行调整运算之前，根据 BP 神经网络算法的要求需要进行初始条件的设置。初始条件包括初始连接权值、传递函数、学习函数、训练函数、学习步长、学习效率 and 误差精度。连接权值是大于 0 小于 1 的常数，初始权值的设置在 0~1 的

范围内尽可能小一些。传递函数和学习函数均选择双曲正切函数。学习效率取 $\eta = 0.3$ 。对矩阵 A 进行一致性调整的过程如下：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/9 & 3 & 1/5 \\ 9 & 1 & 5 & 2 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 1/2 \\ 5 & 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$\lambda_{max} = 4.4644$ ， $CR = 0.172$ 构造完全一致性矩阵：

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0.2563 & 2.1202 & 0.5072 \\ 3.9017 & 1 & 8.3608 & 2 \\ 0.4717 & 0.1196 & 1 & 0.2392 \\ 1.9716 & 0.5 & 4.1806 & 1 \end{bmatrix}$$

进行 BP 神经网络算法调整。输入单元的输入取：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{14} \\ a_{31} \\ a_{32} \\ a_{34} \\ a_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/9 \\ 1/5 \\ 1/3 \\ 1/5 \\ 1/2 \\ 1/2 \end{bmatrix}$$

教师信号取：

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{a}_{12} \\ \hat{a}_{14} \\ \hat{a}_{31} \\ \hat{a}_{32} \\ \hat{a}_{34} \\ \hat{a}_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2563 \\ 0.5072 \\ 0.4717 \\ 0.1196 \\ 0.2392 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

设置精度误差 $\epsilon = 0.01$ ，经 50 步调整输出结果为：

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{12} \\ a'_{14} \\ a'_{31} \\ a'_{32} \\ a'_{34} \\ a'_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2563 \\ 0.3134 \\ 0.4717 \\ 0.3134 \\ 0.3696 \\ 0.3696 \end{bmatrix}$$

重构矩阵 A'：

$$A' = \begin{bmatrix} 1 & 0.2563 & 2.1200 & 0.3134 \\ 3.9017 & 1 & 3.1908 & 2.7056 \\ 0.4717 & 0.3134 & 1 & 0.3696 \\ 3.1908 & 0.3696 & 2.7056 & 1 \end{bmatrix}$$

返回专家组调整为：

$$A'' = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 2 & 1/3 \\ 4 & 1 & 3 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 3 & 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

$\lambda_{max} = 4.2105, CR = 0.08 < 0.1$ ，满足一致性指标。判断矩阵可用，计算各装配路线的权重向量得： $W = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4] = [0.1342 \ 0.4876 \ 0.1029 \ 0.2662]$ 。

通过运用层次分析法(APH)对上述实例权重向量的计算，得出由 4 条装配序列的单权重组成的权重向量 W，可以看出 $\omega_2 > \omega_4 > \omega_1 > \omega_3$ ，亦即第二条装配 (下转第 149 页)

间到后,重新启动 TCP 连接。

3.2 监控中心软件设计

监控中心采用 Delphi 进行开发,数据库为 SQL SERVER,主要完成如下功能:各基站信息管理,实时显示各基站运行参数,历史记录显示、查询、统计,各基站参数设置、设备控制,报警信息处理,各报表生成统计。图 9 为基站监控软件界面及测试蓄电池电压的界面。



图 9 基站监控软件界面

4 结语

本文设计了以 GPRS/CDMA 无线网络为通信手段的基站远程监控系统,全方位的对基站各种信息实施了监控,可提高基站运行安全,有效防止偷盗事件,

(上接第 76 页)

序列的权重值最大,从而第二条装配路线最优。

3 结语

本文提出了基于层次分析法的装配序列评价方法,该方法通过计算评价子项相对权重,进而利用基于 BP 神经网络的判断矩阵调整方法对对比矩阵进行一致性检验与修正,最后对各种可行方案进行比较与衡量,以此获得装配序列总体评价结果。具有一定的实用性和先进性,最后给出了小车总成虚拟装配实例。

参考文献

- 1 Toon J. Flying on mars. Georgia Tech. Research Horizons, 2001,19(1):19-23.
- 2 李磊,魏生民.装配序列的模糊综合评价.中国机械工程,2003,9(13):1606-1609.

提高服务质量、实现网络化数字化管理,提高无人值守基站的管理化水平。GPRS/CDMA 两无线网络可由用户自行选择,移动、电信可充分利用自身网络通信优势,可大大降低成本。

参考文献

- 1 Chen X, Yu SB, Yang ZH. Study on VRLA Batteries on-line monitor. Cui JP, Qi JM, eds. Proc. of 2007 8th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Xi'an: IEEE Press, 2007: 3-606-3-610.
- 2 郭佳奇,惠晓威,于希洋.基于 GPRS 超低功耗排污监测终端的设计.计算机系统应用,2010,19(5):145-147.
- 3 蒋新华,雷娟,冯毅,解晶莹.串联电池组电压测量的新方法.仪器仪表学报,2007,28(4):734-737.
- 4 Chen X, Fan YJ, Sun QL. VRLA Battery Internal Resistance On-line Measurement Based on Digital Phase Sensitive Detection. Proc. of Second International Symposium on Test Automation & Instrumentation. Beijing China: World Publishing Corporation,2008:3-1872-3-1875.
- 5 刘春保,洪镇南,张小伟,廖旭辉.基于 CMOS 图像传感器 OV7720 的网络摄像机设计.现代电子技术,2011,34(4):11-16.

- 3 胡小梅,朱文华,俞涛.基于模糊粗糙集的并行装配序列规划方法.2010,46(15):130-134.
- 4 戴国红,张友良,尤飞.基于一种树模型的装配序列优化生成的研究.中国机械工程,2006,8(17):181-185.
- 5 王孝义,张友良,张帆.基于模拟退火算法的装配序列生成与优化.机械科学与技术,2005,5(24):624-627.
- 6 周开俊,李东波,许焕敏.一种产品装配序列的评价方法.计算机集成制造系统,2006,12(4):563-567.
- 7 Saaty TL. Decision making with the AHP. why is the principal eigenvector necessary. European Journal of Operational Research, 2003,145(1):417-424.
- 8 Kondo K. PIGMOD. Parametric and interactive geometric modeler for mechanical design. Computer-Aided Design, 1990,22(10):623-644.