

FMS 规划方案的综合评估方法研究*

孙连胜 宁汝新 张志英

(北京理工大学机械工程与自动化学院 北京 100081)

摘要: FMS 的设计规划是一项非常复杂的系统工程, 影响最终规划方案质量的因素也很多。因此, 针对 FMS 的设计规划问题, 建立一种系统的综合评估模型十分必要。采用层次分析法建立综合评估模型, 并利用模糊分析法在多层次上对规划方案进行综合地分析评估, 比较和论证多种方案的优劣, 从中择优规划方案, 从而指导实施方案并保证系统的各项性能指标。

关键词: FMS 设计规划 层次分析 模糊分析 综合评估

中图分类号: TH18 TP391

0 前言

为适应不可预测、持续发展和快速多变的市场竞争, 现代制造企业之间的竞争越来越激烈。企业必须在适当的时机以较短的时间和较低的费用迅速实现转产, 但目前单机生产方式或刚性生产方式无法迅速实现转产和高效生产。柔性制造系统(FMS)^[1]正是顺应这种需求产生的, 它对企业提高制造环节的效率和柔性, 适应持续多变的市场竞争环境具有重要意义。但由于其复杂性比传统制造方式更高, 规划时所需考虑的因素也更多。如果设计规划得合理, 不仅可以减少系统运行成本和维护费用, 提高设备利用率和系统生产效率, 而且对系统的快速重组和长期可靠运行均具有十分重要的意义。可见, 在实施 FMS 规划方案之前, 对其进行论证评估十分必要。

为此, 采用层次分析法, 通过细化影响规划方案优劣的诸多因素, 提出了 FMS 规划方案的综合评估模型, 并利用模糊分析法, 对其进行综合地分析评估, 比较和论证多种方案, 及时发现方案的不足, 并从中择优规划方案, 指导实施以保证系统各项性能指标, 使设计方案更加成熟完善。

1 FMS 规划

一个典型的 FMS 基本由四个部分组成^[2]: 加工设备, 辅助设备, 物流设备和控制系统。因此, FMS 的设计规划就是要根据主导产品的类型、产量和加

工工艺等系统特性选择加工设备、物流设备以及各种辅助设备, 然后结合车间空间的结构特点对这些设备进行空间配置, 并充分考虑设备之间在空间位置上的协调性, 以确保整个系统的畅通和自动化。由于 FMS 是集机械、电子、计算机和控制软件等技术于一体的大型复杂系统, 具有高度的柔性、先进性和复杂性, 建造所需投入的人力和物力巨大, 因此, 先期评估就显得格外重要。

目前国内外的研究一般都局限于对系统的某些方面进行评估, 如设备的性能评估, 控制系统的可靠性评估等, 而忽视了对影响 FMS 整体性能的诸多因素进行综合评估。因此, 企业很难对 FMS 的规划方案进行科学合理地综合评估, 也就无法分析比较多种规划方案, 并从中加以选择。

考虑到 FMS 系统的复杂性, 将首先采用层次分析法^[3]对 FMS 进行分析, 建立其综合评估模型, 然后, 采用模糊分析法^[4]对系统的各个层面进行综合评估。主要讨论车间级的 FMS 设计规划方案的事前评估。

2 综合评估模型

层次分析法(AHP)是由美国 T.L.Saty 教授在 1980 年提出的一种处理复杂问题的多目标决策的系统分析方法。采用层次分析法, 就是要根据所评估的对象, 将系统所涉及的诸因素层次化, 建立多级层次结构, 从而建立系统的综合评估模型。因此, 采用层次分析法, 建立 FMS 规划方案的综合评估模型, 可全面地分析评估 FMS 这类复杂系统。

评估因素论域, 即被评估系统所涉及因素的确定是评估过程很重要的环节, 它将直接影响评估效

* 国防科工委预研项目。20020528 收到初稿, 20020902 收到修改稿

果,一般用专家咨询法即 Delphi 法确定或由专家小组会议商定较合理。通过相关资料^[5~7]和专家的意见咨询,归纳出 FMS 规划方案的综合评估模型(如图 1 所示)。

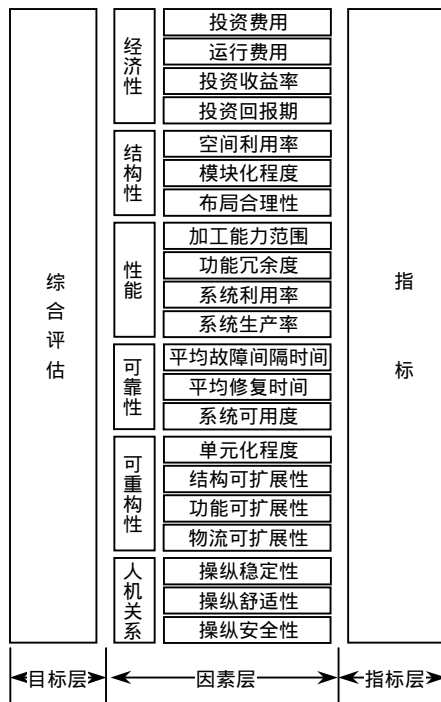


图 1 综合评估模型

FMS 规划方案的综合评估模型共分为 3 层:目标层,因素层和指标层。

目标层,即 FMS 规划方案的最终综合评估值、等级或满意度,其评估值取决于因素层的各影响因素。评语论域可定义为

$$V = [V_1, V_2, \dots, V_N] = [V_1, V_2, V_3, V_4] =$$

[差, 中, 良, 优]

因素层由因素论域组成,并分为两级。一级因素论域可定义为

$$U = [U_1, U_2, \dots, U_M] = [U_1, U_2, \dots, U_6] =$$

[经济性, 结构性, 性能, 可靠性, 可重构性, 人机关系]

二级因素论域为一级因素论域中各因素的进一步细分。如系统结构性的二级因素论域可定义为

$$U_2 = [u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2m}] = [u_{21}, u_{22}, u_{23}] =$$

[空间利用率, 模块化程度, 布局合理性]

因素层各个因素形成一个从上到下有支配关系的递阶层次结构。

指标层,即评估上层因素所需的定性或定量指标。

可见,系统评估问题可转化为最低层(指标层)相对于最高层(目标层)的相对重要性权值的确定或相对优劣的排序问题,并由此作出科学的优化决策和判断。

下面将就其中涉及的因素加以定义。

2.1 经济性

(1) 投资费用 投资建立系统所需各种费用,包括场地、工具、设备、控制系统和安装调试等费用。

(2) 运行费用 维持系统每天运行所需的费用。

(3) 投资收益率 系统投产后每年的净收益与总投资额之比。

(4) 投资回收期 系统投产后,根据每年取得的净收益,将初投资收回所需的时间。

2.2 结构性

(1) 空间利用率 车间内生产面积加上辅助面积与车间总面积的比值。

(2) 模块化程度 加工区、物流区和服务区等区域的模块化划分将有利于生产管理。

(3) 布局合理性 设备间零件转移以及物流通道是否畅通,将直接关系到系统的正常运行。

2.3 功能

(1) 加工能力范围 系统能够满足加工工艺需求的程度。

(2) 功能冗余度 系统中设备在加工能力上存在的功能重叠的程度。

2.4 性能因素

(1) 系统生产率 单位时间内系统生产制造出来的产品数量。它反映了系统的工作能力。

(2) 系统利用率 系统利用率实际上是加工设备,刀具系统以及物流系统利用率的加权平均。而各利用率可通过实际使用时间与可用时间的比值计算。

2.5 可靠性

(1) 平均故障间隔时间 系统在运行过程中连续两次故障的平均间隔时间。它反映了系统在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。

(2) 平均修复时间 修复排除系统故障所需的平均时间。它反映了系统排除故障的能力。

(3) 系统可用度 在任意时刻,当需要和开始执行任务时,系统处于可工作或可使用状态的程度。系统可用度为其各组成单元可用度的乘积,而各组成单元的可用度可采用固有可用度计算。

2.6 可重构性

(1) 单元化程度 对加工设备进行必要的单元划分,将有利于系统功能结构的扩展。

(2) 功能可扩展性 由功能冗余度低的设备组合而成的单元或生产线具有较好的功能扩展性。

(3) 结构可扩展性 设备布置结构的可扩展性是系统功能可扩展性的基础。

(4) 物流可扩展性 物流系统应能够随着系统结构和功能的变化而进行扩展。

2.7 人机因素

(1) 操纵稳定性 操作人员的工作环境是否稳定。

(2) 操纵舒适性 操纵人员在工作时, 应尽量保证其工作舒适, 以避免因工作疲劳造成的工伤或事故。

(3) 操纵安全性 系统运行中, 应能够保障操纵人员的安全。

不难发现, 上述众多系统评估因素复杂程度不一。简单的评估因素, 如投资费用、空间利用率等, 只需通过计算其评估指标就可以得到。而复杂的评估因素, 仅通过简单的计算则很难得到。况且在未正式实施系统前, 处于规划设计阶段, 无法收集系统的评估指标。以系统的可靠性评估为例, 现行主要的可靠性分析方法有基于马氏过程的方法、分解法、工作站等效法、概率流平衡法等^[8-10]。其中有些方法对系统的假设条件过多, 只能求得静态解而降低了解的可信度; 有些方法则通过建立系统方程, 但由于状态组合爆炸而增加了方程的求解难度。此外, 对于类似于人机关系这类主观评估因素, 建立数学模型就更不容易了。为此, 本文将采用技术成熟的大型生产线仿真软件 eM-Plant, 依据系统的设计规划方案, 建立其仿真模型, 通过仿真运行, 收集那些不易通过简单计算而得到的相关系统指标数据, 从而对系统作出综合评估。

3 模糊综合评估

FMS 的设计规划过程, 就是根据实际生产的需求, 由专家或技术人员将设计概念通过规划过程转化成规划方案。在设计规划的整个过程中, 这种映射关系是一种不确定的、模糊的关系, 由设计结果无法得出一个精确的评估结论。在评估中评判的结果多为“优”、“良”、“中”、“差”等, 并需同时考虑和判断多种因素在方案评估结果中的影响大小。因此, 应用模糊分析法对系统规划方案进行综合评估是最为适宜的。

采用模糊分析法评估 FMS 的规划方案, 需要进一步完善综合评估模型, 除了前面提到的综合评估模型, 还需要建立权重分配论域及隶属关系论域。评估因素权重分配论域的确定能反映出各个评估因素在评估中的地位 and 重要程度; 隶属关系论域的确定能反应各个评估因素项对应的设计状态参数属于评语论域某一评估矢量的程度。

3.1 权重分配论域

权重分配论域可用模糊相似比重矩阵的方法

确定。

首先对一级因素论域中的任意两个元素 U_i 、 U_j ($U_i \in U, U_j \in U$) 互作比较得到相似系数 S_{ij} , 建立模糊相似比重矩阵 $S = S_{ij} M \times M$ 。 S_{ij} 的计算方法很多, 根据 FMS 规划方案的模糊综合评估因素论域的特点, 选择其计算式为

$$S_{ij} = 1 \quad i = j \quad (1)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{E} \sum_{k=1}^M S_{ik} S_{jk} \quad i \neq j \quad (2)$$

$$S_{ij} + S_{ji} = 1 \quad i \neq j \quad (3)$$

式(2)中为保证 $0 \leq S_{ij} \leq 1$, E 应为一适当的正数, 可选择

$$E \geq \max_{i \neq j} \left(\sum_{k=1}^M S_{ik} S_{jk} \right)$$

则一级因素论域中各因素的加权值为

$$a_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^M S_i} \quad S_i = \sum_{j=1}^M S_{ij}$$

二级因素论域中各因素的加权值可同理求得。

3.2 隶属关系论域

隶属度可以定量说明事物具有模糊概念的程度。隶属度的确定要求反映出设计类型或参数变化时, 设计及工程实施的难易程度、得益程度、付出代价及其变化规律。不同的问题可选用不同的计算方法。目前, 确定隶属度的主要方法包括: 选取适当的分布函数根据设计要求直接确定、模糊统计试验法、二元对比排序法和专家调查法等。隶属度可以通过实践得到调整与修正。

通过分析系统的评估因素, 可以将其分为两类: 一类是其取值可以直接用数值表示, 如系统性能; 一类是无法直接用数值表达而仅可用语言值表达, 如人机关系。

对于前者可以采取选用适当的分布函数确定隶属度的方法。例如, 将空间利用率评为“差”的分布函数可定义为

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \exp(-\beta(x - \alpha)^2) & x < \alpha \\ 0 & x \geq \alpha \end{cases}$$

由表达式可知, 当空间利用率未达到标准 α 时, 与 α 的差距越大则该评估项属于“差”的程度越大; 当一旦超过 α 时, 则该评估项将不再属于“差”, 而属于“良”或更高的评语矢量。其它评语矢量也有相应的分布函数, α 、 β 可根据实际情况取值。

对于后者可以先将评语论域数值化, 如可将评语矢量的截值分别定义在 0.2、0.5、0.7、0.9, 然后根据实际的仿真结果, 对其进行评估打分。

3.3 模糊综合评估

根据综合评估模型,首先对一级因素 U_i 的 m 个子因素分别作单因素评估,由隶属度函数,得出 U_i 的评判矩阵

$$R_i = r_{jk} m \times N$$

这样,根据合成运算公式有

$$B_i = A_i \cdot R_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) \cdot r_{jk} m \times N = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{iN})$$

B_i 即为一级因素 U_i 的模糊综合评估结果。然后把 B_i 作为 U 的 M 个子因素的单因素评估矢量,得出关于 U 的全部因素的评估矩阵

$$R = (B_1, B_2, \dots, B_M)^T$$

最终,可得到 U 的综合评估矢量

$$B = A \cdot R = (a_1, a_2, \dots, a_M) \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_N)$$

B 是评语论域上的等级模糊子集, b_i 为评语等级 V_i 对综合评定所得等级模糊子集 B 的隶属度。通常可根据最大隶属原则,选取评估结果 B 中评语矢量较大者所对应的评语 V_i ,即可作为系统规划方案的最终评估结果。但采用这种方法,不易进行方案间的比较,因此,为了更充分利用综合评估带来的信息,可以利用评语矢量的分量形成权重,对各个评语的得分进行加权平均,得到总分。如可取评估矢量 b_i 的权重为

$$\delta_i = \frac{b_i}{\sum_{j=1}^N b_j} \quad i=1, 2, \dots, N$$

并对评语论域中的评语 V_i 打分。假如给“优”打 1 分,“良”对应 0.8 分,“中”对应 0.5 分,差对应 0.2 分(即 $c_1=1, c_2=0.8, c_3=0.5, c_4=0.2$)。则综合评估 $B=(b_1, b_2, \dots, b_N)=(b_1, b_2, b_3, b_4)$ 的总分为

$$c = \sum_{i=1}^4 \delta_i c_i$$

这样,通过分别计算多种规划方案的总分,就可以进行方案间的比较。

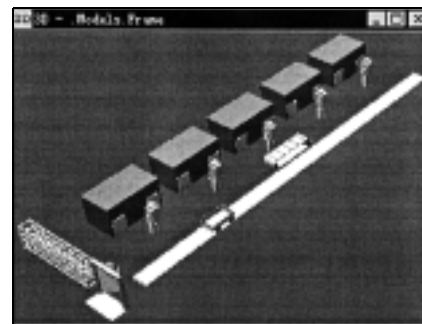
4 实例分析

为验证本文提出的 FMS 规划方案综合评估模型的有效性,以某研究所的 FMS 为研究对象,进行仿真评估实验。所内现有 5 台数控加工中心,分别为 CNC1 (型号 YCN-VMC85A), CNC2 (型号 YCM-90HVAR), CNC3 (型号 TCN-YARM90), CNC4 (型号 YCN-YAMAD33), CNC5 (型号 CN-PTAM44),采用直线型布局形式(如图 2a 所示)。在目前这种配置方式

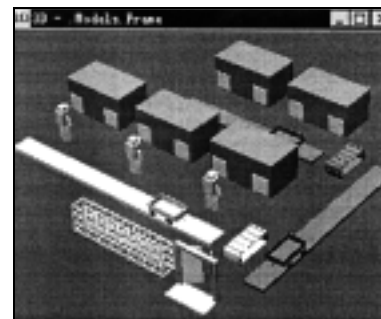
下,技术工人的工作强度比较大,除要完成加工设备的上下料工作,还要用手推小车将完工的零件转移到下一道工序。此外,由于缓冲站、小车数量较多,使车间内生产区与辅助区之间界线比较模糊,不便于管理。



(a)



(b)



(c)

图 2 方案比较

为此,提出一种解决方案(如图 2b 所示)。设备间零件的转移采用有轨小车,这样,不但可减轻技术工人的劳动强度,还可缩短零件的搬运时间,提高系统的整体效率。此外,由于减少了缓冲站和小车的数量,使得车间内生产区与辅助区之间的界线变得清晰,从而方便了管理。但是,由于有轨小车及其控制系统需要新的资金投入,而且为了不使小车成为零件转移中的瓶颈,生产调度就必须做得更加细致。

就目前的加工任务而言,5 台加工设备的功能彼此互有重叠,存在较大的功能冗余。通过分析发现:CNC2、CNC3 与 CNC5 的设备组合,功能冗余比较小,而且完全可以满足当前每天所需加工的 3

大类零件。此外,采用直线型布局方式,不利于系统的结构和功能扩展。因此,在方案 b 的基础上,本文提出另一种解决方案(如图 2c 所示)。将 5 台加工设备划分为两个单元,单元 1 中配置 CNC2、CNC3 与 CNC5 三台设备,单元 2 中配置 CNC1 与 CNC4 两台设备。单元间的主通道导轨以及单元 2 中的有轨小车和技术工人可以暂时不作配置。这样,当加工任务的种类或数量有所增加并稳定在一个新水平上时,就可以在这一基础上,增加配置,从而沿着主通道向外进行结构和功能拓展。

为更加全面地比较三种规划方案,可利用仿真软件 eM-Plant 构建三种方案的模型,并根据仿真结果采用本文提出的方法对各方案进行综合评估。综合评估的步骤如下。

- (1) 针对综合评估模型中一级因素 U_i 中各子因素的特点,确定计算其评估值的方法,是采取分布函数确定隶属度的方法,还是采取评估打分的方法,并确定相应的参数。
- (2) 根据规划方案的实际指标数据,对一级因素 U_i 中各子因素进行单因素评估,得出评判矩阵 R_i 。
- (3) 采用模糊相似比重矩阵的方法确定一级因素 U_i 中各子因素的加权值,得出权重矢量 A_i 。
- (4) 通过计算 $A_i \cdot R_i$ 得出一级因素 U_i 的综合评估结果 B_i ,并得到全部一级因素的评估矩阵 R 。
- (5) 采用模糊相似比重矩阵的方法确定各一级因

素的加权值,得出权重矢量 A 。

(6) 通过计算 $A \cdot R$ 得到规划方案的综合评估矢量 B 。对其进行加权平均,得到总分 c 。

由于篇幅所限,仅以方案 c 的综合评估为例。通过计算得到表所列的各一级因素的评估结果。方案 c 的综合评估矢量 B 为

$$[0.15 \ 0.15 \ 0.20 \ 0.20 \ 0.20 \ 0.10] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0.499 & 0.499 & 0 \\ 0 & 0 & 0.649 & 0.349 \\ 0 & 0 & 0.499 & 0.499 \\ 0.175 & 0.525 & 0.299 & 0 \\ 0 & 0 & 0.799 & 0.2 \\ 0 & 0.599 & 0.399 & 0 \end{bmatrix} = [0.035 \ 0.240 \ 0.532 \ 0.192]$$

对其进行加权平均,总分 $c=0.035 \times 0.2+0.240 \times 0.5+0.532 \times 0.8+0.192 \times 1=0.745$,同理,可对方案 a 和方案 b 进行综合评估。

由结果可知,如果按照最大隶属原则对方案进行评估,则方案 a、b、c 分别属于“差”,“中”,“良”;如果按照加权平均方法对方案进行总分评估,则方案间的差别更加明显。其实,方案 b 与方案 c 虽然在短期内需对物流设备有所投资,但优越性是很明显的,尤其是方案 c,在可重构性上有明显的优势。

表 方案评估结果

	方案 a				方案 b				方案 c			
	差	中	良	优	差	中	良	优	差	中	良	优
经济性(0.15)	0	0.799	0.299	0	0	0.299	0.699	0	0	0.499	0.499	0
结构性(0.15)	0.699	0.299	0	0	0	0.349	0.649	0	0	0	0.649	0.349
性能(0.20)	0.699	0	0.299	0	0.200	0.499	0.299	0	0	0	0.499	0.499
可靠性(0.20)	0.299	0.399	0.349	0	0	0.699	0.299	0	0.175	0.525	0.299	0
可重构性(0.20)	0.999	0	0	0	0.749	0.249	0	0	0	0	0.799	0.200
人机关系(0.10)	0.399	0.599	0	0	0	0.599	0.399	0	0	0.599	0.399	0
综合评估	0.544	0.294	0.130	0	0.190	0.447	0.362	0	0.035	0.240	0.532	0.192
总分	0.384				0.552				0.745			

5 结论

针对目前 FMS 规划方案评估仍无有效方法的问题,采用层次分析法和模糊分析法建立了一种综合评估方法。实例证实,该方法可以较全面地分析评估影响 FMS 规划方案优劣的各种因素,通过分析比较多种方案,辅助设计者择优规划方案,并对方案加以改进。值得一提的是,评估因素论域中诸多因素的指标数据,大多是采用软件 eM-Plant 仿真得到,而有些数据,如经济性指标,则是通过大量调

查研究才得到的。此外,影响 FMS 规划方案的因素可能不止本文所归纳的这些评估因素,这也是评估模型需要进一步积累完善的地方。

参 考 文 献

- 1 许怡如,吴盛济,宁汝新,等. 先进制造系统规划设计. 北京:兵器工业出版社,2000
- 2 谭益智,王偲鹏,马玉林,等. 柔性制造系统. 北京:兵器工业出版社,1995
- 3 徐树柏. 层次分析法. 天津:天津大学出版社,1998

- 4 韩立岩, 汪培庄. 应用模糊数学. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 1998
- 5 王家善, 吴清一, 周佳平. 设施规划与设计. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 6 吴启迪, 严隽薇, 张浩. 柔性制造自动化的原理与实践. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 7 张晓萍, 颜永年, 吴耀华, 等. 现代生产物流及仿真. 北京: 清华大学出版社, 1998
- 8 Yuandis P, Styblinski M A, Smith D R, et al. Reliability modesling of felexible manufacturing systems. *Microelectronics and Reliability*, 1994, 34 (7): 1203~1220
- 9 范玉顺, 吴澄, 杨建华. FMS 可靠性指标计算的有色广义随机 Petri 网方法. *计算技术与自动化*, 1997, 16(4): 1~18
- 10 疏松桂. 带有缓冲库的 CIMS 分析及其可靠性研究. *自动化学报*, 1998, 18(1): 15~22

RESEARCH ON COMPREHENSIVE EVALUATION METHOD OF FMS PLANNING

*Sun Liansheng Ning Ruxin Zhang Zhiying
(Beijing Institute of Technology)*

Abstract: The planning of FMS is a very complicated system project, and its final quality is affected by a lot of factors. Hence, a systematic and comprehensive evaluation model established for the FMS planning is necessary. A comprehensive evaluation model based on the hierarchy analysis is proposed, through which planned schemes of the FMS can be analyzed, evaluated, compared and demonstrated at multiple levels with the fuzzy analysis, and the best one can be selected to guide the implementation and ensure the performance of the FMS.

Key words: Flexible manufacturing system Planning

Hierarchy analysis Fuzzy analysis

Comprehensive evaluation

作者简介: 孙连胜, 男, 1976 年出生, 北京理工大学机械工程学院博士。主要从事 CAD/CAM, 虚拟制造技术等领域的研究工作。