

南京航空航天大学
论文集

(二〇〇二年)

第12册

五卷

南京航空航天大学科技部编

二〇〇三年六月

五 院

○五三系



序号	姓 名	职 称	单位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
1	曹春平 王岩 王宁生	硕士 博士 正高	053 053 053	基于Agent的虚拟企业结构与信息交互	控制工程	2002.09.06	
2	曹江辉 王宁生 解放 朱建江	博士 正高 博士 中级	053 053 053 053	基于CORBA的制造执行系统的实现	南京航空航天大学学报	2002.34.04	J
3	查敦林 陈希 曹春萍 王宁生	博士 博士 博士 正高	053 053 053 053	SQL Server 2000 的安全性管理策略	计算机应用研究	2002.00.00	J
4	查敦林 陈希 王宁生	博士 博士 正高	053 053 053	供应链信息技术架构研究	中国机械工程	2002.13.23	H
5	陈富林 胡明华	副高 正高	053 072	空管CBT软件系统研究及开发	计算机应用	2002.22.02	J
6	陈希 查敦林 王宁生	博士 博士 正高	053 053 053	基于CORBA 的虚拟企业生产计划体系结构研究	南京航空航天大学学报	2002.34.05	J
7	陈勇	副高	053	塑料挤出造粒机组集散控制系统结构设计	仪器仪表学报	2002.23.01	H
8	陈勇	副高	053	Smant Spring Concept for helicopter Uuration and Noize Control	21st conference of International Concit of Aeronoutical Science	2002.01	
9	陈勇 顾仲权 陶宝祺	副高 正高 正高	053 011 011	主动控制后缘附翼模型的实验研究	振动工程学报	2002.15.01	H
10	陈勇	副高	053	双螺杆塑料造粒机组集散控制系统设计	数据采集与处理	2001.16.02	H*
11	陈勇 熊克 王鑫伟	副高 副高 正高	053 013 013	飞行器智能结构系统研究现状与关键问题	中国工程院21次航空工程科技论坛	2002.01	
12	丁学明 吴洪涛	硕士 正高	053 053	全对称平面三自由度并联机床位置分析	南京航空航天大学第三届研究生学术会议	2002.01	
13	方喜峰 吴洪涛	博士 正高	053 053	基于参数化变型设计技术的凸轮CAD/CAM系统研究	华东船舶工业学院学报	2002.16.06	J
14	姬鹏华 周燕飞	硕士 副高	053 053	可重构制造系统的合弄结构	计算机工程与应用	2002.00.03	J
15	吉卫喜 叶文华 王宁生	博士 正高 正高	053 053 053	敏捷制造模式下GT/ERP系统的研究	中国机械工程	2002.13.14	H
16	柯文 秦宝荣 解放 王宁生	博士 博士 博士 正高	053 053 053 053	ADAM数据采集网络在加工中心DNC系统中的应用	机械与电子	2002.00.06	J
17	梁睿君 赵文鹏 陈富林	中级 硕士 副高	053 053 053	柔性制造系统控制系统的重构技术	机械科学与技术	2002.21.03	H

序号	姓 名	职 称	单 位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
18	林晓通 王宁生	博士 正高	053 053	Fuzzy Comprehensive Judgement on the Mechanical Equipment Bid Sheet	International Journal of Plant Engineering	2002.07.02	W
19	林晓通 王宁生	博士 正高	053 053	企业动态联盟中盟友的模糊综合 评价	机械设计与制造工程	2002.00.02	J
20	刘静 李桥梁 吴洪涛	硕士 中级 正高	053 053 053	光纤收发器的设计	电子机械工程	2002.18.05	
21	刘军 王宁生	博士 正高	053 053	面向快速变形设计的CE-CAPP系 统设计	机电21世纪	2002.00.03	
22	刘文富 王宁生 沈春林	博士 正高 正高	053 053 053	大规模定制设计的产品族匹配研 究	南京航空航天大学学报	2002.34.04	J
23	楼佩煌 戴勇	正高 正高	053 053	基于Internet的远程故障诊断与维 修向导系统研究	中国机械工程	2002.13.02	H
24	秦宝荣 王宁生	博士 正高	053 053	基于模糊综合评判的定位基准决 策	制造技术与机床	2002.00.10	H
25	秦宝荣 柯文 王宁生	博士 博士 正高	053 053 053	基于遗传算法的箱体零件加工路 线决策方法研究	中国机械工程	2002.13.24	H
26	秦宝荣 王宁生	博士 正高	053 053	箱体零件工艺路线分层决策方法	制造技术与机床	2002.00.12	H
27	秦宝荣 王宁生	博士 正高	053 053	基于人工神经网络的零件表面加 工方案决策方法研究	中国机械工程	2002.13.15	H
28	秦宝荣 王宁生	博士 正高	053 053	基于遗传算法的加工中心工步排 序优化方法	中国机械工程	2002.13.18	H
29	孙国梓 吴含前 姜澄宇 王宁生	博士 博士 正高 正高	053 053 053 053	一种基于面向对象原理的PDM产 品模型框架	南京航空航天大学学报	2002.34.01	J
30	孙志峻 潘全科 朱剑英	中级 博士 正高	053 053 053	基于遗传算法的多资源作业车间 智能优化调度	中国机械工程	2002.13.24	H
31	孙志峻 朱剑英 潘全科	中级 正高 博士	053 053 052	基于遗传算法的多资源作业车间 智能动态优化调度	机械工程学报	2002.38.04	EI、H
32	孙志峻 朱剑英	中级 正高	053 053	含机器人的作业车间双资源智能 优化调度	机器人	2002.24.04	H
33	孙志峻 乔冰 潘全科 朱剑英	中级 副高 博士 正高	053 073 053 053	具有柔性加工路径的作业车间批 量调度优化研究	机械科学与技术	2002.21.03	H
34	王洪宇 叶文华	硕士 正高	053 053	CAPP系统与Smarteam集成技术 的研究	机械设计与制造工程	2002.31.04	J

序号	姓 名	职 称	单位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
35	王林博 周燕飞 张万礼 袁普及	硕士 副高 中级 硕士	053 053 053 053	可重构车间管理与控制系统	机电一体化	2002.08.06	J
36	王岩 曹春平 王宁生	博士 博士 正高	053 053 053	基于委托代理机制的并行工程组织的模式的研究	工业工程与管理	2002.07.01	J
37	王岩 曹春平 王宁生	博士 博士 正高	053 053 053	动态联盟环境下企业生产计划与控制	CAD/CAM与制造业信息化	2002.00.11	
38	王毅栋 楼佩煌 范兴柱	硕士 正高 硕士	053 053 053	DNC信息采集系统研究与开发	制造业自动化	2002.04.01	J
39	王忠宾 王宁生 叶文华	博士 正高 正高	053 053 053	一种支持MCM的产品族信息系统	南京航空航天大学学报	2002.34.03	J
40	席文明 朱剑英	博士后 正高	053 053	基于分层神经网络带预测器的视觉跟踪	西安交通大学学报	2002.36.07	EI、H
41	席文明 朱剑英	博士后 正高	053 053	基于分层神经网络的微装配全局—局部视觉伺服研究	机械工程学报	2002.38.10	H
42	席文明 罗翔 朱剑英	博士后 副高 正高	053 外 053	基于约束卡尔曼滤波器预测的视觉跟踪研究	南京航空航天大学报	2002.34.06	J
43	席文明 吴洪涛 罗翔 朱剑英	博士后 正高 副高 正高	053 053 外 053	机器人相对雅可比矩阵解析求解方法研究	东南大学学报	2002.32.04	EI、H
44	席文明 吴洪涛 朱剑英	博士后 正高 正高	053 053 053	微装配技术的发展现状	机械科学与技术	2002.21.06	H
45	熊启家 吴洪涛 左健民 李鹭扬 李桥梁 朱剑英	博士 正高 正高 博士 中级 正高	053 053 外 053 053 053	广义质量的空间算子代数描述	南京航空航天大学学报	2002.34.06	J
46	薛善良 叶文华 王宁生	博士 正高 正高	053 053 053	面向敏捷制造的可制造性评价和合作伙伴选择研究	中国机械工程	2002.13.17	H
47	薛善良 叶文华 王宁生	博士 正高 正高	053 053 053	产品拆卸配置优化研究	机械科学与技术	2002.21.03	H
48	叶文华 戴勇	正高 正高	053 053	面向产品方案决策的层次分析改进算法研究	机械科学与技术	2002.12.02	H
49	叶文华 戴勇 王祎	正高 正高 硕士	053 053 053	基于模糊判断的产品方案综合决策方法研究	南京航空航天大学学报	2002.34.02	J
50	叶文华 陈蔚芳	正高 副高	053 053	专项生产模式下基于成组技术的制造系统集成	高技术通讯	2002.12.04	J

序号	姓 名	职 称	单位	论 文 题 目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
51	周万坤 朱剑英	中级 正高	053 053	采用均匀设计法在线优化模糊控制因子	工业控制计算机	2002.15.04	
52	周燕飞 马 犇 王林博 袁普及	副高 硕士 硕士 硕士	053 053 053 053	产品数据管理系统的用户数据管理	数据采集与处理	2002.17.04	H
53	周燕飞 王林博 袁普及	副高 硕士 硕士	053 053 053	基于批生产的逐段式车间作业调度算法	南京航空航天大学学报	2002.00.04	J
54	周跃进	副高	053	Computer-intergrated manufacturing in China:A report of Industrial field Surveys	Int.Journal of Operations Production Management	2002.22.03	W
55	朱建江 戴勇 王宁生	博士 正高 正高	053 053 053	基于Holon的可重构MES的研究	中国机械工程	2002.13.08	H
56	朱建江 王宁生	博士 正高	053 053	基于WEB的干部公示管理系统的开发	计算机应用研究	2002.精扩本.二	J
57	闫凯果 楼佩煌	硕士 正高	053 053	利用OLE技术解决PB应用开发中图片出入库问题	计算机应用研究	2002.00.增刊	J

企业动态联盟中盟友的模糊综合评价

林晓通,王宁生

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:企业动态联盟中盟友的选择是关系到动态联盟成败最关键的因素之一。以最基本的企业动态联盟的方式——供应链为模式建立评价指标体系,运用模糊数学中多级模糊综合评判的理论与方法,建立合理的模糊综合评价模型,全面考虑影响决策过程的各种因素,特别是可量化因素与不可量化因素能够同时参与比较。为企业动态联盟中盟友的评价提供科学的方法和手段。

关键词:企业动态联盟;模糊综合评判;盟友

中图分类号:IP14

文献标识码:B

文章编号:1007-9483(2002)02-0081-03

Fussy Comprehensive Assess on Allies in Enterprises' Dynamic Alliance

LIN Xiao-tong, WANG Ning-sheng

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing, 210016, China)

敏捷制造是在 CIMS 信息集成、并行工程过程集成的基础上发展起来的,被认为是 21 世纪制造企业的主要发展模式,而动态联盟(Virtual Enterprise, VE)是敏捷制造的一种企业组织形式,他是为适应市场竞争需要,降低风险,共享合作者资源,在社会分工协作背景下以产品为中心而组织的企业间动态组织。动态联盟具有许多特点,其中之一就是将制造系统空间由企业内部库扩展到全国乃至全球,通过信息高速公路网络建立“虚拟企业”加盟的企业,以产品为中心,根据各自在该产品中的不同任务确定不同的加入方式:供应链式、转包加工式、合资经营式、插入兼容式或虚拟合作式^[1]。所承担的任务完成后,加盟的企业就从动态联盟中退出。

企业动态联盟组织过程中,盟友的选择是关系到动态联盟成败关键的因素之一,大多采用专家组讨论的方式进行。评价决策缺乏科学性,而模糊(Fuzzy)综合评价模型适用于不同方案相对于不同评价指标下的综合评定问题,根据评判值的大小可确定由各个预备盟友的优良度,从而为盟友的最终选定提供必要的决策依据。

模糊数学方法是 20 世纪 60 年代由 Zadeh L A 首先提出来的。模糊数学理论可采用精确的数学方法来描述模糊性现

象^[2]。目前模糊集合论在各个领域的应用已经十分广泛,如设计方案的模糊综合评价^[3]、用模糊综合评定方法评定企业的经济效益等等,但在企业动态联盟中盟友的模糊综合评判方面的研究应用,国内还少见报道。现就动态联盟中盟友的模糊综合评判方面进行一些有益的研究和探索。

1 综合评价指标体系及隶属度的确定

企业动态联盟中盟友的模糊综合评判过程是一个涉及多因素、多目标的决策过程,既要能够最大限度地满足企业动态联盟所需的核心资源,又要能够使联盟中的所有伙伴企业实现“双赢”或“多赢”的要求,并且风险最小收益最大。由于某些指标的不确定性,只能定性描述的因素以及不可预测的经济因素,使得评标本身具有较大的模糊性,其推理判断是模糊的推理和模糊的判断,最终的决策也是模糊的决策,以上过程都是在综合评价指标体系的基础上进行的。

企业动态联盟中盟友的指标体系是个复杂的多层树状结构体系,其加入的形式不同,指标体系也有所不同,但中上层指标基本相同。以供应链方式组成的企业动态联盟为例(其他组成方式类似),用分层法^[4]建立以下指标体系,如图 1 所示。

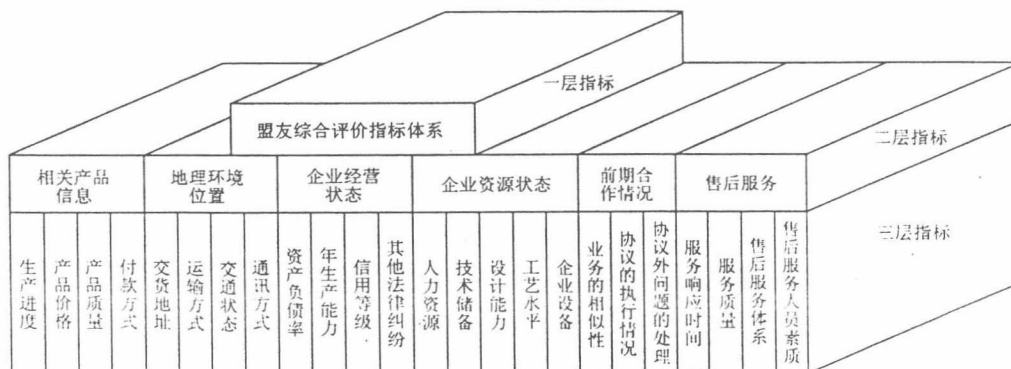


图 1 多指标多层次综合评判体系模型

收稿日期:2001-10-30

作者简介:林晓通(1964-),男,浙江金华人,东南大学副教授,现为南京航空航天大学在读博士生,主要研究领域为 ERP、CIMS 等。

隶属度的确定:

a. 用相对隶属度公式确定定量评价指标(可量化因素)的隶属度。

对越大越优型指标(如价格、生产效率等):

$$r_j = \begin{cases} 1 & Y_j > Y_p \\ \frac{Y_j - Y_l}{Y_p - Y_l} & Y_l \leq Y_j \leq Y_p \\ 0 & Y_j \leq Y_l \end{cases}$$

式中: r_j 为子集 X^i 中第 j 个评价指标的指标隶属度; Y_p, Y_l 分别表示子集 X^i 第 j 个指标的特征量, 在有关设计规范中或文件资料中有规定的上下值, 未作规定的指标则分别取全体方案该指标特征的最大最小值。

对越小越优型指标(如机器的噪声、能耗等), r_j 计算其指标的隶属度:

$$r_j = \begin{cases} 0 & Y_j > Y_p \\ \frac{Y_p - Y_j}{Y_p - Y_l} & Y_l \leq Y_j \leq Y_p \\ 1 & Y_j \leq Y_l \end{cases}$$

b. 用二元对比排序法确定定性评价指标(不可量化因素)的隶属度, 对子集中的某一定性评价指标, 根据模糊优先关系知识设计模糊语言数值化分值, 见表1。

表1 模糊语言数值化分值

二元对比模糊语言	很好	好	较好	相同	差	较差	很差
数值化分值	1	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1	0

各指标隶属度确定后, 即可建立指标隶属度矩阵。

2 多目标多级模糊综合评价^[2]

盟友的指标评价体系是一树型结构, 因此对盟友的指标体系的评价是个多目标多级模糊综合评价的过程。先从最深(或低)层的评价指标开始, 逐层向上评价, 直至总的评价目标为止(现以多目标二层结构为例)。

2.1 多因素评价指标的层次划分

设在某一动态联盟的组建初期同一节点上, 共有 N 个厂家参加竞争, 评价委员会由 k 个评委组成, 该预备盟友共有 M 个评价指标(因素)的集 X , 将 X 按属性类型划分为 s 个子目标的子集 X^i (若一级因素 $X^i, i=1, 2, \dots, s$, 仍有较多的因素, 还可将 X^i 再分小, 于是可得三级、四级等多级模型)。

其中: $X^i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{M_i}^i\} \quad i=1, 2, \dots, s$

满足:

$$\sum_{i=1}^s M_i = M \quad \bigcup_{i=1}^s X^i = X \quad X^i \cap X^j = \emptyset \quad i \neq j$$

先讨论于子目标的子集 X^i 单级模糊评价。

2.2 单级模糊评价

设某个子目标的指标集为:

$$X^i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{M_i}^i\} \quad i=1, 2, \dots, s$$

评语集为:

$$V^i = \{v_1^i, v_2^i, \dots, v_{M_i}^i\} \quad i=1, 2, \dots, s$$

评语集一般可用很差、差、一般、好、很好等一般评语标尺描述。对应指标的权重集为:

$$A^i = \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_{M_i}^i\} \quad i=1, 2, \dots, s$$

满足: $\sum_{i=1}^s a_i^i = 1 \quad i=1, 2, \dots, s$

其中权重 $a_j^i (j=1, 2, \dots, M_i; i=1, 2, \dots, s)$ 表示指标 x_j^i 在该指标集中的重要程度, 一般由 k 个评委给定并整理得到。如有足够的学习样本, 也可按神经网络学习的方法给定。

确定每个评价因素对每个评价等级的隶属度, 构成单目标模糊评判矩阵。

$$R^i = \begin{bmatrix} R_{1j}^i \\ R_{2j}^i \\ \dots \\ R_{M_i j}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}^i & r_{12}^i & \dots & r_{1m}^i \\ r_{21}^i & r_{22}^i & \dots & r_{2m}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{M_i 1}^i & r_{M_i 2}^i & \dots & r_{M_i m}^i \end{bmatrix} \quad i=1, 2, \dots, s$$

其中 r_{pj}^i 表示指标 x_j^i 评为 v_j 的隶属度 ($i=1, 2, \dots, s; p=1, 2, \dots, M_i; j=1, 2, \dots, m$), r_{pj}^i 由评标委员会 k 个评委在评语标尺上打模糊分且经过适当的处理确定。

$R_p^i = \{r_{p1}^i, r_{p2}^i, \dots, r_{pm}^i\} (i=1, 2, \dots, s; p=1, 2, \dots, M_i)$, 表示指标 x_p^i 的评价集。由此可得子目标 i 的综合评价向量:

$$B^i = A^i \circ R^i = (a_1^i, a_2^i, \dots, a_{M_i}^i) \circ$$

$$\begin{bmatrix} r_{11}^i & r_{12}^i & \dots & r_{1m}^i \\ r_{21}^i & r_{22}^i & \dots & r_{2m}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{M_i 1}^i & r_{M_i 2}^i & \dots & r_{M_i m}^i \end{bmatrix} = (b_1^i, b_2^i, \dots, b_m^i)$$

其中: $b_j^i = \bigvee_{p=1}^{M_i} (a_p^i r_{pj}^i) \quad (i=1, 2, \dots, s; j=1, 2, \dots, m)$

2.3 多目标多级模糊综合评价

求出 s 个子目标的综合评价向量后, 由同一层子目标的评语集 B_i 可构成总目标的指标隶属度矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \dots \\ B^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{s1} & b_{s2} & \dots & b_{sm} \end{bmatrix}$$

再给定各层子目标的权重集 A 为: $A = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_s)$ 。

其中: $\sum_{i=1}^s a_i = 1$ 。由此可求得总目标的综合评价向量为:

$$B = A \circ R = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_s) \circ$$

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{s1} & b_{s2} & \dots & b_{sm} \end{bmatrix} = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m)$$

整个综合评价二级评判模型的框图如图2所示。最大隶属度为: $b_p = \max_{1 \leq j \leq m} b_j, 1 \leq p \leq m$ 。表明该盟友最大隶属于 v_p 。

对 N 个厂家评价指标分别进行模糊运算, 即可得到相应的总目标的综合评价向量, 比较各综合评价向量, 找出属于最好的最大隶属度。

图2 二级评判模型的框图

3 实例

例如: 某企业动态联盟中盟主获得制造20台桥式双梁起重机的业务, 跨度为19.5m, 起重量为10t, 起升高度为9m, 起升速度为20m/min, 小车运行速度为45m/min, 大车运行机

构速度为 30m/min, 工作等级为 A6, 室内使用。其中运行小车必须通过供应链方式组成企业动态联盟进行制造。

共有 3 个生产厂家参加竞争, 评价委员会由 5 位专家组成, 分别对 6 个子目标、24 个因素进行评分, 确定隶属度, 给定其权重集。(由于篇幅有限, 只能给出部分数据)。第 1 个生产厂家的第 3 个子目标(企业经营状态) X^3 :

因素集 $X^3 = \{ \text{年生产能力, 资产负债率, 信用等级, 法律纠纷} \}$

评语集 $V^3 = \{ \text{最优, 优, 较优, 相同, 较差, 差, 最差} \}$

相应的权重集 $A^3 = \{ 0.5 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.2 \}$

由评价委员会用二元对比排序法确定定性评价指标的隶属度, 整理得模糊评判矩阵:

$$R^3 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

X^3 的综合评判向量: $B^3 = A^3 \cdot R^3 = \{ 0.15 \ 0.25 \ 0.12 \ 0.05 \ 0.02 \ 0.02 \ 0 \}$

同理可得: B^1, B^2, B^4, B^5, B^6 。由 $B^1, B^2, B^3, B^4, B^5, B^6$ 组成总目标模糊评判矩阵 $R^{(1)}$ 。相应的子目标的权重集: $A = \{ 0.2 \ 0.3 \ 0.25 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.05 \}$

得到第一份标书的总目标综合评判向量:

$B^{(1)} = A \cdot R^{(1)} = \{ 0.14 \ 0.052 \ 0.052 \ 0.015 \ 0.006 \ 0.006 \ 0.002 \}$

同理可得第二、三份标书的目标综合评判向量:

(上接第 73 页)

图 2 是对研机的原理图。

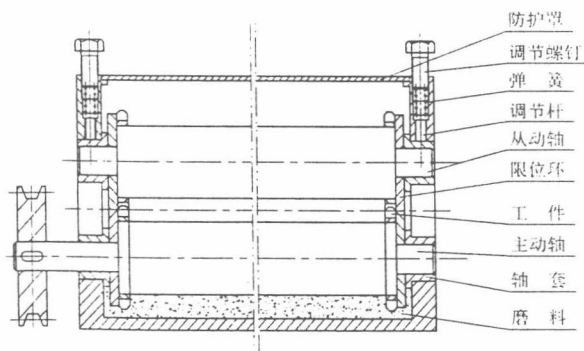


图 2 研磨机原理图

3 试验结果和分析

3.1 研磨时间对公法线变动量的影响

选用粒度 80 目的碳化硅作为磨料, 零件硬度 $\geq 35\text{HRC}$, 研磨时间取 10min, 30min, 60min。取 25 个零件试验, 测量公法线变动量, 并求其平均值, 结果如图 3 所示: 随着研磨时间的延长公法线变动量逐渐变小, 研磨 1h 后, 变化速率变缓。

3.2 研磨压力的影响

通过调节研磨压力(调节 2 个调节螺栓来调整研磨压力), 研磨速度略有改变, 但变化不十分明显。

3.3 磨料的影响

将磨料换成软抛光膏后, 齿面粗糙度明显提高, 但公法线及径向齿跳变化不明显。

$$B^{(2)} = A \cdot R^{(2)} = \{ 0.21 \ 0.12 \ 0.048 \ 0.032 \ 0.008 \ 0.002 \ 0.001 \}$$

$$B^{(3)} = A \cdot R^{(3)} = \{ 0.18 \ 0.08 \ 0.075 \ 0.034 \ 0.005 \ 0.002 \ 0.003 \}$$

比较 $B^{(1)}, B^{(2)}, B^{(3)}$ 可得: 第二份标书属于最优的隶属度(第一个数)最大, 则第二份标书中标。

4 结束语

用模糊综合评判的方法进行评标决策, 能够很好地处理类似模糊决策的问题, 他不但充分发挥专家的作用, 还尽可能地减少了个人主观臆断所带来的危害, 为合理评标决策提供了科学的依据。笔者根据模糊数学原理建立评标决策过程中多级综合评判数学模型, 能够全面考虑影响评标决策过程的各种因素, 特别是可量化因素与不可量化因素能够同时参与比较。在各种影响决策的指标出现优越性交叉时, 可以做出更为科学的、有理论依据的科学判断。

参考文献:

- [1] 徐晓飞, 战德臣, 叶丹, 等. 动态联盟企业组织方法体系[J]. 计算机集成制造系统——CIMS, 1999, 1(5): 7-12.
- [2] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海: 上海科技出版社, 1983. 1-100.
- [3] 彭天好. 机械产品设计方案模糊综合评价[J]. 模糊系统与数学, 1997(2): 74-78.
- [4] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988. 1-120.

3.4 研磨零件硬度的影响

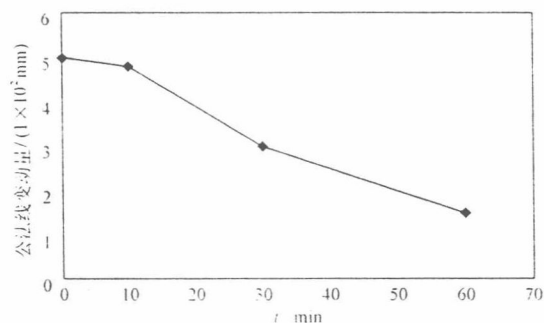


图 3 研磨时间对公法线变动量的影响

用相同的试验条件研磨未淬火的软齿面齿轮齿面出现了明显拉痕, 且齿顶磨损严重。

取 50 件传动齿轮, 硬度 $\geq 35\text{HRC}$, 用 80 目的碳化硅研磨 1h, 结果见表 1。

表 1 研磨前后传动齿轮精度的变化 mm

	研磨前		研磨后	
	公法线变动量	径向齿跳	公法线变动量	径向齿跳
最大	0.050	0.150	0.025	0.100
最小	0.010	0.050	0.000	0.040
平均	0.020	0.116	0.013	0.068
标准差	0.009	0.023	0.006	0.017

由表 1 可知传动齿轮最大公法线变动量从 0.050mm 降到 0.025mm, 下降了 0.025mm。径向齿跳从 0.150mm 降到 0.100mm, 下降 0.050mm, 同时齿轮精度的分散性也下降了 40%~60%。

Fuzzy Comprehensive Judgment on the Mechanical Equipment Bid Sheet

LIN Xiao-tong^{1,2}, WANG Ning-sheng¹, BAO Zheng-qiang¹

¹Department of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China

²Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China

Abstract: *The reasonable model of fuzzy comprehensive judgment is found by means of the theory and method of multi-level fuzzy judgment on the basis of the judging index system of mechanical equipment bid sheets. The scientific method is supplied for the judging bids, the key chain of the judging process of the mechanical equipment bid sheet. All factors are considered, especially quantitative factors or qualitative factors in the process of judgment.*

Key words: mechanical equipment, judging bid, fuzzy comprehensive judgment

1 Introduction

The competing rules are standardizing along with economical globalization. The way of inviting public bidding is used for buying a large amount of mechanical equipment. In this way a just competing circumstance can be provided for manufacturers. On the other hand, the price to the consumer can be reduced and some leak of the buying process of mechanical equipment is stopped to a certain extent. But the most pivotal chain of the bidding process, the judging bid is mostly carried out by means of expert discussion. It is a more complicated process of decision-making to select the best bidding sheet. Some indexes of many different bid sheets are not good or bad and all kinds of judging indexes affect each other, and they make the decision-maker too hard in selection. At that time, the decision-maker generally makes a decision according to the main indexes and other indexes are merely referenced. The qualitative factors cannot be compared. It is short of scientific quality. Then the model of fuzzy comprehensive judgment is suitable for the comprehensive judging problem of projects relative to different judging indexes. The excellent degree is decided by the judging value and the evidence of decision-making is provided for the judging bid.

L. A. Zadeh first founded the fuzzy mathematic method in 1960s. The fuzzy phenomena are described by accurate mathematical methods in fuzzy mathematics. At present, fuzzy set theory is widely applied in every field, such as the fuzzy comprehensive judgment of the design of a project, the fuzzy comprehensive judgment of enterprise economical benefit and so on. But it is seldom found in research and application of fuzzy comprehensive judging of mechani-

cal equipment bids. Some beneficial research and application are done on this aspect.

2 Comprehensive judging index systems and definition of membership degree

The judging bid process of mechanical equipment is a decision-making process to deal with many factors and targets. It has to satisfy all comprehensive judging criteria as well as the substantial demand that is required in a bidding sheet and the bidding price is lowest, except that the price is under the cost. The judging bidding, the consequence, the judgment and the final decision-making are fuzzy due to the indetermination of some indexes, the qualitative factors and uncertain economical factors. The process above is operated on the basis of a comprehensive judging index system.

The index system of mechanical equipment is a complicated tree frame system. The indexes of the bottom layer are probably different according to different equipment, but the indexes of the upper layer are the same basically. Hereinafter, the index system (Figure 1) is constituted by a delaminating method according to current mechanical products.

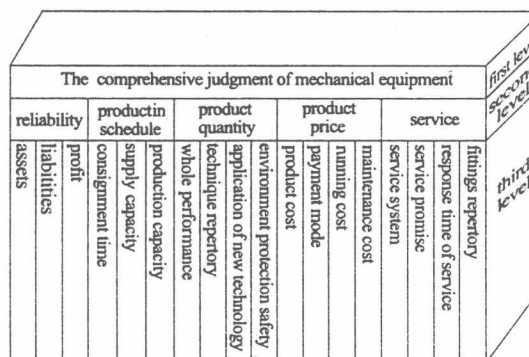


Figure 1 The system model of multi-level and multi-index comprehensive judgment

Calculation of membership degree:

(1) The membership degrees of the judging index (quantitative factors) are calculated by the formula of relative membership degree.

The membership degrees are calculated from higher indexes (such as price, productivity etc.) by the following formula:

$$r_j = \begin{cases} 1 & Y_j > Y_p \\ \frac{Y_j - Y_f}{Y_p - Y_f} & Y_f \leq Y_j \leq Y_p \\ 0 & Y_j \leq Y_f \end{cases}$$

where: r_j denotes the membership degree of judging index j in subset X_i

Y_j denotes the judging index j value.

Y_p , Y_f means the characteristic values of judging index j in subset X_i , the fluctuating values stated in the relevant design criterion or document are taken, the maximum and the minimum index of all bidding sheets are adopted if they are not stated.

The membership degrees are calculated from lower-indexes (such as mechanical noise, energy consumption, etc.) by the following formula:

$$r_j = \begin{cases} 0 & Y_j > Y_p \\ \frac{Y_p - Y_j}{Y_p - Y_f} & Y_f \leq Y_j \leq Y_p \\ 1 & Y_j \leq Y_f \end{cases}$$

(2) The membership degrees of a qualitative judging index are calculated by duality contrast axis. The number marking values of fuzzy language are designed about the qualitative judging indexes according to the relation knowledge of fuzzy priority.

Table 1 The number marking values of fuzzy language

The fuzzy language of duality contrast axis	Very good	Preferred	Good	Same	Bad	Poor	Very bad
The number marking values	1	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1	0

The matrix R of index membership degree about the subset X_i is constituted according to all membership degrees of the index above.

3 Multi-target and multi-level fuzzy comprehensive judgment^[1]

The index system of judging a project is a tree-like frame. So it is a process of multi-target and multi-level fuzzy comprehensive judgment to judge the bidding project of mechanical equipment. It is judged from the lowest level gradually to the highest level until the total judging target. (In this paper we take a two-level frame for example).

(1) The partition of multi-factor judging index

It is supposed that there are N enterprises to take part in bidding in a public bidding meeting and the judging bidding committee consists of k evaluating committeemen. The mechanical product has a set X of M judging indexes. X can be divided into s subsets X^i of subtargets by the type of character (It may be further divided if there are more factors in the next subset. The third or fourth level of the model will be obtained).

There

$$X^i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{M_i}^i\}, \quad i=1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{i=1}^s M_i = M$$

And

$$\bigcup_{i=1}^s X^i = X$$

$$X^i \cap X^j = \varnothing, \quad i \neq j$$

First of all, the single level fuzzy judgment of sub-target subset X_i is discussed.

(2) Single level fuzzy judgment

Assume the index subset of some sub-target is:

$$X^i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_{M_i}^i\} \quad i=1, 2, \dots, s$$

Comment set is:

$$V^i = \{v_1^i, v_2^i, \dots, v_m^i\} \quad i=1, 2, \dots, s$$

Comment set is general described with rule language of very bad, bad, ordinary, good, and very good; the right value of corresponding index is

$$\underline{A}^i = \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_{M_i}^i\} \quad i=1, 2, \dots, s$$

And satisfied:

$$\sum_{j=1}^{M_i} a_j^i = 1 \quad i=1, 2, \dots, s$$

hereinto the right value, $a_j^i (j=1, 2, \dots, M_i; i=1, 2, \dots, s)$ denotes the index X_j^i impor-

tance degree in its index set. The right value set is generally given by k committeemen in a committee of judging bidding. It is also decided by the learning method ^[4] of a neural network if there are enough samples.

The membership degree of each judging index to each judging level is confirmed and constitutes the fuzzy judging matrix of a single object.

$$R^i = \begin{bmatrix} R_1^i \\ R_2^i \\ \vdots \\ R_{M_i}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}^i & r_{12}^i & \cdots & r_{1m}^i \\ r_{21}^i & r_{22}^i & \cdots & r_{2m}^i \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{M_i1}^i & r_{M_i2}^i & \cdots & r_{M_im}^i \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, s$$

Hereinto r_{pj}^i denotes the membership degree of index u_p^i judge to v_j ($i=1, 2, \dots, s$; $p=1, 2, \dots, M_i$, $j=1, 2, \dots, m$), r_{pj}^i may be decided by the method that the fuzzy score is remarked on judging rule by k committeemen in a committee of judging bidding and is processed properly. $R_p^i = \{r_{p1}^i, r_{p2}^i, \dots, r_{pm}^i\}$ ($i=1, 2, \dots, s$; $p=1, 2, \dots, M_i$), denotes the judging set of index u_p^i . The comprehensive judging vector of sub-target is obtained.

$$B^i = A^i \circ R^i = (a_1^i, a_2^i, \dots, a_{m_i}^i) \circ \begin{bmatrix} r_{11}^i & r_{12}^i & \cdots & r_{1m}^i \\ r_{21}^i & r_{22}^i & \cdots & r_{2m}^i \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{M_i1}^i & r_{M_i2}^i & \cdots & r_{M_im}^i \end{bmatrix} = (b_1^i, b_2^i, \dots, b_m^i)$$

Hereinto $b_j^i = \bigvee_{p=1}^{M_i} (a_p^i r_{pj}^i) \quad i=1, 2, \dots, s; \quad j=1, 2, \dots, m$

(3) The fuzzy comprehensive judgment of multi-target and multi-level

The judging set B^i of the same level sub-target may constitute the total target matrix R of membership degree after the comprehensive judging vector of a single level sub-target is obtained.

$$R = \begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \vdots \\ B^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{s1} & b_{s2} & \cdots & b_{sm} \end{bmatrix}$$

Then the right value set A of each level sub-target is given

$$A = (a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_s), \text{ hereinto: } \sum_{i=1}^s a_i = 1$$

therefore the comprehensive judging vector of the total target is obtained:

$$B = A \circ R = (a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_s) \circ \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ b_{s1} & b_{s2} & \cdots & b_{sm} \end{bmatrix} = (b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_m)$$

The frame plot of the whole two-level judging model of comprehensive judgment is shown in Figure 2.

The maximal membership degree is: $b_p = \max_{i=1}^m \{b_i\}$ $1 \leq p \leq m$, it denotes that the bidding sheet is farther subjected to v_p .

The fuzzy operation is carried through for the bidding indexes of N bidding sheets. The comprehensive judging vector of the corresponding total target is then obtained. The most excellent and maximal membership degree is found after each comprehensive judging vector is compared.

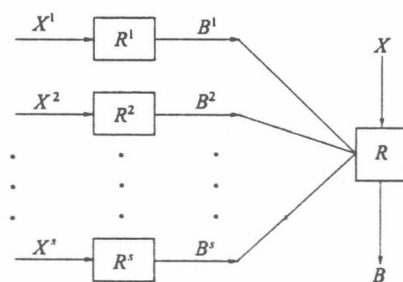


Figure 2 The frame chart of a two-level judging model

4 A case

An enterprise invites public bidding to buy 20 lift bridges of single beam electro motion calabash, their span is 19.5 meter, lift capacity: 5 ton, lift height: 9 meter, lift velocity 20 meter /minute, dolly move velocity 30 meter /minute, cart move velocity 20 meter /minute; controlled on ground, working class: A5, use indoor.

There are 3 manufacturers to be invited to the public bidding. The judging bidding committee consists of 5 evaluating committeemen who grade 18 factors and ascertain their membership degrees and right values. (The limited data are only given because of the space).

The third sub-target of bidding sheet X^3 :

Factor set $X^3 = \{\text{whole performance, technique repertory, application of new technology, Environment protection safety}\}$

The judging set $V^3 = \{\text{very good, preferred, good, same, bad, poor, very bad}\}$

The corresponding right degree set: $A^3 = \{0.5 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.2\}$

The membership degrees of qualitative judging index are decided by judging bidding committee with duality contrast taxis. The fuzzy judging matrix is obtained after rearrangement:

$$R^3 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

the comprehensive judging vector of X_3 : $B^3 = A^3 \cdot R^3 = \{0.15 \ 0.25 \ 0.12 \ 0.05 \ 0.02 \ 0.02 \ 0\}$

In the same way we can get B^1 , B^2 , B^4 . the fuzzy comprehensive judging matrix of the total target R is composed of B^1 , B^2 , B^3 , B^4 .

$$R = \begin{bmatrix} B^1 \\ B^2 \\ B^3 \\ B^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.02 & 0.26 & 0.02 & 0.02 & 0.01 & 0.01 \\ 0.35 & 0.13 & 0.12 & 0.01 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0.15 & 0.25 & 0.12 & 0.05 & 0.02 & 0.02 & 0 \\ 0.06 & 0.28 & 0.14 & 0.03 & 0.02 & 0.01 & 0 \end{bmatrix}$$

The corresponding right degree set: $A = \{0.2 \ 0.4 \ 0.3 \ 0.1\}$

The comprehensive judging vector of the first bidding sheet is obtained:

$$B^{(1)} = A \circ R = \{0.14 \ 0.052 \ 0.052 \ 0.015 \ 0.006 \ 0.006 \ 0.002\}$$

The comprehensive judging vectors of the second and third bidding sheets are obtained in the same way:

$$B^{(2)} = A \circ R = \{0.21 \ 0.12 \ 0.048 \ 0.032 \ 0.008 \ 0.002 \ 0.001\}$$

$$B^{(3)} = A \circ R = \{0.18 \ 0.08 \ 0.075 \ 0.034 \ 0.005 \ 0.002 \ 0.003\}$$

The membership degree that the second bidding sheet belongs to is very good and is the maximum by comparing with $B^{(1)}$ $B^{(2)}$ $B^{(3)}$. The second bidding sheet wins the bid.

5 Conclusions

The effect of the experts may adequately be brought into play; the harm of individual decisions is reduced as much as possible and the scientific evidence is supplied for a reasonable judging bid if the fuzzy comprehensive judging method is used for judging bid and decision-making. The reasonable model of multi-level comprehensive judgment is founded in the process of judging bid and decision-making. All factors are completely considered, especially quantitative factors or qualitative factors in the process of judgment. The more scientific and more reasonable judgment is made when some indexes affecting decision-making appear advantageous.

References

- [1] P. Z. Wang, *Fuzzy Set Theory and Application*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, pp. 1~100, 1983
- [2] S. B. Xu, *Administrative Levels Analytical Method Principle*. Tianjin: Tianjin University Press, pp. 1~20, 1988
- [3] T. H. Peng, *The Fuzzy Comprehensive Judgment of Mechanical Product Design Project*.
- [4] K. Q. Zou, *The Neural Network Method of Comprehensive Judgment*. Fuzzy System and Mathematics, No. 4, 1998
- [5] G. W. Cheng, *Judging Enterprise Economical Benefit with Fuzzy Comprehensive judgment*. Journal of Harbin University of Science and Technology, No. 3, 1997

Brief Biographies:

LIN Xiao-tong is now a Ph. D. candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, his current interests are in CIMS, CAD and CAPP

WANG Ning-sheng is now a professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, his current interests are in CIMS and FMS

BAO Zheng-qiang obtained a Ph. D. degree, he is now an associate professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, his current interests are in CIMS and FMS

基于遗传算法的箱体零件加工路线决策方法研究

秦宝荣 柯文 王宁生

摘要:在对箱体零件典型加工路线分析的基础上,定义了工步优先权和加工路线能量函数,建立了工步排序的数学模型,提出了基于遗传算法的工步排序优化方法,并对遗传操作的算法进行了改进设计,最后,用典型算例说明算法的应用。排序以典型加工路线为目标、零件的特殊要求为约束,将排序算法与零件型面、加工方法相分离,提高了算法的适用性、通用性和灵活性。

关键词:计算机辅助工艺规划;箱体零件;加工路线决策;遗传算法

中图分类号:TH166;TP391

文献标识码:A



秦宝荣 副教授

加工路线决策是CAPP的关键问题之一,其主要任务是将零件上各个加工特征的加工方法按照一定的规则排序,生成整个零件的加工路线。由于零件上加工特征和加工方法的多样性,加工要求的个性,以及决策过程的经验性,使加工路线的决策非常复杂,成为创成式CAPP系统实用化的一个瓶颈。

传统的创成法采用决策表和决策树的方法,排序逻辑固定于源程序中,决策知识与决策算法不能独立,系统的灵活性和通用性很差,专家系统方法只是在一定程度上解决了传统创成法存在的问题,基于模糊逻辑^[1]、神经网络、遗传算法^[2]的CAPP系统借助数学模型解决加工路线决策问题,但离实际应用还有一段距离,基于分级约束的加工方法排序^[3]按多个层次确定回转类零件的加工顺序,基本实现排序算法与零件的形状特征分离。但箱体零件加工特征的种类多,涉及的加工方法多,排序约束复杂,其加工路线的决策远比回转类零件困难。

1 箱体零件典型加工路线分析及工步排序数学描述

1.1 箱体零件典型加工路线分析^[3,4]

箱体零件常见的加工特征包括平面、阶梯面、槽、凹坑、光孔、阶梯孔、锥孔、螺孔等,平面、阶梯面、通槽常用的加工方法有铣削、刨削、磨削,盲槽、凹坑的加工方法为铣削,通孔、阶梯孔、锥孔常用的加工方法有钻孔、扩孔、镗孔、铰孔,螺纹常用的加工方法为攻丝。按加工方法的特点,可将箱体

零件的加工特征抽象为平(平面、阶梯面)、槽(槽、凹坑)、孔(光孔、阶梯孔、锥孔)、螺纹。

箱体零件上面的常用加工方案为粗铣(或粗刨)一半精铣(或半精刨)一精铣(或精刨)一磨。孔的常用加工方案为钻一扩一铰一研磨或粗镗一半精镗一精镗一研磨(或金刚镗、珩磨)。按照加工性质,可把加工方案抽象为粗加工一半精加工一精加工一光整加工。

箱体零件加工路线排序应遵循基面先行原则、先粗后精原则、先面后孔原则。按照先粗后精原则和先面后孔原则,可简化抽象出箱体零件典型加工路线是,面粗加工一面半精加工一面精加工一槽粗加工一槽精加工一孔粗加工一孔半精加工一螺纹加工一孔精加工一孔光整加工一面光整加工。

对于某一具体的箱体零件,按照加工特征的类型、加工方法的性质与典型加工路线进行匹配,并根据零件的特点适当调整,确定各种加工的优先次序,并对各种加工确定一个优先权系数 p ,加工的优先权越高, p 值越大。按照优先权系数由高到低排序,即可得到符合典型加工路线的加工序列。

为了便于排序过程的数学描述和算法的实现,定义二个概念。

定义1 将每一工步中加工特征、加工方法、优先权系数、定位基准、加工设备等信息的全体称为工步基本信息元,简称工步元

$$s = (f, m, p, F_R, M_c)$$

式中, f, m, p, F_R, M_c 分别为加工特征代码、加工方法、优先权系数、本次加工的基准特征集合、可用于本次加工的机床集合。

定义2 将有先后次序要求的工步称为关联工

步。若要求工步 s_i 先于工步 s_j , 记为 $s_i > s_j$ (或 $s_i - s_j > 0$)。没有先后次序要求的工步称为非关联工步。

加工路线排序时, 可根据零件加工中基准的转换次序定义若干个关联工步, 作为排序优化的约束条件。

1.2 工步排序的数学描述

设 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 是某零件 n 个工步元的集合, S 有 n 个工步元, 所以存在 $n!$ 种工步顺序。把某一工步顺序表示为

$$x = \langle s_{a(1)}, s_{a(2)}, \dots, s_{a(n)} \rangle$$

$$\{s_{a(1)}, s_{a(2)}, \dots, s_{a(n)}\} = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$$

问题的解集合为

$$V = \{ \langle s_{a(1)}, s_{a(2)}, \dots, s_{a(n)} \rangle : [a(1), a(2), \dots, a(n)] = (1, 2, \dots, n) \}$$

对某一工步顺序 x , 可定义其能量为

$$\sum_{i=1}^n p(s_{a(i)}) \times 10^{(n-i)}$$

式中, $p(s_{a(i)})$ 为工步元 $s_{a(i)}$ 的优先权系数。

排序优化的目标是找一个最优的顺序 $x^* \in V$, 满足加工要求, 且能量最大。即

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^n p(s_{a(i)}) \times 10^{(n-i)} \right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g_i(s) > 0$$

式中, $g_i(s)$ 为关联工步约束不等式, 可根据零件的加工要求和基准配置情况来定义。

用罚函数法, 可构造出工步排序优化的代价函数

$$\max f(x) = \sum_{i=1}^n [1 - rh(s_{a(i)})] p(s_{a(i)}) \times 10^{(n-i)} \quad (2)$$

式中, r 为违背约束条件的惩罚系数, $r = 1.2 \sim 1.5$ 。

函数的取值为

$$h(s_{a(i)}) = \begin{cases} 1 & s_{a(i)} \text{ 违背约束条件} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

2 基于遗传算法的工步排序方法与算法设计^[5,6]

2.1 基因编码与适应度函数

基因编码采用自然数编码, 每一个基因码对应一个工步元。对于要求连续加工或同时加工的多个工步, 可合并为一个工步, 对同一方位面上尺寸相同、加工要求相同的特征组, 可作为一个特征处理, 排序结束后, 再扩展成多个工步。

直接采用式(2)的代价函数作为适应度函数, 即

$$F(x) = f(x)$$

2.2 初始种群及选择策略

将基因码随机生成若干个(> 10)序列作为原始种群, 计算种群中个体的适应度, 将个体按适应度由大到小排序, 选择前若干个(4~10)个体作为下一代的初始种群, 初始种群的规模根据排序的规模确定。

2.3 启发式交叉算子

将初始种群中个体按交叉概率($P_c = 0.60 \sim 0.99$)随机配对成父母个体对, 父母个体交叉运算后得到子个体 x' 。交叉算子见图1, 首先, 逐个检查父个体中的基因码, 将能满足约束条件的基因原位复制到子个体 x' , 其次, 同样操作, 将母个体中能满足约束条件的基因原位复制到子个体 x' (父个体中已复制的相同基因放弃), 然后, 将子个体 x' 中缺少的基因码随机填充, 最后将子个体 x' 加入到种群中去。子个体 x' 中遗传了父母个体的优良基因, 使子个体比父母个体有显著改进。



图1 交叉算子

2.4 变异算子

常规的变异操作可能会使一些已确定的关联工步位置发生变化, 产生新的违背约束的情况, 为防止这种情况的发生, 我们给变异操作增加一个约束。首先, 按照变异概率, 随机选择并复制个体 x , 随机产生变异点 $a(i)$ 、 $a(j)$; 然后, 判断 $s_{a(i)}$ 、 $s_{a(i)}$ 是否为关联工步, 若 $s_{a(i)}$ 、 $s_{a(i)}$ 是非关联工步, 或者 $s_{a(i)}$ 、 $s_{a(i)}$ 是关联工步, 但 $s_{a(i)}$ 、 $s_{a(i)}$ 当前位置不符合排序优化的约束条件, 则做交换变异操作, 产生新个体 x'' , 见图2, 若 $s_{a(i)}$ 、 $s_{a(i)}$ 是关联工序, $s_{a(i)}$ 、 $s_{a(i)}$ 当前位置符合排序优化的约束条件, 则不做任何操作; 最后, 将个体 x'' 加入到种群中去。

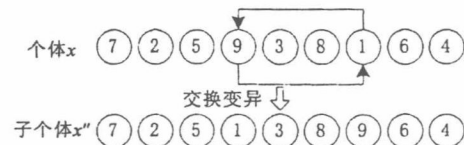


图2 变异算子

由于算法中增加了自定义约束, 变异操作有利于种群的多样化, 且有利于个体的进化, 可选择较大的变异概率($P_m = 0.1 \sim 0.4$)。

2.5 算法终止条件

若连续10次以上迭代, 最优个体的适应度保