

Study on Complex Products Job-shop Scheduling System Based on MES

Etude sur le système de planning des ateliers de produits complexes basé sur MES

基於 MES 的複雜產品（船舶）車間作業調度系統研究

SU Xiang, SUN Hongxia, LIAN Chunguang, YUE Xima

蘇翔, 孫紅霞, 連春光, 嶽喜馬

Received 5 May 2008; accepted 20 May 2008

Abstract: Various random disturbances that happen in the process of complex products (ship) production cannot feedback timely, and the plans of job-shop operation are too rough to instruct job-shop production. The purpose of this study is to solve the problems above, help the course of complex products (ship) job-shop production runs orderly and efficiently, and improve the job-shop on-site management level. In this paper, we proposed complex products job-shop scheduling system based on MES. The system adopts six-level, refined plan and scheduling mechanism. Its key part is the job-shop scheduling model with man-machine coordinated mechanism. What's more, an improved Genetic Algorithm based on TOC is proposed to make the optimized algorithm module of the system more scientific and effective.

Key words: Complex Products; MES; Job-shop Scheduling System; Man-machine Coordinated Mechanism; Genetic Algorithm

Résumé: Diverses perturbations qui se produisent au hasard dans le processus de production des produits complexes (navire) ne peuvent pas être aperçues en temps opportun, et les plans de l'opération des ateliers sont trop approximatifs pour guider la production. Le but de cette étude consiste à résoudre les problèmes ci-dessus, rendre le cours de la production des produits complexes (ship) dans les ateliers ordonné et efficace et améliorer le niveau de gestion sur place. Dans cet article, nous avons proposé le système de planning des ateliers de produits complexes basé sur MES. Le système contient six niveaux de programmation raffinée et de mécanismes de planning. Son élément essentiel est le modèle de programmation avec les mécanismes de coordination homme-machine. De plus, un algorithme génétique amélioré basé sur TOC est également proposé de rendre le module de l'algorithme du système optimisé plus scientifique et efficace.

Mots-clés: produits complexes; MES; système de planning des ateliers; mécanismes de coordination

homme-machine; algorithme génétique

摘要: 針對目前複雜產品（船舶）生產過程中所出現的各種隨機擾動不能得到及時回饋，以及車間作業計畫粗略難以直接指導車間生產的現狀，本文提出基於MES的複雜產品車間作業調度系統。該系統採用逐層細化的五級計畫與調度機制，以人機協同的車間作業調度模型為核心，通過改進基於TOC的遺傳演算法，使系統的演算法模組優化性能更具有科學性和操作性。該系統有助於實現複雜產品（船舶）車間生產過程的有序運作，從而提高生產車間的現場管理水準。

關鍵字: 複雜產品； MES； 車間作業調度； 人機協同； 遺傳演算法

1. 製造執行系統（MES）

1.1 MES 的關鍵問題描述

製造執行系統（Manufacturing Execution System, 簡稱 MES）的概念由美國先進製造研究機構 AMR 在 20 世紀 90 年代提出。MES 作為製造企業計畫層與控制層之間的執行層，它一方面將業務管理層 ERP 系統的命令進一步細化後，向生產過程發出製造指令；另一方面，將程式控制層收集到的即時資訊，回饋回業務管理層，作為以後編制生產計畫的依據，並對車間作業進行即時動態調度，將企業資源計畫和程式控制整合在一起，形成 ERP/MES/PCS 三層為核心的企業資訊集成系統。

由此可見，MES 是企業資源計畫系統和設備控制系統之間的橋樑和紐帶，是企業實現敏捷化和全域優化的關鍵系統，是船舶行業資訊化建設發展的關鍵。

1.2 ERP/MES/PCS 三層資訊集成

MES 的架構具體概括為“一個平臺、二個集成、三個支撐系統”。船舶行業綜合資訊平

臺包括企業資料集成平臺及應用集成平臺兩大部分。ERP/MES/PCS 的三層體系就是建立在這個平臺之上，通過資料庫技術和相關集成技術將整個企業聯為一體。

ERP 和 MES 之間的集成採用“資訊集成內容遵循 S95 標準，消息封裝格式應用 XML 技術，企業應用集成平臺採用 BizTalk server 來實現”的仲介軟體集成方法，該集成平臺性能穩定、可靠性高。

MES 與 PCS 的集成則應用 OPC 技術。OPC 使 MES 在集成過程資訊時，無需考慮 OPC 的底層細節技術，只要遵循 OPCXML 或 OPCOM/DCOM 的規範，其 OPC 用戶端就可以方便地訪問 OPC 伺服器，從而使 MES 可以方便地根據現場實際情況結合企業應用的需要，快速地實現 OPC 伺服器的過程資訊集成。在充分發揮上述兩大集成技術所構建的集成平臺的穩定性好、可靠性高的基礎之上，建立了基於 MES 的車間作業調度系統的基本框架圖，如圖 1 所示：

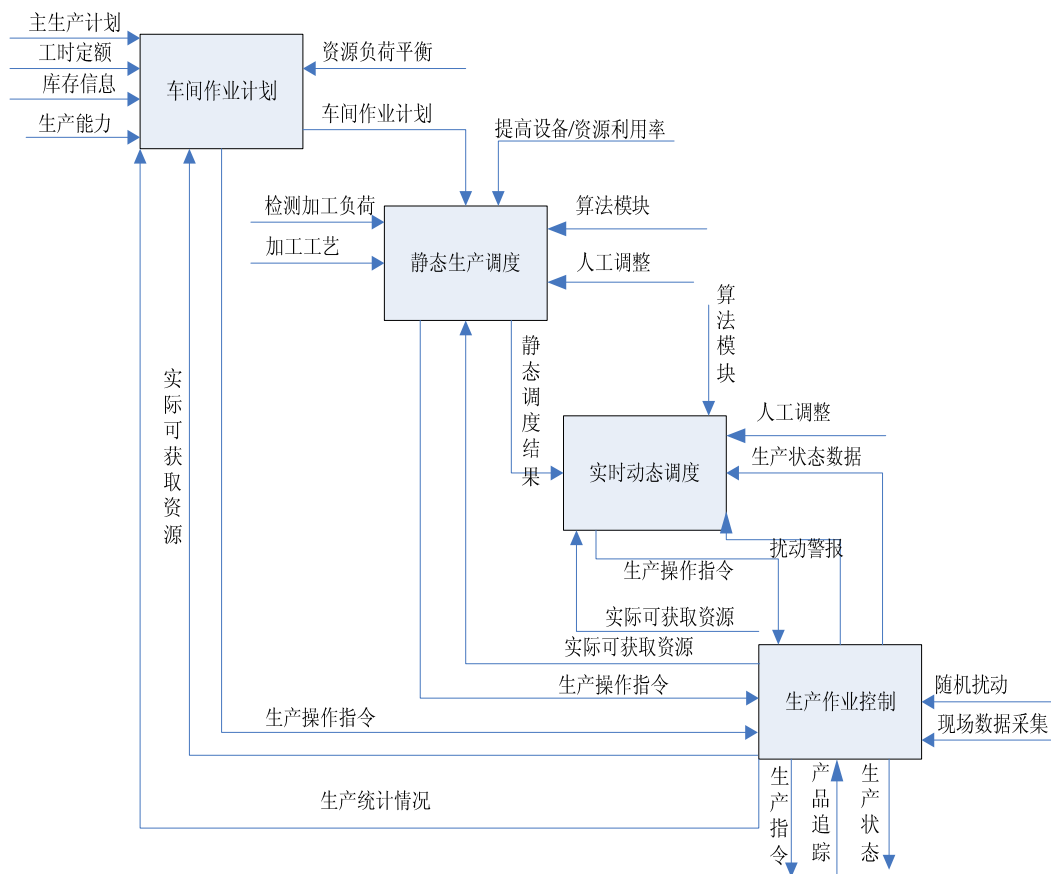


圖 1 基於 MES 的車間作業調度系統的基本框架

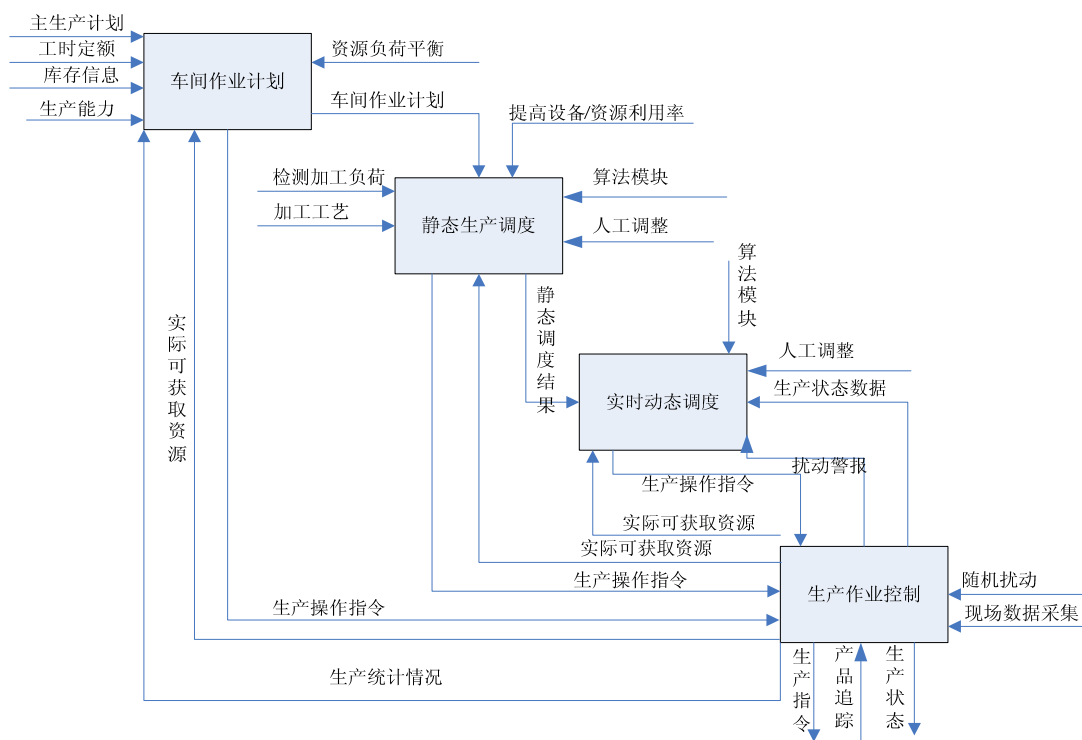


圖 2 生產作業計畫和調度控制的流程圖

2. 車間作業調度系統的功能分析 與設計

基於MES的車間作業調度系統由工序作業計畫層、調度層和生產作業控制三者有機組成，通過制定合理的工序級生產作業計畫、優化調度和對生產狀態的閉環監控使製造過程平滑地按計劃進行。本節以造船企業為例進行說明。

2.1 造船企業車間工作流程描述

首先加工車間接受到ERP下達的生產計畫，根據生產能力、庫存資訊以及工時定額，編制車間作業計畫，下發給各生產單元進行生產。各生產單元對生產計畫執行情況進行控制，並對影響生產的各個因素狀態如物料情況、人力資源、品質檢測、設備狀態等進行監控，將所跟蹤和採集得到的生產情況資訊和資源狀況資訊向上回饋；最後，生產車間對生產計畫重新進行調度分配。各生產單元在監控生產計畫執行情況的同時，還生成生產進度分析報告，並將關鍵資訊回饋給上層的ERP。具體的生產作業計畫和調度控制的流程如圖2所示。

2.2 車間作業調度系統的功能分析與設計

通過對造船企業車間生產與管理流程的分析，車間計畫調度系統的功能需求主要體現在以下四個方面。

- (1) 提供資料的導入、匯出和管理。
- (2) 編制工序級生產作業計畫。
- (3) 提供生產作業排序資訊，排產甘特圖以及結果報表；並對突發性事件，能及時進行即時動態調度。
- (4) 對生產過程進行跟蹤管理。

通過對車間的功能需求分析，提出了一個五級計畫和調度機制：

(1) 工序級作業計畫編制模組 PWP

該模組生成工序級操作計畫，即詳細計畫；提供基於指定生產單元相關的優先順序、屬性、特徵、方法等的作業排序功能，確定在

規定的計畫內各種製造設施的具體使用情況，每日/班內加工的工件種類和數量。工序級作業計畫是基於有限能力的生產執行計畫。其目的就是要安排一個合理的序列以最大限度地壓縮生產過程中的輔助時間，制定具體的工序級生產作業計畫^[4]。

(2) 能力計畫模組 CP

該模組通過比較生產需求與生產線上關鍵操作中設備的能力，反映出對設備資源的需求，可以隨時提供每一種產品所剩餘的生產能力。

(3) 日批量發放模組 DLR

該模組說明生產計畫人員在每天或每班更準確地把待加工產品發放到生產線上去。

(4) 日生產調度模組 DPS

該模組中的有限資源調度引擎將產生詳細的機器調度。此外根據每次運行的不同目的，系統還會提供具體的分析結果。

(5) 動態操作調度模組 DOS

該模組說明一些關鍵的生產操作，進行局部的重新調度和優化。它也可以用來對瓶頸操作重新產生詳細的機器調度表，這時會考慮最新的在製品WIP，機器狀態和緊急的訂單進行計算。幫助生產線上的監查人員對緊急事件做出反應，同時有效地優化資源結構。

3. 人機協同的車間作業調度模型的 構建及調度演算法優化

針對複雜產品（船舶）車間作業調度系統的核心功能模組——調度模組，構建了柔性的人機協同車間作業調度模型，提供多管道的靈活調度方式。與以往的單一調度方式相比，在很大程度上提高了作業調度的效率。同時通過對標準遺傳演算法的改進，設計了基於TOC的改進遺傳演算法，使演算法功能模組的實用性增強。

3.1 人機協同的車間作業調度模型的構建

一般的調度演算法模型難以解決複雜產品（船舶）車間錯綜複雜的作業調度問題，本文

結合人工智慧方法和遺傳優化演算法，構建了人機協同的作業調度模型。對於靜態作業調度問題，利用自動調度演算法模組快速地獲得較優調度方案；對於複雜的動態調度問題，則可以利用專家智慧作業調度模組獲得可行的初始

調度方案。然後依據對初始調度方案的不當之處，調度員決定是否進行第二次人工調整，以彌補自動調度演算法優化性不夠好的缺點。根據上述兩種作業調度途徑，建立了相應的車間作業調度模型，如下圖 3 所示^[5-6]。

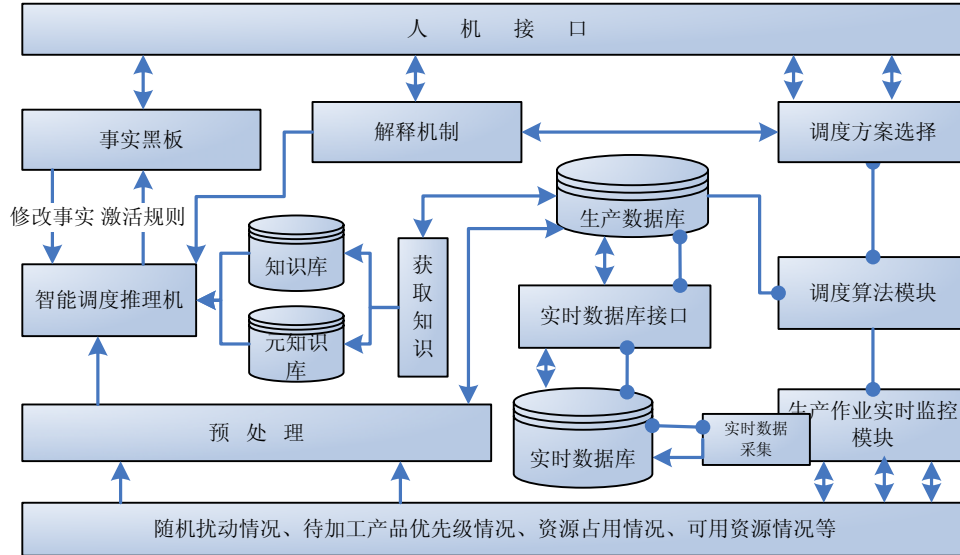


圖 3 車間作業調度的過程模型

3.2 基於 TOC 的改進遺傳調度演算法的設計

針對車間作業調度過程模型的調度演算法模組，提出基於 TOC 的改進遺傳調度演算法。該演算法通過改進標準遺傳演算法，以約束理論 (TOC) 引導收斂方向，有效抑制了標準遺傳演算法的早熟收斂、隨機漫遊等現象，加快了演算法的搜索速度。

(1) 標準遺傳演算法改進

① 染色體編碼策略

融合工件號的編碼方法與機器分配的編碼方法，將產生的染色體相同位置的基因一一相對應，就能得到調度問題的一個可行解。該方法解決了工件號編碼忽略“一工序多機器”的問題，同時也克服了機器分配編碼未考慮工序間先後關係的缺陷^[7]。

② 種群多樣性控制策略

在種群進行初始進化時，首先緩存父代種群，在生成子代種群後，分別計算子代種群與父代種群的種群進化期望值，比較它們的進化期望值 e 。若子代種群進化期望值大於父代種群期望值時，則“進化”，否則利用類比退火演算法“退化”。然後進行交叉、變異。再進行下一輪反覆運算計算，直到反覆運算結束，從而保證種群一直按照進化規則進化。

根據種群多樣性控制原理，種群進化方向

應該與高種群平均適應度和低種群多樣性的種群進化方向一致，而 e 控制著進化方向，因此 e 應與 \bar{F} 成正比而與 $H(N)$ 成反比。根據上述思想，種群進化期望值 e 的具體計算步驟如下：

1) 計算出 N 條染色體的資訊熵 $H(N)$ ，其

$$\text{計算公式為 } H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^M (-p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (1)$$

式中 P_{ij} 表示 N 個染色體工件號 i 出現在第 j 個基因位的概率； S 表示工件總數； M 表示染色體基因位數。

2) 計算出種群平均適應度值

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M F_{ij} \quad (2)$$

式中 F_{ij} 表示第 i 個染色體中第 j 個基因位的適應度。

3) 根據資訊熵和平均適應度，即可計算出種群的進化期望值 $e = \frac{\bar{F}}{1 + H(N)}$ (3)

③ 最優個體保存替代策略

由於選擇、交叉或和變異操作都可能喪失最優解，因此需要每次進化週期結束後，找出每代中最優個體將其保存放在篩檢程式中。父代種群生成子代種群後，用篩檢程式中的歷史

最優個體替換掉子代種群中的最差個體，從而避免最優個體風暴。篩檢程式的規模事先給定，如果個體數目超過其規定規模時，可以通過去除適應度最小的個體或剔除那些與其他點距離最近的點來控制，從而保證篩檢程式中非劣解的均勻分佈。

④ 非法解轉化策略

由於交叉母體與交叉點是隨機選擇的，既可能生成可行解，也可能生成非法解，因此必須對新染色體進行合法性檢查。非法解的識別過程：讀出染色體中的一個基因，確定它代表的工件號 i 和工序號 j ；比較本工序開始時間 (st_{ij}) （零件 i 的第 j 道工序的開始時間）和上一工序完成時間 $(et_{i(j-1)})$ （零件 i 的第 j 道工序的結束時間），如果 (st_{ij}) 先於 $(et_{i(j-1)})$ ，則認為這個染色體是一個非法解。出現非法解後，需將識別出的非法基因移動到排序的末位元，這種處理方式得到的解是和父代相似度最大的可行解。

⑤ 參數調整策略

文獻 8 分析了各遺傳運算元對演算法的影響，得出了重要的結論，選擇概率、交叉概率 p_c 和變異概率 p_m 的合理選擇無論是對提高適應度還是增強種群的多樣性都是非常有利的。

1) 選擇概率的選擇

很多文獻中都是比較適應度對個體進行選擇，該方法收斂速度慢，極易陷入局部最優。文獻 9 提出了基於資訊熵的遺傳退火選擇方法，在很大程度上克服了以上缺陷，選擇概率為：

$$p_{si} = e^{-(H_i + \beta F_i)} / \sum_{i=1}^N e^{-(H_i + \beta F_i)}$$

其中 $H_i = \sum_{j=1}^M -p_{ij} \ln p_{ij}$ 表示第 i 個染色體的資訊熵； F_i 表示第 i 個個體的適應度； $\beta = (\alpha T_s)^{-1}$ ， α 為 Boltzmann 常數， $\{T_s\}$ 為趨近於 0 的溫度控制序列。

2) 交叉概率和變異概率的選擇

採用以下自我調整參數來動態調整交叉和變異概率^[10-11]：

$$p_c = \begin{cases} 0.9 - \frac{0.3(F_{\max} - F_{\min})}{F_{\max} - F_{\min}}, & F \geq \bar{F} \\ 0.9, & F < \bar{F} \end{cases}$$

$$p_m = \begin{cases} 0.1 - \frac{0.099(F_{\max} - F_{\min})}{F_{\max} - F_{\min}}, & F \geq \bar{F} \\ 0.9, & F < \bar{F} \end{cases}$$

式中：

$$F = \max(\text{fitness}(\text{parent}_1), \text{fitness}(\text{parent}_2))$$

parent_1 和 parent_2 為選擇的交叉或變異物件。

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i$$

在上述自我調整 GA 中，交叉概率 p_c 和變異概率 p_m 會隨群體的適應度自動改變。當種群各個體的適應度趨於一致或者趨於局部最優時，使 p_c 和 p_m 增加，以跳出局部最優；而當群體適應度比較分散時，使 p_c 和 p_m 減少，以利於優良個體的生存。同時，對於適應度高於群體平均適應值的個體，選擇較小的 p_c 和 p_m ，使得該優良解得以保護；而低於平均適應值的個體，選擇較大的 p_c 和 p_m 值，增加新個體產生的速度^[12]。

(2) 演算法描述

基於 TOC 的改進遺傳演算法，詳細步驟如下：

① 尋找瓶頸

使用列工序負荷表的方法尋找瓶頸資源步驟如下：

- 1) 首先在工序集 $\{o_{ij}\}$ 中，找出通過加工設備 M_i 的所有工序 $\{o_{ij}\}$ ，計算出設備 M_i 的加工時 $\{p_m\}$ ；
- 2) 計算出各設備將被有效佔用的時間 $\{\sum p_m\}$ ；
- 3) 計算每類設備的負荷率 $\{\sum p_m / k(m)\}$ ，其中 $k(m)$ 為設備 M 所擁有的數量；
- 4) 對各類設備的負荷率 $\{\sum p_m / k(m)\}$ ，進行比較，其中最大值對應的設備即為本次排序的瓶頸資源。

② 工序分割

為了使瓶頸資源利用率最高，對應於每個加工任務，瓶頸工序之前採用倒排的方式(拉式生產方式)，瓶頸工序之後採用正排的方式(推式生產方式)。如圖 4 所示。

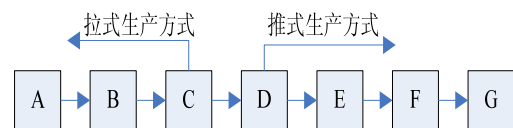


圖 4 工序分割

③ 對瓶頸前工序排序

對瓶頸前面的工序使用改進的遺傳演算法獲得較優解 S1。因為這個解是從瓶頸工序倒排序生的解，因此，再生成模式之前，要取它的逆序 S2。然後再把 S2 演化成一個模式(S3)來保存，進行下一步全域優化工作。在後面的遺傳操作中，一方面不能破壞 S3 的模式，另一方面，

也不能破壞 S3 中隱含的時間點資訊。

④ 全域優化

全域優化就是要把還沒有參加排序的工序插入到模式 S3 中，進行二次排序優化。最後獲得較好的可行解。

改進的遺傳演算法流程如圖 5 所示。

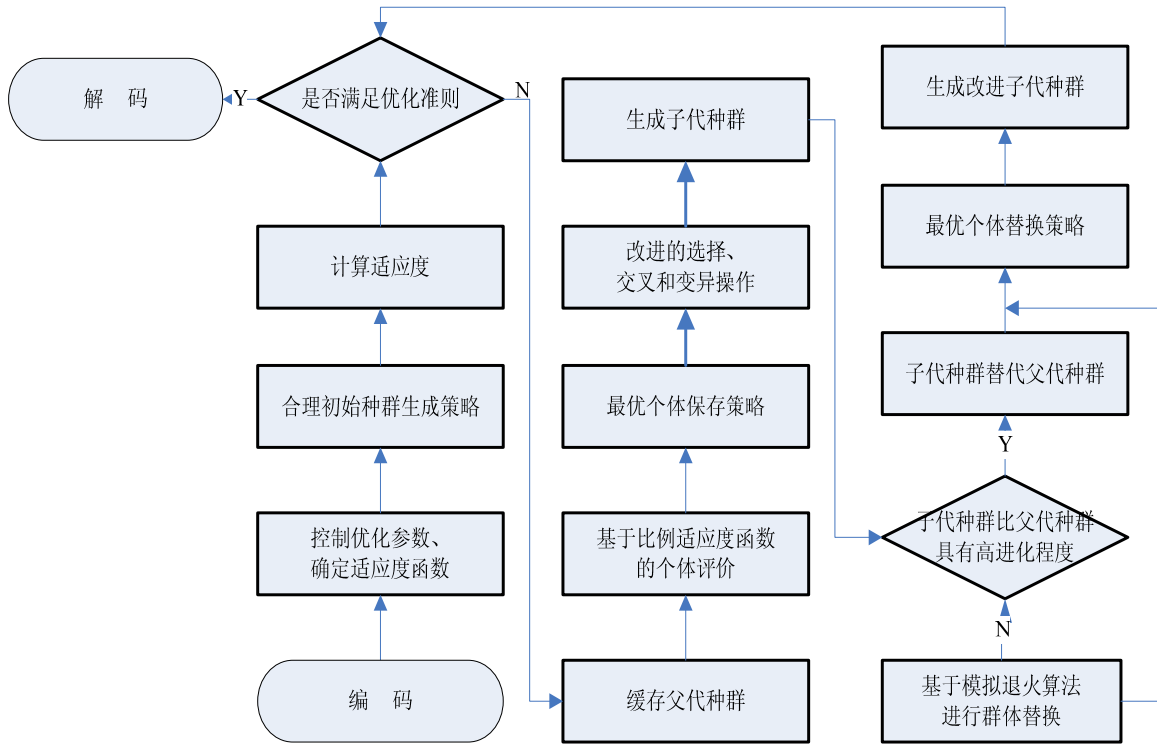


圖 5 改進的遺傳演算法流程圖

(3) 演算法可行性分析

通過使用 VC++ 對標準遺傳演算法、改進遺傳演算法、基於 TOC 的標準遺傳演算法和基於 TOC 的改進遺傳演算法對典型車間調度問題 (FT06, FT10, FT20) 進重複性計算實驗，由於篇幅的限制，這裡就不具體介紹算例。實驗結果表明在遺傳代數和種群規模取比較小的值時，用標準遺傳演算法和改進遺傳演算法優化的解具有一定的隨機性，解的品質有可能出現較大的波動。

相比之下，使用基於 TOC 的改進遺傳算求解車間作業調度問題時，解的品質的穩定性較好，並且計算代價較小。在複雜產品（船舶）車間中由於產品生產工藝的複雜性，適宜使用基於 TOC 的改進遺傳演算法，它能在較小的計算代價下搜索到滿意解，並且解的品質較穩定。

4. 結語

本文設計了基於 MES 的複雜產品車間作業調度系統，該系統通過對製造過程中車間層合理計畫、有效調度與即時控制，實現了生產過程的有序運作，資源的優化，產品製造週期的縮短，庫存的降低，提高生產車間的現場管理水準，最終有助於企業經濟效益的提高。

針對調度功能模組，本文構造柔性的人機協同的作業調度模型，提供多管道的靈活的作業調度方式。

對於系統中的演算法模組，本文設計了基於 TOC 的改進遺傳演算法。通過對比分析，基於 TOC 的改進遺傳演算法優化的解的穩定性較好，並且計算代價較小，較適宜複雜產品（船舶）車間調度系統的實施。

REFERENCES

- Agenetic algorithm for the resource. Constrained multiproject scheduling problem [J]. *European Journal of Operational Research*.
- Alsulranny, Yas Abbas, Aqel, Musbah. (2003). Pattern Recognition Using Multilayer Neural-Genetic Algorithm[J]. *Neurocomputing*, 51 (4) : 237-241.
- Christoph S.Thomalla.Job(2001). Shop scheduling with alternative process plans[J]. *International Journal of Production Economics*, (74):125-134.
- Ignacio Rojas, Jesus Gonzalez, Hector Pomares, et al. (2002). Statistical analysis of the main parameters involved to design of a genetic algorithm [J]. *IEEE Transactions Reviews*,32(1):31-37.
- J.F.Goncalves,J.J. M. Mendes,M.G.C. Resende.
- Yang Hao,Zhou Na,Zhu Jianying.(2003). Development of a distributed and intergratable manufacturing execution system framework[J].*Journal of Southeast University (English Edition)*, 19(1): 64-69.
- 吳剛, 史海波. (2006). 基於中介軟體的 MES 與 ERP 系統資訊集成技術研究[J].《微電腦資訊》(管控一體化), 222 (9-3): 46-49.
- 徐天松, 丁師鏞, 劉玉峰, 邱正鋒. (2005). 資訊化在造船生產計畫管理中的突破——簡述造船日程計畫管理系統的開發與應用[J]. *滬東中華技術情報*, (4): 36-40
- 董榮鳳, 王海宴, 李新立, 肖冬. (2000). 大學生素質評測統的開發和應用[J]. *中國管理科學*, 8: 435-440.
- 席政. (2007). 人工智慧在航太飛行任務規劃中的應用研究. *航空學報*, 28 (4): 791-795.
- 盧冰原, 陳華平, 古春生, 穀峰. (2004). 基於模糊邏輯的偏柔性工作車間調度模型[J]. *中國管理科學*, 12 (6).
- 張毅, 楊秀霞. (2005). 一種基於能量嫡的快速遺傳演算法研究. *系統工程理論與實踐*, 2 (2): 123-128.
- 汪民樂, 高曉光, 劉剛. (2006). 遺傳演算法早熟問題的定量分析及其預防策略[J]. (2007) *系統工程與電子技術*, 28 (8):1249-1251.

The author: SU Xiang (蘇翔), 男(漢族), 江蘇科技大學經濟管理學院教授, 博士, 中国江苏。研究方向: ERP、資訊管理、企業管理。