

文章编号: 1001-0920(2008)11-1221-05

基于离散时间最优控制的航空发动机装配序列规划

汤新民¹, 钟诗胜²

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016; 2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为实现航空发动机维修差错的控制, 采用基于优先约束关系的装配子网对发动机部件装配序列建模. 在给定的装配评价准则下, 将装配序列规划问题转化为最优变迁激发序列问题. 引入离散时间的 Pontryagin 最小值原理 (DTPMP), 将极小化哈密顿函数这一全局优化的必要条件作为求解零部件装配序列的启发信息. 为避免潜在死锁, 给出了最优变迁激发序列算法. 最后对最优装配序列规划算法的分析显示, 该算法有多项式时间的复杂度.

关键词: 发动机装配序列规划; 离散时间最优控制; 装配 Petri 网; 最优装配序列

中图分类号: TP391.73

文献标识码: A

Aero-engine assembly sequence planning based on discrete-time pontryagin's minimum principle

TANG Xin-min¹, ZHONG Shi-sheng²

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: TANG Xin-min, E-mail: tangxinmin@nuaa.edu.cn)

Abstract: To eliminate maintenance error during aero-engine assembly, assembly sub-Petri nets is used to modeling aero-engine parts assembly sequence (PAS) based on assembly precedence relationship. By the given assembly evaluation criterion, assembly sequence planning can be transformed into optimal transition firing sequence (OFS). Discrete-time Pontryagin's minimum principle (DTPMP) is introduced to find OFS and DTPMP states that an OFS must minimize the Hamiltonian function which can be treat as the heuristic information to find the PAS. In addition, to avoid latent deadlock, the OFS algorithm is proposed. After complexity analysis, the OFS algorithm based on DTPMP is proved to be polynomial complexity.

Key words: Aero-engine assembly sequence planning; Discrete-time Pontryagin's minimum principle; Assembly Petri nets; Optimal assembly sequence

1 引言

在航空发动机的维修过程中, 装配作业是整个维修作业的重要组成部分. 因为发动机结构复杂、零件数目巨大, 航空维修工作中存在大量的人为差错. 据英国民航局统计, 在经常发生的维修缺陷清单里, 排在最前面的两位都与发动机的装配密切相关: 1) 部件安装不正确; 2) 装错件. 在适航标签制度的基础上, 采用计算机技术跟踪每个零部件在车间的分解、修理、装配信息, 可以大大减少这类人为差错的产生, 也是航空维修现代化的一个重要标志^[1].

本文基于优先约束关系的装配子网对发动机部件的装配序列建模, 在给定的装配评价准则下, 将装

配序列规划问题转化为最优变迁激发序列问题, 引入离散时间的 Pontryagin 最小值原理 (DTPMP), 用于求解最优的装配序列. 并在适航标签制度的基础上, 利用装配序列规划结果跟踪每个零部件在车间的分解、修理、集件、装配信息, 减少维修差错的产生, 保证发动机的可靠性.

2 发动机装配 Petri 网建模研究

2.1 装配工艺与装配 Petri 子网

装配工艺系统如图 1 所示, 表示组成整机或部件、组件各组成部分的相互关系及装配过程的先后次序, 对设计用于维修生产的装配工艺规程具有指导作用^[2]. 在图 1 中, 每类零部件都用长方格表示,

收稿日期: 2007-08-10; 修回日期: 2007-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60572174); 南京航空航天大学创新基金项目 (Y0809-072).

作者简介: 汤新民 (1979—), 男, 湖南常德人, 博士生, 从事 CIMS, DEDS 建模的研究; 钟诗胜 (1964—), 男, 江西龙南人, 教授, 博士生导师, 从事人工智能、CIMS 等研究.

方格中间部分标注零部件的名称,右端标注零部件数量,左端标注零部件的件号,根据装配的先后次序,用线条连接而成。

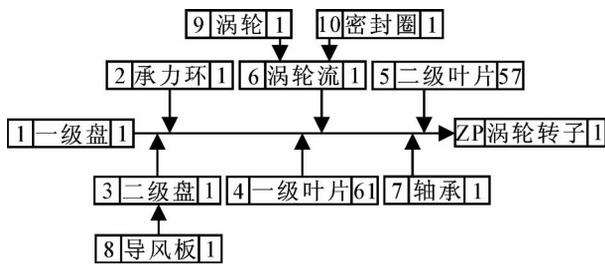


图1 航空发动机涡轮转子装配工艺系统

图1给出了一种可行的装配工艺,很难用计算机表达和推理,无法在给定的评价准则下推理出更优的装配工艺^[3]。装配优先矩阵(APM)可以表达发动机零部件之间基于工艺上的装配优先约束关系,也是一种复杂的AND/OR关系。且优先关系中包含了方向性,如“ c_i 在 x 方向上优先于 c_j ”,意味着在 x 方向上 c_i 必须首先装配,然后才能装配 c_j 。假设已经从图1中得到装配优先矩阵 $B = [b_{ij}]$, $i, j = 1, 2, \dots, n$, 其中

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{零件 } c_i \text{ and 优先于零件 } c_j; \\ d, & \text{零件 } c_i \text{ 在 } d \text{ 方向上 or 优先于零件 } c_j; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

定义1 装配Petri网(APN)定义为

$$APN = (P, T, Pre, Post, D, m_0).$$

其中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为库所集合,表示所有装

配的先决条件的集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为变迁集合,表示所有装配操作的集合,变迁激发的序列即为零部件装配的序列; $Pre: P \times T \rightarrow N$ 为前关联矩阵, N 为非负整数集; $Post: T \times P \rightarrow N$ 为后向关联矩阵; $D: T \rightarrow \{0, 1\}$ 为装配方向变换函数, $D(t_j)$ 表示 t_j 在APN中装配方向的改变次数; m_0 为初始标识,表示装配的初始状态。

零部件装配的优先顺序关系可以分解为如表1所示的6种基本Petri子网,其装配Petri网模型如图2所示。其中:库所 p_b 和 p_f 分别表示零部件全部装配开始和全部结束, t_b 和 t_f 分别表示产品装配开始和装配结束的操作。因此,可以通过分析装配优先矩阵的行与列,按表1给出的规则生成装配Petri子网。

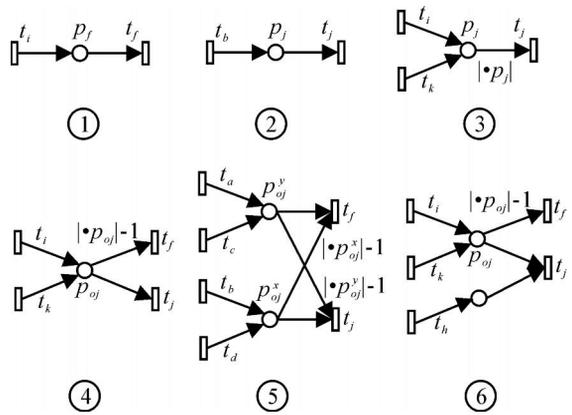


图2 装配Petri网模型

Kendra等人假设在装配结束变迁 t_f 与装配初

表1 装配Petri子网的基本形式

序号	装配优先关系	优先矩阵行或列	装配方向变换函数
	c_i 不优先于任何零部件	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$D(t_f) = D(t_i)$
	没有任何零部件优先于 c_j	$[0 \ 0 \ 0 \ 0]$	$\begin{cases} D(t_b) = 0, \\ D(t_j) = 1 \end{cases}$
	有1个或1个以上的零部件 and 优先于 c_j	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$D(t_j) = \begin{cases} 0, & d(t_j) = d(t_i), d(t_j) = d(t_k); \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$
	至少有2个零部件 or 优先于 c_j	$\begin{bmatrix} 0 \\ x \\ 0 \\ y \end{bmatrix}$	$D(t_j) = \begin{cases} 0, & d(t_j) = d(t_i); \\ 0, & d(t_j) = d(t_k); \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$
	两两部分分别在多个不同的方向上 and 优先于 c_j	$\begin{bmatrix} y \\ x \\ y \\ x \end{bmatrix}$	$D(t_j) = \begin{cases} 0, & d(t_j) = d(t_a), d(t_j) = d(t_c); \\ 0, & d(t_j) = d(t_b), d(t_j) = d(t_d); \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$
	至少有3个零部件 and/or 优先于 c_j	$\begin{bmatrix} 0 \\ x \\ 1 \\ x \end{bmatrix}$	$D(t_j) = \begin{cases} 0, & d(t_j) = d(t_i), d(t_j) = d(t_k); \\ 0, & d(t_j) = d(t_h); \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$

始状态 p_b 之间存在着连接弧, 得出 APN 是强连接的. 在以下的讨论中, 引入终止库所 p_e , 且假设该弧由 t_f 指向 p_e .

2.2 最优装配序列的评价方法

在发动机装配过程中, 装配质量控制是保证发动机技术状态的重要手段, 零部件装配跟踪是保证装配质量的主要环节. 为了避免装配差错, 在零部件进入装配线前, 要用扫描器识别零部件挂签上的条形码. 一方面对零部件的安装完成情况进行记录, 另一方面, 不同件号的零部件要通过装配差错判断程序, 以确定安装位置及顺序的正确性.

安装差错判断程序给出了合法装配序列的判断准则, 发动机或单元体在装配序列规划过程中, 还需要对装配方案进行评价, 以获得最优的装配序列, 常用评价指标包括装配时间、装配成本等^[3,4]. 由于航空发动机轴类零部件较多, 而且轴向方向尺寸较大, 改变一次装配方向需要增加工装的安装时间, 在装配过程中选择装配方向数最少为标准. 若在装配状态 m_i 下装配 t_i 对应的零部件后达到状态 m_{i+1} , 即 $m_i [t_i > m_{i+1}, \sum_{k=0}^{d-1} D(t_k) \text{ 为状态 } m_{i+1} \text{ 下的装配方向总改变次数. 则在初始装配状态 } m_0 \text{ 下, 经过 } d \text{ 次装配操作达到装配状态 } m_d \text{ 时的最优装配序列评价函数为}$

$$\min \left\{ \sum_{k=0}^{d-1} D(t_k), m_0 [\{ t_0, t_1, \dots, t_{d-1} \} > m_d] \right\}. \quad (1)$$

在给定的装配评价准则下, 可将装配序列规划问题转化为最优变迁激发序列问题, 为解决装配 Petri 网的最优激发序列问题, 将引入离散时间的 Pontryagin 最小值原理.

3 面向 Petri 网的最优控制原理

3.1 Petri 网合法激发序列的描述

航空发动机装配序列采用 Petri 网建模后, 装配序列规划问题将转化为最优变迁序列激发问题, 激发序列的优化是在可行激发序列集合内实现的, 因此本文首先给出变迁合法激发序列问题的描述^[5].

对于 Petri 网, $PN = (P, T, Pre, Post, m_0)$. 设 $|P| = n, |T| = m$, 则系统的状态方程为 $m(d) = m(0) + Cu$. 其中: $C = Post - Pre, u = [u_i]$, 初始条件为 $m(0) = m_0$. 可行激发向量定义在欧氏空间, 满足如下条件: $u(k) \in R^{(m)}$, 经过 d 步激发后最终标识由 $m(d) = m_d$ 的约束给出. 若对 Petri 网进行可达性分析, 则其目标函数可以表示为

$$J = m(d) + \sum_{k=0}^{d-1} \Phi(m(k), u(k)). \quad (2)$$

其中: 第 1 项由目标标识 $m(d)$ 确定, 第 2 项是以前

各个中间标识和激发向量的 函数之和, 与 均为度量函数. 激发向量 $u(k)$ 事先并不给出, 其中 $k = 0, 1, \dots, d - 1$. 一旦给出激发向量, 采用上述方程可得到唯一的 状态轨迹 $m(k)$, 进一步可得目标函数值 J . 因此, 最优控制问题即为找到激发向量 $u(k)$, 满足上述约束条件并使得目标函数 J 达到最小.

由于 Petri 网的合法激发序列(LFS) 问题是可达性问题的子问题, 可描述为: 给定变迁激发向量 u 和激发次数 d , 寻找一组最优的变迁激发序列 $\{u^*(k)\}$, 使得如下的目标函数达到最小^[6]:

$$J = m(d) + \sum_{k=0}^{d-1} \Phi(m(k), u(k)),$$

$$\text{s. t. } m(k) = m(k-1) + Cu(k), \quad (3a)$$

$$m(k) \geq Pre \cdot u(k) \quad (3b)$$

$$\sum_{i=1}^m u_i(k) = 1, u(k) = [u_i(k)], \quad (3c)$$

$$\sum_{k=0}^{d-1} u(k) = u, \quad (3d)$$

$$m(0) = m_0, m(d) = m_d, \quad (3e)$$

$$m(k) \geq 0, m_i(k) \in Z, \quad (3f)$$

$$u(k) \geq 0, u_i(k) \in Z. \quad (3g)$$

其中: 约束(3a) 为 Petri 网的状态方程, 约束(3b) 给出了激发向量 $u(k)$ 激发的使能条件, 约束(3c) 表明激发向量 $u(k)$ 所有元素之和为 1, 约束(3d) 表明激发向量 $u(k)$ 之和恰好等于激发向量, 约束(3e) 表明初始标识和目标标识为确定的, 约束(3f) 表明每个中间标识向量的非负性和整性, 约束(3g) 表明每个激发向量的非负性和整性.

求解上述整数规划问题存在的主要障碍是随着变迁激发步数的增加, 约束和变量的数目也随之增加. 为避免状态爆炸, 本文采用最优控制理论, 将单步整数规划问题划分为 d 个子问题“分而治之”, 首先引出面向 Petri 网的离散最优控制原理.

3.2 面向 Petri 网的离散最优控制

设 $u(k)$ 和 $m(k)$ 分别为 d 步离散最优控制问题的控制向量和状态向量, 状态方程为 $m(k+1) = f(m(k), u(k))$. 令目标函数 J 如式(2) 所示, 则存在 $n \times 1$ 维关联向量 $(k+1)$ 和常数 ϕ , 在如下 3 个假设条件下满足 5 个方程^[6,7] (以下条件 是推导离散最优控制问题的基本假设).

假设 1 矩阵 $f_m(m(k), u(k))$ 对所有的 k 是非奇异的.

假设 2 集合 $(m(k), u(k)) = \{ (m(k), u(k)), f(m(k), u(k))^T \}$, 对每个 $m(k)$ 为 z 方向凸性的闭集.

假设 3 矩阵 $f_m(m(k), u(k))$ 对所有的 k 为

z 方向矩阵.

方程 1 系统状态方程 $m(k+1) = f(m(k),$

$u(k))$.

方程 2 系统的初始状态 $m(0) = m_0$.

方程 3 协状态方程

$$\lambda(k)^T = \lambda(k+1)^T f_m(m(k), u(k)) + \lambda(k+1)^T g_m(m(k), u(k)).$$

方程 4 协状态方程的边界条件

$$\lambda(d)^T = \lambda_0^T m(d)^T.$$

方程 5 极小化哈密顿函数 $\min H(k+1),$

$$m(k), u(k) = \min \{ \lambda(k+1)^T f(m(k), u(k)) + \lambda(k+1)^T g(m(k), u(k)) \}.$$

为实现序列规划的全局最优,必须考虑方程 1 ~ 方程 3 下的方向凸性.

定义 2 若 z 为非零向量,且 $\forall a, b \in S, \forall [0, 1],$ 存在 $\theta \in [0, 1]$ 满足如下条件:

$$a + (1 - \theta)b + \theta z \in S, \quad (4)$$

则称集合 S 是 z 方向凸的^[8].

离散时间最优控制是在方向凸性的条件下推导而来的,方向凸性是一个较凸性更弱的特性,大大拓展了最优控制的应用范围.

4 零部件最优装配序列规划研究

4.1 固定端点的最优装配序列问题

在 2.2 节给出的装配序列评价准则下,装配序列规划问题可转换为 APN 的变迁最优激发序列问题.因装配最优序列规划问题中已知初始标识 m_0 和目标标识 m_d ,故装配序列规划问题可转化为固定端点的最优控制问题,即 $\lambda(d) = 0$.同时考虑装配评价函数中装配方向改变次数最少的要求,令

$$H(m(k), u(k)) = e^T [m(k) + Cu(k)] + D(u(k)),$$

得目标函数的具体形式为

$$J = \sum_{k=0}^{d-1} \{ e^T [m(k) + Cu(k)] + D(u(k)) \}, \quad (5)$$

其中 $\alpha > 0$ 为给定的常数,用于调整标识与装配方向改变次数的权重关系.此时哈密顿函数为

$$H_k = \{ \lambda^T(k+1) + e^T \} \{ m(k) + Cu(k) \} + D(u(k)). \quad (6)$$

采用离散最优值原理,使目标函数达到极小的必要条件为

$$\begin{aligned} m(k+1) &= m(k) + Cu(k), \\ \lambda^T(k) &= \partial H_k / \partial m(k) = \lambda^T(k+1) + e^T, \\ m(0) &= m_0, m(d) = m_d, \lambda(d) = 0. \end{aligned}$$

定理 1 对于 APN,设集合

$$S(m(k), u(k)) = \{ e^T [m(k) + Cu(k)] + D(u(k)), [m(k) + Cu(k)]^T \},$$

则必然存在非零向量 z,使得 $(m(k), u(k))$ 为 z 方

向凸的.

证明 反设不存在非零向量 z,使得 $\forall a, b \in S(m(k), u(k)), \forall [0, 1],$ 不存在 $\theta \in [0, 1]$ 满足 $a + (1 - \theta)b + \theta z \in S(m(k), u(k))$. 因为向量 a 和 b 可表示为

$$\begin{aligned} a &= \{ e^T [m(0) + Cu_a] + D(u_a(k)), [m(0) + Cu_a]^T \}, \\ b &= \{ e^T [m(0) + Cu_b] + D(u_b(k)), [m(0) + Cu_b]^T \}. \end{aligned}$$

构造向量 z 如下:

$$z = \frac{1}{s} [s - a - (1 - \theta)b], \quad (7)$$

其中 $s \in S(m(k), u(k))$. 将 s, a, b 代入式(7) 后化简可得

$$\begin{aligned} z &= \frac{1}{s} \left\{ \begin{aligned} &e^T m(0) \\ &m(0)^T \end{aligned} \right\} + C \left\{ \begin{aligned} &e^T [u_s - u_a - (1 - \theta)u_b] \\ &[u_s - u_a - (1 - \theta)u_b]^T \end{aligned} \right\} + \\ &-\left[\begin{aligned} &D(u_s) - D(u_a) - (1 - \theta)D(u_b) \\ &0 \end{aligned} \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

式(8) 只需 $m(0), u_s, u_a, u_b$ 线性无关,则一定存在非零向量 z,因此反设不成立,定理 1 得证.

集合 $S(m(k), u(k)) = \{ e^T [m(k) + Cu(k)] + D(u(k)), [m(k) + Cu(k)]^T \}$ 为 z 方向凸性的闭集,根据必要条件 $\lambda(d) = 0$ 和迭代关系 $\lambda(k+1)^T = \lambda(k)^T - e^T$ 可得到 $\lambda(k)^T$,继而通过极小化哈密顿函数得到各步的变迁激发向量 $u(k)$. 定理 1 给出了装配 Petri 网方向凸性存在的充分条件,为了避免每一步线性规划中不必要的搜索,在每次迭代过程中仅需要搜索在标识 $m(k)$ 下的使能变迁集,这样将大大减低计算的复杂度.

4.2 最优装配序列规划算法及分析

极小化哈密顿函数作为全局优化的必要条件,同时也是求解零部件装配序列的启发信息,为多个使能的变迁赋予不同的优先权将产生不同的装配路径.本文采用赋以哈密顿函数值较低的变迁以高优先权的方法计算最优装配序列,流程如图 3 所示.

若采用 APN 可达树的方法求解目标序列,设可达树为二元树(每个节点都有 2 个后继节点),则将有 $\sum_{i=0}^m 2^i = 2^{m+1} - 1$ 个节点,因此算法的复杂度为 $O(2^{m+1})$ ^[9,10].若采用最优装配序列规划方法,每个装配变迁激发一次,哈密顿函数值的计算代价为 $O(m)$.假设每个库所都有 2 个输出变迁发生冲突,激发之前验证使能条件的代价为 $O(n+2)$,累计的复杂度为 $O(nm+2m)$.最优控制算法将可达树算法的指数时间复杂度降低为多项式时间复杂度,为在

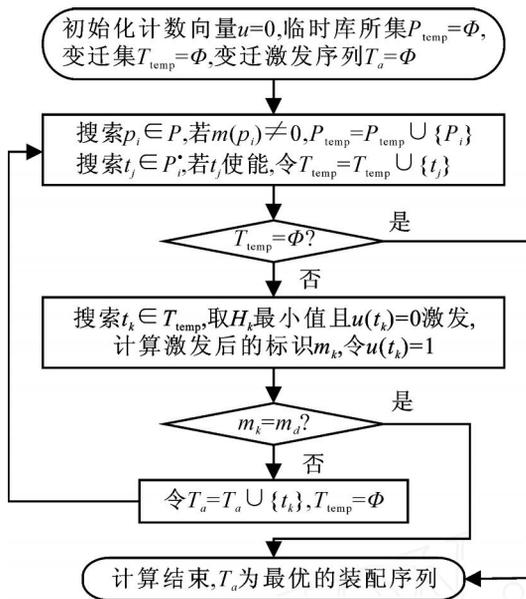


图 3 最优装配序列算法流程图

可行时间内求解装配序列提供了一种有效途径。

5 案例研究

本文以航空发动机涡轮转子的装配验证最优装配序列算法的可行性。如图 1 所示为发动机涡轮转子的装配工艺系统图，为求解装配方向变换次数最少的变迁序列，算法过程如下。

Step1: 根据零部件两两间的装配优先关系建立装配优先矩阵。设零部件向量为 [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]，沿涡轮转子轴向向右的方向为 x 方向，相反的方向为 -x 方向，径向设为 y 方向。由图 1 可知 1 ~ 10 号部件的装配方向向量为 $d(T) = [-x, y, x, -x, x, -x, -x, x, -x, -x]$ ，其装配优先矩阵如下：

$$APM = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Step2: 根据装配优先矩阵构造如图 4 所示的 APN。

Step3: 对每个子问题取 $\epsilon = 5.0$ ，计算每个变迁激发对应的哈密顿函数，赋以哈密顿函数值较低的变迁以高优先权，此时可得

$$u_1(t_b) = 1, u_2(t_9) = 1, u_3(t_{10}) = 1,$$

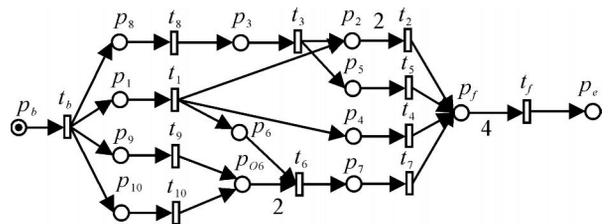


图 4 发动机涡轮转子装配 Petri 网

$$u_4(t_1) = 1, u_5(t_6) = 1, u_6(t_7) = 1, \\ u_7(t_4) = 1, u_8(t_8) = 1, u_9(t_3) = 1, \\ u_{10}(t_5) = 1, u_{11}(t_2) = 1, u_{12}(t_f) = 1.$$

可得最优装配序列为 $\pi = \{9, 10, 1, 6, 7, 4, 8, 3, 5, 2\}$ 。因此装配方向变换函数为 $D(T) = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1]$ ，装配方向变换总次数为 2。图 5 所示为最优序列与任意序列下目标函数值的比较结果，比较结果显示最优装配序列目标函数值较任意序列小，该最优序列为装配方向变换最少的序列。

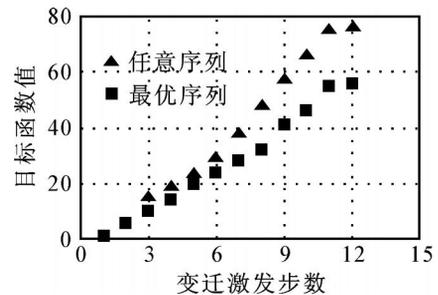


图 5 不同序列下目标函数值比较

6 结 论

本文基于优先约束关系的装配子网对发动机部件的装配序列建模，将装配序列规划问题转化为最优变迁激发序列问题，引入离散时间的 Pontryagin 最小值原理用于求解最优的装配序列。未来的研究方向是最优目标分解序列规划，即给定需要被分解的零部件集合，在分解最少零部件的条件下生成目标分解序列。

参考文献(References)

[1] 汤新民, 钟诗胜. 基于 Petri 网的航空维修分解装配序列规划及其应用[J]. 中国民航学院学报, 2006, 24(5): 21-25.
(Tang X M, Zhong S S. Petri nets based aircraft maintenance disassembly and assembly process planning [J]. J of Civil Aviation University of China, 2006, 24(5): 21-25.)

[2] 何文治, 马业广, 王云机. 航空制造工程手册——发动机装配与试车[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
(He W Z, Ma Y G, Wang Y J. Aeronautic manufacture engineering handbook — Aero-engine assembly and testing [M]. Beijing: Aeronautic Industry Publishing Company, 1995.) (下转第 1230 页)

6 结 论

本文针对采用具有加权因子的最小二乘法构成的自适应控制器,研究不同加权因子对控制系统性能的影响.并针对被控对象噪声方差可能取值范围设计多个基于不同加权因子的辨识器,并针对每个辨识模型设计控制器.采用一个基于模型输出误差具有积分形式的指标切换函数,在每个采样时刻选择最优模型,并将基于此模型的控制器切换为当前控制器.仿真结果表明,采用多个自适应模型构成的控制器和传统的单自适应模型控制器相比,可很好地改善瞬态响应.同时证明,虽然多个控制器之间相互切换,但闭环系统是全局收敛的,被控对象输出渐近跟踪参考输入.

参考文献(References)

- [1] 王伟, 李晓理. 多模型自适应控制[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(Wang W, Li X L. Multiple model adaptive control [M]. Beijing: Science Publishing House, 2001.)
- [2] Narendra K S, Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42(2): 171-187.
- [3] Narendra K S, Xiang C. Adaptive control of discrete-time systems using multiple models[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(9): 1669-1686.
- [4] 李晓理, 王伟. 基于局部化技术的多模型自适应控制[J]. 自动化学报, 2000, 26(4): 523-528.
(Li X L, Wang W. Localization based multiple-model adaptive control [J]. Acta Automatic Sinica, 2000, 26(4): 523-528.)
- [5] Narendra K S, Driollet Osvaldo. Stochastic adaptive control using multiple models for improved performance in the presence of random disturbance[J]. Int J Adapt Control Signal Process, 2001, 15(3): 287-317.
- [6] 李晓理, 王书宁. 含有界扰动系统的多模型自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(4): 577-581.
(Li X L, Wang S N. Multiple-model adaptive control of system with bounded disturbance [J]. Control Theory and Applications, 2003, 20(4): 577-581.)
- [7] 李晓理, 王伟. 基于有界扰动分区的多模型自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(2): 283-286.
(Li X L, Wang W. Multiple model adaptive control based on the divided scope of bounded disturbance [J]. Control Theory and Applications, 2006, 23(2): 283-286.)
- [8] Goodwin G C, Sin K S. Adaptive filtering, prediction and control [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1984.
- [9] 李树英, 许茂增. 随机系统的滤波与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
(Li S Y, Xu M Z. Filtering and control of stochastic system [M]. Beijing: National Defence Publication, 1991.)

(上接第 1225 页)

- [3] Kendra E Moore, Askiner Gungor, Surendra M Gupta. A Petri net approach to disassembly process planning [C]. 23rd Int Conf on Computers and Industrial Engineering. Britain, 1998: 165-168.
- [4] Stefano Caselli, Francesco Zanichelli. On assembly sequence planning using Petri nets [C]. Proc of Assembly and Task Planning. Pittsburgh, 1995: 239-244.
- [5] Ahmed Tarek. Optimal legal firing sequence of Petri nets using linear programming [J]. Optimization and Engineering, 2004, 5(1): 25-43.
- [6] Tadashi Matsumoto, Ahmed Tarek. Finding legal firing sequences of Petri nets by means of dynamic programming included linear programming [C]. Proc of the 35th Conf on Decision and Control. Kobe, 1996: 4459-4466.
- [7] Tadashi Matsumoto. Finding legal firing sequences in submarking reachability problems of Petri nets by discrete time pontryagin 's minimm principle [C]. 1997 IEEE Int Symposium on Circuits and Systems. Hong Kong, 1997: 1017-1020.
- [8] Ahmed Tarek. Optimization algorithms applied to large Petri nets [D]. Texas: Texas Tech University, 2001: 36-39.
- [9] Kendra E Moore, Surendra M Gupta. Petri net approach to disassembly process planning for products with complex AND/OR precedence relationships [J]. European J of Operational Research, 2001, 135(2): 428-449.
- [10] 蒋昌俊. 一类同步合成网合法发射序列判定的一个多项式时间算法 [J]. 中国科学 (E 辑), 2002, 32(1): 116-124.
(Jiang C J. Algorithm with polynomial complexity for detecting legal firing sequence of synchronous composed Petri nets [J]. Science in China (Series E), 2002, 32(1): 116-124.)