

基于特征单元的设备选型状态空间理论与方法

毛范海*, 刘晓娜, 钱峰, 刘丰文

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 提出零件特征单元加工过程的状态空间理论,并将之用于解决零件加工的工艺设备选型问题.基于复杂零件特征具有多样性和复合性的特点,定义特征单元,以便于分析零件特征.针对单一特征单元,提取特征单元加工前和加工后两个状态,通过分析两个状态变换原因,构建状态变换矩阵,得出状态变换矩阵代表工艺设备加工能力的结论.通过构建状态变换方程描述加工过程.建立状态空间,将工艺设备选型问题转换为加工前和加工后两个状态在状态空间中的路径规划问题.在实际生产的约束条件下,将状态空间中路径规划问题转化为现有工艺路线的优化问题,并且建立工艺设备选型优化模型,优选出较理想的工艺路线,从而选出与该条工艺路线对应的一套工艺设备.应用算例验证了该方法的可行性.

关键词: 设备选型; 状态空间; 特征单元; 工艺路线; 优化模型

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201502004

0 引言

工艺设备选型是指购置设备时,根据生产工艺要求和市场供应情况,按照技术上可行、经济上合理、生产上适用的原则,对多种工艺设备进行调查和分析比较,确定出最优的工艺设备方案^[1-2].工艺设备选型是生产作业中重要工作之一,由于工艺设备种类、型号繁多,没有有效的方法对之进行合理选择^[3-4].工艺设备选型是生产线设计规划中的一项重要工作,其所形成的方案在很大程度上影响着生产作业的生产效率、加工质量和生产成本,关乎企业投资行为成败^[5-6].

目前,一般企业主要根据管理者的决策水平和专业人员的经验,通过客观评价机床设备实现设备选型.现有的机床设备选型评价方法有模糊综合评判^[7-8]、遗传算法^[9]、层次分析法^[10]、神经网络^[11]、灰度关联^[12]等,然而,这些评价方法只是对设备进行客观评价,没有与具体的加工工艺相关联,导致工艺设计与设备选型之间未建立较强的关联.然而,设备选型与加工工艺是密不可分的,与工艺分离的设备选型难以获得全局最优解.

总的来说,到目前为止尚没有一种设备选型的方法把设备与工艺真正联系起来.

针对目前的设备选型没有与工艺设计建立较强的关系这个问题,本文提出根据零件加工工艺的设备选型的状态空间方法.解决的问题是针对一类特征,已知零件上所有该类特征的毛坯状态和成品状态,选出一套成本最低且满足加工要求的工艺设备.解决方法是:首先,把加工特征分类为特征单元,研究特征单元的特征状态.其次,通过研究特征单元状态之间的关系,引入状态变换矩阵,分析状态变换矩阵与设备加工能力的关系.建立状态变换方程,描述加工过程.通过定义状态空间,建立状态空间的设备选型模型,最终转化为多条工艺路线的优化问题,并建立工艺设备选型优化模型.最后,通过算例进行可行性验证.

1 零件加工过程的状态空间理论

1.1 划分零件特征单元

复杂零件上的特征具有多样性和复合性.在不考虑加工尺寸和加工精度的条件下,把只需要一把刀具就可加工出的特征称为特征单元,否则

称为组合特征. 例如孔, 不考虑加工尺寸和加工精度, 只需要一把钻头就可加工出孔特征; 而对于内螺纹孔, 则需要钻头和丝锥, 因此内螺纹孔是组合特征.

零件特征的组合性, 增加了设备选型的难度. 若针对每一类特征单元进行设备选型, 不仅可以降低设备选型难度, 而且利于实现设备聚类, 降低购置成本. 若要实现整个零件设备选型, 只需把每一类特征优选出的工艺设备进行合理组合. 本文只讨论零件上某一类特征单元的设备选型问题.

实际生产加工中, 零件上常见的组合特征有内螺纹孔和外螺纹孔, 特征单元有孔、螺纹、平面、柱面、锥面、槽等. 零件上常见组合特征与特征单元的关系, 如图 1 所示.

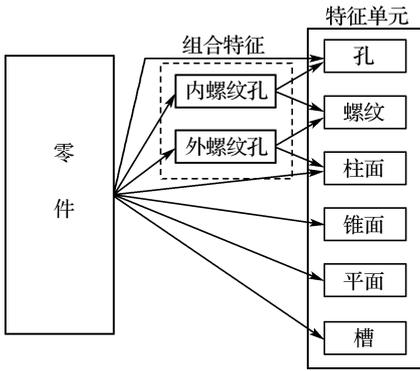


图 1 零件、组合特征与特征单元的关系

Fig. 1 Relationship between part, combined feature and feature-unit

1.2 特征单元的状态

实际生产中, 各类特征单元需要关注的信息有很多, 为方便后文的描述, 做如下定义:

定义 1 表示特征单元某一类信息参数的特征称为特征单元的状态特征, 用 s 表示. 例如孔的尺寸 s_1 、精度 s_2 、表面粗糙度 s_3 、材料缺陷 s_4 等都是孔的状态特征. 需要说明的是 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 都是数值, 例如孔的尺寸是 $\phi 30$, 则 s_1 是 30.

特征单元的状态特征有多个, 随着不同生产过程中, 对特征单元状态特征的关注点不同, 研究状态特征的种类以及数量的多少也不尽相同. 多数生产过程关注特征单元的尺寸、精度、表面粗糙度这 3 个状态特征.

定义 2 由多个状态特征组合到一起呈现出特征单元的综合特性, 这种综合特性称为特征单

元的状态, 用 S 表示. 特征单元的状态特征与状态的关系: 由特征单元的 n 个状态特征组成的列向量表示特征单元的状态, 表示形式如下:

$$S = (s_1 \quad s_2 \quad \cdots \quad s_n)^T$$

定义 3 特征单元加工前的状态称为初始状态 S_i , 特征单元加工后的状态称为最终状态 S_o . 表示形式为

$$S_i = (s_{i,1} \quad s_{i,2} \quad \cdots \quad s_{i,n})^T$$

$$S_o = (s_{o,1} \quad s_{o,2} \quad \cdots \quad s_{o,n})^T$$

为方便以上几个定义的理解, 以特征单元——孔为例, 已知孔的毛坯和成品的尺寸、精度、表面粗糙度, 由定义 1 可知, 孔的尺寸、精度和表面粗糙度是孔的 3 个状态特征, 由此可知, 该生产过程主要关注这 3 个状态特征; 由定义 2 可知, 毛坯孔和成品孔是孔的两个状态; 由定义 3 可知, 毛坯即初始状态, 由 $S_i = (s_{i,1} \quad s_{i,2} \quad s_{i,3})^T$ 表示, 成品即最终状态, 由 $S_o = (s_{o,1} \quad s_{o,2} \quad s_{o,3})^T$ 表示. 建立孔特征由毛坯状态 S_i 到成品状态 S_o 的状态模型, 如图 2 所示.

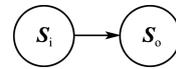


图 2 孔特征的状态模型

Fig. 2 State model of hole features

1.3 状态变换矩阵

特征单元的各状态之间有着紧密的联系, 为了清晰地表示出两状态间的关系, 引入状态变换矩阵, 定义如下:

定义 4 描述特征单元从一种状态到另一种状态变换关系的矩阵, 称为状态变换矩阵 T . 建立特征单元状态变换模型, 如图 3 所示.

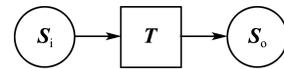


图 3 状态变换模型

Fig. 3 State transformation model

为了方便构造后文的状态变化方程, 状态变换矩阵 T 的表示形式如下:

$$T = \begin{pmatrix} t_1 & & & \\ & t_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & t_n \end{pmatrix}$$

式中: t 为 S_i 至 S_o 各状态特征的变化量。

例如,在孔加工中,只关注孔的尺寸、精度和表面粗糙度这3个状态特征,毛坯孔(尺寸 $\phi 30$, 精度 IT14, 表面粗糙度 $R_a = 20 \mu\text{m}$) 加工至成品孔(尺寸 $\phi 35$, 精度 IT7, 表面粗糙度 $R_a = 3.2 \mu\text{m}$)。由定义3可知,

$$S_i = (30 \quad 14 \quad 20)^T$$

$$S_o = (35 \quad 7 \quad 3.2)^T$$

S_i 至 S_o 尺寸变化量是5,精度变化量是-7,表面粗糙度变化量是-16.8,由定义4可知,该过程的状态变换矩阵为

$$T = \begin{pmatrix} 5 & & \\ & -7 & \\ & & -16.8 \end{pmatrix}$$

在实际加工中,特征单元从一种状态到另一种状态的变化是通过设备加工完成的,特征单元的状态变换一次,可以看作是一台设备对特征单元加工了一次,特征单元状态发生了多大变化,取决于设备的加工能力。因此状态变换矩阵是设备加工能力的一项指标。然而,设备的加工能力不能只看状态变换矩阵,还要看特征单元的初始状态。换句话说,基于特征单元某一初始状态的设备对特征单元加工后产生的状态变换矩阵才能表示设备的加工能力。在确定加工方法(车削、铣削、刨削等)的前提下,已知特征单元的某一初始状态和状态变换矩阵,通过查阅工艺手册就可确定出该状态变换处于哪个加工阶段(粗加工、半精加工、精加工),从而选择相应加工阶段的加工设备。

1.4 状态变换方程

为建立状态与状态变换矩阵之间的关系,引入状态变换方程,定义如下:

定义5 由特征单元的初始状态 S_i 、最终状态 S_o 和特征变换矩阵 T , 构成形如 $S_o = T \otimes S_i$ 的广义乘法矩阵方程,该方程称为特征单元的状态变换方程。

一台设备 M 对某一特征单元加工的模型,如图4所示。

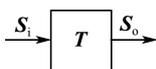


图4 一台设备加工模型

Fig. 4 One device machining model

特征状态方程运算法则如下:

$$S_o = T \otimes S_i = \begin{pmatrix} s_{i,1} + t_1 \\ s_{i,2} + t_2 \\ \vdots \\ s_{i,n} + t_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 $S_i = (s_{i,1} \quad s_{i,2} \quad \cdots \quad s_{i,n})^T$ 。

在设备 M 参与下产生的矩阵

$$T = \begin{pmatrix} t_1 & & & \\ & t_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & t_n \end{pmatrix}$$

式(1)表示在设备 M 的参与下,从初始状态 S_i 变换到最终状态 S_o 的整个加工过程。

两台设备 M_1 、 M_2 对特征单元加工的模型,如图5所示。

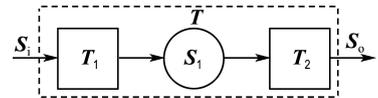


图5 两台设备加工模型

Fig. 5 Two devices machining model

特征状态方程运算法则如下:

$$S_1 = T_1 \otimes S_i = \begin{pmatrix} s_{i,1} + t_{1,1} \\ s_{i,2} + t_{1,2} \\ \vdots \\ s_{i,n} + t_{1,n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$S_o = T_2 \otimes S_1 = \begin{pmatrix} s_{i,1} + t_{1,1} + t_{2,1} \\ s_{i,2} + t_{1,2} + t_{2,2} \\ \vdots \\ s_{i,n} + t_{1,n} + t_{2,n} \end{pmatrix} \quad (3)$$

由式(2)和(3)可得

$$S_o = T_2 \otimes T_1 \otimes S_i = \begin{pmatrix} s_{i,1} + t_{1,1} + t_{2,1} \\ s_{i,2} + t_{1,2} + t_{2,2} \\ \vdots \\ s_{i,n} + t_{1,n} + t_{2,n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 $S_i = (s_{i,1} \quad s_{i,2} \quad \cdots \quad s_{i,n})^T$ 。

在设备 M_1 参与下产生的矩阵

$$T_1 = \begin{pmatrix} t_{1,1} & & & \\ & t_{1,2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & t_{1,n} \end{pmatrix}$$

在设备 M_2 参与下产生的矩阵

$$T_2 = \begin{pmatrix} t_{2,1} & & & \\ & t_{2,2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & t_{2,n} \end{pmatrix}$$

式(4)表示在设备 M_1 、 M_2 的参与下,从初始状态 S_i 变换到最终状态 S_o 的整个加工过程。

由式(4)可知,特征单元若经过多台设备加工,输出特征矢量 S_o 等于所有变换矩阵的倒序广义相乘,再广义乘上输入特征矢量 S_i 。

1.5 状态空间

为把特征单元的状态、状态变换矩阵和状态变换方程联系起来,定义状态空间:

定义 6 以特征单元的状态特征为坐标轴撑起的多维空间,称为状态空间。状态空间模型如图 6 所示。

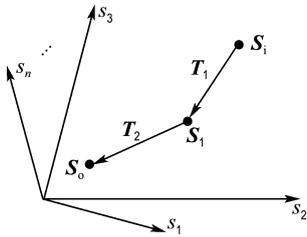


图 6 状态空间模型

Fig. 6 The state space model

状态空间中存在如下几个关系:

(1)状态空间与特征单元的状态关系:由特征单元状态的表达式 $S = (s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n)^T$ 和状态空间的定义可知,特征单元在加工过程中的每一种状态都可在状态空间中唯一确定为一个状态点,并且构成一一对应的映射关系。

(2)状态空间与特征单元的状态变换矩阵关系:特征单元的状态变换矩阵在状态空间中的几何表示是从前一个状态指向后一个状态的有向线段,如图 6 所示。

(3)状态空间与特征单元的状态变换方程关系:特征单元的状态变换方程在状态空间中表示一条或几条有向线段把多个状态点串联起来形成的由初始状态点指向最终状态点的有向路径,如图 6 所示。

2 工艺设备选型的状态空间方法

2.1 设备选型问题的转化

机械加工过程中,通过设备的加工实现特征单元由毛坯状态到成品状态的转化,从而完成加工过程。由以上介绍的零件加工过程的状态空间理论可知,零件上某一特征单元的毛坯状态和成品状态可抽象到状态空间中的初始状态 S_i 和最终状态 S_o ;特征单元从毛坯状态到成品状态的过程可抽象到状态空间中由初始状态 S_i 经过若干个状态的变化最终到达最终状态 S_o 。

理论上说,在没有任何限制条件下,由毛坯状态到成品状态的加工途径有无数条,表现在状态空间中是由一条或多条有向线段将多个状态连接起来,形成由初始状态指向最终状态的无数条路径,如图 7 所示。换句话说,只要是从初始状态出发,能够到达最终状态的所有路径,理论上都是实现加工过程的途径。从初始状态到最终状态的所有路径构成设备选型的可行集。

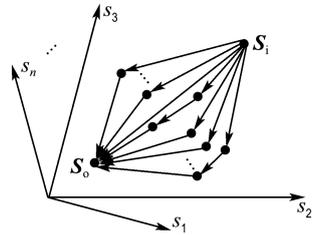


图 7 状态空间的路径

Fig. 7 Paths in the state space

工艺设备选型就是根据工艺选择出一套最理想的工艺设备,这套工艺设备必然对应一条加工路径,所以它必对应状态空间中的一条路径。因此,工艺设备选型就转化为在众多的加工路径中选择出一条能够满足加工要求的最理想加工路径。

实际生产中,由于加工条件的限制,并不是状态空间中的所有路径都能在实际加工中实现。在设备选型过程中,通过排除那些在实际生产中不能实现的路径来缩小设备选型的约束集合。缩小约束集合的方法是通过特征单元可用加工路径的穷举即通过穷举特征单元的加工工艺路线,构成一个比原有集合小得多的新集合,这个新集合

是有效集,因此,设备选型最终转化为多条工艺路线的优化问题.

例如已知加工平面的初始状态 S_i 、最终状态 S_o ,状态空间中由 S_i 到 S_o 的所有路径构成平面加工设备选型的可行集.通过查阅工艺手册,平面加工可由粗铣-半精铣-精铣-粗刨-半精刨-精刨、粗铣-半精磨等 6 条工艺路线完成,如图 8 所示,图中 6 条加工路线分别为 1、2、...、6,用 j 表示.这 6 条工艺路线就是根据实际生产形成的设备选型的有效集.

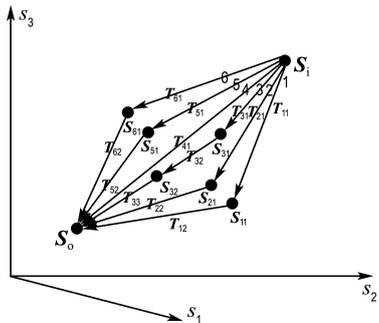


图 8 状态空间中的工艺路线

Fig. 8 Process routes in the state space

其中 T_{ji} 为第 j 条加工路线中第 i 个设备的加工能力; S_{ji} 为第 j 条加工路线中第 i 个状态.

2.2 工艺设备选型优化模型

工艺设备选型问题已转化为工艺路线优化问题,因此,要实现工艺设备选型需要建立工艺路线优化模型.

约束条件:

(1) 零件上有 p 个同类特征单元的特征 F_λ , 其中 $\lambda = 1, \dots, p$.

(2) 对于任一个特征 $F_\lambda (\lambda = 1, \dots, p)$, 根据加工要求写出各 F_λ 总的状态变换矩阵

$$T^\lambda = \begin{pmatrix} t_1^\lambda & & & \\ & t_2^\lambda & & \\ & & \ddots & \\ & & & t_n^\lambda \end{pmatrix}$$

(3) 根据 p 个状态变换矩阵 $T^\lambda (\lambda = 1, \dots, p)$, 列出每个 F_λ 的 j 条工艺路线 U_j^λ , 其中 $j = 1, \dots, u$.

(4) p 个 F_λ 的所有工艺路线 $U_j^\lambda (j = 1, \dots, u)$ 中涉及的所有机床设备 $M_i (i = 1, \dots, k)$, 对应每

台机床设备 M_i 的购置成本为 $\omega_i (i = 1, \dots, k)$, 各台机床生产每件零件的运营成本为 $m_i (i = 1, \dots, k)$.

(5) 对应每个 $F_\lambda (\lambda = 1, \dots, p)$, 各优选出一条加工路线,共优选出 p 条加工路线,这 p 条加工路线涉及的机床设备 M_z 的购置成本为 $\omega_z (z = 1, \dots, \zeta)$, 其中 $\zeta < k$.

(6) 每年生产该零件 N 件,连续生产 y a.

目标函数:

使优选出的工艺设备加工该批零件的总成本最低,总成本指购置成本和运营成本:

$$\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_\zeta + N \cdot y \cdot (m_1 + m_2 + \dots + m_\zeta)$$

通过对工艺路线优化模型的求解,可以选择出最优的一套工艺设备.

3 应用算例

本算例以一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂的缸盖为加工零件,研究缸盖上孔这一特征单元.因缸盖上孔数量繁多,为简化算例篇幅,假设缸盖上只有排气座圈底孔(孔 1)、后端面孔(孔 2)、进气座圈底孔(孔 3)这 3 个孔,只讨论这 3 个孔的工艺设备优化选型.

3.1 孔的加工要求

3 个孔的初始状态(铸造毛坯孔)和最终状态(成品)如表 1 所示.

表 1 孔的加工要求

Tab.1 Processing requirement of holes

孔	状态	直径/mm	精度	表面粗糙度 $R_a/\mu m$
1	毛坯孔	34	IT15	25
	成品	36	IT7	3.2
2	毛坯孔	38	IT15	25
	成品	40	IT8	3.2
3	毛坯孔	37	IT15	25
	成品	39.2	IT7	3.2

由表 1 构造孔 1 的初始状态 S_i^1 、最终状态 S_o^1 和总的状态变换矩阵 T^1 :

$$S_i^1 = \begin{pmatrix} s_{i,1}^1 \\ s_{i,2}^1 \\ s_{i,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 34 \\ 15 \\ 25 \end{pmatrix}, S_o^1 = \begin{pmatrix} s_{o,1}^1 \\ s_{o,2}^1 \\ s_{o,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 36 \\ 7 \\ 3.2 \end{pmatrix},$$

$$T^1 = \begin{pmatrix} t_1^1 & & \\ & t_2^1 & \\ & & t_3^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & & \\ & -8 & \\ & & -21.8 \end{pmatrix}$$

由表 1 构造孔 2 的初始状态 S_i^2 、最终状态 S_o^2 和总的状态变换矩阵 T^2 ：

$$S_i^2 = \begin{pmatrix} s_{i,1}^2 \\ s_{i,2}^2 \\ s_{i,3}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 38 \\ 15 \\ 25 \end{pmatrix}, S_o^2 = \begin{pmatrix} s_{o,1}^2 \\ s_{o,2}^2 \\ s_{o,3}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 40 \\ 8 \\ 3.2 \end{pmatrix},$$

$$T^2 = \begin{pmatrix} t_1^2 \\ t_2^2 \\ t_3^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ -7 \\ -21.8 \end{pmatrix}$$

由表 1 构造孔 3 的初始状态 S_i^3 、最终状态 S_o^3 和总的状态变换矩阵 T^3 ：

$$S_i^3 = \begin{pmatrix} s_{i,1}^3 \\ s_{i,2}^3 \\ s_{i,3}^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 37 \\ 15 \\ 25 \end{pmatrix}, S_o^3 = \begin{pmatrix} s_{o,1}^3 \\ s_{o,2}^3 \\ s_{o,3}^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 39.2 \\ 7 \\ 3.2 \end{pmatrix},$$

$$T^3 = \begin{pmatrix} t_1^3 \\ t_2^3 \\ t_3^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.2 \\ -8 \\ -21.8 \end{pmatrix}$$

3.2 孔的分析过程

由 2.1 节可知,设备选型最终转化为工艺路线的优化问题.通过参考机械加工工艺^[13-14],孔 1 的加工可由半精镗-精镗、粗拉-精拉、半精镗-精磨、扩孔-半精铰-精铰 4 条加工路线完成.

(1) 镗削工艺路线

镗削工艺路线如表 2 所示,镗削加工状态变换模型如图 9 所示.

表 2 镗削工艺路线

Tab. 2 Boring process route

工序号	加工方法	设备	尺寸		精度		表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	
			输入	输出	输入	输出	输入	输出
1	半精镗	镗床	$\phi 34$	$\phi 35.5$	IT15	IT10	25	6.3
2	精镗	镗床	$\phi 35.5$	$\phi 36$	IT10	IT7	6.3	3.2



图 9 镗削加工状态变换模型

Fig. 9 State transformation model of boring process

由表 2 可知,半精镗和精镗的变换矩阵

$$T_{i1}^1 = \begin{pmatrix} t_{i1,1}^1 \\ t_{i1,2}^1 \\ t_{i1,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5 \\ -5 \\ -18.7 \end{pmatrix}$$

$$T_{i2}^1 = \begin{pmatrix} t_{i2,1}^1 \\ t_{i2,2}^1 \\ t_{i2,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 \\ -3 \\ -3.1 \end{pmatrix}$$

由 1.4 节可知,镗削加工变换过程的特征状态方程为

$$S_o^1 = T_{i2}^1 \otimes T_{i1}^1 \otimes S_i^1 = \begin{pmatrix} 36 \\ 7 \\ 3.2 \end{pmatrix}$$

(2) 拉削工艺路线

拉削工艺路线如表 3 所示,拉削加工状态变换模型如图 10 所示.

表 3 拉削工艺路线

Tab. 3 Broaching process route

工序号	加工方法	设备	尺寸		精度		表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	
			输入	输出	输入	输出	输入	输出
1	粗拉	拉床	$\phi 34$	$\phi 35.5$	IT15	IT9	25	5
2	精拉	拉床	$\phi 35.5$	$\phi 36$	IT9	IT7	5	3.2

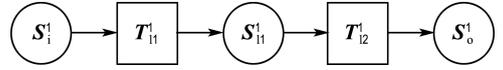


图 10 拉削加工状态变换模型

Fig. 10 State transformation model of broaching process

由表 3 可知,粗拉和精拉的变换矩阵

$$T_{i1}^1 = \begin{pmatrix} t_{i1,1}^1 \\ t_{i1,2}^1 \\ t_{i1,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5 \\ -6 \\ -20 \end{pmatrix}$$

$$T_{i2}^1 = \begin{pmatrix} t_{i2,1}^1 \\ t_{i2,2}^1 \\ t_{i2,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 \\ -2 \\ -1.8 \end{pmatrix}$$

拉削加工变换过程的特征状态方程为

$$S_o^1 = T_{i2}^1 \otimes T_{i1}^1 \otimes S_i^1 = \begin{pmatrix} 36 \\ 7 \\ 3.2 \end{pmatrix}$$

(3) 镗-磨工艺路线

镗-磨工艺路线如表 4 所示,镗-磨加工状态变换模型如图 11 所示.

由表 4 可知,半精镗和精磨的变换矩阵

$$T_{im1}^1 = \begin{pmatrix} t_{im1,1}^1 \\ t_{im1,2}^1 \\ t_{im1,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5 \\ -5 \\ -18.7 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{T}_{tm2}^1 = \begin{pmatrix} t_{tm2,1}^1 & & \\ & t_{tm2,2}^1 & \\ & & t_{tm2,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & & \\ & -3 & \\ & & -3.1 \end{pmatrix}$$

镗-磨加工变换过程的特征状态方程为

$$\mathbf{S}_o^1 = \mathbf{T}_{tm2}^1 \otimes \mathbf{T}_{tm1}^1 \otimes \mathbf{S}_i^1 = \begin{pmatrix} 36 \\ 7 \\ 3.2 \end{pmatrix}$$

表 4 镗-磨工艺路线

Tab. 4 Boring-grinding process route

工序号	加工方法	设备	尺寸		精度		表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	
			输入	输出	输入	输出	输入	输出
1	半精镗	镗床	$\phi 34$	$\phi 35.5$	IT15	IT10	25	6.3
2	精磨	磨床	$\phi 35.5$	$\phi 36$	IT10	IT7	6.3	3.2

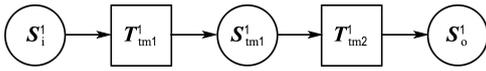


图 11 镗-磨加工状态变换模型

Fig. 11 State transformation model of boring-grinding process

(4) 扩-铰工艺路线

扩-铰工艺路线如表 5 所示,扩-铰加工状态变换模型如图 12 所示。

表 5 扩-铰工艺路线

Tab. 5 Bearizing-reaming process route

工序号	加工方法	设备	尺寸		精度		表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	
			输入	输出	输入	输出	输入	输出
1	扩孔	扩床	$\phi 34$	$\phi 35$	IT15	IT11	25	10
2	半精铰	半精铰床	$\phi 35$	$\phi 35.75$	IT11	IT9	10	6.3
3	精铰	精铰床	$\phi 35.75$	$\phi 36$	IT9	IT7	6.3	3.2

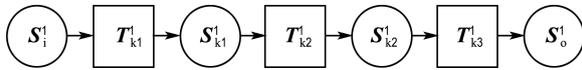


图 12 扩-铰加工状态变换模型

Fig. 12 State transformation model of bearizing-reaming process

由表 5 可知,扩孔、半精铰和精铰的变换矩阵

$$\mathbf{T}_{k1}^1 = \begin{pmatrix} t_{k1,1}^1 & & \\ & t_{k1,2}^1 & \\ & & t_{k1,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & -4 & \\ & & -15 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{T}_{k2}^1 = \begin{pmatrix} t_{k2,1}^1 & & \\ & t_{k2,2}^1 & \\ & & t_{k2,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.75 & & \\ & -2 & \\ & & -3.7 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{T}_{k3}^1 = \begin{pmatrix} t_{k3,1}^1 & & \\ & t_{k3,2}^1 & \\ & & t_{k3,3}^1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.25 & & \\ & -2 & \\ & & -3.1 \end{pmatrix}$$

扩-铰加工变换过程的特征状态方程为

$$\mathbf{S}_o^1 = \mathbf{T}_{k3}^1 \otimes \mathbf{T}_{k2}^1 \otimes \mathbf{T}_{k1}^1 \otimes \mathbf{S}_i^1 = \begin{pmatrix} 36 \\ 7 \\ 3.2 \end{pmatrix}$$

孔 2 和孔 3 的处理过程如孔 1。

3.3 状态空间中的工艺路线

通过分析缸盖上 3 个孔的工艺路线,可以定性表示出 3 个孔在状态空间中的路径. 现只把孔 1 特征的加工路线在状态空间表示出来,如图 13 所示,图中 1、2、3、4 分别表示镗削、拉削、镗-磨、扩-铰工艺路线; s_1^1, s_2^1, s_3^1 分别表示孔 1 尺寸、精度、表面粗糙度状态特征轴。

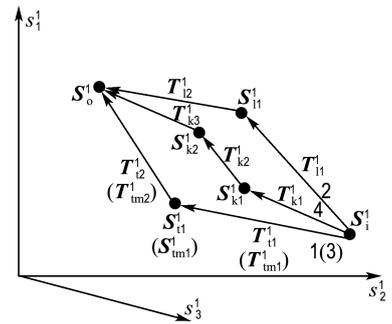


图 13 孔 1 工艺路线在状态空间的模型

Fig. 13 The model of process routes of hole 1 in the state space

3.4 优化模型

约束条件:

- (1) 缸盖上有 3 个孔特征 F_λ , 其中 $\lambda = 1, 2, 3$.
- (2) 对于任一个孔特征 $F_\lambda (\lambda = 1, 2, 3)$, 根据加工要求得到各孔的状态变换矩阵:

$$\mathbf{T}^1 = \begin{pmatrix} 2 & & \\ & -8 & \\ & & -21.8 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{T}^2 = \begin{pmatrix} 2 & & \\ & -7 & \\ & & -21.8 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{T}^3 = \begin{pmatrix} 2.2 & & \\ & -8 & \\ & & -21.8 \end{pmatrix}$$

- (3) 根据 3 个孔的状态变换矩阵 \mathbf{T}^λ , 参照工艺

手册查得每个 F_λ 有 4 条工艺路线 U_j , 其中 $j = 1, 2, 3, 4$.

(4) 3 个孔 F_λ 共列出 12 条工艺路线, 所涉及的机床设备有半精镗床、精镗床、粗拉床、精拉床、精磨床、扩床、半精铰床和精铰床, 对应每台机床设备的购置成本为 8 万、10 万、8 万、9 万、15 万、8 万、9 万和 10 万.

(5) 最终目标是对应每个 $F_\lambda (\lambda = 1, 2, 3)$, 各优选出一条加工路线, 共优选出 3 条加工路线, 这 3 条加工路线涉及的机床设备 M_z 的购置成本为 $\omega_z (z = 1, \dots, \zeta)$, 其中 $\zeta < 8$.

(6) 每年生产柴油机 10 万件.

(7) 该零件需连续生产 10 a, 半精镗床、精镗床、粗拉床、精拉床、精磨床、扩床、半精铰床和精铰床生产每件零件的运营成本为 2 元、3 元、3 元、5 元、5 元、1 元、2 元和 3 元, 其中优选出的 3 条加工路线所涉及机床设备 M_z 的运营成本为 $m_z (z = 1, \dots, \zeta)$.

目标函数:

因已知的 3 个孔的工艺路线是一致的, 只需优选出一条加工路线, 使加工缸盖的总成本最低:

$$\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_\zeta + 1 \times 10^5 \times 10 \times (m_1 + m_2 + \dots + m_\zeta)$$

3.5 优化算法

优化算法思路: 利用贪心算法, 首先使购买机床设备的购置费用最低, 其次, 确保购置费用和运营成本之和较低.

优化算法步骤如下:

步骤 1 通过机床聚类使机床的购置费用最低.

(1) 统计加工各类孔所对应的各工艺路线中所需机床数量, 如表 6 所示.

表 6 设备聚类初始表

Tab. 6 Machine tools clustering initial table

项目	设备数量						
	半精镗床	精镗床	粗拉床	精拉床	精磨床	扩床	半精铰床 精铰床
孔 1	2	1	1	1	1	1	1
孔 2	2	1	1	1	1	1	1
孔 3	2	1	1	1	1	1	1

由表 6 可知, 半精镗床数量为 $2 + 2 + 2 = 6$, 在以上各列机床数量和中最大. 因此选择所有含

有半精镗床的工艺路线. 由加工各类孔所列出的加工路线可知, 可选择半精镗-精镗、半精镗-精磨.

(2) 除去半精镗床, 其余机床数量如表 7 所示.

表 7 设备聚类优化表

Tab. 7 Machine tools clustering updated table

项目	设备数量						
	精镗床	粗拉床	精拉床	精磨床	扩床	半精铰床	精铰床
孔 1	1	1	1	1	1	1	1
孔 2	1	1	1	1	1	1	1
孔 3	1	1	1	1	1	1	1

由表 7 可知, 以上各列机床数量和中都为 $1 + 1 + 1 = 3$, 因此无法选出某种机床使数量和中最大, 机床聚类结束.

通过设备聚类优选出半精镗-精镗、半精镗-精磨这 2 条工艺路线.

步骤 2 通过计算购置成本和运营成本之和最低来选择最优工艺路线.

半精镗-精镗:

购置成本

$$\omega_1 + \omega_2 = (8 + 10) \text{ 万元} = 18 \text{ 万元}$$

运营成本

$$1 \times 10^5 \times 10 \times (m_1 + m_2) = 1 \times 10^5 \times 10 \times (2 + 3) \text{ 万元} = 500 \text{ 万元}$$

总成本

$$\omega_1 + \omega_2 + 1 \times 10^5 \times 10 \times (m_1 + m_2) = (18 + 500) \text{ 万元} = 518 \text{ 万元}$$

半精镗-精磨:

购置成本

$$\omega_1 + \omega_5 = (8 + 15) \text{ 万元} = 23 \text{ 万元}$$

运营成本:

$$1 \times 10^5 \times 10 \times (m_1 + m_5) = 1 \times 10^5 \times 10 \times (2 + 5) \text{ 万元} = 700 \text{ 万元}$$

总成本

$$\omega_1 + \omega_5 + 1 \times 10^5 \times 10 \times (m_1 + m_5) = (23 + 700) \text{ 万元} = 723 \text{ 万元}$$

比较半精镗-精镗和半精镗-精磨的加工总成本可知, 应选用半精镗-精镗加工路线, 因此加工缸盖上这 3 个孔应选用半精镗床和精镗床, 从而实现工艺设备的选型.

4 结 论

(1)从生产加工过程的角度把零件上的加工特征划分为特征单元,通过研究特征单元来代替研究整个零件,实现工艺设备选型,可大大简化工艺设备选型的复杂程度。

(2)状态变换矩阵和状态变换方程可以描述特征单元的状态变换量和状态变换过程.通过引入状态空间方法,将工艺设备选型转化为状态空间中从初始状态到最终状态间的路径优化问题.结合实际生产过程,最后将工艺设备选型问题转化为多条工艺路线的优化问题。

(3)应用状态空间理论,将设备选型问题与工艺设计联系起来,找到工艺设备选型的可行集.在实际生产的限制下,分析得出现有工艺路线是工艺设备选型的有效集,并且建立工艺设备选型优化模型,这对于工艺设备选型问题具有重大意义。

参 考 文 献:

- [1] 李河水,喻林平,骆 雪. 加工中心设备选型探讨[J]. 科技广场, 2011(5):250-253.
LI He-shui, YU Lin-ping, LUO Xue. Selection of equipment processing center [J]. **Science Mosaic**, 2011(5):250-253. (in Chinese)
- [2] 钟志胜,闻定原,郭定新,等. 数控机床的选型[J]. 航天工艺, 2000(6):50-53.
ZHONG Zhi-sheng, WEN Ding-yuan, GUO Ding-xin, *et al.* Selection of NC machine tool [J]. **Aerospace Manufacturing Technology**, 2000(6):50-53. (in Chinese)
- [3] 俞圣梅,吴梅英. 数控机床的选型(上)[J]. CAD/CAM与制造业信息化, 2005(4):70-73.
YU Sheng-mei, WU Mei-ying. Selection of NC machine tool (I) [J]. **Digital Manufacturing Industry**, 2005(4):70-73. (in Chinese)
- [4] 亚 东. 数控设备选型要素[J]. 机电新产品导报, 2003(10):55-62.
YA Dong. The elements of NC equipment selection [J]. **Machinery & Electrical New Products Guide**, 2003(10):55-62. (in Chinese)
- [5] 陆 飞. 企业信息化建设中设备选型原则[J]. 沿海企业与科技, 2003(5):41.
LU Fei. The principles of equipment selection in enterprises information construction [J]. **Coastal Enterprises and Science & Technology**, 2003(5):41. (in Chinese)
- [6] 毛敏华,陶少雄. 设备选型评价模型与应用研究[J]. 价值工程, 2012, 21:55-58.
MAO Min-hua, TAO Shao-xiong. Evaluation model and application study of selecting type of the equipment [J]. **Value Engineering**, 2012, 21:55-58. (in Chinese)
- [7] 邹志勇,陈链冰,林文生. 机械设备选型方案的模糊综合评价[J]. 建设机械技术与管理, 2005(4):89-94.
ZOU Zhi-yong, CHEN Lian-bing, LIN Wen-sheng. Fuzzy comprehensive evaluation of equipment type selecting schemes [J]. **Construction Machinery Technology & Management**, 2005(4):89-94. (in Chinese)
- [8] 米长富,田建平,杨海栗,等. 基于模糊综合评判的机床设备选型研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(7):109-112.
MI Chang-fu, TIAN Jian-ping, YANG Hai-li, *et al.* Machine tool selection based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. **Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique**, 2012(7):109-112. (in Chinese)
- [9] 林 碧,谢明红. 基于遗传算法的柔性制造系统机床选择问题研究[J]. 现代制造工程, 2007(11):75-78, 98.
LIN Bi, XIE Ming-hong. Research of machine selection model of flexible manufacturing system based on genetic algorithm [J]. **Modern Manufacturing Engineering**, 2007(11):75-78, 98. (in Chinese)
- [10] 黎咏梅. 基于模糊层次分析法的设备选型评价方法研究[J]. 中国西部科技, 2013, 12(4):8-10.
LI Yong-mei. Evaluation method of selecting type of the equipment based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation [J]. **Science and Technology of West China**, 2013, 12(4):8-10. (in Chinese)
- [11] 俞书伟,王新宇,崔有祥,等. 基于模糊信息分配与神经网络的综采设备选型决策支持系统[J]. 煤矿现代化, 1999(5):21-22.

YU Shu-wei, WANG Xin-yu, CUI You-xiang, *et al.* A fully mechanized equipment selection decision support system based on the fuzzy information distribution and neural network [J]. **Coal Mine Modernization**, 1999(5):21-22. (in Chinese)

[12] 陈婀娜. 基于灰色系统理论的数控机床选型决策 [J]. 微计算机信息, 2006(18):138-139, 276.

CHEN E-nuo. The lectotype decision making of NC machine tool based on grey system theory [J]. **Microcomputer Information**, 2006 (18): 138-139, 276. (in Chinese)

[13] 李翠翘, 李建政, 孟刚. 零件机械加工工艺设计原

则的探讨[J]. 机械研究与应用, 2005, 18(5):67-68, 92.

LI Cui-qiao, LI Jian-zheng, MENG Gang. Discussion of design principle of mechanical machining technics for parts [J]. **Mechanical Research & Application**, 2005, 18(5): 67-68, 92. (in Chinese)

[14] 王凡, 宋建新. 实用机械制造工艺设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:83-103.

WANG Fan, SONG Jian-xin. **Practical Mechanical Manufacturing Process Design Manual** [M]. Beijing: China Machine Press, 2008:83-103. (in Chinese)

State space theory and method for equipment selection based on feature-unit

MAO Fan-hai*, LIU Xiao-na, QIAN Feng, LIU Feng-wen

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The state space theory of machining process of part feature-unit is proposed to solve the problem of machining production line process equipment selection. Since part features are diverse and complex, feature-unit is defined to facilitate the analysis of part features. For a type of feature-unit, firstly, the two states of feature-unit before and after processing are extracted. Secondly, through analysis of the transforming reason of the two states, the state transformation matrix is constructed, and the conclusion is drawn that the state transformation matrix is on behalf of processing capacity of equipment. Thirdly, the state transformation equation is constructed to describe the machining process. Fourthly, through establishment of the state space, the problem of process equipment selection is translated into the path planning problem. Under the actual production constraint, the path planning problem in state space is translated into existing process routes optimization problem, and process equipment selection optimization model is established to optimize the most ideal process route, so a set of ideal process equipment can be selected. At last, an application example verifies the feasibility of this method.

Key words: equipment selection; state space; feature-unit; process route; optimization model