DOI: 10.3901/JME.2020.21.231

自动化生产线中关键设备的预维护策略研究*

沈南燕^{1,2} 武星^{1,2} 李静^{1,2} 苏琨^{1,2} 祝更生^{1,2}

(1. 上海大学机电工程与自动化学院 上海 200444;

2. 上海大学上海市智能制造及机器人重点实验室 上海 200444)

摘要: 为了避免由于设备故障导致的生产线停产, 首先研究生产线故障维修成本、预防性维护成本和停产损失的计算方法, 建立生产线平均可靠度与维护总成本多目标优化模型, 从而获得了最优的生产线周期性维护计划。针对关键设备, 如数控机床、工业机器人, 运行状态突然严重劣化的情况, 基于时间延迟理论得到了关键设备子系统可靠度随时间变化的规律, 根据设备运行状态的监测数据, 采用支持向量机模型对设备子系统潜在故障的发生概率进行预测。由此建立了关键设备延迟维护最佳时刻优化模型, 并通过粒子群优化算法求解关键设备的最佳维护时刻。最后, 通过实例仿真分析验证了文本预维护策略的有效性, 能够在保证可靠度要求的同时, 有效降低维护成本。

关键词: 生产线可靠度; 维护成本; 多目标优化; 时间延迟理论; 设备状态监测

中图分类号: TB497

Research on Pre-maintenance Strategy of Key Equipment in Automatic Production Line

SHEN Nanyan^{1,2} WU Xing^{1,2} LI Jing^{1,2} SU Kun^{1,2} ZHU Gengsheng^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444;

2. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Robotics, Shanghai University, Shanghai 200444)

Abstract: In order to avoid the shutdown of production line caused by equipment failures, the optimal periodic maintenance plan is firstly obtained by solving a multi-objective optimization model of average reliability and total maintenance cost of the entire production line where the costs of downtime, breakdown repair and preventive maintenance are accurately evaluated based on equipment reliability. For the sudden and severe deterioration of key equipment, such as CNC machine tool and industrial robot, time delay theory is utilized to formulate subsystem reliability of key equipment and then the potential failure probability of equipment subsystem is predicted by using Support Vector Machine according to monitoring data on equipment operating status. And thus, the optimization model of delayed maintenance time of key equipment is established and solved by particle swarm optimization to search for the optimal maintenance time of key equipment. The case study conducted by simulation analysis shows the effectiveness of the proposed pre-maintenance strategy which can ensure the reliability and minimize maintenance cost of production line.

Key words: reliability of production line; maintenance cost; multi-objective optimization; time delay theory; equipment condition monitoring

0 前言

以汽车零部件制造业为代表, 在大批量、多品种、快节奏的生产模式下, 自动化生产线的稳定运

行是良好订单响应能力和产品质量的重要保障。因此为了避免由于设备故障导致的生产线停产, 研究符合自动化生产线特点的预防性维护策略显得尤为重要。

预防性维护策略制定的关键是确定维护时间以及维护持续时间。TLILI等^[1]以可靠度作为评价设备状态的指标, 当设备使用寿命或者受冲击次数达到

* 国家科技重大专项资助项目(2016ZX04004003)。20191125 收到初稿, 20200319 收到修改稿

极限时对其进行维护,并通过平均维护成本对其进行优化;BRIS等^[2]考虑到批量生产连续性的要求,在保证设备正常运行的前提下,需要错开维护时间与任务执行时间;VILARINHO等^[3]认为计算预防性维护的成本时,可考虑直接更换部件的成本,从而选择更经济的方式对设备进行维护;LI等^[4]将周期预防维护策略和故障率刷新因子相结合,通过建立模型求解维护间隔周期、维护持续时间以使维护成本最小化;肖雷^[5]提出了一种非完美维护策略,即对设备进行维护后,无法回复到初始的完美状态,因此需要考虑其退化趋势;李有堂等^[6]引入了设备可靠度理论用于多设备串联的预防性维护策略制定。

对于自动化生产线而言,这些维护策略还存在一些不足。首先,自动化生产线上设备由多个子系统组成,以上维护策略的可靠度计算都未精细到设备子系统层面。其次由于自动化生产线中的设备都是串联的,单机设备的维护策略忽略了设备与设备之间的相关性。而且生产线中的某些关键设备由于加工负荷较大,往往更容易出现问题。因此预防性维护策略的制定既要着眼于整条生产线,又要能够对关键设备有所侧重。

除了预防性维护,基于设备状态数据的预测性维护也成为了当前的研究热点。SIDIBE等^[7]引入威布尔分布函数,结合设备参数判断设备退化趋势,从而判断设备能否延迟维护。CANIZO等^[8]提出了面向大数据环境的设备预测性维护方案,使用随机森林算法预测下一时间段设备发生故障的概率;SOBRAL等^[9]通过传感器采集设备的振动数据,并建立设备状态与振动数据的关系模型,实现对设备失效时间的预测。然而要在实际生产中实现所有设备的预测性维护是存在困难的。由于正常生产中设备故障样本数据较少,且设备状态的复杂性也增加了预测性维护模型建立的难度。

本文根据批量生产的连续性特点,精细化了设备可靠度和维护成本的计算模型,从而通过多目标优化得到了生产线平均可靠度和维护成本综合最佳的周期性维护计划。此外,针对生产线周期性维护期间关键设备状态突然严重劣化的情况,基于时间延迟理论得到了设备子系统可靠度,结合设备运行状态监测数据预测各子系统潜在故障的发生概率,以可靠度和维护成本为优化目标,最终得到了存在潜在故障的关键设备的延迟维护最佳时刻。

1 自动化生产线预维护策略

本文提出了一种周期性维护计划和关键设备最佳维护时刻相结合的有限时间区间内自动化生产线非完美预维护策略。

首先结合生产计划,制定有限时间区间 $[0, T]$ 内的周期性预防性维护计划。本文通过建立生产线平均可靠度和维护成本多目标优化模型^[9],确定最优维护次数 N ,并计算对应的维护间隔 τ_i 和维护持续时间 t_i ,以此形成生产线周期性维护计划,以便对运行一段时间后的生产线进行全面的检查、检测,防止故障发生。若设备运行状态一直良好,生产线的维护工作只需按照该周期性维护计划执行。但实际生产过程中不可避免地会出现关键设备运行状态突然严重劣化甚至突发故障的情况。为了尽量避免由此对生产线运行造成的严重影响,需要根据设备状态变化及时确定其最终维护时刻。

图1 预维护策略实施效果图

如图1所示,关键设备维护时刻分为两大类情况进行考虑:情况1当系统监测到某关键设备发生功能故障报警,必须立刻对该设备进行维修,则最终维护时刻即为当前时刻,其对应的维护所需时间由实际维护情况决定;情况2当系统监测到某关键设备产生警告提示信息或存在一定的劣化趋势,但设备仍能继续运行,即该设备存在潜在故障^[11],但可以延迟维护。关键设备延迟维护的最佳时刻 T_g ,是通过时间延迟理论分析设备劣化趋势,计算其随时间变化的可靠度,并结合生产计划最小化维护成本获得的。并基于最终延迟维护时刻的设备可靠度,可以预测获得维护所需时间 t_k 。其中情况2.1表示该关键设备的延迟维护最佳时刻不在生产线下一个维护周期内,需要在延迟维护最佳时刻到达时,即刻对设备进行维护;情况2.2表示延迟维护的最佳时刻在生产线下一个维护周期内,可以在生产线周期性维护时对该设备进行处理。

2 自动化生产线周期性维护计划

为了实现本文提出的预维护策略, 首先综合役龄回退因子^[12]与设备退化理论^[13], 建立了经过多次预防性维护后的设备可靠度计算模型。将设备维护导致的订单生产延误损失引入维护成本计算, 并通过回归预测得到计算所需维护持续时间, 提高维护成本计算精准性。最后以生产线平均可靠度和维护成本为目标进行优化, 以确定最优的生产线周期性维护计划。

2.1 基于威布尔分布的设备可靠度计算

可靠度计算中确定设备失效分布类型是一个关键问题, 大量实践证明设备寿命变化服从威布尔分布^[14]。因此, 本文选择了应用广泛的威布尔分布函数来描述设备退化的各个阶段。

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

式中, β 表示分布曲线的形状, 又称为形状参数; η 表示的是坐标尺度, 又称为尺度参数。并且 $\beta > 0, \eta > 0, t > 0$, 进而得到对应的故障率函数

$$\lambda(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (2)$$

制定周期性维护计划时需要保证在每个维护间隔时间内设备均具有一定的可靠度, 这样才能确保完成生产计划。根据可靠度定义, 如设备在 $[0, T]$ 时刻, 可靠度可以表示为

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(u) du \quad (3)$$

则可靠度与故障率的关系如下式所示

$$\ln R(t) = - \int_0^t \lambda(u) du \quad (4)$$

自动化机械加工生产线设备往往自动化程度高且功能复合化。典型的数控机床和机器人都是由机械、电气等多个子系统组成。因此为了对可靠度进行精细化计算, 可将关键复杂设备分解为若干个子系统, 结合上式得到设备各子系统在第 k 次预防性维护间隔时间内的可靠度

$$R_{k,j,z}(t) = \exp \left[- \int_0^t \prod_{i=0}^{k-1} \theta_i \lambda_{j,z} \left(t + \sum_{y=1}^{k-1} (1 - \alpha_y) \tau_y \right) dt \right] \quad (5)$$

式中, $R_{k,j,z}(t)$ 为第 k 次预防性维护间隔时间内第 j 台设备的第 z 子系统的可靠度; $\lambda_{j,z}(t)$ 为第 j 台设备的第 z 子系统的故障率函数; τ_y 为第 y 次预防性维护间隔时间; α_y 为第 y 次维护的役龄回退因子;

θ_i 为第 i 次维护的设备退化因子。

若每台设备能够正常运行则每个子系统都必须是无故障的, 因此整台设备属于串联系统。设定自动化生产线中各设备分别完成各加工工序, 彼此间无法替换, 因此整个生产线可视为一个更大的串联系统。由此可得到生产线在第 k 次预防性维护间隔时间内的可靠度计算如下

$$R_{k,line}(t) = \prod_{j=1}^m \prod_{z=1}^l R_{k,j,z}(t) \quad (6)$$

式中, m 为自动化生产线关键设备数量; l 为各设备所划分的子系统数量。

对设备运行时间段的可靠度积分, 再除以运行总时间即可获得生产线平均可靠度, 计算公式为

$$R_a(N, \tau_i) = \frac{\sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_i} \left(\prod_{j=1}^m \prod_{z=1}^l \exp \left[- \int_0^t \prod_{r=0}^{i-1} \theta_r \lambda_{j,z} \left(t + \sum_{k=1}^{i-1} (1 - \alpha_k) \tau_k \right) dt \right] \right) dt}{\sum_{i=1}^N \tau_i} \quad (7)$$

2.2 基于可靠度的生产线维护成本计算

生产线维护成本主要包括该周期性维护计划 $[0, T]$ 有限时间区间内总的故障维修成本 C_1 、预防性维护成本 C_2 和预防性维护导致的总停工损失 C_3 , 以下分别对这三部分展开分析。

2.2.1 周期性维护计划内的故障维修成本 C_1

预防性维护间隔时间内中不可避免地会发生对设备进行小修和大修。自动化生产线各周期性维护计划内的故障维修成本 C_2 可表示为生产线上所有设备的维修成本之和, 表达式如下

$$C_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m Cb_{i,j} \quad (8)$$

式中, N 为自动化生产线预防性维护次数; m 为自动化生产线设备数量; $Cb_{i,j}$ 为第 i 次预防性维护间隔时间内第 j 台设备的维修成本, 由于设备不同子系统的维护成本区别较大, 为了能够更为准确地得到设备维修成本, 应当从设备各子系统层面进行维修成本的计算。

不同子系统的故障形式、维修方式、配件价格、检查维护耗时等因素均会导致维修成本变化。因此, 需要以设备各个子系统故障率函数为基础、结合其历史维修成本, 计算设备维修成本 $Cb_{i,j}$, 表达式如下

$$Cb_{i,j} = \sum_{z=1}^l F_{i,j,z} \left(\frac{\sum_{k=1}^{Nf_{j,z}} Cf_{j,z,k}}{Nf_{j,z}} \right) \quad (9)$$

式中, l 为该设备所具有的子系统数量; $Nf_{j,z}$ 为第 j 台设备的第 z 子系统发生的故障维修次数; $Cf_{j,z,k}$ 为第 j 台设备第 z 子系统第 k 次故障维修成本; $F_{i,j,z}$ 为第 i 次预防性维护间隔时间内生产线第 j 台设备的第 z 子系统故障预计发生次数, 其表达式为

$$F_{i,j,z}(\tau_i) = \int_{a_{i-1}}^{\tau_i + a_{i-1}} \prod_{z=0}^{i-1} \theta_z \lambda_{j,z}(t) dt \quad (10)$$

式中, τ_i 为第 i 次预防性维护间隔时间, $\lambda_{j,z}(t)$ 为该子系统的故障率函数。

2.2.2 周期性维护计划内总预防性维护成本 C_2

周期性维护计划内总预防性维护成本 C_2 为

$$C_2 = \sum_{i=1}^N C_{pm}(\tau_i, t_i) \quad (11)$$

式中, t_i 为第 i 次维护持续时间, $C_{pm}(\tau_i, t_i)$ 为自动化生产线预防性维护成本函数, 通常形式为 $C_{pm}(\tau_i, t_i) = q_1 + q_2 \alpha_i \tau_i + q_3 t_i$, 且 q_1, q_2, q_3 根据各设备情况均为定值, 可以通过对预防性维护成本的历史数据拟合得到这三个参数。

本文采用支持向量机(SVM)模型^[15]对生产线维护持续时间进行回归预测。输入量为生产线历史维护时刻的可靠度, 输出量为对应的维护持续时间 t_i ; 通过训练历史数据, 并使用粒子群寻优算法进行模型参数寻优, 获得最优生产线预防性维护持续时间预测模型; 将待预测样本输入训练完成的模型中即可得到生产线预防性维护持续时间预测值 t_i 。

2.2.3 周期性维护导致的总停工损失 C_3

自动化生产线停工损失计算需要依据维护时刻该设备的可靠度。与以往周期性维护计划不同的是, 自动化生产线的停工损失除了考虑维护时间内设备折旧损失之外, 还着重考虑订单延误造成的损失。因此, 生产线预防性维护所造成的总停工损失 C_3 的表达式如下

$$C_3 = \sum_{i=1}^w C_{dw,i} + \sum_{i=1}^N C_{pt} t_i \quad (12)$$

式中, $C_{pt} t_i$ 为设备折旧损失, 根据设备的固定资产在使用寿命中的磨损状态而确定; C_{pt} 为单位时间内的折旧损失, 根据各个设备的价值取定值; t_i 为维护持续时间。 w 为延误的订单数量; $C_{dw,i}$ 为第 i 个延误订单的延误损失, 是生产线停机维护损失的主要成分, 与生产线的生产计划和具体的维护持续时间 t_i 有关, 表达式如下

$$C_{dw,i} = k_{d1} N_{dw,i} \quad (13)$$

式中, k_{d1} 为基于延误量的订单生产延误成本计算系

数; $N_{dw,i}$ 为第 i 个订单生产延误量, 可依据图 2 因预维护导致生产延误示意图进行计算。

图2 因周期性维护导致生产延误示意图

2.3 生产线周期性维护计划多目标优化模型

在制定自动化生产线周期性维护计划时, 需要综合考虑生产线可靠度和维护成本。由于自动化生产线的可靠度是不断变化的, 可靠度的评估应该以自动化生产线平均可靠度为目标。自动化生产线平均可靠度与维护成本综合优化模型为

$$\begin{aligned} & \text{Get } N, \tau_i \\ & \min C(N, \tau_i) = C_1 + C_2 + C_3 \\ & \max R_a(N, \tau_i) = \frac{\sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_i} \left(\prod_{j=1}^m \prod_{z=1}^l \exp \left[-\int_0^t \prod_{r=0}^{i-1} \theta_r \lambda_{j,z} \left(t + \sum_{k=1}^{i-1} (1 - \alpha_k) \tau_k \right) dt \right] \right) dt}{\sum_{i=1}^N \tau_i} \\ & \text{s.t. } \sum_{i=1}^N \tau_i + \sum_{i=1}^N t_i \leq T \\ & R_{j,z} \geq \lim R \end{aligned} \quad (14)$$

式中, N, τ_i 为决策变量, 并且需要满足一定的约束条件; N 为预防性维护次数; τ_i 为对应的第 i 次维护间隔时间; $R_a(N, \tau_i)$ 为该维护计划内自动化生产线的平均可靠度, $C(N, \tau_i)$ 为该维护计划内自动化生产线的维护成本; 约束条件 $R_{j,z} \geq \lim R$ 表示任意时刻设备子系统可靠度应大于可靠度下限值, 可靠度下限可以根据实际情况选取, 通常为 0.8。

建立的生产线平均可靠度-维护成本优化模型中, 求解的关键问题就是确定生产线在有限时间内的维护次数 $N \in \{1, 2, 3, \dots\}$ 、对应的维护间隔时间 τ_i 以及维护持续时间 t_i , 并使得生产线可靠度尽可能高并且维护成本尽可能低。但可靠度与维护成本存在一定的正相关性: 当可靠度越高时需要的维护次数越多将造成维护成本上升, 而维护成本的减少又将会使得生产线可靠度下降。因此, 需要求解这两个优化目标的平衡点。本文基于粒子群算法^[16]求出不同维护次数的 Pareto 解, 并权衡生产线平均可靠度和维护性成本, 从而制定最优维护计划。

3 关键设备延迟维护时刻决策

依据生产线预防性维护策略进行整体维护时，还需着重关注生产线中的关键设备，即生产负荷高易故障、对订单完成率影响大、备件成本高的设备。本文研究对象为自动化机械加工生产线，其关键设备为数控机床和工业机器人。为此，本节引入时间延迟理论对设备劣化情况进行分析^[17]，基于设备各子系统状态数据，采用支持向量机预测设备各子系统潜在故障发生的概率，计算设备可靠度，并建立自动化生产线关键设备延迟维护最佳时刻优化模型。

3.1 时间延迟理论模型

潜在故障没有得到及时有效地处理会进一步发展劣化成为功能故障，两类故障之间存在着一定的时间延迟，并且延迟时间不定。在时间延迟的间隔内，可以通过对设备状态的实时监测，对其状态进行判定，计算出设备子系统潜在故障发生的概率，识别其严重性和劣化速度，再结合实际生产计划、成本制定设备延迟维护最佳时刻。

时间延迟理论的重点是确定潜在故障与功能故障的间隔时间(P-F 间隔)的分布函数。通过分布函数可以判断设备故障的发展趋势，结合可靠度与故障率的关系判断能否将关键设备的维护时刻延迟至生产线的维护周期中。使用指数分布函数来表征设备缺陷发展 P-F 间隔在实践应用中取得了较好的效果^[19]。因此，将 P-F 间隔分布函数表示为

$$H(t) = 1 - e^{-bt} \quad (15)$$

式中，参数 b 表示指数分布函数的尺寸参数。

3.2 关键设备可靠度计算

在自动化生产线加工过程中，关键设备的健康状况将影响着整条生产线，决定着整条生产线能否继续进行工作。因此，在确定最佳维护时刻时将以该设备的可靠度来代表整条生产线的可靠度。由于设备各系统之间是串联关系，以及设备服役导致的状态退化会使得各个子系统有一定的概率发生潜在故障，由 l 个子系统组成的设备存在潜在故障的可靠度计算如下

$$R^g(t) = \prod_{i=1}^l R_i^g(t) \quad (16)$$

式中， R_i^g 是考虑第 i 个子系统存在潜在故障时该设备的可靠度。当子系统中某个部件发生潜在故障，可以将其当成一个独立的部分进行处理。该子系统

能够正常工作的前提是子系统剩余部件未发生故障并且发生潜在故障的部件未发展成为功能故障。因此，第 i 个子系统存在潜在故障时的可靠度由该系统内剩余部件未发生故障的可靠度和存在潜在故障部件的可靠度组成，计算方法如下

$$R_i^g(t) = R_{i, \text{left}}(t) R_{i, k, \text{pf}}(t) \quad (17)$$

$R_{i, k, \text{pf}}(t)$ 为第 i 个子系统第 k 个部件发生潜在故障部件的可靠度，计算公式如下

$$R_{i, k, \text{pf}}(t) = 1 - S_i H_i(t) \quad (18)$$

式中， S_i 为第 i 个子系统潜在故障的发生概率，可通过支持向量机理论的二分类模型预测获得； $H_i(t) = 1 - e^{-(b_i t + t_{i,0})}$ 为第 i 个子系统潜在故障发展成功能故障的时间延迟分布函数；两者的乘积为失效概率，即发生功能故障的概率。为了避免 t 趋近 0 时，存在潜在故障的部件可靠度大于 0.98 的情况，加入参数 $t_{i,0}$ 对其进行修正。由上式在 $R_{i, k, \text{pf}}(t) = 0.98, t = 0$ 的条件下计算参数 $t_{i,0}$

$$t_{i,0} = \ln \left(\frac{S_i}{S_i - 0.02} \right) \quad (19)$$

式(17)中 $R_{i, \text{left}}(t)$ 为子系统 i 排除存在潜在故障部件以外剩余部分的可靠度。在计算各子系统可靠度时应综合考虑整个系统的可靠度、该子系统潜在故障发生概率以及潜在故障的劣化趋势。假设子系统中发生潜在故障的部件只有一个，即第 k 个部件发生潜在故障，则该子系统剩余部分的可靠度计算如下式所示

$$R_{i, \text{left}}(t) = R_{i,1}(t) R_{i,2}(t) \cdots R_{i, k-1}(t) R_{i, k+1}(t) \cdots R_{i, n}(t) = \frac{R_i(t)}{R_{i, k}(t)} \quad (20)$$

式中， $R_{i, k}$ 为该设备第 i 子系统的第 k 个部件正常情况下的可靠度。将设备各子系统可靠度约束下限值设定为 0.8，而关键设备各子系统的组成部件数量远大于 10，则可计算得到各子系统内处于正常状态的单部件可靠度大约为 0.98；由于在关键设备延迟维护最佳维护时刻的研究中延迟处理的时间相对较短，使得该部件处于正常状态下可靠度随时间变化的量可以忽略不计。因此选取单个部件可靠度为 0.98，即 $R_{i, k}(t) = 0.98$ 。

综上，设备子系统正常运行下的可靠度计算如下

$$R_i(t) = \exp \left[- \int_0^{t+t_e} \prod_{r=0}^{e-1} \theta_r \lambda_i \left(t + \sum_{j=1}^{e-1} (1 - \alpha_j) \tau_j \right) dt \right] \quad (21)$$

式中， e 表示当前时刻处于第 e 次预测性维护间隔

内; t_c 为设备在该次维护间隔时间内的累积运行时间; $\lambda_i(t)$ 为第 i 子系统的故障率函数; α_j 为第 j 次维护的役龄回退因子; θ_r 第 r 次维护的设备退化因子。

3.3 延迟维护时刻优化

在关键设备延迟维护最佳时刻优化中所涉及的维护成本将只包含该设备的预测性维护成本和整个生产线的停机成本。

生产线的停机成本计算按照第 2.2.3 节中的计算方法进行计算。设备预测性维护成本计算公式如下所示

$$C_4(t) = p_1 + p_2 t + p_3 t_k \quad (22)$$

式中, t_k 为设备维护所需时间的预测值, 其基于维护时刻的设备可靠度预测得到; p_1, p_2, p_3 根据各设备情况均为定值。

综上所述, 关键设备延迟维护最佳时刻问题中所涉及的维护成本如下所示

$$W(t) = \sum_{i=1}^w C_{dw,i} + C_4 \quad (23)$$

基于延迟处理的关键设备可靠度和维护成本的表达式, 构建如式(24)所示的关键设备延迟维护最佳时刻多目标优化模型, 使得维护成本尽可能小、可靠度尽可能高。

Find t

$$\left\{ \begin{array}{l} \min W(t) = \sum_{i=1}^w C_{dw,i} + C_4 \\ \max R^s(t) = \prod_{i=1}^l \left[\frac{\exp \left[-\int_0^{t+t_c} \prod_{r=0}^{e-1} \theta_r \lambda_i \left(t + \sum_{j=1}^{e-1} (1-\alpha_j) \tau_j \right) dt \right]}{0.98} \right] \times (1 - S_i \times H_i(t)) \end{array} \right.$$

s.t. $R^s(t) \geq \lim R$

$t \leq T_m$

(24)

式中, T_m 为该模型运行时刻至最近的生产线周期性维护时间; 求解得到的 T_g 为延迟维护的最佳时刻; $R_i^s(t)$ 为该设备第 i 子系统存在潜在故障的可靠度函数。基于粒子群算法对该模型进行多目标优化, 粒子群中的粒子所代表的是延迟处理的时间, 且生成粒子的范围为 $[0, T_d]$, 其中 T_d 代表的是当前时刻到最近的生产线周期性维护开始时刻。

3.4 最终延迟维护时刻确定

如图 3 所示, 基于对设备状态的实时监控, 在设备未发生功能故障时, 计算设备潜在故障发生概率, 并通过时间延迟理论计算当前维护间隔内的可靠度, 当可靠度低于 0.8 时, 对关键设备延迟维护

的最佳时刻进行优化; 若设备某些子系统发生故障, 产生报警, 则将对对应子系统潜在故障发生概率置为 1, 结合设备其余子系统的实时状态数据, 计算其余子系统潜在故障发生概率, 从而得到该关键设备的可靠度, 并对其延迟维护的最佳时刻进行优化。最后根据该设备延迟维护的最佳时刻是否落在生产线下一个维护周期内, 决定该设备最终延迟维护时刻。

图 3 设备延迟维护最终时刻决策流程

其中, 延迟维护最佳时刻优化的关键的步骤是预测各子系统潜在故障的发生概率。以数控机床为例, 其故障发生率较高的几个子系统分别为: 主轴系统、进给系统、冷却/排屑系统、气/液压系统。为了获得设备各子系统潜在故障的发生概率, 在设备各子系统之间没有相互作用的前提下, 以表 1 中所述特征量描述各子系统状态, 并作为设备各子系统潜在故障发生概率预测模型的输入量。

表 1 表征数控机床各子系统状态的特征量

子系统名称	特征值矩阵
主轴系统	振动信号峭度、峰值因子、脉冲因子、裕度因子、频段能量(g ² Hz)、频率重心(Hz)、质量特征
进给系统	进给速度(m/s)、输出扭矩(N·m)、定位误差(mm)
冷却/排屑系统	冷却液温度(℃)、冷却液流量(L/min)、排屑器转速(r/min)、运行速度(m/min)
液/气压系统	液压泵压力(MPa)、油液温度(℃)、压缩机压力(MPa)、流量(L/min)

4 实例分析

4.1 生产线周期性维护计划实例分析

为验证所建立的周期性维护计划优化模型, 根据合作企业提供的设备报警记录, 给出如下算例进行分析, 并通过软件进行运算和结果的可视化, 模型参数如下所述。

(1) 根据设备维修记录, 拟合出威布尔分布参数的值, 确定了设备每个子系统的平均维修成本。生产线关键设备各子系统故障时间(MTBF)符合威布尔参数与平均维修成本如表 2 所示。

表 2 设备各子系统故障分布威布尔参数与平均维修成本

设备名称	子系统名称	参数 η	参数 β	平均维修成本/元
数控机床 1	主轴系统	1 351	2.2	1 500
	进给系统	1 731	1.97	3 000
	冷却/排屑系统	1 841	2.1	400
	液/气压系统	1 071	2.11	500
数控机床 2	主轴系统	1 372	2.04	1 300
	进给系统	1 693	2.07	2 500
	冷却/排屑系统	1 773	2.12	500
	液/气压系统	985	2.2	550
工业机器人	机械系统	1 581	2.04	2 000
	控制系统	1 471	2.08	500
	驱动系统	994	2.11	1 200

(2) 设每次预防性维护后设备劣化程度相同, 则可取役龄回退因子和设备退化因子相同, 即 $\alpha_i=0.95$, $\theta_i=1.01$ 。

(3) 运行时间 $T=1\ 440\text{ h}$, 即周期性维护计划的制定的时间上限。

(4) 根据维护要求, 该生产线周期性维护至少耗时 15 h, 并且必须在 24 h 内完成。

(5) 生产线周期性维护的成本函数具备以下关系

$$C_{pm,j}(\tau_i, t_{i,j}) = 8\ 500 + 40\alpha_i\tau_i + 90t_i$$

(6) 设备每次维护间隔时间内, 其可靠度不能低于 0.7。

(7) 该生产线生产计划为

$$M = [0\ 200; 210\ 320; 330\ 600; 635\ 730; 740\ 1080; 1090\ 1410]$$

矩阵每一行表示一个订单, 第一个元素表示生产开始时间, 第二元素表示订单结束时间。如在这之间发生维护工作, 则该订单视为订单生产延误, 延误成本根据该订单延误量计算; 生产节拍为 40 s/件; 基于订单生产延误量的延误订单成本计算系数

取 $k_{d1}=3$ 。

把以上参数代入优化模型中, 计算该生产线设备在 $[0, 1\ 440]\text{h}$ 的有限时间区间内的预防性维护计划。得到不同维护次数 N 的 Pareto 解分布如图 4 所示。

图 4 不同维护次数 N 的 Pareto 解分布

由图 4 结果可知, 在 0 至 1 440 h 内需要对生产线至少进行 4 次预防性维护工作, 才能满足可靠度的约束; 当预防性维护次数少时, 生产线可靠度较低, 生产线故障发生概率较高, 故障维修成本成为维护成本的主要因素; 而预防性维护次数过多时, 尽管生产线可靠度提升了, 但预防性维护的维护成本将大大提升。随着预防性维护次数的增加, 生产线平均可靠度呈现上升趋势, 而同时也造成了维护成本的不断上升; 当预防性维护次数达到一定值时, 可靠度上升趋势变缓而成本急剧上升, 将会造成过大浪费, 结果符合实际情况。

通过比较, 维护次数为 5 次的 Pareto 解的生产线平均可靠度均大于 0.85, 满足生产线对于可靠度的要求, 并且维护成本与其他维护次数相比较低。与维护次数为 4 的结果相比, 维护成本相差不大但生产线平均可靠度提升明显, 因此选择维护次数为 5 的 Pareto 解中维护成本最低的解作为最优解, 其在 $[0, 1\ 440]\text{h}$ 有限时间区间内的维护成本为 121 919.52 元, 生产线平均可靠度为 0.86。最终确定自动化生产线周期性维护计划, 包括预防性维护次数 N 、对应的维护间隔时间 τ_i 、维护持续时间 t_i 。如表 3 所示。

表 3 自动化生产线周期性维护计划相关内容

第 i 次维护	维护间隔时间/h	维护持续时间/h	维护间隔内平均可靠度
1	311.02	23.31	0.856
2	275.99	23.81	0.864
3	303.68	20.99	0.819
4	218.18	21.69	0.871
5	211.10	22.28	0.860

4.2 关键设备延迟维护最佳时刻实例分析

为验证所建立的设备延迟维护最佳时刻优化模型的有效性,以数控机床为例,给出如下算例进行分析,并通过 Matlab 软件进行运算和结果的可视化,模型中的参数说明如下。

(1) 数控机床加工同种产品,则在正常运行情况下机床的工艺参数是不变的。

(2) 数控机床潜在故障发生在第 1 次维护间隔时间内,该维护计划已经执行了 95 h,距离下次预防性维护时间为 165 h。

(3) 数控机床各子系统潜在故障的时间延迟分布参数为: 0.009(主轴系统); 0.012 1(进给系统); 0.008(冷却/排屑系统); 0.016(气/液压系统)。

(4) 数控机床各子系统可靠度符合威布尔分布的参数为: $\beta=2.2, \eta=1\ 351$ (主轴系统); $\beta=1.97, \eta=1\ 731$ (进给系统); $\beta=2.1, \eta=1\ 841$ (冷却/排屑系统); $\beta=2.11, \eta=1\ 071$ (气/液压系统),数控机床维护成本计算参数: $p_1=200, p_2=20, p_3=30$ 。

(5) 生产计划: [0 11;24 165],即当前生产订单还有 11 h 生产完成,下一个订单生产时间距离当前时刻为 24 h 至 165 h;生产节拍为 40 s/件;基于订单生产延误量的延误订单成本计算系数 $k_{d1}=3$ 。

(6) 基于 SVM 建立各子系统潜在故障发生概率预测模型,将每个子系统的 300 组状态数据样本,按照 8:2 的比例划分为训练集与测试集用来训练预测模型,模型的训练结果如表 4 所示。

表 4 子系统潜在故障发生概率预测模型准确率

子系统名称	惩罚参数 C	核参数 γ	准确率(%)
主轴系统	19.61	5.54	95.83
进给系统	2.26	0.41	85.42
冷却/排屑系统	18.06	1.82	93.75
液/气压系统	44.64	3.89	91.67

(7) 本实例中,设备状态监测系统发现数控机床产生了气压系统警告“系统工作压力过低”,其他子系统的状态数据特征值矩阵如表 5 所示。

表 5 数控机床各子系统状态数据特征值矩阵

子系统名称	特征值矩阵
主轴系统	[4.46, 12.69, 17.64, 22.68, 0.51, 829.73, 1]
进给系统	[84.9, 7.68, 0.013]
冷却/排屑系统	[83.5, 150.1, 361.2, 1.7]

将上述数据输入对应的预测模型,获得的该机床各子系统的潜在故障发生概率如表 6 所示。

表 6 数控机床各子系统潜在故障发生概率预测结果

子系统名称	潜在故障发生概率
主轴系统	0.07
进给系统	0.17
冷却/排屑系统	0.05
液/气压系统	1

结合设备报警说明和工人经验,该结果符合设备实际情况。将该数控机床各子系统的状态判定结果代入式(20)子系统时间延迟分布函数的修正参数值如表 7 所示。

表 7 各子系统时间延迟分布函数的修正参数值 $t_{i,0}$

序号	子系统名称	修正参数值
1	主轴系统	0.287
2	进给系统	0.125
3	冷却/排屑系统	0.251
4	液/气压系统	0.020

通过粒子群对关键设备延迟维护最佳时刻进行优化得到其 Pareto 解分布,如图 5 所示。

图 5 延迟维护最佳时刻多目标优化 Pareto 解分布

根据图 5 结果,不同解均有各自优势,可靠度高的解其成本较高,而可靠度低的解成本较低,符合预期结果。Pareto 解的可靠度均大于 0.8,选取维护成本最低的解作为最优解。通过设备延迟维护最佳时刻多目标优化得到运行结果如表 8 所示,该设备的延迟维护最佳时刻为 11.005 h 后,该时刻设备的可靠度为 0.802,满足可靠度约束并且维护成本相对较低。

表 8 延迟维护最佳时刻优化结果

序号	最佳维护时刻优化相关结果	数值
1	距离维护时间/h	11.005
2	预计停机时间/h	7.346
3	设备可靠度	0.802
4	预计维护成本/元	640.479

如图 6 所示, 采用本文所提策略, 分析此案例, 可以发现: 根据设备可靠度计算结果, 该设备无法正常运行至下次生产线的维护周期, 因此该设备的最终延迟维护时刻确定为 11.005 h 后; 当前订单完成时刻为 11 h 后, 而最终的维护时刻正好在当前订单生产完成后, 避免了该订单生产延误, 且不会对下一个订单造成影响。

图 6 最终延迟维护时刻决策结果

5 结论

(1) 改进了以往周期性维护计划优化问题中维护成本的粗略估算方式, 建立了考虑订单生产延误损失的维护成本计算模型; 并提出了基于设备子系统故障分析的维修成本计算方法。

(2) 改进了存在潜在故障的关键设备的可靠度计算方法, 分析粒度精细到子系统的子部件。在设备发生报警、警告提示或存在劣化趋势时, 采用支持向量机分类器获得设备各子系统潜在故障的发生概率, 并基于时间延迟理论建立了关键设备延迟维护最佳时刻优化模型。

(3) 通过实例仿真分析, 证明了本文所提出生产线预维护策略的有效性, 生产线周期维护计划可以指导一个生产周期中预防性维护的时间以及持续时间, 关键设备延迟维护最佳时刻决策可以有效判断设备的维护时刻, 保证订单的连续生产。该预维护策略集成在某汽车零部件制造企业 MES 系统中, 保证自动化生产线可靠度要求的同时, 有效降低了维护成本。

参 考 文 献

[1] TLILI L, RADHOU M, CHELBI A, et al. Generalized reliability models and preventive maintenance policy for systems subject to competing dependent failure processes[J]. IFAC-Papers On Line, 2015, 48(3): 2164-2169.

[2] BRIS R, CHÂTELET E, YALAOUI F. New method to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel

systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 82(3): 247-255.

[3] VILARINHO S, LOPES I, OLIVEIRA J A. Preventive maintenance decisions through maintenance optimization models: a case study[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 1170-1177.

[4] LI D, ZHANG Z, ZHONG Q, et al. Performance deterioration modeling and optimal preventive maintenance strategy under scheduled servicing subject to mission time[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(4): 821-828.

[5] 肖雷. 基于剩余寿命预测信息和生产调度的关键传动部件维护决策优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

XIAO Lei. Research on optimization of maintenance decision of key transmission parts based on residual life prediction information and production scheduling [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[6] 李有堂, 刘建松, 李晶. 基于产品检测的串联多设备预防性维护策略[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(1): 34-37.

LI Youtang, LIU Jiansong, LI Jing. Preventive maintenance strategy of series multi-device based on product detection[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(1): 34-37.

[7] SIDIBE I, KATHAB A, ADJALLAH K. Reliability and preventive maintenance analysis of Weibull distributed lifetime systems[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(7): 306-311.

[8] CANIZO M, ONIEVA E, CONDE A, et al. Real-time predictive maintenance for wind turbines using big data frameworks[C]//2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). IEEE, 2017: 70-77.

[9] SOBRAL J, SOARES C G. Preventive maintenance of critical assets based on degradation mechanisms and failure forecast[J]. IFAC-Papers On Line, 2016, 49(28): 97-102.

[10] 王灵芝, 徐宇工, 张家栋. 基于设备有效度和可靠度的预防修经济优化模型[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 167-172.

WANG Lingzhi, XU Yugong, ZHANG Jiadong. Economic optimization model of preventive maintenance based on equipment effectiveness and reliability [J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(4): 167-172.

[11] 袁锴. 基于延迟时间模型的不完备检查间隔计算方法

- 研究[J]. 科技展望, 2016, 26(19): 126-127.
- YUAN Kai. Research on calculation method of incomplete inspection interval based on delay time model [J]. Science and Technology Outlook, 2016, 26(19): 126-127.
- [12] 张民悦, 李丹丹. 基于混合故障率的并联系统预防维修优化及其仿真[J]. 四川理工学院学报, 2014, 27(2): 87-90.
- ZHANG Minyue, LI Dandan. Preventive maintenance optimization and simulation of parallel system based on mixed failure rate[J]. Journal of Sichuan University of Science and Technology, 2014, 27(2): 87-90.
- [13] NOORTWIJK J M V. A survey of the application of gamma processes in maintenance[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(1): 2-21.
- [14] HUANG C, WANG P, PANG W, et al. The performance analysis of multi-hop MIMO free space optical communications with space-time block codes over exponentiated Weibull fading channels[J]. Optics Communications, 2019, 442: 95-100.
- [15] YANG Q, YANG Q, YAN W, et al. PSO based LS-SVM approach for fault prediction of primary air fan[C]//2015 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2015: 75-80.
- [16] WANG J, KUMBASAR T. Parameter optimization of interval type-2 fuzzy neural networks based on PSO and BBBC methods[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2019, 6(1): 250-260.
- [17] LU X, WANG W, YANG H, et al. Optimizing the periodic inspection interval for a 1 out of 2 cold standby system using the delay - time concept[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2012, 28(6): 648-662.
- [18] Van OOSTEROM C D, ELWANY A H, ÇELEBI D, et al. Optimal policies for a delay time model with postponed replacement[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 232(1): 186-197.
- [19] 夏唐斌, 奚立峰, 周晓军, 等. 串并联衰退系统的多目标预防性维护优化建模[J]. 计算机集成制造, 2010, 16(4): 783-788.
- XIA Tangbin, XI Lifeng, ZHOU Xiaojun, et al. Multi objective preventive maintenance optimization modeling of series parallel recession system [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16 (4): 783-788.
- [20] ZHOU X, LU Z, XI L. Preventive maintenance optimization for a multi-component system under changing job shop schedule[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 101: 14-20.
-
- 作者简介: 沈南燕, 女, 1982 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能制造与机器人技术。
E-mail: shny@shu.edu.cn
- 李静(通信作者), 女, 1982 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进制造装备及磨削技术。
E-mail: ian1982@shu.edu.cn