

基于可靠性的 PDS 系统执行机构预测维修模型

孙 浩 高 鑫 刘爱萍

(中国石油兰州石化公司)

摘 要: 针对当前 UNIPOL 气相法聚乙烯装置中产品排料系统 (Product Discharge System, PDS) 出料阀执行机构故障检修及过度检修的现象, 基于设备及其零部件的最小可靠度, 借助威布尔分布建立了以零部件最小可靠度为检修依据的预防性维修模型, 利用对最小可靠度设备进行整体更换及局部修复, 实现了 PDS 系统出料阀门执行机构的预测检修。

关键词: PDS 系统; 执行机构; 可靠性分析; MATLAB; 预测检修

1 引 言

兰州石化公司 30 万吨 / 年全密度聚乙烯装置引用美国 UNIVATION 公司的 UNIPOL 气相法聚乙烯专利技术。精制后的乙烯、共聚单体、氢气等原料进入聚合反应器, 在高效齐格勒-纳塔型催化剂的作用下生成聚乙烯树脂粉料, 由 PDS 系统排出反应器, 经脱气回收后送入挤压造粒系统造粒成型, 最终由风送系统送至成品料仓等待包装^[1]。对于整个装置而言, PDS 系统是维持物料平衡的关键单元, 一旦其发生故障将导致装置降负荷生产或被迫停车。

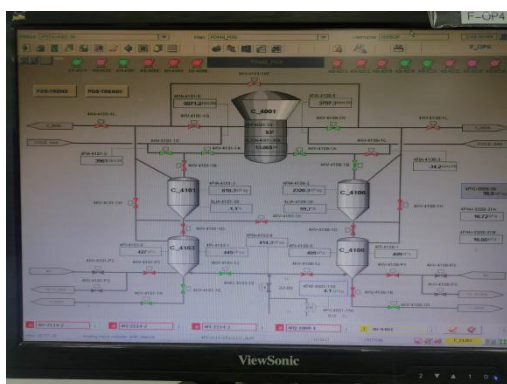


图 1 DCS 操作画面上 PDS 系统

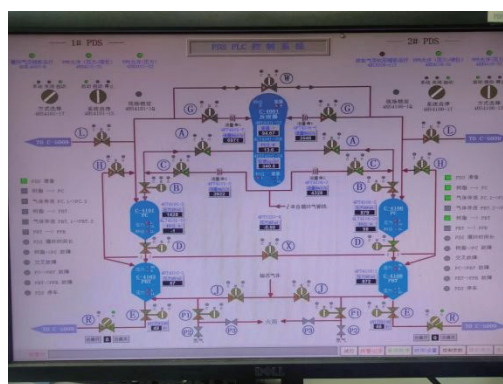


图 2 PLC 控制的 PDS 系统画面

PDS 系统共设有两条出料线并直接与反应器相连, 生成的聚乙烯树脂粉料通过交替动作的气动控制阀门被送至后系统。

经统计, 自装置 2006 年开车以来, 由气动阀门的执行机构失效导致的 PDS 系统故障率高达 98.2%。由此可见, 对执行机构进行储备及计划检修工作对 PDS 系统的长周期运行具有重大意义^[2]。当前装置对执行机构备台进行了储备, 平时对备用执行机构的所有往复件和密封件进行更换, 当在用机构出现故障时方便直接对其进行更换。上述检修模式有效地降低了故障检修时间, 然而对于 PDS 系统而言仍属于故障检修, 将造成一定的减产损失; 与此同时, 对每次故障执行机构内构件进

行整体更换会造成过度检修，从而产生不必要的备件费用^[3]。

2 基于实际生产的模型构想

根据执行机构的结构形式，文章将基于 PDS 系统的可靠性建立执行机构预测维修模型，有效降低执行机构故障因生产负荷调整造成的产量损失及频繁更换备件产生的备件费用。

2.1 假设条件

为保证装置顺利完成生产任务，窗口检修时间较短且维保人员施工力量不足，因此无法对 PDS 系统内所有执行机构进行检修，为保证模型的准确性，现提出以下假设：

PDS 系统在相邻的大修间进行 PM 活动的时间为 $[0, T]$ ，可将其分为 n 等份 ($n \in \mathbb{N}$)，每份长度设为 ΔT ，可以得出： $(q=1, 2, 3 \dots n)$ ， $T_n=T$ ，设 T_q 为任意时间段 $(T_q, T_{q+1}]$ ，如图 2 所示。

PDS 系统内所有执行机构的 M 个零部件在 0 时刻（装置停工大修后）均为全新状态。各零部件间的故障分布相互独立且服从威布尔分布。

对达到最低可靠度的零部件进行更换及修复；对未达到最低可靠度的零部件进行视情维修。在 ΔT 内对某零部件进行更换或修复时，可对未达到其最低可靠度的零部件进行保养，从而实现多台机构中多个零部件的 PM 工作。

相较于 PM 活动时间 T ，维护保养时间可忽略不计。

为降低 PM 造成的停产损失，零部件 i 在 T_q 触发零部件 j (i 不等于 j) PM 的时间段 $(t_q, \alpha \Delta T + t_q]$ ($\alpha \in \mathbb{N}$) 内可进行机会 PM 作业。

PDS 系统内各设备在装置生产过程中持续运行。

2.2 执行机构的 PM 工作

对于 PDS 系统的 PM 工作主要有 3 种类型：更换 (PM1) 修复 (PM2) 和保养 (PM3)。在 PDS 系统中，PM1 是直接使用新执行机构对在用执行机构进行更换，更换原因通常是执行机构已无法修复或使用更先进的机构；PM2 一般包括对执行机构进行修复或更换其内部的零部件（如弹簧、密封圈等）。PM3 只是对设备的运行环境进行改善，主要包括：除尘、调节以及润滑等；用 $X(i, T_q)$ 来表示零部件 i 在 T_q 采取的 PM 方式，PM1、PM2、PM3 和不进行 PM 时的取值分别为 1、2、3 和 0。

2.3 基于最小可靠度的执行机构检维修模型

执行机构 S 在 $[0, T]$ 内的 PM 过程如图 3 所示，用 $sg(i, T_q)$ 来标记 T_q 内零部件 i 是否需要 PM1 或 PM2，用 $V(T_q)$ 来标记 T_q 需要进行 PM1 或 PM2 的零部件总数，用 $op(i, T_q)$ 来标记 T_q 内是否需要零部件 i 进行机会 PM1 或 PM2，分别为：

$$sg(i, T_q) = \begin{cases} 1, & R(i, T_{q+1}) \geq R_{min}(i) \\ 0, & R(i, T_{q+1}) < R_{min}(i) \end{cases} \quad (1)$$

$$V(T_q) = \sum_{i=1}^M sg(i, T_q) \quad (2)$$

$$op(i, T_q) = \begin{cases} 1, & R(i, T_{q+1}) \geq R_{min}(i) \\ 0, & R(i, T_{q+1}) < R_{min}(i) \end{cases} \quad (3)$$

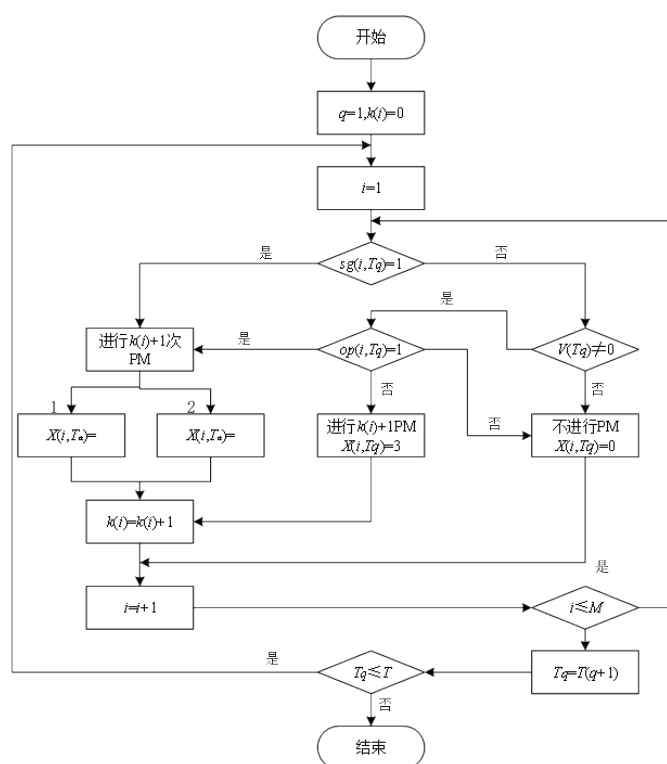


图 3 基于最小可靠度的检修模型

经 PM 后，某执行机构的可靠性如下：

- ① 通过修复或更换，PDS 系统中故障执行机构得以修复；
- ② 经任意 PM，使 PDS 系统内未失效的执行机构性能得到改善、寿命得以增加。

在 PM 之后，PDS 系统某台执行机构在时刻 t 的可靠度为：

$$R(j, t) = \sum_{i=1}^n R_s(i, k(i)) R_{p_{i, k(i)}}(t) \quad (4)$$

式中， $R_s(i, k(i))$ 为零部件 i 经第 $k(i)$ 次 PM 后得以修复的初始可靠度； $R_{p_{i, k(i)}}(t)$ 为零部件 i 在第 $k(i)$ 次 PM 后未失效零件的可靠度。若零部件 i 在时间段 T_s 进行了第 $k(i)$ 次 PM，则有： $t_x(i, k(i)+1)=T_s$ ， $R_s(i, k(i))=R(i, t_{s+})$ ；若零部件 i 在时间段进行了第 $k(i)+1$ 次预防性维修，则有： $t_x(i, k(i)+1)=T_z$ 。相对于 ΔT 很小，在 ΔT 的可靠度变化很小， $R_f(i, k(i)) \approx R(i, t_z-)$ 。根据零部件 i 第 $k(i)$ 次进行的 PM 类型，PDS 系统内设备的可靠度变化如下 ($t \in (t_s, t_z)$)：

- (1) 更换。经过更换后，从时刻开始，设备完成更新且可靠度为 1。
- (2) 修复。零部件 i 得到修复后，设备从时刻开始，失效零件得到修复，未失效的零件性能得到改善。
- (3) 保养。对零部件 i 进行保养后，从时刻开始，设备的运行性能得到了一定改善。

3 基于可靠性的模型建立

为更好地保障模型的准确性，需对 PDS 系统执行机构的不同零部件运行过程及故障类型进行分析。结合 PDS 系统的实际工作情况及历史检修数据，可得出表 1^[4]。

表 1 PDS 系统执行机构各零部件故障形式

序号	设备分类	零部件名称	零部件功能	故障发生初期能否被观测	备注
1	执行机构	执行机构壳体	连接球阀，盛装其他零部件	否	可通过执行机构动作的快慢及现场巡检中发现
		执行机构往复件	气源作用于往复件上实现球阀的启闭	否	
		传动零部件密封	密封气源，保障传动时的作用力	是	
		静密封	防止气源外漏以及外部污物进入机构	是	

3.1 执行机构的威布尔分布模型

PDS 系统内执行机构密封件及执行机构往复零部件在实际运行过程中长期承受交变载荷，容易因疲劳损伤而导致设备故障，因此可采用威布尔分布。其中，二参数威布尔分布的密度函数为：

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (5)$$

分布函数为：

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中， α 为形状参数， β 为尺度参数。

代入三种 PM 模式，则有：

(1) 整体更换。更换后设备成为全新状态，执行机构可靠度取决于具有最小可靠度的零部件，有：

$$R_S(i, k(i)) = R_{fmin}(i) \quad (7)$$

$$R_{p,i,k(i)}(t) = e^{-\left(\frac{t-t_S}{\eta(i)}\right)^{\beta(i)}} \quad (8)$$

(2) 设备修复。更换的零部件得到更新，未更换零部件可靠度保持不变， T 为检修间隔，则：

$$R_S(i, k(i)) = R_{fmin}(i) \quad (9)$$

$$R_{p,i,k(i)}(t) = e^{-\left(\frac{t-(T+t_S)}{\eta(i)}\right)^{\beta(i)}} \quad (10)$$

(3) 日常保养。保养未对零部件进行更换及检修，零部件可靠度均保持不变，则：

$$R_{p,i,k(i)}(t) = e^{-\left(\frac{t-t_S}{\eta(i)}\right)^{\beta(i)}} \quad (11)$$

由上述各式可知：服从威布尔分布的零部件 i 在的可靠度为：

$$R(i, t) = e^{-\left(\frac{t-nT-t_S}{\eta(i)}\right)^{\beta(i)}} \quad (12)$$

3.2 往复零部件的可靠性寿命

为实现基于 PDS 系统出料阀门执行机构运行可靠性的预测检修工作，本章将结合执行机构往复件出厂性能参数及其运行过程中的实际受力情况，计算其初始可靠度。为提高模型计算的准确程度，须提前进行如下假设：

因装置近期所生产的铬系及茂金属牌号生产时间有限且数据不充分，本文所整理的应力参数为装置生产钛系牌号产品时的相关数据。

执行机构各零部件出厂强度及所产生的应力基本服从正态分布。

当应力 S 和强度均呈正态分布时，随机变量的概率密度函数可分别表示为：

$$f(S) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S-\mu_s}{\sigma_s}\right)^2\right] \cdots \cdots (-\infty < S < \infty) \quad (13)$$

$$g(\delta) = \frac{1}{\sigma_\delta \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta-\mu_\delta}{\sigma_\delta}\right)^2\right] \cdots \cdots (-\infty < \delta < \infty) \quad (14)$$

式中，与分别表示应力 S 及强度的均值和标准差。

令，则根据前述公式可知，随机变量 y 也是正态分布的，且其均值与标准差分别为：

$$\mu_y = \mu_\delta - \mu_s \quad (15)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_\delta^2} \quad (16)$$

而随机变量 y 的概率密度函数则为：

$$h(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdots \cdots (-\infty < \delta < \infty) \quad (17)$$

当或时产品可靠，故可靠度 R 可表达为：

$$R = P(y > 0) = \int_0^\infty h(y) dy = \int_0^\infty \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right] dy \quad (18)$$

令，则：，当时， z 的下限为：

$$z_0 = \frac{0-\mu_y}{\sigma_y} = -\frac{\mu_\delta-\mu_s}{\sqrt{\sigma_\delta^2+\sigma_s^2}} \quad (19)$$

当时， z 的上限也是，即，将上述关系代入式，得：

$$R = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\mu_\delta-\mu_s}{\sqrt{\sigma_\delta^2+\sigma_s^2}}}^\infty \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\mu_y}{\sigma_y}}^\infty \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz \quad (20)$$

显然，随机变量是标准正态分布变量，而上式所表达的可靠度 R 则可通过查阅标准正态分布表的分布函数值求得，如下式所示：

$$R = 1 - \Phi(z) = 1 - \Phi\left(-\frac{\mu_\delta-\mu_s}{\sqrt{\sigma_\delta^2+\sigma_s^2}}\right) = \Phi\left(\frac{\mu_\delta-\mu_s}{\sqrt{\sigma_\delta^2+\sigma_s^2}}\right) = \Phi(z_R) \quad (21)$$

基于 MATLAB 软件，得到执行机构往复件的初始可靠度如表 2 所示^[5]。

表 2 执行机构往复件初始可靠度计算

设备位号	零部件名称	初始可靠度	备注
A/B/E/H/G 阀	活塞杆	0.9998	
	小连杆	0.9995	
	滑动销	0.9999	
	哈弗卡环	0.9997	
	密封件	0.9994	
C/J 阀	驱动弹簧	0.9996	
	活塞盘	0.9996	
	传动轴	0.9998	
	密封件	0.9994	
D 阀	执行机构	0.9823	未对其内部零部件进行过更换

3.3 PDS 系统及执行机构可靠性分析

为使模型更加符合实际装置实际生产情况并得到有效简化，本文对选取了日常生产中对 PDS 系统运行影响较大的几组执行机构。因 PDS 系统有两条出料线，当单线出料时，下文所述的任意一台出料阀故障都将导致该套系统停车。根据 PDS 系统的实际运行特点，结合系统可靠性分配原理可选择等分配法，等效图如下所示：

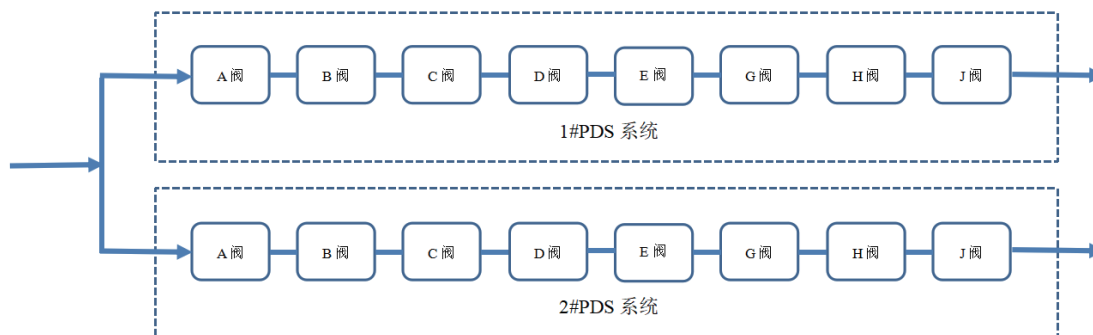


图 4 PDS 系统等效模型

由图 4 可得出：

$$R_1 = R_2 \quad (22)$$

$$R_2 = 1 - R_1 \quad (23)$$

$$R_{1A} = R_{1B} = R_{1C} = R_{1D} = R_{1E} = R_{1G} = R_{1H} = R_{1J} = \sqrt[8]{1 - R_1} \quad (24)$$

$$R_{2A} = R_{2B} = R_{2C} = R_{2D} = R_{2E} = R_{2G} = R_{2H} = R_{2J} = \sqrt[8]{1 - R_1} \quad (25)$$

由此，可得出每台执行机构的最小允许可靠度为 0.9170，为保证 PDS 系统的可靠性运行，取执行机构往复零部件最小可靠度为 92%。对于执行机构而言，其内部零部件相互配合，一个零部件失效将导致整个执行机构发生故障。因此，执行机构内零部件为串联逻辑。因执行机构密封件发生失效时，仍可继续正常使用一段时间，为兼顾设备运行的经济性，有：

对于 A/B/E/H/G 阀：

$$R_{活} = R_{小} = R_{滑} = R_{哈} > R_{密} \quad (26)$$

对于 C/J 阀：

$$R_{驱} = R_{活} = R_{传} > R_{密} \quad (27)$$

初始可靠度由零部件出厂参数由 MATLAB 软件计算得出，最小可靠度由系统可靠性再分配法求得。其中，因 D 阀执行机构为扇形结构，当前检修力量无法实现对其进行解体检修，因此需返厂进行检修工作，其最小可靠度降至 92% 时即进行拆除同时返厂修复。

表 3 执行机构往复件最小可靠度确定

设备位号	零部件名称	初始可靠度	最小可靠度	备注
A/B/E/H/G 阀	活塞杆	0.9998	0.9869	
	小连杆	0.9995	0.9869	
	滑动销	0.9999	0.9869	
	哈弗卡环	0.9997	0.9869	
	密封件	0.9994	0.97	最小可靠度为经验值
C/J 阀	驱动弹簧	0.9996	0.9826	
	活塞盘	0.9996	0.9826	
	传动轴	0.9998	0.9826	
	密封件	0.9994	0.97	最小可靠度为经验值
D 阀	执行机构	0.9823	0.95	整体返厂检修

4 优化后检维修模型费用核算

为了验证基于可靠性对 PDS 系统执行机构建立的预测维修模型是否有效，结合建立模型后 PDS 系统执行机构的实际运行情况，本文从延长检修周期提高备件使用率以及降低工艺成本和产量损失等两个方面对经济效益进行核算。

4.1 检修周期确定及节约费用计算

结合上文对于威布尔模型的建立，可得执行机构最小可靠性寿命为：

$$t_R = \gamma + \eta \left(\ln \left(\frac{1}{p} \right) \right)^{\frac{1}{m}} \quad (28)$$

将初始可靠度及最小可靠度代入 MATLAB 进行计算，具体检修周期如表 4 所述 [6]。

表 4 执行机构检修周期

设备位号	失效部位	实际可使用周期（结合最小可靠度模型计算出的最长使用周期）	计划检修周期	机构形式	备注
A 阀	执行机构	9.4 个月	6 个月	双作用活塞气缸	根据最小使用时间的零部件确定执行机构的使用周期。对于时间间隔不大的零部件，为降低检修次数适当进行了调整
B 阀	执行机构	9.4 个月	6 个月	双作用活塞气缸	
C 阀	执行机构	38.2 个月（一个大检修周期）	18 个月	单作用活塞气缸（无曲轴）	
D 阀	执行机构	45.4 个月（一个大检修周期）	12 个月	扇形机构	
E 阀	执行机构	8.5 个月	3 个月	单作用活塞气缸（有曲轴）	
G 阀	执行机构	7.8 个月	6 个月	双作用活塞气缸	
H 阀	执行机构	40.3 个月（一个大检修周期）	18 个月	双作用活塞气缸	
J 阀	执行机构	12.2 个月	6 个月	单作用活塞气缸（无曲轴）	

如上表所示，对于预测检修节省备件费用可利用下式进行计算：

$$C = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{t_{Ri}}{T_i} \right) \times C_{mi} \quad (30)$$

式中，为利用预测检修节省的备件总费用；n 为执行机构备件的个数；为执行机构的计划检修周期；为执行机构的预测检修周期；为单台执行机构的检修费用。

4.2 工艺成本损耗费用

每当 PDS 系统执行机构发生突发性故障时，装置聚合反应单元都需要进行降负荷操作，在此期间将导致反应器内的大量气相损失同时使得单位时间生产的聚乙烯产品变少，造成较大的经济损失。按照机构的故障模式，计算式有如下几种情况：

(1) 每次均为单台机构发生故障（不包括 W 阀及 X 阀）：

$$C_1 = n \times [(P_n - P_a) \times (t_m + t_c) \times C_p + C_g] \quad (31)$$

(2) 每次单套 PDS 系统多台机构发生故障:

$$C_2 = n \times [(P_n - P_a) \times (t_m + t_c) \times C_p + C_g] \quad (32)$$

(3) 每次两套 PDS 系统多台机构发生故障:

$$C_3 = n \times (P_n \times (t_m + t'_c) \times C_p + C'_g) \quad (33)$$

因此出料执行机构发生突发性故障时所产生工艺成本损耗费用的期望值为:

$$C = p_1 \times C_1 + p_2 \times C_2 + p_3 \times C_3 \quad (34)$$

式中:

C: 执行机构出现突发性故障时的经济损失;

n: 执行机构发生突发性故障的次数;

P_n: 装置正常运行时的生产负荷;

P_a: 装置因执行机构故障而被迫维持的生产负荷;

t_m: 单台执行机构从出现故障到复位的时间;

t_c: 降低及提升负荷所使用的时间;

t'_c: 反应系统停车到正常生产时所使用的时间;

C_p: 生产出聚乙烯树脂的成本价;

C_g: 单台执行机构故障产生气相损失造成的经济损失

C'_g: 反应系统停车到正常生产时所产生的的气相损失;

P₁: 每次单台执行机构发生故障的概率;

P₂: 每次单套 PDS 系统多台执行机构发生故障的概率;

P₃: 每次两套 PDS 系统多台执行机构发生故障的概率。

4.3 优化后检维修模型费用核算

为了更加真实地反映优化检维修模型后 PDS 系统所节约的费用, 本文以最容易发生故障的几台机构为算例进行计算。

由 L 公司的体制可知, 其所有员工均为正式员工且人员数量充足, 故在费用核算这一节内不做讨论。因此, 优化检维修后节约的费用主要包括:

(1) 确定最佳检修周期避免事后检修及过度检修:

$$C_a = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{t_{ri}}{t}\right) \times C_{mi} \quad (35)$$

(2) 降低工艺成本损耗费用

$$C_b = p_1 \times C_1 + p_2 \times C_2 + p_3 \times C_3 \quad (36)$$

结合 L 公司 PDS 系统内设备历年检修数据, 得出表 5:

表 5 PDS 系统出料执行机构失效概率

单台执行机构发生故障的概率 p1	单套 PDS 系统多台执行机构发生故障的概率 p2	两套 PDS 系统多台执行机构发生故障的概率 p3	备注
0.101	0.008	0.0085	每年

总节约费用为：

$$C = C_a + C_b \quad (37)$$

经核算，通过对 PDS 系统出料执行机构的检维修策略进行优化，当年节约各项费用总计 328.422 万元。优化后的检维修模型不仅实现了 PDS 系统的长周期稳定运行，也实现了企业的提质增效并由此验证了 PDS 系统出料阀门检维修策略的有效性。

5 结 论

(1) 本文结合 PDS 系统的实际运行情况，建立了执行机构往复件的威布尔分布模型，梳理了历史检修记录，确定了出料阀门执行机构的最低可靠度，给出了 PDS 系统出料阀门零部件的更换依据，为 PDS 系统的预测检修工作奠定了理论基础。

(2) 确定了执行机构的最佳检修周期，从避免过度检修、优化备件选商、减少工艺成本损耗等方面，计算了检维修优化模型所节约的费用，验证了本文所提出的 PDS 系统检维修策略的可靠性、准确性以及有效性，为同类装置 PDS 系统的维修管理提供了理论支持。

参考文献

- [1] 许鸿善，李沛祺，席卓妮，李凯青．甘肃省石化行业智能制造发展现状及对策建议 [J]．北方经济，2022，12：50-53.
- [2] 唐悦影．浅谈如何提升石油化工设备运行可靠性 [J]．工业技术，2014，06：50-51.
- [3] 马金欣，金政伟，李磊，袁炜，刘艳丽．Unipol 聚乙烯工艺技术国内开发与应用进展 [J]．现代塑料加工应用，2020，32(6)：56-59.
- [4] 袁德喜，刘婷，许云民，等．浅谈 PDS 控制阀的损坏情况分析 [J]．仪器仪表用户，2023，1：96-100.
- [5] 童愚，基于 RCM 理论的工业设备维修策略和维修管理系统研究 [D]．杭州：浙江大学，2007.
- [6] 黄勇，王凯全．基于 RCM 和 RBI 的设备寿命周期管理与应用 [J]．工业安全与环保，2018，34(10)：