

文章编号:1671-6833(2009)02-0098-05

具有不可靠缓冲区的混杂生产线系统性能研究

刘 军, 刘 杰, 王胜强, 冯瑞成

(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 在文献[7]基础上,将不可靠缓冲区引入到不可靠双设备生产线系统中,在离散模型的基础上,系统分析了系统状态概率的变迁情况.采用文献[7]研究方法,猜想系统内部状态概率的形式,代入到内部状态方程,得到满足内部状态方程的解.如果猜想正确,那么必能找到这组解的一个线性组合满足边界条件.通过对系统设备、缓冲区等相关状态概率的处理,降低了问题的求解阶次,探讨并发展了一种评价其系统性能近似解析方法,给出了其研究算法.仿真结果证明了该方法的有效性.

关键词: 混杂系统;离散模型;不可靠缓冲区;多故障模式

中图分类号: TP 271 **文献标识码:** A

0 引言

众所周知,一个生产线系统一般来说都是混杂系统^[1].在这种系统中一般都广泛存在连续过程和离散事件.同时,不确定性以及随机扰动事件都是不可避免的,例如,订单的到达、设备的损坏等.所有这些都给生产系统的控制及分析带来了相当大的难度.早在20世纪50年代,生产线系统因为它的经济和学术价值,众多学者就开始了使用解析方法来对其进行建模、分析.对生产线的性能进行研究时,根据精益生产的应用需求,一般学者都只考虑两个指标:生产率与缓冲区平均盈余水平.对由不可靠双设备及可靠缓冲区组成的生产线系统,针对相似型、不相似型、同步、异步等多种模型,在依靠操作型故障、依靠时间型故障等不同的假设下,很多学者都得到了相关生产线性能分析的解析解.虽然越来越多的工作集中在研究超过两台设备的生产线上^[2-6],但对多故障模式的双设备生产线系统研究不多.缓冲区也是影响生产线系统性能的重要因素.缓冲区通过临时存储工件,使生产线上的其他设备连续生产而不受设备故障影响以及长时间处于加工状态的设备影响,提高了系统的生产力.但缓冲区和系统中的其他机械装置一样也可能出现故障.如果考虑缓冲

区可能发生故障的情况,问题就变得更加复杂.

受文献[7]的启发,笔者将不可靠缓冲区引入到不可靠双设备生产线系统中,在离散模型的基础上,发展了一种评价其性能的解析方法.

1 模型假设及系统的性能指标

1.1 模型假设

图1为一典型的双设备生产线系统.物料到达第一台设备进行加工,进入缓冲区,再进入第二台设备加工,最后退出生产线.设第一台设备不存在“饥饿”现象,第二台设备不存在“阻塞”现象.

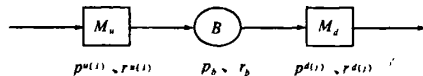


图1 双设备生产线系统

Fig.1 Two-machine Line

模型假设:

- (1) 设备 M_u 或 M_d 存在故障模式: $u(i)$, $d(j)$ ($i, j = 1, 2$);
- (2) 设备不能同时发生一种以上的故障,一旦发生故障,那么在其修好之前设备不会再发生其他故障,设备的故障为依靠操作型故障;
- (3) 设备未发生故障、处于故障模式 $u(1)$, $d(1)$ 和 $u(2)$, $d(2)$ 时, M_u 或 M_d 的生产率分别为: $\gamma_u, \gamma_d; \gamma'_u, \gamma'_d$ 和 γ''_u, γ''_d ;

收稿日期:2008-10-14;修订日期:2009-01-13

基金项目:国家科技部攻关计划资助项目(06C26216201853);甘肃省教育厅导师项目(0703-06);甘肃省自然科学基金项目(2007GS04072).

作者简介:刘 军(1974-),男,甘肃礼县人,兰州理工大学副教授,博士,主要研究方向为混杂系统、生产调度与控制, E-mail: liuj@lut.cn.

(4) 设备 M_u 或 M_d 的故障率和维修率分别为 $p^{u(i)}, r^{u(i)}$ 或 $p^{d(j)}, r^{d(j)}$, 均服从几何分布. 设备的总故障率 $p^u = p^{u(1)} + p^{u(2)}, p^d = p^{d(1)} + p^{d(2)}$;

(5) $p_b (p_b < 1)$ 和 $r_b (r_b < 1)$ 分别为缓冲区的故障率和维修率, 且服从几何分布. 缓冲区的故障也为依靠操作型故障, 其容量为 N .

1.2 系统的性能指标

系统在 t 时刻的状态可由 $s(t) = (n, \alpha_u(t), \alpha_d(t), \alpha_b(t))$ 表示. $n (0 \leq n \leq N)$ 为整数, 表示缓冲区中待加工零件的个数; $\alpha_k (k = u, d)$ 表示相应设备 M_u 或 M_d 的状态, $\alpha_k = 1 (k = u, d)$ 表示设备处于正常工作状态, 否则 $\alpha_k = u(1)$ 或 $d(1)$ 或 $\alpha_k = u(2)$ 或 $d(2)$. $\alpha_b \in \{0, 1\}$ 表示缓冲区工作状态. $\alpha_b = 1$ 表示缓冲区处于正常工作状态; $\alpha_b = 0$ 表示缓冲区发生故障, 不能接收或发送零件. 设 P_u, P_d 分别表示设备 M_u, M_d 的平均输出, 则:

$$P_u = \gamma_u \text{prob}(\alpha_u = 1, n < N \text{ and } \alpha_b = 1) + \gamma_u \text{prob}(\alpha_u = u(1), n < N \text{ and } \alpha_b = 1) + \gamma_u \text{prob}(\alpha_u = u(2), n < N \text{ and } \alpha_b = 1) = \gamma_u \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{s=1, d(1), d(2)} p(n, 1, s, 1) + \gamma'_u \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{s=1, d(1), d(2)} p(n, u(1), s, 1) + \gamma''_u \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{s=1, d(1), d(2)} p(n, u(2), s, 1) \quad (1)$$

$$P_d = \gamma_d \text{prob}(\alpha_d = 1, n > 0 \text{ and } \alpha_b = 1) + \gamma'_d \text{prob}(\alpha_d = d(1), n > 0 \text{ and } \alpha_b = 1) + \gamma''_d \text{prob}(\alpha_d = d(2), n > 0 \text{ and } \alpha_b = 1) = \gamma_d \sum_{n=1}^N \sum_{t=1, u(1), u(2)} p(n, t, 1, 1) + \gamma'_d \sum_{n=1}^N \sum_{t=1, u(1), u(2)} p(n, t, d(1), 1) + \gamma''_d \sum_{n=1}^N \sum_{t=1, u(1), u(2)} p(n, t, d(2), 1) \quad (2)$$

由于设备不会造成被加工零件的损坏也不会拒绝加工某一个零件. 因此, $P_u = P_d$.

缓冲区的平均盈余水平为:

$$\bar{n} = \sum_{n=1}^N n \sum_{\substack{\alpha_u=1, u(1), u(2) \\ \alpha_d=1, d(1), d(2) \\ \alpha_b=0, 1}} p(n, \alpha_u, \alpha_d, \alpha_b) \quad (3)$$

2 求解

2.1 临时状态

临时状态的概率为零, 它不对系统的性能产生影响. 根据模型假设, 以下状态都是临时状态:

$(n, u(i), d(j), 0) (0 \leq n \leq N), (0, 1, 1, 1), (0, 1, d(j), 0), (0, u(i), 1, 0), (0, u(i), d(j), 1), (0, 1, d(j), 1), (0, 1, 1, 0), (1, 1, d(j), 1), (1, 1, d(j), 0), (N, u(i), d(j), 1), (N, u(i), 1, 0), (N, u(i), 1, 1), (N, 1, 1, 0), (N, 1, 1, 1), (N, 1, d(j), 0), (N-1, u(i), 1, 0), (N-1, u(i), 1, 1)$

2.2 内部状态

内部状态是指缓冲区处于 $2 \leq n \leq N-2$ 的状态, 其状态转移图如图 2 所示. 由于缓冲区中零件数从一个时间段到下一个时间段内只能增加或减少一个零件. 因此, 根据图 2 可以列出有关系统内部状态概率关系等式:

$$p(n, u(i), d(j), 1) = p^{u(i)} p^{d(j)} (1 - p_b) p(n, 1, 1, 1) + (1 - r^{u(i)}) (1 - r^{d(j)}) p(n, u(i), d(j), 1) + (1 - r^{u(i)}) p^{d(j)} (1 - p_b) p(n, u(i), 1, 1) + p^{u(i)} (1 - r^{d(j)}) (1 - p_b) p(n, 1, d(j), 1) \quad (4)$$

$$p(n, 1, 1, 1) = \sum_{i=1}^2 r^{u(i)} r_b p(n, u(i), 1, 0) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 r^{u(i)} r^{d(j)} p(n, u(i), d(j), 1) + \sum_{i=1}^2 r^{u(i)} (1 - p^d) (1 - p_b) p(n, u(i), 1, 1) + \sum_{j=1}^2 (1 - p^u) r^{d(j)} (1 - p_b) p(n, 1, d(j), 1) + \sum_{j=1}^2 r^{d(j)} r_b p(n, 1, d(j), 0) + r_b p(n, 1, 1, 0) + (1 - p^u) (1 - p^d) (1 - p_b) p(n, 1, 1, 1) \quad (5)$$

$$p(n, 1, d(j), 1) = (1 - r^{d(j)}) r_b p(n-1, 1, d(j), 0) + \sum_{i=1}^2 r^{u(i)} (1 - r^{d(j)}) p(n-1, u(i), d(j), 1) + \sum_{i=1}^2 r^{u(i)} p^{d(j)} (1 - p_b) p(n-1, u(i), 1, 1) + (1 - p^u) (1 - r^{d(j)}) (1 - p_b) p(n-1, 1, d(j), 1) + (1 - p^u) p^{d(j)} (1 - p_b) p(n-1, 1, 1, 1) \quad (6)$$

受限制, 笔者仅列出了其中的 3 个. 由图 2 可知, 系统内部状态方程可表示为状态概率: $p(n, 1, 1, 1), p(n, u(i), 1, 1), p(n, 1, d(j), 1), p(n, u(i), d(j), 1)$ 之间的关系. 受文献[7]的启发, 设想系统的内部状态概率满足如下形式:

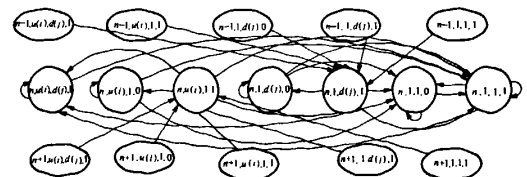


图 2 系统内部状态转移图

Fig. 2 Internal State Transitions

$$\begin{cases} p(n,1,1,1) = X^n; \\ p(n,u(i),1,1) = X^n U(i); \\ p(n,1,d(j),1) = X^n D(j); \\ p(n,u(i),d(j),1) = X^n U(i) D(j). \end{cases} \quad (7)$$

把式(7)代入式(4),经过变形,式(4)可写为:

$$\frac{1 - p_b(1 - r^{u(i)})(1 - r^{d(j)})}{1 - p_b} = \frac{U(i)(1 - r^{u(i)} + p^{u(i)})}{U(i)} \cdot \frac{D(j)(1 - r^{d(j)} + p^{d(j)})}{D(j)} \quad (8)$$

令 $M_{ij} = \frac{1 - p_b(1 - r^{u(i)})(1 - r^{d(j)})}{1 - p_b}$,

显然: $M_{ij} > 0$.

设 $\frac{U(i)(1 - r^{u(i)} + p^{u(i)})}{U(i)} = K_{ij} \sqrt{M_{ij}}$,

$$\frac{D(j)(1 - r^{d(j)} + p^{d(j)})}{D(j)} = \frac{\sqrt{M_{ij}}}{K_{ij}} \quad (9)$$

则 $U(i), D(j) (i, j = 1, 2)$ 可表示为 K_{ij} 的函数.

当 $i, j (i, j = 1, 2)$ 取不同数值时,有

$$K_{12} = K_{11} \frac{\sqrt{M_{11}}}{\sqrt{M_{12}}}; K_{21} = K_{11} \frac{\sqrt{M_{21}}}{\sqrt{M_{11}}} \quad (10)$$

把式(7)和式(9)、(10)代入经过变形后的式(5)、(6). 显然,式(5)是关于 K_{11} 的四次方程,不妨将其解依次记为 k_1, k_2, k_3, k_4 (均为实数). 与此相应的 $U(i), D(j), X (i = 1, 2; j = 1, 2)$ 的值依次记为: $U_{i,m}; D_{j,m}, X_m (i = 1, 2; j = 1, 2; m = 1, 2, 3, 4)$.

2.3 边界条件

边界条件是指缓冲区处于 $n = 0, 1$ 和 $n = N - 1, N$ 的状态. 同理,可以列出有关系系统边界状态概率关系等式. 受空间限制,此处略去状态转移图,仅列出了其中的两个状态转移方程.

$$\begin{aligned} p(1,1,1,1) &= \sum_{i=1}^2 r^{u(i)} p(0,u(i),1,1) + \\ &\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 r^{u(i)} r^{d(j)} p(1,u(i),d(j),1) + \\ &\sum_{i=1}^2 r^{u(i)} r_b p(1,u(i),1,0) + r_b p(1,1,1,0) + \\ &\sum_{i=1}^2 r^{u(i)} (1 - p^D)(1 - p_b) p(1,u(i),1,1) + \\ &(1 - p^U)(1 - p^D)(1 - p_b) p(1,1,1,1) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} p(N-1,1,1,1) &= \sum_{j=1}^2 r^{d(j)} p(N,1,d(j),1) + \\ &\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 r^{u(i)} r^{d(j)} p(N-1,u(i),d(j),1) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^2 r^{d(j)} r_b p(N-1,1,d(j),0) + r_b p(N-1,1, \\ &1,0) + \sum_{j=1}^2 (1 - p^U) r^{d(j)} (1 - p_b) p(N-1, \\ &d(j),1) + (1 - p^U)(1 - p^D)(1 - p_b) p(N-1, \\ &1,1,1) \end{aligned} \quad (12)$$

状态方程(11)、(12)可以分别表示为边界状态概率: $p(1,u(i),d(j),1), p(1,u(i),1,1), p(1,1,1,1)$ 和 $p(N-1,u(i),d(j),1), p(N-1,1,d(j),1), p(N-1,1,1,1)$ 之间的关系.

如果猜想式(7)成立,那么必能找到一个关于内部状态方程解的线性组合满足系统的边界条件. 换句话说,内部状态概率必须满足如下形式:

$$\begin{cases} p(n,1,1,1) = \sum_{m=1}^4 C_m X_m^n \\ p(n,u(i),1,1) = \sum_{m=1}^4 C_m X_m^n U_{i,m} \\ p(n,1,d(j),1) = \sum_{m=1}^4 C_m X_m^n D_{j,m} \\ p(n,u(i),d(j),1) = \sum_{m=1}^4 C_m X_m^n U_{i,m} D_{j,m} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $C_m (m = 1, 2, 3, 4)$ 为满足边界条件的未知数. 因此,可通过式(11)把边界状态概率表示成 C_1, \dots, C_m 的函数.

将边界状态概率和式(13)代入经过变形的等式(11)、(12)的状态方程,有:

$$\begin{aligned} \frac{p^D(1 - p_b)}{p^{d(j)}} \sum_{m=1}^4 C_m X_m \frac{D_{j,m}}{K_m} &= \\ \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{m=1}^4 r^{d(k)} C_m X_m U_{i,m} D_{k,m} + \\ \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^4 \frac{r^{u(i)} p_b + (1 - r^{u(i)}) p_b r_b}{1 - (1 - r^{u(i)})(1 - r_b)} C_m X_m U_{i,m} + \\ \sum_{i=1}^2 \sum_{m=1}^4 (1 - p^D)(1 - p_b) C_m X_m U_{i,m} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{p^U(1 - p_b)}{p^{u(i)}} \sum_{m=1}^4 C_m X_m^{N-1} U_{i,m} K_m &= \\ \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^4 r^{u(k)} C_m X_m^{N-1} U_{k,m} D_{j,m} + \\ \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^4 \frac{r^{d(j)} p_b + (1 - r^{d(j)}) p_b r_b}{1 - (1 - r^{d(j)})(1 - r_b)} C_m X_m^{N-1} D_{j,m} + \\ \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^4 (1 - p^U)(1 - p_b) C_m X_m^{N-1} D_{j,m} \end{aligned} \quad (15)$$

同时,所有状态概率满足归一化条件. 两台设备加工的零件数相同:

$$\sum_{n=0}^N \sum_{x=1, u(1), u(2)} \sum_{y=1, d(1), d(2)} \sum_{z=0,1} p(n, x, y, z) = 1 \tag{16}$$

$$P_u = P_d \tag{17}$$

式(14) ~ (17) 是由 4 个未知数组成的 4 个线性无关的方程组, 解这个方程组可得到 $C_m (m = 1, 2, 3, 4)$, 求出系统的状态概率. 进而通过式(1) ~ (3) 求出系统的性能指标.

3 算法

(1) 把式(7) 和式(10)、(9) 代入经过变形的式(5)、(6), 求出式(5) 的解 k_1, k_2, k_3, k_4 (均为实数), 算出相应的 $U_{i,m}, D_{j,m}, X_m (i = 1, 2, j = 1, 2, m = 1, 2, 3, 4)$;

(2) 由式(14) ~ (17) 计算 $C_m (m = 1, 2, 3, 4)$, 同时计算系统的内部和边界状态概率;

(3) 由式(1) ~ (3) 计算系统的性能指标.

4 仿真研究

笔者以 MATLAB 作为仿真工具, 以系统的平均输出 P 和缓冲区平均盈余水平 \bar{n} 作为性能指标来检验这种算法的有效性. 表 1 列出了所讨论的 4 种情况, 缓冲区容量变化对 P, \bar{n} 的影响如图 3, 4 所示.

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation Parameters

	Case1	Case2	Case3	Case4
$p^{u(1)}$	0.051	0.051	0.051	0.051
$p^{u(2)}$	0.051	0.051	0.051	0.051
$r^{d(1)}$	0.310	0.310	0.310	0.310
$r^{d(2)}$	0.410	0.410	0.410	0.410
$p^{d(1)}$	0.041	0.041	0.051	0.051
$p^{d(2)}$	0.031	0.031	0.031	0.031
$r^{d(1)}$	0.610	0.610	0.610	0.610
$r^{d(2)}$	0.510	0.510	0.510	0.510
p_b	0.020	0.050	0.020	0.031
r_b	0.500	0.500	0.500	0.500
$\gamma_u = \gamma_d$	1.000	1.000	1.000	1.000
$\gamma'_u = \gamma'_d$	0.500	0.500	0.500	0.500
$\gamma''_u = \gamma''_d$	0	0	0	0

从图 3, 4 可以看出: 当缓冲区容量增大时, 生产线的生产效率、缓冲区平均盈余水平也在增大, 不过增大的幅度越来越小, 最后趋向于平稳. 另外, 由图 3 可见, 缓冲区的故障率增加时, 生产线的效率相应地降低, 这与实际情况是一致的, 缓冲区故障对生产线的影响, 相当于生产线上的一台设备发

生故障的情况. 由图 4 可见, 缓冲区故障率对平均盈余水平的影响也很大, 随着缓冲区故障率的增加, 系统的缓冲区平均盈余水平相应的会减小.

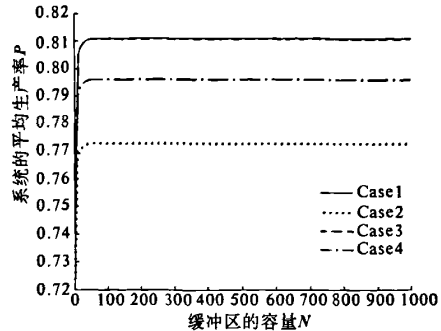


图 3 缓冲区的容量对生产率的影响

Fig. 3 Average throughput for different buffer level

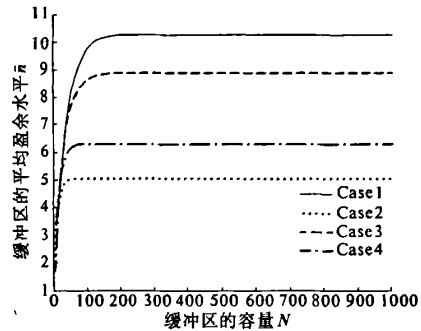


图 4 缓冲区的容量对平均盈余水平的影响

Fig. 4 Average buffer level for different buffer level

5 结束语

提供了一种研究具有多故障模式及不可靠缓冲区混杂生产线性能的解析方法. 在 Tolio 等^[7]对可靠缓冲区及多故障双设备混杂生产线研究的基础上, 将不可靠缓冲区引入其中, 在离散模型的基础上, 分析了系统状态概率的变迁情况, 给出了相应的求解方法及算法, 探讨并发展了一种评价多故障混杂生产线系统性能的近似解析方法. 仿真结果证明了该方法的有效性.

参考文献:

[1] ATHANS M. Challenge to control: a collective view, IEEE Trans [J]. Automatic Control, 1987, 32(4): 274 - 285.
 [2] DIAMANTIDIS A C, PAPAPOPOULOS C T, VIDALIS M I. Exact analysis of a discrete material three - station one - buffer merge system with unreliable machines [J]. International Journal of Production Research, 2004, 42(4): 651 - 675.

- [3] DIAMANTIDIS A C, PAPADOPOULOS C T. Markovian analysis of a discrete material manufacturing system with merge operations, operation - dependent and idleness failures [J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 50:466 - 487.
- [4] COLLEDANI M, MATTA A, TOLIO T. Performance evaluation of production lines with finite buffer capacity producing two different products[J]. OR Spectrum, 2005, 27:243 - 263.
- [5] MOURANI S, HENNEQUIN S, XIE X. Failure models and throughput rate of transfer lines [J]. International Journal of Production Research, 2007, 45(8): 1835 - 1859.
- [6] TAN B. A three - station merge system with unreliable stations and a shared buffer [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2001, 33:1011 - 1026.
- [7] TOLIO T, MATTA A, GERSHWIN S B. Analysis of two - machine lines with multiple failure modes [J]. IIE Trans, 2002, 34(2):51 - 62.

Performance Evaluation of Production Lines with Unreliable Buffer

LIU Jun, LIU Jie, WANG Sheng - qiang, FENG Rui - cheng

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050 China)

Abstract: On the basis of the method of analysis of two - machine lines with multiple failure modes in [7], an unreliable buffer is presented in this paper. We study the transitions of the states probabilities based on the discrete model. A corresponding method are developed here, the basic idea of which is to analyze the Markov chain and make a guess of the form that internal state probabilities should assume. By substituting this guess into the internal equations, a set of 4 solutions can be found. If the guess is correct, it must then be possible to find a linear combination of these solutions that also satisfies the boundary conditions. By dealing with the states probabilities of the machines and the buffer of the system, thus reducing the orders of solving the problem, an approximate technique is proposed to evaluate the performance of hybrid production systems. The experiment confirms the robustness of this method.

Key words: hybrid system; discrete model; unreliable buffer; multiple fault mode

(上接第97页)

Effect of Co Content on Corrosion Behavior of Fe - Mo - P - C - B - Si Bulk Glassy Alloys

LI Fu - shan, YUAN Jing - hui, HUANG Feng - yong, REN Chen - xing, KONG Chao

(School of Materials Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The corrosion behavior of $(\text{Fe}_{1-x}, \text{Co}_x)_{76}\text{Mo}_4(\text{P}_{0.45}\text{C}_{0.2}\text{B}_{0.2}\text{Si}_{0.15})_{20}$ ($76x=0, 10$ and 20) bulk metallic glasses was researched in this paper. The electric polarization curves of the bulk metallic glasses were measured in 1 mol/L and 2 mol/L HCl. From the electric polarization curves, features of corrosion behavior were analyzed. The weight loss experiments of bulk metallic glasses $(\text{Fe}_{1-x}, \text{Co}_x)_{76}\text{Mo}_4(\text{P}_{0.45}\text{C}_{0.2}\text{B}_{0.2}\text{Si}_{0.15})_{20}$ ($76x=0, 10$ and 20) in different density HCl were also conducted. The corrosion rate is lower than $0.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. The results indicate that BMG system has high anti - corrosion properties. Furthermore, the corrosion resistance of bulk metallic glasses improves with the increase of Co content in the alloys. The weight loss experiments show that the corrosion rate of the bulk metallic glasses changes within the range of $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. The corrosion rate decreases with the increase of Co content in the alloys.

Key words: bulk metallic glass; Fe - based alloys; electric corrosion; corrosion resistance