

工业机器人系统可靠性预测方法研究

陈胜军

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 阐述了工业机器人系统可靠性研究的意义和基本思路, 将传统的可靠性理论与机器人系统的设计阶段相结合, 给出了工业机器人系统可靠性的预测模型和计算方法. 实例分析表明提出的可靠性预测方法较好地解决了工业机器人这一复杂系统的可靠性预测问题, 计算结果与实际统计情况基本一致.

[关键词] 机器人, 可靠性预测, 失效率

[中图分类号] TP242.2 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)02-0006-04

Study on Reliability Prediction Method of Industrial Robot System

Chen Shengjun

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042 China)

Abstract The significance and the basic thought of studying robot system reliability are put forward. Reliability prediction models and calculation methods of robot system are established by combining tradition reliability theories and the design of robot system. Example analysis shows that reliability prediction theory of the paper fairly well resolves the problem of complex robot system of reliability prediction, and that the calculated results are basically in conformity with the practical statistics results.

Key words robot, reliability prediction, crash-rate

机器人具有自由度多、运动范围大、结构复杂和较强的独立性等特点. 这一方面使机器人具有高度的灵活性^[1-3], 同时也使得在机器人运动的包络范围内每一处都成为潜在危险区, 一旦失效或发生故障, 将造成难以预测的后果. 机器人实用化和商品化的关键在于它的可靠性和安全性. 因此, 研究机器人系统的可靠性问题具有重要的现实意义. 对于机器人含机械、光电、电气、液压、计算机等多种类型的元器件和控制软件在内的复杂系统来说, 研究其可靠性问题相对比较困难, 关于这方面的报道还非常罕见^[11]. 正因为如此, 努力开展这方面的基础研究显得尤为重要.

1 工业机器人系统可靠性预测方法

1.1 可靠性数学模型

可靠性数学模型的一般表达式为:

$$R_s(t) = f [R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t)], \quad (1)$$

式中, $R_s(t)$ 为系统的可靠度; $R_i(t)$ 为元件 i 的可靠度 ($i = 1, 2, \dots, n$); n 为元件的总数量. 针对某种具体机器人系统, 公式 (1) 还有具体的表达形式. 不失一般性, 假设: (1) 机器人各子系统之间不存在工作替代关系且无冗余, 即若某一个子系统发生故障或失效, 则整个机器人系统就无法正常工作; (2) 组成各子系统的元件之间也不存在工作替代关系且无冗余, 即若某一个元件发生故障或失效, 则整个子系统无法正常工作. 在上述假设条件下可知: 机器人的各子系统以及整个系统均为可靠性串联模型^[4-5]. 因此, 机器人串联系统可靠性的一般数学模型为:

收稿日期: 2007-06-26

基金项目: 南京师范大学科研基金 (2002KZXGQ2B31) 资助项目.

通讯联系人: 陈胜军, 副教授, 博士, 研究方向: 可靠性与质量工程. E-mail: shjunchen@163.com

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t), \quad (2)$$

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda_s(t) dt\right], \quad (3)$$

$$MTBF_s = \int_0^\infty R(t) dt \quad (4)$$

$$R_i(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda_i(t) dt\right], \quad (5)$$

式中, $\lambda_i(t)$ 为元件 i 的瞬时失效率; $MTBF_s$ 为系统平均无故障工作时间; $MTBF_i$ 为元件 i 的平均无故障工作时间。

1.2 寿命分布

在公式 (2) ~ (3) 中并没有涉及元件和各系统的寿命分布问题, 但这一问题难以回避。假设: 在组成机器人系统的所有 n 个元件中, 寿命服从指数分布 (以偶然故障为主) 的元件有 m 个, 其失效率用 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 表示; 寿命服从非指数分布 (以耗损故障为主) 的元件则为 $(n - m)$ 个, 其瞬时失效率用 $\lambda_j(t) (j = m + 1, m + 2, \dots, n - m)$ 表示。

则有:

$$\lambda_1 = \sum_{i=1}^m \lambda_{s_i} \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \sum_{j=m+1}^{n-m} \lambda_j(t), \quad (7)$$

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 = \sum_{i=1}^m \lambda_i + \sum_{j=m+1}^{n-m} \lambda_j(t), \quad (8)$$

$$R_s(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda_s(t) dt\right] = \exp\left\{-\left[\sum_{i=1}^m \lambda_i\right] + \int_0^t \sum_{j=m+1}^{n-m} \lambda_j(t) dt\right\}, \quad (9)$$

式中, λ_1 为寿命服从指数分布的元件失效率之和; λ_2 为寿命服从非指数分布的元件瞬时失效率之和; λ_s 为系统失效率; $R_s(t)$ 为系统可靠度。

电子元件的寿命按指数分布处理。由于机械零部件一般均经过磨合才正常工作, 基本处于偶然失效期, 为简化计算, 也认为其失效率基本保持一定^[6]。

1.3 系统失效率的计算

1.3.1 计算公式

机器人系统失效率的计算公式为:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^N \lambda_{s_i} \quad (10)$$

式中, λ_s 为系统失效率; N 为子系统的数目; λ_{s_i} 为第 i 个子系统的失效率。

$$\lambda_{s_i} = \sum_{j=1}^m n_j \lambda_j \quad (11)$$

式中, m 为第 i 个子系统中的元件型号数目; n_j 为相同型号元件的数目; λ_j 为第 i 个子系统的第 j 种型号元件的失效率。值得指出的是, 在机器人系统设计的不同阶段年, λ_j 的计算方法是不同的, 下面予以分别考虑。

(1) 在机器人系统的方案论证和初步设计阶段, 可以按元件计数法的思路进行计算。即:

$$\lambda_j = \lambda_{Gj} \pi_{Qj} \pi_{kj} \quad (12)$$

式中, λ_{Gj} 为在某种使用环境下第 j 种元件的通用失效率; π_{Qj} 为第 j 种元件的质量等级; π_{kj} 为第 j 种元件的环境因子。当整个机器人系统的各元件在同一环境下工作时, π_{kj} 取值为 1 下同。

(2) 在机器人系统的详细设计阶段 (画出了原理图, 选出了元部件后), 可按故障率预计法的思路进行计算。即:

$$\lambda_j = \lambda_{Gj} \pi_{kj} D_j \quad (13)$$

式中, λ_{Gj} 为第 j 种元件的基本失效率; π_{kj} 为第 j 种元件的环境因子; D_j 为第 j 种元件的减额因子。

当计算出机器人系统的失效率后,在机器人系统寿命服从指数分布的情况下可得:

$$R_s(t) = e^{-\lambda_s t},$$

(14)

$$MTBF_s = \frac{1}{\lambda_s},$$

(15)

式中符号意义同前.

1. 3. 2 数据的获取

在缺乏数据的情况下, 以下几条途径是可行的. (1)借鉴国外相似产品的有关失效数据, 根据国内的制造工艺水平、使用环境条件、电流电压等情况进行修正. (2)借鉴国内相似产品的有关失效数据, 根据各自的制造工艺水平、使用环境条件、电流电压等情况进行修正. (3)查阅有关的可靠设计手册 (见表 1).

表 1 可靠性预测数据及来源

Table 1 Prediction date& source of reliability

可靠性数据	数据来源
MIL-HDBK-217 系列《电子设备可靠性预计手册》	美国
《非电子零部件可靠性数据》	美国国防部情报分析中心
《英国电子元器件可靠性数据手册》	英国
《法国电子设备可靠性预计手册》	法国
GJB/Z299《电子设备可靠性预计手册》	中国

2 实例分析

现要设计一台 6 自由度的全关节示教再现式直流电动点焊机器人. 试对该机器人系统进行可靠性预计, 并对预计结果进行分析.

解 本例要求对机器人系统进行可靠性预计, 故按公式 (10) ~ (12)进行计算.

2 1 建立可靠性模型

点焊机器人系统大体可分为: 机器人本体、计算机及控制、电动伺服和点焊机 4 部分. 由于各子系统均无冗余且相互之间无替代关系, 故它们之间是可靠性串联关系. 点焊机器人系统的可靠性模型如图 1 所示.

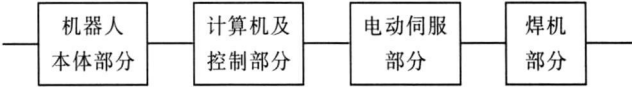


图 1 点焊机器人系统的可靠性模型

Fig.1 Reliability model of spot-welding robot system

在点焊机器人系统中, 由于各子系统的元件之间无冗余且相互之间也无替代关系, 故所有子系统之间也是可靠性串联模型.

2 2 子系统失效率的计算

为简化计算步骤, 将计算机、控制部分和电动伺服部分合称为控制子系统, 一起进行预计. 机器人各子系统的初步组成方案及其失效率预计计算分别见表 2~ 4 表 2~ 4 中的数据主要来源于《现代仪器仪表创新设计与先进技术应用手册》(1~ 4 卷) (中国知识出版社, 2006), 部分数据来源于《现代机械设计手册》(机械工业出版社, 2006).

2 3 系统可靠性指标计算

由公式 (10)得: $\lambda_s = \lambda_{s1} + \lambda_2 + \lambda_3 = 669\,893(\text{fit}) = 669\,893 \times 10^{-9} (1/\text{h})$
由公式 (15)得: $MTBF_s = 1/\lambda_s = 1\,493(\text{h})$
由公式 (14)得: $R_s(t) = \exp(-\lambda_s t) = \exp(-669\,893 \times 10^{-9} t)$

2 4 结果分析

(1)计算结果表明: 控制子系统的失效率最大, 机器人本体次之, 焊机的失效率最小. 这是因为机器人本体和焊机主要由机械零部件组成, 控制子系统主要由电子元件组成, 而电子元件的失效率要大于机械零部件的

表 2 机器人本体子系统失效率预计表

Table 2 Crash rate anticipate of robot nomenclon subsystem

名称	数量	$\lambda_c, \pi_c (\text{fit})$	累积失效率
直流伺服电机	6	240 024	14 400
测速发动机	6	2 400	14 400
微动开关	24	2 707	64 968
齿轮	2	169	338
中间齿轮	2	169	338
伞齿轮	5对	169* 2	1690
直齿轮	3对	169* 2	1014
谐波减速器	4套	1 670	6 680
滚珠丝杠	2	1 670	3 340
轴承	63	1 378	86 814
主轴	1	100	100
大臂支轴	2	100	200
腕大壳	1	100	100
腕小壳	1	100	100
传动箱体	1	100	100
传动轴	1	100	100
腕转轴	3	100	300
输出轴	5	100	500
机器人本体子系统失效率 λ_d			195 482

失效率. 焊机因结构简单元件少故失效率相对较小.

表 3 焊机子系统失效率预计表

名称	数量	$\lambda_{\text{C}} \pi_{\text{C}}$ (fit)	累积失效率
继电器	4	330* 6	7 920
集成电路	11	30* 35	11 550
可控硅	2	100* 10	2 000
波断开关	1	960	960
电位器	5	810* 1. 5	6 075
焊接变压器	1	140* 3	420
汽缸	1	1 000	1 000
汽缸控制阀	2	1 640	3 280
极片	2	873	1746
电极	1	873	873
焊机子系统失效率 $\lambda_{\text{s}2}$			35 824

表 4 控制子系统失效率预计表

名称	数量	$\lambda_{\text{C}} \pi_{\text{C}}$ (fit)	累积失效率
集成电路	100	30* 35	105 000
继电器	35	330* 6	69 300
接触器	5	1 100* 6	33 000
接插件	29	689	19 981
开关及按钮	17	20* 2. 9	986
电源变压器	6	140* 3	2 520
计算机系统	1	147 800	147 800
伺服单元	6	10 000	60 000
控制子系统失效率 $\lambda_{\text{s}3}$			438 587

(2)由表 1可知: 轴承、电机和微动开关对机器人本体可靠性的影响较大; 由表 2可知: 集成电路、继电器、电位器、汽缸控制阀等对焊机可靠性的影响较大; 由表 3可知: 集成电路、计算机系统、继电器、伺服单元等对控制子系统可靠性的影响较大. 要想提高整个系统的可靠性, 就要在详细设计阶段采取措施提高上述关键元器件和零部件的可靠性.

(3)整个点焊机器人系统的 MTBF_s 约为 1 493 h 接近 80年代末世界发达国家水平. 到 90年代中期, 世界工业机器人的 MTBF_s 一般在 2 000~ 3 000 h 之间^[7]. 由此可见, 国内工业机器人的可靠性水平还有待提高.

3 结语

本文将可靠性的基本理论应用于工业机器人的设计阶段, 给出了机器人这一特殊复杂系统的可靠性预测计算模型, 并通过实例给出了具体的分析方法与步骤, 计算结果与实际统计情况^[7]基本一致, 该方法具有一定的工程应用价值.

[参考文献] (References)

[1] ID Walker JR. Failure mode analysis for a hazardous waste clean-up manipulator[J]. Reliab Engng Syetem Safety, 2001, 58 (3): 277-290

[2] 谢园园. 动态环境下基于蚁群算法的机器人路径规划[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2006, 6(3): 21-26
Xie Yuanyuan. Path planning for robots based on ant colony algorithm under dynamic environment[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2006, 6(3): 21-26 (in Chinese)

[3] 张益军. 基于中枢模式发生器的步态控制策略的研究[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2005, 5(3): 14-17.
Zhang Yijun. Research in locomotion control based on central pattern generation[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2005, 5(3): 14-17. (in Chinese)

[4] 朱玉芳. 小口径管道机器人的检测精度分析[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2004, 4(2): 35-38
Zhu Yufang. Testing accuracy analysis for small diameter pipe inspection robot[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2004, 4(2): 35-38 (in Chinese)

[5] 吴永平. 工程机械可靠性[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002 102-114
Wu Yongping. Engineering Mechanical Reliability[M]. Beijing: People Traffic Press, 2002 102-114 (in Chinese)

[6] 刘惟信. 机械可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996 32-41.
Liu Weixin. Design of Mechanical Reliability[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996 32-41 (in Chinese)

[7] 廖炯生. 机器人的可靠性、维修性、安全性[M]. 北京: 科学出版社, 1994 10-51.
Liao Jingsheng. Reliability and Maintenance and Safety of Robots[M]. Beijing: Science Press, 1994 10-51 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]