

机器人的

可靠性

维修性

安全性



廖炯生 主编

科学出版社



机器人的可靠性、维修性、安全性

廖炯生 主编

科学出版社

1994

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书采用按专题独立成章的体裁,对机器人可靠性、维修性、安全性技术进行全面介绍.主要内容包括可靠性预计和分配,失效模式及影响分析,故障树分析,机器人的维修及自修理,安全性评价和机器人安全系统设计,安全性计算机和安全系统 CAD,防碰撞方法,以及人工智能在安全系统中的应用等.

本书可供从事机器人研究、设计、制造和应用的科技人员,以及从事可靠性技术工作的人员阅读,也可作高等学校有关专业的大学生和研究生的参考书.

JS440/34
06

机器人的可靠性、维修性、安全性

廖炯生 主编

责任编辑 唐正必

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

蓝地公司激光照排

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1994年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1994年7月第一次印刷 印张:12

印数:1-1100 字数:271 000

ISBN 7-03-004103-8/TN·156

定价:14.30 元

序

工业机器人的可靠性、维修性和安全性是机器人在生产中是否可依赖的关键性能,也是在生产线上机器人是否能替代工人顶班劳动的重要问题. 因此, 有时把可靠性、维修性和安全性 (RMS) 合起来叫做可信赖性 (Dependability).

机器人是一个复杂的机械-机电-电子系统. 电子系统的可靠性是迄今研究和实践最多的领域, 已经有一套成熟的设计和分析方法可供应用. 而机电和机械部件都是由很多零件组装而成的, 这些零件的失效规律是非常复杂和变化多端的. 所以, 目前国外生产的机器人的可靠性都受到伺服系统和机械本体可靠性的制约.

工业机器人一般容许在失效时进行维修, 但是维修过程往往造成经济损失, 因此可维修性便是可信赖性的一个重要指标. 机器人应用场合, 包括安装调整、编程示教、操作监控、维护修理等都需要人的参与, 为了人身安全和保障生产的正常运行, 必须考虑安全性问题.

我国工业机器人的研制和应用尚处于起步阶段. 为了使这一新技术在我国迅速发展, 因此在定型设计、制造和应用一开始就注意其可靠性、维修性和安全性是非常必要的. 本书的出版将有助于提高我国机器人的技术性能和应用水平, 使机器人产业在我国能顺利发展.

杨嘉墀

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 机器人的可靠性预计和可靠性分配	(5)
2.1 引言	(5)
2.2 可靠性预计	(5)
2.3 可靠性分配	(18)
参考文献	(20)
第三章 机器人失效分析	(21)
3.1 引言	(21)
3.2 失效因果分析方法	(21)
3.3 失效的根源	(23)
3.4 液压传动机器人 FMEA 实例	(23)
参考文献	(27)
第四章 机器人事故原因树分析	(28)
4.1 引言	(28)
4.2 由工业机器人造成的事故	(28)
4.3 工业机器人的潜在危险	(30)
4.4 工业机器人事故的分类	(34)
4.5 机器人事故的故障树分析	(36)
参考文献	(39)
第五章 机器人的维修	(40)
5.1 引言	(40)
5.2 准备阶段	(40)
5.3 机器人的安装阶段	(41)
5.4 机器人的预测性维修	(42)
5.5 机器人的预防性维修	(42)
5.6 机器人的故障后维修	(45)
5.7 维修人员的选择与培训	(47)
5.8 结论	(47)
参考文献	(47)
第六章 自修理和自组织机器人	(48)
6.1 引言	(48)
6.2 自修理系统	(48)
6.3 基本假设	(49)
6.4 机器人自诊断	(51)

6.5	机器人软件故障的自修理	(53)
6.6	机器人硬件故障的自修理	(55)
6.7	机器人自校准和自组织控制的说明	(56)
6.8	自组织机器人——一个导引	(57)
	参考文献	(59)
第七章	工业机器人安全性概观	(61)
7.1	引言	(61)
7.2	安全性标准和立法	(61)
7.3	机器人事故统计分析	(62)
	参考文献	(67)
第八章	人-机器人系统安全性评价	(68)
8.1	引言	(68)
8.2	安全性评价的步骤	(68)
8.3	识别产生于人-机系统中的危险的作用-变化模型和作用链模型	(68)
8.4	对人的作用及危险的性质	(70)
8.5	机器人对人的危险的分析	(71)
8.6	结论	(74)
	参考文献	(74)
第九章	机器人安全系统设计及其实现	(75)
9.1	安全系统设计概述	(75)
9.2	周界保护	(79)
9.3	安全联锁系统	(81)
9.4	安全地板	(84)
9.5	安全敏感器系统	(86)
9.6	光电保护系统	(89)
9.7	典型的机器人安全保护系统举例	(91)
9.8	结论	(93)
	参考文献	(93)
第十章	安全计算机设计及实现	(94)
10.1	引言	(94)
10.2	安全计算机的特点	(94)
10.3	T ³ 机器人概述	(95)
10.4	安全计算机的硬件配置	(97)
10.5	安全计算机软件结构	(98)
10.6	解算器	(102)
10.7	工具终端变换	(104)
10.8	速度与加速度计算	(105)
10.9	禁区算法	(106)
10.10	结论	(107)

参考文献	(108)
第十一章 机器人安全系统的计算机辅助设计	(109)
11.1 引言	(109)
11.2 CAD 如何帮助提高机器人安全性	(109)
11.3 用于工业机器人系统设计的 GRASP	(110)
11.4 利用 CAD 进行机器人离线编程	(111)
11.5 GRASP 用于安全设计时的一些适配	(112)
11.6 陷阱点	(113)
11.7 操作区域及最大可达包络面	(114)
11.8 IBM 7565 系统说明	(115)
11.9 安全性硬件	(116)
11.10 安全性软件	(117)
参考文献	(119)
第十二章 计算机控制的工业机器人防碰撞方法	(120)
12.1 引言	(120)
12.2 系统结构	(120)
12.3 防止内部碰撞的算法	(122)
12.4 防止外部碰撞的算法	(123)
12.5 结论	(128)
参考文献	(128)
第十三章 人与机器人之间非规范性相互作用的智能安全系统	(129)
13.1 引言	(129)
13.2 系统描述	(129)
13.3 控制结构	(132)
13.4 模 型	(132)
13.5 安全性敏感器	(133)
13.6 执行部分	(134)
13.7 安全性算法	(134)
13.8 结论	(135)
13.9 安全性算法的准程序	(135)
参考文献	(136)
第十四章 应用于机器人故障安全操作的人工智能	(137)
14.1 引言	(137)
14.2 RISS 系统状态	(138)
14.3 RISS 系统结构	(139)
14.4 通向 NBS 控制器的接口	(148)
14.5 总结	(149)
参考文献	(149)

附录 A 工业机器人可靠性维修性安全性要求	(150)
A.1 可靠性维修性指标论证	(150)
A.2 可靠性建模、预计与分配	(151)
A.3 元件可靠性保障要求	(152)
A.4 关键部件可靠性试验验证要求	(159)
A.5 机器人可靠性分析及整机考核要求	(160)
A.6 机器人维修性的设计要求	(161)
A.7 机器人安全性设计要求	(162)
A.8 计算机控制系统电磁兼容性设计要求	(163)
参考文献	(165)
附录 B 美国国家标准——工业机器人系统安全性要求 ANSI/RIA R15.06-1986	(167)
B.1 范围,目的,除外	(167)
B.2 有关的美国国家标准	(167)
B.3 定义	(168)
B.4 建造、重建和修改	(169)
B.5 机器人或机器人系统的安装	(171)
B.6 安全防护	(172)
B.7 管理	(175)
B.8 测试与起动	(175)
B.9 培训	(176)
附录 C 一些外国机器人公司情况及其机器人可靠性指标介绍	(177)
C.1 美国 Westing house 公司	(177)
C.2 美国 Graco 机器人公司	(178)
C.3 美国 Adept 机器人公司	(179)
C.4 意大利菲亚特集团的 KOMAU 公司	(179)
C.5 西德 KUKA 机器人公司	(181)

第一章 绪 论

传说在公元前 3 世纪, 古希腊发明家戴达罗斯用青铜为克里特岛国王迈诺斯塑造了一个守卫宝岛的青铜卫士塔罗斯, 是一个机器人。我国西周时代 (公元前 1066 年—公元前 771 年) 流传有关巧匠偃师献给周穆王一个歌舞机器人 (艺伎) 的故事。这些传说和神话中的机器人, 形象地反映了人类对于先进生产工具的创造性想象和勇敢追求。但是, 机器人从幻想世界走向现实世界是从自动化生产发展的需要出发, 并以现代科学技术的高度发展为条件的。

1960 年, 美国定型生产了 Unimate 机器人, 从此, 机器人产业开始形成。1970 年, 第一次国际工业机器人会议在美国举行, 这标志着机器人技术开始发展为专门学科。三十余年来, 世界范围内的机器人产业迅速发展。至 1992 年, 日、美和欧洲各国机器人安装数已达 40.96 万台以上。虽然 1986—1987 年间操作手式机器人的发展速度有些回落, 但智能机器人“热潮”不减。尤其引人注目的是, 机器人的应用领域正在未可限量地向前扩展。80 年代末, 日本机器人协会公布了 233 个应用机器人的新领域, 从搬运、焊接、喷涂、装配、检验, 发展到上天、下海、排雷、消防、看护、家事……几乎处处可以用上机器人。可以毫不夸张地说, 机器人的应用是新技术革命的重要标志, 机器人技术是当代高技术的一个重要方面。

当前世界范围新技术革命的特点是信息化、知识化和分散化。大规模、大批量的生产方式正面临着小批量、多品种的市场需求的挑战。自动化生产过程正在由刚性向柔性自动化的方向发展。而机器人固有的通用性和灵活性正好适应了新技术革命的需要, 所以, 机器人已成为计算机控制的现代自动化生产系统中的重要成员。

机器人技术发展形成了新的学科——机器人学。它是一门具有深远影响的边缘学科, 是为 21 世纪新技术革命打基础的学科。机器人学综合应用了力学、机械学、自动控制、传感技术、计算机技术、人工智能等学科的成果, 并且反过来有力地推动着这些学科的发展。特别是近十多年来, 人工智能的研究掀起了热潮, 因为它具有巨大的潜力, 有可能渗透到各个领域促使其更新换代, 加快社会经济的发展, 并有助于进一步理解人类智能的机制。而智能机器人正是人工智能研究的最好载体。

那么, 什么是机器人呢? 国际学术界至今还没有对机器人作出统一的、公认的、文字表述严格的定义。美国工业机器人协会 (RIA) 和国家标准局 (NBS), 日本机器人协会 (JIRA)、国际标准化组织 (ISO) 都提出过机器人定义, 综合起来大体上可按如下特点描述:

- 1) 机器人的动作机构具有类似于人或其它生物体某些器官 (如肢体、感官等) 的功能;
- 2) 机器人具有通用性, 工作种类多样, 动作程序灵活易变;
- 3) 机器人具有不同程度的智能, 如记忆、感知、推理、决策、学习等;
- 4) 机器人具有一定程度的独立性, 在自动工作模式下可以不依赖于人的干预。

一般认为,按机器人的发展程度可分为三代:

第一代机器人是以“示教-再现”方式工作的机器人,即操作工人先示范操作,计算机把操作程序和有关条件贮存下来,再控制机器人操作机构去重复操作。目前国际上商品化、实用化的机器人大都属于第一代机器人。

第二代机器人具有一定的感觉装置,可以获取简单信息,通过计算机分析处理,进行反馈控制,表现出低级智能。

第三代机器人是智能机器人,它具有多种感觉功能,可进行复杂的逻辑思维、判断、决策,在作业环境中独立行动。这类机器人目前还处于实验探索阶段。

机器人的应用可以大大提高生产效益。它基本上能够独立作业,可以“不知疲倦地”劳作,也不受情绪或环境条件的影响,使产品质量稳定。例如,美国一家工厂用机器人加工歼击机部件,在金属板上钻 250 种高精度孔眼,每班可完成 20—30 个零件而无一次品;由工人操作时只能完成 6 件,而且次品率高达 10%。

机器人的应用还可能打开一些“禁区”,例如利用空间机器人辅助进行空间微重力、高真空环境下的特殊材料制备和特种药品生产,利用水下机器人进行海洋开发,以及进行核能研究等。

采用机器人的现代自动化生产系统越来越复杂,生产速度很高,因此,对其可靠性和维修性的要求也更严格了。例如,在汽车自动生产线上进行点焊、弧焊、喷漆的机器人,如果因为可靠性不高而经常停产;或者由于维修性不好,出了故障不能迅速修复的话,若以每 2.5 分钟生产一辆汽车的速度计算,则停产所造成的经济损失是很惊人的。所以,国外有的机器人在生产线上发生故障的平均修复时间要求小于 2 分钟。

尽管机器人的操作有其特点,但它也是由许多普通元件和零件构成的,因此,和所有机器一样,它在工作过程中也会出毛病,需要修理或更换故障部件,以恢复正常功能。可以说,可靠性的作用在于延长机器人的“能工作时间”,而维修性的作用在于减少机器人的“不能工作时间”,二者是密切相关的,综合起来决定了机器人的可用性。

机器人本体及其各关节是可以多自由度运动的机械,各自由度的运动是通过电动机或液压、气压机构实现的,运用计算机、电子线路来控制;机器人臂和终端操作机构的运动路径由计算机来规划和编程,运动参数如位置、速度等用各种传感器来测量和反馈。所以,机器人集机械、电子、电气、机电、液压、气压、光电等类元部件之大成,机器人的维修是一项复杂而艰巨的任务。

生产中使用机器人是为了改善有毒、有害工种操作工人的安全卫生条件,提高生产效率和产品质量。但是,一旦机器人发生故障,不仅会因停产而造成经济损失,增加维修费用,而且还可能会出现伤人、毁物等事故。国外曾经多次发生机器人打死工人的悲剧。1981 年 7 月日本首次发生“机器人杀人”事故,据统计,1987 年至 1990 年末日本已有 11 人被机器人打死。由此可见,机器人的安全性是至关重要的。

机器人不同于普通机器之处是自由度多,可以在更大的范围内按更多样的方式运动。这一方面使机器人具有高度灵活性,另一方面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,如果发生故障可能造成难以预测的后果。机器人本身是由硬件和软件组成的复杂系统,因此不仅有硬件安全性问题,而且有软件安全性问题。而机器人的安装调整、编程示教、操作监控、维护修理都还需要人的参与。因此,在机器人应用中

要进行“人-机”工程分析。对于自动化生产系统中人和其他机器（包括机器人）的相互关系要精心设计，尽力避免如机器人意外运动等危险情形的发生。

我国已将工业机器人列为重点研制开发的十大民品之一。近年来，航空航天部研制的点焊、弧焊机器人，机械电子部研制的喷漆机器人已在汽车生产线顶班上岗，这标志着我国的机器人技术已从试验阶段开始进入了应用阶段。

机器人实用化和商品化的关键在于它的可靠性、维修性和安全性 (Reliability, Maintainability and Safety, 简记为 RMS)。考虑到我国研制和应用机器人的实践经验还不多，借鉴国外在这方面的经验与教训，应该在工业机器人的设计、制造和应用一开始就注意其可靠性、维修性和安全性问题，把它解决好。

十几年来，国内已经编译出版了一些机器人书籍，但是还没有关于机器人可靠性、维修性和安全性的专门书籍出版。从国外来看，在众多的机器人书籍中也只见到一本机器人安全性论文专集 (Robot Safety, IFS (Publications) Ltd., 1985) 出版*。有鉴于此，本书旨在机器人可靠性、维修性和安全性技术方面作一个比较全面和比较系统的介绍，以适应我国机器人产业发展的需要。

本书第一部分是关于机器人可靠性与维修性。前三章主要是关于通用的可靠性技术在机器人可靠性设计中的应用。其中“机器人的可靠性预计和可靠性分配”一章以航空航天部研制的点焊和弧焊机器人（电动式）以及喷漆机器人（液压式）为例，介绍了可靠性预计和分配的方法和结果。“机器人失效分析”一章则介绍可靠性分析方法，包括失效模式和影响分析 (FMEA)、事件树分析 (ETA) 和故障树分析 (FTA) 方法，讨论了造成失效的几类原因，并以液压机器人为例介绍 FMEA。“机器人事故原因树分析”一章则从工业安全的角度出发，具体分析建造了工业机器人事故原因树。这是 FTA 技术应用于安全性和风险分析的例子。

“机器人的维修”一章中指出，任何机器人系统的成功应用最终决定于维修。该章从机器人采购和安装前的准备工作、安装工作、预测性维修、预防性维修、事后维修，以及维修人员的选择和培训等方面进行了很实际的讨论，有不少是经验之谈。“自修理和自组织机器人”一章则详细介绍了自修理机器人的研究概况、自修理系统的定义、机器人的自维修要求和对于自诊断的考虑；讨论了硬件和软件的自修理问题，以及校准和控制等事项。该章最后部分大胆地、引人入胜地展望了自组织机器人的发展前景。

本书第二部分讨论机器人安全性。这一部分共八章。

“工业机器人安全性概观”一章提供了世界范围内多领域的机器人安全性概观，主要涉及机器人安全性标准和立法，以及各国机器人事故的统计分析。

“人-机器人系统安全性评价”一章介绍了用于人-机系统安全性评价的“作用-变化”模型和作用链模型，作为识别机器人所造成的危险的一种方法。

“机器人安全系统设计及其实现”一章综述性介绍第一代（示教-再现式）和第二代（带传感器）机器人的安全系统设计。

更进一步，“安全计算机设计及其实现”、“机器人安全系统的计算机辅助设计”这两章集中讨论了计算机应用于机器人安全性监测和 CAD 应用。例如，被称作“看门狗”的

* 本书编成后，获悉加拿大渥太华大学 B. S. Dhillon 教授出版了有关机器人可靠性与安全性方面的专著。

安全性计算机独立于控制计算机,用来监测机器人各关节及工具终端运动的位置、速度和加速度不得超过最大容许值,否则就在安全界限内停住机器人。

“计算机控制的工业机器人防碰撞方法”一章介绍了机器人防碰撞这一专题,如同本章题目所标示的,防碰撞和计算机控制以及机器人安全性是紧密相关的。

最后两章“人与机器人之间非规范性相互作用的智能安全系统”、“应用于机器人故障安全操作的人工智能”集中介绍人工智能安全系统。前者指出,常规做法在机器人和人之间简单地隔一道墙是不能解决问题的,完全不允许工人进入机器人工作区也是办不到的。文中提出了基于机器人与人及有关设备的“安全轮廓”概念的安全系统,它监视和预测碰撞以防止危险。后者介绍的 RISS 系统把人工智能应用于敏感器(信息)汇合、故障检测与诊断和恢复,以及使用以往的经验来增进系统的性能(自学习)。智能安全系统从一个方面也反映出智能机器人技术的迅速发展。

以上提要介绍的正文部分的十四章内容,采取了专题独立成章的体裁。限于篇幅,只能从现有材料中精选这一小部分来进行介绍,并力求覆盖与机器人可靠性、维修性、安全性有关的各个方面问题;取材也力求由浅入深,既有常规技术的介绍,也包括一些重要的发展趋向。每章后面一般附有详细的参考文献,以便读者进一步检索和深入研究。

本书附录 A 是在吸取国内外经验的基础上,全面提出第一代工业机器人可靠性、维修性、安全性的技术要求,它包括可靠性和维修性指标论证、可靠性指标分配和预计、元件可靠性保障要求、关键部件可靠性试验验证要求、机器人整机考核和可靠性分析要求、机器人维修性设计要求、机器人安全性设计要求,以及机器人计算机控制系统电磁兼容性设计要求。

附录 B 是关于机器人安全性的一项标准。近十年来,美、苏(前苏联)、英、德、日等国都在研究制订机器人安全防护标准,其中美国于 1986 年公布了机器人安全性专题国家标准 ANSI/RIA R 15.06(工业机器人系统安全性要求)。这项标准对于我国工业机器人设计、制造和应用很有参考价值。

附录 C 则是一些外国机器人公司的情况及其机器人可靠性指标介绍。

本书由廖炯生主编。朱北园编写了第二、四和十二章,并参与了第三章及附录 A 的部分编写工作,以及全书的资料收集及校订整理工作;黄雨祝编写了附录 C;周传珍编写了第九章;段志刚参与编写了第十、十一章;其余部分由廖炯生编写。最后由廖炯生对全书进行校订和整理。

本书的编写出版得到原航天工业部科技司的大力支持,并得到部内研制、生产、应用工业机器人的厂、所领导和同志们们的热情帮助,在此谨致衷心的感谢。

限于水平,书中难免存在缺点和错误,热诚希望广大读者批评指正。

参 考 文 献

- [1] 蔡自兴,机器人原理及其应用,中南工业大学出版社,1988.
- [2] 周远清、张再兴等,智能机器人系统,清华大学出版社,1989.
- [3] [日]渡边茂主编,卜炎、张宝兴、刘守谦译,产业机器人的应用,机械工业出版社,1986.
- [4] Bonney M. C., Yong Y. F., Robot Safety, IFS (Publications) Ltd., 1985.

第二章 机器人的可靠性预计和可靠性分配

2.1 引言

产品的可靠性是指产品在规定条件下、规定时间内完成规定功能的概率。产品的失效率则是指产品在某一时刻 t 的单位时间内发生失效的概率。对于像工业机器人这样的在发生失效后可以修复的产品，在时间轴上正常工作和发生失效这两种状态总是交替地变化着的。所以，在时刻 t 产品是完好还是失效，这是一个重要的信息。一般把产品在时刻 t 处于完好状态的概率定义为产品在该时刻的可用性。把产品的两次失效之间的时间平均值 MTBF (Mean Time Between Failures) 作为产品的平均寿命。不可修复的产品的平均寿命则为失效前平均时间 MTTF (Mean Time to Failure)。把从发现产品失效到修复所需时间的平均值称为平均修复时间 MTTR (Mean Time to Repair)。以上为主要的可靠性、维修性指标。

产品的优劣，一方面决定于各项性能指标，另一方面就是取决于它的可靠性指标。可靠性预计是指在产品的设计阶段定量地估计未来产品的可靠性的方法。可靠性分配则是指在可靠性预计的基础上，将经过论证确定的可靠性指标合理地分配给组成产品的各个部分，以提供产品在设计、生产过程中应达到的可靠性目标。

工业机器人是包括机械、电子、电气、液压、气压等多种类型的元件和计算机软件的复杂系统。为了使机器人能长期可靠地运行，做好可靠性预计和可靠性分配工作是很关键的一环。本文以航空航天部研制的点焊、弧焊、喷漆三种类型的工业机器人为例，介绍可靠性预计和分配的方法。

2.2 可靠性预计

在确定了产品的设计方案后，就可以进行可靠性预计。通过预计能够使设计者根据预计值发现产品的可靠性薄弱环节，对设计方案提出修改意见；使设计者对产品在有现的元器件水平和生产、使用条件下可能达到的可靠性指标有一个较客观的预估。预计的结果准确与否取决于下述两个条件：

- 1) 反映组成产品的各个部分之间的可靠性关系的概率计算公式，即产品的可靠性模型。

- 2) 经过分析和简化的、可用于元件可靠性预计的失效率数据。

从产品设计方案的选择、修改、实施，直至最终形成产品的过程中，需要进行多次可靠性预计，而且越早进行可靠性预计越有意义，因为借助预计值可及早发现问题，及时采取措施、少走弯路。预计的方法随产品研制的阶段不同而不同，一般有相似设备或相似电路类比法、有源器件组估算法、元器件计数预计法和元器件应力分析预计法。以下将要介绍的点焊、弧焊、喷漆机器人的预计方法均采用元器件计数预计法，这是针对

机器人设计方案已经确定，并正在实施这一阶段进行的。

根据以上提到的可靠性预计所依赖的两个条件，预计的第一步工作是，应该建立正确的可靠性模型。把被分析对象——工业机器人看作一个由若干子系统、部件、元件等组成的系统。那么子系统、部件、元件之间，以及它们与系统之间不仅存在着功能、结构方面的关系，而且还存在着可靠性方面的关系。把系统中各个部分的可靠性及各部分之间的可靠性关系用框图或数学公式的形式正确地描述出来，此即为建立可靠性模型。第二步工作是选择合理的元件失效率数据，用这些数据代入描绘可靠性模型的算式，计算出各个部件、子系统、系统的失效率。在对点焊、弧焊、喷漆机器人进行可靠性预计时，所有电子元件的失效率数据采用的是美军“MIL-HDBK-217D”手册中的数据，所有非电子器件的失效率数据采用美国国防部情报分析中心编写的《非电子器件可靠性数据》文件中的数据。应该指出，《非电子器件可靠性数据》文件中的某些元件的失效率数据因统计数据不充分且不够准确，使得预计的结果在个别地方存在着一定的相对关系误差。尽管如此，预计结果仍然能够在很大程度上反映出系统中的各个薄弱环节，因此对机器人的研制，尤其是在研制初期起了一定的作用。

2.2.1 焊接机器人的可靠性预计

本小节我们详细介绍Ⅰ型点焊机器人和Ⅱ型弧焊机器人的可靠性预计。Ⅰ型点焊和Ⅱ型弧焊机器人分别为6自由度和5自由度的全关节示教再现式直流电动机器人，由机器人本体、计算机及控制、电动伺服、点焊机或弧焊机等四个子系统组成。由于各个子系统之间不存在替代工作的关系，且无冗余，所以，如果有一个子系统发生失效，则整个机器人系统就不能正常工作，这种情况被称作可靠性串联，其可靠性模型框图如图2.1所示。

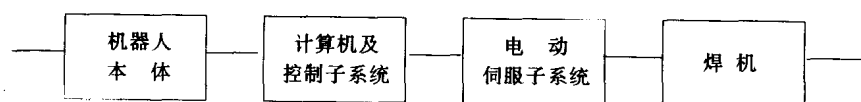


图 2.1 焊接机器人可靠性模型框图

若组成各个子系统的部件之间也未采用替代工作和冗余的方式，则所有子系统也是可靠性串联模型，如图2.2—2.7所示。Ⅰ型点焊机器人和Ⅱ型弧焊机器人的计算机、控制子系统与电动伺服子系统的原理、结构基本雷同，统一用图2.2和2.3表示。

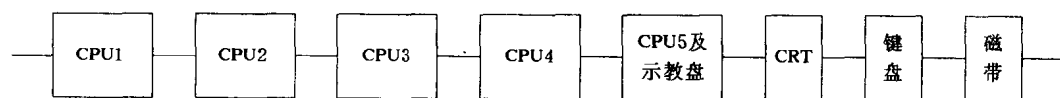


图 2.2 计算机及控制子系统可靠性模型框图

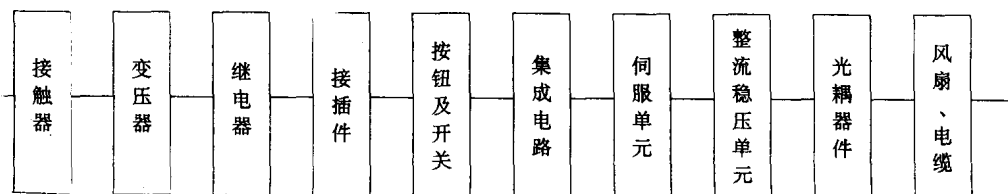


图 2.3 电动伺服子系统可靠性模型框图

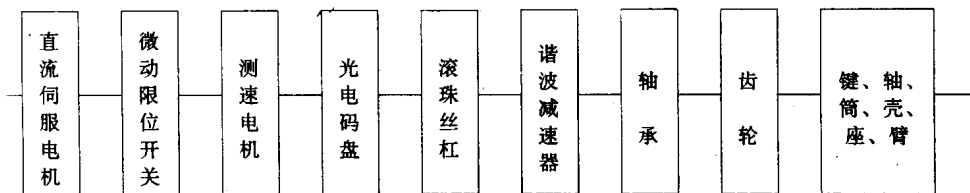


图 2.4 点焊机器人本体可靠性模型框图

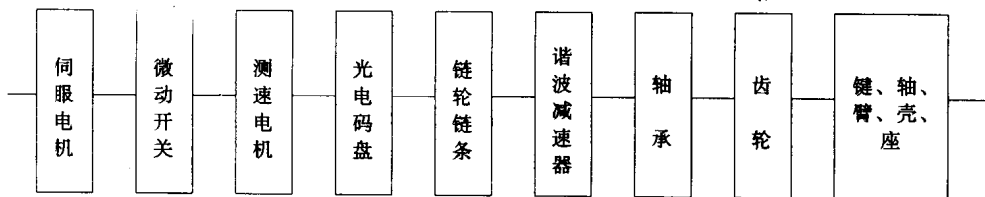


图 2.5 弧焊机器人本体可靠性模型框图

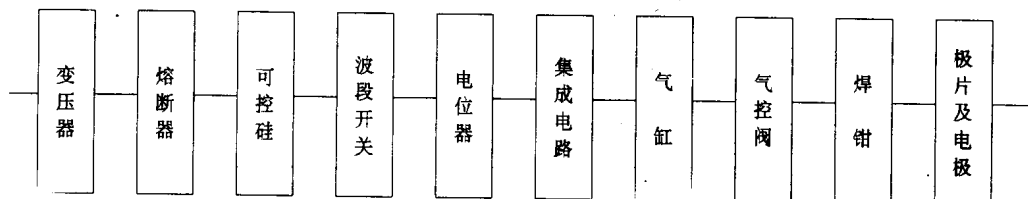


图 2.6 点焊机子系统可靠性模型框图

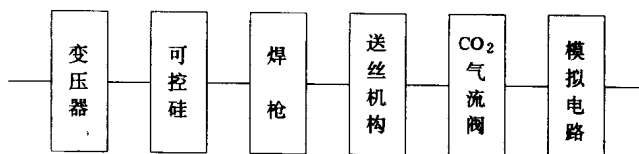


图 2.7 弧焊机系统可靠性框图

建立可靠性模型后,便可根据元件的失效率数据和可靠性模型计算各项可靠性指标。在元件计数预计法中,元件的失效率与由它们所组成的设备的失效率之间有以下关系^[1,2]:

$$\lambda_{\text{设备}} = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_G \cdot \pi_Q)_i \quad (2.1)$$

式中

λ_G ——在某一使用环境中第 i 种元器件的通用失效率,以下预计均按“地面固定”环境;

π_Q ——第 i 种元器件的质量系数;

N_i ——第 i 种元器件的数量;

n ——元件的种类数;

$\lambda_{\text{设备}}$ ——由关系式涉及的所有元器件组成的设备的失效率;

失效率的单位为 fit, $1 \text{ fit} = 1 \times 10^{-9} \text{ 次失效/h}$.

在焊接机器人可靠性预计的具体实例中, $\lambda_{\text{设备}}$ 表示机器人本体、计算机及控制子系统、电动伺服子系统、焊机子系统等的失效率. 由于这几个子系统以可靠性串联的形式组成机器人系统的可靠性模型, 因此机器人系统的失效率等于各子系统失效率之和^[2,3]. 预计数据见表 2.1 和表 2.2. 为了简化预计的步骤, 表中将计算机、控制子系统和电动伺服子系统合并起来进行预计, 称这三部分为控制部分.

从预计结果可以看出, I 型点焊机器人和 II 型弧焊机器人的控制部分的失效率 $\lambda_{\text{控}}$ 最大, 机器人本体次之, 焊机的失效率最小. 这是因为电子元器件较机械零部件的可靠性低, 而控制部分绝大多数的元件是电子元器件的缘故. 机器人本体、焊机子系统主要由机械零部件组成. 另外, 焊机子系统元件数量少、结构简单, 可靠性相对来说就较高. 这说明, 预计结果能反映实际系统的情况. 在表 2.1, 2.2 中还可以看出一些可靠性较低的器件和单元, 如集成电路、接插件、继电器等. 如果对他们采取措施提高其可靠性, 就能提高整个机器人系统的可靠性.

表 2.1 点焊机器人系统可靠性预计表

序 号	名 称	数 量	$\lambda_G \pi_Q$ (fit)	累积失效率 λ
	本 体 部 分			$\lambda_{\text{本}} = 195182$
1	齿 轮	2	169	338
2	中间齿轮	2	169	338
3	伞 齿 轮	5 对	169×2	1690
4	直 齿 轮	3 对	169×2	1014
5	谐波减速器	4 套	1670	6680
6	滚珠丝杠	2	1670	3340
7	轴 承	63	1378	86814
8	微动开关	24	2707	64968
9	直流伺服电机	6	2400	14400
10	测速发电机	6	2400	14400
11	底 座	1	略	
12	腰转支座	1	略	
13	主 轴	1	100	100
14	腰 外 套	1	略	
15	大 臂	1	略	
16	大臂支座	1	略	
17	大臂支轴	2	100	200

续表 2.1

序 号	名 称	数 量	$\lambda_G \pi_Q$ (fit)	累积失效率 λ
本 体 部 分				$\lambda_{\text{本}} = 195182$
18	腕 大 壳	1	100	
19	腕 小 壳	1	100	
20	传动箱体	1	100	
21	传 动 轴	1	100	100
22	内 套 筒	1	略	
23	中间套筒	1	略	
24	腕 转 轴	3	100	300
25	输 出 轴	5	100	500
26	丝杠支座	2	略	
27	平 键	18	略	
控 制 部 分				$\lambda_{\text{控}} = 438587$
28	专用计算机	1 台	147800	147800
29	伺服单元	6 套	(10000) ¹⁾	60000
30	集成电路	100 片	30×35	105000
31	继 电 器	35	330×6	69300
32	接 触 器	5	1100×6	33000
33	接 插 件	29	689	19981
34	开关及按钮	17	2.9×20	986
35	电源变压器	6	140×3	2520
36	电 缆		略	
焊 机 子 系 统				$\lambda_{\text{焊}} = 35824$
37	可 控 硅	2	100×10	2000
38	集成电路	11	30×35	11550
39	继 电 器	4	330×6	7920
40	波 断 开 关	1	960	960
41	电 位 器	5	810×1.5	6075
42	焊接变压器	1	140×3	420