

工业机器人系统可靠性预测方法研究

王 达¹ 孙 鹏² 王 燊³

沈阳新松机器人自动化股份有限公司 辽宁 沈阳 110100

摘 要：可靠性是企业质量管理的核心问题，任何一个现代化的大型企业都必须认真对待。在工业机器人的发展中，工业机器人的性能和精度的需求已经逐渐向可靠性需求的方向发展，其可靠性也越来越受到重视。通过对工业机器人可靠性的研究，给出了其数学模型和方法，并对其进行了仿真计算，结果显示，该方法能很好地解决工业机器人的可靠性预测问题，具有很高的工程应用价值。

关键词：工业机器人；可靠性；预测方法

引言：机器人作为一种新型的机械设备，可以在恶劣的工作条件下，代替工人进行一系列高品质的工作。最初机器人仅仅应用于汽车制造上，但随着机器人技术的发展和精度的不断提高，在工业自动化中得到了越来越多的应用。而我国的机器人产业相对于国外发达国家来说，起步比较晚，在研究、制造方面与国外30年前的水平相差无几，尚未形成一个完整的机器人产品标准。就目前来说，我国机器人产业的整体可靠性低、创新能力弱和高端产品匮乏的弊端已经显露出来，要想在将来抢占市场的主动权，必须脚踏实地，不断提高产品的可靠性和安全性，以提高企业的核心竞争力。

1 工业机器人组成概述以及可靠性分析

1.1 工业机器人系统构成

主机器人是一个在三维空间具有较多自由度的，并能实现诸多拟人动作和功能的机器，而工业机器人则是在工业生产上应用的机器人。它的特点是：可编程、拟人化、通用性、机电一体化。包括以下几个机构：

1.1.1 主体

主体机械包括大臂、小臂、腕部、手部等多个自由度的机械系统。有些机器人还配备了其他的步行装置。工业机器人整体上有6个以上的自由度，一般都有1~3个活动自由度。

1.1.2 驱动系统

驱动机器人的动力装置。根据动力源的不同，可以划分为三种类型：液压、气动、电动。根据需要还可以将这三种类型的模型结合起来并形成一个复合的传动系统。也可以通过机械传动装置如同步带、轮系、齿轮等间接驱动。这三种基本的驱动方式都有各自的特点，目前主要采用的是电动^[1]。

1.1.3 控制系统

根据机器人的工作命令和来自传感器的反馈，控制

机器人的执行机构，实现预定的动作和功能。

高性价比的微型定位装置，给机械手控制器的发展提供了一个新的契机，使得开发低成本、高功能的机械手控制器成为可能^[2]。目前，机器人控制器主要采用ARM系列、DSP系列、POWERPC系列、Intel系列等强大的处理器。

1.1.4 感知系统

该系统包括内、外两部分，分别对内外环境进行监测。

内感应器：用于探测机械手自身状况（例如手臂之间的夹角）的感应器。具体包括：位置、位置、角度等。

外感应器：用于探测机器人周围的环境（例如探测目标，与目标之间的距离）和状态（例如探测到被摄物体是否滑动）。具体包括距离、视觉、力矩等。

智能感应系统的应用，使其具有更高的灵活性、实用性和智能化水平，虽然人的感官系统对外界的资讯反应更灵敏，但在某些特定的信息获取上，工业机器人却要优于人工。

1.1.5 末端执行器

末端执行器连接在机械手最后一个关节上的部件，它一般用来抓取物体，与其他机构连接并执行需要的任务。

1.2 工业机器人可靠性及其应用

工业机器人是否能够在生产中长时间、稳定地工作，其可靠性直接关系到其是否能够取代人力的工作^[3]。工业机器人的可靠性、可维修性、安全性和成本是工业机器人能否实现商业化的关键。

工业机器人的使用可以极大地改善生产效率，能够独立工作，工作时不会感到疲惫，也不会受到外界的情绪和环境因素的干扰，从而保证了产品的品质。现代化的自动化生产系统，由于使用了机器人，变得更加复杂和快速，因而对它的可靠性提出了更高的要求。比如，

在自动化汽车流水线上进行点焊、弧焊、喷漆等作业的机器人，因其可靠性差而频繁地停机，或因维修能力差而发生故障，无法及时修理，造成的经济损失是非常可观的。

在不同的工作环境下，工业机器人可以进行高强度的、持久的、重复的工作，从而使人类摆脱了繁重的体力劳动。人在长达数小时的工作中，尤其是重复的重复工作，会使人感到疲乏，工作效率下降，出错率增加。比如：在汽车生产中，焊接和螺纹零件的组装是一项非常繁重的工作。

工业机器人具有良好的工作环境适应性，可以代替人类在恶劣的工作环境中从事危险的工作，只要在材料和结构上做出合理的选择，就可以在夜晚的高温、低温、异压的环境中，在有有害气体、粉尘、烟雾、放射性辐射等环境中进行作业，或者由工艺机器人代替^[4]。

2 工业机器人发展现状

2.1 世界发展现状

工业机器人的产业构成分为：上游、中游、下游三个部分。上游是核心组件，中游是主体和集成技术，下游是二次开发和配套设施。目前，日本、欧洲都是工业机器人的主要技术。由于发达国家早期出现了大量的工人，并且由于环境的原因，他们在很久以前就发展了工业机器人，这就是他们的先进性。就拿美国来说，50年代就有了“工业机器人”这个概念；日本早在70年代就开始发展工业机器人。他们在技术上有着很深的造诣，在某些关键零件上也是如此。目前日本的生产能力和保有量为66%，其汽车拥有量约为每一万人300辆；中国的汽车数量相对较少，但也正是因为如此，中国的汽车销量才会更好。目前，工业机器人的应用也很集中，主要集中于中国，韩国，日本，美国，德国。在这些国家中，75%的产品都是工业机器人。自2013年起，中国已经成为世界上最大的工业机器人市场。就应用产业而言，最大的应用产业是汽车制造业。

2.2 我国工业机器人发展现状

自2013年起，我国工业机器人技术发展迅速，这主要是由于国家政策保障、宏观经济促进、社会环境和技术发展的支撑。由于劳动力成本上升，促使了机器人取代人类。与此同时，我们的关键核心零件，也在逐步的国产化，而在低端的机器人，我们的核心零件，都是国产的，而高端的，还远远不够。新技术的发展必将推动机器人技术的发展。近年来，国内的工业机器人销量呈逐年上升趋势，2013年约为37,000台，至2016年约为90,000台。从技术层面来看，从2015年起，我们就进入了

一个技术的高速发展阶段。到2025年，我国的工业机器人将会有很大的发展。截止到2016年，我国已经建成或正在建设的近50个工业机器人园区；有影响的机器人企业将超过800个；已有50多家上市公司从事机器人业务；2015年，中国大陆的机器人公司成长了30%。

2.3 制约中国工业机器人的发展发展瓶颈

2.3.1 国外企业具有领先优势，国内机器人的市场占有率较低。要想在市场上取得更大的突破，就必须占据更高的市场。

2.3.2 减速器、伺服、电机等关键部件的性能还需进一步提升。例如，精密减速机的额定转矩和传动效率还有待提高。在电机动态响应、过载能力、效率等方面，存在着较大的差距；我们目前还没有达到这个级别的工业机器人。在控制系统的硬件上有很大的差异；在软件实现的构建、控制算法、二次开发等方面还存在着一些不足，动态特性还需要进一步提高；工艺软件包、工艺应用还存在一定的差距。核心技术缺失，产业空心化，国内机器人产业面临着性能和成本的双重压力；产品低端化，重复程度低，工业生产的要求与已有产品的性能存在着明显的矛盾；前沿技术的研究不够深入，缺乏系统性的支撑。

3 可靠性预测研究的内容

从选择、修改、实施直至控制系统的开发，都要进行可靠性预测，并对可靠性进行了预测，并对可靠性进行了客观的评估，对各元件进行了重点分析，指出了薄弱环节，提出了改进的措施。

故障报告、分析和纠正措施系统对提高可靠性具有重要意义。在生产和开发过程中，建立故障报告表、故障分析报告表、措施实施报告表，并对多个报告的现场状况进行实时记录，以便分析和改正措施，并将其应用于设计、实验和生产中。

4 可靠性预测的意义

可靠性预测的方法，在开发和设计的各个阶段都有很大的差异。在产品招标和初期设计阶段，由于不了解所开发的产品中使用的零部件，所以初期的估算往往是一个大致的估算，通常是通过类似的设备或者类似的电路来进行，有源器件的估算和零部件的估算。当产品的设计基本完成，并附上更详尽的元件应力资料时，就可以使用元件的应力分析方法来进行更细致的预测。

5 可靠性预测方法

5.1 工业机器人的可靠性预测与规划

在设计阶段，对机械臂的可靠性进行预测，通常是从零件到机构，再到系统的预测，其可靠性的估算可以

用寿命、强度、概率、类比等方法来进行；而在预测软件的可靠性时，我们可以用假定的方法估算，对其进行可靠性预测，并对其进行分析，得出其可靠度的预算值。工业机器人的可靠性模型是由各个子系统的可靠度模型串联起来的，而各个子系统是由各个组件或最小组件组成的。

5.2 工业机器人控制系统性能指标的确定

可靠性指数是工业机器人可靠性的重要指标，其可靠性指标包括：可靠性 $R(t)$ 、平均无故障时间 MTBF 和失效率 λ 。MTBF 是一个重要的可维修产品的参数。其测量方法是：在一定的条件和时间内，产品的总使用寿命与总失效次数的比率。因为 MTBF 是一个很重要的参数，在设计中，可靠度工程师和设计人员通常采用多种方法和准则来估算其 MTBF。有关的标准有 MIL-HDBK-217F、Siemens Norm、Fides 或 UTEC80-810 (RDF2000) 等。

失效率 (λ) 所有部件失效模式下失效率百分比的分布(比如，一个正向动作开关的故障模式是：接触器不开=20%,接触器不关=80%。所以不开= $\lambda \times 0.2$,不关= $\lambda \times 0.8$) 每个故障对安全系统性能的影响(比如，危险失效= λ_d ,非危险失效= λ_s)检测到的危险失效(利用自动运行的自我诊断技术)占全部危险失效的百分比： $\lambda_{dd} = \lambda_d \times DC$ 。未检测到的危险失效(利用自动运行的自我诊断技术)占全部危险失效的百分比： $\lambda_{du} = \lambda_d \times (1-DC)$

MTTFD 平均危险失效前时间。从设备投入使用到出现危险故障的平均操作时间。指两个相邻的危险故障之间的平均工作时间，又称其为平均故障时间。MTTFd 是由安全可靠标准方法试验统计分析获得的：

$$MTTF = \frac{B_{10d}}{0.1 \times n_{op}}$$

n_{op} 一为年平均动作次数 (或时间)，单位：动作次数/年；

MTTF_d 为平均失效前时间，单位为：年。

$$B_{10d} = 2 \times B_{10};$$

B_{10} 寿命是指零部件在特定条件下运行时，将有 10% 将发生失效的平均寿命。

控制系统的可靠性除了以上指标，还需要 EMC (抗扰度、骚扰度)、环境温度、湿度、海拔、震动条件下的能力，这些都直接决定了控制系统的可靠性。

对于相关重要的安全功能，系统还要有容错冗余机制、可靠的错误诊断能力、危险失效分析及安全状态导入等等，这些都可以极大程度减小机器人意外情况下对

人员的伤害程度。

确定所要研究的系统是否可靠，工业机器人通常是不连续运行的，其可靠性是衡量其可靠性的重要标准；其次，确定各系统指数的高低，并确定各指标的高低，以达到使用的需要；在满足设计要求的情况下，不需要将系统的可靠性指标设定的太高，以免增加生产费用。

5.3 建立预测模型以及相应分析

首先，我们应当建立相应的模型假设，我们以串联型工业机器人为例：工业机器人的各个子系统或相应的零部件相互联系又相对独立，拥有自己特定的功能，无法相互替代，因此我们建立的数学关系表达式应当如下：

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

其中， $R_s(t)$ 是系统整体的可靠性参数， $R_n(t)$ 表示相应子系统或者相应零部件的可靠性参数。N 为相应的子系统或者零件的总数。

在此基础上，我们可以更方便地进行预测分析。在目前的情况下，可以得到相当好的可靠度评价。此外，本文还从分配的观点出发，提出了以下几种主要的分配方法：等分法、代数分配法、伯努利微分方程、重要性因素分配法等，或者按照可靠度预测得到实际可靠度，采用比例分配法。每个子系统的可靠度指数与总的可靠性指数之间存在着以下的联系： $F(R_1, R_2, \dots, R_n) > R$ 。R 是系统所需的可靠度指数。

在没有任何限制的情况下，上式将会有无数的解决办法，按照系统工程的原则，应当按照技术上的合理、经济的计算，迅速地对上式进行限制，并得出其解。

结束语：

工业机器人是一种结构和系统十分复杂的产品，与一般的机械相比，它具有更大的独立性和更大的自由度。因此，如果我们能够从可靠性的角度来分析机器人的稳定性，建立一个稳定的数学模型，并对它的稳定性进行计算，从而减少它的失灵，从而改善它的可靠性。

参考文献：

- [1]林青. 机器人可靠性研究机器人技术与应用[J].1995. (05):128.
- [2]王瑞芳, 刘林, 徐片. 机器人系统的故障预测技术研究[J].制造业自动化, 2008(11):149-15.
- [3]陈胜军. I: 业机器人系统可靠性预测方法研究[J]. 南京师范大学学报1: 工程技术版, 2009. (07):51-52.
- [4]陈胜军. 面向工业机器人系统的可靠性预测方法研究[J]. 数学的实践与认识.2012. (09):135-136.