

基于故障树方法的并联机器人失效分析

牛越峰, 温庆荣

华北光电技术研究所, 北京 100015

摘要 用故障树方法, 分析了并联机器人失效问题, 给出了典型并联机器人的失效级别、失效形式、失效原因和失效后果。采用故障树分析法建立并联机器人故障树, 基于概率层面, 给出了可能失效的相关定性、定量分析, 得出了并联机器人失效的薄弱环节和一般规律, 可确保并联机器人在应用中具有高可靠性。

关键词 并联机器人; 失效分析; 故障树分析

并联机器人是一类全新的机器人, 具有刚度大、承载能力强、误差小、精度高、自重负荷比小、动力性能好、控制容易等一系列优点, 在 21 世纪将有广阔的发展和前景。并联机器人通常应用于对可靠性要求很高的场所, 如外科手术、宇宙空间、远程控制或高速运动机构中^[1]。一个可靠性差的并联机器人不仅不能正常地完成工作, 甚至可能会对使用者、工作环境和对象造成伤害。例如在远程手术中, 使用可靠性差的并联机器人是非常危险的, 轻者会导致手术失败, 重者可能会对患者造成严重伤害, 因此, 并联机器人必须保持良好的可靠性, 将可靠性研究应用到并联机器人领域具有重要意义^[2]。

1 并联机器人组成及失效形式分析

并联机器人由静平台、动平台和多条并行支链组成^[3-5]。

支链分为主动支链、被动有传感支链和被动无传感支链。主动支链具有至少一个主动关节提供所需要的动力, 沿着适当的轨迹推动支链运动; 被动有传感支链至少具有一个有传感的关节, 其主要作用是抑制支链沿着轨迹运动。被动无传感支链上的每一个关节都是无传感的关节, 支链主要用来约束动平台的运动。

支链由一条或多条连杆和多个运动副组成。构成并联机器人各条支链的运动副由连杆对它们实现有效的连接。连杆一般由刚性好的材料制成。

运动副是连接动平台与连杆、连杆与连杆、连杆与静平台的重要部件, 运动副按照是否装有传感器和驱动器可以分为 3 种: 1) 主动运动副, 即安装有驱动器和传感器的运动副; 2) 被动有传感运动副, 即没有安装驱动器, 安装有传感器的运动副; 3) 被动无传感运动副, 既没有安装驱动器, 也没有安装传感器的运动副。图 1 为五支链的并联机器人。

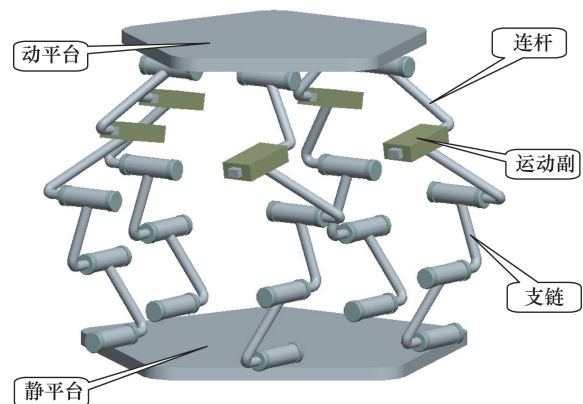


图 1 五支链的并联机器人

Fig. 1 Parallel robot with 5 branches

并联机器人失效形式分为机械本体失效、电气系统失效以及包括软件和硬件在内的控制系统失效。每一种失效形式都会影响其他系统或作为其失效的一部分。由于并联机器人个体在机构设计方面差异巨大, 因此对于给定的并联机器人的失效分析, 应该考虑构成并联机器人所有系统的失效事件、对系统的影响以及对总体性能的影响。从构成并联机器人机械本体的元素来分析, 导致并联机器人失效的因素主要有^[6]。

1) 连杆的失效。其失效形式是连杆断裂。连杆失效导致直接后果就是运动副之间的联系失效, 运动不能有效传递, 从而导致机构整体失效。

2) 运动副的失效。运动副失效最常见的形式是关节断裂和关节挤坏。关节断裂使相应的并联机器人支链分成 2 部分, 因而并联机器人将失去 1 条支链; 关节挤坏是由于关节变形、润滑油失效等原因造成的, 由于关节挤坏将导致其相连 2

收稿日期: 2015-07-21; 修回日期: 2016-01-31

作者简介: 牛越峰, 工程师, 研究方向为光电转台设计及并联机器人, 电子邮箱: bjtunyf@163.com

引用格式: 牛越峰, 温庆荣. 基于故障树方法的并联机器人失效分析[J]. 科技导报, 2016, 34(23): 115-119; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.23.012

条连杆的运动遭到破坏,也就是相应的连杆和关节将变成单连杆。3种运动副,它们的失效形式是不同的。主动型运动副的主要失效形式可以分为驱动器失效、传动失效和传感器失效;被动有传感运动副失效形式除了关节断裂和关节挤坏外,还有传感器失效;被动无传感运动副失效形式是常见的运动副失效形式,即关节断裂和关节挤坏。

3) 支链的失效。支链的失效分为组成部分失效导致的失效和支链的奇异导致的失效。并联机器人的支链失效是由于连杆的失效、主动关节失效和被动关节失效造成的。因此,支链的机械失效形式包括支链的断裂、自由度的减损和传感或运动的减损。支链的断裂是由于关节或连杆的断裂将支链分成2部分,导致机构失去1条支链和支链上的驱动器及关节。自由度的减损是由于关节挤坏或主动关节锁定失效而导致的。当1个关节的传感器失效,对应的支链也会因为不能反馈传感信息而失效。当主动关节失效,对应的支链将不能运动。支链的奇异导致失效,除了构件失效导致机器人支链机械本体失效外,在工作空间的边界上或在工作空间里的奇异位置,也就是在这个位置机构将失去1个或多个自由度,支链将不能沿着设定轨迹运动。因此,支链的奇异位形也被认为是并联机器人支链的失效形式。

4) 不可靠构型将导致并联机器人的失效。在这种情况下,即使所有的主动关节被锁定,并联机器人不能提供向某





一方向运动所必需的力或力偶,仍会沿着这一方向瞬间运动。由于这种瞬时不受约束的运动是不可控制的,因此也被称作失效。

由于并联机器人结构的多样性以及复杂性,至今没有一种好的方法对其可靠性进行有效的分析研究,为了揭示并联机器人诸多失效之间的内在逻辑关系,本研究提出采用故障树分析法对并联机器人失效问题进行研究。

2 故障树分析法

故障树分析(fault tree analysis, FTA)是演绎地表示事故或故障事件发生原因及其逻辑关系的逻辑树图,以最终会导致最坏结果的故障状态作为目标来进行分析,把最坏结果的故障状态选定为顶事件,先找出导致最坏结果故障状态的原因和可能的各种因素,将这些原因和因素作为第二级事件,然后再找出导致第二级事件发生的原因和各种可能因素,并依此类推,逐级找出导致各个中间事件发生的原因和各个可能因素,直到找出非常明晰不需要再分解的原因。在并联机器人系统中,把并联机器人的失效作为顶事件,把各个中间环节导致失效的原因和可能因素作为事件,顶事件与中间事件和底事件直接有内在的逻辑关系,用逻辑符号连接各个有关联的事件,最终连成一个倒立的树状结构,构成树状图形的符号,如表1^[7-9]所示。

表1 故障树分析常用的符号及其含义
Table 1 Common signs and meanings to FTA

符号	名称	含义
	结果事件	顶事件和中间事件都用此符号表示,是可以再分解的事件,下面可以分解为中间事件或底事件,与逻辑门联接。
	底事件	不能再进行分解的事件,或者是没有必要再进行分解的最基本事件,位于故障树的最底层,是导致故障的最基本的原因,在逻辑图里只能作为输入,不能作为输出。
	与门	各事件是逻辑与的关系,当事件 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ 全部发生时,才会导致事件 A 发生。相对应的表达式为: $A = B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cap \dots \cap B_n$ 。
	或门	各事件是逻辑或的关系,当事件 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ 中只要有一个发生,就会导致事件 A 发生。相对应的表达式为: $A = B_1 \cup B_2 \cup B_3 \cup \dots \cup B_n$ 。

3 并联机器人故障树的建立

并联机器人故障树是并联机器人系统故障组合和传递逻辑关系正确而抽象的表达,建树是否完善会直接影响定性、定量分析的结果,是关键的一步。因此,建树时首先应对并联机器人系统及其组成部分失效的原因、后果以及各种影响因素和因果关系进行透彻的研究。

3.1 顶事件的确定

对于并联机器人系统来说,以最终会导致最坏结果的故障状态作为目标来进行分析,把最坏结果的故障状态选定为顶事件。并联机器人由机械本体、电气系统和包括软件和硬件在内的控制系统构成。这些系统的每一种失效形式都会

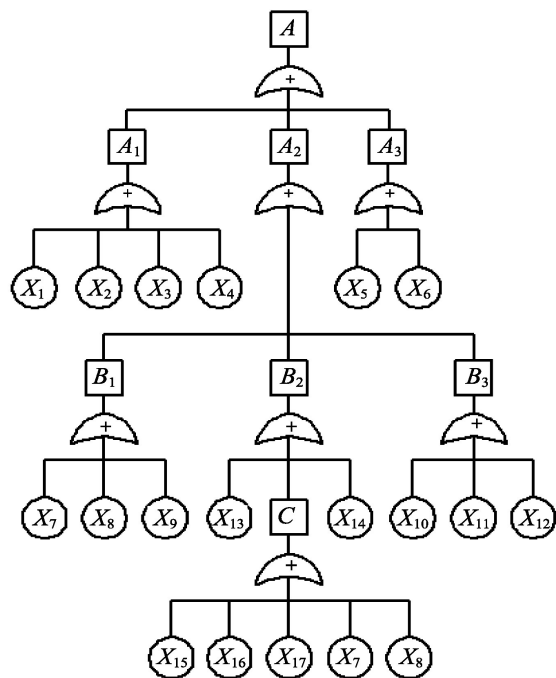
影响其他的系统或作为其失效的一部分,所以将并联机器人失效作为顶事件^[10]。

3.2 故障树的建立

从顶事件开始对故障树进行研究,先找出导致顶事件发生的原因和可能的各种因素,将这些原因和因素作为第二级事件。然后再找出导致第二级事件发生的原因和各种可能因素,并依此类推,逐级找出导致各个中间事件发生的原因和各个可能因素,直到找出非常明晰不需要再分解的原因。这样,就完成了故障树的建立。

将机械本体、电气系统以及包括软件和硬件在内的控制系统作为第一级中间事件,本研究主要对机械本体分支进行

详细研究。机器人机械本体的失效原因有:连杆失效,主动、被动关节失效,主动、被动支链失效或末端执行器失效。因此,机械本体的失效包括自由度的缺损、驱动的缺损和约束的缺损。自由度的缺损是由于关节的挤坏、支链的奇异位形和支链之间的干涉导致的;驱动的缺损将降低机构动力学和运动学性能,它主要是由于传动机构失效、传感器失效和驱动器失效导致的;约束的缺损将使并联机器人获得不可控制的有限的运动,它主要是由于不确定构型、主动支链缺损和被动无传感支链的断裂导致的。其中,无传感支链的断裂是由于关节挤坏、支链奇异位形、关节断裂、连杆断裂和主动关节锁定造成的。根据以上分析建立并联机器人故障树,如图2所示。其中,A表示顶事件,A₁、A₂、A₃表示第一级中间事件,B₁、B₂、B₃表示第二级中间事件,C表示第三级中间事件,X₁~X₁₇表示底事件。



- A—并联机器人失效
- A₁—电气部分失效
- A₂—机械本体失效
- A₃—控制部分失效
- B₁—自由度的缺损
- B₂—约束的缺损
- B₃—驱动的缺损
- C—被动无传感支链的断裂
- X₁—电源失效
- X₂—开关失效
- X₃—电缆失效
- X₄—电机失效
- X₅—硬件失效
- X₆—软件失效
- X₇—关节挤坏
- X₈—支链奇异位形
- X₉—支链干涉
- X₁₀—传动机构失效
- X₁₁—传感器失效
- X₁₂—驱动器失效
- X₁₃—不确定构型
- X₁₄—主动支链减损
- X₁₅—关节断裂
- X₁₆—连杆断裂
- X₁₇—主动关节锁定

图2 并联机器人的故障树
Fig. 2 FTA of parallel robots

4 并联机器人的故障树分析

4.1 定性分析

定性分析的主要任务是寻找导致顶事件发生的所有可能的失效模式——失效谱,或找出使系统成功的成功谱,也就是找出故障树的全部最小割集或全部最小路集^[11]。所谓最小割集就是指如果故障树的某几个底事件同时发生将引起顶事件的发生,而去掉其中任意一个底事件后,就不再是割集,这几个底事件所组成的集合就成为故障树的最小割集。

采用结构法或布尔代数运算法求并联机器人故障树的最小割集,由图2的故障树可以得出,并联机器人各故障事件间的关系都是逻辑或门关系,故其全部最小割集就是全部底事件,即全部最小割集为:{X₁}、{X₂}、{X₃}、{X₄}、{X₅}、{X₆}、{X₇}、{X₈}、{X₉}、{X₁₀}、{X₁₁}、{X₁₂}、{X₁₃}、{X₁₄}、{X₁₅}、{X₁₆}、{X₁₇}。

4.2 定量分析

利用故障树作为计算模型来对并联机器人进行故障树定量分析,先计算底事件发生概率,再通过底事件求顶事件(即系统失效)的发生概率,从而评估系统的可靠性、安全性及风险等。假定故障树的顶事件及相互独立的全部底事件均只有“正常”和“失效”这2种状态,则根据底事件发生的概率,由下自上按故障树的逻辑结构逐级运算,即可求得顶事件发生的概率^[12]。

4.2.1 顶事件发生概率

可按下列公式计算顶事件发生概率,

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - q(i)] \quad (1)$$

式中,Q是顶事件发生的概率,k是最小割集的个数,q(i)是最小割集发生的概率。

根据可靠性理论及工程实践经验,给出底事件发生概率建议值(表2)。

表2 底事件故障发生概率建议值

Table 2 Proposed probabilities of fault tree bottom event

底事件	故障概率 q(i)
X ₁	5×10 ⁻⁴
X ₂	1×10 ⁻⁴
X ₃	1×10 ⁻⁴
X ₄	5×10 ⁻⁴
X ₅	1×10 ⁻⁴
X ₆	5×10 ⁻⁴
X ₇	1×10 ⁻³
X ₈	1×10 ⁻⁵
X ₉	1×10 ⁻⁵
X ₁₀	1×10 ⁻⁴
X ₁₁	5×10 ⁻⁴
X ₁₂	5×10 ⁻⁴
X ₁₃	1×10 ⁻⁵
X ₁₄	5×10 ⁻⁵
X ₁₅	1×10 ⁻⁵
X ₁₆	1×10 ⁻⁶
X ₁₇	1×10 ⁻³

将各底事件概率值代入式(1),即可计算出并联机器人失效的概率 Q 。

$$Q=1-(1-5\times 10^{-4})^5\cdot(1-1\times 10^{-4})^4\cdot(1-1\times 10^{-3})^2\cdot(1-1\times 10^{-5})^4\cdot(1-5\times 10^{-5})\cdot(1-1\times 10^{-6})=0.005981$$

4.2.2 底事件概率重要度 $I_q(i)$ 和关键性重要度 $I_c(i)$

通过故障树分析可以得出,一个底事件的发生则必然导致顶事件发生,但在实际工程中,不同的底事件失效引起的顶事件故障的程度也不同,但故障树中不能表现出区别。因此,应该将底事件对顶事件的影响程度排列分成不同级别,对造成顶事件严重程度高的底事件应重点注意,以提高其可靠性。由于要求不同,设计对象不同,重要度的含意也不同,下面计算其中常用的2种底事件概率重要度。

1) 底事件概率重要度 $I_q(i)$

底事件概率重要度是指因底事件发生概率变化而引起顶事件发生概率变化的程度,表示为:

$$I_q(i)=\frac{\partial Q}{\partial q_i} \quad (2)$$

式中, $i=1, 2, \dots, k$,由于本系统中每个底事件就是一个最小割集,而底事件 X_7 和 X_8 出现了2次,所以各底事件概率重要度分别为:

$$I_q(1)-I_q(6)=1$$

$$I_q(7)=I_q(8)=2$$

$$I_q(9)-I_q(17)=1$$

共有17项底事件,而底事件概率重要度为1的有15项,这17个底事件,其中任何1项发生都将导致顶事件发生。 $I_q(i)$ 越大,说明底事件 X_i 就越重要,对顶事件发生影响就越大,从上述结果可知,底事件 X_7 和 X_8 的概率重要度最大,因此 X_7 和 X_8 的概率变化对顶事件概率影响最大,即对并联机器人影响最大的的失效原因是关节挤坏和奇异位形。

另外,顶事件发生概率的变化量 ΔQ 与各底事件发生概率的变化量 $\Delta q(i)$ 间有近似关系:

$$\Delta Q=\sum_{i=1}^k I_q(i)\cdot\Delta q(i) \quad (3)$$

式(3)说明,如果使概率重要度大的底事件发生概率下降,将更有效地降低顶事件的发生概率。

2) 底事件的关键性重要度 $I_c(i)$

关键性重要度是底事件 X_i 的故障概率 $q(i)$ 的变化率与它引起的顶事件发生概率 Q 的变化率之比,关键性重要度从两个方面描述了事件的重要性。不仅强调底事件的概率重要度,而且还强调了底事件发生概率对系统故障贡献的大小^[13-14],关键性重要度定义为:

$$I_c(i)=\frac{q(i)}{Q}I_q(i) \quad (4)$$

将 $q(i)$ 、 Q 、 $I_q(i)$ 的数值代入,即可得出各底事件关键性重要度(表3)。

从表3的结果可知各底事件的关键性重要度排序为: $I_c(7) > I_c(17) > I_c(1)=I_c(4)=I_c(6)=I_c(11)=I_c(12) > I_c(2)=I_c(3)=I_c(5)=I_c(10) > I_c(8) > I_c(9)=I_c(13)=I_c(15) > I_c(16)$ 。

表3 底事件关键性重要度

Table 3 Critical importance of fault tree bottom event

底事件代号	关键性重要度 $I_c(i)$
X_1	0.0836
X_2	0.0167
X_3	0.0167
X_4	0.0836
X_5	0.0167
X_6	0.0836
X_7	0.334
X_8	0.00334
X_9	0.00167
X_{10}	0.0167
X_{11}	0.0836
X_{12}	0.0836
X_{13}	0.00167
X_{14}	0.00836
X_{15}	0.00167
X_{16}	0.000167
X_{17}	0.167

按关键性重要度大小顺序列出系统底事件,可以用于诊断故障、指导运行和维修。 $I_c(i)$ 越大表明由 X_i 触发系统故障的可能性就越大。因此,一旦顶事件发生,应首先怀疑的是关键性重要度最大的底事件。在这个事件中,也就是并联机器人的关节挤坏和主动关节锁定是导致并联机器人故障的最大原因。

5 结论

1) 通过对并联机器人组成结构进行分析,给出了典型并联机器人的失效级别、失效形式、失效原因和失效后果。

2) 采用故障树分析法建立并联机器人故障树,基于概率层面,给出了可能失效的相关定性、定量分析,找出了薄弱环节。

对于故障概率值高的部件,应从选材和加工工艺等方面采取措施尽量降低其故障概率值;对于概率值低而重要度高的部件和环节,须采取相应措施予以重视。具体而言,就是在工程设计时尽量避免奇异位形的出现;在制造时加强质量控制,对于容易挤坏的关节要提高其可靠性,并配置备件;在计算并联机器人的运动时,做好路径规划,避免主动关节被锁定。

本研究将故障树方法应用在并联机器人设计当中,取得了较好的效果,预防了并联机器人可能出现的故障。故障发生时,提高了故障诊断的准确率,节省了时间,提高了可靠性。

参考文献(References)

- [1] Notash L, Huang L. On the design of fault tolerant parallel manipulators [J]. Mechanism & Machine Theory, 2003, 38(38): 85-101.
- [2] 黄真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论与控制[M]. 北京: 机

- 械工业出版社, 1997: 110-115.
- Huang Zhen, Kong Lingfu, Fang Yuefa. Mechanics and control of parallel manipulators[M]. Beijing: Mechanical Press, 1997: 110-115.
- [3] Sahinkaya M N. Guest Editorial: Special issue on dynamics and control of parallel manipulators[J]. Policy Futures in Education, 2012, 10(26): 552-562.
- [4] Huang C, Liu L, Wang X, et al. Robust scheme of global parallel force/position regulators for robot manipulators under environment uncertainty[J]. Control Theory and Technology, 2007, 5(3): 235-239.
- [5] Hassan M, Notash L. Optimizing fault tolerance to joint jam in the design of parallel robot manipulators[J]. Mechanism & Machine Theory, 2007, 42(10): 1401-1417.
- [6] 宿吉鹏. 并联机器人运动可靠性分析[D]. 黑龙江: 东北大学, 2006.
- Su Jipeng. The reliability analysis of parallel robot kinematics[D]. Heilongjiang: Northeastern University, 2006.
- [7] 孙志礼, 陈良玉. 实用机械可靠性设计理论及方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 138-145.
- Sun Zhili, Chen Liangyu. Theory and method of practical mechanical reliability design[M]. Beijing: Science Press, 2003: 138-145.
- [8] 徐维新, 秦英孝. 可靠性工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988: 165-171.
- Xu Weixin, Qin Yingxiao. Security Engineering[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1988: 165-171.
- [9] 史定华. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1993: 89-95.
- Shi Dinghua. Technical methods and theories of fault tree analysis[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1993: 89-95.
- [10] Zhang H H, Xie L Z, Li D Z. Safety analysis of cornea grafting microsurgery robot system[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2004, 30(2): 151-155.
- [11] 董方元. 双35高炮供弹机故障树分析[J]. 四川兵工学报: 2003, 24(4): 18-21.
- Dong Fangyuan. Fault diagnosed of cartridge supplying device for Double 35 based on fault tree analysis[J]. Journal of Sichuan war industry, 2003, 24(4): 18-21.
- [12] 常星. 基于土压平衡盾构机大功率减速器的可靠性评估及参数优化设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- Chang Xing. Reliability assessment and parameter optimization design of large power reducer based on earth pressure balance shield machine [D]. Chongqing: Chong Qing University, 2011.
- [13] 陈明, 陈云, 陈炳森. 复杂产品研发中的技术风险管理[J]. 制造业自动化: 2005, 27(10): 6-8.
- Chen Ming, Chen Yun, Chen Bingsen. Management of technical risk in the development of complex product[J]. Manufacturing Automation, 2005, 27(10): 6-8.
- [14] 王萍, 杨保年. 基于故障树的地铁车辆客室自动门系统可靠性分析[J]. 南京工业职业技术学院学报, 2013, 13(2): 22-25.
- Wang Ping, Yang Baonian. Reliability analysis of auto passenger door system in metro vehicle based on fault tree[J]. Journal of Nanjing Institute of Industry Technology, 2013, 13(2): 22-25.

Fault diagnosis of parallel robots using fault tree analysis

NIU Yuefeng, WEN Qinrong

North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract Parallel robots are usually used in occasions requiring high reliability, such as surgical operation, space station remote control and high-speed motion mechanism. Methodologies for parallel robot diagnosis are studied using fault tree analysis in this paper. A summary of mechanical failure levels, modes, effects and causes of parallel manipulators is tabulated to establish the fault tree analysis for parallel robots. Qualitative and quantitative results are presented with probability levels, and the general rules of highly reliable parallel robots for application are derived.

Keywords parallel robots; failure analysis; fault tree analysis

(责任编辑 傅雪)