

文章编号: 1000-582X(2012)01-024-05

数控系统软件故障定位技术

袁修华^{1,2}, 王义强¹, 胡艳娟², 赵宏伟²

(1. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315100; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要: 为了快速准确地对数控系统中的软件故障实施定位, 提高数控系统可靠性, 提出将改进的相似路径算法和模糊判断技术应用到数控系统软件故障定位领域。根据监控器记录的信息, 生成失效路径; 根据改进的相似路径算法, 由程序控制流图和失效路径生成相似路径集; 通过程序切片算法, 将可疑代码的范围减少; 同时采用模糊数学来判断可疑代码, 进而对控制流类故障进行定位。为了验证该方法的可行性, 事先在 NURBS 插补模块中植入故障, 并对该模块进行故障定位实验。实验结果表明, 该方法是一种行之有效的数控系统软件故障定位方法。

关键词: 数控系统软件; 故障定位; 失效路径; 相似路径; 模糊判断

中图分类号: TG659

文献标志码: A

Software fault location of CNC system

YUAN Xiu-hua^{1,2}, WANG Yi-qiang¹, HU Yan-juan², ZHAO Hong-wei²

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo, Zhejiang 315100, P. R. China;
2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, P. R. China)

Abstract: In order to quickly and accurately locate the fault of CNC software and improve the reliability of CNC system, an improved algorithm of similar path and fuzzy judgment is introduced into the fault location of CNC software. Firstly, according to the execution information recorded by monitor, the failed path is generated; secondly, the similar path set can be obtained from control flow graph and failed path; then the search scope of suspicious codes can be reduced by program slicing; finally, the fuzzy mathematics is performed to judge suspicious codes. In addition, the experiment on the NURBS interpolation injected bugs is carried out. The experiment results indicate that the proposed method is effective in locating the fault of the CNC software.

Key words: CNC software; fault location; failed path; similar path; fuzzy judgment

随着软件技术的发展, 数控系统逐渐由软件来实现硬件的功能, 即硬件功能软件化。从理论上讲, 软件消除了硬件退化的先天局限性, 软件化的数控系统是正确、一致和健壮的。但是, 软件可靠性要比硬件可靠性更难以保证。近年来, 数控系统硬件可靠性得到了很大的提高^[1-3]; 然而, 国内外关于数控系统软件可靠性的研究, 尤其是故障诊断方面的研

究甚少。因此, 数控系统软件故障诊断成为提高数控系统可靠性的一个主要研究内容。

数控机床故障分析常采用故障模式及影响分析(FMEA)和故障树分析(FTA)^[3-6]方法。这些方法在机床本体和数控系统硬件故障分析上取得了成功, 但在软件故障分析时并不适用, 不能有效地定位故障程序代码。以往软件故障定位是在软件测试阶段的研究,

收稿日期: 2011-09-12

基金项目: 国家科技重大专项 (2009ZX04014-013-01)

作者简介: 袁修华(1983-), 男, 浙江大学博士后, 主要从事数控系统可靠性方面的研究。

王义强(联系人), 男, 浙江大学教授, 博士生导师, (E-mail) jluwang@gmail.com。

主要有程序切片^[7-8]、可视化测试^[9]、相似路径集^[10-11]等方法。程序切片可以缩小错误代码的范围,但是计算效率低;可视化测试要求尽可能多的测试用例来覆盖代码;相似路径集算法无法判断相似路径是否可行。另外,这些故障定位方法计算代价高,定位精度不高。

笔者针对数控系统维护阶段的故障展开研究,即数控系统软件故障定位。提出的数控系统软件故障定位方法涉及失效路径的生成、改进的相似路径算法和模糊判断,实现人工智能故障定位。

1 数控系统软件故障定位

随着数控系统向高精度、高速化、智能化和复合化的方向发展,实时性要求越来越高,计算量越来越大,软件故障问题也越来越突出。数控系统软件故障按类型分为内存错误、初始化错误、计算错误、输入/输出错误、竞争类错误和控制流错误等。前面 5 类错误可以通过工具来自动检测,只占软件故障很少一部分。数控系统软件故障主要是控制流类错误,它无法用工具检测,这里要定位的故障即是控制流类故障。数控系统软件故障可以描述为:人为设计错误会在软件中产生一些缺陷,当软件执行路径经过缺陷程序代码时,就会发生故障。数控系统软件故障定位就是选取与故障运行相似的成功路径集,比较失效路径和成功相似路径的差异来定位故障代码。借鉴飞机黑匣子的概念,在功能模块各个分支处插桩,并设计了数控系统软件监控器。监控器包含了软件测试阶段的执行轨迹信息(输入/输出数据、执行路径等)。在数控系统工作时,监控器实时记录软件模块的运行信息。数控系统软件故障定位方法如图 1 所示。

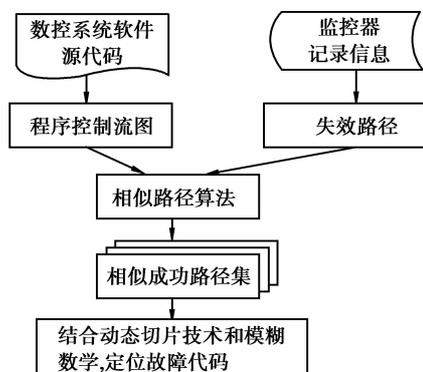


图 1 数控系统软件故障定位方法

完整的故障定位步骤为:

1) 根据监控器记录的软件模块执行轨迹,生成失效路径;

- 2) 根据数控系统软件源代码,生成程序控制流程图;
- 3) 根据相似路径算法,对程序控制流程图和 1 条失效路径处理,生成相似路径集;
- 4) 利用监控器记录的历史执行轨迹,对相似路径集中的路径进行可行性判断;
- 5) 利用程序切片技术和模糊数学,计算失效路径中代码的可疑度,按照可疑度大小排序,可疑度最大的程序代码即为故障代码。

2 相似路径算法实现

求解相似路径涉及到分析程序的控制流图,搜索控制流图的无约束边,替换失效路径中的无约束边,判断相似路径的可行性等操作。

2.1 程序控制流图

程序控制流图是一个具有唯一入口和唯一出口的有向图。在控制流图中,节点表示程序中谓词节点,边表示控制流。它将程序源代码用图的形式表示,方便地分析代码间的主宰关系、蕴含关系和执行路径等。假设边 e_0 和边 e_k 分别是控制流图的唯一进入边和离开边,当从边 e_0 到边 e_j 的任何路径都经过边 e_i ,边 e_i 和边 e_j 存在主宰关系,即边 e_i 主宰边 e_j ;当从边 e_i 到边 e_k 的任何路径都经过边 e_j ,边 e_i 和边 e_j 存在蕴含关系,即边 e_i 蕴含边 e_j ;当边 e_u 既不主宰其他的边也不被其他边所蕴含,则边 e_u 称为无约束边。

2.2 相似路径算法

相似路径算法是根据程序控制流图,采用无约束边的路径替换算法,生成相似路径,其基本思想如图 2 所示。失效路径 π_f 与相似路径 π_1 间的距离反映路径间的差异,其值越大,说明路径差异越大,相似程度越低。路径距离的计算步骤如下: $\text{dist}(\pi_f, \pi_1)$ 的初始值为 0;对路径 π_f 与 π_1 中不能对齐的每条无约束边, $\text{dist}(\pi_f, \pi_1)$ 的值均加 1;对能够对齐但不相等的两条无约束边, $\text{dist}(\pi_f, \pi_1)$ 的值累加 1;最后得到的值即是 2 条路径的距离。

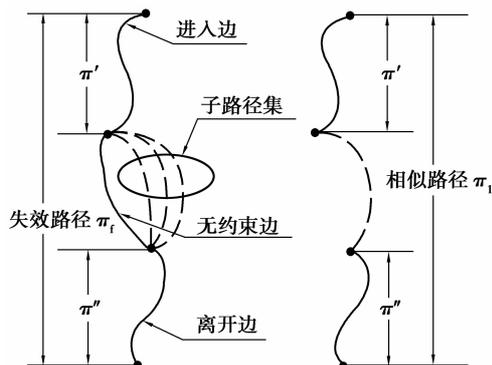


图 2 相似路径生成示意图

在“替换无约束边→填补不连续”的思想下,相似路径算法首先确定失效路径中的谓词节点和无约束边,然后在控制流图中寻找相似路径,如图 3 所示。程序中谓词节点有 while、for、if、switch/case 等,这些语句节点取值决定控制流图中的执行路径。在数控系统工作过程中,监控器实时记录和保存软件模块执行轨迹信息。在获得相似路径集后,根据监控器的历史执行轨迹信息来判断相似路径是否可行,可行的相似路径即是成功相似路径。

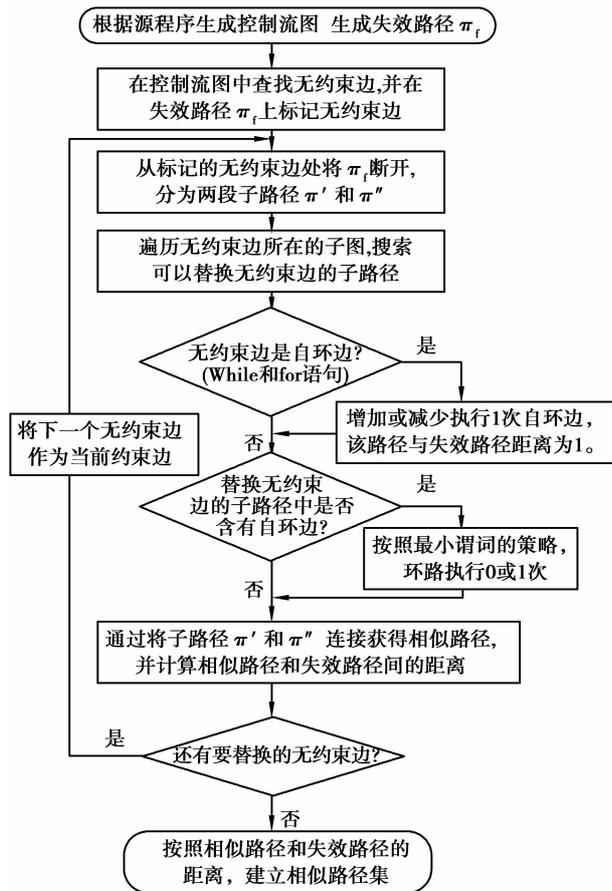


图 3 相似路径算法

3 程序切片和模糊判断技术

程序切片是指将与某个输出变量有关的语句和谓词都抽取出来组成一个新的程序。程序切片具体做法是:根据给定的切片变量和语句标号,从语句标号处向前回溯,找出所有影响切片变量值的语句,再由这些语句组成新的程序。程序切片将程序中不可能产生故障的部分删除,把故障定位在一个较小的范围中。

在以往的故障定位过程中,程序代码或者判断是怀疑代码,或者判断是正确代码。如果故障代码判断是正确的,不再接受其他相似成功路径的考察,

则会导致故障定位失败。为改进这种判断方法,引入了模糊判断。模糊数学^[12-13]吸收人脑对于模糊事物识别和判断的优点,用精确的数学方法处理模糊事物。在故障定位时,采用故障隶属度函数计算程序代码的可疑度,即

$$\mu(x_p, x_t) = x_t / (x_p + x_t), \quad (1)$$

式中: x_t 表示失效路径经过控制流图中边的次数; x_p 表示相似路径集中的成功相似路径经过控制流图中边的次数。根据失效路径和成功相似路径,逐个计算控制流图中边的故障隶属度值,故障隶属度值最大的程序语句即为故障代码。

4 数控程序故障定位分析

以数控系统 NURBS 插补为例,来进行软件故障定位。图 4 是 NURBS 数控插补程序,插补原理见参考文献^[14-15]。图 4 中 S_x 表示插补程序的第 x 句代码,在 S_{25} 中植入了故障。

```
double Cac_u(double m_ui, double m_U[2], double m_B
[12], double m_Vec, double m_A, double m_Epli, double
m_T, int m_path[8]) //m_path 记录程序执行路径
{
S1 double t, m_u;
S2 double m_deriv[6], m_R; //一、二阶导数和曲率半径
S3 double m_VV[2]; //加速度和弓高误差约束的速度
S4 DOUBLE m_v; //NURBS 实时插补速度
S5 t = (m_ui - m_U[0]) / (m_U[1] - m_U[0]);
... //省略代码是计算 m_deriv 和 m_R, 是顺序结构
S19 m_V[0] = sqrt(pow(m_R, 2) - pow(m_R - m_Epli, 2)) / m_T;
S20 m_V[1] = sqrt(m_R * m_A);
S21 m_path[0] = 1;
S22 if(m_VV[1] <= m_VV[0]) {
S23 m_path[1] = 1;
S24 if(m_VV[1] <= m_VV[0]) {
S25 m_V = m_Vec; //植入故障, 正确是 m_V = m_VV[1]
S26 m_path[2] = 1; }
S27 else {
S28 m_V = m_VV[2];
S29 m_path[3] = 1; }
S30 else {
S31 m_path[4] = 1;
S32 if(m_VV[1] <= m_Vec) {
S33 m_V = m_VV[1];
S34 m_path[5] = 1; }
S35 else {
S36 m_V = m_Vec;
S37 m_path[6] = 1; }
S38 m_u = m_ui + m_V * m_T / sqrt(pow(m_deriv[0], 2) +
pow(m_deriv[1], 2) + pow(m_deriv[2], 2));
S39 if(m_u > 1) {
S40 m_u = 1;
S41 m_path[7] = 1; }
S42 return m_u;
}
```

图 4 NURBS 插补程序

NURBS 曲线参数分别是:控制点(5,5,4)、(25,40,9)、(50,70,16)、(60,100,22)、(70,73,30)、(50,57,37)、(112,40,41),权因子(1.00,1.20,1.00,1.25,0.90,0.85,1.00),控制矢量(0,0,0,0,0.453 1,0.548 5,0.630 6,1.000,1.000,1.000,1.000),如图 5 所示。插补参数分别是:插补速度(m_Vec)是 4 m/s、插补周期(m_T)是 2 ms、最大进给加速度(m_A)是 5 m/s²、最大弓高误差(m_Epli)是 2 μm。当在此插补参数下插补该曲线时,数控插补程序出现了故障。即当 $u=0.544 7$ 时插补点出现了弓高误差大于事先设定的最大弓高误差(2 μm),如图 6 所示。

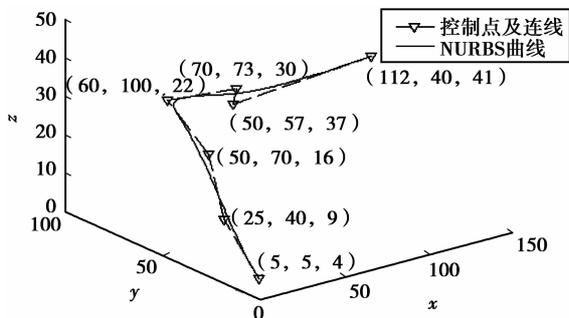


图 5 NURBS 曲线

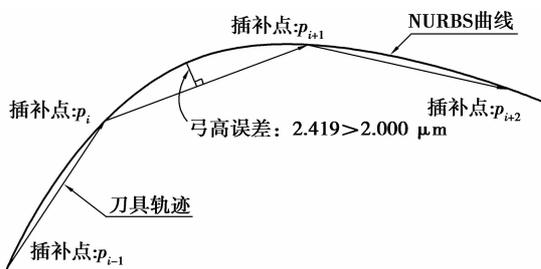


图 6 插补故障示意图

首先根据 NURBS 插补源程序构造控制流程图,如图 7 所示。其中,源程序代码和控制流图元素对应关系,如表 1 所示。根据控制流图确定各边的主宰和蕴含关系,进而确定控制流图中无约束边。图 7 中无约束边是 $e_4 e_5 e_6 e_7 e_9$ 和 e_{10} 。根据发生故障时监控器的记录,当 $u=0.544 7$ 时发生了故障,失效路径 π_f 是: $e_1 e_2 e_4 e_8 e_9 e_{11}$ 。根据程序控制流图,失效路径中无约束边是 e_4 和 e_9 。根据相似路径算法(图 3),对于无约束边 e_4 ,用无约束边 e_5, e_6, e_7 替换,得到相似路径分别是 $\pi_1 \{e_1 e_2 e_5 e_8 e_{10} e_{11}\}$ 、 $\pi_2 \{e_1 e_3 e_6 e_8 e_{10} e_{11}\}$ 、 $\pi_3 \{e_1 e_3 e_7 e_8 e_{10} e_{11}\}$;对于无约束边 e_9 ,用无约束边 e_{10} 替换,得到相似路径是 $\pi_4 \{e_1 e_2 e_4 e_8 e_{10} e_{11}\}$;因此,相似路径集是 $\{\pi_1 \{e_1 e_2 e_5 e_8 e_{10} e_{11}\}, \pi_2 \{e_1 e_3 e_6 e_8 e_{10} e_{11}\}, \pi_3 \{e_1 e_3 e_7 e_8 e_{10} e_{11}\}, \pi_4 \{e_1 e_2 e_4 e_8 e_{10} e_{11}\}\}$,相似

路径与失效路径的距离都是 1。根据监控器记录的历史轨迹,成功的相似路径有 π_1, π_2 和 π_3 。根据公式(1)计算失效路径的元素可疑度,计算结果如表 2 所示。

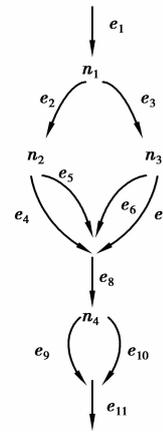


图 7 插补程序的控制流图

表 1 程序代码与控制流图元素对应关系

代码行	控制流图元素	代码行	控制流图元素
1-21	e_1	32	n_3
22	n_1	33,34	e_6
23	e_2	36,37	e_7
24	n_2	38	e_8
25,26	e_4	39	n_4
28,29	e_5	40,41	e_9
31	e_3	42	e_{11}

表 2 元素的可疑度

失效路径元素	e_1	e_2	e_4	e_8	e_9	e_{11}	n_1	n_2	n_4
可疑度	0.25	0.50	1.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	0.25

在表 1 中,边 e_4 的可疑度是最大的,因此是故障边。根据切片技术,将与 u 无关的第 26 句代码删除。故障代码是第 25 句代码,这与之前植入的故障代码相符合。因此,数控系统软件故障定位是一种行之有效的故障定位方法。

5 结 论

为了快速准确地定位数控系统软件故障,提高数控系统可靠性,笔者提出采用改进的相似路径算法和模糊数学来定位数控系统软件中的控制流类故障。同时,以 NURBS 插补模块为例,对植入故障的

插补程序进行了故障定位实验。实验结果表明数控系统软件的故障定位方法可以将故障定位到代码层,是一种行之有效的故障定位方法。因此,提出的数控系统软件故障定位为软件故障自修复和可靠性自增长提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 乔巍巍,贾亚洲,张海波,等. 数控系统故障分析及可靠性提高措施[J]. 吉林大学学报:工学版,2006,36(2): 69-72.
QIAO WEI-WEI, JIA YA-ZHOU, ZHANG HAI-BO, et al. Failure analysis and reliability enhancement measures of computer numerical control system [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(2): 69-72.
- [2] 游达章,唐小琦,戴怡,等. 贝叶斯理论的可靠性评估方法及在数控系统评估中的运用[J]. 中国机械工程, 2011,22(3):314-317.
YOU DA-ZHANG, TANG XIAO-QI, DAI YI, et al. Reliability estimation of CNC system based on bayes method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011,22(3):314-317.
- [3] ZHANG H B, JIA Y Z, ZHOU G W. Time between failures model and failure analysis of CNC system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology: New Series, 2007,14(2):197-201.
- [4] 张日明,孙大文. 数控装备故障模式分析[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,38(增刊): 123-125.
ZHANG RI-MING, SUN DA-WEN. Fault mode and effect analysis of computer numerical control equipment[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2008,38(S1): 123-125.
- [5] 贾志成,胡仲翔,申桂香,等. 数控机床故障模式的对比分析[J]. 兵工学报,2009,30(1): 86-90.
JIA ZHI-CHENG, HU ZHONG-XIANG, SHEN GUI-XIANG, et al. Contrast of fault mode analyses of CNC machine tools between the Chinese-built and the German [J]. Acta Armamentarii,2009,30 (1): 86-90.
- [6] WANG Y Q, WANG X J, HUA S M. Reliability analysis and improvement of ATCs of CNC lathes[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 37/38: 939-943.
- [7] ZHANG X Y, GUPTA N, GUPTA R. A study of effectiveness of dynamic slicing in locating real faults[J]. Empirical Software Engineering, 2007, 12(2): 143-160.
- [8] LIU S K, YANG X H. The analyzing technique of program based on program slicing[C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Advanced Measurement and Test, May 15-16, 2010, Sanya, China. [S. l.]: Advanced Materials Research, 2010, 108-111: 856-859.
- [9] JONES J A, HARROLD M J, STASKO J. Visualization of test information to assist fault localization[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Software Engineering, May 19-21, 2002, Orlando, FL, USA. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2002: 467-477.
- [10] WANG T, ROYCHOUDHURY A. Automated path generation for software fault localization [C]//Proceedings of the 20th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering, Nov. 7-11, 2005, Long Beach, CA, USA. [S. l.]: Association for Computing Machinery, 2005: 347-351.
- [11] YE J M, ZENG Y, JIN C, et al. A method to generate the most similar path set based on given failure path[C]//Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, Oct. 29-31, 2010, Xiamen, China. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2010, 1: 635-638.
- [12] 刘世豪,叶文华,唐敦兵,等. 基于层次分析法的数控机床性能模糊综合评判[J]. 山东大学学报:工学版, 2010,40(1):68-72.
LIU SHI-HAO, YE WEN-HUA, TANG DUN-BING, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for the performance of a numerical control machine tool based on the analytic hierarchy process [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2010, 40(1):68-72.
- [13] 张根保,庞继红,陈国华,等. 数控装备质量的模糊物元综合评价方法[J]. 重庆大学学报,2010,34(1): 36-41.
ZHANG GEN-BAO, PANG JI-HONG, CHEN GUO-HUA, et al. A comprehensive evaluation method of fuzzy matter element for CNC equipment quality[J]. Journal of Chongqing University,2010,34(1): 36-41.
- [14] LIU X B, AHMAD F, YAMAZAKI K, et al, Adaptive interpolation scheme for NURBS curves with the integration of machining dynamics [J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 2005, 45(4/5): 433-444.
- [15] ZHANG D L, ZHOU L S. Intelligent NURBS interpolator based on the adaptive feedrate control[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(5): 469-474.