

基于梯形图复杂依赖关系的分解研究

赵 莹, 严 义*

(杭州电子科技大学 智能与软件技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 依赖关系分析是一种重要的测试、理解、维护程序及并行编译常用的方法。针对由于梯形图复杂依赖关系而导致其并行性不易识别的问题,从数据和控制依赖两方面建立了梯级间的依赖关系,提出了基于梯形图依赖关系的分解方法,并给出了具体实例。研究表明,该基于梯形图复杂依赖关系的分解方法能快速识别出梯形图的并行梯级,缩短了扫描周期,并提高了系统响应速度。

关键词: 可编程控制器;梯形图;数据依赖;控制依赖

中图分类号: TP332.3;TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)05-0605-04

Study on decomposition for LD-based complicated dependence analysis

ZHAO Ying, YAN Yi

(Institute of Software and Intelligent Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Dependence analysis is an important method of testing, understanding, maintaining program and parallel compiling. Aiming that the parallelism of ladder diagram (LD) is difficult to identify, the dependence relations among the rungs were established from the data and control aspects. A method was proposed to decompose dependence relations and the examples were given. The research results show that the method can identify the concurrent rungs, shorten the scan time and improve the response speed of the system.

Key words: programmable logic controller (PLC); ladder diagram; data dependence; control dependence

0 引 言

由于具有使用灵活方便、抗干扰能力强、可靠性高等一系列优点,可编程逻辑控制器(PLC)已成为工业控制领域普遍使用的通用控制器^[1]。PLC采用梯形图编程,通过逐条扫描用户程序完成控制的功能,但这种执行限制了PLC的响应速度。为提高PLC响应速度,文献[2]提出了改进PLC内核引擎的调度算法,文献[3]提出了避免PLC无效指令的编译优化方法。近年来随着高性能并行计算机技术的迅速发展,通过依赖技术来识别串行程序中的并行性、提高响应速度已取得一系列理论成果。目前国内外学者已提出了许多关于程序的依赖性分析方法^[4-5],而针对梯形图的依赖性分析却较少涉及。Miyazawa、Daoshan Du等人提出了梯形图程序简单的数值依赖关系^[6-8],但他们均未详细说明依赖关系如何获得,更未涉及到控制语句的分

析。控制语句也是梯形图的重要组成部分,其依赖关系及并行性的研究对于梯形图并行编译意义重大。

为此,本研究在已有的依赖性分析及相关技术工作基础上,将程序依赖分析的思想首次引入梯形图的分析中,提出基于梯形图复杂依赖关系的分解方法,讨论如何构造依赖图,然后通过实例探讨其在并行性识别上的应用。结果表明,该方法在一定程度上可以解决梯形图并行性难以识别及并行编译的问题。

1 梯形图基本概念

国际电工委员会发布的IEC61131-3国际标准规范了5种PLC编程语言:顺序功能图、功能块图、梯形图、指令表及结构文本,其中,梯形图语言源于继电器原理图,具有直观易懂的优点,是最常用的编程语言。梯形图遵循“从左到右,自上而下”的原则。梯形图工作流程图如图1所示,PLC实现控制的过程就是输入

收稿日期:2011-11-25

作者简介:赵 莹(1986-),女,河南新郑人,主要从事智能与软件技术方面的研究。E-mail: xftj_zy@163.com

通信联系人:严 义,男,教授,硕士生导师。E-mail: yybjyj@163.com

刷新,运行用户程序,输出刷新,永不停止而反复地进行着,该过程称为循环扫描工作方式。由于梯形图程序遵循冯·诺依曼体系,所有的指令将按照一定的顺序串行执行,这就导致了PLC的响应速度慢。

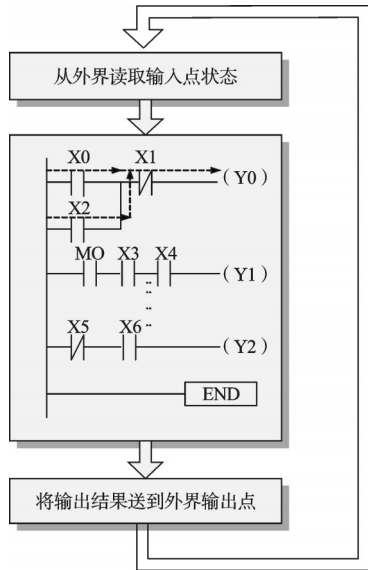


图1 梯形图工作流程图

随着并行计算的发展,梯形图并行执行的研究被提上日程,通过利用FPGA特有的硬件并行性来提高PLC的执行速度^[9-10],已经成为可编程控制器领域新的研究热点。如果能充分挖掘梯形图中的并行性,然后在支持并行运行机制的芯片上(如FPGA)运行,则PLC完全摆脱了冯·诺依曼体系的限制,可使得PLC响应速度大幅提高,如何发掘梯形图串行程序中的并行性至关重要。本研究以梯形图的梯级为依赖分析单元,通过对依赖关系的分解进而识别梯级的并行性。梯形图依赖关系分析对其程序的分析、调试、维护以及并行架构开发等方面都具指导意义。

2 梯级间的依赖关系

梯形图之间的依赖关系较为复杂。首先,输入、输出变量之间可交叉,这样就形成梯级间的多种依赖;其次,梯形图存在多种控制语句,当各种控制语句相互嵌套时,依赖关系也就错综复杂而不易判断;另外,梯形图中还存在功能块的执行造成的梯级依赖。对于如此繁多的关系,本研究提出的方法将各种因素引起的依赖关系进行分类处理,使其关系简单化,易于并行分析。

为了便于理解,本研究对依赖关系的基本概念做以下定义:

(1) 数据依赖。

数据依赖是由于读/写同一变量而引起的一种依赖关系。下面给出梯形图依赖的形式化定义:

定义1:梯形图中的某两个梯级(Rung)S和T:若存在变量x使之满足下述条件之一,则代表两梯级对变量x存在着某种数据依赖关系,称T依赖于梯级S,记为 $S \delta T$ 。

判断条件如下:

① 若同时有变量 $x \in OUT(S) \wedge x \in IN(T)$,且梯级T在梯级S之后,则称T关于变量x流依赖于S,记为 $S \delta^l T$;

② 若同时有变量 $x \in IN(S) \wedge x \in OUT(T)$,且梯级T在梯级S之后,则称T关于变量x反依赖于S,记为 $S \delta^r T$;

③ 若同时有变量 $x \in OUT(S) \wedge x \in OUT(T)$,且梯级T在梯级S之后,则称T关于变量x输出依赖于S,记为 $S \delta^o T$ 。

梯形图数据依赖关系如图2所示。

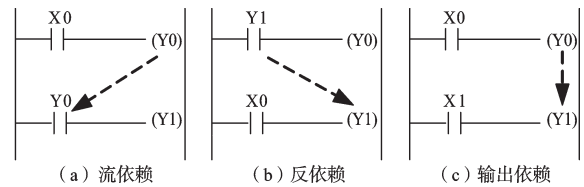


图2 梯形图基本的数据依赖关系

(2) 控制依赖。

定义2:控制流程图(Control Flow Graph)是一有向图,用四元组 $\langle V, E, I, Start/Stop \rangle$ 表示。其中,V是结点集,梯形图中的每个梯级对应图中的一个结点;E为边集, $E = \{ \langle v_1, v_2 \rangle \mid v_1, v_2 \in V \text{ 且 } v_1 \text{ 执行完后可能执行 } v_2 \}$;I为标识符,即流程图中节点从X到Y发生的条件,标记为“F”或“T”;Start和Stop分别为梯形图的入口和出口。

定义3:后继支配节点(Post-dominate)若从X到出口节点的每一条路径都要经过Y,则称节点X被节点Y后继支配,记作 $y \Delta_p x$;反之,则记为 $y \bar{\Delta}_p x$ 。若 $y \Delta_p x$ 且 $y \neq x$,则称y是x的严格后继节点,记作 $y \bar{\Delta}_p x$ 。当且仅当 $y \bar{\Delta}_p x \wedge (\forall z \mid z \bar{\Delta}_p x) [z \Delta_p y]$,则y为x的直接后继节点,记作 $y \Delta_{ip} x$ 。y控制依赖于x,记为 $x \delta_c y$ 当且仅当:

- ① $y \Delta_p x$;
- ② \exists 一条从x到y的有向路径 $P = \langle x, m, \dots, y \rangle$,其中,任何一个节点 $z \in P (z \neq x, y)$ 且 $y \Delta_p z$ 。

定义4:后继支配树(Post-dominate Tree)是一棵以STOP为根节点的树,树中的任一节点都被它的祖先节点后继支配。

3 依赖关系分解

基于以上依赖分析的相关定义,本研究将梯级分成两块:彼此间有依赖关系的梯级块和彼此间无依赖关系的梯级块,对无依赖关系的梯级进行并行处理。

对有依赖关系的必须按照原有梯级顺序执行,即保证原有程序语法、语义的正确性。

3.1 数据依赖关系分解

在任何情况下,图2所示的3种数据依赖关系的梯级必须按顺序执行。本研究假设程序所有的梯级数为 M ,则顺序执行整个程序的扫描周期数为 M 。本研究根据依赖关系对梯形图梯级进行分解,分解方法如下:

(1) 遍历整个梯形图,根据3种数据依赖关系,记录梯级间的依赖关系;

(2) 将没有依赖关系的所有梯级标记为梯级块 L_1 ,依赖于 L_1 梯级中的梯级标记为 L_2 ,以此类推,设梯级 R_m, R_n 所在梯级块为 L_i, L_j ,则依赖于梯级 R_m, R_n 的梯级标记为 $L_{\max(i,j)+1}$;

(3) 按以上步骤,最后得出梯级块 L_1, L_2, \dots, L_N ,顺序执行梯级块,并行执行梯级块内的梯级集,则分解后周期数 $N < M$ 。

这样就缩减了顺序执行的周期数,提高了执行速度。本研究以如图3所示的简单梯形图程序为例说明,梯形图需要5个周期完成。通过数据依赖关系可知 $R2 \delta^{\circ} R3, R2 \delta^{\lceil} R4, R3 \delta^{\lceil} R4$ 。根据以上分解方法, $R1, R2$ 和 $R5$ 标记为 L_1 ; $R3$ 标记为 L_2 ; $R4$ 依赖 $R2, R3$,标记为 L_3 ,其中 $\max=(L_1, L_2)+1=3$ 。分解后梯形图需3个周期完成,速度提高40%。

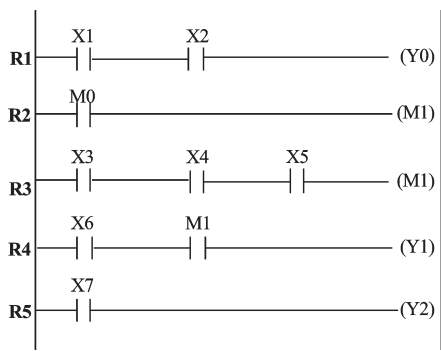


图3 含数据依赖关系的程序示例

3.2 控制依赖关系分解

基本控制指令在PLC的系统中占有重要地位,用来决定执行顺序和流程,使程序更加清晰易读。控制依赖在梯形图中的典型表现为以下3大类指令:

(1) 控制转移指令:条件跳转指令(JMP和LBL),循环指令(FOR和NEXT);

(2) 调用中断指令:子程序调用(CALL和SERT),中断指令(INT和IRET);

(3) 部分功能指令:主要是定时器/计数器(T/C)。

控制依赖关系的分解过程就是控制依赖图的生成过程。为了更加直观地理解控制语句的依赖关系,控制依赖图(Control Dependence Graph)是根据控制流程

图和后继支配树构造的,生成CDG算法如下:

(1) 访问CFG所有边Edge;

(2) 在CFG中 $\forall \text{Edge}(A, B)$ 且满足在后继支配树中 B 不是 A 的祖先;

(3) 对于满足以上条件的任何边,循环执行以下步骤,直至所有的边执行完毕。访问后继支配树:

① If L 是 A 的父节点, then从 L 到 B 的所有节点,包括 B 但不包括 L ,都控制依赖于 A ; /* L 是 A 和 B 在后继支配树的最小共同祖先*/;

② If L 是 A , then在后继支配树中从 L 到 B 的所有节点,包括 B 和 A ,都控制依赖于 A ;

(4) 根据上述步骤得到的控制依赖关系生成控制依赖关系图。

本研究以含控制指令的梯形图程序(如图4所示)为例说明依赖关系分解过程。

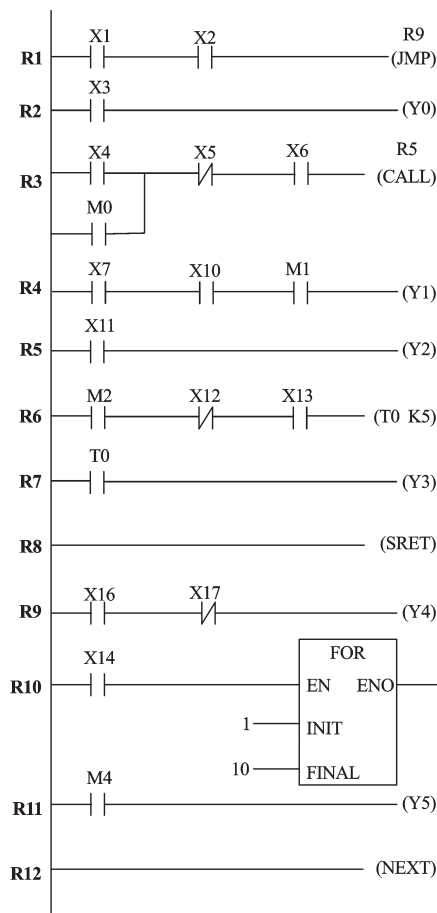


图4 含跳转指令的梯形图程序

该梯形图由12个梯级组成,因此其程序流程图可抽象为12个结点,梯形图的程序执行流程图如图5(a)所示,其中,标识符表示执行下一动作的前提条件。如 $T1$ 表示跳转条件 $f_1=x_1 \& x_2$ 为真, $F1$ 表示 f_1 值为假。

流程图各节点的直接后继结点分别为: $\{R1 \Delta_{ip} \text{START}\}, \{R9 \Delta_{ip} R1\}, \{R3 \Delta_{ip} R2\}, \{R4 \Delta_{ip} R3\}, \{R9 \Delta_{ip} R4\}, \{R6 \Delta_{ip} R5\}, \{R7 \Delta_{ip} R6\}, \{R8 \Delta_{ip}$

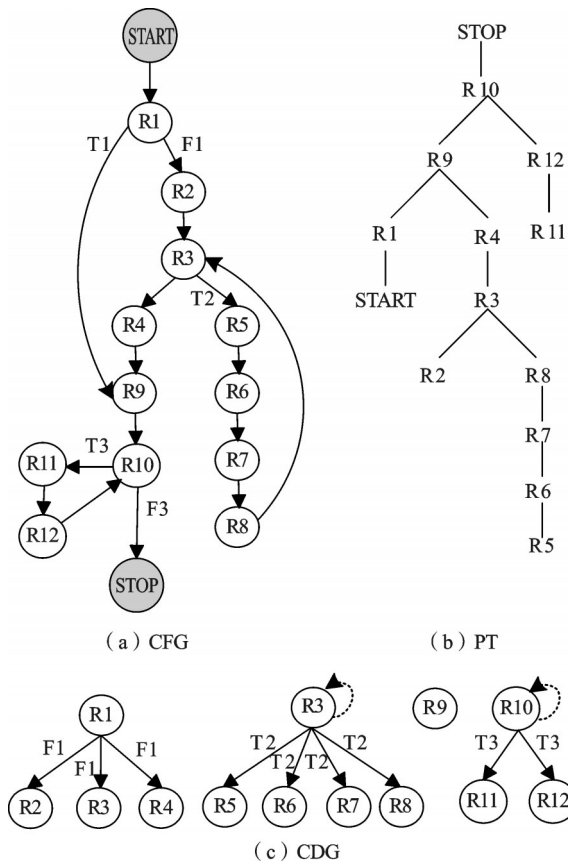


图5 依赖图生成过程

$R7\}$, $\{R3 \Delta_{ip} R8\}$, $\{R10 \Delta_{ip} R9\}$, $\{STOP \Delta_{ip} R10\}$, $\{R10 \Delta_{ip} R11\}$, $\{R10 \Delta_{ip} R12\}$ 用后继支配树表示如图5(b)所示。通过以上算法分解得到最终的依赖图如图5(c)所示。从图5中可得, $R1 \delta_c (R2, R3, R4)$; $R3 \delta_c (R5, R6, R7, R8)$; $R10 \delta_c (R11, R12)$, 需要注意的是 $R6 \delta_c R7$ 是由于定时器引起的控制依赖。基于CDG并行执行的梯级满足以下条件:

- (1) 最初,在CDG中没有入弧的结点;
 - (2) 执行完结点,如果条件T/F满足,则在CDG中下一层次的所有结点。
- 根据控制依赖分解,原有的梯级重新组合后,扫描周期由原来的12个缩短为4个,执行层次依次为: ①R1、R9、R10; ②R2、R3、R4、R11、R12; ③R5、R6、R8; ④R7。

通过以上方法获取的数据依赖关系和控制依赖关系,本研究可对任何梯形图作初步的关系分解,直观、全面地看出梯级间的关联关系,挖掘其并行性。依据这些关系,本研究可确定一些梯级必须在另一些梯级执行完后执行,而部分梯级却可以并行执行。子节点必须在父节点执行完后执行,标识符相同的节点集可并行执行。在依赖关系较少的情况下,可并行的梯级就越多,使用的扫描周期就越少,速度也得到极大的提高。同时识别出的可并行梯级,为以后梯形图的并行

编译提供了依据。

4 结束语

本研究首次将依赖分析技术应用于梯形图,对梯级间的关联关系进行了分析,提出了基于依赖关系的分解方法,尽可能最大程度地识别潜在并行性。该方法适用于并行编译的前端处理工作,可将其引入到今后的梯形图研究中,为最终实现梯形图并行化编译打好基础。

参考文献(References):

- [1] 李国厚,张发玉,侯铁兵. PLC原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] JEONG S, KIM Y S, KWON W H. Scheduling Algorithm for Programmable Logic Controllers with Remote I/Os[C]// Programmable of Fourth International Workshop on Real-time Computing System and Application. Washington: IEEE computer society, 2002: 87-94.
- [3] 章航平,严义. 一种避免PLC无效指令的编译优化方法[J]. 机电工程, 2009, 26(4): 31-35.
- [4] JEANNE F, IBM T J, KARL J, et al. The program dependence graph and its use in optimization[J]. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 1987, 9(3): 319-349.
- [5] GIRKAR M, POLYCHRONOPOUIOS C D. Automatic extraction of functional parallelism from ordinary programs [J]. *IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems*, 1992, 3(2): 166-178.
- [6] MIYAZAWA I, NAGAO T, FUKAGAWA M, et al. Implementation of Ladder Diagram for Programmable Controller using FPGA[C]//Emerging Technologies and Factory Automation, Barcelona: [s.n.], 1999: 1381-1385.
- [7] ICHIKAWA S, AKINAKA M, IKEDA R, et al. Converting PLC Instruction Sequence into Logic Circuit: a Preliminary Study [C]//IEEE International Symposium Industrial Electronics. Montreal: [s.n.], 2006: 2930-2935.
- [8] DU Dao-shan, LIU Ya-dong, GUO Xin-gu, et al. Study on LD-VHDL conversion for FPGA-based PLC implementation [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40(1-2): 1181-1190.
- [9] ECONOMAKOS C, ECONOMAKOS G. Optimized FPGA Implementations of Demanding PLC Programs based on Hardware High-Level Synthesis[C]// Proceedings IEEE International Conference: Emerging Technologies and Factory Automatio. Hangzhou: [s.n.], 2008: 1002-1009.
- [10] PATIL M M, SUBBARAMAN S, NILKUND P S. IEC control specification to HDL synthesis: Considerations for implemrtng PLC on FPGA and scope for research[C]//International Conference an Control, Automation and Systems. KINTEX: [s.n.], 2010: 2170-2174.

[编辑:李辉]