

文章编号: 1000-6893(2004)05-0512-04

# 可重构制造系统的性能分析

蔡宗琰

(西北工业大学 机电工程学院, 陕西 西安 710072)

Performance Measurement of Reconfigurable Manufacturing System

CAI Zongyan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**摘 要:** 可重构制造系统的生产管理与控制是实施可重构制造系统哲理的关键技术, 而可重构制造系统的性能分析是可重构制造系统生产管理与控制的重要功能。基于可重构制造系统的赋时可重构 Petri 网模型及其调度 Gantt 图, 提出可重构制造系统的性能指标评价方法, 定义最大完成时间、生产资源利用率、作业完成时间和零件的平均生产能力等可重构制造系统的性能指标, 并计算了实例系统的性能指标。实例研究表明, 可重构制造系统的性能分析方法体现了可重构制造系统的重构柔性本质。

**关键词:** 飞行器制造技术; 性能指标; 赋时可重构 Petri 网; 调度算法; 可重构制造系统

**中图分类号:** V2601.2      **文献标识码:** A

**Abstract:** The production management and control are key technologies enabling reconfigurable manufacturing system, while their performance measurement is one of the most important functions that manage and control reconfigurable manufacturing system. Based on timed reconfigurable Petri nets and Gantt chart, the methodology of performance measurement is suggested for reconfigurable manufacturing system. Meanwhile, the performance measurements such as Makespan, utilization of a production resource, completion time of a job and average throughput of a part are defined for reconfigurable manufacturing system. A calculation example of reconfigurable manufacturing system is given to demonstrate the result of the performance measurement of reconfigurable manufacturing system. It is shown that the performance measurement built in this paper expresses the reconfigurable flexibilities of reconfigurable manufacturing system.

**Key words:** aircraft manufacturing technology; performance measurement; timed reconfigurable Petri nets; scheduling algorithm; reconfigurable manufacturing system

可重构制造系统(Reconfigurable Manufacturing System, RcMS)是先进制造领域的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>。它是一旦需要就面向机床级和系统级进行重构, 实现准确地提供所需的制造功能和生产能力以快速适应变化的市场的新制造哲理<sup>[4]</sup>。可重构制造系统的调度优化和性能指标分析, 是可重构制造系统关于系统优化理论体系的重要组成部分, 但目前尚未见这方面研究工作的报道<sup>[3]</sup>。为此, 本文将基于可重构制造系统建模与调度的成果, 开展可重构制造系统的性能指标分析工作。即利用作者提出的可重构制造系统赋时可重构 Petri 网模型(Timed Reconfigurable Petri Net for RcMS, TRPN2RcMS)和基于该模型的调度算法 SA2 RcMS 的运行结果<sup>[5,6]</sup>, 进行可重构制造系统的性能指标分析。这是建立关于可重构制造系统的系统优化理论体系的关键工作之一。

## 1 可重构制造系统的性能指标

制造系统的性能指标包括生产率、生产能力、生产均衡性、在制品数、通过时间、等待队长、等待时间、设备利用率、设备有效利用率、设备完好率、设备可维修性、使用方便性、可靠性、柔性和集成度等<sup>[7]</sup>。但分析与计算制造系统的性能指标的方法/工具有多种, 且一个制造系统的性能表现是多方面的, 这就导致制造系统性能指标评价体系的建立和性能指标的定义必须与其所使用的计算分析方法/工具相对应。因此, 确定制造系统的性能分析的内容时, 不仅要考虑制造系统的内涵及其涵盖的范围, 而且要考虑其计算分析方法。

决定可重构制造系统可重构性高低的基本特征有模块性、集成性、定制性、转换性、诊断性等, 因此, 可重构制造系统的性能指标应体现其重构柔性的本质。文献[8,9]将生产线的每一设备看作一个模块, 利用可重构的逻辑控制器控制生产线的运行, 并使用赋时 Petri 网对逻辑控制器进行

建模,从而提出以循环时间作为可重构生产线的性能指标。但该研究成果不适合于可重构制造系统的建模和性能分析。关于可重构制造系统的建模和优化,已有采用 TRPN2RcMS 模型及其重构算法对可重构制造系统进行建模<sup>[5]</sup>,又采用基于 TRPN2RcMS 模型的 SA2RcMS 调度算法生成可重构制造系统优化的调度结果<sup>[6]</sup>。因此,本文基于可重构制造系统的 TRPN2RcMS 模型和利用 SA2RcMS 调度算法求解 TRPN2RcMS 模型得到的可重构制造系统调度结果,定义可重构制造系统性能指标。因为可重构制造系统的性能指标必须体现可重构制造系统的重构柔性本质,度量可重构制造系统的静态性能和动态性能,本文提出生产资源利用率、作业完成时间、零件生产能力、最大完成时间  $T_{\text{makespan}}$ 、停工时间和维修率等作为可重构制造系统的性能指标。其中停工时间和维修率是面向 RcMS 中机器的故障和维修而定义的。

(1)最大完成时间  $T_{\text{makespan}}$  最大完成时间分为重构前和重构后两种情况定义。重构前的最大完成时间等于可获得每一作业的最终零件状态的所有托肯的最终状态位的建模时间的最大值。重构后的最大完成时间等于可获得每一作业的最终零件状态的所有托肯的最终状态位的建模时间的最大值与系统的重构时间和斜升时间之和。即

$$T_{\text{makespan, bf}} = T_{\text{FM, max}} \quad (1)$$

$$T_{\text{makespan, af}} = T_{\text{FM, max}} + T_{\text{RC}} + T_{\text{RP}} \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{makespan, bf}}$ 为重构前的制造系统的最大完成时间;  $T_{\text{makespan, af}}$ 为重构后的制造系统的最大完成时间;  $T_{\text{FM}}$ 为可获得每一作业的最终零件状态的所有托肯的最终状态位的建模时间;  $T_{\text{RC}}$ 为制造系统的重构时间;  $T_{\text{RP}}$ 为制造系统的斜升(Ramp up)时间,即从制造系统重构后至制造系统正常运行的调整时间。

(2)生产资源利用率 在 TRPN2RcMS 模型中,生产资源利用率  $U_{\text{PR}}$ 等于表示生产资源的 TOOPN(Timed Object Oriented Petri Net)模型的空闲状态的位不处于空闲或等待状态,即位没有托肯的累计时间。

$$U_{\text{PR}} = \sum_j T_j(P_1) / T_M \quad (3)$$

式中:  $P_1$ 为生产资源处于空闲或等待状态的位;  $T_j(P_1)$ 为  $P_1$ 没有托肯的第  $j$ 次延迟时间;  $T_M$ 为与  $T_j(P_1)$ 的持续状态相对应的建模时间。

生产设备的使用状况不同,对应着不同的建模时间  $T_M$ 的取值。如果某生产设备仅在重构前

的制造系统中被利用,那么  $T_M = T_{\text{makespan, bf}}$ ;如果某生产设备仅在重构后的制造系统中被利用,那么  $T_M = T_{\text{makespan, af}}$ ;如果某生产设备在制造系统重构前后都被利用,那么其  $T_M = T_{\text{makespan, bf}} + T_{\text{makespan, af}}$ 。

(3)作业完成时间 在 TRPN2RcMS 模型中,作业完成时间  $T_C$ 等于可获得每一作业的最终零件状态的所有托肯的最终状态位的建模时间与系统的重构时间和斜升时间之和。

$$T_C = T_{\text{FM}} + T_{\text{RC}} + T_{\text{RP}} \quad (4)$$

如果某作业在重构前已完成,则

$$T_C = T_{\text{FM}} \quad (5)$$

(4)零件的平均生产能力 零件的平均生产能力  $T_{\text{Ave}}$ 等于表示在某一时间段里零件的最终状态的托肯的数量。

$$T_{\text{Ave}} = N(P_{\text{fp}}, M_{\text{fp}}) / T_M \quad (6)$$

式中:  $M_{\text{fp}}$ 为一个零件的最终状态的托肯;  $P_{\text{fp}}$ 为存放零件的最终状态的托肯的位;  $N(P_{\text{fp}}, M_{\text{fp}})$ 为在某一时间段内,在位  $P_{\text{fp}}$ 获得托肯  $M_{\text{fp}}$ 的数量。

## 2 可重构制造系统的性能指标计算

文献[5]以某航空航天制造企业 XX2CIMS 工程中的某数控加工车间为背景,提出了一个可重构制造系统的实例系统。实例系统重构前后的零件需求如表 1 和表 2,表中  $M$  表示机床,  $b$  表示装卸站。实例系统重构前后零件属性的赋时状态位的时间如表 3 和表 4,表中  $X_{i,j}$  表示  $X$  零件在机床  $M_j$  上完成工序顺序  $i$ 。文献[6]和文献[5]分别提供了该实例系统重构前后的 TRPN2RcMS 模型,而且文献[6]提出可重构制造系统的调度算法 SA2RcMS,并在 Windows2000 环境下采用 Microsoft Visual C++ 6.0 实现了 SA2RcMS 调度算法,得到实例系统重构前后系统的调度 Gantt 图,但该调度 Gantt 图没有考虑制造过程中机床因等待 AGV 运来待加工工件的等待时间。因此,现将其转换为考虑机床等待时间的调度 Gantt 图,分别如图 1 和图 2。根据图 1 和图 2,可分析计算可重构制造系统的性能指标。

(1)最大完成时间

根据式(1)和式(2)可得重构前后的最大完成时间:

$$T_{\text{makespan, bf}} = T_{\text{FM, max}} = 189$$

$$T_{\text{makespan, af}} = T_{\text{FM, max}} + T_{\text{RC}} + T_{\text{RP}} =$$

表1 实例系统重构前的零件需求

Table 1 Part requirement: RcMS before reconfiguration

零件类型	工序顺序		
	1	2	3
A	M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> /M <sub>5</sub>	b
B	M <sub>1</sub> /M <sub>3</sub>	M <sub>2</sub> /M <sub>4</sub>	b

表2 实例系统重构后的零件需求

Table 2 Part requirement: RcMS after reconfiguration

零件类型	工序顺序			
	1	2	3	4
A	M <sub>2</sub> /M <sub>1</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>5</sub>	b	
B	M <sub>3</sub> /M <sub>5</sub> /M <sub>6</sub>	M <sub>1</sub>	b	
C	M <sub>1</sub> /M <sub>2</sub>	M <sub>5</sub> /M <sub>6</sub>	M <sub>1</sub>	b
D	M <sub>1</sub> /M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub> /M <sub>6</sub>	M <sub>2</sub>	B

表3 实例系统重构前零件属性的赋时状态位时间

Table 3 Time of timed place of part attribute: RcMS before reconfiguration

机床	零件属性	赋时位/min					
		P <sub>1,M</sub>	P <sub>2,M</sub>	P <sub>3,M</sub>	P <sub>4,M</sub>	P <sub>5,M</sub>	P <sub>6,M</sub>
M <sub>1</sub>	A1 111	5	10	T*	8	60	6
	B1 111	5	10	T	8	50	6
	A1 211	5	10	T	8	40	6
M <sub>2</sub>	A1 112	5	8	T	6	60	5
	B1 212	5	8	T	6	60	5
M <sub>3</sub>	B1 113	5	5	T	5	50	5
	A1 213	5	5	T	5	60	5
M <sub>4</sub>	B1 214	5	5	T	5	40	5

\* 注: T 为等待时间, 其数值随制造系统的作业调度结果而变化, 但对给定的作业调度结果, 各零件属性的 T 有确定值。

表4 实例系统重构后零件属性的赋时状态位时间

Table 4 Time of timed place of part attribute: RcMS after reconfiguration

机床	零件属性	赋时位/min					
		P <sub>1,M</sub>	P <sub>2,M</sub>	P <sub>3,M</sub>	P <sub>4,M</sub>	P <sub>5,M</sub>	P <sub>6,M</sub>
M <sub>1</sub>	A1 111	5	10	T*	10	40	8
	B1 211	5	8	T	10	50	8
	C1 111	5	12	T	11	50	9
	C1 311	5	8	T	10	40	8
M <sub>2</sub>	D1 111	5	10	T	12	60	10
	A1 112	5	10	T	10	50	5
	C1 112	5	5	T	10	40	5
	D1 112	5	8	T	10	80	5
M <sub>3</sub>	D1 312	5	8	T	10	30	5
	A1 213	5	8	T	6	20	5
	B1 113	5	5	T	5	30	5
	D1 213	5	7	T	6	30	5
M <sub>5</sub>	A1 215	5	6	T	8	25	5
	B1 115	5	8	T	8	35	5
	C1 215	5	5	T	8	20	5
M <sub>6</sub>	B1 116	5	7	T	7	20	5
	C1 216	5	6	T	7	25	5
	D1 216	5	5	T	7	30	5

\* 注: T 为等待时间, 其数值随制造系统的作业调度结果而变化, 但对给定的作业调度结果, 各零件属性的 T 有确定值。

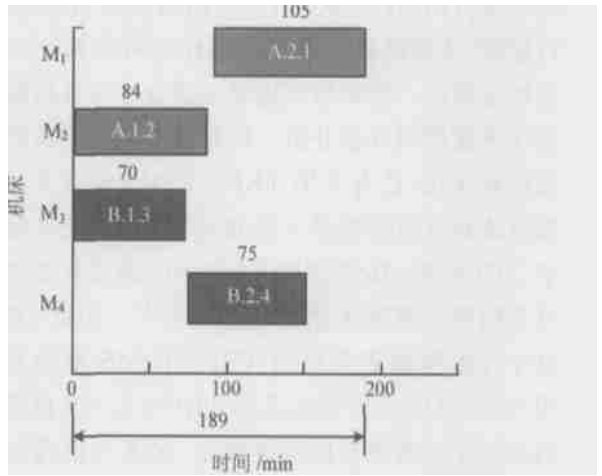


图1 RcMS 重构前系统的调度 Gantt 图(考虑机床等待时间)

Fig1 Gantt Chart of Scheduling: RcMS before reconfiguration (Waiting time of machine tool is considered)

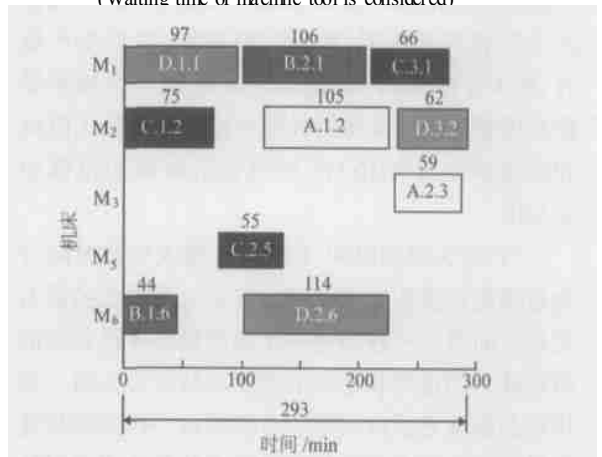


图2 RcMS 重构后的系统的调度 Gantt 图(考虑机床等待时间)

Fig2 Gantt Chart of Scheduling: RcMS after reconfiguration (Waiting time of machine tool is considered)

$$293 + 45 + 45 = 383$$

(2) 生产资源利用率

根据式(3) 可得机床利用率:

$$U_{PR}(M_1) = \frac{\sum_{j=1}^4 T_j(P_1)}{T_{makespan, bf} + T_{makespan, af}} =$$

$$\frac{105 + 97 + 106 + 66}{189 + 293 + 45 + 45} = 65.4\%$$

$$U_{PR}(M_2) = \frac{\sum_{j=1}^4 T_j(P_1)}{T_{makespan, bf} + T_{makespan, af}} =$$

$$\frac{84 + 75 + 105 + 62}{189 + 293 + 45 + 45} = 57\%$$

同理可得:

$$U_{PR}(M_3) = 221\%, U_{PR}(M_4) = 1311\%,$$

$$U_{PR}(M_5) = 916\%, U_{PR}(M_6) = 2716\%$$

(3) 作业完成时间

由式(4),式(5)可得重构前零件作业完成时间:

$$T_{C0}(A) = 194 + 25 = 219$$

$$T_{C0}(B) = 150 + 25 = 175$$

同理可得重构后零件的作业完成时间:

$$T_{C1}(A) = 45 + 45 + 289 = 379$$

$$T_{C1}(B) = 45 + 45 + 203 = 383$$

$$T_{C1}(C) = 45 + 45 + 274 = 364$$

$$T_{C1}(D) = 45 + 45 + 293 = 383$$

(4)零件的平均生产能力

根据式(6)可得重构前零件的平均生产能力:

$$T_{0,Ave}(A) = \frac{N(P_{2,A,3,b}^b)}{T_{makespan}} = \frac{2}{189} = 0.0106$$

$$T_{0,Ave}(B) = 0.0159$$

同理可得重构后零件的平均生产能力:

$$T_{1,Ave}(A) = \frac{N(P_{2,A,3,b}^b)}{T_{RC} + T_{RP} + T_{makespan}} = \frac{2}{45 + 45 + 293} = 0.0052$$

$$T_{1,Ave}(B) = 0.01078$$

$$T_{1,Ave}(C) = 0.01052$$

$$T_{1,Ave}(D) = 0.01026$$

计算结果表明:以上各项可重构制造系统的性能指标能够度量可重构制造系统的静态特性和动态特性,用这些性能指标来表示可重构制造系统的性能体现了可重构制造系统的柔性本质。

### 3 结论

可重构制造系统的性能分析既是分析和控制可重构制造系统的重要手段,也是计算机辅助可重构制造系统设计的组成模块之一。本文提出的可重构制造系统的性能指标能够度量可重构制造系统的静态特性和动态特性,体现了可重构制造系统的柔性本质。RcMS的性能指标分析与作者已提出的TRPN2RcMS模型及其重构算法、SA2RcMS调度算法共同构成了可重构制造系统关于系统优化的理论体系的内涵。需进一步研究的方向:<sup>1</sup> 研究其它的可重构制造系统建模与调度方法,建立包括可靠性、质量、可重构性等性能指标的可重构制造系统性能指标评价体系;<sup>0</sup> 开展AGV的路径调度的优化研究。

### 参 考 文 献

- [1] Koren Y, Heisel U, Jovane F, et al. Reconfigurable manufacturing systems [J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(2): 527- 540.
- [2] Mehrabi M G, Ulsoy A G, Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2000, 11(4): 403- 419.
- [3] Mehrabi M G, Ulsoy A G, Koren Y, et al. Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2002, 13(2): 135- 146.
- [4] 蔡宗琰,严新明. 计算机辅助可重构制造系统设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(2): 125- 129. (Cai Z Y, Yan X M. Computer aided reconfigurable manufacturing system design [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(2): 125- 149.)
- [5] 蔡宗琰,严新明. 可重构制造系统重构算法的实例研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 13(2): 162- 166, 173. (Cai Z Y, Yan X M. Case study on reconfiguration algorithm for reconfigurable manufacturing system[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(2): 162- 166, 173.)
- [6] 蔡宗琰. 计算机辅助可重构制造系统设计的概念研究[D]. 西安:西北工业大学, 2002. (Cai Z Y. Conceptual study on computer aided reconfigurable manufacturing system design [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.)
- [7] 李培根. 制造系统性能分析建模- 理论与方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1998. 42- 76. (Li P G. Modeling of manufacturing system performance theory and method[M]. Wuhan: Publishing House of Huazhong University of Science and Technology, 1998. 42- 76.)
- [8] Park E, Tilbury D M, Khargonekar P P. Performance analysis of machining systems with modular logic controllers [A]. Proceedings of 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation [C]. Detroit, Michigan, 1999. 137- 144.
- [9] Park E, Tilbury D M, Khargonekar P P. Modular logic controllers for machining systems: formal representation and performance analysis using Petri nets [J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1999, 15(6): 1046- 1061.

作者简介:



蔡宗琰(1964- ) 男,福建莆田人,南京航空航天大学机械科学与工程博士后流动站博士后、副教授,2002年毕业于西北工业大学机械制造及其自动化专业。主要从事计算机集成制造系统、计算机辅助设计与产品数据管理、制造执行系统、可重构制造系统等研究。联系电话:029-85251906, E-mail: dr\_caizongyan@263.net

(责任编辑:蔡斐)