

基于网论的数控系统动态性能仿真^{*}

赵丽 王太勇 胡世广

(天津大学机械工程学院, 天津 300072)

【摘要】 为校验数控系统运行时的逻辑与性能可达性,引入了基于网论原理的系统动态建模与分析技术。提出了带抑制弧 TTPN 的有条件等价转换策略,可有效降低分析模型的维度与复杂度。建立了系统运动控制相关过程的分析模型,经等效转换处理后进行了仿真分析,并给出了系统调整的量化依据。仿真表明经调整后的系统能达到预期指标。

关键词: 数控系统 运行时 网论 仿真

中图分类号: TP273; O157.6 **文献标识码:** A

Simulation of CNC System Dynamic Performance Based on Net Theory

Zhao Li Wang Taiyong Hu Shiguang

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract

In order to check the realizability of CNC system runtime logic and performance, technology of system dynamic modeling and analyzing based on net theory was introduced. A strategy of conditional equal-transformation of TTPN with inhibitor arc was proposed, which will descend the model dimension and decrease analyzing complexity. An analyzing model of the system motion control-associated processes was built, which was then transformed equivalently according to the foregoing strategy. With that model, a simulation was carried out and the quantitative basis for the system structure adjusting was given. Further simulation illustrates that the adjusted system is able to achieve expected performance.

Key words CNC system, Runtime, Net theory, Simulation

引言

随着需求的不断推动,作为数控机床控制中枢的数控系统也日益被赋予了更多的功能期望,并且系统的开放性发展趋势还要求系统具备接纳新技术、嵌入新功能的能力,这必将导致系统逻辑关系与组织结构复杂性的急剧增长。科学、高效的系统建模与分析方法可有效保证系统的结构良好、降低开发风险。随着建模与分析技术的发展,一些学者已经在探讨这些技术在数控系统开发中的应用研究,并分别提出了基于域工程、统一建模语言(UML)、Agent、有限状态机、IDEF等理论或技术原理的系统

建模分析策略^[1~6]。这些研究为进行系统建模分析提供了有益的参考方案,然而其中仍有一些期待解决的问题。如 Agent 之间的协调问题等尚未解决;由于 IDEF 采用层次化的设计方法建立模型,因而使得系统缺乏鲁棒性,误差一旦产生,就会沿着它的层次结构传递,并且各个模块之间缺乏一致性,对环境的变化反应迟缓,缺乏灵活性;有限状态机的存储有限性使得其对输入具有依赖性,也阻止了它们对非正则集合的识别;而基于域工程、UML 的建模手段更擅长于系统静态结构分析,对于系统动态性能分析手段尚有欠缺。

在 Carl A Petri 博士提出的网状结构的系统模

收稿日期: 2008-09-10 修回日期: 2008-10-31

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA042005)、天津市科技计划项目(08ZCKGX02300)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060056016)

作者简介: 赵丽, 博士生, 主要从事开放式数控技术研究, E-mail: leafyeva@yahoo.cn

拟分析模型基础上发展起来的 Petri 网(PN)理论(简称网论),由于采用基于形式化数学的可视化图形表达方式对离散事件动态系统(DEDS)异步、同步、并行等逻辑关系进行描述,既能分析 DEDS 系统运行性能,又可用于检查与防止诸如锁死、堆栈溢出、资源冲突等不期望的系统行为逻辑,因而成为一种有效的自动化分析理论,已在许多领域得到了广泛应用^[7~9]。数控系统是一种典型的 DEDS 系统,本质上属于一类特殊的计算机系统,本文通过引入网论分析原理实现对数控系统动态性能的仿真分析。

1 带抑制弧 TTPN 的有条件等效转换

由于任何一个真实的自动化系统的运行均依赖于时间轴的约束,这使得不包含时间要素、仅能实现资源流通通路分析的基本 PN 无法真实地反映系统的运行性能。这里引入赋时 PN(TPN)的概念,通过在基本 PN 中移入时间约束,以解决上述问题。根据数控系统运行特性,采用将时间与变迁相关联的方式,构成赋时变迁 PN(TTPN)。

定义 TTPN 为一个 6 要元^[10],即

$$\text{TTPN} = (P, T, I, O, m_0, D) \quad (1)$$

式中 P ——库所的有限集合, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n > 0$ 为库所个数

T ——变迁的有限集合, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $m > 0$ 为变迁个数,且 $P \cap T = \emptyset$

I ——输入函数, $I: P \times T \rightarrow N$, 定义了从 P 到 T 的有向弧的重复数或权的集合, 这里 $N = \{0, 1, \dots\}$

O ——输出函数, $O: T \times P \rightarrow N$, 定义了从 T 到 P 的有向弧的重复数或权的集合

m_0 ——初始标识, $m_0: P \rightarrow N$, 为一列向量, 其第 i 个元素表示第 i 个库所中的初始托肯数

D ——所有变迁的时延集, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, 体现了系统的时间约束, 其中 d_j 为变迁 t_j 的时延

此外,基本 PN 的另一个主要不足是缺乏“零”检测能力,即无法控制库所托肯为零的情况,这使得其计算能力受到很大限制。这对于分析包含发生优先权的数控系统显得极为重要。抑制弧的引入解决了这一问题。一个抑制弧为一条由库所输出至变迁的特殊的连接弧。与普通连接弧的作用相反,有抑制弧相连的变迁只有当该弧上的输入库所不含托肯时才使能,否则不使能;变迁激发时,抑制弧上没有

托肯的流动。带抑制弧 PN 为具有优先权的系统建模提供了解决手段,并已经证明一个带抑制弧的 PN 是图灵机等价的^[11]。从 PN 的类型来说,带抑制弧 PN 也是一种扩展/增广 PN^[12],其运行规则相比于经典 PN 发生了重要改变,文献^[13]指出了带抑制弧 PN 的数学描述规定。

由该规定可以看出,相比于标准 PN,带抑制弧的增广 PN 增加了描述维度,加大了数学表达的复杂程度,从而使得分析过程变得甚为困难,甚至难以满足工程需要。基于此,本文提出了一种有条件的等价转换机制以降低 PN 模型描述维度。转换的原则在于所形成的等价形式要保证对相应变迁的约束及激发条件与抑制弧形成的约束保持一致,同时不对网内其余元素产生附加影响。

初始条件设:对于一个 TTPN,引出抑制弧的原库所为 p_0 ,其初始托肯 $m(p_0) = n$,被抑制的变迁为 t^h ,抑制权值 $\omega^h = 1$, t^h 时延定义为 $d^h > 0$;自 p_0 引出允许弧输入至一个变迁 t_0 ,其时延定义为 $d_0 \geq 0$,并设 $I(p_0, t_0) = \omega_0$;若无 t_0 则引入一新变迁作为 t_0 ,并令 $\omega_0 = 1$,则为实现该抑制弧的等效转换,需进行以下处理:

(1)引入新库所 p_1^e 与 p_2^e ,其容量分别为 ω_0 与 1,并令其初始托肯为零。

(2)引入新变迁 t_1^e 与 t_2^e ,变迁 t_2^e 时延 $d_2^e = d_0$, t_1^e 为瞬时变迁。

(3)去除 p_0 至 t_0 的允许弧连接,并令 $m(p_0) = n + 1$ 。

(4)构造弧使得以 p_0, p_1^e, p_2^e 以及 t_0, t_1^e, t_2^e, t^h 为序所形成的输入、输出矩阵分别为

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 + 1 & 0 & 1 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

基于上述规则,一个抑制弧 TTPN(IATTPN)将被等效转换为不含抑制弧的普通 TTPN。对于大多数网格应用场合,上述等效转换约束条件: $d^h > 0$ 以及 $\omega^h = 1$ 能够容易满足。由于经转换处理的带抑制弧 TTPN 以标准 TTPN 的形式出现,因此有助于实现对系统 TTPN 的快速分析与仿真处理。

2 数控系统运动控制相关过程动态分析模型

运动控制是数控系统的本质功能和技术实现难点,具有实时性要求高、多过程耦合紧密以及并发运

行的特点。对运动控制及相关过程的协调处理能力直接反映了数控系统的性能优劣。同时,这一协调过程又是一个典型的精确定时匹配、资源调度以及激发优先权控制并存的复杂过程。通过建立 IATTPN 模型,并依前述规则进行等效转换,可对规划的数控系统的这种运动控制能力进行预测分析。

根据数控系统结构规划,进行运动控制时系统需要有能力进行如下几个主要的相关控制过程:程序读入与预处理,插补处理,轴补偿,位控,PMC 扫描与辅助控制,一级显示刷新,二级显示刷新,通用交互控制,以及实时智能监测与优化。其中,一级显示刷新为对轴位置与速度信息的实时人机更新;二级显示刷新为对程序加工进程及其余加工标志信息的人机更新;轴补偿由于不作为系统本质能力,且对系统分析不产生关键影响,在此忽略该过程;实时智能监测与优化由于涉及大量的数据采集与实时处理,占用系统资源较多,因此在系统结构规划时将分别部署至单独的处理单元;其余控制过程初始规划为采用同一处理器,且按激发优先权由高到低排序为位控、插补处理、PMC 扫描与辅助控制、一级显示刷新、二级显示刷新、程序读入与预处理/通用交互控制。针对开发的 TDNC 数控系统,本文建立其运动控制相关过程协调处理 IATTPN 模型(图 1)。

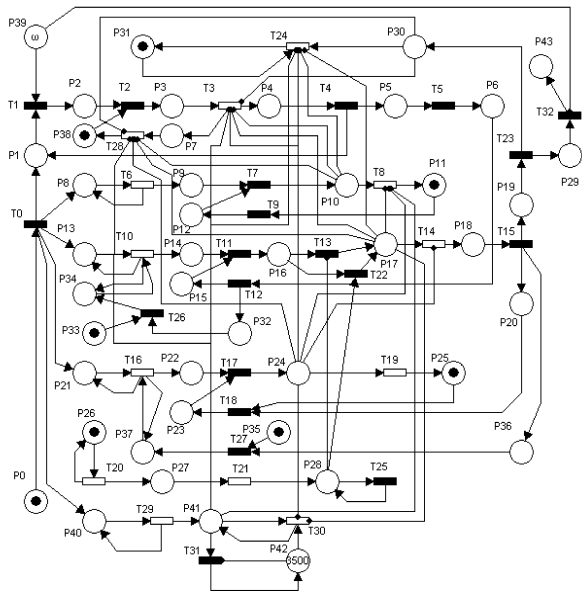


图 1 运动控制相关过程协调处理 IATTPN 模型
Fig. 1 IATTPN model of motion control related processes

该 IATTPN 模型中包含了多条抑制弧,这些抑制弧保证了各处理过程之间的激发优先权关系。然而,这种优先权关系的存在也使得某些关键的系统指标要求可能无法得到有效满足,宏观上表现为较高优先权的处理过程对系统资源具有优先消费权,从而使得较低优先权的处理过程得不到足够的系统

资源支持。因此,一个健壮的数控系统运行过程应能有效避免这种情况的发生。

模型中几个关键的变迁及其含义:T3 为程序预处理;T14 为插补运行;T16 为位控时钟;T19 为位控运行;T29 为 PMC 时钟;T30 为 PMC 语句扫描。其余变迁以及库所,由于篇幅关系本文不依次列举。

由数控技术原理知,程序预处理应能满足插补与位控的消耗;插补与位控周期需按照严格的比例关系进行规划;同时 PMC 也需在其固定的扫描周期内完成程序规定的端口扫描与处理。按设计需求对系统基本参数作如下预设:每三次预处理循环完成一次预处理工作;每次预处理生成 3~15 段预插补数据,以变量 P 表示;每插补周期完成 2/4 次位控,依位控周期而定;插补周期 0.8 ms;位控周期 0.4/0.2 ms,以变量 C 表示;PMC 扫描周期 10 ms,处理时间 $2 \mu\text{s}/\text{步}$,最大程序 4 500 步,以变量 L 表示;一级刷新时钟周期 0.5 ms,处理时间 0.05 ms;二级刷新运行时间 0.05 ms;通用交互时间 0.2 ms;数据采集频率 10 kHz,数据处理周期 3 ms。由此可确定图 1 所示 IATTPN 模型中的相应变迁时延。

这些参数中存在几个可变量:数控系统的位控周期反映了系统的精度控制能力;每次预处理生成的预插补数据段数的变化体现了数控系统对不同加工条件的柔性适应能力;而 PMC 的最大程序段数则体现了该数控系统所能处理的 PMC 的程序的复杂程度。根据前述抑制弧等效转换规则对该 IATTPN 模型进行处理,可实现对系统的这种资源协调处理能力的快速仿真分析。

3 仿真分析

由前述,Petri 网建立在形式化数学分析基础上,能根据给定的托肯、变迁等参数值,通过计算分析出系统的逻辑合理性,而无需跟随并采样实际系统的运行状态数据,因而其仿真分析无实时性要求。基于此,本文在通用操作系统平台上对前述系统模型进行了仿真。初始设变量 P 取值 5, C 取 0.4,即变迁 T16 对应的时延 $d_{16} = 0.4 \text{ ms}$;对 L 分别取 3 500 及 4 500 进行仿真。

图 2 为 PMC 在这两种条件下的运行结果。图中,两条折线分别为 PMC 时钟(T29)与一个 PMC 扫描循环(T30)完成的激发计数(firing counts,简称 FC)。仿真采样时长为 100 ms($10 \times 5\,000 \times 0.002$)。需要指出的是,这里的仿真采样时长虽然在数值上对应于实际数控系统的运行时间,但其只是仿真程序的一个内部计算参数,并非真实的仿真时间。由图看出,在 $L = 3\,500$ 时,这两种激发计数分别为

10次与9次,两者相差一个恒定的周期(10 ms),两条折线保持严格的同步关系,表明在时钟周期内PMC可以完成对所有程序段的扫描与运算处理。当 $L=4500$ 时,这两种激发计数分别为10次与7次,且两条折线也不能保持同步关系。由两次计数间隔可以看出,PMC每完成一次扫描循环,运行时间大于PMC时钟周期。因此,在PMC程序段数取规定的最大值时,该系统无法实现精确的扫描控制。由此,在系统部署时,需要将PMC模块部署于单独的处理子上以满足预期性能指标。

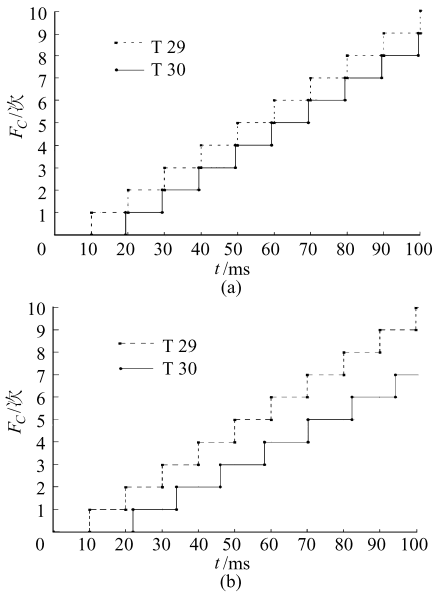


图2 PMC运行仿真结果

Fig.2 Simulation result of PMC

(a) $L=3500$ (b) $L=4500$

在消除了PMC的影响后,进一步对系统进行仿真分析,在采样 22.5 ms 、 $P=3$ 、 $C=0.4\text{ ms}$ 时的结果如图3所示。

图3中,由上至下3条折线分别代表变迁T19、

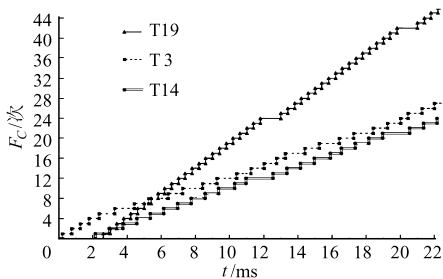


图3 变迁T3/T14/T19激发计数

Fig.3 Firing counts of transitions T3/T14/T19

T3、T14在时间轴上的激发计数。可知 C 取 0.4 ms 、 P 取3时,位控与插补不能实现按比例严格同步;在 11 ms 及 19 ms 时出现插补延滞,导致其后的位控过程出现数据饥饿。实际上,在仿真过程中发现,随着 P 的减小插补延滞及位控的数据饥饿现象逐渐加剧;在将 P 加大到5时,在采样时间段内,上述延滞及数据饥饿现象消失;在 C 取 0.2 ms 时,上述现象更为严重,在 P 取极大值15时仍出现数据饥饿现象。这表明较小的 C 将加大其对系统资源的消耗,导致其“上游”数据供应端无法得到足够的系统资源进行数据加工;较小的 P 意味着数据供应端的数据加工效率低。虽然可以通过加大这两个值来消除数据饥饿现象,然而较小的 C 及较小的 P 却是系统满足高精度、高速、小线段加工控制的必要保证。仿真说明该系统无法满足 $C=0.4\text{ ms}$ 、 $P<5$ 或 $C=0.2\text{ ms}$ 的加工控制要求。因此,在进行系统部署时,须将插补及位控模块进行独立部署。

图4为调整系统部署结构后,在采样 15 ms 、 $P=3$ 、 $C=0.2\text{ ms}$ 时的仿真结果。可以看出,在 C 和 P 均取极小值时,插补变迁与位控变迁严格遵循周期按比例协调运行。这表明经调整后的数控系统应能满足前述预设指标要求。

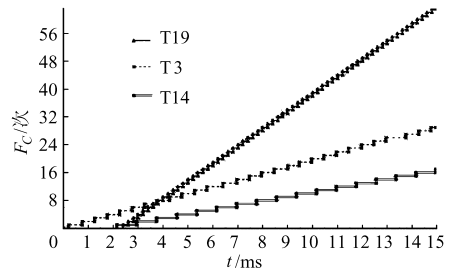


图4 调整系统部署结构后变迁T3/T14/T19激发计数

Fig.4 Firing counts of transitions T3/T14/T19 after adjusting structure of the system

4 结束语

基于网论基本原理,采用带抑制弧的TTPN可以建立数控系统动态分析模型;所提出的IATTPN有条件等效转换方案能有效降低模型维度与分析难度,便于后续仿真分析;系统的动态仿真分析为确定系统构成的瓶颈提供了精确的量化依据,从而能给出相应的调整规划;仿真实例表明经调整后的系统能达到预设的性能指标。

参考文献

- 于东,郭锐锋,刘明烈,等. 开放式数控系统域建模研究[J]. 小型微型计算机系统,2000,21(7):729~732.
Yu Dong, Guo Ruifeng, Liu Minglie, et al. Research of domain modeling on open CNC systems[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2000, 21(7): 729~732. (in Chinese)
- 周建辉,陈统坚,李伟光. 开放式数控系统的UML建模[J]. 现代制造工程,2004(5):20~22.

- Zhou Jianhui, Chen Tongjian, Li Weiguang. Modeling the open numerical control system with UML[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2004(5): 20~22. (in Chinese)
- 3 程涛,吴波,杨叔子,等.支持分布式网络化制造的智能数控系统的研究[J].中国机械工程,2004,15(8):688~693.
Cheng Tao, Wu Bo, Yang Shuzi, et al. Study on intelligent CNC system for distributed networked manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(8): 688~693. (in Chinese)
- 4 姚鑫骅,潘雪增,傅建中,等.微制造数控系统的实时有限状态机建模研究[J].浙江大学学报:工学版,2005,39(12): 1 965~1 968,1 997.
Yao Xinhua, Pan Xuezheng, Fu Jianzhong, et al. Research on real-time FSM modeling for microfabrication NC system[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(12): 1 965~1 968,1 997. (in Chinese)
- 5 Wang Y H, Hu J, Li Y. Study on a reconfigurable model of an open CNC kernel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138(1~3): 472~474.
- 6 史晓娟,王小椿.智能化数控系统的建模分析[J].仪器仪表学报,2003,24(6):640~642.
Shi Xiaojuan, Wang Xiaochun. The modeling analysis of the intelligent numerical control system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(6): 640~642. (in Chinese)
- 7 袁崇义. Petri网原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2005.
- 8 向华,陈吉红,周云飞,等.基于PC数控实时检测系统建模方法研究[J].中国机械工程,2003,14(20):1 777~1 779.
Xiang Hua, Chen Jihong, Zhou Yunfei, et al. Research on modeling method of the real time inspection systems in numerical control system based on PC[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(20): 1 777~1 779. (in Chinese)
- 9 Kasirolvalad Z, Motlagh M R, Shadmani J M A. An intelligent modular modeling approach for quality control of CNC machines product using adaptive fuzzy Petri nets[C]//8th International Conference on Control, Automation Robotics and Vision, 2004: 1 342~1 347.
- 10 江志斌. Petri网及其在制造系统建模与控制中的应用[M].北京:机械工业出版社,2004.
- 11 李拥新,陈鸣,蒋序平,等.一种用于网络管理的基于逻辑的 Policy 定义语言[J].计算机研究与发展,2002,39(11): 1 491~1 497.
Li Yongxin, Chen Ming, Jiang Xuping, et al. A logic-based Policy definition language for network management[J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(11): 1 491~1 497. (in Chinese)
- 12 吴维敏,董利达,苏宏业,等.基于抑制弧 Petri网的离散事件系统的监控理论综述[J].浙江大学学报:工学版,2003, 37(1):42~46.
Wu Weimin, Dong Lida, Su Hongye, et al. Supervisory control of discrete event systems based on inhibitor arc Petri nets: a survey[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2003, 37(1): 42~46. (in Chinese)
- 13 刘隽.系统 RMS 建模技术研究[D].北京:北京航空航天大学,2004.
Liu Juan. Research on modeling technology of system RMS[D]. Beijing: Beihang University, 2004. (in Chinese)

(上接第 212 页)

- 4 李宝仁,刘军,杨刚.气动人工肌肉系统建模与仿真[J].机械工程学报,2003,39(7): 23~28.
Li Baoren, Liu Jun, Yang Gang. Modeling and simulation of pneumatic muscle system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003,39(7): 23~28. (in Chinese)
- 5 Vasina M, Solc F, Hoder K. Shape memory alloys-unconventional actuators[C]// Industrial Technology, 2003 IEEE International Conference on Publication. Maribor, Slovenia: ICIT, 2003:190~193.
- 6 祝捷,曹志奎,马培菽.SMA 驱动的微型双三足步行机器人作方位运动的研究[J].传动技术,2002,16(4):23~28.
Zhu Jie, Cao Zhikui, Ma Peisun. Research omnidirectional movement of micro dual-tripod walking robot motivated by shape memory alloy[J]. Drive System Technique, 2002,16(4):23~28. (in Chinese)
- 7 田东艳,金明,兑关锁,等.形状记忆合金纤维在变轴力作用下的力学性能研究[J].工程力学,2007,27(7):174~183.
Tian Dongyan, Jin Ming, Dui Guansuo, et al. Mechanical properties of SMA fiber under varying axial force[J]. Engineering Mechanics, 2007,27(7):174~183. (in Chinese)
- 8 Koeneman E J, Schuhz R S, Wolf S I, et al. A pneumatic muscle hand therapy device[C]//Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS. San Francisco: IEMBS,2004:2 711~2 713.
- 9 隋立明,王祖温,包钢.气动肌肉的刚度特性分析[J].中国机械工程,2004,15(3):242~244.
Sui Liming, Wang Zuwen, Bao Gang. Analysis of stiffness characteristics of the pneumatic muscle actuator[J]. China Mechanical Engineering, 2004 15(3):242~244. (in Chinese)
- 10 隋立明,王祖温,包钢.气动肌肉与生物肌肉的力学特性对比研究[J].机床与液压,2004(6): 22~24.
Sui Liming, Wang Zuwen, Bao Gang. A comparison of mechanical properties of pneumatic muscle with biological muscle[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004(6): 22~24. (in Chinese)