

# 基于神经内分泌调控机制的类生物化制造系统研究

唐敦兵 张海涛 蔡祺祥 郑堃 顾文斌

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:**从制造系统、生物系统、控制系统学科交叉的角度出发,借鉴生物有机系统的神经-体液调控机制及规律,提出了一种新型的类生物化制造系统体系结构,研究如何将生物有机体的神经内分泌激素调控机制借用到制造系统调度规划与管理中。首先提出了有机制造单元的概念,然后建立了基于有机制造单元的具有多主体协调与递归控制特点的类生物化制造系统协调模型。基于神经内分泌激素调节规律,建立了类生物化制造系统的多重反馈控制模型,实现车间层在干扰环境下的快速自适应调度与控制。

**关键词:**制造系统; 生物系统; 神经内分泌; 激素; 控制模型

中图分类号: TH166

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)02-0175-06

## Bio-inspired Manufacturing System Based on Neuroendocrine Regulation Mechanism

Tang Dunbing, Zhang Haitao, Cai Qixiang, Zheng Kun, Gu Wenbin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** From the interdisciplinary point of manufacturing engineering, biology engineering as well as control engineering, a new type of bio-inspired manufacturing system architecture is presented based on the neuroendocrine regulation mechanism of the biological organism, and especially the general principles of hormone release control are used for adaptive production planning and control. First, a concept of organic manufacturing cell is proposed, and then a reference framework of bio-inspired manufacturing system is established based on recursive control and regulation of organic manufacturing cells. Mimicking the hormone secretion and release behavior, a multiple feedback control model of bio-inspired manufacturing system is set up, which can enable the adaptive scheduling and production control to deal with the changes and stimulus on the job shop floor.

**Key words:** manufacturing system; biological system; neuroendocrine; hormone; control model

随着以全球化、动态化和用户驱动为显著特征的市场竞争的加剧,制造业不仅面临着技术进步带来的机遇,同时还面临着世界范围内日益激烈的产品竞争的挑战。产品生命周期日益缩短,生产批量越来越小(甚至是一类一件),更新速度日益加快,

使得制造企业的生产方式已由面向产品的生产逐渐转变为面向顾客的生产,制造系统的运行环境也越来越充满了不确定性。尤其对于复杂产品(如大型飞机)的生产过程而言,其规模大(加工设备数量达千台),生产中带有可重入和复杂的工艺及资源

**基金项目:**国家自然科学基金(51175762)资助项目;江苏省杰出青年基金(BK201210111)资助项目。

**收稿日期:**2014-01-15; **修订日期:**2014-02-15

**作者简介:**唐敦兵,男,1972年2月生,博士,教授,博士生导师,德国洪堡学者,江苏特聘教授。主要研究方向:制造系统与自动化、智能制造系统、计算机辅助工程。研究成果:发表论文100余篇,其中SCI论文30余篇,EI论文90余篇,获得国家科技进步二等奖1项。

**通信作者:**唐敦兵, E-mail: d.tang@nuaa.edu.cn.

约束,多目标、不确定性事件频繁发生,且经常伴有持续变化而又不可预知的任务(生产任务的变化、紧急任务等)和事件(机床故障、等待某个制造资源等),生产负荷基本上呈动态性与非线性。如何快速有效地应对制造环境中出现的各种不确定性因素是今天制造系统必须考虑的一个关键问题。作为制造系统基础理论最关键的部分,制造系统建模和构造理论在前期主要包括集成计算机辅助制造定义方法、面向对象的制造系统分析方法和 Petri 网等方法。研究表明,这些建模方法主要用于对制造系统进行分析、定义和描述;采用这些方法建立的制造系统模型只是被制造功能单元用来完成各种操作任务,不具有模型重构和资源重新配置的能力,无法实现对外界干扰的快速反应。

为了能使制造系统更好地适应新的市场环境,国际上制造领域的学者提出了多种新的制造系统控制和组织模式,如:多智能体制造系统<sup>[1-3]</sup>(Multi-agent manufacturing system, MAMS)、Holonc 制造系统<sup>[4-6]</sup>(Holonc manufacturing system, HMS)、分形制造系统<sup>[7]</sup>(Fractal manufacturing system, FMS)等,其中对 MAMS 的研究最为广泛与集中。MAMS 是指由一组智能体(Agent)构成的系统,系统中的 Agent 具有自主性、主动性、交互性等特征,他们通过协作来完成某些任务或达到某些目标。但通过分析可以发现,多智能体制造系统的控制方法还存在一些缺陷。各 Agent 之间是通过一种显式协调机制来进行相互通信的,即一个 Agent 只有明确地接收到其他 Agent 所传来的信息才会进行自主反应。由于信息的延迟,这种显式协调机制会导致各个 Agent 跟不上制造环境信息的变化,尤其是当制造系统较为复杂时,Agent 之间的信息交互数据量将变得相当庞大,从而使信息延迟所产生的负面影响更大。此外,当各 Agent 依据自己的局部信息做决策时,往往不能使系统性能达到最优或近优,甚至有可能互相冲突,因而整个系统的控制和决策往往不能达到最优效果,而且不可避免地存在大量难以解决的决策冲突和死锁。前面提到的 FMS、HMS 等,虽然体系结构有所差异,但相关研究大多仍采用类似 Agent 的方法来进行制造系统建模,即采用 Agent 来表示 Holon 单元或者分形制造单元,与多智能体制造系统大同小异。因此,寻求具有协调同步性强和全局优化能力好等特点的自适应制造系统建模方法仍有待进一步研究。

值得注意的是,在当前制造系统的研究中,生

物制造与仿生制造日益受到重视。中国国家自然科学基金委在(2011~2020)机械工程学科发展战略报告中将生物制造与仿生制造科学列为 11 项重大研究领域之一,并指出如何将受控的生物行为集成到制造系统中是生物制造中的一个重要研究方向<sup>[8]</sup>。在生物制造与仿生制造科学背景下,传统制造系统的原理、技术和目标需要得到进一步延伸。

目前,有研究者已展开了这方面的相关研究,如文献[9,10]提出并讨论了生物型制造系统及仿生制造的概念。在研究过程中,通过总结和分析,发现目前的生物型制造系统研究存在以下问题:多数有关生物型制造系统的研究主要是从进化的角度描述产品开发和制造过程,强调通过模仿生物基因(尤其是形状基因、尺寸基因、结构基因及材质基因信息)间的编码、遗传、复制来设计和制造产品。如何将生物系统内部存在的最根本的控制与协调机理(神经控制-体液调节)运用到复杂的制造系统中还未见系统报道。生物控制论的研究结果表明:有机生物体控制系统是结构优越、功能完美的大系统,它拥有“神经-体液”相结合的双重调节机制,是具有多种协调控制作用和多级递归结构的协调控制系统<sup>[11]</sup>。比如,虽然人的许多活动如进食、体位变化、甚至呼吸运行等,都会对血压产生影响,但人体的血压通常是保持稳定的;又比如,人在奔跑时,心脏并没有接收到大脑有意识的非常明确的命令,但能按照自己固有的方式来自适应响应其他部位的要求,快速调节供血的多少。文献[12~14]从生物控制论的角度解释了人体在保持血压、体温稳定时的自适应控制机制和规律,并发现在生物各层次的子系统中,有不少子系统与工程控制系统类似。另外,与 Agent 间的直接传输信息不同,生物有机体(如器官)之间通过体液调节(如甲状腺素等各种内分泌激素分泌)来间接影响其他个体,各有机体根据感知到的生物信息素的强度主动调节自己的行为,其通信量小,能实现快速同步协调与合作,从而达到全局优化的目的。这种协调机制与基于 Agent 的显式协调机制相比,具有隐式协调的特点,可称之为隐式协调机制。若能将生物有机体的这种隐式协调机制引入制造系统研究中,必能有效地实现制造系统的快速协调控制与全局优化,并对制造过程中出现随机因素的意外情况做出及时的反应和处理,从而提高制造系统的鲁棒性和实用性。

因此,借鉴生物系统的基础研究成果和神经-体液调控机制的相关知识,从制造系统、生物系统、控制系统学科交叉的角度,将自组织与自适应视为

制造系统的生命特征,将制造系统视为一个有生命的有机体,本文研究如何将生物有机体的神经-体液自适应调控机制和规律借用到制造系统的调度规划与管理中,力图解决目前制造系统建模中的自适应和全局优化控制等问题。

## 1 基于神经-体液调节机制的类生物化制造系统参考模型

### 1.1 有机制造单元的概念

首先提出有机制造单元的新概念,并将其作为类生物化制造系统的基本组成部分,相当于能完成某种生命功能的各层次器官。类生物化制造系统可看作最为宏观层次的有机制造单元,各制造车间、工段乃至最低层次的制造资源(如机床、机器人等)都可视为各个层次的有机制造单元。有机制造单元的基本结构如图 1 所示,它是一个具有自组织功能的自主体,由数字神经节点、控制器、感知器、决策器及设备基元组成,能针对内外部环境的变化进行自我调节,能应对各种复杂性因素。数字神经节点能够迅速感知环境变化,快速做出条件反射式反应,能够保持与其他信息通道的高速畅通,具有智能决策、学习和记忆功能。对有机制造单元来说,其所面对的复杂性有两个主要来源:单元本身内部环境和单元所处外部环境。前者主要与单元内部的制造资源和信息有关,而后者主要与外部环境中现实的或可能的变化有关。有机制造单元通过类神经-体液调节的方式来处理外部和内部的复杂性变化,且在控制和感知功能之间维持一定的平衡并做出最终决策。

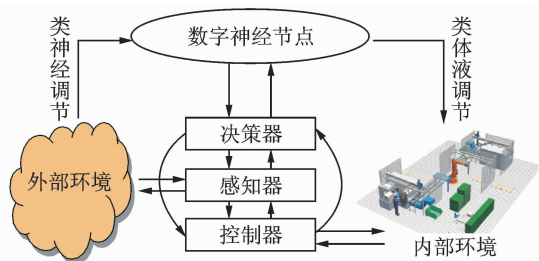


图 1 有机制造单元基本结构

Fig. 1 Basic structure of organic manufacturing cell

### 1.2 类生物化制造系统递归控制模型

在生物有机体中,内分泌系统与神经系统一起相互合作对机体进行调节,其最重要的功能之一就是维持机体的内平衡。神经系统也可以从高层感知外界环境变化,调节内分泌系统的活动,维持有机体的内平衡。内分泌系统和神经系统一起组成一个负

反馈系统,调节内分泌系统的活动,保持有机体内环境的稳态。同时,在神经-体液调控机制的作用下,所有层次的生物子系统(从细胞、组织到器官)均具有自组织特性,整个系统呈递归性质,每个子系统都能针对环境的变化自我调节,各个子系统之间由其上层的系统进行协调,使得生物有机体具有很大的灵活性,更适应于复杂变化的生存环境。

受生物有机系统的神经-体液调控机制的启发,提出采用递归控制结构来构造类生物化制造系统模型(见图 2)。该系统模型采用由不同层次的有机制造单元构成递归控制的结构,每一层次上的有机制造单元都具有学习和适应能力,它们对自身面临的内外环境复杂性具有自我调节功能。在对子系统的监督和和各子系统之间充分交流协作基础上,宏观层有机制造单元通过类中枢控制和类体液调节机制对微观层有机制造单元的行为进行协调,并强调自治与控制之间的平衡。在类生物化制造系统递归控制模型中,通过类神经调节来迅速感知制造系统的外界环境变化,并建立相应的感知模型;通过类神经中枢控制和类体液调节,使宏观层有机制造单元对微观层有机制造单元的协调控制活动具有一定的次序、强度、灵活性和适应性,从而提高制造系统的有机性,增强制造系统在复杂环境中的适应能力;通过有机制造单元之间的多自主体协调与控制方法,实现有效的局部协作并做出合理的有机制造单元重构。

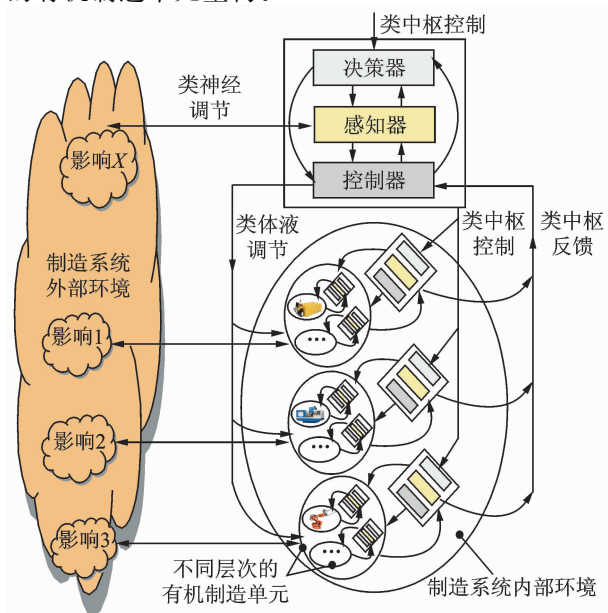


图 2 类生物化制造系统递归控制模型

Fig. 2 Recursive control model of bio-inspired manufacturing model

## 2 神经内分泌激素调控机制

在有机生物体内,其神经-体液系统通过内分泌细胞(腺体)分泌多种激素,随血液传送到机体的各部位,对所作用的靶细胞的生理活动起着兴奋性或抑制性作用,从而使生物体维持机体内外环境的快速稳定。激素间具有复杂的相互作用,不同激素对机体的调节作用不是相互独立的,而是相互影响的。对某一生物功能可能有多种激素共同调节。若不同激素对同一生理作用都有促进作用,则这些激素之间的关系称为协同作用。例如,生长激素、肾上腺素、胰高血糖素均可提高血糖浓度,这些激素在提高血糖浓度上就存在着协同作用。若两种激素对同一生理作用起到相反的作用,则这两种激素之间的作用称为拮抗作用。例如,胰岛素可以降低血糖,而胰高血糖素可以升高血糖,所以胰岛素与胰高血糖素在调节血糖浓度上存在着拮抗作用。由于不同激素对同一生理活动的调节过程中存在着协同与拮抗作用,内分泌系统可以对该生理活动进行有效而且灵活地调节,使这种调节处于比较稳定的状态。激素之间的协同与拮抗作用对维持机体内环境稳态具有重要意义。

不同腺体激素的浓度之所以在生物体内部能够维持快速的稳定,最主要的原因是内分泌激素调节的规律在其中起到了至关重要的作用。在生物控制领域已有学者总结出了内分泌激素调节的通用规律<sup>[15]</sup>:激素的变化规律  $F(G)$  具有单调性和非负性,激素分泌调节的上升函数  $F_{up}(G)$  和下降函数  $F_{down}(G)$  遵循 Hill 函数规律,如式(1,2)所示

$$F_{up}(G) = \frac{(G/T)^n}{(G/T)^n + 1} \quad (1)$$

$$F_{down}(G) = \frac{1}{(G/T)^n + 1} \quad (2)$$

式中: $G$  为函数自变量; $T$  为阈值,且  $T > 0$ ;  $n$  为 Hill 系数,且  $n \geq 1$ ;  $n$  和  $T$  共同决定曲线上升和下降的斜率。该函数具有如下的性质:(1)  $F_{up}(G) = 1 - F_{down}(G)$ ; (2)  $F(G)_{T=G} = 1/2$ ; (3)  $0 \leq F(G) \leq 1$ 。其中, $F(G)$  表示  $F_{up}(G)$  或  $F_{down}(G)$ 。

在神经-体液系统中,如果激素  $X$  与激素  $Y$  相互影响,则激素  $X$  的分泌速率  $S_X$  与激素  $Y$  的浓度  $C_Y$  的关系为

$$S_X(C_Y) = aF_{up(down)}(C_Y) + S_{X0} \quad (3)$$

式中: $S_{X0}$  表示激素  $X$  的基础分泌速率,不受浓度  $C_Y$  的影响; $a$  为控制激素分泌速率的常量系数。

激素在分泌的同时,也在进行挥发或者降解。从定量的角度用微分方程的形式可对实时激素浓度进行如下描述

$$\frac{dC}{dt} = -\alpha C(t) + S(t) \quad (4)$$

式中: $C(t)$  表示在某个时刻的激素浓度, $t$  表示时间, $\alpha$  表示激素挥发系数, $S(t)$  表示激素分泌速率。将式(3)代入式(4)中,可得

$$\begin{cases} \frac{dC_X}{dt} = -\alpha C_X(t) + S_X(C_Y(t)) \\ \frac{dC_Y}{dt} = -\beta C_Y(t) + S_Y(C_X(t)) \end{cases} \quad (5)$$

在通常不考虑激素基础分泌率的情况下,若  $X$  对激素  $Y$  有相反的拮抗作用,以 Hill 函数形式描述式(5)可得

$$\begin{cases} \frac{dC_X}{dt} = -\alpha C_X(t) + a \frac{(C_Y(t)/T_Y)^{n_Y}}{(C_Y(t)/T_Y)^{n_Y} + 1} \\ \frac{dC_Y}{dt} = -\beta C_Y(t) + b \frac{1}{(C_X(t)/T_X)^{n_X} + 1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $a, b$  为控制激素分泌速率的常量系数; $C_X, C_Y$  为激素浓度阈值。例如: $X$  对激素  $Y$  的拮抗作用具体表现为

$$\begin{cases} \frac{dC_X}{dt} = -1C_X(t) + 50 \frac{(C_Y(t)/20)^2}{(C_Y(t)/20)^2 + 1} \\ \frac{dC_Y}{dt} = -2C_Y(t) + 500 \frac{1}{(C_X(t)/5)^2 + 1} \end{cases} \quad (7)$$

设  $C_X, C_Y$  的初始值分别为 0 和 30, 则其拮抗作用曲线如图 3 所示。从图中可见,经过 4 个左右的时间单位后,激素  $X, Y$  的分泌浓度趋于稳态平衡。

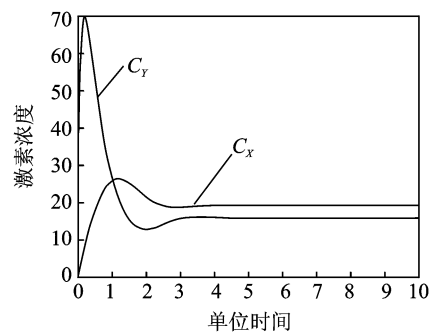


图3 激素拮抗作用曲线

Fig. 3 Hormone antagonizing curve

内分泌的各种激素调节控制原理可以总结为:中枢神经系统分泌各种促分泌腺激素刺激相应的内分泌腺体分泌相应的腺体激素,各种腺体激素在体内血液循环或体液中的浓度,反馈给中枢神经系统进行调节,从而使各种腺体激素在遵循 Hill 函数规律下相互作用从而使其浓度能得到精确、稳定的控制,并使得人体各种生理参数处于平衡状态。

### 3 类生物化制造系统的类激素调控机制

在前面已提到,现代制造系统的基本特点之一就是需要快速有效地应对制造环境中出现的各种不确定性干扰因素,从而保持比较稳定的平衡状态。基于上述内分泌激素调节机制的特点,提出采用内分泌激素调节机制来具体研究类生物化制造系统的自适应控制问题。在激素的调节过程中,广泛存在着反馈调节的机制。这些调节大多数是负反馈调节,以维持激素浓度在体内的相对稳定。例如,神经内分泌激素调节机制对人体甲状腺激素的多重反馈调节过程如图 4(a)所示。中枢神经系统刺激下丘脑分泌促甲状腺释放因子(Thyrotrophic releasing factor, TRF);TRF 刺激垂体分泌促甲状腺激素(Thyroid stimulating hormone, TSH);TSH 刺激甲状腺分泌甲状腺激素(Thyroid hormone, TH)。当 TH 的分泌量超过(低于)正常值,垂体就会抑制(促进)TSH 的分泌;TSH 分泌的波动又会影响 TRF 的分泌,这两种反馈调节方式是负反馈调节。

在类生物化制造系统中,将把加工任务( $T$ )和制造资源( $R$ )看作两种相互拮抗作用的激素,将车间控制器视为中枢神经系统,将有机制造单元视为腺体,将任务偏差( $\Delta T$ )、资源偏差( $\Delta R$ )等制造环境中的量化指标视为相应的激素浓度,借鉴上述的神经内分泌激素 Hill 函数调节原理,建立相应的类生物化制造系统自适应控制模型(如图 4(b)所示)。图 4(b)中: $\bar{T}$ 为制造系统的全局任务; $\bar{R}$ 为制造系统的全局资源; $\bar{T}_i$ 为有机制造单元  $i$  的加工任务输入; $\bar{R}_i$ 为有机制造单元  $i$  的制造资源; $T_i$ 为有机制造单元  $i$  实际完成的加工任务; $R_i$ 为有机制造单元  $i$  实际消耗的制造资源; $\Delta T_i$ 为有机制造单元  $i$  的任务偏差, $\Delta T_i = T_i - \bar{T}_i$ ; $\Delta R_i$ 为有机制造单元  $i$  的资源偏差, $\Delta R_i = R_i - \bar{R}_i$ ; $Z_{ij}$ 为有机制造单元  $i$  与有机制造单元  $j$  之间的加工能力相似度。

实际加工过程中,在满足一定的约束条件下,首先要优化配置每个加工单元的负荷。通常情况下,每个加工单元承受的负荷都是经过优化配置的。如果出现了一些突发因素,如紧急订单、设备故障等,造成系统中在制品大量积压或缺乏,此时就要采用相应的过程控制策略进行调节。若是遇到新增任务等情况,则以加工任务变化  $\Delta T$  作为激素激励信号,以资源调整  $\Delta R$  作为激素响应,以式(6)中激素拮抗作用的方式建立资源与任务的有机匹配模式,通过车间控制器和有机单元控制器快速实现车间层的自适应重新调度,包括加工任务的快

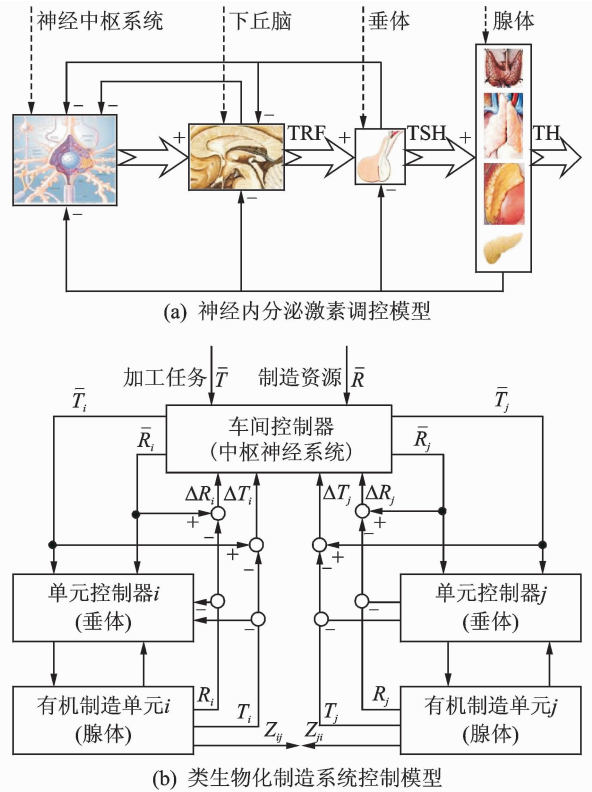


图 4 神经内分泌激素调控模型及其启发的类生物化制造系统控制模型

Fig. 4 Neuroendocrine regulation model and control model of bio-inspired manufacturing system

速重新调整和以及根据各有机制造单元间的加工能力相似度对制造资源进行快速重新配置,从而在受到干扰后快速实现资源负荷的重新平衡。

在同样,如遇到机床故障或者出现资源短缺等情况,则以资源的变化  $\Delta R$  作为激素激励信号,以任务的调整  $\Delta T$  作为激素响应,实现自适应重新调度。此外,也可将在制品量、制造资源利用率、制造资源负荷平衡、单位时间产出量等指标视为有机制造单元的类激素,并通过图 4(b)中类生物化制造系统自适应控制模型来对其进行快速调节。

模拟生物的神经内分泌激素调节行为,搭建了类生物化制造系统的模拟运行平台,如图 5 所示,其中硬件平台的功能与生物系统的功能类比如表 1 所示。

在生物意义上来说,类生物化制造系统可被理解为是由多个基因(腺体)和一个类神经中枢组成,它能针对环境的变化进行自我调节,能应对各种复杂的动态环境。类神经中枢即为类生物化制造系统的主控制器(这里采用嵌入式 ARM 作为主控制器),它起着协调各内部基因以及有机制造单元的功能。有机制造单元中的各个基因在一定程度上

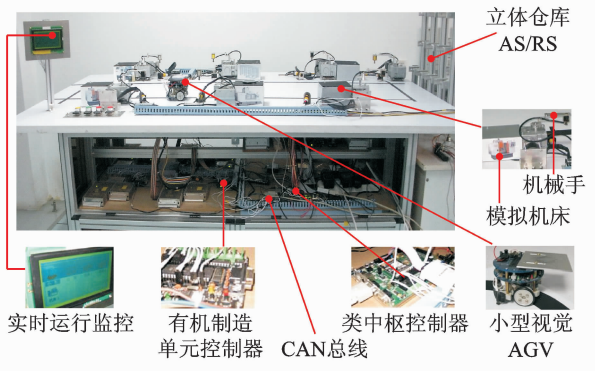


图5 类生物化制造系统模拟运行平台

Fig. 5 Test bed of bio-inspired manufacturing system

表1 类生物化制造系统的模拟运行平台硬件实现和生物控制的功能类比

Tab. 1 Analogous biological control functions of test bed hardware of bio-inspired manufacturing system

制造系统	生命体系统
主控制器(ARM)	神经中枢(中枢控制)
有机制造单元控制器	脑垂体
机床	细胞(腺体)
AGV	细胞(腺体)
总线(CAN总线)	体液
基于CAN总线的通信	体液调节
通信协议	体液调节规则
传感器	细胞表面的受体
效应器	细胞分泌激素
正常行为	分泌促激素
故障行为	分泌抑制激素

具有一定的自治性,它们执行任务时无须经过上级的控制,但同时各个基元又是上一级控制的对象。有机制造单元控制器执行类激素调节功能,同时它又把自身的状况通过类体液调节(这里采用CAN总线通讯)实时向上级反馈,以便于类神经中枢进行整体决策。

## 4 结束语

借鉴生物有机系统的神经-体液调控机制及自适应与自组织规律,从制造系统、生物系统、控制系统学科交叉的角度,提出了有机制造单元的新概念,并将其作为类生物化制造系统的基本组成部分;有机制造单元之间通过类中枢控制和类体液调节等隐式协调机制使其相互间的控制活动有一定的次序、强度以及灵活性和适应性,从而提高制造系统的有机性,增强制造系统在复杂变化环境中的适应能力,克服传统的分级递阶制造系统及多智能体制造系统等的缺点。借鉴神经内分泌激素调节原理及其闭环负反馈调节机制,建立类生物化制造

系统的多重反馈控制模型,使得干扰环境下能实现车间层的快速重新调度与控制。

## 参考文献:

- [1] Renna P. Multi-agent based scheduling in manufacturing cells in a dynamic environment[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(5): 1285-1301.
- [2] Jana T K, Bairagi B, Paul S, et al. Dynamic schedule execution in an agent based holonic manufacturing system [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2013, 32(4): 801-816.
- [3] Jana T K, Saha P, Sarkar B, et al. Implementation of agent based holonic control in discrete manufacturing[J]. Advances in Production Engineering & Management, 2013, 8(3): 157-168.
- [4] Morariu C, Morariu O, Borangiu T. Customer order management in service oriented holonic manufacturing[J]. Computers in Industry, 2013, 64(8): 1061-1072.
- [5] Lei Jing, Yang Zhuyuan. Disturbance management design for a holonic multiagent manufacturing system by using hybrid approach[J]. Applied Intelligence, 2013, 38(3): 267-278.
- [6] Leitao P, Restivo F. A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24(5): 625-634.
- [7] Ryu K, Yung M. Agent-based fractal architecture and modeling for developing distributed manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(17): 4233-4255.
- [8] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] Ueda K, Vaario Y, Fujii N. Interactive manufacturing: Human aspect for biological manufacturing system[J]. Annuals of the CIRP, 1998, 47(1): 389-392.
- [10] Ueda K, Kito T, Fujii N. Modeling biological manufacturing systems with bounded-rational agents[J]. Annuals of the CIRP, 2006, 55(1): 469-472.
- [11] 黄秉宪, 韩秀苓. 生物控制论基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1991.
- [12] 张自立, 彭永康. 现代生命科学进展[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] 弗里德里希·克拉默. 混沌与秩序: 生物系统的复杂结构[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- [14] 涂序彦. 生物控制论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
- [15] Farhy L S. Modeling of oscillations of endocrine networks with feedback [J]. Methods Enzymology, 2004(384): 54-81.