

机床绿色制造系统工程 的实施框架*

Implementation Framework of System Engineering for Green Manufacturing of Machine Tool

武汉科技大学制造工程研究所 江志刚 周帆 张华 张旭刚



江志刚

武汉科技大学工业工程系副教授。主要研究方向为绿色制造与再制造、制造系统工程。近年来,主持和参与完成国家自然科学基金、国家科技支撑计划、国家 863 计划、湖北省自然科学基金等课题 20 余项。绿色制造基础理论与技术方法体系项目获 2006 年度湖北省自然科学二等奖,取得软件著作权 2 项,出版学术著作 1 部,在机械工程学报、Journal of Cleaner Production、International Journal of Advanced Manufacturing Technology 等国内外权威期刊上发表学术论文 30 余篇。

机床制造业作为基础装备制造业,对于振兴我国装备制造业起着非常重要的作用。为此,如何实施机床绿色制造,开发节省能源、减少排放的绿色机床,优化机床制造过程以及回收利用废旧机床,实现资源循环利用,对于振兴我国机床制造业具有重要战略意义。

绿色制造是一个综合考虑资源消耗和环境影响的现代制造模式,其目标是使得产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个生命周期中,对环境负面影响极小,资源利用率最高,并使企业经济效益和社会效益协调优化^[1]。绿色制造已经成为国内外很多企业优先发展战略之一。机床制造业作为基础装备制造业,对于振兴我国装备制造业起着非常重要的作用。为此,如何实施机床绿色制造,开发节省能源、减少排放的绿色机床,优化机床制造过程以及回收利用废旧机床,实现资源循环利用,对于振兴我国机床制造业具有重要战略意义。

机床绿色制造技术的研究和应用已引起了国内外的广泛关注。Weinert 和 Diaz 等对绿色机床的设

计以及机床使用过程的资源消耗和环境影响分析评价进行了研究^[2-3]。李先广等提出了一种齿轮加工机床的绿色设计和制造技术框架,并对干式切削技术、少无切屑加工技术、数控化技术、模块化及结构优化设计技术、再制造重用等技术及策略进行了研究^[4]。李聪波等建立了一种基于产品设计主线和生命周期主线的机床行业绿色制造运行模式^[5]。曹华军等建立废旧机床再制造技术框架,并对机床再制造的关键技术进行了深入研究^[6]。周鹏分析了机床绿色制造目前存在的主要问题,并针对政府、企业和有关部门提出了一些意见和建议^[7-8]。此外,当前已经出现了不少专门从事机床再制造业务的企业。美国已有 200 多家专门从事机床再制造的公司,德国吉特迈集团股份公

* 国家科技支撑计划项目(2012BAF02B03)和自然科学基金(51205295)资助。

司等著名机床企业也非常重视机床再制造业务。我国重庆机床厂、广州机床厂等也开展了大量的废旧机床再制造业务。综上所述,机床绿色制造方面的研究已成为国内外研究热点,机床的绿色设计、机床的绿色工艺规划、机床的节能减排以及废旧机床的回收再制造等方面都有大量机构和学者进行了深入的研究。但是,由于机床绿色制造的运行与实施是一个复杂的系统工程,因此,如果从孤立的绿色制造方法、绿色制造技术、绿色制造工具和绿色制造设备等方面去研究机床绿色制造过程,将无法从全局上使“机床绿色制造”运行于最优状态,发挥出最佳效益^[9]。本文正是从这一视角出发,运用系统工程的理论和方法对机床绿色制造的实施进行研究,以期对机床制造企业实施绿色制造提供一定的参考。

机床绿色制造系统的结构模型

机床绿色制造与传统机床制造的区别主要在于,机床绿色制造从机床的整个生命周期审视,并力求逐步实现:(1)机床零部件由再生材料制造;(2)机床重量和体积减少40%以上;(3)提高传动效率,降低空转功率等,能源消耗减少30%~40%;(4)使用过程的废弃物减少50%~60%;(5)报废机床的材料100%可回收。

机床绿色制造的核心是在机床整个生命周期过程中实现“4R”,即(1)减量化(Reduce),从源头就注意减少资源(包括能源)使用量及废物排放量,减轻环境负荷,降低人体健康安全危害;(2)重用(Reuse),要求机床或者其零部件能够反复使用;(3)再生循环(Recycle),要求生产出来的机床在完成其使用功能后能重新变成可以利用的资源,而不是不可再生的垃圾。再循环有两种情况,一种是原级再循环,即废品被循环用来制造同种类型的新产品;另

一种是次级再循环,即将废物资源转化成其他产品的原料;(4)再制造(Remanufacturing),是以机床全生命周期设计和管理为指导,以废旧机床实现性能恢复和提升为目标,以优质、高效、节能、节材、环保为准则,以先进技术和产业化生产为手段,对废旧机床进行修复和改造的技术。机床绿色制造过程如图1所示。

机床绿色制造系统是指机床生命周期全过程及其所涉及的制造资源要素和环境影响因素所组成的具有绿色特性的一个有机整体。其制造资源包括物能资源(物料、能源、设备等)、资金和人力资源及相关的绿色制造理论、技术和信息;环境影响因素是指生态影响、资源利用、职业健康、安全性等一系列广义环境影响要素;其绿色特性是指在机床生命周期全过程中对环境负面影响最小,资源利用率最高。

机床生命周期中的每一个设计环节、工艺环节、制造或者再制造环节构成机床绿色制造系统的子系统,这些子系统通过在生命周期中的工

艺关系和物能资源转换联接在一起,形成具有一定关系结构的机床绿色制造系统,如图2所示。

基于机床生命周期绿色制造系统主要包括机床绿色制造资源供应子系统、绿色设计子系统、绿色制造执行子系统、使用与维护子系统、回收与再制造子系统以及制造信息控制与反馈子系统。

机床绿色制造资源供应子系统主要为机床绿色制造提供原材料的生产供应,是机床绿色制造系统运行过程中产生环境影响的根源。机床绿色制造要求选择材料应考虑到以下几个原则:(1)优先选择可再生材料和可回收材料,提高资源利用率,实现循环经济;(2)尽量选用低能耗、少污染的材料;(3)使用较少的材料种类,简化产品结构,便于零件生产、标示等;(4)尽量选用性价比高、进货周期短、且功能满足要求的零部件,以便降低维修率,提高机床的使用寿命。

机床绿色设计系统在很大程度上决定机床绿色制造过程的绿色性

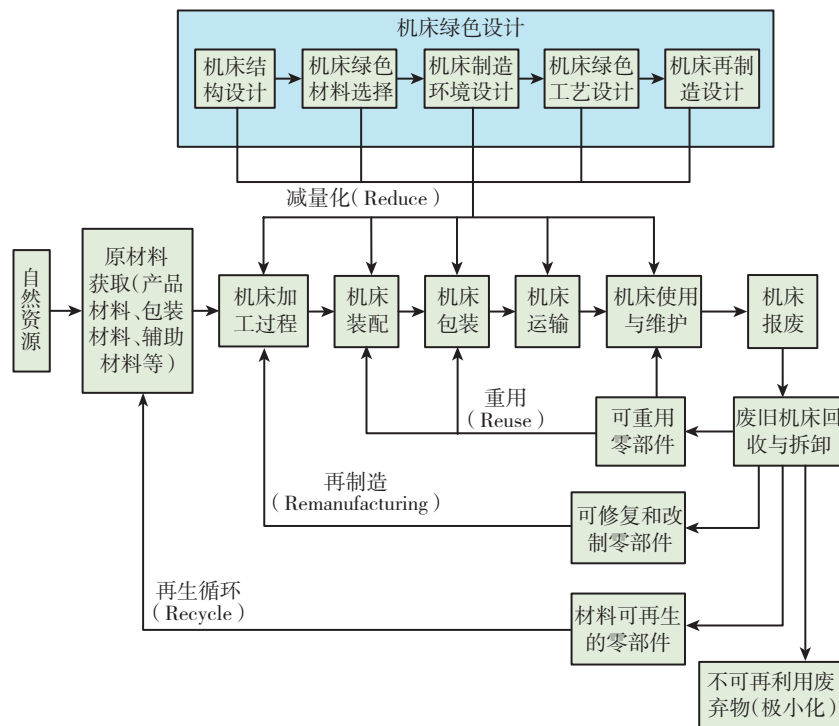


图1 机床绿色制造过程

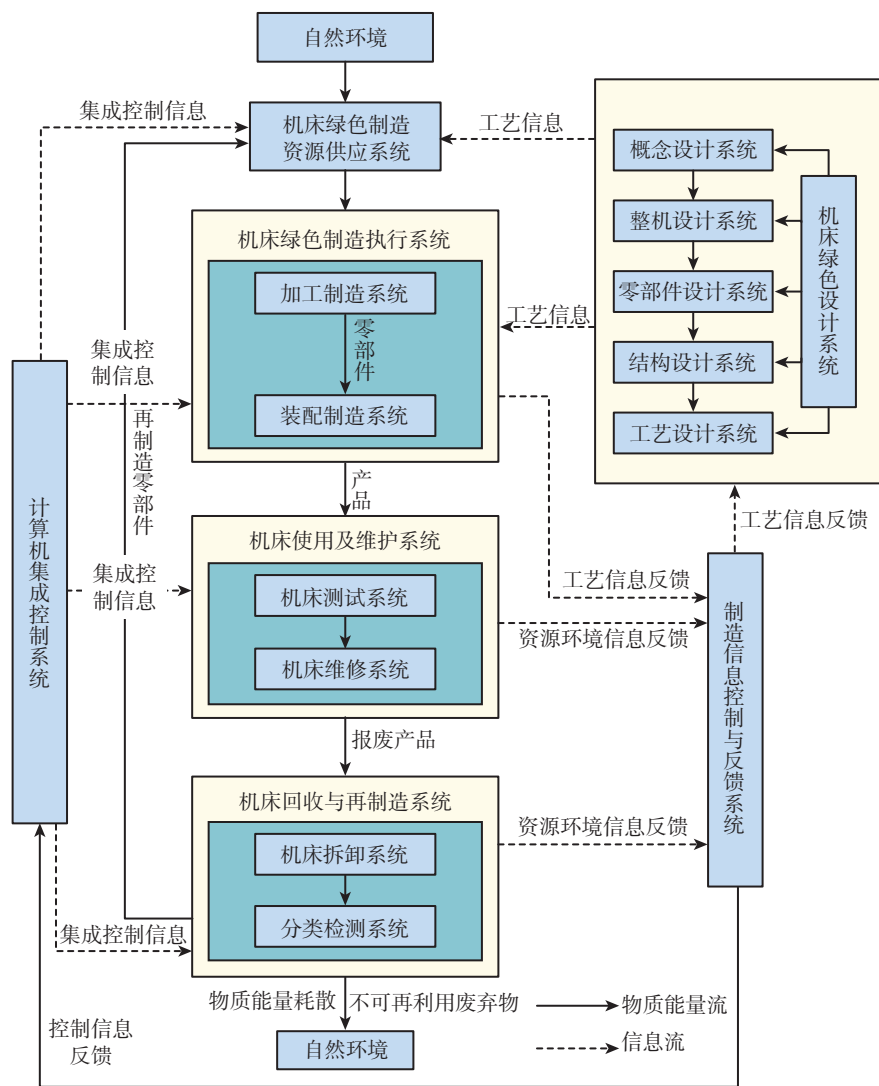


图2 基于机床生命周期的绿色制造系统结构模型

及机床的绿色效能。机床绿色设计系统包括概念设计、整机设计、零部件设计与工艺设计等系统。在机床的概念设计、结构设计阶段,就应充分考虑机床在其全生命周期范围内的资源环境问题,从源头上制定机床的绿色解决方案。这就要求机床绿色设计必须覆盖产品从市场需求、产品设计、加工制造、使用和维护,直到机床报废、回收、再制造等全生命周期的过程,以体现机床在全生命周期内的绿色效能。机床工艺绿色设计是指采用物料和能源消耗少、废弃物少,且环境污染小的工艺方案和工艺路线,机床工艺绿色设计应该做到以下几点:(1)尽量采用可回收再利用

材料,注意到产品零件在废弃后带来难处理的工艺问题,从而减少对环境的影响及材料的浪费;(2)改良和简化工艺流程,分解复杂的生产工艺,降低生产成本,提高产品的合格率,谋求生产过程废料最少化,避免不安全因素;(3)改变生产工艺或制造技术,改善工艺控制,改造原有设备,加强工艺创新,将原材料消耗、能源消耗和对环境的危害降低到最低程度。机床绿色设计运行过程如图3所示。

机床绿色制造执行系统是采用先进的绿色制造技术,将原材料物化并以机床形式输出的过程。机床绿色制造执行系统主要由零部件加工制造系统和装配制造系统构成。按

照机床绿色设计系统提供的设计信息,在集成控制系统和监测与反馈系统的控制下,对输入执行系统的物质能量资源进行处理和转化,对制造装备、生产时间和空间进行调度和分配,最终装配出质量合格的产品。

机床制造过程绿色化途径一般可以归为3类:新型绿色工艺技术、传统工艺的绿色性改进以及制造过程绿色优化技术,机床绿色制造执行系统运行过程如图4所示。

机床使用与维护系统是对机床生命周期的延伸,主要由测试系统和维修系统构成。机床使用和维护是机床生命周期中的重要环节,设计和生产机床的目的就是满足客户使用需求,这也是用户购买机床的最终目的。机床维修程序要规范,在用户维修时,机床制造厂应根据用户的故障反馈信息,在分析出故障原因后找出相应的解决方案并做好充分的排除故障准备,然后派技术人员前往解决,降低企业售后维修服务成本。对于整机大修的机床,可以将能再次使用的零件和不能使用的零件分门别类。能再次使用的零件可重复使用,节省原料和零件的采购时间,节约修理成本。机床的维护对于机床生命周期的延伸有着很重要的意义。机床生命周期的延伸,直接有利于减少废弃物的产生,有利于减少环境污染。

机床回收与再制造系统是当机床使用超过一定时期进入报废阶段后,对其进行回收和再制造。机床报废大多是由于加工精度和功能不再能达到要求,而其床身、主轴和上、下工作台面等很多部件都未能达到设计使用寿命等因素而引起的。随着机床的报废而损坏或锈蚀,浪费了大量的钢、铁等材料。为了提高资源的重复利用率和加强报废机床回收再处理的管理,报废机床回收后,应由再制造系统对其进行回收和分拣,对报废零件进行剩余寿命预测和

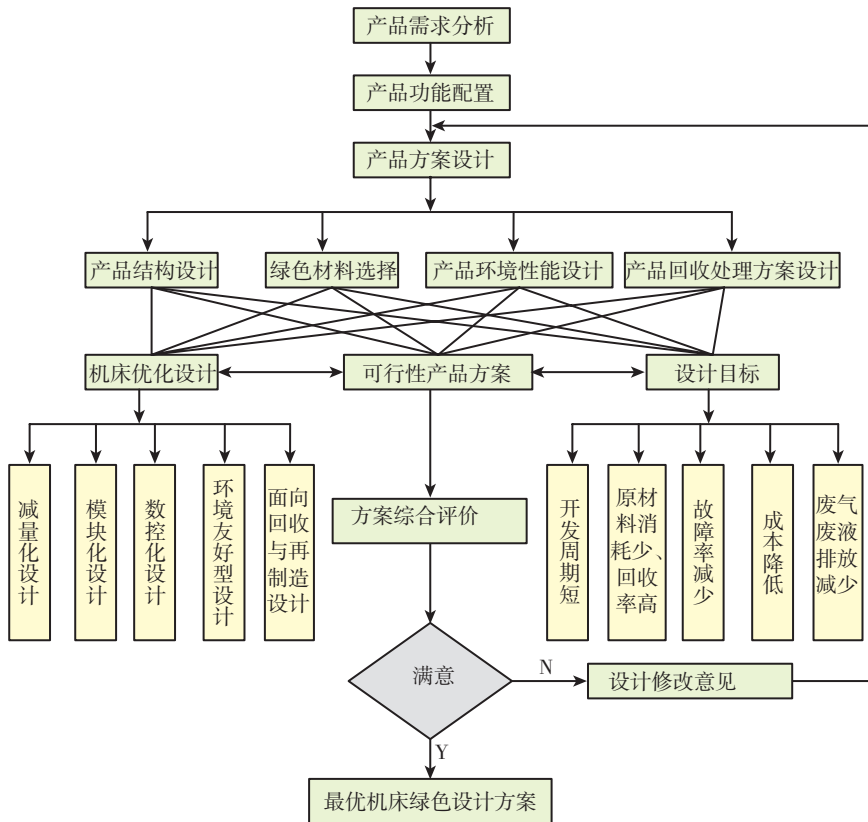


图3 机床绿色设计运行过程

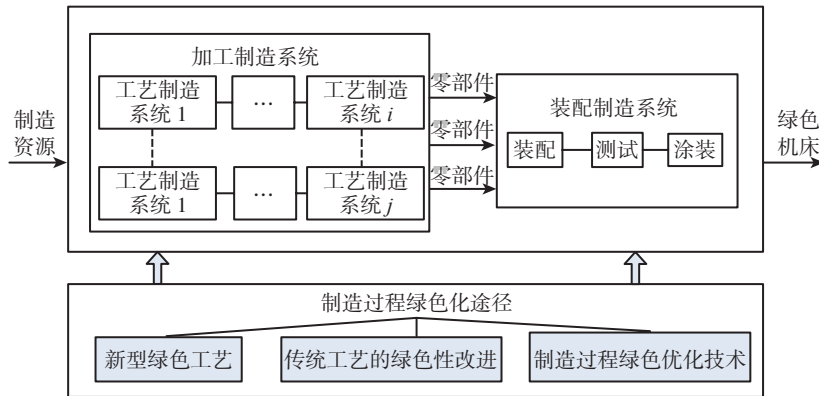


图4 机床绿色制造执行系统运行过程

可靠性评估,由机床绿色设计系统对其进行再制造设计。对于可以进行功能改造的报废机床,可以进行数字化改造,改进其功能;对于不能进行功能改造的报废机床,可进行拆卸,由机床绿色制造执行系统对其进行实物再制造,最终实现报废产品的重用。机床回收与再制造系统运行过程如图5所示。

机床绿色制造系统的各子系统之间通过物质、能量和各类制造信息

的转换与传递发生关联。为了实现机床的绿色制造,要对机床全生命周期的各个阶段实施绿色设计和规划,对生产工艺参数和设备运行参数进行全面的计算机集成控制,并将机床全生命周期过程中出现的工艺、装备和资源环境信息进行实时的分析、评估和反馈,以保证绿色制造系统在机床制造的全生命周期中实现大限度的协调运行,从源头上控制机床绿色制造系统对制造资源的消耗和对

环境的不利影响。机床制造信息控制与反馈系统主要由3个部分构成:一是负责对机床技术信息进行处理的产品与工艺设计系统;二是对机床绿色制造执行系统的装备、工艺参数、生产任务、时间、空间进行调度和控制的计算机集成控制系统;三是利用各种工业传感器,对生产制造过程及回收再制造过程进行监测,并将信息反馈给控制系统和设计系统的传感监测与反馈系统。在制造信息控制与反馈系统中,信息流的运行呈现比较明显的协同和闭环模式,与机床的生命周期同步,并在机床绿色制造系统内部形成最大限度的闭环运行。

机床绿色制造系统工程 的实施框架

机床绿色制造系统工程是以机床绿色制造系统为研究对象,应用系统工程的理论和方法来研究和处理机床绿色制造过程中的有关问题,实现机床绿色制造的整体最优。

为全面分析机床绿色制造实施的关键要素,明确机床绿色制造系统工程的实施内容,以机床生命周期为基础,提出了一种“一条主线,四大体系”的机床绿色制造系统工程的实施框架,如图6所示。“一条主线”是指机床绿色制造系统工程实施的过程主线;“四大体系”是指机床绿色制造系统工程技术支持体系、机床绿色制造系统工程知识支撑体系、机床绿色制造系统措施保障体系和机床绿色制造系统工程标准规范体系。

机床绿色制造的实现过程是机床绿色制造系统工程实施框架的核心和主线。首先要制定机床绿色制造系统的设计目标,包括系统需求分析、系统功能分析、系统方案设计、系统结构设计等,理清各阶段的任务,并根据各系统任务的特点及功能性需求,对机床绿色制造的关键技术进

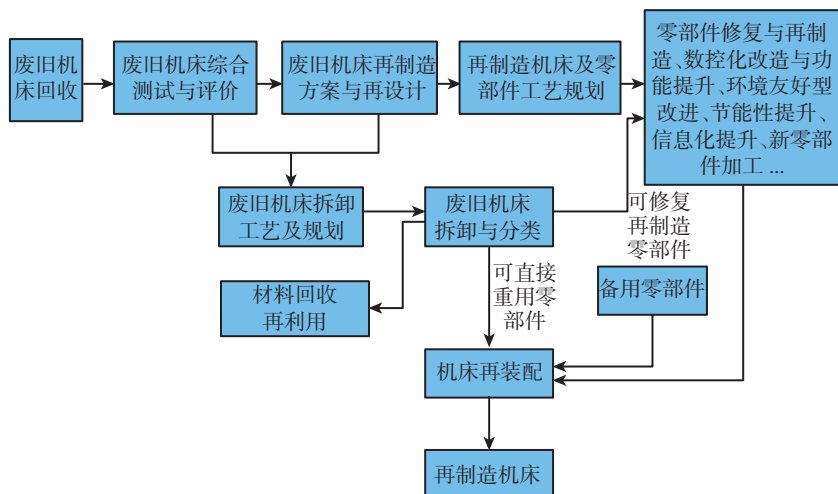


图5 机床回收与再制造系统运行过程

行系统深入的研究,建立覆盖机床全生命周期的绿色制造系统工程技术流程;其次要在实施中不断改善和优化机床绿色制造实施流程,在不断的试验与研究中,掌握其内在规律和本质,从制造与决策、试验与优化、维护与开发和分析与评价方面,推动机床绿色制造实施过程的持续改善。

机床绿色制造系统工程的知识支撑体系是机床绿色制造系统工程的持续发展的重要源泉。机床绿色制造知识支撑体系的构建主要包括以下几个方面:(1)对我国机床绿色制造经验进行总结,包括机床设计、制造过程的知识方法、薄弱环节的改进分析知识、零部件失效机理与修复方法等;(2)对国际机床绿色制造技术的引进消化与吸收,以及国外机床绿色制造系统工程的实施模式借鉴;(3)对正在模拟运行的数据进行深入的分析,持续改进机床绿色设计,并促进机床绿色制造系统工程技术体系、标准规范体系和优化方法体系的不断丰富与完善。

机床绿色制造系统工程技术支持体系是机床绿色制造实施的关键环节。机床绿色制造实施过程的绩效,在很大程度上是由技术支持体系决定的。机床绿色制造的技术支撑体系主要包括:(1)机床绿色设计系统:主要包括产品需求分析、产品概

念设计,产品绿色材料的选择、产品可拆卸性设计、产品方案综合评价等方面。(2)机床再制造系统:主要包括再制造系统设计技术、再制造工艺技术、再制造质量控制技术、再制造生产计划与控制技术等;(3)机床的数控化与智能化改造系统:机床的数控化与智能化包括普通机床的数控化改造和原有数控机床的改造。采用经济型数控系统对现有普通机床和旧的数控机床、加工中心进行改造,是实现资源合理利用的最佳方式,是机床绿色制造系统工程的重要方式。

机床绿色制造系统工程的标准规范体系是提升机床绿色制造性能的重要依据。为支持、指导和规范机床绿色制造系统工程的实施,需要建立与完善机床绿色制造的评估方法体系、数据库技术和标准规范体系。机床绿色制造系统工程评估方法体系是指对机床生命周期可靠性及安全性设计、绿色工艺设计、制造过程环境设计、回收与再制造设计等方面进行评价的模型库和方法库;机床绿色制造数据库技术是开展机床绿色制造绿色评价、设计等所需要的信息资源,如机床轻量化设计数据库、回收数据库、工艺绿色特性数据库等;机床绿色制造标准规范体系是指在机床绿色制造过程中支持绿色

设计、系统设计、工艺与材料、包装与运输、回收与再制造的技术标准与规范。

机床绿色制造系统工程措施保障体系是从政策、人才等方面实施机床绿色制造的重要措施保证。机床绿色制造的实施,一方面,要强化企业实施绿色制造的责任和义务,发挥企业作为技术创新主体的积极作用,加强企业绿色制造技术创新能力,支持研发和应用新技术和新工艺;另一方面,要建立完善的人员培训与工程实践相结合的绿色制造工程师能力提升机制,加速人才队伍的建设,为机床绿色制造系统工程提供人才保证;此外,政府有关部门需要进一步加大绿色制造的宣传、激励和引导,促使我国大多机床制造企业化被动为主动,尽快顺应内外部经济环境和发展形势,深化对绿色制造的认识,有步骤、分阶段的将机床绿色制造真正融入生产、设计流程中。

结束语

作为资源消耗和环境排放严重的典型行业,机床制造业实施绿色制造是其实现可持续发展的迫切要求,对机床行业的长远发展具有重要的指导意义。机床制造业实施绿色制造也是一个复杂的系统工程。基于此,本文对机床绿色制造系统工程的实施框架进行了具体研究,构建了一种由制造资源供应、绿色设计、制造执行、使用与维护、回收与再制造等子系统构成的基于全生命周期的机床绿色制造系统模型,并建立了一种以机床绿色制造过程为主线,以知识支撑、技术支撑、标准规范和措施保障4大体系为支撑的一种机床绿色制造系统工程的实施框架体系及实施途径。

参考文献

- [1] 刘飞,曹华军,张华.绿色制造的理论与技术.北京:科学出版社,2005.
- [2] Weinert K, Inasaki I, Sutherland J

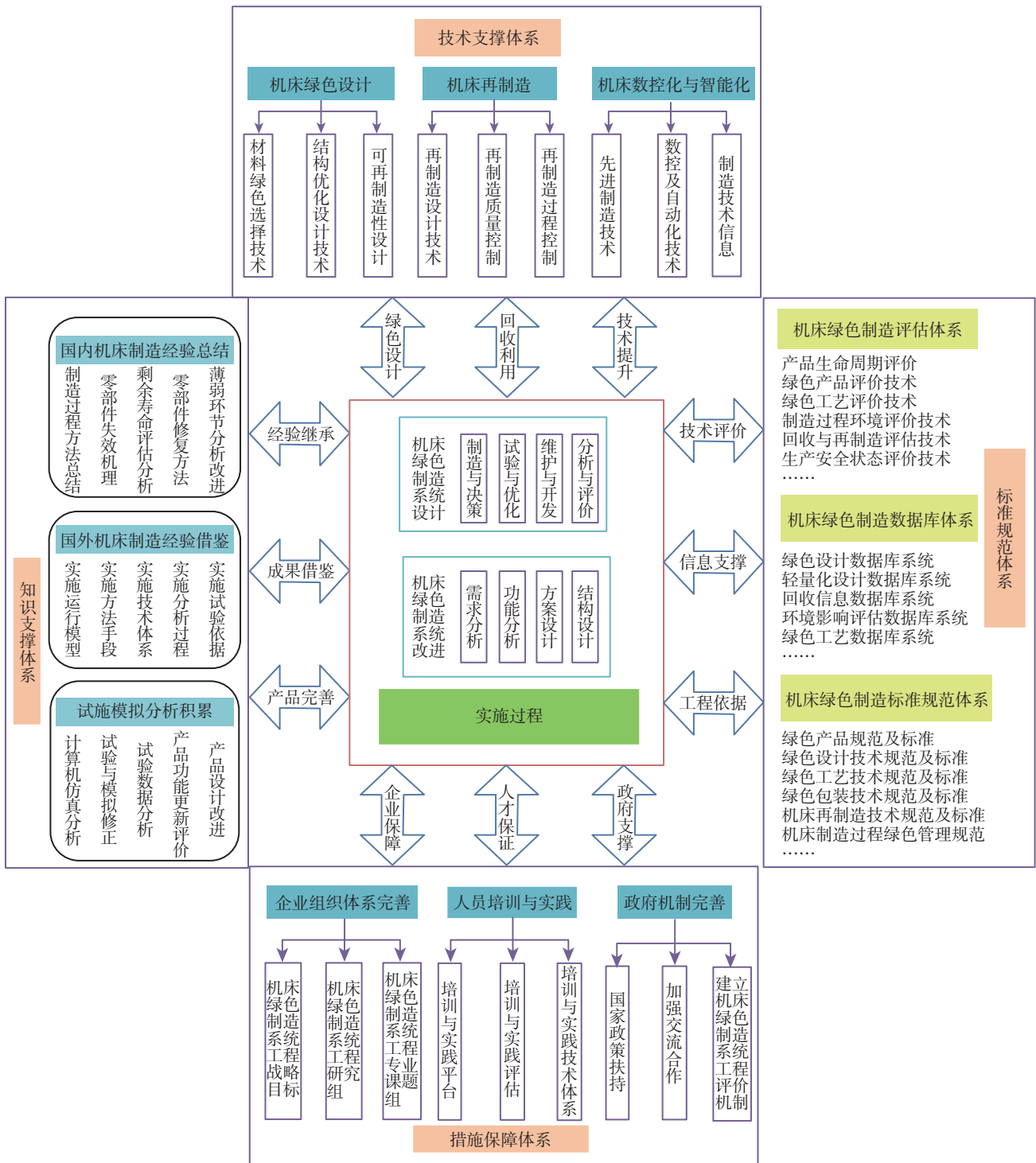


图6 机床绿色制造系统工程的实施框架

W, et al. Dry machining and minimum quantity lubrication. CIRP Annals, 2004, 53 (2): 511-537.
 [3] Diaz N, Choi S, Helu M, et al. Machine tool design and operation strategies for green manufacturing. 4th CIRP (HPC 2010), 271-276
 [4] 李先广,刘飞,曹华军. 齿轮加工机床的绿色设计与制造技术. 机械工程学报, 2009, 45(11):140-145.

[5] 李聪波,刘飞,王秋莲,等. 面向生命周期的机床行业绿色制造运行模式. 中国机械工程, 2009, 20(24): 2932-2937.
 [6] 刘飞,曹华军,杜彦斌. 机床再制造技术框架及产业化策略研究. 中国表面工程, 2006, 19(5):25-28.
 [7] 曹华军,杜彦斌,刘飞. 机床再制造综合测试与评价支持系统的开发及应用. 重

庆大学学报(自然科学版),2009(11):1262-1267.
 [8] 周鹏. 我国机床行业的绿色制造关键技术存在问题及建议. 机电产品开发与创新, 2012, 25(3):141-143.
 [9] 张华,江志刚. 绿色制造系统工程理论与实践. 北京: 科学出版社, 2013.

(责编 亦非)