

## 机械模具三维仿真系统的开发与研制

姚俊峰<sup>1</sup>, 张涛<sup>1</sup>, 曹利军<sup>2</sup>

(1.厦门大学软件学院, 厦门 361005; 2.福建浔兴拉链科技股份有限公司, 晋江 362200)



**摘要:** 对机械模具三维仿真系统(MSS)的开发步骤、总体结构和基本功能做了介绍, 该系统具有自学习和自适应的特点, 将其应用于生产实践, 经过两年多的试运行, 用该系统优化出的操作参数指导生产, 各项生产指标显著提高。通过本仿真系统的应用, 一个新产品模具设计时间可缩短为2-3个月, 从设计时间、设计费用、设计成功率等角度可降低设计开发支出达600万元, 年可降低模具生产成本约300万元。福建浔兴拉链科技股份有限公司使用该仿真系统后, 一年可间接创造经济效益1080万元。是一种有利于推动我国工业经济由粗放型向集约型转化的有效的先进实用技术。

**关键词:** 三维仿真系统; 设计; 仿真; 预报; 寻优

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2006) S1-0237-05

## Research and Development of Mechanical Mould Three-dimensional Simulation System

YAO Jun-feng<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, CAO Li-jun<sup>2</sup>

(1. Software School, Xiamen University, Xiamen 361005 China; 2. Xunxing Zipper Scientific and Technical Co. Ltd, Jinjiang 362200, China)

**Abstract:** The development steps, system structure and the main functions of the Mechanical Mould Three-dimensional Simulation System(MSS) were introduced. The system is characteristic of *self-study* and *self-adapting*. It has been applied in production for 2 years. Results show the optimized parameters can guide production very well. The designing time of a new mould could be shortened from half a year to 2 months. *The development cost could be reduced* 6 million RMB by shortening time and increasing success ratio. *The production cost of a mould could be economized* 3 million RMB. *The economical profit* is 10 million and 800 thousand RMB after MSS was applied in Xunxin Zipper Sci&Tech Cop.Ltd. It is a key technique promoting economy from extensive production to intensivism.

**Key words:** three-dimensional simulation system; design; simulation; forecast; optimize

### 引言

随着人类社会经济和科学技术的发展, 拉链由最初的金属材料向非金属材料, 单一品种单一功能向多品种多规格综合功能发展, 由简单构造到今天的精巧美观, 五颜六色, 经过了漫长的演变过程。其性能、结构、材料日新月异, 用途广泛, 深入到了航天、航空、军事、医疗、民用等各个领域, 小小拉链在人们生活中起到的作用越来越大, 越来越显示出它的重要性和生命力。拉链, 作为本世纪对人类最为实用的十大发明之一, 已被载入了历史的史册。

自1980年开始, 特别是1995年以后, 我国拉链生产以空前的速度发展, 一大批新兴的民营拉链企业脱颖而出, 规模不断扩大。拉链产品不断增加, 目前, 世界上的三大类拉链, 各个品种、各个规格基本上都能生产。1999年我国拉链的产量实现了第一次历史性的飞跃, 产量超过了100亿米, 成为世界上最大的拉链生产国。

近年来, 中国拉链年产量已跃居世界首位, 但要想与YKK等国际品牌竞争, 尚有较大差距。当前, 国内拉链企

业大打价格战, 依然是以量见长, 而难以质取胜。一些业内人士忧心忡忡, 唯恐演变成降价倾销和恶性竞争。其实不必担心, 因为这不过是中国拉链业参与国际化竞争前必经的一个前奏。降价, 是市场竞争和产品丰富的结果, 是中国加入WTO、参与国际竞争的必由之路。拉链价格一路走低, 作为一个信号告诉我们的拉链企业: 市场形势供求关系在变化, 企业要控制产量, 提高质量, 开拓国际市场。

价格竞争在特定的环境、特定的时期会产生一定效果, 但它毕竟是种低层次的竞争手段。如果把市场制胜的全部希望寄托在价格上, 这样的企业将会死路一条。关键要看降价竞争是因为成本下降, 还是为了搞垮对手进行倾销, 想通过绊倒对手的方式赢取胜利是不现实的, 只有加足马力不断提高产品质量和技术创新, 不断使自己的产品在价格上更具竞争力, 才能最终取胜。

由于劳动力成本较低, 中国拉链产品一直占有价格优势。但东南亚金融危机之后, 韩、泰、印尼等国的劳动力成本大大下降, 已接近于中国甚至更低。而中国拉链产品与国际先进水平相比, 质量上依旧处于劣势。为了新世纪来临之时, 能在国际化竞争中立于不败之地, 中国拉链企业在提高产品质量的同时, 还应最大限度地降低生产成本, 从粗放型走上集约化经营之路。

中国加入WTO, 要想打开国际市场的大门, 中国拉链

收稿日期: 2006-02-18 修回日期: 2006-05-22

基金项目: 福建省科技厅2003年重点资助项目(2003H057)

作者简介: 姚俊峰(1973-), 男, 山西代县人, 博士后, 副教授, 研究方向为三维仿真系统, 三维中间件及混沌理论、人工智能在复杂工业过程中的应用及三维中间件在企业管理系统中的应用。

企业的产品任重道远,可能要走三个阶段:第一阶段价格便宜,质量稳定,先占领世界亚非拉等中、低档拉链市场;第二阶段逐步稳居中、低档市场,赢得中国拉链“物美价廉”的信誉,开始打入中、高档国际市场。如美国,欧洲等地;第三阶段中国将有自己的世界知名拉链企业,已能够与日本 YKK 等分庭抗礼,并抢占大部分市场。

中国正式加入 WTO 后,即使我们的拉链企业不进军国际市场,国外拉链企业也会乘机攻占中国拉链市场。因而中国拉链企业与其被动应战,不如主动出击,先发制人。

计算机仿真学是以多种学科理论为基础、以计算机及其软件为工具进行实验研究的方法体系,它体现了实验思考的方法,用以探索复杂系统深层次的机理和规律性,具有科学的先验性;它可以帮助求出已经建立的数学模型和改进现有的模型,故已成为替代实物制造和实际测量的重要工具,并广泛地应用于几乎所有的工程和非工程领域,国内许多院校在这方面已开展了大量卓有成效的工作。

基于此,决定开发“拉链仿真系统”,达到模拟拉链的开合过程,根据特定的设计就可给出拉链的各项性能指标,起到缩短开发新产品周期,降低成本的目的,提高产品的质量与市场竞争力,创造显著的经济效益,在国际市场上居领先地位,打破高档拉链由国外大厂占据主要市场的局面,为中国民族产业的掘起提供技术保障。

### 1 三维仿真系统的开发步骤

该系统的开发基于生命周期法,经历了认识、概念化、形式化、实现和测试五个阶段,如图 1 所示。

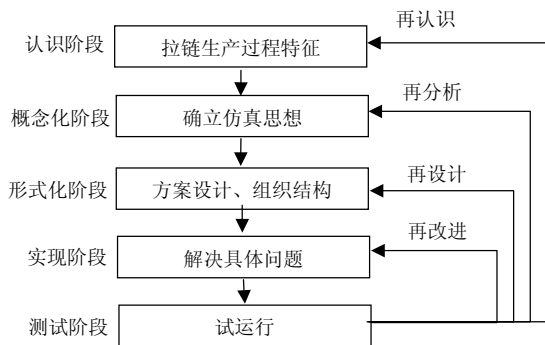


图 1 系统开发生命周期模型

该系统的具体开发步骤为:

- (1) 软件分析: 包括操作者的需求分析和软件的功能分析。
- (2) 软件框架设计: 包括系统总体设计、总体流程设计和模块分解。
- (3) 软件设计: 包括数据设计、模型设计、知识库设计和界面设计。数据设计包括数据文件设计,数据传输设计和动态数据交换设计;模型设计包括拉链拉合受力模型、模式识别、神经网络与混沌遗传算法的设计;界面设计包括主界面中要反映信息的取舍和信息集中设计。

(4) 程序编制: 将拉链拉合受力模型、三维产品接口、设计平台开发、模式识别算法、BP 算法与混沌遗传算法(CGA)由数学表示转变为程序语言表达;建立一些必要的知识库;数据传输的程序设计。

(5) 系统集成: 将数据模块、算法模块、知识库集成为 MSS 系统,包括解决各模块的接口问题、模块集成和形成 MSS 系统。

### 2 MSS 的主要功能与开发内容

“机械模具三维仿真系统(MSS)”采用面向对象程序设计方法,面向拉链产品设计者,使用在当今世界范围内广泛流行的操作系统和语言环境进行编程。图形用户界面优美、友好。软件的结构框图如图 2 所示:

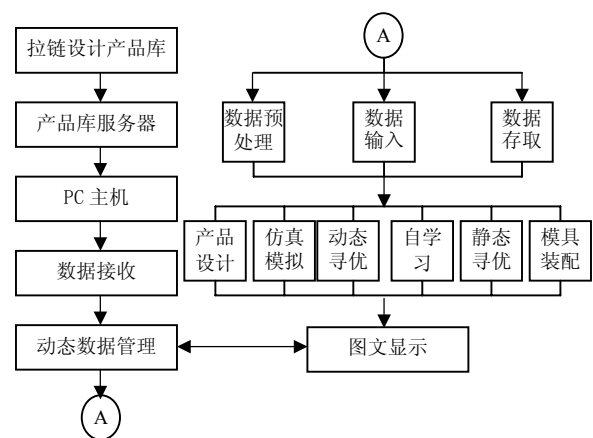


图 2 软件的结构框图

拉链产品设计仿真系统的四大功能为:设计、仿真、预报与寻优;

设计:设计平台建立、新产品设计、模具设计、产品库建立;

仿真:力学模型建立、模具装配过程、参数检测过程、拉链拉合过程;

预报:模具装配干涉现象、拉合轻滑度、拉头拉片结合强力、自锁强力、拉头拉片抗张张力、拉头拉片抗扭力;

寻优:特定型号拉链的关键参数静态寻优、拉头关键参数给定后的动态寻优、链牙关键参数给定后的动态寻优;具体如下:

- (1) 权限管理: 主要包括功能授权、图档授权和查看权限;
- (2) 图档管理: 对文档进行图档入库、查询、浏览、修改(新版本号为原版本号加 1)、删除、打印、复制出库等操作。
- (3) 设计库: 可选存储格式为三维存储格式 12 种中的任一种,主要包括拉头、链牙与拉片分类为尼龙、金属、塑钢、针对不对型号的设计库,存放数据库采用 SQL-Server。
- (4) 静态寻优: 用户选择产品类型(金属、尼龙、塑钢)、型号(2、3、5 等),通过下拉列表选择不同的五个力学性能

指标或整体组合后,即可得出单个拉头、链牙、拉片的三维造型、组合造型、关键尺寸值及五个力学性能指标的参考值及标准状态下的力学性能指标图表显示,并进行模拟检测,可进行局部放大、缩小,整体放大、缩小,及各自的关键尺寸标注,点图、网格图与实体图,并可动画模拟。

(5) 动态寻优:对于国标常规拉链,在已有设计库的基础上,拉头(口高、口宽、腰与支芯的垂直距离)或链牙(单齿宽度、单齿厚度、合宽)的关键尺寸输入后,系统自动给出样品型号,并自动调出与之相配的三维样品,画出三维组合图,及在常规检测状态或不同状态下的五个力学性能指标值,对于轻滑度则给出不同的拉动角度下其不同的轻滑度值,同时加上动画模拟;对于创新型拉链,在已有设计库的基础上,调用一种链牙结构时,自动调用与之相匹配的拉头结构,可达到最优的设计效果,及其力学性能指标值;

(6) 模具装配三维 CAD 设计系统:将模具的标准件(上、下模框,顶针、顶针固定板、动模固定板、静模固定板、垫角、静模框、牛角、锁紧滑块)设计出来成为一个标准库,将设计出来的产品进行组装,可进行模具的动态装配模拟,模具的工作过程模拟,运动过程中的实时干涉检测,供模具开发人员使用;

(7) 拉链产品设计平台:将共享软件 POV-Ray 接入,供设计人员进行拉链产品进行造型设计;

### 3 主要模块的设计思想

本项目采用的技术具有学科交叉性、高科技、高难度等特点,综合运用(1) 计算机图形学;(2) VC# 图形编程技术;(3) SQL Server 数据库技术;(4) OPENGL 编程;(5) 分形与混沌理论;(6) 人工智能理论(神经网络与遗传算法);(7) 机械力学;

采用的关键技术如下为:

- (1) 建模方法为将传统的力学模型与人工智能模型结合;
- (2) 混沌理论引入到仿真系统,使其真正得到工业应用;
- (3) 计算机图形学引入到力学模型仿真中;
- (4) 基于最低层的图形编程技术应用;

#### 3.1 模具装配过程干涉现象检测八叉树算法研究

产品设计仿真系统中仿真模块<sup>[1]</sup>的主要功能有:根据用户的操纵,显示、移动、旋转三维实体;计算、显示系统的各种静态、动态信息(如某对象的位置,容器中的剩余空间,最突出点等);对运动中的实体是否与其它物件发生干涉进行自动检验。八叉树数据结构是近10年CAD技术发展的最新研究成果<sup>[2-3]</sup>,是继边界描述(B-REP)及结构实体几何(CSG)之后的又一种三维实体模型的描述方法,在计算几何、机械制造及机器人设计和产品三维仿真中都得到广泛的应用。

在布局过程中,人是通过对计算机屏幕上的三维实体进行不断的移动,旋转来完成整个仿真过程的。当移动或旋转

一个实体时,一个首要的问题就是它是否与其它实体碰撞,因此干涉检验是每一步布局操作都必不可少的。

设现在要移动第  $i$  个布局对象,令  $ST$  表示状态空间树,  $SO$  表示  $A$  的状态树,那干涉检验过程如图3所示。

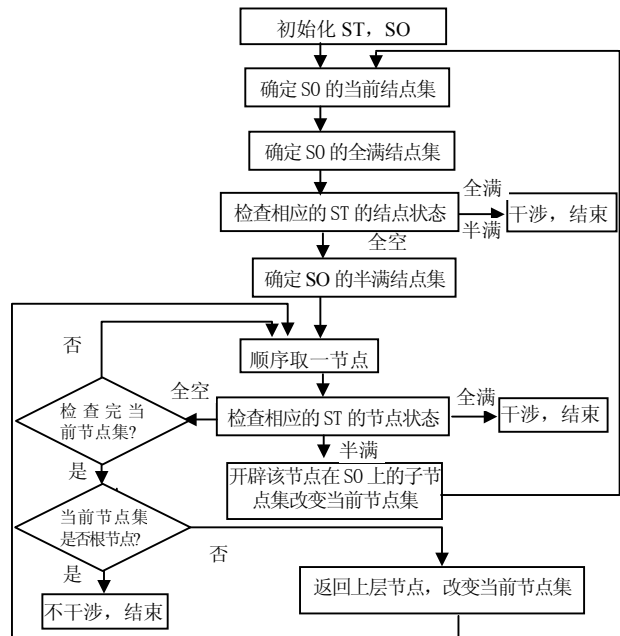


图3 干涉检验过程

具体步骤描述如下:

- (1) 初始化状态空间树  $ST$  及  $A$  的状态树  $SO$ ; 首先将第  $i$  个对象  $A$  的状态信息从  $ST$  中剔除,即检查  $ST$  的所有节点整数值的第  $i$  位,若为1,则将第  $i$  位与第 16 位变为 0,移动  $A$ ,确定  $SO$  树的根节点的状态,赋予当前节点集。
- (2) 确定当前节点集,确切地说,是确定  $SO$  中组成当前节点集的人个兄弟节点(或根节点),并划分离全满和半满节点的集合。
- (3) 确定当前节点集中节点状态为全满的节点集合。
- (4) 依全满节点集序号的顺序,依次检查与节点相应的  $ST$  节点的状态,若该点状态为全满或半满,则发生干涉,过程结束,否则,检查下一节点。
- (5) 确定当前节点集中半满节点的集合。
- (6) 依半满节点集合的序号,取下一节点为当前节点。
- (7) 检查与当前节点相应的  $ST$  中节点的状态,若该点状态为全满,则发生干涉,过程结束;若半满,转8;若全空,转9。
- (8) 开辟  $SO$  中当前节点的8个子节点(包括初始化它们),将它们置为当前节点集,转 2。
- (9) 检查半满集是否已检查完,转10;若未检查完,转6。
- (10) 检查当前节点集是否是根节点,若是,则不发生干涉,过程结束;若不是,转11。
- (11) 变当前节点集为上层节点集。若无剩余节点,转10;

若有, 转6。

### 4.2 力学模型与人工智能模型组合建模技术

要想完成该系统的四大功能“仿真、设计、预报与寻优”, 必须把拉链拉合过程中链牙的啮合原理及在各种不同情况(拐角、扭曲、拉动角度)下的受力搞清楚, 由于拉链比较小, 纯粹靠眼睛的观察与人为的猜测、估计并不能很好地解决问题。为此, 利用科学的方法, 从实用的角度出发, 我们采用通过建立力学模型, 对不同的拉链在各种情况下链牙、拉头体和拉片的受力进行了分析, 为拉链模具的设计者及拉链生产者提供理论指导, 同时也为拉链仿真系统的完成创造了良好的条件。

#### 4.2.1 力学模型建立

建立的力学模型主要包括: 拉链拉合过程链齿啮合原理、拉链在拐角时的受力分析、拉链在扭曲时的受力分析、拉链在特殊应用环境下的受力分析(特殊应用环境主要指高温、低温、腐蚀性物质、灰尘等条件。由于在这些环境下材料的物理或者化学性能改变, 导致材料热胀冷缩、变硬、变脆等情况发生, 进而影响拉链的拉合轻滑度)、拉头体拉攀结合力、拉头体拉攀极限扭力、拉链拉合过程中的拉动角度问题、拉头体抗张抗压强度。

#### 4.2.2 神经网络模型

采用神经网络进行预估的过程从本质上说是一个寻找输入集合 A 与被预估质量指标集合 B 的映射, 集合 A 中的每个变量都必须与被预估的质量指标有关, 集合 A 与 B 之间的映射关系式为  $f(x)$ , 其结构关系如图 4 所示。

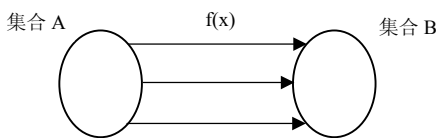


图 4 神经元网络进行在线仿真检测的映射关系图

图中函数关系式  $f(X)$  由神经网络中的网络结构和权重来表征, 集合 A 的大小视所选择的输入变量(即输入节点数)多少而定。输入变量越多, 集合 A 越大, 而集合 A 越大, 对应的函数关系式  $f(X)$  越复杂。神经网络记忆功能的强弱取决于隐含层数和隐含节点数的多少, 但由于隐含层和节点数多, 会使计算量大, 实用性差, 故隐含层数和隐含节点数不宜过多。

基于神经网络(ANN)的预报系统开发框架如图 5 所示。

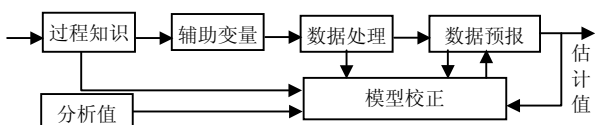


图 5 神经网络数据预报框架图

神经网络是整个系统框架的核心。

### 4.2.3 基于力学模型的人工智能建模技术

基于力学模型的数学模型由于其计算速度较慢, 计算出来的数据存在大滞后问题, 很难实现实时仿真。神经网络由于无需对象的先验知识, 只需根据对象的输入输出数据直接建模, 使它在解决高度非线性和严重不确定性系统建模与控制方面具有巨大潜力。但由于神经网络在处理问题时不涉及过程的原理, 不能表达其中的物理意义, 因此, 将神经网络与能表达一定物理意义的力学模型结合起来, 对于描述工艺过程更为有利。基于力学模型的神经网络预报建模流程如图 6 所示。

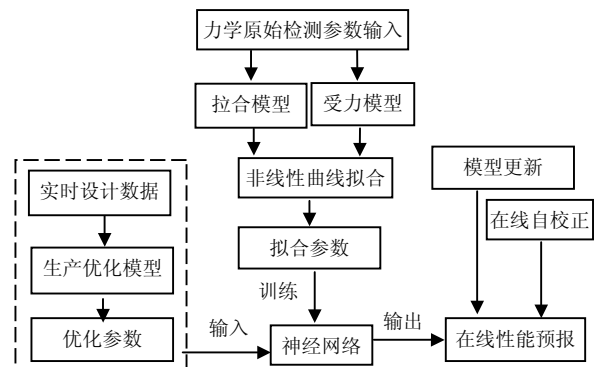


图 6 基于力学模型的神经网络在线仿真建模流程图

本文采用三层 BP 网络和误差反向传播的 BP 网络学习算法, 权值误差按照  $\delta$  规则<sup>[3-4]</sup> 进行调整, 各层间的激活函数取 Sigmoid 型函数。网络结构如图 7 所示。

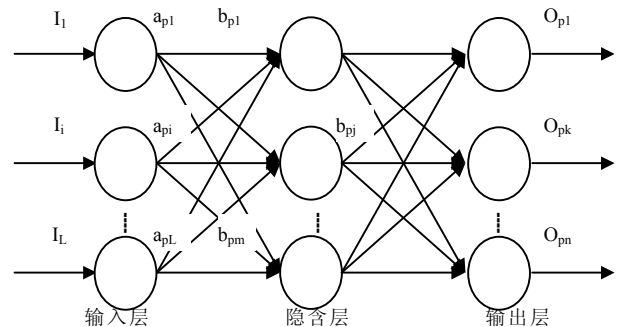


图 7 三层 BP 网络结构图

### 4.3 基于混沌变量的变步长梯度下降寻优算法研究

梯度法是解决非线性问题寻优常用的方法, 但它具有收敛慢、收敛速度依赖于变量尺度的缺点, 在极小点附近尤为显著。

混沌是自然界中一种较为普遍的现象, 它看似混乱, 却有着精致的内在结构, 具有“随机性”、“遍历性”及“规律性”等特点<sup>[5]</sup>, 在一定范围内能按其自身的“规律”不重复地遍历所有状态。混沌优化方法在搜索空间小时效果显著, 但搜索空间大时其效果却不能令人满意<sup>[6]</sup>。

本文结合混沌运动的遍历性和梯度下降法的迭代过程

简单、易收敛到极小点等特点,提出了基于混沌变量的变尺度梯度下降优化算法。该算法利用梯度下降法产生初始解,然后将k个具有微小差异的混沌变量加载到变步长中,进行梯度下降寻优,如果找到了比初始值更好的优化点,则用此值代替原初始值,否则继续寻优。并且随着迭代过程的进行,变步长因子逐渐缩小,可保证在最优值附近不致于产生拉锯现象。针对3个常用的优化测试函数的测试结果表明,该算法的优化效率远远高于传统的梯度下降法及文献[7]和文献[8-9]给出的方法。

### 5 应用效果

系统参数检测界面如图8所示,模具装配过程进行干涉模拟检测结果如图9所示。

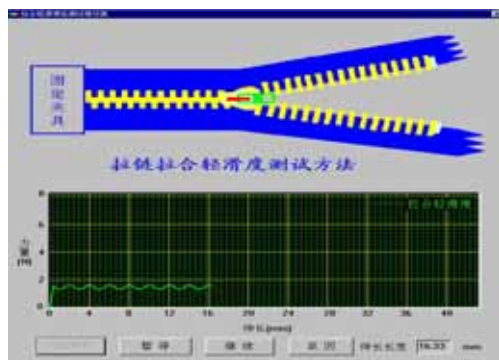


图8 对应拉链轻滑度检测仿真示意图

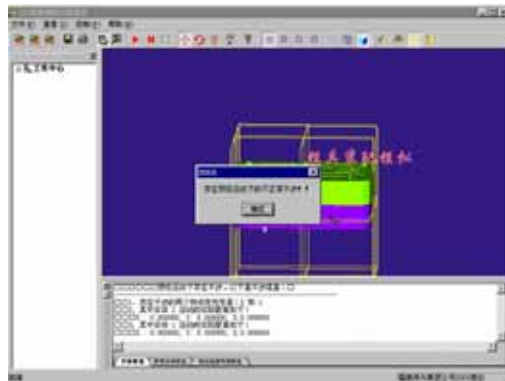


图9 模具装配过程干涉检测模拟实

1) 经济效益(形成生产能力、成本、市场销售额、利税、创汇、内部收益率、投资回收期等);

(1) 减少模具设计周期

通过本仿真系统的应用,一个新产品模具设计时间可缩短为2-3个月,较使用前6-10个月设计时间减少60%以上,

从设计时间、设计费用、设计成功率等角度可降低设计开发支出达600万元。

(2) 降低模具试制过程成本费用

通过本系统对模具的生产及试制过程的程序化控制,使开发和研制一体化和系统化,减少模具成型过程中的材料耗费、人工成本、费用支出,并提高成材率和成功率,预计年可降低模具生产成本约300万元。

(3) 通过提高设计、生产、人力成本和市场应用推广的效率预计年可间接创造效益180万元。预计,公司使用拉链仿真系统后,一年可间接创造经济效益1080万元。

2) 社会效益

该系统技术处于世界领先水平,通过技术转让在国内外同行业中具有广阔的市场前景。

该项研究成果科技含量高、投资少、效益高、适应性强,软件研发过程中使用的人工智能与数值解析方法相结合的综合建模方法具有较强的实用性,挖掘企业现有生产潜力,具有普遍推广价值和重要意义,是一种有利于推动我国工业经济由粗放型向集约型转化的有效的先进实用技术。

### 参考文献:

- [1] 王喆, 杨青, 查建中. 基于八叉树的三维干涉检验系统 [J]. 机械设计, 2002, 12(12): 26-28.
- [2] Yamaguchi K, Kunii T L, Fujimure K. Octree-Related Data Structure and Algorithms [J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716). 1984, 21(4): 53-59.
- [3] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies[C]//Proc of Ist European Conf. Artificial Life. Paris, France: Elsevier, 1991.
- [4] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. An Investigation of Some Properties of an Ant Algorithm[C]//ProcPPSN'92, London, 1992.
- [5] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用 [J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615.
- [6] 张彤, 王宠伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用 [J]. 控制与决策, 1999, 14(3): 285-287.
- [7] 钱富才, 费楚红, 万百五. 利用混沌搜索全局最优的一种混合算法 [J]. 信息与控制, 1998, 27(3): 232-235.
- [8] 曹晓华, 蒋卫华, 沈继红. 一种基于混沌的优化算法 [J]. 黑龙江商学院学报(自然科学版), 2000, 16(1): 57-59.
- [9] Potts J C. The development and evaluation of an advanced genetic algorithms based on migration and artificial election [J]. IEEE Trans. System, man and cybern (S1083-4419), 1994, 24(1): 73-96.