

产品结构建模技术发展综述

Review on Product Structure Modeling Technology Development

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 席平 张宝源



席平

博士,北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授,博导,目前担任北京航空航天大学CAD(数字化设计)中心主任。主要研究方向:数字化设计技术的基础理论和应用技术研究、软件开发和工程应用,承担多项国家自然科学基金项目、省部级项目及企业应用项目。

产品结构建模技术经历了从面向结果的建模到包含过程的建模,并逐渐向面向目标的建模迈进的发展历程,分别解决产品结构模型的有无问题、建模快慢问题以及建模自动化智能化问题。理清产品结构建模技术发展历史有利于领域研究者把握技术未来发展方向,取得更新的成果。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.036

人机环境等设计要求(工程约束),应用科学的原理、知识和经验,通过逐步的构思、计算和表示以获得满足这些需求的产品模型的过程。分析评价是在得到产品模型后,通过理论计算、CAE仿真、实物试验等方式验证模型是否满足设计要求,进而通过优化设计以更好地满足设计要求的过 程。产品建模与分析评价共同构成了产品设计过程,其中前者解决产品设计结果“有无”问题,后者解决产品设计结果“好坏”问题。

产品模型是设计要求和工程约束的具体载体。在现代数字化设计制造环境下,产品模型是产品设计过程的最终产物,并且随着CAD/CAE集成优化设计、三维标注以及设计制造一体化建模等新技术的融入,产品模型已成为工程分析、优化设计、工

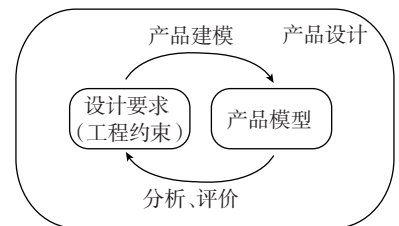


图1 产品设计与产品建模的关系

艺规划、数控编程、虚拟装配等后续环节的依据和数据源头^[3]。

广义的产品模型可以分为3大类:结构模型、性能模型和过程模型^[4]。结构模型是性能模型、过程模型等广义产品模型的基础,是产品性能的载体,是产品设计过程的最终结果,因此也是本文讨论的主要对象。

产品结构模型是数字化设计制造技术实现的基石和保障,在产品的整个设计体系中占有重要地位,因而对产品结构建模技术的发展脉络进

制造业是国民经济的命脉,而设计是产品研制的第一道工序,设计工作的质量和水平直接影响到产品的质量、性能和技术经济效益^[1-2]。因此,要提高产品的市场竞争能力,设计起着关键性作用。

产品设计总体上可分为两个过程:产品建模和分析评价,见图1。产品建模是根据功能、性能、工艺和

行梳理,把握其发展方向具有重要意义。

面向结果的建模技术

产品结构建模技术是计算机辅助设计(CAD)技术的重要组成部分,并且随着建模需求的增长和相关技术的成熟而不断向前发展。

设计目标、建模过程和产品模型(建模结果)是产品建模的3个要素。其中,设计目标是建模的起点,产品模型是建模的终点。而产品建模技术的发展却正好与之相反,经历了从面向结果的建模到包含过程的建模,并逐渐向面向目标的建模迈进的历程,如图2所示。

面向结果的CAD系统忠实记录设计完成后的产品结构、形状、位置、装配关系、工艺要求等最终设计结果。模型中各个几何和非几何元素的尺寸和位置相对固定,各元素之间没有约束关系,也不含有建模历史。修改设计需要删除相关几何元素,再重新绘制,较为困难^[5]。这类建模技

术只记录了最后结果,而未记录建模过程信息。图3为某减速器输入轴工程图,是面向结果的建模实例。

面向结果的建模技术包括:二维绘图、实体建模、曲面建模、三维标注等。

1 二维绘图

二维绘图是面向结果的建模的早期形态。传统上使用一个或多个二维视图表达零件及装配体,并通过手工方式将这些视图绘制在图纸上。二维绘图系统就是应用计算机技术取代手工绘图,以解决手工绘图存在的工作量大、效率不高、图形精度低等问题。其主要技术包括基本图形的光栅化绘制算法、求交算法、两图形间的包含判定算法、图形裁剪算法、区域填充算法、图形的坐标变换等^[6]。但是,二维绘图技术并未解决用二维视图表示零件存在的不直观、不完整等局限性。因此,随着计算机技术的发展,人们很自然地提出了用实体及自由曲面的方式在三维空间中直接表示产品形状。

2 实体建模

实体是封闭的三维形体,它将整个三维空间分成实体内部、实体外部和实体边界上3个部分^[7]。因而利用实体模型可以计算模型的体积、惯性矩等整体属性,可以进行干涉检查和碰撞检测,还可以应用有限元分析等方法对模型进行力学仿真。在CAD领域,有3种比较常见的实体建模方法,即构造实体几何(CSG)方法、边界表示(B-Rep)方法和八叉树(Octree)方法。

3 曲面建模

利用边界表示方法和构造实体几何方法已经可以表示复杂多面体,但若构建更为复杂的包含自由曲线曲面的模型,还需要在两者基础上附加曲线、曲面的建模方法。

对自由曲线曲面描述方式的研究始于航空和汽车工业。1963年美国波音公司的Ferguson首先提出用参数形式的矢量函数来表示曲线曲面^[8],从此这成为曲线曲面形状数学描述的标准形式。1971年,法国Renault汽车公司的Bézier提出了一种由控制多边形定义曲线的方法^[9]:设计人员只需移动控制顶点就可方便地修改曲线的形状,而且形状的变化完全在预料之中。1974年,美国通用汽车公司的Gordon和Riesenfeld在研究Bézier方法的基础上,引入了B样条方法^[10]。它在兼具Bézier方法几乎全部优点的基础上,还具有局部性,便于修改。1975年,Versprille在其博士论文中将B样条方法推广到有理情形,首先提出了非均匀有理B样条(Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS)的概念^[11],解决了B样条曲线曲面无法精确表示圆锥曲线和初等解析曲面的问题,从此NURBS逐渐成为工业界描述产品自由曲线曲面形状的标准方法。2003年,Sederberg提出了T样条方法^[12],T样条允许控制网格中出现T型控制点,从而为产品形状描述

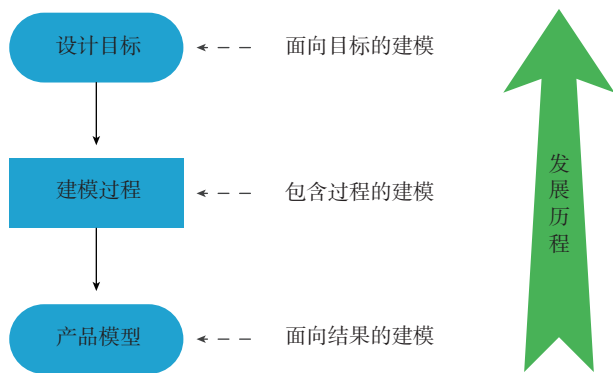


图2 产品建模技术发展历程

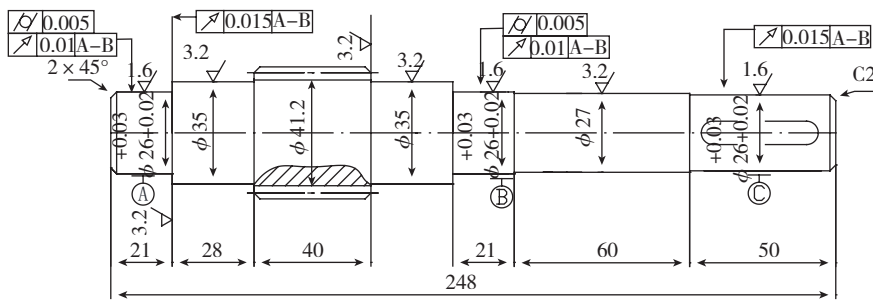


图3 面向结果的建模实例

表1 几何约束求解主要算法

算法分类	具体算法	主要研究者
基于数值计算的方法	Newton-Raphson 迭代法	Lin 等 ^[19] ; Nelson ^[20]
	Doolittle's 方法	Light 等 ^[21]
	BFGS 优化方法	Ge 等 ^[22]
	同伦连续法	Lamure 等 ^[23] ; Peng 等 ^[24]
基于符号计算的方法	Gröbner 基方法	Buchberger ^[25] ; Hoffmann ^[26] ; Kondo ^[27-28]
	吴方法	吴文俊 ^[29] ; Gao 等 ^[30]
	结式法	Deepark ^[31] ; 杨路等 ^[32]
基于图论的方法	三角形分解法	Owen ^[33-34]
	S-tree 分解法	Latham 等 ^[35] ; Joan-Arinyo 等 ^[36]
	几何变换法	高小山等 ^[37]
	轨迹求交法 (LIMd)	高小山等 ^[38]
	C-tree 分解法	Gao 等 ^[39]
	基于簇合并的方法	Hoffmann 等 ^[40] ; Fudos 等 ^[41]
	自由度分析法	Kramer ^[42-43] ; 乔雨等 ^[44] ; 陈立平 ^[45]
剪枝-规约法	李彦涛等 ^[46]	
基于人工智能的规则推理方法	规则推理法	Aldefeld ^[47] ; Suzuki 等 ^[48]
	延拓法	Sunde ^[49] ; Gao 等 ^[50]
	推理数据库法	Brüderlin ^[51]
	引进新的作图工具	Verroust 等 ^[52] ; Gao 等 ^[53]

包含过程的建模优点主要有:

(1) 模型中包含建模历史过程, 不仅记录了建模结果, 还可以知道如何建立的模型;

(2) 支持模型的快速修改和产品的系列化设计;

(3) 支持基于草图的逐步求精设计模式。

但仍有如下不足之处:

(1) 记录了建模结果和建模过程, 但不知道建模原因;

(2) 精确数字化定义和参数修改的可控性要求参数化设计尽量满足全约束条件, 对于欠约束和过约束情况(多见于自由曲面特征建模)缺乏有效的处理手段;

(3) 给定设计目标, 必须由设计者告知建模系统详细的建模过程, 自动化程度仍不够高。

为解决上述不足之处, 进一步提

高产品建模的自动化、智能化程度, 引出了面向目标的建模技术。

面向目标的建模技术

面向目标的建模是指给定设计目标和初始设计参数, 无需设计者告知建模系统详细的建模过程, 系统较自动地完成产品建模的模式。类似于数据库的 SQL 语言, 如查询语句“select...from...where...”, 只需用户指定要从哪些表中查询哪些字段, 符合什么条件, 就可以自动得到查询结果, 而不用关心 DBMS 系统怎样完成查询。

面向目标的建模是产品建模系统的理想模式。已有的意图实现面向目标建模的技术包括基于知识的建模技术、性能驱动的建模技术、“Constraint-based Modeling”技术等。

1 基于知识的建模技术

包含过程的建模技术本质上仍是几何领域的技术, 而从最初的设计目标和工程约束到底层的几何约束需要借助设计方法和经验, 进行大量的逻辑推理、工程计算等, 需要人工参与^[54-55]。为提高自动化建模程度, 研究者将人工智能(AI)技术引入了 CAD 系统, 由此产生了基于知识的建模技术^[56-57], 它将 CAD 技术的应用范围从几何造型领域扩展到了工程设计领域。利用基于知识的建模系统进行产品开发, 用户只需给定设计要求和初始工程参数, 就可以在知识库中蕴涵的设计知识的作用下推理得到产品的几何参数, 进而构造出符合设计目标的产品模型^[58-59]。知识驱动技术是实现从工程约束到几何约束转化的有力工具。

研究符合设计过程特点的知识表示模型以及知识的计算机理解过程, 是基于知识的产品设计的关键技术。目前知识工程及专家系统中通常采用的知识表示方法有: 产生式表示法^[60]、框架表示法^[61]、语义网络表示法^[62]、一阶谓词逻辑表示法^[63]、过程表示法^[64]、面向对象表示法^[65]、人工神经网络表示法^[66-67]、本体表示法^[68-69]、多 Agent 表示法^[70-71]和概念格表示法^[72-73]等。

2 性能驱动的建模技术

性能驱动的建模技术提出了产品性能特征(Performance Characteristic, PC)的概念^[74], 以性能特征为控制整个设计过程的基本特征, 成为连接性能需求与产品结构的桥梁^[75]。性能特征模型中包括确定产品各级的功能模型和质量模型。

该技术提出的性能特征模型由产品功能、功能参数和功能参数值组成。其中功能参数用来描述产品功能的实现程度, 功能参数值是功能实现程度的量化指标。功能之间的关系可分成以下几类: 包容关系、依赖关系、没有关系, 以功能树表示^[76]。产品的任何一种基本性能, 即性能元,

可以表示为一个有序四元组^[77]。

性能驱动的建模从性能特征的角度将设计过程概括为研究和决定如何从性能特征到几何特征、材料特征和工艺特征的映射。映射是指在知识库中搜索已存在的产品和模型。如果找不到合适的产品或模型,则对该级性能特征进行功能分解,再对其子性能特征进行映射,直到所有的性能特征都映射完成。

3 “Constraint-based Modeling”技术

“Constraint-based Modeling”是由英国 Bath 大学的 Hicks^[78]、Mullineux^[79]和 Matthews^[80]等人提出的建模技术。该技术综合考虑工程约束和几何约束,将产品建模问题显式地转化为方程组求解问题,进而将每一个约束方程看作罚函数,0 代表约束满足,与 0 偏离的程度代表约束不满足的程度,从而将方程组求解问题转化为优化问题。若优化结果使目标函数最小值为 0,则求得约束方程组的解;若最小值大于 0,则求得约束方程组的最佳权解。

Hicks 等^[78]将该方法应用于机构运动分析,通过建立简化模型,使得问题规模减小。Matthews^[80]将该方法应用于产品改型设计,仅部分结构需要重新建模,因而问题规模得到控制。

结束语

按照对产品结构建模 3 个要素的着眼点不同,可将产品结构建模技术分为:面向结果的建模技术、包含过程的建模技术和面向目标的建模技术 3 大类别。产品结构建模技术经历了从面向结果的建模到包含过程的建模,并逐渐向面向目标的建模迈进的发展历程,分别解决产品结构模型的有无问题、建模快慢问题以及建模自动化智能化问题。理清产品结构建模技术发展历史有利于领域研究者把握技术未来发展方向,取得更新的成果。

参考文献

- [1] 王玉新. 数字化设计. 北京: 机械工业出版社, 2003: 1-5.
- [2] 张京辉. 绿色设计与机械制造业的可持续发展. 现代制造工程, 2003, 8(S1): 88-90.
- [3] 张宝源, 席平. 三维标注技术发展概况. 工程图学学报, 2011, 32(4): 74-79.
- [4] 王涛. 广义产品建模方法的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [5] 董玉德, 谭建荣, 赵韩. 基于约束参数化的设计技术研究现状分析. 中国图象图形学报, 2002, 7(6): 532-538.
- [6] 唐荣锡, 汪嘉业, 彭群生, 等. 计算机图形学教程(修订版). 北京: 科学出版社, 2000: 33-152.
- [7] GOLDMAN R. 计算机图形学与几何造型导论. 北京: 清华大学出版社, 2011: 293-303.
- [8] FERGUSON J C. Multivariable curve interpolation[R]. Seattle: The Boeing Co., 1963.
- [9] BÉZIER P E. Numerical control - mathematics and application. London: Forrest trans, 1972.
- [10] BARNHILL R E, RIESENFELD R F. Computer-aided geometric design. Pittsburgh Academic Press, 1974.
- [11] VERSPRILLE K J. Computer aided design application of rational B-spline approximation form [D]. Syracuse: Syracuse University, 1975.
- [12] SEDERBERG T W, ZHENG J, BAKENOV A, et al. T-splines and T-NURCCs. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 161-172.
- [13] 吴睿, 刘华明, 李刚. 基于工程约束的参数化设计技术研究. 机械科学与技术, 2000, 19(4): 539-540.
- [14] SUTHERLAND I E. Sketchpad, a man-machine graphical communication system// Proceedings of the Spring Joint Computer Conference. Detroit, 1963: 329-345.
- [15] 高小山, 蒋鲲. 几何约束求解综述. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(4): 385-396.
- [16] HOFFMANN C M, JOAN-ARINYO R. A brief on constraint solving. Computer Aided Design and Applications, 2005, 2(5): 655-692.
- [17] 石志良. 几何约束系统建模与求解方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [18] 林强, 高小山, 刘媛媛, 等. 基于几何约束求解的完备方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(7): 828-834.
- [19] LIN V C, GOSSARD D C, LIGHT R A. Variational geometry in computer-aided design. Computer Graphics, 1981, 15(3): 171-177.
- [20] NELSON G. Juno, a constraint-based graphics system. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1985, 19(3): 235-243.
- [21] LIGHT R, GOSSARD D. Modification of geometric models through variational geometry. Computer-Aided Design, 1982, 14(4): 208-214.
- [22] GE J X, CHOU S C, GAO X S. Geometric constraint satisfaction using optimization methods. Computer-Aided Design, 1999, 31(14): 867-879.
- [23] LAMURE H, MICHELUCCI D. Solving geometric constraints by homotopy. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1996, 2(1): 28-34.
- [24] PENG X B, LEE K, CHEN L P. A geometric constraint solver for 3-D assembly modeling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(5-6): 561-570.
- [25] BUCHBERGER B. Applications of Gröbner bases in non-linear computational geometry//Proceedings of the International Symposium on Trends in Computer Algebra. London: Springer-Verlag, 1988: 52-80.
- [26] HOFFMANN C M. Solid and geometric modeling. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1992: 257-302.
- [27] KONDO K. PIGMOD: parametric and interactive geometric modeler for mechanical design. Computer-Aided Design, 1990, 22(10): 633-644.
- [28] KONDO K. Algebraic method for manipulation of dimensional relationships in geometric models. Computer-Aided Design, 1992, 24(3): 141-147.
- [29] 吴文俊. 几何定理机器证明. 自然科学进展, 1992(1): 1-14.
- [30] GAO X S, CHOU S C. Solving geometric constraint systems II. a symbolic computational approach. Computer-Aided Design, 1998, 30(2): 115-122.
- [31] DEEPARK K. Automatic geometry reasoning: Dixon resultant, Gröbner basis, and characteristic set[R]. New York: State University of New York, 1995.
- [32] 杨路, 张景中, 侯晓荣. 非线性代数方程组与定理机器证明. 上海: 上海科技教育出版社, 1996: 23-38.
- [33] OWEN J. Algebraic solution for geometry from dimensional constraints // Proceedings of ACM Symposium on Solid Modeling Foundation. Austin, 1991: 397-407.
- [34] OWEN J. Constraints of simple

- geometry in two and three dimensions. *International Journal of Computer Geometry and Its Applications*, 1996, 6(5): 421-423.
- [35] LATHAM R S, MIDDLEDITCH A E. Connectivity analysis: a tool for processing geometric constraints. *Computer-Aided Design*, 1996, 28(11): 917-928.
- [36] JOAN-ARINYO R, SOTO-RIERA A, VILA-MARTA S, et al. Revisiting decomposition analysis of geometric constraint graphs. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(2): 123-140.
- [37] 高小山, 黄磊东, 蒋鲲. 求解几何约束问题的几何变换法. *中国科学 (E 辑)*, 2001, 31(2): 182-192.
- [38] 高小山, 张桂芳, 杨伟强. 几何约束求解与复杂连杆机构的模拟. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(5): 517-522.
- [39] GAO X S, LIN Q, ZHANG G. A C-tree decomposition algorithm for 2D and 3D geometric constraint solving. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(1): 1-13.
- [40] HOFFMANN C M, LOMONOSOV A, SITHARAM M. Decomposition plans for geometric constraint systems (Part I). Performance measures for CAD. *Journal of Symbolic Computation*, 2001, 31(4): 367-408.
- [41] FUDOS I, HOFFMANN C M. A graph-constructive approach to solving systems of geometric constraints. *ACM Transactions on Graphics*, 1997, 16(2): 179-216.
- [42] KRAMER G. Solving geometric constraint systems//*Proceedings of AAAI-90*. Boston, 1990: 1038-1044.
- [43] KRAMER G. Solving geometric constraint systems a case study in kinematics. *Computer-Aided Design*, 1993, 25(10): 678-679.
- [44] 乔雨, 王波兴, 向文. 基于自由度分析的三维几何约束推理求解. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(6): 557-561.
- [45] 陈立平. 几何约束系统最大归约理论及应用研究 [D]. 武汉: 华中理工大学, 1995.
- [46] 李彦涛, 胡事民, 孙家广. 一个几何约束系统分解的新算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2000, 12(12): 926-930.
- [47] ALDEFELD B. Variation of geometries based on a geometric-reasoning method. *Computer-Aided Design*, 1988, 20(3): 117-126.
- [48] SUZUKI H, ANDO H, KIMURA F. Geometric constraints and reasoning for geometric CAD systems. *Computer & Graphics*, 1990, 14(2): 211-224.
- [49] SUNDE G. Specification of shape by dimensions and other geometric constraints// *Geometric modeling for CAD applications*. Amsterdam: North-Holland, 1988: 199-213.
- [50] GAO X S, CHOU S C. Solving geometric constraint systems I: A global propagation approach. *Computer-Aided Design*, 1998, 30(1): 47-54.
- [51] BRÜDERLIN B D. Constructing three-dimensional geometric objects defined by constraints// *Proceedings of Workshop on Interactive 3D Graphics*. New York: ACM Press, 1986:111-129.
- [52] VERROUST A, SCHONEK F, ROLLER D. Rule-oriented method for parameterized computer aided design. *Computer-Aided Design*, 1992, 24(10): 531-540.
- [53] GAO X S, JIANG K, ZHU C C. Geometric constraints solving with conics and linkage. *Computer-Aided Design*, 2002, 34(6): 421-433.
- [54] 潘双夏, 张帅, 冯培恩. 基于工程约束的产品参数化建模策略研究. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2001, 13(9): 840-845.
- [55] ANDERL R, MENDGEN R. Modelling with constraints: theoretical foundation and application. *Computer-Aided Design*, 1996, 28(3): 155-168.
- [56] 孙兆洋, 刘继红. 设计思考过程模型中设计意图的表达. *机械工程学报*, 2009, 45(8):182-189.
- [57] 赵晖. 设计知识重用使能技术研究与实践 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
- [58] ROCCA G L. Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design. *Advanced Engineering Informatics*, 2012, 26(2):159-179.
- [59] CHANDRASEGARAN S K, RAMANI K, SRIRAM R D, et al. The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(2):204-228.
- [60] 蔡良鹏. 基于知识的 CAD 建模与装配的关键技术研究及应用 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
- [61] 刘伟. 智能 CAPP 系统中工艺路线和切削参数的决策研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [62] 郭晶, 张振明, 田锡天, 等. 基于知识的热处理工艺设计技术. *制造业自动化*, 2012, 34(12):34-37.
- [63] 龚晶, 刘检华, 赵柏萱, 等. 基于知识的管路布局自动评价技术. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(10): 2522-2531.
- [64] 潘志毅, 黄翔, 李迎光. 基于有向图邻接矩阵扩展的产品设计智能导航. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(3):445-450.
- [65] 周伟祝, 宦婧. 新的面向对象知识表示方法. *计算机应用*, 2012, 32(S2):16-18.
- [66] 王小华, 荣命哲, 吴翊, 等. 高压断路器故障诊断专家系统中快速诊断及新知识获取方法. *中国电机工程学报*, 2007, 27(3):95-99.
- [67] 顾嘉运, 刘晋飞, 陈明. 基于 SVM 的大样本数据回归预测改进算法. *计算机工程*, 2014(1):161-166.
- [68] 王元卓, 贾岩涛, 刘大伟, 等. 基于开放网络知识的信息检索与数据挖掘. *计算机研究与发展*, 2015, 52(2):456-474.
- [69] 张铁辉, 吕勇, 张贵. 基于知识本体提纯的无人机故障数据采集仿真. *计算机仿真*, 2014, 31(11):88-91.
- [70] 杨清平, 蒲国林, 王刚, 等. 基于交互历史的多 Agent 自动协商研究. *计算机科学*, 2008, 35(9):226-229.
- [71] 汪浩祥, 严洪森. 基于多 Agent 可互操作知识化制造动态自适应调度策略. *控制与决策*, 2013, 28(2):161-168.
- [72] 石慧, 魏玲. 面向对象 (属性) 概念格的布尔表达. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2015, 51(2): 415-420.
- [73] 万青, 魏玲, 李涛. 一种基于并不可约元的建格新方法. *西北大学学报*, 2013, 43(1): 10-14.
- [74] 周受钦, 凌卫青, 谢友柏. 集成信息 CAD 系统中的知识建模与数据映射分析. *西安交通大学学报*, 2000, 34(9):77-81.
- [75] 凌卫青, 耿海鹏, 谢友柏. 产品性能因素描述构架的建立. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(2):144-149.
- [76] 戴旭东, 谢友柏. 产品性能特征建模及以性能特征驱动的产品现代设计模式. *计算机工程与应用*, 2003(3): 43-46.
- [77] 赵艾萍, 凌卫青, 谢友柏. 支持性能驱动设计的产品性能表达. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(11):1020-1025.
- [78] HICKS B J, MEDLAND A J, MULLINEUX G. The representation and handling of constraints for the design, analysis, and optimization of high speed machinery. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2006, 20: 313-328.
- [79] MULLINEUX G. Constraint resolution using optimisation techniques. *Computers & Graphics*, 2001, 25: 483-492.
- [80] MATTHEWS J A. A Constraint-based approach for assessing the capabilities of existing design to handle product variation [D]. Bath: University of Bath, 2007. (责编 谷雨)