

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.041

绿色设计中产品拆卸序列生成与评价*

张玲^{1,2} 王正肖¹ 潘晓弘¹ 董天阳³

(1. 浙江大学现代制造工程研究所, 杭州 310027; 2. 浙江科技学院经济管理学院, 杭州 310023;

3. 浙江工业大学计算机学院, 杭州 310032)

【摘要】 通过分析产品拆卸特点,建立面向绿色设计的拆卸序列评价指标体系,提出拆卸序列的选择和评价模型。利用产品设计中 BOM 和各零部件的回收处理方式建立层次化的属性关联图,并通过分层分步的方法进行拆卸序列的求解。综合考虑了拆卸的几何可行性、经济性等因素,从而生成优化的产品拆卸序列,并支持复杂产品的拆卸序列规划。为了验证该方法的有效性和实用性,开发了面向绿色设计的拆卸序列规划系统,对实际产品进行拆卸序列规划应用,并提供了规划结果。

关键词: 绿色设计 拆卸序列 产品回收 序列规划

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0199-06

Generation and Evaluation of Disassembly Sequences in Green Design

Zhang Ling^{1,2} Wang Zhengxiao¹ Pan Xiaohong¹ Dong Tianyang³

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. School of Economics and Management, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China

3. College of Computer, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract

After analyzing the characteristics of disassembly systematically, a multi-objective optimization model that could be employed to generate and evaluate appropriate disassembly sequences in green design efficiently was presented. The hierarchical attributed liaison graph (HALG) was built according to bill of material (BOM) and the knowledge in demanufacturing domains, and the disassembly sequence was generated automatically from HALG through recursively decomposing the assembly into subassemblies. This approach addressed the geometric feasibility of disassembly, the economic value of disassembly, and so on. For more, this approach could be used in the disassembly planning of the complicated products. To verify the validity and efficiency of the approach, the disassembly sequence planning system in green design was implemented and a variety of assemblies including some complicated products were tested, then the corresponding results were presented.

Key words Green design, Disassembly sequence, Product recycling, Sequence planning

引言

产品拆卸的目的就是进行零部件的重用、再生和回收处理,以减轻废弃产品对环境的压力,同时也最大限度地利用有限资源。拆卸序列规划方法可

以大致分为两类:人机交互法和自动推理法。人机交互法的自动化程度很低,而且对于比较复杂的产品难以产生合理的拆卸序列。因此,研究人员提出了不同的方法用于拆卸序列的自动生成与评价^[1-7]。然而,在拆卸序列规划中,除了根据产品

收稿日期:2009-12-07 修回日期:2010-01-06

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2009AA04Z151)

作者简介:张玲,博士生,浙江科技学院讲师,主要从事绿色设计、逆向物流和制造业信息化研究, E-mail: seraph_80@163.com

通讯作者:王正肖,副教授,主要从事产品设计、网络化制造和供应链管理研究, E-mail: wangzhengxiao@zju.edu.cn

CAD模型的几何拓扑信息和约束关系进行序列生成外,还需要考虑拆卸的经济性和环境的友好性,充分体现绿色设计的内涵。

鉴于此,本文提出面向绿色设计的层次化拆卸序列生成和评价方法。该方法利用产品设计中物料清单(bill of material,简称BOM)和各零部件的回收方式建立层次化的属性关联图,通过分层分步思想进行拆卸序列的求解,支持复杂产品的拆卸序列规划。

1 拆卸序列规划过程

产品的拆卸可以是完全拆卸,也可以是有选择的部分拆卸,主要取决于拆卸目的。在产品设计时,根据各零部件的功能和结构关系定义了BOM,其体现了产品装配的层次关系,可以用来指导产品的拆卸。因此,本文通过对Lee^[7]等人提出的属性关联图模型进行扩展,建立层次化属性关联图模型(hierarchical attributed liaison graph,简称HALG)和带权的层次化属性关联图模型(weighted hierarchical attributed liaison graph,简称WHALG)。

在产品回收中,根据组成子装配体的各个零件的材料属性或回收处理方式,子装配体可作为一个整体进行重用或回收处理,不一定需要把子装配体的所有零件全部拆卸下来^[8]。面向绿色设计的拆卸序列规划过程如图1所示。

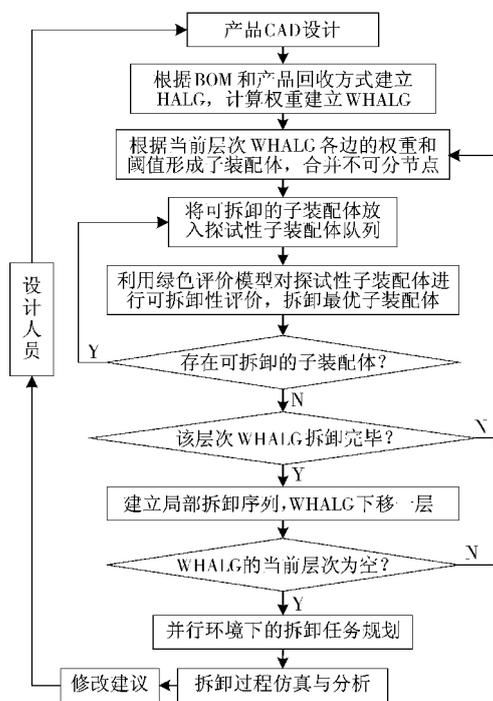


图1 面向绿色设计的拆卸序列规划流程图

Fig. 1 Process of disassembly sequence planning for green design

2 拆卸序列选择与评价模型

在拆卸序列规划中,一般可获得多个可行的拆卸序列。为了能够选择最优方案,需要按照一定的标准对其进行可拆卸性的评价。图1的拆卸序列规划过程只有在建立产品可拆卸性的选择与评价体系后才能有效地进行分析和评价。本文利用层次分析法对设计中产品的零部件属性、拆卸方法、回收经济性、操作序列优化等因素进行非量纲化评价指标模糊描述,以建立面向绿色设计的产品可拆卸性评价指标体系和多级模糊评判模型。

2.1 基于模糊层次分析法的拆卸序列选择和评价模型

基于模糊层次分析法的拆卸序列选择和评价模型建立步骤如下:

(1) 根据拆卸序列规划的实际需要建立评价指标因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 将 U 分成若干组使得 $U = \bigcup_{i=1}^k U_i, U_i \cap U_j = \emptyset (i \neq j)$, 称 U 为第一级因素集。 $U_i = \{u_1^{(i)}, u_2^{(i)}, \dots, u_{n_i}^{(i)}\} (i = 1, 2, \dots, k)$ 为第二级因素集, 其中 $\sum_{i=1}^k n_i = n$ 。

(2) 选择模糊评判集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 其中 $v_j (0 < j \leq m)$ 表示参与评判决策的试探性子装配体 j , 然后对第二级因素集 U_i 的 n_i 个因素进行单因素评判, 即建立模糊映射 $f_i: U_i \rightarrow \Gamma(V)$, 得单因素评判矩阵为

$$R_i = [r_{ab}^{(i)}]_{n_i \times m}$$

式中 $r_{ab}^{(i)}$ ——选择试探性子装配体 b 进行拆卸时第 a 项评价因素的值

设 U_i 的权重为 $A_i = (a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \dots, a_{n_i}^{(i)})$, 求得综合评判为 $A_i \cdot R_i = \tilde{B}_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 。

(3) 对第一级因素集 U 作综合评判, 设 U 的权重为 $A = (a_1, a_2, \dots, a_k)$, 总评判矩阵为

$$R = [\tilde{B}_1 \quad \tilde{B}_2 \quad \dots \quad \tilde{B}_k]^T$$

得一级模型的综合评判为

$$A \cdot R = B$$

根据评判结果 B 选择评价最优的试探性子装配体进行拆卸, 其中 $B \in \Gamma(V)$ 。

2.2 面向绿色设计的拆卸序列评价指标体系建立

本文在 House of DFA 方法^[9]的基础上建立了面向绿色设计的拆卸序列选择和评价指标体系。根据产品回收处理的实际情况, 给出了如下评价准则: 包括零件属性、拆卸方法、回收经济性和拆卸序列优化 4 个一级指标, 并建立相应二级评价指标(如图 2

所示)。零件属性、拆卸方法和回收经济性属于静态指标,与拆卸的先后顺序没有太多的关联,在拆卸序列的选择和评价中只需要计算一次;而拆卸序列优化的评价指标是动态指标,会随着拆卸的进展有所不同,需要动态计算。

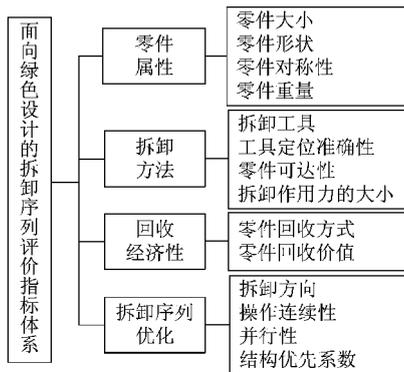


图 2 面向绿色设计的拆卸序列评价体系

Fig. 2 Evaluation system of disassembly sequence in green design

(1) 零件属性

通常情况下,小而轻的零件比较容易拆卸,大而重的零件比较难拆卸,因此,产品拆卸的难易程度与零件各属性值有一定的联系,可根据零件的形状、大小、对称性、质量 4 个属性进行零件可拆卸性的评估,各评价指标的评价值如表 1 所示。在拆卸序列规划时,零件的属性可从产品的 CAD 模型中导入。

表 1 零件属性各评价指标的评价值

Tab. 1 Evaluation index value of component properties

零件属性的评价指标		评价值
零件形状	圆形(长度 $L/D > 1.5$)	0.8
	$L, 直径 D)$	
	$L/D < 0.8$	0.4
	$0.8 \leq L/D \leq 1.5$	0.2
非圆形(长度 A , 宽度 B , 高度 $C)$	$A/B \leq 3$ 或 $A/C > 4$	0.4
	$A/B \leq 3$ 或 $A/C \leq 4$	0.4
	$A/B > 3$	0.2
零件大小	厚度(直径)	
	$0.25 < D \leq 50$	0.6
	D/mm	
	$D \leq 0.25$ 或 $D > 50$	0.2
	$5 < L \leq 500$	0.8
	长度 L/mm	
	$2 \leq L \leq 5$ 或 $500 < L \leq 2000$	0.4
	$L < 2$ 或 $L > 2000$	0.2
零件对称性	关于多个轴 180° 对称	0.8
	仅关于一个轴 180° 对称	0.4
	不对称	0.2
零件质量 W/g	$0.1 < W \leq 1800$	0.8
	$0.01 \leq W \leq 0.1$ 或	
	$1800 < W \leq 6000$	0.4
	$W < 0.01$ 或 $W > 6000$	0.2

考虑零件大小的评价指标时,需从零件的长度和厚度两个子目标进行评价,两个子目标的评价结果的平均值作为零件大小指标的评价值。

(2) 拆卸方法

拆卸产品时需要使用一定的工具,并施加相应的作用力和扭矩才能顺利地完成任务。拆卸工具的定位准确性、零件可达性都会对拆卸的难易程度产生影响。在拆卸方法的评价中,包括拆卸工具、拆卸工具定位准确性、零件可达性和拆卸作用力 4 个二级评价指标,其评价值如表 2 所示。拆卸产品可能会同时需要施加作用力和扭矩,因此,拆卸作用力的评价由作用力和扭矩 2 个评价结果进行加权平均求得。

表 2 拆卸方法各评价指标的评价值

Tab. 2 Evaluation index value of disassembly technique

拆卸方法评价指标		评价值
拆卸工具	不需要拆卸工具	0.8
	使用一般工具	0.4
	需要专用或特殊的工具	0.1
拆卸工具定位准确性	没有定位准确性要求	0.6
	定位准确性要求一般	0.4
	需要很高的定位准确性	0.2
零件可达性	零件可达性好	0.8
	零件可达性一般	0.4
	零件可达性差	0.2
拆卸作用力	$M < 40$	0.8
	作用力 M/N	
	$40 \leq M < 180$	0.5
	$M \geq 180$	0.2
扭矩 $T/N \cdot m$	$T < 10$	0.6
	$10 \leq T < 80$	0.4
	$T \geq 80$	0.1

(3) 回收经济性

产品拆卸的目的是为了产品的回收,以节约资源和保护环境。在拆卸产品时,必须充分考虑回收经济性。在评价产品回收经济性时,主要从产品的回收方式和回收价值两个方面进行评价(如表 3 所示)。产品的回收方式主要分为:零部件的重用、原材料回收和废品处理。从产品的再利用角度看,重用的零部件回收经济性比较好。回收价值的计算公式可以表示为^[5]

$$V = R - H + K$$

式中 R ——购买重用零部件或回收原材料费用
 H ——拆卸零部件所需劳动成本及其他费用
 K ——零部件不回收时作为废弃物所需的处理费用
 V ——产品的回收价值

表3 回收经济性各评价指标的评价值

Tab.3 Evaluation index value of recovery economy

拆卸方式评价指标		评价值
回收方式	零件重用	0.8
	原材料回收	0.6
	废品处理	0
回收价值 $V/\text{元}$	$V=0$	0
	$0 < V < 0.5$	0.2
	$0.5 \leq V < 2$	0.5
	$V \geq 2$	0.8

(4) 拆卸序列优化

从拆卸操作本身出发,考虑拆卸方向、操作连续性、并行性和结构优先系数等因素。拆卸序列优化的各个评价指标评价值如表4所示。

表4 拆卸序列优化各评价指标的评价值

Tab.4 Evaluation index value of disassembly sequence optimization

拆卸序列优化评价指标		评价值
拆卸方向	自下而上进行拆卸	0.6
	从侧面进行拆卸	0.5
	自上而下进行拆卸	0.4
操作连续性 $C(S)$	$C(S) < 0.1$	0.8
	$0.1 \leq C(S) < 0.5$	0.4
	$C(S) \geq 0.5$	0.2
并行性 $P(S)$	$P(S) < 0.2$	0.8
	$0.2 \leq P(S) < 0.6$	0.4
	$P(S) \geq 0.6$	0.2
结构优先系数	面面贴合、轴孔配合	0.8
	螺纹联接、螺栓联接等	0.6
	键联接、轴承联接等	0.4
	焊接、铆接等	0.2

操作连续性反应了前后两次操作之间操作工具和拆卸方向的变换,其计算方法为^[10]

$$C(S) = 0.5I + 0.5E$$

式中 I ——操作工具的变化,若拆卸子装配体或零件 S 与前一次操作使用相同的工具, $I=0$,否则 $I=1$

E ——零件拆卸方向的变化, $E = \alpha/360$, α 是拆卸方向的变化角度

$C(S)$ ——操作连续性

在产品拆卸时,并行性越好表示可以同时进行拆卸的零件越多。并行性的计算公式为^[7]

$$P(S) = |N_1 - N_2| / (N_1 + N_2)$$

式中 N_1 ——被拆除子装配体 S 的零件数目

N_2 ——拆除子装配体 S 后剩余的零件数目

$P(S)$ ——并行性

3 应用实例

为了比较本文的拆卸序列生成算法与 Lee^[7] 提出的基于子装配体识别的拆卸序列生成算法的计算复杂度,假设待拆卸的产品由 n 个零件组成,HALG 包含 2 个层次。第 1 层次的 HALG 中拆卸对象数目为 m ,其中有 J 个子装配体,第 i 个子装配体的零件数目为 $k_i (i=1, \dots, J)$ 。基于子装配体识别的拆卸序列生成算法的计算复杂度为 $O(n^2)$ 。本文提出的面向绿色设计的拆卸序列生成方法是分层分步进行的,在第 1 层次的 HALG 上,拆卸规划的时间复杂度为 $O(m^2)$;在 HALG 的第 2 层次上,各子装配体规划的计算复杂度可以表示为 $O(k_i^2)$ 。因此,本文的拆卸序列生成算法的计算复杂度为 $\text{Max}(O(m^2), \text{Max}(O(k_i^2)))$ 。如果 $m \geq J$,拆卸序列规划算法的计算复杂度取决于第 1 层次 HALG 中拆卸对象的数目;否则,拆卸序列规划算法的计算复杂度取决于第 1 层次的 HALG 中最复杂子装配体中拆卸对象数目。因此,对于大型复杂产品的拆卸规划,采用本文方法将有助于提高拆卸规划效率。

利用图 3 所示的装配体 Wave-Hand 说明面向绿色设计的产品拆卸序列规划的基本过程及该评价体系的有效性。

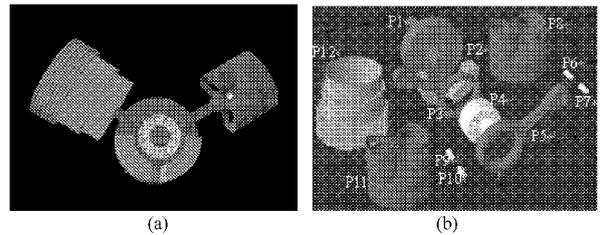


图3 装配体 Wave-Hand

Fig.3 Assembly Wave-Hand

(a) Wave-Hand 装配图 (b) Wave-Hand 爆炸图

装配体 Wave-Hand 的 BOM 如图 4 所示,该产品共包含 12 个零件,在第 1 层次上包含两个子装配体 S2.1 和 S2.2。如果不利用产品的层次属性,需要产生包含所有 12 个零件的拆卸序列。但是根据产品的回收方案,S2.1 和 S2.2 这两个子装配体是整个机构使用中最主要的工作部分,它们不能进行零部件重用,并且组成子装配体的各个零件使用相同的原材料,可以作为一个子装配体进行原材料的回收,因此,只需要在第 1 层次进行拆卸序列规划,即对 5 个对象进行拆卸规划,不需对子装配体 S2.1 和 S2.2 进行进一步的拆卸规划。根据文献^[10],可得所有可以拆卸的子装配体为 P1、P2、P4、S2.2

和 S3, 其中, $S3 = \{S2.2, S2\}$, $S2 = \{P1, S1\}$, $S1 = \{P2, S2.1\}$ 。

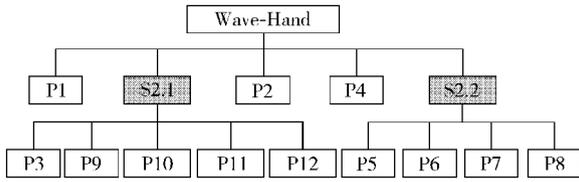


图 4 Wave-Hand 的 BOM

Fig. 4 BOM of Wave-Hand

由于存在 5 个可以拆卸的子装配体, 但是这些子装配体之间包含了相同的零件, 不可能被同时拆卸, 必须通过评价选择最优的子装配体进行拆卸。在此, 引入面向绿色设计的拆卸序列评价指标体系进行最优子装配体的评价与选择。假定各级指标的权重相等, 可得 P1、P2、P4、S2.2 和 S3 的综合评价价值分别为 0.644、0.569、0.581、0.663 和 0.575。其中, S2.2 的评价价值最高, 选择 S2.2 先进行拆卸。在拆卸了 S2.2 后, 子装配体 S2.1 和 S1 也是可拆卸的, 将这两个子装配体作为试探性子装配体。由于拆除 S2.2, 子装配体 S3 已不存在, 不需要再对其进行评价。采用同样的方法, 对现有的试探性子装配体进行重新评价, 可得 S2.1 的评价价值最高, 为 0.675, 先对其进行拆卸。此时, 因为拆除 S2.1, 子装配体 S1 已不存在, 剩下的各个拆卸对象的评价结果排序依次为: P1、P4 和 P2。装配体 Wave-Hand 第 1 层次的拆卸偏序树如图 5 所示。在可拆卸性评价中, 各评价指标的权重可以根据产品设计的实际情况进行调整。

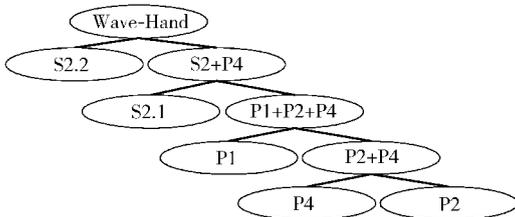


图 5 Wave-Hand 第 1 层次拆卸偏序树

Fig. 5 Disassembly sequence tree for the first layer of Wave-Hand

采用 Visual C++ 6.0 及 OpenGL 开发了面向绿色设计的拆卸序列规划系统, 如图 6 所示。拆卸规划时, 首先从三维 CAD 系统导入装配体的三维几何模型信息, 根据产品 BOM 和各零部件的回收方式建立层次化的属性关联图; 然后, 根据层次关系进行局部的拆卸序列规划; 最后, 合成各局部序列为全局拆卸序列, 进行拆卸过程的仿真模拟。实例中利用面向绿色设计的拆卸序列规划系统对轮式装载机进行了拆卸序列规划和拆卸过程仿真。应用表明, 本文提出的拆卸序列规划方法可以从绿色设计的角度比较全面地对拆卸序列进行选择 and 评价, 支持复杂产品的拆卸序列规划, 而且得到的拆卸序列比较合理和实用。

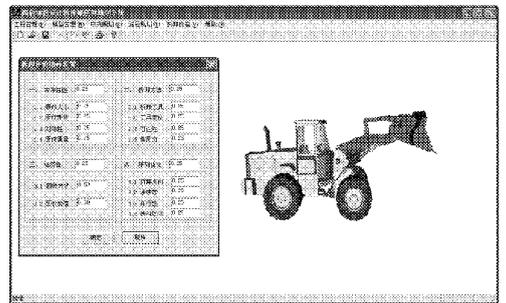


图 6 面向绿色设计的拆卸序列规划系统

Fig. 6 Disassembly sequence planning system in green design

4 结束语

提出了面向绿色设计的层次化拆卸序列生成和评价方法, 从产品拆卸的几何可行性、经济可行性和环境因素等方面进行综合考虑。根据组成产品的各零部件回收处理的实际情况, 建立了面向绿色设计的拆卸序列评价指标体系, 并开发了面向绿色设计的拆卸序列规划系统。由于该系统综合考虑了拆卸的几何可行性、经济性和环境等因素, 因此, 规划生成的拆卸序列更加合理和实用。该系统采用分层分步的规划方法, 降低了拆卸规划计算的复杂度, 可以用于复杂产品的拆卸序列规划。此外, 建立的拆卸序列评价指标体系可以根据绿色产品设计的实际需要进行扩展, 以提高拆卸规划的有效性。

参 考 文 献

- Zahed Siddique, David W Rosen. A virtual prototyping approach to product disassembly reasoning[J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(12): 847~860.
- Hu D, Hu Y, Li C. Mechanical product disassembly sequence and path planning based on knowledge and geometric reasoning [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(9): 688~696.
- Fabio Giudice, Giovanna Fargione. Disassembly planning of mechanical systems for service and recovery: a genetic algorithms based approach[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2007, 18(3): 313~329.
- Xanthopoulos A, Iakovou E. On the optimal design of the disassembly and recovery processes[J]. Waste Management, 2009, 29(5): 1702~1711.

- 5 Langella Ian M. Heuristics for demand-driven disassembly planning[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(2): 552 ~ 577.
- 6 潘晓勇, 骆祥峰, 刘光复, 等. 基于层次概率模糊认知图的产品拆卸序列研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(4): 6 ~ 10.
Pan Xiaoyong, Luo Xiangfeng, Liu Guangfu, et al. Research on disassembly sequence of products based on hierarchical probabilistic fuzzy cognitive map[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(4): 6 ~ 10. (in Chinese)
- 7 Sukhan Lee. Subassembly identification and evaluation for assembly planning[J]. IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics, 1994, 24(3): 493 ~ 503.
- 8 Murayama T, Kagawa K, Oba F. Computer-aided redesign for improving recyclability[C]//Proceedings of EcoDesign99: 1st International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan, 1999: 746 ~ 751.
- 9 Rampersad H. The House of DFA[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Pittsburgh, Pennsylvania, 1995: 312 ~ 318.
- 10 Dong Tianyang, Ling Zhang, Tong Ruofeng, et al. A hierarchical approach to disassembly sequence planning for mechanical product[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30(5 ~ 6): 507 ~ 520.
- 11 江吉彬, 许明三, 曾寿金, 等. 废旧机电产品再制造的拆卸路径规划[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 203 ~ 206.
Jiang Jibin, Xu Mingsan, Zeng Shoujin, et al. Disassembly path planning method of waste electromechanical products in remanufacturing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 203 ~ 206. (in Chinese)
- 12 张雷, 刘光复, 刘志峰, 等. 面向绿色设计的产品优化配置方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 122 ~ 128.
Zhang Lei, Liu Guangfu, Liu Zhifeng, et al. Product optimizing configuration method oriented green design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 122 ~ 128. (in Chinese)

精准农业生产关键装备演示与技术研讨会暨 2010 中国农机学会会员日活动在上海举办

精准农业是现代信息技术、农艺技术和农业装备技术的高度集成,它可以实现农业的低投入、高效率及可持续发展,对促进农业发展方式的转变,实现农业现代化具有战略意义。

2010年11月30日,中国农业机械学会联合上海市农业机械学会在位于上海崇明岛的长江农场举办了“精准农业生产关键装备演示与技术研讨会暨2010中国农机学会会员日活动”。中国农业机械学会和上海市农业机械学会有关会员、上海市农垦和农机系统管理、研发、制造、使用、推广等部门和单位的专家学者等近80人参加了活动。

会员日活动由上海市农业机械学会秘书长吴福良主持,张振新副秘书长代表中国农业机械学会致辞。上海市农业机械研究所总工程师刘建政研究员作了“多功能变量喷雾机的研究”的专题报告,重点介绍了适应水稻田间作业的多功能变量喷雾机的自动对行导向、地面仿形自动平衡和变量喷雾智能控制系统的设计等内容;上海长江农场万事发实业总公司张建汉总经理作了“长江农场精准农业的实践”的专题报告,介绍了长江农场10000亩精准农业示范基地应用GIS、GPS、RS技术和大型精准农业机械,完成稻麦作物的测产、测土配方、变量施肥、变量播种田间生产管理决策等的实践概况,以及形成适合长江三角洲地区、具有中国特色和上海特点的水稻精准农业技术和装备模式的计划等内容。

与会代表现场参观考察了长江农场从国外引进的多台精准农业装备,并进行了“十二五期间如何消化国外先进技术,加大自主创新力度,开展精准农业关键技术与装备的研发”的研讨。上海市农业机械学会学术委员会主任王圣滔教授作了总结发言。