

基于多色集合理论的概念设计形式化解决方法

唐永刚, 李宗斌, 李善仓

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 应用多色集合理论的个人颜色、统一颜色和递阶结构树建立了产品的概念设计递阶结构信息模型, 分析了概念设计产品信息模型中的三类约束关系, 并用统一颜色和元素个人颜色之间的模块布尔矩阵对这些约束关系进行了形式化描述. 提出了产品概念设计推理过程的形式化方法, 实现了从产品功能需求到方案元表示的可行方案的推理过程, 并把推理结果提供给下层设计进行优选和评估. 最后, 以隔振系统的概念设计为例验证了该方法. 研究表明, 该方法可以快速地对产品概念设计进行信息建模, 为知识创新提供了一个全新的思路.

关键词: 多色集合; 概念设计; 递阶结构树; 约束

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2004)01-0068-05

Formalized Solution of Conceptual Design Based on Polychromatic Sets

Tang Yonggang, Li Zongbin, Li Shancang

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The unified color sets, individual color sets and hierarchy structural tree are applied to establish a conceptual design product information model. Three kinds of restrictions of the information model are analyzed and formalized by employing the relation matrix of unified colors and individual colors. A formalized method of reasoning process for product conceptual design is proposed, and the process from product function demands to method atom is developed. The reasoning process result is prepared for the next process for evaluation and optimization. An example of isolation system is provided for the further explanation of the above theory. It is verified that the method enables to construct the information model rapidly for a product conceptual design, and offers a totally new idea to knowledge creativity.

Keywords: polychromatic sets; conceptual design; hierarchy tree; restriction

在产品概念设计过程中, 信息模型的建立是关键的一步, 而信息模型的形式化描述是实现计算机辅助概念设计的基础. 因此, 必须用适当的形式化语言来描述概念设计过程中的功能、方案及它们之间复杂的推理和约束关系. 普通集合论数学工具在建模时不能同时描绘元素、子系统以及整个系统的性质, 而在多色集合中, 不仅它的元素, 且集合整体本身都能被同时涂上一些不同的颜色, 用来表示研究对象元素和它的整体属性. 同样, 在多色集合形象表示形式的多色图中, 任何节点和任何边都可以同

时被涂上一些不同的颜色. 因此, 利用多色集合和多色图可以很方便地描述概念设计信息模型中的功能、分功能和方案元, 以及它们之间的推理和约束关系.

1 多色集合理论简介

1.1 多色集合

多色集合 (Polychromatic Sets, 简称 PS) 是俄罗斯的 V. V Pavlov 教授于 2000 年提出的^[1]. 在 PS 中, 对于集合 $S = (a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)$ 中的元素 a_i

收稿日期: 2003-04-28. 作者简介: 唐永刚 (1978~), 男, 硕士; 李宗斌 (联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59885005).

S , 颜色集合 $F(a_i) = (f_1, \dots, f_i, \dots, f_k)$ 被称为元素 a_i 的个人颜色. $F(a)$ 是所有元素个人颜色的集合. 颜色集合 $F(S) = (F_1, \dots, F_j, \dots, F_m)$ 被称为集合 A 的统一颜色, 颜色 F_j 对应集合 A 的第 j 个性质.

在多色集合中, 应用矩阵 $[S \times F(S)]$ 来描述元素和统一颜色的关系^[2], 表示多色集合的统一颜色和元素 $a_i \in A$ 同名的个人颜色的相互关系, 并且可以用布尔矩阵来表示^[2]

$$[a_{i(j)}]_{S, F(S)} = [S \times F(S)] = \begin{matrix} & F_1 & \dots & F_j & \dots & F_m \\ \begin{bmatrix} a_{1(1)} & \dots & a_{1(j)} & \dots & a_{1(m)} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ a_{i(1)} & \dots & a_{i(j)} & \dots & a_{i(m)} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ a_{k(1)} & \dots & a_{k(j)} & \dots & a_{k(m)} \end{bmatrix} & a_1 & \dots & a_i & \dots & a_k \end{matrix} \quad (1)$$

其中, 若 $F_j \in F(a_i)$, 则 $a_{i,(j)} = 1$, 否则为 0.

用矩阵 $[F(a) \times F(S)]$ 表示个人颜色与统一颜色的关系

$$[c_{i(j)}]_{F(a) F(S)} = [F(a) \times F(S)] = \begin{matrix} & F_1 & \dots & F_j & \dots & F_m \\ \begin{bmatrix} c_{1(1)} & \dots & c_{1(j)} & \dots & c_{1(m)} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ c_{i(1)} & \dots & c_{i(j)} & \dots & c_{i(m)} \\ \dots & & \dots & & \dots \\ c_{k(1)} & \dots & c_{k(j)} & \dots & c_{k(m)} \end{bmatrix} & f_1 & \dots & f_i & \dots & f_k \end{matrix} \quad (2)$$

式(2)中如果个人颜色 f_i 影响到统一颜色 F_j 的存在, 则 $c_{i(j)} = 1$.

为了描述概念设计产品信息建模中的约束关系, $F(S)$ 的存在和元素 a_i 的个人颜色之间的关系, 需要展开的模块布尔矩阵为

$$[(F(S), F(a_i)) \times (F(S), F(a_i))] = \begin{matrix} & F(S) & & F(a_i) \\ \begin{bmatrix} [F(S) \times F(S)] & 0 \\ [F(a_i) \times F(S)] & [F(a_i) \times F(a_i)] \end{bmatrix} & F(S) & & F(a_i) \end{matrix} \quad (3)$$

1.2 多色图

普通的图可记为 $G = (A, C)$, 其中 S 是节点的集合, C 是连接节点边的集合, 但是这种传统的图论工具不可能同时既描绘图的节点和边的组成, 又描绘图的节点和边所具有的不同性质^[3]. 在多色图中, 任何节点和任何边都可以同时被涂上一些不同的颜色, 这是多色图和单色图的区别. 由于颜色具有对应对象的性质, 不同颜色能描绘不同的性质, 因此第 i 种颜

色所对应的性质为 F_i , 第 j 种颜色所对应的性质为 F_j 等. 在一般情况下, 多色图 (PG) 由 $(F(G), P_{SS}, P_{SC})$ 组成. 其中, $F(G)$ 描绘多色图整体的性质, P_{SS} 描绘节点及其性质, 而 P_{SC} 描绘边及其性质.

2 概念设计模型及其形式化描述

2.1 递阶结构模型

基于多色集合的产品概念设计模型可以用多色集合的递阶结构树来表示. 产品的总功能 A 的递阶结构用递阶结构树图 $G^* = (A^*, C^*)$ 表示, 其中顶点集合

$$A^* = (A, A_1, A_2, \dots, A_k, A_l, \dots, A_m^N, a_1, a_2, \dots, a_i) \quad (4)$$

描绘了总功能 A 逐层递阶分解, 直到可以由方案元来实现的过程 (见图 1).

分功能 $A, A_1, A_2, \dots, A_k, A_l, \dots, A_m^N$ 由相应的零件、组件和部件以及按功能、行为等划分的单元来实现. 其中, 第 N 层分功能 $A_1^N, A_2^N, \dots, A_m^N$ 对应的实现方法被称为方案元, 用 a_1, a_2, \dots, a_i 表示. 对于边的集合 C^* , 其元素

$$c_{i(j)} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } A_j^{i+1} \text{ 是 } A_i^i \text{ 的子功能} \\ 0 & \text{相反的情况} \end{cases} \quad (5)$$

$G^* = (A^*, C^*)$ 说明了把 A 分解成更低一层的分功能以及功能和分功能之间的关系, 该功能树的最高阶分功能可以由相应的方案元来实现. 为了简化, 可以将分功能 A_i^N 的方案元表示为 A_i^{N+1} . 作为结构树的第 $N+1$ 层, $A^* = (A, A_1, A_2, \dots, A_k, A_l, \dots, A_m^N, A_l^{N+1}, \dots, A_m^{N+1}, a_1, a_2, \dots, a_i)$, 该模型可以描述产品概念设计从需求功能到最终方案元的推理过程.

在实际应用中, 产品的功能划分往往并不清晰, 分功能之间存在着相互约束, 因此需要将功能与分功能之间的关系进行分类, 对递阶结构树图进行扩展. 在实际应用中, 上层功能与下层分功能之间除了存在直接的推理关系之外, 还可能存在约束关系, 2 个分功能之间也可能存在约束关系. 这些约束关系可以概括为以下几类: R_1 为推理过程中的约束条件; R_2 为分功能之间的约束关系; R_3 为某一分功能对另一分功能直接子功能的约束关系; R_4 为方法之间的约束关系, 即最底层方案元之间的约束关系.

通过对约束问题进行分类, 可以对功能递阶结构树进行扩展, 引入描述约束关系的边, 这样在结构树图中的边可以分成 3 类 (见图 1).

利用多色集合表示概念设计产品的信息模型,

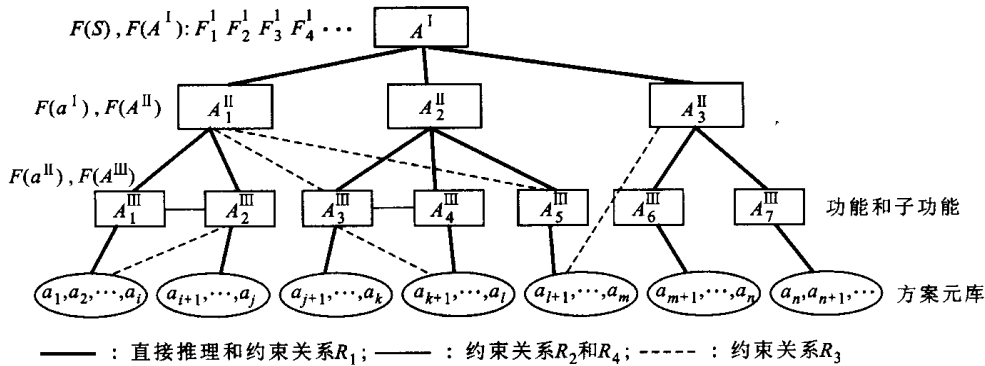


图 1 产品概念设计递阶信息结构模型示意图

将系统按功能和实现方法逐层分解,直到最底层方案元。每层包括需要实现的功能和可能的解决方案,第 i 层需要实现的功能用该层元素的集合 S 的统一颜色 $F^i(S)$ 来表示。方案用元素个人颜色 $F^i(a)$ 描述,对应着下一层需要实现的功能,即 $F^{i+1}(S)$ 。

引入描述约束关系的边以后,需要将边图上 3 种不同的颜色对应于上述的 3 类边,边的着色用 $F(c)$ 来表示。

2.2 推理过程的实现及约束问题的解决

推理机制的核心是模块布尔矩阵(见式(3)),该模块布尔矩阵由 3 个成分组成: $[F(a_i) \times F(S)]$; $[F(S) \times F(S)]$; $[F(a_i) \times F(a_i)]$ 。它描绘了 $F(S)$ 的存在和元素 a_i 个人颜色之间的关系。为了描述 $F(S)$ 的存在和该集合所有元素个人颜色之间的关系,可以用 $F(a)$ 替代 $F(a_i)$,此时模块布尔矩阵扩展为 $[F(S), F(a)] \times [F(S), F(a)]$ 。另外,为了表示 2 种分功能间的约束, $[F(S) \times F(S)]$ 不仅要表示描述某分功能 A 的颜色集合 $F(S)$ 自身的相互关系矩阵,还要扩展为描述 2 个分功能 A_1 和 A_2 的统一颜色 $F(A_1)$ 和 $F(A_2)$ 之间的关系矩阵 $[F(A_1) \times F(A_2)]$ 。

如果在递阶结构树图中,两顶点之间没有边连接,则这 2 个顶点所描述的功能之间没有推理或者约束关系,模块布尔矩阵的 3 个成分均为 0,即式(3)等于 0。

如果在递阶结构树图中,两顶点之间有边连接,则根据边的颜色 $F(c)$ 的取值不同,有 3 种情况:如果 $F_1(c) = 1$,则说明两顶点之间存在直接推理关系,用矩阵 $[F(a) \times F(S)]$ 描述;如果 $F_2(c) = 1$,则说明两顶点之间存在约束关系 R_2 或 R_4 ,用矩阵 $[F(S) \times F(S)]$ 或者矩阵 $[F(a) \times F(a)]$ 描述(最底层);如果 $F_3(c) = 1$,则说明两顶点之间存在约

束关系 R_3 ,用矩阵 $[F(a) \times F(S)]$ 描述。如果已经到达递阶结构树的最底层,则无需定义元素个人颜色。推理矩阵简化见式(1)。

根据以上各种不同情况,自上至下搜索递阶结构树的各个边,采用相应的推理矩阵进行推理,最终得到的解就是由方案元表示的满足给定条件的可行方案集。

3 设计步骤

利用多色集合来描述系统的功能模型,并建立产品概念设计的信息模型,实现方案推理包括的步骤为:对所设计的系统进行分析,将需求功能 A 进行逐层分解,建立系统的递阶结构模型,在分解过程中,如果分功能已经可以很容易实现,或者现实中已经有比较成熟的零件或部件相对应,则分解过程中止,否则,需要进一步划分下层的子功能;找出所有可能存在的约束关系,并按约束的性质进行分类,将递阶结构模型进行完善和扩展;详细定义各层的统一颜色 $F^i(A)$ 和个人颜色 $F^i(a)$,其中 $F^i(A)$ 描述的是第 i 层需要实现的功能, $F^i(a)$ 描述的是下一层需要实现的功能,也即下一层推理过程的输入,用布尔向量表示;方案库的建立是一个不断完善、扩充和创新的过程,如果在推理过程中找不出可选方案,则需检查方案元库是否完善,若不完善,则需进行知识创新,用创建新方案元来满足要求;根据递阶结构模型描述,建立推理矩阵和约束矩阵 $[F(A), F(a_i)] \times [F(A), F(a_i)]$,推理矩阵用来实现从上一层需求功能到下一层需实现功能的搜索过程,该过程直到得出由最底层方案元表示的可行方案为止,约束矩阵用来排除分功能或者方案元之间存在约束的方案,这些方案在现实中是不可行的;自上至下根据推理矩阵和约束条件逐层求解,

得出可选方案集,因此推理的结果就是得到用方案元表示的可选方案的集合,以便进行评估和优选.

4 隔阵系统概念设计实例

振动隔离(简称隔振)即采用附加子系统将振源与需减振的对象隔开,以减小振源对隔振对象的影响.隔振系统的设计主要是根据条件选取适当的隔振器和布置方式,然后审核其结果^[4, 5].

(1)功能分解.隔振系统可以分解为 2 个部分:隔振器支撑方式和隔振元件.支撑方式可以有普通支撑、高位支撑、悬挂式等,隔振元件有金属弹簧、空气弹簧、橡胶弹簧组合及橡胶弹簧等.这些元件在现实中已经有非常成熟的产品,因此可以做为方案元.

(2)约束关系.支撑方式对隔振元件的选择存在约束关系.

(3)递阶信息结构模型.模型共有 5 个顶点:总功能 A;支撑方式 A₁;隔振元件 A₂;支撑方案元,即 A₁ 的元素;隔振方案元,即 A₂ 的元素;A₁ 对 A₂ 的方案元存在约束关系 R₃,如图 2 所示.

该模型用递阶结构树描述

$$G^* = (A^*, C^*), A^* = (A, A_1, A_2, A_1, A_2)$$

$$C^* = [c_{i(j)}] = \begin{matrix} & A & A_1 & A_2 & A_1 & A_2 \\ \begin{matrix} A \\ A_1 \\ A_2 \\ A_1 \\ A_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$[C \times F(c)] = \begin{matrix} & F_1(c) & F_2(c) & F_3(c) \\ \begin{matrix} c_2(1) \\ c_3(1) \\ c_4(2) \\ c_5(2) \\ c_5(3) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

各顶点的统一颜色和个人颜色为第 1 层:总功能为 A₀. F₁^I 表示结构简单; F₂^I 表示结构较复杂; F₃^I 表

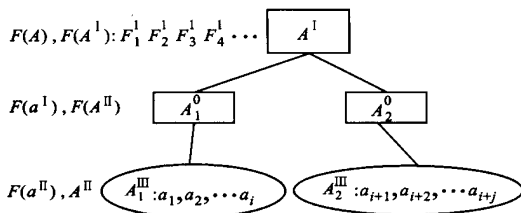


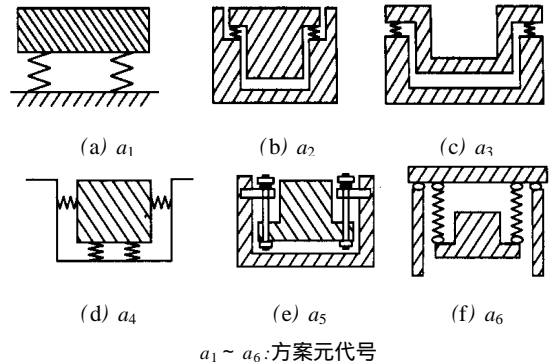
图 2 隔振系统概念设计的递阶信息结构模型示意图

示结构复杂; F₄^I 表示减小水平回转; F₅^I 表示设备质心位置高; F₆^I 表示隔振最小频率低; F₇^I 表示隔振最小频率中; F₈^I 表示隔振最小频率高; F₉^I 表示高频隔振性好; F₁₀^I 表示耐高温; F₁₁^I 表示耐油; F₁₂^I 表示价格低; F₁₃^I 表示积极隔振系统; F₁₄^I 表示消极隔振系统.

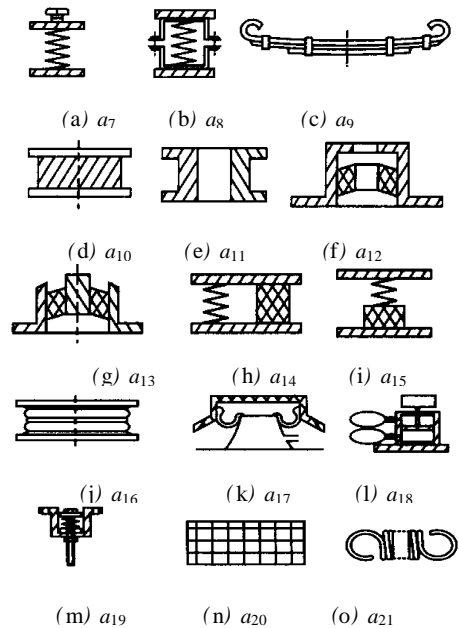
第 2 层:支撑方式 A₁ 和隔振元件 A₂. F₁² 表示普通支撑结构; F₂² 表示高位支撑结构; F₃² 表示上下支撑结合; F₄² 表示悬吊结构; F₅² 表示金属螺旋弹簧减振器; F₆² 表示板簧; F₇² 表示橡胶复合材料减振器; F₈² 表示空气弹簧减振器; F₉² 表示橡胶螺旋组合; F₁₀² 表示乳胶海绵和隔振纤维.

第 3 层:方案元库. 支撑方式方案元库 A₁ (a₁ ~ a₆) 如图 3 所示, 隔振元件方案元库 A₂ (a₇ ~ a₂₁) 如图 4 所示.

(4)推理矩阵共有 5 条边, 根据边的着色不同, 分别对应一个推理矩阵(或约束矩阵). 其中, 5 个推



a₁ ~ a₆:方案元代号
图 3 支撑方式方案元库



a₇ ~ a₂₁:方案元代号
图 4 隔振元件方案元库

理矩阵分别是: $[F(A_1) \times F(A_2)]$; $[F(A_2) \times F(A_1)]$; $[F(A_1) \times F(A_1)]$; $[F(A_2) \times F(A_2)]$. 这里省略了矩阵的具体取值.

(5) 推理过程. 给定已知条件, 用布尔向量表示 ($F_1^1 \sim F_{14}^1$) 为 10000010000101. 根据推理矩阵 和 得到 4 种方案(具体推理过程略), 用 ($F_1^2 \sim F_{10}^1$) 分别表示为 1000100000, 1000010000, 1000000010, 1000000001.

由于得出的方案并不是方案元, 所以要进行第 2 层推理过程. 根据推理矩阵 \sim 由图 3 图 4 作出以下推理:

(1) 对于由推理矩阵 和 得到的方案 1, 可得 2 组可选方案, 即 (a_1, a_7) 和 (a_1, a_8);

(2) 对于由推理矩阵 和 得到的方案 2, 可得 1 组可选方案, 即 (a_1, a_9);

(3) 对于由推理矩阵 和 得到的方案 3, 可得 3 组可选方案, 即 (a_1, a_{16}), (a_1, a_{17}), (a_1, a_{18});

(4) 对于由推理矩阵 和 得到的方案 4, 可得 1 组可选方案, 即 (a_1, a_{20}).

在上述的推理过程中, 利用矩阵 解决了约束问题 R_3 , 排除了存在约束的方案 a_1 、 a_{19} 和 a_{21} , 最终得到 7 种可行方案.

5 结 论

(1) 利用多色集合理论的个人颜色、统一颜色以

及递阶结构树, 可以建立概念设计产品信息结构模型, 全面描述系统设计所需要的信息. 该模型由于基于多色集合理论的数学工具, 因此易于计算机表达和操作.

(2) 概念设计过程中的推理和约束关系可以分为 3 类, 利用多色集合统一颜色和元素个人颜色之间的模块布尔矩阵来描述, 并在推理过程中得到解决.

(3) 说明了该方法的推理过程, 验证了其可行性.

(4) 建立了隔振系统的方案元库. 方案库的建立是一个不断完善、扩充和创新的过程. 如果在推理过程中找不出可选方案, 可以通过创建新方案元来满足要求, 从而为知识创新提供了思路.

参考文献:

- [1] Pavlov V V. Polychromatic sets and graphs for CALS in machine building [M]. Moscow: Stankin Press, 2002.
- [2] 李宗斌. 多色集合及其在仿真复杂对象和系统时的应用[J]. 信息与控制, 2001, 30(3): 204~208.
- [3] 李宗斌, 李天石. 多色图及其在仿真复杂对象及系统时的应用[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(6): 759~762.
- [4] 张阿舟, 姚起航. 振动控制工程[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.
- [5] 中国船舶工业总公司第九设计研究院. 隔振设计手册[Z]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.

(编辑 管咏梅)

西安交通大学举行电气绝缘学科 50 周年庆典暨第九届全国工程电介质会议

2003 年 10 月 24 日上午, 电气绝缘学科 50 周年庆典暨第九届全国工程电介质会议在科学馆 101 报告厅隆重开幕. 开幕式由电气绝缘研究中心主任钟力生主持, 西安交通大学党委副书记李玉华教授首先发表了热情洋溢的讲话, 他以切身体会回顾了绝缘学科从创建以来走过的历史, 对为创建和发展绝缘学科而奋斗了毕生的老教授们表示了崇高的敬意, 并祝愿绝缘学科走向进一步的辉煌. 交通大学校友总会总干事马宽强教授宣读了校友总会发来的贺信. 电气绝缘学科的创建者之一马乃祥教授深情地介绍了自己伴随绝缘学科走过的 50 年历程, 并回顾了自己在科学研究之路上的经历, 对绝缘学科今天的发展感到由衷的欣慰.

电力设备电气绝缘国家重点实验室副主任李盛涛教授详细介绍了电气绝缘学科自创建以来的发展情况, 以及取得的辉煌成就. 绝缘专业毕业生、西北核技术研究所的邱爱慈院士和上海交通大学的王寿泰教授深情回顾了自己在绝缘读书时的情景, 对已故恩师表达了深深的缅怀之情, 并对本学科的新兴发展方向进行了展望. 哈尔滨理工大学电气电子学院副院长李忠华教授以专业校友和同行的双重身份, 介绍了两校绝缘学科的合作与交流情况, 并希望两校的绝缘学科加强协作, 共创辉煌.

在庆典仪式上发言的还有全国电线电缆行业协会的代表、上海电缆研究所印永福先生, 杜邦中国集团有限公司陆宝琦先生, 西安新兴绝缘材料厂唐民乐厂长, 天津市电力科学研究院姜龙华院长, 四川森普管材股份有限公司董事长傅登华先生.

(电力设备电气绝缘国家重点实验室)