

复合材料许用值试验件制造过程质量控制与检验

王春寿,张冠彪,刘袁财

(中国商飞上海飞机设计研究院,上海 201210)

[摘要] 民用飞机复合材料许用值试验件的类型繁杂、批次多且制造精度要求高,试验件的制造过程需要严格的质量控制以提高试验件的合格率;复合材料许用值试验件数量庞大且每个试验件需要检测的参数多,要提高试验件的检测效率就必须有合理的检测方法。根据自身从事复合材料许用值工作的经验,提炼了一些制造过程质量控制方法和检测方法,为复合材料许用值试验件的制造提供参考。

关键词: 复合材料;许用值;制造过程;质量控制;检测方法

Manufacturing Process Quality Control and Inspection of Composites Allowable Value Specimens

WANG Chunshou, ZHANG Guanbiao, LIU Shuaicai

(COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

[ABSTRACT] Due to various types, multiple batches and high manufacturing accuracy for civil aircraft composites allowable value specimens, strict quality control is required during the manufacturing process to improve the acceptability of specimens. Huge amount of composites allowable value specimens are needed, and lots of parameters of each specimen should be inspected, so it is necessary to use reasonable inspect methods to increase efficiency. Based on author's experience about composites allowable value specimens manufacturing, some manufacturing process quality control methods and inspection methods are refined, which provide references for subsequent manufacturing of composites allowable value specimens.

Keywords: Composite; Allowable value; Manufacturing process; Quality control; Inspection method

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.092

复合材料有着传统金属材料无法比拟的优势,如比强度高、比刚度、可设计性强、疲劳性能好等,因此其在民用飞机结构中的应用逐年攀升。复合材料在机体结构中的比例已成为衡量商用飞机先进性的重要指标之一^[1-4]。

民用飞机复合材料结构的设计许用值是 AC20-107B 建议的复合材料结构积木式验证试验的重要组成部分,是复合材料结构设计的基础,也是复合材料结构符合 CCAR-25-R4 25.613 条款的试验依据^[5-6]。

国内某型民用飞机复合材料许用值试验件制造初期在加工和检验过程中遇到了较多的困难,如试验件标识方法不完备、可追溯性差等,导致试验件报废重制。试验件检测方法的不完善、检测效率低导致试验件迟迟无法交付。

本文基于笔者从事民用飞机复合材料许用值工作的多年经验,阐述了工艺规范文件中未提及的复合材料

许用值试验件制造过程的质量控制方法和检测方法,为复合材料许用值试验件的制造提供参考。

1 复合材料许用值试验件制造流程

复合材料许用值试验件从制造的角度可以分为两类:一类是装配件,如开孔拉伸、压缩试验件,充填孔拉伸、压缩试验件,机械连接试验件等;一类是非装配件,如无缺口拉伸、压缩试验件,冲击后压缩试验件,面内剪切试验件等。

民用飞机复合材料许用值试验件制造的流程如图 1 所示,其中各流程节点基本包含了复合材料许用值试验件的制造过程。不过,各试验件制造承担方的生产流程在局部细节可能不太一致,图 1 仅作为示例。

2 质量重点控制工序

图 1 红色框中的工序在试验件制造过程中容易被

忽视,但是对后续试验件合格交付起着决定性的作用,甚至出错后会导致试验件报废,是本文要介绍的质量重点控制的制造过程。

2.1 FO编制

FO (fabrication order) 是试验件制造的大纲,是指令性文件,应包含试验件制造每一个工序,FO 的质量决定着试验件最终的合格率。但是制造单位在编制FO时,易忽视制造工序中的小细节,比如试板 0° 基准的标识。如果试板铺贴时未进行 0° 基准的标识,试板固化后将很难识别试板的 0° 基准线,此试板就将面临报废重制的风险,导致制造周期变长、制造成本增加。因此,FO中应包含试验件制造工序中的每一个细节。

2.2 工装准备

复合材料结构设计许用值试验件制造的工装要求与结构装机件的工装材料一致,以代表结构件的制造工艺。工装的边缘部位需要标识 0° 方向以作为试板铺贴时纤维方向的参考,如图2所示。复合材料结构设计许用值试验件制造工装表面平面度要求至少 0.02mm ,才能确保固化后的试板表面满足平面度的要求。在转移、清洗过程中应避免划伤工装表面,若工装表面局部出现划伤,在试板铺贴时需避开此区域。

2.3 试板铺贴

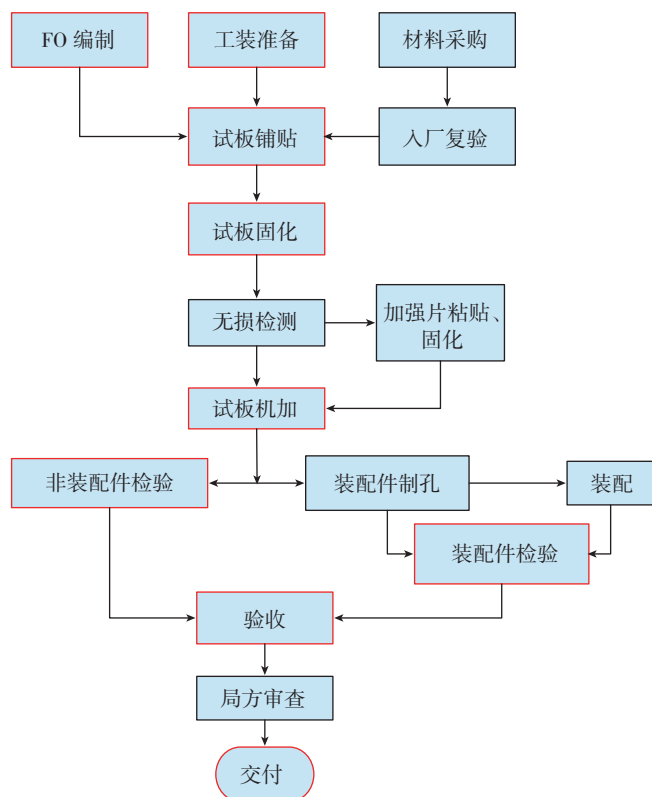


图1 民用飞机复合材料许用值试验件制造流程

Fig.1 Civil aircraft composite allowable specimens manufacturing process

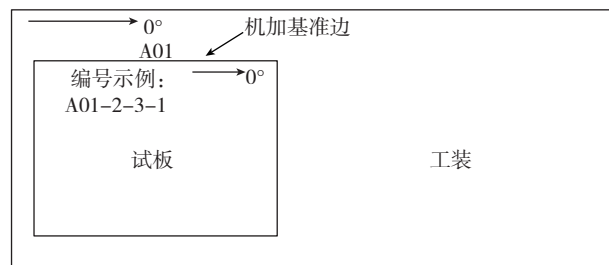


图2 试板制造工装与试验件 0° 方向标识

Fig.2 Identifying of manufacture tooling and 0° direction

试板铺贴前,在工装边缘标注将要铺贴试板的铺层代码,层板铺贴完成后在层板的边缘余料区进行试板 0° 基准的标识,此标识也是试板机加的参考,试板的基准边需要一直保留在试板上直到此试板机加完毕。试板铺贴完成后,需要在试板的余料区进行编号,试板编号应包含的信息有:铺层代码、材料批次、炉批次、流水号,此编号同样需要保留至试板机加完毕。试板标识和编号方法如图3(a)所示。

2.4 试板固化

复合材料结构许用值对于批次相同的材料,需要考虑炉批次对于性能的影响,在试板进入热压罐固化前,应确认同一批材料的不同炉次试板不能同时进一个热压罐。

固化前应在典型位置设置热电偶以记录工装和试板的升温、保温和降温曲线以确保温度控制满足工艺规范的要求。“典型位置”一般为升降温速率最快的位置,由热分布试验确定。

2.5 试板机加

复合材料许用值试板机加前,需先在试板上将每个试验件的位置、编号标识清楚,试验件编号应包含以下信息:试验项目代码、试验环境代码、试板编号、试验件流水号。这么做的目的是保持对试板、试验方法、试验环境、批次及工艺处理循环的可追溯性。在试板上进行试验件编号时应遵循从左到右、从上到下的原则或在试板上用耐久性标记笔画出跨越每个试验件的斜线,以保证在试验后能够重新拼凑出试板。追溯每个试验件在试板上具体位置的方案如图3所示,这些信息在试验后追查试验数据中的异常点时能起到关键的作用^[7-9]。

在进行试验件切割时,应始终以原试板的基准边为基础,以保证纤维的取向与基准边一致。为了避免纤维方向的累积误差超过规定的取值,推荐复合材料许用值采用小尺寸的试板^[9]。

2.6 验收、交付

试验件制造承担方交付试验件时,验收人员应对试验件外形尺寸(长度、宽度、厚度、孔径)、形位公差(平行度、垂直度、平面度、孔的位置度)的测量数据进行复验。

复验数量应不低于交付总数的 40%，验证的测量数据为被抽中试验件的所有检测数据。

试验件交付时要求每个试验件独立密封包装，并且将同一组试验件（同一试验项目、同一材料批次、同一炉批次的试验件）再进行一次封装。

国内某型民用飞机某部段复合材料许用值试验件制造信息如表 1 所示，其中包含试验矩阵、合格率、成本、制造周期等信息。总成本为试验件制造的总投入，单件成本为生产一件合格试验件的费用。

表 1 中控制前数据为某型民机首批启动的复合材料许用值试验件制造信息，试验件大量报废导致试验矩阵不完整，无法产生基于统计的 B 基准设计值^[7-8]；控制后数据为总结经验教训后，采用本文所述的制造过程

质量控制方法，重新启动该部段许用值试验件制造的信息。由表 1 中数据可以看出，采用本文阐述的质量控制方法后，试验件制造合格率由 50% 提高到 90%，单件成本降低了约 40%，成效非常显著，验证了本文所述方法的有效性。

3 检验方法

复合材料许用值试验件数量庞大且单个试验件需要检测的参数多，要提高试验件的检测效率就必须有合理的检验方法，本文以开孔拉伸试验件与面内剪切试验件为例，推荐一套快速的试验件检测方法。开孔拉伸试验件、面内剪切试验件的构型如图 4、图 5 所示^[10-11]，其中尺寸与公差标注包含了复合材料许用值试验件需要检测的所有参数，分为两类：一类是外形尺寸及公差，包括长度、宽度、厚度、孔径、R 角半径；另一类是形位公差，包括垂直度、平行度、平面度、孔的位置度。

3.1 外形尺寸

复合材料许用值试验件长度、宽度的测量要求采用游标卡尺，长度测量 3 个点的数据，宽度测量 5 个点的数据；厚度的测量要求采用螺旋测微仪测量 5 个点的数据。各测量点应尽量分散以代表所测参数的分布情况，每一个点都要求在公差范围内，并要求记录各测量点的测量数据。

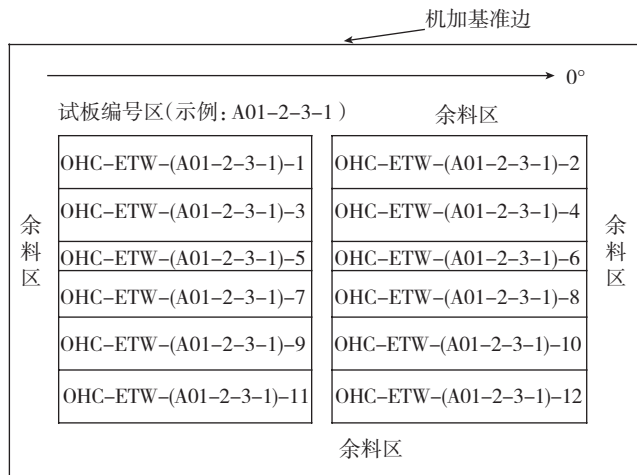
孔径的测量采用塞规，塞规两端分别代表孔径公差的下限（通端）与上限（止端），止端塞不进入待测孔内，通端可顺利通过待测孔，此孔即为合格^[12]，孔径的检测只需记录合格与否。面内剪切试验件的 R 角一般采用 R 规进行检测，R 规只能检验 R 角是否满足要求，不能测量具体数值。

3.2 形位公差

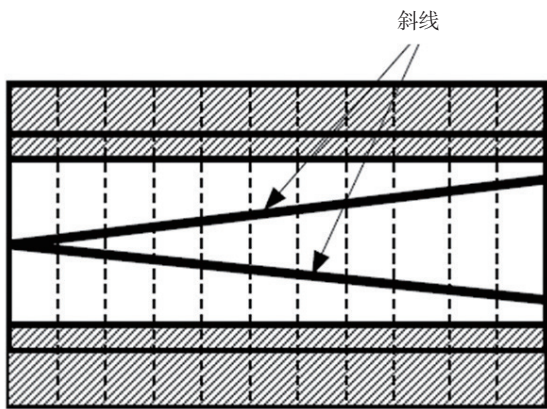
复合材料许用值试验件中的形位公差均可以采用 3 坐标仪器进行测量。3 坐标测量精度高，但是测量的成本高且效率比较低。当短时间内需要检测的试验件数量较多时，不推荐采用 3 坐标测量。

平行度的要求见图 4 和图 5 中的标注①、②、⑨、⑩，平行度一般采用标准平台和千分表配合测量。以图 4 中的标注①为例，将基准平面 B 紧贴在标准平台上，移动千分尺在试验件的待测平面上滑动，记录最高点与最低点读数，两者差值即为待测面相对于 B 平面的平行度，测量示意图如图 6 所示^[12]。

平面度要求见图 4 中的标注③，平面度的测量采用刀口尺、标准平台和塞尺相互配合。首先将待测平面 B 面紧贴标准平台，再用 0.08 的塞尺插入 B 平面与平台之间，若能插入则平面度不合格^[12]，若不能插入则进行下一步测量；将刀口尺压于待测试验件表面，用 0.08 的



(a) 编号的方式



(b) 画斜线的方式

图3 追溯试验件在试板上位置的方法

Fig.3 Methods of tracing location of specimen on test panel

表1 某型民用飞机复材许用值试验件制造信息

控制前后	矩阵总数 / 件	投产数量 / 件	合格数量 / 件	总成本 / 元	制造周期 / 年	单件成本 / 元
控制前	5556	7000	3517	1499	3	4262
控制后	5556	6200	5556	1460	1	2628

塞尺插入待测平面与刀口尺之间,在试验件的不同位置进行多次检测,若能插入则平面度不合格,若不能插入则平行度满足要求。

孔的位置度见图4中的标注④,孔对于基准边C的测量方法为:分别测量孔边到基准边C、孔边到基准边C对应的另一侧边的距离,计算两个距离的差值即为孔的位置度公差,若差值小于0.1,则孔相对于基准C的位置度满足要求^[12-13]。

垂直度要求见图5中的标注⑤、⑥、⑦,垂直度的测量采用标准平台、塞尺与方箱互相配合。以图5中的标注⑥为例,将基准平面A紧靠在标准平台上,待测面B与方箱贴紧,尝试用0.51的塞尺插入B面与方箱之间,

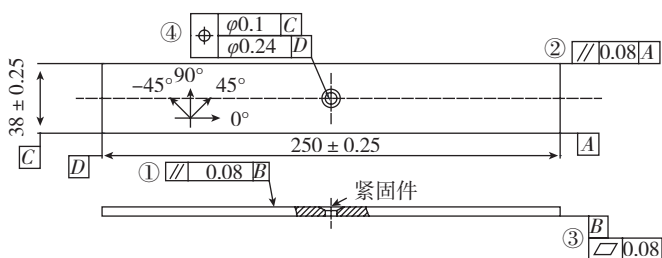


图4 开孔压缩试验件构型 (单位: mm)
Fig.4 Configuration of open-hole compression specimens

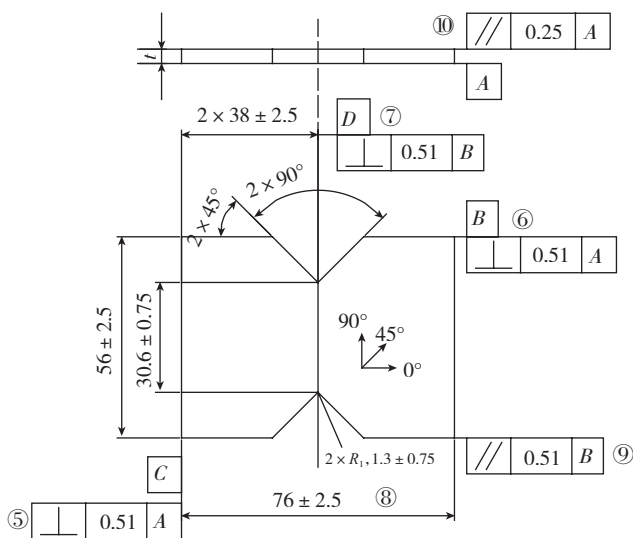


图5 面内剪切试验件构型 (单位: mm)
Fig.5 Configuration of in-plane shear specimens

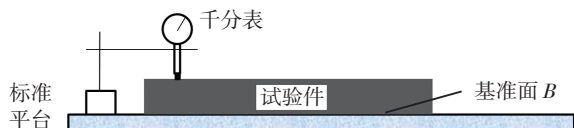


图6 复合材料许用值试验件平行度测量
Fig.6 Parallelism measurement for composite allowable value specimen

若不能插入则垂直度满足要求,反之,垂直度不满足要求,测量示意图如图7所示^[12]。

本节所述的方法能够实现复合材料设计许用值试验件快速有效的检测。采用本节所述的检测方法检测一件试验件所需时间约为3min,而采用3坐标仪器检测相同试验件约需6min,说明了本节所述方法的快速性,表1中的试验矩阵在1年内全部交付与所述的检测方法密不可分。通过对比验证了本节测量方法和3坐标仪器测量结论的一致性,说明了该检测方法的有效性,此检测方法得到了CAAC制造检查代表的认可,试验件也成功取得了CAAC颁发的适航标签^[14]。图8为标签示意图。

4 结论

本文对民用飞机复合材料结构许用值试验件制造过程的质量控制方法进行了详细的阐述,旨在提高复合材料结构许用值试验件的合格率,降低制造成本。提炼出了一套CAAC制造检查代表认可的民用飞机复合材料许用值试验件的快速有效的检测方法。

采用本文阐述的质量控制方法和检测方法后,国内某型民机某部段复合材料许用值试验件制造合格率由50%提高到90%,单件成本降低了约40%,制造周期也由3年缩短至1年,成效显著,说明了本文所述方法的有效性。

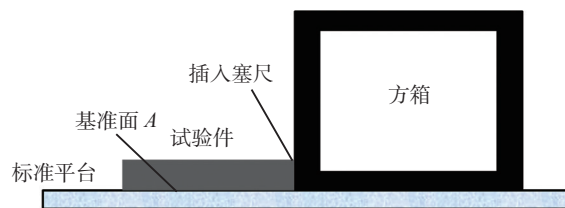


图7 复合材料许用值试验件垂直度测量
Fig.7 Verticality measurement for composite allowable value specimen

1 国家 Country 中国 CHINA	2 中国民用航空总局 CAAC 符合性 Conformity <input type="checkbox"/> 适航性 Airworthiness <input type="checkbox"/>	3 证书编号 Certificate Ref. No. -AMC08-46372	
4 单位 Organization: 航空工业有限公司			
5 工作单/合同单/票号 Work Order/Contract/Invoice / :		6 序号 Item	
7 内容 Description	8 件号 Part No.	9 适用性 Eligibility	10 数量 Qty
11 系列号/批号 Serial/Batch No.	12 产品状态 Status/Work		
13 备注 Remarks 请求单: -AMC121-S8839/0			
14 新产品 New Parts 除本证书产品目录以外的其他型号,已在以上国家适航规章中注册/批准/并获产品 (即CPDRL) 符合性批准/适航性批准/适航性批准。 Certifies that the Part(s) identified above except as otherwise specified in block 13 are (are) manufactured/inspected in accordance with the Airworthiness Regulations of the stated country and/or in the case of parts to be exported with the approved design data and with the notified special requirements of the importing country.		15 使用过的产品 Used Parts 除本证书产品目录以外的其他型号,已在以上国家适航规章中注册/批准/并获产品 (即CPDRL) 符合性批准/适航性批准/适航性批准。 Certifies that the work specified above except as otherwise specified in block 13 are (are) manufactured/inspected in accordance with the Airworthiness Regulations of the stated country and in respect to that work, the part(s) is (are) Condition for safe operation and considered ready for release to service (are).	
16 批准人签名 Signature	18 批准日期 Date:	19 中国民航总局授权 Issued by or on behalf of the CAAC	
17 批准人姓名 (行印的) Name (Printed)	DMIR-SAACC -016		

图8 某部段复合材料层板设计许用值试验件适航标签
Fig.8 Airworthiness approval tag of certain component composite laminates allowable value specimens

参考文献

- [1] 陈绍杰. 复合材料与 A380 飞机 [J]. 航空制造技术, 2002, 45(9): 27-29.
- CHEN Shaojie. Composites and airliner A380[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, 45(9): 27-29.
- [2] 陈绍杰. 复合材料与 B7E7 “梦想”飞机 [J]. 航空制造技术, 2005, 48(1): 34-37.
- CHEN Shaojie. Composites and Dreamliner B7E7[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 48(1): 34-37.
- [3] 汤家力, 朱广荣, 李凯, 等. 民用飞机复合材料部件级疲劳与损伤容限试验 [C]// 第 17 届全国复合材料学术会议论文集. 北京: 航空制造技术杂志社, 2012.
- TANG Jiali, ZHU Guangrong, LI Kai, et al. Fatigue and damage tolerance test for composite component of civil aircraft[C]//Proceedings of the 17th National Conference on Composite Materials. Beijing: Aeronautical Manufacturing Technology Magazine, 2012.
- [4] 刘佳. 复合材料球面框的全尺寸适航验证试验方法 [J]. 飞机设计, 2014, 34(6): 48-52.
- LIU Jia. The full-scale test method for airworthiness certification of composite pressure bulkhead[J]. Aircraft Design, 2014, 34(6): 48-52.
- [5] FAA. AC20-107B composite aircraft structure[S]. Washington: FAA, 2010.
- [6] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准 [S]. 北京: CAAC, 2011.
- CAAC. CCAR-25-R4: airworthiness standard for transport aircraft[S]. Beijing: CAAC, 2011.
- [7] FAA. Material qualification and equivalency for polymer matrix composite material systems[S]. Washington: FAA, 2003.
- [8] CMH-17 协调委员会. 复合材料手册·聚合物基复合材料(第 1 卷): 结构材料的表征指南 [M]. 汪海, 沈真, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
- CMH-17 Composite Materials Handbook. Composite materials handbook: polymer matrix composites, Volume 1: guidelines for characterization of structure materials[M]. WANG Hai, SHEN Zhen, trans. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014.
- [9] American Society for Testing and Materials As-sociation. ASTM test method D5687-95(2002), standard guide for preparation of flat composite panels with processing guidelines for specimen preparation[S]// Annual Book of ASTM Standards, Volume 15.03. West Conshohocken, PA, 2002.
- [10] American Society for Testing and Materials Association. ASTM test method D6484-04, standard test method for open-hole compressive strength of polymer matrix composite laminates[S]//Annual Book of ASTM Standards, Volume 15.03. West Conshohocken, PA, 2004.
- [11] American Society for Testing and Materials Association. ASTM test method D7078-05, standard test method for shear properties of composite materials by V-notched rail shear method[S]//Annual Book of ASTM Standards, Volume 15.03. West Conshohocken, PA, 2005.
- [12] 余键, 南秀蓉, 马素玲. 公差与测量技术 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- YU Jian, NAN Xiurong, MA Suling. Tolerance and measurement technology[M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [13] 吕淑萍. 孔位置度的检验 [J]. 装备制造技术, 2011(3): 103-104.
- LÜ Shuping. The detection of position accuracy of the hole[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(3): 103-104.
- [14] 中国民用航空局航空器适航审定司. AP-21-AA-2011-03-R4: 航空器型号合格审定程序 [S]. 北京: CAAC, 2011.
- Aircraft Airworthiness Certification Department of CAAC. AP-21-AA-2011-03-R4: standardization procedure for design approval of civil aircraft and parts[S]. Beijing: CAAC, 2011.
- 通讯作者: 王春寿, 硕士、工程师, 研究方向为复合材料结构设计与分析, E-mail: wangchunshou@comac.cc.
- (责编 逸飞)
-
- (上接第 91 页)
- LEI Ningning, LI Wenhua, WANG Zheng, et al. Research on BOM under the integrated environment of PLM & ERP systems in construction machinery industry[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2013(8): 28-29.
- [6] 吴思达, 周传宏. Teamcenter 二次开发中 PSE 产品结构的获取及自动排序功能的实现 [J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(8): 150-152.
- WU Sida, ZHOU Chuanhong. The acquisition of PSE product structure in the second development of Teamcenter and the realization of automatic ordering function[J]. Computer Engineering and Science, 2008, 30(8): 150-152.
- [7] 屈力刚, 苑俊超, 魏佩振. 基于 MBD 的三维装配 BOM 重构技术 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(9): 78-80.
- QU Ligang, YUAN Junchao, WEI Peizhen. Reconstruction technology of 3D assembly BOM based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(9): 78-80.
- [8] 徐天宝. EBOM 到 MBOM 的映射机理及其在装配企业的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2010.
- XU Tianbao. Study on mechanism of transformation from EBOM to MBOM and its application in assembly enterprises[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [9] 夏秀峰, 梁利亮. PDM 中单一 BOM 数据源的 NoSQL 数据组织研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(7): 1440-1444.
- XIA Xiufeng, LIANG Liliang. NoSQL data organization research on a single BOM data source in PDM [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 37(7): 1440-1444.
- [10] 徐天宝, 王君英. 基于工艺管理的物料清单映射技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(9): 1913-1920.
- XU Tianbao, WANG Junying. Based on BOM mapping technology management technology[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2011, 17(9): 1913-1920.
- 通讯作者: 雷焕丽, 高级工程师, 研究方向为航空发动机燃油控制系统数字化装配工艺设计, E-mail: 2456675572@qq.com.
- (责编 铃兰)