[控制系统]

基于信息技术的高压开关操动机构可靠性保障

文/深圳供电局有限公司深圳电力技术研究中心　张　欣　赵宇明　黄荣辉　向　真　黄炜昭
西安高压电器研究院有限责任公司　赵　奔

首先分析高压开关操动机构的产品可靠性需求与特点，提出利用信息技术建立从设计到交付维护端到端的产品可靠性保障系统架构，并分别阐述了子系统的实现技术方案与数据模型，对子系统间的数据交换方式进行了分析和说明。基于信息系统提供数据的实际数据，验证了该方案对于系统性地提高操动机构可靠性所具有的促进能力，并展望了进一步实现系统优化的方向。

高压开关用液压弹簧操动机构是一个机电液一体化的复合产品，为高压开关的分合闸动作提供动力是保障电力输送网络系统的关键元器件之一。据国际大电网（CIGRE）多年高压开关设备运行故障统计，操动机构和机械运行故障占到开关总故障的55%～70%，2010年国家高压电气质量监督检测中心统计的断路器大容量试验故障的75次中，操动机构有36次（48%），由此可见，操动机构是开关故障的高发区，提高高压开关运行可靠性的重点应该是解决操动机构的运行能力与可靠性。

可靠性是指产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力，表示在一定时间内产品无故障发生的概率。通常可靠性可分为两种：一种是固有可靠性，是指产品在设计、制造过程中，产品对象已经赋予的固有属性，这部分的可靠性是在产品在设计开发时可以控制的；另一种是使用可靠性，是指产品在实际使用过程中表现出来的可靠性，除了固有可选性的影响因素外，还需要考虑产品安装、操作使用及维修保障等各方面因素的影响。产品可靠性是受设计、制造、试验以及使用维护过程中多种因素的共同影响和作用；为提高产品的可靠性，需要进行大量的试验和长时间的过程跟踪，状态记录与数据的统计分析，然后建立相应的模型（失效模式，故障树FTA等）进行产品可靠性评估与改善措施的分析。

对于产品可靠性的研究具有以下特点。

1）可靠性是涉及多种科学技术的新兴交叉学科，涉及数学、失效物理学、设计方法与方法学、实验技术、人机工程、环境工程、维修技术、生产管理、计算机技术等。

2）可靠性工作周期长、耗资大，非几个人、某一个部门可以做好的，需全行业通力协作、长期工作，如何在小样本条件下确定系统的可靠性参数是一个迫切需要解决的问题。

3）常规的可靠性理论是在二态假设（元件或系统两类状态：要么完全正常，要么完全故障）和概率假设基础上建立的，但在可靠性工程实际中，很难满足上述两个基本假设，用常规可靠性理论进行系统评价并不能完全反映实际情况。

随着信息技术的成熟与应用，并不断与传统产业融合，产业界及学术界分别提出。第三次工业革命、德国工业4.0、工业互联网等概念和相应的新技术，促使可靠性向综合化、自动化、系统化和智能化的方向发展。

1）综合化。指统一的功能综合设计而不是分立单元的组合叠加，以提高系统的信息综合利用和资源共享能力。

2）自动化。指设计对象具有功能的一定自动执

行能力，可提高产品在使用过程中的可靠性。

3）系统化。指研究对象要能构成有机体系，发挥单个对象不能发挥的整体效能。

4）智能化。指将计算技术引入产品全生命周期，采用例如人工智能等先进技术，提高产品的可靠性和可维修性。

在此以高压开关设备的核心元器件液压弹簧操动机构为研究对象，着重阐述了信息技术在其产品设计、制造以及交付试验过程的解决方案与实施成果。

问题提出与总体方案设计

高压开关设备具有产品价值高、服役周期长、客户定制需求多、产品构成复杂、现场运行环境严酷、研制流程复杂、试验检测复杂、维护复杂、产品技术复杂（包括材料学，机械结构设计、电气性能设计、热性能设计、电磁兼容设计、传感器设计、微电子技术等多学科综合优化）、产品数据管理困难等特点，是典型的复杂装备产品。操动机构安装到高压开关上交付，在运行过程中存在电场、磁场和温度场的复杂相互作用过程；另一方面操动机构的动作也依赖于与开关灭弧室结构的相互配合、相互作用所影响的高压开关的机械性能、绝缘性能、开断能力、载流性能等综合因素。

正如钱学森所说：“产品的可靠性是设计出来的，生产出来的，管理出来的”。因此，要提高操动机构的产品可靠性需要综合考虑产品设计、制造、交付和使用维护等全生命周期各个阶段中与可靠性密切相关的共性问题，并利用信息技术建立设计阶段的协同设计平台、制造和服务过程的追溯数据库，通过收集设计、仿真、制造和试验过程数据，提出相应的操动机构可靠性保障解决方案。

整个业务过程的信息系统框架如图1所示，顶层的是针对相应电压等级的高压开关操动机构提出的符合IEC标准以及用户特殊工况需求环境下的性能和可靠性参数指标；中间层是实际业务过程对各种参数指标的实例化过程，包括：三维数模的设计仿真分析、设计需求/资料的有效交互与传递，公差等级带定义，工艺及设备选择与实现；产品整机装配与试验过程，减少和避免差错率，提高制造系统的可靠性；底层是对交付过程中整机运行故障的反馈、跟踪过程，包括出厂前的早期失效，三包服务过程的异常故障以及定期检修发现问题的处理分析。

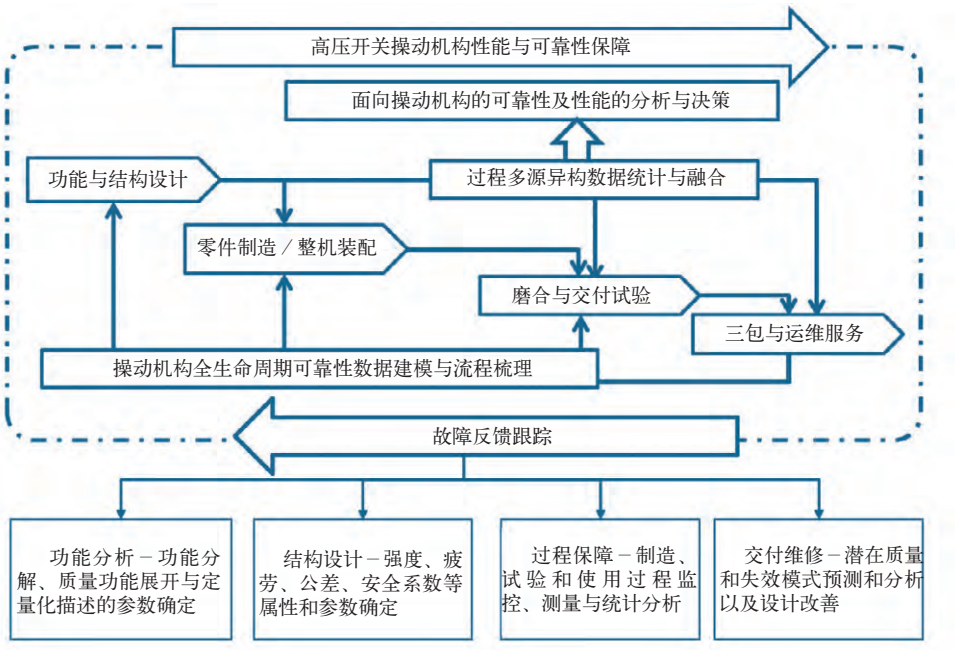


图1　操动机构产品可靠性信息系统框架模型与闭环控制示意图

整个系统涉及企业和用户多个部门、跨专业以及多种软件子系统之间的信息传递与数据融合分析。针对产品故障从整个产品的全生命周期过程，分别追踪寻找产生原因，寻求最佳（质量/成本/效率）评估的解决方案，系统地改善产品可靠性。

系统实现的关键技术

1．产品协同设计可靠性保障系统

产品设计过程是对用户需求进行理解、分析，并根据所能使用的资源（企业自身的零部件制造、装配能力，供应链系统提供的材料、元器件和工艺

能力），进行成本/质量/功能对比，在综合性价比对比择优条件下，以恰当实物形态结构和系统相应用户/市场需求的过程；产品的开发设计过程以5%的投入决定了整个产品75%～85%以上的费用，直接决定了产品的固有可靠性。设计过程是信息高度集中的知识密集型工作，因此，有效地利用信息平台提高设计过程的信息交互效率和质量，降低设计差错率，是保障产品可靠性的重要措施。

在高压开关的工程设计过程中，如图2所示，开关的设计人员关注用户对工程图的布局、间隔距、出线方式等需求，并着力考虑断路器/隔离/接地开关的三维空间位置；操动机构的设计必须要满足高压开关的设计需求，除了机构本身的结构外，对可靠性影响更多地是机构与本体的连接方式，工程使用环境/工况、开关的分合闸行程等。

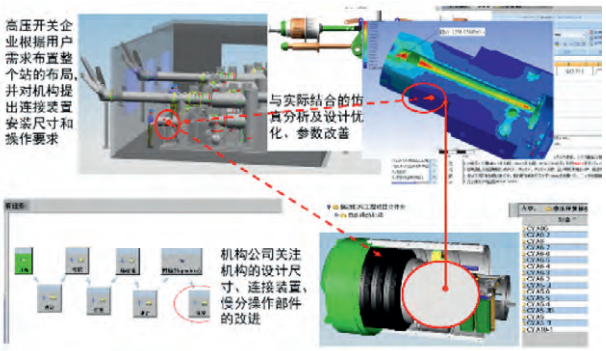


图2　开关与机构的协同设计与数据交互

通常的需求-相应交互方式如图3a所示各自完成相应的设计，然后以供-求关系部门（采购与销售）进行设计需求的传递，同时企业内部各部门之间相对独立，产生如下问题。

1）整个过程的信息传递效率低效。

2）任何一个手工传递环节出现遗漏和偏差将直接影响到产品的设计结果。

3）无法进行生产前的验证和数模分析，等实物生产出来后再进行验证，浪费时间和费用。

利用产品数据管理（PDM）系统建立的高压开关-操动机构产品协同设计平台，定义如图3b所示的跨企业协同设计流程，在机构公司内部利用ERP等系统建立跨部门的信息协作。

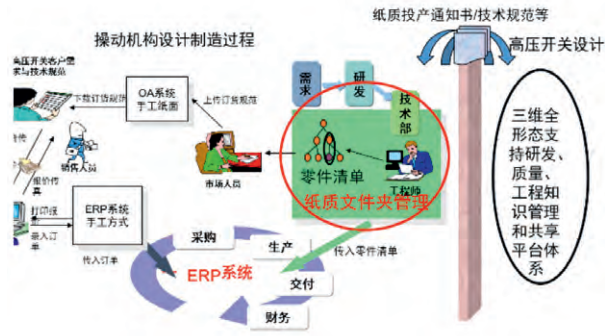
1）通过权限管理，机构设计人员可与开关设计人员分享工程需求信息，实现网络化协同与交互，消除传递环节人为干扰，提升信息传递质量和效率。

2）实现机构设计数据的统一管理、共享和流程监控，实现用户与车间的信息无缝对接。

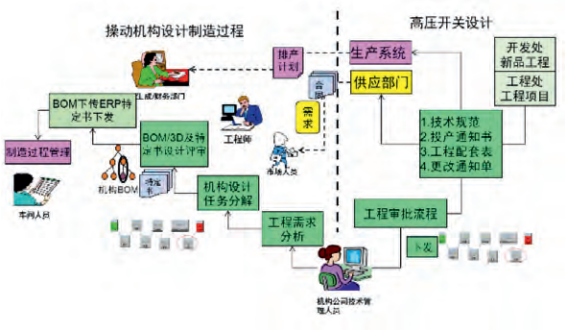
3）机构公司内部利用PDM、ERP、MES系统实现设计数据和特定书的电子化传递。

4）积累开关/机构研发相关知识，提高管理效率和质量，提高信息检索效率50%。

5）通过建立数字化研发平台，专注设计和3D校核，提高设计质量，降低差错率。



（a）物理隔离的设计过程



（b）基于协同平台的设计过程

图3　不同产品设计工作流程对比

2．产品制造交付过程追溯系统

产品制造交付过程的信息构成非常复杂，涉及的范围很广，如人员信息、零部件信息、工艺信息、工序状况信息及设备等，而每一个信息又由多个因子组成，如零部件信息中包括零件号、规格、批号、材料、零件名等，不仅数据量大、数据类型和结构复杂，而且数据间存在复杂的语义联系，数据获取记录载体也是多种。工艺人员产品结构EBOM（工程BOM，Engineering BOM）为基础编制零件加工和装配工艺。

产品制造过程信息系统的数据关系模型如图4所示，它将零件加工和产品装配等过程所需的人员、设备等资源信息与工艺过程进行关联，并标记生产计划的派工和完工状态，成为带有时间维度的制造BOM（MBOM，Manufacturing BOM）。产品制造过程的质量，决定了产品除设计因素外

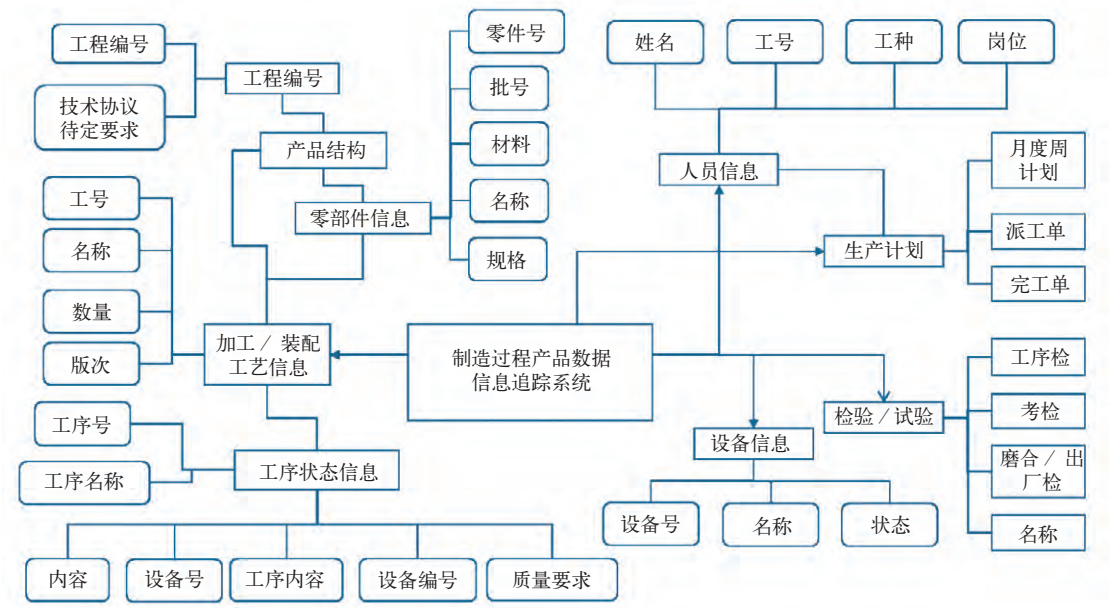


图4　制造过程数据关系模型示意图

的绝大部分质量，是企业追求精益质量的核心环节之一。通过制造过程信息系统，将制造过程质量检验和整机试验过程作为重点关注内容，记录各工序的质量信息，整机分装和总装扭矩、装配完整性检查以及磨合性能检测信息，拥有制造过程所有静态和动态的数据，形成以质量BOM（QBOM，Quality BOM）为核心的制造数据集合，从而为产品质量追溯、制造系统的可靠性评价和改进提供数据基础。

制造交付过程追溯系统包括制造过程目标设计、关键工序数据统计、数据评估和过程控制四个功能模块。

1）目标设计与工序数据统计模块将高压开关所需机构产品的工程信息和性能特定参数信息（如：分合闸速度特性值等），转化到系统，主要的途径如下。

①工程特定要求以及产品结构的层级关系，包含在产品EBOM中，经与PDM系统的数据集成，直接获取设计需求。

②零件的材料、热处理和尺寸精度要求，转化为系统对制造过程质量控制的原材料牌号、硬度和公差范围要求。

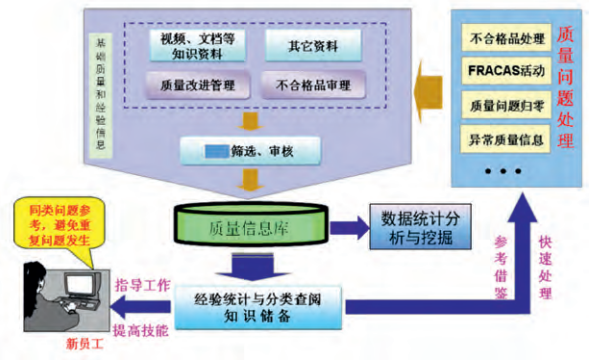
③对于操动机构中的关键重要零件的工艺和工序质量参数要求，采用Excel格式文件批量导入。

2）数据评估和报警模块。采用统计过程控制方式，对质检人员输入系统的质量数据与系统的目标数据进行实时对比，超差数据系统给出警告，并对相关零件进行标示，记录相应的返修和质量评审意见；对于一个批次中抽检的零部件则进行历史记录数据的比对，按照正态分布的统计规律，处理抽检质量数据给出不合格品处理建议。

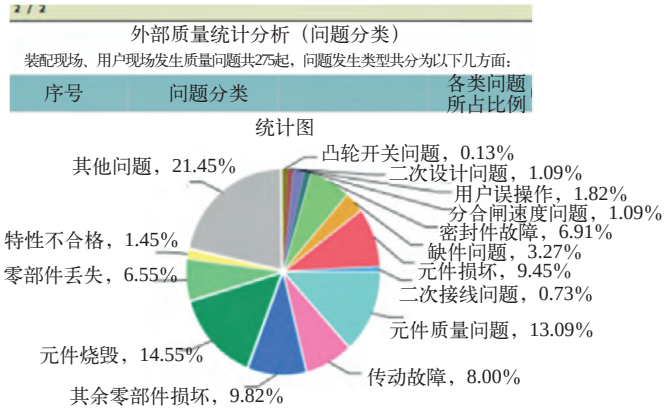
3）过程控制模块。对于加工类零件定期对统计质量数据进行总结分析，根据零件尺寸公差的分布情况，给出质量目标设定的修订建议。对于装配过程，通过扫描条码获取关重件的装配情况，对比EBOM的机构，及时发现漏装、错装，以便装配工人进行更改。交付和现场维修，记录被修理产品的BOM变更和零部件替换情况，对易损件和需要定期保养的元器件给出维修提示。工程施工人员和产品用户通过互联网查询产品质量问题的处理方法和措施，设备制造商则根据用户反馈信息，进行相关工程质量问题的追踪和查询，以便在制造及使用维护阶段进行产品的设计质量改善。

制造交付系统不仅要解决机构在厂内的制造、装配以及出厂磨合试验的可靠性保障问题，同时对售后的三包以及定期维护/维修信息同样需要进行跟踪与记录，并将这些信息与设计源头的工程需求、制造过程状态进行关联，从而实现对机构产品全生命周期的可靠性保障管理。对于售后交付的产品运行信息获取和记录，通常需要支持多媒体的异构信息，并且具备将离线环境下获取信息，反馈到系统的批量导入功能。

产品售后交付系统的信息流程关系如图5所示，该系统在企业内部以及配套现场运行，将产品出厂后的质量以及元器件运行可靠性信息记录到系统中，并反馈给技术部门促进产品可靠性的改善与提升。对于不能通过网络进行产品运维信息反馈的现场维修部门人员，采用信息记录卡：跟踪记录每台操动机构在用户现场安装调试以及维修、维护的故障问题，处理办法和结果，并附照片说明，然后通过Excel格式导入或手工录入到系统，逐步积累成服务质量知识库，以提高现场问题的处理能力和经验。



（a）售后交付系统结构示意图



（b）按照季度统计的质量问题分类图

图5　售后产品质量与可靠性保障信息系统

基于信息技术的产品可靠性改善应用

通过信息技术提供的定量化数据分析，为基于经验为主的机构装配可靠性分析提供数据支撑，在操动机构的制造过程可靠性除了要求每个零件的制造符合设计标准外，部件的装配以及公差的配合对机构的性能有一定的影响，首先对机构及功能模块的装配性能影响因素分析如图6所示，通常在对装配作业的过程能力分析，考虑装配的错装率（通过对核心件的条码防错功能）和装配结果的故障率，而对于产品的性能差异性（机构配开关本体的分合闸特性差异）及分布情况较少考虑，此应用将通过对数据的统计分析进行应用说明。利用制造交付信息系统提供操动机构核心零件的关键实际制造尺寸、装配关联关系等如下表所示，对比不同零件的配合公差分布形成的零件配合间隙，在一定的油液力下（碟簧/氮气压缩产生的压强），对机构分合闸运动速度特性的影响，评估装配工艺的可靠性能力。

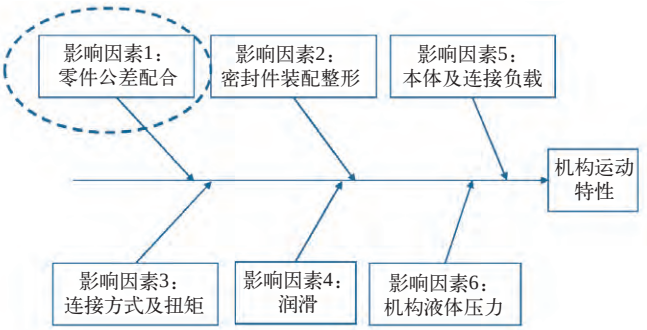


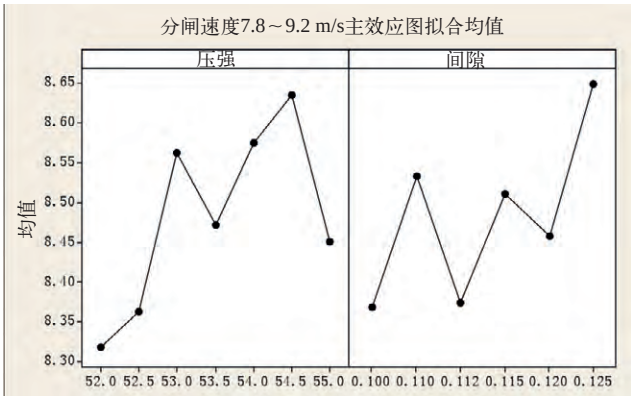
图6　操动机构装配性能可靠性影响多因素分析

表1　某机构性能与零部件结构参数对应关系表

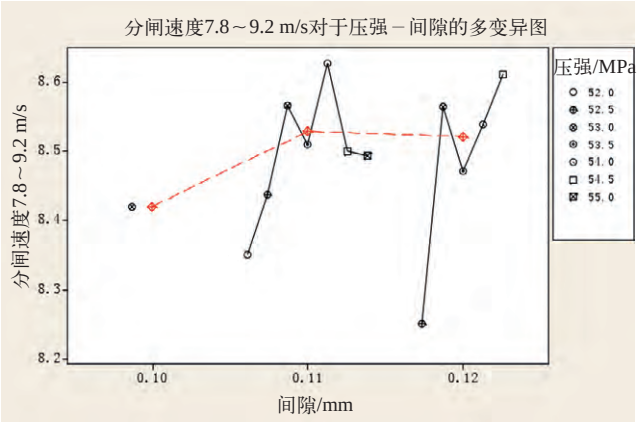
产品型号	关键特性	零部件名称	关键结构参数目标范围值
CY操动机构	分闸速度	合闸缓冲环	ϕ30（0，+0.35）mm
		活塞杆	合闸缓冲段ϕ45（+0.01，−0.01）mm
		碟簧提供油液压强	50（+2.5，−2.5）MPa
		分闸节流阀	调整伸出量
	合闸速度	分闸缓冲环	ϕ37（+0.036，+0.078）mm
		活塞杆	分闸缓冲段ϕ37（+0.01，−0.01）mm
		碟簧提供油液压强	50（+2.5，−2.5）MPa
		合闸节流阀	调整伸出量
	分闸时间	电磁阀	155（+5.4/+3.9，−5.4/−3.9）Ω
		分闸限位座	65（−0.2，−0.3）mm
	合闸时间	分闸缓冲环	ϕ37（+0.035，+0.078）mm
		电磁阀	155（+5.4/+3.9，−5.4/−3.9）Ω

分别从5个工程中，共抽取49台机构的机心，进行相关数据的验证，得出：压强、速度和间隙符合正态分布；影响分闸速度的合闸缓冲环与活塞杆形成的间隙尺寸分布，符合正态分布，均值：0.114 mm，方差：0.004 883，可以按照正态分布的规律处理相关的数据；确认分闸速度、油液压强也符合正态分布，分闸速度的均值为8.523 m/s，方差为0.174 8；油液压强均值为53.45 MPa，方差为0.694 7。

对分闸速度影响的主因素及相关性分析：影响分闸速度的固定结构因素作用结果如图7所示，不同间隙对分闸速度的影响不同，当压强固定，间隙越大、速度越高；间隙固定。压强越大，速度越高。



(a)



(b)

图7　影响因素对比图

基于对图7的分析，为调整装配作业者提供了参考规则。当已知油液压强一定以及零件配对安装完成条件下，开关负载大小以及分闸节流阀的开度调节，就决定了能否达到产品要求的速度v。例如：油液压强小、间隙小、负载大，那么调整到额定分闸速度的概率低，建议更换机构配试负载小的开关本体。根据液压机构出厂调整装配的余度，装配过程、制造过程获取的零件信息以及检测的油液压强，通过表的判断逻辑，系统为作业者在机构出厂调整以及和开关本体选配方面提供预测指导，对于完全不可能达到的分闸速度，就可以直接提示更换机构。

结束语

信息技术为提高企业的整体运行管理水平，建立了坚实的基础支持平台，从而为定量化分析产品故障、问题追溯，可靠性保障提供了有力支撑，以此实现了：①高压开关操动机构全生命周期的关键数据统计与追溯。②故障与失效原因的快速定位与分析、反馈。③为合理持续改进设计与服务升级提供基础。

基于数据的积累进一步的工作应着力在：①加强基础研究尤其是材料和关键零部件的可靠性试验并将数据纳入系统，从而在设计阶段提高产品的固有可靠性。②针对统计故障，建立故障树分析模型，研究潜在失效的预判算法和验证。EA

（收稿日期：2015.09.02）
（编辑：杨得润）