

[电力市场]

储能、可中断负荷等电网友好型资源参与电力市场机制初探

文/ 内蒙古电力交易中心有限公司 王海利 吴明波 李 铎 张跃龙 徐 江 段宇昊

以储能、可中断负荷等电网友好型资源为主要研究对象，分析了其参与国外电力市场的主要模式，总结了国内部分省份的实践经验。在借鉴国内外相关经验的基础上，结合内蒙古电力多边交易市场的相关政策和各建设阶段的主要目标，提出了电网友好型负荷参与电力多边交易市场机制。

近年来，伴随我国各个地区经济社会的快速发展以及新能源发电的爆发式增长，电网供需平衡面临新的挑战。具体包括：①季节性尖峰负荷矛盾突出。随着居民消费升级、电气化水平持续提高，天气因素对用电负荷和用电量的影响更加明显。夏季高温、冬季寒潮等极端天气对用电负荷变化影响显著，以季节性和区域性为特征高峰供电紧张问题已经凸显。②电网调峰调差压力逐年加大。在西北、东北的新能源富集区域，部分地区受外送通道容量限制的影响，出现了弃风、弃光现象。电源侧调峰调差能力受不可控因素影响较大的情况下，迫切需要储能或负荷侧参与调解，实现从源随荷动逐步向源网荷互动的转变。③新形势下需要创新负荷柔性调节机制。随着我国经济进入新常态以及电力市场化改革的深入推进，传统的有序用电行政性手段执行难度日益加大，需要创新体制机制和技术鼓励柔性可调负荷积极参与电网互动，确保电网安全。

鉴于上述新挑战、新问题，急需深化电力市场改革、研究电网友好型负荷参与电力市场的可行方式、分析可能产生的经济效益与社会效益。通过鼓励研究储能、可

中断负荷等电网友好型负荷参与电力市场的机制设计来缓解电力供需紧张局势、促进新能源消纳。

国内外现状分析

1. 国外电网友好型资源参与电力市场现状

国外电力市场起步早、较为成熟，对储能、可中断负荷等电网友好型负荷，参与多种能量市场和辅助服务市场的可能性及不同市场机制下的获益途径进行了一些探索。早在 2001 年，美国加利福尼亚州出现的能源危机使美国许多州的电力公司认识到解决能源危机应在需求侧采取一些经济手段和技术措施，来减少用户在系统高峰时期的负荷需求。引入储能、可中断负荷等电网友好型负荷参与市场交易，是美国各州电力公司所采用的实现调峰、调频的重要管理手段。

2018 年 2 月，美国联邦能源监管委员会颁布了第 841 号命令等法规，要求独立系统运营商修改其电费费率，以便电池储能系统可以参与能源、容量和辅助服务等市场；要求每一个系统运营商在考虑储能具体特征的基础上修改其市场规则；并对储能资源的物理特征和运

基金项目：内蒙古电力集团（有限）责任公司 2019 年科技项目

行特征进行了明确定义,如充电状态,充电时间,充电/放电限制,运行时间,充电/放电爬坡率等。通过以上措施,来促使系统运营商通过提高利用储能资源的能力,从而提高市场和电网的运营有效性。储能参与主能量现货市场价值收益,主要取决于储能系统在充放电过程中的价格差。在现有的市场机制下,主能量现货市场的电价差一般不足以抵消由于储能系统循环效率等因素所造成的损失。以 CAISO 为例,储能系统获取收益最大的应用领域是调频辅助服务市场。为了平衡 5 min 实时市场电力预测和实际需求之间的差异,CAISO 以 4 s 为基础,通过减少或增加一部分可以随时接受调度安排的可控资源的电力输出来响应系统需求,并维持电网频率稳定。调频里程越长,储能系统收益越大。

目前,多个国家和地区对可中断负荷参与电力市场的运行机制进行了探索和实践,其中,美国和欧盟的经验较为丰富、机制较为完善。通过电价激励、需求侧竞价等市场手段引导用户主动参与需求响应、调峰和调频等辅助服务,提高用户的参与积极性。美国典型的可中断负荷项目主要分为价格型和激励型两大类,价格型项目通过不同的电价机制(分时电价、关键峰荷电价和实时电价等),鼓励用户参与市场;激励型项目通过不同的可中断负荷分类(如直接负荷控制、可削减负荷和容量市场),制定不同的奖惩措施,来鼓励用户参与市场。欧盟的英国、芬兰、西班牙和法国分别设计了不同的分时电价机制,而挪威则将可中断负荷进行分类补偿,并发展了电力调频容量市场,使得需求侧资源可以与发电机组竞价,来参与调频市场。

2. 国内电网友好型资源参与电力市场分析

目前,我国电力市场试点建设省份,如广东、江苏、甘肃、新疆、东北和山西等省份的电力辅助服务市场规则中都将储能列为辅助服务的市场主体。以江苏调峰辅助服务市场为例,各类电网侧、电源侧、用户侧储能设施以及综合能源服务商都可作为该市场的主体参与启停调峰辅助服务;准入条件为充电/放电功率 20 MW 以上,持续时间 2 h 以上的储能电站或综合能源服务商注册为该市场成员;交易规则为储能电站、综合能源服务商不参与报价,但优先安排启停,按照日前中标的启停调峰折算单位电量最高价对充/放电容量予以结算,但不低

于充放电损失,另外不再给予其他补偿。

最近几年,广东、天津、山东、上海、江苏、浙江、河南、江西和重庆等省市受电网供需平衡矛盾和促进可再生能源消纳因素驱动,相继出台了需求响应支持政策、陆续启动需求响应试点,进行可中断负荷管理,并获得一定成效。作为典型的特大型受端城市电网,上海市针对电网尖峰负荷缺口、低谷时段备用容量等不足问题,从 2014 年起组织实施需求响应;2019 年 7 月 30 日 14~15 时,江苏公司实施 2019 夏季首次削峰需求响应,实际减少负荷达 402 万 kW;2019 年 7 月 30 日,浙江省宁波、嘉兴等地启动 2019 年首次电力需求响应,引导用电大户转移用电高峰 6 万 kW;另外,新疆地区探索利用电力需求响应促进新能源风电消纳的新途径,在弃风时段增加用电需求,通过“造峰用电”来减少弃风。目前,各省市主要靠政府补贴支持需求响应项目,不具备可持续发展的可能性,急需研究各种电网友好型负荷参与电力现货与辅助服务市场的长效机制,通过价格机制,充分反映实际成本。

内蒙古地区电力用户可调节潜力分析

2019 年,内蒙古地区的工业用户电能消费占全社会电能消费比重超过 76%。其中,以钢铁、煤炭、石油和化工等为代表的重点高耗能企业的用电量占总工业用电比重超过 90%。在现阶段电力市场环境下,受制于技术、管理等多方面因素的限制,分散式小用户难以主动参与电力市场。而工业用户用电负荷量相对较大,用电负荷分布比较规律,且用电时段可调整,使得工业用户能够很好的参与市场主体。对工业用户来说,能够通过调整和削减用电负荷,参与主能量现货市场和辅助服务市场。

为了真实地反映用户的意愿,并能详细地得到各行业的信息以及中断时间等因素带来的影响,本文采用用户调查法对内蒙古地区 9 个盟市工业用户企业的参与意愿、可调潜力和技术能力等因素进行调研,主要调研手段有网络调研问卷和实地考察,其中网络调研问卷共收到 269 份填报结果。利用网络问卷进行数据处理,分析工业企业用户可调节潜力,提前一周通知的削峰可调潜力下限为 950 MW,填谷可调潜力下限为 500 MW;日

前通知的削峰可调潜力下限为 680 MW、填谷可调潜力下限为 390 MW。通过企业现场调研，了解到铁合金冶炼行业的“削峰”能力为 10%~15%。若采用停炉手段进行响应，“削峰填谷”能力可以达到 100%，但此种手段会影响用户的生产进度等信息。

根据网络调查问卷调研和工业用户现场调研结果，

结合各类型企业的行业属性和生产特点，对内蒙古电网工业用户可调节潜力进行初步测算，结果见下表。表中显示了七个重点工业行业用户参与调研的可调潜力分段平均占比和分行业折算到 2019 年全地区的各行业可调潜力，经过统计六大用电重点工业行业，总的可调潜力为 710 MW。

表 2019 年内蒙古电网重点工业行业用户可调节潜力统计 (单位:MW)

网络调研可 调潜力下限	Q12_提前一 周通知_削 峰	Q12_提前一 周通知_填 谷	Q13_日前_ 削峰	Q13_日前_ 填谷	Q14_日内提 前 4 h 以上	Q14_日内提 前 4 h 以内	可调占比 (%)	折算到全地 区的可调 潜力
铁合金	241.76	96.96	201.76	74.76	162.36	151.46	18	410.83
硅铁	58.00	38.10	58.00	38.10	58.00	58.00	7	99.26
稀土	4.80	2.10	3.10	2.10	3.35	2.40	10	8.42
单晶硅、多 晶硅	39.00	41.00	11.00	14.00	8.00	5.00	3	21.19
电解铝	120.00	0.00	12.00	0.00	105.00	53.00	5	127.09
PVC	50.00	30.10	50.00	30.10	50.00	50.00	3	43.37
总计	514	209	336	160	387	320		710

电网友好型资源参与电力多边交易市场机制设计

考虑到内蒙古地区近年来经济发展迅速，可再生能源装机容量大，大型工业用户多，高耗能产业分布密集，具有一定的代表性。同时，内蒙古电力公司受制于外送通道运行水平和建设进度限制，区内能源资源配置压力大，鼓励电网友好型负荷参与电力市场可以帮助解决部分现实问题。内蒙古电网电力现货市场的建设工作分三个阶段组织实施，经过了起步阶段后，当前正处于完善阶段。主要目标包括建立发电侧单侧竞价的日前现货市场，按照“谁受益、谁付费”的原则，建立辅助服务的市场化交易机制等；2021 年至远期为成熟阶段，将实现发电侧、用电侧的双向竞争参与，并建立辅助服务与电能量交易的联合优化机制。

在设计电网友好型负荷参与电力多边交易市场的机制之前，需要先了解参与者的自身运行特性、参与市场的潜力（如偏好时间、参与规模和持续时间等），另外其参与意愿也与补偿机制或激励措施紧密相关。电网友好型负荷参与市场的基本要素至少包括以下几个方面。

市场参与者包括市场管理者、市场监管者、满足准入条件的电力大用户、独立储能项目以及提供服务的聚合商。

市场参与方式设计中原则上允许储能项目参与各种电力市场，如能源市场、容量市场和辅助服务市场等，且同一时间内一个储能系统只能担任一个市场主体角色，能量/辅助服务供应商或能量购买者。而为鼓励更多储能项目、电力用户或聚合商参与市场，建设初期可以暂时不设置或设置较低的容量/负荷量限制，允许的电力大用户直接参与市场，一般用户可通过服务聚合商代理参与。

电网友好型负荷作为市场参与者的收益与其参与的市场类型、市场出清价格、响应时长、负荷削减能力、储能系统买入/卖出价格差等因素有关。其中，储能系统的卖出价格可能是卖出电能量价格或提供辅助服务收益，负荷削减能力一般与用户基线负荷有关。考虑到本文研究对象为可再生能源装机规模较大省份，为了有效促进新能源消纳，在考虑用户自身负荷基准水平的基础上，建议进一步考虑用户参与，经过市场整型的负荷曲线与可再生能源消纳所需负荷曲线之间的形状相似性。

1. 电网友好型资源参与中长期交易市场机制设计完善阶段，考虑到储能、可中断负荷等电网友好型

负荷一般容量较小或可削减用电量比例有限,在中长期交易市场中主要考虑市场化交易电量,可采取双边协商、集中竞价和合同转让等交易方式,包括年度双边交易、年度竞价交易、月度双边交易和月度竞价交易等类型。已签署的中长期交易合同电量可在交割日5个工作日之前,进行自由双边协商转让,通过电网安全校核后,在合同转让的市场交易平台上确认。

电力调度机构协商电力交易机构在综合考虑月度电力供需形势、供热期电量需求、安全校核、电网检修计划安排和合同执行进度等因素的基础上,将电网友好型负荷的年度市场合同电量形成相应的月度电量分解计划。电力交易机构将月度电量分解计划,与月度双边交易、月度竞价交易、合同转让交易等,汇总形成最终的月度电量执行计划,并按规定进行市场信息发布。

电力调度机构依据已公布的月度电量执行计划,综合考虑月内的电力供需情况、安全校核、电网检修计划安排和月度电量完成进度等因素,采用逐日滚动分解的方式,将各电网友好型负荷的月度电量执行计划分解至每日,形成各储能项目或大工业用户削减的日执行电量计划。日执行电量计划需在每日现货市场开市之前完成,并按规定向市场成员披露信息。日执行电量计划合同属性上为差价合同,该合同不形成具有物理执行意义的日执行电量计划,多对应的合约电量自动释放进入现货市场的交易空间。

在电网友好型负荷资源参与电力多边市场交易机制设计时,既要考虑如何有效弥补中断负荷用户的损失,又要使电网企业有获利的空间,才能使其长效、稳定运转。而价格是双方利益冲突的纽带,所以只有设计合理的电网友好型负荷资源价格才能达到双方利益的均衡,实现高效的用电方式。

电力公司不知道用户真实的缺电成本时,难以确定电网友好型资源的价格。委托-代理机制模型可以解决电力公司与用户之间的信息不对称问题,避免出现某一方市场参与者隐瞒或虚报私有信息而使自身的利益最大化的现象。电力交易机构作为委托人根据可观测信息设计一个激励合同,促使电网友好型负荷资源作为代理人在签约后选择适宜的行动以实现委托人效用最大化。全年负荷调整合同可以分为分段计时调整合同、负荷曲线调

整合同两大类。该方法对电力市场的外在环境要求不高,在不同的条件下可设计激励合同、降低外购电价格风险、满足资源利用效率的要求及电力公司和用电客户之间的利益平衡,简单易行,能被利益双方接受。优化问题模型为

$$\max(\rho_w \cdot P_{\text{IL}} - \rho_{\text{IL}} \cdot P_{\text{IL}}) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \rho_{\text{IL}} \cdot P_{\text{IL}} - \bar{C}_{\text{IL}} \geq 0 \quad (2)$$

$$\rho_{\text{IL}} \cdot P_{\text{IL}} - C_{\text{IL}} \geq \rho_{\text{IL}} \cdot P_{\text{IL}} - \bar{C}_{\text{IL}} \quad (3)$$

式中, ρ_w 是电网企业的外购电力价格; ρ_{IL} 是可中断电价; P_{IL} 是负荷中断量; C_{IL} 是用户真实的负荷中断成本; $\bar{C}_{\text{IL}}$ 是用户上报的负荷中断成本; $\rho_w \cdot P_{\text{IL}}$ 是外购电的成本; $\rho_{\text{IL}} \cdot P_{\text{IL}}$ 对用户的中断补偿。式(1)为电网企业效益最大化目标函数;式(2)为个人理性约束,保证了用电客户积极参与可中断负荷管理的可能性;式(3)为激励相容约束,保证了用电客户真实反映自己负荷中断成本的可能性。求解上述优化问题,可以得到电网友好型负荷在中长期市场的统一价格。

成熟阶段,为了达成进一步促进新能源消纳等目标,中长期交易市场中在近期阶段已经实现的市场化交易电量的基础上,还可以考虑对可再生能源消纳量、年度市场合同电量进行交易。若交易双方形成了有交割曲线形式的市场化合同,则该部分日交割曲线将具有物理执行意义;调度机构只对该交易中电网友好型负荷资源月度电量执行计划中的基数电量部分进行分解,形成电网友好型市场成员基数电量合同的日执行电量计划。

2. 电网友好型资源参与现货交易市场机制设计

(1) 完善阶段:电网友好型资源参与电能量市场及独立的辅助服务市场

在完善阶段,内蒙古电力多边交易市场的建设目标有:探索建立发电侧单侧竞价的日前现货市场、建设日内、实时/平衡的现货市场;扩大市场参与主体,开展新能源与抽蓄电站、低谷供热负荷等新兴市场成员的交易;按照“谁受益、谁付费”的原则,建立辅助服务的市场化交易机制等。

现有中长期市场规则框架下的合同电量转让交易和电量互保协议等机制为大型独立运行储能系统参与电量市场提供了可能性。尤其是可以以周为周期开展的合同电量转让交易,指市场主体之间可以采用自主协商模

式，将一方拥有的全部/部分合同电量转让给其他市场主体，没有价格限制，分别在年度、月度常规交易闭市后、交易合同执行前开展，还可以以周为周期按需开展，经过安全校核后达成交易，时间灵活性较强。给予储能等具备电能输出能力的新市场主体较高的优先级，使其既可以与常规火电机组，又可与新能源发电企业进行合同电量转让，可以在一定程度上保证储能电量在电量市场获得部分收益。此外，发电机组出力/电量偏差超出阈值会受到惩罚，售电公司出现偏差电量也会受到考核或付出更高的购电成本，发电企业、售电公司可与储能、可中断负荷等电网友好型负荷提供商直接签订双边合同来规避以上风险。

对于储能、可中断负荷等电网友好型负荷参与调频辅助服务市场的机制，初步设计为电网友好型负荷与发电机组，根据日前公布次日的调频里程需求，共同申报次日各时段调频里程价格。按排序价格从低到高依次出清，直至满足需求，最后一个中标 AGC 发电单元的排序价格作为调频市场的统一出清价格。目前内蒙古地区建设的相对容量较小的储能项目可提供 AGC 上调和下调服务；考虑生产特征，大部分可中断负荷只能通过减少负荷（类似于增加发电出力）提供 AGC 上调服务。调频容量可先参照发电机组进行补偿。后续 AGC 容量补偿也交由市场决定。在日前确定了次日的调频容量需求与调频里程需求后，储能、可中断负荷等电网友好型负荷与发电机组可申报次日的调频容量价格与各时段的调频里程价格。以购买调频辅助服务的成本最小为优化目标

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{n_g} s_{g,i,t} (CP_{g,i,t} \cdot FC_{g,i,t} + MP_{g,i,t} \cdot FM_{g,i,t}) + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{n_s} (CP_{s,i,t} \cdot FC_{s,i,t} + MP_{s,i,t} \cdot FM_{s,i,t}) + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{n_{il}} (CP_{il,i,t} \cdot FC_{il,i,t} + MP_{il,i,t} \cdot FM_{il,i,t}) \right\} \quad (4)$$

式中，下标 g, s, il 分别是发电机组、储能、可中断负荷； n 是不同类型的市场主体数量； $s_{g,i,t}$ 是日前确定的第 i 个发电机组在第 t 时段状态，开机状态（ $s_{g,i,t}=1$ ）和停运状态（ $s_{g,i,t}=0$ ）； $FC_{*,i,t}$ 是发电机组/储能/可中断负荷中第 i 个市场主体在第 t 时段愿意提供的调频容量， $PC_{*,i,t}$ 是对应的成本； $FM_{*,i,t}$ 是发电机组/储能/可中断负荷中第 i 个市场主体在第 t 时段愿意提供的调频里程， $MP_{*,i,t}$ 为对应的成本。

考虑到可中断负荷仅能提供 AGC 上调服务，为保证电力系统可靠性，AGC 双向调节资源都应具备充裕性，故需限制可中断负荷在调频资源中占比。

$$0 \leq \sum_{i=1}^{n_{il}} FC_{il,i,t} \leq \frac{1}{1-k_{\max}} \left(\sum_{i=1}^{n_g} s_{g,i,t} FC_{g,i,t} + \sum_{i=1}^{n_s} FC_{s,i,t} \right) \quad (5)$$

式中， $k_{\max}$ 是可中断负荷申报容量可占调频容量资源的最大比例。

(2) 成熟阶段：电网友好型资源参与辅助服务和电能交易的联合优化调度

在成熟阶段，内蒙古电力多边交易市场的建设将继续完善现货市场建设，实现发电侧、用电侧的双向竞争参与；完善辅助服务市场建设，建立辅助服务与电能量交易的联合优化机制；将需求侧响应、电供热、充电桩和储能等新的市场主体纳入竞争机制。

内蒙古电力市场采用“中长期+现货”的总体架构，具有多模式、多品种的中长期交易在年度、季度、月度和周等周期开展，通过交易电量日分解与现货市场衔接，现货市场包括日前、日内和实时电能量市场。根据当前的市场规则，在中长期交易电量日分解的基础上，以系统运行效益最大化为目标函数，以中长期日分解曲线为计算基态，考虑系统负荷平衡、备用容量机组出力上下限、机组爬坡和线路潮流等约束条件，进行日前电能量交易优化出清。通过日前电能量交易确定次日系统机组组合、运行曲线及 96 点分时边际电价，初期以分时边际价格作为全网出清电价，待条件成熟后采用分时区域电价或分时节点电价；在日前交易出清结果的基础上，日内交易进一步考虑各约束条件，按照日前申报信息，进行滚动优化；实时平衡交易依据未来 15 min 电网状态变化，以调整成本最小化为目标确保供需实时平衡。

储能充电、用户增加负荷的效果等同于发电机减发，进行买入报价；储能放电、用户削减负荷类似于发电机增发，进行卖出报价。如前讨论可知，储能、可中断负荷等电网友好型负荷可以提供 AGC、调峰辅助服务。满足响应速率要求的电网友好型负荷还可提供设备辅助服务，在日前申报各时段备用容量与价格，与发电机组共同竞争，获取收益。规定一个市场主体同一时段只能参与一个市场。发电机组与电网友好型负荷在日前

市场申报次日各时段愿意提供的出力、备用容量、ACG容量/里程以及相应的报价,优化目标为系统综合效益最大化,即在保证最大程度接纳新能源的基础上购买电量和辅助服务的总成本尽量小;在日内市场申报周期为4 h,优化目标和约束条件与日前相同;实时市场以未来15 min系统调节总成本最小为优化目标,系统调节成本包括购买电量成本和调频里程成本。

此外,当电力系统出现短期容量或电力短缺时,发电侧单边竞价形成的分时电价可能给予不了用户进一步削减负荷的激励,引入用户侧参与竞争并进一步采用15 min或5 min分时节点电价可以更精确地反映每天各时段供需关系和有效传达电价信号。同时,为了进一步促进新能源消纳,在成熟阶段可对用户采取两部制实时电价机制。该电价机制可以通过负荷基准线的设计为电网友好型负荷资源提供一个对冲实时电价波动风险的途径,从而鼓励更多的电网友好型负荷以独立或聚合的形式参与电力多边交易市场。同时,基于对负荷基准线的设计,进一步引导电网友好型负荷资源的增、减用电行为,更有利于促进本地区的新能源消纳。

在两部制实时电价机制中,用于计算的用户基准线负荷极其重要。本文通过三步计算获取用户基准曲线:

1) 根据用户历史负荷求得用户正常用电的平均负荷值。

2) 在假设负荷具有足够的柔性的前提下,优化求解获得系统能给出友好促进系能源消纳的理想负荷运行曲线。

3) 用户正常用电平均负荷值与理想负荷标么曲线乘积即为两部制实时电价的用户基准线负荷。对用户而言,该方法可以公平有效地激励用户参与市场;对系统而言,该方法以新能源消纳为目标,确保最大化全社会边际效益。

结束语

储能、可中断负荷等电网友好型资源参与电力市场有很大的应用前景,可以增加系统备用,保障电网安全,参与调峰促进新能源消纳,参与调频辅助同步联网,通过市场手段减少有序用电的发生,从供需平衡上改善电力系统运行状态。同时,能够鼓励用户侧参与市场,随着储能技术发展和储能行业的壮大,吸引更多社会资本参与电力系统的建设与运行,并可在一定程度上降低政府部门对电力系统的投资成本和电力系统自身的运行成本,产生直接的经济效益和社会效益。

此外,储能、可中断负荷等电网友好型资源参与电力市场还需要相关软硬件基础设施的支撑,例如用于直控负荷或储能的自动控制装置,以及高级计量装置、智能电表等硬件基础设施,和服务系统、管理系统、监控系统、终端嵌入式软件、聚合商管理系统和用户能量管理系统等软件设施。以上需求为5G通信、大数据、云计算和区块链等新兴技术提供了应用场景,技术的发展也将影响市场管理模式,带来新的机遇。**EA**

(收稿日期:2021.01.22)

(上接第65页)

动块A带动容栅测标尺及光栅读数头前后移动,进而实现自动化高精度检测。该丝杆负载能力强,抗干扰性较强,能够实现精度较高的定位。

上述联动装置结构设计方案中,移动块A各部件要求实现紧密配合,减小由于步进电动机转动引起的振动,保证测试装置采集数据的实时性和抗干扰性。

该自动测试装置的固定装置、联动装置各结构部分均精确定位,互相配合,使整体结构设计简单高效,稳定可靠,确保了测试装置能够进行高精度检测。

结束语

本文研发的专用容栅传感器自动测试装置,通过特定的结构设计,配合光栅尺、步进电动机等控制设备,能够快速、自动地实现待测件高精度测量,并将检测误差、精度实时显示在显示屏上,便于测试者对测试结果进行观察及记录。该测试装置解决了手工测试时间长、干扰较大等缺点,满足设计的基本功能需求,制作周期短,造价低,技术含量高。**EA**

(收稿日期:2020.08.13)