

城市轨道交通车辆全寿命周期成本招标分析

孙悦 张光准

(国信招标集团股份有限公司, 100044, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘要 城市轨道交通车辆作为城市轨道交通中最为关键也最为昂贵的设备,其采购金额占到工程总造价的10%~15%;但是城市轨道交通车辆全寿命周期长达30年,其后期的运行及维修养护成本更为高昂。在传统招标模式下,采购比较注重评价车辆初始采购成本,往往忽视后期更为庞大的能耗成本及车辆维护成本。针对性地引入车辆全寿命周期成本招标模式,尝试解决建设与运营分割的弊端,统筹考虑车辆全寿命周期中所产生的费用,实现采购单位整体效益的最优化。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 全寿命周期成本; 招标

中图分类号 F224.5:U271.92

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.07.033

Analysis of Urban Rail Transit Vehicle Life-cycle Cost Bidding

SUN Yue, ZHANG Guangzhun

Abstract Vehicle is the most critical and expensive equipment in urban rail transit, its purchase amount accounts for 10 to 15% of the total project cost. Since the life cycle of urban rail transit vehicle is up to 30 years, the operation and maintenance cost may be even more costly. In traditional bidding mode, the initial purchase cost of vehicle attracts more attention in evaluation, while the huge energy consumption and maintenance costs tend to be ignored. By introducing the bidding mode of urban rail transit vehicle life cycle cost, the goal to achieve the overall benefit optimization for purchasing department is proposed, which will solve the disadvantages of the construction and operation division, consider the overall cost incurred in the vehicle life cycle.

Key words urban rail transit; vehicle; life-cycle cost; bidding

Author's address Guoxin Tendering Group Co., Ltd., 100044, Beijing, China

车辆作为城市轨道交通设备采购中的重中之重,随着城市轨道交通的快速发展,其采购量迎来了井喷式增长。2017年,国内共有20座城市发布了51次城市轨道交通研究车辆中标公告,市场订单

为9322辆,总金额达678.6亿元。

虽然678.6亿元已是极大的金额,但这只是城市轨道交通车辆的一次性购置成本。城市轨道交通车辆的设备寿命周期长达30年,其设备运行阶段所需的能耗、维护、检修、报废处置成本更高昂。这就是所谓的“冰山效应”,设备的初始购置成本仅是冰山一角,沉在水底下的隐性成本(运行和维护费用)才是构成全寿命周期成本的主体。但是在传统招标采购方式中,评标决策时比较注重城市轨道交通车辆的初始采购成本,易忽视车辆进入运营期后更为庞大的能耗成本及车辆维护成本,导致后期需承受巨大的资金压力。因此,在城市轨道交通车辆招标中,针对性地引入基于全寿命周期成本的分析方法具有重大的指导意义和现实意义。该方法能够引导车辆制造商在投标阶段更加注重方案优化和工艺改进,力求实现车辆在全寿命周期内的成本最小化,同样也为采购单位节约了大量资金并提升了运营管理质量。

1 全寿命周期成本的概念及其在招标应用中的特点

1.1 全寿命周期成本概念

全寿命周期成本指的是在产品全寿命周期内,为购买、制造、维持其正常运行或使用和最终报废需要发生的所有成本。根据时间的先后顺序可将产品的寿命周期划分为论证与研制阶段、生产阶段、使用阶段、报废处置阶段等,每一个寿命周期阶段都会对应一项成本。这种理念着眼于设备的全寿命周期,将未来运行期的信息向前集成,在采购阶段提前考虑整个流程后期的运营成本。

1.2 全寿命周期成本在招标应用中的特点

从全寿命周期的概念可以看出,全寿命周期成本是在满足安全、效能、可用率等条件的基础上,使产品在其寿命周期内成本最低的管理方法。由于运行期的费用可以通过计算模型估算,因此全寿命

周期成本的管理方法具有宏观预测、全面控制的特点。从招标角度而言,在采购阶段不仅要考虑建设阶段购置标的产品的价格,还要考虑产品在整个运行使用阶段所发生的能耗、维修保养以及报废处置的成本。在招标采购活动中,通过对设备全寿命周期的费用构成进行分析计算,以货币量化的全寿命周期成本作为评标决策的依据,在评标时按照招标文件的规定推荐全寿命周期成本最低的投标人为中标人,或者对其进行加分以提升其中标的概率。因此,基于全寿命周期成本分析进行招标采购具有“全系统、全费用、全过程”的特点。

2 全寿命周期成本理念在城市轨道交通车辆招标中的具体应用

车辆是城市轨道交通中最为关键的设备,具有以下鲜明特征:

1) 初始造价高。车辆设备初始购置费用高昂,约占工程总造价的 10%~15%。

2) 运维成本占比大。车辆设计运行寿命周期长达 30 年,后期的运行及维保成本更是一笔庞大的费用。

3) 可靠性要求高。车辆作为容纳乘客的运输载体,一旦发生故障将直接影响地铁运行,从而造成重大的社会影响和经济损失。

4) 前期可优化。车辆制造商可以通过改进方案、优化设计等方式降低故障发生率,提升设备可靠性水平,从而减少全寿命周期内发生的成本。

5) 后期可验证。在车辆投入运行一段时间后,可通过信息管理系统或现场巡检记录,对前期车辆制造商承诺的可用率、故障率、可维修性等可靠性指标进行验证。

在国内城市轨道交通车辆传统招标模式中,在采购阶段,建设管理部门的主要目的是控制概算、追求适当节资,因此比较关注车辆的初次投入成本。但是在车辆投入运行之后,运营管理部门承担着保障车辆可靠运行的责任,可能需要花费更多资金用于预防性维修及纠正性维修等。传统的车辆招标模式下,车辆制造商在可维护性方面不必花费太多精力,针对节能、降噪等运营期应注重的方面较少进行优化设计,在备品备件供应方面可能会采用不平衡报价且与运营维护脱节,造成质保期后备件采购价格过高。

结合上述城市轨道交通车辆的鲜明特点以及

消除传统招标模式弊端的现实需求,车辆采购可采用基于全寿命周期成本分析的创新性招标模式,以全寿命周期内成本合理且最低为主要采购目标和决策依据。这样一方面可将建设与运营部门紧密衔接起来,充分考虑车辆在制造、运行阶段的所有费用;另一方面也从采购源头引导车辆制造商主动提升研发工艺和技术水平,合理安排备品备件供应及价格设定,从而起到优化全寿命周期成本的目的。

基于车辆全寿命周期成本分析进行招标采购,关键在于合理准确地估算车辆的全寿命周期成本,以及制定完善全面的招标方案设计。

2.1 城市轨道交通车辆全寿命周期成本计算模型

根据车辆的特性,可将其全寿命周期成本分为 4 个部分,即车辆购置成本、车辆运营能耗成本、车辆维修保养成本和车辆回收处置成本,可表示为:

$$L_{CC} = C_A + C_O + C_M + C_D \quad (1)$$

式中:

L_{CC} ——全寿命周期成本;

C_A ——车辆购置成本;

C_O ——车辆运营能耗成本;

C_M ——车辆维修保养成本;

C_D ——车辆回收处置成本。

2.1.1 购置成本

车辆的购置成本可以表示为:

$$C_A = P + P_{yb} + P_f \quad (2)$$

式中:

P ——设备原价,包含车辆、备品备件、专用工具等;

P_{yb} ——运输保险费;

P_f ——服务费,包括设计联络费、人员培训、质量检查与试验等。

在目前国内的城市轨道交通车辆招标中,可以认为设备购置成本即为产品的投标报价。由于将设备购置期初设为折现基期,因此购置成本不受利率和通货膨胀的影响。

2.1.2 运营能耗成本

车辆投入运行至报废处置期间所产生的主要成本之一就是运营能耗成本,其构成可表示为:

$$C_O = \sum_{i=1}^n \left[P_{C,i} \times z \times \frac{1}{(1+r)^{i-1}} \times (1+C_{PI})^{i-1} \right] \quad (3)$$

式中:

$P_{C,i}$ ——设备第 i ($i=1,2,\dots,n$) 年的列车牵引

电能损耗, n 为全寿命周期年限;

z ——基年电费价格;

r ——利率(折现率),按年底计息;

C_{PI} ——消费价格指数,代表通货膨胀率。

2.1.3 车辆维修养护成本

车辆维修养护成本是车辆全寿命周期中最重要的成本,其构成可表示为:

$$C_M = \sum_{i=1}^n \left[(P_{H,i} + P_{B,i}) \times \frac{1}{(1+r)^{i-1}} \times (1+C_{PI})^{i-1} \right] + \sum_{m=1}^x P_{J,\alpha} \times \frac{1}{(1+r)^{a-1}} \times (1+C_{PI})^{a-1} + \sum_{n=1}^y P_{D,\beta} \times \frac{1}{(1+r)^{b-1}} \times (1+C_{PI})^{b-1} \quad (4)$$

式中:

$P_{H,i}$ ——按基年价格计算的人工费用;

$P_{B,i}$ ——按基年价格计算的车辆备件及耗材成本;

$P_{J,\alpha}$ ——按基年价格计算的车辆架修的费用,下标 α 表示第 m ($m=1,2,\dots,x$) 次架修时的年份;

$P_{D,\beta}$ ——按基年价格计算的车辆大修费用,下标 β 表示第 n ($n=1,2,\dots,y$) 次大修时的年份。

2.1.4 车辆回收处置成本

车辆回收处置成本表示如下:

$$C_D = (P_d - P_r) \times \frac{1}{(1+r)^{n-1}} \times (1+C_{PI})^{n-1} \quad (5)$$

式中:

P_d ——按基年价格计算的车辆报废时的回收成本,包括拆除费用、环保费用等;

P_r ——按基年价格计算的车辆报废后可回收的残值。

为便于直观展示全寿命周期成本组成,本文以常见的6辆编组列车(B型车)为例,对30年的全寿命周期成本进行分析。参考某地铁公司6B型列车的实际运营情况,设定的计算条件包括:

1) 基于近年各地6B型列车中标价情况,车辆购置成本设为620万元/辆。

2) 运营能耗成本计算中,车辆平均运行里程设为120 000 km/(车·年),工业用电价格为0.8元/kWh,平均能耗为1.6 kWh/(车·km)。

3) 车辆维修养护成本计算中,人工成本按12万/(人·年)计算,人员配置为3.4人/辆,备件及耗材成本为7万/辆。车辆架修及大修在全寿命周期

内按3次和2次计算。架修发生在第5年、第15年及第25年,大修则发生在第10年及第20年。其中,按基年价格计算的架修费用为560万/列,大修费用为1 200万/列。

4) 车辆回收处置成本按购置费用的5%计算,考虑到回收残值,因此为负数。

5) r 按当前人民币一年期贷款基准利率4.35%计算, C_{PI} 按2.5%计算。

将上述条件代入式(1)一式(4),可得到 C_A 为3 720万元, C_O 为2 118.514 9万元, C_M 为9 535.600 5万元, $C_D = -31$ 万元。

综上所述,按现值计算的 L_{CC} 为15 343.115 4万元。其中,初次的车辆购置费仅占全寿命周期费用的24%,而运营期能耗成本和车辆维护成本则分别约占14%和62%。由此也可看出运营期能耗成本和车辆维护成本在全寿命周期成本中有着不可忽视的重要性。因此,仅采用传统招标模式进行车辆采购不能体现车辆的全寿命周期成本费用,随着大数据的发展,现阶段已具备采用全寿命周期成本招标模式进行车辆采购的条件。

2.2 城市轨道交通车辆基于全寿命周期成本分析的招标方案设计

在传统的城市轨道交通车辆招标模式中,采购单位只与车辆制造商签订供货合同,即只采购车辆设备。在运营期的车辆日常维护保养方面,采购单位通常采取自主维修模式。在车辆深度保养方面,由于运营单位专业维护设备和维保人员专业技术水平的限制,车辆架修和大修则需要依托车辆生产厂商进行。在这种招标模式下,建设采购与运营需求互相割裂,无法形成协同效应。

若采用基于全寿命周期成本分析的招标方式,则可将车辆设备与运营管理作为项目整体进行统一招标。这样做的优点主要有:

1) 可以促使车辆承包商通过轻量化设计、空调及照明节能优化等方面进一步挖掘潜力降低能耗,为运营单位节约能耗费用。

2) 促使车辆制造商提高车辆可维护性,提高产品质量,降低故障率,延长部件寿命,逐步从“计划修”过度至“状态修”。

3) 引入互联网技术,建设完善智能化运维系统,利用人工智能、大数据等现代技术,减少人工成本,提升维保力量。因此,在城市轨道交通车辆整体招标采购中合理引入全寿命周期成本管理思想,

有助于充分发挥车辆制造商维修维护的专业性优势,大幅降低运营单位的维护成本。

2.2.1 根据自身需要确定招标范围

基于全寿命周期成本分析进行招标方案设计时,招标范围除了传统招标模式中的车辆供货之外,还可以进一步扩大到全寿命周期运营管理服务。全寿命周期运营管理服务费用主要包括车辆运行电耗费用、车辆运行及维护成本、车辆备件成本等。

首先可在传统招标范围的基础上增加车辆维保,即相应车辆在 30 年全寿命周期内的运营管理,包括但不限于满足车辆正常运营所需要的车辆保养检修、备件和易耗件的提供及更换、架修、大修等全部工作。这样能促使车辆制造商在制造期就选用可靠性更高的技术方案和关键零部件以降低故障率,通过批量采购的议价权控制备件成本,而且在维保方面可利用既有的技术人员充分发挥专业性优势,以及通过优化修程、精简修制大幅提升维修效率。

在上述招标范围的基础上还可增加电费,即在全寿命周期内的全部牵引能耗和车辆空调照明用电费用。由于牵引能耗成本较高,车辆制造商必须采用更充分的轻量化设计和节能设计,以优化能耗成本。

在上述基础上还可以增加司机服务,即列车的驾驶服务费用。车辆制造商通过优化管理,可优化司机配置比例,还可培养同时具备驾驶技能和车辆维护技能的复合型生产人员,以进一步提升效率。

当前各地的城市轨道交通建设进度和运营管理成熟度差距较大,各地可以根据实际情况选择符合自身要求的招标范围组合。比如北京、上海、广州等城市已经在车辆运营、维修管理方面积攒了丰富的经验和培养了众多优秀专业人才,可以考虑仅将电费以及部分维修养护成本(比如全寿命周期备品备件的提供)等划入招标范围。这样一方面可以享受全寿命周期成本控制带来的益处,还可以充分发挥自身的车辆维保经验及专业人员力量。但目前还有许多城市只开通了一条地铁线路或地铁线路还未正式开通运营,导致人才储备和经验积累不足。如果继续沿着自建车辆运营管理队伍的思路前进,则需要较长的培养时间以及高昂的学习成本。在这种情况下,则可以考虑在采购时尽量扩大招标范围,比如选择含“采购+维保+电费+司机”的

全方位车辆服务,以充分利用车辆制造商的专业技术优势和专业人员储备。

2.2.2 投标报价方式的确定

在招标文件中,可规定投标人按照车辆供货范围和全寿命周期车辆运营管理服务两部分进行报价。其中,全寿命周期运营管理服务报价由投标人根据事先确定的招标范围进行报价。由于车辆的运营服务期限很长,为了有效控制成本,需要设置合理的控制价。车辆全寿命周期成本控制价计算既是全寿命周期成本招标中的难点,也是全寿命周期成本招标的核心。城市轨道交通车辆作为高价值的复杂设备系统,其全寿命周期长达 30 年,具有设备寿命周期长、费用组成多、成本影响因素多等特点。为了更为准确科学地计算控制价,一方面应穷尽列举所有可以事先清晰界定的边界条件,另一方面也可以委托第三方机构计算招标控制价。为了不使投标人的报价过于离散,投标人应按照给出的招标范围、边界条件和控制价合理计算自身的投标价,以确保实现全寿命周期成本最低的管控目标。

2.2.3 评标办法的设定

在当前中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会下发的评标办法模板中,采用的是综合评价法,分别从商务、技术、价格及国产化 4 个部分进行评审。为了平稳进行招标模式的转变,若立即按照全寿命周期成本最低作为中标依据则显得过于仓促。因此,建议在保持当前综合评价法的前提下,提高价格的评分权重,并在价格评议中对全寿命周期成本进行着重打分,评分标准向全寿命周期成本低价有利的方向倾斜。同时,可在商务、技术评分中,加强对投标人本地化维保实力、大架修配套能力、运营期可靠性指标、故障响应时间、全寿命周期维保方案、全寿命周期车辆运营管理方案等进行评分,引导投标人主动优化全寿命周期成本管理。

2.2.4 合同费用支付及特殊条款设定

在确定中标人后中,采购单位将与中标人分别签订车辆供货合同和车辆全寿命周期运营管理服务的框架协议。车辆供货合同的费用使用建设投资,车辆全寿命周期费用纳入运营成本逐年列支。在车辆供货合同中,支付条款与传统招标项目可保持一致。对于车辆全寿命周期运营管理服务框架协议,采购单位根据事先约定的合同条款按年度对车辆制造商进行绩效考核,根据考核结果按年进行支付。

在采用基于全寿命周期成本的招标方案时,双方签订的合同中除了常规的双方权利义务、主要技术条款之外,还应包括列车服务可靠度、列车退出正线运营故障率、车辆系统故障率等技术参数的保证指标和保证条款。同时在合同中应详细规定处罚条款,当实际运行期间的性能指标统计与投标文件不符时,确因车辆制造商原因造成的,则应按照合同约定的罚则进行处罚。

3 结语

城市轨道交通车辆采用基于全寿命周期成本分析的招标采购模式,使得采购阶段即统筹考虑后期能耗、维修保养及报废处置的成本,有利于实现整体效益最大化,对于城市轨道交通建设、运营单位和车辆制造商而言都能达到双赢。国家发改委近日发布《加强城市轨道交通车辆投资项目监管有关事项的通知》,要求“引导现有城市轨道交通车辆制造、组装企业向车辆架修、大修和维保业务转型。”在今后车辆新造业务逐步萎缩的行业背景下,推行包含车辆维保等内容在内的创新性招标模式,可以让各个车辆制造商充分发挥其专业技术优势,有利于逐渐将渐显过剩的城市轨道交通车辆新造

产能转化为维保能力,保持城市轨道交通制造企业的健康持续发展。

尽管有其显而易见的优势,但基于全寿命周期成本分析进行城市轨道交通车辆招标作为一种创新性招标模式,具体落实到实践中还需要一定的时间,需要各个相关单位人员共同努力和完善。但是全寿命周期成本理念作为一种更加科学的管理理念,应用在城市轨道交通车辆招标中有利于实现多方共赢的局面,因此城市轨道交通车辆招标从传统招标模式向全寿命周期成本招标模式转变一定是未来的发展方向。

参考文献

- [1] 皇甫小燕.城市轨道交通车辆全寿命周期成本探讨[J].城市轨道交通研究,2012(5):8.
- [2] 曹杨.基于LCC理论的电力设备采购评标办法及其应用研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [3] 伏晓.全寿命周期成本(LCC)理论在电力设备招标采购中的应用研究[D].广州:暨南大学,2014.
- [4] 李鸿雁.全寿命周期成本在国家电网公司招标管理中的应用研究[D].北京:华北电力大学,2012.
- [5] 蒋钧,谭飞.城市轨道交通车辆全寿命周期成本分析[J].土木工程与管理学报,2014(2):91.

(收稿日期:2018-08-28)

(上接第152页)

点,可以大大降低试验过程中的时间成本和经济成本,因此具有良好的应用前景。

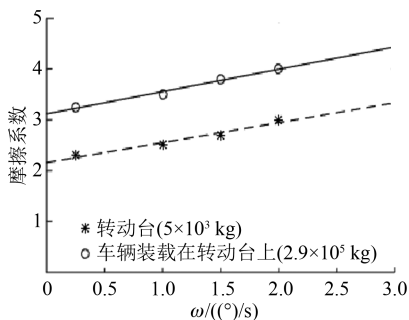


图5 测试台摩擦特性

2) 针对该移动式测试台,利用仿真软件建模研究转向架不同悬挂元件对回转阻力系数的影响。发现转动角速度增大时,回转阻力系数增大;空气弹簧处于正常状况和过充状态时,对回转阻力系数影响不大,但是当空气弹簧失气时,车体质量落在橡胶堆弹簧上,会使得回转阻力系数明显增大;其他元件中,横向止档对回转阻力系数几乎无影响,

中心销和牵引拉杆会对其产生一些影响,但影响相对微弱。除此之外,对测试台本身的摩擦特性进行了研究,可为实际试验过程提供参考。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家监督管理总局,中华人民共和国国家标准化管理委员会.铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范:GB/T 5599—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [2] 刘启灵,向涌.换轨车转向架回转阻力矩优化计算[J].铁道车辆,2014(10):5.
- [3] 曹晓宁,刘玉梅,苏建,等.转向架与车体间的回转阻力矩测定[J].上海交通大学学报,2013(6):979.
- [4] 石怀龙,邬平波,罗仁.客车转向架回转阻力矩特性[J].交通运输工程学报,2013(4):45.
- [5] TORRENS S, LONDON E. Resistance of Railway Vehicles to Derailment and Roll-Over: GM/RT 2141—2009[S]. Detroit: General Motors, 2009.
- [6] MIGUEL A, ASIER A, JORDI V. A new parameter identification methodology for the bogie rotational resistance test of a rail vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016(3): 879.

(收稿日期:2018-08-16)