

基于用户工况的氢能源汽车经济性敏感度分析

赵金刚 郭凤刚 李松涛

(北汽福田汽车股份公司,北京 100085)

【欢迎引用】赵金刚,郭凤刚,李松涛.基于用户工况的氢能源汽车经济性敏感度分析[J].汽车文摘,2025(7):57-62.

【Cite this paper】ZHAO J G, GUO F G, LI S T. Economic Sensitivity Analysis of Hydrogen Energy Vehicles Based on User Operating Conditions[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(7): 57-62.

【摘要】为了探究有无补贴市场下氢能源重型载货车的经济性,通过建立氢能源汽车性能仿真模型及总拥有成本(TCO)模型,对比研究基于用户工况下满足整车动力性需求的不同动力配置、氢气价格及百公里氢耗敏感性。结果表明,动力配置对整车成本的影响显著,匹配燃料电池系统功率越大,整车成本越高。氢能重型载货车在有无补贴市场均需适配应用场景,补贴市场下虽可盈利,但能力偏弱,无补贴市场下,氢气价格低于21元/kg能实现盈利。100 km氢耗量对成本影响显著,补贴市场下氢耗低于12 kg可盈利,低于9 kg经济性媲美燃油重型载货车,无补贴市场需控制在10 kg以内才可能盈利。研究结果为氢能源汽车进一步商业化提供了技术理论依据,对行业发展具有一定的参考意义。

关键词:氢燃料电池汽车;整车模型;经济性

中图分类号:U469.72+2 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240037

Economic Sensitivity Analysis of Hydrogen Energy Vehicles Based on User Operating Conditions

Zhao Jingang, Guo Fenggang, Li Songtao

(Beiqi Foton Motor Co., Ltd., Beijing 100085)

【Abstract】To investigate the economic feasibility of hydrogen-powered heavy-duty trucks in both subsidized and non-subsidized markets, a hydrogen vehicle performance simulation model and a Total Cost of Ownership (TCO) model are established. Through comparative analysis of different powertrain configurations meeting dynamic performance requirements under user-specific operating conditions, as well as sensitivity studies on hydrogen pricing and energy consumption per 100 km, several critical findings are obtained as following. Powertrain configuration significantly impacts total vehicle cost, with higher fuel cell system power leading to increased overall costs. Hydrogen-powered heavy trucks require scenario-specific adaptations in both market types. While profitability is achievable in subsidized markets, the margin remains narrow. In non-subsidized markets, economic viability requires hydrogen prices below 21 RMB/kg. The study reveals substantial sensitivity to hydrogen consumption, with profitability thresholds established at <12 kg/100 km in subsidized markets and <10 kg/100 km in non-subsidized environments. Notably, when consumption falls below 9 kg/100 km in subsidized markets, economic performance becomes comparable to conventional diesel trucks. These findings provide theoretical foundations and technical references for advancing hydrogen vehicle commercialization, offering valuable insights for industry development.

Key words: Hydrogen fuel cell vehicle, Vehicle model, Economy

0 引言

在能源危机与节能减排背景下,氢能源汽车具有绿色环保和续航里程长的优势,特别适用于中长途、中重型商用车场景,是目前氢能应用的重要领

域,被视为绿色低碳交通的有效解决方案之一^[1-2]。然而,目前氢能源汽车制造成本高、氢气价格高且100 km氢耗高,制约了行业的发展。同时受制于加氢站基础配套设施建设滞后影响,当前的氢能源汽车仍不能覆盖传统商用车的全部应用场景^[3]。本文

通过对实际场景工况下氢能重型载货车进行动力配置差异敏感性、氢气价格敏感性及 100 km 氢耗敏感性分析,旨在研究有、无补贴市场下氢能重型载货车的经济性。

1 整车性能目标分析

1.1 应用场景分析

目前,氢能重型载货车的市场需求按场景可分为:矿区倒短、厂区倒短、港口牵引、城市渣土、城市环卫、物流配送等^[3]。这些应用场景的共同特点是区域相对封闭,或者运营路线相对固定,方便建设加氢站等基础设施^[3]。根据市场需求,选取具有代表性的某厂区到港口(场外)和厂内倒短(场内)的用户工况作为本研究的应用场景,主要车型为 49 t 重型载货车。本文分别从企业情况、车辆情况、运行情况及经营情况 4 个方面提取关键信息,如表 1 所示。

表 1 应用场景基本信息

类型	明细	内容	备注
企业情况	运输发包方(运费结算主体)	某货运物流有限公司	
	承运方	某物流有限公司	
	发包方年货物运输需求量/ $\times 10^4$ t	100	TEU 箱
车辆情况	现有运输车辆数/辆	200~300	
	现有车辆基本情况	49 t 重型载货车	
	实际载装质量/t*	20~35	
运行情况	单边行驶距离/km*	3~10	
	运输路线(起点-终点)	厂站到前沿码头	
	运输情况*	厂内倒短,厂外满载去空载回	
	平均日行驶趟数*	20	
	100 km 氢耗/L	12	
	100 km 电耗/kW·h	190	
经营情况	运输单价/元*	100	厂内单趟
	运费结算情况	3 个月	
	年维修保养费/元·年 ⁻¹	1 000~2 000	
	年保险费/元	28 000	
	年均油价/元·L ⁻¹	8	
	当地落地电价/元·(kW·h) ⁻¹ *	1.2	含服务费

注:标“*”的明细项为需要重点关注的信息。

根据表 1 提炼得到基于应用场景的信息,如表 2 所示。

表 2 基于应用场景的信息

名称	内容	备注
车型	49 t 重型载货车	
日行驶里程/km	300	
满/空载车速/km·h ⁻¹	30~60	场景 1:场内
满/空载车速/km·h ⁻¹	30~60/60~70	场景 2:场外
装载量/kg	35 000	
总质量/kg	49 000	

1.2 整车性能目标设定

根据实际场景工况信息,拟开发车型性能目标初步设定,如表 3 所示。为便于后续研究的一致性,依据一线调研数据,初步设定 100 km 耗氢量为 12 kg、100 km 耗电量为 190 kW·h,同时为满足表 2 中提到的日行驶里程 300 km,设定整车总续驶里程为 300 km。

表 3 整车性能目标设定值

名称	目标设定	备注
最高车速/km·h ⁻¹	89	
巡航车速/km·h ⁻¹	60	
持续爬坡度/%	4	满载 40 km/h
持续爬坡度/%	12	满载 15 km/h
最大爬坡度/%	30	满载 5 km/h
100 km 氢耗/kg	12	基于实际调研设定值
100 km 耗电量/kW·h	190	基于实际调研设定值
总续驶里程/km	300	基于实际调研设定值

基于表 3 的整车性能目标,建立整车仿真分析模型,通过动力经济性匹配计算得出整车的总功率和扭矩需求,如表 4 所示。

表 4 基于整车性能目标计算的总功率和扭矩需求

额定转速/最大转速/r·min ⁻¹	1 550/2 530
额定功率/峰值功率/kW	238/324
额定扭矩/峰值扭矩/N·m	1 464/3 287

2 整车动力配置敏感度分析

为探究不同动力配置对整车成本的影响,列举了两种燃料电池系统动力总成方案(方案 1:90 kW,方案 2:128 kW),同时为满足总续驶里程 300 km 的需求,分别匹配储氢量为 29.88 kg 的 6 瓶组和储氢量为 39.84 kg 的 8 瓶组 2 种氢系统方案,如表 5 所示。通过 2 种动力配置组合分析燃料电池系统功率、氢系统储氢量、动力电池容量对整车成本的敏感性。

参考目前的行业价格对上述 2 种动力总成方案的整车成本进行敏感度分析,如表 6 所示。由于当前燃

料电池系统与动力电池相比无价格优势,与同需求纯车型对比相差较大。方案2与方案1相比,整车成本明显上升,表明不同的动力配置对整车成本敏感度影响较大。

表5 基于整车性能目标的动力总成匹配方案

49 t 重型载货车		方案1	方案2
整车性能	100 km 氢耗/kg	12	12
	100 km 耗电量/kW·h	190	190
	纯电续航里程/km	249	249
	纯电续航里程/km	62.32	46.32
	总续航里程/km	311.32	295.32
动力总成匹配	燃电系统/kW	90	128
	动力电池/kW·h	148	110
	储氢量/kg	29.88	39.84

表6 不同动力配置对整车成本敏感度分析

49 t 重型载货车	方案1	方案2	对标同需求EV车型
不含动力总成的底盘/万元	44.3	44.3	44.3
燃电+储氢系统+动力电池/万元	70.76	81.40	33.84
整车成本/万元	115.06	125.7	78.14

3 整车总拥有成本(TCO)分析

3.1 TCO 计算模型

总拥有成本(Total Cost of Ownership, TCO)^[4]的完整模型包括购置成本、使用成本、维护成本、车辆折旧和环境成本,计算公式为:

$$TCO=C_p+C_u+C_m-C_s-C_e \quad (1)$$

式中:TCO为总拥有成本, C_p 为购置成本, C_u 为使用成本, C_m 为维护成本, C_s 为车辆折旧, C_e 为环境成本。

选取传统燃油重型载货车和纯电重型载货车作

为参考,建立3种车型的TCO模型,其涉及的项目差异如表7所示。

3.2 TCO 分析

由于不同应用场景的月收入与运维费用有差异,本文分别对场景1(场内)和场景2(场外)进行对比分析,并同时分析了有无补贴对氢能源重型载货车盈利能力及价格的影响。

场内TCO分析结果如表8所示。氢能源重型载货车在有国补和地补的情况下盈利能力较强,年盈利108 360元,在仅有国补的情况下年盈利仅有8 080元,无补贴的情况下则年亏损约92 200元。若按当前氢源价格30元/kg,100 km氢耗为8.6 kg以下或者按当前100 km氢耗12 kg计算,在氢源价格为21元/kg以下时,氢能源重型载货车才能扭亏为盈。

为进一步分析场内无补贴市场下的整车价格影响因素,以49 t燃油对标车型年盈亏为结果导向,在100 km氢耗10 kg、氢源价格为23元/kg时,氢能源重型载货车价格为100万元;在100 km氢耗10 kg、氢源价格为20元/kg时,氢能源重型载货车价格为114.1万元;在100 km氢耗10 kg、氢源价格为15元/kg时,氢能源重型载货车价格为138.1万元。

场外TCO成本分析结果如表9所示。氢能源重型载货车在有国补和地补的情况下盈利能力较强,年盈利可达96 360元,在仅有国补的情况下年亏损3 920元,无补贴的情况下年亏损则达104 200元。若按当前氢源价格为30元/kg,在100 km氢耗为8 kg以下或者按当前100 km氢耗12 kg计算,在氢源价格低于20元/kg时,氢能源重型载货车才能扭亏为盈。

为进一步分析场外无补贴市场下的整车价格影响因素,以49 t燃油对标车型年盈亏为结果导向,在

表7 不同车型TCO模型差异

项目	传统燃油重型载货车	纯电重型载货车	氢能源重型载货车
购置成本(C_p)差异	车型:发动机+变速器+油箱 有购置税 无政策补贴	车型:动力电池系统+电驱系统+电控系统 无购置税 目前有政策补贴	车型:燃料电池系统+储氢系统+匹配的动力电池+电驱系统+电控系统 无购置税 目前有政策补贴
使用成本(C_u)差异	柴油 保险费用 有车船税	电能 保险费用 免车船税	氢气 保险费用 免车船税
维护成本(C_m)差异	内燃机定期维保成本	动力电池系统定期维护成本	燃料电池系统、动力电池系统定期维护成本
车辆折旧(C_s)差异	内燃机残值	动力电池残值	燃料电池系统残值 动力电池残值
环境成本(C_e)差异	加油便利、加注快速 无路权偏向 车辆载货空间大	充电便利性差、充电时间长 存在路权偏向 挤占较大的车辆载货空间	加氢便利性差、加注快速 存在路权偏向 挤占较小的车辆载货空间

表8 49 t重型载货车TCO分析-场景1(场内)

项目	国补和地补	国补	无补贴	-	-	建议1	建议2	建议3
车型	燃电车1	燃电车2	燃电车3	纯电车	燃油车	燃电车4	燃电车5	燃电车6
补贴前购置价/万元	140.0	140.0	140.0	75.0	50.0	100.0	114.1	138.1
补贴/万元	100.3	50.1	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0
补贴后购置价/万元	39.7	89.9	140	72.2	50	100	114.1	138.1
残值5%/万元	7.0	7.0	7.0	3.8	2.5	5.0	5.7	6.9
2年资金成本6%/万元	16.8	16.8	16.8	9.0	6.0	12.0	13.7	16.6
折旧 测算 (5年)	年均折旧/万元	9.9	19.9	30.0	15.5	10.7	21.4	29.6
	年均增值税收益/万元	3.6	3.6	3.6	2.0	1.3	2.6	3.0
	月折旧金额/元	5 220	13 577	21 933	11 283	7 833	15 667	21 636
日均里程/km	300	300	300	300	300	300	300	300
月均工作日/天	25	25	25	25	25	25	25	25
平均100 km能耗/kg	12	12	12	190	45	10	10	10
燃料价格/元·kg ⁻¹	30.0	30.0	30.0	1.2	8.0	23.0	20.0	15.0
燃料费用/元·月 ⁻¹	27 000	27 000	27 000	17 100	27 000	17 250	15 000	11 250
驾驶员工资/元·月 ⁻¹	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000
运维费用/元·月 ⁻¹	4 250	4 250	4 250	2 500	2 300	4 250	4 250	4 250
月使用成本/元	44 470	52 827	61 183	38 883	45 133	45 167	45 126	45 136
月收入/元	53 500	53 500	53 500	53 500	53 500	53 500	53 500	52 500
年盈亏/元	108 360	8 080	-92 200	175 400	100 400	100 400	100 400	100 400

注:考虑到电堆更换情况,按照300 km/天,一个月工作25天测算,5年运行里程为45万km;运维费用包含了保险费、轮胎费、维护费和保养费。

表9 49 t重型载货车TCO分析-场景2(场外)

项目	国补和地补	国补	无补贴	-	-	建议1	建议2	建议3
车型	燃电车1	燃电车2	燃电车3	纯电车	燃油车	燃电车4	燃电车5	燃电车6
补贴前购置价/万元	140.0	140.0	140.0	75.0	50.0	99.8	114.2	138.2
补贴/万元	100.3	50.1	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	0.0
补贴后购置价/万元	39.7	89.9	140	72.2	50	99.8	114.2	138.2
残值5%/万元	7.0	7.0	7.0	3.8	2.5	5.0	5.7	6.9
2年资金成本6%/万元	16.8	16.8	16.8	9.0	6.0	12.0	13.7	16.6
折旧 测算 (5年)	年均折旧/万元	9.9	19.9	30.0	15.5	10.7	21.3	29.6
	年均增值税收益/万元	3.6	3.6	3.6	2.0	1.3	2.6	3.0
	月折旧金额/元	5 220	13 577	21 933	11 283	7 833	15 629	21 651
日均里程/km	300	300	300	300	300	300	300	300
月均工作日/天	25	25	25	25	25	25	25	25
平均100 km能耗/kg	12	12	12	190	45	10	10	10
燃料价格/元·kg ⁻¹	30.0	30.0	30.0	1.2	8.0	23.0	20.0	15.0
燃料费用/元·月 ⁻¹	27 000	27 000	27 000	17 100	27 000	17 250	15 000	11 250
司机工资/元·月 ⁻¹	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000	8 000
运维费用/元·月 ⁻¹	4 250	4 250	4 250	2 500	2 300	4 250	4 250	4 250
月使用成本/元	44 470	52 827	61 183	38 883	45 133	45 129	45 134	45 151
月收入/元	52 500	52 500	52 500	52 500	52 500	52 500	52 500	52 500
年盈亏/元	96 360	-3 920	-104 200	163 400	88 400	88 400	88 400	88 400

注:考虑到电堆更换情况,按照300 km/天,一个月工作25天测算,5年运行里程为45万km;运维费用包含了保险费、轮胎费、维护费和保养费。

100 km 氢耗 10 kg、氢源价格为 23 元/kg 时,氢能源重型载货车售价为 99.8 万元;在 100 km 氢耗 10 kg、氢源价格为 20 元/kg 时,氢能源重型载货车售价为 114.2 万元;在 100 km 氢耗 10 kg、氢源价格 15 元/kg 时,氢能源重型载货车售价为 138.2 万元。

3.3 氢气价格敏感度分析

对 3.2 节 TCO 分析结果进行信息提取,如表 10 和表 11 所示,以纯电重型载货车与燃油重型载货车作为参照,分析有无补贴情况下的氢能源整车对氢气价格敏感性。

表 10 国补下整车 TCO 结果部分信息

项目	燃电重型载货车	纯电重型载货车	燃油重型载货车
C_p 购置成本/万元	89.86	72.20	50.0
C_s 残值/万元	7.00	3.75	2.50
年行驶里程/ $\times 10^4$ km	9	9	9
100 km 能耗	12 kg	190 kW·h	45 L
每月运维费用/元	4 250	2 500	2 300

表 11 无补贴下整车 TCO 结果部分信息提取

项目	燃电重型载货车	纯电重型载货车	燃油重型载货车
C_p 购置成本/万元	140.0	72.2	50.0
C_s 残值/万元	7.00	3.75	2.50
年行驶里程/ $\times 10^4$ km	9	9	9
100 km 能耗	12 kg	190 kW·h	45 L
每月运维费用/元	4 250	2 500	2 300

在有国补的情况下,氢能源重型载货车的购置成本为 89.86 万,仍为三者中最高。进一步分析不同氢气价格、不同类型重型载货车的 TCO,如图 1 所示,当氢气价格为 30 元/kg 时,氢能源重型载货车已经开始盈利;当氢气价格低于 22 元/kg 时,氢能源重型载货车的经济性将高于燃油重型载货车;当氢气价格低于 15 元/kg 时,氢能源重型载货车在 3 种车型中经济性最好。

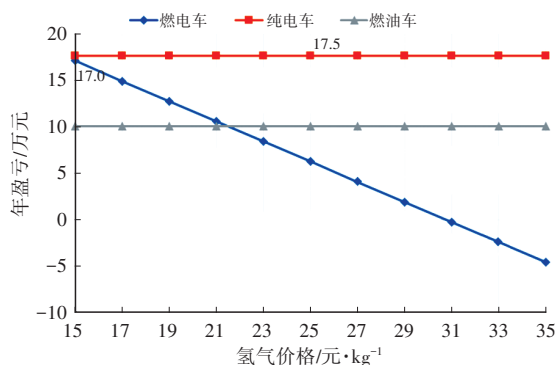


图 1 国补下整车对氢气价格敏感度分析

在无补贴情况下,如图 2 所示,当氢气价格低于 21 元/kg 时,氢能源重型载货车开始盈利;当氢气价格低于 15 元/kg 时,氢能源重型载货车的经济性仍为三者最低。

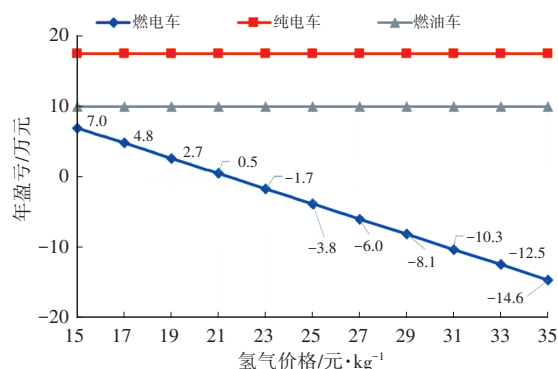


图 2 无补贴下整车对氢气价格敏感度分析

3.4 100 km 氢耗敏感度分析

对 3.2 节 TCO 分析结果进行信息提取,如表 12 和表 13 所示,将纯电重型载货车与燃油重型载货车作为参照,分析有无补贴情况下的氢能源整车对 100 km 氢耗的敏感性。

表 12 国补下整车 TCO 结果部分信息提取

项目	燃电重型载货车	纯电重型载货车	燃油重型载货车
C_p 购置成本/万元	89.86	72.20	50.00
C_s 残值/万元	7.00	3.75	2.50
年行驶里程/ $\times 10^4$ km	9	9	9
能源价格	30 元/kg	1.2 元/kW·h	8 元/L
运维费用/元/月	4 250	2 500	2 300

表 13 无补贴下整车 TCO 结果部分信息

项目	燃电重型载货车	纯电重型载货车	燃油重型载货车
C_p 购置成本/万元	140.0	72.2	50.0
C_s 残值/万元	7.00	3.75	2.50
年行驶里程/ $\times 10^4$ km	9	9	9
能源价格	30 元/kg	1.2 元/kW·h	8 元/L
运维费用/元/月	4 250	2 500	2 300

根据市场调研,氢能源重型载货车的 100 km 氢耗在 7~18 kg 范围内。如图 3 所示,在有国补情况下,当 100 km 氢耗低于 12 kg 时,氢能源重型载货车开始盈利;当 100 km 氢耗低于 9 kg 时,氢能源重型载货车的经济性和燃油重型载货车相当,但仍低于纯电重型载货车。

在无补贴情况下,如图 4 所示,氢能源重型载货车 100 km 氢耗只有达到 8.5 kg 才能实现盈利,在 3 种车型中经济性仍为最低。

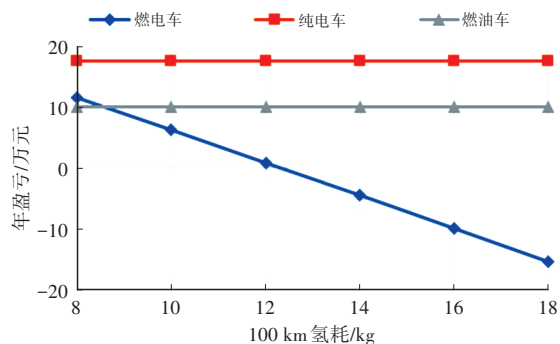


图3 国补下整车对100 km氢耗敏感度分析

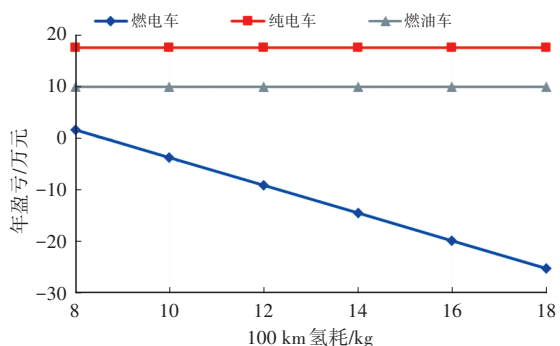


图4 无补贴下整车对100 km氢耗敏感度分析

4 结束语

本文基于实际应用场景,全面分析了在有无补贴市场下不同动力配置、氢气价格及100 km氢耗对氢能源汽车经济性的影响,研究结果如下:

(1)通过匹配计算得出满足整车性能需求的不同动力总成方案,分析了动力配置对氢能源整车成本的影响,即匹配燃料电池系统功率越大整车成本就越

高,因此需在设计开发阶段综合考虑动力匹配方案。

(2)氢能源重型载货车在有无补贴市场情况下,均需要有很好的应用场景,在补贴市场氢能源重型载货车可实现盈利,但盈利能力弱于其他车型;在非补贴市场当氢气价格低于21元/kg时,氢能源重型载货车开始盈利,同时以对标49 t燃油车年盈亏为结果导向进一步分析无补贴市场下氢气价格对整车价格的影响,综上积极探索寻找廉价的氢源,降低用氢成本对于降低氢能源重型载货车使用成本至关重要。

(3)整车100 km氢耗对于降低其使用成本同样尤为重要。在补贴市场,当100 km氢耗<12 kg时,氢能源重型载货车可实现盈利,当100 km氢耗<9 kg时,氢能源重型载货车的经济性与燃油重型载货车相当;在非补贴市场,只有100 km氢耗低于10 kg,才有可能实现盈利。这要求整车有更合理的能量管理策略,助推整车节能技术的不断创新,对于整车企业具有现实指导意义。

参考文献

- [1] 秦志东, 张志芸, 赵宏建, 等. 氢燃料电池商用车氢安全保障技术研究[J]. 汽车文摘, 2023(8): 31-35.
- [2] 曹瑜. 液氢燃料电池汽车动力系统及能量管理策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [3] 刘青, 刘勇, 姚哲皓, 等. 中重型新能源卡车应用场景与模式浅析[J]. 汽车与配件, 2021(17): 55-57.
- [4] 田新华. A公司基于TCO的采购成本管理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

(责任编辑 明慧)