

引用格式:邹永莉,邓志强,李同翔,等.油田注水井能耗评价方法与应用[J].油气藏评价与开发,2020,10(5):98-102.

ZOU Y L, DENG Z Q, LI T X, et al. Energy consumption evaluation method of oilfield injection wells and its application[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(5): 98-102.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.05.014

油田注水井能耗评价方法与应用

邹永莉¹,邓志强¹,李同翔²,贺三¹,刘航¹

(1.西南石油大学石油与天然气工程学院,四川成都610500;2.中国石化重庆天然气管道有限责任公司,重庆408000)

摘要:为了找出能耗异常的注水井,对油田注水井进行能耗评价。基于能量守恒定律,建立了单泵单井模型,推导出单井输入功率与单井单位注水量电耗的线性关系式,并据此提出直线截距法和单耗节能率法,分别对注水系统和注水井进行能耗评价。利用我国西北地区A油田与东北地区B油田的部分注水系统数据进行了验证。结果表明,通过理论分析并结合现场数据可知,单井输入功率与单井单位注水量电耗存在线性关系,直线斜率和截距综合反映了注水系统以及注水井的能耗情况。利用直线截距法对注水系统进行评价,评价结果与传统的系统效率法基本吻合。利用单耗节能率法对注水井进行能耗评价,可找出能耗异常的注水井,结合现场实际情况,分析原因并采取相应的措施,从而提高注水系统效率。

关键词:注水井;能耗评价;单泵单井模型;直线截距法;单耗节能率法

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Energy consumption evaluation method of oilfield injection wells and its application

ZOU Yongli¹, DENG Zhiqiang¹, LI Tongxiang², HE San¹, LIU Hang¹

(1.School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2.Chongqing Natural Gas Pipeline Co., Ltd., SINOPEC, Chongqing 408000, China)

Abstract: In order to find the injection wells with abnormal energy consumption, the energy consumption evaluation has been carried out for them. Based on the law of energy conservation, the model of single-pump corresponding to single-well is established, and the linear relationship between input power and power consumption per unit injection rate of single wells is deduced. Therefore, the straight line intercept method and the unit consumption energy saving rate method are put forward to evaluate the energy consumption of water injection systems and injection wells respectively. The results are verified by data from some water injection systems in oilfield-A in northwest and oilfield-B in northeast China. The results show that, according to theoretical analysis and field data, there is a linear relationship between the input power and the power consumption per unit of injection of a single well. The slope and intercept of straight line reflect the energy consumption of injection system and water injection well. The evaluation results of the injection system using the linear intercept method are basically consistent with the traditional system efficiency method. In addition, the evaluation of the energy consumption of injection wells by the unit consumption energy saving rate method can help to identify the injection wells with abnormal energy consumption. Combined with the actual situation on the site, the causes can be analyzed and the corresponding measures are taken to improve the efficiency of injection system.

Key words: injection well, energy consumption evaluation, single pump single well model, linear intercept method, unit consumption energy saving rate method

油田注水是油田开发过程中向地层补充能量、提高油田采收率的重要手段之一。由于油层的非均质性,可能出现注水井注水压力差别大,以一个注水压力系统满足油田多层系注水,势必造成配水间单井阀门控制节流损失过大,导致注水系统单位注水

量电耗增大。因此,有必要对注水井进行能耗评价,找出注水能耗高的注水井,从而提高注水系统运行效率。目前,大量学者从注水节能监测、提高注水系统效率以及优化注水系统方面开展了大量的研究,而对注水井的研究主要集中在节能降耗方

收稿日期:2019-03-19。

第一作者简介:邹永莉(1981—),女,硕士,助理实验师,油气集输与油田节能降耗理论与应用研究。地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail:15930933@qq.com

面^[1-7]。万春利^[8]认为注水井注入能力影响着注水系统的能耗,通过建立油田注水系统地上、地下能耗、效率分析等计算模型,编制相应评价软件可指导油田生产。孙冰等^[9]认为井泵压差是注水系统中最大的压差,应首先降低注水井井泵压差才能挖掘注水系统的节能潜力。雷钧等^[10]认为单井输入功率与单井单位注水量电耗是线性关系,利用二者的线性关系可对注水井进行节能评价。

在已有的评价方法中,传统的系统效率法可对注水系统进行能耗评价,但系统效率法不能对注水井进行能耗评价,无法反映注水井能耗的高低,而油田现场迫切需要找出能耗高的注水井,从而采取相应的措施降低能耗。为此,本文基于能量守恒定律,推导出单井输入功率和单井单位注水量电耗的关系,结合油田现场数据进行了验证,并提出评价方法对注水系统以及注水井进行能耗评价。

1 能耗评价体系

1.1 参数计算方法

注水系统的单位注水量电耗测试和计算严格按照国家标准 GB/T 33653—2017《油田生产系统能耗测试和计算方法》规定执行^[11]。

1.2 能耗评价体系的确立

通常情况下,注水系统中每台注水泵连接着数十口注水井,无法测算出每口井的单位注水量电耗,不能进行能耗比较^[12]。对于不同的注水井,可简化为单泵单井模型,使其能耗具有可比性(图1)。

由注水系统的能量守恒定律,即电动机输入功率+泵入口水功率=注水泵机组损失+站内管线损失+回流损失+注水管网损失+有效功率^[13-18],如式(1)所示:

$$N_{Mpin} = N_{mpsys} + N_{lssys} + N_{rsys} + N_{pv} + N_e \quad (1)$$

式中: N_{Mpin} 为注水泵机组输入功率,kW; N_{mpsys} 为注水系统泵机组损失功率,kW; N_{lssys} 为注水系统站内管线功率损失,kW; N_{rsys} 为注水系统回流损失功率,kW; N_{pv} 为注水管网损失功率,kW; N_e 为注水系统有效功率,kW。

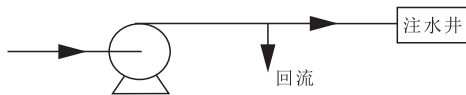


图1 单泵单井模型

Fig. 1 Model of single-pump corresponding to single-well

根据单泵单井模型情况,结合国家标准 GB/T 33653—2017《油田生产系统能耗测试和计算方法》中各项损失的计算方法,求得任一单井所连接的电动机输入功率,如式(2)所示:

$$N_{Mini} = N_{mpi} + \frac{(P_{Pouti} - P_{Souti})G_{pi}}{3.6} + \frac{P_{Souti}G_{rsi}}{3.6} + N_{pvi} + \frac{P_{wi}G_{wi}}{3.6} - \frac{P_{Pinz}G_{pi}}{3.6} \quad (2)$$

式中: N_{Mini} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的注水泵电动机输入功率,kW; N_{mpi} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的注水泵机组的功率损失,kW; P_{Pouti} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的注水泵出口压力,MPa; P_{Souti} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的注水站出站压力,MPa; G_{pi} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的注水泵流量,m³/h; G_{rsi} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的回流量,m³/h; N_{pvi} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的注水管网损失功率,kW; P_{wi} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的注水压力,MPa; G_{wi} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的注水流量,m³/h; P_{Pinz} 为注水系统中第*i*个单泵单井模型的注水泵入口折算压力,MPa。

单位注水量电耗是油田注水生产用电量与注水量的比值,则单井单位注水量电耗与单井输入功率之间的关系如式(3)所示:

$$M_{Jwi} = \frac{N_{Mini}}{G_{wi}} = \frac{N_{mpi}}{G_{wi}} + \frac{(P_{Pouti} - P_{Souti})G_{pi}}{3.6G_{wi}} + \frac{P_{Souti}G_{rsi}}{3.6G_{wi}} + \frac{N_{pvi}}{G_{wi}} + \frac{P_{wi}G_{wi}}{3.6G_{wi}} - \frac{P_{Pinz}G_{pi}}{3.6G_{wi}} \quad (3)$$

式中: M_{Jwi} 为单井单位注水量电耗,kW·h·m⁻³。

目前,大多数注水系统单井井口前没有安装测量单井单位注水量电耗的仪表,无法直接获取单井单位注水量电耗。当注水管线比较短,地形起伏差异比较小时,单井单位注水量电耗与单井的流量呈线性关系。故采用按流量配比的方式计算单井单位注水量电耗,如下式(4)~(5)所示:

$$M_{Jwi} = m\lambda_i M_{Jw} \quad (4)$$

$$\lambda_i = \frac{G_{wi}}{\sum_{j=1}^m G_{wi}} \quad (5)$$

式中: M_{Jw} 为注水系统单位注水量电耗,kW·h·m⁻³; m 为注水系统的注水井总数量; λ_i 为注水系统中第*i*口注水井的注水量与注水井总流量的比例。

在注水系统单泵单井模型当中,单井输入压力 P_{wi} 为变量,其余与单井输入压力 P_{wi} 无关的常量可以

看成常数,如式(6)所示,则斜率 k 为单井输入流量的倒数,如式(7)所示。将单井输入功率 $p_{wi}G_{wi}$ 可作为自变量,单井单位注水量电耗 M_{Jwi} 作为因变量,则二者符合线性关系,式(8)所示,线性关系见图2。

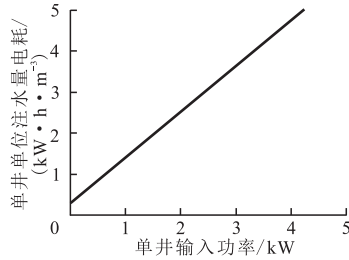


图2 单井输入功率与单井单位注水量电耗关系

Fig. 2 Linear relationship between input power and power consumption per unit water injection rate of single well

$$c = \frac{N_{mpi}}{G_{wi}} + \frac{(p_{pouti} - p_{souti})G_{pi}}{3.6G_{wi}} + \frac{p_{souti}G_{rsi}}{3.6G_{wi}} + \frac{N_{PVi}}{G_{wi}} - \frac{p_{Pin}G_p}{3.6G_{wi}} \quad (6)$$

$$k = \frac{1}{G_{wi}} \quad (7)$$

$$M_{Jwi} = k(p_{wi}G_{wi}/3.6) + c \quad (8)$$

式(6)一式(8)中: c 为单井输入功率与单井单位注水量电耗直线截距; P_{Pin} 为注水泵入口压力,MPa; G_p 为注水泵流量, m^3/h ; k 为单井输入功率与单井单位注水量电耗直线斜率。

斜率 k 的物理意义为单井井口流量的倒数;截距 c 的物理意义为单位注水量功率消耗,即单位注水量泵机组损失功率、单位注水量站内管线损失、单位注水量回流损失、单位注水量注水管网损失之和与泵入口水带来的功率的差值。

单井输入功率与单井单位注水量电耗线性关系的斜率和截距综合反映了注水系统以及注水井的能耗情况。因此,可利用直线斜率和直线截距对注水系统和注水井进行能耗评价。

2 能耗评价方法

2.1 直线截距法

直线截距法是利用单井输入功率与单井单位注水量电耗直线关系的截距大小进行比较。直线截距 c 的物理意义是注水系统的单位注水量功率消耗,表明了输入单位水量所需要消耗的功率,可将截距 c 作为评价注水系统能耗评价的指标,即直线截距评价法。通过获取大量注水系统的数据,依照被监测对象70%以上合格,20%优良的原则,对注水系统进行评价^[19-20]。

2.2 单耗节能率法

单耗节能率法是利用单井单位注水量电耗理论值与实际值的差值与理论值之比,由式(9)计算。通过比较单耗节能率 α 的大小,单耗节能率 α 越大,则能耗更低。单耗节能率 α 计算示意图见图3。

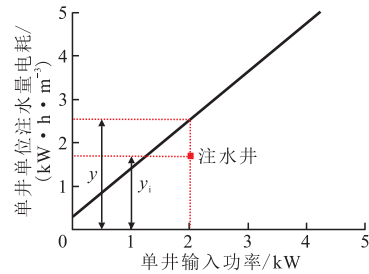


图3 α 的计算方法

Fig. 3 Computational method of α

$$\alpha = \frac{y - y_i}{y} \quad (9)$$

式中: α 为单耗节能率; y 为注水系统中第 i 口注水井理论上所需要的单位注水量电耗, $kW \cdot h \cdot m^{-3}$; y_i 为注水系统中第 i 口注水井实际的单位注水量电耗, $kW \cdot h \cdot m^{-3}$ 。

单耗节能率 α 为正数,表明该注水井处于能耗较低的状态,单耗节能率 α 为负数,表明该注水井处于能耗较高的状态。

3 能耗评价方法的应用

采用我国西北A油田和东北B油田的注水系统的数据进行验证,结果见图4、图5。从图4中可以看出,在A油田注水系统中,注水压力与注水流量较小,单井输入功率主要在1~6 kW,单井单位注水量电耗波动较小,主要在2~12 $kW \cdot h \cdot m^{-3}$,单井输入功率与单井单位注水量电耗符合线性关系,拟合度 R^2 为0.9474,现场数据拟合结果与理论分析结果相吻合。

从图5中可以看出,在B油田注水系统中,注水

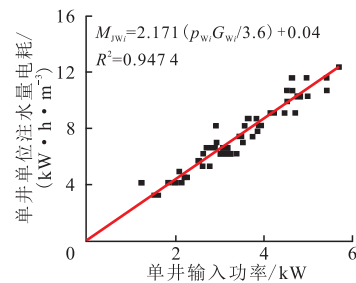


图4 A油田注水系统

Fig. 4 Water injection system of A oilfield

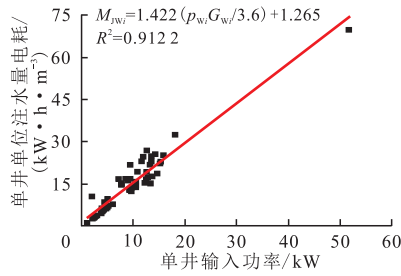


图5 B油田注水系统

Fig. 5 Water injection system of B oilfield

压力与注水流量较大,单井输入功率主要在0~20 kW之间,单井单位注水量电耗波动较大,主要在0~35 kW·h·m⁻³之间,单井输入功率与单井单位注水量电耗符合线性关系,拟合度R²为0.912 2,现场数据拟合结果与理论分析结果相吻合。

3.1 注水系统能耗评价

在油田A与油田B中各取5个注水系统,共493口注水井,做出各注水系统的单井输入功率与单井单位注水量电耗的线性关系(图6)。

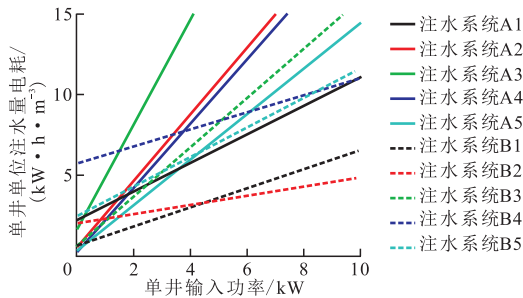


图6 A油田与B油田注水系统

Fig. 6 Water injection system of A oilfield and B oilfield

对于往复泵,国家标准GB/T 31453—2015《油田生产系统节能监测规范》中规定,注水系统效率限定值为40%,节能评价值为45%,可对这十个注水系统进行评价^[21]。同样,依照被监测对象70%以上合格,20%优良的原则,利用直线截距法对注水系统进行能耗评价,评价结果对比见表1。

根据评价结果可知,传统的系统效率法与直线截距法的评价结果基本吻合。

3.2 注水井能耗评价

在选取的10个注水系统中,计算单耗节能率,得出各注水系统中能耗高的注水井,油田A注水系统见表2,油田B注水系统见表3。

结合油田现场数据分析,J31-63注水井能耗高

表1 评价结果对比

Table 1 Comparison of evaluation results

注水系统	注水系统效率/%	直线截距/(kW·h·m ⁻³)	传统系统效率法评价结果	直线截距法评价结果
注水系统A1	37.58	2.207	不合格	不合格
注水系统A2	61.77	0.506	节能	合格
注水系统A3	40.95	1.573	合格	合格
注水系统A4	53.39	0.232	节能	节能
注水系统A5	45.87	0.288	节能	节能
注水系统B1	44.89	0.640	合格	合格
注水系统B2	41.28	2.001	合格	合格
注水系统B3	41.86	0.600	合格	合格
注水系统B4	19.76	5.736	不合格	不合格
注水系统B5	27.89	2.450	不合格	不合格

表2 油田A注水系统

Table 2 Water injection system of A oilfield

注水系统	注水井	单耗节能率
注水系统A1	L61-38	-0.830 0
注水系统A2	H47-61	-1.810 2
注水系统A3	J10-55	-1.872 4
注水系统A4	H509-62	-0.745 1
注水系统A5	S16-24	-0.348 7

表3 油田B注水系统

Table 3 Water injection system of B oilfield

注水系统	注水井	单耗节能率
注水系统B1	J31-63	-6.095 4
注水系统B2	J63-11	-1.291 1
注水系统B3	Q29-25	-4.746 9
注水系统B4	J71-163	-2.244 0
注水系统B5	F43-29	-1.879 0

的原因是由于油压过高,泵的扬程不够,注水流量为0,可通过适当增加泵的扬程缓解;其余各注水井之所以能耗高,是因为注水压力过低,达不到需要的配注量,结合油田实际情况,可采取洗井、放大水嘴等措施提高注水量。

根据注水井能耗评价结果,可找出能耗异常的注水井,结合现场实际情况采取对应措施,从而提高注水系统效率。目前,该评价方法仅用了两个油田的部分注水系统的现场数据进行验证,若要推广并应用该评价方法,还需要更多的数据对该评价方法进行完善。

4 结论

1) 通过理论分析并结合现场数据可知,单井输入功率与单井单位注水量电耗存在线性关系,直线斜率和截距综合反映了注水系统以及注水井的能耗情况。

2) 利用直线截距法对注水系统进行能耗评价, 评价结果与传统的系统效率法基本吻合, 可直接利用该方法对注水系统进行能耗评价。

3) 利用单耗节能率法对注水井进行能耗评价, 可找出能耗异常的注水井, 结合现场实际情况, 分析原因并采取相应的措施, 从而提高注水系统效率。

参考文献

- [1] 阮岩, 罗海龙, 程为彬, 等. 基于站效的注水系统能耗监测评价指标的建立[J]. 水泵技术, 2018, (3): 1-5.
RUAN Y, LUO H L, CHENG W B, et al. Establishment of monitoring and evaluation index of water injection system energy consumption based on station efficiency[J]. Pump Technology, 2018, (3): 1-5.
- [2] 李洪斌, 张承慧. 变频调速注水泵站优化控制[J]. 电气传动, 2002, 32(4): 28-31.
LI H B, ZHANG C H. Optimization control of pump station for water injection system[J]. Electric Drive, 2002, 32(4): 28-31.
- [3] 张承慧, 夏东伟, 程兆林, 等. 变频驱动注水系统效率优化问题的建模与控制[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 42-47.
ZHANG C H, XIA D W, CHEN Z L, et al. Modeling and control of frequency converter driving water injection system for efficiency optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6): 42-47.
- [4] 梅永贵, 孙维超, 付国庆, 等. 提高二连油田注水系统效率技术[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(S1): 62-64.
MEI Y G, SUN W C, FU G Q, et al. Study on improving the injection system efficiency in Erlian Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(S1): 62-64.
- [5] 李从信, 刘贤梅, 陈森鑫. 大型注水系统的优化运行[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 69-72.
LI C X, LIU X M, CHEN M X. Operation optimization of large-scale water injection systems[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 69-72.
- [6] 郭俊忠, 常玉连, 高胜. 注水系统运行方案优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(12): 127-130.
GUO J Z, CHANG Y L, GAO S. Study on optimized operation scheme of water injection system[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2002, 22(12): 127-130.
- [7] 万春利. 采油三厂注水井注入能力分析评价技术的研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
WAN C L. Research on injection capacity analysis and evaluation technology of injection well in No. 3 oil production plant[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.
- [8] 孙冰, 陈曦. 注水井措施优先对节能效果的影响[J]. 油气田地面工程, 2008, 27(5): 37-38.
SUN B, CHEN X. The influences on measure preference of water injection well to saving energy effect[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2008, 27(5): 37-38.
- [9] 雷钧, 周杰, 濮新宏, 等. 注水井能效状况评价方法与分析[J]. 石油工业技术监督, 2019, 35(5): 23-26.
LEI J, ZHOU J, PU X H, et al. Evaluation method and analysis of energy efficiency of water injection wells[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2019, 35(5): 23-26.
- [10] 全国能源基础与管理标准化技术委员会, 全国石油天然气标准化技术委员会油气田节能节水分技术委员会. 油田生产系统能耗测试和计算方法: GB/T 33653—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 9-13.
SAC/TC20. Energy consumption test and calculation method for oilfield production system: GB/T 33653—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017: 9-13.
- [11] 陈立达, 杨济源, 王翀, 等. 基于单井单位注水量电耗的注水系统评价方法[J]. 石油石化节能, 2019, 9(4): 9-13.
CHEN L D, YANG J Y, WANG C, et al. Water injection system evaluation method based on energy consumption per unit water injection capacity[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2019, 9(4): 9-13.
- [12] 常玉连, 高胜, 郭俊忠. 注水管网系统模型简化技术与计算方法研究[J]. 石油学报, 2001, 22(2): 95-100.
CHANG Y L, GAO S, GUO J Z. A study on model simplification technology and calculation method of water flooding pipeline network system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2): 95-100.
- [13] 李从信, 陈森鑫, 郭福田, 等. 注水系统的计算方法[J]. 石油学报, 1998, 19(3): 120-124.
LI C X, CHEN M X, GUO F T, et al. A method of hydraulic calculation for water injection systems[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2): 95-100.
- [14] 马庆坤, 刘前进. 注水系统效率测算方法的探讨[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(2): 76-79.
MA Q K, LIU Q J. Discussion on the calculation method of system efficiency of water flooding[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1997, 19(2): 76-79.
- [15] PALSSON B, DAVIES D R, TODD A C, et al. The water injection process: a technical and economic integrated approach[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2003, 81(3): 333-341.
- [16] 程为彬, 吴九辅. 基于前置增压泵压力和流量可调性注水技术的应用[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 115-118.
CHENG W B, WU J F. Water flooding technology with changeable pressure and flux based on preceding booster[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 115-118.
- [17] 王早祥, 杨德伟. 油田注水地面枝状管网水力计算[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 125-128.
WANG H X, YANG D W. Hydraulic calculation of branch form pipe networks for oilfield above-ground water injection system [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(1): 125-128.
- [18] 王艳. 油田注水系统经济运行研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
WANG Y. Study on economic operation of water injection system in oilfield[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.
- [19] 全国石油天然气标准化技术委员会. 油田生产系统节能监测规范: GB/T 31453—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 6-7.
China Natural Gas Standardization Technology Committee. Monitoring and testing code for energy conservation of oilfield production system: GB/T 31453—2015[S]. Beijing: China Standards Press, 2015: 6-7.

(编辑 尹淑容)