

文章编号:1671-8879(2007)03-0093-05

# 工程发动机动力储备性能的评价指标

焦生杰, 蔡应强

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 为了合理评价工程机械用发动机(柴油机)动力储备性能,对现行评价指标——扭矩适应系数  $K_m$  和转速适应系数  $K_n$  进行了分析与研究,指出  $K_m$  和  $K_n$  在作为评价工程机械用发动机动力储备性能的量化指标时,特别是在比较不同发动机的动力储备性能时,只考虑了发动机扭矩外特性曲线上的两个点——最大扭矩点和额定扭矩点,忽略了这两点之间扭矩曲线形状的差异性,因而不能全面反映发动机的动力储备性能的动态过程。提出了新的动力储备性能综合评价指标——动力储备系数  $K$ ,定义了其计算式,通过与  $K_m$  和  $K_n$  的对比以及实际的评价结果检验,证明了其合理性和可行性,为准确全面评价发动机的动力储备性能及其选型提供了理论依据。

**关键词:** 机械工程; 发动机; 储备性能; 动力储备系数; 评价指标

**中图分类号:** U469.1

**文献标志码:** A

## Evaluation criterion of construction machinery engine's power reserve properties

JIAO Sheng-jie, CAI Ying-qiang

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education,  
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to evaluate the engine's power reserve properties, the characteristic factor of torque-load  $K_m$  and the accommodation factor of speed  $K_n$  for construction machinery are analyzed. It is pointed out that engine's power reserve properties is decided mainly by engine's external characteristic curve, but  $K_m$  and  $K_n$  only take the two points of engine's external characteristic curve (the biggest torque and the rated torque) into account, and ignore the difference of the shape of the torque curve between the two points. As the quantitative criterion of evaluating engine's power reserve properties, when they are specially used in comparing the power reserve properties between different engines, they cannot comprehensively reflect engine's power reserve properties. A new comprehensive evaluation criterion of power reserve properties (power reserve factor  $K$ ) is suggested and formulated. Contrasted with  $K_m$  and  $K_n$ , and examined by the actual evaluation result,  $K$  is proved to be reasonable and feasible, it provides a theoretic criterion for the comprehensive evaluation of engine's power reserve properties. 3 tabs, 4 figs, 10 refs.

**Key words:** mechanical engineering; engine; reserve properties; power reserve factor; evaluation criterion

收稿日期:2006-04-26

基金项目:国家 863 计划项目(2001AA422013)

作者简介:焦生杰(1955-),男,陕西富平人,教授,博士研究生导师,E-mail:jsj@chd.edu.cn.



## 0 引言

发动机作为工程机械的动力,综合评价其整机性能及与工程机械匹配的合理性时,要考虑多方面因素:基本参数、动力性能指标、经济性能指标和排放性能指标等。对于推土机一类的工程机械来说,其中最重要的就是发动机的动力储备性能。工程机械用发动机(主要指柴油机)动力储备性能的优劣,目前主要是依据发动机外特性扭矩适应性系数  $K_m$  和转速适应性系数  $K_n$  来评价的<sup>[1-3]</sup>。然而,在研究过程中发现,上述两个系数  $K_m$  和  $K_n$  用作评价发动机动力储备性能的量化指标,特别是在比较不同发动机的动力储备性能时不能全面地反映发动机的动力储备性能。为此,本文通过对发动机外特性曲线的研究,提出了动力储备系数的概念,它不仅能够反映发动机扭矩储备能力的大小,而且还能够体现发动机转速适应性能,并且还涉及到动力储备面积和发动机的额定功率,是一个比较全面地反映发动机动力储备能力的综合评价指标。

## 1 现行评价指标的不足

工程机械,尤其是铲土运输机械,其工作对象主要是较为坚硬的土石方(时常还会遇到大石块及树根等),因此在工作过程中常常出现短时间的峰值载荷,使发动机转速急剧下降,甚至发生强制性熄火。

为了避免发动机发生强制性熄火,且能更好地适应外部载荷的剧烈变化,减少发动机转速的波动性,提高发动机的平均输出功率,除了在传动系中增加不可透性的减振降扭装置外,通常还希望通过提高柴油机的动力储备性能来解决此类问题。

发动机的动力储备性能主要以发动机的外特性来体现。所谓发动机外特性,是指发动机油量调节拉杆固定在额定功率循环供油位置时,发动机的性能指标(主要指功率  $P_e$ 、燃油消耗率  $g_e$  等)随转速  $n$  的变化关系,如图 1 所示。扭矩适应性系数  $K_m$  和转速适应性系数  $K_n$  的定义式分别为式(1)和式(2),很明显,  $K_m$  和  $K_n$  均大于 1。

$$K_m = \frac{M_{e,\max}}{M_{eb}} \quad (1)$$

$$K_n = \frac{n_b}{n_m} \quad (2)$$

式中:  $M_{e,\max}$  为最大扭矩 ( $N \cdot m$ );  $M_{eb}$  为额定功率对应的扭矩 ( $N \cdot m$ );  $n_b$  为额定功率对应的转速 ( $r/min$ );  $n_m$  为最大扭矩对应的转速 ( $r/min$ )。

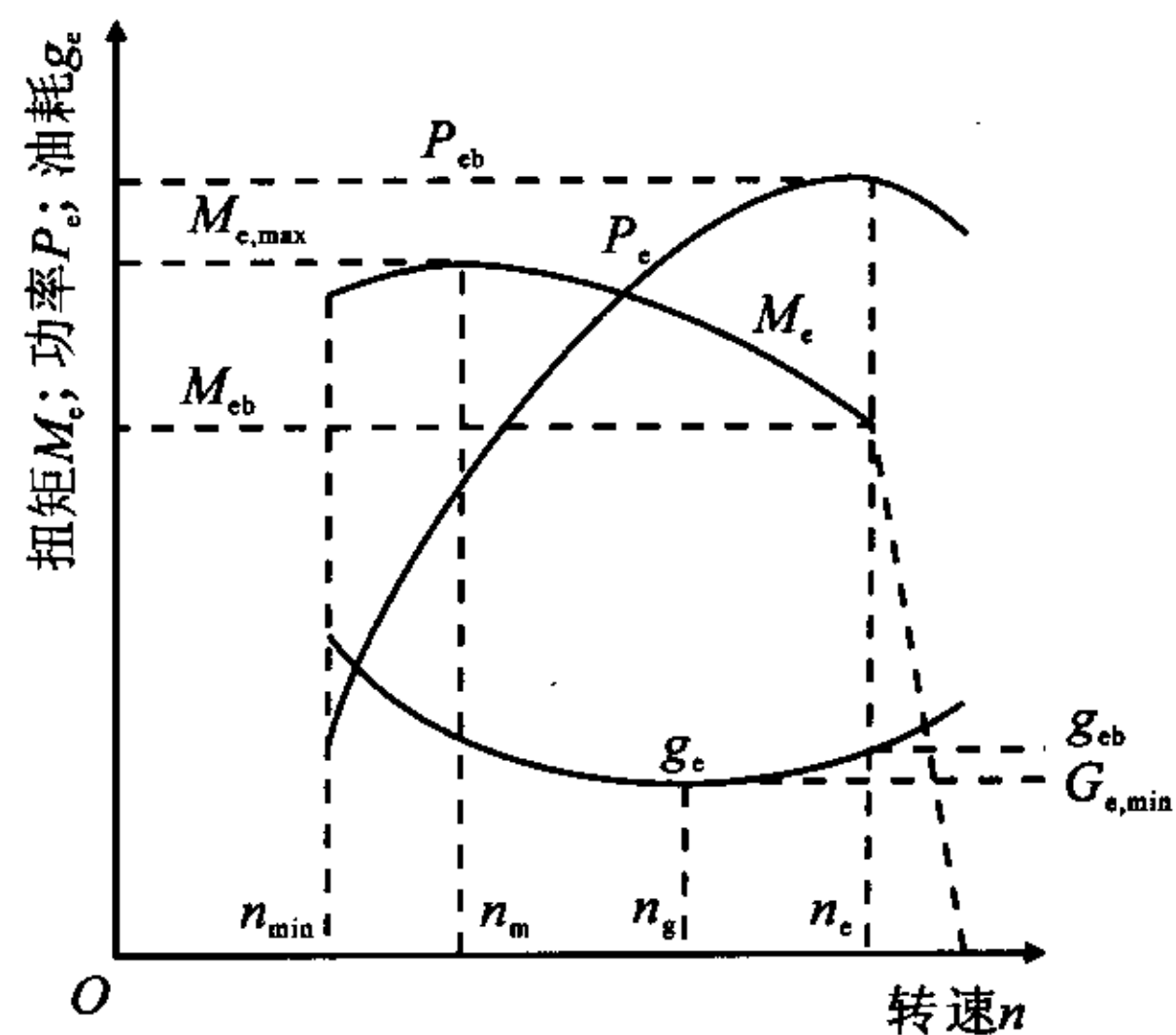


图1 发动机外特性曲线

通常,发动机工作时的正常转速为  $n_m \sim n_b$ , 而  $K_m$  和  $K_n$  值的实际意义如下。

系数  $K_m$  主要说明车辆在作业中阻力增大、发动机转速下降时扭矩自动增加的能力,因而该值的大小反映了车辆在不换挡的情况下发动机克服外载荷的能力;  $K_n$  值越大,车辆克服外载荷的能力也就越大。

$K_m$  和  $K_n$  作为发动机动力储备性能的两个公认的评价指标,其意义是不言而喻的,但它们也存在着一定的缺陷。从图 2 可以看出,3 条外特性曲线的  $K_m$  和  $K_n$  是相同的,但 3 台发动机的动力储备能力明显存在着较大的差异,发动机 1 的动力储备能力明显强于发动机 2 和发动机 3。这主要是因为  $K_m$  和  $K_n$  只考虑了发动机外特性曲线上的两个点:最大扭矩点和额定扭矩点,很显然,用这两个点的参数来衡量发动机的工作性能,不能全面地反映发动机的动力储备性能。

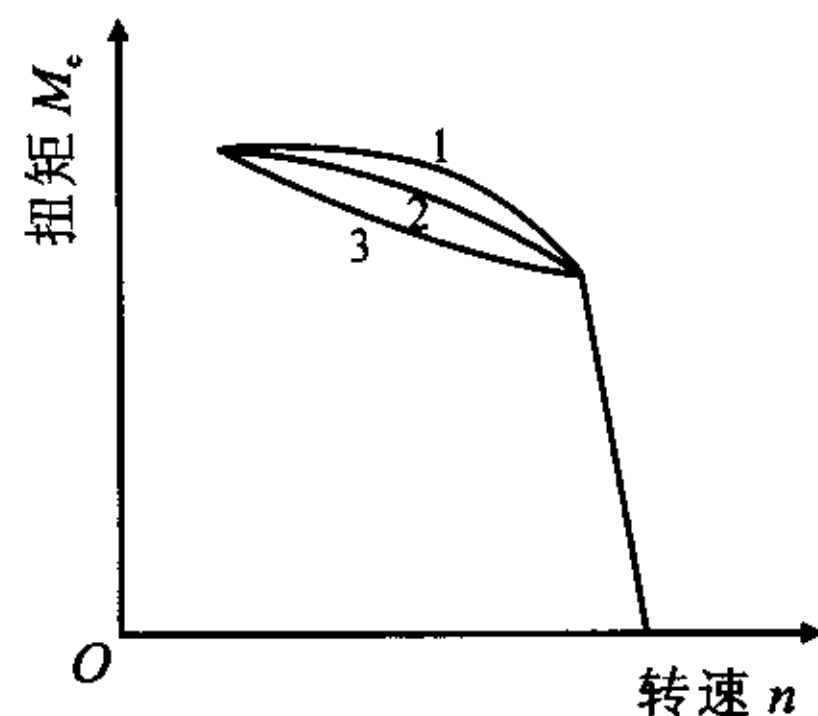


图2 发动机外特性曲线对比(扭矩)

上述两个指标虽都能在一定程度上各自反映发动机的动力储备性能,但却不能说明发动机转速与扭矩之间的变化关系,因为  $K_m$  仅仅是  $M_{e,\max}$ 、 $M_{eb}$  两个扭矩的比值,其大小尽管能反映发动机克服瞬时超负荷的能力,但却不能说明发动机克服瞬时超负荷时的转速波动性;同样,  $K_n$  仅是  $n_b$ 、 $n_m$  两个转速的比值,没有反映出两转速间的扭矩变化大小,因而其大小尽管可反映出发动机转速的波动性,但却不能反映发动机克服瞬时超负荷的能力。

由上面分析可知:系数  $K_m$  和  $K_n$  用作评价发动机动力储备性能的量化指标,特别是在比较不同发动机的动力储备性能时是不够全面的<sup>[4-10]</sup>。



## 2 动力储备系数

从前面的分析可知,发动机动力储备性能的好坏主要取决于发动机外特性曲线(扭矩)上最大扭矩点与额定扭矩点之间那段非调速曲线(以下简称动力储备曲线)的形状,其动力储备能力是由动力储备曲线上所有的点共同构造而成的,并非只与最大扭矩点和额定扭矩点有关。故用来评价发动机动力储备能力的指标必须包含动力储备曲线上所有点的信息,这样的评价指标才能够全面、准确地反映发动机的动力储备性能。因此,本文提出了动力储备面积  $S$  和动力储备系数  $K$  的概念。 $S$  是指由动力储备曲线、 $n=n_m$  和  $M=M_{eb}$  两条直线围成的面积,如图3中实线阴影面积所示。

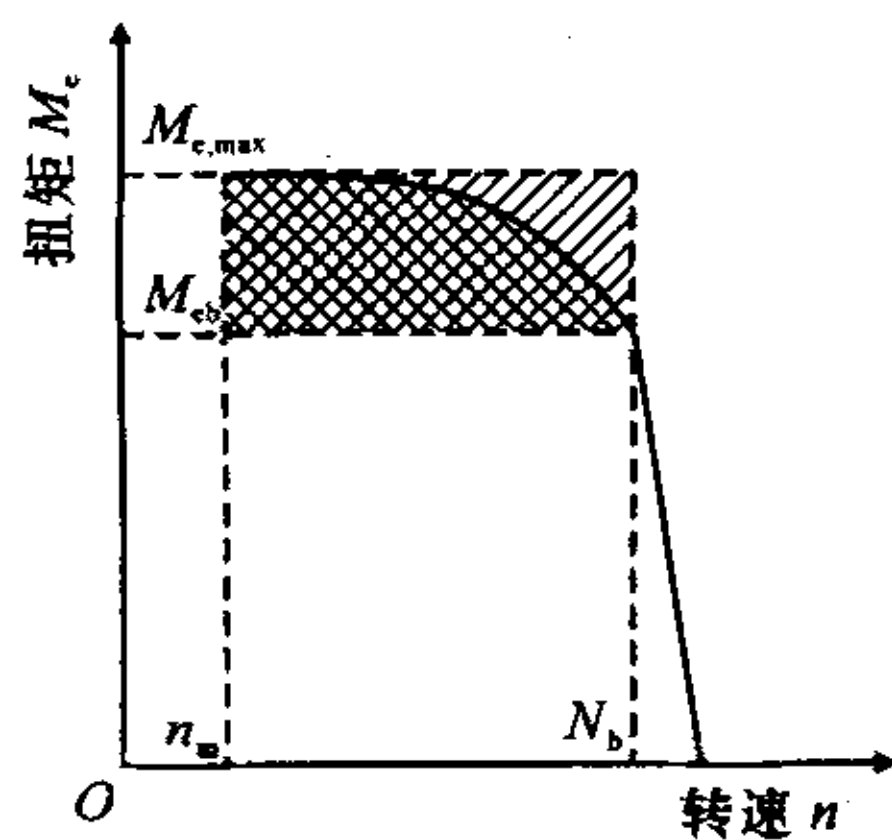


图3 发动机扭矩储备面积

发动机  $P_e$ 、 $M_e$ 、 $n$  三者有如下关系

$$P_e = \frac{M_e n}{9\,550} \quad (3)$$

而  $S$  也是由扭矩和转速的乘积构成的,由此可知,动力储备面积本质上和功率是等同的,也是一个以 kW 为单位的量纲值。

在理想状态下,最大动力储备面积  $S_{max}$  为矩形,如图3中虚线阴影面积,也就是说发动机为恒扭矩,不管外界载荷如何变化,发动机在其工作转速内始终保持最大扭矩输出,此时

$$S_{max} = (K_m - 1)(K_n - 1)M_{eb}n_b = \frac{9\,550(K_m - 1)(K_n - 1)P_{eb}}{9\,550} \quad (4)$$

显然,这是发动机的理想动力输出特性,在发动机实际工作中要实现这一目标是不可能的,但它却为此项研究提供了所期望达到的目标值。

为了能够得到一个无量纲值,将  $S$  除以其在理想状态下的最大值,再乘以相关系数就得到了一个全新的发动机动力储备性能评价指标——动力储备系数  $K$

$$K = \frac{K_m K_n S}{9\,550(K_m - 1)(K_n - 1)P_{eb}} \quad (5)$$

由式(5)可以看出, $K$  整合了系数  $K_m$ 、 $K_n$ 、 $S$  和  $P_{eb}$ ,不仅能够反映发动机扭矩储备能力的大小,而且还能够体现发动机转速适应性能,并且还涉及到动力储备面积和发动机的额定功率,是一个比较全面地反映发动机动力储备性能的综合评价指标。

从图3还可以看出, $S$  的大小不仅与动力储备曲线上的最大扭矩点和额定扭矩点有关,而且与动力储备曲线上的每一点都有密切的关系,每一个点的值的大小都会影响到  $S$  的大小,进而影响到  $K$  的大小,故而  $K$  能够准确、真实地反映发动机动力储备性能。

式(5)说明了  $K$  除了和  $S$  有关外,还与发动机的额定功率有关;相同的动力储备面积,额定功率越低,动力储备系数越大,也就是发动机的动力储备性能越好,这也是符合客观规律的。因为相同的动力储备面积,其额定功率越低,其  $K_m$  或  $K_n$  实际上是增大的(因为  $M_{e,max}/M_{eb}$ 、 $n_b/n_m$  都是假分数,分子分母减去相同值后其结果会增大),从而也印证了式(5)的合理性。

在理想状态下, $S$  达到其最大值  $S_{max}$ , $K$  也达到其极限值,将式(4)代入式(5)可得

$$K_{max} = K_m K_n$$

显然, $K$  值越接近  $K_m K_n$ ,发动机也就越接近恒扭矩的理想状态,其动力储备能力也就越好,故  $K$  作为发动机动力储备性能的评价指标是合理的。

由于  $K$  的计算涉及到扭矩储备面积  $S_n$ ,而计算  $S_n$  需要知道发动机外特性上的多个数据,数据越多,结果越准确。然而在一般发动机的铭牌上只标有额定扭矩点和最大扭矩点的数据,这就给计算带来了不便之处。为了扩大式(5)的应用范围,可以采用以下简化拟合公式计算  $K$  值<sup>[1]</sup>

$$M_e = M_{eb} \left( a + b \frac{n}{n_b} + c \frac{n^2}{n_b^2} \right) \quad (6)$$

$$\text{其中, } a = \frac{K_m K_n (K_n - 2) + 1}{(1 - K_n)^2}; b = \frac{2(1 - a)}{2b - K_n}; c = -\frac{b}{2} K_n$$

$$\text{从而由 } S_n = \int_{n_m}^{n_b} M_e dn - (n_b - n_m)M_{eb} \text{ 可得}$$

$$S_n = M_{eb} \left[ (a - 1)(n_b - n_m) + \frac{b}{2n_b} (n_b^2 - n_m^2) + \frac{c}{3n_b^2} (n_b^3 - n_m^3) \right] \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)得到  $K$  的最终计算公式

$$K = K_m K_n M_{eb} \left[ (a - 1)(n_b - n_m) + \frac{b}{2n_b} (n_b^2 - n_m^2) + \frac{c}{3n_b^2} (n_b^3 - n_m^3) \right] / [9\,550(K_m - 1)(K_n - 1)P_{eb}] \quad (8)$$

此时,动力储备系数  $K$  已经完全可以由发动机铭牌上的数据计算得出,扩大了  $K$  的应用范围,虽然式(8)的计算精度不如式(5),且也只涉及到最大扭矩点和额定扭矩点,是一种简化的评价指标,但它却综合了  $K_m$ 、 $K_n$  和  $P_{eb}$  等参数,比评价指标  $K_m$ 、 $K_n$



计算准确,在实际运用中也是可取的。

### 3 评价指标检验

为了验证用式(5)定义的动力储备系数评价发动机动力储备性能的准确性和可行性,对额定功率约为 180 kW 的工程机械用柴油机的扭矩外特性曲线进行了拟合(试验数据由厂家提供),拟合曲线如图 4 所示,拟合方程和各拟合曲线斜率的变化情况如表 1 和表 2 所示。

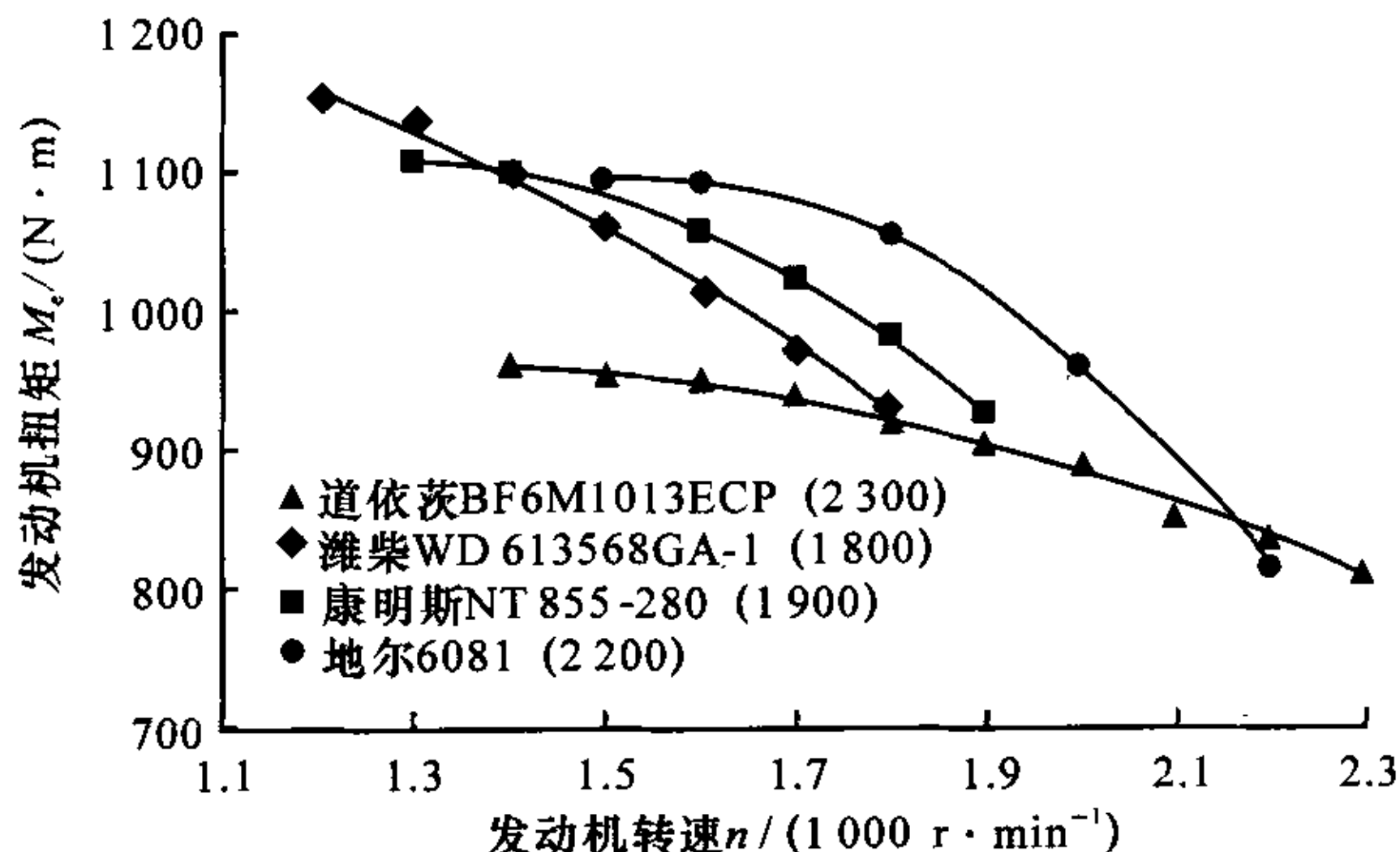


图 4 180 kW 系列发动机动力储备曲线

表 1 扭矩动力储备曲线拟合方程

发动机型号	扭矩动力储备曲线拟合方程 ( $x$ 为发动机转速( $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ); $y$ 为扭矩)	一次导数	二次导数
迪尔 6081H	$y = -650.36x^2 + 2\,004.50x - 449.86$	$dy/dx = -1\,300.72x + 2\,004.50$	$d^2y/dx^2 = -1\,300.72$
道依茨 BF6M1013ECP	$y = -140.15x^2 + 345.23x + 753.56$	$dy/dx = -280.30x + 345.23$	$d^2y/dx^2 = -280.30$
康明斯 NT 855-C280	$y = -447.62x^2 + 1\,133.50x + 389.41$	$dy/dx = -895.24x + 1\,133.50$	$d^2y/dx^2 = -895.24$
潍柴 WD 613568GA-1	$y = -202.38x^2 + 217.86x + 1\,188.10$	$dy/dx = -404.76x + 217.86$	$d^2y/dx^2 = -404.76$

表 2 发动机动力储备曲线斜率的变化

发动机转速 ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	迪尔 6081H	道依茨 BF6M1013ECP	康明斯 NT 855-C280	潍柴 WD 613568GA-1
2 300		-299		
2 200	-857	-271		
2 100	-727	-243		
2 000	-597	-215		
1 900	-467	-187	-567	
1 800	-337	-159	-478	-511
1 700	-207	-131	-388	-470
1 600	-77	-103	-299	-430
1 500		-75	-209	-389
1 400		-47	-120	-349
1 300			-30	-308
1 200				-268

通常来说,工程机械对发动机扭矩外特性曲线的要求是接近额定工作点的那段曲线要陡一点,也就是斜率大一点;而远离额定工作点的那段曲线要缓一点,也就是斜率要小一点。这样就能够保证发动机在外界负荷变化时,发动机在尽可能小的转速波动范围内适应扭矩的变化,最大可能的改善发动机的工作条件。

从图 4 和表 1、表 2 可以看出,4 条曲线中,迪尔 6081H 和康明斯 NT 855 发动机的动力储备性能相对较好,且尤以迪尔 6081H 发动机为佳,而另外两条曲线则不能很好的满足上述要求。

根据以上所述和式(5)的定义,将上述 4 台发动机的  $K$  算出,结果列于表 3。为了便于比较,也将  $K_m$  和  $K_n$  同时列于表内。

表 3 发动机动力储备性能评价指标

发动机型号	$P_{eb}/$ kW	$M_{eb}/$ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	$n_b/$ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	$M_{e,max}/$ ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	$n_m/$ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	$K_m$	$K_n$	$K_mK_n$	$S$	$K$
迪尔 6081H	186	812	2 200	1 095	1 500	1.35	1.47	1.98	135 840	0.92
道依茨 BF6M1013ECP	195	810	2 300	960	1 400	1.19	1.62	1.93	83 801	0.74
康明斯 NT 855-C280	180	926	1 900	1 107	1 300	1.2	1.46	1.75	70 605	0.78
潍柴 WD 613568GA-1	176	930	1 800	1150	1 200	1.24	1.5	1.86	74 078	0.68

表 3 中 4 台发动机的  $K$  值依次为,迪尔 6081H、康明斯 NT 855-C280、道依茨 BF6M1013ECP、潍柴 WD 613568GA-1,这与前面的分析结果相吻合。作者曾在全液压推土机中采用道依茨 BF6M1013ECP 发动机,研究结果表明:其适应推土机外载荷剧烈变

化的能力明显较差;而康明斯 NT 855-C280 的情况则要好得多;迪尔 6081H 是专用于推土机的发动机,从其实际作业状况来看,它有足够的动力储备能力来满足推土机的作业要求,这也证明了发动机动力储备性能的评价指标——动力储备系数  $K$  的合



理性和可行性。

## 4 结 语

(1) 扭矩适应系数  $K_m$  和转速适应系数  $K_n$  虽能在一定程度上反映发动机的动力储备性能,但却不能说明发动机在外界阻力增加时其转速下降与扭矩增大之间的变化关系,且在  $K_m$  和  $K_n$  相同时无法判断发动机的动力储备性能的优劣。而动力储备系数  $K$  却能反映发动机实际扭矩储备面积与理想状态下的扭矩储备面积的逼近程度,且计算式中既包括了  $K_m$ 、 $K_n$ ,也包括了动力储备面积  $S$  和额定功率  $P_{eb}$ ,因此  $K$  可作为综合评价发动机动力储备性能的指标。 $K$  值越大(越接近于  $K_m$ 、 $K_n$ ),说明发动机的整体动力储备能力越大。

(2)  $K$  值的计算涉及到扭矩储备面积  $S_n$ ,而计算  $S_n$  需要知道发动机外特性上的多个数据,数据越多,结果越准确。然而,一般发动机的铭牌上只标有额定扭矩点和最大扭矩点的数据,这就给计算带来了不便,为了简化,采用了扭矩拟合方程,推导出了  $K$  值计算式。

(3) 由  $K$  值计算结果、理论分析和实践结果对比可知,三者的结果相吻合,说明了该评价指标是合理可行的。

### 参考文献:

### References:

- [1] 陆明,王耀华,谭业发. 发动机动力特性的一个新评价指标[J]. 柴油机,1999,21(1):16-20  
LU Ming, WANG Yao-hua, TAN Ye-fa. A new evaluation criterion of ICE power characteristic: theoretical power characteristic factor  $K_n$  and its computing [J]. Diesel Engine, 1999, 21(1): 16-20.
- [2] 吴克刚,钟益斌. 发动机综合性能仿真系统[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(5):111-114.  
WU Ke-gang, ZHONG Yi-bin. Simulation system for engine performance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(5): 111-114.
- [3] 柴保明,吴炳胜,王祖纳. 发动机整机性能的综合评价[J]. 内燃机学报,2002,20(1):67-70.  
CHAI Bao-ming, WU Bing-sheng, WANG Zu-na. The fuzzy evaluation of rational total system used in industrial machinery [J]. Transactions of CSICE, 2002, 20(1): 67-70.
- [4] 徐方大,吕国培,宋正亚,等. 柴油机速度及扭矩特性的探讨[J]. 江苏理工大学学报:自然科学版,1999,20(4):45-48.  
XU Fang-da, LÜ Guo-pei, SONG Zheng-ya, et al. Discussion the speed and torque characteristics of diesel engine[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 1999, 20(4): 45-48.
- [5] 高国珍,吴小毛,付文华,等. 改善柴油机扭矩特性的探讨[J]. 南昌大学学报:工科版,2003,25(2):82-87.  
GAO Guo-zhen, WU Xiao-mao, FU Wen-hua, et al. Study on the improvement of the torque characteristics of diesel engine [J]. Journal of Nanchang University: Engineering and Technology Edition, 2003, 25(2): 82-87.
- [6] 刘生全,马志义,张春化,等. 提高天然气汽车动力性能的研究[J]. 中国公路学报,2003,16(1):118-121.  
LIU Sheng-quan, MA Zhi-yi, ZHANG Chun-hua, et al. Study of improving the dynamic performance of natural gas automobile[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 118-121.
- [7] 王赞松,褚福磊,刘亚东. 基于神经网络的柴油机故障诊断[J]. 交通运输工程学报,2003,3(4):44-47.  
WANG Yun-song, CHU Fu-lei, LIU Ya-dong. Fault diagnosis of diesel engine based on neural network [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 44-47.
- [8] 孙跃东,周萍,尹冰声. 工程车辆液力变矩器与发动机匹配的研究[J]. 上海理工大学学报:自然科学版,2003,25(3):289-292.  
SUN Yue-dong, ZHOU Ping, YIN Bing-sheng. Study on the matching of torque converter and engine for engineering vehicles[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology: Natural Science Edition, 2003, 25(3): 289-292.
- [9] 官春峰,刁增祥,彭莫. 内燃机的动力特性[J]. 内燃机学报,2000,18(4):439-442.  
GONG Chun-feng, DIAO Zeng-xiang, PENG Mo. Dynamic characteristic of internal combustion engines [J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(4): 439-442.
- [10] 刘春玲. 发动机负荷特性曲线研究[D]. 长春:吉林大学,2004.