

## 航空通信系统中信道编码理论及应用分析

邹星, 李金喜, 丁勇飞, 方正  
(中航工业无线电电子研究所, 上海 200241)

**摘要:** 一般地, 航空通信系统具有功率受限、带宽受限、时延受限的特点。针对航空通信系统对信道编码高增益和低时延的要求, 首先理论推导通信系统(特别是二进制通信系统)应用  $r$  码率信道编码获得编码增益的香农极限值, 并仿真对比分析几类典型信道编码的编码性能, 最后结合工程实现考虑的技术指标对几类信道编码的应用范围进行了定性分析, 其对航空通信系统的信道编码选取具有工程指导意义。

**关键词:** 航空通信; 信道编码; 香农极限; 香农距离

**中图分类号:** TN911.22      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)10-0068-05

## Theoretical Analysis and Application of Channel Coding in Aviation Communication Systems

ZOU Xing, LI Jin-xi, DING Yong-fei, FANG Zheng  
(Aeronautical Radio Electronics Research Institute, AVIC, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Generally, the aviation communication system has some constraints, such as power, bandwidth and latency. To satisfy its requirements of high coding gain and low latency to channel coding, the paper derives the theoretical Shannon limit on the minimum SNR required for coded system, especially for the binary communication system. And then, the performance of several typical kinds of channel coding is analyzed through simulation. Finally, qualitative analysis is made to the application scope of the different channel coding methods with consideration of the technical indicators of them. The conclusion has engineering significance for the selection of channel coding in aviation communication systems.

**Key words:** aviation communication; channel coding; Shannon limit; Shannon distance

### 0 引言

航空通信系统能够实现航空器与外界环境互联互通, 是飞行保障的基本条件。其通信系统需要面对无线电频谱管制、航空器低功耗、时敏性需求等多方面的限制, 是一个典型的功率受限、带宽受限、时延受限系统。为保证航空通信系统在恶劣空间电磁环境下实现可靠通信, 要求该系统具有较高的接收灵敏度。其中, 信道编码就是一种改善接收机性能的有效技术, 能够大大提升功率、效率<sup>[1]</sup>, 故广泛应用于各类通信系统。

本文从香农公式出发, 推导了通信系统(特别是二进制通信系统)应用  $r$  码率信道编码获得编码增益的

理论极限值, 并仿真分析了几类典型信道编码的编码性能, 综合考虑编码增益、编码效率、信源长度和译码时间等技术指标, 结合工程实践对几类信道编码的应用范围进行了定性分析, 对航空通信系统信道编码方案选取具有较大的工程指导意义。

### 1 信道编码增益极限的理论分析

根据有噪声信道编码定理(香农第二编码定理)可知, 对于任意通信系统, 只要其通信速率  $R_b$  小于信道容量  $C$ , 则总能够找到一种编码方式, 在该通信系统中实现  $R_b$  速率的无误码信息传输<sup>[2]</sup>。这是信道编码的存在性定理, 为通信系统采用信道编码改善传输性能提供了理论依据。带宽受限通信系统的信道容量  $C$  的定义为

$$C = B \ln(1 + \frac{S}{N}) \quad (1)$$

式中:  $B$  为通信系统信道带宽;  $S/N$  为通信系统接收机信噪比。考虑信号功率  $S$  和噪声功率  $N$  的关系, 即  $S =$

收稿日期: 2014-12-01

基金项目: 航空电子系统综合技术重点实验室和航空科学基金联合资助项目(2013ZC15008)

作者简介: 邹星(1990—), 男, 江西抚州人, 硕士, 工程师, 研究方向为航空无线通信技术。

$E_b R_b, N = N_0 B$ , 结合香农第二编码定理可知, 系统通信速率  $R_b$  与系统比特信噪比  $E_b/N_0$  存在关系, 即

$$R_b < C = B \text{lb} \left( 1 + \frac{E_b R_b}{N_0 B} \right) \quad (2)$$

假设通信系统寻找到一种编码效率为  $r$  (简称  $r$  码率) 的信道编码并采用 Nyquist 速率  $R_t$  进行数据传输, 则该系统的净传输速率  $R_b$  将满足  $R_b = r R_t$ , 其中  $B = R_t/2 = R_b/2r$ , 代入式(2)可知

$$R_b < \frac{R_b}{2r} \text{lb} \left( 1 + \frac{E_b R_b}{N_0 R_b/2r} \right) \quad (3)$$

化简得

$$\frac{E_b}{N_0} > \frac{2^{2r} - 1}{2r} \quad (4)$$

式(4)表征了通信系统采用  $r$  码率的信道编码实现无误码信息传输的比特信噪比  $E_b/N_0$  的极限, 如图 1 所示。

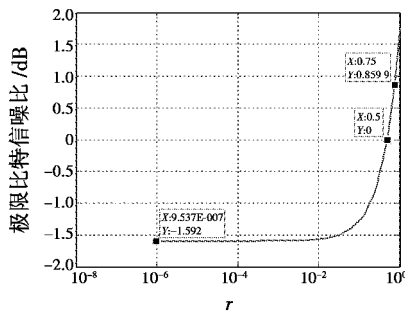


图 1  $r$  码率编码实现无误码信息传输  $E_b/N_0$  的极限

Fig. 1 The limit of  $E_b/N_0$  required for coded system when BER is 0

由图 1 可知,  $r$  越小, 实现无误码信息传输要求的  $E_b/N_0$  越低, 且随着码率的不断降低而趋近于  $-1.59$  dB; 同时由图可知,  $r$  为 0.5 时,  $E_b/N_0$  约为 0 dB,  $r$  为 0.75 时,  $E_b/N_0$  约为 0.86 dB。

在通信系统的工程实现中, 通常仅要求系统传输误码率 (BER) 低于一定量级。如语音通信的误码率要求为  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ , 图像及测控信息通信的误码率要求为  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。对式(3)进行修正, 得到在指定误码率传输下  $E_b/N_0$  的极限值。误码率容忍的本质即为信息熵的扩展, 因此可以得到

$$R_b (1 - H(P_e)) < \frac{R_b}{2r} \text{lb} \left( 1 + \frac{E_b R_b}{N_0 R_b/2r} \right) \quad (5)$$

式中,  $H(P_e)$  为误码率的熵函数。化简得

$$E_b/N_0 > \frac{2^{2r(1-H(P_e))} - 1}{2r} \quad (6)$$

图 2 所示为  $r$  码率信道编码在指定误码率传输下  $E_b/N_0$  的极限值。

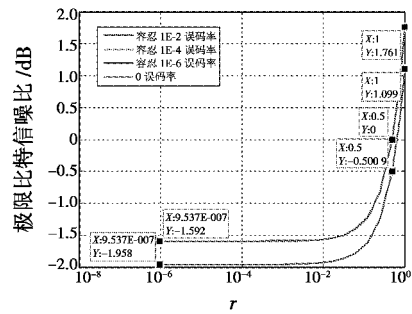


图 2  $r$  码率编码在指定误码率传输下  $E_b/N_0$  的极限

Fig. 2 The limit of  $E_b/N_0$  required for coded system with specified BER

由图 2 可知, 在相同码率信道编码条件下, 通信系统实现指定误码率以下的信息传输所需的  $E_b/N_0$  低于无误码信息传输的  $E_b/N_0$ 。同时, 当容忍误码率低于  $10^{-4}$  时,  $E_b/N_0$  的极限值与无误码信息传输的  $E_b/N_0$  差距很小 (误码率低于  $10^{-4}$  的曲线与零误码率的曲线基本重合), 这是因为二进制熵函数在自变量逼近 0 或 1 时取值波动很小, 导致熵函数  $H(P_e)$  对式(3)的修正可以忽略。

本文讨论了通信系统中采用  $r$  码率信道编码实现指定误码率限制下  $E_b/N_0$  的极限值。通信体制解调门限与此值的差值即为该通信体制下的信道编码增益理论极限。例如: 定义  $10^{-5}$  为可靠传输的误码率门限, 某未信道编码的通信系统的解调门限为 9.6 dB, 则在该通信系统中  $r$  为 0.75 时信道编码可达到的最高编码增益约为 8.74 dB。

## 2 二进制调制编码增益极限的理论分析

二进制调制 (如 BPSK, DBPSK, GMSK 等) 广泛应用于各类通信系统的工程实现。同时, BPSK 具有优越的仿真、测试效率, 是当前信道编码增益仿真测试的理想载体。因此, 二进制调制下信道编码的增益极限具有重要的参考意义。

假设 BPSK 通信系统采用  $r$  码率的信道编码, 将  $R_b$  速率的信息扩展为  $R_c$  速率进行数据传输, 则传输单位能量  $E_c$  与信息单位能量  $E_b$  存在  $E_c = r E_b$  的关系。接收 BPSK 码元信号  $y$  与发射 BPSK 码元信号  $x$  的关系为

$$y = x + n = \pm \sqrt{E_c} + n \quad (7)$$

式中: 发射信号  $x$  的极性服从等概率分布; 接收噪声  $n$  服从均值为 0、方差为  $N_0/2$  的高斯分布。因此, 接收信号概率分布函数为

$$f_y(\eta) = (f_x(\eta) |_{x=-\sqrt{E_c}} + f_x(\eta) |_{x=\sqrt{E_c}}) / 2 \quad (8)$$

令  $R_c = 1$  bit/s, 该 BPSK 通信系统的最大互信息量 ( $\max(I(x; y))$ ) 即为其信道容量  $C^{[2]}$ , 表示为

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{2} f_y(\eta) \Big|_{x=-\sqrt{E_c}} \text{lb} \frac{f_y(\eta) \Big|_{x=-\sqrt{E_c}}}{f_y(\eta)} + \frac{1}{2} f_y(\eta) \Big|_{x=\sqrt{E_c}} \text{lb} \frac{f_y(\eta) \Big|_{x=\sqrt{E_c}}}{f_y(\eta)} \right) d\eta \quad (9)$$

代入高斯分布概率密度函数,得

$$C = \frac{1}{2\sqrt{\pi N_0}} \int_{-\infty}^{\infty} \left( e^{-\frac{(x-\sqrt{E_c})^2}{N_0}} \text{lb} \frac{2e^{-\frac{(x-\sqrt{E_c})^2}{N_0}}}{e^{-\frac{(x-\sqrt{E_c})^2}{N_0}} + e^{-\frac{(x+\sqrt{E_c})^2}{N_0}}} + e^{-\frac{(x+\sqrt{E_c})^2}{N_0}} \text{lb} \frac{2e^{-\frac{(x+\sqrt{E_c})^2}{N_0}}}{e^{-\frac{(x-\sqrt{E_c})^2}{N_0}} + e^{-\frac{(x+\sqrt{E_c})^2}{N_0}}} \right) dx \quad (10)$$

式(10)所示的信道容量值为一复杂积分结果,无法得到其闭式解。本文采用 Matlab 分析工具,将式(10)的复杂积分运算构造为级数函数进行近似处理。图3为  $r$  取 0.99, 0.75, 0.5 时, BPSK 调制下信道容量  $C$  与  $E_b/N_0$  的关系。

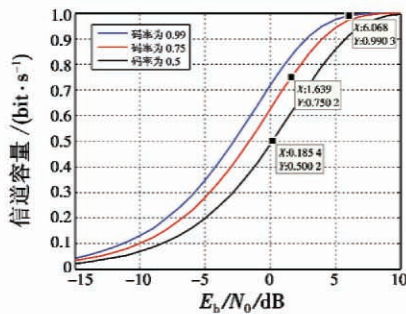


图3  $r$  不同时 BPSK 信道容量与  $E_b/N_0$  的关系

Fig. 3 The relationship between  $E_b/N_0$  and the channel capacity of BPSK when  $r$  varies

由图3可知,当  $r$  为 0.99 时,  $E_b/N_0$  约大于 6.07 dB, 可保证信道容量  $C$  略大于  $r$ ; 当  $r$  为 0.75 时,  $E_b/N_0$  约大于 1.64 dB, 可保证信道容量  $C$  略大于  $r$ ; 当  $r$  为 0.5 时,  $E_b/N_0$  约大于 0.185 dB, 可保证信道容量  $C$  略大于  $r$ 。

同时,本文通过 while 循环调用式(10)的级数近似函数进行数据处理,获得几种基于 BPSK 常用的信道编码码率下信息可靠传输所需  $E_b/N_0$  的极限值,即 BPSK 调制结合  $r$  码率信道编码的香农极限值。与式(4)所示的任意波形(WAVE)调制下采用  $r$  码率信道编码实现无误码传输的香农极限进行了对比,如表1所示。

表1 常用码率下信道编码的香农极限

Table 1 The Shannon limit of the channel coding

with some common rate

dB

码率 $r$	1/100	1/6	1/4	1/3
BPSK	-1.561	-1.073	-0.818	-0.495
WAVE	-1.561	-1.08	-0.794	-0.55
码率 $r$	1/2	2/3	3/4	4/5
BPSK	0.188	1.06	1.627	2.04
WAVE	0	0.569	0.860	1.037

由表1可知,当信道编码的码率很低(低于1/4)时, BPSK 调制波形的信道编码香农极限约等于波形传

输体制的信道编码香农极限;当信道编码效率较高时, BPSK 调制波形的信道编码香农极限与波形传输体制有一定的差距。若想弥补该固有差距,则可考虑低频谱效率的高阶正交波形调制(MOWM)。

考虑工程项目通常要求系统误码率为  $10^{-5}$ , 结合图2的分析结论可知,表1所述信道编码的香农极限普遍适用于工程实现的性能评估。

### 3 几种典型信道编码的编码增益及应用分析

译码算法及大规模集成电路的不断发展为航空无线通信系统提供了多种性能优异的信道编码方案<sup>[3]</sup>。在实际系统的工程实现中,信道编码方案的选取主要参考以下几个指标。

1) 编码增益:航空无线通信必须考虑在功率受限环境下的通信能力,若信道编码具有较高的编码增益,则提高系统的传输性能,降低通信设备的功耗,提高通信设备的干扰容限。

2) 编码效率:航空无线通信必须考虑在带宽受限环境下的通信能力,特别是在宽带通信系统中,对编码/组帧效率等都有严格的要求。

3) 信源长度:航空无线通信通常采用消息报文的形式进行信息传输,其报文长度依据通信协议不同有所不同,则信道编码增益会因信源长度不同而有所差异的。

4) 译码时间:航空无线通信的部分业务对传输时延较苛刻,因而对信道编码的选取提出了限制。

本文基于 BPSK 调制对几种应用广泛的信道编码进行了性能仿真,主要包括 RS 交织卷积级联码、Turbo 码、Turbo 乘积码、LDPC 码。定义香农距离为 BPSK 调制下信道编码所需最小  $E_b/N_0$  与香农极限的差值。

表2为 RS 交织卷积级联码的性能仿真结果。其中,交织深度为 5, RS 码码型为 (255, 223) 或 (255, 239)<sup>[4]</sup>, 卷积编码码率为 1/2 或 3/4。由表2可知,当误码率为  $10^{-5}$  时, RS 交织卷积级联码具有 6.5 dB 左右的编码增益,香农距离约为 2.4 dB。

表2 RS 交织卷积级联码的编码增益

Table 2 The code gain of the RS-CC code

项目	参数值			
信源长度	8920		9560	
RS 码型	(255, 223)		(255, 239)	
卷积码率	1/2	3/4	1/2	3/4
级联码率	0.437	0.656	0.469	0.703
香农极限/dB	-0.086	0.995	0.048	1.292
$E_b/N_0@10^{-5}/\text{dB}$	2.35	3.05	2.45	3.75
编码增益/dB	7.25	6.55	7.15	5.85
香农距离/dB	2.436	2.394	2.402	2.458

表3为 Turbo 码的性能仿真结果。其中, Turbo 码

码率为 1/3 或 1/2<sup>[5]</sup>, 信源长度为 1784 或 8920, 译码迭代次数为 5。由表 3 可知, 当误码率为 10<sup>-5</sup> 时, Turbo 码具有 8.5 dB 左右的编码增益, 香农距离约为 1 dB。

表 3 Turbo 码的编码增益

Table 3 The code gain of Turbo code

项目	参数值			
	1784		8920	
信源长度	1784		8920	
码率	1/3	1/2	1/3	1/2
香农极限/dB	-0.495	0.188	-0.495	0.188
$E_b/N_0 @ 10^{-5}/\text{dB}$	0.77	1.4	0.37	1.03
编码增益/dB	8.83	8.2	9.23	8.57
香农距离/dB	1.265	1.212	0.865	0.842

表 4 为 TPC 码的性能仿真结果。其中, TPC 码型分别为 (32, 26) \* (32, 26), (64, 57) \* (64, 57)<sup>[6]</sup>, 译码迭代次数为 5。由表 4 可知, 当误码率为 10<sup>-5</sup> 时, TPC 码具有 6.2 dB 左右的编码增益, 香农距离约为 1.8 dB。

表 4 TPC 码的编码增益

Table 4 The code gain of Turbo product code

项目	参数值	
	676	3249
信源长度	676 3249	
码率	0.660	0.793
香农极限/dB	1.02	1.98
$E_b/N_0 @ 10^{-5}/\text{dB}$	3.2	3.5
编码增益/dB	6.3	6.1
香农距离/dB	2.18	1.52

表 5 为 LDPC 码的性能仿真结果。其中, 信源长度为 1024 或 16 384, LDPC 码率为 1/2 或 4/5, 译码最大迭代次数为 15<sup>[7]</sup>。由表 5 可知, 当误码率为 10<sup>-5</sup> 时, LDPC 码具有 8 dB 左右的编码增益, 香农距离约为 1.1 dB。

表 5 LDPC 码的编码增益

Table 5 The code gain of LDPC code

项目	参数值			
	1024		16 384	
信源长度	1024		16 384	
码率	1/2	4/5	1/2	4/5
香农极限/dB	0.188	2.04	0.188	2.04
$E_b/N_0 @ 10^{-5}/\text{dB}$	1.7	3.6	0.9	2.76
编码增益/dB	7.9	6	8.7	6.84
香农距离/dB	1.512	1.56	0.712	0.72

由表 2 ~ 表 5 信道编码性能的仿真结果可知, 这几类信道编码均具备较高的编码增益, 特别是 Turbo 码及 LDPC 码, 具有很小的香农距离, 并逼近相应码率的香农极限, 具有更高的编码增益; RS 交织卷积级联码及 TPC 码存在误码瓶颈, 编码增益难以超过 7 dB。对于相同码型的信道编码, 可以通过降低信道编码码率或者提高信源长度来提高其编码增益, 具体性能提升可参考表 2 ~ 表 5 的仿真结果。

定义  $r$  高于 0.5 时为高码率(反之为低码率), 信

源长度高于 4096 为长码(反之为短码), 本文定性分析了这几类信道编码的应用范围。在此简称 RS 交织卷积级联码为级联码, 如表 6 所示。

表 6 几类信道编码在不同条件下的应用对比

Table 6 The application contrast of some channel codings under different conditions

项目	低码率长码	低码率短码	高码率短码	高码率长码
编码增益	Turbo ≥ LDPC > 级联码	Turbo > LDPC > 级联码	LDPC ≥ TPC > 级联码	LDPC > 级联码 ≥ TPC
译码时间	级联码 < Turbo < LDPC	级联码 < Turbo < LDPC	级联码 < TPC < LDPC	级联码 < TPC < LDPC

1) RS 交织卷积级联码的码率及码长的选取较为灵活, 具有实现结构简单、译码时间较短的特点, 易满足系统时延指标, 具有较高实用与参考价值。当系统时延要求不高时, 通常可由编码增益更高的 TPC, LDPC, Turbo 码代替。

2) Turbo 码在码率较低时具有高的编码增益及适中的译码时间, 且在信源长度较短时依然具备高编码增益, 特别适合低码率信息传输。但其在码率要求较高时需要删除大量校验信息, 导致译码性能恶化。

3) TPC 具有较高的编码增益及适中的译码时间, 在信源长度较短时编码增益与 LDPC 相当, 适合作为高码率和短码条件下信息传输的编码方案。但在信源长度较长时, 通常可由编码增益较高的 LDPC、级联码代替。

4) LDPC 具有编码增益高、码率扩展灵活的特点, 同时其编码增益随着信源长度的增大而提高, 是高码率、长码信息传输的理想编码方案, 同时其在低码率、短码传输中性能优越。但其在低信噪比环境下迭代次数过多会导致译码时间偏长, 需考虑系统时延指标进行选取。

## 4 结论

本文从香农极限公式入手, 对信道编码的编码增益理论极限值  $E_b/N_0$  进行了分析, 重点推导了  $r$  码率编码实现无误码信息传输的极限、 $r$  码率编码在指定误码率传输下的极限和  $r$  码率信道编码时 BPSK 信道容量  $C$  与  $E_b/N_0$  的对应关系; 并采用 Matlab 仿真分析了波形/BPSK 调制结合  $r$  码率编码的香农极限; 同时仿真分析了几类典型信道编码: 级联码、Turbo 码、TPC 码和 LDPC 码的编码增益及香农距离等性能指标, 结合实际通信系统对编码增益、编码效率、信源长度和译码时间等指标的需求, 定性分析了几类信道编码的工程应用范围, 为航空无线通信在功率受限、带宽受限、时延受限的复杂电磁环境下合理选取最佳信道编码方式提供了较大的工程指导意义。



## 参 考 文 献

- [1] 易克初,孙永军. 数字通信理论与系统[M]. 北京:电子工业出版社,2013. (YI K C, SUN Y J. Digital communication; theory and system[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. )
- [2] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27 (3) : 379-423, 623-656.
- [3] 刘东华,向良军. 信道编码与 Matlab 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2014. (LIU D H, XIANG L J. Channel coding and Matlab simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. )
- [4] 许拔. 深空通信中 RS 码的编译码算法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2004. (XU B. A research on the algorithm about the coding and decoding of the RS codes in the deep space communication[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. )
- [5] BERROU C, GLAVIEUX A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(10) : 1261-1271.
- [6] PYNDIAH R M. Near-optimum decoding of product codes: block Turbo codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(8) : 1003-1010.
- [7] 王单. LDPC 编译码算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2006. (WANG D. A research on encoding and decoding theory of LDPC codes[D]. Xi'an: Xidian University, 2006. )
- (上接第 38 页)
- (LIU Q Z, SONG N. A requirement analysis model for aviation force in air attack[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2008(10) : 138-143. )
- [3] 邢清华,刘付显. 区域防空部署优化系统建模[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(5) : 712-715. (XING Q H, LIU F X. Modeling on area air defense optimization deployment system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(5) : 712-715. )
- [4] 程启月,邱莞华,申卯兴. 基于联合作战兵力配置的非合作博弈研究[J]. 数学的实践与认识,2010,40(3) : 26-30. (CHENG Q Y, QIU W H, SHEN M X. Studies of forces assignment for joint operations based on no cooperative game [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010, 40(3) : 26-30. )
- [5] 朴成日,沈治河. 基本作战样式下航母编队兵力配置方法[J]. 指挥控制与仿真,2013,35(2) : 58-62. (PIAO C R, SHEN Z H. Disposition method of aircraft carrier formation in basic mode of operations[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(2) : 58-62. )
- [6] 熊哲,许瑞明,田丰. 改进 PSO 算法的混编群兵力部署优化[J]. 计算机工程与应用,2012,48(6) : 235-237. (XIONG Z, XU R M, TIAN F. Improved particle swarm optimization algorithm applied to hybrid force disposition optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(6) : 235-237. )
- [7] 任继业,陈明,张小水. 基于概率的兵力部署模型[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2007,8(5) : 45-47. (REN J Y, CHEN M, ZHANG X S. A research on the strategy stochastic force disposition model based on probability[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2007, 8(5) : 45-47. )
- [8] SHERALIH D, DRISCOLL P J. Evolution and state-of-the-art in integer programming [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000, 124(1/2) : 319-340.
- [9] GOMORY R E. Outline of an algorithm for integer solutions to linear problem [J]. Bulletin of the American Mathematical Society, 1958, 64(5) : 275-278.
- [10] 李裕梅,连晓峰,徐美萍,等. 整数规划中割平面法的研究[J]. 数学的实践与认识,2011,41(11) : 82-90. (LI Y M, LIAN X F, XU M P, et al. Study on cutting plane method in integer programming [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(11) : 82-90. )
- [11] HUA Z S, HUANG F H. A variable-grouping based genetic algorithm for large-scale integer programming [J]. Information Sciences, 2006, 176(19) : 2869-2885.
- [12] SCHLÜTER M, EGEA J A, BANGA J. Extended ant colony optimization for non-convex mixed integer nonlinear programming [J]. Computers and Operations Research, 2009, 36(7) : 2217-2229.
- [13] KITAYAMA S, YASUDA K. A method for mixed integer programming problems by particle swarm optimization [J]. Electrical Engineering in Japan, 2006, 157(2) : 40-49.
- [14] SALMAN A, AHMAD I, AL-MADANI S. Particle swarm optimization for task assignment problem [J]. Microprocessors and Microsystems, 2002, 26(8) : 363-371.